T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

# Salınımlı Hidroşekillendirmenin Deneysel İncelenmesi ve Mikroyapısal Karakterizasyonu

Osman ÖZTÜRK

DOKTORA TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Temmuz-2022
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

## TEZ KABUL VE ONAYI

Osman ÖZTÜRK tarafından hazırlanan "Salınımlı Hidroşekillendirmenin Deneysel İncelenmesi ve Mikroyapısal Karakterizasyonu" adlı tez çalışması 05/07/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

| **Jüri Üyeleri** | **İmza** |
|---|---|
| **Başkan**<br>Prof. Dr. Haydar LİVATYALI | …….. |
| **Danışman**<br>Prof. Dr. Hüseyin Selçuk HALKACI | …….. |
| **Üye**<br>Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN | …….. |
| **Üye**<br>Dr. Öğr. Üyesi Ömer MUSIC | …….. |
| **Üye**<br>Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Okan GÖRTAN | …….. |

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN
Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması TÜBİTAK tarafından 219M489 nolu proje ile ve Konya Teknik Üniversitesi ÖYP Koordinatörlüğü tarafından 2017-ÖYP-044 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.

Osman ÖZTÜRK

Tarih: 05.07.2022

# ÖZET

## DOKTORA TEZİ

## SALINIMLI HİDROŞEKİLLENDİRMENİN DENEYSEL İNCELENMESİ VE MİKROYAPISAL KARAKTERİZASYONU

**Osman ÖZTÜRK**

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

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

**2022, 87 Sayfa**

**Jüri**
**Prof. Dr. Hüseyin Selçuk HALKACI**
**Prof. Dr. Haydar LİVATYALI**
**Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN**
**Dr. Öğr. Üyesi Ömer MUSIC**
**Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Okan GÖRTAN**

Bu tezin temel amacı, salınımlı hidrolik şişirme testi (HŞT) kullanarak oda sıcaklığında sınırlı şekillendirilebilirliği olan Ti-6Al-4V alaşımının şekillendirilebilirliğini artırmaktır. Tezin ikincil amacı, artan şekillendirilebilirliğin mikroyapısal nedenlerini araştırmaktır. Deney aşamasında salınımlı hidrolik şişirme testleri yapılmış ve sonuçlar monoton şişirme testine ait deney numuneleri ile kalınlık dağılımı ve şişme yüksekliği açısından karşılaştırılmıştır. Karakterizasyon aşamasında, artan şekillendirilebilirliği mikroyapısal değişikliklerle ilişkilendirmek için dislokasyon yoğunluğu ölçüme dayalı olarak hesaplanmış, kırılma yüzeyi analizi, kalınlık ve mikro sertlik dağılımları karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, salınımlı basıncın daha homojen bir kalınlık dağılımı ile daha yüksek bir kalınlık azalması sağladığını göstermiştir. Şişme yüksekliği ve patlama basıncı monoton şekillendirmeye göre %15.4 ve %17 artmış, bu da malzemenin kırılmasının geciktirildiğini göstermiştir. Salınımlı test sonuçları, Ti-6Al-4V alaşımının oda sıcaklığında şekillendirilebilirliğinin birim şekil değişimi açısından %47 arttığını göstermektedir. Ayrıca, salınımlı basıncın, oda sıcaklığında şekillendirilmesi zor malzemelerin şekillendirilebilirliğini geliştirdiği ve bunun da monoton basınca kıyasla daha homojen bir kalınlık dağılımına yol açtığı gösterilmiştir. Malzeme karakterizasyonunun sonuçları, salınımlı HŞT sırasında gerilme gevşemesi durumunun gerçekleştiğini göstermektedir. Gerilme gevşemesi neticesinde dislokasyon yoğunluğunun azaldığı, XRD ölçümleri ve yapılan hesaplamalarla ortaya konulmuştur. Dislokasyon yoğunluğunun azalması dislokasyonların kilitlenmesini engellemiş ve hasarın oluşmasını geciktirmiş, böylece şişme yüksekliğinin artmasına neden olmuştur. Artan şekillendirilebilirlikten kaynaklanan daha fazla plastik deformasyon, kesit boyunca sertliği de artırmıştır. Sonuç olarak salınımlı şekillendirme ile; sünekliği düşük, pekleşmeyen ve hekzagonal sıkı paket kristal yapının baskın olduğu Ti-6Al-4V alaşımının şekillendirilebilirliği belirgin olarak artırılmış ve bu artışın mikroyapısal nedenleri ortaya konulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Hidrolik Şişirme Testi, Hidroşekillendirme, Malzeme Karakterizasyonu, Membran Teorisi, Sac Şekillendirme, Şekillendirilebilirlik, Ti-6Al-4V

# ABSTRACT

## PhD THESIS

## EXPERIMENTAL INVESTIGATION AND MICROSTRUCTURAL CHARACTERIZATION OF PULSATING HYDROFORMING

**Osman ÖZTÜRK**

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

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

**2022, 87 Pages**

**Jury**
**Prof. Dr. Hüseyin Selçuk HALKACI**
**Prof. Dr. Haydar LİVATYALI**
**Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN**
**Asst. Prof. Dr. Ömer MUSIC**
**Asst. Prof. Dr. Mehmet Okan GÖRTAN**

The main purpose of this dissertation is to increase the limited formability of Ti-6Al-4V alloy sheet at room temperature using the pulsating hydraulic bulge test. The secondary purpose of this research is to investigate the microstructural reasons for the increased formability. During the experimental phase, hydraulic bulge tests were conducted, and the results were compared with the monotonic bulge test specimens concerning thickness distribution and bulge height. In the characterization phase, dislocation density estimations, fracture surface analysis, the thickness and micro hardness distributions were used to associate the increased formability with the microstructural changes. The results have indicated that the pulsating pressure introduces a higher thickness reduction with a more homogenous thickness distribution. The bulge height and the burst pressure increased by 15.4 % and 17 %, when compared to monotonic forming which means failure of the material is delayed. Test results with pulsation suggest that the formability of the Ti-6Al-4V sheet at room temperature is increased by 47% in terms of elongation. The reported results demonstrate that pulsating pressure improves the formability of difficult-to-form materials at room temperature leading to a more homogeneous thickness distribution as compared to the monotonic pressure. Results of the material characterization suggests that stress relaxation phenomenon took place during the pulsating HBT. For the microstructural characterization; the decrease in the dislocation density in the early stage of forming prevented the locking of the dislocations and delayed the occurrence of the damage, i.e., leading to increased bulge height. The more plastic deformation resulting from the increased formability also increased the hardness along the cross section. As a result, with pulsating forming, the formability of the Ti-6Al-4V sheets with low ductility, non-hardening, and hexagonal close packed dominant crystal structure can be significantly increased, and the microstructural reasons for this improvement has been revealed.

**Keywords:** Formability, Hydraulic Bulge Test, Hydroforming, Material Characterization, Membran Theory, Sheet Forming, Ti-6Al-4V

# ÖNSÖZ

Bu çalışmanın, değişken yükleme ile plastik şekillendirilen metal malzemelerin şekillendirilme davranışındaki değişimin ve bu işlem sırasında mikroyapı düzeyinde gerçekleşen mekanizmaların anlaşılmasına katkı sunmasını dilerim.

Tez çalışmam boyunca bana büyük destek veren ve doktora süresinin tam ortasında yaşanan küresel salgın nedeniyle zor süreçlerden geçtiğimiz günlerde büyük motivasyon sağlayan tez danışmanım Prof. Dr. Hüseyin Selçuk HALKACI'ya, malzeme karakterizasyonu sayesinde doktora tezime ve bundan sonraki çalışmalarımda bakış açımı çok değiştiren ikinci danışmanım Doç. Dr. Hasan KOTAN'a, doktora sırasında deneysel çalışmalar ve tedarik süreçleri konusunda büyük emekleri olan Dr. Öğr. Üyesi Mevlüt TÜRKÖZ ve Doç. Dr. Murat DİLMEÇ'e, tez izleme toplantılarında eksik ve hatalı gördükleri çalışmaları yapıcı bir şekilde eleştiren ve teze değer katan TİK üyeleri Prof. Dr. Haydar LİVATYALI ve Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN'e, deneysel çalışmalar sırasında yardımlarını esirgemeyen Arş. Gör. Mevlüt AYDIN, Arş. Gör. Gürkan ATAŞ ve Arş. Gör. Ömer Faruk GÖKCEPINAR'a, malzeme karakterizasyonu çalışmalarında göstermiş olduğu yardım ve fedakarlık için Arş. Gör. Yusuf Furkan YAPAN'a, bugüne ulaşmamda en büyük emeğe sahip olan annem Hülya ÖZTÜRK ve babam Necmi ÖZTÜRK'e, tez çalışmam sırasında bana en büyük desteği veren eşim Mine ÖZTÜRK'e, birlikte geçirdiğimiz vakitlerden fedakarlık eden oğullarım Ahmet Yiğit ÖZTÜRK ve Selim Arda ÖZTÜRK'e teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışmasını 219M489 numaralı proje ile destekleyen TÜBİTAK kurumuna da şükranlarımı sunarım.

Osman ÖZTÜRK
KONYA-2022

# İÇİNDEKİLER

**ÖZET** ..... **iv**

**ABSTRACT** ..... **v**

**ÖNSÖZ** ..... **vi**

**İÇİNDEKİLER** ..... **vii**

**SİMGELER VE KISALTMALAR** ..... **ix**

**1. GİRİŞ** ..... **1**

1.1. Motivasyon ..... 1
1.2. Hidro-şekillendirme ..... 2
1.3. Sac Malzemelere Uygulanan Mekanik Testler ..... 5
1.3.1. Nakazima Testi ..... 5
1.3.2. Hidrolik Şişirme Testi ..... 6
1.3.3. Small Punch Test ..... 7
1.4. Araştırma Hipotezleri ..... 8
1.5. Araştırma Hedefleri ..... 9
1.6. Tezin Ana Hatları ..... 10

**2. KAYNAK ARAŞTIRMASI** ..... **11**

2.1. Salınımlı Hidroşekillendirme Konusundaki Çalışmalar ..... 11
2.2. Gerilme Gevşemesi Konusunda Yapılan Çalışmalar ..... 17

**3. MATERYAL VE YÖNTEM** ..... **21**

3.2. Hidrolik Şişirme Testi ..... 24
3.2.1. Membran Teorisi ..... 24
3.2.2. Hidrolik Şişirme Testi Kalıp Tasarımı ..... 28
3.2.3. Ölçme Sisteminin Tasarımı ..... 29
3.2.4. Deney Tasarımı ..... 32
3.2.5. Deneylerin Yapılması ..... 34
3.6. Malzeme Karakterizasyonu ..... 35
3.6.1. Numunelerin Hazırlanması ve Bakalite Alınması ..... 36
3.6.2. XRD Analizleri ..... 39
3.6.3. SEM Mikroskop İncelemesi ..... 40
3.6.4. Mikrosertlik Ölçümü ..... 40
3.6.5. FIB ve Mikroskopisi İncelemeleri ..... 41
3.6.6. XRD Sonuçlarından Dislokasyon Yoğunluğu Hesaplanması ..... 42
3.7. Monoton ve Salınımlı Hidrolik Şişirme Testlerinin Karşılaştırılması ..... 42
3.7.1. Şekillendirilebilirlik Açısından Karşılaştırılması ..... 43
3.7.2. Mekanik Özellikler Açısından Karşılaştırılması ..... 44
3.7.3. Mikroyapısal Özellikleri Açısından Karşılaştırılması ..... 44

**4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA** ..... **46**

4.1. Şekillendirilebilirlik Açısından Karşılaştırma ..... 46
4.1.1. Şişme Yüksekliği ve Yırtılma Basıncı ..... 47
4.1.2. Kalınlık Dağılımı ..... 50
4.2. Mekanik Özellikler Açısından Karşılaştırma ..... 55
4.2.1. Temin Halindeki Malzemenin Monoton Çekme Testi Sonuçları ..... 55
4.2.2. Salınımlı ve Monoton Şartlarda Gerilme-BŞD Diyagramlarının Karşılaştırılması ..... 58
4.2.3. BŞD Dağılımlarının Karşılaştırılması ..... 60
4.2.4. Mikrosertlik Dağılımlarının Karşılaştırılması ..... 61
4.3. Temin Halindeki Malzeme Karakterizasyonu ..... 61
4.3.1. SEM ile Faz Yapısının İncelenmesi ..... 61
4.3.2. FIB ile Tane Boyutunun Belirlenmesi ..... 64
4.3.3. XRD Analizleri ile Faz Dağılımının Belirlenmesi ..... 65
4.3.4. Dislokasyon Yoğunluğu ..... 65
4.4. Deney Sonrası Malzeme Karakterizasyonu ..... 66
4.4.1. XRD Analizlerinden Dislokasyon Yoğunluğu Hesaplanması ..... 66
4.4.2. SEM ile Kırılma Yüzeylerinin İncelenmesi ve Karşılaştırılması ..... 69

**5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER ..... 71**

5.1 Sonuçlar ..... 71
5.2 Öneriler ..... 73

**KAYNAKLAR ..... 74**

**EKLER ..... 81**

# SİMGELER VE KISALTMALAR

## Simgeler

| | | |
|---|---|---|
| α-Ti | : | Düşük sıcaklık titanyum fazı |
| β-Ti | : | Yüksek sıcaklık titanyum fazı |
| δ | : | Dislokasyon yoğunluğu (nm) |
| ε | : | Kafes gerilmesi |
| β | : | XRD grafiğinde pikin yarı yüksekliğindeki pik genişliği (rad) |
| θ | : | XRD grafiğinde şiddetin maksimum olduğu açı (rad) |
| λ | : | X ışını dalga boyu (nm) |
| ρ | : | Eğrisellik yarıçapı (mm) |
| a | : | Genlik (MPa) |
| Al | : | Alüminyum |
| d | : | Şişirme kalıbı iç çapı (mm) |
| $D^*$ | : | Tane boyutu (nm) |
| $f$ | : | Frekans ($s^{-1}$) |
| h | : | Anlık şişme yüksekliği (mm) |
| H | : | Hidrojen |
| K | : | Scherrer sabiti |
| N | : | Azot |
| O | : | Oksijen |
| P | : | İç basınç (MPa) |
| $P_0$ | : | Başlangıç basıncı (MPa) |
| R | : | Kalıp radyusu (mm) |
| s | : | Anlık levha kalınlığı (mm) |
| $s_0$ | : | İlk levha kalınlığı (mm) |
| Ti | : | Titanyum |
| V | : | Vanadyum |

## Kısaltmalar

| | | |
|---|---|---|
| BF | : | Aydınlık Alan (Bright Field) |
| BİTAM | : | Bilim ve Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi |
| BŞD | : | Birim Şekil Değişimi (mm/mm) |
| DF | : | Karanlık Alan (Dark Field) |
| FIB | : | Focused Ion Beam (Odaklanmış İyon Demeti) |
| HMDÇ | : | Hidro Mekanik Derin Çekme |
| HMK | : | Hacim Merkezli Kübik |
| HNC | : | Hidrolik Nümerik Kontrol |
| HSP | : | Hekzagonal Sıkı Paket |
| HŞ | : | Hidro-Şekillendirme |

| | | |
|---|---|---|
| HŞT | : | Hidrolik Şişirme Testi |
| HV | : | Vickers Sertliği |
| MR | : | Aktif Ölçüm Aralığı |
| SÇO | : | Sınır Çekme Oranı |
| SEM | : | Taramalı Elektron Mikroskobu |
| SMR | : | Ölçüme Başlangıç Noktası |
| SP | : | Small Punch |
| ŞSD | : | Şekillendirme Sınır Diyagramı |
| ŞSE | : | Şekillendirme Sınır Eğrisi |
| S-HŞT | : | Salınımlı Hidrolik Şişirme Testi |
| TEM | : | Geçirimli Elektron Mikroskobu |
| THŞ | : | Tüp Hidro-Şekillendirme |
| UTS | : | Ultimate Tensile Strength (Maksimum Çekme Dayanımı, MPa) |

# 1. GİRİŞ

## 1.1. Motivasyon

Mühendislik malzemeleri üzerine yapılan araştırmalar neticesinde her geçen gün çok daha üstün özelliklerde ve daha hafif malzemeler geliştirilmektedir. Ancak yeni geliştirilen malzemelerin yüksek ısıl direnç, korozyon direnci ve düşük yoğunluk gibi özellikleri her alanda uygulanabilir olduklarını göstermemektedir. Çünkü her uygulamanın belirli geometrik ve fiziksel özellikleri karşılaması ve bu nedenle uygun bir üretim yöntemi ile belirli süreçlerden geçmesi gerekir. Örneğin üretim endüstrisinde taşıyıcı ve muhafaza elemanı olarak sıklıkla kullanılan saclar ele alındığında, haddeleme gibi bir yöntem ile ince saclar haline getirilmesi ve çeşitli sac şekillendirme yöntemleri ile belirli bir geometriye ulaşması beklenir. Ancak her malzemenin kendine has bir şekillendirilebilirlik sınırı vardır ve bu durum kısıtlayıcı bir özellik olarak görülmektedir. Şekillendirilebilirlik, bir sacın şekillendirme sırasında buruşma, boyun verme ve yırtılma öncesinde ulaşılabilen en yüksek Birim Şekil Değiştirme (BŞD) seviyesi olarak tanımlanmaktadır. Bu nedenle düşük sünekliğe ve yüksek mukavemete sahip malzemelerin yeterli seviyede şekillendirilebilirliğe ulaşılabilmesi için araştırma ve geliştirme faaliyetleri yürütülmektedir. Şekillendirilebilirliğin etkisi bununla da kalmayıp, malzemenin mekanik özelliklerini (performansını) de etkilemektedir ve bu ilişki proses-performans etkileşimi olarak verilmektedir. Ayrıca ilgili malzemenin hangi potansiyel uygulamalarda kullanılacağının tespit edilmesi gerekir. Bu sayede hangi imalat yöntemi üzerinden hangi BŞD seviyelerinin hedeflendiği de önceden belirlenebilir.

Bu çalışmaya motivasyon sağlayan problem; havacılık, otomotiv ve biyomedikal gibi endüstrilerinde çokça kullanılan Ti-6Al-4V alaşımının oda sıcaklığında şekillendirilebilirliğinin düşük olmasıdır. Sac malzemeler özelinde Hidro-Şekillendirme (HŞ) gibi gelişmiş yöntemler kullanılarak şekillendirilebilirlik sınırlarının artırılması mümkündür. Ancak bu yöntemlerin de yetersiz kalabildiği iş parçalarında, mevcut yöntemin geliştirilmesi ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Salınımlı Hidro-Şekillendirme (S-HŞ) son yıllarda araştırma konusu olmuş ve HŞ preslerinde ek maliyet gerektirmeden uygulanabilen bir proses olarak ileri sürülmüştür. Ancak bu yöntemin mekanik özelliklere nasıl etki ettiği ve neden şekillendirilebilirliği iyileştirdiği üzerinde yeterli bilimsel araştırma bulunmamaktadır. Araştırmaya motivasyon sağlayan diğer bir bulgu ise, şu ana kadar yapılan çalışmaların çoğunlukla şekillendirmenin

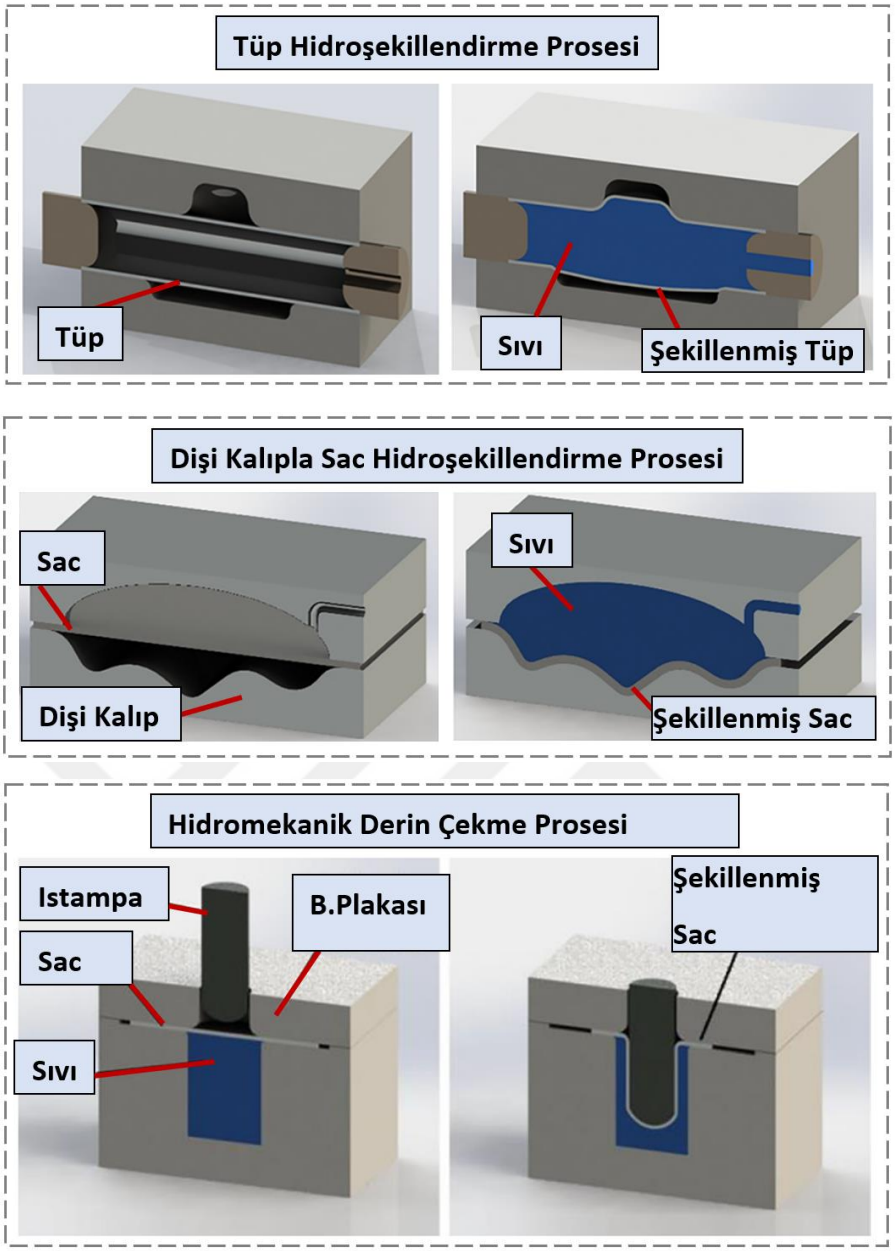
iyileştirilmesi üzerine yoğunlaşmış olmasına rağmen malzeme karakterizasyonu ile ilişkilendirmenin yeterli düzeyde olmamasıdır. Bu nedenle şekillendirilebilirlik çalışmaları ile birlikte malzeme mikroyapısı ve fiziksel özelliklerindeki değişimler ile şekillendirilebilirliğin ilişkilendirilebileceği öngörülmüştür.

## 1.2. Hidro-şekillendirme

Hidroşekillendirme, karmaşık şekilleri son şekline yakın imal edebilmek için mekanik kuvvetler yerine sıvı basıncının (veya mekanik kuvvet-sıvı basıncı kombinasyonunun) kullanıldığı bir sac şekillendirme yöntemidir. Hidroşekillendirme prosesi diğer şekillendirme proseslerine göre birçok avantaja sahiptir. Bunlar daha az incelme (Zhang ve ark., 2004), gelişmiş mekanik özellikler, daha iyi yüzey kalitesi (Alaswad ve ark., 2012), daha az montaj gerektirmesi (Zhang ve Danckert, 1998) ve elde edilen ürün son şekle yakın olduğu için daha az ikincil işlem gerektirmesidir (Zhang, 1999). Bu avantajları sağlayan esas mekanizma; sıvı basıncının sac yüzeyine dik doğrultuda ve eşit miktarda etki etmesiyle malzemenin lokal incelmelerinin azalmasıdır. Bu sayede daha homojen kalınlık dağılımı elde edilebilmektedir. Ancak bu prosesin tam verimli sonuç verebilmesi için basınç, baskı plakası vb. yükleme eğrilerinin proses boyunca optimize edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle HŞ konusunda çok çeşitli akademik çalışmalar yapılmakta ve endüstriye uygulanmaktadır.

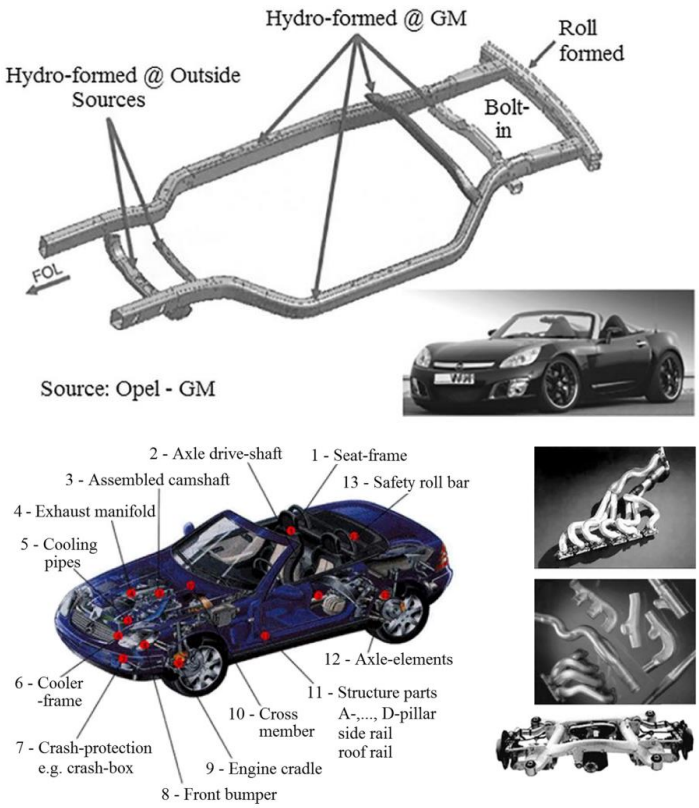
### Hidroşekillendirme Proseslerinin Sınıflandırılması

Hidroşekillendirme (HŞ) olmadığında üretilmesi çok zor veya imkansız olan değişken kesitli ve doğrusal olmayan parçalar, otomotiv ve havacılık sektörlerinde mevcuttur. Bu açıdan HŞ çok önemli bir proses olup birçok alanda kendi alt türlerini oluşturmuştur. Klasik şekillendirme yöntemlerinde malzemeler sadece şekillendirme doğrultusuna bağlı olarak şekillenirken, HŞ'de bulunan sıvı sayesinde farklı doğrultularda anlık olarak şekillendirme mümkün olmuştur. Bu açıdan bakıldığında HŞ, imalat yöntemlerindeki bir boşluğu doldurmaktadır (Zhang, 1999). Ayrıca derin çekme gibi klasik yöntemlerdeki sınır çekme oranı HŞ ile 2'den 3.2 değerine çıkabilmiştir. HŞ kullanılan ekipmanların ve parametrelerin farklılığına göre üç grupta incelenebilir. Bunlar; tüp HŞ, dişi kalıpla HŞ ve hidromekanik derin çekmedir. HŞ proseslerinin sınıflandırılması Şekil 1.1'de verilmiştir. Bazı araştırmacılar kullanılan ilkel sacın geometrisini esas alarak, bu sınıflandırmayı tüp HŞ, sac HŞ ve kabuk HŞ olarak da yapmıştır (Bell ve ark., 2019).



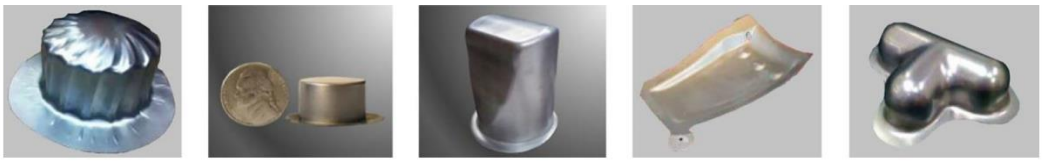

**Şekil 1.1.** HŞ proseslerinin sınıflandırılması. Sırasıyla tüp HŞ, dişi kalıpla HŞ ve hidromekanik derin çekme proseslerinin uygulama prensibi verilmiştir (Bell ve ark., 2019).

Tüp HŞ ile üretilebilecek parçalar çoğunlukla otomotiv endüstrisinde önem kazanmıştır. Bazı parçalar sadece tüp HŞ ile üretilebilecek olup, eklemeli imalat gibi karmaşık şekillerin üretilmesini sağlayan daha yeni teknolojiler olmakla birlikte bu gibi yöntemler maliyet açısından HŞ'nin rakibi olmaya çok uzaktır. Şekil 1.2'de tüp HŞ ile üretilen bir otomotiv şasi parçası verilmiştir. Motor beşiği, koruma barı, soğutma borusu ve egsoz manifoldu gibi tüp HŞ ile üretilmeye uygun parçalar da Şekil 1.2'de verilmiş olup yine bu yöntemle üretilmektedir.




**Şekil 1.2.** Tüp HŞ ile üretilmiş bir otomotiv şasi alt takımı (Tolazzi, 2010).

Sac hidroşekillendirme ise genellikle muhafaza elamanı olarak kullanılan sac parçaların tek seferde üretilebilmesini mümkün kılmaktadır. Sac HŞ ile üretilen örnek parçalar Şekil 1.3'te verilmiştir. Ayrıca türbin parçası gibi normalde birden fazla işlemden geçen ve kaynakla birleştirilmesi gereken parçalar, sac HŞ ile tek seferde imal edilebilmektedir. Sac HŞ'nin alt türü olan hidromekanik derin çekme (HMDÇ) ile klasik derin çekmedeki şekillendirilebilirliği ifade eden sınır çekme oranı (SÇO) 2'den 3.2'ye çıkarılabilmektedir. Ayrıca ılık HMDÇ gibi daha gelişmiş HŞ yöntemleriyle bu oran 3.6'ya kadar çıkarılabilmiştir (Türköz ve ark., 2020).



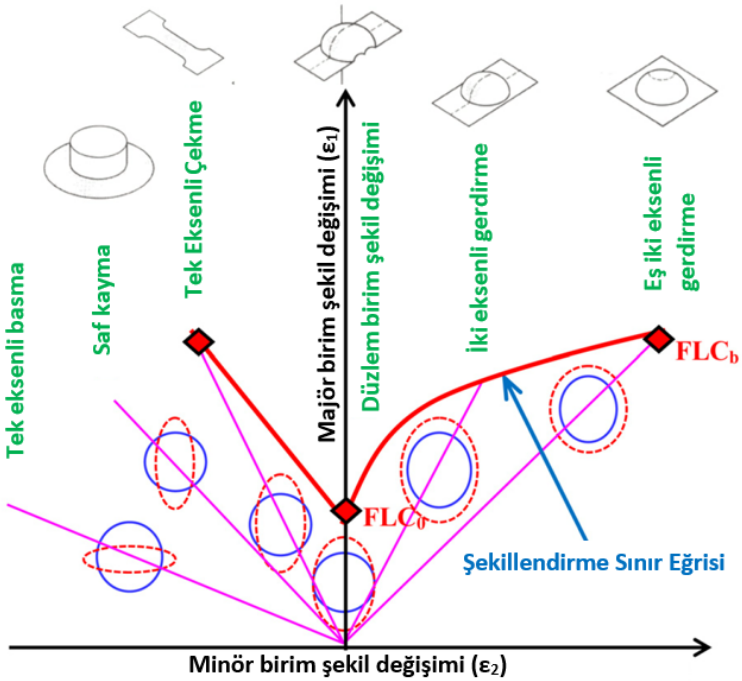
Aluminum Spiral Cap | Tiny Niobium Cup | Slat-track can for Airbus A320 | Aluminum Muffler | Inconel Turbine Component

**Şekil 1.3.** Sac HŞ (Dişi kalıpla ve HMDÇ) ile üretilmiş bir örnek parçalar (Bell ve ark., 2019).

## 1.3. Sac Malzemelere Uygulanan Mekanik Testler

### 1.3.1. Nakazima Testi

Sac metallerin plastik şekillendirilebilmesi ve şekillendirme sırasında ortaya çıkabilecek problemlerin erken teşhis edilebilmesi için çeşitli BŞD durumlarında boyun verme davranışının incelenmesi gerekli olmuştur. Sac şekillendirilebilirliğinin deneysel olarak karakterize edilebilmesi için literatürde Şekillendirme Sınır Diyagramları (ŞSD) geliştirilmiştir (Keeler, 1961, Goodwin, 1968). ŞSD; majör ve minör doğrultudaki eksenler ile ifade edilir ve tipik bir ŞSD'de BŞD durumları Şekil 1.4'te verilmiştir (Paul, 2016). Şekil 1.4'te düz kırmızı çizgi ile ŞSD için belirlenen sınır eğrisine ise Şekillendirme Sınır Eğrisi (ŞSE) adı verilir. ŞSE'nin altında kalan bölge şekillendirme için güvenli bölgeyi temsil eder. Bu eğriler, günümüzde sonlu elemanlar metodu ile yapılan şekillendirme analizlerinde BŞD'nin değerlerine göre yırtılma ve buruşmaya maruz kalan bölgelerin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Testin yapılması için gerekli koşullar, EN ISO 12004-2 standardı ile belirlenmiştir (Slota ve ark., 2015).




**Şekil 1.4.** Tipik bir şekillendirme sınır diyagramında BŞD durumları.

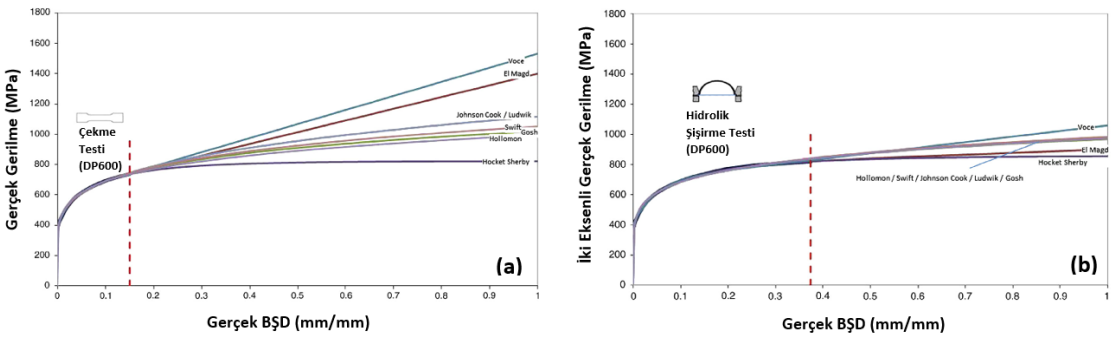
ŞSD'lerin deneysel olarak elde edilebilmesi için yüzeyi gridlenmiş numunelerin yarı küresel uçlu ıstampa ile yırtılana kadar şekillendirilmesi ve şekil değiştiren gridlerin görüntü işleme ile analiz edilmesi gerekmektedir. Ayrıca gridleme işlemi sıradan kaplama-boyama yöntemleriyle yapılamaz. Numunedeki gridlerin plastik deformasyonla birlikte uzaması da istendiği için numune serigrafi yöntemi ile kaplanır

ve ısıl işleme tabi tutulur. Tüm bu işlemlerin gerektirdiği maliyet ve uzmanlık nedeniyle ŞSD'lerin deneysel olarak elde edilmesi göreceli olarak pahalı olmaktadır. Bu nedenle ŞSD'lerin analitik ve sayısal olarak elde edilebilmesiyle ilgili literatürde çalışmalar bulunmaktadır (Paul, 2016).

### 1.3.2. Hidrolik Şişirme Testi

Malzemelerin mekanik özellikleri malzemenin süneklik, rezilyans ve pekleşme davranışı gibi kendine has özellikleri hakkında bilgi verir ve şekillendirme sırasında göstereceği davranışın öngörülebilmesi için gereklidir. Ayrıca ürün ve proses geliştirme süreçlerini kısaltan şekillendirme simülasyonları sırasında, malzemenin şekillendirme davranışının güvenilir şekilde simüle edilebilmesi için doğru malzeme modelinin ve gerçek gerilme-gerçek BŞD eğrilerinin uygun biçimde elde edilmesi gerekmektedir. Gerçek gerilme-gerçek BŞD eğrilerinin elde edilmesi için en ucuz ve yaygın yöntem ASTM E8-04 and DIN EN 10002 standartlarında yapılan çekme testi uygulamaktır. Ancak çekme testi sadece sınırlı bir BŞD halini temsil edebilmektedir. Daha ileri BŞD değerlerinde gerilmenin nasıl değişeceğini belirlemek için çekme testinden elde edilen eğri ekstrapolasyon ile uzatılmaktadır. Şekil 1.5.a'da DP600 çeliği için çekme testi ile elde edilen gerilme-BŞD eğrisi, kesikli kırmızı çizgiye kadar olan eğridir. Çeşitli ekstrapolasyon yöntemleri ile malzemenin daha yüksek BŞD'lerdeki malzeme davranışı öngörülmektedir. Ancak grafikte görüleceği üzere kullanılan yaklaşıma göre eğriler birbirinden uzaklaşmaktadır. Bu durumda hangi ekstrapolasyon yönteminin kullanıldığına göre malzeme davranışı farklı yorumlanabilmektedir (Hallfeldt ve ark., 2014).

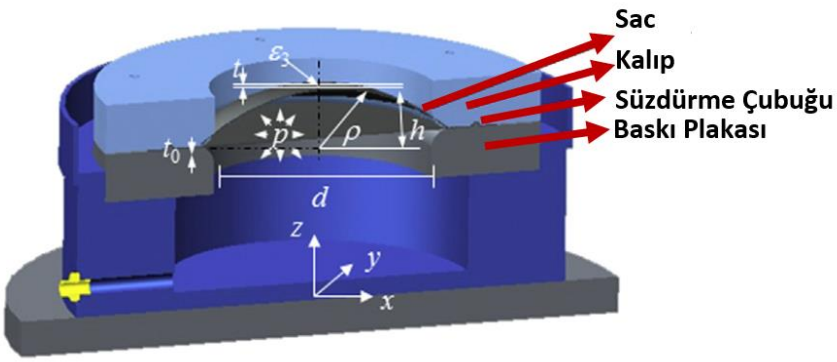
Hidrolik şişirme testi (HŞT) ise iki eksenli gerdirme halini gerçekleştirdiği için daha yüksek BŞD değerlerine ulaşılabilmektedir. Şekil 1.5.b'de aynı malzemenin şişirme testinden elde edilen gerçek gerilme- gerçek BŞD eğrisi verilmiştir. Çekme testinde yaklaşık 0.15 mm/mm BŞD değerinde kopma gerçekleşirken, şişirme testinde 0.37 mm/mm değeri civarında yırtılma gerçekleşmiştir. Ayrıca çekme testinde kullanılan ekstrapolasyon yöntemleri HŞT'ye uygulandığında eğrilerin birbirinden çok uzaklaşmadığı görülmektedir. HŞT'nin asıl avantajı ise sürtünmesiz durumda malzemenin iki eksenli gerilmeye maruz kalmasıdır. Dolayısıyla bu test sayesinde malzemenin saf gerdirme halindeki şekillendirilebilirlik davranışı karakterize edilebilir. Ayrıca belirli şartlar altında iki eksenli gerdirme sonucu gerçek gerilme-gerçek BŞD grafiği elde edilebilir. Grafiğin elde edilebilmesi için iç basınç, şişme merkezindeki




**Şekil 1.5.** DP600 çeliğine ait, çekme testi (a) ve hidrolik şişirme testi (b) ile elde edilen gerçek gerilme-gerçek BŞD eğrilerinin karşılaştırılması. Kesikli çizgiden sonraki kısım literatürdeki çeşitli yöntemlerle ekstrapole edilmiştir (Hallfeldt ve ark., 2014).

kalınlık ve eğrisellik radyusu anlık olarak ölçülebilmesi gerekir. Sadece basıncın ölçüldüğü testlerde anlık şişme yüksekliğini ölçerek; kalınlık ve eğrisellik radyusunun analitik hesaplandığı yaklaşımlar da mevcuttur.

Şekil 1.6'da HŞT'ye ait test düzeneği verilmiştir. Test edilecek numuneler genellikle dairesel formda kesilir. Şişirme sırasında kalıp ve baskı plakası arasında kaymayacak kadar yük altında tutulur. Kaymayı tamamen önlemek için kalıplara süzdürme çubuğu eklenir. Şişirme sırasında mümkünse anlık olarak şişme yüksekliği, eğrisellik radyusu ve iç basınç ölçülür (Hallfeldt ve ark., 2014).




**Şekil 1.6.** Hidrolik şişirme testinin şematik gösterimi (Hallfeldt ve ark., 2014).

### 1.3.3. Small Punch Test

Small Punch (SP) testi, ilk olarak radyasyona maruz kalan düşük kalınlıklı elemanların kırılma tokluğunun belirlenmesi için Japonya'da geliştirilmiştir (Suzuki ve ark., 1992). Esas olarak standart test yöntemlerinin boyutlarının ilgili elemanlara göre çok büyük olması SP testinin geliştirilmesine zemin hazırlamıştır (Gülçimen, 2013). Deformasyonun uygulandığı numunenin yarıçapı yaklaşık 2 mm olarak verilmektedir. İzleyen yıllarda SP testi bir standart haline getirilmiştir. SP testinde numunenin ölçüleri

diğer yöntemlere göre oldukça küçük olduğu için neredeyse tahribatsız muayene yöntemi olarak da kabul edilmektedir. Çünkü genellikle ilgili parçadan numune alınması parçanın işlevine engel oluşturmamaktadır. Ayrıca çalışma ortamında daha önceden öngörülmemiş fiziksel ve mekanik şartlara maruz kalan malzemelerde SP testi kullanılabilmektedir (Gülçimen, 2013).

### 1.4. Araştırma Hipotezleri

Tezin amacı doğrultusunda yapılacak deneysel çalışmalar ve mikroyapı incelemeleri ile aşağıda verilen hipotezler test edilecektir. Her bir hipotezin ortaya atılmasının gerekçesi, literatürde yapılan benzer çalışmalara atıf yapılarak desteklenmiştir.

- *Hipotez 1.* Salınımlı HŞT'de basıncın salınımlı uygulandığı durumda, monoton uygulandığı duruma kıyasla daha yüksek şişme yüksekliği elde edilir. *Gerekçe:* Salınımlı tüp HŞ ile ilgili yapılan deneysel ve sayısal çalışmalarda sabit basınç eğrilerine göre şekillendirme sınırının yükseldiği gösterilmiştir (Yang ve ark., 2017). Salınımlı sac HŞ ile ilgili gerçekleştirilen sayısal çalışmada, tüp için geçerli olan bu durumun sac prosesinde de olduğunu ortaya koymuştur (Yang ve ark., 2011).
- *Hipotez 2.* Salınımlı HŞT'de basıncın pozitif eğimli ve salınımlı uygulandığı durumda, pozitif eğimli ve sabit uygulandığı duruma kıyasla daha yüksek incelmeye ulaşılır. *Gerekçe:* Salınımlı HŞ ile ilgili yapılan deneysel ve sayısal çalışmalarda sabit basınç eğrilerine göre daha üniform kalınlık dağılımının elde edildiği gösterilmiştir Salınımlı HŞ proseslerinde yırtılmanın gecikmesi, dolayısıyla kalınlık doğrultusunda yüzde incelmenin daha fazla olduğu gösterilmiştir. (Mori ve ark., 2007).
- *Hipotez 3.* Salınımlı basıncın sünekliği artırıcı etkisi, mikroyapıdaki değişimler ile ilişkilendirilebilir. *Gerekçe:* Literatürde bazı çalışmalarda proses etkisi gösterildikten sonra mikroyapıdaki değişimler de incelenmiştir. Yeni geliştirilen elektro-salınım tüp şekillendirme yöntemi yapılan bir çalışmada, tane yapısı ölçeğinde yapılan mikroyapı incelemesi sonucu sıcaklıktaki ve basınçtaki salınımın şekillendirilmeyi artırdığı ileri sürülmüştür (Tang ve ark., 2020). Daha ayrıntılı mikroyapı incelemeleri şimdiye kadar salınımlı HŞ'nin uygulanmadığı HSP kristal yapısındaki Ti-6Al-4V için yapılacaktır.

### 1.5. Araştırma Hedefleri

Bu çalışmada salınımlı hidrolik şişirme deneyi sırasında basıncın değişken verilmesinin sünekliği artırıcı etkisinin deneysel olarak incelenmesi ve mikroyapısal karakterizasyonunun yapılması amaçlamıştır. Malzeme olarak yüksek mukavemet ve aşınma direncine sahip olmasına rağmen düşük pekleşme davranışı nedeniyle düşük oranda şekillendirilen HSP kristal yapısındaki Ti-6Al-4V Grade 5 alaşımı seçilmiştir. Bu malzemenin oda sıcaklığında şekillendirilebilirliği düşük olduğu için Salınımlı HŞ ile şekillendirilebilirliğinin artırılması anlamlı olmaktadır. İlgili malzeme için hidrolik şişirme deneyleri monoton ve salınımlı olarak gerçekleştirilecektir. Ayrıca şekillendirilebilirlik açısından oluşan performans artışının mikroyapısal sebepleri de incelenecektir. Tezin amacı doğrultusunda aşağıda verilen araştırma hedeflerine ulaşılmıştır.

i. Deneysel Safha
   a. Monoton ve Salınımlı koşullarda Hidrolik Şişirme Testleri (HŞT) tam faktöriyel deney tasarımına göre gerçekleştirilmiştir.
   b. En yüksek şişme yüksekliğini veren optimum parametreler elde edilmiştir.
   c. Optimum parametrelerle aynı şişme yüksekliğine kadar yırtılmadan salınımlı ve monoton deneyler gerçekleştirilmiştir.

ii. Malzeme Karakterizasyonu Safhası
   a. HŞT öncesi malzemeye malzeme karakterizasyonu (XRD ve FIB) yapılmıştır.
   b. HŞT sonrası optimum salınımlı ve monoton şartlardaki numunelere malzeme karakterizasyonu (XRD, SEM) yapılmıştır.
   c. HŞT sonrası aynı yüksekliğe şekillendirilmiş optimum salınımlı ve monoton şartlardaki numunelere malzeme karakterizasyonu (XRD, SEM) yapılmıştır.
   d. Dislokasyon yoğunluğu ölçüme dayalı olarak (Tane boyutu ve XRD kullanılarak) belirlenmiştir.
   e. Kırılma yüzeylerinden SEM ile elde edilen görüntüler çukur boyutu ve miktarına göre analiz edilmiştir.

iii. Araştırma sonuçları, deneysel olarak salınımın etkisini gösterecek şekilde yorumlanacaktır. Şekillendirilebilirlikteki artışın nedenleri mikroyapısal olarak ortaya konulmuştur.

## 1.6. Tezin Ana Hatları

*i. Giriş*

Bu bölümde doktora tezine zemin hazırlayan motivasyon ve arka planda HŞ ile ilgili bilinmesi gereken temel bilgiler verilmiştir. Ayrıca araştırmanın amacı ve hedefler belirtilmiştir.

*ii. Kaynak araştırması*

Bu bölümde iş parçası geometrisi, proses ve malzeme karakterizasyonu açısından salınımlı HŞ ile ilgili daha önce yapılan çalışmalar ve literatürdeki boşlukların belirlenmesine yönelik kaynak araştırması verilmiştir.

*iii. Materyal ve yöntem*

Bu bölümde doktora tezinde takip edilecek deneysel yöntem, kullanılan malzeme özellikleri, numune hazırlama yöntemleri, yapılan testlerin detayları, ölçme sisteminin yapılışı, malzeme karakterizasyonu ile monoton ve salınımlı HŞT sonuçlarının karşılaştırmaları detaylıca açıklanmıştır.

*iv. Araştırma Sonuçları ve Tartışma*

Bu bölümde araştırmanın sonuçları şekillendirilebilirlik, mekanik özellikler ve malzeme karakterizasyonu açısından irdelenmiş ve literatür ile de karşılaştırılarak tartışılmıştır.

*v. Sonuçlar ve Öneriler*

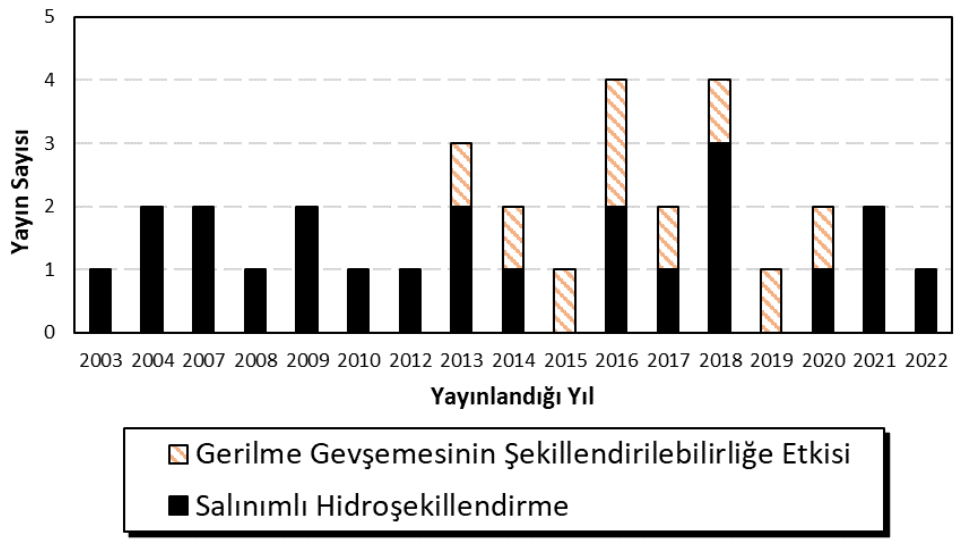
Bu bölümde doktora tezinde elde edilmiş sonuçlar özetlenmiştir. İleride yapılabilecek özgün çalışmalar öneri olarak sunulmuştur.

*vi. Kaynaklar*

# 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

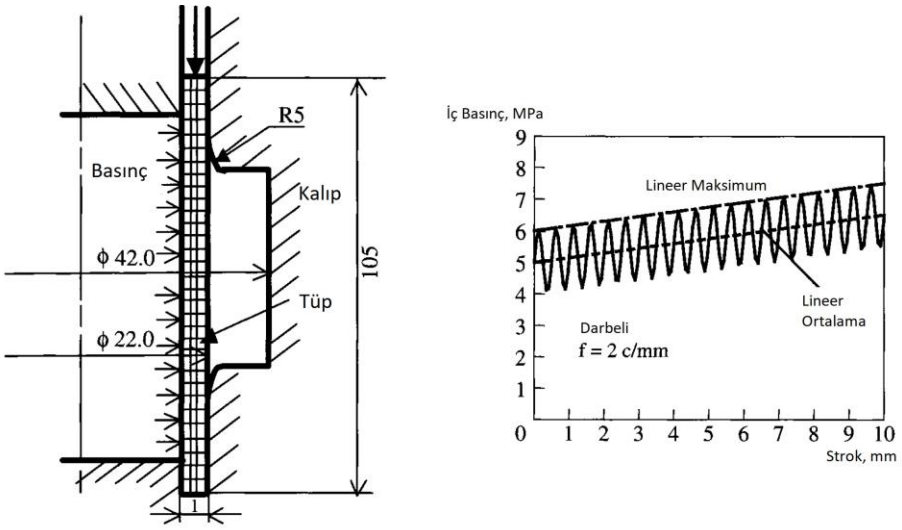
## 2.1. Salınımlı Hidroşekillendirme Konusundaki Çalışmalar

Salınımlı hidroşekillendirme konusunda yapılan çalışmalar, genel olarak sıvı basıncının, ıstampa veya baskı plakasıyla sağlanan salınımın şekillendirilebilirliğe ve son parçanın kalitesine olumlu etkisinin araştırılması üzerinde yoğunlaşmıştır. Parça kalitesini somut olarak ifade edebilmek için kalınlıktaki incelmenin dağılımı ve boşluk doldurma oranı ölçüt olarak alınmıştır. Şekil 2.1'de görüldüğü gibi 2013'ten öneki çalışmalar proses parametrelerinin etkileri üzerine olduğu daha sonraki çalışmalarda ise gerilme gevşemesinin şekillendirmeye etkisi araştırılmıştır. literatürde salınımlı HŞ'nin şekillendirilebilirliğe etkisi üzerine yapılan yayınların özeti verilmiştir.




**Şekil 2.1.** Salınımlı hidroşekillendirme ve gerilme gevşemesi konusundaki yayınların yıllara göre dağılımı (Mori ve ark., 2003, Mori ve ark., 2004, Loh-Mousavi ve ark., 2007, Mori ve ark., 2007, Loh-Mousavi ve ark., 2008, Xu ve ark., 2014, Mohebbi ve ark., 2015, Ma ve ark., 2021, Shi ve ark., 2022).

Tüp hidroşekillendirme (THŞ) gibi yöntemler ile çok daha hafif parçalar elde edilebilmektedir. Özellikle yapısal bileşenlerin üretimi için THŞ çok uygundur. THŞ'de şekillendirilebilirlik sınırının artırılması için, sıvı basıncının monoton artışlı yerine salınımlı artışlı olarak uygulanması fikri ortaya atılmıştır (Mori ve ark., 2003). THŞ'de iç basıncın salınımlı verilmesinin şekil değiştirme davranışına etkisini sayısal ve deneysel olarak incelemiştir. İç basıncın doğrusal artırılması yerine salınımlı olarak artırılmasıyla gerçekleştirilen hidroşekillendirme yöntemine salınımlı hidroşekillendirme adı verilmektedir. Şekil 2.2'de şematik olarak tüp hidroşekillendirme ve salınımlı THŞ'de basınç profili verilmiştir. Salınımlı

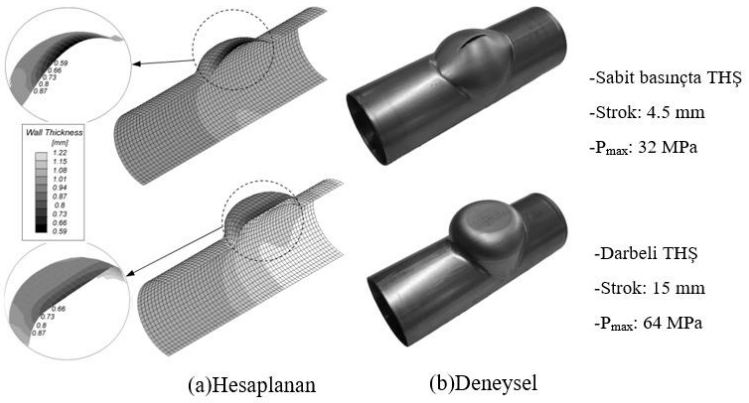



**Şekil 2.2.** Solda; THŞ'nin şematik gösterimi, sağda salınımlı THŞ'de basınç profili verilmiştir (Mori ve ark., 2003).

hidroşekillendirme ile malzemede yırtılma ve burkulma engellenmiştir. Ayrıca boşluk doldurma oranı artmış, kalınlıktaki incelme azalmıştır (Mori ve ark., 2003).

HŞ ile üretilmiş bir malzemede görülebilecek en önemli iki kusur buruşma ve yırtılmadır. Bu kusurlar parçanın HŞ ile başarısız şekillendirildiğinin göstergesidir. Mori ve ark. (2004) yaptıkları çalışmada THŞ'de iç basıncın düşük olması durumunda buruşma, yüksek olması durumunda yırtılma meydana geldiğini belirtmiştir (Mori ve ark., 2004). Salınımlı THŞ'de ise buruşma ve yırtılmaların önlenerek, malzemenin şekillendirilebilirlik kabiliyetinin arttığı gözlemlenmiştir.

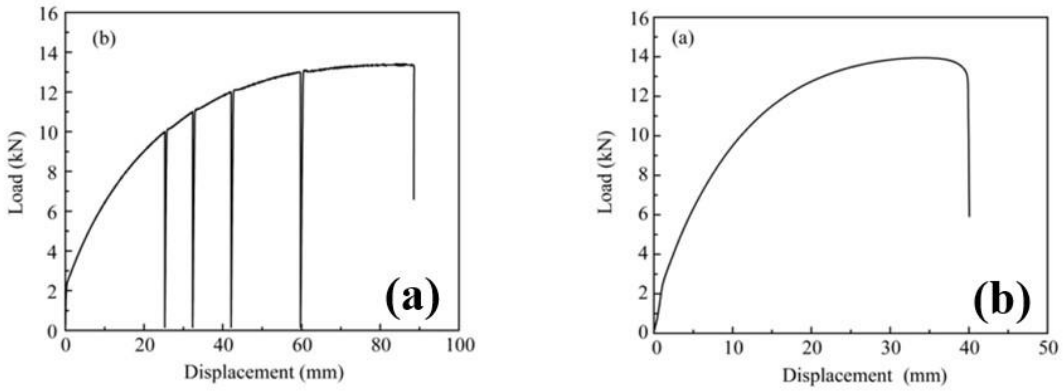
THŞ prosesi sırasında kullanılan dişi kalıpla kalıplar, parçanın son şekline ulaşmasına hizmet etmekle birlikte proses sonunda kalıp boşluğunun tam dolmaması durumu ortaya çıkabilmektedir. Loh-Mousavi (2007) salınımlı THŞ'nin boşluk doldurma oranına etkisini T-şekilli parçalarda sonlu elemanlar analizi ve deneysel çalışmalar ile incelemiştir (Loh-Mousavi ve ark., 2007). Kapalı kalıpta THŞ'de iç




**Şekil 2.3.** (a) Altta salınımlı THŞ olmak üzere hesaplanan sac kalınlıkları, (b) Simülasyonların deneysel olarak doğrulanması (Loh-Mousavi ve ark., 2007).

basınçtaki salınımın boşluk doldurma oranını önemli ölçüde artırdığı tespit edilmiştir. Buna ek olarak kalınlıktaki incelmelerin kademeli gerçekleştiği, darbesiz THŞ'de ise incelmelerin bölgesel olarak daha fazla olup yırtılmayla sonuçlandığı gösterilmiştir. Şekil 2.3'te Salınımlı THŞ'nin T-şekilli parçaların şekillenebilme kabiliyetine olan tesirini göstermektedir. Kalıp boşluğunu doldurma oranı, dolayısıyla nihai geometriye en yakın parça salınımlı THŞ ile elde edilmiştir (Loh-Mousavi ve ark., 2007).

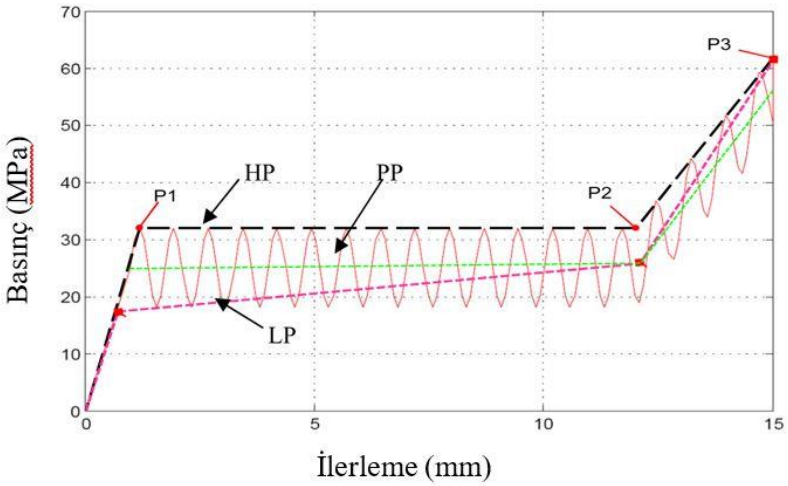
Zhang ve ark. (2009) yükleme eğrisinin paslanmaz çelik tüplerin şekillendirilebilirliğine etkisi üzerine çalışma yapmıştır (Zhang ve ark., 2009). Diğer THŞ uygulamalarından farklı olarak eksenel besleme kullanılmadan, iç basınçtaki salınımın işlem performansına etkisi incelenmiştir. Eksenel besleme kullanılmayarak, basıncın etkisi ön planda tutulmuştur. Monoton artan iç basınç ile karşılaştırıldığında; dış çap dağılımı, kalınlık dağılımı ve yırtılma deformasyonu açısından salınımlı iç basıncın şekillendirilebilirliği önemli ölçüde artırdığı tespit edilmiştir. Şekillendirme mekanizmasını araştırmak için salınımlı iç basınca benzer şekilde, 304 paslanmaz çeliğe kesintili çekme testi uygulanmıştır. Şekil 2.4'te gösterilen kesintili çekme testinde, klasik çekme testine göre kopma uzamasının %40 daha fazla olduğu ve deformasyon dağılımının daha düzgün olduğu sonucu elde edilmiştir. Bu durumun açıklaması olarak, kesintili çekme testinde metalik malzemenin mikroyapısında meydana gelen değişimler gösterilmiştir (Zhang ve ark., 2009).




**Şekil 2.4.** (a) Kesintili çekme testinde yük-deplasman eğrisi,
(b) Klasik çekme testinde yük-deplasman eğrisi (Zhang ve ark., 2009).

Honggang An (2010) "Hibrit Global ve Lokal Arama Kullanarak Tüp Hidroşekillendirmenin Çok Amaçlı Optimizasyonu" başlıklı doktora tezindeki çalışmaların bir bölümünü salınımlı THŞ'nin yükleme eğrilerinin optimizasyonuna ayırmıştır (An, 2010). Karşılaştırma maksadıyla Şekil 2.5'te görülen düşük basınç (LP), yüksek basınç (HP), ve salınımlı basınç (PP) olmak üzere üç basınç hattı kullanılmıştır.

Optimizasyon probleminin amacı olarak; yırtılmanın, buruşmanın ve aşırı incelmenin minimize edilmesinin yanı sıra kalıp boşluğu doldurma oranının maksimize edilmesi esas alınmıştır. Üç farklı basınç hattının karşılaştırılması sonucu, salınımlı basınç ile daha üniform sac kalınlığının elde edilebildiği bulunmuştur.




**Şekil 2.5.** THŞ'de kullanılan üç farklı basınç hattı. HP yüksek basıncı, LP düşük basıncı, PP salınımlı basıncı göstermektedir (An, 2010).

Xu ve ark. (2013) dikdörtgen kesitli paslanmaz çelik tüp şeklinde parçaların hidroşekillendirilmesinde proses parametrelerinin tesiri üzerine çalışmıştır. Salınımlı iç basıncın malzemenin şekillendirilebilirliğini gözle görülür oranda iyileştirdiğini göstermiştir. Salınımlı basınç sonucunda oluşan üniform kalınlık dağılımı sebebiyle, malzemede oluşan yırtılma daha homojen bir görünüm sergilemiştir (Xu ve ark., 2013).

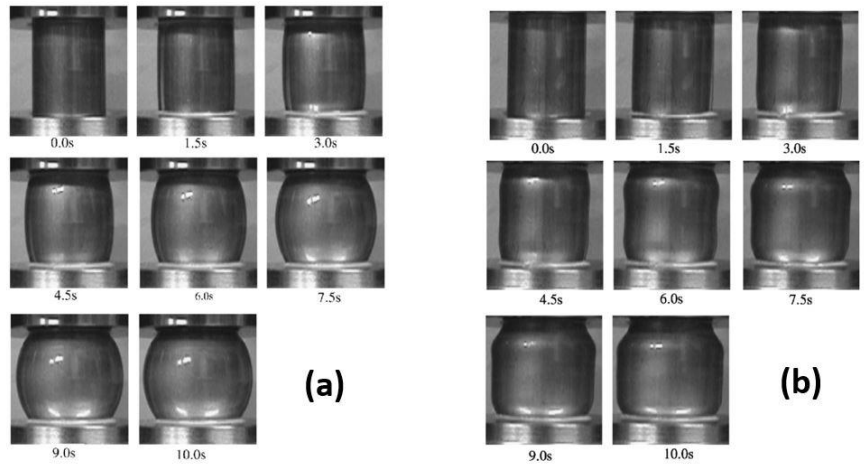
Xu ve ark. (2014) tüp kesitli motor taşıyıcı gövdesinin tüp hidroşekillendirme ile imalatında salınımlı iç basıncın etkisini incelemiştir. Monoton artan yükleme eğrisi ile yırtılma sınırını aştığı bilinen malzemeler, salınımlı yükleme eğrisi ile şekillendirilebilmiştir. Bu sayede daha fazla eksenel strok gerçekleştirilebilmiştir (Xu ve ark., 2014).

Salınımlı tüp hidroşekillendirme konusunda çalışmaların çoğunluğu parametrelerin şekillendirilebilirliği etkisi üzerine olmakla birlikte, Ashrafi ve Khalili (2015) tarafından parametrelerin etkisi Taguchi yöntemiyle sayısal olarak da ortaya konulmuştur (Ashrafi ve Khalili, 2015). T şeklinde bakır malzemenin salınımlı hidroşekillendirmesinde altı parametre ve iki seviye seçilmiştir. Varyans analizi ve SN oranı ile birlikte buruşma, yükseklik ve sac kalınlığı açısından önemli parametreler belirlenmiştir. Çizelge 2.1'de belirtilen parametrelerin buruşma, yükseklik ve sac

**Çizelge 2.1.** Salınımlı THŞ'de parametreler ve seviyeleri. (Ashrafi, 2016).

| Notasyon | Proses Parametresi | 1.Seviye | 2.Seviye |
|---|---|---|---|
| A | Istampa deplasmanının basınç iniş ve çıkış zamanlarına oranı | 1 | 2 |
| B | Toplam Istampa Deplasmanı (mm) | 18 | 24 |
| C | Basıncın ilk tepe noktası (bar) | 210 | 240 |
| D | Basıncın son tepe noktası (bar) | 240 | 270 |
| E | Basıncın osilasyon sırasında genliği (bar) | 20 | 40 |
| F | Basıncın tepe noktalarının sayısı | 10 | 15 |

kalınlığına etkileri aşağıdaki gibi bulunmuştur. Çizelgeye göre A, B ve F parametreleri en fazla buruşmaya etki etmiştir. C, B ve F parametreleri en fazla şişme yüksekliğine etki etmiştir. A, C ve F parametreleri en çok sac kalınlığına etki etmiştir. D ve E parametreleri tüm kriterlere en az etki eden parametrelerdir.




**Şekil 2.6.** (a) Sabit basınçta THŞ'de genişleme, (b) Salınımlı basınçta üniform genişleme (Mori ve ark., 2007).

THŞ prosesinin kalitesini belirleyen önemli göstergelerden birisi nihai parçanın kesiti boyunca sac kalınlığındaki farklılıkların büyüklüğüdür. Başka bir ifade ile üniform kalınlık dağılımının sağlanması amaçlanmalıdır (Mori ve ark., 2007). Yapılan sayısal ve deneysel çalışmalarda Mori ve ark. (2007)'ye göre salınımlı THŞ'deki salınımlı iç basınç, üniform genişlemeyi sağlamış ve lokal incelmeleri azaltmıştır. Deneyde kalıp kullanılmaması üniform genişlemenin gözlemlenmesini kolaylaştırmıştır. Şekil 2.6'da sabit basınçtaki THŞ'ye kıyasla, salınımlı THŞ ile üniform genişlemenin mümkün olduğunu göstermektedir. Şekillenebilirlikteki artışı, basınçtaki salınım sırasında gerilim bileşenlerindeki değişimler ile açıklamıştır. Şekil 2.6'da salınımlı HŞ'de görülen üniform genişlemeye dikkat edildiğinde, kalıp kullanılmadığı için salınımlı THŞ'de sürtünme yerine başka mekanizmaların da tesiri olduğu ortaya çıkmıştır.

Sürtünme koşulları THŞ prosesine önemli ölçüde etki etmektedir. Hama ve ark. (2004)'e göre THŞ'de sürtünmenin azaltılmasının şekilendirilebilirliğe olumlu etkisinin salınımlı THŞ'deki salınımlı iç basıncın etkisi ile benzer olduğunu ortaya koymuştur (Hama ve ark., 2004). Ayrıca salınımlı THŞ'nin, düşük sürtünmeli klasik THŞ'ye göre daha düşük basınçlarda aynı doldurma oranını sağlayabildiğini göstermiştir.

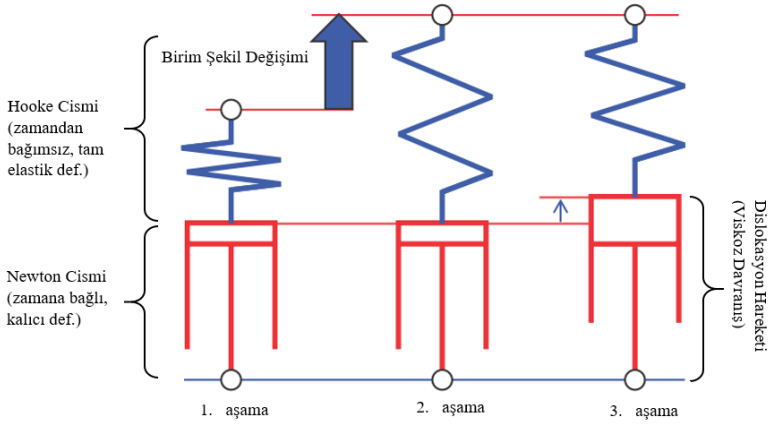
Sürtünmenin etkisini inceleyebilmek için, Loh-Mousavi ve ark. (2008) daha önce sabit sürtünme katsayısı için salınımlı THŞ konusunda yaptığı çalışmayı, sürtünmesiz koşul dahil olmak üzere farklı sürtünme katsayıları için yaparak geliştirmiştir (Loh-Mousavi ve ark., 2008). Sonuç olarak sürtünmesiz durumda bile salınımlı THŞ'nin daha iyi şekillendirilebilirlik sağladığı elde edilmiştir. Bu durum, salınımlı THŞ sırasında malzemede gerçekleşen deformasyon mekanizmalarının şekillendirilebilirliği artırdığını işaret eder. Farklı sürtünme değerleri için incelme ise kendi içerisinde yaklaşık olarak aynı çıkmıştır.

Salınımlı THŞ üzerine yapılan çalışmaların büyük çoğunluğunda, basınçtaki darbe etkisi düşüş ve yükselişler ile sağlanmıştır. Yang ve ark. (2009) ise basınçta düşüş olmadan ve basamaklı bir şekilde artırılması ile darbe etkisini sağlamıştır (Yang ve Chen, 2009). Bu çalışmada basınç artışını temsilen basınç basamağı "$\Delta p$" ve basıncın sabit tutulduğu zaman aralığını temsilen "$\Delta t$" parametrelerinin şekillendirilebilirliğe etkisini incelemişlerdir. Şekillendirilebilirlik kriteri olarak; kalınlık dağılımı, üniform sac kalınlığı, kalıp boşluğu doldurma oranı ve potansiyel yırtılma olmak üzere dört kriter seçilmiştir. Analizlere dayanarak şekillendirilebilirliği tanımlayan f göstergesi öne sürülmüştür. Sonuç olarak $\Delta p$ basınç farkı ve $\Delta t$ zaman farkının daha küçük değerleri, şekillendirilebilirliğin dört kriterine olumlu etki etmiştir.

Güncel olarak yayınlanmış üç ayrı çalışmada salınımlı THŞ ve sac HŞ ile ilgili olumlu sonuçlar elde edilmiştir (Hu ve Pan, 2020, Ma ve ark., 2021, Shi ve ark., 2022). Bu çalışmalarda kalınlık dağılımına ek olarak, kalıbı doldurma oranını ölçebilmek için yeni bir yöntem geliştirilmiştir. Salınımlı ve monoton şekillendirilmiş tüp şeklinde miller sıvı ile doldurulup, ağırlık artışındaki fark gözlemlenmiştir (Ma ve ark., 2021). Yapılan güncel çalışmalar, salınımlı HŞ'nin birçok farklı malzeme ve proses için gelecekte araştırmayı bekleyen uygulama alanları olduğunun ispatı niteliğindedir. Ayrıca bu konudaki literatürün çoğunlukla tüp HŞ ile ilgili olduğu, sac HŞ ile ilgili çalışmaların henüz yeterli düzeyde olmadığı gözlemlenmiştir.

## 2.2. Gerilme Gevşemesi Konusunda Yapılan Çalışmalar

Gerilme gevşemesinin şekillendirilebilirliği artırması ve bu mekanizmanın anlaşılması konusunda yapılan çalışma sayısı son yıllarda giderek artmıştır. Bazı malzemelerde, şekil değiştirme devam ettiği sırada geçici olarak şekil değişiminin sabit tutulması, malzemenin geriliminde azalmaya sebep olmaktadır (Yamashita ve ark., 2015). Uygulanan yük ve şekil değişimi sabit tutulduğu halde oda sıcaklığında gerilimin düşmesi, gerilme gevşemesi fenomeni (stress relaxation phenomenon) olarak tanımlanır (Prasad ve ark., 2020). Gerilme gevşemesinin nedeni olarak, elastik deformasyona uğrayan malzemenin, şekil değişiminin durdurulması sonrasında elastik deformasyonların bir kısmının kalıcı deformasyona dönüşmesi gösterilmektedir. Gerilme gevşemesini daha iyi anlamak için Hooke cismi ve Newton cisminin seri bağlı olduğu Maxwell modeli kullanılır. Burada Hooke cismi, zamandan bağımsız tam elastik davranışı, Newton cismi ise zamana bağlı viskoz davranışı simgeler. Şekil 2.7'de



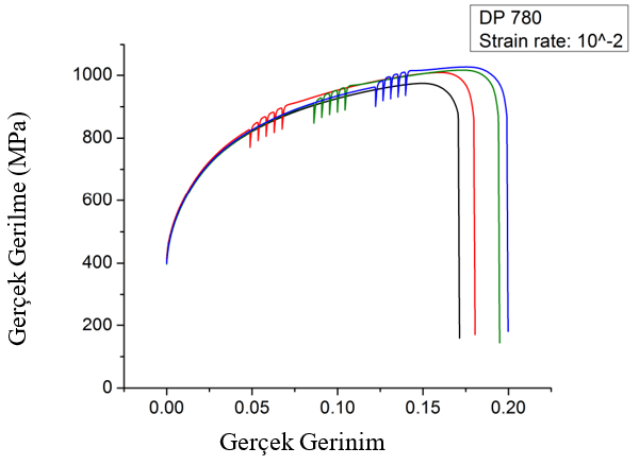

**Şekil 2.7.** Maxwell modeli (Yamashita ve ark., 2015).

Maxwell modeli verilmiştir (Yamashita ve ark., 2015). Maxwell modelinde birinci aşamada yüksüz durumdayken, ikinci aşamada bir miktar şekil değişimi uygulandığında Hooke cismi elastik deformasyona uğrar. Gerilme gevşemesinin oluştuğu duraklama anında, Newton cismi kalıcı deformasyona uğradığı için, elastik deformasyonun bir kısmı kalıcı deformasyona dönüşür. Bu durumda üçüncü aşama, gerilme gevşemesini açıklamaktadır. Newton cisminin kalıcı deformasyonu, dislokasyon hareketleri ile açıklanmaktadır. Bu model, viskoz ve elastik davranışı içerdiği için, viskoelastik malzeme modeli olarak da bilinir.

Bu fenomenin şekillendirilebilirlik ile ilgisine yönelik ilk çalışmalardan biri Yamashita ve ark. (2015) tarafından derin çekme için yapılmıştır (Yamashita ve ark., 2015). Öncelikle kullanılacak çelik malzemenin çekme testi klasik yöntemle ve

duraklamalı olarak ayrı ayrı yapılmıştır. Duraklamalı olarak uygulanan testte kopmanın daha geç meydana geldiği ve sünekliğin arttığı gözlemlenmiştir. Derin çekme için yapılan denemelerde, sac metalin derin çekilmesi sırasında doğrusal ıstampa hareketi yerine, ıstampanın belirli süre duraklamaları ile derin çekilebilirlik artmıştır. Duraklamalı derin çekme ile sac malzemenin şekillendirme sınır derinliği %40 kadar artmıştır. Bu duruma açıklama olarak, gerilme gevşemesi sırasında elastik deformasyonların plastik deformasyonlara dönüşmesi verilmiştir.

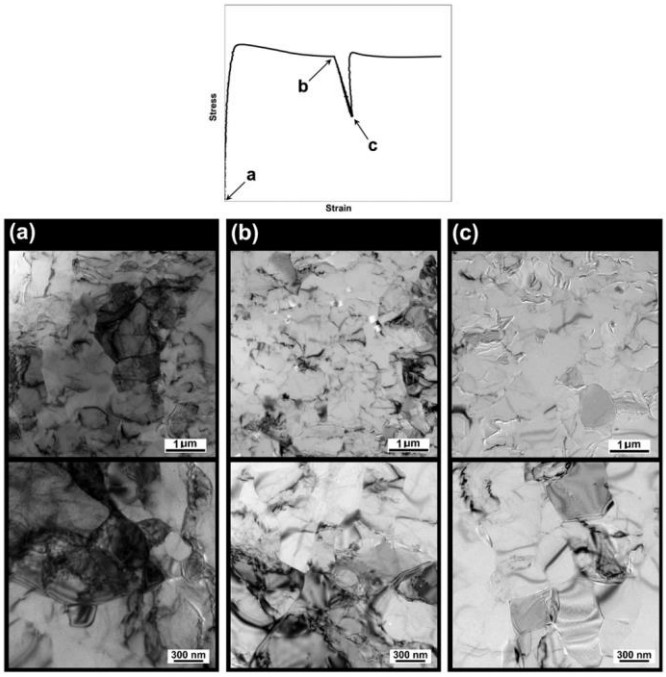
Daha sonraki çalışmalarda, gerilme gevşemesi testi ile malzemelerin sünekliğinin artırılması üzerine yoğunlaşılmıştır. Hariharan ve ark. (2013) üç farklı malzemede gerilme gevşemesinin sünekliğe etkisini gerilme gevşemesi testi ile araştırmıştır (Hariharan ve ark., 2013). Düşük karbonlu çelik, çift fazlı çelik ve TRIP (Transformation Induced Plasticity) çeliğinin kullanıldığı deneylerde her üç malzeme için de yüzde uzama değerleri artmıştır. Süneklikteki artışın gerinim hızına da duyarlı olduğu tespit edilmiştir. Malzeme özelliklerine göre gerinim hızına duyarlılığın değiştiği ve çalışmanın bu açıdan ilerletilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Gerilme gevşemesi testlerinin malzemenin maksimum çekme dayanımı noktasına (UTS) uzaklığı da süneklikte etkili olmaktadır. Şekil 2.8'de klasik çekme deneyine göre




**Şekil 2.8.** Çift fazlı çeliğin sabit gerinim hızında, klasik çekme deneyi ile gerilme gevşemesinin karşılaştırılması (Hariharan ve ark., 2013).

sünekliğin üç durumda da arttığı ve gevşemenin UTS'ye yakın bölgede verilmesinin sünekliği daha fazla artırdığı görülmektedir. Başka bir çalışmada Eipert ve ark. (2014) iki farklı dayanımda titanyum alaşımının gerilme gevşemesi testlerini gerçekleştirmişlerdir. Diğer çalışmadan farklı olarak 0° ve 90° haddeleme doğrultularını kullanarak anizotropinin etkisini incelemiştir (Eipert ve ark., 2014).

Gerilme gevşemesi sırasında malzemenin iç yapısındaki değişimler ile ilgili en belirgin araştırma Mohebbi ve ark. (2015) tarafından yapılmıştır. Çekme testi yerine düzlem BŞD basma testi sırasında malzeme iç yapısı TEM ile görüntülenmiştir (Mohebbi ve ark., 2015). Şekil 2.9 (a)'da test öncesi TEM görüntüsü verilmiştir. Küçük tane yapısında dislokasyon yoğunluğu düşük olmasına rağmen, büyük tanelerde yüksek dislokasyon yoğunluğu gözlemlenmiştir. Burada kullanılan numune Accumulative Roll Bonding (ARB) yöntemi ile üretildiğinden, sekiz çevrim haddelemeye maruz kaldığı da belirtilmelidir. Şekil 2.9 (b)'de malzemeye basma testi ile 0.3 gerinim verildikten sonraki TEM görüntüsü verilmiştir. Dislokasyon yoğunluğunun çevrimlerde azaldığına ve en sonunda daha yüksek yoğunluğa ulaşıldığına vurgu yapılmıştır. Şekil 2.9 (c)'de ise gerilme gevşemesi sonundaki TEM görüntüsü gösterilmiştir. Gerilme gevşemesi sonucunda dislokasyonlar büyük ölçüde kaybolmuş ve tane sınırları keskinleşmiştir. Gerilme gevşemesi sonucundaki TEM görüntülerinden elde edilen gözlemler; tane içinde dislokasyon yoğunluğunun önemli ölçüde azalması, dislokasyonların daha stabil olacak şekilde yeniden düzenlenmesi ve tane sınırlarının keskinleşmesidir. Bunun sebebi olarak gerilme gevşemesi sırasında efektif gerilmeler ile birlikte iç gerilmelerin de azalması gösterilmiştir.




**Şekil 2.9.** (a) Basma testi öncesi, (b) Basma testinde 0.3 gerinim sonrası ve (c) gerilme gevşemesi sonrası TEM görüntüleri (Mohebbi ve ark., 2015).

Hariharan ve ark. (2016) tarafından yapılan çalışmada süneklik artırıcı gerilme gevşemesinin; süreye, gerinim hızına ve gevşemenin hangi gerinimde uygulandığına

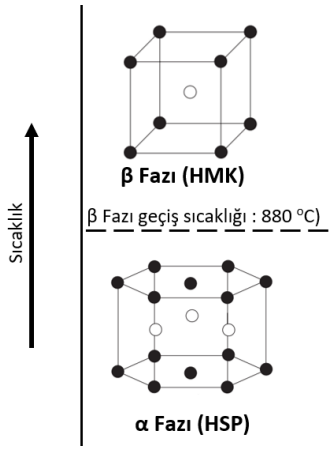
bağlı olduğu sonucu çıkarılmıştır. Malzeme iç yapısı açısından bu olayın sebebi olarak dislokasyonların kaybolması ve zamana bağlı toparlanma gösterilmiştir. Gerinim ile diskolasyonların kaybolmasının ilişkili olduğu, gerinim hızı ile de toparlanmanın ilişkili olduğu varsayılmıştır. Ayrıca gerilme gevşemesinin, dislokasyon yoğunluğu ve iç gerilmelere bağlı olarak analitik modeli çıkartılmıştır (Hariharan ve ark., 2016).

# 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışma ile oda sıcaklığında şekillendirilebilirliği düşük olan Ti-6Al-4V malzemesinin, salınımlı basınç altında daha yüksek oranda şekillendirilebilirliğinin şişirme testi kullanılarak deneysel olarak araştırılması ve iyileşmenin mikroyapı ile ilişkilendirilmesi amaçlanmıştır. Bu bölümde; kullanılan malzemenin özellikleri, şişirme testine ait deney düzeneğinin tasarımı, deney parametrelerinin tasarımı, malzeme karakterizasyonu için izlenecek deneysel yöntem, numune hazırlama yöntemleri, ölçme sisteminin tasarımı ile ilgili yöntemler sunulmuştur. 3.1. Malzeme Özellikleri

Çalışmada seçilen Ti-6Al-4V alaşımı, dünyada kullanılan titanyum alaşımlarının % 60'ını oluşturmaktadır (Dhal ve ark., 2021). Yaygın kullanılmasının iki ana sebebi; yüksek mukavemet/ağırlık oranı ve çok iyi korozyon direncidir. Özellikle mukavemeti, rakibi olduğu alüminyum ve magnezyum gibi malzemelere göre çok yüksektir ve havacılık sektöründe genellikle bu alaşım kullanılmaktadır. Yüksek dayanımına rağmen, yoğunluğu alüminyum ve kompozit malzemelere göre nispeten fazla olduğu için sivil havacılık uygulamalarında daha az kullanılır. Özellikle yüksek sıcaklıklarda yüksek mukavemeti nedeniyle savaş jetlerinde daha çok tercih edilmektedir. Örneğin üretilmiş en verimli yolcu uçaklardan biri olan Boeing 787 gibi modellerde %10 oranında titanyum alaşımı kullanılırken, bu oran F-16 ve F-35 gibi savaş uçaklarında sırasıyla % 25 ve % 35'tir (Mouritz, 2012).

Malzeme içerisindeki titanyum atomları iki farklı kristal yapıda bulunabilir. Bunlar HMK yapıdaki düşük sıcaklık fazı α-Ti ve HSP yapıdaki yüksek sıcaklık fazı β-Ti'dir. Her iki fazın kristal yapıları Şekil 3.1'de verilmiştir. Bu fazlar, titanyum alaşımlama için kritik sıcaklık olan, 880 °C'de saf titanyumda allotropik dönüşüm sonucu oluşur. Bu fazların belirli oranlarda oluşturulmasıyla her bir alaşım farklı miktarda fazlar içereceği için titanyum alaşımları üç grupta incelenmiştir. Bunlar α-Ti, β-Ti ve α/β-Ti alaşımlarıdır. Her iki fazı da (α ve β) elde etmek için kararlaştırıcı elementler kullanılır. Kararlaştırıcı elementlere örnek olarak V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu ve Al verilebilir. Alaşımlama için kullanılan ve titanyum içerisinde çözünen bu elementler, *arayer atomu* (interstitial atom) ve *yeralan atomu* (substitutional atom) olmak üzere kendi içinde iki gruba ayrılabilir. Her titanyum alaşımının kendine has mikroyapısı oluşacağı için kullanılacağı alana göre çeşitli titanyum alaşımları geliştirilmiştir (Anil Kumar ve ark., 2021).




**Şekil 3.1.** Membran teorisine ait parametreler (Froes, 2011).

Bu çalışmada kullanılan Ti-6Al-4V Grade 5 alaşımı hem α hem β fazını içeren α/β-Ti alaşımları grubuna girer ve havacılık sektöründe yaygın olarak kullanılır. Ergime sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda N, O ve H elementleriyle reaksiyona girerek metalik, kovalent ve iyonik bağlar oluşturabilir. Ayrıca her iki fazı elde etmek için Al ve V dengeleyici elementleri kullanılır (Froes, 2011). Burada Vanadyum'un β fazı için, Alüminyum'un ise α fazı için kararlaştırıcı olduğu bilinmektedir. Bu çalışmada kullanılan malzeme 219M489 nolu TÜBİTAK projesi ile temin edilmiş ve ilgili malzemenin; sertifikası, mekanik özellikleri ve kimyasal kompozisyonu Şekil 3.2'de verilmiştir.

西安领航新材料科技有限公司
TSM TECHNOLOGY CO., LTD
质量证明书 QUALITY CERTIFICATION EN10204 3.1 生产许可证编号:XK10-003-00009

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Address | Keji 5th Road NO.8 Gaoxin District,Xi'an | Customer | Dr. Mevlüt TÜRKÖZ | CI No | TSMB20201030 |
| Tel | 02987547434 | Products | Titanium Plates Gr5 | Specs | AS FOLLOWING |
| sales | Bella | 数量合计(Total) : 29 公斤 (kgs) | | | |

| Heat No. | Standrad | Size (mm) | Material | Quantity (pcs) | Weight (kgs) | Mechanical properties: Tensile Strength (Mpa) Min.895 | Rp0.2Yield Strength,0.2% Min.828 | Elongation (%) Min.8 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | 1043 | 932 | 10 |
| 066-775 | ASTM B265 | 5*1000*1000 | 6Al-4V | 13 | 29 | 1017 | 966 | 10.5 |

检测结果 Test Result(s)

| Heat No. | Size (mm) | Material | Element | Chemical Composition (%): Ti | Fe | C | N | O | H | Al | V | Residuals: Each≤0.10 | Total≤0.40 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | ≤0.40 | ≤0.08 | ≤0.05 | ≤0.20 | ≤0.015 | 5.5-6.75 | 3.5-4.5 | | |
| 066-775 | 5*1000*1000 | Gr.5 | Test Value | Analysis | 0.049 | 0.010 | 0.011 | 0.044 | 0.0089 | 6.15 | 4.15 | Acceptable | Acceptable |
| 066-775 | | | | | 0.049 | 0.010 | 0.013 | 0.069 | 0.0089 | 6.08 | 4.05 | | |

1. We hereby certify that the product described herein have been manufactured, inspected and tested in accordance with the customer specification and the results satisfy the requirement.

编制人 Compiled by 唐茜 审核 Verify 惠绍冬 质量印章 Stamp 日期 date 2020.11.10

| | Mekanik Özellikler (Ti-6Al-4V Grade 5) | | |
|---|---|---|---|
| | Çekme Dayanımı (MPa) | Akma Dayanımı (%0.2'de, MPa) | Uzama (%) |
| Numune 1 | 1043 | 932 | 10 |
| Numune 2 | 1017 | 966 | 10.5 |

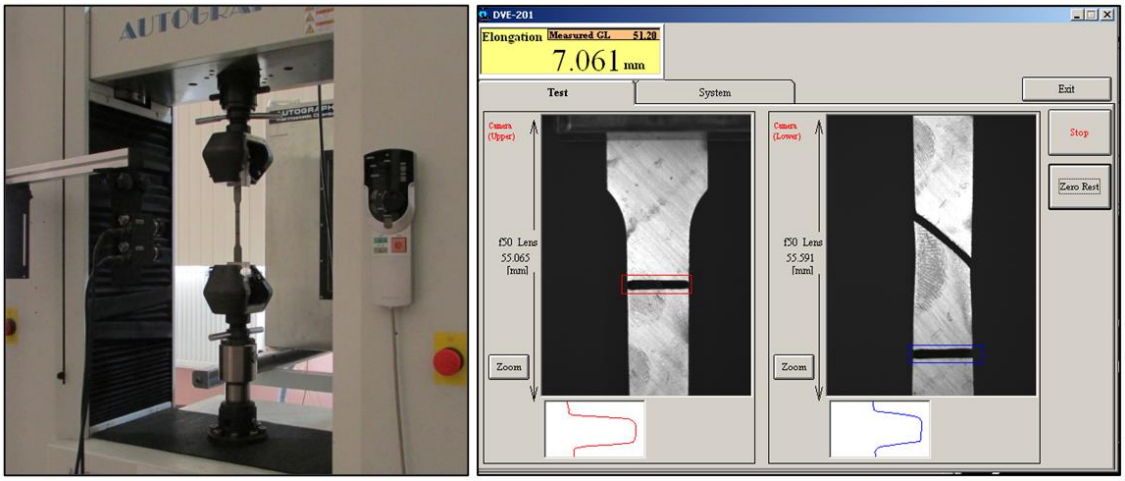
| | Kimyasal Kompozisyon (%) | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Ti | Fe | C | N | O | H | Al | V |
| Referans | ≤90 | ≤0.40 | ≤0.08 | ≤0.05 | ≤0.20 | ≤0.015 | 5.5-6.75 | 3.5-4.5 |
| Numune 1 | 89.58 | 0.049 | 0.010 | 0.011 | 0.040 | 0.009 | 6.15 | 4.15 |
| Numune 2 | 89.72 | 0.049 | 0.010 | 0.013 | 0.069 | 0.009 | 6.08 | 4.05 |

**Şekil 3.2.** Malzeme sertifikasında belirtilen mekanik özellikler ve kimyasal kompozisyon.

Ayrıca malzemeye üç farklı doğrultuda (Hadde doğrultusu ile 0°, 45° ve 90°) üç tekrarlı çekme testi ASTM-E8 standardına göre uygulanarak literatürdeki Ti-6Al-4V alaşımının mekanik özellikleri ile karşılaştırılması yapılmıştır. Daha önce Konya Teknik Üniversitesi (KTÜN) laboratuvarında uzama teli ile yapılan çekme testleri en küçük boyutlu (subsize) numune ile yapılmıştır ve Şekil 3.3'te çekme testinin uygulanışı verilmiştir.

**Şekil 3.3.** KTÜN'de Ti-6Al-4V alaşımına uygulanan çekme testi.

Ancak normal boyutlarda numunenin video ekstansometre ile test yapılmasının daha güvenilir olacağı düşünülerek, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi bünyesindeki video eksansometreli çekme cihazında testler tekrarlanmıştır. ASTM-E8 standardında ve 3 mm/dk çekme hızında yapılan çekme testi düzeneği ve video ekstansometre görüntüsü Şekil 3.4'te verilmiştir.




**Şekil 3.4.** NÖHÜ'de video ekstansometre ile uygulanan çekme testleri.

### 3.2. Hidrolik Şişirme Testi

Bu çalışmada salınımlı şekillendirme sırasında gerçekleşen yükleme ve boşaltma işleminin malzeme sünekliğine etkisinin sürtünmeden bağımsız olarak araştırılması amaçlanmıştır. Çünkü aksi takdirde iyileşmenin sürtünmeden mi yoksa malzeme özelliklerinden mi kaynaklandığına karar verilemeyecekti. Literatürde salınımlı şekillendirme sırasında sürtünme katsayısının değişimini inceleyen sınırlı sayıda çalışma (Yang ve ark., 2015) bulunmaktadır. Çünkü malzeme cinsi ve şekillendirme prosesine göre sürtünme katsayısının elde edilmesi zor, değişken ve maliyetli olmaktadır.

Bu sebeplerden dolayı, salınımlı şekillendirme ile elde edilen artışın sürtünmeden bağımsız olarak sadece malzeme mikroyapısına bağlı olarak incelemesi düşünülmüştür. Dolayısıyla malzemenin en az sürtünmeye ve iki eksenli gerdirmeye maruz kaldığı hidrolik şişirme testinin uygulanmasına karar verilmiştir.

Hidrolik şişirme testinde KTÜN'de bulunan HŞ presi kullanılmıştır. Test sonucunda gerçek gerilme ve gerçek BŞD'nin elde edilebilmesi için şişirme testi analitik hesaplamaları yapacak tarzda tasarlanmıştır. Bu nedenle izleyen bölümlerde membran teorisi ve buna uygun kalıp tasarımı açıklanmıştır.

#### 3.2.1. Membran Teorisi

Şişirme testinden akma eğrisi elde edilirken kabuklar için membran teorisi kabulü yapılmaktadır (Lemoine ve ark., 2011). Bu kabulünün yapılabilmesi için eğilme gerilmelerinin ihmal edilebilmesi yani levha kalınlığın çapa oranının $s_0/d \leq 1/100$ koşulunu sağlanması gerekir. Deneylerde $s_0$= 0.55 mm, d= 100 mm olmak üzere bu oran 1/180 olmuştur.

Gerilme-BŞD eğrisini oluşturabilmek için kubbe merkezindeki anlık kalınlık (s) ve eğrisellik yarıçapı (ρ) değerleri gerekmektedir. Bu değerleri anlık ölçmek oldukça zor olduğundan, anlık şişme yüksekliği ve anlık iç basınca bağlı olarak ρ ve s değerlerinin analitik olarak hesaplandığı yaklaşımlar öne sürülmüştür. Eğrisellik yarıçapı ve kalınlık (ρ ve s) değerlerinin sırasıyla Panknin ve Kruglov yaklaşımlarıyla hesaplanması daha önceki YMK (Yüzey Merkezli Kübik) yapıdaki çalışmalarda denenmiş ve başarılı sonuçlar alınmıştır (Şükür ve ark., 2016). Literatürde de her malzeme ve deney sistemi için farklı yaklaşım kombinasyonlarının daha iyi sonuç verebileceği belirtilmiştir (Martins ve ark., 2013). Tez kapsamında HSP kristal yapısına sahip Ti-6Al-4V alaşımında çeşitli yaklaşımlarla analitik hesaplamalar yapılmış ve

Panknin-Lazarescu yaklaşımı literatürde verilen akma eğrisi ve deney sonunda ölçülen kalınlık açısından yakın sonuç vermiştir (Odenberger ve ark., 2012a, Odenberger ve ark., 2012b). Çizelge 3.1'de Kruglov ve Lazarescu yaklaşımlarının karşılaştırılması verilmiştir. Ayrıca literatürde titanyum alaşımları için kullanılan analitik yaklaşımlar benzer şekilde verilmiştir (Djavanroodi ve Janbakhsh, 2013).

**Çizelge 3.1.** Deneysel ve teorik olarak gerçek BŞD'lerin karşılaştırılması.

| **Yöntem** | **Kubbe merkezindeki son kalınlık (mm); s** | **Gerçek BŞD (mm/mm); ln ($s/s_0$)** |
|---|---|---|
| Kruglov Yaklaşımı | 0.519 | 0.058 |
| Lazarescu Yaklaşımı | 0.499 | 0.095 |
| Deneysel Sonuç | 0.500 | 0.095 |

Şişirme deneyine ait boyutsal parametreler Şekil 3.5'te verilmiştir. Eğrilik yarıçapının hesaplanması için Panknin yaklaşımında (3.1) denklemi kullanılır;

$$\rho = \frac{\left(R + \frac{d}{2}\right)^2 + h^2 - (2Rh)}{2h} \tag{3.1}$$

Burada (3.1) denklemindeki h pres üzerindeki sensör ile anlık olarak ölçülebilmektedir. Tepe noktası kalınlık hesabı ise Kruglov yaklaşımı ile (3.2) denkleminden hesaplanır. Diğer parametre olan kalıp radyusu sabittir. Kruglov denkleminde anlık h yüksekliğinin ölçülebilmesi sayesinde anlık merkez levha kalınlığı hesaplanmıştır.

$$s = s_0 \left[ \frac{\left(\frac{d}{2\rho}\right)}{\sin^{-1}\left(\frac{d}{2\rho}\right)} \right]^2 \tag{3.2}$$

Tepe noktası kalınlık hesabı için daha ayrıntılı başka bir yöntem Lazarescu tarafından önerilmiştir (Lăzărescu ve ark., 2011b). Aşağıda verilen (3.3) denklemi ile tepe noktası kalınlığının anlık değeri hesaplanmıştır.

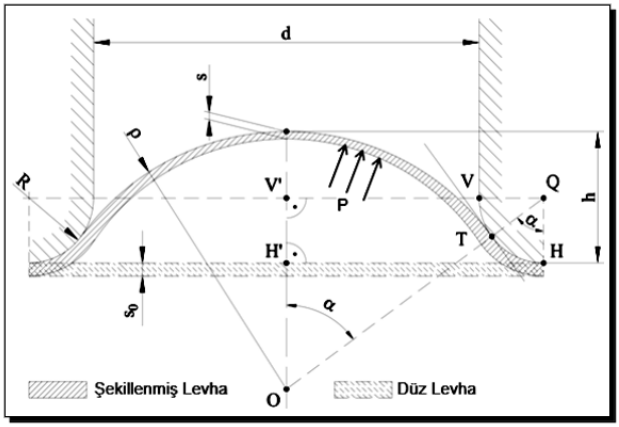
$$s = s_0 \exp(-\varepsilon_b) = s_0 \left( \frac{\alpha}{\sin \alpha} \right)^{-2(1+c\alpha)} \tag{3.3}$$

Burada α ve $\alpha_{max}$ açısı ile c sabitini ayrıca hesaplamak gerekir. Lazarescu yaklaşımına göre (3.4), (3.5) ve (3.6) eşitlikleri ile verilen alt denklemlerden; α açısı, $\alpha_{max}$ açısı ve c sabiti hesaplanmıştır (Lăzărescu ve ark., 2011a).

$$\alpha = \arcsin\left[\left(\frac{d}{2}+R\right) \Big/ \left(\frac{1}{2h}\left(\frac{d}{2}+R\right)^2+\frac{h}{2}\right)\right] \tag{3.4}$$

$$\alpha_{\max} = \arcsin\frac{\left(\frac{d}{2}+R\right)}{\left(\frac{1}{2h_{\max}}\left(\frac{d}{2}+R\right)^2+\frac{h_{\max}}{2}\right)} \tag{3.5}$$

$$c = \left(\ln\sqrt{\frac{s_0}{s_{\min}}}-\ln\frac{\alpha_{\max}}{\sin\alpha_{\max}}\right) \Big/ \left(\alpha_{\max}\ln\frac{\alpha_{\max}}{\sin\alpha_{\max}}\right) \tag{3.6}$$



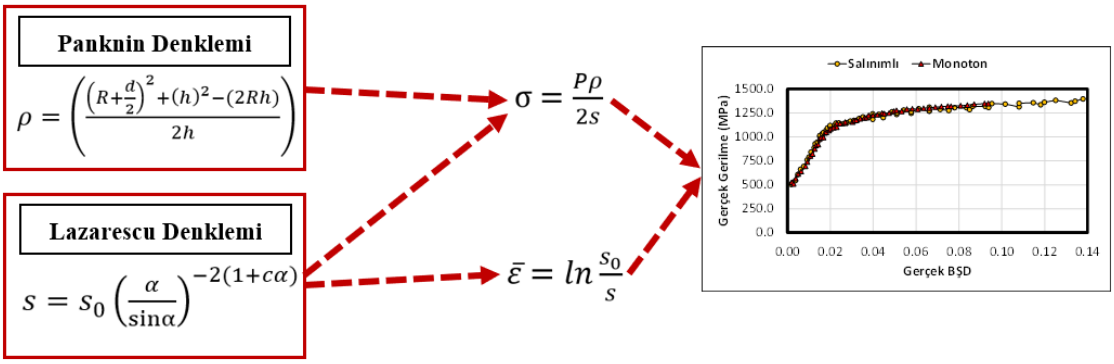

| | |
|---|---|
| $s_0$ | İlkel levha kalınlığı (mm) |
| s | Kubbe merkezindeki anlık levha kalınlığı (mm) |
| d | Kalıp açıklığı çapı (mm) |
| ρ | Eğrisellik yarıçapı (mm) |
| R | Kalıp radyusu (mm) |
| h | Anlık şişme yüksekliği (mm) |
| α | Hayali küre merkezinin sabit H noktası ile yaptığı açı |
| O | Hayali küre merkezi |
| P | İç basınç (MPa) |

**Şekil 3.5.** Membran teorisine ait parametreler.

**Çizelge 3.2.** Tepe noktası kalınlığının analitik olarak hesaplanmasında kullanılan iki farklı yöntemin karşılaştırılması (Lăzărescu ve ark., 2011a, Djavanroodi ve Janbakhsh, 2013).

| Kruglov Yaklaşımı | | Lazarescu Yaklaşımı | |
|---|---|---|---|
| ***Denklem*** | $s = s_0\left[\dfrac{\left(d/2\rho\right)}{\sin^{-1}\left(d/2\rho\right)}\right]^2$ | ***Ana denklem*** | $s = s_0\exp(-\varepsilon_b) = s_0\left(\dfrac{\alpha}{\sin\alpha}\right)^{-2(1+c\alpha)}$ |
| ***Gerekli Değerler*** | d, ρ, $s_0$ | ***Alt denklem-1*** | $\alpha = \arcsin\left[\left(\dfrac{d}{2}+R\right)\Big/\left(\dfrac{1}{2h}\left(\dfrac{d}{2}+R\right)^2+\dfrac{h}{2}\right)\right]$ |
| | | ***Alt denklem-2*** | $\alpha_{max} = \arcsin\dfrac{\left(\dfrac{d}{2}+R\right)}{\left(\dfrac{1}{2h_{max}}\left(\dfrac{d}{2}+R\right)^2+\dfrac{h_{max}}{2}\right)}$ |
| | | ***Alt denklem-3*** | $c = \left(\ln\sqrt{\dfrac{s_0}{s_{min}}}-\ln\dfrac{\alpha_{max}}{\sin\alpha_{max}}\right)\Big/\left(\alpha_{max}\ln\dfrac{\alpha_{max}}{\sin\alpha_{max}}\right)$ |
| | | ***Gerekli Değerler*** | d, $s_0$, R, h, $h_{max}$, $\alpha_{max}$, α, c, $s_{min}$ |

Şekil 3.6'da membran teorisine bağlı olarak elde edilen analitik değelerden gerçek gerilme-gerçek BŞD eğrisinin elde edilmesi gösterilmiştir. Bu analitik denklemlerde basınç ve yükseklik anlık olarak alınan ölçümlerden alınmakta olup gerilmenin hesaplanması Panknin ve Lazarescu denklemlerine bağlıdır. Panknin denkleminin güvenilirliği için eğrisellik yarıçapı (ρ) optik tarama ile ölçülmüştür. Lazarescu denkleminin güvenilirliği için ise kalınlık dağılımı ölçülürken elde edilen kubbe merkezindeki kalınlık ölçülmüştür.




**Şekil 3.6.** Panknin ve Lazarescu denklemlerine bağlı olarak gerçek gerilme ve gerçek BŞD değerlerinin elde edilmesi.

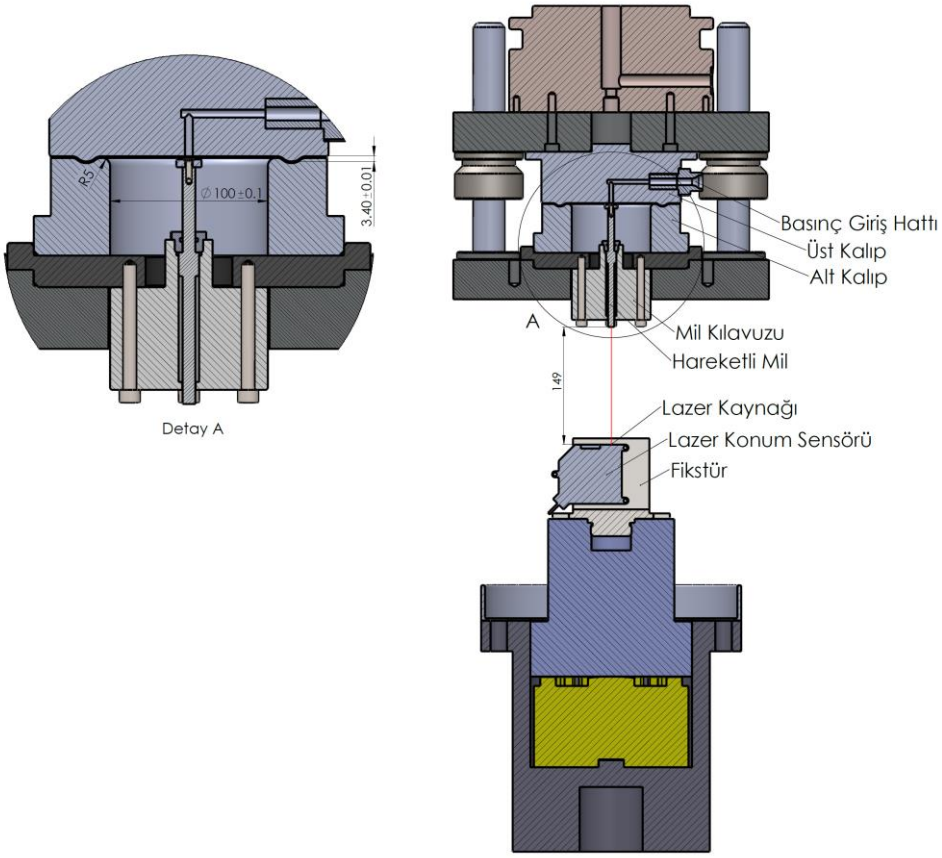
### 3.2.2. Hidrolik Şişirme Testi Kalıp Tasarımı

HŞT'lerin yapıldığı sütunlu pres KTÜN Makine Mühendisliği Bölümü Hidro-Şekillendirme laboratuvarında bulunmaktadır ve 600 kN baskı plakası kuvveti ile 100 MPa sıvı basıncı kapasitesindedir. Şekil 3.7'de verilen HŞ presinde hidrolik sıvı basıncı 2.5 litre hacimli basınç yükseltici ile sağlanmaktadır. Şişirme testlerinin yapılabilmesi için Şekil 3.8'de görülen lazer sensörü, gerekli aparatlar ve doğrusal iletim elemanlarının prese montajı yapılmıştır.

Kalıp tasarımlarında gerekli görüldüğünde revizyon da gerçekleştirilmiştir. Literatürde basınç hattının bağlı olduğu kalıbın dolu olarak tasarlandığı ve yeterli büyüklükte bir kanal ile basıncın karşı levhaya ulaştırıldığı düzenekler mevcuttur (Wang ve ark., 2007). Bu sayede levha ve üst kalıp arasında hava boşluğu kalma ihtimali oldukça azalmaktadır. Bu çalışmada üst kalıbın içi dolu olacak şekilde yeniden tasarlanmasının performans deneylerinde olumlu netice verdiği görülmüştür. Lazer

**Şekil 3.7.** KTÜN Makine Mühendisliği Bölümü laboratuvarında bulunan HŞ presi. Şekilde pres gövdesi, HNC kontrolcü ve basınç aküleri görülmektedir.

mesafe sensörünün bağlanacağı aparat ve levhadaki şişmeyi lazere iletecek mekanizma imal edilerek ve prese monte edilmiştir.




**Şekil 3.8.** Hidrolik Şişirme Test'ine ait kalıp tasarımı ve ölçüm sistemi.

Kalıp tasarımı yapılırken daha önce açıklandığı gibi membran eleman kabulüne uygun çap seçilmiştir. Ayrıca kalıp radyusunun (Şekil 3.5'teki kalıp radyusu R, kalıp çapı d olmak üzere) R<(d/20) koşuluna uyması durumunda membran teorisi kabulüne kalıp radyusunun etkisinin ihmal edilebileceği literatürde belirtilmiştir (Mahabunphachai ve Koç, 2008). Bu nedenle kalıp radyusu R=5 mm olarak alınmıştır. Alt ve üst kalıp, mil kılavuzu, hareketli mil, ara bağlantı ve lazer fikstürünün imalat resimleri EK-1'de verilmiştir.

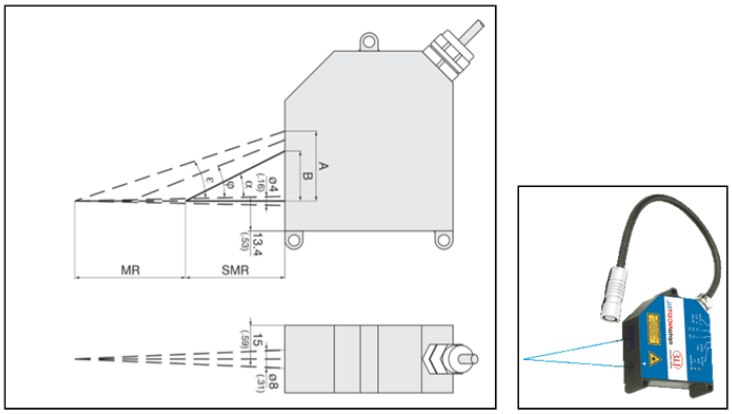
### 3.2.3. Ölçme Sisteminin Tasarımı

Kullanılan ölçme sistemi, numune şişirilirken basınç ve yüksekliği anlık olarak ölçecek şekilde tasarlanmıştır. İç basınç ±0.1 MPa doğrulukla piezoelektrik basınç sensörü tarafından ölçülmektedir (Urmamen, 2021). Şişme yüksekliği anlık olarak ölçülerek kalınlığa bağlı olan BŞD hesaplanmasında kullanılır. Bu nedenle salınımlı HŞT kalıp düzeneğine levhanın merkezindeki şişme yüksekliğinin ölçülebileceği şekilde aparat eklenmiştir. Ölçüm için % ±0.1 doğrusal hassasiyete sahip optoNCDT ILD1700-200 model lazer mesafe sensörü kullanılmıştır (Anonim, 2022). Şekil 3.9'da

gösterilen Lazer Mesafe Sensörünün (LMS) aktif ölçüm aralığı 200 mm olarak verilmiştir.

Şişme yüksekliğinin anlık olarak ölçümü için lazeri doğrudan numune merkezinde konumlandırmak mümkün olmaktadır. Ancak yüksek basınçlarda levhanın patlaması durumunda cihazın zarar görmesi kaçınılmazdır. Bu nedenle levha ile ölçüm cihazı arasına tek yönlü sızdırmazlığa sahip Şekil 3.10'da verilen mil-kılavuz düzeneği tasarlanmıştır.

Şekil 3.10'daki tasarımda, kılavuz alt kalıba bir ara bağlantı (⑥) ile sabitlenir. Kılavuz (⑧) içerisine bir mil eklenir. Milin dışında bir bası yayı (⑦) kullanılmıştır. Milin üst yüzeyinden basma kuvveti uygulanması ve kuvvetin bırakılması durumlarına senkronize olarak cevap verebilmektedir. Değişken basınç altındaki levhanın ileri geri salınım hareketi ancak bu şekilde kovanın alt tarafına iletilebilir. Milin uzunluğu hesaplanırken hem levhanın maksimum şişebileceği yükseklik hem de ölçüm cihazının çalışma aralığı dikkate alınmıştır. Milin alt ucu ile LMS (⑨) arasındaki mesafe ise LMS'nin ölçüm aralığına göre belirlenmiştir. Ancak milin doğrusal hareket aralığı




| MR | SMR | α | φ | ε | A | B |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 2 | 24 | 35.0 ° | 40.0 ° | 44.8 ° | 25.8 | 16.8 |
| 10 | 30 | 34.3 ° | 35.2 ° | 35.6 ° | 28.7 | 20.5 |
| 20 | 40 | 28.8 ° | 27.5 ° | 26.7 ° | 30.1 | 22.0 |
| 50 | 45 | 26.5 ° | 23.0 ° | 18.3 ° | 31.5 | 22.5 |
| 100 | 70 | 19.0 ° | 15.4 ° | 10.9 ° | 32.6 | 24.1 |
| 200 | 70 | 19.0 ° | 9.8 ° | 7.0 ° | 33.1 | 24.1 |
| 250VT | 70 | 19.0 ° | 8.4 ° | 6.0 ° | 33.5 | 24.1 |

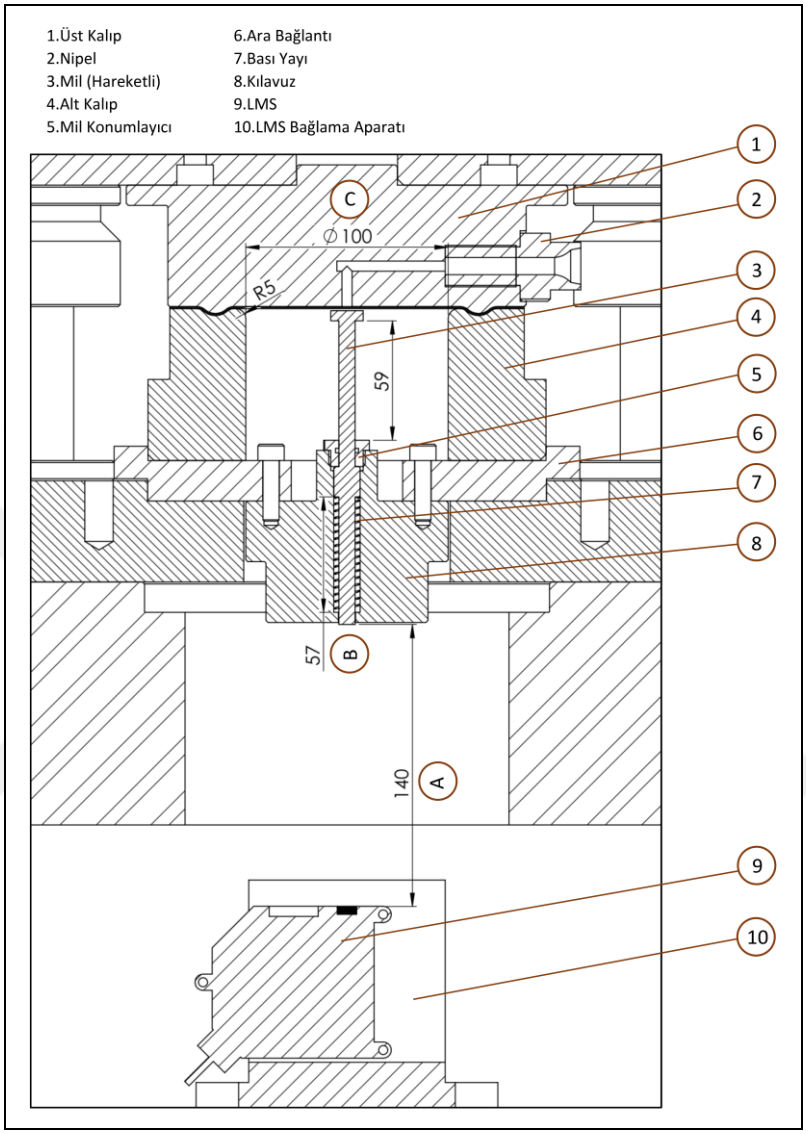
SMR = Ölçüme başlangıç noktası

MR = Aktif Ölçüm Aralığı

**Şekil 3.9.** Lazer Mesafe Sensörü'nün (LMS) çalışma aralığı (MR=200 mm ve SMR=70 mm).

esasen yayın boyutlarına bağlıdır. Bu tasarımda serbest yay boyu 80 mm, montajda yay boyu 57 mm (bkz. Şekil 3.9'da B ölçüsü) ve bloke yay boyu 20 mm'dir.

Burada bloke yay boyu ile yay sarımları birbiri ile temas edecek kadar sıkışmış durumdaki boyu kastedilir. Bu durumda levhanın şişmesiyle milin ulaşabileceği maksimum ilerleme 37 mm olmaktadır. Ayrıca kullanılan sensörün en hassas çalıştığı



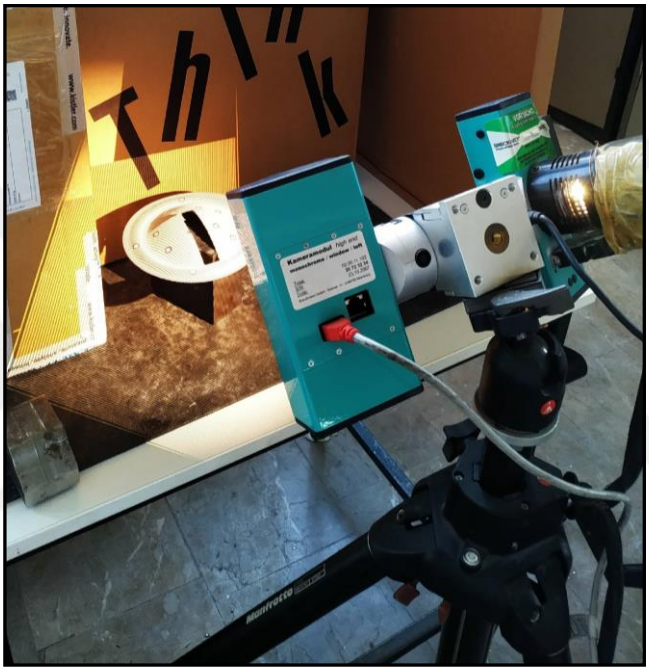

**Şekil 3.10.** Salınımlı HŞT kalıp tasarımı ve LMS yükseklik ölçüm düzeneği.

aralık kullanım kılavuzunda orta-aralık (mid-range) olarak tanımlanmıştır. Buna dayanarak, ölçümün başladığı nokta aynı zamanda ölçüm hassasiyetinin de yüksek olduğu aralıkta olacak şekilde tasarlanmıştır.

Şekil 3.10'da gösterilen kalıpların ve kılavuzların montajı tamamlandıktan sonra lazer mesafe sensörünün HNC kartına bağlantısı yapılmıştır. Win-PED yazılımında konum sensörü olarak tanımlanan lazer mesafe ölçerden deneme amacıyla veriler alınmıştır. Birçok deneme yapılarak ölçmenin doğruluğu kontrol edilmiştir. Bu kontroller sırasında presin ıstampasının hareketini ölçen ve LMS'den on kat daha hassas

olan lineer konum sensöründen faydalanılmıştır. Böylece LMS sisteminin kataloğunda verilen hassasiyetle ölçme yaptığı doğrulanmıştır.

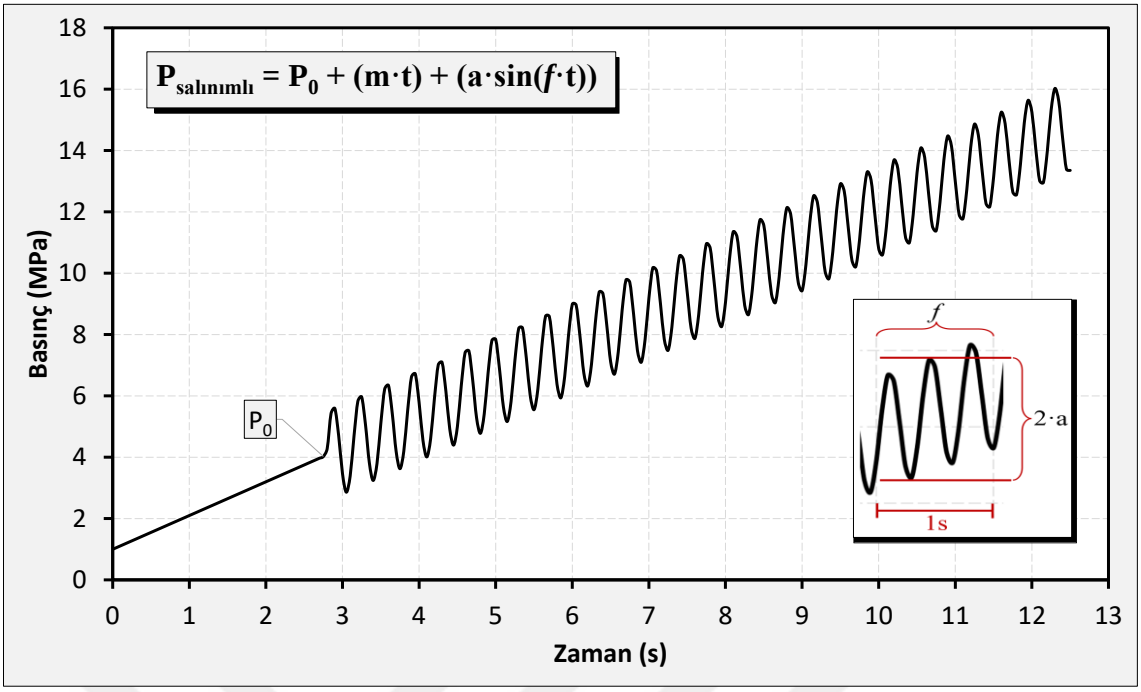
Testlerin tamamlanmasından sonra eğrisellik yarıçaplarının ölçülebilmesi için KTÜN laboratuvarında bulunan optik tarama cihazı kullanılmıştır. Şekil 3.11'de verilen optik tarama cihazı kullanılarak numuneler tersine mühendislikte kullanılan Geomagic Design X yazılımı ile yüzeye dönüştürülmüştür. Elde edilen yarıçaplar, gerilme-BŞD eğrisindeki Panknin kriteri ile bulunan analitik yarıçaplar ile karşılaştırılmıştır. Bu sayede, kullanılan analitik yaklaşımın güvenilirliği test edilmiştir.



**Şekil 3.11.** KTÜN laboratuvarında bulunan optik tarama ile yapılan tersine mühendislik ölçümü.

### 3.2.4. Deney Tasarımı

Deneylerde kullanılan şişirme parametreleri; genlik (a), frekans (*f*) ve başlangıç basıncıdır ($P_0$). Şekil 3.12'de ilgili parametrelerin fonksiyon üzerinde gösterimi verilmiştir. Bu fonksiyon sinüs fonksiyonunun bir çeşidi olup, literatürde artan sinüzoidal fonksiyon olarak geçmektedir. Fonksiyonun ($P_0$ + (m·t)) bölümü; $P_0$ basıncına kadar olan kısmı temsil etmektedir. Devamında (a·sin(*f*·t)) bölümü ise artan sinüzoidal yani salınımlı kısmı temsil etmektedir. Burada; ´*f*´ saniyedeki tepecik sayısı, ´a´ basınçtaki en büyük değişimin yarısı, ´m´ fonksiyonun eğimi ve ´t´ ise zamandır. Basınç profilini gösteren örnek grafikler EK-2'de verilmiştir.




**Şekil 3.12.** Örnek bir salınımlı basınç eğrisi üzerinde salınımlı basınca ait parametrelerin ve sinüzoidal fonksiyonun gösterimi.

HŞT için lazer kesim ile elde edilen numuneler ve testlerin toplam süresi dikkate alındığında üç farklı parametre ve üç farklı seviye için mümkün olan tüm kombinasyonların yapılmasına karar verilmiştir. Bu nedenle tam faktöriyel deney tasarımı tercih edilmiştir. Çizelge 3.3'te salınımlı basınç parametreleri, Çizelge 3.4'te ise tam faktöriyel deney planı verilmiştir. Deneyler üçer tekrarlı yapılmıştır. Ancak literatürde önerildiği üzere, elde edilen sonuçlardan herhangi biri veya bir kaçı istatistik açısından istenilen aralığın dışında (outlier) olabilmektedir (Hekimoglu ve ark., 2009).

**Çizelge 3.3.** Pres kapasitesine göre seçilen salınımlı basınç parametreleri.

| Salınımlı Basınç Parametreleri | | |
|---|---|---|
| **Genlik (MPa)** | **Frekans ($s^{-1}$)** | **Başlangıç Basıncı (MPa)** |
| 0.5 | 1 | 2 |
| 1.5 | 2 | 4 |
| 2.5 | 3 | 7 |

Bu nedenle Chauvenet kriteri kullanılarak istatistiksel olarak anlamlı aralıkta olmayan sonuçlar çıkarılmıştır (Wang ve ark., 2018). Diğer üç değerin ortalaması alınarak her bir parametre için şişme yüksekliği elde edilmiştir. Bazı deneylerde bu

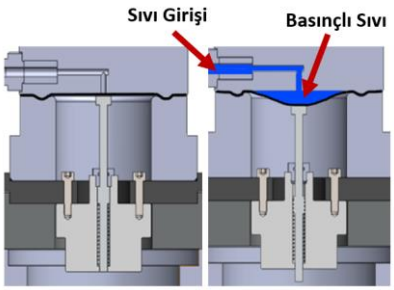
yöntem ile atılan değerler olduğu için, gerekli durumda ilgili deney üçten fazla kez tekrar edilmiştir. Çizelge 3.4'te 28 numaralı deney ise monoton HŞT'yi temsil ettiği için hiçbir parametreye sahip değildir.

**Çizelge 3.4.** Tam faktöriyel deney tasarımı.

| **Deney No.** | Genlik (MPa) | Frekans (Hz) | Başlangıç Basıncı (MPa) | **Deney No.** | Genlik (MPa) | Frekans (Hz) | Başlangıç Basıncı (MPa) | **Deney No.** | Genlik (MPa) | Frekans (Hz) | Başlangıç Basıncı (MPa) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **1** | 0.5 | 1 | 2 | **10** | 0.5 | 2 | 2 | **19** | 0.5 | 3 | 2 |
| **2** | 0.5 | 1 | 4 | **11** | 0.5 | 2 | 4 | **20** | 0.5 | 3 | 4 |
| **3** | 0.5 | 1 | 7 | **12** | 0.5 | 2 | 7 | **21** | 0.5 | 3 | 7 |
| **4** | 1.5 | 1 | 2 | **13** | 1.5 | 2 | 2 | **22** | 1.5 | 3 | 2 |
| **5** | 1.5 | 1 | 4 | **14** | 1.5 | 2 | 4 | **23** | 1.5 | 3 | 4 |
| **6** | 1.5 | 1 | 7 | **15** | 1.5 | 2 | 7 | **24** | 1.5 | 3 | 7 |
| **7** | 2.5 | 1 | 2 | **16** | 2.5 | 2 | 2 | **25** | 2.5 | 3 | 2 |
| **8** | 2.5 | 1 | 4 | **17** | 2.5 | 2 | 4 | **26** | 2.5 | 3 | 4 |
| **9** | 2.5 | 1 | 7 | **18** | 2.5 | 2 | 7 | **27** | 2.5 | 3 | 7 |
| | | | | | | | | **28** | – | – | – |

### 3.2.5. Deneylerin Yapılması

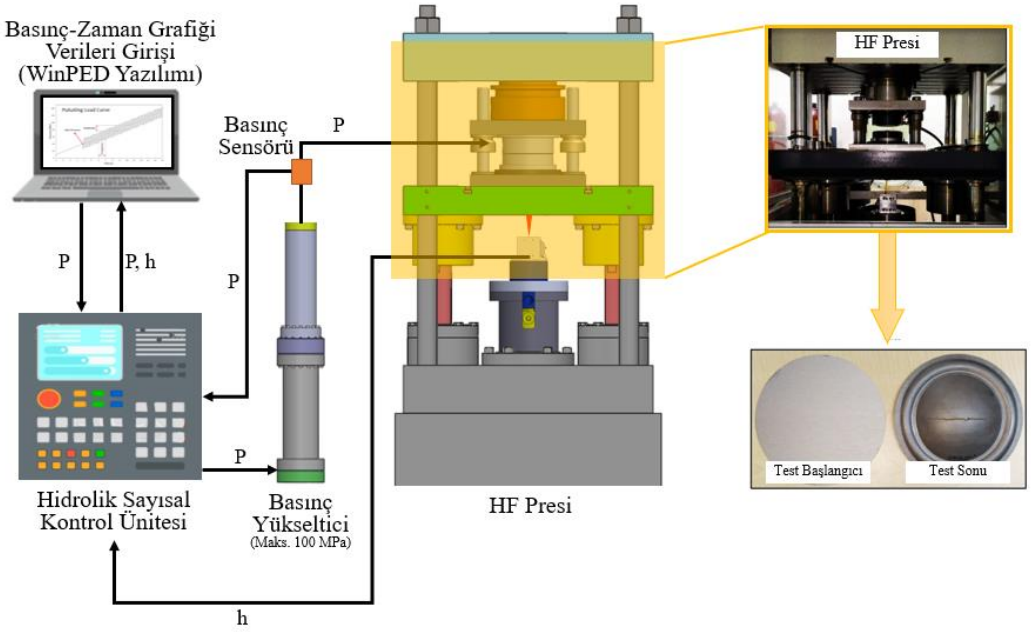
Deneyler, Şekil 3.13'te verilen prensibe göre yapılmıştır. Şişirme sırasında basınç ve şişme yüksekliği aynı anda her 20 ms'de bir kaydedilmiştir. Yüksekliğin doğru ölçülebilmesi için deneyin başlangıcında, levhanın alt yüzeyi ile milin üst ucunun temas etmesi sağlanır. Şişirme sırasında mil, bası yayını sıkıştırarak ilerler. Salınımlı yükleme durumuna geçildiğinde basınç periyodik olarak yükselir ve düşer. Basınç düştüğünde, geri hareketi bası yayında biriken enerji sağlar.




**Şekil 3.13.** HŞT'lerin yapılması prensibi; deney başlangıcında levhanın alt yüzeyi ile milin üst ucunun temas etmesine ve Şişirme sırasında mil yayı sıkıştırarak ilerlemesine dayanır.

Şekil 3.14'te tüm sistemin döngüsel şeması ile deney öncesi ve sonrası numuneler verilmiştir. Buradaki çalışma prensibine göre kişisel bilgisayardan girilen

basınç-zaman eğrisi HNC kontrol ünitesine aktarılır. Buradan basınç yükselticideki oransal valfler sayesinde istenilen hassasiyette frekans ve genlik sağlanmıştır. Geri dönüş olarak da basınç ve lazer mesafe sensörlerinden P (iç basınç) ve h (şişme yüksekliği) verileri sırasıyla Bar ve mm cinsinden alınmıştır. Basınç değerleri daha sonra MPa birimine çevrilmiştir. Baskı plakası kuvveti ise HŞT'de levhanın kaymaması gerektiği için maksimum değer olan 588000 N (60 ton) kapasitede kullanılmıştır. Sürekli maksimum yük uygulandığı için baskı plakası güvenlik amaçlı kaydedilmiştir. Ayrıca deneylerden sonra numunenin dış çapı ölçülerek, içe doğru kayma olmadığından emin olunması amaçlanmıştır. Çünkü kalıplar arasından iç bölgeye doğru kayma olması durumunda, yükseklik beklenenden fazla çıkmakta ve yanıltıcı bilgi vermektedir. Deneyler sırasında süzdürme çubuğu ve maksimum baskı plakası kuvveti ile kaymaya izin verilmemiş ve saf gerdirme hali sağlanmıştır.




**Şekil 3.14.** HŞT sisteminin döngüsel şeması ve numunelerin test öncesi-sonrası gösterimi.

## 3.6. Malzeme Karakterizasyonu

Bu bölümde malzeme karakterizasyonu için yapılan incelemeler sırasında izlenen yöntemler verilmiştir. Temin edilmiş, salınımlı ve monoton şartlarda HŞT ile şekillendirilmiş numunelere uygulanan çeşitli karakterizasyon yöntemleri aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- Temin Edilen Malzeme İçin

- Numune kesme, bakalite alma ve metalografik olarak numune hazırlanması
- XRD analizleri
- SEM ile mikroyapısal inceleme
- FIB/TEM mikroskopları ile inceleme
- Dislokasyon yoğunluğu hesaplamaları

- Salınımlı ve Monoton Şekillendirilmiş Malzeme İçin
  - Şekillendirilmiş numuneden kesme ve bakalite alma ve metalografik olarak numune hazırlanması
  - XRD analizleri
  - SEM ile kırılma yüzeyi inceleme
  - Dislokasyon yoğunluğu hesaplamaları

### 3.6.1. Numunelerin Hazırlanması ve Bakalite Alınması

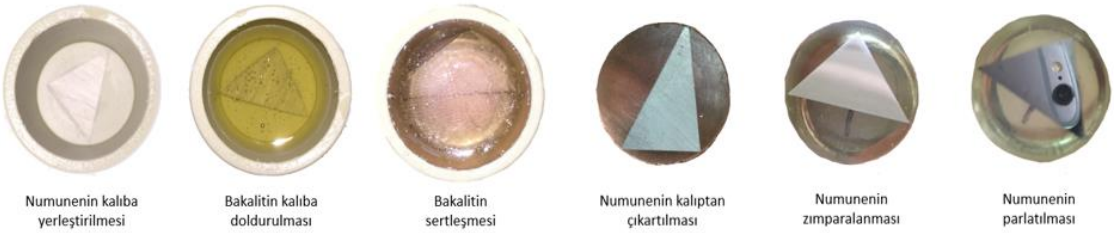
Bu kısımdaki numune hazırlama yöntemleri, temin haldeki ve şekillendirilmiş malzemeler olmak üzere iki alt başlıkta verilmiştir. Bu doğrultuda temin haldeki malzemeler düz levhadan kesilip hazırlama işlemine tabi tutulurken, şekillenmiş levhaların geometrisi kubbe kesiti şeklinde olduğu için bu levhaların klasik kesme işlemleri ile hazırlanması mümkün olmamaktadır. Şekillenmiş malzeme için özel olarak tasarlanan numune kesme ve karakterizasyona hazırlama işlemleri alt başlıkta açıklanmıştır.

**Temin Halindeki Malzeme**

Temin edilen Ti-6Al-4V levha malzemeleri öncelikli olarak oda sıcaklığı X-ışını kırınım yöntemi (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM), odaklanmış iyon demeti mikroskobu (FIB) ve geçirimli elektron mikroskobu (TEM) teknikleri kullanılarak mikroyapısal olarak karakterize edilmiştir. Test ve karakterizasyon çalışmaları için standartlara uygun boyutta numuneler ise su jeti ile kesilmiştir.

Mikroyapısal karakterizasyon için ilk olarak XRD, SEM ve mikrosertlik çalışmaları için uygun yöntemler kullanılarak numuneler hazırlanmıştır. XRD ve mikrosertlik analizleri için numuneler malzeme yüzeyinden hazırlanırken SEM çalışmaları için numuneler hem malzemenin yüzeyinden hem de karşı kesitinden (cross-section) hazırlanmıştır. Şekil 3.15’te test ve karakterizasyon için numune hazırlama adımları gösterilmektedir. Numune hazırlama prosesi numunenin kesilmesi, bakalite alınması, zımparalanması, parlatılması ve dağlanması adımlarından

oluşmaktadır. Numune kesildikten sonra kalıp içerisine yerleştirilmiştir ve soğuk bakalite alma işlemi uygulanmıştır. Bakalit karışımı epoksi reçine, hızlandırıcı ve sertleştiriciden oluşmaktadır. Karışım kalıp içerisine dökülerek yaklaşık 15 dakika sertleşmesi beklenmiştir ve sertleşen numune kalıptan çıkartılmıştır. Daha sonra zımparalama işlemine başlanmıştır. Numune zımparalama işlemi sırasıyla 800, 1200 ve 2500'lük zımpara kağıtları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada dikkat edilen detay her bir zımpara aşaması bir önceki zımpara aşamasına dik ve önceki zımpara izlerini yok edecek şekilde yapılmıştır. Zımparalama işlemi tamamlandıktan sonra parlatma aşamasına geçilmiştir. Başlangıçta 6 µm elmas solüsyon ile 60-90 dakika arası kaba parlatma yapılmıştır daha sonra 3µm elmas solüsyon ile 60-120 dakika arası ince parlatma yapılmıştır. Parlatma sonucunda numune yüzeyleri ayna görüntüsü verecek parlaklık seviyesine getirilmiştir. En son aşama olan dağlama aşaması sadece SEM numunelerine uygulanmıştır. Kullanılan dağlama sıvısı Kroll's bileşimi olup 92 ml saf su, 6 ml nitrik asit ve 2 ml hidroflorik asitten oluşmaktadır. Farklı dağlama süreleri denenmiş ve 15 saniyelik dağlama süresi ile en iyi sonuçlar alındığı için asıl numunelerde 15 saniye boyunca dağlama sıvısında bekletilmiştir. Dağlama süresi biter bitmez numuneler alkol ile temizlenmiştir.




**Şekil 3.15.** Temin edilmiş malzemeden metalografik numune hazırlanması.

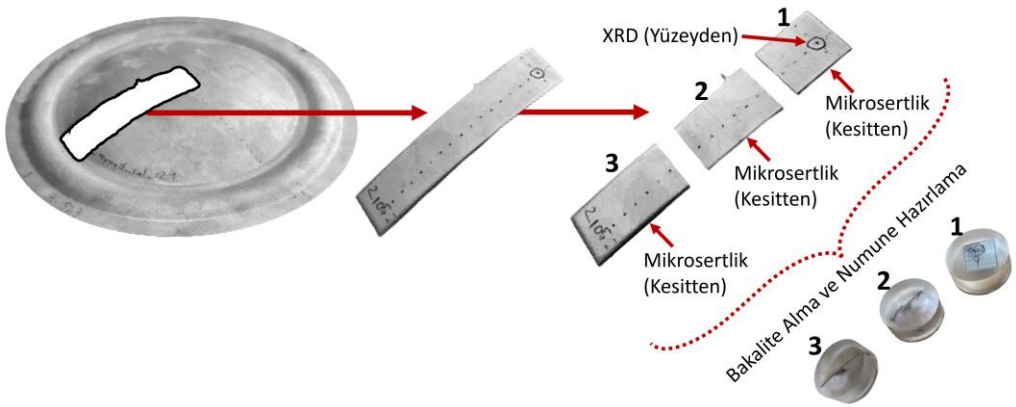
Çizelge 3.5'te numune hazırlanmasında uygulanan zımparalama ve parlatma işlemlerinin detayları verilmiştir. Parlatma ile numuneler istenilen kalitede elde edilene kadar elmas ve alümina solüsyonlar farklı sürelerde uygulanmıştır.

**Çizelge 3.5.** Numune hazırlanmasında uygulanan zımparalama ve parlatma işlemlerinin detayları.

| Numune | Zımparalama | Parlatma |
|---|---|---|
| XRD | Önce 800, sonra 1200 | 1µm Alümina solüsyon (180 dk) + 1µ elmas solüsyon (30 dk) |
| Sertlik | Önce 800, sonra 1200 | 1µm elmas solüsyon (150 dk) |

**Salınımlı ve Monoton Şartlarda Şekillendirilmiş Malzeme**

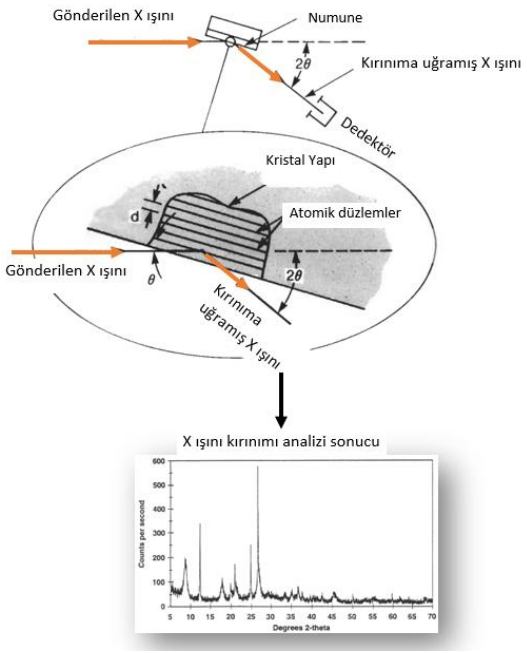
Şekillendirilmiş malzemeler için bakalite alma, zımparalama, parlatma ve dağlama işlemleri temin edilen levha için uygulanan prosedür ile aynıdır. Ancak şekillenmiş numunelerde karakteristik bir BŞD dağılımı oluştuğu için numune kesimi özel olarak su jetinde yapılmıştır. Kesim sırasında malzeme ısıya ve plastik deformasyona maruz kalmadığı için en uygun yöntem olarak su jeti seçilmiştir. Şekil 3.16'da şekillenmiş numunelerden numune kesilmesi için izlenen yöntem gösterilmiştir. Burada mikrosertlik ölçümleri diğer ölçümlerden farklı olarak kesitten alınmıştır. Şişme testinden çıkan numunenin geometrisinden dolayı yüzeyden sertlik ölçmek mümkün olmamaktadır. Bu nedenle Şekil 3.16'da verilen 2 ve 3 no'lu numuneler karşı kesitinden bakalite alınırken 1 no'lu numuneler yüzeyinden bakalite alınmıştır. Daha sonra zımparalama-parlatma işlemleri uygulanmıştır ve 1 no'lu numuneler XRD analizine alınmıştır. XRD analizleri sonrasında hem monoton hem de salınımlı şekillendirme sonrasında malzeme mikroyapısındaki kafes gerilmeleri hesaplanmış ve malzeme temin haliyle karşılaştırılmıştır. XRD sonuçları alındıktan sonra 1 no'lu numunenin bakaliti kırılmış ve karşı kesitinden tekrar bakalite alınmıştır. Karşı kesitinden bakalite alınan 1, 2 ve 3 no'lu numunelerin mikrosertlik ölçümleri yapılmıştır. Bu analizler ile de şekillendirilen bölge boyunca, monoton ve salınımlı şekillendirmede farklı olacak dislokasyon yoğunluğuna bağlı olarak sertlik değerlerinde de farklılıkların olması beklenmektedir. Son olarak sertlik ölçümleri yapıldıktan sonra 1 no'lu numune dağlanarak SEM incelemesi yapılmıştır. Bu analizler şekillendirme açısından en iyi sonuç veren iki şekillendirme parametresi için uygulanmış olup toplamda bu adımda 6 farklı numunenin mikroyapısal analizi gerçekleştirilmiştir.




**Şekil 3.16.** Test sonucu şekillenmiş levhadan metalografik numune hazırlanması.

### 3.6.2. XRD Analizleri

XRD analizi genel olarak malzemedeki fazların tespiti ve oranı, tane büyüklüğü ve mikroyapı kusurları gibi bir takım yapısal özelliklerin belirlenmesinde kullanılan tahribatsız bir karakterizasyon tekniğidir (Brundle ve Evans, 1992). Özellikle kristal yapıya sahip malzemelerde kullanıma uygundur, çünkü atomlar belirli kristal yapı düzenlerinde katıyı oluştururlar. Çalışma prensibi, kristal yapılı malzeme üzerine gönderilen X ışınlarının yansımasının bir detektör ile tespit edilmesine dayanır. Malzeme içerisinde farklı çeşitlerde atomlar ve/veya kristal yapılar varsa, X ışınları farklı atomik düzlemlerden farklı şiddette ve farklı açılarda yansımaktadır. Malzemedeki kristallerin X ışınlarını farklı karakteristiklerde kırınıma uğratması olarak da adlandırılabilir. Bu nedenle tekniğe, X ışını kırınımı adı verilmiştir. Esas olarak her bir kristalin kırınımı kendine özgüdür ve sadece o kristali tanımlar. Doğrudan görüntü alınan bir teknik değildir. Dolayısıyla kırınıma uğrayan ışınların özelliklerinin oluşturduğu grafik deseninin (pattern) analiz edilmesi gerekir. Kırınıma uğrayan ışınların özellikleri (açı ve şiddet) bir grafiğe aktarıldığında, malzemedeki faz dağılımı hesaplanabilmektedir.




**Şekil 3.17.** X ışını kırınımı tekniğinin çalışma prensibi (Brundle ve Evans, 1992).

Şekil 3.17'de XRD analizi şematik olarak açıklanmıştır. Bu çalışmada BİTAM'da bulunan cihazdan XRD verileri alınmıştır. Standart LaB6 numunesi kullanılarak, 40 kV voltaj ve 20 mA akım değerinde çalışan Cu-Kα radyasyon kaynağı ($\lambda$ = 0.1542 nm) numuneye uygulanmıştır.

### 3.6.3. SEM Mikroskop İncelemesi

SEM mikroskobu, malzemenin istenilen yüzeyinden yüksek çözünürlükte görüntü alınabilmesini sağlayan bir karakterizasyon tekniğidir (Brundle ve Evans, 1992). Mikroskobik inceleme yaparken ışık mikroskobunun yetersiz kaldığı durumlarda SEM kullanılmaktadır. Çok yüksek büyütmelere (100.000 kez) ulaşılabildiği için ışık mikroskobuna göre çok daha yakın ve net görüntüler elde edilebilir. Işık mikroskobuna göre 10 kat kadar maliyetlidir. Ancak en sık kullanılan karakterizasyon tekniklerinden biridir.

Bu çalışmada SEM ile elde edilen görüntülerde, α ve β fazlarının görüntülenmesi hedeflenmiştir. SEM ile görüntülenecek numunelere dağlama uygulanmıştır. Dağlama sayesinde titanyum alaşımındaki α ve β fazlarının görünür olması amaçlanmıştır. Dağlama sıvısı olarak literatürde Kroll's bileşimi olarak bilinen 92 ml saf su, 6 ml nitrik asit ve 2 ml hidroflorik asit karışımı uygulanmıştır (Hoar ve ark., 2021). Dağlama yapılırken fazların ortaya çıkabilmesi için dağlama süresi kritik öneme sahiptir. Bu nedenle çeşitli dağlama süreleri ile denemeler yapılmış ve 15 saniyelik dağlama süresinde karar kılınmıştır.

Ayrıca, SEM mikroskobu kullanılarak şekillendirilmiş numunelerden yırtılma yüzeylerine dik doğrultuda görüntüler alınmıştır. Buradaki amaç, salınımlı ve monoton şartlarda şişirilmiş numunelerin kırılma yüzeylerinin karşılaştırılması ve her iki numune için sünek veya gevrek kırılma karakteristikleri hakkında yorum yapılabilmesidir.

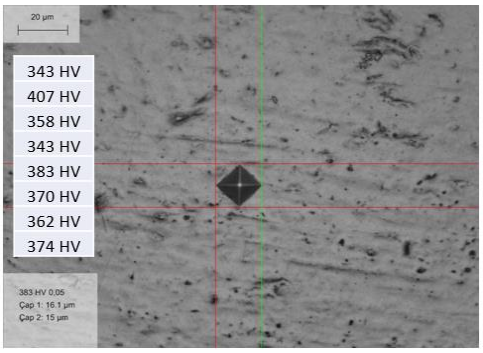
### 3.6.4. Mikrosertlik Ölçümü

Akma sınırı daha yüksek olan malzemenin dayanımına orantılı olarak sertliğinin de yüksek olması beklenir. Salınımlı HŞT ile daha yüksek şişme yüksekliğine ulaşılması, başka bir ifadeyle yırtılmanın gecikmiş olması beklenmektedir. Dolayısıyla malzemedeki dayanımın ne yönde değiştiğini anlayabilmek için sertlik dağılımı alınmıştır.

**Şekil 3.18.** Mikrosertlik ölçüm cihazı.

Bu amaçla NEÜ'de bulunan ve Şekil 3.18'de görülen mikrosertlik cihazı kullanılmıştır. Daha önce verilen Şekil 3.16'da gösterildiği gibi şişirilmiş numunelerin kesit yüzeyinden mikrosertlik ölçümleri alınmıştır. Ölçümlerde 10 g yük uygulanmış olup ölçüm birimi Mikro-Vickers'tir. Şekil 3.19'da örnek bir ölçüm gösterilmiştir.

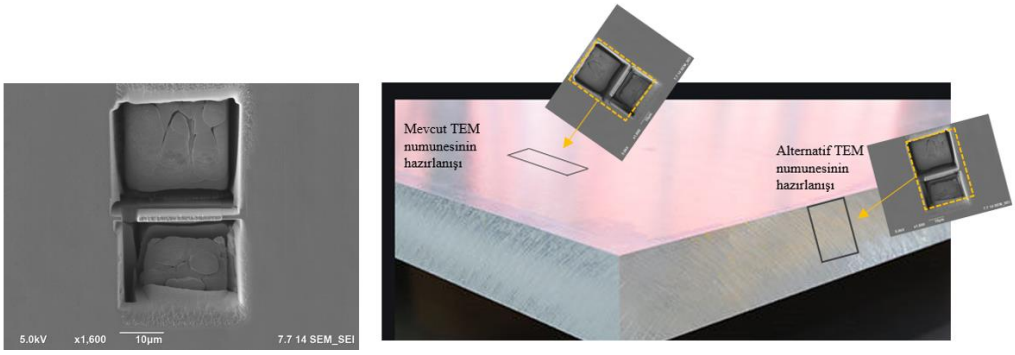
**Temin Numune – 368 HV (±21)**




**Şekil 3.19.** Temin edilmiş malzemeye ait numunenin mikrosertlik ölçümü.

### 3.6.5. FIB ve Mikroskopisi İncelemeleri

Kapsamlı mikroyapısal analiz yapıp tane boyutu, kristal yapı ve dislokasyon davranışını tespit etmek için Sabancı Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi (SUNUM) bünyesinde malzemenin temin halinden FIB görüntüleri alınmıştır. FIB mikroskobu levha malzemesinin tane boyutunu ve boyut dağılımını tespit etmek için kullanılmıştır (Kotan ve Darling, 2018). Numunenin hazırlanışı Şekil 3.20'de gösterilmiştir.




**Şekil 3.20.** FIB karşı kesit yöntemiyle numune hazırlanışı.

### 3.6.6. XRD Sonuçlarından Dislokasyon Yoğunluğu Hesaplanması

Malzemenin tane boyutu, dislokasyon yoğunluğu ve kafes gerilmesi; XRD analizi verileri kullanılarak analitik olarak hesaplanabilmektedir (Langford ve Wilson, 1978). Bu yönteme, ölçüme dayalı hesaplama (estimation) adı verilir. Literatürde analitik olarak hesaplanan değerlerin deneysel verilerle karşılaştırılmasıyla yaklaşımın güvenilirliğini gösteren çalışmalar mevcuttur (Ungár, 2001, Yang ve ark., 2020). Aşağıda verilen denklem (3.7) tane boyutunu, denklem (3.8) dislokasyon yoğunluğunu ve denklem (3.9) kafes gerilmesini vermektedir. Burada; $D^*$ tane boyutu, δ dislokasyon yoğunluğu, ε kafes gerilmesi, θ şiddetin maksimum olduğu açı, β pikin yarı yüksekliğindeki pik genişliği, K Scherrer sabiti, λ X ışını dalga boyu olarak tanımlanmıştır.

$$D^* = \frac{K\lambda}{\beta \cos\theta}[nm] \tag{3.7}$$

$$\delta = \frac{1}{\left(D^*\right)^2}\left[nm^{-2}\right] \tag{3.8}$$

$$\varepsilon = \frac{\beta}{4\tan\theta} \tag{3.9}$$

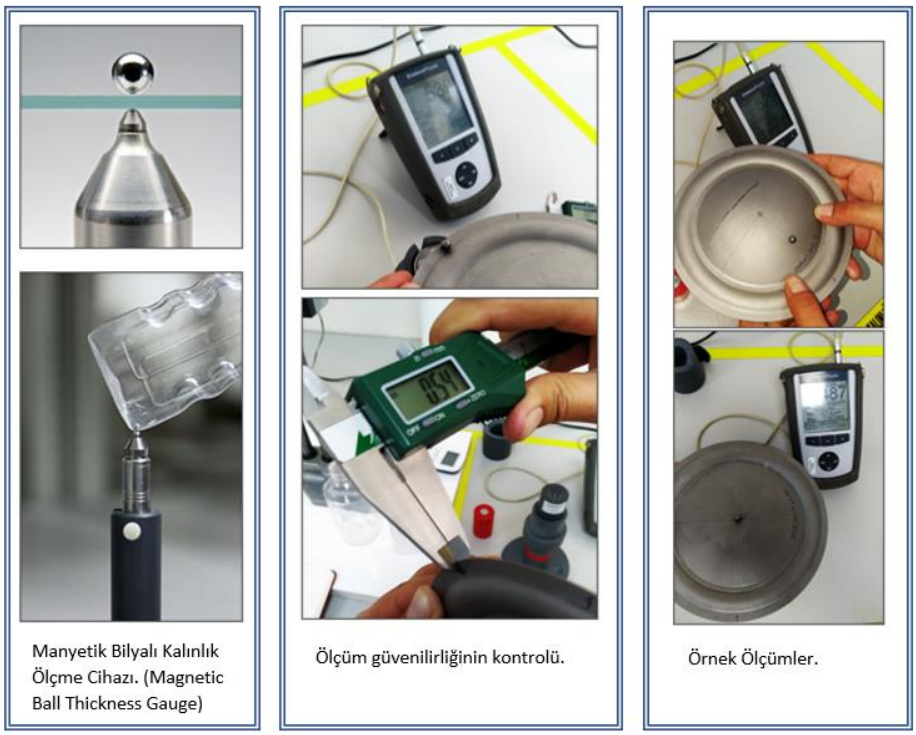
## 3.7. Monoton ve Salınımlı Hidrolik Şişirme Testlerinin Karşılaştırılması

Bu bölümde deneysel sonuçların birbiriyle karşılaştırma yöntemleri verilmiştir. HŞ proseslerinde en önemli kriterlerden birisi BŞD ile doğrudan bağlantılı olan kalınlık dağılımıdır. Şekillendirilebilirlik açısından HŞT'den elde edilebilecek sonuçlar; şişme yüksekliği ve kalınlık dağılımıdır. Deneysel sonuçlar mekanik özellikler açısından da karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma gerilme-BŞD eğrileri üzerinden ve mikrosertlik

değerleri açısından yapılmıştır. Ayrıca malzeme karakterizasyonu sonucu salınımlı ve monoton şekillendirilmiş numunelerin nasıl karşılaştırıldığı bu bölümde verilmiştir.

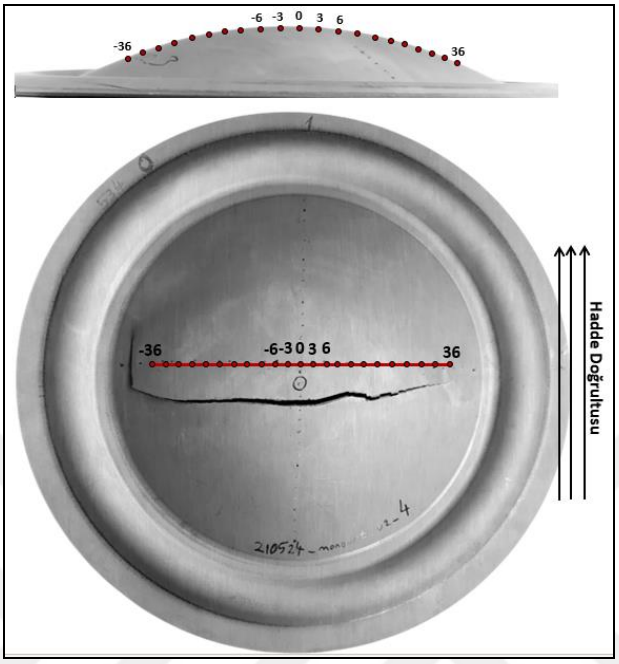
### 3.7.1. Şekillendirilebilirlik Açısından Karşılaştırılması

Şişirme deneyinden elde edilen numunelerin kalınlık dağılımlarının elde edilmesi, şekillendirilebilirlik hakkında önemli bilgiler içermektedir. KTÜN Hidroşekillendirme Laboratuvarında bulunan ultrasonik kalınlık ölçerin ölçüm alt sınırı 0.5 mm olduğundan bu malzemede kullanılamamıştır. Bu nedenle manyetik bilyalı kalınlık ölçer kullanılmıştır. Manyetik bilyalı kalınlık ölçerin çalışma prensibi ve örnek ölçümler Şekil 3.21'de verilmiştir.




**Şekil 3.21.** Manyetik bilyalı kalınlık ölçme cihazının çalışma prensibi ve yapılan ölçümlerden örnekler.

Kalınlık dağılımı eğrisel mesafe boyunca ve her seferinde yüzeye dik bir şekilde alınmıştır. Bu ölçüm yönteminde prob ile bilya arasındaki mesafe ölçüldüğü için, her ölçüm noktasında en küçük değer görülene kadar malzeme hareket ettirilmiştir. Bu




**Şekil 3.22.** Manyetik bilyalı kalınlık ölçme cihazı ile kalınlık dağılımının alınması planlanan konumların gösterilmesi. Bu örnekte ölçüm hadde doğrultusuna dik alınmaktadır.

sayede ölçüm hatası en aza indirilmiştir. Şekil 3.22'de şişirme sonucu malzemenin hangi eğrisel mesafesi boyunca ve hangi konumlardan ölçüm alınacağı detaylı olarak gösterilmiştir. Şekilde kırmızı çizgi ile hadde yönüne dik doğrultuda ölçüm alındığı görülmektedir. Ölçüm hattının tam 90$^{o}$ döndürülmesiyle bu kez hadde yönünde ölçüm alınmıştır.

### 3.7.2. Mekanik Özellikler Açısından Karşılaştırılması

Salınımlı yükleme altında öne sürülen en önemli hipotezlerden birisi malzemenin sünekliğinin artmasıdır. Sünekliğini karşılaştırabilmek için her iki durum için de gerçek gerilme-gerçek BŞD eğrileri oluşturulmuştur. Ayrıca temin edilen malzemeye üç farklı doğrultuda üç tekrarlı çekme testi uygulanmış olup, anizotropik özelliği ile ilgili yorum yapılmıştır.

### 3.7.3. Mikroyapısal Özellikleri Açısından Karşılaştırılması

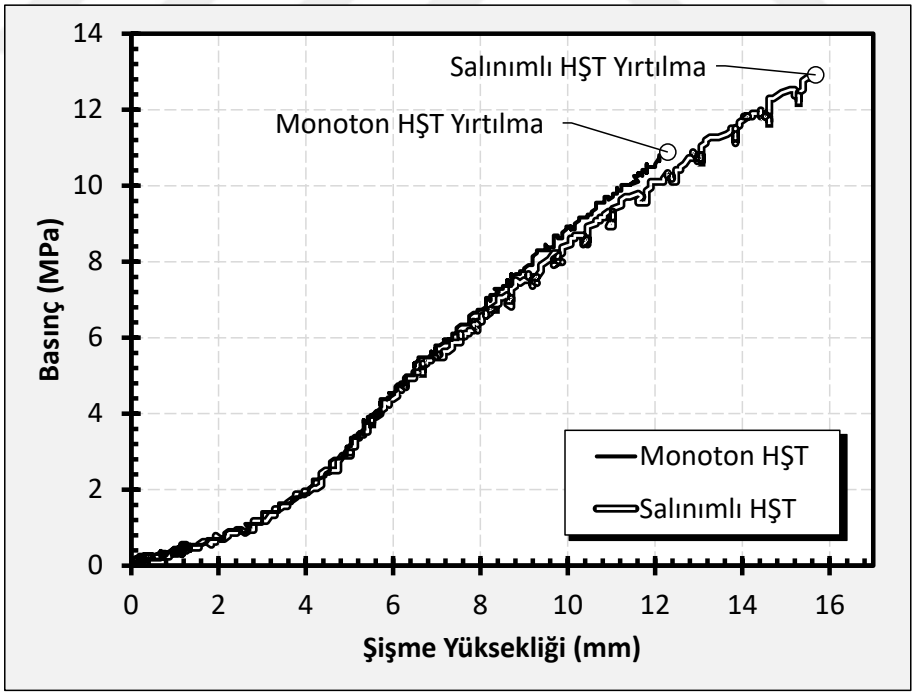
Malzeme karakterizasyonu sonucu malzemenin kırılma yüzeyleri SEM ile incelenip sünek kırılma veya gevrek kırılmadan hangisine yakın olduğu yorumu

yapılmıştır. Ayrıca her bir malzemeden elde edilen XRD verileri analiz edilip analitik denklemler üzerinden tane boyutu, dislokasyon yoğunluğu ve kafes gerilmeleri elde edilmiştir. Özellikle dislokasyon yoğunlukları süneklikteki değişimin yorumlanması için karşılaştırmaya tabi tutulmuştur.

# 4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

## 4.1. Şekillendirilebilirlik Açısından Karşılaştırma

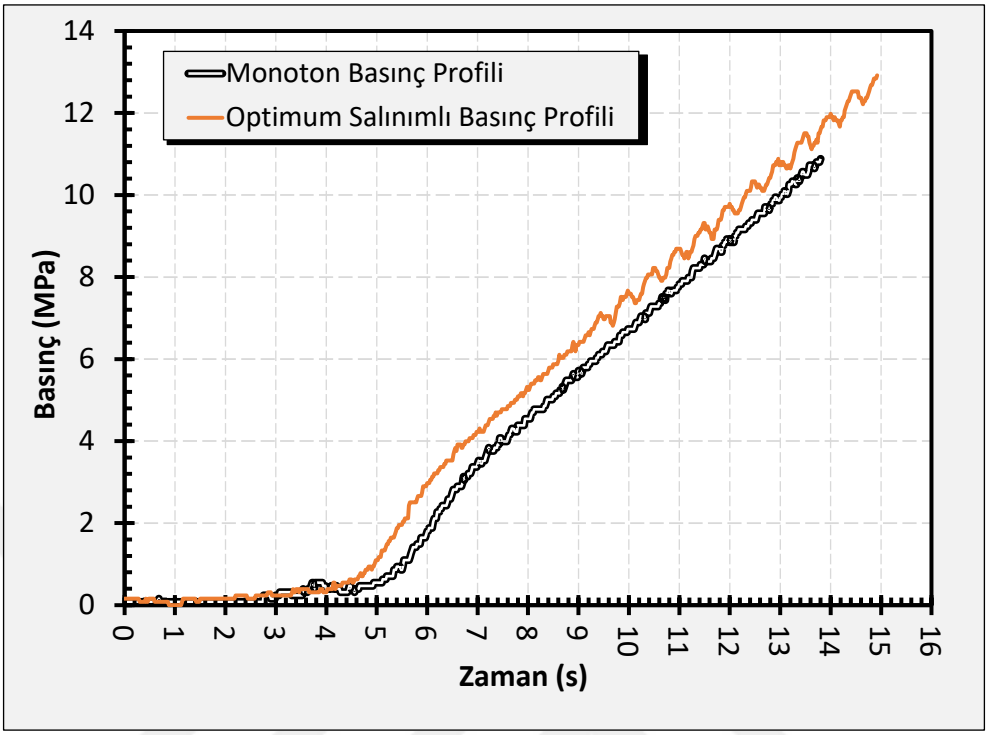
Şekillendirilebilirlik açısından sonuçlar iki kısımda değerlendirilmiştir. İlk olarak salınımlı basıncın şekillendirilebilirliğe etkisi, şişme yüksekliği ve yırtılma basıncı açısından karşılaştırılmıştır. Bu aşamada salınım parametreleri olan genlik, frekans ve başlangıç basıncının sistemin çıkışlarına etkisi istatistiksel olarak incelenmiştir. İkinci olarak test sonrası numunelerin kalınlık dağılımları hadde doğrultusunda ve haddeye dik doğrultuda ölçülüp karşılaştırılmıştır. Bu sonuçlara geçmeden önce Şekil 4.1'de maksimum yüksekliği veren salınımlı basınç profili ve monoton basınç profili verilmiştir. Şekildeki basınç profili zamana bağlı verilmek yerine şişme yüksekliğine bağlı olarak verilmiştir. Bu sayede şekillendirilebilirlikte önemli olan iki veri aynı grafikte verilmiştir. Grafikte açıkça görüldüğü gibi, salınım etkisi ile yırtılmanın hem daha yüksek basınçlarda gerçekleştiği, hem de iki eksenli gerilme durumunda salınım altında boyun vermenin geciktiği sonucu çıkarılmıştır. Şekilde salınımlı HŞT olarak verilen basınç profili, en yüksek şişme yüksekliğinin elde edildiği deneye aittir.




**Şekil 4.1.** Maksimum şişme yüksekliğini veren şişme yüksekliği-basınç profilleri

Şekil 4.1'deki sonucu veren basınç profili Şekil 4.2'de basınç-zaman eğrisi olarak verilmiş olup, 0.5 MPa genlik, 2 Hz frekans ve 7 MPa başlangıç basıncına sahiptir. Toplamda 27 farklı parametre kombinasyonuna sahip deneylerden en yüksek

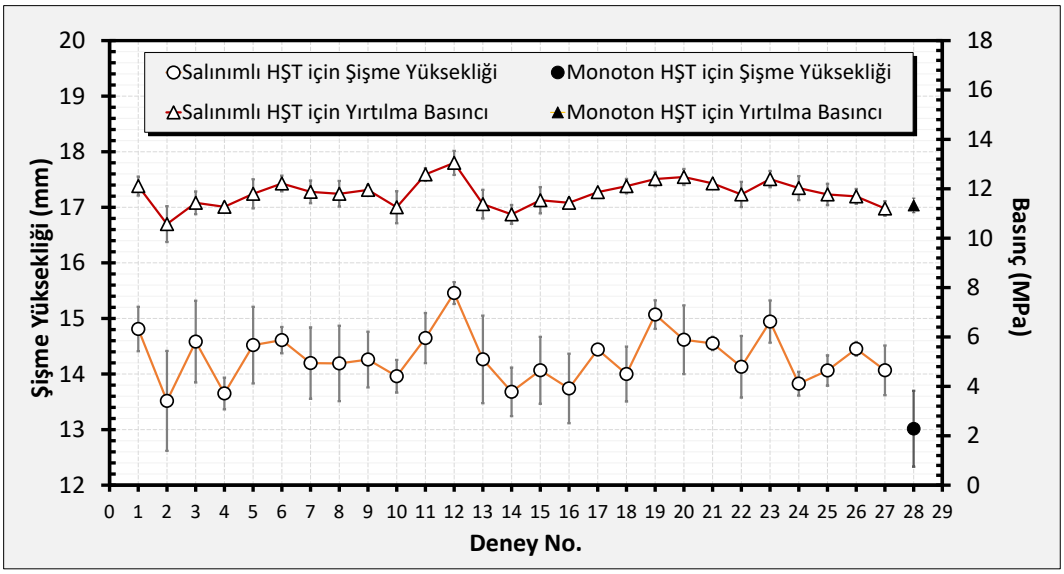
şişme yüksekliğini veren deney bu profile sahiptir. Karşılaştırma için monoton basınç profili de aynı grafikte verilmiştir.




**Şekil 4.2.** Maksimum şişme yüksekliğini veren basınç-zaman grafiği.

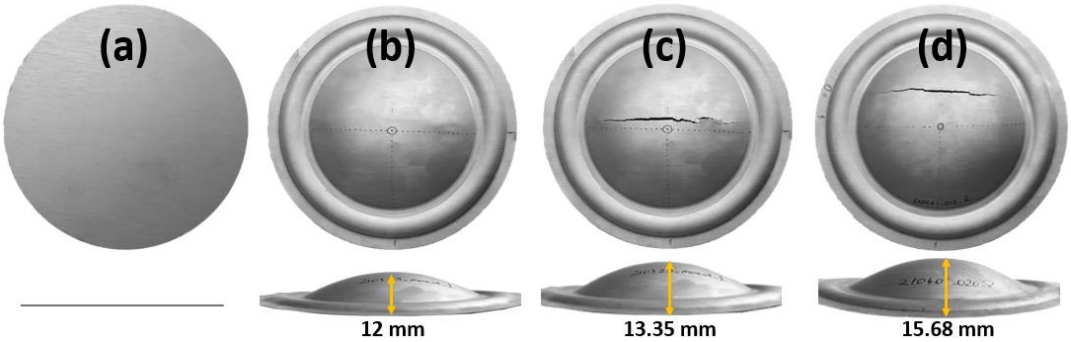
### 4.1.1. Şişme Yüksekliği ve Yırtılma Basıncı

Salınımlı yüklemenin şekillendirilebilirliğe olan etkisini tartışabilmek için salınımlı basıncın şişme yüksekliği ve yırtılmaya etkisi incelenmiştir. İç basınç ve şişme yüksekliği HŞT sırasında anlık olarak ve 20 ms aralıklarla ölçülmüştür. Şekil 4.3'te elde edilen şişme yüksekliği ve yırtılma basıncı değerleri hata çubukları ile verilmiştir. Buradaki her bir deney Çizelge 3.4'teki deney numarasına karşılık gelen parametreler ile gerçekleştirilmiştir. Ortalama şişme yükseklikleri monoton HŞT için 13.39 mm, en iyi sünekliği sağlayan 12 numaralı salınımlı HŞT için de 15.45 mm olarak bulunmuştur. Yırtılma basınçları ise aynı numuneler için sırasıyla 11.15 MPa ve 13.05 MPa olarak bulunmuştur.




**Şekil 4.3.** Tam faktöriyel deney planına göre salınımlı ve monoton şartlarda gerçekleştirilen deneylerin şişme yüksekliği ve yırtılma basıncı sonuçları.

Şekil 4.4'te farklı aşamalardaki numuneler verilmiştir. Şekil 4.3 ve Şekil 4.4 birlikte incelendiğinde tüm salınımlı HŞT'lerin monoton HŞT'ye göre daha yüksek şişme yüksekliğine ulaştığı söylenebilir. Yırtılma basıncının şişme yüksekliğiyle orantılı olarak değişmesi beklenen bir sonuçtur.



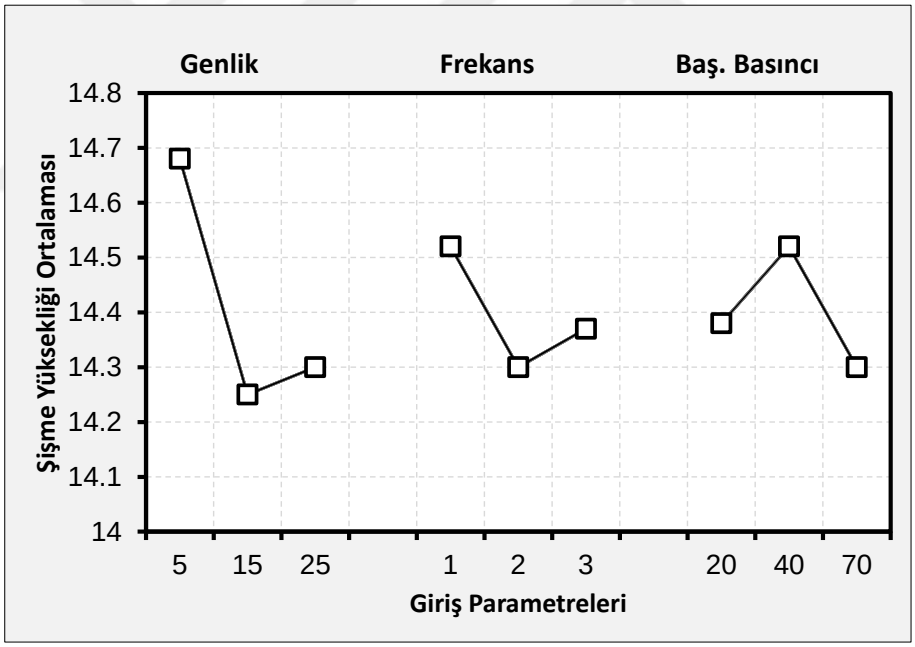

**Şekil 4.4.** Şekilde (a) HŞT numunesi, (b) Yırtılmadan önceki HŞT numunesi, (c) Monoton şartlarda yırtılmış HŞT numunesi, (d) Maksimum şişme yüksekliğini veren salınımlı şartlarda yırtılmış HŞT numunesi verilmiştir.

Maksimum şişme yüksekliğine parametreleri 0.5 MPa genlik, 2 Hz frekans ve 7 MPa başlangıç basıncı olan 12 numaralı deneyde ulaşılmıştır. 10-14 nolu deneyler incelendiğinde, iyileşme belirli bir tepe noktasına çıkıp sonra düşmektedir. Bu aralıkta yapılan deneylerin tamamı 2 Hz frekansta yapılmıştır. Genlikler ise parametrenin düşük ve orta seviyesindedir. Buradan hareketle sünekliği artırıcı optimum parametrelerin, 2 Hz frekans ve düşük genliklerde elde edilme ihtimalinin daha fazla olduğu sonucu çıkarılmıştır.

Ancak yukarıdaki gözlemler bilimsel bir temele dayanmadığı ve yanıltıcı olabileceği için parametrelerin süneklik artışına etkisi istatistiksel olarak da incelenmiştir. Çünkü 19 ve 23 nolu deneylerde de iyileşme eğilimi vardır. Bu amaçla, deneydeki giriş parametreleri ve şişme yüksekliği, üç adet giriş ve bir adet çıkış olarak tasarlanıp varyans analizine tabi tutulmuştur. Varyans analizinin sonuçları Şekil 4.5 ve Çizelge 4.1'de verilmiş olup parametrelerin şişme yüksekliğine katkıları elde edilmiştir.

**Çizelge 4.1.** ANOVA analizi sonuçları.

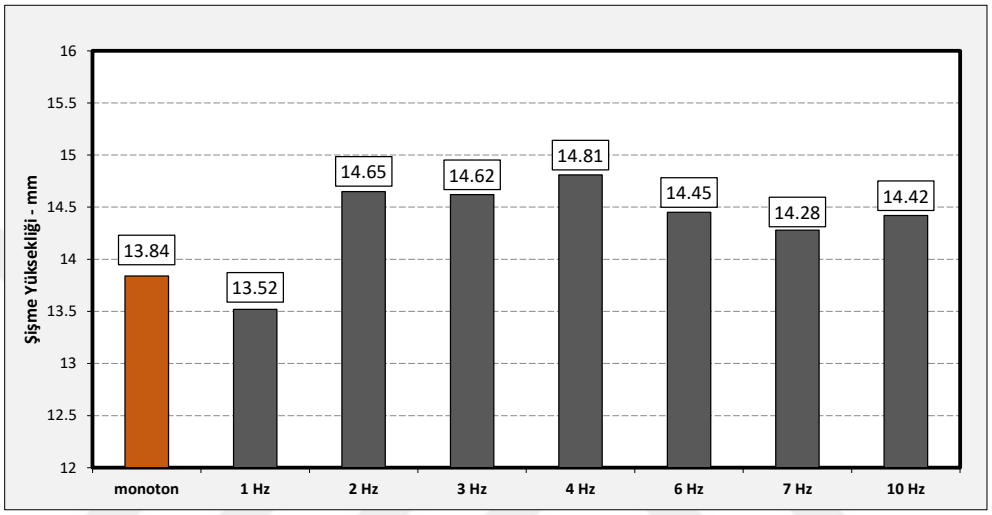
| Kaynak | Serbestlik Derecesi | Etki Düzeyi | Düzeltilmiş Kareler Toplamı | Düzeltilmiş Kareler Ortalaması | F-Değeri | P-Değeri |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Genlik | 2 | 63.14% | 0.32540 | 0.162700 | 21.31 | 0.045 |
| Frekans | 2 | 15.57% | 0.08027 | 0.040133 | 5.26 | 0.160 |
| Başlangıç Basıncı | 2 | 18.33% | 0.09447 | 0.047233 | 6.19 | 0.139 |
| Hata | 2 | 2.96% | 0.01527 | 0.007633 | | |
| Toplam | 8 | 100.00% | | | | |




**Şekil 4.5.** ANOVA analizi sonucu.

İstatistiksel analiz sonuçlarına göre hata oranı % 2.96 olmak üzere; genlik, frekans ve başlangıç basıncının çıkış cevabına katkıları sırasıyla % 63.14, % 15.57 ve % 18.33 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca genlik parametresinin P-değeri 0.045 olup 0.05'ten küçük olduğu için genliğin etkili bir parametre olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Frekans ve başlangıç basıncının P-değerinin sırasıyla 0.160 ve 0.139'dur. Bilindiği gibi P-değeri 0.05'ten büyükse parametrenin istatistiksel olarak anlamlı bir etkisinin

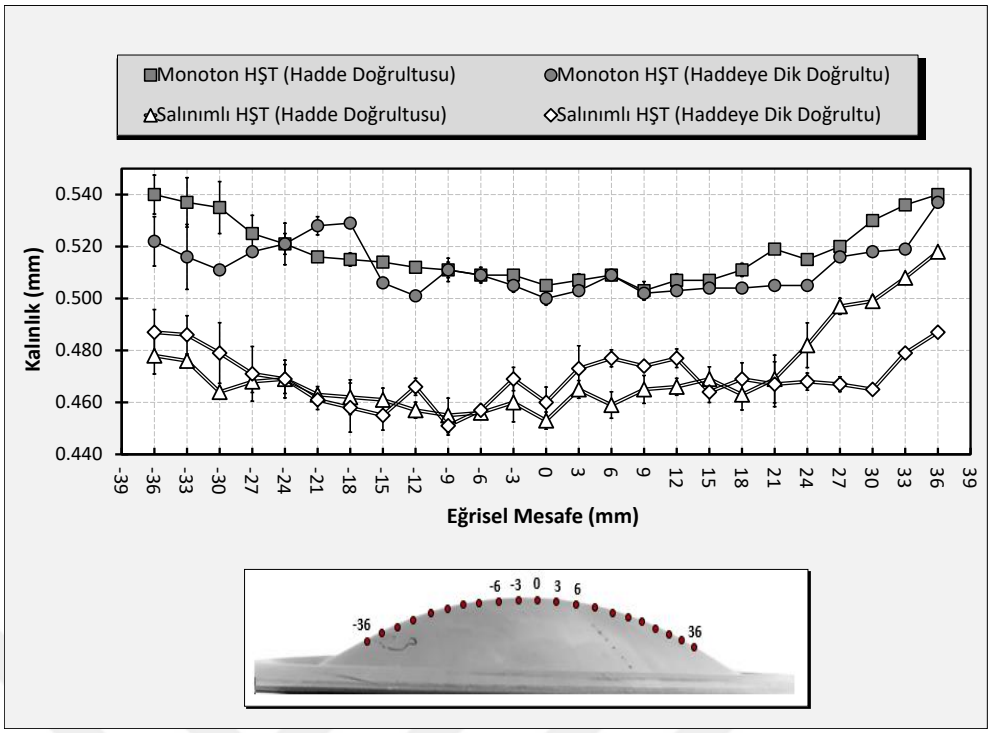
olmadığı sonucuna ulaşılır. Buna göre genlik parametresi salınımlı HŞT için önemli parametre iken frekans ve başlangıç basıncının proses üzerinde etkisinin olmadığı bulunmuştur. Ayrıca tarama deneyleri de gerçekleştirilerek frekansın daha yüksek seviyelerinde de çıkış cevabına etkisinin az olup olmadığı araştırılmıştır. Şekil 4.6'da sonuçları verilen tarama deneylerinde genlik ve başlangıç basıncı 0.5 MPa ve 4 MPa olarak sabit tutulmuştur. Frekansın daha yüksek değerlerinin şişme yüksekliğine artırıcı etkisinin olmadığı sonucuna ulaşılmıştır.




**Şekil 4.6.** Yüksek frekansların etkisini test etmek içi yapılan tarama deneylerinin sonuçları.

### 4.1.2. Kalınlık Dağılımı

Kalınlık dağılımı sac metal şekillendirme proseslerinin son ürün kalitesi için kontrol edilen en önemli kriterlerdendir. Bu çalışmada salınımlı ve monoton HŞT ile elde edilmiş numunelerin kalınlık dağılımları karşılaştırılmıştır. Ölçüm hassasiyeti 0.001 mm olan manyetik bilyalı kalınlık ölçer kullanılarak kubbe şeklindeki numunelerin kalınlıkları belirlenen doğrultu takip edilerek 3 mm aralıklarla ölçülmüştür. Şekil 4.7'de kalınlık dağılımları hata çubuklarıyla verilmiştir.

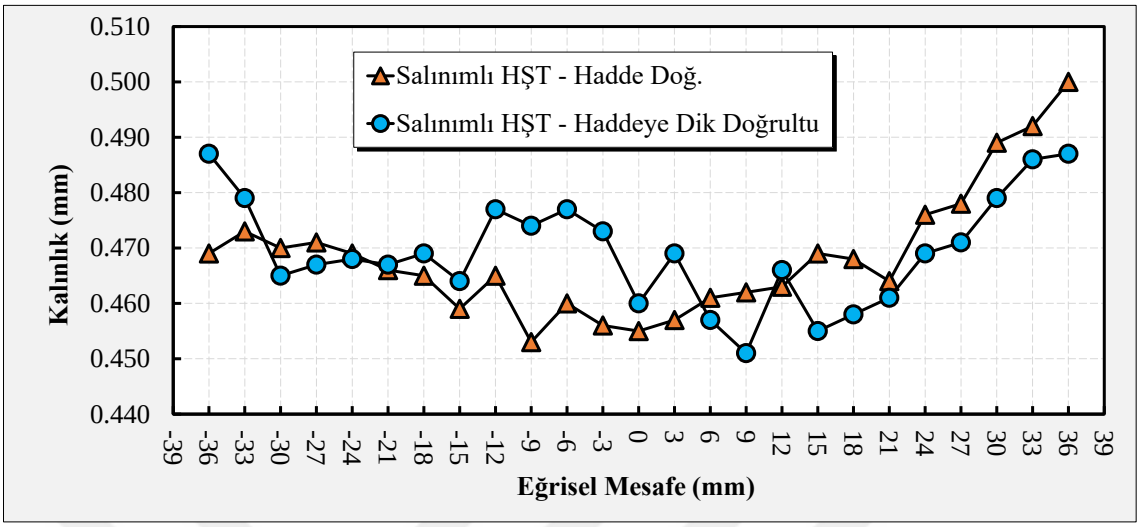



**Şekil 4.7.** İki farklı hadde doğrultusunda elde edilen kalınlık dağılımları.

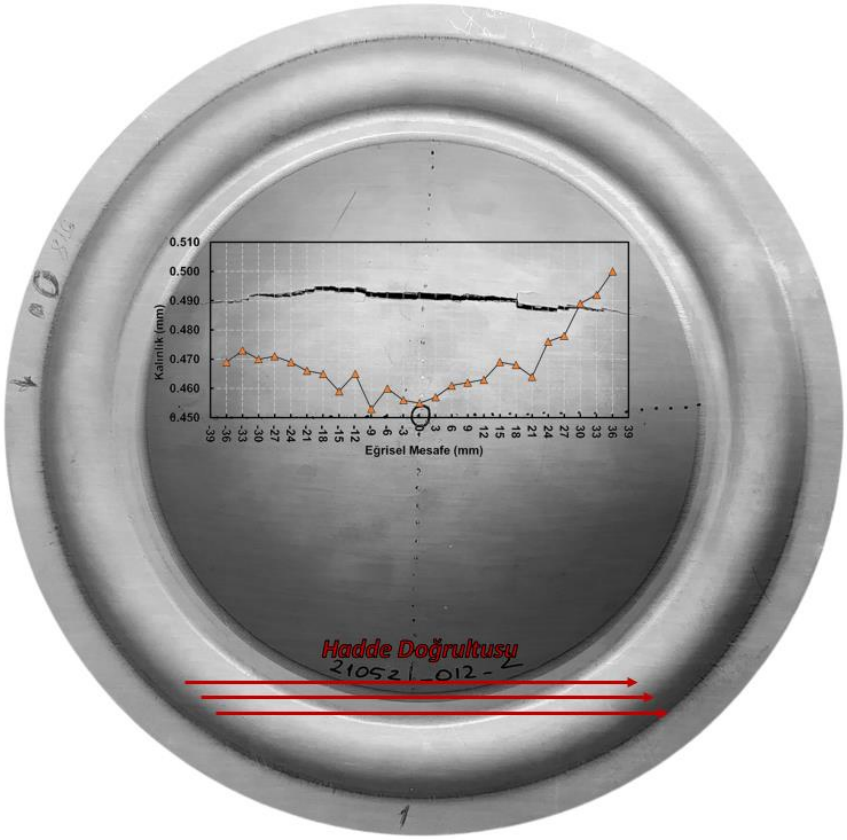
Ölçüm sonuçlarına göre her iki hadde doğrultusunda da salınımlı HŞT'de monoton duruma kıyasla daha fazla incelme olduğu bulgular arasındadır. İlk kalınlık olan 0.55 mm'ye göre monoton deneyler sonucu 0.50 mm'de, salınımlı deneylerde ise 0.45 mm'de yırtılma olmuştur. Sonuçlar yüzde incelme olarak hesaplanırsa; monoton HŞT'de % 9 olan maksimum incelme, salınımlı HŞT'de % 18'e çıkmıştır. Yani malzemenin yırtılması salınımlı yüklemede gecikmektedir. Bu sonuç, kalınlık doğrultusundaki BŞD'ler açısından da olumlu bulgular elde edileceğini açıkça göstermiştir. Her iki hadde doğrultusunda ölçüldüğü için elde edilen sonuçlar anizotropiden bağımsız olup Ti-6Al-4V alaşımının oda sıcaklığında sünekliğinin artırılması sağlanmıştır.

Hadde doğrultusuna göre kalınlık dağılımındaki değişim Şekil 4.8'de verilmiştir. Ortalama kalınlık dağılımları göz önüne alındığında haddenin kalınlık dağılımına gözle görülür etkisi olmadığı fark edilmiştir. Ancak hadde doğrultusunda Şekil 4.8'de görüldüğü gibi kubbe merkezinin 12 mm kadar soluna kadar daha fazla incelme tespit edilmiştir. Başka bir ifadeyle; en azından merkeze yakın bölgede, haddeye dik doğrultuya göre hadde doğrultusunda yüzde incelmenin daha fazla olduğu görülmüştür. Sırasıyla Şekil 4.9 ve 4.10'da salınımlı HŞT numunesinin hadde doğrultusunda ve dik doğrultuda kalınlık dağılımı numune üzerinde verilmiştir. Özellikle Şekil 4.10'da

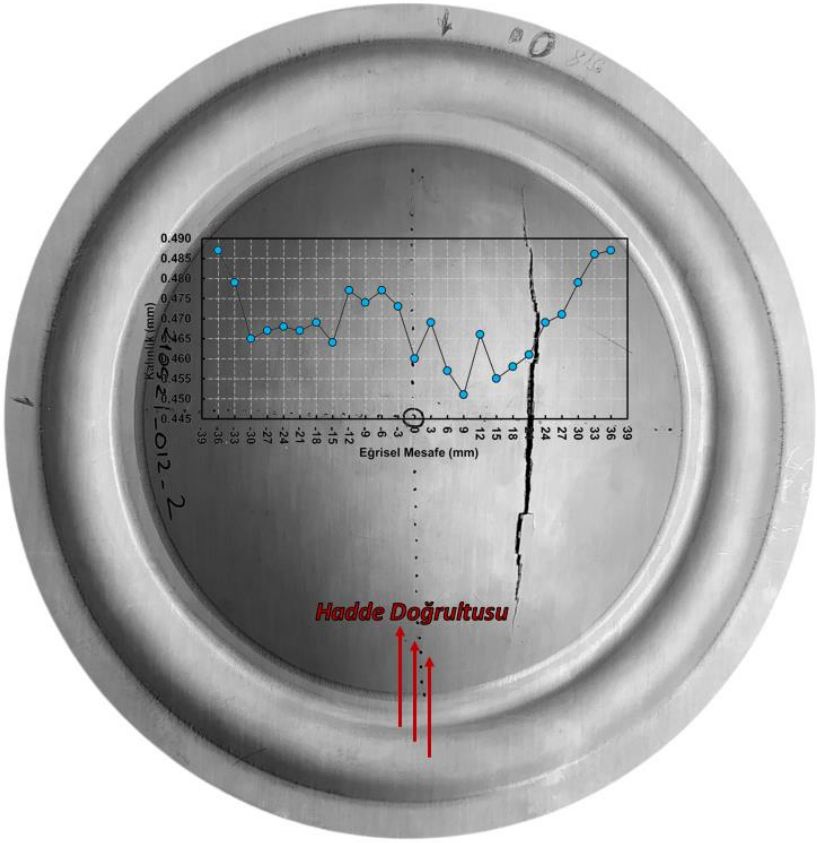
yırtılma hattına yakın bölgelerin kalınlık dağılımının değişimine etkisi de açıkça görülebilmektedir.




**Şekil 4.8.** Ortalama 15.45 mm şişme yüksekliğine ulaşılan salınımlı HŞT numunesinin iki doğrultudaki kalınlık dağılımı.

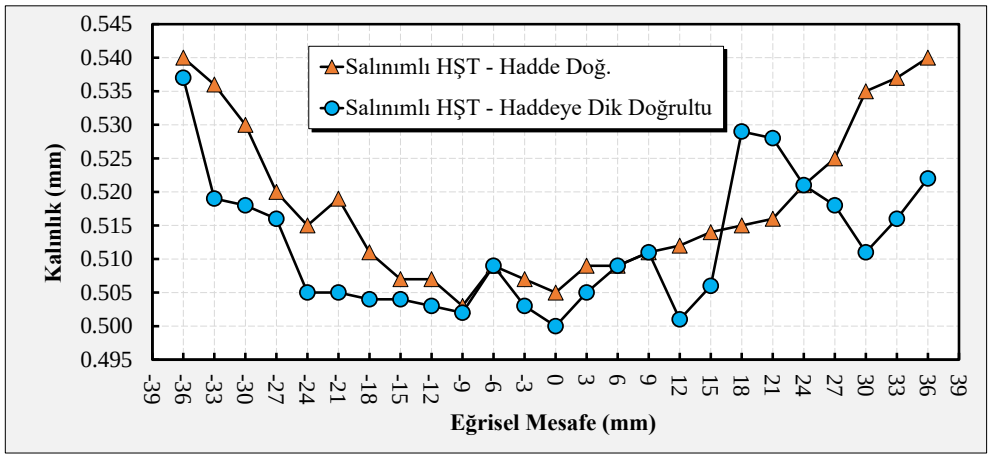



**Şekil 4.9.** Ortalama 15.45 mm şişme yüksekliğine ulaşılan salınımlı HŞT numunesinin kalınlık dağılımı (Hadde doğrultusu).

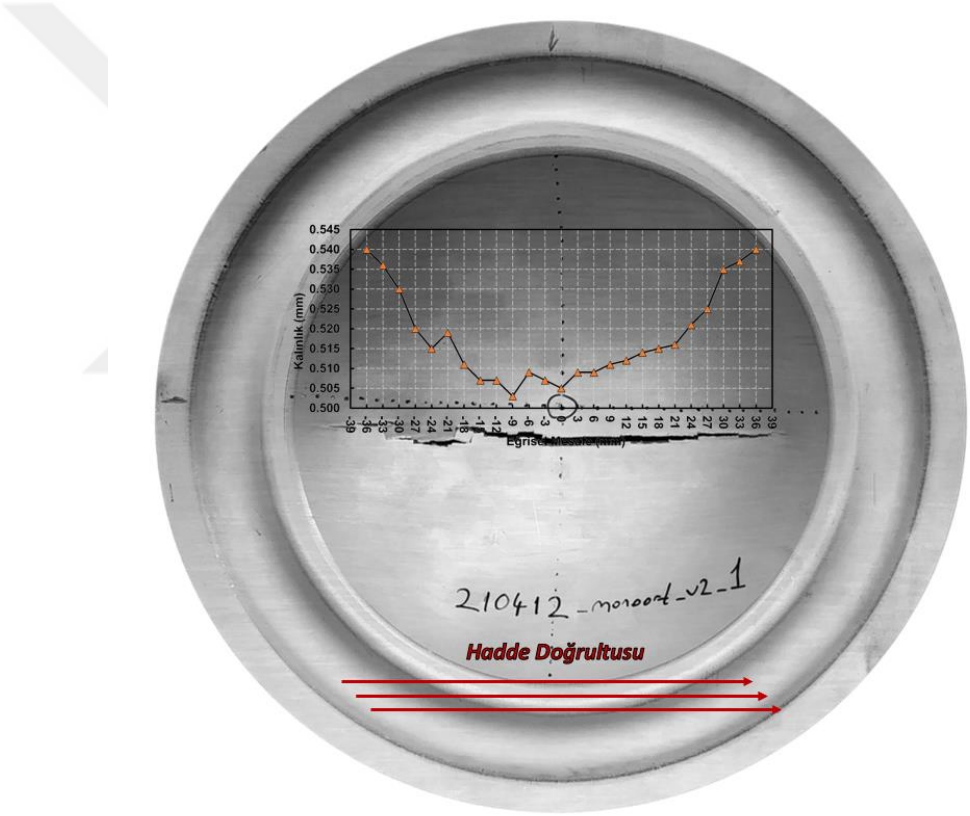



**Şekil 4.10.** Ortalama 15.45 mm şişme yüksekliğine ulaşılan salınımlı HŞT numunesinin kalınlık dağılımı (Haddeye dik doğrultu).

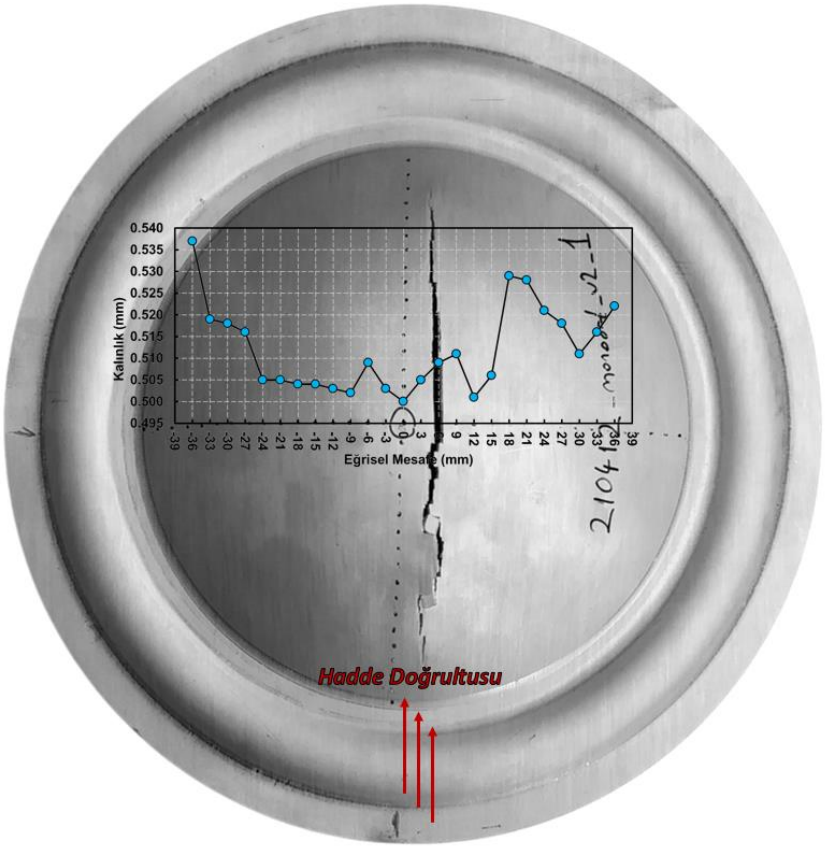
Salınımlı HŞT numunelerine ek olarak monoton HŞT numuneleri de hadde doğrultusuna ve kırılma hattına göre kalınlık dağılımı açısından incelenmiştir. Şekil 4.11'de ortalama 13.39 mm yüksekliğe çıkan monoton HŞT numunesinin iki farklı doğrultudaki kalınlık dağılımı verilmiştir. Hadde doğrultusunun kalınlık dağılımına ciddi bir etki göstermediği bulunmuştur. Sırasıyla Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'te monoton HŞT numunesinin hadde doğrultusu ve dik doğrultudaki kalınlık dağılımları ayrı ayrı verilmiştir. Burada haddeye dik doğrultuda yırtılma hattının kalınlık dağılıma etkisi salınımlı duruma benzer şekilde Şekil 4.13'de görülmektedir. Salınımlı ve monoton şekillendirilmiş numuneler arasında dikkat çeken bir diğer fark ise ulaşılan minimum kalınlıktır. Monoton ve salınımlı numunelerde sırasıyla en fazla 0.50 mm ve 0.45 mm kalınlığa kadar inilmiştir. Aradaki bu fark, gerçek BŞD hesaplanırken ($\varepsilon=\ln(s/s_0)$) daha da artmıştır. Bu durum, numunelerin mekanik özellikler açısından kıyaslandığı bölümde detaylıca açıklanmıştır.




**Şekil 4.11.** Ortalama 13.39 mm şişme yüksekliğine ulaşılan monoton HŞT numunesinin iki doğrultudaki kalınlık dağılımı.




**Şekil 4.12.** Ortalama 13.39 mm şişme yüksekliğine ulaşılan monoton HŞT numunesinin kalınlık dağılımı (Hadde doğrultusu).

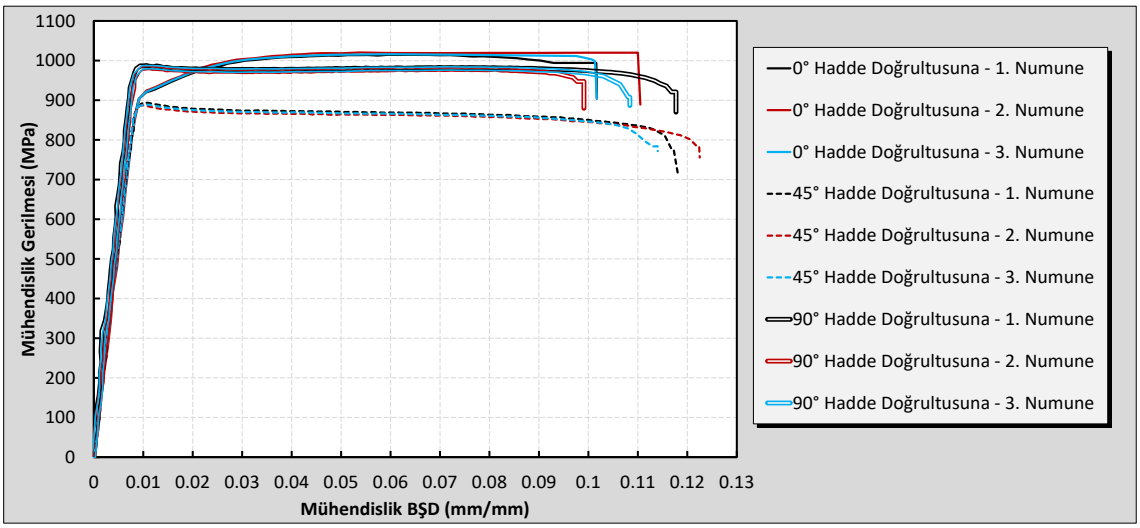



**Şekil 4.13.** Ortalama 13.39 mm şişme yüksekliğine ulaşılan monoton HŞT numunesinin kalınlık dağılımı (Haddeye dik doğrultu).

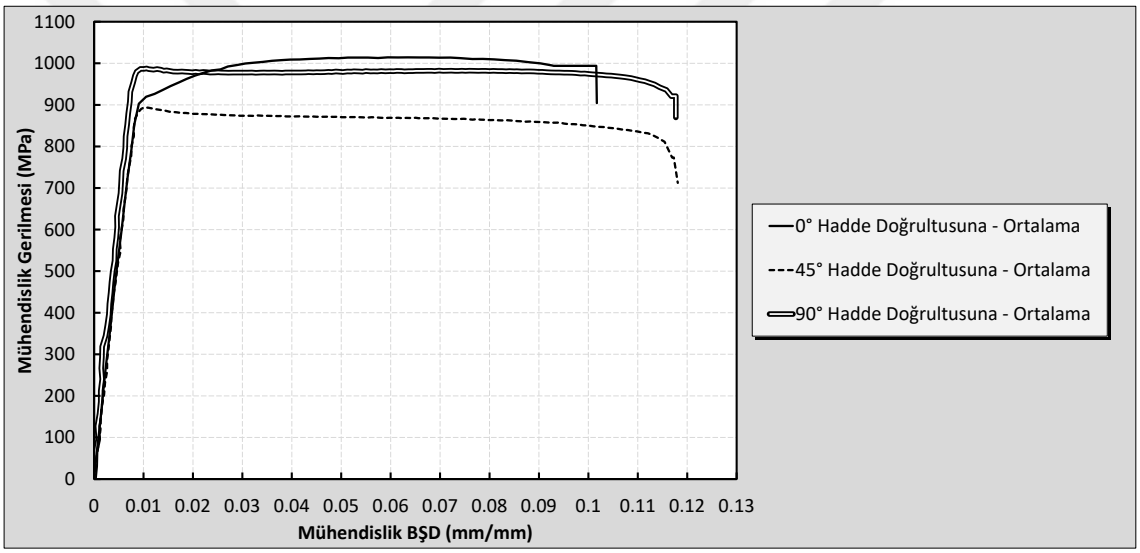
## 4.2. Mekanik Özellikler Açısından Karşılaştırma

### 4.2.1. Temin Halindeki Malzemenin Monoton Çekme Testi Sonuçları

Şekil 3.2'de görülen sertifikada belirtilen mekanik özellikleri doğrulamak için temin edilen malzemeden ASTM-E8 standardına göre çekme numuneleri hazırlanmış, 0°, 45° ve 90° hadde doğrultusunda tek eksenli çekme testi uygulanmıştır. Üç tekrarlı yapılan çekme testlerinin sonuçları Şekil 4.14'te, farklılıkları daha kolay görmek için ortalamaları da Şekil 4.15'te verilmiştir. Literatür ile karşılaştırıldığında uyumlu sonuçlar elde edilmiştir (Badr ve ark., 2015). Literatürde 45° doğrultuya sahip numunede akma ve çekme mukavemetlerinin düşük, kopma uzamalarının daha fazla olması daha dengeli tane dağılımı ile açıklanmıştır (Gao ve ark., 2022).

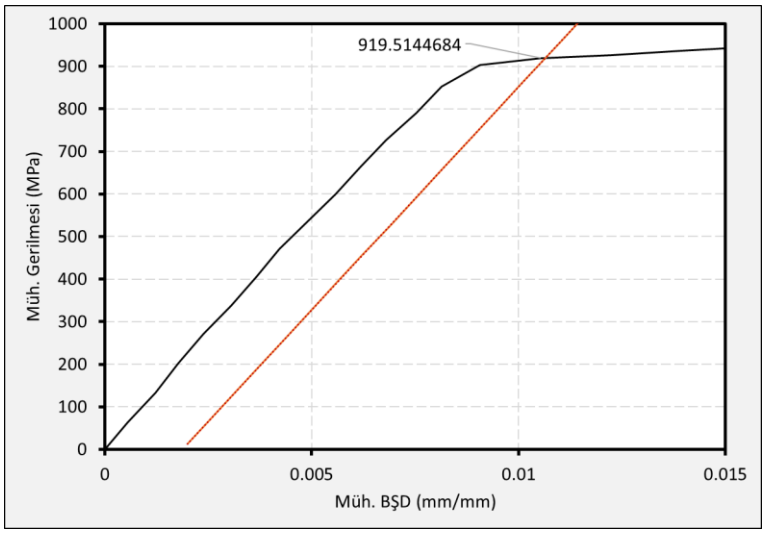



**Şekil 4.14.** Üç farklı doğrultuda (0°, 45° ve 90°) kesilmiş numunelerden video ekstansometre ile elde edilen çekme testi sonuçları.

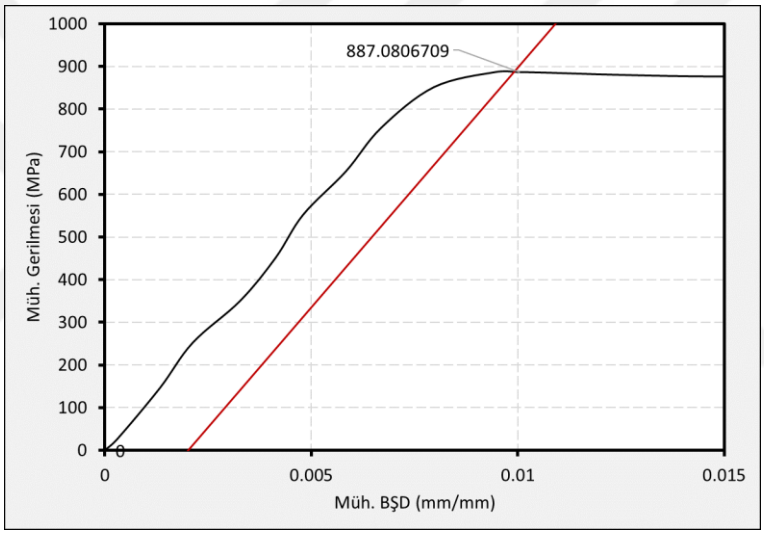



**Şekil 4.15.** Üç farklı doğrultuda (0°, 45° ve 90°) kesilmiş numunelerden video ekstansometre ile elde edilen çekme testi sonuçlarının ortalamaları.

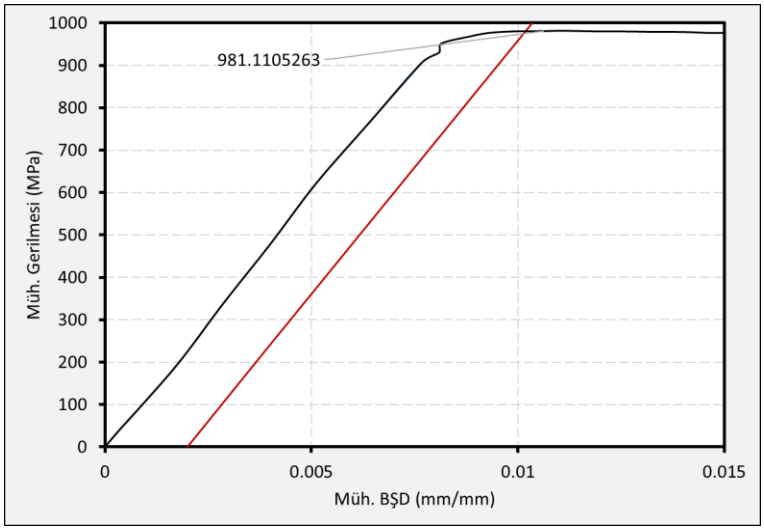
Akma dayanımı açısından karşılaştırmak gerekirse; Şekil 4.15'te de görüldüğü gibi eğrilerin akma noktası belirgin değildir. Bilindiği gibi bu tip malzemelerde sıfır noktasından 0.002 mm/mm ileriden elastik eğriye çizilen paralel doğrunun akma eğrisini kestiği noktanın gerilme değerinin akma dayanımını gösterdiği kabul edilir. Şekil 4.16, 4.17 ve 4.18'de sırasıyla 0°, 45° ve 90° için akma dayanımları; 919.5 MPa, 887.1 MPa ve 981.1 MPa olarak bulunmuştur.




**Şekil 4.16.** 0° doğrultuda kesilmiş numunenin akma mukavemeti.




**Şekil 4.17.** 45° doğrultuda kesilmiş numunenin akma mukavemeti.

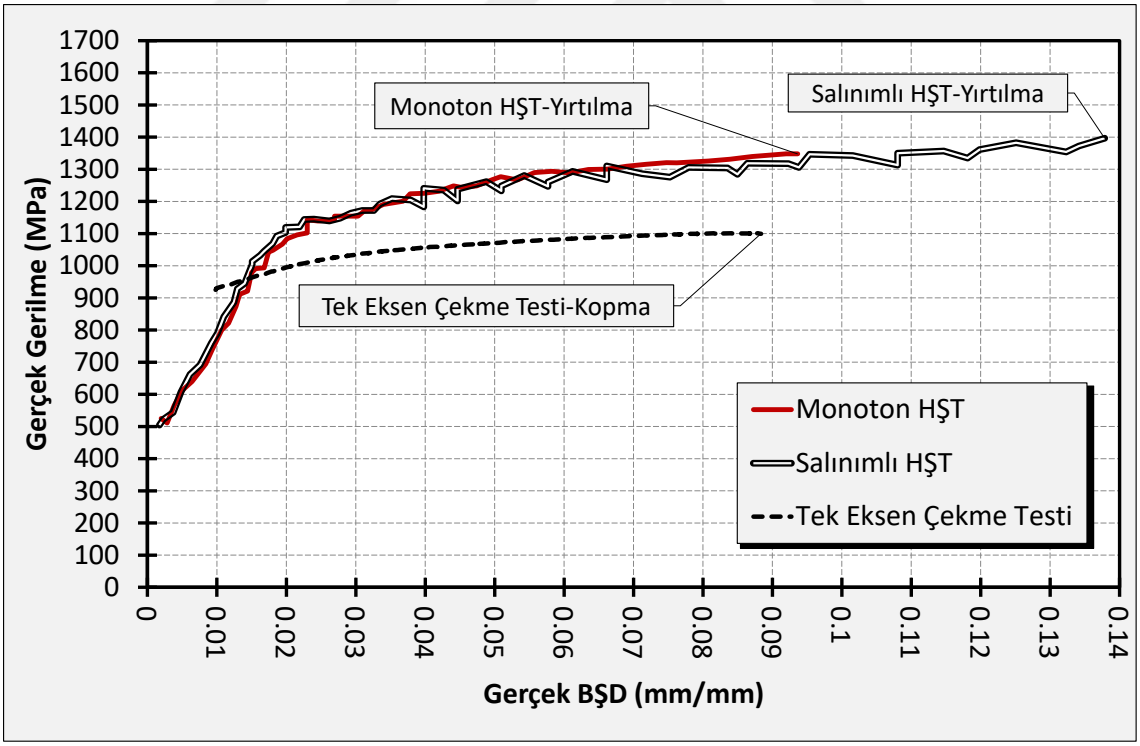



**Şekil 4.18.** 90° doğrultuda kesilmiş numunenin akma mukavemeti.

### 4.2.2. Salınımlı ve Monoton Şartlarda Gerilme-BŞD Diyagramlarının Karşılaştırılması

Ti-6Al-4V alaşımının gerilme durumu, şekillendirilebilirliği etkileyen en kritik faktörlerden biridir. Bu nedenle gerçek gerilme ve gerçek BŞD durumlarının incelenmesi mekanik özellikler açısından karşılaştırmada önemli rol oynar. Çekme testi uygulanan, salınımlı ve monoton HŞT ile elde edilen gerçek gerilme-gerçek BŞD eğrilerinin karşılaştırılması Şekil 4.19'da verilmiştir. Sonuç olarak Ti-6Al-4V alaşımının oda sıcaklığında sünekliğinin salınımlı yükleme durumunda önemli oranda arttığı sonucuna ulaşılmıştır.

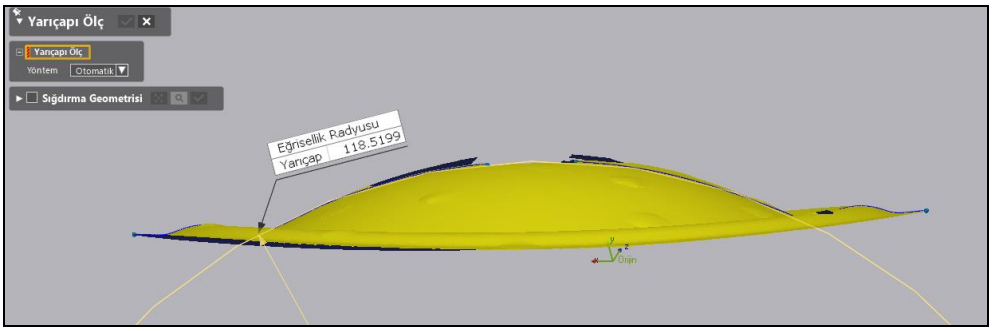
Tüm testlerde ve literatürde görüldüğü (Odenberger ve ark., 2012a) gibi Ti-6Al-4V pekleşme ve süneklik özelliği oldukça düşük olan bir malzemedir. BŞD açısından değerlendirildiğinde gerçek eğriler dikkate alınarak sırasıyla çekme testi, monoton ve salınımlı durumda BŞD değerleri 0.088, 0.094, 0.138 mm/mm olarak hesaplanmıştır. Yani Monoton HŞT ve çekme testi için BŞD hemen hemen aynı iken salınımlı yüklemede %47 artmıştır.



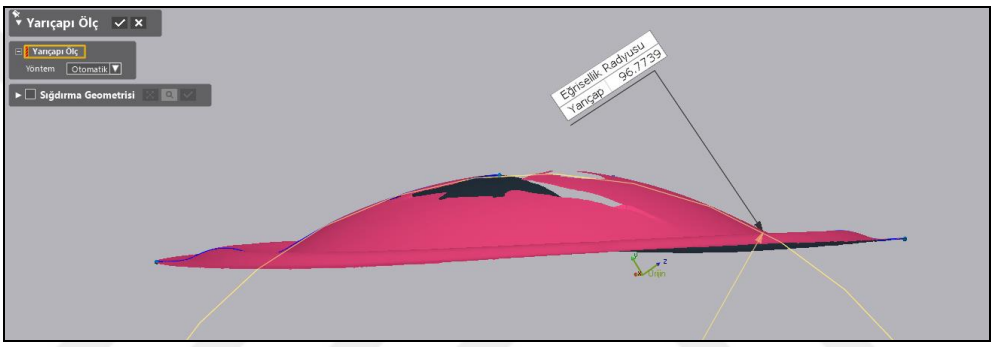

**Şekil 4.19.** Çekme testi, salınımlı HŞT ve monoton HŞT ile elde edilen gerçek gerilme – gerçek BŞD eğrilerinin karşılaştırılması.

Gerilme-BŞD eğrisi elde edilirken eğrisellik yarıçapı, anlık yüksekliğe bağlı olarak analitik yöntemle hesaplanmıştır. Hesaplanan küre kesitine ait eğrisellik

yarıçapının doğrulanması için salınımlı ve monoton HŞT numuneleri optik tarama ile taranmış ve katı yüzeye dönüştürülmüştür. Şekil 4.20 ve Şekil 4.21'te monoton ve salınımlı şartlarda yırtılmış numunelerin ulaştığı minimum yarıçaplar gösterilmiştir.




**Şekil 4.20.** 12.29 mm yükseklikte yırtılan monoton HŞT numunesinin taranmış yüzey modeli.




**Şekil 4.21.** 15.68 mm yükseklikte yırtılan salınımlı HŞT numunesinin taranmış yüzey modeli.

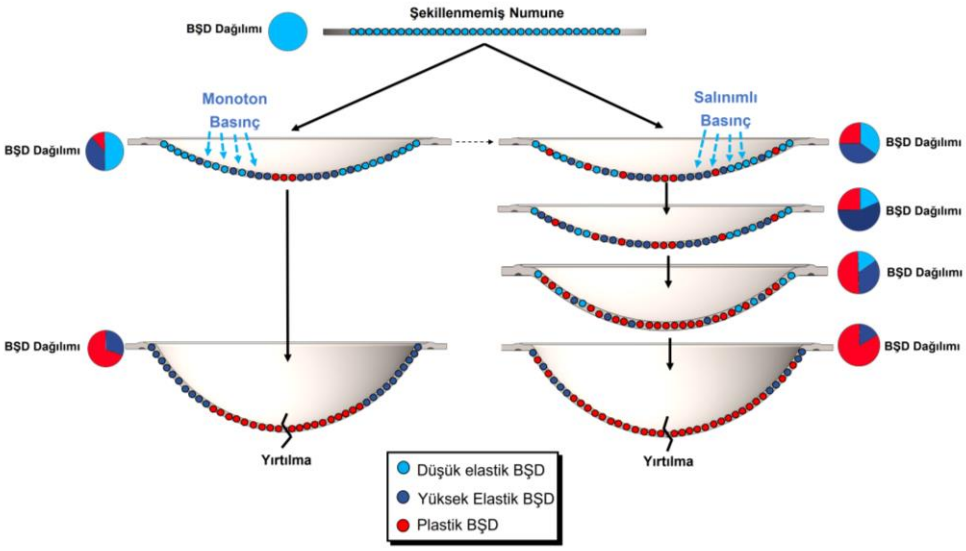
Çizelge 4.2'de analitik olarak hesaplanan ve deney sonucu ölçülen değerlerin karşılaştırılması verilmiştir. Elde edilen sonuçlar özellikle tarama sonucu ölçülen eğrisellik yarıçapları açısından, Panknin yaklaşımına ait denklemlerin gerçeğe oldukça yakın sonuçlar verdiğini göstermiştir. Lazarescu denklemi ile hesaplanan merkezdeki kalınlığı ise deneysel olarak alınan ölçüme göre kabul edilebilir hata göstermiştir.

**Çizelge 4.2.** Panknin ve Lazarescu modellerindeki eğrisellik yarıçapı ve kubbe merkezi kalınlıklarının güvenilirliğinin sağlanması. Yarıçap ve kalınlık değerleri yırtılma sonrası ölçülmüştür.

| Parametre | Analitik Sonuç | Ölçüm Sonucu | % Hata |
|---|---|---|---|
| $\rho_{mon}$ (Eğrisellik Yarıçapı, Monoton) | 124.2 mm | 118.5 mm | % 5 |
| $s_{mon}$ (Kubbe Merkezi Kalınlığı, Monoton) | 0.519 mm | 0.500 mm | % 6 |
| $\rho_{sal}$ (Eğrisellik Yarıçapı, Salınımlı) | 99.3 mm | 96.8 mm | % 2.5 |
| $s_{sal}$ (Kubbe Merkezi Kalınlığı, Salınımlı) | 0.490 mm | 0.450 mm | % 8 |

### 4.2.3. BŞD Dağılımlarının Karşılaştırılması

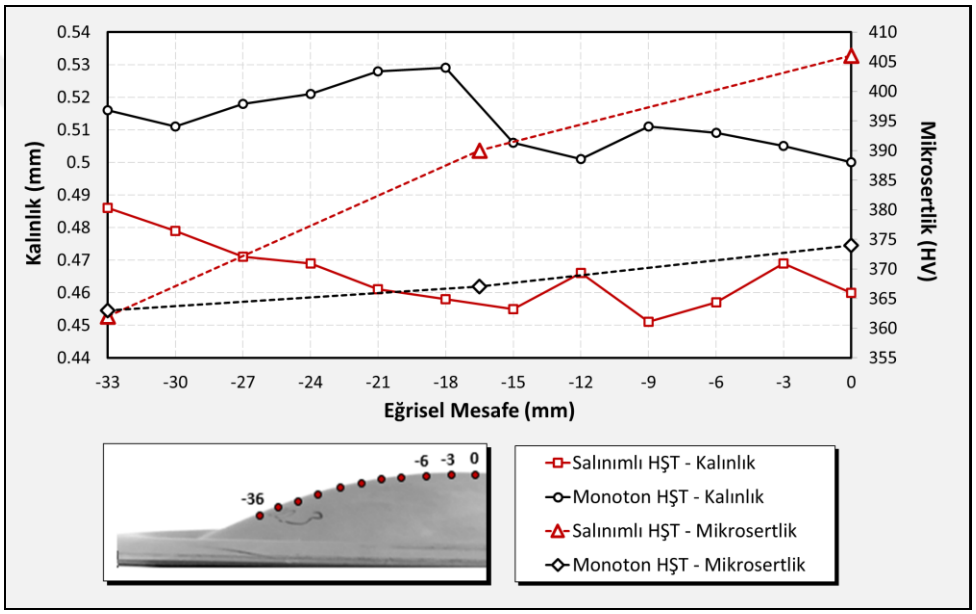
Salınım sırasında gerilmedeki düşüşler sırasında plastik deformasyonun orta bölgede lokalize olması yerine malzemenin diğer bölgelerine yayıldığı literatürde tek eksenli çekme testi özelinde belirtilmiştir (Yamashita ve ark., 2015). Benzer durum monoton ve salınımlı şişirme testlerini kıyasladığımızda da gerçekleşmiş olacağı düşünülmüştür. Özellikle salınımlı basınç altındaki numune daha yüksek BŞD değerine ulaşması ve daha geç yırtılması, BŞD dağılımının monoton basınçtaki ile farklı olacağı düşünülmüştür. Yamashita ve ark. (2015) tarafından BŞD dağılımı ile ilgili yapılan yorum, bu çalışmada şişirme testi ve Ti-6Al-4V için yapılmıştır. Şekil 4.22'de BŞD dağılımının yırtılma anına kadar olan gelişimi verilmiştir. Monoton basınç altındaki numune ele alındığında öncelikle merkez etrafında yüksek elastik BŞD'lerin ve merkezde plastik BŞD'lerin başladığı şeklinde yorumlanmıştır. Şişirmenin devamında yüksek elastik BŞD'ye ulaşan bölgeler lokalize bir şekilde plastik BŞD'ye dönüşür ve nihayet yırtılma gerçekleşir. Salınımlı basınca maruz kalan numune ele alındığında ise sabit basınçlı duruma göre BŞD'nin gelişimi farklı olmaktadır. Salınımlı numune için özellikle basınçtaki düşüşler sırasında, gerilme gevşemesi nedeniyle yüksek elastik BŞD'lerin bir kısmının plastik BŞD'ye dönüştüğü yorumu yapılmıştır. Bu durumun her salınım sırasında gerçekleştiği ve en iyi numunede yaklaşık 11 adet salınım olduğu göz önüne alınırsa, plastik BŞD'lerin ortada lokalize olmak yerine numunenin gerdirme eksenleri boyunca yayılarak ilerleyeceği yorumu yapılmıştır. Bunun sonucu olarak malzeme daha geç yırtılmış ve oda sıcaklığında titanyum alaşımının şekillendirilebilirliği artmıştır.




**Şekil 4.22.** Monoton ve salınımlı basınca maruz kalan numunelerin, kesit boyunca BŞD dağılımlarının gelişimi.

### 4.2.4. Mikrosertlik Dağılımlarının Karşılaştırılması

Kubbe şeklindeki numunelerden mikrosertlik ölçümleri Şekil 4.23'te verilmiştir. Monoton HŞT için, kalıp radyusundan kubbe merkezine doğru sertlik değeri 368 HV'den 375 HV'ye salınımlı HŞT için ise, 368 HV'den 406 HV'ye yükselmiştir. Salınımlı HŞT numunelerinde daha yüksek mikrosertlik değerleri elde edilmiştir. Kalıp radyusu bölgesinden kubbe merkezine doğru kalınlığın azalması ile tutarlı olacak şekilde sertlik değerleri artmıştır. Başka bir ifadeyle deformasyona daha fazla uğrayan bölgeler daha fazla incelmiş ve sertlikleri daha yüksek çıkmıştır. Ayrıca elde edilen sertliklerin literatür ile benzer olduğu bulunmuştur (Venkatesh ve ark., 2001, da Rocha ve ark., 2006, Yu ve ark., 2018).



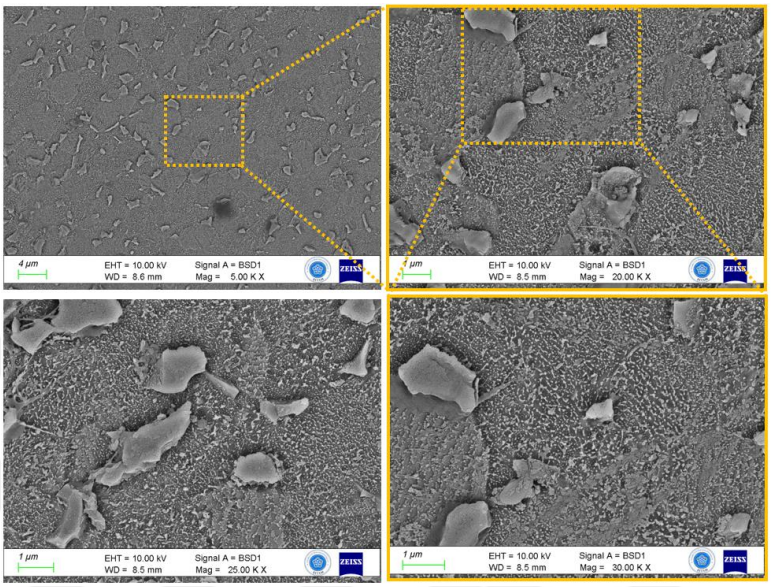

**Şekil 4.23.** Salınımlı ve monoton HŞT'ye ait kalınlık ve mikrosertlik dağılımları.

## 4.3. Temin Halindeki Malzeme Karakterizasyonu

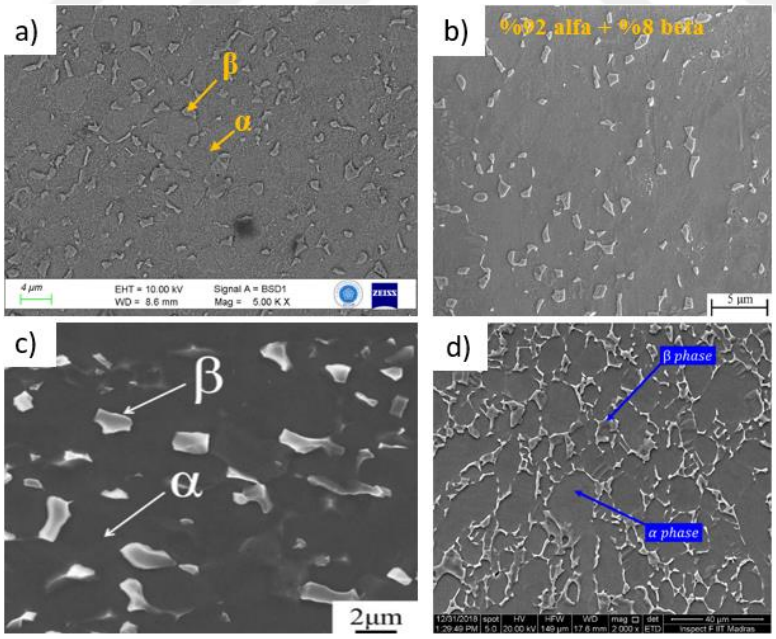
### 4.3.1. SEM ile Faz Yapısının İncelenmesi

SEM ile faz yapısı incelenmiş ve mikroyapı karakterize edilmiştir. Malzemenin temin halinden FE-SEM (Field Emission Scanning Electron Microscopy) ve EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) analizleri yapılmıştır. Şekil 3.14'te görüldüğü gibi malzeme yüzeyinden ve kesitinden (cross-section) çeşitli büyütme oranlarında alınan SEM görüntüleri Şekil 4.24'te verilmiştir. EDS analizi ile mikroyapının çoğunlukta α fazı, azınlıkta ise tane sınırlarında granüler yapıda β fazı olmak üzere çift fazlı olduğu gösterilmiştir. SEM görüntülerinde de α fazının baskın olduğu gözlemlenmiş olup bu faz malzemenin matrisi olarak tanımlanmıştır. Her bir fazın hacimsel oranı ImageJ

yazılımı ile hesaplanmıştır. Hacimsel oranlar α ve β fazları için sırasıyla %95.3 ve %4.7 olarak bulunmuş olup literatürdeki sonuçlara uyumludur (Verleysen ve Peirs, 2017). Şekil 4.25'te karşılaştırma amacıyla literatürde Ti-6Al-4V için rapor edilen mikroskop görüntüleri verilmiştir.



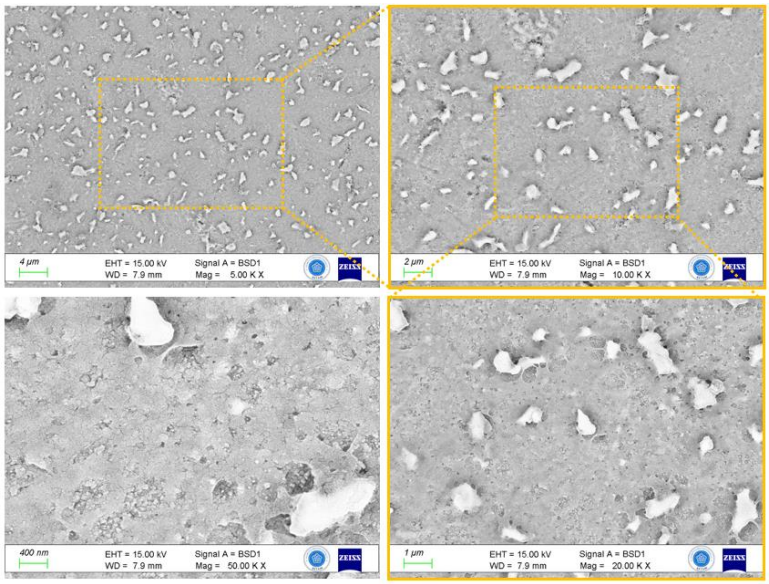
**Şekil 4.24.** Temin hali numunesinin yüzeyinden alınan SEM görüntüleri




**Şekil 4.25.** Ti-6Al-4V malzemesine ait SEM görüntüleri sırasıyla (a) Bu çalışma, (b) (Sun ve ark., 2015), (c) (Zhang ve ark., 2018), (d) (Prasad ve ark., 2020) için verilmiştir.

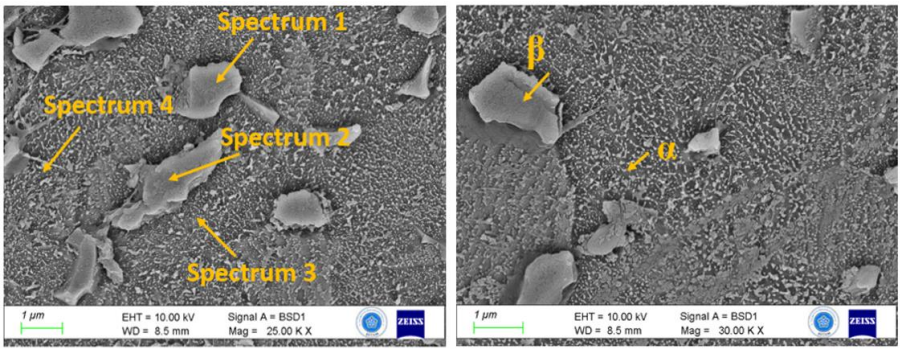
Temin edilen malzemeye SEM ile kesit analizi de gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.26'da farklı büyütmelerde kesitten alınan SEM görüntüleri verilmektedir.

Yüzeyden alınan görüntülere benzer şekilde kesit görüntülerinde de farklı kontrast gösteren fazlar tespit edilmiştir.



**Şekil 4.26.** Numunenin karşı kesitinden alınan SEM görüntüleri.

Farklı kontrast gösteren fazların kompozisyon analizi için noktasal ve alansal EDS çalışması yapılmıştır. Şekil 4.27'de malzeme yüzeyinde farklı bölgelerde gerçekleştirilen noktasal EDS analizleri gösterilmekledir. Analiz sonucunda dört farklı spektrumdaki kompozisyonlar Çizelge 4.3'teki gibi belirlenmiştir. Vanadyum'un β fazı, Alüminyum'un ise α fazı kararlaştırıcı olduğu bilinmektedir.




a) b)

**Şekil 4.27**. (a) EDS analizinin yapıldığı farklı bölgeler (b) Mikroyapıda bulunan fazlar.

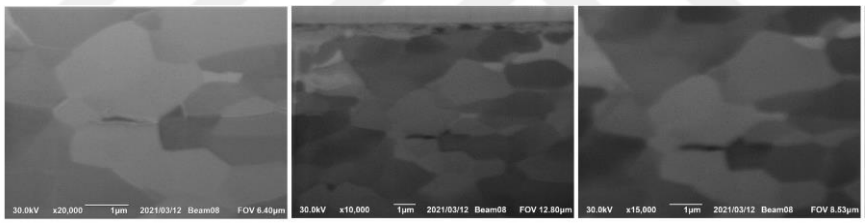
**Çizelge 4.3.** Noktasal EDS analizi sonucundaki kompozisyonlar.

| Kompozisyon (% ağırlık) | Ti | V | Al | C | O |
|---|---|---|---|---|---|
| Spektrum 1 | 44.1 | 22.4 | 1.2 | 22 | 10.1 |
| Spektrum 2 | 42.4 | 23.6 | 0.9 | 22.5 | 10.6 |
| Spektrum 3 | 62.3 | 1.4 | 5.9 | 18.6 | 11.6 |
| Spektrum 4 | 59.4 | 1.3 | 6 | 22.2 | 11.2 |

Bu durumda matris fazının α fazı, diğer fazın ise β fazı olduğu görülmektedir. XRD sonuçlarından pik şiddetleriyle kıyaslama yapıldığında da bu durum doğrulanmaktadır. XRD sonuçlarına göre mikroyapıda baskın olan fazın yaklaşık %90 oranıyla α fazı olduğu tespit edilmiş olup bu sonuç literatürle uyumludur (Prasad ve ark., 2020).

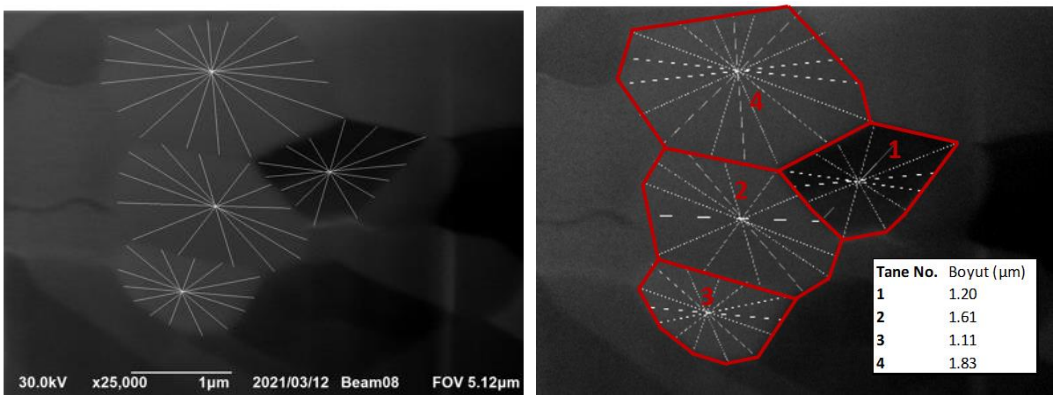
### 4.3.2. FIB ile Tane Boyutunun Belirlenmesi

FIB mikroskobu ile yapılan analizlerde, taneler arasındaki yönelme farkı kullanarak mikroyapı görüntülenir. Bu mikroskobun avantajı, büyük alanlar resmedileceği için mikroyapının büyük bir bölümü aynı anda incelenerek analiz yapılabilir. FIB yöntemiyle 10,000 kat ve 25,000 kat büyütmede elde edilen görüntüler Şekil 4.28'de verilmiştir. Şekilde farklı kontrastlarda görülen yapılar taneleri göstermektedir. Tane boyutu analizi ImageJ programı kullanılarak yapılmıştır. Şekil 4.29'da tane boyutu hesaplanmasında kullanılan yöntem gösterilmiştir. Öncelikle bir tanenin merkezinden geçen doğrular çizilmiştir. Çizilen doğruların uzunlukları ölçülüp ortalaması alınmıştır. Hesaplanan değer bir adet tanenin boyutunu vermektedir.




**Şekil 4.28.** FIB mikroskobu ile görüntüleme işlemi sonucu Ti-6Al-4V alaşımının tane yöneliminin gösterimi.

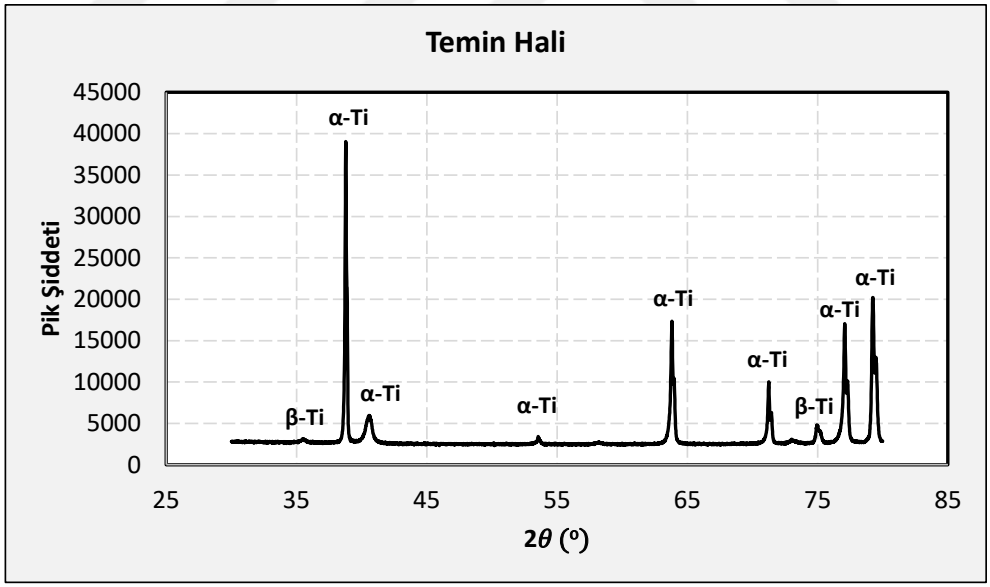
Tüm taneler için bu yöntem uygulanmıştır ve her bir değer toplanıp ortalaması alınmıştır. Yapılan incelemeler neticesinde ortalama tane boyutu 1.15 µm olarak tespit edilmiştir. Tespit edilen bu tane boyutu haddeleme ile üretilen Ti-6Al-4V levha malzemesi için literatürde verilen tane boyutları ile karşılaştırıldığında benzerlik göstermektedir (Guo ve ark., 2014, Chao ve ark., 2017, Luo ve ark., 2019, Despax ve ark., 2020). Ayrıca tanelerde haddelenmeye bağlı yönlenme gözlemlenmemiştir. FIB yönteminin avantajı daha geniş alanları tarayabilmesidir, bu sayede mikroyapı daha geniş açıdan incelenebilmektedir (Kotan ve Darling, 2015).




**Şekil 4.29.** FIB mikroskobu ile görüntüleme işlemi sonucu Ti-6Al-4V alaşımının ortalama tane boyutunun hesaplanması.

### 4.3.3. XRD Analizleri ile Faz Dağılımının Belirlenmesi

Temin halindeki malzemede yapılan XRD çalışmaları oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Oda sıcaklığında gerçekleştirilen XRD çalışmaları BİTAM'da yapılmıştır ve XRD analizlerinin sonucu Şekil 4.30'da verilmiştir. Kristal yapı analizleri ve hesaplamalar BİTAM bünyesinde gerçekleştirilen çalışmalardan elde edilen sonuçlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir.




**Şekil 4.30.** Ti-6Al-4V temin halinin XRD kırınım sonuçları.

### 4.3.4. Dislokasyon Yoğunluğu

Dislokasyon yoğunluğu, tane boyutu ve kafes gerilmelerinin ölçüme dayalı hesaplanmasında Scherrer Denklemi ve Williamson Hall metodu kullanılmıştır. Bu amaçla; deneysel olarak elde edilen XRD datalarından tüm alfa ve beta piklerinin konumları (θ) ve genişlikleri (β) belirlenmiştir. Elde edilen bu verilerle ortalama α ve β

tane boyutu hesaplanmıştır (Ali ve ark., 2020). Scherrer denkleminde K; Scherrer sabiti olup 0.9'dur. İkinci olarak λ; X-ışını kaynağının dalga boyu olup 0.15406 nm'dir. Her ikisi de radyan birimli olmak üzere; β pik genişliği, θ ise pik konumudur ve XRD verilerinden çekilmiştir. Çizelge 4.4'te Ti-6Al-4V malzemenin temin halinin XRD kırınım datalarından hesaplanan alfa (α) ve beta (β) fazları için tane boyutu, dislokasyon yoğunluğu ve kafes gerilmesi değerleri verilmiştir. Dislokasyon yoğunluklarının Williamson-Hall yöntemi ile hesaplandığında güvenilir olması için dislokasyonun $5x10^{12}$ $m^{-2}$'den büyük olması gerektiği literatürde özellikle belirtilmiştir (Ungár, 2001).

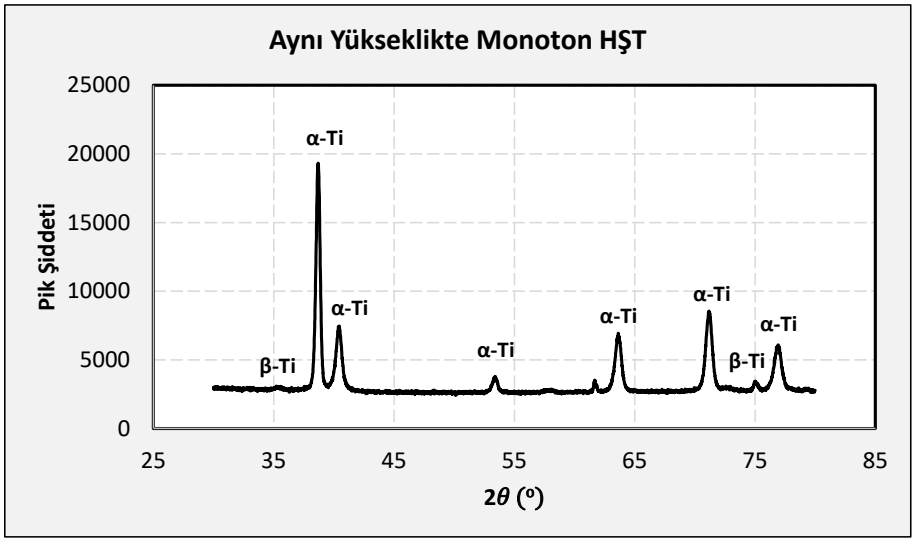
**Çizelge 4.4.** Malzemenin temin hali için tane boyutu, dislokasyon yoğunluğu ve kafes gerilmesi (microstrain) değerleri.

| α | | | β | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Tane Boyutu | Dislokasyon Yoğunluğu | Kafes gerilmesi | Tane Boyutu | Dislokasyon Yoğunluğu | Kafes gerilmesi |
| 21.40541 | 0.004071 | 0.004716 | 7.987228 | 0.015675 | 0.0073 |

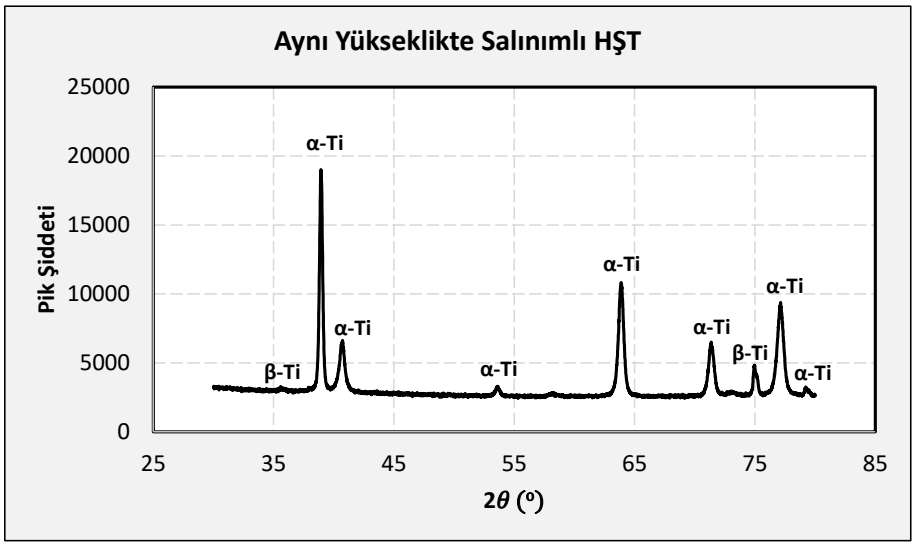
## 4.4. Deney Sonrası Malzeme Karakterizasyonu

### 4.4.1. XRD Analizlerinden Dislokasyon Yoğunluğu Hesaplanması

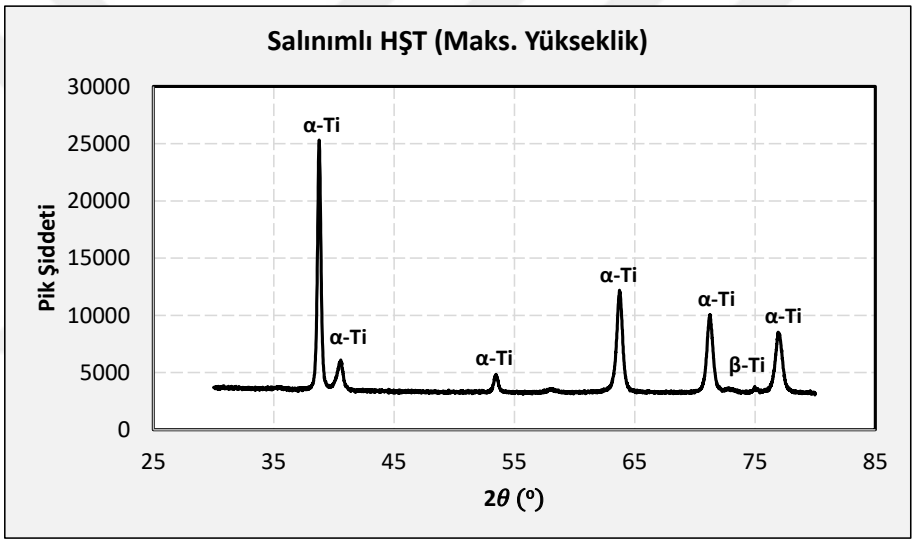
Şekillendirilmiş malzemelere XRD analizleri uygulanmıştır. Sırasıyla, aynı yükseklikte monoton HŞT, aynı yükseklikte salınımlı HŞT ve maksimum yükseklikte salınımlı HŞT Şekil 4.31, Şekil 4.32, Şekil 4.33 ve Şekil 4.34'de verilmiştir.



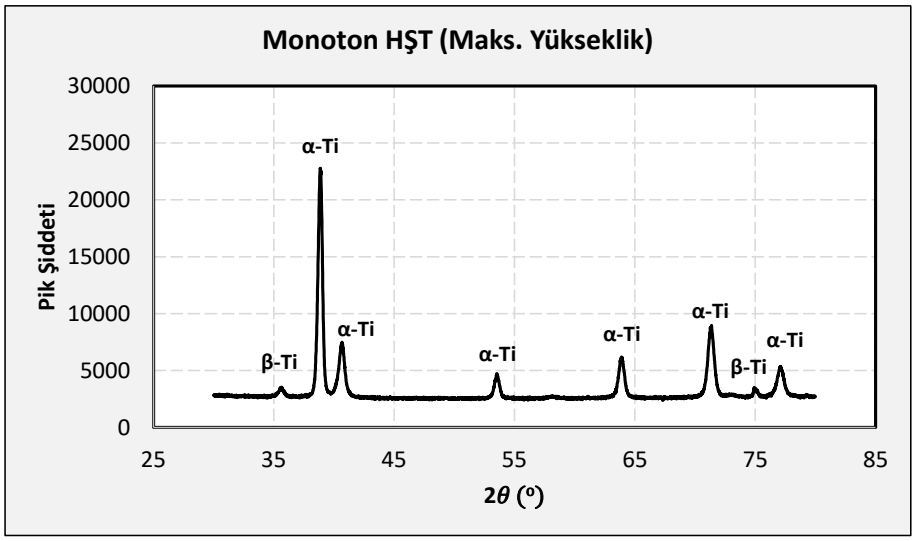

**Şekil 4.31.** Aynı yükseklikte elde edilen monoton HŞT numunelerinin XRD analizi.




**Şekil 4.32.** Aynı yükseklikte elde edilen salınımlı HŞT numunelerinin XRD analizi.




**Şekil 4.33.** Maksimum yükseklikteki salınımlı HŞT numunelerinin XRD analizi.




**Şekil 4.34.** Maksimum yükseklikteki monoton HŞT numunelerinin XRD analizi.

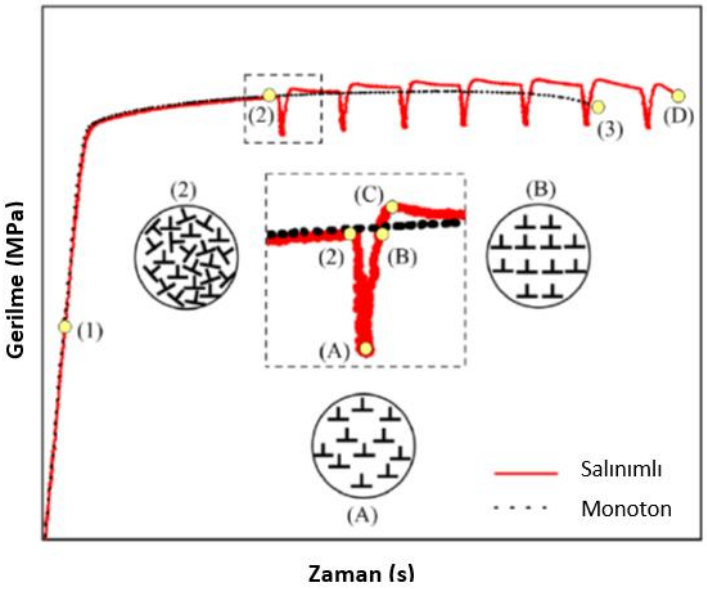
Çizelge 4.5'te dislokasyon yoğunluklarının ölçüme dayalı hesaplama sonuçları verilmiştir. Salınımlı ve monoton şartlarda HŞT'leri karşılaştırabilmek için yırtılmadan önce aynı yüksekliğe kadar (12 mm) şişirilip durdurulmuş numuneler de elde edilmiştir. Buna göre temin haldeyken $2.07 \cdot 10^{15}$ $m^{-2}$ olan dislokasyon yoğunluğu, 12 mm yükseklikte monoton şartlarda $3.23 \cdot 10^{15}$ $m^{-2}$ değerine yükselmiştir. Salınımlı şartlarda ise $2.81 \cdot 10^{15}$ $m^{-2}$ değerine yükselmiştir. Bu durumda, aynı yüksekliğe monoton ve salınımlı şartlarda şişirilmiş malzemelerden salınımlı olan daha düşük dislokasyon yoğunluğuna sahiptir. Yırtılana kadar yapılan deneylerden elde edilen sonuç ise salınımlı şekillendirmede son dislokasyon yoğunluğu daha büyük çıkmıştır.

**Çizelge 4.5.** Malzemenin temin hali için tane boyutu, dislokasyon yoğunluğu ve kafes gerilmesi (microstrain) değerleri.

| Numune | Temin | Monoton HŞT | Salınımlı HŞT | Monoton HŞT | Salınımlı HŞT |
|---|---|---|---|---|---|
| Dislokasyon Yoğunluğu $x10^{15}$ ($m^{-2}$) | 2.07 | 3.23 | 2.81 | 4.09 | 4.91 |
| Şişme Yüksekliği (mm) | 0 | 12 (Yırtılma yok) | 12 (Yırtılma yok) | 13.39 (Yırtılmış) | 15.45 (Yırtılmış) |

Dislokasyonların durumu ile sonuçlar incelendiğinde salınım etkisi ile şekillendirilebilirlikteki artışın mikroyapı ile ilişkili olduğu sonucu ortaya çıkmıştır. Salınım sırasındaki basınç düşüşlerinde malzemede gerilme gevşemesi meydana geldiği düşünülmektedir. Her gerilme gevşemesinde dislokasyon yoğunluğu azalmakta, bu nedenle fazladan şekillendirilmesi mümkün olmaktadır. Çeşitli araştırmacılar tarafından DP780, TRIP780 ve SS316L gibi çeşitli malzemeler için de gerilme gevşemesi durumu ortaya konulmuştur (Hariharan ve ark., 2013, Varma ve ark., 2019). Şekil 4.35'de salınımlı şekillendirme sırasında zamana bağlı gerilme gelişimi üzerinden, gerilme gevşemesi açıklanmıştır. Şekilde monoton HŞT için gerçekleşen deformasyon aşamaları 1-3 ile verilmiştir. Salınımlı HŞT için ise 1-2 numaraları ve A-D harfleri ile deformasyon yolu gösterilmiştir. Monoton HŞT'de (1) noktasında elastik BŞD'ler oluşmaya başlamaktadır. Sabit basınç eğrisi uygulandıkça elastik BŞD'ler kısmen plastik BŞD'ye dönüşmektedir. Bu noktadan sonra lokalize olmuş plastik BŞD'lerin malzemede heterojen yapı oluşturduğu ve (3) noktasında yırtılma ile sonuçlandığı literatürde belirtilmiştir (Montay ve ark., 2007). Salınımlı HŞT durumunda ise (2) noktası gerilme gevşemesinin başlangıcı olup, bu noktada mikroyapıdaki dislokasyonlar yeniden düzenlenmeye başlar. (A) noktasında basınç ya da malzemenin maruz kaldığı gerilme kesintiye uğrar. Bu durumda hareketli dislokasyon yoğunluğu Orowan

mekanizmasına göre azalmaya başlar (Varma ve ark., 2017). Bu sayede dislokasyonlar daha serbest hareket edebilmeye ve gerilmeler homojen olmaya başlar (Dotsenko, 1979, Prasad ve ark., 2020). Dolayısıyla dislokasyonlar Şekil 4.35'deki gibi yeniden düzenlenip mikroyapı içinde uygun pozisyonlara yerleşirler. (C) noktasına kadar basıncın ani artırılmasıyla daha önce azalmış ve yeniden düzenlenmiş dislokasyonlar, dislokasyon kilitlenmesine uğramadan fazladan plastik deformasyona sebep olurlar. Tam da bu noktada salınım etkisi ile süneklik artmış olmaktadır. Gerilme gevşemesi durumu (D) noktasına kadar birden fazla kez tekrarlanır. Burada önemli parametreler, gevşemenin süresi ve ani basınç artışının miktarıdır. Doktora tezinde her iki parametrenin en iyi değerleri, genlik ve frekansa bağlı olarak araştırılmıştır.

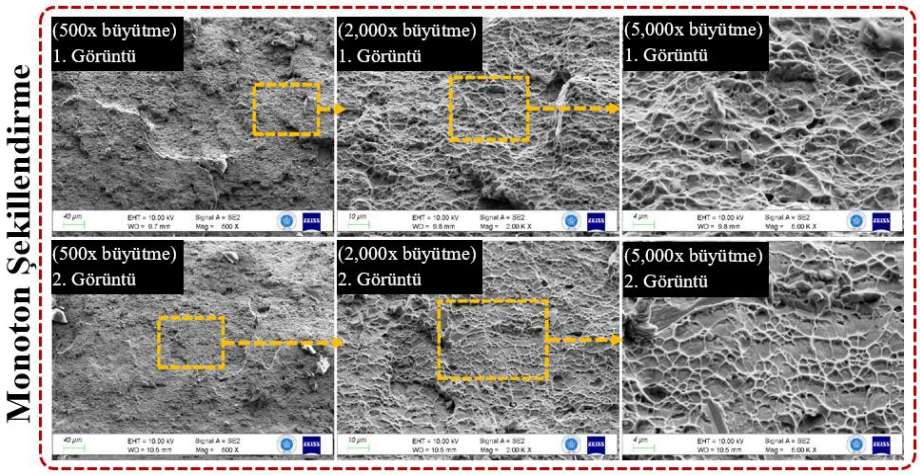



**Şekil 4.35.** Monoton ve salınımlı HŞT'lerdeki gerilme gelişiminin şematik gösterimi. 1-3 noktaları arası monoton şekillendirmeyi, 1-2 ve A-D noktaları arası ise salınımlı şekillendirmeyi göstermektedir.

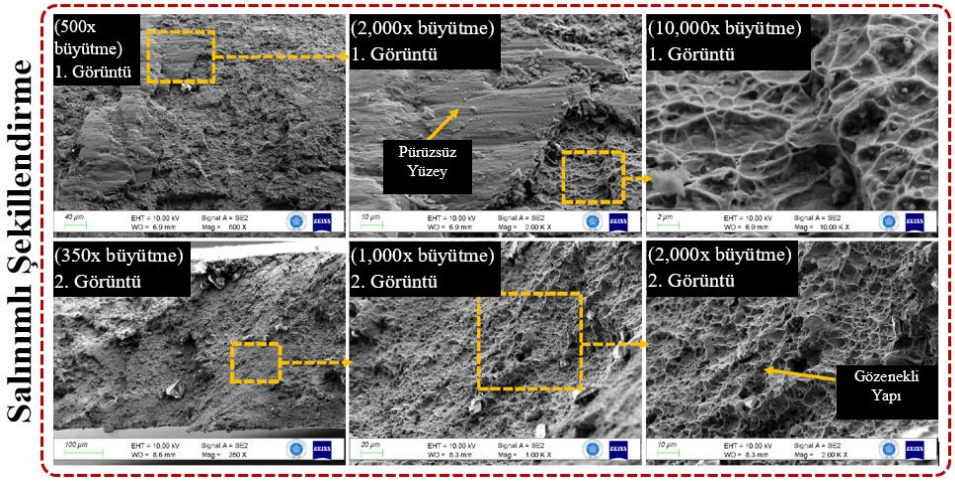
### 4.4.2. SEM ile Kırılma Yüzeylerinin İncelenmesi ve Karşılaştırılması

Kırılma mekanizmaları üzerinden salınımlı şekillendirmenin etkisi göstermek için, monoton ve salınımlı şartlarda şekillendirilmiş numunelerin kırılma yüzeylerinden SEM görüntüleri elde edilmiştir. Şekil 4.36 ve Şekil 4.37'de verilen kırılma yüzeyleri incelendiğinde, monoton şartlardaki numunenin daha çok gevrek karakterde kırılma yüzeyi gösterdiği gözlemlenmiştir. Düşük şekillendirilebilirliğe sahip Ti-6Al-4V için bu sonuç beklenmektedir. Ancak Şekil 4.37'deki salınımlı şartlardaki numunede, daha gözenekli bir yapı görülmektedir. Bu kırılma morfolojisi, salınımlı şekillendirme ile sünek kırılmaya yaklaşıldığı şeklinde yorumlanmıştır. Bu durum, salınımlı

şekillendirmenin sünekliğe olumlu etkisinin mikroyapısal ispatı açısından en dikkat çekici sonuçlardan biri olmuştur.




**Şekil 4.36.** Monoton HŞT numunesinin kırılma yüzeyi.




**Şekil 4.37.** Salınımlı HŞT numunesinin kırılma yüzeyi.

SEM görüntüleri incelendikten sonra salınımlı ve monoton şartlarda şişirilen numunelerin kırılma yüzeyleri çukur morfolojisi ve yoğunluğu açısından analiz edilmiştir. Şekil 4.39'da monoton ve salınımlı numunelerin görüntü işleme ile elde edilen çukur sayıları ve çukur çapları verilmiştir. Çizelge 4.6'da ise salınımlı ve monoton numunelerin çukur sayıları, çukur alanları ve çukur çapları verilmiştir. Bu sonuçlara göre çukur sayısı salınımlı numunede 1891 olup monotona göre % 21 daha fazladır. Buna paralel olarak ortalama çukur alanı monotona göre yaklaşık % 20 daha azdır. Ortalama çukur çapı ise monotona göre % 10 daha küçük çıkmıştır. Düşük plastik deformasyona sahip Ti-6Al-4V alaşımı çukur sayısının artması ve çukurların kapladığı alanın/çapın azalmasıyla daha az gevrek kırılma davranışı göstermiştir. Kırılma yüzeylerinin analizi EK-3'te ayrıntılarıyla verilmiştir.

# 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

## 5.1 Sonuçlar

Bu doktora tezi ile salınımlı hidroşekillendirme sayesinde oda sıcaklığında şekillendirilebilirliği düşük, pekleşmesi oldukça zayıf, hekzagonal sıkı paket kristal yapının baskın olduğu ve titanyum alaşımları arasında en çok tercih edilen Ti-6Al-4V alaşımının oda sıcaklığında şekillendirilebilirliği belirgin olarak artırılmıştır. Bu sonuca göre sıcak şekillendirme veya elektrik destekli şekillendirme gibi karmaşık ve nispeten yüksek maliyetli yöntemler yerine oda sıcaklığında hidroşekillendirme prosesinde sadece yükleme yöntemini değiştirerek şekillendirme sınırının artırılabildiği gösterilmiştir. Şekillendirme sınırındaki artış, salınımlı şişirme testlerinde ulaşılan maksimum incelme ve şişme yüksekliği açısından gösterilmiştir. Ayrıca şekillendirilebilirlikteki artışın nedenleri mikroyapı düzeyinde bu malzemede ilk kez detaylıca incelenmiş ve gerilme gevşemesi mekanizması ile ilişkilendirilmiştir.

Bu çalışmada üç farklı hipotez ileri sürülmüş ve doğrulanmıştır. Birinci hipotezde salınımlı hidrolik şişirme testi (HŞT) uygulanarak monoton HŞT'ye göre daha yüksek şişme yüksekliği elde edilebileceği öne sürülmüştür. Gerçekleştirilen deneyler ile salınımlı şartlarda daha yüksek şişme yüksekliklerinin elde edildiği kanıtlanmıştır. İkinci hipotez olarak kalınlık doğrultusundaki maksimum incelmenin salınımlı yükleme altında daha fazla olacağı öne sürülmüştür. Gerçekleştirilen deneylerde salınımlı durumda malzemenin hasara çok daha fazla incelme değerlerine ulaştıktan sonra uğradığı kanıtlanmıştır. Son hipotez ise şekillendirilebilirlikteki artışın mikroyapısal nedenler ile ilişkilendirilebileceğidir. Yapılan malzeme karakterizasyonu sonucunda, dislokasyon yoğunluğu ve kırılma yüzeyleri açısından salınımlı yüklemenin oluşturduğu gerilme gevşemesi ile süneklik artışı sağladığı kanıtlanmıştır. Dolayısıyla tüm hipotezler doğrulanarak şekillendirilebilirliği yüksek olan malzemelerde var olan salınım ile süneklik artışı etkisinin, şekillendirilebilirliği düşük ve pekleşmeyen Ti 6Al 4V alaşımında da geçerli olduğu gösterilmiştir. Çalışmada elde edilen bulgular aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

- Salınımlı basınç uygulanan HŞT ile Monoton HŞT'ye göre maksimum şişme yüksekliği % 15.4 ve yırtılma basıncı % 17 artmıştır.
- Salınımlı yükleme uygulandığında kırılma hasarının meydana geldiği kalınlık incelmesi % 9'dan % 18'e yükselmiştir.

- Monoton ve salınımlı durumlar mekanik davranış açısından karşılaştırıldığında, BŞD'nin yaklaşık % 47 oranında artması nedeniyle etkin sünekliğin arttığı sonucuna varılmıştır. Bu sonuçlara salınımlı HŞ ile titanyum alaşımının oda sıcaklığında şekillendirilebilirliğinin dikkate değer düzeyde arttığını göstermiştir. Ayrıca bu artışın sürtünmeden bağımsız olduğu ilk kez bu çalışmada kullanılan salınımlı HŞT'ler ile gösterilmiştir.
- Salınımlı testte birden fazla kez gerçekleşen gerilme gevşemesi sayesinde BŞD dağılımında plastik deformasyonun merkezde yoğunlaşması yerine, numunenin gerdirme eksenleri boyunca dağılım gösterdiği ve kırılma anındaki BŞD'nin artışına sebep olduğu şeklinde yorumlanmıştır.
- Ti-6Al-4V levhanın şekillendirilebilirliğindeki iyileşmenin, gerilme gevşemesi sonrası dislokasyonların yok olması ile ilişkili olduğu bulunmuştur. Bu durumda, dislokasyonların kilitlenmesi gecikmekte, dolayısıyla daha fazla plastik deformasyon mümkün olmaktadır.
- Varyans analizi yapıldığında salınımlı HŞT sonuçlarının etki düzeyi genlik, frekans ve başlangıç basıncı için sırasıyla % 63.1, % 15.6 ve % 18.3 olduğu bulunmuştur. Aynı sırayla P değerleri de 0.045, 0.160 ve 0.139 olduğu için salınım genliğinin, şekillendirilebilirliğin artmasına katkıda bulunan en baskın faktör olduğu bulunmuştur. Frekans ve başlangıç basınç parametrelerinin sonuçlar üzerinde etkili olmadığı belirlenmiştir. Bu sonuç, salınımlı yüklemede gerilme gevşemesi için yalnızca gerilme genliğinin etkili olduğunu göstermektedir.
- Salınımlı şekillendirmede daha yüksek mikrosertlik dağılımı oluşması monoton yüklemeye göre daha büyük plastik BŞD'nin elde edilmesi sonucunu da desteklemektedir.

Bu doktora tezinde elde edilen bulgular, oda sıcaklığında Ti-6Al-4V malzemesinin şekillendirilebilirliğinin salınımlı HŞ ile artırılabileceğini ve bu artışın sürtünmeden bağımsız olarak malzeme mikroyapısındaki yeniden düzenlenen dislokasyonlar ile ilişkili olduğunu göstermiştir. İlgili malzemeler için literatürde kullanılan ve maliyeti yüksek olan sıcak şekillendirme veya süperplastik şekillendirme yerine oda sıcaklığında ve kontrol edilmesi daha kolay olan HŞ prosesinin kullanılabileceği bulunmuştur.

## 5.2 Öneriler

Salınımlı HŞ yöntemi ile şekillendirilebilirliği düşük malzemelerin süneklik davranışı iyileştirilebilmektedir. Ancak henüz salınımlı yükleme için çalışma konusu olmamış proses ve malzemeler için bir çok potansiyel çalışma önerilmektedir. Aşağıda bu öneriler sıralanmıştır.

- DIC kameralarla şişme sırasında BŞD ve eğrisellik yarıçapının değişimi kaydedilerek hesaplamaya göre daha doğru sonuçlar bulunabilir.
- Şişirme sonucu elde edilen numuneler, optik veya lazer tarama yöntemleriyle sırasıyla önce nokta bulutu daha sonra katı model haline getirilebilir. Bu sayede sadece yükseklik açısından değil, kubbenin formu üzerinden salınımlı ve monoton yükleme kıyaslanabilir.
- Çeşitli sezgisel optimizasyon yöntemleri kullanılarak salınımlı HŞ prosesi daha geniş aralıkta optimize edilebilir.
- Salınımlı HŞ prosesinin sayısal modellenmesiyle analizlerin adaptif olarak kontrol edilerek BŞD'nin gelişimine göre parametrelerin kendiliğinden değişmesi sağlanabilir. Bunun için salınım ile malzemedeki mekanik özellik değişimini en iyi temsil eden malzeme modeli araştırılabilir.
- Hidromekanik derin çekmede, basınç, baskı plakası ve ıstampa ilerlemesi olmak üzere üç farklı proses bileşenine aynı anda salınım uygulanabilir.

**KAYNAKLAR**

Alaswad, A., Benyounis, K. Y. ve Olabi, A. G., 2012, Tube hydroforming process: A reference guide, *Materials & Design*, 33, 328-39.

Ali, S., Karunanithi, R., Prashanth, M. ve Rahman, M. A., 2020, X-ray peak broadening on microstructure, and structural properties of titanium and Ti-6Al-4V alloys, *Materials Today: Proceedings*, 27, 2390-3.

An, H., 2010, Multi-Objective Optimization of Tube Hydroforming Using Hybrid Global and Local Search, Doktora Tezi, *University of Windsor*.

Anil Kumar, V., Gupta, R. K., Prasad, M. J. N. V. ve Narayana Murty, S. V. S., 2021, Recent advances in processing of titanium alloys and titanium aluminides for space applications: A review, *Journal of Materials Research*, 36, 3, 689-716.

Anonim, 2022, Operating Instructions optoNCDT 1700 optoNCDT 1710, https://www.micro-epsilon.com/download/man_archiv/man--optoNCDT-1700--en.pdf, [Ziyaret Tarihi: 01.01.2022].

Ashrafi, A. ve Khalili, K., 2015, Investigation on the effects of process parameters in pulsating hydroforming using Taguchi method, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 230, 7, 1203-12.

Badr, O. M., Rolfe, B., Hodgson, P. ve Weiss, M., 2015, Forming of high strength titanium sheet at room temperature, *Materials & Design*, 66, 618-26.

Bell, C., Corney, J., Zuelli, N. ve Savings, D., 2019, A state of the art review of hydroforming technology, *International Journal of Material Forming*, 13, 5, 789-828.

Brundle, W. R. ve Evans, C., 1992, Encyclopedia of materials characterization: surfaces, interfaces, thin films, Butterworth-Heinemann, p. 198-213.

Chao, Q., Hodgson, P. D. ve Beladi, H., 2017, Thermal stability of an ultrafine grained Ti-6Al-4V alloy during post-deformation annealing, *Materials Science and Engineering: A*, 694, 13-23.

da Rocha, S. S., Adabo, G. L., Henriques, G. E. ve Nobilo, M. A., 2006, Vickers hardness of cast commercially pure titanium and Ti-6Al-4V alloy submitted to heat treatments, *Braz Dent J*, 17, 2, 126-9.

Despax, L., Vidal, V., Delagnes, D., Dehmas, M., Matsumoto, H. ve Velay, V., 2020, Influence of strain rate and temperature on the deformation mechanisms of a fine-grained Ti-6Al-4V alloy, *Materials Science and Engineering: A*, 790.

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.

Djavanroodi, F. ve Janbakhsh, M., 2013, Formability Characterization of Titanium Alloy Sheets. In: Titanium Alloys - Advances in Properties Control, Eds, p.

Dotsenko, V. I., 1979, Stress Relaxation in Crystals, *Physica status solidi*, 93(1), 11-43.

Eipert, I., Sivaswamy, G., Bhattacharya, R., Amir, M. ve Blackwell, P., 2014, Improvement in Ductility in Commercially Pure Titanium Alloys by Stress Relaxation at Room Temperature, *Key Engineering Materials*, 611-612, 92-8.

Froes, F. H., 2011, Titanium alloys: properties and applications. In: Encyclopedia of materials: science and technology, Eds, p. 9367-9.

Gao, S., He, T., Li, Q., Sun, Y., Sang, Y., Wu, Y. ve Ying, L., 2022, Anisotropic behavior and mechanical properties of Ti-6Al-4V alloy in high temperature deformation, *Journal of Materials Science*, 57, 1, 651-70.

Goodwin, G. M., 1968, Application of Strain Analysis to Sheet Metal Forming Problems in the Press Shop, SAE Transactions, 380-7.

Guo, M.-L., Liu, J., Tan, M.-J. ve Chua, B.-W., 2014, Microstructure Evolution of Ti-6Al-4V during Superplastic-like Forming, *Procedia Engineering*, 81, 1090-5.

Gülçimen, B., 2013, P91 Çeliğinin Sürünme Ve Kırılma Özelliklerinin Small Punch Testiyle Belirlenmesi, Doktora Tezi, *Uludağ Üniversitesi*.

Hallfeldt, T., Hotz, W., Leppin, C., Keller, S., Friebe, H., Till, E. T., Müller, R., Vučetić, M. ve Vegter, H., 2014, Sheet Bulge Testing. In: Comprehensive Materials Processing, Eds, p. 85-93.

Hama, T., Asakawa, M. ve Fukiharu, H., 2004, Simulation of Hammering Hydroforming by Static Explicit FEM, 44, 123-8.

Hariharan, K., Dubey, P. ve Jain, J., 2016, Time dependent ductility improvement of stainless steel SS 316 using stress relaxation, *Materials Science and Engineering: A*, 673, 250-6.

Hariharan, K., Majidi, O., Kim, C. M., Lee, M. G. ve Barlat, F., 2013, Stress Relaxation for Formability Improvement, *Key Engineering Materials*, 554-557, 145-50.

Hekimoglu, S., Erenoglu, R. C. ve Kalina, J., 2009, Outlier detection by means of robust regression estimators for use in engineering science, *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, 10, 6, 909-21.

Hoar, E., Sahoo, S., Mahdavi, M., Liang, S., Roy, S. ve Garmestani, H., 2021, Statistical modeling of microstructure evolution in a Ti-6Al-4V alloy during isothermal compression, *Acta Materialia*, 210.

Hu, G. ve Pan, C., 2020, Investigation on deformation behavior of magnesium alloy sheet AZ31B in pulsating hydroforming, *Proceedings of the Institution of*

*Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 235, 1-2, 198-206.

Keeler, S. P., 1961, Plastic Instability and Fracture in Sheets Stretched Over Rigid Punches, Doktora Tezi, *Massachusetts Institute of Technology*.

Kotan, H. ve Darling, K. A., 2015, Isothermal Annealing of a Thermally Stabilized Fe-Based Ferritic Alloy, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 24, 9, 3271-6.

Kotan, H. ve Darling, K. A., 2018, A study of microstructural evolution of Fe-18Cr-8Ni, Fe-17Cr-12Ni, and Fe-20Cr-25Ni stainless steels after mechanical alloying and annealing, *Materials Characterization*, 138, 186-94.

Langford, J. I. ve Wilson, A. J. C., 1978, <Seherrer after Sixty Years: A Survey and Some New Results in the Determination of Crystallite Size, *Journal of applied crystallography*, 11(2), 102-13.

Lăzărescu, L., Comşa, D. S. ve Banabic, D., 2011a, Validation of A New Methodology for Determination of Stress-Strain Curves Through Bulge Test, *ACTA TECHNICA NAPOCENSIS-Series: APPLIED MATHEMATICS, MECHANICS, and ENGINEERING*, 54(2), 299-306.

Lăzărescu, L., Comşa, D. S. ve Banabic, D., 2011b, Determination of Stress-Strain Curves of Sheet Metals by Hydraulic Bulge Test: 1429-34.

Lemoine, X., Iancu, A. ve Ferron, G., 2011, Flow Curve Determination at Large Plastic Strain Levels: Limitations of the Membrane Theory in the Analysis of the Hydraulic Bulge Test: 1411-6.

Loh-Mousavi, M., Bakhshi-Jooybari, M., Mori, K. I. ve Hyashi, K., 2008, Improvement of formability in T-shape hydroforming of tubes by pulsating pressure, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 222, 9, 1139-46.

Loh-Mousavi, M., Mori, K., Hayashi, K., Maki, S. ve Bakhshi, M., 2007, 3-D Finite Element Simulation of Pulsating T-Shape Hydroforming of Tubes, *Key Engineering Materials*, 340-341, 353-8.

Luo, J., Xiong, W., Li, X. ve Chen, J., 2019, Investigation on high-temperature stress relaxation behavior of Ti-6Al-4V sheet, *Materials Science and Engineering: A*, 743, 755-63.

Ma, J., Yang, L., Liu, J., Chen, Z. ve He, Y., 2021, Evaluating the quality of assembled camshafts under pulsating hydroforming, *Journal of Manufacturing Processes*, 61, 69-82.

Mahabunphachai, S. ve Koç, M., 2008, Investigation of size effects on material behavior of thin sheet metals using hydraulic bulge testing at micro/meso-scales, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48, 9, 1014-29.

Martins, B., Santos, A. D. ve Teixeira, P., 2013, A study on the influence of different variables for determination of flow stress using hydraulic bulge test, *International Journal of Materials Engineering Innovation*, 4(2), 132-48.

Mohebbi, M. S., Akbarzadeh, A., Yoon, Y.-O. ve Kim, S.-K., 2015, Stress relaxation and flow behavior of ultrafine grained AA 1050, *Mechanics of Materials*, 89, 23-34.

Montay, G., François, M., Tourneix, M., Guelorget, B., Vial-Edwards, C. ve Lira, I., 2007, Strain and strain rate measurement during the bulge test by electronic speckle pattern interferometry, *Journal of Materials Processing Technology*, 184, 1-3, 428-35.

Mori, K., Maeno, T. ve Maki, S., 2007, Mechanism of improvement of formability in pulsating hydroforming of tubes, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47, 6, 978-84.

Mori, K., Patwari, A. U. ve Maki, S., 2003, Finite element simulation of hammering hydroforming of tubes, *Computational Fluid and Solid Mechanics*, 498-501.

Mori, K., Patwari, A. U. ve Maki, S., 2004, Improvement of Formability by Oscillation of Internal Pressure in Pulsating Hydroforming of Tube, *CIRP Annals*, 53, 1, 215-8.

Mouritz, A. P., 2012, Introduction to aerospace materials. In: Introduction to Aerospace Materials, Eds, p. 1-14.

Odenberger, E. L., Hertzman, J., Thilderkvist, P., Merklein, M., Kuppert, A., Stöhr, T., Lechler, J. ve Oldenburg, M., 2012a, Thermo-mechanical sheet metal forming of aero engine components in Ti-6Al-4V – PART 1: Material characterisation, *International Journal of Material Forming*, 6, 3, 391-402.

Odenberger, E. L., Schill, M. ve Oldenburg, M., 2012b, Thermo-mechanical sheet metal forming of aero engine components in Ti-6Al-4V—PART 2: Constitutive modelling and validation, *International Journal of Material Forming*, 6, 3, 403-16.

Paul, S. K., 2016, Prediction of complete forming limit diagram from tensile properties of various steel sheets by a nonlinear regression based approach, *Journal of Manufacturing Processes*, 23, 192-200.

Prasad, K., Krishnaswamy, H. ve Arunachalam, N., 2020, Investigations on ductility improvement and reloading yielding during stress relaxation of dual phase Ti–6Al–4V titanium alloy, *Journal of Alloys and Compounds*, 828.

Shi, C., Wang, A. ve Li, J., 2022, Study on pulsating hydroforming of equal wall thickness spiral tube for shale gas exploitation, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 120, 5-6, 4217-31.

Slota, J., Jurčišin, M., Spišák, E. ve Šiser, M., 2015, Experimental Flc Determination of High Strength Steel Sheet Metal, *Acta Metallurgica Slovaca*, 21, 4.

Sun, P., Fang, Z. Z., Koopman, M., Paramore, J., Chandran, K. S. R., Ren, Y. ve Lu, J., 2015, An experimental study of the (Ti–6Al–4V)–xH phase diagram using in situ synchrotron XRD and TGA/DSC techniques, *Acta Materialia*, 84, 29-41.

Suzuki, M., Eto, M., Nishiyama, Y., Fukaya, K., Saito, M. ve Misawa, T., 1992, Small specimen test techniques for the evaluation of toughness degradation, *Journal of Nuclear Materials* 191-194, 1023-7.

Şükür, E. F., Türköz, M., Dilmeç, M., Halkacı, H. S. ve Halkacı, M., 2016, Comparison of Flow Curves of AA 5457-O Sheet Material Determined by Hydraulic Bulge and Tensile Tests at Warm Forming Temperatures, *Journal of Testing and Evaluation*, 44, 2.

Tang, Z., Chen, J., Dang, K., Liu, G. ve Tao, K., 2020, Experimental investigation into the electropulsing assisted pulsating gas forming of CP-Ti tubes, *Journal of Materials Processing Technology*, 278.

Tolazzi, M., 2010, Hydroforming Applications In Automotive: A Review, *International Journal of Material Forming*, 3, 307-10.

Türköz, M., Cora, Ö. N., Gedikli, H., Dilmeç, M., Halkacı, H. S. ve Koç, M., 2020, Numerical optimization of warm hydromechanical deep drawing process parameters and its experimental verification, *Journal of Manufacturing Processes*, 57, 344-53.

Ungár, T., 2001, Dislocation densities, arrangements and character from X-ray diffraction experiments, *Materials Science and Engineering A*, 309-310, 14-22.

Urmamen, M. K., 2021, Hidro-Mekanik Derin Çekme Presinin Çift Taraflı Hidro-Şekillendirme Yapacak Şekilde Modifikasyonu Ve Performansının Deneysel Analizi, Yüksek Lisans Tezi, *Konya Teknik Üniversitesi*.

Varma, A., Gokhale, A., Jain, J., Hariharan, K., Cizek, P. ve Barnett, M., 2017, Investigation of stress relaxation mechanisms for ductility improvement in SS316L, *Philosophical Magazine*, 98, 3, 165-81.

Varma, A., Krishnaswamy, H., Jain, J., Lee, M.-G. ve Barlat, F., 2019, Advanced constitutive model for repeated stress relaxation accounting for transient mobile dislocation density and internal stress, *Mechanics of Materials*, 133, 138-53.

Venkatesh, T. A., Conner, B. P., Lee, C. S., Giannakopoulos, A. E., Lindley, T. C. ve Suresh, S., 2001, An Experimental Investigation of Fretting Fatigue in Ti-6Al-4V: the Role of Contact Conditions and Microstructure, *Metallurgical and Materials transactions A*, 32(5), 1131-46.

Verleysen, P. ve Peirs, J., 2017, Quasi-static and high strain rate fracture behaviour of Ti6Al4V, *International Journal of Impact Engineering*, 108, 370-88.

Wang, C., Caja, J. ve Gómez, E., 2018, Comparison of methods for outlier identification in surface characterization, *Measurement*, 117, 312-25.

Wang, G., Zhang, K. F., Han, W. B., Wu, D. Z. ve Wang, C. W., 2007, Superplastic Bulging Capability of Ti-6Al-4V Butt-Welded Plate by High Energy Beam Welding, *Materials Science Forum*, 551-552, 411-6.

Xu, Y., Zhang, S., Cheng, M., Song, H. ve Zhang, X., 2014, Application of Pulsating Hydroforming in Manufacture of Engine Cradle of Austenitic Stainless Steel, *Procedia Engineering*, 81, 2205-10.

Xu, Y., Zhang, S. H., Zhu, Q. X., Cheng, M., Song, H. W. ve Zhang, G. J., 2013, Effect of Process Parameters on Hydroforming of Stainless Steel Tubular Components with Rectangular Section, *Materials Science Forum*, 749, 67-74.

Yamashita, H., Ueno, H., Nakai, H. ve Higaki, T., 2015, Technology to Enhance Deep-drawability by Strain Dispersion Using Stress Relaxation Phenomenon, *SAE World Congress & Exhibition*, No. 2015-01-0531.

Yang, J., Wu, J., Zhang, Q., Han, R. ve Wang, K., 2020, Investigation of flow behavior and microstructure of Ti–6Al–4V with annealing treatment during superplastic forming, *Materials Science and Engineering: A*, 797.

Yang, L., Tang, D. ve He, Y., 2017, Describing tube formability during pulsating hydroforming using forming limit diagrams, *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 52, 4, 249-57.

Yang, L., Wu, C. ve He, Y., 2015, Dynamic frictional characteristics for the pulsating hydroforming of tubes, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 86, 1-4, 347-57.

Yang, L. F. ve Chen, F. J., 2009, Investigation on the Formability of a Tube in Pulsating Hydroforming, *Materials Science Forum*, 628-629, 617-22.

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.

Yu, H., Yan, M., Li, J., Godbole, A., Lu, C., Tieu, K., Li, H. ve Kong, C., 2018, Mechanical properties and microstructure of a Ti-6Al-4V alloy subjected to cold rolling, asymmetric rolling and asymmetric cryorolling, *Materials Science and Engineering: A*, 710, 10-6.

Zhang, S., Yuan, A., Wang, B., Zhang, H. ve Wang, Z., 2009, Influence of loading path on formability of 304 stainless steel tubes, *Science in China Series E: Technological Sciences*, 52, 8, 2263-8.

Zhang, S. H., 1999, Developments in hydroforming, *Journal of Materials Processing Technology*, 91, 236-44.

Zhang, S. H. ve Danckert, J., 1998, Development of hydro-mechanical deep drawing, *Journal of Materials Processing Technology*, 83(1-3), 14-25.

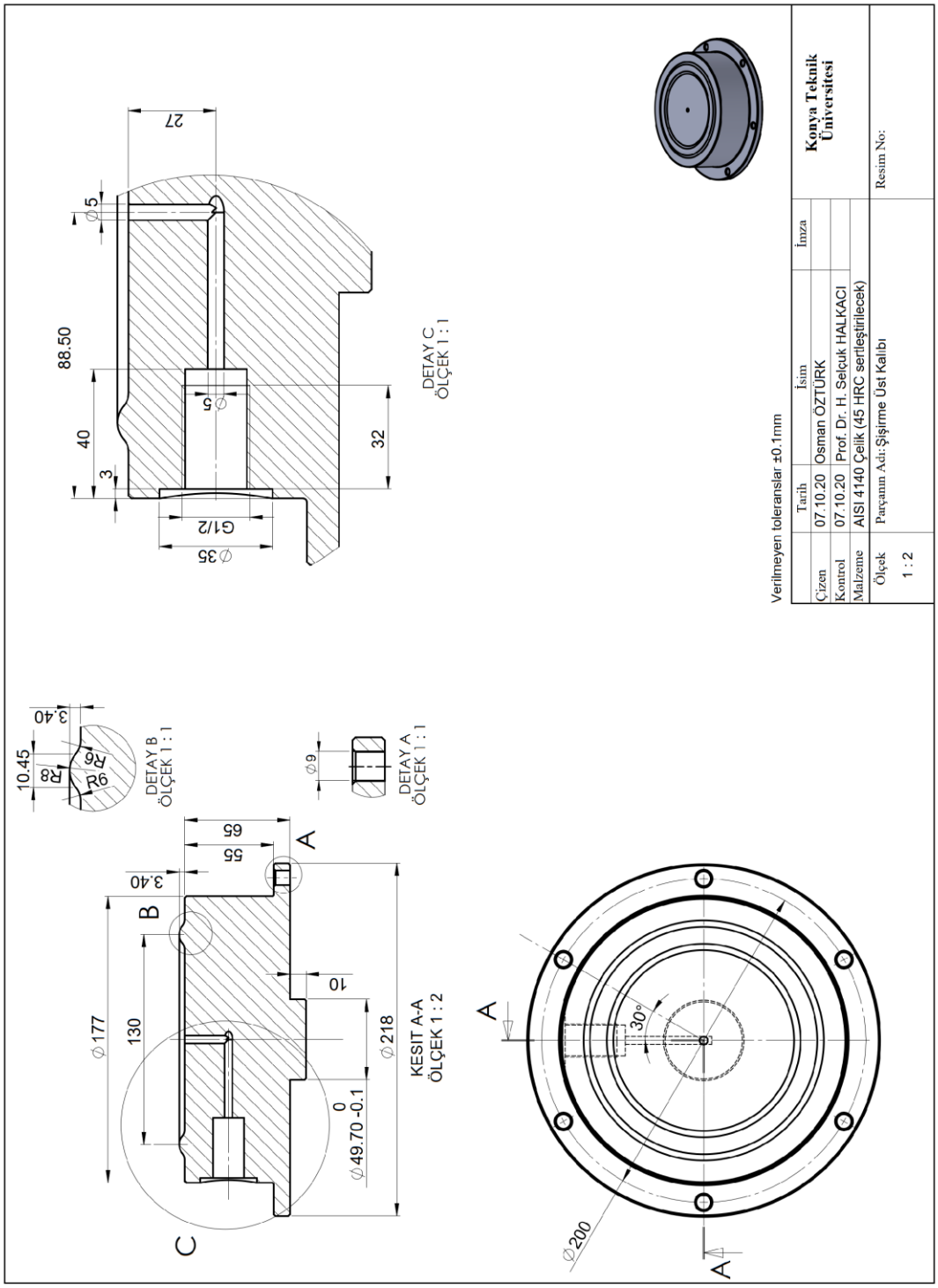
Zhang, S. H., Wang, Z. R., Xu, Y., Wang, Z. T. ve Zhou, L. X., 2004, Recent developments in sheet hydroforming technology, *Journal of Materials Processing Technology*, 151, 1-3, 237-41.

Zhang, W., Ding, H., Cai, M., Yang, W. ve Li, J., 2018, Ultra-grain refinement and enhanced low-temperature superplasticity in a friction stir-processed Ti-6Al-4V alloy, *Materials Science and Engineering: A*, 727, 90-6.

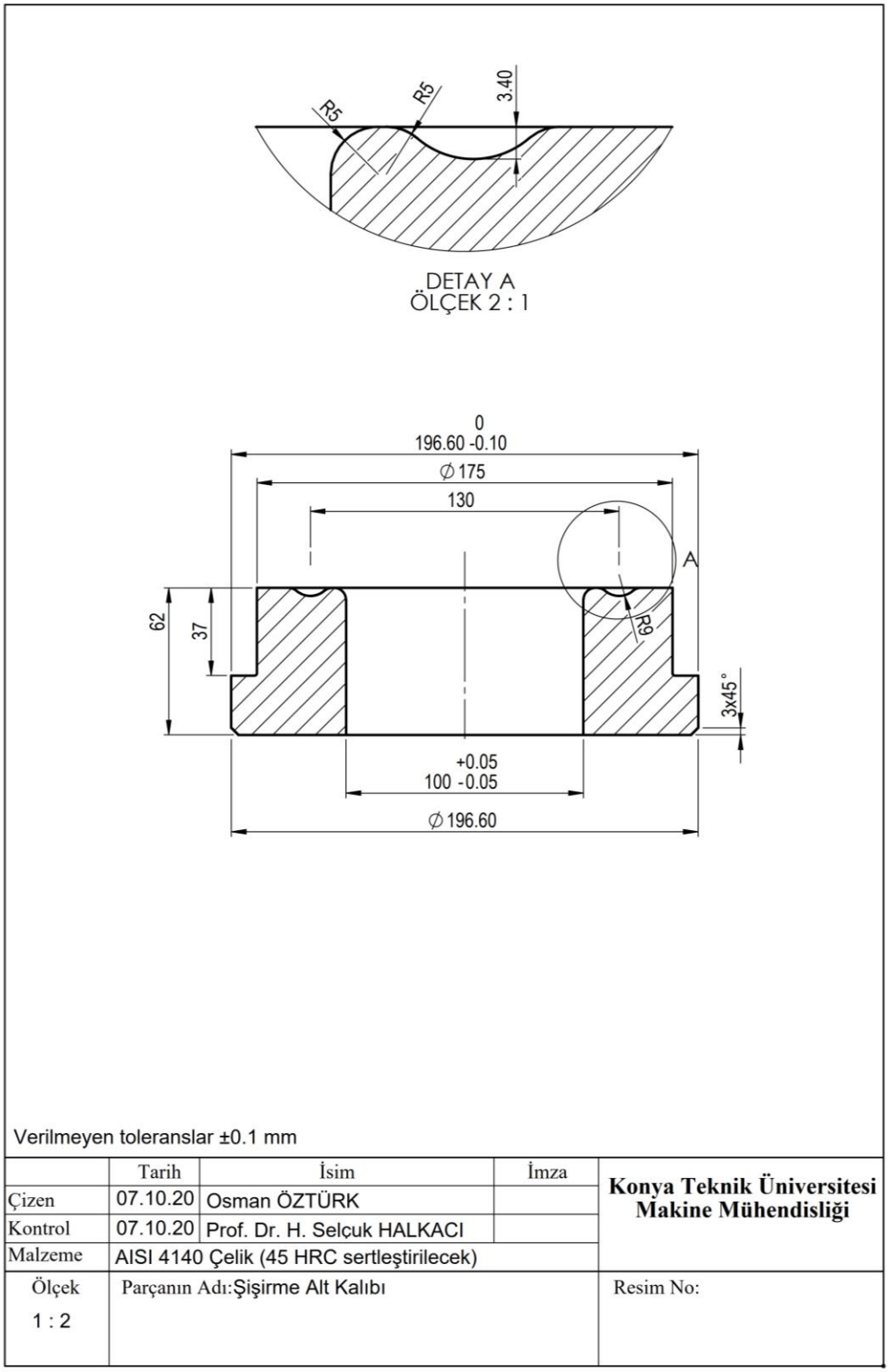
# EKLER

## EK-1 Şişirme Kalıbının İmalat Resimleri

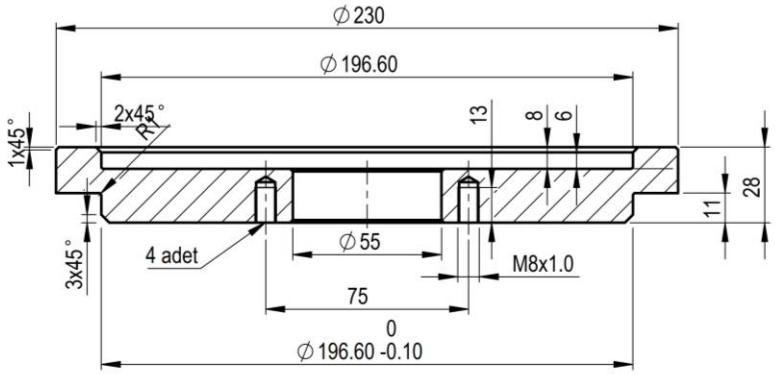
### 1. Şişirme Üst Kalıbı İmalat Resmi



## 2. Şişirme Alt Kalıbı İmalat Resmi



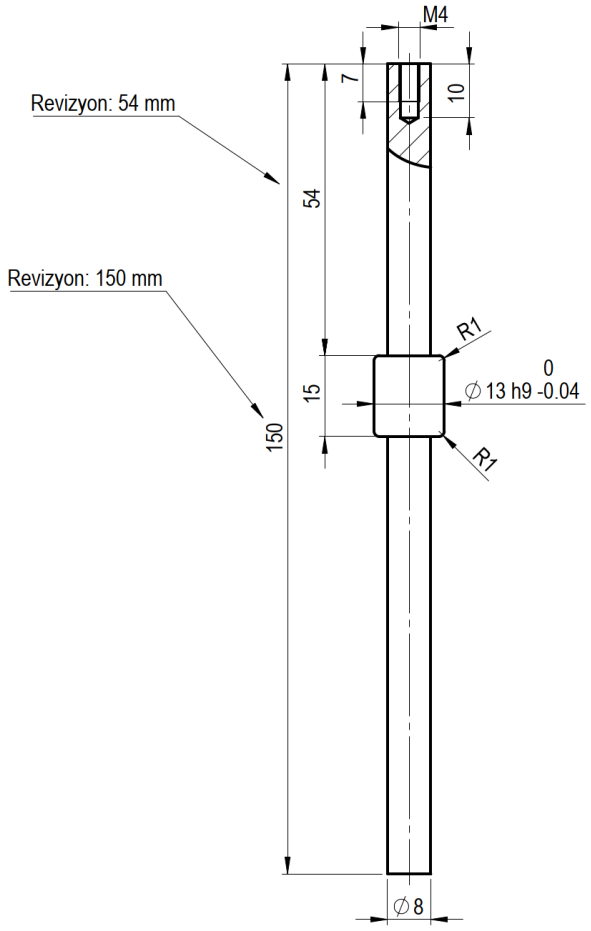
## 3. Ara Bağlantı İmalat Resmi




Malzeme: 4140 Çeliği (45 HRC)

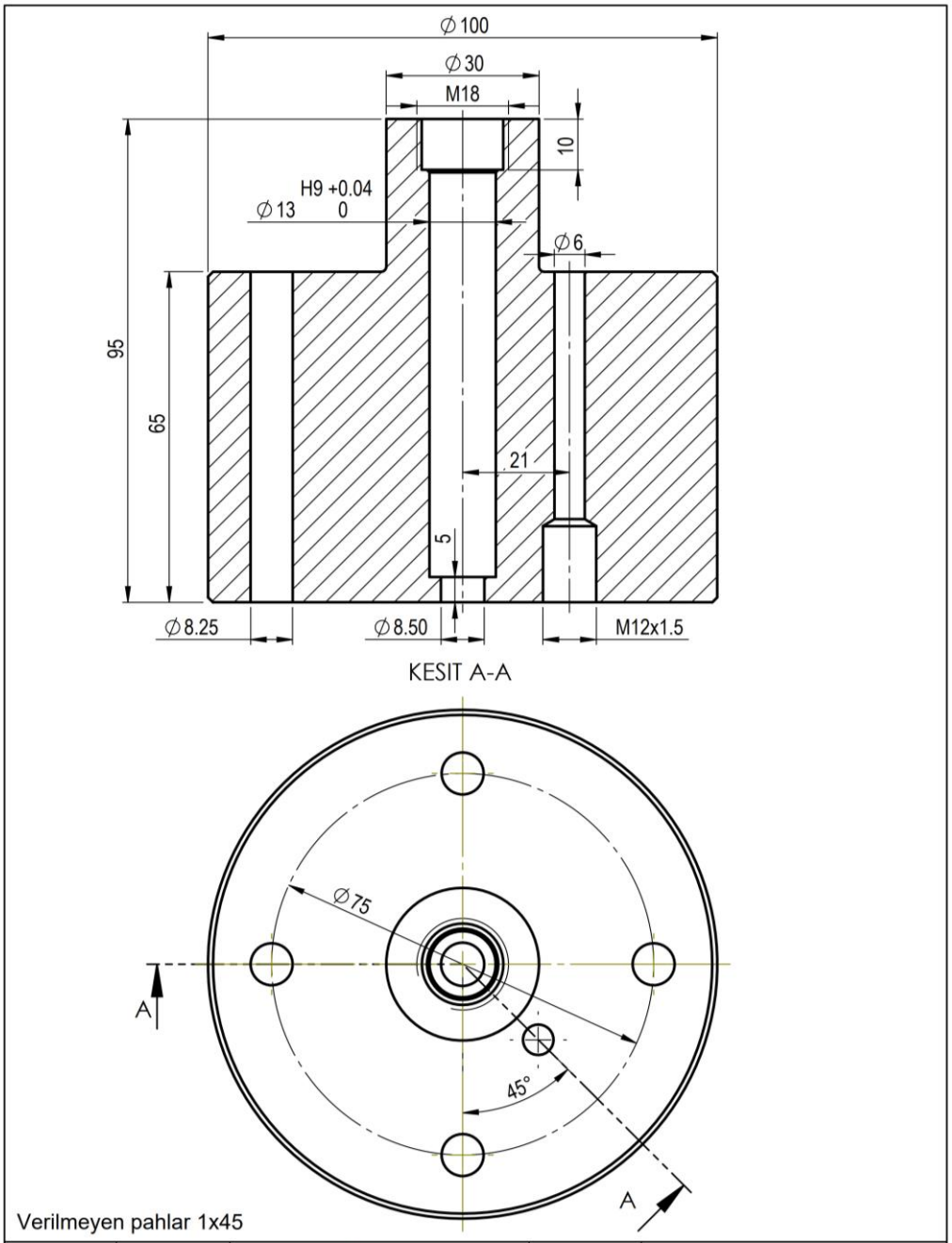
| | Tarih | İsim | İmza | Konya Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği |
|---|---|---|---|---|
| Çizen | 07.10.20 | Osman ÖZTÜRK | | |
| Kontrol | 07.10.20 | Prof. Dr. H. Selcuk HALKACI | | |
| Stand. Kont. | | | | |
| Ölçek | Parçanın Adı: Ara bağlantı | | | Resim No: |

## 4. Hareketli Mil İmalat Resmi



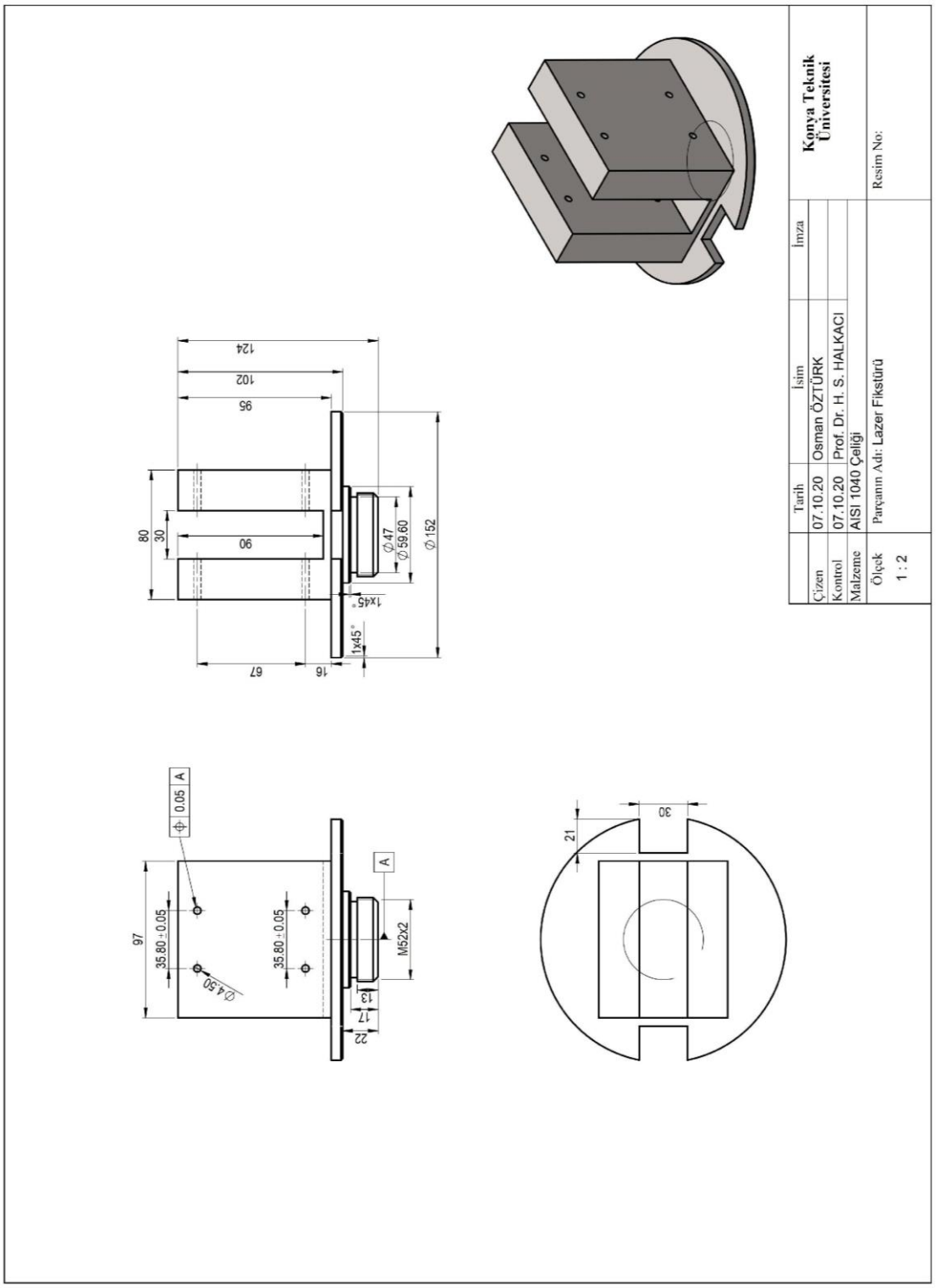

| | Tarih | İsim | İmza | Konya Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği |
|---|---|---|---|---|
| Çizen | 10.10.20 | Osman ÖZTÜRK | | |
| Kontrol | 10.10.20 | Prof. Dr. H. Selçuk HALKACI | | |
| Malzeme | AISI 1040 Çeliği | | | |
| Ölçek 1:1 | Parçanın Adı: Eksenel hareketli mil | | | Resim No: |

## 5. Mil Kılavuzu İmalat Resmi

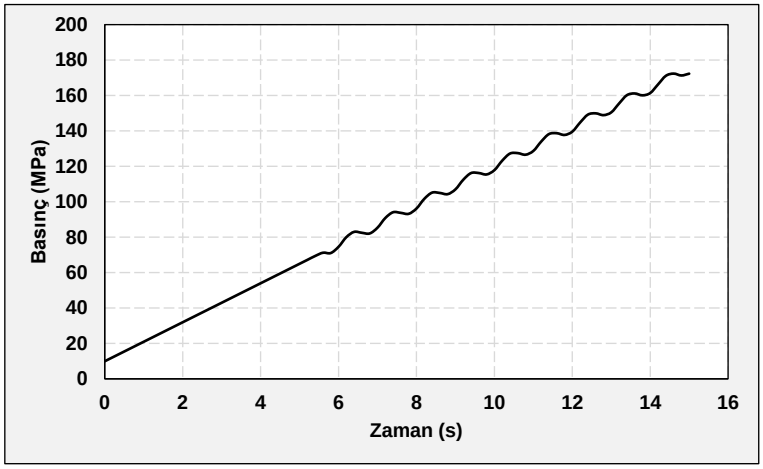



| | Tarih | İsim | İmza | |
|---|---|---|---|---|
| Çizen | 07.10.20 | Osman ÖZTÜRK | | **Konya Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği** |
| Kontrol | 07.10.20 | Prof. Dr. H. Selçuk HALKACI | | |
| Malzeme | AISI 1040 Çeliği | | | |
| Ölçek 1 : 1 | Parçanın Adı: Mil Kılavuzu | | | Resim No: |

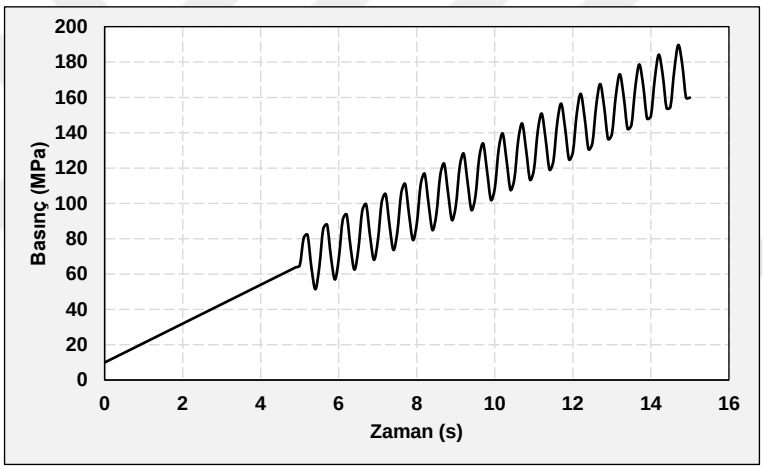
## 6. Lazer Fikstürü İmalat Resmi



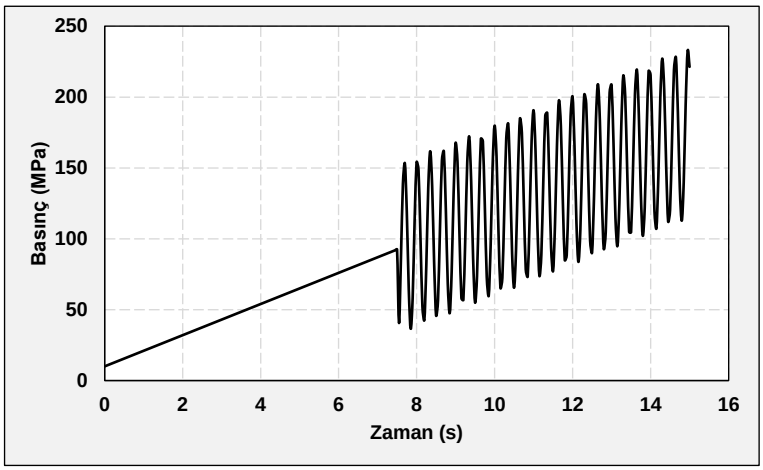
## EK-2 Giriş Salınımlı Basınç Profili




**Şekil Ek-2.1.** Düşük Genlikli Basınç Profili.




**Şekil Ek-2.2.** Orta Genlikli Basınç Profili.




**Şekil Ek-2.3.** Yüksek Genlikli Basınç Profili.