



**V BÜKME İŞLEMİNDE SICAKLIĞIN GERİ ESNEME DAVRANIŞINA  
ETKİSİNİN DENEYSEL ARAŞTIRILMASI**

**Tahsin ÖNEL**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HAZİRAN 2017**

Tahsin ÖNEL tarafından hazırlanan “V BÜKME İŞLEMİNDE SICAKLIĞIN GERİ ESNEME DAVRANIŞINA ETKİSİNİN DENEYSEL ARAŞTIRILMASI” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

**Danışman:** Yrd. Doç. Dr. İbrahim KARAAĞAÇ  
İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum. ....

**Başkan :** Doç. Dr. Onuralp ULUER  
İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum. ....

**Üye :** Doç. Dr. Mustafa GÜNAY  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Karabük Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum. ....

TezSavunma Tarihi: 12/06/2017

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....  
Prof. Dr. Hadi GÖKÇEN  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Tahsin ÖNEL

12 / 06 / 2017

# V BÜKME İŞLEMİNDE SICAKLIĞIN GERİ ESNEME DAVRANIŞINA ETKİSİNİN DENEYSEL ARAŞTIRILMASI

(Yüksek Lisans Tezi)

Tahsin ÖNEL

GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2017

## ÖZET

Bu çalışmada, DP600 ve Titanyum Grade 1 sac malzemelerin V bükümü sonrası oluşan ve bir şekillendirme kusuru olarak kabul edilen geri esneme davranışına, sıcaklık ve işlem parametrelerinin etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Deneysel çalışmalar; şekillendirme kuvveti, şekillendirme sıcaklığı, ütüleme süresi ve şekillendirme hızının elektronik olarak hassas kontrol edilebildiği deney düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Deney parametreleri olarak, şekillendirme sıcaklığı (Oda sıcaklığı (RT), 100, 200, 300, 400 ve 500°C), kalıp açısı (15, 30, 45, 60 ve 75°), ütüleme süresi (0, 10 ve 20 s), zımba uç kavisi (0, 2 ve 4 mm) belirlenmiştir. Deneysel çalışmalarda şekillendirme hızı 10 mm/s olarak sabit alınmıştır. Isıtma işlemi; oransal-integral-türevsel denetleyici (PID) kontrollü ısıtma panosunun kontrol ettiği çubuk ısıtıcı rezistans kullanılarak gerçekleştirilmiştir. V bükülen parçalarda geri esneme açıları bilgisayar kontrollü koordinat ölçme cihazı (CMM) kullanılarak ölçülmüştür. DP600 sac malzemede; kalıp açısındaki 15 derecelik artışın geri esneme açısını ortalama 0,63 derece, zımba uç kavisindeki 2 mm'lik artışın da geri esneme açısını ortalama 0,14 derece arttırdığı tespit edilmiştir. Ayrıca, DP600 sac malzemede ütüleme süresindeki 10 saniyelik artışın geri esneme açısını 0,14 derece azalttığı tespit edilmiştir. Titanyum Grade 1 sac malzemede de geri esneme açısının kalıp açısındaki 15 derecelik artışa bağlı olarak ortalama 0,65 derece arttığı, zımba uç kavisindeki 2 mm'lik artışın ise geri esneme açısını ortalama 0,17 derece arttırdığı tespit edilmiştir. Ütüleme süresindeki 10 saniyelik artışın ise Titanyum Grade 1 sac malzemede geri esneme açısını ortalama 0,14 derece azalttığı tespit edilmiştir. Sıcaklık değişimine bağlı olarak, her iki malzemede de geri esneme açılarında belirgin değişimler gözlemlenmiştir. DP600 sac malzemelerin V bükümünde oda sıcaklığından 200°C'ye kadar sıcaklık artışında geri esneme açısının arttığı, 300°C'de ise belirgin bir şekilde azalmaya başladığı ve 400°C'de de azalmaya devam ettiği, 500°C'de ise tekrar artmaya başladığı gözlemlenmiştir. Titanyum Grade 1 sac malzemede ise oda sıcaklığından 300°C'ye kadar geri esneme açısının arttığı, 300°C'den itibaren ise geri esneme açısının azalmaya başladığı ve 500°C'ye kadar azalmanın devam ettiği belirlenmiştir.

Bilim Kodu : 91438  
Anahtar Kelimeler : Geri esneme, V-Bükme, DP600, Titanyum Grade 1  
Sayfa Adedi : 89  
Danışman : Yrd. Doç. Dr. İbrahim KARAAĞAÇ

THE EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE TEMPERATURE EFFECT ON  
SPRINGBACK BEHAVIOR IN V BENDING PROCESS

(M. Sc. Thesis)

Tahsin ÖNEL

GAZI UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2017

ABSTRACT

In this study, the effect of temperature and process parameters on the springback behaviour which is considered as a forming defect that occurs after the V bending process of DP600 and Titanium Grade 1 sheet metals was investigated experimentally. The experimental studies were conducted in an experimental setup which the bending force, bending temperature, holding time, and bending speed can be precisely controlled with electrical equipment. Bending temperature (Room temperature (RT), 100, 200, 300, 400 and 500°C), die angle (15, 30, 45, 60 and 75°), holding time (0, 10 and 20 s), and punch radius (0, 2 and 4 mm) were determined as the experiment parameters. In the experimental studies, bending speed was fixed to 10 mm/s. The heating operation was conducted with a rod heater resistor that was controlled by the Proportional-Integral-Derivative (PID) heat controller. The springback angles of the V bent pieces were measured with the computer controlled Coordinate Measuring Machine (CMM). It was determined that for DP600 sheet metal, a 15 degree increase in die angle resulted in an average 0,63 degree, and a 2 mm increase in punch radius resulted in an average 0,14 degree increase in springback angle. It was also determined that for DP600 sheet metal, a 10 second increase in holding time decreased the springback angle by an average 0,14 degree. For Titanium Grade 1 sheet metal, a 15 degree increase in die angle resulted in an average 0,65 degree, and a 2 mm increase in punch radius resulted in an average 0,17 degree increase in the springback angle. A 10 second increase in holding time for Titanium Grade 1 sheet metal decreased the springback angle by 0,14 degree. It was observed that for both materials there were significant changes in springback angles depending on the temperature. It was also observed that the springback angle of DP600 sheet metal in V bending increased during the heat increase from room temperature up to 200°C, it started to decrease significantly in 300°C, continued decreasing in 400°C, and started increasing in 500°C. For Titanium Grade 1 sheet metal, it was determined that the springback angle increased until it was 300°C, started to decrease after 300°C and continued decreasing until it was 500°C.

Science Code : 91438

Key Words : Springback, V-bending, DP600, Titanium Grade 1

Page Number : 89

Supervisor : Assist. Prof. Dr. İbrahim KARAAĞAÇ

## TEŞEKKÜR

Tezin hazırlanması esnasında fikir, bilgi ve tecrübelerinden fazlasıyla faydalandığım, kişiliğiyle bana rehberlik eden, kıymetli danışmanım ve değerli hocam Yrd. Doç. Dr. İbrahim KARAAĞAÇ' a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Deneyleerin gerçekleştirilmesi, tez yazım aşaması gibi birçok konuda yardımını esirgemeyen değerli dostlarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bugünlere gelmemde ve yetişmemde emeklerini hiçbir şekilde esirgemeyen ve beni her daim destekleyen aileme şükranlarımı sunarım.

Ayrıca bu tezi 07-2015-12 numaralı BAP projesi ile destekleyen GAZİ ÜNİVERSİTESİ'ne teşekkürlerimi sunarım.

## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
ÖZET .....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ .....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	3
2.1. DP600 Sac Malzemede Geri Esnemenin Araştırıldığı Çalışmalar.....	5
2.2. Titanyum Sac Malzemelerde Geri Esnemenin Araştırıldığı Çalışmalar .....	10
3. KAVRAMSAL BİLGİLER VE GERİ ESNEME TEORİSİ.....	17
3.1. Şekillendirme İşlemleri ve Standardı .....	17
3.2. V-Bükme Yöntemi .....	18
3.3. Geri Esneme Davranışı ve Teorisi .....	20
4. MATERYAL VE METOT .....	23
4.1. Deneysel Çalışma Ortamı.....	23
4.1.1. Isıtma ünitesi ve sıcaklık ölçümü .....	24
4.2. Deney Malzemelerinin Karakterizasyonu .....	26
4.2.1. DP600 sac malzemenin karakterizasyonu .....	27
4.2.2. Titanyum Grade 1 sac malzemenin karakterizasyonu.....	29
4.3. Deney Parametreleri .....	32
4.4. Geri Esnemenin Ölçümü .....	34



5. DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI.....	35
5.1. İşlem Parametrelerinin Geri Esnemeye Etkileri.....	35
5.1.1. DP600 sac malzemede işlem parametrelerinin geri esnemeye etkileri ....	35
5.1.2. Titanyum Grade 1 sac malzemede işlem parametrelerinin geri esnemeye etkileri .....	45
5.2. Bükme Bölgesindeki Sıcaklığın Geri Esnemeye Etkisi .....	55
5.2.1. DP600 sac malzemede sıcaklığın geri esnemeye etkisi .....	56
5.2.2. Titanyum Grade 1 sac malzemede sıcaklığın geri esnemeye etkisi .....	64
5.3. Deney Numunelerinin Mikro Yapı İncelemesi .....	72
6. SONUÇ VE ÖNERİLER .....	81
KAYNAKLAR .....	83
ÖZGEÇMİŞ .....	89

**ÇİZELGELERİN LİSTESİ**

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 3.1. Şekillendirme yöntemleri.....	18
Çizelge 4.1. DP600 sac malzemenin kimyasal kompozisyonu (% wt).....	28
Çizelge 4.2. DP600 sac malzemeye ait çekme ve sertlik testi sonuçları .....	29
Çizelge 4.3. Titanyum Grade 1 sac malzemenin kimyasal kompozisyonu (% wt) .....	30
Çizelge 4.4. Titanyum Grade 1 sac malzemeye ait çekme ve sertlik testi sonuçları ....	31
Çizelge 4.5. Deney parametreleri.....	32
Çizelge 5.1. DP600 sac malzemelerin deney sıcaklıklarında ferrit-martenzit tanecik oranı .....	80

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 2.1. V-bükme kalıplarıyla farklı açılarda şekillendirilmiş numuneler.....	3
Şekil 2.2. Deneyleer için tasarlanan ve imal edilen nihai kalıp.....	4
Şekil 2.3. Deney düzeneğinin fiziki görüntüsü ve sayısal modeli .....	5
Şekil 2.4. Elektrohıdrolık şekillendirme deney düzeneğinin şematık gösterımı .....	7
Şekil 2.5. Bükme aparatı.....	13
Şekil 2.6. Darbe akımı yardımcı bükme cihazı .....	14
Şekil 2.7. V-bükme cihazı.....	15
Şekil 2.8. Geri esneme-sıcaklık-zımba uç kavısı ilişkisi .....	16
Şekil 3.1. İmalat süreci aşamaları .....	17
Şekil 3.2. Bükme operasyonları a) Serbest bükme b) Kenar bükme c) Çift etkili bükme d) Ezerek bükme e) Döndürerek bükme .....	18
Şekil 3.3. V-bükme yönteminin aşamaları a) 1. Aşama b) 2. Aşama c) 3. Aşama d) 4. Aşama .....	19
Şekil 3.4. V-bükme uygulamaları .....	19
Şekil 3.5. Geri esnemenin şematık gösterımı.....	20
Şekil 3.6. Gerilme birim deformasyon eğrisi.....	21
Şekil 4.1. Deney düzeneği genel görüntüsü.....	24
Şekil 4.2. Sıcaklık kontrol ve ısıtma ünitesi ile kalıp grubunun genel görüntüsü .....	25
Şekil 4.3. Deney malzemesinin ısınma periyodunun grafiksel gösterımı.....	25
Şekil 4.4. Termal kamera sıcaklık kontrol görüntüleri a) 100°C b) 200°C c) 300°C d) 400°C e) 500°C.....	26
Şekil 4.5. Deney numuneleri a) DP600 b) Titanyum Grade 1 .....	27
Şekil 4.6. Çift fazlı çeliklerin şematık mikro yapısı .....	27
Şekil 4.7. DP600 çekme testi numuneleri a) Test öncesi b) Test sonrası .....	28
Şekil 4.8. Titanyum Grade 1 malzemesi SEM görüntüsü.....	30

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 4.9. Titanyum Grade 1 çekme testi numuneleri a) Test öncesi b) Test sonrası ....	31
Şekil 4.10. Kalıp ve zımba görüntüleri a) Dişi kalıplar b) Zımbalar .....	33
Şekil 4.11. Geri esnemenin CMM' de ölçümü a) Ölçüm işlemi b) Ölçüm ortamı.....	34
Şekil 5.1. DP600 malzemesine ait bükülmüş deney numuneleri.....	36
Şekil 5.2. RT'da DP600 sac malzeme için kalıp açısı-geri esneme ilişkisi, zımba uç kavisi 0 mm.....	36
Şekil 5.3. RT'da DP600 sac malzeme için kalıp açısı-geri esneme ilişkisi, zımba uç kavisi 2 mm.....	37
Şekil 5.4. RT'da DP600 sac malzeme için kalıp açısı-geri esneme ilişkisi, zımba uç kavisi 4 mm.....	37
Şekil 5.5. 100°C sıcaklıkta DP600 sac malzeme için kalıp açısı-geri esneme ilişkisi, zımba uç kavisi 0 mm. ....	38
Şekil 5.6. 100°C sıcaklıkta DP600 sac malzeme için kalıp açısı-geri esneme ilişkisi, zımba uç kavisi 2 mm. ....	38
Şekil 5.7. 100°C sıcaklıkta DP600 sac malzeme için kalıp açısı-geri esneme ilişkisi, zımba uç kavisi 4 mm. ....	39
Şekil 5.8. 200°C sıcaklıkta DP600 sac malzeme için kalıp açısı-geri esneme ilişkisi, zımba uç kavisi 0 mm. ....	39
Şekil 5.9. 200°C sıcaklıkta DP600 sac malzeme için kalıp açısı-geri esneme ilişkisi, zımba uç kavisi 2 mm. ....	40
Şekil 5.10. 200°C sıcaklıkta DP600 sac malzeme için kalıp açısı-geri esneme ilişkisi, zımba uç kavisi 4 mm. ....	40
Şekil 5.11. 300°C sıcaklıkta DP600 sac malzeme için kalıp açısı-geri esneme ilişkisi, zımba uç kavisi 0 mm. ....	41
Şekil 5.12. 300°C sıcaklıkta DP600 sac malzeme için kalıp açısı-geri esneme ilişkisi, zımba uç kavisi 2 mm. ....	41
Şekil 5.13. 300°C sıcaklıkta DP600 sac malzeme için kalıp açısı-geri esneme ilişkisi, zımba uç kavisi 4 mm. ....	42
Şekil 5.14. 400°C sıcaklıkta DP600 sac malzeme için kalıp açısı-geri esneme ilişkisi, zımba uç kavisi 0 mm. ....	42

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 5.15. 400°C sıcaklıkta DP600 sac malzeme için kalıp açısı-geri esneme ilişkisi, zımba uç kavisi 2 mm. ....	43
Şekil 5.16. 400°C sıcaklıkta DP600 sac malzeme için kalıp açısı-geri esneme ilişkisi, zımba uç kavisi 4 mm. ....	43
Şekil 5.17. 500°C sıcaklıkta DP600 sac malzeme için kalıp açısı-geri esneme ilişkisi, zımba uç kavisi 0 mm. ....	44
Şekil 5.18. 500°C sıcaklıkta DP600 sac malzeme için kalıp açısı-geri esneme ilişkisi, zımba uç kavisi 2 mm. ....	44
Şekil 5.19. 500°C sıcaklıkta DP600 sac malzeme için kalıp açısı-geri esneme ilişkisi, zımba uç kavisi 4 mm. ....	45
Şekil 5.20. Titanyum Grade 1 malzemesine ait bükülmüş deney numuneleri.....	46
Şekil 5.21. RT’da Titanyum Grade 1 sac malzeme için kalıp açısı-geri esneme ilişkisi, zımba uç kavisi 0 mm. ....	46
Şekil 5.22. RT’da Titanyum Grade 1 sac malzeme için kalıp açısı-geri esneme ilişkisi, zımba uç kavisi 2 mm. ....	47
Şekil 5.23. RT’da Titanyum Grade 1 sac malzeme için kalıp açısı-geri esneme ilişkisi, zımba uç kavisi 4 mm. ....	47
Şekil 5.24. 100°C sıcaklıkta Titanyum Grade 1 sac malzeme için kalıp açısı-geri esneme ilişkisi, zımba uç kavisi 0 mm.....	48
Şekil 5.25. 100°C sıcaklıkta Titanyum Grade 1 sac malzeme için kalıp açısı-geri esneme ilişkisi, zımba uç kavisi 2 mm.....	48
Şekil 5.26. 100°C sıcaklıkta Titanyum Grade 1 sac malzeme için kalıp açısı-geri esneme ilişkisi, zımba uç kavisi 4 mm.....	49
Şekil 5.27. 200°C sıcaklıkta Titanyum Grade 1 sac malzeme için kalıp açısı-geri esneme ilişkisi, zımba uç kavisi 0 mm.....	49
Şekil 5.28. 200°C sıcaklıkta Titanyum Grade 1 sac malzeme için kalıp açısı-geri esneme ilişkisi, zımba uç kavisi 2 mm.....	50
Şekil 5.29. 200°C sıcaklıkta Titanyum Grade 1 sac malzeme için kalıp açısı-geri esneme ilişkisi, zımba uç kavisi 4 mm.....	50
Şekil 5.30. 300°C sıcaklıkta Titanyum Grade 1 sac malzeme için kalıp açısı-geri esneme ilişkisi, zımba uç kavisi 0 mm.....	51

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 5.31. 300°C sıcaklıkta Titanyum Grade 1 sac malzeme için kalıp açısı-geri esneme ilişkisi, zımba uç kavisi 2 mm.....	51
Şekil 5.32. 300°C sıcaklıkta Titanyum Grade 1 sac malzeme için kalıp açısı-geri esneme ilişkisi, zımba uç kavisi 4 mm.....	52
Şekil 5.33. 400°C sıcaklıkta Titanyum Grade 1 sac malzeme için kalıp açısı-geri esneme ilişkisi, zımba uç kavisi 0 mm.....	52
Şekil 5.34. 400°C sıcaklıkta Titanyum Grade 1 sac malzeme için kalıp açısı-geri esneme ilişkisi, zımba uç kavisi 2 mm.....	53
Şekil 5.35. 400°C sıcaklıkta Titanyum Grade 1 sac malzeme için kalıp açısı-geri esneme ilişkisi, zımba uç kavisi 4 mm.....	53
Şekil 5.36. 500°C sıcaklıkta Titanyum Grade 1 sac malzeme için kalıp açısı-geri esneme ilişkisi, zımba uç kavisi 0 mm.....	54
Şekil 5.37. 500°C sıcaklıkta Titanyum Grade 1 sac malzeme için kalıp açısı-geri esneme ilişkisi, zımba uç kavisi 2 mm.....	54
Şekil 5.38. 500°C sıcaklıkta Titanyum Grade 1 sac malzeme için kalıp açısı-geri esneme ilişkisi, zımba uç kavisi 4 mm.....	55
Şekil 5.39. DP600 sac malzemede sıcaklık-geri esneme ilişkisi, kalıp açısı 15°-zımba uç kavisi 0 mm. ....	56
Şekil 5.40. DP600 sac malzemede sıcaklık-geri esneme ilişkisi, kalıp açısı 15°-zımba uç kavisi 2 mm. ....	57
Şekil 5.41. DP600 sac malzemede sıcaklık-geri esneme ilişkisi, kalıp açısı 15°-zımba uç kavisi 4 mm. ....	57
Şekil 5.42. DP600 sac malzemede sıcaklık-geri esneme ilişkisi, kalıp açısı 30°-zımba uç kavisi 0 mm. ....	58
Şekil 5.43. DP600 sac malzemede sıcaklık-geri esneme ilişkisi, kalıp açısı 30°-zımba uç kavisi 2 mm. ....	58
Şekil 5.44. DP600 sac malzemede sıcaklık-geri esneme ilişkisi, kalıp açısı 30°-zımba uç kavisi 4 mm. ....	59
Şekil 5.45. DP600 sac malzemede sıcaklık-geri esneme ilişkisi, kalıp açısı 45°-zımba uç kavisi 0 mm. ....	59
Şekil 5.46. DP600 sac malzemede sıcaklık-geri esneme ilişkisi, kalıp açısı 45°-zımba uç kavisi 2 mm. ....	60

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 5.47. DP600 sac malzemede sıcaklık-geri esneme ilişkisi, kalıp açısı 45°-zımba uç kavisi 4 mm. ....	60
Şekil 5.48. DP600 sac malzemede sıcaklık-geri esneme ilişkisi, kalıp açısı 60°-zımba uç kavisi 0 mm. ....	61
Şekil 5.49. DP600 sac malzemede sıcaklık-geri esneme ilişkisi, kalıp açısı 60°-zımba uç kavisi 2 mm. ....	61
Şekil 5.50. DP600 sac malzemede sıcaklık-geri esneme ilişkisi, kalıp açısı 60°-zımba uç kavisi 4 mm. ....	62
Şekil 5.51. DP600 sac malzemede sıcaklık-geri esneme ilişkisi, kalıp açısı 75°-zımba uç kavisi 0 mm. ....	62
Şekil 5.52. DP600 sac malzemede sıcaklık-geri esneme ilişkisi, kalıp açısı 75°-zımba uç kavisi 2 mm. ....	63
Şekil 5.53. DP600 sac malzemede sıcaklık-geri esneme ilişkisi, kalıp açısı 75°-zımba uç kavisi 4 mm. ....	63
Şekil 5.54. Titanyum Grade 1 sac malzemede sıcaklık-geri esneme ilişkisi, kalıp açısı 15°-zımba uç kavisi 0 mm. ....	65
Şekil 5.55. Titanyum Grade 1 sac malzemede sıcaklık-geri esneme ilişkisi, kalıp açısı 15°-zımba uç kavisi 2 mm. ....	65
Şekil 5.56. Titanyum Grade 1 sac malzemede sıcaklık-geri esneme ilişkisi, kalıp açısı 15°-zımba uç kavisi 4 mm. ....	66
Şekil 5.57. Titanyum Grade 1 sac malzemede sıcaklık-geri esneme ilişkisi, kalıp açısı 30°-zımba uç kavisi 0 mm. ....	66
Şekil 5.58. Titanyum Grade 1 sac malzemede sıcaklık-geri esneme ilişkisi, kalıp açısı 30°-zımba uç kavisi 2 mm. ....	67
Şekil 5.59. Titanyum Grade 1 sac malzemede sıcaklık-geri esneme ilişkisi, kalıp açısı 30°-zımba uç kavisi 4 mm. ....	67
Şekil 5.60. Titanyum Grade 1 sac malzemede sıcaklık-geri esneme ilişkisi, kalıp açısı 45°-zımba uç kavisi 0 mm. ....	68
Şekil 5.61. Titanyum Grade 1 sac malzemede sıcaklık-geri esneme ilişkisi, kalıp açısı 45°-zımba uç kavisi 2 mm. ....	68
Şekil 5.62. Titanyum Grade 1 sac malzemede sıcaklık-geri esneme ilişkisi, kalıp açısı 45°-zımba uç kavisi 4 mm. ....	69

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 5.63. Titanyum Grade 1 sac malzemede sıcaklık-geri esneme ilişkisi, kalıp açısı 60°-zımba uç kavisi 0 mm. ....	69
Şekil 5.64. Titanyum Grade 1 sac malzemede sıcaklık-geri esneme ilişkisi, kalıp açısı 60°-zımba uç kavisi 2 mm. ....	70
Şekil 5.65. Titanyum Grade 1 sac malzemede sıcaklık-geri esneme ilişkisi, kalıp açısı 60°-zımba uç kavisi 4 mm. ....	70
Şekil 5.66. Titanyum Grade 1 sac malzemede sıcaklık-geri esneme ilişkisi, kalıp açısı 75°-zımba uç kavisi 0 mm. ....	71
Şekil 5.67. Titanyum Grade 1 sac malzemede sıcaklık-geri esneme ilişkisi, kalıp açısı 75°-zımba uç kavisi 2 mm. ....	71
Şekil 5.68. Titanyum Grade 1 sac malzemede sıcaklık-geri esneme ilişkisi, kalıp açısı 75°-zımba uç kavisi 4 mm. ....	72
Şekil 5.69. Mikro yapı incelemesi için kalıplanan deney numuneleri a) DP600 b) Titanyum Grade 1 .....	74
Şekil 5.70. Mikro yapı görüntüleri için deney numunesinde belirlenen bölgeler.....	74
Şekil 5.71. DP600 sac malzemede büküm bölgesi mikro yapı görüntüleri a) RT b) 100°C_c) 200°C d) 300°C e) 400°C f) 500°C.....	75
Şekil 5.72. DP600 sac malzeme 1. bölge mikro yapı görüntüleri a) RT b) 100°C c) 200°C d) 300°C e) 400°C f) 500°C.....	75
Şekil 5.73. Titanyum Grade 1 sac malzemede büküm bölgesi mikro yapı görüntüleri a) RT b) 100°C c) 200°C d) 300°C e) 400°C f) 500°C.....	76
Şekil 5.74. Titanyum Grade 1 sac malzemede 1.bölge mikro yapı görüntüleri a) RT b) 100°C c) 200°C d) 300°C e) 400°C f) 500°C.....	76
Şekil 5.75. DP600 sac malzemede 1. bölge sertlik ölçüm sonuçları .....	77
Şekil 5.76. DP600 sac malzemede 2. bölge sertlik ölçüm sonuçları .....	78
Şekil 5.77. Titanyum Grade 1 sac malzemede 1. bölge sertlik ölçüm sonuçları .....	78
Şekil 5.78. Titanyum Grade 1 sac malzemede 2. bölge sertlik ölçüm sonuçları .....	79



## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

### Simgeler

$\alpha$

Alfa-Titanyum sac malzemede faz ismi

$\beta$

Beta-Titanyum sac malzemede faz ismi

$^{\circ}\text{C}$

Santigrat derece

$\text{s}^{-1}$

1/saniye

### Kısaltmalar

### Açıklamalar

**ABAQUS**

Sonlu elemanlarla analiz yazılımı

**ASTM**

Amerikan Malzeme ve Test Derneği

**CMM**

Bilgisayarlı koordinat ölçme cihazı

**DIC**

Dijital görüntü korelasyon cihazı

**DIN**

Alman Standartlar Enstitüsü

**Dk**

Dakika

**DP**

Çift fazlı sac malzeme

**F**

Şekillendirme kuvveti

**GPa**

Gigapaskal

**HV**

Vickers sertlik değeri

**K**

Bükme faktörü

**KN**

Kilo Newton

**L**

Bükme eksenini yönünde sac malzeme genişliği

**mm**

Milimetre

**MPa**

Megapaskal

**PID**

Oransal-İntegral-Türevsel denetleyici

**RT**

Oda sıcaklığı

**s**

Saniye

**S**

Çekme dayanımı

**Kısaltmalar****SEM****t****TRIP****W****Açıklamalar**

Elektron tarama mikroskobu

Sac malzeme kalınlığı

Üç fazlı sac malzeme

Bükme kanalı genişliği



## 1. GİRİŞ

Günlük hayatta yaygın olarak kullanılan sac metalden üretilmiş ürünler; medikal, gıda, uçak, otomotiv ve hatta uzay sanayine kadar geniş bir yelpazede kendine kullanım alanı bulmaktadır. Çeşitli yöntemlerle şekillendirilmiş sac metal ürünler yaşamın vazgeçilemez bir parçası haline gelmiştir.

Her gün farklı özelliklere ve fonksiyonlara sahip birçok sac malzeme, kullanım amaçlarına göre bir dizi şekillendirme yöntemi yardımıyla imalat sürecinden geçirilmektedir. En çok kullanılan şekillendirme yöntemlerinden bir tanesi de V-bükmedir. V-bükmede dışı kalıp üzerine yerleştirilen sac malzeme zımbanın etkisiyle şekillendirilmektedir. Fakat V-bükülen ürünlerde şekillendirme sonrası malzeme özelliklerine bağlı olarak geri esneme, ezilme vb. gibi deformasyonlar oluşmaktadır. Dışı kalıp ile zımba arasında şekillendirilen sac malzeme, elastik gerilmelerin etkisiyle eski formuna kavuşmak istemektedir. Bu durum “geri esneme” olarak açıklanmaktadır. Geri esnemenin tamamıyla ortadan kaldırılabilmemesinin imkansız olduğu kabul edilse de önceden tahmin edilerek telafi edilebileceği bir gerçektir. Geri esnemeye kalıp açısı, ütüleme süresi, sıcaklık gibi işlem parametrelerinin ve malzeme özelliklerinin büyük etkileri bulunmaktadır.

Sac malzemeler arasında DP600 sac malzemenin otomotiv, Titanyum Grade 1 sac malzemenin ise havacılık ve endüstriyel sanayindeki yeri yadsınamaz bir gerçektir. Bu iki malzemenin yapısal özellikleri farklı sektörlerde yaygın kullanımına sebep olmaktadır. Fakat her sac malzemedeki bükme operasyonlarında olduğu gibi bu iki sac malzemenin de bükme operasyonu ile şekillendirilmesinde geri esneme problemi bir şekillendirme kusuru olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, DP600 ve Titanyum Grade 1 sac malzemelerinin V-bükme işlemi ile şekillendirilmesinde; kalıp açısı, zımba uç kavisi, ütüleme süresi ve sıcaklık gibi parametrelerin geri esnemeye etkisinin deneysel olarak araştırılmasıdır. Geri esnemenin önceden bilinmesi doğru açığı elde etmek için harcanan deneme-yanılma süresini kısaltarak üretim maliyetinde azalmaya ve zamandan da tasarruf edilmesine imkan tanıyacaktır.

Çalışma kapsamında; öncelikle DP600 ve Titanyum sac malzemelerin V-bükme yöntemiyle bükümüne yönelik literatür araştırması yapılmıştır. Çalışma kapsamında şekillendirilecek malzemelerin belirlenmesiyle birlikte deney parametreleri belirlenmiş ve deney malzemelerinin karakterizasyonu yapılmıştır. Çalışmanın devamında, mevcut klasik V-bükme yapan elektronik kontrollü deney düzeneğine sıcaklık ünitesi eklenerek revizyon yapılmış ve deneysel çalışmalara başlanılmıştır. Deneysel çalışmaların tamamlanmasıyla birlikte deney numunelerinin geri esneme değerleri CMM kullanılarak ölçülmüş ve şekillendirilen numunelerin mikro yapı incelemeleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, işlem parametrelerinin ve sıcaklığın geri esnemeye etkisi açısından yorumlanmıştır.



## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Geri esneme, sac metal şekillendirme operasyonlarında karşılaşılan en genel şekillendirme problemlerinden birisidir. Literatürde geri esneme hakkında çok sayıda deneysel ve sayısal yöntemlerin kullanıldığı çalışma yapılmıştır [1]. Yapılan bu çalışmalardan bazıları aşağıda verilmiştir.

Şahin yapmış olduğu çalışmasında, zımba uç yarıçapının sabit olduğu üç farklı V kalıp açısında, üç değişik kalınlıkta (0,6; 0,8 ve 1 mm) üç farklı tip sac malzemeyi şekillendirmiş ve deneysel olarak elde ettiği sonuçları birbirleriyle karşılaştırmıştır. Sonuçta bükme yarıçapının sac malzeme kalınlığına olan oranı arttıkça geri esnemenin arttığını, bükme yarıçapıyla geri esnemenin orantılı hareket ettiğini ve kalıp açıklığı arttıkça geri esnemenin de buna paralel olarak arttığını analiz etmiştir. Ayrıca sıcaklığın artmasıyla malzemelerin akma dayanımında belirgin düşüşlerin olduğu ve bu nedenle geri esnemenin azaldığını tespit etmiştir [2]. Şekillendirmiş olduğu deney numunelerinden oluşan bir grup örneklem Şekil 2.1’de verilmiştir .

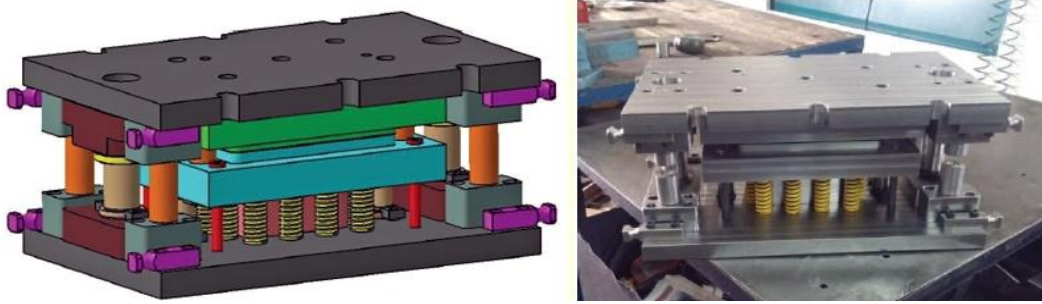


Şekil 2.1. V-bükme kalıplarıyla farklı açılarda şekillendirilmiş numuneler [2]

Ötü çalışmasında, V-bükme ile şekillendirilen iki farklı alüminyum malzemede şekillendirme sonrasında oluşan geri esnemeye etki eden hadde yönü, ütüleme süresi, malzeme kalınlığı gibi parametrelerin etkilerini deneysel ve teorik açıdan incelemiştir. Sonuç olarak kalınlık ve ütüleme süresi arttıkça geri esnemenin azalacağını ve geri esnemenin belirlenmesinde hadde yönünün de önemli bir etkiye sahip olduğunu belirlemiştir [3].

Özdemir ise yapmış olduğu tez çalışmasında farklı sac malzemeleri, değişik kalınlıklarda, farklı kalıp açısı ve zımba uç yarıçaplarında V-bükme yöntemi ile şekillendirmiş, deneylerin yapılamadığı veriler için ise yapay sinir ağları yardımıyla sigmoid fonksiyonu kullanarak geri esnemeyi tahmin etmiştir. Sert malzemelerin aynı işlem parametreleri altında daha fazla geri esmediği ve zımba uç kavisi ile geri esneme arasında doğru orantılı ilişki olduğu sonucuna ulaşmıştır. Sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen sonuçlar ile deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında % 85'in üzerinde birbirleriyle uyum içinde olduğunu gözlemlemiştir [4].

Sönmez çalışmasında 0,7 mm kalınlıktaki düşük karbonlu DC04 çelik sac malzemesi için açılı kanal çekme işlemi ile geri esneme davranışını deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi yardımıyla sayısal olarak incelemiştir. Çalışmasında anizotropik malzemede geri esnemenin daha fazla olduğunu tespit etmiştir [5]. Deneyler için tasarlanan kalıp seti ve imalatı gerçekleştirilen kalıp Şekil 2.2'de verilmiştir.



Şekil 2.2. Deneyler için tasarlanan ve imal edilen nihai kalıp [5]

Sarıkaya tez çalışmasında ısıl işlem uyguladığı 1,6; 2 ve 2,5 mm kalınlıklardaki 2014 ve 6061 alüminyum alaşımlarını 60°, 90° ve 120° kalıplarda bükerek ısıl işlemin şekillendirilen malzemelerin geri esneme davranışına etkisini hem deneysel hem de sonlu elemanlar analizi yöntemi yardımıyla sayısal olarak incelemiştir. Çalışma sonucunda kalınlık artışına bağlı olarak geri esnemenin azaldığı ve kalıp açısı arttıkça geri esnemenin arttığı sonucuna her iki deney malzemesinde de ulaşmıştır [6].

Işıktaş çalışmasında DKP ve paslanmaz çelik malzemeleri tasarlamış olduğu kalıpta V-bükme işlemine tabi tutarak geri esnemeyi araştırmıştır. Çalışmasında sac malzemelerde kalınlık arttıkça geri esnemenin azaldığını, sertliği fazla olan malzemelerin sahip olduğu

elastik olmayan enerjisinin büyük olmasından dolayı geri esneme değerinin de fazla olduğu sonucunu elde etmiştir [7].

Toros ve diğerleri Hill-48, Barlat-89 ve YLD2000 gibi farklı malzeme modellerinde sonlu elemanlar analizi yöntemini kullanarak TRIP800 çeliğinin geri esnemesini araştırmışlardır. V-bükme ile şekillendirme işleminde sonlu elemanlarla analiz sonuçlarına göre geri esneme davranışını en iyi YLD2000-2d modeli yardımıyla tahmin edilebildiğini belirlemişlerdir [1]. Yapmış oldukları çalışmada kullandıkları deneysel düzeneğin fiziki görüntüsü ve sayısal modeli Şekil 2.3'te verilmiştir.



Şekil 2.3. Deneysel düzeneğin fiziki görüntüsü ve sayısal modeli [1]

Tez çalışması kapsamında kullanılan malzemelere ait literatürde yapılan çalışmalar malzeme türüne göre sınıflandırılarak aşağıda sunulmuştur.

### 2.1. DP600 Sac Malzemede Geri Esnemenin Araştırıldığı Çalışmalar

Son zamanlarda ileri yüksek mukavemet çeliklerinin özellikle otomotiv endüstrisinde kullanımını kayda değer bir şekilde artmıştır. Bu sac malzeme türleri arasında da çift fazlı saclar büyük bir öneme sahiptir [8-12]. Çift fazlı saclarla ilgili yapılan çalışmalar bu bölümde incelenmiştir.

Öztürk ve diğerleri ileri yüksek mukavemet çelikleri arasından iyi şekil verilebilirlik ve yüksek mukavemet özellikleriyle öne çıkan DP600 sac malzemenin ılık şekillendirilmesinde oluşan geri esnemeyi deneysel araştırmışlardır. Çalışmalarında, oda sıcaklığı (RT) ile 300°C arasında değişen sıcaklık parametresinin geri esnemeye etkilerini gözlemlemişlerdir. Geri esnemenin 200°C'ye kadar arttığını ancak bu sıcaklıktan sonra geri

esnemenin önemli derecede azaldığını, oda sıcaklığı ile 300°C'deki akma dayanımının birbirine çok yakın olduğunu ve 300 °C'deki şekil verilebilirliğin oda sıcaklığındakinden daha düşük olduğunu tespit etmişlerdir. Farklı sıcaklıklarda DP600 malzemenin karmaşık davranışlar gösterdiğini belirlemişlerdir [10].

İleri yüksek gerilimli saclarda geri esnemenin araştırıldığı diğer bir çalışmada, Yanagimoto ve Oyamada 100 kN' luk hidrolik pres yardımıyla, artan sıcaklıklarda yüksek mukavemet çelik sacları üzerinde gerilim yüklemesi ve boşaltması testleri yapmışlardır. Çalışmalarının sonucunda ileri yüksek gerilimli saclarda 750 Kelvin üzerindeki yüksek sıcaklıklarda sıcaklık arttıkça geri esnemenin azaldığını gözlemlemişlerdir [13].

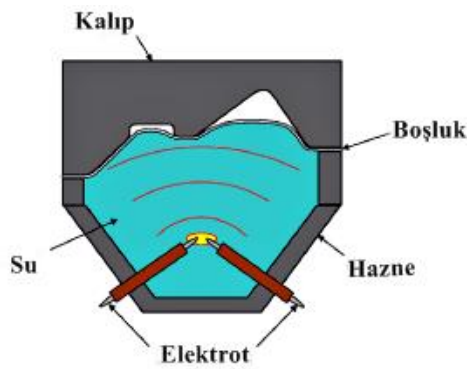
Geri esnemenin araştırıldığı diğer bir çalışmada Ghaei ve diğerleri doğrusal olmayan elastik yükleme ve boşaltma davranışını göz önünde bulundurarak, ileri yüksek mukavemet çeliklerinin geri esneme simülasyonunu yapmışlardır. Yükün boşaltılmasından sonra malzemenin doğrusal olmayan plastik deformasyon bölgesinin içine doğru esnediğini, yükleme üzerine ise malzemenin boşaltmanın aksine doğrusal olmayan elastik bölgeye doğru ivmelendiğini belirlemişlerdir [14].

Ghadbeigi ve diğerleri ticari DP600 çeliğinin bölgesel deformasyon ve hasar mekanizmalarını SEM ve DIC cihazları yardımıyla araştırmışlardır. Malzeme şekillendirmesi sonucunda oluşan çatlaklardan nihai çatlığa kadar olan süreci farklı geometrilerde ele almışlardır. Tanımlanmış hasar başlangıç mekanizmaları için eş gerinim değerleriyle birlikte ferrit ve martenzit fazlardaki gerinim dağılımını ölçmüşlerdir. Gerinim haritalarına göre ferrit fazında geniş plastik deformasyon olduğunu belirlemişlerdir. Malzemedeki martenzit fazının heterojen gerinim dağılımlarında plastik olarak deforme edilebilir olduğunu tespit etmişlerdir [15].

Lee ve diğerleri çift fazlı saclar gibi su verilemeyen ileri yüksek mukavemet çeliklerinin şekillendirilmesinde yanal kızılötesi ışınları kullanarak bölgesel ısıtma yardımıyla geri esnemeyi azaltmayı amaçlamışlardır. Çalışmalarında, önemli bir maliyete sahip yanal kızılötesi ışınları sayesinde DP980 sac malzemesini bölgesel ve fırın tarzı ısıtma yöntemi ile ısıtarak V-bükme kalıbında şekillendirmişlerdir. Sonuçta bölgesel ısıtmanın fırın tarzı ısıtmaya göre daha faydalı sonuçlar verdiğini gözlemlemişlerdir [16].



Golovashchenko ve diğeri zımba ile sac metal panellerin şekillendirilmesinde geri esnemenin elektrohidrolik ayarlanmasını kullanarak geri esnemeyi yok etmeği amaçlamışlardır. Bu çalışmada kullanılan yöntem ile 1 ve 1,4 mm kalınlığında DP980 sac malzemede ve 1 mm kalınlığında DP600 sac malzemede şekillendirme sonrasında geri esnemeyi elemine etmişlerdir [17]. Çalışmalarında kullandıkları elektrohidrolik şekillendirme deney cihazının şematik gösterimi Şekil 2.4’te verilmiştir.



Şekil 2.4. Elektrohidrolik şekillendirme deney düzeneğinin şematik gösterimi [17]

Çift fazlı çeliklerin otomobil endüstrisinde kullanımında yaygın bir şekilde kaynaklı yapıya ihtiyaç duyulmaktadır. Farabi ve diğeri lazerle kaynatılmış DP600/DP980 çift fazlı çelik eklentilerinin mikro yapısını ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Kaynaklı yapıdaki pekleşme değerinin DP600 metalininkinde olduğundan daha yüksek, DP980 metalininkinde olduğundan daha düşük değere sahip olduğunu ve sertliği daha az olan bölgenin DP980 tarafında daha büyük bir alana sahip olduğunu tespit etmişlerdir [8].

Tisza ve Lukacs yüksek mukavemet çift fazlı çeliklerinin şekillendirilmesinde ortaya çıkan geri esnemeyi araştırmışlardır [11]. Bir diğeri çalışmalarında ayrıca yüksek mukavemet çift fazlı çeliklerinin şekillendirilebilirliğini de deneysel olarak araştırmış ve artan deney sayısı karşısında tasarruf sağlamak amacıyla izotropik-kinematik sertleşme kurallarını kullanan sayısal simülasyonlarla çalışmalarını desteklemişlerdir. Malzeme parametrelerini belirlemek ve şekillendirme konusunda daha iyi simülasyon sonuçları elde edebilmek için ayrıca bir test cihazı geliştirmişlerdir [12].

Otomotiv endüstrisi araçların ağırlığını azaltmak için her geçen gün daha da fazla ileri yüksek mukavemet çeliği kullanmaktadır. Azalan malzeme ağırlığı ve artan dayanıma bağlı olarak geri esneme değeri de artmaktadır. Andersson hafif çelik ve alüminyum

malzemelerden ileri yüksek mukavemet çeliklerine kadar birçok malzemenin geri esneme değerini test etmek ve davranış özelliklerini ortaya koyabilmek amacıyla esnek ray adını verdiği yarı endüstriyel deneysel bir araç geliştirmiştir. Çalışmasında ileri yüksek mukavemet çeliklerindeki geri esneme davranışını sayısal ve deneysel olarak analiz etmiştir. Sayısal çalışmalarında sac metal şekillendirme simülasyonlarını LS-DYNA ortamında yapmıştır [18].

Fırat ve diğerleri Bauschinger etkisinin görülebileceği, zımba ile şekillendirme işleminde kullanılan bir çift fazlı çeliği sonlu elemanlar analizi yardımıyla anizotropik plastiklik modeli olarak tanımlamışlardır. Oluşturdukları bu model yardımıyla çalışmalarında çelik çatı sertleştirici malzemesindeki geri esneme deformasyonunu sayısal olarak incelemişlerdir [19].

Gösling ve diğerleri sonlu eleman simülasyonları ve istatistiksel modelleme tekniklerini kullanarak geri esnemenin kaynaklı malzeme üzerindeki geometrik sapmalar hakkında stratejiler oluşturabilmek amacıyla sayısal bir çalışma ortaya koymuşlardır. Geri esnemeyi telafi edici gerilim hal modifikasyonu, parça sertliği, parça geometrisi gibi stratejileri tanımlamışlardır. Sonlu elemanlar analizi ile %5'ten daha küçük görelî sapma değerlerinde çekme testlerindeki geri esneme davranışının tahmin edilebilir olduğunu tespit etmişlerdir. Geri esnemenin parça modifikasyonu ile telafisi ele alındığında ise uygun geometrik kararlılık için bazı bölgelerdeki geri esneme değerinin aşırı telafisi gerekirken, bazı bölgelerde ise geri esnemenin daha az telafisine ihtiyaç olduğunu belirlemişlerdir. Çalışma esnasında sayısal tahminlerle deneysel sonuçları karşılaştırmışlardır [20].

Geçmişte dört adet alüminyum alaşımı hakkında yapılan çekme-bükme testleri sonucunda deney malzemelerinin, şekillendirme sonrasında 15 aya kadar olan periyotta şekillenmeye (malzeme üzerindeki yükün boşaldığı zamandan itibaren) devam ettiği yani zamana bağlı geri esnemenin olduğu görülmüştür. Bundan esinlenen Lim ve diğerleri; DP600, DP800, DP980, TRIP780 ileri yüksek mukavemet çelikleri ile zamana dayalı geri esneme deformasyonunu araştırmışlardır. Oda sıcaklığı esnemesi ve anelastiklik değerini zamana bağlı davranışın elde edilebilmesi mümkün bölgelerde test etmişlerdir. Sonuçta yükün boşalmasından 1-2 saat sonra anelastikliğin ihmal edilebilir olduğunu belirlemişlerdir. Esneme simülasyonlarındaki artık gerilimlerin deneysel sonuçlarla kalitatif bir uyum

içinde olduğunu fakat simülasyon sonuçlarının zamana bağlı geri esneme açısını olduğundan fazla gösterdiğini tespit etmişlerdir [21].

Padmanabhan ve diğerleri ileri yüksek mukavemet çeliklerinden DP600, DP800 ve DP980 üzerinde çekme sınırlama kuvvetinin etkisini deneysel olarak araştırmışlardır. Çalışmalarında; şekillendirilmiş parçalarda yüksek çekme dayanım kuvvetinin daha az geri esneme yönünde etki oluşturduğunu analiz etmişlerdir [22].

Taşımacılık sektöründe hafif parçalardan yapılan imalat çok büyük bir yere ve öneme sahiptir. Buradaki en önemli ayrıntı sac metal kalınlığı azaltılırken araçların çarpma anındaki enerji emilim kapasitesini düşürmemektir. Geiger ve diğerleri DP600, DP800 ve CP800 oluşan bir denek grubunun farklı yükler altındaki mekanik davranışlarını incelemişlerdir. Mekanik özelliklerin ve akma eğrilerinin sonuçlarının yükleme halindeki malzemenin pekleşme değerinin ve gerilim seviyesinin belirlenmesinde önemli bir etkiye sahip olduğunu gözlemlemişlerdir [9].

Geri esnemenin büyüklüğü, genel olarak şekillendirmeden sonra malzeme üzerinde arta kalan gerilimin büyüklüğüne dayanmaktadır. Eggertsen ve Mattiasson beş farklı sertleşme modeliyle dört farklı çelik malzeme üzerinde geri esnemenin tam bir tahmininin yapılmasını sağlamak amacıyla malzeme modelleme çalışması yapmışlardır. Bu sayede kesin bir geri esneme tahmininde bulunabilmek için Bauschinger etkisi, daimi yumuşama etkisi gibi etkileri tanımlayabilen bir sertleşme modeli kullanılması gerektiğini belirlemişlerdir [23].

Saxena ve diğerleri çift fazlı çeliklerden DP600 çeliğinin bükme sınır eğrilerinin ölçümünü yapmış ve bükme limitlerinin şekillendirme limitlerinden daha yüksek olduğunu analiz etmişlerdir. Ayrıca zımba uç kavisi gibi diğer bazı parametrelerin geri esnemeye olan etkilerini araştırmış ve yüksek zımba uç kavislerinde daha düşük bükme gerinimi ve daha yüksek geri esneme değeri elde edildiği sonucuna ulaşmışlardır [24].

Özsoy ve diğerleri zımba ile şekillendirme işlemlerinde elastiklik ölçümünün çift fazlı çeliklerde geri esnemenin tahmin edilebilirliğine olan etkisini sayısal olarak çalışmış ve elde ettikleri sonuçları deneysel verilerle karşılaştırmışlardır. Çalışmalarında oda sıcaklığında eksenel olmayan çekme yüklemesinde 0,8 mm kalınlığındaki çift fazlı

çeliklerin Young ve Hill modellerinde mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Etkili plastik gerinim ve parça kalınlığı dağılımının her iki modelde de benzer olduğunu ve farklılığının en fazla %4-%6 arasında olduğunu tespit etmişlerdir. Sonlu eleman sonuçlarının nihai parça geometrisinin tahmininde kritik rolü olduğunu belirlemişlerdir [25].

Kılıç ise yapmış olduğu tez çalışmasında DP600 sac malzemenin farklı şekillendirme hızı, kalınlık ve genişlikte geri esneme davranışlarını 60° V şekilli kalıp kullanarak deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Geri esnemenin artan sac kalınlığına bağlı olarak önemli ölçüde azaldığını ve hız artışıyla birlikte geri esnemedeki değişimin kalın saclarda daha fazla olduğunu tespit etmiştir. Fakat, 500 mm/dk hızla yapılan şekillendirmelerde farklı davranış özelliklerinin ortaya çıktığını fark etmiştir. Ayrıca, genişliğin geri esnemeye kayda değer bir etkisinin olmadığını görmüştür. Çalışmasının sonucunda analitik sonuçların deneysel verilerin çok altında olduğunu tespit etmiştir [26].

## **2.2. Titanyum Sac Malzemelerde Geri Esnemenin Araştırıldığı Çalışmalar**

Zhou ve diğerleri çalışmalarında lazer delik sızdırmazlık sonuçları doğrultusunda Titanyum Grade 1 kaynağına ait sertlik değerinin doğrudan malzemenin mikro yapısı ile alakalı olduğunu tespit etmişlerdir. Elektrolitle kaynatılan malzemelerin mikro yapısında çokça iğnemsiz alfa fazı bulunurken, elektrolit kullanılmadan yapılan kaynakların mikro yapısında tırtıklı, düz ve iğnemsiz alfa fazların karışık yapıda bulunduğunu analiz etmişlerdir. Elektrolit yardımıyla veya elektrolitsiz yapılan kaynak işlemlerinde kaynak bölgesinde ikinci bir fazın bulunmadığını, bu bölgede sadece Titanyum alfa fazının bulunduğunu tespit etmişlerdir [27].

Takuda ve diğerleri ticari Titanyum Grade 1 ve Grade 2 sac malzemelerin üzerinde çeşitli gerilme yörüngelerinde monoton, ters ve dairesel yükleme ile oluşan anizotropik deformasyon davranışlarını incelemiştir. Çalışma sonucunda titanyum alaşımlı sac malzemelerin gerilme gerinim eğrilerinin referans edilmiş magnezyum alaşımlı sac malzemelere göre daha küçük değerlere sahip olduğunu gözlemlemiştir [28].

Takuda ve diğerleri ticari saf Titanyum Grade 1 sac malzemelerdeki anizotropik deformasyon davranışına ait kristal plastiklik sonuçlarını sonlu elemanlar analizi yardımıyla incelemiştir. Çalışma sonucunda Lankford değeri, gerilme gerinim eğrisi,

plastik çalışma hatları, gerinim yörüngesindeki doku değerleri açısından elde edilen deneysel sonuçlarla simülasyon sonuçlarının uyumlu olduğunu gözlemlemiştir [29].

Barletta ve diğerleri Titanyum Grade 2 düz saclarının küçük uç kavisleri ile keskin bükme açılarını elde edebilmek için lazerle bükme işlemlerinin sonuçlarını deneysel ve sayısal olarak araştırmışlardır. Çalışmalarında 140° üzerini keskin bükme açıları olarak kabul etmişlerdir. Sonlu elemanlar analizi yardımıyla bükme işlemleri için sayısal bir model geliştirmişlerdir. Model sonucunda elde sayısal ve deneysel sonuçların birbiriyle uyum içinde olduğunu analiz etmişlerdir. Sonuçlara göre Titanyum Grade 2 malzemesinin son derece esnek ve değişen parametreler karşısında duyarlı bir yapıya sahip olduğunu tespit etmişlerdir [30].

Venettacci ve diğerleri Titanyum Grade 2 ve AA 7075 T6 alüminyum saclarının harici güçle desteklenen lazer bükme işlemleri esnasında meydana gelen geri esneme sonuçlarını araştırmışlardır. Çalışma sonucunda bükme bölgesindeki seçici lazer ısıtma ve malzeme temas basıncının uygun bir kombinasyonu sayesinde her iki sacın da çok küçük uç kavisleriyle yüksek açılarda bükülebildiğini analiz etmişlerdir. Lazerle yapılan ısıtmanın her iki malzemenin de yüksek açılarda bükülmesi esnasında meydana gelebilecek kopma riskini azalttığı sonucuna ulaşmışlardır [31].

Singh ve diğerleri biyomedikal uygulamalarda, 3-aminopropiltrioks silan filmlerin Titanyum Grade 5 malzemelerin yüzeyine kendi kendine kimyasal bağ yapması üzerine çalışmışlardır. Titanyum Grade 5 malzemelerin yüzey topografyası ve biyokimyasal yüzey modifikasyonları incelendiğinde, silanizasyon yöntemi ile yapı doğruluğunu gözlemlemiştir. İki basamaklı prosedür uygulanarak silisyum Titanyum Grade 5 malzeme yüzeyine tutundurulmuştur. Böylece ileriki çalışmalarda peptid ya da biyomoleküllerin yüzeye tutundurulabileceğini öngörmüşlerdir [32].

Yapılan literatür araştırması sonucunda Titanyum Grade 1 malzemelerle ilgili şekillendirmeye yönelik çalışmaların kısıtlı olduğu görülmüştür. Bu nedenle diğer titanyum malzemelere ait araştırmalara aşağıda yer verilmiştir.

Çift fazlı ( $\alpha+\beta$ ) alaşımlardan olan Ti6Al4V alaşım malzemeler; otomotiv, uzay, uçak ve biyomedikal endüstrisinde hafif ancak dayanımlı malzemeler olarak yaygın bir şekilde

kullanılmaktadır. Ti6Al4V sac malzemelerde geri esneme ve şekillendirilebilirlikle ilgili yapılan çalışmalar bu bölümde verilmiştir [33-36].

Şekillendirme sınır diyagramı, herhangi bir sac metal malzemenin şekillendirilebilirliğinin karakterizasyonunda oldukça kullanışlı bir veridir. Djavanroodi ve Derogar şekillendirilebilirlik, çatlak analizi ve gerinim dağılımını su ile derin çekme yöntemi kullanarak Ti6Al4V titanyum alaşımı ve Al6061-T6 alüminyum alaşımı üzerinde deneysel olarak analiz etmişlerdir. İşlem parametrelerinin şekillendirme sınır diyagramı üzerindeki etkilerini deneysel olarak ölçmüş ve ABAQUS/Standard yazılımı yardımıyla işlem sürecini simülasyona aktarmışlardır. Kalınlık, akma ve çekme mukavemeti, gerinim sertleşmesi, gerinim hassasiyeti gibi değerlerin şekillendirme sınır diyagramı üzerinde önemli etkileri olduğunu analize etmişlerdir. Pekleşme ve gerinim hassasiyeti değerlerinin artmasıyla nihai gerinim değerinin arttığı sonucuna ulaşmışlardır. Yapmış oldukları çalışmanın sonucunda simülasyon değerlerinin deneysel verilerle tutarlı olduğunu ve bu işlemlerin simülasyonunda ABAQUS yazılımının başarıyla kullanılabileceğini ortaya koymuşlardır [33].

Kotkunda ve diğerleri Ti6Al4V alaşım çeliğinin oda sıcaklığı ile 400°C aralığında derin çekme yöntemi ile şekillendirilebilirliğini deneysel olarak araştırmışlar ve 150°C'nin altında şekillendirilebilirliğin düşük olduğunu tespit etmişlerdir. Hem deneysel hem de sonlu elemanlar simülasyonları sonuçlarına göre derin çekme ile şekillendirme sonucunda boyun ve üst duvar bölgesinde kusurun arttığını gözlemlemişlerdir. Maksimum çekme oranına 400°C'de 1,8 olarak ulaşmışlardır [37]. Kotkunda ve diğerleri bir başka çalışmalarında da farklı genişlikteki deneklere Nakazima testini uygulayarak 400°C altında Ti6Al4V alaşımının şekillendirme sınır diyagramını araştırmışlardır. Şekillendirmede optimal sonuçlara 400°C'de ulaşıldığını analiz etmişlerdir [34].

Hu ve diğerleri lazer yardımcı bölgesel ısıtma ile lazer uçlu şekillendirme yöntemini kullanarak yüksek mukavemet titanyum alaşım çeliklerinin bükülebilirlik kapasitesini arttırma yollarını araştırmışlardır. Yaptıkları çalışma sonucunda malzemenin önceden ısıtılması ve ısının malzeme içinde muhafaza edilmesinin şekillendirilebilirliğini arttırdığını tespit etmişlerdir [38].

Titanyum alaşımları; imalat sürecinde yüksek mekanik mukavemet ve düşük malzeme ağırlığı kombinasyonu ile metallerin tamamına yakınının üstünde bir basamakta yer almaktadır. Titanyum malzemelerin şekillendirilmesinde kullanılan en etkili yöntemlerden birisi de bükme işlemidir. Adamus ve Lacki, Ti6Al4V titanyum alaşım bir çubuğun bükme ile şekillendirilmesini sonlu elemanlar yöntemi yardımıyla simüle etmiş ve deneysel olarak araştırmışlardır. Geri esneme bilgisinin, bükülen parçaların şekillendirilmesinde elde edilen sonuçların kesinliği açısından çok önemli bir veri olduğunu ortaya koymuşlardır. Geri esnemenin bükme açısı, bükülmüş malzemede çap kalınlık oranı gibi parametrelere dayandığını belirlemişler ve 4 mm çubuk çapında bükme açısı arttıkça geri esnemenin arttığını tespit etmişlerdir [39]. Deneysel çalışmalarda kullandıkları bükme cihazı Şekil 2.5'te verilmiştir.



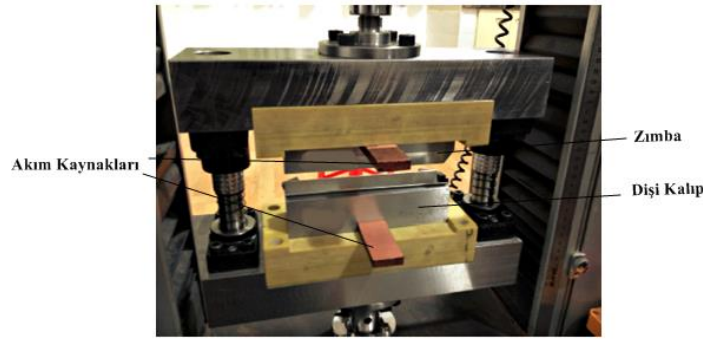
Şekil 2.5. Bükme aparatı [39]

Yang ve Yang Ti6Al4V alaşım malzemeye sıcak baskı boyunca 850°C -930°C sıcaklık değeri, 0.01-1 s<sup>-1</sup> gerinim değeri aralığında ve % 70 mühendislik basınç gerilmesi değeri altındaki mikro yapısını ve dokusal görünümünü incelemişlerdir. Çalışmanın sonucunda sıcaklığın 900°C' nin altında ve gerinim değerinin 0.1 s<sup>-1</sup>'nin üstünde olduğu parametrelerde malzemenin mikro yapısının genel olarak  $\alpha$  taneciklerinden oluştuğunu fark etmişlerdir. Daha yüksek sıcaklıklarda ve daha düşük gerinim değerlerinde dinamik kristallenmenin meydana geldiğini tespit etmişlerdir. Ayrıca mikro yapının malzemenin mekanik özelliklerini belirlemede önemli bir parametre olduğunu belirlemişlerdir [36].

Sıcak gerdirme-sürünme şekillendirme yöntemi; şekillendirilmesi zor, ince et kalınlıklı malzemelerin imalatında kullanılan eski bir yöntemdir. Xiao ve diğerleri Ti6Al4V alaşım çeliğinin sıcak esneme-sürünme şekillendirme süreci boyunca kullanılan işlem

parametrelerinin şekillendirmeye olan etkilerini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışma neticesinde geri esneme sonuçlarına en büyük etkiyi sağlayan parametrenin sıcaklık olduğunu ve sıcaklık arttırıldıkça geri esnemenin azaltılabileceğini analiz etmişlerdir [40].

Li ve diğerleri Ti6Al4V alaşımının bükme ile şekillendirilmesinde darbe akımının etkisini araştırmışlardır. Akım yoğunluğunun önemli derecede çekme gerilmesini ve gerinimi etkilediğini analiz etmişlerdir. Akım yoğunluğu arttıkça akma geriliminin azaldığı ve gerinimin arttığı sonucunu elde etmişlerdir. Bükme bölgesinde meydana gelen deformasyonlardan darbe akımı sayesinde kaçınılabileceğini analiz etmişlerdir. Çalışmalarında 620,4 °C sıcaklığa kadar ulaşmış ve Şekil 2.6'da verilen darbe akımı yardımcı bükme deney cihazını kullanmışlardır [41].



Şekil 2.6. Darbe akımı yardımcı bükme cihazı [41]

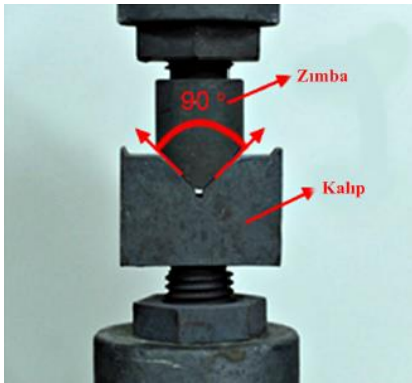
Fan ve Gao, Ti6Al4V sacının tek noktadan sıcak artışı elektrikli şekillendirilmesi sonucunda oluşan şekillendirilmiş parçaların boyutsal kararlılığını sayısal ve deneysel olarak araştırmışlardır. Tek noktadan sıcak artışı elektrikli şekillendirme yönteminin kararlılığı arttırmak ve iş parçasının iç gerilimini azaltmak için benimsenebilecek bir yöntem olduğu sonucuna ulaşmışlardır [42].

Yang ve diğerleri de şekillendirme tekniklerindeki gelişmeler, mikro yapıların analizindeki gelişmeler gibi son dönemdeki titanyum alaşımlarının plastik şekillendirme teknolojilerinde meydana gelen gelişmeleri içine alan bir derleme çalışması yapmışlardır [35].



Sun ve diğeri Ti6Al4V sacının yüksek sıcaklıklarda şekillendirilmesinde deformasyon sıcaklığının ve germe değerinin akma dayanımı üzerindeki etkilerini ölçmüş ve deformasyon mekanizmasını analiz etmişlerdir. Çalışmalarında sıcaklık arttıkça akma dayanımının azaldığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca, 700°C'nin altında Ti6Al4V alaşımının istikrarsız akma sonuçları verdiği verisini elde etmişlerdir [43].

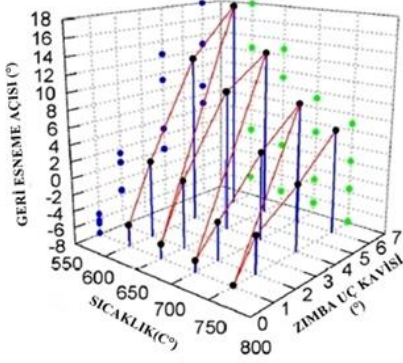
Zong ve diğeri Ti6Al4V alaşım saclarının V-bükme kalıbı ile sıcak şekillendirilmesinde geri esneme ölçümünü içeren bir çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında; oda sıcaklığı ile 850°C aralığında sıcaklık parametresi, 0.1 mm/s sabit hızda hız parametresi, 1, 2, 4 ve 6 mm olmak üzere zımba uç kavis parametresi gibi geri esnemeye etki eden birçok parametrenin şekillendirme üzerindeki olumlu ve olumsuz etkilerini araştırmışlardır. İzotropik bir sertleşme modeli ile V-bükme ve geri esneme davranışlarını sayısal ve deneysel olarak analiz etmişlerdir. Farklı sıcaklıklarda ve farklı zımba uç kavislerinde negatif ve pozitif geri esneme açıları elde etmişler ve sıcaklık arttıkça geri esnemenin azaldığını belirlemişlerdir. Ayrıca, V-bükme kalıbı ile şekillendirmede genelde pozitif bir geri esneme elde edildiği sonucuna ulaşmışlardır. Ve zımba uç kavis arttıkça geri esnemenin arttığı tespit etmişlerdir. Ütuleme süresinin de geri esnemeyi azaltıcı bir etkiye sahip olduğunu belirlemişlerdir [44]. Çalışmalarında kullanılan deney cihazının görüntüsü Şekil 2.7'de verilmiştir.



Şekil 2.7. V-bükme cihazı [44]

Zong ve diğeri yaptıkları deneysel ve sayısal çalışmalar sonucunda elde ettikleri verilerden; sıcaklık ve zımba uç kavisinin geri esnemeye olan etkisini grafiksel olarak ortaya koymuşlardır. Geri esnemenin sıcaklıkla ters, zımba uç kavis ile doğru orantılı

sonuçlara sahip olduğunu analiz etmişlerdir [44]. Elde edilen grafik Şekil 2.8’de verilmiştir.



Şekil 2.8. Geri esneme-sıcaklık-zımba uç kavisi ilişkisi [44]

Yapılan literatür araştırmaları incelendiğinde hem sıcaklığın hem de işlem parametrelerinin birlikte V-bükme ile şekillendirme yönteminde geri esnemeye etkisinin yeterince araştırılmadığı görülmektedir. DP600 sac malzeme için geri esnemenin 300°C’ye kadar araştırıldığı, Titanyum Grade 1 sac malzeme için ise soğuk ve sıcaklıkla şekillendirme çalışmalarının yeterince araştırılmadığı gözlemlenmiştir.

Bu tez çalışmasında 1 mm kalınlıkta DP600 ve Titanyum Grade 1 sac malzemelerinin V-bükme kalıplarında bükülmesinde oluşan geri esnemeye sıcaklık (RT, 100°C, 200°C, 300°C, 400°C ve 500°C), kalıp açısı (15°, 30°, 45°, 60° ve 75°), zımba uç kavisi (0, 2 ve 4 mm) ve ütüleme süresi (0,10 ve 20 s) parametrelerinin etkisi deneysel araştırılmıştır.

### 3. KAVRAMSAL BİLGİLER VE GERİ ESNEME TEORİSİ

Bu bölümde şekillendirme işleminin tanımı, V-bükme yöntemi ve geri esneme davranışı açıklanmıştır.

#### 3.1. Şekillendirme İşlemleri ve Standardı

Günlük hayatta kullanılan birçok malzemenin imalatında belli başlı bir dizi süreç takip edilmektedir. İmal edilecek son ürünün elde edilebilmesi için hammaddenin temel biçimlendirilmesi, parçalara ayrılması, ısı işlem vb. yardımıyla malzeme özelliklerinin değiştirilmesi, malzemelerin birbirine eklenmesi, kaplanması ve son olarak da nihai şeklin verilmesi amacıyla şekillendirme işlemlerinden geçirilmesi gibi süreçler uygulanmaktadır. Bu işlemler, DIN 8580 standardına göre Şekil 3.1’de verilmiştir [45].



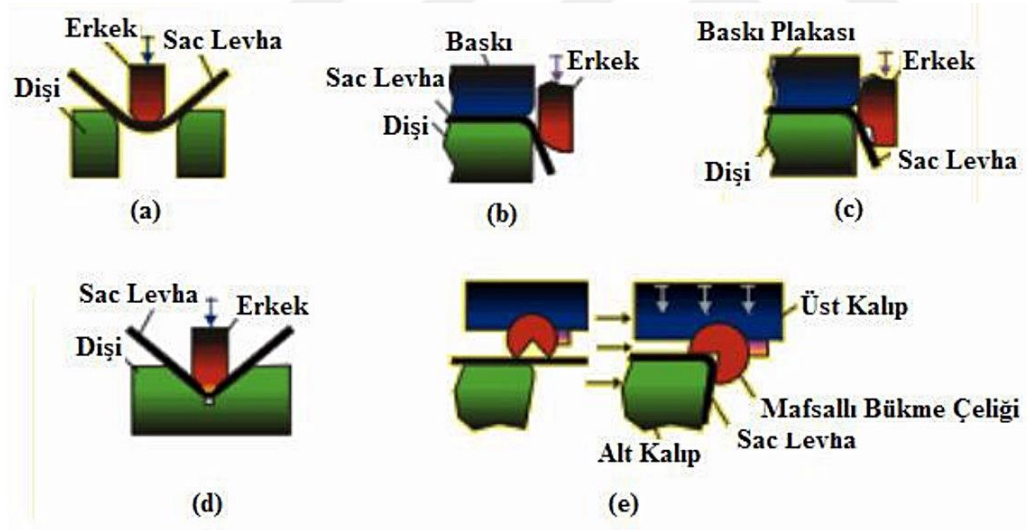
Şekil 3.1. İmalat süreci aşamaları [45]

DIN 8582 standardına göre şekillendirme yöntemleri beş ana başlıktan oluşmaktadır [45]. Bu gruplar Çizelge 3.1’de aşağıda verilmiştir. V-bükme ile şekillendirme yöntemi ise bükme ile şekillendirme grubu altında yer almaktadır.

Çizelge 3.1. Şekillendirme yöntemleri [45]

ŞEKİLLENDİRME YÖNTEMLERİ
1. Basma ile Şekillendirme
2. Çekme ile Şekillendirme
3. Basma ve Çekme ile Şekillendirme
4. Bükme ile Şekillendirme
5. Kesme ile Şekillendirme

Bükme operasyonları, kullanılacak sac malzemenin şekline bağlı olarak değişmektedir. Literatürde kullanılan bükme operasyon çeşitleri Şekil 3.2’de verilmiştir.

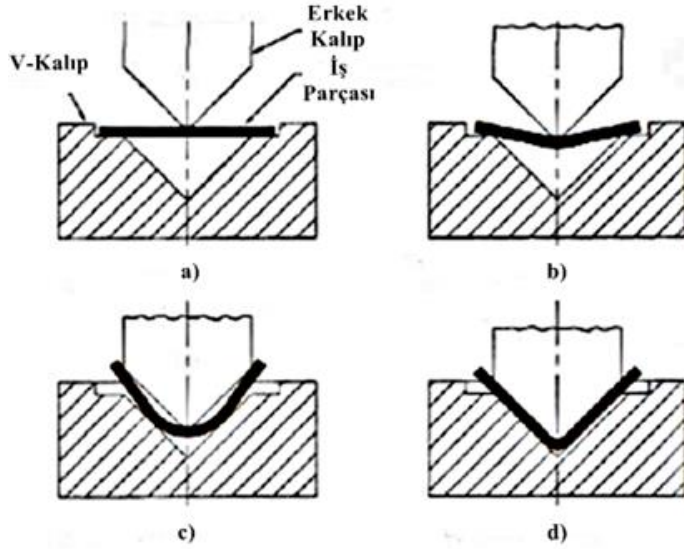


Şekil 3.2. Bükme operasyonları a) Serbest bükme b) Kenar bükme c) Çift etkili bükme d) Ezerek bükme e) Döndürerek bükme [2]

### 3.2. V-Bükme Yöntemi

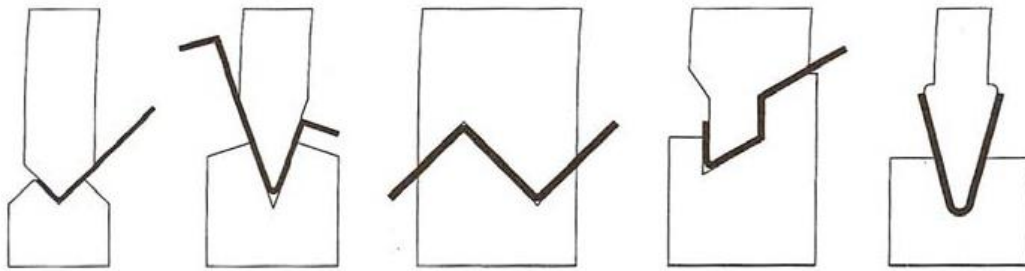
V-bükme yöntemi ile şekillendirme geleneksel şekillendirme yöntemlerinden birisidir. V-bükme; açılı dişi V kalıp üzerine yerleştirilen iş parçasının zımba ve dişi kalıp arasında bükülerek V formunun elde edilmesi yöntemidir. V-bükme yöntemi ile şekillendirmede tam bir şekillendirme süreci Şekil 3.3’te erkek kalıbın iş parçasına temas ettiği birinci aşama (a), iş parçasının bükülmeye başladığı ikinci aşama (b), iş parçasının kalıp şeklini

aldığı üçüncü aşama (c) ve nihai ürünün elde edildiği son aşama (d) ile birlikte dört temel aşamadan oluşmaktadır [2].



Şekil 3.3. V-bükme yönteminin aşamaları a) 1. Aşama b) 2. Aşama c) 3. Aşama d) 4. Aşama [2]

Farklı geometrilerde V-bükme uygulamalarının değişik örnekleri Şekil 3.4'te verilmiştir.

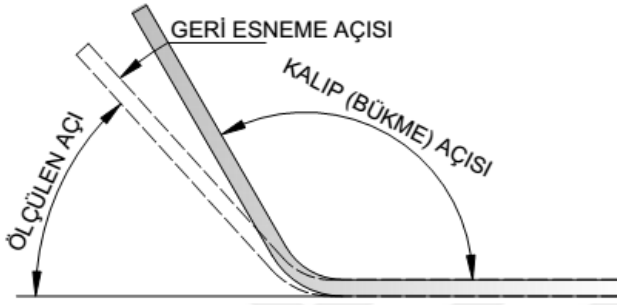


Şekil 3.4. V-bükme uygulamaları [6]

Ezerek bükme geri esnemeyi azaltmak için yaygın kullanılan etkili bir yöntemdir. Bu sebeplerden dolayı imalat teknolojisinde V-bükme yöntemi ile şekillendirmede yaygın kullanılan bir yöntem haline almıştır.

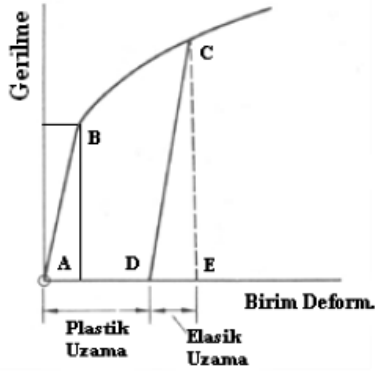
### 3.3. Geri Esneme Davranışı ve Teorisi

Bükme işlemlerinde malzemelerin maksimum çekme gerilmesi aşılmadan elastikiyet sınırı aşılmaktadır. Bu nedenle malzeme üzerinden yük kaldırıldığında, sahip olduğu elastik gerilmelerden dolayı sac malzeme eski halini almaya ve bükülen malzeme esneyerek geriye doğru açılmaya çalışmaktadır. Malzemenin eski haline dönme çabası geri esneme olarak adlandırılmaktadır [2]. Geri esnemenin şematik gösterimi Şekil 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3.5. Geri esnemenin şematik gösterimi [2]

Geri esneme teorik olarak gerilme birim deformasyon eğrisi yardımıyla açıklığa kavuşturulabilmektedir. Gerilme birim deformasyon eğrisi Şekil 3.6'da verilmiştir. AB doğrusu boyunca gerilme ve birim deformasyon elastik bölgede orantılı olarak değişime uğramaktadır. Grafik üzerinde C noktası ve devamında deformasyon plastik bölgede devam etmektedir. Gerilim C noktasında iken yük kaldırıldığında birim deformasyon değeri C noktasının izdüşümü olan E değeri yerine D değerini almaktadır. Bu durum malzemenin plastik bölgedeki elastik özelliğinden kaynaklanmaktadır. Burada AD malzemedeki kalıcı şekil değişikliğini ifade ederken, DE ise malzemenin eski haline dönme isteğinin bir göstergesini yani geri esnemeyi belirtmektedir [26, 45].



Şekil 3.6. Gerilme birim deformasyon eğrisi [45]

Geri esneme, imalat sürecinde sac malzemelerin şekillendirilebilirliğini olumsuz etkileyen bir faktördür. Artan geri esneme, şekillendirilen sac malzemenin kalitesini azaltırken, şekillendirme sürecini de uzatarak parça başına birim maliyet artışına sebep olmaktadır. Bükme işleminde geri esneme değeri; malzemenin cinsi, kalınlığı, ütüleme süresi, kalıp açısı, zımba uç kavisi, sıcaklık vb. gibi birçok parametreden etkilenmektedir. Düzgün parça geometrilerinin elde edilebilmesi için geri esnemenin ortadan kaldırılması gerekmektedir. Çeşitli yöntemlerle geri esneme telafi edilmeye veya işlemin başında tahmin edilmeye çalışılmaktadır [2].





## 4. MATERYAL VE METOT

Deneysel çalışmalar; tasarımı, imalatı ve kalibrasyonu yapılan elektronik kontrollü deney cihazında yapılmıştır. Deney cihazı Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi Biriminden alınan proje desteği ile şekillendirme hızı, bükme kuvveti, ütüleme süresi bilgisayardan veri girilebilecek ve kontrol edilebilecek şekilde revize edilmiştir. Ayrıca, sıcaklık kontrol ünitesi ve ekipmanları da eklenmiştir.

Deney cihazında V-bükme işlemi; tel erozyon tezgahında kesilerek hazırlanan kalıp ve zımbalar aracılığıyla yapılmıştır. Kalıplar üzerinde sac malzemelerin hep aynı konumda olmasını sağlayan kanallar bulunmaktadır.

Deney cihazında şekillendirme zımbasının üzerinde yük hücresi bulunmaktadır. Programa girilen kuvvet değeri ile yük hücresinin sahip olduğu kuvvet değeri aynı seviyeye ulaştığı zaman ütüleme süresi miktarınca zımba iş parçasına kuvvet uygulamaktadır. Sıcak şekillendirme işlemlerinde ise el ile dijital olarak şekillendirme sıcaklığı ayarlanmakta ve ısıtıcı rezistans ısınmaya başlamaktadır. Rezistans üzerinde bulunan termokapıl (ısı çifti) ile sıcaklık oluşmaktadır. PID denetleyici ile sıcaklık istenilen değerde sabitlenebilmektedir. Ayarlanan sıcaklığa ulaşan rezistans malzeme üzerine yerleştirilmekte ve sac malzemenin ısınması termal kamera ile kontrol edilmektedir. Sac malzemenin istenilen sıcaklığa ulaşması ile birlikte rezistans sac malzeme üzerinde 10 saniye bekletilmekte ve sonrasında rezistans sac malzeme üzerinden alınarak şekillendirme işlemi yapılmaktadır.

Yapılan deneyler sonucunda şekillendirilen deney numunelerinin geri esneme açıları bilgisayarlı koordinat ölçme cihazı (CMM) yardımıyla ölçülmüştür.

### 4.1. Deneysel Çalışma Ortamı

Deney düzeneği sıcaklık kontrollü olarak şekillendirmeyi yapabilecek şekilde tasarlanmış ve revize edilmiştir. Deney düzeneği; mekanik ünite, elektrik ünitesi, elektronik kontrol ve veri alma ünitesi, ısıtma ve sıcaklık ünitesi, hidrolik ünite ve kalıp grubundan oluşmaktadır. Deney düzeneğinin genel görüntüsü Şekil 4.1'de verilmiştir [46]. Deney

düzenine sıcaklık kontrolü elektronik olarak ayarlanmaktadır. Isıtıcı rezistans istenilen sıcaklığa ulaştığında PID kontrol yapılarak istenilen sıcaklıkta sabit tutulmaktadır. Ayrıca şekillendirme kuvveti zımbaya bağlı olan yük hücresi tarafından anlık olarak izlenmektedir. Ütuleme süresi de kontrol yazılımı aracılığıyla ayarlanabilmektedir.



Şekil 4.1. Deney düzeneği genel görüntüsü

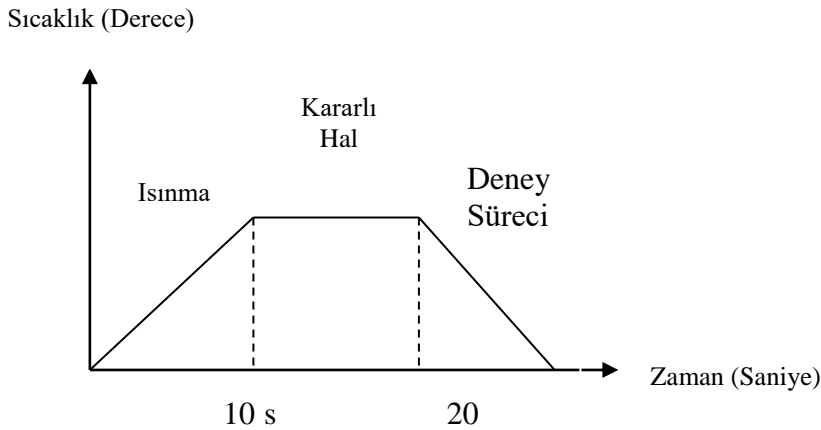
#### 4.1.1. Isıtma ünitesi ve sıcaklık ölçümü

Deneysel çalışmalarda ılık şekillendirme deney numunelerinin ısıtılması ve sıcaklık kontrolü elektrikli ısıtma ünitesine entegre rezistans yardımıyla yapılmıştır. Rezistansın sıcaklığı PID ile kontrol edilmiştir. Rezistans üzerinde sıcaklığı ölçmek için termokapıl bulunmaktadır. Sıcaklık kontrol paneli üzerinde sıcaklık elle ayarlanmaktadır. Isıtma işleminin başlamasıyla, sıcaklık kontrol panelindeki PID yardımıyla rezistanstan gelen verilere göre sıcaklık ayarlanan değerde sabit tutulmaktadır. Isıtma ünitesinde rezistansların kenarında elektriksiz yalıtım için polyamid malzemeler bulunmaktadır. Sıcaklık kontrol panelinin ve ısıtma grubunun görüntüsü ile kalıp grubunun görüntüsü Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2. Sıcaklık kontrol ve ısıtma ünitesi ile kalıp grubunun genel görüntüsü

Deneysel çalışmanın ısıtma sürecinde termal kamera ile sıcaklık anlık izlenmiştir. Sıcaklık istenilen değere ulaştığında ise 10 saniyelik süre ile rezistans deney malzemesinin üzerinde bekletilmiştir. Çalışmada rezistans öncelikle ısıtılmış, kararlı yapıda malzeme üzerinde 10 saniye bekletildikten sonra rezistans malzemesi üzerinden kaldırılarak deney malzemesi soğumadan bükme işlemi gerçekleştirilmiştir. Malzemenin ısıtılması esnasında gerçekleşen sıcaklık değerinin değişimi Şekil 4.3'te verilmiştir.

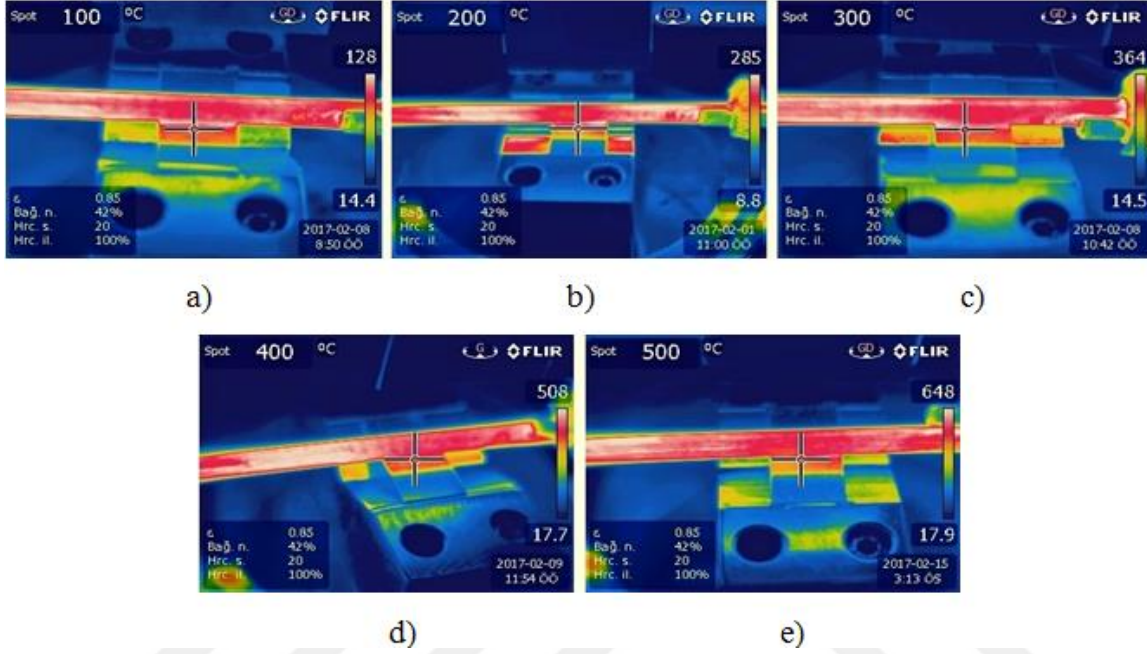


Şekil 4.3. Deney malzemesinin ısınma periyodunun grafiksel gösterimi

Termal kameradan alınan sıcaklık değerleri ile deney numuneleri üzerinde homojen bir sıcaklık dağılımının olduğu görüntülenmiştir. Böylece deney numuneleri, aynı sıcaklık değerinde ve benzer şekilde ısıtılmıştır. Bu durum bükme bölgesinin rezistans yardımıyla

ısıtılmasının geri esnemeye olan etkisinin araştırılmasında diğer parametreleri sabit tutarak doğru sonuca ulaşılması için önemli bir etkidir.

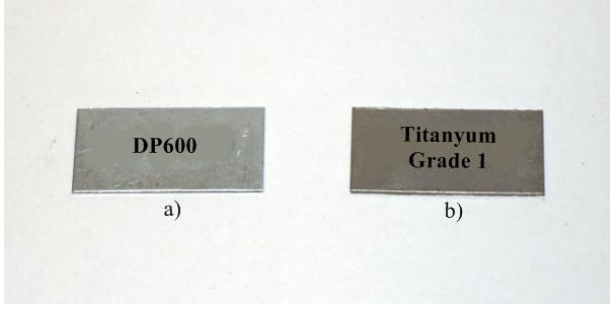
Deneysel çalışma esnasında alınan termal kamera görüntüleri Şekil 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.4. Termal kamera sıcaklık kontrol görüntüleri a) 100°C b) 200°C c) 300°C d) 400°C e) 500°C

## 4.2. Deney Malzemelerinin Karakterizasyonu

Deneysel çalışmalarda DP600 ve Titanyum Grade 1 sac malzemeler kullanılmıştır. Bu malzemelerin seçilmesinde otomotiv, uzay ve havacılık endüstrisinde sahip oldukları büyük kullanım alanı önemli bir yer tutmaktadır. Deney malzemeleri öncelikli olarak 20 mm x 40 mm x 1 mm boyutlarında giyotin makasta kesilerek hazırlanmıştır. Kullanılan deney numuneleri Şekil 4.5'te gösterilmiştir.

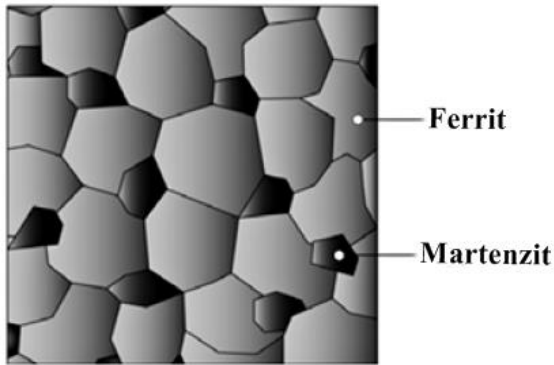


Şekil 4.5. Deney numuneleri a) DP600 b) Titanyum Grade 1

#### 4.2.1. DP600 sac malzemenin karakterizasyonu

20. yüzyılın üçüncü çeyreğinde yaşanan petrol kriziyle birlikte otomotiv üreticileri daha az yakıt tüketen hafif otomotivlerin üretilmesine yönelik çalışmalar başlatmıştır. Çift fazlı saclar sahip oldukları iyi şekil verilebilme özelliği sayesinde bu konuda ön plana çıkmıştır [26].

Çift fazlı çelikler yüksek sünekliliği sağlayan ferrit mikro yapı içinde dağılmış sert martenzit yapıdan oluşmaktadır. Yüksek mukavemet özelliklerine sahip martenzit yapı mikro yapı içinde % 20'lik bir alanı kapsamaktadır [47]. DP çeliklerindeki karbon, martenzit yapıyı oluştururken sertleşmeye de yardımcı olan bir elementtir. Krom, vanadyum, molibden, nikel de sertleşmeye arttırıcı etkide bulunabilmektedir [48]. Çift fazlı çeliklere ait mikro yapı Şekil 4.6'da verilmiştir.



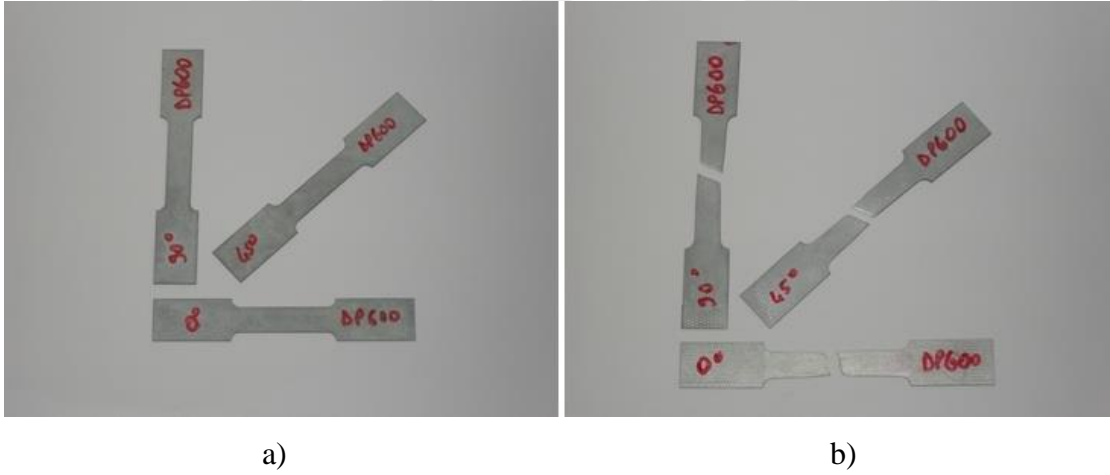
Şekil 4.6. Çift fazlı çeliklerin şematik mikro yapısı [48]

DP600 sac malzemenin karakterizasyonunda sac malzemeye çekme testi, sertlik ölçme testleri yapılmış ve kimyasal spektrometre ile sac malzemenin kimyasal analizi yapılmıştır. Kimyasal spektrometre analizinden elde edilen sonuçlar Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. DP600 sac malzemenin kimyasal kompozisyonu (% wt)

MALZEME	Zn	Fe	Mn	Cr	Co
DP600	73,346	25,702	0,515	0,091	0,311

Çekme testi için çekme test numuneleri öncelikle tel erozyon tezgahında ASTM-E8 standardına uygun olarak 0°, 45° ve 90° hadde yönlerinde kesilerek hazırlanmıştır. Üç farklı hadde yönünde hazırlanan test numunelerine ait test öncesi ve sonrası görüntüleri Şekil 4.7’de verilmiştir. Çekme testi sonucunda elde edilen mekanik özellikler Çizelge 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.7. DP600 çekme testi numuneleri a) Test öncesi b) Test sonrası

Ayrıca deney malzemeleri; İnstron marka sertlik ölçme ve çekme cihazı yardımıyla Vickers sertlik ölçme testine ve ayrıca çekme testine tabi tutulmuştur. Deney numunesi üzerinden üç farklı noktadan alınan sertlik ölçme sonuçları ve diğer test sonuçları Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2. DP600 sac malzemeye ait çekme ve sertlik testi sonuçları

	DP600				
	Maksimum Çekme Gerilmesi (MPa)	Akma Gerilmesi (MPa)	Maksimum Çekme Gerilmesindeki Çekme Gerinimi (%)	Young Modülü (GPa)	Sertlik, Vickers (HV3)
1. Test	662,900	281,130	21,015	19,637	149
2. Test	650,057	268,613	20,753	20,145	151
3. Test	663,551	392,650	20,099	22,708	149
Ortalama	658,836	314,131	20,622	20,830	150

#### 4.2.2. Titanyum Grade 1 sac malzemenin karakterizasyonu

1791 yılında William Gregor tarafından bulunan titanyum doğada alüminyum, demir ve magnezyumdan sonra en çok bulunan yaygın elementlerden birisidir [49]. Titanyum % 45 hafif olmasına karşın çeliğe göre daha dayanıklı ve mukavim bir malzemedir. Alüminyuma göre ise 2 kat dayanıklı fakat % 60 ağır bir yapıya sahiptir [50].

Titanyum alaşımları genel olarak  $\alpha$ ,  $\beta$  ve  $\alpha+\beta$  alaşımları olmak üzere üç grupta toplanmaktadır.  $\alpha$  alaşımları tamamıyla  $\alpha$  fazından oluşurken,  $\beta$  alaşımı büyük oranda  $\beta$  fazından oluşmaktadır.  $\alpha+\beta$  alaşımı ise oda sıcaklığında hem  $\alpha$  fazına hem de  $\beta$  fazına sahiptir [51-54].

$\alpha$  alaşımları diğer alaşımlara göre daha fazla  $\alpha$  fazına sahip olduğu için ısıtılma işlemiyle sertleştirilememekte ve dövülebilirliği diğer alaşımlara göre daha düşüktür.  $\alpha$  alaşımlarının düşük dövülebilirliği, dövme anında malzeme yüzeyinde meydana gelen çatlaklardan da anlaşılabilir [51-54].

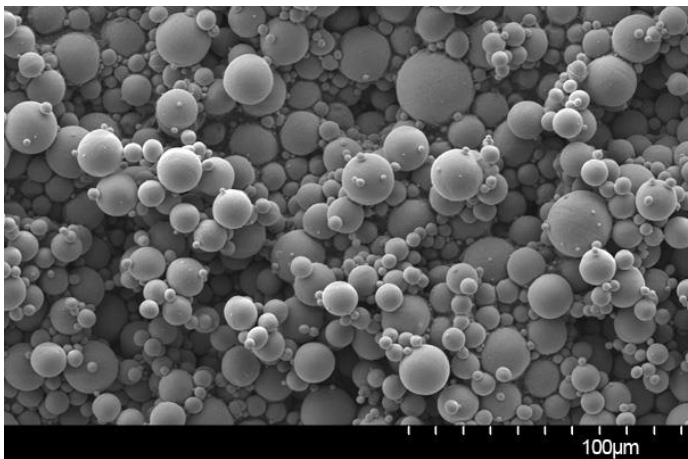
Önemli miktarda  $\beta$  fazı içeren  $\beta$  alaşımları ise soğuk şekillendirilebilme, yüksek yoğunluk, dövülebilirlik vb. özellikleriyle diğer titanyum alaşımlardan ayrılmaktadır [49]. Yüksek mukavemet gerektiren uçak parçaları, yay, boru vs. malzemelerin imalatında hammadde olarak  $\beta$  alaşımları kullanılmaktadır [51, 53, 54, 56].

$\alpha+\beta$  alaşımları ise  $\alpha$  ve  $\beta$  fazlarından oluşan bir kompozisyona sahiptir. En genel  $\alpha+\beta$  alaşımı ise Ti6Al4V'dir. Titanyum üretiminin çoğunu Ti6Al4V alaşımının üretimi oluşturmaktadır [51, 53, 54, 57, 58].

Havacılık malzemelerinde, ısıtma üniteleri ve diğer yoğunlaştırıcı tüp malzemelerde üstün esnekliği, düşük gerinimi ve korozyona dayanıklı yapısı sebebiyle çokça tercih edilen Titanyum Grade 1 sac malzemenin karakterizasyonunda, DP600 sac malzemedede olduğu gibi çekme testi, sertlik ölçme testi ve kimyasal analiz testleri yapılmıştır. Kimyasal analiz sonuçları Çizelge 4.3'te ve mikro yapısı da Şekil 4.8'de verilmiştir.

Çizelge 4.3. Titanyum Grade 1 sac malzemenin kimyasal kompozisyonu (% wt)

MALZEME	Ti
Titanyum Grade 1	99,9



Şekil 4.8. Titanyum Grade 1 malzemesi SEM görüntüsü



Üç farklı hadde yönünde hazırlanan Titanyum Grade 1 sac malzemenin çekme testi numuneleri Şekil 4.9’da verilmiştir. Çekme testi ve sertlik ölçme testi sonrası elde edilen mekanik özellikler Çizelge 4.4’te verilmiştir.



Şekil 4.9. Titanyum Grade 1 çekme testi numuneleri a) Test öncesi b) Test sonrası

Çizelge 4.4. Titanyum Grade 1 sac malzemeye ait çekme ve sertlik testi sonuçları

	Titanyum Grade 1				
	Maksimum Çekme Gerilmesi (MPa)	Akma Gerilmesi (MPa)	Maksimum Çekme Gerilmesindeki Çekme Gerinimi (%)	Young Modülü (GPa)	Sertlik, Vickers (HV3)
1. Test	309,216	166,330	33,729	23,178	120
2. Test	300,883	192,076	10,596	21,990	119
3. Test	320,080	214,583	9,865	21,071	117
Ortalama	310,060	190,997	18,063	22,080	118,66

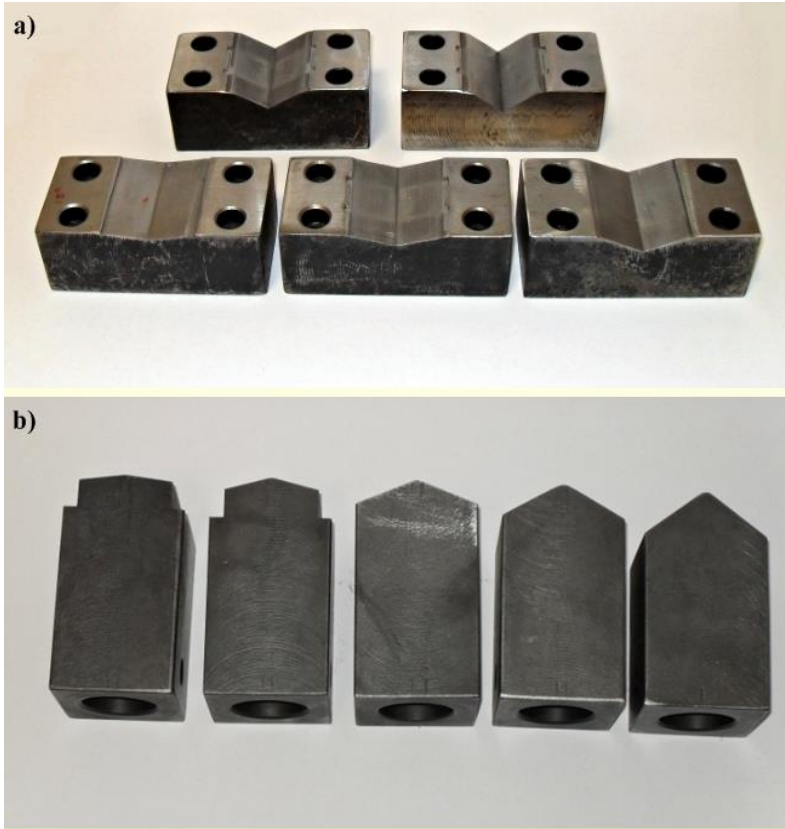
### 4.3. Deney Parametreleri

Tez çalışmasında; geri esnemeye kalıp açısı, zımba uç kavisi, ütüleme süresi, malzeme cinsi, rezistans ile ısıtılan bükme bölgesindeki sıcaklık farklılığı gibi parametrelerin etkisi deneysel araştırılmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan deney parametreleri Çizelge 4.5'te verilmiştir.

Çizelge 4.5. Deney parametreleri

DENEY PARAMETRELERİ	PARAMETRE DEĞERLERİ
Malzeme	DP600, Titanyum Grade 1
Kalıp Açısı	15°, 30°, 45°, 60° ve 75°
Zımba Uç Kavisi	0, 2 ve 4 mm
Ütüleme Süresi	0, 10 ve 20 s
Sıcaklık	RT, 100°C, 200°C, 300°C , 400°C ve 500°C

Deneysel çalışmada kullanılan kalıplar ve zımbalar Şekil 4.10'da verilmiştir.



Şekil 4.10. Kalıp ve zımba görüntüleri a) Dişi kalıplar b) Zımbalar

V-bükme ile şekillendirme yönteminde malzemelerin doğru şekillendirilebilmesi için çekme dayanıma bağlı olarak hesaplanan şekillendirme kuvveti her iki malzeme için ayrı ayrı hesaplanmış ve deneysel çalışmada uygulanmıştır.

Şekillendirme kuvvetinin hesaplanmasında Eşitlik 4.1'den yararlanılmıştır.

$$F = \frac{K \times L \times S \times t^2}{W} \quad (4.1)$$

Bu eşitlikte;

F, bükme kuvvetini (N),

K, bükme faktörünü (1,2 olarak kabul edilmiştir),

L, bükme eksenine yönünde sac malzeme genişliğini (mm),

S, çekme dayanımını (N/mm<sup>2</sup>),

t, sac malzeme kalınlığını (mm),

W, bükme kanalı genişliğini (mm) ifade etmektedir.

Eşitlik 4.1 yardımıyla şekillendirme kuvveti DP600 sac malzeme için 5550 N, Titanyum Grade 1 sac malzeme için ise 2600 N olarak hesaplanmış ve deneyler aşamasında bu kuvvetler uygulanmıştır.

Deneysel çalışmalarda belirlenen deney parametrelerine göre 540 adet deney yapılmıştır. Her bir deney güvenirliliği arttırmak için ikişer defa tekrar edilmiştir. İki deney sonucunda elde edilen verilerin ortalaması deney sonucu olarak değerlendirilmiş ve bu şekilde çalışmaya dahil edilmiştir.

#### 4.4. Geri Esnemenin Ölçümü

Bükülerek şekillendirilen sac parçalarındaki geri esnemenin ölçümü bilgisayarlı koordinat ölçme cihazı (CMM) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ölçüm işlemi öncesi şekillendirilen parçalar büyük bir sac malzeme üzerine deforme edilmeden yapıştırılmıştır. Daha sonra makinenin probu bir büküm yüzeyindeki üç farklı noktaya değiştirilerek bir düzlem oluşturulmuştur. Devamında prob bu defa diğer yüzeyde üç farklı noktaya temas ettirilerek dokundurulmuş ve ikinci düzlem elde edilmiştir. Elde edilen bu iki düzlem arasındaki açı ölçülerek geri esneme açısı elde edilmiştir. Geri esnemenin CMM ile ölçümüne ve ölçüm ortamına ait görüntüler Şekil 4.11’de verilmiştir.



Şekil 4.11. Geri esnemenin CMM’de ölçümü a) Ölçüm işlemi b) Ölçüm ortamı

## **5. DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI**

### **5.1. İşlem Parametrelerinin Geri Esnemeye Etkileri**

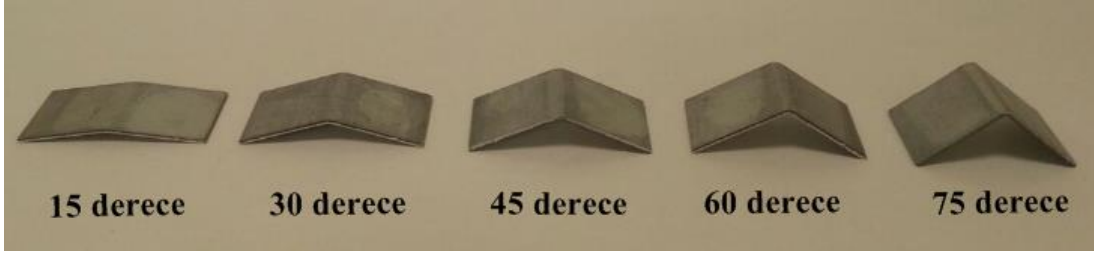
Bükme operasyonlarında şekillendirilen parçanın büküm bölgesinin iç yüzeyinde basma, dış yüzeyinde çekme gerilmeleri oluşmaktadır. Kalıp strokuna bağlı olarak bu gerilmelerin değeri artmaktadır [59-60]. Bükme operasyonlarında büküm açısının artması ile birlikte kalıp stroku artmakta ve bu nedenle basma ve çekme gerilmeleri artmaktadır. Gerilmelerdeki bu artış geri esneme açısının kalıp açısının artışına bağlı olarak artmasına sebep olmaktadır. Deneysel çalışmalarda kalıp açısının artışına bağlı olarak DP600 ve Titanyum Grade 1 sac malzemelerinde geri esneme açısının arttığı gözlemlenmiştir.

Bükme işlemlerinde ütüleme işlemi; şekillendirilen parçanın şeklini sınırlamaya, elastik gerinimin azalmasına ve kalıcı gerinimlerdeki artışa sebep olmaktadır [61-62]. Elastik gerinimin azalıp kalıcı gerinimlerin artması parçanın eski haline dönmesini sınırlamakta ve geri veya ileri esnemeyi azaltmaktadır. Deneysel çalışmalarda DP600 ve Titanyum Grade 1 sac malzemelerinde ütüleme süresinin artmasının geri esnemenin azalmasına sebep olduğu gözlemlenmiştir.

Bükme işlemi esnasında, geri esneme plastik bölgenin büyüklüğüne bağlı olarak değişmektedir. Küçük bir zımba uç kavisi tüm bükme gücünün dar bir alanda yoğunlaşmasına sebep olmaktadır. Daha büyük zımba uç kavisine sahip bükme işlemlerinde, kuvvet daha geniş bir plastik bölge boyunca yayılmaktadır. Plastik bölgenin büyüklüğündeki bu artış geri esnemenin de artmasına sebep olmaktadır [63]. Deneysel çalışmalarda DP600 ve Titanyum Grade 1 sac malzemeleri için zımba uç kavisindeki artışın geri esneme açısında artışa sebep olduğu gözlemlenmiştir.

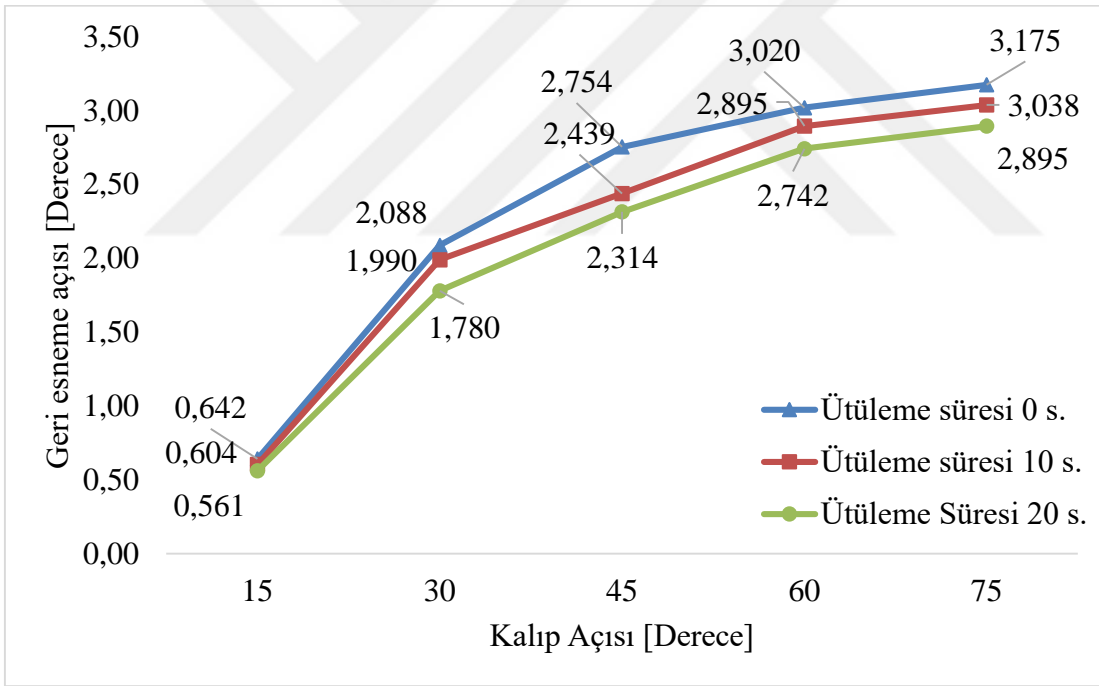
#### **5.1.1. DP600 sac malzemedeki işlem parametrelerinin geri esnemeye etkileri**

Elde edilen sonuçlar, incelenen parametrelerin geri esnemeye olan etkilerini net bir şekilde ortaya koymaktadır. Kalıp açısı, zımba uç kavisi, ütüleme süresi parametrelerinin geri esnemeye etkileri grafik olarak verilmiştir. DP600 malzemesine ait bükülmüş deney numuneleri Şekil 5.1'de verilmiştir.

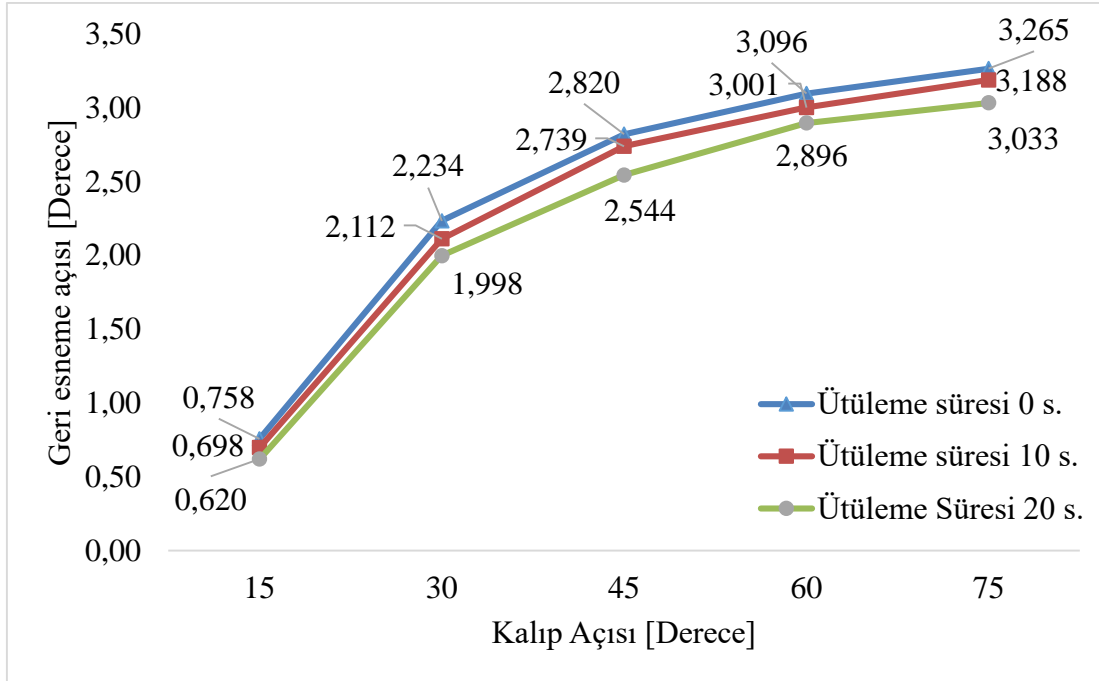


Şekil 5.1. DP600 malzemesine ait bükülmüş deney numuneleri

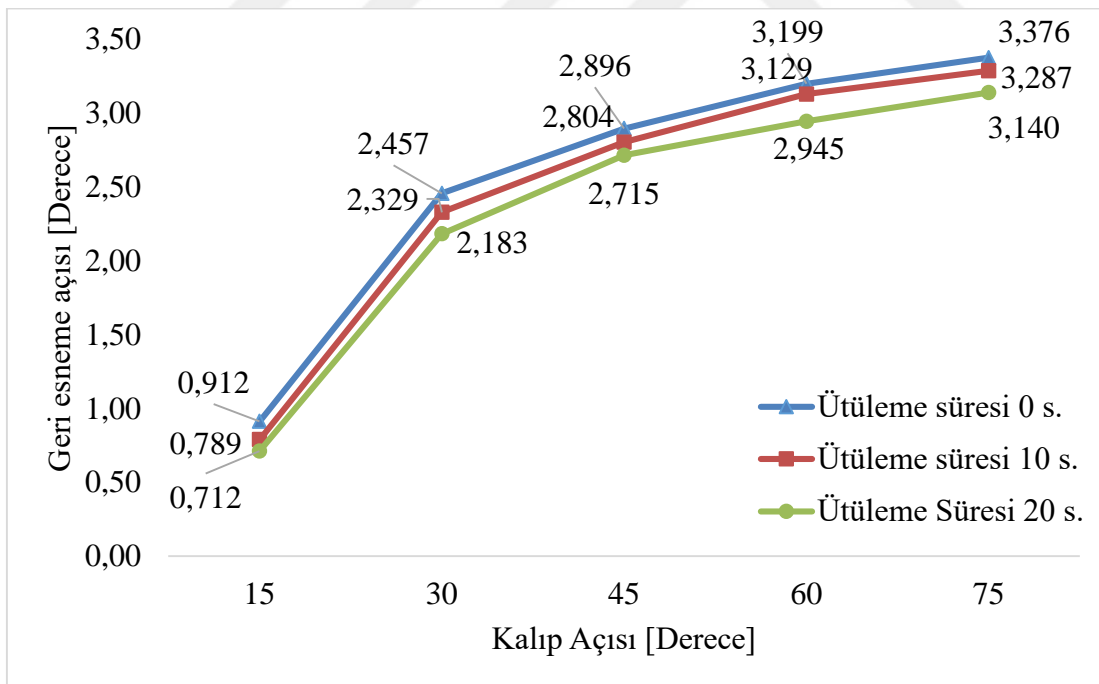
Oda sıcaklığında elde edilen verilerin grafiksel gösterimi Şekil 5.2-5.4'te, 100°C'de elde edilen verilerin grafiksel gösterimi Şekil 5.5-5.7'de, 200°C'de elde edilen verilerin grafiksel gösterimi Şekil 5.8-5.10'da, 300°C'de elde edilen verilerin grafiksel gösterimi Şekil 5.11-5.13'de, 400°C'de elde edilen verilerin grafiksel gösterimi Şekil 5.14-5.16'da, 500°C'de elde edilen verilerin grafiksel gösterimi Şekil 5.17-5.19'da verilmiştir.



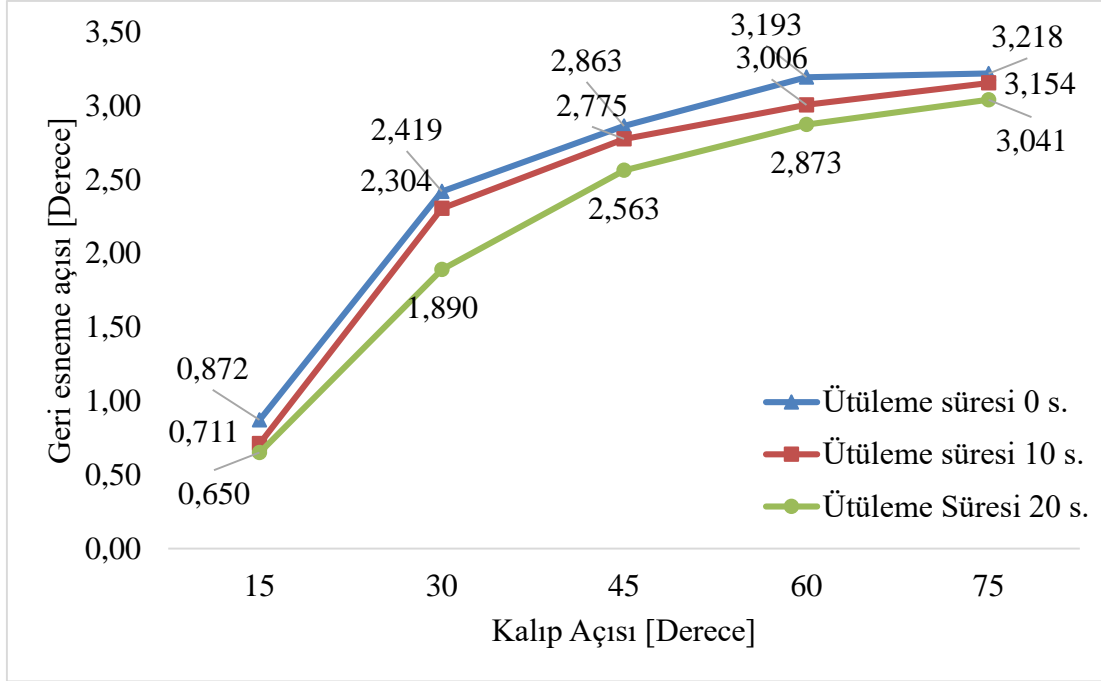
Şekil 5.2. RT'da DP600 sac malzeme için kalıp açısı-geri esneme ilişkisi, zımba uç kavisi 0 mm



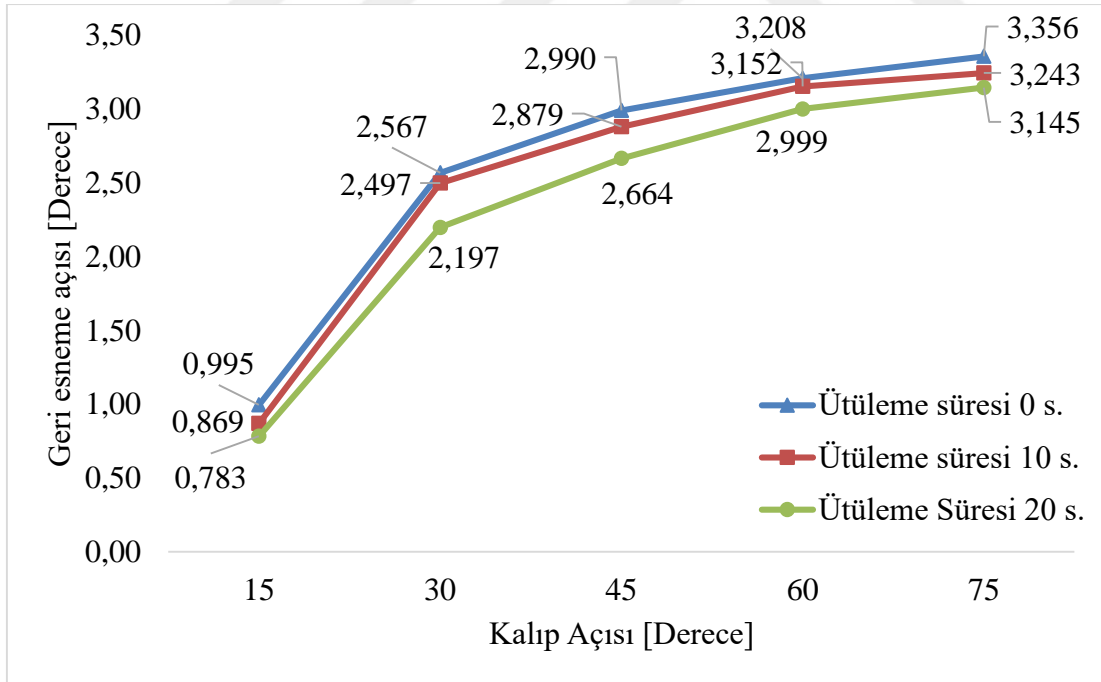
Şekil 5.3. RT'da DP600 sac malzeme için kalıp açısı-geri esneme ilişkisi, zımba uç kavisi 2 mm



Şekil 5.4. RT'da DP600 sac malzeme için kalıp açısı-geri esneme ilişkisi, zımba uç kavisi 4 mm

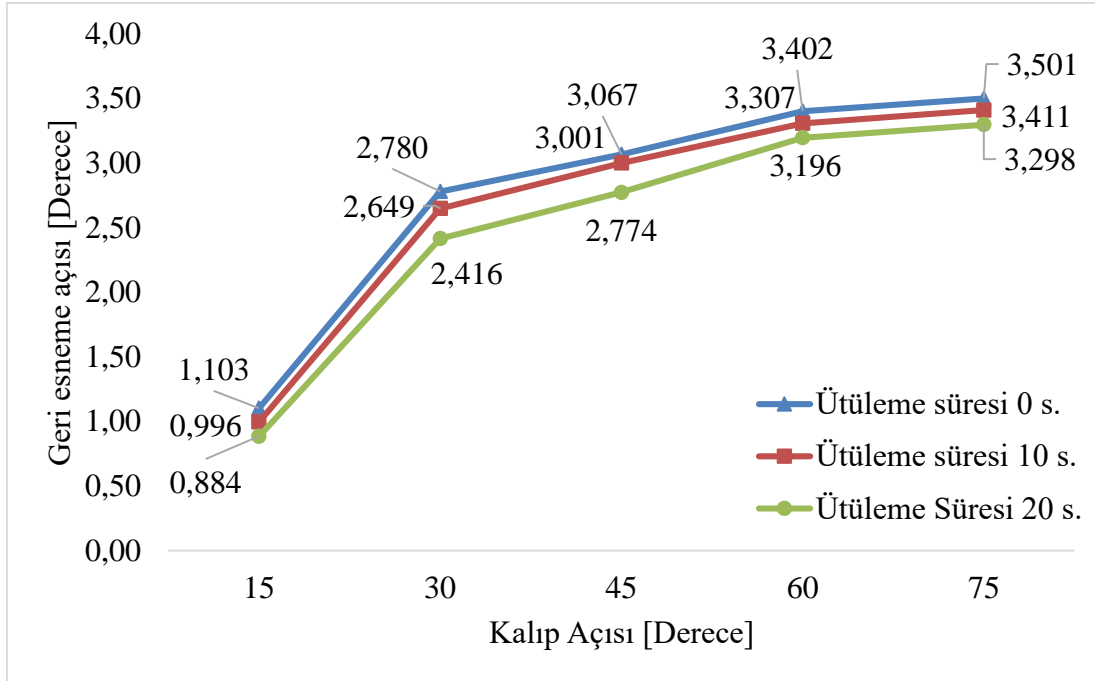


Şekil 5.5. 100°C sıcaklıkta DP600 sac malzeme için kalıp açısı-geri esneme ilişkisi, zımba uç kavisi 0 mm

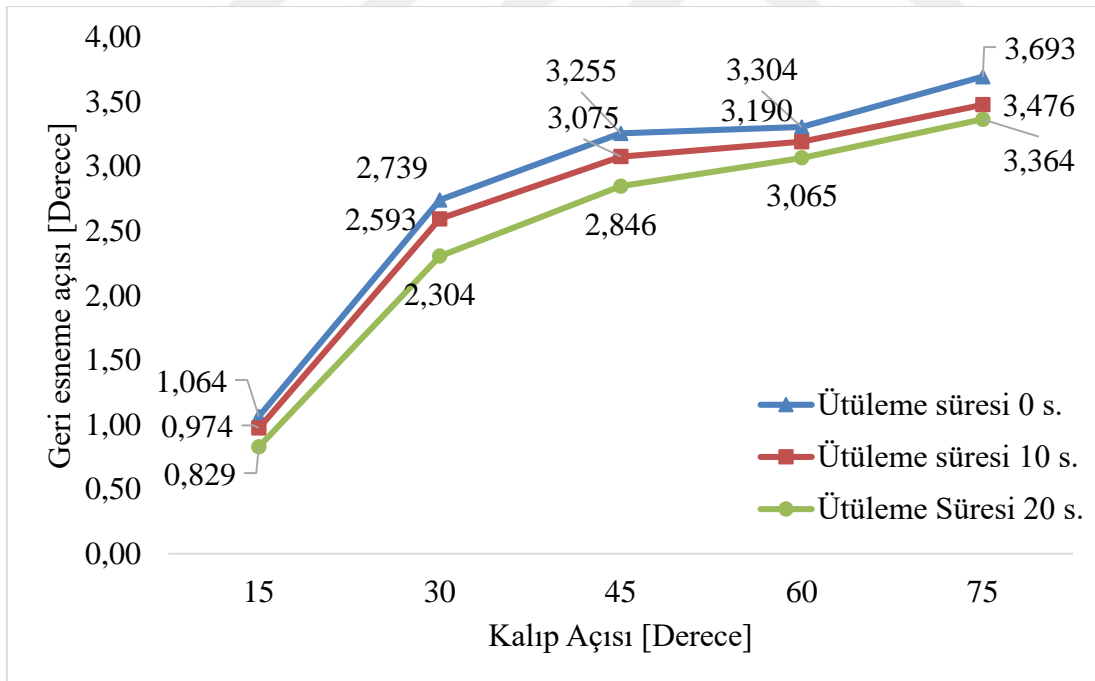


Şekil 5.6. 100°C sıcaklıkta DP600 sac malzeme için kalıp açısı-geri esneme ilişkisi, zımba uç kavisi 2 mm

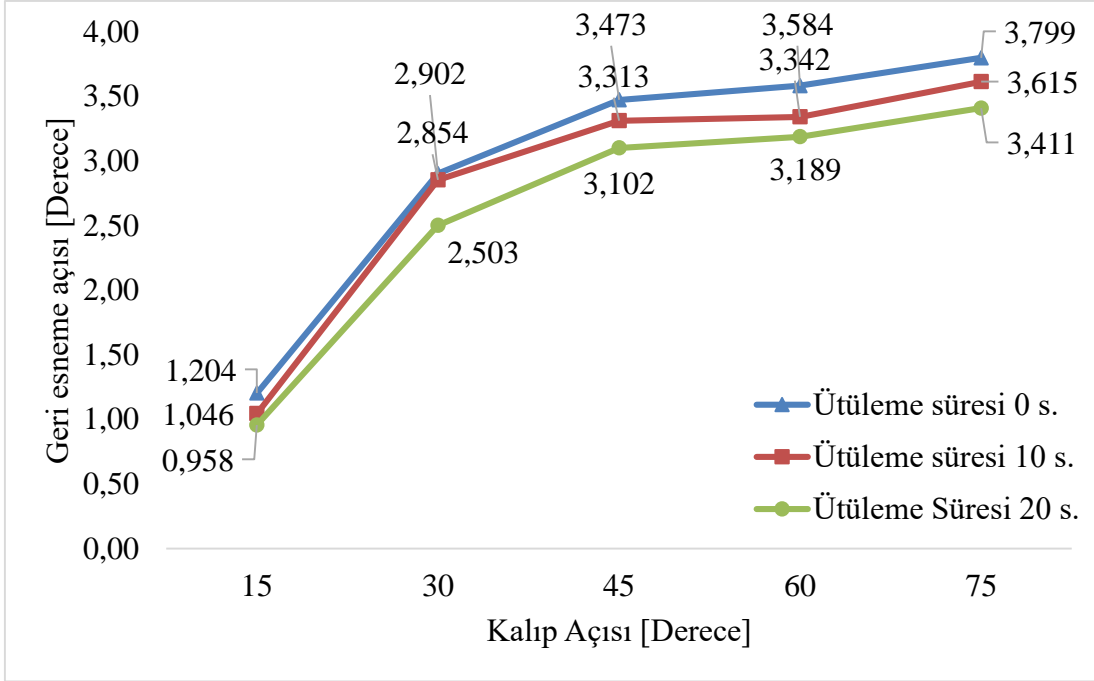




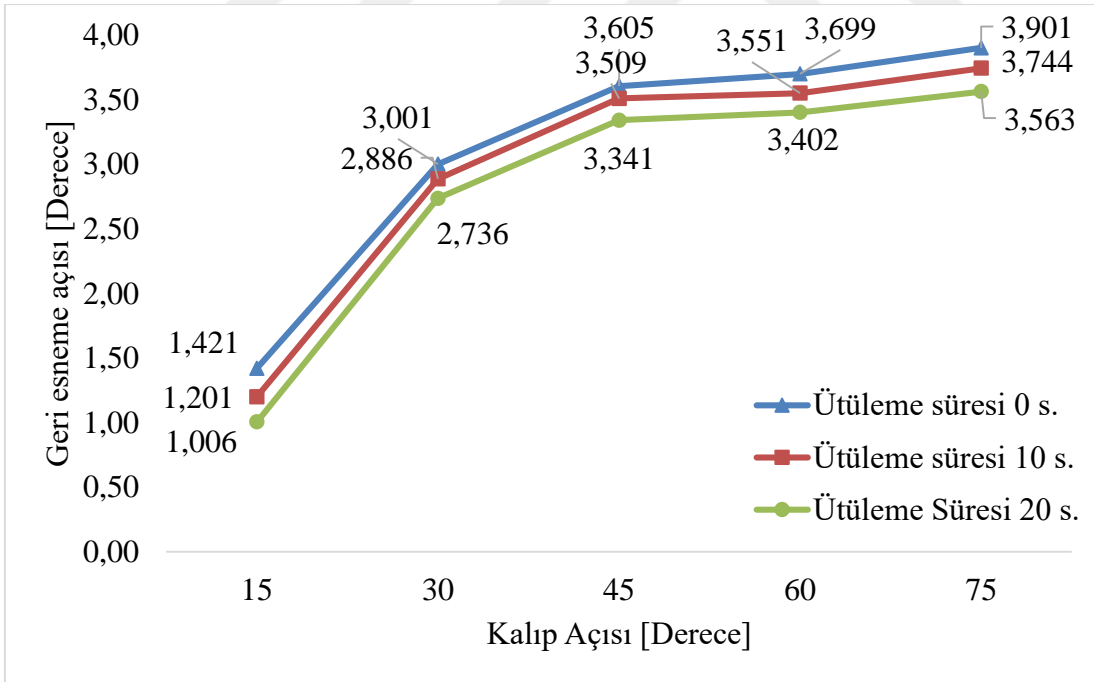
Şekil 5.7. 100°C sıcaklıkta DP600 sac malzeme için kalıp açısı-geri esneme ilişkisi, zımba uç kavisi 4 mm



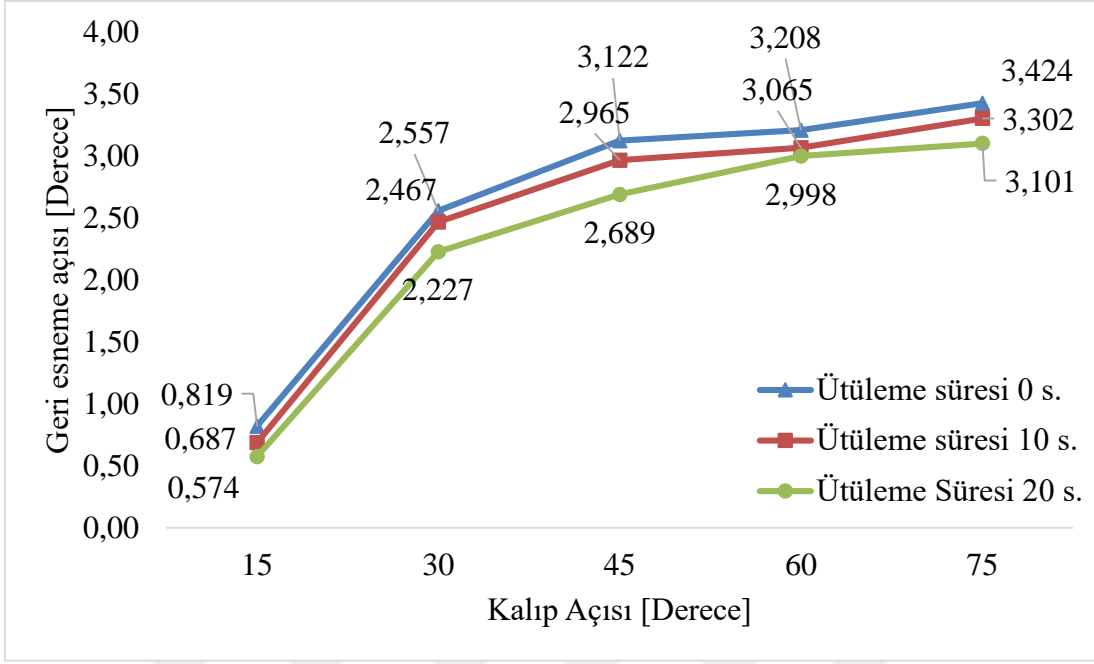
Şekil 5.8. 200°C sıcaklıkta DP600 sac malzeme için kalıp açısı-geri esneme ilişkisi, zımba uç kavisi 0 mm



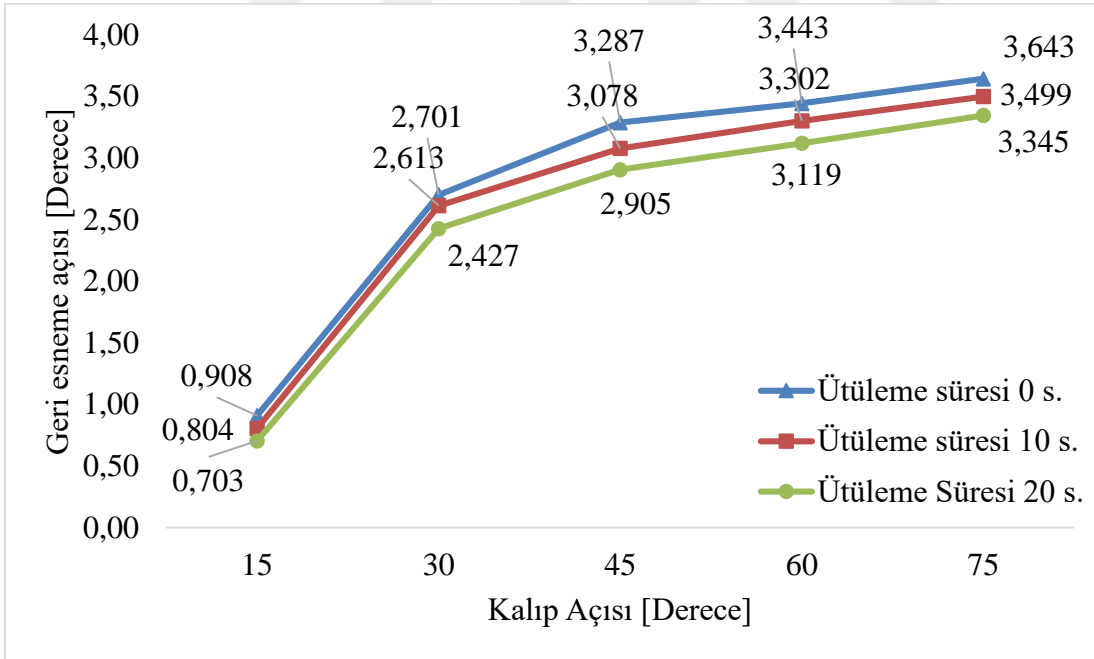
Şekil 5.9. 200°C sıcaklıkta DP600 sac malzeme için kalıp açısı-geri esneme ilişkisi, zımba uç kavisi 2 mm



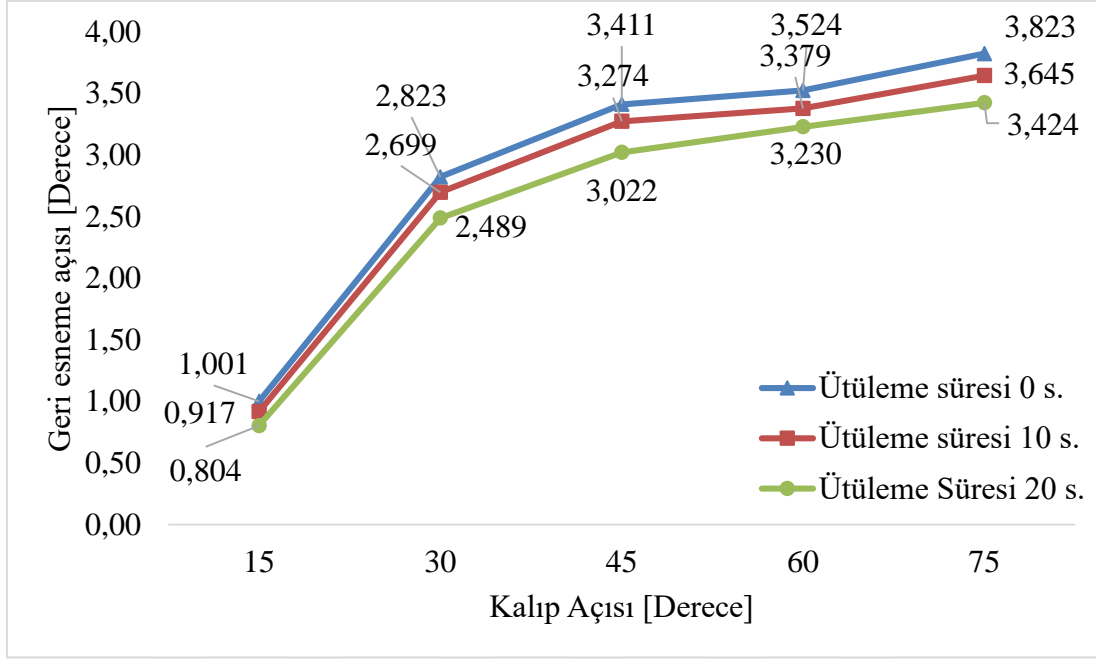
Şekil 5.10. 200°C sıcaklıkta DP600 sac malzeme için kalıp açısı-geri esneme ilişkisi, zımba uç kavisi 4 mm



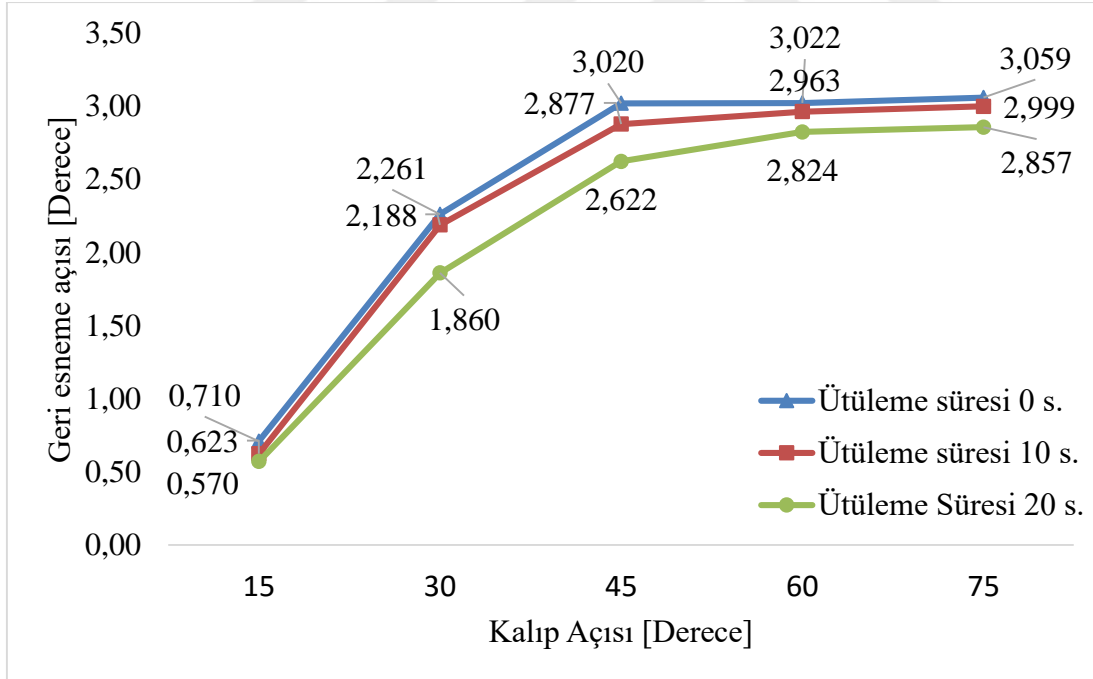
Şekil 5.11. 300°C sıcaklıkta DP600 sac malzeme için kalıp açısı-geri esneme ilişkisi, zımba uç kavisi 0 mm



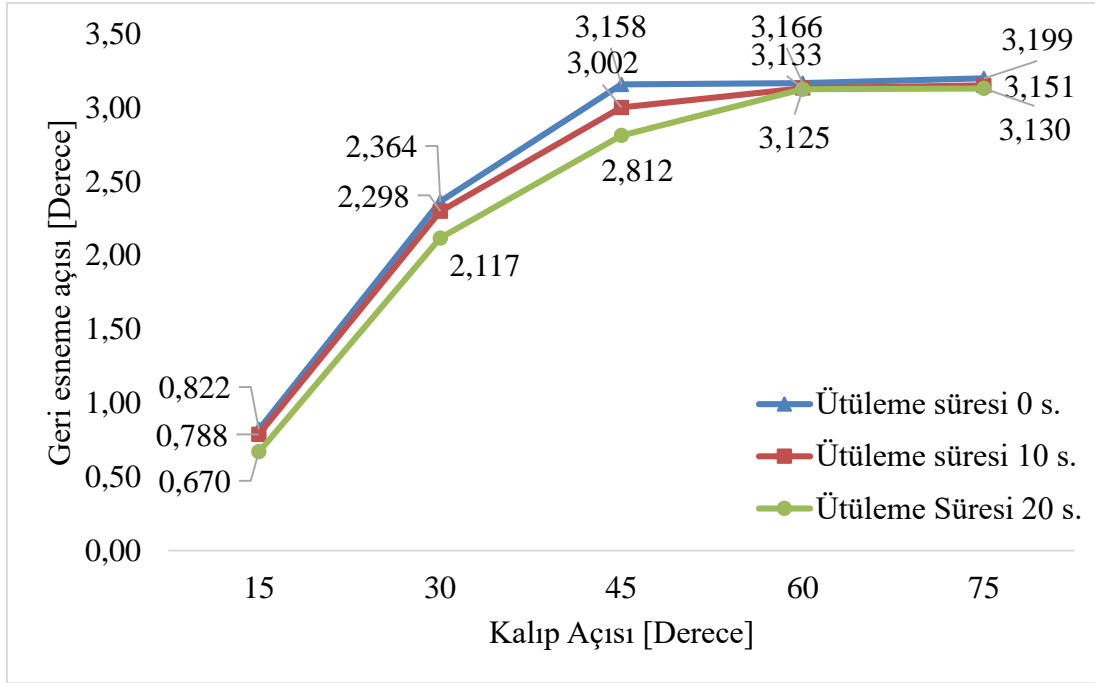
Şekil 5.12. 300°C sıcaklıkta DP600 sac malzeme için kalıp açısı-geri esneme ilişkisi, zımba uç kavisi 2 mm



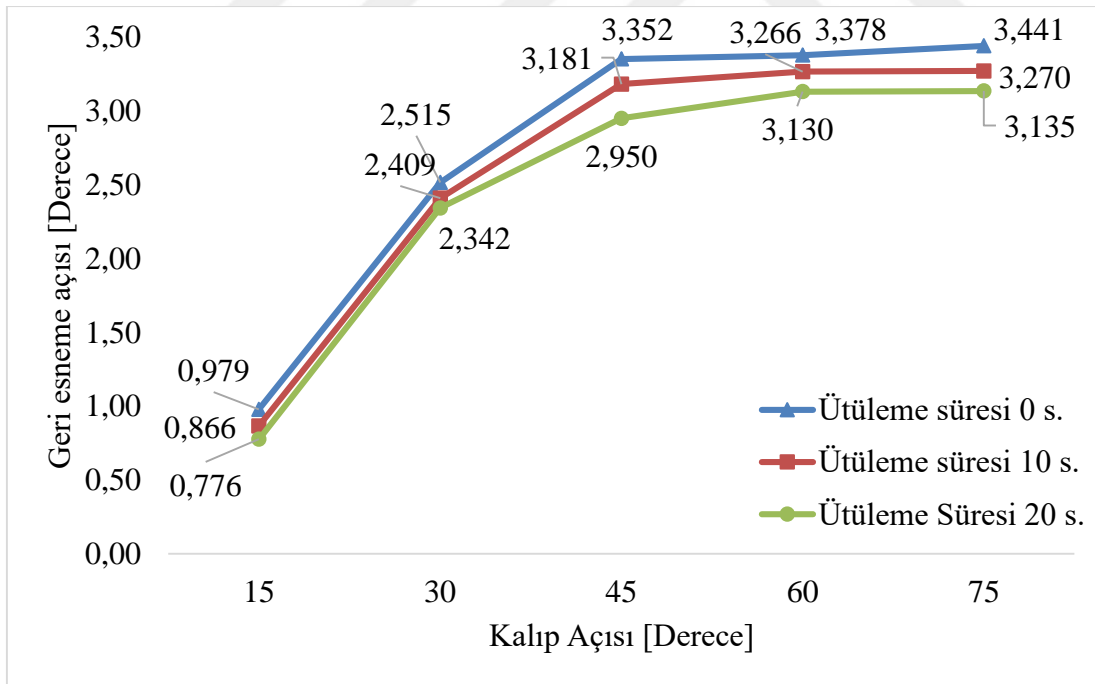
Şekil 5.13. 300°C sıcaklıkta DP600 sac malzeme için kalıp açısı-geri esneme ilişkisi, zımba uç kavisi 4 mm



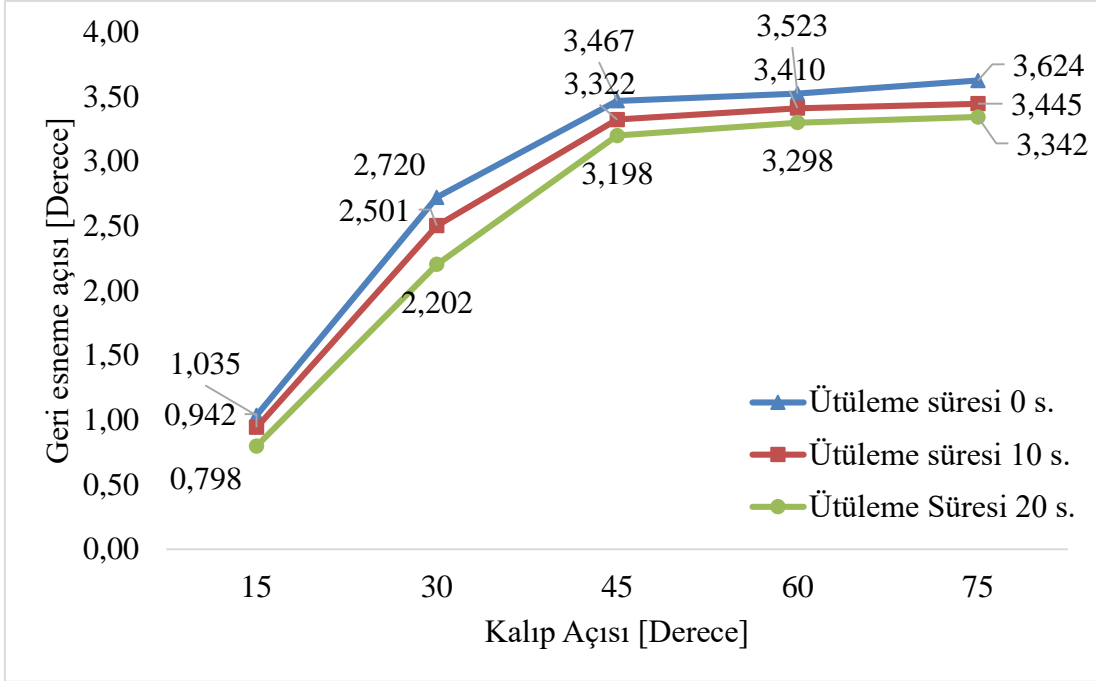
Şekil 5.14. 400°C sıcaklıkta DP600 sac malzeme için kalıp açısı-geri esneme ilişkisi, zımba uç kavisi 0 mm



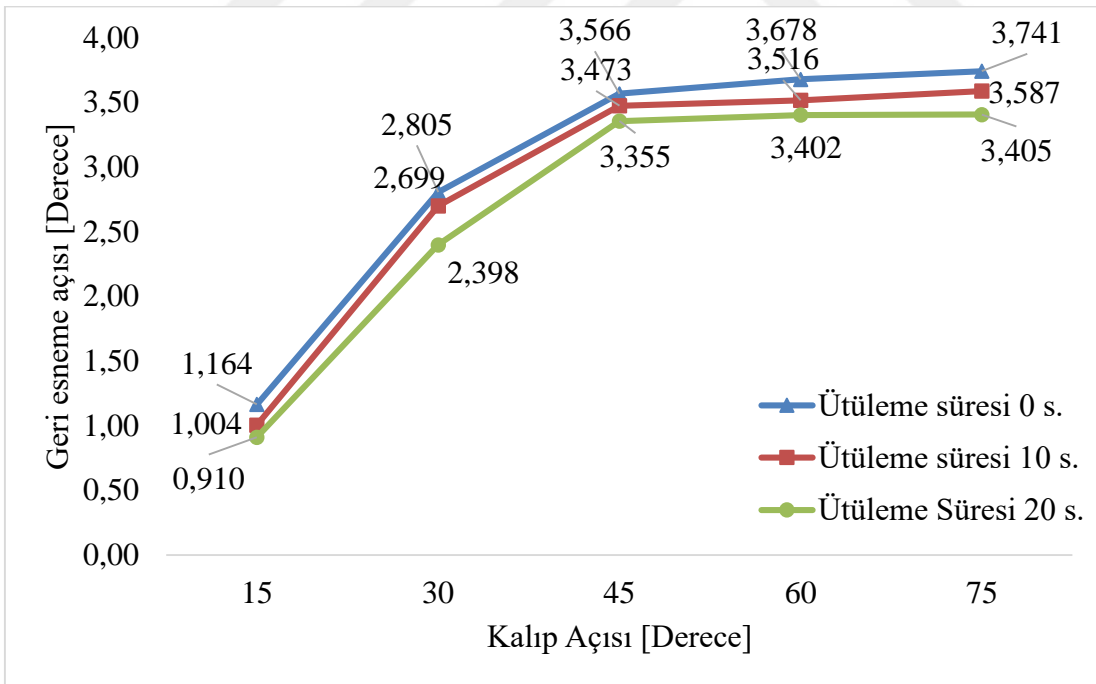
Şekil 5.15. 400°C sıcaklıkta DP600 sac malzeme için kalıp açısı-geri esneme ilişkisi, zımba uç kavisi 2 mm



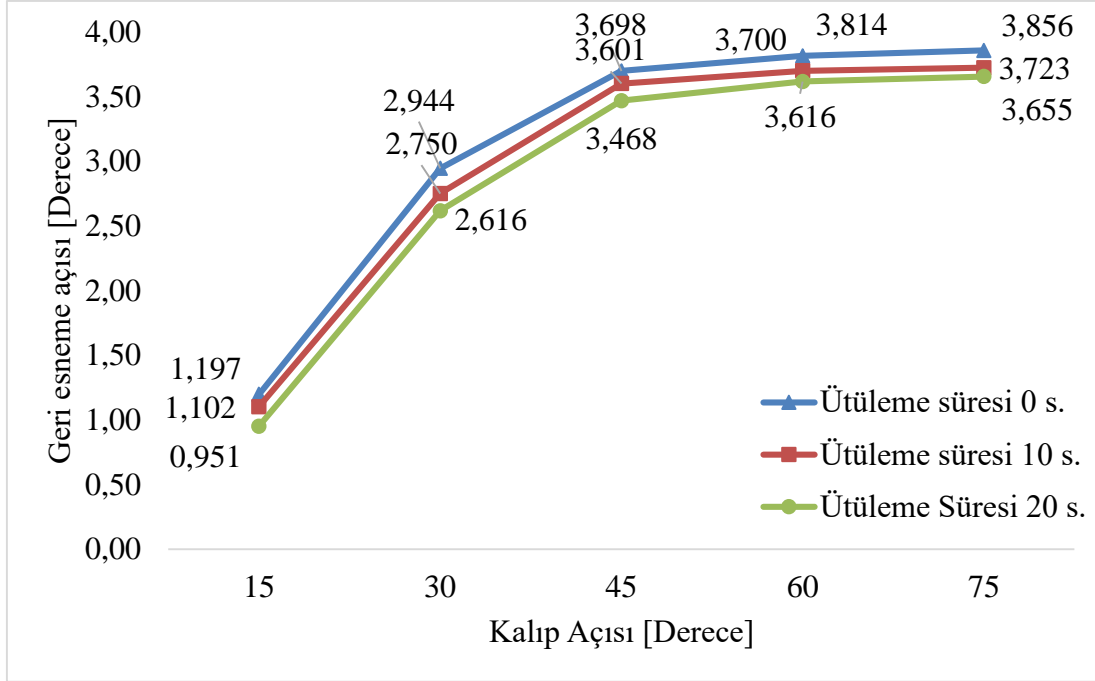
Şekil 5.16. 400°C sıcaklıkta DP600 sac malzeme için kalıp açısı-geri esneme ilişkisi, zımba uç kavisi 4 mm



Şekil 5.17. 500°C sıcaklıkta DP600 sac malzeme için kalıp açısı-geri esneme ilişkisi, zımba uç kavisi 0 mm



Şekil 5.18. 500°C sıcaklıkta DP600 sac malzeme için kalıp açısı-geri esneme ilişkisi, zımba uç kavisi 2 mm

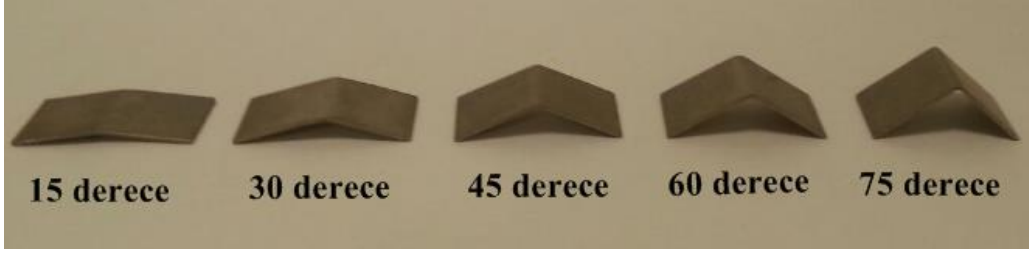


Şekil 5.19. 500°C sıcaklıkta DP600 sac malzeme için kalıp açısı-geri esneme ilişkisi, zımba uç kavisi 4 mm

DeneySEL çalışma sonuçlarından ütüleme süresi ile geri esnemenin ters orantılı olduğu ve ütüleme süresi arttıkça geri esnemenin azaldığı sonucuna varılmıştır. Kalıp açısı ile geri esnemenin ise doğru orantılı olduğu, kalıp açısı arttıkça geri esnemenin arttığı gözlemlenmiştir. Deney sonuçları zımba uç kavisi açısından değerlendirildiğinde zımba uç kavisi arttıkça geri esnemenin arttığı tespit edilmiştir. Kalıp açısındaki 15°'lik artışın geri esneme açısını 0,63° arttırdığı, zımba uç kavisindeki 2 milimetrelilik artışın da geri esneme açısını ortalama 0,14° arttırdığı tespit edilmiştir. Ayrıca ütüleme süresindeki 10 saniyelik artışın geri esneme açısını ortalama 0,14° azalttığı tespit edilmiştir.

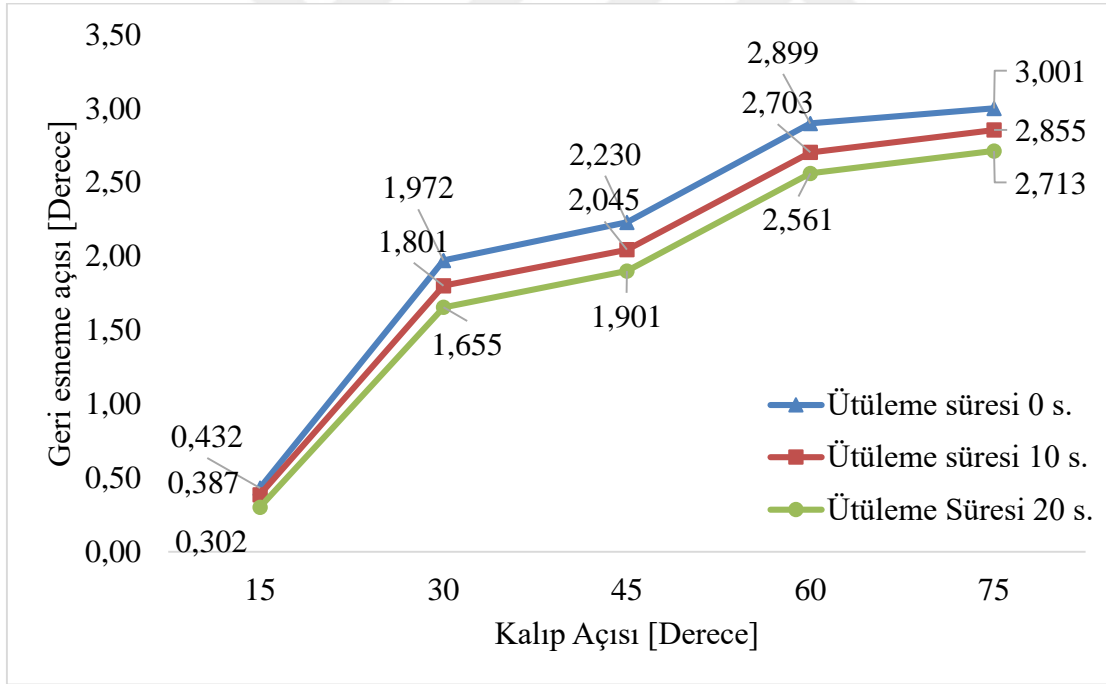
### 5.1.2. Titanyum Grade 1 sac malzemede işlem parametrelerinin geri esnemeye etkileri

Titanyum Grade 1 sac malzeme için de deney sonuçları işlem parametrelerinin geri esnemeye olan etkisi açısından incelenmiştir. DeneySEL çalışma esnasında bükülen Titanyum Grade 1 sac malzemesine ait bükülmüş deney numuneleri Şekil 5.20'de verilmiştir.



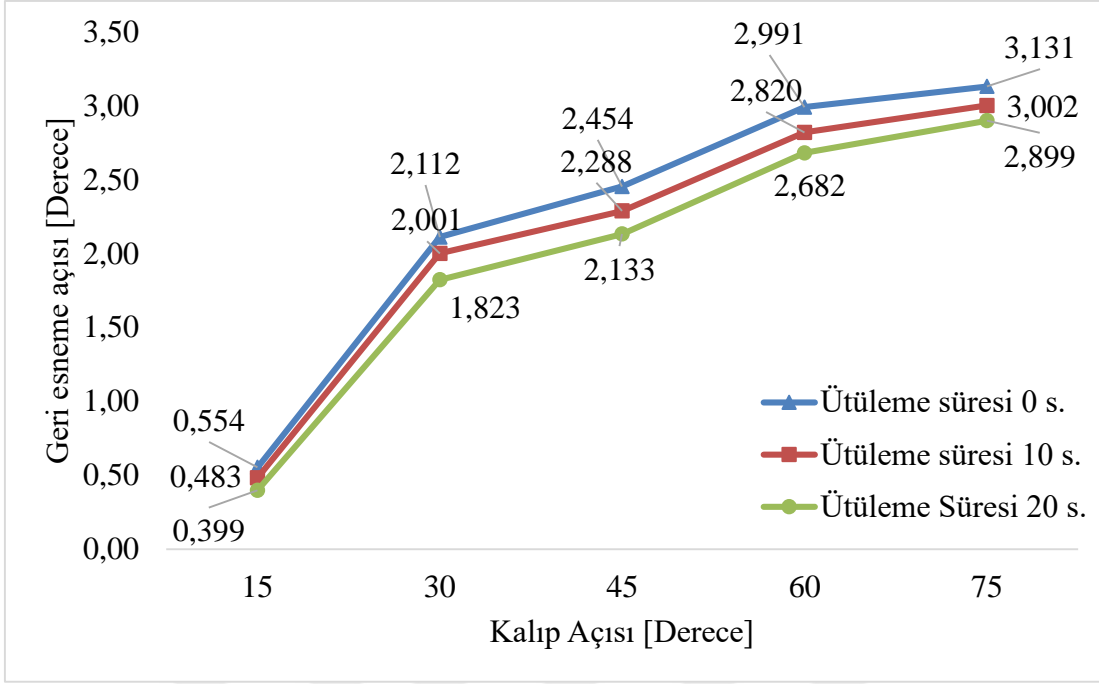
Şekil 5.20. Titanyum Grade 1 malzemesine ait bükülmüş deney numuneleri

Oda sıcaklığında elde edilen verilerin grafiksel gösterimi Şekil 5.21-5.23'te, 100°C'de elde edilen verilerin grafiksel gösterimi Şekil 5.24-5.26'da, 200°C'de elde edilen verilerin grafiksel gösterimi Şekil 5.27-5.29'da, 300°C'de elde edilen verilerin grafiksel gösterimi Şekil 5.30-5.32'de, 400°C'de elde edilen verilerin grafiksel gösterimi Şekil 5.33-5.35'te, 500°C'de elde edilen verilerin grafiksel gösterimi Şekil 5.36-5.38'de verilmiştir.

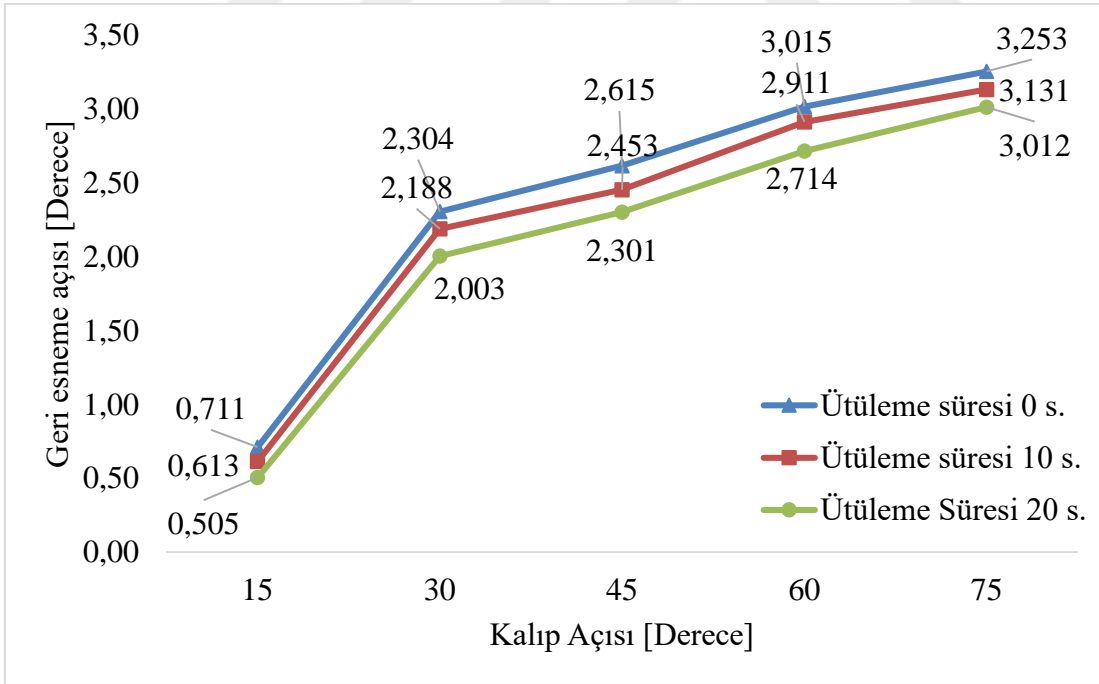


Şekil 5.21. RT'da Titanyum Grade 1 sac malzeme için kalıp açısı-geri esneme ilişkisi, zımba uç kavisi 0 mm

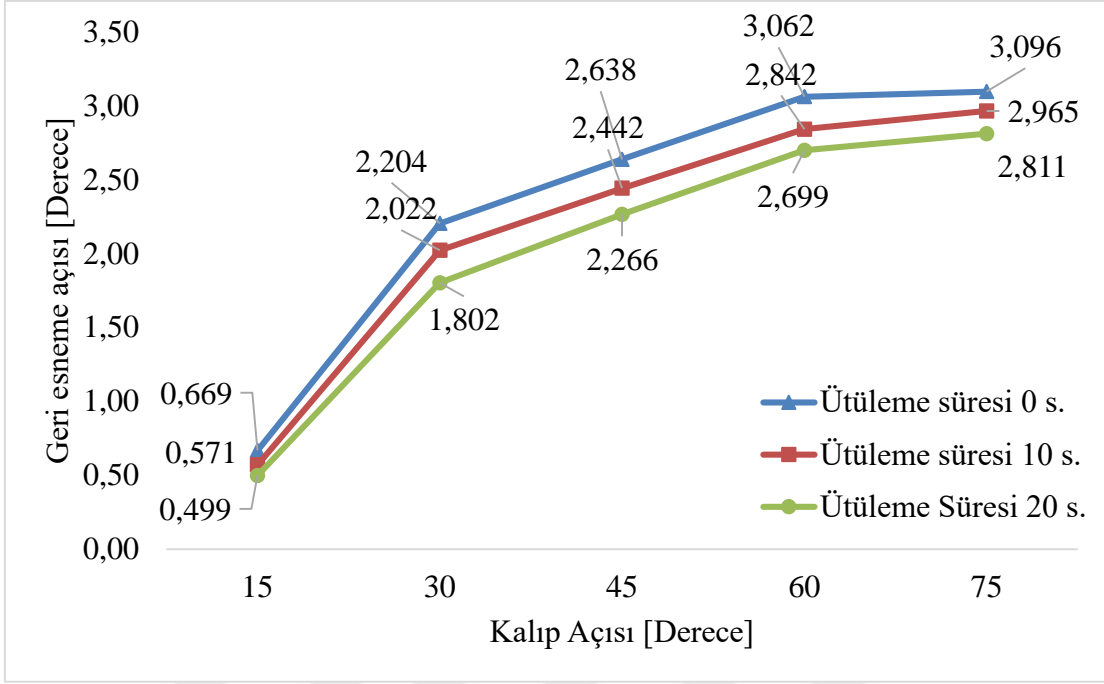




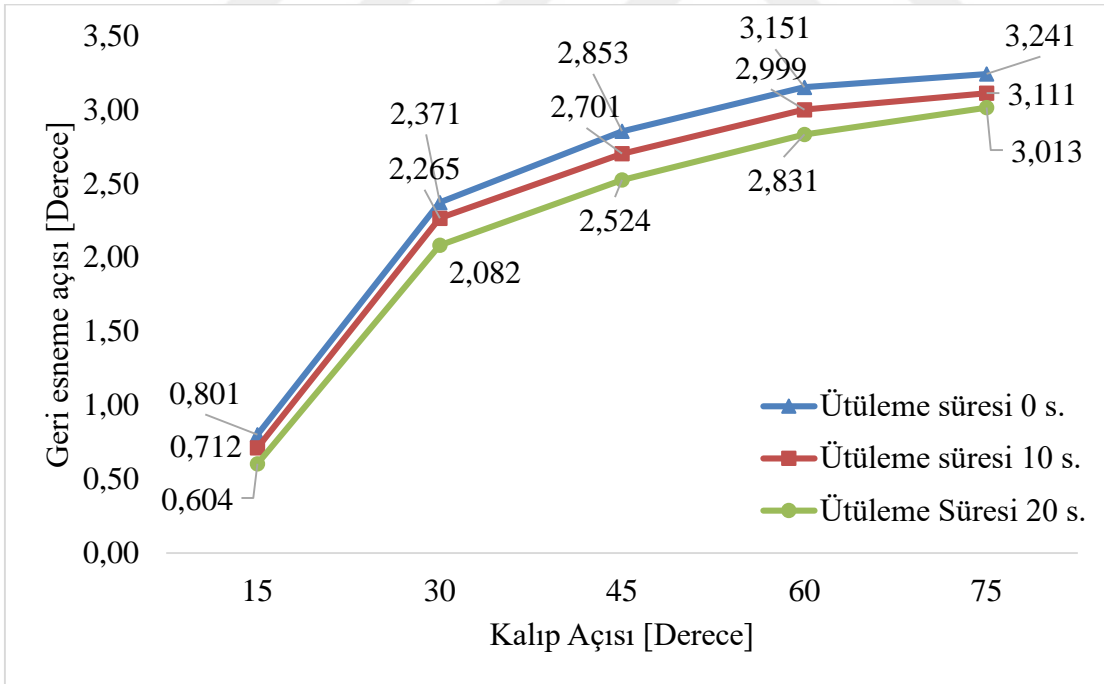
Şekil 5.22. RT'da Titanyum Grade 1 sac malzeme için kalıp açısı-geri esneme ilişkisi, zımba uç kavisi 2 mm



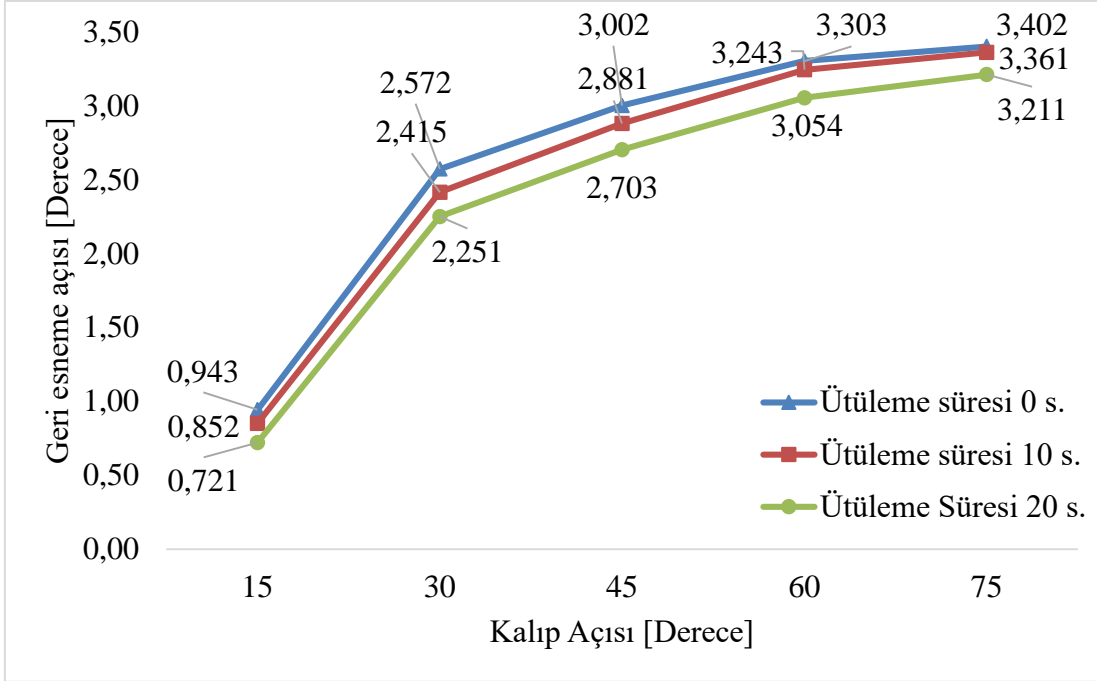
Şekil 5.23. RT'da Titanyum Grade 1 sac malzeme için kalıp açısı-geri esneme ilişkisi, zımba uç kavisi 4 mm



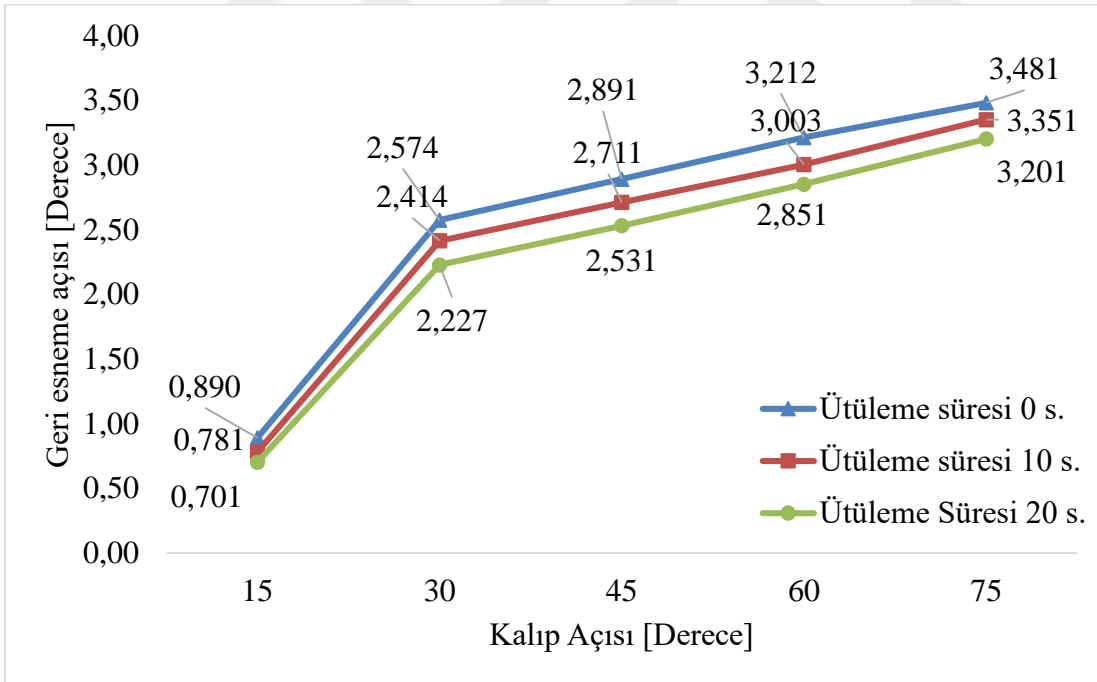
Şekil 5.24. 100°C sıcaklıkta Titanyum Grade 1 sac malzeme için kalıp açısı-geri esneme ilişkisi, zımba uç kavisi 0 mm



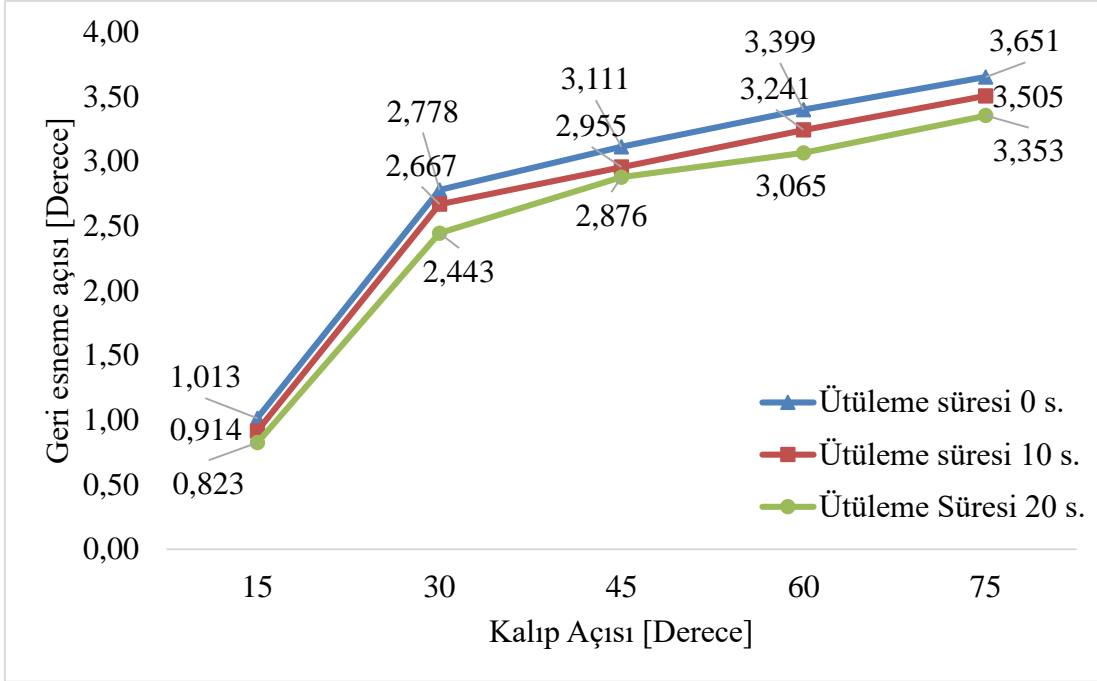
Şekil 5.25. 100°C sıcaklıkta Titanyum Grade 1 sac malzeme için kalıp açısı-geri esneme ilişkisi, zımba uç kavisi 2 mm



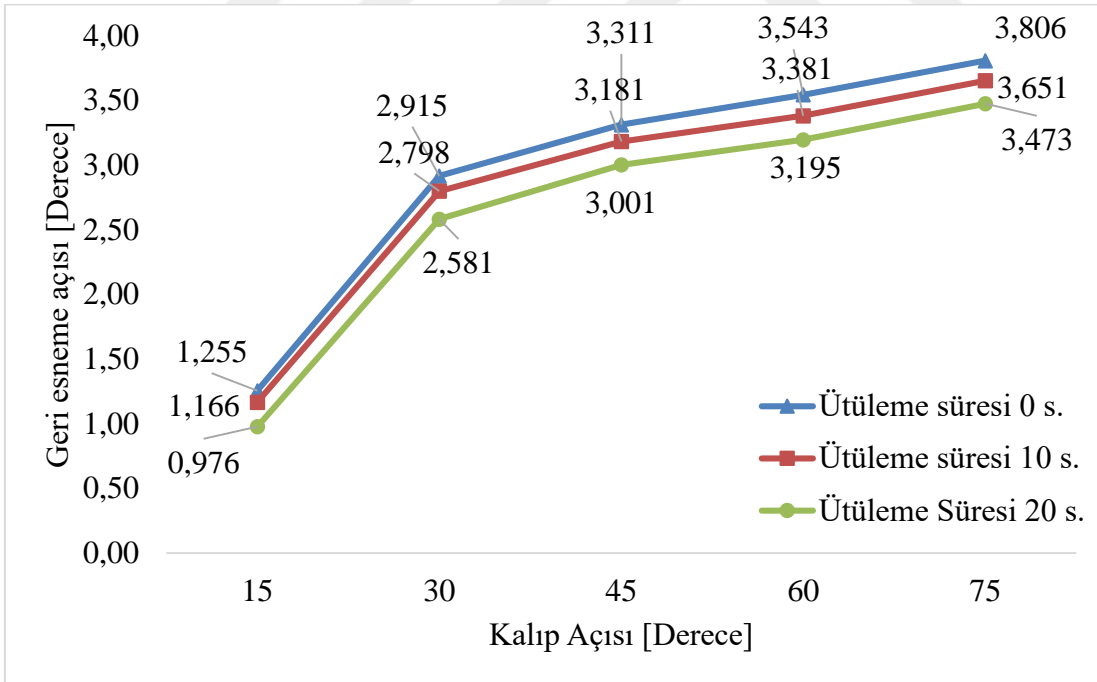
Şekil 5.26. 100°C sıcaklıkta Titanyum Grade 1 sac malzeme için kalıp açısı-geri esneme ilişkisi, zımba uç kavisi 4 mm



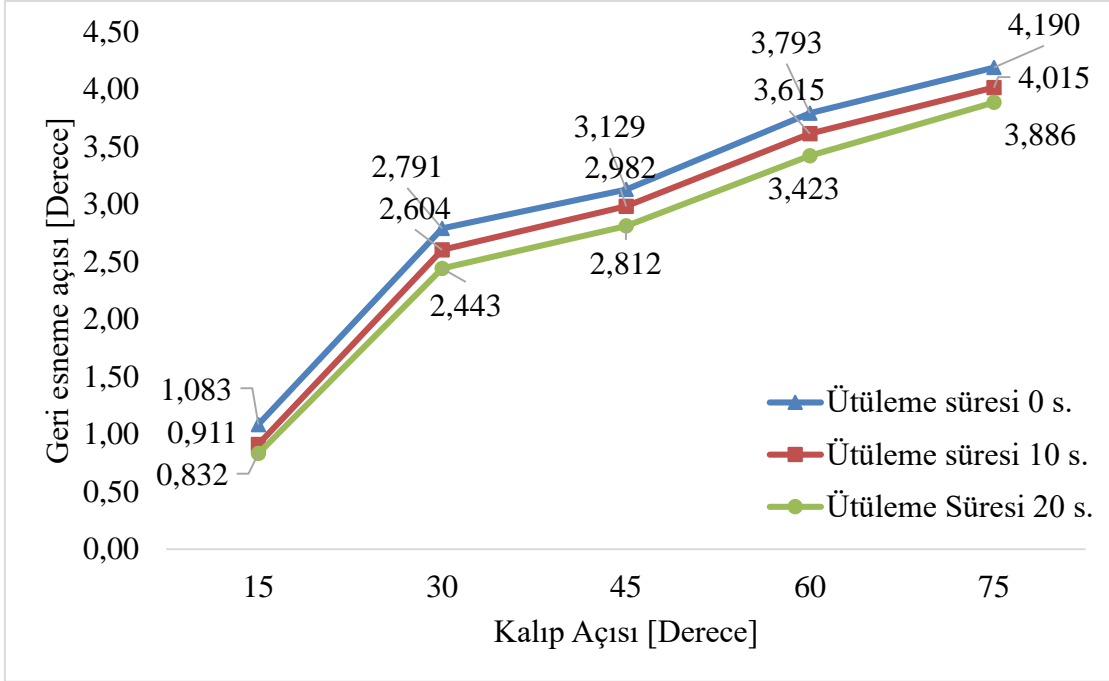
Şekil 5.27. 200°C sıcaklıkta Titanyum Grade 1 sac malzeme için kalıp açısı-geri esneme ilişkisi, zımba uç kavisi 0 mm



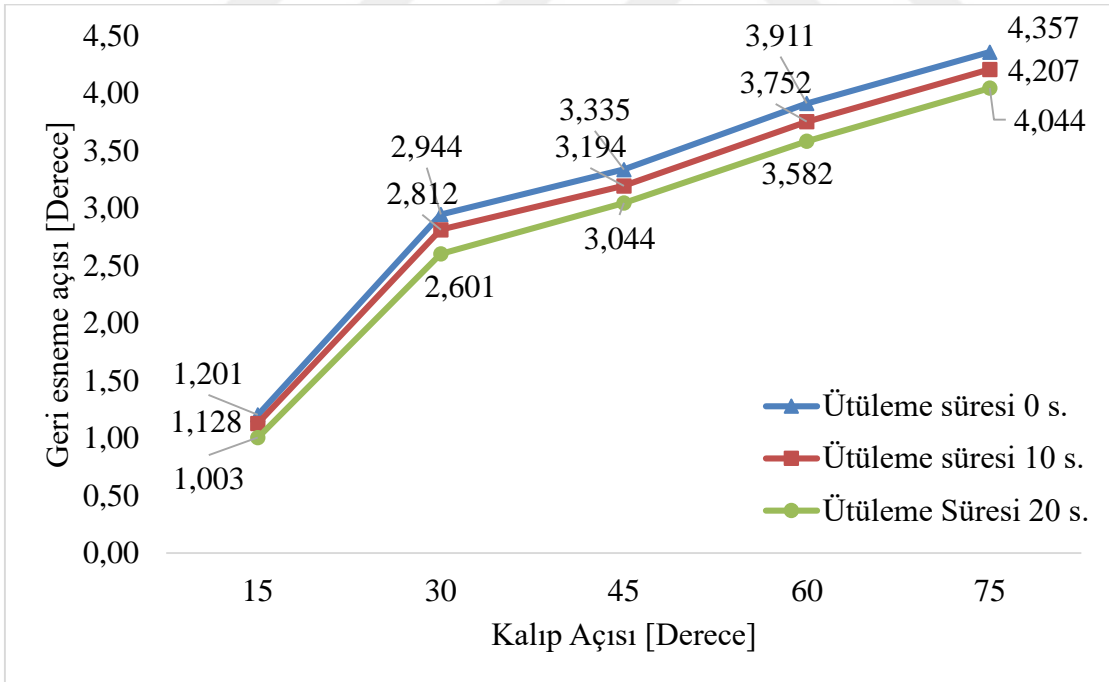
Şekil 5.28. 200°C sıcaklıkta Titanyum Grade 1 sac malzeme için kalıp açısı-geri esneme ilişkisi, zımba uç kavisi 2 mm



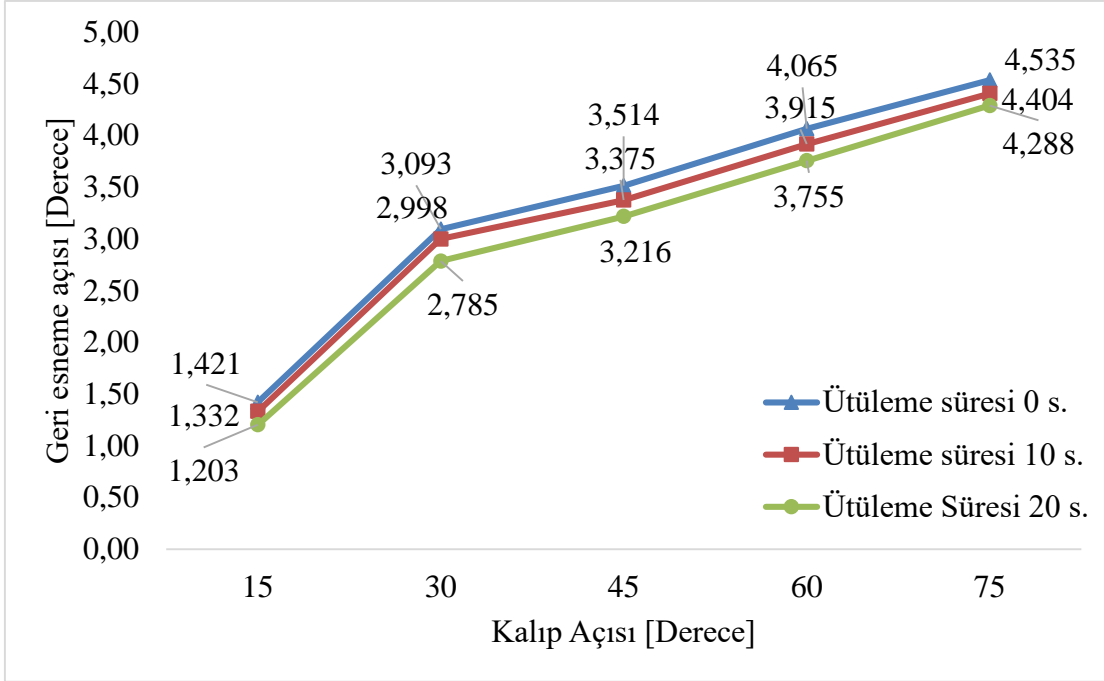
Şekil 5.29. 200°C sıcaklıkta Titanyum Grade 1 sac malzeme için kalıp açısı-geri esneme ilişkisi, zımba uç kavisi 4 mm



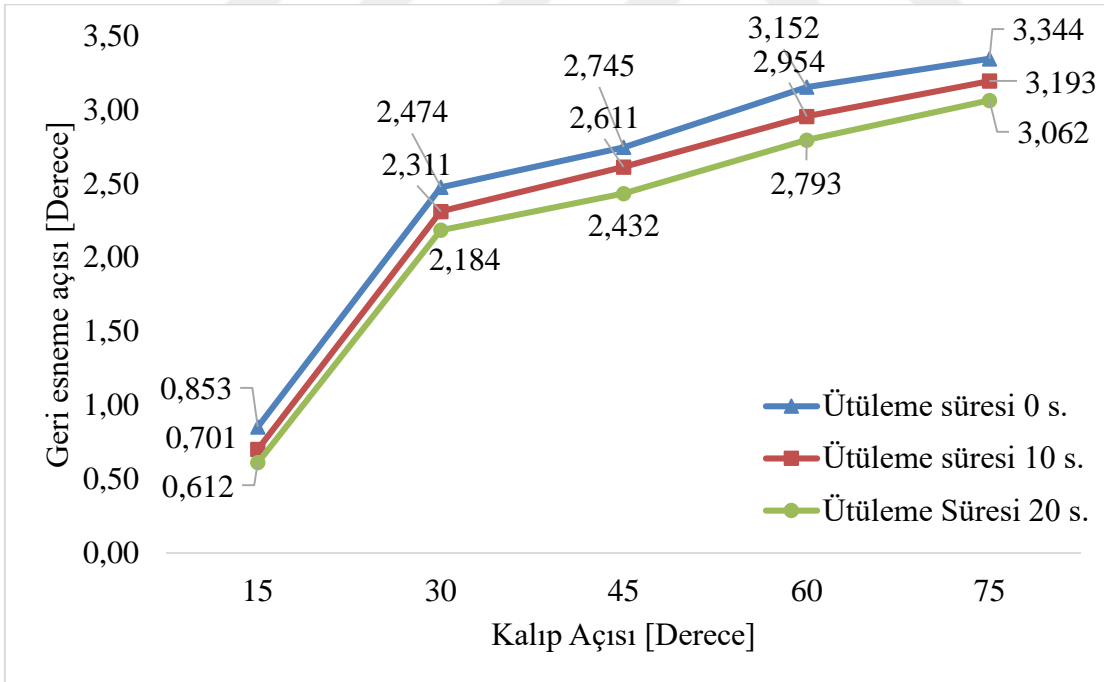
Şekil 5.30. 300°C sıcaklıkta Titanyum Grade 1 sac malzeme için kalıp açısı-geri esneme ilişkisi, zımba uç kavisi 0 mm



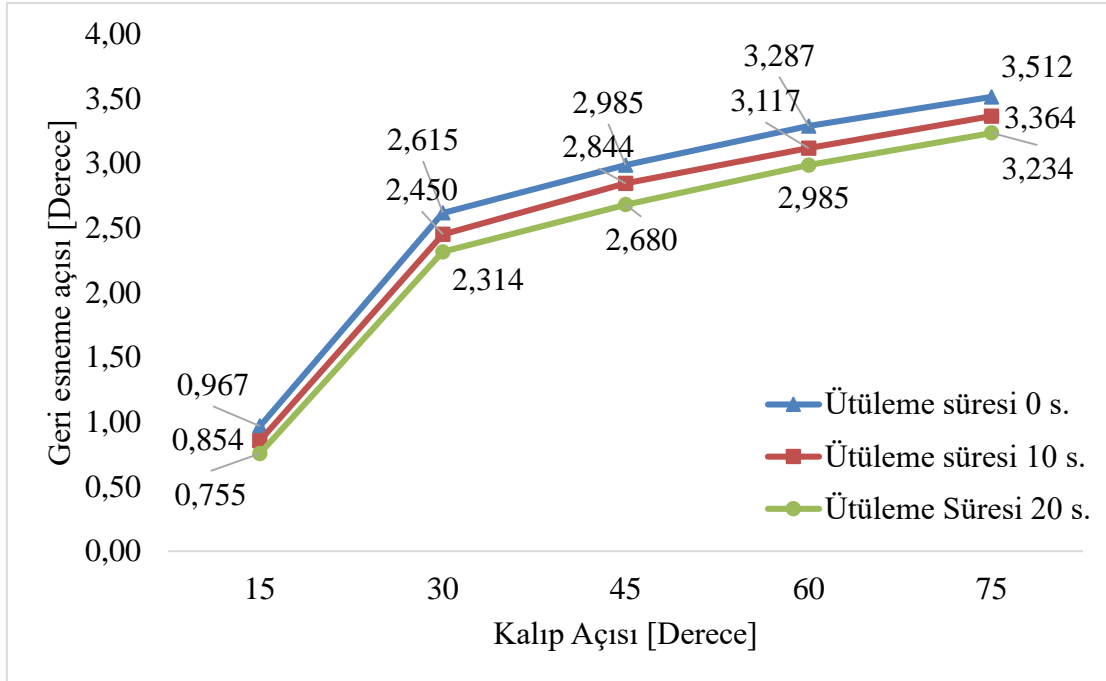
Şekil 5.31. 300°C sıcaklıkta Titanyum Grade 1 sac malzeme için kalıp açısı-geri esneme ilişkisi, zımba uç kavisi 2 mm



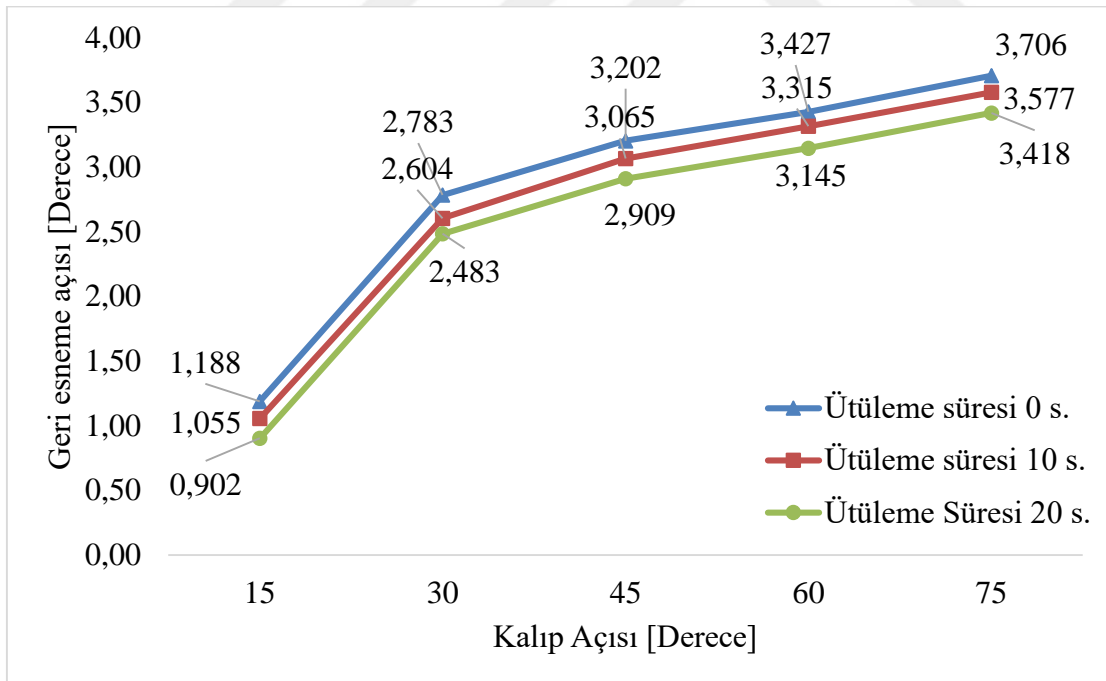
Şekil 5.32. 300°C sıcaklıkta Titanyum Grade 1 sac malzeme için kalıp açısı-geri esneme ilişkisi, zımba uç kavisi 4 mm



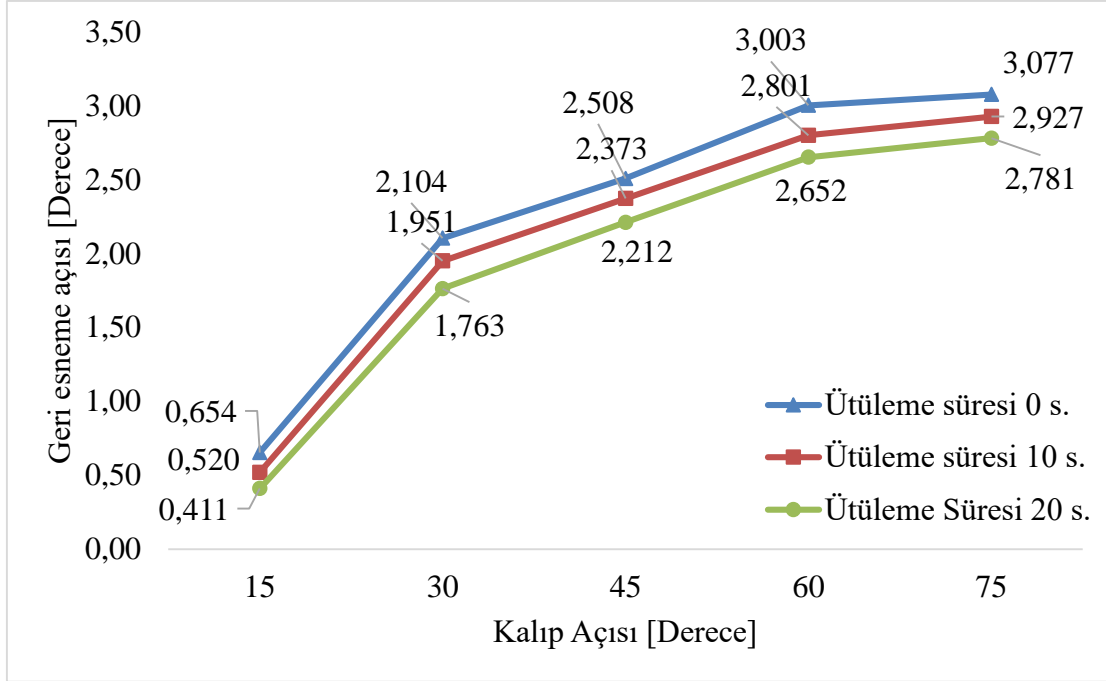
Şekil 5.33. 400°C sıcaklıkta Titanyum Grade 1 sac malzeme için kalıp açısı-geri esneme ilişkisi, zımba uç kavisi 0 mm



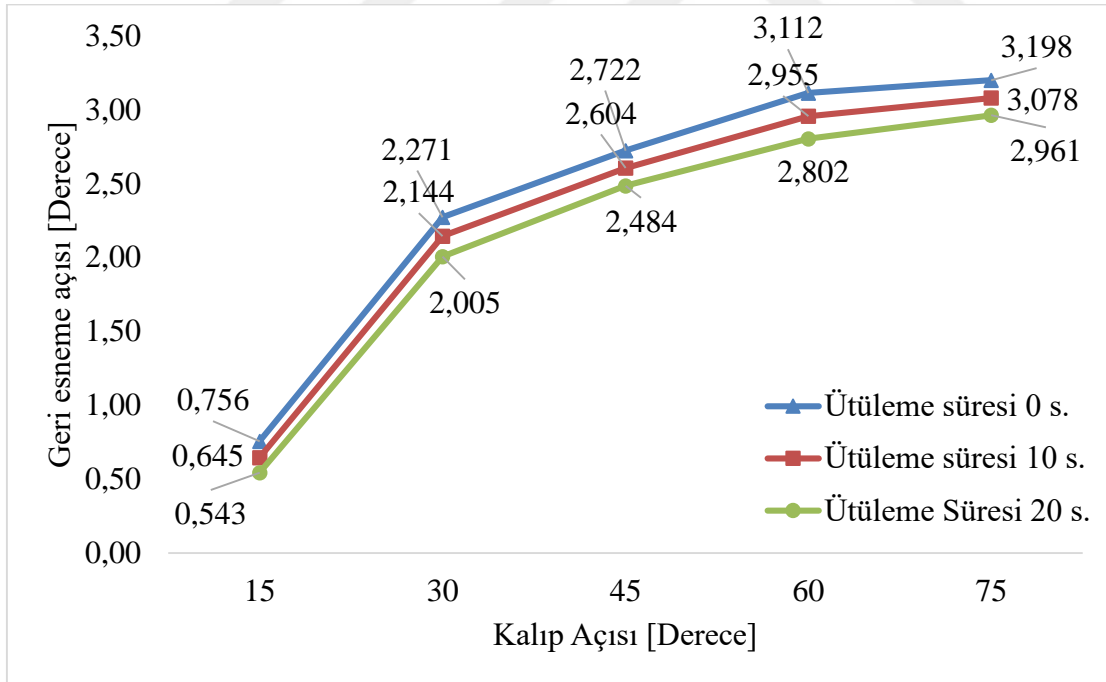
Şekil 5.34. 400°C sıcaklıkta Titanyum Grade 1 sac malzeme için kalıp açısı-geri esneme ilişkisi, zımba uç kavisi 2 mm



Şekil 5.35. 400°C sıcaklıkta Titanyum Grade 1 sac malzeme için kalıp açısı-geri esneme ilişkisi, zımba uç kavisi 4 mm

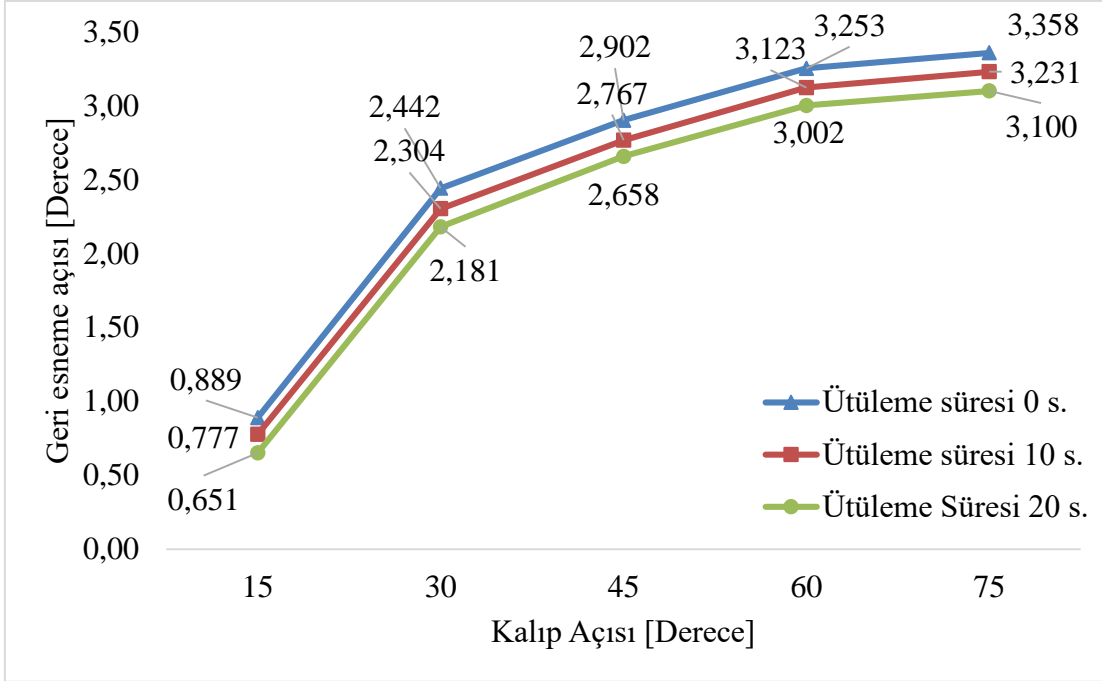


Şekil 5.36. 500°C sıcaklıkta Titanyum Grade 1 sac malzeme için kalıp açısı-geri esneme ilişkisi, zımba uç kavisi 0 mm



Şekil 5.37. 500°C sıcaklıkta Titanyum Grade 1 sac malzeme için kalıp açısı-geri esneme ilişkisi, zımba uç kavisi 2 mm





Şekil 5.38. 500°C sıcaklıkta Titanyum Grade 1 sac malzeme için kalıp açısı-geri esneme ilişkisi, zımba uç kavisi 4 mm

İşlem parametrelerinin geri esnemeye etkileri açısından değerlendirildiğinde Titanyum Grade 1 sac malzemede de DP600 sacında olduğu gibi kalıp açısı arttıkça geri esneme artmakta, ütüleme süresi arttıkça ise geri esneme azalmaktadır. Zımba uç kavisi ile geri esneme arasında doğru orantı bulunmaktadır. Zımba uç kavisi arttıkça geri esneme açısı artmaktadır. Ayrıca kalıp açısının 15° artmasının geri esneme açısını ortalama 0,65° arttırdığı, ütüleme süresindeki 10 saniyelik artışın da geri esneme açısını ortalama 0,14° azalttığı tespit edilmiştir. Zımba uç kavisindeki 2 milimetrelik artışın geri esneme açısını da ortalama 0,17° arttırdığı tespit edilmiştir.

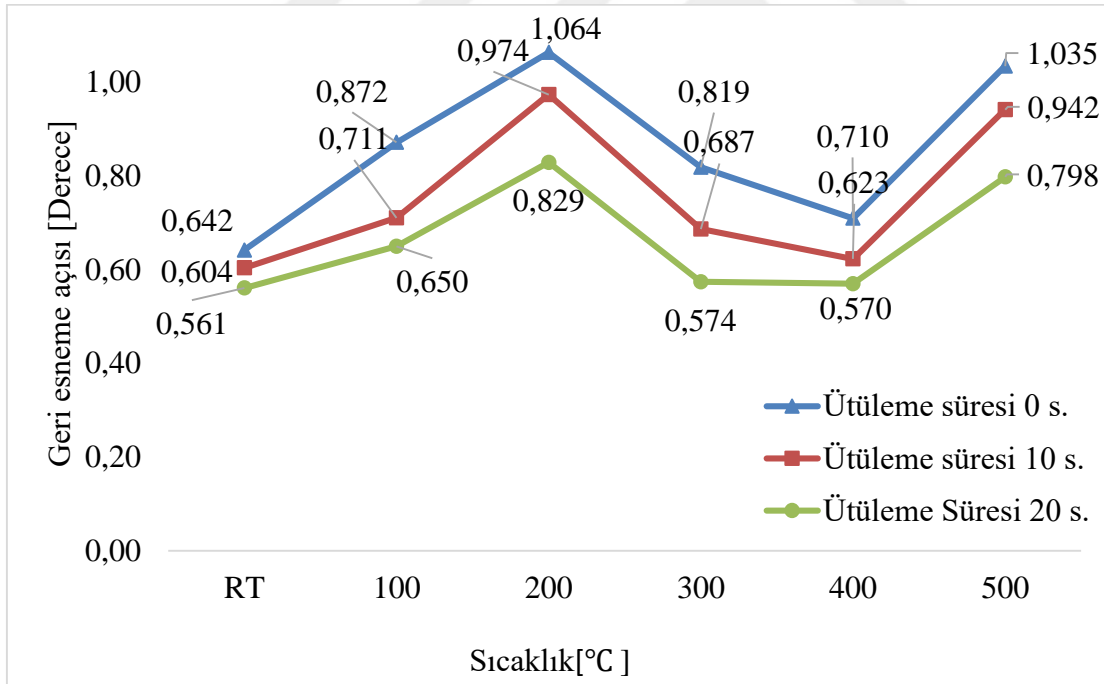
## 5.2. Bükme Bölgesindeki Sıcaklığın Geri Esnemeye Etkisi

Deneysel sonuçlarda elde edilen veriler rezistans yardımıyla bükme bölgesinin ısıtılmasının geri esnemeye olan etkisini ortaya çıkarmıştır. Aynı kalıp ve zımba uç kavisinde veriler grafiklere aktarıldığında aynı malzeme türlerinde tüm grafiklerin aynı şekilde davrandığı belirlenmiştir. Bu benzer yol haritası aslında bükme bölgesinin rezistans yardımıyla ısıtılmasının geri esnemeye olan etkisinin matematiksel bir açıklamasıdır. Farklı deney parametrelerinde de benzer sonuçlara ulaşılması deney parametrelerinin uygulamasının güvenilirliğini ortaya çıkarmıştır.

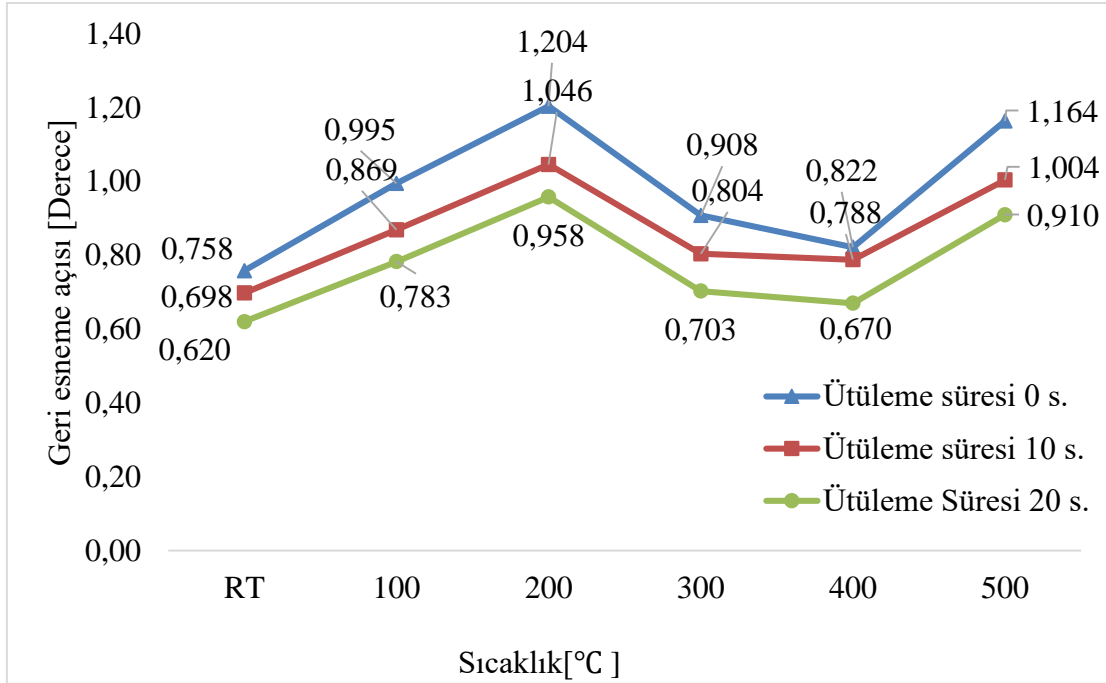
Sıcaklık arttıkça geri esnemenin azalacağı yönünde genel bir kanı olsa da DP600 ve Titanyum Grade 1 sac malzemeler için sıcaklığa bağlı olarak geri esneme açısından büyük değişimler olduğu tespit edilmiştir.

### 5.2.1. DP600 sac malzemedeki sıcaklığın geri esnemeye etkisi

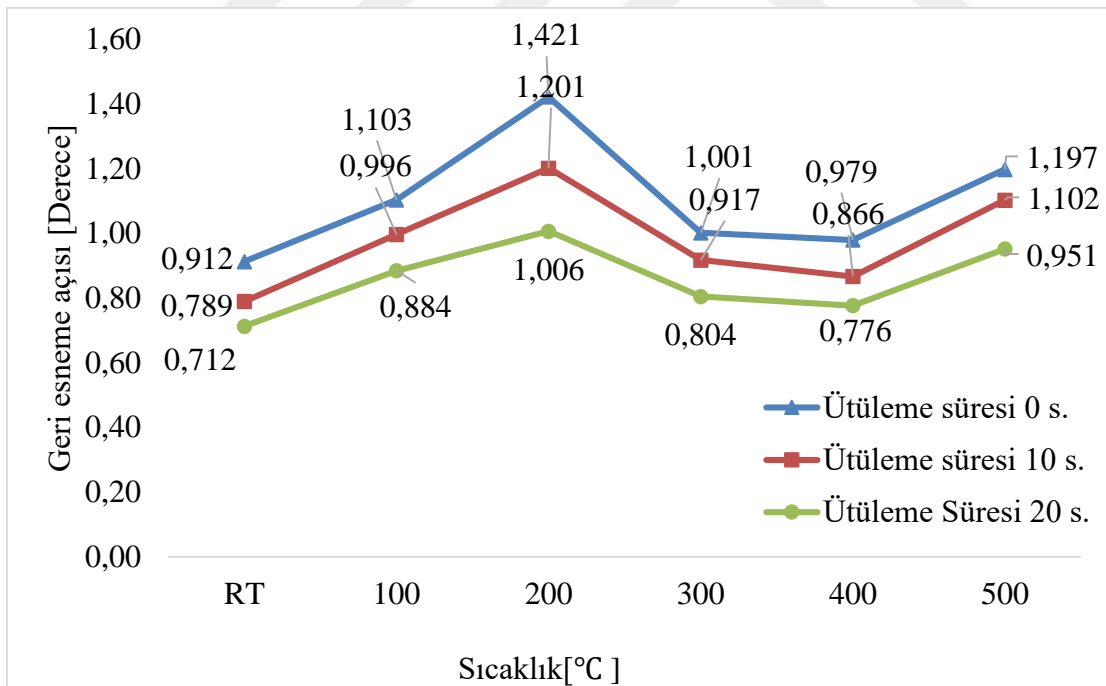
DP600 sac malzemenin bükme bölgesinin rezistans yardımıyla ısıtılması sonucu elde edilen geri esneme grafikleri Şekil 5.39-5.53'te verilmiştir. Sırasıyla 0, 2 ve 4 mm'lik zımba uç kavislerinde ve 15° kalıp açısında elde edilen grafikler Şekil 5.39-5.41'de, 30° kalıp açısında elde edilen grafikler Şekil 5.42-5.44'te, 45° kalıp açısında elde edilen grafikler Şekil 5.45-5.47'de, 60° kalıp açısında elde edilen grafikler Şekil 5.48-5.50'de ve 75° kalıp açısında elde edilen grafikler de Şekil 5.51-5.53'te verilmiştir.



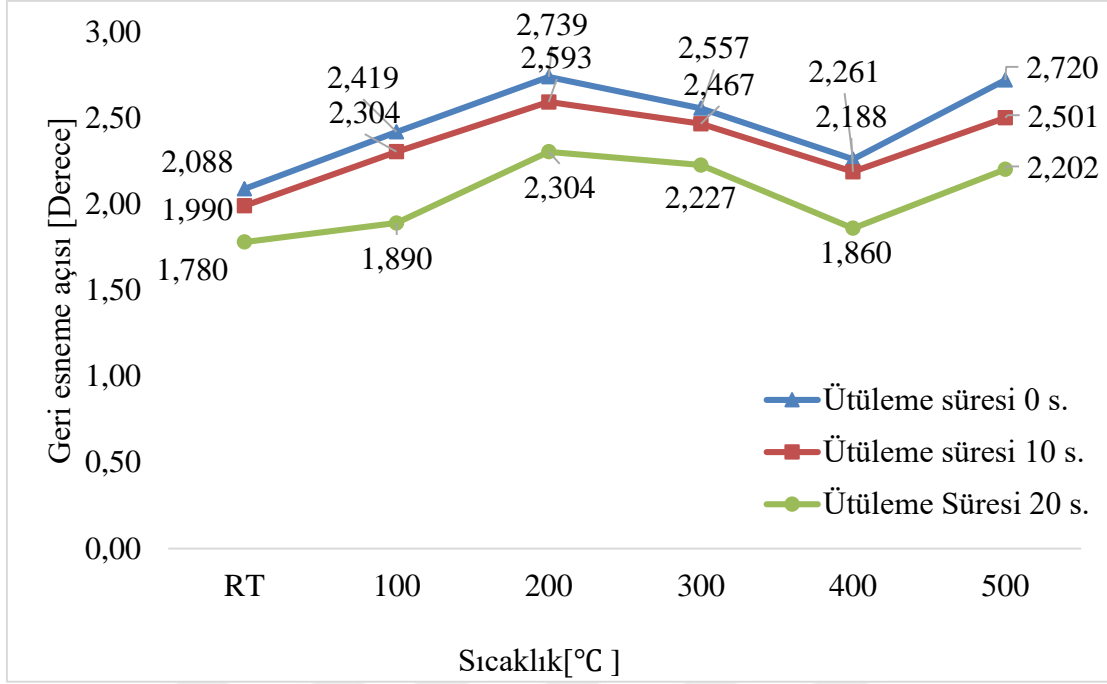
Şekil 5.39. DP600 sac malzemedeki sıcaklık-geri esneme ilişkisi, kalıp açısı 15°-zımba uç kavisleri 0 mm



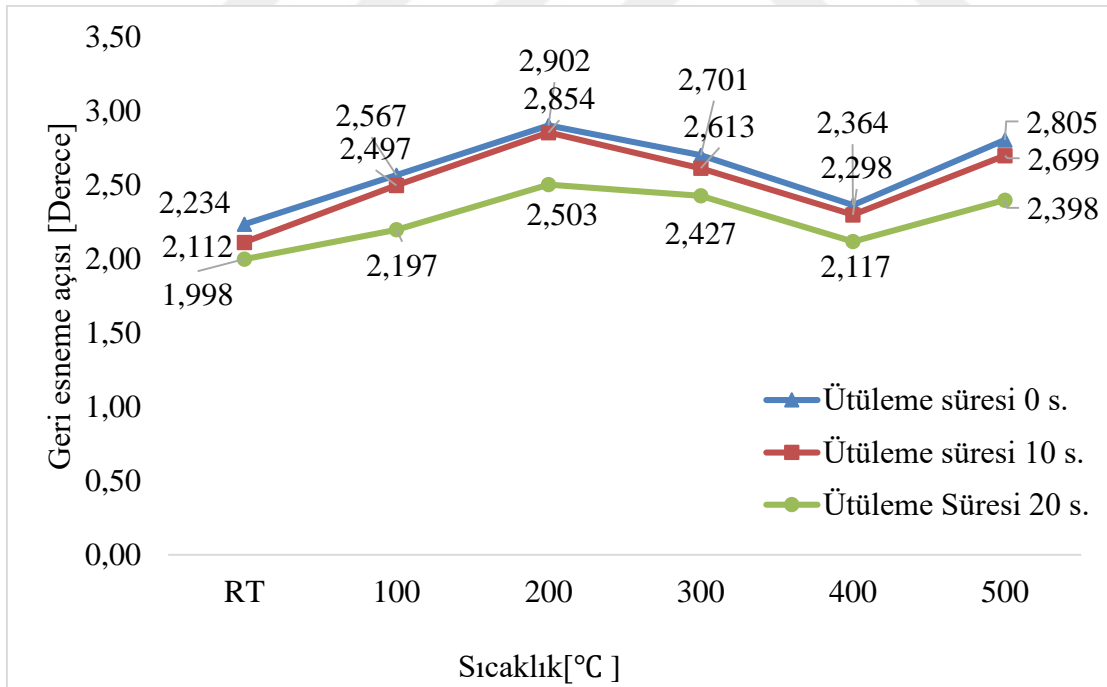
Şekil 5.40. DP600 sac malzemede sıcaklık-geri esneme ilişkisi, kalıp açısı 15°-zımba uç kavisi 2 mm



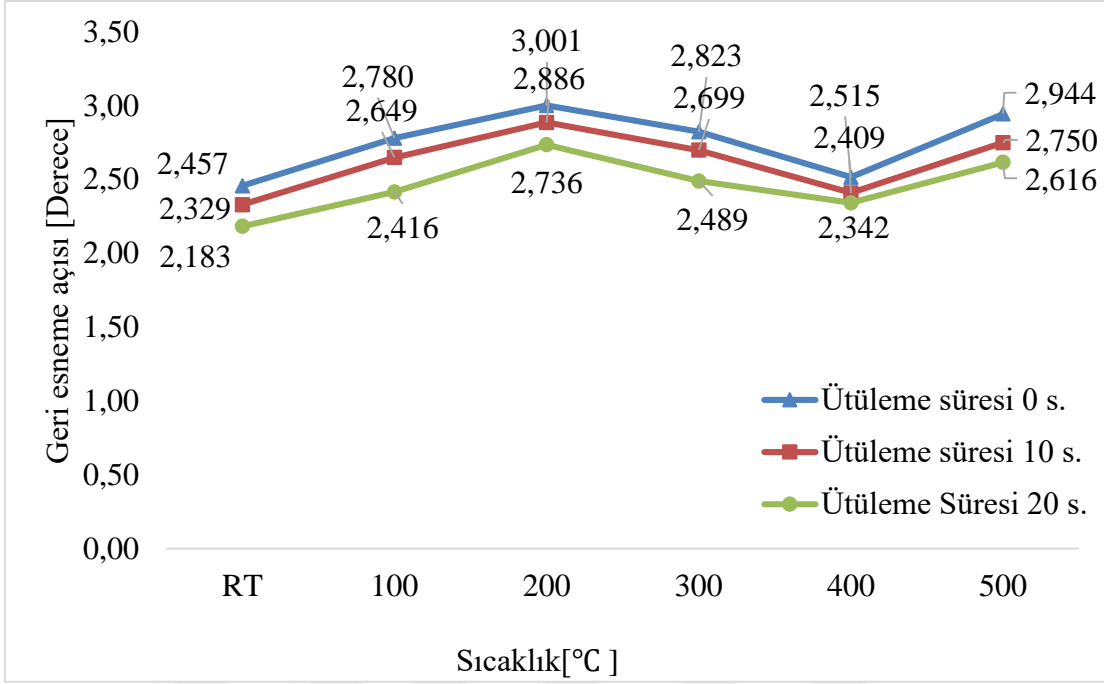
Şekil 5.41. DP600 sac malzemede sıcaklık-geri esneme ilişkisi, kalıp açısı 15°-zımba uç kavisi 4 mm



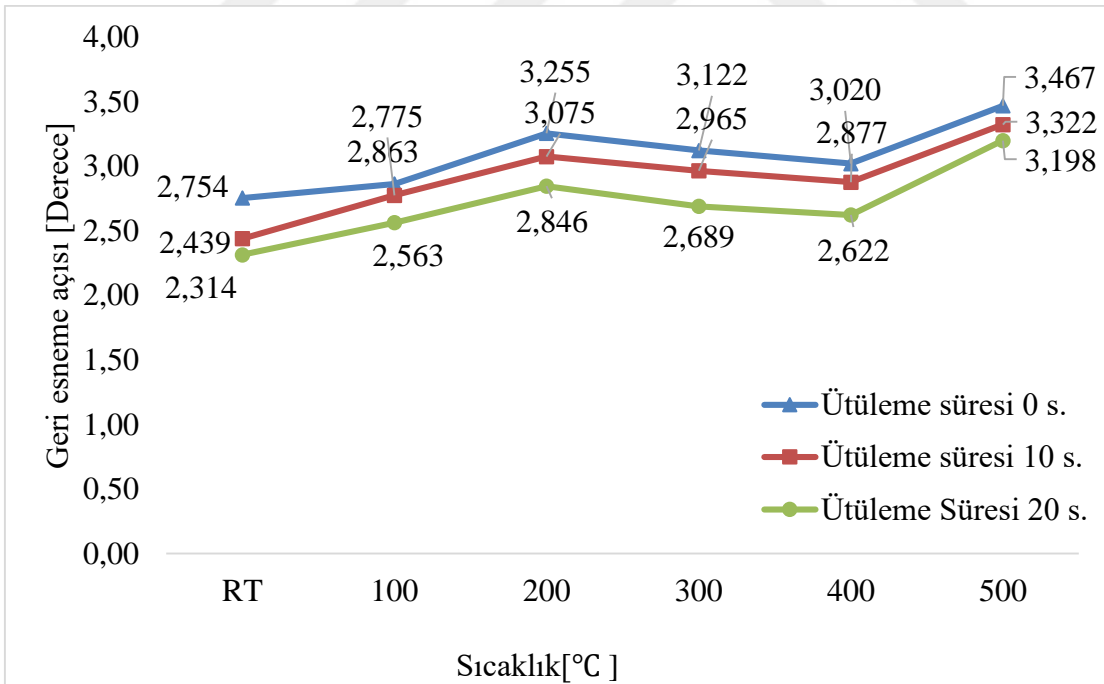
Şekil 5.42. DP600 sac malzemede sıcaklık-geri esneme ilişkisi, kalıp açısı 30°-zımba uç kavisi 0 mm



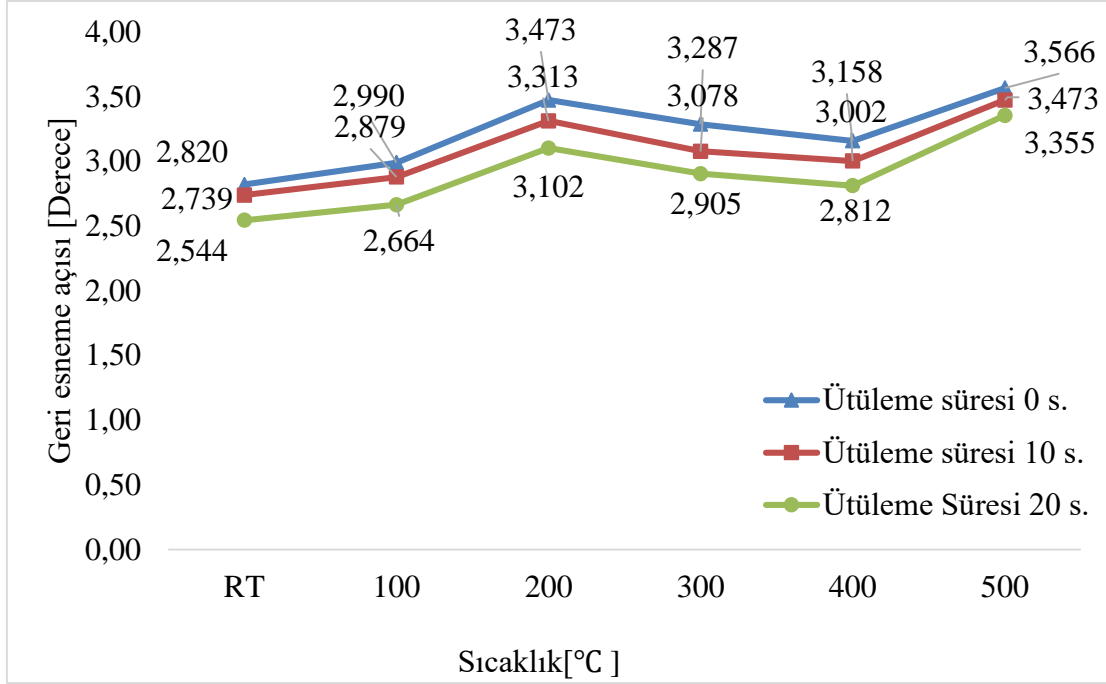
Şekil 5.43. DP600 sac malzemede sıcaklık-geri esneme ilişkisi, kalıp açısı 30°-zımba uç kavisi 2 mm



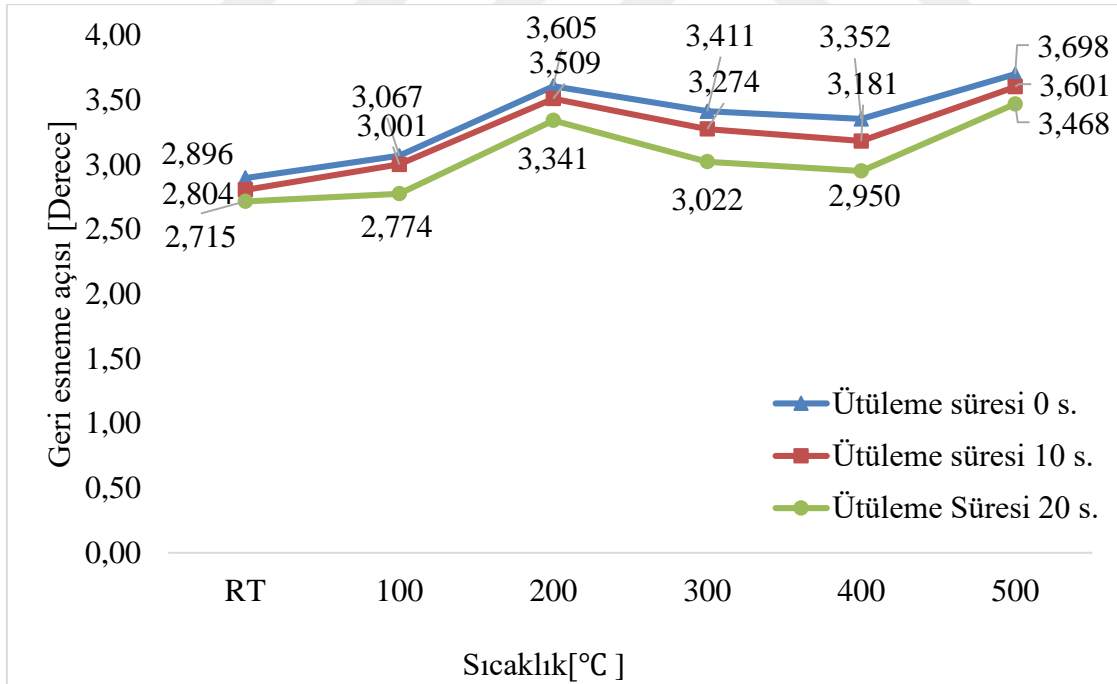
Şekil 5.44. DP600 sac malzemede sıcaklık-geri esneme ilişkisi, kalıp açısı 30°-zımba uç kavisi 0 mm



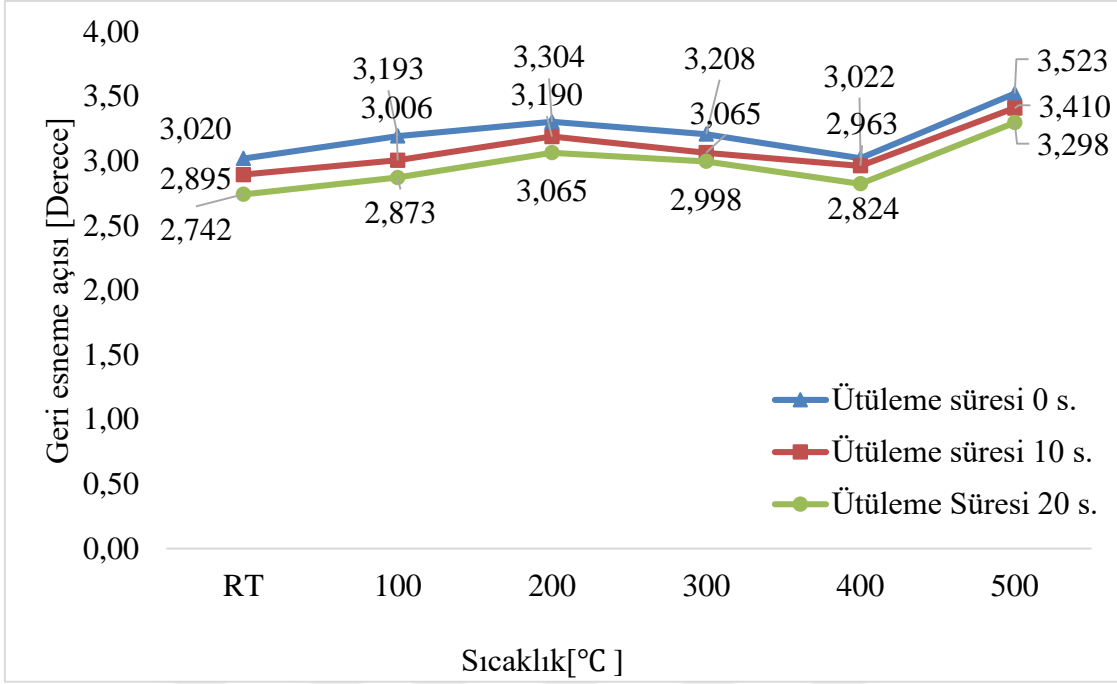
Şekil 5.45. DP600 sac malzemede sıcaklık-geri esneme ilişkisi, kalıp açısı 45°-zımba uç kavisi 0 mm



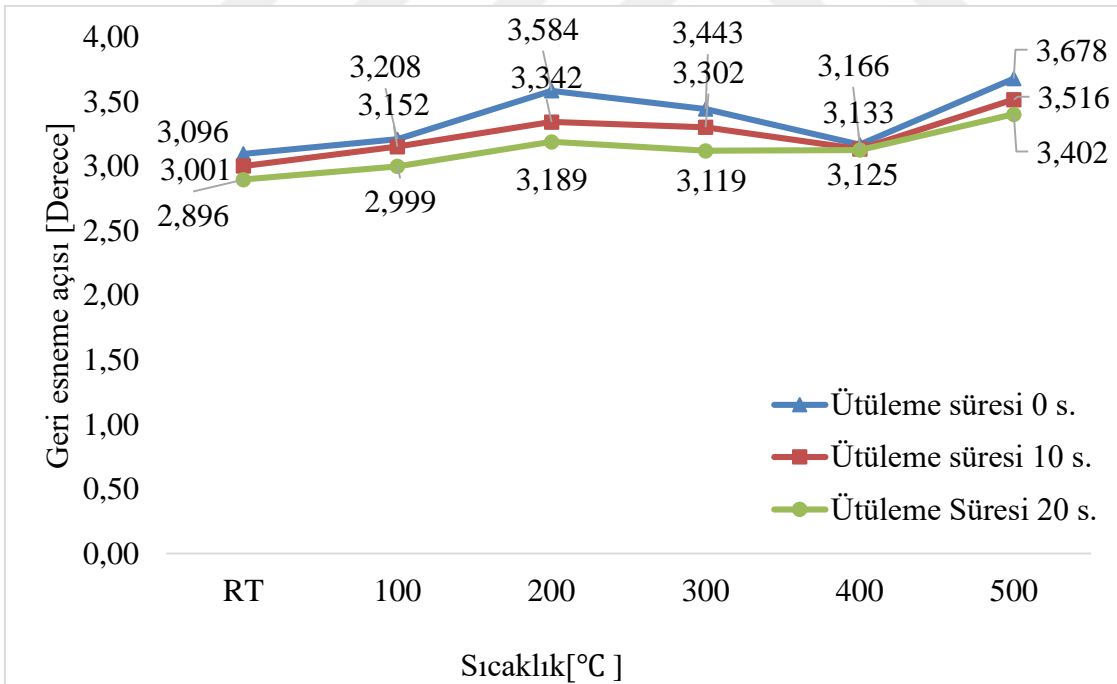
Şekil 5.46. DP600 sac malzemede sıcaklık-geri esneme ilişkisi, kalıp açısı 45°-zımba uç kavisi 2 mm



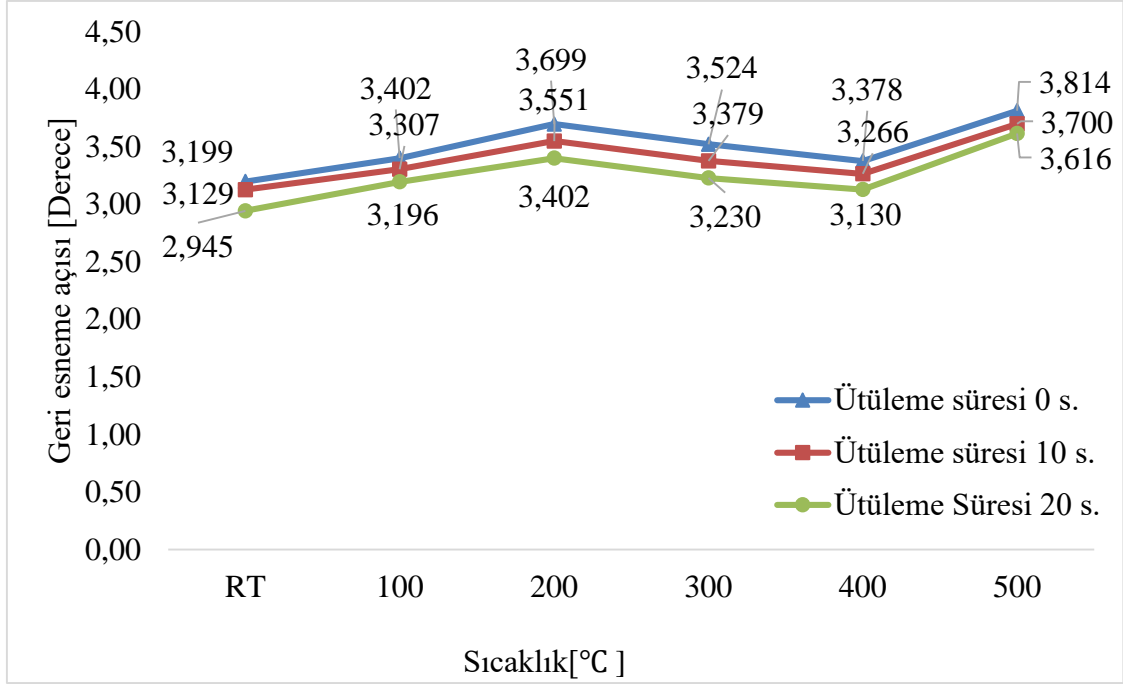
Şekil 5.47. DP600 sac malzemede sıcaklık-geri esneme ilişkisi, kalıp açısı 45°-zımba uç kavisi 4 mm



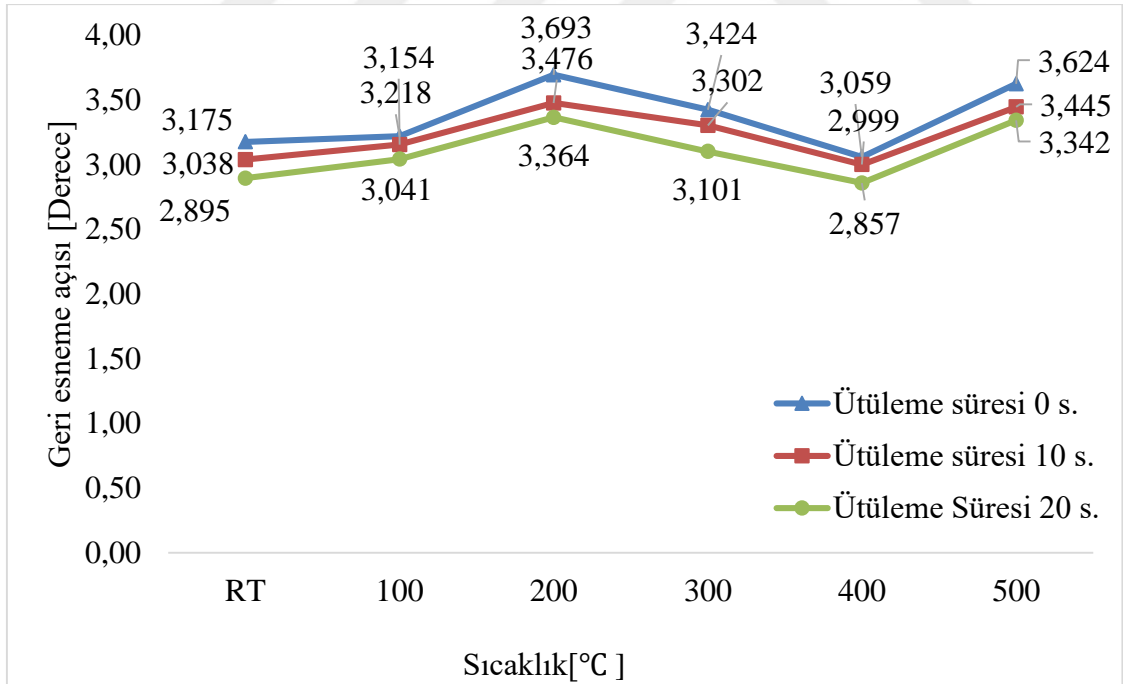
Şekil 5.48. DP600 sac malzemedeki sıcaklık-geri esneme ilişkisi, kalıp açısı 60°-zımba uç kavisi 0 mm



Şekil 5.49. DP600 sac malzemedeki sıcaklık-geri esneme ilişkisi, kalıp açısı 60°-zımba uç kavisi 2 mm

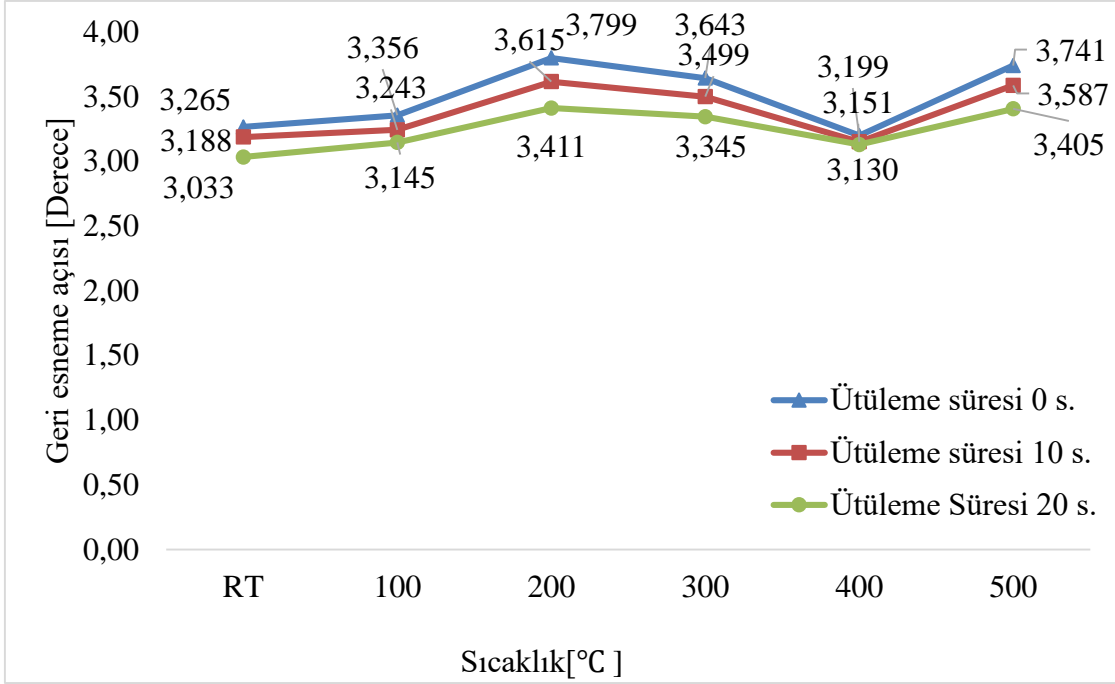


Şekil 5.50. DP600 sac malzemedeki sıcaklık-geri esneme ilişkisi, kalıp açısı 60°-zımba uç kavisi 4 mm

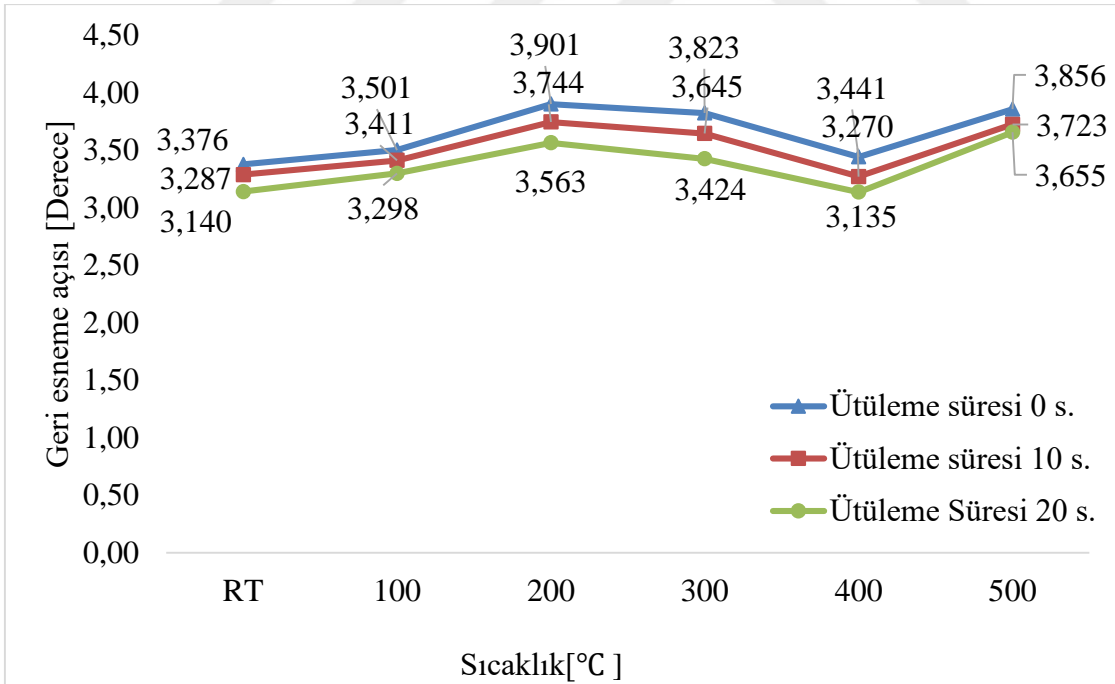


Şekil 5.51. DP600 sac malzemedeki sıcaklık-geri esneme ilişkisi, kalıp açısı 75°-zımba uç kavisi 0 mm





Şekil 5.52. DP600 sac malzemede sıcaklık-geri esneme ilişkisi, kalıp açısı 75°-zımba uç kavisi 2 mm



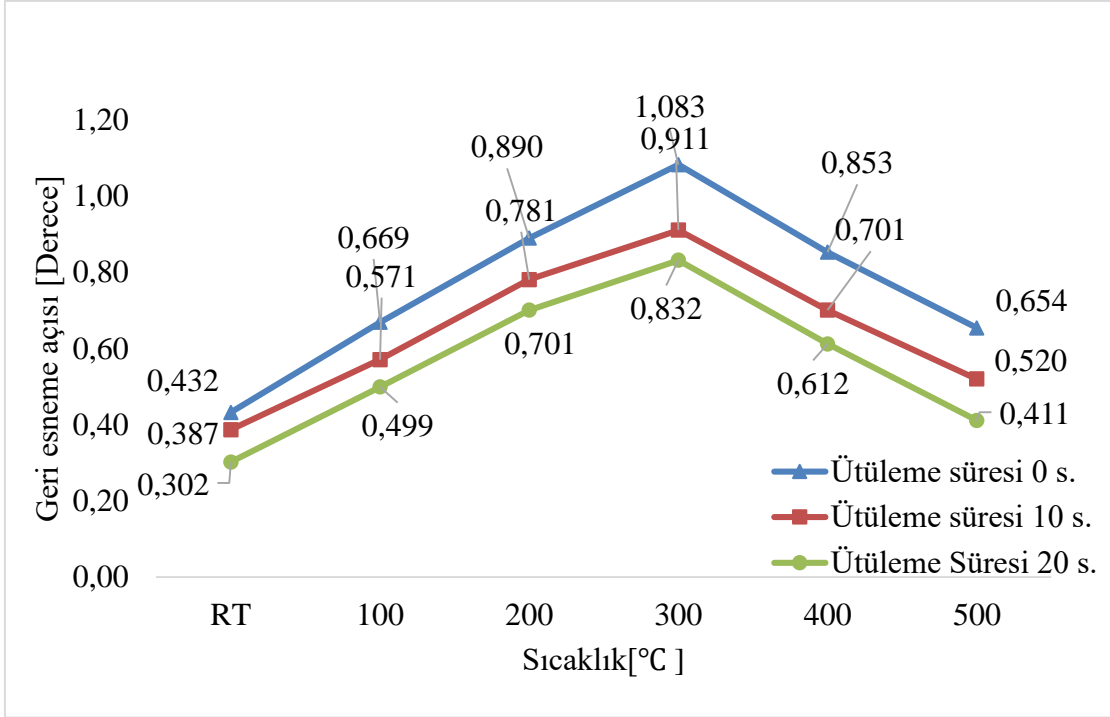
Şekil 5.53. DP600 sac malzemede sıcaklık-geri esneme ilişkisi, kalıp açısı 75°-zımba uç kavisi 4 mm

Deneysel çalışma sonuçlarından DP600 sac malzemenin sıcaklığa karşı duyarlı olduğu ve sıcaklığın şekillendirilebilirliği etkilediği gözlemlenmiştir. Oda sıcaklığından 200°C'ye kadar geri esneme açısının arttığı, 200°C'den 400°C'ye kadar azaldığı, 400°C'den 500°C'ye kadar da geri esnemenin arttığı gözlemlenmiştir.

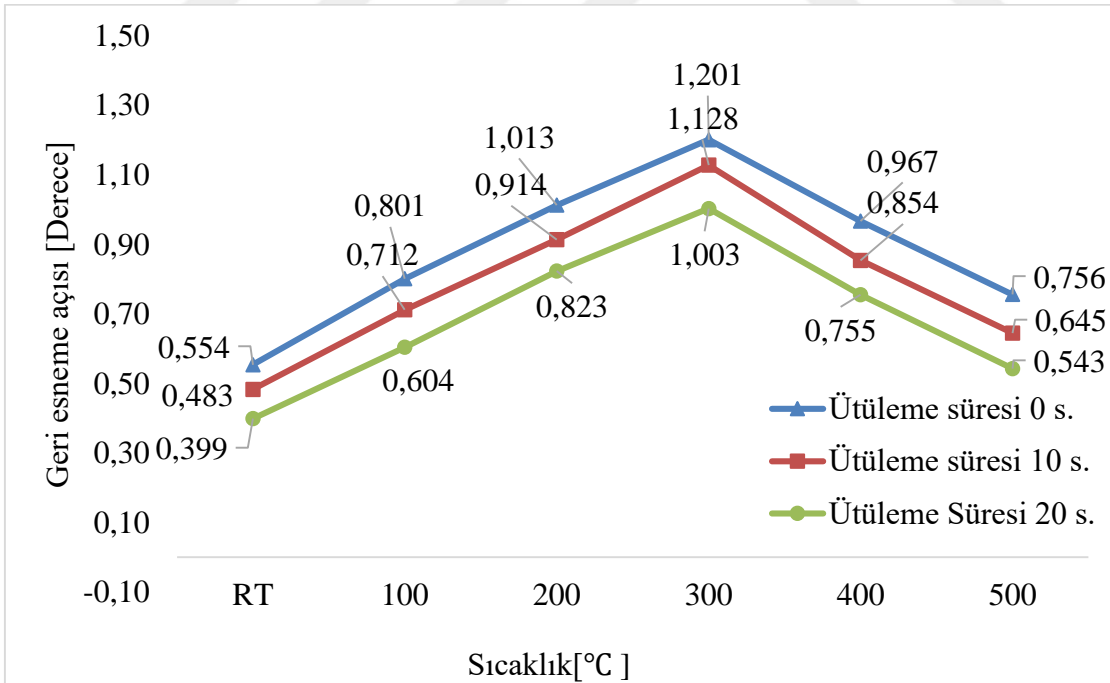
Bu durumun sıcaklıktaki değişime bağlı olarak malzeme iç yapısındaki değişimden kaynaklandığı gözlemlenmiştir. Sıcaklığa etkisiyle ferrit-martenzit yapısında meydana gelen değişim ve sertlik ölçümlerinin geri esneme değerleriyle uyumu sebebiyle bu durumun gözlemlendiği tespit edilmiştir.

### **5.2.2. Titanyum Grade 1 sac malzemedeki sıcaklığın geri esnemeye etkisi**

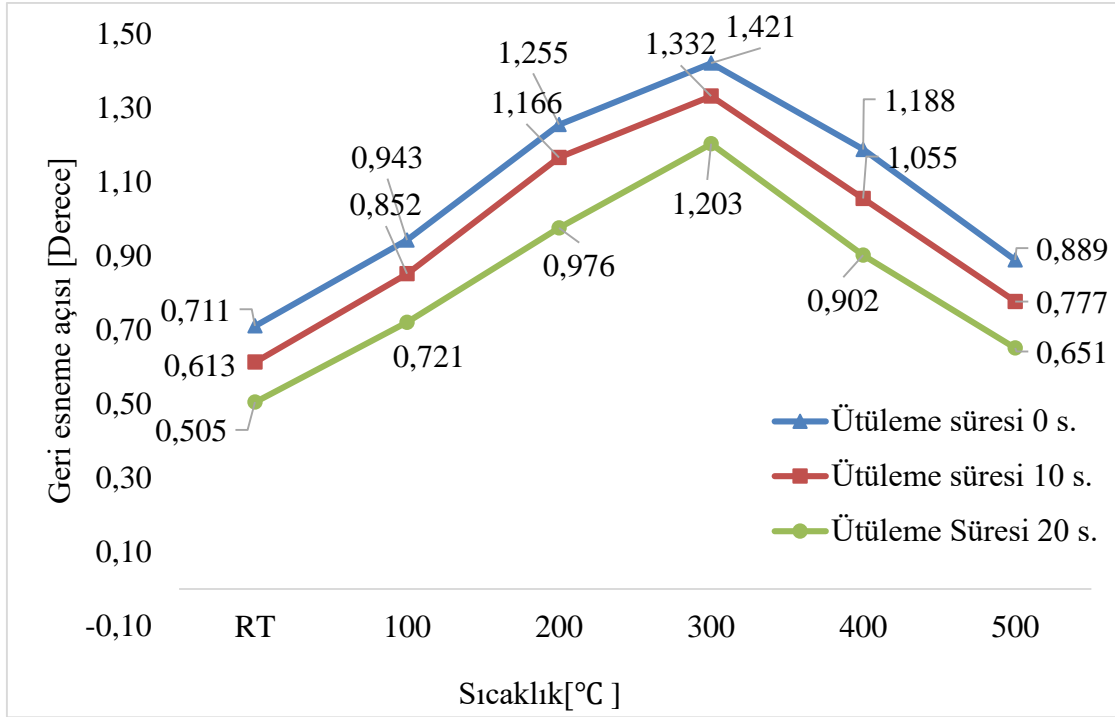
Titanyum Grade 1 sac malzemenin bükme bölgesinin rezistans yardımıyla ısıtılması sonucu elde edilen geri esneme grafikleri Şekil 5.54-5.68'de verilmiştir. Sırasıyla 0, 2 ve 4 mm'lik zımba uç kavislerinde ve 15° kalıp açısında elde edilen grafikler Şekil 5.54-5.56'da, 30° kalıp açısında elde edilen grafikler Şekil 5.57-5.59'da, 45° kalıp açısında elde edilen grafikler Şekil 5.60-5.62'de, 60° kalıp açısında elde edilen grafikler Şekil 5.63-5.65'de ve 75° kalıp açısında elde edilen grafikler Şekil 5.66-5.68'de verilmiştir.



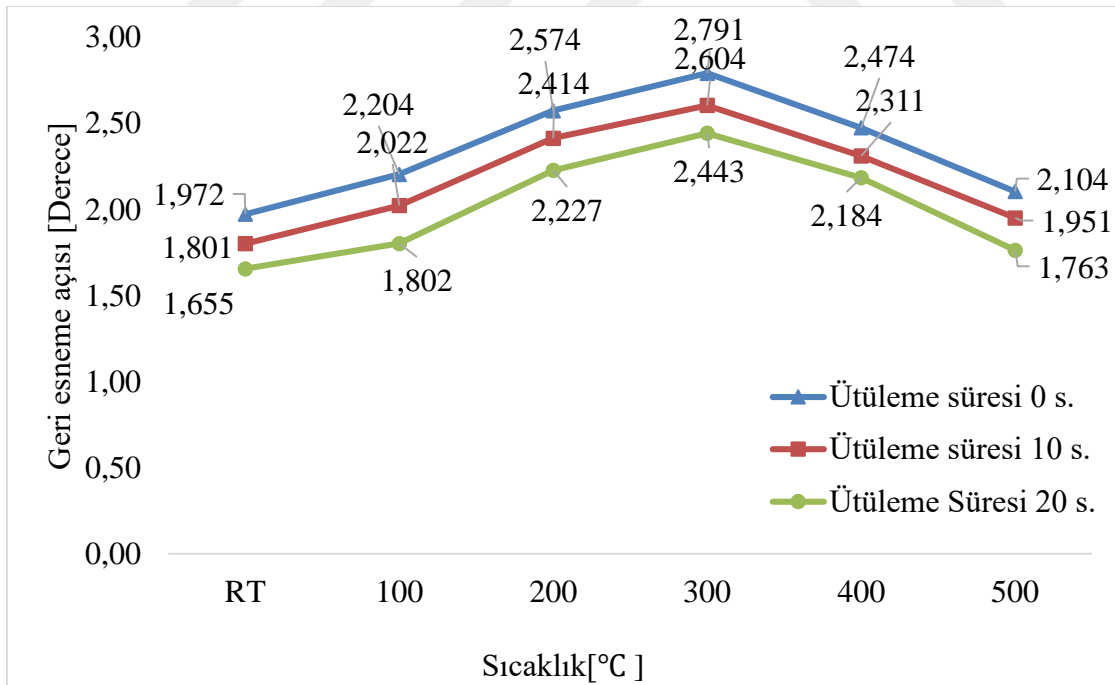
Şekil 5.54. Titanyum Grade 1 sac malzemede sıcaklık-geri esneme ilişkisi, kalıp açısı 15°-zımba uç kavisi 0 mm



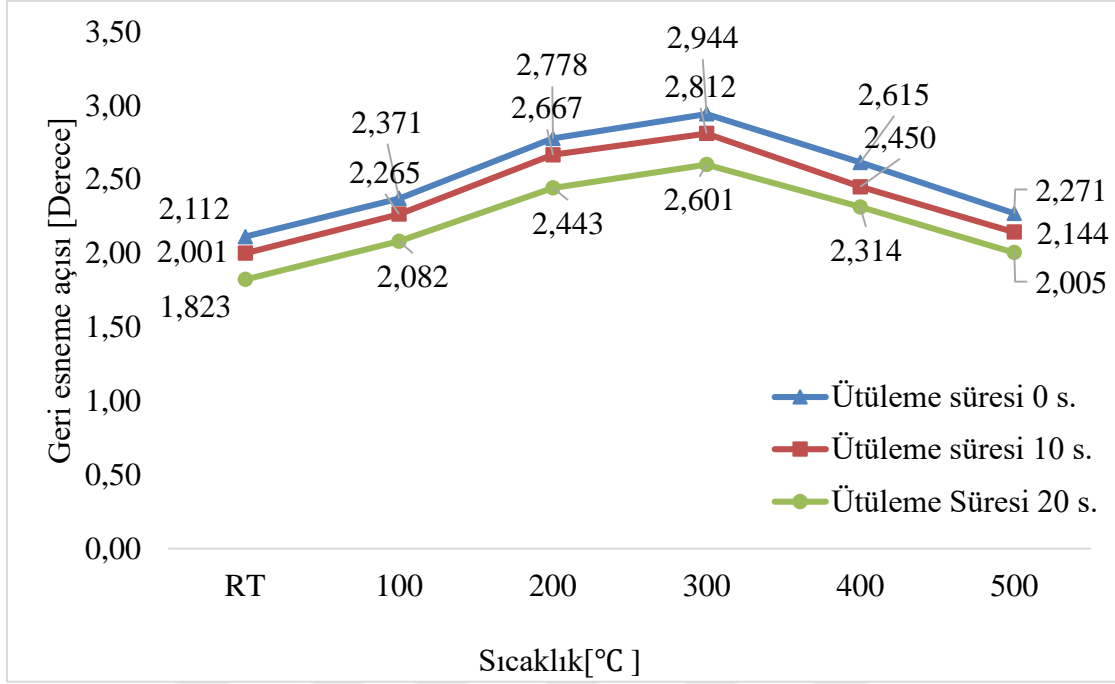
Şekil 5.55. Titanyum Grade 1 sac malzemede sıcaklık-geri esneme ilişkisi, kalıp açısı 15°-zımba uç kavisi 2 mm



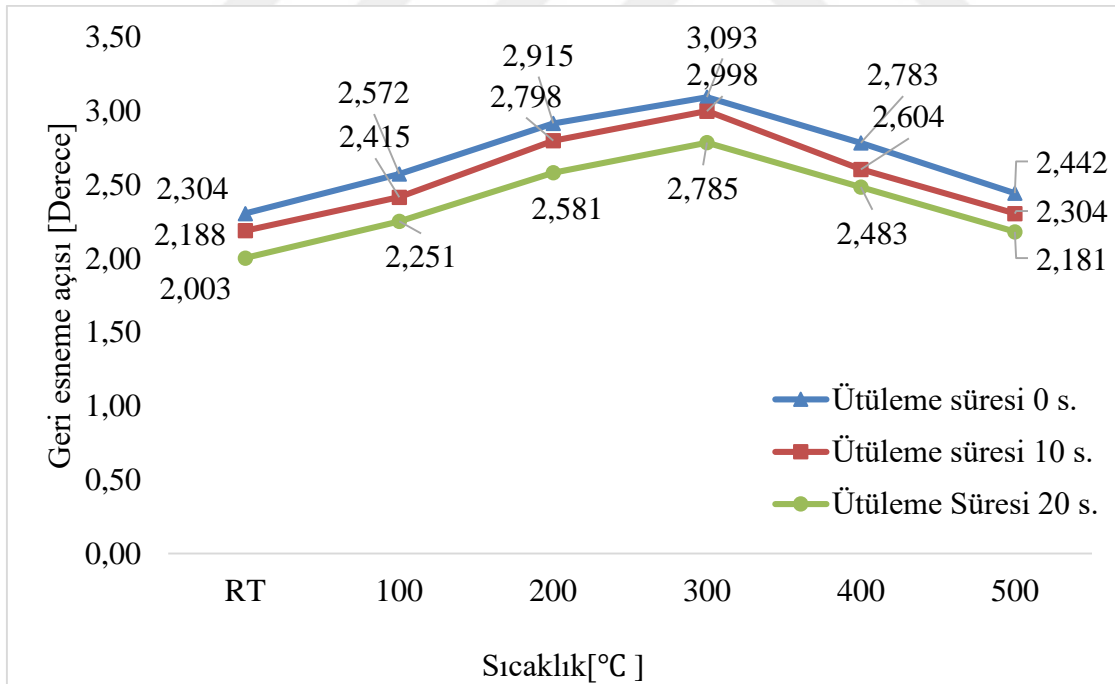
Şekil 5.56. Titanyum Grade 1 sac malzemede sıcaklık-geri esneme ilişkisi, kalıp açısı 15°-zımba uç kavisi 4 mm



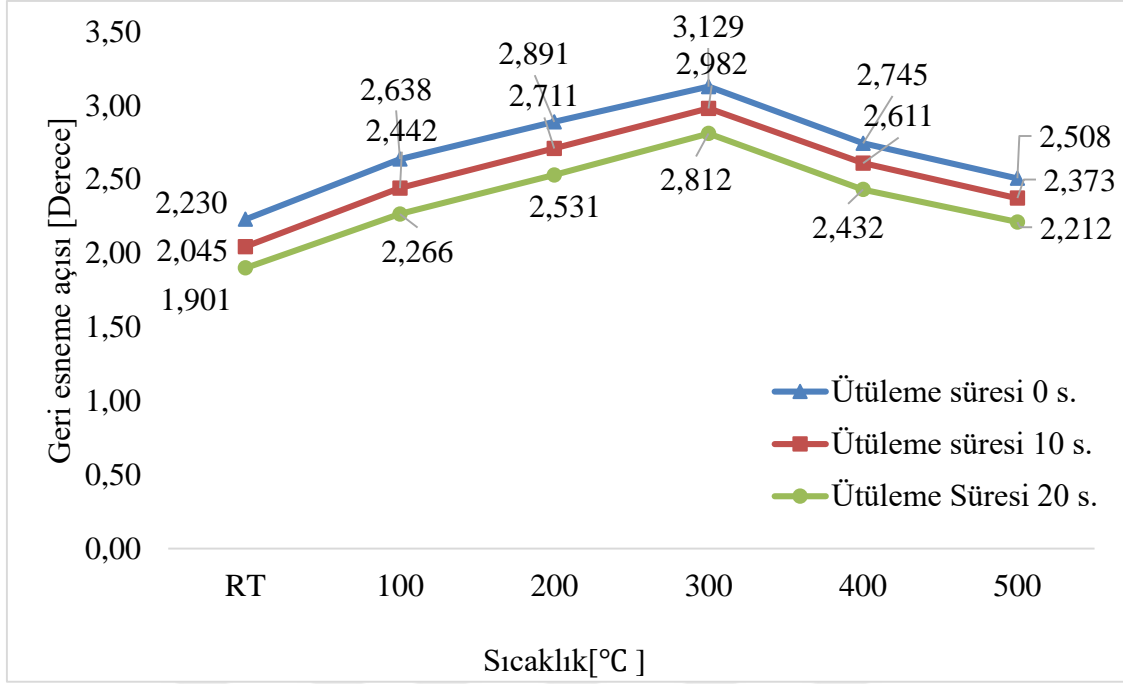
Şekil 5.57. Titanyum Grade 1 sac malzemede sıcaklık-geri esneme ilişkisi, kalıp açısı 30°-zımba uç kavisi 0 mm



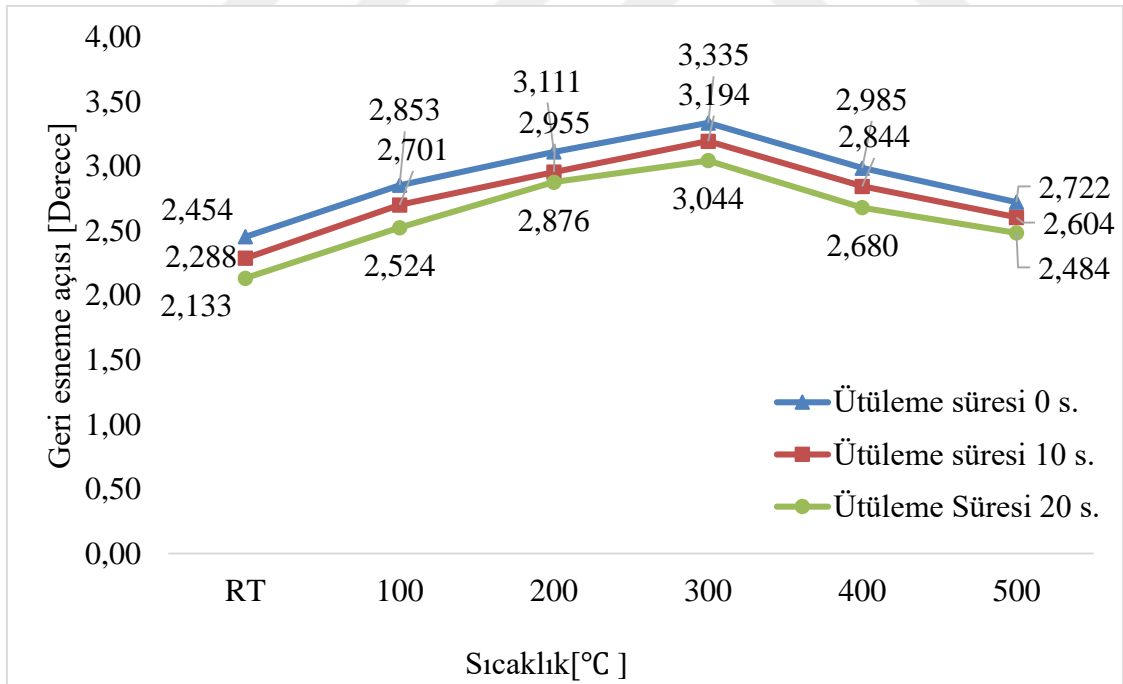
Şekil 5.58. Titanyum Grade 1 sac malzemede sıcaklık-geri esneme ilişkisi, kalıp açısı 30°-zımba uç kavisi 2 mm



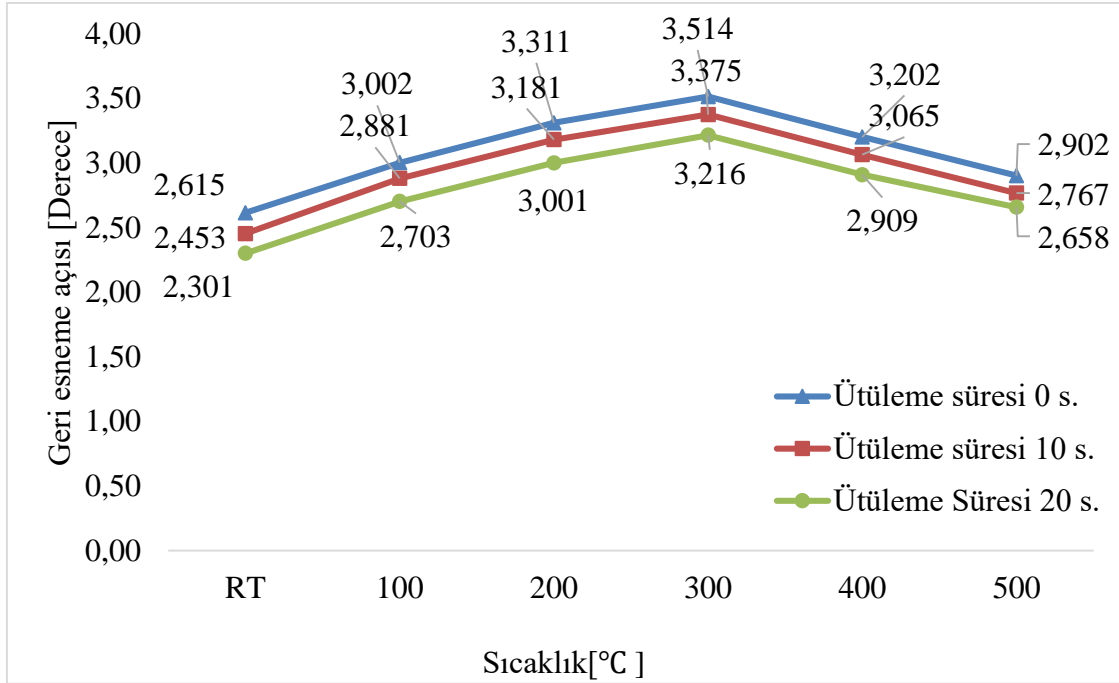
Şekil 5.59. Titanyum Grade 1 sac malzemede sıcaklık-geri esneme ilişkisi, kalıp açısı 30°-zımba uç kavisi 4 mm



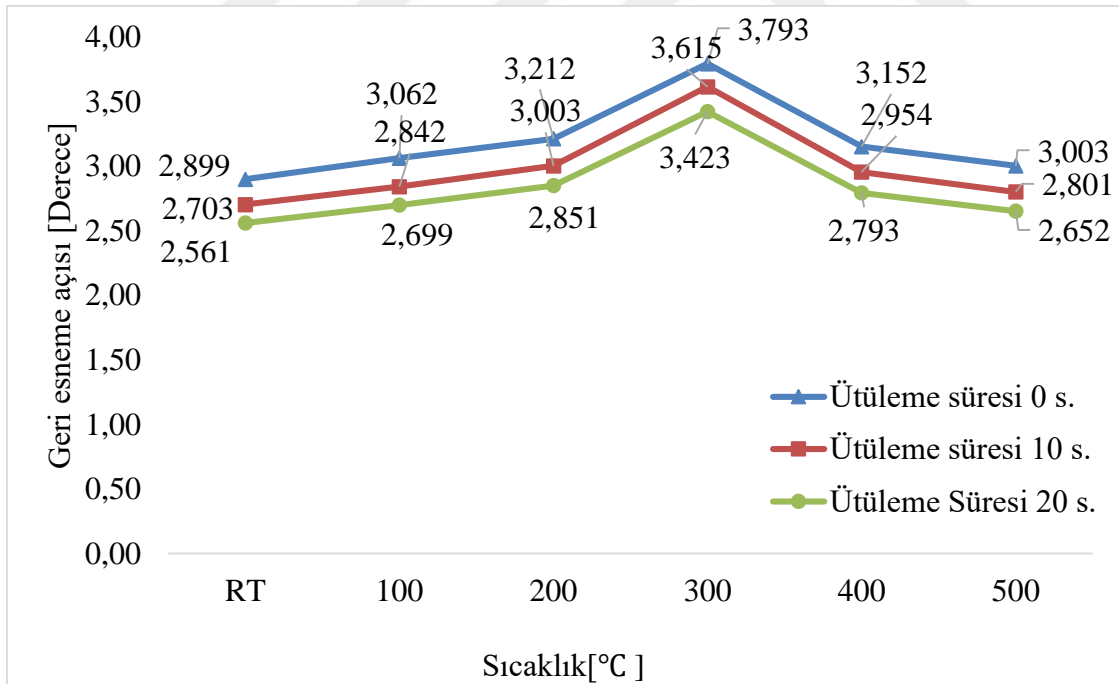
Şekil 5.60. Titanyum Grade 1 sac malzemede sıcaklık-geri esneme ilişkisi, kalıp açısı 45°-zımba uç kavisi 0 mm



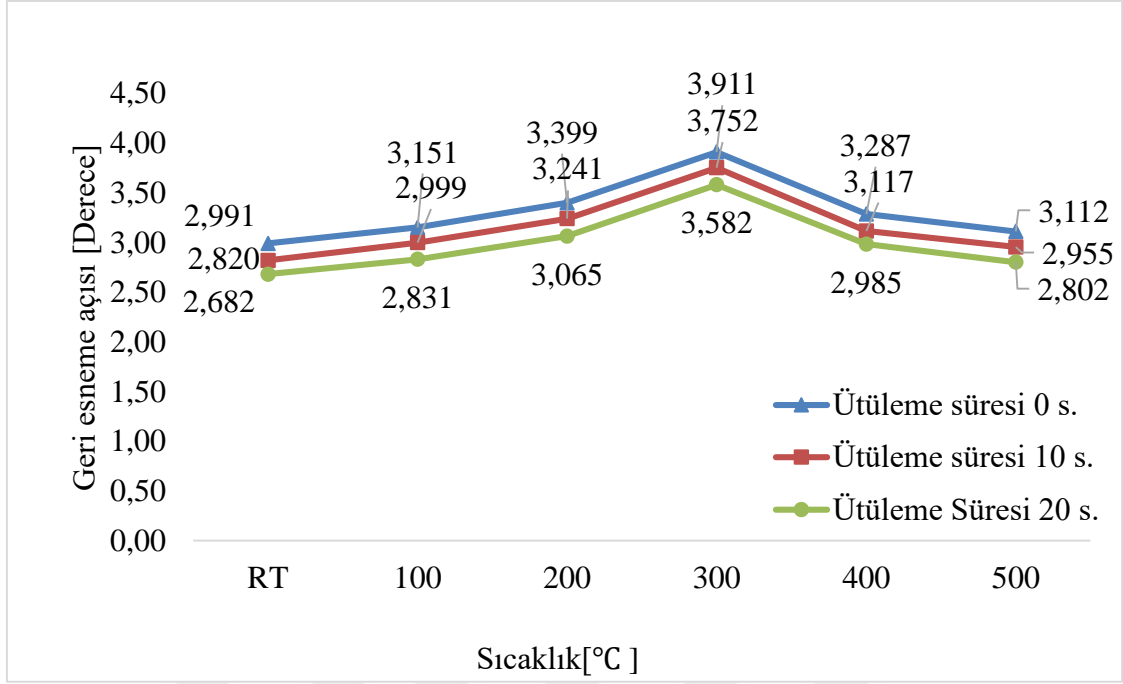
Şekil 5.61. Titanyum Grade 1 sac malzemede sıcaklık-geri esneme ilişkisi, kalıp açısı 45°-zımba uç kavisi 2 mm



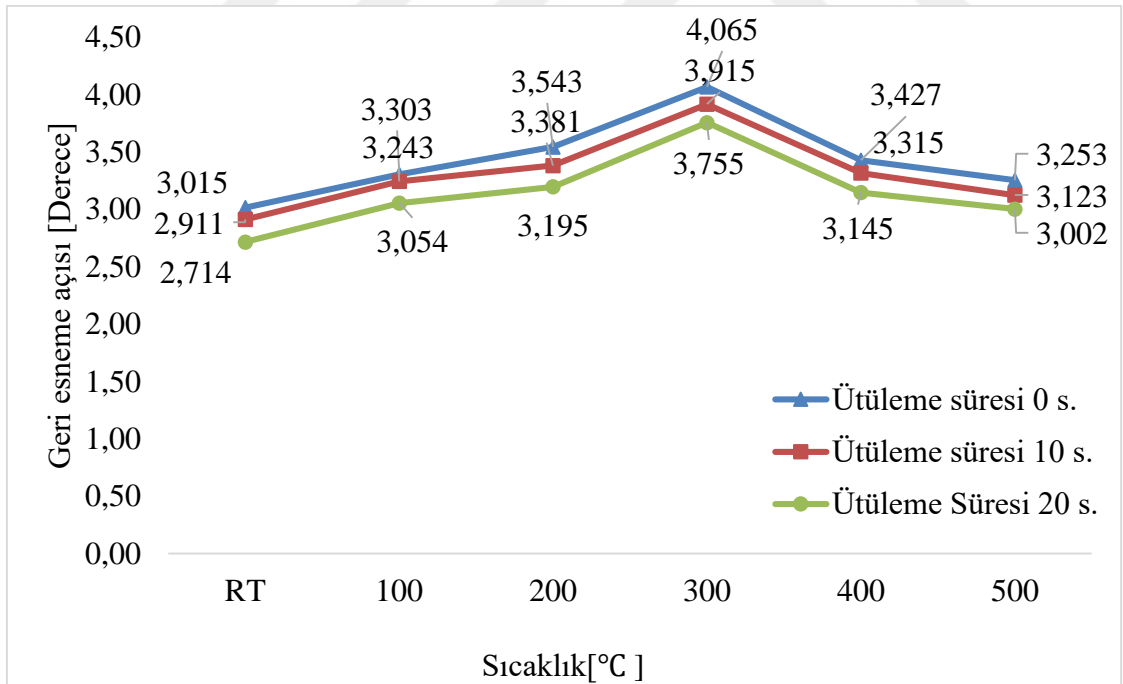
Şekil 5.62. Titanyum Grade 1 sac malzemede sıcaklık-geri esneme ilişkisi, kalıp açısı 45°- zımba uç kavisi 4 mm



Şekil 5.63. Titanyum Grade 1 sac malzemede sıcaklık-geri esneme ilişkisi, kalıp açısı 60°- zımba uç kavisi 0 mm

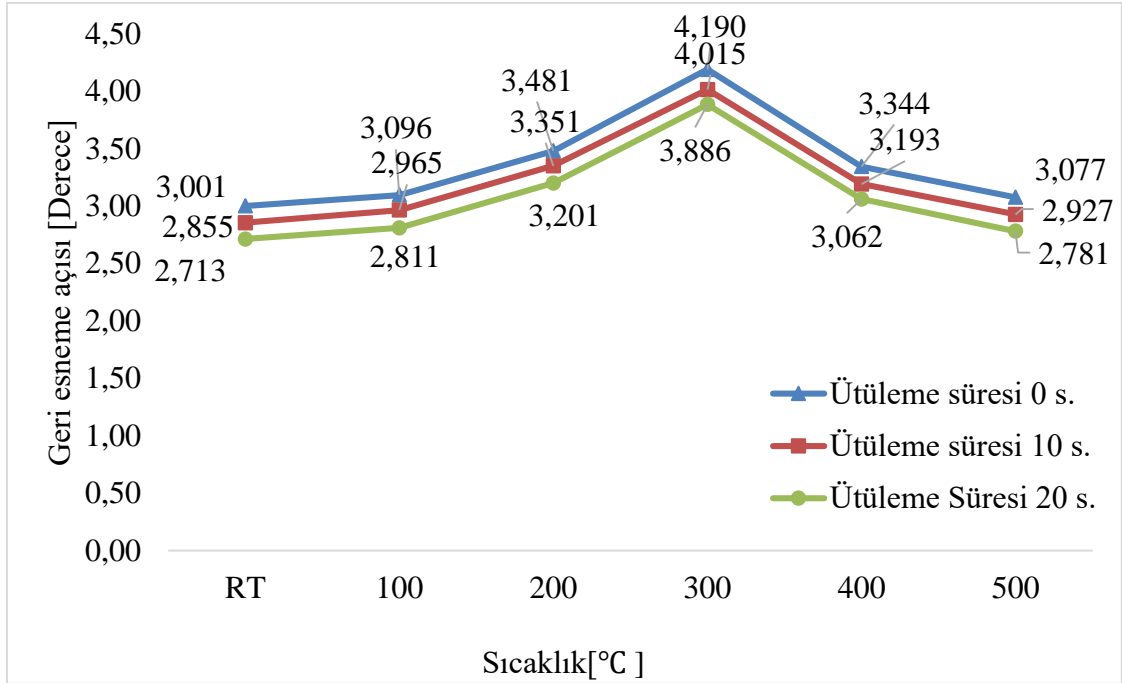


Şekil 5.64. Titanyum Grade 1 sac malzemede sıcaklık-geri esneme ilişkisi, kalıp açısı 60°-zımba uç kavisi 2 mm

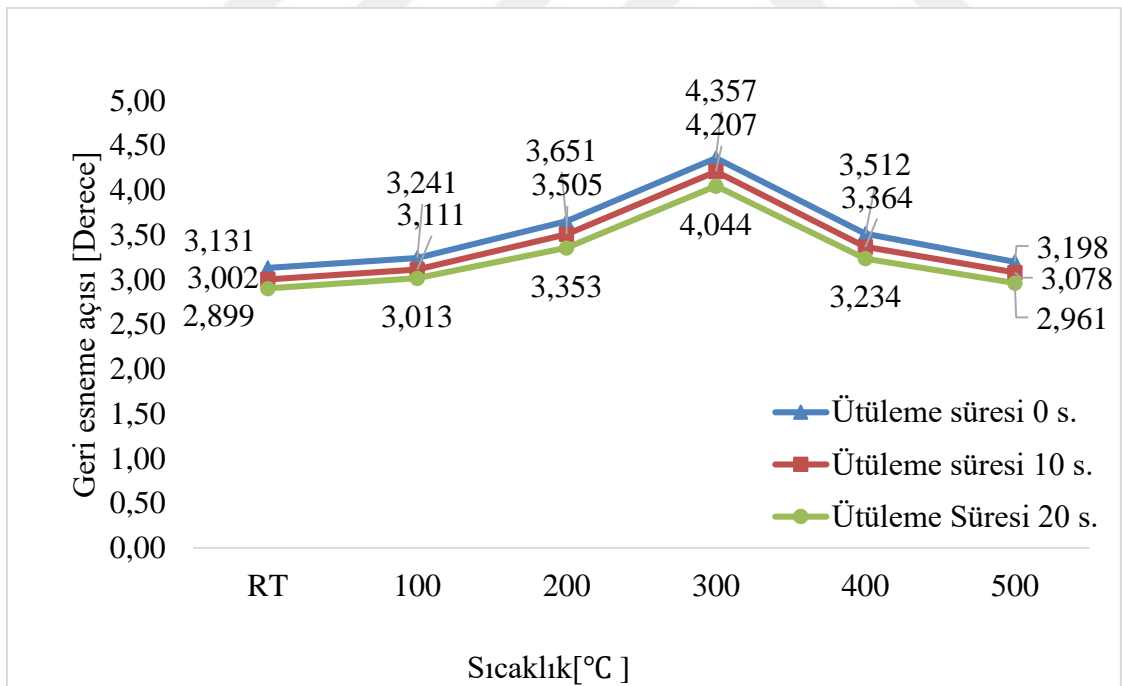


Şekil 5.65. Titanyum Grade 1 sac malzemede sıcaklık-geri esneme ilişkisi, kalıp açısı 60°-zımba uç kavisi 4 mm

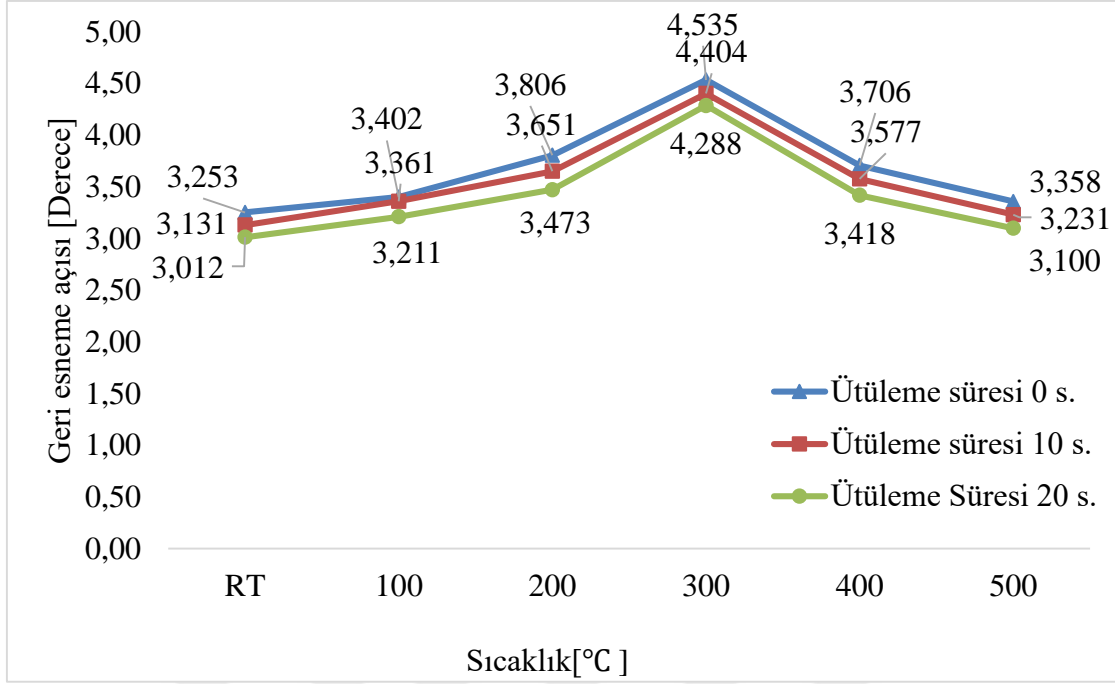




Şekil 5.66. Titanyum Grade 1 sac malzemede sıcaklık-geri esneme ilişkisi, kalıp açısı 75°-zımba uç kavisi 0 mm



Şekil 5.67. Titanyum Grade 1 sac malzemede sıcaklık-geri esneme ilişkisi, kalıp açısı 75°-zımba uç kavisi 2 mm



Şekil 5.68. Titanyum Grade 1 sac malzemedeki sıcaklık-geri esneme ilişkisi, kalıp açısı 75°-zımba uç kavisi 4 mm

Titanyum Grade 1 sac malzemedeki de geri esnemenin sıcaklığa duyarlı olduğu gözlemlenmiştir. Sıcaklık değişimi ile birlikte sac malzemenin sertliklerinde değişim olduğu tespit edilmiştir. Sertliklerindeki değişime bağlı olarak Titanyum Grade 1 sac malzemenin V bükümünde geri esneme açısının oda sıcaklığından 300°C'ye kadar arttığı, 300°C'den 500°C'ye kadar da azaldığı gözlemlenmiştir.

### 5.3. Deney Numunelerinin Mikro Yapı İncelemesi

Elde edilen sonuçlar ile geri esneme açısı arasındaki ilişkiyi açıklamak amacıyla deney malzemelerinin mikro yapı incelemesi Leica DM 4000M marka metal mikroskobu yardımıyla yapılmıştır. Sac malzemelerin mikro yapılarından elde edilen sonuçlarla geri esneme sonuçları karşılaştırılmıştır.

Mikro yapı incelemesinde deney numunelerini bakalite alma işlemi için kesme, kalıplama (bakalite alma), zımparalama, parlatma, dağlama ve mikroskopta inceleme işlemlerine tabi tutulmuştur.

Şekillendirilmiş olan deney numunesi istenilen özellikleri sağlayan en küçük parçadır. Kesmeden kaynaklanan deformasyonun en az olduğu su sirkülasyonlu abrasiv diskli kesme cihazı yardımıyla numuneler kesilerek hazırlanmıştır.

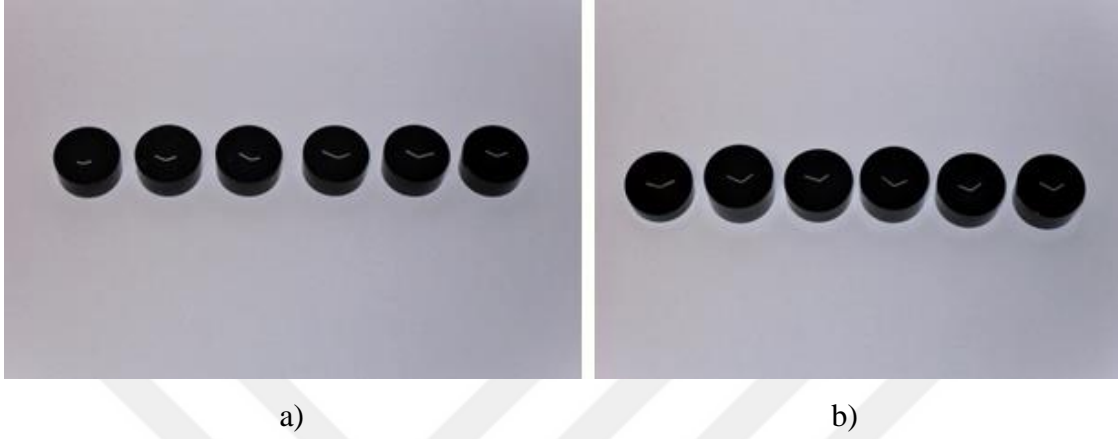
Zımparalama ve parlatma işleminin yapılabilmesi için deney numuneleri elle tutulamayacak kadar küçük olduğundan kalıba (bakalite) alınarak düzgün bir yüzey haline getirilmiştir. Malzemelerin kalıba alınması aşamasında sıcak bakalitleme de denilen sıcakta ve basınç altında kalıplama yöntemi kullanılmıştır. Kesilen numunenin incelenecek yüzeyi bakalite alma cihazının kalıplama haznesine dik olarak yerleştirilmiş ve hazneye bakalit tozu ilave edilmiştir. Numune ve tozun bulunduğu hazne öncelikle 50 kN'luk yük ve 200°C'ye kadar ısıtılmıştır. Haznedeki tozun ergiyip numunenin etrafını kaplaması sonucunda hazne soğutulmuştur. Bu işlem 7 dakikada (4 dakikası ısıtma, 3 dakikası ise soğutma) tamamlanmıştır.

Kalıplama sonucunda oluşan pürüzlü yüzeylere zımparalama ve ardından parlatma işlemleri uygulanmıştır. Zımparalama işlemi, çeşitli zımparalama kademelerini içermektedir. Her kademede bir evvelki kademede kullanılan aşındırıcılardan daha ince aşındırıcı kullanılmaktadır. Bu aşamada her kademenin numune yüzeyinde oluşturduğu deformasyon ve çizikler minimuma indirilmeye çalışılmıştır.

Zımparalanan numuneler mekanik parlatma işlemine tabi tutulmuştur. Numuneler parlatma keçeleri ile parlatılmıştır.

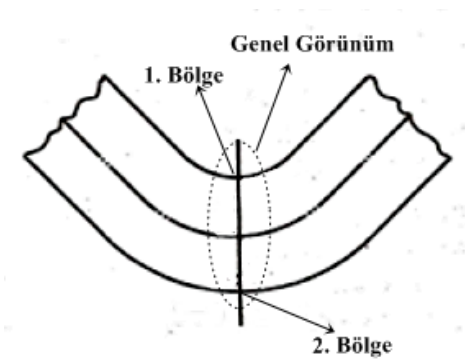
Parlatılan malzemeler dağlama işlemine tabi tutulmuştur. Dağlamada her malzeme için ayrı bir ayraç kullanılmaktadır. Dağlama işlemi için DP600 sac malzeme de % 2 Nital, Titanyum Grade 1 sac malzeme de ise Kroll's Reagent ayraç kullanılmıştır. DP600 sac malzemenin dağlanmasında numune ayıracın içine batırılıp 10 saniye bekletilip çıkarılmıştır. Su ile durulandıktan sonra alkol ile iyice yıkanmıştır. Titanyum Grade 1 sac malzeme de ise bir parça pamuk ayıraca batırılmış ve pamuk 45-60 saniye boyunca numune üzerine sürülmüştür. Numune yüzeyinin matlaşmasının ardından numune su ile durulanmış ve alkol ile yıkanmıştır. Her iki malzeme de numune yüzeyi matlaşana kadar ayraç numuneye temas ettirilmeye devam edilmiştir.

Tez çalışmasında mikro yapı incelemesine tabi tutulacak deney numunelerinin bakalite alınarak oluşturulmuş kalıplarının görüntüleri (soldan sağa sırasıyla RT, 100°C, 200°C, 300°C, 400°C ve 500°C) Şekil 5.69’da verilmiştir.



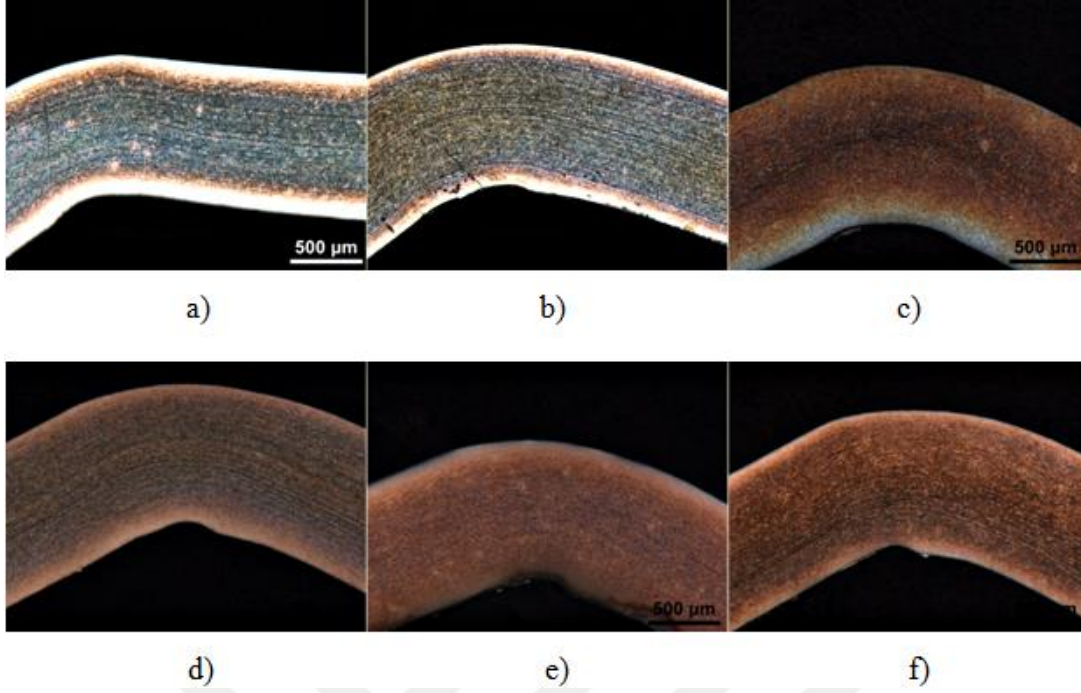
Şekil 5.69. Mikro yapı incelemesi için kalıplanan deney numuneleri a) DP600 b) Titanyum Grade 1

Mikro yapı incelemesinde bakalit kalıplanmış numuneler mikroskop yardımıyla incelenmiş ve sıcaklığın büküm bölgesindeki oluşturduğu değişimi gözlemlemek amacıyla numune üzerinde büküm bölgesi belli bölgelere ayrılmış ve bu bölgelerden alınan görüntüler kendi içinde yorumlanmıştır. Mikro yapı incelemesi için bükülen numune üzerinden belirlenen bölgeler Şekil 5.70’de verilmiştir.

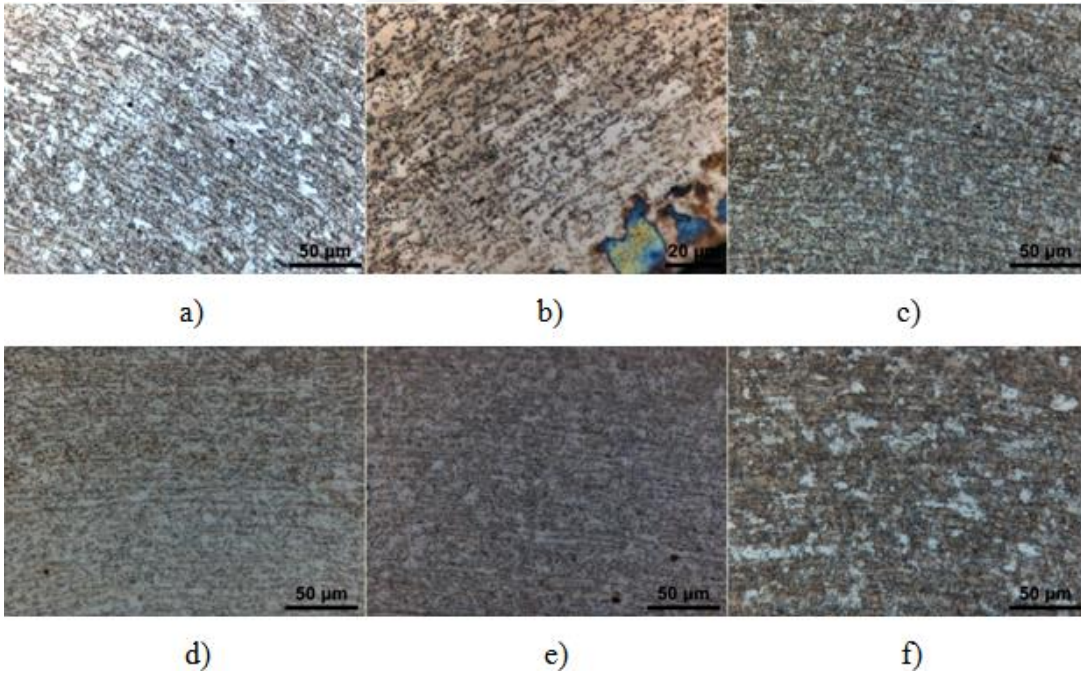


Şekil 5.70. Mikro yapı görüntüleri için deney numunesinde belirlenen bölgeler

DP600 sac malzemeye ait büküm bölgesinin genel mikro yapı görüntüleri Şekil 5.71’de, 1. bölge olarak belirlenen büküm bölgesi iç tarafının mikro yapı görüntüleri de 5.72’de verilmiştir.

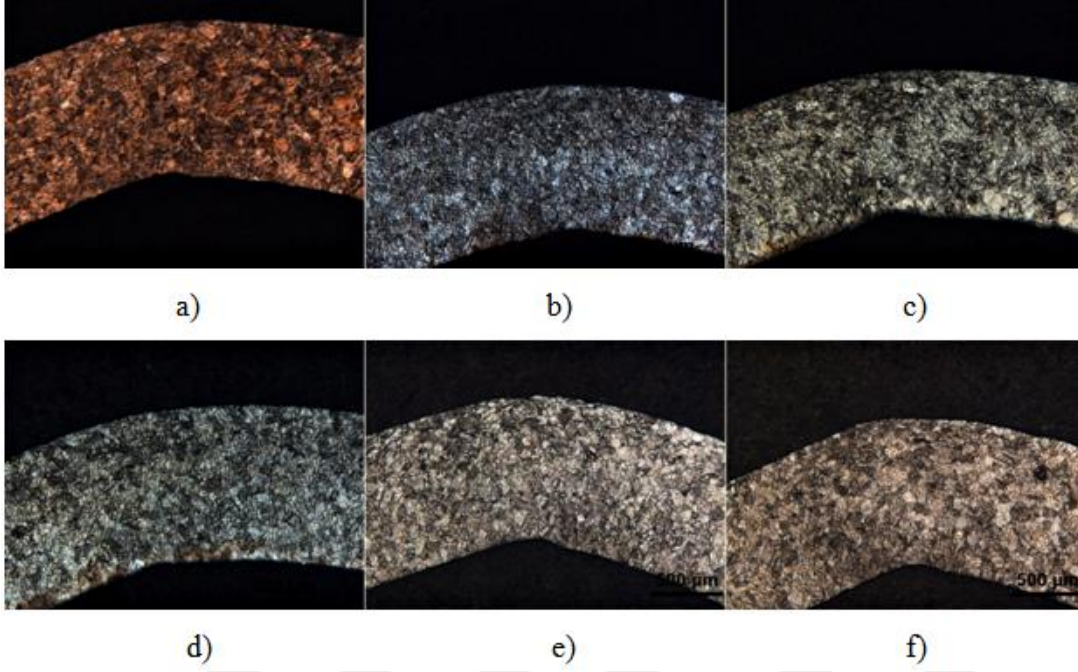


Şekil 5.71. DP600 sac malzemede büküm bölgesi mikro yapı görüntüleri a) RT b) 100°C c) 200°C d) 300°C e) 400°C f) 500°C

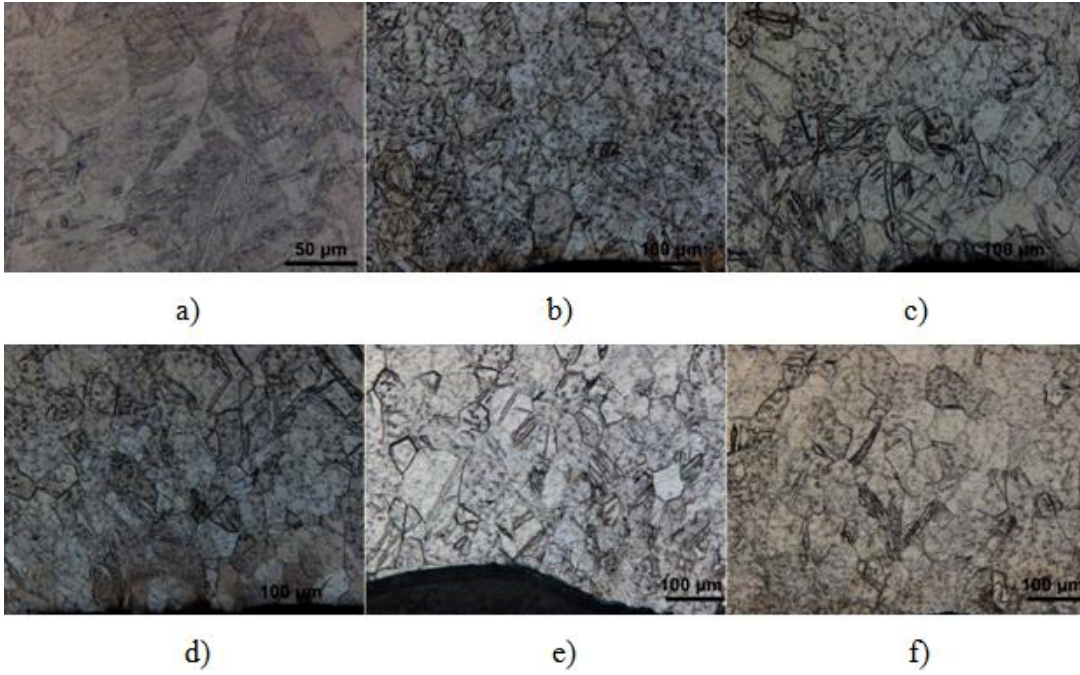


Şekil 5.72. DP600 sac malzeme 1. bölge mikro yapı görüntüleri a) RT b) 100°C c) 200°C d) 300°C e) 400°C f) 500°C

Titanyum Grade 1 sac malzemeye ait büküm bölgesi genelinin mikro yapı görüntüleri Şekil 5.73'te, 1. bölge olarak belirlenen büküm bölgesi iç tarafının mikro yapı görüntüleri 5.74'te verilmiştir.



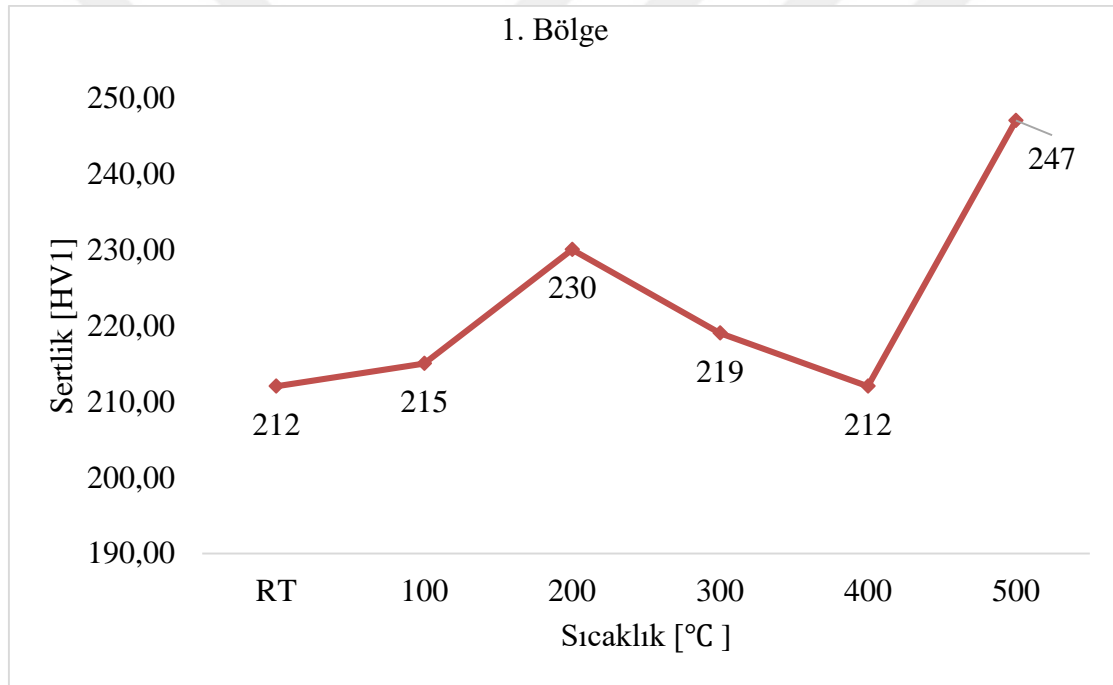
Şekil 5.73. Titanyum Grade 1 sac malzemede büküm bölgesi mikro yapı görüntüleri a) RT b) 100°C c) 200°C d) 300°C e) 400°C f) 500°C



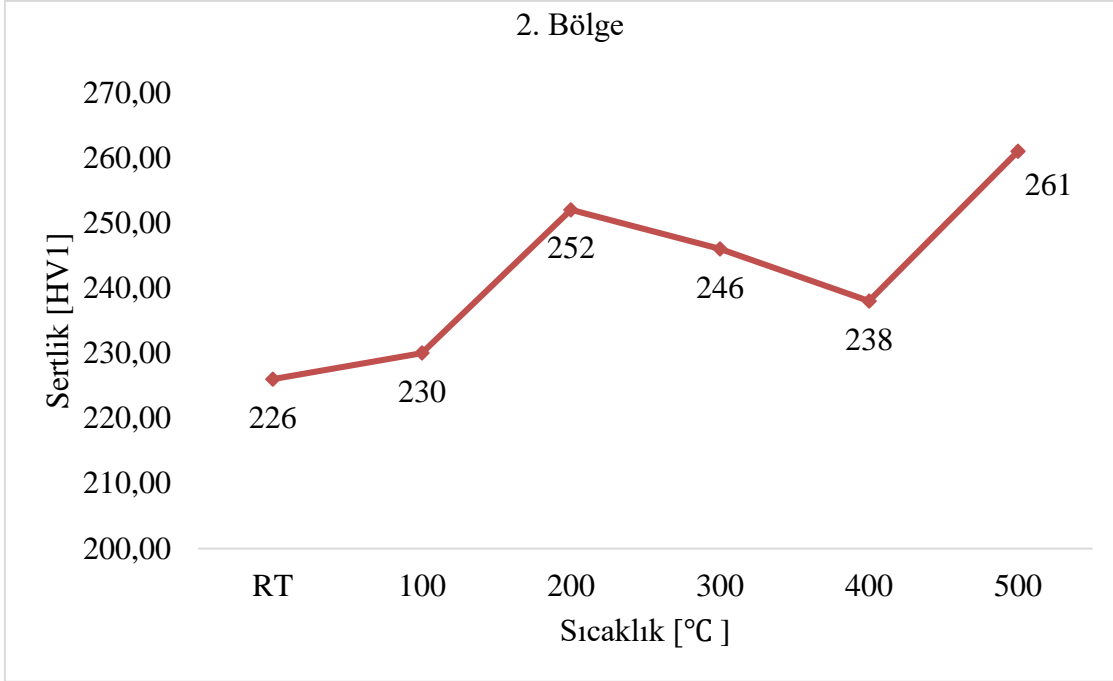
Şekil 5.74. Titanyum Grade 1 sac malzemede 1. bölge mikro yapı görüntüleri a) RT b) 100°C c) 200°C d) 300°C e) 400°C f) 500°C

Deneysel çalışma sonuçları ile sertlik arasındaki ilişkiyi kurabilmek için deney numunelerinde sertlik ölçümleri yapılmıştır. Sertlik ölçümlerinde daha önceden belirlenen bir ve iki numaralı bölgeler kullanılmıştır. Deney numuneleri üzerinde 1 numaralı bölgeden elde edilen sertlik değerlerinin sıcaklıkla değişimi DP600 sac malzeme için Şekil 5.75'te, Titanyum Grade 1 sac malzeme için 5.77'de; 2 numaralı bölgeden elde edilen sertlik değerlerinin sıcaklıkla değişimi DP600 sac malzeme için Şekil 5.76'da, Titanyum Grade 1 sac malzeme için ise Şekil 5.78'de verilmiştir.

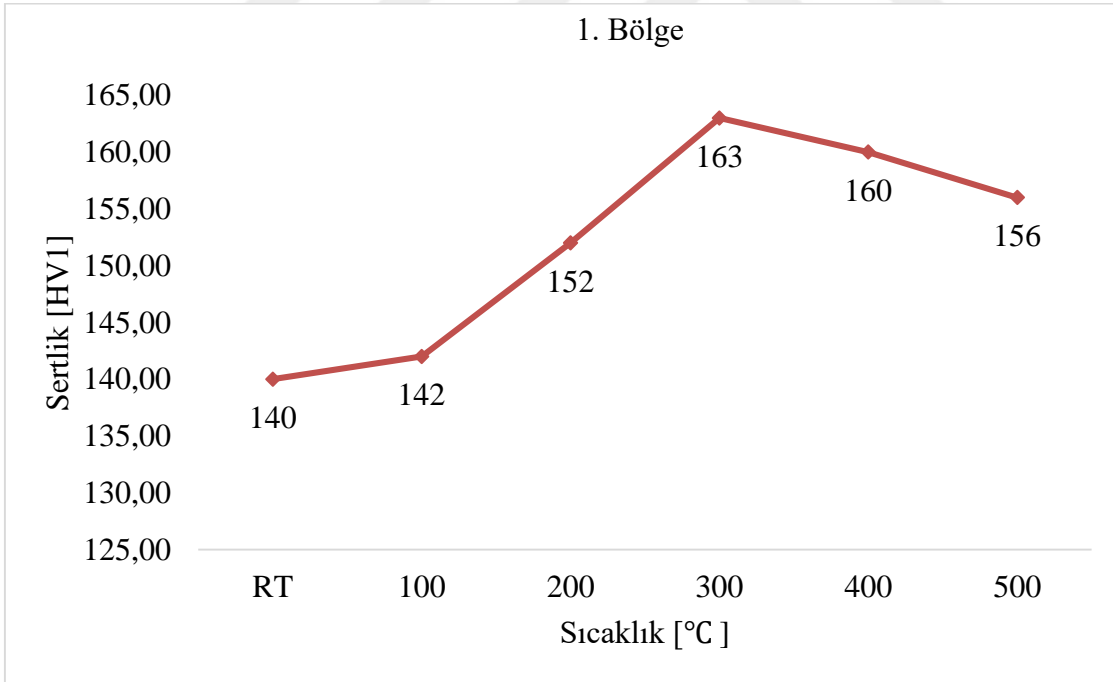
Her iki sac malzeme türü için de sertliğin artmasına bağlı olarak geri esneme açısının arttığı, azalmaya bağlı olarak da geri esneme açısının azaldığı tespit edilmiştir.



Şekil 5.75. DP600 sac malzemede 1. bölge sertlik ölçüm sonuçları

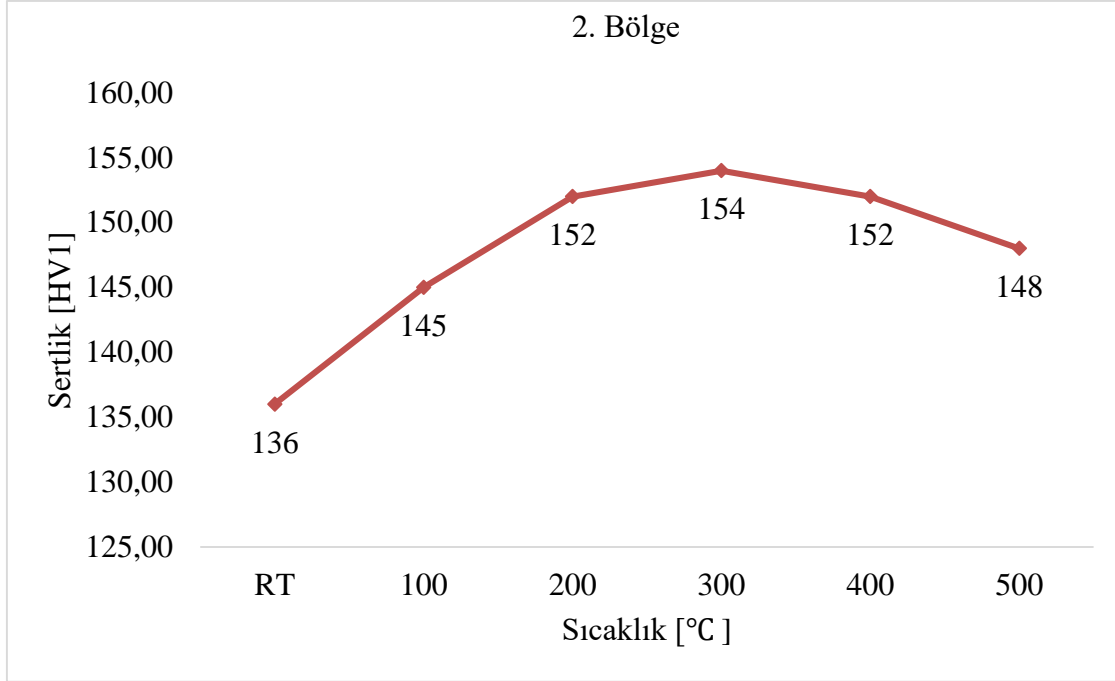


Şekil 5.76. DP600 sac malzemede 2. bölge sertlik ölçüm sonuçları



Şekil 5.77. Titanyum Grade 1 sac malzemede 1. bölge sertlik ölçüm sonuçları





Şekil 5.78. Titanyum Grade 1 sac malzemede 2. bölge sertlik ölçüm sonuçları

Ayrıca DP600 sac malzemeler için ferrit-martenzit oranını gösteren faz analizi de yapılmıştır. Faz analizi büküm bölgesinin iç tarafındaki 1. bölgeden yapılmıştır. Analiz ile farklı sıcaklıklarda V-bükme işlemine tabi tutulması sonucu deney numunelerinin sahip oldukları ferrit ve martenzit tanecik oranları belirlenmiştir. Farklı sıcaklıklarda bükülen deney malzemelerinin sahip olduğu ferrit ve martenzit tanecik oranı Çizelge 5.1’de verilmiştir. Sert bir yapı olan martenzitin tanecik oranı oda sıcaklığından 200°C’ye kadar artış gösterirken, sırasıyla 300°C ve 400°C’de azalmış, son aşamada da 500°C’de tekrar yükselmiştir. Faz analizi sonuçları, sertlik ölçüm sonuçları ve geri esneme değerleri aynı artış ve azalışı gösterirken geri esnemenin martenzit artışına bağlı olarak sertliğin artmasından dolayı arttığı, martenzit oranındaki ve sertlikteki azalmaya bağlı olarak da azaldığı mikro yapı incelemeleri sonucu tespit edilmiştir.

Çizelge 5.1 DP600 sac malzemelerin deney sıcaklıklarında ferrit-martenzit tanecik oranı

SICAKLIK	FERRİT (%)	MARTENZİT (%)
RT	76,74	23,16
100°C	72,84	28,82
200°C	68,78	29,72
300°C	73,43	27,42
400°C	75,59	24,94
500°C	72,68	28,14

## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, V bükme sonucu şekillendirilen sac parçalarda meydana gelen ve bir şekillendirme kusuru olan geri esneme davranışı deneysel olarak araştırılmıştır. Deneysel çalışmalar, büküm bölgesi hassas sıcaklık kontrollü ısıtıcı rezistans ile farklı sıcaklıklarda ısıtılarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmada; kalıp açısı, ütüleme süresi, zımba uç kavis ve şekillendirme sıcaklığı deney parametreleri olarak belirlenmiştir. Deney cihazı elektronik kontrollü olarak tasarlanarak üretilmiş ve tüm deney parametreleri bilgisayar ortamında girilerek deneysel çalışma yapılmıştır. Elde edilen veriler veri okuma sistemi ile anlık olarak bilgisayar ortamına aktarılabilmiştir. Çalışmada elde edilen önemli sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Kalıp açısındaki artışa bağlı olarak şekillendirilen parçalarda geri esneme açısının arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum, büküm açısının artmasıyla birlikte bu bölgede basma ve çekme gerilmelerinin artmasından kaynaklanmaktadır. DP600 sac malzeme; kalıp açısındaki 15 derecelik artışın geri esneme açısını ortalama 0,63 derece, Titanyum Grade 1 sac malzeme de 15 derecelik kalıp açısındaki artışın geri esneme açısını ortalama 0,65 derece arttırdığı belirlenmiştir.
- Zımba uç kavisindeki artışa bağlı olarak geri esneme açısının da arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum, zımba uç kavisinin büyümesi ile birlikte gerilmelerin daha geniş bir alana yayılmasından kaynaklanmaktadır. Zımba uç kavisindeki 2 mm'lik artışın geri esneme açısını DP600 sac malzeme için ortalama 0,14 derece arttırdığı, Titanyum Grade 1 sac malzeme için de geri esneme açısını ortalama 0,17 derece arttırdığı tespit edilmiştir.
- Bükme esnasında ütüleme işleminde sac parçanın şekli sınırlanmaktadır. Bu durum elastik gerilmelerin azalmasına kalıcı gerilmelerin artmasına sebep olmaktadır. Bundan dolayı ütüleme süresindeki artış geri esneme açısında azalmaya sebep olmaktadır. Deneysel çalışmalarda da, DP600 sac malzeme ütüleme süresindeki 10 saniyelik artışın da geri esneme açısını 0,14 derece azalttığı, Titanyum Grade 1 sac malzeme de ütüleme süresindeki 10 saniyelik artışın geri esneme açısını ortalama 0,14 derece azalttığı tespit edilmiştir.

- Şekillendirme öncesinde sac malzemenin büküm bölgesinin ısıtılmasının geri esneme davranışını önemli ölçüde etkilediği tespit edilmiştir. Sıcaklıkla birlikte sac malzemenin mikro yapısındaki değişimler incelenerek bu durum açıklanmıştır. DP600 sac malzemedeki oda sıcaklığından 100°C'ye ve 100°C'den 200°C'ye kadar sıcaklık artışında geri esneme açısının arttığı, 200°C'den 300°C'ye geçişte ise belirgin bir şekilde azalmaya başladığı ve 400°C'de de bu azalmanın devam ettiği, 500°C'de ise tekrar artmaya başladığı gözlemlenmiştir. Mikro yapı incelemesindeki faz analizinde de martenzit oranının oda sıcaklığından 200°C'ye kadar arttığı, 200°C'den 400°C'ye kadar azaldığı ve tekrar 400°C'den 500°C'ye kadar arttığı tespit edilmiştir. Sertlik ölçümlerinde de aynı durumun olduğu gözlemlenmektedir. Bu durum sertlik artışına bağlı olarak geri esnemenin artmasına ve sertlik azalmasına bağlı olarak da geri esneme açısındaki azalmayı göstermektedir. DP600 sac malzemedeki 200°C ve 400°C sıcaklıklarının bir değişim sıcaklığı olduğunu göstermektedir.
- Titanyum Grade 1 sac malzemenin mikro yapı incelemesinde RT' dan 300°C' ye kadar geri esneme açısının arttığı, 300°C'den itibaren ise geri esneme açısının azalmaya başladığı ve 500°C'ye kadar bu azalmanın devam ettiği belirlenmiştir. Titanyum Grade 1 sac malzemenin sertlik ölçümlerinde de RT'dan 300°C'ye kadar sertlik artışı olduğu, 300°C'den 500°C'ye kadar da sertliklerin azaldığı gözlemlenmiştir. Geri esneme açısındaki değişim ile sertlik değerlerindeki değişimlerin birebir örtüşmesi geri esnemenin sıcaklıkla birlikte değişen sertlik değerlerine bağlı olarak değiştiğini ortaya koymaktadır.

## KAYNAKLAR

1. Toros, S., Polat, A., Ozturk, F. (2012). Formability and springback characterization of TRIP800 advanced high strength steel. *Materials & Design*, 41, 298-305.
2. Şahin, Ç. Ö. (2013). *Sac Levhaların V-Bükme Sonucu Geri Yaylanma Davranışlarının İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
3. Ötü, R. (2012). *V Bükme Kalıplarında Alüminyum Alaşımli Sacların Şekillendirilmesi ve Geri Esneme Miktarlarının Tespiti*, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
4. Özdemir, A. (2010). *Sac Metal Ürünlerde Geri Esneme Miktarının Deneysel ve Sonlu Elemanlarla Tespiti, Yapay Sinir Ağlarıyla Tahmini*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
5. Sönmez, E. (2015). *Metal Şekillendirme İşleminde Geri Esneme Tahmininin Deneysel ve Sonlu Elemanlar Yöntemiyle İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
6. Sarıkaya, O. T. (2008). *Analysis of Heat Treatment Effect on Springback in V-Bending*, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
7. Işıktaş, A. (2011). *Farklı Kanlınlıklardaki DKP ve Paslanmaz Sacların Farklı Açılarda Yapılan V-Bükme İşlemindeki Geri Yaylanmalarının İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
8. Farabi, N., Chen, D. L., Zhou, Y. (2011). Microstructure and mechanical properties of laser welded dissimilar DP600/DP980 dual-phase steel joints. *Journal of Alloys and Compounds*, 509(3), 982-989.
9. Geiger, M., Merklein, M., Kaupper, M. (2008). Investigation of the mechanical behaviour of advanced high strength steels under various loading conditions. *International Journal of Material Forming*, 1(1), 225-228.
10. Ozturk, F., Toros, S., Kilic, S., (2009). Tensile and Spring-Back Behavior of DP600 Advanced High Strength Steel at Warm Temperatures. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 16(6), 41-46.
11. Tisza, M., Lukács, Z. (2014). Springback Analysis of High Strength Dual-phase Steels. *Procedia Engineering*, 81, 975-980.
12. Tisza, M., Lukács, Z. (2015). Formability Investigations of High-Strength Dual-Phase Steels. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 28(12), 1471-1481.

13. Yanagimoto, J., Oyamada, K. (2007). Mechanism of Springback-Free Bending of High-Strength Steel Sheets under Warm Forming Conditions. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 56(1), 265-268.
14. Ghaei, A., Green, D. E., Aryanpour, A. (2015). Springback simulation of advanced high strength steels considering nonlinear elastic unloading–reloading behavior. *Materials & Design*, 88, 461-470.
15. Ghadbeigi, H., Pinna, C., Celotto, S. (2013). Failure mechanisms in DP600 steel: Initiation, evolution and fracture. *Materials Science and Engineering: A*, 588, 420-431.
16. Lee, E., Hwang, J., Lee, C., Yang, D., Yang, W. (2014). A local heating method by near-infrared rays for forming of non-quenchable advanced high-strength steels. *Journal of Materials Processing Technology*, 214(4), 784-793.
17. Golovashchenko, S. F., Gillard, A. J., Mamutov, A. V., Ibrahim, R. (2014). Pulsed electrohydraulic springback calibration of parts stamped from advanced high strength steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 214(11), 2796-2810.
18. Andersson, A. (2007). Numerical and Experimental Evaluation of Springback in Advanced High Strength Steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 16(3), 301-307.
19. Firat, M., Karadeniz, E., Yenice, M, Kaya, M. (2013). Improving the Accuracy of Stamping Analyses Including Springback Deformations. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 22(2), 332-337.
20. Gössling, M., Kracker, K., Brosius, A., Kuhnt, S., Tekkaya, A. E. (2011). Strategies for springback compensation regarding process robustness. *Production Engineering*, 5(1), 49-57.
21. Lim, H., Lee, M. G., Sung, J. H., Wagoner, R. H. (2008). Time-dependent Springback. *International Journal of Material Forming*, 1(1), 157-160.
22. Padmanabhan, R., Sung, J., Lim, H., Oliveira, M. C., Menezes, L. F., Wagoner, R. H. (2008). Influence of draw restraining force on the springback in advanced high strength steels. *International Journal of Material Forming*, 1(1), 177-180.
23. Eggertsen, P., Mattiasson, K. (2009). Material modelling for accurate springback prediction. *International Journal of Material Forming*, 2(1), 793.
24. Saxena, K.K., Das, I. M., Mukhopadhyay, J. (2017). Evaluation of bending limit curves of aluminium alloy AA6014-T4 and dual phase steel DP600 at ambient temperature. *International Journal of Material Forming*, 10(2), 221-231.
25. Özsoy, M., Esener, E., Ercan, S., Firat, M. (2014). Springback Predictions of a Dual-phase Steel Considering Elasticity Evolution in Stamping Process. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39(4), 3199-3207.

26. Kılıç, S. (2009). *DP600 Çeliğinin Geri Esneme Davranışının İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde.
27. Pequegnat, A., Huang, Y.D., Khan, M.I., Zhou, Y. (2012). Effects of electrolyte on hardening in laser hole sealing of commercially pure grade 1 titanium. *Journal of Materials Processing Technology*, 212 (10), 2012-2019.
28. Yi, N., Hama, T., Kobuki, A., Fujimoto, H., Takuda, H. (2016). Anisotropic deformation behavior under various strain paths in commercially pure titanium Grade 1 and Grade 2 sheets. *Materials Science and Engineering: A*, 655, 70-85.
29. Hama, T., Kobuki, A., Takuda, H. (2017). Crystal-plasticity finite-element analysis of anisotropic deformation behavior in a commercially pure titanium Grade 1 sheet. *International Journal of Plasticity*, 91, 77-108.
30. Gisario, A., Mehrpouya, M., Venettacci, S., Barletta, M. (2017). Laser-assisted bending of Titanium Grade-2 sheets: Experimental analysis and numerical simulation. *Optics and Lasers in Engineering*, 92, 110-119.
31. Gisario, A., Barletta, M., Venettacci, S. (2016). Improvements in springback control by external force laser-assisted sheet bending of titanium and aluminum alloys. *Optics & Laser Technology*, 86, 46-53.
32. Kharbanda, O.P., Sharan, J., Koul, V., Dinda, A.K., Mishra, M., Gupta, G., Singh, M.P. (2017). Tethering of 3-aminopropyltriethoxy silane films on medical grade V titanium alloy surface through self-assembled monolayers (SAMs) for biomedical applications. *Applied Surface Science*, 412, 648-656.
33. Djavanroodi, F., Derogar, A. (2010). Experimental and numerical evaluation of forming limit diagram for Ti6Al4V titanium and Al6061-T6 aluminum alloys sheets. *Materials & Design*, 31(10), 4866-4875.
34. Kotkunde, N., Srinivasan, S., Krishna, G., Gupta, A. K., Singh, S. K. (2016). Influence of material models on theoretical forming limit diagram prediction for Ti-6Al-4V alloy under warm condition. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 26(3), 736-746.
35. Yang, H., Fan, X., Sun, Z., Guo, L., Zhan, M. (2011). Recent developments in plastic forming technology of titanium alloys. *Science China Technological Sciences*, 54(2), 490-501.
36. Yang, L., Yang, Y. (2014). Deformed microstructure and texture of Ti6Al4V alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 24(10), 3103-3110.
37. Kotkunde, N., Deole, A. D., Gupta, A. K., Singh, S. K., Aditya, B. (2014). Failure and formability studies in warm deep drawing of Ti-6Al-4V alloy. *Materials & Design*, 60, 540-547.

38. Hu, Y., Luo, M., Yao, Z. (2011). Increasing the capability of laser peen forming to bend titanium alloy sheets with laser-assisted local heating. *Materials & Design*, 90, 364-372.
39. Adamus, J., Lacki, P. (2011). Forming of the titanium elements by bending. *Computational Materials Science*, 50(4), 1305-1309.
40. Xiao, J., Li, D., Li, X., Ding, P., Zhao, K., Huang, X., Xu, M. (2015). Process parameters optimization of Ti-6Al-4V alloy sheet during hot stretch-creep forming. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 25(2), 420-428.
41. Li, X., Zhou, O., Zhao, S., Chen, J. (2014). Effect of Pulse Current on Bending Behavior of Ti6Al4V Alloy. *Procedia Engineering*, 81, 1799-1804.
42. Fan, G., Gao, L. (2014). Numerical simulation and experimental investigation to improve the dimensional accuracy in electric hot incremental forming of Ti-6Al-4V titanium sheet. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 72(5), 1133-1141.
43. Sun, S., Guo, B., Shan, D., Zhong, Y. (2009). Research on elevated temperature deformation behavior of Ti-6Al-4V sheets. *Rare Metals*, 28(6), 550.
44. Zong, Y., Liu, P., Guo, B., Shan, D. (2015). Springback evaluation in hot v-bending of Ti-6Al-4V alloy sheets. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 76(1), 577-585.
45. Schuler. (1998). *Metal Forming Handbook*, Germany:Springer.
46. Önel, T., Karağaç, İ. (2017). *The Experimental Investigation of Springback Phenomenon in DP600 Sheet Metal Material and Estimation with Fuzzy Logic*. 3rd Iron and Steel Symposium, Karabük.
47. Llewellyn, D. T., Hillis, D. J. (1996). Ironmaking and Steelmaking Review. *Dual Phase Steels*, 23, 471-478.
48. International Iron & Steel Institute Committee on Automotive Applications. (2005). *Advanced High Strength Steel (AHSS) Application Guidelines*.
49. Tek, Ö. (1993). Gözde Bir Metal Titanyum. *Bilim ve Teknik, Tübitak Yayınları*, (339), 50-53.
50. TIMETAL. (2012). Titanium Metals Cooperation Technical Manuals. *Properties and Processing of Timetal*, 6-4.
51. Akagündüz, E. (2008). *Isıl İşlem Görmüş Ti6Al4V Alaşımının Yüzey Özelliklerinin Mikroyapı ve Yüzey Çizilme Dayanımları Açısından İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Makine ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.



52. Bıçakçı, N. (2015). *Ti6Al4V Titanyum Alaşımının Delinebilirliğinin Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
53. Mavi, A. (2013). *Kesici Takımlara Uygulanan Kriyojenik İşlemin Ti6Al4V Titanyum Alaşımının İşlenmesinde Kesici Takım Performansının Etkisi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
54. Yıldız, T. (2015). *Ti6Al4V Alaşımının Tornalanmasında İşleme Parametrelerinin Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü ve Kesme Kuvveti Üzerindeki Etkisinin Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
55. Ribeiro, M. V., Moreira, M. R. V., Ferreira, J. R. (2003). Optimization of titanium alloy (6Al-4V) machining. *Journal of Materials Processing Technology*, 143-144, 458-463.
56. Ezugwu, E. O., Bonney, J., Yamane, Y. (2003). An overview of the machinability of aeroengine alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 134(2), 233-253.
57. Committee, A. (1980). Introduction to titanium and its alloys. *ASM Metals Handbook*, 2, 1770-1771.
58. Fujii, H. (1998). Strengthening of  $\alpha+\beta$  titanium alloys by thermomechanical processing. *Materials Science and Engineering: A*, 243(1-2), 103-108.
59. Aereus, R., Eyckens, P., Bael, A. V., Duflou, J. R. (2010). Force prediction for single point incremental forming deduced from experimental and FEM observations. *Int J AdvManufTechnol*, 46, 969-982.
60. Aslan, Y., Karaağaç, İ. (2014). V Bükmede Geri Esneme Davranışları. *GU Sci Part: C*, 2(3), 255-263.
61. Karaağaç, İ. (2017). The Experimental Investigation of Springback in V-Bending Using the Flexforming Process. *Arab J SciEng*, 42(5), 1853-1864.
62. Zong, Y., Liu, P., Guo, B., Shan, D. (2015). Springback evaluation in hot V-bending of Ti-6Al-4V alloysheets. *Int J AdvManufTechnol*, 76, 577-585.
63. Buang, M. M., Abdullah, S. A., Saedon, J. (2015). Effect of Die and Punch Radius on Springback of Stainless Steel Sheet Metal in TheAir V-Die Bending Process. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences (JMES)*, 8, 1322-1331.



## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı,adı : ÖNEL, Tahsin  
 Uyuğu : T.C.  
 Doğum tarihi ve yeri : 1989, Erdemli  
 Medeni hali : Bekar  
 e-mail : tahsinonel@hotmail.com



### Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	Kara Harp Okulu	2011
Lise	Işıklar Askeri Lisesi	2007

### İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2012-2016	11.Ana İkm.Mrk.K.lığı	Kh.Tk.K.
2016-Halen	5.Ana Bkm.Fb.Md.lüğü	Mal Saymanı

### Yabancı Dil

İngilizce

### Yayınlar

Önel, T., Karaağaç, İ. (2017). *The Experimental Investigation of Springback Phenomenon in DP600 Sheet Metal Material and Estimation with Fuzzy Logic*. 3rd Iron and Steel Symposium, Karabük.

### Hobiler

Yüzme, Atış



*GAZİ GELECEKTİR..*