



**CNC BORU BÜKME TEZGAHLARINDA ŞEKİLLENDİRİLEN INCONEL  
718 BORU PARÇALARININ GERİ YAYLANMA DAVRANIŞININ  
İNCELENMESİ**

**Alparslan KOÇAPINAR**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ŞUBAT 2024**

## 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.

Alparslan KOCAPINAR

22/02/2024

# CNC BORU BÜKME TEZGAHLARINDA ŞEKİLLENDİRİLEN INCONEL 718 BORU PARÇALARININ GERİ YAYLANMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Alparslan KOCAPINAR

GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Şubat 2024

## ÖZET

Boru parçaları özellikle havacılık ve otomotiv endüstrilerinde üretilen platformlarda oldukça fazla yer almaktadır. Hava akışı, iklimlendirme, motor ve yakıt tankı bağlantısı gibi amaçlar için kullanılan boru parçaları, kullanıldıkları yerlerin özelliklerinden dolayı karmaşık formlara ve çok sayıda büküm noktasına sahip olabilirler. Diğer taraftan, sac metal malzemelerin şekillendirilme operasyonları sırasında karşılaşılan geri yaylanma davranışı ise benzer şekilde boru büküm tezgâhlarında form verilen boru parçalarında da görülmektedir. Bu tez çalışmasında ince duvarlı inconel 718 malzemesinden imal edilmiş boru parçalarının geri yaylanma davranışı hem sonlu elemanlar yöntemi hem analitik yöntem hem de deneysel çalışmalar ile incelenmiştir. Sayısal çalışmalar Pam-Stamp yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar kapsamında Taguchi deney tasarım yöntemi kullanılmış olup L9 ortogonal dizin için çalışmalar yürütülmüştür. Büküm yarıçapı, büküm açısı ve boru dış çapının et kalınlığına bölünmesi ile elde edilen geometrik oran gibi boru büküm karakteristiğini oluşturan parametrelerin geri yaylanmayı nasıl etkilediği incelenmiştir. Sayısal ve analitik yöntem ile edilen sonuçların tutarlılığı deneysel sonuçlar ile karşılaştırılarak araştırılmıştır. Boru büküm işleminin geri yaylanma davranışının hem deneysel çalışmaların verileri kullanılarak elde edilen bağıntılar yardımıyla hem de sayısal çözümler ile önceden tahmin edilmesinin mümkün olacağı sonucuna varılmış olup bu sayede imalat sürecinde sık sık başvurulanan deneme yanılmaların önüne geçilerek; zaman, maliyet ve iş gücünden önemli kazanımlar elde edilecektir.

Bilim Kodu : 91440  
Anahtar Kelimeler : Geri yaylanma, inconel 718, döner-çekme boru büküm  
Sayfa Adedi : 105  
Danışman : Prof. Dr. Atilla BIYIKOĞLU  
İkinci Danışman : Dr. Öğr. Gör. Yavuz ZÜMRÜT

INVESTIGATION OF SPRINGBACK BEHAVIOR OF INCONEL 718 PIPE PARTS  
FORMED ON CNC PIPE BENDING MACHINES

(M. Sc. Thesis)

Alparslan KOCAPINAR

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

February 2024

ABSTRACT

Tube parts are widely used in platforms produced especially in the aviation and automotive industries. Tube parts used for purposes such as air flow, air conditioning, engine and fuel tank connection may have complex forms and many bending points due to the characteristics of the places where they are used. On the other hand, the springback behavior encountered during the forming operations of sheet metal materials is also observed in tube parts formed on tube bending machines. In this thesis study, the springback behavior of tube parts made of thin-walled Inconel 718 material was examined using by finite element method, analytical method and experimental studies. Numerical studies were carried out using Pam-Stamp software. Within the scope of experimental studies, the Taguchi experimental design method was used and studies were carried out for the L9 orthogonal array. How the parameters that make up the tube bending characteristics, such as bending radius, bending angle and the geometric ratio obtained by dividing the tube outer diameter by the wall thickness, affect the springback, were examined. The consistency of the results obtained by numerical and analytical methods was investigated by comparing with experimental results. It has been concluded that it is possible to predict the springback behavior of the tube bending process both with the help of the relations obtained using the data of experimental studies and with numerical analysis, thus preventing the trial and error frequently used in the manufacturing process; significant savings in time, cost and labor will be achieved.

Science Code : 91440

Key Words : Springback, inconel 718, rotary-draw tube bending

Page Number : 105

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Atilla BIYIKOĞLU

Co-Supervisor : Inst. Dr. Yavuz ZÜMRÜT

## TEŞEKKÜR

Tez çalışması süresi boyunca desteklerini esirgemeyen akademik anlamda bilgi birikim ve tecrübelerinden yaralandığım saygıdeğer danışman hocam Prof. Dr. Atilla BIYIKOĞLU ve yardımcı tez danışman hocam saygıdeğer Dr. Öğr. Gör. Yavuz ZÜMRÜT' e,

Özellikle sayısal yazılım programlarında üstün tecrübeye sahip çalışma arkadaşım Sinan HAHOLU' ya,

Tecrübelerinden sürekli faydalandığım ve her danıştığım konuda bana içtenlikle yanıt veren çalışma arkadaşlarım Ferhat ORHAN ve Emre EROL' a,

Tez konumun temelini oluşturan malzemenin tedarik edilmesinde desteklerini esirgemeyen yöneticilerim sayın Hakan AYDIN, Erhan İĞNELİ ve Görkem ÜNER' e,

Deney çalışmamı gerçekleştirmemi sağlayan Hacı Mehmet VURUCU ve değerli ekibine,

Tez çalışmam için bana sunmuş olduğu imkân ve fırsatlardan dolayı Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş. 'ne,

Son olarak çalışma motivasyonum konusunda her daim arkamda olan ailem ve Merve SADIKOĞLU' na sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

**İÇİNDEKİLER**

	<b>Sayfa</b>
ÖZET .....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xiii
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xix
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI .....	3
2.1. Boru Büküm Terminolojisi.....	3
2.2. Boru Büküm Yöntemleri .....	4
2.2.1. Sıkıştırılmayla boru bükme yöntemi .....	4
2.2.2. İttirme ile boru bükme yöntemi.....	5
2.2.3. Rulo boru bükme yöntemi.....	5
2.2.4. Gerdirme ile boru bükme yöntemi .....	6
2.2.5. Sıvı basıncı ile boru bükme yöntemi.....	7
2.2.6. Döner-çekme boru bükme yöntemi.....	8
2.3. Boru Parçası Bükümü Esnasında Ortaya Çıkan Problemler .....	12
2.3.1. Kırışma problemi .....	13
2.3.2. Yırtılma problemi.....	13
2.3.2. Kesit daralması.....	14
2.3.3. Geri yaylanma problemi.....	14

	<b>Sayfa</b>
2.4. Problemin Tanımlanması .....	16
2.4.1. Problemin fiziksel tanımı .....	16
2.4.2. Problemin matematiksel tanımı.....	17
2.5. Literatürde Yer Alan Çalışmalar .....	18
2.6. Literatür Araştırmasının Değerlendirilmesi .....	20
<b>3. MALZEME, METOD VE DENEYSEL YÖNTEM .....</b>	<b>21</b>
3.1. Malzeme.....	21
3.1.1. Inconel alaşımlarının genel yapısı .....	21
3.1.2. Inconel 718 alaşımı gerçek gerilim-gerinim grafiklerinin oluşturulması.	24
3.1.3. Inconel alaşımlarında ısıl işlem.....	28
3.1.4. Inconel 718 uygulama alanları .....	30
3.2. Metod .....	30
3.2.1. Taguchi yöntemi .....	30
3.2.2. Matematiksel yöntem.....	33
3.2.3. Sayısal yöntem .....	33
3.3. Deneysel Yöntem ve Ekipmanlar .....	38
3.3.1. Deney tasarımı ve parametreleri .....	38
3.3.2. Deney numuneleri .....	40
3.3.3. Deney tezgâhının hazırlanması .....	41
3.3.4. Kalıpların belirlenmesi .....	42
3.3.5. Deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesi .....	43
<b>4. ÇALIŞMA SONUÇLARI VE TARTIŞMALAR.....</b>	<b>45</b>
4.1. Deneysel Çalışma .....	45
4.1.1. Deneysel çalışma sonuçları .....	45

	<b>Sayfa</b>
4.1.2. Anova analizleri .....	56
4.1.3. Taguchi analizleri.....	56
4.2. Analitik Çalışma .....	61
4.3. Sonlu Elemanlar Yöntemi Analizleri .....	64
4.3.1. Geometri modellerinin oluşturulması .....	64
4.3.2. Malzeme tanımlamaları .....	68
4.3.3. Ağ yapısı ve eleman tipi belirlenmesi .....	68
4.3.4. Temas yüzeyleri ve sürtünme katsayıları .....	80
4.3.5. Sınır şartları ve yüklemeler .....	81
4.3.6. Analiz sonuçları .....	83
4.4. Deneysel, Analitik ve Sayısal Çalışma Sonuçlarının Karşılaştırılması .....	91
4.4.1. Büküm açısının geri yaylanma üzerindeki etkisi .....	93
4.4.2. Büküm yarıçapının geri yaylanma üzerindeki etkisi .....	94
4.4.3. Geometrik oranın geri yaylanma üzerindeki etkisi.....	96
<b>5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....</b>	<b>97</b>
5.1. Sonuçlar .....	97
5.2. Öneriler .....	99
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>101</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>105</b>

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 3.1. Inconel 718 ağırlıkça nominal kimyasal kompozisyonu.....	22
Çizelge 3.2. Inconel 718 spesifikasyonu.....	22
Çizelge 3.3. AMS 5596-sac, şerit, plaka inconel 718 süper alaşımı mekanik özellikleri.....	23
Çizelge 3.4. AMS 5662 ve 5663 -çubuk, dövme, ring inconel 718 süper alaşımı mekanik özellikleri.....	23
Çizelge 3.5. AMS 5589 -dikişsiz boru (f) inconel 718 süper alaşımı mekanik özellikleri.....	23
Çizelge 3.6. Bazı sıcaklık noktalarına göre inconel 718 elastisite modül (a) değerleri.....	24
Çizelge 3.7. Solüsyona alma sıcaklığına göre inconel 718 mekanik özellikleri.....	29
Çizelge 3.8. Taguchi ortogonal dizin tablosu .....	32
Çizelge 3.9. Deney parametreleri ve seviyeleri .....	38
Çizelge 3.10. Taguchi yöntemine göre oluşturulan deney tasarımı.....	39
Çizelge 3.11. Numune geometrik özellikleri .....	40
Çizelge 3.12. Kalıpların belirlenmesi.....	42
Çizelge 4.1. Deney 1 açısız geri yaylanma değerleri.....	45
Çizelge 4.2. Deney 2 açısız geri yaylanma değerleri.....	46
Çizelge 4.3. Deney 3 açısız geri yaylanma değerleri.....	47
Çizelge 4.4. Deney 4 açısız geri yaylanma değerleri.....	48
Çizelge 4.5. Deney 5 açısız geri yaylanma değerleri.....	49
Çizelge 4.6. Deney 6 açısız geri yaylanma değerleri.....	50
Çizelge 4.7. Deney 7 açısız geri yaylanma değerleri.....	51
Çizelge 4.8. Deney 8 açısız geri yaylanma değerleri.....	52

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 4.9. Deney 9 açısai geri yaylanma değerleri.....	53
Çizelge 4.10. Q-Testi gözlem sayısı için belirlenmiş değerler tablosu.....	54
Çizelge 4.11. Tüm açısai geri yaylanma deney sonuçları.....	55
Çizelge 4.12. Anova modeline göre parametrelerin geri yaylanmaya etkisi .....	56
Çizelge 4.13. Deneysel ve Taguchi yöntemi açısai geri yaylanma değerleri .....	57
Çizelge 4.14. Taguchi doğrulama deneyi parametre değerleri ve geri yaylanma sonucu .....	58
Çizelge 4.15. Taguchi doğrulama deneyi sonucu .....	58
Çizelge 4.16. Taguchi doğrulama deneyi karşılaştırması .....	59
Çizelge 4.17. Ful faktöriyel Taguchi açısai geri yaylanma sonuçları.....	59
Çizelge 4.18. Analitik çalışma parametre ve değerleri .....	61
Çizelge 4.19. Malzeme mekanik özellikleri .....	62
Çizelge 4.20. Analitik çözümleme açısai geri yaylanma sonuçları .....	63
Çizelge 4.21 Sayısal analiz parametreleri ve değişkenleri.....	64
Çizelge 4.22. Malzeme tanımlamaları .....	68
Çizelge 4.23. Simülasyon 1 takım eleman tipi özellikleri .....	71
Çizelge 4.24. Simülasyon 1 boru parçası eleman tipi özellikleri.....	71
Çizelge 4.25. Simülasyon 2 takım eleman tipi özellikleri .....	72
Çizelge 4.26. Simülasyon 2 boru parçası eleman tipi özellikleri.....	72
Çizelge 4.27. Simülasyon 3 takım eleman tipi özellikleri .....	73
Çizelge 4.28. Simülasyon 3 boru parçası eleman tipi özellikleri.....	73
Çizelge 4.29. Simülasyon 4 takım eleman tipi özellikleri .....	74
Çizelge 4.30. Simülasyon 4 boru parçası eleman tipi özellikleri.....	74
Çizelge 4.31. Simülasyon 5 takım eleman tipi özellikleri .....	75
Çizelge 4.32. Simülasyon 5 boru parçası eleman tipi özellikleri.....	75

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 4.33. Simülasyon 6 takım eleman tipi özellikleri .....	76
Çizelge 4.34. Simülasyon 6 boru parçası eleman tipi özellikleri.....	76
Çizelge 4.35. Simülasyon 7 takım eleman tipi özellikleri .....	77
Çizelge 4.36. Simülasyon 7 boru parçası eleman tipi özellikleri.....	77
Çizelge 4.37. Simülasyon 8 takım eleman tipi özellikleri .....	78
Çizelge 4.38. Simülasyon 8 boru parçası eleman tipi özellikleri.....	78
Çizelge 4.39. Simülasyon 9 takım eleman tipi özellikleri .....	79
Çizelge 4.40. Simülasyon 9 boru parçası eleman tipi özellikleri.....	79
Çizelge 4.41. Temas yüzeyleri ve sürtünme katsayı değerleri.....	80
Çizelge 4.42. Sınır şartları ve yüklemeler.....	82
Çizelge 4.43. Sayısal geri yaylanma analizi sonuçları.....	87
Çizelge 4.44. Sayısal ve Taguchi yöntemi açısız geri yaylanma değerleri.....	88
Çizelge 4.45. Taguchi doğrulama sayısal çalışma değerleri ve Taguchi geri yaylanma sonucu.....	89
Çizelge 4.46. Taguchi doğrulama sayısal çalışma sonucu karşılaştırması .....	89
Çizelge 4.47. Ful faktöriyel Taguchi açısız geri yaylanma sonuçları.....	90
Çizelge 4.48. Deneysel, analitik ve sayısal çalışmalar ile elde edilen açısız geri yaylanma sonuçları .....	91
Çizelge 4.49. Büküm açısının açısız geri yaylanma üzerindeki etkisi.....	93
Çizelge 4.50. Büküm yarıçapının açısız geri yaylanma üzerindeki etkisi .....	94
Çizelge 4.51. Geometrik oranın açısız geri yaylanma üzerindeki etkisi.....	96

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Boru büküm terminolojisi.....	3
Şekil 2.2. Boru bükme sırasında teğetsel deformasyonun yüklenmesi ve boşaltılması..	16
Şekil 3.1. Inconel 718 alaşımı çekmedeki mühendislik gerilim-gerinim grafiği (21°).....	25
Şekil 3.2. Inconel 718 alaşımı çekmedeki gerçek gerilim-gerinim grafiği (21°).....	26
Şekil 3.3. Logaritmik skalada çekme grafiği .....	27
Şekil 3.4. Logaritmik skalada inconel 718 alaşımı çekme diyagramı (21°C) .....	27
Şekil 3.5. Isıl işlem koşullarına göre inconel 718 çekme dayanımı.....	29
Şekil 3.6. Newton iterasyon grafiği .....	37
Şekil 4.1. Taguchi açısız geri yaylanma değerleri güvenilirliği .....	57
Şekil 4.2. Taguchi açısız geri yaylanma değerleri kalıntı yüzde olasılık grafiği .....	60
Şekil 4.3. Eleman boyutu yakınsaması .....	70
Şekil 4.4. Büküm açısının açısız geri yaylanma üzerindeki etkisi .....	93
Şekil 4.5. Büküm yarıçapının açısız geri yaylanma üzerindeki etkisi .....	94
Şekil 4.6. Geometrik oranın açısız geri yaylanma üzerindeki etkisi .....	96

## RESİMLERİN LİSTESİ

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 2.1. Sıkıştırma ile boru bükme .....	4
Resim 2.2. İttirme ile boru bükme .....	5
Resim 2.3. Rulo ile boru bükme .....	5
Resim 2.4. Üç silindirli boru bükme .....	6
Resim 2.5. Gerdirme ile boru bükme .....	7
Resim 2.6. Sıvı basıncı ile boru bükme .....	7
Resim 2.7. Sıvı basıncı ile şekillendirilmiş boru parçaları .....	8
Resim 2.8. Döner-çekme tezgâhı.....	8
Resim 2.9. Döner-çekme tezgâhı .....	9
Resim 2.10. Döner-çekme tezgâhı yardımcı takımları.....	9
Resim 2.11. Büküm kalıbı .....	10
Resim 2.12. Alt çene .....	10
Resim 2.13. Üst çene.....	10
Resim 2.14. Basınç kalıbı .....	11
Resim 2.15. Mandrel.....	11
Resim 2.16. Kaşık.....	12
Resim 2.17. Boru parçası iç yüzeyinde meydana gelen kırışma.....	13
Resim 2.18. Boru parçası dış yüzeyinde meydana gelen yırtılma .....	13
Resim 2.19. Boru parçası kesit daralması .....	14
Resim 2.20. Geri yaylanma davranışı .....	15
Resim 3.2. COC malzeme tedarik belgesi AMS 5589 çekme testi mühendislik sonuçları .....	25
Resim 3.2. Inconel 718 bazı uygulama alanları .....	30
Resim 3.3. Bazı geometrik şekillerin elemanlara ayrılması .....	34

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 3.4. Doğrusal sönümlü yay sistemi.....	36
Resim 3.5. Deneysel çalışmada kullanılacak olan yarı mamul boru parçaları .....	40
Resim 3.6. Tezgâh yardımcı ekipmanlarının örnek kurulumu .....	41
Resim 3.7. Büküm yarıçapına göre değişkenlik gösteren büküm kalıpları .....	42
Resim 3.8. Boru parçasının tezgâha yerleşim örneği .....	43
Resim 3.9. Büküm açısının kontrol ünitesine girilmesi .....	43
Resim 3.10. Büküm yarıçapının kontrol ünitesine girilmesi .....	43
Resim 3.11. Büküm işlemi tamamlanan parçaların ölçüm için etiketlenmesi ve paketlenmesi .....	44
Resim 4.1. Deney 1.1 geri yaylanma değeri .....	45
Resim 4.2. Deney 1.2 geri yaylanma değeri .....	45
Resim 4.3. Deney 1.3 geri yaylanma değeri .....	45
Resim 4.4. Deney 2.1 geri yaylanma değeri .....	46
Resim 4.5. Deney 2.2 geri yaylanma değeri .....	46
Resim 4.6. Deney 2.3 geri yaylanma değeri .....	46
Resim 4.7. Deney 3.1 geri yaylanma değeri .....	47
Resim 4.8. Deney 3.2 geri yaylanma değeri .....	47
Resim 4.9. Deney 3.3 geri yaylanma değeri .....	47
Resim 4.10. Deney 4.1 geri yaylanma değeri .....	48
Resim 4.11. Deney 4.2 geri yaylanma değeri .....	48
Resim 4.12. Deney 4.3 geri yaylanma değeri .....	48
Resim 4.13. Deney 5.1 geri yaylanma değeri .....	49
Resim 4.14. Deney 5.2 geri yaylanma değeri .....	49
Resim 4.15. Deney 5.3 geri yaylanma değeri .....	49
Resim 4.16. Deney 6.1 geri yaylanma değeri .....	50

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 4.17. Deney 6.2 geri yaylanma değeri .....	50
Resim 4.18. Deney 6.3 geri yaylanma değeri .....	50
Resim 4.19. Deney 7.1 geri yaylanma değeri .....	51
Resim 4.20. Deney 7.2 geri yaylanma değeri .....	51
Resim 4.21. Deney 7.3 geri yaylanma değeri .....	51
Resim 4.22. Deney 8.1 geri yaylanma değeri .....	52
Resim 4.23. Deney 8.2 geri yaylanma değeri .....	52
Resim 4.24. Deney 8.3 geri yaylanma değeri .....	52
Resim 4.25. Deney 9.1 geri yaylanma değeri .....	53
Resim 4.26. Deney 9.2 geri yaylanma değeri .....	53
Resim 4.27. Deney 9.3 geri yaylanma değeri .....	53
Resim 4.28. Doğrulama deneyi birinci gözlem sonucu .....	58
Resim 4.29. Doğrulama deneyi ikinci gözlem sonucu .....	58
Resim 4.30. Doğrulama deneyi üçüncü gözlem sonucu .....	58
Resim 4.31. Simülasyon 1 model geometrisi.....	65
Resim 4.32. Simülasyon 2 model geometrisi.....	65
Resim 4.33. Simülasyon 3 model geometrisi.....	65
Resim 4.34. Simülasyon 4 model geometrisi.....	66
Resim 4.35. Simülasyon 5 model geometrisi.....	66
Resim 4.36. Simülasyon 6 model geometrisi.....	66
Resim 4.37. Simülasyon 7 model geometrisi.....	67
Resim 4.38. Simülasyon 8 model geometrisi.....	67
Resim 4.39. Simülasyon 9 model geometrisi.....	67
Resim 4.40. Eleman boyutu 1,5 x 1,5 mm için açısai geri yaylanma değeri.....	69

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 4.41. Eleman boyutu 2 x 2 mm için açılmal geri yaylanma değeri.....	69
Resim 4.42. Eleman boyutu 3 x 3 mm için açılmal geri yaylanma değeri.....	70
Resim 4.43. Simülasyon 1 takım ağ yapısı .....	71
Resim 4.44. Simülasyon 1 büküm sonrası teorik boru parçası ağ yapısı.....	71
Resim 4.45. Simülasyon 1 boru parçası ağ yapısı .....	71
Resim 4.46. Simülasyon 2 takım ağ yapısı .....	72
Resim 4.47. Simülasyon 2 büküm sonrası teorik boru parçası ağ yapısı.....	72
Resim 4.48. Simülasyon 2 boru parçası ağ yapısı .....	72
Resim 4.49. Simülasyon 3 takım ağ yapısı .....	73
Resim 4.50. Simülasyon 3 büküm sonrası teorik boru parçası ağ yapısı.....	73
Resim 4.51. Simülasyon 3 boru parçası ağ yapısı .....	73
Resim 4.52. Simülasyon 4 takım ağ yapısı .....	74
Resim 4.53. Simülasyon 4 büküm sonrası teorik boru parçası ağ yapısı.....	74
Resim 4.54. Simülasyon 4 boru parçası ağ yapısı .....	74
Resim 4.55. Simülasyon 5 takım ağ yapısı .....	75
Resim 4.56. Simülasyon 5 büküm sonrası teorik boru parçası ağ yapısı.....	75
Resim 4.57. Simülasyon 5 boru parçası ağ yapısı .....	75
Resim 4.58. Simülasyon 6 takım ağ yapısı .....	76
Resim 4.59. Simülasyon 6 büküm sonrası teorik boru parçası ağ yapısı.....	76
Resim 4.60. Simülasyon 6 boru parçası ağ yapısı .....	76
Resim 4.61. Simülasyon 7 takım ağ yapısı .....	77
Resim 4.62. Simülasyon 7 büküm sonrası teorik boru parçası ağ yapısı.....	77
Resim 4.63. Simülasyon 7 boru parçası ağ yapısı .....	77
Resim 4.64. Simülasyon 8 takım ağ yapısı .....	78

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 4.65. Simülasyon 8 büküm sonrası teorik boru parçası ağ yapısı.....	78
Resim 4.66. Simülasyon 8 boru parçası ağ yapısı .....	78
Resim 4.67. Simülasyon 9 takım ağ yapısı .....	79
Resim 4.68. Simülasyon 9 büküm sonrası teorik boru parçası ağ yapısı.....	79
Resim 4.69. Simülasyon 9 boru parçası ağ yapısı .....	79
Resim 4.70. Sayısal çözümleme global eksenini .....	81
Resim 4.71. Sayısal çözümleme mesnet kullanımı.....	81
Resim 4.72. Simülasyon 1 açısız geri yaylanma değeri.....	83
Resim 4.73. Simülasyon 2 açısız geri yaylanma değeri.....	83
Resim 4.74. Simülasyon 3 açısız geri yaylanma değeri.....	84
Resim 4.75. Simülasyon 4 açısız geri yaylanma değeri.....	84
Resim 4.76. Simülasyon 5 açısız geri yaylanma değeri.....	85
Resim 4.77. Simülasyon 6 açısız geri yaylanma değeri.....	85
Resim 4.78. Simülasyon 7 açısız geri yaylanma değeri.....	86
Resim 4.79. Simülasyon 8 açısız geri yaylanma değeri.....	86
Resim 4.80. Simülasyon 9 açısız geri yaylanma değeri.....	87
Resim 4.81. Taguchi doğrulama sayısal analiz sonucu .....	89

## SİMGELER VE KISALTMALAR

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

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklamalar</b>
$D$	Boru dış çapı
$t$	Boru dış çapı
$R$	Büküm yarıçapı
$\theta$	Büküm açısı
$\Delta\theta$	Açısal geri yaylanma
$\varepsilon_{\theta}$	Geri yaylanma öncesi dış teğetsel gerinim
$\varepsilon_s$	Akma noktasındaki gerinim
$\varepsilon_{\theta}^p$	Geri yaylanma sonrası dış teğetsel kalıntı gerinimi
$\Delta\varepsilon_{\theta}$	Geri yaylanma sürecindeki teğetsel elastik gerinim
$\varepsilon_{\theta}'$	Doğrusal olmayan yükün kalıntı gerinimi
$\sigma_{\theta}$	Geri yaylanma öncesi dış teğetsel gerilim
$\sigma_s$	Akma noktasındaki gerilim
$\sigma_{\theta}^p$	Geri yaylanma sonrası dış teğetsel kalıntı gerilimi
$\Delta\sigma_{\theta}$	Geri yaylanma sürecindeki teğetsel elastik gerilim
$\sigma_{\theta}'$	Doğrusal olmayan yükün kalıntı gerilimi
$n$	Pekleşme üsteli
$E$	Elastisite modülü
$K$	Plastisite modülü
$\sigma_s$	Akma dayanımı
$S$	Sinyal
$N$	Gürültü
$m$	Kütle matrisi
$c$	Sönümlenme matrisi
$k$	Katılık matrisi
$a$	İvme
$v$	Hız

**Simgeler****Açıklamalar**

$x$	Konum
$l$	Akma dayanımı
$\sigma_g$	Gerçek gerilim
$\varepsilon_g$	Gerçek gerinim
$F(u)$	İterasyon fonksiyonu
$F_{(ext)}$	Sonuç fonksiyonu
$F_{(0)}$	T:0 anı başlangıç fonksiyonu
$K^{-1}_{(0)}$	T:0 anı iterasyon Katsayısı
$u_1$	Birincil iterasyon değişkeni
$u_2$	İkincil iterasyon değişkeni
$u_n$	Sıralı iterasyon değişkeni
$u_i$	Dış etmensiz başlangıç iterasyonu
$R = F_{(ext)}$	Çözüm fonksiyonu
$\mu$ :	Ortalama değer
$R^2$	Güvenilirlik katsayısı

**Kısaltmalar****Açıklamalar**

<b>AMS</b>	Aerospace Materials Specifications
<b>COC</b>	Certificate of Conformity
<b>DA</b>	Doğrudan yaşlandırılmış
<b>F</b>	Varyans tutarlılık değeri
<b>FE</b>	Finite elements
<b>GA</b>	Güven aralığı
<b>HS</b>	Yüksek mukavemetli
<b>İTN</b>	İlk teğetsel nokta
<b>L9</b>	Seviye 9
<b>P</b>	Tahmini tutarlılık değeri
<b>PYY</b>	Polinom yanı yüzey
<b>S</b>	Standart sapma
<b>SD</b>	Serbestlik derecesi
<b>SEM</b>	Sonlu elemanlar metodu
<b>STD</b>	Standart solüsyona alınmış ve yaşlandırılmış
<b>STN</b>	Son teğetsel nokta
<b>TA</b>	Tahmini aralık
<b>TE</b>	Tarafsız eksen
<b>TUSAŞ</b>	Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş.
<b>3D</b>	Üç boyut

## 1. GİRİŞ

Günümüzde imalat sektöründe yer alan firmalar, rekabetçi kalabilmek ve sürdürülebilir başarıyı elde edebilmek için, sahip oldukları üretim yöntemlerini geliştirmek ve bu konularda çalışmalar sürdürmektedir. Üretim yöntemlerinin gelişmesi, hızlı üretim, hızlı teslimat, üretim kapasitesinin artması, maliyet azalması gibi faktörlerin ortaya çıkmasını sağlayarak firmaların kendi ekosisteminde yer alan unsurların da refah ve kalkınma seviyesini arttırmış olacaktır [1].

Özellikle otomotiv ve uçak endüstrisi'nde artan müşteri talepleri, firmaların üretim süreçlerinin oldukça verimli ve etkin olması zorunluluğuna iter. Kısa zamanda doğru ve etkin üretimin son derece önem arz ettiği günümüzde sac metal malzemeler gibi boru parçalarının imalatlarında da ortaya çıkabilecek problemlerin de kısa sürede çözüme kavuşturulabilmesi rekabetçi ortamda önemli avantajlar ortaya çıkaracaktır.

### Problem durumu / Konunun tanımı

Özellikle sac metal malzemelerin soğuk şekillendirme süreçleri esnasında gözlemlenen geri yaylanma davranışı, benzer şekilde endüstriyel boru parçalarının imal edilmesi sırasında da karşımıza çıkmaktadır. Inconel 718 malzemesinden üretilen boru parçalarına belirli bir yarıçapta form vermek istenildiğinde tüm metallerde görüldüğü üzere bu malzemelerde de geri yaylanma hareketi olmaktadır. Doğru olarak hesaplanmamış, öngörülmemiş bir geri yaylanma hareketi, üretilen parçanın çoğu zaman tolerans dışında kalmasına ve malzemenin hurdaya çıkmasına neden olmaktadır. Bu problem hem üretim maliyetinin artmasına hem de boşa iş gücü sarf edilmesine yol açmaktadır.

Geri yaylanma hareketinin oluşturduğu problem, sac metal malzemelerde tersine mühendislik yöntemi ile nispeten çözüme kavuşturulabilirken, boru parçalarında bu yöntem kesit daralmasına sebebiyet vereceği için söz konusu olamamaktadır [2].

### Araştırmanın amacı ve önemi

Inconel 718 alaşımından mamul boru parçalarına döner-çekme boru büküm yöntemi ile form verme işlemi için geri yaylanma değerleri sayısal ve deneysel yöntemlerle elde edilerek karşılaştırılacaktır. Böylelikle endüstriyel firmalar önceden tahmin edilen bu değerlere göre daha verimli bir üretim sağlayabileceklerdir. Literatürde inconel 718 malzemesinden mamul boru parçaları için bu konuda herhangi bir çalışmaya rastlanılmamış olup bu çalışma ile bilime önemli bir katkıda bulunulacaktır.



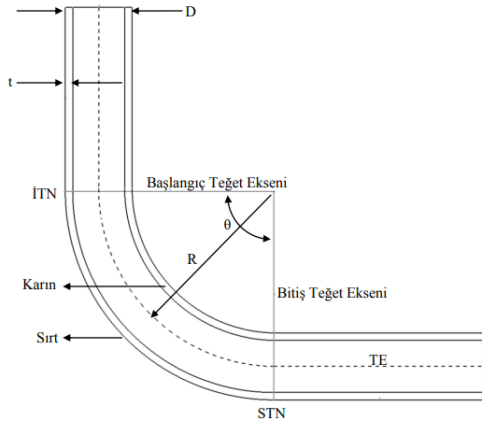
## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

### 2.1. Boru Büküm Terminolojisi

Boru bükme işlemi temelde soğuk veya sıcak plastik şekillendirme yöntemlerine dayanan bir süreci kapsamaktadır.

Tezgâhtan gelen kuvvetler doğrultusunda, boru parçaları, tezgâha bağlı olan ve belirli yarıçapa sahip kalıpların şekillerini alırken, sırt kısmında çekme ile oluşan normal gerilme ile karın kısmında basma ile oluşan normal gerilmeler neticesinde doğrultu değişmesi şeklinde ifade edilebilir (Bkz. Şekil 2.1) [3].

Boru büküm işlemlerinin gerçekleştirilebilmesi için boru dış çapı, boru kalınlığı, büküm yarıçapı ve büküm açısı gibi parametrelerin bilinmesi gereklidir. Bu parametreler ise şekil 2.1’de belirtilmiştir.



Şekil 2.1. Boru büküm terminolojisi [3]

$D$ : Boru dış çapı (mm)

$t$ : Boru kalınlığı (mm)

$R$ : Büküm yarıçapı (mm)

$\theta$ : Büküm açısı ( $^{\circ}$ )

İTN: İlk teğet noktası

STN: Son teğet noktası

TE: Tarafsız eksen

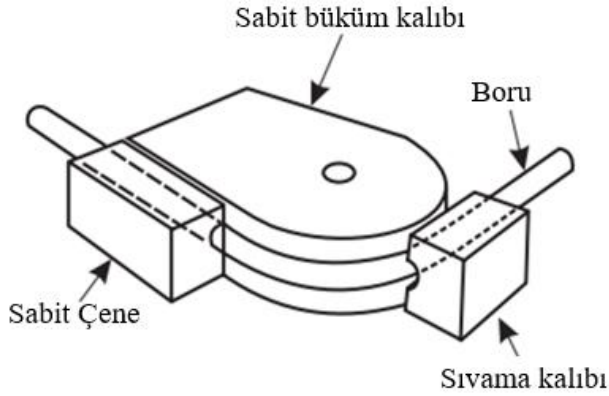
## 2.2. Boru Büküm Yöntemleri

Endüstriyel tesisler tarafından kullanılan birçok farklı boru büküm tekniği vardır. Bu yöntemler: Sıkıştırma ile (compression) boru bükme, itirme ile (push bending) boru bükme, rulo boru bükme (roll bending), gerdirme (stretch bending) ile boru bükme, sıvı basıncı ile boru bükme (hydroforming) ve döner-çekme (rotary-draw) boru bükme yöntemleridir [4,5].

### 2.2.1. Sıkıştırma ile boru bükme yöntemi

Bu yöntemde döner-çekme boru bükme tezgâhlarında yer alan takımlara benzer takımlar yer alır. Ancak bu yöntemin döner çekme yönteminden en büyük farkı form kalıbının sabit olması ve üst çene yerine sıvama kalıbının kullanılmasıdır. Sıkıştırma ile bükmede, iş parçası form kalıbı üzerine sabitlendikten sonra sıvama kalıbı formun etrafında dönerek boru parçasının şekil alması sağlanır [4].

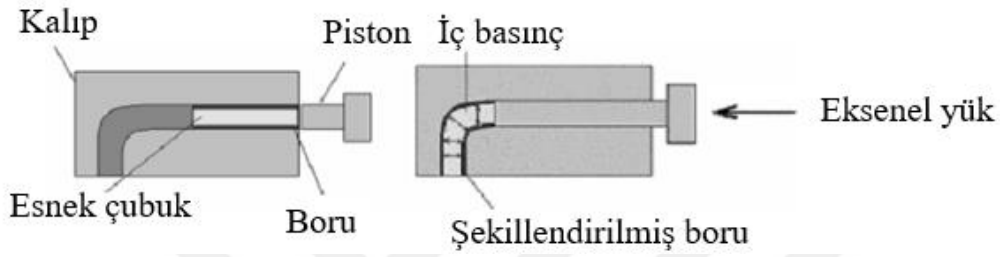
Birden fazla büküm noktasına sahip parçalar malafa gerektirdiği için seri üretim de bu yöntem çok uygun değildir [4].



Resim 2.1. Sıkıştırma ile boru bükme [4]

### 2.2.2. İtirme ile boru bükme yöntemi

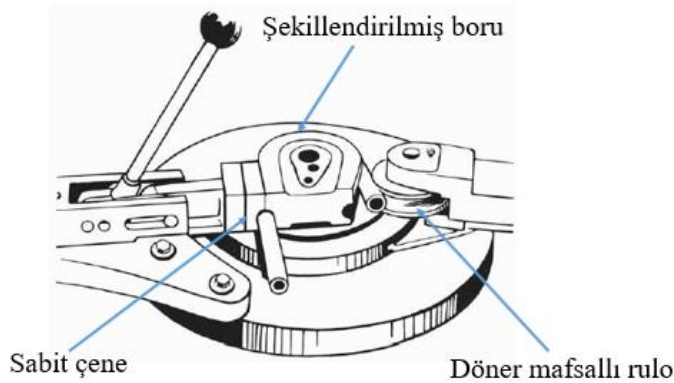
Boru parçası aksel yük ile önceden şekillendirilmiş kalıp ve pistonun yer aldığı bir sisteme iletilir. Kalıbın şeklini alması temeline dayanan bir boru büküm yöntemidir [6]. Büküm bölgesinde, boru içinde esneklik gösteren piston iç basınç oluşturarak borunun form kalıbının şeklini almasını sağlarken aynı zamanda boru parçasının karın bölgesinde malzeme birikmesi neticesinde ortaya çıkabilecek olan kırışıklığa karşı da direnç gösterir [6,7].



Resim 2.2. İtirme ile boru bükme [7]

### 2.2.3. Rulo boru bükme yöntemi

Boru dış çapının en az dört katı kadar büküm yarıçapı olan parçalar için bu yöntem tavsiye edilir. Ayrıca küçük çaplı boruların bükülmesi için en pratik yöntem olmasının yanı sıra küçük büküm yarıçapına sahip borular için de oldukça elverişlidir [4]. Büküm kalıbı çevresinde yer alan döner mafsallı rulo ve çene detayları yardımı ile büküm işlemi gerçekleştirilir.

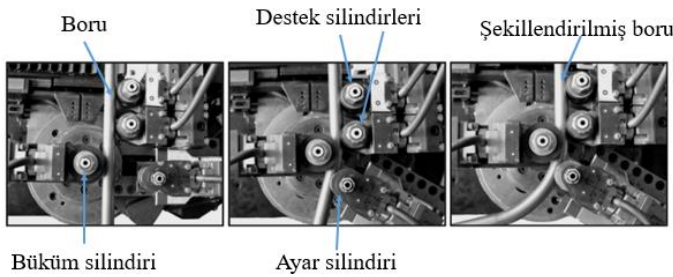


Resim 2.3. Rulo ile boru bükme [4]

### Üç silindirli rulo büküm

Üç silindirli boru bükme sistemlerinde, bir büküm silindiri, bir ayar silindiri ve bir destek silindiri ana ekipmanlar olarak yer alır. Çoğunlukla sayısal olarak kontrol edilen bu sistemlerde daha hassas işlemlerin gerçekleştirilebilmesi için fazladan bir destek silindiri de bulunabilir. Destek silindirleri parçanın sisteme sabitlenmesini sağlarlar. Büküm silindiri parçanın büküm yarıçapını belirleyen parçadır. Buradan da anlaşılacağı üzere büküm silindiri istenilen yarıçaplara göre değişkenlik göstererek farklı yarıçapta parçaların üretilmesine olanak sağlar. Program ile konumu kontrol edilen ayar silindiri ise parçanın istenilen büküm açısını sağlayana kadar hareketini sürdürür [8].

Üç silindirli, boru bükme yönteminin çalışma prensibi üç aşamaya ayrılabilir. Kurulum aşamasında destek silindiri ile büküm silindiri arasındaki mesafe boru çapı kadar olacak şekilde kapanır. Başlangıç aşamasında ise ayar silindiri parçanın büküm yarıçapının ve açısının verilebilmesi için sayısal sistemde belirtilen noktaya hareket eder bu süreçte eşzamanlı olarak boru beslemesi sağlanır. Son olarak boru parçası istenilen forma eriştiği için, silindirler kurulum aşamasındaki konumlarına geri gelir ve parça ile olan temasları kesilir [8].



Resim 2.4. Üç silindirli boru bükme [8]

#### **2.2.4. Gerdirme ile boru bükme yöntemi**

En eski ve kullanımı en kolay olan boru bükme yöntemidir. İki sabit çene tarafından konumlandırılan boru parçasının merkezine, hidrolik güç aktaran kolların bağlı olduğu ana kalıp ile kuvvet uygulanarak borunun ana kalıbın şeklini ve yarıçapını alması sağlanır. Bu yöntem ile istenilen birçok büküm yarıçapı elde edilebilir. Ancak, çoğunlukla hidrolik kolların el gücü ile çalıştırılması nedeniyle seri üretimlerde kullanıma uygun değildir.

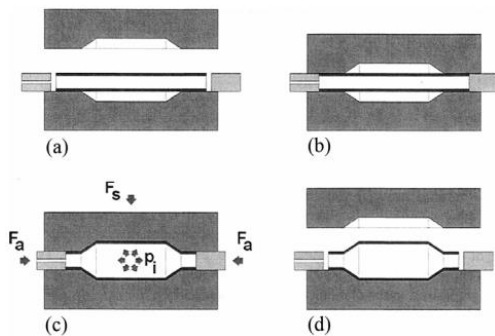
Diğer taraftan kalın cidarlı ve standart boru çaplarına sahip boru parçalarının üretimi için oldukça kullanışlı bir yöntemdir. Formu zarar görmüş boru parçalarının düzeltilmesi için de sıklıkla kullanılır. Desteksiz duvarlara sahip olmalarından dolayı, dış çaplarından 6 kat daha az büküm yarıçapına sahip paslanmaz çelik boruların ise bu yöntem ile üretilmeleri oldukça zordur [4].



Resim 2.5. Gerdirme ile boru bükme

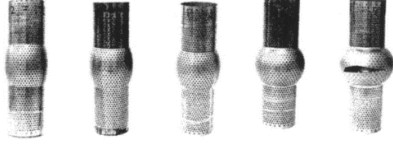
### 2.2.5. Sıvı basıncı ile boru bükme yöntemi

Sıvı basıncı ve hidrolik aksel yükler yardımı ile boru parçalarının kalıp şeklini alması ilkesine dayanan bir şekillendirme yöntemidir. Boru parçası önceden şekillendirilmiş iki dışı kalıbın içinde konumlandırılır. Kalıplar boru parçasını ezmeyecek şekildeki kritik ara mesafeye konumlandırılır ve boru parçası hidrolik sıvı ile doldurulur. Yeterli miktarda hidrolik sıvı ile doldurulan boru parçasının her iki ağzı, sızdırmazlık aparatı takılı olan ve aksel yük uygulayarak hidrolik sıvının basınçlandırılmasını sağlayan ekipmanlar ile kapatılır. Böylece boru içinde oluşturulan hidrolik basınç yardımı ile boru duvarları kalıbın şeklini alır [5].



Resim 2.6. Sıvı basıncı ile boru bükme, a) Boru parçasının konumlandırılması, b) Kalıpların kapanması, c) Sıvı basıncının devreye girmesi, d) Kalıpların kaldırılması [5]

Sıvı basıncı yardımı ile boru şekillendirme yöntemi otomotiv endüstrisinde oldukça fazla kullanılmaktadır. Tavan direkleri, çerçeve rayları, motor kızakları, arka akslar ve egzoz manifoldları gibi parçalar bu teknik ile üretilmektedir [9].



Resim 2.7. Sıvı basıncı ile şekillendirilmiş boru parçaları [9]

Bu yöntemin bazı avantajları; iki ya da daha fazla parçanın kaynaklanması yerine yekpare parça üretimi, en uygun kesit tasarımı sayesinde ağırlık azaltılması, üretim esnasında daha az takım ihtiyacı sebebiyle üretim maliyetlerinin az olması, hassas toleranslı parça üretimi ve minimum geri yaylanma davranışı, tek seferde doğru üretim neticesinde hurda sayısının azlığı olarak sayılabilir [9].

### 2.2.6. Döner-çekme boru bükme yöntemi

Endüstride yaklaşık % 95 oran ile en çok tercih edilen boru bükme yöntemidir. Yardımcı takımlar sayesinde modifiye edilebilme imkanına da sahip olan bu tezgâhlar, iş parçası malzeme çeşitliği, hızlı ve yüksek üretim kapasitesi, malzeme tasarrufu, karmaşık geometrilerin hassas üretimi gibi unsurlar nedeniyle tercih edilmektedirler. Tezgâh gücünü hidrolik, pnömotik ya da elektrik sistemlerinden sayısal ya da elle kontrollü olarak alır [4].



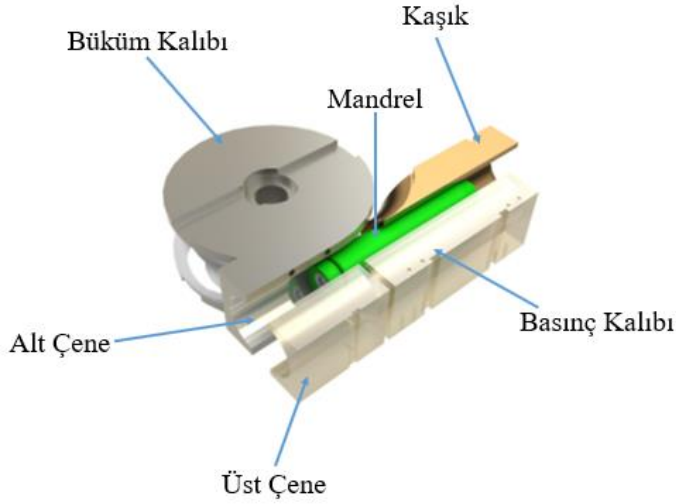
Resim 2.8. Döner-çekme tezgâhı

Sadece boru parçalarının değil; u, t ve dikdörtgen kesitlere sahip parçaların da bu yöntem ile şekillendirilebilmesi mümkündür [6].



Resim 2.9. Döner-çekme tezgâhı

Döner-çekme tezgâhları modifiye edilebilme yeteneğini yardımcı takımlardan almaktadır.

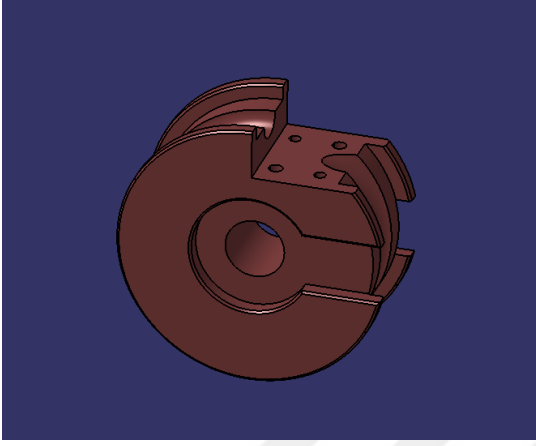


Resim 2.10. Döner-çekme tezgâhı yardımcı takımları [10]

Bu takımların iş parçasına göre değiştirilebilme özelliği istenilen farklı büküm yarıçaplarına ve farklı kesitlere sahip parçaların üretilmesine olanak sağlar. Tezgâh çalışma prensibini anlatabilmek için bu kalıpların görevleri aşağıda belirtilmiştir.

### Büküm kalıbı

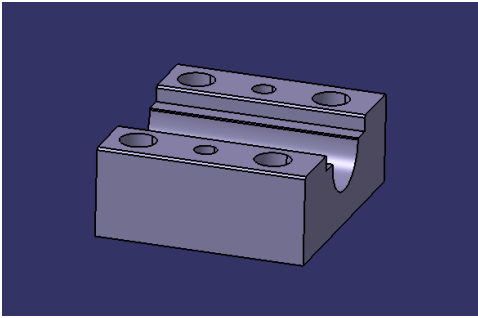
İş parçasının istenilen büküm yarıçapını alabilmesini sağlayan, mekanizma çalışması esnasında dairesel hareket eden kalıptır. İstenilen büküm yarıçapı, boru dış çapı ve boru malzemesine göre bu kalıp ayrı ayrı tasarlanarak imal ettirilir. İş parçasına göre uygun olan kalıp tezgâha monte edilir.



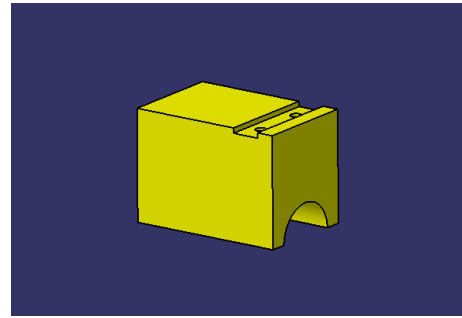
Resim 2.11. Büküm kalıbı

### Alt ve üst çene

Alt çene, büküm kalıbına monte edilirken üst çene tezgâha monte edilir. Mekanizma çalışmaya başladığı anda ise iş parçasının kaymasını engellerler.



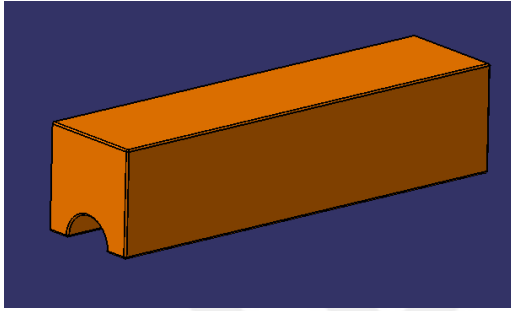
Resim 2.12. Alt çene



Resim 2.13. Üst çene

### Basınç kalıbı

İş parçasına bükümü esnasında ortaya çıkan basma ve çekme gerilmelerini dengelemek amacı ile basınç uygulayan kalıptır. Basınç kalıbı sabit bir konumdadır. Ancak gerekli durumlarda iş parçası ile olan kayma temas sürtünmesini azaltmak için hareketli de olabilir. Bu sayede dış duvar incelmesinin önüne geçilerek daha kaliteli üretim sağlanmış olur [4].

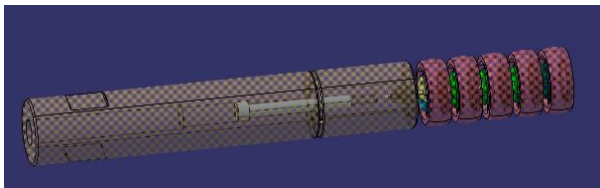


Resim 2.14. Basınç kalıbı

Basınç kalıbı, özellikle yüksek büküm açısına sahip parçalarda dış duvara destek vererek cidar incelmesinin önüne geçer [6].

### Mandrel

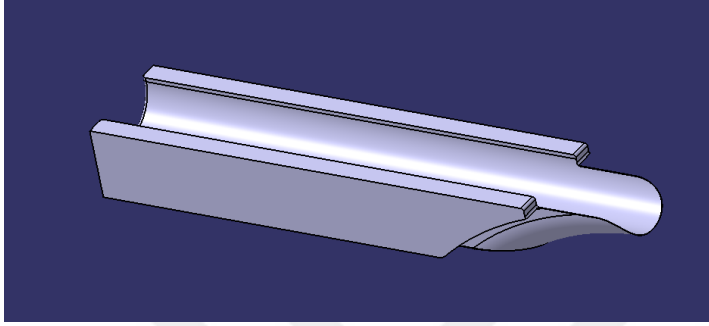
Boru parçasının içine, boru dış yüzeyine destek vermesi amacı ile yerleştirilen bir takımdır. İş parçası bükümü esnasında boru dış yüzeyinde ortaya çıkabilecek düzleşmeyi engelleyerek kesit daralmasının önüne geçilmesini sağladığı gibi boru iç yüzeyinde meydana gelen kırışmanın önleminde de kaşık takımına yardımcı olur. Özellikle havacılık endüstrisi gibi son derece hassas toleranslara sahip parçaların üretiminin söz konusu olduğu endüstrilerde oldukça önemli bir yer tutan takımdır. [4].



Resim 2.15. Mandrel

## Kaşık

Mandrel ya da iş parçası tarafından basınç kalıbına iletilen kuvvetin absorbe edilmesini sağlayan, dolayısıyla malzemenin iç büküm karnında ortaya çıkabilecek fazla malzeme birikiminin önüne geçerek kırışmayı engelleyen takımdır [4].



Resim 2.16. Kaşık

## Çalışma prensibi

İş parçası üst çene yardımı ile alt çene ve büküm kalıbı üzerine konumlandırılır. Büküm kalıbı dönerken iş parçasını, gerektiği takdirde boru duvarının çökmesini önlemek için kullanılan madrel ve sabit ya da hareketli olabilen basınç kalıbı üzerinden çeker böylelikle iş parçasının dairesel hareketi başlatılmış olur. Dairesel hareketini tamamlayan boru parçası büküm kalıbı üzerine sıvandıği için büküm kalıbının yarıçapını alır. Büküm açısını belirleyen faktör ise dairesel hareket için geçen süredir.

## **2.3. Boru Parçası Bükümü Esnasında Ortaya Çıkan Problemler**

Boru parçalarının bükümü esnasında en çok karşılaşılan problemler; kırışma, yırtılma, geri yaylanma ve kesit incelmesi olarak belirtilebilir. Bu sorunlar parçaların hurdaya çıkmasına sebep olduğu için maliyet açısından olumsuz etkiler ortaya çıkarır. Ayrıca parçanın doğru olarak üretilmemesinden dolayı ortaya çıkan zaman kaybı da özellikle seri üretim yapan firmalarda üretim ve sevkiyat gibi unsurların olumsuz etkilenmesine neden olur.

### 2.3.1. Kırışma

Sac metal parçalarına belirli yarıçapta form verilmek istenildiğinde karşılaşılan bu sorunla, benzer şekilde boru büküm süreçlerinde de karşılaşılabılır. Sayısal kontrollü döner-çekme boru bükme tezgâhlarında kırışma problemi iki farklı şekilde ortaya çıkmaktadır: İlki büküm operasyonu sırasında boru parçasının, kaşık ve mandrel ile temas eden bölgesinde sürtünmeden kaynaklı oluşan dalgalanmalardır. İkincisi ise özellikle ince duvarlı ve geniş çaplı boru parçalarının belirli yarıçaplara bükümü esnasında karın bölgesinde biriken fazla malzemenin oluşturduğu kırışmalardır. Kırışma problemi, üst çene yardımı ile boru parçasının kayması engellenerek malzeme akışının sağlıklı yapılması ile giderilebilir [11].



Resim 2.17. Boru parçası iç yüzeyinde meydana gelen kırışma [12]

### 2.3.2. Yırtılma

Boru parçalarının bükümü esnasında dış bölgede uzamaya bağlı olarak azalan malzeme miktarından dolayı ortaya çıkan bir problemdir. Bu sorun, döner-çekme boru bükme yönteminde malzeme kırışmasının önüne geçmek amacıyla üst çenenin boru parçasını kaydırmaması için yapılan yüklemenin fazla geldiği durumlarda malzeme akışının kısıtlanması ya da hiç olmaması nedeniyle de ortaya çıkabilmektedir.



Resim 2.18. Boru parçası dış yüzeyinde meydana gelen yırtılma [13]

### 2.3.3. Kesit daralması

Kesit düzleşmesi olarak da bilinen bu problem özellikle ince cidarlı boru parçalarının bükümü esnasında ortaya çıkmaktadır. Boru çapı, et kalınlığı, büküm açısı ve yarıçapı gibi parametrelere bağlı olarak büküm süreci için iç destek gereken durumlarda madrel kullanılmaması boru parçasının iç yüzeyine doğru çökmesine sebep olarak orijinal kesit geometrisinin daralmasına sebebiyet verecektir.

Kesit düzgünlüğünün önemli olduğu endüstriyel uygulamalarda düzgün bir kesit elde edebilmek amacıyla boru parçasının iç yüzeyine mandrel ya da elastik bir malzeme destek verme amacıyla yerleştirilebilir. Bu yardımcı aparatların büküm sürecinde iş parçası iç yüzeylerine destek vermesi ile kesit daralmasının önemli ölçüde önüne geçilebilmesine rağmen, bükülmüş yüzeylerde yine de bir miktar distorsiyon oluşması muhtemel olabilir [6]



Resim 2.19. Boru parçası kesit daralması [14]

### 2.3.4. Geri yaylanma

Metallerin çekme testi sonunda ortaya çıkarılan gerilim-gerinme mühendislik eğrisinde elastik ve plastik olmak üzere iki temel bölge vardır. Metallerin kalıcı şekil değiştirdiği bölge plastik deformasyon bölgesi olarak tanımlanırken, eski haline dönme hareketinin gözlemlendiği bölge ise elastik şekil değiştirme bölgesidir. Malzeme akma sınırının üzerinde bir gerilmeye maruz bırakacak seviyede yük uygulanan parçalar ilk olarak elastik deformasyona, ardından plastik deformasyona uğrar.

Parçalardaki dış yük kalktığı anda, parça kalıcı olarak şekilde değiştirmesine karşın malzemede meydana gelen elastik deformasyonun geri kazanılması isteği şekil bozukluklarına neden olur ve nihai parça istenilenden farklı şekle sahip olur. Bu probleme "geri esneme" denir ve endüstri için çözülmesi güç bir sorun teşkil eder [15].

Büküm esnasında boru dış yüzeyinde çekme gerilmesi ile iç yüzeyinde bası gerilmesi meydana gelmektedir, bu gerilmeler ise büküm işlemi tamamlandıktan sonra parçalarının maruz kaldıkları yüklerin kaldırılmasıyla, kalıntı gerilme ve kalıntı büküm momenti oluşturarak geri esnemenin ortaya çıkmasına sebep olmaktadır [2].

Özellikle sac metal parça şekillendirilmesinde oldukça sık gözlemlenen bu sorun boru parçaları şekillendirilmesinde de ortaya çıkmaktadır. Ancak boru büküm işlemleri ardından orta çıkan geri yaylanma sac metal şekillendirme süreçlerinin ardından ortaya çıkan geri yaylanmanın aksine tersine mühendislik ile giderilebilmesi oldukça zordur [2].

Boru parçaları için geri yaylanmayı etkileyen faktörler malzeme çeşidi, büküm yarıçapı, boru dış çapının et kalınlığına bölünmesi ile elde edilen geometrik oran [16] ve büküm açısı [17] olarak belirtilebilir.

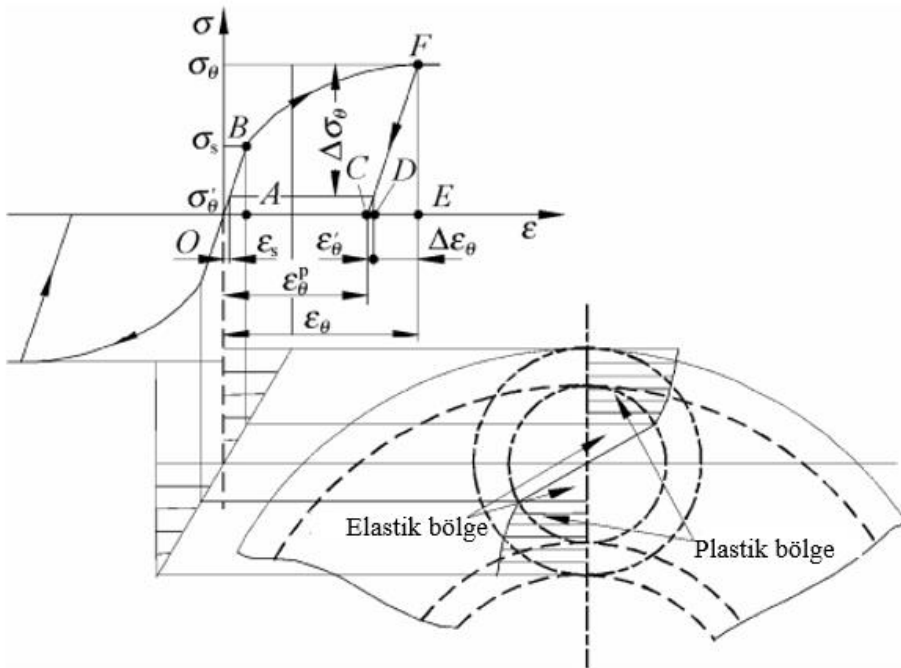


Resim 2.20. Geri yaylanma davranışı [10]

## 2.4. Problemin Tanımlanması

### 2.4.1. Problemin fiziksel tanımı

Boru parçalarının bükümü sırasında boru dış yüzeyinde meydana gelen teğetsel çekme gerilmeleri ve iç yüzeyinde meydana gelen teğetsel basma gerilmeleri deformasyon sürecinin temelini oluşturmaktadır. Bu deformasyonlar aynı zamanda geri esnemeye yol açan en önemli etmenlerdir. [18]



Şekil 2.2. Boru bükme sırasında teğetsel deformasyonun yüklenmesi ve boşaltılması [18]

$\varepsilon_{\theta}$  : Geri yaylanma öncesi dış teğetsel gerinim

$\varepsilon_s$  : Akma noktasındaki gerinim

$\varepsilon_{\theta}^p$ : Geri yaylanma sonrası dış teğetsel kalıntı gerinimi

$\Delta\varepsilon_{\theta}$ : Geri yaylanma sürecindeki teğetsel elastik gerinim

$\varepsilon_{\theta}'$  : Doğrusal olmayan yükün kaldırılması neticesinde ortaya çıkan kalıntı gerinimi

$\sigma_{\theta}$  : Geri yaylanma öncesi dış teğetsel gerilim

$\sigma_s$  : Akma noktasındaki gerilim

$\sigma_{\theta}^p$ : Geri yaylanma sonrası dış teğetsel kalıntı gerilimi

$\Delta\sigma_{\theta}$ : Geri yaylanma sürecindeki teğetsel elastik gerilim

$\sigma_{\theta}'$  : Doğrusal olmayan yükün kaldırılması neticesinde ortaya çıkan kalıntı gerilimi

Şekil 2.2’de yer alan OBF eğrisi üzerinden F noktasına kadar olan süreçte boru parçaları belirli bir yük altında deformasyona uğrayarak şekil almaktadırlar. F noktasından D noktasına geçiş ise boru parçasından yükün kaldırıldığı süreçtir. Aynı zamanda bu süreç boru malzemesinin elastik deformasyon enerjisinin geri kazanılma isteğinin ortaya çıktığı ve dolayısıyla geri yaylanmanın gözlemlendiği süreçtir. D noktasından C noktasına geçiş ise geri yaylanma sonrası malzemede ihmal edilecek kadar az olan kalıntı gerilmelerin kalıntı gerinimine sebep olduğu davranışı gösteren bölgedir [18].

Dış boru duvarlarının teğetsel yöndeki kalıntı gerilmeleri ve kalıntı şekil değiştirmeleri geri yaylanma analizinin sağlanabilmesi adına oldukça faydalıdır. Yükün kaldırılma kanununa göre yüklemmeden boşaltmaya kadar olan şekil değiştirmelerin ilişkisi eşitlik 2.1’de yer aldığı gibi elde edilir [18].

$$\varepsilon_{\theta} = \varepsilon_{\theta}^p + \varepsilon_{\theta}' + \Delta\varepsilon_{\theta} \quad (2.1)$$

#### 2.4.2. Problemin matematiksel tanımı

Da-Xin ve arkadaşlarının [18] 2009 yılında yapmış oldukları çalışma neticesinde boru parçalarının geri yaylanma davranışlarını elde edebilmek için analitik denklem türetmişlerdir (Eşitlik 2.2). Bu denklemin türetilebilmesi için plastik ve elastik deformasyon teorisinden yararlanmışlardır.

$$\Delta\theta = \theta \frac{K}{E} \left[ \frac{D}{2R} + \frac{t}{R} \left[ \left( e^{\frac{-\sqrt{3}}{2} \left( \frac{\sigma_s}{K} \right)^{\frac{1}{n}}} - 1 \right) \right] \right]^{n-1} \quad (2.2)$$

$R$ : Büküm yarıçapı (mm)

$\theta$ : Büküm açısı (°)

$n$ : Pekleşme üsteli

$E$ : Elastisite modülü (Gpa)

$D$ : Boru dış çapı (mm)

$K$ : Plastisite modülü (Mpa)

$t$ : Boru et kalınlığı (mm)

$\sigma_s$ : Akma dayanımı (Mpa)

## 2.5. Literatürde Yer Alan Çalışmalar

Li ve arkadaşları [2] Ti-3Al-2.5V malzemesinden mamul boru parçasının döner-çekme boru şekillendirme yöntemine göre geri yaylanma problemini ele almışlardır. Çalışmalarında plastik deformasyon teorisinden hareketle problemi analitik olarak ifade ederek çözmüşlerdir. Ayrıca hem açık/kapalı 3 boyutlu -sonlu elemanlar yöntemini kullanarak çözüm elde etmişler hem de deneysel çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Çalışma kapsamında geri yaylanma davranışının endüstride parçaların hurda olmasına sebebiyet verdiği, büküm yarıçapına göre değiştiği; büküm yarıçapı arttıkça açısız geri yaylanma derecesinin doğrusal olarak arttığı sonucuna varmışlardır. Aynı zamanda Al50520 alaşımlı boruya ve 1Cr18Ni9Ti alaşımlı boruya göre geri yaylanma değerlerinin çok daha fazla olduğu ortaya konulmuştur. Büküm açısı ve büküm yarıçapı parametrelerine göre analitik formülasyon, deneysel ve sonlu elemanlar a yöntemlerine göre elde ettikleri açısız geri yaylanma davranış sonuçlarını karşılaştırmışlardır.

Jeong ve arkadaşlarının [16] yapmış oldukları çalışmalarında, bükme işlemi sırasında, inconel 625 malzemesine sahip ince cidarlı boru parçalarının geri yaylanma miktarının tahmin edilebileceği ortaya konmuştur. Çalışmada, boru parçasının eğilme momentini ve geri yaylanmasını tahmin etmek için elastik-plastik deformasyonun değerlendirildiği teorik bir analiz yapılmıştır. Araştırmada yer alan SEM analizlerinde ise 90° ile 180° aralığında bükme açısı, 0,01 ile 0,1 aralığında sürtünme katsayısı ve 6,75 ile 25,75 mm aralığında büküm yarıçapı parametre değerlerine göre geri yaylanma davranışı incelenmiştir. Çalışmada geri yaylanmanın malzeme özelliklerine, büküm yarıçapına ve geometrik orana (D/t) bağlı olduğu da bildirilmiştir. Sürtünme katsayısı ve büküm yarıçapına göre geri yaylanma açısı ve son eğrilik yarıçapının değişimi, ikinci dereceden regresyon kullanılarak ampirik olarak ifade edilmiştir. Ortaya çıkan sonuçların inconel 625 alaşımlı boruların büküm sürecindeki geri yaylanma değerlerini tahmin etmeye faydalı olacağı belirtilmiştir.

Dere'nin [6] yaptığı çalışmada, döner çekme ile bükme işleminin deneysel ve sonlu eleman analizi sonuçları karşılaştırılmıştır. Çalışmadaki amaç, iki farklı malzeme tipinin, SS304 ve St37, büküm karakteristiklerini elde edip, istenilen üretimin sağlanabilmesi için yapılacak olan büküm sayısını azaltmak olarak belirtilebilir. Döner çekme ile bükme işlemindeki ana değişkenlerin büküm açısı, büküm yarıçapı, büküm yapılacak parçanın malzeme özellikleri ve geometrisi olarak belirtildiği bu çalışmada, büküm işlemi, deneylerde ve sonlu eleman analizlerinde, iki farklı malzeme, üç farklı büküm açısı ve üç farklı boru geometrisi için ele alınmıştır. Sonlu elemanlar analizlerinde açık yöntem kullanılmıştır. Deney sonuçları ile sonlu eleman analizleri sonuçlarının birbiri ile tutarlı olduğu belirtilmiştir.

Sözen [3] tarafından gerçekleştirilen çalışmada boru bükme operasyonu, açık sayısal yöntem sistemine dayalı bir SEM programı olan LS -DYNA programı vasıtası ile modellenmiş ve elde edilen geri yaylanma değerleri literatürde yer alan deneyler ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca, farklı geometrik ve süreçsel parametrelere göre simülasyonlar oluşturularak çeşitli geri yaylanma değerleri elde edilmiş ve kayıt altına alınmıştır. Elde edilen geri yaylanma değerlerinin farklı veki modellerinin oluşturulmasına olanak sağlamasıyla tasarım noktalarındaki sonuçlara en yakın değerleri bize sunan, polinom yanıt yüzey (PYY) yöntemi ile, geri yaylanma açısının farklı parametrelere göre nasıl değişkenlik gösterdiğini ortaya koyan matematiksel bir ifade elde edilmiştir.

Lu ve arkadaşları [19] yaptıkları çalışmalarında düzlem gerinim varsayımı ve üslü pekleşme kanununu kullanarak boru büküm yöntemindeki gerilme, enine kesit distorsiyonu, tarafsız yüzeyin eğrilik yarıçapı, duvar kalınlığı değişimi, eğilme momenti ve tarafsız yüzey sapma açısı gibi bazı teorik formüller geliştirmişlerdir. Sanal çalışma prensibine göre geri yaylanma açısı formüle edilmiştir. Boru bükümü esnasında boru iç yüzeyinde meydana gelen duvar kalınlaşma miktarının ve dış yüzeyinde meydana gelen duvar incelme miktarının düzlem şekil değiştirme varsayımı altında ve tarafsız yüzey sapması dikkate alınarak hesaplanabileceğini belirten analitik bir model geliştirmişlerdir. Geliştirilen analitik modellerin tutarlılığı, literatürde yer alan deneysel sonuçlar ve simülasyonu doğrulanmış sonuçlar ile karşılaştırılarak teyit edilmiştir.

Ma ve arkadaşlarının [20] çalışmalarında tipik bir Al-Mg-Si alaşımlı boru parçasının, büküm işleminden önce ve sonra doğal yaşlandırma işleminin geri yaylanma davranışı üzerindeki etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Ön/son yaşlanma ısı işlem etkisinin geri yaylanma üzerindeki etkisi için temel bir varsayım oluşturulmaya çalışılmıştır. Solüsyona alınmış ve ardından doğal yaşlandırıldıktan sonra ısı formuna ulaşan boru parçalarının geri yaylanma açılarının solüsyonla ısı işleme tutulmuş borulara göre yaklaşık iki katı kadar olduğu belirtilmiştir. Ayrıca geri yaylanma açısının doğal yaşlanma süresi arttıkça arttığı bildirilmiştir. Boru büküm işlemi sonrası yapay yaşlandırma ısı işlem sürecinin geri yaylanma üzerindeki etkisinin oldukça az olduğu sonucuna varılmıştır. Ek olarak alüminyum alaşımlı boru parçaları için en uygun şekil verilebilme ve ürün kalitesi için solüsyona alındıktan sonra büküm işleminin yapılması ve ardından yapay yaşlandırmaya tabi tutulmasının tercih edilebileceği bu çalışma kapsamında belirtilen bir diğer husustur.

## **2.6. Literatür Araştırmasının Değerlendirilmesi**

Literatür araştırmaları neticesinde endüstride sıkça kullanılan alüminyum, çelik ve titanyum alaşımlarından mamul boru parçalarının büküm problemlerinin ele alındığı görülürken, inconel 718 malzemesinden mamul boru parçaları için herhangi bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Çalışma kapsamında, inconel 718 malzemesinden mamul boru parçalarının geri yaylanma davranışının incelenmesi ile literatürdeki bu eksikliğin giderileceği düşünülmektedir. Çalışma hem deneysel hem de sonlu elemanlar analizi yöntemlerini içerecek olup ayrıca literatürde yer alan analitik bir yöntemin de probleme uygulanması gerçekleştirilecektir. Çalışma sonucunda tüm yöntemlerin sonuçları karşılaştırılarak genel bir değerlendirme yapılacaktır.

Literatürde konuyla ilgili deneysel çalışmalarda herhangi bir deney tasarım yönteminin uygulanmadığı görülmüş olup bu hususun da bir eksiklik olarak değerlendirilebileceği düşünülmektedir. Bu bağlamda çalışmanın deneysel kısmında, literatürde genel kabul görmüş olan Taguchi deneysel tasarım yöntemi ve yöntem kapsamında da Taguchi L9 dizisi uygulanacaktır. Böylelikle optimum deney sayısı ile en verimli sonuçların alınması hedeflenmektedir.

### **3. MALZEME, METOD VE DENEYSEL YÖNTEM**

#### **3.1. Malzeme**

##### **3.1.1. Inconel alaşımlarının genel yapısı**

Nikel-demir bazlı bir süper alaşım olan inconel 718 Nickel Corporation tarafından 1950'li yıllarda geliştirilmiştir. Günümüzde özellikle havacılık endüstrisinde sıklıkla karşımıza çıkan inconel 718 türbin motoru, kojenerasyon ve ısıl işlem ekipmanları gibi yüksek sıcaklığa dayanım gerektiren birçok uygulamada kullanılmaktadır. Dayanım ve tokluk değeri oldukça yüksek olan bu malzemenin ayrıca ısıl yorulma, oksidasyon direnci, korozyon direnci, dövme, kaynak ve lehimleme kolaylığı gibi birçok avantajı vardır [21].

Mekanik ve korozyon direncini artırmak için genellikle inconel alaşımları, Al, Ti, Nb, Co, Cu ve W ile ekstra alaşıma sahip olabilirler. Ayrıca inconel alaşımlarında %1-20 arasında değişen miktarlarda Fe mevcut olabilir [22].

Nikel bazlı bir süper alaşım olan inconel 718 alaşımı, 650 °C kadar iyi mekanik özellik ve yapısal kararlılık göstermesini sağlayan niyobyum katkı elementine sahiptir [23,24].

Dayanımı en yüksek ve en geniş kullanım alanına sahip süper alaşımlardan biri olan inconel 718, 650°C – 815°C sıcaklık çalışma aralığında ise mukavemetini hızlı bir şekilde kaybeder [24].

Çizelge 3.1'de inconel 718 alaşımı içerisinde yer alan elementlerin ağırlıkça nominal kompozisyon miktarı verilmiştir.

Çizelge 3.1. Inconel 718 ağırlıkça nominal kimyasal kompozisyonu [24,25]

Element	% Ağırlık
Ni	50-55
Cr	17-21
Fe	17-19
Nb+Ta	4,75-5,50
Mo	2,8-3,3
Ti	0,65-1,15
Al	0,2-0,8
Co	1 maksimum
C	0,08 maksimum
Mn	0,35 maksimum
Si	0,35 maksimum
P	0,015 maksimum
S	0,015 maksimum
B	0.006 maksimum
Cu	0.3 maksimum

Demir elementi, ana sertleştirici faz olarak bilinen yarı-kararlı  $\gamma$ " oluşumunu sağlayarak alaşımın sertleşmesini sağlar. Benzer şekilde molibden elementi de alaşıma sertlik kazandırır. Katı eriyik sertleştirici elementler olarak yer alan krom oksidasyona karşı direnç sağlar. Alüminyum ve titanyum, hacimce yüksek oranda çökelti fazının oluşturulmasını sağlar. Karbon ve bor tanecik boyutunun artırılmasını sağlayarak mukavemet ve sünekliği arttırmaktadır [24,26]. Bor ve Zirkonyum alaşımın sıcak halde işlenebilirliğini arttırdığı gibi gerilme- kopma direncinin artırılmasını da sağlar [24,27].

Kullanım alanları, ısıl özellikleri, mekanik özellikleri ve numune geometrilerine göre sınıflara ayrılan inconel 718 malzemesinin spesifikasyonu çizelge 3.2’de belirtilmiştir.

Çizelge 3.2. Inconel 718 spesifikasyonu

Spesifikasyon	Form	Uygulama
AMS 5589	Boru	Sürünme, Stres Yırtılması
AMS 5590	Boru	Kısa Zamanlı
AMS 5596	Sac, Şerit, Plaka	Sürünme, Stres Yırtılması
AMS 5597	Sac, Şerit, Plaka	Kısa Zamanlı
AMS 5662,5663	Çubuk, Dövme	Sürünme, Stres Yırtılması
AMS 5664	Çubuk, Dövme	Kısa Zamanlı
AMS 5383	Döküm	Kısa Zamanlı
AMS 5962	Çubuk	

Çizelge 3.3'te inconel 718 AMS 5596 alaşımının oda sıcaklığı ile 650°C'deki mekanik özellikleri belirtilmiştir.

Çizelge 3.3. AMS 5596-sac, şerit, plaka inconel 718 süper alaşımı mekanik özellikleri [25] [28]

Özellik	Oda Sıcaklığı	650°C
Çekme Dayanımı (MPa)	1241,057	965,266a
		999,740b
Akma Dayanımı (MPa)	1034,214	792,897a
		827,371b
% Uzama	12	5
Sertlik	Rc 36 veya Eşleniği	-

Çizelge 3.4'te inconel 718 AMS 5662 ve 5663 alaşımlarının oda sıcaklığı ile 650°C'deki mekanik özellikleri belirtilmiştir.

Çizelge 3.4. AMS 5662 ve 5663 -çubuk, dövme, ring inconel 718 süper alaşımı mekanik özellikleri [25,28]

Özellik	Oda Sıcaklığı	649°C
Çekme Dayanımı (MPa)	185c	145c
	180d	140d
	180e	140e
Akma Dayanımı (MPa)	150	125
% Uzama	12c	12c
	10d	10d
	6e	6e
Sertlik	331 BHN veya Eşleniği	-

Çizelge 3.5'te inconel 718 AMS 5589 alaşımının oda sıcaklığı ile 650°C'deki mekanik özellikleri belirtilmiştir.

Çizelge 3.5. AMS 5589 -dikişsiz boru (f) inconel 718 süper alaşımı mekanik özellikleri [25,28]

Özellik	Oda Sıcaklığı	704°C
Çekme Dayanımı (MPa)	1275,530	-
Akma Dayanımı (MPa)	1034,214	-
% Uzama	12	-
Sertlik	Rc 36 veya Eşleniği	-

- a: Kalınlık 0.025 in'e kadar ve 0.025 in dahil.  
b: Kalınlık 0.025 in üzerinde.  
c: Boyuna.  
d: Dövme parçalar için uzun enine.  
e: Çubuklar için enine.  
f: Dış çap 0.125 in. ve üzeri, duvar kalınlığı 0.015 in ve üzeri

Inconel 718 alaşımının bazı sıcaklık noktalarına göre elastisite değerleri çizelge 3.6'da belirtilmiştir.

Çizelge 3.6. Bazı sıcaklık noktalarına göre inconel 718 elastisite modül (a) değerleri [25,28]

Sıcaklık (°C)	Elastik Modül (GPa)	Kayma Modül (GPa)	Poisson Oranı
21	199,948	77,221	0,294
649	163,406	63,432	0,283
704	158,579	61,363	0,292

a: Sıcak haddelenmiş, 982°C/1 saat olarak yassı ısıtma işlemi görmüş, havada soğutma. + 718°C/8 saat, fırında soğutma -6.6°C/saat ile 621°C, toplam 18 saat yaşlandırma sürecine tabi tutulmuştur. Bükülmeye 813 ila 571 cps ve burulmaya 3110 ila 2097 cps sıklık aralıkları ile dinamik testler gerçekleştirilmiştir.

### 3.1.2. Inconel 718 alaşımı gerçek gerilim-gerinim grafiklerinin oluşturulması

Çalışma kapsamında inconel 718 malzemesinin mühendislik gerilim-gerinim grafiği yerine gerçek gerilim-gerinim grafiği kullanılmıştır. Bilindiği üzere mühendislik gerilim-gerinim grafikleri oluşturulurken yük altındaki numunenin süreç esnasındaki kesitsel ve boyutsal değişimi dikkate alınmamaktadır. Bu nedenle de gerçek gerilim-gerinim grafiğine göre aynı gerinim ölçüsü noktasında daha düşük gerilim değerlerine erişilmektedir. Bu durum daha güvenilir tasarım yapılabilmesine olanak sağlamasına karşın deneysel çalışmalarda malzeme davranışı önem arz ettiği için doğru sonuçları ortaya koyamamaktadır.

Gerçek gerilim ve gerinim değerlerinin elde edilebilmesi için deney çalışması kapsamında kullanılan AMS 5589 spesifikasyonuna sahip malzemelerin COC belgeleri temin edilmiştir.

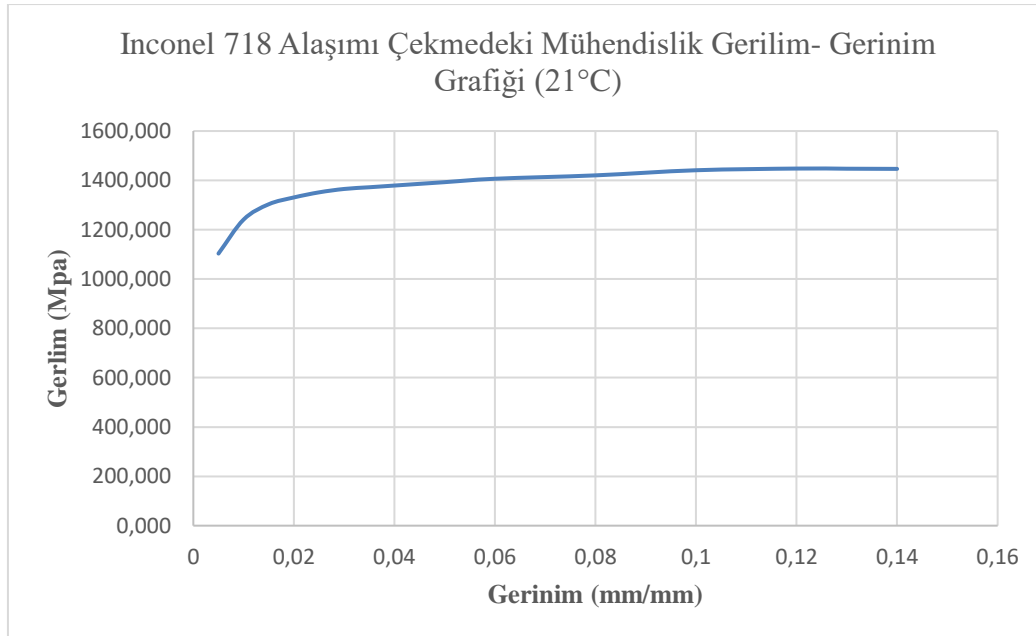
Tedarikçi firma tarafından oluşturulan bu belgelerde AMS 5589 spesifikasyonuna sahip inconel 718 boru parçalarına yapılmış olan çekme testi ile elde edilen mühendislik verileri de yer alır (Bkz Resim 3.1).

## TEST REPORT

Materials Testing Laboratory											
TMI MRP#	TMI Lot#	Customer PO. #		Quantity 543 ft							
		Type & Grade 718 Seamless		Size 0.7500" +/- 0.0075 OD 0.0350" +/- 10% Wall							
<input checked="" type="checkbox"/> FAR TAA <input checked="" type="checkbox"/> DFARS BAA <input checked="" type="checkbox"/> FAR BAA		Specifications AMS 5589 Rev. Q, ASQ/41 Rev. 11, CPFR-2000 Rev. 6, DFARS Compliant, Ultrasonic Testing, LCS, PWA 300 87, MCL F140, MCL F170 and MCL F230, 5M 4F, SIS 26C									
Chemical Analysis (Wt.%)											
HEAT# : 2189-9-9381						Melt Source / Analysis: KOKOMO, IN, USA/HAYNES					
C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	Ti	Cb+Ta	Co	
0.054	0.25	0.009	<0.002	0.09	18.30	52.10	3.19	0.95	5.11	0.36	
Cu	Al	Fe	B	Ni	Cb	Ta	Mg	Se	Pb		
0.06	0.59	18.60	0.004	.3ppm	5.11	<0.05	<0.01	<1ppm	<1ppm		
Mechanical Properties											
Tensile Strength		0.2% Offset Yield Strength		% Elongation		Hardness					
133,000 PSI		77,500 PSI		48		3.6.2					
Lab samples precipitation		heat treated per AMS 5589-G, Paragraph		26		*HRC48					
208,000 PSI		180,000 PSI									
Stress Rupture Results											
CONDITION	TEST TEMP (°F)	STRESS (KSI)		HOURS @ STRESS		%ELONG.					
Precipitation	1300	72.5	97.5	59.9		34					
heat treated											
* TUBE METHODS HAS CONTROLLED THIS MATERIAL TO P & W REQUIREMENTS FOR LCS PER P & W - MCL MANUAL SECTION F-17											

Resim 3.1. COC malzeme tedarik belgesi AMS 5589 çekme testi mühendislik sonuçları

Çekme testleri sonucunda elde edilen kuvvet-uzama değerleri numunenin ilk boy ve kesit alanlarına bölünerek mühendislik gerilim-gerinim grafikleri elde edilir [29].



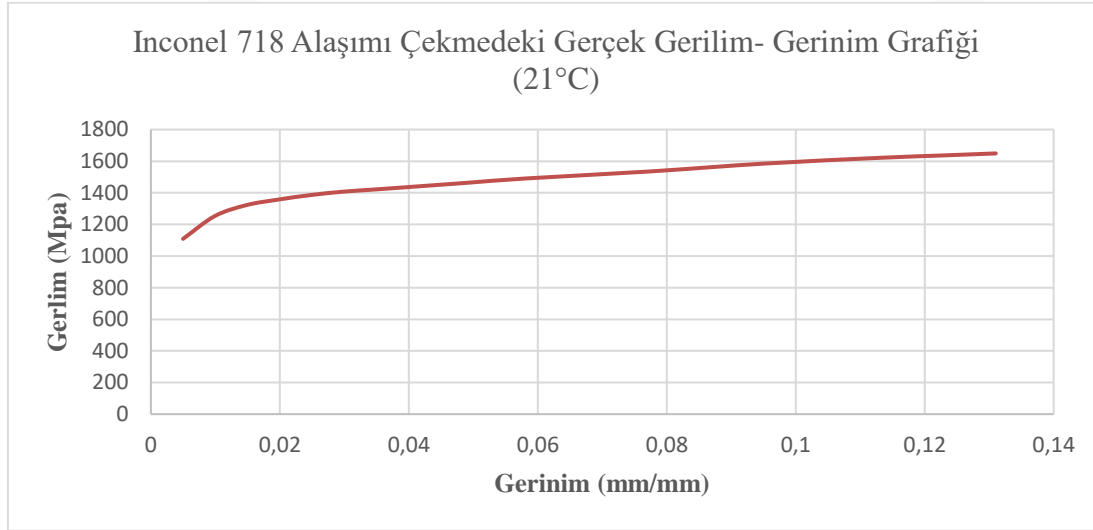
Şekil 3.1. Inconel 718 alaşımı çekmedeki mühendislik gerilim-gerinim grafiği (21°C)

Çekme testi sonucunda elde edilen mühendislik gerinimi değerleri kullanılarak da eşitlik 3.1' de yer aldığı gibi gerçek gerinim değerleri elde edilir [30].

$$\varepsilon = \int_{l_0}^l \frac{\partial l}{l} = \ln \frac{l}{l_0} = \ln(1 + \varepsilon) \quad (3.1)$$

Çekme testi sonucunda elde edilen mühendislik gerilim ve gerinim değerleri kullanılarak eşitlik 3.2' de yer aldığı gibi gerçek gerilme değeri elde edilir [30].

$$\sigma = \sigma_n (1 + \varepsilon) \quad (3.2)$$



Şekil 3.2. Inconel 718 alaşımı çekmedeki gerçek gerilim- gerinim grafiği (21°C)

Holloman bağıntısı ise (Bkz. Eş. 3.3) gerçek gerilim ve gerçek gerinim grafiğinin oluşturulmasını sağlayan yöntemlerden bir diğeridir. Ancak bu yöntem ile gerçek gerilim ve gerçek gerinim değerlerinin elde edilebilmesi için plastisite modülü,  $K$  ve pekleşme üsteli olan  $n$  değerlerinin belirli olması gereklidir. Şekil 3.2 'de belirtildiği gibi gerçek gerilim ve gerinim değerlerinin çekme testi sonucuna göre eşitlik 3.1 ve 3.2 yardımı ile elde edilmiş olması  $K$  ve  $n$  değerlerinin yine şekil 3.2 yardımı ile belirlenebilmesine olanak sağlamaktadır.

$$\sigma_g = K \times \varepsilon^n \quad (3.3)$$

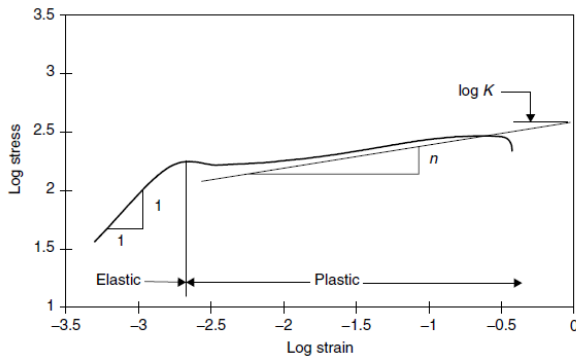
$K$  = Plastisite modülü (Mpa)

$n$  = Pekleşme üsteli

Holloman eşitliğinin her iki tarafının logaritması alınırsa;

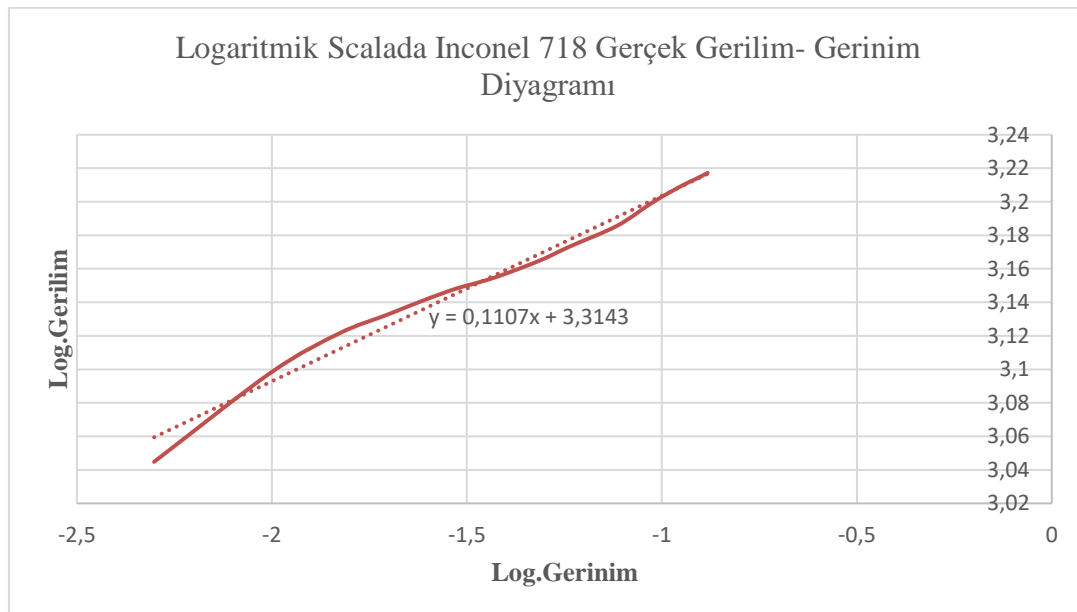
$$\ln \sigma_g = \ln K + n \ln(\varepsilon_g) \quad (3.4)$$

Eşitlik 3.4 elde edilir. Bu bağıntı logaritmik çizelgeye aktarıldığında doğrusal bir denklem elde edilir. Pekleşme üsteli  $n$ , doğrunun eğimine eşittir (Şekil 3.3). Plastik deformasyondan dolayı mukavemette meydana gelen artışa pekleşme denir. Logaritmik grafikte gerçek birim şekil değişiminin 1 yapan gerilme değeri de  $K$  plastisite modülüdür [29].



Şekil 3.3. Logaritmik skalada çekme grafiği [30]

Holloman bağıntısının logaritmik skala grafiğine taşınması, pekleşme üsteli ve plastisite modülü değerlerinin kolaylıkla elde edilebilmesini sağlar.



Şekil 3.4. Logaritmik skalada inconel 718 alaşımı çekme diyagramı (21°C)

Logaritmik skaladaki çekme diyagramlarında elde edilen doğrunun eğimi pekleşme üstelini değerini verecektir. Gerçek gerinim değerini 1 yapan gerilme değeri de plastisite modülünü verecektir. Bu bağlamda AMS 5589 spesifikasyonuna sahip inconel 718 malzemesi için;

Pekleşme üsteli (n): 0,1107

Plastisite modülü (K): 2062,054 Mpa

Elde edilen bu değerler daha sonra bölüm 4'te yer alan analitik çözümlelerde kullanılacaktır.

### 3.1.3. Inconel alaşımlarında ısıtım işlemi

Uygulama alanı ve ihtiyaç duyulan mekanik özellikler, inconel 718 malzemesinin ısıtım işlem parametreleri olan süre, sıcaklık ve soğutma hızını belirler. Bu alaşımlar için genellikle ısıtım süreci solüsyona alma ve ardından yaşlandırma işleminin yapılmasıdır.

Havacılık endüstrisinde statik ve dinamik yükler altında yüksek dayanıma ihtiyaç duyulduğundan, solüsyona alma ve iki aşamadan oluşan standart yaşlandırma işlemi yapılır. Yaşlandırma işlemi süreci ise aşağıda belirtilmiştir.

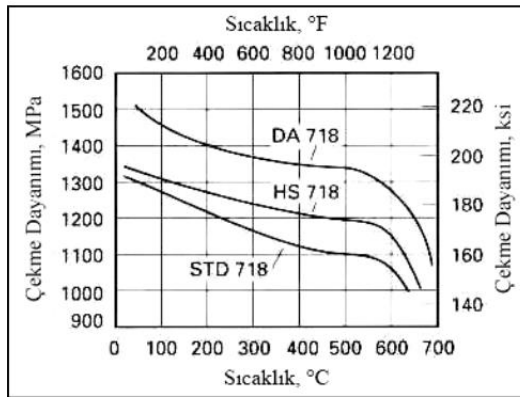
- 1-2sa süreli olacak şekilde 925-1010°C sıcaklık değerleri arasında solüsyona alma.
  - 8 saat boyunca 720°C sıcaklığında yaşlandırma ardından fırında 55°C/sa soğutma hızıyla 620°C' ye soğutma.
  - Toplam ısıtım işlem süresi 18 saat olacak şekilde 620°C sıcaklığında 8 saat yaşlandırma
- [24]

Çizelge 3.7. Solüsyona alma sıcaklığına göre inconel 718 mekanik özellikleri [27]

Solüsyona alma sıcaklığı (°C)	Akma dayanımı (MPa)	Çekme dayanımı (MPa)	% Uzama	650°C'de 690 MPa ile gerilme-kopma ömrü (sa)
Direkt yaşlandırılmış	1330	1525	19	95
940°C, 1sa, a.c.	1240	1460	18	194
955°C, 1sa, a.c.	1180	1420	20	122
970°C, 1sa, a.c.	1145	1405	23	218
980°C, 1sa, a.c.	1172	1405	24	200
1010°C, 1sa, a.c.	1185	1390	22	270
1040°C, 1sa, a.c.	1165	1365	25	225

Yukarıdaki tablo dikkate alındığında aynı periyotta solüsyona alma sıcaklığı arttıkça malzemenin akma ve çekme dayanımı azalırken, gerilme-kopma mekanik dayanımının ise arttığı gözlemlenmektedir. Sıcaklığın fonksiyon değişkeni olarak belirlendiği üç farklı ısıl işlem süreci inconel 718 malzemesi için belirtilebilir. Bunlar; standart solüsyona alınmış ve yaşlandırılmış (STD), yüksek mukavemetli inconel 718 (HS) ve doğrudan yaşlandırılmış inconel 718 (DA). Standart solüsyona alınmış ve yaşlandırılmış ısıl işlem süreci geometrik olarak zor ve karmaşık parçaların üretimi için kullanılır. Yüksek mukavemetli inconel 718 ısıl işlem süreci yüksek dayanım gerektiren ve daha az karmaşık geometriye sahip parçaların üretimi için kullanılan ısıl işlem sürecidir, daha ince tanecik yapısının elde edildiği bu süreçte malzeme işlenebilirliği daha kolaydır. Doğrudan yaşlandırma ise daha fazla dayanıma ihtiyaç duyulan parçaların üretiminde kullanılan ısıl işlem sürecidir [24].

Şekil 3.5. Isıl işlem koşullarına göre inconel 718 çekme dayanımı [26]



### 3.1.4. Inconel 718 uygulama alanları

Inconel 718 malzemesi özellikle yüksek sıcaklıklardaki mekanik özellikleri sayesinde havacılık, roket, nükleer ve kimyasal alanlarda faaliyet gösteren endüstrilerde yaygınlıkla kullanılmaktadır. Uçak gaz türbinlerinde (örn. diskler, şaftlar, egzoz sistemi, kanatlar), roket motor parçalarında, pistonlu motorlarda, nükleer reaktörlerde, yakıt tankı borularında, yüksek basınçlara dayanıklı endüstriyel tanklarda ve ısıtım işlem ekipmanlarında bu malzemeden oldukça fazla kullanılmaktadır [31].



Resim 3.2. Inconel 718 bazı uygulama alanları [32]

## 3.2. Metod

### 3.2.1. Taguchi yöntemi

Japon Mühendis ve Bilim adamı Dr. Genichi Taguchi'nin 1940'larda ürün ya da süreç kalitesinin artırılması ve maliyetin düşürülmesi amacı ile geliştirmiş olduğu tekniktir [33]. Özellikle deney tasarımı açısından dünya çapında en çok tercih edilen yöntemlerden birisidir.

Taguchi tekniğindeki amaç tasarımdan imalata kadar geçen her süreçte verimliliği düşük maliyetle sağlayabilmektir. Bu tekniğe göre üretim sürecinde oluşabilecek tüm sapmaları azaltmak esastır. Taguchi yöntemi kontrol edilebilen parametreleri içeren ve gürültü faktörü olan adlandırılan kontrol dışı faktörlere duyarsız bir sistem tasarımını sağlarken en az sayıda deney ile en doğru sonuçların elde edilmesini sağlar [34].

### Taguchi sinyal/gürültü oranı (S/N)

Deney tasarım yöntemi olarak da bilinen Taguchi yönteminde sinyal gürültü oranı önemli bir yer tutmaktadır. Deney tasarımlarında değişkenlere parametre ve bu değişkenlerin alabileceği farklı değerlere seviye adı verilir. Yapılacak deneydeki amaç bu parametrelerin seviyelerine bağlı olarak sonucu nasıl etkilediğini tespit etmektir.

Deney tasarımında deney sonucunu en çok değiştiren parametrenin etkisine sinyal adı verilir. Ek olarak, deney tasarımlarında yer almayan parametrelerde söz konusu olabilir. Dış faktörler adı verilen bu değişkenler de deneylerin sonuçlarına etki yapabilir. Taguchi tekniğinde dış faktörlerin ürün ya da süreç üzerinde oluşturmuş oldukları etkiye ise gürültü adı verilir. S/N olarak anılan sinyalin gürültüye oranı, deney tasarımlarında yer alan kontrol edilebilir ve kontrol edilemeyen parametrelerin deney sonucu üzerinde oluşturduğu etkiyi elde edebilmek için standart sapma ve ortalama değer ile birlikte kullanılan istatistiksel bir terimdir [35,36].

Deney sonuçlarında S/N oranı yüksek elde edilmiş ise dış faktörlerin sonucu çok etkilemediği yorumu yapılabildiği gibi deney tasarımının ve deney sonucunun da başarılı olduğu yorumu ayrıca yapılabilir. Taguchi deney tasarım yöntemince gerçekleştirilen deney sonuçlarının sağlıklı yorumlanabilmesi üç farklı S/N oranı gündeme gelmektedir.

#### *En küçük-en iyi*

Hedef değer en küçük olarak belirtildiği dolayısıyla y değerinin 0 olduğu bu sistemlerde amaç dış faktörlerin sonucu nasıl etkilediğini gözlemlemektir [37].

$$S/N = -10 \log \left( \frac{1}{10} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (3.5)$$



4. Faktörlerin ve seviyelerin Taguchi ortogonal dizin tablosuna aktarılması
5. Deneilerin gerçekleştirilmesi ve sonuçların toplanması
6. Sonuçların analizi
7. Sonuçların anova tablosuna göre analizi
8. Doğrulama deneylerinin gerçekleştirilmesi

### 3.2.2. Matematiksel yöntem

Çalışma kapsamında AMS5589 spesifikasyonuna inconel 718 malzemesine sahip boru parçalarının büküm süreci için geri yaylanma davranışlarının analitik olarak incelenmesi daha önce bölüm 2.4.2’de belirtildiği gibi Da-Xin ve arkadaşlarının [18] türetmiş oldukları eşitlik yardımı ile incelenecektir.

$$\Delta\theta = \theta \frac{K}{E} \left[ \frac{D}{2R} + \frac{t}{R} \left[ \left( e^{\frac{-\sqrt{3}}{2} \left( \frac{\sigma_s}{K} \right)^{\frac{1}{n}}} - 1 \right) \right]^{n-1} \right] \quad (2.2)$$

### 3.2.3. Sayısal yöntem

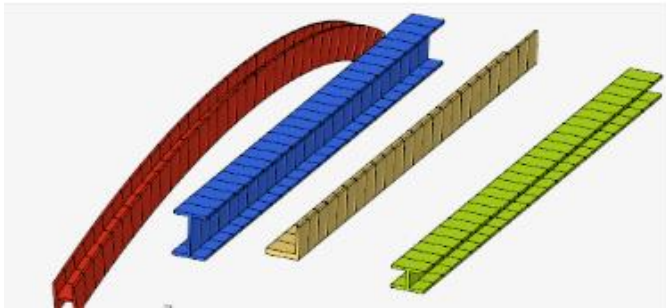
Matematiksel modellerin tanımını J.N. Reddy 2019 yılında yayınlamış olduğu kitabında [39] şöyle belirtmektedir. “İlgili değişkenler açısından fiziksel veya fizyolojik süreçlerin analitik açıklamalarıdır. “

Bir sürecin matematiksel modelleri, sürecin çalışma şekli ile ilgili varsayımlar kullanılarak ve süreci yöneten uygun yasalar kullanılarak geliştirilir ve bunlar çok karmaşık cebirsel, diferansiyel ve/veya integral denklemlerle ifade edilir. Geometrik ve materyal karmaşıklıkları nedeniyle matematiksel modellemelerin sunmuş olduğu kesin analitik çözümler bu problemlerde verimsiz kalabilmektedir. Bu noktada ise sayısal yöntemler devreye girmektedir. Sayısal analiz yöntemleri tipik olarak bir sürekliliğe sahip olan diferansiyel denklemlerin bağımlı değişkenlerinin değerleri arasında süreklilik sağlayan bir modele göre oluşturulan cebirsel ifadelerdir. Problem zorluluğuna göre cebirsel denklemler çoğunlukla bilgisayar ortamında çözüme kavuşturulur. Bir sürecin matematiksel modelini değerlendirmek ve özelliklerini tahmin etmek için bilgisayar ortamında sayısal yöntemlerin kullanılmasına ise sayısal simülasyon denir [39].

### Sonlu elemanlar yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemi, çoklu fizik, karmaşık geometri ve sınır koşullarını içerebilen gerçek dünya problemlerine uygulanmasında en çok tercih edilen sayısal yöntemdir. Sonlu elemanlar yönteminde, belirli bir alan, alt alanların bir devamı olarak görülür ve her bir alt alan üzerinde, denklem, geleneksel varyasyonel yöntemlerine göre yaklaşık olarak hesaplanır. Yaklaşık çözümler aramanın temel nedeni ise; karmaşık bir işlevi olan bir problemin basit polinomlar aracılığı ile daha basit olarak ortaya konulabilmesidir [39].

Sonlu elemanlar yöntemi, diğer sayısal analiz çözüm yöntemlere göre üstün olmasını sağlayan üç ana neden söz konusudur. Karmaşık geometrileri ağ olarak ayırarak sonlu elemanların oluşturulması bu elemanları zamana bağlı olarak nasıl değiştiğini açıklaması ilk neden olarak belirtilebilir. İkinci neden ise her bir sonlu eleman üzerinde ve eleman düğümlerindeki cebirsel tanımlamaların yapılabilmesidir. Üçüncü neden ise birbirini takip eden değişkenlerin eleman tiplerine sürekliliği sağlayabilmek adına ardı ardına tanımlanabilmesidir. [39]



Resim 3.3. Bazı geometrik şekillerin elemanlara ayrılması [40]

### Kapalı (implicit) yöntem

Geniş aralıklar kullanılarak, daha az non-lineer olan problemlerin çözülmesinde tercih edilen bir sayısal yöntem çeşididir. Sistemin hem şimdiki hem de ilerideki bir zamanının denklemlerinin çözülebilmeye olanak sağlar.

Kapalı yöntemde her bir elemandaki düğüm noktasının sahip olduğu serbestlik derecesine göre doğrusal olmayan denklem elde edilir ve çözümü sağlanır. En çok tercih edilen tekniği ise Newton-Raphson yöntemidir [29].

Her bir basamak sonrası elde edilen sonuç izin verilen değerin altına gelirse bir sonraki basamağa geçilir. Yeni basamağın deneme değerleri için bir öndeki adımın değerleri alınır. Yakınsama elde edildiğinde, yeni sınır şartlarına göre yeni sonuçlar elde edilir. Kapalı yöntem yardımı ile oluşturulan matematiksel modellere göre elde edilen değerler analitik çözümlere son derece yakın olabilmektedir, ancak yakınsama sorunu devam etmektedir. Ek olarak karmaşık problemler söz konusu olduğunda cebirsel denklemlerin çözümü için ihtiyaç duyulan çok büyük matrislerin bilgisayar ortamında çözülmesi gerekir ki bu da bilgisayar ortamında saklama alanı sorunu oluşturabilir [41].

### Açık (explicit) yöntem

Açık yöntemde, ileriki zamandaki çözümlenme işlemi sağlanır ve o andaki duruma göre gerçekleştirilir. Açık metodu kapalı yöntemden ayıran en önemli farkı her bir zaman basamağında diğer basamaklardan bağımsız olarak iterasyonun gerçekleştirilmesidir. Bu durum açık metot ile çözümlenme yapılan sistemlerde, sonuca daha erken varıldığını gösterir. Kapalı yöntemde gözlemlenen yakınsama sorunu, açık metotta gözlemlenmez, ancak elde edilen sonuçların doğruluğu için tereddütler söz konusu olabilir.

### Açık (explicit) ve kapalı yöntemlerin karşılaştırılması

Temas yüzeylerinde meydana gelen anlık değişimlerden dolayı kapalı sistem çözümlenmelerinde yakınsama problemi ortaya çıkmasına karşın açık sistemli çözümlenmelerde bu sorun çözüm sonucunu ciddi anlamda etkilememektedir.

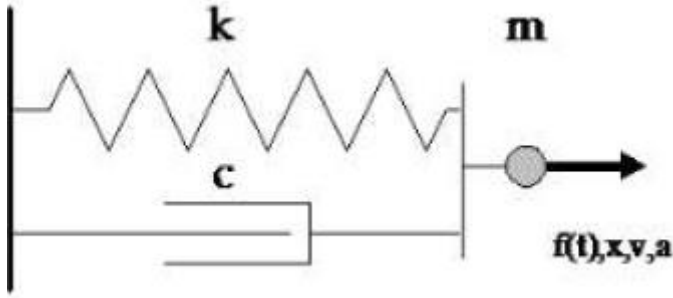
Ek olarak kapalı sistem çözümlerinde iteratif süreç temel alındığından dolayı denklemler oldukça büyük boyutlara erişebilirken açık sistem çözümlenmelerinde denklem sayısı önem arz ettiği için çözüme daha kolay erişilebilmektedir [15,29].

Prior [42] yaptığı çalışmada karmaşık geometriye sahip parçaların şekillendirme süreci simülasyonu için açık yöntemi önermiştir.

Karafils ve Boyce [43] şekillendirme süreçleri için açık metot ve geri yaylanma davranışını inceleyebilmek için ise kapalı metodun tercih edilmesinin iyi sonuçlar ortaya çıkardığını belirtmişlerdir.

### Çalışma kapsamında kullanılan açık sistem sayısal çözümleme boru büküm süreci

Çalışma kapsamında boru büküm süreci için SEM yazılımı PAM-STAMP ile kapalı sistem sayısal çözümler gerçekleştirilmiştir. Bu yazılımın büküm sürecinde kullanmış olduğu sayısal iterasyonlarda temel alınan analitik denklem ise her bir elemanın anlık davranışını ele alabilen ve literatürde doğrusal sönümlü yay sistemi olarak bilinen ifadedir.



Resim 3.4. Doğrusal sönümlü yay sistemi

$$m_{a_n} + c_{v_n} + k_{x_n} = f_n \quad (3.8)$$

$m$ : Kütle matrisi

$c$ : Sönümlenme matrisi

$k$ : Katılık matrisi

$a$ : İvme

$v$ : Hız

$x$ : Konum

$n$ : Zaman adımı

### Çalışma kapsamında kullanılan kapalı sistem sayısal çözümleme geri yaylanma süreci

PAM STAMP yazılımında kullanılan sayısal çözümlemede, şekillendirme süreci statik olarak değerlendirilmiş olup, dinamik etkilerden olan düğüm hızlanması ve ivmelenmesi 0 kabul edilmiştir.

Her bir adımlamada yazılım Newton iterasyonu olarak bilinen doğrusal iterasyonların doğrusal olmayan denklemlerin çözümlenebilmesi için çalışır.

Newton iterasyonları

$$F(u) = F_{(ext)} \quad F_{(ext)} = 0 \text{ (Geri yaylanma durumu)} \quad (3.9)$$

$$F(u) = F_{(0)} + \delta F / \delta u_{(0)} \delta u \longrightarrow \delta u_1 = K^{-1}_{(0)} (F_{(ext)} - F_{(0)}) \quad (3.10)$$

$$u_1 = \delta u_1 \quad (3.11)$$

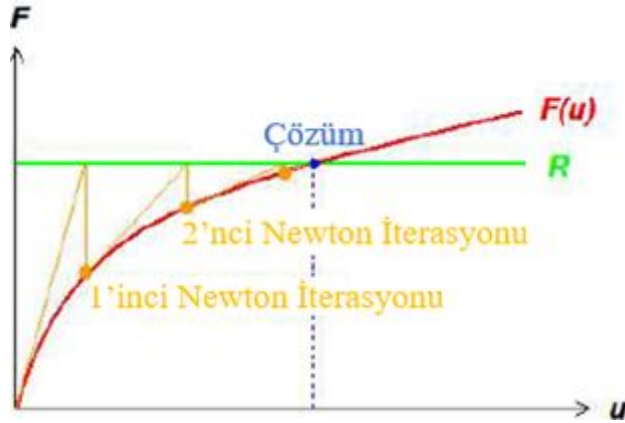
$$F(u) = F_{(u_1)} + \delta F / \delta u_{(u_1)} \delta u \longrightarrow \delta u_2 = K^{-1}_{(u_1)} (F_{(ext)} - F_{(u_1)}) \quad (3.12)$$

$$u_2 = \delta u_1 + \delta u_2 \quad (3.13)$$

$$u_n = \delta u_1 + \delta u_2 + \dots + \delta u_n \quad (3.14)$$

Yer değiştirme yakınsaması eşitlik 3.15 elde edilene kadar devam eder.

$$|\delta u_n| / \text{Maks} (|\delta u_i|) < \text{Tol} \quad (3.15)$$



Şekil 3.6. Newton iterasyon grafiği

$$R = F_{(ext)} \quad (3.16)$$

PAM STAMP yazılımı kapalı sistem geri yaylanma sayısal analizi için doğrusal olmayan çözümlene iterasyon sayısı 20 olarak sabittir. Çözümlene 20'nci adımı tamamladıktan sonra geri yaylanma değeri sayısal olarak elde edilmiş olur.

### 3.3. Deneysel Yöntem ve Ekipmanlar

#### 3.3.1. Deney tasarımı ve parametreleri

Tez çalışması kapsamında inconel 718 malzemesine sahip boru parçalarının şekillendirilmesi esnasında ortaya çıkan geri yaylanma davranışı ele alınacaktır. Geri yaylanmayı etkileyen kontrol edilebilir faktörler ise daha önceden bahsedildiği gibi malzeme, büküm yarıçapı, boru dış çapının et kalınlığına bölünmesi ile elde edilen geometrik oran [16] ve büküm açısıdır [17]. Malzemenin sabit olduğu bu çalışmada, 3 kontrol edilebilir faktör ve her bir faktör için tanımlanmış 3 seviye yer almaktadır.

Çizelge 3.9. Deney parametreleri ve seviyeleri

Deney Parametreleri	Geometrik Oran (D/t)	Büküm Açısı ( $\theta^\circ$ )	Büküm Yarıçapı (R mm)
Seviyeler	10,71	30	19
	12,5	60	31,8
	21,43	90	38,1

Deney tasarımı tüm bilimsel çalışmalarda önemli bir yer tutmaktadır. Doğru deney tasarımı yönteminin belirlenmesi daha az deney sayısına göre uygun maliyette deneylerin gerçekleşmesini sağladığı gibi elde edilen sonuçların da hızlı yorumlanabilmesini sağlar. Tez çalışmamız kapsamında deney tasarımı, literatürde ve endüstriyel çalışmalarda sıklıkla karşılaştığımız ve bölüm 3.2.1’de ayrıntılarından bahsedilen Taguchi deney yöntemine göre yapılacaktır. Taguchi deney tasarımının tercih edilmesindeki en önemli faktörler ise bu yöntemle ful faktöriyel deney sayısı yerine Taguchi ortogonal dizinleri kullanılarak daha az sayıda deney ile istenilen sonuçların elde edilmesinin amaçlanması, süre ve maliyetten kazanım sağlanmasının amaçlanmasıdır.

Deney kapsamında 3 kontrol edilebilir faktör ve her bir faktör için 3 seviye olması sebebiyle Taguchi ortogonal dizin olarak L9 seçilmiştir. Deney sürecinin verimli işleyebilmesi adına her bir deney 3 defa tekrar edilerek toplamda 27 deney gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3.10. Taguchi yöntemine göre oluşturulan deney tasarımı

Malzeme	Geometrik Oran (D/t)	Büküm Açısı ( $\theta^\circ$ )	Büküm Yarıçapı (R mm)	Deney No	Deney Tekrar No
Inconel 718 AMS 5589	10,71	30	19	1	1.1
					1.2
					1.3
	10,71	60	31,8	2	2.1
					2.2
					2.3
	10,71	90	38,1	3	3.1
					3.2
					3.3
	12,5	30	31,8	4	4.1
					4.2
					4.3
	12,5	60	38,1	5	5.1
					5.2
					5.3
	12,5	90	19	6	6.1
					6.2
					6.3
	21,43	30	38,1	7	7.1
					7.2
					7.3
	21,43	60	19	8	8.1
					8.2
					8.3
	21,43	90	31,8	9	9.1
					9.2
					9.3

### 3.3.2. Deney numuneleri

AMS 5589 spesifikasyonuna sahip inconel 718 malzemesinin deneysel çalışmalar için parça geometrik özellikleri çizelge 3.11’de belirtilmiştir. Tedarik edilen boru parçalarından minimum boyutlarda hurda çıkması için deney öncesi numunelerin oluşturulabilmesi için herhangi bir kesim işlemi yapılmamıştır.

Tam boyutlar üzerinde deney çalışmaları tamamlandıktan sonra boru parçalarının uygun noktalarından kesim sağlanılarak numuneler oluşturulmuştur.



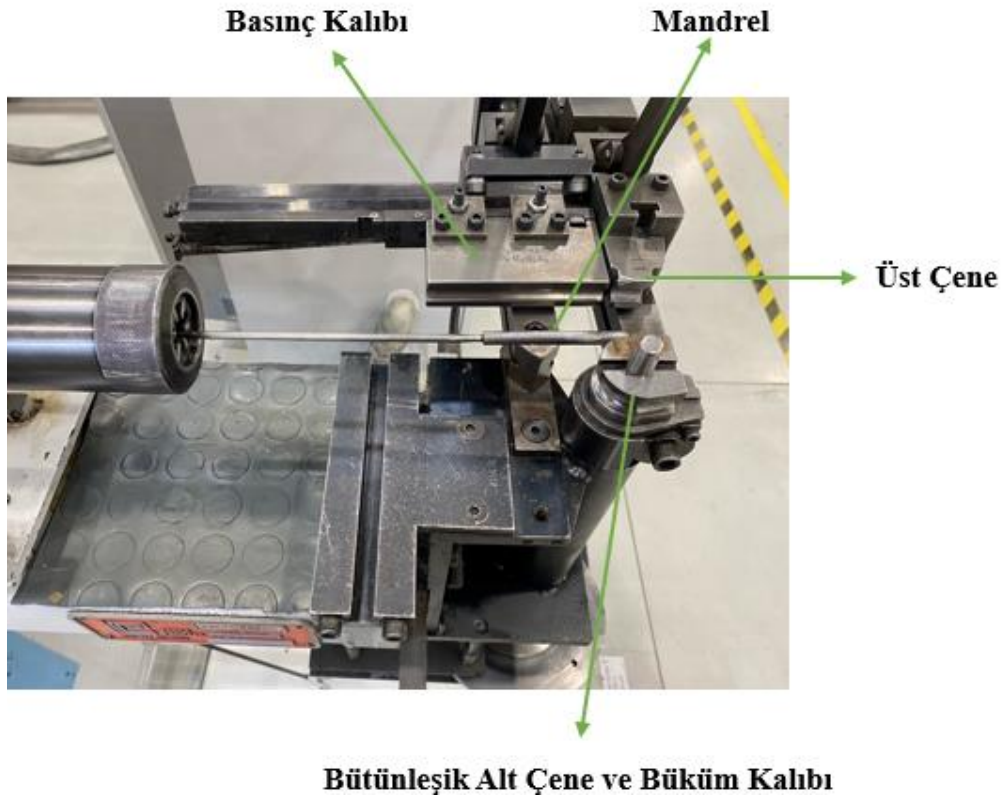
Resim 3.5. Deneysel çalışmada kullanılacak olan yarı mamul boru parçaları

Çizelge 3.11. Numune geometrik özellikleri

Dış Çap (D)	Kalınlık (t)	Geometrik Oran (D/t)	Numune Sayısı
6,35mm (.25")	0,508mm (.02")	12,5	9
9,525mm (.375")	0,889mm (.035")	10,71	9
19,05mm (.75")	0,889mm (.035")	21,43	9

### 3.3.3. Deney tezgâhının hazırlanması

Çizelge 3.10'da yer aldığı gibi tezgâh kurulumu gerektiren toplam 9 deney vardır. Her bir deney çalışması kurulumu için döner-çekme boru büküm tezgâhlarına ayrı ayrı yardımcı takımlardan olan büküm kalıbı, basınç kalıbı, alt çene, üst çene ve mandrel bağlantıları sağlanmıştır. Deney no 8 ve 9'da kırışma probleminin ön görülmesi sebebi ile sadece bu çalışmalar için kaşık takımları ayrıca tezgâha monte edilmiştir.



Resim 3.6. Tezgâh yardımcı ekipmanlarının örnek kurulumu

### 3.3.4. Kalıpların belirlenmesi

Döner – çekme boru büküm tezgâhlarında büküm parametrelerini yöneten ekipmanlar büküm kalıbı, alt çene, üst çene, kaşık, mandrel ve basınç kalıbıdır. Toplam deneysel çalışma sayısı 27 olmasına karşın deney tekrar sayısının 3 olması sebebi ile farklı kurulum gerektiren 9 deney söz konusudur. Her bir farklı deney çalışmasında kullanılan takımların isimleri ve geometrik özellikleri çizelge 3.12’de belirtilmiştir.

Çizelge 3.12. Kalıpların belirlenmesi

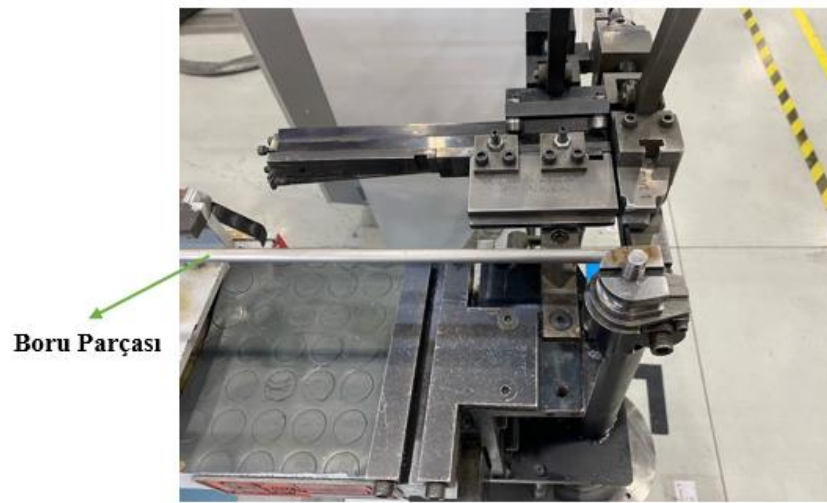
Deney No	Büküm Kalıbı <i>Boru Büküm yarıçapı</i> (R mm) <i>Boru Dış çapı</i> (D mm)	Alt Çene, Üst Çene, Basınç Kalıbı <i>Boru Dış çapı</i> (D mm)	Mandrel <i>Boru Kalınlığı</i> (t mm)	Kaşık <i>Boru Dış çapı</i> (D mm)
1	R: 19,05 D: 9,525	D: 9,525	0,889	-
2	R: 31,8 D: 9,525	D: 9,525	0,889	-
3	R: 38,1 D: 9,525	D: 9,525	0,889	-
4	R: 31,8 D: 6,35	D: 6,35	0,508	-
5	R: 38,1 D: 6,35	D: 6,35	0,508	-
6	R: 19,05 D: 6,35	D: 6,35	0,508	-
7	R: 38,1 D: 19,05	D: 19,05	0,889	-
8	R: 19,05 D: 19,05	D: 19,05	0,889	R: 19,05 D: 19,05
9	R: 31,8 D: 19,05	D: 19,05	0,889	R: 31,8 D: 19,05



Resim 3.7. Büküm yarıçapına göre değişiklik gösteren büküm kalıpları

### 3.3.5. Deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesi

Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş.'nin bünyesinde yer alan boru büküm atölyesinde gerçekleştirilen deneylerde ilk olarak tezgâha çizelge 3.13'te belirtilen kalıplar yerleştirilmiştir. Sayısal kontrolün sağlandığı ünite yardımı ile kalıpların birbiri ile olan konumları ayarlanmıştır, ardından boru parçalarında ön hazırlık için çapak alma tesviye işlemi sağlanmıştır. Boru parçası tezgâh yardımcı ekipmanları üzerine yerleştirilmiştir.



Resim 3.8. Boru parçasının tezgâha yerleşim örneği

Kontrol ünitesine büküm yarıçapı ve büküm açısı girildikten sonra boru parçasının istenilen formu alması sağlanmıştır.



Resim 3.9. Büküm açısının kontrol ünitesine girilmesi



Resim 3.10. Büküm yarıçapının kontrol ünitesine girilmesi

Boru parçası takım üzerinden sökölmeden tekrar deneyleri sağlanmıştır. Tekrar deneyleri tamamlandıktan sonra iş parçası tezgâhtan sökölerek 3 büküm numunesinin elde edilebilmesi için şerit testere istasyonuna getirilerek kesim işlemi sağlanmıştır. Elde edilen numunelerin kesim işlemlerinin ardından ortaya çıkan çapakların tesviye işlemi sağlandıktan sonra açısal geri yaylanma değerlerinin daha sonra ölçöllebilmesi için numuneler etiketlenerek paketlenmiştir. Her bir deney çalışması için belirtilen bu işlemler sırayla gerçekleştirilmiştir.



Resim 3.11. Büküm işlemi tamamlanan parçaların ölçöl için etiketlenmesi ve paketlenmesi

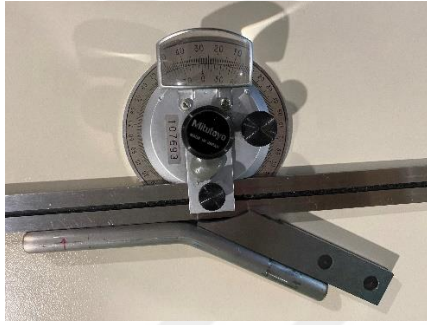
Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.ř.'nin bünyesinde yer alan Eaton Leonard boru büküm tezgâhlarına Amerikan birim sistemine göre girdilerin yapılmasından dolayı etiketlemede yer alacak olan uzunluk ölçölüleri için inch birimi kullanılmıştır.

## 4. ÇALIŞMA SONUÇLARI VE TARTIŞMALAR

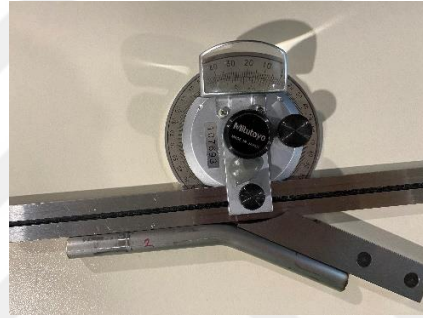
### 4.1. Deneysel Çalışma

#### 4.1.1. Deneysel çalışma sonuçları

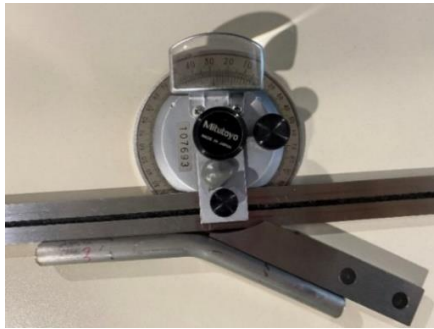
Dış çapı 9,525 mm ve kalınlığı 0,889 mm olan AMS 5589 spesifikasyonuna sahip inconel 718 malzemesinden üretilmiş yarı mamul boru parçasına 19,05 mm büküm yarıçapı ve 30° büküm açısı verebilmek için yapılan deney çalışmasında ortaya çıkan açısal değerler ve buna bağlı açısal geri yaylanma değerleri çizelge 4.1’de verilmiştir.



Resim 4.1. Deney 1.1 geri yaylanma değeri



Resim 4.2. Deney 1.2 geri yaylanma değeri

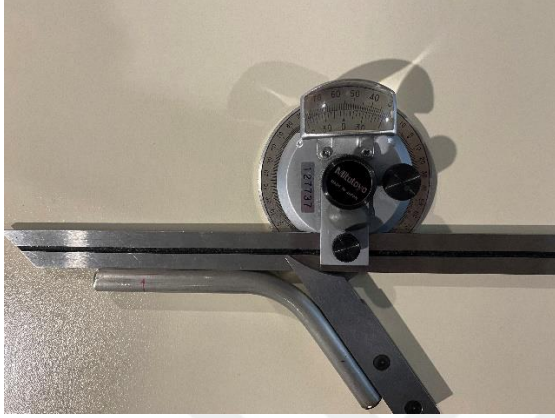


Resim 4.3. Deney 1.3 geri yaylanma değeri

Çizelge 4.1. Deney 1 açısal geri yaylanma değerleri

Deney No	Deney Tekrar No	Açı Sonuç (°)	Açısal Geri Yaylanma Sonuç (°)	Ortalama Açısal Geri Yaylanma Sonuç (°)
1	1.1	31,1	1,1	1,5
	1.2	31,9	1,9	
	1.3	31,6	1,6	

Dış çapı 9,525 mm ve kalınlığı 0,889 mm olan AMS 5589 spesifikasyonuna sahip inconel 718 malzemesinden üretilmiş yarı mamul boru parçasına 31,8 mm büküm yarıçapı ve 60° büküm açısı verebilmek için yapılan deney çalışmasında ortaya çıkan açısal değerler ve buna bağlı açısal geri yaylanma değerleri çizelge 4.2’de verilmiştir.



Resim 4.4. Deney 2.1 geri yaylanma değeri Resim 4.5. Deney 2.2 geri yaylanma değeri



Resim 4.6. Deney 2.3 geri yaylanma değeri

Çizelge 4.2. Deney 2 açısal geri yaylanma değerleri

Deney No	Deney Tekrar No	Açı Sonuç (°)	Açısal Geri Yaylanma Sonuç (°)	Ortalama Açısal Geri Yaylanma Sonuç (°)
2	2.1	64,5	4,5	4,7
	2.2	65	5	
	2.3	64,7	4,7	

Dış çapı 9,525 mm ve kalınlığı 0,889 mm olan AMS 5589 spesifikasyonuna sahip inconel 718 malzemesinden üretilmiş yarı mamul boru parçasına 38,1 mm büküm yarıçapı ve 90° büküm açısı verebilmek için yapılan deney çalışmasında ortaya çıkan açısal değerler ve buna bağlı açısal geri yaylanma değerleri çizelge 4.3'te verilmiştir.



Resim 4.7. Deney 3.1 geri yaylanma değeri Resim 4.8. Deney 3.2 geri yaylanma değeri



Resim 4.9. Deney 3.3 geri yaylanma değeri

Çizelge 4.3. Deney 3 açısal geri yaylanma değerleri

Deney No	Deney Tekrar No	Açı Sonuç (°)	Açısal Geri Yaylanma Sonuç (°)	Ortalama Açısal Geri Yaylanma Sonuç (°)
3	3.1	95,5	5,5	6
	3.2	96,1	6,1	
	3.3	96,4	6,4	

Dış çapı 6,35 mm ve kalınlığı 0,508 mm olan AMS 5589 spesifikasyonuna sahip inconel 718 malzemesinden üretilmiş yarı mamul boru parçasına 31,8 mm büküm yarıçapı ve 30° büküm açısı verebilmek için yapılan deney çalışmasında ortaya çıkan açısal değerler ve buna bağlı açısal geri yaylanma değerleri çizelge 4.4'te verilmiştir.



Resim 4.10. Deney 4.1 geri yaylanma değeri Resim 4.11. Deney 4.2 geri yaylanma değeri

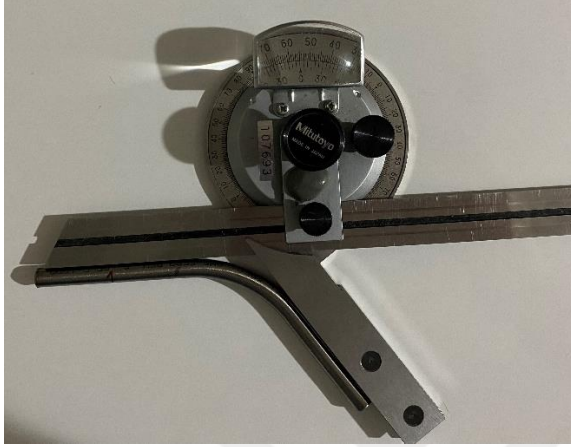


Resim 4.12. Deney 4.3 geri yaylanma değeri

Çizelge 4.4. Deney 4 açısal geri yaylanma değerleri

Deney No	Deney Tekrar No	Açı Sonuç (°)	Açısal Geri Yaylanma Sonuç (°)	Ortalama Açısal Geri Yaylanma Sonuç (°)
4	4.1	33,9	3,9	4,6
	4.2	34,5	4,5	
	4.3	35,5	5,5	

Dış çapı 6,35 mm ve kalınlığı 0,508 mm olan AMS 5589 spesifikasyonuna sahip inconel 718 malzemesinden üretilmiş yarı mamul boru parçasına 38,1 mm büküm yarıçapı ve 60° büküm açısı verebilmek için yapılan deney çalışmasında ortaya çıkan açısal değerler ve buna bağlı açısal geri yaylanma değerleri çizelge 4.5'te verilmiştir.



Resim 4.13. Deney 5.1 geri yaylanma değeri Resim 4.14. Deney 5.2 geri yaylanma değeri



Resim 4.15. Deney 5.3 geri yaylanma değeri

Çizelge 4.5. Deney 5 açısal geri yaylanma değerleri

Deney No	Deney Tekrar No	Açı Sonuç (°)	Açısal Geri Yaylanma Sonuç (°)	Ortalama Açısal Geri Yaylanma Sonuç (°)
5	5.1	65	5	5,1
	5.2	66,5	6,5	
	5.3	63,8	3,8	

Dış çapı 6,35 mm ve kalınlığı 0,508 mm olan AMS 5589 spesifikasyonuna sahip inconel 718 malzemesinden üretilmiş yarı mamul boru parçasına 19,05 mm büküm yarıçapı ve 90° büküm açısı verebilmek için yapılan deney çalışmasında ortaya çıkan açısal değerler ve buna bağlı açısal geri yaylanma değerleri çizelge 4.6'da verilmiştir.



Resim 4.16. Deney 6.1 geri yaylanma değeri Resim 4.17. Deney 6.2 geri yaylanma değeri

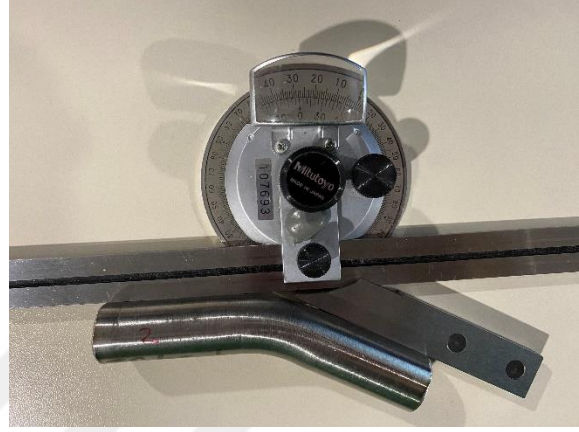
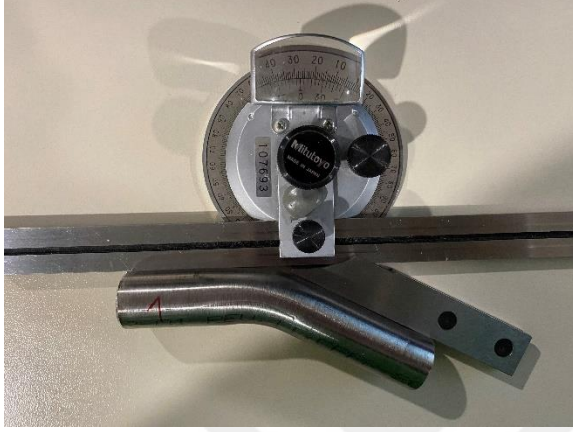


Resim 4.18. Deney 6.3 geri yaylanma değeri

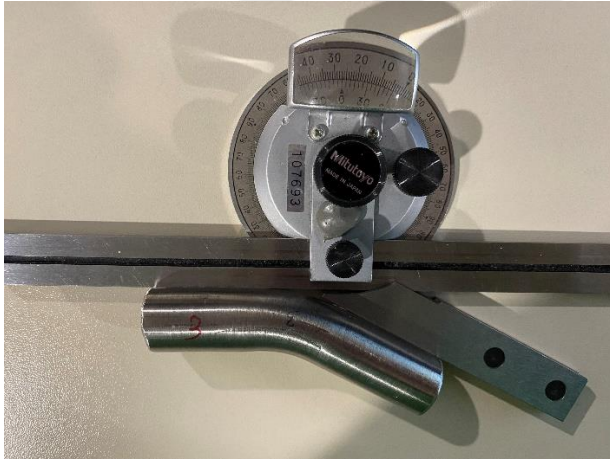
Çizelge 4.6. Deney 6 açısal geri yaylanma değerleri

Deney No	Deney Tekrar No	Açı Sonuç (°)	Açısal Geri Yaylanma Sonuç (°)	Ortalama Açısal Geri Yaylanma Sonuç (°)
6	6.1	95,8	5,8	5,1
	6.2	96	6	
	6.3	93,5	3,5	

Dış çapı 19,05 mm ve kalınlığı 0,889 mm olan AMS 5589 spesifikasyonuna sahip inconel 718 malzemesinden üretilmiş yarı mamul boru parçasına 38,1 mm büküm yarıçapı ve 30° büküm açısı verebilmek için yapılan deney çalışmasında ortaya çıkan açısal değerler ve buna bağlı açısal geri yaylanma değerleri çizelge 4.7’de verilmiştir.



Resim 4.19. Deney 7.1 geri yaylanma değeri Resim 4.20. Deney 7.2 geri yaylanma değeri



Resim 4.21. Deney 7.3 geri yaylanma değeri

Çizelge 4.7. Deney 7 açısal geri yaylanma değerleri

Deney No	Deney Tekrar No	Açı Sonuç (°)	Açısal Geri Yaylanma Sonuç (°)	Ortalama Açısal Geri Yaylanma Sonuç (°)
7	7.1	32,9	2,9	2,8
	7.2	32,5	2,5	
	7.3	33	3	

Dış çapı 19,05 mm ve kalınlığı 0,889 mm olan AMS 5589 spesifikasyonuna sahip inconel 718 malzemesinden üretilmiş yarı mamul boru parçasına 19,05 mm büküm yarıçapı ve  $60^\circ$  büküm açısı verebilmek için yapılan deney çalışmasında ortaya çıkan açısal değerler ve buna bağlı açısal geri yaylanma değerleri çizelge 4.8’de verilmiştir.



Resim 4.22. Deney 8.1 geri yaylanma değeri Resim 4.23. Deney 8.2 geri yaylanma değeri



Resim 4.24. Deney 8.3 geri yaylanma değeri

Çizelge 4.8. Deney 8 açısal geri yaylanma değerleri

Deney No	Deney Tekrar No	Açı Sonuç ( $^\circ$ )	Açısal Geri Yaylanma Sonuç ( $^\circ$ )	Ortalama Açısal Geri Yaylanma Sonuç ( $^\circ$ )
8	8.1	63	3	3,2
	8.2	63,5	3,5	
	8.3	63,1	3,1	

Dış çapı 19,05 mm ve kalınlığı 0,889 mm olan AMS 5589 spesifikasyonuna sahip inconel 718 malzemesinden üretilmiş yarı mamul boru parçasına 31,8 mm büküm yarıçapı ve 90° büküm açısı verebilmek için yapılan deney çalışmasında ortaya çıkan açısal değerler ve buna bağlı açısal geri yaylanma değerleri çizelge 4.9'da verilmiştir.



Resim 4.25. Deney 9.1 geri yaylanma değeri Resim 4.26. Deney 9.2 geri yaylanma değeri



Resim 4.27. Deney 9.3 geri yaylanma değeri

Çizelge 4.9. Deney 9 açısal geri yaylanma değerleri

Deney No	Deney Tekrar No	Açı Sonuç (°)	Açısal Geri Yaylanma Sonuç (°)	Ortalama Açısal Geri Yaylanma Sonuç (°)
9	9.1	94	4	4,1
	9.2	94,5	4,5	
	9.3	93,8	3,8	

### Deneysel sonuçların değerlendirilmesi

Tüm deney sonuçları Q-Testi kötü verilerin ayıklanması yöntemine göre değerlendirilmiştir.

Eşitlik 4.1'e göre elde edilen değerler, gözlem sayısı ve %90 güven aralığına göre oluşturulmuş olan çizelge 4.10'da yer alan değerlerden büyük olduğu durumlarda şüphelenilen değerler ihmal edilir [44].

$$Q = \frac{Ara}{Dağılım} \quad (4.1)$$

Ara: Şüpheli değer ile ona en yakın değer arasındaki fark

Dağılım: En büyük ve en küçük değerler arasındaki fark

Çizelge 4.10. Q-Testi gözlem sayısı için belirlenmiş değerler tablosu [44]

Q (% 90 Güven)	0,94	0,76	0,64	0,56	0,51	0,47	0,44	0,41
Gözlem Sayısı	3	4	5	6	7	8	9	10

Tüm sonuçlar, Q-Testi yöntemi gözlem sayısı 3 için belirlenmiş olan %90 güven aralığına göre tutarlı bulunmuştur (Elde edilen değer < 0,94). Sonuçların tutarlı bulunulmasından dolayı hiçbir değer göz ardı edilmemiştir. Deney tekrarlarında elde edilen sonuçlar dikkate alınarak ortalama açılmal geri yaylanma değerleri ortaya çıkarılmıştır (Çizelge 4.11).

Gerçekleştirilen tüm deney sonuçları çizelge 4.11’de verilmiştir.

Çizelge 4.11. Tüm açısız geri yaylanma deney sonuçları

Geometrik Oran (D/t)	Büküm Açısı ( $\theta^\circ$ )	Büküm Yarıçapı (R mm)	Deney No	Deney Tekrar No	Açı Sonuç ( $^\circ$ )	Açısız Geri Yaylanma Sonuç ( $^\circ$ )	Ortalama Açısız Geri Yaylanma Sonuç ( $^\circ$ )
10,71	30	19	1	1.1	31,1	1,1	1,5
				1.2	31,9	1,9	
				1.3	31,6	1,6	
10,71	60	31,8	2	2.1	64,5	4,5	4,7
				2.2	65	5	
				2.3	64,7	4,7	
10,71	90	38,1	3	3.1	95,5	5,5	6
				3.2	96,1	6,1	
				3.3	96,4	6,4	
12,5	30	31,8	4	4.1	33,9	3,9	4,6
				4.2	34,5	4,5	
				4.3	35,5	5,5	
12,5	60	38,1	5	5.1	65	5	5,1
				5.2	66,5	6,5	
				5.3	63,8	3,8	
12,5	90	19	6	6.1	95,8	5,8	5,1
				6.2	96	6	
				6.3	93,5	3,5	
21,43	30	38,1	7	7.1	32,9	2,9	2,8
				7.2	32,5	2,5	
				7.3	33	3	
21,43	60	19	8	8.1	63	3	3,2
				8.2	63,5	3,5	
				8.3	63,1	3,1	
21,43	90	31,8	9	9.1	94	4	4,1
				9.2	94,5	4,5	
				9.3	93,8	3,8	

#### 4.1.2. Anova analizleri

İstatiksel veri çözümlene programı olan MINITAB yazılımı kullanılarak Anova ve Taguchi analizleri sağlanmıştır. Anova bir süreç içerisindeki parametrelerin sonuçları nasıl etkilediğini ortaya koyan bir veri analizi yöntemidir. Çalışma kapsamında inconel 718 malzemesi için geometrik oran, büküm açısı ve büküm yarıçapı parametrelerine bağlı deneysel olarak elde edilen açısal geri yaylanma değerleri Anova ile çözümlenmiştir. Böylelikle belirli bir güven değeri noktasında geri yaylanma sonucunu en çok hangi parametrenin etkilediği belirlenmiştir.

Çizelge 4.12. Anova modeline göre parametrelerin geri yaylanmaya etkisi

Kaynak	SD	Kareler Toplamı	Etki	F-Değeri	P-Değeri
Geometrik Oran (D/t)	2	3,696	23,88%	2,27	0,306
Büküm Açısı ( $\Theta^\circ$ )	2	6,816	44,04%	4,18	0,193
Büküm Yarıçapı (R mm)	2	3,336	21,55%	2,05	0,328
Hata	2	1,629	10,53%		
Total	8	15,476	100,00%		
Anova Güven Seviyesi ( $R^2$ )		89,47%			

Anova analizi deneysel olarak elde edilen açısal geri yaylanma değerlerini en çok etkileyen parametrenin büküm açısı olduğunu göstermekle beraber büküm yarıçapı ve geometrik oran parametrelerinin de önemli derecede etkilerinin olduğunu göstermektedir.

#### 4.1.3. Taguchi analizleri

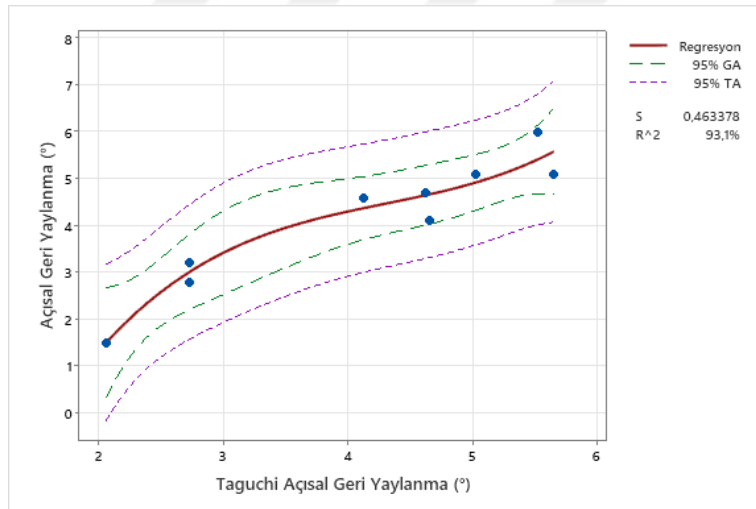
Bölüm 3'te belirtildiği gibi deneysel yöntem için L9 ortogonal dizine sahip Taguchi deney tasarımı belirlenmiş olup, deneysel çalışmalar bu yönetime göre gerçekleştirilmiştir. Elde edilmiş olan deneysel sonuçlar MINITAB yazılımı Taguchi modülüne girdi verisi olarak alınmıştır. Girdi verilerinin sağlanması ile Taguchi açısal geri yaylanma değerleri elde edilmiştir.

Çizelge 4.13. Deneysel ve Taguchi yöntemi açısai geri yaylanma değeri

Geometrik Oran (D/t)	Büküm Açısı (θ°)	Büküm Yarıçapı (R mm)	Açısai Geri Yaylanma (°)	Taguchi Açısai Geri Yaylanma (°)
10,71	30	19	1,5	2,06
10,71	60	31,8	4,7	4,62
10,71	90	38,1	6	5,52
12,5	30	31,8	4,6	4,12
12,5	60	38,1	5,1	5,66
12,5	90	19	5,1	5,02
21,43	30	38,1	2,8	2,72
21,43	60	19	3,2	2,72
21,43	90	31,8	4,1	4,66

Taguchi ve deneysel açısai geri yaylanma ilişkisini veren regresyon denklemi eşitlik 4.2’de verilmiştir.

$$\text{Açısai Geri Yaylanma} = - 10,11 + 9,081 \text{ Taguchi Açısai Geri Yaylanma} - 1,984 \text{ Taguchi Açısai Geri Yaylanma}^2 + 0,1536 \text{ Taguchi Açısai Geri Yaylanma}^3 \quad (4.2)$$



Şekil 4.1. Taguchi açısai geri yaylanma değeri güvenilirliği

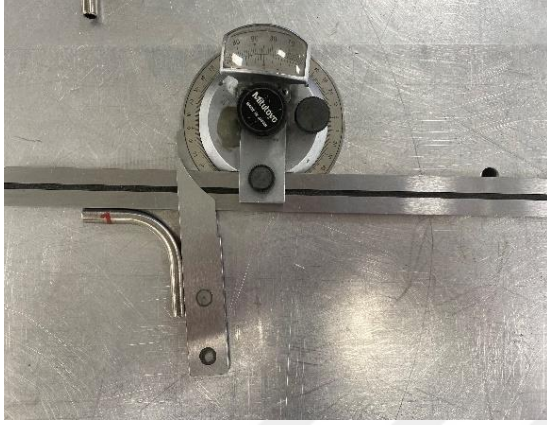
#### Taguchi doğrulama deneyi çalışması

MINITAB yazılımı ile elde edilen Taguchi açısai geri yaylanma değeri tutarlılığının tespit edilebilmesi adına L9 deney tasarımında yer almayan bir dizin belirlenmiş olup doğrulama deneyi sağlanmıştır.

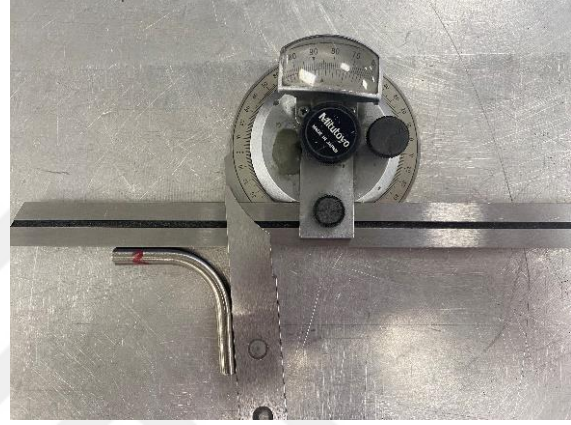
Doğrulama deneyi öncesi Taguchi açısai geri yaylanma değeri çizelge 4.14'te belirtilmiştir.

Çizelge 4.14. Taguchi doğrulama deneyi parametre değeri ve geri yaylanma sonucu

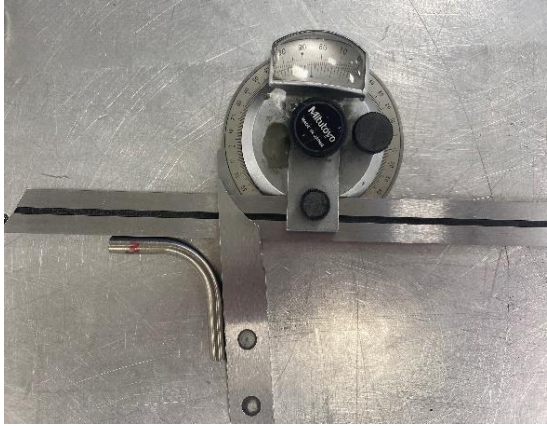
Geometrik Oran (D/t)	Büküm Açısı ( $\theta^\circ$ )	Büküm Yarıçapı (R mm)	Taguchi Geri Yaylanma ( $\Delta\theta^\circ$ )
12,5	90	19,05	5,02



Resim 4.28. Doğrulama deneyi birinci gözlem sonucu



Resim 4.29. Doğrulama deneyi ikinci gözlem sonucu



Resim 4.30. Doğrulama deneyi üçüncü gözlem sonucu

Çizelge 4.15. Taguchi doğrulama deneyi sonucu

Gözlem No	Geri Yaylanma Açısı	Deney Ortalaması
1	5,4	5,0
2	4,5	
3	5,0	

Çizelge 4.16. Taguchi doğrulama deneyi karşılaştırması

Taguchi Açısal Geri Yaylanma (°)	Açısal Geri Yaylanma Deney Sonuç (°)
5,02	5,0

Çizelge 4.16 incelendiğinde doğrulama deneyinde elde edilen sonucun Taguchi yönteminin öne sürdüğü sonuç ile birebir örtüştüğü görülebilir. Tez çalışması kapsamında deney tasarımı olarak belirlenen Taguchi yöntemi sayesinde ful faktöriyel deney yapılmadan MINITAB yazılımı kullanılarak açısal geri yaylanma değerleri önceden tespit edilebilmiştir. Ful faktöriyel çalışma düşünüldüğünde Taguchi yönteminin öne sürdüğü açısal geri yaylanma değerleri çizelge 4.17’de belirtilmiştir.

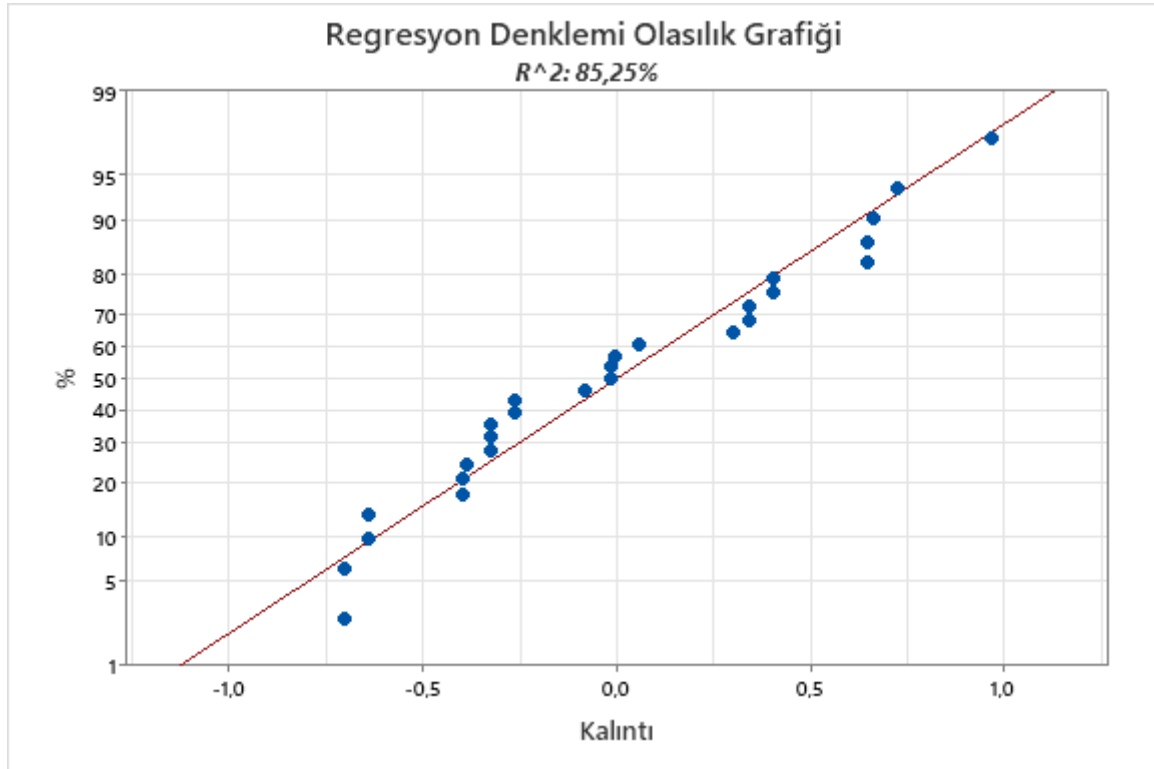
Çizelge 4.17. Ful faktöriyel Taguchi açısal geri yaylanma sonuçları

Geometrik Oran (D/t)	Büküm Açısı ( $\theta^\circ$ )	Büküm Yarıçapı (R mm)	Taguchi Açısal Geri Yaylanma Sonuç ( $\Delta\theta^\circ$ )
10,71	30	19,05	2,06
10,71	30	31,8	3,26
10,71	30	38,1	3,42
10,71	60	19,05	3,42
10,71	60	31,8	4,62
10,71	60	38,1	4,79
10,71	90	19,05	4,16
10,71	90	31,8	5,36
10,71	90	38,1	5,52
12,5	30	19,05	2,92
12,5	30	31,8	4,12
12,5	30	38,1	4,29
12,5	60	19,05	4,29
12,5	60	31,8	5,49
12,5	60	38,1	5,66
12,5	90	19,05	5,02
12,5	90	31,8	6,22
12,5	90	38,1	6,39
21,43	30	19,05	1,36
21,43	30	31,8	2,56
21,43	30	38,1	2,72
21,43	60	19,05	2,72
21,43	60	31,8	3,92
21,43	60	38,1	4,09
21,43	90	19,05	3,46
21,43	90	31,8	4,66
21,43	90	38,1	4,82

### Açısal geri yaylanma için parametrik regresyon denkleminin oluşturulması

Ful faktöriyel deney için Taguchi yöntemine göre elde edilen açısal geri yaylanma değerleri için eşitlik 4.3'te yer aldığı gibi parametrik regresyon denklemi elde edilmiştir.

$$\text{Açısal geri yaylanma } (^{\circ}) = 1,298 - 0,1008(\text{Geometrik Oran}) + 0,03500(\text{Büküm Açısı } (^{\circ})) + 0,0750(\text{Büküm Yarıçapı (mm)}) \quad (4.3)$$



Şekil 4.2. Taguchi açısal geri yaylanma değerleri kalıntı yüzde olasılık grafiği

Eşitlik 4.3 kullanılarak; geometrik oran, büküm yarıçapı ve büküm açısı parametrelerinin değerlerine bağlı olarak açısal geri yaylanma sonucu elde edilebileceği gibi bu parametrelerden herhangi ikisinin değerleri sabit alındığında, diğer parametrenin değişen değerleri için geri yaylanma açısının değişimi de kolaylıkla bulunabilir. Bu bağlamda, endüstriyel uygulamalarda geometrik oranın sabit (belirli çap ve et kalınlığındaki bir boru) ve büküm yarıçapının sabit olduğu hallerde, geri yaylanma sonucunda belirli bir değerde kalıcı büküm açısının elde edilmesi için boruya başlangıçta ne kadar fazladan bir büküm açısı verilmesi gerektiği yine eşitlik 4.3 yardımıyla belirlenebilir.

## 4.2. Analitik Çalışmalar

AMS 5589 spesifikasyonuna sahip inconel 718 malzemesi için geri yaylanma davranışları Da-Xin ve arkadaşlarının [18] 2009 yılında yapmış oldukları çalışma sonucunda elde ettikleri denklem yardımı ile çözümlenmiştir. Analitik çalışmalar için çözümlenmeler ful faktöriyel olarak gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.18. Analitik çalışma parametre ve değerleri

Analitik Çalışma No	Dış Çap (D mm)	Kalınlık (t mm)	Büküm Açısı ( $\theta^\circ$ )	Büküm Yarıçapı (R mm)
1	9,525	0,889	30	19,05
2	9,525	0,889	30	31,8
3	9,525	0,889	30	38,1
4	9,525	0,889	60	19,05
5	9,525	0,889	60	31,8
6	9,525	0,889	60	38,1
7	9,525	0,889	90	19,05
8	9,525	0,889	90	31,8
9	9,525	0,889	90	38,1
10	6,35	0,508	30	19,05
11	6,35	0,508	30	31,8
12	6,35	0,508	30	38,1
13	6,35	0,508	60	19,05
14	6,35	0,508	60	31,8
15	6,35	0,508	60	38,1
16	6,35	0,508	90	19,05
17	6,35	0,508	90	31,8
18	6,35	0,508	90	38,1
19	19,05	0,889	30	19,05
20	19,05	0,889	30	31,8
21	19,05	0,889	30	38,1
22	19,05	0,889	60	19,05
23	19,05	0,889	60	31,8
24	19,05	0,889	60	38,1
25	19,05	0,889	90	19,05
26	19,05	0,889	90	31,8
27	19,05	0,889	90	38,1

Da-Xin ve arkadaşlarının 2009 yılında yapmış oldukları çalışma neticesinde türetmiş oldukları açılal geri yaylanma denklemi eşitlik 4.4'te belirtilmiştir.

$$\Delta\theta = \theta \frac{K}{E} \left[ \frac{D}{2R} + \frac{t}{R} \left[ \left( e^{\frac{-\sqrt{3}}{2}} \left( \frac{\sigma_s}{K} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right) \right]^{n-1} \right] \quad (4.4)$$

$\Delta\theta$ : Açılal geri yaylanma (°)

$R$ : Büküm yarıçapı (mm)

$\theta$ : Büküm açısı (°)

$n$ : Pekleşme üsteli

$E$ : Elastisite modülü (Gpa)

$D$ : Boru dış çapı (mm)

$K$ : Plastisite modülü (Mpa)

$t$ : Boru et kalınlığı (mm)

$\sigma_s$ : Akma dayanımı (Mpa)

Daha önce bölüm 3.1.2'de belirtildiği üzere AMS5589 spesifikasyonuna sahip inconel 718 malzemesi için çekme testi sonucunda elde edilen mekanik özellikler çizelge 4.19'da yer almaktadır.

Çizelge 4.19. Malzeme mekanik özellikleri

Elastisite Modülü, E (Mpa)	202705,864
Plastisite modülü, K (Mpa)	2062,054
Pekleşme Üsteli, n	0,1107
Akma Dayanımı, $\sigma_s$ (Mpa)	1243,54

Her bir çalışma için çizelge 4.18’de yer alan geometrik spesifikasyonlar ile çizelge 4.19’da yer alan malzeme özellikleri dikkate alınarak açısal geri yaylanma değerleri eşitlik 4.4’e göre analitik olarak elde edilmiştir. Elde edilen bu değerler çizelge 4.20’de belirtilmiştir.

Çizelge 4.20. Analitik çözümleme açısal geri yaylanma sonuçları

Analitik Çalışma No	Dış Çap (D mm)	Kalınlık (t mm)	Büküm Açısı ( $\theta^\circ$ )	Büküm Yarıçapı (R mm)	Analitik Açısal Geri Yaylanma Sonuç ( $\Delta\theta^\circ$ )
1	9,525	0,889	30	19,05	1,05
2	9,525	0,889	30	31,8	1,65
3	9,525	0,889	30	38,1	1,94
4	9,525	0,889	60	19,05	2,1
5	9,525	0,889	60	31,8	3,31
6	9,525	0,889	60	38,1	3,89
7	9,525	0,889	90	19,05	3,15
8	9,525	0,889	90	31,8	4,96
9	9,525	0,889	90	38,1	5,83
10	6,35	0,508	30	19,05	1,50
11	6,35	0,508	30	31,8	2,37
12	6,35	0,508	30	38,1	2,79
13	6,35	0,508	60	19,05	3,0
14	6,35	0,508	60	31,8	4,75
15	6,35	0,508	60	38,1	5,57
16	6,35	0,508	90	19,05	4,51
17	6,35	0,508	90	31,8	7,12
18	6,35	0,508	90	38,1	8,36
19	19,05	0,889	30	19,05	0,57
20	19,05	0,889	30	31,8	0,89
21	19,05	0,889	30	38,1	1,05
22	19,05	0,889	60	19,05	1,13
23	19,05	0,889	60	31,8	1,79
24	19,05	0,889	60	38,1	2,1
25	19,05	0,889	90	19,05	1,70
26	19,05	0,889	90	31,8	2,68
27	19,05	0,889	90	38,1	3,14

### 4.3. Sonlu Elemanlar Yöntemi Analizleri

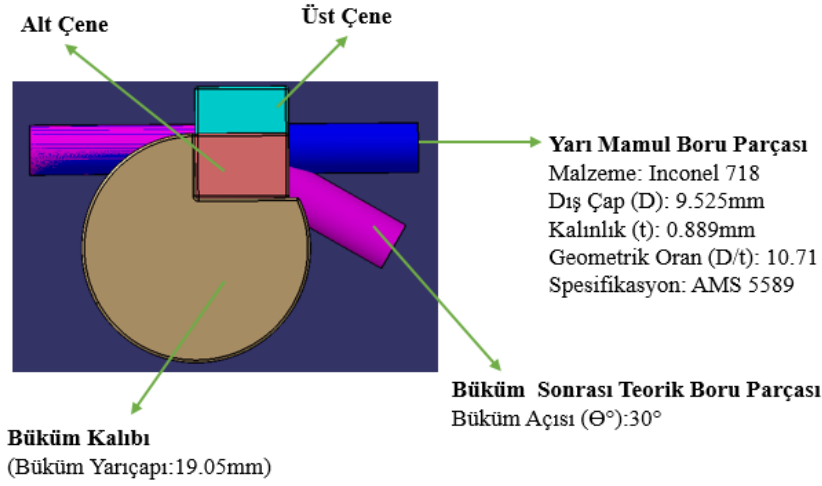
Sayısal analiz çalışmaları kapsamında toplamda 9 simülasyon modeli oluşturulmuştur. Bu simülasyonların parametre ve değerleri çizelge 4.21’de belirtilmiştir. Sayısal analiz çalışma sonuçları ile deneysel sonuçların karşılaştırılabilmesi için deney tasarımında yer alan parametre ve bu parametrelerin değerleri analiz çalışmalarında da sabit tutulmuştur.

Çizelge 4.21. Sayısal analiz parametreleri ve değişkenleri

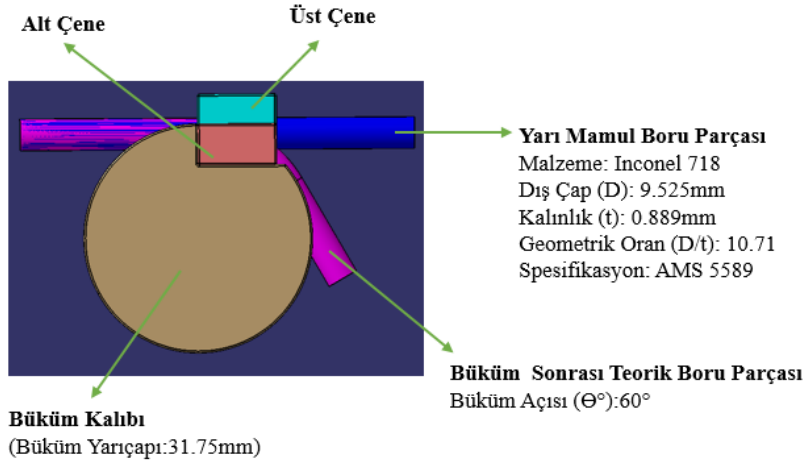
Malzeme	Simülasyon No	Geometrik Oran (D/t)	Büküm Açısı ( $\theta^\circ$ )	Büküm Yarıçapı (R mm)
Inconel 718 AMS 5589	1	10,71	30	19
	2	10,71	60	31,8
	3	10,71	90	38,1
	4	12,5	30	31,8
	5	12,5	60	38,1
	6	12,5	90	19
	7	21,43	30	38,1
	8	21,43	60	19
	9	21,43	90	31,8

#### 4.3.1. Geometri modellerinin oluşturulması

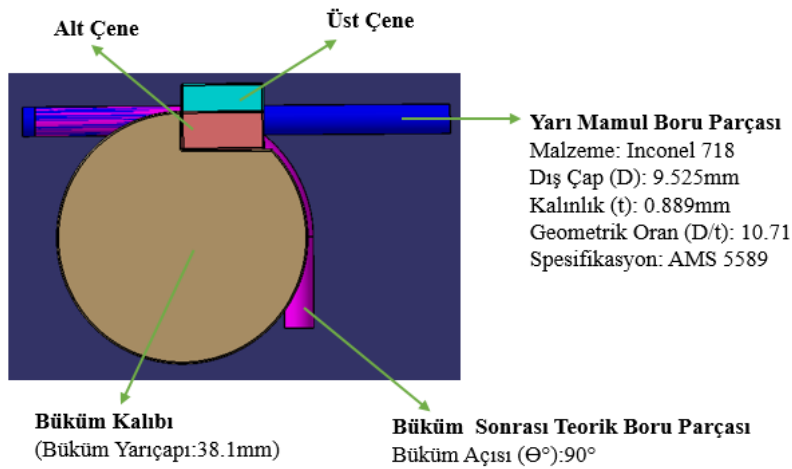
3 boyutlu modelleme yazılımı olan CATIA aracı kullanılarak toplam 9 farklı simülasyon çalışması için geometri modelleri oluşturulmuştur. Döner-çekme boru büküm makinası yardımcı takımlarından olan büküm kalıbı, alt çene ve üst çene her bir simülasyon için kaşık takımı ise simülasyon no 8 ve 9 için modellenmiştir, ayrıca geri yaylanma davranışı sayısal çözümlerle irdelenecek olan boru parçaları ile teorik olarak büküm sonrası oluşacak olan boru parçalarının da modelleri yine aynı yazılım kullanılarak oluşturulmuştur.



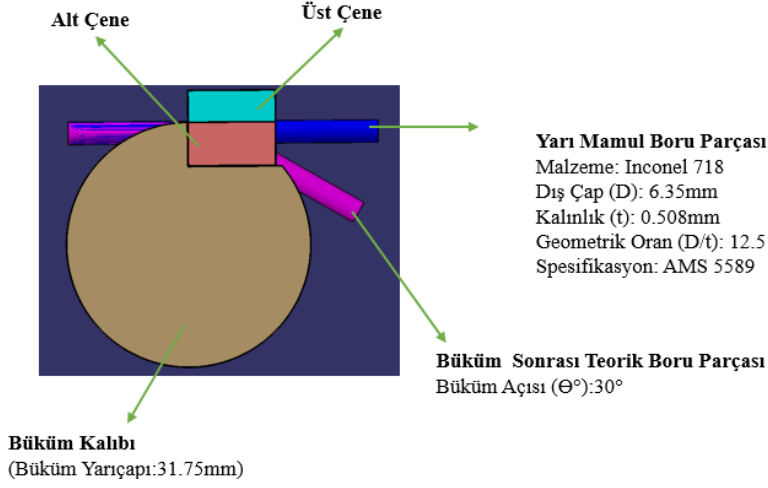
Resim 4.31. Simülasyon 1 model geometrisi



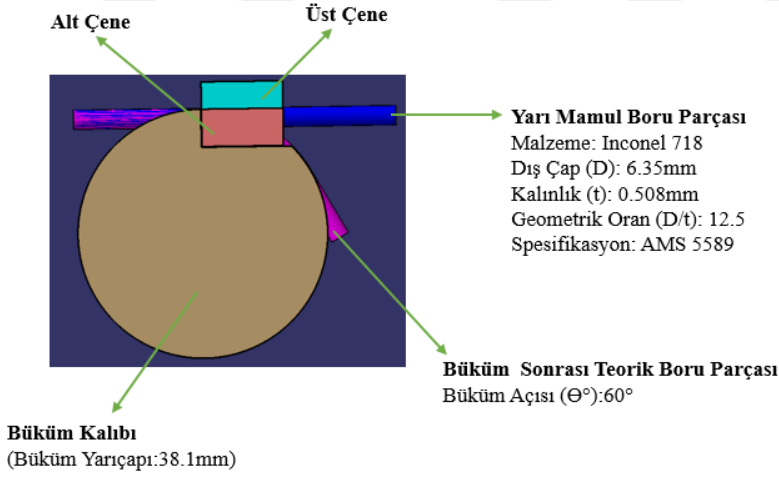
Resim 4.32. Simülasyon 2 model geometrisi



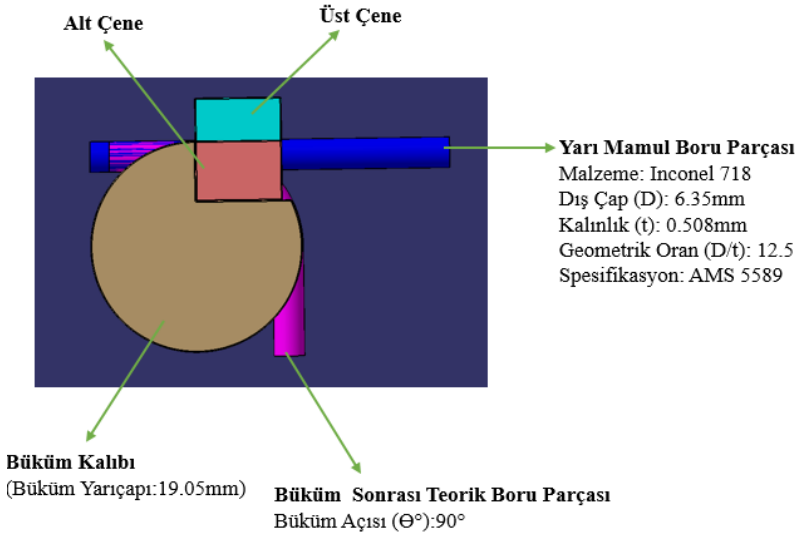
Resim 4.33. Simülasyon 3 model geometrisi



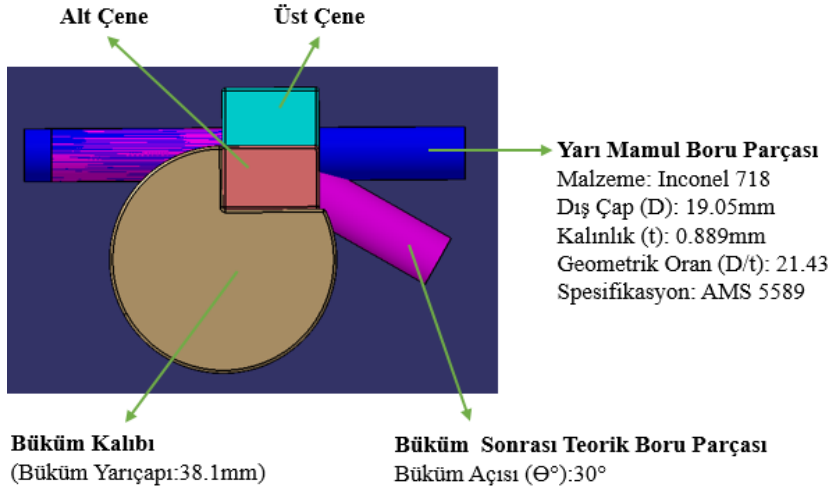
Resim 4.34. Simülasyon 4 model geometrisi



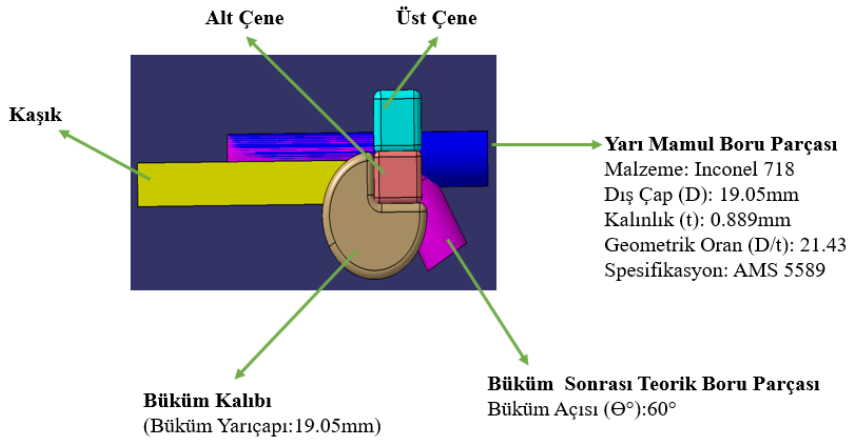
Resim 4.35. Simülasyon 5 model geometrisi



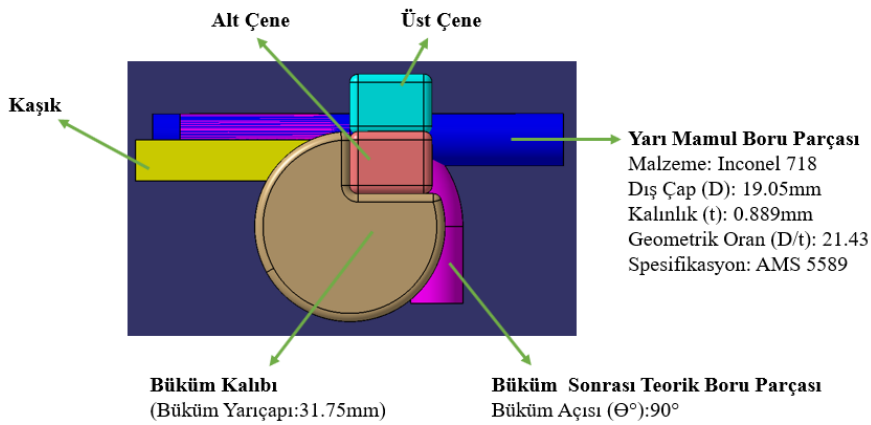
Resim 4.36. Simülasyon 6 model geometrisi



Resim 4.37. Simülasyon 7 model geometrisi



Resim 4.38. Simülasyon 8 model geometrisi



Resim 4.39. Simülasyon 9 model geometrisi

### 4.3.2. Malzeme tanımlamaları

Her bir döner-çekme yardımcı takımlarında büküm operasyonu sürecinde herhangi bir deformasyon söz konusu olmayacağından dolayı bu detaylar sayısal çözümleme yazılım ürün ağacında rijit cisim olarak tanımlanmıştır, dolayısıyla bu takımlara malzeme ataması yapılmasına gerek yoktur.

Boru parçalarına AMS 5589 spesifikasyonuna sahip inconel 718 malzemesi tanımlaması yapılmıştır. Çalışma kapsamında sayısal sonuçlar deneysel sonuçlar ile karşılaştırılacağından dolayı boru parçalarına yapılan malzeme tanımlamalarında gerçek gerilim ve gerçek gerinim değerleri kullanılmıştır.

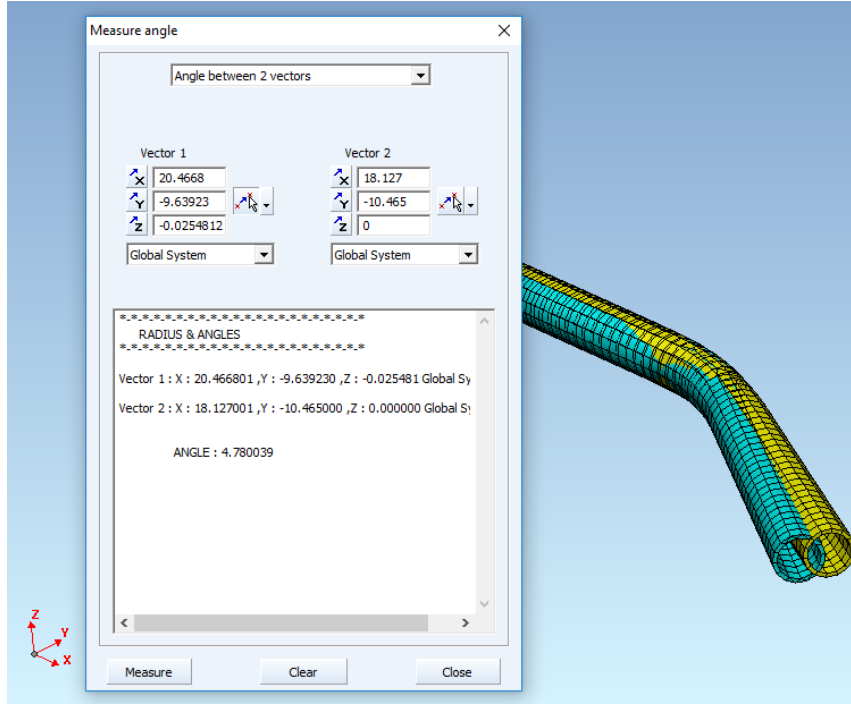
Çizelge 4.22. Malzeme tanımlamaları

	Boru Parçası	Büküm Kalıbı	Alt Çene	Üst Çene	Kaşık
Malzeme	AMS 5589 Inconel 718	Rijit Cisim	Rijit Cisim	Rijit Cisim	Rijit Cisim

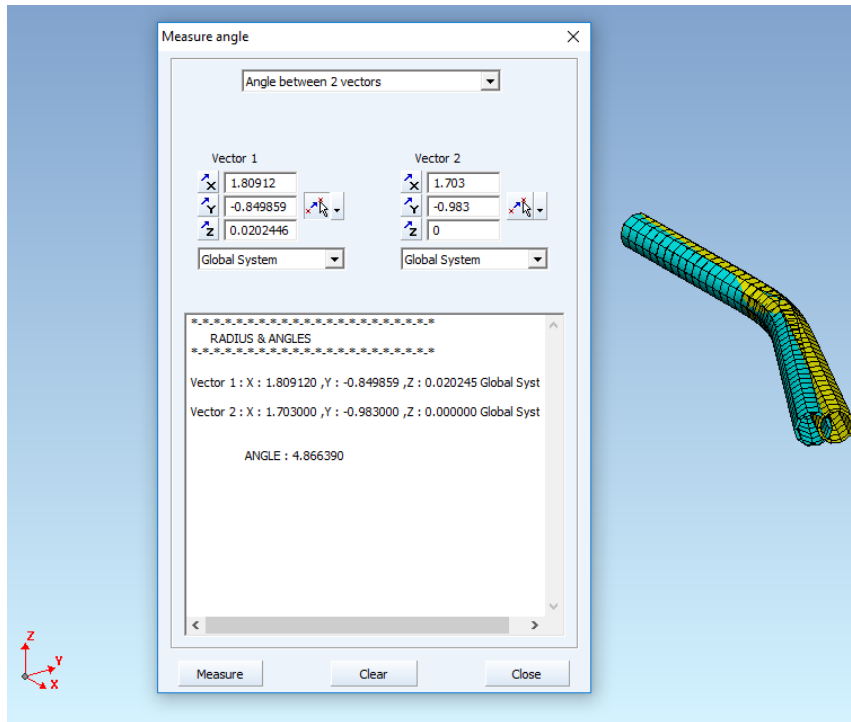
### 4.3.3. Ağ yapısı ve eleman tipi belirlenmesi

Sayısal çalışmalarda en doğru sonuçları elde edebilmek için eleman tipi ve ağ yapısının doğru belirlenmesi kritik önem teşkil etmektedir. Tüm simülasyonlarda yer alan modeller için ağ yapısı sayısal çözümleme yazılım aracı olan LS DYNA kullanılarak belirlenmiştir. Ağ yapısı, model boyutları ve çözümleme süresi dikkate alınarak belirlenmiştir, ayrıca büküm süreci esnasında malzeme birikmesinin beklenildiği yerler ile temas eden takım detaylarının yüzeylerine ve keskin kenarlara verimli çözümler elde edilebilmesi için eleman bölünmesi sağlanmıştır.

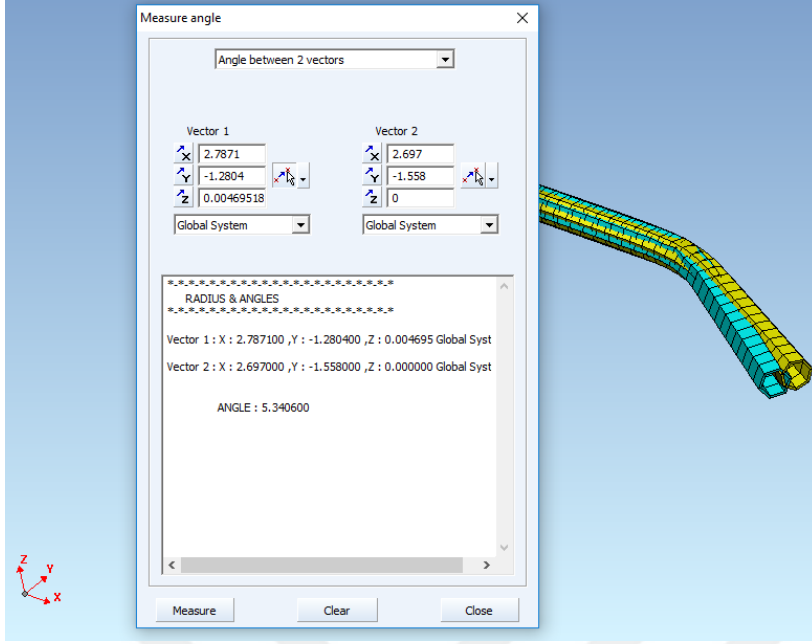
Doğru ağ yapısının belirlenebilmesi için bazı ön çalışmalar yapılarak eleman boyutu yakınsaması yapılmıştır. Sırasıyla 1,5x1,5 mm, 2x2 mm ve 3x3 mm eleman boyutu değerleri seçilerek açılal geri yaylanma sonuçları elde edilmiştir



Resim 4.40. Eleman boyutu 1,5 x 1,5 mm için açılal geri yaylanma değeri

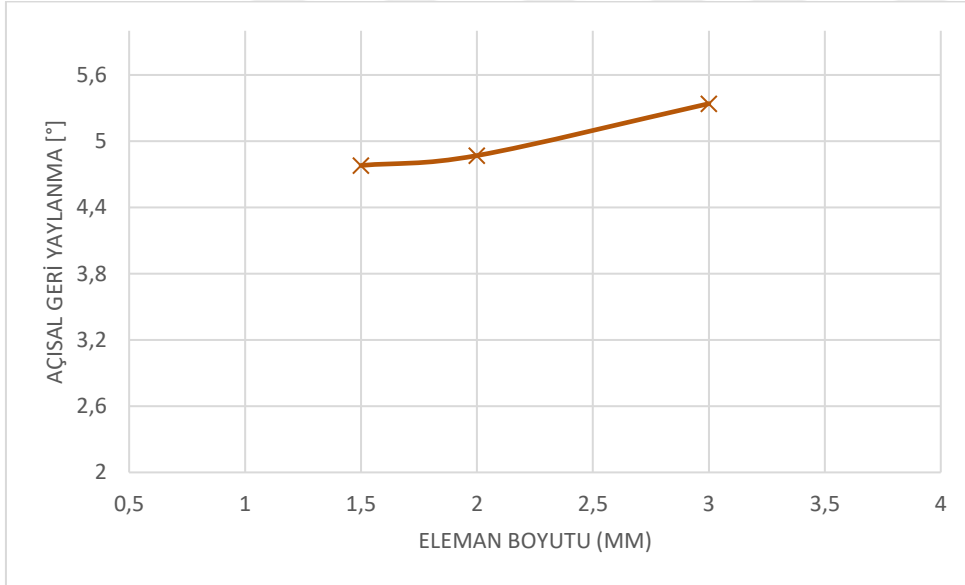


Resim 4.41. Eleman boyutu 2 x 2 mm için açılal geri yaylanma değeri



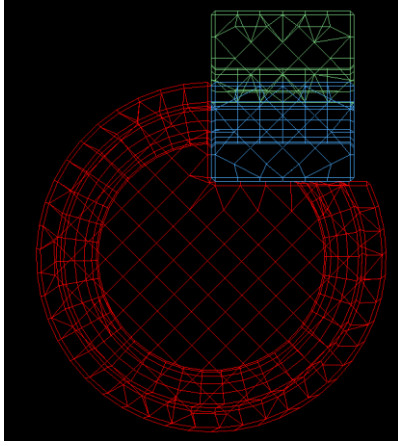
Resim 4.42. Eleman boyutu 3 x 3 mm için açısai geri yaylanma değeri

Şekil 4.3. Eleman boyutu yakınsaması



Şekil 4.3 incelendiğinde eleman boyutu 2 mm'den küçüldükçe açısai geri yaylanma değeri 4,8 dereceye yakınsadığı kolaylıkla görülebilir. Böylelikle sayısal analiz sonuçlarının eleman boyutundan bağımsız olabilmesi için tercih edilmesi gereken değeri 2 mm ya da bu değeri daha küçük olması gerekliliği sonucuna varılmıştır.

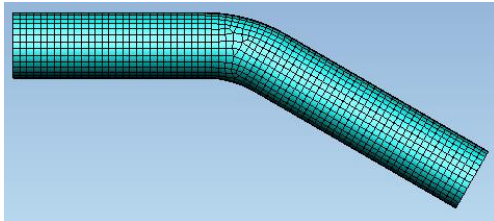
Her bir analiz çalışması için eleman tipleri ve boyutları sırasıyla aşağıda belirtilmiştir;



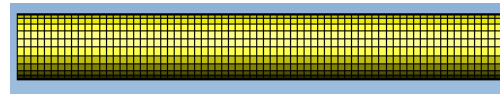
Resim 4.43. Simülasyon 1 takım ağ yapısı

Çizelge 4.23. Simülasyon 1 takım eleman tipi özellikleri

Eleman Tipi	Üçgen ve Dörtgen (Triangle & Quadrangle) Hibrit Yüzey Elemanı
Maksimum Eleman Boyutu	3 mm
Minimum Eleman Boyutu	0,5 mm
Açı	20°
Boşluk Toleransı	0,1 mm



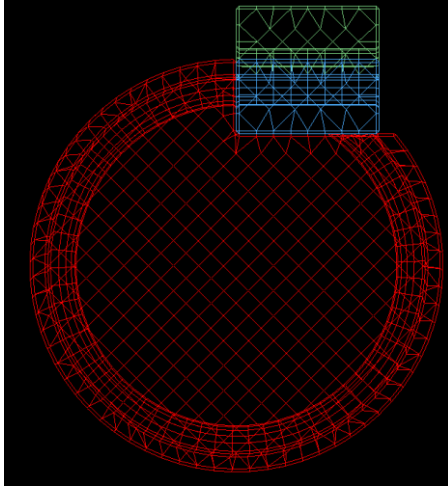
Resim 4.44. Simülasyon 1 büküm sonrası teorik boru parçası ağ yapısı



Resim 4.45. Simülasyon 1 boru parçası ağ yapısı

Çizelge 4.24. Simülasyon 1 boru parçası eleman tipi özellikleri

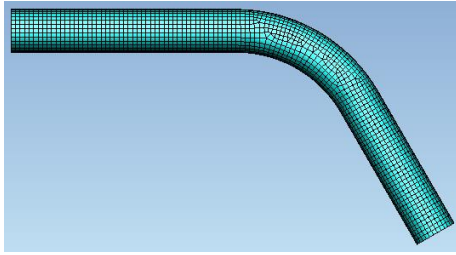
Eleman Tipi	3 Boyutlu Düzgün Altı Yüzlü (Hegzahedron)
Maksimum Eleman Boyutu	1 mm
Boşluk Toleransı	0,1 mm



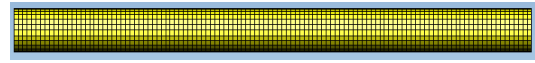
Resim 4.46. Simülasyon 2 takım ağ yapısı

Çizelge 4.25. Simülasyon 2 takım eleman tipi özellikleri

Eleman Tipi	Üçgen ve Dörtgen (Triangle & Quadrangle) Hibrit Yüzey Elemanı
Maksimum Eleman Boyutu	3 mm
Minimum Eleman Boyutu	0,5 mm
Açı	20°
Boşluk Toleransı	0,1 mm



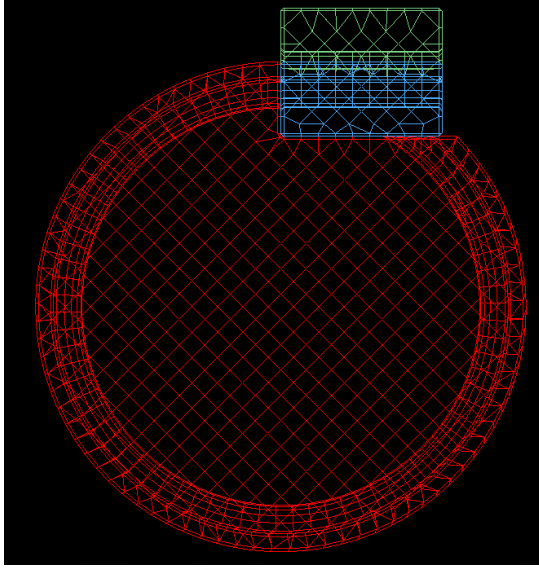
Resim 4.47. Simülasyon 2 büküm sonrası teorik boru parçası ağ yapısı



Resim 4.48. Simülasyon 2 boru parçası ağ yapısı

Çizelge 4.26. Simülasyon 2 boru parçası eleman tipi özellikleri

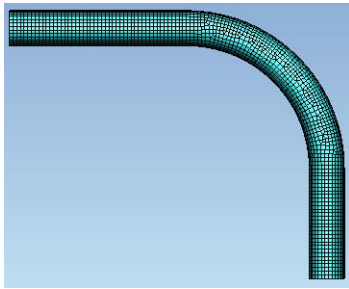
Eleman Tipi	3 Boyutlu Düzgün Altı Yüzlü (Hegzahedron)
Maksimum Eleman Boyutu	1 mm
Boşluk Toleransı	0,1 mm



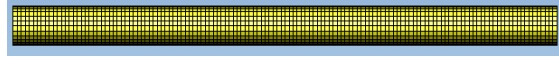
Resim 4.49. Simülasyon 3 takım ağ yapısı

Çizelge 4.27. Simülasyon 3 takım eleman tipi özellikleri

Eleman Tipi	Üçgen ve Dörtgen (Triangle & Quadrangle) Hibrit Yüzey Elemanı
Maksimum Eleman Boyutu	3 mm
Minimum Eleman Boyutu	0,5 mm
Açı	20°
Boşluk Toleransı	0,1 mm



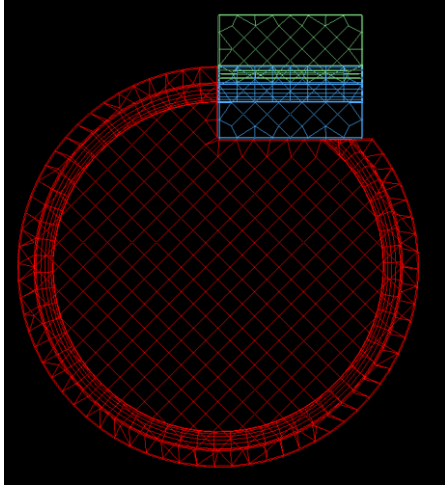
Resim 4.50. Simülasyon 3 büküm sonrası teorik boru parçası ağ yapısı



Resim 4.51. Simülasyon 3 boru parçası ağ yapısı

Çizelge 4.28. Simülasyon 3 boru parçası eleman tipi özellikleri

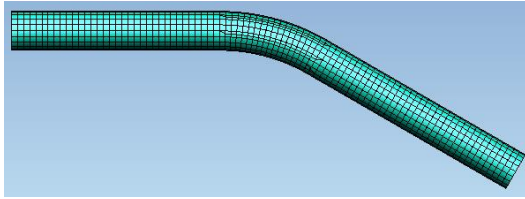
Eleman Tipi	3 Boyutlu Düzgün Altı Yüzlü (Hegzahedron)
Maksimum Eleman Boyutu	1 mm
Boşluk Toleransı	0,1 mm



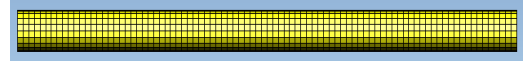
Resim 4.52. Simülasyon 4 takım ağ yapısı

Çizelge 4.29. Simülasyon 4 takım eleman tipi özellikleri

Eleman Tipi	Üçgen ve Dörtgen (Triangle & Quadrangle) Hibrit Yüzey Elemanı
Maksimum Eleman Boyutu	3 mm
Minimum Eleman Boyutu	0,5 mm
Açı	20°
Boşluk Toleransı	0,1 mm



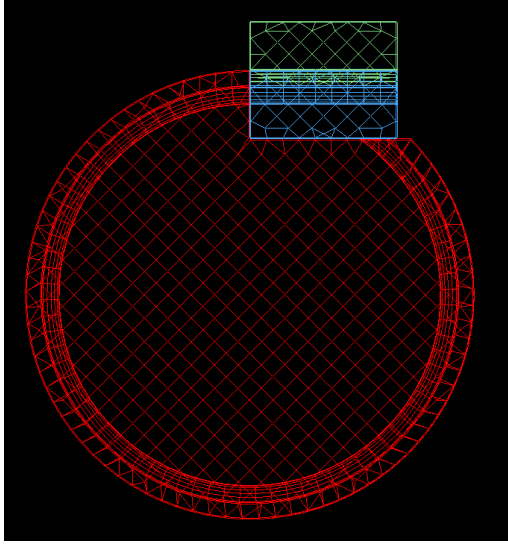
Resim 4.53. Simülasyon 4 büküm sonrası teorik boru parçası ağ yapısı



Resim 4.54. Simülasyon 4 boru parçası ağ yapısı

Çizelge 4.30. Simülasyon 4 boru parçası eleman tipi özellikleri

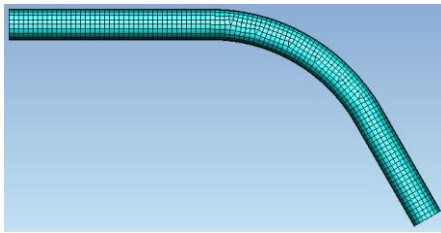
Eleman Tipi	3 Boyutlu Düzgün Altı Yüzlü (Hegzahedron)
Maksimum Eleman Boyutu	1 mm
Boşluk Toleransı	0,1 mm



Resim 4.55. Simülasyon 5 takım ağ yapısı

Çizelge 4.31. Simülasyon 5 takım eleman tipi özellikleri

Eleman Tipi	Üçgen ve Dörtgen (Triangle & Quadrangle) Hibrit Yüzey Elemanı
Maksimum Eleman Boyutu	3 mm
Minimum Eleman Boyutu	0,5 mm
Açı	20°
Boşluk Toleransı	0,1 mm



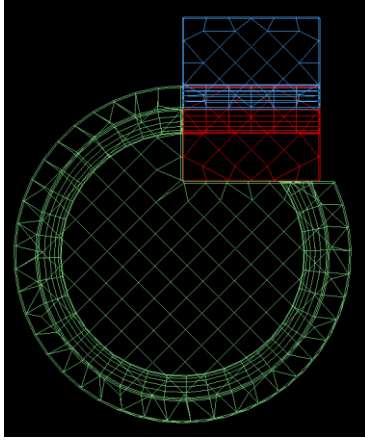
Resim 4.56. Simülasyon 5 büküm sonrası teorik boru parçası ağ yapısı



Resim 4.57. Simülasyon 5 boru parçası ağ yapısı

Çizelge 4.32. Simülasyon 5 boru parçası eleman tipi özellikleri

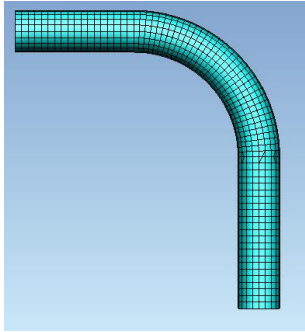
Eleman Tipi	3 Boyutlu Düzgün Altı Yüzlü (Hegzahedron)
Maksimum Eleman Boyutu	1 mm
Boşluk Toleransı	0,1 mm



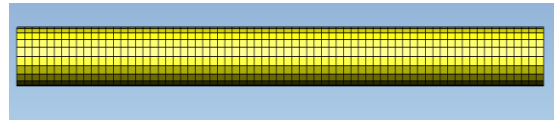
Resim 4.58. Simülasyon 6 takım ağ yapısı

Çizelge 4.33. Simülasyon 6 takım eleman tipi özellikleri

Eleman Tipi	Üçgen ve Dörtgen (Triangle & Quadrangle) Hibrit Yüzey Elemanı
Maksimum Eleman Boyutu	3 mm
Minimum Eleman Boyutu	0,5 mm
Açı	20°
Boşluk Toleransı	0,1 mm



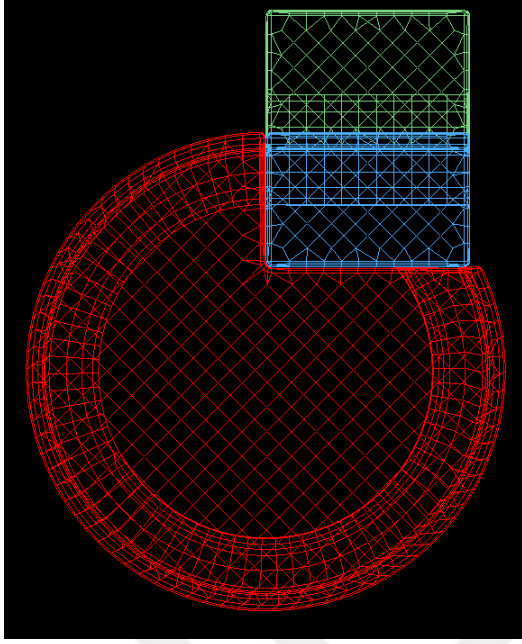
Resim 4.59. Simülasyon 6 büküm sonrası teorik boru parçası ağ yapısı



Resim 4.60. Simülasyon 6 boru parçası ağ yapısı

Çizelge 4.34. Simülasyon 6 boru parçası eleman tipi özellikleri

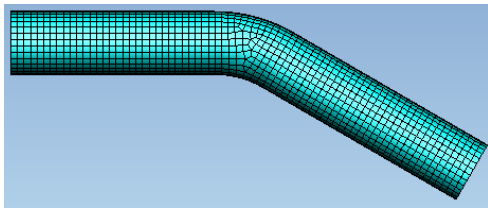
Eleman Tipi	3 Boyutlu Düzgün Altı Yüzlü (Hegzahedron)
Maksimum Eleman Boyutu	1 mm
Boşluk Toleransı	0,1 mm



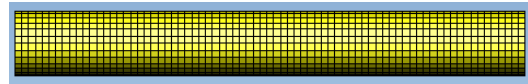
Resim 4.61 Simülasyon 7 takım ağ yapısı

Çizelge 4.35. Simülasyon 7 takım eleman tipi özellikleri

Eleman Tipi	Üçgen ve Dörtgen (Triangle & Quadrangle) Hibrit Yüzey Elemanı
Maksimum Eleman Boyutu	3 mm
Minimum Eleman Boyutu	0,5 mm
Açı	20°
Boşluk Toleransı	0,1 mm



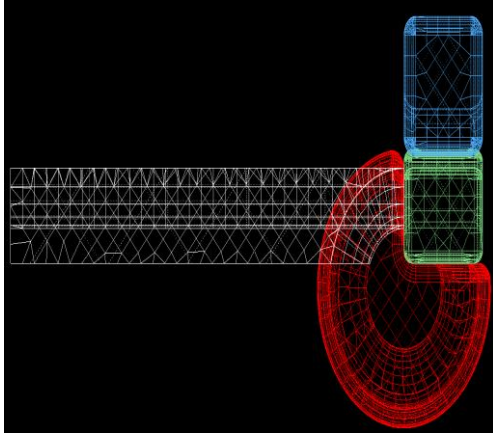
Resim 4.62. Simülasyon 7 büküm sonrası teorik boru parçası ağ yapısı



Resim 4.63. Simülasyon 7 boru parçası ağ yapısı

Çizelge 4.36. Simülasyon 7 boru parçası eleman tipi özellikleri

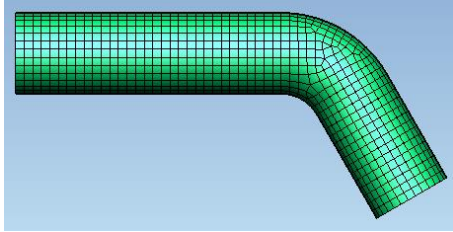
Eleman Tipi	3 Boyutlu Düzgün Altı Yüzlü (Hegzahedron)
Maksimum Eleman Boyutu	2 mm
Boşluk Toleransı	0,1 mm



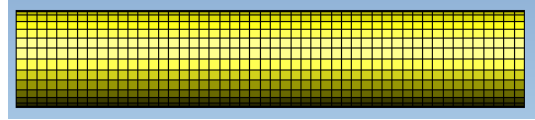
Resim 4.64. Simülasyon 8 takım ağ yapısı

Çizelge 4.37. Simülasyon 8 takım eleman tipi özellikleri

Eleman Tipi	Üçgen ve Dörtgen (Triangle & Quadrangle) Hibrit Yüzey Elemanı
Maksimum Eleman Boyutu	3 mm
Minimum Eleman Boyutu	0,5 mm
Açı	20°
Boşluk Toleransı	0,1 mm



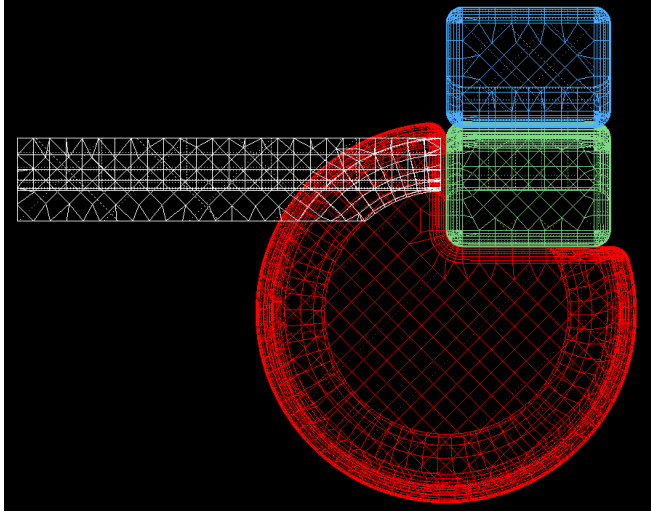
Resim 4.65. Simülasyon 8 büküm sonrası teorik boru parçası ağ yapısı



Resim 4.66. Simülasyon 8 boru parçası ağ yapısı

Çizelge 4.38. Simülasyon 8 boru parçası eleman tipi özellikleri

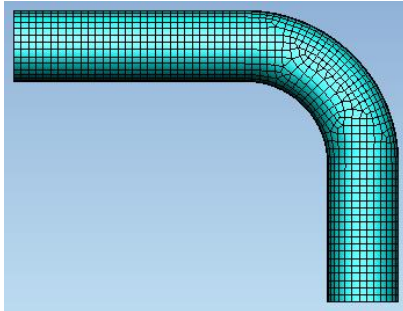
Eleman Tipi	3 Boyutlu Düzgün Altı Yüzlü (Hegzahedron)
Maksimum Eleman Boyutu	2 mm
Boşluk Toleransı	0,1 mm



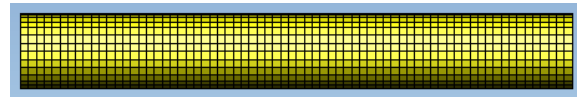
Resim 4.67. Simülasyon 9 takım ağ yapısı

Çizelge 4.39. Simülasyon 9 takım eleman tipi özellikleri

Eleman Tipi	Üçgen ve Dörtgen (Triangle & Quadrangle) Hibrit Yüzey Elemanı
Maksimum Eleman Boyutu	3 mm
Minimum Eleman Boyutu	0,5 mm
Açı	20°
Boşluk Toleransı	0,1 mm



Resim 4.68. Simülasyon 9 büküm sonrası teorik boru parçası ağ yapısı



Resim 4.69. Simülasyon 9 boru parçası ağ yapısı

Çizelge 4.40. Simülasyon 9 boru parçası eleman tipi özellikleri

Eleman Tipi	3 Boyutlu Düzgün Altı Yüzlü (Hegzahedron)
Maksimum Eleman Boyutu	2 mm
Boşluk Toleransı	0,1 mm

#### 4.3.4. Temas yüzeyleri ve sürtünme katsayıları

Sac metal şekillendirme sürecine benzer olarak boru şekillendirme sürecinde de takım detayları ve iş parçasının birbiri ile olan ilişkileri temas yüzeyleri ve buna bağlı olarak sürtünme katsayıları ile belirlenir.

Çizelge 4.41. Temas yüzeyleri ve sürtünme katsayı değerleri

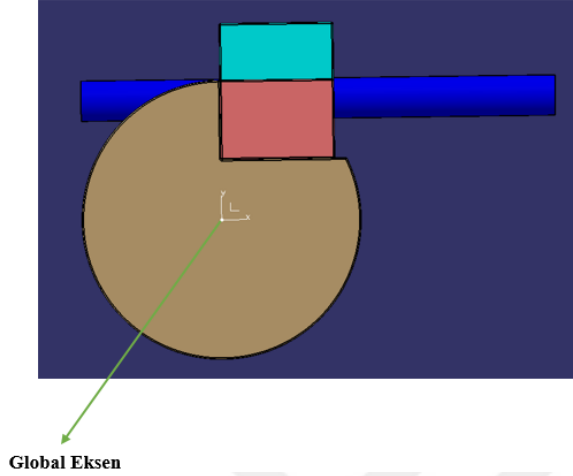
	Boru Parçası- Büküm Kalıbı Temas Yüzeyi Katsayısı	Boru Parçası- Üste Çene Temas Yüzeyi Katsayısı	Boru Parçası- Alt Çene Temas Yüzeyi Katsayısı	Boru Parçası- Kaşık Temas Yüzeyi Katsayısı
Simülasyon 1	1	1	1	-
Simülasyon 2	0,1	0,1	0,1	-
Simülasyon 3	0,1	0,1	0,1	-
Simülasyon 4	0,1	0,1	0,1	-
Simülasyon 5	0,1	0,1	0,1	-
Simülasyon 6	0,1	0,1	0,1	-
Simülasyon 7	0,25	0,25	0,25	-
Simülasyon 8	0,25	0,25	0,25	0,05
Simülasyon 9	0,25	0,45	0,25	0,05

Sürtünme katsayılarının belirlenmesi sayısal analiz yazılımlarında önemli bir yer tutmaktadır. Katsayıların fazla verilmesi şekillendirme esnasında boru parçasının yırtılmasına sebebiyet verirken az verilmesi ise boru parçasının temas etmesi gereken yüzeylerden ayrılmasına ya da kırışmasına sebebiyet verebilir.

PAM STAMP yazılımını geliştiren ESI Group firmasının oluşturmuş olduğu boru büküm dokümanı dikkate alınarak temas yüzeyleri sürtünme katsayı değerleri belirlenmiştir (Çizelge 4.41) [45].

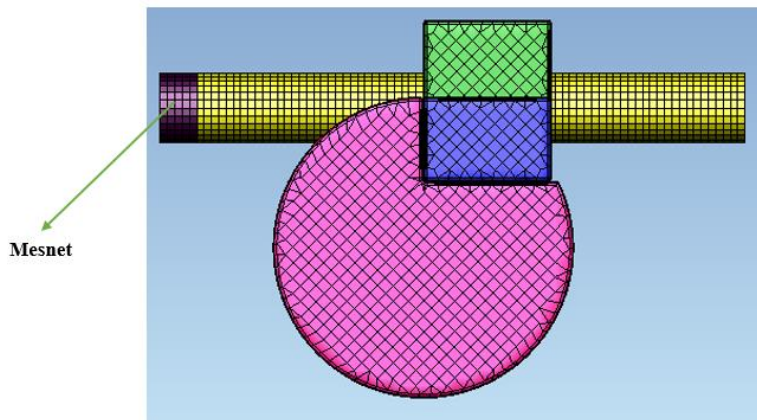
### 4.3.5. Sınır şartları ve yüklemeler

CATIA yazılımında modelleri oluşturulan boru parçası, büküm kalıbı, alt çene ve üst çene detaylarının eksenleri PAM-STAMP merkez eksenine taşınır (Bkz. Resim 4.70).



Resim 4.70. Sayısal çözümleme global eksenini

Resim 4.70’de belirtilen eksen simülasyonlarda yer alacak olan tüm takım ve boru parçalarının açısal kinematik eksenidir. Tüm takım detaylarına sadece z ekseninde dönme serbestliği verilerek diğer 5 hareket özgürlüğü kilitlenmiştir. Sayısal çözümleme sürecinin temelini boru parçasının kalıplar üzerindeki hareketi oluşturduğu için boru parçasının kinematik hareketliliği serbest bırakılmıştır, sadece boru parçasının başlangıç noktalarındaki eleman yüzeylerine mesnet tanımlaması yapılarak parçanın kalıplar üzerine sıvanması amaçlanmıştır (Bkz. Resim 4.71).



Resim 4.71. Sayısal çözümleme mesnet kullanımı

Döner – çekme boru büküm tezgâhlarının yardımcı ekipmanlarından olan mandrel takımları büküm esnasında boru parçasında meydana gelebilecek olan iç çökmeyi engellemek için kullanılır, kaşık takımları ise büküm esnasında boru iç yüzeyinde malzeme birikmesinden dolayı ortaya çıkan kırışmayı engellemek için kullanılır. Ancak boru çapı, boru et kalınlığı, büküm yarıçapı ve büküm açısı gibi parametrelere göre bu detayların büküm süreci için gerekli olup olmadığına karar verilir, ek olarak küçük büküm yarıçapına sahip süreçlerde madrel ve kaşık kullanımı hem maliyete hem de boru parçasının dış yüzeyinde incelmeye sebebiyet verebilir [46].

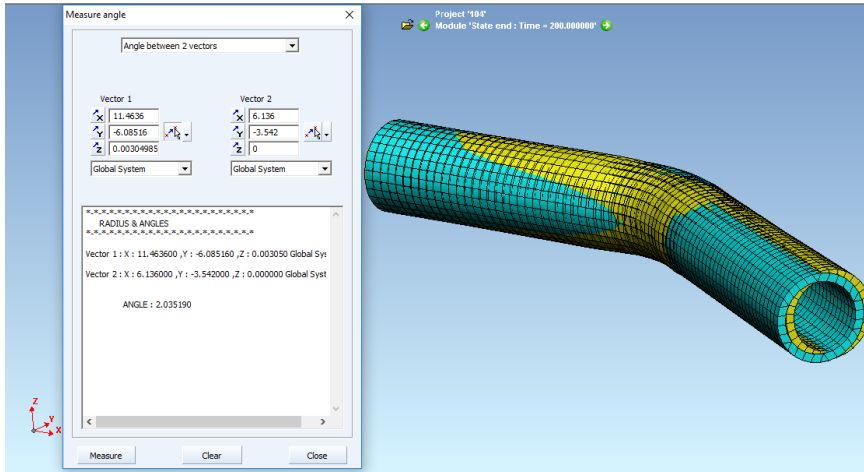
Çalışma kapsamındaki analizlerde simülasyon 1,7,8,9'da iç çökme meydana gelme ihtimali ön görüldüğü için mandrel modellerinin analize eklenmesi gerekliliği ortaya çıkmıştır, Ancak, simülasyon sürecine madrel gibi karmaşık geometriye sahip detayın eklenmesi oldukça güçtür, bu nedenle bu detayın simülasyon görevini üstlenebilmesi adına aksi yönde çekme kuvveti oluşturan mesnet ve boru parçalarının iç yüzeylerine destek olması amacı ile basınç yüklemesi analizlere eklenmiştir [46].

Çizelge 4.42. Sınır şartları ve yüklemeler

	Açısal Hız (rad/s)	Toplam Büküm Zamanı (s)	Kartezyen Kinematik-Takım Serbestlik Derecesi	Kartezyen Kinematik-Boru Serbestlik Derecesi	İç Basınç (MPa)
Simülasyon 1	150	0,003491	0	6	10
Simülasyon 2	150	0,006981	0	6	-
Simülasyon 3	150	0,010472	0	6	-
Simülasyon 4	150	0,003491	0	6	-
Simülasyon 5	150	0,006981	0	6	-
Simülasyon 6	150	0,010472	0	6	-
Simülasyon 7	150	0,003491	0	6	20
Simülasyon 8	150	0,006981	0	6	20
Simülasyon 9	150	0,010472	0	6	30

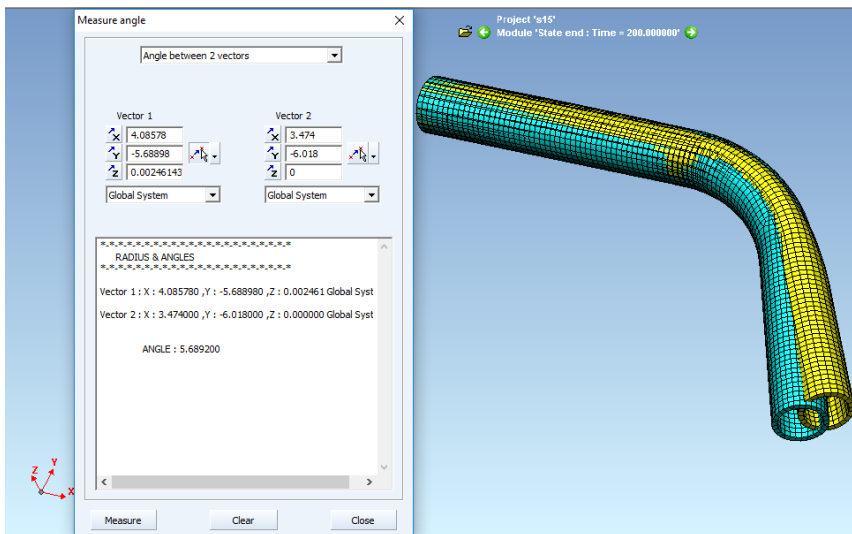
### 4.3.6. Analiz sonuçları

Dış çapı 9,525 mm ve kalınlığı 0,889 mm olan AMS 5589 spesifikasyonuna sahip inconel 718 malzemesinden üretilmiş yarı mamul boru parçasına 19,05 mm büküm yarıçapı ve 30° büküm açısı verebilmek için yapılan SEM çalışmasında ortaya çıkan geri yaylanma değeri resim 4.72’de belirtilmiştir.



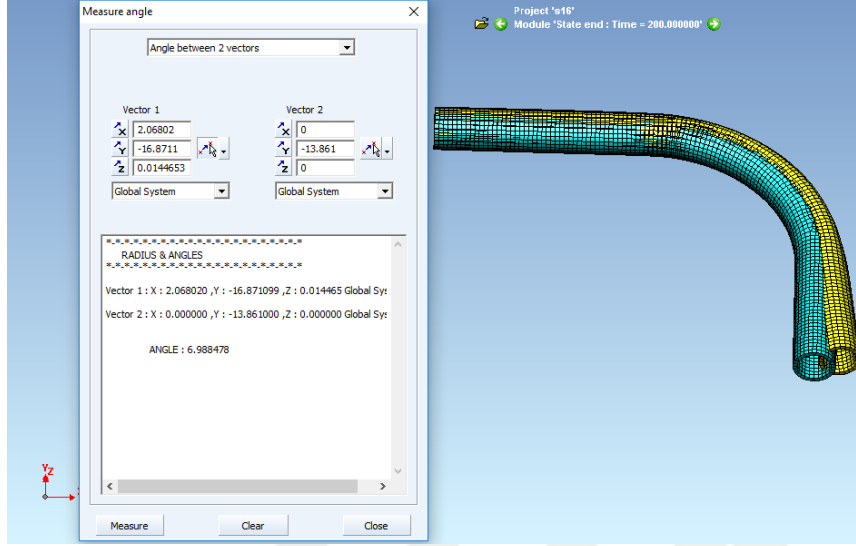
Resim 4.72. Simülasyon 1 açısıl geri yaylanma değeri

Dış çapı 9,525 mm ve kalınlığı 0,889 mm olan AMS 5589 spesifikasyonuna sahip inconel 718 malzemesinden üretilmiş yarı mamul boru parçasına 31,8 mm büküm yarıçapı ve 60° büküm açısı verebilmek için yapılan SEM çalışmasında ortaya çıkan geri yaylanma değeri resim 4.73’te belirtilmiştir.



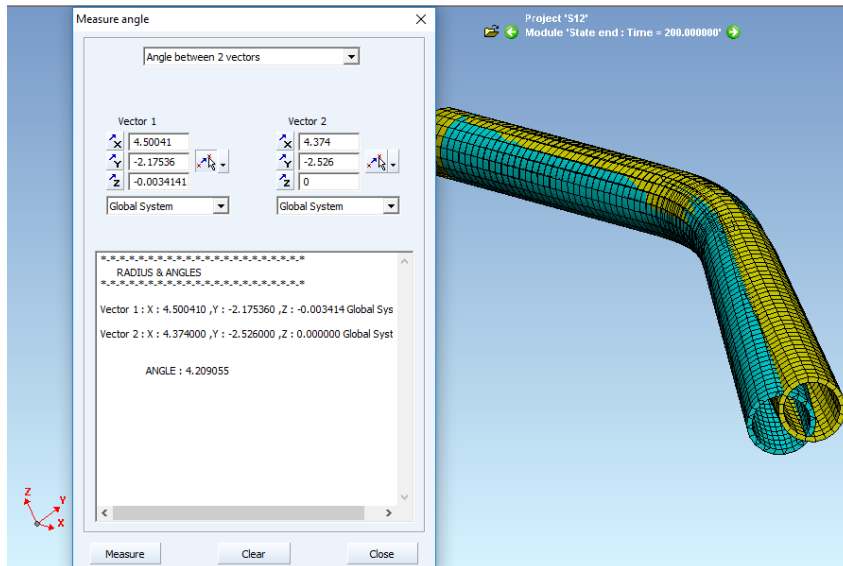
Resim 4.73. Simülasyon 2 açısıl geri yaylanma değeri

Dış çapı 9,525 mm ve kalınlığı 0,889 mm olan AMS 5589 spesifikasyonuna sahip inconel 718 malzemesinden üretilmiş yarı mamul boru parçasına 38,1 mm büküm yarıçapı ve  $90^\circ$  büküm açısı verebilmek için yapılan SEM çalışmasında ortaya çıkan geri yaylanma değeri resim 4.74'te belirtilmiştir.



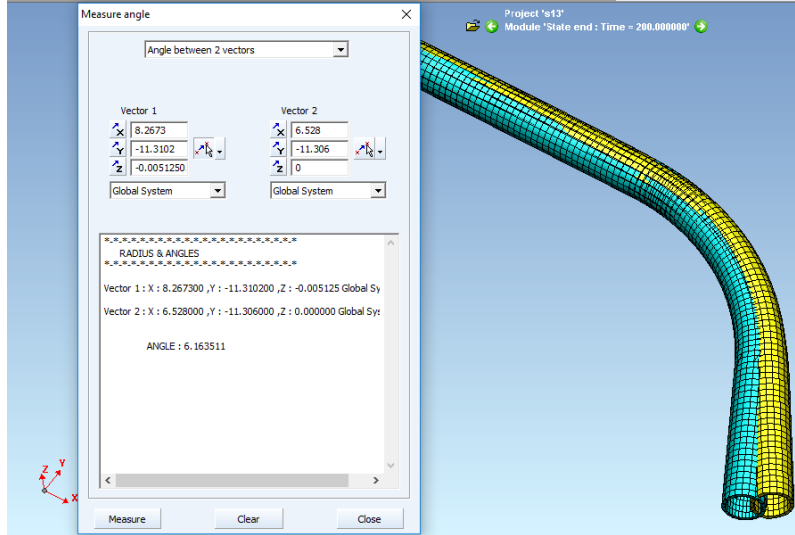
Resim 4.74. Simülasyon 3 açısız geri yaylanma değeri

Dış çapı 6,35 mm ve kalınlığı 0,508 mm olan AMS 5589 spesifikasyonuna sahip inconel 718 malzemesinden üretilmiş yarı mamul boru parçasına 31,8 mm büküm yarıçapı ve  $30^\circ$  büküm açısı verebilmek için yapılan SEM çalışmasında ortaya çıkan geri yaylanma değeri resim 4.75'te belirtilmiştir.



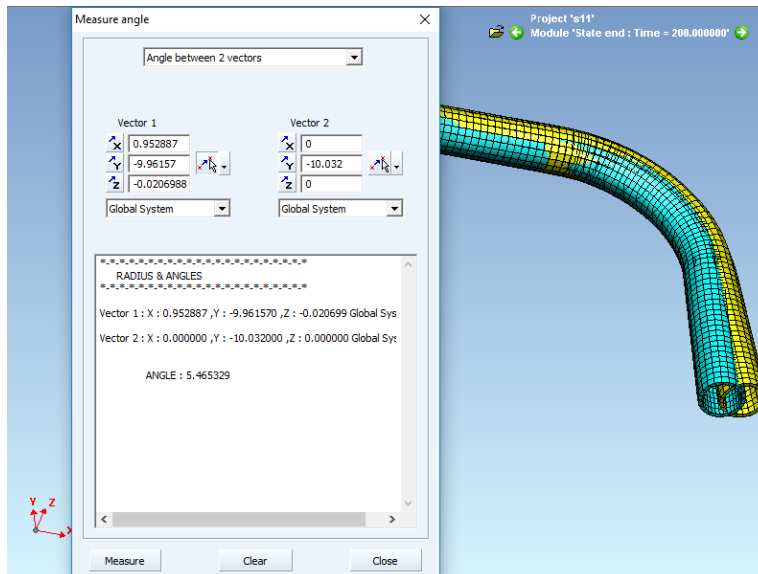
Resim 4.75. Simülasyon 4 açısız geri yaylanma değeri

Dış çapı 6,35 mm ve kalınlığı 0,508 mm olan AMS 5589 spesifikasyonuna sahip inconel 718 malzemesinden üretilmiş yarı mamul boru parçasına 38,1 mm büküm yarıçapı ve 60° büküm açısı verebilmek için yapılan SEM çalışmasında ortaya çıkan geri yaylanma değeri resim 4.76'da belirtilmiştir.



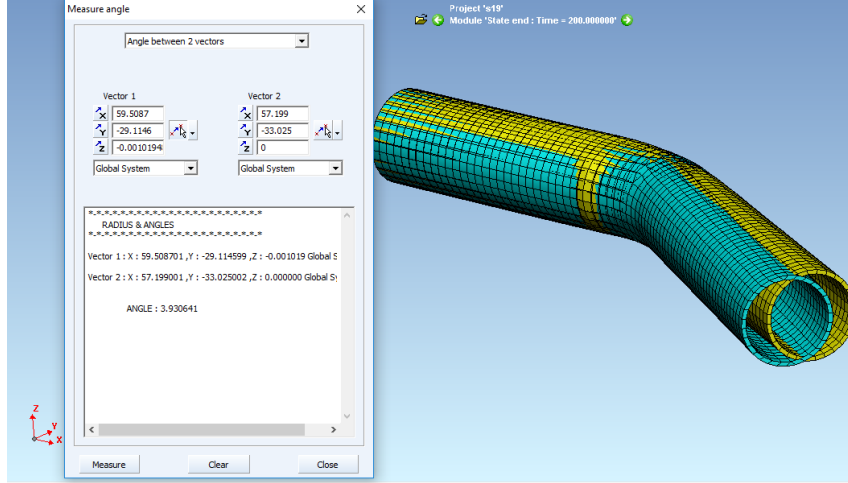
Resim 4.76. Simülasyon 5 açisal geri yaylanma değeri

Dış çapı 6,35 mm ve kalınlığı 0,508 mm olan AMS 5589 spesifikasyonuna sahip inconel 718 malzemesinden üretilmiş yarı mamul boru parçasına 19,05 mm büküm yarıçapı ve 90° büküm açısı verebilmek için yapılan SEM çalışmasında ortaya çıkan geri yaylanma değeri resim 4.77'de belirtilmiştir.



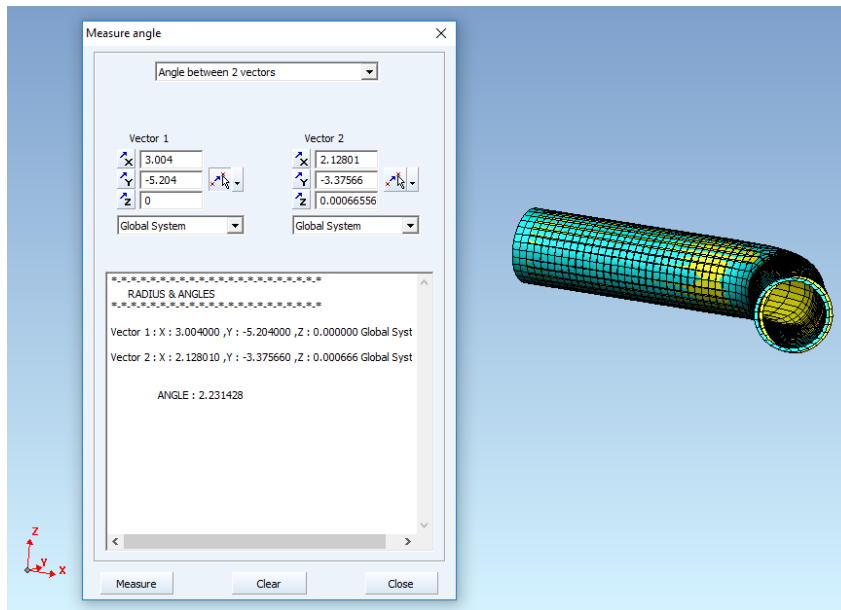
Resim 4.77. Simülasyon 6 açisal geri yaylanma değeri

Dış çapı 19,05 mm ve kalınlığı 0,889 mm olan AMS 5589 spesifikasyonuna sahip inconel 718 malzemesinden üretilmiş yarı mamul boru parçasına 38,1 mm büküm yarıçapı ve 30° büküm açısı verebilmek için yapılan SEM çalışmasında ortaya çıkan geri yaylanma değeri resim 4.78'te belirtilmiştir.



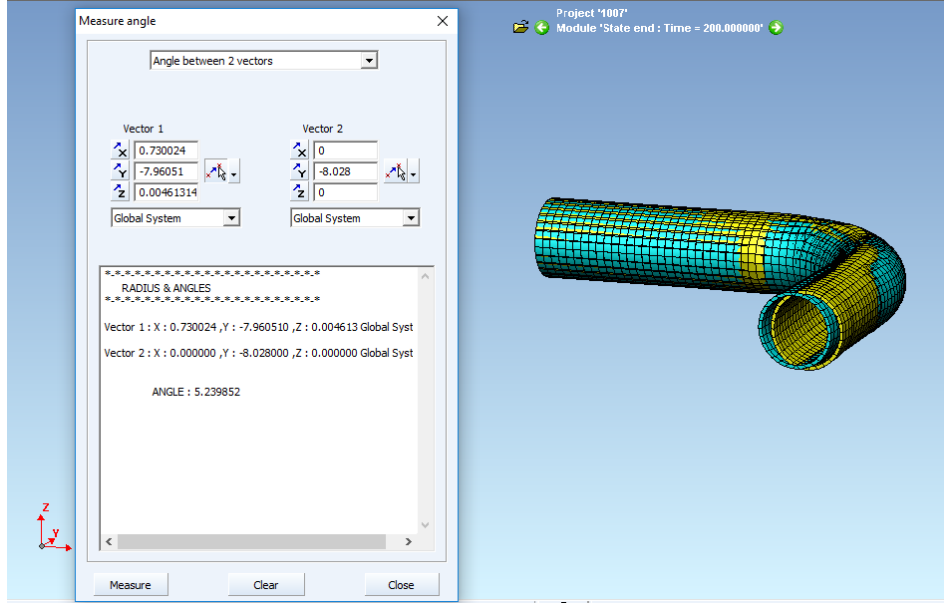
Resim 4.78. Simülasyon 7 açısız geri yaylanma değeri

Dış çapı 19,05 mm ve kalınlığı 0,889 mm olan AMS 5589 spesifikasyonuna sahip inconel 718 malzemesinden üretilmiş yarı mamul boru parçasına 19,05 mm büküm yarıçapı ve 60° büküm açısı verebilmek için yapılan SEM çalışmasında ortaya çıkan geri yaylanma değeri resim 4.79'da belirtilmiştir.



Resim 4.79. Simülasyon 8 açısız geri yaylanma değeri

Dış çapı 19,05 mm ve kalınlığı 0,889 mm olan AMS 5589 spesifikasyonuna sahip inconel 718 malzemesinden üretilmiş yarı mamul boru parçasına 31,8 mm büküm yarıçapı ve 90° büküm açısı verebilmek için yapılan SEM çalışmasında ortaya çıkan geri yaylanma değeri resim 4.80'de belirtilmiştir.



Resim 4.80. Simülasyon 9 açısız geri yaylanma değeri

Çizelge 4.43. Sayısal geri yaylanma analizi sonuçları

Malzeme	Simülasyon No	Geometrik Oran (D/t)	Büküm Açısı ( $\theta^\circ$ )	Büküm Yarıçapı (R mm)	Açısız Geri Yaylanma ( $\Delta\theta^\circ$ )
Inconel 718 AMS 5589	1	10,71	30	19	2,04
	2	10,71	60	31,8	5,69
	3	10,71	90	38,1	6,99
	4	12,5	30	31,8	4,21
	5	12,5	60	38,1	6,16
	6	12,5	90	19	5,47
	7	21,43	30	38,1	3,93
	8	21,43	60	19	2,23
	9	21,43	90	31,8	5,24

### Taguchi sayısal analiz

Sayısal çalışmalar da kullanılan tüm parametre ve değerleri deneysel çalışmalar ile karşılaştırılabilmesi için L9 ortogonal dizine göre gerçekleştirilmiştir. Ful faktöriyel sayısal çalışmaların sağlanabilmesi için 3 parametre ve bu parametrelerin 3'er değerlerinin olduğunu düşünüldüğünde 27 sayısal çalışma gerekecektir. L9 için toplam 9 sayısal çözümleme sağlandığı için geriye 18 sayısal çalışma yapılması gereklidir. Ancak analiz süresi ve verimliliği değerlendirildiğinde geri kalan 18 çalışma için Taguchi yönteminin ortaya sunduğu değerler araştırılacaktır.

Elde edilmiş olan sayısal sonuçlar MINITAB yazılımı Taguchi modülüne girdi verisi olarak alınmıştır. Girdi verilerinin sağlanması ile Taguchi açısal geri yaylanma değerleri elde edilmiştir.

Çizelge 4.44. Sayısal ve Taguchi yöntemi açısal geri yaylanma değerleri

Simülasyon No	Geometrik Oran (D/t)	Büküm Açısı ( $\theta^\circ$ )	Büküm Yarıçapı (R mm)	Açısal Geri Yaylanma ( $^\circ$ )	Taguchi Açısal Geri Yaylanma ( $\Delta\theta^\circ$ )
1	10,71	30	19	2,04	2,22
2	10,71	60	31,8	5,69	5,32
3	10,71	90	38,1	6,99	7,18
4	12,5	30	31,8	4,21	4,40
5	12,5	60	38,1	6,16	6,34
6	12,5	90	19	5,47	5,10
7	21,43	30	38,1	3,93	3,56
8	21,43	60	19	2,23	2,42
9	21,43	90	31,8	5,24	5,42

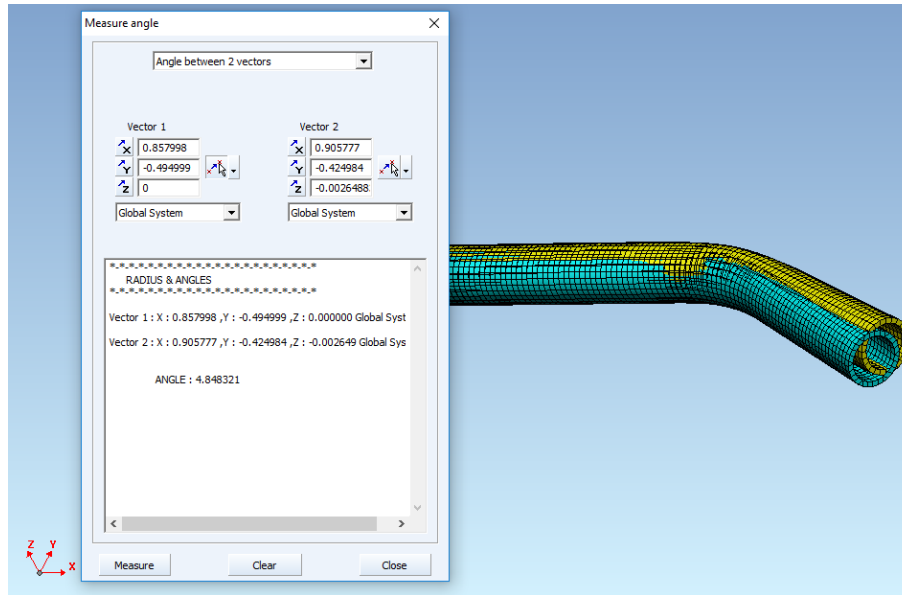
### Taguchi doğrulama sayısal çalışması

MINITAB yazılımı ile elde edilen Taguchi açısal geri yaylanma değerlerinin tutarlılığının tespit edilebilmesi adına L9 simülasyonun yer almayan bir dizin belirlenmiş olup doğrulama sayısal çalışması sağlanmıştır.

Doğrulama çalışması öncesi Taguchi açısız geri yaylanma değeri çizelge 4.45'te belirtilmiştir.

Çizelge 4.45. Taguchi doğrulama sayısal çalışma değeri ve Taguchi geri yaylanma sonucu

Geometrik Oran (D/t)	Büküm Açısı ( $\theta^\circ$ )	Büküm Yarıçapı (R mm)	Taguchi Geri Yaylanma ( $\Delta\theta^\circ$ )
10,71	30	38,1	4,67



Resim 4.81. Taguchi doğrulama sayısal analiz sonucu

Çizelge 4.46. Taguchi doğrulama sayısal çalışma sonucu karşılaştırması

Taguchi Açısız Geri Yaylanma ( $^\circ$ )	Açısız Geri Yaylanma Sayısal Sonuç ( $^\circ$ )
4,67	4,85

Çizelge 4.46 incelendiğinde doğrulama sayısal çalışmasında elde edilen sonucun Taguchi yönteminin öne sürdüğü sonuca oldukça yakın olduğu görülebilir. Böylelikle tez çalışması kapsamında simülasyon yöntemlerinden biri olarak tercih edilen Taguchi yöntemi sayesinde full faktöriyel sayısal analiz çalışması yapılmadan MINITAB yazılımı kullanılarak açısız geri yaylanma değeri önceden tespit edilebilmiştir.

Ful faktöriyel çalışma düşünüldüğünde doğruluğu teyit edilmiş Taguchi yönteminin öne sürdüğü açısız geri yaylanma değerleri çizelge 4.47’de belirtilmiştir.

Çizelge 4.47. Ful faktöriyel Taguchi açısız geri yaylanma sonuçları

Geometrik Oran (D/t)	Büküm Açısı ( $\theta^\circ$ )	Büküm Yarıçapı (R mm)	Açısız Geri Yaylanma Sayısal Sonuç ( $\Delta\theta^\circ$ )
10,71	30	19,05	2,22
10,71	30	31,8	4,02
10,71	30	38,1	4,67
10,71	60	19,05	3,52
10,71	60	31,8	5,32
10,71	60	38,1	5,97
10,71	90	19,05	4,73
10,71	90	31,8	6,53
10,71	90	38,1	7,18
12,5	30	19,05	2,6
12,5	30	31,8	4,4
12,5	30	38,1	5,04
12,5	60	19,05	3,9
12,5	60	31,8	5,7
12,5	60	38,1	6,34
12,5	90	19,05	5,1
12,5	90	31,8	6,9
12,5	90	38,1	7,55
21,43	30	19,05	1,12
21,43	30	31,8	2,92
21,43	30	38,1	3,56
21,43	60	19,05	2,42
21,43	60	31,8	4,22
21,43	60	38,1	4,86
21,43	90	19,05	3,62
21,43	90	31,8	5,42
21,43	90	38,1	6,07

#### 4.4. Deneysel, Analitik ve Sayısal Çalışma Sonuçlarının Karşılaştırılması

Tez çalışması kapsamında yer alan deneysel, analitik ve sayısal çalışmalar ile elde edilen açısal geri yaylanma sonuçları çizelge 4.48’de belirtilmiştir.

Çizelge 4.48. Deneysel, analitik ve sayısal çalışmalar ile elde edilen açısal geri yaylanma sonuçları

Geometrik Oran (D/t)	Büküm Açısı ( $\theta^\circ$ )	Büküm Yarıçapı (R mm)	Açısal Geri Yaylanma Deneysel Sonuç ( $\Delta\theta^\circ$ )	Açısal Geri Yaylanma Analitik Sonuç ( $\Delta\theta^\circ$ )	Açısal Geri Yaylanma Sayısal Sonuç ( $\Delta\theta^\circ$ )
10,71	30	19,05	2,1	1,05	2,22
10,71	30	31,8	3,3	1,65	4,02
10,71	30	38,1	3,4	1,94	4,67
10,71	60	19,05	3,4	2,1	3,52
10,71	60	31,8	4,6	3,31	5,32
10,71	60	38,1	4,8	3,89	5,97
10,71	90	19,05	4,2	3,15	4,73
10,71	90	31,8	5,4	4,96	6,53
10,71	90	38,1	5,5	5,83	7,18
12,5	30	19,05	2,9	1,5	2,6
12,5	30	31,8	4,1	2,37	4,4
12,5	30	38,1	4,3	2,79	5,04
12,5	60	19,05	4,3	3	3,9
12,5	60	31,8	5,5	4,75	5,7
12,5	60	38,1	5,7	5,57	6,34
12,5	90	19,05	5,0	4,51	5,1
12,5	90	31,8	6,2	7,12	6,9
12,5	90	38,1	6,4	8,36	7,55
21,43	30	19,05	1,4	0,57	1,12
21,43	30	31,8	2,6	0,89	2,92
21,43	30	38,1	2,7	1,05	3,56
21,43	60	19,05	2,7	1,13	2,42
21,43	60	31,8	3,9	1,79	4,22
21,43	60	38,1	4,1	2,1	4,86
21,43	90	19,05	3,5	1,7	3,62
21,43	90	31,8	4,7	2,68	5,42
21,43	90	38,1	4,8	3,14	6,07

Deneysel, analitik ve sayısal çalışma sonuçlarının yer aldığı çizelge 4 .48 incelendiğinde, deneysel çalışma sonuçlarına en yakın sonuçların sırasıyla sayısal ve analitik yöntemlerle elde edildiği söylenebilir. Sayısal analiz sonuçlarının deney sonuçları ile örtüşmesi, analiz yapısının doğru belirlendiğini ortaya çıkardığı gibi inconel 718 malzemesine sahip bir boru parçası için deney yapılmadan açısal geri yaylanma değerlerinin önceden tespit edilebileceğini göstermiştir, böylelikle zaman, is gücü ve maliyet gibi üretim süreçlerinde kritik önem arz eden kavramlardan ortaya çıkabilecek olumsuzlukların önüne geçilebilecektir.

Analitik yöntem ise yine deneysel ya da sayısal çalışmalar yapılmadan açısal geri yaylanma değerlerinin önceden tahmin edilebileceğini ortaya koymuştur. Çizelge 4.48 incelendiğinde deneysel ve analitik yöntemler ile elde edilen değerlerin birbirleri ile genel olarak tutarlı olduğu gözlemlenmiştir. Bölüm 4.2’de belirtilen analitik geri yaylanma denklemi dikkate alındığında malzeme özellikleri ve geometrik sınırlamaların açısal geri yaylanma üzerindeki etkisinin önemli olduğu görülmektedir, ancak açısal geri yaylanmayı etkileyen tezgâh takımlarının birbiri ile ve boru parçası ile olan ilişkileri gibi dış faktörlerin dikkate alınmaması, düzlemsel gerinim esas alınarak büküm sürecinin her noktada eşit olduğunun kabul edilmesi, büküm aşamasında meydana gelen kesit daralmasının dikkate alınmaması gibi hususların elde edilen sonuçlardaki kısmi farkların temelini oluşturduğu değerlendirilebilir.

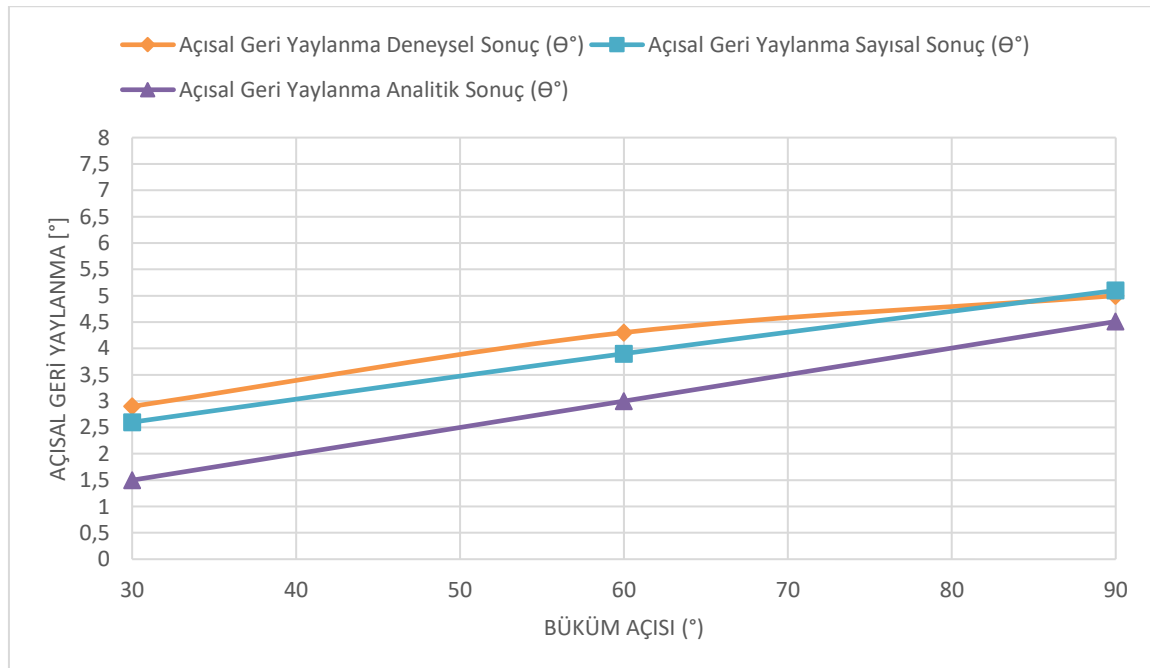
#### 4.4.1. Büküm açısının geri yaylanma üzerindeki etkisi

Tez çalışması kapsamında yer alan deneysel, analitik ve sayısal çalışmalar dikkate alındığında boru büküm süreci için büküm açısı arttıkça açısız geri yaylanmanın arttığı gözlemlenmiştir (Bkz. Çizelge 4.49 ve Şekil 4.4). Büküm açısının açısız geri yaylanma üzerindeki bu etkisi, büküm açısı ile beraber deformasyona uğrayan alanın artmasından kaynaklanmaktadır [18].

Tez kapsamındaki ful faktöriyel çalışma sayısının 27 adet olması, büküm açısının açısız geri yaylanma üzerindeki etkisinin 27 farklı grafikte ortaya çıkarılabileceğini göstermektedir, ancak bu grafiklerin davranışları benzer olduğu için tamamına tez içeriğinde yer verilmesine gerek görülmemiştir.

Çizelge 4.49. Büküm açısının açısız geri yaylanma üzerindeki etkisi

Geometrik Oran (D/t)	Büküm Açısı ( $\theta^\circ$ )	Büküm Yarıçapı (R mm)	Açısız Geri Yaylanma Deneysel Sonuç ( $\Delta\theta^\circ$ )	Açısız Geri Yaylanma Sayısal Sonuç ( $\Delta\theta^\circ$ )	Açısız Geri Yaylanma Analitik Sonuç ( $\Delta\theta^\circ$ )
12,5	30	19,05	2,9	2,6	1,5
12,5	60	19,05	4,3	3,9	3
12,5	90	19,05	5	5,1	4,51



Şekil 4.4. Büküm açısının açısız geri yaylanma üzerindeki etkisi

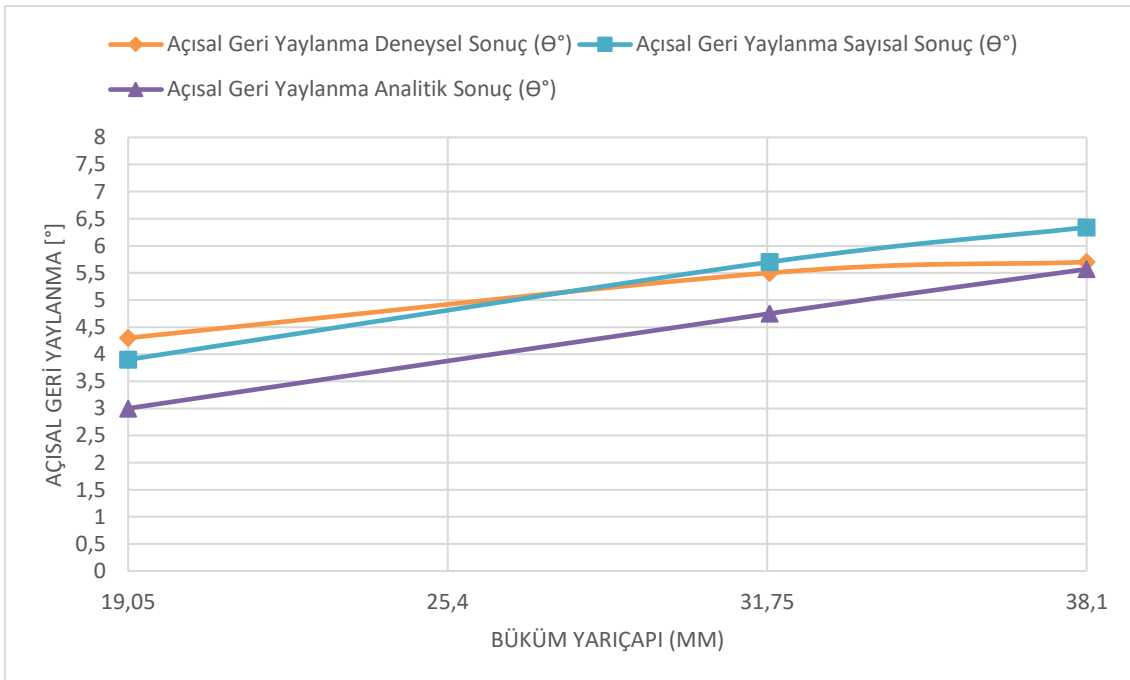
#### 4.4.2. Büküm yarıçapının geri yaylanma üzerindeki etkisi

Büküm yarıçapının küçülmesi plastik deformasyonun artmasına sebep vermektedir, bu durum da daha küçük elastik gerinim enerjisinin depolanmasına neden olacağı için açısız geri yaylanmada azalma gözlemlenir [2]. Bu bağlamda; tez kapsamında yer alan deneysel, analitik ve sayısal çalışmalar dikkate alındığında boru büküm süreci için büküm yarıçapı arttıkça açısız geri yaylanmanın arttığı gözlemlenmiştir (Bkz. Çizelge 4.50 ve Şekil 4.5).

Tez kapsamındaki ful faktöriyel çalışma sayısının 27 adet olması, büküm yarıçapının açısız geri yaylanma üzerindeki etkisinin 27 farklı grafikte ortaya çıkarılabileceğini göstermektedir, ancak bu grafiklerin davranışları benzer olduğu için tamamına tez içeriğinde yer verilmesine gerek görülmemiştir.

Çizelge 4.50. Büküm yarıçapının açısız geri yaylanma üzerindeki etkisi

Geometrik Oran (D/t)	Büküm Açısı ( $\theta^\circ$ )	Büküm Yarıçapı (R mm)	Açısız Geri Yaylanma Deneysel Sonuç ( $\Delta\theta^\circ$ )	Açısız Geri Yaylanma Sayısal Sonuç ( $\Delta\theta^\circ$ )	Açısız Geri Yaylanma Analitik Sonuç ( $\Delta\theta^\circ$ )
12,5	60	19,05	4,3	3,9	3
12,5	60	31,8	5,5	5,7	4,75
12,5	60	38,1	5,7	6,34	5,57



Şekil 4.5. Büküm yarıçapının açısız geri yaylanma üzerindeki etkisi

#### 4.4.3. Geometrik oranın geri yaylanma üzerindeki etkisi

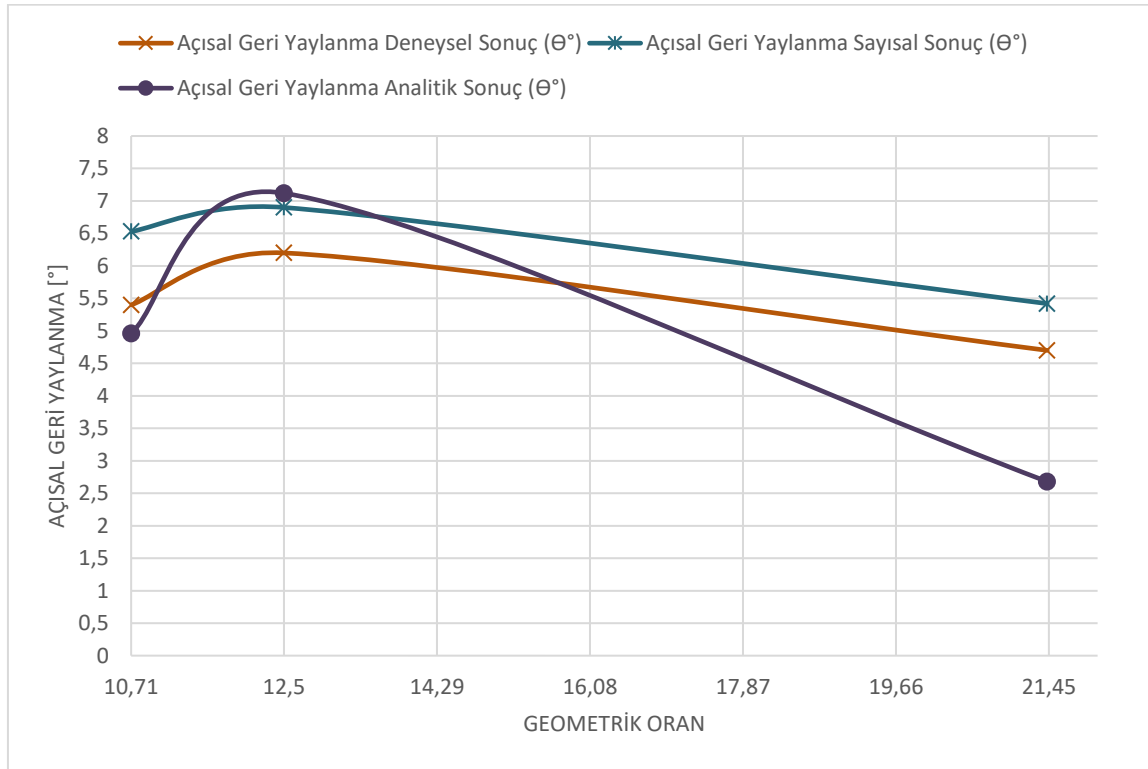
Tez çalışması kapsamında yer alan deneysel, analitik ve sayısal çalışmalar dikkate alındığında boru büküm süreci için geometrik oranın, açısız geri yaylanmayı doğrudan etkilediği sonucuna varılmıştır.

Geometrik oran açısız geri yaylanmayı açıklayacak bir indeks olarak literatürde sıklıkla kullanılmaktadır. Ancak boru et kalınlığının ve boru çapının birlikte değiştirilmesi ile elde edilen geometrik oran değerine göre geri yaylanmanın belirgin bir şekilde değerlendirilemeyeceğinden, et kalınlığının ya da çapın sabit tutularak elde edilecek olan geometrik orana göre açısız geri yaylanma davranışının incelenmesi daha açıklayıcı çıkarımların elde edilmesini sağlar [47].

Şekil 4.6 ve çizelge 4.51 incelendiğinde aynı kalınlığa sahip boru parçalarında boru çapı arttıkça açısız geri yaylanmanın azaldığı sonucuna varılırken, kalınlık değişimine nazaran boru çapının açısız geri yaylanmayı daha çok değiştirdiği sonucuna da varılabilir. Tez kapsamındaki full faktöriyel çalışma sayısının 27 adet olması, geometrik oranın açısız geri yaylanma üzerindeki etkisinin 27 farklı grafikte ortaya çıkarılabileceğini göstermektedir, ancak bu grafiklerin davranışları benzer olduğu için tamamına tez içeriğinde yer verilmesine gerek görülmemiştir.

Çizelge 4.51. Geometrik oranın açısai geri yaylanma üzerindeki etkisi

Geometrik Oran (D/t)	Büküm Açısı ( $\theta^\circ$ )	Büküm Yarıçapı (R mm)	Açısai Geri Yaylanma Deneysel Sonuç ( $\Delta\theta^\circ$ )	Açısai Geri Yaylanma Sayısal Sonuç ( $\Delta\theta^\circ$ )	Açısai Geri Yaylanma Analitik Sonuç ( $\Delta\theta^\circ$ )
10,71	90	31,8	5,4	6,53	4,96
12,5	90	31,8	6,2	6,9	7,12
21,43	90	31,8	4,7	5,42	2,68



Şekil 4.6. Geometrik oranın açısai geri yaylanma üzerindeki etkisi

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 5.1. Sonuçlar

AMS 5589 spesifikasyonuna sahip inconel 718 boru malzemesinin büküm işlemi ardından ortaya çıkan açısız geri yaylanma davranışları deneysel, sayısal ve analitik çalışmalar ile incelenmiştir.

- Literatürde daha önce inconel 718 malzemesine sahip AMS 5589 spesifikasyonlu boru parçalarının geri yaylanma davranışlarının araştırılması ile ilgili herhangi bir deneysel çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu bağlamda tez kapsamında elde edilen sonuçların değerini daha da artmakta olup çalışma sonuçlarının bilime önemli derecede bir katkı yapacağı değerlendirilmektedir.
- Çalışmada inconel 718 malzemesinden mamul boru parçaları için boru dış çapının boru kalınlığına bölünmesi ile elde edilen geometrik oran, büküm açısı ve büküm yarıçapı parametrelerinin açısız geri yaylanma değerleri üzerine etkileri incelenmiş ve bu parametrelerin açısız geri yaylanma değerlerini doğrudan etkilediği gözlemlenmiştir.
- Deneysel, sayısal ve analitik çalışmalar büküm açısı arttıkça açısız geri yaylanmanın arttığını göstermiştir.
- Deneysel, sayısal ve analitik çalışmalar büküm yarıçapı arttıkça açısız geri yaylanmanın arttığını göstermiştir.
- Deneysel, sayısal ve analitik çalışmalar, açısız geri yaylanmanın geometrik orana göre değiştiğini ancak geri yaylanma üzerinde hangi eğilime sebep olduğu ile ilgili net ifadelerin ortaya çıkamayacağını gösterirken, aynı kalınlığa sahip boru parçaların çap değerleri arttıkça açısız geri yaylanmanın azaldığını göstermiştir.
- Tahmini Taguchi sonuçlarının doğruluğunu teyit edebilmek amacıyla yapılan deney çalışmasında elde edilen değer ile tahmini değer birbirini oldukça tutarlı olduğu tespit edilmiştir. Böylelikle full faktöriyel deney gerçekleştirmek gibi oldukça maliyet gerektiren süreçlerin önüne geçilerek ileriye dönük geri yaylanma sonuçlarının elde edilebilmesi de mümkün kılınmıştır.

- Tahmini Taguchi sonuçlarının doğruluğunu teyit edebilmek amacıyla yapılan sayısal analiz çalışmasında elde edilen değer ile tahmini değer birbirini oldukça tutarlı olduğu tespit edilmiştir. Böylelikle ful faktöriyel sayısal analiz çalışmalarını gerçekleştirmek gibi oldukça fazla zaman gerektiren süreçlerin önüne geçilerek, açılal geri yaylanma değerleri önceden sayısal olarak tespit edilebilmiştir.
- Deneysel çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar dikkate alınarak, inconel 718 malzemesinden mamul boru parçalarının büküm süreci için açılal geri yaylanma regresyon denklemi elde edilmiştir. Bu bağlamda, endüstriyel uygulamalarda geri yaylanma sonucunda belirli bir değerde kalıcı büküm açısının elde edilmesi için boruya başlangıçta ne kadar fazladan bir büküm açısı verilmesi gerektiği kolaylıkla belirlenebilir.
- Analitik ve deneysel çalışma geri yaylanma sonuçlarındaki farklılıkların, analitik çözümde yer alan ve dış faktörler olarak tabir edilebilen takım boru parçası temas ilişkileri ile düzlemsel gerinim ve kesit daralması kabullerinden kaynaklandığı anlaşılmaktadır.
- Tez çalışmasında yer alan Anova analizleri geri yaylanmayı en çok etkileyen parametrelerin sırasıyla büküm açısı, geometrik oran ve büküm yarıçapı olduğunu göstermiştir.

## 5.2. Öneriler

- Taguchi formülasyonunun da doğruluğunun ortaya konulduğu bu çalışmada Taguchi deney tasarımlarının önemi de ortaya çıkmıştır. Böylelikle diğer alaşımlı metal boruları için ileride bu kapsamda çalışmanın yapılması durumunda Taguchi deney tasarımına göre süreç yürütülebilir.
- Hem sayısal hem deneysel çalışmalarda tespit edilen önemli bir diğer durum ise dönerçekme yardımcı takımlarından olan kaşık kullanımı ile ilgilidir. Tez kapsamında yer alan 8 ve 9 no'lu deneysel ve sayısal çalışmalar için malzeme birikmesinden dolayı boru büküm sürecinde kırışma gözlemlenmiştir. Belirtilen bu çalışmalara ise kaşık takımı eklendiğinde bu sorun ortadan kalkmıştır. Buradan elde edilen çıkarım ise; büküm yarıçapının yaklaşık olarak boru dış çapının 2 katından daha az olduğu durumlarda, malzeme birikmesinden dolayı ortaya çıkan kırışmanın önüne geçilebilmesi için kaşık takımı kullanılması gerekliliğidir.
- Inconel 718 malzemesi ile benzer mekanik özelliklere sahip olan ve havacılık endüstrisinde oldukça fazla kullanılan inconel 625 malzemesi için de deneysel ve sayısal geri yaylanma çalışmaları yapıp, bu çalışmada elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılabilir ve yakınlığı araştırılabilir.
- Tez çalışması kapsamında oluşturulan sayısal analizlerdeki yöntem dikkate alınarak, diğer alaşımlı metal boruların gerekli malzeme mekanik özellikleri kullanılmak suretiyle geri yaylanma davranışları için sayısal çalışmalar yapılabilir.
- Çalışma kapsamında inconel 718 malzemesine sahip boru parçaları için elde edilen açısız geri yaylanma değerleri ile literatürde daha çok yer alan alüminyum, çelik ve titanyum alaşımlı metal boru parçalarının benzer şartlar altındaki açısız geri yaylanma değerleri karşılaştırılarak malzemelerin açısız geri yaylanma üzerindeki etkisi araştırılabilir.



## KAYNAKLAR

1. Erçağ, G. (2017). *4. Endüstri devrimi için yol haritası belirlenmesinde farklı ülke örneklerinin incelenmesi ve Türkiye için model önerisi*. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
2. Li, H., Yang, H., Song, F. F., Zhan, M. ve Li, G. J. (2012). Springback characterization and behaviors of high-strength Ti-3Al-2.5 V tube in cold rotary draw bending. *Journal of Materials Processing Technology*, 212(9), 1973-1987.
3. Sözen, L. (2011). *Boru bükme operasyonu sonucunda meydana gelen geri yaylanma miktarının öngörülmesi*. Yüksek Lisans Tezi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi-Fen Bilimleri Enstitüsü-Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara.
4. Miller, G. (2003). *Tube forming processes: A comprehensive guide*, Society of Manufacturing Engineers. Michigan, 72-150.
5. Grantab, R. (2006). *Interaction between forming and crashworthiness of advanced high strength steel s-rails*, MSc Thesis, University of Waterloo, Ontario.
6. Dere, F. (2013). *Experimental and Finite Element Analysis of Rotary Draw Tube Bending Process*. MSc Thesis, Master of Science in Mechanical Engineering Department, Middle East Technical University, Ankara.
7. Zhang, Y., Redekop, D. (2006). Shell element simulation of the push method of tube bending. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 17(1-2), 301-304.
8. Hagenah, H., Vipavc, D., Plettke, R. ve Merklein, M. (2010, September). *Numerical model of tube freeform bending by three-roll-push-bending*. In 2nd International Conference on Engineering Optimization, 1-10.
9. Ahmetoglu, M., Altan, T. (2000). Tube hydroforming: state-of-the-art and future trends. *Journal of Materials Processing Technology*, 98(1), 25-33.
10. İnternet: *Unison Ltd: All-Electric CNC Tube and Pipe Bending Machines*. URL: [https://www.unisonltd.com/knowledge\\_base/principles-of-rotary-draw-bending](https://www.unisonltd.com/knowledge_base/principles-of-rotary-draw-bending). Son Erişim Tarihi: 11 25, 2023
11. Li, H., Yang, H., Zhan, M. ve Gu, R. (2006). A new method to accurately obtain wrinkling limit diagram in NC bending process of thin-walled tube with large diameter under different loading paths. *Journal of Materials Processing Technology*, 92-196.
12. Liu, N., Yang, H., Li, H. ve Yan, S. (2016). Plastic wrinkling prediction in thin-walled part forming process: A review. *Chinese Journal of Aeronautics*, 29(1), 1-14.
13. Zhan, M., Gu, C., Jiang, Z., Hu, L. ve Yang, H. (2009). Application of ductile fracture criteria in spin-forming and tube-bending processes. *Computational Materials Science*, 47(2), 353-365.

14. Mentella, A., Strano, M. (2011, October). Rotary Draw Bending of Small Diameter Copper Tubes: Predicting the Quality of the Cross-section. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 274.
15. Hatipoğlu, H.A. (2007). *Experimental and Numerical Investigation of Sheet Metal Hydroforming (Flexforming) process*. MSc Thesis, O.D.T.Ü Institute of Natural and Applied Sciences, Ankara, 37-41.
16. Jeong, H. S., Ha, M. Y. ve Cho, J. R. (2012). Theoretical and FE analysis for inconel 625 fine tube bending to predict springback. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 13, 2143-2148.
17. Jiang, Z. Q., Yang, H., Zhan, M., Xu, X. D. ve Li, G. J. (2010). Coupling effects of material properties and the bending angle on the springback angle of a titanium alloy tube during numerically controlled bending. *Materials & Design*, 31(4), 2001-2010.
18. Da-Xin, E., He, H. H., Liu, X. Y. ve Ning, R. X. (2009). Spring-back deformation in tube bending. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 16(2), 177-183.
19. Lu, S., Fang, J., Wang, K. (2016). Plastic deformation analysis and forming quality prediction of tube NC bending. *Chinese Journal of Aeronautics*, 29(5), 1436-1444.
20. Ma, J., Ha, T., Blindheim, J., Welo, T., Ringen, G. ve Li, H. (2020). Exploring the influence of pre/post-aging on Springback in Al-Mg-Si alloy tube bending. *Procedia Manufacturing*, 47, 774-780.
21. Kuo, C. M., Yang, Y. T., Bor, H. Y., Wei, C. N. ve Tai, C. C. (2009). Aging effects on the microstructure and creep behavior of Inconel 718 superalloy. *Materials Science and Engineering: A*, 510, 289-294.
22. Thomas, A., El-Wahabi, M., Cabrera, J. M. ve Prado, J. M. (2006). High temperature deformation of Inconel 718. *Journal of materials processing technology*, 177(1-3), 469-472.
23. Wang, C., Li, R. (2004). Effect of double aging treatment on structure in Inconel 718 alloy. *Journal of Materials Science*, 39(7), 2593-2595.
24. İnanır, Z. (2012). *Yüksek Çalışma Sıcaklıklarının Inconel 718 Alaşımının Yapısal ve Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
25. İnternet: *Special Metals*. URL: <https://www.specialmetals.com/documents/technical-bulletins/inconel/inconel-alloy-718>. Son Erişim Tarihi: 10.03.2022.
26. Klopp, W. D. (1995). Nickel Base Alloys: IN-718. *Aerospace Structural Metals Handbook, USA*.
27. Davis, J. R. (1997). Heat-resistant materials. *ASM Specialty Handbook*, 361-382.
28. Battelle Memorial Institute. (2022). *Metallic Materials Properties Development and Stevardization (MMPDS) Handbook*. Ohio. 58-101.

29. Aydoğan, C. S. (2015). *Ti Alaşımlarının Diyaframla Hidrolik Şekillendirilmesinde Geri Esneme Miktarlarının Sayısal ve Deneysel İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara.
30. Ergun, C. (2012). İTÜ Malzeme Bilimi Metallerin Mekanik Özellikleri. *İTÜ Malzeme Bilimi Metallerin Mekanik Özellikleri, MAL201 Ders Notları*. İstanbul.
31. Akca, E., Gürsel, A. (2015). A review on superalloys and IN718 nickel-based INCONEL superalloy. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, 3(1).
32. İnternet: *Ulbrich*. URL: <https://www.ulbrich.com/blog/inconel-718-vs-inconel-625-battle-of-the-titans>. Son Erişim Tarihi: 26.11.2023.
33. Durmaz, S. (2008). *Taguchi metodunun kauçuğun vulkanizasyonu prosesine uygulanması*. Doktora Tezi. Sakarya Üniversitesi.
34. Yalçındağ, Y. (2021). *Gıda İşletmelerinde Taguchi Yöntemi ile Süreç İyileştirme ve Bir Uygulama*. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Pamukkale Üniversitesi, Denizli.
35. Topçu, R. M. (2018). *Uygulamalı bir laboratuvar çalışması üzerinden Yates ve Taguchi deney tasarımlarının karşılaştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir Osman Gazi Üniversitesi, Eskişehir.
36. Kandemir, Y. (2018). *Kompozit Malzemelerin Enerji Sönümleme Performansına Numune ve Tetikleyici Geometrik Değişkenlerin Etkisinin Taguchi Metodu ile İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli.
37. Şanyılmaz, M. (2006). *Deney Tasarımı ve Kalite Geliştirme Faaliyetlerinde Taguchi Yöntemi İle Bir Uygulama*. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya.
38. Karna, S. K., Sahai, R. (2012). An overview on Taguchi method. *International Journal of Engineering and Mathematical Sciences*, 1(1), 1-7.
39. Reddy, J. N. (2004). *Introduction to the Finite Element Method*. New York: McGraw-Hill, 4-5.
40. İnternet: *Blog-ST Mühendislik*. URL: <https://blog.s-t.com.tr/2021/05/18/1d-kiris-elemanlari-2d-mesh-ve-yuzeye-donusturme/>. Son Erişim Tarihi: 26.11.2023.
41. Özer, F. (2011). *Geliştirilmiş Yüksek Mukavemetli Çeliklerde Şekil Verme Operasyonları Sonucu Oluşan Geri Esnemenin Doğru Tahmini ve Telifisi*. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, T.O.B.B E.T.Ü., Ankara.
42. Prior, A. M. (1994). Applications of implicit and explicit finite element techniques to metal forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 45(1-4), 649-656.
43. Karafillis, A. P., Boyce, M. C. (1996). Tooling and binder design for sheet metal forming processes compensating springback error. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 36(4), 503-526.

44. İnternet: *Deneyisel Verilerin Değerlendirilmesi*. URL: <https://web.itu.edu.tr/~ozcanm/kim/Deneyisel%20Verilerin%20Degerlendirilmesi.pdf>. Son Erişim Tarihi: 10.12.2023.
45. Group, E. (2016). *PAM – STAMP User’s Guide*. France, 228-229.
46. Agarwal, R. (2004). *Tube bending with axial pull and internal pressure*. Doctoral dissertation, Texas A&M University, Texas.
47. Li, H., Yang, H., Tian, Y., Li, G. ve Wang, Z. (2012). Geometry-dependent springback behaviors of thin-walled tube upon cold bending. *Science China Technological Sciences*, 55, 3469-3482.





*Gazili olmak ayrıcalıktır*