MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇELİK DİRSEK BORULARIN ÜRETİM PROSESİNİN SONLU ELEMANLAR ANALİZİ YÖNTEMİ İLE MODELLENMESİ VE ÜRETİM PARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYONU

ŞABAN SARAÇ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Fen Bilimler Enstitüsü
Makine Mühendisliği
Anabilim Dalı

DANIŞMAN
Prof. Dr. Mustafa AY

EŞ-DANIŞMAN
Dr. Selim HARTOMACIOĞLU

İSTANBUL, 2021

MARMARA UNIVERSITY
INSTITUTE FOR GRADUATE STUDIES
IN PURE AND APPLIED SCIENCES

MODELING OF STEEL ELBOW MANUFACTURING PROCESSES VIA FINITE ELEMENT METHOD AND OPTIMIZATION OF PRODUCTION PARAMETERS

ŞABAN SARAÇ

MASTER THESIS

Department of Mechanical Engineering

Thesis Supervisor
Prof. Dr. Mustafa AY

Thesis CO- Supervisor
Dr. Selim HARTOMACIOĞLU

ISTANBUL, 2021

Kabul ve Onay Belgesi (Türkçe)

MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Öğrencisi Şaban SARAÇ' ın "Çelik dirsek boruların üretim prosesinin sonlu elemanlar analizi yöntemi ile modellenmesi ve üretim parametrelerinin optimizasyonu" başlıklı tez çalışması, 7 Temmuz 2021 tarihinde savunulmuş ve jüri üyeleri tarafından başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Mustafa AY (Danışman)
Marmara Üniversitesi ..... (İMZA).....

Prof. Dr. Mehmet UÇAR (Üye)
Marmara Üniversitesi ..... (İMZA).....

Dr. Öğr. Üyesi Barkın BAKIR (Üye)
Marmara Üniversitesi ..... (İMZA).....

ONAY

Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun …/…/2021 tarih ve …….. sayılı kararı ile Şaban SARAÇ' ın Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans derecesi alması onanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü
Prof. Dr. Bülent EKİCİ

Kabul ve Onay Belgesi (İngilizce)

MARMARA UNIVERSITY
INSTITUTE FOR GRADUATE STUDIES IN PURE AND APPLIED SCIENCES

Şaban SARAÇ, a Master of Science student of Marmara University Institute for Graduate Studies in Pure and Applied Sciences, defended his thesis entitled "Modeling of Steel Elbow Manufacturing Processes via Finite Element Method and Optimization of Production Parameters", on July 07, 2021 and has been found to be satisfactory by the jury members.

Jury Members

Prof.Dr. Mustafa AY (Advisor)
Marmara University ..... (SIGN).....

Assoc.Prof. Mehmet UÇAR (Jury Member)
Marmara Üniversitesi ..... (SIGN).....

Assist.Prof. Barkın BAKIR (Jury Member)
Marmara Üniversitesi ..... (SIGN).....

APPROVAL

Marmara University Institute for Graduate Studies in Pure and Applied Sciences Executive Committee approves that Şaban SARAÇ be granted the degree of Master of Science in Department of Mechanical Engineer on July …, 2021. (Resolution no: …….).

Director of the
Institute Prof. Dr.
Bülent EKİCİ

ÖNSÖZ/TEŞEKKÜR

Tecrübesi, deneyimleri, iyi niyeti ve insani yönüyle örnek bir insan olan tez aşaması ve ders döneminde her an desteklerini esirgemeyen değerli danışman hocam Prof. Dr. Mustafa AY' a çok teşekkür ederim.

Sonlu elemanlar analizi sektöründe ülkemizin değerlerinden olan, insanlığı, yardım severliği ve deneyimleri ile tez aşamasında ve hayatımın birçok alanında yardımlarını esirgemeyip iyi ve doğru yetişmemiz için çabalayan 2. Danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Selim HARTOMACIOĞLU' na çok teşekkür ederim.

Prosesin incelenmesi ve teknik aşamalarda destek olan EUROFORM Çelik İmalat Sanayi A.Ş. ve Üretim Müdürü Murat MANAV' a çok teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimime ve tezime destek veren canım eşime, aileme ve çalışma arkadaşlarıma çok teşekkür ederim.

Şaban SARAÇ

Temmuz 2021

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ/TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ABSTRACT v
SEMBOLLER/SYMBOLS vi
ŞEKİL LİSTESİ viii
TABLO LİSTESİ/LIST OF TABLE xiii
1. GİRİŞ/INTRODUCTION 1
1.1. Kaynak Parçaları ve Flanşlar Hakkında: 1
1.2. Fittings 1
1.2.1. Dişli 1
1.2.2. Flanşlar 2
1.2.3. Soket Kaynak 3
1.2.4. Alın Kaynak 3
1.3. 90° ve 45° DİRSEKLER 4
1.4. 180° DİRSEKLER 6
1.5. T Dirsekler 6
1.6. Lap Ortak Saplama Uçları 6
1.7. Redüktörler 7
1.8. Kapak 8
1.9. Flanşlar 9
1.10. Kaynak Boyun Flanşları 10
1.11. Slip-on, Lap Eklem Dişli 10
1.12. Soket Kaynak 12
1.13. Kör 13
2. BORU EK PARÇALARI İMALAT/ÜRETİM PROSESİ 13
2.1. DİRSEK ÜRETİM PROSESİ: 14
2.1.1. Mandrel Yöntemi (Sıcak Şekillendirme) 14
2.1.2. Ekstrüzyon Yöntemi 15
2.1.3. UO Yöntemi 15
2.1.4. Sıcak Şekillendirme Yöntemi 16
2.1.5.T Tipi Üretim Süreci: 16
2.1.6. Sıcak Ekstrüzyon Yöntemi 17
2.2. REDÜKTÖR İMALAT SÜRECİ: 18

2.2.1. Dış Kalıp Yöntemi ... 18
2.3. KAPAK ÜRETİM SÜRECİ: ... 18
2.3.1. Derin Çekme Yöntemi ... 18
2.4. STUBEND ÜRETİM PROSESİ: ... 19
2.4.1. Parlatma Metodu ... 19
2.4.2. Isıl İşlem Montajı ... 19
3. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ ... 20
3.1.Sonlu Elemanlar Yönteminin Tanımı ve Kapsamı ... 20
3.2 Sonlu Elemanlar Yönteminin Mühendislikteki Uygulama Alanları ... 21
3.3. Sonlu Elemanlar Yönteminin Tarihçesi ... 21
3.4.Sonlu Elemanlar Yönteminde Yapısal Analiz Prosedürü ... 23
3.5. Doğrusal Olmayan Analiz ... 23
3.5.1. Doğrusal Olmayan Yapı Durumu ... 23
3.5.2 Doğrusal Olmayan Yapı Tipleri ... 25
3.5.3 Zaman Eğrileri Kavramı ... 25
3.5.5.1 Artımsal Yöntem ... 34
3.5.5.2. Newton – Raphson Yöntemi ... 35
3.5.6.Büyük Yerdeğiştirme ve Büyük Gerinim Davranışı ... 37
3.5.6.1. Toplam Langrange Formülasyonu ... 37
3.5.6.2. Güncellenmiş Langrange Formülasyonu ... 37
3.5.7.Malzemeye Bağlı Doğrusal Olmayan Durum ... 38
3.5.7.1.Giriş ... 38
3.5.7.2.Doğrusal Olmayan Elastik Model ... 38
3.5.7.3.Elastoplastik Malzeme Modeli ... 39
3.5.7.3.1.Akma Kriteri ... 39
3.5.7.3.2. İleri Akma Davranışı ... 41
4. LİTERATÜR TARAMASI ... 44
5. AMAÇ ve ÖNEM ... 49
6. MATERYAL VE YÖNTEM ... 50
6.1. Paslanmaz Çelik Fittings Üretimi ... 51
6.1.1. Paslanmaz Çelik Dirsek ve Tee Üretimi ... 51
6.2. KALIP MODELİ ... 61
6.3. SONLU ELEMANLAR MODELİ ... 66
7. BULGULAR VE TARTIŞMA ... 70
8.SONUÇ VE DEĞERLENDİRMELER ... 102
9. KAYNAKÇA ... 103

ÖZET

ÇELİK DİRSEK BORULARIN ÜRETİM PROSESİNİN SONLU ELEMANLAR ANALİZİ YÖNTEMİ İLE MODELLENMESİ VE ÜRETİM PARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYONU

Günümüzdeki teknolojilerin ilerlemesi ile boru ve dirsek elemanlarının parçaları, doğalgaz boru hatları, petrokimya, makine imalat sanayi, su dağıtım ve akış sistemleri, kanalizasyon sistemleri, temel kazıkları, gemi inşa sanayi, basınçlı kaplar, havacılık, uzay ve savunma sanayi, borular ağları, rafineriler, çelik yapılar, tüp ve boru mühendisliği vb. alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada dirsek boruların soğuk şekillendirme yöntemlerinden biri olan ekstrüzyon yöntemi incelenmiştir.

Literatür incelendiğinde, çelik boruların üretim şartları, üretimde meydana gelen sorunlar farklı kişiler tarafından incelenmiş ve öneriler ortaya konmuştur. Bu çalışmada AISI 316L (EN 1.4404) kalite paslanmaz çelik dirsek boruların üretim prosesi incelenmiştir. Solidworks programı ile oluşturulan kalıp tasarım modeli, doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizi yazılımı ANSYS programına simülasyonların gerçekleştirilebilmesi için aktarılmıştır. ANSYS programının zamana bağlı yapısal analiz bölümünde proses modellenerek simülasyonu yapılmıştır. Borunun, dirsek ürününe dönüştürülmesi prosesinde gerilme dağılımları ve dirsek üzerinde oluşan toplam deformasyon değişimlerinin elde edilmesi konularında bilgi sahibi olunmuştur. Simülasyonda yapılan çalışma ve deneysel veriler karşılaştırılarak üretim prosesinin parametreleri optimize edilmiştir. Bu sayede üretim maliyetleri minimize edilerek maliyet etkin üretim amaçlanmıştır. Üretim ortamı ve şartlar simüle edilerek veriler çıkarılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Dirsek, Boru, AISI 316L Paslanmaz Çelik, Optimizasyon, Sonlu Elemanlar Analizi

ABSTRACT

MODELING OF STEEL ELBOW MANUFACTURING PROCESSES VIA FINITE ELEMENT METHOD AND OPTIMIZATION OF PRODUCTION PARAMETERS

With the advancement of today's technologies, parts of pipe and elbow elements, natural gas pipelines, petrochemicals, machinery manufacturing industry, water distribution and flow systems, sewage systems, foundation piles, shipbuilding industry, nurse containers, aviation, space and defense industry, pipe networks, refineries, steel structures, tube and pipe engineering, etc. widely used in areas. In this study, extrusion method, which is one of the cold forming methods of elbow pipes, has been investigated.

When the literature is examined, the production conditions of steel pipes and the problems that occur in production have been examined by different people and suggestions have been made. In this study, the production process of AISI 316L (EN 1.4404) quality stainless steel elbow pipes has been investigated. The mold design model created with the Solidworks program was transferred to the non-linear finite element analysis software ANSYS program for simulations. The process was modeled and simulated in the transient structural analysis section of the ANSYS program. In the process of transforming the pipe into an elbow product, we have learned about the stress distributions and obtaining the total deformation changes on the elbow. The parameters of the production process have been optimized by comparing the work done in the simulation and experimental data. In this way, cost-effective production is aimed by minimizing production costs. The data was extracted by simulating the production environment and conditions.

Keywords: Elbow, Pipe, AISI 316L Stainless Steel, Optimization, Finite Element Analysis

SEMBOLLER/SYMBOLS

A **:** Bükme yarıçapı

D **:** Boru Dış Çapı

t **:** Et Kalınlığı

$\mathbf{L_1}$: Ana Boru Dış Çap Uzunluğu

$\mathbf{L_2}$: Ana Boru İç Çap Uzunluğu

K : Direngenlik Matrisi

d : Düğümsel Yer değiştirme Vektörü

F : Düğümsel Dış Yük Vektörü

λ : Zamana Bağlı Yük Fonksiyonu

$\mathbf{R_a}$: Profil Sapmalarının Aritmetik Ortalama

$\mathbf{R_{max}}$: Maksimum Yüzey Pürüzlülük Derinliği

$\mathbf{R_z}$: Maksimum profil yüksekliği

$\mathbf{R_{p\ max}}$: Profilin En Büyük Tepe Yüksekliği Değerleri Ortalaması

$\mathbf{R_t}$: Pürüzlülük profilinde, bir değerlendirme uzunluğu içinde profilin en yüksek ve en alçak noktaları arasındaki yükseklik farkı

$\mathbf{R_{Sk}}$: Pürüzlülük profilinde, profil sapmalarının küpleri ortalaması

$\mathbf{W_a}$: Profilin aritmetik ortalama dalgalılığı (sapması)

$\mathbf{W_t}$: Profilin toplam dalgalılığı

LS : Profil filtresi uzunluğu

LT : Ölçüm uzunluğu

LM : Değerlendirme Uzunluğu

VB : Z eksenindeki ölçüm (range) aralığı

NX : Ölçüm alınan nokta sayısı

VT : Ölçüm hızı

λ : Zamana bağlı yük fonksiyonu

$\boldsymbol{\delta_U}$: Virtüel yer değiştirme

$\boldsymbol{\delta\varepsilon_g}$: Virtüel gerinim

u, v, w : Düğümsel yer değiştirme vektörleri

N : Şekil Fonksiyonu

B : Eleman gerinim- yer değiştirme matrisi

$\mathbf{K_T}$: Tanjant direngenlik matrisi

$\boldsymbol{K_0}$: Lineer direngenlik matrisi

$\boldsymbol{K_U}$: Başlangıç yer değiştirme direngenlik matrisi

$\boldsymbol{K_\sigma}$: Başlangıç gerilme direngenlik matrisi

$\boldsymbol{\sigma_P}$: Piola – Kirchhoff gerilme tensörü

$\boldsymbol{\sigma_c}$: Cauchy gerilme tensörü

$\boldsymbol{\varepsilon_A}$: Almansi gerinim tensörü

$\boldsymbol{E_s}$: Secant elastiklik modülü

$\boldsymbol{\varepsilon^P}$: Plastik gerinim

$\boldsymbol{\varepsilon^e}$: Elastik gerinim

E : Elastiklik modülü

$\boldsymbol{\varepsilon_G}$: Gren gerinimi

$\boldsymbol{\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3}$: Asal gerilmeler

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1. Dişli Boru Ucu (Yoon, 2016) 2
Şekil 2. Entegre Flanş (Yoon, 2016) 2
Şekil 3. Soket Kaynak (Yoon, 2016) 3
Şekil 4. Alın Kaynak (Yoon, 2016) 3
Şekil 5. 90° uzun dirsek (Yoon, 2016) 4
Şekil 6. 45° uzun dirsek (Yoon, 2016) 4
Şekil 7. Lap Ortak Saplama Ucu (Yoon, 2016) 7
Şekil 8. Eksantrik Redüktör (Yoon, 2016) 8
Şekil 9. Konsantrik Redüktör (Yoon, 2016) 8
Şekil 10. Kapak (Yoon, 2016) 9
Şekil 11. Kaynak Boyun Flanşı (Yoon, 2016) 10
Şekil 12. Geçme Flanşı (Yoon, 2016) 11
Şekil 13. Bindirme Bağlantı Flanşı (Yoon, 2016) 12
Şekil 14. Dişli Flanş (Yoon, 2016) 12
Şekil 15. Soket Kaynaklı Flanş (Yoon, 2016) 13
Şekil 16. Kör Flanş (Yoon, 2016) 13
Şekil 17. Mandrel Yöntemi (www.hardhatengineering.com, 2018) 14
Şekil 18. Ekstrüzyon Yöntemi (www.hardhatengineering.com, 2018) 15
Şekil 19. UO Yöntemi (www.hardhatengineering.com, 2018) 15
Şekil 20. Sıcak Şekillendirme Yöntemi (www.hardhatengineering.com, 2018) 16
Şekil 21. T Tipi Üretim Süreci (www.hardhatengineering.com, 2018) 17
Şekil 22. Sıcak Ekstrüzyon Yöntemi (www.hardhatengineering.com, 2018) 17
Şekil 23. Dış Kalıp Yöntemi (www.hardhatengineering.com, 2018) 18
Şekil 24. Derin Çekme Yöntemi (www.hardhatengineering.com, 2018) 19
Şekil 25. Dişli dişi için sonlu elemanlar modeli örneği (Rajadurai ve ark., 2014) 20
Şekil 26. Dişli Kaplin Modellemesi (Liu, 2003) 21
Şekil 27. Teneke kutusu düşme testi (Hutton, 2004) 23
Şekil 28. Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Davranış (Karabulut, 2007) 24
Şekil 29. Zaman eğrisi için örnek yükleme durumu (Karabulut, 2007) 26
Şekil 30. Doğrusal olmayan yapıya örnek: Tek elemanlı çubuk yapısı. (Karabulut, 2007)

..... 27
Şekil 31. Artımsal çözüm yöntemi (Karabulut, 2007)..... 34
Şekil 32. Newton-Raphson yöntemi (Karabulut, 2007) 35
Şekil 33. Newton – Raphson yöntemi ile artımsal yöntemin birlikte kullanılması. (Karabulut, 2007) 36
Şekil 34. Düzeltilmiş Newton-Raphson yöntemi. (Karabulut, 2007)..... 36
Şekil 35. Doğrusal olmayan elastik malzeme modeli. (Karabulut, 2007)..... 39
Şekil 36. Yumuşak çelik için tipik bir gerilme-gerinim eğrisi (Karabulut, 2007)..... 39
Şekil 37. Doğrusal pekleşen elastoplastik malzeme modeli. (Karabulut, 2007)..... 40
Şekil 38. Akma yüzeyi. (Karabulut, 2007)..... 41
Şekil 39. Toplam gerinim artırımının ayrıştırılması. (Karabulut, 2007) 42
Şekil 40. Eşyönlü (izotropik) pekleşme davranışı. (Karabulut, 2007) 42
Şekil 41. Kinematik pekleşme davranışı. (Karabulut, 2007)..... 43
Şekil 42. Paslanmaz Çelik Dirsek İmalatı İş Akış Şeması (Manav, 2018) 54
Şekil 43. Bitmiş ürün dirsek örnekleri (www.euroformcelik.com.tr) 54
Şekil 44. Thickness Gage (Kalınlık Ölçer) Makine No: LF24H003..... 55
Şekil 45. Lazer Optik Ölçüm Cihazı-1..... 55
Şekil 46. Lazer Optik Ölçüm Cihazı-2..... 56
Şekil 47. Lazer Optik Ölçüm Cihazı-3..... 56
Şekil 48. Lazer optik ile ölçümü yapılan 1.Numune..... 57
Şekil 49. Lazer optik ile ölçümü yapılan 2.Numune..... 57
Şekil 50. Mahr Yüzey Pürüzlülük Ölçüm Cihazı..... 58
Şekil 51. Kontur Ölçüm Cihazı..... 58
Şekil 52. 1.Numune Cmm Ölçümü..... 59
Şekil 53. 2.Numune Cmm Ölçümü..... 59
Şekil 54. Dirsek Ölçüleri (EN 10253-4 Standardı, 2008)..... 60
Şekil 55.Kalıp Tasarımı..... 62
Şekil 56. Deney Düzeneği..... 62
Şekil 57. EN10253-4 A403 Standardı..... 63
Şekil 58. Kaynak Ağzı Açılmış Büküme Hazır Boru..... 64
Şekil 59. 6 " Üst Kalıp..... 64
Şekil 60. 6 " Alt Kalıp..... 65

Şekil 61. 6 " Sabit Erkek..... 65
Şekil 62. Alt dişi kalıp mesh görüntüsü..... 68
Şekil 63. Üst dişi kalıp mesh görüntüsü 68
Şekil 64. Erkek kalıp mesh görüntüsü 69
Şekil 65. İtici mesh görüntüsü 69
Şekil 66. Boru mesh görüntüsü 69
Şekil 67. 1. Numune ile 25 saniyelik proses karşılaştırılması-1..... 72
Şekil 68. 1. Numune ile 25 saniyelik proses karşılaştırılması-2..... 72
Şekil 69. 1. Numune ile 30 saniyelik proses karşılaştırılması-1..... 73
Şekil 70. 1. Numune ile 30 saniyelik proses karşılaştırılması-2..... 73
Şekil 71. 1.Numune ile 35 saniyelik proses karşılaştırılması-1..... 74
Şekil 72. 1.Numune ile 35 saniyelik proses karşılaştırılması-2..... 74
Şekil 73. 1.Numune ile 40 saniyelik proses karşılaştırılması-1..... 75
Şekil 74. 1.Numune ile 40 saniyelik proses karşılaştırılması-2..... 75
Şekil 75. 2.Numune ile 25 saniyelik proses karşılaştırılması-1..... 76
Şekil 76. 2.Numune ile 25 saniyelik proses karşılaştırılması-2..... 76
Şekil 77. 2.Numune ile 30 saniyelik proses karşılaştırılması-1..... 77
Şekil 78. 2.Numune ile 30 saniyelik proses karşılaştırılması-2..... 77
Şekil 79. 2.Numune ile 35 saniyelik proses karşılaştırılması-1..... 78
Şekil 80. 2.Numune ile 35 saniyelik proses karşılaştırılması-2..... 78
Şekil 81. 2.Numune ile 40 saniyelik proses karşılaştırılması-1..... 79
Şekil 82. 2.Numune ile 40 saniyelik proses karşılaştırılması-2..... 79
Şekil 83. 20 saniyelik prosesin kuvvet - zaman - kümülatif iterasyon yakınsama grafiği 80
Şekil 84. 25 saniyelik prosesin kuvvet - zaman - kümülatif iterasyon yakınsama grafiği 80
Şekil 85. 30 saniyelik prosesin kuvvet - zaman - kümülatif iterasyon yakınsama grafiği 80
Şekil 86. 35 saniyelik prosesin kuvvet-zaman-kümülatif iterasyon yakınsama grafiği . 81
Şekil 87. 40 saniyelik prosesin kuvvet-zaman-kümülatif iterasyon yakınsama grafiği . 81
Şekil 88. 20 saniyelik prosesin Von-Mises gerilim dağılımının izometrik görünüşü 81
Şekil 89. 25 saniyelik prosesin Von-Mises gerilim dağılımının izometrik görünüşü 82

Şekil 90. 30 saniyelik prosesin Von-Mises gerilim dağılımının izometrik görünüşü 82
Şekil 91. 35 saniyelik prosesin Von-Mises gerilim dağılımının izometrik görünüşü 82
Şekil 92. 40 saniyelik prosesin Von-Mises gerilim dağılımının izometrik görünüşü 83
Şekil 93. 20 saniyelik prosesin Von-Mises gerilim dağılımının X ekseninden görünüşü 83
Şekil 94. 25 saniyelik prosesin Von-Mises gerilim dağılımının X ekseninden görünüşü 84
Şekil 95. 30 saniyelik prosesin Von-Mises gerilim dağılımının X ekseninden görünüşü 84
Şekil 96. 35 saniyelik prosesin Von-Mises gerilim dağılımının X ekseninden görünüşü 84
Şekil 97. 40 saniyelik prosesin Von-Mises gerilim dağılımının X ekseninden görünüşü 85
Şekil 98. 20 saniyelik prosesin Von-Mises gerilim dağılımının Y ekseninden görünüşü 85
Şekil 99. 25 saniyelik prosesin Von-Mises gerilim dağılımının Y ekseninden görünüşü 86
Şekil 100. 30 saniyelik prosesin Von-Mises gerilim dağılımının Y ekseninden görünüşü 86
Şekil 101. 35 saniyelik prosesin Von-Mises gerilim dağılımının Y ekseninden görünüşü 86
Şekil 102. 40 saniyelik prosesin Von-Mises gerilim dağılımının Y ekseninden görünüşü 87
Şekil 103. 20 saniyelik prosesin Von-Mises gerilim dağılımının Z ekseninden görünüşü 87
Şekil 104. 25 saniyelik prosesin Von-Mises gerilim dağılımının Z ekseninden görünüşü 88
Şekil 105. 30 saniyelik prosesin Von-Mises gerilim dağılımının Z ekseninden görünüşü 88
Şekil 106. 35 saniyelik prosesin Von-Mises gerilim dağılımının Z ekseninden görünüşü 88
Şekil 107. 40 saniyelik prosesin Von-Mises gerilim dağılımının Z ekseninden görünüşü

..... 89
Şekil 108. 20 saniyelik proseste borunun toplam deformasyonu 89
Şekil 109. 25 saniyelik proseste borunun toplam deformasyonu 90
Şekil 110. 30 saniyelik proseste borunun toplam deformasyonu 90
Şekil 111. 35 saniyelik proseste borunun toplam deformasyonu 90
Şekil 112. 40 saniyelik proseste borunun toplam deformasyonu 91
Şekil 113. 20 saniyelik prosesin Von-Mises maksimum ve minimum gerilme grafiği . 91
Şekil 114. 25 saniyelik prosesin Von-Mises maksimum ve minimum gerilme grafiği . 92
Şekil 115. 30 saniyelik prosesin Von-Mises maksimum ve minimum gerilme grafiği . 92
Şekil 116. 35 saniyelik prosesin Von-Mises maksimum ve minimum gerilme grafiği . 93
Şekil 117. 40 saniyelik prosesin Von-Mises maksimum ve minimum gerilme grafiği . 93
Şekil 118. 20 saniyelik prosesin minimum ve maksimum kuvvet reaksiyon-zaman grafiği 94
Şekil 119. 25 saniyelik prosesin minimum ve maksimum kuvvet reaksiyon-zaman grafiği 94
Şekil 120.30 saniyelik prosesin minimum ve maksimum kuvvet reaksiyon-zaman grafiği 95
Şekil 121. 35 saniyelik prosesin minimum ve maksimum kuvvet reaksiyon-zaman grafiği 95
Şekil 122. 40 saniyelik prosesin minimum ve maksimum kuvvet reaksiyon-zaman grafiği 96
Şekil 123. 20 saniyelik prosesin minimum ve maksimum moment reaksiyon-zaman grafiği 96
Şekil 124. 25 saniyelik prosesin minimum ve maksimum moment reaksiyon-zaman grafiği 97
Şekil 125. 30 saniyelik prosesin minimum ve maksimum moment reaksiyon-zaman grafiği 97
Şekil 126. 35 saniyelik prosesin minimum ve maksimum moment reaksiyon-zaman grafiği 98
Şekil 127. 40 saniyelik prosesin minimum ve maksimum moment reaksiyon-zaman grafiği 98

TABLO LİSTESİ/LIST OF TABLE

Tablo 1. 90° Dirsek Ölçüleri 61
Tablo 2. Standard Ölçüler..... 63
Tablo 3. AISI 316L alaşımına ait kimyasal kompozisyon. 66
Tablo 4. AISI 316L malzemesinin mekanik özellikleri 67
Tablo 5. AISI 316L / EN 1.4404 bileşenlerinin döngüsel elastoplastik analizi için geçerli gerilme-uzama eğrileri için tablo verileri (Möller, 2017)..... 67
Tablo 6. Mesh tanımlanması işlemi sonrasında eleman ve düğüm noktaları miktarları 68
Tablo 7. Kalınlık ölçer ile ölçülen 2 adet numunenin ölçüm sonuçları tablosu 70
Tablo 8. 1. Numune ve 2. Numune boruların yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçları 70
Tablo 9. 1.Numune ve 2. Numune boruların iç ve dış yarıçap ölçüm sonuçları 70
Tablo 10. 1.Numune ve 2. Numune CMM Ölçüm Sonuçları..... 71
Tablo 11. 1.Numune ve 2. Numune Cmm İç ve Dış Yarıçap Ölçüm Sonuçları 71
Tablo 12. Standard ve Ölçüm Sonuçları Karşılaştırması 71
Tablo 13. Analizlerin geometrik ölçülerinin karşılaştırma tablosu 99
Tablo 14. Proses veri karşılaştırma tablosu 99
Tablo 16. Kuvvet ve moment verileri..... 100

1. GİRİŞ/INTRODUCTION

1.1. Kaynak Parçaları ve Flanşlar Hakkında:

Günümüzdeki teknolojilerin ilerlemesine rağmen, kaynaklı boru sistemi yüksek basınç ve yüksek sıcaklık uygulamalarındaki kullanım için en iyi seçimdir. Okullardaki, endüstriyel tesislerdeki ve fabrikalardaki birçok boru işi, tamamen kaynaklı bir sistemin doğal avantajlarından yararlanmıştır. Örneğin, boru, vana, bağlantı parçası ve flanş bölümlerini birleştiren kapalı bir konteyner haline gelirler. Ayrıca, kaynaklı bir bağlantı sızıntı potansiyelini en aza indirir ve hizmet ömrünü uzatan bölümün bir parçası haline gelir. Bu, özellikle iç basınç koşullarında daha fazla güvenlik payı sağlar. Ek olarak, kaynak teçhizatı boru ile sürekli bir metal yapı oluşturur ve herhangi bir boru sistemine dövme gücü eklenir. Ayrıca, pürüzsüz eklemler yalıtımı kolaylaştırır ve daha az yer kaplar. Kaynaklı sistemlerde kullanılmak üzere özel olarak tasarlanmış bağlantı parçalarının ve flanşların türlerine ayrıntılı bir şekilde bakıldığında, her ikisi de tanıma ve tercih etme konusundaki kazançları dikkat çekicidir.

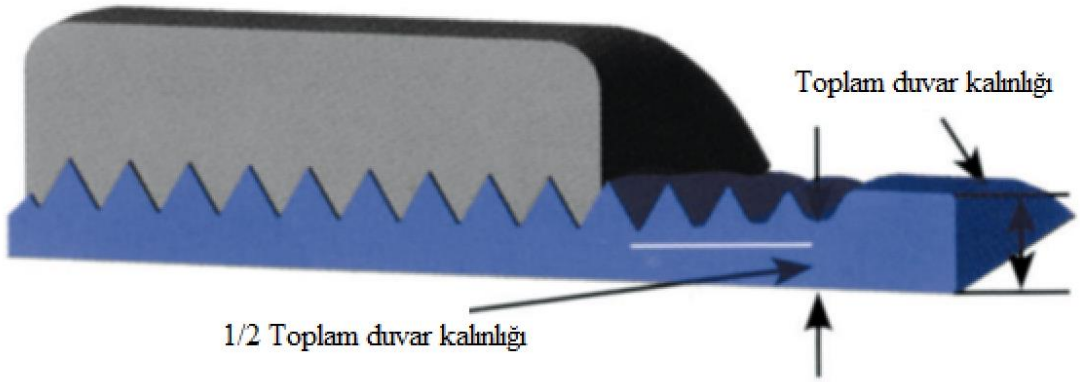
1.2. Fittings

Bir montaj ve boru sisteminde, yönü veya işlevi değiştirmek ve bu sisteme bazı mekanik vasıtalarla veya kaynakla birleştirmek için kullanılan herhangi bir parçadır. Borunun yönünü değiştirmenin en basit yolu onu bükmektir. Bununla birlikte, akışı kısıtlamanın yanı sıra, bu yöntem genellikle bağlantının şeklini bozar. Bu metot boru şekline zarar verir ve mukavemetini azaltır. Yön değiştirmenin başka bir yöntemi, azaltılmış eklemler yapmaktır. Düz boru parçaları gerekli dönüş için kesilmiş ve birbirine kaynaklanmıştır. Bu yol daha büyük türbülans yaratarak akış verimliliğini önemli ölçüde azaltır. Tek bir söndürülmüş viraj, yumuşak bir dirseğin yaklaşık altı katı kadardır. Akım oranı, iç basınç ve korozyon ortamına karşı korumanın birincil tasarım konuları olması sebebiyle, boru sistemleri için bağlantı parçaları tercih edilir.

1.2.1. Dişli

Bu bağlantı parçaları sisteme dişler vasıtasıyla birleştirilmiştir. Dişlerin kesilmesi, duvar kalınlığının yarısı kadar derinlere nüfuz edebilir, böylece boru bağlantı bölgesinde

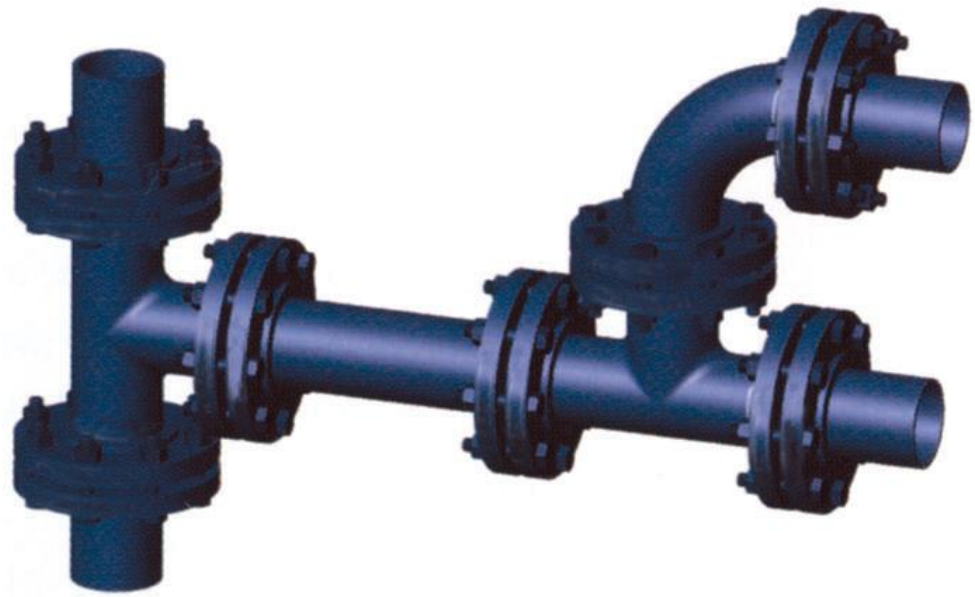
zayıflar. Bununla birlikte, dişli sistemler hazırlanması ve montajı bakımından önemli miktarda saha imalatına ihtiyaç duyduğu için daha fazla zaman alır. Örneğin; dişli boru uçları, vb. Gereksiz saha üretimi ve dişli bağlantılar, daha yüksek çalışma basınçlarında potansiyel sorunlu alanlar oluşturur.



Şekil 1. Dişli Boru Ucu (Yoon, 2016)

1.2.2. Flanşlar

Eşleştirilmiş parçaları civatalamak için entegre flanşlarla birleştiren bağlantı parçalarıdır. Flanşlı bağlantı elemanlarının dezavantajları yüksek ağırlıktaki yükleri ve fazla yer kaplamasıdır.



Şekil 2. Entegre Flanş (Yoon, 2016)

1.2.3. Soket Kaynak

Bu bağlantı parçaları, belirli bir boru boyutuna uyan iç çapa sahiptir. Boru, rakorun içine yerleştirilir ve daha sonra çevresel olarak dıştan kaynaklanır. Bir girintinin oluştuğu armatürün içindeki korozyonun başlamasına izin veren potansiyel bir uyumsuzluğa sahip olması büyük bir dezavantajdır.



Şekil 3. Soket Kaynak (Yoon, 2016)

1.2.4. Alın Kaynak

Bağlantı parçaları daha az boşluklu, daha yumuşak iç yüzeylerde kullanır ve daha kademeli yön değiştirmeler sağlar.



Şekil 4. Alın Kaynak (Yoon, 2016)

1.3. 90° ve 45° DİRSEKLER

Dirsekler çok sık kullanılan bağlantı parçaları olduğundan, ilk olarak tercih edilmektedir. Genel olarak, boyut tanımlamaları uzun yarıçap ya da kısa yarıçaptır. Uzun yarıçaplı dirsek genellikle standart servis koşulları için yeterlidir. Merkezden uca kadar olan ölçü her zaman dirseğin nominal ölçüsünün 1-1,5 katı kadardır. Kısa yarıçaplı dirsekler, boru çapına eşit bir merkezden uca ölçüme sahiptir.

Belirli bir iş için kullanılacak olan dirsek tipi genellikle malzeme akış oranı, kullanılabilir alan ve başlangıç maliyeti gibi üç faktöre bağlı olarak seçilir.



Şekil 5. 90° uzun dirsek (Yoon, 2016)



Şekil 6. 45° uzun dirsek (Yoon, 2016)

Akış oranının kritik olduğu ve alanın mevcut olduğu servis için, kullanıcı uzun yarıçaplı armatürleri seçebilir. Bu ona iç sürtünme ve akıntı türbülansından akış ve basınç düşüşünde en az azalma sağlar. Alan sınırlı olduğunda ve akış oranı kritik olmadığında, genellikle kısa yarıçaplı dirsek seçilir.

Akışkanlar uzun mesafelere taşınırken veya çok sayıda doğrudan değişiklikle karşılaştıklarında, daha büyük pompalama ekipmanlarının kurulumunu gerektirebilecek daha büyük sürtünme kayıpları nedeniyle kısa yarıçaplı dirsekler tavsiye edilmez.

Uzun yarıçaplı dirsek, kısa yarıçaplı bağlantılardan daha az maliyetlidir. Uzun yarıçaplı dirsekler, alan tasarruflarına uygun olarak minimum akış direnci sunar ve şu anda kullanımdaki tüm dirseklerin %90'ından fazlasını oluşturur. Borulama sistemlerinde meydana gelen sayısız varyasyon nedeniyle, bağlantı elemanları üreticileri standart parçalar olarak özel şekiller ve parçalar ile bir dizi armatür üretirler. Bazı ana kaynak bağlantı parçaları ve mevcut flanşlar aşağıda açıklanmıştır.

90° redüksiyon dirsek, bir boru sistemi içerisindeki akış uzunluğunun azaltılması ve yön değiştirmesi için tasarlanmıştır. Hem standart bir 90° dirsek hem de redüktör kullanarak bunu yapabilir veya 90 uzunluğunda yarıçapı azaltan dirsek bunu yapabilir. İkincisi normalde tercih edilir, çünkü bir bağlantı parçasını ortadan kaldırır ve gerekli kaynağı üçte birinden daha fazla azaltır. Ayrıca, indirgeme dirseğinin yayı boyunca çaptaki kademeli azalma, akışa karşı daha düşük direnç sağlar ve akış türbülansının ve potansiyel iç aşınmanın etkisini de azaltır. Bu özellikler, hattaki büyük basınç düşüşlerini önler. Bu bağlantı düz dirsek ve redüktör kombinasyonundan daha az yer kapladığından, boru izolasyonu uygulaması basitleştirilmiştir. Redüksiyon dirseğin yapılması, dirsek ve redüktör kombinasyonundan daha maliyetli ve daha zordur. Bununla birlikte, daha az kaynak gerektiğinden ve montaj daha hızlı olduğu için, gerçek döküm farkı çok az olabilir.

45° uzun redüksiyon dirseği, 90° uzun yarıçaplı dirseğin tüm akış avantajlarına sahiptir. Genellikle kısmi veya kademeli bir değişim arzu edildiğinde kullanılır. 45° uzun yarıçaplı dirseğe olan talep biraz sınırlıdır ve pazarın çok küçük bir bölümünü oluşturmaktadır.

1.4. 180° DİRSEKLER

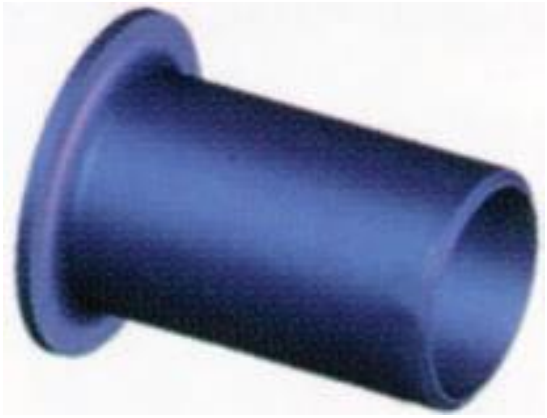
Yönünde 180° değişiklik yapılması için önerilen prosedür, iki 90 derece dirsek veya bir düz boru parçasından 180° boru kıvrımını imal eden bir alan oluşturmaktan ziyade şekillendirilmiş 180° dirsek parçasını kullanmaktır. Dönüş boruları, öncelikle ısıtıcı bobinlerde ve ısı değiştiricilerde kullanılır. Alanın sahip olduğu bobin sayısı, kısa veya uzun bir yarıçap dönüşünün istenip istenmediğini belirler. Tüm uzun ve kısa 180° yarıçap dönüşleri, 90° dirsekle eşleşenlerin merkezindeki boyutlara sahiptir.

1.5. T Dirsekler

Bir T dirsek, ana akışa 90° 'de akışa izin veren bir dallanmış ve takviye edilmiş çıkış elemanıdır. Ana akış, T dirseğin akışı boyunca geçer. 90° çıkışa T dirseğin dalı denir. Bir düz T dirsek, her üç çıkış ile aynı zamanda ve bölümleri de aynı büyüklükte üretilmektedir. Tasarım akış oranına uyum sağlamak, kol çıkışından daha küçük olan bir redüksiyon T dirseği ile yapılır.

1.6. Lap Ortak Saplama Uçları

Bu bağlantı parçaları, hızlı bağlantı kesme sistemi gerektirebilecek hatlarda kullanılır. Ayrıca flanşlar boruya kaynatıldığında veya boruya sabitlendiğinde flanşların civata deliklerinin sıralanmasını kolaylaştırmak için kullanılır. Normalde, saplama uçları çift olarak monte edilir, çift bağlantı parçaları iki bağlantı ek flanşı ile eşleşir. Bu, gelecekteki temizlik ve kontrol için hattın açılmasını sağlar ve hattın değiştirilmesi gerektiriyorsa, flanşlar sisteme bağlı olmadıkları için yeniden kullanılabilir, çünkü sisteme bağlanmamışlardır. Borunun dışına serbestçe montajlanır. Bağlantı ekleminin daha iyi bir şekilde kapatılması ve sızıntısının önlenmesi için geçmeli bağlantı saplama uçları, tırtıklı conta yüzeyleri ile yapılır. Bu yüzey, bir flanşın yükseltilmiş conta yüzeyinin yerini almıştır.



Şekil 7. Lap Ortak Saplama Ucu (Yoon, 2016)

1.7. Redüktörler

Eksantrik veya konsantrik olan tüm redüktörler, borunun etkili boyutunu azaltır. Daha küçük çapraz kesit alanı ile akan malzemeye artan sürtünme direnci ve sistemin artan basıncı vardır.

Eksantrik redüktör, azaltma çıkış ucu kapalı merkezine sahiptir. Girişin bir tarafı ile düz olacak, ancak diğer çıkış ile hizalanmayacaktır. Bu redüktör, konsantrik redüktörden daha serttir ve daha pahalıdır.

Konsantrik redüktöre göre bir avantaj, düz bir tavana veya duvara asılabilir veya asılabilir. Bu, boru sistemine daha fazla destek sağlar ve çoğu zaman gerekli alanı azaltır. Düz kenarlı yatay boru sistemlerinde kullanıldığında, yabancı madde için bir tuzak görevi görür. Düz tarafa monte edildiğinde aşağı, yabancı malzemenin sıkışmasını önler. Konsantrik redüktör, ortak bir merkez hattında hem giriş hem de çıkış ile yapılır. Bu redüktör, eksantrik tipten daha az üretilmektedir ve çoğu boru tesisatına uyarlanabilir.



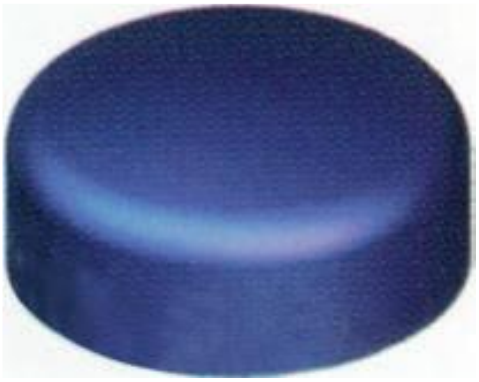
Şekil 8. Eksantrik Redüktör *(Yoon, 2016)*



Şekil 9. Konsantrik Redüktör (Yoon, 2016)

1.8. Kapak

Bir kapağın işlevi, bir hattın ucunu bloke etmektir. Kapak, açık uçtan uzağa yerleştirilir ve eklemin etrafına kaynaklanır.



Şekil 10. Kapak (Yoon, 2016)

1.9. Flanşlar

Bir flanş, bir boru sisteminin iki parçasını birleştirmek veya bir basınçlı kap çıkışında, valfinde veya herhangi bir diğer flanşlı tertibatta bir boru sistemi oluşturmak üzere tasarlanmış metalden yapılmış bir dövme parçası veya döküm halkasıdır. Flanşlar, vidalama veya kaynaklama ile boru sistemine birleştirilir ve birbirine cıvatalarla birleştirilir. Örneğin, yapılan her basınç kabının en az bir flanşlı çıkışı vardır. Bu çıkış, önceden belirlenmiş bir cıvata dairesine ve delik sayısına sahiptir. Flanşlar, cıvata dairesi ve cıvata delikleriyle eşleşecek şekilde tasarlanmış ve yapılmıştır, böylece ikisi birlikte çiftleştirilebilir. Bu flanştan boru sistemi başlatıldı. Normal olarak, boru sisteminin basınç derecesi arttıkça flanşın kalınlığı ve dış çapı artar. Flanşın en önemli kısmı yüzüdür. Flanş yüzleri, bir conta için yeterli yüzey temas alanı sağlayacak şekilde işlenir. Flanş sınıflamaları:

1.9.1. Yükseltilmiş-Yüz: 150 ve 300 sınıfları için temas alanı 0.0625 inç büyütülmüştür. 300'ün üzerinde sınıflandırılması için temas alanı 0,25 inç yükseltilmiştir.

1.9.2. Düz Yüzey: Demir flanşları dökmek için 150 veya 300 sınıfı flanşları civatalarken, düz yüzey kullanılmalıdır.

1.9.3. Halka Tipi Mafsal: Normal kullanım, 400 ve daha üst sınıflardaki flanşlarla, ancak istenirse alt sınıflar için tasarlanabilir. Flanşlar, özellikle 150, 300, 400, 600, 900, 1500 ve 2500 sınıfları için tasarlanmıştır. Yaygın flanş tipleri, yüksek göbek kaynak boyunlu, alçak göbekli kaymalı, turlu mafsallı, dişli, soket ve kördür.

1.10. Kaynak Boyun Flanşları

Kaynak boyunlu flanş normal olarak yüksek göbek flanşları olarak adlandırılır. Gerilmeleri boruya transfer etmek ve birbirinden farklı şekilde dağıtmak için tasarlanmıştır, böylece bağlantılar yapıldıktan sonra flanşın dibindeki yüksek stres konsantrasyonunu azaltır. Kaynak boyunlu flanş, doğal mukavemeti nedeniyle en iyi tasarlanmış flanştır. Uzun konik bir göbek ve kalınlığın kademeli olarak geçişi kaynak bağlantısının bölgesi, mukavemet ve rezistans açısından güçlenmeye takviye ekler. Flanş kalınlığından, koniklikten etkilenen boru cidar kalınlığına düzgün geçiş, hat genleşmesi ya da diğer değişken kuvvetlerin neden olduğu yeniden şekillendirilmiş bükme koşulları altında son derece faydalıdır.

Kaynak boyun flanşları, genellikle yüksek basınç ve sıfır altı veya yüksek sıcaklıkları içeren hizmetlerde kullanılır. Wld boyun kanatları, eşleşen borunun iç çapına uyacak şekilde delinir. Bu nedenle, boru ne kadar hafifse, flanşların deliği o kadar büyük olur.

Boru hattının birleştirilmesinden sonra, akış türbülansını arttırabilecek ve metal erozyonuna katkıda bulunabilecek bir akış kısıtlaması yoktur.



Şekil 11. Kaynak Boyun Flanşı (Yoon, 2016)

1.11. Slip-on, Lap Eklem Dişli

Slip-on bir flanş düşük bir göbeğe sahiptir, çünkü boru kaynak öncesinde kaynak flanşı içine girer. Yeterince sağlamlık sağlamak ve sızıntıyı önlemek için hem içeride hem dışarıda kaynak yapılır. Eşleşen borunun daha düşük maliyeti, birçok kullanıcıya boyun flanşlarının kaynak yapılmasını tercih eder. Bununla birlikte, ek maliyet nedeniyle monte

edilen maliyet kaynak boyunlu flanş için çok daha az değildir.

Kör bağlantı flanşı, delik ve flanş yüzeyinin kesişimindeki yarıçap haricinde hemen hemen kaymalı flanşla aynıdır. Bu yarıçap, bir vat eklemi saplama ucuna bağlantı sağlamak için gereklidir.

Normalde, bir geçmeli bağlantı flanşı ve bir turlu mafsallı bağlantı ucu düzeneği, çoğunlukla, inceleme veya temizleme için sık sık sökülmüş olan borulama sistemlerinde kullanılmaktadır. Bu flanşlar, flanşları döndürme ve cıvata deliklerini hizalama yeteneklerinin olduğu sistemlerde avantajlıdır. Geniş çaplı ve zorlu boru tesisatı montajını basitleştirir.

Dişli bir flanş, kaymalı flanşa benzer, ancak delik dişlidir. Başlığı, kaynaksız monte edilebilmesidir. Bu özellik, düşük basınçta ve ortam sıcaklıklarında çalışan servislerin tercih edilmesini sağlar. Dişli flanşlar, kaynakların tehlikeli olabileceği tehlikeli bölgelere monte edilebilir.

Dişli flanşlar, aşırı sıcaklık koşulları veya herhangi bir büyük boyuttaki eğilme gerilmeleri için uygun değildir. Yaygın olarak dalgalanan koşullar, sadece bir ısıtma döngüsünden veya gerilmelere tekrar tekrar maruz kaldıktan sonra dişler boyunca sızıntıya neden olabilir. Eklem etrafındaki conta kaynağı bazen sızıntı olasılığını ortadan kaldırmak için gerçekleştirilir, ancak bu her zaman tatmin edici değildir, ne de mümkün değildir.



Şekil 12. Geçme Flanşı (Yoon, 2016)



Şekil 13. Bindirme Bağlantı Flanşı (Yoon, 2016)



Şekil 14. Dişli Flanş (Yoon, 2016)

1.12. Soket Kaynak

Soket kaynak flanşları başlangıçta küçük boyutlu yüksek basınçlı borularda kullanılmak üzere geliştirilmiştir ve kaymalardan biraz daha pahalıdır. Bir iç kaynak ile sağlandığında, bunların statik gücü eşittir, ancak yorulma mukavemeti, çift kaynaklı kaymalı flanşlardan çok daha büyüktür.



Şekil 15. Soket Kaynaklı Flanş (Yoon, 2016)

1.13. Kör

Kör flanş, bir boru sisteminin ucunu boşaltmak ve hattın iç kısmına erişim sağlamak için kullanılan sağlam bir dövmedir. İç basınç ve cıvata yükünün duruşundan bu flanşlar, en çok vurgulanan tiptir. Bununla birlikte, kör flanştaki maksimum gerilmeler merkezde bükülme darbelerine sahip olduğundan, diğer flanş türlerinden daha yüksekte güvenli bir şekilde izin verilebilir. Ancak, uygun değillerdir. Tekrarlanan şiddetli su darbesi veya sıcaklık kritik bir faktör olduğunda. Bu durumlar için bir kaynak başlığı daha uygundur.



Şekil 16. Kör Flanş (Yoon, 2016)

2. BORU EK PARÇALARI İMALAT/ÜRETİM PROSESİ

Dirsek, T tipi, redüktör ve diğer boru bağlantı parçaları üretimi için kullanılan çeşitli prosesler vardır. Bağlantı parçaları dikişsiz boru ve kaynaklı borudan dolgu malzemesi ile üretilmiştir. Geniş çaplı ek borular levhalardan üretilmektedir.

Üretilen dövme ek parça borular için çeşitli yöntemler kullanılır, bunlar sıcak ve soğuk şekillendirme işleminin farklı türleridir.

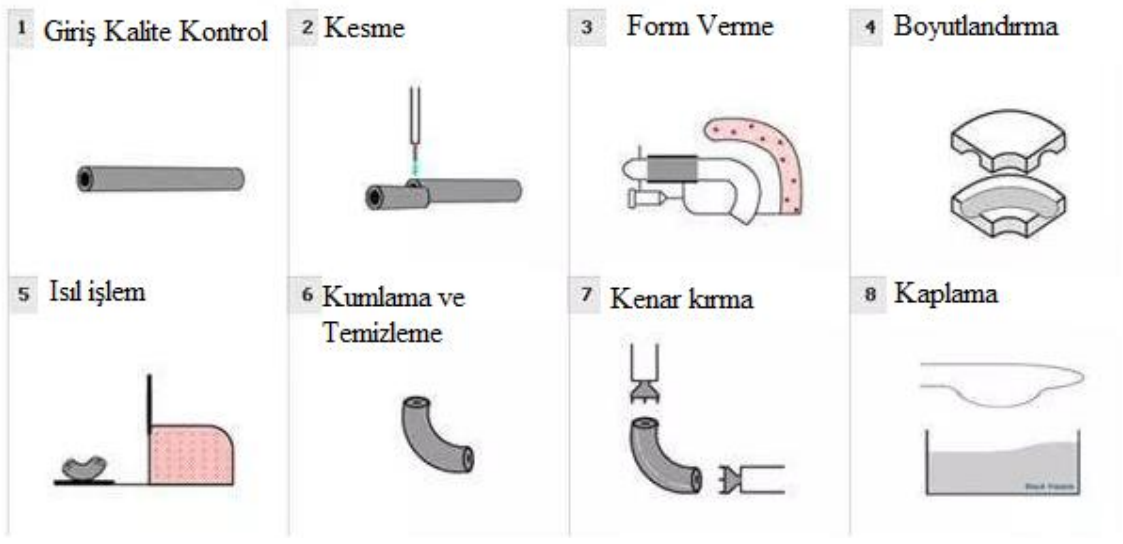
Bu yöntemler;

- Sıcak Şekillendirme veya ekstrüzyon yöntemi
- Hidrolik Bulge Yöntemi- Soğuk şekillendirme
- UO veya Tek Kaynak Dikiş Yöntemi
- Monaka veya Çift Kaynak Dikiş Yöntemi
- Kapaklar için Derin Çekme Yöntemi
- Saplama Uçları için Parlama Yöntemi

2.1. DİRSEK ÜRETİM PROSESİ:

2.1.1. Mandrel Yöntemi (Sıcak Şekillendirme)

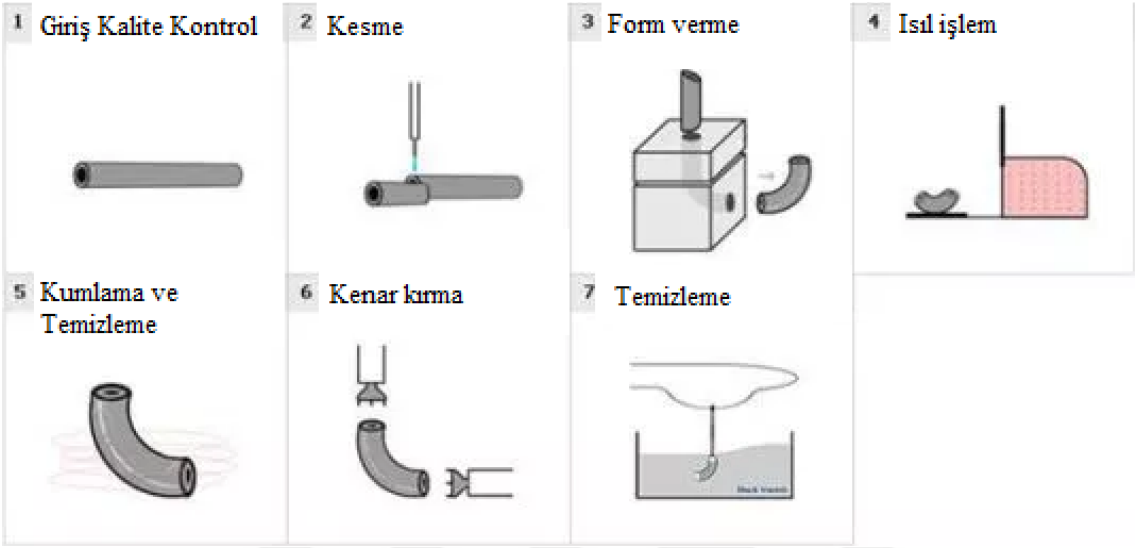
İmalat için en yaygın boru üretim proseslerinden biri ve sıcak şekillendirme yöntemlerinden biri olan mandrel yöntemidir. Bu yöntemde boru parçalar halinde kesilir ve hidrolik piston yardımıyla itilir. İndüksiyon ısıtma bobini boruyu ısıtır ve borunun aynı anda genişlemesine ve bükülmesine izin veren mandrel adlı bir kalıp üzerine itilir. Bu yöntem, dirsek çapının geniş bir yelpazesini üretmek için kullanılabilir.



Şekil 17. Mandrel Yöntemi (www.hardhatengineering.com, 2018)

2.1.2. Ekstrüzyon Yöntemi

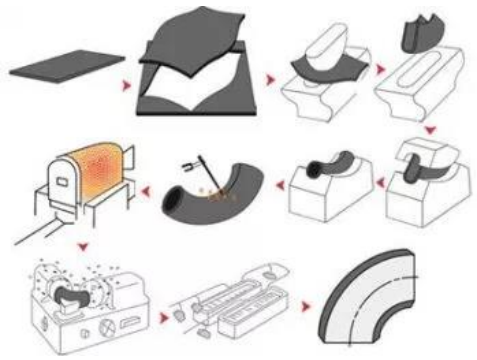
Soğuk ekstrüzyon yönteminde, bitmiş ürünle aynı çapa sahip bir boru bir kalıp içinden itilir ve istenen şekle getirilir. Genellikle paslanmaz çelikten küçük ve orta boy dirseklere uygulanır.



Şekil 18. Ekstrüzyon Yöntemi (www.hardhatengineering.com, 2018)

2.1.3. UO Yöntemi

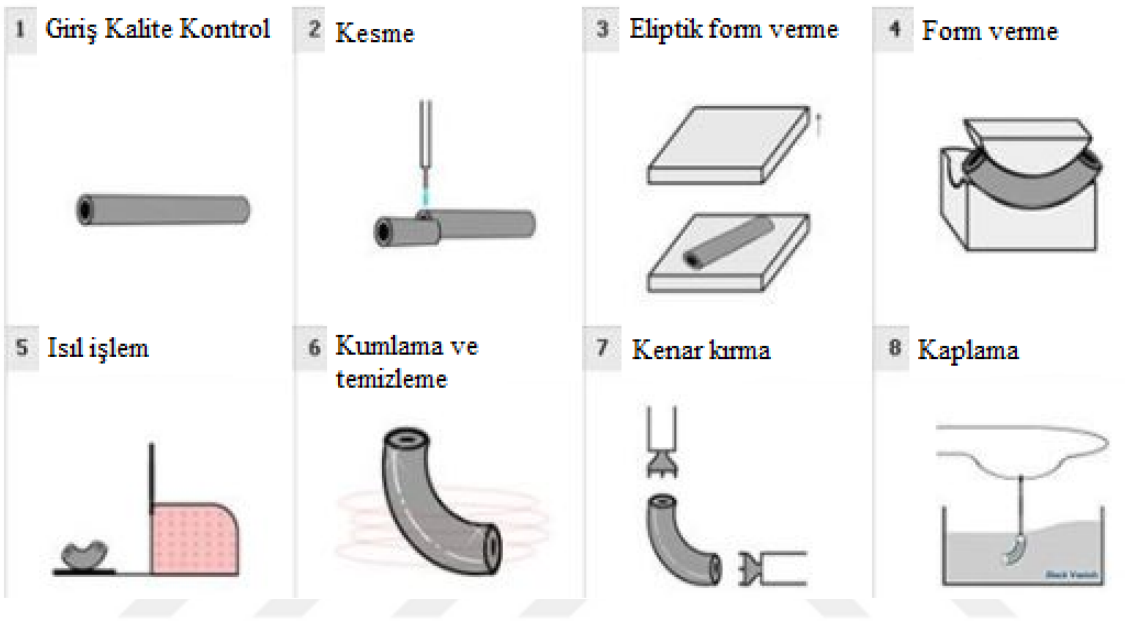
UO yöntemi, dirsek, T tipi ve redüktörlerin orta büyüklüğünü üretmek için kullanılır. Levha, özel olarak tasarlanmış bir şekilde kesilir, önce bir kalıp kullanılarak bir U-şekline ve daha sonra başka bir kalıp kullanılarak O-şeklinde veya Tumbler şekline dönüştürülür, bu nedenle bu yöntem UO yöntemi olarak bilinir. Tumbler şeklinde şekillendirilen bağlantı parçaları bir kez kapatıldıktan sonra, kapatma dikişinin içinden ve dışından kaynak yapılır. U şeklinde ve daha sonra O şeklinde bir kesim plakasıdır.



Şekil 19. UO Yöntemi (www.hardhatengineering.com, 2018)

2.1.4. Sıcak Şekillendirme Yöntemi

Sıcak şekillendirme kalıbı bükme yönteminde, bir boru ısıyı oluşturmaya ve kalıp içinde belirli bir şekle sahip olacak şekilde ısıtılır, bu işlem gerekli şekil, boyut ve duvar kalınlığını elde etmek için gerektiği kadar tekrarlanabilir. Genellikle bir mandrel üzerinde bükülemeyen kalın duvarlı parçalara uygulanır.

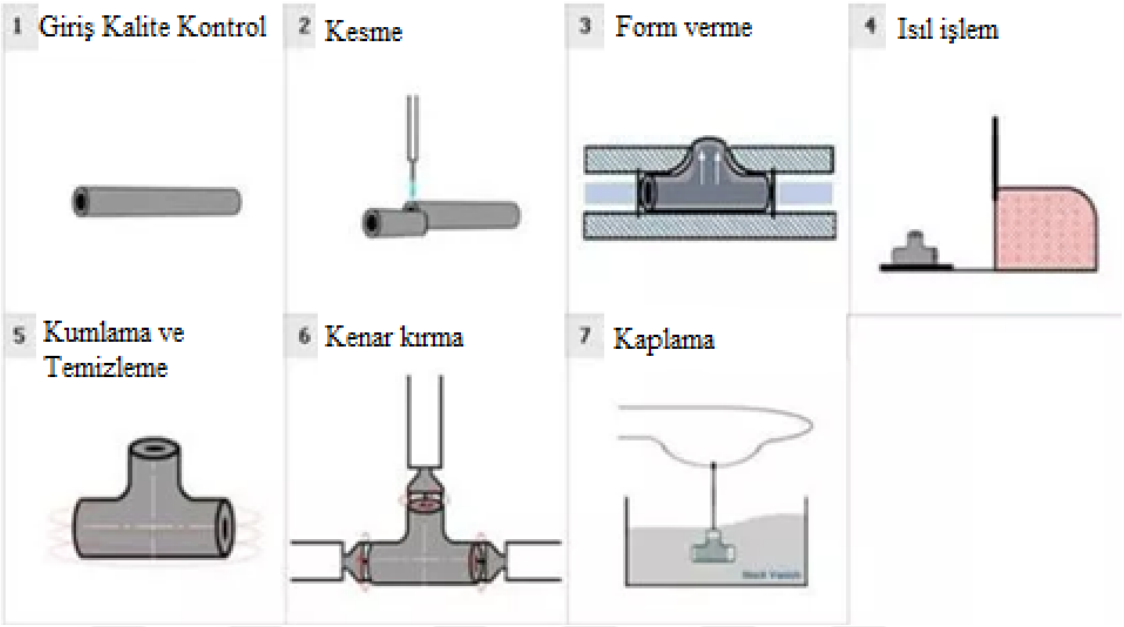


Şekil 20. Sıcak Şekillendirme Yöntemi (www.hardhatengineering.com, 2018)

2.1.5.T Tipi Üretim Süreci:

Hidrolik Bulge Yöntemi

T Tipi boru üretiminde hidrolik bulge yöntemi kullanılmıştır. Boru kesim parçası hidrolik kalıba yerleştirilir ve sıvı borunun içine doldurulur. Hidrolik basınç, daldaki sabit açıklıktaki dalı dışarı iter. Bu yöntem iyi yüzey kalitesini sağlar. Bununla birlikte, bu yöntemle daha yüksek kalınlıkta T tipi boru üretilemez.



Şekil 21. T Tipi Üretim Süreci (www.hardhatengineering.com, 2018)

2.1.6. Sıcak Ekstrüzyon Yöntemi

Büyük çaplı T tipi, duvar kalınlığı fazla olan ve/veya hidrolik çıkıntı yöntemiyle üretilemeyen zor işlenebilir özel malzeme sıcak ekstrüzyon yöntemi kullanılarak üretilir. Sıcak ekstrüzyon metodunda, normalde daha büyük çaplı boru, bitmiş ürün boyutuna göre kullanılır. Dal çıkış, ekstrüzyon aleti yardımıyla borudan ekstrüde edilir. Gövde ve borunun diğer boyutları da gerektiğinde kalıba basılarak ayarlanabilir.

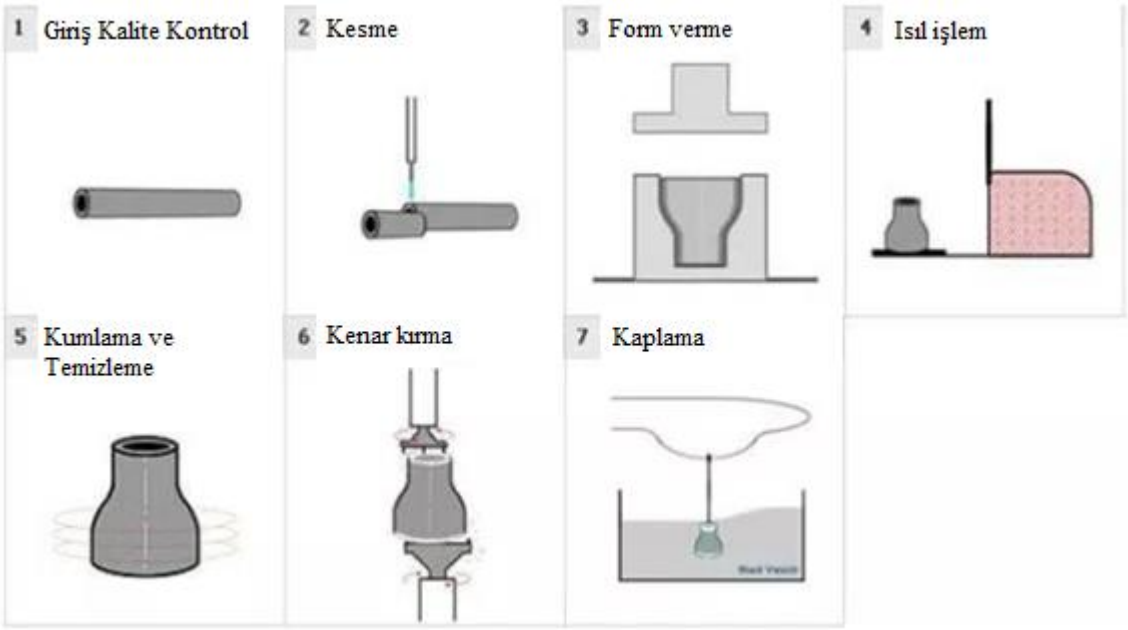


Şekil 22. Sıcak Ekstrüzyon Yöntemi (www.hardhatengineering.com, 2018)

2.2. REDÜKTÖR İMALAT SÜRECİ:

2.2.1. Dış Kalıp Yöntemi

Redüktörlerin üretimi için en yaygın yöntem dış kalıp metodudur. Boru dış kalıpta kesilir ve preslenir; borunun bir ucunu daha küçük bir boyuta sıkıştırılır. Bu yöntem, küçük ve orta boyutlu redüktörlerin imalatında faydalıdır.

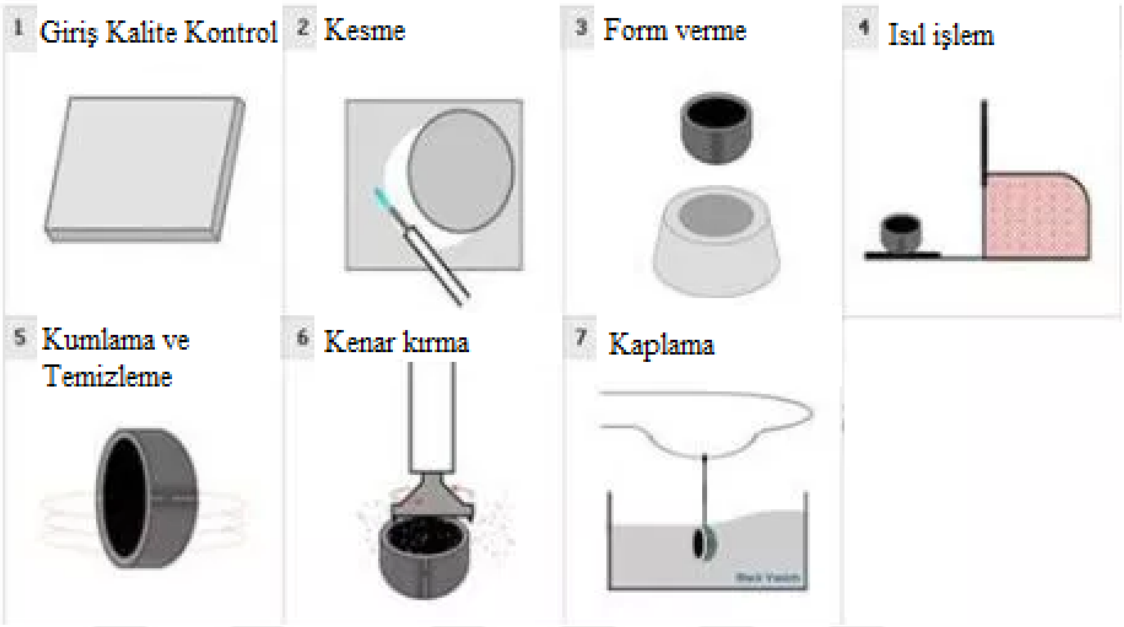


Şekil 23. Dış Kalıp Yöntemi (www.hardhatengineering.com, 2018)

2.3. KAPAK ÜRETİM SÜRECİ:

2.3.1. Derin Çekme Yöntemi

CAP Derin Çekme metodu ile üretilmektedir. Bu yöntemde, levha bir daire içinde kesilir ve derin çekme kalıbıyla oluşturulur.



Şekil 24. Derin Çekme Yöntemi (www.hardhatengineering.com, 2018)

2.4. STUBEND ÜRETİM PROSESİ:

2.4.1. Parlatma Metodu

Stubends veya lap eklem flanşları, parlatma yöntemi ile üretilmektedir. Boru ucu bir flanş veya flanş yüzü oluşturmak için dışarı atılmıştır. Saplama uçları, dövme bloğun nihai boyuta işlendiği dövme ile üretilir.

2.4.2. Isıl İşlem Montajı

Sıcak bitmiş boru bağlantı parçaları ısıl işlem gerektirmez, ancak soğuk bitmiş boru bağlantı parçaları için ASTM standardına göre ısıl işlem gereklidir.

Bağlantı Parçaları için Ortak Isıl İşlemler

Normalizasyon
Su Verme
Temperleme
Çözüm Tavlama
Stres Giderici
Yukarıdakilerin Kombinasyonu (www.hardhatengineering.com, 2018)

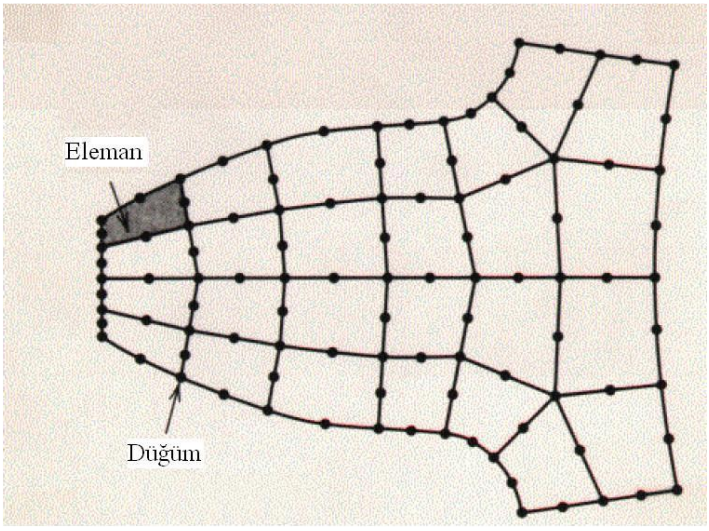
3. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

3.1.Sonlu Elemanlar Yönteminin Tanımı ve Kapsamı

Sonlu elemanlar yöntemi, çözülmesi zor olan problemleri daha basit adımlara ayırarak, her bir adımın kendi içerisinde çözülmesiyle sonuca ulaşılan bir çözüm yöntemidir. Bu yöntemde zengin malzeme kütüphanesi ve çok çeşitli kontak noktaları tanımlama imkânı sunulması çözümün irdelenmesi için avantaj sağlamaktadır. Kalıplar, aparatlar, fikstürler, kalıpçılık teknikleri ve işleme teknikleri ampirik metotlara dayalı deneysel çalışmaları zorunlu kulan yüksek maliyetli bir yöntemdir. Bu nedenle zamandan kazanmak ve yüksek maliyetten tasarruf etmek için kullanılacak olan kalıp, fikstür ve aparatın özelliklerinin önceden belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. (Yıldız ve Kırlı, 2003)

Sonlu elemanlar yönteminin kullanımındaki esas nedenler aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

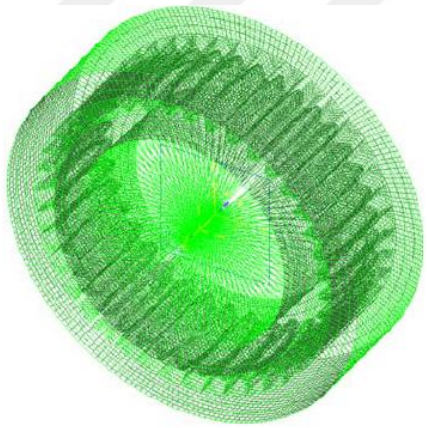
- Maliyeti azaltmak ve zamandan tasarruf etmek
- Hatasız ürün çıkarabilmek
- Prototip test miktarlarını minimize etmek
- Prototip aşamadaki uygun olmayan ürünlerin analizlerinin simülasyonu
- Ürün kalitesinin iyileştirilmesi ve mükemmelleştirilmesi
- Güvenilirliği artırmak (Liu, 2003)



Şekil 25. Dişli dişi için sonlu elemanlar modeli örneği (Rajadurai ve ark., 2014)

3.2 Sonlu Elemanlar Yönteminin Mühendislikteki Uygulama Alanları

- Makine Mühendisliği
- Havacılık ve Uzay Mühendisliği
- Otomobil Mühendisliği
- İnşaat Mühendisliği
- Yapısal Analiz (Statik, dinamik, doğrusal ve doğrusal olmayan)
- Termal Analizler
- Akış Analizleri
- Elektromanyetik Analizler
- Jeomekanik Analizler
- Biyomekanik Analizler



Şekil 26. Dişli Kaplin Modellemesi *(Liu, 2003)*

3.3. Sonlu Elemanlar Yönteminin Tarihçesi

Sonlu elemanlar yönteminin matematiksel kökleri 80 yıl öncesinde başlamaktadır. Deneme çözümlerini kullanarak diferansiyel denklemleri çözmek için yaklaşık yöntemler, köken olarak daha da eskidir. Lord Rayleigh ve Ritz diferansiyel denklemlerin çözümlerine yaklaşmak için deneme fonksiyonlarını kullandı. Galerkin de çözüm için aynı kavramı kullandı. Modern sonlu elemanlar yöntemine kıyasla önceki yaklaşımlardaki dezavantaj, deneme işlevlerinde kullanılan yöntem tüm alanın üzerinde uygulanması gerektiğidir. Galerkin yöntemi 1940'lara kadar, sonlu elemanlar yöntemi için çok güçlü bir temel sağlamıştır. Courant parçalı-sürekli fonksiyonlar kavramını tanıttığında, sonlu elemanlar yöntemi gerçek bir başlangıç yapmıştır. (Hutton, 2004)

1935 yılında Hans von tarafından ilk jet motorlu uçak yapılmıştır. Uçak mühendisleri jet motorunun icadı ile farklı sorunlarla karşılaşmaktaydı. Daha yüksek hızlarda, uçak gövdesi, kanat ve kanatçıkları daha büyük yüklere maruz kalmaktadır. Bu yüklere dayanmak için uçak gövdesi, kanat ve kanatçık yapılarının daha karmaşık analizine olan ihtiyaçlarla uğraşıyorlardı. Bu mühendisler, modern bilgisayarlardan yararlanmadan, topluca esneklik yöntemi olarak bilinen, bilinmeyenlerin kuvvetler ve bilinenlerin yer değiştirmeler olduğu matris kuvvet analizi yöntemlerini geliştirdiler. Sonlu elemanlar yöntemi, en çok kullanılan biçimi, bilinmeyenlerin uygulanan kuvvet sistemlerine yanıt olarak sistem yer değiştirmeleri olduğu yer değiştirme yöntemine karşılık gelir.

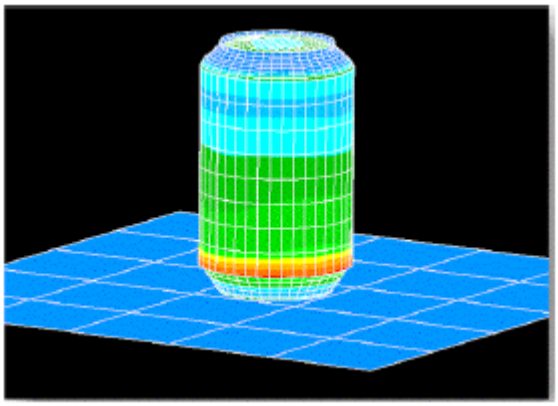
Sonlu eleman terimi ilk olarak 1960 yılında Clough tarafından düzlem gerilme analizi tanımlamasında kullanılmıştır ve o zamandan beri yaygın olarak kullanılmaktadır. 1960'lar ve 1970'lerdeki on yıllar boyunca, sonlu elemanlar yöntemi levha bükme, kabuk bükme, basınçlı kaplar ve elastik yapısal analizde genel üç boyutlu problemlerdeki uygulamalara ve ayrıca sıvı akışı ve ısıya genişletildi. Yöntemin daha büyük sapmalara genişletilmesi ve dinamik analizlerin geliştirme süreci bu yıllarda geliştirilmeye başlanmıştır. (Hutton, 2004)

Sonlu elemanlar yöntemi, çok büyük matrisler üzerinde gerekli işlemler nedeniyle hesaplama açısından yoğundur. Mühendislik analizinde kullanılmak üzere çok güçlü, yüksek hızlı araçlar olarak kabul edilen ana bilgisayar kullanıyordu. 1960'larda, ABD'nin uzay keşif programı ile bağlantılı olarak, sonlu elemanlar yazılım kodu NASTRAN geliştirildi. NASTRAN, ilk büyük sonlu eleman yazılım koduydu. Yüz binlerce serbestlik derecesine (düğüm alanı değişken hesaplamaları) sahipti. Yıllardan beri NASTRAN' ın geliştirilmesi, sonlu elemanlar analizi için birçok ticari yazılım paketi sunulmuştur. Bunlar arasında ANSYS, ALGOR ve COSMOS/M bulunmaktadır. Günümüzün hesaplama ortamında, bu paketlerin çoğu masaüstü bilgisayarlarda ve mühendislik iş istasyonlarında statik ve dinamik yapısal analiz, ısı analizinde büyük sorunlara çözümler elde etmek için kullanılabilir. (Hutton, 2004)

1943-Courant (Varyasyonel Yöntemler)
1956-Turner, Clough, Martin and Topp (Sertlik)
1960-Clough (Sonlu Elemanlar ve Düzlem Problemleri)
1970ler- Merkezi İşlem Birimi bilgisayarı uygulamaları

1980ler- Mikrobilgisayarlar, ilk ve son işlemciler

1990lar-Büyük yapısal sistemlerin analizleri



Şekil 27. Teneke kutusu düşme testi (Hutton, 2004)

3.4.Sonlu Elemanlar Yönteminde Yapısal Analiz Prosedürü

- Yapıyı parçalara bölün (Düğümler, elementler)
- Her bir element üzerindeki fiziksel büyüklüklerin davranışını tanımlayın
- Tüm yapı için yaklaşık bir sistem denklemi oluşturmak üzere düğümlerdeki öğeleri bağlayın (birleştirin)
- Düğümlerdeki bilinmeyen miktarları içeren denklem sistemini çözün (Örneğin; yer değiştirme)
- Seçilen elementlerde istenen nitelikleri hesaplayın (Örneğin; gerilme, gerinim)

3.5. Doğrusal Olmayan Analiz

3.5.1. Doğrusal Olmayan Yapı Durumu

Çok sayıda mühendislik çözümü doğrusal yaklaşım ile yapılabilir. Sonlu elemanlar yönteminde yapısal davranış:

Kd=F

Lineer olarak tanımlanabilir. Bu matris formatında:

K : Yapının direngenlik matrisi

d : Düğümsel (nodal) yer değiştirme vektörü

F : Düğümsel dış yük vektörü

Matris denklemi sonlu elemanlar analizi modelinin davranışını tanımlar. K yapı

direngenlik matrisi yapının sınır şartlarına, malzemesine ve şekline bağlıdır. Lineer analiz kabullerine göre, K matrisi değişmediğine göre, yukarıdaki denklem bir kere düzenlenir ve çözülür. Bu denklemin çözümü çok büyük modellerde bile, saniyeler içerisinde (günümüz iş istasyonlarında) çözümlenebilir. (www.muhendishesabi.com, 2021)

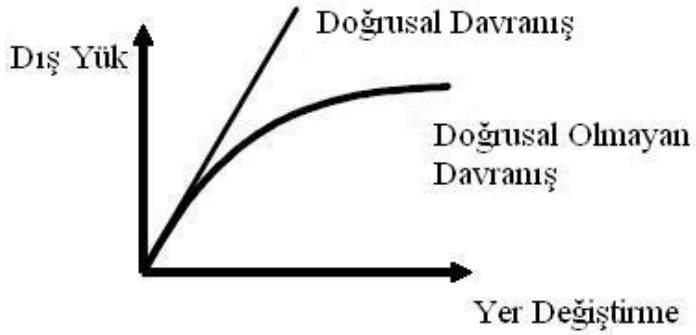
Lineer problemlerin karakteristikleri

- Yer değiştirmeler yük ile orantılıdır.
- Yapının direngenliği yük seviyesinden bağımsızdır.

Her ne kadar gerçek yapıların davranışı doğrusal olmasa da yer değiştirmeler ile yükler arasında bir orantı yoktur. Doğrusal olmayan yapı durumu genellikle çoğu pratik problemde ihmal edilebilir. Cebri lineer denklem takımları aşağıdaki kriterler sağlandığında oluşur. Bu kriterler:

- Yer değiştirmelerin küçük değerde olması ve denge denklemlerinde ihmal edilebilir olması
- Gerinim – gerilme değerleri arasında orantı olması
- Yük; yer değiştirmeden bağımsız ve yapının kalıcı olarak deformasyonuna neden olmaması

Çok sayıda problemin çözümü yukarıdaki yaklaşımlardan dolay bırakılmıştır. Yer değiştirmeler yapının şeklini değiştirecek kadar büyük olabilir ve bu nedenle ihmal edilemez. Çok sayıda malzeme doğrusal olmayan davranış gösterir ya da doğrusal malzeme modeli gerilme değeri belirli bir değeri aştıktan sonra kullanılamaz. Bununda ötesinde yükler yer değiştirmelere bağlı olarak yönelimlerini değiştirebilir. Sonuç olarak yapı doğrusal olmayan davranış gösterir ve bu kavram bir sonlu elemanlar analizinde varsa denge denklemleri doğrusal olmayan hale gelir.



Şekil 28. Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Davranış (Karabulut, 2007)

3.5.2 Doğrusal Olmayan Yapı Tipleri

Doğrusal olmayan yapı aşağıdaki gibi belirtilebilir:

Geometrik açıdan doğrusal olmayan durum: Yapının tüm geometrik biçimi üzerinde büyük yer değiştirmelerin etkisi

Malzemeye bağlı doğrusal olmayan durum: Malzeme davranışı doğrusal değildir. Modeller aşağıdaki gibi olabilir.

- Doğrusal olmayan elastik
- Elastoplastik
- Viskoelastik
- Viskoplastik

Sınır şartlarına bağlı doğrusal olmayan durum: Yer değiştirmeler sınır koşullarına bağlıdır. En sık sınır nonlineeritesine temas problemlerinde rastlanır. Doğrusal olmayan yapısal davranışın sonuçları aşağıdaki gibi tanınmak zorundadır:

Süper pozisyon prensibi uygulanamaz. Örneğin; birkaç yük durumu birleştirilemez. Doğrusal olmayan analiz sonuçları belirli bir ölçeğe uydurulamaz. Belirli bir zaman anına karşılık gelen yük ele alınabilir. Yüklerin uygulanma sırası önemli olabilir. Özellikle plastik deformasyon yük davranışına bağlıdır. Bundan ötürü doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizinde yükler ufak artışlar halinde bölünür. Yapısal davranış uygulanan yükle orantılı değildir. Yapıda var olabilecek ilk gerilmeler (kaynak ya da ısıl işlemden dolayı var olabilecek kalıntı gerilmeler) önemli olabilir.

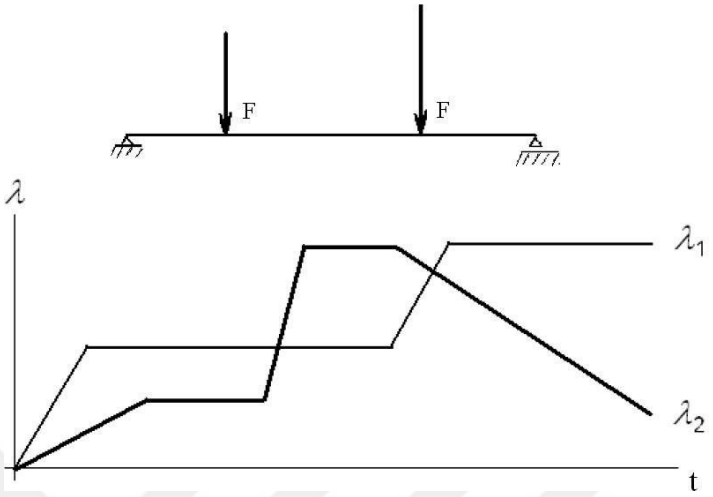
3.5.3 Zaman Eğrileri Kavramı

Doğrusal olmayan statik analizlerde yükler zaman eğrileri kullanılarak ardışık olarak uygulanır. Burada "zaman" değişkeni sözde bir zamanı temsil eder ve belirli bir adımda izafi olarak uygulanan yüklerin yoğunluğunu sembolize eder.
Doğrusal olmayan dinamik analizlerde ve doğrusal olmayan statik analizlerde zamana bağlı malzeme modelinde "zaman" kavramı gerçek zamanı temsil eder. Örnek olması açısından F_1 ve F_2 yüklü olan basit kiriş yapısı şekilde gösterilmiştir.

$F_1 = \lambda_1(t)$ ve $F_2 = \lambda_2(t) f_2$ (1.1)

F_1 ve F_2 : Nominal (giriş) kuvvet değerleri

λ_1 ve λ_2 : Zamana bağlı yük fonksiyonları



Şekil 29. Zaman eğrisi için örnek yükleme durumu (Karabulut, 2007)

Zaman adımının seçimi problemin doğrusal olmayan seviyesi ve çözüm prosedürü gibi birkaç faktöre dayalıdır. Genellikle tatmin edici hassasiyetteki bir doğrusal olmayan yapının simüle edilmesi için küçük adımlar gerekli olacaktır. Diğer taraftan çok sayıdaki küçük zaman adımı CPU kullanım zamanı tüketimini arttırır. Bilgisayar yazılımları genellikle çözüm sürecinin kısaltılması için uygun otomatik adım algoritmaları ile donatılmıştır.

3.5.4. Geometrik Açıdan Doğrusal Olmayan Durum

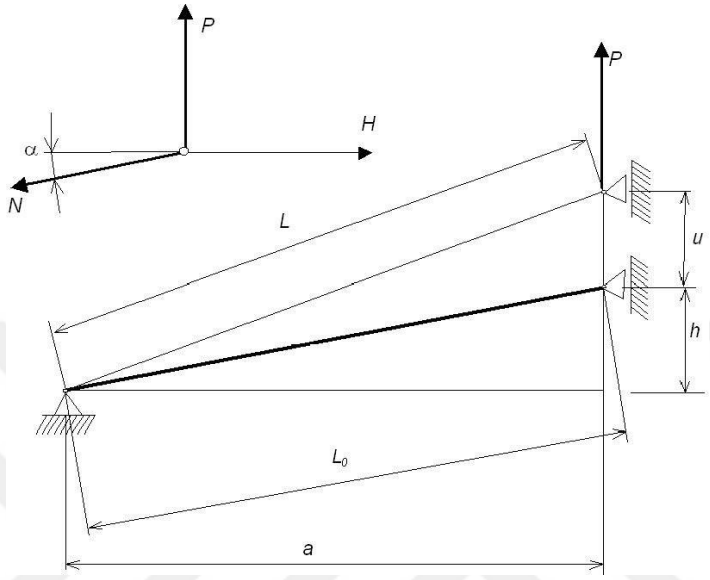
3.5.4.1. Büyük Yer değiştirme ve Küçük Gerinim Davranışı

Geometrik açıdan doğrusal olmayan durumu incelemek için basit bir örnekle başlanılabilir. Yapı oldukça basittir ve şekil 2.4'te görüldüğü üzere bir çubuk elemandan oluşmaktadır. Başlangıçta P kuvveti ve N eksenel kuvveti sıfırdır ve çubuğun ilk boyu L_0 dır.

Şekil 30' da gösterilen serbest cisim diyagramı kullanıldığında,

$$N\sin\alpha - P = 0 \qquad N\frac{h+u}{L} - P = 0 \tag{1.2}$$

Malzemenin lineer olarak elastik olduğunu ve E elastiklik modülüne sahip olduğu düşünüldü. Çubuk elemanın A kesitindeki küçük değerde olacak deformasyonlar ihmal edildi.



Şekil 30. Doğrusal olmayan yapıya örnek: Tek elemanlı çubuk yapısı. (Karabulut, 2007)

Bu durumda çubuktaki eksenel kuvvet:

$$\mathbf{N = EA_0\varepsilon} \tag{1.3}$$

A_0 : İlk kesit

ε : Mühendislik gerinimi

E : Elastiklik Modülü

L_0 : İlk boy

L : Son boy

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} \tag{1.4}$$

Şekilden de görüleceği üzere uzunluklar aşağıdaki gibidir:

$$L_0 = \sqrt{a^2 + h^2} \text{ ve } L = \sqrt{a^2 + (h+u)^2} \tag{1.5}$$

Bu durumda ε değeri karmaşık hale gelecektir ve bu problemin üstesinden gelebilmek için Green gerinim ifadesi aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$\varepsilon_G = \frac{L^2 - L_0^2}{2L_0^2} \tag{1.6}$$

Örnek durum için Green gerinim ifadesi:

$$\boldsymbol{\varepsilon_G = \frac{h}{L_0}\frac{u}{L_0} + \frac{1}{2}\left(\frac{u}{L_0}\right)^2} \quad \text{haline gelecektir.} \tag{1.7}$$

1.4 ve 1.4 denklemlerinden

$$\varepsilon_G = \frac{L^2 - L_0^2}{2L_0^2} = \frac{L - L_0}{2L_0}\frac{L + L_0}{L_0} = \frac{1}{2}\varepsilon\frac{L + L_0}{L_0} = \frac{1}{2}\varepsilon\left(\frac{L + L_0}{L_0} + 1 - 1\right) = \frac{1}{2}\varepsilon\left(\frac{L - L_0}{L_0} + \frac{2L_0}{L_0}\right)$$

ya da $\varepsilon_G = \varepsilon + \frac{1}{2}\varepsilon^2$ (1.8)

Temel denklemin aşağıdaki gibi elde edildiği göz önünde bulundurulursa

$$\boldsymbol{\sigma = \frac{N}{A_0} = E\varepsilon} \tag{1.9}$$

aynı temel denklem Green gerinimi kullanılarak aşağıdaki şekli alır:

$$\boldsymbol{\sigma = E\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\epsilon_G = E\frac{\varepsilon}{\varepsilon + \frac{1}{2}\varepsilon^2} = \frac{E}{1 + \frac{1}{2}\varepsilon}\varepsilon_G} \tag{1.10}$$

Bu temel denklemde E yerine $E^* = E/[1 + (1/2)\varepsilon]$ değerini kullanmamız gerektiği anlamına gelir. Ancak küçük olan mühendislik gerinimi Green gerinimi ve mühendislik gerinimi arasındaki farka eşittir ve ihmal edilebilir. Örneğin orta sertlikteki bir çelik malzemesi için $\varepsilon = 0{,}002$ dir. $\varepsilon_G = 0{,}02 + 0{,}5(0{,}02)^2 = 0{,}002002$. Gerinimin küçük olduğu varsayımı ile $\sigma \approx E\varepsilon_G$ olarak yazılabilir ve 1.7 denklemine göre.

$$\boldsymbol{N = \frac{EA_0}{L_0^2}\left(hu + \frac{1}{2}u^2\right)} \tag{1.11}$$

1.11 denkleminin 1.2 denklemi yerine koyulması ve $L \approx L_0$ olduğu varsayımı ile

$$\frac{EA_0}{2L_0^3}(u^3 + 3hu^2 + 2h^2u) = P \text{ denklemi elde edilir.} \tag{1.12}$$

Açıkça görüldüğü üzere denklem u yer değiştirme ifadesinin doğrusal olmayan bir denklemi haline gelmiştir. Bu da P ile u yer değiştirme arasındaki ilişkinin doğrusal olmadığını göstermektedir.

1.2 ve 1.12 denklemlerini elde etmenin başka bir yolu da mevcuttur. Virtüel yer değiştirme prensibinden yapı dengede halinde iken iç ve dış kuvvetlerin virtüel işi kinematik olarak virtüel yer değiştirmelere eşittir.

Tek serbest dereceli bu yapı için sadece tek bir yer değiştirme δu mümkündür ve virtüel yer değiştirme prensibi aşağıdaki şekle sahiptir:

$$\int_V \sigma \delta \varepsilon_g \, dV = P \delta u \qquad (1.13)$$

Burada $\delta \varepsilon_g$ virtüel yer değiştirmeye karşılık gelen virtüel gerinimdir. 1.7 denkleminden virtüel gerinim aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\delta \varepsilon_g = \frac{d\varepsilon_G}{du} \delta u = \frac{d}{du}\left[\frac{h}{L_0}\frac{u}{L_0} + \frac{1}{2}\left(\frac{u}{L_0}\right)^2\right] \delta u = \frac{h+u}{L_0^2} \delta \mathrm{u} \qquad (1.14)$$

Virtüel yerdeğiştirmeler prensibinde virtüel yerdeğiştirme sonsuz küçüklükte varsayılır ve gerilme $\sigma = (N / A)$ değişime uğramaz. σ ve $\delta\varepsilon_G$ bu örnekte tüm hacim için sabit olduğuna dikkat edilirse hacim değişimi küçük gerinimlerden ötürü ihmal edilebilir $V \approx V_o = A_o L_o$ ve 1.13 denklemi aşağıdaki hali alır:

$$\mathbf{N \frac{h+u}{L_0^2} \delta u A L_0 = P \delta u}$$

Denklemin son hali

$$\mathbf{N \frac{h+u}{L_0} = P}$$

Virtüel yerdeğiştirme prensibi kullanımı karmaşık yapıların denge koşullarını elde etmek için uygundur. Genel üç boyutlu bir durum için üç yerdeğiştirme *u v w* ve Green geriniminin altı bileşeni vardır.

$$\varepsilon_x = \frac{\delta u}{\delta x} + \frac{1}{2}\left[\left(\frac{\delta^u}{\delta x}\right)^2 + \left(\frac{\delta v}{\delta x}\right)^2 + \left(\frac{\delta w}{\delta x}\right)^2\right], \qquad \gamma_{xy} = \frac{\delta u}{\delta y} + \frac{\delta v}{\delta x} + \frac{\delta u}{\delta x}\frac{\delta u}{\delta y} + \frac{\delta v}{\delta x}\frac{\delta v}{\delta_y} + \frac{\delta w}{\delta x}\frac{\delta w}{\delta y}$$

$$\varepsilon_y = \frac{\delta u}{\delta x} + \frac{1}{2}\left[\left(\frac{\delta^u}{\delta x}\right)^2 + \left(\frac{\delta v}{\delta x}\right)^2 + \left(\frac{\delta w}{\delta x}\right)^2\right], \qquad \gamma_{xz} = \frac{\delta u}{\delta z} + \frac{\delta w}{\delta x} + \frac{\delta u}{\delta x}\frac{\delta u}{\delta z} + \frac{\delta v}{\delta x}\frac{\delta v}{z} + \frac{\delta w}{\delta x}\frac{\delta w}{\delta z}$$

$$\varepsilon_z = \frac{\delta u}{\delta x} + \frac{1}{2}\left[\left(\frac{\delta^u}{\delta x}\right)^2 + \left(\frac{\delta v}{\delta x}\right)^2 + \left(\frac{\delta w}{\delta x}\right)^2\right], \qquad \gamma_{yz} = \frac{\delta v}{\delta z} + \frac{\delta w}{\delta y} + \frac{\delta u}{\delta y}\frac{\delta u}{\delta z} + \frac{\delta v}{\delta y}\frac{\delta v}{\delta z} + \frac{\delta w}{\delta y}\frac{\delta w}{\delta z} \tag{1.15}$$

$\mathbf{u_i}, \mathbf{v_i}, \mathbf{w_i}$ düğümsel yer değiştirme ve $\mathbf{N_i}$ şekil fonksiyonu aşağıdaki şekilde belirlenebilir:

$$\boldsymbol{u} = \sum_i \boldsymbol{N_i u_i}, \boldsymbol{v} = \sum_i \boldsymbol{N_i v_i}, \boldsymbol{w} = \sum_i \boldsymbol{N_i w_i} \tag{1.16}$$

Bu denklemlerin Green gerinimi ifadesi ile yorumlanması sonucunda;

$$\varepsilon = \left(B_L + \frac{1}{2}B_N\right)d\Big) \tag{1.17}$$

denklemi elde edilir. Bu denklemin matriks formu aşağıdaki gibidir:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{Bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon_x} \\ \boldsymbol{\varepsilon_y} \\ \boldsymbol{\varepsilon_z} \\ \boldsymbol{\gamma_{xy}} \\ \boldsymbol{\gamma_{xz}} \\ \boldsymbol{\gamma_{yz}} \end{Bmatrix} \tag{1.18}$$

d düğüm yerdeğiştirme matrisidir. B_L bu küçük değere sahip yerdeğiştirme matrisi, B_N ise Green gerinim değerinin yerdeğiştirmelerin doğrusal olmayan bir fonkisyonu olduğunu yansıtan matristir. Bu matrisin elemanları *d* düğümsel yerdeğiştirmelerinin doğrusal fonksiyonudur.

Virtüel gerinimin virtüel düğümsel yerdeğiştirmelere karşılık geldiği gösterilmelidir.

$$\delta_\varepsilon = (B_L + B_N)\delta \mathrm{d} = \mathrm{B}\delta \mathrm{d} \quad (1.19)$$

Virtüel yerdeğiştirme prensibine göre; sistem dengede ise iç kuvvetlerin virtüel iş değeri dış kuvvetlerin virtüel iş değerine eşit olmalıdır ve bu prensip aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\int_V \boldsymbol{\delta \varepsilon^T \sigma dV = \delta d^T F} \quad (1.20)$$

Bu denklemde F düğümsel kuvvetler matrisidir.

Gerilme ve gerinim arasındaki doğrusal ilişki malzeme $\sigma = D\varepsilon$, şeklindedir ve malzeme elastiklik katsayısıdır.

1.19 denkleminin 1.20 da yerine koyulması ile

$\delta d^T \int_V B^T \sigma dV = \delta d^T F$ elde edilir. (1.21)

$$\int_V B^T \sigma dV = F \quad (1.22)$$

Yukarıda son belirtilen denklem; bilinmeyen düğümsel yer değiştirmeler için matris formunda doğrusal olmayan denklem takımıdır.

$$R(d) = F \quad (1.23)$$

3.5.5. Artımsal ve Tekrarlı Çözüm Yöntemleri

Basit çubuk yapı örneğinden de görüleceği üzere büyük yer değiştirmeler doğrusal olmayan denge denklemleri (1.2 ya da 1.12) vermektedir. Sonlu elemanlar analizinde genellikle doğrusal olmayan denklem takımları vardır (1.23). Basit çubuk yapı ile başlanacak olunursa (1.2) ve (1.12) denklemi aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$R(u) = P \tag{1.24}$$

Burada;

$$\boldsymbol{R(u) = N\frac{h+u}{L_0} = \frac{EA}{2L_0^3}(u^3 + 3hu^2 + 2h^2u)} \tag{1.25}$$

Yukarıdaki doğrusal olmayan denklemi çözmenin temel adımı doğrusallaştırma yaklaşımıdır. Bu da kuvvetteki küçük artışın ve bu artışa karşılık gelen yer değiştirmedeki artış ile sağlanır. P kuvveti ve u yer değiştirme değeri için $R(u+\mathrm{d}u)$, $P_1 = P+\mathrm{d}P$ ve ilgili yerdeğiştirme $u_1 = u+\mathrm{d}u$ ifadeleri lineer fonksiyon ile yaklaşım yapılabilir.

$$R(u+\mathrm{d}u) = R(u) + \left(\frac{\mathrm{d}R}{\mathrm{d}u}\right)_u \mathrm{d}u$$ ve denklemin yaklaşık durumu

$$R(u) + \left(\frac{\mathrm{d}R}{\mathrm{d}u}\right)_u \mathrm{d}u = P + \mathrm{d}P$$

(1.23) denklemi varsayımı ile;

$$\boldsymbol{\left(\frac{\mathrm{d}R}{\mathrm{d}u}\right)_u \mathrm{d}u = \mathrm{d}P} \tag{1.26}$$

ya da $\mathbf{K_T(u)du = dP}$

(1.27)

$$K_T = \left(\frac{\mathrm{d}R}{\mathrm{d}u}\right)_u \tag{1.28}$$

K_T tanjant direngenliği olarak adlandırılır. Çubuk yapısının özel bir durumu için tanjant direngenliği aşağıdaki şekilde kolaylıkla bulunur:

$$K_T = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}u}\left(\frac{u+h}{L_0}\right)N + \left(\frac{u+h}{L_0}\right)\frac{\mathrm{dN}}{\mathrm{d}u}$$

(1.10) denkleminin kullanılması ile;

$$\frac{\mathbf{dN}}{\mathbf{d}\boldsymbol{u}} = \frac{\boldsymbol{EA}}{\boldsymbol{L_0}}\frac{\boldsymbol{u+h}}{\boldsymbol{L_0}}$$

$$K_T = K_0 + K_u + K_\sigma \tag{1.29}$$

Burada;

$K_0 = \frac{EA}{L_0}\left(\frac{h}{L_0}\right)^2$ Doğrusal direngenliktir.

$K_u = \frac{EA}{L_0}\left[2\frac{u}{h} + \left(\frac{u}{h}\right)^2\right]\left(\frac{h}{L_0}\right)^2$ Başlangıç yer değiştirme direngenliğidir.

$K_\sigma = \frac{N}{L_0}$ Başlangıç gerilme direngenliğidir.

Yerdeğiştirmeden bağımsız olan doğrusal direngenlik küçük deplasman analizlerinden tanınır. Başlangıç yerdeğiştirme direngenliği; yerdeğiştirmenin direngenlik üzerine olan etkisini yansıtır. Başlangıç gerilme direngenliği; yük artırımından önce çubuk yapıda eksenel kuvvet olduğunu gösterir.

1.21 ve 1.22 denklemlerince tanıtılan genel durum;

$$R(d + \mathrm{d}d) = R(d) + K_T\mathrm{d}d$$
$$K_T = \mathrm{d}d = \mathrm{d}F \tag{1.30}$$

$K_T = \frac{\partial R}{\partial d}$ ifadesine tanjant direngenlik matrisi denir.

$$K_T = K_0 + K_u + K_\sigma \tag{1.31}$$

Burada;

K_T : Doğrusal direngenlik matrisi

K_u : Başlangıç deplasman direngenlik matrisi

K_o : Başlangıç gerilme direngenlik matrisi

Tanjant direngenlik matrisinin tanıtılması çok önemlidir. Sonraki bölümlerde en çok kullanılan çözüm yöntemlerinden kısaca bahsedilecektir.

3.5.5.1 Artımsal Yöntem

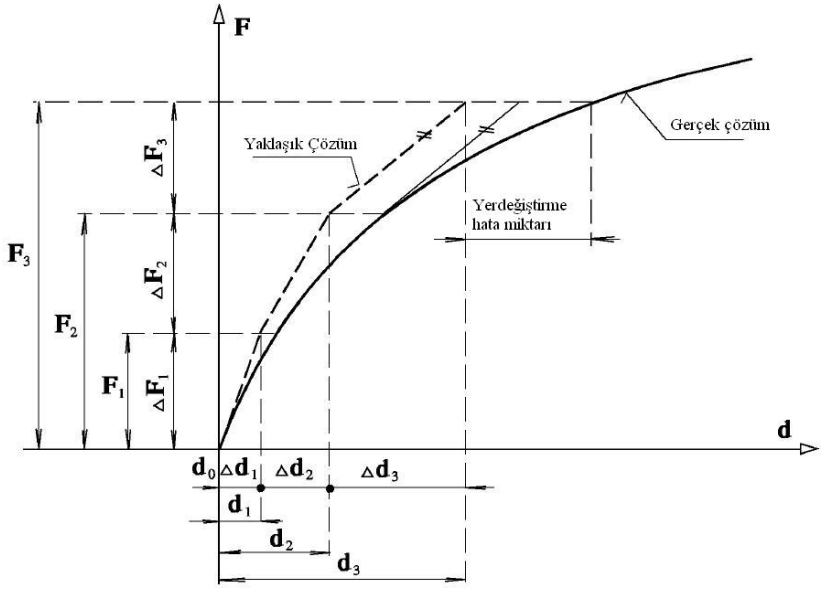
Yük $\triangle F_i$ değerindeki çok küçük artışlara bölünür. Deplasman artışları $\triangle d_i$ eş zamanlı lineer denklem takımlarından hesaplanır.

$$\mathbf{K_{T(i-1)}\Delta d_i = \Delta F_i} \quad (1.32)$$

ve güncellenmiş çözüm aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\mathbf{d_i = d_{i-1} + \Delta d_i} \quad (1.33)$$

Prosedür Şekil 31'de gösterilmiştir. Açıkça görüleceği üzere bu yöntem etkisizdir ve hata birikiminden dolayı güvenilir değildir.



Şekil 31. Artımsal çözüm yöntemi (Karabulut, 2007)

3.5.5.2. Newton – Raphson Yöntemi

İlk deplasman değeri d_0 'ın bilindiği varsayılsın. İlk yer değiştirmeye karşılık gelen F kuvveti aşağıdaki lineer denklemin çözülmesi ile hesaplanır:

$$K_{T(0)} d_1 = F \qquad (1.34)$$

Burada $K_{T(0)} = K_T(d_0)$ ifadesi ilk deplasmanlar için hesaplanan tanjant direngenlik matrisidir. d_1 deplasmanı bilinmediğinden (1.23) denklemi bulunamaz ve;

$$R(d_1) \neq F$$

Bunun anlamı gerilme kuvvetlerinin olduğudur.

$$r_1 = R(d_1) - F \qquad (1.35)$$

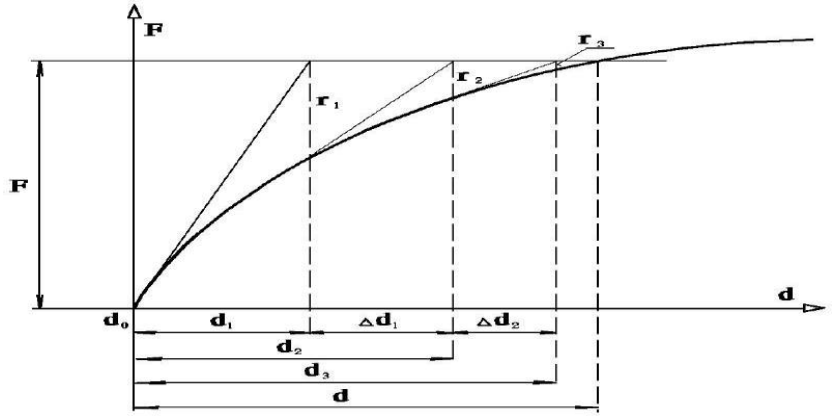
Yeni tanjant direngenlik matrisinin hesaplanmasıyla $\boldsymbol{K_{T(i)} = K_T(d_1)}$ ve yeni cebri lineer denklem takımlarının çözülmesi ile;

$$\mathbf{K_{T(1)} \triangle d_1 = r_1} \qquad (1.36)$$

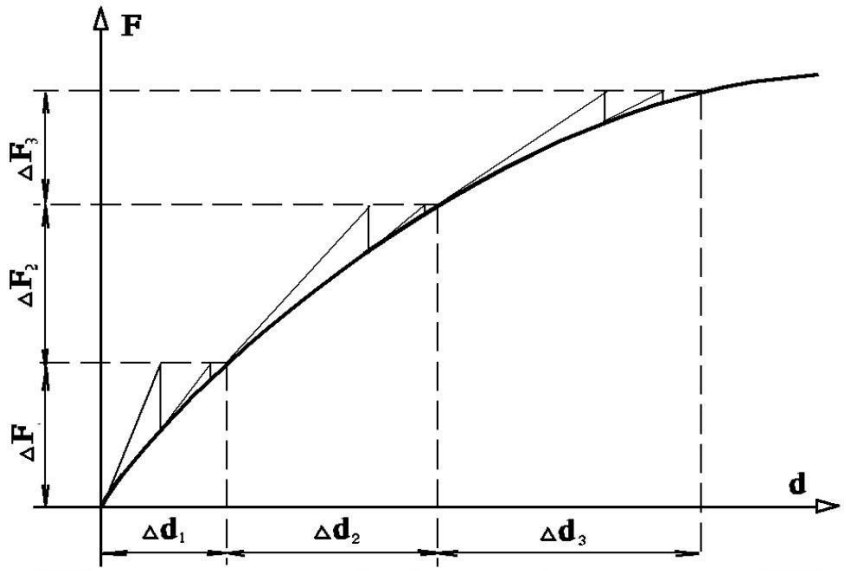
geliştirilmesi ile geliştirilmiş bir çözüm elde edilir:

$$d_2 = d_1 + \Delta d_1 \qquad (1.37)$$

Eğer $\mathbf{r_2 = R(d_2) - F \neq 0}$ ise prosedür doğru çözümün elde edilmesine dek tekrarlanır. Artımlar Şekil 32'de gösterilmiştir. Bu yöntem Newton – Raphson yöntemi (NR) olarak bilinir ve Şekil 33'de gösterildiği üzere çoğunlukla artımsal yöntemle birleştirilir.



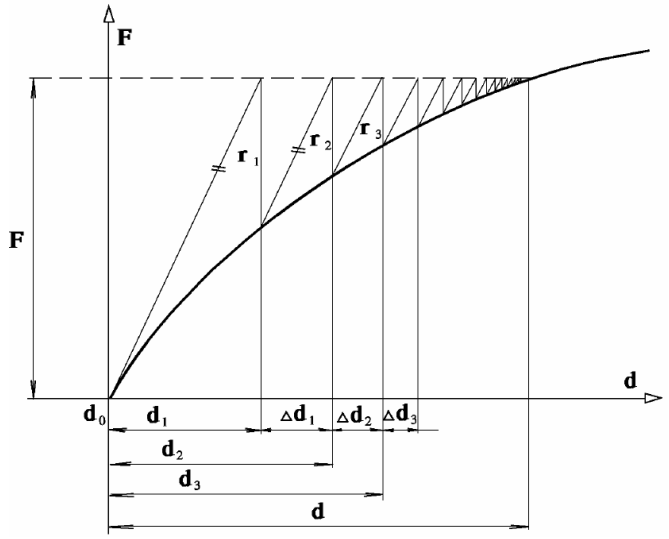
Şekil 32. Newton-Raphson yöntemi (Karabulut, 2007)



Şekil 33. Newton – Raphson yöntemi ile artımsal yöntemin birlikte kullanılması. (Karabulut, 2007)

3.5.5.3. Düzeltilmiş Newton – Raphson Yöntemi

Standart olan NR yöntemi birçok durumda etkin olmasına rağmen büyük sistemler için lineer denklem takımlarının çözümünde yetersiz kalabilir. Düzeltilmiş NR yöntemi standart yöntemden farklıdır ve direngenlik matrisinin güncellenmiş halidir. Şekil 34'den görüleceği üzere tanjant direngenlik matrisi şekillenmiştir ve başlangıçta artımlar ile bileşenlerine ayrılmıştır. Bu yöntemin avantajı hesap süresini korumaktadır. Çünkü tanjant direngenlik matrisinin çarpanlarına ayrılması sadece kuvvet artırımından dolayı gerçekleşir. Diğer taraftan artımların sayısı genellikle daha çoktur.



Şekil 34. Düzeltilmiş Newton-Raphson yöntemi. (Karabulut, 2007)

3.5.6.Büyük Yerdeğiştirme ve Büyük Gerinim Davranışı

Gerinim büyük olduğunda yapının şekil ve hacim değişimini ihmal etmek kabul edilemez. Basit çubuk yapı için örneklendirilecek olunursa; (1.11) ve (1.12) denklemlerindeki $\mathbf{A_0}$ çubuk kesit alanı için anlık kesit alanı A ve $\mathbf{L_0}$ çubuk boyu için anlık çubuk boyu L'nin bilinmesi gerekir.

Buna uygun olarak; virtüel yerdeğiştirme prensibinin vurgulandığı (1.20) denklemindeki integrasyon anlık hacme göre ele alınmalıdır. Anlık hacim bilinmediğinden, anlık hacme yerdeğiştirmelere bağlıdır ve yerdeğiştirmeler de bilinmemektedir, yerdeğiştirmeler ilk hesaplanması gereken değerlerdir. Bu problemi çözmek için integrallerin bilinen bir hacmi ele alacağı transformasyon ifadesi gereklidir.

3.5.6.1. Toplam Langrange Formülasyonu

Toplam langrange formülasyonunda tüm integraller yapının deforme olmamış haline göre hesaplanır.

$$\int_{V_0} \boldsymbol{\delta \varepsilon_G^T \sigma_P} \mathrm{d}\boldsymbol{V} = \boldsymbol{\delta d^T F} \qquad (1.38)$$

Transformasyondan dolayı yeni gerilme ifadesi Piola -Kirchhoff gerilme tensörü σ_P olarak adlandırılır ve Green gerilme tensörü ε_G ile ilişkilendirilmelidir.

3.5.6.2. Güncellenmiş Langrange Formülasyonu

Güncellenmiş langrange formülasyonunda; bilinen deforme olmuş "i" biçimi başlangıç olarak kabul edilir ve sonraki biçimi (i+1) devamlı olarak güncellenir.

$$\int_{V_0} \delta\left({}^{i+1}\varepsilon_A^T\right)^{i+1} \sigma_C \mathrm{d}V = \delta d^T F \qquad (1.39)$$

(1.40) denkleminin sol tarafında $\boldsymbol{\sigma_c}$ Cauchy gerilme tensörüdür ve $\boldsymbol{\varepsilon_A}$ Almansi gerinim tensörüdür. $\boldsymbol{{}^{i+1}\varepsilon_A}$ ve $\boldsymbol{{}^{i+1}\sigma_C}$ notasyonu gerilme ve gerinimin (i+1) konfügrasyonunda olduğu anlamına gelir. i anlık durumu için integrasyon V_i hacmi üzerinden yapılır. Toplam langrange ve güncellenmiş langrange formülasyonlarında gerilme ve gerinimin farklı ölçülerinin kullanımı; iç kuvvetler virtüel işinin integrasyonu yapılan hacim üzerinde dikkate alınmayacağı koşulunu izler.

3.5.7.Malzemeye Bağlı Doğrusal Olmayan Durum

3.5.7.1.Giriş

Doğrusal elastik sonlu elemanlar analizi; doğrusal temel gerilme – gerinim denklem eşitliği üzerine kuruludur:

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D}\boldsymbol{\varepsilon} \tag{1.40}$$

Burada *D* malzeme matrisi; elastiklik modülü ve poisson oranı gibi sabit değerlerin bir fonksiyonudur. Sabit *D* malzeme matrisi gerinim – yerdeğiştirme ilişkisiyle bağlantılı olan sabit *K* matrisini verir.

$$\varepsilon = \mathrm{Bd} \tag{1.41}$$

$$K = \int_V B^T DB\mathrm{d}V \tag{1.42}$$

Lineer elastisiteden hareketle elastik temel denklemin (1.40) doğrusal olmadığı durumda malzeme matrisi de (D) sabit değildir. Sabit olmayan D malzeme matrisi doğrusal olmayan yapı denklemleri verir. Sonuç olarak; Yerdeğiştirme virtüel iş prensibinden türetilen denge denklemleri doğrusal olmayan özellik gösterir. Bu denklemlerin çözümü geometrik açıdan doğrusal olmayan durumdaki yöntemlerle aynı temelde yapılır. Genellikle yük küçük artımlara bölünür ve her bir artım için tekrarlamalar yapılır (Düzeltilmiş NR ve NR yöntemi). Bununda ötesinde her bir yük artırımı için gerilme tekrarlamaları da yapılmalıdır. Malzemeye bağlı doğrusal olmayan durumlar sıklıkla geometrik ve/veya sınır şartlarına bağlı doğrusal olmayan durumlar ile birleştirilir.

3.5.7.2.Doğrusal Olmayan Elastik Model

Malzemelerin doğrusal olmayan davranışı farklı formüller ile ifade edilebilir. Aralarından en kolay anlaşılır olanı toplam format yöntemidir. Şekil 35‘ten de görüleceği üzere gerilme ve gerinimler E_s sekant elastiklik modülü açısından tanımlanır.

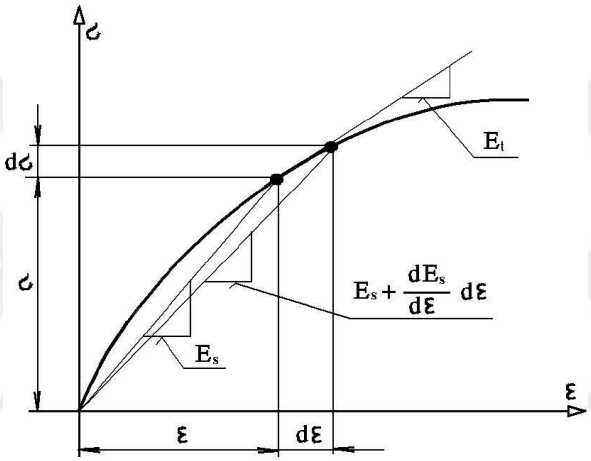
$$\sigma = E_s\varepsilon(\varepsilon) \tag{1.43}$$

Hipo – elastik biçimde gerilme ve gerinim artımları arasındaki ilişki E_t tanjant elastiklik modülü açısından tanımlanır.

$$\mathbf{d\varepsilon = E_t(\varepsilon)d} \qquad (1.44)$$

Doğrusal olmayan elastik malzeme hiperelastik formatta da formüle edilebilir. Bu formatta deformasyon enerji yoğunluğu fonksiyonu *U* ve buna karşılık gelen tamamlayıcı enerji yoğunluğu fonksiyonunun U^* varlığı kabul edilir.

$$\sigma = \frac{dU}{d\varepsilon} \text{ ve } \varepsilon = \frac{dU^*}{d\sigma} \qquad (1.45)$$

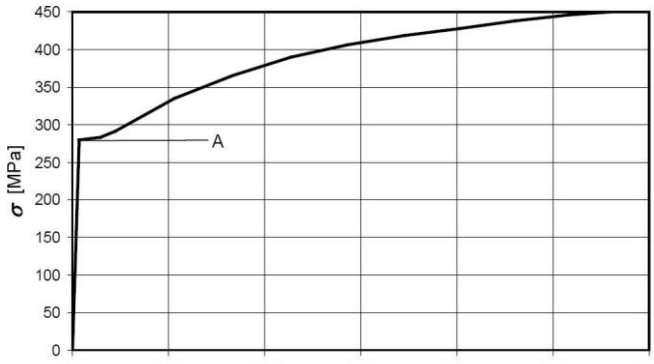


Şekil 35. Doğrusal olmayan elastik malzeme modeli. (Karabulut, 2007)

3.5.7.3.Elastoplastik Malzeme Modeli

3.5.7.3.1.Akma Kriteri

Deneyler doğrusal elastik modelin sınırlı gerilme aralıklarında kabul edilebilir olduğunu göstermektedir. Örnek olarak Şekil 2.10'da yumuşak çelik bir malzemenin gerilme –

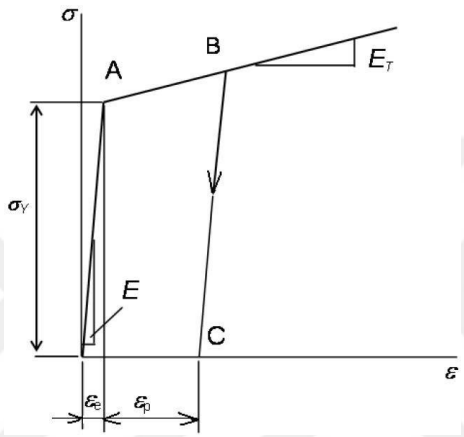


Şekil 36. Yumuşak çelik için tipik bir gerilme-gerinim eğrisi (Karabulut, 2007)

gerinim eğrisi verilmiştir. A noktası ile temsil edilen akma değerine kadar deformasyonlar elastiktir ve gerilme – gerinim ilişkisi $\sigma = E\varepsilon$ olarak belirtilebilir.

Gerilme akma noktasını aştığında bir elastoplastik kanun gerilme ve gerinim arasındaki ilişkiyi belirlemektedir.

Şekil 37'de akma gerilmesi, elastiklik modülü ve tanjant modülü ile tanımlı iki çizgili yaklaşım gösterilmiştir. $\mathbf{E_t = 0}$ olduğunda malzeme modeli tam plastik davranış gösterir. $\mathbf{E_t \neq 0}$ ise malzemede pekleşme meydana gelir.



Şekil 37. Doğrusal pekleşen elastoplastik malzeme modeli. (Karabulut, 2007)

Matematiksel bir ifadede, akma olayı akma fonksiyonu ile tanımlanarak sayısal bir fonksiyon ile tanımlanabilir. Akma fonksiyonu aşağıdaki formatta yazılabilir:

$F < 0$ elastik davranış, $F = 0$ plastik davranış (1.46)

Mühendislik uygulamalarında aşağıda bahsedilen iki kriter malzemelerin akma kriteri olarak en sık kullanılır:

Von – Mises Akma Kriteri

$$F = (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 - 2\sigma_Y = 0 \quad (1.47)$$

Burada $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ asal gerilmelerdir. Yani; eşdeğer gerilme σ_{eff} akma gerilmesine σ_y'ye ulaştığında akma meydana gelir.

$$\sigma_{\text{eff}} = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} = \sigma_{\text{y}} \quad (1.48)$$

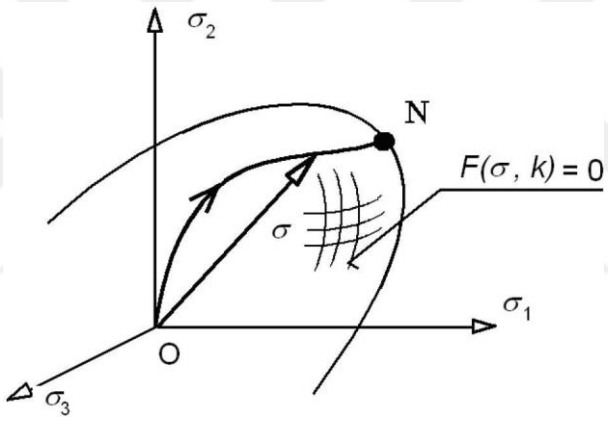
Tresca Akma Kriteri

$$F = \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 - {\sigma_y}^2\right]\left[(\sigma_2 - \sigma_3)^2 - {\sigma_y}^2\right]\left[(\sigma_3 - \sigma_1)^2 - {\sigma_y}^2\right] = 0 \quad (1.49)$$

İki akma kriteri arasındaki en büyük fark yaklaşık %15 olan kayma gerilmesi durumudur. Diğer gerilmeler için bu fark azdır. Bu nedenle her iki kriterin de mühendislik uygulamaları için uygun olduğu düşünülmektedir.

$$F(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)=0 \quad (1.50)$$

denklemi Şekil 38'den de görüleceği üzere asal gerilmeler uzayında akma yüzeyi tanımlar. Yüzeyin içindeki gerilmeler elastik gerilmeleri ve yüzeydeki gerilmeler plastik gerilmeleri göstermektedir. Bu yüzeyin dışında gerilme olamaz.



Şekil 38. Akma yüzeyi. (Karabulut, 2007)

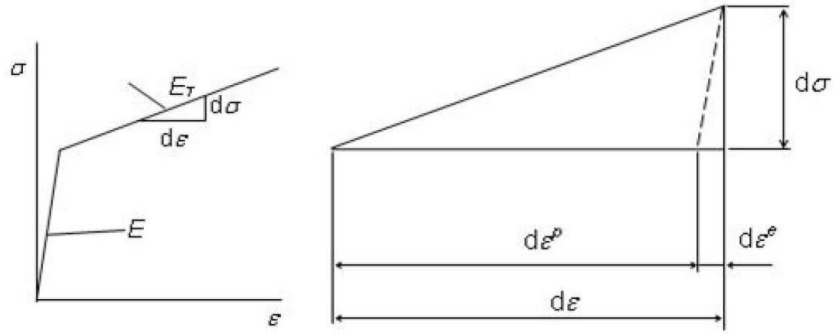
3.5.7.3.2. İleri Akma Davranışı

İleri akma davranışının temel varsayımı toplam gerinimin elastik (geri dönüştürülebilir) ve plastik (geri dönüştürülemeyen) kısımlara ayırmaktır. Şekil 39'a göre tek eksenli gerilme hali için:

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = E_T, \qquad \frac{d\sigma}{d\varepsilon^e} = E_T \quad (1.51)$$

ve bu durumda plastik gerinim artırımı aşağıdaki hali alır:

$$\mathbf{d\varepsilon^p = d\varepsilon - d\varepsilon^e = \frac{E - E_T}{EE_T} d\sigma} \quad (1.52)$$



Şekil 39. Toplam gerinim artırımının ayrıştırılması. (Karabulut, 2007)

Benzer şekilde çok eksenli yükleme durumlarında da toplam gerinim elastik ve plastik kısımlara ayrıştırılabilir.

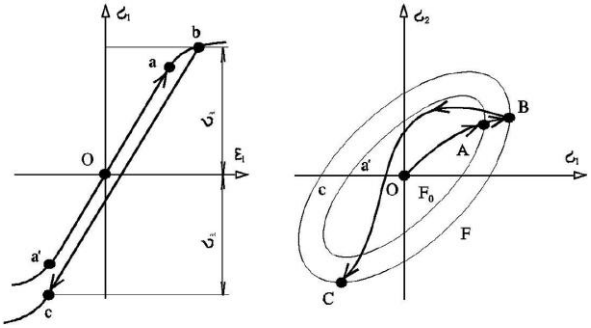
$$\varepsilon = \varepsilon^{e} + \varepsilon^{p} \tag{1.53}$$

Tam plastik davranış gösteren bir malzeme için; plastik deformasyon boyunca akma yüzeyinde değişim meydana gelmez. Pekleşen bir malzeme için plastik deformasyon akma yüzeyinde değişime sebep olur. İlk akma yüzeyi bir sonraki ile yer değiştirir. Aşağıdaki şekle sahip düzeltilmiş bir akma fonksiyonu uyarlanır:

$$F(\sigma, \varepsilon^{P}, K) = 0 \tag{1.54}$$

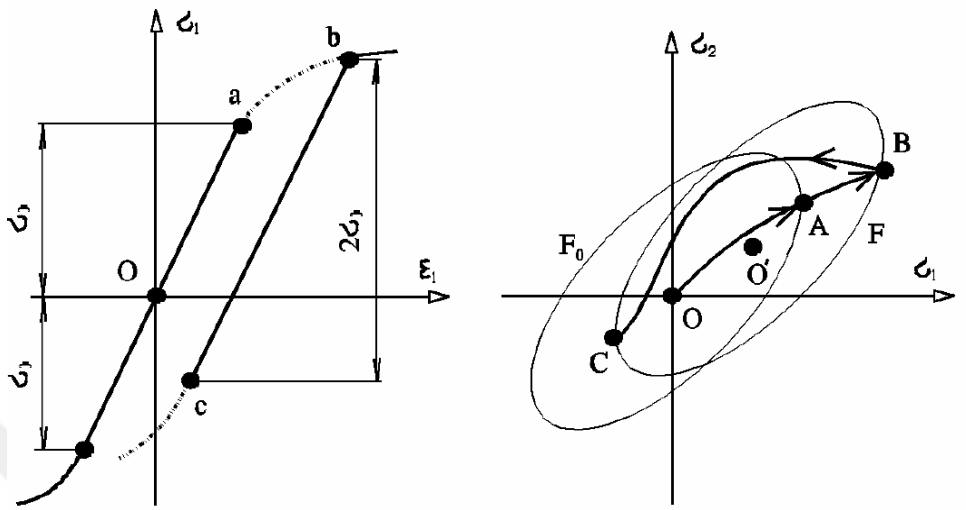
Bu akma fonksiyonu gerilmelere aynı zamanda plastik gerinimlere ve pekleşme katsayısına bağlıdır. Plastik gerinimlerin akma fonksiyonunun düzeltmesi pekleşme kuralları ile sağlanır.

Eşyönlü (izotropik) pekleşme kuralında; akma yüzeyi boyut olarak artar ancak orijinal şeklinde bir değişiklik meydana gelmez. Çok eksenli ve tek eksenli yüklemeler için izotropik pekleşme durumunun şematik gösterimi Şekil 40'ta verilmiştir.



Şekil 40. Eşyönlü (izotropik) pekleşme davranışı. (Karabulut, 2007)

Kinematik pekleşme kuralında; orijinal akma yüzeyi gerilme alanlarında yeni konuma sahiptir ancak boyutunda ve şeklinde bir değişim söz konusu değildir. Kinematik pekleşme döngüsel davranış olan modellemelerde çok büyük öneme sahiptir.



Şekil 41. Kinematik pekleşme davranışı. (Karabulut, 2007)

Sonlu elemanlar analizi havacılık, otomotiv ve savunma sanayisinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar analizinin verileri sonucunda deneysel testlerin varyasyonlarını simüle edilmiş halini görmemiz önemli ölçüde zaman ve para tasarrufu sağlamaktadır. Analiz sonucu parametreler, ortam koşulları, program ve ortam uyum sağladığı sürece yüksek oranda doğru çıkmaktadır. Sonlu elemanlar analizi sonucu ulaşılan veriler ile deneysel veriler karşılaştırılarak prosesler iyileştirilebilir.

4. LİTERATÜR TARAMASI

K.M. Prabhakaran ve V. Venkat Raj 2003 yılında, boruların eksenel çatlaklıklarının kök nedenini bulmak, bu çatlaklıkların oluşmasını engellemek, gerekli çözümü geliştirmek ve formülize etmek için h1 sabiti üzerinde çalışmışlardır. Bükme prosesindeki dirsek boruların çatlamaya karşı hassasiyeti incelenmiştir. İnce cidarlı boruların aniden şekillendirilmesi, dairesel kesitin elips şeklinde ovalleştirilmesi, tepede yüksek eğilme gerilimini (çevresel bileşenlerini) ortaya çıkartmış ve dairesel kesitte bir çatlak veya kırılma başlamış olabileceğini savunmuşlardır. Bu olay analitik ve deneysel çalışma ile doğrulanmıştır. Bu nedenle, çatlama eşik kuvvetini tahmin etmek gereklidir. Bu çalışma açıklıklı bükme altında eksenel yönde çatlak, uzun yarıçaplı dirsekler için plastik J-integrali için kapalı bir form ifadesini sunmuştur. Denklem, çok çeşitli geometrileri kapsayan çok sayıdaki sonlu elemanlar analiz verilerine dayanılarak türetilmiştir. Doğrusal olmayan sonlu eleman analizleri, WARP3D yazılımı kullanılarak materyalin doğrusal ve geometrik olmayışı göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmiştir. Malzeme Ramberg-Osgood yasasını geniş bir yelpazedeki gerilme sertleştirme üssü ile takip ettiği varsayılarak hesaplanmıştır. Farklı çatlak boyutu, geometri ve gerilme sertleştirme sabitine sahip dirsekler, elastik-plastik FEM kullanılarak analiz edilmiştir. Çalışmada 160 vaka incelenmiştir. Düzlem içi eğilme bükülme momentine maruz kalan duvar boyunca bir çatlak olan dirsek için yapılan analizden sonuçlar çıkarılmıştır. Kronun dış yüzeyi kapanma gibi davranır ve iç çatlak yüzeyi açılır. Çatlak yüzeyindeki herhangi bir noktanın net yer değiştirmesi, çatlak yüzeyinin merkez hattının net açıklık yer değiştirmesinin ve çatlak yüzlerinin merkez çizgiye göre dönüşünün üst üste binmesidir. Mevcut durumda birbirleriyle temas halinde olmamakla birlikte net dış yüzey yer değiştirmesinin çok düşük olacağı şekilde döndükleri gözlemlenmiştir. Dirsek geometrisi, çatlak boyutu, malzeme özellikleri değişmediği sürece plastik etki fonksiyonu "h1" parametresinin sabit olduğu savunulmuştur. (Prabhakaran ve Raj, 2003)

Do-Sik Shim ve arkadaşları 2016 yılında, silindirik boruların şekillendirme prosesinin optimizasyonu için çalışmıştır. Endüstriyel uygulamalar için, bükülmüş borular hatasız 2 boyutlu veya 3 boyutlu olarak doğru bir biçimde şekillendirilmelidir. Bu çalışmada, ürün kalitesinin iyileştirilmesi ve mükemmelleştirilmesi için, rulo bükme altında dikdörtgen kesitli boruların davranışı analiz edilmiştir ve incelenmiştir. Bir boru ürünü büyük bir

eğriliğe sahip olduğunda, borunun kesiti eğilme momenti altında küçülür. Hataları en aza indirmek ve ürün kalitesini arttırmak için, bu çalışma, yapısal elemanlar olarak eksenel kırışıklıklara ve zayıf mukavemete neden olan büzülme yükünü düzenlemek ve ortadan kaldırmak için çift aşamalı şekillendirme önerilmektedir. Çift aşamalı şekillendirmede, ön bükülme noktasındaki bükülme yarıçapının, enine kesit bozulmasını önlemek için önemli ve kritik bir parametre olduğu varsayılmıştır. Ön bükülme yarıçapını belirlemek ve enine kesit büzülmesinin nedenini bulmak için malzemenin davranışı analiz edilmiştir. Boru malzemesinin bükülme momentlerine maruz kalan kesiti üzerindeki bükülme gerilmeleri, kesitteki büzülme momentlerini indükleyen iç kuvvetlerin dağılımını sağlar. Bu makalenin ana fikri, birinci aşamadaki ön bükme yarıçapının düzenlenmesiyle enine kesit bozukluklarının en aza indirilebilmesidir. Önerilen süreç tasarımı, ticari bir program ve deneyleri simüle eden doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizi aracılığıyla değerlendirilmiştir. Çalışmanın asıl amacı çift aşamalı bükme yerine çok aşamalı bükme yaparak en fazla iyileştirmeyi sağlayıp kaliteyi arttırmaktır. Bu çalışma sonrasında bükme yarıçaplarını optimize etmeyi planlıyorlar. Prosesi daha fazla şekillendirme adımında yapmak, kesitsel distorsiyonun azaltılmasında etkili olacaktır. Silindirik bir borunun artımlı bükülmesi sırasında şekillendirme adımlarını optimize etmek için bir yöntem geliştirilmiştir. (Shim ve ark., 2016)

Seok Su Sohn ve arkadaşları 2013 yılında boruların mikro yapı ve akma mukavemeti optimizasyonu için çalışmışlardır. API X70 ve X80 serisi boru hatları, spiral boru şekillendirme ile farklı suşlarda (kalınlık / çap oranı: suş) boru şekillendirilmiştir. Çelik sac veya borulardan 2.5 mm aralıklarla alınan gerilim numuneleri test edilmiş ve şekillendirmeden önce ve sonra verim davranışları, akma dayanımı ve verim oranları analiz edilmiştir. Borularda, iç tarafta sürekli verim ve düşük verim oranları gösterilmiş, dış tarafta süreksiz verim ve yüksek verim oranları gösterilmiştir. Bunun nedeni Bauschinger etkisinin ve suş (kalınlık / çap oranı) sertleştirme etkisinin sırasıyla iç ve dış taraflarda baskın olmasıdır. Spiral borulamadan sonra genel akma dayanımı, gerilme sertleşmesinin ve Bauschinger etkisinin rakip etkisi ile tanımlanmıştır. Rakip etkiler, mikro yapıya ve boru şekillendirme yüklerine bağlıdır. Düşük sıcaklıklı transformasyon mikro yapıları, boru oluşturulduktan sonra genel akma mukavemetinde daha büyük artış elde etmek için tercih edilmiştir. Belirli bir mikro yapı için, akma mukavemetinin bir optimizasyonu, gerinim sertleştirme etkisini en üst düzeye çıkarmak ve Bauschinger

etkisini en aza indirmek için boru şekillendirme yüklerini kontrol etmek suretiyle de elde edilebilir. (Sohn ve ark., 2013)

S. Sumeshn ve arkadaşları 2016 yılında, yapısal olarak çarpık duvardan, çevresel olarak çatlak boru kıvrımları için büyük yer değiştirmeye bağlı olarak küçük yer değiştirme ve çökme momentlerine dayanan sınır momentlerinin karşılaştırmalı değerlendirmesi, düzlem içi kapatma eğilimi altında sonlu elemanlar analizi kullanılarak gerçekleştirmiştir. İki kere elastik eğimli yöntem kullanılarak veriler ve anlık durumlar elde edilmiştir. Sonuçlar incelmenin etkisinin en az olduğunu göstermiştir. Göz önüne alınan olgular için ovalitenin hem sınır hem de çöküş anlarındaki etkileri önemlidir ve bu nedenle analizde incelmeye gerek yoktur. Ayrıca, incelenen geometrilerle boru dirseklerinin analizine ovalite eklendiğinde, çökme momentlerinin belirlenmesi tercih edilmiştir. (Sumesh ve ark., 2016)

Min Chul Jo ve arkadaşları 2017 yılında, borular, boru oluşturma ve düzleştirme sırasında tekrarlı gerilim ve sıkıştırma gerilimleri geçirdiğinde, düzleştirilmiş tabakalar, sıcak haddelenmiş rulolardan çok daha yüksek veya daha düşük akma dayanımı göstermekte ve bu da akma dayanımı standartlarını karşılamada zorluklara neden olmaktadır. Bu çalışmada, Molibden içeriği ve kıvrılma ısısı kontrol edilerek imal edilen X70 (483 MPa) ve X80 (552 MPa) hat borusu çeliklerinde mikro yapı ve boru oluşturucu suşun (kalınlık / çap (t / D)) akma mukavemeti değişimleri üzerine etkileri araştırılmıştır. Akma dayanımı, gerilme sertleştirme üssü ve Bauschinger gerilme parametresi değişen gerilme ön gerilme ile gerilim-sıkıştırma deneyleri ile ölçüldü. Molibden içeriği X70 çeliklerinden daha yüksek olan X80 çeliklerinde, daha yüksek Molibden içeriği, aküler ferrit (AF), granüler bainit (GB), bainitik ferrit (BF) gibi düşük sıcaklıkta dönüştürülmüş mikro yapıların oluşumunu ve Bauschinger etkisini azalmaktadır. Akma dayanımındaki azalma X80 çeliğinde X70 çeliğinden daha küçüktür. Sarma sıcaklığı düştükçe, AF, BF ve perlitin hacim fraksiyonları artarken, QPF, GB ve MA değerleri azalmış ve akma mukavemeti yaklaşık 30 MPa artmıştır. Daha yüksek serme sıcaklığında boru oluştuktan sonra akma mukavemeti küçük ölçüde artmışken, daha düşük sarma sıcaklığında büyük ölçüde azalmıştır. Farklı t / D'ye sahip çelikler karşılaştırıldığında, gerilme sertleşmesi etkisi Bauschinger etkisini aştığında, boru oluşumundan sonra akma mukavemeti büyük ölçüde 65 MPa daha yüksek t / D altında artmıştır. Boru oluşumundan sonra akma dayanımındaki büyük azalmayı önlemek veya en aza indirmek için, düşük sıcaklık

transformasyon mikro yapıları, kaba tane boyutu ve yüksek t / D oranı tercih edilmiştir. (Jo ve ark., 2017)

M. Ahmed ve M.S.J. Hashmi sonlu elemanlar analiziyle sabit uçlu ve serbest uçlu boruların üretim esnasındaki gerilme özelliklerini karşılaştırmıştır. Boru şeklindeki işlenmemiş parçalardan çıkarılan endüstriyel bileşenlerin hidrolik bulge prosesi ile üretilmesi, yaygın olarak uygulanan bir endüstriyel işlemdir. Tipik borulama bileşenlerinden farklı olarak, farklı kesit şekline sahip içi boş yapısal bileşenler, bu işlemle dairesel borulardan imal edilir. Tüpler, çıkıntı oluşturmadan önce veya çıkıntı oluştururken eğilir. Tipik bir ürün birkaç bükülmeye sahip olabilir ve enine kesiti farklı konumlarda farklı uzunluğa sahip olabilir. Bu proses sırasında ürün eksenel yönde harekete ihtiyaç duymadığı için, deformasyon davranışı bölüm bölüm analiz edilebilir. Bu araştırmada, önceden bükülmüş dairesel bir tüpten kare kesit bir dirseğin çıkıntı oluşturması için sonlu eleman simülasyonu sunulmaktadır. Oluşturulan bileşenin gerilme ve gerinim dağılımı sunulmaktadır. Uç kısımları sabit tutularak oluşturulan dirseklerin, kalıp boyunca hareket ederek serbest uçlu oluşturulana göre daha iyi gerilme özelliğine sahip olduğu bulunmuştur. Her iki uç durumda oluşan dirseklerin duvar kalınlığı, %10 ila %30 oranındadır. Bununla birlikte, geri esneme, her iki şekillendirme koşulu için çok ihmal edilebilir bir durumdur. (Hashmi ve Ahmed, 1999)

Merve Yavuz 2011 yılında boru bükme prosesinin problemlerinin önlenmesi için neler yapılması gerektiğini açıklamıştır. Bükme prosesi çok farklı endüstri alanındaki önemli metal şekillendirme operasyonlarından biridir. Bükme, malzemelerin doğrultularının sıcak ve soğuk olarak istenilen yöne doğru değiştirilmesi prosesidir. Boru bükme, havacılık ve uzay, otomotiv ve inşaat sektörleri de dâhil olmak üzere pek çok alanda kullanılan bir prosestir. Çok çeşitli metotlar, aparatlar ve fikstürler boru bükme işleminde kullanılabilir. Borunun et kalınlığına, kıvrılması istenen radius derecesine, malzemesine, ısıl işlem çeşidine, geometrisine, kaplama teknolojisine, üretimin miktarına, operatör kullanım gereksinimine ve ilk yatırım maliyetine göre farklı boru bükme yöntemleri, basit aparatlar veya yüksek teknoloji içeren makineler ve teçhizatları kullanılabilir. Boru bükme yöntemleri arasında en çok kullanılan yöntem malafalı boru bükme yöntemidir. Malafalı bükme, borunun dönen bir makara etrafına sardırılarak büküldüğü bir yöntemdir. Bu yöntemde en çok karşılaşılan problemler borunun kırışması, borunun yamulması, borunun yüzey pürüzlülüğünün bozulması, kesit alanındaki bozukluklar,

istenilen ideal şeklin alınamaması, istenen kalitede şekillendirmenin yapılamaması ve borunun kırılmasıdır. Bu problemler, çok ince veya çok kalın et kalınlığına sahip borunun kullanılmasına, çok düşük değerde bükme açısıyla büküm yapılmasına, malafanın hatalı konumlandırılmasına, uygun ekipman kullanılmamasına bağlıdır. Bu çalışmada boru bükmede karşılaşılan problemlerin oluşmaması için neler yapılması gerektiği açıklanmaya çalışılmıştır. Bilgisayar destekli tasarım (CAD) ile 800 mm boyunda 25mm çapında 2.5 mm et kalınlığına sahip boruyu bükebilen, malafalı boru bükme makinasının boru bükme kalıpları çizilmiş ve tasarlanmıştır. Tasarlanan kalıpların makine üzerindeki montajları gösterilerek gerçek simüle edilmiştir. Bu kalıpların tasarımında ve montajında dikkat edilmesi gereken noktalar önemle vurgulanmıştır. Bilgisayar destekli tasarım ile en doğru kalıplar program aracılığıyla tespit edilmiştir. Tasarımda oluşan hatalar üretim aşamasından önce, maliyet etkin bir çalışma amaçlanarak bilgisayar ortamında düzeltilmiştir. Böylece bilgisayar destekli tasarım programı kullanılarak zaman, işçilik ve malzeme kaybı önlenmiştir ve maddi kazanç sağlanmıştır. Yapılan çizimler ve montajlarda Catia ve Solidworks programları kullanılmıştır. (Yavuz, 2011)

Hakan Karabulut 2007 yılında borulama sistemlerinde kullanılan paslanmaz çelik dirsek parçalarının soğuk şekil verme yöntemi ile imalatının simülasyonunun sonlu elemanlar analizi ile gerçekleştirmiştir. Pro/Engineer programı ile oluşturulan geometrik model; simülasyonların gerçekleştirilebilmesi için doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizi yazılımı Ansys/Ls-Dyna'ya aktarılmıştır. Simülasyonlar ile boru parçasında soğuk şekil verilmesi işlemi boyunca meydana gelen gerilme/gerinim dağılımlarının elde edilmesi ile şekil verme süreci boyunca boru yapısının değişimi incelenmiştir. Şekil verme süresi, sürtünme koşulları ve kalıp-ana boru malzemeleri arasındaki boşluk mesafesine göre farklı simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonuçları karşılaştırılmıştır. (Karabulut,2007)

Musa Özkan 2011 yılında boru içi akışı sayısal olarak incelemiştir. Bu hesaplamalar için Fluent ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğini kullanmıştır. 35 adet yeni dirsek tasarımını, daha az basınç kaybını amaçlayarak analiz etmiştir. Ulaştığı çözümleri karşılaştırarak sonuçları yorumlamıştır. (Özkan, 2011)

Literatürde boruların bükülmesi ve analizi özel olarak ANSYS programı ile detaylı araştırmacılar tarafından farklı veya spesifik parametreler ışığında araştırılmıştır.

Yapılacak olan bu tez çalışması ile dirsek boru üretimindeki hatalar, üretim aşamaları, prosesler ve bozulmalar incelenerek deneysel veriler ve sonlu elemanlar analizi karşılaştırmaları yapılarak üretim parametreleri analiz edilecektir.

5. AMAÇ ve ÖNEM

Dirsek borularının üretimi ve soğuk şekillendirilmesinde kullanılan ekstrüzyon yöntemi uygulaması esnasında mevcut boruların plastik deformasyon analizi, boruların plastik deformasyona uğrayan kısımların Von-Mises gerilme dağılımları, toplam deformasyonları, yüzey pürüzlülüğü, dairesellik, kesitteki değişim (et kalınlığı değişimi) parametrelerinin analizi ve sonlu elemanlar analizi yapılarak incelenecektir. Deneysel veriler ile sonlu elemanlar analizi verileri karşılaştırılacaktır. Yapılacak olan karşılaştırma ve analiz sonucu ekstrüzyon yöntemine uygun yaklaşım amaçlanmıştır.

6. MATERYAL VE YÖNTEM

Bir metale veya başka bir yapısal malzemeye yeterli bir yük uygulandığında, malzemenin şeklinin değişmesine veya bozulmasına neden olur. Bu şekil değişikliğine deformasyon adı verilir. Kuvvet kaldırıldıktan sonra malzemenin eski, orijinal şekline dönmesini sağlayan geçici şekil değişikliğine elastik deformasyon denir. Başka bir ifadeyle, elastik deformasyon, bir malzemenin düşük gerilme altında, şeklindeki bir değişikliktir ve gerilim giderildikten sonra geri kazanılabilir. Bu tür bir deformasyon, bağların gerilmesini içerir, ancak atomlar birbirlerinden kaymazlar, kopma yaşanmaz.

Gerilme metali veya yapısal başka bir malzemeyi kalıcı olarak deforme etmek için yeterli olduğunda buna plastik deformasyon denir. Plastik deformasyon, dislokasyonların hareketiyle sınırlı sayıda atomik bağın kırılmasını içerir, atomlar birbirlerinden kayarlar. Bir kristal düzlemdeki tüm atomların bağlarını aynı anda kırmak için gereken kuvvet çok büyüktür. Bununla birlikte, dislokasyonların hareketi, kristal düzlemlerdeki atomların çok daha düşük stres seviyelerinde birbirlerinden kaymalarına izin verir. Atomların en yoğun düzlemleri boyunca hareket etmek için gereken enerji en düşük olduğundan, dislokasyonlar, malzemenin bir tanesi içinde tercih edilen bir hareket yönüne sahiptir. Bu, tane içindeki paralel düzlemler boyunca meydana gelen kaymaya neden olur. Bu paralel kayma düzlemleri, optik bir mikroskopla görülebilen kayma bantları oluşturmak için bir araya gelir. Kayma bandı, mikroskop altında tek bir çizgi olarak görünür, ancak aslında resimde gösterildiği gibi yakın aralıklı paralel kayma düzlemlerinden oluşur. (www.nde-ed.org, 2021)

Materyal, Araç ve Gereçler:

1. Deney Ünitesi Olarak Bükme İş istasyonu
2. Yazılım
3. Standartlar
4. İnce cidarlı boru
5. Bükümü gerçekleştirecek kalıp modeli

Deneysel çalışmada giriş ve çıkış parametresi olarak;

1. İtme Hızı
2. Kalıp Boşlukları
3. Kesitteki değişim (Et Kalınlığı)

4. Gerilmelere
5. Oluşan Hasar
6. Boyutsal Ölçüm Analizleri

6.1. Paslanmaz Çelik Fittings Üretimi

Euroform Çelik İmalat San. ve Tic. Ltd. Şti. Orhangazi / Bursa `da bulunan fabrikasında paslanmaz çelik dikişli/dikişsiz alın kaynaklı dirsek, te redüksiyon ve kep üretmektedir. Üretimi IS0 9001-2008'e uygunluğu Türk Standartları Enstitüsü tarafından, (PED) 97/23/EC ve AD2000 Merkblatt W0'a uygunluğu TÜV-SÜD tarafından belgelendirilmiştir. Sertifikalı ve kaliteli hammadde kullanmakla birlikte kalite kontrol sürecini üretimin her aşamasında titizlikle gerçekleştirmektedir.

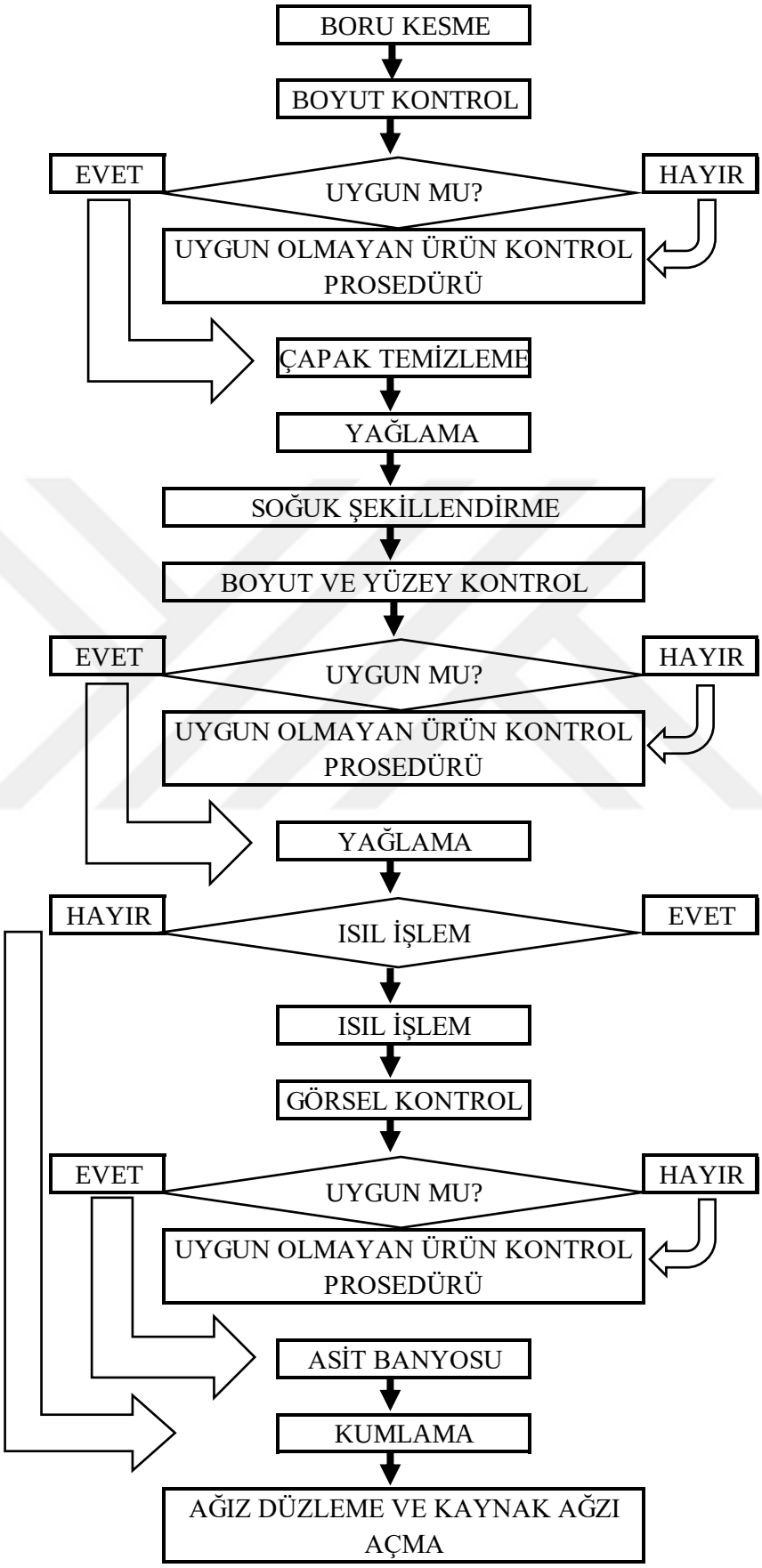
6.1.1. Paslanmaz Çelik Dirsek ve Tee Üretimi

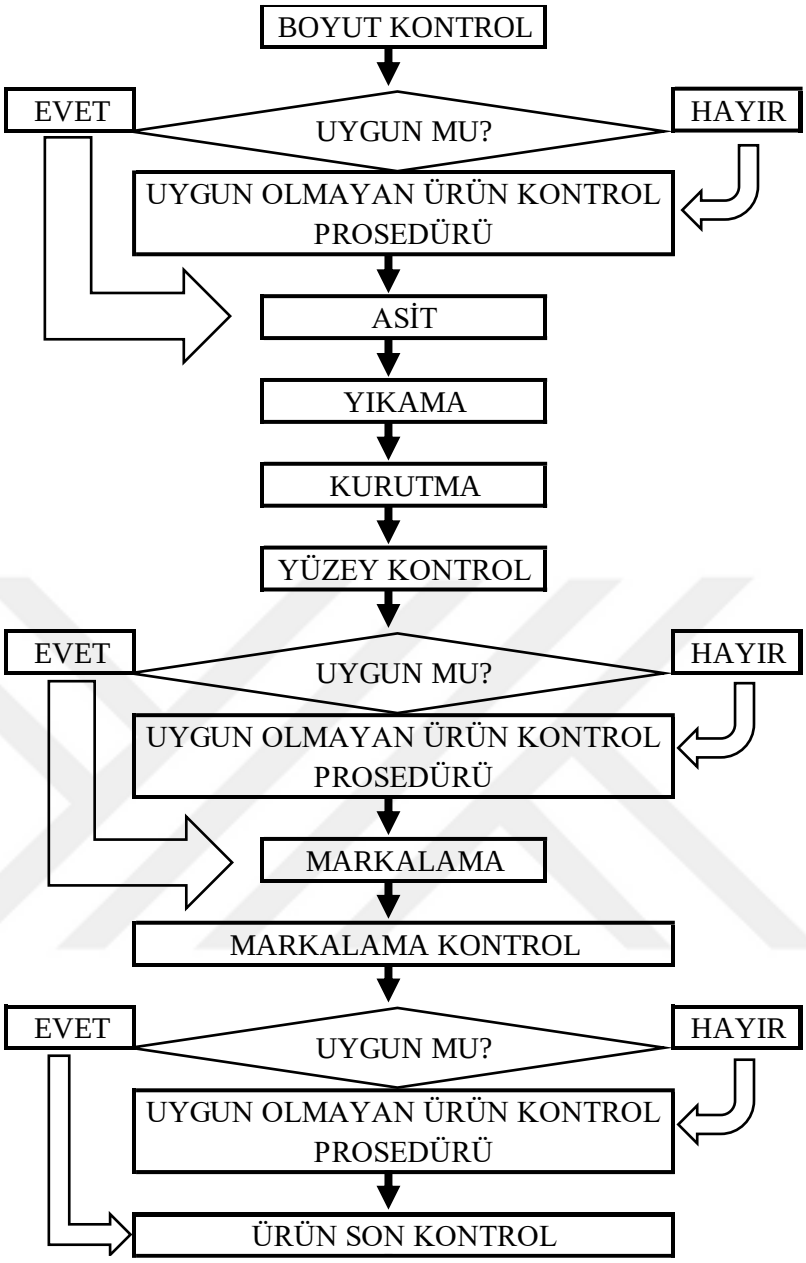
Firma Orhangazi/Bursa`da bulunan fabrikasında paslanmaz çelik dikişli ve dikişsiz alın kaynaklı dirsek, tee, redüksiyon ve kep üretmektedir. Üretiminin IS0 9001-2008'e uygunluğu Türk Standartları Enstitüsü tarafından, (PED) 97/23/EC ve AD2000 Merkblatt W0'e uygunluğu TÜV-SÜD tarafından belgelendirilmiştir. Sertifikalı ve kaliteli hammadde kullanmakta, kalite kontrol sürecini üretimin her aşamasında titizlikle gerçekleştirmektedir.

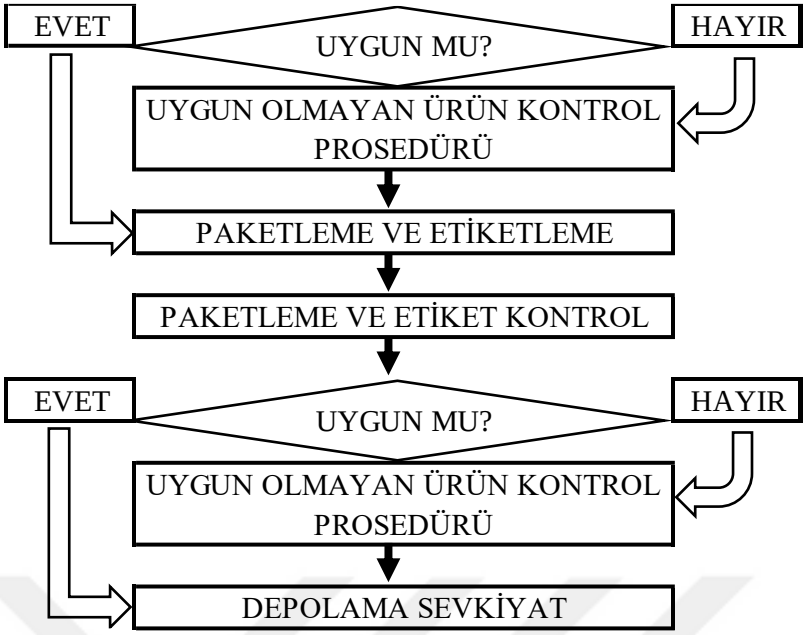
6.1.2. Çelik Üretim

Firma sahip olduğu makine parkıyla müşterilerinin talepleri doğrultusunda kaynaklı ve talaşlı imalat yapabilmektedir. Paslanmaz ve karbon çelik malzemelerden boru devreleri, özel boru bağlantı parçaları, parçalı dirsekler, depolama tankları, özel kesimler ve hassas çelik konstrüksiyon işleri yapabilmektedir. (www.euroformcelik.com.tr, 2021)

6" paslanmaz çelik dirsek üretim standartı ASTM A403'tür. Üretilen dirseğin ölçüm standartı ise ASME B16.9'dur. Üretim ve ölçümler bu standarda göre yapılmakta ve ölçülmektedir. Üretim aşamalarından yağlama prosesinde, soğuk deformasyon için klor bazlı yağlayıcı kullanılmaktadır. Boru ile kalıp arasındaki sürtünmenin azaltılması amaçlanmaktadır. Paslanmaz çelik dirsek imalatı iş akış şeması aşağıdaki şekildedir.


BORU KESME
BOYUT KONTROL
EVET
UYGUN MU?
HAYIR
UYGUN OLMAYAN ÜRÜN KONTROL PROSEDÜRÜ
ÇAPAK TEMİZLEME
YAĞLAMA
SOĞUK ŞEKİLLENDİRME
BOYUT VE YÜZEY KONTROL
EVET
UYGUN MU?
HAYIR
UYGUN OLMAYAN ÜRÜN KONTROL PROSEDÜRÜ
YAĞLAMA
HAYIR
ISIL İŞLEM
EVET
ISIL İŞLEM
GÖRSEL KONTROL
EVET
UYGUN MU?
HAYIR
UYGUN OLMAYAN ÜRÜN KONTROL PROSEDÜRÜ
ASİT BANYOSU
KUMLAMA
AĞIZ DÜZLEME VE KAYNAK AĞZI AÇMA


BOYUT KONTROL
EVET
UYGUN MU?
HAYIR
UYGUN OLMAYAN ÜRÜN KONTROL PROSEDÜRÜ
ASİT
YIKAMA
KURUTMA
YÜZEY KONTROL
EVET
UYGUN MU?
HAYIR
UYGUN OLMAYAN ÜRÜN KONTROL PROSEDÜRÜ
MARKALAMA
MARKALAMA KONTROL
EVET
UYGUN MU?
HAYIR
UYGUN OLMAYAN ÜRÜN KONTROL PROSEDÜRÜ
ÜRÜN SON KONTROL



Şekil 42. Paslanmaz Çelik Dirsek İmalatı İş Akış Şeması (Manav, 2018)



Şekil 43. Bitmiş ürün dirsek örnekleri (www.euroformcelik.com.tr)

Euroform Çelik İmalat Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti.' den numune olarak 2 adet çapı 6"'lik paslanmaz AISI 316L kalite çelik boru temin edilmiştir. Borular farklı yöntemlerde ve farklı kişiler tarafından ölçülmüştür. Boruların kalınlıkları Thickness Gage (Kalınlık Ölçer) ile manuel olarak ölçülmüştür. Ölçüm sonuçları raporlanmıştır ve aşağıdaki gibidir.



Şekil 44. Thickness Gage (Kalınlık Ölçer) Makine No: LF24H003

Kalınlık ölçer ile yapılan ölçüm sonuçları Tablo 1'de verilmiştir.
İkinci metot olarak;

Hexagon Metrology F-41800 Montoire Manufactured:2016-04-07 Type:RA-7325SEI-4 S/N:7325SEI-3984-FA MODEL:RS3 SERİAL#:16-05-018 MFG DATE:2016-02

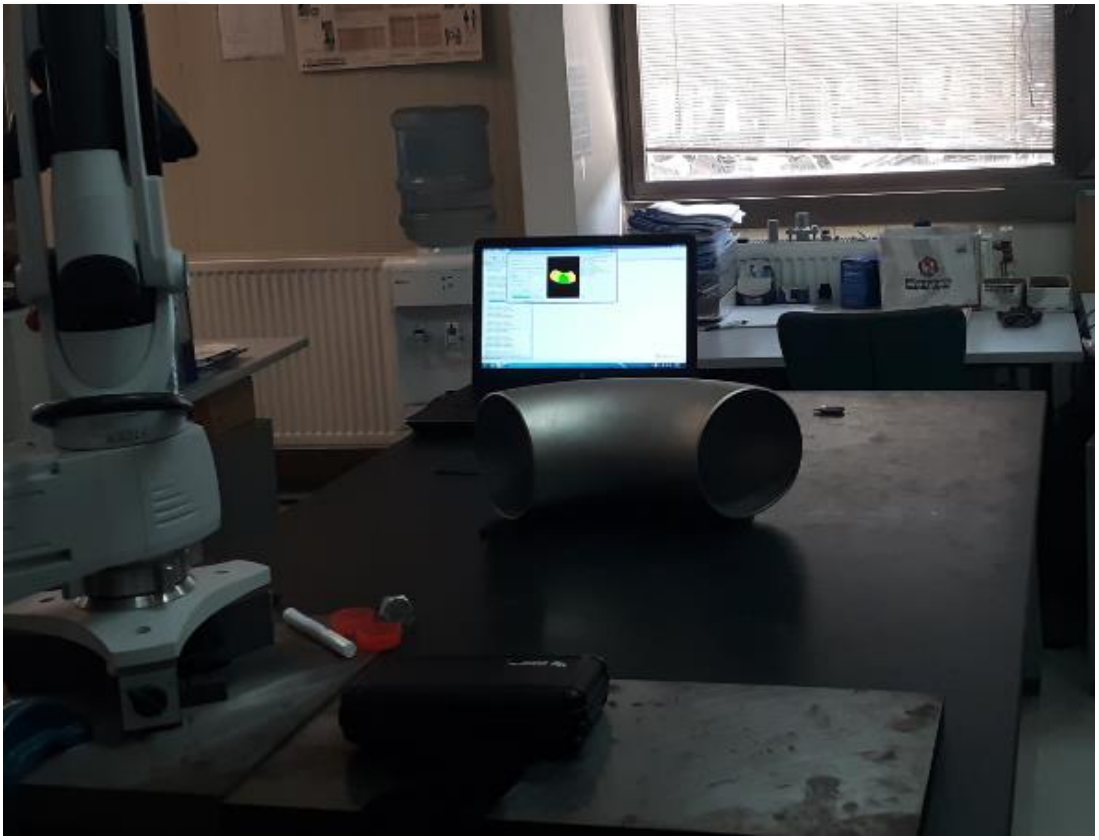
Lazer optik ölçüm cihazı ile 2 adet borunun ölçümü yapılmıştır ve 3d modeli çıkarılmıştır.



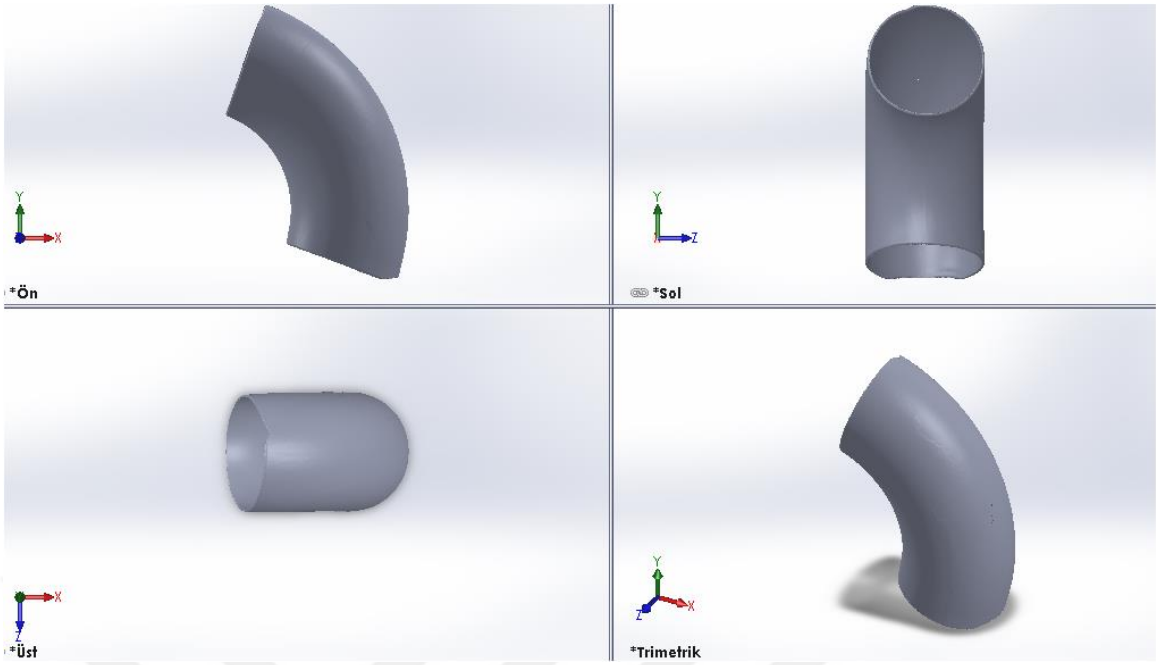
Şekil 45. Lazer Optik Ölçüm Cihazı-1



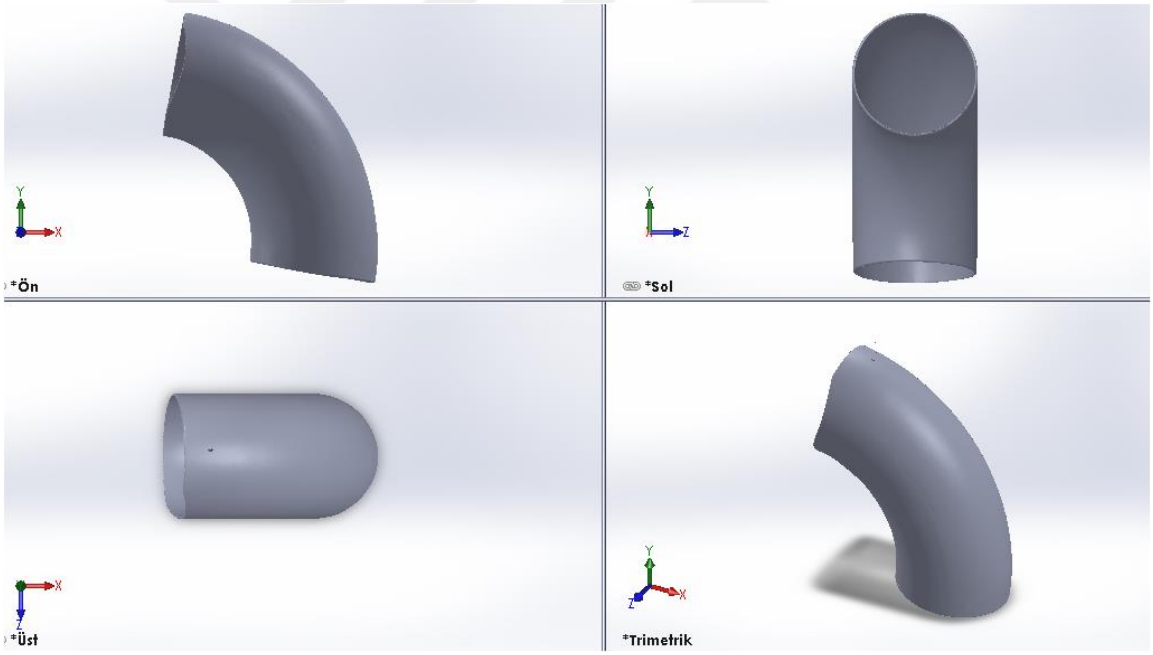
Şekil 46. Lazer Optik Ölçüm Cihazı-2



Şekil 47. Lazer Optik Ölçüm Cihazı-3



Şekil 48. Lazer optik ile ölçümü yapılan 1.Numune



Şekil 49. Lazer optik ile ölçümü yapılan 2.Numune

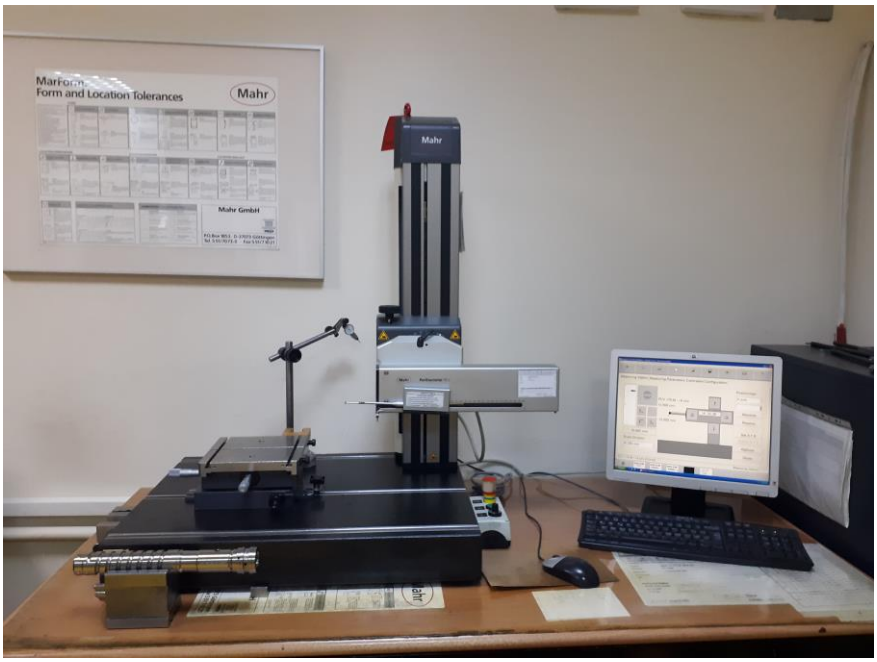
Lazer optik sonucu ölçümü yapılan veriler bulgular ve tartışma kısmında verilmiştir.

Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri Mahr yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı ile yapılmıştır. Yapılan ölçüm sonuçları Tablo 8'de verilmiştir.



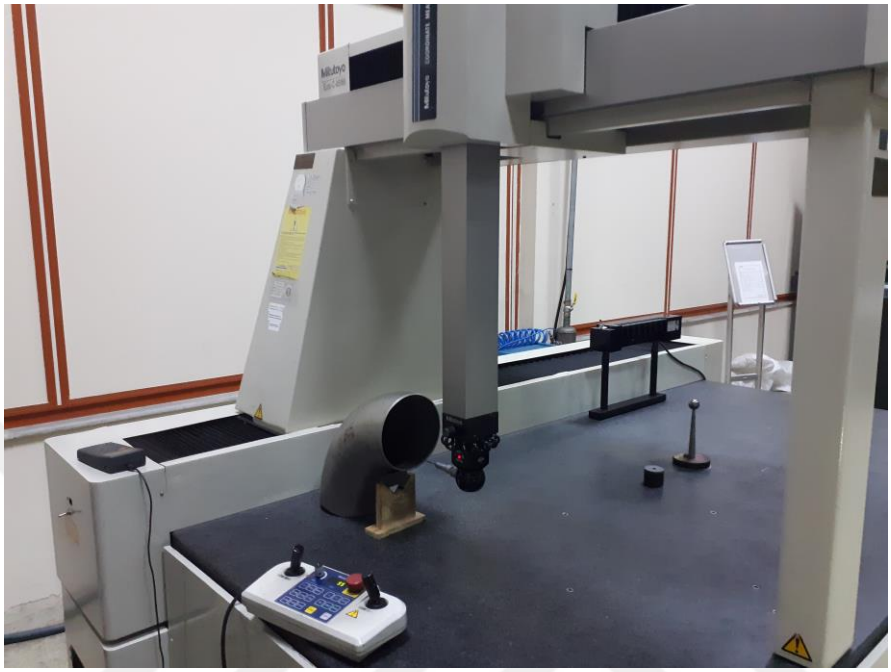
Şekil 50. Mahr Yüzey Pürüzlülük Ölçüm Cihazı

Parça iç yarıçap ve dış yarıçapları kontur ölçüm cihazında ölçülmüştür. Yapılan ölçüm sonuçları Tablo 9'te verilmiştir.

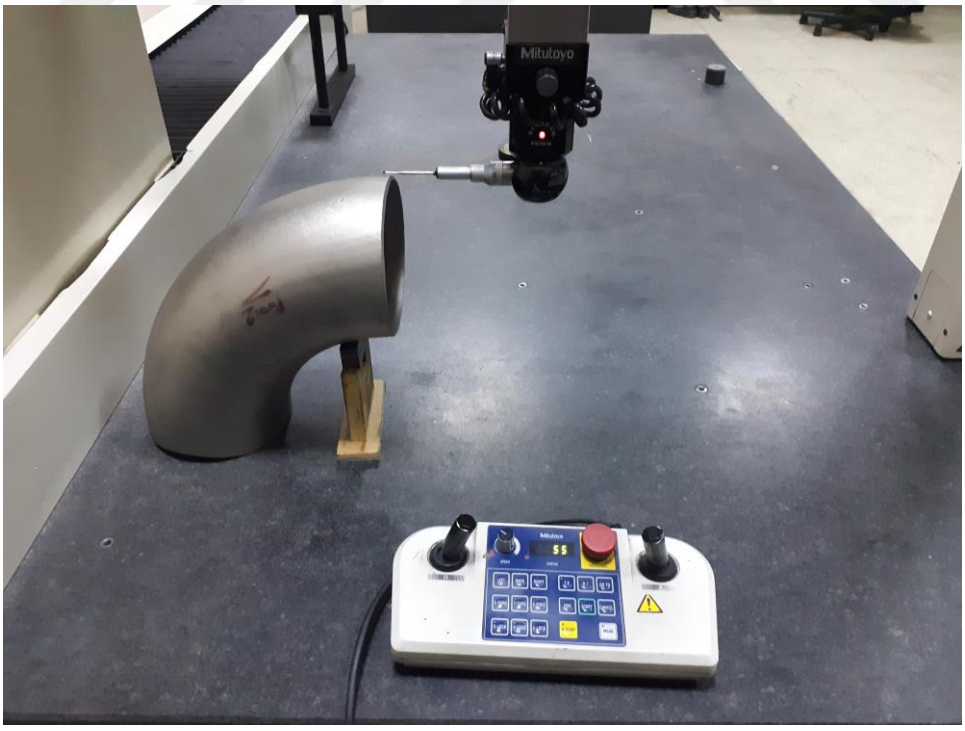


Şekil 51. Kontur Ölçüm Cihazı

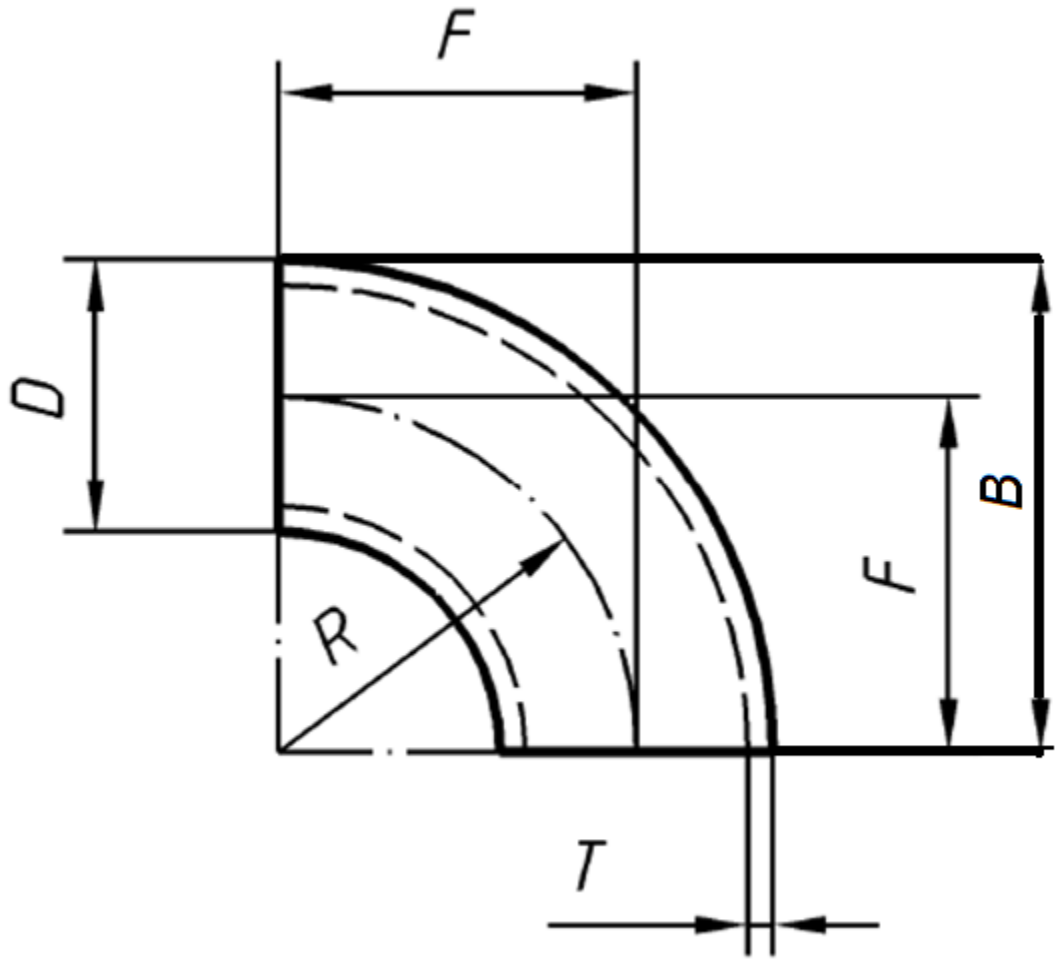
Parçaların kaynak ağzı ve sabit uçların; iç yarıçap, dış yarıçap, minimum yükseklik, maksimum yükseklik, tepe ve alt et kalınlıkları CMM cihazında ölçülmüştür. Yapılan ölçüm sonuçları Tablo 10 ve Tablo 11'de verilmiştir.



Şekil 52. 1.Numune Cmm Ölçümü



Şekil 53. 2.Numune Cmm Ölçümü



Şekil 54. Dirsek Ölçüleri *(EN 10253-4 Standardı, 2008)*

D: Borunun çapı

R: Borunun bükme yarıçapı

T: Borunun et kalınlığı

Standart ve ölçüm sonuçları karşılaştırması Tablo 6'da verilmiştir.

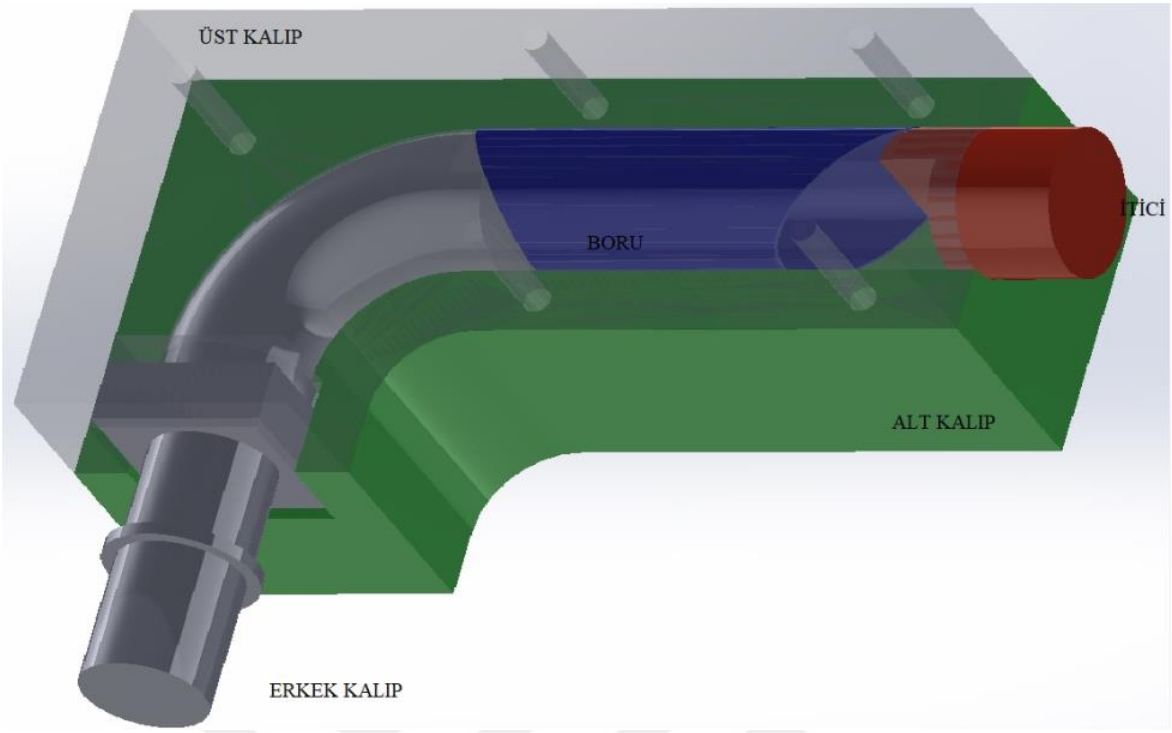
Tablo 1. 90° Dirsek Ölçüleri

DN	D	2D			3D			5D
		F	C	B	F	C	B	F
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
15	21,3	25	50	36	28	56	38	45
20	26,9	25	50	39	29	58	43	57
25	33,7	28	56	42	38	76	55	72
32	42,4	32	64	53	48	96	69	93
40	48,3	38	76	62	57	114	81	108
50	60,3	51	102	81	76	152	106	135
65	76,1	63	127	102	95	190	133	175
80	88,9	76	152	121	114	228	159	205
100	114,3	102	203	159	152	304	209	270
125	139,7	127	254	197	190	380	260	330
150	168,3	152	305	237	229	458	313	390
200	219,1	203	406	313	305	610	414	510
250	273,0	254	508	391	381	762	518	650
300	323,9	305	610	467	457	914	619	775
350	355,6	356	711	533	533	1066	711	850
400	406,4	406	813	610	610	1220	813	970
450	457,0	457	914	686	686	1372	914	1122
500	508,0	508	1016	762	762	1524	1016	1245
600	610,0	610	1220	914	914	1828	1219	1524
700	711,0	711	1422	1066	1067	2134	1422	1778
800	813,0	813	1626	1220	1219	2438	1625	2033
900	914,0	914	1828	1371	1372	2744	1829	2285
1000	1016,0	1016	2032	1524	1524	3048	2032	2540

(EN 10253-4:2008 (E) Standardı)

6.2. KALIP MODELİ

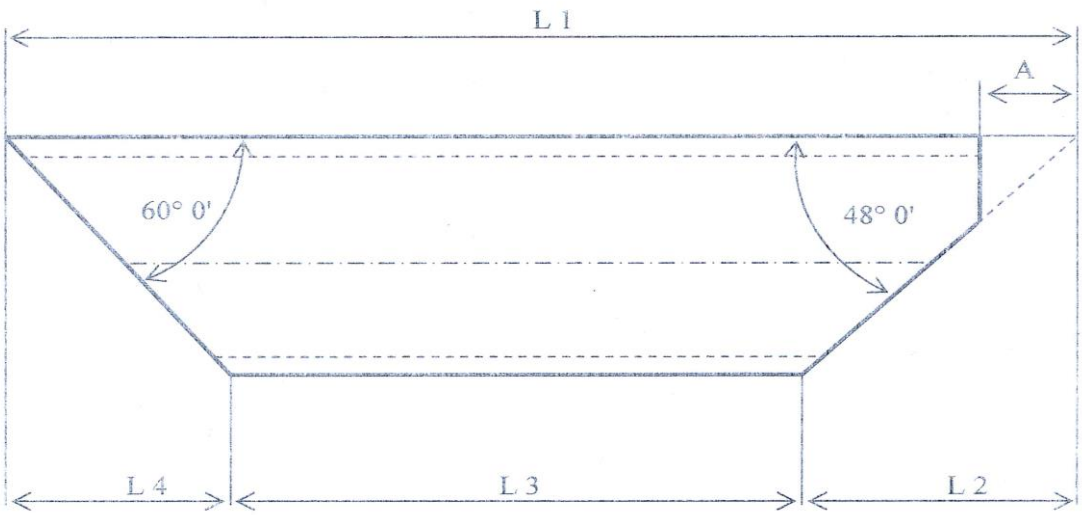
CAD Modelinin tamamı Solidworks 2018 programında hazırlandı ve ANSYS19.2 programına transferi sağlandı. Geometrik model oluşturulurken ANSI B16.9 standardına göre dirseğin ve soğuk şekillendirme yöntemlerinden ekstrüzyon ile boru bükme prosesinin elemanlarının teknik resimleri ve CAD izometrileri aşağıdaki şekilde belirtilmiştir:



Şekil 55. Kalıp Tasarımı



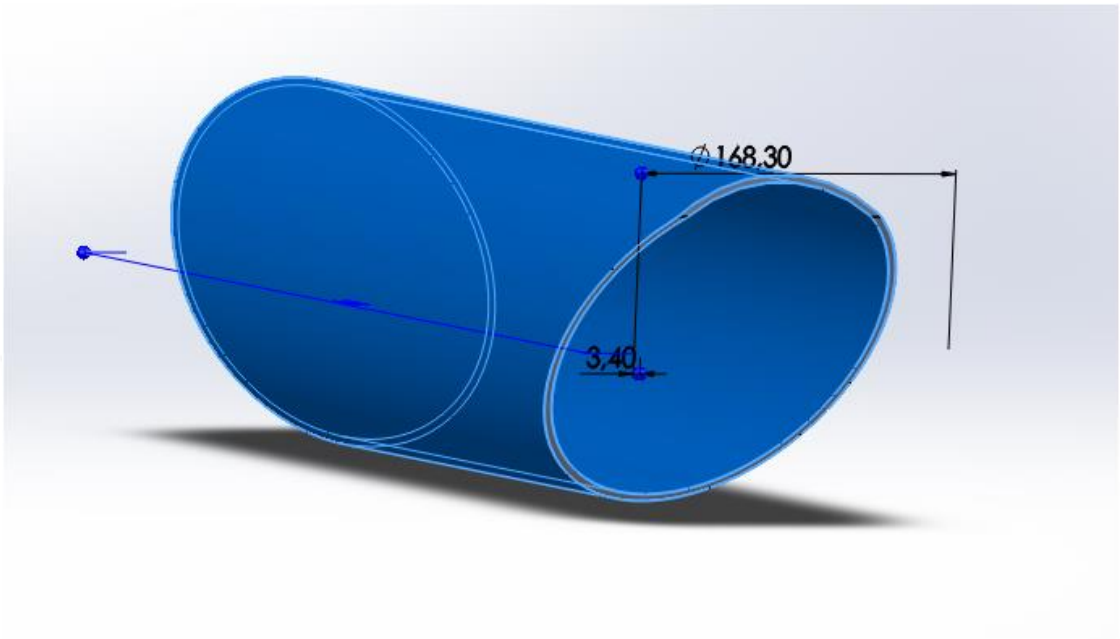
Şekil 56. Deney Düzeneği



Şekil 57. EN10253-4 A403 Standardı

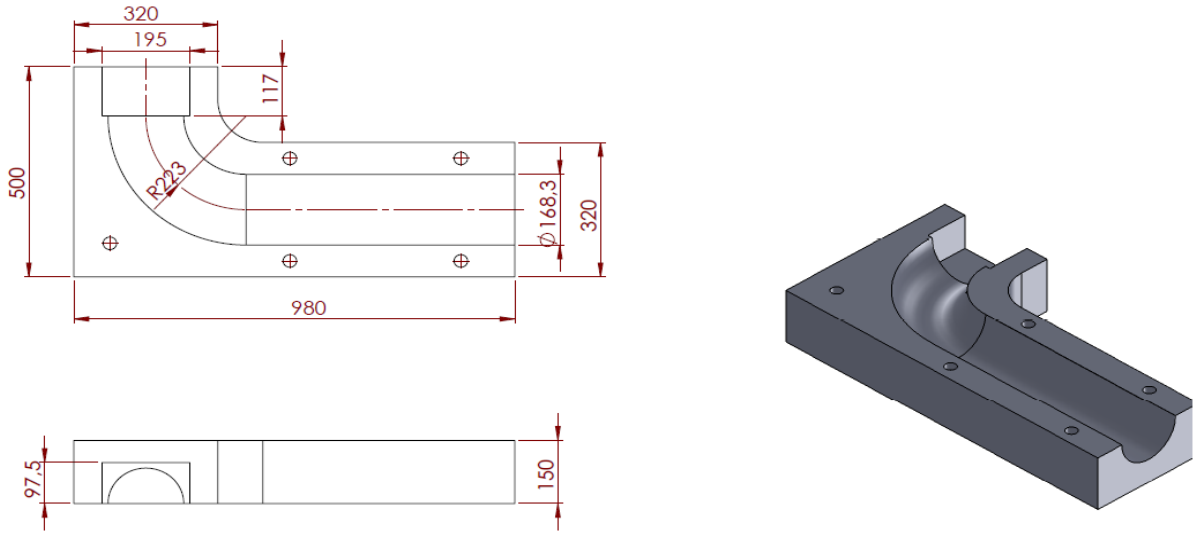
Tablo 2. Standard Ölçüler

Nominal Boru Dış Çapı (inç)	Boru Çapı (mm)	L1 (mm)	L3 (mm)	L2 (mm)	L4 (mm)	A(mm)
1"	ø33,4	100	51	30	19	4
1.1/4"	ø42,16	122	60	44	24	6
1.1/2"	ø48,26	139	68	49	28	6
2"	ø60,33	183	94	55	35	6
2.1/2"	ø73,03	232	120	70	42	8
3"	ø88,9	270	139	80	51	8
4"	ø114,3	366	191	109	66	10
5"	ø141,3	450	243	126	81	12
6"	ø168,28	535	287	151	97	18
8"	ø219,08	695	372	197	126	20

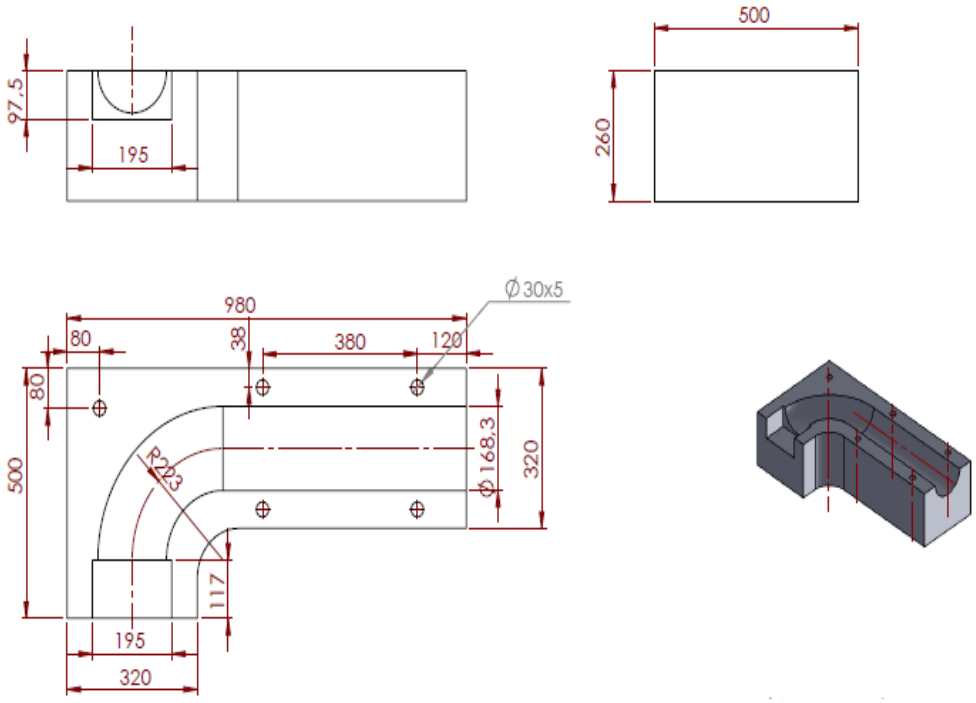


Şekil 58. Kaynak Ağzı Açılmış Büküme Hazır Boru

90° büküm işlemi gerçekleştirilmeden önce, boru farklı açılarda kesilir. ASME B16.9 Standardına uygun olarak boru dış çapı φ=168.3 mm ve et kalınlığı 3.40 mm dir.

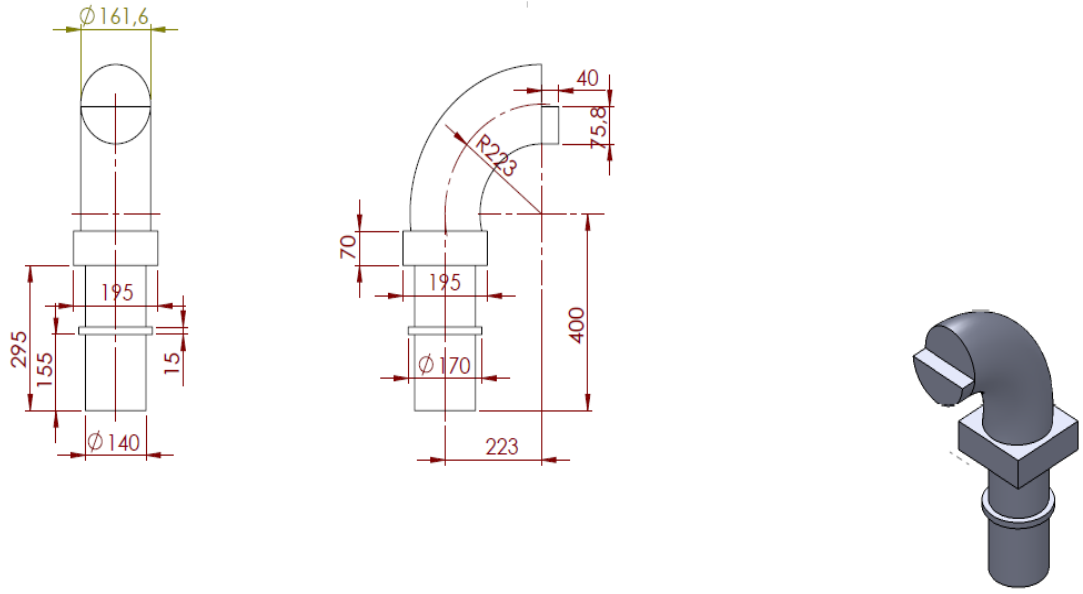


Şekil 59. 6 " Üst Kalıp



Şekil 60. 6 " Alt Kalıp

Bükme prosesinde alt ve üst dişi kalıbın birbirini tamamlayarak kapatılması, bükme süreci boyunca borunun dış çeperinde deformasyonu engellemeyi amaçlamaktadır. Hidrolik iticinin kuvveti etkisinde kalan boru kalıbın şeklini ortam sıcaklığı, yağlama koşulları şekil verilecek olan son ürün geometrisini etkileyecek olan faktörlerdendir.



Şekil 61. 6 " Sabit Erkek

Sabit erkek borunun şekil verme prosesi boyunca iç kısmın deformasyonunu engelleyen kalıbın bir parçasıdır.

6.3. SONLU ELEMANLAR MODELİ

Bükme prosesi sırasında meydana gelen deformasyonu, kalıcı şekil değişikliğini anlamak ve boru yapısında oluşan gerilme ve gerinim dağılımlarını belirlemek için sonlu elemanlar simülasyonu programı kullanılmıştır. Simülasyonların gerçekleştirilebilmesi için Ansys/ Transient Structural Analiz metodu kullanılmıştır. Geometrik model Solidworks 2018'de çizilmiştir. Çizilen geometrik model Ansys programına aktarılmıştır.

Transient Structural Analiz metodu büyük deformasyonların ve karmaşık temas problemleri için kullanılan hızlı çözüm sağlayan bir analiz programıdır.

6" SCH10S AISI 316L paslanmaz çelik dirsek boru sonlu elemanlar analizi yöntemiyle Ansys programı aracılığıyla belirli yer değiştirme verilerek proses analizi yapılacaktır. Yapılan analiz sonucu veriler gerçek proses verileri ile karşılaştırılacaktır. Programda sürtünmesiz ortam, uygulanan sabit kuvvet simüle edilecektir. Gerçek proses şartlarında dirsek kaynak ağzı açıldıktan sonra jelatin ile kaplanıp yağlama işlemi sonrası kalıba yerleştirilmektedir. Bu işlemler sonrası hidrolik itici ile soğuk şekillendirme işlemi yapılmaktadır. Ansys sonlu elemanlar analizi programında paslanmaz çelik malzemesi 22° oda sıcaklığında farklı süreler içerisinde aynı yük altındaki eşdeğer stresi ve kuvvet reaksiyonları incelenecektir. Kullanılacak olan AISI 316L paslanmaz çeliğin malzeme kompozisyonu ve mekanik özellikleri şu şekildedir:

Tablo 3. AISI 316L alaşımına ait kimyasal kompozisyon.

Element	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni
%	≤0,03	≤2,0	≤1,00	≤0,045	≤ 0,030	16,0-18,0	2,0-3,0	10,0-14,0

(Ayvaz, 2020)

Tablo 4. AISI 316L malzemesinin mekanik özellikleri

Yoğunluk	8000 kg/m3
Sertlik Rockwell B	79
Çekme Dayanımı	560 MPa
Akma Dayanımı	290 MPa
Kopma Uzaması	50%
Elastisite Modülü	193 GPa
Poisson Oranı	0,29

(Galanais ve Manolakos, 2009)

Tablo 5. AISI 316L / EN 1.4404 bileşenlerinin döngüsel elastoplastik analizi için geçerli gerilme-uzama eğrileri için tablo verileri (Möller, 2017)

ε / T	0,00049	0,00054	0,00061	0,00070	0,002	0,003	0,005	0,01	0,05
20 °C	-	-	-	140 MPa	174 MPa	186 MPa	202 MPa	224 MPa	297 MPa
100 °C	-	-	119 MPa	-	153 MPa	164 MPa	177 MPa	194 MPa	275 MPa
200 °C	-	100 MPa	-	-	129 MPa	138 MPa	146 MPa	162 MPa	238 MPa
300 °C	86 MPa	-	-	-	112 MPa	118 MPa	129 MPa	140 MPa	212 MPa

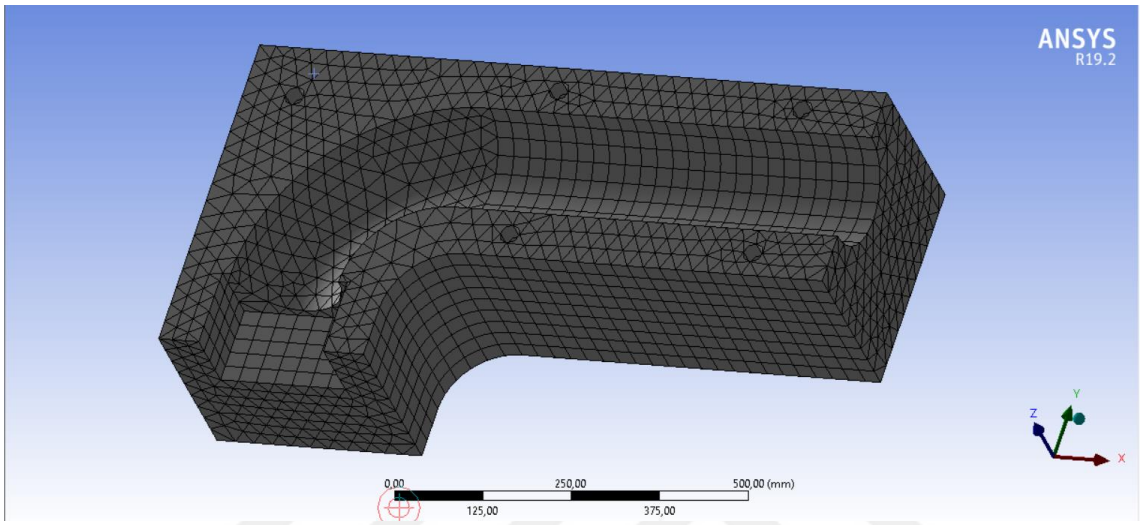
Ansys programı içerisinde Transient Structural bölümü seçilmiştir. Engineering Data > General Materials > Non-Linear kısmından dişi ve erkek kalıp için Structural Steel, şekillendirilecek olan boru için ise Stainless Steel malzemesi program kütüphanesi verileri seçilmiştir. AISI 316L paslanmaz çelik malzemesinin gerilme gerinim grafiği değerleri ve diğer mekanik özellikleri bu kısımda değiştirilmiştir.

Projede kullanılacak olan malzemenin izotropik elastisite değerleri yazılmıştır. Verilerin girişi sonrasında proje güncellenerek, veriler kaydedilmiştir. Proje içerisine parçaların montajlanmış geometrileri Geometry > Import Geometry > Browse seçeneğine tıklanarak çekilmiştir. Geometri onaylanması sonrasında Model > Edit seçeneği ile analiz parametreleri düzenlenmiştir.

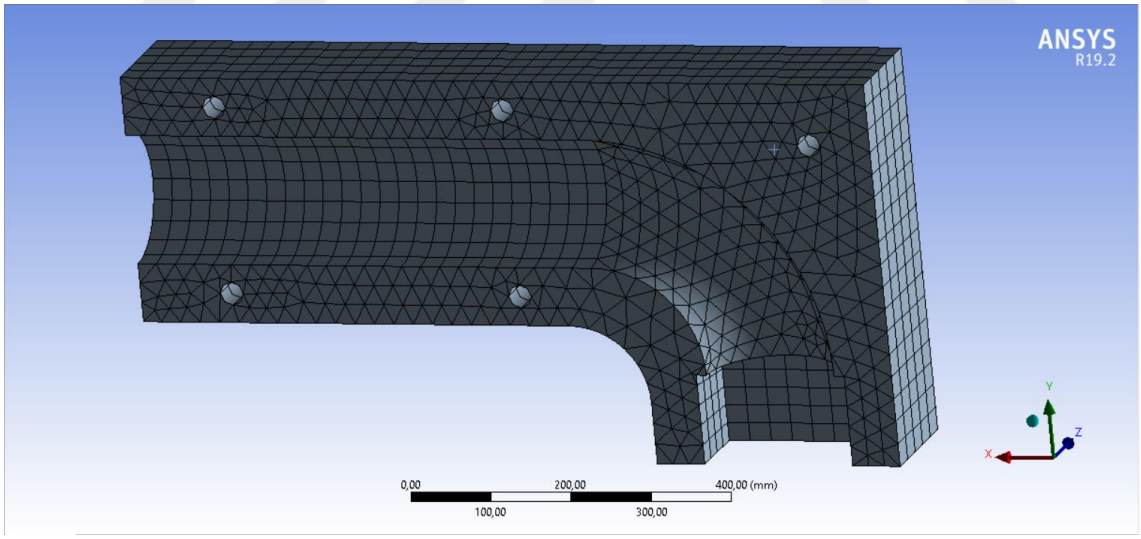
Boruya şekil verecek olan kalıp, proseste kullanılan ile 1:1 oranda çizilmiştir. 159175 düğüm ve 87105 eleman atılarak mesh işlemi gerçekleştirilmiştir.

Tablo 6. Mesh tanımlanması işlemi sonrasında eleman ve düğüm noktaları miktarları

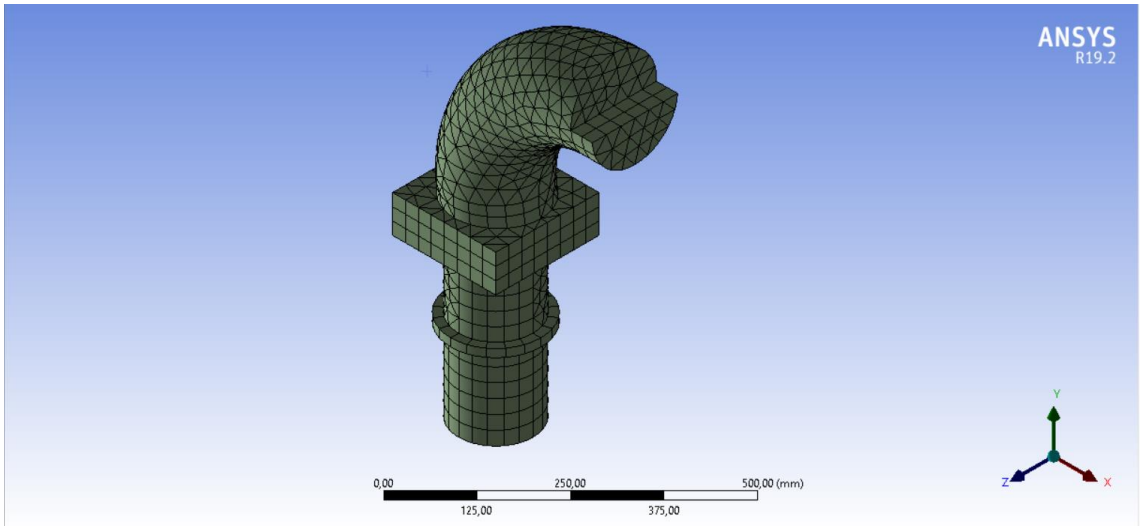
	Eleman Sayısı	Düğüm Noktası Sayısı
Alt Kalıp	23521	37058
Üst Kalıp	16011	25935
Sabit Erkek	3807	8410
İtici	1676	2914
Boru	42090	84858



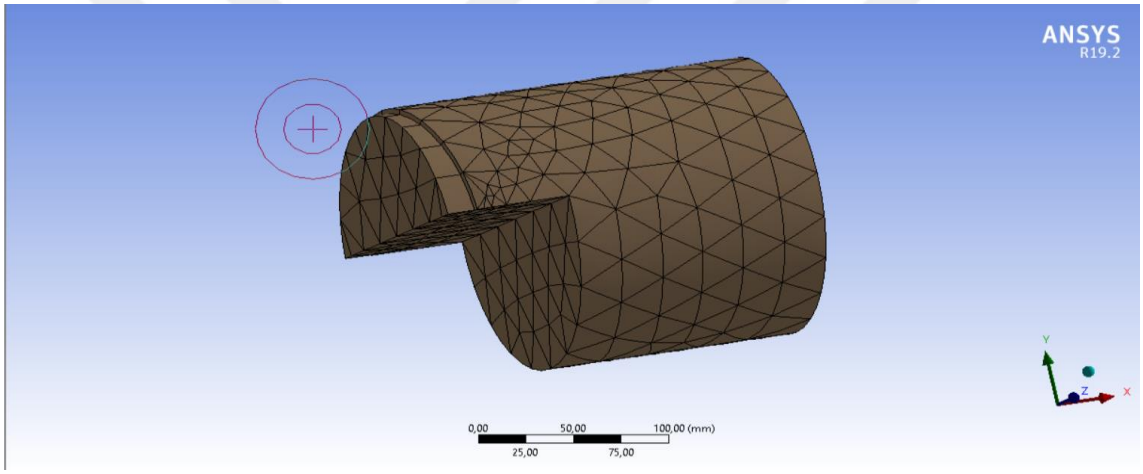
Şekil 62. Alt dişi kalıp mesh görüntüsü



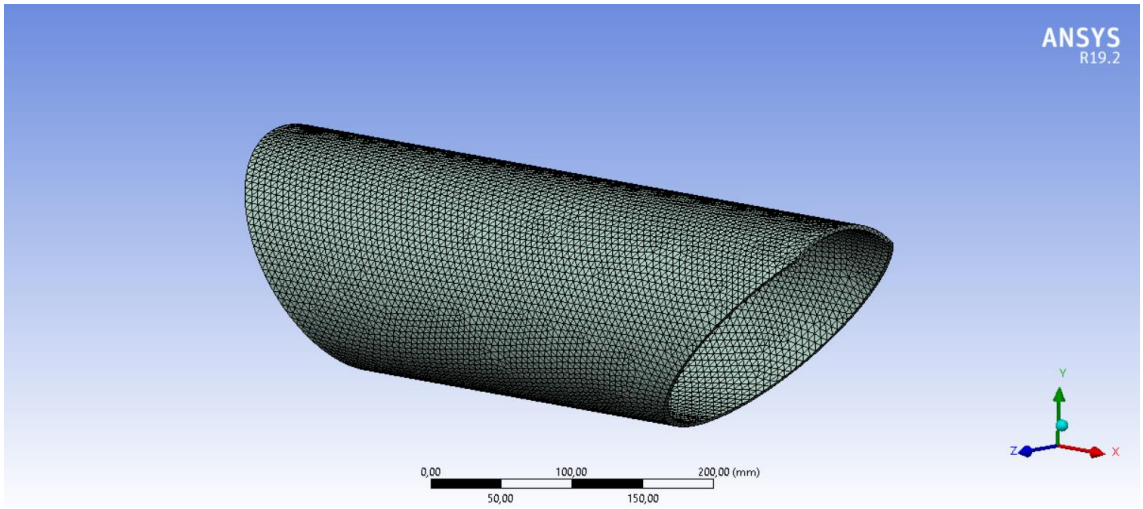
Şekil 63. Üst dişi kalıp mesh görüntüsü



Şekil 64. Erkek kalıp mesh görüntüsü



Şekil 65. İtici mesh görüntüsü



Şekil 66. Boru mesh görüntüsü

7. BULGULAR VE TARTIŞMA

Tablo 7. Kalınlık ölçer ile ölçülen 2 adet numunenin ölçüm sonuçları tablosu

PARÇA NO: 1.NUMUNE								
MAKİNE NO: LF24H003								
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
İÇ YARIÇAP KALINLIĞI(mm)	3,20	3,40	3,72	4,10	4,02	3,92	3,84	3,36
DIŞ YARIÇAP KALINLIĞI(mm)	4,58	4,12	3,98	3,88	4,00	4,32	4,26	4,02
PARÇA NO: 2.NUMUNE								
MAKİNE NO: LF24H003								
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
İÇ YARIÇAP KALINLIĞI(mm)	3,08	3,42	3,76	3,82	4,08	3,80	3,64	3,44
DIŞ YARIÇAP KALINLIĞI(mm)	3,76	3,34	3,14	3,10	3,16	3,18	3,28	3,54

Tablo 8. 1. Numune ve 2. Numune boruların yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçları

YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ								
No	Ra(µm)	R_{max}(µm)	R_z(µm)	$R_{p\ max}$(µm)	R_t(µm)	R_{Sk}	W_t(µm)	W_a(µm)
1. Numune	3,98	39,83	20,51	18,75	41,31	-0,75	77,23	15,72
2. Numune	5,46	39,9	28,44	24,67	44,84	0,21	54,43	7,48
LS(µm)		LT(mm)	LM(mm)	Z	VB(µm)	NX	VT(mm/s)	
2,5		5,6	4	5	±252,2	11200	0,5	

Tablo 9. 1.Numune ve 2. Numune boruların iç ve dış yarıçap ölçüm sonuçları

KONTUR ÖLÇÜMÜ		
	İç Radius(mm)	Dış Radius(mm)
1. Numune	135,0394	302,397
2. Numune	138,3874	314,0634

Analizler sonucu elde edilen geometriler ile ölçümü yapılan 2 adet numune dirseğin lazer optik ölçümleri sonucunda elde edilen geometriler karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma işlemi Polyworks programında yapılmıştır. 4 farklı sürede yapılan analiz ile 2 adet numune karşılaştırılmıştır.

Tablo 10. 1.Numune ve 2. Numune CMM Ölçüm Sonuçları

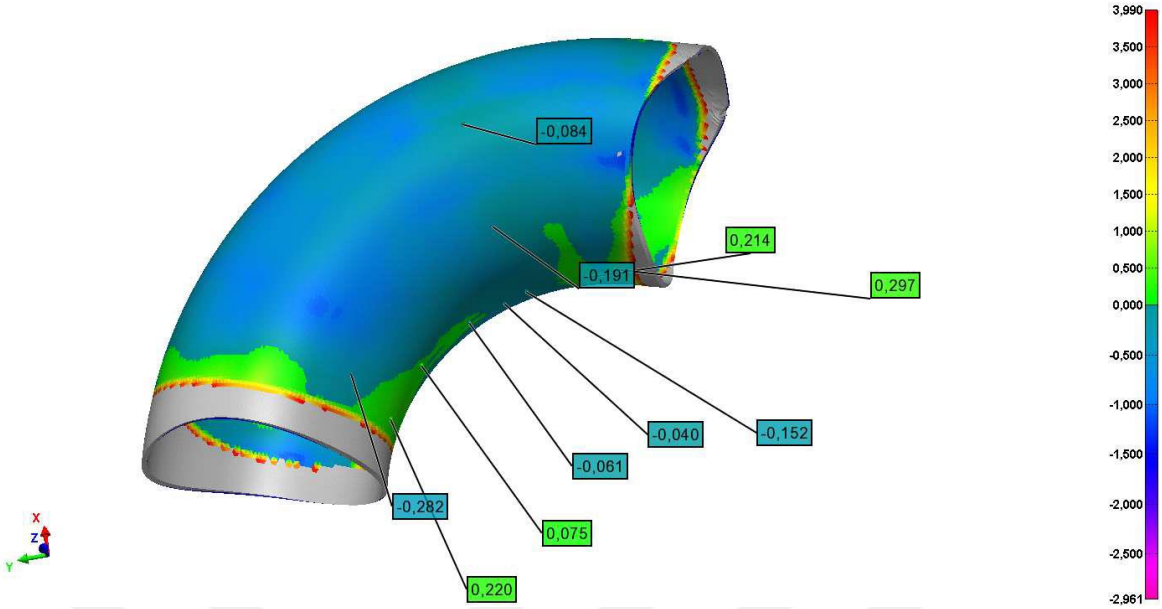
CMM ÖLÇÜMÜ				
	KAYNAK AĞZI İÇ ÇAP(mm)	KAYNAK AĞZI DIŞ ÇAP(mm)	K.A. MAX H(mm)	K.A. MİN H(mm)
1. Numune	160,924	169,561	311,261	142,903
2. Numune	161,272	167,927	312,069	144,048
	SABİT UÇ İÇ ÇAP(mm)	SABİT UÇ DIŞ ÇAP(mm)	S.U. MAX H(mm)	S.U. MİN H(mm)
1. Numune	161,004	168,684	310,952	143,03
2. Numune	161,554	168,344	312,755	141,797
	S.U. TEPE ET KALINLIĞI(mm)	S.U. ALT ET KALINLIĞI(mm)	K.A. TEPE ET KALINLIĞI(mm)	K.A. ALT ET KALINLIĞI(mm)
1. Numune	3,947	3,401	4,362	3,379
2. Numune	4,152	3,013	3,534	3,162

Tablo 11. 1.Numune ve 2. Numune Cmm İç ve Dış Yarıçap Ölçüm Sonuçları

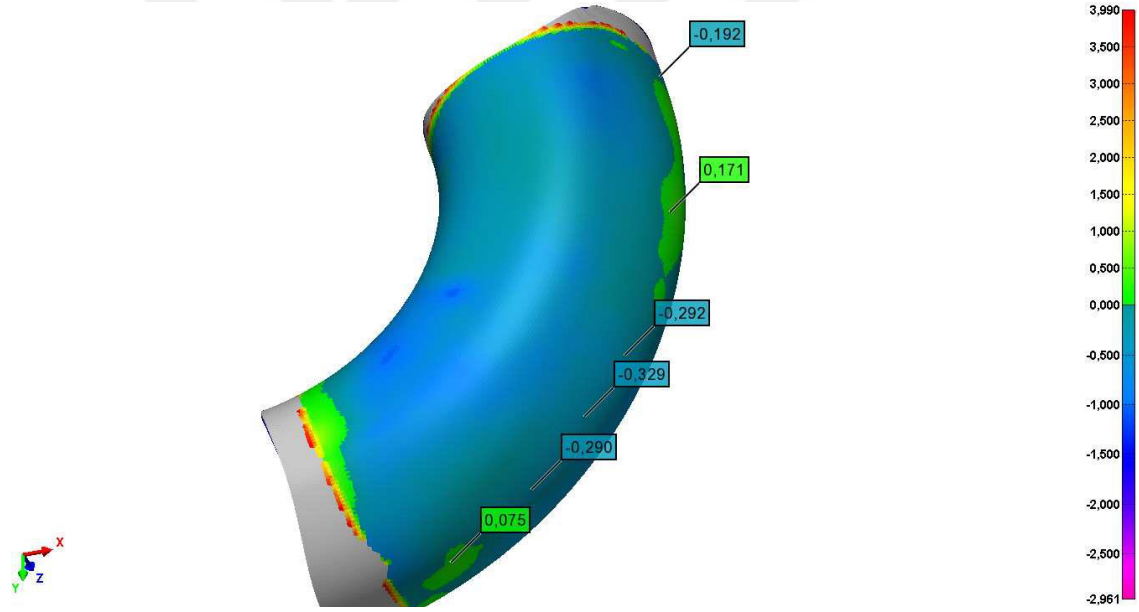
CMM ÖLÇÜMÜ		
	İç Yarıçap (mm)	Dış Yarıçap(mm)
1. Numune	191,347	307,875
2. Numune	194,721	319,065

Tablo 12. Standard ve Ölçüm Sonuçları Karşılaştırması

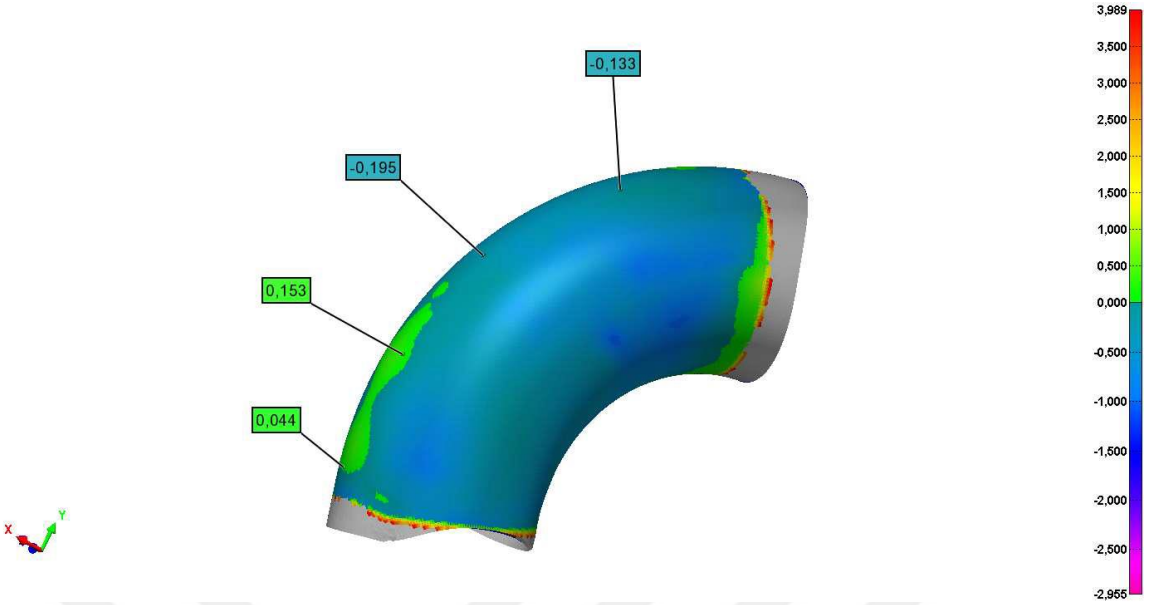
D	ÇAP (mm)	TOLERANS ARALIĞI	1.NUMUNE	2.NUMUNE
6"	168,3	166,78-170,58	168,684	168,344
T	ET KALINLIĞI	TOLERANS ARALIĞI	1.NUMUNE	2.NUMUNE
6"	3,4	min.2.98	3,42-4,58	3,10-4,08
B	MAKSİMUM YÜKSEKLİK (mm)	TOLERANS ARALIĞI	1.NUMUNE	2.NUMUNE
6"	313,15	310,75-315,9	311,261	312,069
R	YARIÇAP (mm)	TOLERANS ARALIĞI	1.NUMUNE	2.NUMUNE
6"	229	227-231	226,4805	228,1055



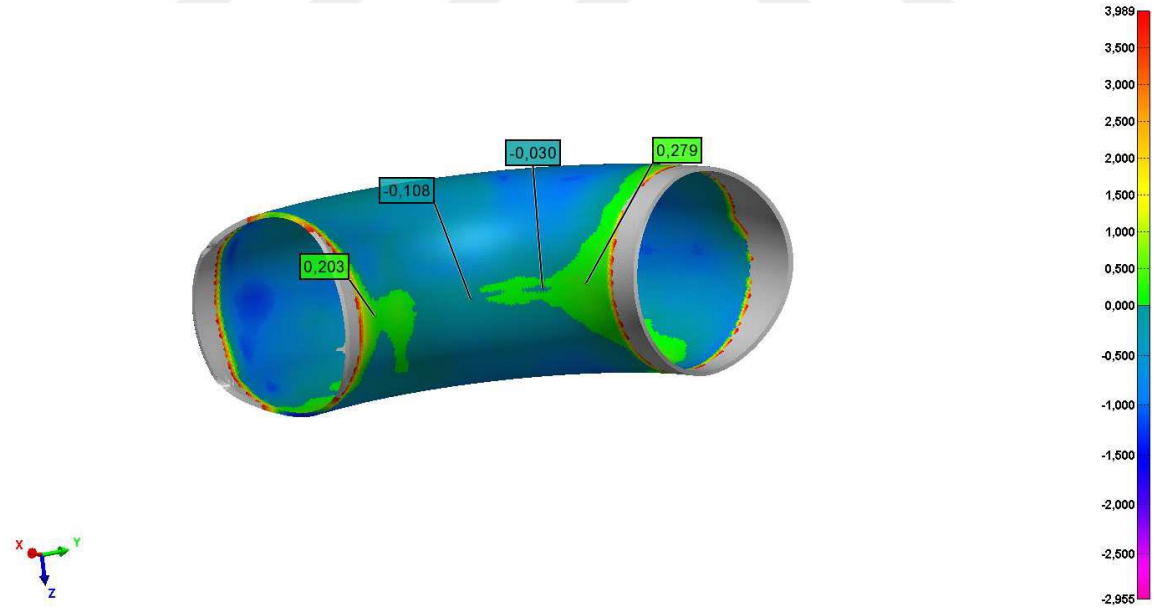
Şekil 67. 1. Numune ile 25 saniyelik proses karşılaştırılması-1



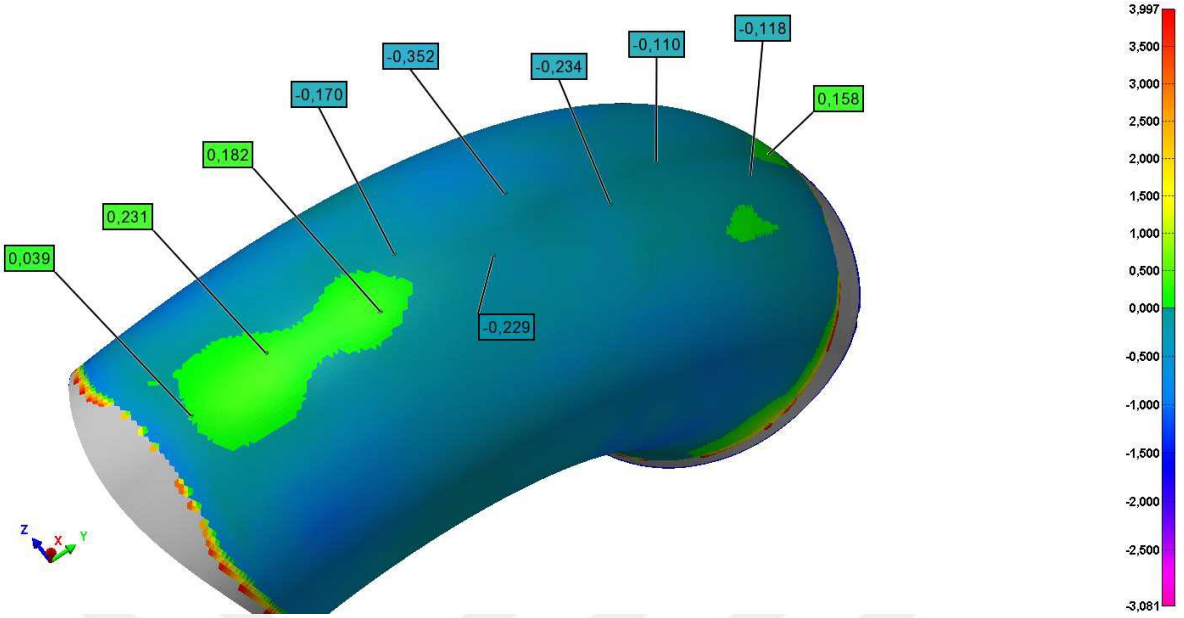
Şekil 68. 1. Numune ile 25 saniyelik proses karşılaştırılması-2



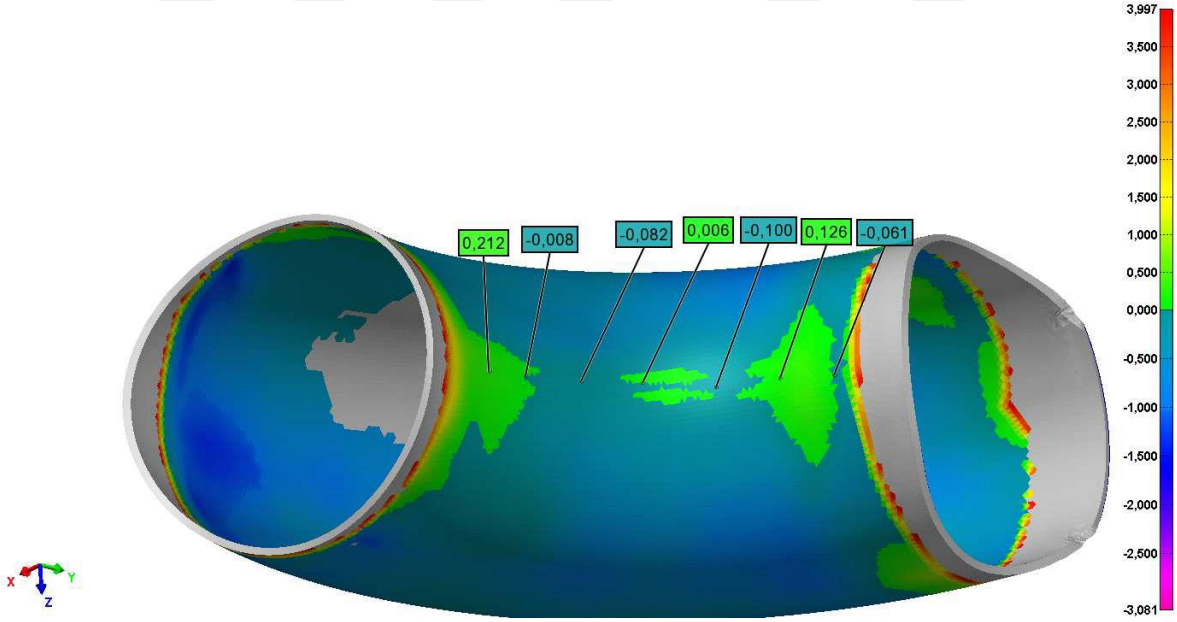
Şekil 69. 1. Numune ile 30 saniyelik proses karşılaştırılması-1



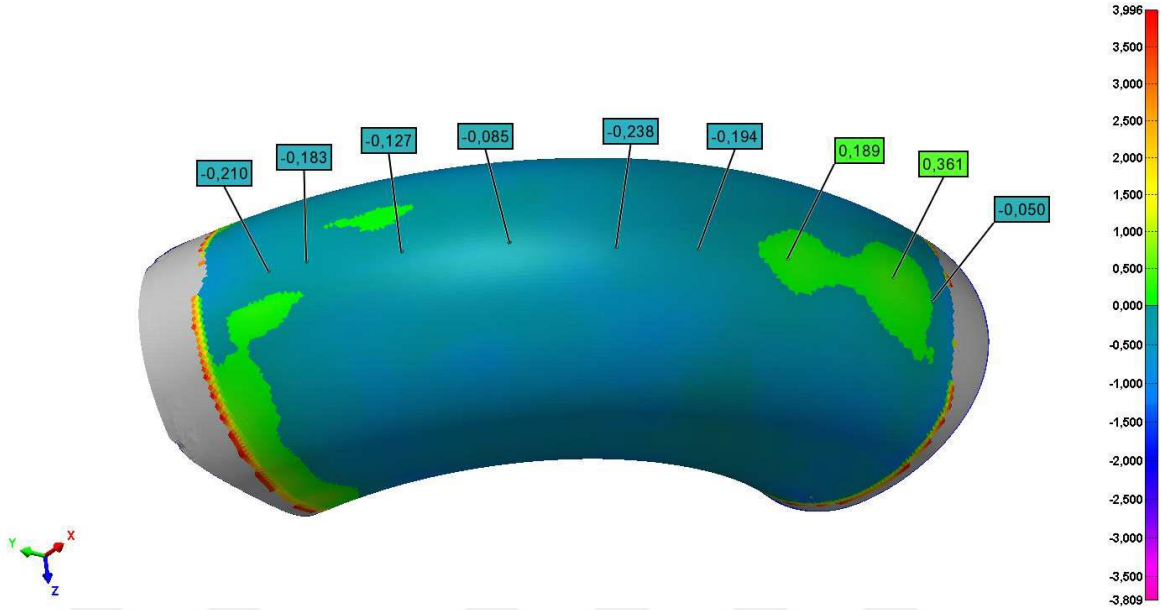
Şekil 70. 1. Numune ile 30 saniyelik proses karşılaştırılması-2



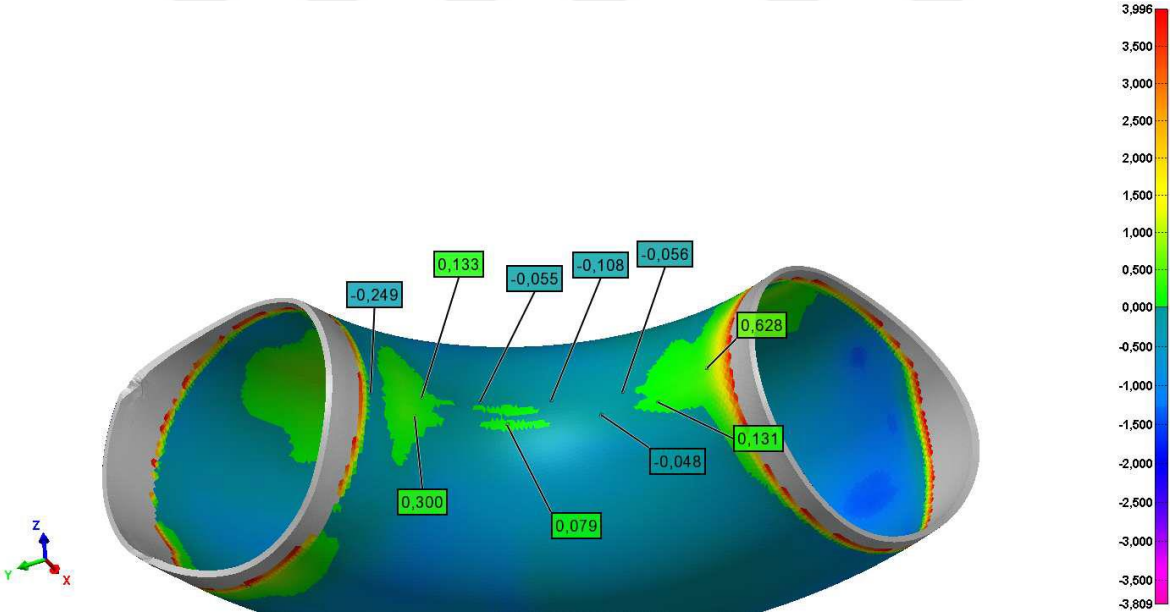
Şekil 71. 1.Numune ile 35 saniyelik proses karşılaştırılması-1



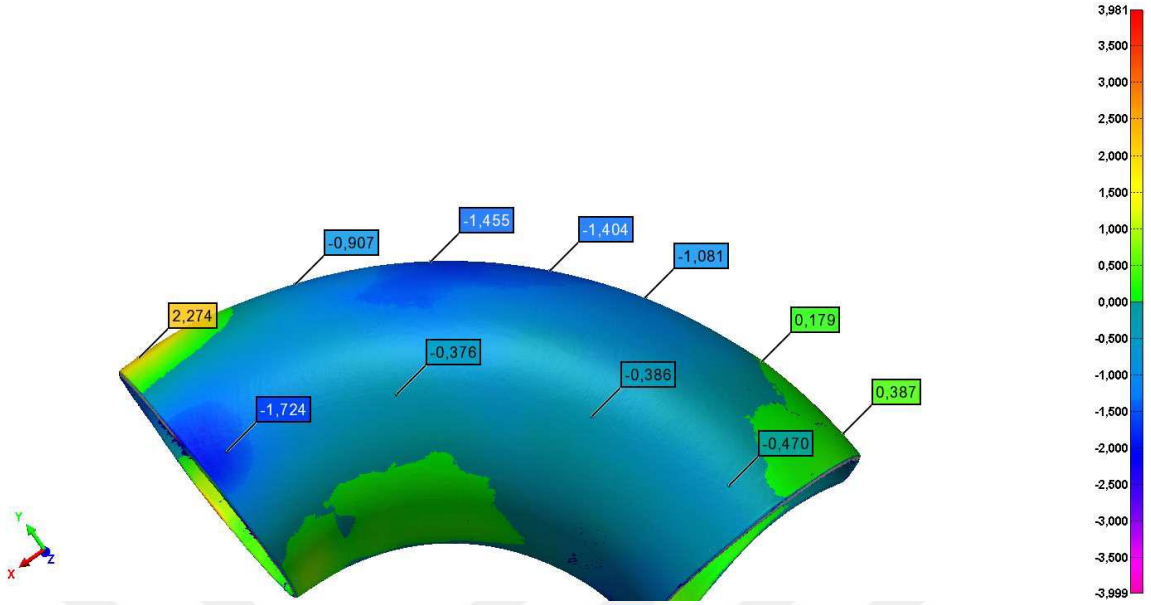
Şekil 72. 1.Numune ile 35 saniyelik proses karşılaştırılması-2



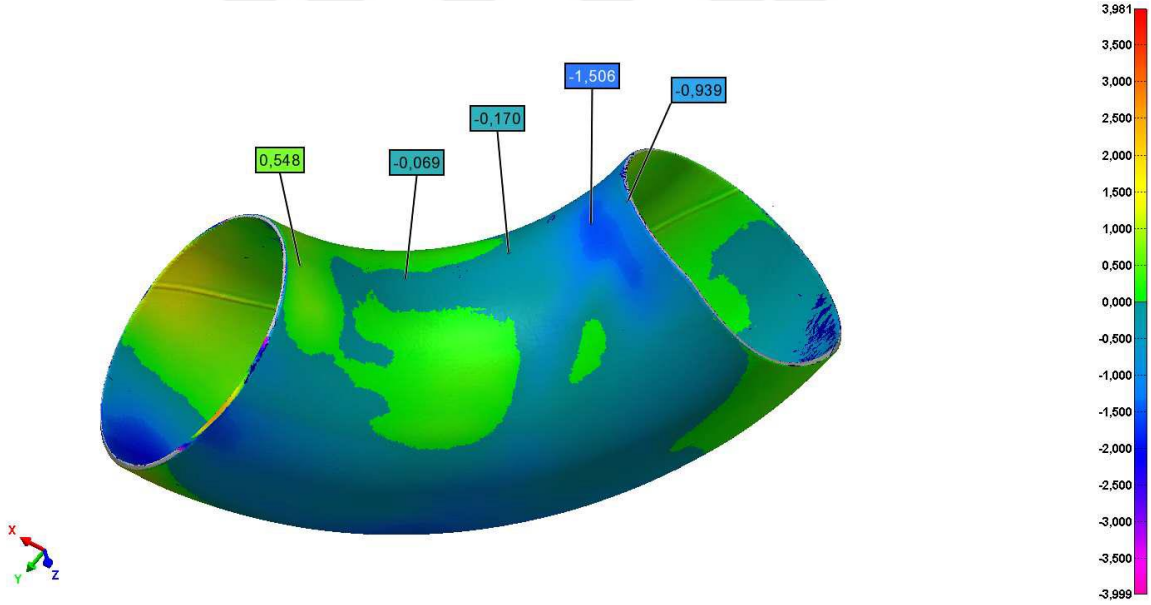
Şekil 73. 1.Numune ile 40 saniyelik proses karşılaştırılması-1



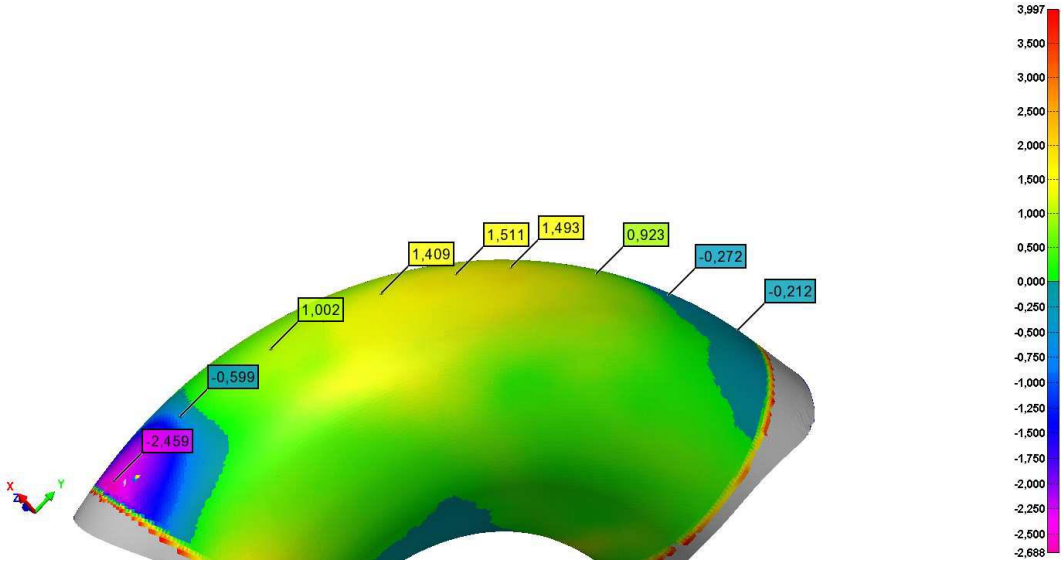
Şekil 74. 1.Numune ile 40 saniyelik proses karşılaştırılması-2



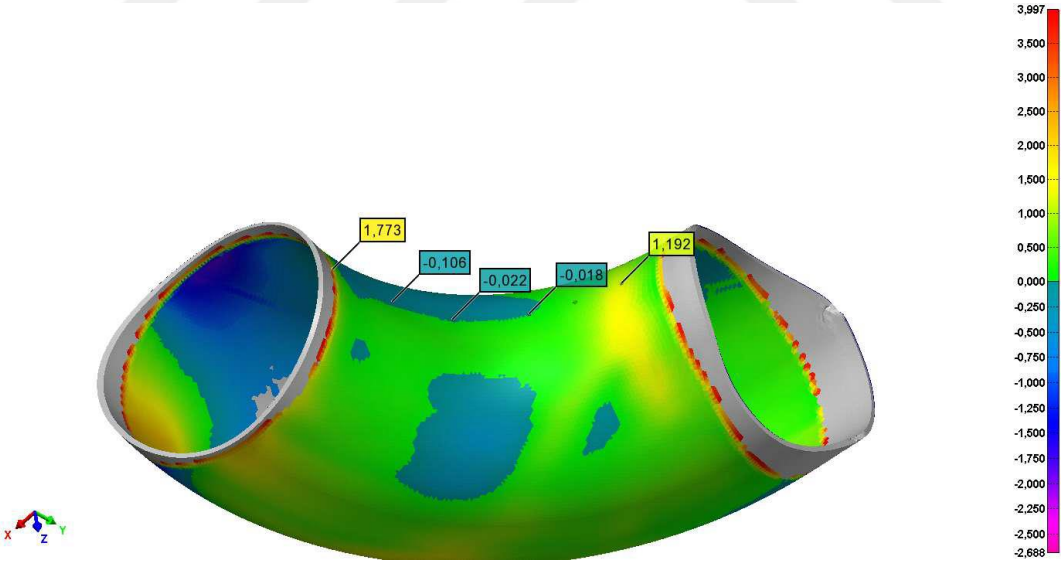
Şekil 75. 2.Numune ile 25 saniyelik proses karşılaştırılması-1



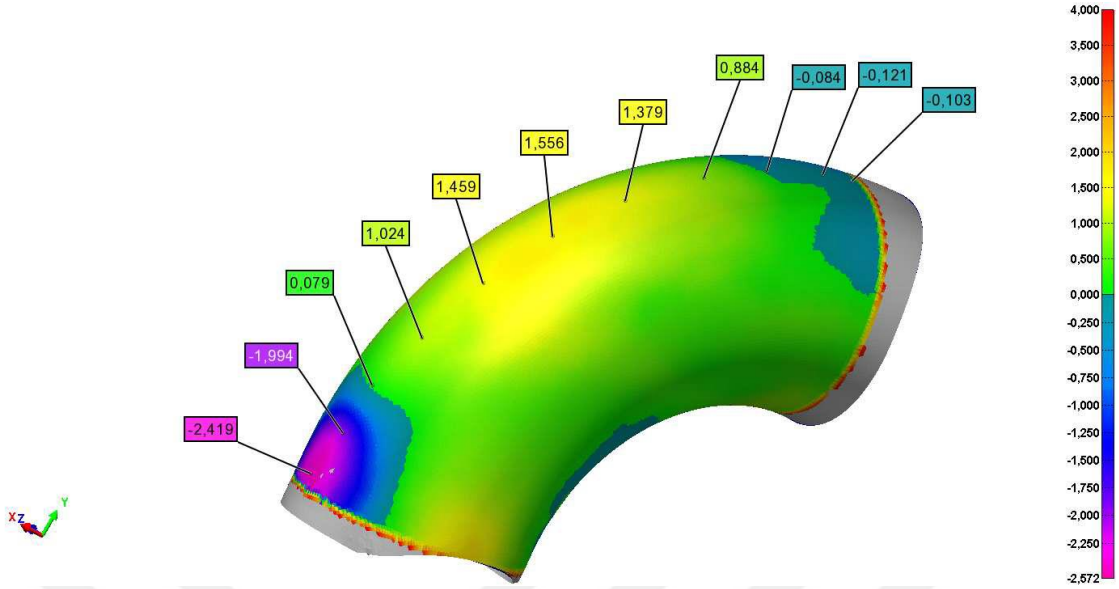
Şekil 76. 2.Numune ile 25 saniyelik proses karşılaştırılması-2



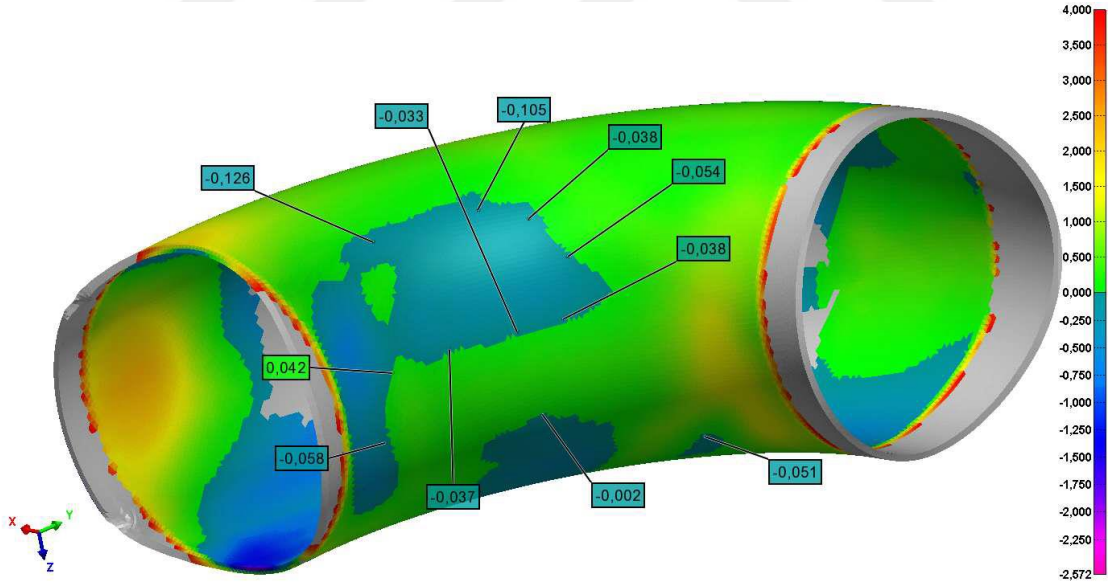
Şekil 77. 2.Numune ile 30 saniyelik proses karşılaştırılması-1



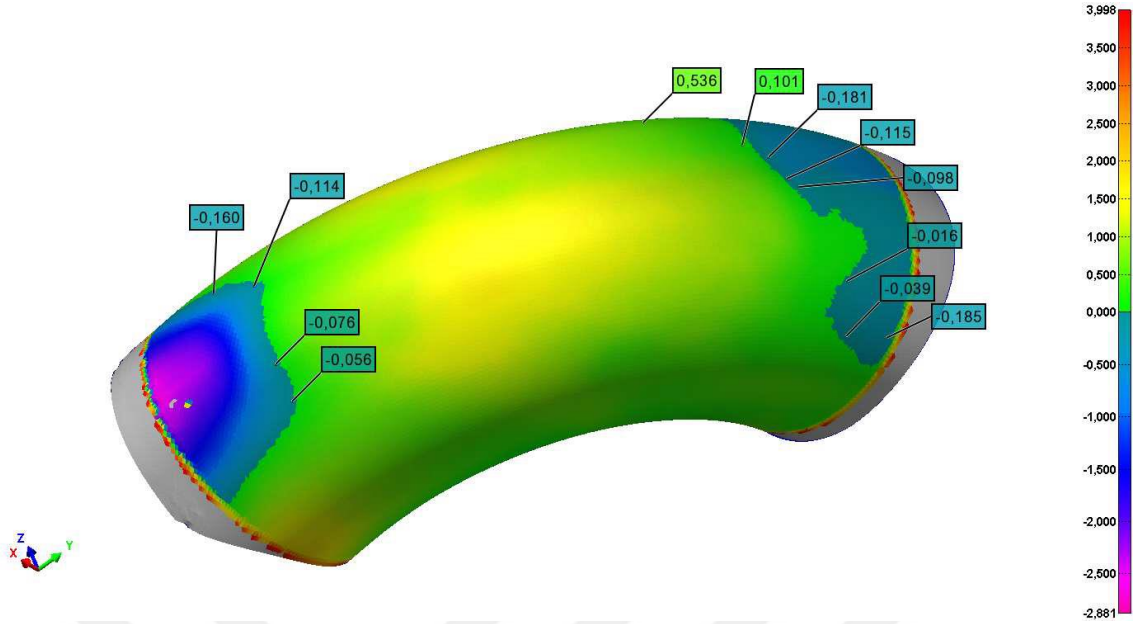
Şekil 78. 2.Numune ile 30 saniyelik proses karşılaştırılması-2



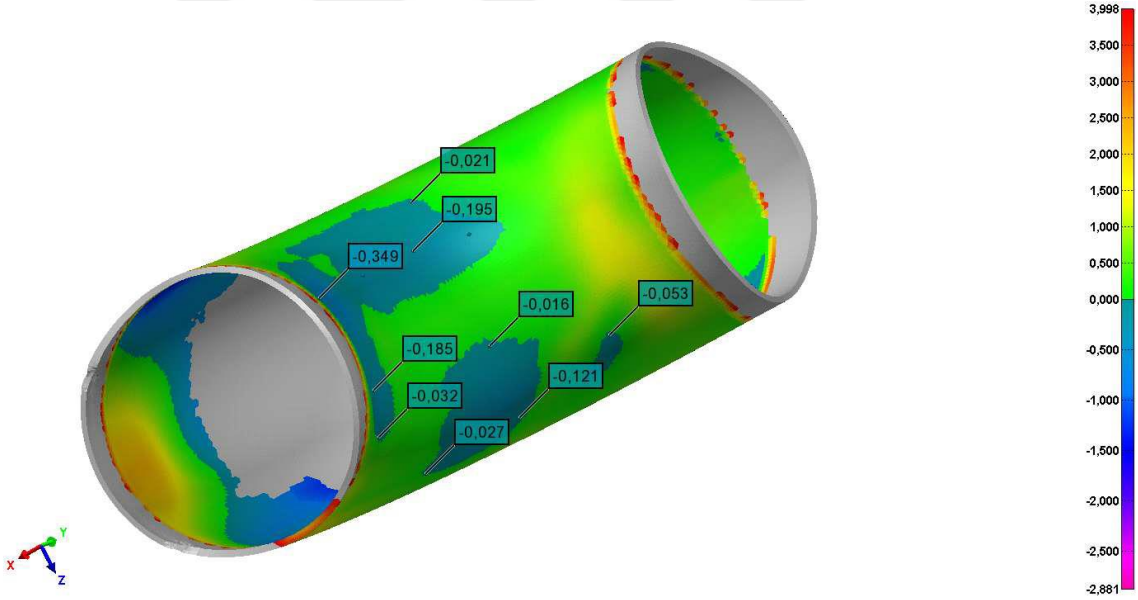
Şekil 79. 2.Numune ile 35 saniyelik proses karşılaştırılması-1



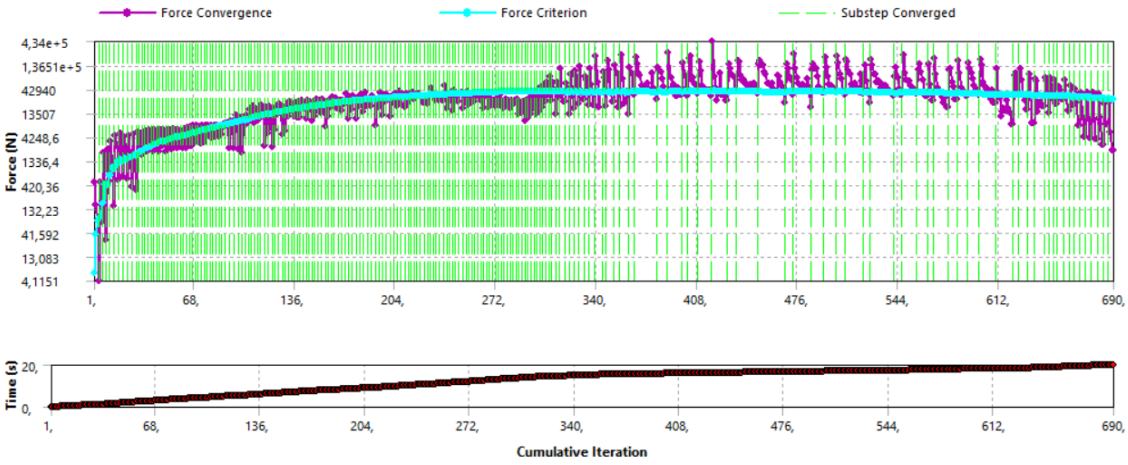
Şekil 80. 2.Numune ile 35 saniyelik proses karşılaştırılması-2



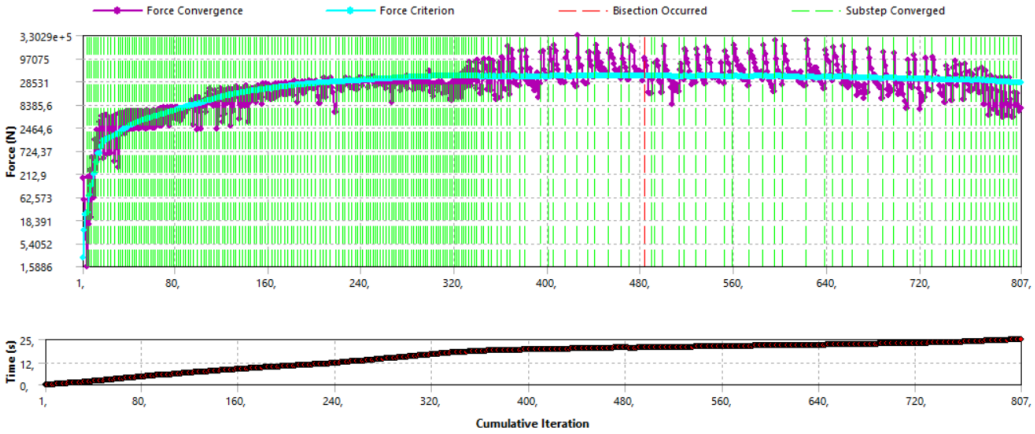
Şekil 81. 2.Numune ile 40 saniyelik proses karşılaştırılması-1



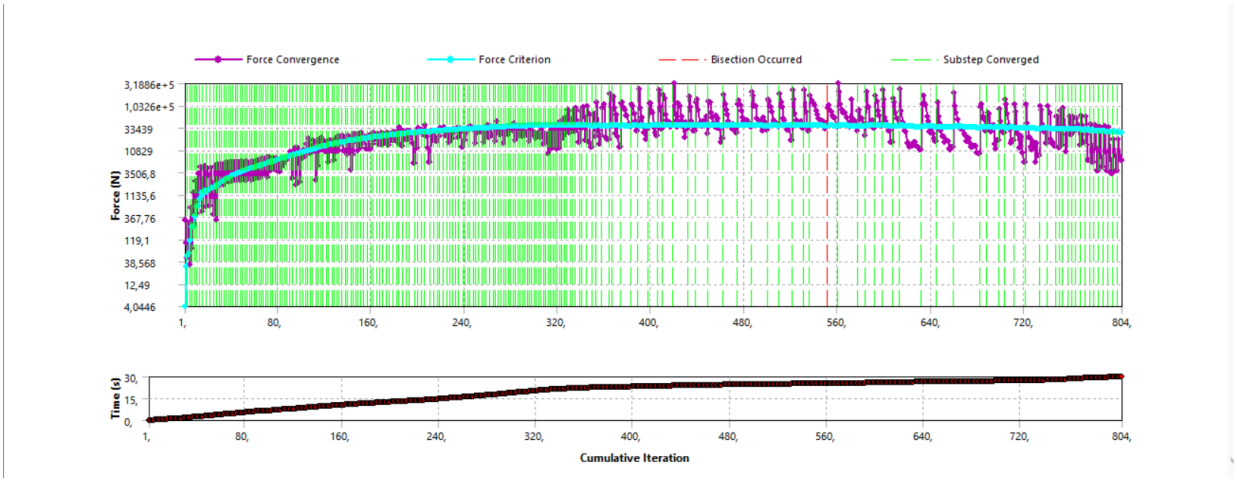
Şekil 82. 2.Numune ile 40 saniyelik proses karşılaştırılması-2



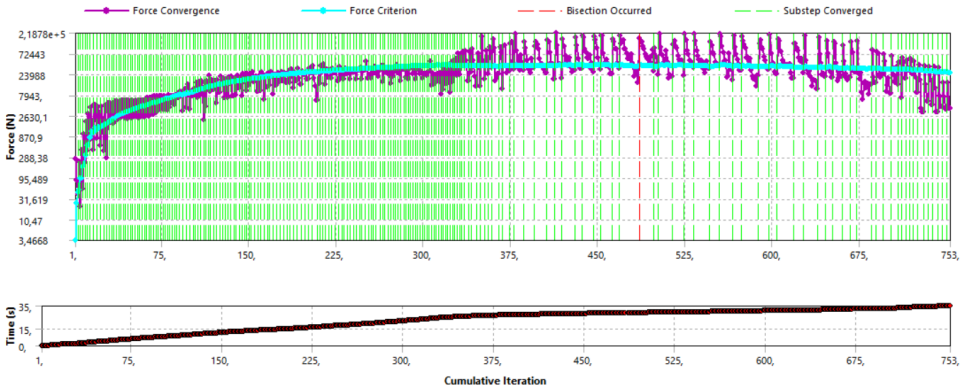
Şekil 83. 20 saniyelik prosesin kuvvet - zaman - kümülatif iterasyon yakınsama grafiği



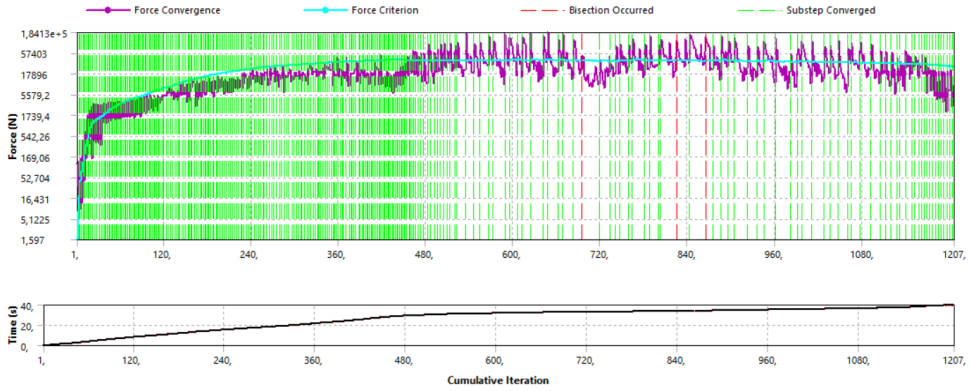
Şekil 84. 25 saniyelik prosesin kuvvet - zaman - kümülatif iterasyon yakınsama grafiği



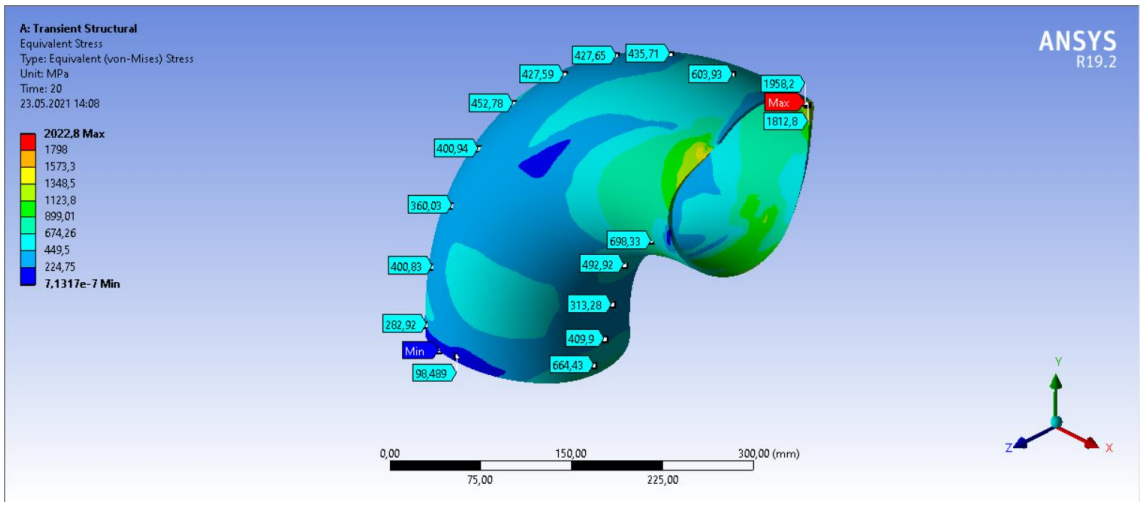
Şekil 85. 30 saniyelik prosesin kuvvet - zaman - kümülatif iterasyon yakınsama grafiği



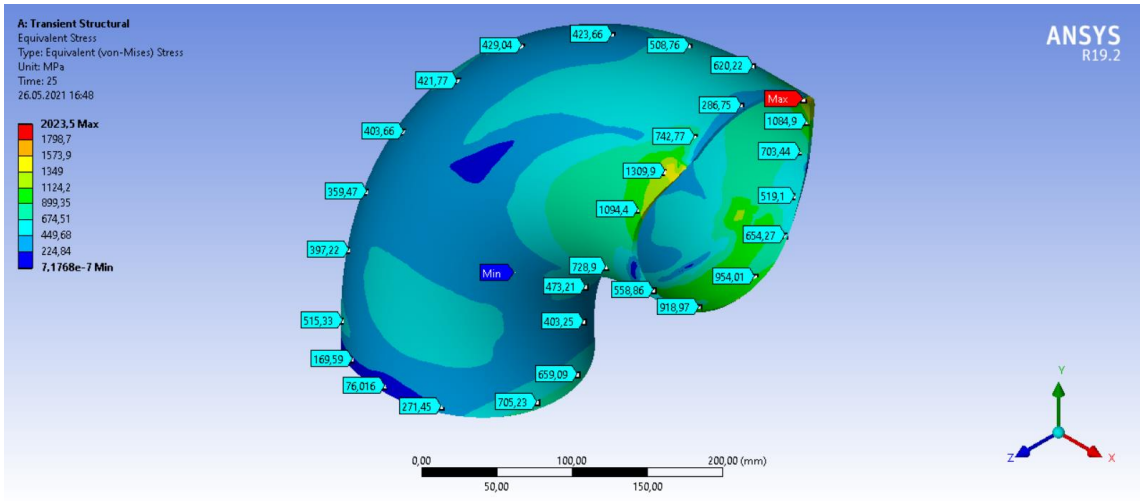
Şekil 86. 35 saniyelik prosesin kuvvet-zaman-kümülatif iterasyon yakınsama grafiği



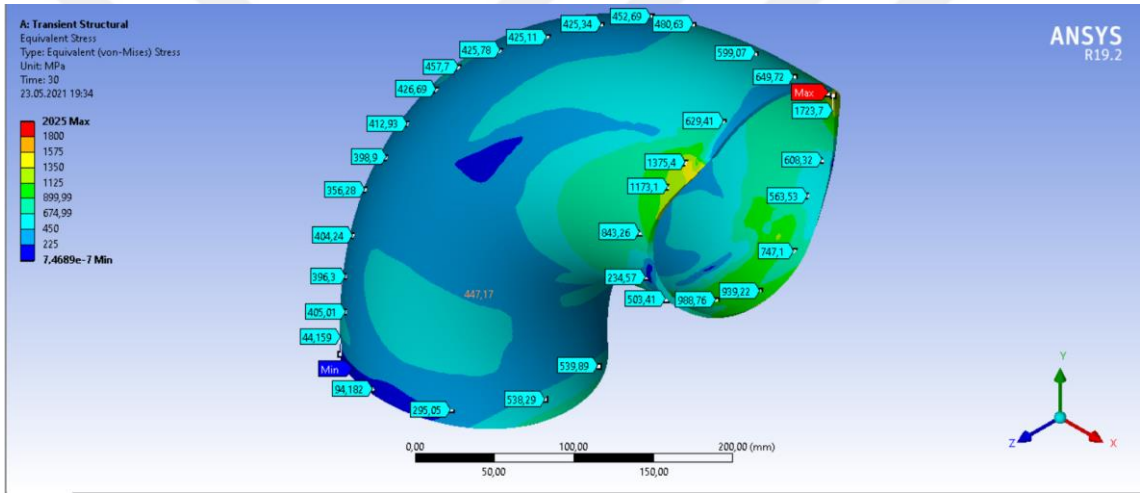
Şekil 87. 40 saniyelik prosesin kuvvet-zaman-kümülatif iterasyon yakınsama grafiği



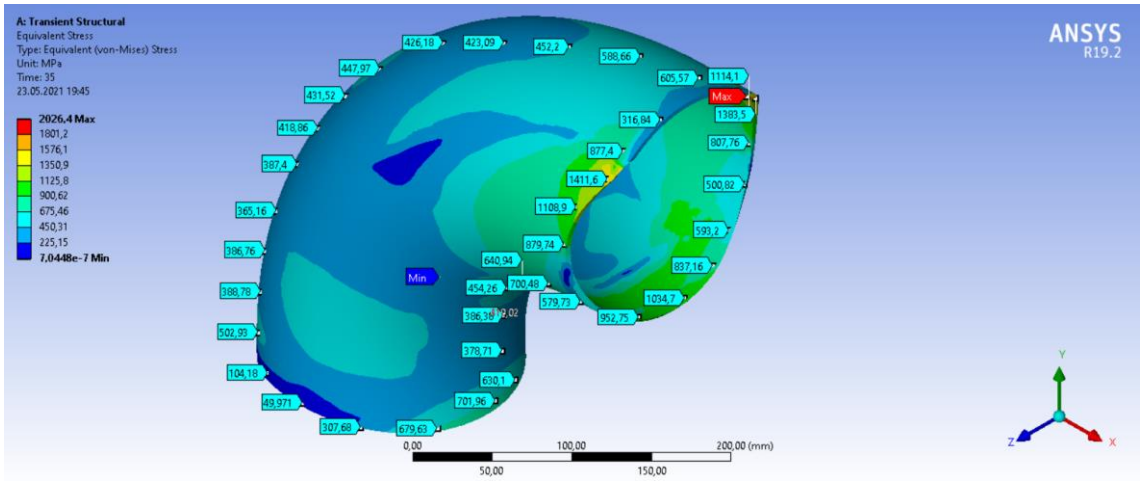
Şekil 88. 20 saniyelik prosesin Von-Mises gerilim dağılımının izometrik görünüşü



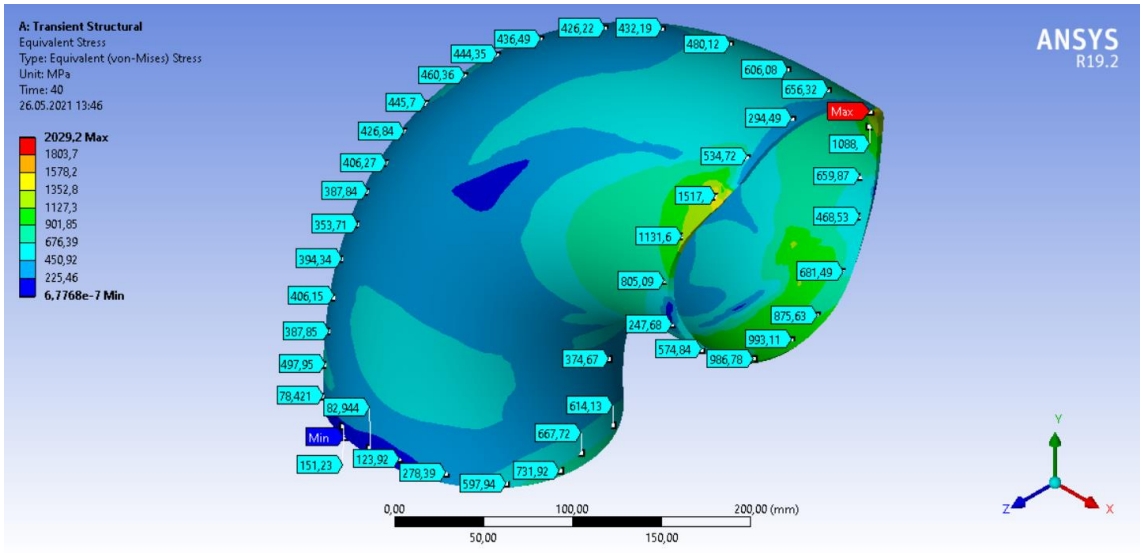
Şekil 89. 25 saniyelik prosesin Von-Mises gerilim dağılımının izometrik görünüşü



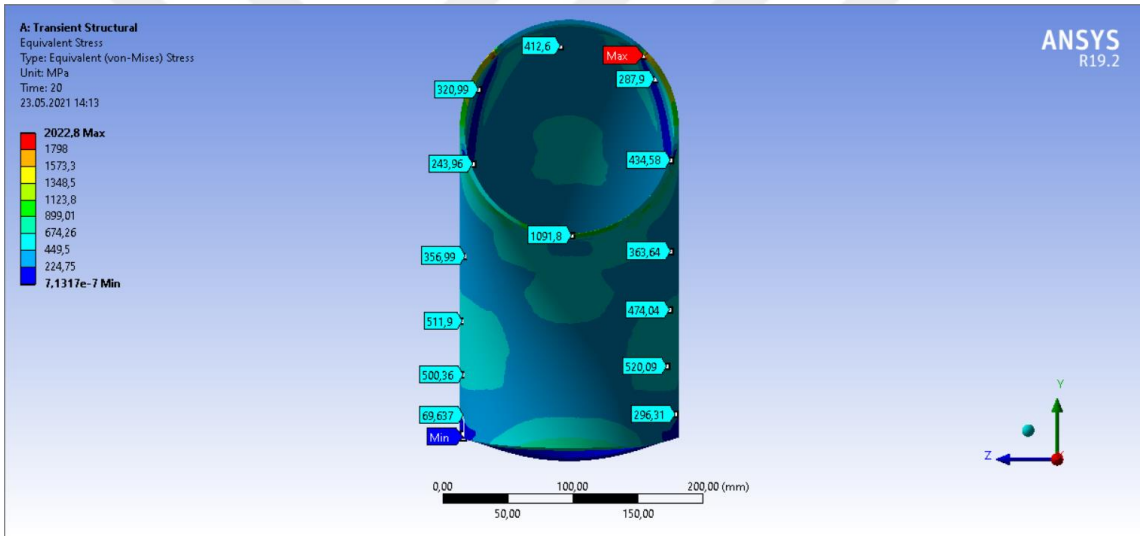
Şekil 90. 30 saniyelik prosesin Von-Mises gerilim dağılımının izometrik görünüşü



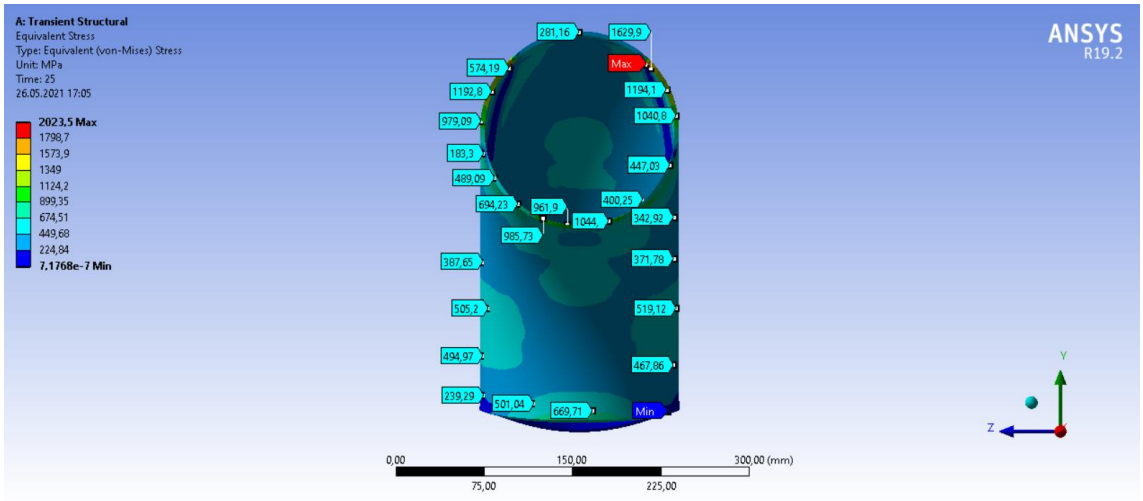
Şekil 91. 35 saniyelik prosesin Von-Mises gerilim dağılımının izometrik görünüşü



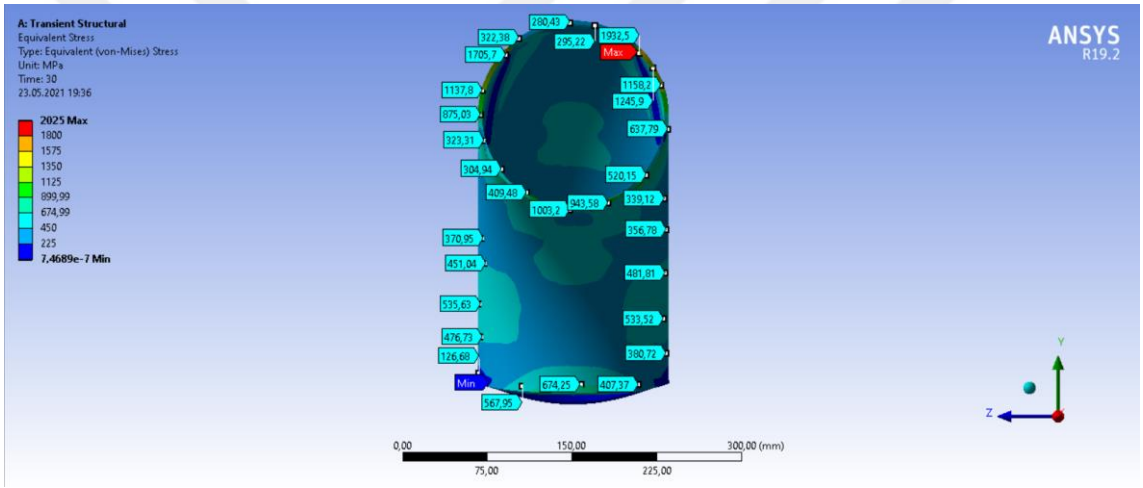
Şekil 92. 40 saniyelik prosesin Von-Mises gerilim dağılımının izometrik görünüşü



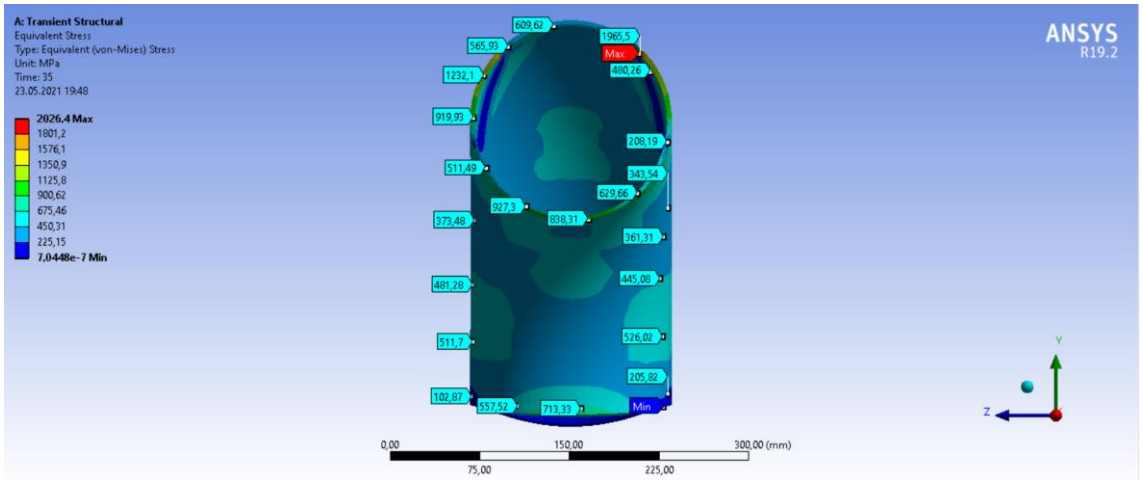
Şekil 93. 20 saniyelik prosesin Von-Mises gerilim dağılımının X ekseninden görünüşü



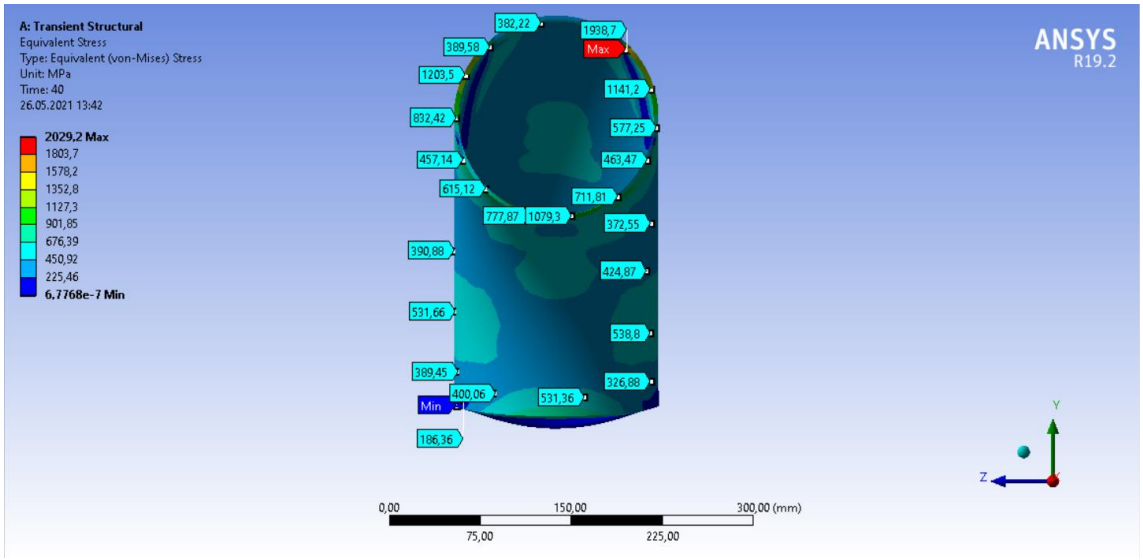
Şekil 94. 25 saniyelik prosesin Von-Mises gerilim dağılımının X ekseninden görünüşü



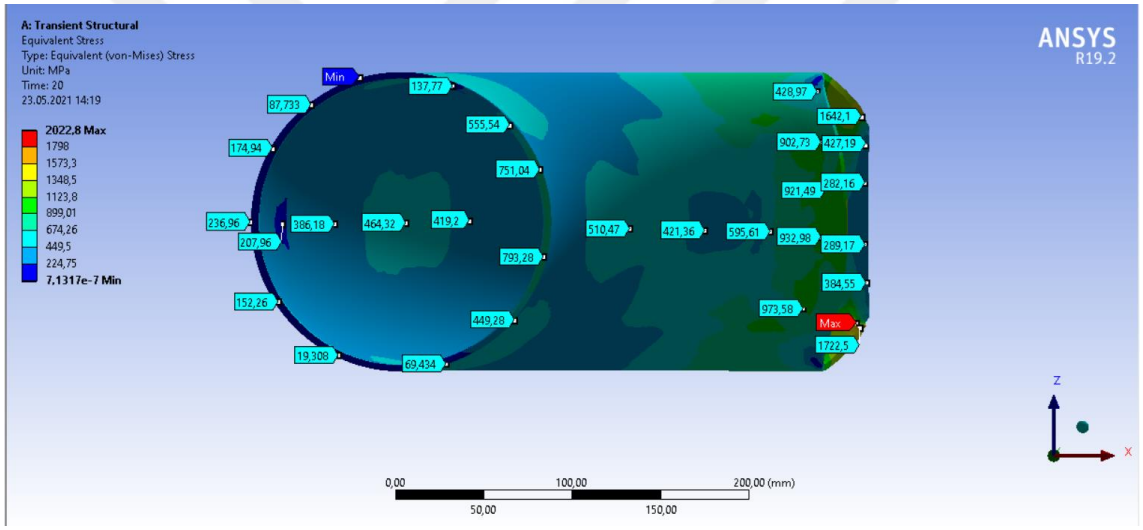
Şekil 95. 30 saniyelik prosesin Von-Mises gerilim dağılımının X ekseninden görünüşü



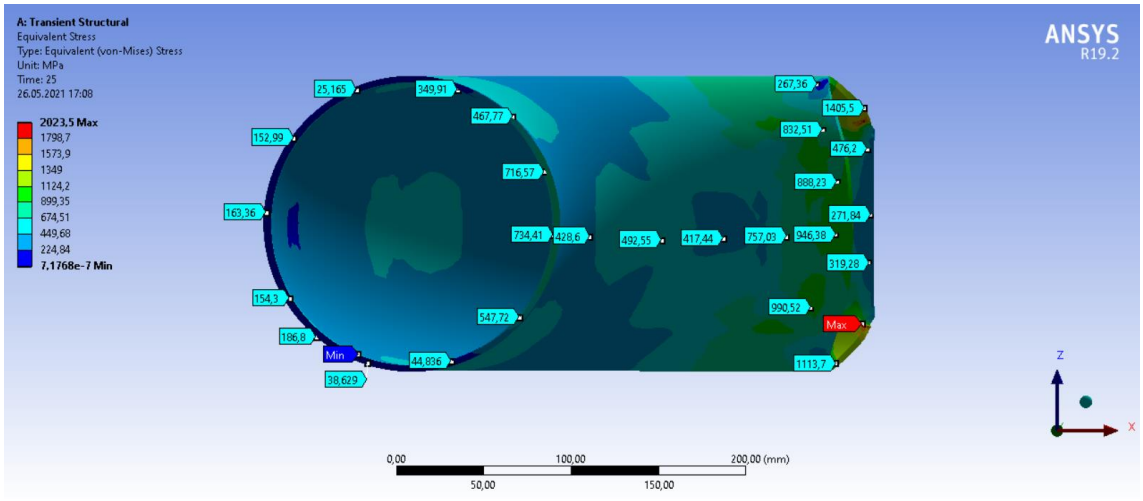
Şekil 96. 35 saniyelik prosesin Von-Mises gerilim dağılımının X ekseninden görünüşü



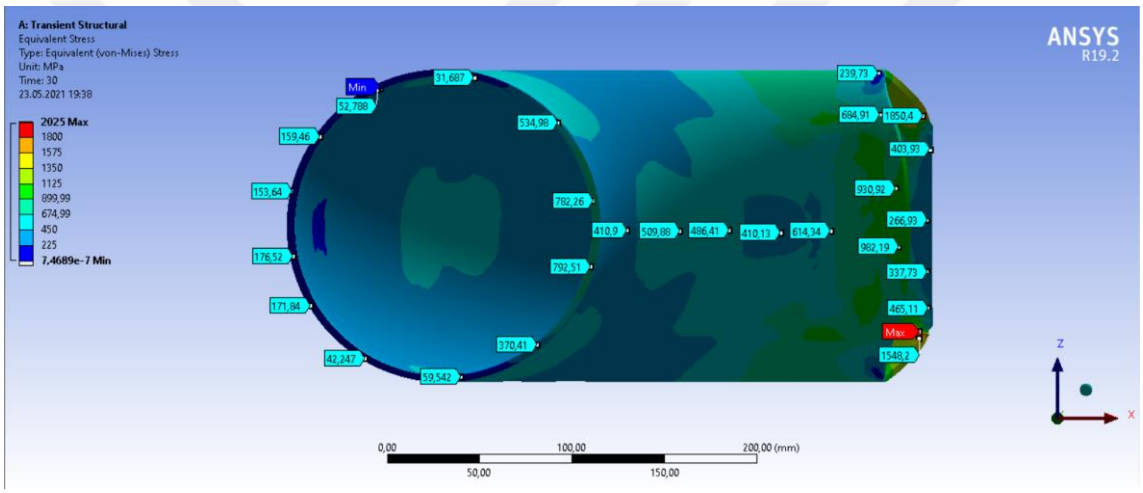
Şekil 97. 40 saniyelik prosesin Von-Mises gerilim dağılımının X ekseninden görünüşü



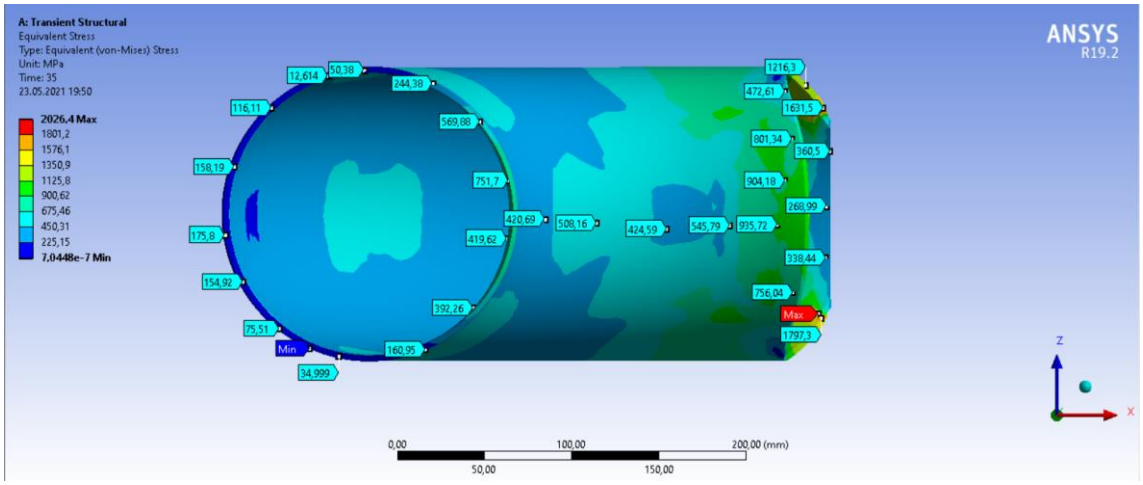
Şekil 98. 20 saniyelik prosesin Von-Mises gerilim dağılımının Y ekseninden görünüşü



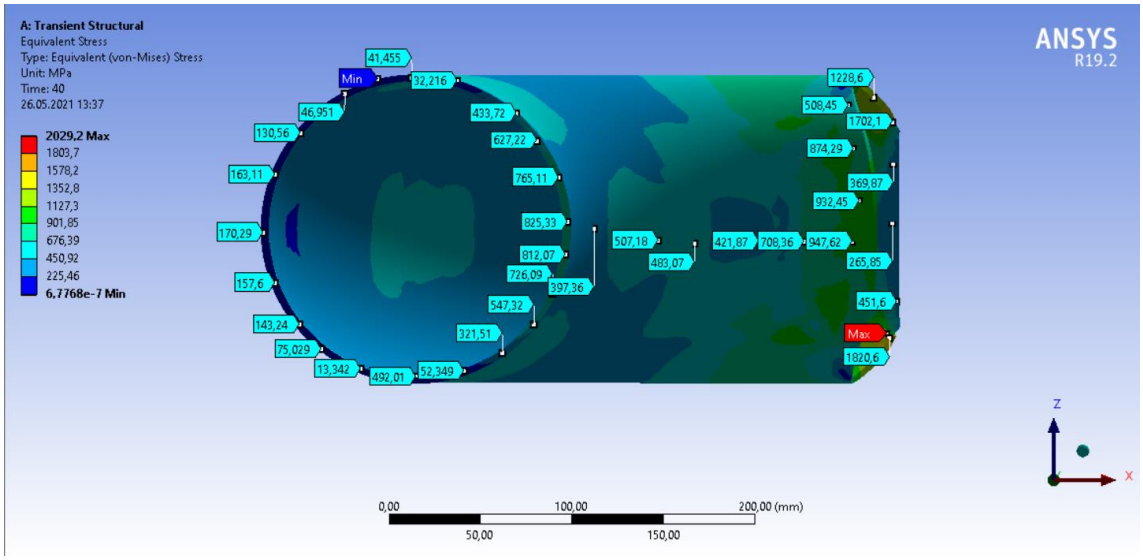
Şekil 99. 25 saniyelik prosesin Von-Mises gerilim dağılımının Y ekseninden görünüşü



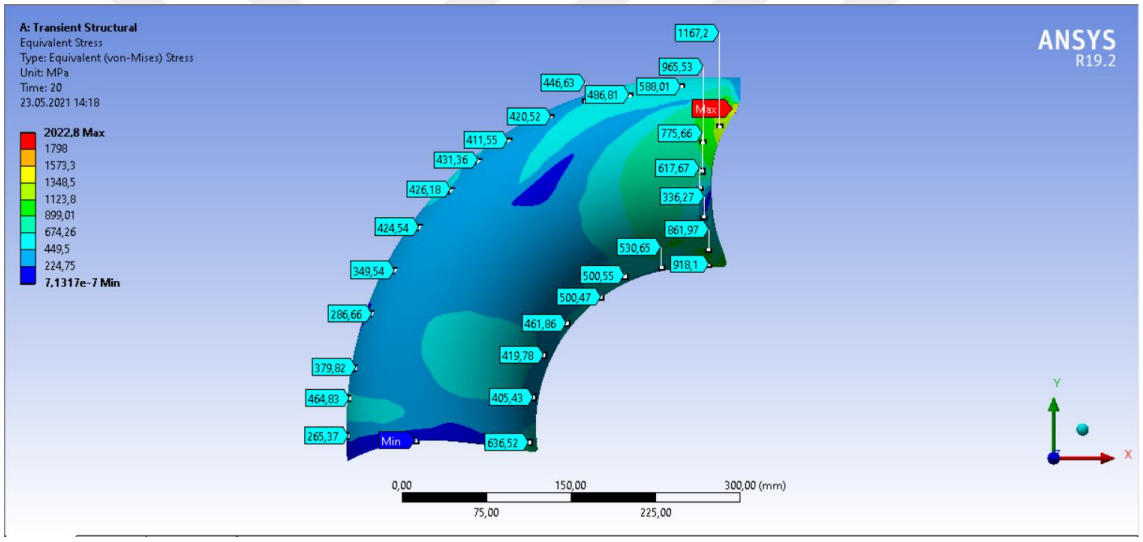
Şekil 100. 30 saniyelik prosesin Von-Mises gerilim dağılımının Y ekseninden görünüşü



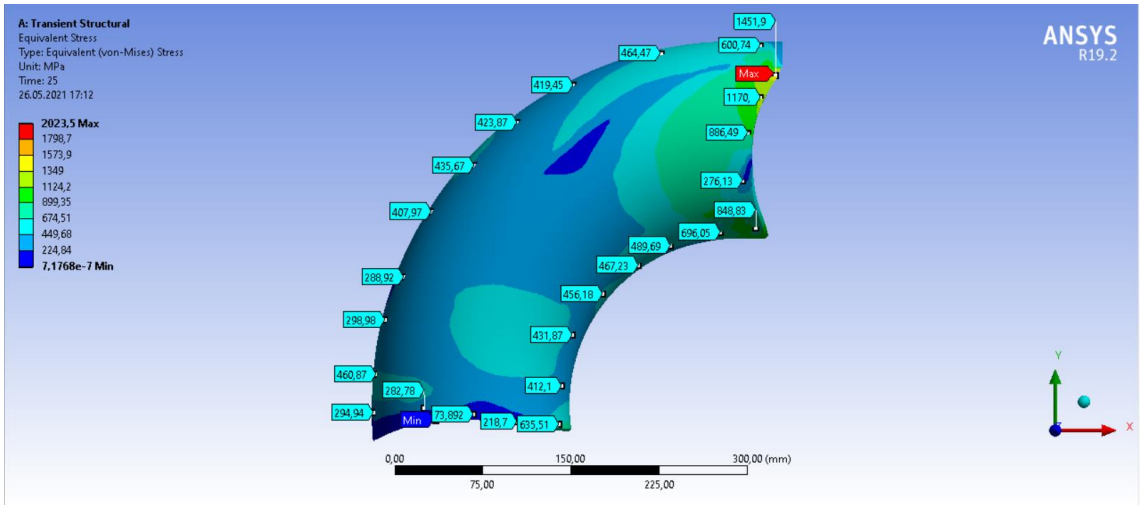
Şekil 101. 35 saniyelik prosesin Von-Mises gerilim dağılımının Y ekseninden görünüşü



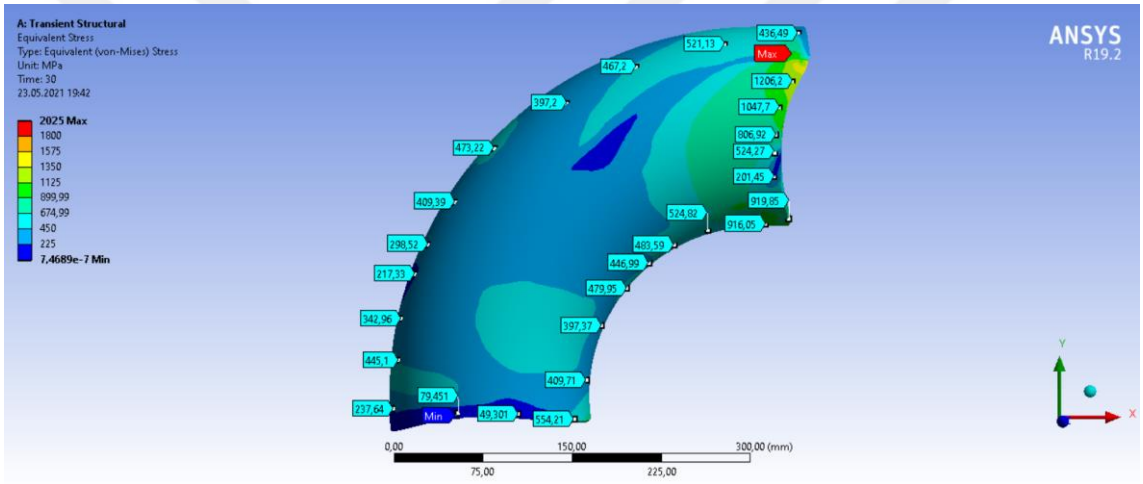
Şekil 102. 40 saniyelik prosesin Von-Mises gerilim dağılımının Y ekseninden görünüşü



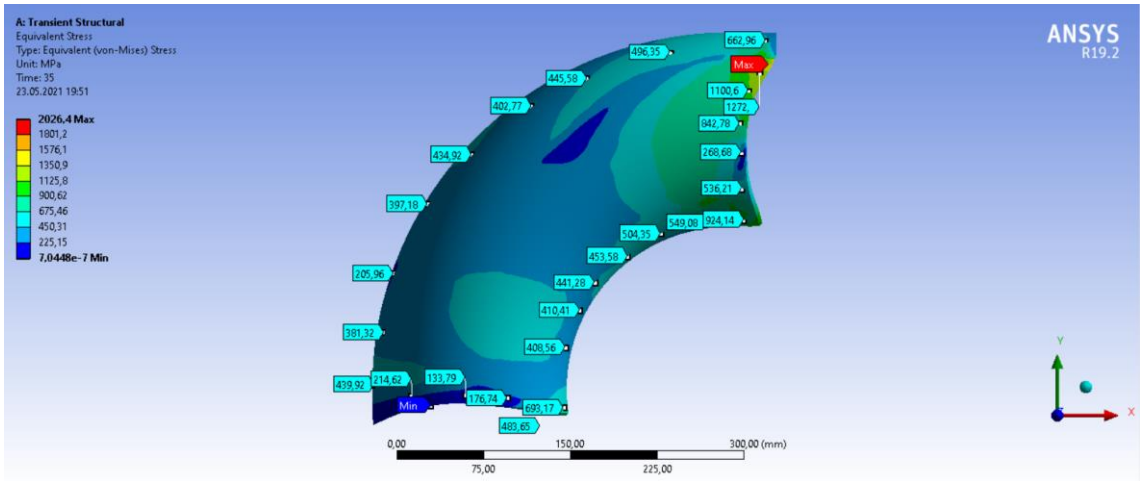
Şekil 103. 20 saniyelik prosesin Von-Mises gerilim dağılımının Z ekseninden görünüşü



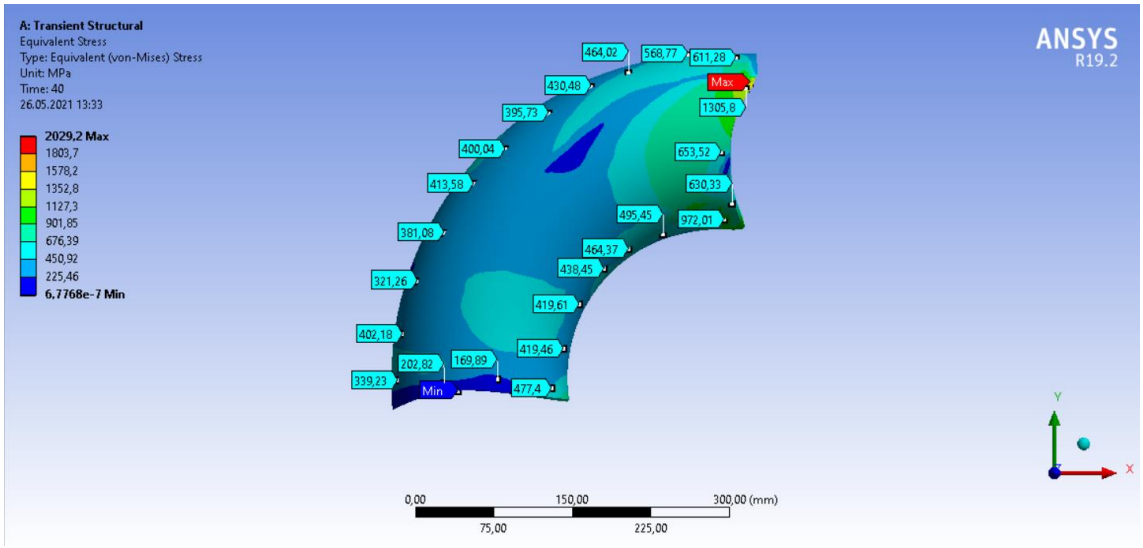
Şekil 104. 25 saniyelik prosesin Von-Mises gerilim dağılımının Z ekseninden görünüşü



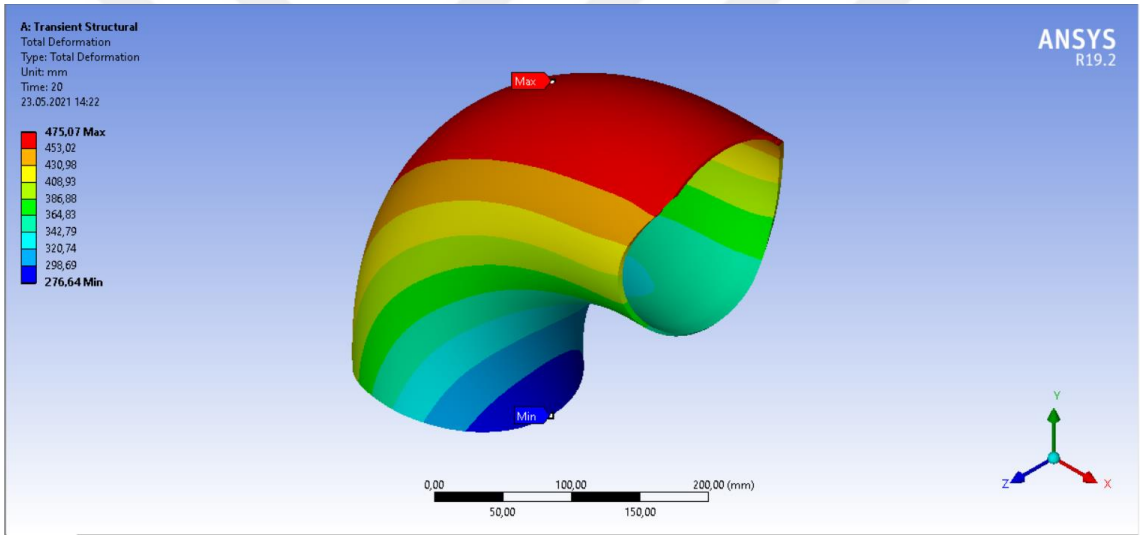
Şekil 105. 30 saniyelik prosesin Von-Mises gerilim dağılımının Z ekseninden görünüşü



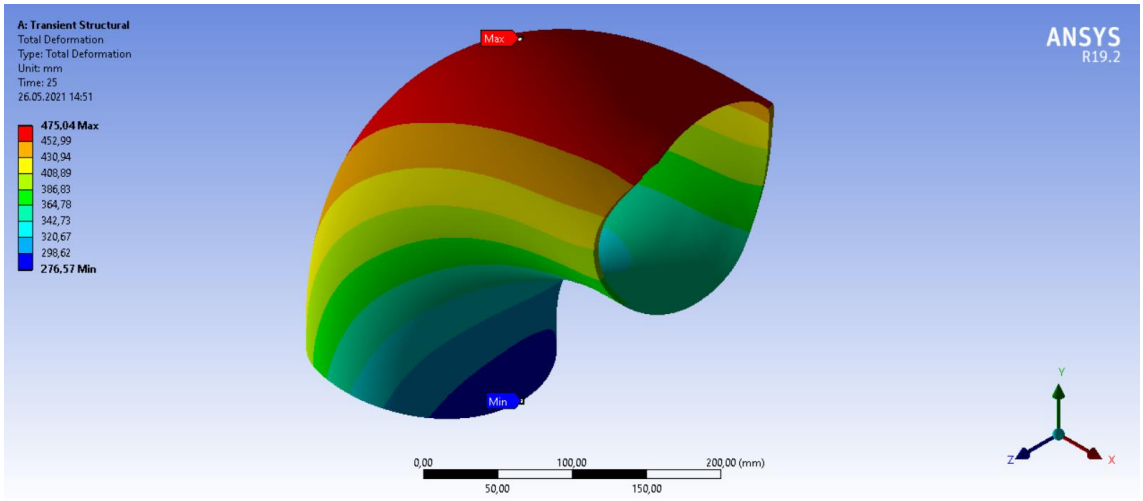
Şekil 106. 35 saniyelik prosesin Von-Mises gerilim dağılımının Z ekseninden görünüşü



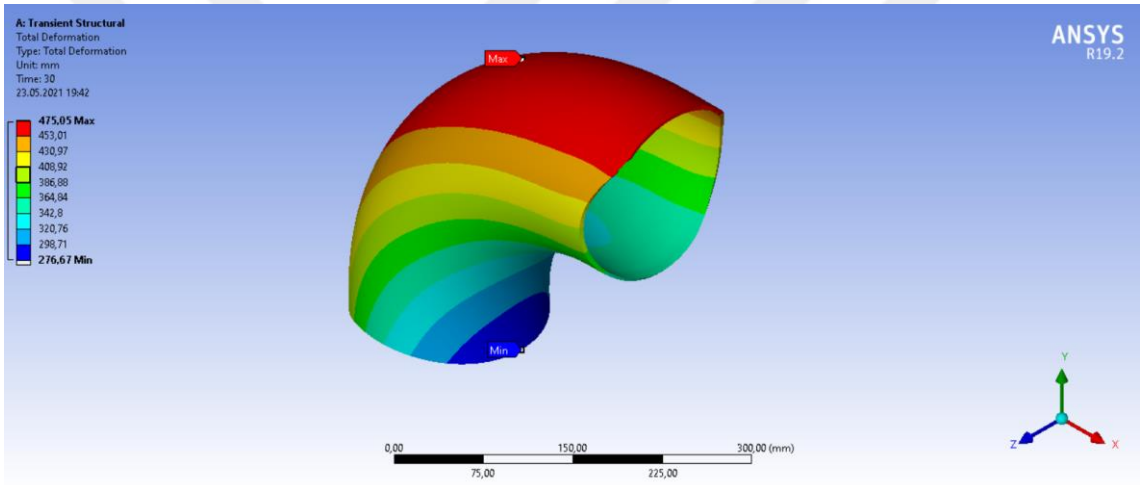
Şekil 107. 40 saniyelik prosesin Von-Mises gerilim dağılımının Z ekseninden görünüşü



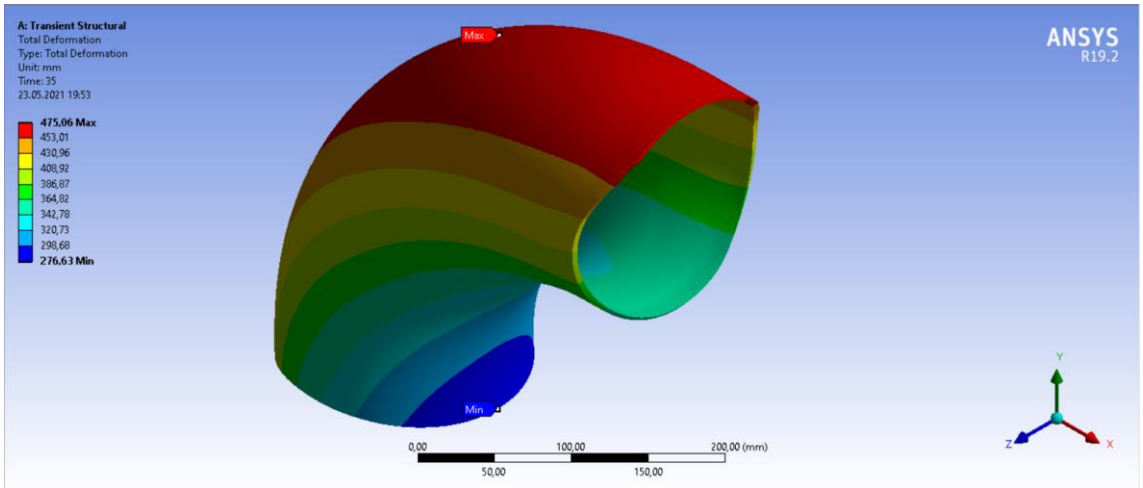
Şekil 108. 20 saniyelik proseste borunun toplam deformasyonu



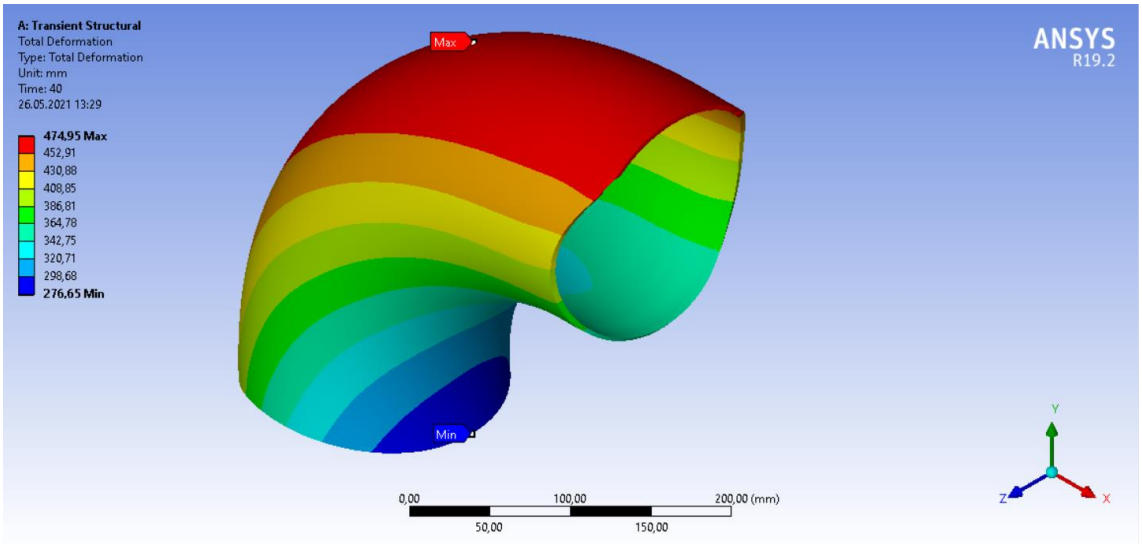
Şekil 109. 25 saniyelik proseste borunun toplam deformasyonu



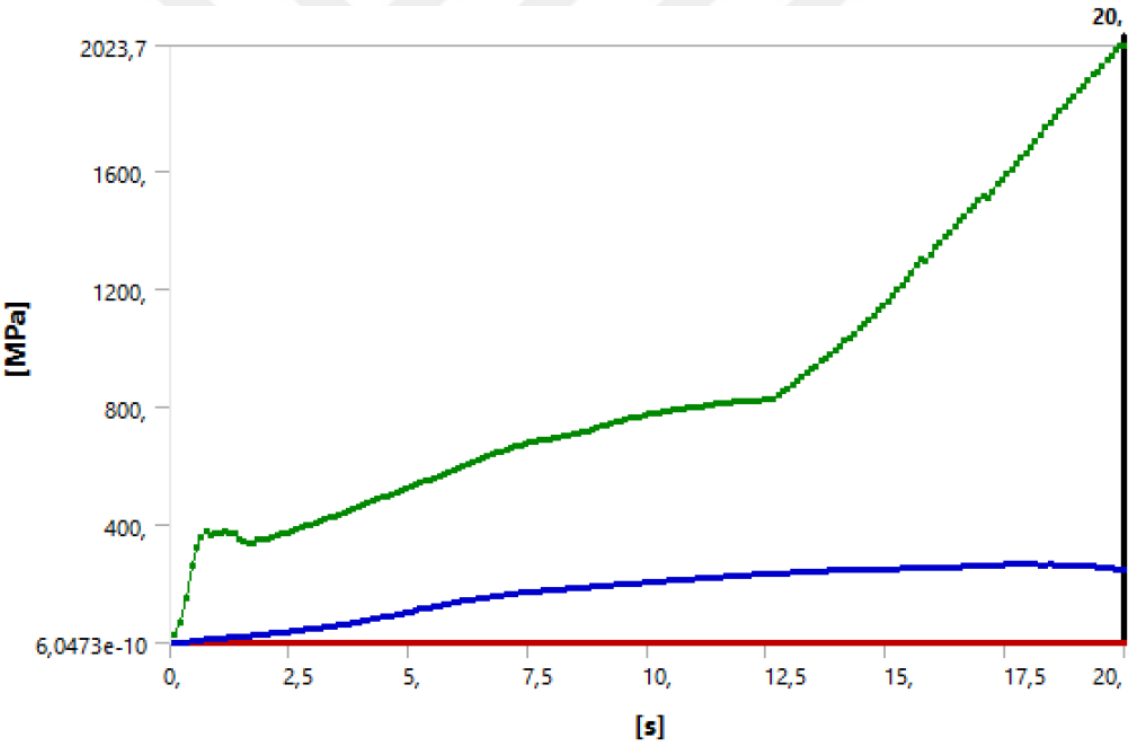
Şekil 110. 30 saniyelik proseste borunun toplam deformasyonu



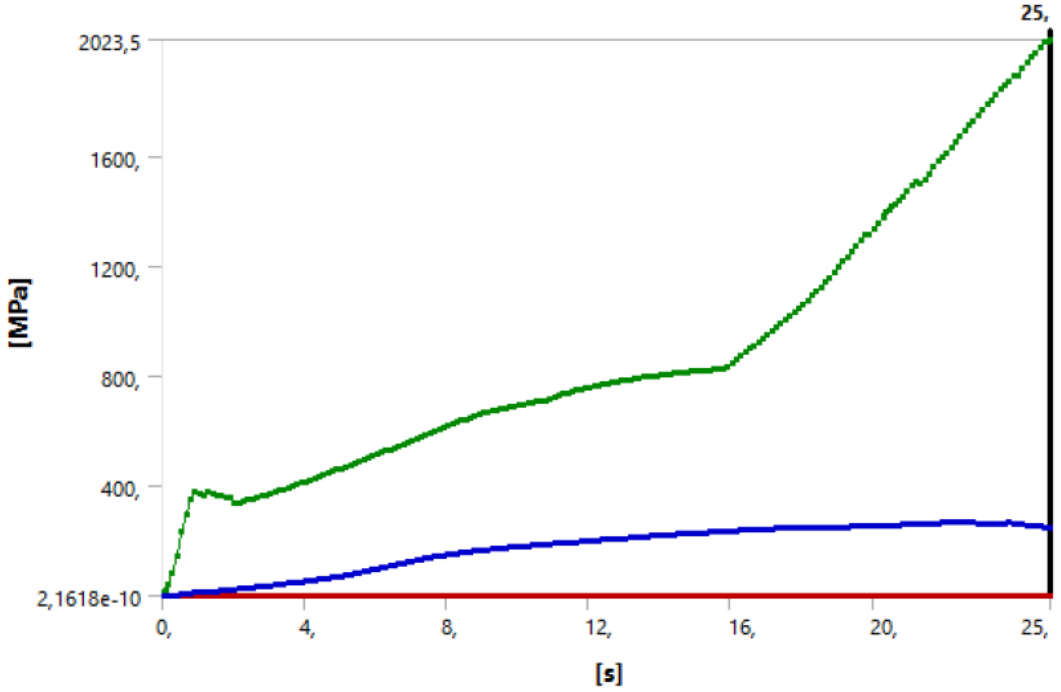
Şekil 111. 35 saniyelik proseste borunun toplam deformasyonu



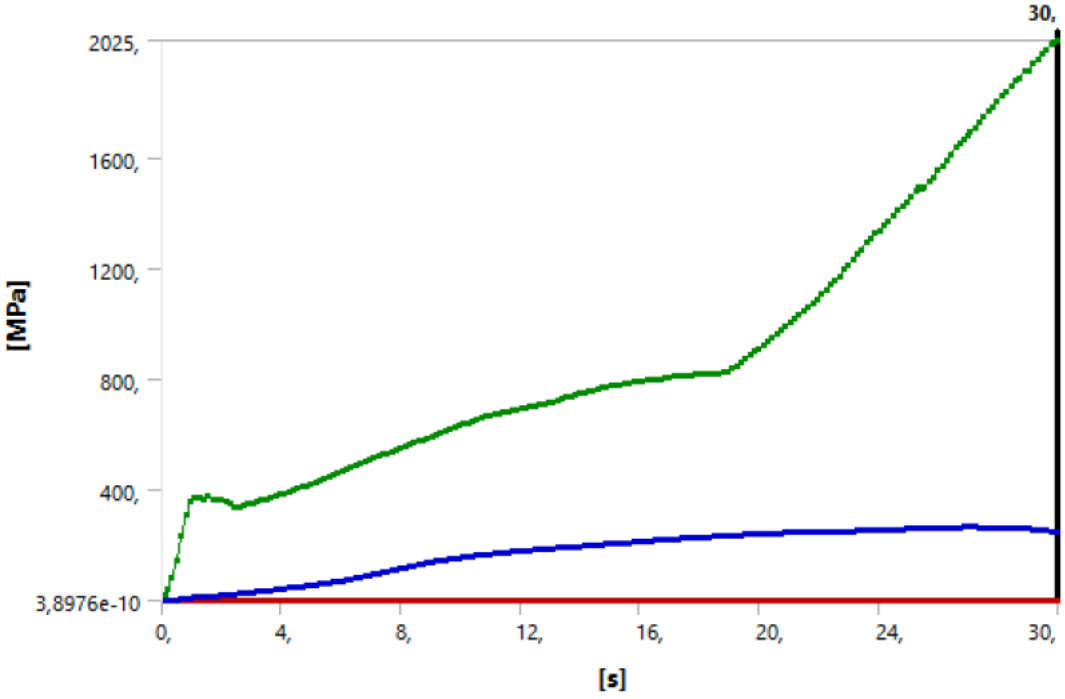
Şekil 112. 40 saniyelik proseste borunun toplam deformasyonu



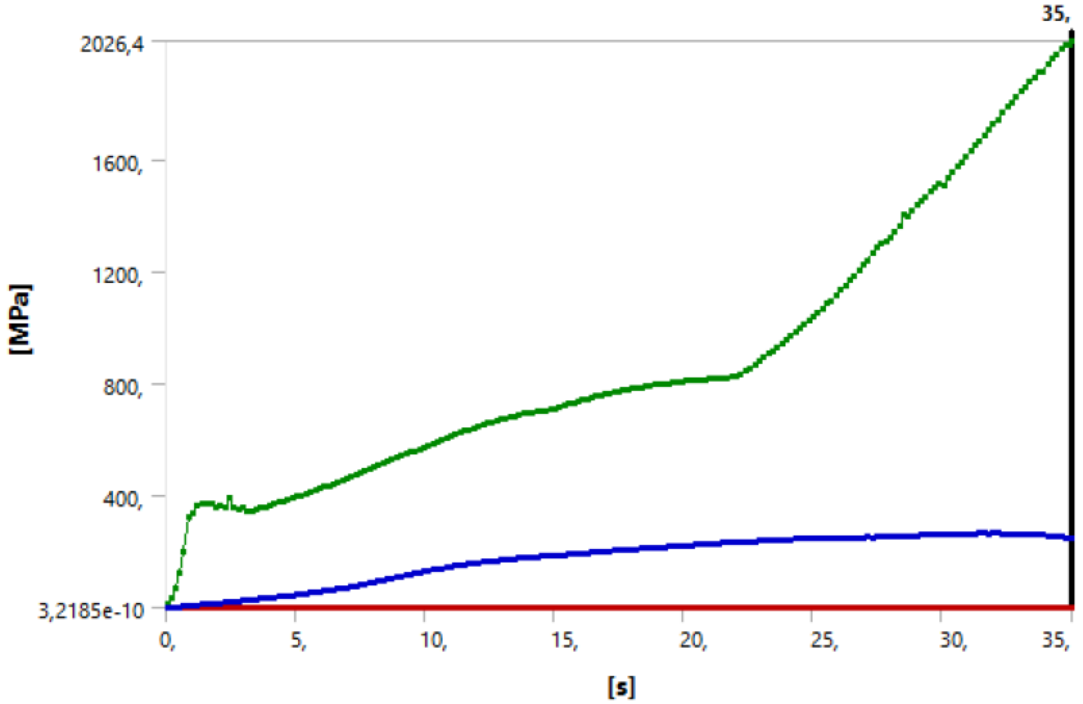
Şekil 113. 20 saniyelik prosesin Von-Mises maksimum ve minimum gerilme grafiği



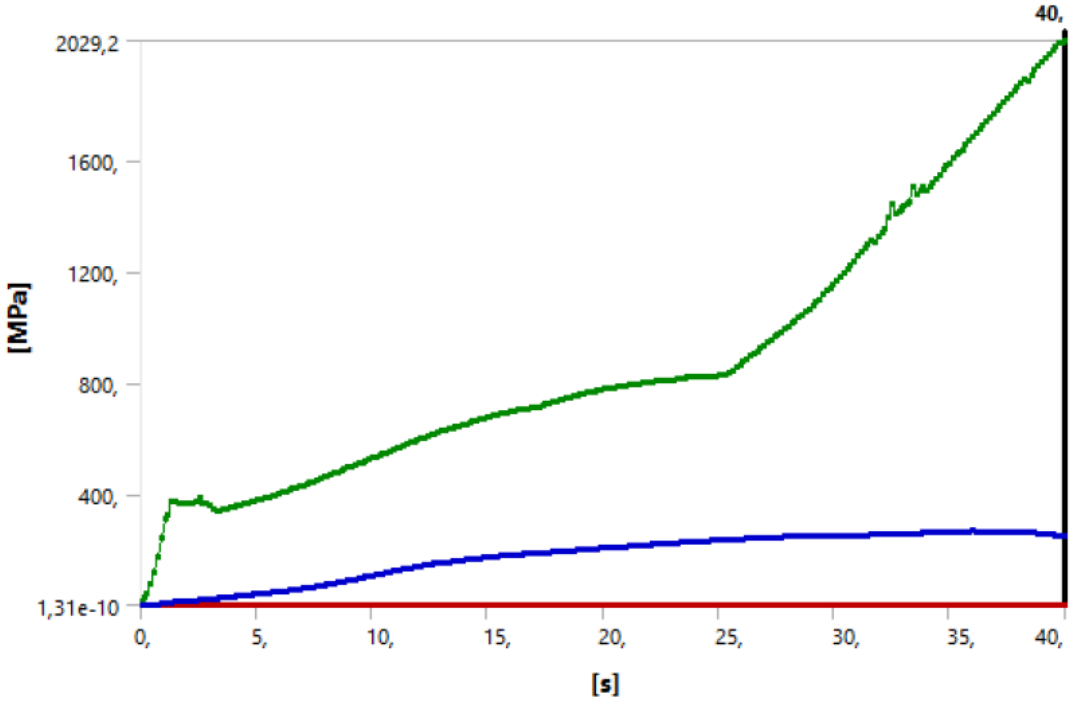
Şekil 114. 25 saniyelik prosesin Von-Mises maksimum ve minimum gerilme grafiği



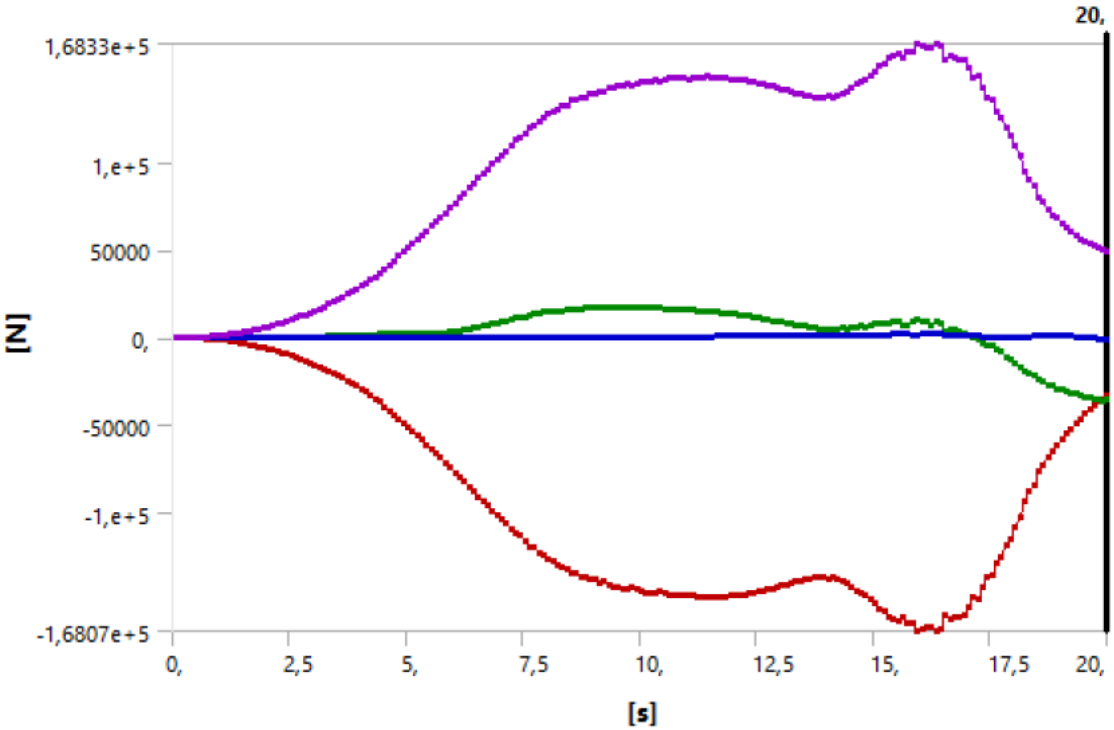
Şekil 115. 30 saniyelik prosesin Von-Mises maksimum ve minimum gerilme grafiği



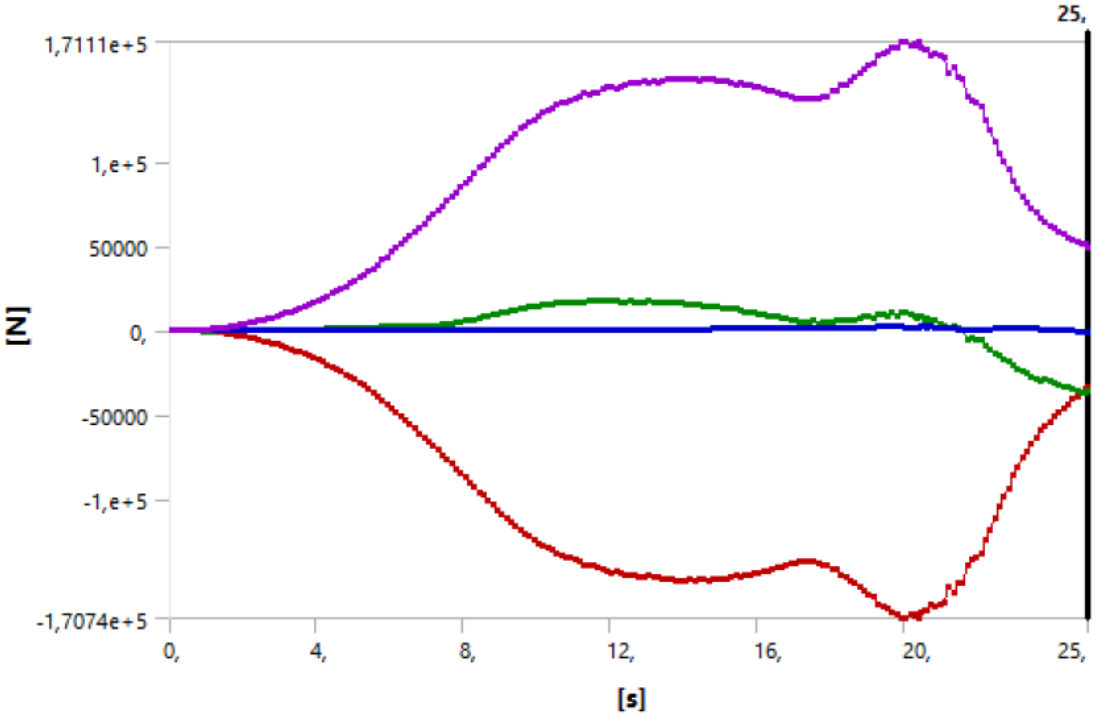
Şekil 116. 35 saniyelik prosesin Von-Mises maksimum ve minimum gerilme grafiği



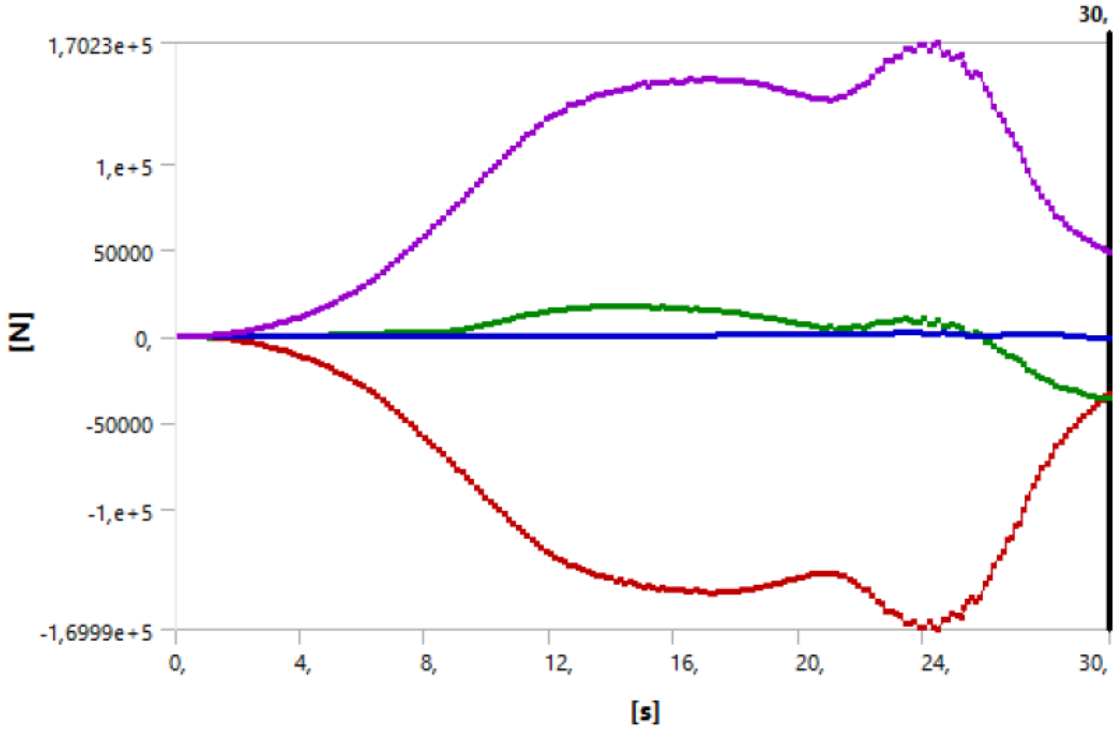
Şekil 117. 40 saniyelik prosesin Von-Mises maksimum ve minimum gerilme grafiği



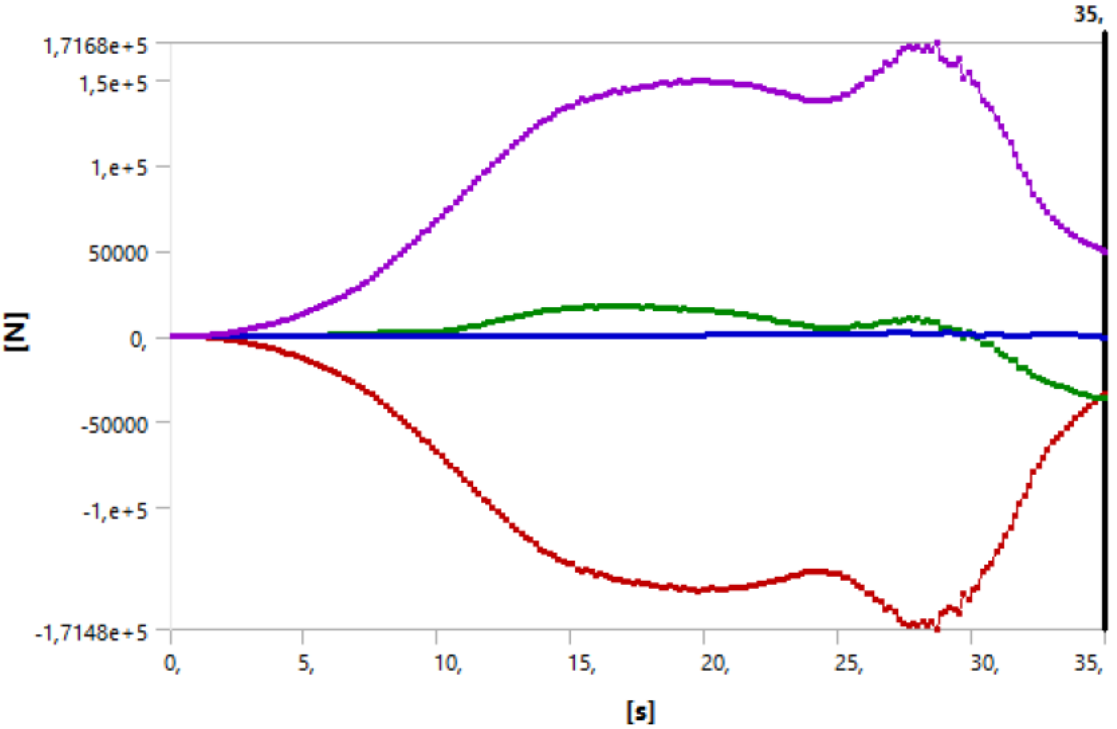
Şekil 118. 20 saniyelik prosesin minimum ve maksimum kuvvet reaksiyon-zaman grafiği



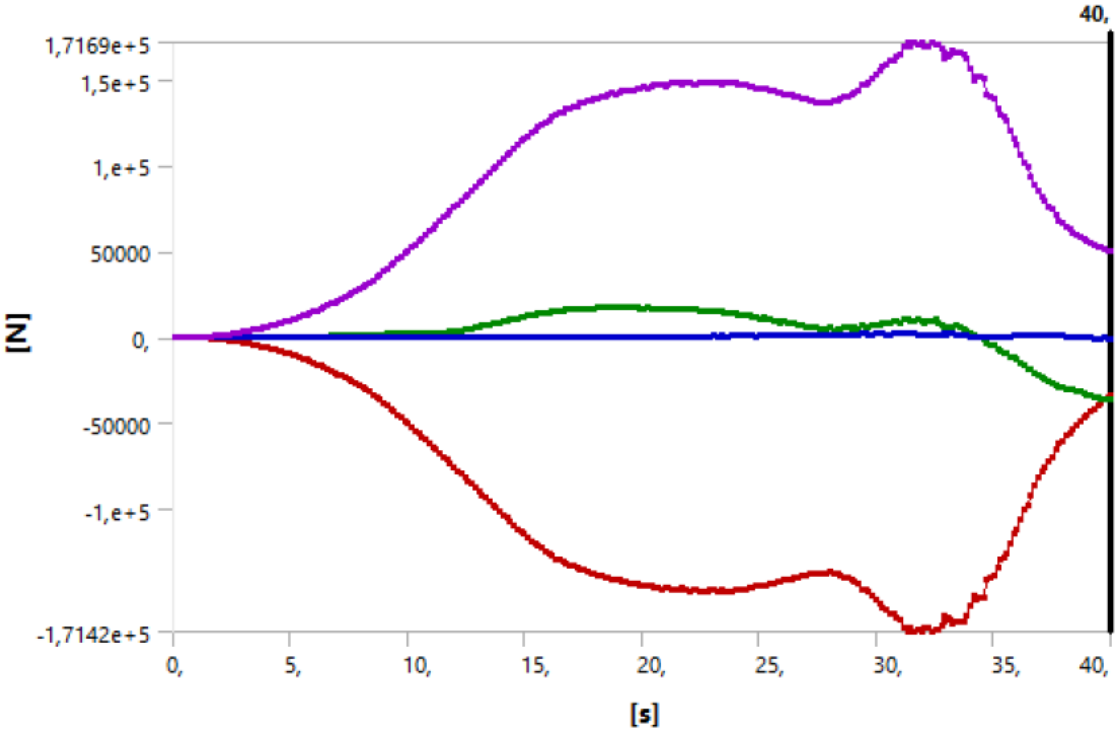
Şekil 119. 25 saniyelik prosesin minimum ve maksimum kuvvet reaksiyon-zaman grafiği



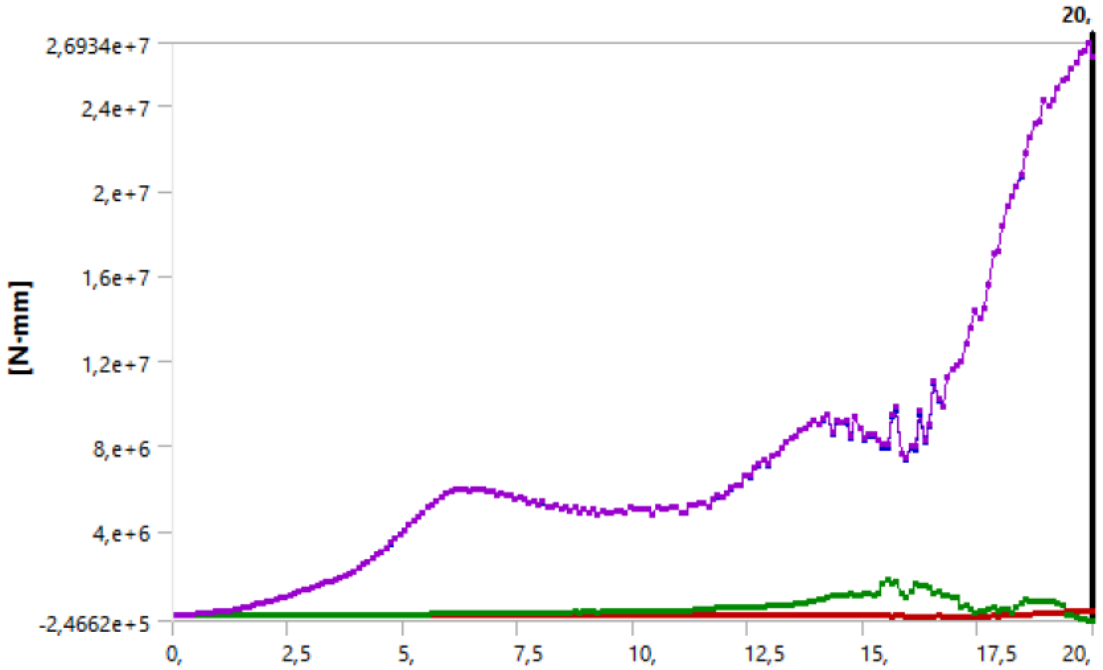
Şekil 120.30 saniyelik prosesin minimum ve maksimum kuvvet reaksiyon-zaman grafiği



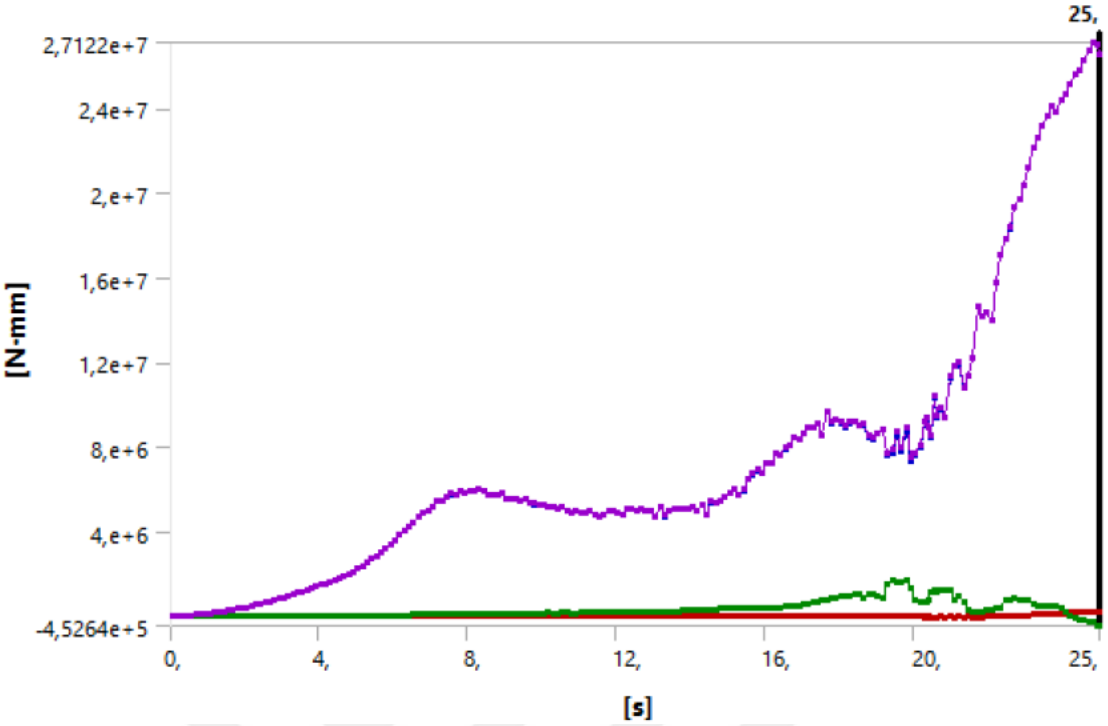
Şekil 121. 35 saniyelik prosesin minimum ve maksimum kuvvet reaksiyon-zaman grafiği



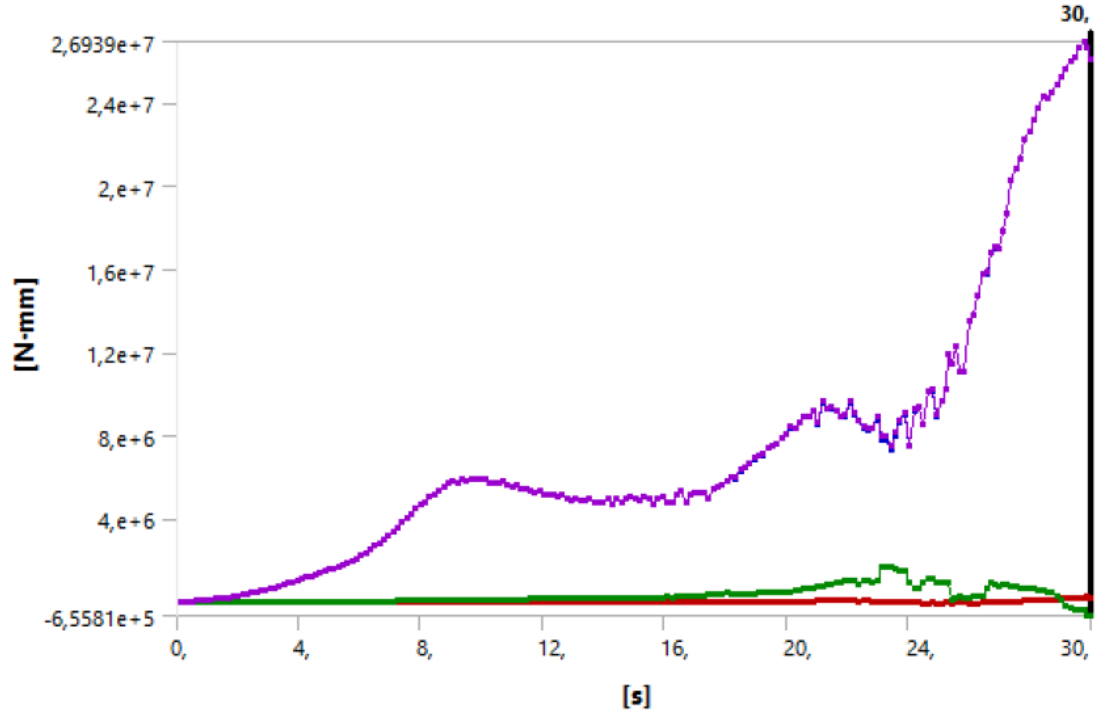
Şekil 122. 40 saniyelik prosesin minimum ve maksimum kuvvet reaksiyon-zaman grafiği



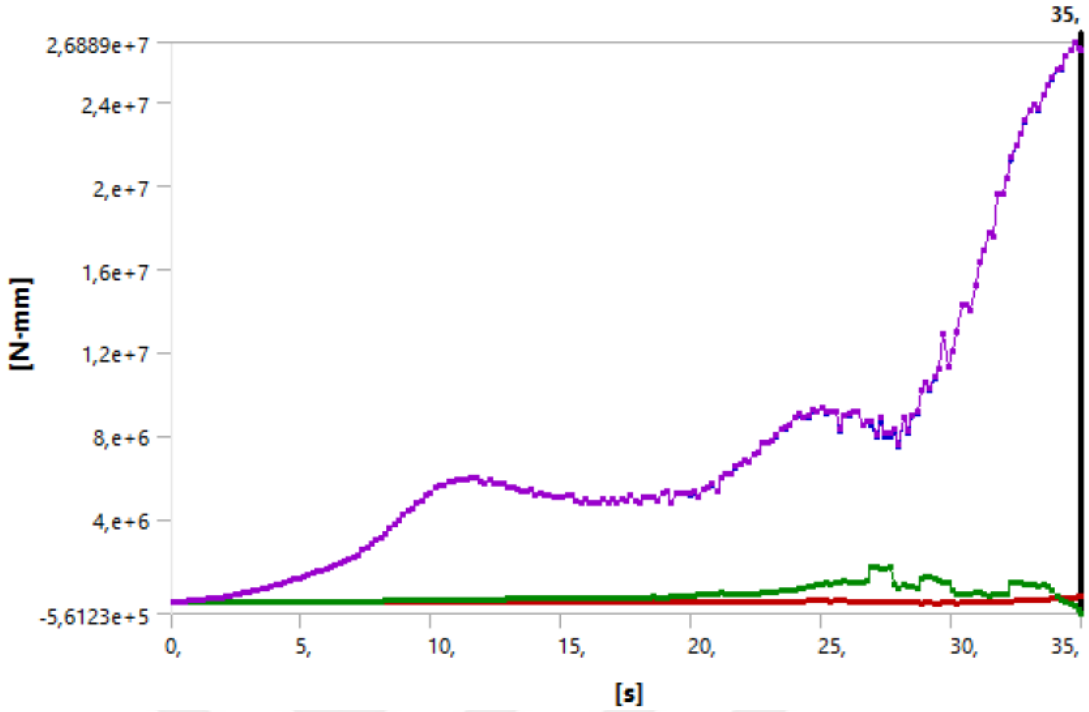
Şekil 123. 20 saniyelik prosesin minimum ve maksimum moment reaksiyon-zaman grafiği



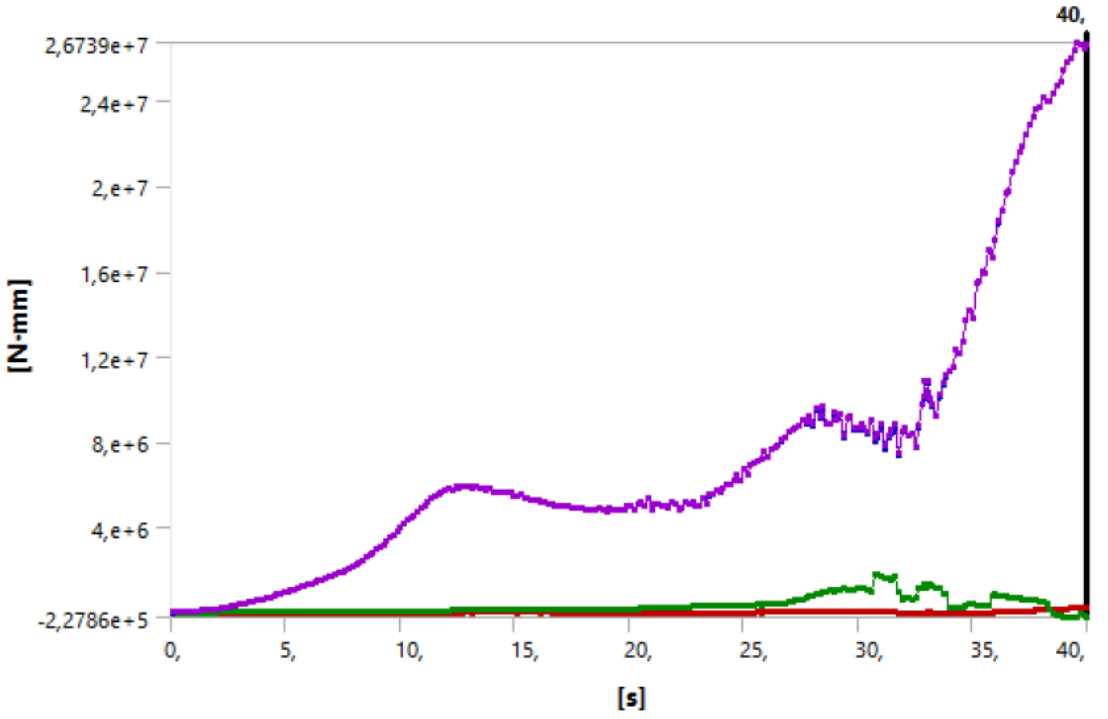
Şekil 124. 25 saniyelik prosesin minimum ve maksimum moment reaksiyon-zaman grafiği



Şekil 125. 30 saniyelik prosesin minimum ve maksimum moment reaksiyon-zaman grafiği



Şekil 126. 35 saniyelik prosesin minimum ve maksimum moment reaksiyon-zaman grafiği



Şekil 127. 40 saniyelik prosesin minimum ve maksimum moment reaksiyon-zaman grafiği

Tablo 13. Analizlerin geometrik ölçülerinin karşılaştırma tablosu

ZAMAN (sn)	ÇAP (mm)	Dış Yarıçap (mm)	Merkez Yarıçap (mm)	İç Yarıçap (mm)
20	169,278	311,83	230,3515	143,55
25	169,286	313,65	230,3288	145,37
30	169,262	314,23	230,3994	145,95
35	169,286	314,78	230,3548	146,5
40	169,289	315,04	230,5477	146,76
Nominal Ölçü	168,28	313,15	229	144,85
ZAMAN (sn)	Çap % Sapma	Dış Yarıçap % Sapma	Merkez Yarıçap % Sapma	İç Yarıçap % Sapma
20	0,5931	-0,4215	0,5902	-0,8975
25	0,5978	0,1597	0,5803	0,3590
30	0,5837	0,3449	0,6111	0,7594
35	0,5978	0,5205	0,5916	1,1391
40	0,5996	0,6035	0,6759	1,3186

Tablo 14. Proses veri karşılaştırma tablosu

Süre (sn)	Toplam Deformasyon (mm)	Von-Mises Gerilme (MPa)	Min. Kuvvet (N)	Max. Kuvvet (N)	İterasyon Sayısı
20	475,07	2023,7	4,1151	434000	690
25	475,04	2023,5	1,5886	330290	807
30	475,05	2025	4,0446	318860	804
35	475,06	2026,4	3,4668	218780	753
40	474,95	2029,2	1,597	184130	1207

Tablo 15. Kuvvet ve moment verileri

Süre (sn)	Kuvvet(N)	Moment(Nmm)
20	168330	26934000
25	171110	27122000
30	170230	26939000
35	171680	26889000
40	171690	26739000

Literatürdeki araştırmalarda farklı kalıp mesafe boşlukları ve farklı sürtünme katsayıları göz önüne alınarak yapılan analizlerde, boşlukların azalması ve sürtünme katsayılarının artması durumunda gerilmelerin yükselmesi sonucunda deformasyonların da yükseldiği ifade edilmiştir. (Karabulut,2007) Dinamik ve statik sürtünme kuvvetlerinin ve deformasyonların artması ihtiyaç duyulan kuvvetin artmasına sebep olacaktır. Bu artış üretim maliyetlerinin, enerji sarfiyatının ve ürüne etki eden gerilmelerin artışına sebep olacaktır.

farklı olarak, gerçek ürün ile analiz sonucu elde edilen ürün karşılaştırılması yapılmıştır. Kalıp teknolojisinde ilk defa bu işe yatırım yapacak olan kişiler için bilgisayar destekli analiz programlarının üretime nasıl yardımcı olabileceği ele alınarak incelenmiştir.

Bilgisayar destekli tasarımın zaman kaybını önlediğini ve maddi kazanç sağladığı literatürdeki araştırmalarda da anlatılmıştır. (Yavuz M., 2011) Bilgisayar destekli tasarım ile boruların şekillendirileceği kalıp, mandrel, itici ve döndürücü aparatların doğru tasarım tespiti, oluşabilecek hataların üretim aşamasından önce görülmesini sağlamaktadır. Bu hatalar bilgisayar ortamında çok daha erken zamanda düzeltilebilmektedir. Tezde bulunan benzer yöntem maliyetlerin azaltılması konusunda otak akıl oluşturmuştur.

Daha az basınç kaybını amaçlayan (Özkan M., 2011) çalışmada tasarım iyileştirilmesi amaçlanmıştır. 35 dirsek modeli üzerinde çalışılmış, farklı hızlar ve farklı basınçlar arasında CFD yazılımları kullanılarak %2.49'luk kazanım sağlayan tasarım üzerinde deneyler yapılarak sonuca ulaşılmıştır.

Yapılan tez çalışmasında boru dirsek parçalarının analizleri ve ölçümleri sonucu bazı bulgulara ulaşılmıştır. Analiz sonucu elde edilen geometri ile lazer optik cihaz ile elde edilen geometri çakıştırması et kalınlıkları, iç yarıçap, dış yarıçap ve boyutsal veriler

hakkında bilgi vermektedir. Et kalınlıkları 2.98 mm ölçüsünün üzerinde ölçülmüştür. Et kalınlıkları ölçülerinin tamamı standardın minimum ölçüsünün üzerindedir.

20,25,30,35 ve 40 saniyelik prosesin kuvvet zaman kümülatif iterasyon yakınsama grafikleri çözümün doğru olduğunu göstermektedir. Birbirine yakınsamaları benzer yükseliş ve alçalış göstererek ilerlemektedir.

20,25,30,35 ve 40 saniyelik prosesin Von-Mises gerilim dağılımları kaynak ağzı açılmış olan borunun, itici ile temas ettiği alanda maksimum olduğu belirlenmiştir. İticinin temas ettiği alan tüm proses boyunca gerilim altında olduğu belirlenmiştir. Minimum gerilimin olduğu bölge ise borunun şekillenmeye başladığı tarafın uç bölgesinde olduğu belirlenmiştir.

Toplam deformasyonun maksimum olduğu bölge yapılan her analiz için de ortak olan alanda, yani dirsek borunun dış yarıçapının orta merkezinde çıkmıştır. Toplam deformasyonun minimum olduğu bölge ise iç yarıçapın iticiye en uzak olan, bükülme işleminin ilk başladığı bölgedir.

20,25,30,35 ve 40 saniyelik proseslerin toplam deformasyon, Von-Mises gerilmeleri, maksimum ve minimum kuvvet değişimleri ve iterasyon sayısı verileri tablo ile verilmiştir.

Analiz sonucu elde edilen geometriler üzerinden ölçüm yapılarak nominal ölçüler ile veri karşılaştırılması yapılmıştır. Bu karşılaştırma tablo olarak verilmiştir. Nominal ölçülen çap, dış yarıçap, merkez yarıçap ve iç yarıçap verilerinin ne kadar sapması olduğu hesaplanmıştır.

Prosesin gerçekleştirilebilmesi için sistemin harcadığı güç ile ürünün mali değeri karşılaştırılarak optimum proses seçilmeli ve sanayi için uygulanmalıdır. Eski deneme yanılma yöntemlerinin geride kaldığı, bilgisayar destekli tasarımın ve analizlerin önemi anlatılmaya çalışılmıştır.

8.SONUÇ VE DEĞERLENDİRMELER

Karşılaştırma sonuçları incelenmiştir. Analiz sonucu elde edilen geometri veriler EN 10243-4 standardına 6” boru için uygundur. Analiz 5 farklı hız referans alınarak yapılmıştır. Prosesin toplam süresi 20, 25, 30, 35 ve 40 saniye olmak üzere 5 farklı zaman diliminde çalışılmıştır. Her proses için boru 465 mm yer değiştirme verilerek şekil alması kalıp içerisinde sağlanmıştır. Analiz sonucu elde edilen gerilme kuvvetleri karşılaştırılmıştır. Analiz ile gerçek veriler % 95 oranda birbirleri ile uyuşmaktadır. Gerilme kuvvetlerinin maksimum olduğu alan hidrolik iticinin temas alanı olduğu belirlenmiştir. Toplam deformasyonun borunun dış çapında diğer alanlarla karşılaştırıldığında maksimum olduğu belirlenmiştir. Gerilme kuvvetinin maksimum olduğu dış yarıçap bölgesinde yağlamanın ve kalıp pürüzlülüğün ideal olması üretim hatalarının önüne geçecektir. Kalıp tasarımı ve bakımı için, gerilme bölgelerinin maksimum olduğu alanlar yüksek hassasiyette ve ideal yüzey pürüzlülüğünde üretilmelidir. İşlem parametrelerinden biri olan proses zamanının bükme işlemi sonrasında dirsek parçasının geometrik yapısı üzerine olan etkileri incelenmiştir. Proses için ideal olan zaman 25 saniye olarak belirlenmiştir. Geometrik ölçülerin nominal olan ölçülerle kıyaslandığında proses zamanı 25 saniye ortaya çıkmıştır. Toplam deformasyonun ve Von-Mises gerilmelerinin minimum olduğu tespit edilmiştir. Hidrolik iticinin kuvvet ihtiyacı süre kısaldıkça arttığı tespit edilmiştir. Kalıp tasarımının iyileştirilmesi için, kalıp ömrü ile üretilen dirsek boru adedi arasındaki ilişki incelenebilir. Bu inceleme ürün kalitesinin iyileştirilmesi ve mükemmelleştirilmesine destek olacaktır.

9. KAYNAKÇA

Ayvaz, S. İ., "Mikrodalga ısıtmanın biyomedikal 316L alaşımının borlama kinetiğine etkisinin incelenmesi ve borür tabakasının karakterizasyonu", Doktora Tezi, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Manisa, Türkiye (2020).

EN 10253-4 Standardı. "Alın kaynaklı boru bağlantı elemanları- Bölüm 4: Özel muayene şartlarına sahip biçimlendirilebilir östenitik ve östenitik ferritik (dubleks) paslanmaz çelikler", (2008).

Galanais N.I.; Manolakos D.E., "Investigation of Cutting Parameters in Manufacturing of Femoral Heads", Proceedings of the World Congress on Engineering 2009 Vol II (s. 4-7). London / UK: https://www.researchgate.net/publication/44260249. (2009).

Hashmi M.S.J.; Ahmed M., "Finite element simulation of bulge forming of an elbow of box section from circular tube", Journal of Materials Processing Technology, 410-418, (1999).

Hutton D.,Fundementals of finite element analysis, New York, McGraw - Hill Companies Inc., USA (2004).

Jo M.C. ve ark.,"Effects of coiling temperature and pipe-forming strain on yield strength variation after ERW pipe forming of API X70 and X80 linepipe steels", Materials Science & Engineering A, 304-311, (2017).

Karabulut, H. "Boru Dirsek Parçalarının Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Şekillendirilmesi", Yüksek Lisans Tezi, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Tasarım ve İmalar Mühendisliği Anabiim Dalı, Kocaeli, Türkiye, (2007).

Liu, Y., Finite element method lecture notes, Mechanical Engineering Department, University of Cincinati, (2003, January).

Manav, M., Kişisel Görüşme, Euroform Çelik İmalat San. Ve Tic. Ltd. Şti. (2018).

Möller,M.“https://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/contentassets/ff751fa4d1594c69898a15f99d3844d3/ssm-rapport-2017-05.pdf”,(2017).

Özkan, M. “Boru içi akışın dirseklerde incelenmesi ve mevcut dirsek tasarımlarının iyileştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Kocaeli, Gebze, Türkiye, (2011).

Prabhakaran K.M.; Raj V.V., “Closed form expression for plastic J-integral for an elbow with a through-wall crown crack under opening bending moment”, International Journal of Pressure Vessels and Piping 80, 31-39,(2003).

Rajadurai S. ve ark. “www.ijrdet.com: http://www.ijrdet.com” (2014, 03).

Shim D.S. ve ark., “Double-stage forming using critical pre-bending radius in roll bendingof pipe with rectangular cross-section”, Journal of Materials Processing Technology, 189-203, (2016).

Sohn S. S. ve ark., “Effects of microstructure and pipe forming strain on yield strength before and after spiral pipe forming of APIX70 and X80 linepipe steel sheets”, Materials Science & Engineering A, 18-26, (2013).

Sumesh S. ve ark., “Assessment of plastic loads of critical throughwall circumferentially cracked pipe bends with structural distortions under in-plane bending”, Thin-Walled Structures, 144-151,(2016).

http://www.euroformcelik.com.tr/tr/fitings_imalat.php (06.01.2021).

https://hardhatengineer.com/pipe-fittings/pipe-fittings-manufacturing-process/ (12.05.2021)

https://www.nde-ed.org/Physics/Materials/Structure/deformation.xhtml (20.05.2021)

http://www.muhendishesabi.com/2020/04/15/nonlinear-dogrusal-olmayan-analizleri-anlamak/ (07.06.2021)

Yavuz, M., “Boru bükme kalıp tasarımı ve üretim paremetrelerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 1-88, (2011).

Yıldız H.; Kırlı, O., “Derin çekme işleminin doğrusal olmayan sonlu elemanlar metodu yardımıyla modellenmesi”, Mühendislik Bilimleri Dergisi, 317-326, (2004).

Yoon, S. D., Technical Data Handbook for Butt Weld Pipe Fittings/The 2nd Edition, (2016, January).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı: Şaban SARAÇ

Yabancı Dil: İngilizce, Almanca

Eğitim ve Akademik Durumu

Lise: Tuzla Behiye Dr. Nevhiz Işıl Anadolu Lisesi

Lisans: İstanbul Teknik Üniversitesi,2016 (GANO:3,14/4)

Yüksek Lisans: Marmara Üniversitesi,2021(GANO:3,29/4)

İş Tecrübesi

CNK Havacılık – Teknik Satın Alma- 1 yıl

Hema Endüstri – Üretim Mühendisi-2018-Halen

Uluslararası Bilimsel Toplantılarda Sunulmuş Bildiriler

Mustafa AY, Selim HARTOMACIOĞLU, Murat MANAV, Şaban SARAÇ

"Çelik Dirsek Üretim Prosesinin Sonlu Elemanlar Analizi Yöntemi İle Modellenmesi ve Üretim Parametrelerinin Optimizasyonu", 5.Uluslararası Akademik Öğrenci Çalışmaları Kongresi 17-18 Aralık 2021