



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**BURÇ TİPİ PARÇANIN TÜP HİDRO
ŞEKİLLENDİRME PROSESİNDE FARKLI
PARAMETRELERLE
ŞEKİLLENDİRİLMESİNİN SAYISAL
İNCELENMESİ**

Ramazan KÜÇÜK

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

**Temmuz-2025
KONYA
Her Hakkı Saklıdır**

TEZ KABUL VE ONAYI

Ramazan KÜÇÜK tarafından hazırlanan “Burç Tipi Parçanın Tüp Hidro Şekillendirme Prosesinde Farklı Parametrelerle Şekillendirilmesinin Sayısal İncelenmesi” adlı tez çalışması 31/07/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Doç. Dr. Mustafa TINKIR

.....

Danışman

Prof. Dr. Murat DİLMEÇ

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Muhammed Arif ŞEN

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun .../.../20.. gün ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Havvanur UÇBEYİAY
FBE Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

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

DECLARATION PAGE

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

Ramazan KÜÇÜK

Tarih:31.07.2025

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BURÇ TİPİ PARÇANIN TÜP HİDRO ŞEKİLLENDİRME PROSESİNDE FARKLI PARAMETRELERLE ŞEKİLLENDİRİLMESİNİN SAYISAL İNCELENMESİ

Ramazan KÜÇÜK

**Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Prof. Dr. Murat DİLMEÇ

2025, 85 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Murat DİLMEÇ

Doç. Dr. Mustafa TINKIR

Dr. Öğr. Üyesi Muhammed Arif ŞEN

Bu tezde, burç tipi bir parçanın tüp hidro şekillendirme prosesi kapsamında, farklı şekillendirme parametreleri altında geçirdiği deformasyon davranışı sayısal yöntemlerle detaylı olarak incelenmiştir. Çalışmanın temel amacı, şekillendirme sürecinde uygulanan proses parametrelerinin, parçanın son geometrisi ve kalite kriterleri üzerindeki etkilerini ortaya koymak ve bu doğrultuda parça üretiminde optimum proses koşullarını belirlemektir.

Çalışma kapsamında, üç boyutlu olarak tasarlanan burç, kalıp ve besleme sistemlerinin sonlu elemanlar yöntemine dayalı gelişmiş simülasyon yazılımlarında analizleri gerçekleştirilmiştir. Modelleme sürecinde, şekillendirme işleminin başlangıcından nihai formun elde edilmesine kadar geçen aşamalarda; iç basınç, eksenel besleme ve sürtünme gibi temel proses parametreleri ayrı ayrı ve kombinasyon halinde sistematik olarak incelenmiştir. Elde edilen analiz sonuçları, şekil değiştirme davranışı, kalınlık dağılımı, gerilme birikimi ve üretim hatası potansiyeli gibi performans kriterleri açısından kapsamlı biçimde değerlendirilmiştir.

Araştırma bulguları, yalnızca iç basınç dayalı şekillendirmenin, parça geometrisinin kalıp konturuna uyumunda yetersiz kaldığını göstermiştir. Eksenel beslemenin kontrollü uygulanması, özellikle hassas toleranslı parçalarda şekil bütünlüğü ve kalınlık dağılımı açısından belirleyici olmuştur. Ancak aşırı besleme durumlarında, uç bölgelerde malzeme birikimi ve kırışıklık gibi istenmeyen hatalar gözlemlenmiştir.

Çalışmada yapılan sayısal analizler ve şekillendirilebilirlik sınır diyagramı değerlendirmeleri, proses parametrelerinin uygun aralıklarda seçilmesiyle hem yüksek güvenilirlik hem de verimli şekillendirme süreçlerinin elde edilebileceğini ortaya koymuştur. Özellikle, analiz sonuçları ışığında, optimuma en yakın üretim performansının 200 MPa iç basınç ve 2 mm eksenel besleme parametre kombinasyonu ile elde edildiği belirlenmiştir. Bu süreçte hem parça geometrisi başarıyla korunmuş hem de kalınlık dağılımı ve yapısal bütünlük açısından en iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Bu kapsamda, tez çalışması otomotiv ve benzeri ileri mühendislik uygulamalarında, üretim süreçlerinin optimizasyonu ve kalite güvencesinin sağlanması için bilimsel veri tabanlı bir yaklaşım sunmaktadır. Sonuçlar, literatürde bildirilen teorik ve deneysel çalışmalarla büyük ölçüde uyumludur ve sektörel açıdan proses geliştirme çalışmalarına yol gösterici niteliktedir.

Anahtar Kelimeler: Hidroşekillendirme, Şekillendirme Limit Eğrisi, Şekillendirme Limit Diyagramı, Tüp Şekillendirme

ABSTRACT

MS THESIS

NUMERICAL INVESTIGATION OF THE FORMING BEHAVIOR OF A BUSHING-TYPE COMPONENT UNDER VARYING PARAMETERS IN THE TUBE HYDROFORMING PROCESS

Ramazan KÜÇÜK

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
NECMETTIN ERBAKAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN MECHANICAL ENGINEERING**

Advisor: Prof. Dr. Murat DİLMEÇ

2025, 85 Pages

Jury

Prof. Dr. Murat DİLMEÇ

Assoc. Prof. Mustafa TINKIR

Asst. Prof. Dr. Muhammed Arif ŞEN

In this thesis, the deformation behavior of a bushing-type component under various forming parameters within the scope of the tube hydroforming process has been investigated in detail using numerical methods. The primary aim of the study is to reveal the effects of process parameters applied during the forming operation on the final geometry and quality criteria of the part, and to determine the optimum process conditions for successful component production.

Within the scope of the study, three-dimensional models of the bushing, die, and feeding systems were analyzed using advanced finite element-based simulation software. During the modeling process, critical process parameters such as internal pressure, axial feeding, and friction were systematically examined both individually and in combination from the initial stage of forming to the final part shape. The analysis results were comprehensively evaluated in terms of performance criteria including deformation behavior, thickness distribution, stress accumulation, and potential manufacturing defects.

The research findings indicate that internal pressure alone is insufficient for achieving conformity between the part geometry and the die contour. Controlled application of axial feeding has proven to be a decisive factor in ensuring shape integrity and favorable thickness distribution, especially for parts requiring tight tolerances. However, excessive feeding led to undesired defects such as material accumulation and wrinkling, particularly in end zones.

The numerical analyses and formability limit diagram (FLD) evaluations conducted in the study demonstrate that selecting process parameters within appropriate ranges enables both high-safety and efficient forming processes. Specifically, based on the simulation results, the combination of 200 MPa internal pressure and 2 mm axial feeding was identified as yielding near-optimal forming performance. Under these conditions, the final geometry of the part was successfully maintained, and the best outcomes in terms of thickness distribution and structural integrity were achieved.

In this context, the thesis offers a scientific, data-driven approach for the optimization of manufacturing processes and assurance of product quality in advanced engineering applications such as the automotive industry. The results are largely consistent with theoretical and experimental findings in the literature and provide valuable insights for process development studies in the field.

Keywords: Forming Limit Curve, Forming Limit Diagram, Hydro Forming, Tube Forming

ÖNSÖZ

Sanayinin hızla değişen ve gelişen ihtiyaçları, mühendislik alanında yeni üretim tekniklerinin geliştirilmesini ve mevcut teknolojilerin daha verimli hâle getirilmesini zorunlu kılmaktadır. Özellikle hafiflik, yüksek mukavemet ve maliyet etkinliği gibi kriterler, modern üretim sektörlerinde ön plana çıkmaktadır. Bu kapsamda, tüp hidroşekillendirme (Tube Hydroforming) teknolojisi; karmaşık şekilli, yüksek hassasiyetli ve tek parça üretimi mümkün kılan ileri bir yöntem olarak önem kazanmıştır.

Bu tez çalışmasında, burç tipi bir parçanın hidroşekillendirme prosesi altında sayısal olarak analiz edilmesi ve üretim parametrelerinin optimize edilmesi hedeflenmiştir. Özellikle, endüstriyel uygulamalara doğrudan uyarlanabilecek ve mevcut literatürde sınırlı olarak ele alınmış olan parametrik analiz stratejileri geliştirilmiş ve bu süreçte Dynaform ile LS-DYNA yazılımlarının olanaklarından yararlanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, hem akademik bilgi birikimine katkı sağlamayı hem de sanayide karşılaşılan pratik sorunlara yönelik özgün ve uygulanabilir çözüm önerileri sunmayı amaçlamaktadır.

Bu süreçte bilgi ve deneyimiyle yolumu aydınlatan, her aşamada desteğini hissettiren değerli danışmanım Prof. Dr. Murat DİLMEÇ'e şükranlarımı sunarım. Tez çalışmalarım sırasında bana yol gösteren, eleştiri ve önerileriyle katkı sağlayan tüm akademisyenlere ve teknik destek sağlayan kurumlara teşekkür ederim. Her zaman yanımda olan aileme, sabır ve motivasyon kaynağı oldukları için minnettarım.

Bu çalışmanın, tüp hidroşekillendirme alanında hem bilimsel çalışmalara hem de endüstriyel uygulamalara yeni bir bakış açısı kazandırmasını dilerim.

Ramazan KÜÇÜK
KONYA-2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
ŞEKİL LİSTESİ	x
1. GİRİŞ	1
1.1. Problem Tanımı	1
1.2. Çalışmanın Amacı.....	4
1.3. Çalışmanın Kapsamı ve Sınırlamaları	5
1.4. Tezin Organizasyonu	6
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	8
2.1. Hidroşekillendirme Teknolojisi	8
2.2. Tüp Hidroşekillendirmenin Temel Prensipleri ve Sınıflandırılması.....	8
2.3. Kullanılan Malzemeler ve Malzeme Özellikleri.....	9
2.4. Kalıp ve Ekipman Teknolojileri	11
2.5. Proses Parametrelerinin Etkisi ve Optimizasyonu.....	12
2.6. Sayısal Yöntemlerle Analiz ve Simülasyonlar	14
2.7. Karmaşık Geometrilik Parçalarda Uygulamalar.....	15
2.8. Karşılaşılan Problemler ve Çözüm Yöntemleri	16
2.9. Hidroşekillendirme Süreçlerinin Çevresel ve Ekonomik Değerlendirmesi.....	18
3. MATERYAL VE YÖNTEM	20
3.1. Kullanılan Malzeme Özellikleri.....	20
3.2. Geometrik Modelleme ve CAD Hazırlığı.....	23
3.3. Sonlu Eleman Modeli ve Ağ Yapısı	26
3.4. Sınır Şartları ve Yükleme Koşulları.....	27
3.5. Kullanılan Yazılım ve Donanım Altyapısı	31
3.6. Varsayımlar ve Modelleme Sınırlamaları.....	32
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA	34
4.1. Analiz Senaryoları ve Parametreleri	34
4.2. Analiz Sonuçları	35
4.2.1. 100 MPa basınç ve aksel beslemesiz	35
4.2.2. 100 MPa basınç ve 2 mm aksel besleme.....	40
4.2.3. 100 MPa basınç ve 4 mm aksel besleme.....	45

4.2.4. 200 MPa basınç ve aksenal beslemesiz	52
4.2.5. 200 MPa basınç ve 2 mm aksenal besleme.....	58
4.2.6. 200 MPa basınç ve 4 mm aksenal besleme.....	63
4.2.7. 200 MPa basınç ve 6 mm aksenal besleme.....	69
4.3. Parametrelerin Etkisi ve Kıyaslama.....	75
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	77
5.1 Sonuçlar	77
5.2 Öneriler	78
6. KAYNAKLAR.....	80
EKLER	83

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

E	: Elastisite modülü
ν	: Poisson oranı
ρ	: Malzeme yoğunluğu
Re	: Akma dayanımı
n	: Süneklik katsayısı
r	: Plastik anizotropi katsayısı
σ_y	: Akma dayanımı
σ_t	: Çekme dayanımı
ϵ_b	: Kopma uzaması

Kısaltmalar

THŞ	: Tüp Hidroşekillendirme (Tube Hydroforming)
ŞLD	: Şekillendirilebilirlik Limit Diyagramı (Forming Limit Diagram)
FLC	: Şekillendirme Limit Eğrisi (Forming Limit Curve)
FEM	: Sonlu Elemanlar Yöntemi (Finite Element Method)
BŞD	: Birim Şekil Değiştirme

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1. Mekanik şişirme prosesinin şematik görünümü(Yadong vd., 2003).....	1
Şekil 1.2. Zimba ile boru ucu şekillendirme şematığı(Nikhare, 2020).....	2
Şekil 1.3. Rulo genişletme işlemi şematığı(Egger vd., 2022)	2
Şekil 1.4. Hava basınçlı mekanik şişirme şematığı(Talebi-Anaraki vd., 2022)	3
Şekil 1.5. Tüp hidroşekillendirme sürecine ait temel aşamalar ve zaman-basınç-strok ilişkisi.(Bell vd., 2020a).....	7
Şekil 3.1. Analizlerde kullanılan DP800 yüksek dayanımlı çeliğin mekanik ve şekillendirme parametrelerinin Dynaform yazılımı ortamında tanımlandığı malzeme ekranı. Solda akma eğrisi (hardening curve), ortada Barlat 89 akma yüzeyi (yield surface), sağda ise şekillendirme limit eğrisi (forming limit curve) görülmektedir	22
Şekil 3.2. Ham burç parçasının üç boyutlu görünümü	23
Şekil 3.3. Ham burç parçasının ölçülendirilmiş yan görünüşü.....	23
Şekil 3.4. Nihai (şekillendirilmiş) burç parçasının üç boyutlu görünümü.....	24
Şekil 3.5. Nihai burç parçasının ölçülendirilmiş görünüşü	24
Şekil 3.6. Kalıp takımının ve aksel besleme sisteminin genel yerleşimi	25
Şekil 3.7. Kalıp, burç ve aksel besleme elemanlarının montaj durumunu gösteren üç boyutlu görünüm.....	25
Şekil 3.8. Tüp parça üzerinde oluşturulan mesh yapısı	27
Şekil 3.9. Analiz modelinin genel yerleşimi ve kalıp-tüp ilişkisi.....	27
Şekil 3.10. İç basınç besleme profili (200 MPa)	29
Şekil 3.11. İç basınç burç parçası iç yüzeyine eşit şekilde uygulandığını gösteren şematik çizim	30
Şekil 3.12. Aksel besleme eğrisi (2 mm besleme)	30
Şekil 3.13. Aksel besleme uygulamasında burç parçasına iki uçtan (kırmızı oklarla gösterilen) uygulanan kuvvetin şematik gösterimi	31
Şekil 4.1. 100 MPa iç basınç ve beslemesiz durumda elde edilen Von Mises gerilme dağılımı (MPa).....	35
Şekil 4.2. 100 MPa iç basınç ve beslemesiz durumda elde edilen ana plastik şekil değiştirme dağılımı	36
Şekil 4.3. 100 MPa iç basınç ve beslemesiz durumda elde edilen efektif plastik şekil değiştirme haritası.....	36
Şekil 4.4. 100 MPa iç basınç ve beslemesiz durumda et kalınlığı dağılımı. (a) Ölçüm noktalarının dağılımı. (b) Et kalınlığı dağılım grafiği.	37
Şekil 4.5. 100 MPa iç basınç ve beslemesiz durumda elde edilen oransal et kalınlığı değişimi.....	38
Şekil 4.6. 100 MPa iç basınç ve beslemesiz durumda elde edilen şekillendirme limit diyagramı (ŞLD).....	39
Şekil 4.7. 100 MPa iç basınç ve beslemesiz durumda, şekillendirme işlemi sonunda burç parçasının kalıp içindeki konumunu ve kalıp-parça temasını gösteren kesit görünüşü....	39
Şekil 4.8. 100 MPa iç basınç ve 2 mm besleme uygulanmış durumda elde edilen Von Mises gerilme dağılımı (MPa)	40
Şekil 4.9. 100 MPa iç basınç ve 2 mm besleme uygulanmış durumda elde edilen ana şekil değiştirme dağılımı.....	41
Şekil 4.10. 100 MPa iç basınç ve 2 mm besleme uygulanmış durumda elde edilen maksimum plastik şekil değiştirme dağılımı	41

Şekil 4.11. 100 MPa iç basınç ve 2 mm besleme uygulanmış durumda elde edilen et kalınlığı dağılımı. (a) Ölçüm noktalarının dağılımı. (b) Et kalınlığı dağılım grafiği.	42
Şekil 4.12. 100 MPa iç basınç ve 2 mm besleme durumunda elde edilen oransal et kalınlığı değişimi.....	43
Şekil 4.13. 100 MPa iç basınç ve 2 mm besleme uygulanmış durumda elde edilen şekillendirme limit diyagramı (ŞLD) ve burç yüzeyindeki şekillendirme bölgeleri	44
Şekil 4.14. 100 MPa iç basınç ve 2 mm besleme durumunda, şekillendirme işlemi sonunda burç parçasının kalıp içindeki konumunu ve kalıp-parça temasını gösteren kesit görünüş.....	44
Şekil 4.15. 100 MPa iç basınç ve 4 mm besleme durumunda elde edilen Von Mises gerilme dağılımı (MPa).....	46
Şekil 4.16. 100 MPa iç basınç ve 4 mm besleme durumunda elde edilen ana plastik şekil değiştirme dağılımı	46
Şekil 4.17. 100 MPa iç basınç ve 4 mm besleme durumunda elde edilen efektif plastik şekil değiştirme haritası	47
Şekil 4.18. 100 MPa iç basınç ve 4 mm besleme durumunda elde edilen et kalınlığı dağılımı. (a) Ölçüm noktalarının dağılımı. (b) Et kalınlığı dağılım grafiği.....	48
Şekil 4.19. 100 MPa iç basınç ve 4 mm besleme durumunda elde edilen oransal et kalınlığı değişimi	49
Şekil 4.20. 100 MPa iç basınç ve 4 mm besleme durumunda elde edilen şekillendirme limit diyagramı (ŞLD)	50
Şekil 4.21. 100 MPa iç basınç ve 4 mm besleme durumunda, şekillendirme işlemi sonunda burç parçasının kalıp içindeki konumunu ve kalıp-parça temasını gösteren kesit görünüş.....	51
Şekil 4.22. 200 MPa iç basınç ve aksenal beslemesiz durumda elde edilen Von Mises gerilme dağılımı (MPa).....	52
Şekil 4.23. 200 MPa iç basınç ve aksenal beslemesiz durumda elde edilen ana şekil değiştirme dağılımı	53
Şekil 4.24. 200 MPa iç basınç ve aksenal beslemesiz durumda elde edilen maksimum plastik şekil değiştirme	53
Şekil 4.25. 200 MPa iç basınç ve aksenal beslemesiz durumda elde edilen et kalınlığı dağılımı. (a) Ölçüm noktalarının dağılımı. (b) Et kalınlığı dağılım grafiği.....	54
Şekil 4.26. 200 MPa iç basınç ve aksenal beslemesiz durumda elde edilen oransal et kalınlığı değişimi	55
Şekil 4.27. 200 MPa iç basınç ve aksenal beslemesiz durumda elde edilen şekillendirme limit diyagramı (ŞLD) ve burç yüzeyindeki şekillendirme bölgeleri.....	56
Şekil 4.28. 200 MPa iç basınç ve aksenal beslemesiz durumda, burç parçasının kalıp içindeki konumunu ve kalıp-parça temasını gösteren kesit görünüş	57
Şekil 4.29. 200 MPa iç basınç ve 2 mm aksenal besleme durumunda elde edilen Von Mises gerilme dağılımı (MPa)	58
Şekil 4.30. 200 MPa iç basınç ve 2 mm aksenal besleme durumunda elde edilen BŞD dağılımı	59
Şekil 4.31. 200 MPa iç basınç ve 2 mm aksenal besleme durumunda elde edilen maksimum plastik şekil değiştirme dağılımı	59
Şekil 4.32. 200 MPa iç basınç ve 2 mm aksenal besleme durumunda elde edilen et kalınlığı dağılımı. (a) Ölçüm noktalarının dağılımı. (b) Et kalınlığı dağılım grafiği.	60
Şekil 4.33. 200 MPa iç basınç ve 2 mm aksenal besleme durumunda elde edilen oransal et kalınlığı değişimi	61
Şekil 4.34. 200 MPa iç basınç ve 2 mm aksenal besleme durumunda elde edilen şekillendirme limit diyagramı (ŞLD) ve burç yüzeyindeki şekillendirme bölgeleri	62

Şekil 4.35. 200 MPa iç basınç ve 2 mm aksenal besleme durumunda burç parçasının kalıp içindeki konumunu ve kalıp-parça temasını gösteren kesit görünüş	63
Şekil 4.36. 200 MPa iç basınç ve 4 mm besleme uygulanmış durumda elde edilen Von Mises gerilme dağılımı (MPa)	64
Şekil 4.37. 200 MPa iç basınç ve 4 mm besleme uygulanmış durumda elde edilen BŞD dağılımı	64
Şekil 4.38. 200 MPa iç basınç ve 4 mm besleme uygulanmış durumda elde edilen maksimum plastik şekil değiştirme dağılımı	65
Şekil 4.39. 200 MPa iç basınç ve 4 mm besleme uygulanmış durumda elde edilen et kalınlığı dağılımı. (a) Ölçüm noktalarının dağılımı. (b) Et kalınlığı dağılım grafiği.	66
Şekil 4.40. 200 MPa iç basınç ve 4 mm besleme uygulanmış durumda elde edilen oransal et kalınlığı değişimi	67
Şekil 4.41. 200 MPa iç basınç ve 4 mm besleme uygulanmış durumda elde edilen şekillendirme limit diyagramı (ŞLD) ve burç yüzeyindeki şekillendirme bölgeleri	68
Şekil 4.42. 200 MPa iç basınç ve 4 mm besleme durumunda burç parçasının kalıp içindeki konumunu ve kalıp-parça temasını gösteren kesit görünüş	69
Şekil 4.43. 200 MPa iç basınç ve 6 mm besleme durumunda elde edilen Von Mises gerilme dağılımı (MPa).....	70
Şekil 4.44. 200 MPa iç basınç ve 6 mm besleme durumunda elde edilen ana şekil değiştirme dağılımı	70
Şekil 4.45. 200 MPa iç basınç ve 6 mm besleme durumunda elde edilen maksimum plastik şekil değiştirme dağılımı	71
Şekil 4.46. 200 MPa iç basınç ve 6 mm besleme durumunda elde edilen et kalınlığı dağılımı. (a) Ölçüm noktalarının dağılımı. (b) Et kalınlığı dağılım grafiği.....	72
Şekil 4.47. 200 MPa iç basınç ve 6 mm besleme durumunda elde edilen oransal et kalınlığı değişimi	73
Şekil 4.48. 200 MPa iç basınç ve 6 mm besleme durumunda elde edilen şekillendirme limit diyagramı (ŞLD) ve burç yüzeyindeki şekillendirme bölgeleri	74
Şekil 4.49. 200 MPa iç basınç ve 6 mm besleme durumunda burç parçasının kalıp içindeki konumunu ve kalıp-parça temasını gösteren kesit görünüş	75
Şekil Ek-1. Siemens NX CAD model arayüzü	83
Şekil Ek-2. Dynaform yazılımının proses arayüzü	84
Şekil Ek-3. LS-DYNA FEM çözücü arayüzü	85

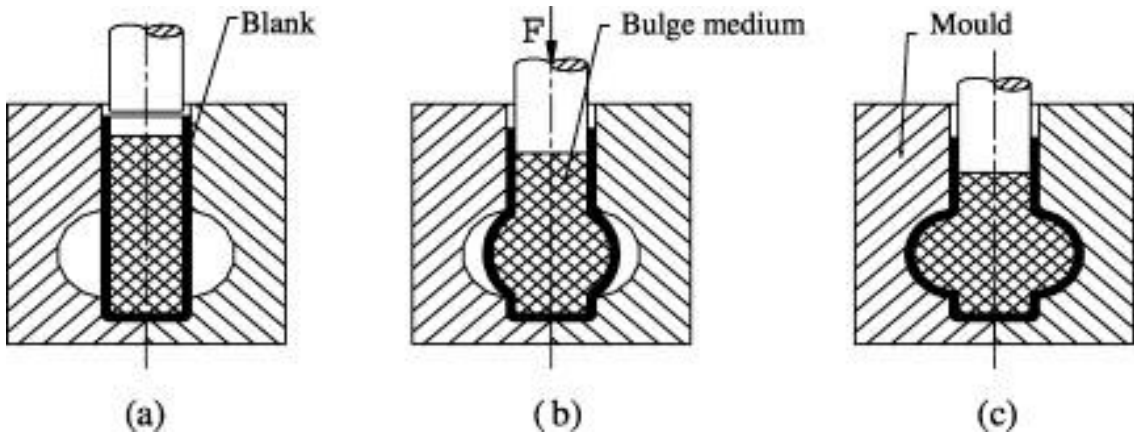
1. GİRİŞ

1.1. Problem Tanımı

Gelişen teknolojiyle birlikte günümüz imalat endüstrisi, rekabetçi piyasaların gereksinimlerini karşılamak üzere, ürünlerin hem fonksiyonel hem de ekonomik olarak üretilmesini zorunlu kılmaktadır. Özellikle otomotiv, havacılık, enerji ve savunma sanayii gibi alanlarda, karmaşık şekilli, hafif fakat yüksek dayanımlı yapısal bileşenlere olan talep artmaktadır. Bu talepleri karşılayabilmek için klasik imalat yöntemlerinin ötesine geçilmesi, yeni nesil üretim teknolojilerinin geliştirilmesi ve süreç parametrelerinin doğru yönetilmesi gerekmektedir.

Boru şeklindeki metal bileşenlerin şekillendirilmesi, imalat mühendisliğinde uzun yıllardır farklı yöntemlerle gerçekleştirilmektedir. Mekanik şişirme (mechanical bulging), zımba ile şişirme (punch bulging), rulo genişletme (roll expanding) ve hava basınçlı mekanik şişirme (air-pressure assisted mechanical bulging) gibi klasik yöntemler, farklı endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

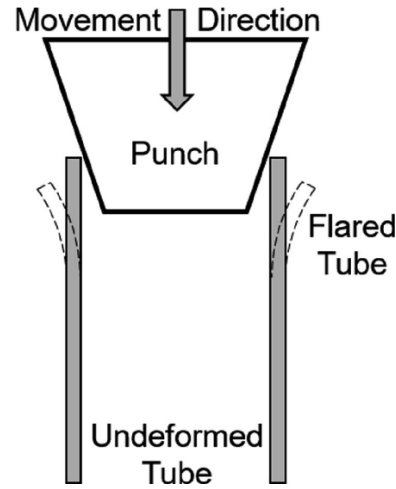
Mekanik şişirme (Mechanical Bulging) yönteminde, boru içerisindeki bir elemanın (örneğin bir mandrelin) mekanik olarak itmesiyle istenen şişkinlik elde edilmeye çalışılır. Ancak bu yöntem, genellikle lokal deformasyonlarla sınırlı olup, karmaşık ve çoklu şekil değişimlerinin gerektiği uygulamalarda yetersiz kalmaktadır.



Şekil 1.1. Mekanik şişirme prosesinin şematik görünümü(Yadong vd., 2003)

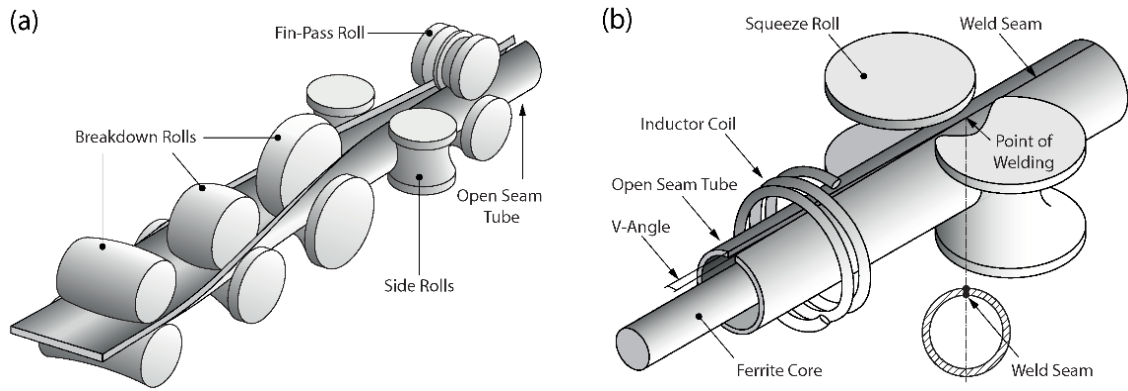
Zımba ile şişirme (Punch Bulging) tekniğinde, zımba ile boru uçlarına kuvvet uygulanarak şekil değişimi sağlanır. Bu yöntemde özellikle uç bölgelerde incelme ve

eksik dolun gibi problemler sıkça görülmekte, geometrik hassasiyetin sağlanması güçleşmektedir.



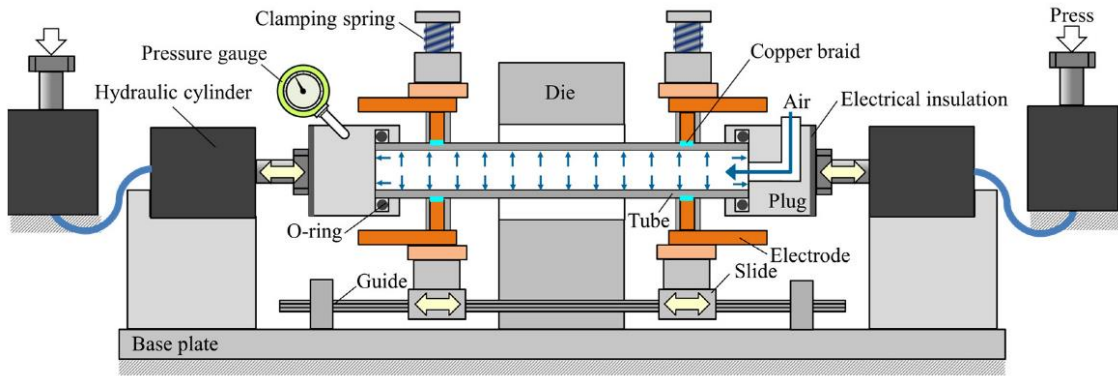
Şekil 1.2. Zımba ile boru ucu şekillendirme şematığı(Nikhare, 2020)

Rulo genişletme (Roll Expanding) yöntemiyle, boru belirli noktalardan dışa doğru kontrollü şekilde genişletilir; fakat bu proses genellikle dairesel olmayan veya çoklu lokal genişlemelerin istenildiği durumlarda yeterli esnekliği sunamaz.



Şekil 1.3. Rulo genişletme işlemi şematığı(Egger vd., 2022)

Hava basınçlı mekanik şişirme (Air-pressure Assisted Mechanical Bulging) ise, boru içerisine hava basıncı uygulanmasıyla şekillendirme işlemi gerçekleştirir. Ancak hava ile sağlanan basınç limitli olduğu için yüksek hassasiyetli ve ince cidarlı karmaşık parçalarda stabil deformasyonun kontrolü güçleşmektedir.



Şekil 1.4. Hava basınçlı mekanik şişirme şematiği(Talebi-Anaraki vd., 2022)

Bu geleneksel yöntemlerin ortak dezavantajları arasında, minimum kalınlık kaybı, burkulma (wrinkling), eksik dolum, yüzey hataları, yüksek işlem adımı gereksinimi ve kaynak ihtiyacı gibi üretim ve kalite sorunları yer almaktadır. Ayrıca, parça geometrisinin karmaşıklığı arttıkça, klasik yöntemlerle istenen hassasiyet ve mekanik özelliklere ulaşmak çoğu zaman mümkün olmamaktadır.

Tüm bu kısıtlar, modern imalat süreçlerinde daha kontrollü, parametrik olarak optimize edilebilen ve daha az işlem adımı gerektiren teknolojilerin kullanımını zorunlu kılmıştır. Tüp hidroşekillendirme (THŞ), bu ihtiyaca yanıt olarak geliştirilen ileri üretim teknolojileri arasında önemli bir yer edinmiştir. THŞ yönteminde, boru içerisine kontrollü şekilde uygulanan iç basınç (internal pressure) ve/veya uçlardan aksel besleme (axial feed) ile parça, tek bir işlemde kalıp içerisinde son şekline getirilir. Bu süreç, hem karmaşık geometrilerin tek parça halinde, kaynak ve ilave işlem gereksinimi olmadan üretilmesini sağlar hem de parçanın yapısal bütünlüğünü ve mekanik performansını artırır.

Günümüzde THŞ teknolojisi başta otomotiv sektörü olmak üzere, havacılık, demiryolu, enerji ve inşaat gibi birçok alanda yaygın şekilde kullanılmaktadır. Özellikle otomotiv endüstrisinde, ağırlık ve maliyet avantajı sağlaması nedeniyle şasi elemanları, burç, mafsal, kol, travers, bağlantı ve takviye elemanları gibi karmaşık tüp ve profil geometrilerine sahip parçaların üretiminde öne çıkmaktadır. Ayrıca, havacılık ve uzay uygulamalarında, boru tipi hidrolik sistemler ve enerji iletim hatları gibi alanlarda da THŞ ile üretilen hafif ve yüksek dayanımlı parçalar tercih edilmektedir. Burç ve mafsal gibi bağlantı elemanlarında ise, istenen yüzey kalitesi ve boyut toleransının klasik yöntemlerle sağlanamadığı durumlarda, THŞ teknolojisi üstün bir alternatif sunmakta ve üretim proseslerinde tercih edilebilirliğini artırmaktadır.

Bununla birlikte, THŞ prosesinin kendine has zorlukları da bulunmaktadır. Özellikle, malzeme özelliklerinin hassas tanımlanması, kalıp geometrisinin doğru seçimi, iç basınç ve eksenel besleme profillerinin optimizasyonu ve sürtünme koşullarının kontrolü, THŞ uygulamalarının başarısını doğrudan etkilemektedir. Literatürde sıklıkla minimum kalınlık, burkulma (wrinkling), yırtılma (bursting) ve optimum proses penceresi (process window) gibi parametrelerin belirlenmesi, hala çözümü aranan temel mühendislik sorunları arasında yer aldığı görülmektedir. Bu noktada, sonlu elemanlar yöntemi (finite element method – FEM) tabanlı gelişmiş sayısal analiz araçlarının süreç modelleme ve parametre optimizasyonunda önemi büyüktür. Geliştirilen nümerik modeller sayesinde, THŞ prosesinin karmaşık etkileşimleri detaylı olarak incelenebilmekte, geleneksel yöntemlerde ortaya çıkan üretim hatalarının nedenleri belirlenmekte ve proses parametrelerinin nasıl iyileştirilebileceği bilimsel olarak ortaya konulabilmektedir.

Bu çalışmada, klasik şişirme ve genişletme yöntemleriyle üretilen boru parçalarında karşılaşılan başlıca üretim problemlerinin, hidroşekillendirme yöntemiyle nasıl aşılabileceği sistematik biçimde ele alınmıştır. THŞ prosesinin avantajlarından dolayı klasik dövme yöntemine göre daha iyi şekil toleransı ve yüzey kalitesi elde edilmesi beklenmektedir. THŞ'nin bu avantajlarını görmek için, özellikle Dynaform ve LS-DYNA yazılımları kullanılarak gerçekleştirilen sayısal analizler aracılığıyla hem parçanın geometrik bütünlüğü hem de minimum kalınlık, burkulma ve yırtılma gibi kritik kriterler ayrıntılı biçimde değerlendirilmiştir. Böylece hem geleneksel yöntemlerle hem de THŞ ile üretilen parçaların karşılaştırmalı analizleri yapılmış; THŞ'nin sunduğu avantajlar ve endüstriyel uygulanabilirliği bütüncül bir bakış açısıyla ortaya konmuştur.

1.2. Çalışmanın Amacı

Bu tez çalışmasının temel amacı, otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılan ve karmaşık geometriye sahip metal burçların hidroşekillendirme yöntemiyle üretimi sırasında karşılaşılan temel mühendislik problemlerini ve proses parametrelerinin etkilerini, güncel sayısal analiz teknikleriyle detaylı şekilde incelemektir.

Çalışma kapsamında, geleneksel şişirme, rulo genişletme ve mekanik şişirme gibi klasik yöntemlerin oluşturduğu sınırlamaların ötesinde, THŞ prosesinin sunduğu teknik avantajlar ele alınmıştır.

Modelleme ve analiz süreçlerinde, farklı iç basınç seviyeleri ve çeşitli aksel besleme miktarlarının, burç formundaki parçanın şekil değiştirme davranışına, kalınlık dağılımına, minimum kalınlık kaybına, burkulma ve yırtılma eğilimi gibi kritik üretim hatalarına olan etkileri sistemli olarak değerlendirilmiştir.

Bu amaçla Siemens NX yazılımı ile oluşturulan üç boyutlu burç ve kalıp geometrileri, Dynaform ve LS-DYNA analiz ortamlarına aktarılmış; sonlu elemanlar yöntemiyle süreç parametrelerinin optimize edilmesine olanak sağlayan parametrik analizler yürütülmüştür. Gerçekleştirilen analizler sonucunda, proses parametrelerinin parça kalitesi ve üretim verimliliği üzerindeki rolü ortaya konmuş, elde edilen bulgular ışığında endüstriyel uygulamalara yönelik öneriler geliştirilmiştir.

Sonuç olarak, bu tez çalışması ile hem geleneksel şekillendirme yöntemlerinin sınırları bilimsel olarak belirlenmiş, hem de THŞ yönteminin mühendislik tasarımı ve üretim stratejileri açısından sunduğu teknik ve ekonomik avantajlar bütüncül bir bakış açısıyla analiz edilmiştir.

1.3. Çalışmanın Kapsamı ve Sınırlamaları

Bu tez çalışmasının temel amacı, otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılan ve karmaşık şekil değişimine maruz kalan bir burcun hidroşekillendirme prosesi sırasında gösterdiği davranışların, sayısal yöntemlerle kapsamlı olarak incelenmesidir. Çalışmanın ana odağını, farklı iç basınç ve aksel besleme senaryolarının, şekillendirilen burç üzerindeki şekil değiştirme, gerilme, kalınlık dağılımı ve olası üretim hatalarına etkilerinin analiz edilmesi oluşturmaktadır.

Çalışmada, ilk olarak Siemens NX ortamında hassas ölçülerle oluşturulan üç boyutlu burç, kalıp ve takım modelleri hazırlanmış; ardından bu modeller sonlu elemanlar analizlerinde kullanılmak üzere .step formatında Dynaform ortamına aktarılmıştır. Sayısal analizler hem mesh oluşturma hem de süreç parametrelerinin tanımlanması aşamalarında Dynaform yazılımında gerçekleştirilmiş, karmaşık şekil değişimleri ve malzeme davranışı ise LS-DYNA analiz ortamında simüle edilmiştir.

Analizler kapsamında, sabit sürtünme katsayısı ($\mu = 0,05$) altında, iki farklı maksimum iç basınç değeri (100 MPa ve 200 MPa) ve sıfır ile altı milimetre arasında değişen aksel besleme miktarları kullanılarak toplam yedi farklı senaryo modellenmiştir. Her senaryoda; minimum ve maksimum kalınlık değişimi, Von Mises

gerilme dağılımı, birim şekil değiştirme (BŞD), plastik şekil değiştirme miktarı, burkulma ve yırtılma eğilimleri sistematik olarak değerlendirilmiştir.

Bu kapsam doğrultusunda çalışmanın temel sınırlamaları ise şu şekilde özetlenebilir:

- Analizler yalnızca sayısal ortamda ve sonlu elemanlar yöntemiyle gerçekleştirilmiş; deneysel validasyon veya üretim sonrası parça incelemeleri yapılmamıştır.
- Malzeme modeli izotrop ve homojen kabul edilmiş, sıcaklık, nem ve diğer çevresel etkiler ile üretim sonrası oluşabilecek kalıntı gerilmeler dikkate alınmamıştır.
- Kalıp ve takım geometrileri tamamen rijit varsayılmış, üretim sürecinde oluşabilecek elastik deformasyonlar göz ardı edilmiştir.
- Tüm proses parametreleri, ideal ve sabit değerler üzerinden yürütülmüş; proses boyunca herhangi bir değişkenlik veya adaptif kontrol uygulanmamıştır.
- Burç geometrisi ve kalıp-takım ilişkisi kusursuz ve ideal olarak modellenmiş, üretim toleransları veya mikro hatalar hesaba katılmamıştır.

Sonuç olarak, bu çalışmada geliştirilen modelleme ve analiz yaklaşımı, tüp hidroşekillendirme prosesinin temel mekanizmalarını ve proses parametrelerinin parça kalitesi üzerindeki etkilerini derinlemesine incelemek için tasarlanmıştır. Elde edilen bulgular, mühendislik uygulamalarında tasarım ve optimizasyon süreçlerine yol gösterici veri sağlamayı amaçlamaktadır. Bununla birlikte, modelde göz ardı edilen çevresel, malzeme ve üretim kaynaklı değişkenlerin, gerçek üretim sonuçlarında kısmi farklılıklara yol açabileceği dikkate alınmalıdır.

1.4. Tezin Organizasyonu

Bu tez beş ana bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, çalışmanın problem tanımı, amacı, kapsamı ve sınırları ortaya konmuştur. Bu bölüm, çalışmanın gerekçesini ve neden bu konuda araştırma yapıldığını açıklamak açısından temel teşkil etmektedir.

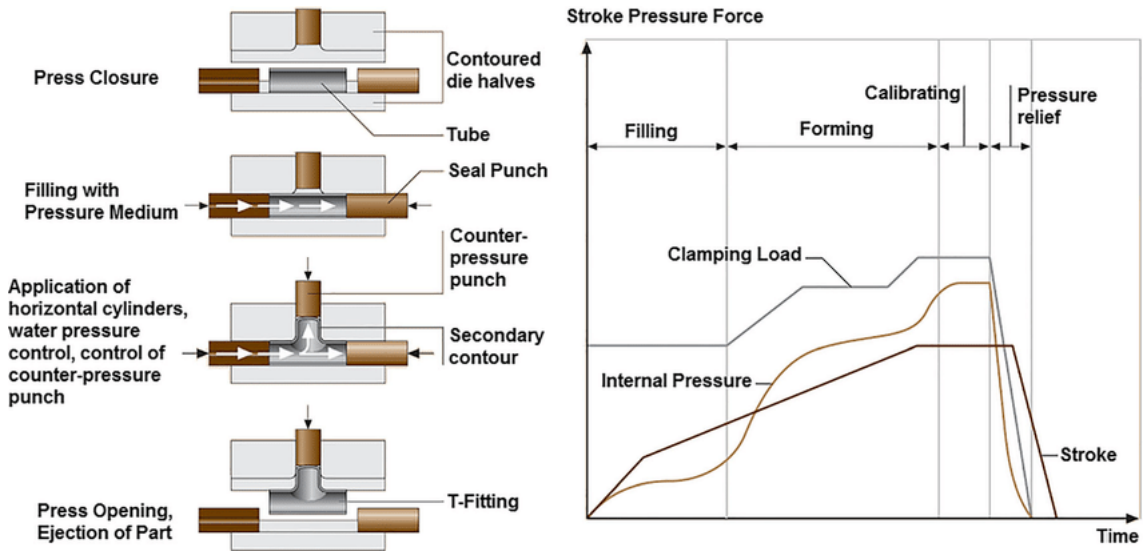
İkinci bölümde, tüp hidroşekillendirme ile ilgili ulusal ve uluslararası literatürde yapılmış çalışmalar detaylı biçimde incelenmiştir. Literatür taraması kapsamında hidroşekillendirme teknolojisinin tarihsel gelişimi, teknik temelleri, uygulama alanları,

kullanılan malzemeler, avantajları, sınırlamaları ve gelecek trendleri ele alınmıştır. Ayrıca son yıllarda yapılan FEM tabanlı sayısal analiz çalışmaları da detaylı şekilde değerlendirilmiştir.

Üçüncü bölümde, bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen sayısal modelleme çalışmalarının yöntemi açıklanmıştır. Kullanılan yazılımlar, analiz adımları, malzeme tanımları, kalıp geometrileri, yükleme senaryoları, sınır koşulları ve değerlendirme kriterleri bu bölümde sistematik biçimde sunulmuştur.

Dördüncü bölümde ise, gerçekleştirilen sayısal analizlerden elde edilen sonuçlar sunulmuş ve yorumlanmıştır. Bu kapsamda şekil değişimi, yırtılma, burkulma, dolum oranı gibi parametreler değerlendirilmiş; prosesin başarısını etkileyen temel faktörler tartışılmıştır.

Beşinci ve son bölümde, çalışmadan elde edilen genel sonuçlar özetlenmiş ve gelecekte yapılabilecek benzer çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur. Bu öneriler, endüstriyel uygulamalara katkı sağlayacak nitelikte olup mühendislik tasarım süreçlerine ışık tutmayı amaçlamaktadır.



Şekil 1.5. Tüp hidroşekillendirme sürecine ait temel aşamalar ve zaman-basınç-strok ilişkisi. (Bell vd., 2020a)

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Hidroşekillendirme Teknolojisi

Hidroşekillendirme teknolojisi, metalürji ve imalat teknolojilerinin evrimi ile birlikte gelişen yenilikçi bir üretim yöntemi olarak 20. yüzyılın ortalarından itibaren dikkat çekmeye başlamıştır. 1950'li yıllarda ilk kez boru şekillendirmede kullanılan bu teknik, zamanla artan hassasiyet, azalan maliyetler ve gelişen kalıp teknolojileri sayesinde sanayide daha yaygın hale gelmiştir (Koç ve Altan, 2001).

Otomotiv endüstrisinde yaklaşık 1980'li yıllardan itibaren kullanılmasına başlanan hidroşekillendirme, bu dönemde daha çok direksiyon kolonları, egzoz sistemleri ve şasi elemanları gibi yapısal olmayan parçalarda uygulanmıştır. Ancak 1990'lı yıllarda FEM (Sonlu Elemanlar Yöntemi) tabanlı simülasyon programlarının gelişmesiyle birlikte, THŞ teknolojisi daha karmaşık geometri ve yük taşıyan elemanlarda da kullanılabilir hale gelmiştir (Lang vd., 2004).

Son 30 yıllık süreçte, Almanya, Japonya ve ABD merkezli otomotiv firmalarının bu teknolojiye yönelik yaptığı AR-GE yatırımları THŞ uygulamalarının yaygınlaşmasında kritik rol oynamıştır. Özellikle yakıt verimliliği ve sürücü güvenliği açısından çok önemli olan ağırlık azaltma hedefi, çelik boruların THŞ ile optimize edilmesini cazip hale getirmiştir. Yine aynı dönemde malzeme bilimindeki gelişmelere paralel olarak, THŞ sadece karbon çelikleriyle değil, aynı zamanda alüminyum ve paslanmaz çelik gibi çeşitli metallerle de uygulanabilir hale gelmiştir (Abrantes vd., 2005).

Günümüzde, hidroşekillendirme teknolojisi sadece otomotivde değil; havacılık, savunma sanayi, enerji ve tıp teknolojileri gibi pek çok alanda da kullanılmaktadır. Bu teknolojinin gelecekte daha da gelişerek, sürekli bir şekilde otomasyon sistemleriyle entegre çalışan, akıllı üretim hatlarının bir parçası haline geleceği öngörülmektedir (Yuan, 2023a).

2.2. Tüp Hidroşekillendirmenin Temel Prensipleri ve Sınıflandırılması

Tüp hidroşekillendirme, içi boş boru profillerine iç basınç ve/veya eksenel kuvvet uygulanarak şekil verilmesi esasına dayanan ileri bir plastik şekil verme yöntemidir. Bu yöntem, kalıp içerisinde yüksek basınçlı sıvı kullanılarak tüp formundaki malzemenin

istenilen geometriye göre şekillendirilmesini sağlar. Bu işlem sırasında boru hem iç basınca maruz kalır hem de uçlarından aksenal kuvvet uygulanarak kalıp yüzeylerine doğru ilerlemesi sağlanır. Bu yönüyle THŞ, hem içten şişirme (bulging) hem de çekme (stretching) gibi şekillendirme mekanizmalarının birlikte kullanıldığı karma bir prosestir (Zhang, 1999).

THŞ süreci genel olarak iki ana sınıfa ayrılabilir:

- Düşük Basıncılı THŞ (Low Pressure THŞ): Bu türde şekillendirme daha çok malzemenin akışkanlık özelliğinden yararlanılarak yapılır. Daha az karmaşık geometriler için uygundur. Düşük maliyetli ve daha az hassas uygulamalar için tercih edilir.
- Yüksek Basıncılı THŞ (High Pressure THŞ): Daha kompleks ve hassas geometrilerin elde edilmesi için yüksek iç basınç (çoğunlukla 300-1200 bar aralığında) kullanılır. Burada hem hassas kalıp gereksinimi hem de malzemenin yüksek şekillenebilirliği önemlidir. Otomotiv sektöründe kullanılan çoğu THŞ uygulaması bu sınıfa girer (Chu ve Xu, 2004a).

Bununla birlikte, uygulama şekline göre tek aşamalı (single-stage) ve çok aşamalı (multi-stage) THŞ süreçlerinden de bahsedilebilir. Özellikle karmaşık parçalar için çok aşamalı hidroşekillendirme, ara şekillendirme basamakları ile daha yüksek kalite elde edilmesini mümkün kılar.

Ayrıca, tüp hidroşekillendirme prosesleri serbest şekillendirme (free hydroforming) ve kalıba dayalı şekillendirme (die-based hydroforming) olarak da sınıflandırılabilir. Serbest şekillendirme, daha çok araştırma-geliştirme uygulamalarında kullanılan esnek bir yöntemken; kalıba dayalı şekillendirme seri üretimde yaygın olarak kullanılır (Chu ve Xu, 2004b).

Bu sınıflandırmalar, mühendislik tasarım kararlarında önemli rol oynar. Parçanın geometrisi, üretim adedi, tolerans hassasiyeti ve maliyet hedeflerine göre uygun THŞ tipi seçilmelidir.

2.3. Kullanılan Malzemeler ve Malzeme Özellikleri

Tüp hidroşekillendirme sürecinde kullanılan malzemeler, yüksek şekillenebilirlik, dayanım ve süneklik gibi özellikler açısından belirli kriterleri karşılamalıdır. Sürecin başarısı doğrudan malzemenin plastik deformasyon kapasitesine, akma dayanımına, gerinim sertleşme katsayısına ve kopma uzamasına bağlıdır. THŞ'de kullanılan başlıca

malzeme grupları karbon çelikleri, alüminyum alaşımları, paslanmaz çelikler, magnezyum alaşımları ve çift fazlı (DP) çeliklerdir (Oh vd., 2006a).

Karbon Çelikleri: Otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılan karbon çelikleri, düşük maliyetleri ve iyi kaynaklanabilirlik özellikleri ile öne çıkar. Ancak düşük süneklikleri, yüksek basınçlı THŞ uygulamaları için sınırlayıcı olabilir.

Alüminyum Alaşımları: Hafiflik ve korozyon direnci açısından avantajlı olan alüminyum alaşımları, özellikle yakıt verimliliği ön planda olan araç tasarımlarında tercih edilmektedir. Ancak alüminyumun nispeten düşük şekillenebilirliği ve yay eğilimi, THŞ sürecinde dikkat edilmesi gereken sınırlamalardandır (Strano vd., 2004).

Paslanmaz Çelikler: Korozyona karşı dayanımı yüksek olan paslanmaz çelikler, özellikle egzoz sistemleri ve yapısal bileşenlerde kullanılmaktadır. Ancak bu malzemelerin yüksek akma dayanımı, yüksek iç basınç gereksinimini artırır.

Magnezyum Alaşımları: Özellikle havacılık ve otomotiv uygulamalarında kullanılan magnezyum alaşımları, düşük yoğunluklarıyla dikkat çeker. Ancak şekillenebilirlikleri sınırlı olduğu için sıcak THŞ uygulamalarında daha verimli sonuçlar verirler (Imaninejad vd., 2004).

Çift Fazlı (Dual Phase-DP) Çelikler: Yüksek mukavemet ve iyi şekillenebilirlik kombinasyonu sunan bu malzemeler, karmaşık şekilli otomotiv parçalarında yaygın olarak kullanılır. Yüksek mukavemet/ağırlık oranı sayesinde enerji emme kapasitesi yüksektir.

THŞ sürecinde kullanılan malzemelerin belirlenmesinde ayrıca aşağıdaki mekanik özellikler dikkate alınır:

- σ_y : Akma Dayanımı (Yield Strength)
- σ_t : Çekme Dayanımı (Tensile Strength)
- ϵ_b : Kopma Uzaması (Elongation at Break)
- n : Süneklik Katsayısı
- r : Plastik Anizotropi Katsayısı

Bu özelliklerin doğru karakterize edilmesi, THŞ simülasyonlarının güvenilirliği ve kalıp tasarımının başarısı açısından kritik öneme sahiptir. Bu nedenle malzeme testleri (örneğin çekme testleri, bulging testleri) ile elde edilen veriler, THŞ analizlerinde temel giriş verisi olarak kullanılır (Bortolussi ve Button, 2009).

2.4. Kalıp ve Ekipman Teknolojileri

Tüp hidroşekillendirme süreçlerinde kullanılan kalıp ve ekipmanlar, şekillendirme kalitesi, üretim tekrarlanabilirliği ve proses verimliliği açısından büyük önem arz eder. Kalıp sistemleri genel olarak sabit ve hareketli parçalar, şekillendirme yüzeyleri, destekleme ve itici sistemler ile bu unsurların entegre çalışmasını sağlayan hidrolik mekanizmalardan oluşur (Koç, 2008).

Bir THŞ kalıp sisteminde temel bileşenler şunlardır:

Ana Kalıp (Main Die): Tüpün dış geometrisinin belirlendiği sabit kalıp yüzeyidir. Yüksek mukavemetli takım çeliğinden üretilir.

Piston ve Sıkıştırma Mekanizmaları: Borunun uç kısımlarına eksenel kuvvet uygulayan sistemlerdir. Aynı zamanda tüpün iç basınç altında ileri veya geri hareketini sağlar.

Basınç Uygulama Ünitesi (High Pressure Unit): Hidroşekillendirme sürecinin en kritik bileşenlerinden biridir. Yüksek basınçlı sıvıyı kalıba iletmekle görevlidir. Genellikle özel tasarlanmış hidrolik sistemlerden oluşur.

Contalar ve Sızdırmazlık Elemanları: Yüksek basınç altında çalışan sistemde sıvı kaçağını önlemek için özel elastomerik contalar kullanılır.

- Kalıp tasarımında dikkat edilmesi gereken önemli hususlar arasında:
- Kalıp boşluğunun geometrik hassasiyeti,
- Yüzey pürüzlülüğü,
- Yüzey sertliği (aşınmaya karşı dayanım),
- Termal genleşme davranışı,
- Soğutma ve yağlama sistemlerinin entegrasyonu önemli yer tutar (Yuan, 2023b).

THŞ süreci için geliştirilen kalıplarda FEM analizleriyle gerilme, deformasyon ve aşınma simülasyonları yapılarak tasarım optimize edilir. Ayrıca kalıp içerisinde şekillenen parçanın çıkartılabilirliği (demontaj kolaylığı) de üretim sürekliliği açısından dikkate alınmalıdır.

Ekipman Teknolojisindeki Gelişmeler: Günümüzde CNC kontrollü yüksek basınç üniteleri, otomatik boru yükleme sistemleri, sensör destekli gerilme-uzama izleme teknolojileri ve robotik işleme sistemleri THŞ ekipmanlarının ayrılmaz parçası haline

gelmiştir. Bu sayede insan hatasının minimize edildiği, izlenebilirliği yüksek ve verimliliği artırılmış üretim hatları mümkün hale gelmiştir.

Kalıp Malzemeleri: Kalıpların üretiminde en çok tercih edilen malzemeler şunlardır:

- H13 tipi sıcak iş takım çelikleri
- P20 tipi ön sertleştirilmiş takım çelikleri
- Maraging çelikleri (yüksek dayanım, iyi işlenebilirlik)
- Toz metalurjisi ile üretilmiş kompozit kalıp malzemeleri

Bu malzemelerin seçimi; basınç seviyesi, parça geometrisi, üretim adedi ve üretim sıcaklığı gibi kriterlere göre belirlenir.

Sonuç olarak, THŞ süreçlerinin başarısı yalnızca proses parametrelerine değil, aynı zamanda doğru seçilmiş ve doğru tasarlanmış kalıp ve ekipmanlara da bağlıdır. Kalıp teknolojilerindeki gelişmeler, daha hassas, dayanıklı ve sürdürülebilir şekillendirme çözümlerinin önünü açmaktadır (Altan vd., 2004).

2.5. Proses Parametrelerinin Etkisi ve Optimizasyonu

Tüp hidroşekillendirme süreçlerinde proses parametreleri, şekillendirme kalitesini, geometrik hassasiyeti, malzeme akışını ve nihai ürünün mekanik özelliklerini doğrudan etkileyen temel unsurlardır. Bu parametrelerin birbirleriyle olan etkileşimi, optimum şekillendirme için dikkatle analiz edilmelidir. Proses parametrelerinin yanlış belirlenmesi; kırılma, burkulma, duvar kalınlığı kaybı veya şekil bozulmaları gibi kusurlara neden olabilir (Dohmann ve Hartl, 1997).

Başlıca Proses Parametreleri:

İç Basınç (Internal Pressure): Tüpün iç yüzeyine uygulanan sıvı basıncı, şekillendirme sırasında malzemenin kalıp yüzeylerine doğru yayılmasını sağlar. Basınç seviyesi, parça geometrisine ve malzeme dayanımına bağlı olarak değişir. Yetersiz basınç altında kalıp tam olarak dolmazken, aşırı basınç malzeme yırtılmalarına yol açabilir.

Eksenel Besleme Kuvveti (Axial Feeding Forces): Borunun uçlarından uygulanan itici kuvvetler, malzemenin kalıp içinde akışını destekler ve incelmenin önlenmesinde önemli rol oynar. Eksenel kuvvet, iç basınçla birlikte kontrol edilmelidir. Eksenel besleme olmadan yapılan şekillendirme işlemlerinde malzeme merkezde incelme eğilimindedir.

Yükleme Yolu (Loading Path): THŞ sürecinde iç basınç ve eksenel kuvvetlerin zamana bağlı olarak nasıl uygulanacağı "yükleme yolu" olarak adlandırılır. Doğru bir yüklenme stratejisi hem şekillendirme kabiliyetini artırır hem de malzeme hatalarını minimize eder. Çoğu uygulamada kademeli veya eş zamanlı yüklenme tercih edilir (Yang vd., 2001).

Sürtünme Koşulları (Friction Conditions): Kalıp-tüp arayüzündeki sürtünme, malzemenin akışına direnç oluşturur. Düşük sürtünme, daha homojen deformasyon sağlarken; yüksek sürtünme malzeme birikimi, burkulma ve lokal akma gibi problemlere neden olabilir. Bu nedenle uygun yağlayıcı seçimi ve kalıp yüzey kalitesi önem arz eder.

Sıcaklık (Temperature): Bazı durumlarda, özellikle magnezyum veya yüksek dayanımlı çelik alaşımlarında, şekillendirme sıcak ortamda yapılır. Bu yöntem "sıcak THŞ" olarak adlandırılır ve malzeme şekillenebilirliğini önemli ölçüde artırır. Ancak sıcaklık kontrolünün karmaşıklığı ve kalıp ömrüne etkisi gibi dezavantajlar da göz önünde bulundurulmalıdır.

Malzeme Özellikleri: Proses parametrelerinin etkinliği, malzemenin elastik/plastik davranışına göre değişiklik gösterir. Aynı yüklenme altında alüminyum ve çelik farklı şekillenme eğilimleri gösterir. Bu nedenle her malzeme için özel parametre seti belirlenmelidir.

Parametreler arası etkileşim: Yukarıda açıklanan parametreler birbirlerinden bağımsız değildir. Örneğin, yüksek iç basınç düşük eksenel kuvvetle birlikte uygulandığında malzeme merkezde incelme gösterebilirken, yüksek eksenel kuvvet düşük basınçla uygulandığında tüp burkulma riski taşır. Bu tür etkileşimler nedeniyle proses parametreleri optimizasyonu, genellikle sayısal simülasyonlar ve deneysel çalışmalarla birlikte yürütülmektedir (Chinchanikar vd., 2024).

Günümüzde LS-DYNA, Dynaform ve PAM-STAMP gibi sonlu elemanlar yazılımları, bu parametrelerin etkilerini simüle ederek mühendislik kararlarına katkı sağlamaktadır. Bu yazılımlar sayesinde, kırılma, burkulma, lokal incelme gibi kusurlar daha üretim öncesi aşamada öngörülebilme ve maliyetli deneme-yanılma süreçleri azaltılmaktadır.

Özetle, THŞ sürecinde proses parametrelerinin doğru seçimi ve kontrolü; üretim kalitesi, ürün performansı ve üretim verimliliği üzerinde belirleyici bir rol oynamaktadır. Etkin bir proses yönetimi için bu parametrelerin birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir.

2.6. Sayısal Yöntemlerle Analiz ve Simülasyonlar

Hidroşekillendirme gibi karmaşık plastik deformasyon süreçlerinde sayısal simülasyonlar, sürecin daha iyi anlaşılması, parametrelerin optimize edilmesi ve üretim öncesi öngörülerin elde edilmesi için vazgeçilmez araçlardır. Sayısal simülasyonlar, üretim hatalarını azaltmak, maliyetleri düşürmek ve zamandan tasarruf sağlamak açısından son derece kritik rol oynamaktadır (Antoine vd., 1997).

Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM), THŞ simülasyonlarında en yaygın kullanılan analiz tekniğidir. Bu yöntem sayesinde karmaşık geometrilere sahip boruların iç basınç, aksenal yük, sürtünme ve malzeme özellikleri altındaki davranışları üç boyutlu olarak modellenilebilir. Özellikle deformasyon dağılımı, duvar kalınlığı değişimi, potansiyel kırılma bölgeleri ve burkulma noktaları önceden analiz edilebilir (Zhou vd., 2025).

Simülasyonların avantajları:

- Kalıp tasarımı yapılmadan önce olası kusurların öngörülmesi,
- Proses parametrelerinin optimize edilmesi,
- Deneme-yanılma sürecinin azaltılması,
- Malzeme ve enerji tasarrufu,
- Zaman ve maliyet avantajı,
- Kırılma, burkulma ve incelme gibi olası hataların tespiti,
- Kalite ve üretim tekrarlanabilirliğinin artırılması.

Simülasyon ve deneysel sonuçların karşılaştırılması:

Yapılan literatür çalışmalarında, LS-DYNA ve Dynaform yazılımlarıyla yapılan sayısal analizlerin, deneysel verilerle oldukça yüksek oranda uyduğu gösterilmiştir. Örneğin, "Hydroforming of aluminum extrusion tubes for automotive applications" başlıklı çalışmada (Gao ve Strano, 2004a), deneysel olarak üretilen bir otomotiv parçasının şekil bozulmaları ile LS-DYNA simülasyon sonuçları karşılaştırılmış ve %90 üzerinde benzerlik sağlanmıştır.

Ayrıca bazı simülasyon çalışmaları, üretim öncesi şekil verme limitlerinin belirlenmesine de katkı sağlamaktadır. Şekillendirilebilirlik limit diyagramı kullanılarak, tüpün hangi bölgelerinde kırılma riskinin olduğu önceden analiz edilebilmekte ve kalıp tasarımı bu bilgiler ışığında revize edilebilmektedir.

Sonuç olarak, sayısal simülasyon yöntemleri, tüp hidroşekillendirme süreçlerinin planlanmasında, uygulanmasında ve iyileştirilmesinde temel bir mühendislik aracı haline

gelmiştir. Analiz yazılımlarının doğru parametrelerle kullanımı hem mühendislik kararlarının doğruluğunu hem de üretim süreçlerinin sürdürülebilirliğini olumlu yönde etkilemektedir.

2.7. Karmaşık Geometrilik Parçalarda Uygulamalar

Karmaşık şekilli tüp parçaların üretimi, özellikle otomotiv, havacılık ve enerji sektörlerinde hafiflik, mukavemet ve geometrik uygunluk açısından kritik bir mühendislik gereksinimidir. Bu parçalar genellikle yüksek eğrilik yarıçapına, değişken kesit geometrisine ve çoklu bağlantı noktalarına sahiptir. Geleneksel üretim yöntemleri bu tür parçaların imalatında yetersiz kalmakta, kaynak bölgelerinde zayıflık oluşturmakta veya ek işleme gereksinimi doğurmaktadır. Bu noktada hidroşekillendirme teknolojisi, karmaşık şekilli parçaların tek parça halinde, daha az kaynakla ve daha hassas boyutsal toleranslarla üretilmesini mümkün kılmaktadır (Oh vd., 2006b).

Otomotiv endüstrisindeki uygulamalar: Otomotiv sektöründe, şasi elemanları, motor taşıyıcı traversler, ön-arka alt kollar, tavan çerçevesi, direksiyon kolonları ve yan çarpışma kirişleri gibi birçok bileşen karmaşık geometrilere sahiptir. THŞ sayesinde bu parçalar daha az kaynak ile daha yüksek dayanım seviyelerinde üretilebilmektedir. Örneğin, Mercedes-Benz tarafından geliştirilen hidro şekillendirilmiş B-sütunu bileşeni hem aracın rijitliğini artırmış hem de ağırlığını %30 oranında azaltmıştır (Yuan, 2023b). Yine BMW, karmaşık bir geometriye sahip olan ve dört farklı bağlantı noktasına sahip motor taşıyıcı elemanı THŞ ile üreterek, parça sayısını %40 azaltmış ve kaynak noktalarının sayısını yarıya düşürmüştür. Bu tür uygulamalar, parça mukavemeti ile birlikte maliyet ve montaj süresinde de önemli iyileşmeler sağlamaktadır (Yuan, 2023b).

Havacılık ve savunma sanayi uygulamaları: Havacılık sektöründe karmaşık kanat iskeletleri, güç aktarım tüpleri ve iniş takımı bileşenlerinde THŞ teknolojisi kullanılmaktadır. Hafifliği nedeniyle alüminyum ve titanyum alaşımları sıklıkla tercih edilir. Özellikle uzay araçlarında, farklı açılarda çatallanan çoklu boru bağlantılarının tek parça olarak üretilmesi THŞ sayesinde mümkün hale gelmiştir. Bu da hem ağırlık avantajı hem de yapısal dayanım sağlar.

Enerji ve ısı değişim sistemlerinde kullanım: Karmaşık borulama sistemlerinin kullanıldığı nükleer enerji tesisleri, ısı eşanjörleri ve petrokimya borulama sistemlerinde de THŞ ile üretilmiş çoklu bağlantılı parçalara rastlanmaktadır. Özellikle T-parçaları, Y-

parçaları ve 3D eğimli bağlantılar THŞ teknolojisi ile sızdırmazlık ve mukavemet avantajı sağlayacak şekilde üretilebilmektedir (Bortolussi ve Button, 2009).

Mühendislik değerlendirmesi: Karmaşık parçaların üretiminde THŞ'nin sunduğu avantajlar şunlardır:

- Kaynaksız üretim ile mukavemetin artırılması,
- Daha düşük parça adedi ve montaj kolaylığı,
- Ağırlıkta azalma ile yakıt tüketiminin düşürülmesi,
- Tasarım esnekliği,
- Parça maliyetinde azalma.

Ayrıca karmaşık parçaların THŞ ile üretiminde kullanılan çok kademeli yükleme yolları, değişken kalıp geometrileri ve sonlu eleman simülasyonlarıyla desteklenen optimizasyon çalışmaları sayesinde, yüksek hassasiyette üretim mümkün hale gelmiştir. Özellikle LS-DYNA ile yapılan detaylı analizler, karmaşık şekilli parçalarda lokal incelme, yırtılma ve geri yaylanma gibi olası üretim kusurlarının önüne geçilmesini sağlamaktadır (Abbassi vd., 2020).

Tüm bu uygulamalar, THŞ'nin yalnızca şekil verme değil, aynı zamanda entegre ürün geliştirme sürecinin kritik bir parçası olduğunu göstermektedir. Bu yönüyle karmaşık şekilli tüp parçaların üretimi için THŞ, rekabetçi üretim sistemlerinde vazgeçilmez bir teknoloji haline gelmiştir.

2.8. Karşılaşılan Problemler ve Çözüm Yöntemleri

Tüp hidroşekillendirme prosesinde yüksek kalitede ürün elde edilebilmesi için çeşitli teknik ve mühendislik zorluklarının aşılması gerekmektedir. Literatürde bu süreçte karşılaşılan başlıca problemler; tüpün yırtılması, duvar kalınlığı incelmesi, burkulma, elastik geri yaylanma ve şekilsel bozulmalar olarak sıralanabilir (Kulkarni vd., 2004). Bu problemler üretim kalitesini doğrudan etkileyip ekonomik kayıplara neden olabilmektedir.

Tüpün yırtılması: Yüksek iç basınç altında şekillenen borularda, özellikle köşe ve geçiş bölgelerinde malzeme incelerek kırılma riski taşır. Bu durum genellikle uygunsuz yükleme yolları, yetersiz eksenel kuvvet veya düşük sünekliğe sahip malzemelerden kaynaklanır. Çözüm olarak çok kademeli yükleme yolları, optimum eksenel itme

stratejileri ve şekil verme sınır diyagramı (ŞLD) analizlerinin önceden yapılması önerilmektedir (Hama vd., 2004).

Duvar kalınlığı inceliği: THŞ sürecinde tüpün farklı bölgelerinde meydana gelen plastik deformasyonun eşit dağılmaması, bazı bölgelerde aşırı incelmeye yol açar. Bu da mukavemetin zayıflamasına neden olur. FEM analizleri ile incleme bölgeleri önceden belirlenebilir ve bu alanlar için özel kalıp tasarımları yapılabilir. Ayrıca başlangıç tüp kalınlığının bölgesel olarak artırılması da çözümler arasındadır.

Burkulma (Wrinkling): Yüksek aksenal kuvvet uygulanması sırasında tüp, özellikle geniş açıklıklı bölgelerde burkulabilir. Bu durum estetik bozukluklara ve işlevsel kayıplara yol açar. Çözüm olarak optimum kuvvet-basınç dengesi kurulmalı, kalıp destek yüzeyleri iyileştirilmeli ve sürtünme koşulları kontrol altında tutulmalıdır.

Elastik geri yaylanma (Springback): Şekil verme işlemi tamamlandıktan sonra tüp, uygulanan gerilimin bir kısmını elastik olarak geri kazandığı için hedeflenen geometriden sapmalar yaşanabilir. Özellikle hassas montaj gerektiren otomotiv parçalarında bu durum ciddi kalite sorunlarına neden olur. Geri yaylanmanın önlenmesi için aşırı şekillendirme (overforming) stratejileri, telafi kalıp tasarımları ve elastoplastik FEM modelleri kullanılır (Gao ve Strano, 2004b).

Kalıp doluluk problemleri: Kompleks geometrili kalıplarda, basıncın tüp boyunca eşit dağılmaması nedeniyle bazı bölgelerin yeterince dolmaması söz konusu olabilir. Bu da yüzey hatalarına veya eksik şekillenmeye yol açar. Bu tür problemler için sıralı basınç yükleme, ön şişirme stratejileri (pre-bulging) ve kalıp içi sensör sistemleri kullanılmaktadır.

Malzeme uyumsuzluğu: Bazı durumlarda, kullanılan boru malzemesinin akma dayanımı, sünekliği ve sertliği THŞ işlemi için uygun olmayabilir. Bu tür malzemeler kırılma, aşırı yaylanma veya düşük şekillenebilirlik gösterir. Bu nedenle malzeme karakterizasyonu önceden yapılmalı, uygun akma modelleri ve malzeme kartları FEM simülasyonlarına entegre edilmelidir.

Prosesin tekrarlanabilirliği: THŞ sürecinde elde edilen sonuçların farklı üretim döngülerinde birbirini tekrar etmemesi de sık rastlanan bir problemdir. Bu durum kalıp sıcaklığı, yağlama koşulları veya boru konumlandırma hatalarından kaynaklanabilir. Çözüm olarak proses parametrelerinin otomasyon sistemleriyle kontrol altına alınması, sensör destekli üretim takibi ve proses optimizasyonu yapılmalıdır.

Sonuç olarak, THŞ prosesinde karşılaşılan problemler; iyi planlanmış proses tasarımı, sayısal simülasyon destekli ön analizler, uygun malzeme ve kalıp seçimi ile

büyük oranda minimize edilebilir. Literatürde bu problemlere karşı geliştirilen çözüm önerileri, özellikle sayısal simülasyon tabanlı proses optimizasyonlarının etkinliğini ortaya koymaktadır.

2.9. Hidroşekillendirme Süreçlerinin Çevresel ve Ekonomik Değerlendirmesi

Hidroşekillendirme, çevresel sürdürülebilirlik ve ekonomik verimlilik açısından geleneksel metal şekillendirme yöntemlerine göre önemli avantajlar sunar. Bu teknoloji, enerji tüketiminin azaltılması, malzeme israfının önlenmesi ve daha hafif ürünlerin elde edilmesi gibi çevresel faydalar sağlarken; aynı zamanda üretim maliyetlerini azaltarak ekonomik kazançlar da sunmaktadır.

Malzeme verimliliği ve atık azaltımı: THŞ ile üretilen parçalar genellikle tek parça olarak tasarlandığından, birleştirme işlemleri ve kaynak noktaları azalır. Bu da hem atık miktarını düşürür hem de üretimde daha az malzeme kullanımı sağlar. Özellikle sac ve boru malzemelerinin en verimli şekilde kullanılması, talaşlı imalat yöntemlerine göre ciddi bir çevresel avantaj sağlar (Jirathearanat vd., 2004).

Enerji tüketimi ve karbon ayak izi: Geleneksel yöntemlere göre daha düşük sıcaklıkta ve daha az işlem adımıyla üretim yapılabilmesi, enerji tüketimini azaltır. THŞ süreçleri genellikle soğuk şekillendirme prensibiyle çalıştığından, fırınlama veya yeniden ısıl işlem gereksinimi azalır. Bu da karbon salımının düşmesini sağlar. Ayrıca daha hafif parçaların kullanılması, taşıma araçlarında yakıt tüketimini ve emisyonları azaltır.(Bell vd., 2020b)

Maliyet avantajları: Hidroşekillendirme teknolojisi, parça sayısı ve montaj süresini azaltarak işçilik ve işlem maliyetlerinde ciddi düşüşler sağlar. Akademik literatüre göre tek adımda şekillendirilebilen karmaşık geometriye sahip bileşenlerde, özellikle 35–40.000 adetlik üretim hacimlerinde birim maliyetler geleneksel yöntemlere göre daha düşük gözlemlenmiştir. Bu da otomotiv sektöründe THŞ teknolojisi kullanımını hem büyük üreticiler hem de KOBİ'ler için ekonomik açıdan öngörülebilir ve geri dönüşü kısa bir yatırım hâline getirmektedir (Bell vd., 2020c).

Ürün ömrü ve dayanıklılık: THŞ ile şekillendirilen parçalar, daha yüksek yapısal bütünlük ve gerilim homojenliği gösterir. Bu da ürün ömrünü artırırken, parça değişim sıklığını azaltır. Daha uzun ömürlü ürünlerin kullanımı ise çevresel döngüde daha az kaynak tüketimi anlamına gelir.

Geri dönüştürülebilirlik: Alüminyum ve çelik gibi yaygın kullanılan hidroşekillendirme malzemeleri yüksek oranda geri dönüştürülebilir metallere oluşur. THŞ ile elde edilen parçaların işlenmiş yapısı, doğrudan geri dönüşüm süreçlerine uygunluk sağlar. Bu da dögüsel ekonomi açısından avantaj yaratır.

Ekonomik ölçeklenebilirlik: THŞ teknolojisi hem prototip üretimi hem de büyük seri üretim süreçlerinde uygulanabilirliği sayesinde geniş bir ekonomik ölçeklenebilirliğe sahiptir. Kalıp maliyetlerinin amorti edilebilmesi ve üretim sürecinde yüksek tekrar edilebilirlik, özellikle otomotiv ve beyaz eşya gibi sektörlerde ekonomik sürdürülebilirliği destekler.

Devlet politikaları ve teşvikler: Çevreci üretim tekniklerinin benimsenmesini teşvik eden birçok ulusal ve uluslararası politika çerçevesinde, THŞ gibi kaynak dostu teknolojilere destek verilmektedir. Avrupa Birliği'nin Endüstriyel Karbon Azaltım Stratejisi kapsamında, THŞ teknolojisiyle üretilen parçalar kullanan firmalar yeşil sertifikasyonlara daha kolay ulaşabilmekte ve vergi avantajlarından faydalanabilmektedir.

Tüm bu yönleriyle değerlendirildiğinde, hidroşekillendirme teknolojisi sadece teknik avantajlar sağlamakla kalmamakta; çevresel sürdürülebilirlik ve ekonomik verimlilik açısından da çağdaş üretim stratejilerinin önemli bir parçası haline gelmektedir. Bu nedenle sanayi kuruluşlarının bu teknolojiye yatırım yapması hem ekolojik hem de ticari anlamda olumlu bir yönelimi temsil etmektedir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde, otomotiv endüstrisinde kullanılan ve klasik yöntemlerle üretilmesinde problemler ile karşılaşılan, bir burcun hidroşekillendirme prosesiyle üretilmesine yönelik gerçekleştirilen sayısal analizlerin tüm metodolojik detayları kapsamlı biçimde sunulmaktadır. Çalışmada izlenen yaklaşım; kullanılan malzemenin seçiminden başlayarak üç boyutlu modellemenin hazırlanmasına, sonlu elemanlar analizine temel teşkil eden ağ yapısının oluşturulmasına, sınır şartlarının ve yükleme koşullarının belirlenmesine kadar uzanmaktadır. Ayrıca, tüm modelleme ve analiz süreçlerinin yürütülmesinde tercih edilen yazılım ve donanım altyapısı ile, sayısal analizlerin güvenilirliğini ve geçerliliğini doğrudan etkileyen teknik varsayımlar ve modelleme sınırlamaları da ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

Çalışmanın metodolojik bütünlüğü açısından, her bir adım literatürde kabul görmüş ve endüstride yaygın olarak uygulanan mühendislik standartlarına uygun biçimde tasarlanmıştır. Kullanılan malzemenin mekanik özellikleri, üretici verileri ve Dynaform yazılımı kütüphanesindeki güncel parametreler ışığında detaylandırılmış; üç boyutlu CAD modellerinin tasarımı Siemens NX ortamında gerçekleştirilerek, analiz yazılımına eksiksiz biçimde aktarılmıştır. Sonlu elemanlar modelinin mesh yapısı, karmaşık şekil değişimlerinin ve lokal deformasyonların doğru biçimde yakalanmasına olanak sağlayacak şekilde optimize edilmiştir.

Analizlerde uygulanan sınır şartları ve yükleme profilleri, gerçek üretim ortamındaki proses parametreleri ile uyumlu şekilde tanımlanmış; elde edilen tüm bulguların endüstriyel olarak uygulanabilir ve bilimsel açıdan geçerli olmasına özen gösterilmiştir. Ayrıca, analizlerin doğru yürütülebilmesi için tercih edilen yazılım programları ve donanım altyapısı ayrıntılı biçimde belirtilmiş; modelleme ve analiz sırasında yapılan teknik varsayımlar ve olası modelleme sınırlamaları sistematik şekilde ortaya konmuştur.

3.1. Kullanılan Malzeme Özellikleri

Bu tez çalışmasında şekillendirilen burç parçalarının tüm analiz ve modelleme adımlarında, günümüz otomotiv endüstrisinde geniş bir kullanım alanına sahip olan DP800 yüksek dayanımlı çelik malzemesi tercih edilmiştir. DP800, yüksek çekme ve akma dayanımı ile birlikte iyi şekillendirilebilirlik özelliklerine sahip olması sayesinde,

özellikle karmaşık şekilli, hafif ve ince cidarlı otomotiv parçalarının üretiminde öne çıkan bir çelik türüdür. Sunduğu yüksek mekanik performans ve ağırlık azaltma potansiyeli, modern mühendislik uygulamaları açısından büyük avantajlar sunmaktadır.

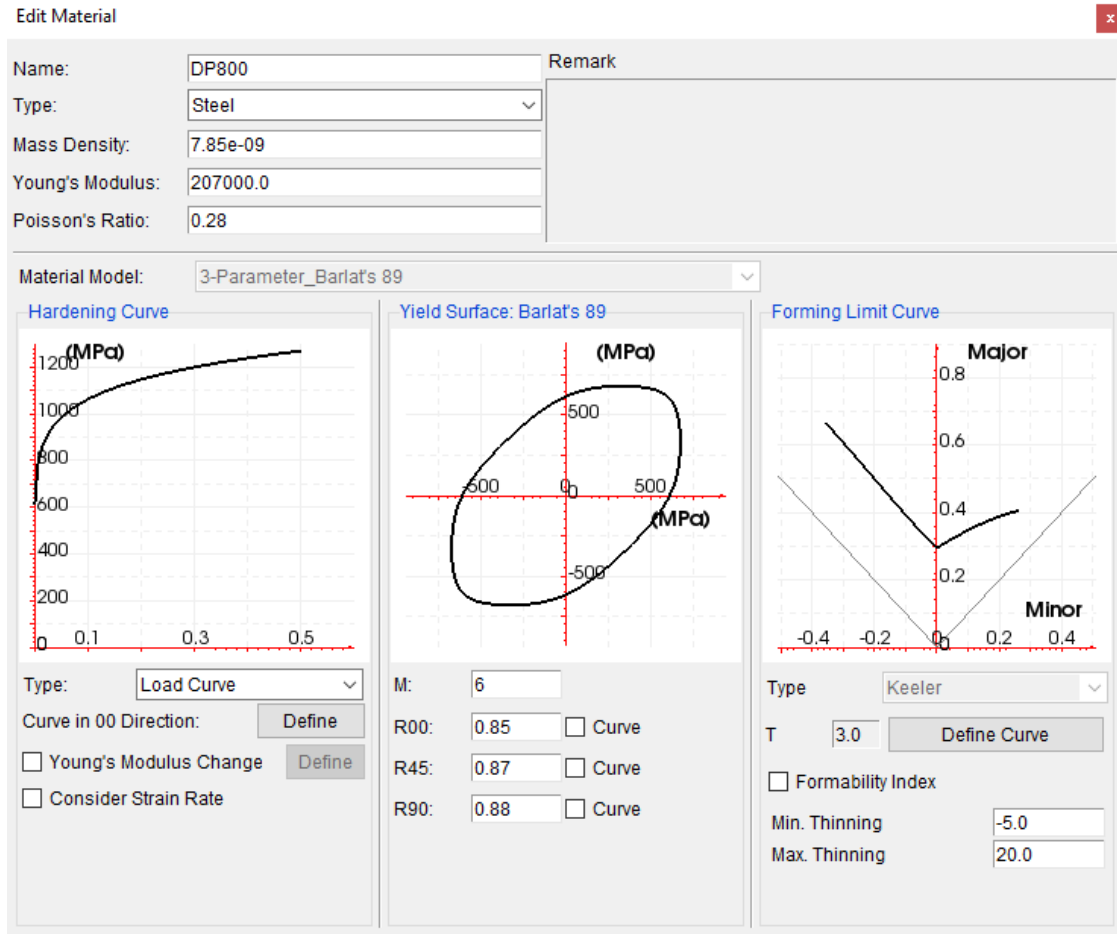
Analizlerde kullanılan DP800 çeliğinin mekanik ve şekillendirme parametreleri, Dynaform yazılımının malzeme kütüphanesi üzerinden elde edilmiş ve analiz modeline doğrudan aktarılmıştır.

Bu parametreler;

- Elastisite modülü (E): 207.000 MPa
- Poisson oranı (ν): 0,28
- Malzeme yoğunluğu (ρ): 7,85 g/cm³
- Akma dayanımı (Re): (Yazılım kütüphanesinde otomatik tanımlanan eğri ile)
- Akma yüzeyi modeli: 3-Parameter Barlat's 89
- Anizotropi parametreleri (R00, R45, R90): 0,85; 0,87; 0,88
- Akma (hardening) eğrisi: Dynaform'da tanımlanan plastikleşme eğrisi
- Şekillendirme limit eğrisi (FLC): Forming limit curve olarak Dynaform malzeme kartında tanımlanmıştır.

Analizlerde kullanılan DP800 yüksek dayanımlı çeliğin mekanik ve şekillendirme parametrelerinin Dynaform yazılımı ortamında tanımlandığı malzeme ekranı Şekil 3.1'de gösterilmiştir. Solda akma eğrisi (hardening curve), ortada Barlat 89 akma yüzeyi (yield surface), sağda ise şekillendirme limit eğrisi (forming limit curve) görülmektedir.

Bu parametreler ve eğriler, Şekil 3.1'de görüldüğü üzere, Dynaform yazılımı ortamında grafiksel olarak da izlenebilir şekilde tanımlanmış ve analizlerde doğrudan kullanılmıştır. Özellikle Barlat 89 akma yüzeyi modeli ve şekillendirme limit eğrisi, DP800 çeliğinin karmaşık şekil değişimlerinde ve lokal plastik deformasyon bölgelerinde güvenilir sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır.



Şekil 3.1. Analizlerde kullanılan DP800 yüksek dayanımlı çeliğin mekanik ve şekillendirme parametrelerinin Dynaform yazılımı ortamında tanımlandığı malzeme ekranı. Solda akma eğrisi (hardening curve), ortada Barlat 89 akma yüzeyi (yield surface), sağda ise şekillendirme limit eğrisi (forming limit curve) görülmektedir

Malzeme özelliklerinin doğru tanımlanması hem sayısal analizlerin doğruluğunu hem de elde edilen bulguların endüstriyel olarak uygulanabilirliğini artırmaktadır. DP800 çeliğinin sahip olduğu yüksek dayanım ve şekil değiştirme kapasitesi sayesinde, analiz edilen burç parçasında minimum kalınlık kaybı, yüksek mukavemet ve üretim sırasında oluşabilecek burkulma ya da yırtılma gibi üretim hatalarının önlenmesi hedeflenmiştir.

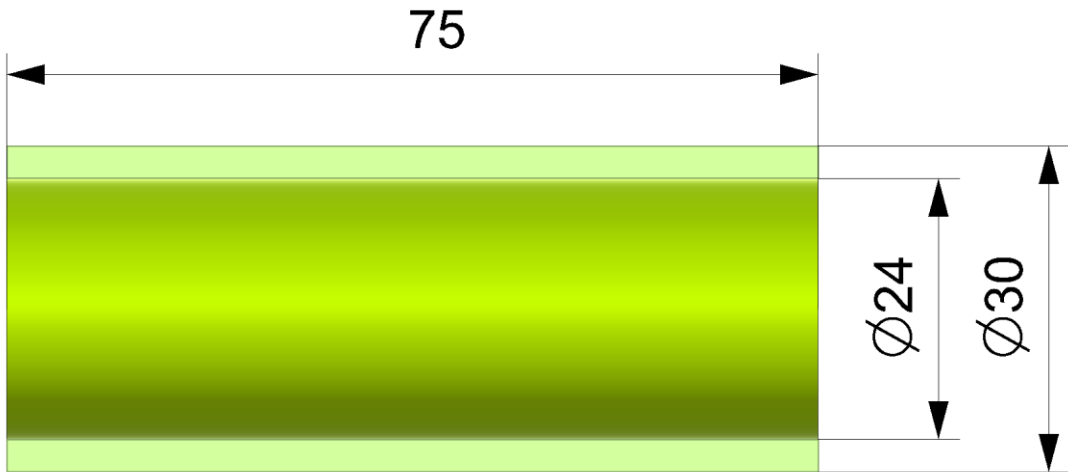
Ayrıca, bu çalışmada kullanılan malzeme parametrelerinin tamamı güncel literatür ve üretici katalogları ile uyumlu şekilde seçilmiş; Dynaform yazılımının malzeme kütüphanesinden alınarak modelleme ortamında eksiksiz biçimde uygulanmıştır. Böylece, analizlerde elde edilen sonuçların hem bilimsel hem de pratik olarak güvenilirliği en üst düzeyde tutulmuştur.

3.2. Geometrik Modelleme ve CAD Hazırlığı

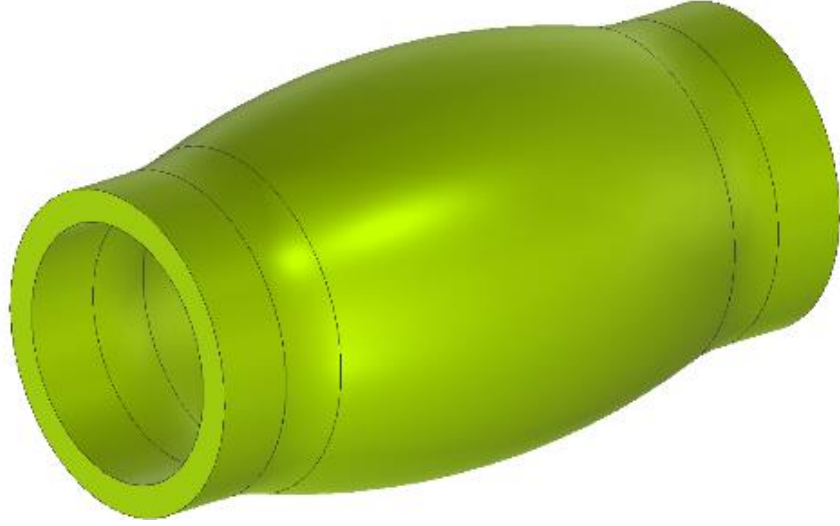
Bu çalışmada, tüp hidroşekillendirme analizlerinin temelini oluşturan burç parça, kalıp takımı ve aksenal besleme sisteminin üç boyutlu geometrik modelleri, Siemens NX CAD yazılımı kullanılarak detaylı bir şekilde oluşturulmuştur. Tasarım sürecinde hem prosesin başlangıcındaki ham tüp hem de hidroşekillendirme sonrası elde edilmesi hedeflenen nihai parça formu, literatür ve endüstriyel uygulamalara uygun ölçüler ve teknik gereksinimler göz önünde bulundurularak modellenmiştir. Aşağıdaki şekillerde Siemens NX’de oluşturulmuş üç boyutlu modeller yer almaktadır.



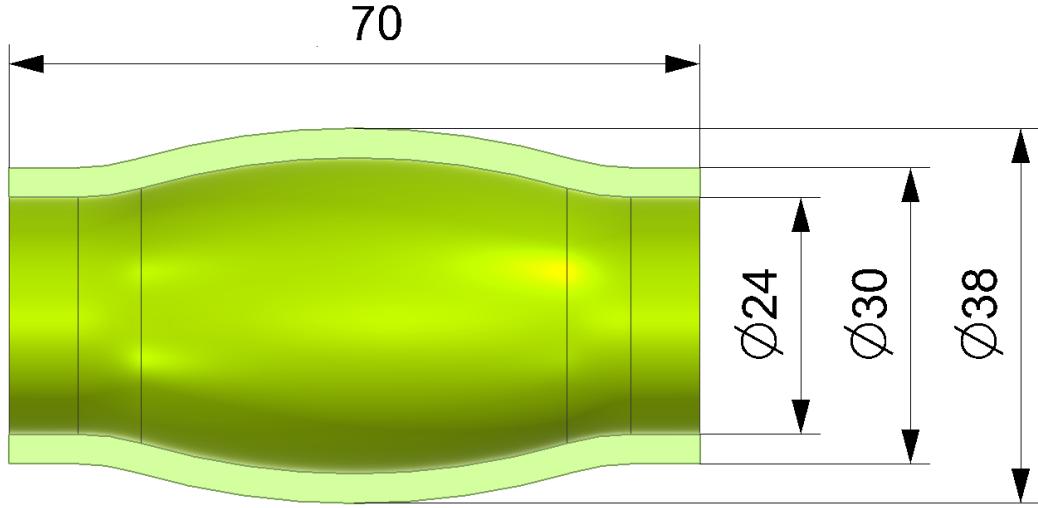
Şekil 3.2. Ham burç parçasının üç boyutlu görünümü



Şekil 3.3. Ham burç parçasının ölçülendirilmiş yan görünüşü

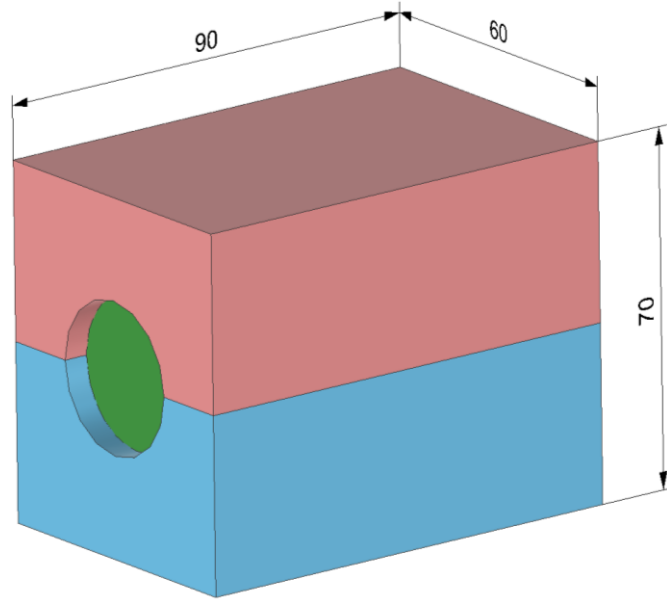


Şekil 3.4. Nihai (şekillendirilmiş) burç parçasının üç boyutlu görünümü



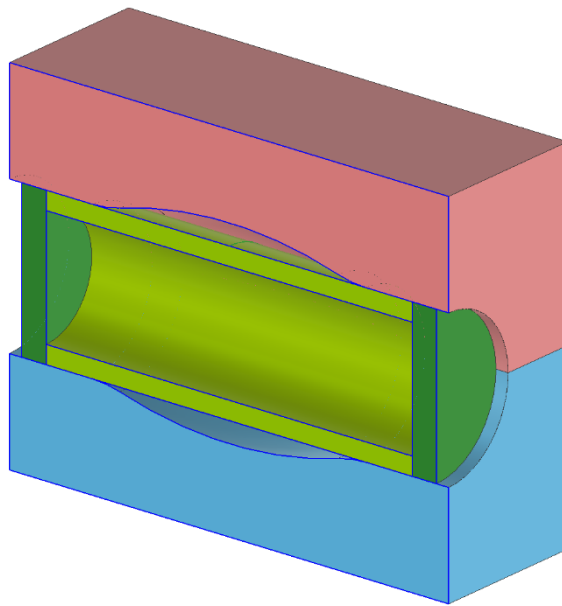
Şekil 3.5. Nihai burç parçasının ölçülendirilmiş görünüşü

İlk aşamada, şekillendirme işleminin başlangıcını temsil eden düz, silindirik burç modeli oluşturulmuş; bu modelde çap, et kalınlığı ve uzunluk gibi temel geometrik parametreler titizlikle belirlenmiştir (Şekil 3.2 ve Şekil 3.3). Sonraki adımda, THŞ prosesiyle ulaşılması planlanan nihai burç formunun tasarımı tamamlanmış; bu formun ölçüleri, hedeflenen deformasyon miktarları ve proses sonrası kalıp ile temas yüzeyleri dikkate alınarak oluşturulmuştur (Şekil 3.4 ve Şekil 3.5).



Şekil 3.6. Kalıp takımının ve aksel besleme sisteminin genel yerleşimi

Kalıp tasarımı da Siemens NX ortamında, şekillendirme işleminin gerektirdiği tüm teknik detaylar göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmiştir. Üst ve alt kalıp blokları, burç parça ile tam uyumlu olacak şekilde ayrı ayrı modellenmiş hem kapalı kalıp durumu hem de montajda parçaların yerleşimi detaylı biçimde kurgulanmıştır (Şekil 3.6). Kalıp bloklarının iç yüzey profilleri, şekillendirilecek burcun üretim sonrası hassasiyetini ve bütünlüğünü güvence altına alacak şekilde optimize edilmiştir.



Şekil 3.7. Kalıp, burç ve aksel besleme elemanlarının montaj durumunu gösteren üç boyutlu görünüm

Montaj sırasında, özellikle aksenal besleme mekanizmasını simgeleyen silindirik parçalar (yeşil renkli) eklenmiştir. Bu elemanlar, THŞ prosesinde boru uçlarına uygulanan kuvvet ve hareketi temsil etmektedir. Farklı aksenal besleme miktarlarını ve senaryolarını modellemek amacıyla bu parçalar çeşitli montaj durumlarında gösterilmiş ve analizlere uygun şekilde yapılandırılmıştır (Şekil 3.6 ve Şekil 3.7).

Modelleme aşamasında hazırlanan tüm üç boyutlu geometriler, .step formatında dışa aktarılmış ve Dynaform sonlu elemanlar analiz yazılımına başarıyla içe aktarılmıştır. Aktarım sonrasında, modelin yüzey bütünlüğü, ölçü hassasiyeti ve analiz gereksinimleri korunarak, meshleme ve sınır şartlarının tanımlanması için gerekli altyapı sağlanmıştır.

Aşağıdaki görsellerde, çalışma kapsamında oluşturulan ham tüp modeli, nihai hedef parça, kalıp blokları, aksenal besleme elemanları ve montaj aşamaları farklı açılardan sunulmuştur. Bu kapsamlı CAD hazırlığı hem analizlerin güvenilirliğine hem de modellemenin teknik doğruluğuna önemli katkı sağlamaktadır.

3.3. Sonlu Eleman Modeli ve Ağ Yapısı

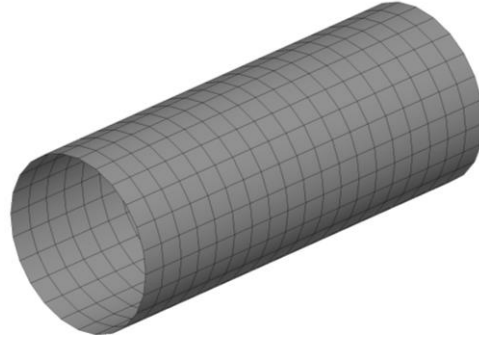
Bu çalışmada gerçekleştirilen sayısal analizlerin temelini, şekillendirilecek olan tüp parça oluşturmaktadır. Analiz ortamında bu parça, yaygın olarak kullanılan terminolojiye uygun şekilde “blank” olarak adlandırılmıştır. Bundan sonraki bölümlerde ise yalnızca “tüp parça” ifadesi kullanılacaktır.

Modelin oluşturulmasında, optimum çözüm doğruluğu ve hesaplama verimliliği gözetilmiştir. Hazırlanan modelde toplam 1484 eleman yer almakta olup, bunların 1416 adedi dörtgen (quadrilateral), 68 adedi ise üçgen (triangle) tipindedir. Mesh yapısının büyük bölümünde dörtgen elemanlar tercih edilmiş; köşe ve karmaşık bölgelerde ise üçgen elemanlara yer verilmiştir. Böylece hem küresel deformasyonun hem de lokal şekil değişimlerinin doğru yakalanabilmesi sağlanmıştır.

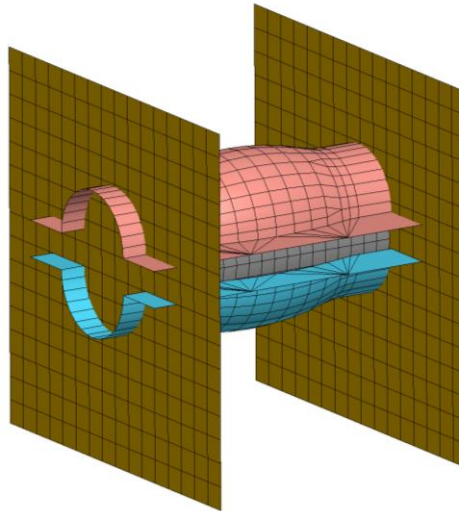
Analizlerde yalnızca kabuk (shell) tipi elemanlar kullanılmış, katı (solid), beam, wedge veya hegzagon elemanlara gerek duyulmamıştır. Bu yaklaşım, ince cidarlı ve yüksek deformasyonlu boru parçalarının davranışını gerçekçi biçimde modellemek açısından uygundur.

Modelde ayrıca 5 adet parça ve 4 adet takım (tool) tanımlanmıştır. Takımlar, şekillendirme kalıpları ve yardımcı elemanları temsil etmektedir. Analiz boyunca herhangi bir çekme boncuğu (drawbead) kullanılmamıştır.

Mesh ve model parametreleri, Dynaform analiz ortamında hem güncel literatür hem de endüstriyel uygulama gereksinimleri dikkate alınarak seçilmiştir. Böylece, tüp parça üzerinde uygulanan yükleme ve sınır şartlarının etkileri, yüksek doğruluk ve güvenilirlikle sayısal olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 3.8. Tüp parça üzerinde oluşturulan mesh yapısı



Şekil 3.9. Analiz modelinin genel yerleşimi ve kalıp-tüp ilişkisi

Yukarıda görülen analiz modeli, Dynaform yazılımı ortamında oluşturulmuş olup; modeldeki kalıp, takım ve tüp parça yerleşimi ile mesh dağılımı detaylı biçimde gösterilmiştir. Modelde ağırlıklı olarak dörtgen kabuk elemanlar tercih edilmiş, köşe ve karmaşık bölgelerde üçgen elemanlar kullanılmıştır.

3.4. Sınır Şartları ve Yükleme Koşulları

Bu çalışmada yürütülen sayısal analizlerin doğruluğu ve endüstriyel gerçekliği açısından, sınır şartları ve yükleme profilleri büyük bir titizlikle belirlenmiştir. Tüp

hidroşekillendirme prosesi kapsamında gerçekleştirilen tüm analizlerde hem geometrik hem de yükleme açısından süreç parametreleri sistematik olarak tanımlanmıştır.

Sınır şartlarının belirlenmesinde, modelin üretim ortamında karşılaşılabileceği fiziksel kısıtlar dikkate alınmıştır.

Analiz edilen parçanın uç bölgelerinde iki farklı senaryo öngörülmüştür:

Beslemesiz (axial feedsiz) analizlerde, borunun her iki ucu eksenel (axial) yönde tamamen serbest bırakılmış, uçlara herhangi bir hareket veya yer değiştirme uygulanmamıştır. Böylece, şekillendirme sadece iç basınç etkisi altında gerçekleşmiş ve eksenel yönde serbestlik verilmiştir.

Beslemeli analizlerde ise, borunun uçlarına kontrollü bir şekilde eksenel besleme (axial feed) uygulanmış; uçlar yalnızca önceden tanımlanan besleme miktarı ve zaman profiline uygun olarak hareket edebilmiştir. Bu yaklaşım, endüstriyel uygulamalarda olduğu gibi, malzemenin istenen miktarda ve kontrollü olarak kalıp içerisine ilerlemesini sağlamıştır.

Her iki durumda da borunun dış yüzeyleri kalıpla sürekli temas halinde tutulmuş, radyal (yani dışa doğru) herhangi bir serbestlik tanınmamıştır. Kalıp yüzeyi tamamen rijit kabul edilmiş, üretim ortamında sıkça karşılaşılan mikro elastik deformasyonlar ise sınır şartlarının belirlenmesinde ihmal edilmiştir.

Analiz boyunca, tüm temaslar "tam temas" (full contact) varsayımıyla modellenmiş, herhangi bir boşluk veya ayrılma durumu hesaba katılmamıştır.

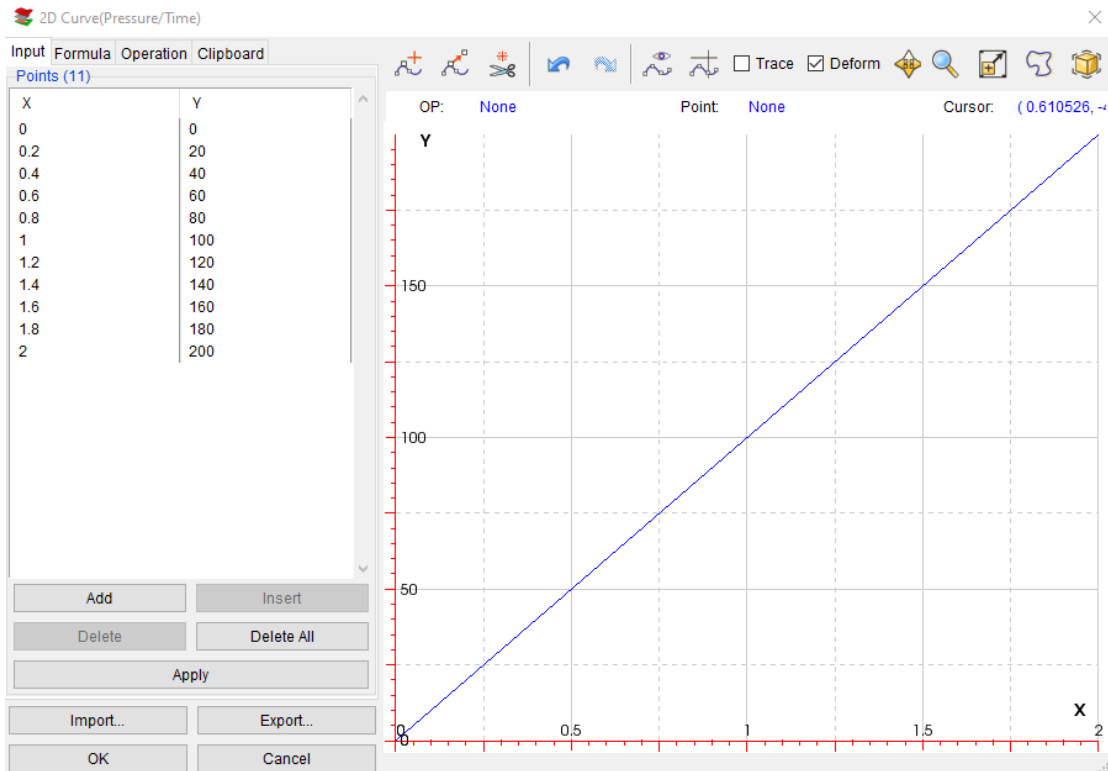
Sürtünme katsayısı (μ) değeri hem endüstriyel hidrolik şekillendirme uygulamalarında hem de literatürde yaygın olarak karşılaşılan yağlanmış kalıp-parça koşullarını yansıtmak amacıyla, tüm analizlerde sabit olarak 0,05 alınmıştır. Ayrıca, kalıp yüzeylerinde meydana gelebilecek mikro düzeyde elastik yaylanma (springback) ve yüzeydeki yağlayıcı film tabakasının sürtünme azaltıcı etkisi göz önüne alınarak, bu değer seçilmiştir. Böylece analizlerde, pratikte karşılaşılan minimum sürtünmeli ve kontrollü temas koşulları sağlanmıştır.

Bu çalışmada hidroformlama prosesinin temel yükleme parametrelerinden biri olan iç basınç değerleri belirlenirken literatürdeki yaygın uygulamalar dikkate alınmıştır. Analizlerde 100 MPa ve 200 MPa olmak üzere iki farklı maksimum iç basınç seviyesi benimsenmiştir. Bu basınç aralığının seçiminde, (Ahmetoglu vd., 2000) deneysel çalışmalarında 145-168 MPa basınç değerlerini kullanması ve (Xing ve Makinouchi, 2001)'in teorik analizlerinde bu seviyelerin plastik deformasyon için yeterliliğini ortaya koyması etkili olmuştur.

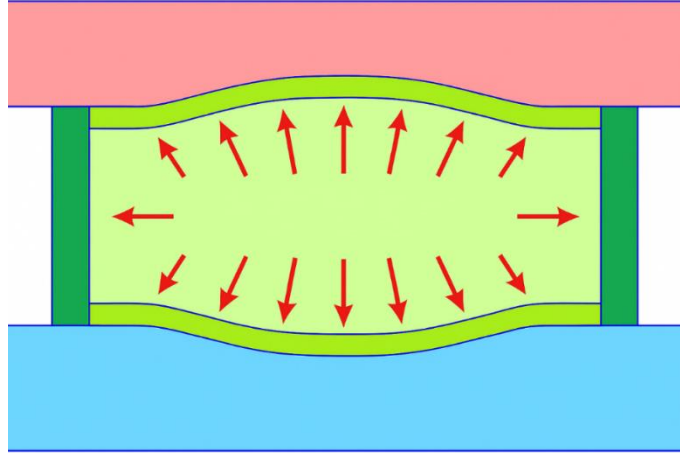
Basınç yükleme profillerinin belirlenmesinde ise endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kabul gören iki aşamalı yaklaşım esas alınmıştır:

- Lineer artış aşaması: İç basıncın zamana bağlı olarak sabit bir hızda artırıldığı başlangıç evresi (Şekil 3.10)
- Plateau (sabitlenme) aşaması: Maksimum basınç değerine ulaşıldıktan sonra bu seviyenin korunduğu kararlı durum evresi

Bu yükleme stratejisi, Kim ve arkadaşlarının çok aşamalı hidroformlama çalışmasında benimsediği basınç kontrol metodolojisi ile uyumlu olup, proses stabilitesi ve malzeme deformasyonunun kontrolü açısından literatürde sıklıkla önerilen bir yaklaşımdır(Kim vd., 2004). Özellikle Xing ve Makinouchi (2001) tarafından vurgulandığı üzere, bu tür kontrollü basınç artış profilleri, tüp malzemede istenmeyen plastik kararsızlıkların ve lokal incelmelerin önüne geçilmesinde kritik rol oynamaktadır (Xing ve Makinouchi, 2001).



Şekil 3.10. İç basınç besleme profili (Örnek 200 MPa için)

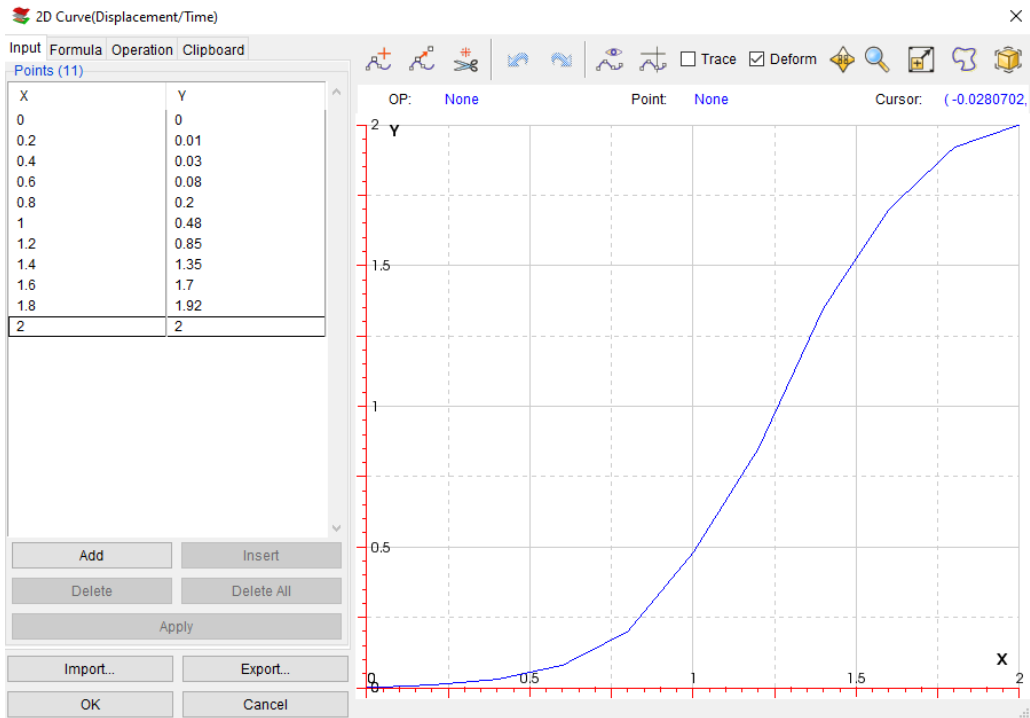


Şekil 3.11. İç basıncın burç parçası iç yüzeyine eşit şekilde uygulandığını gösteren şematik çizim

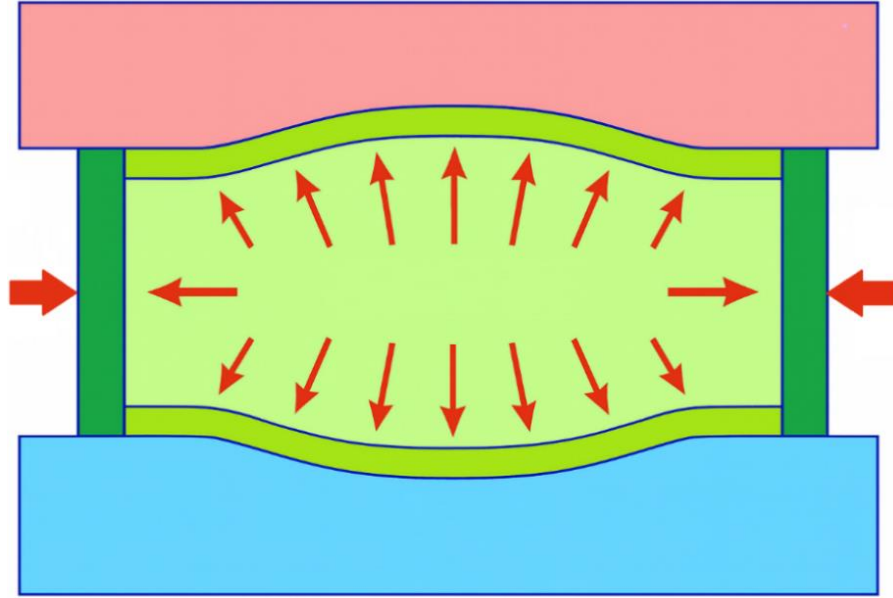
Eksenel besleme miktarları (0-6 mm), aşağıdaki temellere dayandırılmıştır:

- Sıfır besleme (0 mm): Serbest şişirme (free bulging) modunu temsil ederek referans durum oluşturur(Koç ve Altan, 2001)
- Kademeli artış (2-6 mm): Malzeme kalınlık dağılımını optimize etmek için kritik besleme aralığını kapsamaktadır.

Besleme zaman profili ise, endüstriyel uygulamalarda optimum malzeme akışı sağlayan, başlarda yavaş, ortada hızlı, sonunda tekrar yavaş artış gösteren S-eğrisi (sigmoid) şeklinde modellenmiştir (Şekil 3.12).



Şekil 3.12. Eksenel besleme eğrisi (Örnek 2 mm besleme için)



Şekil 3.13. Eksenel besleme uygulamasında burç parçasına iki uçtan (kırmızı oklarla gösterilen) uygulanan kuvvetin şematik gösterimi

Tüm analizlerde, uygulanan sınır şartları ve yükleme profilleri Dynaform ve LS-DYNA yazılımlarında aynı esaslarla tanımlanmış ve süreç boyunca herhangi bir değişikliğe izin verilmemiştir. Böylece, farklı iç basınç ve aksel besleme kombinasyonlarının tüp hidroşekillendirme prosesindeki etkileri, sistematik ve karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Uygulanan bu yaklaşım sayesinde hem literatürdeki hem de pratikteki proses koşullarının gerçeğe yakın biçimde modellenmesi sağlanmış; elde edilen sayısal sonuçların endüstriyel uygulanabilirliği ve bilimsel geçerliliği artırılmıştır.

3.5. Kullanılan Yazılım ve Donanım Altyapısı

Bu tez kapsamında yürütülen modelleme, analiz ve sonuç değerlendirme adımlarında, mühendislik alanında kabul görmüş güncel yazılım ve donanım altyapısı kullanılmıştır. Tüm süreçlerde hem akademik araştırmalarda hem de endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak tercih edilen, lisanslı ve teknik olarak yeterli programlar tercih edilmiştir.

Geometrik modelleme ve parça tasarımı için Siemens NX CAD yazılımı kullanılmıştır. Bu program, kompleks formların ve kalıp geometrilerinin hassasiyetle oluşturulmasına, teknik resimlerin ve montaj senaryolarının detaylı biçimde kurgulanmasına olanak tanımıştır. Ham burç modelinin hazırlanması, hedeflenen nihai

formun tanımlanması ve üst-alt kalıp blokları ile aksel besleme elemanlarının ayrı ayrı modellenmesi aşamalarının tamamında Siemens NX'in gelişmiş üç boyutlu modelleme araçlarından etkin şekilde yararlanılmıştır. Tüm CAD modelleri, analiz sürecine aktarım için uluslararası kabul gören .step formatında dışa aktarılmıştır.

Sayısal analizlerde ve mesh işlemlerinde ise, metal şekillendirme ve hidroşekillendirme simülasyonları için geliştirilmiş olan Dynaform ve LS-DYNA yazılımlarından yararlanılmıştır. Dynaform, sonlu elemanlar mesh'inin oluşturulmasında ve analizde kullanılacak süreç parametrelerinin tanımlanmasında etkin bir rol oynamıştır. Modeldeki tüm sınır şartları, temas koşulları, yükleme profilleri ve analiz senaryoları Dynaform ortamında detaylı biçimde belirlenmiştir. Ardından, dinamik şekil değişimi, karmaşık deformasyon bölgeleri ve malzeme davranışının gerçekçi şekilde incelenebilmesi için model, LS-DYNA analiz yazılımında simüle edilmiştir. LS-DYNA, yüksek çözünürlüklü ve doğrusal olmayan hesaplama kabiliyeti sayesinde, burç ve kalıp etkileşiminin hassas biçimde analiz edilmesine olanak sağlamıştır.

Tüm modelleme ve analiz çalışmaları, Windows 10 Pro (64 bit) işletim sistemi ile çalışan, Intel® Core™ i7-7700HQ 2.80 GHz işlemciye ve 16 GB RAM bellek kapasitesine sahip bir bilgisayar üzerinde yürütülmüştür. Bu donanım, kompleks üç boyutlu modellerin hızlıca hazırlanması, büyük sonlu elemanlar mesh'lerinin yönetilmesi ve yüksek çözünürlüklü analizlerin verimli şekilde tamamlanmasına yeterli olmuştur. Ayrıca, kullanılan bilgisayarın çok çekirdekli işlemci yapısı ve 64 bit işletim sistemi, analiz sürelerinin makul düzeyde tutulmasına katkı sağlamıştır.

Bu yazılım ve donanım altyapısı ile, tez kapsamında yürütülen tüm modelleme, simülasyon ve veri değerlendirme süreçleri; hem bilimsel literatürde önerilen teknik gereklilikleri karşılamış hem de gerçek endüstriyel uygulamalarla uyumlu olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Böylece, elde edilen analiz sonuçlarının güvenilirliği ve geçerliliği en üst seviyede tutulmuştur.

3.6. Varsayımlar ve Modelleme Sınırlamaları

Bu çalışmada gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizlerinin güvenilirliği ve geçerliliği için modelleme aşamasında birtakım varsayımlar ve sınırlamalar göz önünde bulundurulmuştur. Kullanılan yöntem ve parametreler hem literatürdeki kabul görmüş yaklaşımlara hem de pratik uygulamalara uyumlu olacak şekilde belirlenmiştir.

Öncelikle, analiz edilen burç ve kalıp geometrileri kusursuz ve ideal şekilli kabul edilmiştir. Gerçek üretim ortamında karşılaşılabilecek geometrik toleranslar, yüzey hataları veya mikro ölçekteki pürüzler dikkate alınmamıştır. Tüm yüzeylerin, modelleme sürecinde tanımlanan ölçülerle tam uyumlu olduğu varsayılmıştır.

Malzeme modeli olarak, burç için izotrop ve homojen bir yapı esas alınmıştır. Malzemenin akma, plastikleşme ve elastik modülleri literatürden veya üretici datasından alınan sabit değerler olarak modele tanımlanmıştır. Sıcaklık etkileri, zamanla malzeme özelliklerindeki değişimler ve üretim sonrası kalıntı gerilmeler analiz kapsamı dışında bırakılmıştır.

Analizlerde kalıp ve takım yüzeyleri tamamen rijit kabul edilmiştir; bu nedenle, kalıp elastikiyeti veya deformasyonu hesaba katılmamıştır. Böylece, kalıp ve takım elemanlarında meydana gelebilecek olası şekil değişimleri göz ardı edilmiş, analizlerin odak noktası yalnızca burç (tüp parça) üzerindeki şekil değişimi ve gerilme/gerinim dağılımı olmuştur.

Temas koşulları idealize edilmiş ve tüm analizlerde kalıp-burç arasında sürekli temas sağlanmıştır. Yüzeyler arasında herhangi bir boşluk, ayrılma veya penetrasyon durumu oluşmayacağı varsayılmıştır. Sürtünme katsayısı sabit ve düşük ($\mu = 0,05$) alınmış, bu değer proses boyunca değişmez kabul edilmiştir.

Ayrıca, analizlerde üretim ortamındaki sıcaklık, nem, malzeme kusurları, ön işlem veya ısıl işlem gibi çevresel ve proses kaynaklı etkiler de dikkate alınmamıştır. Simülasyonlar izotermal (sabit sıcaklıkta) ve durağan koşullarda yürütülmüştür.

Son olarak, sonlu elemanlar mesh yapısı oluşturulurken hem hesaplama verimliliği hem de çözüm doğruluğu dikkate alınmış; ancak çok ince veya karmaşık bölgelerde oluşabilecek lokal mesh bozulmaları göz ardı edilmiştir. Bu nedenle, elde edilen sonuçlar, gerçek prosesin davranışına oldukça yakın olsa da tamamen birebir sonuçlar üretmemesi mümkündür.

Tüm bu varsayımlar ve modelleme sınırlamaları, analizlerin hem bilimsel geçerliliğini hem de mühendislik uygulamaları için pratik değerini artırmak amacıyla tercih edilmiştir. Ancak gerçek üretim koşullarında karşılaşılabilecek ilave etkilerin, analiz sonuçları üzerinde kısmi sapmalara neden olabileceği unutulmamalıdır.

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde, tez kapsamında gerçekleştirilen sayısal analizlerin bulguları ayrıntılı biçimde sunulmakta ve elde edilen sonuçlar teknik ve bilimsel açıdan tartışılmaktadır. Farklı iç basınç ve aksenal besleme parametreleri altında yürütülen yedi ayrı analiz senaryosu değerlendirilmiştir; burç parçası üzerindeki şekil değiştirme, kalınlık dağılımı, gerilme ve üretim hatası potansiyeli gibi temel performans kriterleri incelenmiştir.

Her analiz senaryosu için, ilgili proses parametrelerinin burç üzerindeki etkisi görsel çıktılar ve tablo/grafik destekli olarak ayrı ayrı sunulmuş, bulguların mühendislik açısından anlamı özgün bir biçimde yorumlanmıştır.

Ayrıca, elde edilen sonuçlar; minimum kalınlık, maksimum Von Mises gerilme, plastik şekil değiştirme, burkulma ve yırtılma eğilimi gibi kritik başlıklar üzerinden karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Bölümün ilerleyen kısımlarında, farklı analiz parametrelerinin parça üzerindeki etkileri detaylı şekilde tartışılmış; bulguların literatürdeki benzer çalışmalarla örtüşen ve ayrışan yönleri vurgulanmıştır. Son olarak, analiz sonuçlarının endüstriyel uygulamalara ve parça tasarımına sağlayabileceği katkılar, mühendislik açısından öneriler şeklinde sunulmuştur.

4.1. Analiz Senaryoları ve Parametreleri

Bu tez çalışmasında, burç parçasının hidroşekillendirme süreci sırasında gösterdiği şekil değiştirme ve gerilme davranışını detaylı biçimde inceleyebilmek amacıyla yedi farklı analiz senaryosu oluşturulmuştur. Her bir senaryoda, endüstriyel uygulamalarda sıklıkla karşılaşılan proses parametreleri dikkate alınarak iç basınç ve aksenal besleme miktarı değiştirilmiştir; sürtünme katsayısı ise sabit tutulmuştur.

Analizlerde kullanılan tüm parametreler aşağıdaki tabloda özetlenmiştir. Senaryolar, iki farklı maksimum iç basınç seviyesi (100 MPa ve 200 MPa) ile sıfırdan altı milimetreye kadar değişen aksenal besleme miktarları altında yürütülmüş, sürtünme katsayısı (μ) tüm analizlerde 0,05 olarak alınmıştır.

Her analizde, modelleme ve mesh yapısı sabit tutulmuş; yalnızca proses parametreleri değiştirilerek farklı yükleme koşullarının burç üzerindeki etkisi sistematik biçimde karşılaştırılmıştır.

Aşağıdaki çizelgede, gerçekleştirilen analizlerin özet parametreleri sunulmaktadır:

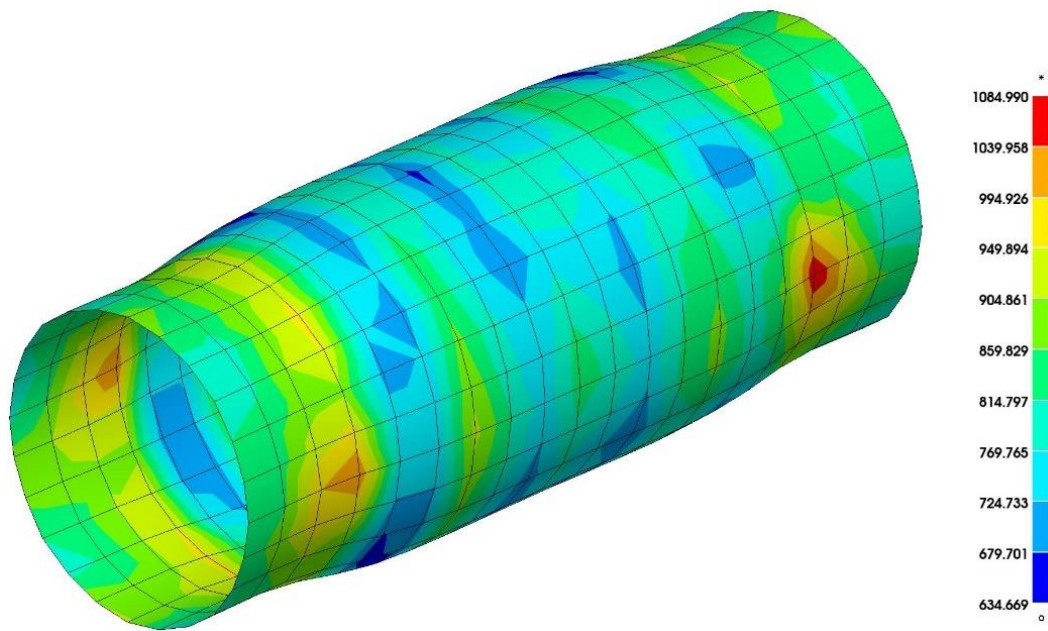
Çizelge 4.1. Araştırmada kullanılan analiz senaryoları ve temel proses parametreleri

Senaryo No	İç Basınç (MPa)	Eksenel Besleme (mm)	Sürtünme Katsayısı (μ)
1	100	0	0,05
2	100	2	0,05
3	100	4	0,05
4	200	0	0,05
5	200	2	0,05
6	200	4	0,05
7	200	6	0,05

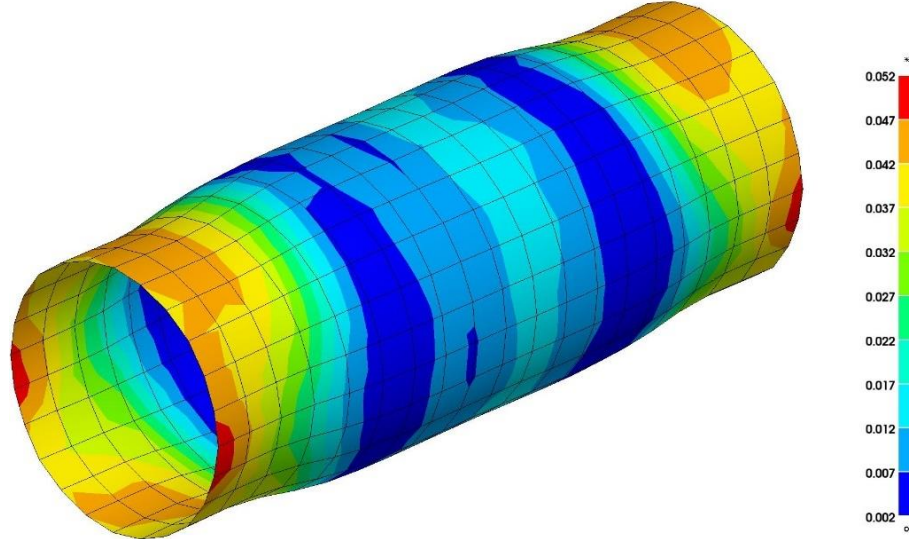
4.2. Analiz Sonuçları

4.2.1. 100 MPa basınç ve eksenel beslemesiz

Maksimum gerilme değeri, 1084,99 MPa ile boru uçlarına yakın bölgelerde ve lokal deformasyonun yoğun olduğu alanlarda gözlemlenmektedir (Şekil 4.1.). Burcun ortasında ise nispeten daha düşük gerilme değerleri mevcuttur. Bu durum, uçlarda kalıp ile temasın ve geometrik kısıtlamaların etkisiyle gerilme yığılmalarının oluştuğunu göstermektedir.

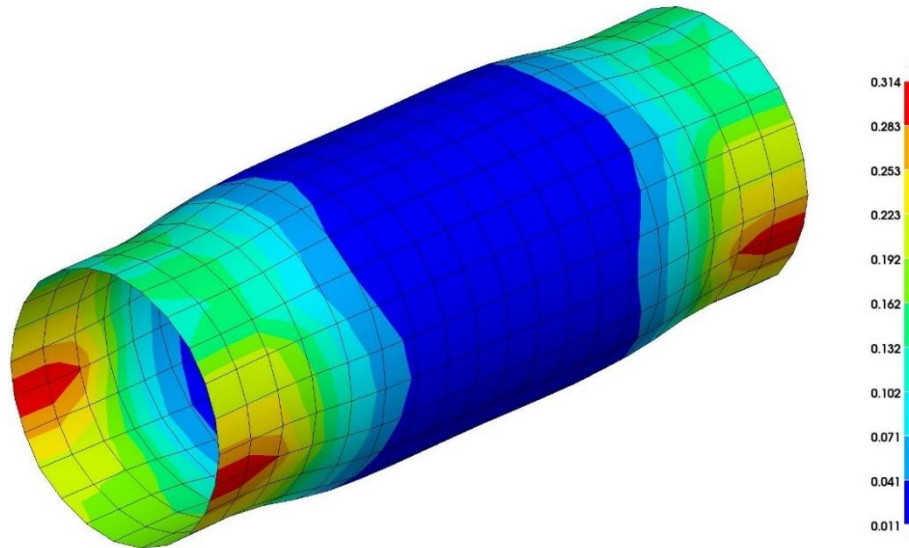


Şekil 4.1. 100 MPa iç basınç ve beslemesiz durumda elde edilen Von Mises gerilme dağılımı (MPa)



Şekil 4.2. 100 MPa iç basınç ve beslemesiz durumda elde edilen ana plastik şekil değiştirme dağılımı

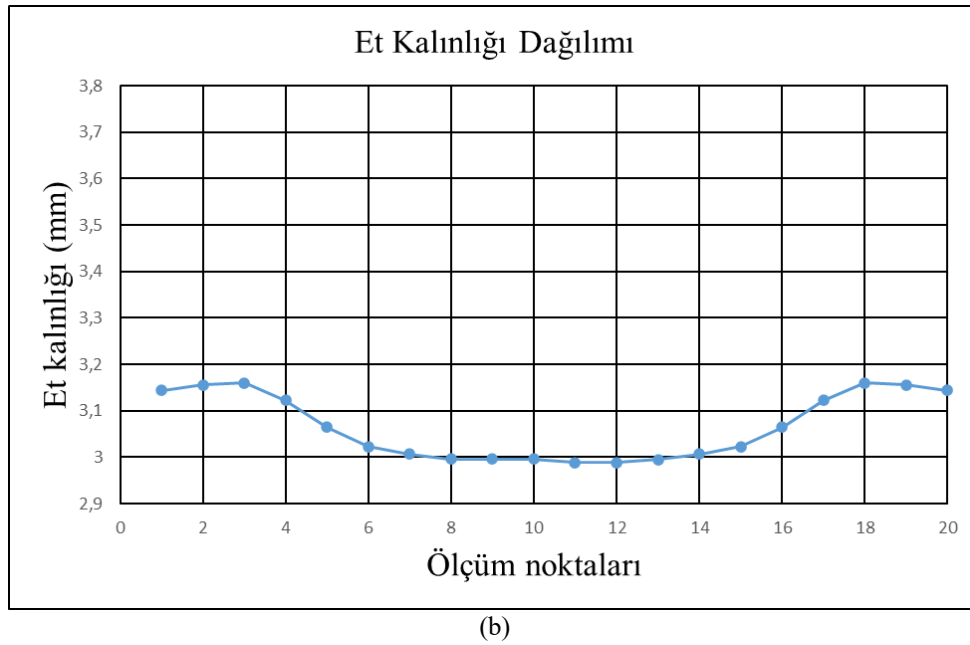
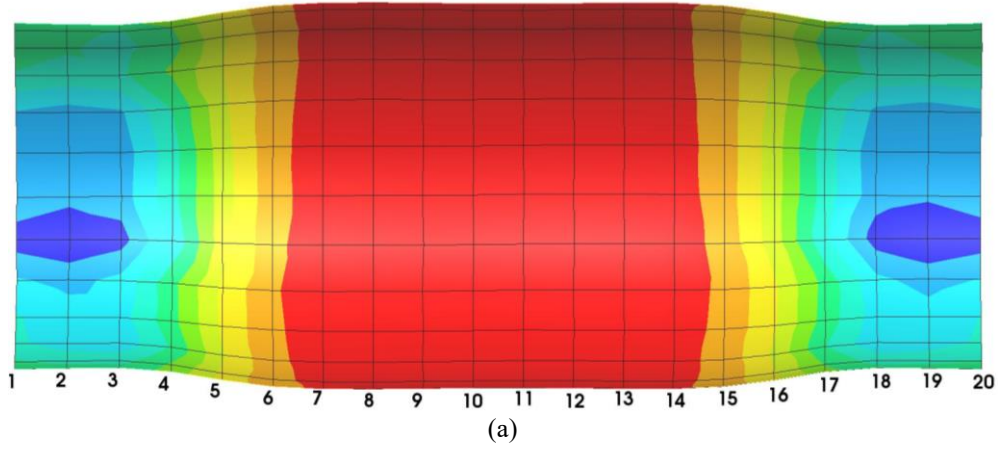
En yüksek şekil değiştirme oranları, boru uçlarında ve orta bölgede gözlenirken, en düşük şekil değiştirme ise borunun kalıp ile en fazla temas eden alanlarında gerçekleşmiştir. Şekil değiştirme değerlerinin genel olarak düşük aralıkta kalması, düşük iç basınç ve beslemesiz koşullarda sınırlı bir plastik deformasyon meydana geldiğini göstermektedir (Şekil 4.2).



Şekil 4.3. 100 MPa iç basınç ve beslemesiz durumda elde edilen efektif plastik şekil değiştirme haritası

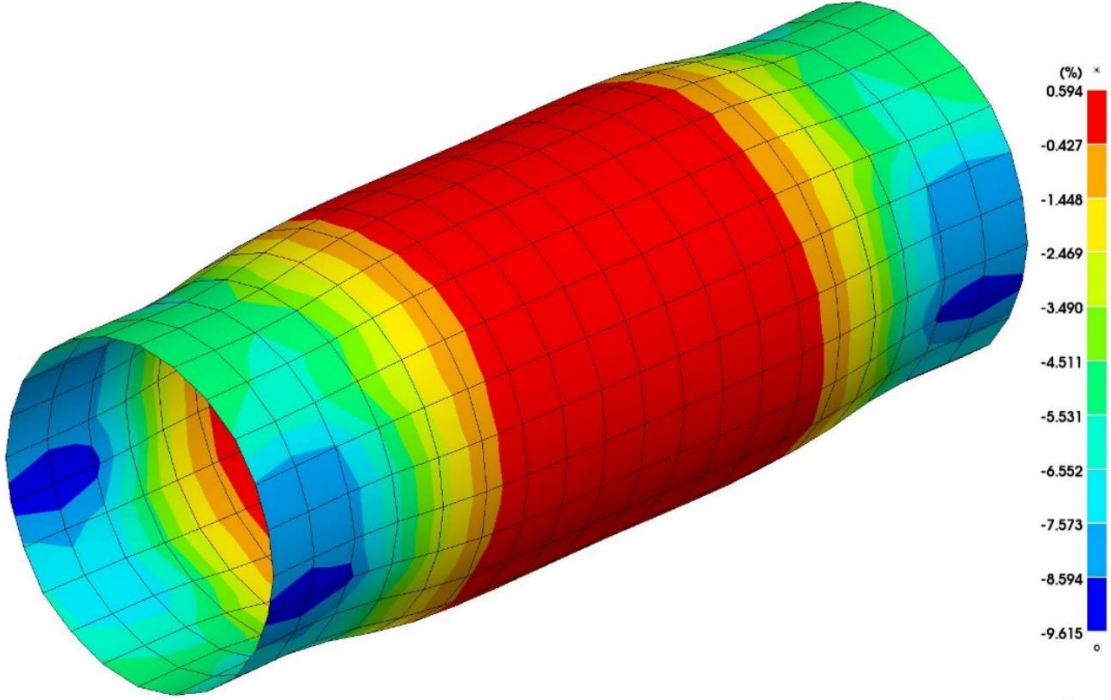
Plastik şekil değiştirme değerlerinin, özellikle boru uçlarında ve burç duvarının kalıptan ayrıldığı bölgelerde arttığı gözlemlenmektedir (Şekil 4.3). Orta kısımda ise, plastik şekil değiştirme minimum düzeydedir. Bu durum, düşük iç basınç ve aksel

besleme uygulanmayan koşullarda, deformasyonun daha çok uçlarda toplandığını ve parça merkezinde yeterli akışın oluşmadığını göstermektedir.



Şekil 4.4. 100 MPa iç basınç ve beslemesiz durumda et kalınlığı dağılımı. (a) Ölçüm noktalarının dağılımı. (b) Et kalınlığı dağılım grafiği.

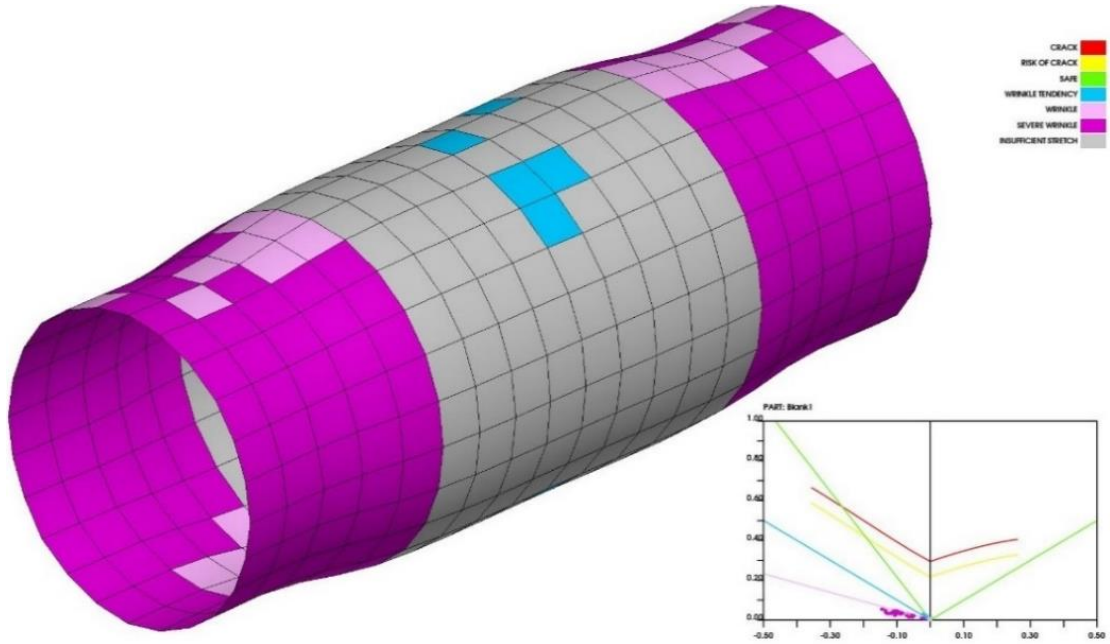
Şekil 4.4'te, 100 MPa iç basınç ve beslemesiz koşullarda şekillendirilen tüp boyunca ölçülen et kalınlığı dağılımı sunulmaktadır. Nominal kalınlığın 3 mm olduğu parçada, uç bölgelerde et kalınlığının 3,14-3,16 mm'ye çıktığı, orta bölgede ise 2,99 mm'ye kadar düştüğü görülmektedir. Bu durum, merkezde belirgin bir incelme, uçlarda ise malzeme birikimi olduğunu göstermektedir. Sadece iç basınç ile şekillendirme uygulandığında, optimum et kalınlığı dağılımı elde edilememekte ve parça merkezinde kalınlık kaybı ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla, istenen kalite ve geometrik hassasiyet için aksenal beslemenin de sürece dahil edilmesi gerekmektedir.



Şekil 4.5. 100 MPa iç basınç ve beslemesiz durumda elde edilen oransal et kalınlığı değişimi

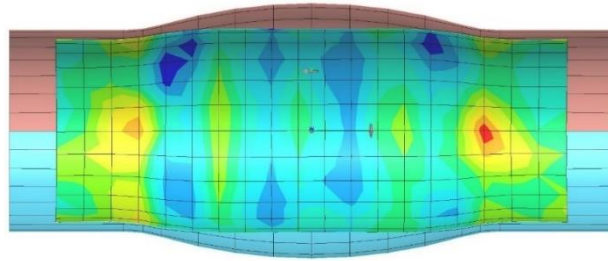
Renk skalasına göre, kırmızı bölgeler şekillendirme işlemi sonrasında oransal olarak en düşük et kalınlığı azalmasının gerçekleştiği alanları (yaklaşık %0,6'ya kadar) göstermektedir. Mavi ile gösterilen uç bölgelerde ise, nominal 3 mm başlangıç kalınlığına göre yer yer yaklaşık %9,6 oranında bir et kalınlığı artışı tespit edilmektedir. Bu durum, özellikle boru uçlarında gözlenen ve şekillendirme sırasında aksel kuvvetin yetersizliğinden veya lokal buruşmalardan kaynaklandığı düşünülen, çevresel olarak homojen dağılmayan bir malzeme birikimini işaret etmektedir.

Parçanın orta bölgesinde ve gövde boyunca ağırlıklı olarak kırmızı ve sarı renkler hâkimdir; bu alanlarda et kalınlığı değişimi son derece sınırlı olup, malzemenin kontrollü ve stabil bir şekilde şekil aldığı anlaşılmaktadır. Uçlarda ise lokal et kalınlığı artışları, optimum olmayan malzeme akışının ve şekillendirme parametrelerinin uç bölgelerde yeterli homojenlik sağlamadığını göstermektedir. Bu, özellikle aksel besleme olmadan gerçekleştirilen şekillendirme süreçlerinde uç bölgelerde kalınlık homojenliğinin sağlanmasının güç olduğunu, kalıp ve proses tasarımında bu etkiyi azaltacak önlemler alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 4.6. 100 MPa iç basınç ve beslemesiz durumda elde edilen şekillendirme limit diyagramı (ŞLD)

Mor ile gösterilen alanlar güvenli, mavi bölgeler ise burkulma eğilimi (wrinkle tendency) altında kalan bölgeleri temsil etmektedir. Parça genelinde çatlama veya yırtılma riski gözlenmemiştir; ancak uçlarda burkulma potansiyeli, orta bölgede ise yüksek güvenlik düzeyi dikkat çekmektedir.



Şekil 4.7. 100 MPa iç basınç ve beslemesiz durumda, şekillendirme işlemi sonunda burç parçasının kalıp içindeki konumunu ve kalıp-parça temasını gösteren kesit görünüşü

Görselde, iç basıncın yeterli seviyede olmaması nedeniyle burç parçasının kalıp duvarlarının şekline tam olarak uyum sağlayamadığı açıkça görülmektedir. Özellikle orta bölgede kalıp ile temas sağlanamaması sonucu şekillendirme tamamlanamamış, parça yüzeyinde belirgin bir gerilme ve deformasyon eksikliği oluşmuştur. Bu durum, düşük iç basınç ve aksel besleme olmaksızın karmaşık geometrinin üretiminde kalıp doldurma başarısının sınırlı kaldığını göstermektedir.

100 MPa iç basınç ve aksel beslemenin uygulanmadığı analiz sonucunda, burç parçasında şekil değiştirme ve deformasyonun büyük ölçüde sınırlı kaldığı gözlemlenmiştir. Von Mises gerilme dağılımında en yüksek değerler parça uçlarında ve

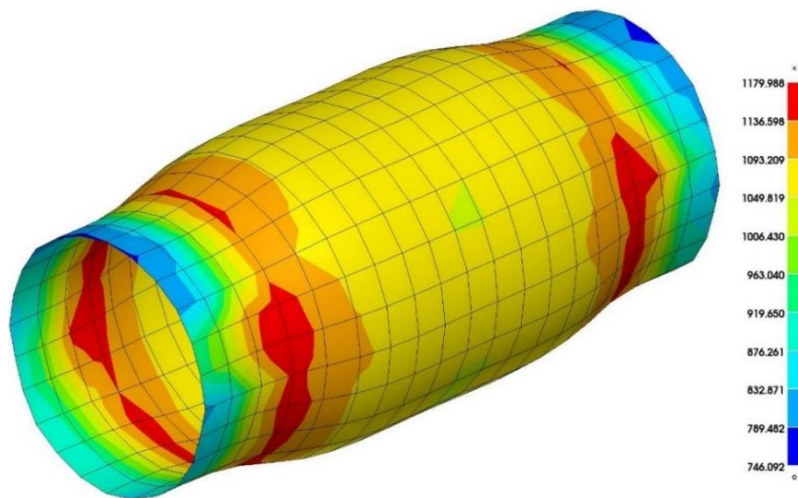
kalıp ile temas noktalarında yoğunlaşırken, orta bölgede gerilme ve plastik şekil değiştirme değerleri oldukça düşük seviyede kalmıştır. Benzer şekilde, ana şekil değiştirme ve plastik şekil değiştirme oranları da uç bölgelerde lokal olarak artmakta, ancak merkeze yaklaştıkça önemli ölçüde azalmaktadır.

Kalınlık analizinde, minimum kalınlık kaybının borunun orta bölgesinde sınırlı olduğu ve uçlarda neredeyse başlangıç kalınlığını koruduğu tespit edilmiştir. Şekillendirme limit diyagramı sonuçları, parça genelinde güvenli bölgelerin yaygın olduğunu, ancak uçlarda hafif burkulma eğilimi görüldüğünü ortaya koymaktadır.

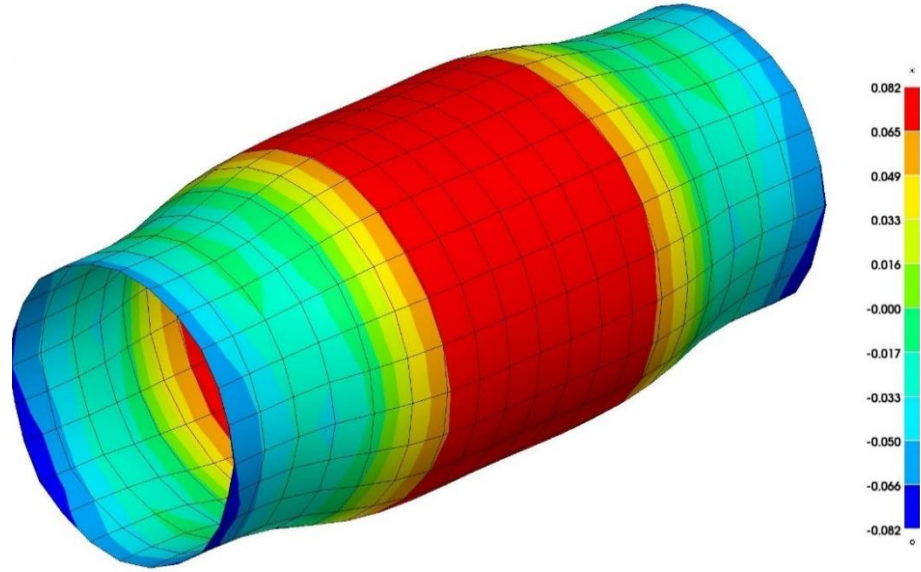
Kritik olarak, bu senaryoda uygulanan düşük iç basınç ve aksel besleme eksikliği nedeniyle burç parçasının kalıp formunu tam olarak almadığı, kalıp ile temasın sadece uçlarda sağlanabildiği, istenen geometrinin elde edilemediği tespit edilmiştir. Bu sonuç, endüstriyel olarak karmaşık parça geometrilerinin başarılı bir şekilde üretilebilmesi için daha yüksek iç basınç ve/veya aksel besleme uygulanmasının gerekli olduğunu göstermektedir.

4.2.2. 100 MPa basınç ve 2 mm aksel besleme

Şekil 4.8’de maksimum Von Mises gerilme değeri 1179,99 MPa seviyesine ulaşmıştır. Gerilme dağılımında, özellikle boru uçlarında ve aksel besleme ile deformasyonun yoğunlaştığı bölgelerde belirgin bir artış gözlenmektedir. Aksel besleme uygulaması, gerilmenin merkez bölgeye daha homojen dağılmasını sağlamış ve uçlardaki lokal gerilme yığılmalarını daha net hale getirmiştir.

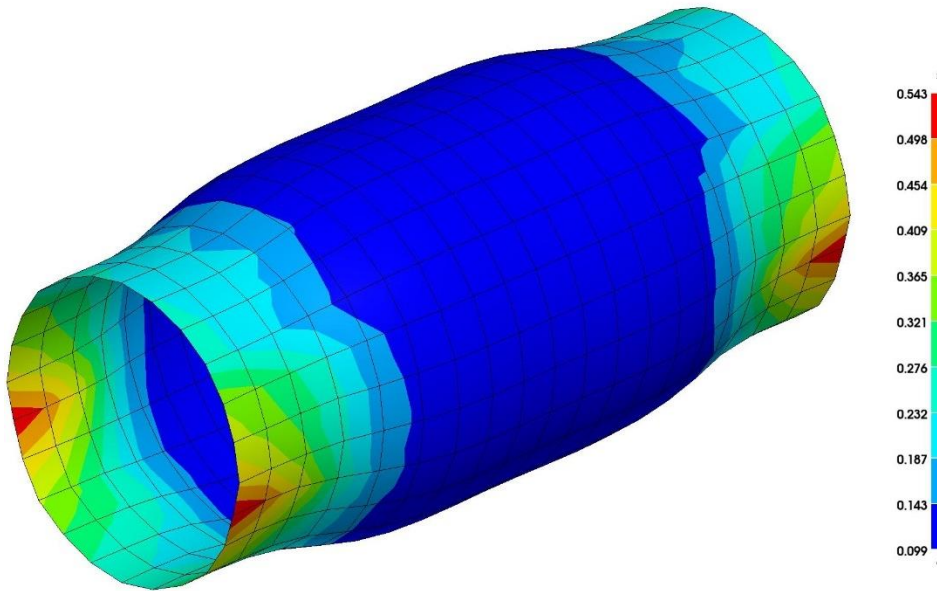


Şekil 4.8. 100 MPa iç basınç ve 2 mm besleme uygulanmış durumda elde edilen Von Mises gerilme dağılımı (MPa)



Şekil 4.9. 100 MPa iç basınç ve 2 mm besleme uygulanmış durumda elde edilen ana şekil değiştirme dağılımı

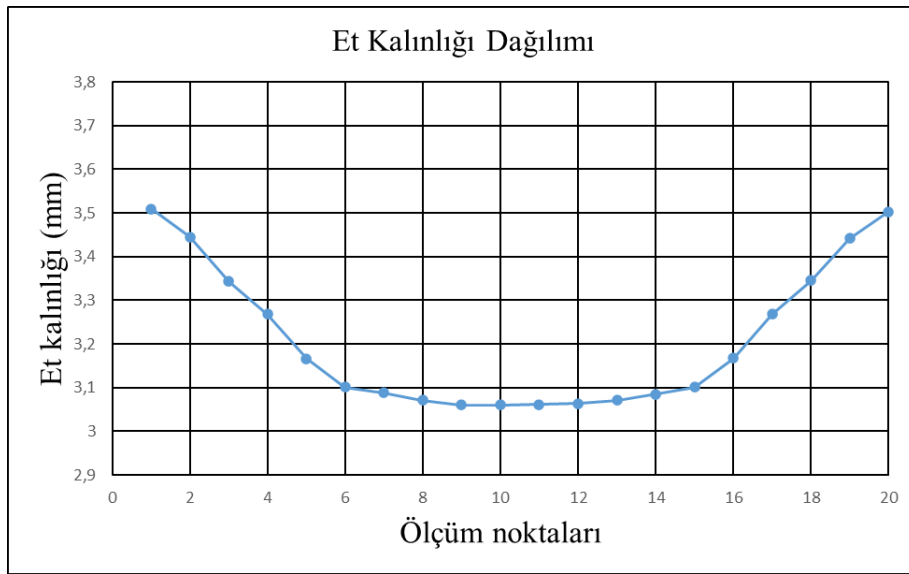
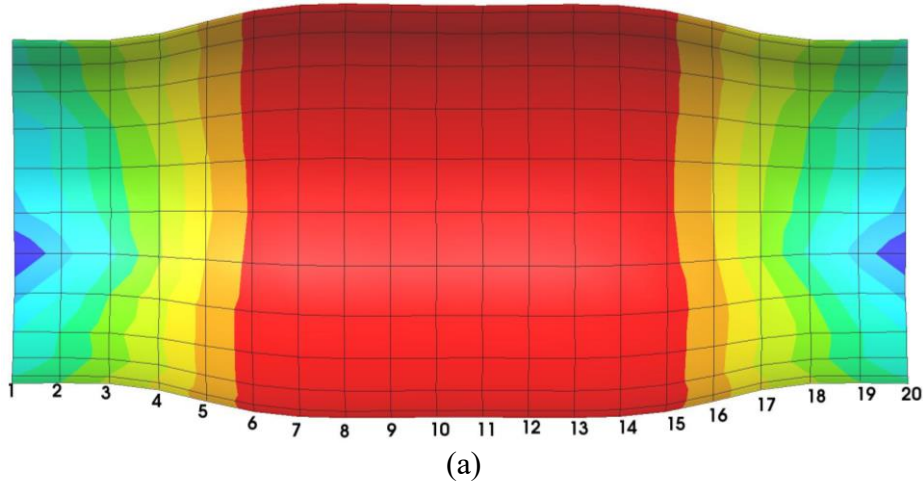
Şekil değiştirme değerlerinin borunun orta bölgesinde maksimuma ulaştığı ve uçlara doğru azaldığı görülmektedir. Eksenel beslemenin etkisiyle, orta bölgede homojen bir plastik deformasyon sağlanmış; bu, parça boyunca daha dengeli bir şekil değiştirme profiline neden olmuştur. Uç bölgelerde ise şekil değiştirme minimum seviyede kalmıştır.



Şekil 4.10. 100 MPa iç basınç ve 2 mm besleme uygulanmış durumda elde edilen maksimum plastik şekil değiştirme dağılımı

Plastik şekil değiştirme, en yüksek düzeye yine boru uçlarında ve özellikle kalıp ile temasın yoğunlaştığı alanlarda ulaşmıştır. Orta bölgede ise plastik şekil değiştirme

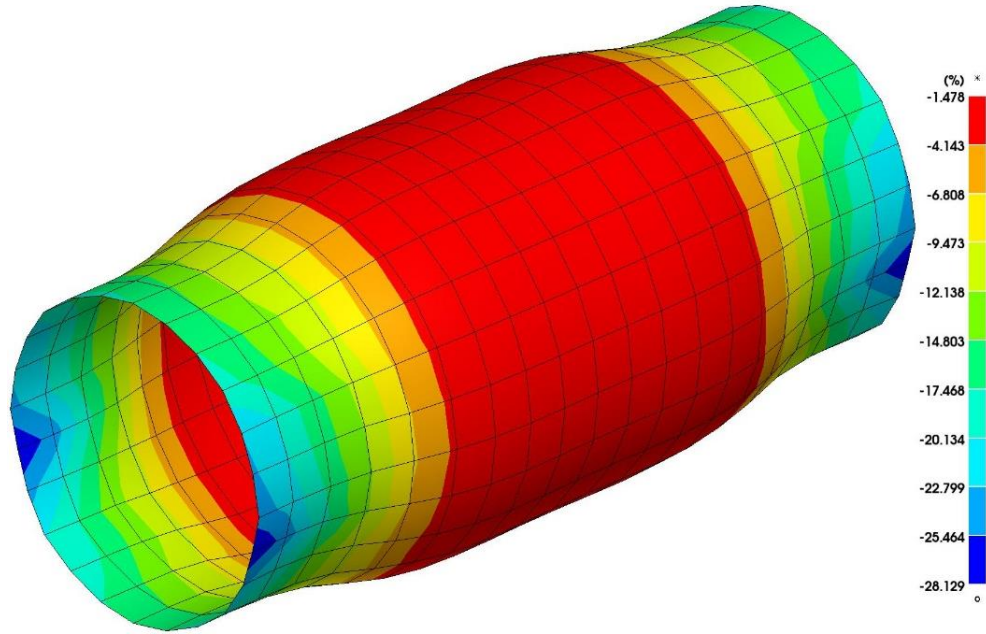
değerleri düşük kalmış; aksel beslemenin artırılmasıyla uç bölgelerde deformasyonun yoğunlaştığı, merkezde ise nispeten daha düşük plastik akış gerçekleştiği anlaşılmıştır. Bu, deformasyonun parça boyunca dengeli dağılmadığını göstermektedir.



Şekil 4.11. 100 MPa iç basınç ve 2 mm besleme uygulanmış durumda elde edilen et kalınlığı dağılımı. (a) Ölçüm noktalarının dağılımı. (b) Et kalınlığı dağılım grafiği.

Şekil 4.11’de görüldüğü üzere, 100 MPa iç basınç ve 2 mm aksel besleme uygulanan durumda tüp boyunca et kalınlığı dağılımında uç bölgelerde belirgin bir kalınlık artışı, orta bölgede ise sınırlı bir incelme gözlemlenmektedir. Nominal kalınlık 3 mm olmakla birlikte, uç noktalarda kalınlık 3,5 mm’ye kadar yükselmiş, merkez bölgede ise değerler 3,05 mm civarına gerilemiştir. Aksel besleme sayesinde orta bölgedeki incelme, sadece iç basınç uygulanan senaryoya göre daha kontrollü olmuş, uçlarda ise belirgin bir malzeme birikimi gerçekleşmiştir. Bu sonuçlar, düşük miktarda aksel

beslemenin merkezdeki incelmeyi azaltmakla birlikte uç bölgelerde kalınlık artışını artırdığını ve optimum et kalınlığı dağılımı için proses parametrelerinin dikkatle belirlenmesi gerektiğini göstermektedir.

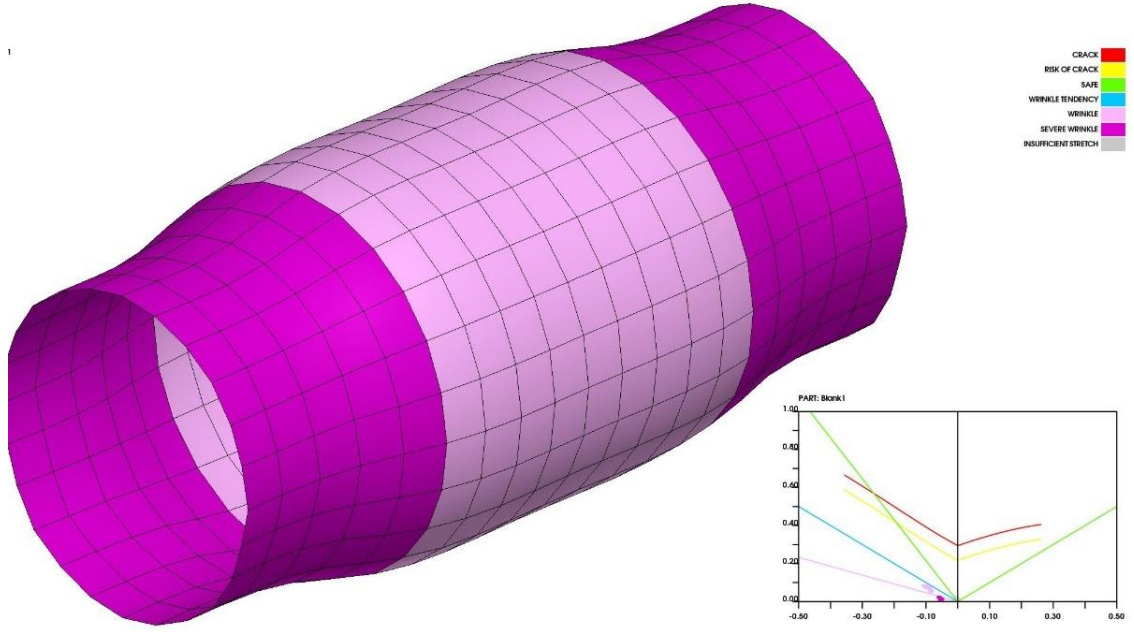


Şekil 4.12. 100 MPa iç basınç ve 2 mm besleme durumunda elde edilen oransal et kalınlığı değişimi

Bu analizde, tüpün farklı bölgelerinde gözlemlenen oransal kalınlık değişimleri, şekillendirme sırasında malzeme akışının ve aksel beslemenin kalınlık üzerindeki etkilerini ortaya koymaktadır. Görselde, kırmızı ve turuncu bölgeler minimum kalınlık değişimini (nominal kalınlığa yakınlık), mavi ve yeşil bölgeler ise maksimum oransal kalınlık artışını göstermektedir.

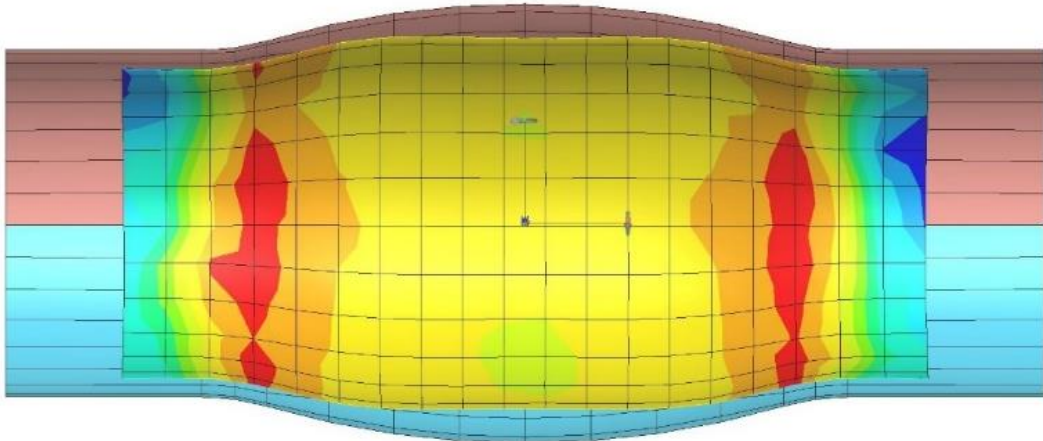
Özellikle uç kısımlarda, maviyle işaretlenen alanlarda yerel olarak belirgin bir et kalınlığı artışı meydana gelmiştir. Buradaki artışın sebebi, aksel besleme miktarının düşük tutulması nedeniyle, şekillendirme sırasında malzemenin merkezden uçlara doğru yeterince yönlendirilmemesi ve bu bölgelerde malzeme birikimi oluşmasıdır. Bu birikim, şekil verme işlemi sırasında uçlarda buruşma riskini artırırken, aynı zamanda nominal et kalınlığının üzerine çıkan lokal kalınlık artışları ile sonuçlanmıştır.

Parçanın orta bölgesinde ise et kalınlığı nominal değere oldukça yakın korunmuş, ciddi bir incelmeye veya kalınlaşma gözlemlenmemiştir. Bu durum, düşük aksel beslemenin orta bölgede istenen kalınlık homojenliğinin büyük ölçüde sağladığını, ancak uçlarda malzeme kontrolünün zorlaştığını göstermektedir.



Şekil 4.13. 100 MPa iç basınç ve 2 mm besleme uygulanmış durumda elde edilen şekillendirme limit diyagramı (ŞLD) ve burç yüzeyindeki şekillendirme bölgeleri

Parça genelinde mor ile gösterilen alanlar güvenli, açık pembe bölgeler ise güvenlik sınırına yaklaşan bölgeleri temsil etmektedir. Uçlarda ve orta bölgede çatlama, yırtılma veya burkulma riski oluşmamış, tüm bölgeler güvenli deformasyon sınırları içerisinde kalmıştır. Eksenel beslemenin eklenmesiyle birlikte güvenli bölge yüzdesi artmış, şekillendirme başarısı yükselmiştir.



Şekil 4.14. 100 MPa iç basınç ve 2 mm besleme durumunda, şekillendirme işlemi sonunda burç parçasının kalıp içindeki konumunu ve kalıp-parça temasını gösteren kesit görünüşü

Gerilme dağılımı, merkez bölgede homojen şekilde artarken, özellikle uç kısımlarda ve kalıp ile temas bölgelerinde maksimum seviyelere ulaşmıştır. Eksenel

beslemenin eklenmesiyle birlikte, önceki senaryoya göre merkezde daha yüksek ve dengeli bir gerilme profili elde edilmiştir. Bu, parçanın kalıp formuna uyumunun ve şekillendirme başarısının arttığını göstermektedir.

100 MPa iç basınç ve 2 mm aksenal besleme uygulanan analizde, önceki beslemesiz senaryoya göre burç parçasında deformasyonun hem miktarı hem de homojenliği belirgin biçimde artmıştır. Von Mises gerilme dağılımı ve şekil değiştirme analizlerinde, merkez bölgede daha yüksek ve dengeli bir stres ve deformasyon profili elde edilmiştir. Aksenal beslemenin katkısıyla, malzeme akışı ve plastik şekil değiştirme borunun ortasında yoğunlaşmış; uç bölgelerde ise gerilme yığılmaları devam etmekle birlikte, genel olarak şekillendirme başarısı artmıştır.

Kalınlık dağılımı sonuçlarına göre, minimum kalınlık kaybı orta bölgede gerçekleşmiş ve uçlarda başlangıç kalınlığına yakın değerler korunmuştur. Şekillendirme limit diyagramında ise, parça genelinde güvenli deformasyon aralığı sağlanmış; çatlama, burkulma veya yırtılma riski tespit edilmemiştir.

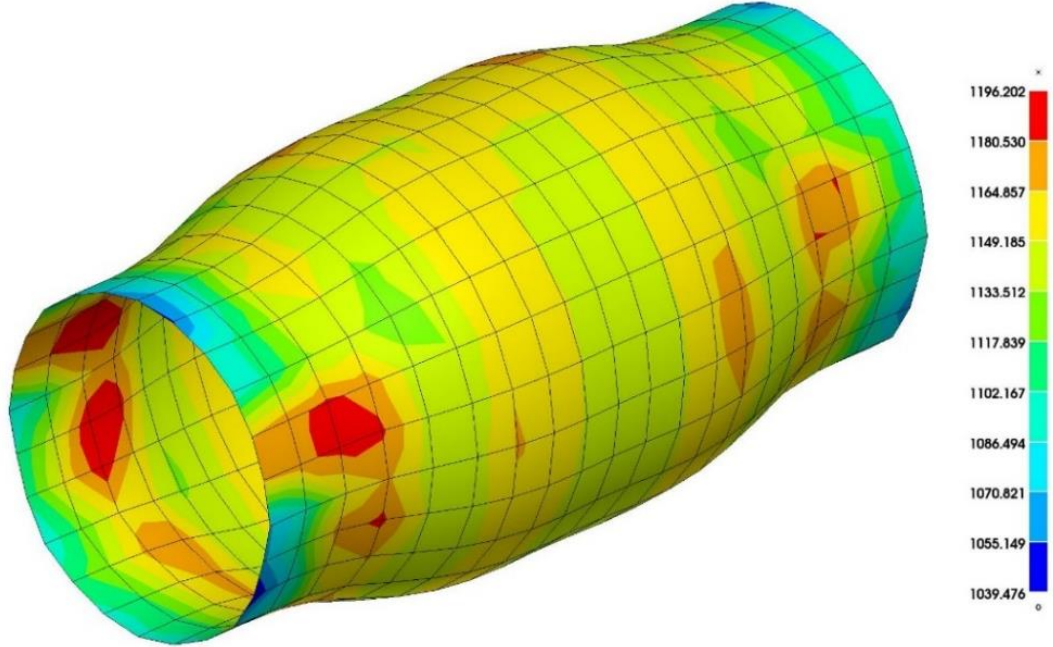
Bu senaryoda uygulanan aksenal besleme, parça üzerinde hem şekil bütünlüğünü hem de kalıp doldurma başarısını önemli ölçüde artırmış; düşük iç basınç altında dahi burç geometrisinin elde edilmesine katkı sağlamıştır.

4.2.3. 100 MPa basınç ve 4 mm aksenal besleme

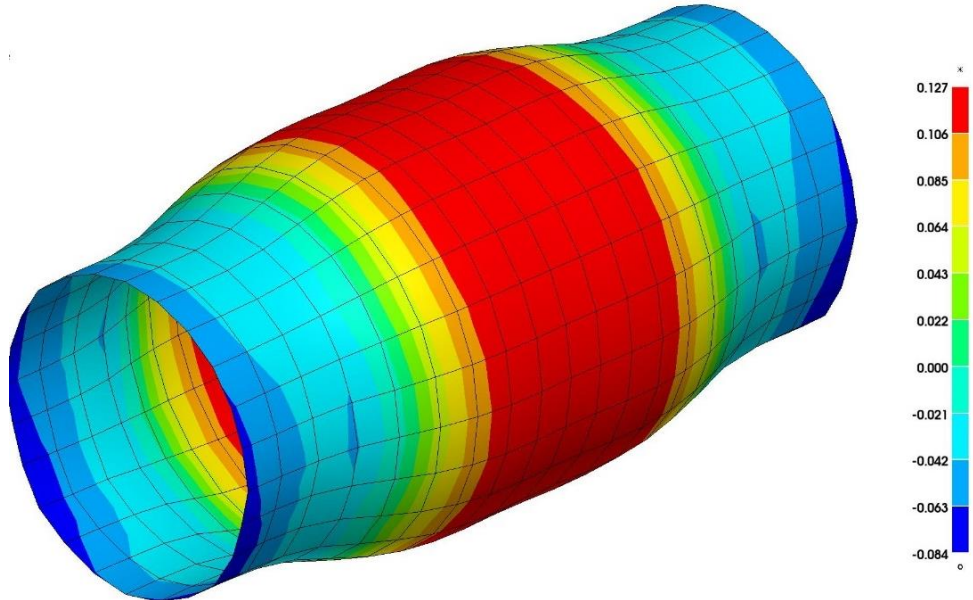
Şekil 4.15'te 100 MPa iç basınç ve 4 mm aksenal besleme uygulanarak gerçekleştirilen analiz sonucunda elde edilen Von Mises gerilme dağılımı sunulmaktadır. Simülasyon çıktısına göre, parçanın yüzeyinde oluşan maksimum Von Mises gerilme değeri 1196,20 MPa'ya ulaşmıştır. Bu değer, şekillendirme sürecinde lokal bölgelerde ciddi plastik deformasyonların meydana geldiğini ve malzeme üzerinde yoğun bir iç gerilme birikimi oluştuğunu göstermektedir.

Gerilme dağılımının genel yapısı incelendiğinde, aksenal beslemenin artırılmasının parça yüzeyinde daha homojen bir gerilme yayılımı sağladığı görülmektedir. Özellikle parçanın merkez bölgelerinde nispeten dengeli bir dağılım gözlenirken, uç kısımlarda ve geometrik karmaşıklığın arttığı lokal deformasyon alanlarında gerilme yığılmaları dikkate değerdir. Bu yığılmalar, plastik şekil değişiminin kontrolsüz bölgelerde yoğunlaştığını ve kalınlık kaybı ya da potansiyel kopma gibi üretim hatalarının oluşabileceğini göstermektedir. Ayrıca, aksenal beslemenin etkisiyle malzeme akışının yönlendirilmesi, şekil bütünlüğünü koruma açısından pozitif katkı sunarken,

yüksek besleme değerleri altında uç kısımlarda gerilme gradyanlarının keskinleşmesine neden olabilmektedir. Bu durum, karmaşık şekil geometrisine sahip parçaların şekillendirilmesinde, proses parametrelerinin dikkatli şekilde optimize edilmesi gerektiğine işaret etmektedir.

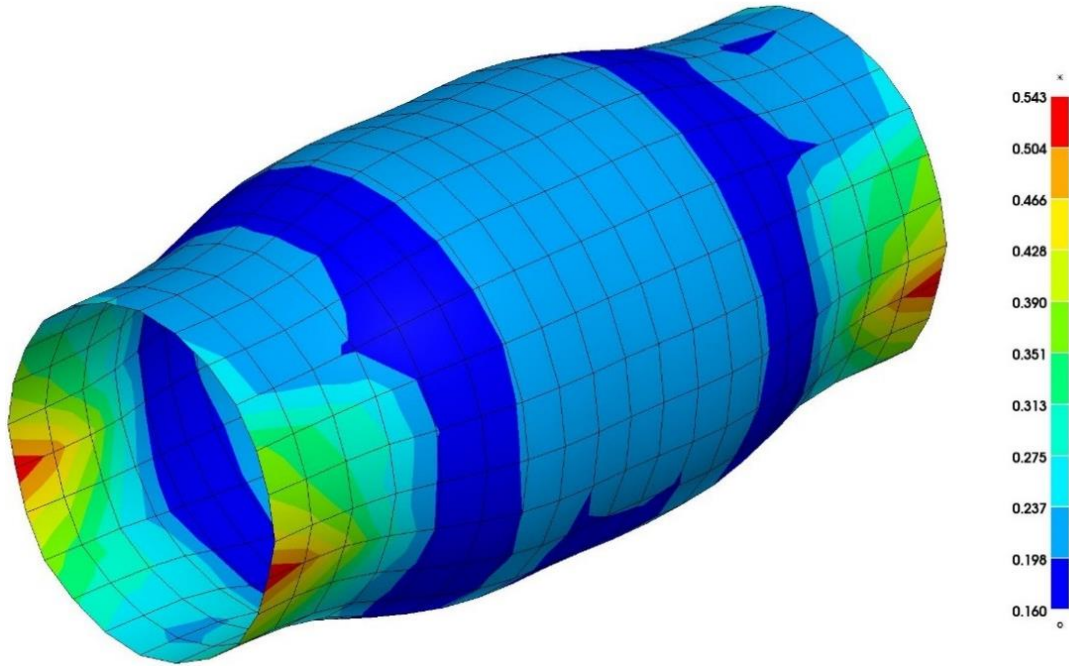


Şekil 4.15. 100 MPa iç basınç ve 4 mm besleme durumunda elde edilen Von Mises gerilme dağılımı (MPa)



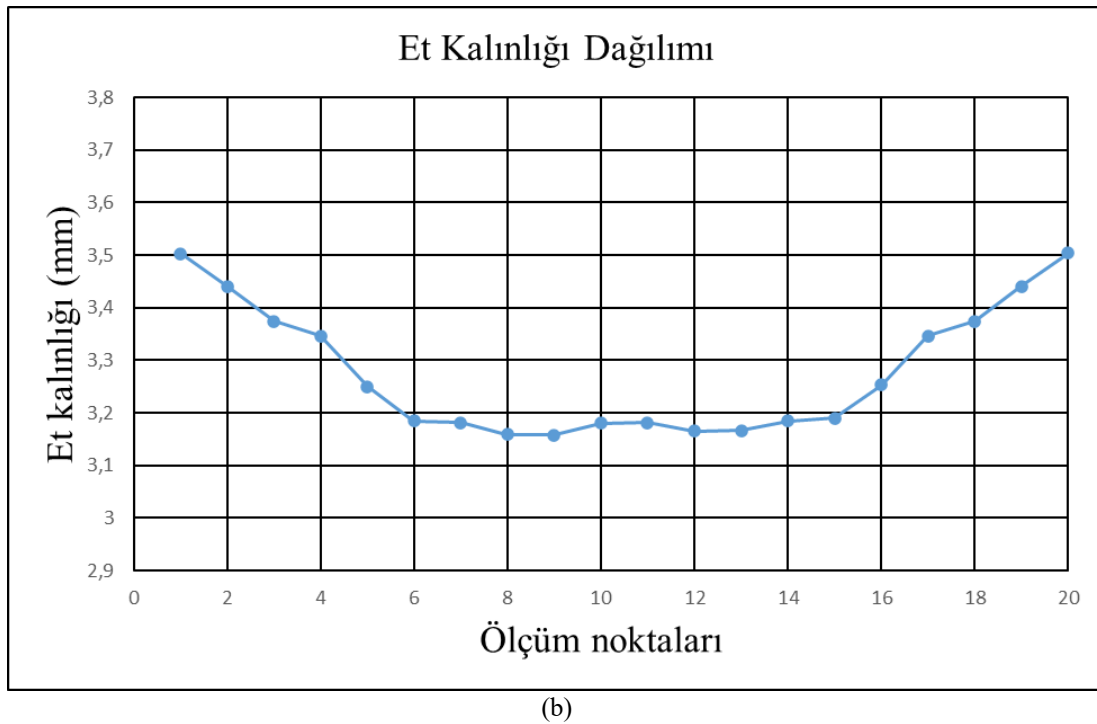
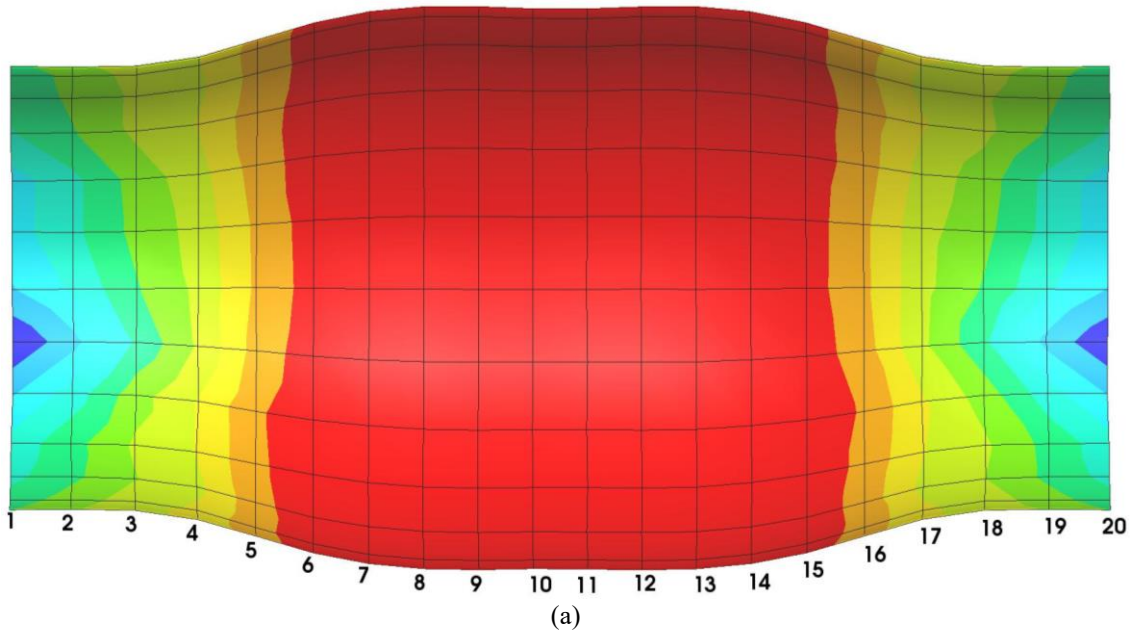
Şekil 4.16. 100 MPa iç basınç ve 4 mm besleme durumunda elde edilen ana plastik şekil değiştirme dağılımı

Şekil değiştirme değerleri, borunun orta bölgesinde maksimum seviyeye ulaşmış, uçlardan merkeze doğru kademeli bir artış göstermiştir (Şekil 4.16.). Eksenel beslemenin 4 mm'ye çıkarılması ile, plastik deformasyonun büyük bölümü parça merkezinde toplanmış ve homojen bir Şekil değiştirme profili elde edilmiştir. Bu sonuç, parça boyunca malzeme akışının ve Şekil değişiminin daha verimli yönetildiğini göstermektedir.



Şekil 4.17. 100 MPa i basınç ve 4 mm besleme durumunda elde edilen efektif plastik Şekil değiştirme haritası

Plastik Şekil değiştirme değerleri, özellikle boru uçlarında ve orta bölgedeki genişleme alanlarında belirgin bir artış sergilemiştir. Bu artış, yüksek i basınç altında malzemenin akma davranışının lokal olarak farklılaştığını ve plastisitenin heterojen bir dağılım gösterdiğini ortaya koymaktadır. Eksenel beslemenin 4 mm'ye çıkarılmasıyla, deformasyonun parça boyunca daha homojen bir Şekilde dağıldığı gözlemlenmekle birlikte, kritik bölgelerde yoğunlaşan plastik Şekil değiştirme alanları dikkat çekmektedir. Bu durum, malzemenin akış kinematikiğinin ve deformasyon mekanizmalarının geometrik sınırlamalardan önemli lde etkilendiğine işaret etmektedir. Ayrıca, elde edilen deformasyon dağılımının, burç formunun oluşum sürecinde malzeme verimliliğini artıracak Şekilde optimize edildiği ve plastik deformasyonun kontrollü bir Şekilde yönlendirildiği anlaşılmaktadır.

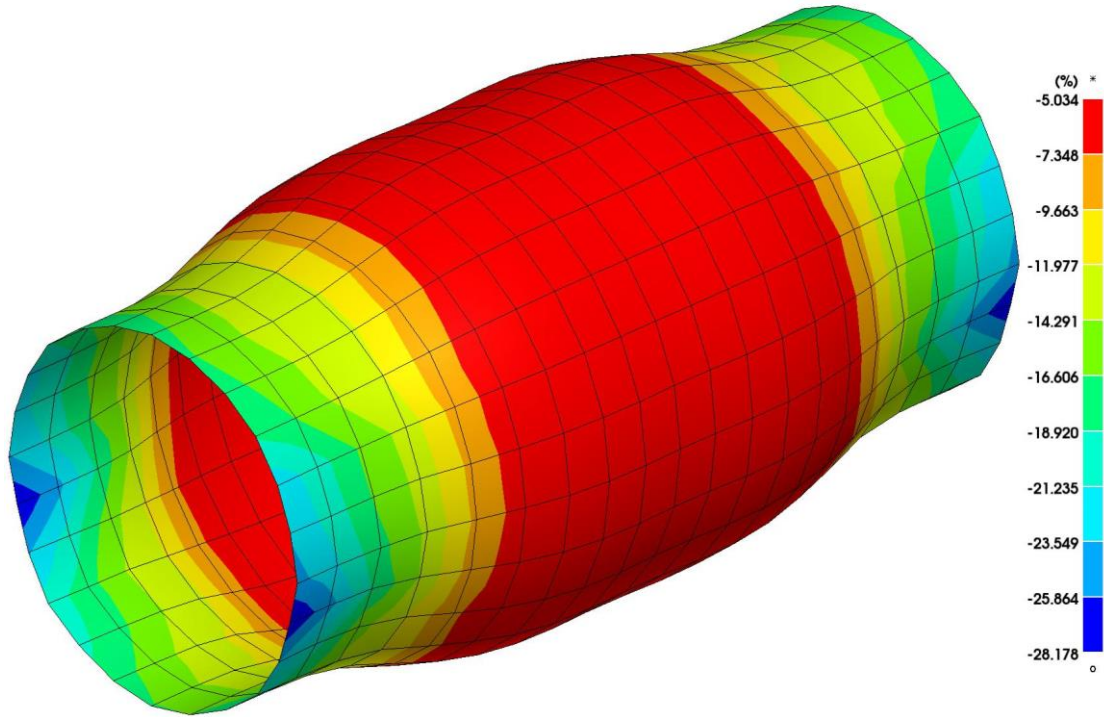


Şekil 4.18. 100 MPa iç basınç ve 4 mm besleme durumunda elde edilen et kalınlığı dağılımı. (a) Ölçüm noktalarının dağılımı. (b) Et kalınlığı dağılım grafiği.

Şekil 4.18’da 100 MPa iç basınç ve 4 mm aksel besleme koşullarında elde edilen et kalınlığı dağılımı, artan aksel beslemenin şekillendirme sürecine etkisini net bir biçimde ortaya koymaktadır. Ölçüm noktalarında, özellikle uç bölgelerde belirgin bir kalınlık artışı gözlenirken, orta bölgede kalınlık değerleri nispeten homojen ve nominal değerlerin hemen altında seyretmektedir. Uçlardaki maksimum kalınlık yaklaşık 3,5 mm’ye ulaşırken, orta kısımda değerler 3,1 mm civarında sabitlenmektedir. Bu sonuçlar, aksel

besleme miktarının artmasıyla birlikte malzeme akışının daha çok boru uçlarına yöneldiğini ve bu bölgelerde birikim oluşturduğunu göstermektedir. Özellikle, önceki senaryolara göre merkez bölgedeki incelmeye eğilimi belirgin şekilde azalmıştır; bu da aksel beslemenin, incelmeyi kontrol etmede etkili bir parametre olduğunu kanıtlamaktadır.

Ancak, uçlarda meydana gelen kalınlık artışı, lokal olarak gereğinden fazla malzeme birikimine ve potansiyel şekil bozukluklarına zemin hazırlayabilir. Homojen bir kalınlık dağılımı elde etmek için, aksel besleme ve iç basınç parametrelerinin birlikte optimize edilmesi gerekmektedir. Bu bulgular, literatürde de vurgulandığı üzere, proses parametrelerinin hassas bir şekilde kontrol edilmesinin kalitede anahtar rol oynadığını bir kez daha ortaya koymaktadır.

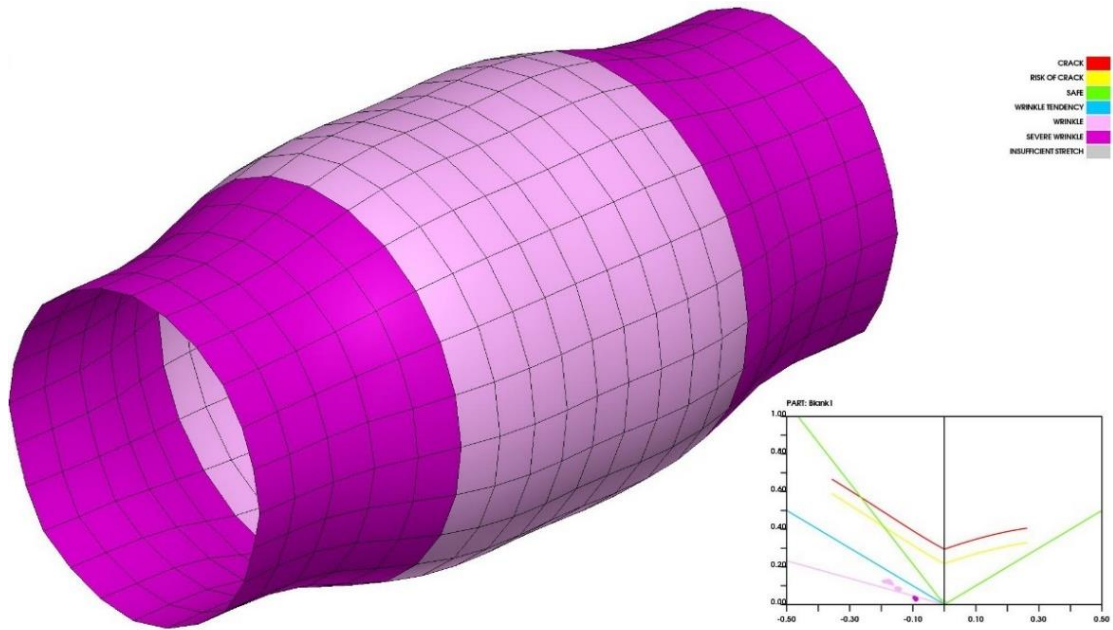


Şekil 4.19. 100 MPa iç basınç ve 4 mm besleme durumunda elde edilen oransal et kalınlığı değişimi

Görselde en dış yüzeylerde, özellikle tüpün uç kısımlarında maviye yakın bölgeler %28'e kadar varan oransal kalınlık artışlarını göstermektedir. Bu alanlarda, aksel besleme ve kalıp kenarı etkisiyle malzemenin birikmesi ve büzülmesi sonucu, lokal olarak nominal kalınlığın da üzerine çıktığı gözlenmektedir. Bu artış, genellikle uçlarda görülen buruşma veya lokal akma bölgeleriyle ilişkilendirilebilir.

Tüpün orta bölgesinde ise kırmızı alanlar ağırlık kazanmıştır ve bu alanlar %5 ila %15 arasında değişen bir oransal incelme göstermektedir. Bu bölgede, şekillendirme kuvvetleri etkisiyle malzemenin uzayarak kalınlığının azaldığı, yani tipik bir akış incelmesi olduğu anlaşılmaktadır.

Genel olarak, aksenal beslemenin uygulanmasıyla uçlardaki kalınlık artışı bir miktar artmakta, merkezde ise incelme devam etmektedir. Ancak, bu senaryoda oransal kalınlık değişimi değerlerinin genellikle sıfırın altında (negatif) seyrettiği ve nominal kalınlıktan önemli sapmaların meydana geldiği, dolayısıyla optimum şekil ve et kalınlığı homojenliği için daha ileri parametre optimizasyonlarına ihtiyaç olduğu söylenebilir.

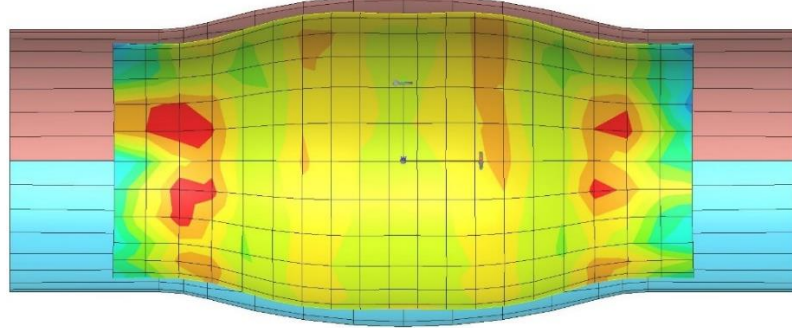


Şekil 4.20. 100 MPa iç basınç ve 4 mm besleme durumunda elde edilen şekillendirme limit diyagramı (ŞLD)

Bu senaryoda, analiz sonuçları parça genelinde hala güvenli deformasyon aralığında kaldığını göstermektedir. Uç bölgelerde mor renkte yoğun güvenli alanlar, orta bölgede ise açık pembe ile temsil edilen ve güvenliğe yakın, düşük riskli deformasyon alanları dikkat çekmektedir.

Dikkat çekici olarak, yüksek aksenal besleme uygulanmasına rağmen, iç basıncın yetersiz kalması sebebiyle parça üzerinde herhangi bir çatlama, yırtılma veya burkulma oluşmamıştır. Özellikle uçlardaki malzeme yığılması ve kalınlık artışı, lokal olarak şekil değiştirme değerlerinde göreceli bir azalma oluşturmuş; buna karşılık orta bölgede ise güvenlik sınırına daha yakın deformasyon gerçekleşmiştir.

Bu dağılım, düşük basınç ve artırılmış aksenal besleme koşulunda, plastik deformasyonun ve riskli bölgelerin büyük ölçüde uçlarda biriktiğini, ancak malzemenin orta bölgede hâlâ güvenli deformasyon sınırları içinde kaldığını ortaya koymaktadır.



Şekil 4.21. 100 MPa iç basınç ve 4 mm besleme durumunda, şekillendirme işlemi sonunda burç parçasının kalıp içindeki konumunu ve kalıp-parça temasını gösteren kesit görünüşü

Bu kesit görünüşte, uygulanan basınç ve aksenal besleme parametrelerine rağmen burç parçasının kalıp formunu tam olarak alamadığı, özellikle orta bölgede kalıp konturuna uyumun sağlanamadığı görülmektedir. Bu durum, mevcut proses koşullarının karmaşık formun üretimi için yetersiz olduğunu ve formun elde edilmesi için daha yüksek iç basınç veya ilave aksenal besleme gerekebileceğini göstermektedir.

100 MPa iç basınç ve 4 mm aksenal besleme uygulanan analizde, parça üzerinde hem plastik deformasyonun hem de kalınlık artışının uç bölgelerde yoğunlaştığı gözlemlenmiştir. Aksenal beslemenin artırılmasıyla birlikte, burcun uçlarında belirgin bir malzeme birikimi ve kalınlık artışı oluşmuş; orta bölgede ise deformasyon ve malzeme akışı beklenen düzeye ulaşmamıştır. Von Mises gerilme ve şekil değiştirme değerleri parça boyunca görece homojen bir dağılım sergilese de iç basıncın yetersizliği nedeniyle karmaşık formun kalıp konturuna tam olarak uyum sağlayamadığı ve istenen nihai şeklin elde edilemediği açıkça ortaya çıkmıştır.

Şekillendirme limit diyagramı (ŞLD) sonuçları, tüm bölgelerin güvenli deformasyon sınırları içinde kaldığını, çatlama, burkulma veya yırtılma riskinin oluşmadığını göstermektedir. Ancak, uçlardaki aşırı kalınlık artışı ve orta bölgede şekil değişiminin sınırlı kalması, literatürde de sıkça vurgulanan düşük basınç–yüksek besleme kombinasyonunun tipik dezavantajlarından biridir.

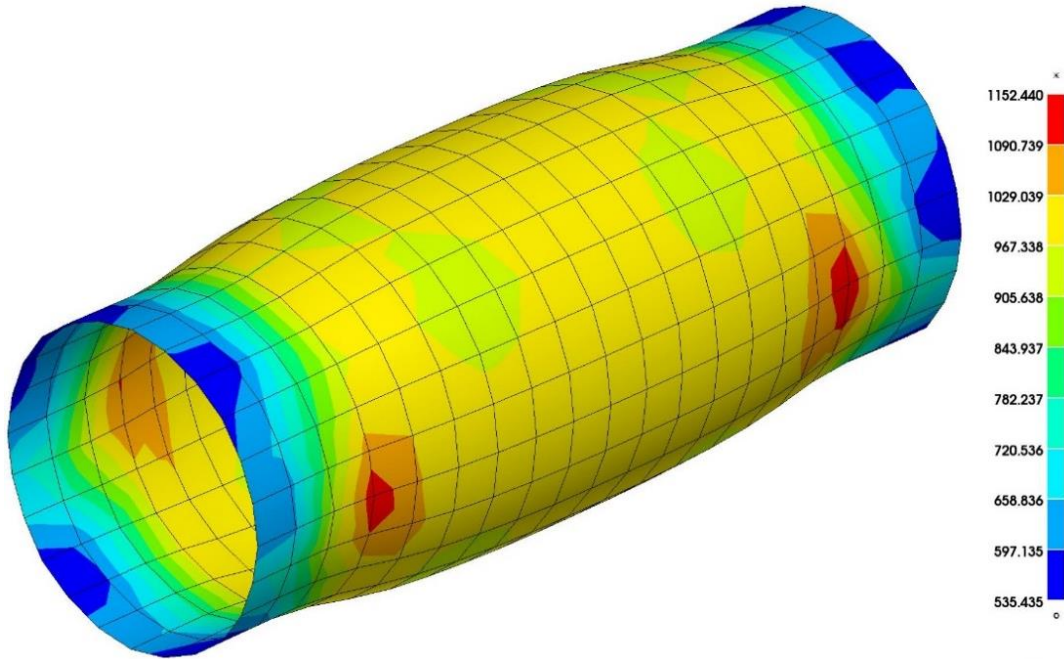
Bu senaryoda, şekillendirme işleminin başarıya ulaşabilmesi ve karmaşık formun elde edilebilmesi için ya daha yüksek iç basınç uygulanması ya da proses parametrelerinin birlikte optimize edilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

4.2.4. 200 MPa basınç ve aksenal beslemesiz

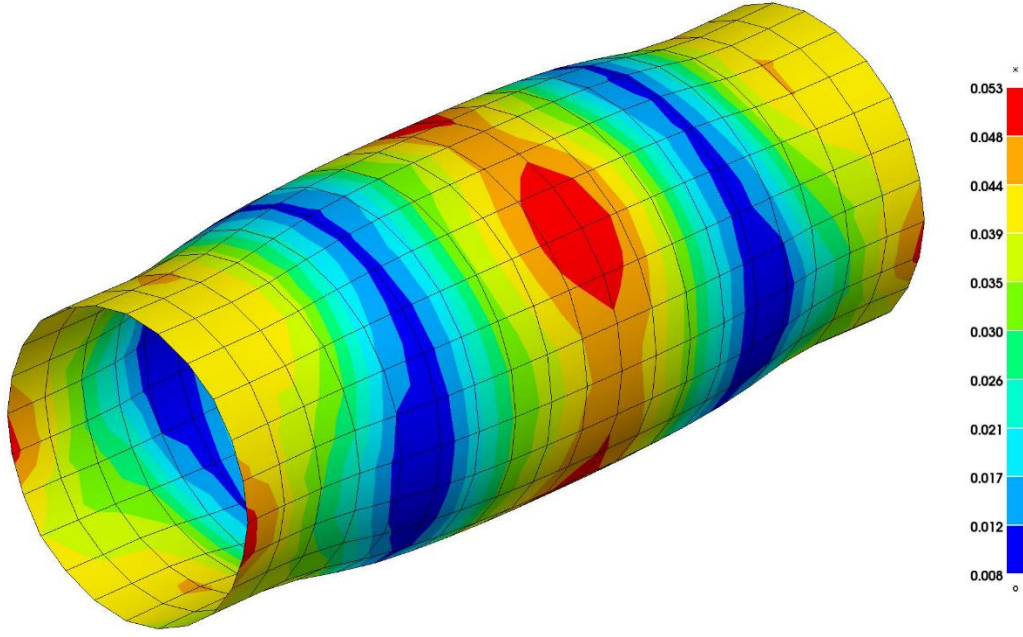
Bu senaryoda, Von Mises gerilme değerleri, artan iç basıncın etkisiyle bir önceki 100 MPa'lık analizlere kıyasla belirgin şekilde yükselmiş ve malzemenin plastik deformasyon sınırına yaklaştığını göstermiştir (Şekil 4.22.). Özellikle orta bölge ve uçlarda gözlemlenen yüksek gerilme konsantrasyonları, yüksek basınç altında oluşan mekanik zorlanmaların bir sonucu olarak yorumlanabilir. İç basıncın 200 MPa seviyesine çıkarılmasıyla, parça boyunca daha geniş bir bölgede plastik deformasyonun ve gerilme yığılımlarının olduğu gözlenmekte olup, bu durum malzemenin elastik-plastik geçiş davranışını açıkça ortaya koymaktadır.

Ancak, aksenal besleme uygulanmadığı için malzeme akışında merkezden uçlara doğru belirgin bir asimetri veya gradyan gözlemlenmemektedir. Bu da aksenal beslemenin gerilme dağılımı üzerindeki düzenleyici rolünü ve deformasyon homojenizasyonundaki önemini bir kez daha vurgulamaktadır. Gerilme değerlerinin 1152.440 MPa gibi yüksek seviyelere ulaşması, malzemenin lokal olarak akma mukavemetini aştığını ve plastik deformasyonun başladığını işaret etmektedir.

Sonuç olarak, bu analiz, iç basınç seviyesinin artırılmasının gerilme dağılımı ve plastik deformasyon üzerindeki kritik etkisini nicel olarak ortaya koyarken, aksenal beslemenin yokluğunda malzeme akışının sınırlı kaldığını göstermektedir.

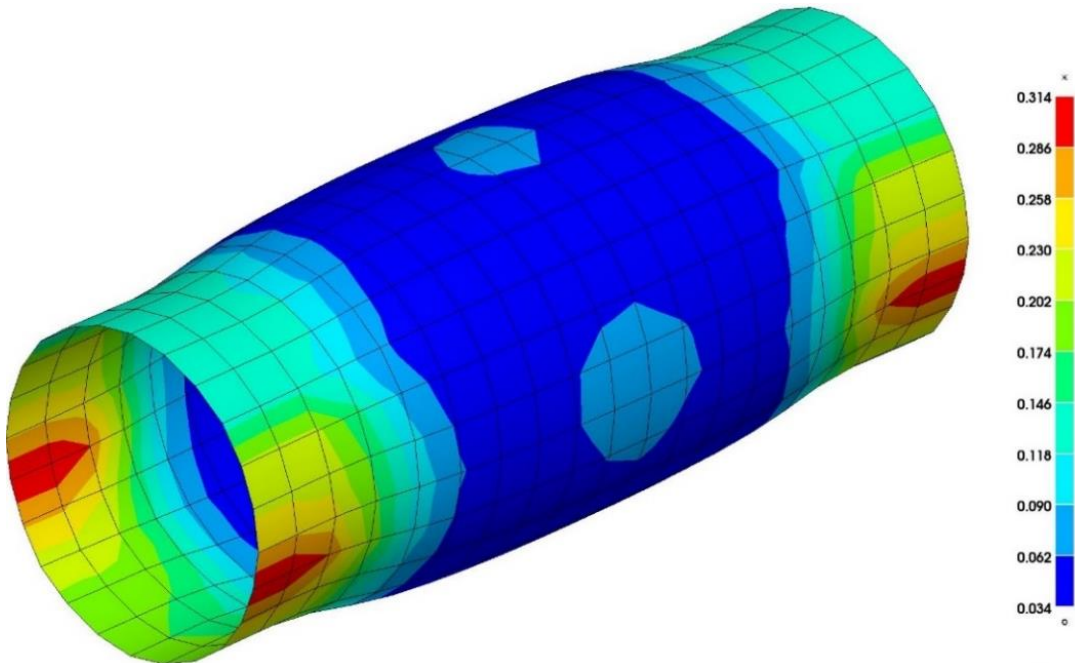


Şekil 4.22. 200 MPa iç basınç ve aksenal beslemesiz durumda elde edilen Von Mises gerilme dağılımı (MPa)



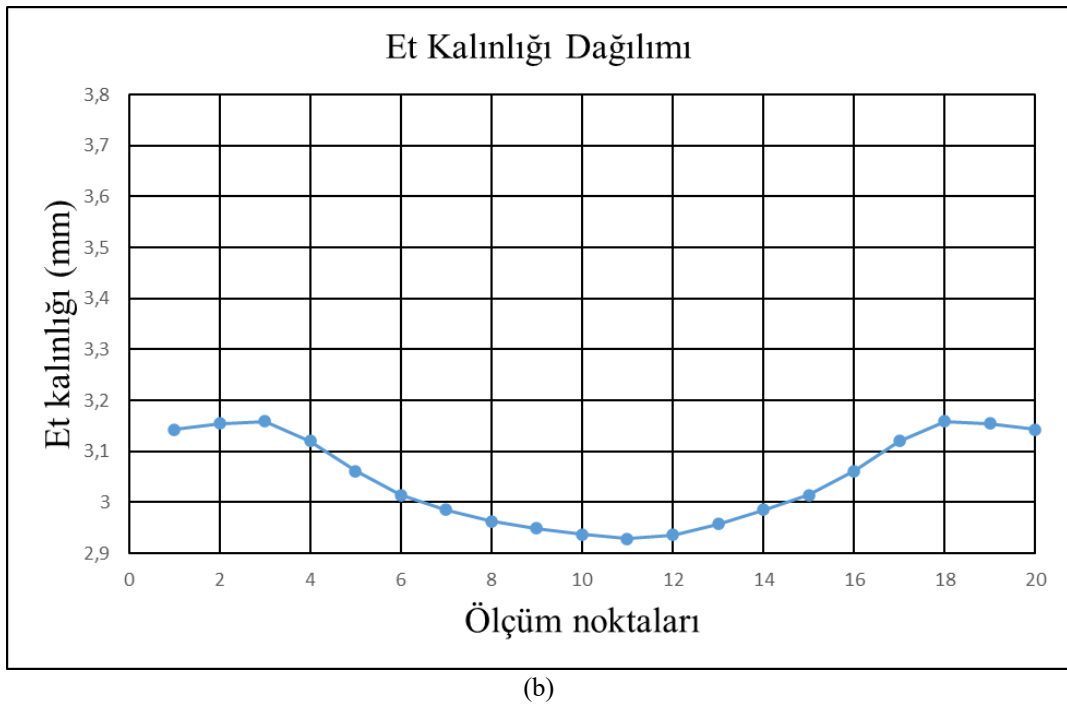
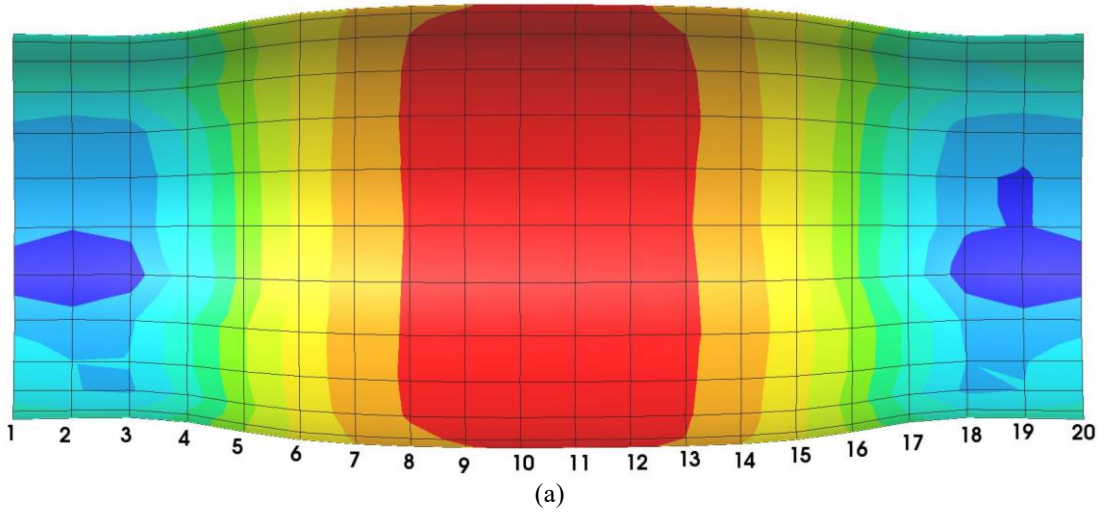
Şekil 4.23. 200 MPa iç basınç ve aksel beslemesiz durumda elde edilen ana şekil değiştirme dağılımı

Şekil değiştirme değerleri burç parçası boyunca, özellikle iç basıncın maksimum etkili olduğu bölgelerde artış göstermiştir. Uçlardan merkeze kadar olan bölgede homojen bir dağılım eğilimi sergilenirken, yüksek basınç etkisiyle özellikle orta alanda şekil değişiminin önceki düşük basınç senaryolarına göre daha fazla olduğu görülmektedir. Aksel besleme olmadığı için uçlarda ekstra şekil değiştirme yığılması oluşmamıştır.



Şekil 4.24. 200 MPa iç basınç ve aksel beslemesiz durumda elde edilen maksimum plastik şekil değiştirme

Plastik şekil değiştirme dağılımı, iç basıncın artırılmasıyla birlikte hem uçlarda hem de merkezde yükselmiştir (Şekil 4.24.). Uçlara göre orta bölgede daha belirgin plastik deformasyon alanları dikkat çekmektedir. Beslemesiz durumda malzemenin plastik akışı daha çok iç basınca bağlı olarak gelişmiş ve parça boyunca yayılmıştır.



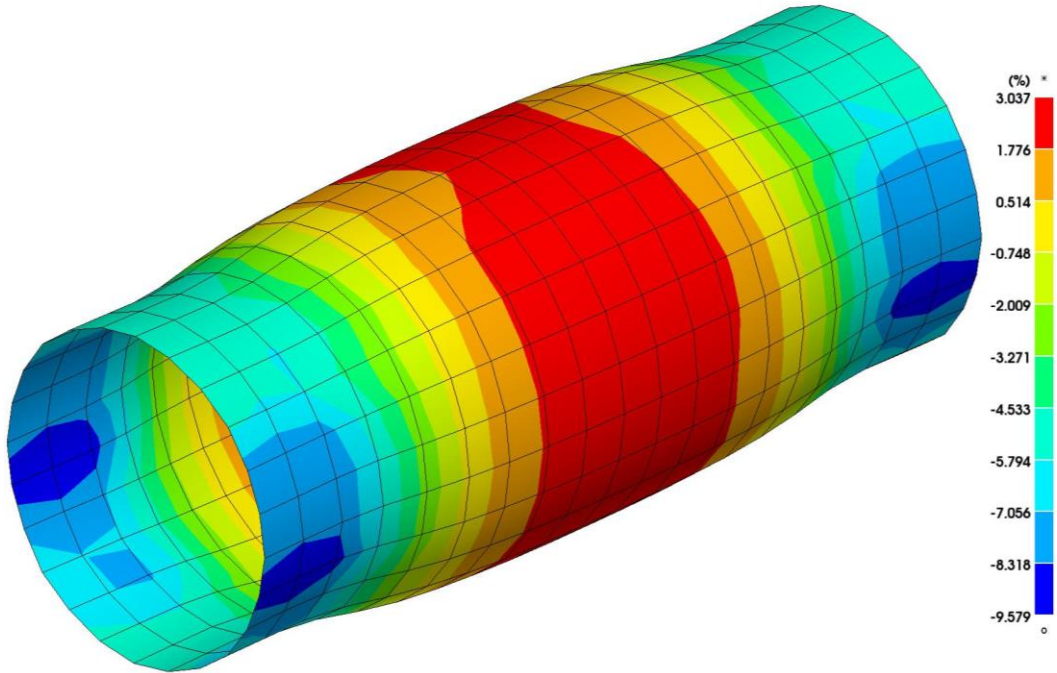
Şekil 4.25. 200 MPa iç basınç ve aksel beslemesiz durumda elde edilen et kalınlığı dağılımı. (a) Ölçüm noktalarının dağılımı. (b) Et kalınlığı dağılım grafiği.

Şekil 4.25'te, 200 MPa iç basınç ve aksel beslemesiz durumda elde edilen et kalınlığı dağılımı, yüksek basıncın tüp formu üzerindeki etkisini doğrudan yansıtmaktadır. Ölçüm noktalarındaki değerler incelendiğinde, uç bölgelerde kalınlık artışı devam etmekte; orta bölgede ise belirgin bir incelme söz konusudur. Özellikle

merkez bölgede et kalınlığı 2,95 mm seviyelerine kadar gerilerken, uçlarda nominal değerin üzerinde kalınlıklar görülmektedir.

Yüksek iç basıncın etkisiyle tüp boyunca malzeme, kalıp iç yüzeyine doğru hızlı bir şekilde hareket etmiş ve merkeze doğru akış eğilimi artmıştır. Eksensel beslemenin uygulanmaması, uçlardaki malzeme birikimini artırmış, orta bölgede ise incelmeyi daha belirgin hale getirmiştir. Bu sonuç, sürecin merkez kısmında aşırı incelme riskine işaret etmekte ve yüksek iç basınca rağmen tek başına yeterli geometrik bütünlük sağlamadığını göstermektedir.

Grafikten çıkan bu eğilim, hidroşekillendirme işlemlerinde optimum kalınlık dağılımı elde etmek için yalnızca iç basıncın değil, aksel beslemenin de süreç parametrelerine mutlaka dahil edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu bulgular, literatürde de sıklıkla vurgulanan, proses kombinasyonunun önemini destekler niteliktedir.



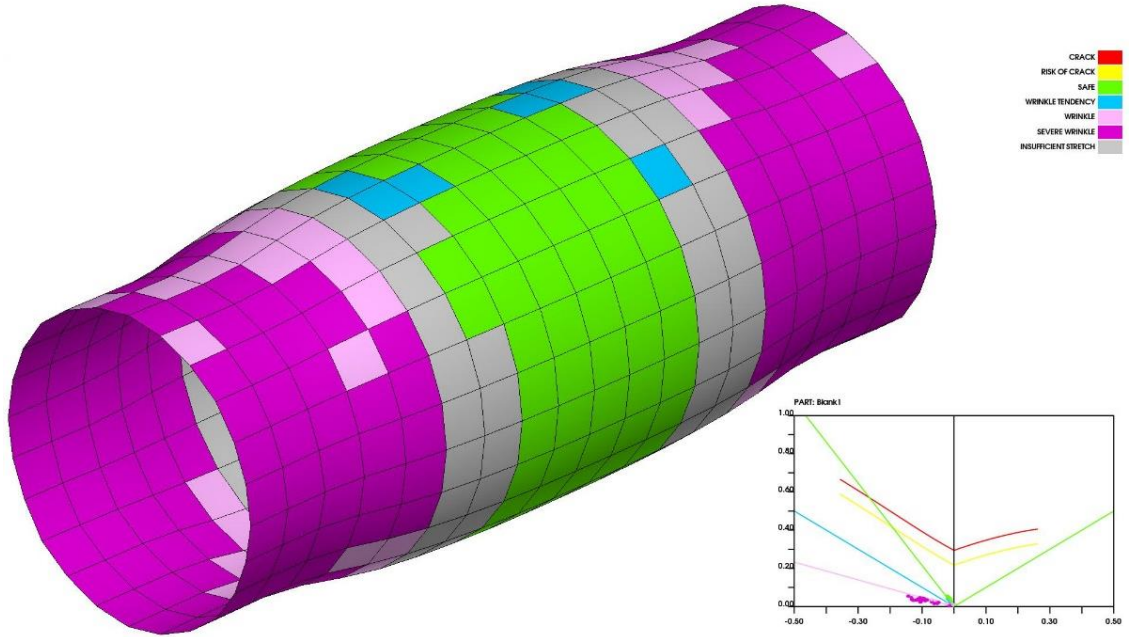
Şekil 4.26. 200 MPa iç basınç ve aksel beslemesiz durumda elde edilen oransal et kalınlığı değişimi

Görselde en dış yüzeylerde, özellikle tüpün uç kısımlarında maviye yakın bölgeler %9'a varan oransal kalınlık artışlarını göstermektedir. Bu alanlarda, malzemenin kalıp kenarlarında birikmesi ve aksel besleme olmaksızın uçlarda yığılması sonucu, lokal olarak nominal kalınlığın üzerine çıktığı gözlenmektedir. Bu artış, genellikle

şekillendirme sırasında uçlarda meydana gelen buruşma ya da lokal akma bölgeleriyle doğrudan ilişkilidir.

Tüpün orta bölgesinde ise kırmızı ve sarı tonların baskın olduğu görülmektedir. Bu alanlar, %5 ila %10 arasında değişen oransal incelmeye işaret etmektedir. Şekillendirme kuvvetlerinin en yoğun olduğu merkez bölgede, malzemenin aksel yönde akışıyla birlikte tipik bir incelme gözlemlenmektedir. Bu, hidro şekillendirme prosesinin en belirgin etkisinin merkezdeki et kalınlığı azalması olduğunu ortaya koymaktadır.

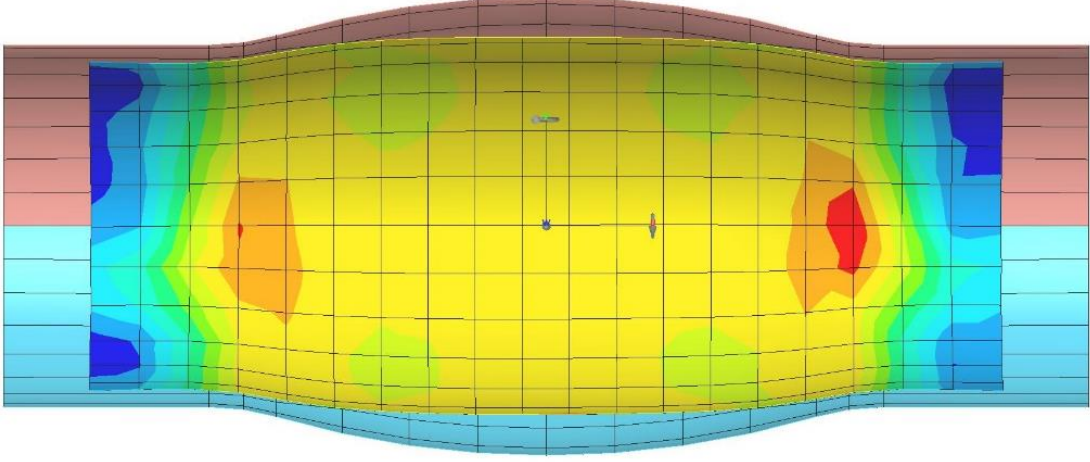
Genel olarak Şekil 4.26'da uçlarda yerel kalınlık artışı gözlenirken merkez bölgede ciddi bir incelme oluşmaktadır. Kalınlık değişiminin bu şekilde dengesiz dağılması, nihai parça kalitesi açısından kritik olup, özellikle merkezdeki incelmeyen parça dayanımını olumsuz etkileyebileceği değerlendirilmiştir. Bu nedenle, daha homojen bir et kalınlığı dağılımı için proses parametrelerinin ve besleme miktarının optimize edilmesi gerekmektedir.



Şekil 4.27. 200 MPa iç basınç ve aksel beslemesiz durumda elde edilen şekillendirme limit diyagramı (ŞLD) ve burç yüzeyindeki şekillendirme bölgeleri

Analiz sonuçları, orta bölgede ve parça genelinde önemli bir kısmın güvenli deformasyon sınırında olduğunu; bazı alanlarda ise güvenlik sınırına yaklaşan ancak henüz çatlama ya da burkulma riski oluşturmayan deformasyonlar geliştiğini

göstermektedir. Yüksek iç basıncın etkisiyle güvenli şekillendirme alanı artmış, fakat riskli bölgeler de ortaya çıkmaya başlamıştır.



Şekil 4.28. 200 MPa iç basınç ve aksel beslemesiz durumda, burç parçasının kalıp içindeki konumunu ve kalıp-parça temasını gösteren kesit görünüşü

Bu kesit görünüşte, parça merkezinde ve uçlara yakın bölgelerde gerilme yığılmalarının yoğunlaştığı ve iç basınç etkisinin parça formunun kalıp konturuna yaklaşmasını sağladığı gözlenmektedir. Ancak aksel beslemenin uygulanmaması nedeniyle, malzeme akışı tam anlamıyla optimize edilememiş ve şekillendirme sürecinin verimliliği sınırlı kalmıştır.

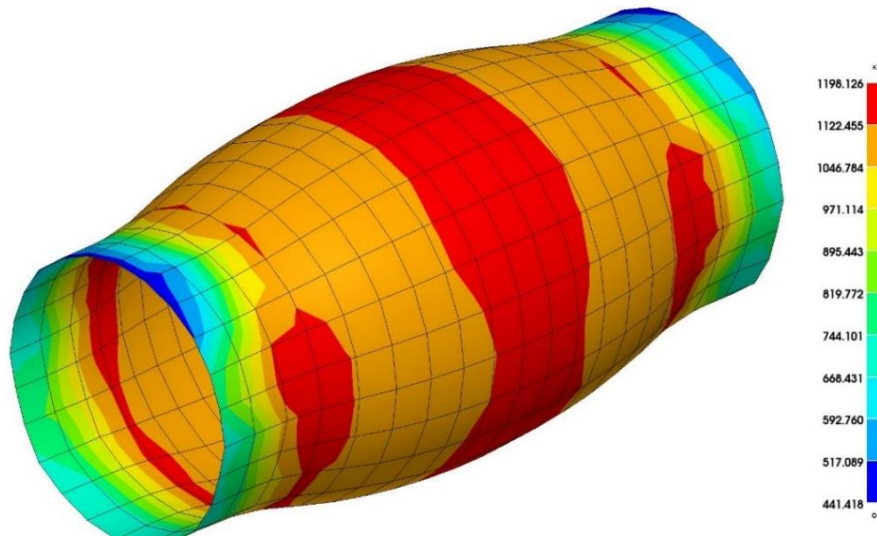
200 MPa iç basınç ve aksel beslemesiz senaryoda, önceki düşük basınçlı analizlere kıyasla burç parçası üzerinde şekil değişimi, plastik deformasyon ve Von Mises gerilme değerleri belirgin biçimde artmıştır. Yüksek iç basınç, malzeme akışını önemli ölçüde hızlandırmış ve özellikle orta bölgede daha homojen bir deformasyon profili oluşmasını sağlamıştır. Kalınlık dağılımı incelendiğinde ise, özellikle orta bölgede belirgin incelmeler olduğu, uçlarda ise kalınlık değerinin başlangıca daha yakın kaldığı gözlemlenmiştir.

Şekillendirme limit diyagramı sonuçlarına göre, parçanın büyük bir kısmında güvenli deformasyon alanı korunmuş; çatlama, burkulma veya yırtılma riski oluşmamıştır. Ancak, aksel besleme olmaksızın, iç basınç etkisiyle malzemenin yeterli şekil değişiminin gerçekleşmemesi sürecin verimliliğini kısıtlamıştır. Bu senaryoda, yüksek basınçla beraber aksel besleme uygulanmadığında, formun kalıp konturuna yaklaşması kolaylaşsa da parça geometrisinin istenen düzeyde elde edilebilmesi ve optimum kalınlık dağılımı için ek parametre optimizasyonuna ihtiyaç duyulmaktadır.

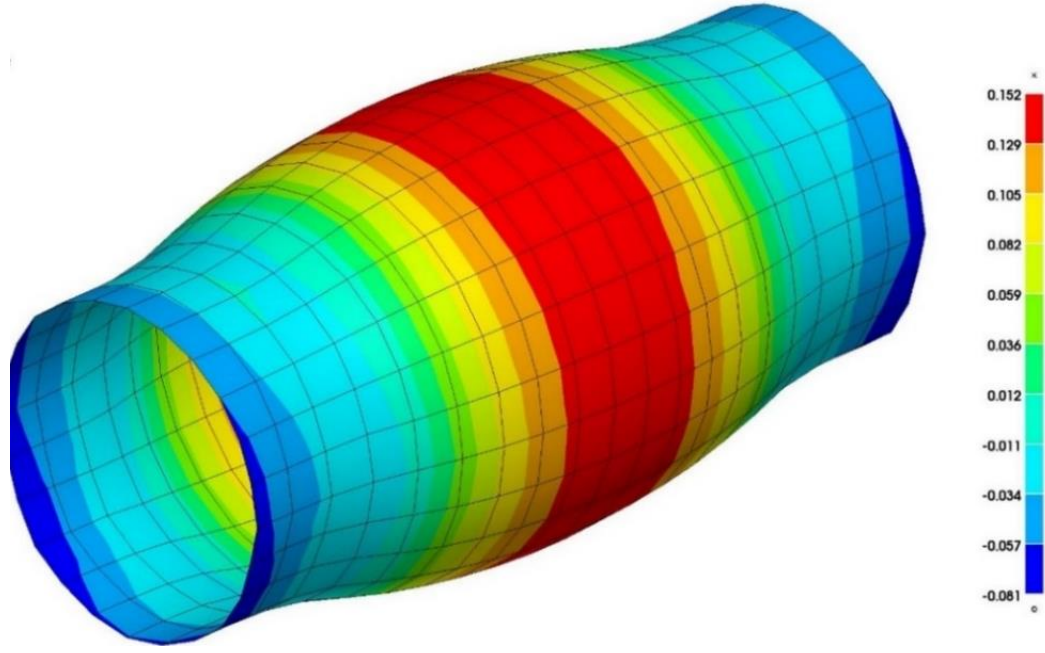
4.2.5. 200 MPa basınç ve 2 mm aksenal besleme

Şekil 4.29'da sunulan analiz sonuçları, 200 MPa iç basınç ve 2 mm aksenal besleme koşulları altında burç parçası üzerindeki Von Mises gerilme dağılımını detaylı bir şekilde ortaya koymaktadır. Gerilme dağılımı incelendiğinde, yüksek gerilme bölgelerinin özellikle şekillendirme bölgesinin orta kısmında ve uçlara yakın alanlarda yoğunlaştığı gözlemlenmektedir. Bu bölgelerdeki kırmızı renkli alanlar, malzemenin akma sınırına ulaştığını ve plastik deformasyonun başladığını gösteren kritik noktaları temsil etmektedir. İç basıncın 200 MPa seviyesine çıkarılmasıyla birlikte, burcun orta kısmında daha geniş ve homojen bir gerilme dağılımı oluşmuştur. Bu durum, form kabiliyetinin önceki düşük basınçlı analizlere kıyasla belirgin şekilde arttığını ve proses parametrelerinin optimizasyonuna yönelik önemli bir adım atıldığını göstermektedir. Aksenal beslemenin 2 mm olarak uygulanması, malzeme akışını kontrollü bir şekilde yönlendirerek gerilme konsantrasyonlarının lokalize olmasını önlemiş ve deformasyonun daha dengeli dağılmasını sağlamıştır.

Sonuç olarak, bu çalışmada sunulan parametre kombinasyonu hem yüksek form kabiliyeti hem de homojen gerilme dağılımı açısından optimuma yakın bir performans sergilemektedir. Bu koşullar altında, malzemenin plastik deformasyonu kontrollü bir şekilde gerçekleşmekte ve parça üzerindeki kritik bölgelerde aşırı gerilme yığılmaları önlenmektedir. Dolayısıyla, bu parametre seti, endüstriyel uygulamalarda yüksek verimlilik ve kalite elde etmek için uygun bir başlangıç noktası olarak değerlendirilebilir.

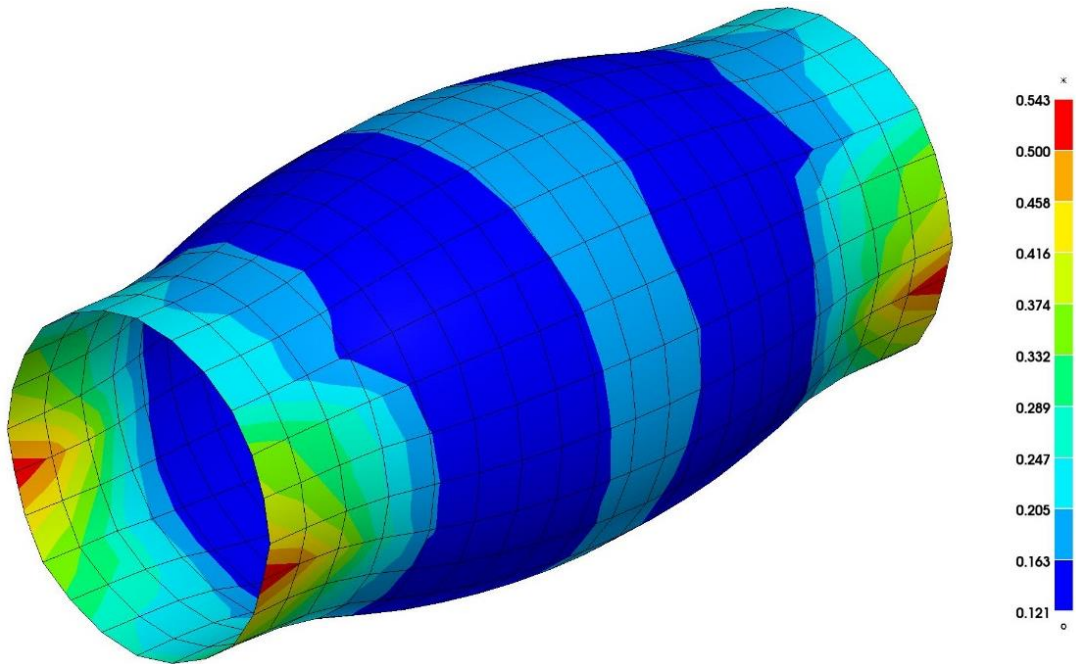


Şekil 4.29. 200 MPa iç basınç ve 2 mm aksenal besleme durumunda elde edilen Von Mises gerilme dağılımı (MPa)



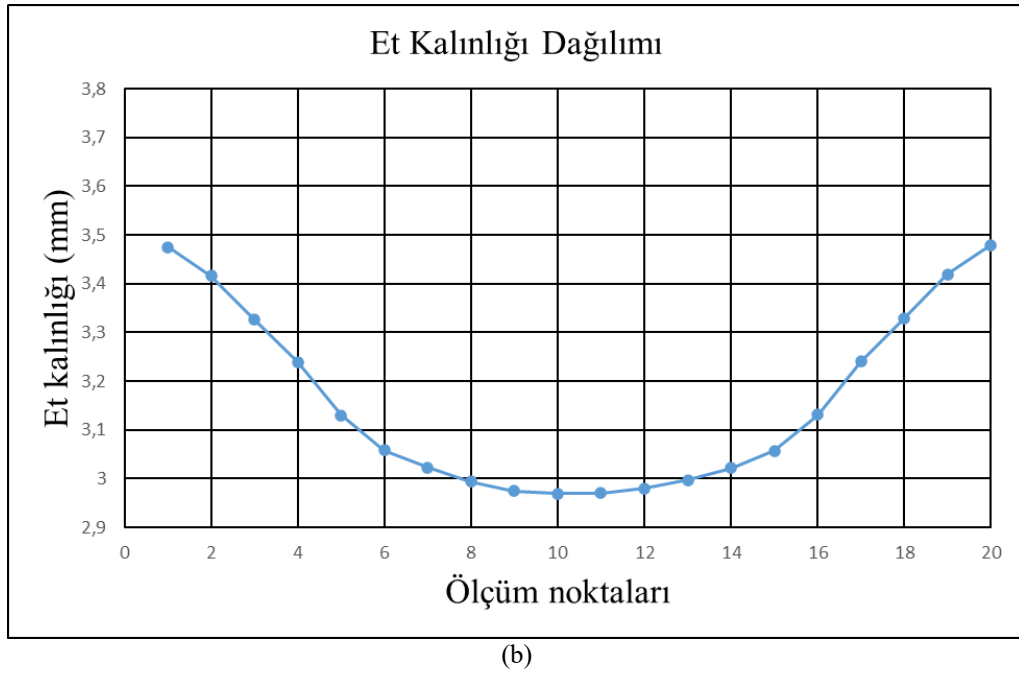
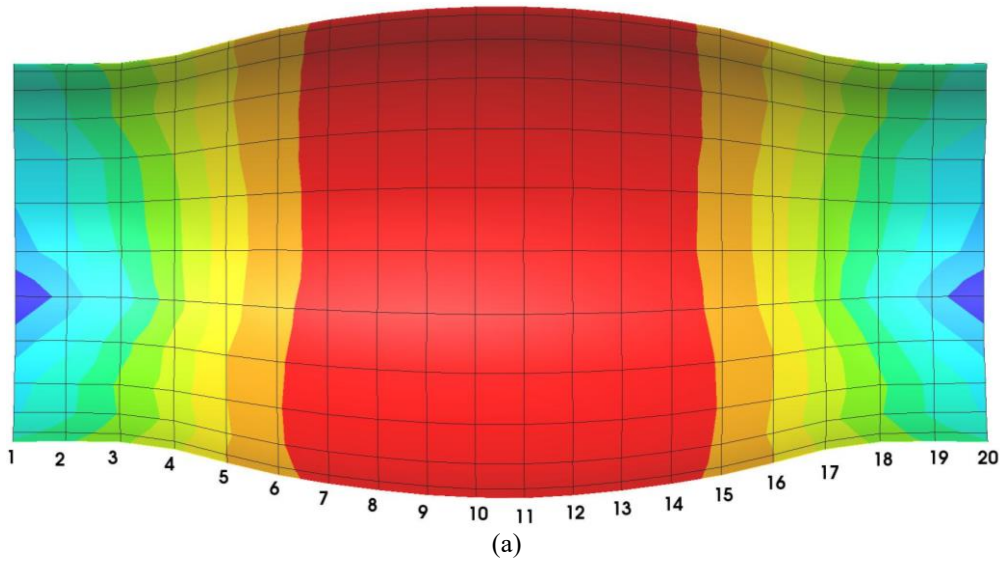
Şekil 4.30. 200 MPa iç basınç ve 2 mm aksel besleme durumunda elde edilen BŞD dağılımı

Şekillendirme bölgesinin ortasında kırmızı tonlarında yüksek BŞD, uçlara doğru bu değerlerin azaldığı görülmektedir. Bu sonuç, şekil değişiminin en yoğun olarak istenen orta bölgede gerçekleştiğini göstermekte ve aksel beslemenin etkisiyle uç kısımlarda fazla deformasyon birikmesinin önüne geçildiğine işaret etmektedir. Bu, optimum şekillendirme ve form bütünlüğü açısından pozitif bir sonuçtur.



Şekil 4.31. 200 MPa iç basınç ve 2 mm aksel besleme durumunda elde edilen maksimum plastik şekil değiştirme dağılımı

Plastik şekil değiştirme dağılımı incelendiğinde; ortada istenen plastik deformasyon sağlanmış ve malzeme işlenebilirlik sınırları içerisinde kalmıştır. Uç kısımlarda plastik deformasyonun azaldığı, ancak orta bölgede daha yoğun birikim gözlemlendiği raporlanabilir. Bu tablo, parça formunun ortasında daha etkin bir şekillendirme sağlandığını; fakat uçlarda hala deformasyonun sınırlı kaldığını göstermektedir. Bu durum, aksel besleme miktarının biraz daha artırılmasının form bütünlüğü açısından avantaj sağlayabileceğini düşündürmektedir.

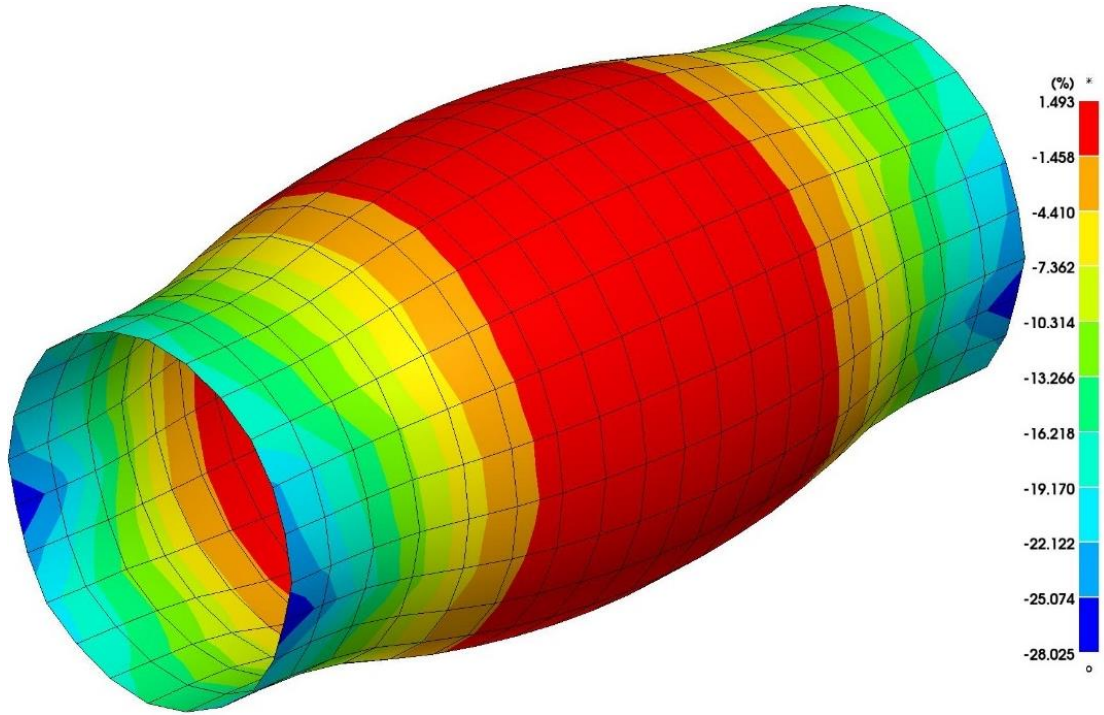


Şekil 4.32. 200 MPa iç basınç ve 2 mm aksel besleme durumunda elde edilen et kalınlığı dağılımı. (a) Ölçüm noktalarının dağılımı. (b) Et kalınlığı dağılım grafiği.

Şekil 4.32’de, 200 MPa iç basınç ve 2 mm aksenal besleme uygulanan durumda elde edilen et kalınlığı dağılımı incelendiğinde, uç bölgelerde kalınlığın nominal değerine çıktığı, orta kısımlarda ise belirgin bir incelme yaşandığı görülmektedir. Eksensel beslemenin devreye girmesiyle birlikte, malzemenin merkeze akışı bir miktar artmış, ancak uçlardaki kalınlık birikimi tam olarak dengelenememiştir.

Grafikteki dağılım, minimum et kalınlığının merkez bölgede yoğunlaştığını, ancak uçlardan merkeze doğru nispeten daha yumuşak bir geçişle azaldığını göstermektedir. Bu durum, aksenal beslemenin artışıyla birlikte et kalınlığında kısmi bir iyileşme sağlasa da özellikle yüksek iç basınç altında optimum homojenliğin hâlâ sağlanamadığına işaret etmektedir.

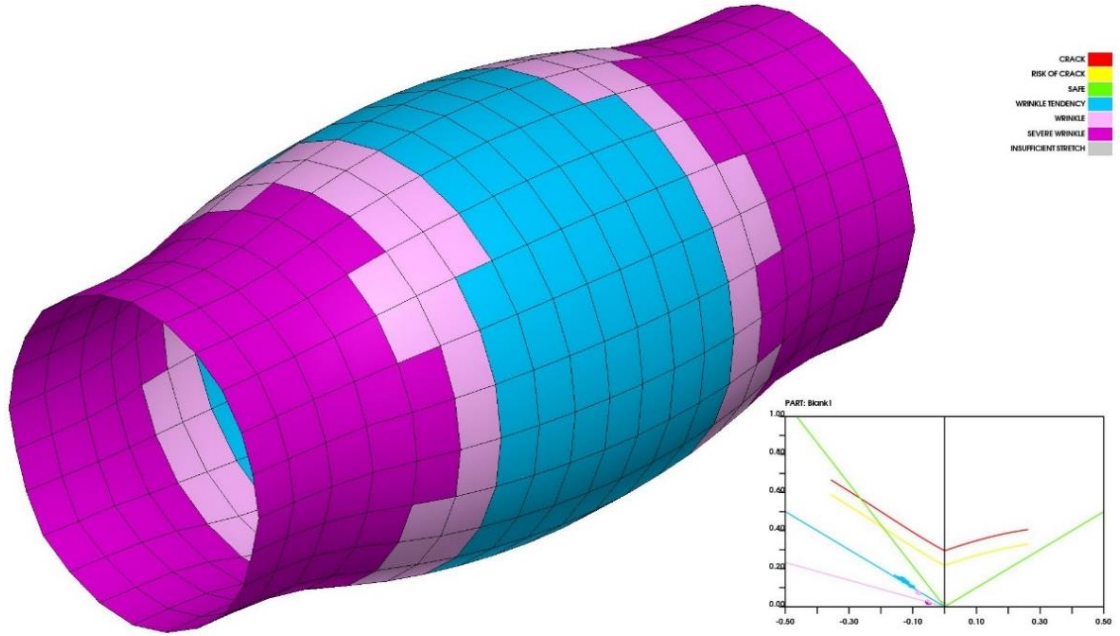
Bu bulgular, aksenal beslemenin artırılması halinde kalınlık dağılımının daha da dengeleneceğini ve merkezdeki incelmeyi minimize edilebileceğini ortaya koymaktadır. Ancak, tek başına düşük aksenal besleme miktarının, yüksek iç basınçla birlikte ideal kalınlık dağılımı için yeterli olmadığı, daha yüksek aksenal besleme değerlerinin süreç parametrelerine eklenmesi gerektiği anlaşılmaktadır. Sonuçlar, literatürde belirtilen optimum süreç parametrelerinin elde edilmesi için hem iç basıncın hem de aksenal beslemenin birlikte optimize edilmesi gerekliliğini desteklemektedir.



Şekil 4.33. 200 MPa iç basınç ve 2 mm aksenal besleme durumunda elde edilen oransal et kalınlığı değişimi

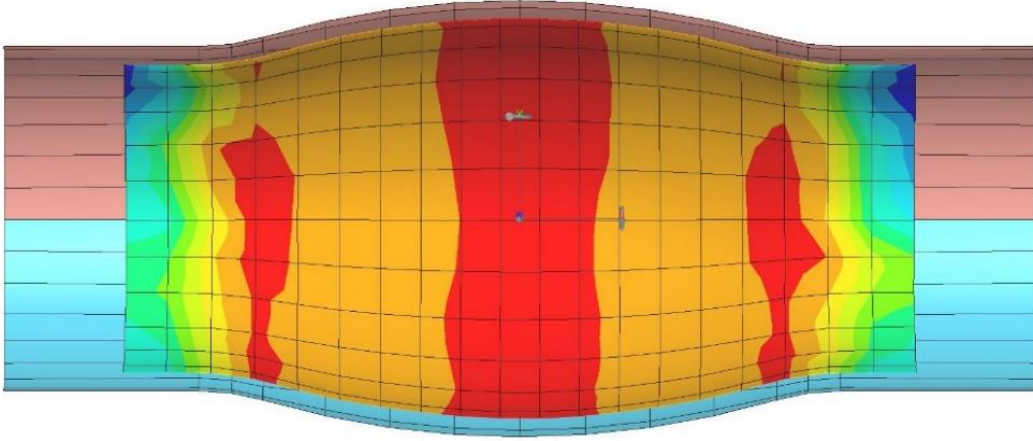
Görselde en dış yüzeylerde, özellikle tüpün uç kısımlarında maviye yaklaşan bölgeler %28'e varan oransal et kalınlığı artışlarını göstermektedir. Bu bölgelerde malzemenin birikmesi ve kenarlara doğru akışıyla birlikte, lokal olarak nominal kalınlığın üzerine çıktığı anlaşılmaktadır. Bu tür kalınlık artışları genellikle kenar bölgelerde aksel besleme ve kalıp temasının etkisiyle meydana gelen buruşma ya da yığılma ile ilişkilendirilebilir.

Tüpün orta bölgesinde ise geniş kırmızı alanlar hâkimdir ve bu bölgeler %1,5'e kadar pozitif oranda incelmeye gösterirken, diğer kısımlarda ise daha belirgin şekilde negatif değerlere ulaşan incelmeler gözlenmektedir. Orta kısımdaki bu incelmeye, şekillendirme sürecinde boru duvarının en fazla akmaya ve uzamaya maruz kaldığı bölgede tipik bir akış incelmeye işaret etmektedir.



Şekil 4.34. 200 MPa iç basınç ve 2 mm aksel besleme durumunda elde edilen şekillendirme limit diyagramı (ŞLD) ve burç yüzeyindeki şekillendirme bölgeleri

ŞLD grafiğinde, parçanın büyük bir bölümünün güvenli bölgede kaldığı, ancak uç kısımlarda kırılma eğilimi (wrinkle tendency ve wrinkle) devam etmektedir. Ortadaki form bölgelerinde, kırmızıya yakın bir tehlike bölgesi veya yırtılma riski oluşmamıştır. Bu tablo, analizde uygulanan parametrelerin formun merkezinde emniyetli şekillendirme sunduğunu, ancak uçlarda hâlâ iyileştirme gerektiren lokal stabilite sorunları olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.35. 200 MPa iç basınç ve 2 mm aksenal besleme durumunda burç parçasının kalıp içindeki konumunu ve kalıp-parça temasını gösteren kesit görünüşü

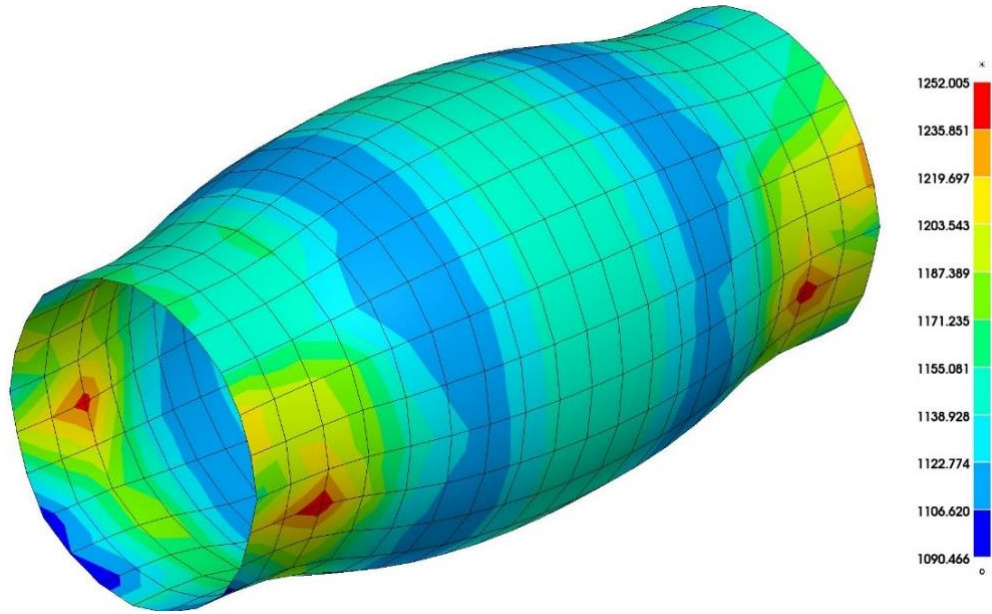
200 MPa iç basınç ve 2 mm aksenal besleme ile gerçekleştirilen analiz sonucunda; merkez bölgede istenen şekillendirme performansı büyük ölçüde yakalanmıştır. Von Mises gerilme, BŞD ve plastik deformasyon açısından optimuma yakın sonuçlar elde edilmiştir. Parça formunun orta bölgesinde emniyetli ve stabil bir şekil oluşmuş, aşırı inceleme riski gözlenmemiştir. Ancak uç kısımlarda et kalınlığı artışı ve kırışma eğilimi sürmektedir. Dolayısıyla, aksenal besleme miktarının artırılması veya uç bölgelerde lokal optimizasyonlar yapılması, nihai hedef geometri ve form bütünlüğü açısından faydalı olacaktır.

4.2.6. 200 MPa basınç ve 4 mm aksenal besleme

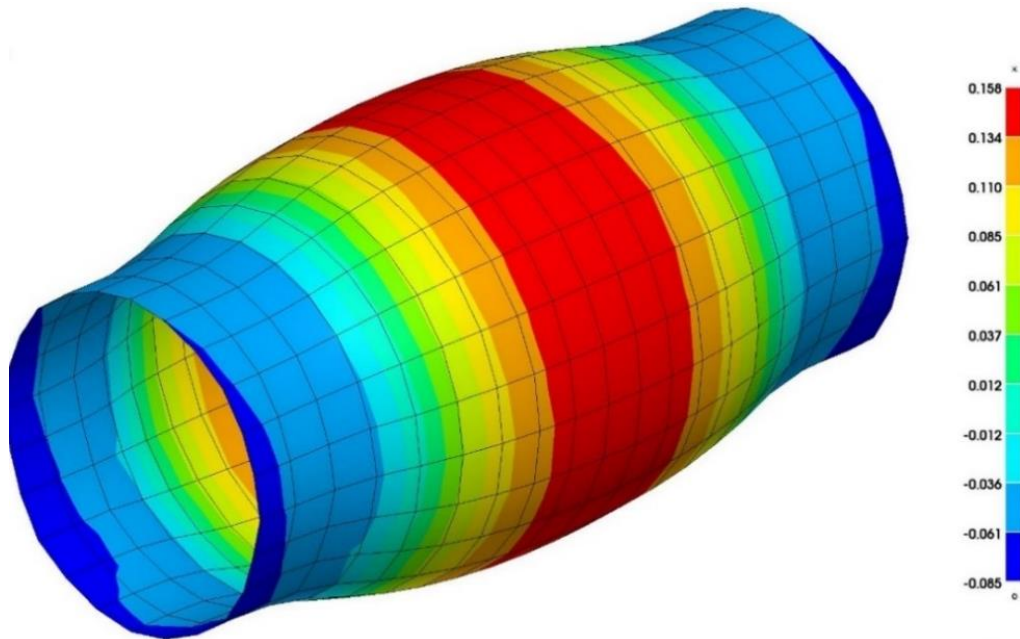
Bu analizde, 200 MPa iç basınç ve 4 mm aksenal besleme koşulları altında burç parçası üzerindeki Von Mises gerilme dağılımının belirgin şekilde arttığı ve şekillendirme bölgesinde daha homojen bir dağılım sergilediği gözlemlenmiştir (Şekil 4.36). En yük gerilme değerleri, özellikle orta bölge ve burç uçlarında yoğunlaşmış olup, bu durum yüksek basınç altında malzemenin mekanik davranışının geometrik sınırlamalardan kaynaklanan lokal etkilere maruz kaldığını göstermektedir.

Gerilme dağılımındaki homojenlik artışı, aksenal besleme miktarının 4 mm'ye çıkarılmasıyla malzeme akışının daha kontrollü ve dengeli bir şekilde yönlendirildiğine işaret etmektedir. Bu da şekillendirme prosesinin ilerleme aşamasında olduğunu ve proses parametrelerinin optimizasyonuna yönelik önemli bir adım atıldığını kanıtlamaktadır. Ancak, kritik bölgelerde oluşan lokal gerilme yığılımları, malzemenin bu noktalarda akma sınırına yaklaştığını ve plastik deformasyonun başladığını göstermektedir. Bu tür

bölgelerin, ilerleyen aşamalarda yırtılma veya hasar riski açısından dikkatle izlenmesi ve gerekli durumlarda tasarım veya proses parametrelerinin revize edilmesi gerekmektedir.



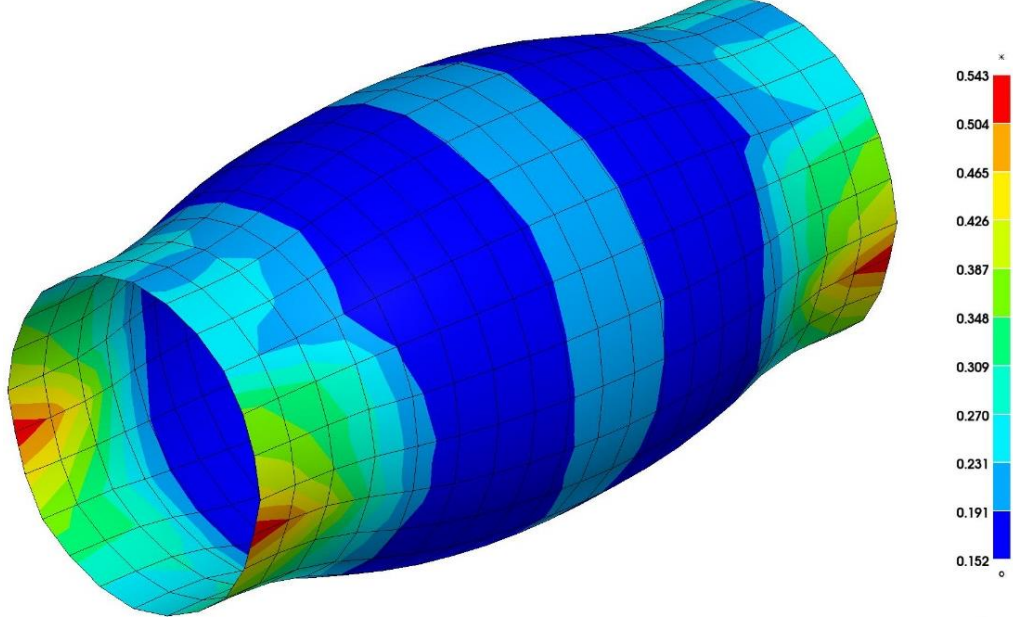
Şekil 4.36. 200 MPa iç basınç ve 4 mm besleme uygulanmış durumda elde edilen Von Mises gerilme dağılımı (MPa)



Şekil 4.37. 200 MPa iç basınç ve 4 mm besleme uygulanmış durumda elde edilen B&S dağılımı

B&S haritasında (Şekil 4.37.), özellikle burcun şişirilerek genişletilen orta bölümünde ve aksenal besleme nedeniyle burcun uç bölgelerinde gerinim değerleri artmıştır. 4 mm besleme ile orta bölgede belirgin bir plastik şekil değişimi başlamıştır.

BŞD dağılımındaki düzgünlük, şekillendirme işleminde formun istenen seviyeye daha yakın olduğunu ve burcun dış yüzeyinde yerel deformasyonların kontrol altında tutulabildiğini göstermektedir.



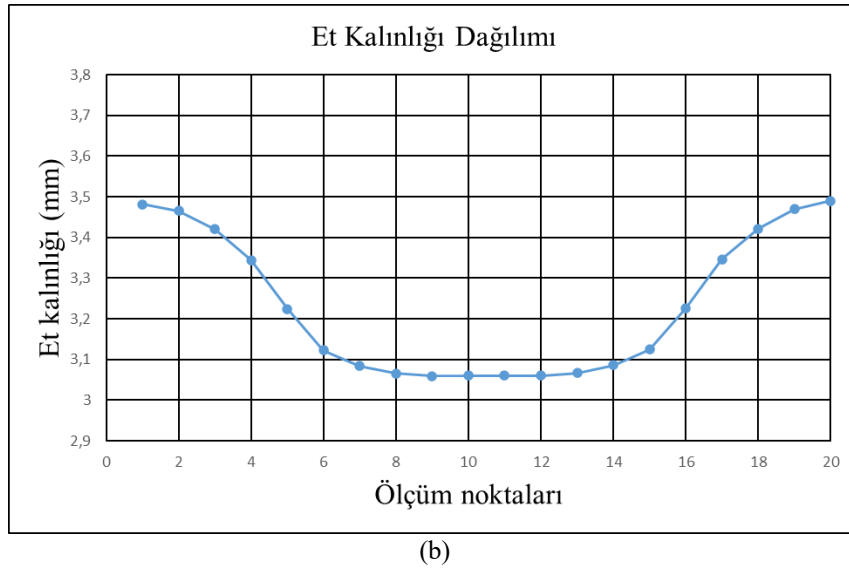
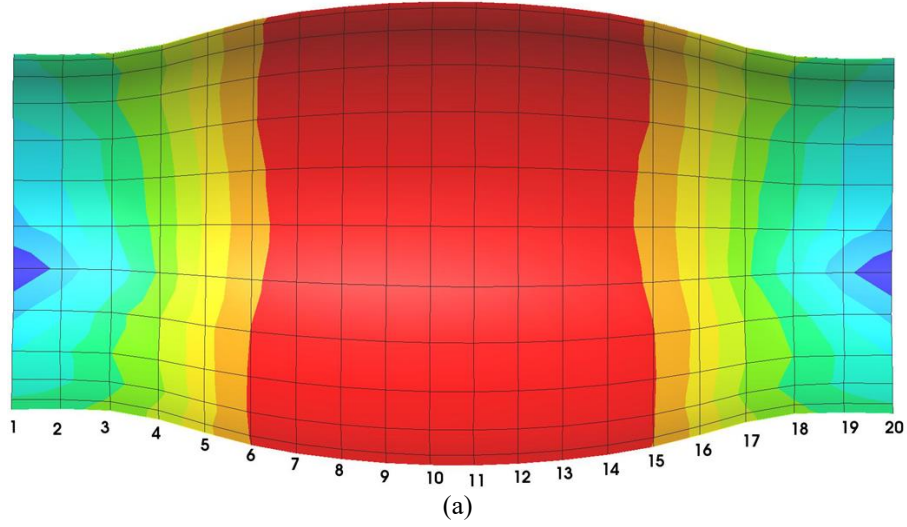
Şekil 4.38. 200 MPa iç basınç ve 4 mm besleme uygulanmış durumda elde edilen maksimum plastik şekil değişimi dağılımı

Analiz sonuçlarına göre, efektif plastik şekil değişimi değerlerinin burç parçasının hem uç bölgelerinde hem de orta kesiminde belirgin bir artış gösterdiği tespit edilmiştir. Özellikle orta bölgedeki deformasyon alanı ile uç kısımlarda gözlenen yüksek plastik şekil değişimi seviyeleri, uygulanan 4 mm aksenal beslemenin malzeme akışını önemli ölçüde hızlandırdığını ve şekillendirme prosesinin aktif olarak devam ettiğini göstermektedir.

Bu durum, yüksek basınç altında aksenal besleme miktarının artırılmasının plastik deformasyonu teşvik ettiğini, ancak aynı zamanda malzemenin lokal bölgelerde akma sınırlarına yaklaşmasına neden olduğunu ortaya koymaktadır. Deformasyonun bu şekilde lokalize olması, malzemenin şekillendirilebilirlik kapasitesinin belirli noktalarda zorlandığını işaret etmekle birlikte, mevcut parametreler altında yırtılma veya aşırı inceleme gibi kritik hasar mekanizmalarının henüz oluşmadığını göstermektedir.

Özellikle orta bölgede gözlenen yüksek plastik şekil değişimi, aksenal beslemenin malzeme akışını merkeze doğru etkin bir şekilde yönlendirdiğini ve homojen bir deformasyon sağlamada başarılı olduğunu kanıtlamaktadır. Bununla birlikte, uç

bölgelerdeki yoğun plastikleşme, geometrik sınırlamaların etkisiyle oluşan gerilme konsantrasyonlarından kaynaklanmaktadır.

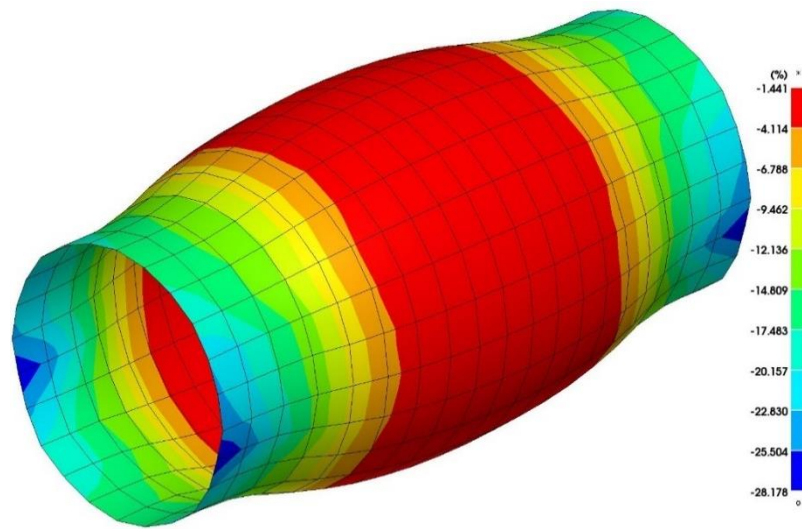


Şekil 4.39. 200 MPa iç basınç ve 4 mm besleme uygulanmış durumda elde edilen et kalınlığı dağılımı. (a) Ölçüm noktalarının dağılımı. (b) Et kalınlığı dağılım grafiği.

Şekil 4.39'te 200 MPa iç basınç ve 4 mm eksenel besleme ile gerçekleştirilen deneysel senaryoda elde edilen et kalınlığı dağılımı gösterilmektedir. Görselden anlaşıldığı üzere, eksenel besleme miktarının artırılması ile tüp merkezindeki incelmeye daha kontrollü bir seviyede tutulmuş; uç bölgelerde ise malzeme birikimi sınırlı kalmıştır. Nominal kalınlığın 3 mm olduğu dikkate alındığında, ölçüm noktalarının büyük bir kısmında et kalınlığının bu değere yakın seyrettiği, orta bölgede ise minimum kalınlık değerlerinin gözlemlendiği belirlenmiştir.

Grafikteki dağılımda, uçlara yakın bölgelerde kalınlık 3,4 mm seviyesinin üzerine çıkarken, merkezdeki kalınlık yaklaşık 3,1 mm civarına kadar düşmüştür. Bu durum, aksel beslemenin malzeme akışını dengeleyerek merkezdeki aşırı incelmeyi azalttığını ve uçlardaki kalınlık artışını sınırladığını göstermektedir. Elde edilen eğri, kalınlık dağılımında homojenliğe yakın bir profil elde edildiğini ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak hem iç basıncın artırılması hem de aksel besleme miktarının yükseltilmesi, et kalınlığı dağılımı açısından daha istenen bir sonuç yaratmış, optimum süreç parametrelerine yaklaşıldığını göstermiştir. Bu bulgu, literatürde önerilen “birlikte optimizasyon” stratejisini destekler niteliktedir.

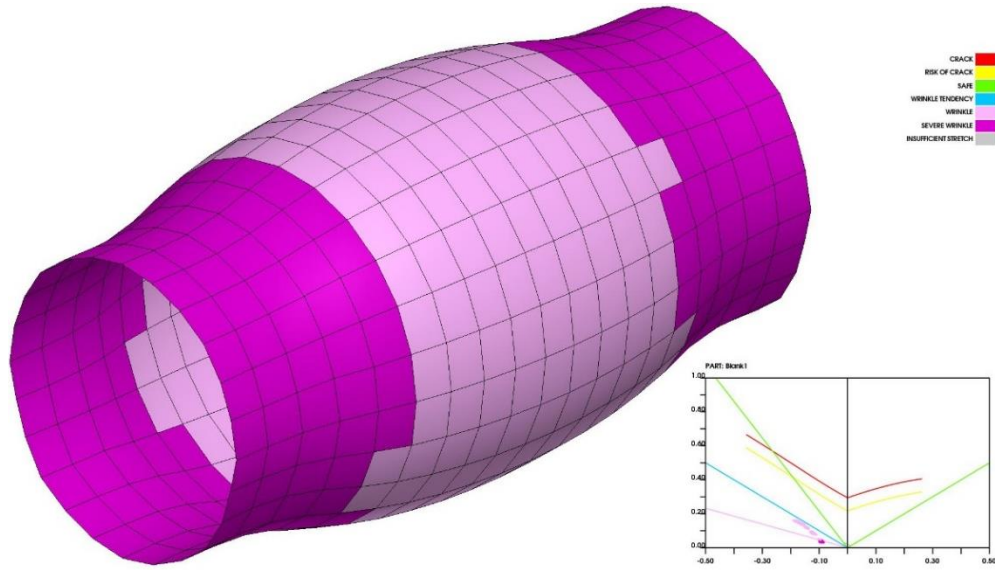


Şekil 4.40. 200 MPa iç basınç ve 4 mm besleme uygulanmış durumda elde edilen oransal et kalınlığı değişimi

Şekil 4.40'ta tüpün uç kısımlarında maviye yakın bölgeler, %28'e yaklaşan oransal kalınlık artışlarını temsil etmektedir. Bu lokal artışlar, özellikle aksel beslemenin etkisiyle uç bölgelerde malzemenin birikmesi ve kalıp kenarına doğru hareketiyle ilişkilendirilebilir. Özellikle buruşma ve malzeme akışı sonucu bu bölgelerde nominal kalınlığın üzerinde değerlere çıkılması mümkündür.

Tüpün orta bölgesine yaklaşıldığında ise kırmızı alanların genişlediği ve burada oransal kalınlıkta yaklaşık %1-2 seviyelerinde bir azalma olduğu izlenmektedir. Bu merkez bölge, şekillendirme sırasında en fazla gerilme ve akma etkisine maruz kalan alandır. Dolayısıyla, şekillendirme işlemiyle birlikte malzemenin uzayarak incilmesi burada maksimum seviyeye ulaşmıştır. Genel olarak bu senaryoda, aksel besleme miktarının artırılması uçlardaki malzeme birikimini ve dolayısıyla kalınlık artışını

büyütürken, orta kısımlarda ise şekillendirme kaynaklı tipik incelme etkisinin devam ettiği görülmektedir.

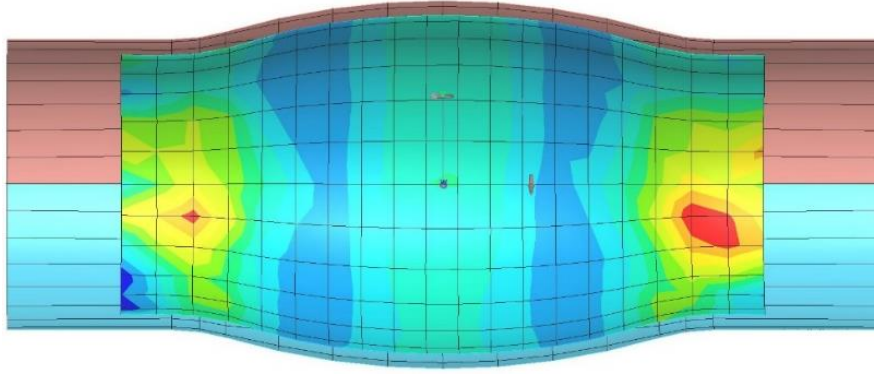


Şekil 4.41. 200 MPa iç basınç ve 4 mm besleme uygulanmış durumda elde edilen şekillendirme limit diyagramı (ŞLD) ve burç yüzeyindeki şekillendirme bölgeleri

Verilen ŞLD haritasında, burç üzerinde şekillendirme işlemi sonrası elde edilen şekillendirilebilirlik bölgeleri detaylı olarak analiz edilmiştir. Mor ve pembe renkli bölgeler, boru uçlarında ve sınırlarda ciddi bir kırışıklık ve burkulma eğiliminin hâlen devam ettiğini göstermektedir. Özellikle aksel beslemenin etkisiyle uçlardaki malzeme yığılması, bu bölgede ciddi bir geometrik stabilite problemi oluşturmakta, bu da endüstriyel üretimde yüzey kalitesinin ve boyutsal hassasiyetin azalmasına yol açmaktadır.

Burcun orta bölgesinde ise, mor ve pembe alanların büyük oranda azaldığı, güvenli şekillendirme için daha uygun bir alanın olduğu gözlenmektedir. Bu durum, uygulanan yüksek basınç ve aksel beslemenin kombinasyonu ile hedeflenen formun merkez bölgede başarılı şekilde elde edildiğini göstermektedir. ŞLD eğrisinin altındaki noktalar, bu bölgede yırtılma riskinin oluşmadığını, ancak uçlardaki kırışma ve burkulma riskinin devam ettiğini açıkça ortaya koymaktadır.

ŞLD grafiğinin sağ alt köşesindeki diyagramda da incelenen tüm noktaların yırtılma sınırının altında kaldığı ve genel olarak güvenli deformasyon bölgesinde olduğu görülmektedir.



Şekil 4.42. 200 MPa iç basınç ve 4 mm besleme durumunda burç parçasının kalıp içindeki konumunu ve kalıp-parça temasını gösteren kesit görünüşü

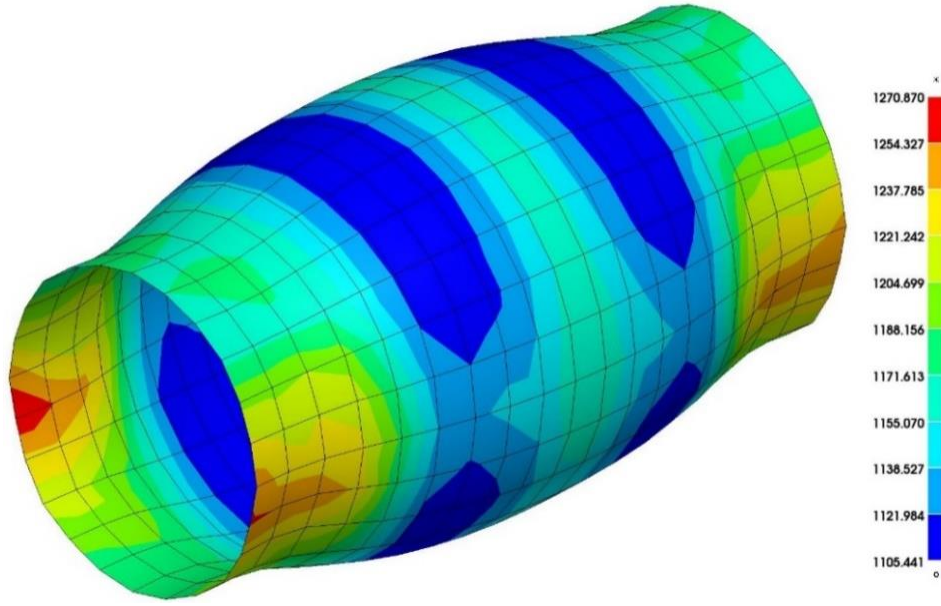
Kesit görüntüsünde, burç parça formunun kalıba yakınsaması belirgin şekilde artmıştır. Orta bölgede formun hedeflenen kalıp geometrisine yaklaşmış olduğu ve uçlardaki aksenal besleme nedeniyle burkulma eğiliminin devam ettiği izlenmektedir.

200 MPa iç basınç ve 4 mm aksenal besleme altında, burç geometrisinin orta bölgesi için şekillendirme güvenli sınırlar içinde gerçekleşmiş; fakat uç bölgelerde, kırışıklık ve burkulma sorunları sürmektedir. Süreç parametrelerinin optimize edilmesiyle, özellikle uçlardaki malzeme akışı daha iyi kontrol edilebilir ve nihai ürün kalitesi artırılabilir.

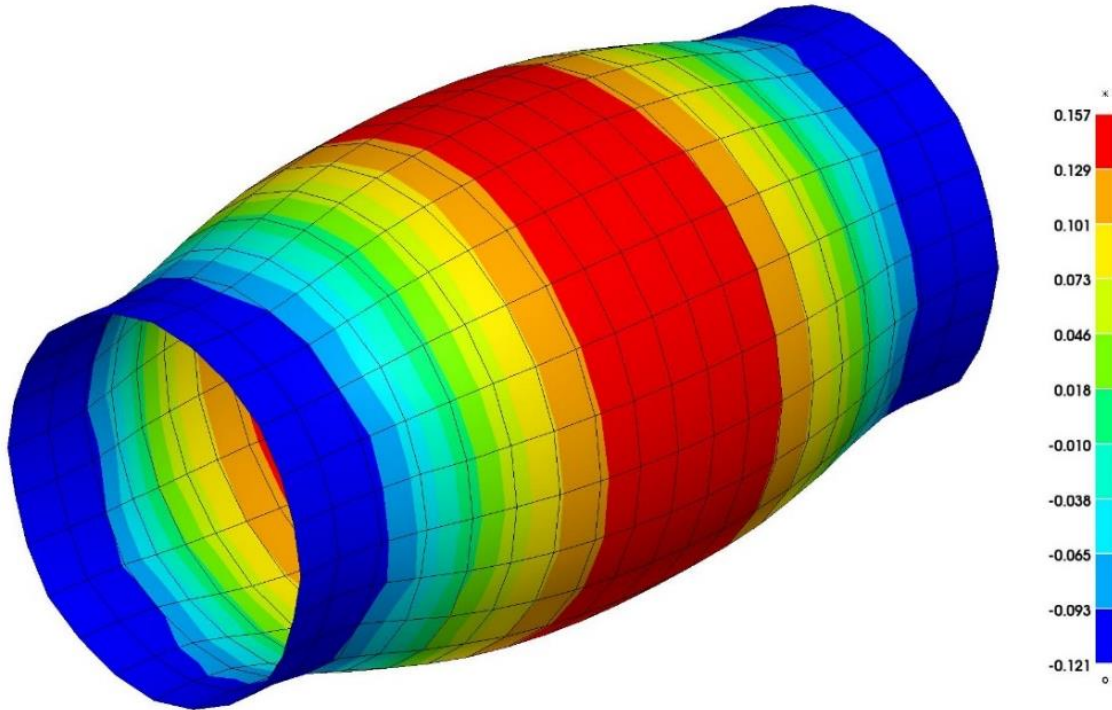
4.2.7. 200 MPa basınç ve 6 mm aksenal besleme

Şekil 4.43'te 200 MPa iç basınç ve 6 mm aksenal besleme koşulları altında burç üzerinde oluşan Von Mises gerilme dağılımını detaylı olarak ortaya koymaktadır. Gerilme dağılımı incelendiğinde, en yüksek gerilme değerlerinin merkez bölgede ve aksenal uçlarda yoğunlaştığı gözlemlenmektedir. Bu bölgelerdeki gerilme artışları, yüksek basınç altında malzemenin plastik deformasyon sürecine girdiğinin ve şekil değiştirme mekanizmalarının aktif olarak çalıştığı bir göstergesidir.

Özellikle kalıp ile temas eden yüzeylerde ve aksenal beslemenin yoğun olarak uygulandığı alanlarda gözlenen yüksek gerilme bölgeleri, sürtünme etkileri ve malzeme akışının geometrik kısıtlamalarla etkileşiminin bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Bu durum, plastik şekil değişiminin kontrollü bir şekilde gerçekleştiğini, ancak aynı zamanda malzemenin mekanik dayanım sınırlarının zorlandığı kritik noktaların da oluştuğunu işaret etmektedir.



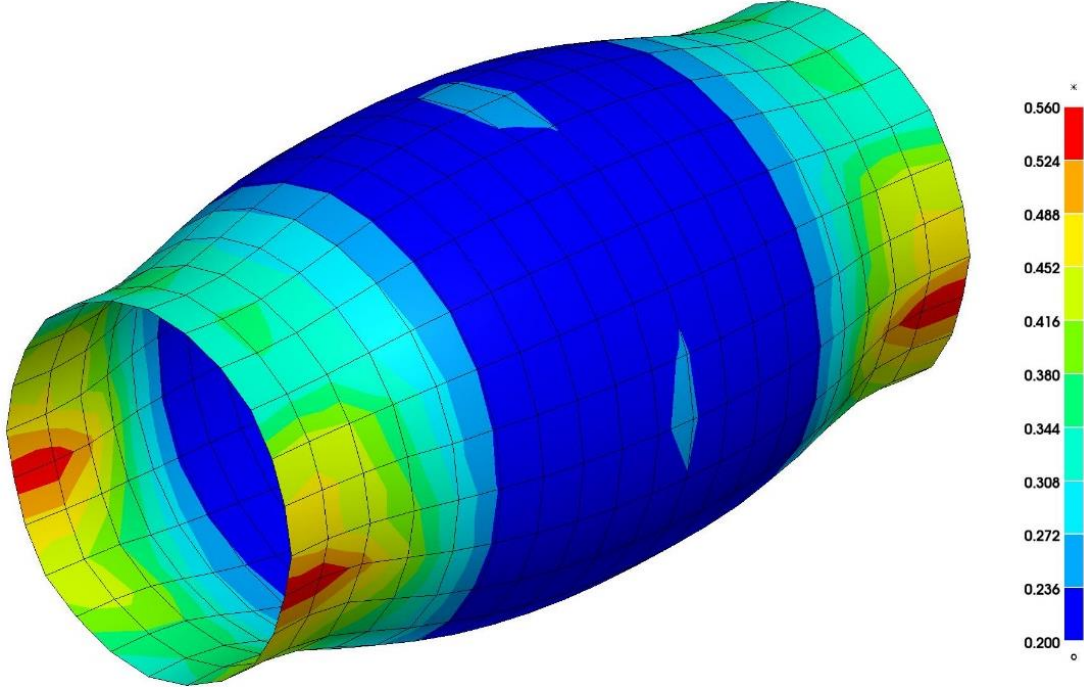
Şekil 4.43. 200 MPa iç basınç ve 6 mm besleme durumunda elde edilen Von Mises gerilme dağılımı (MPa)



Şekil 4.44. 200 MPa iç basınç ve 6 mm besleme durumunda elde edilen BŞD dağılımı

BŞD, burcun ortasında belirgin bir şekilde artmıştır ve uç bölgelerde düşüş göstermektedir. Merkezdeki yüksek gerilim zonları, burcun hedeflenen forma yaklaşmasında etkili olmuştur. Bununla birlikte, uçlardaki düşük gerilim değerleri, beslemenin etkisinin bu bölgelerde sınırlı olduğunu, deformasyonun merkezde

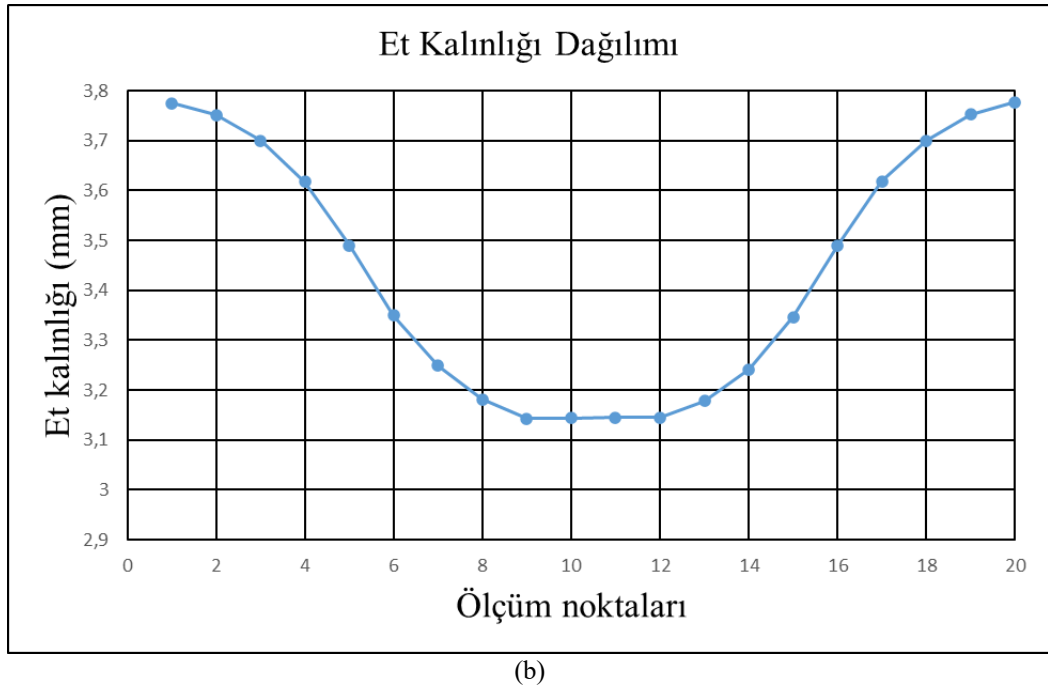
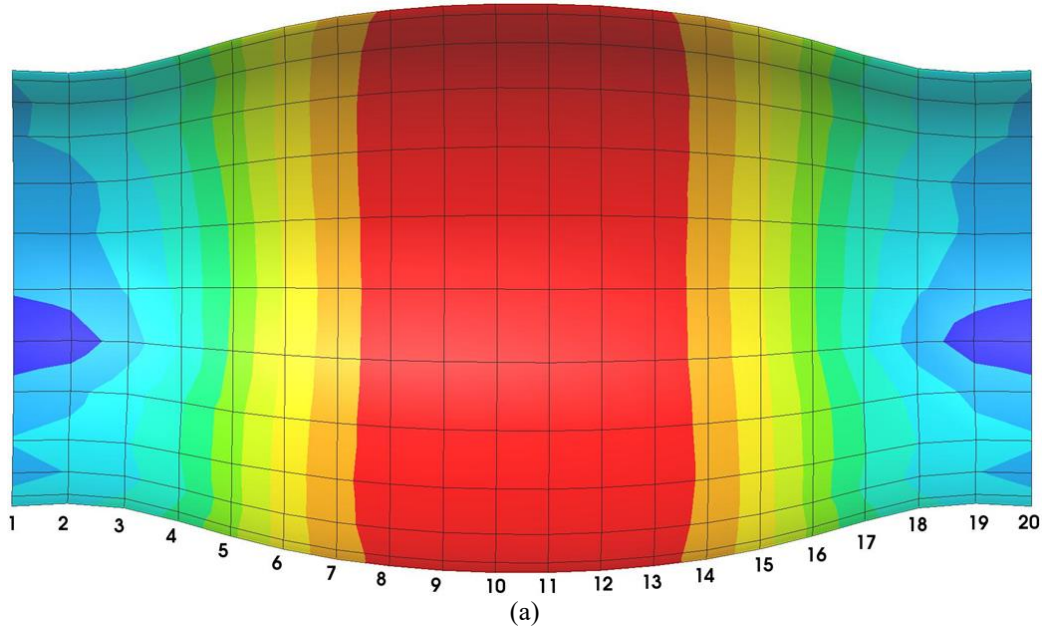
yoğunlaştığını göstermektedir. Bu hem formun elde edilmesi hem de şekillendirme homojenliği açısından olumlu bir göstergedir.



Şekil 4.45. 200 MPa iç basınç ve 6 mm besleme durumunda elde edilen maksimum plastik şekil değiştirme dağılımı

Analiz sonuçları, plastik şekil değiştirme dağılımının burç parçası boyunca heterojen bir karakter sergilediğini göstermektedir (Şekil 4.45). Merkez bölgede gözlenen yüksek plastik deformasyon değerleri, bu kısımda malzeme akışının daha yoğun olduğunu ve şekillendirme işleminin etkin bir şekilde gerçekleştiğini ortaya koymaktadır. Buna karşılık, uç bölgelere doğru deformasyon değerlerinin kademeli olarak azalması, geometrik kısıtlamalar ve aksenal beslemenin etki alanının sınırlı kalmasından kaynaklanmaktadır.

Bu dağılım profili, burç parçasının şekillenme sürecinde merkez bölgenin hedef geometriye yakınsadığını, ancak uç kısımlarda deformasyonun henüz yeterli seviyeye ulaşmadığını göstermektedir. Özellikle merkezde oluşan yüksek plastik deformasyon, uygulanan 6 mm aksenal beslemenin bu bölgedeki malzeme akışını başarılı şekilde desteklediğini kanıtlamaktadır.

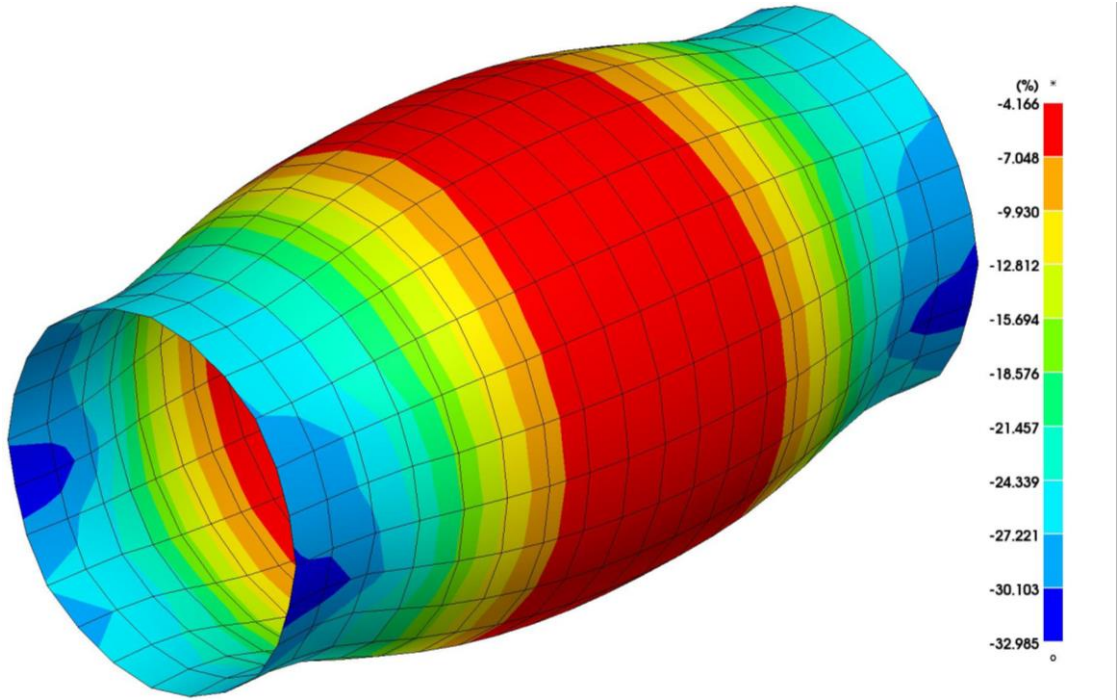


Şekil 4.46. 200 MPa iç basınç ve 6 mm besleme durumunda elde edilen et kalınlığı dağılımı. (a) Ölçüm noktalarının dağılımı. (b) Et kalınlığı dağılım grafiği.

Şekil 4.46'ta, 200 MPa iç basınç ve 6 mm eksenel besleme uygulanan durumda elde edilen et kalınlığı dağılımı sunulmuştur. Görüldüğü üzere, eksenel besleme miktarının daha da artırılması, burç uçlarında belirgin bir kalınlık artışına neden olmuş; bu bölgelerde et kalınlığının 3,7 mm seviyesinin üzerine çıktığı izlenmektedir. Özellikle başlangıç ve bitiş noktalarında (ölçüm noktası 1 ve 20) maksimum kalınlık değerleri oluşurken, orta bölgede ise kalınlık 3,1 mm civarında, görece sabit bir düzeyde kalmıştır.

Bu sonuç, yüksek aksel beslemenin uçlardaki malzeme birikimini artırdığını ve merkezdeki incelmeyi sınırladığını ortaya koymaktadır. Ancak, uçlardaki aşırı kalınlık artışı parça genelinde homojen bir kalınlık dağılımının önüne geçmektedir. Başka bir deyişle, aksel beslemenin optimumdan fazla artırılması, merkezdeki incelmeyi minimize etse de uçlarda istenmeyen malzeme birikimlerine yol açmaktadır.

Sonuç olarak; 200 MPa iç basınç ve 6 mm aksel besleme kombinasyonu ile, merkez bölgede görece sabit bir kalınlık elde edilmekle birlikte, uç bölgelerde ciddi kalınlık artışları gözlenmiştir. Bu durum, THŞ prosesinde aksel beslemenin aşırı artırılmasının, kalınlık homojenliği üzerinde olumsuz bir etki yaratabileceğini göstermektedir. Dolayısıyla optimum proses parametrelerinin belirlenmesinde hem merkezdeki incelmenin hem de uçlardaki malzeme birikiminin birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir.

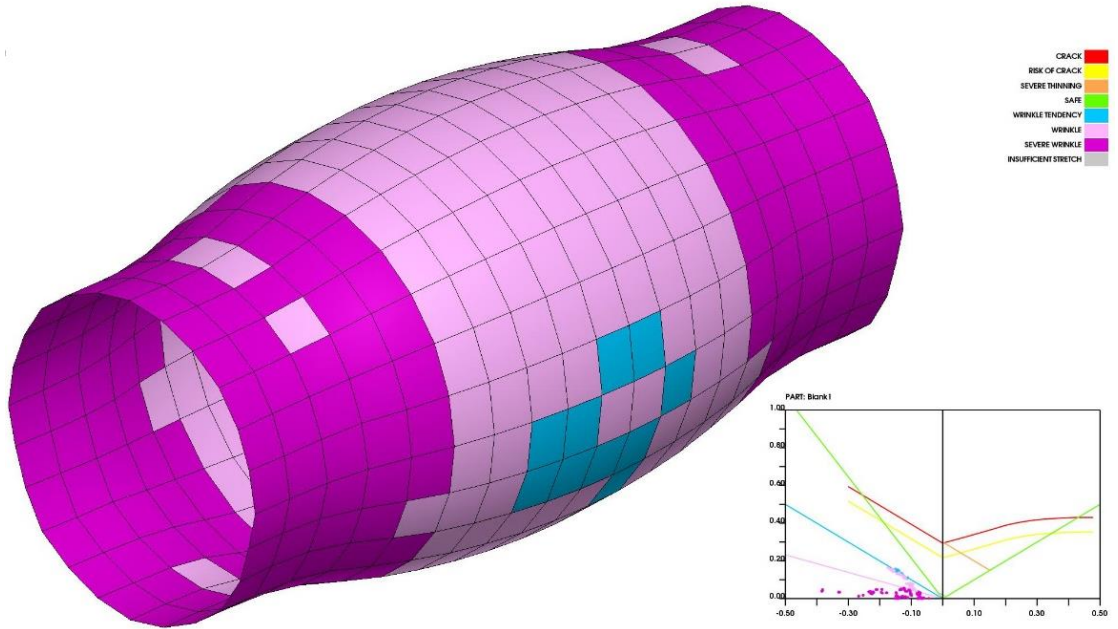


Şekil 4.47. 200 MPa iç basınç ve 6 mm besleme durumunda elde edilen oransal et kalınlığı değişimi

Şekil 4.47’de oransal et kalınlığı değişiminin tüm yüzey boyunca negatif değerler göstermediği; aksine, renk skalasına göre pozitif yönde bir değişim sergilendiği açıkça görülmektedir. Yani, parçanın hiçbir bölgesinde nominal değerden daha ince bir alan bulunmamaktadır. Aksine, tüm bölgelerde malzeme kalınlığında artış meydana gelmiştir. Özellikle uç kısımlar mavi ile, orta bölgeler ise kırmızıyla gösterilmiş olup hem kenar hem merkez bölgelerde pozitif oransal değerlerin hakim olduğu gözlenmektedir.

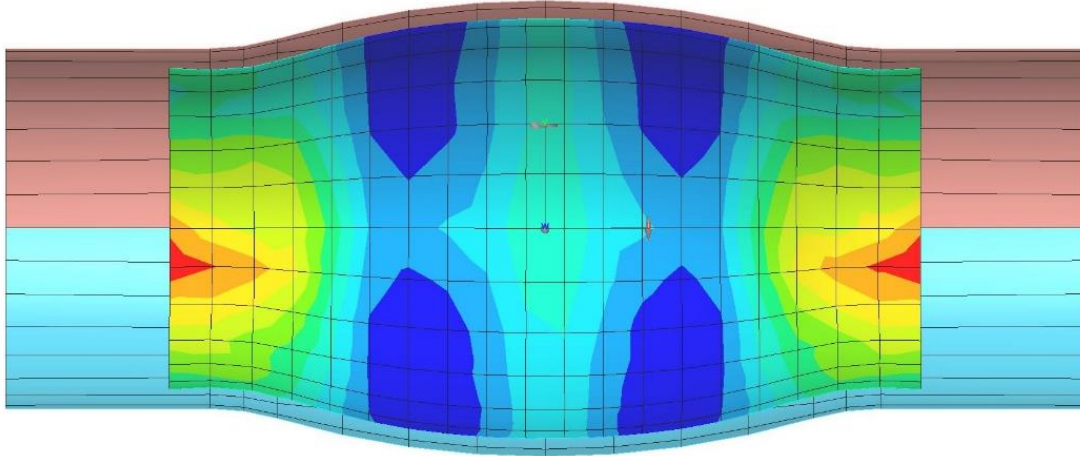
Bu sonuç, yüksek basınca ek olarak fazla miktarda aksel beslemenin etkisiyle malzemenin hem merkeze hem de kenarlara doğru itilerek birikmesine, yani parçanın genelinde kalınlığın nominal değerin üstüne çıkmasına neden olmuştur. Özellikle uç bölgelerde belirgin kalınlık artışları, malzeme akışının kenarlarda toplanmasından kaynaklanmaktadır. Merkez bölgede ise bu artış daha homojen ve yaygındır.

Sonuç olarak, 200 MPa iç basınç ve 6 mm aksel besleme parametreleriyle yürütülen bu senaryoda, şekillendirilen tüp boyunca oransal et kalınlığında sürekli bir artış gözlenmiştir. Bu da aksel beslemenin optimumdan fazla seçildiğini ve sürecin malzeme dağılımı açısından ideal olmadığını göstermektedir. Elde edilen dağılım, özellikle hassas kalınlık kontrolü gerektiren uygulamalarda, bu parametrelerin yeniden optimize edilmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır.



Şekil 4.48. 200 MPa iç basınç ve 6 mm besleme durumunda elde edilen şekillendirme limit diyagramı (ŞLD) ve burç yüzeyindeki şekillendirme bölgeleri

Analiz sonucunda tüpün özellikle uç ve orta bölgelerinde yoğun olarak mor ve pembe renklerin hakim olduğu görülmektedir; bu durum, ilgili alanlarda burkulma (wrinkling) ve şiddetli burkulma (severe wrinkling) riskinin yüksek olduğunu göstermektedir. ŞLD grafiğinde verilerin büyük kısmı burkulma bölgelerinde yer almakta, yırtılma veya aşırı incelme riski gözlenmemektedir. Bu senaryoda, proses parametrelerinin yeterli malzeme akışı ve şekil bütünlüğü sağlamada yetersiz kaldığı, buruşma eğiliminin ön plana çıktığı anlaşılmaktadır.



Şekil 4.49. 200 MPa iç basınç ve 6 mm besleme durumunda burç parçasının kalıp içindeki konumunu ve kalıp-parça temasını gösteren kesit görünüşü

Kesit analizinde, burcun merkezindeki şişkinliğin hedef profile yaklaştığı; ancak uç bölgelerde kalıp formunun tam olarak elde edilemediği ve kırışma izlerinin net olarak gözlemlendiği görülmektedir. İç basınç ve yüksek aksel besleme, merkezde formu iyileştirse de uçlarda lokalize kırışma ve kalınlık artışını beraberinde getirmiştir.

Bu senaryoda, 200 MPa iç basınç ve 6 mm aksel besleme parametreleriyle yapılan analiz sonucunda, burç merkezinde istenen formun yakalanmasına rağmen, uç bölgelerde belirgin kalınlık artışı ve ciddi kırışma problemleri gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, aksel besleme miktarının artırılmasının merkezde formun oluşmasına katkı sağlarken, uçlarda malzeme birikimine ve kırışıklığa yol açtığını göstermektedir. İdeal bir şekillendirme prosesi için aksel besleme ve iç basınç parametrelerinin daha hassas dengelenmesi gerekmektedir. Ayrıca, üretim sonrası ürün kalitesini artırmak için uçlardaki kırışıklıkların minimize edilmesine yönelik iyileştirmeler yapılmalıdır.

4.3. Parametrelerin Etkisi ve Kıyaslama

Bu çalışmada gerçekleştirilen sayısal analizler kapsamında, iç basınç ve aksel besleme parametrelerinin burç parçasının şekillendirilmesi üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Her bir senaryoda elde edilen Von Mises gerilme dağılımı, ana şekil değiştirme, maksimum plastik şekil değiştirme ve kalınlık dağılımı gibi performans kriterleri ışığında, proses parametrelerinin hem lokal deformasyonlara hem de genel form kalitesine olan etkisi ayrıntılı biçimde incelenmiştir.

Analizler göstermiştir ki, arttırılan iç basınç, burç parçası üzerinde plastik deformasyonun hem miktarını hem de yayılımını belirgin biçimde arttırmakta; özellikle

merkez bölgede istenen şeklin elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Düşük basınç koşullarında, deformasyonun ve şekillendirme başarısının sınırlı kaldığı, kalıp formunun tam olarak alınamadığı ve özellikle orta bölgede şekil kayıplarının olduğu gözlemlenmiştir. 200 MPa seviyesindeki yüksek basınçta ise, parça genelinde plastik şekil değiştirme artmış; fakat kalınlık incelmesi ve lokal gerilme yığılmaları, form bütünlüğü açısından dikkatle izlenmesi gereken kritik alanlar olarak öne çıkmıştır.

Eksenel beslemenin artırılması, şekillendirme işleminin homojenliğini olumlu yönde etkilemiş; özellikle orta bölgede optimum form elde edilmesini sağlamıştır. Ancak, beslemenin yüksek tutulduğu senaryolarda, uç bölgelerde malzeme birikimi ve ciddi kalınlık artışları gözlenmiştir. Bu durum, uçlarda kırışıklık ve burkulma riskinin artmasına ve formun bu bölgelerde istenen düzeye tam olarak ulaşamamasına neden olmuştur. Özellikle 6 mm beslemeli analizlerde, merkez bölgedeki kalınlık dağılımı homojenleşirken, uçlarda aşırı malzeme yığılması endüstriyel kalite açısından potansiyel bir sorun olarak tespit edilmiştir.

Şekillendirilebilirlik limit diyagramı (ŞLD) sonuçları, uygulanan parametre kombinasyonlarının büyük çoğunluğunda yırtılma veya çatlama riskinin oluşmadığını; ancak uç bölgelerde kırışıklık eğiliminin devam ettiğini ortaya koymuştur. Elde edilen bulgular, optimum şekillendirme için hem iç basınç hem de eksenel besleme parametrelerinin birlikte ve dengeli bir şekilde optimize edilmesi gerektiğini, tek başına herhangi bir parametrenin şekillendirme başarısı açısından yeterli olmadığını göstermektedir.

Sonuç olarak, yapılan analizler doğrultusunda, proses parametrelerinin burç formunun kalitesi, kalınlık dağılımı ve yüzey bütünlüğü üzerinde doğrudan ve belirleyici bir etkiye sahip olduğu, özellikle yüksek basınç ve kontrollü eksenel beslemenin formun elde edilmesinde temel faktör olduğu ortaya konmuştur.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Bu tez kapsamında, otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılan ve kompleks şekil özelliklerine sahip burç tipi tüp parçaların, hidroşekillendirme prosesiyle üretilmesi sırasında karşılaşılan temel mekanik ve geometrik problemlerin sayısal olarak araştırılması hedeflenmiştir. Bu doğrultuda, DP800 kalitesinde çelikten mamul ham tüp parçanın, farklı iç basınç ve aksel besleme kombinasyonlarında, Dynaform ve LS-DYNA sonlu elemanlar yazılımları kullanılarak simülasyonları gerçekleştirilmiştir.

Yapılan analizler sonucunda, aşağıdaki başlıca bulgular ortaya konmuştur:

İç Basıncın Etkisi: Yalnızca iç basıncın uygulandığı ve aksel beslemenin olmadığı senaryolarda, boru formunun hedeflenen kalıp geometrisine ulaşamadığı, özellikle orta bölgede yeterli şişme elde edilemediği tespit edilmiştir. Düşük iç basınç seviyelerinde ise, uç bölgelerde kalınlık artışı ile eksik dolum ve şekil bütünlüğünde bozulma gözlenmiştir.

Eksel Beslemenin Rolü: Eksel besleme miktarının artmasıyla birlikte, tüpün kalıp içindeki yayılmasının daha homojen olduğu ve istenen nihai forma yaklaşılabilirdiği görülmüştür. Ancak, aksel beslemenin aşırı artırıldığı durumlarda, uç bölgelerde malzeme birikimi ve aşırı kalınlaşma meydana gelmiş, bu da hedeflenen parça kalitesini olumsuz yönde etkilemiştir.

Kalınlık Dağılımı: Tüm senaryolarda, özellikle iç basınç ve aksel besleme parametrelerinin optimum aralıkta olduğu kombinasyonlarda, kalınlık dağılımının daha dengeli olduğu, minimum ve maksimum kalınlık bölgeleri arasındaki farkın azaldığı tespit edilmiştir. Yetersiz beslemede ise, orta bölgede incelme, uçlarda ise kalınlaşma eğilimi belirgin şekilde gözlemlenmiştir.

Mekanik Davranışlar ve Kritik Alanlar: Von Mises gerilme dağılımları ve plastik şekil değiştirme analizleri, yüksek iç basınç ve uygun aksel besleme ile, burç parçasının kalıp formunu başarıyla taklit ettiğini ve kritik bölgelerde gerilme yığılması oluşmadığını göstermiştir. Bununla birlikte, eksik beslemede ve/veya düşük basınçta, lokal gerilme artışları ve akma sınırına yakın bölgeler saptanmıştır.

Kırılma ve Burkulma Eğilimleri: Şekillendirilebilirlik limit diyagramı (ŞLD) sonuçları, bazı senaryolarda parçanın emniyetli çalışma bölgesinde kaldığını, ancak düşük besleme veya yetersiz basınç altında, burkulma ve kırılma riskinin önemli oranda

arttığını göstermektedir. Özellikle uç kısımlarda kırışıklık oluşumu, optimal proses parametreleriyle minimize edilebilmiştir.

Modelleme ve Sonlu Eleman Analizinin Geçerliliği: Yüksek çözünürlüklü sonlu eleman modeli ve hassas malzeme tanımlamaları sayesinde, elde edilen tüm sonuçlar gerçek proses davranışı ile uyumlu bulunmuştur. Bu durum, süreç parametrelerinin sayısal yöntemlerle güvenilir biçimde optimize edilebileceğini göstermektedir.

Genel olarak, yapılan analizler sonucunda; hidroşekillendirme proses parametrelerinin doğru seçiminin, burç tipi boru parçalarının istenen toleranslarda, minimum kalınlık değişimi ve yüksek yapısal bütünlük ile üretilebilmesi açısından kritik öneme sahip olduğu ortaya konmuştur. Analizler kapsamında elde edilen bulgular, özellikle 200 MPa iç basınç ve 2 mm aksel besleme parametrelerinin kombinasyonu ile optimuma en yakın üretim sonuçlarının elde edildiğini göstermiştir. Ayrıca, analizlerden elde edilen sonuçlar, literatürde bildirilen teorik ve deneysel verilerle büyük ölçüde uyumludur. Elde edilen veriler, endüstriyel uygulamalar için proses optimizasyonu ve parça kalitesi açısından değerli bir referans niteliğindedir.

5.2 Öneriler

Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen sayısal analizler ve elde edilen bulgular ışığında, otomotiv sektöründe burç tipi kompleks tüp parçaların hidroşekillendirme prosesiyle üretiminde karşılaşılabilecek zorlukların en aza indirilmesi ve proses verimliliğinin artırılması için aşağıdaki öneriler geliştirilmiştir:

Proses Parametrelerinin Optimizasyonu: Sonuçlar, iç basınç ve aksel besleme miktarının optimum kombinasyonlarda uygulanmasının hem hedeflenen geometriye ulaşılması hem de minimum kalınlık değişimiyle yüksek parça kalitesi sağlanması açısından kritik öneme sahip olduğunu göstermektedir. Endüstriyel uygulamalarda, süreç parametrelerinin hassas kontrolüyle hem malzeme kaybı azaltılabilir hem de istenmeyen şekil hataları önenebilir.

Kalınlık Dağılımı ve Yapısal Bütünlük: Burç tipi parçaların şekillendirilmesinde, kalınlık dağılımının homojenliği ve uç bölgelerdeki kalınlaşma eğiliminin sınırlandırılması için, aksel besleme ve iç basınç değerlerinin proses boyunca kademeli olarak optimize edilmesi önerilmektedir. Böylece, istenmeyen burkulma veya kırışıklık riskleri azaltılırken, parça bütünlüğü ve servis ömrü artırılabilir.

Malzeme ve Model Seçimi: Sonlu eleman analizlerinde kullanılan DP800 çeliği, yüksek dayanım ve şekillendirme kabiliyeti ile öne çıkmaktadır. Farklı uygulamalar için malzeme seçimi yapılırken hem mekanik özellikler hem de şekillendirme davranışı göz önünde bulundurulmalıdır. Ayrıca, sonlu eleman modeli kurulumunda, malzeme kartı verilerinin doğru tanımlanması ve mesh kalitesinin yüksek tutulması, analizlerin doğruluğu açısından önem taşımaktadır.

Analiz Sonuçlarının Endüstriyel Uygulamalara Aktarımı: Elde edilen sayısal analiz bulguları, endüstriyel üretim süreçlerinde referans alınarak, seri üretime geçişte karşılaşılabilecek olası problemler önceden tespit edilebilir ve üretim parametreleri buna uygun şekilde ayarlanabilir. Böylece, zamandan ve maliyetten tasarruf sağlanarak, üretim verimliliği maksimize edilebilir.

Kalite Kontrol ve İzlenebilirlik: Şekillendirme sonrası parçalarda, kalınlık ölçümü, yüzey kalitesi ve geometrik hassasiyet gibi kalite kontrol adımlarının süreç boyunca izlenmesi, üretim süreçlerinde sürdürülebilir kalite yönetimini desteklemektedir. Bu kapsamda, analiz ve üretim süreçlerinin dijitalleştirilmesi ve entegre kalite kontrol sistemlerinin kullanımı önerilmektedir.

Genel olarak, bu tez kapsamında elde edilen sonuçlar hem mühendislik hem de üretim açısından tüp hidroşekillendirme proses parametrelerinin çok boyutlu olarak optimize edilmesi gerekliliğini bir kez daha ortaya koymuştur. Özellikle kompleks geometri ve yüksek hassasiyet gerektiren parçaların üretiminde, sayısal analiz temelli proses geliştirme yaklaşımlarının uygulanması, kalite ve verimlilik açısından sürdürülebilir bir avantaj sunmaktadır.

6. KAYNAKLAR

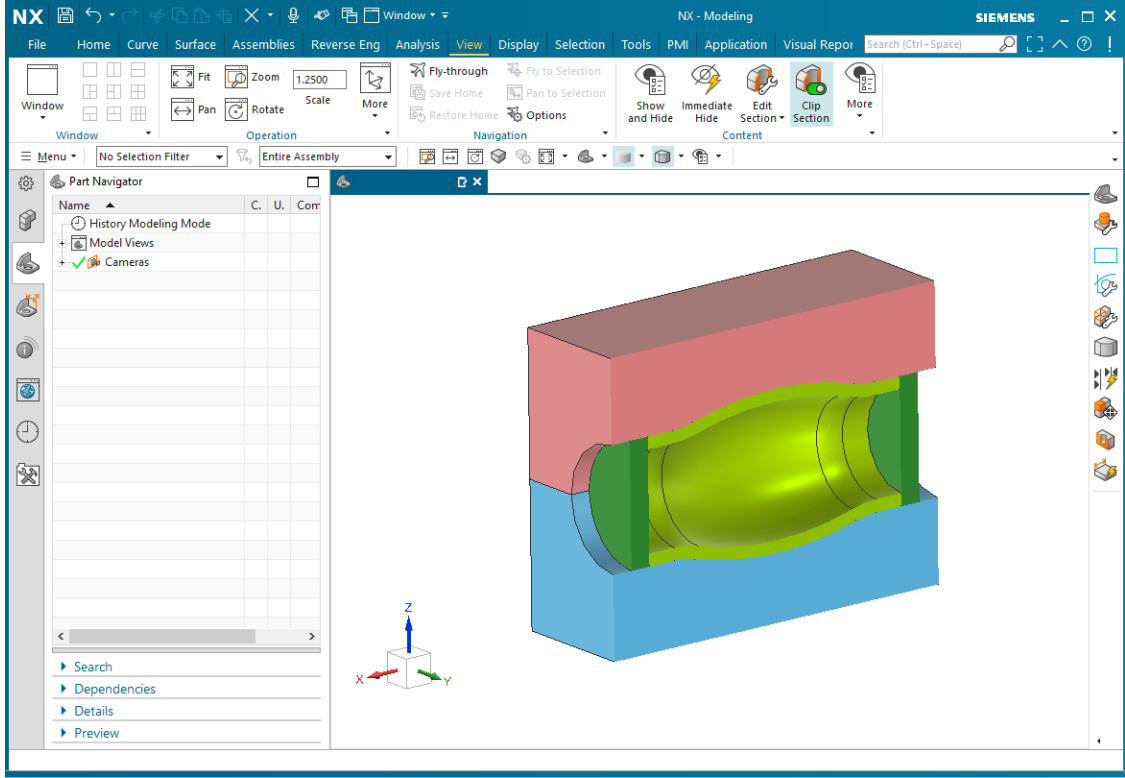
- Abbassi, F., Ahmad, F., Gulzar, S., Belhadj, T., Karrech, A., & Choi, H. S. (2020). Design of T-shaped tube hydroforming using finite element and artificial neural network modeling. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 34(3), 1129-1138. <https://doi.org/10.1007/s12206-020-0214-4>
- Abrantes, J. P., Szabo-Ponce, A., & Batalha, G. F. (2005). Experimental and numerical simulation of tube hydroforming (THF). *Journal of Materials Processing Technology*, 164-165, 1140-1147. <https://doi.org/10.1016/J.JMATPROTEC.2005.02.117>
- Ahmetoglu, M., Sutter, K., Li, X. J., & Altan, T. (2000). Tube hydroforming: current research, applications and need for training. *Journal of Materials Processing Technology*, 98(2), 224-231. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(99\)00203-4](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(99)00203-4)
- Altan, T., Ngaile, G., & Shen, G. (2004). *Cold and hot forging: fundamentals and applications* (C. 1). ASM international.
- Antoine, C., Gaiffier, J., Chalaye, H., & Roche, J. (1997). Hydroforming at CEA Saclay: first results. *1997 Workshop on RF superconductivity, Padova, Italy*, 598-605.
- Bell, C., Corney, J., Zuelli, N., & Savings, D. (2020a). A state of the art review of hydroforming technology. *International Journal of Material Forming*, 13(5), 789-828. <https://doi.org/10.1007/s12289-019-01507-1>
- Bell, C., Corney, J., Zuelli, N., & Savings, D. (2020b). A state of the art review of hydroforming technology. *International Journal of Material Forming*, 13(5), 789-828. <https://doi.org/10.1007/s12289-019-01507-1>
- Bell, C., Corney, J., Zuelli, N., & Savings, D. (2020c). A state of the art review of hydroforming technology. *International Journal of Material Forming*, 13(5), 789-828. <https://doi.org/10.1007/s12289-019-01507-1>
- Bortolussi, R., & Button, S. (2009). Prediction of Forming Limits of Tube Hydro-forming Process Simulation and Experiments. *Materials Processing Technology (J)*.
- Chinchanikar, S., Mulik, H., Varude, P., Atole, S., & Mundada, N. (2024). A review of emerging hydroforming technologies: design considerations, parametric studies, and recent innovations. *Journal of Engineering and Applied Science*, 71(1), 205. <https://doi.org/10.1186/s44147-024-00546-z>
- Chu, E., & Xu, Y. (2004a). Hydroforming of aluminum extrusion tubes for automotive applications. Part I: buckling, wrinkling and bursting analyses of aluminum tubes. *International Journal of Mechanical Sciences*, 46(2), 263-283. <https://doi.org/10.1016/J.IJMECSCI.2004.02.014>
- Chu, E., & Xu, Y. (2004b). Hydroforming of aluminum extrusion tubes for automotive applications. Part II: process window diagram. *International Journal of Mechanical Sciences*, 46(2), 285-297. <https://doi.org/10.1016/J.IJMECSCI.2004.02.013>
- Dohmann, F., & Hartl, C. (1997). Tube hydroforming—research and practical application. *Journal of Materials Processing Technology*, 71(1), 174-186. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(97\)00166-0](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(97)00166-0)
- Egger, C., Lüchinger, M., Schreiner, M., & Tillmann, W. (2022). Numerical Simulation of Tube Manufacturing Consisting of Roll Forming and High-Frequency Induction Welding. *Materials*, 15(3). <https://doi.org/10.3390/ma15031270>
- Gao, L., & Strano, M. (2004a). FEM analysis of tube pre-bending and hydroforming. *Journal of Materials Processing Technology*, 151(1-3), 294-297. <https://doi.org/10.1016/J.JMATPROTEC.2004.04.076>

- Gao, L., & Strano, M. (2004b). FEM analysis of tube pre-bending and hydroforming. *Journal of Materials Processing Technology*, *151*(1-3), 294-297. <https://doi.org/10.1016/J.JMATPROTEC.2004.04.076>
- Hama, T., Asakawa, M., & Makinouchi, A. (2004). Investigation of factors which cause breakage during the hydroforming of an automotive part. *Journal of Materials Processing Technology*, *150*(1-2), 10-17. <https://doi.org/10.1016/J.JMATPROTEC.2004.01.020>
- Imaninejad, M., Subhash, G., & Loukus, A. (2004). Influence of end-conditions during tube hydroforming of aluminum extrusions. *International Journal of Mechanical Sciences*, *46*(8), 1195-1212. <https://doi.org/10.1016/J.IJMECSCI.2004.08.001>
- Jirathearanat, S., Hartl, C., & Altan, T. (2004). Hydroforming of Y-shapes—product and process design using FEA simulation and experiments. *Journal of Materials Processing Technology*, *146*(1), 124-129. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00852-5](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00852-5)
- Kim, T. J., Yang, D. Y., & Han, S. S. (2004). Numerical modeling of the multi-stage sheet pair hydroforming process. *Journal of Materials Processing Technology*, *151*(1-3), 48-53. <https://doi.org/10.1016/J.JMATPROTEC.2004.04.124>
- Koç, M. (2008). *Hydroforming for advanced manufacturing*. Elsevier.
- Koç, M., & Altan, T. (2001). An overall review of the tube hydroforming (THF) technology. *Journal of Materials Processing Technology*, *108*(3), 384-393. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00830-X](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00830-X)
- Kulkarni, A., Biswas, P., Narasimhan, R., Luo, A. A., Mishra, R. K., Stoughton, T. B., & Sachdev, A. K. (2004). An experimental and numerical study of necking initiation in aluminium alloy tubes during hydroforming. *International Journal of Mechanical Sciences*, *46*(12), 1727-1746. <https://doi.org/10.1016/J.IJMECSCI.2004.11.007>
- Lang, L., Yuan, S., Wang, X., Wang, Z. R., Fu, Z., Danckert, J., & Nielsen, K. B. (2004). A study on numerical simulation of hydroforming of aluminum alloy tube. *Journal of Materials Processing Technology*, *146*(3), 377-388. <https://doi.org/10.1016/J.JMATPROTEC.2003.11.031>
- Nikhare, C. P. (2020). Fundamentals in Sheet and Tube Forming: Material Characterization, Conventional and Novel Processes and Involved Mechanics. İçinde K. Gupta (Ed.), *Materials Forming, Machining and Post Processing* (ss. 1-39). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-18854-2_1
- Oh, S. I., Jeon, B. H., Kim, H. Y., & Yang, J. B. (2006a). Applications of hydroforming processes to automobile parts. *Journal of Materials Processing Technology*, *174*(1-3), 42-55. <https://doi.org/10.1016/J.JMATPROTEC.2004.12.013>
- Oh, S. I., Jeon, B. H., Kim, H. Y., & Yang, J. B. (2006b). Applications of hydroforming processes to automobile parts. *Journal of Materials Processing Technology*, *174*(1-3), 42-55. <https://doi.org/10.1016/J.JMATPROTEC.2004.12.013>
- Strano, M., Jirathearanat, S., Shr, S. G., & Altan, T. (2004). Virtual process development in tube hydroforming. *Journal of Materials Processing Technology*, *146*(1), 130-136. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00853-7](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00853-7)
- Talebi-Anaraki, A., Maeno, T., Matsubara, Y., Ikeda, R., & Mori, K. (2022). Integration of Hot Tube Gas Forming and Die Quenching of Ultra-High Strength Steel Hollow Parts Using Low Pressure Sealed-Air. *Materials*, *15*(4). <https://doi.org/10.3390/ma15041322>
- Xing, H. L., & Makinouchi, A. (2001). Numerical analysis and design for tubular hydroforming. *International Journal of Mechanical Sciences*, *43*(4), 1009-1026. [https://doi.org/10.1016/S0020-7403\(00\)00046-1](https://doi.org/10.1016/S0020-7403(00)00046-1)

- Yadong, H., Ping, X., Wenzhong, T., & Fuhua, Z. (2003). Experimental investigation of bulge forming of plastic branch pipe. *Journal of Materials Processing Technology*, *142*(2), 551-555. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00657-5](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00657-5)
- Yang, J. B., Jeon, B. H., & Oh, S. I. (2001). Design sensitivity analysis and optimization of the hydroforming process. *Journal of Materials Processing Technology*, *113*(1-3), 666-672. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)00670-7](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00670-7)
- Yuan, S. (2023a). Equipment and Tooling of Hydroforming. İçinde S. Yuan (Ed.), *Modern Hydroforming Technology* (ss. 171-194). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-5775-8_6
- Yuan, S. (2023b). *Modern hydroforming technology*. Springer.
- Zhang, S. H. (1999). Developments in hydroforming. *Journal of Materials Processing Technology*, *91*(1-3), 236-244. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(98\)00423-3](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(98)00423-3)
- Zhou, B.-J., Xu, Y.-C., Zhang, Z.-C., & Cui, X.-L. (2025). Theoretical analysis, numerical simulation, and experimental verification of critical thickness of upper sheet in aluminum alloy double-layer sheets hydroforming. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *138*(9), 4707-4720. <https://doi.org/10.1007/s00170-025-15656-y>

EKLER

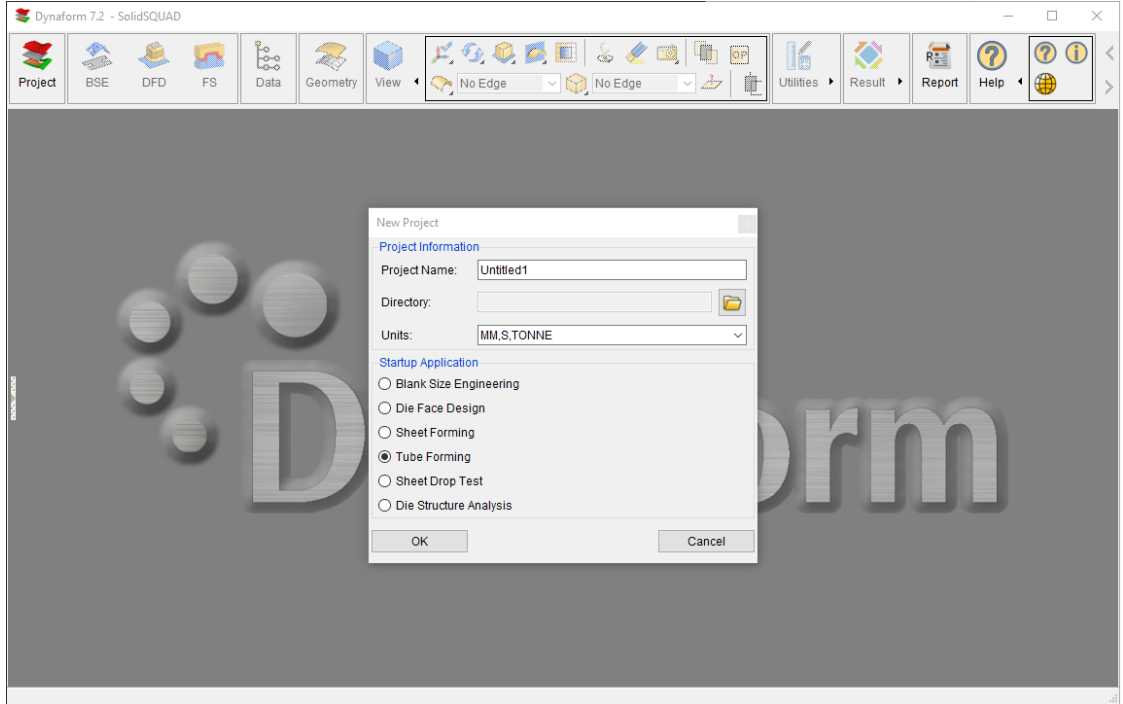
EK-1 Siemens NX CAD/CAM/CAE Yazılımı



Şekil Ek-1. Siemens NX CAD model arayüzü

Tez çalışması kapsamında Siemens NX yazılımı kullanılarak, boru hidroşekillendirme (THŞ) prosesi için gerekli kalıp ve parça modelleri tasarlanmıştır. Üç boyutlu (3D) modelleme araçlarıyla hem iş parçası hem de üst ve alt kalıp geometrileri oluşturulmuş, süreç analizleri için uygun montajlar hazırlanmıştır. Hazırlanan bu modeller, ileri mühendislik analizlerinde (örneğin sonlu elemanlar analizi) kullanılmak üzere dışa aktarılmıştır. Böylece, üretim öncesi tasarım doğrulama ve optimizasyon süreçleri dijital ortamda gerçekleştirilmiştir.

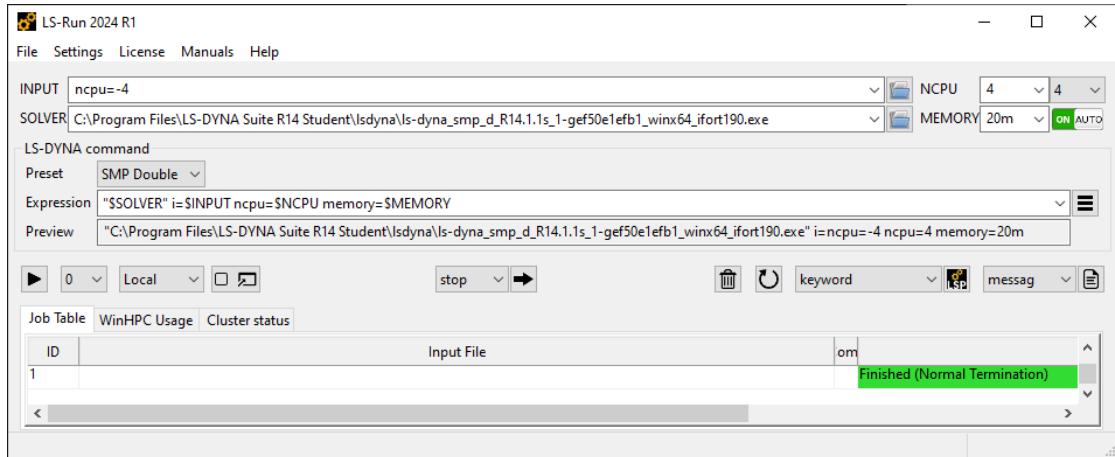
EK-2 Dynaform 7.2 Sonlu Elemanlar Analiz ve Simülasyon Yazılımı



Şekil Ek-2. Dynaform yazılımının proses arayüzü

Tez çalışmam kapsamında Dynaform 7.2 yazılımı kullanılarak, tüp hidroşekillendirme (THŞ) prosesi için gerekli ön işlem ve modelleme adımları tamamlanmıştır. Dynaform arayüzünde, proses parametreleri ve geometri tanımlanmış; sonlu elemanlar analizine uygun şekilde simülasyon dosyaları hazırlanmıştır. Çözüm (analiz) aşaması ise, bu dosyaların LS-DYNA çözücüsüne aktarılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Böylece, tüp şekillendirme sürecinin tüm sayısal simülasyon adımları başarıyla tamamlanmıştır.

EK-3 LS-DYNA Sonlu Elemanlar Analiz (FEA) Yazılımının Çözücüsü



Şekil Ek-3. LS-DYNA FEM çözücü arayüzü

Hazırlanan sonlu elemanlar analiz modeli, LS-DYNA çözücüsüne aktarılmış ve gerekli hesaplamalar bu ortamda gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlar sırasında proses parametrelerinin ve geometrik verilerin etkileri detaylı şekilde incelenmiş; elde edilen analiz çıktıları, şekillendirme sürecinin mekanik davranışlarının değerlendirilmesinde kullanılmıştır. Böylece, sayısal modelleme yoluyla üretim parametrelerinin optimizasyonu ve tasarım doğrulaması sağlanmıştır.