

CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SOĞUK DÖVME İLE ÜRETİMDE SİMÜLASYON UYGULAMALARI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisi Ömer KARADAĞLI

Anabilim Dalı: Makine Mühendisliği

Programı: Konstrüksiyon ve İmalat

MANİSA 2014

CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SOĞUK DÖVME İLE ÜRETİMDE SİMÜLASYON UYGULAMALARI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisi Ömer KARADAĞLI

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 12 Ağustos 2014

Tezin Savunulduğu Tarih: 01 Eylül 2014

Tez Danışmanı:

Yrd. Doç. Dr. Osman ÇULHA

Diğer Jüri üyeleri:

Prof. Dr. Mustafa TOPARLI

Yrd. Doç. Dr. B. Burak ÖZHAN

MANİSA 2014

İÇİNDEKİLER

İÇİNDEKİLER.....	III
ŞEKİL LİSTESİ.....	VI
ÇİZELGE LİSTESİ.....	XIV
KISALTMALAR LİSTESİ	XV
TEŞEKKÜR.....	XVI
ÖZET	XVII
ABSTRACT	XVIII
1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
2. GENEL BİLGİLER	2
2.1. Dövme	2
2.1.1. Dövme İşlemi Tekniği	3
2.1.1.1. Plastik Deformasyon: Gerilme, Strain ve Elastik Limit	4
2.1.1.1.1. Gerilme	4
2.1.1.1.2. Strain	6
2.1.1.1.3. Elastik Limit	8
2.1.1.1.4. Gerilme-Strain Eğrisi	8
2.1.1.2. Metal Akışı.....	10
2.1.1.3. Sıcaklık ve Isı Transferi.....	12
2.1.1.4. Sürtünme.....	13
2.1.2. Dövme İşleminin Avantajları ve Dezavantajları	16
2.1.3. Dövme İşleminin Çeşitleri.....	17
2.1.3.1. Sıcaklığa Göre Dövme İşlemleri.....	17
2.1.3.1.1. Sıcak Dövme	17
2.1.3.1.2. Soğuk Dövme.....	18
2.1.3.1.3. Ilık Dövme	18
2.1.3.2. Kullanılan Kalıplara Göre Dövme İşlemleri	19
2.1.3.2.1. Açık Kalıpta Dövme.....	19
2.1.3.2.2. Kapalı Kalıpta Dövme.....	21
2.1.3.2.3. Kalıp Malzemeleri.....	22
2.1.3.3. Kullanılan Makinelere Göre Dövme İşlemleri	24
2.1.3.3.1. Şahmerdanlar	24
2.1.3.3.1.1. Serbest Düşmeli Şahmerdanlar	24
2.1.3.3.1.2. Güç Düşmeli Şahmerdanlar	26
2.1.3.3.1.3. Karşı Vuruşlu Şahmerdanlar	27

2.1.3.3.2.	Presler	29
2.1.3.3.2.1.	Mekanik Presler.....	29
2.1.3.3.2.2.	Hidrolik Presler	30
2.1.3.3.2.3.	Vidalı Presler	32
2.1.4.	Dövme İşlemlerinde Karşılaşılan Hatalar	33
2.1.4.1.	Malzemedeki Kaynaklanan Hatalar	33
2.1.4.2.	Isıtmadan Kaynaklanan Hatalar	34
2.1.4.3.	Dövme Uygulamasından Kaynaklanan Hatalar	34
2.2.	Soğuk Dövme	35
2.2.1.	Soğuk Dövme İşlemi Tekniği	36
2.2.1.1.	Soğuk Ekstrüzyon	37
2.2.1.2.	Soğuk Dövme İşleminin Temel Karakteristikleri.....	39
2.2.1.3.	Soğuk Dövme İşleminde Kullanılan İş Parçası Malzemeleri.....	40
2.2.1.4.	Soğuk Dövme İşleminde Kullanılan Yağlayıcılar	41
2.2.1.4.1.	Demir İçeren Malzemeler	42
2.2.1.4.2.	Demir İçermeyen Malzemeler	43
2.2.2.	Soğuk Dövme İşleminin Avantajları ve Dezavantajları	43
2.2.3.	Soğuk Dövme İşleminin Endüstriyel Kullanım Alanları	44
2.3.	Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Simülasyonlar	45
2.3.1.	Sonlu Elemanlar Yöntemi Sistematiği	46
2.3.2.	Sonlu Elemanlar Yönteminin Mühendislik Uygulamaları	48
2.3.3.	Metal Şekillendirmede Sonlu Elemanlar Yöntemi Analizleri	49
2.3.3.1.	Metal Şekillendirmede Sonlu Elemanlar Yöntemi Modellemesi için Ticari Kodlar	51
2.3.4.	Simufact.Forming Kodu	51
3.	MATERYAL VE YÖNTEM.....	55
3.1.	Materyal.....	55
3.2.	Yöntem	55
3.2.1.	Simülasyonlarda Kullanılan Girdiler	55
3.2.1.1.	Kalıp, Zarf, Zimba ve İş Parçası Çizimleri.....	55
3.2.1.2.	Temel Simülasyon.....	59
3.2.1.2.1.	Temel Simülasyonda Kullanılan Pres ve Pres Hızı.....	59
3.2.1.2.2.	Temel Simülasyonda Kullanılan Sürtünme Katsayısı	59
3.2.1.2.3.	Temel Simülasyonda Kullanılan Malzemeler	59
3.2.1.2.4.	Temel Simülasyonda Kullanılan Kalıp, Zimba, İş Parçası ve Çevre Sıcaklıkları	61

3.2.1.3.	Pres Hızı Değişim Simülasyonları	61
3.2.1.4.	Sürtünme Katsayısı Değişim Simülasyonları	61
3.2.1.5.	Malzeme Değişim Simülasyonları	62
3.2.1.6.	Sıcaklık Değişim Simülasyonları	64
3.2.2.	Basamaklar Halinde Simülasyonun Oluşturulması	65
3.2.2.1.	Giriş Ekranı.....	65
3.2.2.2.	Ana Simülasyon Ekranı	66
3.2.2.3.	Envanter Penceresi	69
3.2.2.4.	Simülasyon Ağacı Penceresi	71
3.2.2.5.	Sonuçların Görüntülenmesi.....	76
4.	SİMÜLASYON SONUÇLARI.....	78
4.1.	Temel Simülasyon	79
4.2.	Pres Hızı Değişim Simülasyonları ve Temel Simülasyonla Karşılaştırılması	83
4.2.1.	Pres Hızının 6 mm/s Seçildiği Simülasyon.....	83
4.2.2.	Pres Hızının 4 mm/s Seçildiği Simülasyon.....	87
4.2.3.	Pres Hızı Değişim Simülasyonlarının Sonuçlarının Temel Simülasyonun Sonuçları ile Karşılaştırılması	91
4.3.	Sürtünme Katsayısı Değişim Simülasyonları ve Temel Simülasyonla Karşılaştırılması.....	100
4.3.1.	Sürtünme Katsayısının 0,06 Coulomb Seçildiği Simülasyon	100
4.3.2.	Sürtünme Katsayısının 0,04 Coulomb Seçildiği Simülasyon	104
4.3.3.	Sürtünme Katsayısı Değişim Simülasyonlarının Sonuçlarının Temel Simülasyonun Sonuçları ile Karşılaştırılması	108
4.4.	Malzeme Değişim Simülasyonları ve Temel Simülasyonla Karşılaştırılması.....	118
4.4.1.	Malzemenin Ck45 Seçildiği Simülasyon	118
4.4.2.	Malzemenin 1010 Seçildiği Simülasyon	122
4.4.3.	Malzeme Değişim Simülasyonlarının Sonuçlarının Temel Simülasyonun Sonuçları ile Karşılaştırılması.....	126
4.5.	Sıcaklık Değişim Simülasyonları ve Temel Simülasyonla Karşılaştırılması.....	136
4.5.1.	Sıcaklığın 43 °C Seçildiği Simülasyon	136
4.5.2.	Sıcaklığın 33,2 °C Seçildiği Simülasyon	140
4.5.3.	Sıcaklığın 5,8 °C Seçildiği Simülasyon	144
4.5.4.	Sıcaklığın -6,4 °C Seçildiği Simülasyon	148
4.5.5.	Sıcaklık Değişim Simülasyonlarının Sonuçlarının Temel Simülasyonun Sonuçları ile Karşılaştırılması.....	152
5.	SONUÇLAR VE TARTIŞMA	165
KAYNAKLAR		170

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1. a) Çekme Gerilmesi, b) Basma Gerilmesi, c) Kayma Gerilmesi .	5
Şekil 2.2. Açılmal distorsiyon	7
Şekil 2.3. Mühendislik akma eğrisi	9
Şekil 2.4. Gerçek akma eğrisi	10
Şekil 2.5. Silindirik iş parçasına uygulanan yığılma işlemi. (a) Sürtünmesiz. (b) Sürtülmeli	14
Şekil 2.6. Yağlamanın çeşitli türlerinin başlangıcını gösteren Stribeck eğrisi	15
Şekil 2.7. Sıcak dövme işlemi	18
Şekil 2.8. İdeal koşullarda açık kalıpta dövme	20
Şekil 2.9. Gerçek koşullarda açık kalıpta dövme	20
Şekil 2.10. Açık-dar kalıpla yapılan bazı dövme işlemleri: (a) uzatma, (b) toplama, (c) genişletme	21
Şekil 2.11. Kapalı kalıpta dövme	21
Şekil 2.12. Kapalı kalıpta çapaksız (hassas) dövme	22
Şekil 2.13. Tahtalı şahmerdan	25
Şekil 2.14. Güç düşmeli şahmerdanlar	26
Şekil 2.15. Dikey karşı vuruşlu şahmerdan	28
Şekil 2.16. Mekanik pres	29
Şekil 2.17. Hidrolik pres	30
Şekil 2.18. Yaygın olarak görülen iki vidalı pres türü: (a) Sürtünme tahrikli, (b) Direk elektrik tahrikli	32
Şekil 2.19. Bir işlenmemiş dişli parçanın soğuk dövülmesinde şekillendirme basamaklarının şematik olarak gösterimi. (a) Kesilmiş, işlenmemiş parça. (b) Eşzamanlı ileri çubuk ve geri ekstrüzyon. (c) İleri ekstrüzyon. (d) Geri çanak ekstrüzyon. (e) Eşzamanlı flanş yığılması ve tırnak damgalanması	37
Şekil 2.20. Soğuk ekstrüzyondaki metal deplasmanı. (a) Geri ekstrüzyon. (b) İleri ekstrüzyon. (c) İleri-geri birleştirilmiş ekstrüzyon	39
Şekil 2.21. Boru şeklinde veya çanak şeklinde soğuk dövme parça örnekleri	39
Şekil 2.22. Soğuk dövme işlemi ile üretilmiş bazı parçalar	45
Şekil 2.23. Bir freze tezgahı yapısının sonlu elemanlar ile gösterimi	47
Şekil 2.24. Simufact.forming versiyon 11.0.1. kullanıcı arayüzü	53
Şekil 3.1. (a) Anahtar ağız kalıbı, (b) Simülasyon oluşturulurken kullanılan anahtar ağız kalıbının 68°'lik kısmı	56
Şekil 3.2. (a) Kuyruk kalıbı, (b) Simülasyon oluşturulurken kullanılan kuyruk kalıbının 68°'lik kısmı	56

Şekil 3.3. (a) Anahtar ağız kalıp zarfı, (b) Simülasyon oluşturulurken kullanılan anahtar ağız kalıp zarfının 68°lik kısmı.....	56
Şekil 3.4. (a) Kuyruk kalıp zarfı, (b) Simülasyon oluşturulurken kullanılan kuyruk kalıp zarfının 68°lik kısmı.	57
Şekil 3.5. Zimba	57
Şekil 3.6. (a) Alt tabla, (b) Simülasyon oluşturulurken kullanılan alt tablanın 68°lik kısmı.....	57
Şekil 3.7. Üst tabla.	58
Şekil 3.8. (a) Ham iş parçası, (b) Simülasyon oluşturulurken kullanılan ham iş parçasının 60°lik kısmı.....	58
Şekil 3.9. En fazla 200 ton basabilen hidrolik presin temsili resmi	59
Şekil 3.10. 16MnCr5'in farklı strain hızlarıyla 25 °C'de elde edilmiş akma eğrileri	61
Şekil 3.11. Ck45'in farklı koşullar için akma eğrileri: (1) Su verilmiş ve küreselleştirilmiş. (2) Haddelendiği gibi. (3) Su verilmiş ve menevişlenmiş	63
Şekil 3.12. 1010'un farklı strain hızlarıyla oda sıcaklığında elde edilmiş akma eğrileri	64
Şekil 3.13. İzmir'in son 59 yıllık sıcaklık değerleri	65
Şekil 3.14. simufact.forming işlem tanımlama ekranı.....	66
Şekil 3.15. simufact.forming yazılımı ana ekranı: (a) İşlem ağacı, (b) Envanter penceresi, (c) Parça ve simülasyon görüntüleme penceresi.	67
Şekil 3.16. Ana simülasyon ekranındaki araç çubukları.....	67
Şekil 3.17. Envanter penceresi ve girdilerin yapıldığı sağ tuş menüsü.....	69
Şekil 3.18. simufact.material modülü.	70
Şekil 3.19. Simülasyon ağacı penceresi.	72
Şekil 3.20. Mesh penceresi.	73
Şekil 3.21. Forming penceresi.....	75
Şekil 3.22. Simülasyonda sonuçların görülebildiği ana pencerenin son hali.	77
Şekil 4.1. simufact.forming'de simülasyonun tüm parçaları ile görünümü.	78
Şekil 4.2. İş parçasının son hali.	79
Şekil 4.3. Temel simülasyonda basma işleminin sonundaki strain değerleri. (a) İş parçasının kesitindeki ve iç yüzeyindeki değerler. (b) İş parçasının dış yüzeyindeki değerler.....	80
Şekil 4.4. Temel simülasyonda basma işlemindeki gerilme değerleri. (a) İş parçasının kesitindeki ve iç yüzeyindeki değerler. (b) İş parçasının dış yüzeyindeki değerler.....	80
Şekil 4.5. Temel simülasyonda basma işleminin sonundaki sıcaklık değerleri. (a) İş parçasının kesitindeki ve iç yüzeyindeki değerler. (b) İş parçasının dış yüzeyindeki değerler.....	81
Şekil 4.6. Temel simülasyonda basma işlemindeki malzeme akış hızları. (a) İş parçasının kuyruk kısmındaki ve basma yapılan yüzeyindeki hızlar. (b) İş parçasında kuyruk oluşumu bittikten sonraki hızlar.....	82
Şekil 4.7. Temel simülasyonun basma kuvveti grafiği.	83

Şekil 4.8. Pres hızı 6 mm/s seçilen simülasyonda basma işleminin sonundaki strain değerleri. (a) İş parçasının kesitindeki ve iç yüzeyindeki değerler. (b) İş parçasının dış yüzeyindeki değerler.	84
Şekil 4.9. Pres hızı 6 mm/s seçilen simülasyonda basma işlemindeki gerilme değerleri. (a) İş parçasının kesitindeki ve iç yüzeyindeki değerler. (b) İş parçasının dış yüzeyindeki değerler... 84	84
Şekil 4.10. Pres hızı 6 mm/s seçilen simülasyonda basma işleminin sonundaki sıcaklık değerleri. (a) İş parçasının kesitindeki ve iç yüzeyindeki değerler. (b) İş parçasının dış yüzeyindeki değerler.	85
Şekil 4.11. Pres hızı 6 mm/s seçilen simülasyonda basma işlemindeki malzeme akış hızları. (a) İş parçasının kuyruk kısmındaki ve basma yapılan yüzeyindeki hızlar. (b) İş parçasında kuyruk oluşumu bittikten sonraki hızlar.....	86
Şekil 4.12. Pres hızı 6 mm/s seçilen simülasyonun basma kuvveti grafiği.	86
Şekil 4.13. Pres hızı 4 mm/s seçilen simülasyonda basma işlemindeki strain değerleri. (a) İş parçasının kesitindeki ve iç yüzeyindeki değerler. (b) İş parçasının dış yüzeyindeki değerler... 87	87
Şekil 4.14. Pres hızı 4 mm/s seçilen simülasyonda basma işlemindeki gerilme değerleri. (a) İş parçasının kesitindeki ve iç yüzeyindeki değerler. (b) İş parçasının dış yüzeyindeki değerler... 88	88
Şekil 4.15. Pres hızı 4 mm/s seçilen simülasyonda basma işlemindeki sıcaklık değerleri. (a) İş parçasının kesitindeki ve iç yüzeyindeki değerler. (b) İş parçasının dış yüzeyindeki değerler... 89	89
Şekil 4.16. Pres hızı 4 mm/s seçilen simülasyonda basma işlemindeki malzeme akış hızları. (a) İş parçasının kuyruk kısmındaki ve basma yapılan yüzeyindeki hızlar. (b) İş parçasında kuyruk oluşumu bittikten sonraki hızlar.....	89
Şekil 4.17. Pres hızı 4 mm/s seçilen simülasyonun basma kuvveti grafiği.	90
Şekil 4.18. Pres hızı değişim simülasyonlarının sonuçları ile temel simülasyonun sonucu arasında, zımbanın basma yaptığı yüzeydeki strain değerlerinin karşılaştırılması.	91
Şekil 4.19. Pres hızı değişim simülasyonlarının sonuçları ile temel simülasyonun sonucu arasında, kuyruk kısmı ve anahtar ağzı kısmının strain değerlerinin karşılaştırılması.	92
Şekil 4.20. Pres hızı değişim simülasyonlarının sonuçları ile temel simülasyonun sonucu arasında, zımbanın basma yaptığı yan yüzeydeki gerilme değerlerinin karşılaştırılması.....	93
Şekil 4.21. Pres hızı değişim simülasyonlarının sonuçları ile temel simülasyonun sonucu arasında, kuyruk kısmı ve anahtar ağzı kısmı gerilme değerlerinin karşılaştırılması.	94
Şekil 4.22. Pres hızı değişim simülasyonlarının sonuçları ile temel simülasyonun sonucu arasında, zımbanın basma yaptığı kısmın sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması.....	95
Şekil 4.23. Pres hızı değişim simülasyonlarının sonuçları ile temel simülasyonun sonucu arasında, kuyruk sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması.	96
Şekil 4.24. Pres hızı değişim simülasyonlarının sonuçları ile temel simülasyonun sonucu arasında, basma işlemi sırasındaki malzeme akış hızlarının karşılaştırılması.	97

Şekil 4.25. Pres hızı değişim simülasyonlarının sonuçları ile temel simülasyonun sonucu arasında, basma işlemi sırasında kuyruk oluştuktan sonraki malzeme akış hızlarının karşılaştırılması.	98
Şekil 4.26. Pres hızı değişim simülasyonlarının basma kuvvetleri grafikleri ile temel simülasyonun basma kuvvetleri grafiğinin karşılaştırılması: (a) Temel simülasyon, (b) Pres hızının 6 mm/s seçildiği simülasyon, (c) Pres hızının 4 mm/s seçildiği simülasyon.	99
Şekil 4.27. Sürtünme katsayısı 0,06 Coulomb seçilen simülasyonda basma işleminin sonundaki strain değerleri. (a) İş parçasının kesitindeki ve iç yüzeyindeki değerler. (b) İş parçasının dış yüzeyindeki değerler.	100
Şekil 4.28. Sürtünme katsayısı 0,06 Coulomb seçilen simülasyonda basma işlemindeki gerilme değerleri. (a) İş parçasının kesitindeki ve iç yüzeyindeki değerler. (b) İş parçasının dış yüzeyindeki değerler.	101
Şekil 4.29. Sürtünme katsayısı 0,06 Coulomb seçilen simülasyonda basma işleminin sonundaki sıcaklık değerleri. (a) İş parçasının kesitindeki ve iç yüzeyindeki değerler. (b) İş parçasının dış yüzeyindeki değerler.	102
Şekil 4.30. Sürtünme katsayısı 0,06 Coulomb seçilen simülasyonda basma işlemindeki malzeme akış hızları. (a) İş parçasının kuyruk kısmındaki ve basma yapılan yüzeyindeki hızlar. (b) İş parçasında kuyruk oluşumu bittikten sonraki hızlar.	102
Şekil 4.31. Sürtünme katsayısı 0,06 Coulomb seçilen simülasyonun basma kuvveti grafiği....	103
Şekil 4.32. Sürtünme katsayısı 0,04 Coulomb seçilen simülasyonda basma işlemindeki strain değerleri. (a) İş parçasının kesitindeki ve iç yüzeyindeki değerler. (b) İş parçasının dış yüzeyindeki değerler.	104
Şekil 4.33. Sürtünme katsayısı 0,04 Coulomb seçilen simülasyonda basma işleminin sonundaki gerilme değerleri. (a) İş parçasının kesitindeki ve iç yüzeyindeki değerler. (b) İş parçasının dış yüzeyindeki değerler.	105
Şekil 4.34. Sürtünme katsayısı 0,04 Coulomb seçilen simülasyonda basma işleminin sonundaki sıcaklık değerleri. (a) İş parçasının kesitindeki ve iç yüzeyindeki değerler. (b) İş parçasının dış yüzeyindeki değerler.	106
Şekil 4.35. Sürtünme katsayısı 0,04 Coulomb seçilen simülasyonda basma işlemindeki malzeme akış hızları. (a) İş parçasının kuyruk kısmındaki ve basma yapılan yüzeyindeki hızlar. (b) İş parçasında kuyruk oluşumu bittikten sonraki hızlar.	106
Şekil 4.36. Sürtünme katsayısı 0,04 Coulomb seçilen simülasyonun basma kuvveti grafiği....	107
Şekil 4.37. Sürtünme katsayısı değişim simülasyonlarının sonuçları ile temel simülasyonun sonucu arasında, zımbanın basma yaptığı yüzeydeki strain değerlerinin karşılaştırılması.....	109
Şekil 4.38. Sürtünme katsayısı değişim simülasyonlarının sonuçları ile temel simülasyonun sonucu arasında, kuyruk kısmı ve anahtar ağız kısmının strain değerlerinin karşılaştırılması.	110

Şekil 4.39. Sürtünme katsayısı değişim simülasyonlarının sonuçları ile temel simülasyonun sonucu arasında, zımbanın basma yaptığı yan yüzeydeki gerilme değerlerinin karşılaştırılması.	111
Şekil 4.40. Sürtünme katsayısı değişim simülasyonlarının sonuçları ile temel simülasyonun sonucu arasında, kuyruk kısmı ve anahtar ağzı kısmı gerilme değerlerinin karşılaştırılması... 112	112
Şekil 4.41. Sürtünme katsayısı değişim simülasyonlarının sonuçları ile temel simülasyonun sonucu arasında, zımbanın basma yaptığı kısmın sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması.	113
Şekil 4.42. Sürtünme katsayısı değişim simülasyonlarının sonuçları ile temel simülasyonun sonucu arasında, kuyruk sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması.....	114
Şekil 4.43. Sürtünme katsayısı değişim simülasyonlarının sonuçları ile temel simülasyonun sonucu arasında, basma işlemi sırasındaki malzeme akış hızlarının karşılaştırılması.	115
Şekil 4.44. Sürtünme katsayısı değişim simülasyonlarının sonuçları ile temel simülasyonun sonucu arasında, basma işlemi sırasında kuyruk oluştuktan sonraki malzeme akış hızlarının karşılaştırılması.	116
Şekil 4.45. Sürtünme katsayısı değişim simülasyonlarının basma kuvvetleri grafikleri ile temel simülasyonun basma kuvvetleri grafiğinin karşılaştırılması: (a) Temel simülasyon, (b) Sürtünme katsayısının 0.06 Coulomb seçildiği simülasyon, (c) Sürtünme katsayısının 0.04 Coulomb seçildiği simülasyon.....	117
Şekil 4.46. Malzemesi Ck45 seçilen simülasyonda basma işleminin sonundaki strain değerleri. (a) İş parçasının kesitindeki ve iç yüzeyindeki değerler. (b) İş parçasının dış yüzeyindeki değerler.	118
Şekil 4.47. Malzemesi Ck45 seçilen simülasyonda basma işlemindeki gerilme değerleri. (a) İş parçasının kesitindeki ve iç yüzeyindeki değerler. (b) İş parçasının dış yüzeyindeki değerler.	119
Şekil 4.48. Malzemesi Ck45 seçilen simülasyonda basma işleminin sonundaki sıcaklık değerleri. (a) İş parçasının kesitindeki ve iç yüzeyindeki değerler. (b) İş parçasının dış yüzeyindeki değerler.	120
Şekil 4.49. Malzemesi Ck45 seçilen simülasyonda basma işlemindeki malzeme akış hızları. (a) İş parçasının kuyruk kısmındaki ve basma yapılan yüzeyindeki hızlar. (b) İş parçasında kuyruk oluşumu bittikten sonraki hızlar.....	120
Şekil 4.50. Malzemesi Ck45 seçilen simülasyonun basma kuvveti grafiği.	121
Şekil 4.51. Malzemesi 1010 seçilen simülasyonda basma işleminin sonundaki strain değerleri. (a) İş parçasının kesitindeki ve iç yüzeyindeki değerler. (b) İş parçasının dış yüzeyindeki değerler.	122
Şekil 4.52. Malzemesi 1010 seçilen simülasyonda basma işleminin sonundaki gerilme değerleri. (a) İş parçasının kesitindeki ve iç yüzeyindeki değerler. (b) İş parçasının dış yüzeyindeki değerler.	123

Şekil 4.53. Malzemesi 1010 seçilen simülasyonda basma işleminin sonundaki sıcaklık değerleri. (a) İş parçasının kesitindeki ve iç yüzeyindeki değerler. (b) İş parçasının dış yüzeyindeki değerler.	124
Şekil 4.54. Malzemesi 1010 seçilen simülasyonda basma işlemindeki malzeme akış hızları. (a) İş parçasının kuyruk kısmındaki ve basma yapılan yüzeyindeki hızlar. (b) İş parçasında kuyruk oluşumu bittikten sonraki hızlar.	124
Şekil 4.55. Malzemesi 1010 seçilen simülasyonun basma kuvveti grafiği.	125
Şekil 4.56. Malzeme değişim simülasyonlarının sonuçları ile temel simülasyonun sonucu arasında, zımbanın basma yaptığı yüzeydeki strain değerlerinin karşılaştırılması.	127
Şekil 4.57. Malzeme değişim simülasyonlarının sonuçları ile temel simülasyonun sonucu arasında, kuyruk kısmı ve anahtar ağzı kısmının strain değerlerinin karşılaştırılması.	128
Şekil 4.58. Malzeme değişim simülasyonlarının sonuçları ile temel simülasyonun sonucu arasında, zımbanın basma yaptığı yan yüzeydeki gerilme değerlerinin karşılaştırılması.	129
Şekil 4.59. Malzeme değişim simülasyonlarının sonuçları ile temel simülasyonun sonucu arasında, kuyruk kısmı ve anahtar ağzı kısmı gerilme değerlerinin karşılaştırılması.	130
Şekil 4.60. Malzeme değişim simülasyonlarının sonuçları ile temel simülasyonun sonucu arasında, zımbanın basma yaptığı kısmın sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması.	131
Şekil 4.61. Malzeme değişim simülasyonlarının sonuçları ile temel simülasyonun sonucu arasında, kuyruk sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması.	132
Şekil 4.62. Malzeme değişim simülasyonlarının sonuçları ile temel simülasyonun sonucu arasında, basma işlemi sırasındaki malzeme akış hızlarının karşılaştırılması.	133
Şekil 4.63. Malzeme değişim simülasyonlarının sonuçları ile temel simülasyonun sonucu arasında, basma işlemi sırasında kuyruk oluştuktan sonraki malzeme akış hızlarının karşılaştırılması.	134
Şekil 4.64. Malzeme değişim simülasyonlarının basma kuvvetleri grafikleri ile temel simülasyonun basma kuvvetleri grafiğinin karşılaştırılması: (a) Temel simülasyon, (b) Malzemenin Ck45 seçildiği simülasyon, (c) Malzemenin 1010 seçildiği simülasyon.	135
Şekil 4.65. Sıcaklığı 43 °C seçilen simülasyonda basma işleminin sonundaki strain değerleri. (a) İş parçasının kesitindeki ve iç yüzeyindeki değerler. (b) İş parçasının dış yüzeyindeki değerler.	136
Şekil 4.66. Sıcaklığı 43 °C seçilen simülasyonda basma işlemindeki gerilme değerleri. (a) İş parçasının kesitindeki ve iç yüzeyindeki değerler. (b) İş parçasının dış yüzeyindeki değerler.	137
Şekil 4.67. Sıcaklığı 43 °C seçilen simülasyonda basma işleminin sonundaki sıcaklık değerleri. (a) İş parçasının kesitindeki ve iç yüzeyindeki değerler. (b) İş parçasının dış yüzeyindeki değerler.	138

Şekil 4.68. Sıcaklığı 43 °C seçilen simülasyonda basma işlemindeki malzeme akış hızları. (a) İş parçasının kuyruk kısmındaki ve basma yapılan yüzeyindeki hızlar. (b) İş parçasında kuyruk oluşumu bittikten sonraki hızlar.	138
Şekil 4.69. Sıcaklığı 43 °C seçilen simülasyonun basma kuvveti grafiği.	139
Şekil 4.70. Sıcaklığı 33,2 °C seçilen simülasyonda basma işleminin sonundaki strain değerleri. (a) İş parçasının kesitindeki ve iç yüzeyindeki değerler. (b) İş parçasının dış yüzeyindeki değerler.	140
Şekil 4.71. Sıcaklığı 33,2 °C seçilen simülasyonda basma işlemindeki gerilme değerleri. (a) İş parçasının kesitindeki ve iç yüzeyindeki değerler. (b) İş parçasının dış yüzeyindeki değerler.	141
Şekil 4.72. Sıcaklığı 33,2 °C seçilen simülasyonda basma işleminin sonundaki sıcaklık değerleri. (a) İş parçasının kesitindeki ve iç yüzeyindeki değerler. (b) İş parçasının dış yüzeyindeki değerler.	142
Şekil 4.73. Sıcaklığı 33,2 °C seçilen simülasyonda basma işlemindeki malzeme akış hızları. (a) İş parçasının kuyruk kısmındaki ve basma yapılan yüzeyindeki hızlar. (b) İş parçasında kuyruk oluşumu bittikten sonraki hızlar.	142
Şekil 4.74. Sıcaklığı 33,2 °C seçilen simülasyonun basma kuvveti grafiği.	143
Şekil 4.75. Sıcaklığı 5,8 °C seçilen simülasyonda basma işleminin sonundaki strain değerleri. (a) İş parçasının kesitindeki ve iç yüzeyindeki değerler. (b) İş parçasının dış yüzeyindeki değerler.	144
Şekil 4.76. Sıcaklığı 5,8 °C seçilen simülasyonda basma işlemindeki gerilme değerleri. (a) İş parçasının kesitindeki ve iç yüzeyindeki değerler. (b) İş parçasının dış yüzeyindeki değerler.	145
Şekil 4.77. Sıcaklığı 5,8 °C seçilen simülasyonda basma işleminin sonundaki sıcaklık değerleri. (a) İş parçasının kesitindeki ve iç yüzeyindeki değerler. (b) İş parçasının dış yüzeyindeki değerler.	146
Şekil 4.78. Sıcaklığı 5,8 °C seçilen simülasyonda basma işlemindeki malzeme akış hızları. (a) İş parçasının kuyruk kısmındaki ve basma yapılan yüzeyindeki hızlar. (b) İş parçasında kuyruk oluşumu bittikten sonraki hızlar.	146
Şekil 4.79. Sıcaklığı 5,8 °C seçilen simülasyonun basma kuvveti grafiği.	147
Şekil 4.80. Sıcaklığı -6,4 °C seçilen simülasyonda basma işleminin sonundaki strain değerleri. (a) İş parçasının kesitindeki ve iç yüzeyindeki değerler. (b) İş parçasının dış yüzeyindeki değerler.	149
Şekil 4.81. Sıcaklığı -6,4 °C seçilen simülasyonda basma işlemindeki gerilme değerleri. (a) İş parçasının kesitindeki ve iç yüzeyindeki değerler. (b) İş parçasının dış yüzeyindeki değerler.	149
Şekil 4.82. Sıcaklığı -6,4 °C seçilen simülasyonda basma işleminin sonundaki sıcaklık değerleri. (a) İş parçasının kesitindeki ve iç yüzeyindeki değerler. (b) İş parçasının dış yüzeyindeki değerler.	150

Şekil 4.83. Sıcaklığı -6,4 °C seçilen simülasyonda basma işlemindeki malzeme akış hızları. (a) İş parçasının kuyruk kısmındaki ve basma yapılan yüzeyindeki hızlar. (b) İş parçasında kuyruk oluşumu bittikten sonraki hızlar.	151
Şekil 4.84. Sıcaklığı -6,4 °C seçilen simülasyonun basma kuvveti grafiği.	152
Şekil 4.85. Sıcaklık değişim simülasyonlarının sonuçları ile temel simülasyonun sonucu arasında, zımbanın basma yaptığı yüzeydeki strain değerlerinin karşılaştırılması.	153
Şekil 4.86. Sıcaklık değişim simülasyonlarının sonuçları ile temel simülasyonun sonucu arasında, kuyruk kısmı ve anahtar ağzı kısmının strain değerlerinin karşılaştırılması.	156
Şekil 4.87. Sıcaklık değişim simülasyonlarının sonuçları ile temel simülasyonun sonucu arasında, zımbanın basma yaptığı yan yüzeydeki gerilme değerlerinin karşılaştırılması.	157
Şekil 4.88. Sıcaklık değişim simülasyonlarının sonuçları ile temel simülasyonun sonucu arasında, kuyruk kısmı ve anahtar ağzı kısmı gerilme değerlerinin karşılaştırılması.	158
Şekil 4.89. Sıcaklık değişim simülasyonlarının sonuçları ile temel simülasyonun sonucu arasında, zımbanın basma yaptığı kısmın sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması.	159
Şekil 4.90. Sıcaklık değişim simülasyonlarının sonuçları ile temel simülasyonun sonucu arasında, kuyruk sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması.	160
Şekil 4.91. Sıcaklık değişim simülasyonlarının sonuçları ile temel simülasyonun sonucu arasında, basma işlemi sırasındaki malzeme akış hızlarının karşılaştırılması.	161
Şekil 4.92. Sıcaklık değişim simülasyonlarının sonuçları ile temel simülasyonun sonucu arasında, basma işlemi sırasında kuyruk oluştuktan sonraki malzeme akış hızlarının karşılaştırılması.	162
Şekil 4.93. Sıcaklık değişim simülasyonlarının basma kuvvetleri grafikleri ile temel simülasyonun basma kuvvetleri grafiğinin karşılaştırılması: (a) Temel simülasyon, (b) Sıcaklığın 43 °C seçildiği simülasyon, (c) Sıcaklığın 33,2 °C seçildiği simülasyon, (d) Sıcaklığın 5,8 °C seçildiği simülasyon, (e) Sıcaklığın -6,4 °C seçildiği simülasyon.	164

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1. Dövülebilirliklerine göre çeşitli malzemeler .	4
Çizelge 2.2. Dövme kalıplarında kullanılan bazı sıradan çelikler .	23
Çizelge 2.3. Bazı şahmerdan çeşitlerinin karşılaştırılması .	24
Çizelge 2.4. Mekanik pres ile hidrolik pres arasındaki kapasite farkları .	31
Çizelge 2.5. İşlem karakteristiklerinin karşılaştırılması .	40
Çizelge 2.6. Soğuk dövme için uygun alüminyum alaşımların özellikleri .	41
Çizelge 2.7. Çeliğin soğuk dövülmesi için kullanılan yağlama sistemleri .	42
Çizelge 2.8. Bakır ve titanyumun soğuk dövülmesi için kullanılan yağlama sistemleri .	43
Çizelge 2.9. Sonlu elemanlar yönteminin mühendislik uygulamaları .	48
Çizelge 3.1. 16MnCr5 malzeme özellikleri .	60
Çizelge 3.2. Uddeholm Vanadis 4E malzeme özellikleri .	60
Çizelge 3.3. Ck45 malzeme özellikleri .	62
Çizelge 3.4. 1010 malzeme özellikleri .	63

KISALTMALAR LİSTESİ

MÖ Milattan Önce

MS Milattan Sonra

ABD Amerika Birleşik Devletleri

MKE Makine Kimya Endüstrisi

CAD Computer Aided Design (Bilgisayar Destekli Tasarım)

CAM Computer Aided Manufacturing (Bilgisayar Destekli Üretim)

CAE Computer Aided Engineering (Bilgisayar Destekli Mühendislik)

UTS Ultimate Tensile Strength (En Yüksek Çekme Dayanımı)

AISI American Iron and Steel Institute

FEM Finite Element Method (Sonlu Elemanlar Yöntemi)

FEA Finite Element Analysis (Sonlu Eleman Analizi)

TEŞEKKÜR

Hazırladığım projenin tüm aşamalarında çok değerli bilgilerini, tecrübelerini ve zamanını benden esirgemeyen Hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Osman ÇULHA'ya,

Çalışmamdaki parça ile ilgili çizimler ve bilgiler ile ilgili paylaşımlarından dolayı EKO Endüstri Kalıp Otomotiv Plastik Ve Spor Aletleri Sanayi Dış Tic. Ltd. Şti. mühendis ve çalışanlarına,

Çalışmam için gerekli yazılım ile ilgili eğitim ve yardımlarından dolayı NETFORM Mühendislik Makine Metal San. Tic. Ltd. Şti mühendis ve çalışanlarına,

Tüm hayatım ve çalışmalarım boyunca desteklerini hiçbir zaman eksik etmeyen değerli AİLEME,

TEŞEKKÜRLERİMİ SUNARIM.

SOĞUK DÖVME İLE ÜRETİMDE SİMÜLASYON UYGULAMALARI

ÖZET

En eski üretim yöntemlerinden biri olan dövme, günümüzde de endüstride sıklıkla tercih edilen bir metal şekillendirme işlemidir. Dövme işleminde, iş parçası iki kalıp veya takım arasında basma kuvvetlerine maruz kalarak şekil değiştirir. Sıcak dövme işleminde, birçok metal parça geniş yelpazede üretilebilir ve karmaşık geometriler şeklinde işlenebilir. Ilık dövmede ise “soğuk dövmedeki hassaslık ve malzeme kullanımı ile sıcak dövmedeki malzeme işlenebilme aralığı ve geometrik şekilleri” gibi avantajlar bir araya gelmektedir.

Soğuk dövme işleminde, oda sıcaklığında süneklik gösteren metaller, bir ön ısıtma veya ara ısıtmaya maruz kalmadan kolayca şekillendirilebilmektedir. Ayrıca soğuk dövme işleminde yüksek yüzey kalitesi elde edilmekte ve tolerans olarak hassas dövme yapılabilmektedir. Üretim sırasındaki malzeme kullanımı diğer dövme işlemlerinden daha fazla olmakta ve bu da soğuk dövmeyi seri üretimler için çok avantajlı kılmaktadır.

Bu çalışmada, bir dövme fabrikası tarafından soğuk dövme yöntemi ile 16MnCr5 malzemesinden üretilen rot parçası, sonlu elemanlar yöntemi ile simülasyon yapan bir yazılım kullanılarak gerçekte üretildiği koşullara uygun olarak simülasyon ortamında tekrardan üretilmiştir. Daha sonra bu üretim koşullarından yola çıkılarak; “soğuk dövmenin yapıldığı presin hızı, parça ile kalıpların arasındaki sürtünme katsayısı, parçada kullanılan malzeme ve parçanın üretildiği ortamın sıcaklık değerleri” gibi üretim parametreleri değiştirilerek farklı üretim koşulları ile yeni soğuk dövme simülasyonları yapılmıştır.

Bu çalışmalar sonucunda, yapılan simülasyonlardan elde edilen sonuçlar incelenmiş ve bu sonuçlarda, üretim parametrelerindeki değişimlerin, straine, gerilmeye, üretim sırasında iş parçasında oluşan sıcaklığa, malzeme akış hızına ve pres basma kuvvetine olan etkileri görülüp değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Soğuk Dövme, Pres Dövme, Metal Şekillendirme, Sonlu Elemanlar Yöntemi, Metal Şekillendirme Simülasyonları.

SIMULATION APPLICATIONS IN COLD FORGING PRODUCTION

ABSTRACT

Forging, one of the oldest methods of production, is a metal forming process that often preferred in today's industry. In forging process, workpiece is formed by being exposed to press forces between two dies or tools. In hot forging, many metallic parts may be produced in a wide range and can be processed in complex geometries. In warm forging, advantages like "the precision and material using of the hot forging and workability range and geometric shapes of the cold forging" comes together.

In the cold forging process, metals which shows ductility at room temperature, can easily formed without being exposed to a pre-heating or intermediate-heating. Also, in cold forging process, high surface quality can be obtained and precise tolerances can be forged. Using of materials during production is higher than other forging process and this makes cold forging very advantageous in mass production.

In this thesis, the rod part produced from 16MnCr5 material with cold forging process by a forging factory, is produced again in a simulation environment with a simulation software that using finite elements method, in accordance with rod part's real production conditions. Thereafter, based on these production conditions, by changing of production parameters like "press speed of cold forging, coefficient of friction between workpiece and dies, materials using in workpiece and temperature values of enviroment which part is produced", new cold forging simulations were designed with different production conditions.

In conclusion of these studies, results obtained from simulations are examined and in this results, effects of production parameters changings to strain, stress, material flow speed, workpiece temperature and press forces were seen and analyzed.

Keywords: Cold Forging, Press Forging, Metal Forming, Finite Elements Method, Metal Forming Simulations.

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Günümüzde, metal şekillendirme sanayisi giderek gelişmektedir. Metal şekillendirme sanayisinin kollarından birisi olan soğuk dövmenin de; otomotiv, havacılık, inşaat gibi alanlarda kullanımının artmasıyla birlikte önemi artmaktadır. Bu sanayi dalının önemi arttıkça, sektör içindeki endüstriyel kuruluşların arasındaki rekabet de artmakta ve bu kuruluşların mevcut pazarda tutunabilmeleri ve kendi paylarını artırabilmeleri için yüksek kalitede ve düşük maliyetli üretim yapmaları gerekmektedir.

Üretim kalitesini yükseltmek ve maliyeti düşürmek için en önemli kıstaslardan biri de üretim öncesi AR-GE çalışmalarıdır. Bu AR-GE çalışmalarında yeni bir parça tasarlamak ve o parçayı çeşitli deneme üretimlerinden ve testlerden geçirip seri üretim haline getirmek, zaman ve maliyet gerektiren bir iştir. Ancak günümüzde bilgisayar destekli simülasyon çalışmaları ile bu zaman ve maliyet azaltılabilmekte ve tasarımın veya deneme üretimlerinin ilk aşamaları simülasyon yardımıyla sanal ortamda yapılarak iş kolaylaştırılabilmektedir. Bu nedenle sanayide simülasyona giderek artan bir ilgi bulunmakta ve simülasyon ile yapılan çalışmalar gün geçtikçe önem kazanıp, yaygınlaşmaktadır.

Bu tez çalışmasında, soğuk dövme sanayisinde üretilen parçaların; tasarımları sırasında oluşan işgücü, hammadde ve zaman kayıplarının önlenmesi veya azaltılması için; bilgisayar ile tasarım ve simülasyonunun yapılarak sanal ortamda üretiminin yapılması amaçlanmıştır. Bu amaç dahilinde tez için yapılan soğuk dövme üretim simülasyonu için simufact.forming programı seçilmiş ve simülasyonun soğuk dövme işlemleri için nasıl kullanılacağına dair eğitim alınmıştır.

Çalışmamızda soğuk dövme simülasyonunda yapılan parça üretiminde elde edilen gerilme, malzeme akış hızları, üretim sırasında değişen sıcaklık değerleri gibi sonuçlar değerlendirilerek ve üretim esnasında hataların veya kritik noktaların varlığı incelenmiştir. Yapılan bu temel soğuk dövme ile üretim simülasyonundan yola çıkılarak aynı parçanın üretiminin optimizasyonu ve geliştirilmesi için pres hızı, sürtünme katsayısı, sıcaklıklar ve iş parçası malzemeleri gibi girdi değerleri değiştirilerek elde edilen sonuçlar temel üretim simülasyonu ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar sonucunda üretim işleminde optimizasyon ve geliştirmeye yönelik değerlendirmeler yapılmıştır.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Dövme

En eski üretim yöntemlerinden biri olan ve günümüzde de endüstride çok önemli bir yeri bulunan dövme, bir iş parçasının, iki takım veya kalıp arasında, basma kuvvetlerinin etkisi altında plastik şekil değiştirerek istenilen son şekle getirilmesi işlemidir [1].

Dövme sanatının geçmişi, en azından MÖ 4000'e ve muhtemelen daha öncesine kadar uzanmaktadır. Bronz ve işlenmiş demir gibi metaller, ilk insanlar tarafından el aletleri ve silah üretmek için dövülmüştür [2].

Avrupa'da karanlık çağ sırasında, sürekli yapılan savaşlar nedeni ile kültür ve endüstride ciddi bir gerileme yaşanmasına rağmen, oluşan silah ihtiyacı nedeni ile demir endüstrisi değişmeden kalmıştır. Bu çağda en önemli gelişmelerden birisi, Romalıların keşfettiği su gücünün kullanımı ve metallerin dövülmesinin birleştirilmesi ile gelmiştir. Su gücü, körükleri ve mekanik çekiçleri (şahmerdanlar) çalıştırmak için kullanılmıştır. Bu önemli keşif, MS 10. yüzyıl ile 12. yüzyıl arasında kullanıma girmiştir [3].

İşlenmiş demir ve döküm çeliğin dövülmesi daha öncekilere benzer amaçlarla ve tekniklerle 19. yüzyılın sonuna kadar devam etmiş ve ne yazık ki silahlar daha modern metaller kullanılarak dövme işlemi ile üretilmeye devam edilmiştir.

19. yüzyılın demircileri, işlenmiş demirin elde ve açık kalıpta dövülmesinde bilhassa yeteneklilerdi. 10 ton ve daha fazla ağırlıkta olan birçok dövme şaft, dövme işlemi ve çekiç kaynağının bileşimiyle kademeli olarak üretilabiliyordu. 1856 yılında Bessemer çeliğinin üretim sürecinin keşfi, demir dövme sektörü için büyük bir atılım oldu. Dövmeciler şimdi, büyük hacimde ve çok miktarda dövme yapabilmek için düşük maliyetli bol çelik kaynağına sahiptiler. Kapalı kalıp kullanarak yapılan ilk boşluklu çelik dövme işleminin, Colt Revolver silahının parçalarının üretimi için 1862 yılında ABD'de başladığı kabul edilmektedir.

19. yüzyılın sonlarına doğru, açık ocaklı çelik üretim sürecinin, Bessemer çeliğinin üretim süreci ile eşzamanlı gelişmesi, artık dövme sektörünün güvenilir, düşük maliyetli ve yüksek hacimli hammaddelere sahip olduğu anlamına geliyordu.

20. yüzyılın başlarında, motorlu taşıtların, özellikle Henry Ford'un T modelinin tanıtılmasıyla, dövme için önemli bir talep oluştu. 1930'da ABD Ulusal Makine Şirketi'nin ilk

dövme presini (Maxipress) tanıtmasına kadar, dövme işlemleri su gücü ve buhar gücüyle çalışan şahmerdanlar ile yapılıyordu.

Dövme presinin tanıtılması, şahmerdanların modasını geçirmekten ziyade üreticilere ürünlerini geliştirmeleri için meydan okudu ve tabii ki, birçok dövme işi en iyi şahmerdanla yapılabilir.

Günümüzde, birçok uygulama alanı için geniş yelpazede parça üretebilen bilgisayar kontrollü şahmerdanlara ve preslere sahibiz [2].

Türkiye dövme sanayinde ilk adımlar ise, 1960'lı yıllarda MKE tarafından atılmış, savunma sanayi başta olmak üzere kamu kuruluşlarının ihtiyaç duyduğu dövme parça üretimi başlatılmış ve ülkenin ilk dövmecileri yetiştirilmiştir. Bu dönemlerde mevcut bulunan küçük ölçekli ve düşük kapasiteli çok az sayıdaki dövme tesislerinde el aletleri ve basit makine parçaları üretilmekte iken 1960'lı yılların sonlarında otomotiv sanayinin kurulmasına paralel olarak özel sektör dövme tesisleri kurulup gelişmiştir.

1970'li yıllardan bu yana Türkiye'deki dövme sanayi incelendiğinde, sektörde faaliyet gösteren işletmelerin kurulu üretim kapasitelerinin yarıya yakın, hatta yarıdan fazla bölümünü kullanamadıkları tespit edilmektedir.

Günümüzde Türkiye'de teknolojik seviye açısından büyük dövme tesislerinin sanayileşmiş ülkelerdeki tesislere yaklaştığı ve benzerlik gösterdiği gözlenmekle birlikte, küçük ve orta ölçekli işletmelerin teknolojik seviyelerinin düşük düzeyde olduğu kolayca anlaşılabilmektedir. Büyük ve bazı orta işletmeler dünyadaki gelişmelere paralel olarak CAD, CAM, CAE programlarını kullanıp, modern malzeme kontrol ve ölçme laboratuvarlarına sahipken, bu imkanlara sahip olmayan ve hatta kalifiye elemandan yoksun çok sayıda küçük ve orta ölçekli dövme tesislerinin kaliteli üretim sorunları yaşadığı görülmektedir [4].

2.1.1. Dövme İşlemi Tekniği

Dövmede, ilk olarak basit bir parça – örneğin kütük –, istenilen son şekli elde etmek için iki takım (veya iki kalıp) arasında plastik olarak deformasyona uğratılır. Böylece, bir parçanın basit geometrisi, istenilen şekle sahip olan takımlar vasıtasıyla karmaşık geometriye dönüştürülür ve takım/malzeme ara yüzüyle deforme olan malzemeye basınç uygulanır [5].

Dövme işleminde, bir metalin dövülerek kırılmadan veya çatlamadan şekil değiştirebilme kabiliyetine dövülebilirlik denir. Düşük kuvvetlerle çatlamadan dövülerek şekillendirilebilen malzemeler için “dövülebilirliği iyi” denir. Dövülebilirliğin ölçülmesi amacıyla bazı deneyler yapılabilir. Çekme testi, basma testi, burulma testi vb. bu testlerden bazılarıdır. Çizelge 2.1’de bazı malzemeler dövülebilirliklerine göre sıralanmıştır [1].

Dövme işlemi, temelde bir plastik şekil verme işlemi olduğu için, metal akış yönü, deformasyonun büyüklüğü, sürtünme ve sıcaklıklar oluşturulan parçaların özelliklerini büyük ölçüde etkilemektedir [5].

Çizelge 2.1. Dövülebilirliklerine göre çeşitli malzemeler [6].

METAL VEYA ALAŞIM	DÖVME SICAKLIĞI (°C)
Alüminyum alaşımları (en kolay)	400-550
Magnezyum alaşımları	250-350
Bakır alaşımları	600-900
Karbonlu ve az alaşımlı çelikler	850-1150
Martenzitik paslanmaz çelikler	1100-1250
Maraging çelikler	1100-1250
Ostenitik paslanmaz çelikler	1100-1250
Nikel alaşımları	1000-1150
Titanyum alaşımları	700-950
Demir esaslı süper alaşımlar	1050-1180
Kobalt esaslı süper alaşımlar	1180-1250
Niobium alaşımlar	950-1150
Tantalum alaşımlar	1050-1350
Molibden alaşımlar	1150-1350
Nikel esanslı süper alaşımlar	1050-1200
Tungsten alaşımları (en zor)	1200-1300

2.1.1.1. Plastik Deformasyon: Gerilme, Strain ve Elastik Limit

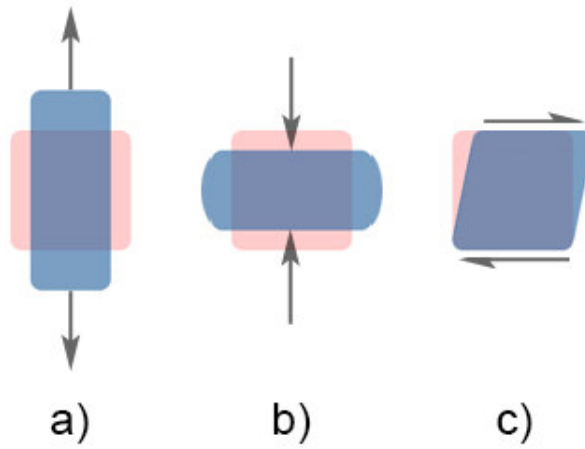
2.1.1.1.1. Gerilme

Katı mekaniği kapsamında kullanılan anlamıyla gerilme (ya da gerilim) (*stress*), birim alana etki eden kuvvet miktarını temsil etmektedir. Bir cisim üzerine etki eden kuvvetler, üç farklı türde gerilme ortaya çıkartmaktadır: çekme gerilmesi, basma gerilmesi ve kayma gerilmesi.

Çekme gerilmesi (*tensile stress*), malzemeyi kuvvet yönünde uzatacak şekilde, yüzey alanına dik yönde kuvvet uygulanmasıyla ortaya çıkmaktadır (Şekil 2.1(a)). Uygulanan kuvvet miktarı sabit kalsa da, kuvvetin uygulandığı alanın büyüklüğüne bağlı olarak gerilme değeri değişim gösterebilmektedir. Dolayısıyla, malzemenin kesit alanındaki çok ufak değişimler bile malzeme boyunca gerilmenin farklılık göstermesine yol açabilmektedir. Her ne kadar sünek malzemeler bu gerilme dalgalanmalarını bir dereceye kadar tolere edebilseler de, bu dalgalanmalar kırılğan malzemelerin beklenenden daha erken kırılmasına yol açmaktadır.

Basma gerilmesi (*compressive stress*) yaratmak için yine yüzey alanına dik yönde, fakat malzemeyi sıkıştıracak şekilde kuvvet uygulanması gerekmektedir (Şekil 2.1(b)). Çekme ve basma gerilmeleri uygulandıkları yüzeylere dik etki ettikleri için, bu iki gerilmenin türü normal gerilme olarak adlandırılmaktadır.

Kayma gerilmesi (*shear stress*) ise, malzemenin iki zıt yüzeyinin birbirine paralel ve ters yönde kaymalarını sağlayacak şekilde kuvvet uygulanmasıyla ortaya çıkmaktadır (Şekil 2.1(c)) [7].



Şekil 2.1. a) Çekme Gerilmesi, b) Basma Gerilmesi, c) Kayma Gerilmesi [7].

Sünek bir çubuğun iki ucundan tutulup çekildiğinde, malzemenin hacminde bir değişim olmayacağı için, çubuk uzadıkça çubuğun kesit alanı azalmaktadır. Kesit alanındaki daralma nedeniyle, bu kesit alanına etki eden gerçek gerilme, şekil değişimi öncesindeki kesit alanı göz önüne alınarak hesaplanan gerilmeden daha yüksek bir değer sergilemektedir.

Malzeme üzerindeki gerçek gerilme, kesit alanındaki daralmaya bağlı bu değer artışı göz önüne alınarak ifade edilebilmektedir. Yine de, daha pratik olması nedeniyle, çoğu zaman malzemenin kuvvet uygulanmadan önceki kesit alanı ölçülüp, sanki alanda bir değişim olmuyormuş gibi, kuvveti bu ilk kesit alanına bölerek gerilmeyi ifade etmek de mümkündür. Her ne kadar gerçek gerilme değerlerini vermese de, pratik olması nedeniyle, bu şekilde hesaplanan gerilmeye mühendislik gerilmesi (*engineering stress*) denir. Malzemenin kuvvet uygulanmadan önceki kesit alanı A_0 , malzeme üzerine etki eden yük de P ile gösterilirse, mühendislik gerilmesi denklem 2.1'deki gibi ifade edilebilir.

$$S = \frac{P}{A_0} \quad (2.1)$$

Mühendislik değerlerinden farklı olarak, çubuğun alanındaki anlık değişimler göz önüne alınarak da gerilme ifade edilebilir. Bu şekilde hesaplanan gerilmeye, malzemeye etki eden gerçek değerleri ifade etmesi nedeniyle gerçek gerilme (*true stress*) denir. Kesit alanının anlık değeri A_i ile gösterilirse gerçek gerilme denklem 2.2'deki gibi ifade edilebilir.

$$\sigma = \frac{P}{A_i} \quad (2.2)$$

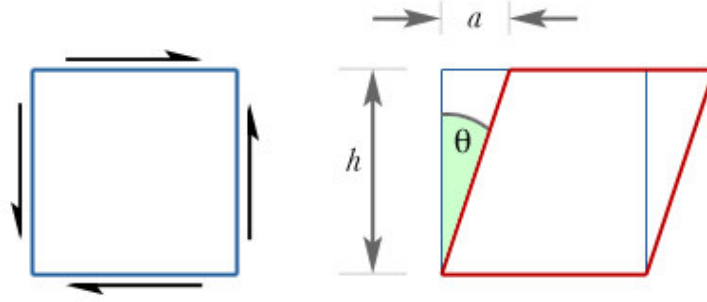
Gerçek gerilme değerlerini hesaplamak için ihtiyaç duyulan anlık değerlerin bir test sırasında takip edilmesi pek de kolay değildir. Fakat denklem 2.3 ile mühendislik gerilmesi, gerçek gerilmeye çevrelebilmektedir [8].

$$\sigma = S(e + 1) \quad (2.3)$$

2.1.1.1.2. Strain

Strain (*gerinim*), yük altındaki bir malzemenin, yük uygulanmadan önceki durumuna kıyasla şeklini ne oranda değiştirdiğini ifade etmektedir. Burada kullanılan anlamıyla şekil değişimi biçimsel bir değişimi değil, daha ziyade şekildeki niceliksel bir değişimi ifade etmektedir. Dolayısıyla strain, bir malzemedeki şekil değişiminin matematiksel olarak ifade edilebilmesini sağlamaktadır.

Strain, uygulanan kuvvet ile aynı yönde oluşuyorsa, bu durum da aynı gerilmedeki gibi, normal strain olarak adlandırılmaktadır. Normal strainden farklı olarak, eğer malzeme üzerine bir kayma kuvveti etki ediyorsa, şekil 2.2'de gösterildiği gibi malzemede bir açısal şekil değişimi, ya da bir açısal distorsiyon (*angular distortion*) oluştuğu gözlemlenebilir.



Şekil 2.2. Açılsal distorsiyon [7].

Bu durumda oluşan şekil değişimine shear strain (*kayma gerinimi*) adı verilir ve düzlemler arası yer değişimini (Şekil 2.2'de a), düzlemler arası mesafeye (Şekil 2.2'de h) bölerek ifade edilebilir.

$$\gamma = \frac{a}{h} = \tan\theta \quad (2.4)$$

Şekil 2.2'ye dikkat edildiğinde, a/h ile gösterilen strain, malzemede oluşan şekil değişim açısının tanjantı ile de hesaplanabilmektedir. Bu nedenle shear strain çoğu zaman, denklem 2.4'te olduğu gibi, malzemede oluşan distorsiyonun açısıyla ifade edilir [7].

Sünek bir çubuk iki ucundan tutulup çekildiğinde oluşan, çubuktaki toplam uzama miktarını çubuğun ilk uzunluğuna oranlanarak engineering strain (*mühendislik gerinimi*) hesaplanabilir. Çubuğun uzunluğundaki değişim Δl ile, ilk uzunluk da l_0 ile gösterilirse, engineering strain denklem 2.5'teki gibi ifade edilebilir.

$$e = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2.5)$$

Mühendislik değerinden farklı olarak, çubuğun uzunluğundaki anlık değişimler göz önüne alınarak da strain ifade edilebilir. Bu şekilde hesaplanan straine, malzemeye etki eden gerçek değerleri ifade etmesi nedeniyle true strain (*gerçek gerinim*) denir. Çubuğun ulaştığı son uzunluk l_f ile gösterilirse, true strain denklem 2.6'daki gibi ifade edilebilir.

$$\varepsilon = \ln \frac{l_f}{l_0} \quad (2.6)$$

True strain değerlerini hesaplamak için ihtiyaç duyulan anlık değerlerin bir test sırasında takip edilmesi pek de kolay değildir. Fakat denklem 2.7 ile engineering strain, true straine çevrilebilmektedir [8].

$$\varepsilon = \ln(1 + e) \quad (2.7)$$

2.1.1.1.3. Elastik Limit

Yük altındaki bir cisim, yük kaldırıldıktan sonra, eğer yüklenmeden önceki şeklini tamamıyla geri kazanıyorsa, bu şekil değişimi elastik olarak tanımlanır. Yük kaldırıldıktan sonra cisim yüklenmeden önceki şekline geri dönemiyorsa, oluşan şekil değişimine kalıcı ya da plastik şekil değişimi adı verilir.

Elastik şekil değişiminde gerilme ve strain arasında doğrusal bir ilişki bulunmaktadır. Örnek olarak, bir çubuk bir ucundan tavana sabitlenip diğer ucuna artan miktarlarda yük asıldığında, belli bir yüke kadar çubuğun yük miktarıyla doğru orantılı olarak esnediği görülür. Yük miktarı belli bir değer üzerine çıktığında ise bu doğrusal ilişkinin geçerliliğini kaybettiği gözlemlenir. Doğrusallığın sona erdiği bu gerilme değerine elastik limit ya da akma mukavemeti (*yield strength*) denir.

Elastik limit, doğrusallığın sona erdiği noktayı gösterdiği gibi, elastik ve plastik şekil değişimleri arasındaki geçişe de işaret etmektedir [9].

2.1.1.1.4. Gerilme-Strain Eğrisi

Gerilme - strain eğrisi, ya da daha sık kullanılan tabiriyle akma eğrisi, tek yönlü çekme ya da basma testlerinde uygulanan gerilme miktarına bağlı olarak malzemede oluşan ortalama strainin nasıl değiştiğini göstermektedir.

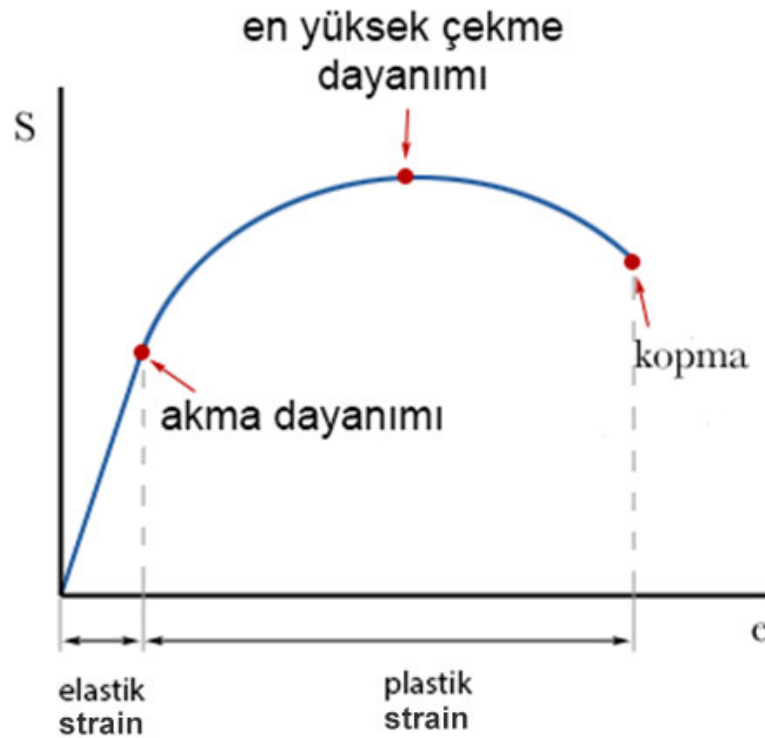
Bir malzemenin gerilme altındaki davranışı tek yönlü çekme testiyle (*uniaxial tensile test*) incelenebilmektedir. Tek yönlü çekme testinde, silindir ya da plaka geometrisinde sahip bir çekme numunesi bir ucundan sabitlenip, diğer ucundan, sadece uzunluğu doğrultusunda yük uygulanarak gerilir. Test sonrasında elde edilen verilerin sağlıklı olması için numuneye uygulanan kuvvetin tek eksen doğrultusunda etki etmesinin kesin bir şekilde sağlanması gerekmektedir.

Bu testte, yük miktarı kontrollü bir şekilde artırılarak numunede oluşan uzama miktarı ölçülür. Dolayısıyla, test sonunda elde edilen veri, kuvvet ve kuvvete bağlı olarak numunede oluşan uzama değerlerinden oluşmaktadır. Elde edilen değerler kullanılarak, mühendislik akma eğrisi çizilebilir. Şekil 2.3'te mühendislik akma eğrisinin genel yapısı gösterilmektedir.

Akma dayanımına kadar gerilme ve strainin doğrusal bir ilişki içinde olduklarını görülebilir. Atomların konumlarında bir değişme olmadan, sadece atomlar arası bağların esnemesi ile ortaya çıkan bu straine elastik strain denir. Elastik strain bir numune üzerindeki yük kaldırıldığında, numune yük uygulanmadan önceki şekline geri dönmektedir.

Gerilme, akma dayanımı üzerine çıktığında, gerilme ve strain arasındaki doğrusal ilişki ortadan kalkmaktadır. Bu noktadan sonra, malzeme içindeki kristal blokları birbirleri üzerinde kaymaya başlayarak kalıcı şekil değişimi oluşturmaktadırlar. Elastik şekil değişiminden farklı olarak, plastik olarak adlandırılan bu kalıcı şekil değişiminde atomların konumları kayma hareketi nedeniyle değişmeye başlamaktadır.

Kristal bloklarının kaymaya başlaması için akma dayanımı miktarında gerilme uygulanması yeterli olmaktadır. Fakat numunedeki straini daha da arttırabilmek için uygulanması gereken gerilme, akma dayanımı sonrasında da artış göstermektedir. Plastik şekil değişimi esnasında karşılaşılan bu “güçlenme” etkisine strain hardening (*gerinim sertleşmesi*) denir.

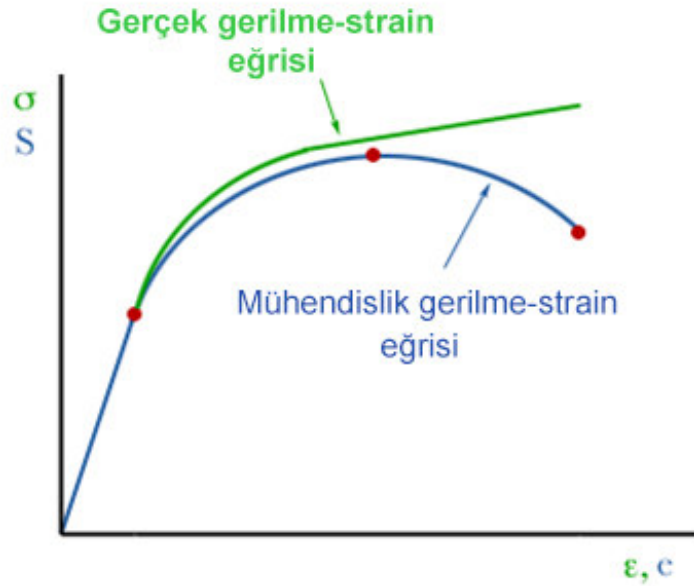


Şekil 2.3. Mühendislik akma eğrisi [10].

Numune üzerindeki yük arttırıldıkça bir noktadan sonra numuneyi daha da uzatabilmek için uygulanması gereken yükün düşmeye başladığı görülmektedir. Akma eğrisi üzerinde görülen bu tepe noktasına en yüksek çekme dayanımı (*ultimate tensile strength, UTS*) denir. Bu yük düşüşünün ardından numunenin bir miktar daha uzadıktan sonra kopmasıyla testin sonuna gelinir.

Gerçek gerilmeyi hesaplarken numunenin test öncesindeki kesit alanı değil, anlık kesit alanı dikkate alınır. Gerçek gerime ve true strain değerleri kullanılarak akma eğrisi çizildiğinde, eğrinin şeklinin değiştiği gözlemlenir (Şekil 2.4).

Şekil 2.4.'te yeşil renkle gösterilen gerçek akma eğrisinin verdiği gerilme değerlerinin, mühendislik akma eğrisine kıyasla daha yüksek olduğu görülmektedir. İki eğri arasındaki bu fark, gerçek akma eğrisi çizilirken kesit alanındaki anlık daralmaların dikkate alınmaması nedeniyle ortaya çıkmaktadır. Diğer bir deyişle, hesaplanan gerçek gerilme değerlerinin, mühendislik değerlerinden daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır [10].



Şekil 2.4. Gerçek akma eğrisi [10].

2.1.1.2. Metal Akışı

Dövmede, başarılı bir şekil verme işlemi yapabilmek için metal akışı iyi anlaşılabilmesi ve iyi kontrol edilmelidir. Metal akışının doğrultusu, şekil değiştirme miktarı ve sıcaklığın son

ürünün özelliklerine etkisi büyüktür. Metal akışı, ürünün mekanik özelliklerini ve ürün yüzeyinde veya içinde çatlak v.s. gibi kusurların oluşumunu belirleyen faktördür. Metal akışının bağlı olduğu işlem değişkenleri şunlardır:

Malzeme: Malzemenin içyapısı, ne miktarda şekil değiştirmiş olduğuna ve uygulanan ısı işlemine bağlıdır. Belirli bir kimyasal bileşim ve içyapı için, bir plastik şekil verme işleminin incelenmesinde söz konusu olan en önemli malzeme değişkenleri akma sınırı ve farklı doğrultularda şekillendirilebilme özelliği yani anizotropidir.

Akma sınırı, şekil değiştirme miktarına, şekil değiştirme hızına ve sıcaklığa bağlıdır. Malzemenin şekillendirilebilme özelliği ise hasara uğramadan şekil değiştirebilme kabiliyetidir ve şu faktörlere bağlıdır:

- Şekil değiştirme sırasındaki şartlar (sıcaklık, şekil değiştirme hızı v.b.),
- Malzeme değişkenleri (kimyasal bileşim, malzeme içindeki boşluklar, kalıntılar, başlangıçtaki içyapı v.b.).

Sıcak şekil verme işlemlerinde sıcaklık gradyanları da metal akışına ve işlem sırasında oluşabilecek hasara etki eder.

Kalıp ve Ekipman: En uygun ekipmanın seçiminde, üretim miktarı, iş yerinin şartları, çevre etkileri, bakım gereksinimleri v.s. dahil bütün şekil verme sistemi göz önüne alınmalıdır. Kalıp değişkenleri ise şunlardır: kalıbın geometrisi, yüzey şartları, kalıp malzemesi, kalıba uygulanan ısı işlemi, kalıbın sertliği, kalıpla malzeme arasındaki temas yüzeyinde sürtünme ve yağlama.

Şekil Değiştirme Bölgesi: Şekil değiştirme bölgesinde malzeme akışını etkileyen faktörler şunlardır:

- Kalıbın geometrisi,
- Sürtünme şartları,
- Ham maddenin özellikleri,
- Şekil değiştirme bölgesindeki ısı şartları.

Metal akışı, ürünün kalitesi ile özelliklerine, ayrıca işlemin yapılması için gerekli kuvvet ve iş değerine etki eder.

Ürün: İşlem değişkenleri ürünün makro ve mikro geometrisine, yani boyutlarla yüzey durumuna etki eder. Sıcaklık, şekil değiştirme miktarı ve şekil değiştirme hızı mikro yapıyı ve ürün özelliklerini tayin eder. Dolayısıyla şu hususlar göz önüne alınmalıdır:

- Ürünün mikro yapısı ile özellikleri arasındaki bağıntılar,
- İşlem şartları ile ısı işlemin mikro yapıya etkisi [1].

2.1.1.3. Sıcaklık ve Isı Transferi

Metal şekillendirme işlemlerinde, plastik deformasyon ve sürtünmenin ısı üretiminde büyük payı bulunmaktadır. İşlemlerde kullanılan mekanik enerjinin yaklaşık %90 - 95'i ısıya dönüşmektedir. Metal şekillendirmede, sıcaklığın büyüklüğü ve dağılımı esas olarak şu hususlara bağlıdır:

- Başlangıç iş parçası ve kalıp sıcaklıkları,
- İş parçası/kalıp ara yüzündeki plastik deformasyon ve sürtünme nedeniyle oluşan ısı,
- İş parçası-kalıplar ve iş parçası-çevre (hava veya yağlayıcı madde ve soğutma sıvısı v.b.) arasındaki ısı transferi.

Isı üretimi, mekanik pres, vidalı pres ve şahmerdan gibi yüksek hızlı ekipmanlarda yapılan dövmelemlerde önemlidir. Isı transferi ve dolayısıyla iş parçasının sıcaklık geçmişi de dövme ekipmanından etkilenir. Örneğin, hidrolik pres, deformasyon sırasında düşük hıza ve düşük strain oranına sahiptir. Mekanik pres ve vidalı pres ise, deformasyon sırasında yüksek hıza ve yüksek strain oranına sahiptir. Ancak hidrolik preste deformasyondan önce uzun bir bekleme süresi vardır, bu da iş parçası ile kalıp arasında daha uzun süren serbest dinlenme ısı transferine neden olur.

Dövmede, metal akışı kararlı olmayan durumdadır. Deforme olan metal ile kalıplar arasındaki temas kesik kesiktir. Temas süresi uzunluğu ve kalıp/malzeme ara yüzündeki ısı transferinin yapısı, sıcaklıkları çok önemli seviyede etkilemektedir. Ayrıca dövme işlemi

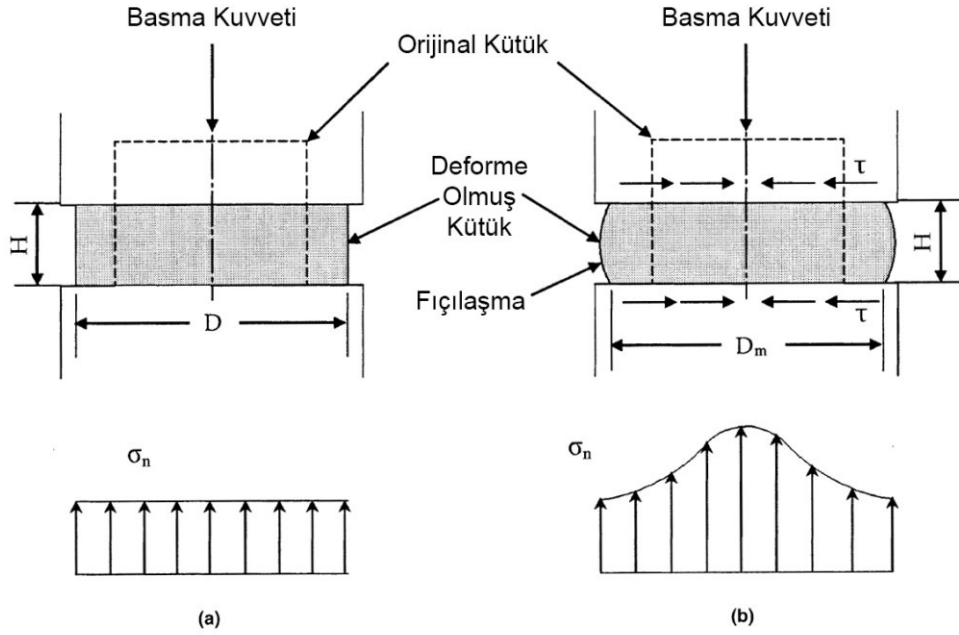
sırasında üretilen ısıнын bir kısmı deforme olmuş malzeme içinde kalır, başka bir kısmı, ısıнын az olduğu malzemenin deforme olmamış/az deforme olmuş bölümüne akar; bu sırada ısıнын bir kısmı da takım ve kalıp içerisine akabilir. Dövme işlemi sırasında oluşan sıcaklıklar, dövülmüş kısmın özellikleri ve mikro yapısının yanı sıra, yağlama şartları ve takım ömrünü de etkiler.

Sıcak dövme işlemlerinde, deforme olan malzeme ile kalıpların basınç altındaki temas süreleri, sıcaklık koşullarını etkileyen en önemli etkenlerdendir. Ayrıca, sıcak dövmede, sadece malzeme ve oluşmuş şekil değil aynı zamanda da kullanılan ekipmanın çeşidi (deformasyon hızı ve kalıp soğutma etkisi) de, metal akış davranışını, şekillendirme yükünü ve işlem için gerekli enerjiyi belirler. Yüzey yırtılması ve çatlaması veya şekil verilmiş malzemede kayma bantları ilerlemesi, genellikle kalıp/malzeme ara yüzünün yakınındaki şekil verilmiş kısmın yüzey tabakalarının aşırı soğumasıyla açıklanabilir.

Günümüzde sonlu elemanlara dayalı işlem modellemesinin gelişmesi ve bilgisayar işlem hızındaki artış ile dövme işlemindeki deformasyon sırasındaki ısı üretimi ve deformasyondan önceki, deformasyon sırasındaki ve deformasyondan sonraki ısı transferinin tamamı çok kısa bir süre içinde bilgisayarda doğru bir şekilde simüle edilip hesaplanabilir. Doğru ısı transferi hesaplamasını sağlamak için, doğru iş parçası ve kalıp ara yüzü ısı transferi katsayısı bilinmelidir. Doğru işlem modelinin kullanılmasıyla, pres hızının etkisi, temas süresi ve metal şekillendirmedeki ısı transferi değerlendirilebilir [11].

2.1.1.4. Sürtünme

Dövmede, metalin akışı kalıplardan deforme olan iş parçasına aktarılan basınçtan kaynaklanır. Bu nedenle, kalıp/iş parçası ara yüzündeki sürtünme koşulları, metal akışını, yüzey oluşumu ve iç kusurları, kalıplardaki gerilmelerin davranışını, yük ve enerji gerekliliklerini büyük ölçüde etkilemektedir. Şekil 2.5, bu önemli olayı, silindirik bir iş parçasının yığma işleminde uygulanırken göstermektedir. Şekil 2.5(a)'da, sürtünmesiz koşullar altında, iş parçası üniform biçimde deforme olmakta ve elde edilen normal gerilme, σ_n , çap boyunca sabit olmaktadır. Şekil 2.5(b)'de, belli bir düzeyde sürtünme gerilmesinin, τ , olduğu gerçek koşullarda, iş parçasının deformasyonunun üniform olmadığı görülmektedir (yani fıçılama). Sonuç olarak, normal gerilme, σ_n , dış çaptan iş parçasının merkezine doğru artmakta ve toplam basma kuvveti sürtünmesiz koşullardan daha çok olmaktadır.



Şekil 2.5. Silindirik iş parçasına uygulanan yığma işlemi. (a) Sürtünmesiz. (b) Sürtünlü [12].

Dövme işleminde sürtünme olayını anlatmak için yaygın olarak iki yasa kullanılır. Bu yasaların her ikisi de ara yüz olaylarının tümünü boyutsuz bir katsayı veya çarpana toplayarak, ara yüz sürtünmesini ölçer. Coulomb sürtünme yasası, ara yüz sürtünmesini ölçmek için bir sürtünme katsayısı, μ , kullanır. Denklem 2.8, basit bir şekilde μ 'nun, sürtünme kayma gerilmesinin τ , ve normal gerilmenin (basınç), σ_n , oranı olduğunu göstermektedir.

$$\tau = \sigma_n \mu \quad (2.8)$$

Kullanılan diğer bir yaygın yasa olan ara yüz kayma sürtünme yasası da, ara yüz sürtünmesini ölçmek için bir sürtünme katsayısı, f , ya da bir kayma katsayısı, m , kullanır. Denklem 2.9, sürtünme kayma gerilmesinin, τ , deforme olan malzemenin akış gerilmesine $\bar{\sigma}$, ve sürtünme katsayısı, f , ya da kayma katsayısına, m , bağlı olduğunu göstermektedir.

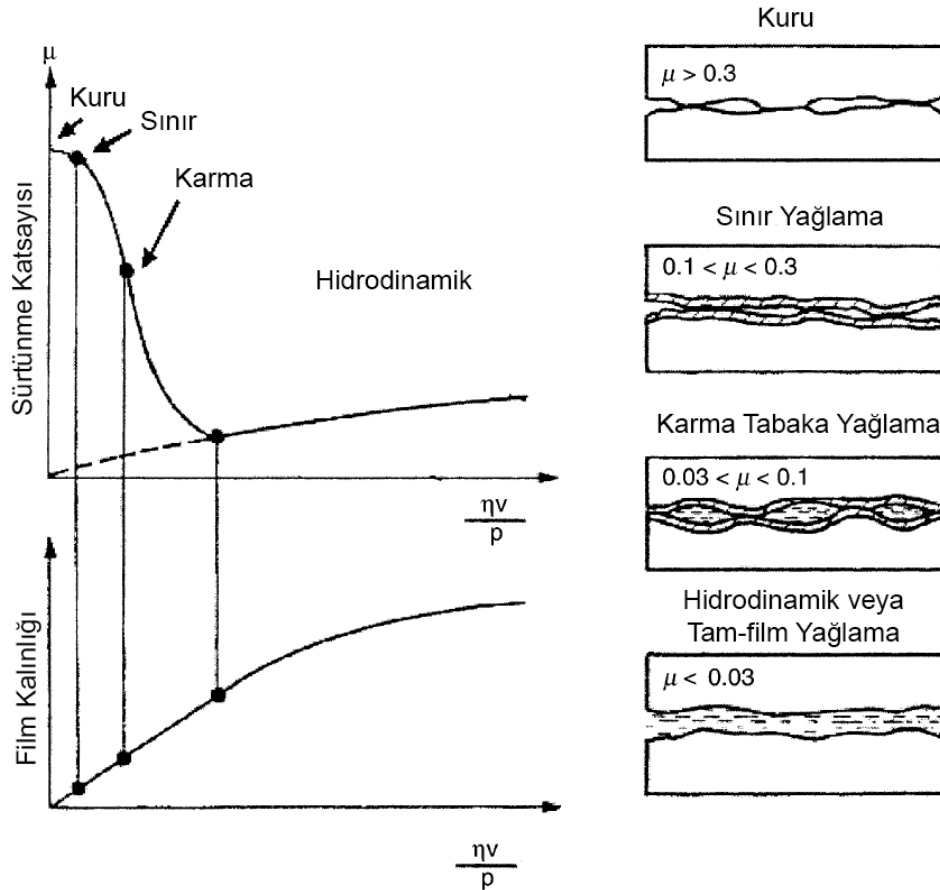
$$\tau = f \bar{\sigma} = \frac{m}{\sqrt{3}} \bar{\sigma} = mk \quad (2.9)$$

Çeşitli şekillendirme durumları için, kayma katsayısı değerleri aşağıdaki gibidir:

- $m = 0,05 - 0,15$ arası: Çeliklerin, alüminyum alaşımlarının ve bakırların geleneksel fosfat-sabun yağlama veya yağ kullanılarak soğuk şekillendirilmesinde.

- $m = 0,2 - 0,4$ arası: Çeliklerin, bakırların ve alüminyum alaşımlarının grafit bazlı (grafit-su veya grafit-yağ) yağlama kullanılarak sıcak şekillendirilmesinde.
- $m = 0,1 - 0,3$ arası: Titanyum ve yüksek sıcaklık alaşımlarının cam yağlama kullanılarak sıcak şekillendirilmesinde.
- $m = 0,7 - 1,0$ arası: Hiç yağlama kullanılmadığında.

Sürtünmenin etkisini azaltmak için yağlayıcı kullanılır. Metal şekillendirmede, sürtünme koşullarını etkileyen dört temel yağlama tipi vardır. Bunlar; kuru koşullar (yağlayıcı yok), sınır yağlama, tam-film yağlama veya hidrodinamik koşullar ve karma tabaka yağlamadır. Şekil 2.6'daki Stribeck eğrisi, yağlamanın çeşitli türlerinin başlangıcını; yağlayıcı viskozitesinin, η , kayma hızının, v , ve normal basıncın, p , kombinasyonunun bir fonksiyonu olarak göstermektedir [12].



Şekil 2.6. Yağlamanın çeşitli türlerinin başlangıcını gösteren Stribeck eğrisi [12].

2.1.2. Dövmeye İşleminin Avantajları ve Dezavantajları

Dövmeye işleminin avantajları ve dezavantajları şunlardır [13]:

Avantajları:

- Dövmeye makine parçaları ağır yük koşullarına dayanabilir (talaşlı imalat veya döküm ile üretimde bu mümkün olmayabilir).
- Zaman tasarrufu sağlayan bir işlemdir.
- Metal parçalar, yapıya zarar verilmeden gereken biçimde kolayca şekillendirilebilir.
- Porozite gibi kusurlar oluşmaz.
- Süneklik ve yükleme darbe direnci artar.
- Metalin yapısı güçlenir ve iç mukavemeti artar.
- Dövmeye işleminde, malzemenin talaşlı imalat işlemi sırasında çapak olarak boşa giden % 50-60'lık kısmından tasarruf edilir.
- Şekil verme yönündeki tane yapısı sürekliliği korunur.

Dezavantajları:

- İlk kurulum maliyeti çok yüksektir.
- Yakın toleransları sağlamak zordur.
- İşlem sonunda yüzey kalitesi çok da iyi olmaz.
- Bazı metaller, sıcak haldeyken çekiç etkisi altında çatlar.
- Metaller belirlenen bir sıcaklık sınırının altında çalışılırsa, çatlar veya distorsiyona uğrarlar ve eğer gerekli aralığın üzerine ısıtılırsa yanarlar.

2.1.3. Dövmeye İşleminin Çeşitleri

2.1.3.1. Sıcaklığa Göre Dövmeye İşlemleri

2.1.3.1.1. Sıcak Dövmeye

Sıcak dövmeye, birçok metal parçanın geniş yelpazede üretilebilmesi için kullanılabilecek bir işlemdir.

Sıcak dövmenin ilkeleri ve uygulamaları, son yüzyıldan beri bellidir fakat ekipmanlar, yağlayıcılar ve dövmeye yapılması daha zor malzemeleri işleyebilme yeteneği de açıkçası son yüzyıldan günümüze uzanan süreçte geliştirilmiştir.

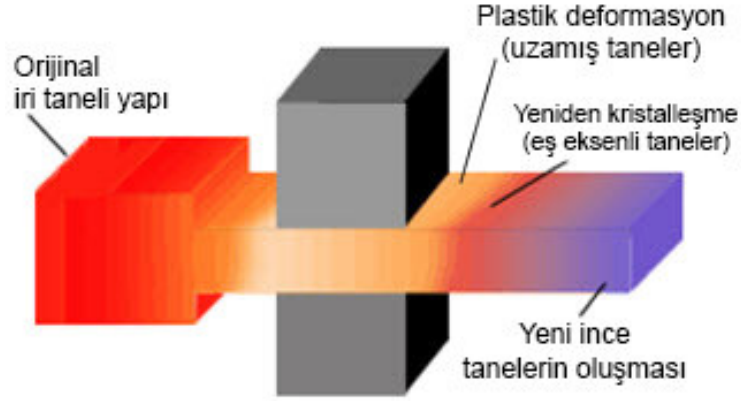
Sıcak dövmeye, metale belli bir sıcaklık ve deformasyon hızında yapılan plastik deformasyon işlemidir, böylece yeniden kristalleşme deformasyonla eşzamanlı meydana gelir ve strain hardening oluşmasından kaçınılır. Bunun gerçekleşmesi için, işlem boyunca yüksek iş parçası sıcaklığına (metalin yeniden kristalleşme sıcaklığı ile uyuşan sıcaklığa) erişilmelidir.

Sıcak dövmenin bir şekli de malzemelerin ve kalıpların aynı sıcaklığa ısıtıldığı izotermal dövmedir. Neredeyse tüm durumlarda, izotermal dövmeye bir vakum ortamında veya oksitlenmeyi önlemek için son derece kontrollü bir ortamda süper alaşımlar üzerinde uygulanmıştır.

Metale sıcak olduğundan hareket ettirilmesi kolaydır ve bu nedenle soğuk dövmeden daha karmaşık şekillerin yapılmasına izin verir. Sıcak dövmeye, soğukken şekil verilmesi zor olan çelik gibi daha sert metaller için yaygın kullanıma sahiptir. İşlem, döküm kütüğün plastik deformasyon sıcaklığına kadar ısıtılması ile başlar, sonra kütük kalıplar arasında istenilen şekil ve büyüklüğe dövlür. Dövmeye işlemi sırasında, döküm, iri taneli yapı bozulur ve kütüğün boyutunun azalması ile elde edilen daha ince taneli yapıyla değişir.

Metale ve ısıtıldığı dereceye bağlı olarak, dövmeye işleminin kendisi malzemenin temperlenmesi veya mukavemetinin artması için yeterli olabilir. Genellikle ürün sıcak dövüldükten sonra ek olarak ısıl işleme de tabi tutulur.

Şekil 2.7, döküm kütüğün sıcak dövmeye işleminde meydana gelen ısıl işlemi şematik olarak göstermektedir [14].



Şekil 2.7. Sıcak dövme işlemi [14].

2.1.3.1.2. Soğuk Dövme

Soğuk dövme, toplu iş parçasının kalıp ve zımba arasına yerleştirilip basma yüküne maruz bırakıldığı bir işlemdir. Bu işlemde dövme sıcaklığı, oda sıcaklığına yakındır ve dövme işlemi zamandan bağımsız bir işlemdir [15].

Soğuk dövmede kullanılan parçalar genelde küçük ve simetrikler. Soğuk dövme ile üretilen parçalar, daha iyi yüzey kalitesi, yorulma dayanımı, süneklik ve gelişmiş tane yapısına sahiptir.

Soğuk dövme işleminde üretim oranları çok yüksektir ve kalıplar sıra dışı ömre sahiptir. İşlem sırasında dövme için yüksek kuvvet uygulanır ve bazen ara işlemler gerekebilir.

Soğuk dövme ile ilgili daha detaylı bilgi ileride verilecektir.

2.1.3.1.3. Ilık Dövme

Ilık dövme, 70'lerin başında tanınmaya başlayan nispeten yeni bir işlemdir. Ilık dövme, Doğu Asya ülkeleri ve Japonya endüstrisinde daha tesisleşmiş olduğu halde, Avrupa'da çok yaygın olarak kullanılmaz.

Ilık dövme soğuk ve sıcak dövmenin avantajlarını bir araya getirir: soğuk dövmeden hassaslık ve malzeme kullanımı ve sıcak dövmeden ise malzemelerin işlenebilme aralığı ve

şekilleri. Ancak, ılık dövmenin uygulanması, makinelerin yeniden ayarlanması için gerekli yüksek yatırım maliyetleri, geliştirme ve takımlar için gerekli masraflar nedeniyle kısıtlıdır.

Ilık dövme, östenitik paslanmaz çelik dışında (bu çelikler 200-300 °C'de dövüldükleri için), 600-900 °C arasındaki çelik parçalara uygulanır. Ilık dövme, özellikle çeliklerin çeşitli sınıflarına ve pek çok demirsiz metal alaşımlarına olmak üzere, geniş çeşitlilikte metal alaşımlarına uygulanabilir. Çoğu mühendislik çeliği ılık dövülebilir fakat kimyasal yapı ve dövme sıcaklığına bağlı olarak deformasyonda kısıtlamalar olabilir. 600 °C ve üstündeki sıcaklıklarda dövme için metal sıcak haddelenmiş ya da çekilmiş durumda alındığı gibi kullanılmalıdır. Düşük sıcaklıklar için küreselleştirme tavlama işlemi genellikle yardımcı olur. Çeliklerin değişik sınıfları, esasen çalışma sıcaklıklarını belirleyen farklı karakteristiklere sahiptir.

İşlem esas olarak döner simetrik parçalara uygulanır ve genellikle konik dişliler, kaymalı yataklar vs. üretimi için soğuk dövme ile birleştirilir [16].

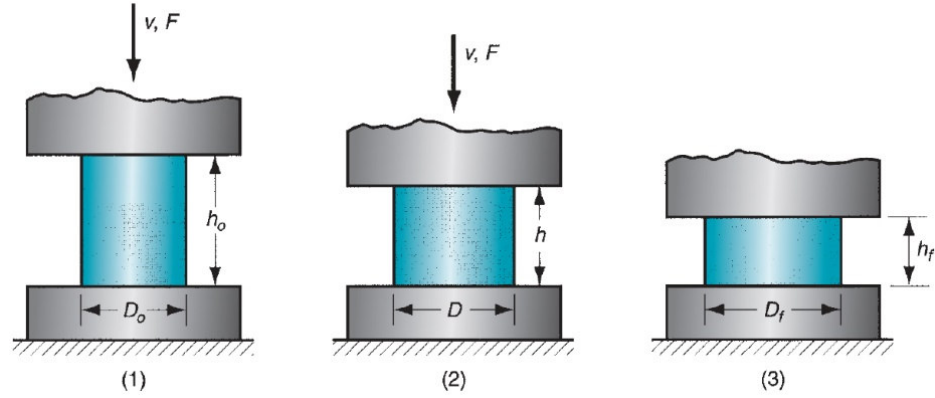
2.1.3.2. Kullanılan Kalıplara Göre Dövme İşlemleri

2.1.3.2.1. Açık Kalıpta Dövme

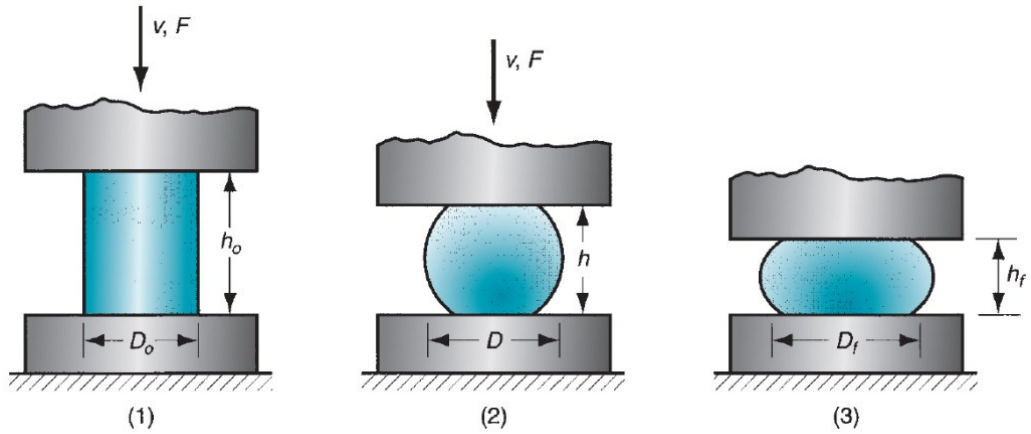
Açık kalıpta dövme en basit dövme işlemidir. Parçalar basit biçimli ve çoğunlukla düzlemsel iki kalıp arasında, uygulanan basma kuvveti ile şekillendirilmektedir. Bu yöntem genellikle kaba şekillendirme ve kapalı kalıpta dövme öncesi ön şekillendirme işlemlerinde kullanılır. Ayrıca kapalı kalıp yatırımının ekonomik olmayacağı kadar az sayıda parça üretiminde ve kapalı kalıba sığmayacak kadar büyük parçaların plastik şekillendirmesinde de açık kalıpta dövme tercih edilir.

Yığılma:

Bu basit açık kalıpta dövme işleminde parçalar iki düz basma yüzeyi arasında şekillendirilmektedir. Şekil 2.8'de görüldüğü gibi yığılma öncesinde (1. durumda), h_0 yüksekliğinde ve D_0 çapında olan silindirik bir parça, ideal durumda yığılma sonrasında (3. durumda), h_f yüksekliğine düşmekte ve D_f çapına genişlemektedir. Gerçek durumda ise (Şekil 2.9), kalıp yüzeylerine dik doğrultuda akmaya çalışan malzeme, sürtünme ve kısmen soğuma nedeniyle temas yüzeylerinde engellendiğinden fıçılama meydana gelir.



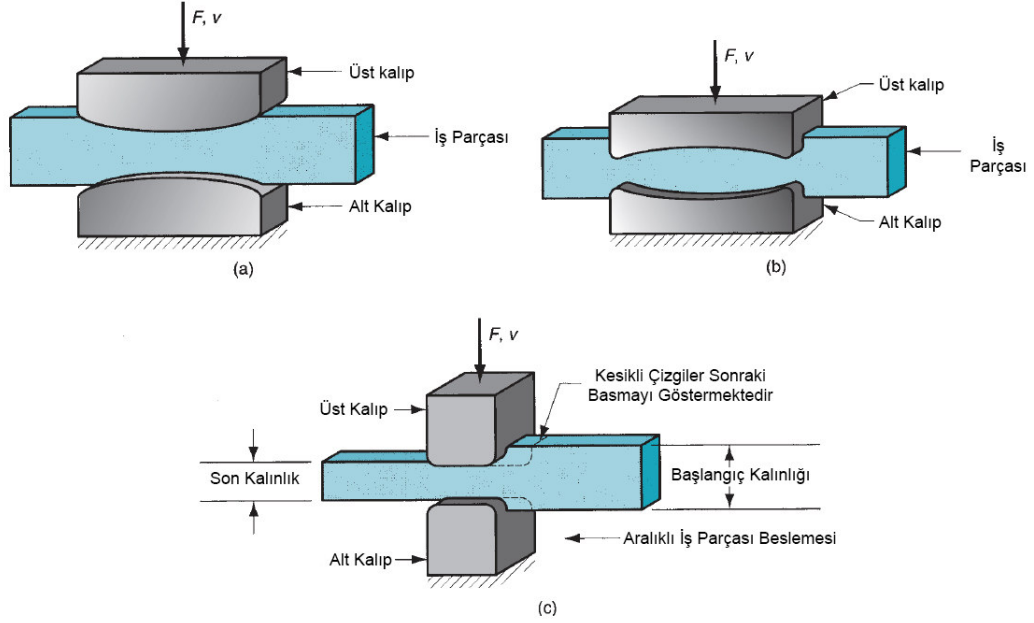
Şekil 2.8. İdeal koşullarda açık kalıpta dövme [17].



Şekil 2.9. Gerçek koşullarda açık kalıpta dövme [17].

Dar Kalıplarla Yığma:

Dar kalıpla dövmede parçadaki şekil değişimi, sürtünmenin malzeme akışını daha az engellediği, kalıbın dar boyutu doğrultusunda meydana gelmektedir. Bu özellikten yararlanarak düz kalıplarla parçada uzatma ve genişletme işlemleri gerçekleştirilebilmektedir (Şekil 2.10(c)). Kalıp genişliğinin çok daraltılması durumunda kesme işlemi dahi yapılabilir. Ayrıca dış bükey (uzatma), iç bükey (toplama) kalıplarla toplama (Şekil 2.10(b)) ve uzatma (Şekil 2.10(a)) işlemleri de uygulanabilir [18].

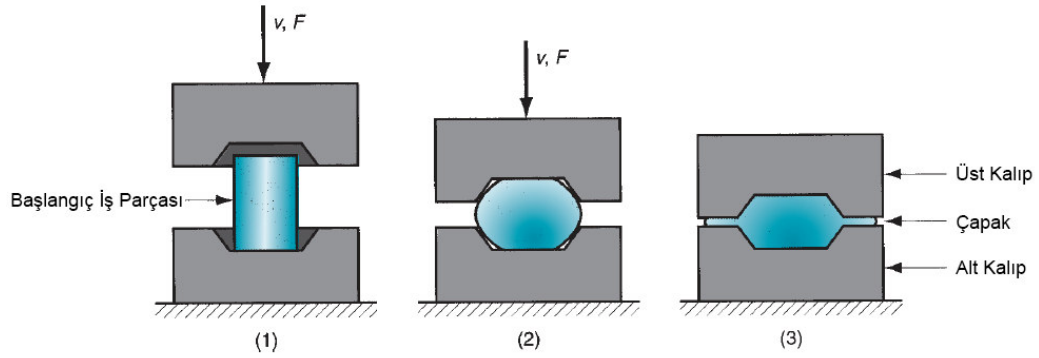


Şekil 2.10. Açık-dar kalıpla yapılan bazı dövme işlemleri: (a) uzatma, (b) toplama, (c) genişletme [17].

2.1.3.2.2. Kapalı Kalıpta Dövme

Kapalı Kalıpta Çapaklı Dövme:

Karmaşık şekilli parçaların dar toleranslar içinde elde edilebilmesi için birbiri üzerine kapanan ve kapandığında elde edilecek parçanın biçimine sahip bir kalıp boşluğu oluşturan kalıplardan yararlanılır (şekil 2.11). Kapalı kalıpta dövmede kalıp maliyeti yüksek olduğu için, yöntem ancak seri üretimler için ekonomiktir.



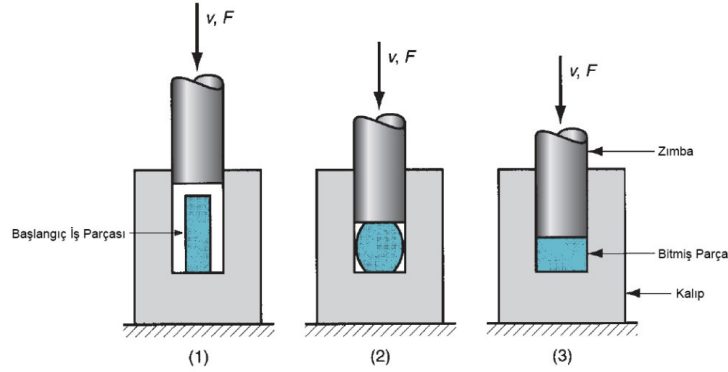
Şekil 2.11. Kapalı kalıpta dövme [17].

Kapalı kalıpta dövmede, şekillendirilmek üzere kalıba yerleştirilen metalin miktarı kalıp boşluğunu doldurmaya yeterli olmalıdır. Bunun tam olarak ayarlanması çok güç olduğundan, malzemenin hacmi kalıbın hacminden fazla tutulur ve kalıpta gerekli düzenlemeler yapılarak, bu fazla malzemenin kalıp boşluğu dışına dar bir şerit şeklinde çıkması sağlanır (çapak). İş parçasını çevreleyen çapak, dövme işleminden sonra mekanik preslerde kesme kalıpları yardımıyla kesilerek uzaklaştırılır. Kesme işleminin güç olduğu yüksek karbonlu ve alaşımlı çeliklerde çapak kesme işlemi ya sıcak olarak, ya da yumuşatma tavını takiben yapılır.

Kapalı kalıpta dövmede malzemeyi bir defada son biçimine getirmek genellikle mümkün değildir. Bu amaçla parça ön şekillendirme ve ara dövme gibi işlemlere tabi tutulur. Bu işlemler genellikle aynı kalıp bloğu üzerinde gerçekleştirilecek şekilde tasarlanır.

Kapalı Kalıpta Çapaksız Dövme (Hassas Dövme):

Hassas dövmede parça bir kapalı kalıpta çapaksız olarak biçimlendirilir (Şekil 2.12). Bu yöntemle üretilen parçalar genellikle ek bir talaş kaldırma işlemine gerek kalmadan veya çok az bir talaş kaldırma işleminden sonra kullanılabilir. Ancak burada kalıba yerleştirilen malzeme miktarının çok hassas olarak ayarlanması gerekmektedir [18].



Şekil 2.12. Kapalı kalıpta çapaksız (hassas) dövme [17].

2.1.3.2.3. Kalıp Malzemeleri

Kalıpların tasarımı, üretimi ve kalıp malzemesinin seçimi ayrı parçaların dövme ile üretiminde çok önemlidir. Kalıplar, makul bir maliyetle kabul edilebilir bir kalıp ömrünü sağlamak amacıyla, uygun kalıp malzemelerinden, modern yöntemler ile yapılmalıdır. Genellikle, bir dövme işleminin ekonomik başarısı kalıp ömrüne ve üretilen parça başına kalıp maliyetine bağlıdır. Kalıplarda kullanılacak malzemelerin şu özellikleri sağlanması beklenmektedir [19]:

- Deformasyona uğramaması için sertlik ve dayanımı yüksek olmalı,
- Aşınmaya dayanıklı olmalı,
- Sünnek olmalı,
- Homojen ve gerilmesiz içyapıya sahip olmalı,
- Yüksek sıcaklık dayanımına sahip olmalı,
- Talaşlı şekillendirilebilmeli,
- Isıl işlemlere elverişli olmalıdır.

Kalıp malzemesi olarak; alaşım çelikler (Cr, Mo, W, V ile birlikte), takım çelikleri, döküm çelikler veya döküm demir kullanılabilir. Ayrıca % 0,7-0,85 C içeren karbon çelikleri, küçük takımlar ve düz kapalı kalıplarda kullanılmaya elverişlidir. Orta alaşımlı takım çelikleri şahmerdan kalıpları için, yüksek alaşımlı çelikler ise preslerde ve yatay dövme makinelerinde kullanılan yüksek sıcaklığa dayanımına sahip kalıplarda kullanılmaya uygundur. Bunların yanı sıra, kalıp ömrünü uzatmak için nitrüleme veya krom kaplama gibi işlemler de gerekebilir. Dövme kalıplarında kullanılan bazı sıradan çelikler çizelge 2.2'de verilmiştir [20].

Çizelge 2.2. Dövme kalıplarında kullanılan bazı sıradan çelikler [20].

Dövme Malzemeleri	Çelikler		Bakır ve Bakır Alaşımları		Hafif Alaşımlar	
	DIN	AISI	DIN	AISI	DIN	AISI
Dövme Kalıpları	C70 W2	-				
	C85 W2	-				
	60MnSi4	-	X30WCrV53	H21	X30WCrV53	-
	40CrMnMo7	-	X38CrMoV51	H11	X38CrMoV51	H11
			X32CrMoV33	H10		
Kalıp Eklentileri	55NiCrMoV6	6F2			55NiCrMoV6	
	56NiCrMoV7	6F3			56NiCrMoV7	6F2
	57NiCrMoV77	-	57NiCrMoV77	-	57NiCrMoV77	6F3
	35NiCrMo16	-				
	X38CrMoV51	H11	X30WCrV93	H21	X38CrMoV51	H11
	X32CrMoV33	H10	X32CrMoV33	H10	X32CrMoV33	H10
	X30WCrV53	-	X30WCrV52	-	X30WCrV53	-
	X37CrMoW51	H12				

2.1.3.3. Kullanılan Makinelere Göre Dövme İşlemleri

2.1.3.3.1. Şahmerdanlar

Tarihsel olarak, şahmerdanlar dövme için en geniş ölçüde kullanılan ekipmanlardır. Ayrıca yapılabilen dövme işlemlerinin çeşitliliği ile dövme işlemi için en ucuz ve esnek makinelerdir. Şahmerdanlar büyük güçler ortaya çıkarabilme kapasitesine sahiptirler ve kısa kalıp temas süreleri vardır.

Şahmerdanın ana bileşenleri; çekiç, çerçeve takımı, örs ve örs başlığından oluşmaktadır. Örs direk olarak çerçeve takımına bağlı, üst kalıp çekice tutturulmuş ve alt kalıp da örs başlığına tutturulmuştur. Dövme işleminde, iş parçası alt kalıba yerleştirilir. Çekiç aşağı düşer, örse bir kuvvet uygulayarak iş parçasını deformasyona uğratır. Şahmerdanlar, çekicinin aşağıya hareketinin tahriğinde kullanılan yöntemlere göre sınıflandırılır. Çizelge 2.3'te bazı şahmerdan çeşitlerinin kapasiteleri karşılaştırılmıştır [6].

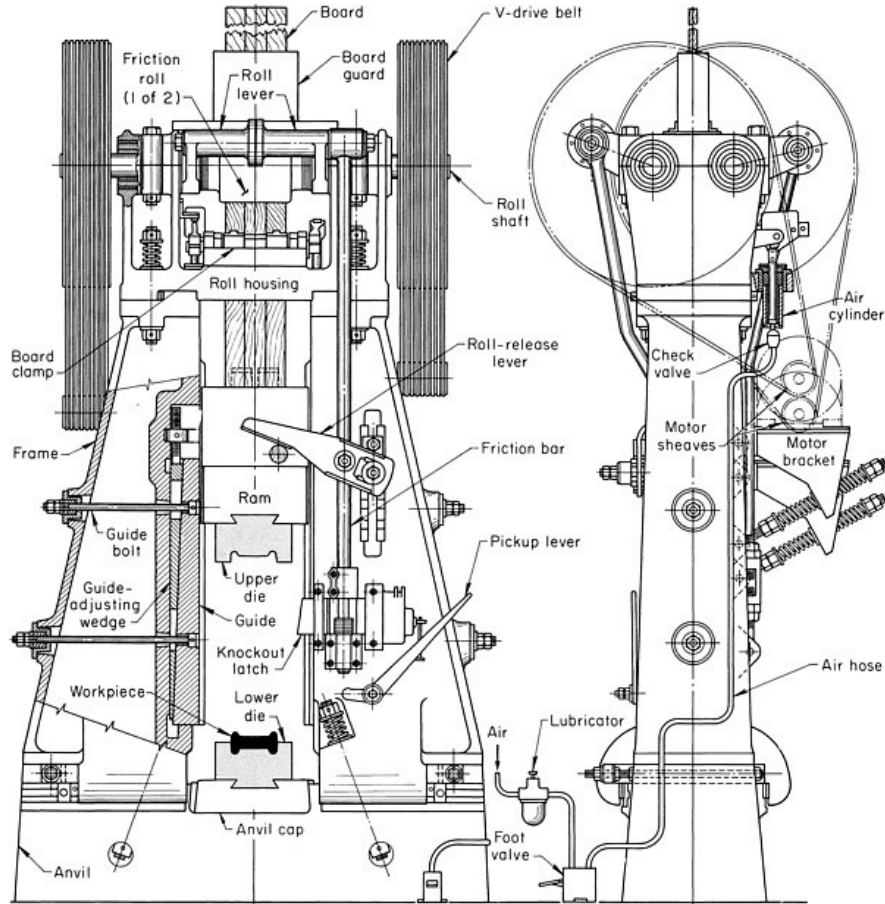
Çizelge 2.3. Bazı şahmerdan çeşitlerinin karşılaştırılması [6].

Şahmerdan Çeşidi	Çekiç Ağırlığı (kg)	Maksimum Darbe Enerjisi (kJ)	Çarpışma Hızı (m/s)	Dakika Başına Darbe Sayısı
Tahtalı Şahmerdan	45-3400	47,5	3-4,5	45-60
Hava veya Buhar Kaldırmalı	225-7250	122	3,7-4,9	60
Elektrohidrolik Düşmeli	450-9980	108,5	3-4,5	50-75
Güç Düşmeli	680-31750	1153	4,5-9	60-100

2.1.3.3.1.1. Serbest Düşmeli Şahmerdanlar

Serbest düşmeli şahmerdanlar, bir örs veya altlıktan, çekiç kılavuzunu ihtiva eden destek sütunlarından ve çekici başlangıç pozisyonuna geri döndüren bir mekanizmadan oluşmaktadır. İş parçasını deforme eden enerji, çekicinin aşağı doğru düşme hareketinden elde edilir. Çekicinin düşme yüksekliği ve ağırlığı, darbenin gücünü belirler. Serbest düşmeli şahmerdanlar; tahtalı, hava kaldırmalı-serbest düşmeli ve elektrohidrolik olmak üzere üç çeşide ayrılabilir.

Tahtalı şahmerdanlar (Şekil 2.13), birkaç kilogramdan daha ağır olmayan parçaların dövülmesi için yaygın olarak kullanılmaktadır. Tahtalı şahmerdanlarda, çekiç, kendisine kama ile tutturulmuş ve şahmerdanın üstündeki iki sürtünme makarasının arasından geçen bir veya daha fazla tahta tarafından kaldırılır. Tahtalar yukarıya doğru çekilerek ve sonra mekanik olarak bırakılarak çekicinin istenilen yükseklikten düşmesi sağlanır. Çekici kaldırmak için gerekli güç bir veya daha fazla motor tarafından sağlanır. Tahtalı şahmerdanların ağırlığı, şahmerdanın büyüklüğüne göre 180-4200 kg arasında değişmektedir. Değişen şahmerdan ağırlığına göre de çekiç düşme yüksekliği 900 mm'den 2,2 m'ye kadar olabilmektedir.



Şekil 2.13. Tahtalı şahmerdan [6].

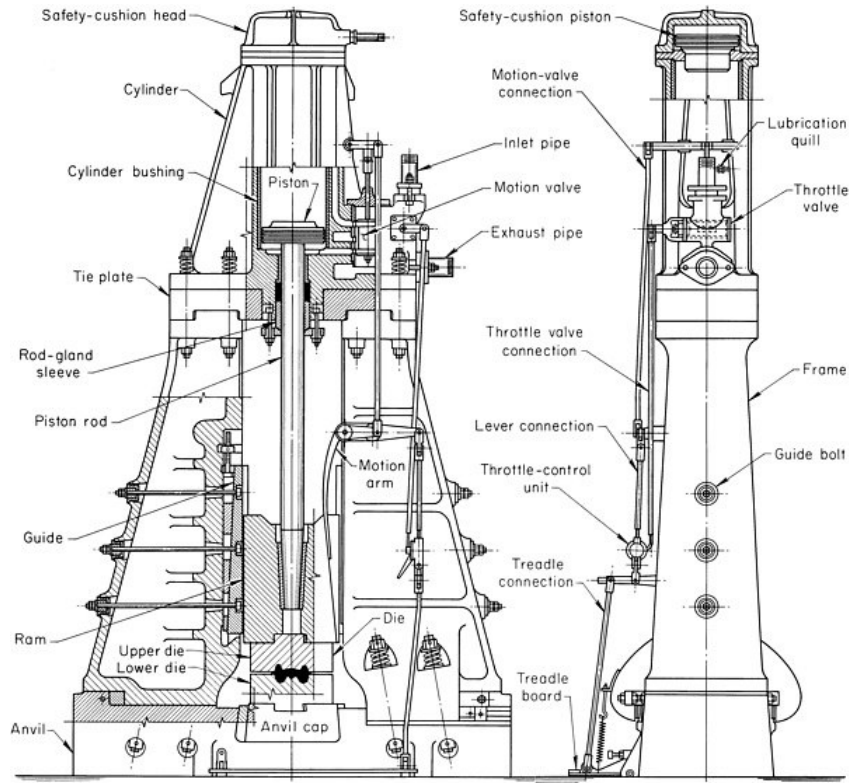
Hava kaldırmalı-serbest düşmeli şahmerdanlar, üst kalıp bakımından ve dövme gücünün düşen çekiç takımının ağırlığından elde edilmesinden dolayı tahtalı şahmerdanlara benzemektedir. Tahtalı şahmerdanlardan farkı ise hava kaldırmalı şahmerdanlarda çekicinin yukarıya hava gücü veya buhar gücüyle kaldırılmasıdır. Hava kaldırmalı şahmerdanlarda genellikle mevcut büyüklük 225-4500 kg arasında olmaktadır. Verilen büyüklüklerdeki hava kaldırmalı şahmerdanlarda yapılan dövme işlemlerindeki parçaların ağırlıkları ile tahtalı

şahmerdanlarda yapılan dövme işlemlerindeki parçaların ağırlıkları hemen hemen aynı olmaktadır.

Elektrohidrolik düşmeli şahmerdanlarda, çekici hava amortisörü etkisine karşı yağ basıncı ile kaldırılır. Sıkıştırılmış hava, çekicin yukarı doğru hareketini yavaşlatır ve aşağıya doğru yaptığı darbe hareketinde hızlanmasına yardımcı olur. Bu nedenle, elektrohidrolik düşmeli şahmerdan aslında küçük bir güç düşmeli şahmerdandır da diyebiliriz [6].

2.1.3.3.1.2. Güç Düşmeli Şahmerdanlar

Güç düşmeli şahmerdanlarda (Şekil 2.14), çekicin aşağı düşme hareketi, yerçekimi etkisine ek olarak hava basıncı, buhar basıncı veya hidrolik basınçla hızlandırılır. Bu tip şahmerdanlar neredeyse sırf kapalı kalıpta dövme için kullanılmaktadır.



Şekil 2.14. Güç düşmeli şahmerdanlar [6].

Buhar veya hava basınçlı güç düşmeli şahmerdanlar, çarpışma basıncı ile dövme için genel kullarımdaki en güçlü makinelerdir. Güç düşmeli şahmerdanda, ağır bir örs bloğu, dikey hareket eden çekici doğru olarak yönlendiren iki çerçeve elemanını

desteklemektedir. Çerçeve ise, bir piston ve piston kolu vasıtasıyla çekici tahrik eden bir silindiri desteklemektedir. Çekiç, alt yüzünde dövme işleminde şekli sağlayan parçalardan biri olan üst kalıbı taşımaktadır. Alt kalıp ise, örse sıkıca sabitlenmiş örs başlığına, kama ile tutturulmuştur.

Pistonun hareketi, buhar, hava veya hidrolik yağının pistonun üst ya da alt kısmına girmesine izin veren bir vana ile kontrol edilir. Vananın hareketi, genellikle elektronik olarak kontrol edilir. Birçok modern güç düşmeli şahmerdan, her ayrı darbenin şiddetinin ayarlanmasına izin veren elektronik darbe kontrolü ile donatılmıştır.

Güç düşmeli şahmerdanların, üst kalıbın dahil olmadığı vurucu kütlenin ağırlığı ile sınıflandırılırlar. Güç düşmeli şahmerdanların değerleri 450-31.750 kg aralığında değişmektedir. Ancak büyük kütleli güç düşmeli şahmerdanlar, büyük bir kısmının zemin altında bulunması durumundan dolayı görülmemektedir. Örneğin, büyüklüğü 22.700 kg olan bir şahmerdan, 453.600 kg veya daha fazla ağırlığa sahip bir kesit çelik örs bloğa sahip olacaktır. Çekiç, piston, ve piston kolunun yaklaşık toplam ağırlığı 20.400 kg olacaktır.

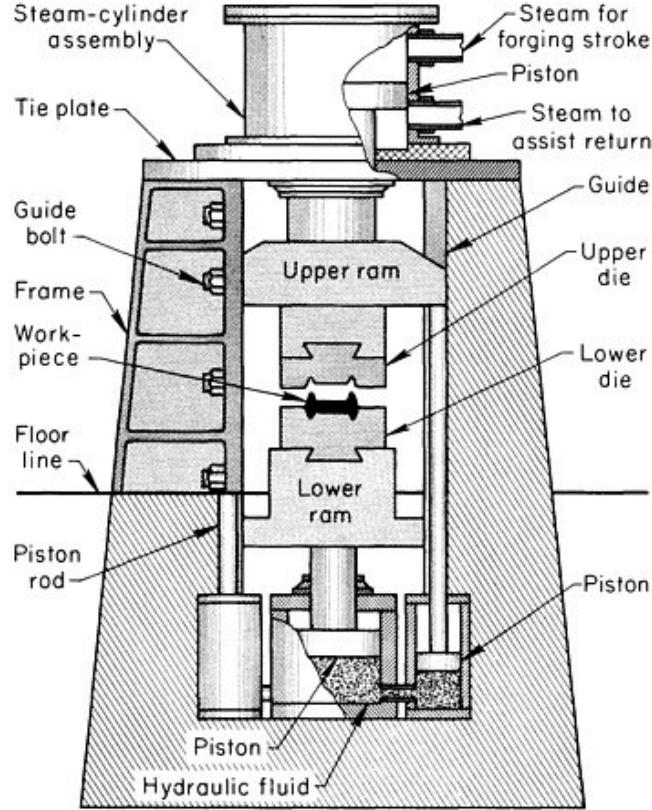
Güç düşmeli şahmerdanlarda, pistondaki düşme basıncıyla elde edilen vurma hızı bazen 7,6 m/s 'yi geçmektedir.

Güç düşmeli şahmerdanların kullanımının birçok avantajı olmasına rağmen, ürettikleri büyük vurma kuvvetleri birçok dezavantaja da neden olmaktadır. Çekicinin kinetik enerjisinin %15-20'si (sert bitirme darbelerinde % 80'e kadar olan kısmı), örs bloğunda ve şahmerdanın dayanaklarında dağılmakta ve bu nedenle iş parçasının deformasyonuna katkı sağlamamaktadır. Örs bloğuna aktarılan enerji, blokta yüksek gerilmeye neden olmakta ve bazen bloğu kırabilmektedir. Ayrıca aktarılan enerji, çevredeki zemin üzerinde şiddetli ve potansiyel olarak zararlı şok dalgaları ortaya çıkarmaktadır. Örs blok dayanaklarında kereste veya demir keçe gibi şok emici malzeme kullanma gerekliliği tesise kayda değer bir maliyet eklemektedir [6].

2.1.3.3.1.3. Karşı Vuruşlu Şahmerdanlar

Karşı vuruşlu şahmerdan, güç düşmeli şahmerdanın başka bir çeşididir ve Avrupa'da yaygın olarak kullanılır. Bu şahmerdanlar vuruş gücünü, karşı yönlerden aynı anda gelen ve orta bir noktada buluşan iki zımbanın hareketi ile oluştururlar. Bazı şahmerdanlar pnömatis sistem veya hidrolik sistem ile çalıştırılırken, bazıları da mekanik-hidrolik veya mekanik-pnömatis sistemleri birleştirirler.

Dikey bir karşı vuruşlu şahmerdanda (Şekil 2.15), buhar üst silindire alınır ve üst çekici aşağıya doğru hareket ettirir. Aynı zamanda üst çekice bağlı pistonlar da alt çekici yukarıya doğru harekete zorlayan bir hidrolik bağlantı boyunca hareket ederler. Geri çekilme hızı, pistonda yukarıya doğru hareket eden buhar (veya hava) basıncı ile artırılır. Uygun tasarım ağırlıklara (takım ve iş parçası da dahil) ve hidroliklere (yavaş alt bağlantı hızları) bağlı olsa da, üst ve alt bağlantıların kinetik enerjileri çarpışmada dengelenebilir.



Şekil 2.15. Dikey karşı vuruşlu şahmerdan [6].

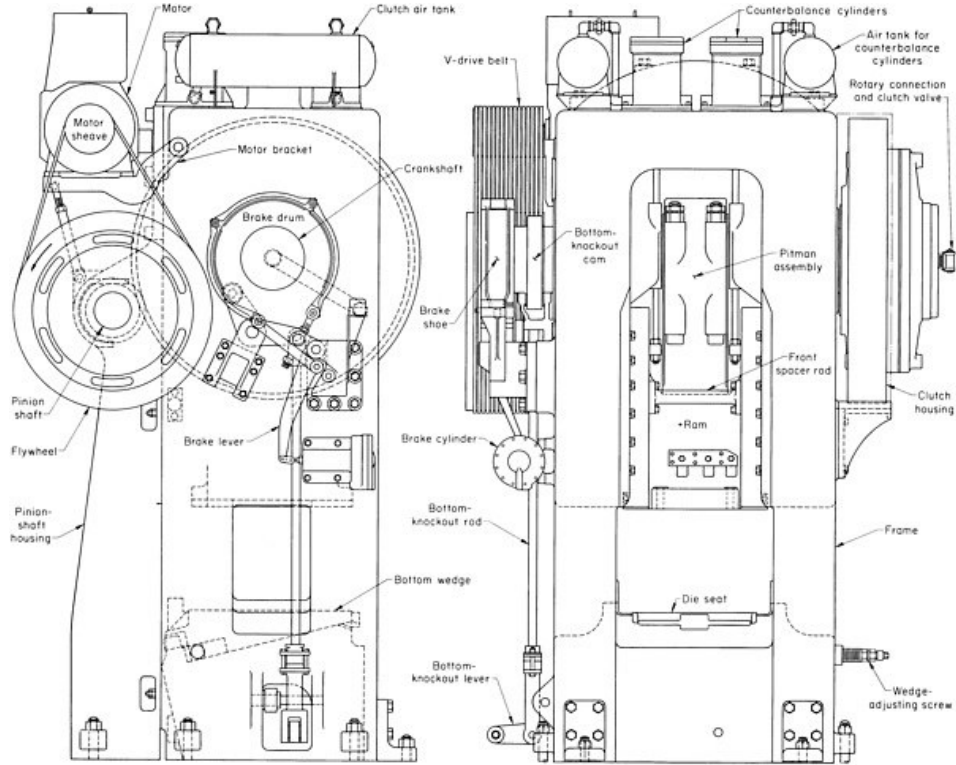
Yatay karşı vuruşlu şahmerdanlarda, kalıp taşıyan ve sıkıştırılmış havayla yatay olarak hareket ettirilen karşılıklı iki çekiç vardır. Isıtılmış haldeki dövülecek külçe, külçe taşıma cihazının doğru zamanlamalı hareketleriyle kalıplar arasında önceden ayarlı modele göre konumlanır.

Karşı vuruşlu şahmerdanların çekiçleri, tekrarlı darbeleri vuracak kapasitededir. Tek yönlü şahmerdanlara göre, çarpışma titreşimi düşmüştür ve yaklaşık olarak her vuruşun tüm enerjisi örste kayıp olmadan iş parçasına aktarılır. Sonuç olarak, hareketli şahmerdan parçalarındaki aşınma, daha uzun çalışma ömrüne katkısı olacak şekilde azaltılmıştır. Çarpışma sırasında güçler dengelenir ve şahmerdan dayanaklarında enerji kaybı oluşmaz [6].

2.1.3.3.2. Presler

2.1.3.3.2.1. Mekanik Presler

Tüm mekanik presler (Şekil 2.16), iş parçasına dişli, kasnak veya manivela bağlantılarıyla iletilen volan enerjisiyle çalıştırılır. Bir elektrik motoru ile tahrik edilen ve havalı kavrama yardımıyla kontrol edilen mekanik preslerde, sabit süreli stroku dikey çalışan çekice aktaran tam eksantrik tahrik mili vardır. Mekanik preslerde çekiç stroku, şahmerdanlar veya hidrolik preslerdekinden daha kısa sürmektedir. Strok sürecinin orta kısmında zımba hızı en büyük, strok sürecinin son kısmında ise darbe kuvveti en büyüktür. Bu dövme preslerinin kapasiteleri uygulayabildikleri maksimum kuvvete göre sınıflandırılır ve 2,7-142 MN arasında değişir.



Şekil 2.16. Mekanik pres [6].

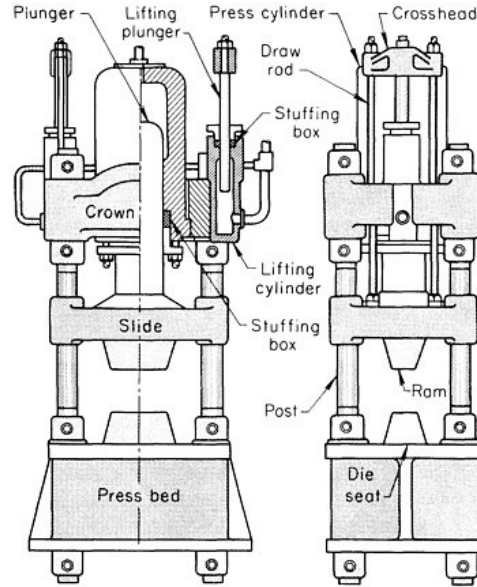
Şahmerdandaki darbenin aksine, bir pres darbesi çarpışmadan daha ziyade sıkıştırmaya benzer ve üniform strok süresiyle sağlanır. Dövme presindeki darbenin karakteri, basma makinesine benzer böylece şahmerdanların ve basma tezgahlarının bazı özelliklerini birleştirir. Ayrıca yığma tezgahları genelde yatay makineler olmasına rağmen, mekanik dövme presleri, yığma tezgahlarınıninkine benzer tahrik sistemleri kullanır.

Şahmerdan ile dövmeye göre, mekanik presler ile dövmede daha hassas yakın toleranslı parçalar üretilir. Mekanik presler otomatik parça besleme sistemine izin vermektedir ve böylelikle, şahmerdanlardan daha yüksek üretim hızlarına sahiptirler (strok oranı, dakika başına 30-100 strok arasında değişmektedir). Mekanik presler ile kullanılan kalıplar çarpma kuvvetleri yerine sıkıştırma kuvvetlerine maruz kaldıkları için, kalıp ömrünü uzatmak için daha sert kalıp malzemeleri kullanılabilir. Ayrıca mekanik preslerdeki dövme işleminde kullanılan kalıplar da daha küçük olabilir.

Mekanik preslerin kısıtlamalarından biri yüksek başlangıç maliyetidir (Aynı miktardaki işi yapabilen şahmerdanların yaklaşık olarak üç katı). Strok kuvveti değiştirilemediğinden dolayı, mekanik presler şahmerdanlarda olduğu gibi birçok ön işlemi gerçekleştiremezler. Genellikle, mekanik presler taslak parçaları döverler ve son şekle bir, iki veya üç darbede ulaşırlar. Şahmerdanlar ise, farklı güçlerde on veya daha fazla darbe yapabilirler [6].

2.1.3.3.2.2. Hidrolik Presler

Hidrolik presler (Şekil 2.17), açık kalıpta dövme ve kapalı kalıpta dövmenin her ikisi için de kullanılabilir. Hidrolik presin çekici, yüksek basınçlı hidrolik veya hidropnömatik sistemin bir parçası olan hidrolik silindirler ve pistonlar ile tahrik edilir. Ani bir yaklaşma hızından sonra, çekiç (üst kalıp eklenmiş haldedir), iş parçasına sıkıştırma kuvveti uygularken yavaş hızda hareket eder. Pres hızları, metal akış hızı denetlenerek, doğru şekilde kontrol edilebilir. Bu işlem özellikle yakın toleranslı dövmede avantaj sağlar.



Şekil 2.17. Hidrolik pres [6].

Hidrolik presin başlıca avantajları;

- Basınç kontrol vanası ile strokun herhangi bir noktasında basınç istenilen şekilde değiştirilebilir.
- Deformasyon oranı strok sırasında gerekirse kontrol edilebilir veya değiştirilebilir. Bu durum özellikle yüksek deformasyon oranlarında kopmaya duyarlı metal dövüldüğünde önemlidir.
- Şahmerdanla dövmede çok zor veya imkansız olan parçaların yapımında, bölünmüş kalıplar kullanılarak hidrolik preste bu parçaların üretimi gerçekleştirilmiş olunur.
- Takımları korumak için maksimum pres gücü kısıtlanabilir.

Hidrolik presin bazı dezavantajları:

- Hidrolik presin başlangıç maliyeti eşdeğer bir mekanik presinkinden daha yüksektir.
- Hidrolik presin hareketi, mekanik preslerden daha düşüktür.
- Hidrolik presin daha yavaş hareketi, iş parçası ve kalıplar arasındaki temas süresini uzatır. Yüksek sıcaklıklardaki metalleri döverken (nikel esaslı alaşımlar ve titanyum alaşımlar gibi), sıcak iş metalinden kalıplara ısı transferi olmasından dolayı, kalıp ömrü kısalmır.

Hidrolik presler, üretebildiği maksimum dövme kuvvetine göre sınıflandırılır. Açık kalıp presleri, 1,8-125 MN arasında, kapalı kalıp presleri ise 4,5-640 MN arasında kuvvet üretecek şekilde yapılmışlardır. Çekiç hızları normal koşullar altında 635-7620 mm/dakika arasında değişmektedir. Çizelge 2.4'te mekanik pres ile hidrolik pres arasındaki kapasite farkları görülmektedir [6].

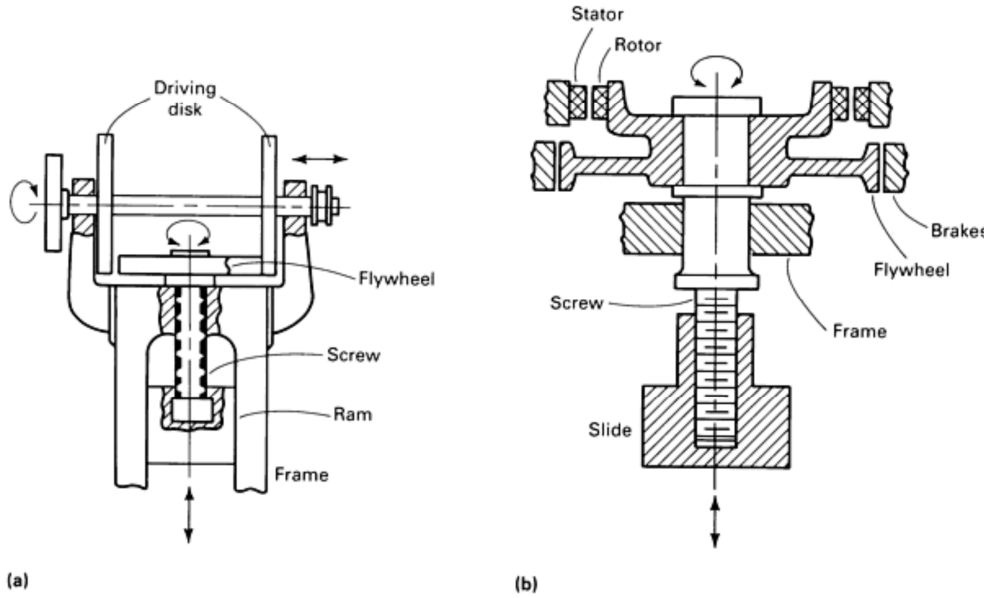
Çizelge 2.4. Mekanik pres ile hidrolik pres arasındaki kapasite farkları [6].

Pres Tipi	Kuvvet (MN)	Pres Hızı (m/s)
Mekanik	2,2-142,3	0,06-1,5
Hidrolik	2,2-623	0,03-0,8

2.1.3.3.2.3. Vidalı Presler

Vidalı presler (Şekil 2.18), enerji kısıtlamalı makinelerdir ve dövme için gerekli kuvveti, volandaki depolanmış enerjiyi kullanarak sağlarlar. Volandaki ataletin dönme enerjisi, bir ucundan volana diğer ucundan çekice bağlanmış dişli vida ile düzlemsel harekete dönüştürülür.

Vidalı presler Avrupa'da pirinç ve alüminyum parçaların dövülmesinde, kompresör ve türbin bıçaklarının hassas dövülmesinde, el aletleri ve dişli benzeri parçaların üretilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Yakın zamanda, vidalı presler Kuzey Amerika'da da, buhar türbini ve jet motoru kompresör bıçaklarının dövülmesi ve dizel motorlarının krank millerinin yapılması gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaya başlandı.



Şekil 2.18. Yaygın olarak görülen iki vidalı pres türü: (a) Sürtünme tahrikli, (b) Direk elektrik tahrikli [6].

Vidalı preslerde, volan ve vida takımına ivme kazandırmak için, sürtünmeli, dişli, elektrikli veya hidrolik tahrik sistemi kullanılır ve açısal kinetik enerji çekicinin düzlemsel hareketine dönüştürülür.

Vidalı presler açık veya kapalı kalıpta dövme için kullanılabilir. Vidalı presler, benzer ağırlıktaki mekanik preslerden strok başına daha fazla enerjiye sahiptir. Bu da strok başına daha fazla iş yapılmasını sağlar. Presteki enerji harcandığında, kalıplar kapanmamış bile olsa çekiç durur. Çekiçin durdurulması, iş parçasına aynı kalıp iziyle çoklu darbe uygulanmasına

olanak sağlar. Kalıp yüksekliğinin ayarlanması kritik öneme sahip değildir ve pres hiçbir şekilde sıkışmaz. Kalıp gerilmeleri ve iş parçasının sıcaklığı ile yüksekliğinin etkileri azaltılmıştır, bu da kalıpların uzun ömürlü olmasını sağlar. Çarpışma hızı mekanik preslerde olduğundan çok daha fazladır. Ancak birçok vidalı pres, tam kuvvetle işleme sadece çekiç başlıklarının ve yataklarının yakınında izin vermektedir.

Vidalı presler genellikle vidanın çapına göre sınıflandırılırlar. Ancak, bu çap pres tarafından üretilen nominal kuvvet listesi ile karşılaştırılabilir. Nominal kuvvet, presin maksimum enerjisini korurken iş parçasını deforme edebilme kapasitesini sağlayan kuvvettir.

Sürtünme vidalı presler, 100-635 mm arasında değişen vida çaplarına sahiptir. Bu büyüklükler nominal kuvvete çevrildiğinde 1,4-35,6 MN kuvvete tekabül etmektedir. Direk elektrik tahrik vidalı presler 600 mm çaplı vidalarla veya 37,3 MN nominal kuvvetle üretilmiştir. Hidrolikle tahrik edilen vidalı presler ise 310 MN kuvvete kadar kapasitelere sahiptir.

Pres hızı, yani dakika başına strok sayısı, çoğunlukla özel dövme işleminin gerektirdiği enerjiye ve vida ve volana ivme kazandırmak için kullanılan tahrik mekanizmasının kapasitesine bağlıdır. Ancak genel olarak vidalı presin üretim hızı, mekanik presten düşüktür. Küçük vidalı presler dakikada 40-50 strok hızla çalışırken, büyük vidalı presler dakikada 12-16 strok hızla çalışmaktadır [6].

2.1.4. Dövme İşlemlerinde Karşılaşılan Hatalar

Dövme işlemlerinde karşılaşılan hatalar (dövme kusurları), ortaya çıkış nedenlerine göre üç kısma ayrılır: malzemeden kaynaklanan hatalar, ısıtmadan kaynaklanan hatalar, dövme uygulamasından kaynaklanan hatalar.

2.1.4.1. Malzemeden Kaynaklanan Hatalar

Fiziksel Hatalar:

- Malzeme, iç çatlaklar ve/veya yüzey çatlakları içerebilir.
- Malzeme yüzeyinde ve içinde kapanmamış boşluklar ve gözenekler olabilir.
- Metalik olmayan kalıntılar, olması gereken sınır değerlerinin üstünde olabilir.

Kimyasal Bileşimden Kaynaklanan Hatalar:

- Kimyasal bileşimde heterojenlik söz konusu olabilir.
- P ve S değerlerinin standart değerlerinden yüksek olması durumunda kırılma oluşabilir.
- Cu ve Sn, bileşimde öngörülen sınır değerlerden fazla ise, yüzey yırtılmaları oluşabilir [18].

2.1.4.2. Isıtmadan Kaynaklanan Hatalar

- Uzun süre yüksek sıcaklıkta bekletilme durumunda parçada tane irileşmesi görülür ve tane sınırlarının oksidasyonu (yanması) söz konusu olabilir.
- Isıtma süresince yüzeyde oluşan oksit tabakası (tufal) dövme öncesi tam olarak temizlenmez ise, işlem sırasında malzemenin yüzeyine gömülen tufal, malzeme özelliklerini ve talaşlı imalat şartlarını çok olumsuz etkiler.
- Isıtma süresince çeliklerde yüzeyden karbon kaybı (dekarburizasyon) olur. Bu da malzemenin sertleşebilmesini, dolayısıyla mekanik özelliklerini etkiler [18].

2.1.4.3. Dövme Uygulamasından Kaynaklanan Hatalar

- Parça yüzeyinde kılcal çatlaklar oluşabilir. Nedenleri; işlem bitirme sıcaklığı düşüktür, soğuma hızı yüksektir, malzemenin sünekliği yetersizdir.
- Parça içinde çatlaklar oluşabilir. Nedenleri; ön şekillendirme yetersizliğinden dolayı dendritik döküm yapısı tam kırılmamıştır, iç boşluklar kaynamamıştır.
- Katlanmalar oluşabilir. Nedenleri; kalıp içindeki metal akışı yanlıştır, dövme sırasında yükseklik için verilen deformasyon miktarları sınır değerlerden fazladır.
- Kemer-kaburga birleşme yerlerinde çatlaklar oluşmaktadır. Nedenleri; meme ve köşe yarıçapları küçüktür ve malzeme akışı düzgün değildir, kalıba konan malzeme

miktarı çok fazladır ve bu nedenle yatay yöndeki malzeme akışı çok fazla olmaktadır.

- Ekstrüzyon hataları vardır. Nedeni; parçanın kalın bir kesitinin komşu kesitlerdeki malzeme tarafından doldurulmasıyla oluşur.
- Aşırı sertlik vardır. Nedenleri; parçanın soğuma hızı yüksektir (martenzitik dönüşüm), bitirme sıcaklığı düşüktür (pekleşme).
- Şekil ve boyut kusurları vardır. Nedenleri; kalıplarda boyut hataları ve yanlış ayarlamalar söz konusudur, kalıp aşınmıştır.
- Artık gerilmeler mevcuttur. Bunun nedenleri; soğuma hızının yüksekliği nedeniyle oluşan yerel sıcaklık farkının büyüklüğü iç gerilmelere neden olur, plastik şekil verme miktarı çok azdır ve bu nedenle deformasyon miktarı yerel farklılıklar gösterdiğinden malzemede yerel farklılıklar ortaya çıkar.
- Yetersiz dövme işlemi olmuştur. Nedeni; düşük nüfuziyet, yani dövme işleminin tüm kesite yayılmayıp yüzeyde kalması sonucu döküm içyapısı tam olarak giderilememiştir.
- Aşırı yöne bağımlılık (anizotropi) oluşmuş olabilir. Nedeni; bunun oluşması için bir kademedede uygulanan plastik şekil verme miktarı %50-70 değerini aşmamalıdır [18].

2.2. Soğuk Dövme

Soğuk dövme; metal iş parçasının, istenilen son şekli oluşturmak için oda sıcaklığına yakın değerlerde, uygun biçimli kalıplarla plastik olarak şekil verildiği yaygın olarak uygulanan bir endüstriyel işlemdir.

Soğuk dövme işlemi, Almanya'da İkinci Dünya Savaşı'nın sonra ermesinden hemen önce geliştirildi. İşlem, savaş için top mermisi kovanları ve diğer savaş malzemelerinin üretilmesinde kullanıldı. Savaştan sonra, ABD'deki bazı firmalar bu fikri aldı. Başta, işin birçoğu kovan üretimine yoğunlaşmıştı ancak firmaların tüketim malları üretiminde maliyetleri kesme olanaklarını fark etmeleri uzun sürmedi.

50'lerin başlarında, işlem, otomobil ve kamyon üreticilerinin dikkatini çekti ve fren lambası yuvaları ve buji gövdeleri gibi araba parçalarını üretmek için kullanıldı. Soğuk dövme, büyük miktarlarda yapılan neredeyse herhangi bir simetrik parçaya ekonomik olarak uygulanabilen bir işlemdi. Örneğin, 1969 yılında soğuk ekstrüzyon ile 500.000 tondan fazla çelik parça üretilmiştir. Karşılaştırma olarak da, 1950'deki toplam üretim 1969'dakinin %10'u kadardı.

1970'lerdeki enerji krizine rağmen, araştırmacılar malzeme kullanımını artırmak, gerekli dövme enerjisini azaltmak ve yüksek hassaslıktaki dövme ile talaşlı imalat işlemlerini saf dışı bırakmak için yoğun olarak çalıştılar.

Çevre kirliliği ve ses seviyeleri gibi sorunlar çok yaygın hale geldiği için, mühendisler, kütüğü son şekline getirmeye yönelik gerekli optimum işlemi bulmak için hidrolükler üzerinde araştırma yapmaktadırlar. Günümüzde, teknoloji, kapalı kalıpta dövme ve soğuk şekillendirme için tasarlanmış çeliklere odaklanmıştır. Kapalı kalıpta soğuk dövme teknolojisi, çapak oluşturmeyen ideal işlemle malzeme kullanımının verimini artırır ve yüksek vasıflı işçiler için ihtiyacı azaltır. Ayrıca, kapalı kalıpta soğuk dövme, sabit hız mafsalları ve konik dişli gibi ürünlerin hassas dövülmesi için anahtar teknoloji haline gelmektedir.

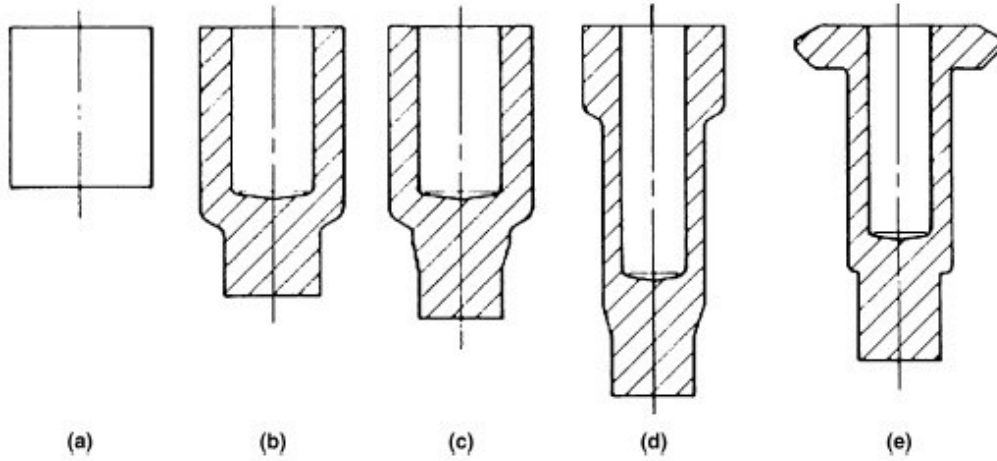
Soğuk dövmenin geleceği ile ilgili yapılan bazı tahminler şunlardır:

- Yeni alaşım tasarımları soğuk dövülmüş ürünlerin özelliklerini artırmaya devam edecek,
- Takım maliyetleri ve bakım masrafları düşecek,
- Soğuk dövmeden daha etkili yaralanmak için yeni teknikler kullanılacaktır [21].

2.2.1. Soğuk Dövme İşlemi Tekniği

Soğuk dövme, bir kaba malzemenin oda sıcaklığında ön ısıtma veya ara ısıtma yapılmadan dövülmesi veya şekil verilmesi olarak tanımlanabilir. Soğuk ekstrüzyon ise, soğuk metalin sıkıştırma kuvvetleri altında çeşitli şekillere doğru plastik olarak aktığı özel bir soğuk dövme şeklidir. Bu şekiller, genellikle nispeten küçük simetrik olmayan kısımları da içeren eksenel simetrik şekillerdir. Soğuk ekstrüzyon işleminde, kapalı kalıpta çapaklı dövme işleminin aksine, çapak oluşmaz.

Soğuk dövme ve soğuk ekstrüzyon terimleri, genelde değiştirilebilir biçimde kullanılırlar ve ekstrüzyon, yığma, damgalama, ütüleme ve radyal dövme gibi çok iyi bilinen dövme işlemlerini kastederler. Bu işlemler genellikle mekanik veya hidrolik pres kullanılarak yapılır. Soğuk dövme işleminde son şekli veya nispeten karmaşık geometriyi oluşturmak için, basit şeklindeki kütüğün biçimlendirmesinden başlanarak birçok şekillendirme basamağı kullanılmaktadır (Şekil 2.19) [22].



Şekil 2.19. Bir işlenmemiş dişli parçanın soğuk dövülmesinde şekillendirme basamaklarının şematik olarak gösterimi. (a) Kesilmiş, işlenmemiş parça. (b) Eşzamanlı ileri çubuk ve geri ekstrüzyon. (c) İleri ekstrüzyon. (d) Geri çanak ekstrüzyon. (e) Eşzamanlı flanş yığılması ve tırnak damgalanması [22].

2.2.1.1. Soğuk Ekstrüzyon

Soğuk ekstrüzyon işlemi, ağır külçe yada önceden şekillendirilmiş iş parçasının ekstrüzyon kalıbına oda sıcaklığında girdiği işlemdir. Bu işlemde, birkaç yüz dereceyi bulabilen sıcaklık artışı deformasyon işinin sıcaklığa dönüşmesinden kaynaklanmaktadır. Soğuk ekstrüzyon, sabit ancak üniform olmayan basınç altındaki plastik akış nedeniyle oluşan metal deplasmanına göre kategorilere ayrılır: ileri (direk), geri (indirek) veya ileri ve geri birleşik (direk-indirek).

İleri (Direk) Ekstrüzyon:

En yaygın ileri ekstrüzyon işleminde, bir kütük zımba vasıtasıyla kalıba doğru itilir. Malzeme zımba ile aynı yönde, çeşitli çıkış kesitlerine doğru akar. İşlem ayrıca içi boş ağır

külçelerin et kalınlığını düşürmek ve silindirik oyuklar veya farklı enine kesitli oyunlar üretmek için de kullanılır. Yuvarlak, dörtgen, üçgen, çokgen gibi katı şekiller de ileri ekstrüzyonla üretilir.

İleri ekstrüzyon, yüksek ekstrüzyon kuvvetleri gerektirir ama işlemi gerçekleştirmek daha kolaydır. Kullanılan çekiç, geniş kuvvet uygulanma yelpazesine sahiptir. İleri ekstrüzyon işlemi, kütük ağırlığının % 18-20'si kadar atık çıkartır.

İleri ekstrüzyonda en önemli kural, alandaki azalmanın bazı bilinen sınırları aşmamasıdır. Açık kalıptaki ekstrüzyonda alandaki azalmanın özgün sınırları; düşük karbonlu çelikler için % 35, alüminyumlar için % 25, AISI 4140 çelik için % 40'tır. Sıkıştırılmış kalıp için bu sınır çok daha yüksek, % 70-75 civarlarındadır.

Geri (İndirek) Ekstrüzyon:

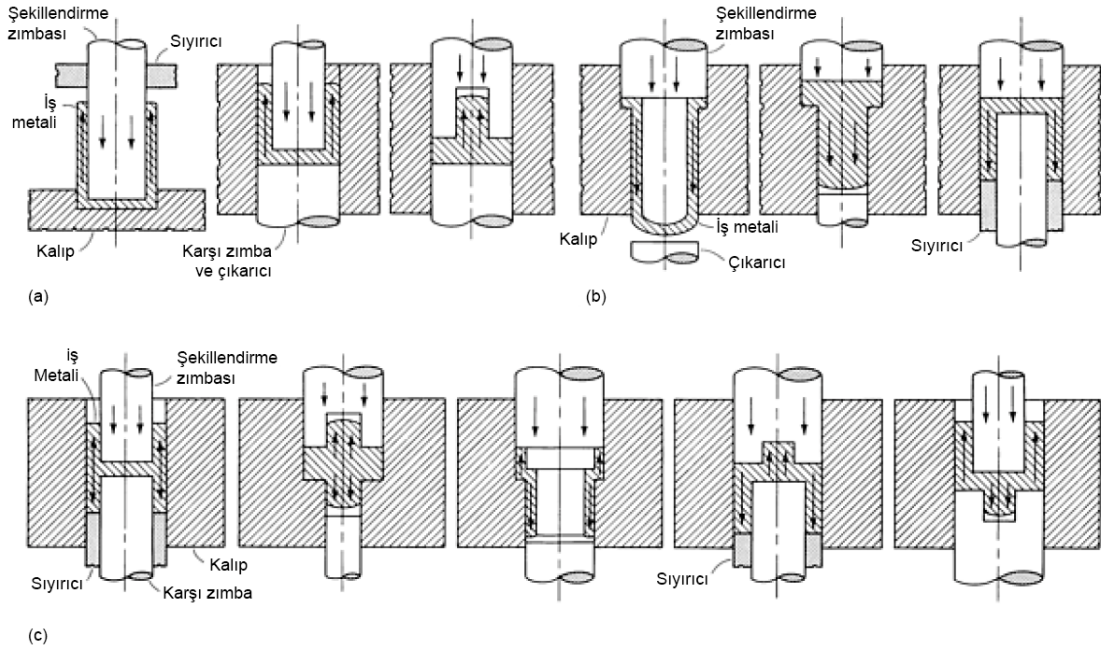
Geri ekstrüzyon işleminde, malzeme üst zimba ile ters yönde akar. İş parçası ya zimba ile kalıp arasında kalan boşlukta şekillenir, ya da zimbanın içindeki boşlukta şekillenir. Geri ekstrüzyon, dairesel iç ve dış çapları, yuvarlak köşeli kareleri, çoklu dış çapları ve çoklu iç çapları üretmek için kullanılır.

Geri ekstrüzyonda, ileri ekstrüzyonda gerekenden % 25-30 daha az ekstrüzyon kuvveti gereklidir. Kullanılan çekiç, içi delik olduğu için, dar kuvvet uygulanma yelpazesine sahiptir. Geri ekstrüzyon işlemi, kütük ağırlığının % 5-6'sı kadar atık çıkartır.

Geri ekstrüzyonda, düşük-orta karbonlu çelikler için maksimum alan azalması % 70-75 arasında izin verilmektedir. Ayrıca geri ekstrüzyon işleminde minimum alan azalması % 20-25 olacak şekilde bir sınır da vardır. Diğer bir kural da, boşluğun maksimum yüksekliği zimba çapının üç katını geçemez ve parçanın dip kalınlığı ekstrüzyon yapılan et kalınlığının 1 veya 1,5 katından az olamaz.

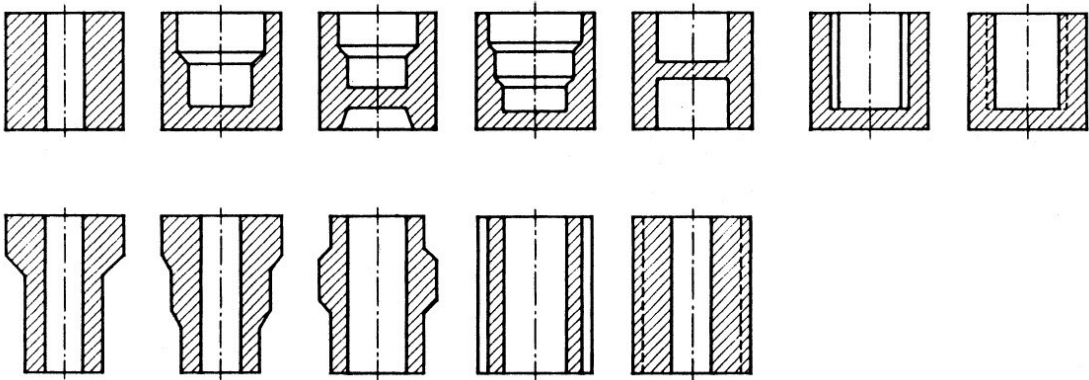
Bu kurallar ayrıca malzeme boşluğu, kaplama, yağlama ve son parça şekli gibi birçok unsurdan da etkilenmektedir.

Bu iki temel ekstrüzyon yöntemi, bazı iş metali ileri bazısı geri olacak şekilde birleştirilir. Soğuk ekstrüzyonun bu üç tipi de şekil 2.20'de gösterilmiştir [6, 22, 23].



Şekil 2.20. Soğuk ekstrüzyondaki metal deplasmanı. (a) Geri ekstrüzyon. (b) İleri ekstrüzyon. (c) İleri-geri birleştirilmiş ekstrüzyon [6].

Bu tekniklerin kombinasyonuyla, şekil 2.21.'de örnek olarak gösterildiği gibi çok fazla sayıda değişik parça üretilebilir.



Şekil 2.21. Boru şeklinde veya çanak şeklinde soğuk dövme parça örnekleri [6].

2.2.1.2. Soğuk Dövme İşleminin Temel Karakteristikleri

Sıcak, soğuk ve ılık dövme işlemlerinin kendilerine özgü karakteristiklerinin karşılaştırılması çizelge 2.5'te verilmiştir.

Çizelge 2.5. İşlem karakteristiklerinin karşılaştırılması [24].

	Sıcak	Ilık	Soğuk
İş Parçasının Ağırlığı	<60 kg	<10 kg	<2 kg
Çelik Sınıfı	Herhangi	C istenilir, Diğer alaşım elementleri < % 10	Düşük alaşımlı çelikler (C < % 0,45, diğerleri < % 3)
Şekil	Altan kesme olmadan herhangi	Altan kesme olmadan dönel-simetrik	Altan kesme olmadan dönel-simetrik
Yüzey Kalitesi	Düşük	Orta	Yüksek
Ara İşlemler	Gerekli değil	Normalde yüzey işlemi yok	Tavlama ve fosfat kaplama
Deformasyon Basıncı	Düşük	Orta	Yüksek
Enerji Maliyeti	Yüksek	Orta	Düşük
Toleranslar	Bol	Yakın	En Yakın
Takım Maliyeti	En düşük	Yüksek	Yüksek

2.2.1.3. Soğuk Dövme İşleminde Kullanılan İş Parçası Malzemeleri

Oda sıcaklığında süneklik gösteren bütün metaller soğuk dövülebilir. Bu grup, öncelikle çelik ve alüminyum alaşımlarından oluşur. Ancak bakır, çinko, kalay, titanyum, berilyum ve nikel alaşımları da özel uygulamalar için soğuk dövülebilir. Soğuk ekstrüzyon parçaları üretmek için yaygın olarak kullanılan çeliklere örnekler şunlardır:

- Sementasyon çelikleri: 1010, 1015 (Alaşımsız), 5115, 5120, 3115 (Alaşımlı)
- Islah çelikleri: 1020, 1035, 1045 (Alaşımsız), 5140, 4130, 4140, 8620 (Alaşımlı)
- Paslanmaz çelikler: 410, 430, 431 (Perlitik), 302, 304, 316, 321 (Östenitik)

Paslanmaz çelikler genelde kolay dövülemezler. Özellikle, östenitik veya östenitik-ferritik çelikler (çok güçlü deformasyon sertleşmesi olan) soğuk dövülebilmek için yüksek kuvvet ve takım basıncına ihtiyaç duyarlar. Ayrıca bu malzemelerin yağlanması çok zordur. Paslanmaz çeliğin dövülmesi bazen malzemenin davranışındaki bilgi eksikliğinden dolayı sınırlıdır. Yaygın olarak soğuk dövülen alüminyum alaşımlara örnekler şunlardır:

- Saf veya safa yakın alüminyum alaşımlar: 1285, 1070, 1050 ve 1100
- Sertleştirilemeyen alüminyum alaşımları: 3003, 5152 ve 5052
- Sertleştirilebilen alüminyum alaşımları: 6063, 6053, 6066, 2017, 2024 ve 7075

Alüminyum ağırlıktan tasarruf etmek için çeliklere alternatif olarak kullanılabilir. Çizelge 2.6, soğuk dövme için uygun alüminyum alaşımların özelliklerini özetlemektedir.

Çizelge 2.6. Soğuk dövme için uygun alüminyum alaşımların özellikleri [22].

Alüminyum Alaşımı	Isıl İşlenebilirlik	Mukavemet	Uzama	Korozyon Dayanımı	Talaşlı İşlenebilirlik	Kaynaklanabilirlik
1050	Hayır	*	****	****	*	****
3103	Hayır	**	*	****	*	****
5056	Hayır	***	**	****	**	**
2014	Evet	***	**	*	***	*
6061	Evet	***	****	***	**	****
7075	Evet	****	**	**	***	*
Not: * = kötü, **** = en iyi.						

Soğuk dövme malzemeleri, kesilmiş veya parçalara ayrılmış kütükler biçiminde olduğu gibi, haddelenmiş veya çekilmiş çubuk veya tel şeklinde de depolanmaktadır. Kesilmiş veya parçalara ayrılmış kütük veya önceden şekillendirilmiş parçanın, boyutları, ağırlığı ve yüzey bitirmesi, soğuk dövülmüş parçalardaki boyutsal toleransların korunması ve dövme presi ve takımının aşırı yüklenmesinden kaçınmak için çok sıkı kontrol edilmelidir [22].

2.2.1.4. Soğuk Dövme İşleminde Kullanılan Yağlayıcılar

Soğuk dövme işlemi için kullanılacak olan yağlayıcı seçimi, işlemin şiddetine (örneğin ara yüz basıncı ve yüzey genişlemesi gibi işlem değişkenleri) ve kütüğün kendisiyle bağlantılı değişkenlere (örneğin sertlik) bağlıdır. Örneğin, küçük çap-boy oranlarına yığma, geri (indirek) ekstrüzyon işlemiyle aynı yağlama performansını (yağlayıcıyı) gerektirmez. Buna ek olarak, çelik için kullanılan yağlama sistemleri, alüminyum veya titanyum için kullanılanlardan çok farklı olabilir [12].

2.2.1.4.1. Demir İçeren Malzemeler

Karbonlu Çelikler: Birçok soğuk dövme işlemine özgü ciddi deformasyon koşullarından dolayı, karbonlu çeliklerin soğuk dövülmesinde en yaygın kullanılan yağlama sistemi çinko-fosfat kaplama ve sabunlama sistemidir. Ancak, hafif yığma gibi basit dövme işlemleri, yağlayıcı olmadan veya basit bir mineral yağı ile tamamlanabilir.

Çinko-fosfat kaplamanın, soğuk dövmedeki yağlama sistemi olarak başarısına rağmen, birçok dezavantajı vardır. Bu nedenle, günümüzde, yağlayıcı üreticileri bu yağlama sistemini değiştirmek için tasarımlar üzerinde çalışmaktadırlar.

Çinko-fosfat kaplama bazı yağlama sistemleri en yaygın sistemler olarak kullanılmasına rağmen, karbonlu çeliklerin soğuk dövülmesi geniş çeşitlilikte işlemleri böylelikle geniş çeşitlilikte yağlama sistemlerini içermektedir. Bu işlemler ve yağlama sistemleri çizelge 2.7'de özetlenmiştir.

Çizelge 2.7. Çeliğin soğuk dövülmesi için kullanılan yağlama sistemleri [12].

İşlem	Deformasyon	Yağlayıcı
Yığma	Hafif	Yok
		Mi+EP+FA
	Şiddetli	Ph+SP
Ütöleme ve Açık Kalıpta Ekstrüzyon	Hafif	Ph+Mi+EP+FA
	Şiddetli	Ph+SP
Ekstrüzyon	Hafif	Ph+Mi+EP+FA
	Şiddetli	Ph+SP
		Ph+MoS ₂
		Ph+MoS ₂ +SP
Mi, Mineral yağ; SP, Sabun; EP, Aşırı basınç katkısı; Ph, Fosfat kaplama; FA, Yağlı katkılar.		

Aşırı basınç katkıları, klor, sülfür ve fosfor içerir. Bu katkıları, metal-metal temasına karşı, mükemmel bariyer (sınır yağlama) üretmek için karbonlu çelik yüzeyleri ile tepkimeye girerler. Şiddetli ekstrüzyon işlemlerinde, kütle yüzey sıcaklığı, sabunun erime noktasını aşabilir. Bu gibi durumlarda, molibden disülfür (MoS₂) sabun yerine kullanılır. En şiddetli işlemlerde, tüm fosfat kaplama, ince bakır kaplama ile değiştirilir.

Paslanmaz Çelikler: % 5'ten daha fazla Cr içeren paslanmaz çelikler ve diğer çeliklerin soğuk dövülmesi için, fosfat kaplamanın yerine bir oksalat kaplama kullanılır. Bu yapılır çünkü, bu malzemeleri fosfatlamak zordur [12].

2.2.1.4.2. Demir İçermeyen Malzemeler

Alüminyum: Alüminyum ile kalıp malzemesi arasındaki yüksek adezyon nedeniyle, alüminyumun soğuk dövmesindeki yağlama özellikle önemlidir. Genel olarak üç çevirimli kaplamadan biri alüminyum ile kullanılır; yani, çinko-fosfat, kalsiyum alüminat veya alüminyum florür. Bu çevirimli kaplamalar ile kullanılan yağlayıcılar sabun ve molibden disülfür içerir.

Bakır: Bakırın soğuk dövülmesi için kullanılan yağlama sistemleri çizelge 2.8'de özetlenmiştir. Birçok aşırı basınç katkısının, bir bakır alaşımının yağlaması için mineral yağ içinde kullanıldığında yararsız olduğu unutulmamalıdır, çünkü aşırı basınç katkıları, karbonlu çeliklerde yaptıkları gibi, metal-metal temasına direnmek için bir bariyer (sınır yağlama) oluşturmak üzere bakır yüzeyi ile reaksiyona girmezler. Buna ek olarak, sülfür katkıları bakırı lekeler.

Titanyum: Titanyumun soğuk dövülmesi çok sınırlı uygulama alanına sahiptir. Ancak bu uygulamalarda kullanılan yağlama sistemleri çizelge 2.8'de gösterildiği gibi özetlenebilir [12].

Çizelge 2.8. Bakır ve titanyumun soğuk dövülmesi için kullanılan yağlama sistemleri [12].

Malzeme	İşlem	Deformasyon	Yağlayıcı
Bakır	Yığma	Hafif	Emülsiyon
		Şiddetli	Mineral yağ
	Ekstrüzyon	Hafif	Emülsiyon
			Mineral yağ
		Şiddetli	Sabunlar
Titanyum	Yığma	Hafif	Emülsiyonlar veya mineral yağlar
		Şiddetli	Bakır kaplama+sabun
			Florür-fosfat kaplama+sabun
	Ekstrüzyon	Hafif	Bakır kaplama+sabun
			Florür-fosfat kaplama+sabun
		Şiddetli	Bakır kaplama+grafit
			Florür-fosfat kaplama+grafit

2.2.2. Soğuk Dövme İşleminin Avantajları ve Dezavantajları

Soğuk dövme işleminin avantajları ve dezavantajları şunlardır [25]:

Avantajları:

- Sona yakın şekli veren dövme işlemidir.

- Soğuk dövme parçalar ile daha yüksek boyutsal doğruluk sağlanır.
- Malzeme kullanımı çok yüksek seviyededir.
- Ölçekleme görülmez.
- Yüksek yüzey kalitesi elde edilir.
- Strain hardening vasıtasıyla yüksek iş parçası mukavemeti elde edilir.
- Sıcak dövmede olduğu gibi uygun tane akışı sağlanabilir.
- Isıtma işlemlerine gerek yoktur.
- Özellikle büyük miktartlı üretimler için çok uygundur.

Dezavantajları:

- İş parçasının üretimi ayrıntılı işlem gerektirir.
- Sıcak dövmeye göre daha az şekil verilebilir.
- Karmaşık şekilli parçaları üretmek zordur.
- Diğer dövme türlerine göre daha pahalı takım maliyetine sahiptir.

2.2.3. Soğuk Dövme İşleminin Endüstriyel Kullanım Alanları

Tarih boyunca, bir üretim işlemi olarak soğuk dövme veya soğuk şekillendirme yoğun bir ilgi gördü ve parça yapımında kullanılan en yaygın yöntemlerden biri haline geldi. Günümüzdeki enerji krizi, ham malzeme sıkıntısı ve artan maliyetler, parça yapımında yüksek verimliliğin göz önünde tutulmasını zorunlulaştırdı. Ancak soğuk dövülen parçaların avantajları, bu sorunların üretim süreci üzerindeki etkilerini azaltabilir. Günümüzde soğuk dövme işlemi; otomotiv, havacılık, inşaat, ziraat, demiryolları, ormancılık gibi alanlarda kullanılan parçaların ya da bu alanlarda kullanılan araçların parçalarının yapımında yaygın olarak kullanılır [26].

Soğuk dövme işlemi ile üretilen bazı parçalara örnek olarak şunlar verilebilir (Şekil 2.22): Tahrik milleri, aks milleri, şanzıman milleri, kamyon aksları, CO₂ tüpleri, darbe emiciler, içi boş miller, sıkıştırılmış doğal gaz silindir tankları, motor/şanzıman parçaları, sürüş parçaları, amortisör parçaları, saplamalar, bilyalı rulman elemanları, bağlantı, tutturma, takım ve hırdavat parçaları [27].



Şekil 2.22. Soğuk dövme işlemi ile üretilmiş bazı parçalar [27].

2.3. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Simülasyonlar

Sonlu elemanlar yöntemi (FEM) adı yakın zamanda verilmiş olmasına rağmen, kavramın kendisi birkaç yüzyıl geriye uzanmaktadır. Örneğin, eski matematikçiler, bir çokgenin çevresinden yaklaşımla dairenin çevresini hesaplayabilmişlerdir.

Belirlenen kapalı bir eğri ile sınırlandırılmış en küçük alan yüzeyinin diferansiyel eşitliğini bulmak için, 1851'de Shellback yüzeyi birçok üçgene ayırdı ve ayrılmış alanların toplamını bulmak için sonlu fark ifadesini kullandı. 1900'lerin başından beridir, düzenli bir şablon içinde sıralanmış birkaç çubuktan oluşan yapısal iskeletin davranışı, bir izotropik elastik gövdeyle tahmin edilmiştir. 1943'te Courant, kesiti birçok üçgene bölerek ve ağ noktalarındaki (günümüz sonlu elemanlar terminolojisinde düğümler denir) ϕ değerleri yönünden, gerilme fonksiyonunun, ϕ , bir lineer varyasyonunu her üçgenin üzerinde kullanarak, içi boş milin burulma direncini belirleme yöntemini sundu. Bu çalışma, bazıları tarafından günümüz sonlu eleman yönteminin kökeni olarak kabul edilir. 1950'lerin ortalarından beridir, uçak sanayisindeki mühendisler, uçak

kanatlarında oluşan gerilmeleri tahmin etmek için bir yaklaşım yöntemi geliştirmeye çalışmaktadırlar. 1959'da, Turner, Cough, Martin ve Topp, üç düğümlü bir üçgen kullanarak kanat kaplamasını modellemek için bir yöntem sundu. Hemen hemen aynı zamanlarda, Argyris ve Kelsey, yapısal analiz problemlerinin çözümü için bazı sonlu eleman fikirlerini içeren ve matris işlemlerini ana hatlarıyla belirleyen birkaç yayın yaptılar.

Sonlu eleman adı ilk olarak, 1960'ta Clough tarafından türetildi. Aslında sonlu elemanlar yöntemi çoğunlukla sezgi ve fiziksel kanıtlara dayalı geliştirilmiş olsa da, yöntem 1960'ların başında klasik Rayleigh-Ritz yönteminin bir biçimi olarak tanındı. Bir defa yöntemin matematiksel dayanağı tanınınca, değişik türdeki problemler için yeni sonlu elemanların geliştirilmesi ve yöntemin popülaritesi adeta katlanarak büyümeye başladı. Bilgisayarların kullanılmaya başlanması, sonlu eleman analiziyle alakalı birçok hesaplamanın hızlıca yapılmasını sağladı ve yöntemi pratikte uygulanabilir yaptı. Yüksek hızlı bilgisayarların gelişmesiyle birlikte, sonlu elemanlar yöntemi uygulamaları da çok etkileyici bir hızda gelişti. Zienkiewicz ve Cheung yöntemin geniş açıklamasını ve herhangi genel bir alandaki problemlere uygulanabilirliğini sundular.

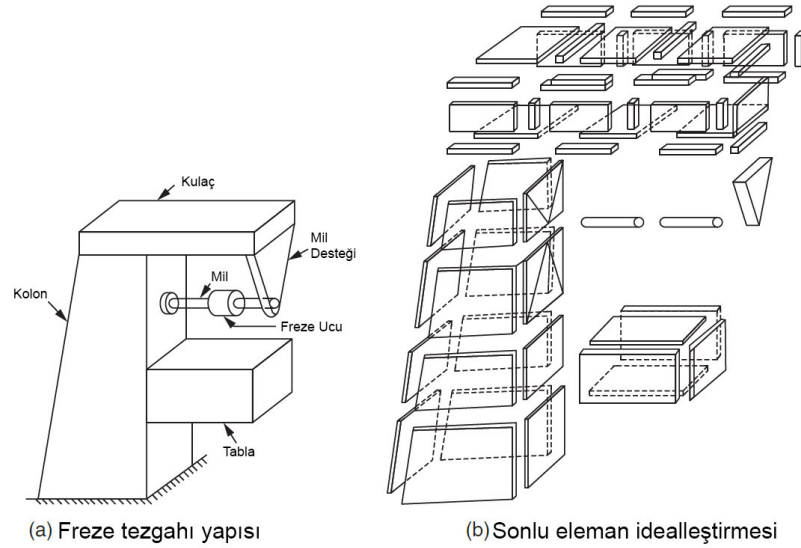
Sonlu elemanlar yönteminin bu geniş açıklaması ile birlikte, sonlu eleman eşitliklerinin Galerkin yöntemi veya en küçük kareler yaklaşımı gibi ağırlıklı kalıntı yöntemi kullanılarak türetilbileceği bulundu. Bu, uygulamalı matematikçiler arasında, lineer ve nonlinear diferansiyel denklemlerin çözümü için sonlu elemanlar yönteminin uygulanmasında yaygın bir ilgiye yol açtı.

Bugün, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak pratik mühendislik sorunları çözmek bir endüstri standardı haline gelmiştir ve tüm bu ilerlemeler ile günümüzde, sonlu elemanlar yöntemi mühendisler ve uygulamalı bilimciler tarafından köklü ve uygun analiz araçlarından biri olarak kabul edilir [28].

2.3.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi Sistematiği

Sonlu elemanlar yönteminde temel fikir, karmaşık bir problemin daha basit olanıyla değiştirilerek çözümünün bulunmasıdır. Çözümün bulunmasında, asıl problem daha basit olanla değiştirildiğinden, kesin çözümden ziyade sadece yaklaşık bir çözüm bulabiliriz. Var olan matematiksel araçlar pratik problemlerin çoğunda kesin çözümün bulunması için (bazen yaklaşık çözümün bulunması için de) yeterli değildir. Bu nedenle, verilen problemin yaklaşık çözümünün bulunması için bile başka uygun yöntem olmamasından dolayı, sonlu elemanlar yöntemini tercih etmek durumundayız. Ayrıca sonlu elemanlar yönteminde, daha fazla sayısal hesaplama yapılarak yaklaşık çözümü geliştirmek veya düzeltmek genellikle mümkün olacaktır.

Sonlu elemanlar yönteminde, çözüm bölgesinin, sonlu elemanlar denilen birçok küçük, birbirine bağlı alt bölgelerden meydana geldiği düşünülür. Sonlu elemanlar modelinin karmaşık geometrik şeklin gösterilmesinde nasıl kullanılması gerektiğine örnek olarak, Şekil 2.23.(a)'da gösterilen freze tezgahı yapısını dikkate alalım. Belirlenen herhangi kesme (yükleme) koşulu altında makinenin kesin tepkisini (gerilmeler ve deplasmanlar gibi) bulmak çok zor olduğundan, bu yapının Şekil 2.23.(b)'de gösterildiği gibi sonlu elemanlar yönteminde birçok parçadan oluştuğu tahmin edilmiştir. Her bir parça veya elemanda, uygun bir tahmini çözüm varsayılmıştır ve yapının toplam denge koşulları elde edilmiştir. Bu koşulların yerine getirilmesi deplasmanlar ve gerilmeler için yaklaşık bir çözüm verecektir [28].



Şekil 2.23. Bir freze tezgahı yapısının sonlu elemanlar ile gösterimi [28].

Sonlu elemanlarla modellemede, sonlu elemanlar düğüm setleri ile sınırlandırılmışlardır. Bu düğümler modelin bölgesel kütle ve katılık özelliklerini tanımlar. Uyum ve yapısal bağlantılar gibi uygulanabilir fiziksel hususlar ile beraber denge denklemleri, bir eşitlik sistemi kurmak için her elemana uygulanır. Sistem daha sonra gelişmiş nümerik teknikler kullanılarak bilinmeyen değerleri bulmak için çözülür. Bu tekniklerden biri olan sonlu eleman analizi (FEA) bir yaklaşım yöntemidir ve doğruluğu kullanılan eleman sayısı artırılarak geliştirilebilir.

Bir sonlu elemanlar yöntemi probleminin çözümü beş adıma bölünebilir:

1. Elemanların tanımlanması,
2. Elemanlar için denklemlerin kurulması,

3. Elemanların özelliklerinin bulunması,
4. Sistem denklemlerini elde etmek için bu eleman özelliklerinin bir araya getirilmesi,
5. Uygun sayısal teknikleri kullanarak sistem denklemlerinin çözülmesi [29].

2.3.2. Sonlu Elemanlar Yönteminin Mühendislik Uygulamaları

Çizelge 2.9. Sonlu elemanlar yönteminin mühendislik uygulamaları [28].

Çalışma Alanı	Denge Problemleri	Özdeğer Problemleri	Yayılm Problemleri
İnşaat mühendisliği yapıları	Kafes kirişlerinin, çerçevelerin, katlanmış plakların, kabuk çatıların, perde duvarların, köprülerin ve ön gerilmeli beton yapıların statik analizleri.	Yapıların doğal frekansları ve modları; yapıların kararlılığı.	Gerilme dalgalarının yayılımı; yapıların periyodik olmayan yüklere tepkisi.
Hava araçlarının yapıları	Hava araçlarının kanatlarının, uçak iskeletlerinin, kanatçıkların, roketlerin, uzay araçlarının ve füze yapılarının statik analizleri.	Hava araçlarının, roketlerin, uzay araçlarının ve füze yapılarının doğal frekansları, sarsıntıları ve kararlılıkları.	Hava araçlarının yapılarının restgele yüklere tepkisi; hava araçlarının ve uzay araçlarının periyodik olmayan yüklere dinamik tepkisi.
Isı iletimi	Katılarda ve akışkanlarda kararlı hal sıcaklık dağılımı	-	Roketlerde, nozullarda, içten yanmalı motorlarda, türbin bıçaklarında, kanatçıklarda ve bina yapılarında geçici ısı akışında.
Jeomekanikler	Hafriyatların, istinat duvarlarının, yer altı açıklıklarının, kaya eklemelerinin ve zemin-yapı etkileşimi problemlerinin analizinde; toprakların, barajların, tabakalı yığınların ve makine temellerinin gerilme analizleri.	Baraj-rezervuar sistemlerinin ve zemin-yapı etkileşimi problemlerinin doğal frekansları ve modları.	Zamana bağlı zemin-yapı etkileşimi problemleri; toprak ve kayaların geçici sızıntıları; toprak ve kayaların gerilme dalga yayılımı.
Hidrolik ve su kaynakları mühendisliği, Hidrodinamik	Potansiyel akışların, serbest yüzey akışlarının, sınır tabaka akışlarının, viskoz akışların ve transonik aerodinamik problemlerinin analizi; hidrolik yapılar ve barajların analizi.	Sığ havzaların, göllerin ve limanların doğal periyotları ve modları; rijit ve esnek kaplarda sıvıların çalkalanması.	Kararsız sıvı akışı ve dalga yayılımı problemlerinin analizi; akiferlerde ve gözenekli ortamda geçici sızıntı; seyreltilmiş gaz dinamikleri; manyetohidrodinamik akışlar.
Nükleer mühendislik	Nükleer basınçlı tankların ve muhafaza yapılarının analizi; reaktör bileşenlerinin kararlı hal sıcaklık dağılımı.	Muhafaza yapılarının doğal frekansları ve kararlılığı; nötron akı dağılımı.	Reaktör bileşen yapılarının dinamik yüklere tepkisi; reaktör bileşenlerinde kararsız sıcaklık dağılımı; reaktör yapılarının termal ve viskoelastik analizi.
Biyomedikal mühendislik	Göz küresi, kemikler ve dişlerin gerilme analizleri, implant ve protez sistemlerinin yük taşıma kapasiteleri, kalp kapakçıklarının mekaniği.	-	Kafatasının çarpışma analizi, anatomik yapıların dinamikleri.
Mekanik tasarımlar	Gerilme yığılması problemleri, basınçlı kaplar, pistonlar, kompozit malzemeler, bağlantılar ve dişlilerin gerilme analizi.	Bağlantılar, dişliler ve takım tezgahlarının doğal frekansları ve kararlılığı.	Dinamik yükler altındaki çatlak ve kırılma problemleri.
Elektrik makineleri ve elektromanyetik	Senkron ve endüksiyon makinelerinin kararlı hal analizi; fukolt akımı; elektrik makinelerinde çekirdek kayıpları; manyetostatikler.	-	Motorlar, aktüatörler ve manyetodinamikler gibi elektromekanik cihazların geçici davranışları.

Daha önce belirtildiği gibi, sonlu elemanlar yöntemi ilk başta uçak yapılarının analizi için geliştirilmişti. Ancak, teorisinin genel yapısı, yöntemi mühendislikteki geniş çeşitlilikteki sınır değeri problemleri için uygulanabilir hale getirir. Bir sınır değeri problemi, bağımlı değişkenlerinde veya türevlerinde önceden belirlenmiş sınır (kenar) şartlarını yerine getirmek için çözümün esas konunun alanı (veya bölgesi) içinde arandığı problemdir. Çizelge 2.9, sınır değeri problemlerinin üç ana kategorisindeki özel sonlu eleman uygulamalarını vermektedir. Bunlar;

1. Denge, kararlı hal veya zamandan bağımsız problemler,
2. Özdeğer problemleri,
3. Yayılım veya geçici problemler.

Denge problemlerinde, eğer katı mekaniği problemleriye, kararlı hal deplasmanını veya gerilme dağılımını, eğer ısı transferi problemleriye, sıcaklık veya ısı akışı dağılımını ve eğer akışkanlar mekaniği problemleriye basınç veya hız dağılımını bulmalıyız.

Özdeğer problemlerinde de, zaman açıkça görülmeyecektir. Problemler, uygun kararlı hal yapısal düzenlemelerine ek olarak belli parametrelerin kritik değerlerinin belirleneceği denge problemlerinin uzantısı olarak kabul edilebilir. Bu problemlerde, eğer katı mekaniği veya yapı problemleriye, doğal frekansları veya burkulma yükü ve mod şekillerini, eğer akışkanlar mekaniği problemleriye, laminar akış kararlılığını ve eğer elektrik devresi problemleriye, rezonans karakteristiğini bulmalıyız.

Yayılım veya geçici problemler, zamandan bağımsız problemlerdir. Örneğin bu tarz problemler, katı mekanikleri alanında, zaman içinde değişen kuvvet altındaki gövdenin tepkisini ve ısı transferi alanında, ani ısıtma ve soğutma altındaki gövdenin tepkisini bulmak istediğimizde ortaya çıkar [28].

2.3.3. Metal Şekillendirmede Sonlu Elemanlar Yöntemi Analizleri

Günümüzde, yeni sonlu eleman analiz araçları, seçilmiş bir işlemin analizinin şekillendirme makinesinde deneme yanılma yöntemi ile yapılması yerine bilgisayarda yapılmasına olanak vermiştir. Sonlu eleman analizi kullanan işlem simülasyonu, endüstride önemli maliyet ve kalite iyileştirmeleri sağlamıştır. Sonlu elemanlar yöntemi simülasyonları, kalıp üretimi öncesinde yapılan endüstriyel şekillendirme işlemlerinin performans tahmininde pratik ve etkili araçlar haline gelmişlerdir. Bugün, sonlu eleman analizi endüstriyel uygulamalarda ve akademik araştırmalarda son derece etkili bir araçtır.

Sonlu elemanlar yöntemi programları metal şekillendirmede büyük deformasyonları ve termal olarak etkilenmiş malzeme akışını tahmin edebilirler. Böylece, şekillendirme mekanikleri hakkında ayrıntılı bilgi sağlayabilirler. Metal şekillendirmenin sonlu elemanlar yöntemi ile simülasyonu son derece karmaşık ve yoğun hesaplama gerektirir. Bunun nedeni, büyük strainlerden dolayı oluşan aşırı nonlineariteler, anizotropik malzemelerin plastik akışı ve değişen temas altındaki düzensiz biçimlendirilmiş yüzeylerin ara yüz sürtünmesidir. Bu nedenle, deforme olan gövde içindeki sıcaklığın nicel ölçümü, gerilme ve strain dağılımları tarzı problemlerin analitik çözümlerini elde etmek zordur. İşte bu nedenle, problem çözümünde sonlu elemanlar yöntemini kullanmak yaygındır.

Sonlu elemanlar yöntemi bilgisayar kodlarının geliştirilmesindeki önemli sorunlar arasında; deformasyon tanımı ve çözüm prosedürü tercihi, akış formülasyonunun tipinin seçimi, malzeme modellerinin uygulanması ve remeshing bulunmaktadır.

Sürekli yayınlarda, Lagrangian ve Euler olmak üzere deformasyonun tanımının iki yöntemi vardır. Lagrangian tanımı, bağımsız değişkenlerde olduğu gibi deforme olmamış haldeki bir malzeme noktasının koordinatlarından yararlanır. Euler tanımı deforme haldeki bir malzeme noktasının koordinatlarından yararlanır. Bundan dolayı, Euler sistemindeki sonlu eleman meshinin uzaysal olarak sabit olduğu yerde, Lagrangian sistemindeki mesh malzeme ile hareket eder.

Çözüm prosedürü ya açık ya da dolaylıdır. Dolaylı prosedür büyük denklem sistemlerini çözmek için otomatik artış yapma stratejisini kullanır. Bu çok fazla depolama ve işlemci gücü gerektirir ancak analizin türüne bağlı olarak bazı avantajlara sahiptir. Açık kodda ise, çözümü tamamlamak daha kolaydır. Daha az kontrol parametresine sahip olduğu için, açık kodları çözümün optimizasyonu için kullanmak daha kolaydır. Bazı durumlarda açık yöntem, bazı durumlarda dolaylı yöntem daha iyidir. Dolaylı yöntem, küçük problemlerde ve bazı diğer uygulamalarda oldukça etkilidir ve açık yöntemden daha hızlı olabilir. Büyük, ince yapılı meshlerin olduğu daha karmaşık analizlerde açık yöntem çok daha etkilidir.

Malzeme modeli, sonlu elemanlar yöntemi algoritmasının önemli bir parçasıdır. Gerçek malzemenin yapısal davranışını tanımlayan uygun fonksiyonlar kullanılmalıdır. Metal şekillendirme analizinde, plastik strain genellikle elastik strainden daha ağır basar ve rijit plastik veya rijit viskoplastik malzemenin idealleştirilmesi yaygın olarak kabul edilir. Bu durumda, akış formülasyonuna göre analiz, Levy-Mises akış kuralına dayanır. Eğer elastisite ihmal edilemezse, malzeme modeli katı formülasyonuna göre formüle edilir; örneğin malzeme elasto-plastik veya elasto-viskoplastik katı olarak kabul edilir. Elasto-plastik malzemeler için katı

formülasyonları, Prandtl-Reuss denklemlerinin kullanımına dayanır. Genellikle, katı formülasyon, rijit plastik modellere göre zamandan daha az tasarrufludur. Bunun nedeni, sonucun daha karmaşık olması, daha küçük adım boyutları gerektirmesidir.

Sonlu eleman analizinin metal şekillendirmeye uygulanmasındaki bir zorluk da meshin değişimi nedeniyle olur. Sonlu elemanlar bazen öyle çarpılır ki hesaplama sırasında büyük hatalar oluşur. Bu tarz zorlukların üstesinden gelmek için, mesh periyodik olarak yeniden yapılandırılmalı yani remeshing yapılmalıdır. Modern sonlu elemanlar yöntemi kodları otomatik remeshing yani yeni meshin oluşumu ve interpolasyon yoluyla bilginin eski meshten yenisine aktarımı için imkan sağlarlar.

Remeshing için iki farklı yaklaşım vardır. Birine uyarlamalı remeshing denir ve kullanıcı tarafından herhangi bir müdahale olmadan büyük deformasyonların simülasyonuna izin verir. Diğer yaklaşıma ise statik remeshing denir. Daha az otomatik olmasına rağmen, sonuç uyarlamalı remeshingde oluşan aşırı hatalardan kaçınır. Uyarlamalı remeshing ayrıca daha ağır hesaplamalara yol açar [29].

2.3.3.1. Metal Şekillendirmede Sonlu Elemanlar Yöntemi Modellemesi için Ticari Kodlar

Piyasada dökme metal şekillendirme uygulamaları için özel hazırlanmış birkaç ticari sonlu elemanlar yöntemi kodu mevcuttur. Bu kodlar, örnek vermek gerekirse, DEFORM, FORGE, simufact.forming ve Q-FORM'dur. ANSYS ve ABAQUS gibi diğer ticari kodlar da bu amaç için başarılı bir şekilde kullanılabilir.

Saç metal şekillendirmede, kabuk elemanlarına bağlı sonlu elemanlar yöntemi kodları, sonlu eleman analizi için yaygın olarak kullanılır. Bu kategorideki ticari kodlara örnek olarak; LS-Dyna ve Pam-Stamp verilebilir [29].

2.3.4. Simufact.Forming Kodu

Simufact, *Simufact Engineering GmbH* tarafından özellikle şekillendirme endüstrisi için geliştirilmiş bir simülasyon programıdır.

Şirket 1995'te Almanca konuşulan pazardaki metal şekillendirme endüstrisi için danışmanlık şirketi olarak kuruldu. O zamanlar FEMUTEC Engineering adıyla bilinen genç şirket, daha sonra MSC.Software'ın Almanca konuşan bölgeler için özel distribütörü oldu ve MSC.SuperForm ve MSC.SuperForge simülasyon çözümlerini devam ettirdi.

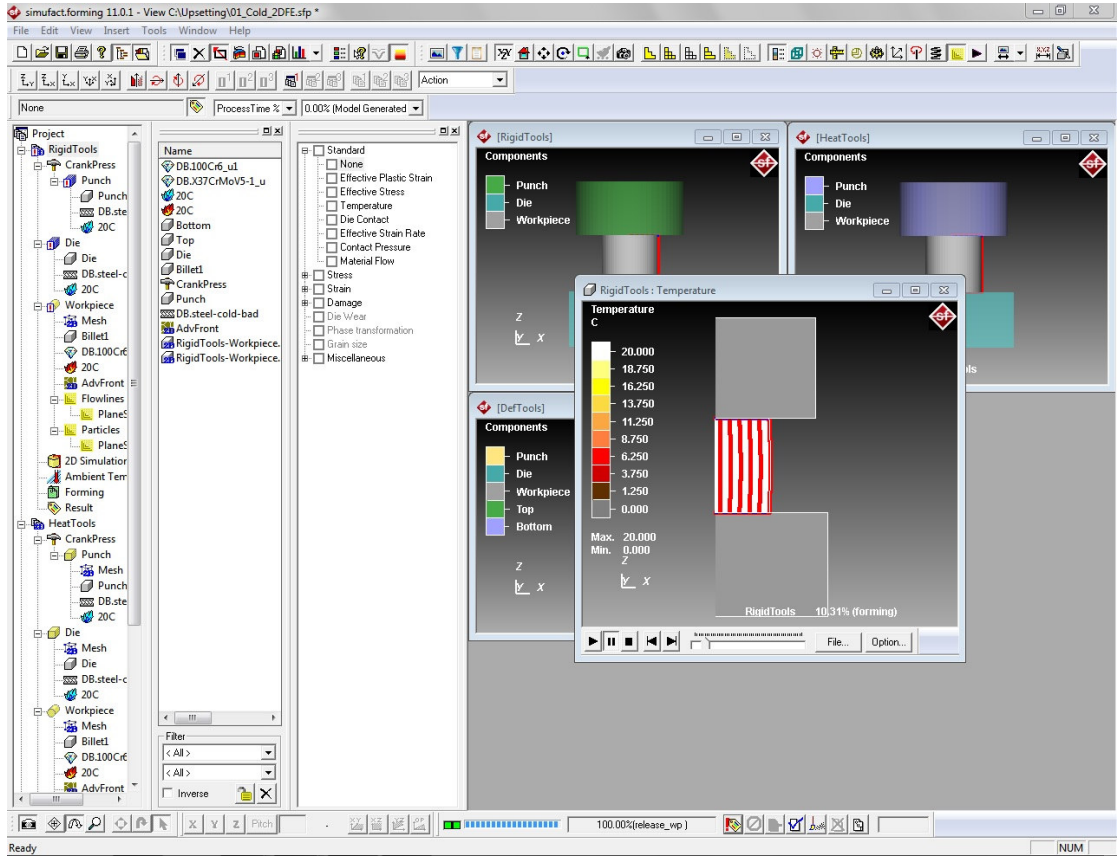
2007'nin başında, şirket MSC.Software'dan bütün üretim simülasyonu bölümünü devraldı ve o zamandan beri son derece uzmanlaşmış pazarda uluslararası yazılım şirketi rolünü oynamaktadır.

2008'de, şirket, adını Simufact Engineering olarak değiştirdi.

Şirketin ortağı MSC.Software'den gelen köklü simülasyon çözümleri MSC.SuperForm ve MSC.SuperForge'un istikrarlı bir gelişmesi olarak, her iki tamamlayıcı teknoloji de şekillendirme teknolojisinin tüm zorlukları ile baş edebilecek tek ve güçlü Simufact programında bir araya getirildi [30,31].

Simufact programları ile soğuk, ılık ve sıcak; hacimsel ve sac metal şekillendirme simülasyonlarının, ısıtma işlem analizleri ve kaynak proseslerinin gerçeğe en uygun şekilde simüle edilmesi mümkündür. Simufact programının alt programlarından birisi olan simufact.forming (Şekil 2.24) ile aşağıdaki prosesler tercihe ve ihtiyaca göre 2D veya 3D olarak ve sıcak, ılık veya soğuk olarak simüle edilebilir:

- Soğuk, ılık ve sıcak dövme prosesleri,
- Soğuk, ılık ve sıcak dövme kalıpları,
- Öngerilmeli / sıkı geçmeli kalıplar,
- Kütlesel profil haddeleme,
- Roll form (sac profil haddeleme),
- Yüzük haddeleme,
- Profil ekstrüzyon,
- Sac şekillendirme,
- Mekanik birleştirme (perçinleme),
- Isıl işlem.



Şekil 2.24. Simufact.forming versiyon 11.0.1. kullanıcı arayüzü.

Simufact.forming ile yapılan simülasyonda, çözümleme işlemi bittikten sonra aşağıdaki parametreleri incelemek mümkündür [32]:

- Malzeme akışı,
- Katlanma,
- Doldurmama,
- Bükülme,
- Çapak / fire / fitil,
- Akış çizgileri,

- Şekillendirme kuvveti ve torkları,
- Kalıp / makara gerilmeleri ve deformasyonu,
- Sıcaklık dağılımı,
- Aşınma,
- Geri esneme,
- Artık gerilemeler,
- Sünek kırılma,
- Mikro yapı,
- Rekristalizasyon ve tane boyutu,
- Faz değişimi,
- Sertlik.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

Bu tez çalışmasında yapılan soğuk dövme işlemi simülasyonlarının tamamı, sonlu elemanlar yöntemini kullanan bir simülasyon yazılımı olan simufact.forming v.11.0.1 ile yapıldı. Simülasyonu oluşturmak için gerekli kalıp, zımba ve zarf çizimlerinde ise CAD yazılımları olan AutoCAD 2012 SP2 ve Solidworks® 2012 SP1 kullanıldı.

Bu çizim ve simülasyon programları, Intel i7 2.2 GHz işlemciye, 8 GB belleğe, 2 GB grafik kartına ve Windows 7 işletim sistemine sahip bir dizüstü bilgisayarda kullanıldı.

3.2. Yöntem

3.2.1. Simülasyonlarda Kullanılan Girdiler

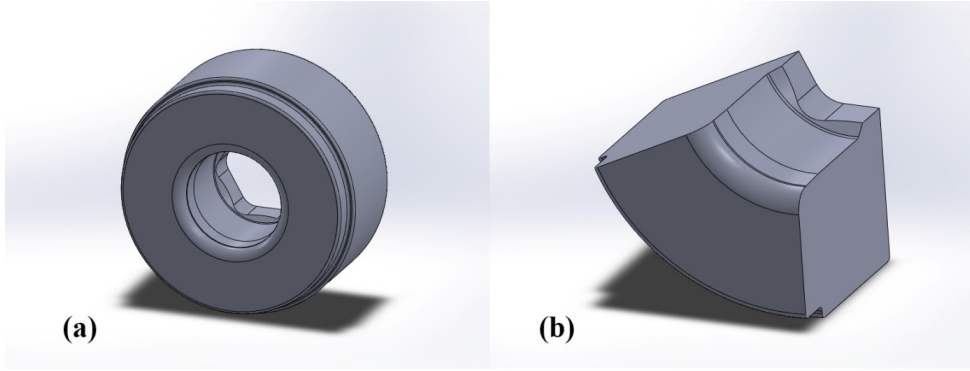
3.2.1.1. Kalıp, Zarf, Zımba ve İş Parçası Çizimleri

Tezde yapılan simülasyonların, soğuk dövme ile üretim işleminin gerçekteki haline en yakın şekilde oluşturulması amaçlanmıştır. Bu nedenle kalıp, zarf ve zımba çizimleri, gerçek rot parçanın üretildiği Eko Endüstri'nin teknik resimleri ile birebir uygun ölçülerde çizilmiştir. Ancak teknik resimler ticari değer taşıdığı için tez çalışmasında sadece ölçüsüz 3 boyutlu çizimler verilmiştir.

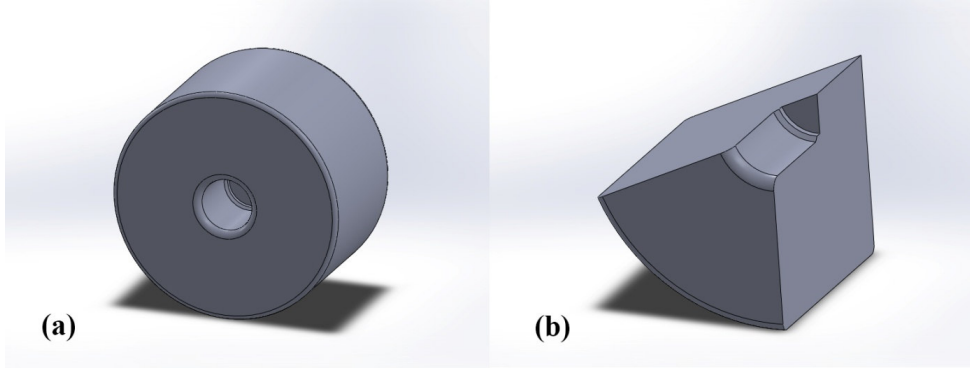
Simülasyonlar oluşturulurken, gerçek üretime uyması için, gerçek teknik resimler kullanılarak bir adet anahtar ağız kalıbı (Şekil 3.1), bir adet kuyruk kalıbı (Şekil 3.2), kalıpların prese oturmasına yardımcı olmak için bir adet anahtar ağız kalıp zarfı (Şekil 3.3), bir adet kuyruk kalıp zarfı (Şekil 3.4), presin çekiç kısmına bağlanan bir adet zımba (Şekil 3.5) ve simülasyonlarda yardımcı parça olarak bir adet alt (Şekil 3.6) ve bir adet de üst tabla (Şekil 3.7) çizimi yapılmıştır.

Daha ileride detaylı olarak bahsedilen nedenlerle soğuk dövme simülasyonları; kalıpların, zarfların ve alt tablanın 68°lik kısımları ve zımba ile üst tablanın tamamı kullanılarak oluşturulmuştur.

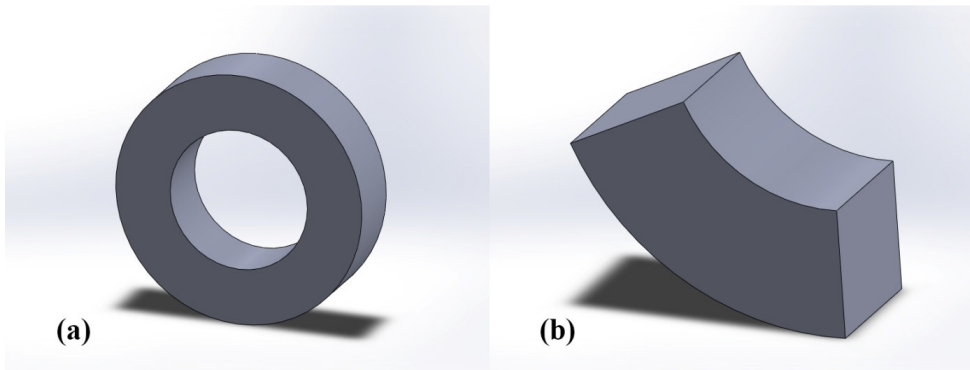
Yapılan bu çizimler tüm simülasyon çalışmalarında kullanılmıştır.



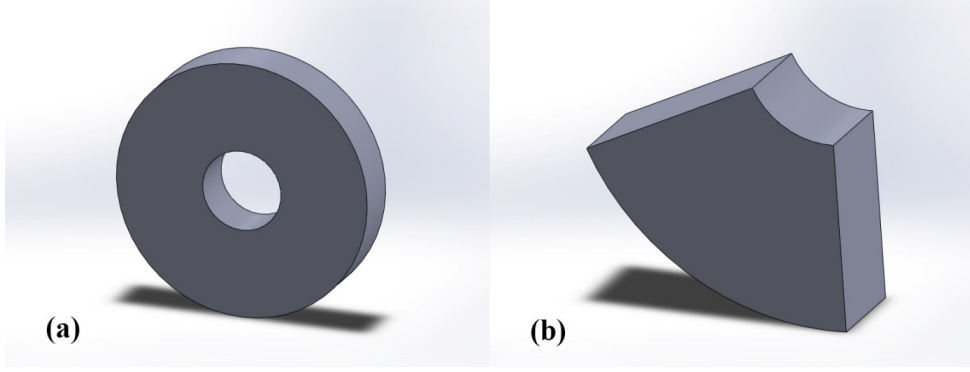
Şekil 3.1. (a) Anahtar ağız kalıbı, (b) Simülasyon oluşturulurken kullanılan anahtar ağız kalıbının 68°lik kısmı.



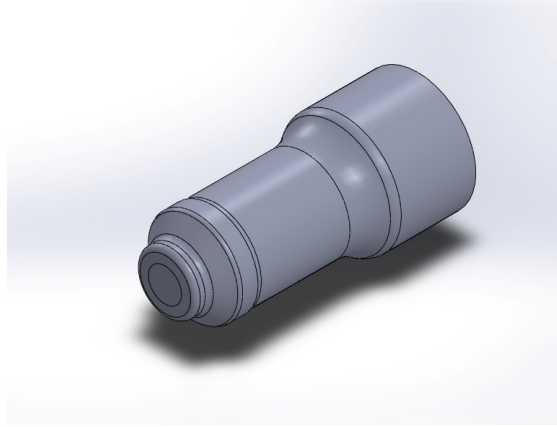
Şekil 3.2. (a) Kuyruk kalıbı, (b) Simülasyon oluşturulurken kullanılan kuyruk kalıbının 68°lik kısmı.



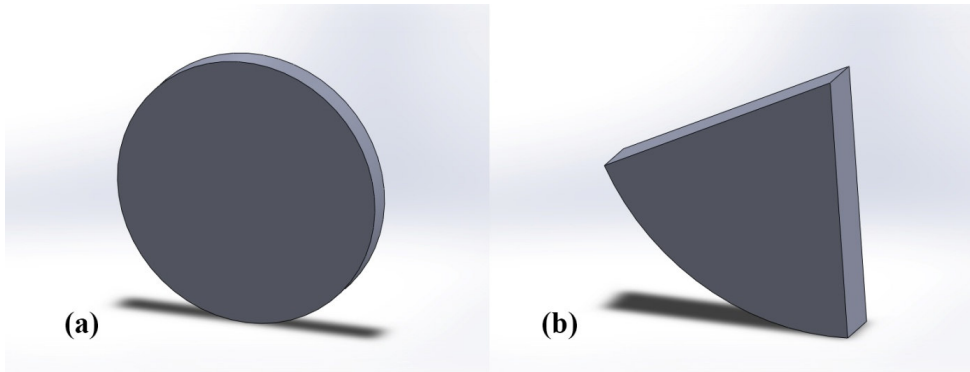
Şekil 3.3. (a) Anahtar ağız kalıp zarfı, (b) Simülasyon oluşturulurken kullanılan anahtar ağız kalıp zarfının 68°lik kısmı.



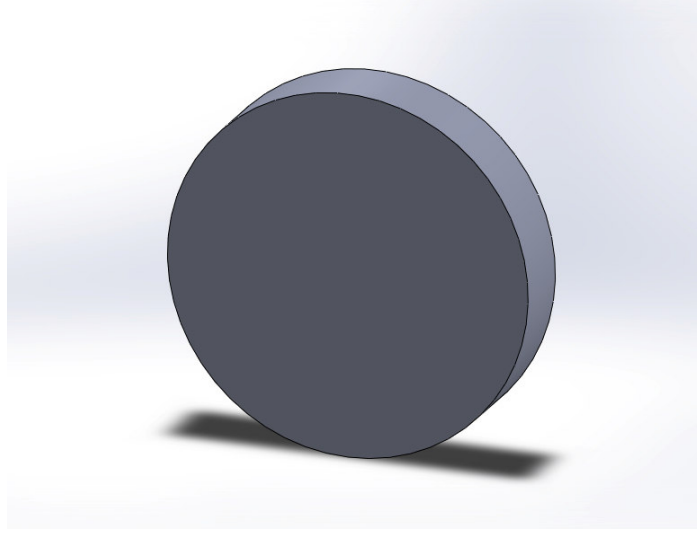
Şekil 3.4. (a) Kuyruk kalıp zarfı, (b) Simülasyon oluşturulurken kullanılan kuyruk kalıp zarfının 68°lik kısmı.



Şekil 3.5. Zimba

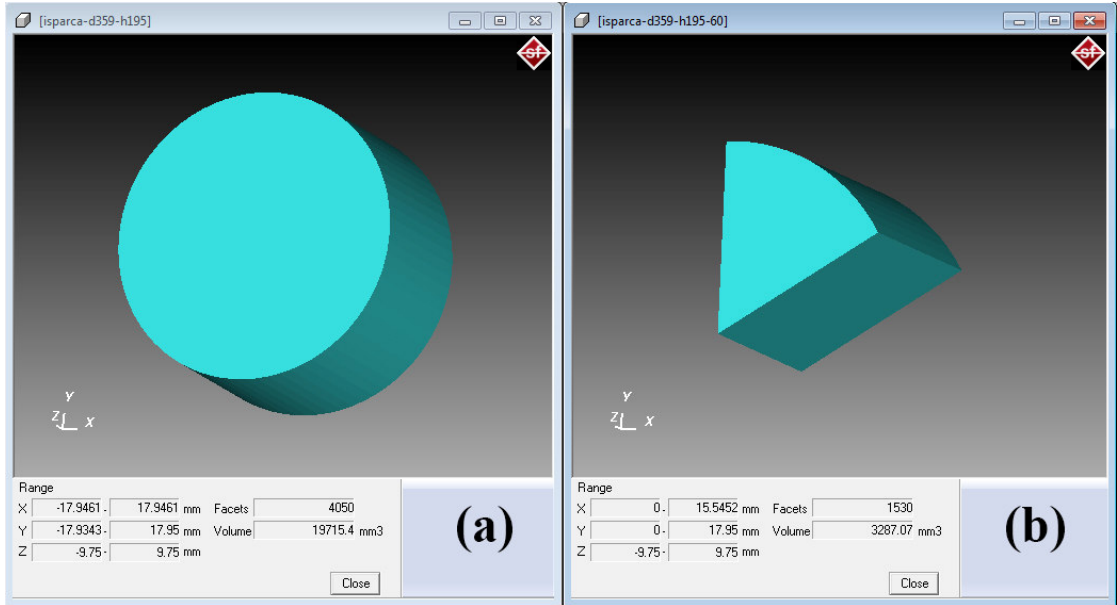


Şekil 3.6. (a) Alt tabla, (b) Simülasyon oluşturulurken kullanılan alt tablanın 68°lik kısmı.



Şekil 3.7. Üst tabla.

Soğuk dövme simülasyonlarını oluştururken gereken iş parçasının ham halinin çizimi ise, çizilecek parçanın şekli basit olduğu için, simufact.forming yazılımının içindeki çizim modülü kullanılarak yapılmıştır. Ham iş parçasının ölçüleri, Eko Endüstri'nin kullandığı ölçüler dikkate alınarak ve toleranslar da hesaba katılarak çap 35,9 mm, yükseklik 19,5 mm olacak şekilde belirlenmiştir. Daha ilerde belirtilecek nedenlerle, simülasyonlarda ham iş parçasının 60°lik kısmı kullanılmıştır (Şekil 3.8).

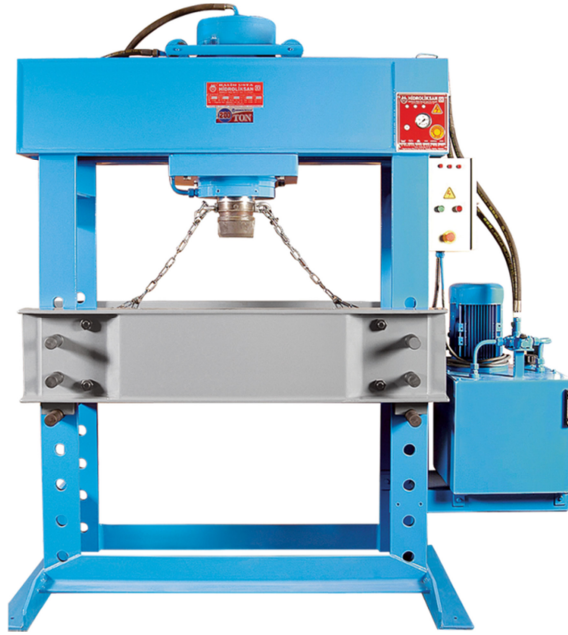


Şekil 3.8. (a) Ham iş parçası, (b) Simülasyon oluşturulurken kullanılan ham iş parçasının 60°lik kısmı.

3.2.1.2. Temel Simülasyon

3.2.1.2.1. Temel Simülasyonda Kullanılan Pres ve Pres Hızı

Temel simülasyon oluşturulurken, soğuk dövme işlemi için en fazla 200 ton basma kuvvetine sahip hidrolik pres seçilmiştir (Şekil 3.9). Hidrolik presin strok hızı olarak da 5 mm/s seçilmiştir. Bu değerler, Eko Endüstri'nin gerçek rot parçasının soğuk dövme ile üretiminde kullandığı değerlere uygundur.



Şekil 3.9. En fazla 200 ton basabilen hidrolik presin temsili resmi [33].

3.2.1.2.2. Temel Simülasyonda Kullanılan Sürtünme Katsayısı

Temel simülasyondaki sürtünme katsayısı değeri seçilirken Eko Endüstri'nin rot parçasının üretimi sırasında kalıp-iş parçası ve zimba-iş parçası arasında kullandığı sabun-fosfat türü yağlayıcı dikkate alınmıştır. Parçalar arasındaki sürtünme katsayısının ölçümü için detaylı test yapma imkanının bulunmamasından dolayı, yaklaşık bir değer olarak 0,08 Coulomb sürtünme katsayısı değeri seçilmiştir.

3.2.1.2.3. Temel Simülasyonda Kullanılan Malzemeler

Temel simülasyondaki ham iş parçası, Eko Endüstri'nin yaptığı üretime uygun olarak, 16MnCr5 seçilmiştir. Kalıpların ve zimbanın malzemesi ise, Eko Endüstri'nin rot parçasının

soğuk dövme ile üretimi sırasında kullandığı kalıp malzemesi olan Uddeholm Vanadis 4E olarak seçilmiştir. Alt tabla, üst tabla ve kalıp zarfları destekleyici çizimler olduğu için bunlara malzeme seçilmemiştir.

Çizelge 3.1'de 16MnCr5'in malzeme özellikleri, çizelge 3.2'de ise Uddeholm Vanadis 4E'nin malzeme özellikleri verilmiştir.

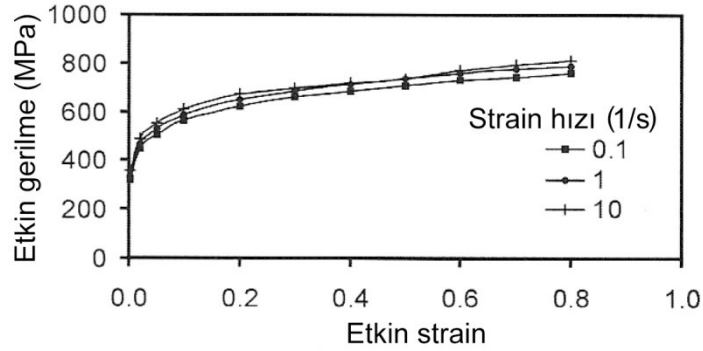
Çizelge 3.1. 16MnCr5 malzeme özellikleri [34].

Malzeme Adı	DIN 16MnCr5		AISI 5115		1.7131
Kimyasal Kompozisyon (%)	C 0,14 - 0,19	Si en fazla 0,40	Mn 1,15	Cr 0,95	
Yoğunluk (g/cm ³)	7,81				
Elastisite Modülü (10 ³ xN/mm ²)	210				
Isıl Genleşme Katsayısı (10 ⁻⁶ °C ⁻¹)	11,1 (20-100 °C)	12,1 (20-200 °C)	12,9 (20-300 °C)	13,5 (20-400 °C)	13,9 (20-500 °C)
Isıl İletim Katsayısı (W/m*K)	41				
Özgül Isı Sığası (J/g*K)	0,46				

Çizelge 3.2. Uddeholm Vanadis 4E malzeme özellikleri [35].

Malzeme Adı		Uddeholm Vanadis 4 Extra				
Kimyasal Kompozisyon (%)	C 1,4	Si 0,40	Mn 0,4	Cr 4,7	Mo 3,5	V 3,7
Yoğunluk (kg/m³)	7700					
Elastisite Modülü (N/mm²)	206000 (20 °C)		200000 (200 °C)		185000 (400 °C)	
Isıl Genleşme Katsayısı (°C⁻¹)	10,9x10⁻⁶ (20-200 °C)			11,7x10⁻⁶ (20-400 °C)		
Isıl İletim Katsayısı (W/m°C)	30 (200 °C)			30 (400 °C)		
Özgül Isı Sığası (J/kg°C)	460					

Temel simülasyondaki iş parçası malzemesi olan 16MnCr5'in akma eğrileri ise şekil 3.10'da verilmiştir.



Şekil 3.10. 16MnCr5'in farklı strain hızlarıyla 25 °C'de elde edilmiş akma eğrileri [36].

3.2.1.2.4. Temel Simülasyonda Kullanılan Kalıp, Zımba, İş Parçası ve Çevre Sıcaklıkları

Temel simülasyonu oluştururken, simüle edilen üretim işleminin soğuk dövme olması nedeniyle, ortam sıcaklığı olarak 20 °C seçilmiştir. Bu değer, ortalama ortam değeri olarak kabul edilmesi nedeniyle tercih edilmiştir. Başlangıçta kalıp, zımba, iş parçası ve çevre sıcaklığının aynı olduğu kabul edildiğinden, bu parçaların hepsinde 20 °C değeri kullanılmıştır.

Simülasyon sırasında zımba-iş parçası, kalıplar-iş parçası ile iş parçası-ortam, kalıplar-ortam, zımba-ortam gibi parçaların arasında temas olması nedeniyle kalıplar ve zımba, sıcaklık değişiminin daha gerçekçi olarak gözlenmesi amacıyla ısıl geçirgenliği olan parça olarak tasarlanmıştır.

3.2.1.3. Pres Hızı Değişim Simülasyonları

Tez çalışmasında yapılan simülasyonların iki tanesi, pres hızları dışındaki diğer girdilerin tamamı temel simülasyon ile aynı kalacak şekilde oluşturulmuştur. Bu simülasyonlardaki amaç, pres hızının değişimiyle ortaya çıkan sonuçların incelenmesi ve temel simülasyonla karşılaştırılmasıdır. Bu amaç doğrultusunda, simülasyonlardaki pres hızları 6 mm/s ve 4 mm/s olacak şekilde seçilmiştir. Bu değerler, temel simülasyondaki pres hızı değerinden biraz daha hızlı ve biraz daha yavaş değerlerdir.

3.2.1.4. Sürtünme Katsayısı Değişim Simülasyonları

Tez çalışmasında yapılan simülasyonların iki tanesi, sürtünme katsayıları dışındaki diğer girdilerin tamamı temel simülasyon ile aynı kalacak şekilde oluşturulmuştur. Bu

simülasyonlardaki amaç, sürtünme katsayısının değişimiyle ortaya çıkan sonuçların incelenmesi ve temel simülasyonla karşılaştırılmasıdır.

Temel simülasyonda seçilen 0,08 Coulomb sürtünme katsayısı değeri, temas yüzeylerinde sabun fosfat yağlayıcının olduğu düşünülerek seçilmiştir. Sürtünme katsayısı değişim simülasyonlarında seçilen değerler, temas yüzeylerinde daha iyi yağlayıcıların olabileceği varsayımından yola çıkılarak 0,06 Coulomb ve 0,04 Coulomb olacak şekilde seçilmiştir. Ancak bu simülasyonlarda da detaylı test ile kesin değer belirleme imkanının olmamasından dolayı sürtünme değerleri yaklaşık olarak belirlenmiştir.

3.2.1.5. Malzeme Değişim Simülasyonları

Tez çalışmasında yapılan simülasyonların iki tanesi, iş parçası malzemeleri dışındaki diğer girdilerin tamamı temel simülasyon ile aynı kalacak şekilde oluşturulmuştur. Bu simülasyonlardaki amaç, iş parçası malzemesinin değişimiyle ortaya çıkan sonuçların incelenmesi ve temel simülasyonla karşılaştırılmasıdır.

Temel simülasyonda iş parçası için seçilen 16MnCr5 malzemesinden farklı olması amacıyla, içindeki karbon oranı daha yüksek olan Ck45 ve içindeki karbon oranı daha düşük olan 1010, malzeme değişim simülasyonlarında iş parçası malzemesi olarak seçilmiştir.

Çizelge 3.3'te Ck45'in malzeme özellikleri, çizelge 3.4'te ise 1010'un malzeme özellikleri verilmiştir.

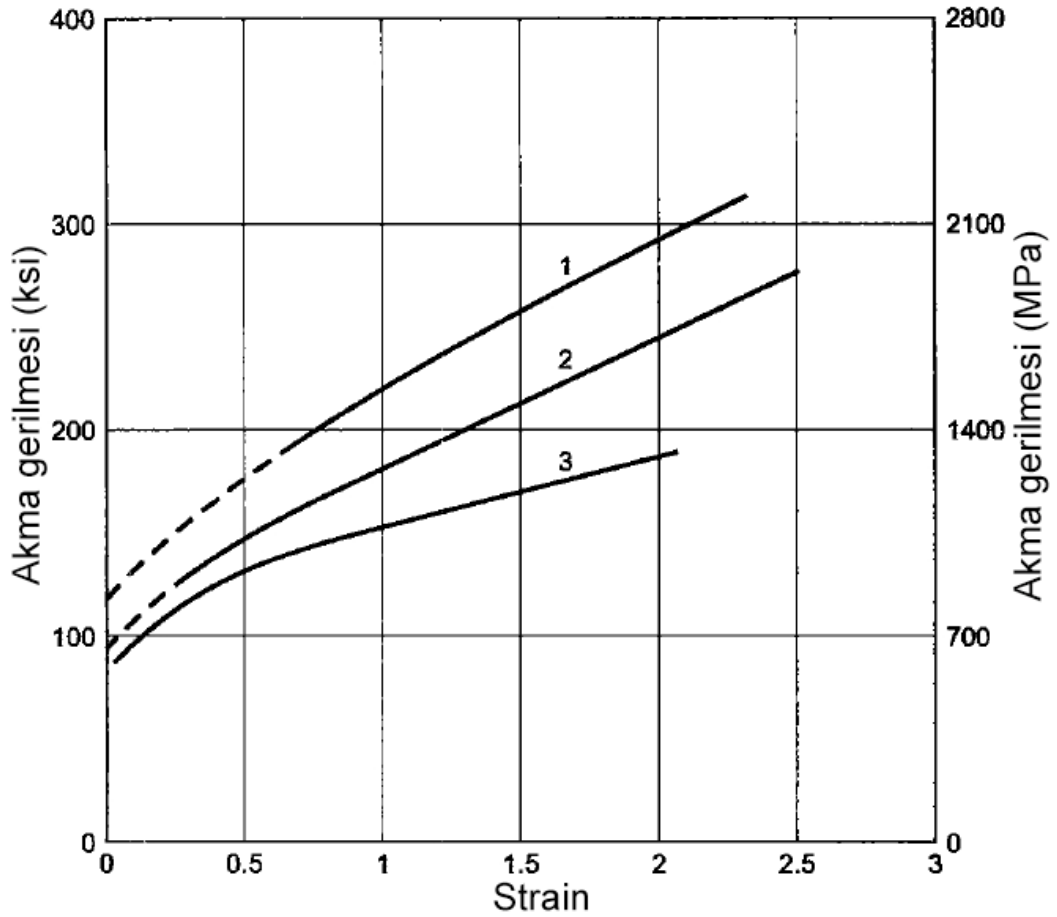
Çizelge 3.3. Ck45 malzeme özellikleri [37].

Malzeme Adı	DIN Ck45		AISI 1045			1.7131	
Kimyasal Kompozisyon (%)	C 0,46	Si en fazla 0,40	Mn 0,65	Cr en fazla 0,4	Mo en fazla 0,10	Ni en fazla 0,40	
Yoğunluk (g/cm³)	7,84						
Elastisite Modülü (10³xN/mm²)	190-210						
Isıl Genleşme Katsayısı (10⁻⁶°C⁻¹)	11,6 (20-100 °C)	12,3 (20-200 °C)	13,1 (20-300 °C)	13,7 (20-400 °C)	14,2 (20-500 °C)	14,7 (20-600 °C)	15,1 (20-700 °C)
Isıl İletim Katsayısı (W/m²K)	15,1						

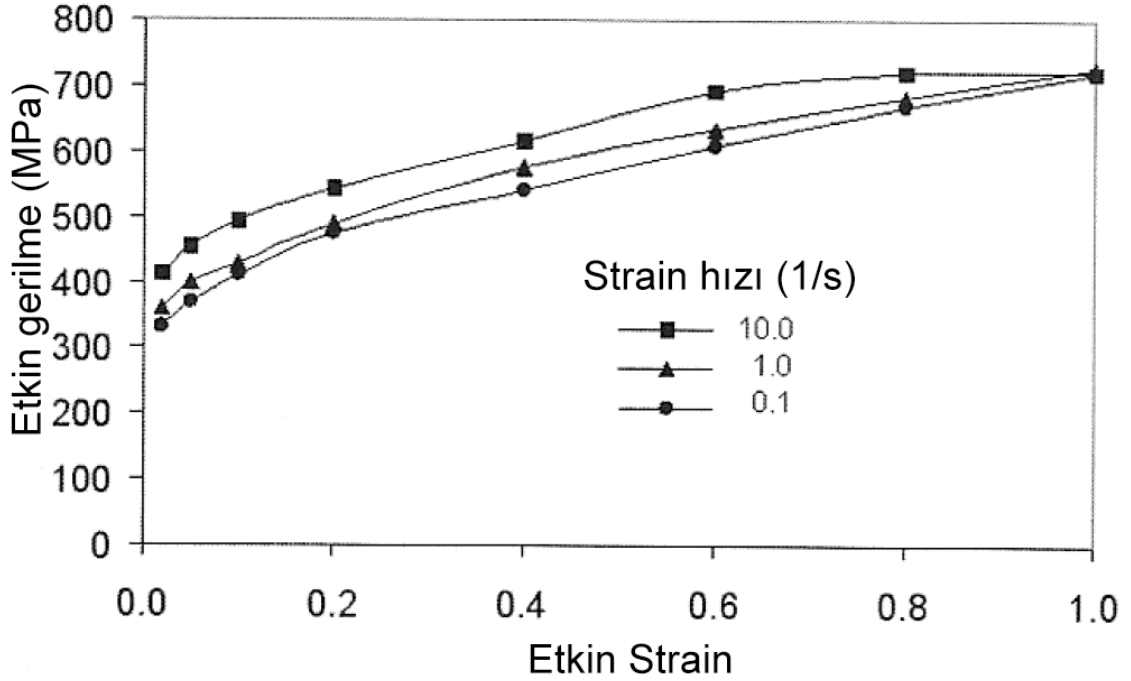
Çizelge 3.4. 1010 malzeme özellikleri [38].

Malzeme Adı	DIN C10	AISI 1010	1.0301
Kimyasal Kompozisyon (%)	C 0,10	Si en fazla 0,40	Mn 0,45
Yoğunluk (g/cm³)	7,85		
Elastisite Modülü (10³xN/mm²)	210		
Isıl Genleşme Katsayısı (10⁻⁶°C⁻¹)	11,0 (20-100 °C)		11,8 (20-200 °C)
Isıl İletim Katsayısı (W/m*K)	58,6		
Özgül Isı Sığası (J/g*K)	0,46		

Şekil 3.11'de Ck45'in akma eğrileri, şekil 3.12'de ise 1010'un akma eğrileri verilmiştir.



Şekil 3.11. Ck45'in farklı koşullar için akma eğrileri: (1) Su verilmiş ve küreselleştirilmiş. (2) Haddelendiği gibi. (3) Su verilmiş ve menevişlenmiş [39].



Şekil 3.12. 1010'un farklı strain hızlarıyla oda sıcaklığında elde edilmiş akma eğrileri [40].

3.2.1.6. Sıcaklık Değişim Simülasyonları

Tez çalışmasında yapılan simülasyonların dört tanesi, kalıp, zımba ve iş parçası başlangıç sıcaklıkları ve çevre sıcaklığı dışındaki diğer girdilerin tamamı temel simülasyon ile aynı kalacak şekilde oluşturulmuştur. Bu simülasyonlardaki amaç, çevredeki sıcaklık değişimiyle ortaya çıkan sonuçların incelenmesi ve temel simülasyonla karşılaştırılmasıdır.

Soğuk dövme işlemi başlamadan önce kalıpların, zımba ve iş parçasının sıcaklıkları çevre sıcaklığı ile aynı olduğundan dolayı hepsinin sıcaklık değerleri aynı seçilmiştir.

EKO Endüstri İzmir'in Kemalpaşa ilçesinde olduğu için, sıcaklık değişim simülasyonlarındaki sıcaklık değerleri seçilmesi sırasında Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nün İzmir'in son 59 yıla ait resmi istatistik verilerinden yararlanılmıştır (Şekil 3.13). Bu verilere göre, son 59 yılın en yüksek, ortalama en yüksek, en düşük ve ortalama en düşük sıcaklık değerleri simülasyonlarda kullanılmak için seçilmiştir. Bu değerler, en yüksek sıcaklık için 43 °C, ortalama en yüksek sıcaklık için 33,2 °C, en düşük sıcaklık için -6,4 °C ve ortalama en düşük sıcaklık için 5,8 °C'dir.

Resmi İstatistikler (İllerimize Ait İstatistiki Veriler)

| İllerimize Ait İstatistik Verileri | Meteorolojik Parametrelerin Türkiye Analizi | TUMAS | Aylık Haber Bülteni | Meteorolojik parametrelerin Tanımlamaları |

İZMİR	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
Uzun Yıllar İçinde Gerçekleşen Ortalama Değerler (1954 - 2013)												
Ortalama Sıcaklık (°C)	8.8	9.5	11.7	15.8	20.8	25.6	28.0	27.6	23.6	18.8	14.1	10.5
Ortalama En Yüksek Sıcaklık (°C)	12.5	13.5	16.4	20.8	26.1	30.8	33.2	32.8	29.0	24.0	18.5	14.1
Ortalama En Düşük Sıcaklık (°C)	5.8	6.1	7.8	11.3	15.5	20.0	22.6	22.5	18.7	14.8	10.7	7.7
Ortalama Güneşlenme Süresi (saat)	4.2	5.0	6.2	7.4	9.5	11.4	12.1	11.5	10.0	7.3	5.3	4.0
Ortalama Yağışlı Gün Sayısı	11.5	10.7	9.0	8.4	5.2	2.0	0.5	0.5	2.1	5.4	8.8	12.8
Aylık Toplam Yağış Miktarı Ortalaması (kg/m ²)	121.0	101.8	74.3	47.0	29.3	8.3	2.0	2.2	15.7	44.3	95.0	144.1
Uzun Yıllar İçinde Gerçekleşen En Yüksek ve En Düşük Değerler (1954 - 2013)*												
En Yüksek Sıcaklık (°C)	22.4	23.8	30.5	32.2	37.5	41.3	42.6	43.0	40.1	36.0	30.3	25.2
En Düşük Sıcaklık (°C)	-6.4	-5.0	-3.1	0.6	7.0	10.0	16.1	15.2	10.0	5.3	-0.1	-4.0

Şekil 3.13. İzmir'in son 59 yıllık sıcaklık değerleri [41].

3.2.2. Basamaklar Halinde Simülasyonun Oluşturulması

Tezde yapılan simülasyon çalışmalarında simufact.forming v.11.0.1 yazılımı kullanılmıştır. Bu yazılım ile 2 boyutlu ve 3 boyutlu simülasyonlar yapılabilmekte ve sonuçlar görsel animasyon olarak değerlendirilebilmektedir.

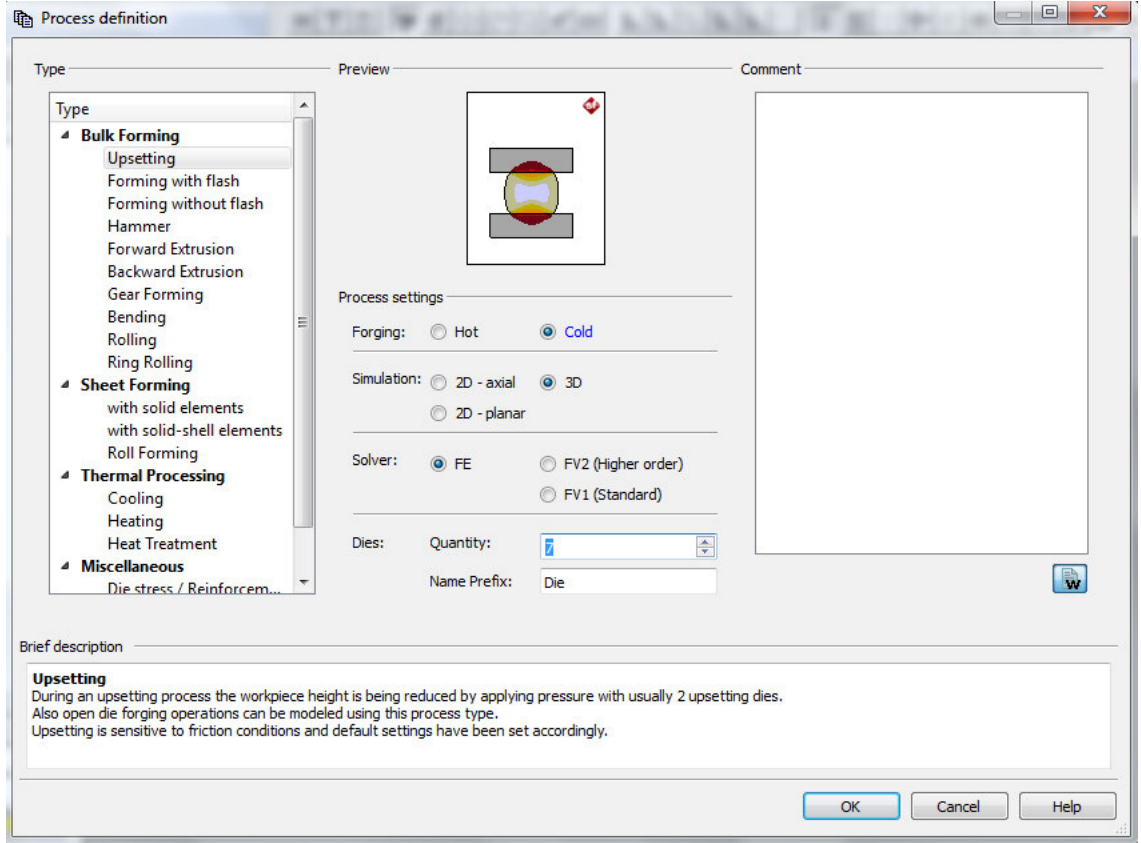
simufact.forming yazılımında önemli olan 3 tane kısım bulunmaktadır:

1. Simülasyona girdi yapılması,
2. Girdiler kullanılarak simülasyonun oluşturulması,
3. Çözüm işlemi bittikten sonra sonuçların incelenmesi.

Bu bölümde temel simülasyon işleminin basamaklar halinde oluşturulması anlatılacaktır.

3.2.2.1. Giriş Ekranı

simufact.forming yazılımı ilk defa açıldığında boş bir ana ekranla karşılaşılır. Bu ana ekranda "New Project" tuşu ile simülasyonu yapılacak işlem türünün seçilebildiği bir ekran açılarak simülasyon oluşturmaya başlanılır (Şekil 3.14).



Şekil 3.14. simufact.forming işlem tanımlama ekranı.

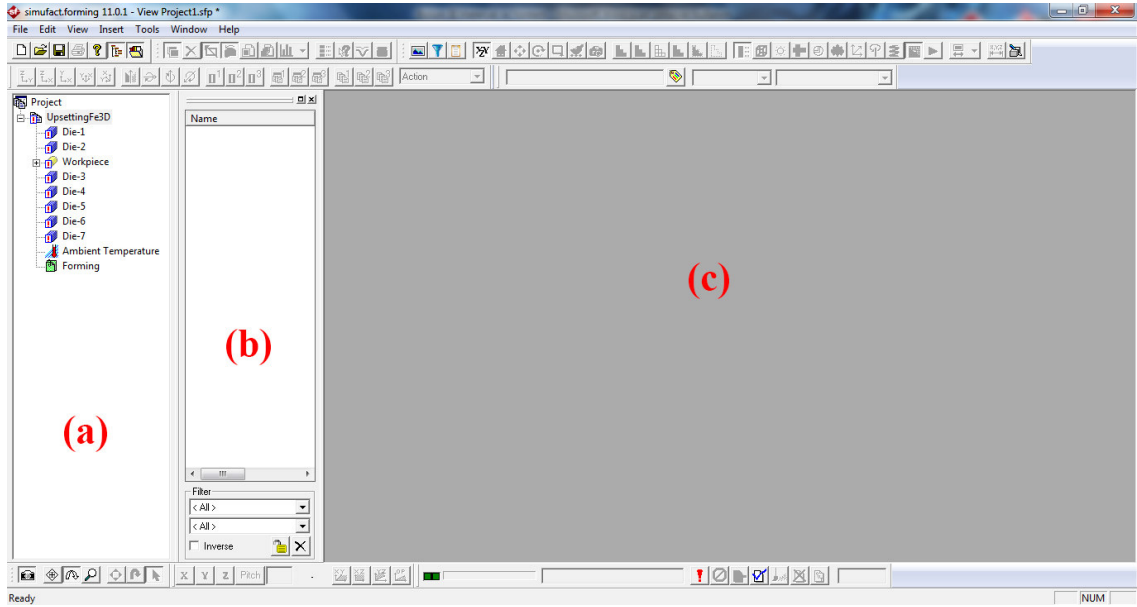
Açılan bu işlem tanımlama ekranında simülasyonda yapılacak işlemin türü yanında sıcaklık (sıcak veya soğuk), boyut (2 veya 3) ve simülasyonu çözmek için kullanılacak çözücü şekli seçilebilir.

Temel simülasyonunun oluşturulması için bu ekranda 3 boyutlu soğuk dövme işlemi seçilmiştir.

3.2.2.2. Ana Simülasyon Ekranı

Girişteki işlem seçme ekranında işlem seçildikten sonra simufact.forming yazılımının ana simülasyon ekranı açılır (Şekil 3.15).

Açılan bu ekran, simülasyon oluşturma işlemlerinin çoğunun yapıldığı ve simülasyon çözüldükten sonra sonuçların görülüp değerlendirildiği yerdir.

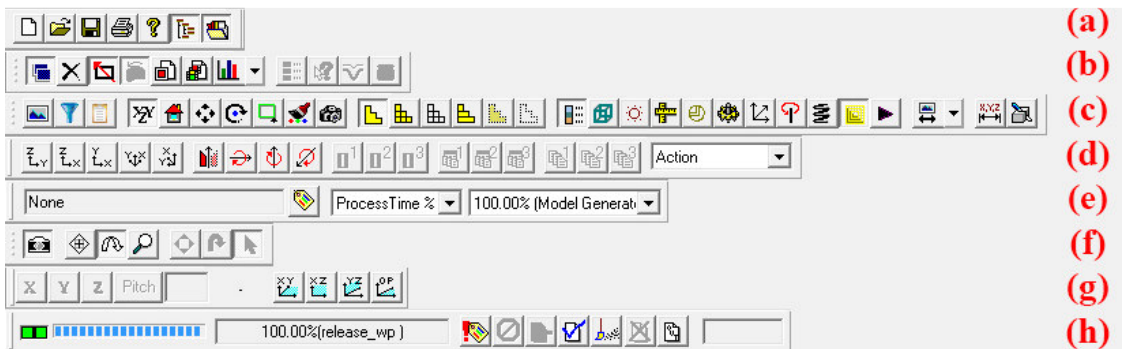


Şekil 3.15. simufact.forming yazılımı ana ekranı: (a) İşlem ağacı, (b) Envanter penceresi, (c) Parça ve simülasyon görüntüleme penceresi.

Ana ekran kabaca 3 kısımdan oluşmaktadır:

1. Simülasyonun kalıp, iş parçası vb. diziliminin görüldüğü simülasyon ağacı (Şekil 3.15 (a)),
2. Simülasyon girdilerinin eklendiği envanter penceresi (Şekil 3.15. (b)),
3. Parça, kalıp çizimlerinin görülebildiği, simülasyon oluşturulduğunda tüm parçaların bir arada görülebildiği ve simülasyonun çözümü bittikten sonra sonuçların animasyon olarak incelenebildiği görüntüleme penceresi (Şekil 3.15. (c)).

Ana simülasyon ekranında simülasyonun kısımları oluşturuldukça aktifleşen araç çubukları bulunmaktadır (Şekil 3.16).



Şekil 3.16. Ana simülasyon ekranındaki araç çubukları.

Şekil 3.16. (a)'da standart çubuk gösterilmektedir. Bu çubuk üzerinden yeni simülasyon açma, kayıt ve yükleme işlemleri yapılabilmekte, yazılımın yardım dosyası açılabilir.

Şekil 3.16. (b)'de sonuç eylem çubuğu gösterilmektedir. Bu çubuk üzerinden sonuç skalalarının ayarlanması, kuvvet grafiğine bakılması, 2 boyutlu simülasyonlarda simülasyon sonucunun sanal olarak 3 boyuta çevrilmesi gibi işlemler yapılabilir. Sonuç eylem çubuğu, simülasyonun çözüm işlemi bittikten sonra açılmaktadır.

Şekil 3.16. (c)'de görüntü çubuğu gösterilmektedir. Bu çubuk üzerinden simülasyonun gösterilmesi, parçaların meshlerinin gösterilmesi, istenilen parçaların gösterilmemesi, istenilen parçaların saydam olarak gösterilmesi, görüntünün hareket ettirilmesi, görüntünün döndürülmesi, belli bir bölümün yakınlaştırılması gibi işlemler yapılabilir. Ayrıca simülasyon görüntüsü üzerinde eksenel düzlemlerin, tanımlanan akış çizgilerinin, refinement boxların gösterilmesi de bu araç çubuğu üzerinden yapılabilir.

Şekil 3.16. (d)'de açı çubuğu gösterilmektedir. Bu çubuk üzerinden simülasyon görüntülerinin görünüm açıları eksenlere göre değiştirilebilir.

Şekil 3.16. (e)'de sonuç basamak çubuğu gösterilmektedir. Bu çubuk üzerinden incelenen simülasyon sonuç animasyonlarının işlem yüzdesi, zaman veya strok olarak ilerlemesi seçilebilir. Ayrıca buradan sonuç seçim penceresi de açılabilir. Sonuç basamak çubuğu, simülasyonun çözüm işlemi bittikten sonra açılmaktadır.

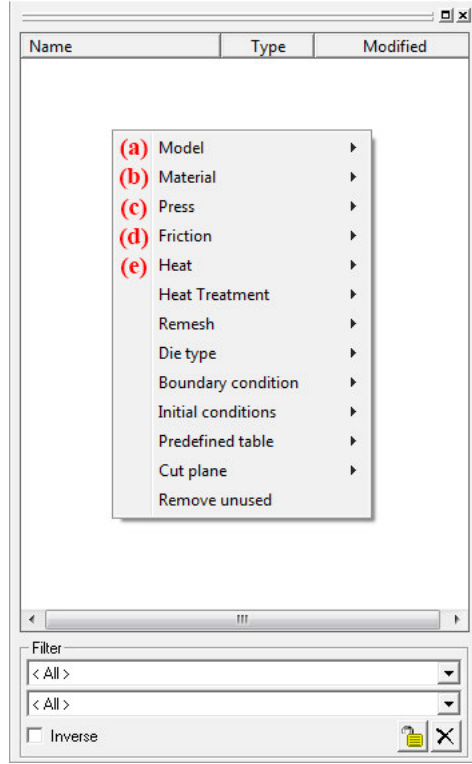
Şekil 3.16. (f)'de fare çubuğu gösterilmektedir. Bu çubuk üzerinden görüntü hareketi veya parça hareketi sistemleri arasında geçiş yapılabilir ve görüntünün yakınlaştırılması, döndürülmesi ve hareket ettirilmesi işlemleri yapılabilir. Ayrıca parça hareketi sistemine geçildiğinde, parçaların bizzat kendilerinin döndürülmesi ve hareket ettirilmesi işlemleri yapılabilir.

Şekil 3.16. (g)'de hareket seçenekleri çubuğu gösterilmektedir. Bu çubukta, fare çubuğundan parça hareketi sistemine geçildiğinde aktif olan ve hareketin ekseninin ve boyunun seçilebildiği tuşlar bulunmaktadır.

Şekil 3.16. (h)'de simülasyon çubuğu gösterilmektedir. Bu çubuk üzerinden simülasyonu oluşturduktan sonra hataların kontrolü, simülasyonun başlatılması ve simülasyonun durdurulması işlemleri yapılabilir. Ayrıca simülasyonun teknik çıktı dosyasına bakılabilir.

3.2.2.3. Envanter Penceresi

simufact.forming yazılımında, envanter penceresi simülasyon girdilerinin yapıldığı, bu girdilerin listelenip gösterildiği penceredir. Bu pencere üzerinde farenin sağ tuşu ile tıklanarak açılan menüden simülasyon girdileri yapılmaktadır (Şekil 3.17).



Şekil 3.17. Envanter penceresi ve girdilerin yapıldığı sağ tuş menüsü.

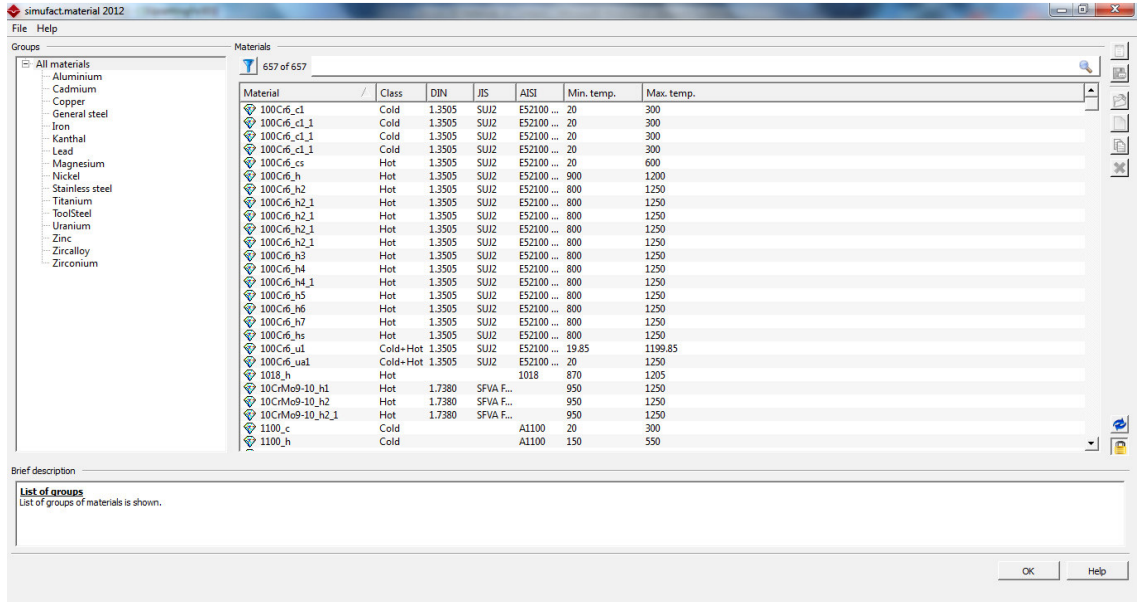
Tezdeki temel simülasyon soğuk dövme işlemi olduğu için girdilerin yapıldığı menüden sadece ilk beş menü kullanılmıştır.

Şekil 3.17. (a)'da model menüsü gösterilmiştir. Bu menüden simülasyon için gerekli çizimlerin simülasyona aktarıldığı veya aktarılmadan önce ön bakış yapılabilirdiği alt menülere erişilmektedir. Ayrıca basit parçaların çizimi için simufact.forming programı altında bulunan bir modüle erişim seçeneği de model menüsünde bulunmaktadır.

Temel simülasyon oluşturulurken bu menüden kalıpların, zarfların ve alt tablanın 68°lik kısımlarının çizimleri ve üst tabla ve zımbanın tam çizimleri simülasyona aktarılmıştır. Ham iş parçası ise geometrik olarak basit bir şekil olduğu için çizim modülü kullanılarak 60°lik dilim olacak şekilde simufact.forming yazılımı içinde çizilmiştir.

Tezdeki simülasyonlarda kullanılan kalıpların, zarfların ve alt tablanın 68°'lik kısım olmasının ve iş parçasının da 60°'lik kısım olmasının nedeni, simülasyondaki mesh ile yapılan eleman sayısını azaltarak, simülasyonun çözüm süresini kısaltmak ve fazla mesh elemanından kaynaklanabilecek olası hataları engellemektir. Bu simülasyonların sonuçlarında 60° iş parçası da tam boyutlu iş parçasının simülasyonları ile aynı sonuçları vermektedir.

Şekil 3.17. (b)'de malzeme menüsü gösterilmiştir. Bu menü simufact.forming yazılımının yan modüllerinden birisi olan simufact.material (Şekil 3.18) ile bağlantılı çalışmaktadır. Bu menüden, simufact.material modülü altında yeni bir malzeme oluşturulabilmekte veya modülün kütüphanesinde hazır bulunan malzemelerden seçim yapılabilmektedir.



Şekil 3.18. simufact.material modülü.

Temel simülasyon oluşturulurken, bu menüden simufact.material modülü kütüphanesinde bulunmayan kalıp malzemesi (Uddeholm Vanadis 4E) için malzeme bilgileri girilerek yeni bir malzeme oluşturulmuş, iş parçası (16MnCr5) içinse malzeme kütüphanesinde hazır bulunan bilgiler kullanılmıştır.

Şekil 3.17. (c)'de pres menüsü gösterilmiştir. Bu menüden simülasyonda hareket için gerekli sistemi sağlayan pres seçimi yapılmaktadır. Alt menüler kullanılarak, sistem kütüphanesi içinde hazır bulunan pres sistemleri seçilebileceği gibi, istenilen özelliklerde yeni bir pres de oluşturmak mümkündür.

Temel simülasyon oluşturulurken, istenilen pres türü ve özellikleri sistem kütüphanesinde olmadığı için, yeni bir pres oluşturulmuştur. Bu pres oluşturulurken pres türü için hidrolik, pres hızı için de 5 mm/s seçilmiştir.

Şekil 3.17. (d)'de sürtünme menüsü gösterilmiştir. Bu menüden birbiri ile temas eden parçalar arasındaki sürtünme katsayısı seçilebilmektedir. Alt menüler kullanılarak, sistem kütüphanesi içinde hazır bulunan sürtünme katsayısı türleri seçilebileceği gibi, istenilen özelliklerde yeni bir sürtünme katsayısı türü ve değeri oluşturmak mümkündür.

Temel simülasyon oluşturulurken, istenilen sürtünme katsayısı türü ve değeri sistem kütüphanesinde olmadığı için, yeni bir sürtünme katsayısı değeri oluşturulmuştur. Bu sürtünme katsayısı değeri oluşturulurken, sürtünme mekaniği türü için "coulomb", sürtünme katsayısı için de "0,08" seçilmiştir.

Şekil 3.17. (e)'de sıcaklık menüsü gösterilmiştir. Bu menü kullanılmaları zorunlu olan iki alt menüden oluşmaktadır.

İlk alt menüde, kalıplar için gerekli sıcaklık değerleri seçimi sistem kütüphanesinden hazır olarak seçilebilmekte veya yeni bir sıcaklık değeri olarak elle girilebilmektedir. Bu noktada simülasyon, iş parçası haricindeki tüm parçaları kalıp olarak değerlendirmektedir. Bu nedenle bu alt menüden girilen sıcaklık değeri, simülasyon oluşturulurken iş parçası dışındaki tüm parçaları etkilemektedir.

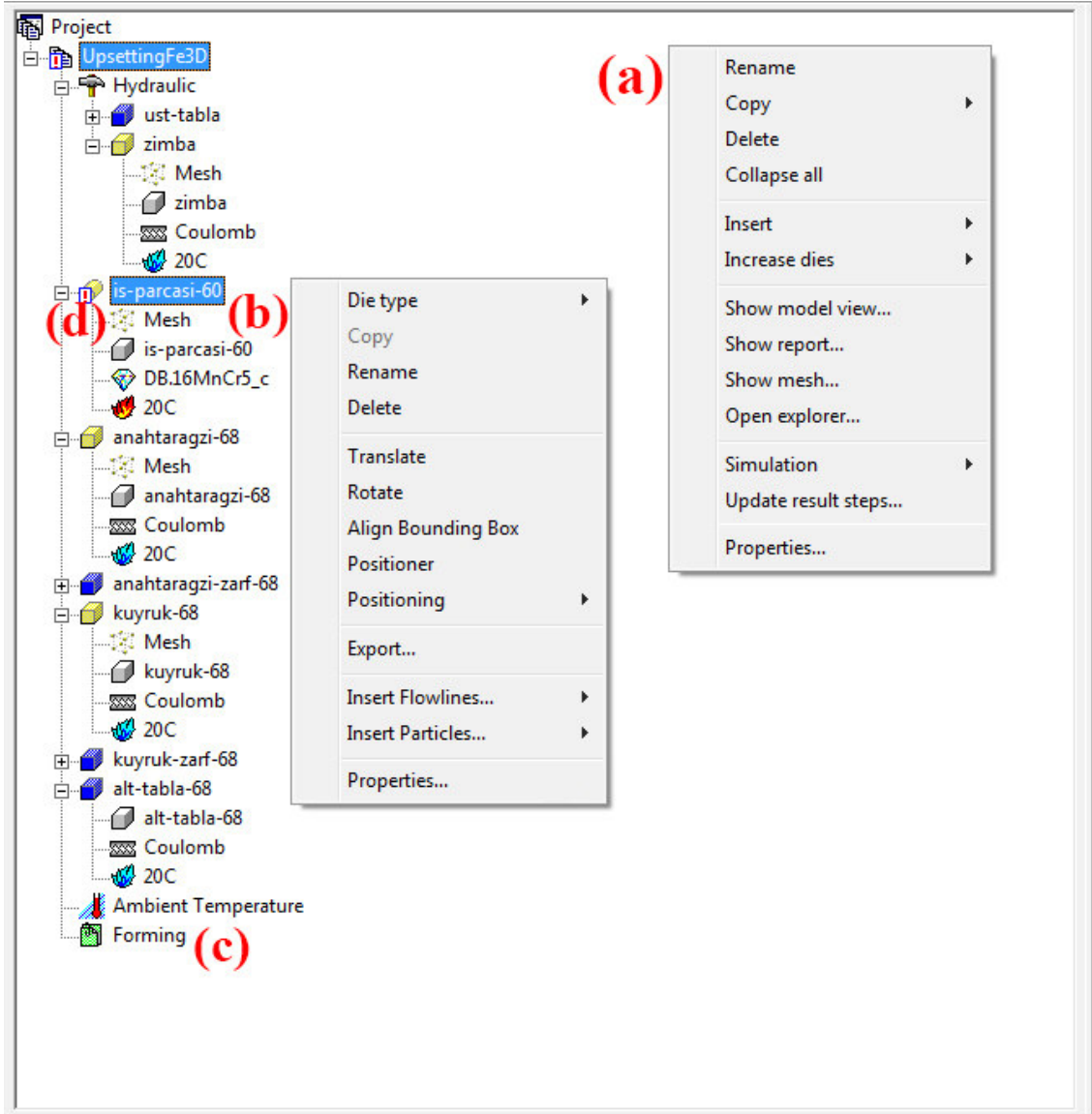
İkinci alt menüde, iş parçası için gerekli sıcaklık değeri sistem kütüphanesinden hazır olarak seçilebilmekte veya yeni bir sıcaklık değeri elle girilebilmektedir.

Temel simülasyon oluşturulurken, kalıp sıcaklık menüsünden elle 20 °C girilmiş, iş parçası sıcaklık menüsünden de elle 20 °C girilmiştir.

3.2.2.4. Simülasyon Ağacı Penceresi

simufact.forming yazılımında simülasyon ağacı penceresi, simülasyonda kullanılan sistemin listesinin görüldüğü, simülasyonun ana ayarlarının yapıldığı bir penceredir (Şekil 3.19). Ayrıca simülasyonda kullanılan çevre sıcaklığı da bu pencerede bulunan "Ambient Temperature" kısmından değiştirilebilmektedir.

Temel simülasyon oluşturulurken, çevre sıcaklığı 20 °C seçilmiştir.



Şekil 3.19. Simülasyon ağacı penceresi.

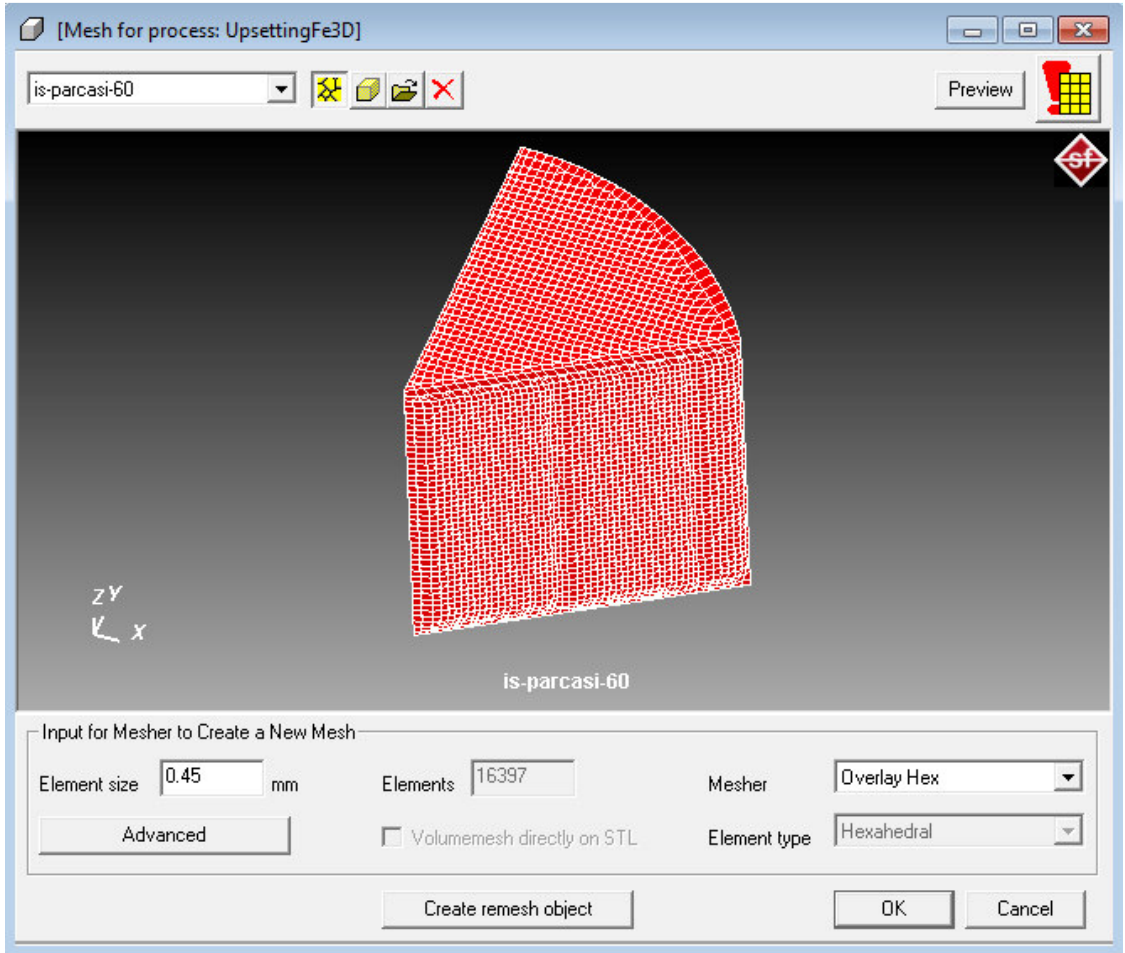
Girdiler, simülasyon ağacı penceresine envanter penceresinden sürüklenerek ilgili parça adının üstüne bırakılacak şekilde aktarılır.

Girdiler envanter penceresine aktarıldıktan sonra, simülasyon parça ve simülasyon görüntüleme penceresinde görülebilmektedir. Bu pencereden görülen ve karmaşık şekilde üst üste duran parçalar, fare çubuğu ve hareket seçenekleri çubuğu kullanılarak simülasyonda istenilen yere hareket ettirilir. Bu şekilde simülasyonun fiziksel ve görsel yapısı düzenlenmektedir.

Simülasyondaki parçaların yerlerinin değiştirilerek düzenlenmesinden sonra, deforme olacak veya ısıyı iletecek parçalar meshlenmektedir. Mesh penceresinin açılması için şekil 3.19 (d)'de gösterilen kısım kullanılır (Şekil 3.20).

Mesh penceresinde, parçanın hangi meshleyici ile meshlenebileceği, mesh eleman boyutu, parçanın belli kısımlarının daha hassas meshlenmesini sağlayan refinement box seçimi gibi ayarlar yapılabilmektedir.

Tez çalışması için simülasyonlar oluşturulurken, kalıplar da ısıl geçirgenlikleri olacak şekilde ayarlandığından, kalıplar için de mesh penceresinden meshing yapılmıştır.



Şekil 3.20. Mesh penceresi.

Temel simülasyonun oluşturulmasında iş parçası için Overlay Hex meshleyicisi seçilmiş, eleman boyutu da 0,45 mm olarak ayarlanmıştır. Isıl geçirgenliği olan kalıplar ve zimba içinse sIMesh tetra meshleyicisi seçilmiş, işlem süresini kısaltmak için ise eleman boyutu olarak

4 mm ayarlanmıştır. Ancak temas yüzeylerinde hassas eleman boyutu olması için refinement box kullanılmış ve iş parçası ile temas eden yüzeylerin eleman boyutu 0,5 mm olacak şekilde düzenlenmiştir.

Simülasyonda parçaların fiziksel yerleşimleri ve gerekli parçaların meshleri yapıldıktan sonra gerekli ayarlamalar Şekil 3.16'da gösterilen menüler yardımıyla yapılabilmektedir.

Şekil 3.19 (a)'da simülasyon işleminin menüsü gösterilmiştir. Bu menü simülasyon işlemi adının üzerine farenin sağ tıklanması ile açılabilir. Bu menüden işlemin adı değiştirilebilmekte, işlem özelliklerine bakılabilmekte, işlem kopyalanabilmekte veya silinebilmektedir. Ayrıca işleme bu menüden gerekirse kalıp eklenebilmekte veya simülasyon işleminde kullanılmak üzere simetri eksenini veya temas tablosu eklenebilmektedir.

Temel simülasyonda kullanılan kalıplar ve iş parçası tam olmadığı için, simülasyonun düzgün olması amacıyla parçaların yan yüzeylerinde simetri eksenleri seçilmiş ve parçalar arasındaki temaslar temas tablosuna girilmiştir.

Şekil 3.19 (b)'de işlem ağacındaki elemanların menüsü gösterilmiştir. Bu menü işlem ağacındaki elemanların adının üzerine farenin sağ tıklanması ile açılabilir. Bu menüden eleman, eğer kalıpsa, kalıp tipi değiştirilebilmekte, elemanların adı değiştirilebilmekte, eleman özelliklerine bakılabilmekte, elemanlar kopyalanabilmekte veya silinebilmektedir. Ayrıca elemanlara gerekirse akış çizgileri eklenebilmekte ve simülasyondaki fiziksel yerleştirilme işlemlerine yardımcı olması amacıyla "positioner" modülü kullanılabilmektedir. Bu modül, parçaların birbiri üzerine yerçekimi etkisiyle temas edinceye kadar serbest düşmesini sağlamaktadır.

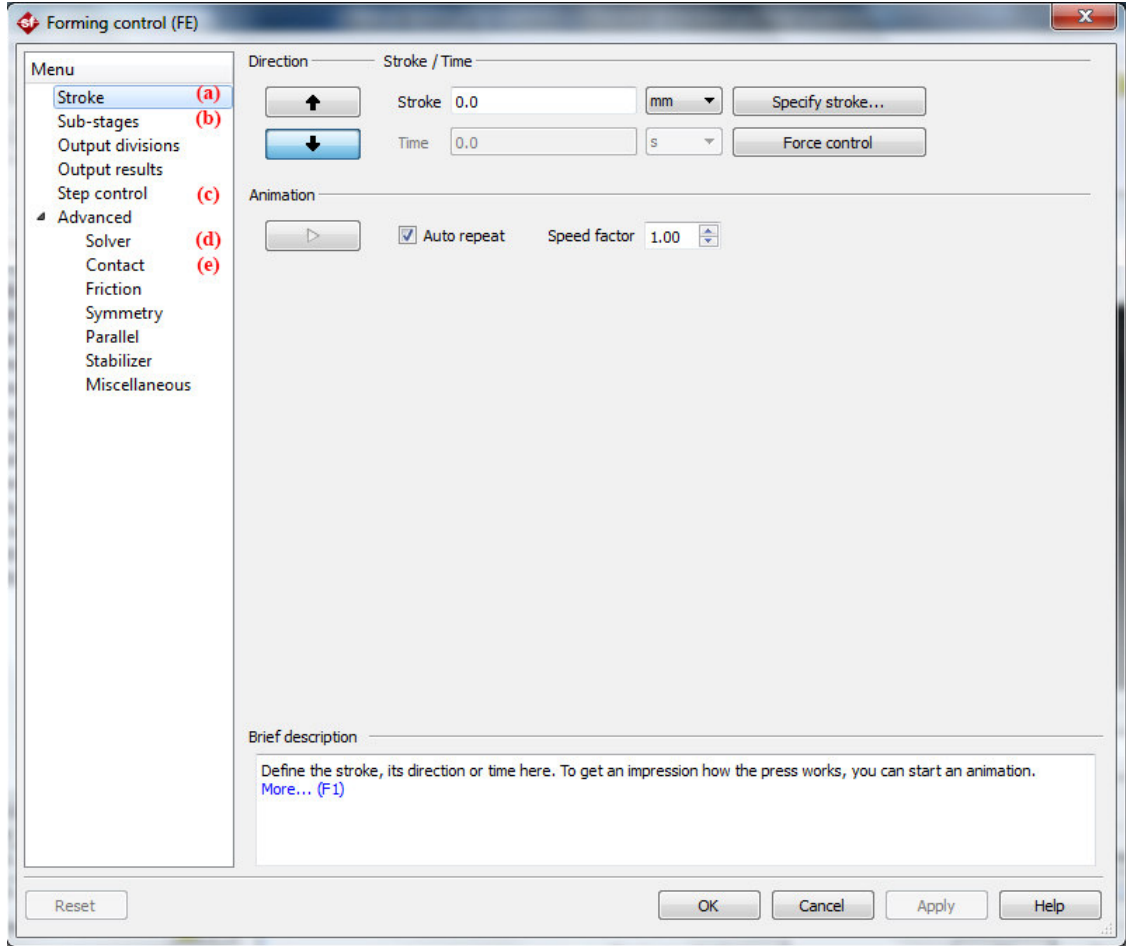
Şekil 3.19 (c)'de forming penceresinin açılacağı kısım gösterilmiştir. Forming penceresi, simülasyonun detaylı son işlemlerinin yapıldığı bir penceredir (Şekil 3.21).

Şekil 3.21 (a)'da forming penceresinde strok ayarlarının yapıldığı menü gösterilmiştir. Bu menüden zımbanın strok hareketinin mesafesi ve hangi yöne olacağı seçilebilmektedir.

Temel simülasyonda, zımba hareketi aşağı yönde ve strok uzunluğu da 25,5 mm olarak seçilmiştir.

Şekil 3.21 (b)'de forming penceresinde alt-aşama ayarlarının yapıldığı menü gösterilmiştir. Bu menüden istenilirse işlemin % olarak hangi strokta durabileceği, basma işi

bittikten sonra geri çekme hareketinin olup olmayacağı ve eğer olacak ise türü ve ne kadar mesafe olacağı seçilebilmektedir. Ayrıca, iş parçasının soğuk dövme simülasyonunun en sonunda kalıplardan ayrılıp ayrılmayacağı da bu menüden seçilebilmektedir.



Şekil 3.21. Forming penceresi.

Temel simülasyon oluşturulurken, zımbanın geri çekilmesi hareketi olarak zımba strok mesafesinin %80'i seçilmiştir.

Şekil 3.21 (c)'de forming penceresinde adım ayarlarının yapıldığı menü gösterilmiştir. Bu menüden toplam işlemin kaç adımda yapılacağı ve hangi adım yönteminin kullanılacağı belirlenebilmektedir.

Temel simülasyonda, sabit adım seçilmiş ve basma işleminin 150 adımda gerçekleşmesi ayarlanmıştır.

Şekil 3.21 (d)'de forming penceresinde çözücü menüsü gösterilmiştir. Bu menüde simülasyonun hangi çözücü sistemi ile çözüleceği seçilebilir.

Temel simülasyonun çözümü için, Multifrontal Sparse (2D/3D) matrix çözücüsü seçilmiştir.

Şekil 3.21 (e)'de forming penceresinde temas ayarları menüsü gösterilmiştir. Bu menüde; bilgisayar simülasyonu çözerken yüzeyler arasında oluşan temasın ayarlamaları ve temastan sonra meshlerin birbirinde ayrılması için gerekli ayarlamalar yapılabilmektedir.

Temel simülasyonda, temastan sonra meshlerin birbirinden ayrılması için gerekli ayırıcı kuvvet olarak 10 Mpa seçilmiştir.

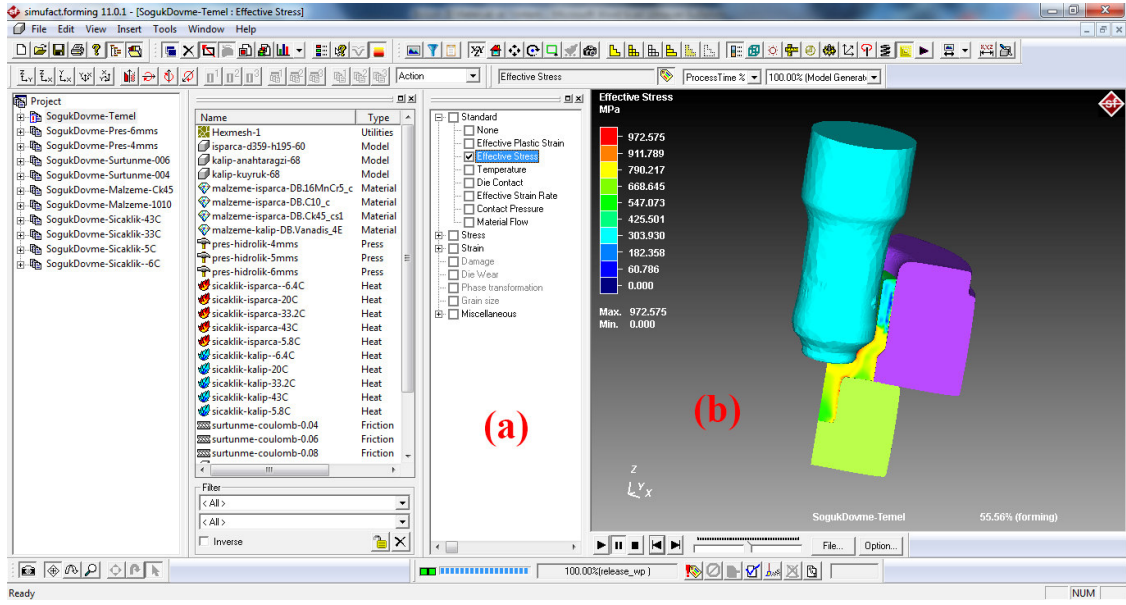
Tüm bu ayarlamalar yapıldıktan sonra simülasyon çubuğu kullanılarak simülasyon işlemi başlatılabilir.

3.2.2.5. Sonuçların Görüntülenmesi

simufact.forming yazılımı, simülasyon çözme işlemini bitirdikten sonra, otomatik olarak sonuç basamak çubuğu ve sonuç eylem çubuğunu aktif etmektedir.

Simülasyon sonuçlarını görüntülemek için, sonuç basamak çubuğundan sonuç seçim penceresi açılır (Şekil 3.22. (a)). Bu pencerede, yapılan simülasyon işlemine dair strain, gerilme, sıcaklık, malzeme akışı, kalıp teması vb. gibi sonuçlara ulaşılabilir.

İstenilen sonuç türünün üzerine farelin sol tuşu ile iki kere tıklandığında sonuç animasyon penceresi açılmaktadır (Şekil 3.22. (b)). Sonuç animasyon penceresinde simülasyonun fiziksel görünümü ve sonucun animasyonun istenildiği gibi izlenebilmesi için gerekli tuşların olduğu bir çubuk bulunmaktadır. Bu çubuk üzerinden animasyonun videosu veya istenilen bir basamağının anlık görüntüsü alınabilir. Ayrıca bu pencerede simülasyon sonuçlarına göre animasyonda değişen renklerin ne anlama geldiğini gösteren bir skala da bulunmaktadır.

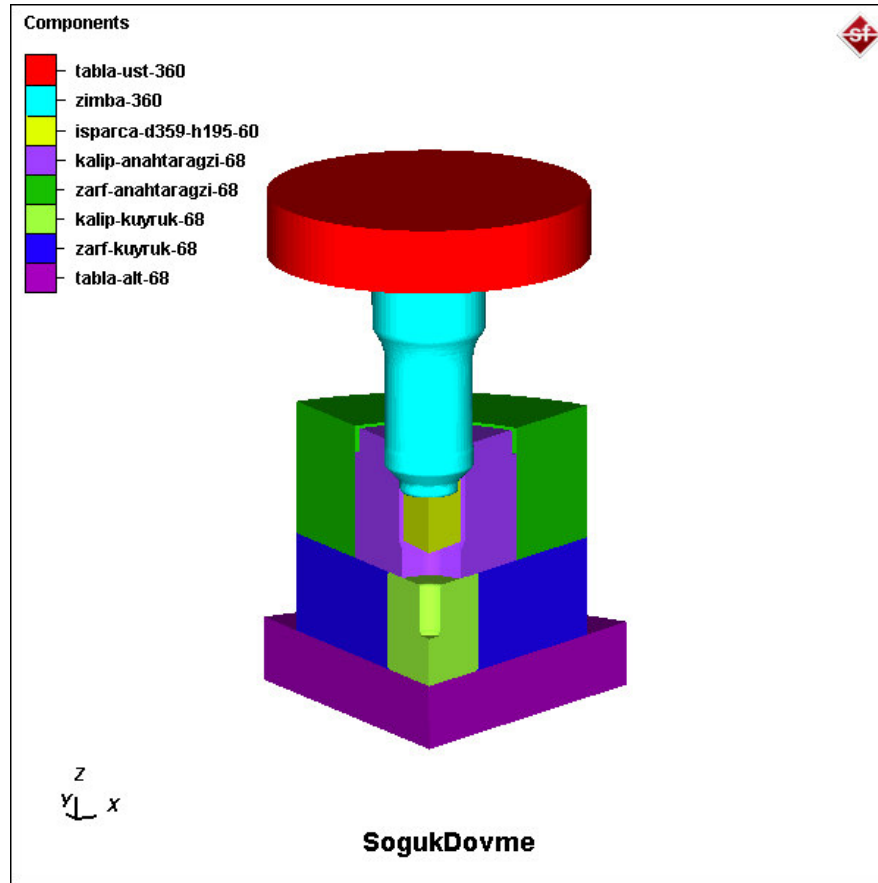


Şekil 3.22. Simülasyonda sonuçların görülebildiği ana pencerenin son hali.

4. SİMÜLASYON SONUÇLARI

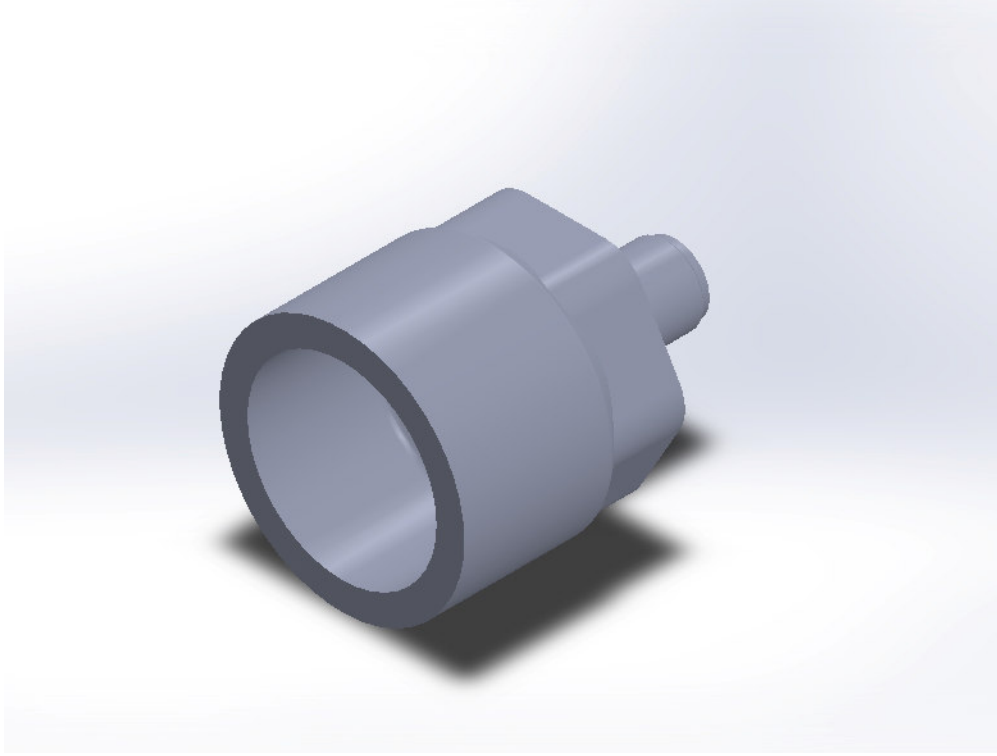
Bu bölümde, simülasyonların sonuçlarına bakılacak ve girdileri değiştirilen simülasyonların sonuçları ile temel simülasyon sonuçları karşılaştırılacaktır.

simufact.forming'de yapılan simülasyonun sonuç görüntüsü simülasyondaki tüm parçalar ile şekil 4.1'deki gibi olmaktadır. Ancak, sonuçlara bakılırken sadece iş parçasının sonuçları dikkate alınacaktır.



Şekil 4.1. simufact.forming'de simülasyonun tüm parçaları ile görünümü.

Simülasyon sırasında zamandan tasarruf etmek ve simülasyondaki fazla eleman nedeniyle oluşabilecek bilgisayar kaynaklı hataları önlemek için, simülasyondaki iş parçası 60°'lik dilim olarak yapılmıştır. Ancak, üretilen rot parçasının gerçekteki son hali (ve eğer simülasyon 360° iş parçası ile yapılsaydı) şekil 4.2'deki gibi olmaktadır.



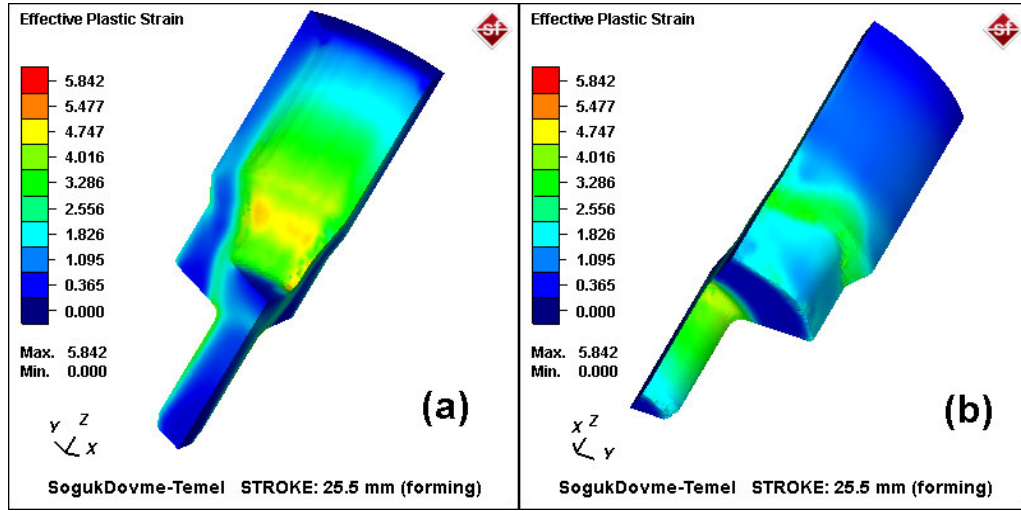
Şekil 4.2. İş parçasının son hali.

Simülasyon sonuçları incelenirken, iş parçasının kritik noktalarındaki strain, gerilme, sıcaklık, malzeme akışı ve simülasyondaki etki eden basma kuvvetlerine bakılacaktır. Simülasyon sonuçları arasında karşılaştırma yapılırken de bu değerler birbirleriyle karşılaştırılacaktır. Sonuçlar karşılaştırılırken, karşılaştırmanın daha kolay olması amacıyla, en küçük skala değerine sahip sonucun skalası kullanılacaktır.

Yapılan tüm simülasyonlarda iş parçası, basma işleminin sonunda kalıbı tam olarak doldurmaktadır. Bu nedenle simülasyonlar için ayrıca kalıp doldurma sonuçlarına bakılmayacak ve sonuçlar arası karşılaştırma yapılmayacaktır.

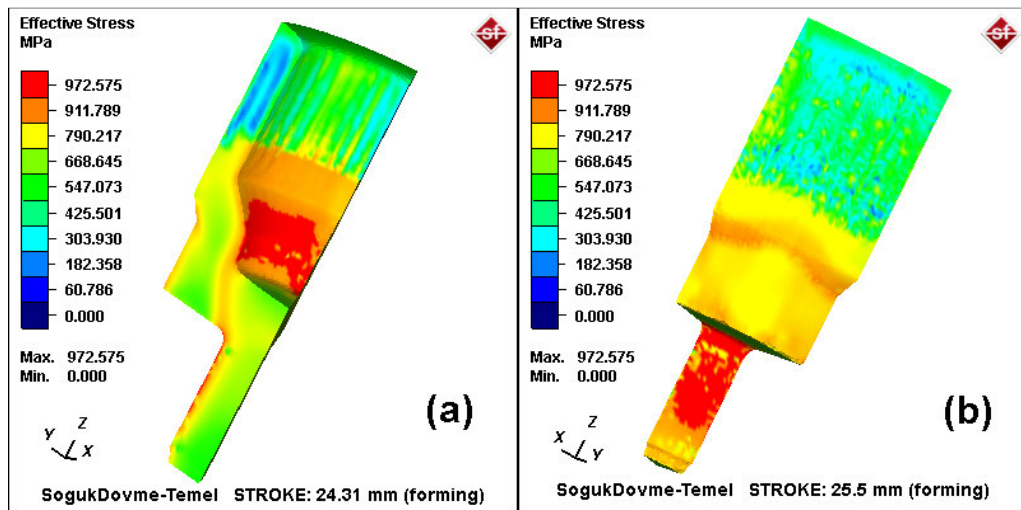
4.1. Temel Simülasyon

Temel simülasyon, girdileri değiştirilen simülasyonların karşılaştırılması için oluşturulmuştur. Bu simülasyonun girdi değerleri de Eko Endüstri'nin rot parçasını gerçekte üretirken kullandığı değerlerle aynı seçilmiştir. Temel simülasyona ait strain, gerilme, sıcaklık, malzeme akışı ve simülasyonda parçalar üzerinde etkili olan basma kuvvetleri aşağıdaki şekillerde verilmiştir.



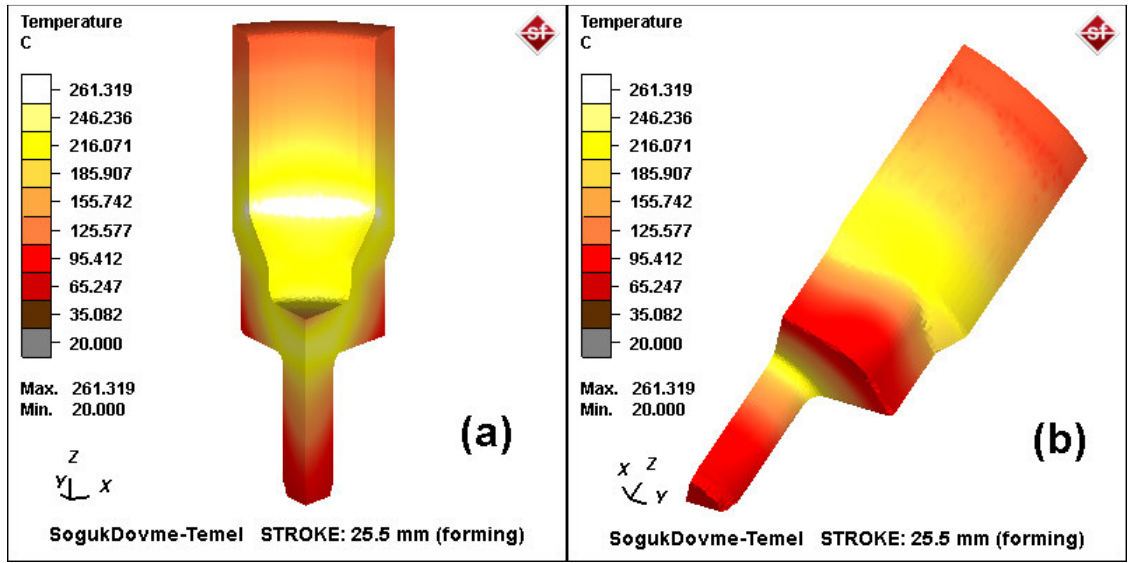
Şekil 4.3. Temel simülasyonda basma işleminin sonundaki strain değerleri. (a) İş parçasının kesitindeki ve iç yüzeyindeki değerler. (b) İş parçasının dış yüzeyindeki değerler.

Şekil 4.3 (a)'da, zımbanın parçanın iç kısmında yaptığı deformasyon sonucunda, parçanın strain değerinin yaklaşık 5,477 ile en fazla olduğu alan görülmektedir. Ayrıca, kesmeye maruz kalan yerleri birleştiren bir hat boyunca ortaya çıkmış, 4,016-1,826 arası olan strain değerleri de görülmektedir. Noktasal bir alanda görülen 5,842 strain değerinin ise mesh hatasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Şekil 4.3 (b)'de, basma işlemi sonunda kuyruk kısmının başlangıç kıvrımının olduğu yerde kesmeden dolayı strainin yüksek olduğu (4,747 - 4,016 değerleri civarında) alan görülmektedir. Ayrıca, anahtar ağız şeklinin olduğu yerde de strainin yaklaşık 4,016 ile yüzeyin geri kalanından daha yüksek değerde olduğu görülmektedir.



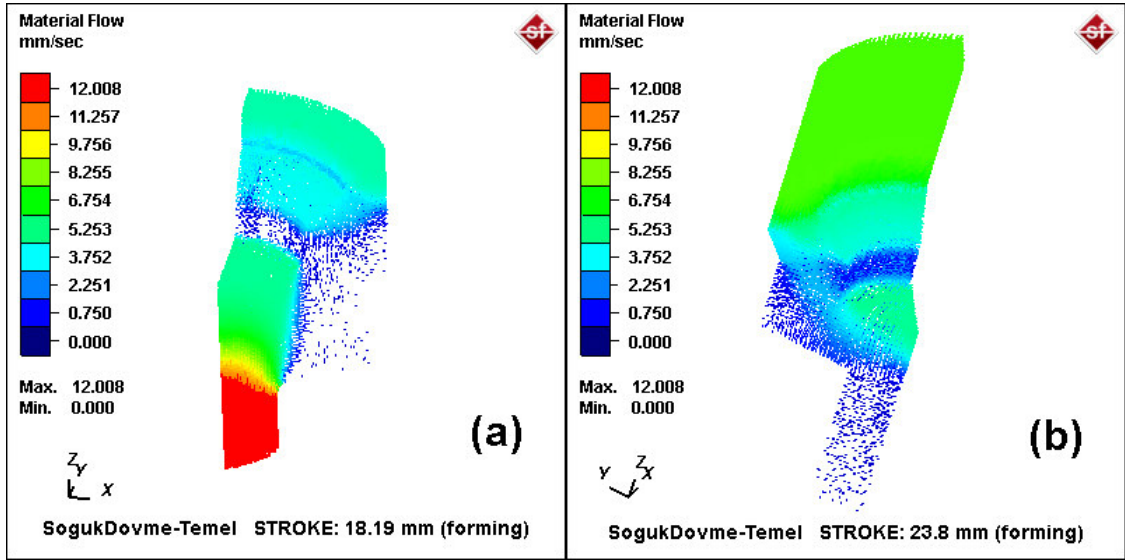
Şekil 4.4. Temel simülasyonda basma işlemindeki gerilme değerleri. (a) İş parçasının kesitindeki ve iç yüzeyindeki değerler. (b) İş parçasının dış yüzeyindeki değerler.

Şekil 4.4 (a)'da, zımbanın parçaya uyguladığı basma kuvveti nedeniyle oluşan deformasyonun temas yüzeylerinde oluşturduğu yüksek gerilme görülmektedir. Bu alan, 972,575 MPa ile parça üzerindeki en yüksek gerilmeye sahip yüzeylerden birisidir. Ayrıca kesmeye maruz kalan yerleri birleştiren bir hat boyunca da gerilmenin yüksek olduğu (911,789-790,217 MPa) görülmektedir. Şekil 4.4 (b)'de, iş parçasının kuyruk kısmının yüzeyinde çok yüksek gerilme değerleri (972,576-911,789 MPa arası) görülmektedir. Bunun nedeni, kuyruk kısmında deplasman hızının yüksek olması ve kuyruk oluşurken kesmenin olmasıdır. Ayrıca, anahtar ağız şeklinin oluştuğu yüzeyde de gerilme değerleri yüzeyin geri kalanından yüksektir (911,789-790,217 MPa arası).



Şekil 4.5. Temel simülasyonda basma işleminin sonundaki sıcaklık değerleri. (a) İş parçasının kesitindeki ve iç yüzeyindeki değerler. (b) İş parçasının dış yüzeyindeki değerler.

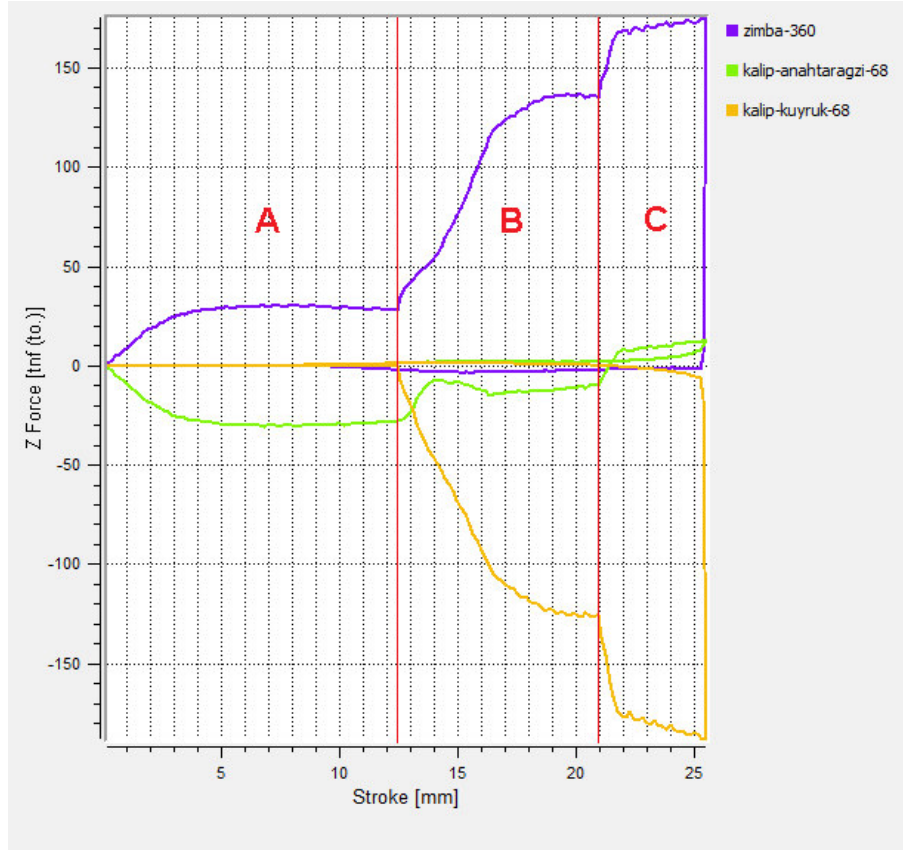
Şekil 4.5 (a)'da, zımbanın iş parçasında basma yaptığı yerlerde yüksek sıcaklıklar (246,236-216,071 °C arası) görülmektedir. Ayrıca basmadan dolayı kalıp içinde sıkışan parçanın yukarıya, kalıp dışına doğru uzaması ve zımbanın aşağıya doğru basma hareketiyle iki yöne doğru gerilen alanda iş parçası üzerindeki en sıcak alan (261,319 °C) görülmektedir. Şekil 4.5 (b)'de, kuyruk kısmının başlangıç kıvrımının olduğu yerde kesmenin olması nedeniyle ve anahtar ağızının şekillendiği kısımda şekil değiştirmenin fazla olması nedeniyle, yüksek sıcaklıklar (246,236-216,071 °C arası) görülmektedir.



Şekil 4.6. Temel simülasyonda basma işlemindeki malzeme akış hızları. (a) İş parçasının kuyruk kısmındaki ve basma yapılan yüzeyindeki hızlar. (b) İş parçasında kuyruk oluşumu bittikten sonraki hızlar.

Şekil 4.6 (a)'da, şekil verme işlemi sırasında zımbanın bastığı yüzey 8,255-5,253 mm/s arası değişen akış hızlarına sahiptir. Ayrıca, kuyruk kesitinin parçanın genel kesitinden daha küçük olması nedeniyle, kuyruk kesitinde parça akış hızının çok yüksek olduğu (12,008 mm/s) görülmektedir. Şekil 4.6 (b)'de, kuyruk kısmı oluşumu bittikten sonra zımbanın basmaya devam etmesi sonucu kalıpla zımba arasında sıkışan malzemenin yukarıya, kalıbın dışına doğru 8,255 mm/s ile hızlıca hareket ettiği de görülmektedir.

Şekil 4.7'de temel simülasyondaki zımbanın yaptığı basma kuvveti ve kalıplara etkileyen kuvvetler görülmektedir. Bu kuvvetler aynı zamanda iş parçasına da etkimektedir. Şekil 4.7'deki A bölgesinde, iş parçasının anahtar ağzı kısmı oluşturulmaktadır. Bu bölgede zımba en fazla 32 ton kuvvet uygulamaktadır ve bu kuvvetin tamamı kalıplardan sadece anahtar ağzı kalıbına etkimektedir. Şekil 4.7'deki B bölgesinde, iş parçasında kuyruk kısmının da oluşumu vardır. Zımbanın yaptığı basma kuvveti tüm kalıpları etkilemektedir. Ancak anahtar ağzı kalıbına etkileyen kuvvet azalırken, kuyruk kalıbına etkileyen kuvvet giderek artmaktadır. Bu bölgede zımba en fazla 138 ton kuvvet uygulamakta ancak bunun 123 tonu kuyruk kalıbına etkirken, 15 tonu anahtar ağzı kalıbına etkimektedir. Şekil 4.7'deki C bölgesinde, iş parçasının kuyruk oluşumu bitmiştir ve kalıp içinde zımba ile kalıp arasında sıkışan malzeme yukarıya, kalıp dışına doğru hareket etmektedir. Bu bölgede zımba en fazla 175,289 ton kuvvet uygulamaktadır. C bölgesinin sonunda, simülasyonda zımbanın geriye çekilmesi başlamakta ve bu nedenle basma kuvvetlerinin ani şekilde azaldığı görülmektedir.



Şekil 4.7. Temel simülasyonun basma kuvveti grafiği.

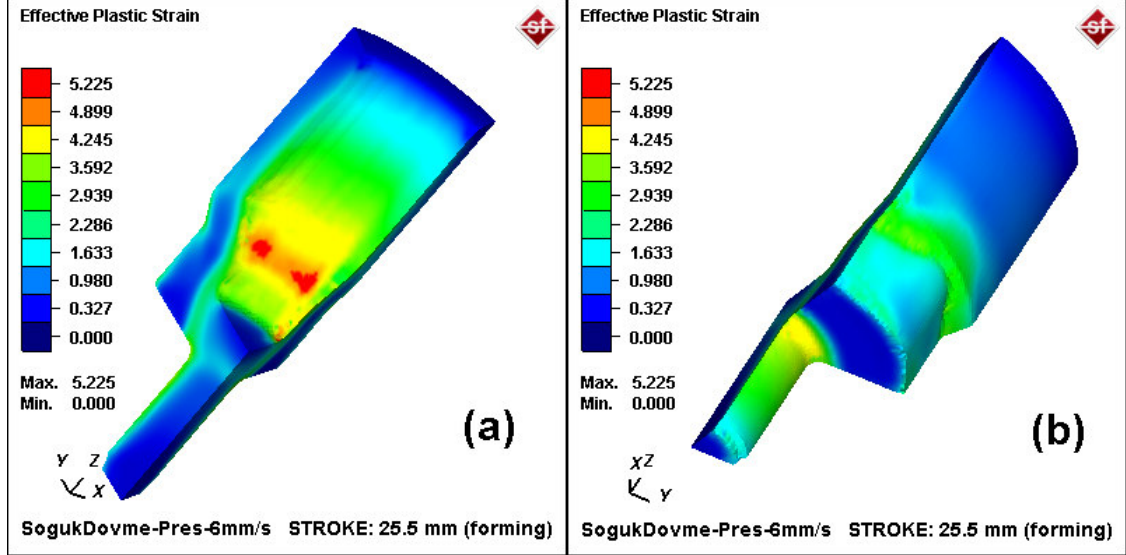
4.2. Pres Hızı Değişim Simülasyonları ve Temel Simülasyonla Karşılaştırılması

4.2.1. Pres Hızının 6 mm/s Seçildiği Simülasyon

Pres hızının 6 mm/s seçildiği simülasyonda, pres hızı dışındaki girdi değerleri temel simülasyon ile aynıdır. 5 mm/s'den daha yüksek bir değer görmek amacıyla, pres hızı 6 mm/s olarak seçilmiştir. Pres hızının 6 mm/s seçildiği simülasyona ait strain, gerilme, sıcaklık, malzeme akışı ve simülasyonda parçalar üzerinde etkili olan basma kuvvetleri aşağıdaki şekillerde verilmiştir.

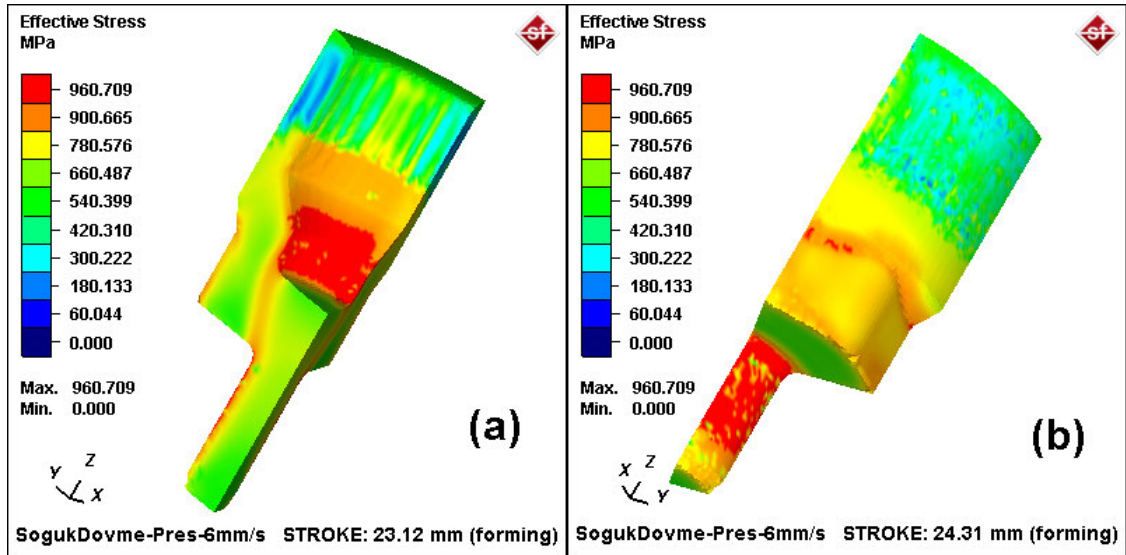
Şekil 4.8 (a)'da, zimbanın parçanın iç kısmında yaptığı deformasyon sonucunda, parçanın strain değerlerinin en yüksek olduğu alan (5,225-4,899 arası) görülmektedir. Ayrıca, kesmeye maruz kalan yerleri birleştiren bir hat boyunca ortaya çıkmış, 3,592 -1,663 arası olan strain değerleri de görülmektedir. Şekil 4.8 (b)'de, basma işlemi sonunda kuyruk kısmının başlangıç kıvrımının olduğu yerde kesmeden dolayı strainin yüksek olduğu (4,245-3,592

değerleri civarında) alan görülmektedir. Ayrıca, anahtar ağız şeklinin oluştuğu yerde de strainin yaklaşık 3,592 ile yüzeyin geri kalanından daha yüksek değerde olduğu görülmektedir.



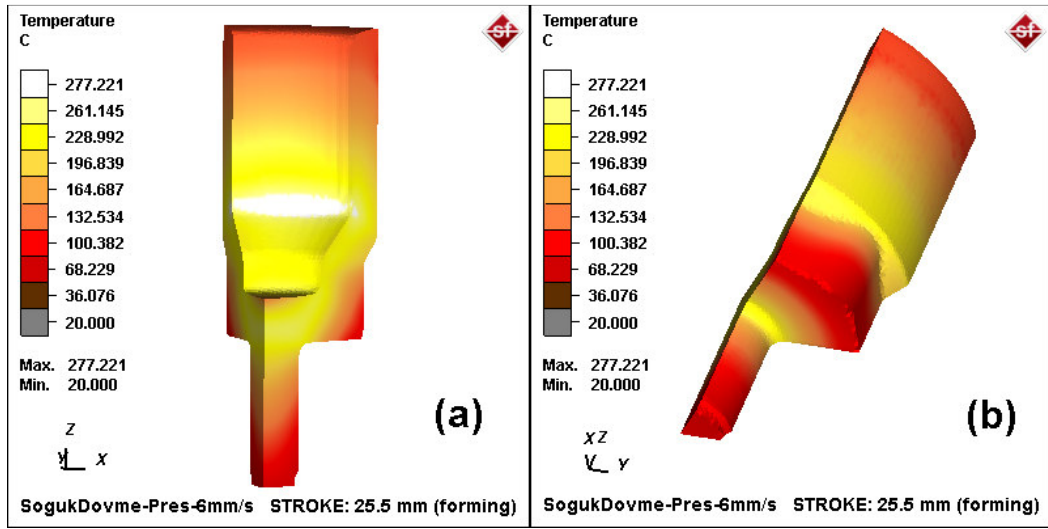
Şekil 4.8. Pres hızı 6 mm/s seçilen simülasyonda basma işleminin sonundaki strain değerleri.

(a) İş parçasının kesitindeki ve iç yüzeyindeki değerler. (b) İş parçasının dış yüzeyindeki değerler.



Şekil 4.9. Pres hızı 6 mm/s seçilen simülasyonda basma işlemindeki gerilme değerleri. (a) İş parçasının kesitindeki ve iç yüzeyindeki değerler. (b) İş parçasının dış yüzeyindeki değerler.

Şekil 4.9 (a)'da, zımbanın parçaya uyguladığı basma kuvveti nedeniyle oluşan deformasyonun temas yüzeylerinde oluşturduğu yüksek gerilme görülmektedir. Bu alan, 960,709 MPa ile parça üzerindeki en yüksek gerilmeye sahip yüzeylerden birisidir. Ayrıca kesmeye maruz kalan yerleri birleştiren bir hat boyunca da gerilmenin yüksek olduğu (900,665-780,576 MPa) görülmektedir. Şekil 4.9 (b)'de, iş parçasının kuyruk kısmının yüzeyinde çok yüksek gerilme değerleri (960,709-900,665 MPa arası) görülmektedir. Bunun nedeni, kuyruk kısmında deplasman hızının yüksek olması ve kuyruk oluşurken kesmenin olmasıdır. Ayrıca, anahtar ağız şeklinin oluştuğu yüzeyde de çok yüksek gerilme değerleri görülmektedir (960,709-780,576 MPa arası).

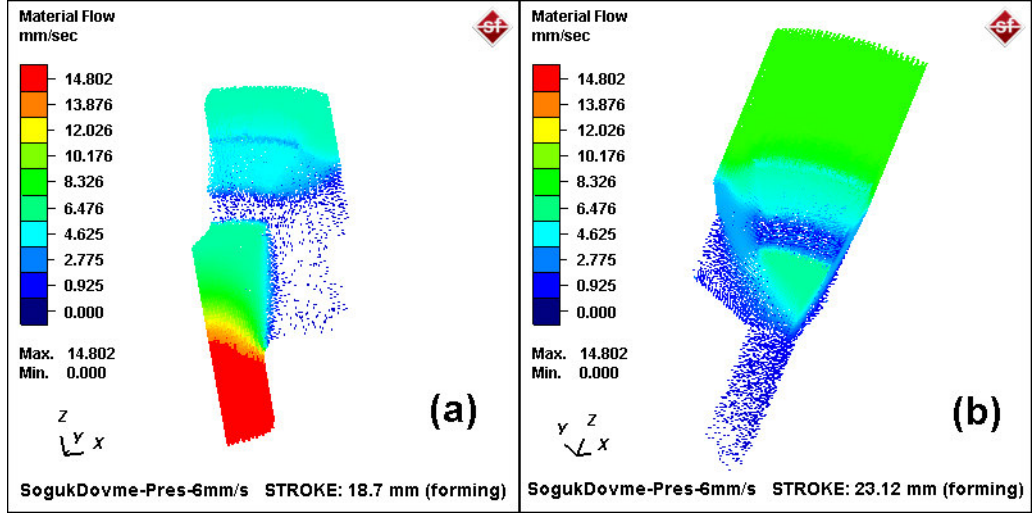


Şekil 4.10. Pres hızı 6 mm/s seçilen simülasyonda basma işleminin sonundaki sıcaklık değerleri. (a) İş parçasının kesitindeki ve iç yüzeyindeki değerler. (b) İş parçasının dış yüzeyindeki değerler.

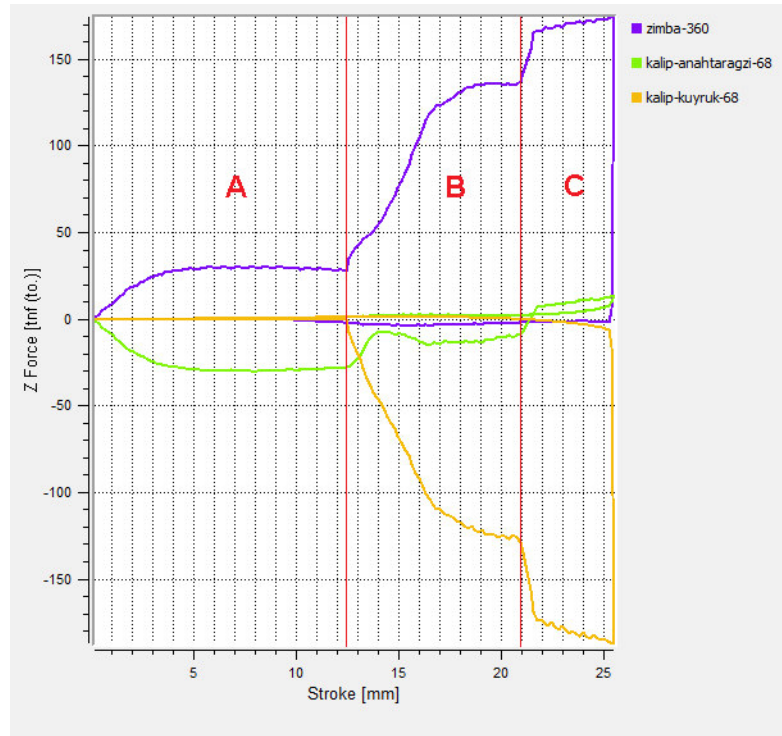
Şekil 4.10 (a)'da, zımbanın iş parçasında basma yaptığı yerlerde yüksek sıcaklıklar (261,145-228,992 °C arası) görülmektedir. Ayrıca basmadan dolayı kalıp içinde sıkışan parçanın yukarıya, kalıp dışına doğru uzaması ve zımbanın aşağıya doğru basma hareketiyle iki yöne doğru gerilen alanda iş parçası üzerindeki en sıcak alan (277,221 °C) görülmektedir. Şekil 4.10 (b)'de, kuyruk kısmının başlangıç kıvrımının olduğu yerde kesmenin olması nedeniyle ve anahtar ağızının şekillendiği kısımda şekil değiştirmenin fazla olması nedeniyle, yüksek sıcaklıklar (261,145-228,992 °C arası) görülmektedir.

Şekil 4.11 (a)'da, şekil verme işlemi sırasında zımbanın bastığı yüzey 10,176-6,47 mm/s arası değişen akış hızlarına sahiptir. Ayrıca, kuyruk kesitinin parçanın genel kesitinden daha küçük olması nedeniyle, kuyruk kesitinde parça akış hızının çok yüksek olduğu (14,802

mm/s) görülmektedir. Şekil 4.11 (b)'de, kuyruk kısmı oluşumu bittikten sonra, zımbanın basmaya devam etmesi sonucu kalıpla zimba arasında sıkışan malzemenin yukarıya, kalıbın dışına doğru 10,176 mm/s ile hızlıca hareket ettiği de görülmektedir.



Şekil 4.11. Pres hızı 6 mm/s seçilen simülasyonda basma işlemindeki malzeme akış hızları. (a) İş parçasının kuyruk kısmındaki ve basma yapılan yüzeyindeki hızlar. (b) İş parçasında kuyruk oluşumu bittikten sonraki hızlar.

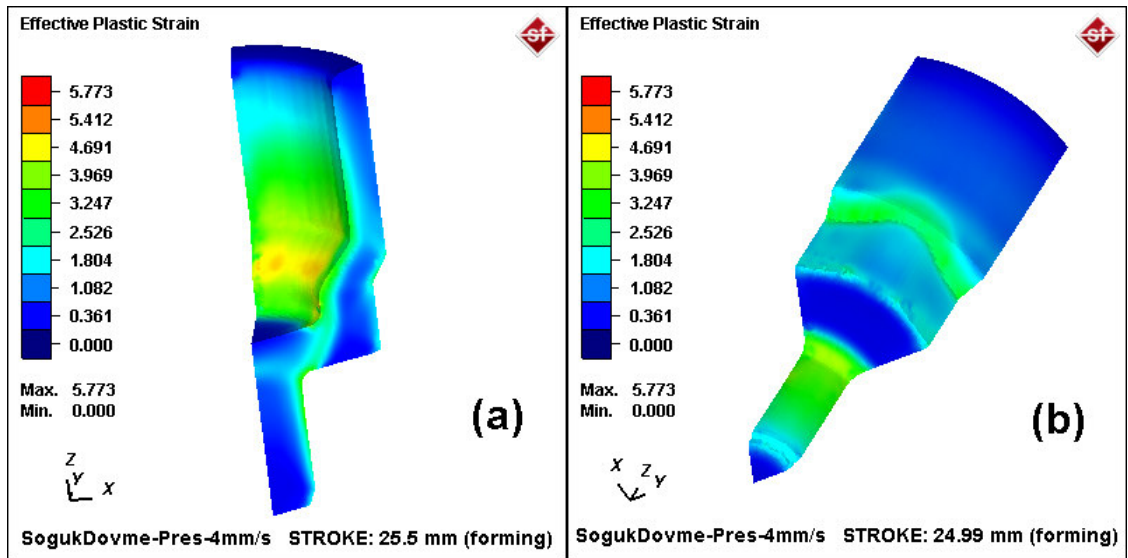


Şekil 4.12. Pres hızı 6 mm/s seçilen simülasyonun basma kuvveti grafiği.

Şekil 4.12'de pres hızının 6 mm/s seçildiği simülasyondaki zımbanın yaptığı basma kuvveti ve kalıplara etkiyen kuvvetler görülmektedir. Bu kuvvetler aynı zamanda iş parçasına da etkimektedir. Şekil 4.12'deki A bölgesinde, iş parçasının anahtar ağız kısmı oluşturulmaktadır. Bu bölgede zımba en fazla 30,5 ton kuvvet uygulamaktadır ve bu kuvvetin tamamı kalıplardan sadece anahtar ağız kalıbına etkimektedir. Şekil 4.12'deki B bölgesinde, iş parçasında kuyruk kısmının da oluşumu vardır. Zımbanın yaptığı basma kuvveti tüm kalıpları etkilemektedir. Ancak anahtar ağız kalıbına etkiyen kuvvet azalırken, kuyruk kalıbına etkileyen kuvvet giderek artmaktadır. Bu bölgede zımba en fazla 136 ton kuvvet uygulamakta ancak bunun 126 tonu kuyruk kalıbına etkinken, 10 tonu anahtar ağız kalıbına etkimektedir. Şekil 4.12'deki C bölgesinde, iş parçasının kuyruk oluşumu bitmiştir ve kalıp içinde zımba ile kalıp arasında sıkışan malzeme yukarıya, kalıp dışına doğru hareket etmektedir. Bu bölgede zımba en fazla 174,196 ton kuvvet uygulamaktadır. C bölgesinin sonunda, simülasyonda zımbanın geriye çekilmesi başlamakta ve bu nedenle basma kuvvetlerinin ani şekilde azaldığı görülmektedir.

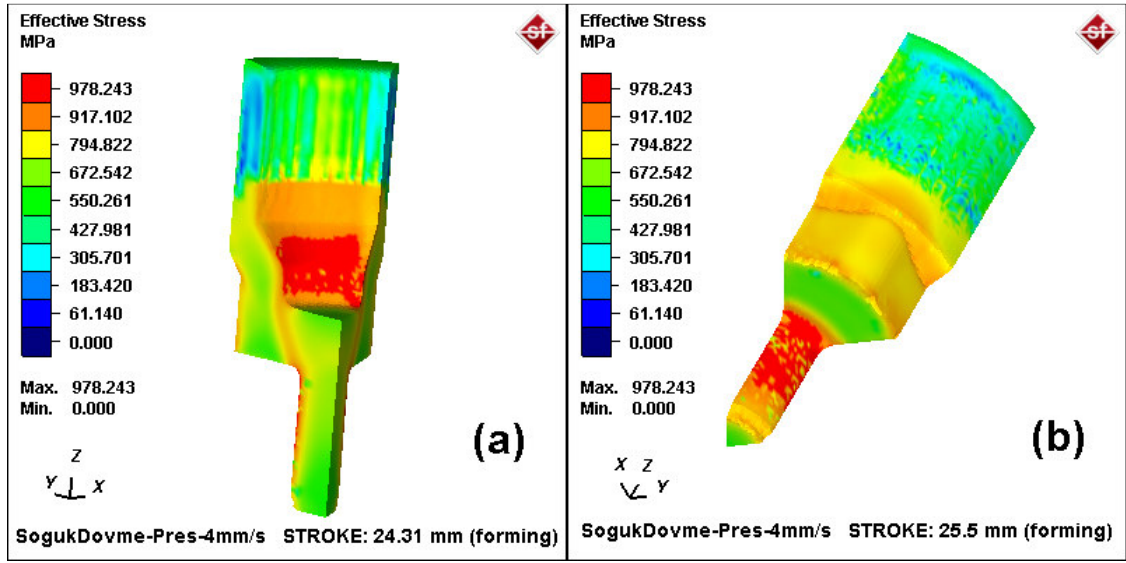
4.2.2. Pres Hızının 4 mm/s Seçildiği Simülasyon

Pres hızının 4 mm/s seçildiği simülasyonda, pres hızı dışındaki girdi değerleri temel simülasyon ile aynıdır. 5 mm/s'den daha düşük bir değer sonuçlarını görmek amacıyla, pres hızı 4 mm/s olarak seçilmiştir. Pres hızının 4 mm/s seçildiği simülasyona ait strain, gerilme, sıcaklık, malzeme akışı ve simülasyonda parçalar üzerinde etkili olan basma kuvvetleri aşağıdaki şekillerde verilmiştir.



Şekil 4.13. Pres hızı 4 mm/s seçilen simülasyonda basma işlemindeki strain değerleri. (a) İř parçasının kesitindeki ve i yüzeyindeki değerler. (b) İř parçasının dış yüzeyindeki değerler.

Şekil 4.13 (a)'da, zımbanın parçanın iç kısmında yaptığı deformasyon sonucunda, parçanın strain değerlerinin en yüksek olduğu alan (5,412-4,691 arası) görülmektedir. Ayrıca, kesmeye maruz kalan yerleri birleştiren bir hat boyunca ortaya çıkmış, 3,247-1,804 arası olan strain değerleri de görülmektedir. Noktasal bir alanda görülen 5,773 strain değerinin ise mesh hatasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Şekil 4.13 (b)'de, basma işlemi sonunda kuyruk kısmının başlangıç kıvrımının olduğu yerde kesmeden dolayı daha fazla strainin olduğu (3,969-3,247 değerleri civarında) alan görülmektedir. Ayrıca, anahtar ağız şeklinin olduğu yerde de strainin yaklaşık 3,969 ile yüzeyin geri kalanından daha yüksek değerde olduğu görülmektedir.

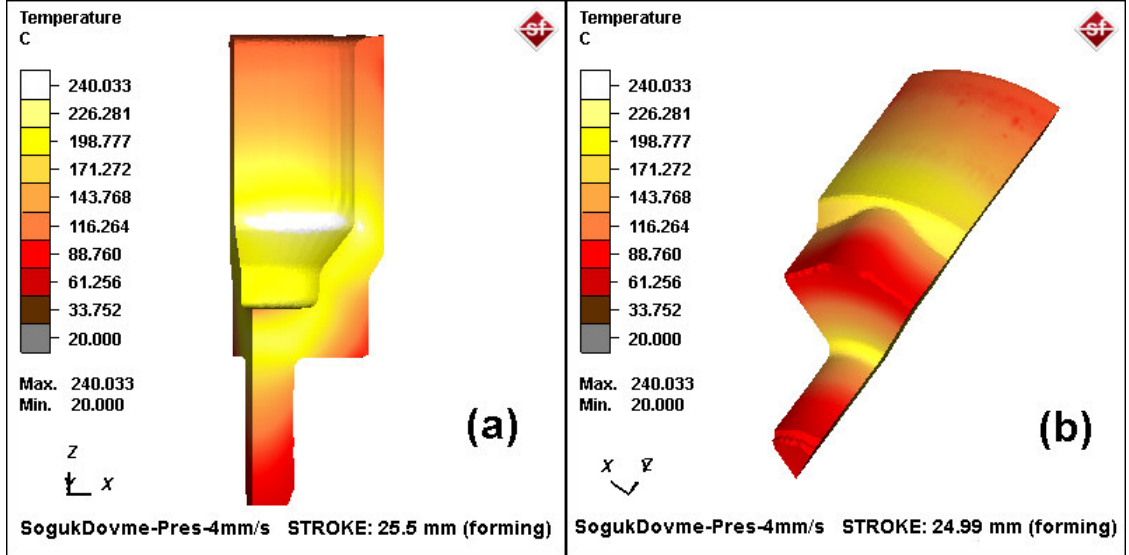


Şekil 4.14. Pres hızı 4 mm/s seçilen simülasyonda basma işlemindeki gerilme değerleri. (a) İş parçasının kesitindeki ve iç yüzeyindeki değerler. (b) İş parçasının dış yüzeyindeki değerler.

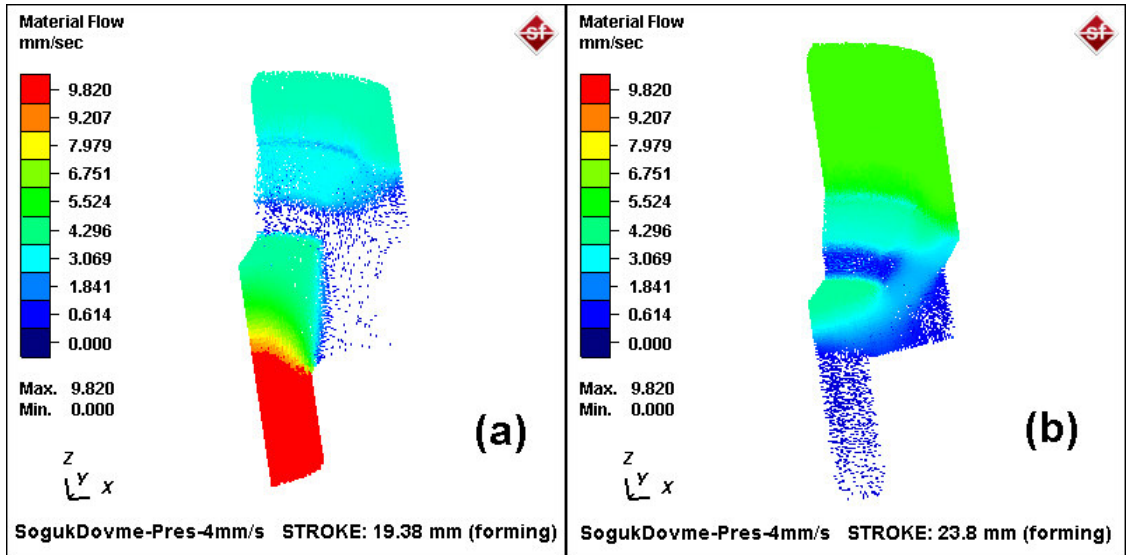
Şekil 4.14 (a)'da, zımbanın parçaya uyguladığı basma kuvveti nedeniyle oluşan deformasyonun temas yüzeylerinde oluşturduğu yüksek gerilme görülmektedir. Bu alan, 978,243 MPa ile parça üzerindeki en yüksek gerilmeye sahip yüzeylerden birisidir. Ayrıca kesmeye maruz kalan yerleri birleştiren bir hat boyunca da gerilmenin yüksek olduğu (917,102-794,822 MPa) görülmektedir. Şekil 4.14 (b)'de, iş parçasının kuyruk kısmının yüzeyinde çok yüksek gerilme değerleri (978,243-917,102 MPa arası) görülmektedir. Bunun nedeni, kuyruk kısmında deplasman hızının yüksek olması ve kuyruk oluşurken kesmenin olmasıdır. Ayrıca, anahtar ağız şeklinin olduğu yüzeyde de gerilme değerleri yüzeyin geri kalanından yüksektir (917,102-794,822 MPa arası).

Şekil 4.15 (a)'da, zımbanın iş parçasında basma yaptığı yerlerde yüksek sıcaklıklar (226,281-198,777 °C arası) görülmektedir. Ayrıca basmadan dolayı kalıp içinde sıkışan

parçanın yukarıya, kalıp dışına doğru uzaması ve zımbanın aşağıya doğru basma hareketiyle iki yöne doğru gerilen alanda iş parçası üzerindeki en sıcak alan (240,033 °C) görülmektedir. Şekil 4.15 (b)'de, kuyruk kısmının başlangıç kıvrımının olduğu yerde kesmenin olması nedeniyle ve anahtar ağzının şekillendiği kısımda şekil değiştirmenin fazla olması nedeniyle, yüksek sıcaklıklar (226,281-198,777 °C arası) görülmektedir.

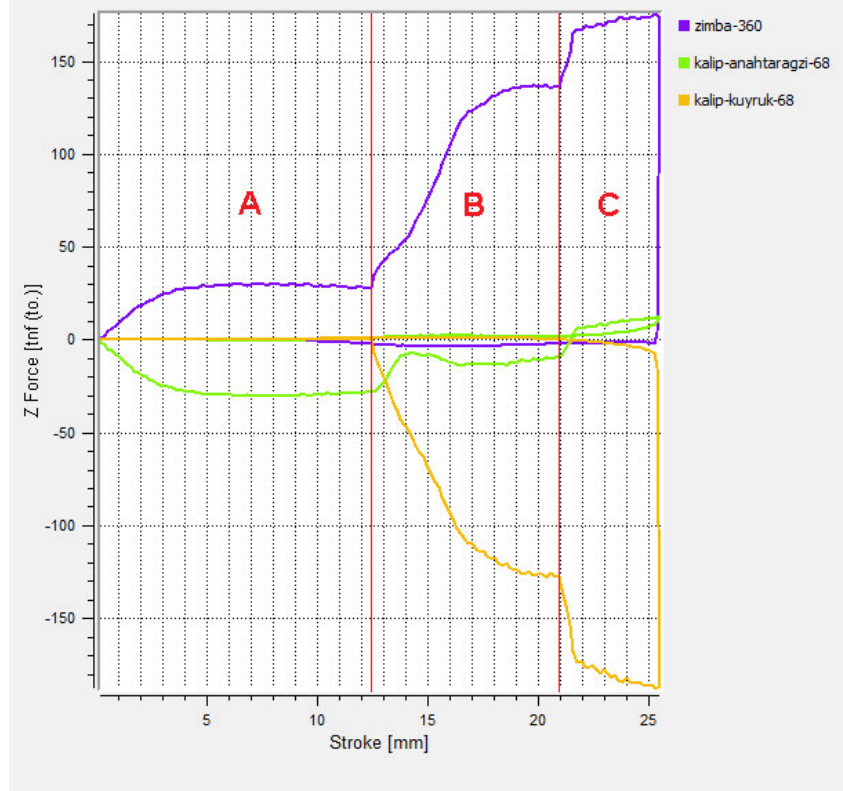


Şekil 4.15. Pres hızı 4 mm/s seçilen simülasyonda basma işlemindeki sıcaklık değerleri. (a) İş parçasının kesitindeki ve iç yüzeyindeki değerler. (b) İş parçasının dış yüzeyindeki değerler.



Şekil 4.16. Pres hızı 4 mm/s seçilen simülasyonda basma işlemindeki malzeme akış hızları. (a) İş parçasının kuyruk kısmındaki ve basma yapılan yüzeyindeki hızlar. (b) İş parçasında kuyruk oluşumu bittikten sonraki hızlar.

Şekil 4.16 (a)'da, şekil verme işlemi sırasında zımbanın bastığı yüzey 6,751-4,296 mm/s arası değişen akış hızlarına sahiptir. Ayrıca, kuyruk kesitinin parçanın genel kesitinden daha küçük olması nedeniyle, kuyruk kesitinde parça akış hızının çok yüksek olduğu (9,820 mm/s) görülmektedir. Şekil 4.16 (b)'de, kuyruk kısmı oluşumu bittikten sonra, zımbanın basmaya devam etmesi sonucu kalıpla zımba arasında sıkışan malzemenin yukarıya, kalıbın dışına doğru 6,751 mm/s ile hızlıca hareket ettiği de görülmektedir.



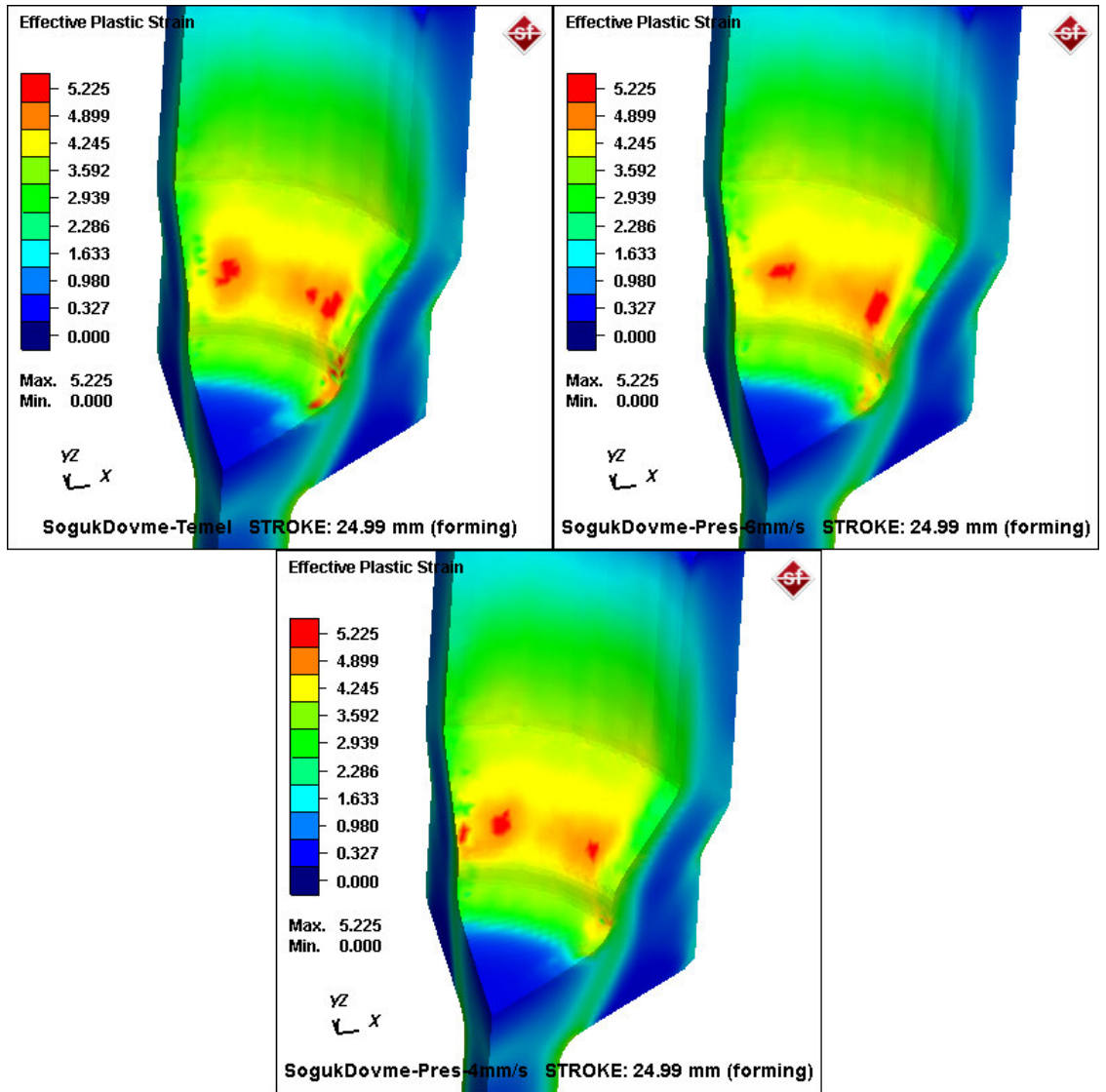
Şekil 4.17. Pres hızı 4 mm/s seçilen simülasyonun basma kuvveti grafiği.

Şekil 4.17'de pres hızının 4 mm/s seçildiği simülasyondaki zımbanın yaptığı basma kuvveti ve kalıplara etkileyen kuvvetler görülmektedir. Bu kuvvetler aynı zamanda iş parçasına da etkimektedir. Şekil 4.17'deki A bölgesinde, iş parçasının anahtar ağzı kısmı oluşturulmaktadır. Bu bölgede zimba en fazla 31 ton kuvvet uygulamaktadır ve bu kuvvetin tamamı kalıplardan sadece anahtar ağzı kalıbına etkimektedir. Şekil 4.17'deki B bölgesinde, iş parçasında kuyruk kısmının da oluşumu vardır. Zımbanın yaptığı basma kuvveti tüm kalıpları etkilemektedir. Ancak anahtar ağzı kalıbına etkileyen kuvvet azalırken, kuyruk kalıbına etkileyen kuvvet giderek artmaktadır. Bu bölgede zimba en fazla 138 ton kuvvet uygulamakta ancak bunun 126 tonu kuyruk kalıbına etkirken, 12 tonu anahtar ağzı kalıbına etkimektedir. Şekil 4.17'deki C bölgesinde, iş parçasının kuyruk oluşumu bitmiştir ve kalıp içinde zimba ile kalıp arasında

sıkışan malzeme yukarıya, kalıp dışına doğru hareket etmektedir. Bu bölgede zimba en fazla 175,670 ton kuvvet uygulamaktadır. C bölgesinin sonunda, simülasyonda zimbanın geriye çekilmesi başlamakta ve bu nedenle basma kuvvetlerinin ani şekilde azaldığı görülmektedir.

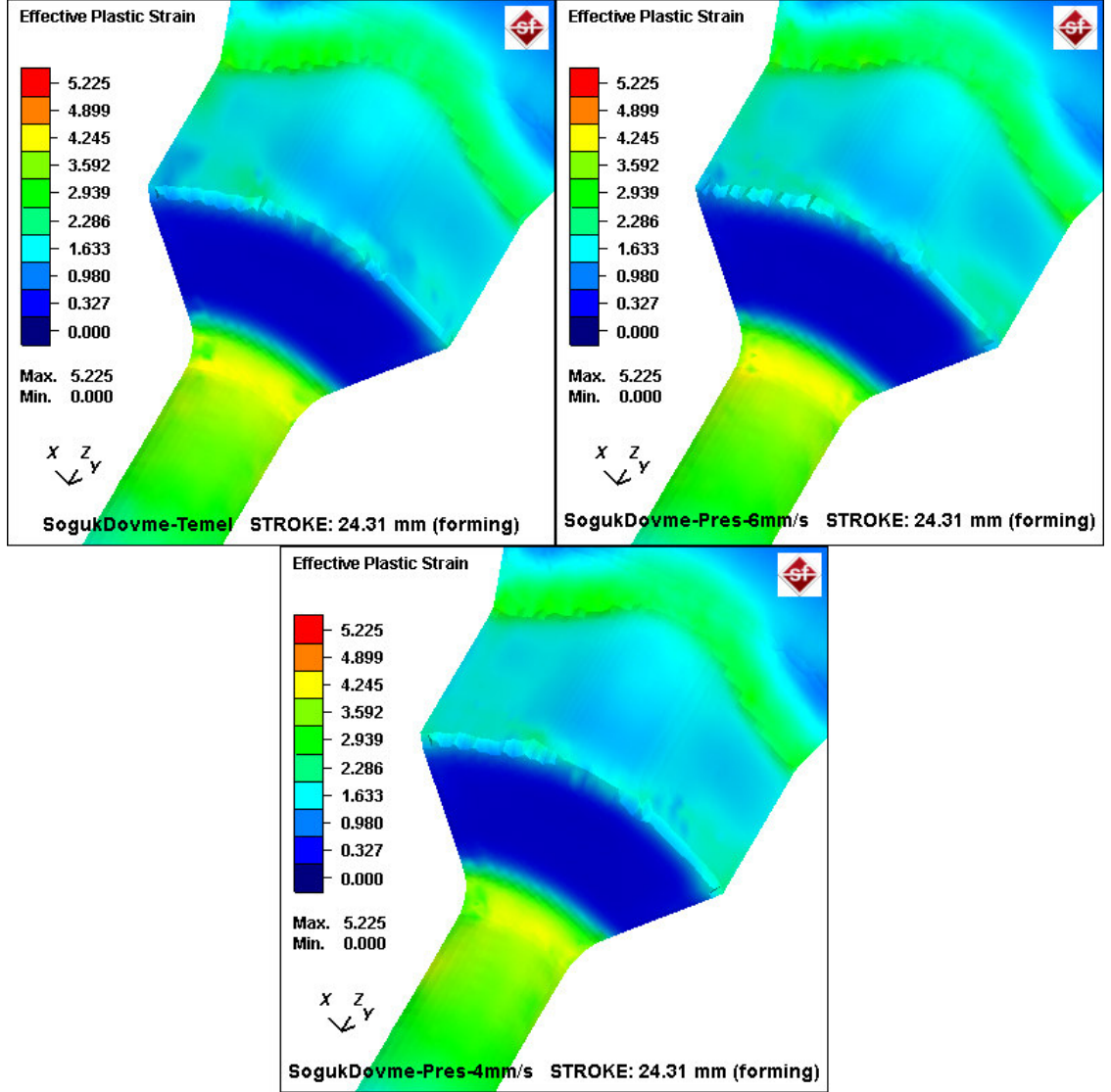
4.2.3. Pres Hızı Değişim Simülasyonlarının Sonuçlarının Temel Simülasyonun Sonuçları ile Karşılaştırılması

Bu bölümde pres hızı değişim simülasyonlarının sonuçları ile temel simülasyonun sonuçları karşılaştırılacaktır.



Şekil 4.18. Pres hızı değişim simülasyonlarının sonuçları ile temel simülasyonun sonucu arasında, zimbanın basma yaptığı yüzeydeki strain değerlerinin karşılaştırılması.

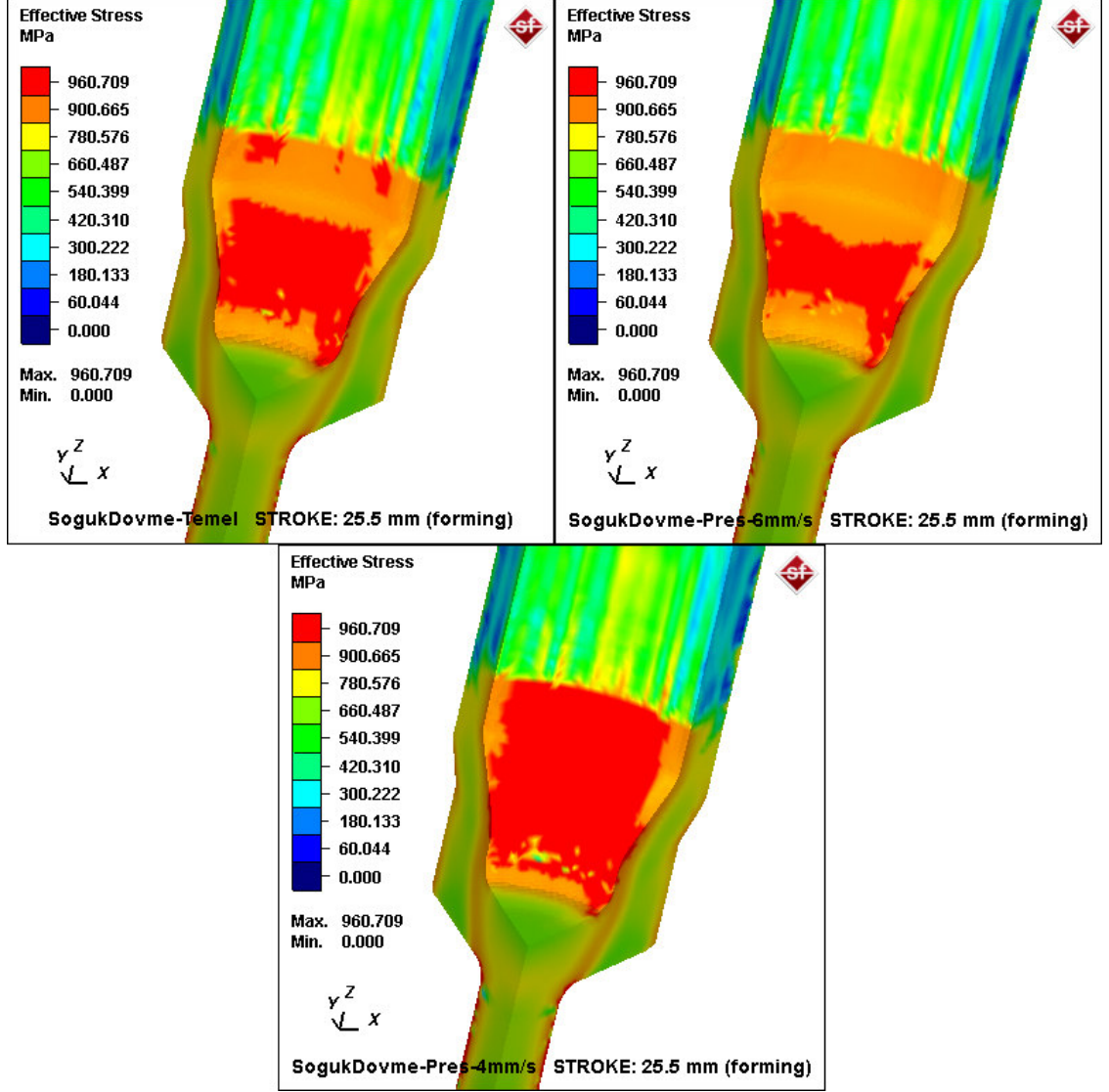
Şekil 4.18'de basma işleminin 24,99 mm'sinde, zımbanın basma yaptığı yüzeyin strain değerleri görülmektedir. Bu yüzey için karşılaştırılan simülasyon sonuçları arasında, pres hızının 5 mm/s olduğu simülasyonda (temel simülasyon) strainin yüksek olduğu alan en fazladır. Pres hızının 6 mm/s olduğu simülasyonda ise strainin yüksek olduğu alan, pres hızının 4 mm/s olduğu simülasyondan daha fazladır.



Şekil 4.19. Pres hızı değişim simülasyonlarının sonuçları ile temel simülasyonun sonucu arasında, kuyruk kısmı ve anahtar ağız kısmının strain değerlerinin karşılaştırılması.

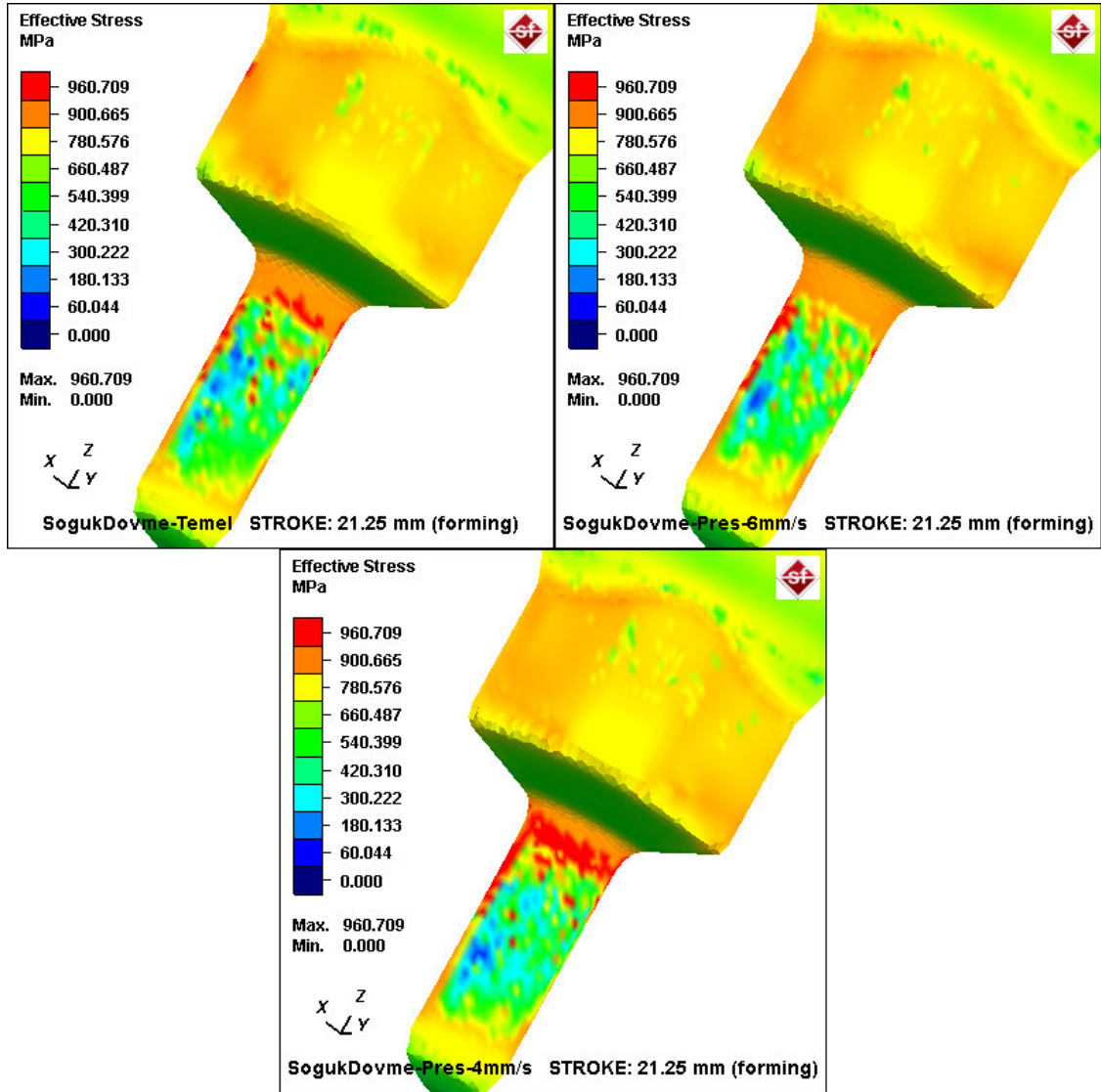
Şekil 4.19'da basma işleminin 24,31 mm'sinde, kuyruk kısmının başlangıç kıvrımının strain değerleri görülmektedir. Bu bölge için karşılaştırılan simülasyon sonuçlarına göre, pres

hızı azaldıkça simülasyondaki strainin yüksek olduğu alan da azalmaktadır. Ayrıca anahtar ağız kısmı için de, pres hızı azaldıkça strain değerlerinin azaldığı görülmektedir.



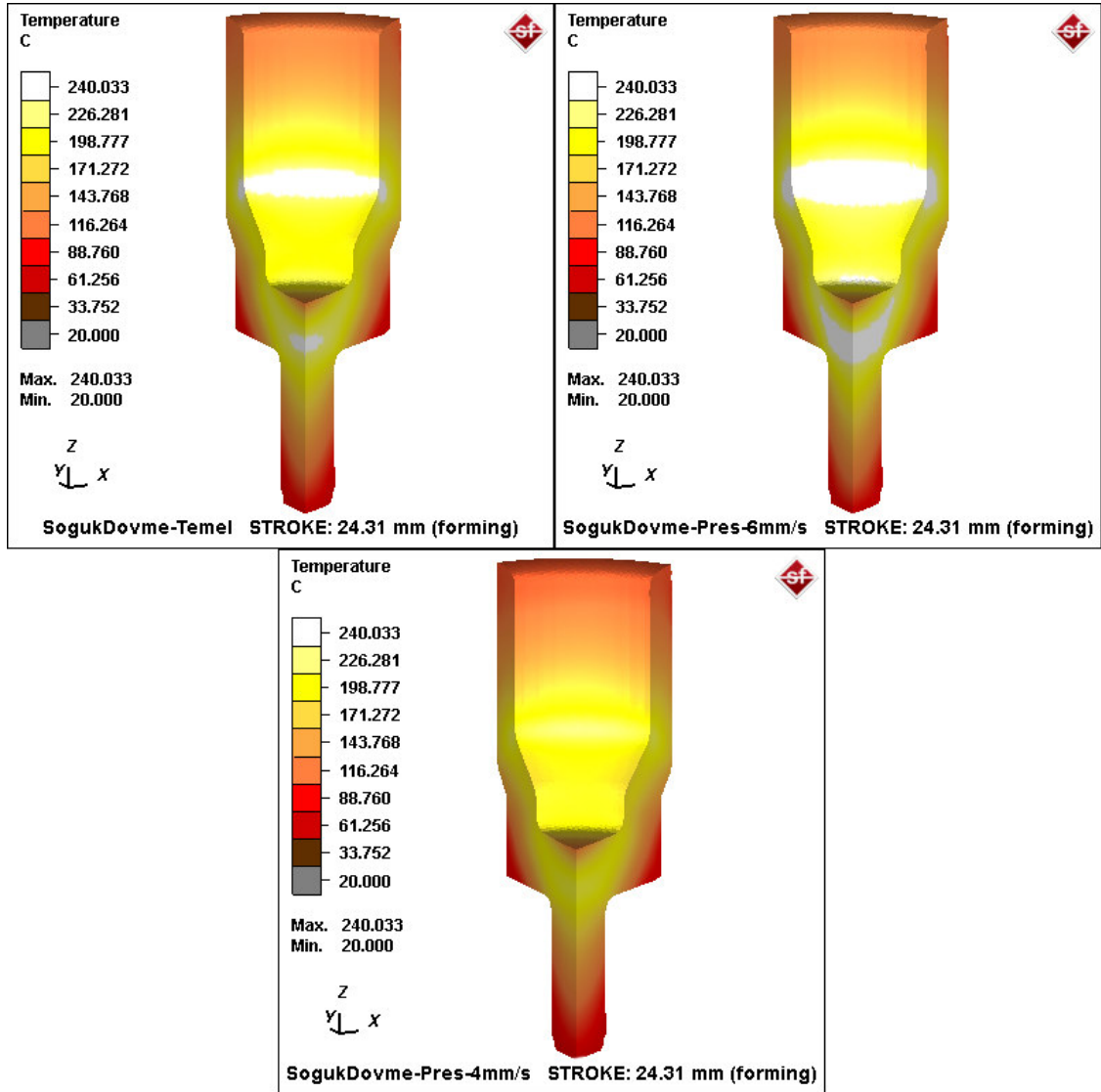
Şekil 4.20. Pres hızı değişim simülasyonlarının sonuçları ile temel simülasyonun sonucu arasında, zımbanın basma yaptığı yan yüzeydeki gerilme değerlerinin karşılaştırılması.

Şekil 4.20'de basma işleminin sonunda, zımbanın basma yaptığı yan yüzeyin gerilme değerleri görülmektedir. Bu yüzey için karşılaştırılan simülasyon sonuçlarına göre, pres hızı arttıkça simülasyonda maksimum gerilmenin olduğu alan azalmaktadır.



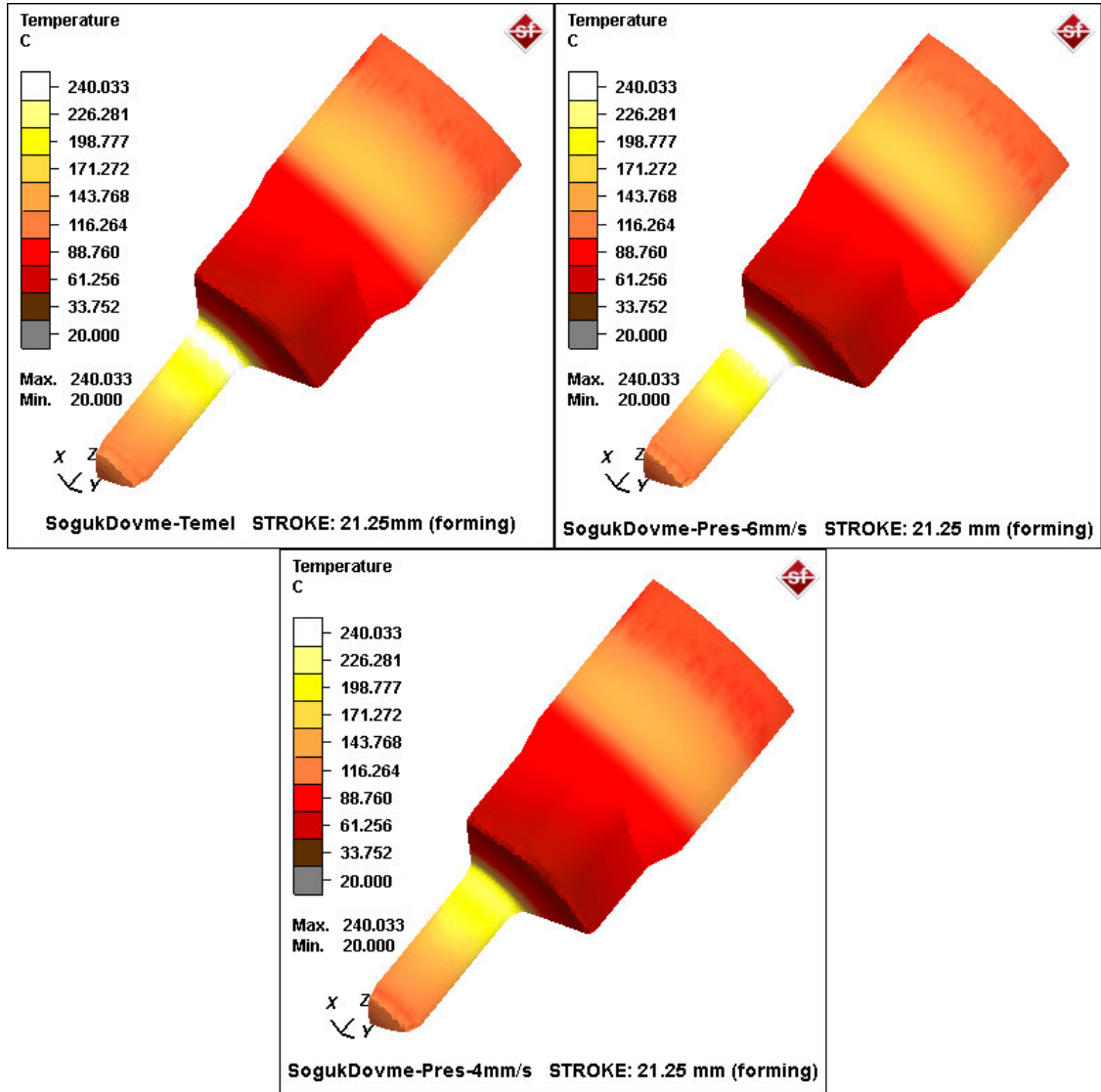
Şekil 4.21. Pres hızı değişim simülasyonlarının sonuçları ile temel simülasyonun sonucu arasında, kuyruk kısmı ve anahtar ağzı kısmı gerilme değerlerinin karşılaştırılması.

Şekil 4.21'de basma işleminin 21,25 mm'sinde, kuyruk kısmının ve anahtar ağzı kısmının gerilme değerleri görülmektedir. Simülasyon sonuçları kuyruk kısmı için karşılaştırıldığında, pres hızı arttıkça kuyruk kısmında oluşan maksimum gerilmenin olduğu alanın azaldığı görülmektedir. Ancak, anahtar ağzı kısmında pres hızı azaldıkça, gerilme değerlerinin azaldığı görülmektedir.



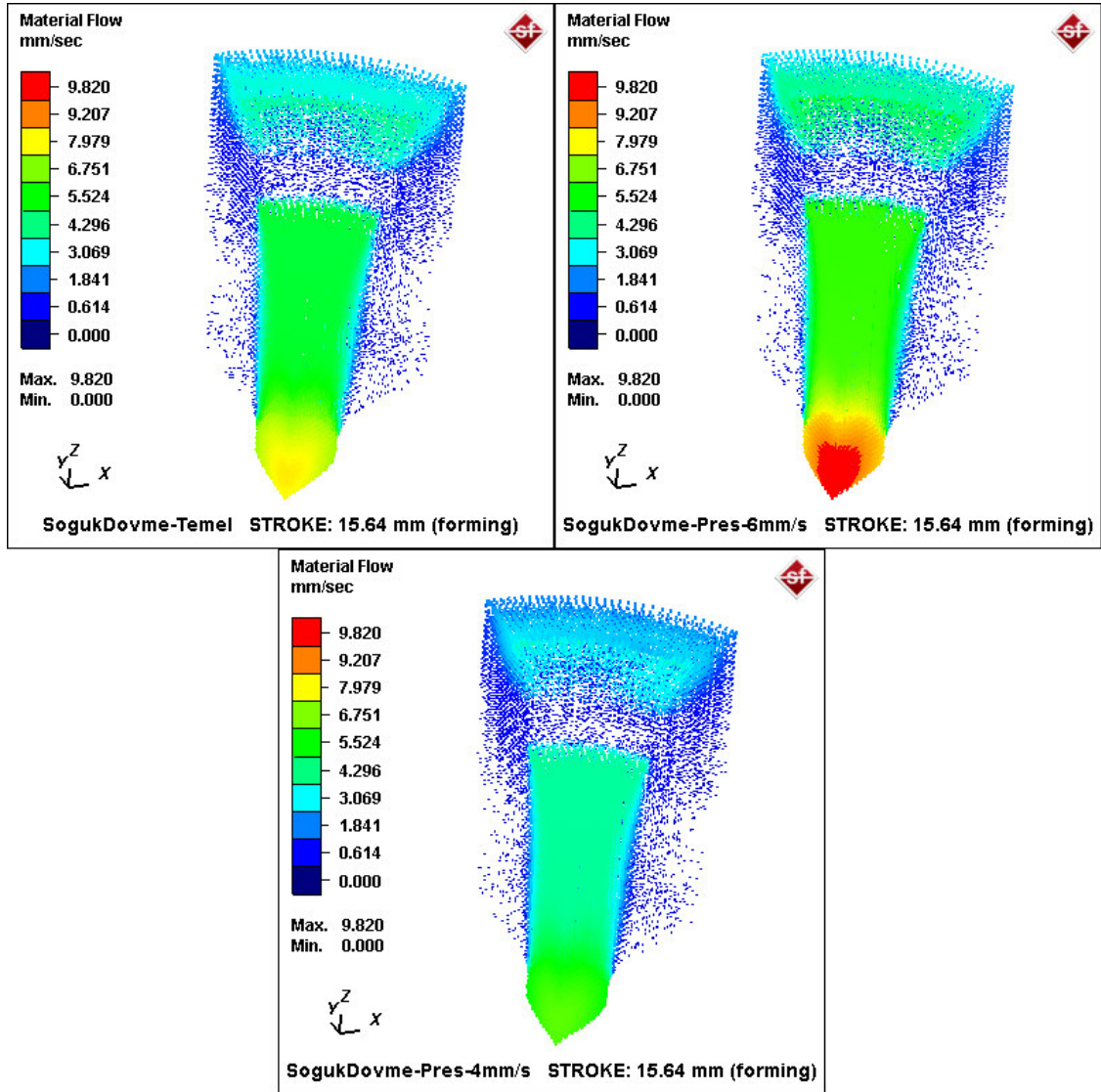
Şekil 4.22. Pres hızı değişim simülasyonlarının sonuçları ile temel simülasyonun sonucu arasında, zımbanın basma yaptığı kısmın sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması.

Şekil 4.22'de basma işleminin 24,31 mm'sinde, zımbanın basma yaptığı kısmın sıcaklık değerleri görülmektedir. Bu kısım için karşılaştırılan simülasyon sonuçlarına göre, pres hızı arttıkça, sıcaklığın daha hızlı arttığı ve daha fazla alana yayıldığı yani daha fazla ısı üretimi olduğu görülmektedir.



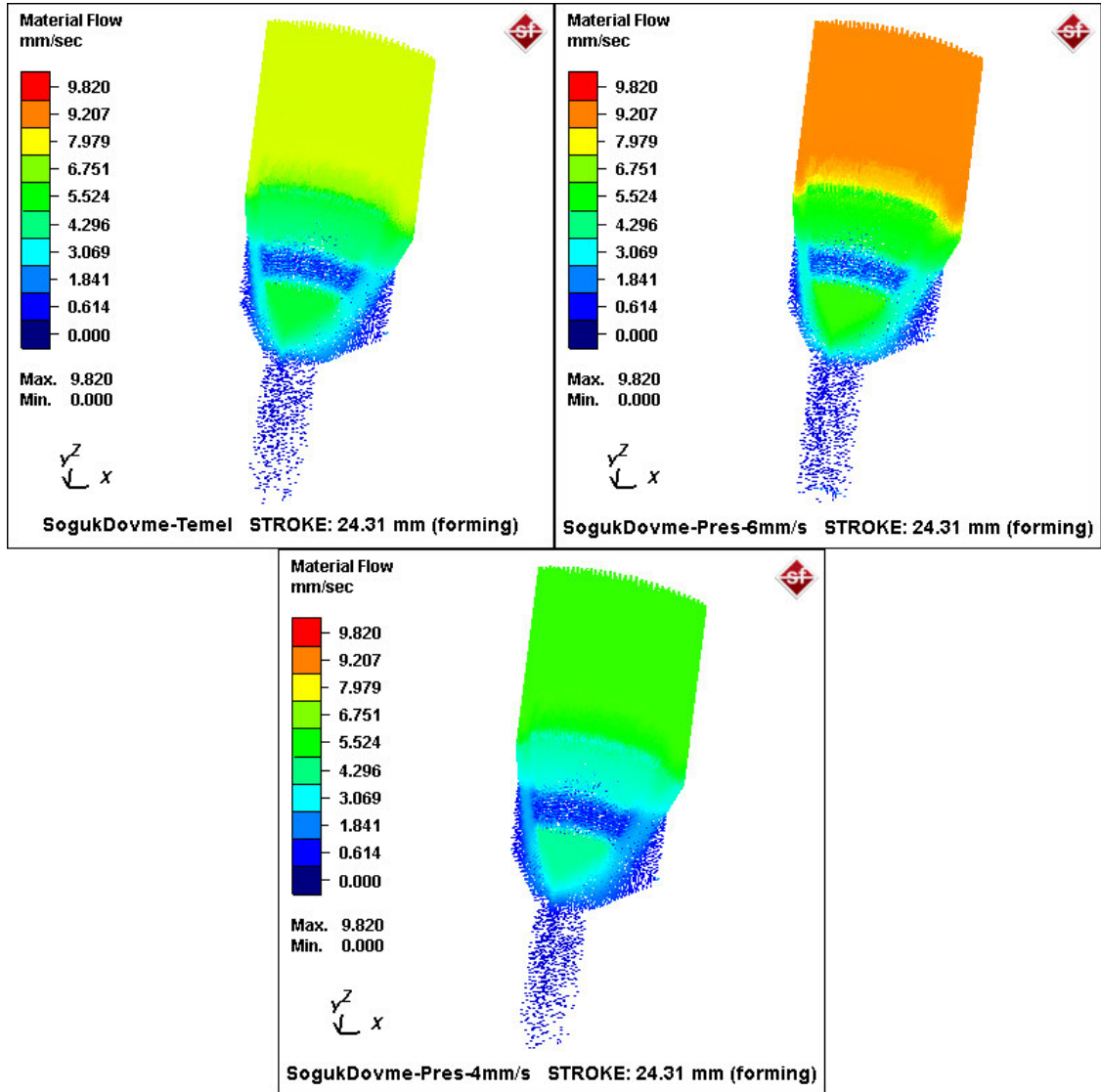
Şekil 4.23. Pres hızı değişim simülasyonlarının sonuçları ile temel simülasyonun sonucu arasında, kuyruk sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması.

Şekil 4.23'te basma işleminin 21,25 mm'sinde, kuyruk kısmındaki sıcaklık değerleri görülmektedir. Kuyruk kısmının başlangıç kıvrımı için karşılaştırılan simülasyon sonuçlarına göre, pres hızı arttıkça, sıcaklığın daha hızlı arttığı ve daha fazla alana yayıldığı yani daha fazla ısı üretimi olduğu görülmektedir.



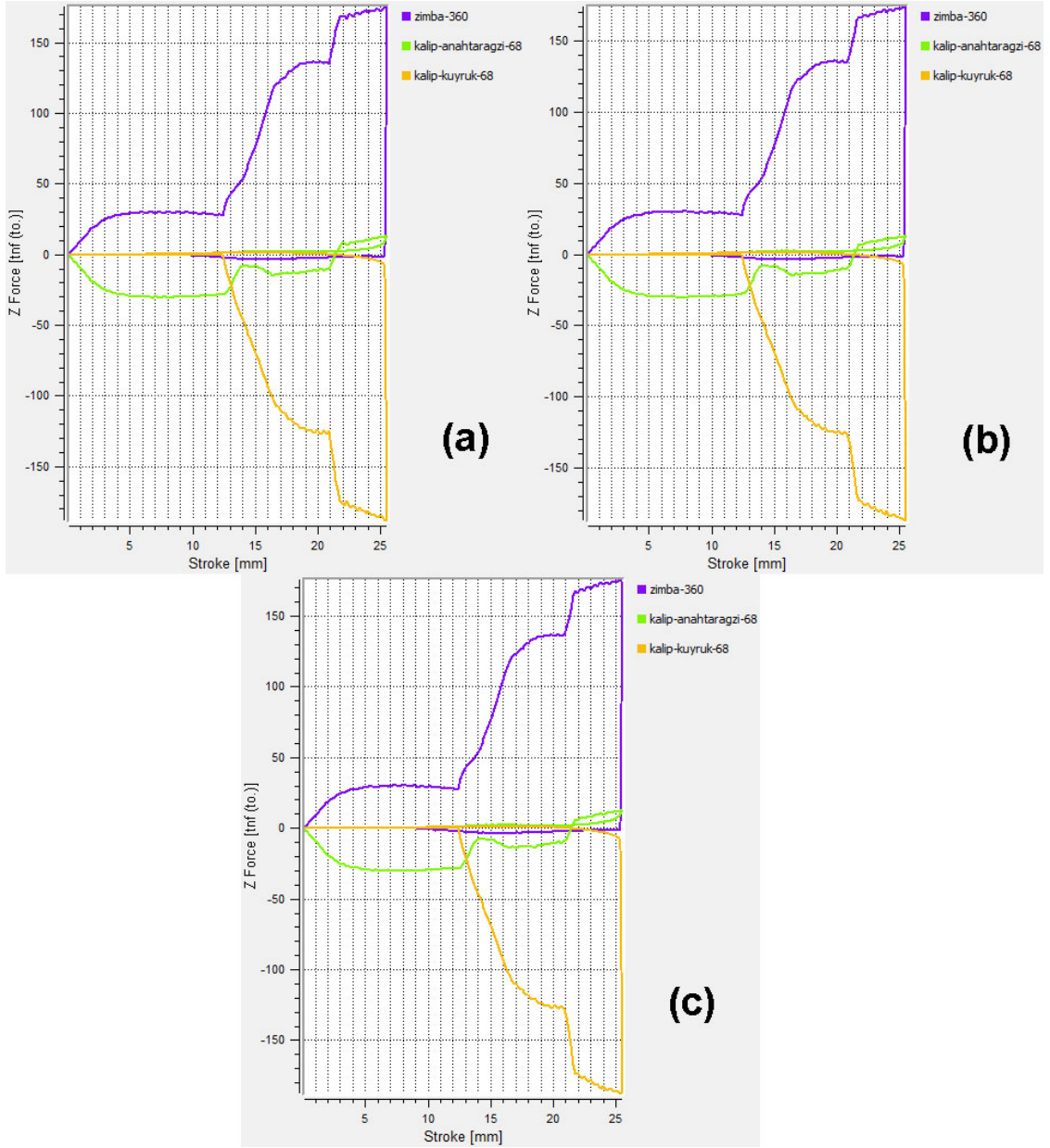
Şekil 4.24. Pres hızı değişim simülasyonlarının sonuçları ile temel simülasyonun sonucu arasında, basma işlemi sırasındaki malzeme akış hızlarının karşılaştırılması.

Şekil 4.24'te basma işleminin 15,64 mm'sinde, zımbanın basma yaptığı kısmın malzeme akış hızları görülmektedir. Bu kısım için karşılaştırılan simülasyon sonuçlarına göre, başlangıç pres hızlarının da farklı olması nedeniyle, pres hızı arttıkça, malzeme akış hızının arttığı görülmektedir.



Şekil 4.25. Pres hızı değişim simülasyonlarının sonuçları ile temel simülasyonun sonucu arasında, basma işlemi sırasında kuyruk oluşuktan sonraki malzeme akış hızlarının karşılaştırılması.

Şekil 4.25'te basma işleminin 24,31 mm'sinde, kuyruk kısmı oluşumu bittikten sonra, zımbanın basmaya devam etmesi sonucu kalıpla zımba arasında sıkışan malzemenin yukarıya, kalıbın dışına doğru yaptığı hareketteki malzeme hızları görülmektedir. Bu kısım için karşılaştırılan simülasyon sonuçlarına göre, başlangıç pres hızlarının da farklı olması nedeniyle, pres hızı arttıkça, malzeme akış hızının arttığı görülmektedir.



Şekil 4.26. Pres hızı değişim simülasyonlarının basma kuvvetleri grafikleri ile temel simülasyonun basma kuvvetleri grafiğinin karşılaştırılması: (a) Temel simülasyon, (b) Pres hızının 6 mm/s seçildiği simülasyon, (c) Pres hızının 4 mm/s seçildiği simülasyon.

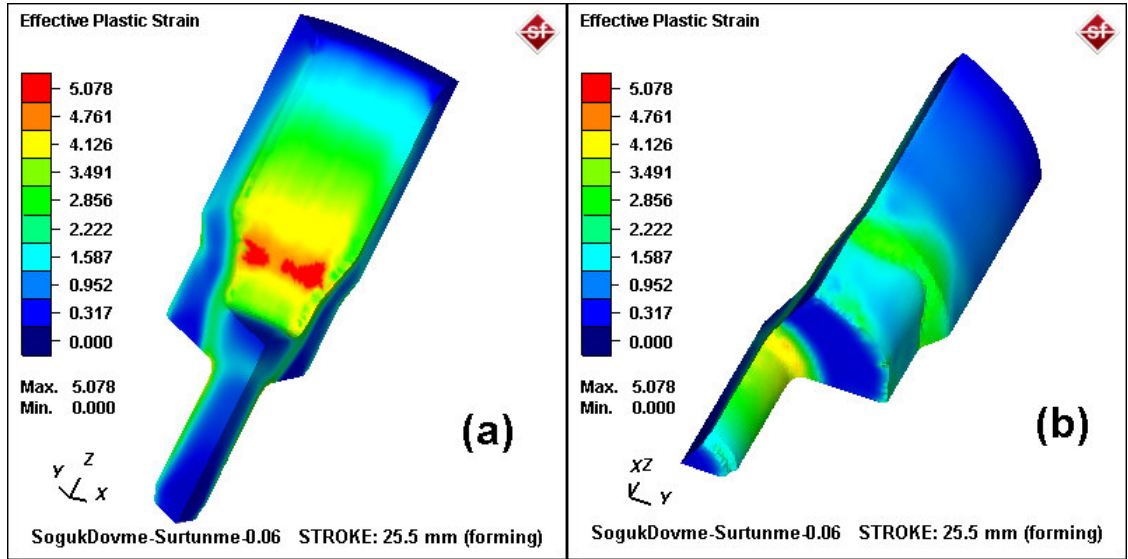
Şekil 4.26'da pres hızı değişim simülasyonlarının basma kuvvetlerinin grafikleri ile temel simülasyonun basma kuvvetlerinin grafiği karşılaştırılmıştır. Grafikler arasında çok az farklılıkların bulunduğu görülmektedir. Pres hızının 5 mm/s seçildiği simülasyonda (temel simülasyon) zimbanın uyguladığı maksimum basma kuvveti 175,289 ton kuvvet olurken, pres hızının 6 mm/s seçildiği simülasyonda zimbanın uyguladığı maksimum basma kuvveti 174,196

ton kuvvet, pres hızının 4 mm/s seçildiği simülasyonda ise zımbanın uyguladığı maksimum basma kuvveti 175,67 ton kuvvet olmaktadır.

4.3. Sürtünme Katsayısı Değişim Simülasyonları ve Temel Simülasyonla Karşılaştırılması

4.3.1. Sürtünme Katsayısının 0,06 Coulomb Seçildiği Simülasyon

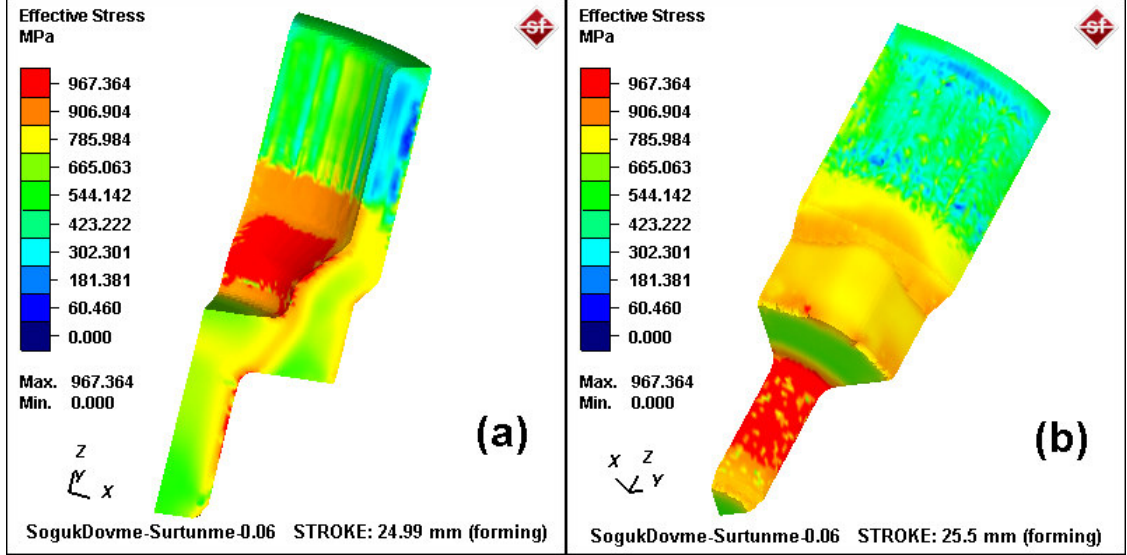
Sürtünme katsayısının 0,06 Coulomb seçildiği simülasyonda, sürtünme katsayısı dışındaki girdi değerleri temel simülasyon ile aynıdır. Temel simülasyonda kullanılan yağlayıcıdan daha iyi yağlayıcı kullanıldığı düşünülerek sürtünme katsayısı 0.06 Coulomb seçilmiştir. Sürtünme katsayısının 0,06 Coulomb seçildiği simülasyona ait strain, gerilme, sıcaklık, malzeme akışı ve simülasyonda parçalar üzerinde etkili olan basma kuvvetleri aşağıdaki şekillerde verilmiştir.



Şekil 4.27. Sürtünme katsayısı 0,06 Coulomb seçilen simülasyonda basma işleminin sonundaki strain değerleri. (a) İş parçasının kesitindeki ve iç yüzeyindeki değerler. (b) İş parçasının dış yüzeyindeki değerler.

Şekil 4.27 (a)'da, zımbanın parçanın iç kısmında yaptığı deformasyon sonucunda, parçanın strain değerlerinin en yüksek olduğu alan (5,078-4,761 arası) görülmektedir. Ayrıca, kesmeye maruz kalan yerleri birleştiren bir hat boyunca ortaya çıkmış, 3,491-1,587 arası olan strain değerleri de görülmektedir. Şekil 4.27 (b)'de, basma işlemi sonunda kuyruk kısmının başlangıç kıvrımının olduğu yerde kesmeden dolayı strainin yüksek olduğu (4,761-4,126

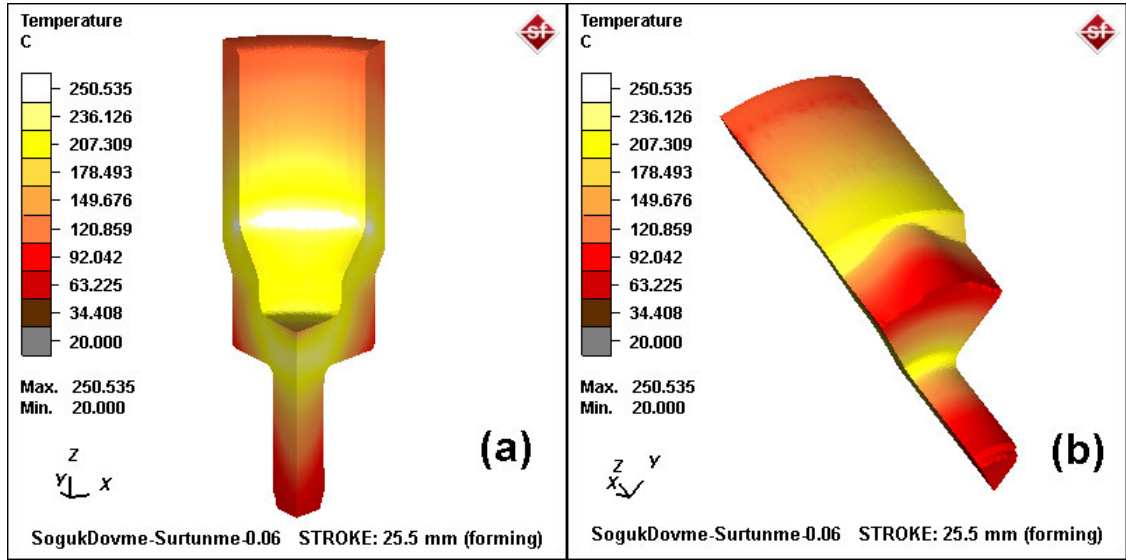
değerleri civarında) alan görülmektedir. Ayrıca, anahtar ağız şeklinin oluştuğu yerde de strainin yaklaşık 3,491 ile yüzeyin geri kalanından daha yüksek değerde olduğu görülmektedir.



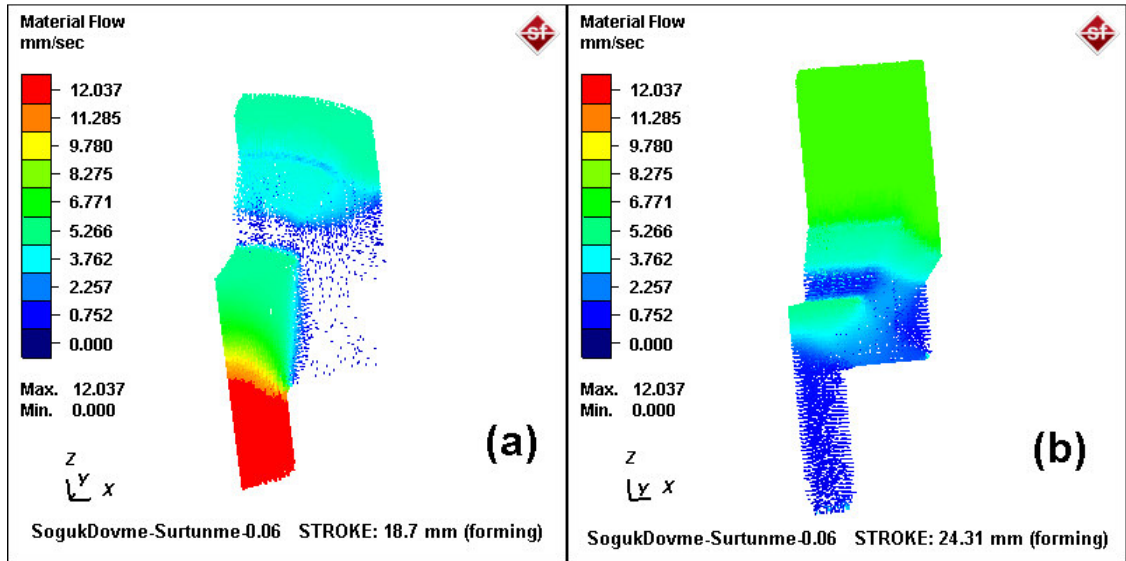
Şekil 4.28. Sürtünme katsayısı 0,06 Coulomb seçilen simülasyonda basma işlemindeki gerilme değerleri. (a) İş parçasının kesitindeki ve iç yüzeyindeki değerler. (b) İş parçasının dış yüzeyindeki değerler.

Şekil 4.28 (a)'da, zımbanın parçaya uyguladığı basma kuvveti nedeniyle oluşan deformasyonun temas yüzeylerinde oluşturduğu yüksek gerilme görülmektedir. Bu alan, 967,364 MPa ile parça üzerindeki en yüksek gerilmeye sahip yüzeylerden birisidir. Ayrıca kesmeye maruz kalan yerleri birleştiren bir hat boyunca da gerilmenin yüksek olduğu (906,904-785,984 MPa) görülmektedir. Şekil 4.28 (b)'de, iş parçasının kuyruk kısmının yüzeyinde çok yüksek gerilme değerleri (967,364-906,904 MPa arası) görülmektedir. Bunun nedeni, kuyruk kısmında deplasman hızının yüksek olması ve kuyruk oluşurken kesmenin olmasıdır. Ayrıca, anahtar ağız şeklinin oluştuğu yüzeyde de çok yüksek gerilme değerleri görülmektedir (967,364-785,984 MPa arası).

Şekil 4.29 (a)'da, zımbanın iş parçasında basma yaptığı yerlerde yüksek sıcaklıklar (236,126-207,309 °C arası) görülmektedir. Ayrıca basmadan dolayı kalıp içinde sıkışan parçanın yukarıya, kalıp dışına doğru uzaması ve zımbanın aşağıya doğru basma hareketiyle iki yöne doğru gerilen alanda iş parçası üzerindeki en sıcak alan (250,535 °C) görülmektedir. Şekil 4.29 (b)'de, kuyruk kısmının başlangıç kıvrımının olduğu yerde kesmenin olması nedeniyle ve anahtar ağızının şekillendiği kısımda şekil değiştirmenin fazla olması nedeniyle, yüksek sıcaklıklar (236,126-207,309 °C arası) görülmektedir.



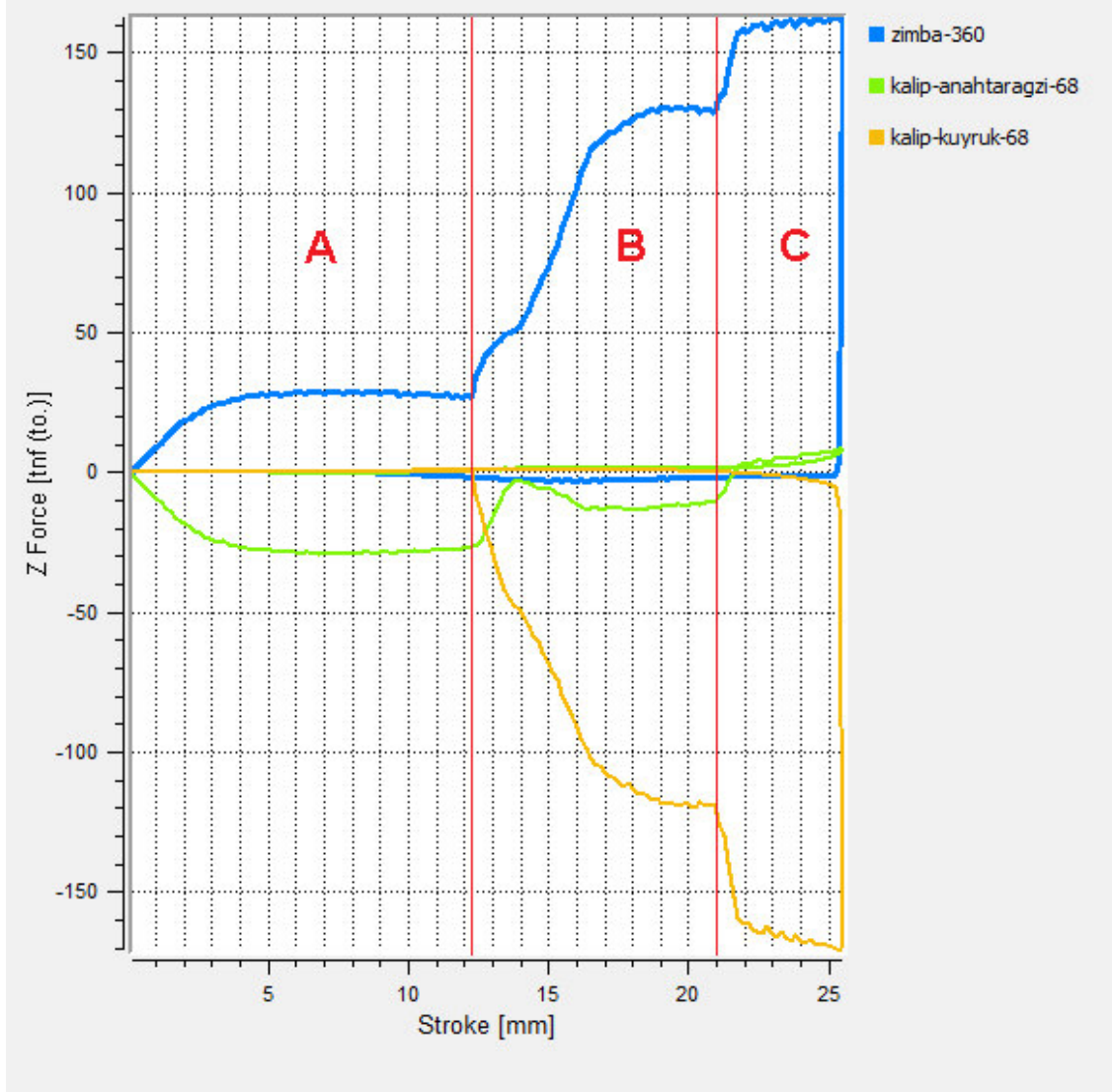
Şekil 4.29. Sürtünme katsayısı 0,06 Coulomb seçilen simülasyonda basma işleminin sonundaki sıcaklık değerleri. (a) İş parçasının kesitindeki ve iç yüzeyindeki değerler. (b) İş parçasının dış yüzeyindeki değerler.



Şekil 4.30. Sürtünme katsayısı 0,06 Coulomb seçilen simülasyonda basma işlemindeki malzeme akış hızları. (a) İş parçasının kuyruk kısmındaki ve basma yapılan yüzeyindeki hızlar. (b) İş parçasında kuyruk oluşumu bittikten sonraki hızlar.

Şekil 4.30 (a)'da, şekil verme işlemi sırasında zımbanın bastığı yüzey 8,275-5,266 mm/s arası değişen akış hızlarına sahiptir. Ayrıca, kuyruk kesitinin parçanın genel kesitinden daha küçük olması nedeniyle, kuyruk kesitinde parça akış hızının çok yüksek olduğu (12,037

mm/s) görülmektedir. Şekil 4.30 (b)'de, kuyruk kısmı oluşumu bittikten sonra, zımbanın basmaya devam etmesi sonucu kalıpla zimba arasında sıkışan malzemenin yukarıya, kalıbın dışına doğru 8,275 mm/s ile hızlıca hareket ettiği de görülmektedir.



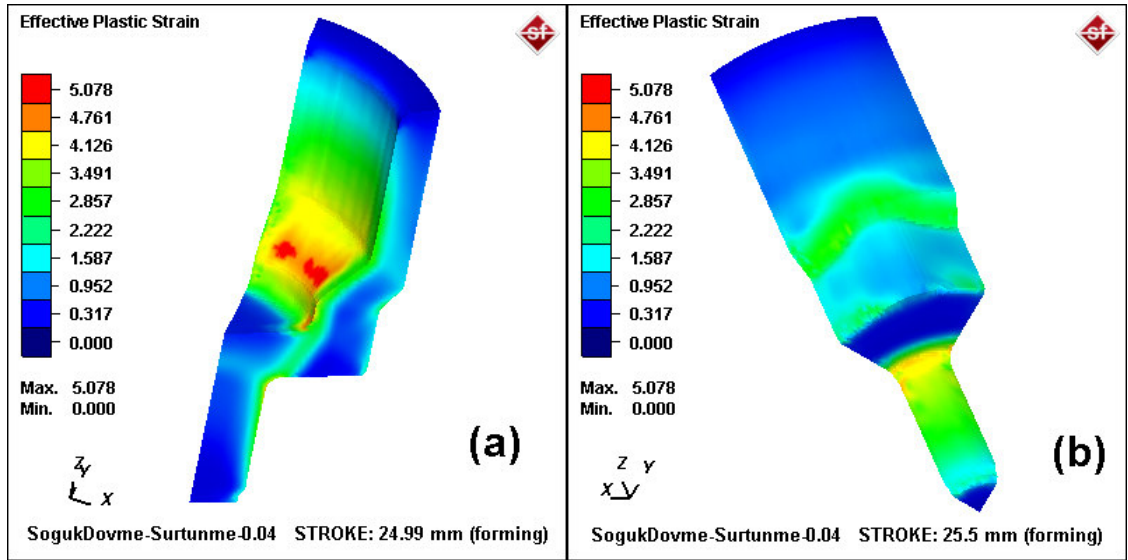
Şekil 4.31. Sürtünme katsayısı 0,06 Coulomb seçilen simülasyonun basma kuvveti grafiği.

Şekil 4.31'de sürtünme katsayısının 0,06 Coulomb seçildiği simülasyondaki zımbanın yaptığı basma kuvveti ve kalıplara etkileyen kuvvetler görülmektedir. Bu kuvvetler aynı zamanda iş parçasına da etmektedir. Şekil 4.31'deki A bölgesinde, iş parçasının anahtar ağzı kısmı oluşturulmaktadır. Bu bölgede zimba en fazla 29 ton kuvvet uygulamaktadır ve bu kuvvetin tamamı kalıplardan sadece anahtar ağzı kalıbına etmektedir. Şekil 4.31'deki B bölgesinde, iş parçasında kuyruk kısmının da oluşumu vardır. Zımbanın yaptığı basma kuvveti tüm kalıpları

etkilemektedir. Ancak anahtar ağız kalıbına etkiyen kuvvet azalırken, kuyruk kalıbına etkileyen kuvvet giderek artmaktadır. Bu bölgede zımba en fazla 130 ton kuvvet uygulamakta ancak bunun 119 tonu kuyruk kalıbına etkirken, 11 tonu anahtar ağız kalıbına etkimektedir. Şekil 4.31'deki C bölgesinde, iş parçasının kuyruk oluşumu bitmiştir ve kalıp içinde zımba ile kalıp arasında sıkışan malzeme yukarıya, kalıp dışına doğru hareket etmektedir. Bu bölgede zımba en fazla 162,538 ton kuvvet uygulamaktadır. C bölgesinin sonunda, simülasyonda zımbanın geriye çekilmesi başlamakta ve bu nedenle basma kuvvetlerinin ani şekilde azaldığı görülmektedir.

4.3.2. Sürtünme Katsayısının 0,04 Coulomb Seçildiği Simülasyon

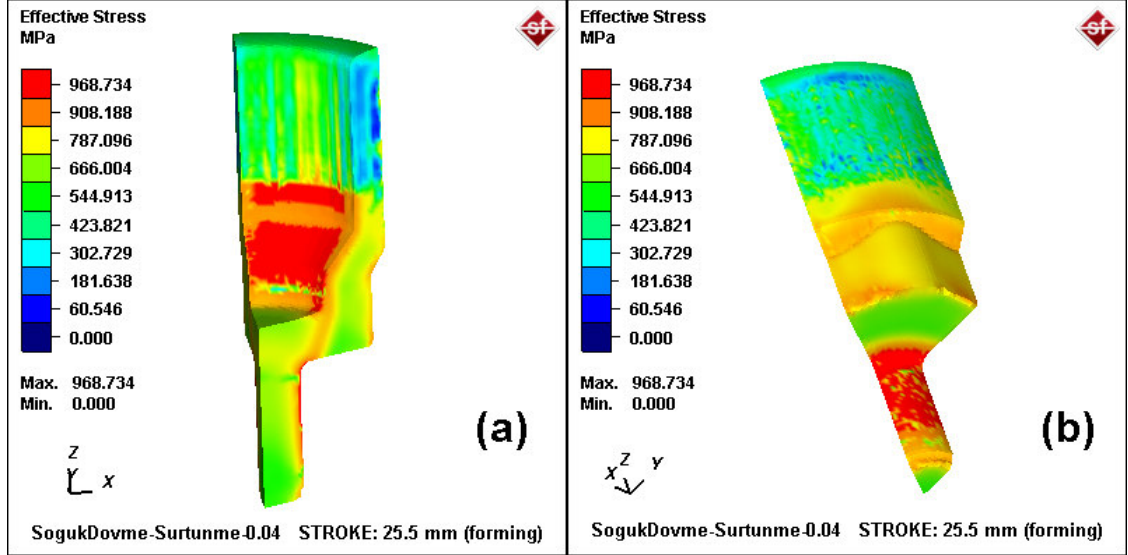
Sürtünme katsayısının 0.04 Coulomb seçildiği simülasyonda, sürtünme katsayısı dışındaki girdi değerleri temel simülasyon ile aynıdır. temel simülasyonda kullanılan yağlayıcıdan çok daha iyi yağlayıcı kullanıldığı düşünülerek sürtünme katsayısı 0,04 Coulomb seçilmiştir. Sürtünme katsayısının 0,04 Coulomb seçildiği simülasyona ait strain, gerilme, sıcaklık, malzeme akışı ve simülasyonda parçalar üzerinde etkili olan basma kuvvetleri aşağıdaki şekillerde verilmiştir.



Şekil 4.32. Sürtünme katsayısı 0,04 Coulomb seçilen simülasyonda basma işlemindeki strain değerleri. (a) İş parçasının kesitindeki ve iç yüzeyindeki değerler. (b) İş parçasının dış yüzeyindeki değerler.

Şekil 4.32 (a)'da, zımbanın parçanın iç kısmında yaptığı deformasyon sonucunda, parçanın strain değerlerinin en yüksek olduğu alan (5,078-4,761 arası) görülmektedir. Ayrıca,

kesmeye maruz kalan yerleri birleştiren bir hat boyunca ortaya çıkmış, 3,491-1,587 arası olan strain değerleri de görülmektedir. Şekil 4.32 (b)'de, basma işlemi sonunda kuyruk kısmının başlangıç kıvrımının olduğu yerde kesmeden dolayı strainin yüksek olduğu (4,761-4,126 değerleri civarında) alan görülmektedir. Ayrıca, anahtar ağız şeklinin oluştuğu yerde de strainin yaklaşık 3,491 ile yüzeyin geri kalanından daha yüksek değerde olduğu görülmektedir.

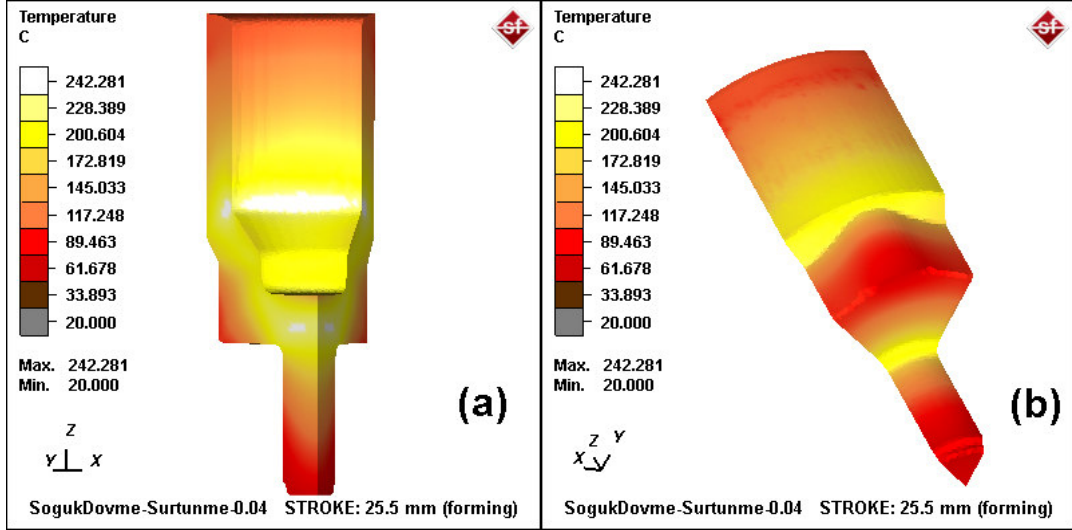


Şekil 4.33. Sürtünme katsayısı 0,04 Coulomb seçilen simülasyonda basma işleminin sonundaki gerilme değerleri. (a) İş parçasının kesitindeki ve iç yüzeyindeki değerler. (b) İş parçasının dış yüzeyindeki değerler.

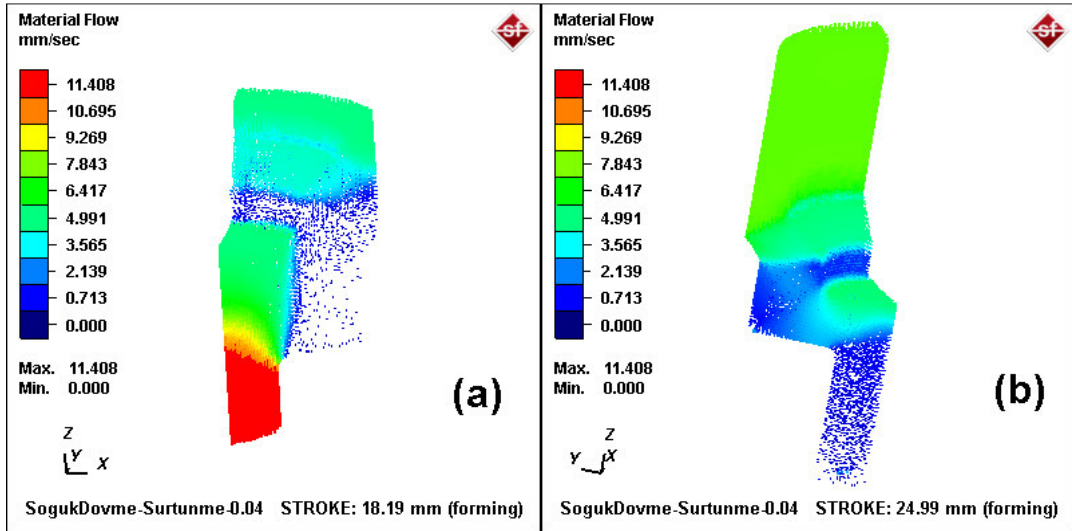
Şekil 4.33 (a)'da, zımbanın parçaya uyguladığı basma kuvveti nedeniyle oluşan deformasyonun temas yüzeylerinde oluşturduğu yüksek gerilme görülmektedir. Bu alan, 968,734 MPa ile parça üzerindeki en yüksek gerilmeye sahip yüzeylerden birisidir. Ayrıca kesmeye maruz kalan yerleri birleştiren bir hat boyunca da gerilmenin yüksek olduğu (908,188-787,096 MPa) görülmektedir. Şekil 4.33 (b)'de, iş parçasının kuyruk kısmının yüzeyinde çok yüksek gerilme değerleri (968,734-908,188 MPa arası) görülmektedir. Bunun nedeni, kuyruk kısmında deplasman hızının yüksek olması ve kuyruk oluşurken kesmenin olmasıdır. Ayrıca, anahtar ağız şeklinin oluştuğu yüzeyde de gerilme değerleri yüzeyin geri kalanından yüksektir (908,188-787,096 MPa arası).

Şekil 4.34 (a)'da, zımbanın iş parçasında basma yaptığı yerlerde yüksek sıcaklıklar (228,389-200,604 °C arası) görülmektedir. Ayrıca basmadan dolayı kalıp içinde sıkışan parçanın yukarıya, kalıp dışına doğru uzaması ve zımbanın aşağıya doğru basma hareketiyle iki yöne doğru gerilen alanda iş parçası üzerindeki en sıcak alan (242,281 °C) görülmektedir. Şekil

4.34 (b)'de, kuyruk kısmının başlangıç kıvrımının olduğu yerde kesmenin olması nedeniyle ve anahtar ağzının şekillendiği kısımda şekil değiştirmenin fazla olması nedeniyle, yüksek sıcaklıklar (228,389-200,604 °C arası) görülmektedir.

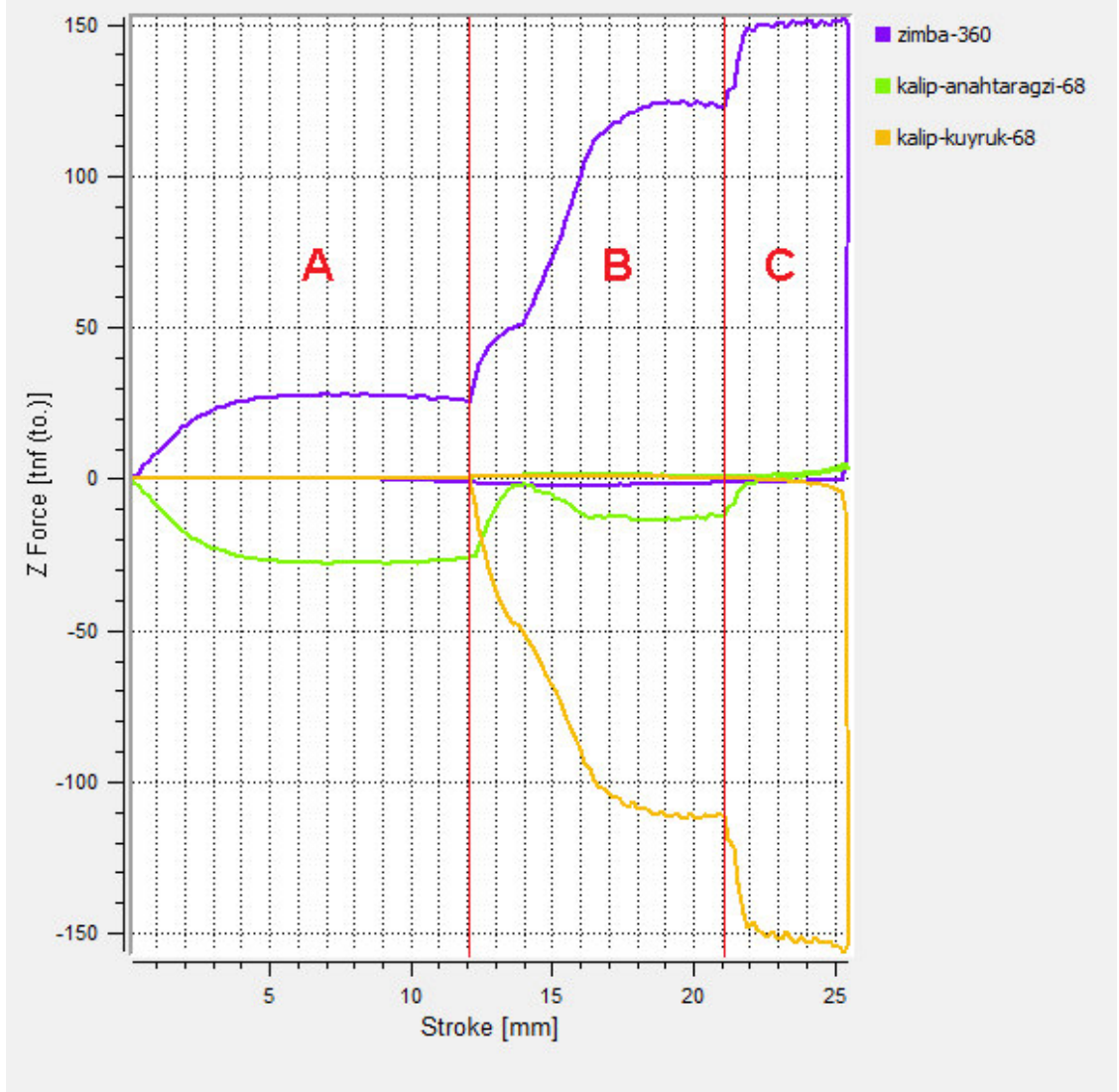


Şekil 4.34. Sürtünme katsayısı 0,04 Coulomb seçilen simülasyonda basma işleminin sonundaki sıcaklık değerleri. (a) İş parçasının kesitindeki ve iç yüzeyindeki değerler. (b) İş parçasının dış yüzeyindeki değerler.



Şekil 4.35. Sürtünme katsayısı 0,04 Coulomb seçilen simülasyonda basma işlemindeki malzeme akış hızları. (a) İş parçasının kuyruk kısmındaki ve basma yapılan yüzeyindeki hızlar. (b) İş parçasında kuyruk oluşumu bittikten sonraki hızlar.

Şekil 4.35 (a)'da, şekil verme işlemi sırasında zımbanın bastığı yüzey 7,843-4,991 mm/s arası değişen akış hızlarına sahiptir. Ayrıca, kuyruk kesitinin parçanın genel kesitinden daha küçük olması nedeniyle, kuyruk kesitinde parça akış hızının çok yüksek olduğu (11,408 mm/s) görülmektedir. Şekil 4.35 (b)'de, kuyruk kısmı oluşumu bittikten sonra, zımbanın basmaya devam etmesi sonucu kalıpla zımba arasında sıkışan malzemenin yukarıya, kalıbın dışına doğru 7,843 mm/s ile hızlıca hareket ettiği de görülmektedir.



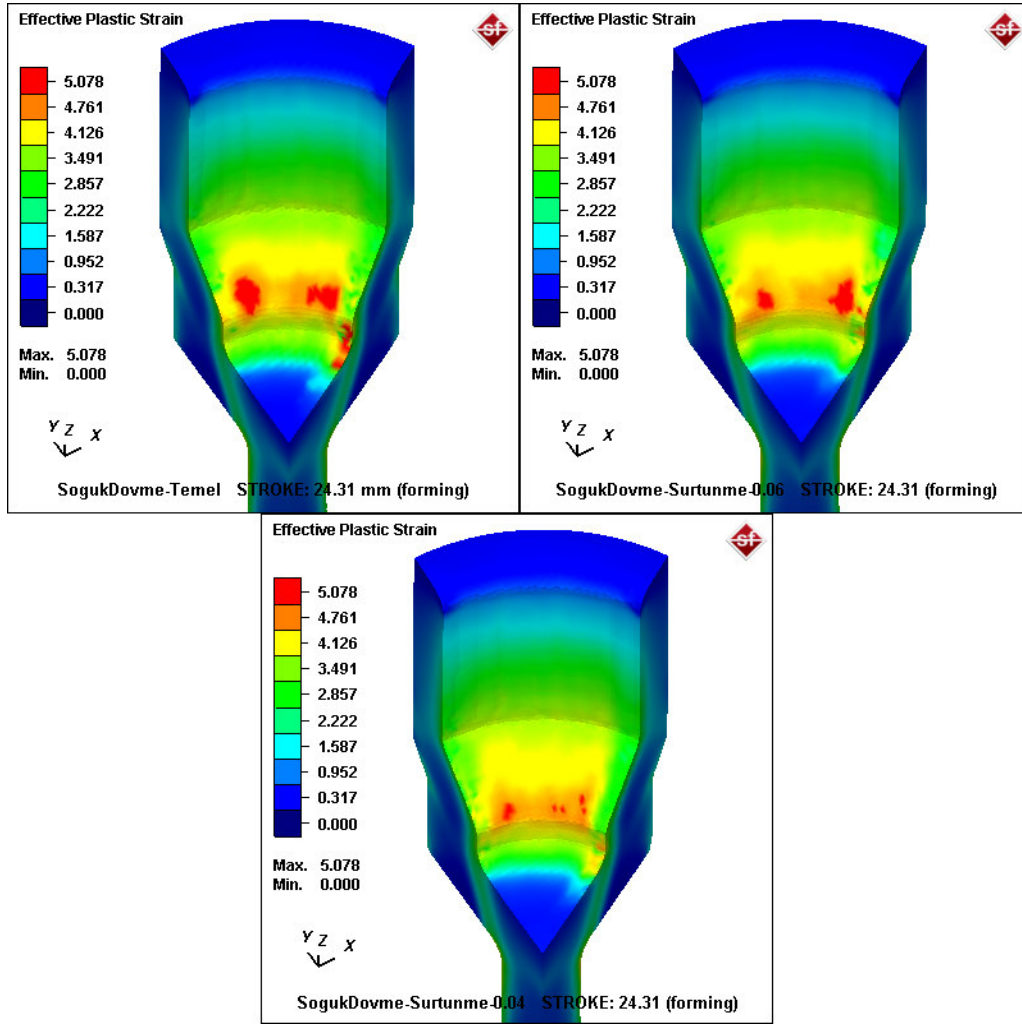
Şekil 4.36. Sürtünme katsayısı 0,04 Coulomb seçilen simülasyonun basma kuvveti grafiği.

Şekil 4.36'da sürtünme katsayısının 0,04 Coulomb seçildiği simülasyondaki zımbanın yaptığı basma kuvveti ve kalıplara etkileyen kuvvetler görülmektedir. Bu kuvvetler aynı zamanda iş parçasına da etmektedir. Şekil 4.36'daki A bölgesinde, iş parçasının anahtar ağız kısmı

oluşturulmaktadır. Bu bölgede zimba en fazla 27 ton kuvvet uygulamaktadır ve bu kuvvetin tamamı kalıplardan sadece anahtar ağız kalıbına etkimektedir. Şekil 4.36'daki B bölgesinde, iş parçasında kuyruk kısmının da oluşumu vardır. Zimbanın yaptığı basma kuvveti tüm kalıpları etkilemektedir. Ancak anahtar ağız kalıbına etkileyen kuvvet azalırken, kuyruk kalıbına etkileyen kuvvet giderek artmaktadır. Bu bölgede zimba en fazla 124 ton kuvvet uygulamakta ancak bunun 112 tonu kuyruk kalıbına etkirken, 12 tonu anahtar ağız kalıbına etkimektedir. Şekil 4.36'daki C bölgesinde, iş parçasının kuyruk oluşumu bitmiştir ve kalıp içinde zimba ile kalıp arasında sıkışan malzeme yukarıya, kalıp dışına doğru hareket etmektedir. Bu bölgede zimba en fazla 152,219 ton kuvvet uygulamaktadır. C bölgesinin sonunda, simülasyonda zimbanın geriye çekilmesi başlamakta ve bu nedenle basma kuvvetlerinin ani şekilde azaldığı görülmektedir.

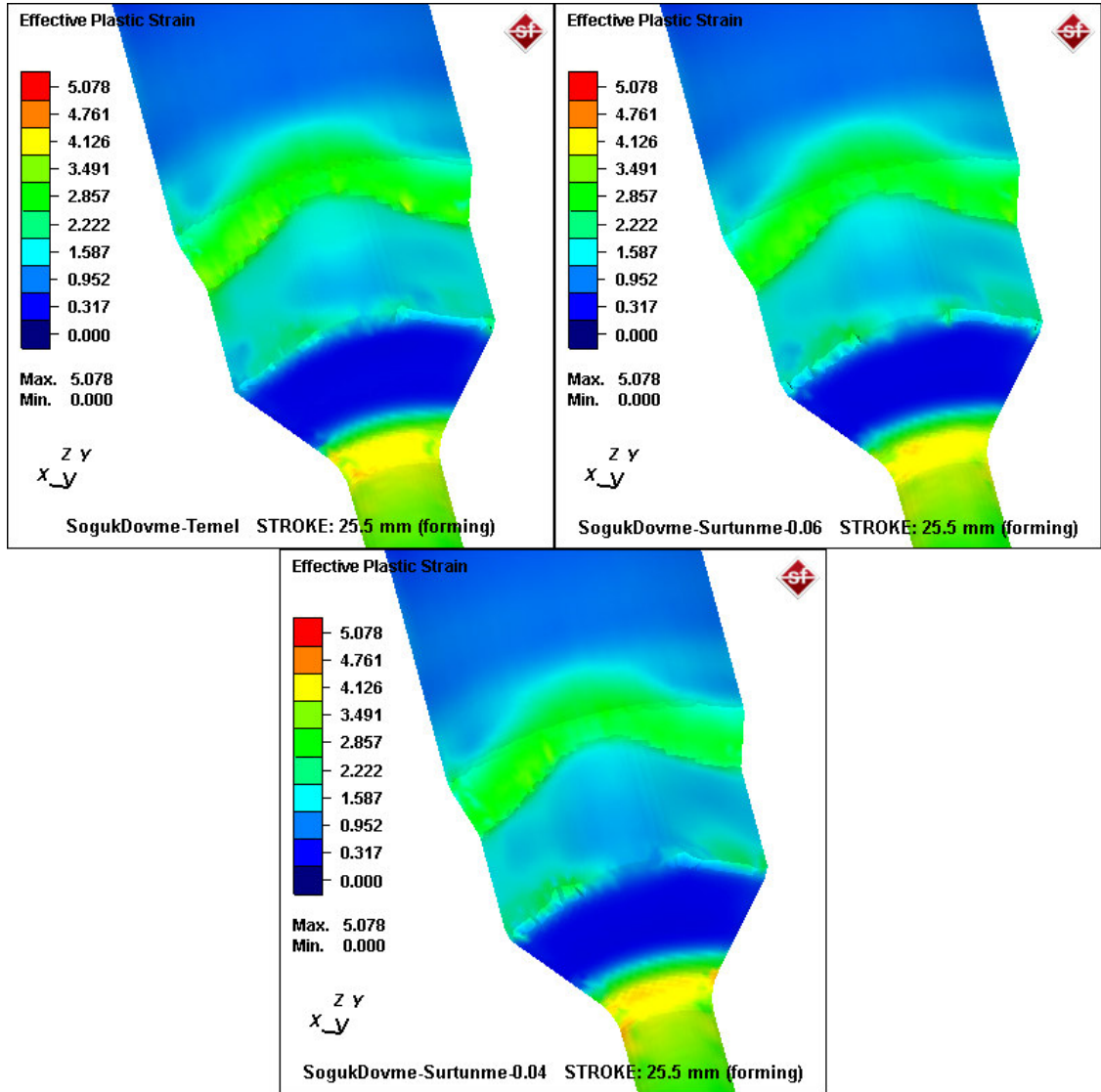
4.3.3. Sürtünme Katsayısı Değişim Simülasyonlarının Sonuçlarının Temel Simülasyonun Sonuçları ile Karşılaştırılması

Bu bölümde sürtünme katsayısı değişim simülasyonlarının sonuçları ile temel simülasyonun sonuçları karşılaştırılacaktır.



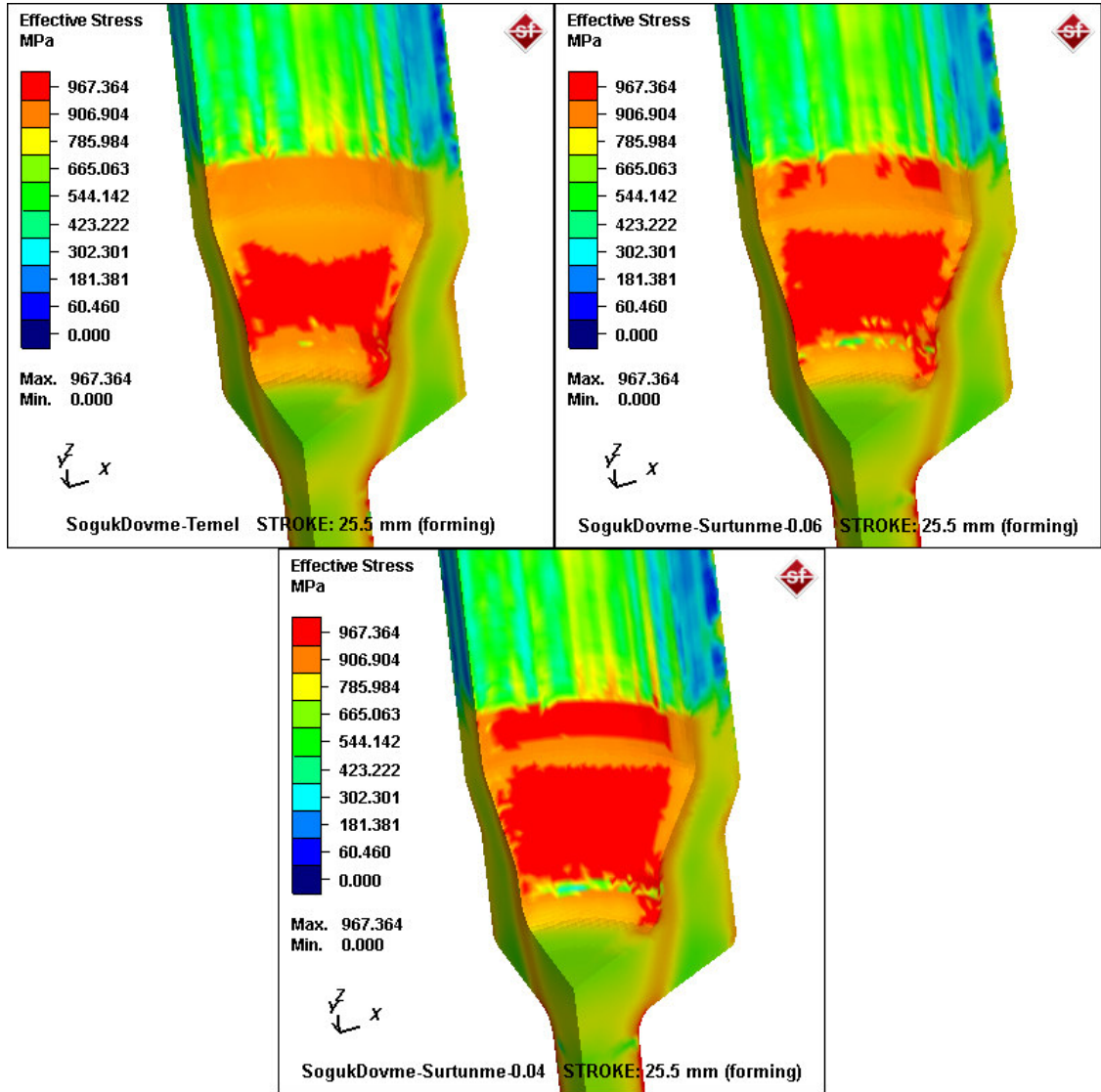
Şekil 4.37. Sürtünme katsayısı değişim simülasyonlarının sonuçları ile temel simülasyonun sonucu arasında, zımbanın basma yaptığı yüzeydeki strain değerlerinin karşılaştırılması.

Şekil 4.37'de basma işleminin 24,31 mm'sinde, zımbanın basma yaptığı yüzeyin strain değerleri görülmektedir. Bu yüzey için karşılaştırılan simülasyon sonuçlarına göre, sürtünme katsayısı azaldıkça simülasyondaki strainin yüksek olduğu alan da azalmaktadır.



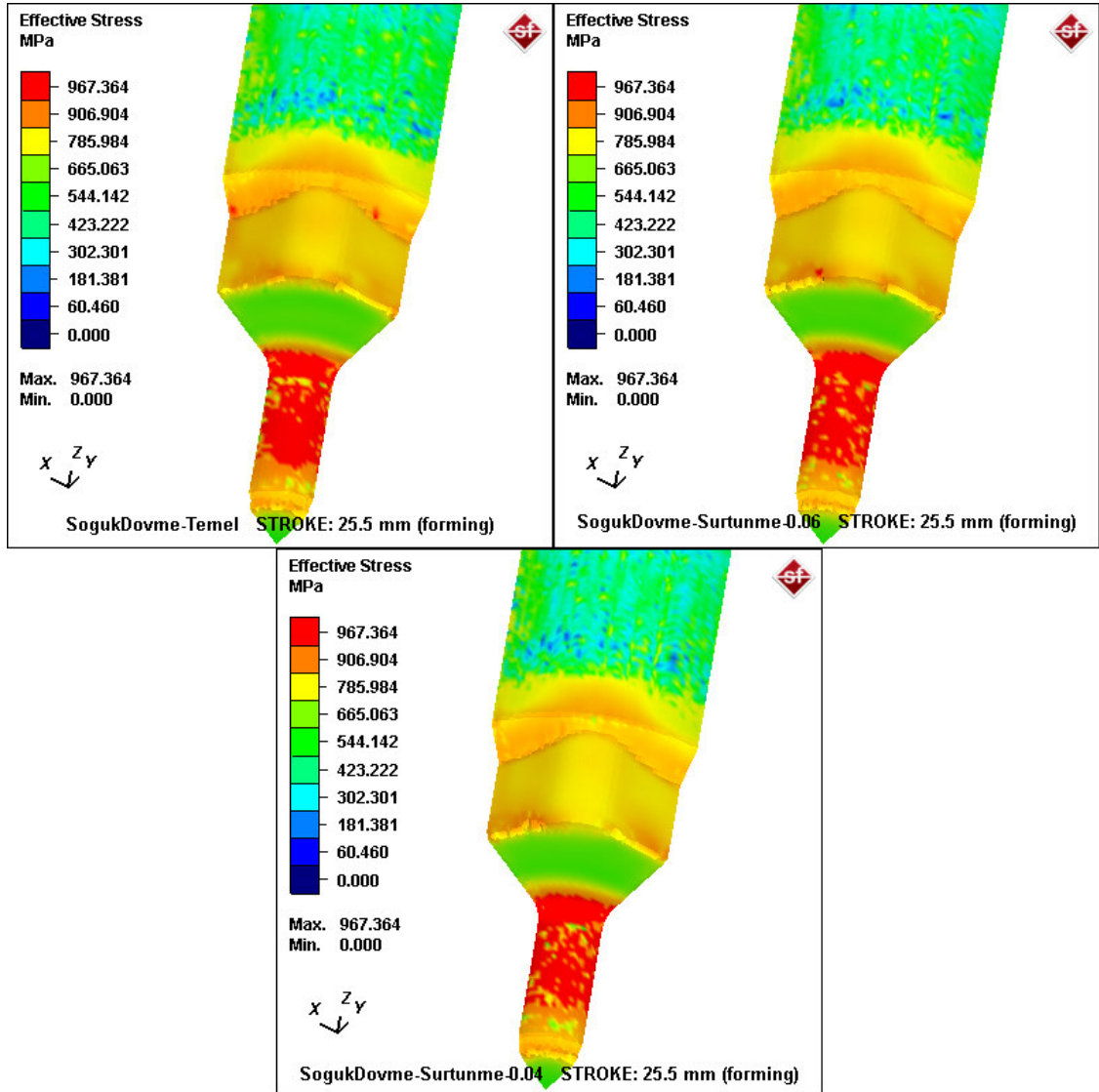
Şekil 4.38. Sürtünme katsayısı değişim simülasyonlarının sonuçları ile temel simülasyonun sonucu arasında, kuyruk kısmı ve anahtar ağız kısmının strain değerlerinin karşılaştırılması.

Şekil 4.38'de basma işleminin sonunda, kuyruk kısmının başlangıç kıvrımının strain değerleri görülmektedir. Bu bölge için karşılaştırılan simülasyon sonuçlarına göre, strain değerleri ve alanları tüm simülasyonlarda aynıdır. Ancak anahtar ağız kısmında, sürtünme katsayısı azaldıkça strain değerlerinin azaldığı görülmektedir.



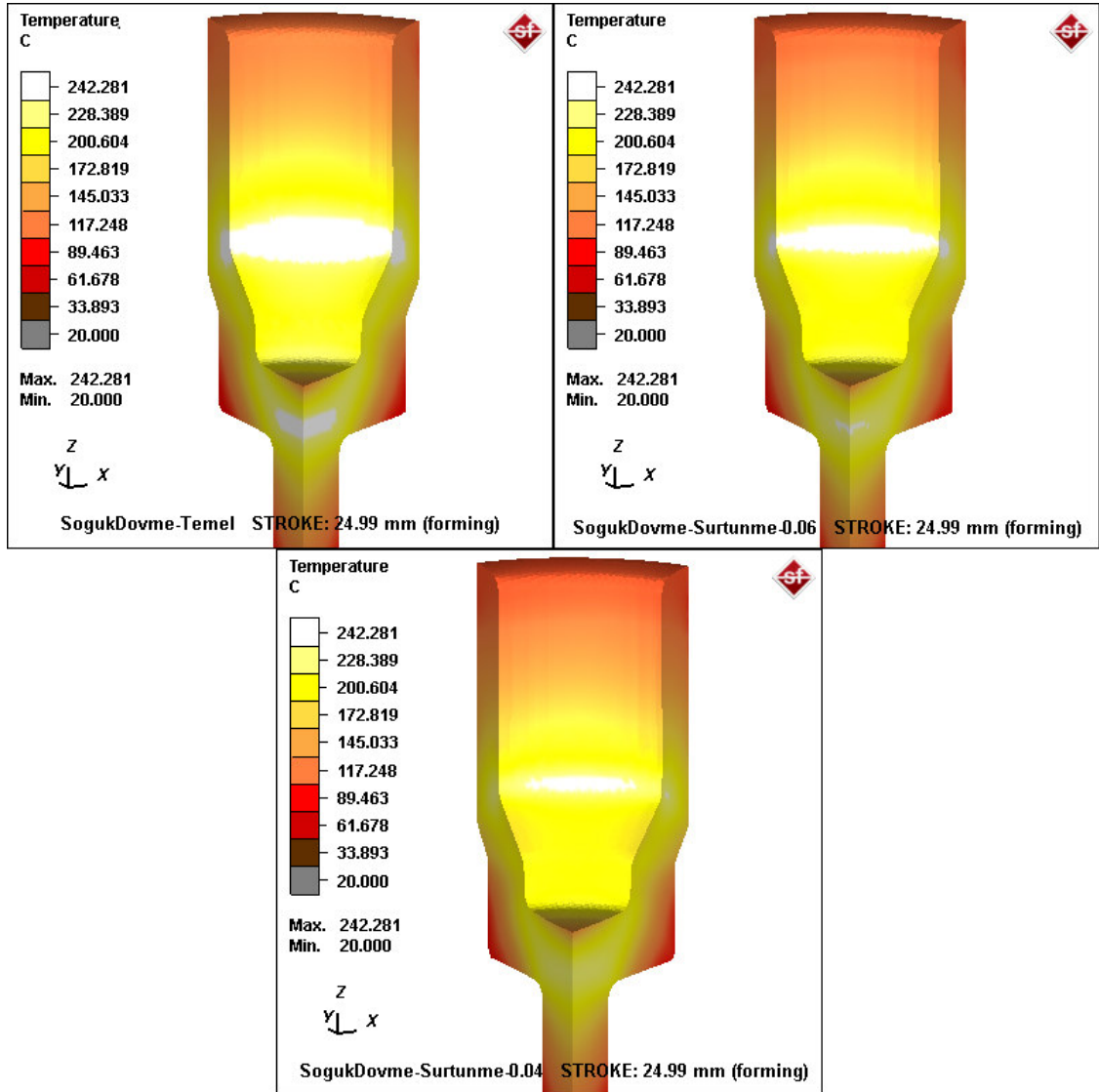
Şekil 4.39. Sürtünme katsayısı değişim simülasyonlarının sonuçları ile temel simülasyonun sonucu arasında, zımbanın basma yaptığı yan yüzeydeki gerilme değerlerinin karşılaştırılması.

Şekil 4.39'da basma işleminin sonunda, zımbanın basma yaptığı yan yüzeyin gerilme değerleri görülmektedir. Bu yüzey için karşılaştırılan simülasyon sonuçlarına göre, sürtünme katsayısı azaldıkça simülasyonda maksimum gerilmenin olduğu alan artmaktadır.



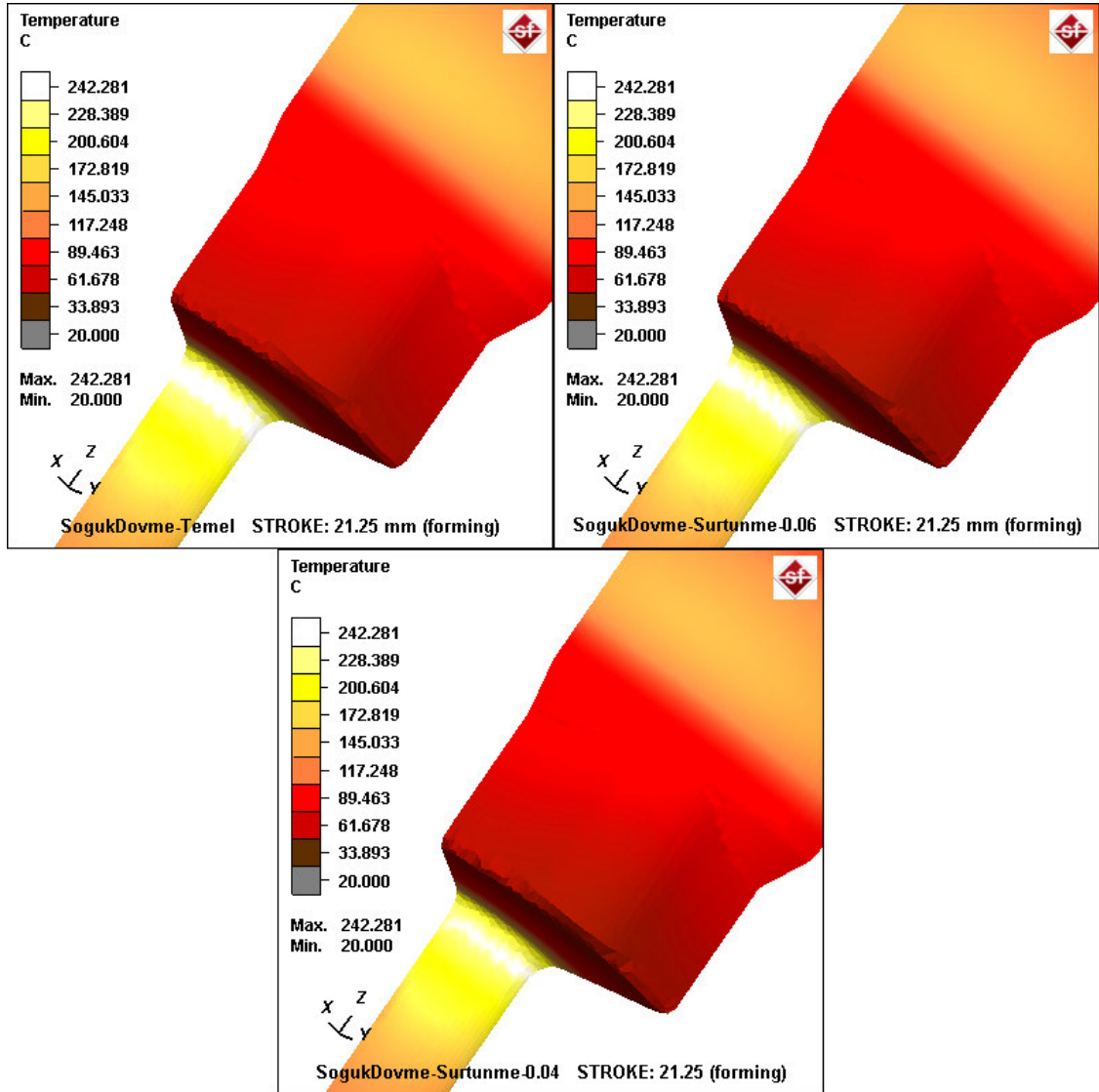
Şekil 4.40. Sürtünme katsayısı değişim simülasyonlarının sonuçları ile temel simülasyonun sonucu arasında, kuyruk kısmı ve anahtar ağzı kısmı gerilme değerlerinin karşılaştırılması.

Şekil 4.40'ta basma işleminin sonundaki kuyruk kısmının ve anahtar ağzı kısmının gerilme değerleri görülmektedir. Simülasyon sonuçları kuyruk kısmı için karşılaştırıldığında, sürtünme katsayısı azaldıkça kuyruk kısmında oluşan maksimum gerilmenin olduğu alanın azaldığı görülmektedir. Ayrıca, anahtar ağzı kısmında sürtünme katsayısı azaldıkça, gerilme değerlerinin azaldığı görülmektedir.



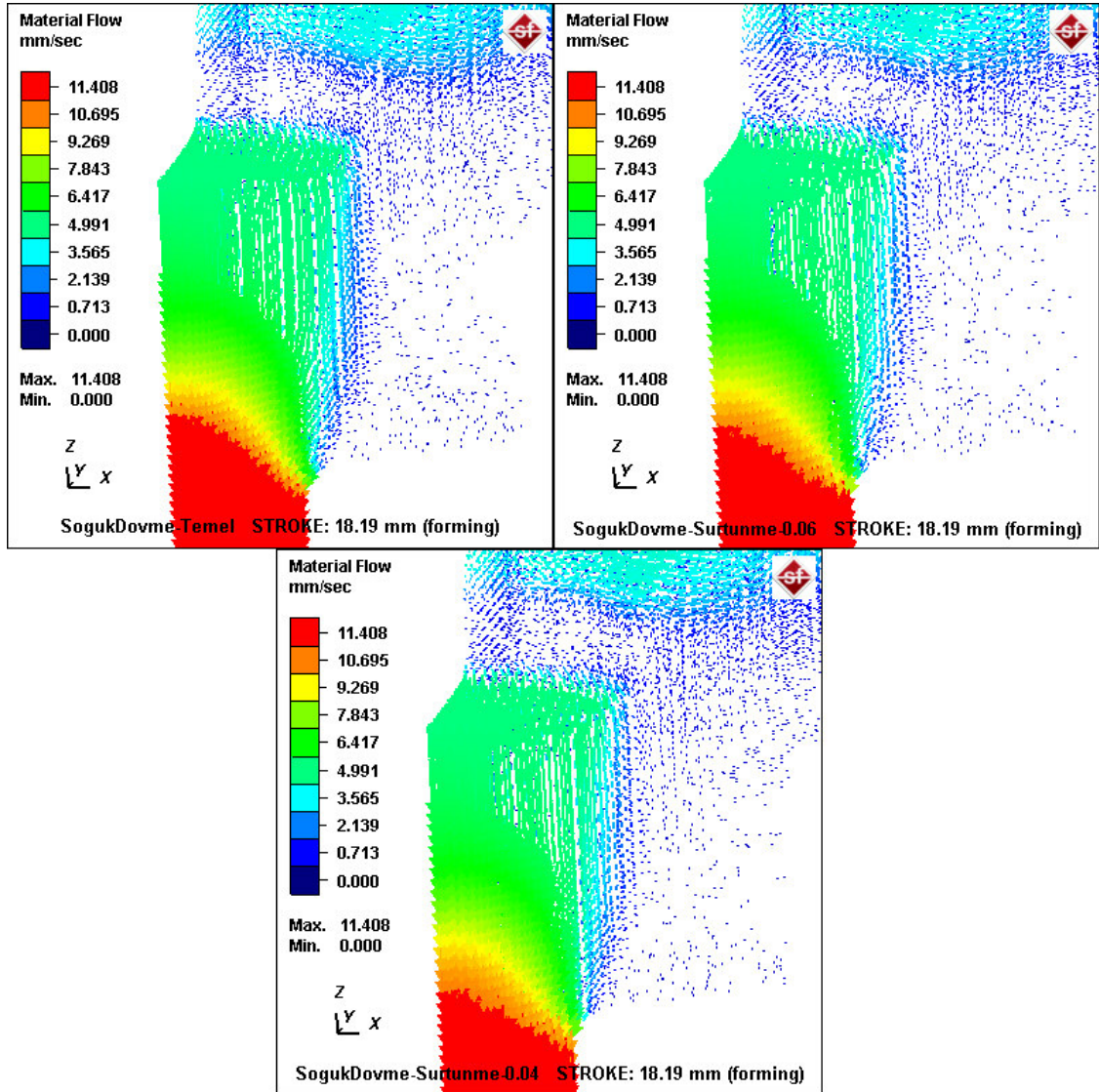
Şekil 4.41. Sürtünme katsayısı değişim simülasyonlarının sonuçları ile temel simülasyonun sonucu arasında, zımbanın basma yaptığı kısmın sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması.

Şekil 4.41'de basma işleminin 24,99 mm'sinde, zımbanın basma yaptığı kısmın sıcaklık değerleri görülmektedir. Bu kısım için karşılaştırılan simülasyon sonuçlarına göre, sürtünme katsayısı azaldıkça, sıcaklığın daha yavaş arttığı ve daha az alana yayıldığı yani daha az ısı üretimi olduğu görülmektedir.



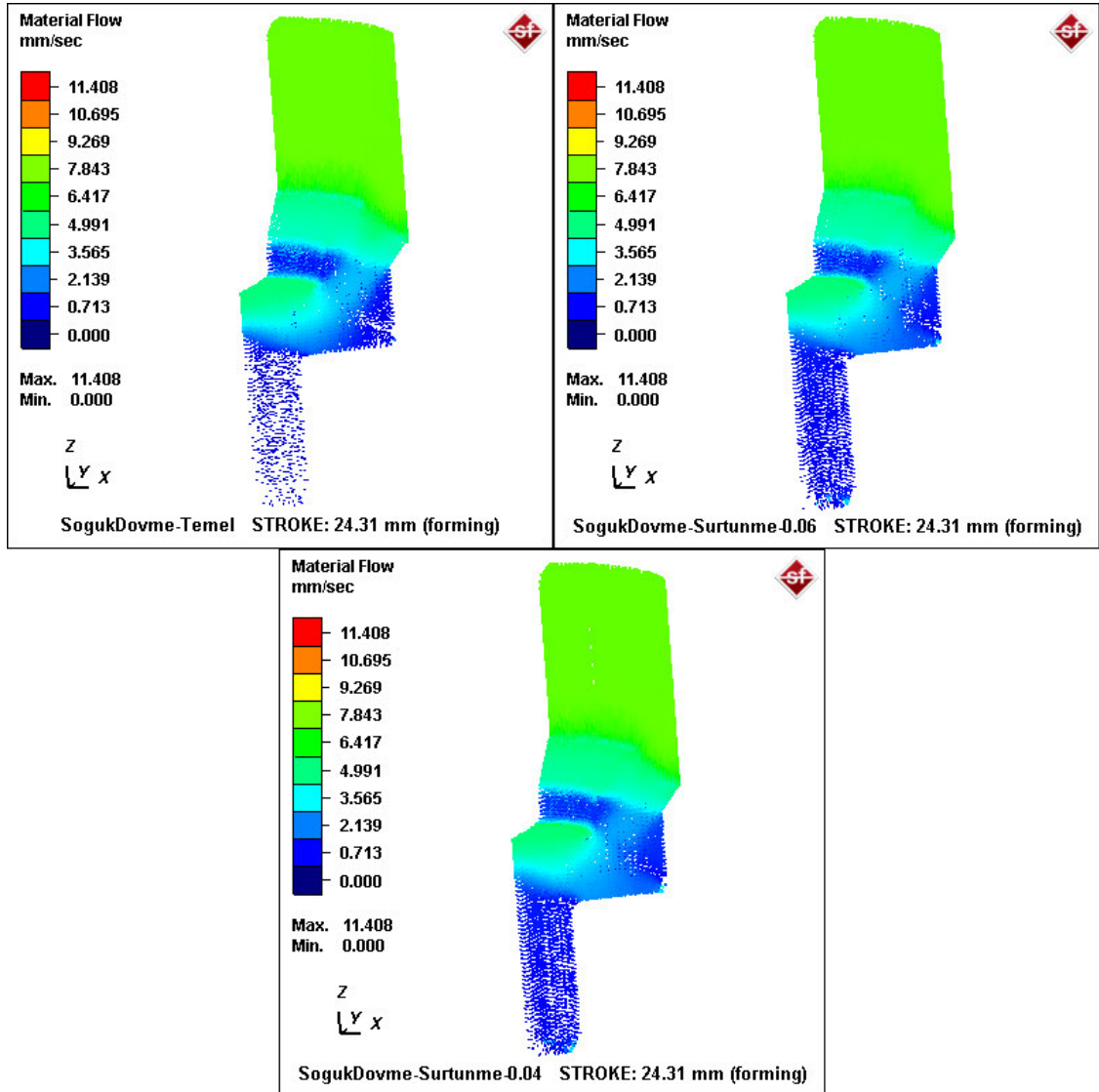
Şekil 4.42. Sürtünme katsayısı değişim simülasyonlarının sonuçları ile temel simülasyonun sonucu arasında, kuyruk sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması.

Şekil 4.42'de basma işleminin 21,25 mm'sinde, kuyruk kısmındaki sıcaklık değerleri görülmektedir. Kuyruk kısmının başlangıç kıvrımı için karşılaştırılan simülasyon sonuçlarına göre, sürtünme katsayısı azaldıkça, sıcaklığın daha yavaş arttığı ve daha az alana yayıldığı yani daha az ısı üretimi olduğu görülmektedir.



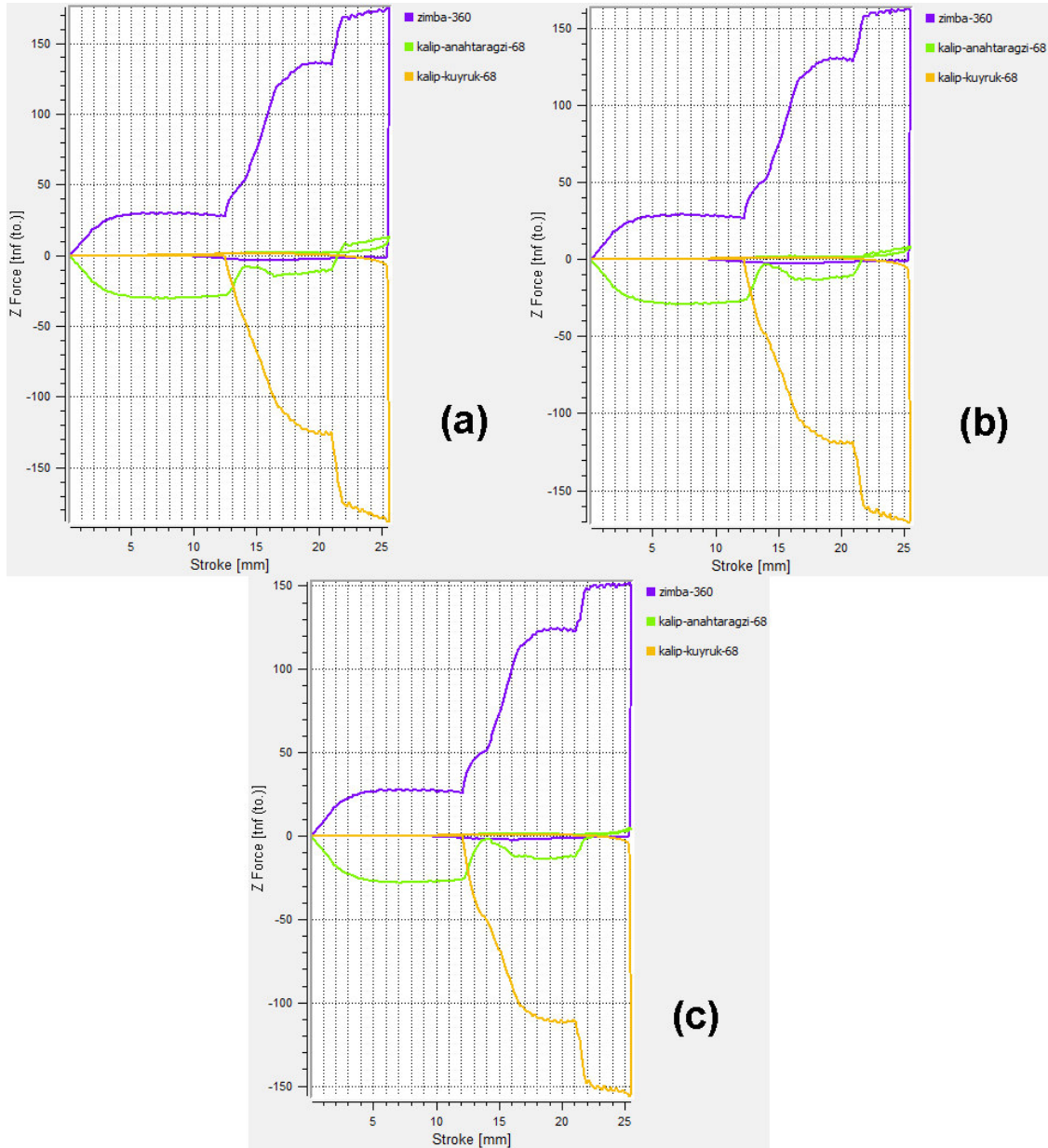
Şekil 4.43. Sürtünme katsayısı değişim simülasyonlarının sonuçları ile temel simülasyonun sonucu arasında, basma işlemi sırasındaki malzeme akış hızlarının karşılaştırılması.

Şekil 4.43'te basma işleminin 18,19 mm'sinde, zımbanın basma yaptığı kısmın malzeme akış hızları görülmektedir. Bu kısım için karşılaştırılan simülasyon sonuçlarına göre, simülasyonlardaki malzeme akış hızlarının yaklaşık olarak aynı olduğu görülmektedir. Ancak, sürtünme katsayısının 0,04 seçildiği simülasyonda malzeme akış hızının diğerlerinden biraz daha yavaş olduğu görülebilir.



Şekil 4.44. Sürtünme katsayısı değişim simülasyonlarının sonuçları ile temel simülasyonun sonucu arasında, basma işlemi sırasında kuyruk oluşuktan sonraki malzeme akış hızlarının karşılaştırılması.

Şekil 4.44'te basma işleminin 24,31 mm'sinde, kuyruk kısmı oluşumu bittikten sonra, zımbanın basmaya devam etmesi sonucu kalıpla zımba arasında sıkışan malzemenin yukarıya, kalıbın dışına doğru yaptığı hareketteki malzeme hızları görülmektedir. Bu kısım için karşılaştırılan simülasyon sonuçlarına göre, simülasyonlardaki malzeme akış hızlarının yaklaşık olarak aynı olduğu görülmektedir.



Şekil 4.45. Sürtünme katsayısı değişim simülasyonlarının basma kuvvetleri grafikleri ile temel simülasyonun basma kuvvetleri grafiğinin karşılaştırılması: (a) Temel simülasyon, (b) Sürtünme katsayısının 0.06 Coulomb seçildiği simülasyon, (c) Sürtünme katsayısının 0.04 Coulomb seçildiği simülasyon.

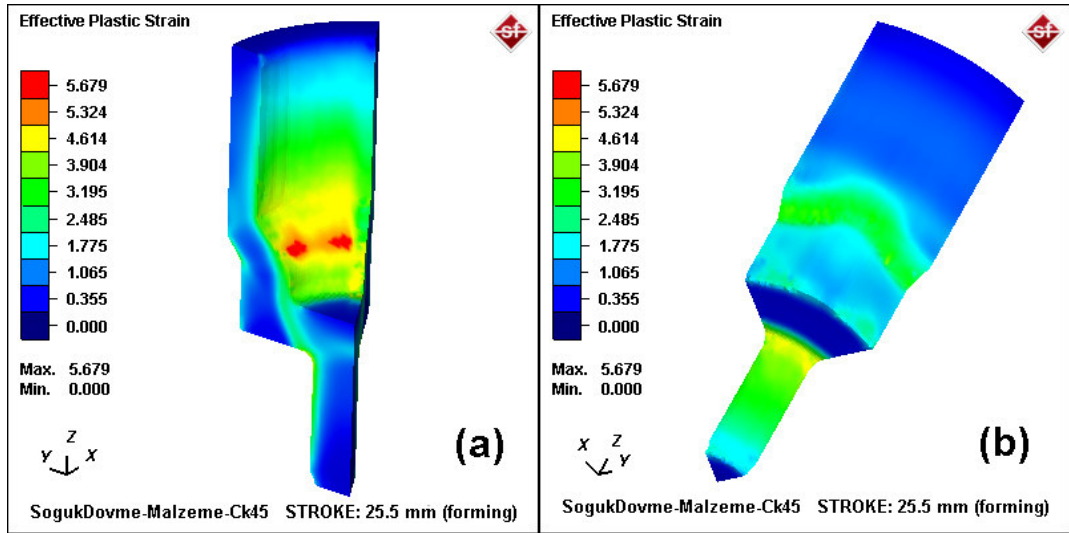
Şekil 4.45'te pres hızı değişim simülasyonlarının basma kuvvetlerinin grafikleri ile temel simülasyonun basma kuvvetlerinin grafiği karşılaştırılmıştır. Grafikler arasında eğrilerde ve maksimum noktalarda farklılıkların bulunduğu görülmektedir. Sürtünme katsayısının 0,08 Coulomb seçildiği simülasyonda (temel simülasyon) zımbanın uyguladığı maksimum basma kuvveti 175,289 ton kuvvet olurken, sürtünme katsayısının 0,06 Coulomb seçildiği simülasyonda

zımbanın uyguladığı maksimum basma kuvveti 162,538 ton kuvvet, sürtünme katsayısının 0,04 Coulomb seçildiği simülasyonda ise zımbanın uyguladığı maksimum basma kuvveti 152,219 ton kuvvet olmaktadır.

4.4. Malzeme Değişim Simülasyonları ve Temel Simülasyonla Karşılaştırılması

4.4.1. Malzemenin Ck45 Seçildiği Simülasyon

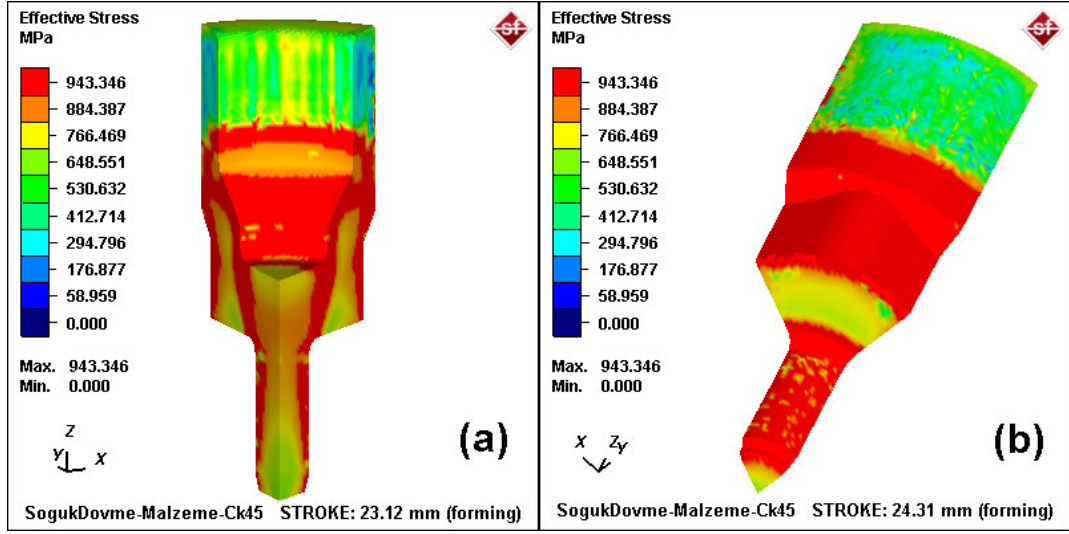
Malzemenin Ck45 seçildiği simülasyonda, iş parçasının malzemesi dışındaki girdi değerleri temel simülasyon ile aynıdır. Temel simülasyonda kullanılan malzemeden daha fazla karbon içeriğine sahip bir malzemenin incelenmesi amacıyla, iş parçası malzemesi Ck45 seçilmiştir. Malzemenin Ck45 seçildiği simülasyona ait strain, gerilme, sıcaklık, malzeme akışı ve simülasyonda parçalar üzerinde etkili olan basma kuvvetleri aşağıdaki şekillerde verilmiştir.



Şekil 4.46. Malzemesi Ck45 seçilen simülasyonda basma işleminin sonundaki strain değerleri.

(a) İş parçasının kesitindeki ve iç yüzeyindeki değerler. (b) İş parçasının dış yüzeyindeki değerler.

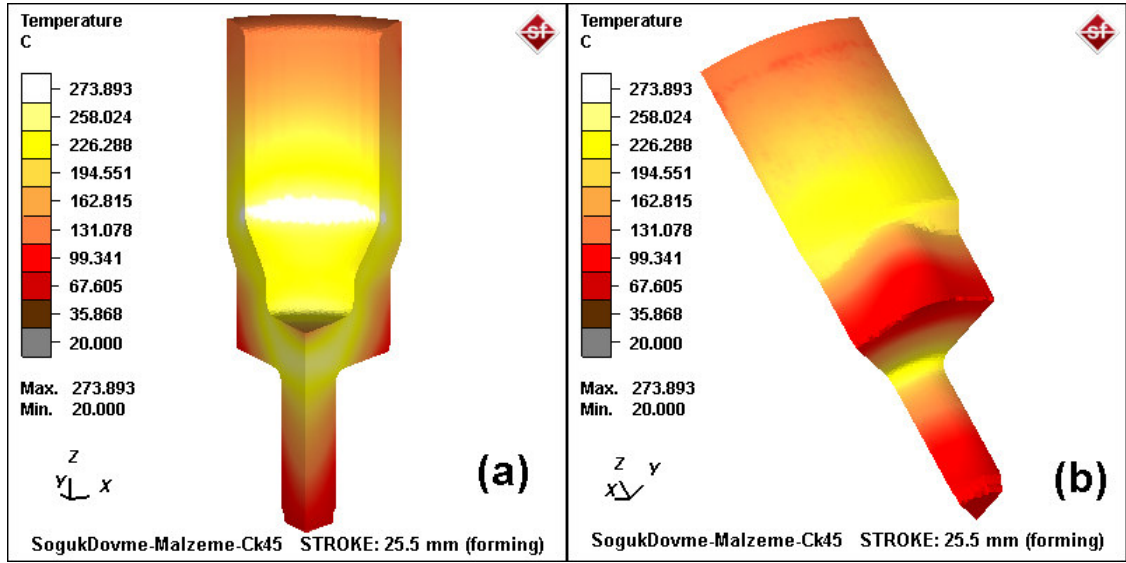
Şekil 4.46 (a)'da, zımbanın parçanın iç kısmında yaptığı deformasyon sonucunda, parçanın strain değerlerinin en yüksek olduğu alan (5,679-5,324 arası) görülmektedir. Ayrıca, kesmeye maruz kalan yerleri birleştiren bir hat boyunca ortaya çıkmış, 3,904-1,775 arası olan strain değerleri de görülmektedir. Şekil 4.46 (b)'de, basma işlemi sonunda kuyruk kısmının başlangıç kıvrımının olduğu yerde kesmeden dolayı strainin yüksek olduğu (4,614-3,904 değerleri civarında) alan görülmektedir. Ayrıca, anahtar ağız şeklinin olduğu yerde de strainin yaklaşık 3,904 ile yüzeyin geri kalanından daha yüksek değerde olduğu görülmektedir.



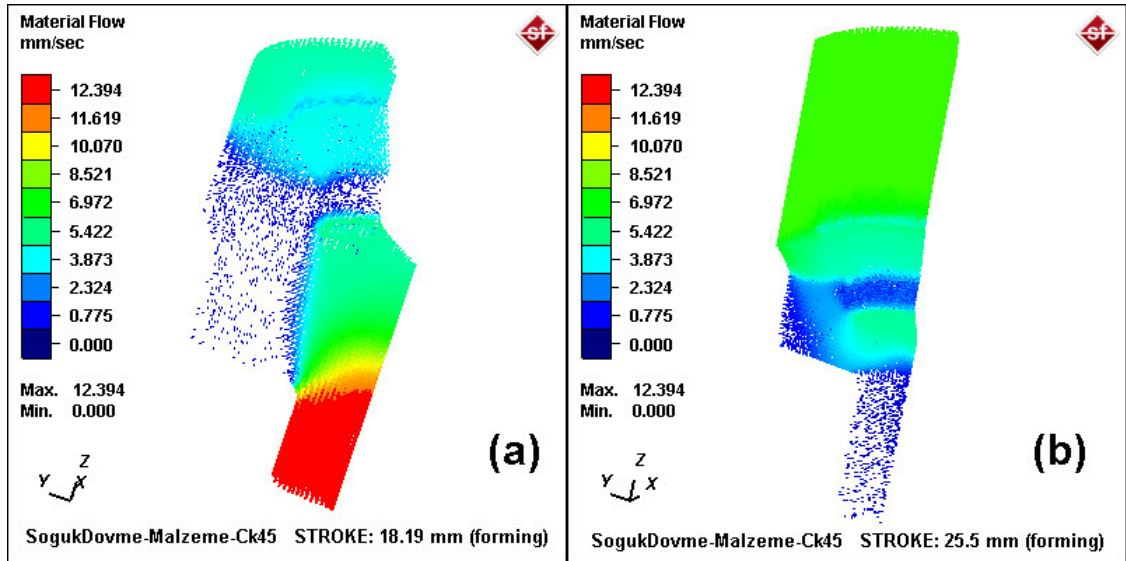
Şekil 4.47. Malzemesi Ck45 seçilen simülasyonda basma işlemindeki gerilme değerleri. (a) İş parçasının kesitindeki ve iç yüzeyindeki değerler. (b) İş parçasının dış yüzeyindeki değerler.

Şekil 4.47 (a)'da, zımbanın parçaya uyguladığı basma kuvveti nedeniyle oluşan deformasyonun iş parçasında oluşturduğu yüksek gerilme görülmektedir. Zımba ile parçanın temas yüzeyindeki alanlarda, 943,346 MPa ile parça üzerindeki en yüksek gerilme değeri görülmektedir. Ayrıca kesmeye maruz kalan yerleri birleştiren bir hat boyunca ve anahtar ağzı kısmının olduğu yerlerde de gerilmenin çok yüksek olduğu (943,346 MPa) görülmektedir. Şekil 4.47 (b)'de, iş parçasının kuyruk kısmının yüzeyinin tamamında çok yüksek gerilme değeri (943,346 MPa) görülmektedir. Bunun nedeni, kuyruk kısmında deplasman hızının yüksek olması ve kuyruk oluşurken kesmenin olmasıdır. Ayrıca, anahtar ağzı şeklinin olduğu yüzeyin tamamında da çok yüksek gerilme değeri görülmektedir (943,346 MPa).

Şekil 4.48 (a)'da, zımbanın iş parçasında basma yaptığı yerlerde yüksek sıcaklıklar (258,024-226,288 °C arası) görülmektedir. Ayrıca basmadan dolayı kalıp içinde sıkışan parçanın yukarıya, kalıp dışına doğru uzaması ve zımbanın aşağıya doğru basma hareketiyle iki yöne doğru gerilen alanda iş parçası üzerindeki en sıcak alan (273,893 °C) görülmektedir. Şekil 4.48 (b)'de, kuyruk kısmının başlangıç kıvrımının olduğu yerde kesmenin olması nedeniyle ve anahtar ağzının şekillendiği kısımda şekil değiştirmenin fazla olması nedeniyle, yüksek sıcaklıklar (258,024-226,288 °C arası) görülmektedir.



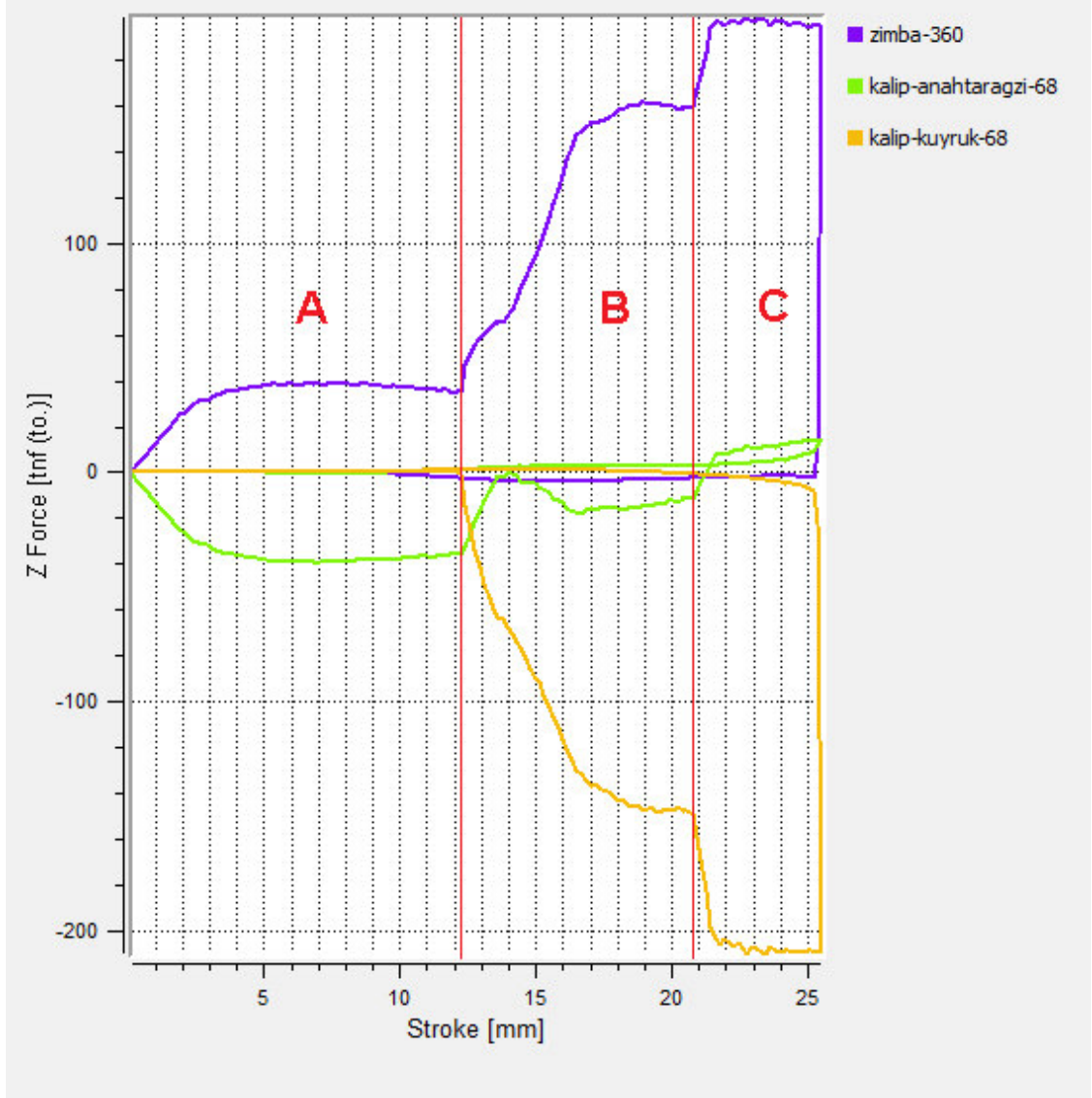
Şekil 4.48. Malzemesi Ck45 seçilen simülasyonda basma işleminin sonundaki sıcaklık değerleri. (a) İş parçasının kesitindeki ve iç yüzeyindeki değerler. (b) İş parçasının dış yüzeyindeki değerler.



Şekil 4.49. Malzemesi Ck45 seçilen simülasyonda basma işlemindeki malzeme akış hızları. (a) İş parçasının kuyruk kısmındaki ve basma yapılan yüzeyindeki hızlar. (b) İş parçasında kuyruk oluşumu bittikten sonraki hızlar.

Şekil 4.49 (a)'da, şekil verme işlemi sırasında zımbanın bastığı yüzey 8,521-5,442 mm/s arası değişen akış hızlarına sahiptir. Ayrıca, kuyruk kesitinin parçanın genel kesitinden daha küçük olması nedeniyle, kuyruk kesitinde parça akış hızının çok yüksek olduğu (12,394

mm/s) görülmektedir. Şekil 4.49 (b)'de, kuyruk kısmı oluşumu bittikten sonra, zımbanın basmaya devam etmesi sonucu kalıpla zimba arasında sıkışan malzemenin yukarıya, kalıbın dışına doğru 8,521 mm/s ile hızlıca hareket ettiği de görülmektedir.



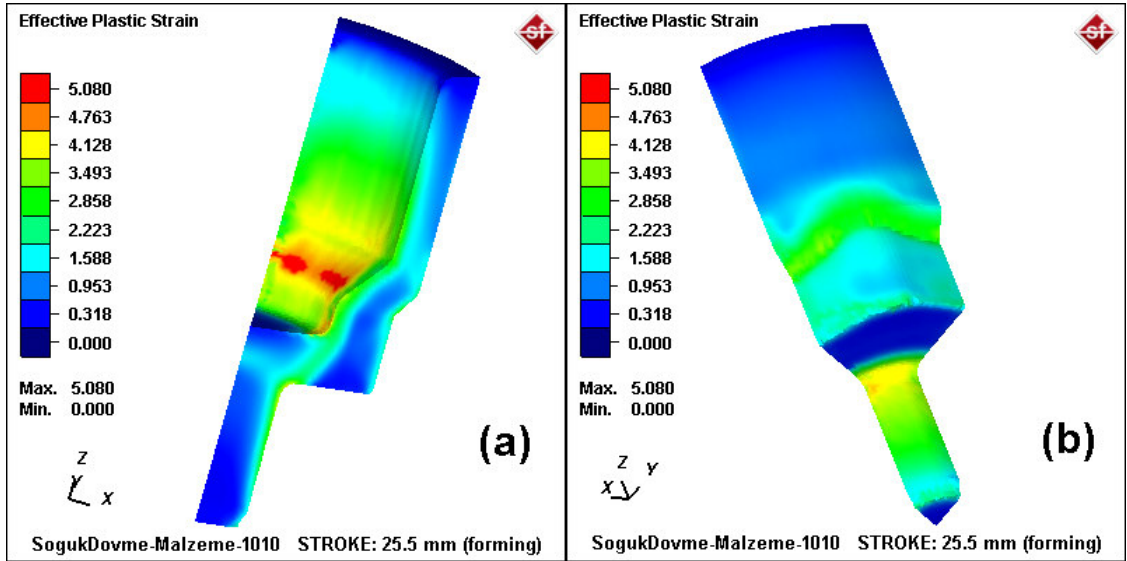
Şekil 4.50. Malzemesi Ck45 seçilen simülasyonun basma kuvveti grafiği.

Şekil 4.50'de iş parçası malzemesinin Ck45 seçildiği simülasyondaki zımbanın yaptığı basma kuvveti ve kalıplara etkiyen kuvvetler görülmektedir. Bu kuvvetler aynı zamanda iş parçasına da etkimektedir. Şekil 4.50'deki A bölgesinde, iş parçasının anahtar ağzı kısmı oluşturulmaktadır. Bu bölgede zimba en fazla 40 ton kuvvet uygulamaktadır ve bu kuvvetin tamamı kalıplardan sadece anahtar ağzı kalıbına etkimektedir. Şekil 4.50'deki B bölgesinde, iş parçasında kuyruk kısmının da oluşumu vardır. Zımbanın yaptığı basma kuvveti tüm kalıpları

etkilemektedir. Ancak anahtar ağız kalıbına etkiyen kuvvet azalırken, kuyruk kalıbına etkileyen kuvvet giderek artmaktadır. Bu bölgede zımba en fazla 163 ton kuvvet uygulamakta ancak bunun 149 tonu kuyruk kalıbına etkirken, 14 tonu anahtar ağız kalıbına etkimektedir. Şekil 4.50'deki C bölgesinde, iş parçasının kuyruk oluşumu bitmiştir ve kalıp içinde zımba ile kalıp arasında sıkışan malzeme yukarıya, kalıp dışına doğru hareket etmektedir. Bu bölgede zımba en fazla 198,378 ton kuvvet uygulamaktadır. C bölgesinin sonunda, simülasyonda zımbanın geriye çekilmesi başlamakta ve bu nedenle basma kuvvetlerinin ani şekilde azaldığı görülmektedir.

4.4.2. Malzemenin 1010 Seçildiği Simülasyon

Malzemenin 1010 seçildiği simülasyonda, iş parçasının malzemesi dışındaki girdi değerleri temel simülasyon ile aynıdır. Temel simülasyonda kullanılan malzemeden daha az karbon içeriğine sahip bir malzemenin incelenmesi amacıyla, iş parçası malzemesi 1010 seçilmiştir. Malzemenin 1010 seçildiği simülasyona ait strain, gerilme, sıcaklık, malzeme akışı ve simülasyonda parçalar üzerinde etkili olan basma kuvvetleri aşağıdaki şekillerde verilmiştir.

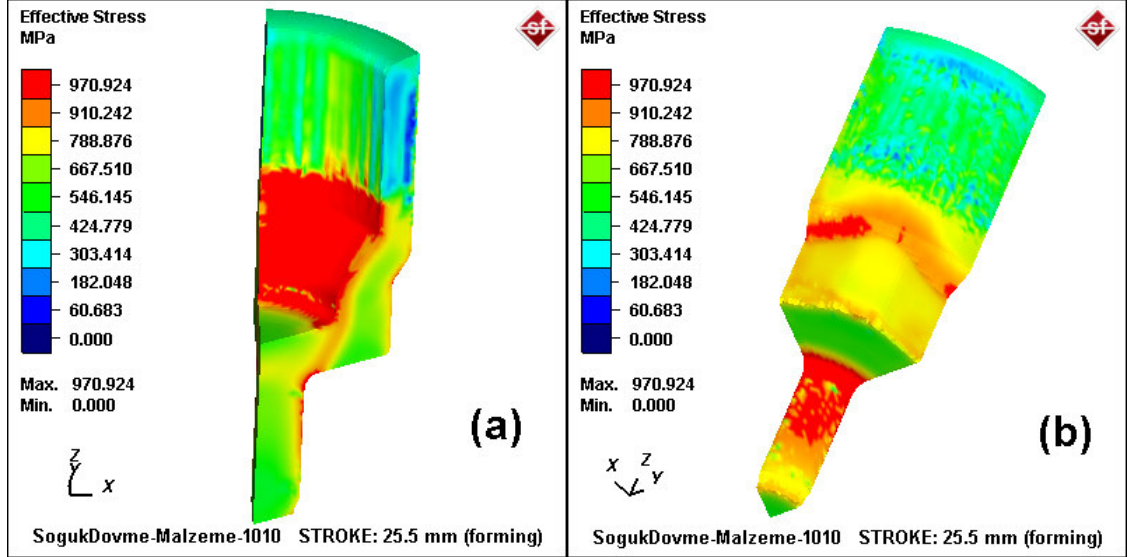


Şekil 4.51. Malzemesi 1010 seçilen simülasyonda basma işleminin sonundaki strain değerleri.

(a) İş parçasının kesitindeki ve iç yüzeyindeki değerler. (b) İş parçasının dış yüzeyindeki değerler.

Şekil 4.51 (a)'da, zımbanın parçanın iç kısmında yaptığı deformasyon sonucunda, parçanın strain değerlerinin en yüksek olduğu alan (5,080-4,763 arası) görülmektedir. Ayrıca, kesmeye maruz kalan yerleri birleştiren bir hat boyunca ortaya çıkmış, 3,493-1,588 arası olan

strain değerleri de görülmektedir. Şekil 4.51 (b)'de, basma işlemi sonunda kuyruk kısmının başlangıç kıvrımının olduğu yerde kesmeden dolayı strainin yüksek olduğu (4,763-3,493 değerleri civarında) alan görülmektedir. Ayrıca, anahtar ağız şeklinin oluştuğu yerde de strainin yaklaşık 3,493 ile yüzeyin geri kalanından daha yüksek değerde olduğu görülmektedir.



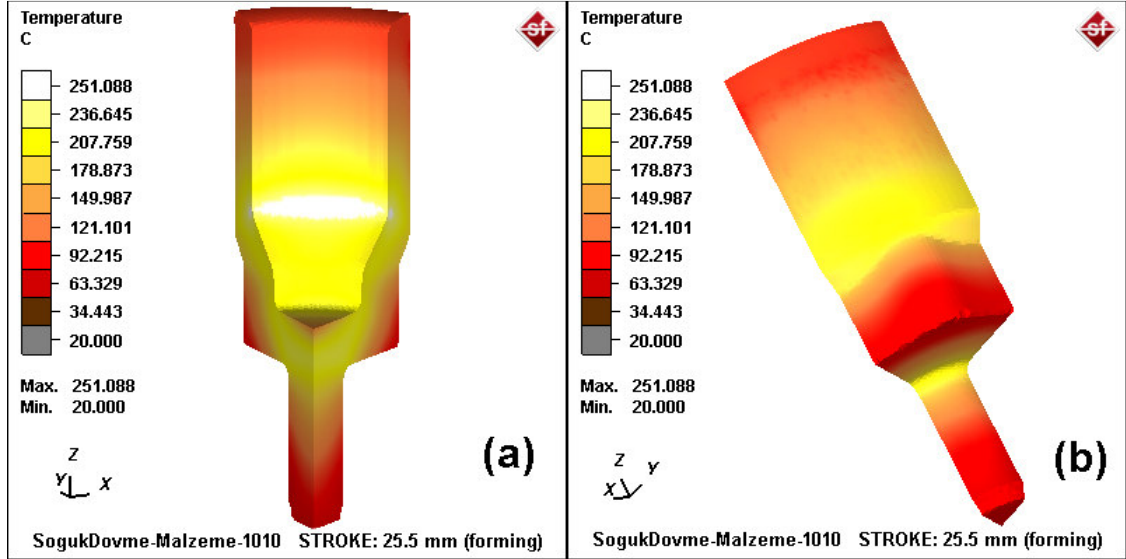
Şekil 4.52. Malzemesi 1010 seçilen simülasyonda basma işleminin sonundaki gerilme değerleri.

(a) İş parçasının kesitindeki ve iç yüzeyindeki değerler. (b) İş parçasının dış yüzeyindeki değerler.

Şekil 4.52 (a)'da, zımbanın parçaya uyguladığı basma kuvveti nedeniyle oluşan deformasyonun temas yüzeylerinde oluşturduğu yüksek gerilme görülmektedir. Bu alan, 970,924 MPa ile parça üzerindeki en yüksek gerilmeye sahip yüzeylerden birisidir. Ayrıca kesmeye maruz kalan yerleri birleştiren bir hat boyunca da gerilmenin yüksek olduğu (910,242-788,876 MPa) görülmektedir. Şekil 4.52 (b)'de, iş parçasının kuyruk kısmının yüzeyinde çok yüksek gerilme değerleri (970,924-910,242 MPa arası) görülmektedir. Bunun nedeni, kuyruk kısmında deplasman hızının yüksek olması ve kuyruk oluşurken kesmenin olmasıdır. Ayrıca, anahtar ağız şeklinin oluştuğu yüzeyde de çok yüksek gerilme değerleri görülmektedir (970,924-788,876 MPa arası).

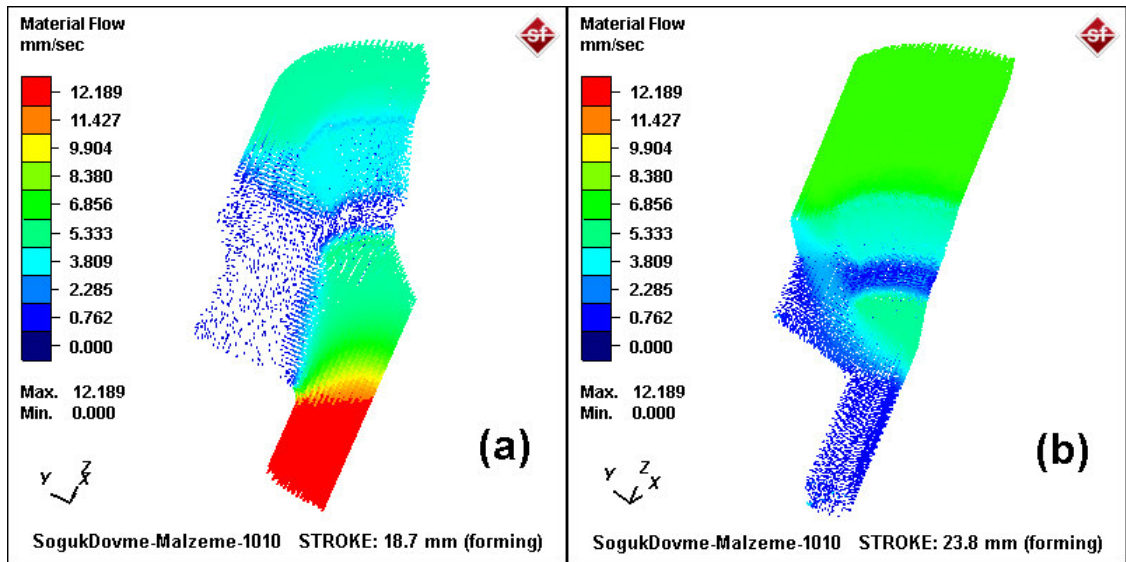
Şekil 4.53 (a)'da, zımbanın iş parçasında basma yaptığı yerlerde yüksek sıcaklıklar (236,645-207,759 °C arası) görülmektedir. Ayrıca basmadan dolayı kalıp içinde sıkışan parçanın yukarıya, kalıp dışına doğru uzaması ve zımbanın aşağıya doğru basma hareketiyle iki yöne doğru gerilen alanda iş parçası üzerindeki en sıcak alan (251,088 °C) görülmektedir. Şekil 4.53 (b)'de, kuyruk başlangıç kısmında kesmenin olması nedeniyle ve anahtar ağızının

şekillendiği kısımda şekil değiştirmenin fazla olması nedeniyle, yüksek sıcaklıklar (236,645-207,759 °C arası) görülmektedir.



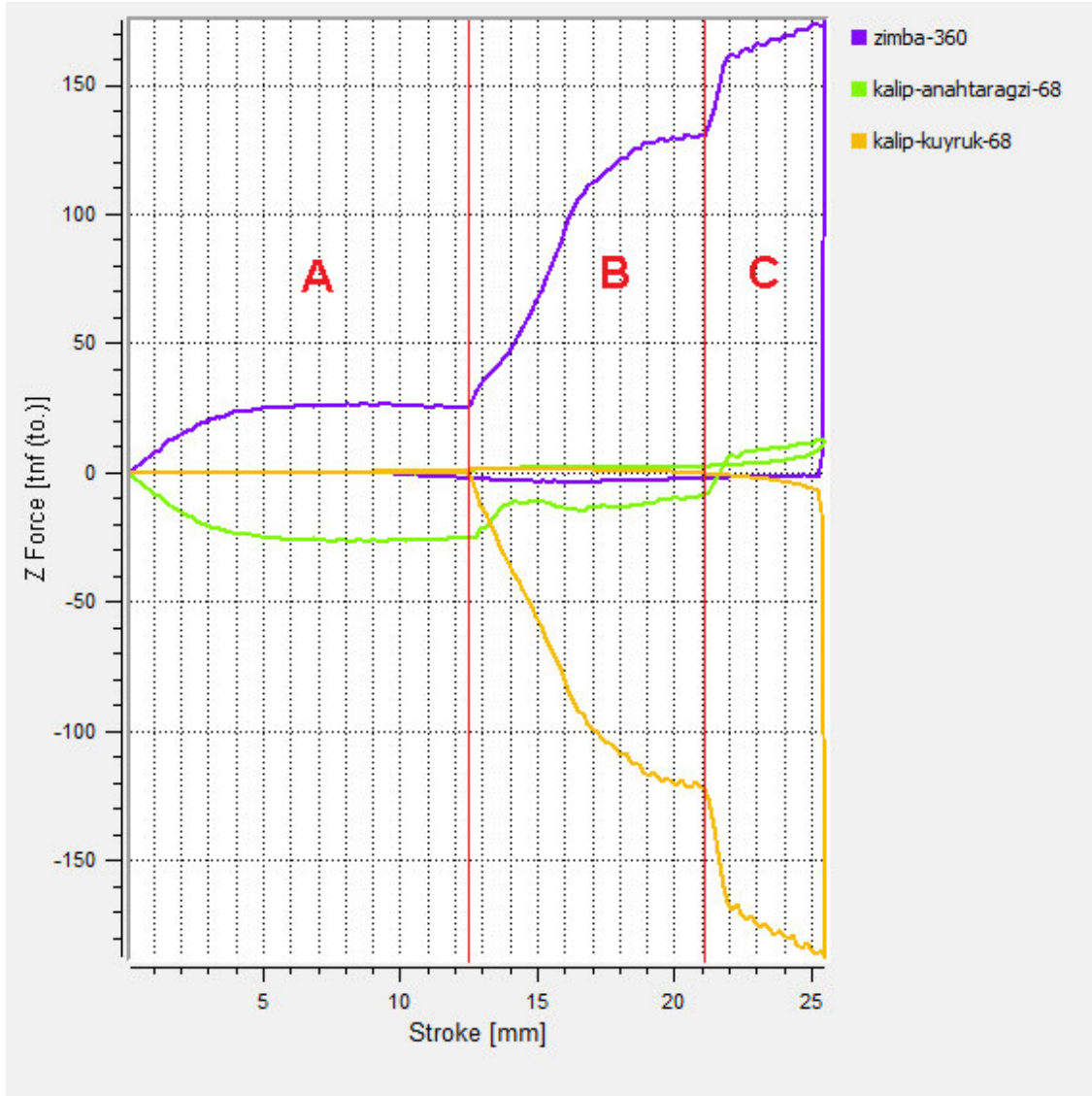
Şekil 4.53. Malzemesi 1010 seçilen simülasyonda basma işleminin sonundaki sıcaklık değerleri.

(a) İş parçasının kesitindeki ve iç yüzeyindeki değerler. (b) İş parçasının dış yüzeyindeki değerler.



Şekil 4.54. Malzemesi 1010 seçilen simülasyonda basma işlemindeki malzeme akış hızları. (a) İş parçasının kuyruk kısmındaki ve basma yapılan yüzeyindeki hızlar. (b) İş parçasında kuyruk oluşumu bittikten sonraki hızlar.

Şekil 4.54 (a)'da, şekil verme işlemi sırasında zımbanın bastığı yüzey 8,380-5,333 mm/s arası değişen akış hızlarına sahiptir. Ayrıca, kuyruk kesitinin parçanın genel kesitinden daha küçük olması nedeniyle, kuyruk kesitinde parça akış hızının çok yüksek olduğu (12,189 mm/s) görülmektedir. Şekil 4.54 (b)'de, kuyruk kısmı oluşumu bittikten sonra, zımbanın basmaya devam etmesi sonucu kalıpla zımba arasında sıkışan malzemenin yukarıya, kalıbın dışına doğru 8,380 mm/s ile hızlıca hareket ettiği de görülmektedir.



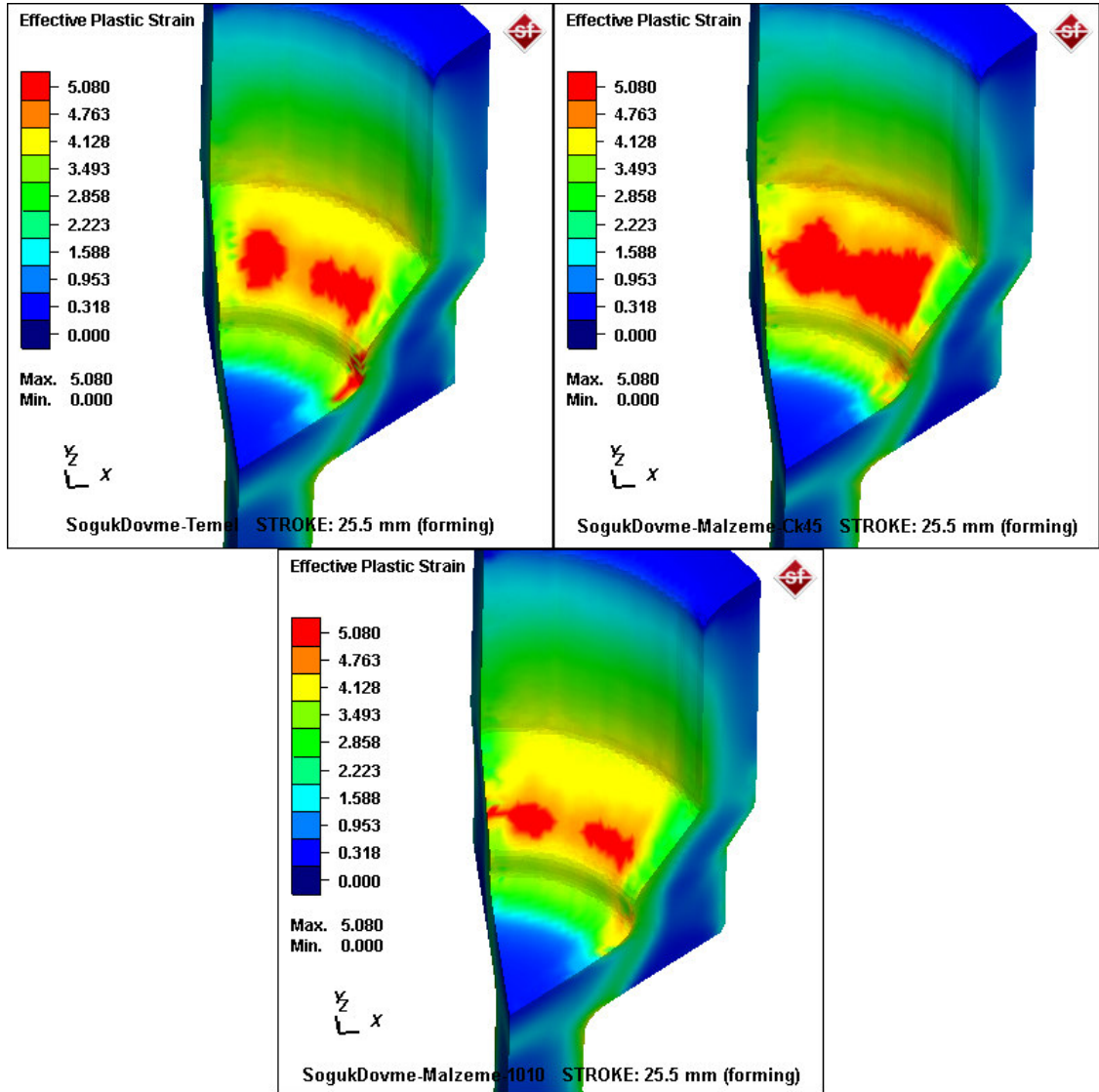
Şekil 4.55. Malzemesi 1010 seçilen simülasyonun basma kuvveti grafiği.

Şekil 4.55'te iş parçası malzemesinin 1010 seçildiği simülasyondaki zımbanın yaptığı basma kuvveti ve kalıplara etkileyen kuvvetler görülmektedir. Bu kuvvetler aynı zamanda iş parçasına da etkimektedir. Şekil 4.55'teki A bölgesinde, iş parçasının anahtar ağız kısmı

oluşturulmaktadır. Bu bölgede zimba en fazla 27 ton kuvvet uygulamaktadır ve bu kuvvetin tamamı kalıplardan sadece anahtar ağız kalıbına etkimektedir. Şekil 4.55'teki B bölgesinde, iş parçasında kuyruk kısmının da oluşumu vardır. Zimbanın yaptığı basma kuvveti tüm kalıpları etkilemektedir. Ancak anahtar ağız kalıbına etkiyen kuvvet azalırken, kuyruk kalıbına etkileyen kuvvet giderek artmaktadır. Bu bölgede zimba en fazla 132 ton kuvvet uygulamakta ancak bunun 122 tonu kuyruk kalıbına etkirken, 10 tonu anahtar ağız kalıbına etkimektedir. Şekil 4.55'teki C bölgesinde, iş parçasının kuyruk oluşumu bitmiştir ve kalıp içinde zimba ile kalıp arasında sıkışan malzeme yukarıya, kalıp dışına doğru hareket etmektedir. Bu bölgede zimba en fazla 174,831 ton kuvvet uygulamaktadır. C bölgesinin sonunda, simülasyonda zimbanın geriye çekilmesi başlamakta ve bu nedenle basma kuvvetlerinin ani şekilde azaldığı görülmektedir.

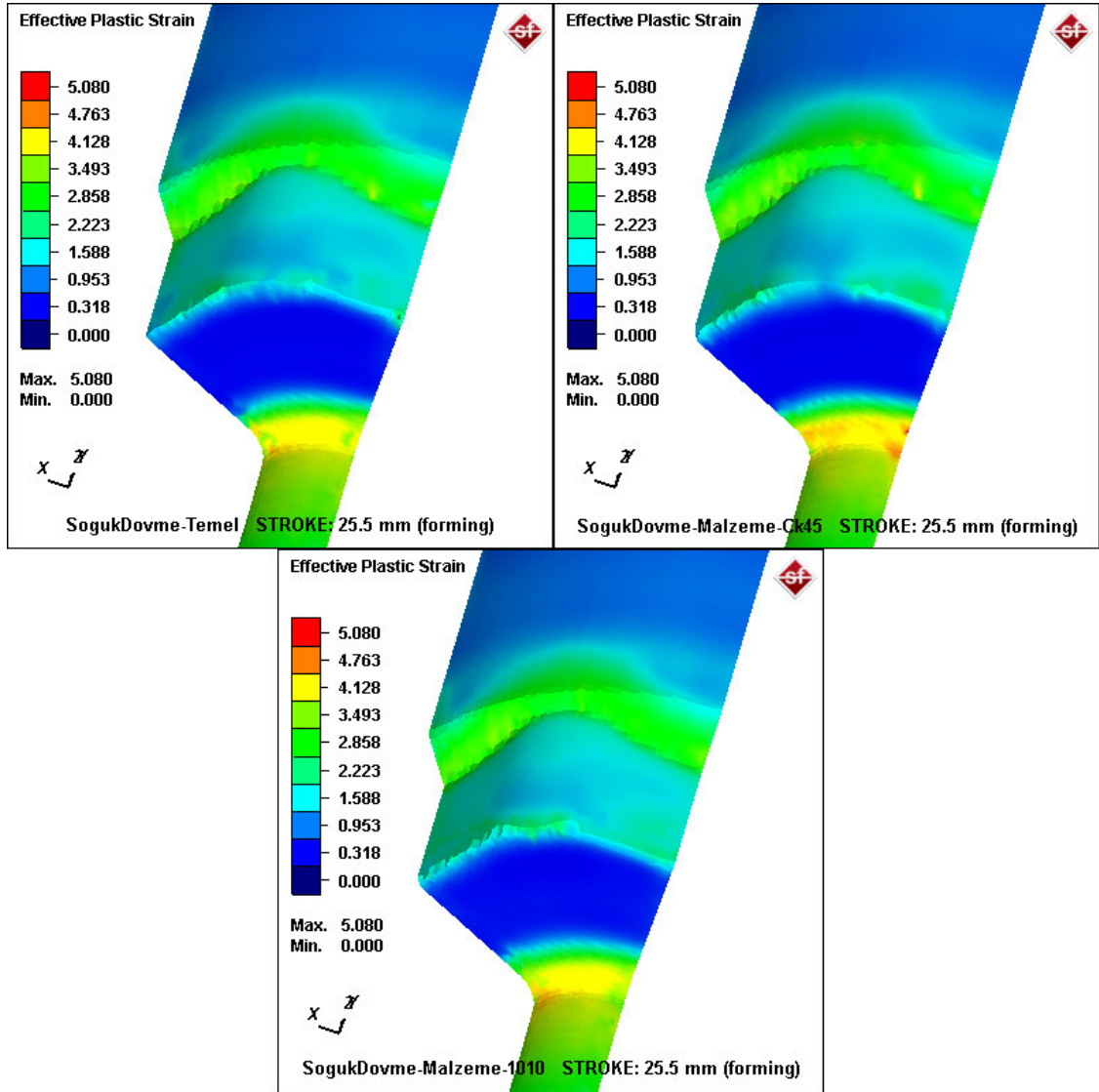
4.4.3. Malzeme Değişim Simülasyonlarının Sonuçlarının Temel Simülasyonun Sonuçları ile Karşılaştırılması

Bu bölümde malzeme değişim simülasyonlarının sonuçları ile temel simülasyonun sonuçları karşılaştırılacaktır.



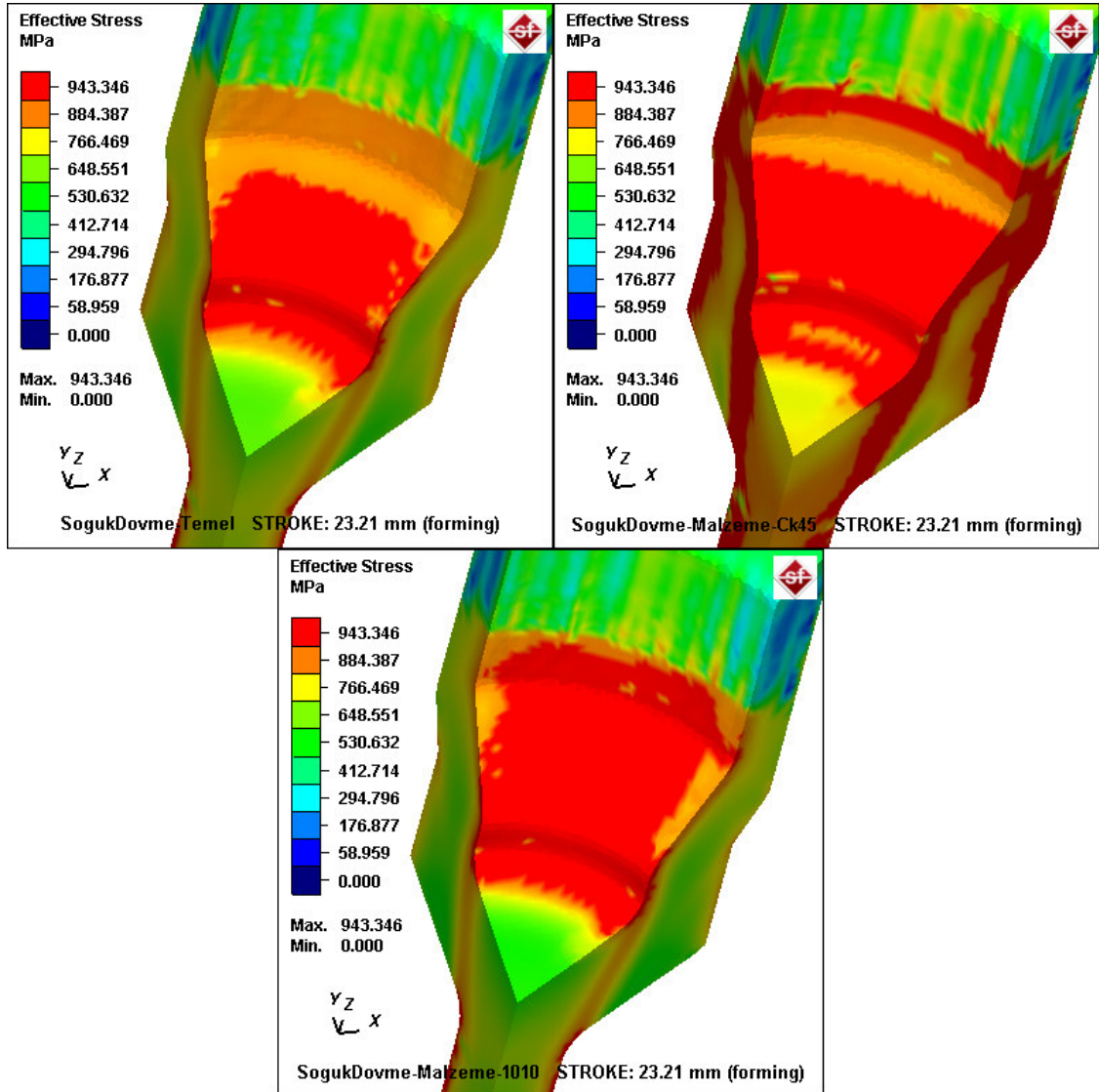
Şekil 4.56. Malzeme değişim simülasyonlarının sonuçları ile temel simülasyonun sonucu arasında, zımbanın basma yaptığı yüzeydeki strain değerlerinin karşılaştırılması.

Şekil 4.56'da basma işleminin sonunda, zımbanın basma yaptığı yüzeyin strain değerleri görülmektedir. Bu yüzey için karşılaştırılan simülasyon sonuçları arasında, iş parçasının malzemesinin Ck45 olduğu simülasyonda yüksek değerli strain alanı en fazladır. İş parçası malzemesinin 16MnCr5 olduğu simülasyonda (temel simülasyon) ise yüksek değerli strain alanı iş parçası malzemesinin 1010 olduğu simülasyondan daha fazladır.



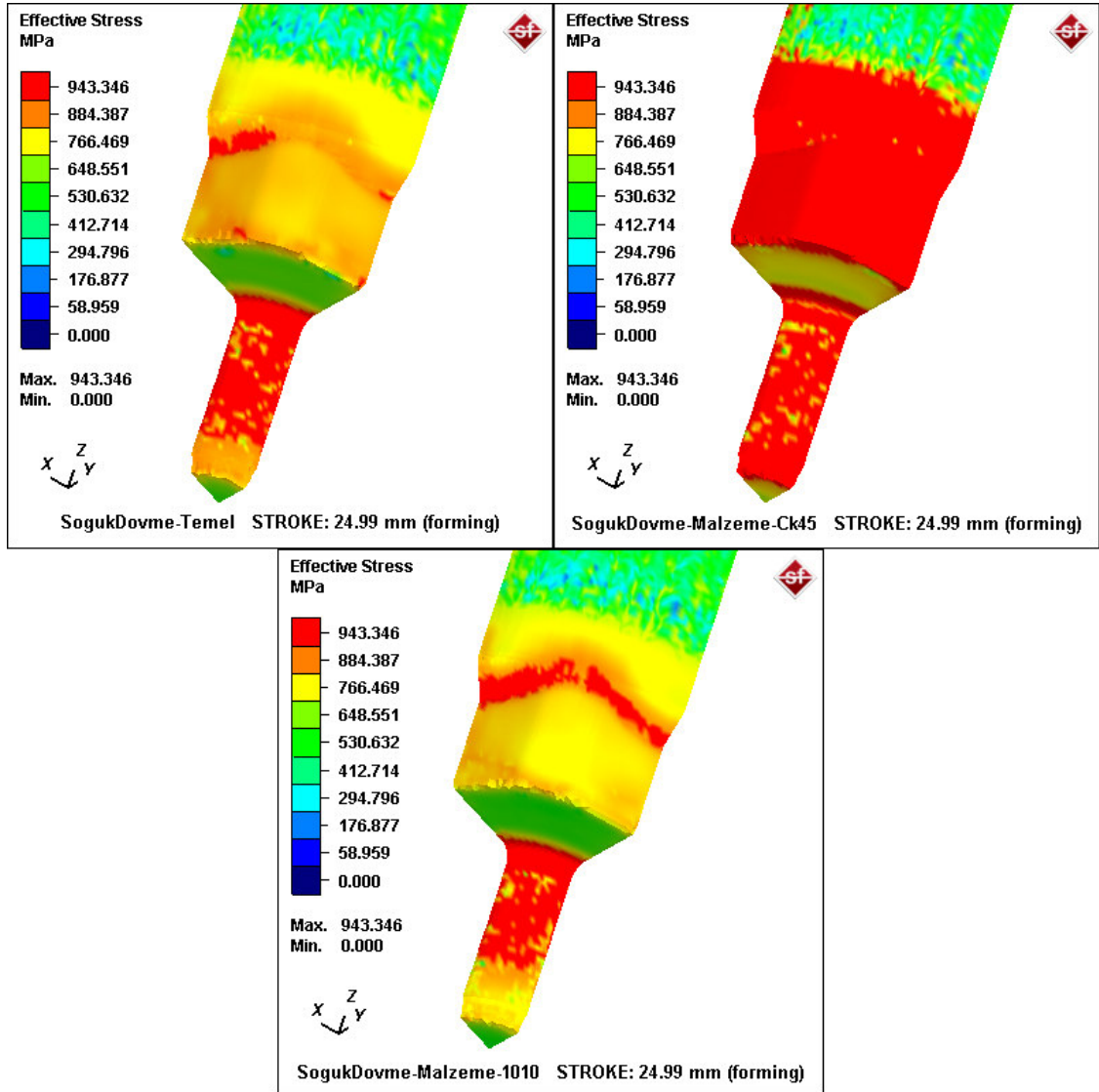
Şekil 4.57. Malzeme değişim simülasyonlarının sonuçları ile temel simülasyonun sonucu arasında, kuyruk kısmı ve anahtar ağız kısmının strain değerlerinin karşılaştırılması.

Şekil 4.57'de basma işleminin sonunda, kuyruk kısmının başlangıç kıvrımının strain değerleri görülmektedir. Bu bölge için karşılaştırılan simülasyon sonuçları arasında, iş parçasının malzemesinin Ck45 olduğu simülasyonda yüksek değerli strain alanı en fazladır. İş parçası malzemesinin 16MnCr5 olduğu simülasyonda (temel simülasyon) ise yüksek değerli strain alanı iş parçası malzemesinin 1010 olduğu simülasyondan daha fazladır. Ancak anahtar ağız kısmında, strain değerlerinin ve alanlarının hemen hemen aynı olduğu görülmektedir.



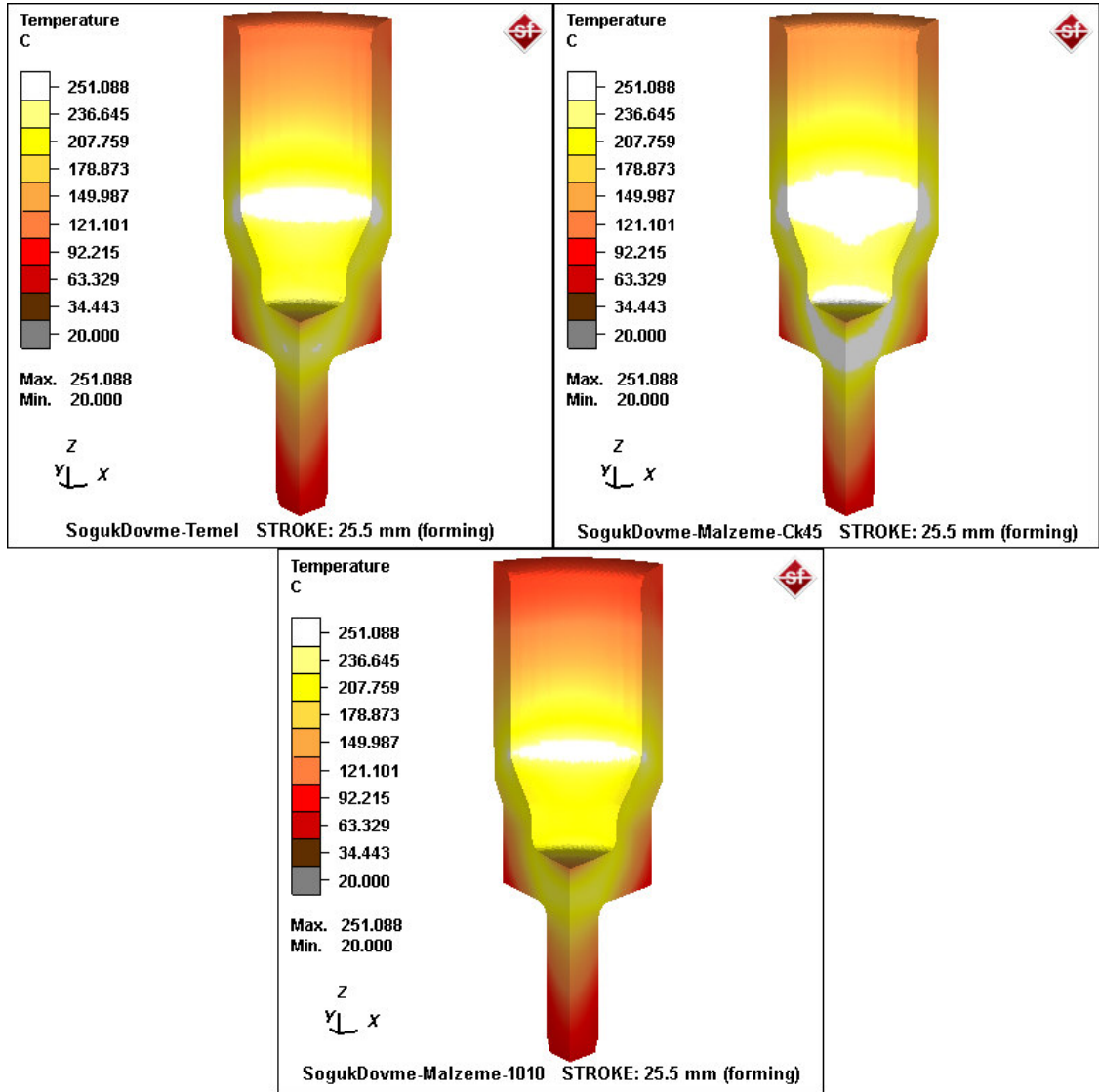
Şekil 4.58. Malzeme değişim simülasyonlarının sonuçları ile temel simülasyonun sonucu arasında, zımbanın basma yaptığı yan yüzeydeki gerilme değerlerinin karşılaştırılması.

Şekil 4.58'de basma işleminin 23,21 mm'sinde, zımbanın basma yaptığı yan yüzeyin gerilme değerleri görülmektedir. Bu yüzey için karşılaştırılan simülasyon sonuçları arasında, iş parçasının malzemesinin Ck45 olduğu simülasyonda maksimum gerilmenin olduğu alan en fazladır. İş parçası malzemesinin 1010 olduğu simülasyonda ise maksimum gerilmenin olduğu alan, iş parçası malzemesinin 16MnCr5 olduğu simülasyondan (temel simülasyon) daha fazladır.



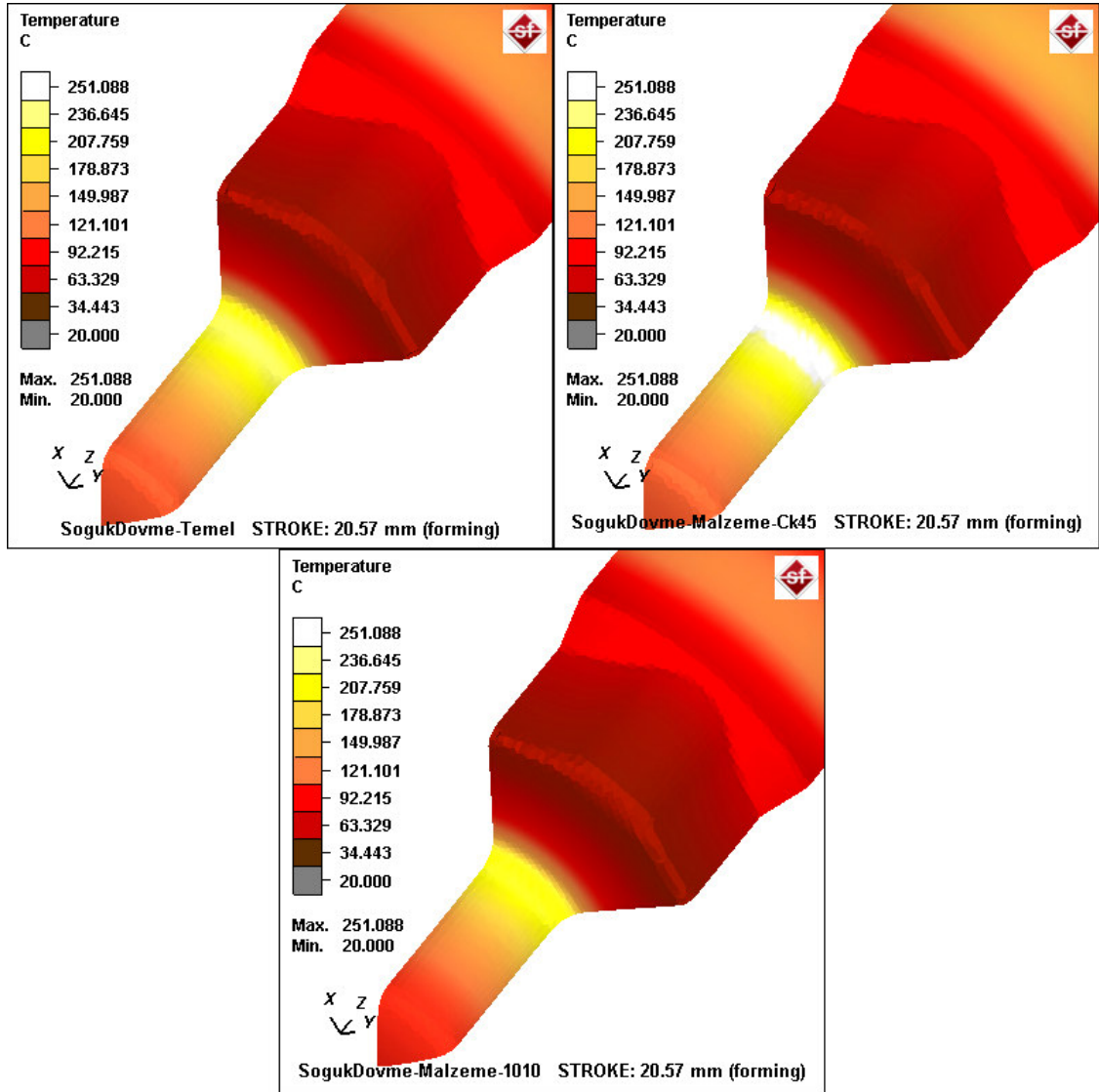
Şekil 4.59. Malzeme değişim simülasyonlarının sonuçları ile temel simülasyonun sonucu arasında, kuyruk kısmı ve anahtar ağzı kısmı gerilme değerlerinin karşılaştırılması.

Şekil 4.59'da basma işleminin 24,99 mm'sinde, kuyruk kısmının ve anahtar ağzı kısmının gerilme değerleri görülmektedir. Simülasyon sonuçları kuyruk kısmı için karşılaştırıldığında, iş parçasının malzemesinin Ck45 olduğu simülasyonda kuyruk kısmındaki gerilmenin en fazla olduğu görülmektedir. İş parçası malzemesinin 16MnCr5 olduğu simülasyonda (temel simülasyon) ise kuyruk kısmındaki gerilme, iş parçası malzemesinin 1010 olduğu simülasyondan daha fazladır. Ancak, anahtar ağzı kısmında, yine iş parçasının malzemesinin Ck45 olduğu simülasyondaki gerilme değerinin en yüksek olduğu görülürken, bu sefer iş parçası malzemesinin 1010 olduğu simülasyondaki gerilmenin, iş parçası malzemesinin 16MnCr5 olduğu simülasyondan (temel simülasyon) daha fazla olduğu görülebilmektedir.



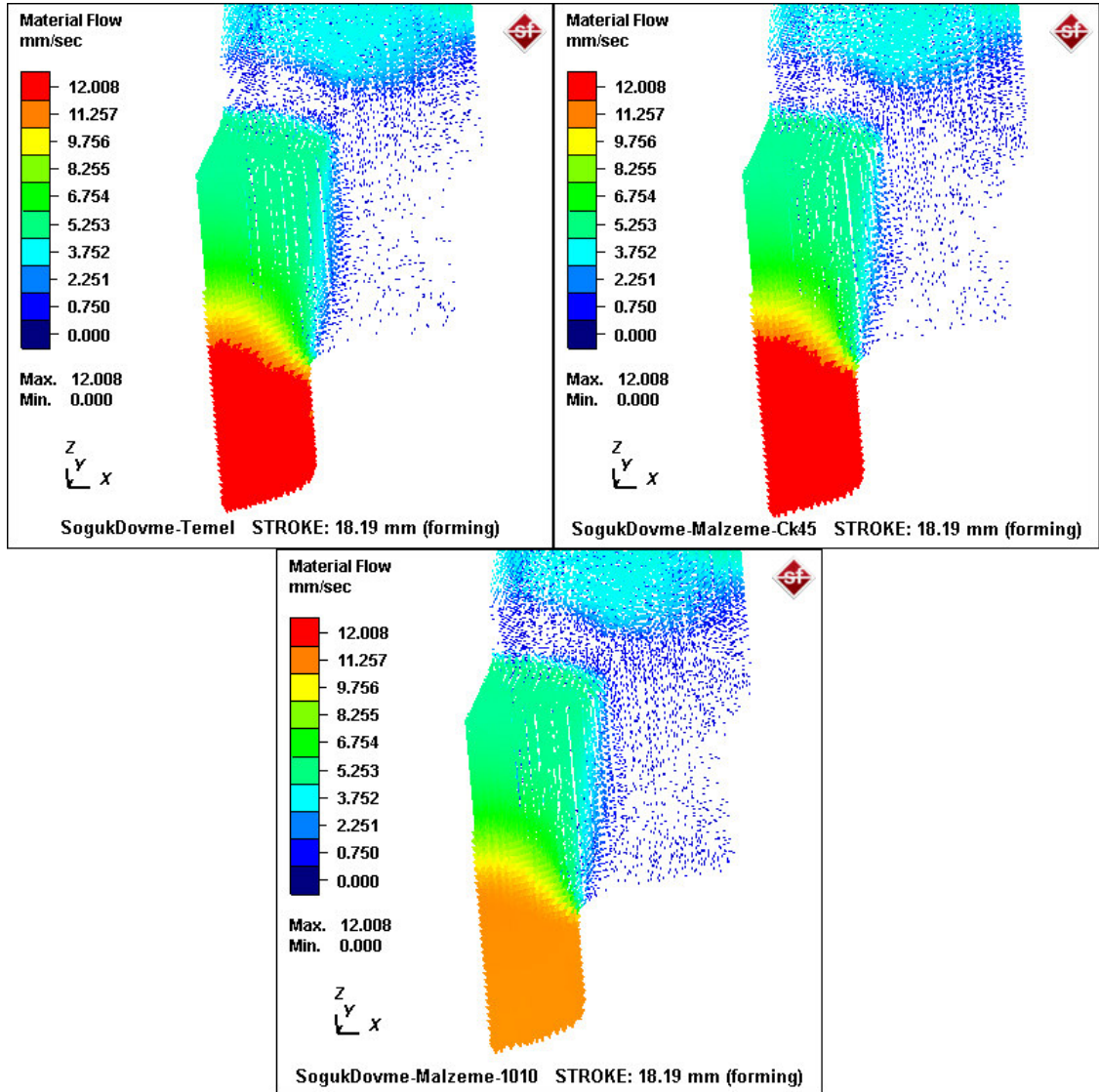
Şekil 4.60. Malzeme değişim simülasyonlarının sonuçları ile temel simülasyonun sonucu arasında, zımbanın basma yaptığı kısmın sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması.

Şekil 4.60'ta basma işleminin sonunda, zımbanın basma yaptığı kısmın sıcaklık değerleri görülmektedir. Bu kısım için karşılaştırılan simülasyon sonuçlarına göre, iş parçası malzemesinin Ck45 olduğu simülasyonda sıcaklığın en hızlı arttığı ve en fazla alana yayıldığı yani ısı üretiminin en çok olduğu görülmektedir. İş parçası malzemesinin 16MnCr5 olduğu simülasyonda (temel simülasyon) ise sıcaklık artışı ve sıcaklığın yayıldığı alan yani ısı üretimi, iş parçası malzemesinin 1010 olduğu simülasyondan daha fazladır.



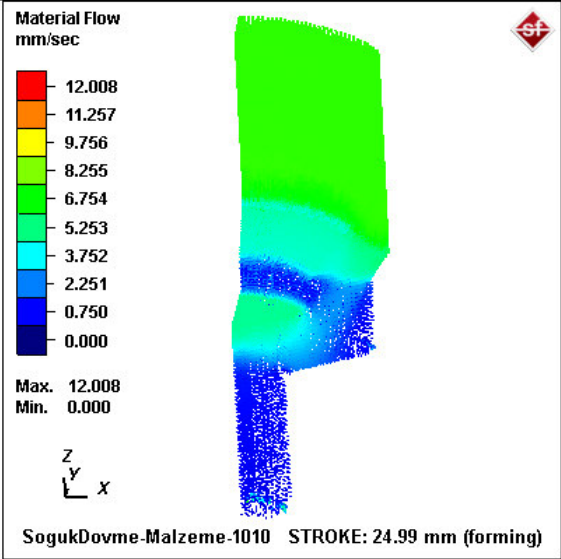
Şekil 4.61. Malzeme değişim simülasyonlarının sonuçları ile temel simülasyonun sonucu arasında, kuyruk sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması.

Şekil 4.61'de basma işleminin 20,57 mm'sinde, kuyruk kısmındaki sıcaklık değerleri görülmektedir. Kuyruk kısmının başlangıç kıvrımı için karşılaştırılan simülasyon sonuçlarına göre, iş parçası malzemesinin Ck45 olduğu simülasyonda sıcaklığın en hızlı arttığı ve en fazla alana yayıldığı yani ısı üretiminin en çok olduğu görülmektedir. İş parçası malzemesinin 16MnCr5 olduğu simülasyonda (temel simülasyon) ve iş parçası malzemesinin 1010 olduğu simülasyonda ise sıcaklık artışı ve sıcaklığın yayıldığı alanın yani ısı üretiminin hemen hemen aynı olduğu görülebilmektedir.



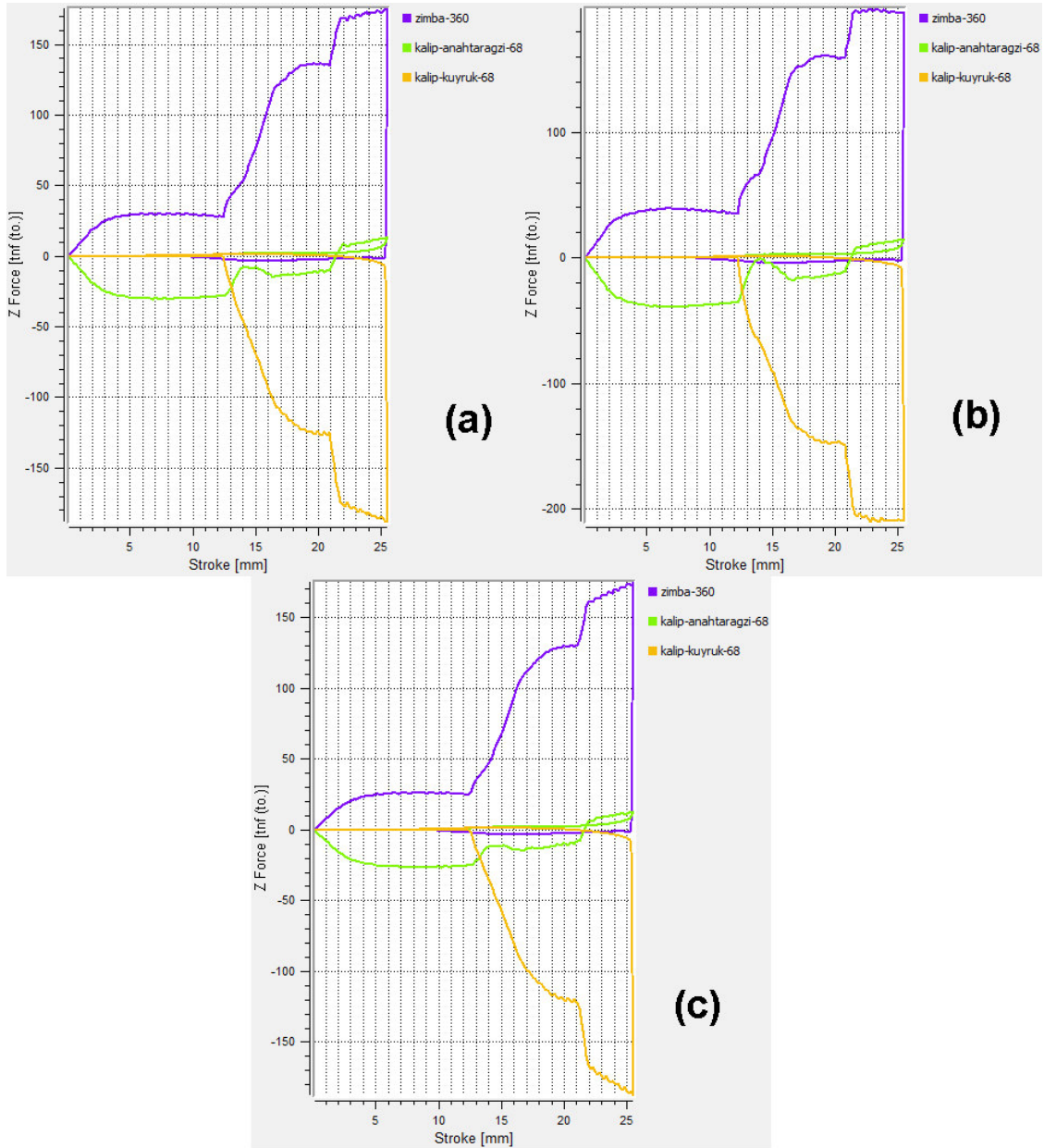
Şekil 4.62. Malzeme değişim simülasyonlarının sonuçları ile temel simülasyonun sonucu arasında, basma işlemi sırasındaki malzeme akış hızlarının karşılaştırılması.

Şekil 4.62'de basma işleminin 18,19 mm'sinde, zımbanın basma yaptığı kısmın malzeme akış hızları görülmektedir. Bu kısım için karşılaştırılan simülasyon sonuçlarına göre, iş parçası malzemesinin Ck45 olduğu simülasyondaki malzeme akış hızının en fazla olduğu görülmektedir. İş parçası malzemesinin 16MnCr5 olduğu simülasyonda (temel simülasyon) ise malzeme akış hızı, iş parçası malzemesinin 1010 olduğu simülasyondan daha fazladır.



karşılaştırılması.

Şekil 4.63'te basma işleminin 24,99 mm'sinde, kuyruk kısmı oluşumu bittikten sonra, zımbanın basmaya devam etmesi sonucu kalıpla zimba arasında sıkışan malzemenin yukarıya, kalıbın dışına doğru yaptığı hareketteki malzeme hızları görülmektedir. Bu kısım için karşılaştırılan simülasyon sonuçlarına göre, simülasyonlardaki malzeme akış hızlarının yaklaşık olarak aynı olduğu görülmektedir.



Şekil 4.64. Malzeme değişim simülasyonlarının basma kuvvetleri grafikleri ile temel simülasyonun basma kuvvetleri grafiğinin karşılaştırılması: (a) Temel simülasyon, (b) Malzemenin Ck45 seçildiği simülasyon, (c) Malzemenin 1010 seçildiği simülasyon.

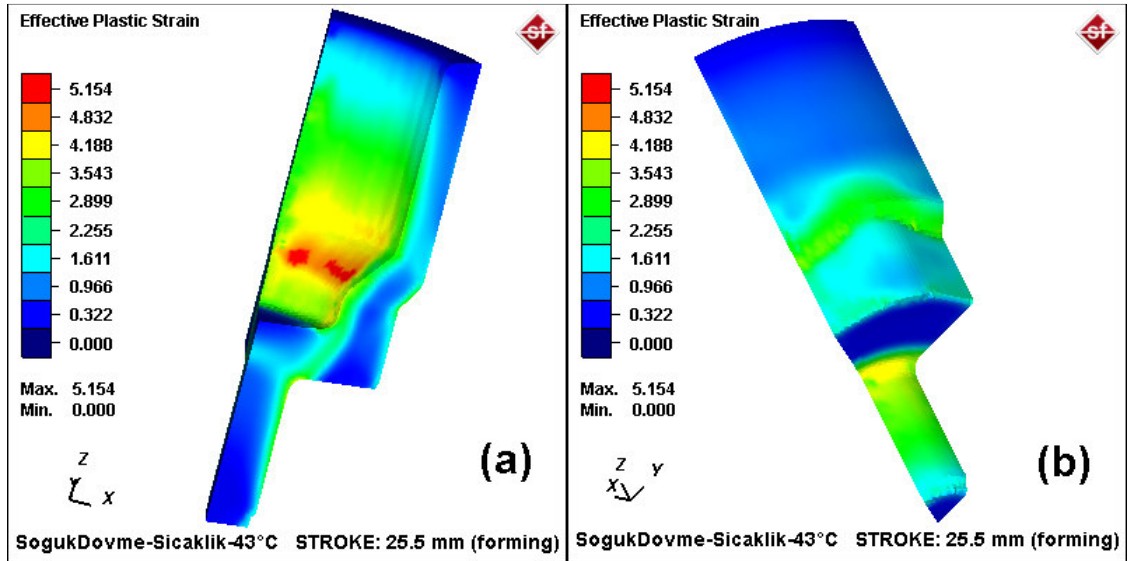
Şekil 4.64'te malzeme değişim simülasyonlarının basma kuvvetlerinin grafikleri ile temel simülasyonun basma kuvvetlerinin grafiği karşılaştırılmıştır. Grafikler arasında eğrilerde ve maksimum noktalarda büyük farklılıkların bulunduğu görülmektedir. İş parçası malzemesinin 16MnCr5 seçildiği simülasyonda (temel simülasyon) zımbanın uyguladığı maksimum basma kuvveti 175,289 ton kuvvet olurken, iş parçası malzemesinin Ck45 seçildiği simülasyonda

zımbanın uyguladığı maksimum basma kuvveti 198,378 ton kuvvet, iş parçası malzemesinin 1010 seçildiği simülasyonda ise zımbanın uyguladığı maksimum basma kuvveti 174,831 ton kuvvet olmaktadır.

4.5. Sıcaklık Değişim Simülasyonları ve Temel Simülasyonla Karşılaştırılması

4.5.1. Sıcaklığın 43 °C Seçildiği Simülasyon

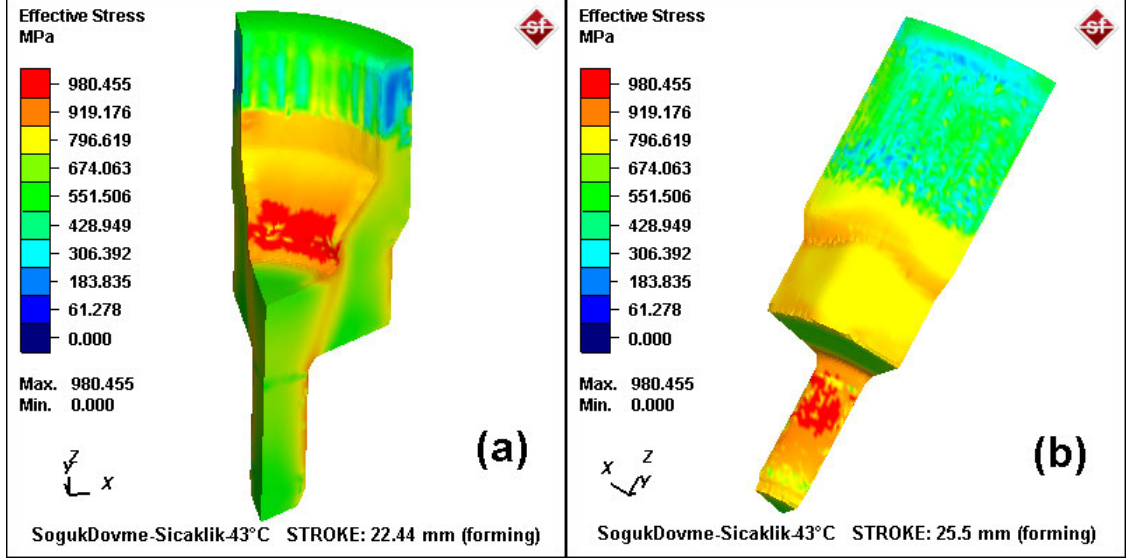
Sıcaklığın 43 °C seçildiği simülasyonda, başlangıç sıcaklıkları dışındaki girdi değerleri temel simülasyon ile aynıdır. Temel simülasyonda seçilenden daha yüksek başlangıç sıcaklık değerinin simülasyona etkisinin incelenmesi amacıyla, simülasyondaki sıcaklıklar Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nün İzmir'in son 59 yıla ait resmi istatistik verilerinden en yüksek sıcaklık olan 43 °C olarak seçilmiştir. Sıcaklığın 43 °C seçildiği simülasyona ait strain, gerilme, sıcaklık, malzeme akışı ve simülasyonda parçalar üzerinde etkili olan basma kuvvetleri aşağıdaki şekillerde verilmiştir.



Şekil 4.65. Sıcaklığı 43 °C seçilen simülasyonda basma işleminin sonundaki strain değerleri. (a) İş parçasının kesitindeki ve iç yüzeyindeki değerler. (b) İş parçasının dış yüzeyindeki değerler.

Şekil 4.65 (a)'da, zımbanın parçanın iç kısmında yaptığı deformasyon sonucunda, parçanın strain değerlerinin en yüksek olduğu alan (5,154-4,832 arası) görülmektedir. Ayrıca, kesmeye maruz kalan yerleri birleştiren bir hat boyunca ortaya çıkmış, 3,543-1,611 arası olan strain değerleri de görülmektedir. Şekil 4.65 (b)'de, basma işlemi sonunda kuyruk kısmının başlangıç kıvrımının olduğu yerde kesmeden dolayı strainin yüksek olduğu (4,188-3,543

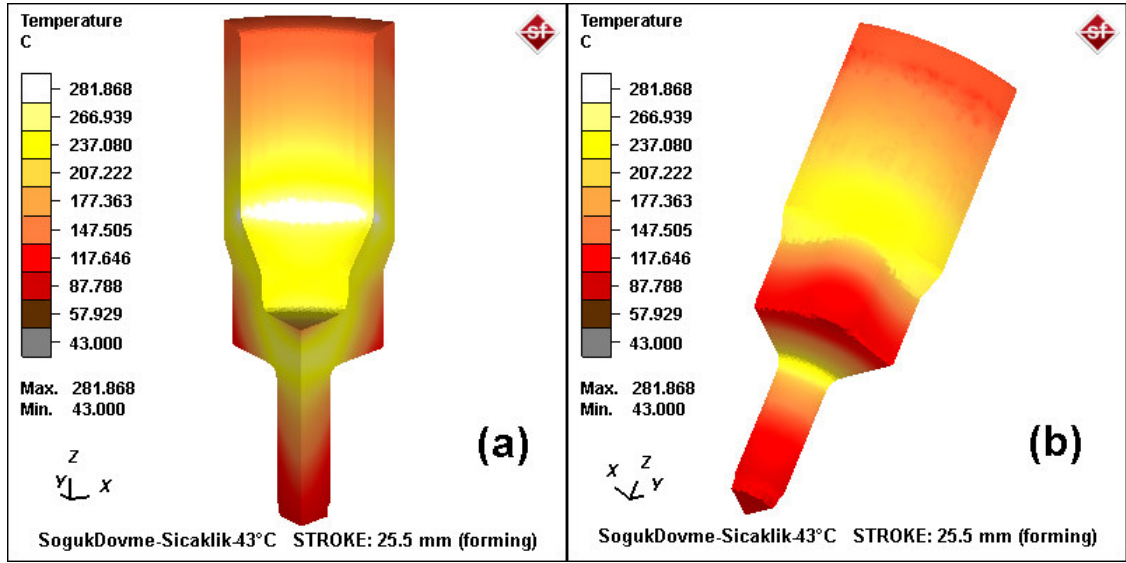
değerleri civarında) alan görülmektedir. Ayrıca, anahtar ağız şeklinin oluştuğu yerde de strainin yaklaşık 3,543 ile yüzeyin geri kalanından daha yüksek değerde olduğu görülmektedir.



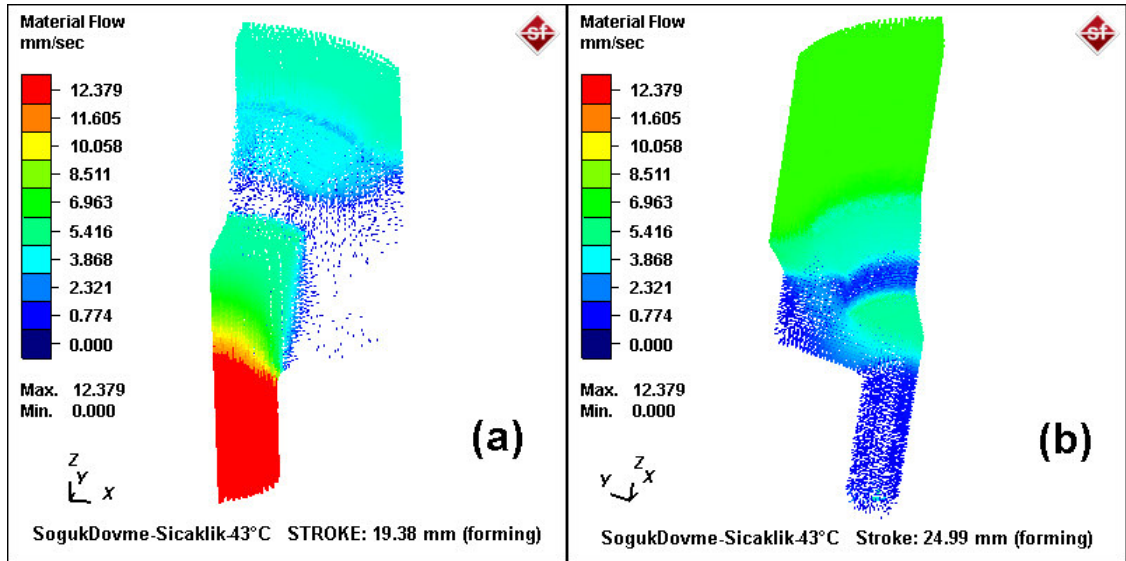
Şekil 4.66. Sıcaklığı 43 °C seçilen simülasyonda basma işlemindeki gerilme değerleri. (a) İş parçasının kesitindeki ve iç yüzeyindeki değerler. (b) İş parçasının dış yüzeyindeki değerler.

Şekil 4.66 (a)'da, zımbanın parçaya uyguladığı basma kuvveti nedeniyle oluşan deformasyonun temas yüzeylerinde oluşturduğu yüksek gerilme görülmektedir. Bu alan, 980,455 MPa ile parça üzerindeki en yüksek gerilmeye sahip yüzeylerden birisidir. Ayrıca kesmeye maruz kalan yerleri birleştiren bir hat boyunca da gerilmenin yüksek olduğu (919,176-796,619 MPa) görülmektedir. Şekil 4.66 (b)'de, iş parçasının kuyruk kısmının yüzeyinde çok yüksek gerilme değerleri (980,455-919,176 MPa arası) görülmektedir. Bunun nedeni, kuyruk kısmında deplasman hızının yüksek olması ve kuyruk oluşurken kesmenin olmasıdır. Ayrıca, anahtar ağız şeklinin oluştuğu yüzeyde de gerilme değerleri yüzeyin geri kalanından yüksektir (919,176-796,619 MPa arası).

Şekil 4.67 (a)'da, zımbanın iş parçasında basma yaptığı yerlerde yüksek sıcaklıklar (266,939-237,080 °C arası) görülmektedir. Ayrıca basmadan dolayı kalıp içinde sıkışan parçanın yukarıya, kalıp dışına doğru uzaması ve zımbanın aşağıya doğru basma hareketiyle iki yöne doğru gerilen alanda iş parçası üzerindeki en sıcak alan (281,868 °C) görülmektedir. Şekil 4.67 (b)'de, kuyruk kısmının başlangıç kıvrımının olduğu yerde kesmenin olması nedeniyle ve anahtar ağızının şekillendiği kısımda şekil değiştirmenin fazla olması nedeniyle, yüksek sıcaklıklar (266,939-237,080 °C arası) görülmektedir.



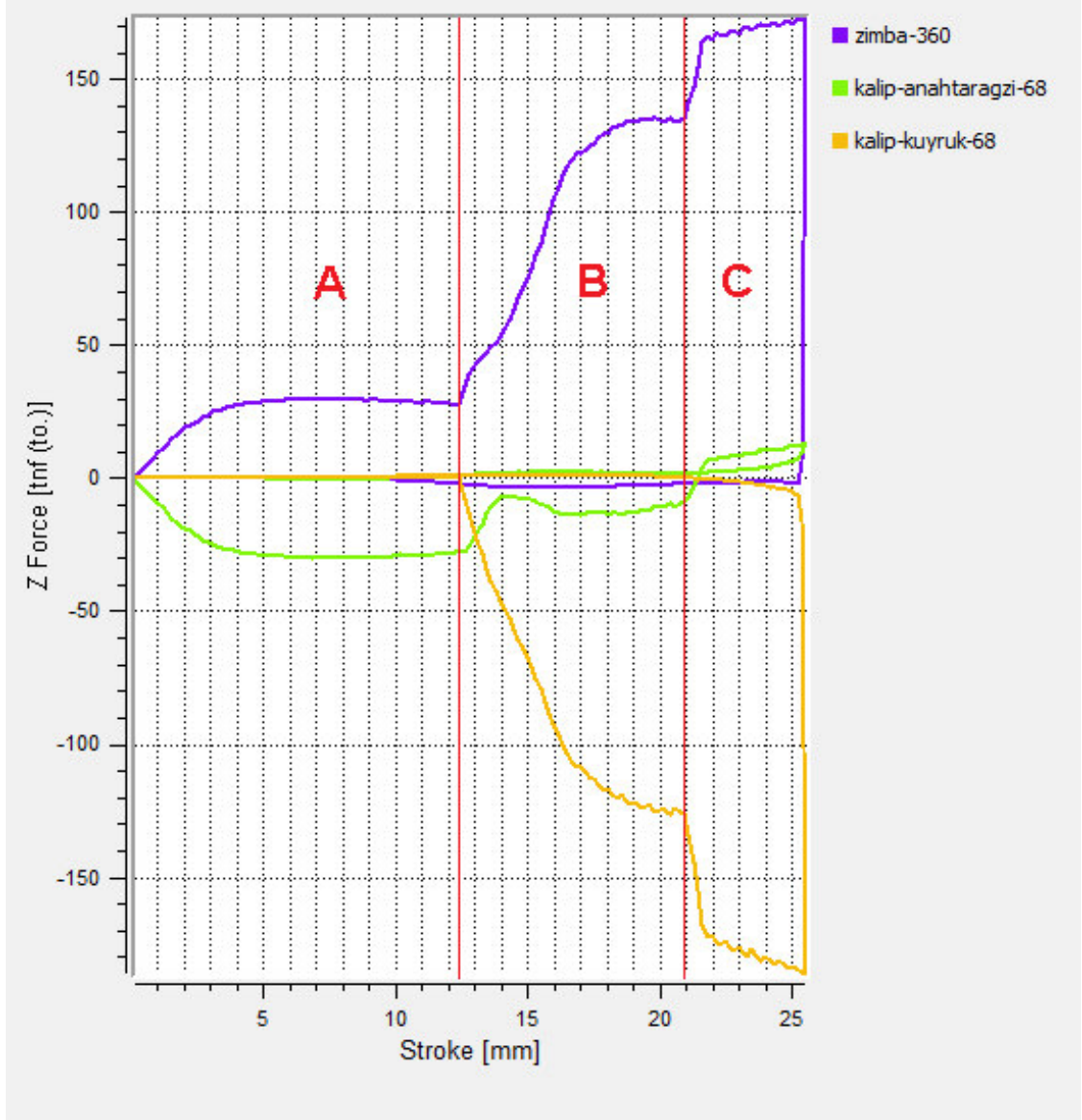
Şekil 4.67. Sıcaklığı 43 °C seçilen simülasyonda basma işleminin sonundaki sıcaklık değerleri. (a) İş parçasının kesitindeki ve iç yüzeyindeki değerler. (b) İş parçasının dış yüzeyindeki değerler.



Şekil 4.68. Sıcaklığı 43 °C seçilen simülasyonda basma işlemindeki malzeme akış hızları. (a) İş parçasının kuyruk kısmındaki ve basma yapılan yüzeyindeki hızlar. (b) İş parçasında kuyruk oluşumu bittikten sonraki hızlar.

Şekil 4.68 (a)'da, şekil verme işlemi sırasında zımbanın bastığı yüzey 8,511-5,416 mm/s arası değişen akış hızlarına sahiptir. Ayrıca, kuyruk kesitinin parçanın genel kesitinden daha küçük olması nedeniyle, kuyruk kesitinde parça akış hızının çok yüksek olduğu (12,379

mm/s) görülmektedir. Şekil 4.68 (b)'de, kuyruk kısmı oluşumu bittikten sonra, zımbanın basmaya devam etmesi sonucu kalıpla zimba arasında sıkışan malzemenin yukarıya, kalıbın dışına doğru 8,511 mm/s ile hızlıca hareket ettiği de görülmektedir.



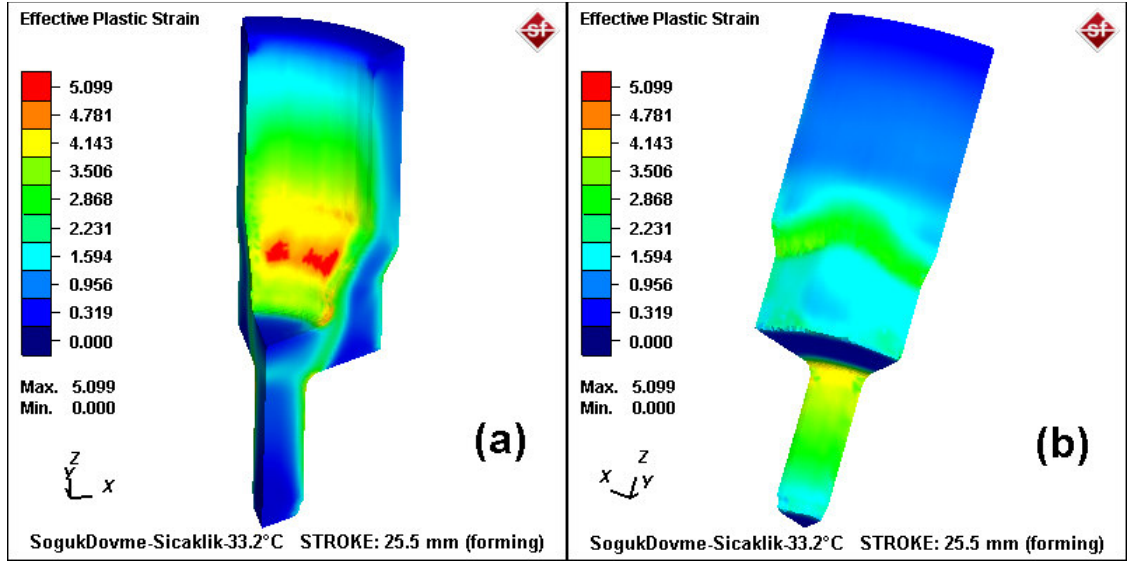
Şekil 4.69. Sıcaklığı 43 °C seçilen simülasyonun basma kuvveti grafiği.

Şekil 4.69'da sıcaklığın 43 °C seçildiği simülasyondaki zımbanın yaptığı basma kuvveti ve kalıplara etkileyen kuvvetler görülmektedir. Bu kuvvetler aynı zamanda iş parçasına da etmektedir. Şekil 4.69'daki A bölgesinde, iş parçasının anahtar ağzı kısmı oluşturulmaktadır. Bu bölgede zimba en fazla 30,5 ton kuvvet uygulamaktadır ve bu kuvvetin tamamı kalıplardan sadece anahtar ağzı kalıbına etmektedir. Şekil 4.69'daki B bölgesinde, iş parçasında kuyruk

kısımının da oluşumu vardır. Zimbanın yaptığı basma kuvveti tüm kalıpları etkilemektedir. Ancak anahtar ağzı kalıbına etkiyen kuvvet azalırken, kuyruk kalıbına etkileyen kuvvet giderek artmaktadır. Bu bölgede zimba en fazla 136 ton kuvvet uygulamakta ancak bunun 126 tonu kuyruk kalıbına etkirken, 10 tonu anahtar ağzı kalıbına etkimektedir. Şekil 4.69'daki C bölgesinde, iş parçasının kuyruk oluşumu bitmiştir ve kalıp içinde zimba ile kalıp arasında sıkışan malzeme yukarıya, kalıp dışına doğru hareket etmektedir. Bu bölgede zimba en fazla 172,929 ton kuvvet uygulamaktadır. C bölgesinin sonunda, simülasyonda zimbanın geriye çekilmesi başlamakta ve bu nedenle basma kuvvetlerinin ani şekilde azaldığı görülmektedir.

4.5.2. Sıcaklığın 33,2 °C Seçildiği Simülasyon

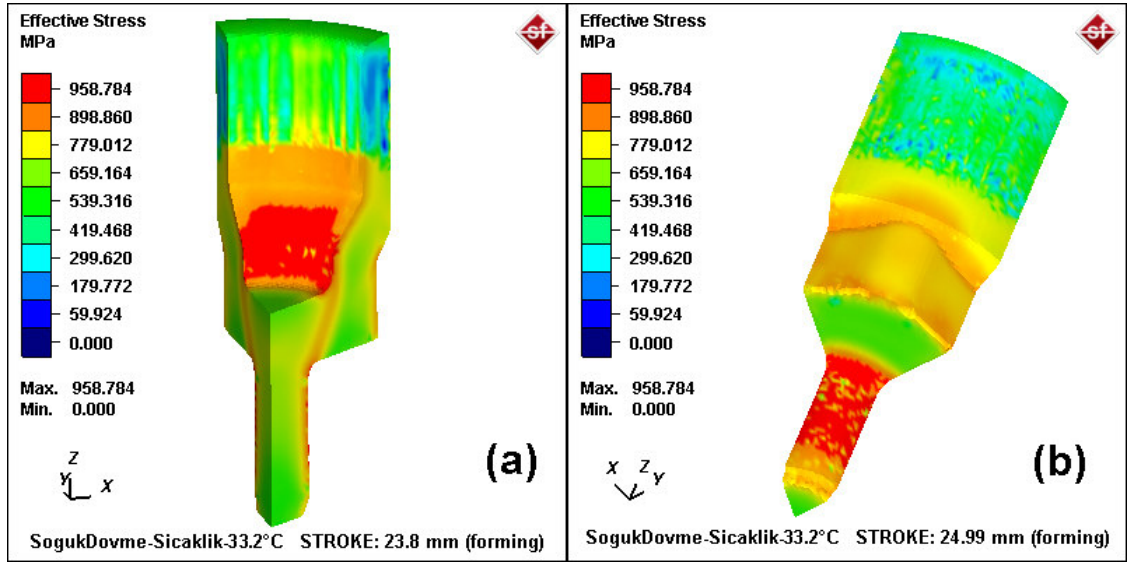
Sıcaklığın 33,2 °C seçildiği simülasyonda, başlangıç sıcaklıkları dışındaki girdi değerleri temel simülasyon ile aynıdır. Temel simülasyonda seçilenden daha yüksek başlangıç sıcaklık değerinin simülasyona etkisinin incelenmesi amacıyla, simülasyondaki sıcaklıklar Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nün İzmir'in son 59 yıla ait resmi istatistik verilerinden ortalama en yüksek sıcaklık olan 33,2 °C olarak seçilmiştir. Sıcaklığın 33,2 °C seçildiği simülasyona ait strain, gerilme, sıcaklık, malzeme akışı ve simülasyonda parçalar üzerinde etkili olan basma kuvvetleri aşağıdaki şekillerde verilmiştir.



Şekil 4.70. Sıcaklığı 33,2 °C seçilen simülasyonda basma işleminin sonundaki strain değerleri.

(a) İş parçasının kesitindeki ve iç yüzeyindeki değerler. (b) İş parçasının dış yüzeyindeki değerler.

Şekil 4.70 (a)'da, zımbanın parçanın iç kısmında yaptığı deformasyon sonucunda, parçanın strain değerlerinin en yüksek olduğu alan (5,099-4,781 arası) görülmektedir. Ayrıca, kesmeye maruz kalan yerleri birleştiren bir hat boyunca ortaya çıkmış, 3,506-1,594 arası olan strain değerleri de görülmektedir. Şekil 4.70 (b)'de, basma işlemi sonunda kuyruk kısmının başlangıç kıvrımının olduğu yerde kesmeden dolayı strainin yüksek olduğu (4,781-3,506 değerleri civarında) alan görülmektedir. Ayrıca, anahtar ağız şeklinin oluştuğu yerde de strainin yaklaşık 3,506 ile yüzeyin geri kalanından daha yüksek değerde olduğu görülmektedir.

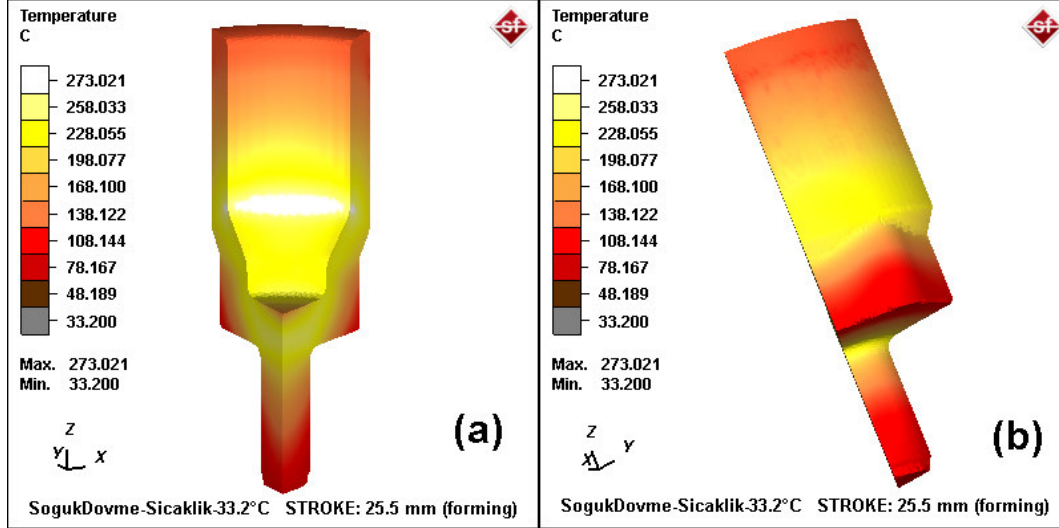


Şekil 4.71. Sıcaklığı 33,2 °C seçilen simülasyonda basma işlemindeki gerilme değerleri. (a) İş parçasının kesitindeki ve iç yüzeyindeki değerler. (b) İş parçasının dış yüzeyindeki değerler.

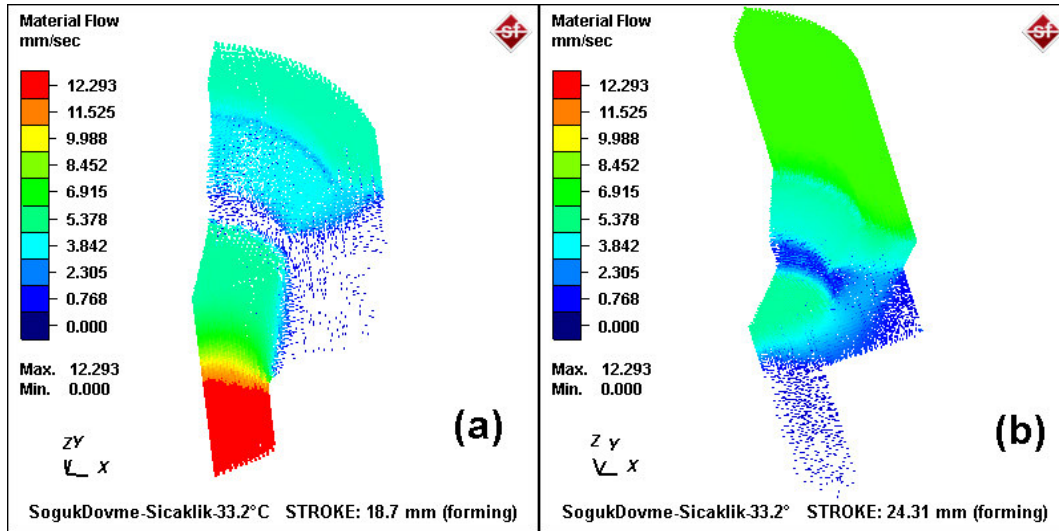
Şekil 4.71 (a)'da, zımbanın parçaya uyguladığı basma kuvveti nedeniyle oluşan deformasyonun temas yüzeylerinde oluşturduğu yüksek gerilme görülmektedir. Bu alan, 958,784 MPa ile parça üzerindeki en yüksek gerilmeye sahip yüzeylerden birisidir. Ayrıca kesmeye maruz kalan yerleri birleştiren bir hat boyunca da gerilmenin yüksek olduğu (898,860-779,012 MPa) görülmektedir. Şekil 4.71 (b)'de, iş parçasının kuyruk kısmının yüzeyinde çok yüksek gerilme değerleri (958,784-898,860 MPa arası) görülmektedir. Bunun nedeni, kuyruk kısmında deplasman hızının yüksek olması ve kuyruk oluşurken kesmenin olmasıdır. Ayrıca, anahtar ağız şeklinin oluştuğu yüzeyde de gerilme değerleri yüzeyin geri kalanından yüksektir (898,860-779,012 MPa arası).

Şekil 4.72 (a)'da, zımbanın iş parçasında basma yaptığı yerlerde yüksek sıcaklıklar (258,033-228,055 °C arası) görülmektedir. Ayrıca basmadan dolayı kalıp içinde sıkışan parçanın yukarıya, kalıp dışına doğru uzaması ve zımbanın aşağıya doğru basma hareketiyle iki

yöne doğru gerilen alanda iş parçası üzerindeki en sıcak alan ($273,021\text{ }^{\circ}\text{C}$) görülmektedir. Şekil 4.72 (b)'de, kuyruk kısmının başlangıç kıvrımının olduğu yerde kesmenin olması nedeniyle ve anahtar ağzının şekillendiği kısımda şekil değiştirmenin fazla olması nedeniyle, yüksek sıcaklıklar ($258,033\text{--}228,055\text{ }^{\circ}\text{C}$ arası) görülmektedir.

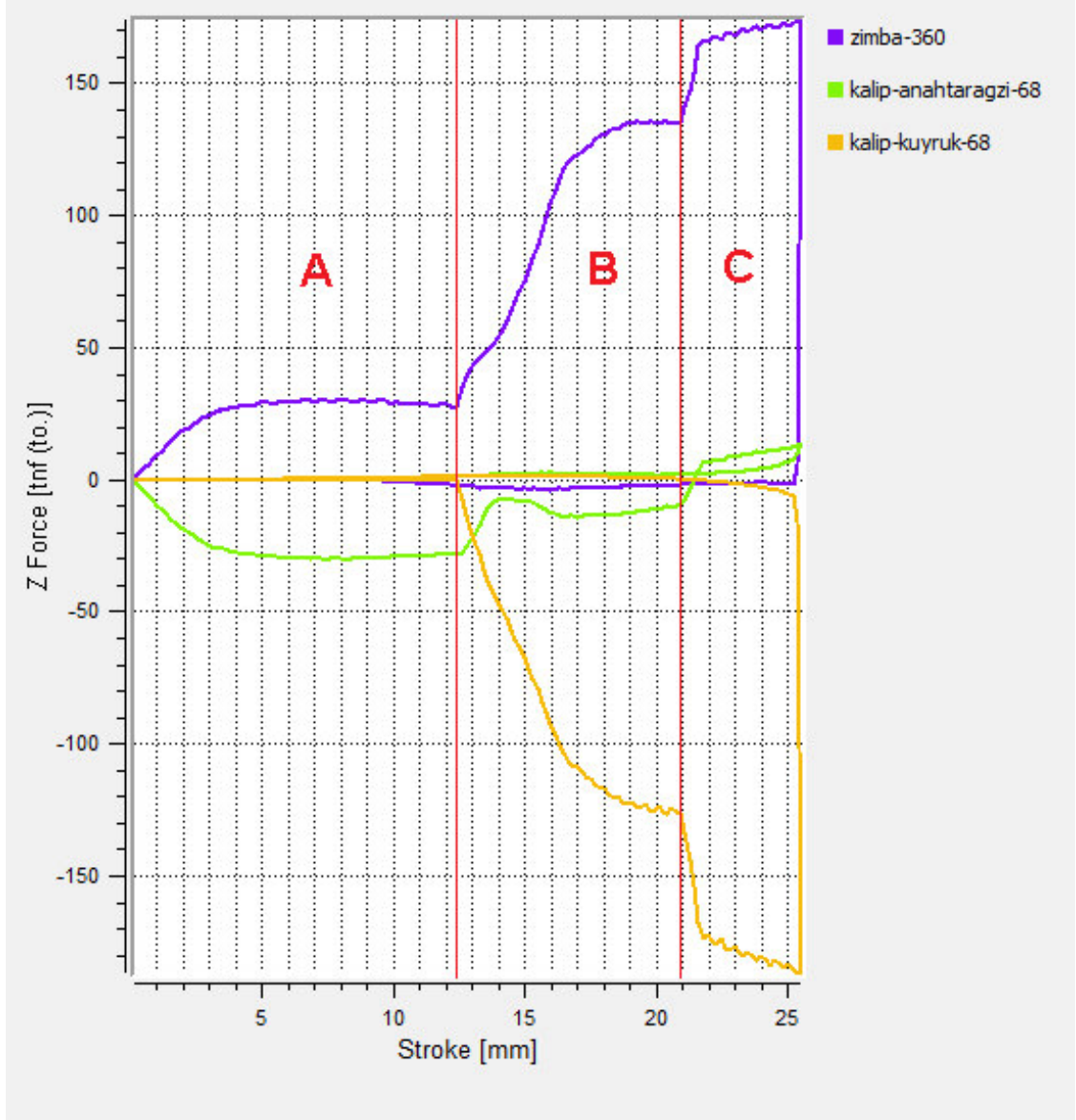


Şekil 4.72. Sıcaklığı $33,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ seçilen simülasyonda basma işleminin sonundaki sıcaklık değerleri. (a) İş parçasının kesitindeki ve iç yüzeyindeki değerler. (b) İş parçasının dış yüzeyindeki değerler.



Şekil 4.73. Sıcaklığı $33,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ seçilen simülasyonda basma işlemindeki malzeme akış hızları. (a) İş parçasının kuyruk kısmındaki ve basma yapılan yüzeyindeki hızlar. (b) İş parçasında kuyruk oluşumu bittikten sonraki hızlar.

Şekil 4.73 (a)'da, şekil verme işlemi sırasında zımbanın bastığı yüzey 8,452-5,378 mm/s arası değişen akış hızlarına sahiptir. Ayrıca, kuyruk kesitinin parçanın genel kesitinden daha küçük olması nedeniyle, kuyruk kesitinde parça akış hızının çok yüksek olduğu (12,293 mm/s) görülmektedir. Şekil 4.73 (b)'de, kuyruk kısmı oluşumu bittikten sonra, zımbanın basmaya devam etmesi sonucu kalıpla zımba arasında sıkışan malzemenin yukarıya, kalıbın dışına doğru 8,452 mm/s ile hızlıca hareket ettiği de görülmektedir.



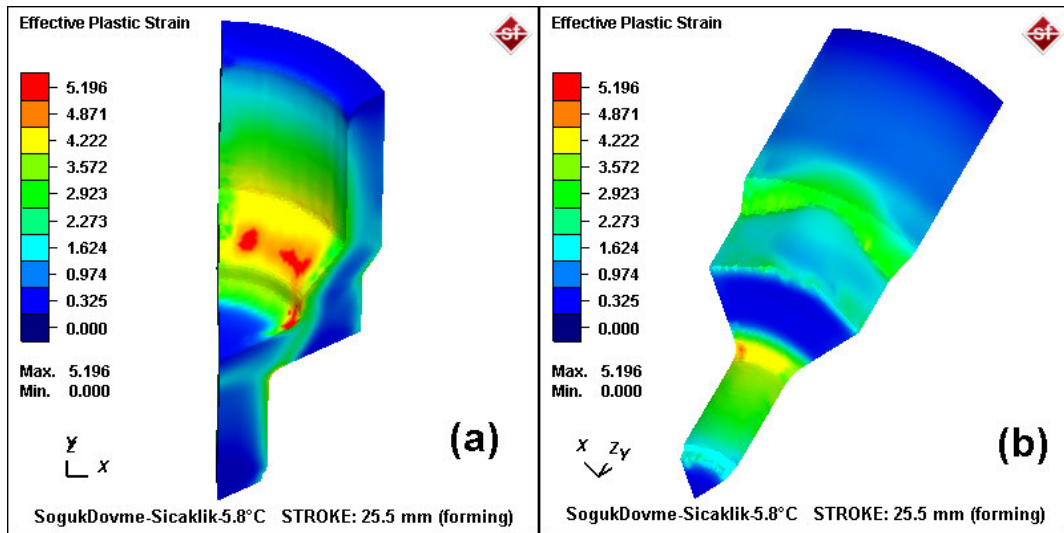
Şekil 4.74. Sıcaklığı 33,2 °C seçilen simülasyonun basma kuvveti grafiği.

Şekil 4.74'te sıcaklığın 33,2 °C seçildiği simülasyondaki zımbanın yaptığı basma kuvveti ve kalıplara etkiyen kuvvetler görülmektedir. Bu kuvvetler aynı zamanda iş parçasına da

etkimektedir. Şekil 4.74'teki A bölgesinde, iş parçasının anahtar ağız kısmı oluşturulmaktadır. Bu bölgede zimba en fazla 31 ton kuvvet uygulamaktadır ve bu kuvvetin tamamı kalıplardan sadece anahtar ağız kalıbına etkimektedir. Şekil 4.74'teki B bölgesinde, iş parçasında kuyruk kısmının da oluşumu vardır. Zimbanın yaptığı basma kuvveti tüm kalıpları etkilemektedir. Ancak anahtar ağız kalıbına etkiyen kuvvet azalırken, kuyruk kalıbına etkileyen kuvvet giderek artmaktadır. Bu bölgede zimba en fazla 136,5 ton kuvvet uygulamakta ancak bunun 127 tonu kuyruk kalıbına etkinken, 9,5 tonu anahtar ağız kalıbına etkimektedir. Şekil 4.74'teki C bölgesinde, iş parçasının kuyruk oluşumu bitmiştir ve kalıp içinde zimba ile kalıp arasında sıkışan malzeme yukarıya, kalıp dışına doğru hareket etmektedir. Bu bölgede zimba en fazla 173,962 ton kuvvet uygulamaktadır. C bölgesinin sonunda, simülasyonda zimbanın geriye çekilmesi başlamakta ve bu nedenle basma kuvvetlerinin ani şekilde azaldığı görülmektedir.

4.5.3. Sıcaklığın 5,8 °C Seçildiği Simülasyon

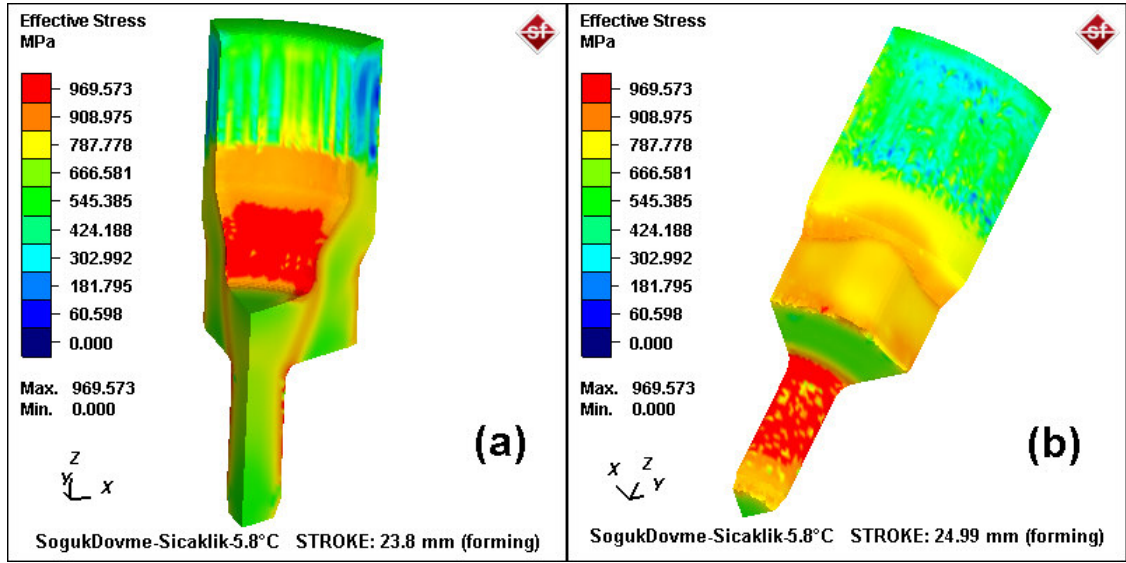
Sıcaklığın 5,8 °C seçildiği simülasyonda, başlangıç sıcaklıkları dışındaki girdi değerleri temel simülasyon ile aynıdır. Temel simülasyonda seçilenden daha düşük başlangıç sıcaklık değerinin simülasyona etkisinin incelenmesi amacıyla, simülasyondaki sıcaklıklar Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nün İzmir'in son 59 yıla ait resmi istatistik verilerinden ortalama en düşük sıcaklık olan 5,8 °C olarak seçilmiştir. Sıcaklığın 5,8 °C seçildiği simülasyona ait strain, gerilme, sıcaklık, malzeme akışı ve simülasyonda parçalar üzerinde etkili olan basma kuvvetleri aşağıdaki şekillerde verilmiştir.



Şekil 4.75. Sıcaklığı 5,8 °C seçilen simülasyonda basma işleminin sonundaki strain değerleri.

(a) İş parçasının kesitindeki ve iç yüzeyindeki değerler. (b) İş parçasının dış yüzeyindeki değerler.

Şekil 4.75 (a)'da, zımbanın parçanın iç kısmında yaptığı deformasyon sonucunda, parçanın strain değerlerinin en yüksek olduğu alan (5,196-4,871 arası) görülmektedir. Ayrıca, kesmeye maruz kalan yerleri birleştiren bir hat boyunca ortaya çıkmış, 3,572-1,624 arası olan strain değerleri de görülmektedir. Şekil 4.75 (b)'de, basma işlemi sonunda kuyruk kısmının başlangıç kıvrımının olduğu yerde kesmeden dolayı strainin yüksek olduğu (4,871-3,572 değerleri civarında) alan görülmektedir. Ayrıca, anahtar ağız şeklinin oluştuğu yerde de strainin yaklaşık 3,572 ile yüzeyin geri kalanından daha yüksek değerde olduğu görülmektedir.

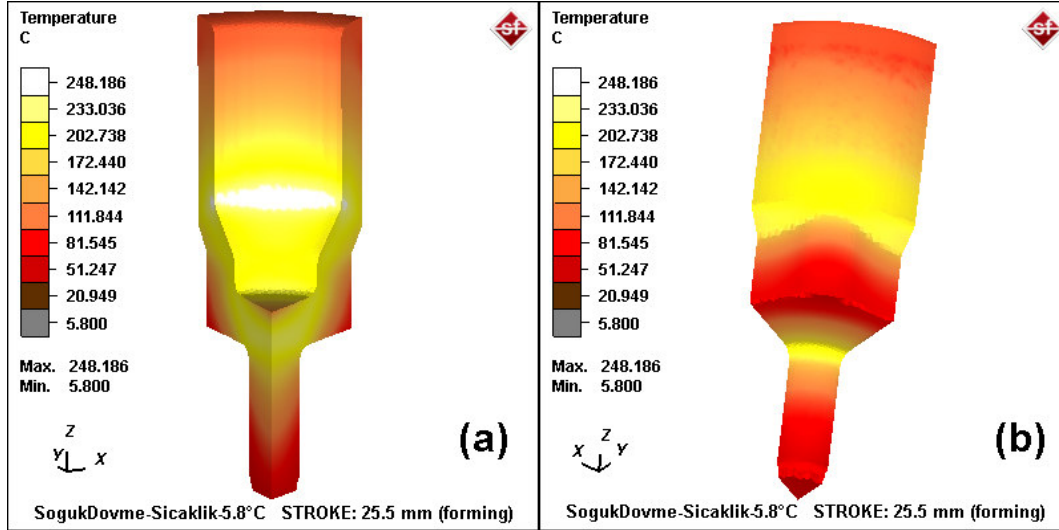


Şekil 4.76. Sıcaklığı 5,8 °C seçilen simülasyonda basma işlemindeki gerilme değerleri. (a) İş parçasının kesitindeki ve iç yüzeyindeki değerler. (b) İş parçasının dış yüzeyindeki değerler.

Şekil 4.76 (a)'da, zımbanın parçaya uyguladığı basma kuvveti nedeniyle oluşan deformasyonun temas yüzeylerinde oluşturduğu yüksek gerilme görülmektedir. Bu alan, 969,573 MPa ile parça üzerindeki en yüksek gerilmeye sahip yüzeylerden birisidir. Ayrıca kesmeye maruz kalan yerleri birleştiren bir hat boyunca da gerilmenin yüksek olduğu (908,975-787,78 MPa) görülmektedir. Şekil 4.76 (b)'de, iş parçasının kuyruk kısmının yüzeyinde çok yüksek gerilme değerleri (969,573-908,975 MPa arası) görülmektedir. Bunun nedeni, kuyruk kısmında deplasman hızının yüksek olması ve kuyruk oluşurken kesmenin olmasıdır. Ayrıca, anahtar ağız şeklinin oluştuğu yüzeyde de gerilme değerleri yüzeyin geri kalanından yüksektir (908,975-787,78 MPa).

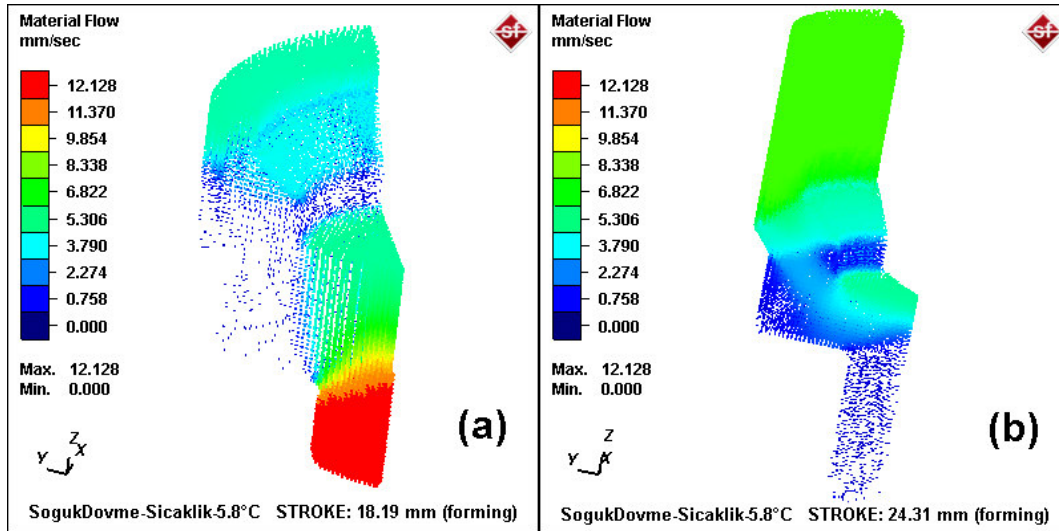
Şekil 4.77 (a)'da, zımbanın iş parçasında basma yaptığı yerlerde yüksek sıcaklıklar (233,036-202,738 °C arası) görülmektedir. Ayrıca basmadan dolayı kalıp içinde sıkışan parçanın yukarıya, kalıp dışına doğru uzaması ve zımbanın aşağıya doğru basma hareketiyle iki

yöne doğru gerilen alanda iş parçası üzerindeki en sıcak alan (248,186 °C) görülmektedir. Şekil 4.77 (b)'de, kuyruk kısmının başlangıç kıvrımının olduğu yerde kesmenin olması nedeniyle ve anahtar ağzının şekillendiği kısımda şekil değiştirmenin fazla olması nedeniyle, yüksek sıcaklıklar (233,036-202,738 °C arası) görülmektedir.



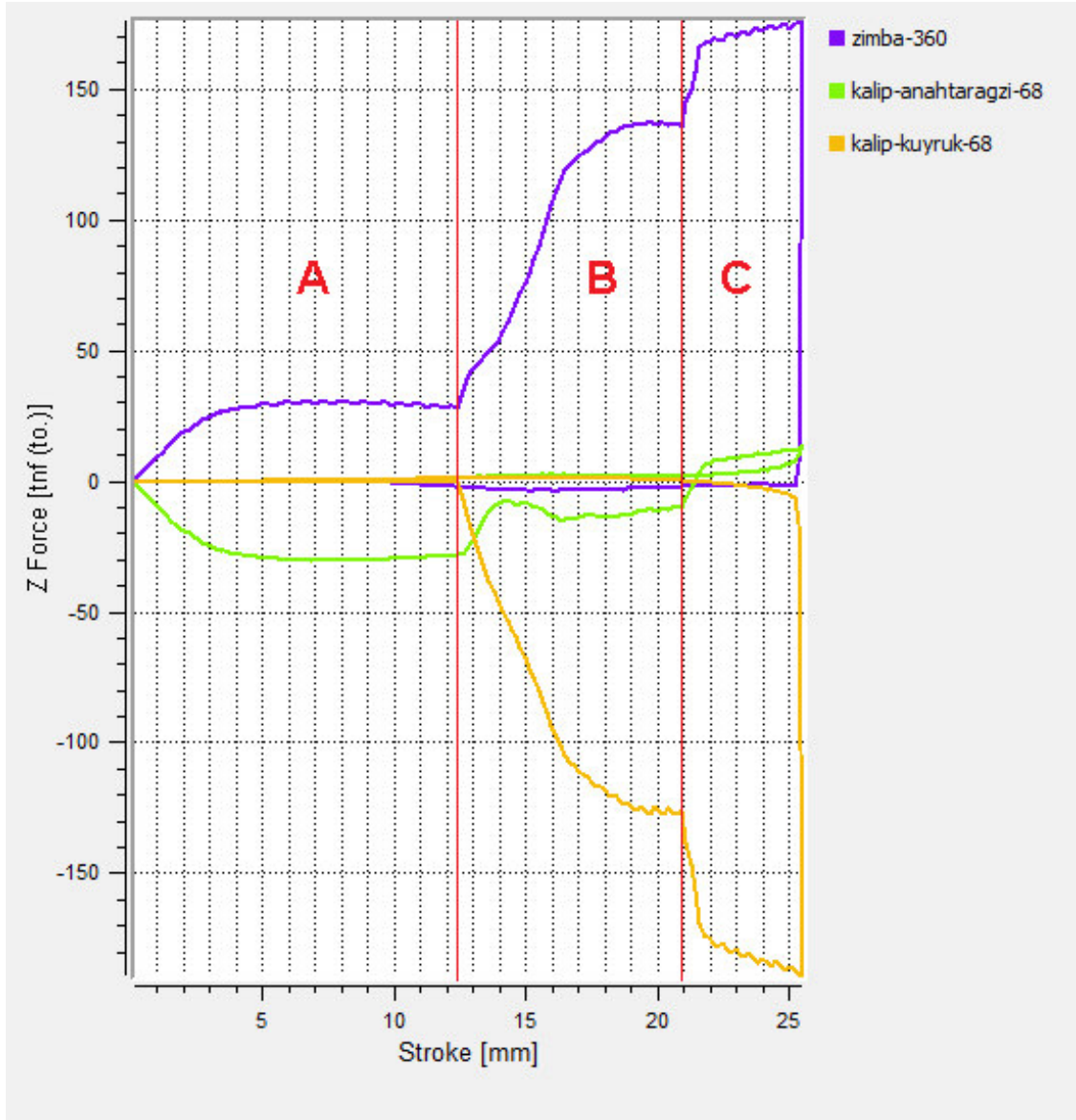
Şekil 4.77. Sıcaklığı 5,8 °C seçilen simülasyonda basma işleminin sonundaki sıcaklık değerleri.

(a) İş parçasının kesitindeki ve iç yüzeyindeki değerler. (b) İş parçasının dış yüzeyindeki değerler.



Şekil 4.78. Sıcaklığı 5,8 °C seçilen simülasyonda basma işlemindeki malzeme akış hızları. (a) İş parçasının kuyruk kısmındaki ve basma yapılan yüzeyindeki hızlar. (b) İş parçasında kuyruk oluşumu bittikten sonraki hızlar.

Şekil 4.78 (a)'da, şekil verme işlemi sırasında zımbanın bastığı yüzey 8,338-5,306 mm/s arası değişen akış hızlarına sahiptir. Ayrıca, kuyruk kesitinin parçanın genel kesitinden daha küçük olması nedeniyle, kuyruk kesitinde parça akış hızının çok yüksek olduğu (12,128 mm/s) görülmektedir. Şekil 4.78 (b)'de, kuyruk kısmı oluşumu bittikten sonra, zımbanın basmaya devam etmesi sonucu kalıpla zımba arasında sıkışan malzemenin yukarıya, kalıbın dışına doğru 8,338 mm/s ile hızlıca hareket ettiği de görülmektedir.



Şekil 4.79. Sıcaklığı 5,8 °C seçilen simülasyonun basma kuvveti grafiği.

Şekil 4.79'da sıcaklığın 5,8 °C seçildiği simülasyondaki zımbanın yaptığı basma kuvveti ve kalıplara etkiyen kuvvetler görülmektedir. Bu kuvvetler aynı zamanda iş parçasına da

etkimektedir. Şekil 4.79'daki A bölgesinde, iş parçasının anahtar ağzı kısmı oluşturulmaktadır. Bu bölgede zimba en fazla 31,5 ton kuvvet uygulamaktadır ve bu kuvvetin tamamı kalıplardan sadece anahtar ağzı kalıbına etkimektedir. Şekil 4.79'daki B bölgesinde, iş parçasında kuyruk kısmının da oluşumu vardır. Zimbanın yaptığı basma kuvveti tüm kalıpları etkilemektedir. Ancak anahtar ağzı kalıbına etkiyen kuvvet azalırken, kuyruk kalıbına etkileyen kuvvet giderek artmaktadır. Bu bölgede zimba en fazla 138 ton kuvvet uygulamakta ancak bunun 128 tonu kuyruk kalıbına etkinken, 10 tonu anahtar ağzı kalıbına etkimektedir. Şekil 4.79'daki C bölgesinde, iş parçasının kuyruk oluşumu bitmiştir ve kalıp içinde zimba ile kalıp arasında sıkışan malzeme yukarıya, kalıp dışına doğru hareket etmektedir. Bu bölgede zimba en fazla 176,054 ton kuvvet uygulamaktadır. C bölgesinin sonunda, simülasyonda zimbanın geriye çekilmesi başlamakta ve bu nedenle basma kuvvetlerinin ani şekilde azaldığı görülmektedir.

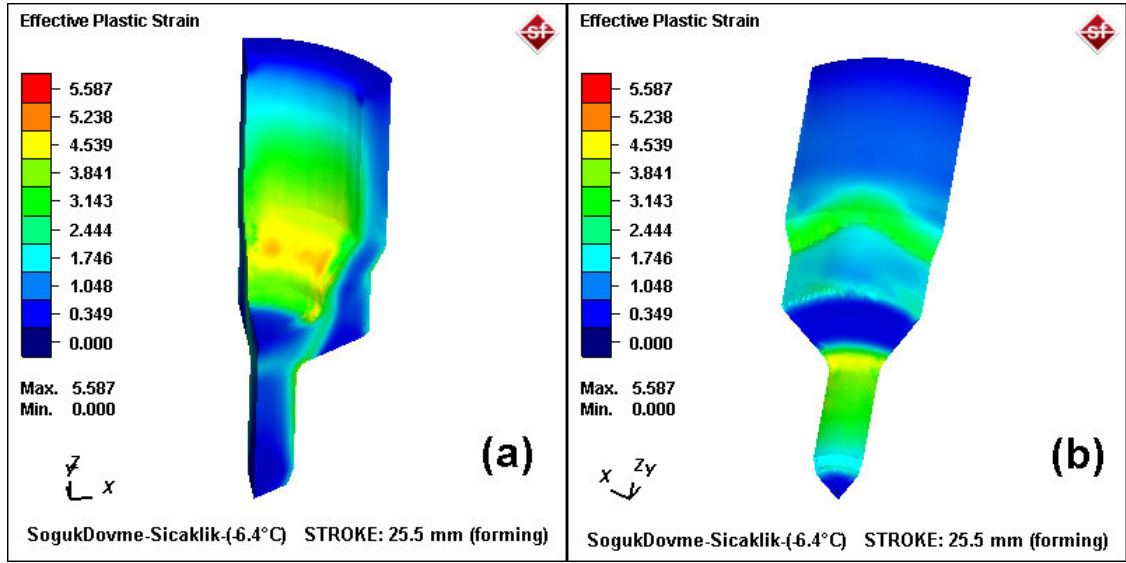
4.5.4. Sıcaklığın -6,4 °C Seçildiği Simülasyon

Sıcaklığın -6,4 °C seçildiği simülasyonda, başlangıç sıcaklıkları dışındaki girdi değerleri temel simülasyon ile aynıdır. Temel simülasyonda seçilenden daha düşük başlangıç sıcaklık değerinin simülasyona etkisinin incelenmesi amacıyla, simülasyondaki sıcaklıklar Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nün İzmir'in son 59 yıla ait resmi istatistik verilerinden en düşük sıcaklık olan -6,4 °C olarak seçilmiştir.

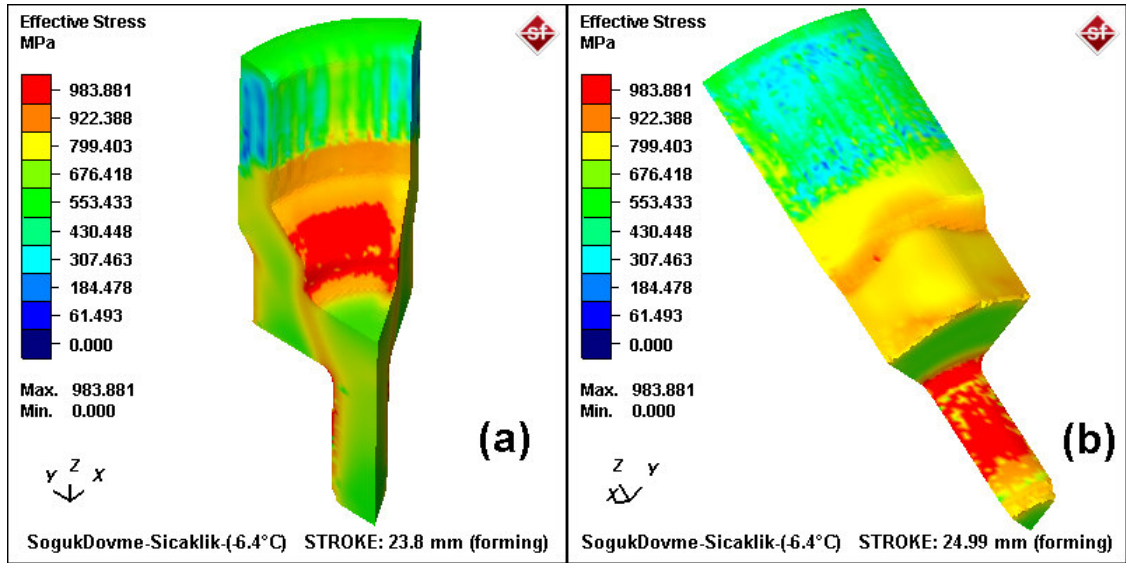
Malzeme davranışının 0 °C altında değişmesine rağmen, simufact.forming yazılımı 0 °C altında sıcaklık değişimi için sadece ΔT 'yi dikkate aldığından, sıcaklığın -6,4 °C seçildiği simülasyon sonuçlarının doğruluk payı çok azdır. Bu nedenle, simülasyon sonuçları verilecek ve diğer sonuçlarla karşılaştırma yapılacak, ancak dikkate alınmayacaktır.

Sıcaklığın -6,4 °C seçildiği simülasyona ait strain, gerilme, sıcaklık, malzeme akışı ve simülasyonda parçalar üzerinde etkili olan basma kuvvetleri aşağıdaki şekillerde verilmiştir.

Şekil 4.80 (a)'da, zimbanın parçanın iç kısmında yaptığı deformasyon sonucunda, parçanın strain değerlerinin en yüksek olduğu alan (5,238-4,539 arası) görülmektedir. Skalada görülen en yüksek değer olan 5,587'nin mesh hatasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca, kesmeye maruz kalan yerleri birleştiren bir hat boyunca ortaya çıkmış, 3,841-1,746 arası olan strain değerleri de görülmektedir. Şekil 4.80 (b)'de, basma işlemi sonunda kuyruk kısmının başlangıç kıvrımının olduğu yerde kesmeden dolayı strainin yüksek olduğu (4,539-3,841 değerleri civarında) alan görülmektedir. Ayrıca, anahtar ağzı şeklinin olduğu yerde de strainin yaklaşık 3,841 ile yüzeyin geri kalanından daha yüksek değerde olduğu görülmektedir.



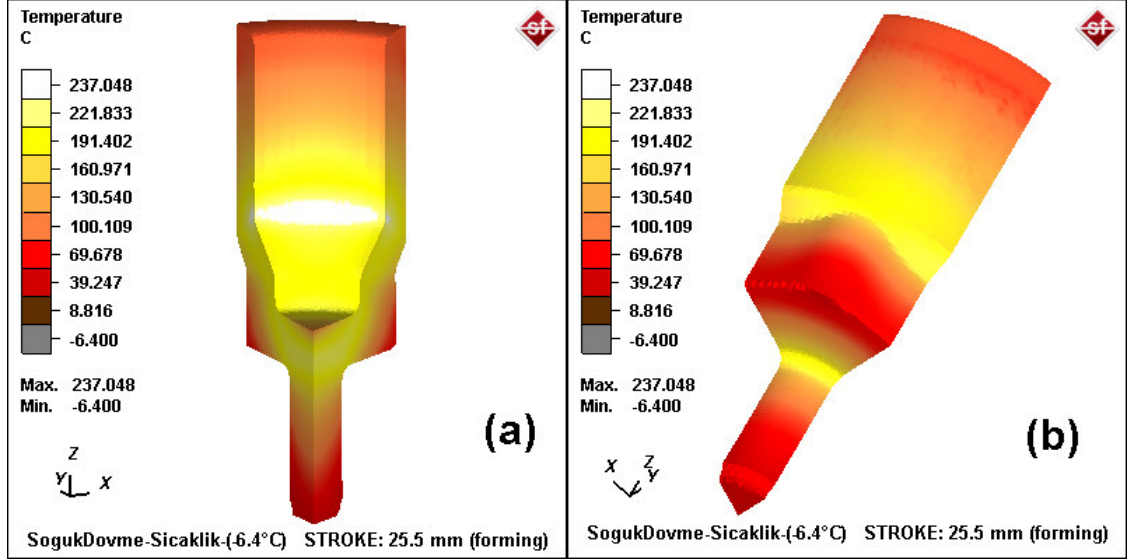
Şekil 4.80. Sıcaklığı -6,4 °C seçilen simülasyonda basma işleminin sonundaki strain değerleri. (a) İş parçasının kesitindeki ve iç yüzeyindeki değerler. (b) İş parçasının dış yüzeyindeki değerler.



Şekil 4.81. Sıcaklığı -6,4 °C seçilen simülasyonda basma işlemindeki gerilme değerleri. (a) İş parçasının kesitindeki ve iç yüzeyindeki değerler. (b) İş parçasının dış yüzeyindeki değerler.

Şekil 4.81 (a)'da, zımbanın parçaya uyguladığı basma kuvveti nedeniyle oluşan deformasyonun temas yüzeylerinde oluşturduğu yüksek gerilme görülmektedir. Bu alan, 983,881 MPa ile parça üzerindeki en yüksek gerilmeye sahip yüzeylerden birisidir. Ayrıca kesmeye maruz kalan yerleri birleştiren bir hat boyunca da gerilmenin yüksek olduğu (922,388-

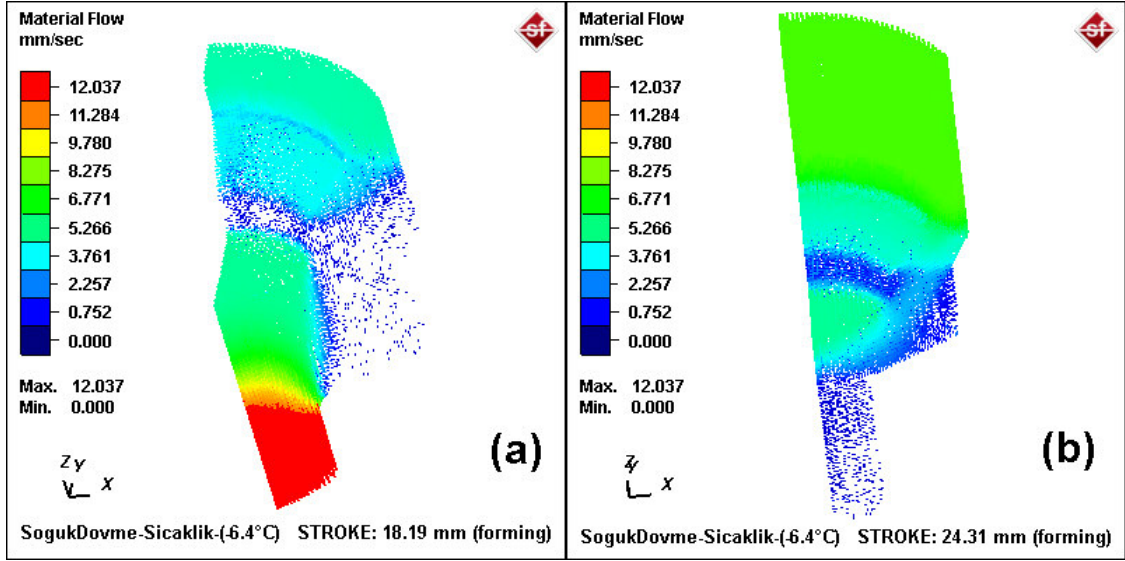
799,403 MPa) görülmektedir. Şekil 4.81 (b)'de, iş parçasının kuyruk kısmının yüzeyinde çok yüksek gerilme değerleri (983,881-922,388 MPa arası) görülmektedir. Bunun nedeni, kuyruk kısmında deplasman hızının yüksek olması ve kuyruk oluşurken kesmenin olmasıdır. Ayrıca, anahtar ağız şeklinin oluştuğu yüzeyde de çok yüksek gerilme değerleri görülmektedir (983,881-799,403 MPa arası).



Şekil 4.82. Sıcaklığı -6,4 °C seçilen simülasyonda basma işleminin sonundaki sıcaklık değerleri.

(a) İş parçasının kesitindeki ve iç yüzeyindeki değerler. (b) İş parçasının dış yüzeyindeki değerler.

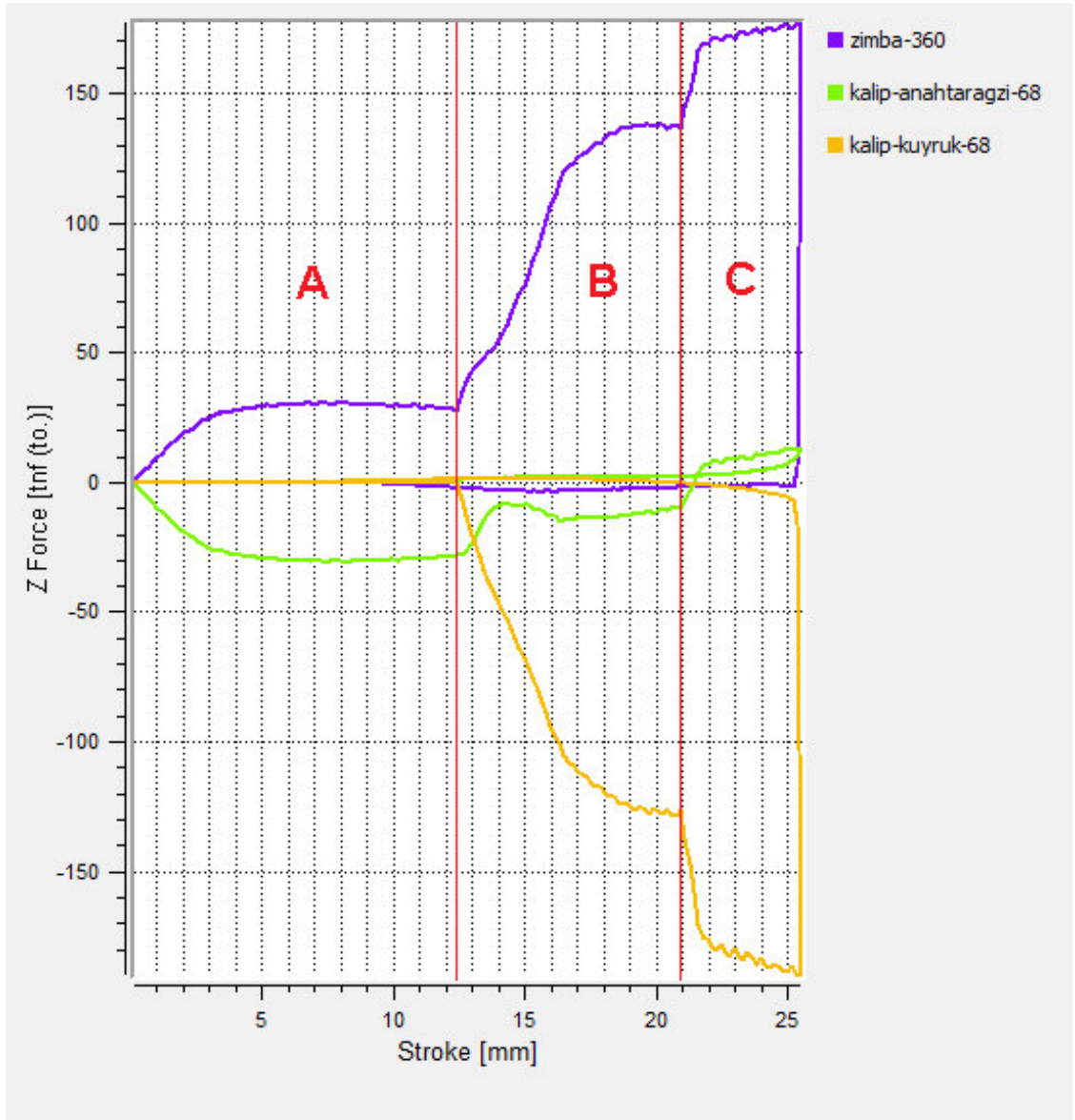
Şekil 4.82 (a)'da, zımbanın iş parçasında basma yaptığı yerlerde yüksek sıcaklıklar (221,833-191,402 °C arası) görülmektedir. Ayrıca basmadan dolayı kalıp içinde sıkışan parçanın yukarıya, kalıp dışına doğru uzaması ve zımbanın aşağıya doğru basma hareketiyle iki yöne doğru gerilen alanda iş parçası üzerindeki en sıcak alan (237,048 °C) görülmektedir. Şekil 4.82 (b)'de, kuyruk kısmının başlangıç kıvrımının olduğu yerde olması nedeniyle ve anahtar ağzının şekillendiği kısımda şekil değiştirmenin fazla olması nedeniyle, yüksek sıcaklıklar (221,833-191,402 °C arası) görülmektedir.



Şekil 4.83. Sıcaklığı -6,4 °C seçilen simülasyonda basma işlemindeki malzeme akış hızları. (a) İş parçasının kuyruk kısmındaki ve basma yapılan yüzeyindeki hızlar. (b) İş parçasında kuyruk oluşumu bittikten sonraki hızlar.

Şekil 4.83 (a)'da, şekil verme işlemi sırasında zımbanın bastığı yüzey 8,275-5,266 mm/s arası değişen akış hızlarına sahiptir. Ayrıca, kuyruk kesitinin parçanın genel kesitinden daha küçük olması nedeniyle, kuyruk kesitinde parça akış hızının çok yüksek olduğu (12,037 mm/s) görülmektedir. Şekil 4.83 (b)'de, kuyruk kısmı oluşumu bittikten sonra, zımbanın basmaya devam etmesi sonucu kalıpla zımba arasında sıkışan malzemenin yukarıya, kalıbın dışına doğru 8,275 mm/s ile hızlıca hareket ettiği de görülmektedir.

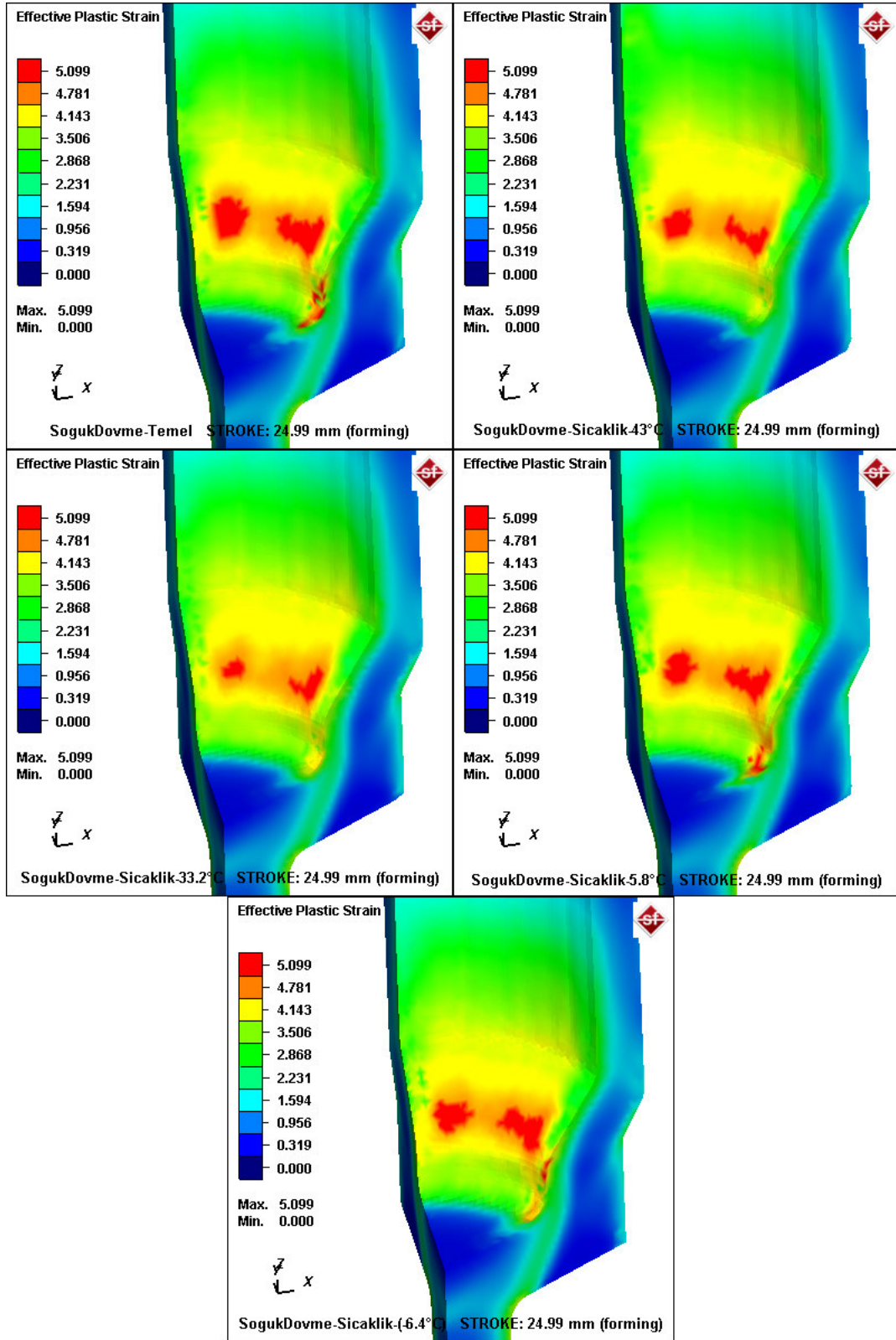
Şekil 4.84'te sıcaklığın -6,4 °C seçildiği simülasyondaki zımbanın yaptığı basma kuvveti ve kalıplara etkileyen kuvvetler görülmektedir. Bu kuvvetler aynı zamanda iş parçasına da etkimektedir. Şekil 4.84'teki A bölgesinde, iş parçasının anahtar ağzı kısmı oluşturulmaktadır. Bu bölgede zımba en fazla 31,5 ton kuvvet uygulamaktadır ve bu kuvvetin tamamı kalıplardan sadece anahtar ağzı kalıbına etkimektedir. Şekil 4.84'teki B bölgesinde, iş parçasında kuyruk kısmının da oluşumu vardır. Zımbanın yaptığı basma kuvveti tüm kalıpları etkilemektedir. Ancak anahtar ağzı kalıbına etkileyen kuvvet azalırken, kuyruk kalıbına etkileyen kuvvet giderek artmaktadır. Bu bölgede zımba en fazla 139 ton kuvvet uygulamakta ancak bunun 128,5 tonu kuyruk kalıbına etkinken, 10,5 tonu anahtar ağzı kalıbına etkimektedir. Şekil 4.84'teki C bölgesinde, iş parçasının kuyruk oluşumu bitmiştir ve kalıp içinde zımba ile kalıp arasında sıkışan malzeme yukarıya, kalıp dışına doğru hareket etmektedir. Bu bölgede zımba en fazla 176,992 ton kuvvet uygulamaktadır. C bölgesinin sonunda, simülasyonda zımbanın geriye çekilmesi başlamakta ve bu nedenle basma kuvvetlerinin ani şekilde azaldığı görülmektedir.



Şekil 4.84. Sıcaklığı -6,4 °C seçilen simülasyonun basma kuvveti grafiği.

4.5.5. Sıcaklık Değişim Simülasyonlarının Sonuçlarının Temel Simülasyonun Sonuçları ile Karşılaştırılması

Bu bölümde sıcaklık değişim simülasyonlarının sonuçları ile temel simülasyonun sonuçları karşılaştırılacaktır.



Şekil 4.85. Sıcaklık değişim simülasyonlarının sonuçları ile temel simülasyonun sonucu arasında, zımbanın basma yaptığı yüzeydeki strain değerlerinin karşılaştırılması.

Şekil 4.85'te basma işleminin 24,99 mm'sinde, zımbanın basma yaptığı yüzeyin strain değerleri görülmektedir. Bu yüzey için karşılaştırılan simülasyon sonuçları arasında, sıcaklığın 20 °C seçildiği simülasyonda (temel simülasyon) yüksek değerli strain alanı en fazladır. Sıcaklığın 43 °C seçildiği simülasyonda da yüksek değerli strain alanının fazla olduğu görülmektedir. Sıcaklığın 5,8 °C ve -6,4 °C seçildiği simülasyonlarda yüksek değerli strain alanlarının birbirine yaklaşık büyüklükte olduğu görülürken, sıcaklığın 33,2 °C seçildiği simülasyonda ise yüksek değerli strain alanı en azdır.

Şekil 4.86'da basma işleminin 24,99 mm'sinde, kuyruk kısmının başlangıç kıvrımının strain değerleri görülmektedir. Bu bölge için karşılaştırılan simülasyon sonuçları arasında, sıcaklık arttıkça kuyruk kısmında oluşan maksimum strainin olduğu alanın azaldığı görülmektedir. Ancak anahtar ağzı kısmında, strain değerlerinin ve alanlarının hemen hemen aynı olduğu görülmektedir.

Şekil 4.87'de basma işleminin sonunda, zımbanın basma yaptığı yan yüzeyin gerilme değerleri görülmektedir. Bu yüzey için karşılaştırılan simülasyon sonuçlarına göre, simülasyon için seçilen sıcaklık arttıkça simülasyonda maksimum gerilmenin olduğu alan azalmaktadır.

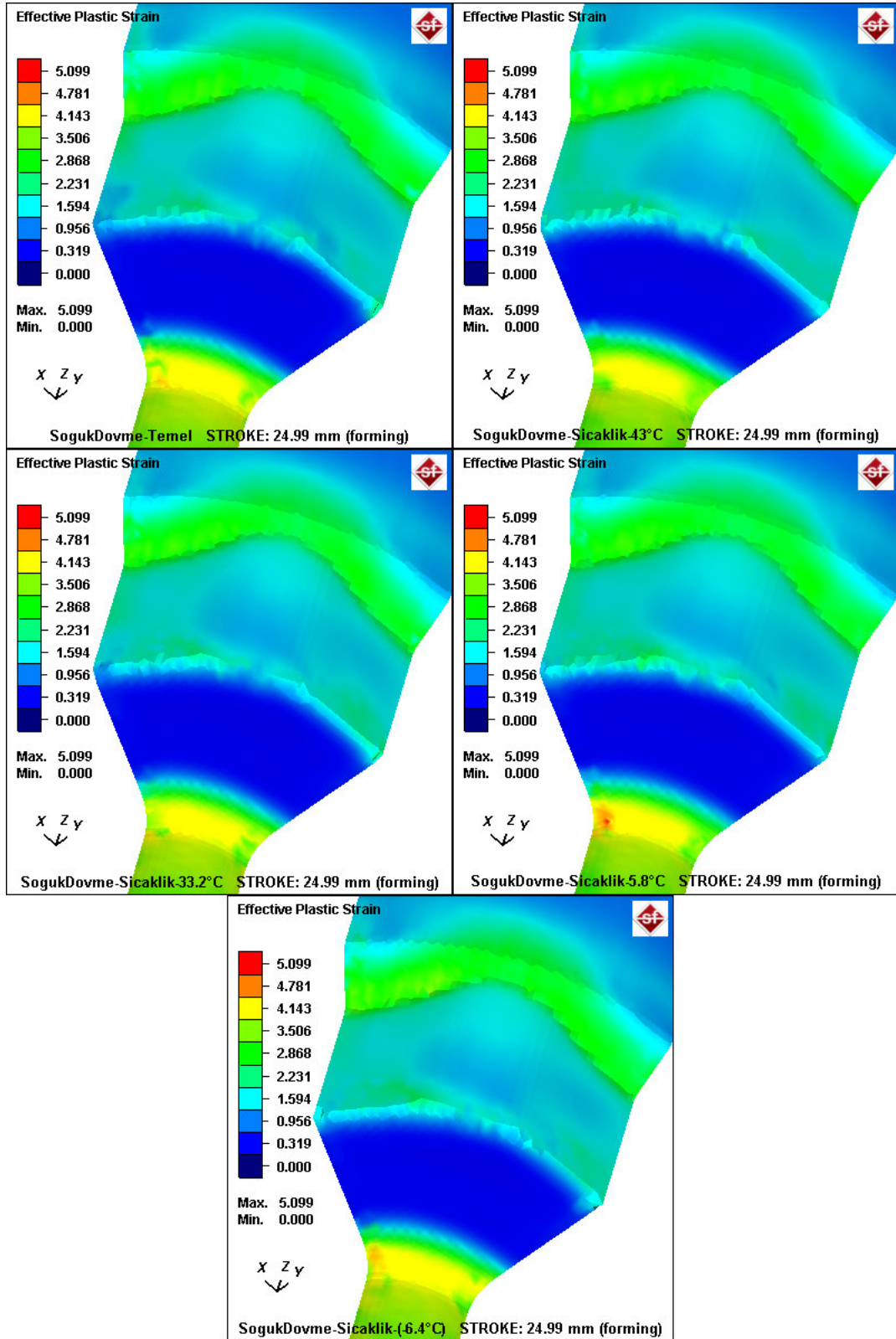
Şekil 4.88'de basma işleminin sonundaki kuyruk kısmının ve anahtar ağzı kısmının gerilme değerleri görülmektedir. Simülasyon sonuçları kuyruk kısmı için karşılaştırıldığında, simülasyon için seçilen sıcaklık arttıkça kuyruk kısmında oluşan maksimum gerilmenin olduğu alan azaldığı görülmektedir. Ayrıca, anahtar ağzı kısmında simülasyon için seçilen sıcaklık arttıkça, gerilme değerlerinin azaldığı görülmektedir.

Şekil 4.89'da basma işleminin 24,99 mm'sinde, zımbanın basma yaptığı kısmın sıcaklık değerleri görülmektedir. Bu kısım için karşılaştırılan simülasyon sonuçlarına göre, başlangıç sıcaklığı arttıkça, sıcaklığın daha hızlı arttığı ve daha fazla alana yayıldığı yani daha fazla ısı üretimi olduğu görülmektedir.

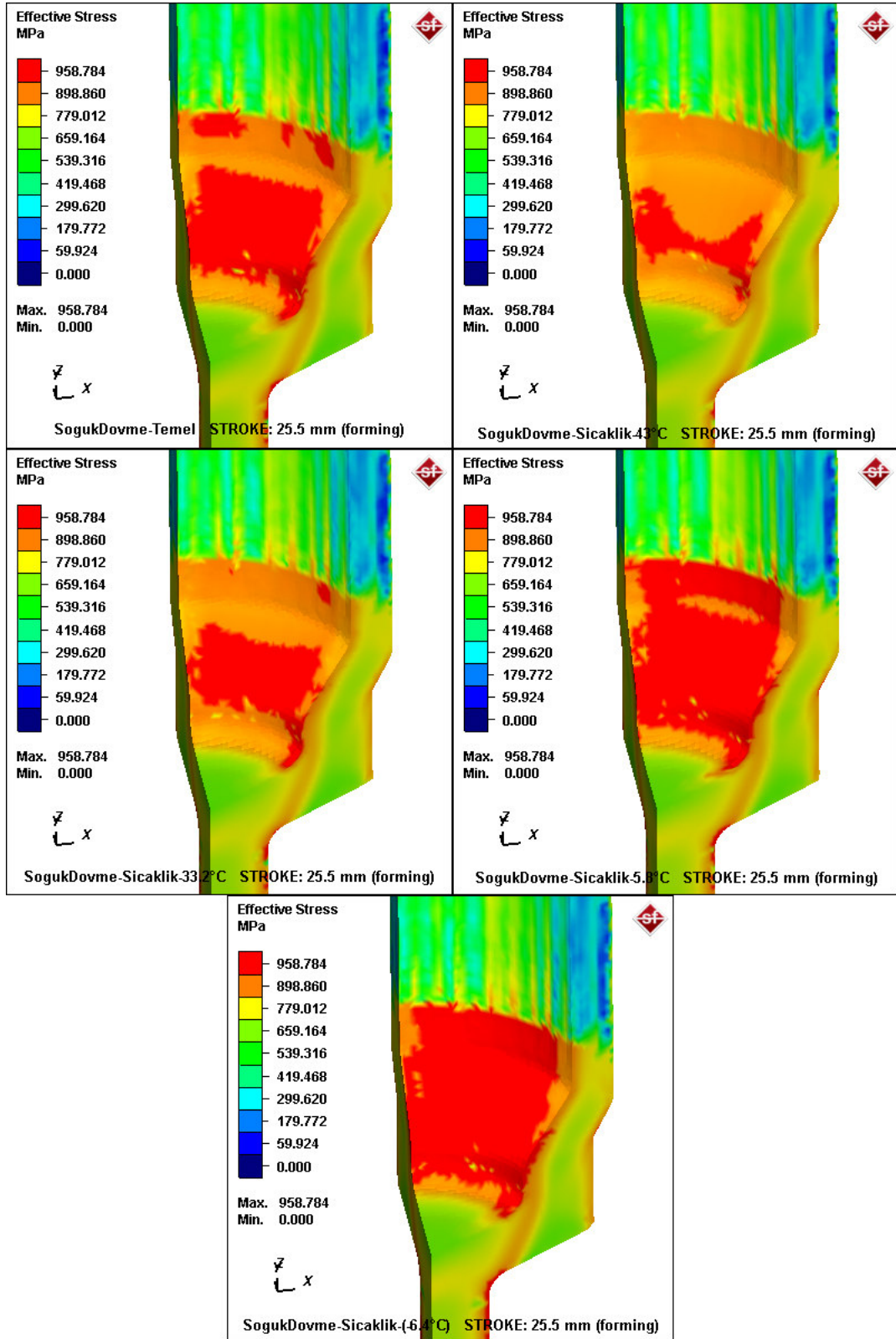
Şekil 4.90'da basma işleminin 21,25 mm'sinde, kuyruk kısmındaki sıcaklık değerleri görülmektedir. Kuyruk kısmının başlangıç kıvrımı için karşılaştırılan simülasyon sonuçlarına göre, başlangıç sıcaklığı arttıkça, sıcaklığın daha hızlı arttığı ve daha fazla alana yayıldığı yani daha fazla ısı üretimi olduğu görülmektedir.

Şekil 4.91'da basma işleminin 18,7 mm'sinde, zımbanın basma yaptığı kısmın malzeme akış hızları görülmektedir. Bu kısım için karşılaştırılan simülasyon sonuçlarına göre, simülasyonlardaki malzeme akış hızlarının yaklaşık olarak aynı olduğu görülmektedir.

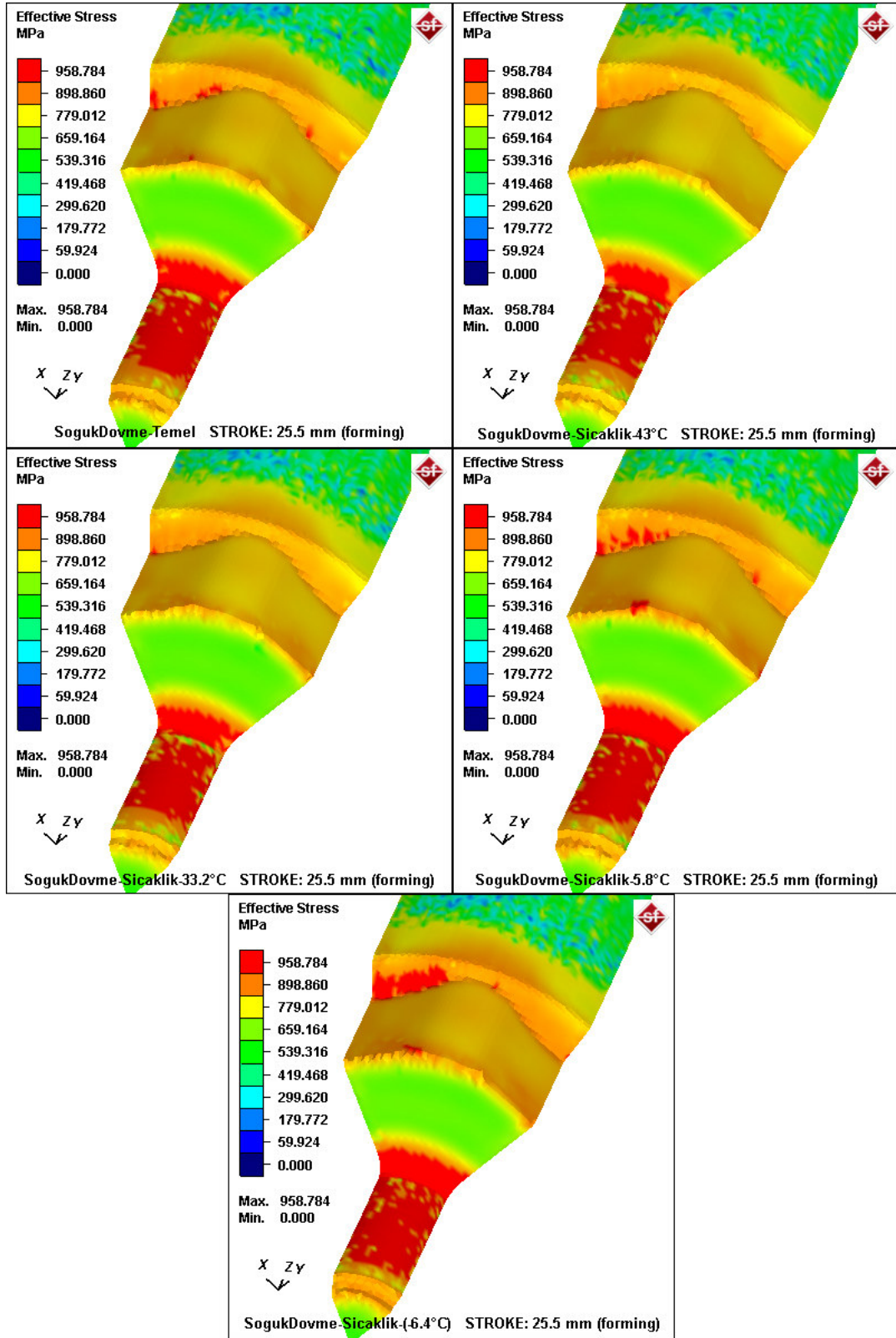
Şekil 4.92'de basma işleminin 23,8 mm'sinde, kuyruk kısmı oluşumu bittikten sonra, zımbanın basmaya devam etmesi sonucu kalıpla zimba arasında sıkışan malzemenin yukarıya, kalıbın dışına doğru yaptığı hareketteki malzeme hızları görülmektedir. Bu kısım için karşılaştırılan simülasyon sonuçlarına göre, simülasyonlardaki malzeme akış hızlarının yaklaşık olarak aynı olduğu görülmektedir.



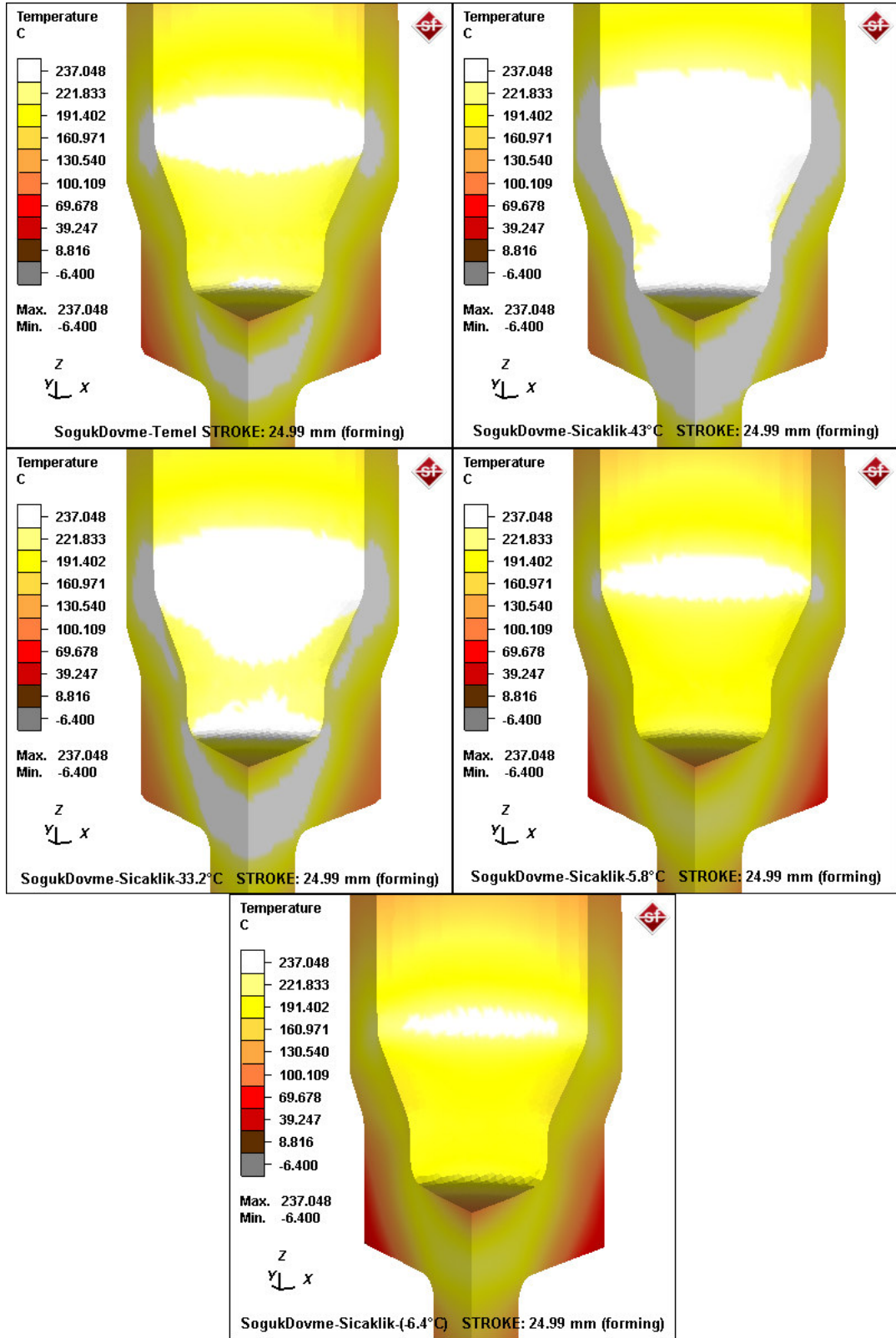
Şekil 4.86. Sıcaklık değişim simülasyonlarının sonuçları ile temel simülasyonun sonucu arasında, kuyruk kısmı ve anahtar ağız kısmının strain değerlerinin karşılaştırılması.



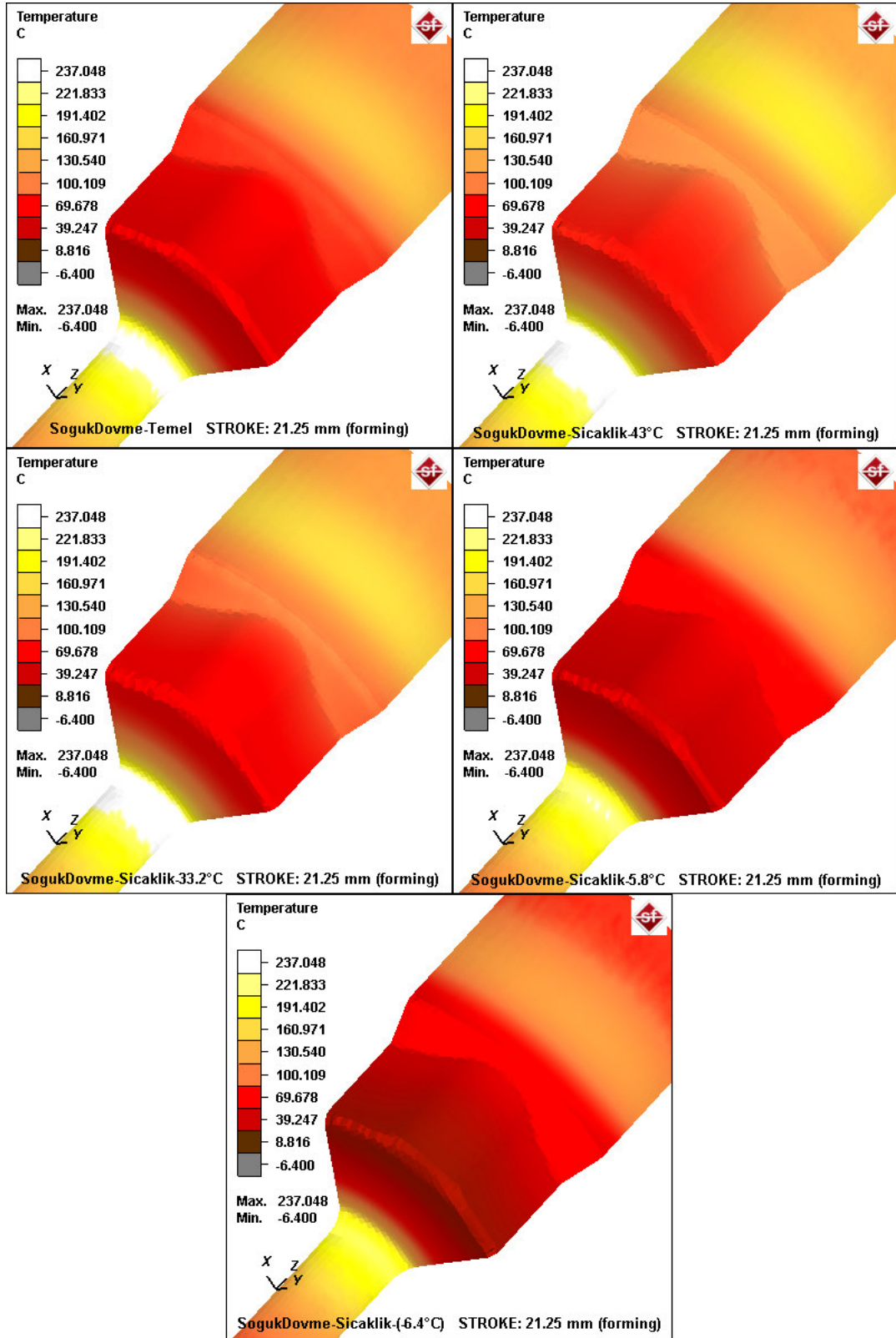
Şekil 4.87. Sıcaklık değişim simülasyonlarının sonuçları ile temel simülasyonun sonucu arasında, zımbanın basma yaptığı yan yüzeydeki gerilme değerlerinin karşılaştırılması.



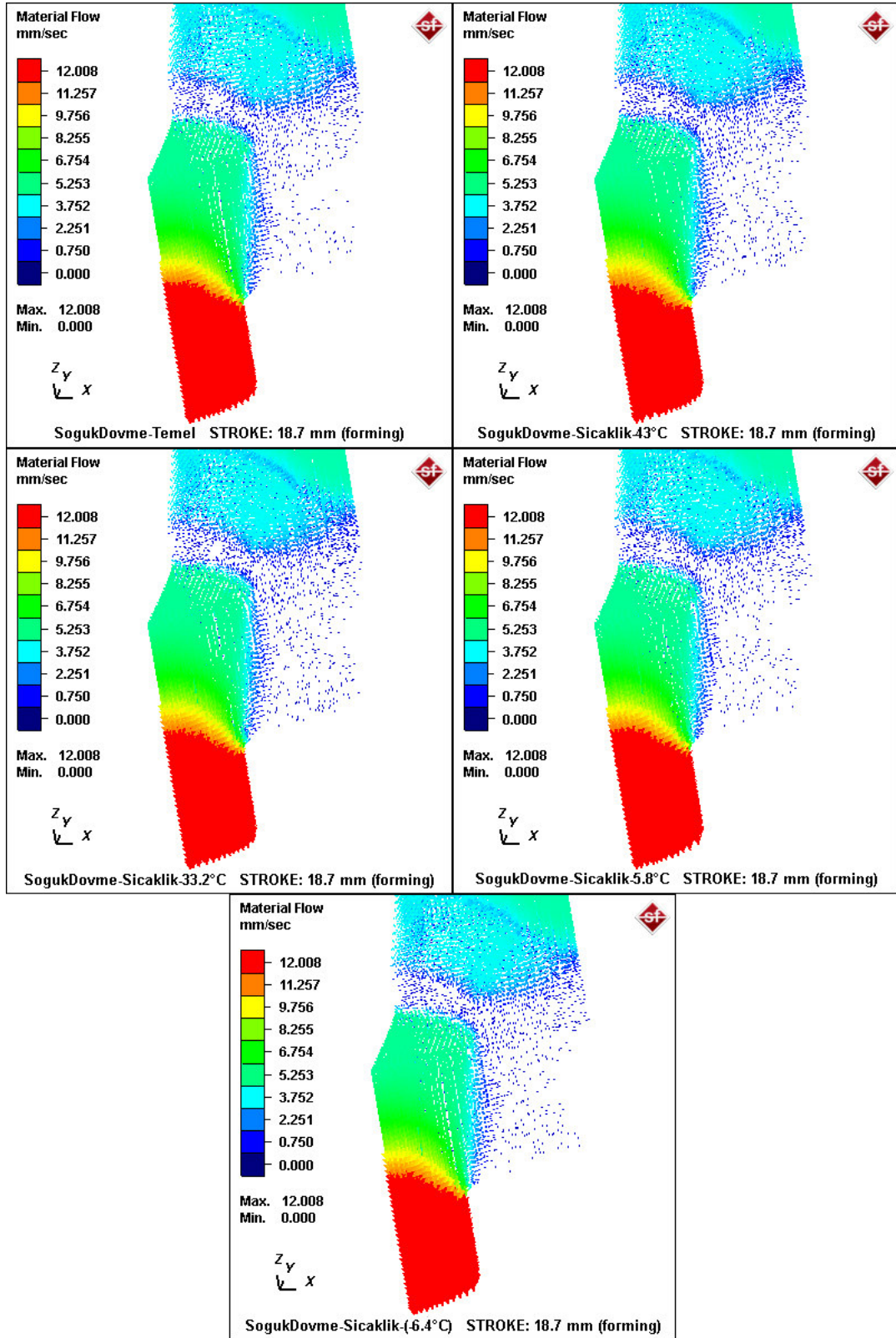
Şekil 4.88. Sıcaklık değişim simülasyonlarının sonuçları ile temel simülasyonun sonucu arasında, kuyruk kısmı ve anahtar ağzı kısmı gerilme değerlerinin karşılaştırılması.



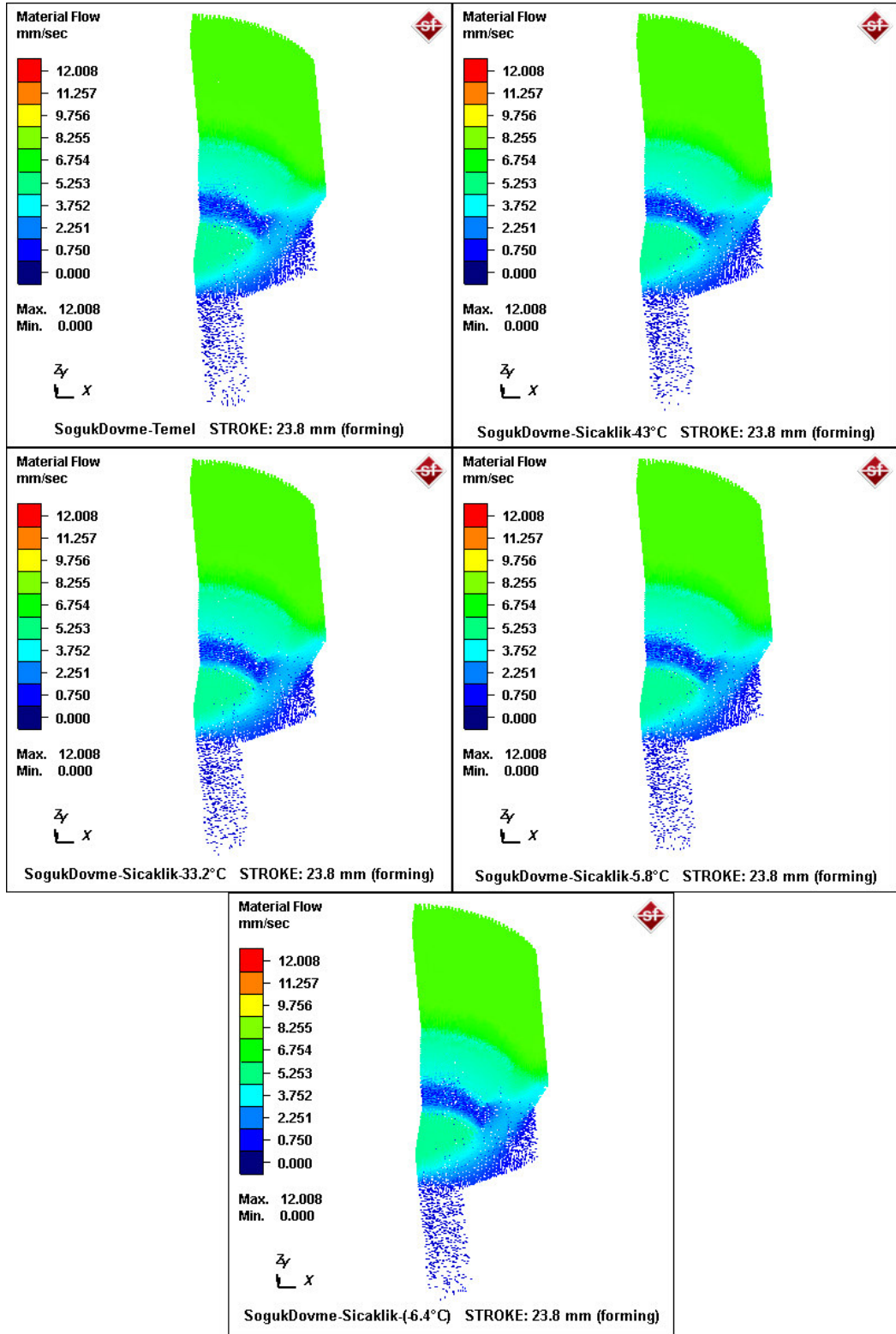
Şekil 4.89. Sıcaklık değişim simülasyonlarının sonuçları ile temel simülasyonun sonucu arasında, zımbanın basma yaptığı kısmın sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması.



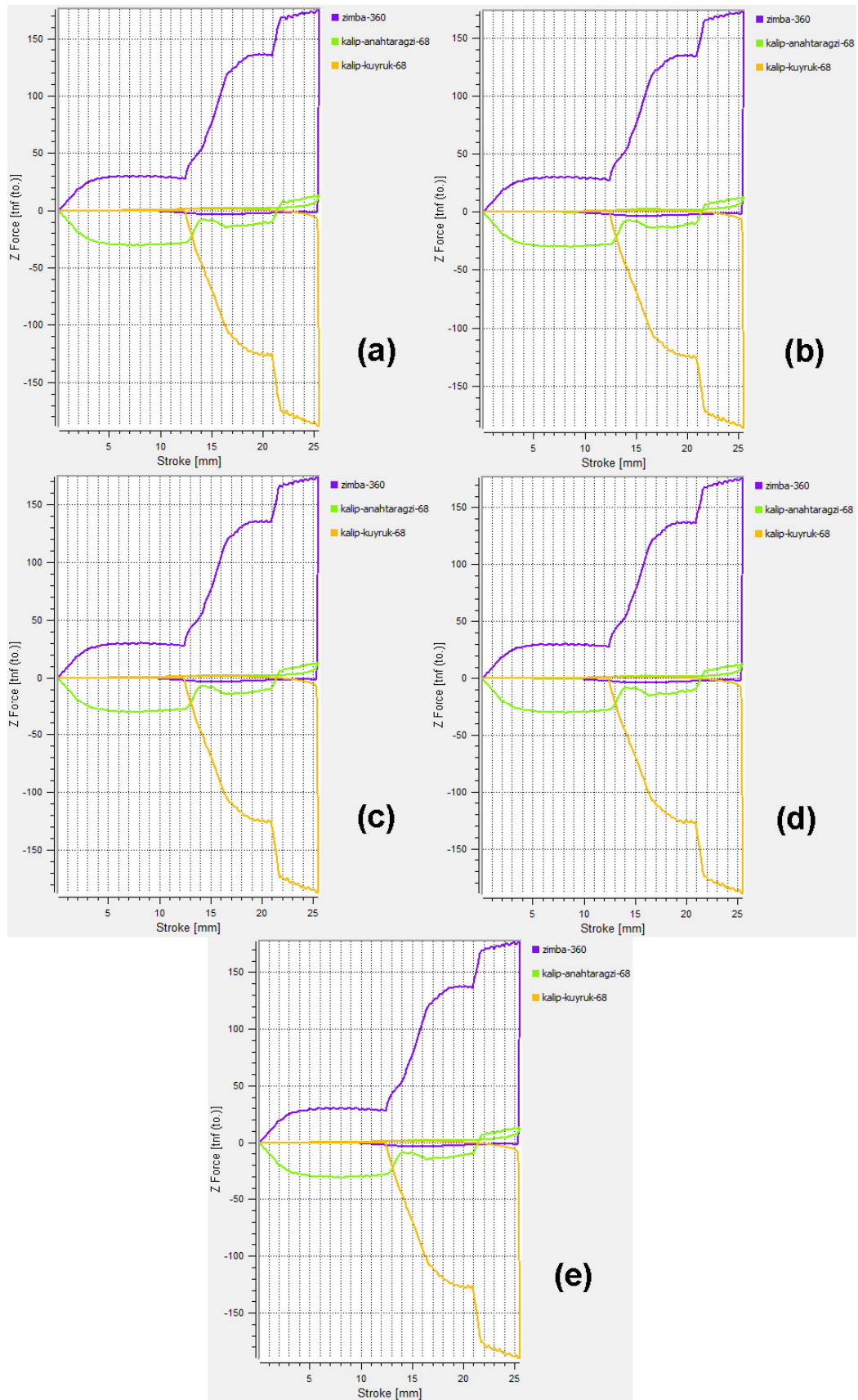
Şekil 4.90. Sıcaklık değişim simülasyonlarının sonuçları ile temel simülasyonun sonucu arasında, kuyruk sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması.



Şekil 4.91. Sıcaklık değişim simülasyonlarının sonuçları ile temel simülasyonun sonucu arasında, basma işlemi sırasındaki malzeme akış hızlarının karşılaştırılması.



Şekil 4.92. Sıcaklık değişim simülasyonlarının sonuçları ile temel simülasyonun sonucu arasında, basma işlemi sırasında kuyruk oluşuktan sonraki malzeme akış hızlarının karşılaştırılması.



Şekil 4.93. Sıcaklık değişim simülasyonlarının basma kuvvetleri grafikleri ile temel simülasyonun basma kuvvetleri grafiğinin karşılaştırılması: (a) Temel simülasyon, (b) Sıcaklığın 43 °C seçildiği simülasyon, (c) Sıcaklığın 33,2 °C seçildiği simülasyon, (d) Sıcaklığın 5,8 °C seçildiği simülasyon, (e) Sıcaklığın -6,4 °C seçildiği simülasyon.

Şekil 4.93'te sıcaklık değişim simülasyonlarının basma kuvvetlerinin grafikleri ile temel simülasyonun basma kuvvetlerinin grafiği karşılaştırılmıştır. Grafikler arasında eğrilerde ve maksimum noktalarda çok az farklılıkların bulunduğu görülmektedir. Sıcaklığın 43 °C seçildiği simülasyonda maksimum basma kuvveti 172,929 ton kuvvet, sıcaklığın 33,2 °C seçildiği simülasyonda maksimum basma kuvveti 173,962 ton kuvvet, sıcaklığın 20 °C seçildiği simülasyonda (temel simülasyon) maksimum basma kuvveti 175,298 ton kuvvet, sıcaklığın 5,8 °C seçildiği simülasyonda maksimum basma kuvveti 176,054 ton kuvvet ve sıcaklığın -6,4 °C seçildiği simülasyonda maksimum basma kuvveti 176,992 ton kuvvet olmaktadır.

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, Eko Endüstri tarafından soğuk dövme yöntemi ile 16MnCr5 malzemesinden üretilen rot parçası, simufact.forming yazılımının kullanıldığı bir simülasyon ortamında gerçekte üretildiği koşullara uygun olarak tekrardan üretilmiştir. Daha sonra bu üretim koşullarından yola çıkılarak; soğuk dövmenin yapıldığı presin hızı, parça ile kalıpların arasındaki sürtünme katsayısı, parçada kullanılan malzeme ve parçanın üretildiği ortamın sıcaklık değerleri gibi üretim parametreleri değiştirilerek farklı üretim koşulları ile yeni üretim simülasyonları yapılmıştır.

Soğuk dövme yöntemi uygulanarak ve farklı üretim parametreleri kullanılarak simüle edilmiş üretim sonuçları değerlendirilmiş ve simülasyon oluşturma aşamasında değiştirilen parametrelerin üretime ve son ürüne olan etkileri incelenmiştir. Simülasyon ortamında yapılan üretimlerin değerlendirilmeleri sonucu:

1. Tüm simülasyonlarda, üretilen iş parçası kalıp içini doldurmuştur.
2. Gerçek üretimdeki pres hızı 5 mm/s, sürtünme katsayısı 0,08 Coulomb, kullanılan iş parçası malzemesi 16MnCr5 ve ortam sıcaklığı yaklaşık olarak 20 °C'dir. Gerçek üretimdeki bu parametrelere göre yapılan simülasyonda elde edilen maksimum strain değeri 5,477, maksimum gerilme değeri 972,575 MPa, maksimum sıcaklık değeri 261,319 °C, maksimum malzeme akış hızı 12,008 mm/s ve maksimum pres kuvveti 175,289 ton kuvvet olmaktadır.
3. Çalışmamızda pres hızı 6 mm/s'ye çıkarılmış ve 4 mm/s'ye düşürülmüştür:
 - a) Pres hızı 6 mm/s'ye çıkarıldığında yani gerçek üretimdeki pres hızına göre 1 mm/s artırıldığında diğer üretim parametreleri sabit kalmak üzere, yapılan simülasyon sonucunda maksimum strain değeri 5,225, maksimum gerilme değeri 960,709 MPa, maksimum sıcaklık değeri 277,221 °C, maksimum malzeme akış hızı 14,802 mm/s ve maksimum pres kuvveti 174,196 ton kuvvet olmaktadır.
 - b) Pres hızı 4 mm/s'ye düşürüldüğünde yani gerçek üretimdeki pres hızına göre 1 mm/s azaltıldığında diğer üretim parametreleri sabit kalmak üzere, yapılan simülasyon sonucunda maksimum strain değeri 5,773, maksimum gerilme değeri 978,243 MPa, maksimum sıcaklık değeri 240,033 °C, maksimum malzeme akış hızı 9,820 mm/s ve maksimum pres kuvveti 175,670 ton kuvvet olmaktadır.

Gerçek üretimin simülasyon sonuçları baz alınarak yapılan değerlendirmede, pres hızının 1 mm/s artırıldığı simülasyon sonuçlarında maksimum strain değeri 0,252 azalış, maksimum gerilme değeri 11,866 MPa azalış, maksimum sıcaklık değeri 15,902 °C artış, maksimum malzeme akış hızı 2,794 mm/s artış ve maksimum pres kuvveti 1,093 ton kuvvet azalış göstermiştir. Pres hızının 1 mm/s azaltıldığı simülasyon sonuçlarında ise maksimum strain değeri 0,296 artış, maksimum gerilme değeri 5,668 MPa artış, maksimum sıcaklık değeri 21,286 °C azalış, maksimum malzeme akış hızı 2,188 mm/s azalış ve maksimum pres kuvveti 0,381 ton kuvvet artış göstermiştir.

Bu özelliklerin değişimi sırasında malzemenin oda sıcaklığındaki mekanik özellikleri ve deformasyonla ortaya çıkan termal enerjiyle oluşan sıcaklık artışı, malzemenin akış ve deformasyon özelliğini değiştirmektedir. Çok kristalli metalik malzemelerin soğuk plastik deformasyonu sonucunda, standart eş eksenli tane boyutu dağılımına sahip olan mikroyapı, deformasyon yönünde yer alan malzeme akış çizgilerine sahip olmaktadır. Tanelerin yönlenmesi ve küçülmesi sayesinde mikroyapı değişmekte ve özelliklerin deformasyon yönünde maksimum değerlere sahip olması sağlanmaktadır. Ayrıca oda sıcaklığında soğuk olarak gerçekleştirilen bu işlemde, çok kristalli malzemenin birim hacminde bulunan dislokasyon sayısı artırılmakta ve deformasyon sertleşmesi meydana gelmektedir. Böylece soğuk deforme olan malzemenin başlangıç durumuna göre sünekliğinde azalan, sertliğinde ve mukavemetinde artan bir özellik kompozisyonu ortaya çıkarılmaktadır. Soğuk deformasyon sonrası meydana gelen bu olay, malzemenin izotropik özelliklerine etki ederek özellikle mekanik ve fiziksel özelliklerinde anizotropik davranış göstermesine neden olmaktadır [42-45]. Pres hızında meydana gelen 1 mm/s'lik bu değişimler sayesinde birim hacimdeki dislokasyon sayısı, malzeme akışı ve tane yönlenmesine bağlı olarak simülasyon sonucu elde edilen strain, gerilme, sıcaklık, pres kuvveti ve malzeme akışı gibi parametreler değişim göstermiştir. Üretim, yapı, özellik ve performans değerleri açısından bakılırsa, deformasyon hızının değişimi malzemenin plastik deformasyon özelliklerinin değişmesine yol açmıştır. Özellikle düşük hızlarda malzeme akış hızı düşüş gösterdiğinden daha fazla strain ve gerilme ortaya çıkmıştır. Artan deformasyon hızında ise malzeme akış hızı artarak yüksek sıcaklık, düşük strain ve gerilme ortaya çıkarmıştır. Pres kuvveti açısından değerlendirdiğimizde ise deformasyon hızı düştükçe pres kuvveti artış göstermiştir.

4. Çalışmamızda sürtünme katsayısı 0,06 Coulomb'a ve 0,04 Coulomb'a düşürülmüştür:

a) Sürtünme katsayısı 0,06 Coulomb'a düşürüldüğünde yani gerçek üretimdeki sürtünme katsayısına göre 0,02 Coulomb azaltıldığında diğer üretim parametreleri sabit kalmak üzere, yapılan simülasyon sonucunda maksimum strain değeri 5,078, maksimum gerilme değeri

967,364 MPa, maksimum sıcaklık değeri 250,535 °C, maksimum malzeme akış hızı 12,037 mm/s ve maksimum pres kuvveti 162,538 ton kuvvet olmaktadır.

b) Sürtünme katsayısı 0,04 Coulomb'a düşürüldüğünde yani gerçek üretimdeki sürtünme katsayısına göre 0,04 Coulomb azaltıldığında diğer üretim parametreleri sabit kalmak üzere, yapılan simülasyon sonucunda maksimum strain değeri 5,078, maksimum gerilme değeri 968,734 MPa, maksimum sıcaklık değeri 242,281 °C, maksimum malzeme akış hızı 11,408 mm/s ve maksimum pres kuvveti 152,219 ton kuvvet olmaktadır.

Gerçek üretimin simülasyon sonuçları baz alınarak yapılan değerlendirmede, sürtünme katsayısının 0,02 Coulomb azaltıldığı simülasyon sonuçlarında maksimum strain değeri 0,399 azalış, maksimum gerilme değeri 5,211 MPa azalış, maksimum sıcaklık değeri 10,784 °C azalış, maksimum malzeme akış hızı 0,029 mm/s artış ve maksimum pres kuvveti 12,751 ton kuvvet azalış göstermiştir. Sürtünme katsayısının 0,04 Coulomb azaltıldığı simülasyon sonuçlarında ise maksimum strain değeri 0,399 azalış, maksimum gerilme değeri 3,841 MPa azalış, maksimum sıcaklık değeri 19,038 °C azalış, maksimum malzeme akış hızı 0,600 mm/s azalış ve maksimum pres kuvveti 23,070 ton kuvvet azalış göstermiştir.

Bilindiği üzere, soğuk şekillendirme işleminde kullanılan farklı türlerdeki yağlayıcı malzemeler, işlemdeki yağlayıcı olarak görev yapmakta ve formasyon farklılığına göre doğrudan sürtünme katsayısına etki ederek uygulanan kuvvet değerini değiştirmektedir. Sektörde kullanılan bazı katı yağlayıcıların uygulanan kuvvete olan etkisinin araştırıldığı çalışmalarda, yağlayıcı malzemeler katı film ve sıvı akışkan esaslı olacak şekilde sınıflandırılarak soğuk deformasyona olan etkileri araştırılmıştır. Kim H. ve arkadaşları tarafından dört farklı katı film esaslı yağlayıcı ile bir sıvı yağlayıcı kullanılarak yapılan derin çekme şekillendirmesinde, sonlu elemanlar model simülasyonunun ters algoritmaları kullanılarak sürtünme katsayısı ve kalıba uygulanan kuvvete olan etkisi belirlenmiştir [46]. Diğer taraftan AHSS kalite çeliklerin derin çekme yöntemi ile şekillendirmesinde, farklı tipe, viskoziteye, yoğunluğa ve birim alandaki kaplama ağırlığına göre sınıflandırılmış yağlayıcılar kullanılarak, bu yağlayıcıların farklı deformasyon hızlarındaki davranışları kalıba gelen kuvvet, ara yüzey basıncı ve sıcaklık cinsinden tanımlanarak proses için en uygun yağlayıcı seçilmiştir. Gerçek üretimdeki yüzey işlemi olarak Zn-sabun-Ph kaplama yöntemi benimsenmiştir. Bu yöntemde 0,08 Coulomb olan sürtünme katsayısının simülasyon çalışmasında 0,06 Coulomb ve 0,04 Coulomb olarak değiştirilmesi ile ortaya çıkan simülasyon sonuçları değerlendirilmiştir. Simülasyonda diğer şartlar sabit kaldığında, düşük sürtünme katsayısı ile çözüm yapıldığında strain, gerilme, pres kuvveti ve sıcaklık gibi değerler düşüş göstermiştir. Bu kalıp ile malzeme arasındaki düşük

sürtünme ve ara yüzey direnci sayesinde ortaya çıkmıştır. Öte yandan artan sürtünme katsayısı değerlerinde ise bu durumun tam tersi gerçekleşmesi mümkündür.

5. Çalışmamızda iş parçası malzemesi için gerçek üretimdeki kullanılan malzemeden daha sert olan Ck45 çelik ve daha yumuşak olan 1010 çelik kullanılmıştır.

a) İş parçası malzemesi Ck45 seçildiğinde diğer üretim parametreleri sabit kalmak üzere, yapılan simülasyon sonucunda maksimum strain değeri 5,679, maksimum gerilme değeri 943,346 MPa, maksimum sıcaklık değeri 273,893 °C, maksimum malzeme akış hızı 12,394 mm/s ve maksimum pres kuvveti 198,378 ton kuvvet olmaktadır.

b) İş parçası malzemesi 1010 seçildiğinde diğer üretim parametreleri sabit kalmak üzere, yapılan simülasyon sonucunda maksimum strain değeri 5,080, maksimum gerilme değeri 970,924 MPa, maksimum sıcaklık değeri 251,088 °C, maksimum malzeme akış hızı 12,189 mm/s ve maksimum pres kuvveti 174,831 ton kuvvet olmaktadır.

Gerçek üretimin simülasyon sonuçları baz alınarak yapılan değerlendirmede, iş parçası malzemesinin Ck45 seçildiği simülasyon sonuçlarında maksimum strain değeri 0,202 artış, maksimum gerilme değeri 29,229 MPa azalış, maksimum sıcaklık değeri 12,574 °C artış, maksimum malzeme akış hızı 0,386 mm/s artış ve maksimum pres kuvveti 23,089 ton kuvvet artış göstermiştir. İş parçası malzemesinin 1010 seçildiği simülasyon sonuçlarında ise maksimum strain değeri 0,397 azalış, maksimum gerilme değeri 1,651 MPa azalış, maksimum sıcaklık değeri 10,231 °C azalış, maksimum malzeme akış hızı 0,181 mm/s artış ve maksimum pres kuvveti 0,458 ton kuvvet azalış göstermiştir.

Üretim parametrelerinden biri olan iş parçası malzemesi, simülasyonlarda incelenen diğer bir değişkendir. Simülasyonlarda özellikle, yüksek karbonlu çelik Ck45 ve düşük karbonlu çelik 1010'un aynı kesitteki şekil alabilme kabiliyetlerinin ortaya çıkarılması sağlanmıştır. Yapılan simülasyonlarda, iş parçası malzemesi olarak 16MnCr5 yerine Ck45 seçilip dövme işlemi yapıldığında pres kuvvetinde ve sıcaklıkta artış gözlemlenmiştir. Kimyasal kompozisyon gereği yüksek karbonlu, perlitik yapıya sahip çeliklerden olan Ck45, 16MnCr5'e göre daha sert olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu nedenle şekillendirme sırasında malzemenin iç sürtünmesi ve kalıp-malzeme sürtünmesinden dolayı daha yüksek deformasyon sıcaklıkları ortaya çıkmıştır. Bir diğer iş parçası malzemesi olarak seçilen 1010 çelik daha düşük karbonlu olup, daha yumuşak olan ferritik yapıdaki bir çeliktir. Bu da daha düşük bir pres kuvveti ortaya çıkarmaktadır.

6. Çalışmamızda sıcaklıklar İzmir'in son 59 yıllık sıcaklık değerleri istatistik verilerindeki en yüksek sıcaklığı için 43 °C'ye çıkarılmış, ortalama en yüksek sıcaklığı için 33,2 °C'ye çıkarılmış ve ortalama en düşük sıcaklığı için 5,8 °C'ye düşürülmüştür.

a) Sıcaklık 43 °C'ye çıkarıldığında yani gerçek üretimdeki kabul edilmiş ortam sıcaklığına göre 23 °C artırıldığında diğer üretim parametreleri sabit kalmak üzere, yapılan simülasyon sonucunda maksimum strain değeri 5,154, maksimum gerilme değeri 980,455 MPa, maksimum sıcaklık değeri 281,868 °C, maksimum malzeme akış hızı 12,379 mm/s ve maksimum pres kuvveti 172,929 ton kuvvet olmaktadır.

b) Sıcaklık 33,2 °C'ye çıkarıldığında yani gerçek üretimdeki kabul edilmiş ortam sıcaklığına göre 13,2 °C artırıldığında diğer üretim parametreleri sabit kalmak üzere, yapılan simülasyon sonucunda maksimum strain değeri 5,099, maksimum gerilme değeri 958,784 MPa, maksimum sıcaklık değeri 273,021 °C, maksimum malzeme akış hızı 12,293 mm/s ve maksimum pres kuvveti 173,962 ton kuvvet olmaktadır.

c) Sıcaklık 5,8 °C'ye düşürüldüğünde yani gerçek üretimdeki kabul edilmiş ortam sıcaklığına göre 14,6 °C azaltıldığında diğer üretim parametreleri sabit kalmak üzere, yapılan simülasyon sonucunda maksimum strain değeri 5,196, maksimum gerilme değeri 969,573 MPa, maksimum sıcaklık değeri 248,186 °C, maksimum malzeme akış hızı 12,128 mm/s ve maksimum pres kuvveti 175,298 ton kuvvet olmaktadır.

Gerçek üretimin simülasyon sonuçları baz alınarak yapılan değerlendirmede, sıcaklığın 23 °C artırıldığı simülasyon sonuçlarında maksimum strain değeri 0,323 azalış, maksimum gerilme değeri 7,880 MPa artış, maksimum sıcaklık değeri 20,549 °C artış, maksimum malzeme akış hızı 0,371 mm/s artış ve maksimum pres kuvveti 2,360 ton kuvvet artış göstermiştir. Sıcaklığın 13,2 °C artırıldığı simülasyon sonuçlarında maksimum strain değeri 0,378 azalış, maksimum gerilme değeri 13,791 MPa azalış, maksimum sıcaklık değeri 11,702 °C artış, maksimum malzeme akış hızı 0,285 mm/s artış ve maksimum pres kuvveti 1,327 ton kuvvet azalış göstermiştir. Sıcaklığın 14,6 °C azaltıldığı simülasyon sonuçlarında ise maksimum strain değeri 0,281 azalış, maksimum gerilme değeri 3,002 MPa azalış, maksimum sıcaklık değeri 13,133 °C azalış, maksimum malzeme akış hızı 0,120 mm/s artış ve maksimum pres kuvveti 0,009 ton kuvvet artış göstermiştir.

Çalışmamızda yapılan üretim simülasyonlarından elde edilen sonuçlar, gelecekteki diğer çalışmalar için bir temel oluşturacak ve üzerinde inceleme yaptığımız parçanın üretim prosesinin geliştirilmesinde de kullanılabilecektir.

KAYNAKLAR

- [1] Çapan, L., 1991. Giriş, Dövülebilirlik, Açık Kalıpta Dövme. TMMOB Makine Mühendisleri Odası, Plastik Şekillendirme-III Kalıp Teknolojisi Seminer Notları. İstanbul, 1991.
- [2] azom.com, 2014.
<http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=2195>
- [3] steelforge.com, 2014.
<http://www.steelforge.com/literature/history-of-forgings/>
- [4] Civelek, A., 1980. Dövme Araştırması, Türkiye Sınai Kalkınma Bankası A.Ş. Sektör Programları ve Proje Müdürlüğü. Yayın no.27. İstanbul, 1980.
- [5] Altan, T., Ngaile, G., Shen, G., 2005. Cold And Hot Forging: Fundamentals And Applications, Chapter 2. ASM International, 2005.
- [6] Semiatin, S., L., 1996. ASM Metals Handbook 9th Edition Volume 14: Forming And Forging. ASM International, 1996.
- [7] muhendishane.org, 2014.
<http://muhendishane.org/kutuphane/malzemelerin-mekanik-davranisi/gerilim-ve-gerinim/>
- [8] muhendishane.org, 2014.
<http://muhendishane.org/kutuphane/malzemelerin-mekanik-davranisi/gerilim-ve-gerinimin-matematiksel-gosterimleri/>
- [9] muhendishane.org, 2014.
<http://muhendishane.org/kutuphane/malzemelerin-mekanik-davranisi/elastik-limit/>
- [10] muhendishane.org, 2014.
<http://muhendishane.org/kutuphane/malzemelerin-mekanik-davranisi/gerilim-gerinim-egrisi/>
- [11] Altan, T., Ngaile, G., Shen, G., 2005. Cold And Hot Forging: Fundamentals And Applications, Chapter 6. ASM International, 2005.
- [12] Altan, T., Ngaile, G., Shen, G., 2005. Cold And Hot Forging: Fundamentals And Applications, Chapter 7. ASM International, 2005.
- [13] Rajput, R. K., 2005. Comprehensive Workshop Practice, Chapter 1. Laxmi Publications, 2005.
- [14] keytometals.com, 2014.
<http://www.keytometals.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&LN=TR&NM=277>
- [15] Cora, Ö., N., 2004 "Friction Analysis in Cold Forging", Yüksek Lisans Tezi. Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2004.

- [16] Aktakka G., 2006. "Analysis of Warm Forging Process", Yüksek Lisans Tezi. Orta Doğu teknik Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2006.
- [17] Groover, P., M., 2010. Fundamentals Of Modern Manufacturing: Materials, Processes And Systems, 4th Edition, Chapter 19. John Wiley And Sons Inc., 2010.
- [18] Aran, A., Demirkol, M., 1995. Plastik Şekil Verme Ve Teknolojisi, Bölüm 4, İstanbul Teknik Üniversitesi Makine Fakültesi İmal Usulleri Ders Notları. İstanbul, 1995.
- [19] Altan, T., Ngaile, G., Shen, G., 2005. Cold And Hot Forging: Fundamentals And Applications, Chapter 21. ASM International, 2005.
- [20] Udomphol, T., 2007. Forging Lecture Notes, Suranaree University Of Technology, 2007.
- [21] cold-flow.com, 2014.
<http://www.cold-flow.com/cf/category/coldforginghistory.html>
- [22] Altan, T., Ngaile, G., Shen, G., 2005. Cold And Hot Forging: Fundamentals And Applications, Chapter 17. ASM International, 2005.
- [23] forging.org, 2014
<https://www.forging.org/design/5242-cold-forging-processes>
- [24] Sheljaskov, S., 1994. Current Level Of Development Of Warm Forging Technology, Journal Of Materials Processing Technology, vol.46, p. 3-18, 1994.
- [25] Witt, S., 2011. Basic Knowledge: Forgings–Significance, Design, Production, Application. German Association of the Forging Industry, 2011.
- [26] cold-flow.com, 2014.
<http://www.cold-flow.com/cf/category/coldforginguse.html#>
- [27] Schuler AG
- [28] Rao, S., S., 2011. The Finite Element Method in Engineering, Fifth Edition, Chapter 1. Elsevier Inc., 2011.
- [29] Valberg, S., H., 2010. Applied Metal Forming – Including FEM Analysis, Chapter 14. Cambridge University Press, 2010.
- [30] Simufact.forming, 2014.
http://www.simufact.de/en/solutions/sol_form.html
- [31] Simufact Engineering GmbH, 2014.
<http://www.simufact.de/en/company/index.html>
- [32] NETFORM Mühendislik Makine Metal San. Tic. Ltd. Şti., 2014.
http://www.netformmetal.com/simufact_forming.asp
- [33] Hidroliksan Pres San. Tic. Ltd. Şti, 2014
http://www.hidroliksan.com/product.asp?product_id=26&t=HD200-Ton-Motorlu
- [34] Metal Ravne d.o.o., 2014.
<http://www.metalravne.com/selector/steels/ec80.html>

- [35] Uddeholms AB, 2014.
http://www.uddeholm.com/files/PB_Uddeholm_vanadis_4_extra_english.pdf
- [36] Schaffer, L., Brito, M. G. A., Geier, M., 2005. Numerical Simulation using Finite Elements to Develop and Optimize Forging Processes, Steel Research International, vol. 76 p.199-204, 2005.
- [37] Metal Ravne d.o.o., 2014.
<http://www.metalravne.com/selector/steels/ck45.html>
- [38] Metal Ravne d.o.o., 2014.
<http://www.metalravne.com/selector/steels/c10.html>
- [39] Moosbrugger, C., 2002. Atlas of Stress-Strain Curves, p. 85. ASM International, 2002.
- [40] Schaffer, L., Brito, M. G. A., 2007. FEM Numerical Simulation and Experimental Investigation on End-Forming of Thin-Walled Tubes Using a Die, Steel Research International, vol .78, p.798-803, 2007.
- [41] T.C. Orman ve Su İşleri Bakanlığı, Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2014.
<http://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?m=IZMIR>
- [42] Callister, W. D., 2007. Material Science and Engineering, An Introduction, 7th Edition. Department of Metallurgical Engineering The University of Utah, 2007.
- [43] Dieter, G. E., 1988. Mechanical Metallurgy, SI Metric Edition. University of Maryland, McGraw-Hill Book Co., 1988.
- [44] Altan, T., Ngaile, G., Shen, G., 2005. Cold And Hot Forging: Fundamentals And Applications, Chapter 14. ASM International, 2005.
- [45] Çapan, L., Metallerde Plastik Şekil Verme. Çağlayan Kitapevi, Dördüncü Baskı, 2003.
- [46] Kim, H., Sung, J. H., Sivakumar, R., Altan T., 2007. Evaluation of Stamping Lubricants Using the Deep Drawing Test, International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 47, issue 14, p. 2120-2132, November 2007.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler:

İsim: Ömer KARADAĞLI

Doğum Yeri: İzmir

Doğum Tarihi: 04.03.1987

Eğitim Bilgileri:

İlköğretim: Yahya Kemal Beyatlı İlköğretim Okulu, İzmir

Lise: İzmir Atatürk Lisesi, İzmir (2005)

Lisans: Celal Bayar Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü,
Manisa (2011)