

T.C.

**MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ FEN
BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
KONSTRÜKSİYON VE İMALAT BİLİM DALI**

**BİR EL ALETİNİN VE KALIBININ DÖVME ÜRETİM PROSESİNDE SICAK
ŞEKİLLENDİRME ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Ece Destina BEKLETENLER

**Danışman
Doç. Dr. Simge İRİZALP**



MANİSA-2023

**Ece Destina
BEKLETENLER**

**BİR EL ALETİNİN VE KALIBININ DÖVME ÜRETİM PROSESİNDE SICAK
ŞEKİLLENDİRME ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

2023

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER	1
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	3
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	4
TABLO DİZİNİ	8
TEŞEKKÜR.....	9
ÖZET.....	10
ABSTRACT.....	12
1.GİRİŞ	1
1.1.Problemin Tanımı.....	2
2.GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	4
2.1.Sıcak Dövme Yöntemi	4
2.2.Dövme Makineleri	4
2.2.1.Serbest Düşme Çekiçler	6
2.3.Kapalı Kalıpta Dövme.....	7
2.3.1.Kapalı Kalıpta Çapaklı Dövme	7
2.3.2.Kapalı Kalıpta Çapaksız Dövme.....	8
2.4.Kapalı Kalıpta Çapaklı Dövme Prosesine Etki Eden Faktörler	9
2.4.1.İş Parçası Sıcaklığı	9
2.4.2.Kalıp Sıcaklığı	10
2.4.3.Kalıp Tasarımı ve Malzeme Seçimi	10
2.4.4.İş Parçası Malzemenin Dövülme Kabiliyeti.....	11
2.4.5.Akış Gerilimi	11
2.4.6.Sürtünme ve Yağlama	11
2.5.Sıcak Dövme İşlemi Hataları	12
2.6.Mikroyapı Kontrolü	13
2.7.Bilgisayar Destekli Mühendislik (CAE) Yazılımlar	14
2.8.Literatür Taramasının Değerlendirilmesi.....	15
3.MATERYAL VE YÖNTEM	17
3.1.Kapalı Kalıpta Çapaklı Dövme Prosesinin Uygulanması	17

3.2.Kapalı Kalıpta Çapaklı Dövme Prosesinin Sonlu Hacimler Yöntemi ile	23
Analiz Edilmesi	23
3.3.Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Kalıp Analizi	33
3.3.1.Aşınma Analizi	35
3.4.Kapalı Kalıpta Çapaklı Dövme Simülasyon Sonuçları Doğrulama.....	37
Çalışmaları	37
3.4.1.Metalografik İnceleme.....	37
3.4.2.Mikro Sertlik Testi.....	40
3.4.3.3D Tarama ile Aşınma Derinliği Ölçümü	41
4.SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	46
4.1.Kapalı Kalıpta Çapaklı Dövme Simülasyonu	46
4.1.1.Geometrinin İncelenmesi ve Ölçü Kontrolü	46
4.2.Kapalı Kalıpta Çapaklı Dövme İşlemi Sonrası El Aletinin Mekanik	
İncelemeleri.....	50
4.3.Kapalı Kalıpta Çapaklı Dövme Sonrası El Aletinin Mikroyapısal	57
İncelemeleri	57
4.4.Deneysel Sonuçların Simülasyon ile Örtüştürülmesi.....	66
4.5.Farklı Proses Parametreleri ile Yapılan Simülasyon Çalışmalarının	
Tartışılması.....	88
4.5.1. En İyileştirilmiş Parametreler ile Yapılan Sıcak Dövme Simülasyonu.....	
Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	98
5.GENEL SONUÇLAR	104
KAYNAKLAR	106
ÖZGEÇMİŞ	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

BV	Birinci Vuruş
CAD	Computer Aided Design (Bilgisayar Destekli Tasarım)
CAE	Computer Aided Engineering (Bilgisayar Destekli Mühendislik)
CAM	Computer Aided Manufacturing (Bilgisayar Destekli Üretim)
DV	Düz Vuruş
E	Potansiyel Enerji (J)
F	Şekillendirme Kuvveti (N)
FEA	Finite Element Analysis (Sonlu Elemanlar Analizi)
FEM	Finite Element Method (Sonlu Elemanlar Yöntemi)
FVM	Finite Volume Method (Sonlu Hacimler Yöntemi)
g	Yerçekimi İvmesi (m/s^2)
h	Yükseklik (m)
HB	Brinell
HRC	Rockwell
HV	Vickers
İV	İkinci Vuruş
m	Kütle (kg)
ÖŞ	Ön Şekillendirme
s	Deplasman (m)
ÜÇ	Üçüncü Vuruş
W	Şekillendirme Enerjisi (J)
2D	İki Boyutlu
3D	Üç Boyutlu

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1.Dövme Makineleri	5
Şekil 2.2.Serbest Düşme Çekiç	6
Şekil 2.3.Kapalı Kalıpta Dövme	7
Şekil 2.4.a) Kapalı Kalıpta Çapaklı Dövme b) Kapalı Kalıpta Çapaklı Dövme Sonucu Oluşan Ürün	8
Şekil 2.5.Kapalı Kalıpta Çapaksız Dövme.....	9
Şekil 2.6.Sıcak Dövme İşlemi Sırasında ve Sonrasında Oluşan Mikroyapılar	13
Şekil 2.7.Sonlu Hacimler Yöntemi ile Oluşturulmuş Model	14
Şekil 3.1.16x17 mm İki Ağız Anahtar Kısa Boy Ürünü Üretim Aşamaları a) Şablon Kesme b) Şablon Isıtma c) Ön Şekillendirme d) Düz Vuruş e) Bitirme Vuruşu f) Ürünün Gözden Çıkarılması g) Ürünün Bantla Kasaya Taşınması h) Ürünlerin Kasada Soğuması	19
Şekil 3.2.a)Nihai Ürünün 2D Teknik Resmi b)2D Sıcak Dövme Kalıp Yüzeyleri c)3D Sıcak Dövme Kalıpları-İş Parçası d)3D Nihai Ürün.....	21
Şekil 3.4.Çapak Alma Kalıbı	22
Şekil 3.5.a)Gerçek Sıcak Dövme Proses Aşamaları b)Sıcak Dövme Simülasyon Aşamaları	22
Şekil 3.6.Simufact Forming Yazılımına CAD Veri Aktarımı.....	24
Şekil 3.7.Simufact Forming Yazılımında Malzeme Seçimi.....	25
Şekil 3.8.Simufact Forming Yazılımında Pres Seçimi	26
Şekil 3.9.Simufact Forming Yazılımında Sürtünme Katsayısı Seçimi	26
Şekil 3.10.Simufact Forming Yazılımında Kalıp ve İş Parçası Sıcaklık Seçimi	27
Şekil 3.11.Simufact Forming Yazılımında İş Parçasının Isıtılması	27
Şekil 3.12.Simufact Forming Yazılımında İş Parçasının Kalıba Taşınma Süresi Boyunca Soğutulması.....	28
Şekil 3.13.İş Parçasının Kalıp Üzerinde Konumlandırılması a) Şekillendirme Gözü Karşı Görünüş b) Şekillendirme Gözü Üst Görünüş c) Düz Vuruş Üst Görünüş d) Bitirme Vuruşu Üst Görünüşü	29
Şekil 3.14.Stroke Değeri için Kalıplara Nokta Ataması Yapılması.....	30
Şekil 3.15.İş Parçasına Mesh Örgüsünün Örülmesi.....	30
Şekil 3.16.Dövme Analizinin Başlatılması	31
Şekil 3.17.Simufact Forming Yazılımında Sıcak Dövme İşlemi Sonrasında Soğutma İşlemi	32
Şekil 3.18.Simufact Forming Yazılımında Çapak Alma İşlemi	33
Şekil 3.19.Kalıp Analizi Yapılması	34

Şekil 3.20.Aşınma Analizi İçin Sertlik ve Aşınma Katsayısı Değerleri Tanımlama	36
Şekil 3.21.Aşınma Derinliği için Ölçüm Mesafeleri.....	36
Şekil 3.22.Metalografik İnceleme Bölgeleri	38
Şekil 3.23.Metkon Digipress Sıcak Kalıplama Cihazı.....	38
Şekil 3.24.Metkon Gripo 2V Zımparalama ve Parlatma Cihazı	39
Şekil 3.25. Nikon Eclipse LV150N Mikroskop	39
Şekil 3.26.Metkon Duroline-M Mikrovickers Sertlik Ölçüm Cihazı	40
Şekil 3.27.Çapak Alma İşlemi Sonrası Sertlik Ölçümü Alınan Bölgeler ve Sertlik Ölçüm Yönleri a) Gövde Bölgesi Yüzey Ölçümleri b) Gövde Bölgesi B Kesiti Ölçümleri c) Anahtar Kafası Yüzey Ölçümleri d) Anahtar Kafası B Kesiti Ölçümleri.....	41
Şekil 3.28.Scantech KSCAN-Magic-II [40]	42
Şekil 3.29.3D Tarama İşlemi Örneği [40].....	42
Şekil 3.30.a)Alt Kalıp Yüzeyi b)Sıcak Dövme İşlemi Sonrası Taranan Alt Kalıp Yüzeyi	43
Şekil 3.31.a)Kalıp Üst Kalıp Yüzeyi b)Sıcak Dövme İşlemi Sonrası Taranan Üst Kalıp Yüzeyi	44
Şekil 3.32.a)Üst Kalıp b)Alt Kalıp Mevcut Yüzey ile 3D Tarama Yüzeylerinin Örtüştürülmesi.....	45
Şekil 4.1.Sıcak Dövme Simülasyonu Sonucu ürün Geometrisinin Yük Uygulama Oranlarına Göre Değişimi	47
Şekil 4.2.Sıcak Dövme İşlemi Prosesi Sonucu Oluşan Ürünün Yüzde Yükleme Miktarına Göre Değişimi	48
Şekil 4.3.Kapalı Kalıpta Sıcak Dövme Simülasyon Sonucu Oluşan Geometriler 1-a)Ön Şekillendirme 1-b)Düz Şekillendirme 1-c)Bitirme Gözü-1. Şekillendirme 1-d)Bitirme Gözü-2. Şekillendirme 1-e)Bitirme Gözü-3. Şekillendirme 2-a)Ürün Teknik Resmi 2-b)L Ölçüsü 2-c)a1 Ölçüsü 2-d)a2 Ölçüsü.....	49
Şekil 4.4.a) Çapak Alma İşlemi Sonrası Simülasyondan Elde Edilen Ürün b) Gerçek Prosesten Elde edilen Ürün	49
Şekil 4.5.Sıcak Dövme Simülasyonu Sonucu Üründe Oluşan Etkin Plastik Gerinim Değerleri a) İş Parçasının Üst Kalıp ile Temas Eden Yüzeyi b) İş Parçasının Alt Kalıp ile Temas Eden Yüzeyi	50
Şekil 4.6.Sıcak Dövme Simülasyonu Sonucu Üründe Oluşan Eşdeğer Gerilme Değerleri a) İş Parçasının Üst Kalıp ile Temas Eden Yüzeyi b) İş Parçasının Alt Kalıp ile Temas Eden Yüzeyi	51
Şekil 4.7.Vuruş Sayısına Göre Etkin Plastik Gerinim Değişimi Grafiği	52
Şekil 4.8.Sıcak Dövme Simülasyonu Sonrası Bölgelere Göre Anahtar Yüzeyinde Oluşan Gerilme-Gerinim Değerleri Grafiği-1 a-b)Gövde c-d)Anahtar Kafası	53
Şekil 4.9.Sıcak Dövme Simülasyonu Sonrası Bölgelere Göre Anahtar Yüzeyinde Oluşan Gerilme-Gerinim Değerleri Grafiği-2 a-b)Gövde c-d)Anahtar Kafası	54
Şekil 4.10.Sıcak Dövme Simülasyonu Sonrası Bölgelere Göre Anahtar Kesitinde Oluşan Gerilme-Gerinim Değerleri Grafiği-1 a-b)Gövde c-d)Anahtar Kafası	55

Şekil 4.11.Sıcak Dövme Simülasyonu Sonrası Bölgelere Göre Anahtar Kesitinde Oluşan Gerilme-Gerinim Değerleri Grafiği-2 e)Gövde f)Anahtar Kafası	56
Şekil 4.12.Mikroyapı İncelemesi Yapılan Bölgeler	57
Şekil 4.13. Soğuma Sonrası a)100x-Gövde Kesit b)100x-Anahtar Kafası Kesit Mikroyapı Görüntüleri	59
Şekil 4.14.Soğuma Sonrası a)200x-Gövde Kesit b)500x-Gövde Kesit c) 200x-Anahtar Kafası Kesit d)500x-Anahtar Kafası Kesit Mikroyapı Görüntüleri	60
Şekil 4.15.Soğuma Sonrası a)200x-Gövde Kesit, b) 200x-Anahtar Kafası Kesit Bölgelerinden Alınan Mikroyapı Ölçümleri (μm)	62
Şekil 4.16. Soğuma Sonrası a)500x-Gövde Yüzey, b)500x-Anahtar Kafası Yüzey Bölgeleri Ötektoid Öncesi Ferrit Tane Kalınlığı Ölçümleri (μm)	64
Şekil 4.17.Soğuma ve Çapak Alma İşlemleri Sonrası A-A Kesiti Boyunca Anahtar Gövdesi ve Kafası için Yüzey Bölgesinde Oluşan Etkin Plastik Gerinim Değerleri ve Sertlik İlişkisi	67
Şekil 4.18.Soğuma ve Çapak Alma İşlemleri Sonrası B-B Kesiti Boyunca Anahtar Gövdesi ve Kafası için Yüzey Bölgesinde Oluşan Etkin Plastik Gerinim Değerleri ve Sertlik İlişkisi	69
Şekil 4.19.Soğuma ve Çapak Alma İşlemleri Sonrası C-C Kesiti Boyunca Anahtar Gövdesi ve Kafası için Kesit Bölgesinde Oluşan Etkin Plastik Gerinim Değerleri ile Sertlik Değerleri İlişkisi	71
Şekil 4.20.Soğuma ve Çapak Alma İşlemleri Sonrası D-D Kesiti Boyunca Anahtar Gövdesi ve Kafası için Kesit Bölgesinde Oluşan Etkin Plastik Gerinim Değerleri ile Sertlik Değerleri İlişkisi	73
Şekil 4.21.A-A Kesitinde Ok Yönünde Gövde-Anahtar Kafası Yüzey Bölgesinde Oluşan Çekme Dayanımı Değerleri Grafiği	77
Şekil 4.22.B-B Kesitinde Ok Yönünde Gövde-Anahtar Kafası Yüzey Bölgesinde Oluşan Çekme Dayanımı Değerleri Grafiği	78
Şekil 4.23.C-C Kesitinde Ok Yönünde Gövde-Anahtar Kafası Kesit Bölgesinde Oluşan Çekme Dayanımı Değerleri Grafiği	79
Şekil 4.24.D-D Kesitinde Ok Yönünde Gövde-Anahtar Kafası Kesit Bölgesinde Oluşan Çekme Dayanımı Değerleri Grafiği	80
Şekil 4.25.10000 Adet Şablon Sonrası Alt ve Üst Kalıp Aşınma Grafikleri	81
Şekil 4.26. Sıcak Dövme İşlemi Sonrası a1) Alt Kalıp Kullanılmamış Göz a2)Alt Kalıp Kullanılmış Göz b3)Üst Kalıp Kullanılmış Göz b4)Üst Kalıp Kullanılmamış Göz	83
Şekil 4.27.Alt Kalıp İçin Simülasyon Sonucu Oluşan Sıcaklık Verileri ile Gerçek Proses Sonrası Aşınma Yüzeylerinin Karşılaştırılması	84
Şekil 4.28.Üst Kalıp İçin Simülasyon Sonucu Oluşan Sıcaklık Verileri ile Gerçek Proses Sonrası Aşınma Yüzeylerinin Karşılaştırılması	85
Şekil 4.29.Sıcak Dövme İşlemi Sonrası Kalıp a)Henüz Kullanılmamış Dişi Kalıp b)10000 Vuruş Sonrası Dişi Kalıpta Oluşan Aşınmalar	86
Şekil 4.30.Sıcak Dövme Simülasyonu Sonucu 1.2714 Malzeme Alt Kalıpta Oluşan Eşdeğer Gerilme ve Sıcaklık Değerleri	87
Şekil 4.31. Farklı Şekillendirme Sıcaklıklarında Oluşan Ürünler	89

Şekil 4.32.Çeşitli Kalıp Sıcaklıklarına Göre Aşınma Derinliği Değerleri	91
Şekil 4.33.Simülasyon Sonucu 1.2714 Malzeme Kalıpta Oluşan Aşınma Derinlikleri a)48 HRC b)52 HRC	92
Şekil 4.34.Simülasyon Sonucu 1.2714 Malzeme Kalıpta 48-52 HRC Sertliklerde Aşınma Derinliği Grafiği.....	92
Şekil 4.35.Sıcak Dövme Simülasyonu Sonucu 1.2343 ve 1.2714 Malzeme Alt Kalıpta Oluşan Eşdeğer Gerilme Değerleri Karşılaştırması	94
Şekil 4.36.Sıcak Dövme Simülasyonu Sonucu 1.2343 ve 1.2714 Malzeme Alt Kalıpta Oluşan Aşınma Derinlikleri.....	95
Şekil 4.37.Sıcak Dövme Simülasyonu Sonucu 52 HRC Sertlikteki 1.2343 ve 1.2714 Malzeme Alt Kalıpta Oluşan Aşınma Derinlikleri.....	96
Şekil 4.38.Alt Kalıpta Meydana Gelen Eşdeğer Gerilme Değerleri a)Vuruş İyileştirmesi Öncesi b)Vuruş İyileştirmesi Sonrası	97
Şekil 4.39.Vuruşlarda Yapılan İyileştirme Sonrası Oluşan Geometriler 1-a)Ön Şekillendirme 1-b)Düz Şekillendirme 1-c)Bitirme Gözü-1. Şekillendirme 1-d)Bitirme Gözü-2. Şekillendirme 1-e)Bitirme Gözü-3. Şekillendirme 2-a)Ürün Teknik Resmi 2-b)L Ölçüsü 2-c)a1 Ölçüsü 2-d)a2 Ölçüsü.....	98
Şekil 4.40.Alt Kalıp İçin a)İyileştirme Öncesi b)En İyileştirilmiş Prosese Ait Simülasyon Sonucu Elde Edilen Eşdeğer Gerilme Değerleri.....	100
Şekil 4.41.Alt Kalıp İçin İyileştirme Öncesi Ve En İyileştirilmiş Prosese Ait Simülasyon Sonucu Elde Edilen Aşınma Derinlikleri Değerleri.....	100
Şekil 4.42.El Aleti İçin a)İyileştirme Öncesi b)En İyileştirilmiş Prosese Ait Simülasyon Sonucu Elde Edilen Etkin Plastik Gerinim Değerleri.....	102
Şekil 4.43.El Aleti için İyileştirme Öncesi Proses İle En İyileştirilmiş Prosesin Sonucunda Çıkan Ürünün Simülasyon Sonucu Oluşan Geometri Ölçüleri	102

Tablo 2.1.Sıcak dövme işleminde meydana gelen hata türleri ve oluşum yüzdeleri	12
Tablo 3.1.DIN 31CrV3 ve 1.2714 kimyasal kompozisyonu.....	17
Tablo 3.2.Hammadde mekanik özellikleri	17
Tablo 3.3.Isıl İşlem görmüş el aletinin ve kalıp çeliğinin mekanik özellikleri.....	18
Tablo 3.4.Dövme aşamalarına ait vuruş yüzdeleri	20
Tablo 3.5.Simülasyon programında kullanılan değişken parametreler.....	23
Tablo 4.1.Soğuma sonrası 200x-gövde kesit, 200x-anahtar kafası kesit bölgeleri ortalama tane boyutu ölçümler (μm).....	63
Tablo 4.4.Soğuma sonrası a)500x-gövde yüzey, b)500x-anahtar kafası yüzey bölgeleri ötektoid öncesi ferrit kalınlığı ölçümleri (μm).....	65
Tablo 4.5.Anahtar bölgelerine göre efektif plastik gerinim ve sertlik değerleri özet tablosu.	75
Tablo 4.6.Simülasyon ve deneysel aşınma derinlikleri.....	82
Tablo 4.7.1.2714 ve 1.2343 Sıcak iş takım çelikleri kimyasal kompozisyonu.....	93
Tablo 4.8.Vuruş yüzdelerinde yapılan iyileştirme tablosu.....	96
Tablo 4.9.En iyileştirilmiş parametre değerleri.....	99
Tablo 4.10.İyileştirme öncesi proses ve en iyileştirilmiş prosese ait simülasyon sonucu elde edilen alt kalıp eşdeğer gerilme ve aşınma değerleri sonuçları.....	101
Tablo 4.11.El aleti için İyileştirme öncesi ve en iyileştirilmiş prosese ait simülasyon sonucu elde edilen etkin plastik gerinim değerleri	103

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca yardımlarını esirgemeyen destekçilerime minnettarlığımı sunmak için zaman ayırmak isterim. İlk olarak çalışmamın her aşamasında bana destek olan, bilgi ve deneyimleri ile yol gösteren kendisini tanımaktan ve birlikte çalışmaktan büyük onur duyduğum sevgili hocam Doç. Dr. Sayın Simge İRİZALP'e teşekkürü bir borç bilirim. Hayatımın her aşamasında koşulsuz desteği için annem Sayın Arzu ÖZBEK'e yürekten teşekkür ederim. Çalışmamın simülasyon sürecindeki bilgileri ve destekleri için Sayın Çağlar HOCALAR ve Sayın Ali Baran METE'ye teşekkürlerimi sunarım. Son olarak, çalışmamı AR-GE Merkezi bünyesinde "PK-2021/002 Bir El Aletinin ve Kalıbının Dövme Üretim Prosesinde Sıcak Şekillendirme Özelliklerinin İncelenmesi" proje kodu ve ismiyle hayata geçiren ve tüm maddi süreci destekleyen, İZELTAŞ İzmir El Aletleri Sanayi ve Ticaret A.Ş.'ye teşekkürü bir borç bilirim.

Ece Destina BEKLETENLER
Manisa, 2023

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Bir El Aletinin ve Kalıbının Dövme Üretim Prosesinde Sıcak Şekillendirme Özelliklerinin İncelenmesi

Ece Destina BEKLETENLER

**Manisa Celal Bayar Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Doç. Dr. Simga İRİZALP

Dövme, kalıplar ve aletler aracılığıyla metallere kolayca şekil verilebilen en kullanışlı şekillendirme yöntemlerinden biridir. Proses, metale çekiçleme veya presleme yöntemi ile kuvvet uygulanması ile oluşur. Kökeni birkaç bin yıl öncesine dayanan en eski ve en kullanışlı metal şekillendirme yöntemlerinden biridir. Dövme işlemi, yüksek derecede yapısal olarak güvenilir ve mukavemet-ağırlık oranlı ürünler üretir, bu da onu, yüksek mukavemetli ve uzun süreli kullanımlara sahip bir ürünün üretimi için dikkate alınması gereken en uygun imalat süreçlerinden biri yapar. Dövme işleminin maliyetini azaltmak için, yöntem, diğer üretim yöntemlerine kıyasla daha kaliteli (yüksek mukavemet ve yüksek güvenilirlik) ürünler üretmek için en iyi parametreleri kullanabilecek şekilde tasarlanmalıdır. Ancak yeni ürün tasarımı için bir proses oluşturmak basit değildir. Tatmin edici bir ürün üretmek ve proses kurmak çok fazla deneme yanılma gerektirir. Ampirik deneme yanılma yöntemi, dövme işlemi için yaygın olarak kullanılmaktadır, ancak çok zaman alan ve maliyetli bir yöntemdir. Sonlu elemanlar (FEM) veya hacimler yöntemi (FVM) vb. gibi yüksek verimli nümerik tekniklerin mevcudiyeti ile, imalat süreçlerinin performansını test etmek için bilgisayar simülasyonları kullanılır. FVM veya FEM gibi analiz tekniklerinin gelişmesiyle, 1980'lerin başında olası bir alternatif olarak bilgisayar simülasyonu tanıtılmıştır. Kalıp tasarımını optimize etmek ve incelemek ve daha kaliteli dövme parçalar üretmek için birçok başarılı girişimde bulunulmuştur. Literatürde FEM ve FVM gibi çeşitli teknikler benimsenmiştir.

Sıcak dövme, optimum malzeme kullanımı ve daha iyi mekanik özelliklere sahip bileşenlerin üretimi için umut verici bir tekniktir. Sıcak şekillendirme işleminde kullanılan kalıp, genellikle yüksek termomekanik yüklere maruz kalır; bu nedenle, kalıpların hizmet ömrü esas olarak aşınma ve plastik deformasyonla sınırlıdır. Hizmet ömrü, yeniden üretim maliyetleri ve sıcak dövme işlemlerinin ekonomisi ile ilgilidir. Bu nedenle, sıcak dövme endüstrisindeki araştırmanın başlıca görevi, dövme kalıplarının hizmet ömrünü iyileştirmektir. Kalıp hizmet ömrü, üretim miktarı açısından boyutsal toleransı karşılayarak üretilen dövme sayısı veya kalıbın arızalara dayanabileceği hizmet süresi ile belirlenir.

Dövme firmaları tasarım sürecinde genellikle deneme yanılma yöntemini kullanmaktadır. Ayrıca, kalıbın tam dolması ve çapak oluşumunda malzeme kaybı gibi kritik hususlar söz konusudur. Ama dövme sanayisi, üretim maliyetlerini indirirken nihai ürün kalitesini arttırmada gün geçtikçe daha rekabetçi hale gelmektedir. Bu çalışmada İzeltaş A.Ş.'de gerçekte uygulanan sıcak dövme prosesi ticari bir FVM yazılımı kullanılarak bire bir simüle edilmiş, sıcaklık değişimleri, kalıpta ve parçada meydana gelen gerilme-gerinim değerleri, kalıpta meydana gelen aşınma derinlikleri gibi sonuçlar gerçekte üretilen üründen alınan numunelere yapılan metalografik ve mekanik incelemeler ile deneysel olarak doğrulanmıştır. Simülasyon sonuçlarının doğrulanmasının ardından mevcutta uygulanan sıcak dövme işleminin iyileştirilmesi için kalıp hammaddesi, kalıp sertliği, kalıp ön sıcaklığı, şablon sıcaklığı, vuruş yüzdeleri gibi kritik parametreler değiştirilerek sonuçlar incelenmiştir. Değişkenlerin etkisi ticari FVM analiz programıyla ortaya konmuştur. Operasyonlar İzeltaş'ta gerçekleştirilmiştir. El aletindeki deneysel ve simülasyon çalışmalarının uyumlu olması kalıp hakkında FVM yardımıyla izlenen yöntemin yüksek oranda güvenilir olduğunu ve gelecek çalışmalar içinde tatmin edici sonuçlar elde edilebileceğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Sıcak Dövme, Sonlu Hacimler Yöntemi, Kapalı Kalıpta Çapaklı Dövme

2023, 124 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

Investigation of Hot Forming Properties of a Hand Tool and Its Die In the Hot Forging Process

Ece Destina BEKLETENLER

**Manisa Celal Bayar University
Graduate School of Applied and Natural Sciences
Department of Mechanical Engineering**

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Simge İRİZALP

Forging is one of the most practical methods for easily shaping metals through patterns and tools. The process involves applying force to the metal object through hammering or pressing. It is one of the oldest and most useful metal shaping methods, dating back several thousand years. The forging process produces products that are highly structurally reliable and have a high strength-to-weight ratio, making it one of the most suitable manufacturing processes to consider for producing high-strength and long-lasting products. To reduce the cost of the forging process, the method should be designed to utilize the best parameters that can produce higher-quality (high strength and high reliability) products compared to other production methods.

However, creating a process for new product design is not simple. Producing a satisfactory product and establishing the process requires a lot of trial and error. The empirical trial and error method is commonly used for the forging process but is time-consuming and costly. With the presence of high-efficiency numerical techniques such as the Finite Element Method (FEM) or Finite Volume Method (FVM), computer simulations are used to test the performance of manufacturing processes.

Computer simulation was introduced as a possible alternative in the early 1980s with the development of analysis techniques like FVM or FEM. Many successful attempts have been made to optimize and examine die design and produce higher-quality forged parts. Various techniques such as Finite Element Method (FEM) and Finite Volume Method (FVM) have been adopted in the literature.

Hot forging is a promising technique for optimal material utilization and the production of components with better mechanical properties. The die used in hot shaping processes is typically subjected to high thermomechanical loads, so the service life of dies is primarily limited by wear and plastic deformation. The service life is related to the cost of re-production and the economy of hot forging processes.

Therefore, the primary task of research in the hot forging industry is to improve the service life of forging dies. The die service life is determined by the number of forgings produced in terms of dimensional tolerance, or the service time the die can withstand without failure.

Forging companies often use a trial-and-error method during the design process. Additionally, critical issues such as material loss due to incomplete filling of the die and the formation of flash are important considerations. However, the forging industry is becoming increasingly competitive in improving the final product quality while reducing production costs. In this study, the hot forging process actually applied at Izeltas A.S. was simulated one-to-one using commercial Finite Volume Method (FVM) software. The results, such as temperature changes, stress-strain values occurring in the die and the part, and wear depths in the die, were experimentally verified through metallographic and mechanical examinations of samples taken from the actually produced product. After the validation of the simulation results, critical parameters such as die material, die hardness, die preheating temperature, template temperature, and impact percentages were altered to improve the current hot forging process. The effect of these variables was determined using a commercial FVM analysis program. The operations were carried out at Izeltas. The compatibility of the experimental and simulation studies on the hand tool showed that the method followed with the help of FVM for the die is highly reliable, and satisfactory results can be obtained for future studies.

Keywords: Hot Forging, Finite Volume Method, Closed Die Forging With Flash

2023, 124 pages

1.GİRİŞ

Dövme yöntemi çekiçlerin, preslerin veya özel dövme makinelerinin kullanılarak minimum malzeme zayıatı ile yüksek mukavemet ve üstün mikroyapı vb. özelliklere sahip parçaların üretilmesini sağlar, bu sebeple tüm üretim süreçleri arasında özel bir yere sahiptir. Dövme işleminde, başlangıç malzemesi nispeten basit bir geometriye sahiptir; bu malzeme bir veya daha fazla işlemde plastik olarak deforme edilerek daha karmaşık biçimli bir ürüne dönüştürülür [1]. Dövme işlemleri genellikle sıcak olarak yapılır. Yüksek sıcaklıklarda metallerin hem şekil değiştirme kabiliyetinin yüksek olması, hem de plastik deformasyon direncinin düşük olması nedeniyle şekil değişimi için uygulanan kuvvet daha küçük olmaktadır [2].

Diğer üretim yöntemlerine nispeten dövme yöntemi daha pahalı takımlar gerektirir. Bu nedenle, çok sayıda parçanın üretilmesi gerektiğinde veya bitmiş üründe gerekli olan mekanik özellikler yalnızca bir dövme işlemiyle elde edilebildiğinde, işlem ekonomik olarak cazip hale gelir. Günümüzde yalnızca Avrupa’da her sene 2 milyon tondan fazla çelik parçanın üretimi sıcak dövme yöntemi ile gerçekleştirilmektedir [3]. Sıcak dövme prosesi, 1000°C’nin üzerine ısıtılmış bir iş parçasını, genellikle grafit bir kalıp yağlayıcıyı, hareketli bir üst kalıp ve sabit bir alt kalıp arasında meydana gelen plastik deformasyonu içermektedir. Böyle bir sistemde, kullanılan kalıp malzemesi erozyon, plastik deformasyon, ısıl ve mekanik yorulma gibi hasar mekanizmalarına karşı dayanıklı olmalıdır [4].

Sürekli artan malzeme, enerji ve özellikle insan gücü maliyetleri, dövme işlemlerinin ve takımlarının mümkün olan en kısa teslim süreleri ile minimum miktarda deneme yanılma ile tasarlanmasını ve geliştirilmesini gerektirir. Bu nedenle, rekabetçi kalabilmek için, bilgisayar destekli tekniklerin, yani CAD, CAM, CAE ve özellikle sonlu eleman analizi (FEA) tabanlı bilgisayar simülasyonunun uygun maliyetli uygulaması mutlak bir gerekliliktir [1].

1.1.Problemin Tanımı

Sıcak dövme işlemi genel olarak 1200 °C sıcaklıklara kadar ısıtılan iş parçasının iki kalıp arasında yüksek kuvvetler altında şekillendirilmesi olarak açıklanabilir. Proseste kullanılan kalıplar sıcak iş takım çeliklerinden talaşlı imalat yöntemi ile üretilmekte ve sonrasında gerekli mukavemeti sağlayan sertliklerin elde edilebilmesi için ısıtıl işlem prosesine tabi tutulmaktadır. Bahsedilen üretim aşamaları ve kalıp hammaddeleri yüksek maliyetlere mal olmakta ve bu sebeple kalıplar birden fazla kez kullanılmaktadır. Dövme kalıplarının birden fazla kez kullanılması sebebiyle kalıplar üzerinde herhangi bir metalografik inceleme yapılamamaktadır. Kalıplarda meydana gelebilecek hasarlara yönelik, ömür tahmini ve ömür uzatmaya yönelik çalışmalar yapılamamaktadır. Bu durum üretim açısından problem oluşturmakta ve hem üretim maliyetini hem de verimini etkilemektedir. Yapılan araştırmada, fiziki koşullar ve yüksek maliyetler sebebiyle incelenmesi mümkün olmayan sıcak dövme kalıpları için sıcak dövme prosesinin nümerik analizlerle simüle edilmesi ve gerçek proses ile üretilen el aleti üzerinden deneysel çalışmalar yapılarak analiz verilerinin güvenilirliğinin ortaya koyulması hedeflenmiştir. İş parçası üzerinde oluşan etkin plastik gerinim, eşdeğer gerilme ve sıcaklık değişimi vb. parametrelerin kalıp ömrünü etkileyen aşınma hasarı üzerindeki etkisini ve bölgelerini simülasyon ortamında tespit ederek incelemek ve sıcak dövme prosesi ile üretilen el aleti üzerinde yapılan incelemeler sonucu elde edilen tane boyutu ve sertlik değerleri ile örtüştürülmesi sonucu nümerik analizlerin güvenilirliğinin sağlanması ve sonrasında proses hazırlıklarının bu nümerik analizlerle yapılarak öngörülerin oluşturulması yöntemiyle çözülmesi amaçlanmıştır.

1.2.Tezin Amacı ve Önemi

Gerçekleştirilen çalışmada, el aleti üzerinde oluşan yüksek plastik gerinimin ve düşük etkin gerilmelerin elde edildiği parametrelerin simülasyon ortamında tespit edilmesi hedeflenmektedir. Amaç, normal koşullar altında incelenmesi mümkün olmayan sıcak dövme kalıplarında oluşan gerilme ve gerinimleri tespit ederek incelemek, sıcaklık değerlerini tespit etmek ve gerçek proses sonuçları ile örtüştürülmesini üretilen el aleti üzerinden yapmaktır. Maksimum gerinim ve sıcaklık dağılımı numunedeki en küçük tane boyutuna atfetmektedir. Böylelikle kalıpta oluşan aşınma, plastik deformasyon, ısıl ve mekanik yorulma gibi hasar türüne yatkın olacak bölgeler tespit edilerek kalıp performansı tayin edilebilecektir. Böylece iş parçası hacmi içinde mikro-çatlak oluşum riski minimize edilecektir. Üretim parametrelerinin optimize edilmesi sağlanarak el aleti mekanik özelliklerinin geliştirilmesinin yanında üretimi gerçekleştiren kalıbın performansının geliştirilmesi amaçlanmıştır. Sonuç olarak, ürün kalitesini arttırıcı yönde sonuçlar elde edilmesinin yanında kalıp hakkında da bilgi birikimi oluşması sağlanacaktır. Bunun yanında sertlik-dayanım korelasyonu ile çekme dayanımı hesaplanabilecektir. El aletinden sertlik değişim profili çıkartılması ile de aşınmaya olan direnç hakkında bilgi birikimi oluşacaktır. Elde edilen sonuçlar sıcak dövme alanında özellikle imalat öncesinde önemli bir yere sahip olacak ve imalat alanına verimli olacak veriler sağlayarak yol gösterici olarak rol oynayacaktır. Aynı zamanda simülasyon programı destekli çalışmaların artmasında etkili olacak; bu ve benzeri programların kullanımı ve proses kurulumlarının hazırlanması açısından yeni çalışmaları teşvik edici konumda olacaktır.

2.GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1.Sıcak Dövme Yöntemi

Sıcak dövme, şablon veya iş parçası olarak bilinen dövülebilir bir metal parçanın plastik deformasyon sıcaklığına kadar ısıtılması sonrasında iki kalıp arasında çekiçleme veya presleme ile önceden belirlenmiş karmaşık bir şekle getirilmesi işlemi olarak tanımlanabilir [5].

Yüksek sıcaklıklarda, malzemeler düşük akış stresine sahiptir ve bu nedenle, şekillendirme için gereken deformasyon yükü azalır ve ekipman kapasitesi küçük olabilir. Sıcak dövme işlemi sırasında, iş parçasının iri tane yapısı parçalanır ve daha ince taneler ile değiştirilir, bu da başlangıç iş parçasının boyutunun küçültülmesiyle elde edilir. Genellikle, ürün sıcak dövüldükten sonra ek olarak ısıl işleme tabi tutulur [5].

2.2.Dövme Makineleri

Dövme yönteminde kullanılan kalıpların yanı sıra, dövme makineleri parçanın üretimi için en önemli unsurlardan birisidir. Dövme makinelerinden işlevsel olarak beklentiler şöyledir:

- Parçanın nihai şekline ulaşması için gerekli olan dövme kuvveti ve enerjisini sağlamak,
- Şekillendirme sırasında oluşan kuvvetlere ve momentlere karşı kalıplara nihai konumlarına kadar olabildiğince hassas kılavuzluk yapmak.

Yukarıda bahsi geçen gereksinimler dövme işleminin zorlu koşullara bağlı olması sebebiyle yüksek yatırım maliyetleri olan güçlü dövme makinelerinin kullanımını zorunlu kılar. Bunlara ek olarak yüksek yatırım maliyetleri mümkün olduğunca üretilen parçaya dağıtılmalıdır. Bu sebeple dövme makineleri yüksek üretkenliğe sahip olmalıdırlar.

Metal bir parçanın şekillendirilebilmesi için, deformasyon enerjisi olarak adlandırılan bir enerji gereklidir. Gereken bu deformasyon enerjisinin büyüklüğü Eşitlik (2.1)’ de gösterilmektedir [6].

$$W = F \cdot s \quad (2.1)$$

Şekil 2.1’de gösterilen Dövme Makineleri ‘Enerji Sınırlı’, ‘Kuvvet Sınırlı’ ve ‘Kurs Sınırlı’ olmak üzere üç temel prensibe göre çalışırlar [8].



Şekil 2.1.Dövme Makineleri [7]

Enerji sınırlı makineler çekiçler ve vidalı presler örnek olarak gösterilebilir. Tezgahın depolanmış çalışma kapasitesi şekil verme işlemi sırasında her bir vuruş çevriminde kullanılır, böylece parça son şeklini alıncaya kadar tezgah gücü tüketilir [6].

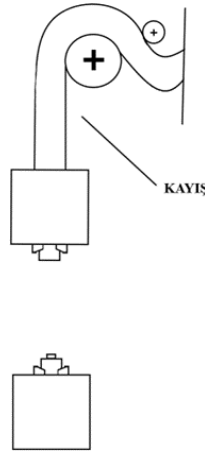
Kuvvet sınırlı makinelerin şekillendirme işlemini yapma kabiliyeti esas olarak bütün koç kursu boyunca sahip oldukları sabit koç kuvveti (en yüksek yük kapasiteleri) ile sınırlandırılmışlardır [8]. Hidrolik presler kuvvet sınırlı tezgahların tipik bir örneğidir.

Kurs sınırlı tezgahlar önceden belirlenmiş olan sabit yol-zaman eğrisine sahiptirler. Kurs sınırlı tezgahlar ‘doğrusal hareketli tezgahlar’ ve ‘döner hareketli tezgahlar olmak üzere’ ikiye ayrılırlar.

Dövme proseslerinde makine olarak presler ve çekiçler kullanılır. Presler esas olarak mekanik, vidalı ve hidrolik olmak üzere üç ayrı tipe ayrılır. Presler, dövme dışında sacların şekillendirilmesi, soğuk ekstrüzyon gibi üretimlerde de kullanılabilir. Preslerde malzemenin plastik şekil değiştirmesi statik basma kuvvetleri altında ve çekiçlere nispeten daha düşük hızlarla yapılır. Çekiçlerin uygulama alanı ise preslere kıyasla daha sınırlı olup daha çok sıcak dövme ve bazı saclara şekil verme işlemlerinde kullanılırlar. Çekiçle dövmede, plastik şekillendirme iş parçasının yüzeyine uygulanan vuruşlarla gerçekleştirilir.

2.2.1.Serbest Düşme Çekiçler

Şekil 2.2’de gösterilen enerji sınırlı tezgahlardan biri olan serbest düşme çekiçler, şekil verme işlemi için tezgahta depolanan çalışma kapasitesinin tamamını kullanır. Böylece parça son şeklini alana kadar tezgahın gücü tükenir. Koç yükseltildiğinde iş parçasının şekillendirilmesi için kullanılacak olan bütün enerji potansiyel enerji olarak depolanır. Yalnızca potansiyel enerjinin kullanıldığı çekiçler serbest düşme çekiç olarak adlandırılır [7].



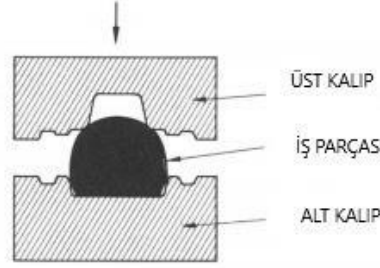
Şekil 2.2.Serbest Düşme Çekiç

Serbest düşme çekiçlerde kullanılan potansiyel enerji formülü Eşitlik (2.2)' de gösterilmektedir [7]. Burada ' m ' koç ve üst kalıp toplam kütlesi, ' g ' yer çekimi ivmesi, ' h ' ise düşme yüksekliğidir [9].

$$E = m \cdot g \cdot h \quad (2.2)$$

2.3.Kapalı Kalıpta Dövme

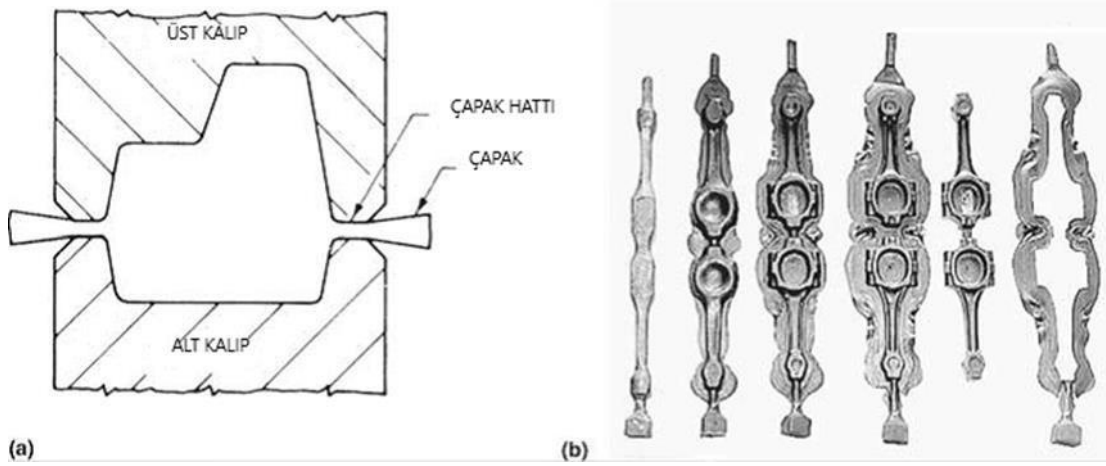
Şekil 2.3'te gösterilen kapalı kalıpta dövme sıcak olarak yapılan metal şekillendirme işlemidir. Çekiçleme veya ezme yöntemi ile üst kalıbın iş parçasına uyguladığı kuvvet ile sağlanan metal akışı kalıp boşluğu tarafından sınırlanır [6].



Şekil 2.3.Kapalı Kalıpta Dövme [6]

2.3.1.Kapalı Kalıpta Çapaklı Dövme

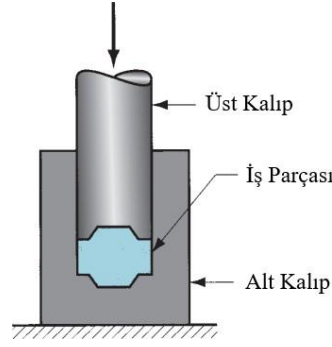
Şekil 2.4' te gösterilen sıcak olarak uygulanan bu yöntemde genellikle iki parçalı olan kalıp kapandığı zaman arada kalan gravür üretilmek istenen parçanın şeklindedir. Böylece kalıp parçalarından birinin diğerine veya her ikisinin birbirine doğru hareketi sonucunda, uygun bir sıcaklığa kadar ısıtılmış olan hammaddenin gravürü doldurması sağlanır [8]. Bu işlem esnasında çapak olarak adlandırılan az miktarda bir malzeme kalıbın dışına çıkmaya zorlanır ve bu şekilde kalıp kapandıkça çapak kalınlığında incelme meydana gelir. Çapak hızlı bir şekilde soğuyarak deformasyona karşı aşırı bir direnç gösterir ve böylelikle kalıbın içindeki basıncı arttırarak metalin kalıbın dolmayan yerlerine doğru akma eğiliminde olmasını sağlayarak gravürün eksiksiz dolmasını sağlar. Dövme işlemi sonucunda çapak iş parçasından kesilerek alınır [10].



Şekil 2.4.a) Kapalı Kalıpta Çapaklı Dövme **b)** Kapalı Kalıpta Çapaklı Dövme Sonucu Oluşan Ürün [10]

2.3.2. Kapalı Kalıpta Çapaksız Dövme

Kapalı kalıpta çapaksız dövme yönteminde Şekil 2.5'te gösterildiği üzere iş parçası tam olarak sınırlandırılmış bir kalıp boşluğu içerisinde plastik deformasyona uğratılır. Bu yöntemde iş parçasının büyüklüğü çok hassas bir doğrulukta olmalıdır. Kalıbın tamamen dolarak istenilen son şeklin elde edilmesi, çapak oluşumu olmadan sağlanmalıdır. Ayrıca, kalıbın tamamen dolması için çapak oluşumundan faydalanılmadığından kapalı kalıpla çapaksız dövme işlemi büyük oranda kalıp tasarımına dayanır. Yukarıda bahsedildiği üzere iş parçasının basılmasından önceki hacmi; kalıbın tamamen dolmasının, fazla dolma olup çok büyük basınçlara mahal verilmeden sağlanması açısından önemlidir. Kalıp için doğru miktarda malzeme ve indirgenmiş dövme zamanı için uygulanabilecek olan bir teknik, yuvarlanmış ve ekstrude edilmiş iş parçalarının kullanılmasıdır [7].



Şekil 2.5.Kapalı Kalıpta Çapaksız Dövme [11]

2.4.Kapalı Kalıpta Çapaklı Dövme Prosesine Etki Eden Faktörler

Sıcak dövme prosesine etki eden önemli bazı parametrelerin bilinmesi gereklidir. Bu parametreler aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- İş parçası sıcaklığı
- Kalıp sıcaklığı
- Kalıp tasarımı ve malzeme seçimi
- İş parçası malzemenin dövülme kabiliyeti
- Akış gerilimi
- Sürtünme ve yağlama

2.4.1.İş Parçası Sıcaklığı

Metallerin şekillendirilebilirliği sıcaklık yükseldikçe artarken dövme işlemi için gereken kuvvet azalır. Çeliğin sıcak dövülmesinde ısıtma sıcaklığı yaklaşık 1100 °C ila 1300 °C arasındadır [9]. İş parçasının yeniden kristalleşme sıcaklığının çok üzerine ısıtılması akış gerilimi, pekleşme katsayısı ve dolayısıyla malzemenin deformasyon direncini azaltarak malzemenin daha kolay şekillendirilmesini sağlar. Bu nedenle dövme işlemi uygun olan en yüksek sıcaklıkta gerçekleştirilmelidir [12]. Kararlı bir dövme işlemi için sıcaklığın iş parçasının eksen ve kesiti boyunca eşit bir şekilde dağılması ve tufal oluşumu ile karbonsuzlaşmayı en aza düşürmek için en kısa süre içerisinde gerçekleştirilmesi gerekmektedir [9].

2.4.2.Kalıp Sıcaklığı

Sıcak dövme prosesini ve kalıp ömrünü önemli ölçüde etkileyen bir diğer faktörde kalıp sıcaklığıdır. Ebaranında çalışmasında bahsettiği gibi kalıp ön ısıtma işlemi kalıpta meydana gelebilecek hasarların önlenmesi için oldukça önemlidir [13]. Sıcak dövme işleminde iş parçası sıcaklığı 1000°C ila 1200 °C dolaylarındadır, bu nedenle soğuk kalıp oldukça yüksek sıcaklıktaki bir iş parçası ile karşılaştığında hem iş parçasının sıcaklığı düşerek dövülebilirliği azalır hem de kalıp ile iş parçası arasındaki yüksek sıcaklık farkı sebebiyle kalıpta hızlı aşınma ve hasar görülebilir. Bunu önlemek amacıyla sıcak dövme prosesi öncesinde kalıba ön ısıtma işlemi uygulanır. Ön ısıtma işlemi kalıp gravürüne sıcak iş parçası yerleştirilmesi, gaz torcu ile ısıtılması, kalıpların tamamen fırına yerleştirilmesi, elektrikli ısıtıcı kullanılması, infrared ışınlarla veya indüksiyon ile ısıtılması vb. birçok yöntemle gerçekleştirilebilir. Ön ısıtma işleminin homojen ve hızlı bir şekilde gerçekleştirilmesi oldukça önem taşır [14].

2.4.3.Kalıp Tasarımı ve Malzeme Seçimi

Dövme kalıbı tasarımı için gerekli olan en önemli bilgi, üretilecek parçanın geometrisi ve malzemesidir. Dövme kalıp gravürü, dövülecek parçanın işlenmiş halinin 3D modelinden elde edilir [4]. Aynı zamanda kalıp gravürünün tasarımı kullanılacak iş parçası malzemesinin mukavemetine, sünekliğine, deformasyon hızına, sürtünme özelliklerine ve şekline bağlıdır. Sıcak dövme işleminde kalıplar termo-mekanik yorulma ömürlerini derinden etkileyen mekanik ve termal yüklere maruz kalırlar. Bu sebeple seçilen kalıp malzemesi yüksek sıcaklıkta yüksek mukavemet ve tokluk sağlamalı, düzgün sertleşme yeteneğine sahip olmalı, mekanik ve termal şoklara karşı direnç göstermeli ve iş parçası üzerinde bulunan tufaller nedeniyle aşınmaya karşı dirençli olmalıdır [15].

2.4.4.İş Parçası Malzemenin Dövülme Kabiliyeti

Dövülebilirlik kabiliyeti malzemenin hatasız (süreksizlik, çatlak vb.) deforme olma yeteneğidir. Malzemenin dövülebilirlik kabiliyeti deformasyon sırasında var olan koşullara (sıcaklık, deformasyon hızı, gerilmeler ve gerinim geçmişi gibi) ve iş parçası malzeme özelliklerine (kimyasal kompozisyon, boşluklar, kalıntılar ve mikroyapı gibi) bağlıdır [4].

2.4.5.Akış Gerilimi

Akış gerilimi çok önemlidir çünkü metal şekillendirme işlemlerinde yükler ve gerilmeler parça geometrisine, sürtünmeye ve deforme olan malzemenin akış gerilimi bağlıdır. Bir metalin akış gerilimi kimyasal kompozisyon, metalürjik yapı, fazlar, tane boyutu, segregasyon, gerinim geçmişi vb. doğrudan deformasyon süreciyle ilgili olmayan faktörler ile deformasyon sıcaklığı, deformasyon veya gerilme derecesi, deformasyon veya gerinim oranı vb. doğrudan deformasyon süreciyle ilgili faktörlerden etkilenir. Böylece akış gerilimi, sıcaklığın, gerinmenin, gerinme hızının ve mikroyapının bir fonksiyonu olarak ifade edilebilir [4].

2.4.6.Sürtünme ve Yağlama

Sıcak dövme işlemlerinde sürtünme, takımların ömrünü, iş parçasının şekillendirilebilirliğini ve üretilen ürünlerin nihai kalitesini (yüzey kalitesi, içyapısı vb.) belirlemede önemli bir rol oynar. Genel olarak, sürtünme katsayısını azaltmak için yağlayıcılar eklenir. Bununla birlikte, ortam sıcaklıklarında kullanılan yüksek kaliteli yağlayıcıların çoğu, yüksek sıcaklıklara dayanamayan organik maddeler olduğundan, özellikle yüksek sıcaklıkta şekillendirme işlemleri sırasında sürtünme ihmal edilebilir bir düzeye indirilemez. Yüksek sıcaklıklarda kullanılmak üzere bir dizi yağlayıcı geliştirilmiştir. Yine de yağlamadan sonraki sürtünme hala önemli bir konudur, çünkü yüksek sıcaklıklardaki sürtünme katsayısı, ortam sıcaklıklarındakiyle karşılaştırılabilir bir düzeye düşürülemez [16].

2.5.Sıcak Dövme İşlemi Hataları

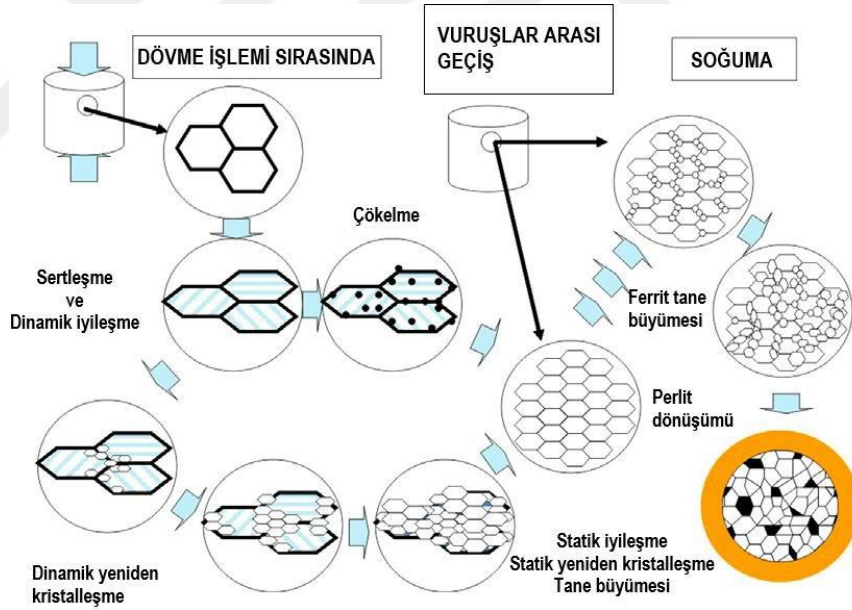
Sıcak dövme işleminde görülen hatalar çeşitli sebeplerle oluşabilmektedir. Bu hatalar hem proses öncesinde hem de proses esnasında oluşabilmektedir. Meydana gelen hatalar sebebiyle proses sonucu oluşan ürün hurda olarak ayrılabilir. Proses sonucu oluşan hurda oranı üretim verimliliğini düşürerek maliyete olumsuz yönde etki etmektedir. Sıcak dövme işlemi sırasında meydana gelen hata yüzdeleri Tablo 2.1’de gösterilmiştir [17].

Tablo 2.1.Sıcak dövme işleminde meydana gelen hata türleri ve oluşum yüzdeleri [17]

Sıcak Dövme İşlemi Hataları	(%)
Ön Şekillendirme Kalıplarının Yanlış Tasarımı	17,2
Deneme Dövme İşlemleri	10,1
Ön Şekillendirme Tasarımından Kaynaklanan Laminasyonlar	9,4
Kalıp Çiftlerinin Yanlış Hizalanması	9,0
Şablonun Kalıp Üzerinde Yanlış Konumlandırılması	6,9
Kısa Kesilmiş Şablon	6,8
Şablon Malzeme Kusuru	5,6
Uygun Olmayan Malzeme Özellikleri (Sertlik, Isıl İşlem)	5,4
Kalıp Yorulması	4,3
Malzeme Akış Problemleri	3,5
Eğik Dövme	2,9
Ön Şekillendirme Sırasında Çatlak İlerlemesi	1,4
Diğer	17,5

2.6.Mikroyapı Kontrolü

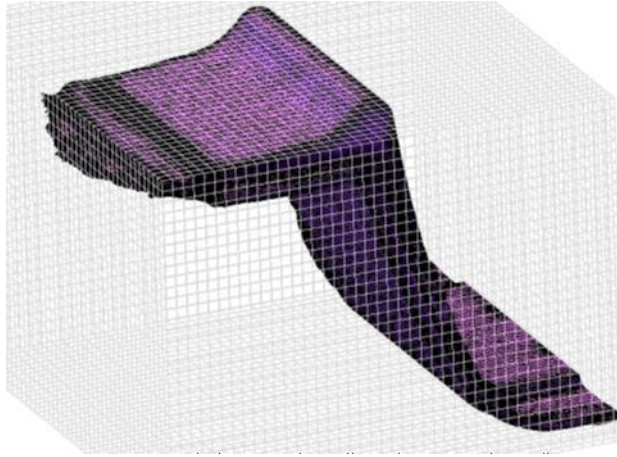
Tüm mühendislik metalleri, yüksek sıcaklıklarda işleme sırasında ve/veya sonrasında gelişen belirli bir mikroyapı tipi içerir. Sıcak şekillendirilmiş parçaların mekanik özellikleri büyük ölçüde mikroyapıya ve bunun parçalar üzerindeki değişimine bağlıdır. Kaliteli bileşenler oluşturma başarısı, mikroyapıyı kontrol etme yeteneğine bağlıdır. İstenilen mikroyapıların elde edilmesi ve bunların gelişimini kontrol etmek için, sıcaklık, soğutma hızı, plastik deformasyon ve deformasyon hızı vb. parametrelerin bilinmesi gereklidir [18]. Özellikle kontrollü bir soğuma hızı ile düşük karbonlu ve düşük alaşımlı çeliklerde ferritik-perlitik bir mikroyapı elde edilebilir. Dövme sonrası oluşan mikroyapıların istenilen tokluk ve mukavemet birleşimini sağlaması için dövme parçaların ince taneli bir mikroyapıya sahip olması gerekmektedir [12]. Sıcak dövme işlemi sırasında ve sonrasında malzeme mikroyapısında oluşan ferrit ve perlit fazları Şekil 2.6’da görülebilmektedir.



Şekil 2.6.Sıcak Dövme İşlemi Sırasında ve Sonrasında Oluşan Mikroyapılar [19]

2.7.Bilgisayar Destekli Mühendislik (CAE) Yazılımlar

Bilgisayar destekli mühendislik yazılımlarında kullanılan sayısal yöntemler, Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) ve Sonlu Hacimler Yöntemini (FVM) içerir. FEM doğru bir simülasyon yöntemi olabilse de özellikle büyük deformasyonlarla sonuçlanan dövme işlemleri için Şekil 2.7’de gösterilen FVM kullanılır. FVM günümüzde, dövme dahil olmak üzere çeşitli dökme metal şekillendirme işlemlerini analiz etmek için yaygın olarak kullanılan güçlü bir yöntem olarak kabul edilmektedir. FVM üzerinde yapılan kapsamlı araştırmalar sonucunda, farklı metal şekillendirme proseslerini simüle etme kabiliyetine sahip farklı ticari yazılımlar elde edilmiştir. Bu araçları kullanarak, dövme işlemini tam olarak simüle etmek ve malzemenin kalıpta nasıl şekillendiği hakkında değerli bilgiler elde etmek için sanal bir kalıp modeli oluşturulabilir ve farklı malzeme özellikleri tanımlanabilir. Böylece gerçek kalıp yapılmadan önce parçaların istenilen şekillere sahip olması garanti edilebilir. Ayrıca yapılan sayısal analiz sonuçları kullanılarak şekillendirme kuvvetleri, parça ve kalıp üzerindeki gerilmeler ve ayrıca plastik deformasyon gibi birçok önemli tasarım parametresi belirlenir. Bu yöntemin süreci simüle etmedeki işlevleri ve yetenekleri nedeniyle üreticiler bu yöntemi sanal üretim olarak bilirler [10].



Şekil 2.7.Sonlu Hacimler Yöntemi ile Oluşturulmuş Model [20]

2.8.Literatür Taramasının Değerlendirilmesi

Dövme yöntemi metallerin, yüksek kuvvetler altında minimum malzeme zayıflığı ile yüksek mukavemet ve üstün mikroyapı vb. özelliklere sahip parçaların üretilmesini sağlayan bir üretim yöntemidir. Bu sebeple, endüstride birincil metal şekillendirme işlemi olarak görülebilir. Sıcak dövme prosesi günümüz imkanları dahilinde geliştirilen yazılımlar sayesinde FEM ve FVM yöntemleri kullanılarak gerçek proses öncesi simüle edilebilmekte böylece gerçek prosese dair öngörüler elde edilebilmektedir. Literatüre bakıldığında sıcak dövme prosesinin farklı alanlarda incelendiği bazı çalışmalar şu şekildedir;

Ghaei ve ark., çalışmalarında 3D radyal dövme işlemi ve kalıp şeklinin kesit alanındaki deformasyona etkisini incelemişlerdir. Ek olarak, 3D modelin sonuçları, 2D eksenel simetrik bir modelden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, radyal dövme işleminde borunun eksenel simetrik olarak deforme olmadığını ve bu nedenle böyle bir analiz için 3D bir modelin gerekli olduğunu göstermiştir [21].

Zhang ve ark., yaptıkları çalışmada gerçek üretim sırasında yol gösterici olabilmesi açısından DEFORM-3D yazılımını kullanarak 42CrMo çeliğinden üretilen iş parçasının dövme işlemini simüle etmiştir. Bu çalışmanın ana amacı, 42CrMo çeliğinin dövme sürecindeki plastik deformasyon özelliklerini incelemek ve bunu yaparken DEFORM-3D'nin uygulanabilirliğini bulmaktır. Simülasyon programı ile iş parçasının farklı bölgelerindeki gerinimler, gerilmeler, sıcaklık değişimleri tespit edilmiş ve ayrıca proseste oluşabilecek dövme kusurları analiz edilmiştir. Elde edilen sıcaklık ve gerilme sonuçları, dövme pratiği ve teorilerine uygun bulunmuştur [22].

Wilson ve ark., ise DEFORM- 2D yazılımını kullanarak dövme işleminde en yaygın durum olan iş parçası ile takım arasında bir sıcaklık farkının olduğu dövme işlemleri için bir termal arayüz modeli sunmuşlardır. Model, doğrudan pürüz temaslarından kaynaklanan ısı akışının yanı sıra yağlayıcı filmden geçen ısı akışını da dikkate alır ve yağlayıcı, malzeme ve proses parametrelerine dayalı olarak etkili bir ısı transfer katsayısı hesaplar [23].

Dövmede FEM uygulanmasına ilişkin bir başka örnek ise, Bang ve ark., yapmış olduğu çalışmadır. Bu çalışmada, sıcak dövme prosesi sırasında dinamik yeniden kristalleşmeye bağlı akış gerilimi değişimi araştırılmıştır. AISI 1015 çeliğinin mekanik testlerine geliştirilmiş bir tasarım uygulanmıştır. Yapısal ilişkiler ve yeniden kristalleşme davranışı daha sonra önceki çalışmalarda önerilen modeller uygulanarak formüle edilmiştir. Elde edilen akış davranışı, ticari FEM kodu kullanılarak eksenel simetrik bir dövme işlemine uygulanmıştır. Simülasyon sonuçları, gerçek strok-yük eğrileri ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır [24].

Hsu ve ark., yaptıkları çalışmada çok damarlı kabloları kesmek için kullanılan kablo kesicinin standart dışı dişli bıçağının sıcak dövme yöntemi ile üretimini incelemek için QForm 3D yazılımını kullanmışlardır. Amaç geleneksel döküm yöntemi yerine bıçağın sıcak dövme yöntemi ile üretilmesini sağlamak ve proses parametrelerini belirlemektir. Ayrıca bıçak üzerinden metalografik incelemeler yapılmış ve simülasyondan elde edilen gerilme, gerinim ve sıcaklıklarla ilişkilendirilmiştir [25].

Soğuk dövme alanında da benzer çalışmalar yapılmaktadır. Militunovic ve ark., yaptığı bir çalışmada amaç, soğuk orbital dövme ile üretilen bir iş parçasının bazı mekanik özelliklerinin ve mikro yapısının test edilmesidir. Deneysel araştırmanın yanı sıra, malzeme akışını araştırmak ve farklı işlem aşamalarında iş parçasındaki gerilme-uzama durumunu belirlemek için U-çapraz bağlantının soğuk orbital dövmesi FEM analizi ile sayısal olarak incelenmiştir [26].

3.MATERYAL VE YÖNTEM

3.1.Kapalı Kalıpta Çapaklı Dövme Prosesinin Uygulanması

Literatürde ıslah çelikleri kategorisinde yer alan sertleşebilirlik özellikleri olan, ısıtılma işlemi sonucunda yüksek dayanım ve süneklik özelliği gösterebilen genellikle sıcak dövme olarak miller, dişliler, cıvatalar, somunlar, krank milleri, piston kolları gibi parçaların üretiminde kullanılan DIN 31CrV3 malzemeden üretilen 16x17 mm İki Ağız Anahtar Kısa Boy ürünü el aleti için ve sıcak iş takım çelikleri kategorisinde yer alan yüksek tokluk, ısıtılma gerilme direnci ve yüzey işlemlerine uygunluk gösteren genellikle sıcak dövme ve şekil verme kalıplarında kullanılan 1.2714 sıcak iş takım çeliği dövme kalıbı malzemesinde kullanılmış ve üretilen dövme kalıpları 3D modelleri İZELTAŞ İzmir El Aletleri Sanayi ve Ticaret A.Ş. firmasında CIMATRON yazılımı ile hazırlanmıştır. Malzemelerin kimyasal kompozisyonları Tablo 3.1’de gösterilmiş olup, firma bünyesinde bulunan HITACHI PMI-MASTER PRO marka spektrometre ile tayin edilmiştir. Hammaddelerin mekanik özellikleri firmanın hammadde tedarikçisi tarafından gönderilen malzeme analiz raporlarından sağlanmış ve Tablo 3.2’de verilmiştir. Sıcak dövme işlemi sonrası üretilen ürünün ısıtılma işlemleri haldeki sertlik değeri ortalama 247,67 HB olarak ölçülmüştür. Sıcak dövme işlemleri firma bünyesinde, simülasyon çalışmaları ise Simufact Forming yazılımı kullanılarak Manisa Celal Bayar Üniversitesi bünyesinde gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3.1.DIN 31CrV3 ve 1.2714 kimyasal kompozisyonu

Çelik Türü	C %	Si %	Mn %	Cr %	Mo %	Ni %	V %	P _{max} %	S _{max} %
DIN 31CrV3	0.33-0.36	0.25-0.40	0.40-0.60	0.40-0.70	0.027	0.145	0.07-0.12	0,011	0,029
1.2714	0.50-0.60	0.10-0.40	0.60-0.90	0.80-1.2	0.35-0.55	1.50-1.80	0.05-0.15	0,030	0,030

Tablo 3.2.Hammadde mekanik özellikleri

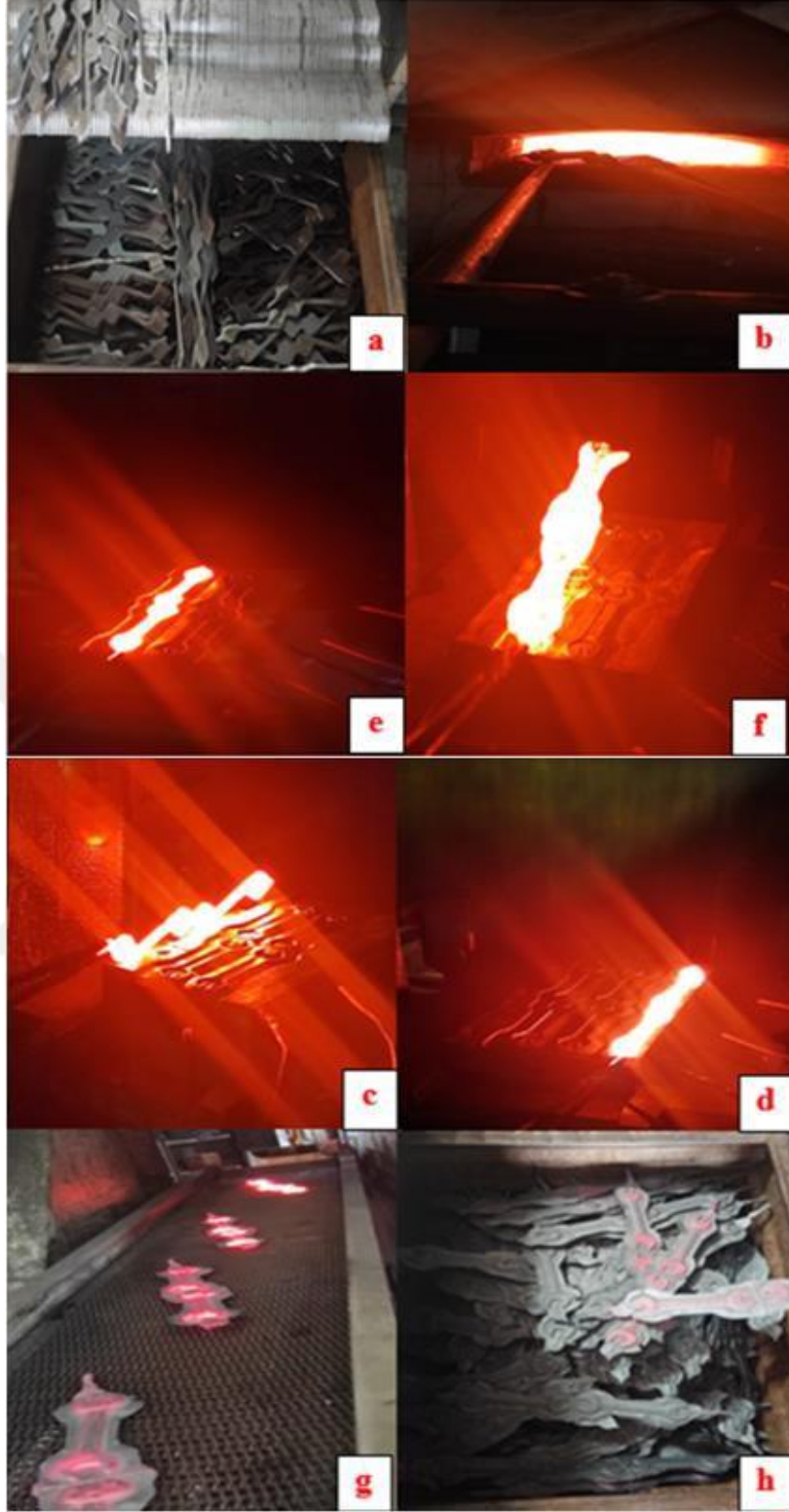
Çelik Türü	Sertlik (HB)	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)
31CrV3	232	559	742
1.2714	376	1045	1270

Tablo 3.3'te verilen mekanik özellikler ise el aletinin ve kalıp çeliğinin ısıtılma işlemi gördükten sonra firmanın kendi yaptırdığı mekanik testlerden elde ettiği sonuçlardır. Isıl işlem olarak 31CrV3 çeliğine 860 °C sertleştirme ve yağda soğutma işlemi sonrası 600 °C'de 120 dk meneviş işlemi uygulanırken, 1.2714 çeliği 400 °C'de ilk ön ısıtma 650 °C'de ikinci ön ısıtma işleminin ardından 850 °C'de sertleştirilip hava sonrası yağda soğutma işlemi uygulanmış 470 °C'de 8 saat temperlenmiştir..

Tablo 3.3.Isıl işlem görmüş el aletinin ve kalıp çeliğinin mekanik özellikleri

Çelik Türü	Sertlik (HB)	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)
31CrV3	290	585	766
1.2714	456	1346	1422

Simülasyonda kullanılacak dövme işlem parametreleri gerçek prosesin uygulanması sonrası belirlenmiştir. Gerçek sıcak dövme prosesine ait işlem basamakları Şekil 3.1'de gösterilmiş olup; iş parçası olarak özel forma sahip 100x8 mm boyutlarında 31CrV3 çeliği dekarbürizasyonu önlemek amacıyla İzeltaş'ta proses geliştirme projesi olarak üretilen açık atmosferli otomatik fırında östenit fazına geçebilmesi için 1200 °C'ye kadar 300 saniye boyunca ısıtılmıştır. Isıtılan iş parçası fırından prese taşınma süresi (5 saniye) kadar soğutulmuştur ve soğutulan iş parçası sıcaklığı 1150°C ölçülmüştür. Kalıp başlangıç sıcaklıkları 110 °C'dir. Dövme işlemi 1200 kg'lık serbest düşme çekiçte sırasıyla; ön şekillendirme, düz vuruş, son vuruş (bitirme gözünde 3 vuruş) olarak gerçekleştirilmiştir.



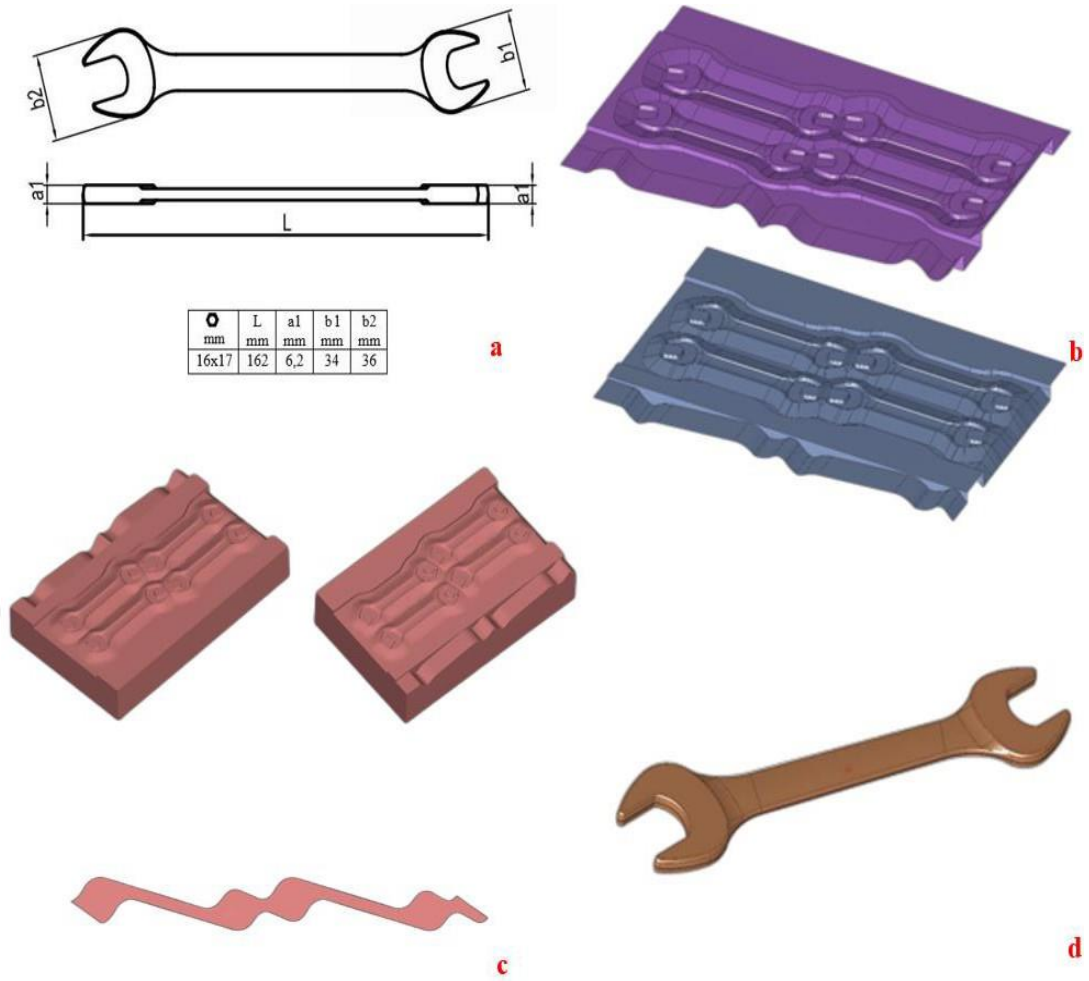
Şekil 3.1.16x17 mm İki Ağız Anahtar Kısa Boy Ürünü Üretim Aşamaları **a)** Şablon Kesme **b)** Şablon Isıtma **c)** Ön Şekillendirme **d)** Düz Vuruş **e)** Bitirme Vuruşu **f)** Ürünün Gözden Çıkarılması **g)** Ürünün Bantla Kasaya Taşınması **h)** Ürünlerin Kasada Soğuması

Tablo 3.4’te vuruş yüzdeleri gösterilmiştir. İş parçası ve dövme kalıplarının 3D modelleri Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Dövme makinesi olarak kullanılan serbest düşme çekicinin şekillendirme kuvveti Eşitlik (2.2) kullanılarak 14,413 kJ değerinde hesaplanmıştır. Sıcak dövme işlemi sonrası nihai ürün sıcaklığı 1180-1190 °C aralığında ölçülmüştür.

Tablo 3.4.Dövme aşamalarına ait vuruş yüzdeleri

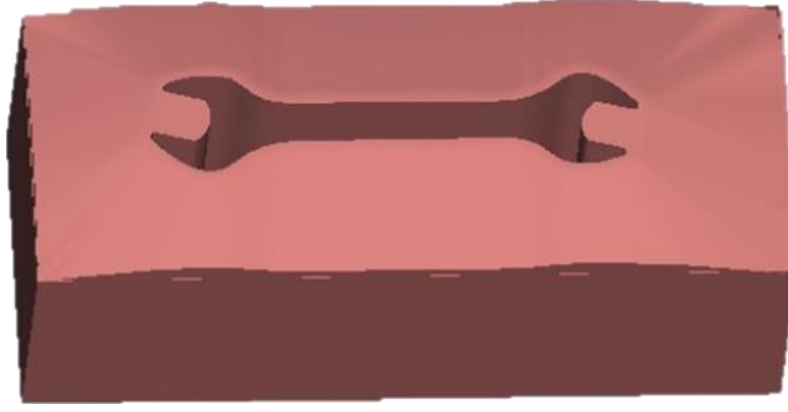
Dövme Aşaması	Vuruş (%)
Ön Şekillendirme (ÖŞ)	30
Düz Vuruş (DV)	30
Birinci Vuruş (BV)	45
İkinci Vuruş (İV)	70
Üçüncü Vuruş (ÜV)	100

Şekil 3.2’de 16x17 mm İki Ağız Anahtar Kısa Boy ürününün 2D; teknik resmi, sıcak dövme kalıp yüzeyleri, 3D; sıcak dövme kalıpları-iş parçası ve nihai ürünün modeli gösterilmiştir. Sıcak dövme kalıp tasarımları firmaya özel bilgiler olması sebebiyle ölçüsel veriler paylaşılamamaktadır.

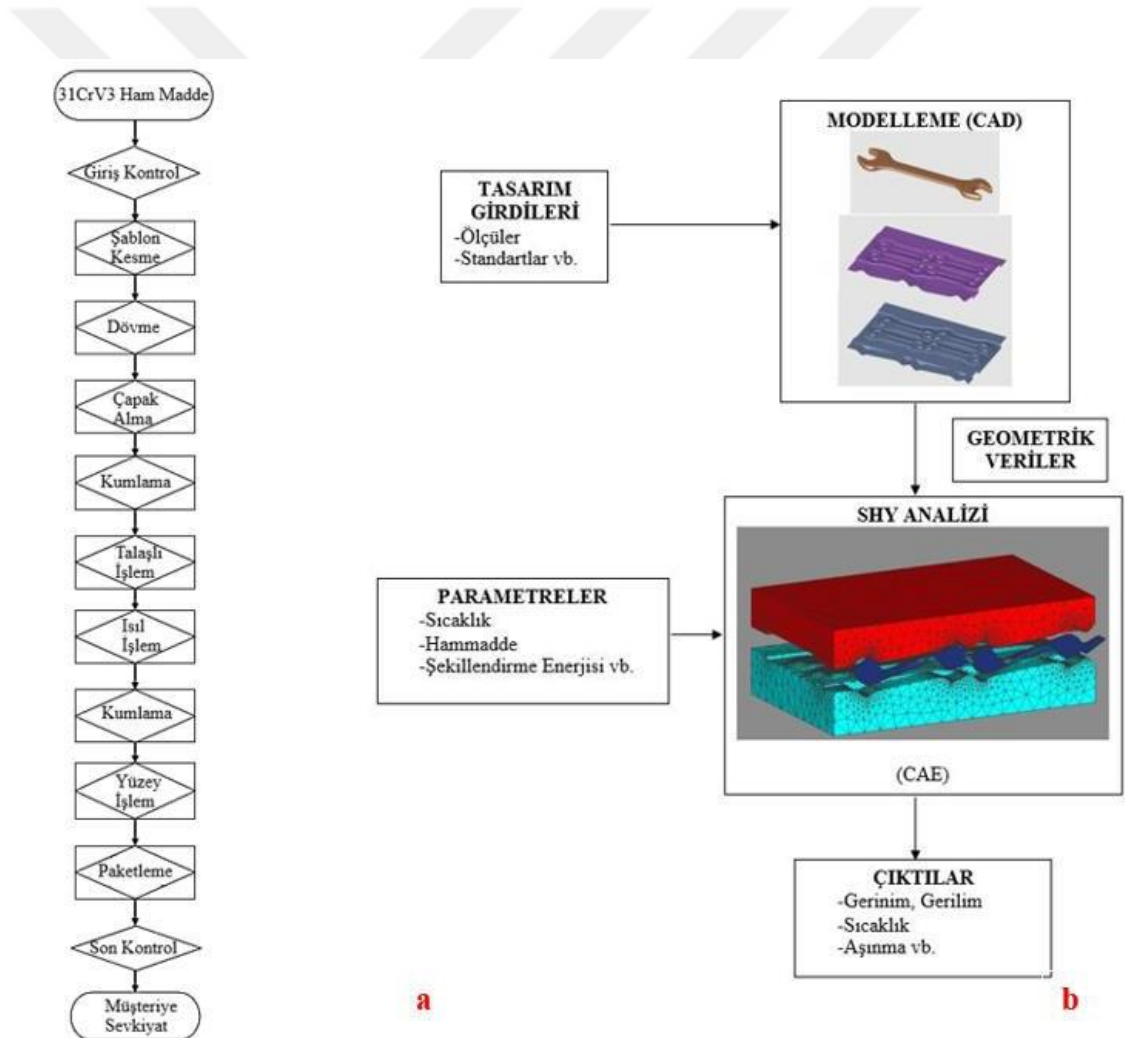


Şekil 3.2.a)Nihai Ürünün 2D Teknik Resmi **b)**2D Sıcak Dövme Kalıp Yüzeyleri
c)3D Sıcak Dövme Kalıpları-İş Parçası **d)**3D Nihai Ürün

Sıcak dövme işlemi sonrası ürünlere çapak alma işlemi uygulanmaktadır. Çapak alma işlemi için kullanılan çapak alıcı kalıbının 3D modeli Şekil 3.3'te gösterilmiştir. Şekil 3.4'te ise gerçek sıcak dövme proses aşamaları ile simülasyon aşamaları gösterilmiştir.



Şekil 3.3.Çapak Alma Kalıbı



Şekil 3.4.a)Gerçek Sıcak Dövme Proses Aşamaları b)Sıcak Dövme Simülasyon Aşamaları

3.2.Kapalı Kalıpta Çapaklı Dövme Prosesinin Sonlu Hacimler Yöntemi ile Analiz Edilmesi

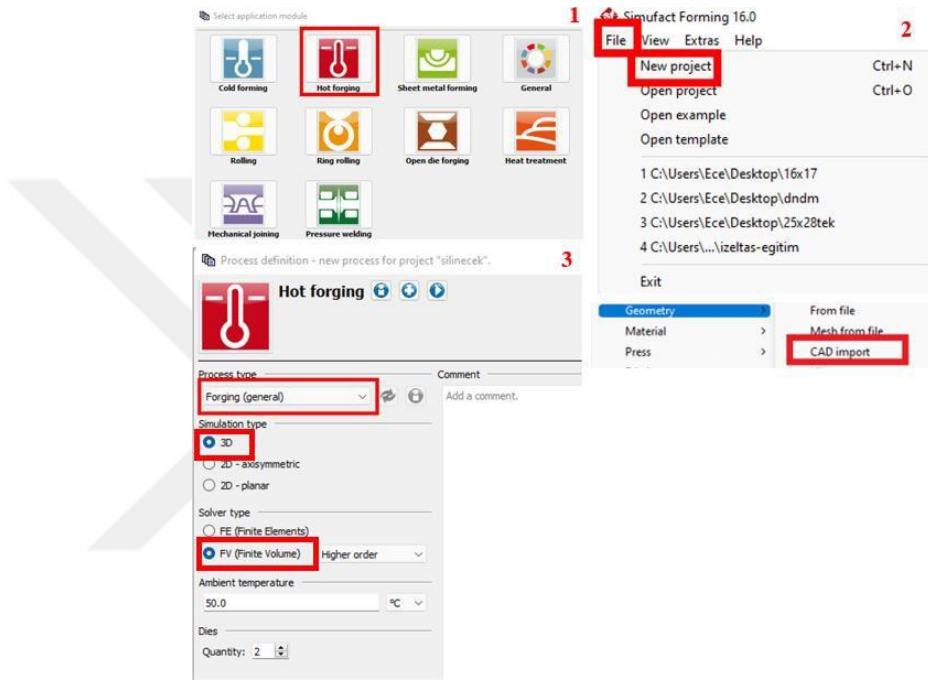
Sıcak dövme prosesinin analizi Simufact Forming yazılımının “Hot Forging” modülü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İzeltaş Firmasında tasarlanan kalıplar ve iş parçası yazılım içerisine aktarılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Dövme makinesi olarak firma bünyesinde kullanılan 1200 kg’lık maksimum 110 cm stroke sahibi düşme çekiç kullanılmıştır. Sıcak dövme analizinin gerçekte de uygulanan parametreler ile birebir uyuşacak şekilde simüle edilmesi sonrası üretilen ürünlerden alınan numuneler ile mikroyapı incelemeleri ve sertlik ölçümleri gerçekleştirilerek simülasyon sonucu elde edilen sıcaklık, hammadde, eşdeğer gerilme, etkin plastik gerinim verileri ile karşılaştırılmıştır. Simülasyon sonuçlarının doğruluğunun ispatı sonrası Tablo 3.5’te verilen parametreler değiştirilerek gerçekte incelenmesi oldukça zor ve maliyetli olan sıcak dövme kalıpları hakkında çıkarımlarda bulunulmuş ve kalıp ömürlerini uzatıcı yönde analizler gerçekleştirilmiştir

Tablo 3.5.Simülasyon programında kullanılan değişken parametreler

Değişken Parametreler	Gerçek Proses Uygun Olarak Tasarlanan Simülasyonda Uygulanan Değerler	İyileştirme Çalışmaları İçin Tasarlanan Simülasyonda Uygulanan Değerler
Vuruş Yüzdeleri	ÖŞ %30 DV %30 BV %45 İV %70 ÜV %100	ÖŞ %25 DV %25 BV %40 İV %65 ÜV %100
Kalıp Başlangıç Sıcaklığı	110 °C	250, 350, 450 °C
İş Parçası Başlangıç Sıcaklığı	1150 °C	900, 1000, 1200, 1300 °C
Kalıp Hammaddesi	1.2174	1.2343
Kalıp Sertliği	48 HRC	52 HRC

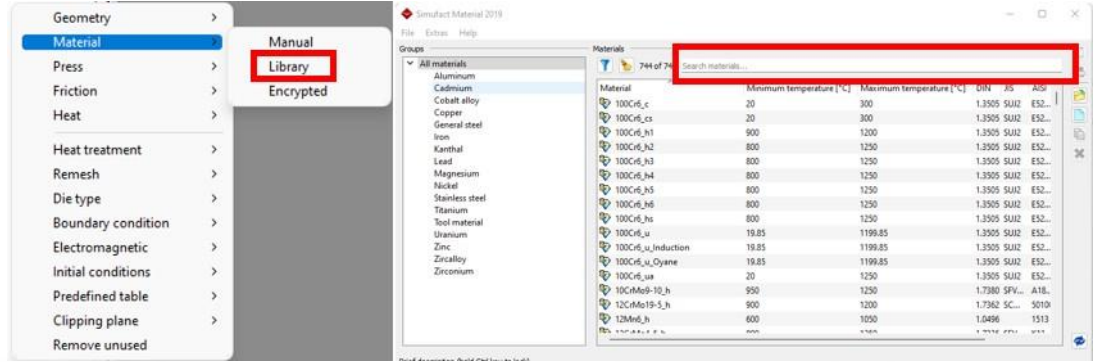
Sıcak dövme analizi proses kurgusu şu şekildedir;

- Simufact Forming yazılımı kullanılarak Şekil 3.4'te gösterilen simülasyon proses adımları takip edilerek yazılım içerisine sıcak dövme analizinde kullanılacak olan Şekil 3.1'de gösterilen CAD dataları Şekil 3.5'te gösterilen şekilde aktarılır.



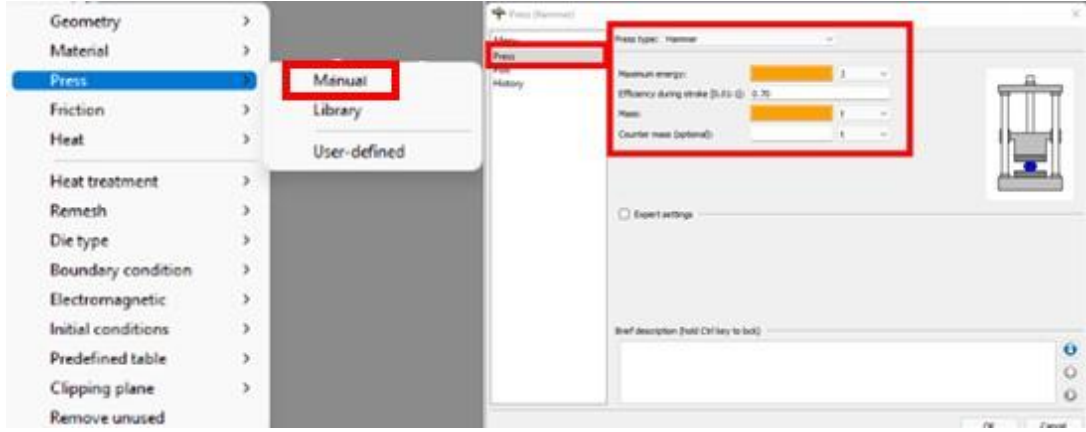
Şekil 3.5. Simufact Forming Yazılımına CAD Veri Aktarımı

- Şekil 3.6’da gösterilen malzeme seçimi bölümünden kalıp ve iş parçası için malzeme ataması yapılır.



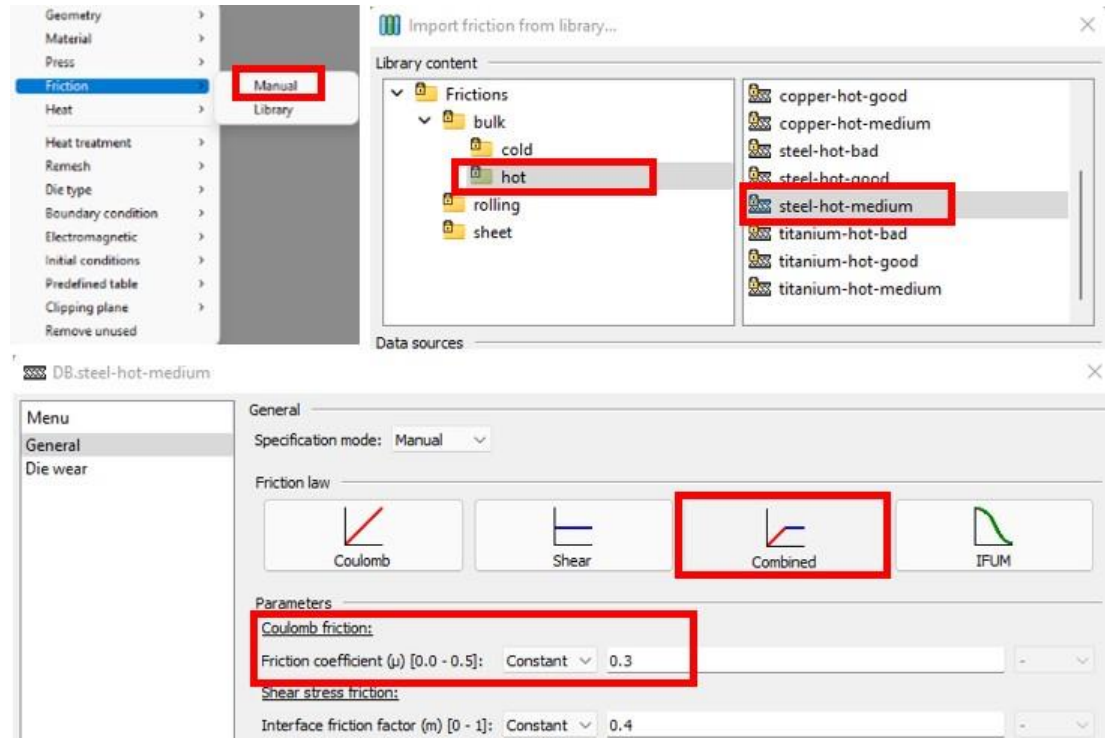
Şekil 3.6.Simufact Forming Yazılımında Malzeme Seçimi

- Şekil 3.7’de gösterilen pres bölümünden kullanılacak pres türü hammer (düşme çekiç) olarak seçilir, maksimum pres enerjisi hesaplanan 14,413 kJ ve kalıp ile koç ağırlığı olan (caunter mass) 1140 kg olarak tüm değerler atanır.



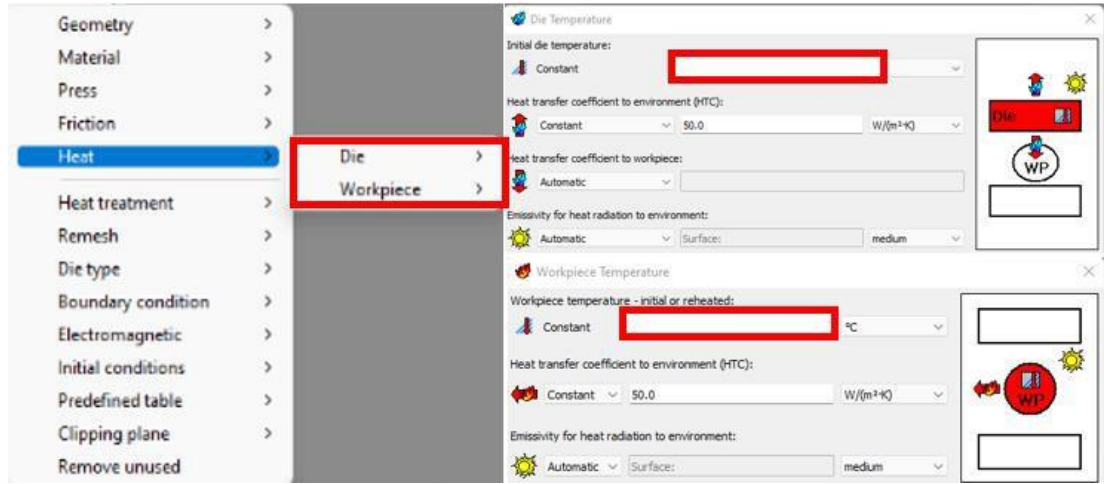
Şekil 3.7.Simufact Forming Yazılımında Pres Seçimi

- Şekil 3.8’de gösterilen bölümden sürtünme katsayısı (μ) 0,3 olarak girilir. Daha önce firma içerisinde yapılan çalışmalarda sürtünme katsayısı yaklaşık olarak (μ) 0,3 olarak hesaplanmıştır. Aynı zamanda literatür taramalarında yapılan çalışmalarda Srebriakov ve ark., Abachi ve ark. yaptıkları çalışmada aynı değeri kullanmışlardır [27,28].



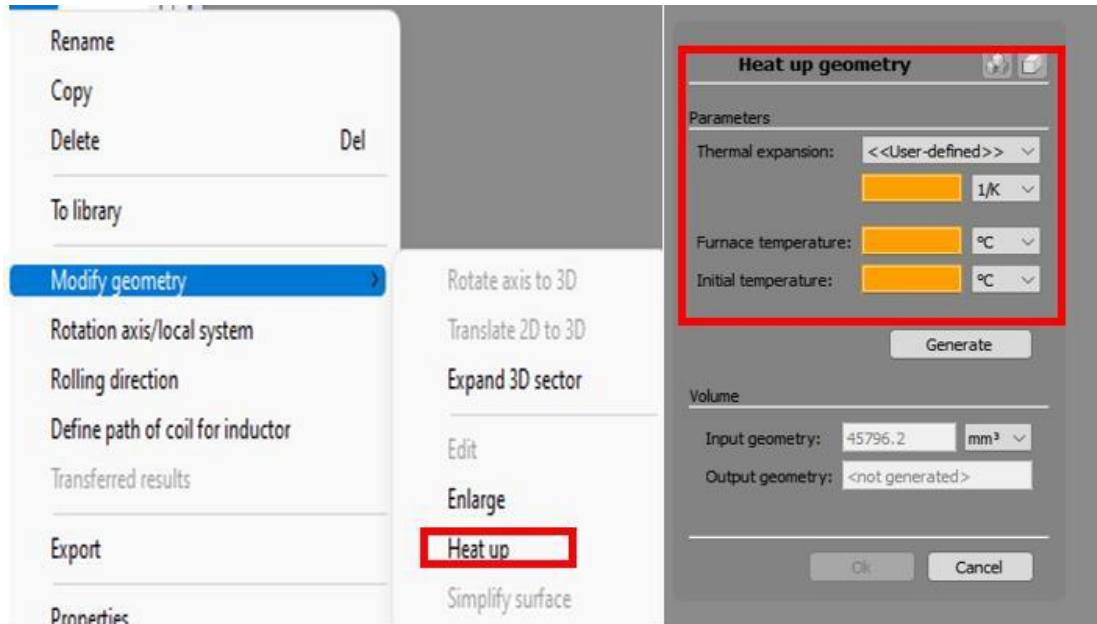
Şekil 3.8.Simufact Forming Yazılımında Sürtünme Katsayısı Seçimi

- Şekil 3.9’da gösterilen bölümden kalıp ve iş parçası sıcaklıkları tanımlanır.



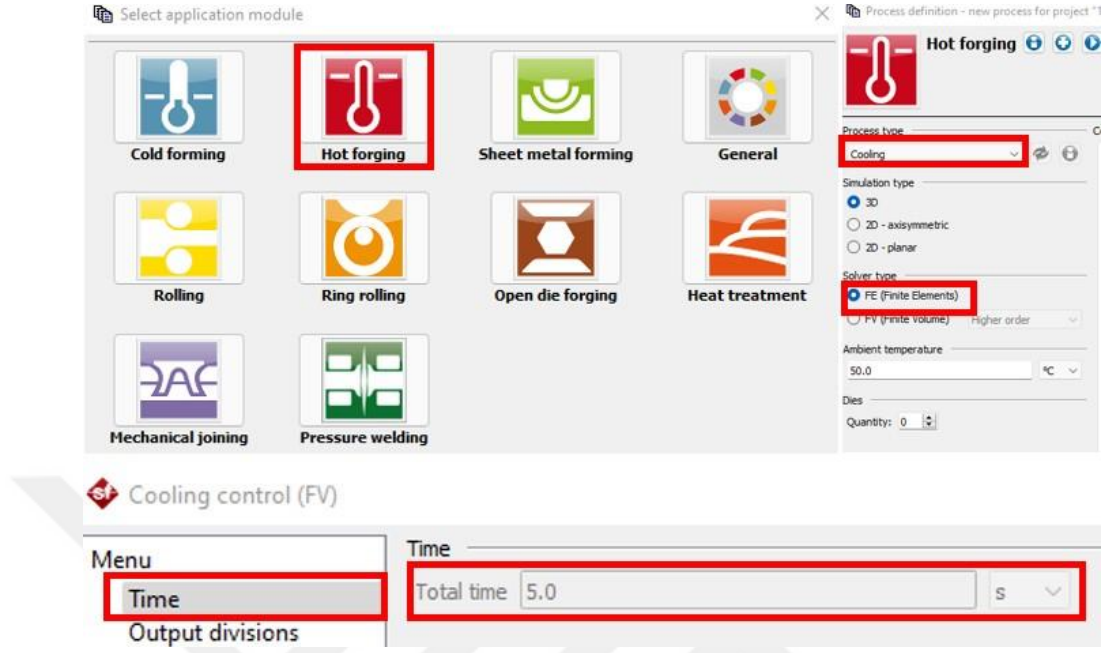
Şekil 3.9.Simufact Forming Yazılımında Kalıp ve İş Parçası Sıcaklık Seçimi

- Şekil 3.10’da gösterilen bölümden termal genleşme çelik ve katsayısı $3,84 \times 10^{-5}$ 1/K, fırın ısısı ve ortam sıcaklığı girilerek iş parçası başlangıç sıcaklığına ısıtılır.



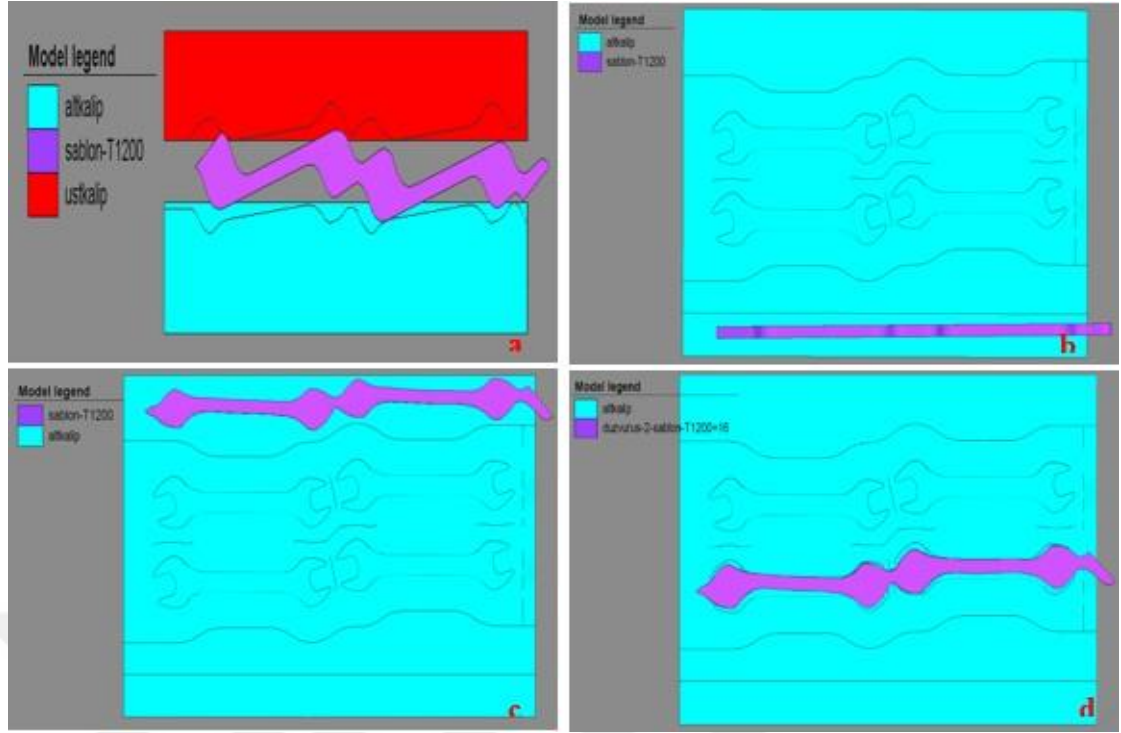
Şekil 3.10.Simufact Forming Yazılımında İş Parçasının Isıtılması

- Şekil 3.11’de gösterilen bölümden soğutma işlemi yapılarak iş parçası prese taşınma süresi olan 5 saniye boyunca soğutulur.



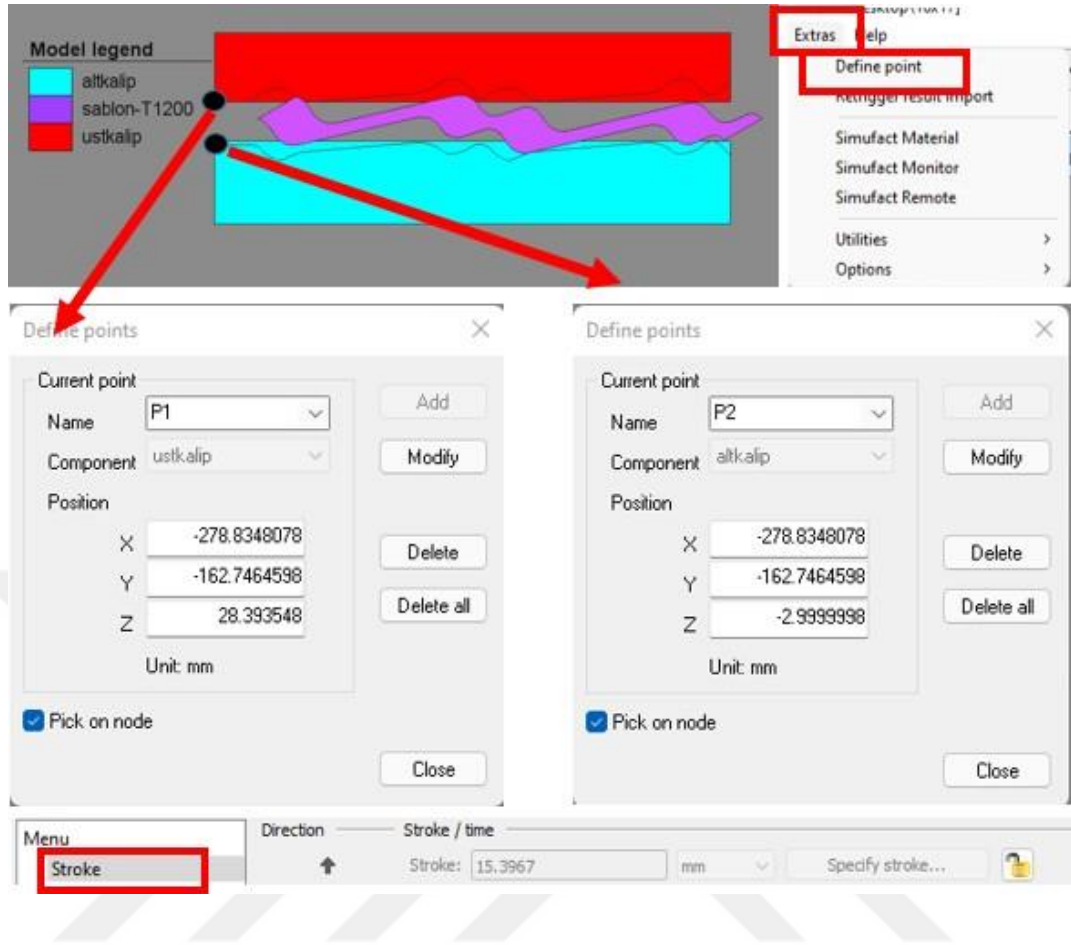
Şekil 3.11. Simufact Forming Yazılımında İş Parçasının Kalıba Taşınma Süresi Boyunca Soğutulması

- İş parçasının kalıp üzerine konumlandırılması sonrası ön şekillendirme, düz vuruş ve bitirme gözü vuruşları (1., 2., ve 3. vuruş) yapılır. Her bir vuruş için iş parçası konumlandırması Şekil 3.12’de verilen şekilde yapılır.



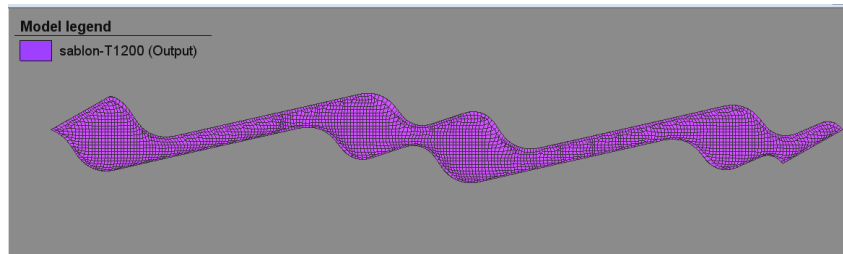
Şekil 3.12.İş Parçasının Kalıp Üzerinde Konumlandırılması **a)** Şekillendirme Gözü Karşı Görünüş **b)** Şekillendirme Gözü Üst Görünüş **c)** Düz Vuruş Üst Görünüş **d)** Bitirme Vuruşu Üst Görünüşü

- Şekil 3.13’te gösterilen bölümden üst kalıp iş parçası ile temas edecek şekilde konumlandırılarak kalıpların köşelerine noktalar atanır. Bu noktalar arasında kalan mesafe stroke değeri olarak girilir. Bu işlem ön şekillendirme, düz vuruş ve bitirme vuruşu adımlarının her birinde iş parçasının konumlandırılması sonrasında tekrarlanır.



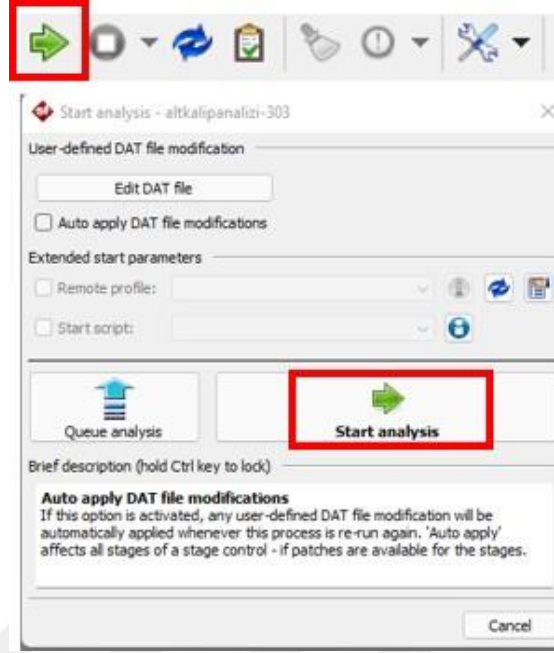
Şekil 3.13.Stroke Değeri için Kalıplara Nokta Ataması Yapılması

- Şekil 3.14'te gösterilen bölümden iş parçasına mesh örgüsü örülür. Minimum element boyutu 1 mm ve element sayısı 38924'tür.



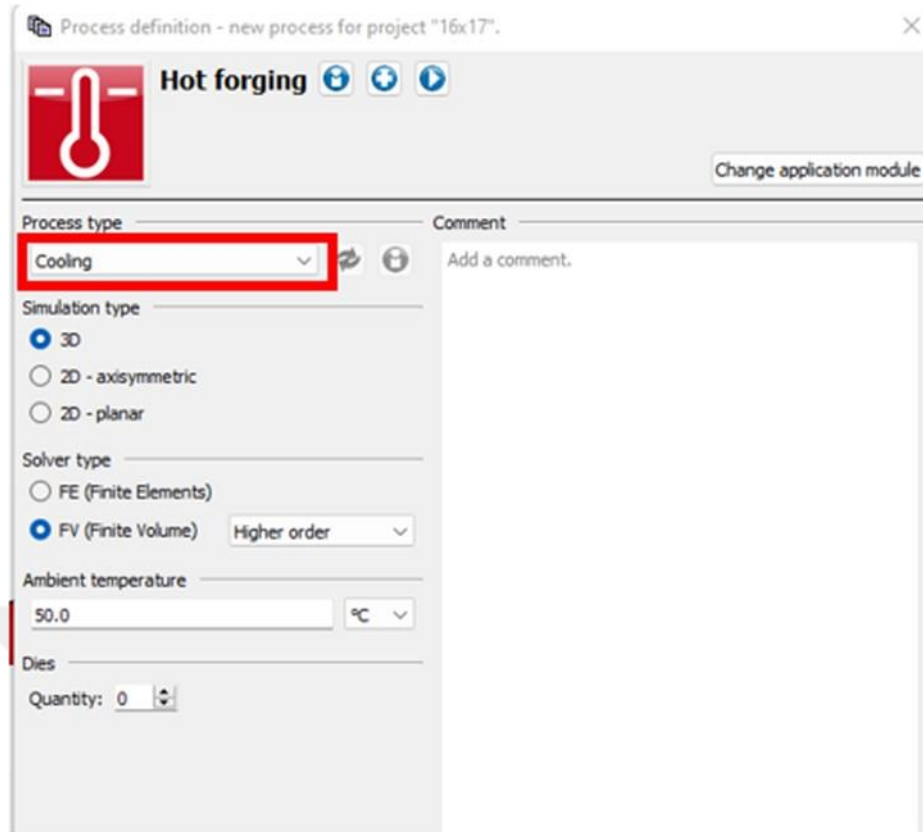
Şekil 3.14.İş Parçasına Mesh Örgüsünün Örülmesi

- Şekil 3.15'te gösterilen bölümden dövme analizi başlatılır.



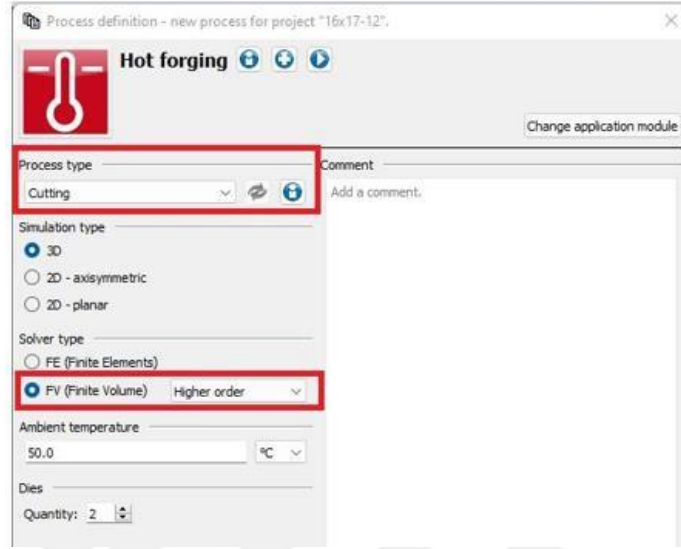
Şekil 3.15.Dövme Analizinin Başlatılması

- Sıcak dövme prosesinin tamamlanması sonrası oluşan geometri Şekil 3.16'da gösterilen hot forging bölümü içerisinde proses tipi cooling seçilerek soğutma süresi 3600 saniye tanımlanarak gerçekleştirilir. Parça oda sıcaklığı seviyelerine soğutulur.



Şekil 3.16. Simufact Forming Yazılımında Sıcak Dövme İşlemi Sonrasında Soğutma İşlemi

- Soğutma işlemi sonrası Şekil 3.3'te gösterilen çapak alıcı kalıp kullanılarak çapak alma işlemi gerçekleştirilir. Şekil 3.17'de gösterilen cutting bölümünden çapak alma işlemi yapılır.

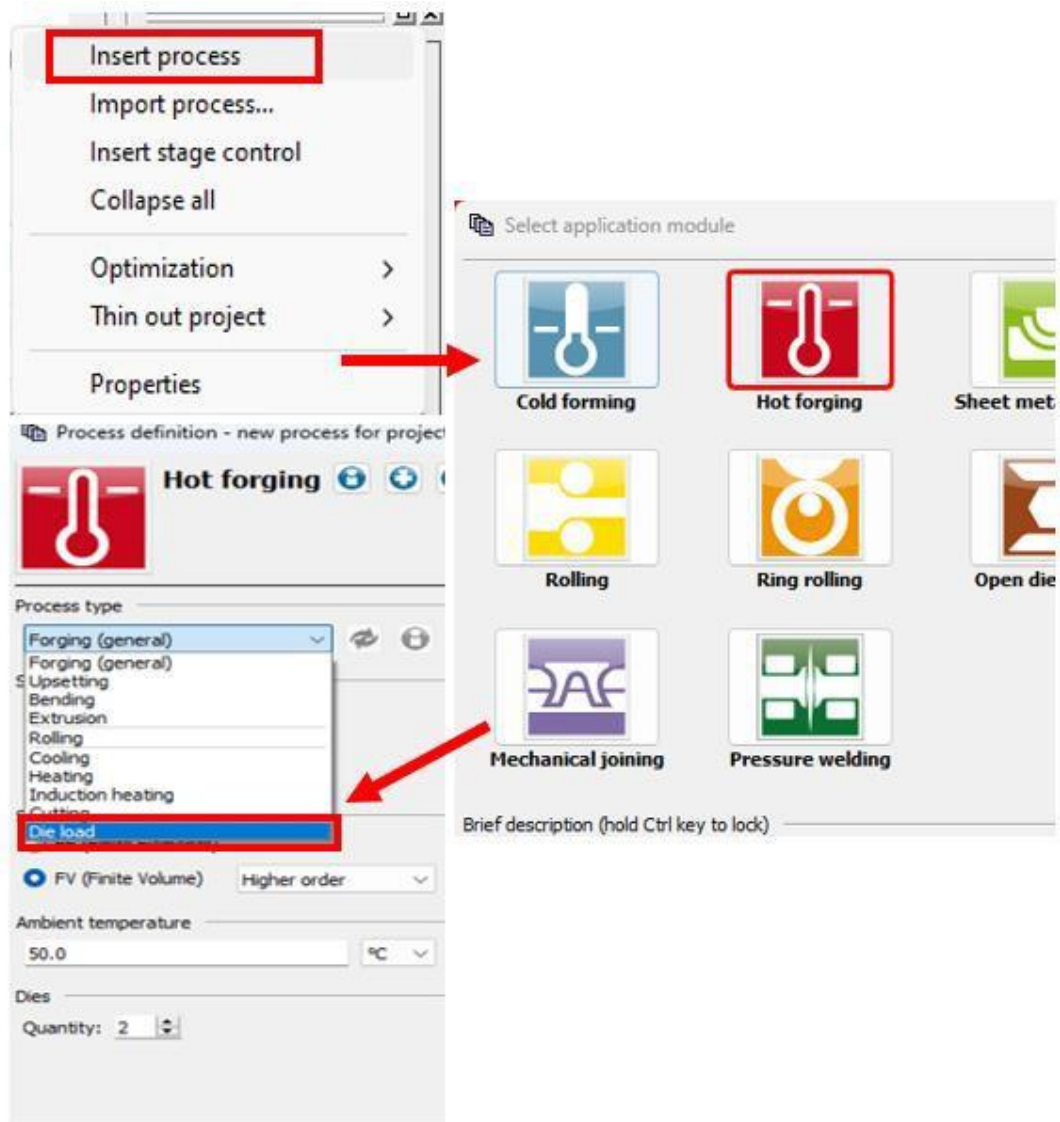


Şekil 3.17.Simufact Forming Yazılımında Çapak Alma İşlemi

- Analizin sonuçlanması sonrası sonuçlar değerlendirilir.

3.3.Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Kalıp Analizi

Sıcak dövme işlemi sonrası kalıp üzerinde meydana gelen aşınma, yükler, gerilmeler ve sıcaklık değişimlerinin detaylı olarak incelenebilmesi için Simufact Forming içerisinde yer alan kalıp analizi bölümü kullanılır. Şekil 3.18’de gösterilen adımlar izlenerek alt ve üst kalıp ayrı ayrı analiz edilir.



Şekil 3.18.Kalp Analizi Yapılması

3.3.1.Aşınma Analizi

Sıcak dövme işleminde meydana gelen arızaların yaklaşık %70'ini aşınma (abrasiv aşınma, adhesif aşınma, oksidasyon aşınması) mekanizması oluşturur [29-31]. FEM yöntemini benimseyen birçok program gibi Simufact Forming programı aşınma derinliklerini belirleyebilmek için Archard modeli ile çalışır. Bu model, iki kayan gövde arasında meydana gelen abrasiv aşınma için geliştirilmiştir. Iwadoh ve ark., maksimum aşınma miktarını hesaplamak için bir denklem oluşturmuştur [32]. Luo ve Shelke aşınmayı hesaplamak için Archard modelini benimsemiştir [33,34]. Kang ve Behrens geleneksel Archard aşınma modelini optimize etmişler ve kalıp sertliğini sıcaklığın bir fonksiyonu olarak tanımlamışlardır [35,36]. Ek olarak, Lee ve Jou yukarıda açıklanan geleneksel Archard aşınma modelini daha da modifiye etmişlerdir [37]. Eşitlik (3.1)'de Archard Aşınma Modeli gösterilmiştir. Modelde aşınma derinliği (W, mm), basınç (P, MPa) ve kayma mesafesi (L, mm) ile doğru orantılıdır ve malzemenin sertliği (H, HV) ile ters orantılıdır. $Ve (K, Pa^{-1})$, Archard'ın aşınma katsayısıdır [38].

$$W = K \frac{LP}{H} \quad (3.1)$$

Sıcaklığın K ve H parametreleri üzerindeki etkisinden dolayı, yukarıdaki modelde bu iki parametrenin malzemelere ilişkin sabit kabul edilmesi mantıksız olup, gerçek üretimde bazı hatalara yol açacaktır. Bu nedenle Lee ve Jou, K ve H 'nin sıcaklığın fonksiyonları olarak kabul edildiği Eşitlik (3.2)'de gösterilen bir aşınma modeli önermiştir [37]. Sıcaklık Kelvin dönüşümü yapılarak hesaplanmıştır.

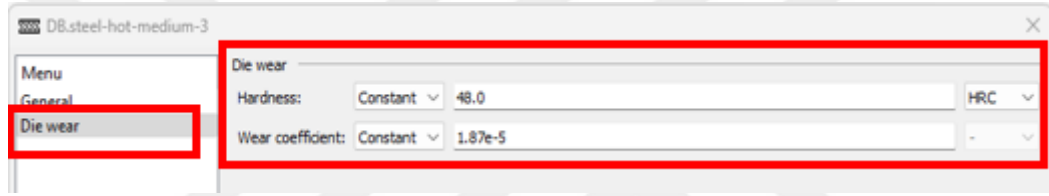
$$W(T) = K(T) \frac{LP}{H(T)} \quad (3.2)$$

Ve bu bağıntıdan sıcaklığa bağlı aşınma katsayısı ve sertlik Eşitlik (3.3) ve (3.4)' te verilen bağıntılar ile elde edilebilir.

$$K(T) = [29,29\ln T - 168,73] \times 10^{-6} \quad (3.3)$$

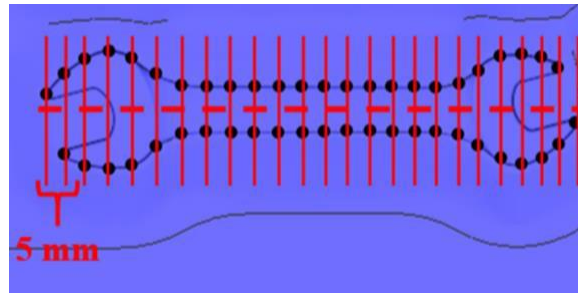
$$H(T) = 9216,4 \times T^{-0,505} \quad (3.4)$$

Şekil 3.19’da aşınma derinliğinin ölçülebilmesi için istenen kalıp sertliği ve aşınma katsayısı değerleri gösterilmiştir. Kalıp sertliği gerçekte kullanılabilecek sıcaklıktan bağımsız olarak 48 HRC, aşınma katsayısı ise Eşitlik (3.3)’ten yola çıkılarak proses sırasında ölçülen maksimum kalıp sıcaklığı olan 330°C baz alınarak $1,87 \times 10^{-5}$ olarak hesaplanmıştır. Ayrıca kayma mesafesi göz ardı edilerek Simufact Forming içerisinde kabul edilen değer olarak alınmıştır.



Şekil 3.19. Aşınma Analizi İçin Sertlik ve Aşınma Katsayısı Değerleri Tanımlama

Simülasyon sonucu elde edilen aşınma derinlik değerleri tek bir parça için elde edilmiş olup gerçek prosese uygun olması açısından dövülen şablon sayısı olan 10000 ile çarpılmıştır. Aşınma derinliği ölçümleri 5 mm aralıklar ile hem gerçek kalıp üzerinden hem de simülasyon üzerinden ölçüm alınarak gerçekleştirilmiştir. Ölçüm alınan bölgeler Şekil 3.20’de gösterilmiştir.



Şekil 3.20. Aşınma Derinliği için Ölçüm Mesafeleri

3.4.Kapalı Kalıpta Çapaklı Dövme Simülasyon Sonuçları Doğrulama Çalışmaları

Sıcak dövme işleminde kullanılan kalıplar yüksek maliyetlerle üretilmektedir. Hammadde tedarigi, ısıtım işlem süreci, kalıp tasarımının oluşturulması, hammaddenin işlenmesi ve kalıp parlatma işlemleri uzun süreler almakta ve maliyeti oldukça yükseltmektedir. Bu sebeple sıcak dövme prosesinde tek kalıp bağlama ile yüksek adetlerde kaliteli ürün elde etmek en büyük amaçtır. Dövme kalıplarında meydana gelecek herhangi bir arıza tüm süreci olumsuz yönde etkileyecektir. Bu çalışmada sıcak dövme kalıplarının maliyetsiz ve kısa süre içerisinde yapılan sıcak dövme simülasyonları ile incelenmesi amaçlanmıştır. Sıcak dövme kalıplarının birden fazla kez silinerek işlenmesi, kütleli ve yüzeysel olarak büyük olmaları ve yalnızca deneysel incelemeler için kullanılamayacak kadar maliyetli olmaları gibi sebeplerden dolayı Simufact Forming simülasyon yazılımından yararlanılmıştır. Simülasyon sonuçlarının doğruluğunun kanıtlanabilmesi için incelenen ürün (16x17 mm İki Ağız Anahtar Kısa Boy) üzerinde metalografik ve mekanik deneysel araştırmalar yapılmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlar ile sıcak dövme simülasyon sonuçları olan sıcaklık, hammadde, eşdeğer gerilme, etkin plastik gerinim özelinde karşılaştırılmış ve analiz çalışmasının doğruluğu kanıtlanmıştır. Sonuçların doğrulanmasının ardından Tablo 3.5'te belirtilen değişken parametreler kullanılarak sıcak dövme kalıp ömürlerini arttırıcı yönde simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiş ve sonuçları sunulmuştur.

3.4.1.Metalografik İnceleme

Mikroyapı incelemeleri için sıcak dövme ile üretilen 16x17 mm İki Ağız Anahtar Kısa Boy ürünü kullanılmıştır. Sıcak dövme işlemi sonrası kasada ortalama 60 dakika soğutulan ürünlerden Simufact Forming analiz sonuçlarında ürün üzerinde en yüksek gerinimlerin görüldüğü bölgeler tespit edilmiştir ve Şekil 3.21'de gösterilen bölgelerden numuneler kesilerek Şekil 3.22'de gösterilen Metkon Digipress sıcak kalıplama cihazı ile bakalite alınmıştır.



Şekil 3.21. Metalografik İnceleme Bölgeleri



Şekil 3.22. Metkon Digipress Sıcak Kalıplama Cihazı

Numuneler Şekil 3.23'te gösterilen Metkon Gripo 2V zımparalama ve parlatma cihazı kullanılarak çeşitli grit ölçülerindeki SiC aşındırıcılar ile zımparalanmıştır (240-400-600-800-1200 grit). Ardından 3 μm 'lik parlatma solüsyonuyla (elmas suyu) parlatma işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.23.Metkon GriPO 2V Zımparalama ve Parlatma Cihazı

Ardından %3 nitrik asit (%97 etil alkol) içeren nital çözelti ile dağlama gerçekleştirilip Şekil 3.24’de gösterilen Nikon Eclipse LV150N mikroskobu ile mikroyapı incelemeleri ve Clemex Vision Lite programı ile tane boyutu ölçümleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.24. Nikon Eclipse LV150N Mikroskop

3.4.2.Mikro Sertlik Testi

Sertlik ölçümleri Vickers cinsinde yapılmış olup Şekil 3.25’de gösterilen Metkon Duroline-M microvickers sertlik ölçüm cihazı kullanılmıştır. Ölçümler 500 gf yük altında yüzey bölgelerinde 315 µm kesit bölgelerinde 86 µm aralıklar ve elmas piramit uç ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.26’da sertlik ölçüm hatları gösterilmiştir.

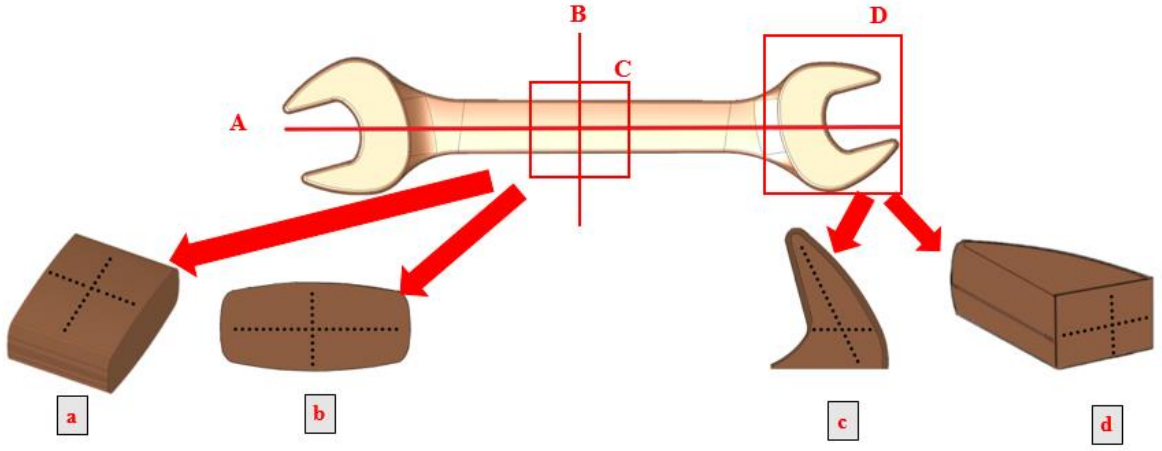


Şekil 3.25.Metkon Duroline-M Mikrovickers Sertlik Ölçüm Cihazı

Sertlik ölçümleri sonrası Eşitlik (3.5)’te [39] gösterilen sertlik çekme dayanımı dönüşüm formülü kullanılarak çeliklerin çekme mukavemeti ile sertlik değerleri arasında sergilediği kolerasyon söz konusudur. Pavlina ve ark., çalışmalarında çok çeşitli bileşimlere ve ferrit, perlit, martenzit, beynit ve karmaşık mikroyapılara sahip 150'den fazla östenitik olmayan, ötektoid altı çelik için sertlik değerleri ile akma ve çekme dayanımı değerleri derlemiştir. Çeliklerin akma dayanımı ve çekme mukavemetleri belirlenmiştir. Çeliklerin hem akma mukavemeti hem de çekme mukavemeti, tüm mukavemet değerleri aralığında sertlik ile doğrusal bir korelasyon sergilediği gözlemlenmiştir. Gerinim-sertleşme potansiyelinin sertlik-akma dayanımı ilişkisi üzerinde etkisinin az olduğu gözlemlenmiştir [39].

$$\zeta D = -99,8 + 3,734HV$$

(3.5)



Şekil 3.26.Çapak Alma İşlemi Sonrası Sertlik Ölçümü Alınan Bölgeler ve Sertlik Ölçüm Yönleri **a)** Gövde Bölgesi Yüzey Ölçümleri **b)** Gövde Bölgesi B Kesiti Ölçümleri **c)** Anahtar Kafası Yüzey Ölçümleri **d)** Anahtar Kafası B Kesiti Ölçümleri

3.4.3.3D Tarama ile Aşınma Derinliği Ölçümü

3D tarama işlemi için Şekil 3.27’de gösterilen Scantech Marka KSCAN-Magic-II model bir tarayıcı kullanılmıştır.

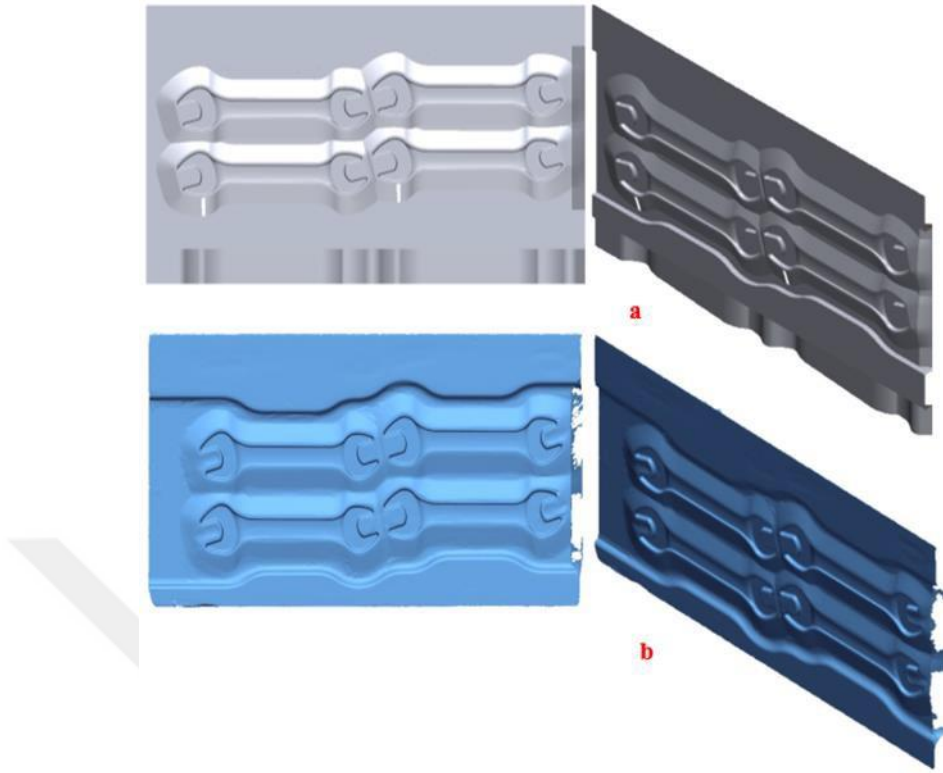


Şekil 3.27.Scantech KSCAN-Magic-II [40]

Tarama işlemi Şekil 3.28’de bir 3D tarama işlemi örneği gösterilmiştir. İşaretleyicilerin yerleştirilmesi sonrası tarama işlemi gerçekleştirilmiş ve Geomagic tersine mühendislik programı ile oluşturulan nokta bulutu yüzeye çevrilmiş ve daha önce hazırlanan sıfır kalıp yüzeyi ile örtüştürülmüştür. Şekil 3.29’da alt kalıp için mevcut kalıp yüzeyi ve sıcak dövme işlemi sonrası taranan kalıp yüzeyi gösterilmiştir.

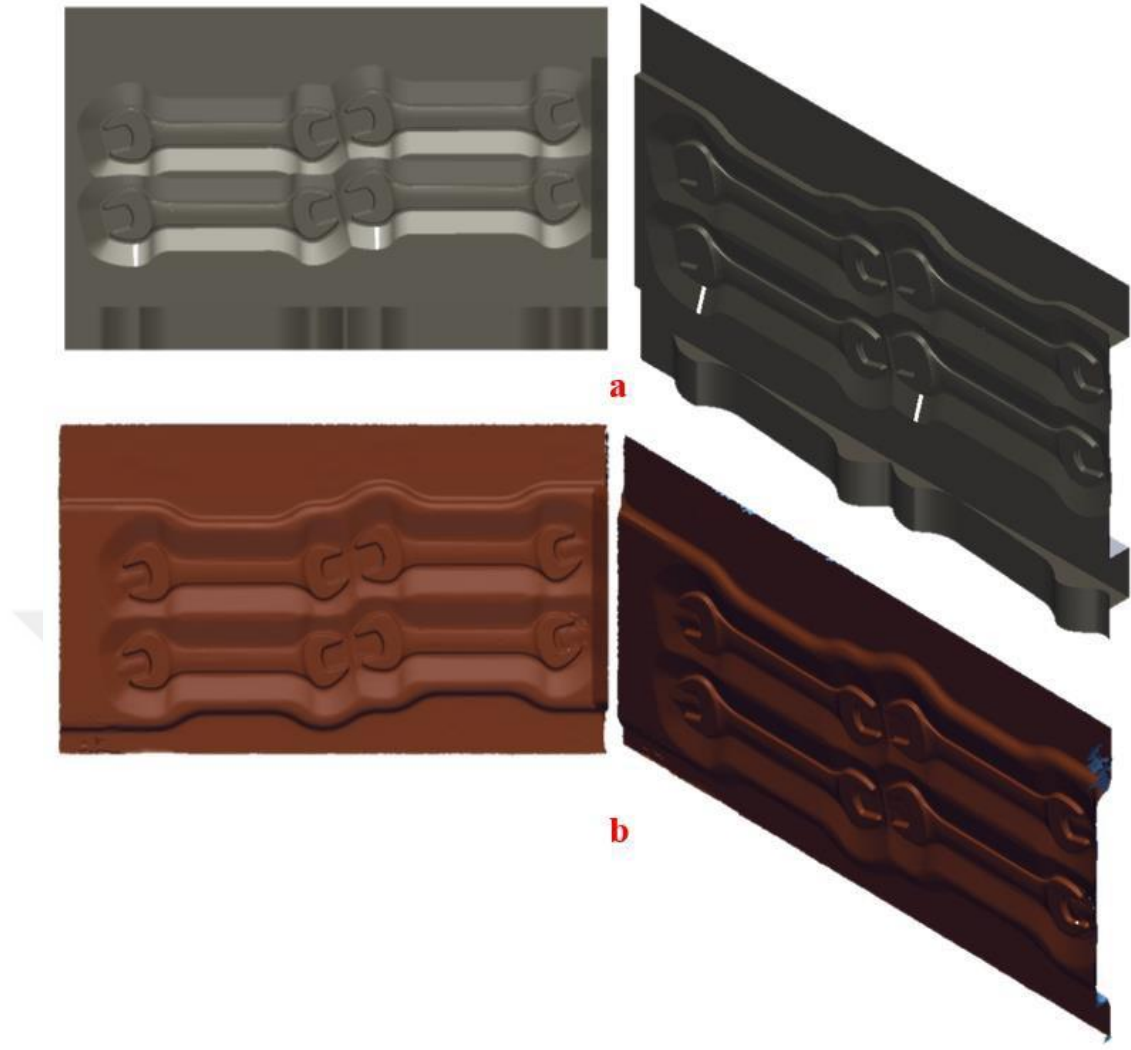


Şekil 3.28.3D Tarama İşlemi Örneği [40]



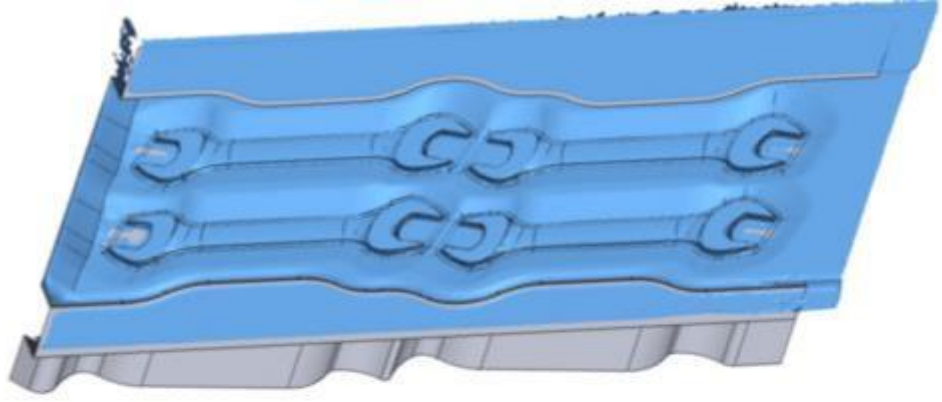
Şekil 3.29.a)Alt Kalıp Yüzeyi **b)**Sıcak Dövme İşlemi Sonrası Taranan Alt Kalıp Yüzeyi

Şekil 3.30’da üst kalıp için mevcut kalıp yüzeyi ve sıcak dövme işlemi sonrası taranan kalıp yüzeyi gösterilmiştir.

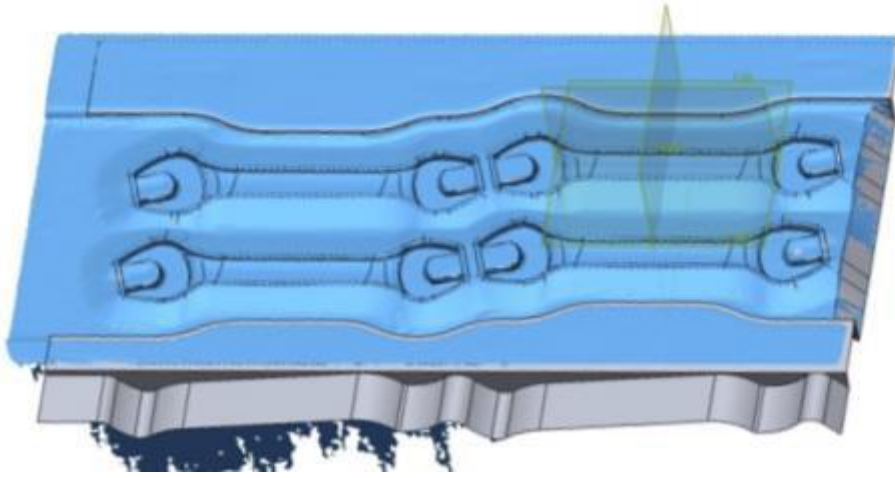


Şekil 3.30.a)Kalıp Üst Kalıp Yüzeyi **b)**Sıcak Dövme İşlemi Sonrası Taranan Üst Kalıp Yüzeyi

Şekil 3.31 'de alt ve üst kalıp için mevcut kalıp yüzeyi ile 3D tarama yüzeylerinin örtüştürülmesi gösterilmiştir.



a



b

Şekil 3.31.a)Üst Kalıp b)Alt Kalıp Mevcut Yüzey ile 3D Tarama Yüzeylerinin Örtüştürülmesi.

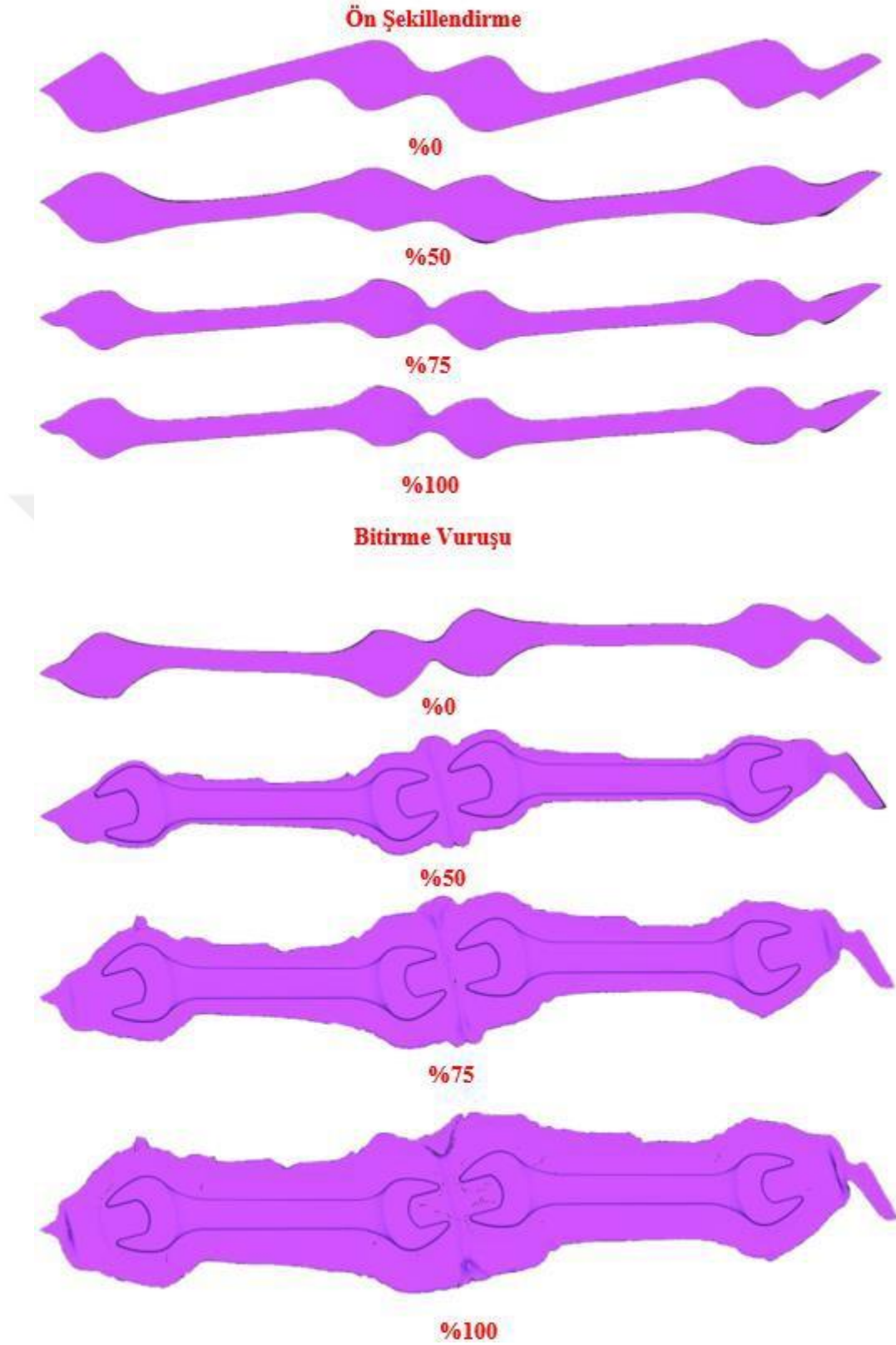
4.SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Çalışma kapsamında 16x17 mm İki Ağız Anahtar Kısa Boy ürününün deneysel incelemeleri ve sıcak dövme simülasyonu incelenmiştir. Gerçekte dövülen ürünler ile simülasyon sonuçları karşılaştırılarak simülasyondan elde edilen veriler hem ürün hem de kalıp için sıcaklık, eşdeğer gerilme ve etkin plastik gerinim özelinde incelenmiştir. Kalıp içinse ayrıca hammadde ve aşınma özelinde incelenmiştir. Hammadde, ısıtılma işlemi, talaşlı işlem, kalıp bağlama işlemi, dövme gibi proses maliyetlerinin yanında bu proseslere ait işçilik maliyetlerinin bulunması ve yüksek olması ile birlikte dövme kalıplarının birden fazla kez kullanılması sebebiyle kalıplardan numune çıkarılması mümkün olmamaktadır. Bu sebeple çok daha az maliyetli olan CAE yazılımlarından Simufact Forming yazılımı kullanılarak gerçekte incelenmesi mümkün olmayan sıcak dövme kalıpları hakkında çeşitli parametreler değiştirilerek kalıp performansını iyileştirici çalışmalar yapılmış sonuçlar literatürde yapılan benzer çalışmalar ile desteklenerek sunulmuştur.

4.1.Kapalı Kalıpta Çapaklı Dövme Simülasyonu

4.1.1.Geometrinin İncelenmesi ve Ölçü Kontrolü

Sıcak dövme simülasyonu sonucu ile elde edilen ürün geometrisinin yük uygulama oranlarına göre değişimi Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



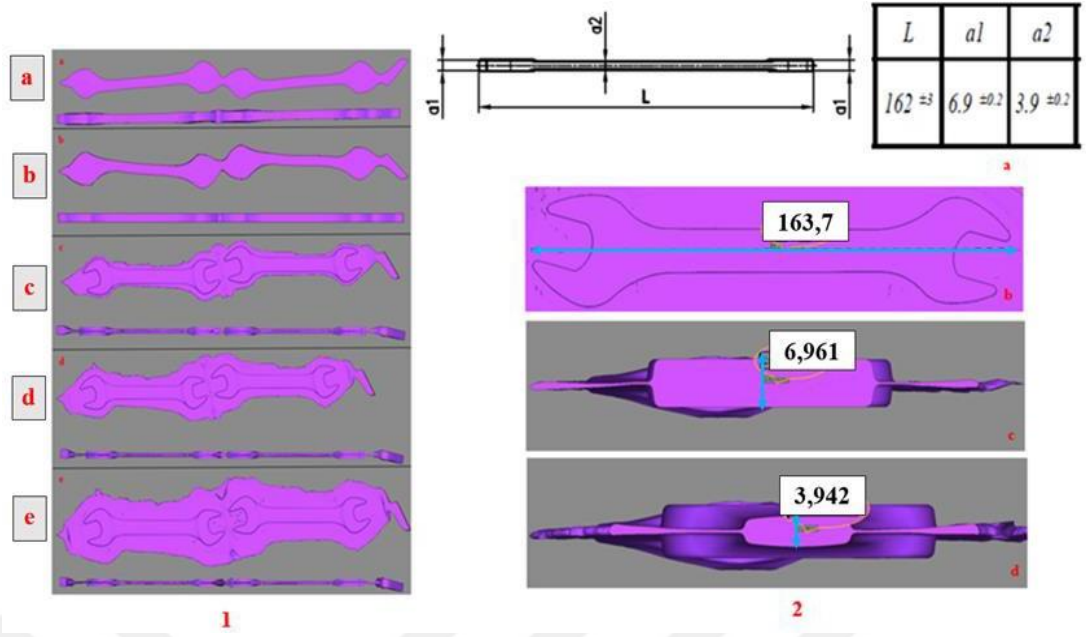
Şekil 4.1.Sıcak Dövme Simülasyonu Sonucu ürün Geometrisinin Yük Uygulama Oranlarına Göre Değişimi

Sıcak dövme işlemi prosesi sonucu oluşan ürünün yüzde yükleme miktarına göre değişimi Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Simülasyon sonucu elde edilen ürün şekli ile gerçek proses sonucu elde edilen ürün şekli örtüşmektedir.



Şekil 4.2.Sıcak Dövme İşlemi Prosesi Sonucu Oluşan Ürünün Yüzde Yükleme Miktarına Göre Değişimi

Sıcak dövme simülasyonu sonucu elde edilen 16x17 mm İki Ağız Anahtar Kısa Boy ürününe ait geometriler ve teknik resme göre ölçü kontrolü Şekil 4.3’te gösterilmiştir. Simülasyon sonucu oluşan geometri ile gerçek ürün ölçülerinin verilen teknik resimde belirtilen toleranslar dahilinde olduğu görülmüştür.



Şekil 4.3.Kapalı Kalıpta Sıcak Dövme Simülasyon Sonucu Oluşan Geometriler 1-**a)**Ön Şekillendirme 1-**b)**Düz Şekillendirme 1-**c)**Bitirme Gözü-1. Şekillendirme 1-**d)**Bitirme Gözü-2. Şekillendirme 1-**e)**Bitirme Gözü-3. Şekillendirme 2-**a)**Ürün Teknik Resmi 2-**b)** L Ölçüsü 2-**c)** $a1$ Ölçüsü 2-**d)** $a2$ Ölçüsü

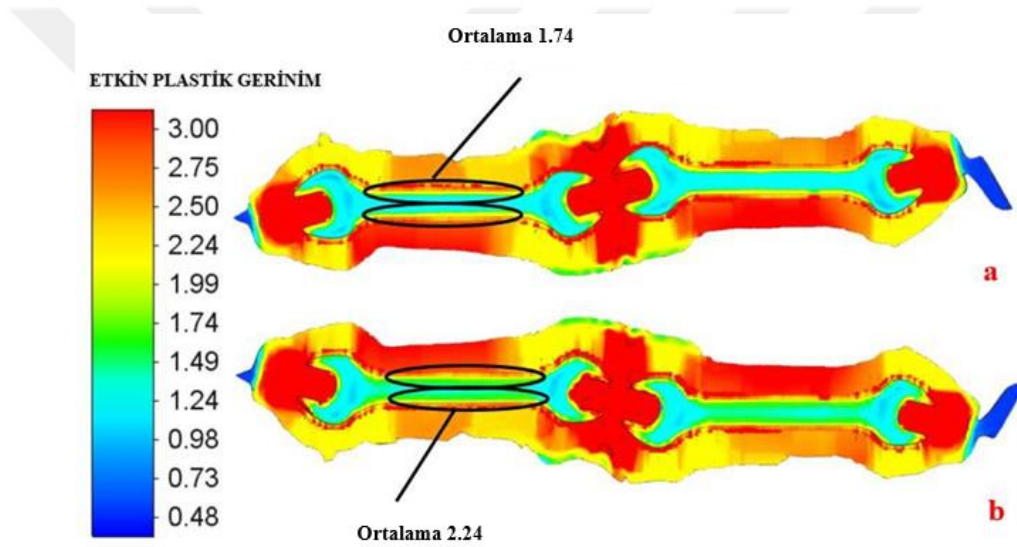
Çapak alma işlemi sonrası gerçek ürün ve simülasyondan elde edilen ürün Şekil 4.4'te gösterilmiştir.



Şekil 4.4.a) Çapak Alma İşlemi Sonrası Simülasyondan Elde Edilen Ürün **b)** Gerçek Prosesten Elde edilen Ürün

4.2.Kapalı Kalıpta Çapaklı Dövme İşlemi Sonrası El Aletinin Mekanik İncelemeleri

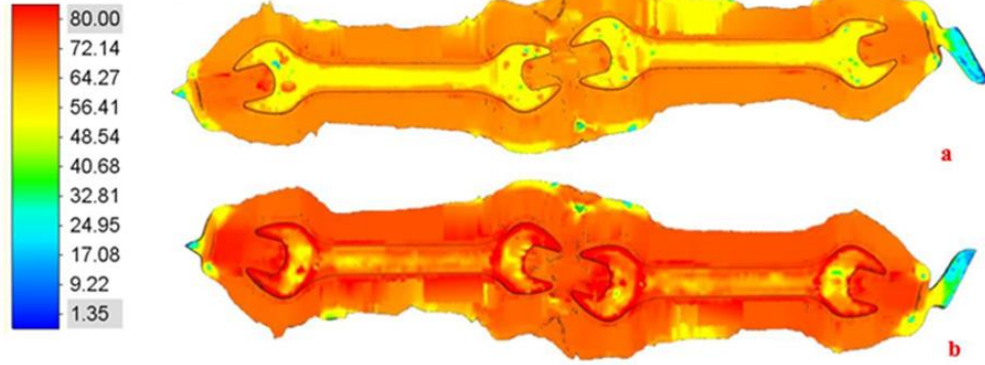
Sıcak dövme simülasyonu sonucu elde edilen veriler ilk aşamada parça sıcak durumdayken incelenmiştir. Simülasyon sonucu elde edilen çapaklı ürün üzerinden etkin plastik gerinim ve eşdeğer gerilme değerleri incelenmiştir. Şekil 4.5'te sıcak dövme simülasyonu sonucu nihai üründe (iş parçasında) oluşan etkin plastik gerinim değerleri gösterilmiştir. Sonuçlara bakıldığında Şekil 4.5(a)'da parçanın üst kalıpla temas eden kısmı, Şekil 4.5(b)'de ise alt kalıpla temas eden kısmı gösterilmiştir. Değerler incelendiğinde iş parçası üzerinde oluşan gerinimlerin alt kalıpla temas eden yüzeyinde daha yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 4.5.Sıcak Dövme Simülasyonu Sonucu Üründe Oluşan Etkin Plastik Gerinim Değerleri **a)** İş Parçasının Üst Kalıp ile Temas Eden Yüzeyi **b)** İş Parçasının Alt Kalıp ile Temas Eden Yüzeyi

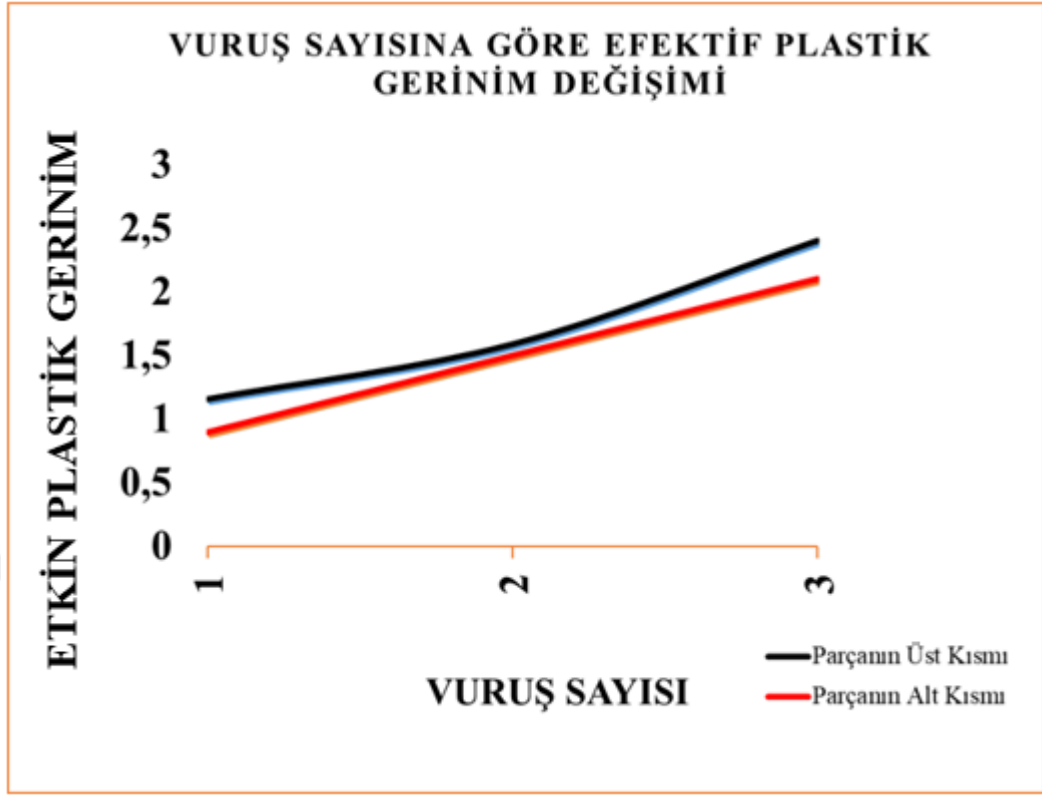
Şekil 4.6'da simülasyon sonucu oluşan nihai ürünün (iş parçasının) eşdeğer gerilme değerleri gösterilmiştir. Değerler incelendiğinde etkin plastik gerinim değerlerinde de olduğu gibi ürün üzerinde oluşan eşdeğer gerilmelerin Şekil 4.6(a)'da gösterilen ürünün üst kalıp ile temas eden yüzeyinde daha düşük, Şekil 4.6(b)'de gösterilen alt kalıp ile temas eden yüzeyinde daha yüksek olduğu görülmüştür.

EŞDEĞER GERİLME [MPa]



Şekil 4.6.Sıcak Dövme Simülasyonu Sonucu Üründe Oluşan Eşdeğer Gerilme Değerleri **a)** İş Parçasının Üst Kalıp ile Temas Eden Yüzeyi **b)** İş Parçasının Alt Kalıp ile Temas Eden Yüzeyi

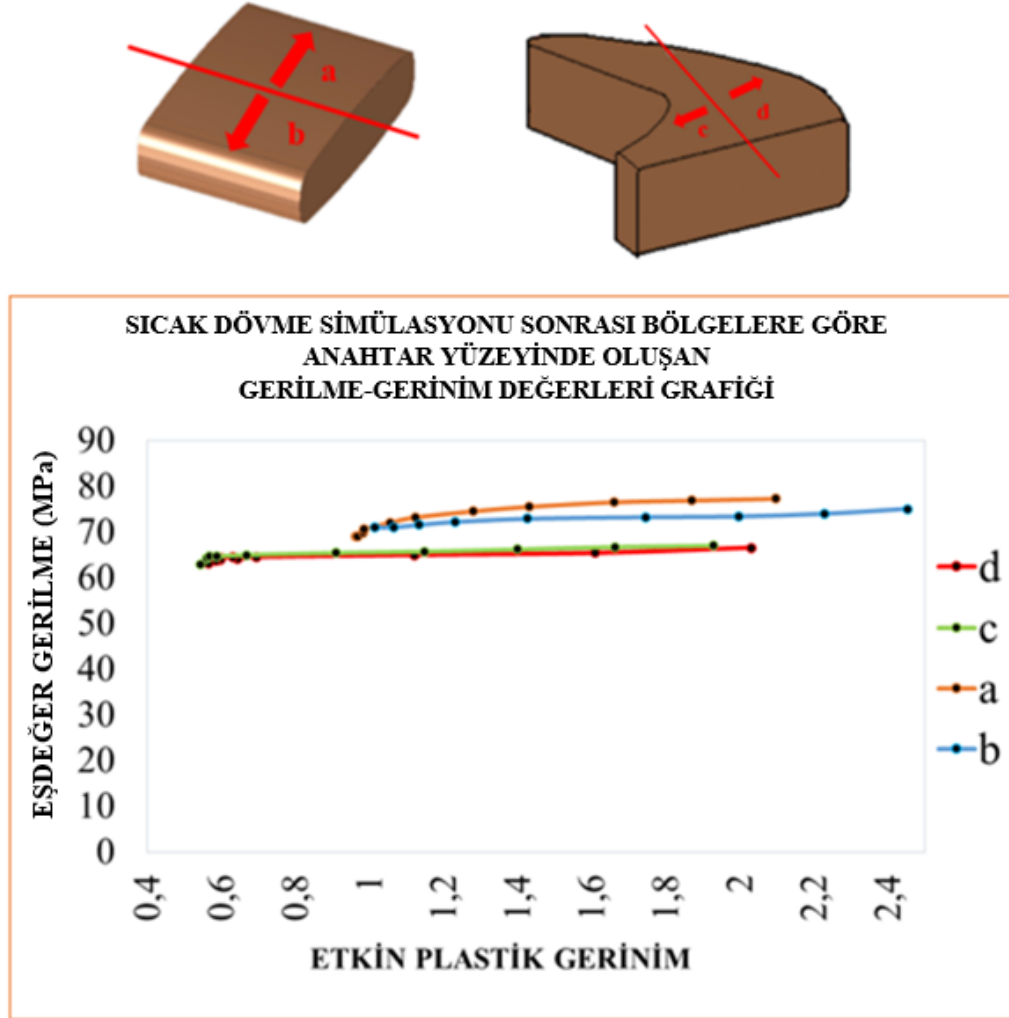
Şekil 4.6'da da belirtildiği gibi, final dövme iş parçasının eş değer maksimum gerilme yaklaşık 80 MPa' a ulaşır. Deformasyon işlemi tamamlandığında, final dövme iş parçasının etkili gerinim dağılımı 2,5 seviyelerine ulaşırken çapak bölgesinde bu değer 2,5'in üzerine çıkabilmektedir, yine Şekil 4.7'de gösterildiği gibi, üst kalıbın ilerlemesi ile, iş parçası kontur bölgesinde plastik olarak deforme olmuş bölge ve etkili gerinim artar. Bu durum kesit profilindeki ani şekil değişiminden kaynaklı daha büyük metal akış direnci nedeniyle gelişir. Şekil 4.7'de gövde yüzey bölgesinden alınan yatay ve dikey yönde oluşan etkin plastik gerinim-eşdeğer gerilme grafikleri gösterilmiştir.



Şekil 4.7.Vuruş Sayısına Göre Etkin Plastik Gerinim Değişimi Grafiği

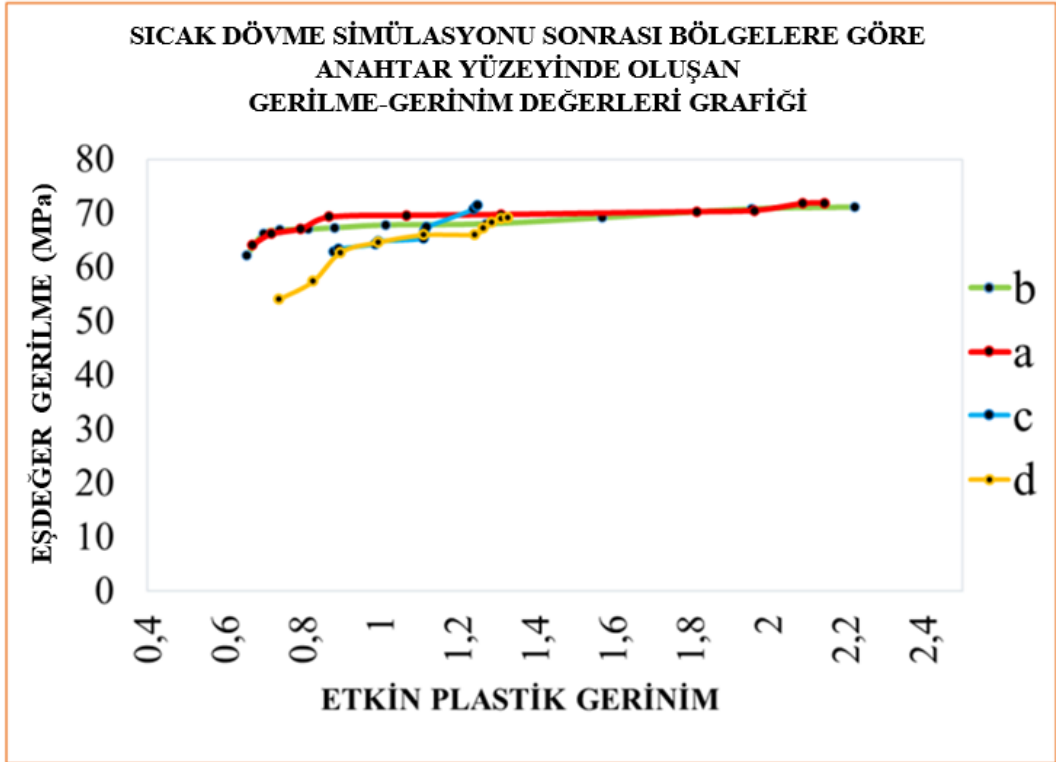
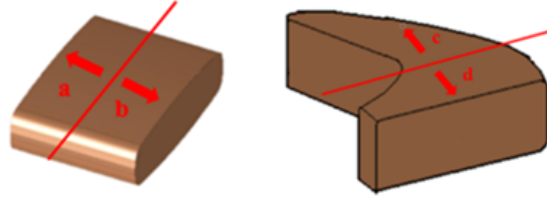
Simülasyon sonucu sıcak ürün üzerinden etkin plastik gerinim ve eşdeğer gerilme değerleri arasındaki ilişkinin incelenebilmesi için ölçümler alınmıştır. Elde edilen sonuçlar ürün gövde yüzey ve kesit bölgelerinden, anahtar kafası yüzey ve kesit bölgelerinden olmak üzere hem dikey hem de yatay yönde ölçümler alınarak karşılaştırma türünde grafikler ile sunulmuştur. Elde edilen sonuçlarda görüleceği üzere gerinim ve gerilme arasındaki ilişki literatürde yapılan çalışmalar ile paralellik göstermektedir [41-43].

Şekil 4.8’de sıcak dövme simülasyonu sonrası bölgelere göre anahtar yüzeyinde oluşan yüzeyinde oluşan gerilme-gerinim değerleri grafiği gösterilmiştir. Parça üzerinden alınan ölçümler çapak bölgelerinde içermektedir bu sebeple çapak bölgelerine yaklaştıkça değerlerde artış görülmektedir.



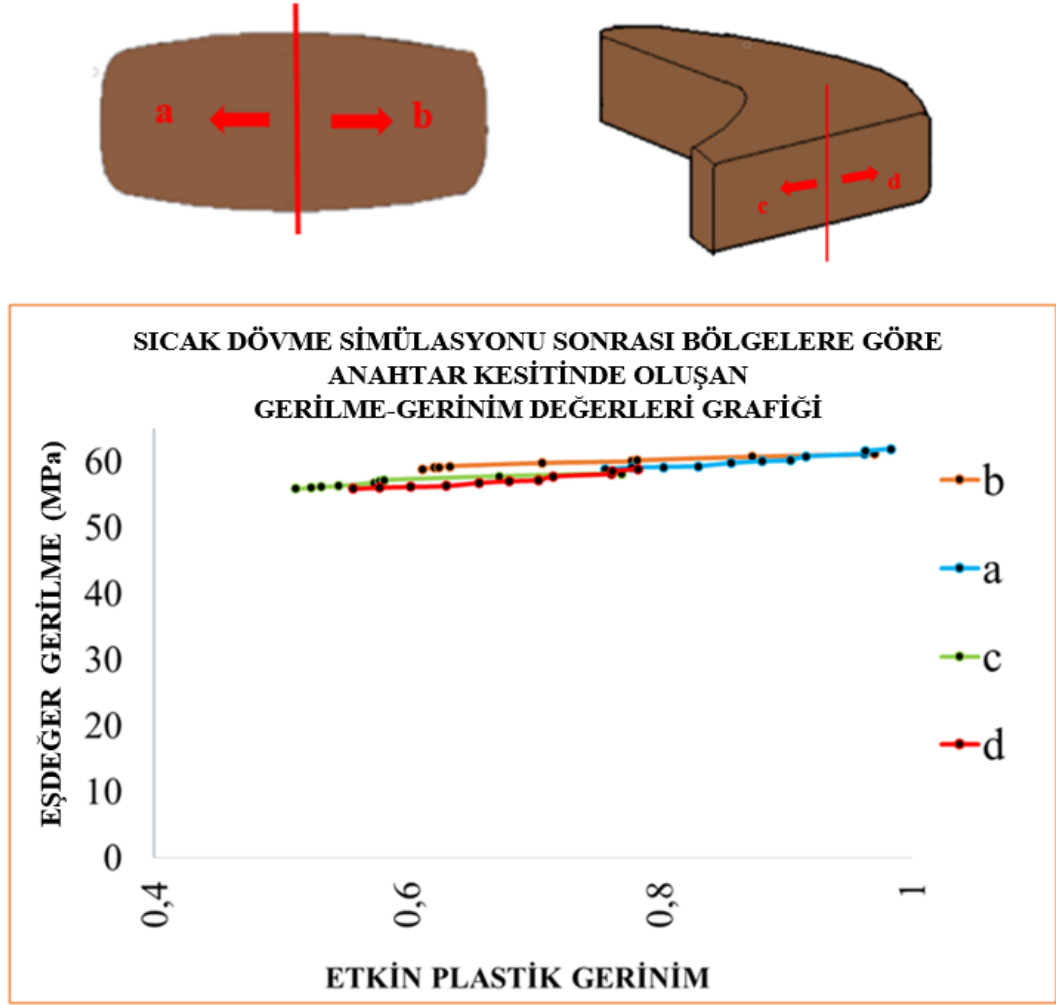
Şekil 4.8.Sıcak Dövme Simülasyonu Sonrası Bölgelere Göre Anahtar Yüzeyinde Oluşan Gerilme-Gerinim Değerleri Grafiği-1 **a-b)**Gövde **c-d)**Anahtar Kafası

Şekil 4.9’da sıcak dövme simülasyonu sonrası bölgelere göre anahtar yüzeyinde oluşan gerilme-gerinim değerleri grafiği gösterilmiştir. Parça üzerinde c bölgesinden alınan ölçümler çapak bölgesinde içermektedir bu sebeple çapak bölgelerine yaklaştıkça değerlerde artış görülmektedir.



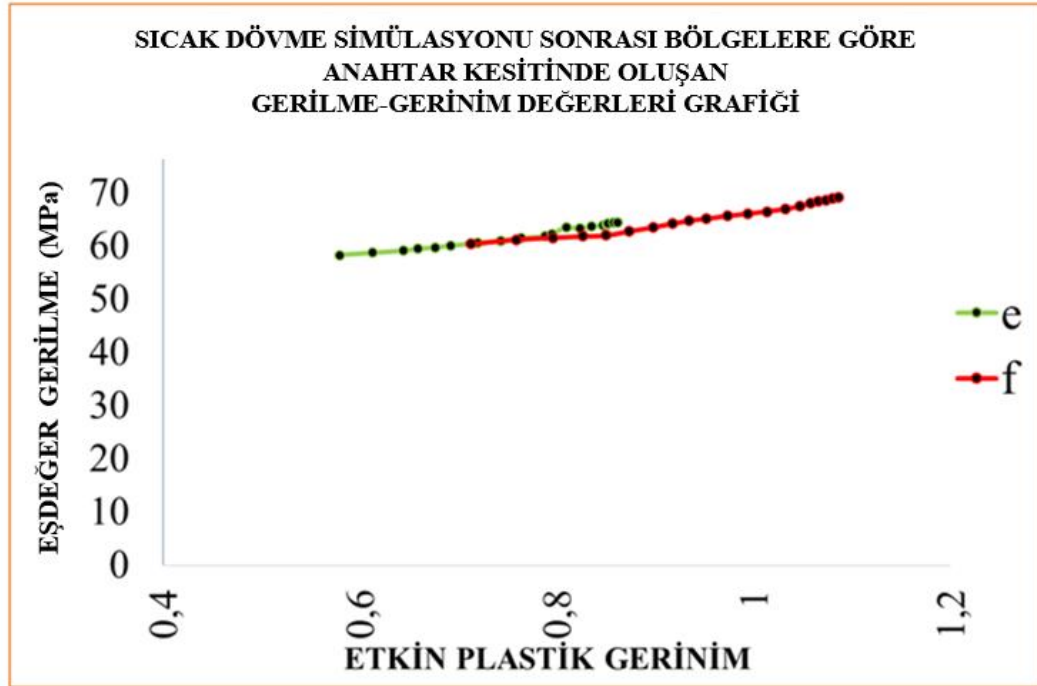
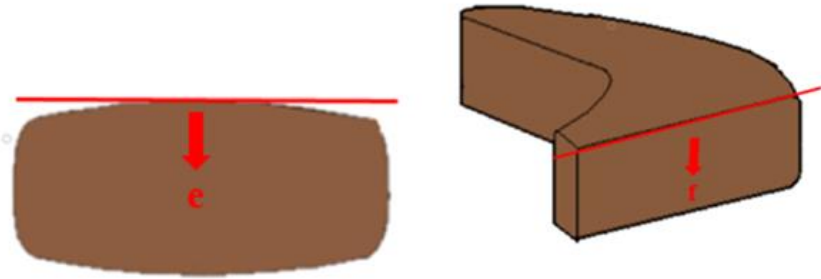
Şekil 4.9.Sıcak Dövme Simülasyonu Sonrası Bölgelere Göre Anahtar Yüzeyinde Oluşan Gerilme-Gerinim Değerleri Grafiği-2 **a-b)**Gövde **c-d)**Anahtar Kafası

Şekil 4.10'da sıcak dövme simülasyonu sonrası bölgelere göre anahtar kesitinde oluşan gerilme-gerinim değerleri grafiği gösterilmiştir. Parça üzerinden alınan ölçümler çapak bölgelerininide içermektedir bu sebeple çapak bölgelerine yaklaştıkça değerlerde artış görülmektedir.



Şekil 4.10.Sıcak Dövme Simülasyonu Sonrası Bölgelere Göre Anahtar Kesitinde Oluşan Gerilme-Gerinim Değerleri Grafiği-1 **a-b)**Gövde **c-d)**Anahtar Kafası

Şekil 4.11’de sıcak dövme simülasyonu sonrası bölgelere göre anahtar kesitinde oluşan gerilme-gerinim değerleri grafiği gösterilmiştir. Parça üzerinden alınan ölçümler çapak bölgelerinde içermektedir bu sebeple çapak bölgelerine yaklaştıkça değerlerde artış görülmektedir.

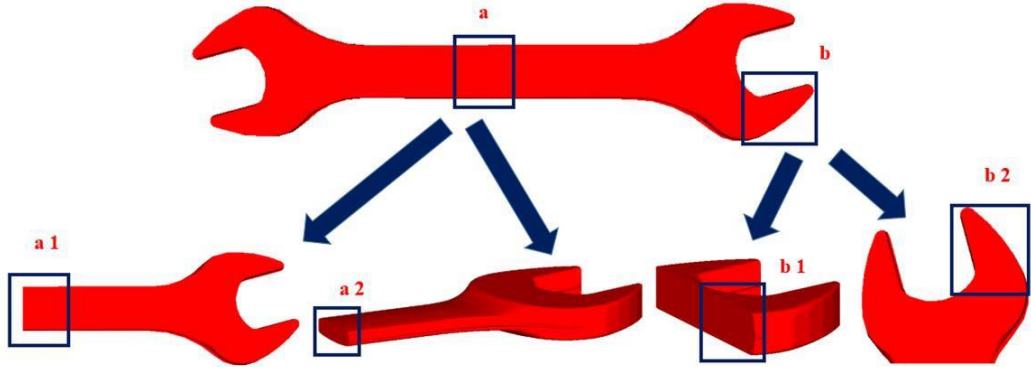


Şekil 4.11.Sıcak Dövme Simülasyonu Sonrası Bölgelere Göre Anahtar Kesitinde Oluşan Gerilme-Gerinim Değerleri Grafiği-2 **e)**Gövde **f)**Anahtar Kafası

Sıcak dövme simülasyonu sonucu elde edilen en yüksek gerilme değerlerinin çapağın olduğu bölgeler ile kalıp geometrisinin değişiklik gösterdiği köşe ve kıvrımlı bölgelerde olduğu görülmüştür literatürde benzer çalışmalar bulunmaktadır [44]. Etkin gerinim birikimi, kesit değişim profilindeki daha büyük metal akma direncinden kaynaklanır. Toplam plastik gerilmelerin sayısal olarak tahmin edilen değerleri genellikle düşüktür ve bu nedenle iş parçası hacminde mikro çatlak oluşma riski minimumdur. Ayrıca, sanal modelde başka herhangi bir kusur veya geometri sapması gözlemlenmemiştir. Bu şekilde sonlu eleman modelinin geçerliliğini ve kalıpların geometrisini doğrular.

4.3.Kapalı Kalıpta Çapaklı Dövme Sonrası El Aletinin Mikroyapısal İncelemeleri

Sıcak dövme işlemi sonrası kasada soğutulan el aletinin çapakları alınarak anahtar kafası ve gövde bölgelerinden alınan numunelerin mikroyapı incelemeleri yapılmıştır. Şekil 4.12’de el aletinin katı modeli üzerinden mikroyapı incelemelerinin yapıldığı bölgeler gösterilmiştir.

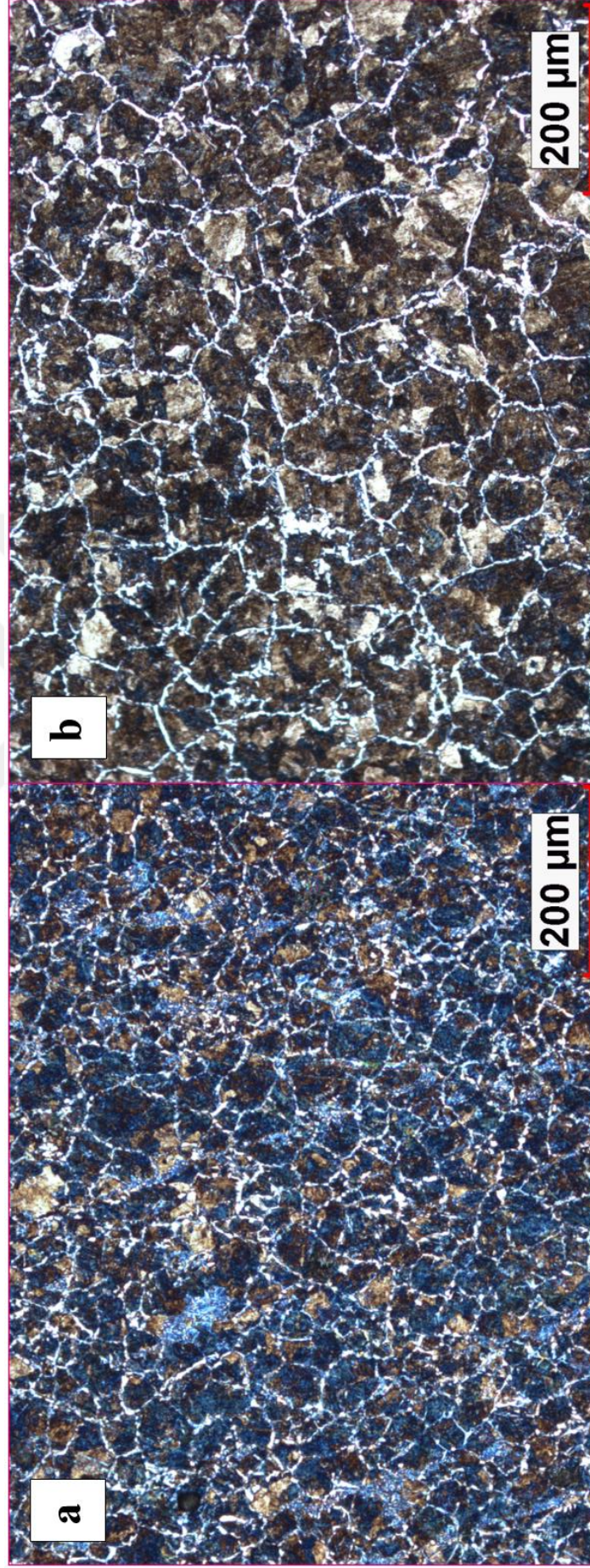


Şekil 4.12.Mikroyapı İncelemesi Yapılan Bölgeler

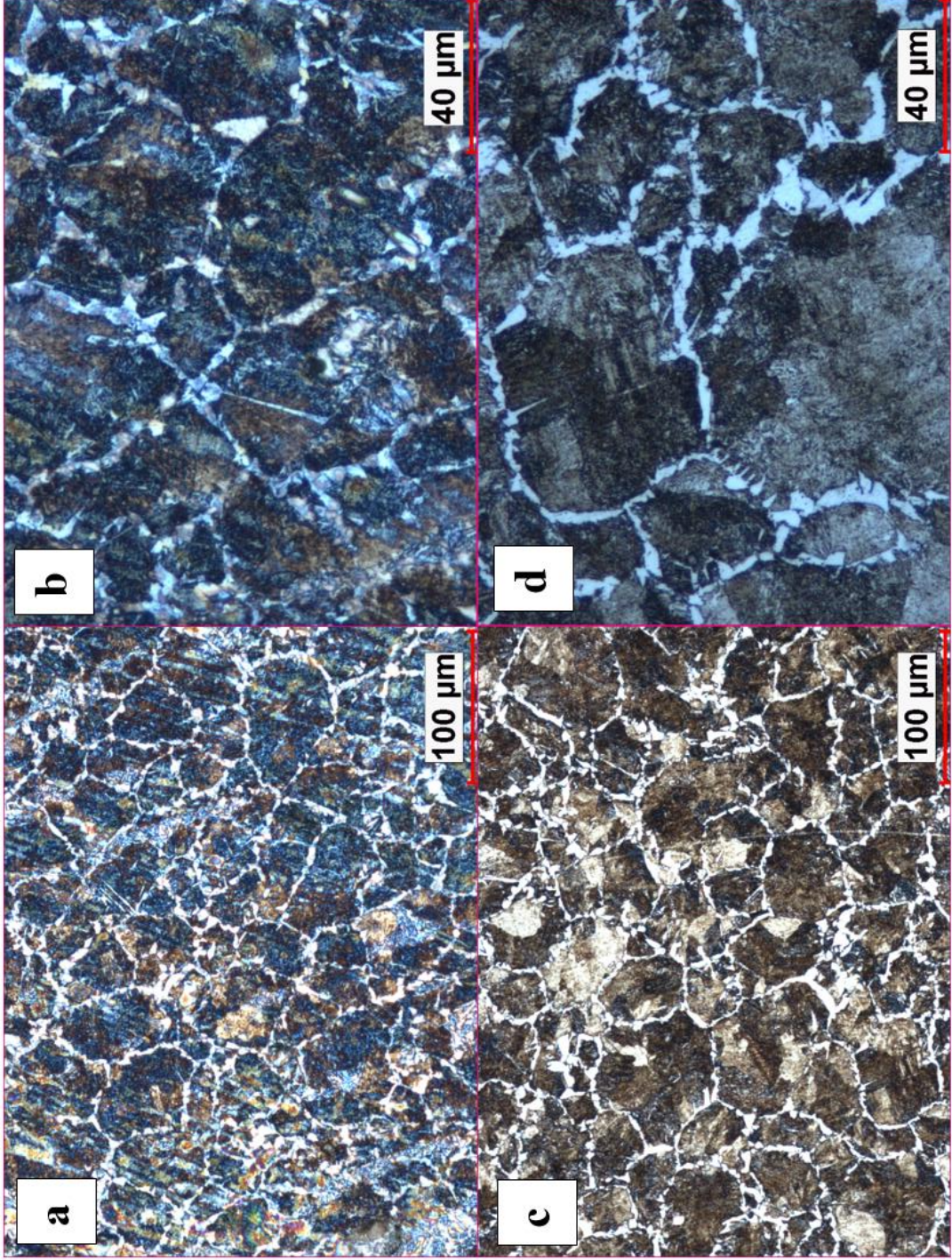
Şekil 4.13’te 100x büyütme ile a)Gövde Kesit b)Anahtar Kafası Kesit mikroyapı görüntüleri gösterilmiştir. Şekil 4.14’te Soğuma sonrası a)200x-Gövde Kesit, b) 500x-Gövde Kesit, c)200x-Anahtar Kafası Kesit, d)500x-Anahtar Kafası Kesit mikroyapı görüntüleri gösterilmiştir.

Genel olarak tane yapısı incelendiğinde gövde bölgesinin tane boyutunun anahtar kafası bölgesinin tane boyutundan daha küçük olduğu gözlemlenmiştir. Gözlemlenen sonucun kanıtlanabilmesi adına Clemex Vision Lite programı kullanılarak tanelerin en ve boy ölçülerinin ortalaması ile tane boyutları belirlenmiştir. Sonuçlar incelediğinde oluşan mikroyapının ferrit ve perlit yapıda olduğu gözlemlenmiştir.





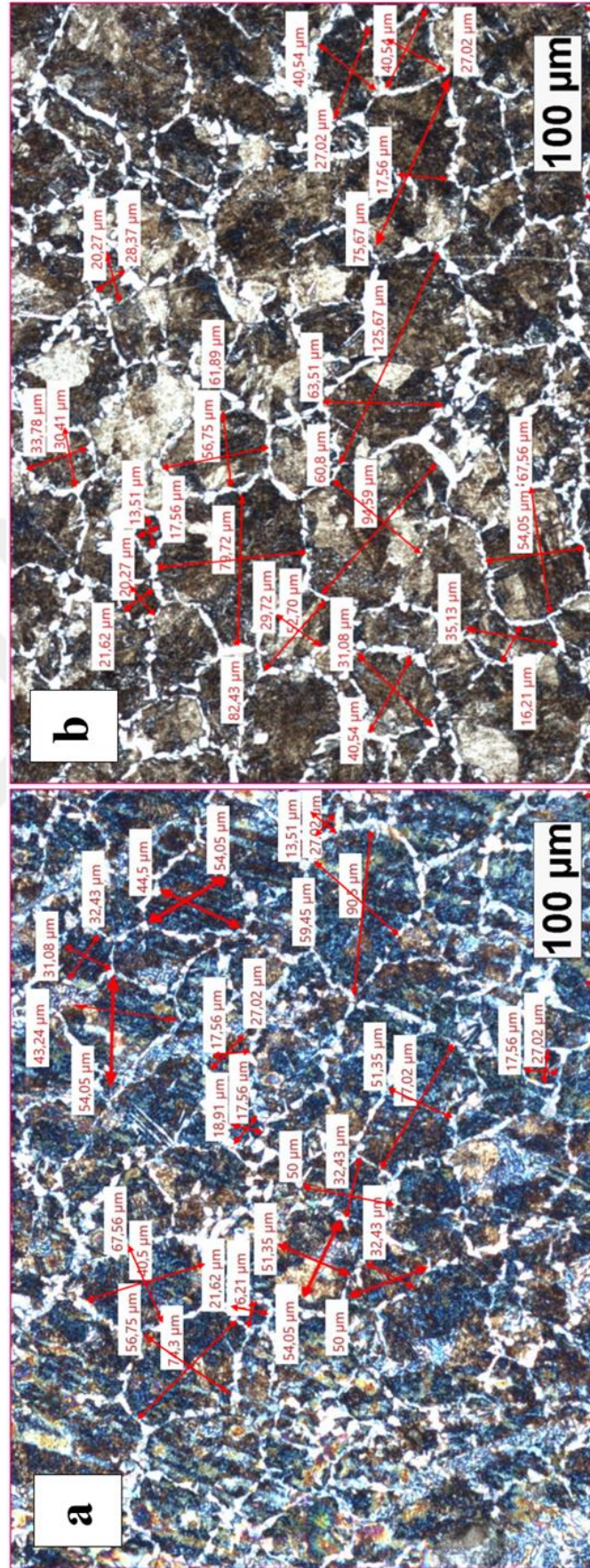
Şekil 4.13. Soğuma Sonrası **a)**100x-Gövde Kesit **b)**100x-Anahtar Kafası Kesit Mikroyapı Görüntüleri



Şekil 4.14. Soğuma Sonrası **a)** 200x-Gövde Kesit **b)** 500x-Gövde Kesit **c)** 200x-Anahtar Kafası Kesit **d)** 500x-Anahtar Kafası Kesit Mikroyapı Görüntüleri

Şekil 4.15'te soğuma sonrası a)200x-Gövde Kesit, b) 200x-Anahtar Kafası Kesit Bölgelerinden Alınan Mikroyapı Ölçümleri (μm) gösterilmiş ve sonuçlar Tablo 4.1'de karşılatırmalı olarak verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde sıcak dövme işleminde iş parçasının kalıpla ilk temas noktası olan gövde bölgesinin kesitinin ortalama tane boyutunun $39,83 \mu\text{m}$, anahtar kafa bölgesinin kesitinin ortalama tane boyutunun ise $50,76 \mu\text{m}$ olduğu görülmüştür. Gövde bölgesinin ortalama tane boyutunun kafa bölgesinin ortalama tane boyutuna göre 1,27 kat daha küçük olduğu görülmüştür.



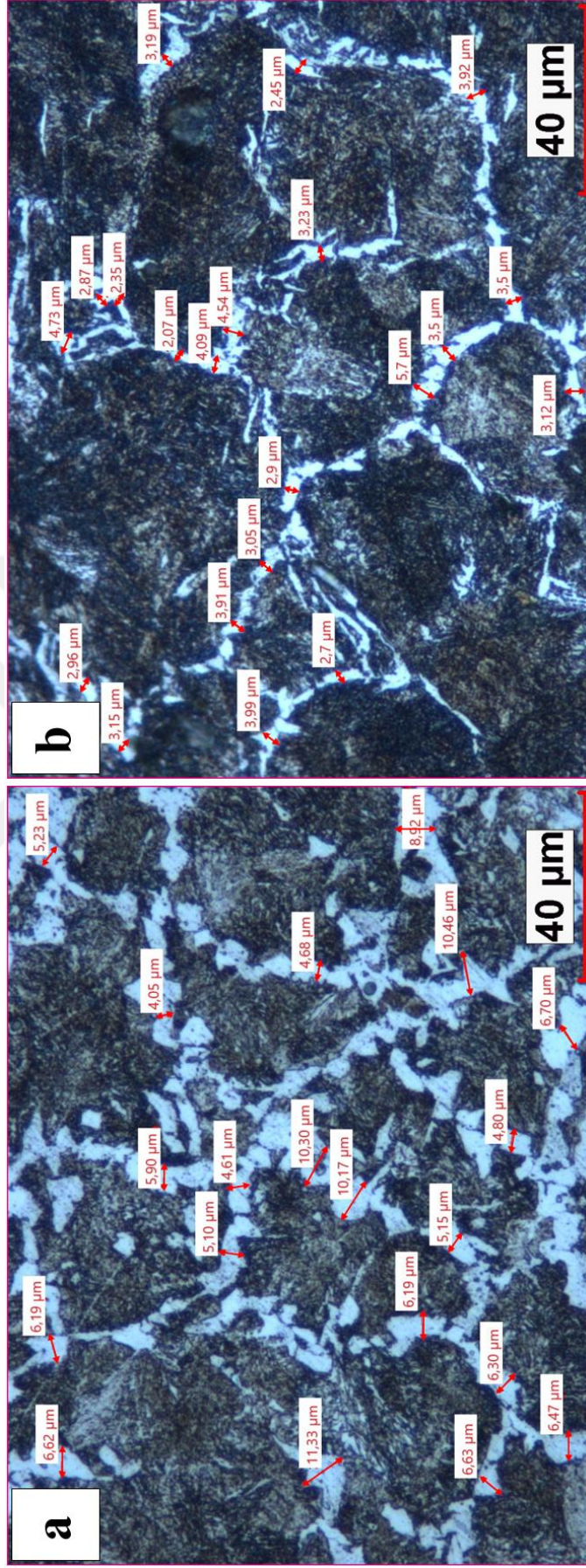


Şekil 4.15. Soğuma Sonrası a) 200x-Gövde Kesit, b) 200x-Anahtar Kafası Kesit Bölgelerinden Alınan Mikroyapı Ölçümleri (μm)

Tablo 4.1.Soğuma sonrası 200x-gövde kesit, 200x-anahtar kafası kesit bölgeleri ortalama tane boyutu ölçümler (μm)

Ölçüm Numarası	200x-Gövde Kesit Ortalama Tane Boyutu Ölçümleri (μm)	200x-Anahtar Kafası Kesit Ortalama Tane Boyutu Ölçümleri (μm)
1	65,52	20,94
2	54,03	15,53
3	41,21	81,12
4	18,91	41,21
5	18,23	77,69
6	22,29	32,09
7	64,18	59,32
8	18,73	94,59
9	74,97	24,32
10	20,26	60,80
11	52,70	25,67
12	41,21	35,81
13	49,27	46,61
14	48,64	33,78
15	31,75	31,07
Ortalama Tane Boyutu Değeri (μm)	39,83	50,76

Şekil 4.16’da soğuma sonrası a)500x-Gövde Yüzey, b)500x-Anahtar Kafası Yüzey Bölgeleri Ferrit Tane Yapısına Ait Mikroyapı Ölçümleri (μm) gösterilmiş ve sonuçlar Tablo 4.3’te karşılatırmalı olarak verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde gövde yüzeyinin ortalama ferrit tane boyutunun 6,95 μm , anahtar kafa kısmının ise 3,42 μm olduğu görülmüştür. Gövde bölgesinin ortalama ferrit tane boyutunun kafa bölgesinin ortalama tane ferrit boyutuna göre 2 kat daha büyük olduğu görülmüştür.



Şekil 4.16. Soğuma Sonrası **a)**500x-Gövde Yüzey, **b)**500x-Anahar Kafası Yüzey Bölgeleri Ötektoid Öncesi Ferrit Tane Kalınlığı Ölçümleri (µm)

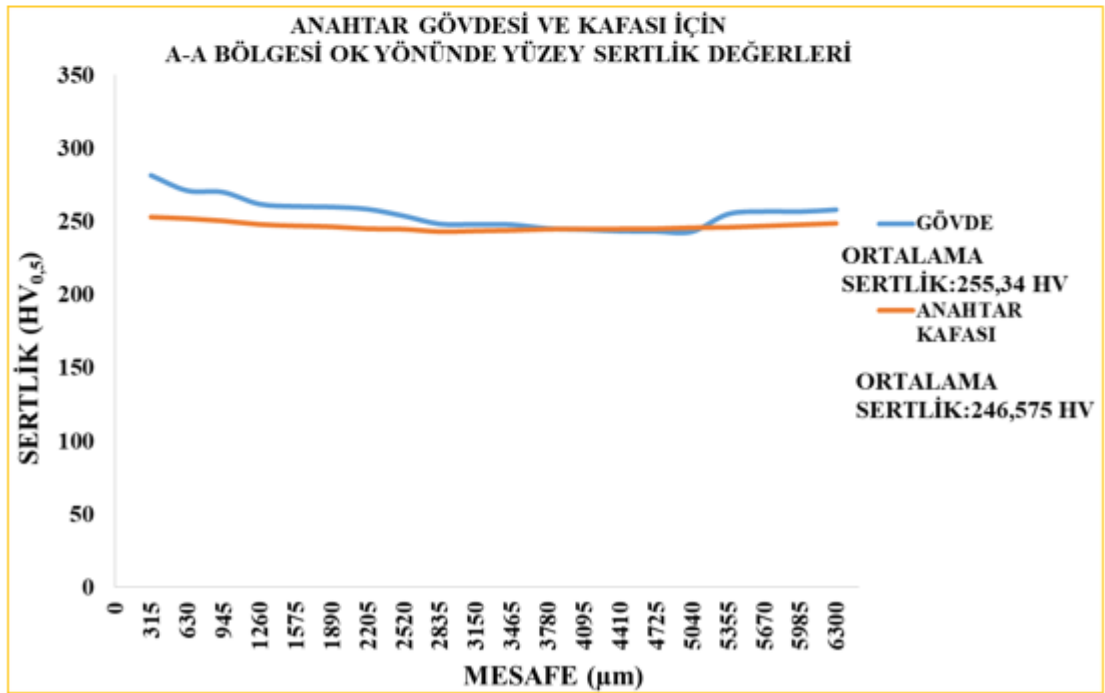
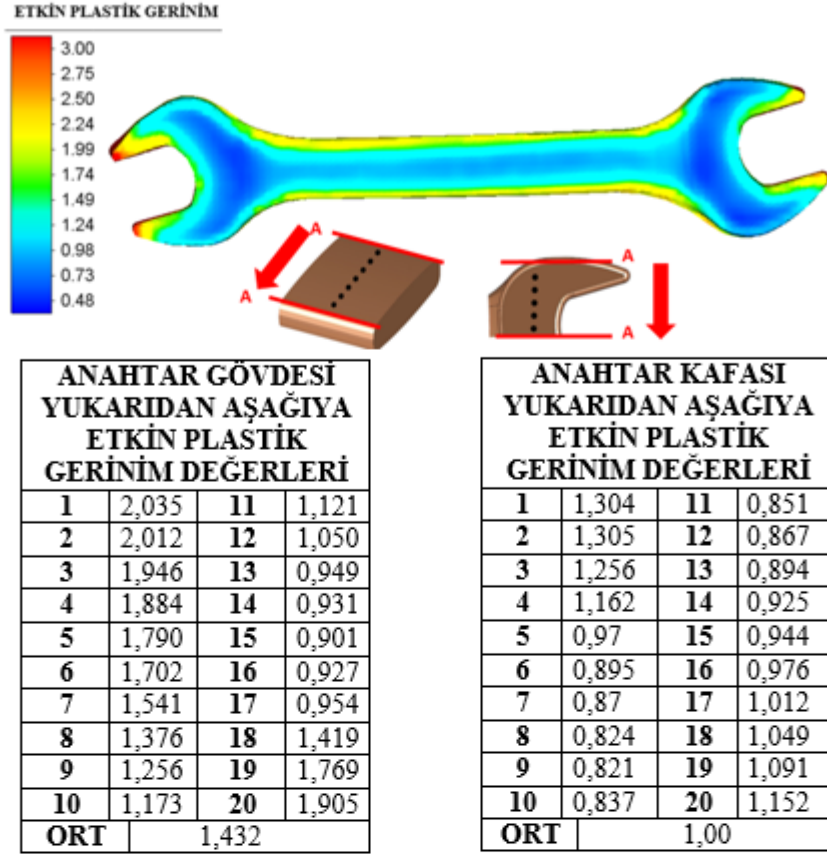
Tablo 4.2.Soğuma sonrası a)500x-gövde yüzey, b)500x-anahtar kafası yüzey bölgeleri ötektoid öncesi ferrit kalınlığı ölçümleri (μm)

Ölçüm Numarası	500x-Gövde Yüzey Bölgeleri Ötektoid Öncesi Ferrit Kalınlığı Ölçümleri (μm)	500x-Anahtar Kafası Yüzey Bölgeleri Ötektoid Öncesi Ferrit Kalınlığı Ölçümleri (μm)
1	6,62	2,7
2	11,33	3,99
3	6,63	3,15
4	6,47	2,96
5	6,19	3,91
6	6,19	3,05
7	6,3	2,9
8	5,1	4,73
9	10,17	2,87
10	5,15	2,35
11	5,9	2,07
12	4,61	4,09
13	10,31	4,54
14	10,17	5,7
15	4,8	3,5
16	4,05	3,5
17	4,68	3,19
18	10,46	3,92
19	6,7	3,23
20	5,23	2,45
21	8,92	3,12
Ortalama Tane Boyutu Değeri (μm)	6,95	3,42

4.4.Deneysel Sonuçların Simülasyon ile Örtüştürülmesi

Sonlu eleman simülasyonları deneylerle doğrulanmalıdır. Bu doğrulama, FEM simülasyonunun iyileştirilmesine yardımcı olur. Doğrulama sürecinde, FEM simülasyon sonuçları deneysel sonuçlarla ilişkili değilse, o simülasyonlar için kullanılan FEM modeli düzeltilmelidir. Aşağıda verilen sonuçlarda, deneysel sonuçlar FEM simülasyonlarının sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

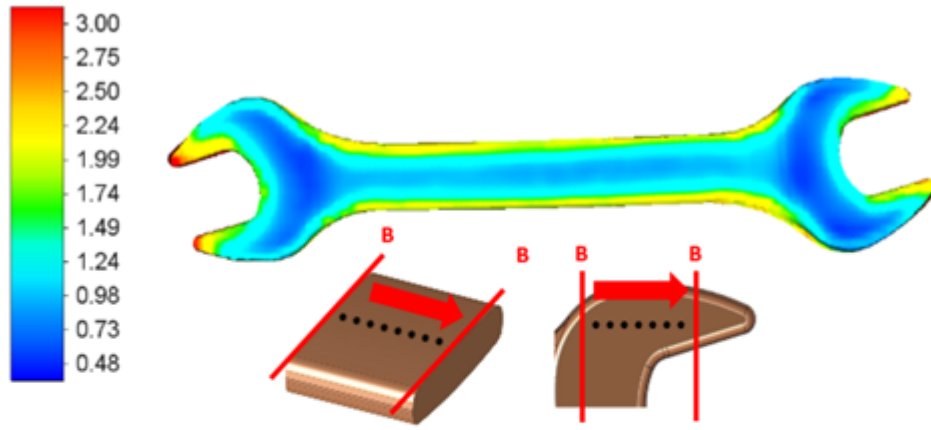
Şekil 4.17’de soğuma ve çapak alma işlemleri sonrası anahtar gövde ve kafa bölgesinin yüzeyinde oluşan dikey yönde etkin plastik gerinim değerleri ile sertlik değerleri ilişkisi gösterilmiştir. Ölçümler çapak bölgelerinde kapsayacak şekilde yapılmıştır. Şekilde gösterilen değerlere bakıldığında etkin plastik gerinim değerlerinin ortalamasının gövde için 1,432, anahtar kafası için 1,00 olduğu görülmektedir. Aynı zamanda şekildeki grafiklerden de görüleceği gibi ortalama sertlik değerleri gövde için 255,34 HV anahtar kafası için 246,575 HV olarak ölçülmüştür. Etkin plastik gerinim değerlerinde ölçüm alınan kesit boyunca çapak bölgesine yaklaşıldıkça artış olduğu gözlemlenmiştir. Bunun sebebi malzeme akışının çapak bölgelerine doğru olmasıdır. Malzeme şekillendirme işlemi süresince oluşan basınç sebebiyle kendisine çıkış noktası arayacak böylelikle bulunduğu boşluklara doğru ilerleyecektir. Çapak boşluğundan çıkmak isteyen malzeme kesit daralması sebebiyle sıkışacak böylelikle yüksek plastik gerinimler meydana gelecektir. Aynı dağılım sertlik değerlerinde de görülmektedir orta bölgelere geldiğinde etkin plastik gerinim değerlerinde düşüş gözlemlenmiştir. Parça akışının uç bölgelere doğru olması ve en fazla şekil değişiminin uç bölgede gerçekleşmesi sebebiyle etkin plastik gerinim değeri uç bölgede daha yüksek değerlere ulaşmakta ve orta bölgelere gidildikçe düşmektedir.



Şekil 4.17. Soğuma ve Çapak Alma İşlemleri Sonrası A-A Kesiti Boyunca Anahtar Gövdesi ve Kafası için Yüzey Bölgesinde Oluşan Etkin Plastik Gerinim Değerleri ve Sertlik İlişkisi

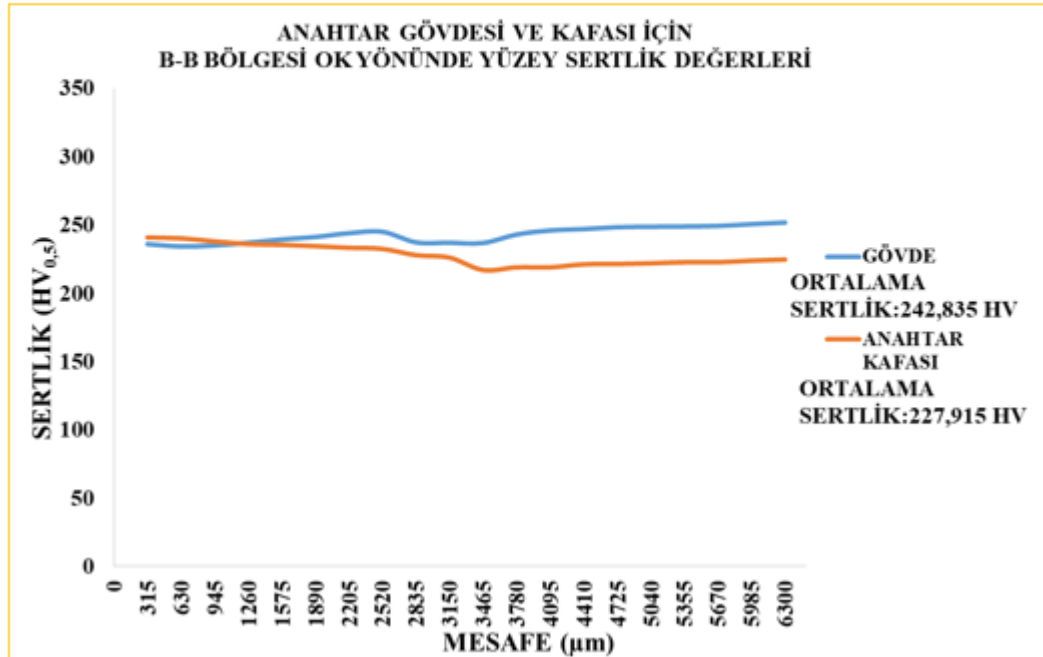
Şekil 4.18’de soğuma ve çapak alma işlemleri sonrası anahtar gövde ve kafa bölgesinin yüzeyinde oluşan yatay yönde etkin plastik gerinim değerleri ile sertlik değerleri ilişkisi gösterilmiştir. Şekilde gösterilen değerlere bakıldığında etkin plastik gerinim değerlerinin ortalamasının gövde için 1,138, anahtar kafası için 0,729 olduğu görülmektedir. Aynı zamanda şekildeki grafiklerden de görüleceği gibi ortalama sertlik değerleri gövde için 242,835 HV anahtar kafası için 227,915 HV olarak ölçülmüştür. Etkin plastik gerinim değerlerinde gövde bölgesi için ölçüm alınan kesit boyunca anahtar kafasına doğru oluşan akış yönüne bağlı olarak artan orta bölgelerde azalan ve sonra tekrar artan değerler gözlemlenmiştir. Bunun sebebi malzeme akışının çift yönlü olarak anahtar kafasına doğru gerçekleşmesi ve yüksek oranda şekil değişiminin gözlemlenmesidir. Aynı dağılım sertlik değerlerinde de görülmektedir. Anahtar kafası ölçüm alınan kesit boyunca incelendiğinde uç bölgeden orta bölgelere gelindiğinde etkin plastik gerinim değerlerinde düşüş gözlemlenmiştir. Parça akışının uç bölgelere doğru olması ve en fazla şekil değişiminin uç bölgede gerçekleşmesi sebebiyle etkin plastik gerinim değeri uç bölgede daha yüksek değerlere ulaşmakta ve orta bölgelere gidildikçe düşmektedir.

ETKİN PLASTİK GERİNİM



ANAHTAR GÖVDESİ SOLDAN SAĞA ETKİN PLASTİK GERİNİM DEĞERLERİ			
1	1,139	11	1,102
2	1,137	12	1,106
3	1,135	13	1,112
4	1,130	14	1,142
5	1,128	15	1,158
6	1,125	16	1,18
7	1,122	17	1,183
8	1,114	18	1,188
9	1,078	19	1,193
10	1,095	20	1,195
ORT	1,138		

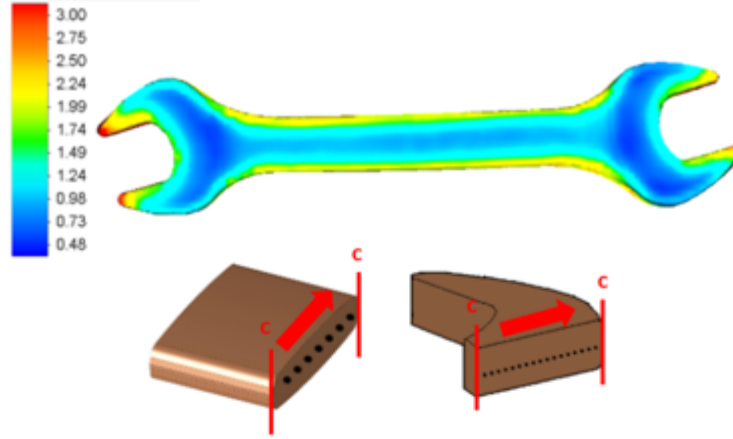
ANAHTAR KAFASI SOLDAN SAĞA ETKİN PLASTİK GERİNİM DEĞERLERİ			
1	1,28	11	0,552
2	1,18	12	0,553
3	1,105	13	0,56
4	1,025	14	0,577
5	0,79	15	0,592
6	0,723	16	0,603
7	0,671	17	0,615
8	0,605	18	0,672
9	0,544	19	0,693
10	0,548	20	0,698
ORT	0,729		



Şekil 4.18. Soğuma ve Çapak Alma İşlemleri Sonrası B-B Kesiti Boyunca Anahtar Gövdesi ve Kafası için Yüzey Bölgesinde Oluşan Etkin Plastik Gerinim Değerleri ve Sertlik İlişkisi

Şekil 4.19’da soğuma ve çapak alma işlemleri sonrası anahtar gövde ve kafa bölgesinin kesitinde oluşan yatay yönde etkin plastik gerinim değerleri ile sertlik değerleri ilişkisi gösterilmiştir. Şekilde gösterilen değerlere bakıldığında etkin plastik gerinim değerlerinin ortalamasının gövde için 0,963, anahtar kafası için 0,697 olduğu görülmektedir. Aynı zamanda şekildeki grafiklerden de görüleceği gibi ortalama sertlik değerleri gövde için 202,41 HV anahtar kafası için 184,415 HV olarak ölçülmüştür. Etkin plastik gerinim değerlerinde gövde bölgesi için ölçüm alınan kesit boyunca anahtar kafasına doğru oluşan akış yönüne bağlı olarak artan orta bölgelerde azalan ve sonra tekrar artan değerler gözlemlenmiştir. Bunun sebebi malzeme akışının çift yönlü olarak anahtar kafasına doğru gerçekleşmesi ve yüksek oranda şekil değişiminin gözlemlenmesidir. Aynı dağılım sertlik değerlerinde de görülmektedir. Anahtar kafası ölçüm alınan kesit boyunca incelendiğinde uç bölgeden orta bölgelere gelindiğinde etkin plastik gerinim değerlerinde düşüş gözlemlenmiştir. Parça akışının uç bölgelere doğru olması ve en fazla şekil değişiminin uç bölgede gerçekleşmesi sebebiyle etkin plastik gerinim değeri uç bölgede daha yüksek değerlere ulaşmakta ve orta bölgelere gidildikçe düşmektedir.

ETKİN PLASTİK GERİNİM

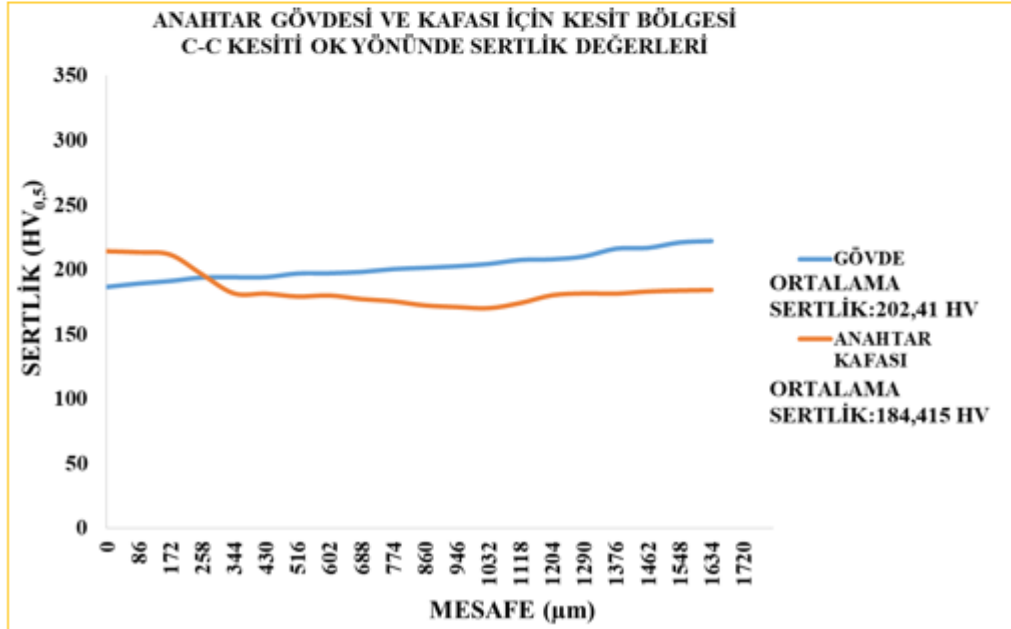


ANAHTAR GÖVDESİ
SOLDAN SAĞA
ETKİN PLASTİK
GERİNİM DEĞERLERİ

1	1,53	11	0,631
2	1,442	12	0,644
3	1,256	13	0,663
4	1,036	14	0,716
5	0,898	15	0,768
6	0,809	16	0,848
7	0,741	17	0,957
8	0,686	18	1,322
9	0,655	19	1,503
10	0,634	20	1,536
ORT	0,963		

ANAHTAR KAFASI
SOLDAN SAĞA
ETKİN PLASTİK
GERİNİM DEĞERLERİ

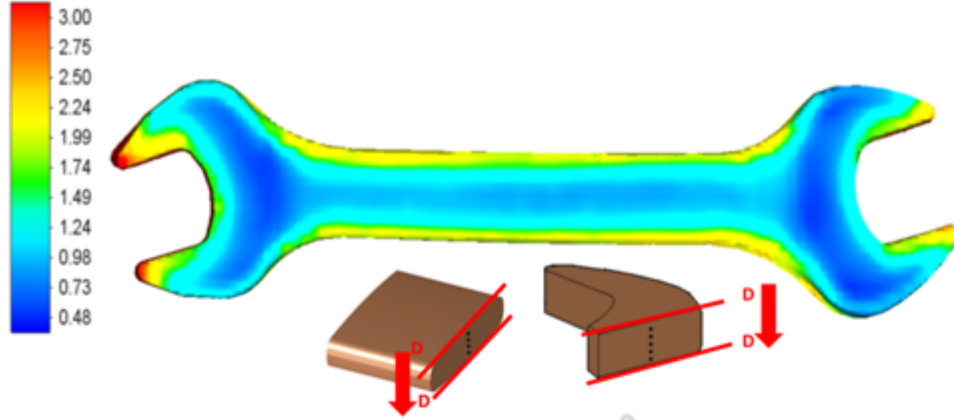
1	1,064	11	0,493
2	0,894	12	0,508
3	0,753	13	0,579
4	0,68	14	0,587
5	0,612	15	0,672
6	0,573	16	0,7
7	0,556	17	0,702
8	0,538	18	0,706
9	0,516	19	1,142
10	0,503	20	1,164
ORT	0,697		



Şekil 4.19.Soğuma ve Çapak Alma İşlemleri Sonrası C-C Kesiti Boyunca Anahtar Gövdesi ve Kafası için Kesit Bölgesinde Oluşan Etkin Plastik Gerinim Değerleri ile Sertlik Değerleri İlişkisi

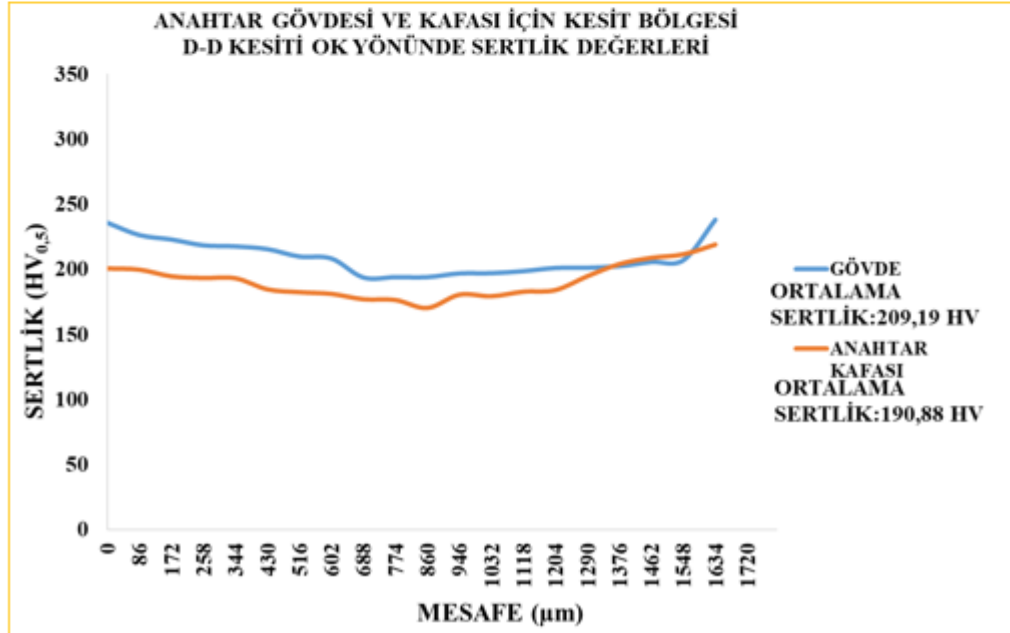
Şekil 4.20’de soğuma ve çapak alma işlemleri sonrası anahtar gövde ve kafa bölgesinin gösterilen kesit boyunca etkin plastik gerinim değerleri ile sertlik değerleri ilişkisi gösterilmiştir. Şekilde gösterilen değerlere bakıldığında etkin plastik gerinim değerlerinin ortalamasının gövde için 0,919, anahtar kafası için 0,613 olduğu görülmektedir. Aynı zamanda şekildeki grafiklerden de görüleceği gibi ortalama sertlik değerleri gövde için 209,19 HV anahtar kafası için 190,88 HV olarak ölçülmüştür. Etkin plastik gerinim değerlerinde gövde bölgesi için ölçüm alınan kesit boyunca anahtar kafasına doğru oluşan akış yönüne bağlı olarak artan orta bölgelerde azalan ve sonra tekrar artan değerler gözlemlenmiştir. Bunun sebebi malzeme akışının çift yönlü olarak anahtar kafasına doğru gerçekleşmesi ve yüksek oranda şekil değişiminin gözlemlenmesidir. Aynı dağılım sertlik değerlerinde de görülmektedir. Anahtar kafası ölçüm alınan kesit boyunca incelendiğinde uç bölgeden orta bölgelere gelindiğinde etkin plastik gerinim değerlerinde düşüş gözlemlenmiştir. Parça akışının uç bölgelere doğru olması ve en fazla şekil değişiminin uç bölgede gerçekleşmesi sebebiyle etkin plastik gerinim değeri uç bölgede daha yüksek değerlere ulaşmakta ve orta bölgelere gidildikçe düşmektedir.

ETKİN PLASTİK GERİNİM



ANAHTAR GÖVDESİ YUKARIDAN AŞAĞIYA ETKİN PLASTİK GERİNİM DEĞERLERİ			
1	0,776	11	0,959
2	0,779	12	0,994
3	0,783	13	1,013
4	0,785	14	1,020
5	0,786	15	1,028
6	0,787	16	1,036
7	0,809	17	1,044
8	0,843	18	1,054
9	0,874	19	1,056
10	0,912	20	1,056
ORT	0,919		

ANAHTAR KAFASI YUKARIDAN AŞAĞIYA ETKİN PLASTİK GERİNİM DEĞERLERİ			
1	0,584	11	0,612
2	0,593	12	0,613
3	0,594	13	0,618
4	0,596	14	0,622
5	0,597	15	0,625
6	0,600	16	0,627
7	0,602	17	0,63
8	0,603	18	0,632
9	0,609	19	0,633
10	0,584	20	0,635
ORT	0,613		



Şekil 4.20. Soğuma ve Çapak Alma İşlemleri Sonrası D-D Kesiti Boyunca Anahtar Gövdesi ve Kafası için Kesit Bölgesinde Oluşan Etkin Plastik Gerinim Değerleri ile Sertlik Değerleri İlişkisi

Ürünün anahtar kafası ile gövdesinin kesit ve yüzey bölgelerinden alınan numunelere yapılan mikroyapı incelemelerine bakıldığında mikroyapıların sertlik değerleri ile örtüştüğü görülmektedir. Anahtar kafası ve gövde yüzey bölgelerinin ortalama sertlik değerlerinin kesit bölgesine göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Yüzeyde daha yüksek sertlik değerlerinin görülmesi soğuma hızına bağlıdır. Sertlik ölçümleri kasa içerisinde durgun havada soğumuş ürünlerden hazırlanan numuneler ile gerçekleştirilmiştir. Soğuma başlangıcı yüzeyden çekirdeğe doğru ilerlemiş ve yüzey bölgesinde sertlik değeri daha yüksek ölçülmüştür. Çekirdeğe yani kesite gidildikçe sertlik değerinde az da olsa bir düşüş olmuştur. Sertlik ve efektif plastik gerinim değerlerine ait özet değerler Tablo 4.5'te gösterilmiştir. Anahtar gövdesinin yüzey ve kesit bölgelerinde soğuma hızının anahtar kafasınıninkine oranla daha fazla olması sebebiyle daha yüksek sertlik değerleri görülmektedir. Hall-Petch teorisine göre ortalama tane boyutu küçüldükçe mukavemet ve sertlik artar [45]. Aynı zamanda içinde yer alan karbür yapıcı alaşım elementleri Cr ve V'un varlığı MC çökeltilerinin oluşumunu sağlayarak dislokasyon hareketine engel oluşturmaktadır [46].

Benzer çalışmalara bakıldığında Ma ve ark. yaptıkları çalışmada ağır bir konteyner başlığının çok aşamalı dövme işlemi sonrası oluşan deformasyona bağlı mikroyapı gelişimini teorik model ve FEM ile birleştirmiş ve deneysel sonuçlar ile kıyaslamışlardır. Sonuçları sıcaklık, akış stresi, etkin plastik gerinim, hasar ve tane boyutundaki değişim açısından değerlendirdiklerinde benzer verileri elde etmişlerdir. Etkin plastik gerinimdeki değişimin tane boyutu ile ters orantılı olduğunu tane boyutu küçüldükçe etkin plastik gerinim değerinin arttığı sonucuna ulaşmışlardır. Ayrıca malzemenin havada soğuması sırasında tane boyutunda az da olsa büyüme gözlemlenmiştir [30].

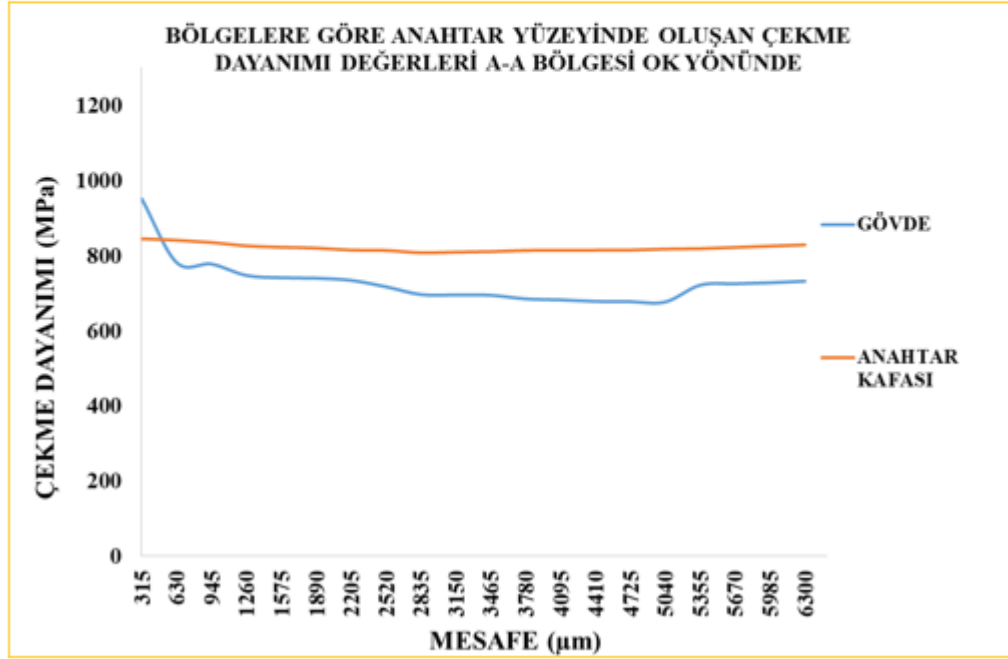
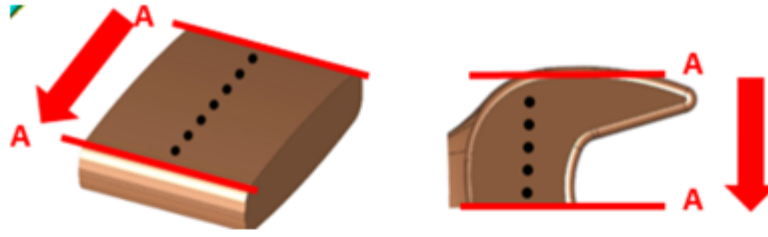
Bir diğer benzer çalışmada ise Wang ve ark. yeniden kristalleştirme modelleri ile, sıcak dövme işlemi sırasında otomotiv ön aks kirişindeki mikro yapı gelişimini tahmin etmek için bir 3D termo-mekanik kuplaj sonlu eleman modeli kurmuştur. Dövme işleminin her adımı sırasında, iş parçası üzerinde şekil değişiminin yüksek olduğu bölgelerde etkin plastik gerinim değerlerinin daha yüksek olduğu ve ortalama tane boyutunun küçülerek 150 μm iken, şekillendirildikten sonra dinamik yeniden kristalleşme nedeniyle neredeyse 45 μm 'ye düştüğü görülmüştür. Aynı zamanda sıcak dövme işleminde parça akışı sebebiyle iş parçasının başlangıç dövme sıcaklığının üstünde bir sıcaklığa ulaştığı gözlemlenmiştir [47].

Tablo 4.3.Anahtar bölgelerine göre efektif plastik gerinim ve sertlik değerleri özet tablosu

Bölge Adı	Etkin Plastik Gerinim Değeri	Sertlik Değeri (HV)
Gövde Yüzey A-A Bölgesi Ok Yönünde	1,432	255,34
Anahtar Kafa Yüzey A-A Bölgesi Ok Yönünde	1,00	246,57
Gövde Yüzey B-B Bölgesi Ok Yönünde	1,138	242,83
Anahtar Kafa Yüzey B-B Bölgesi Ok Yönünde	0,729	227,91
Gövde Kesit C-C Kesiti Ok Yönünde	0,963	202,41
Anahtar Kafa Kesit C-C Kesiti Ok Yönünde	0,697	184,41
Gövde Kesit D-D Kesiti Ok Yönünde	0,919	209,19
Anahtar Kafa Kesit D-D Kesiti Ok Yönünde	0,613	190,88

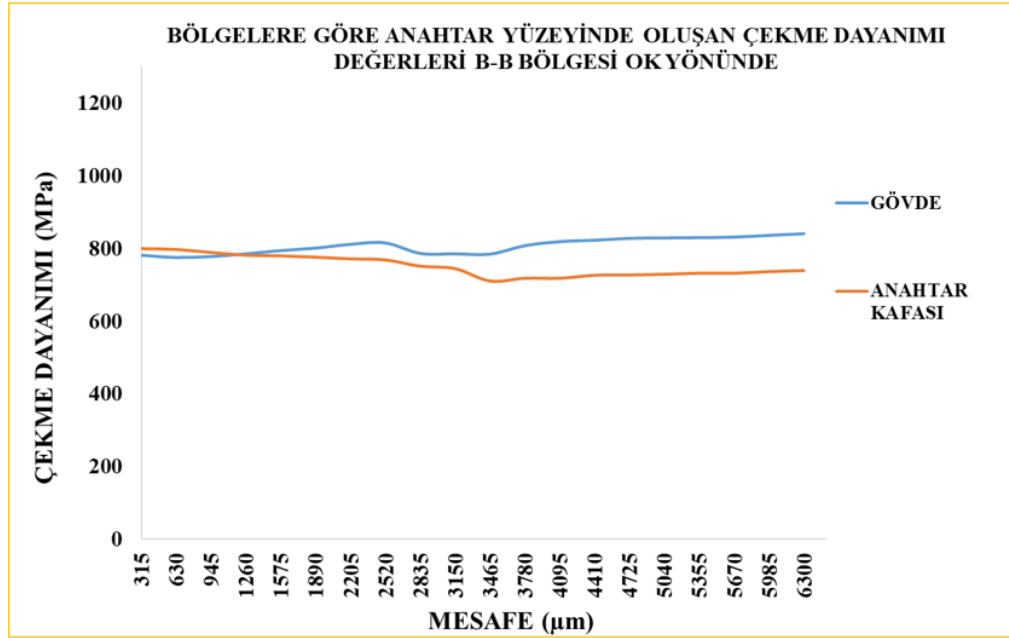
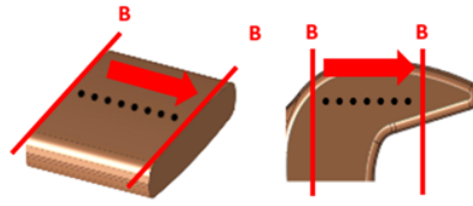
Çekme dayanımı ve sertlik metallerin plastik deformasyona karşı oluşturduğu direncin göstergesidir. Bu nedenle aralarında doğrusal bir ilişki bulunur. Pavlina ve ark. çalışmalarında ve Eşitlik (3.5)'te [39] verilen bağıntıyı kullanarak 129-592 HV sertlik aralığındaki çeliklerin çekme çeliklerin çekme dayanımlarını hesaplamışlardır. Anahtar kafa ve gövde kısımlarının yüzey ve kesit bölgelerinin çekme dayanım değerleri bu bağıntıya göre hesaplanarak, çekme dayanımı-sertlik grafikleri oluşturulmuştur. Şekil 4.21'de A-A bölgesinde ok yönünde gövde-anahtar kafası yüzey bölgesinde oluşan çekme dayanımı değerleri grafiği gösterilmiştir.





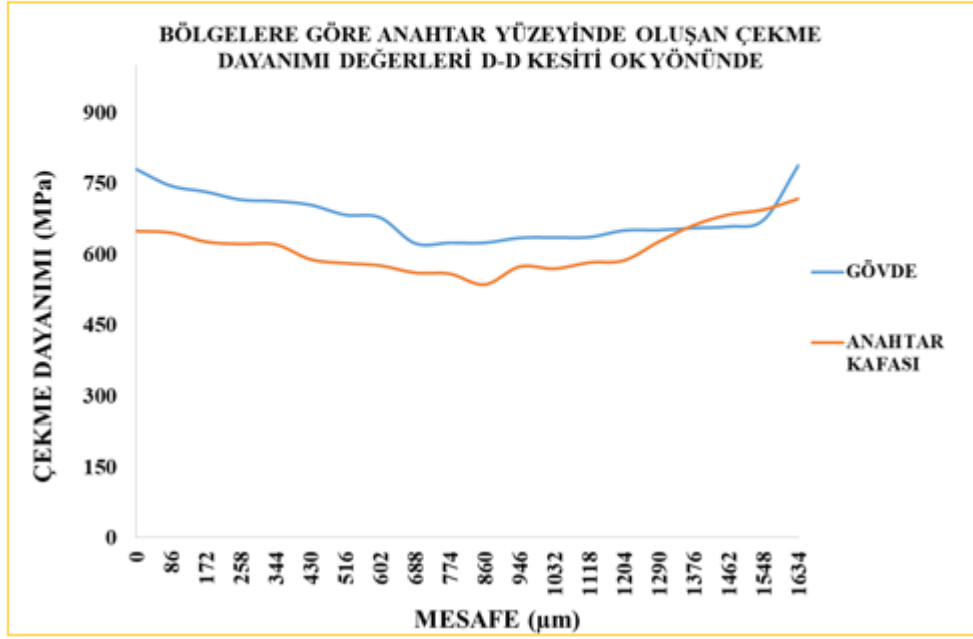
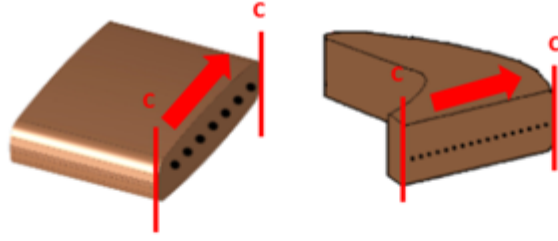
Şekil 4.21.A-A Kesitinde Ok Yönünde Gövde-Anahtar Kafası Yüzey Bölgesinde Oluşan Çekme Dayanımı Değerleri Grafiği

Şekil 4.22’de B-B bölgesinde ok yönünde gövde-anahtar kafası yüzey bölgesinde oluşan çekme dayanımı değerleri grafiği grafiği gösterilmiştir.



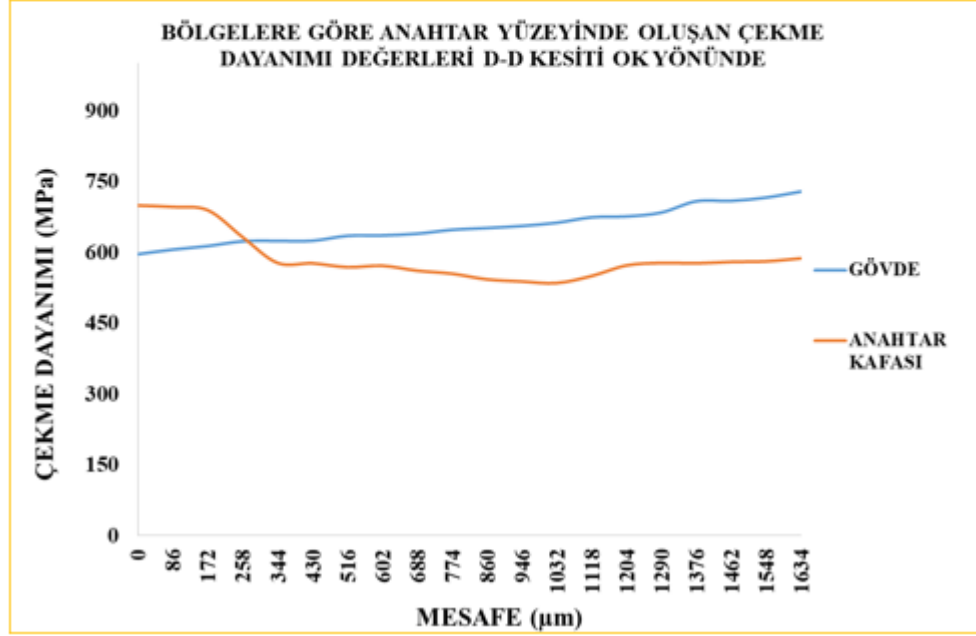
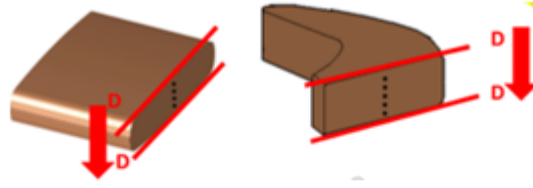
Şekil 4.22.B-B Kesitinde Ok Yönünde Gövde-Anahtar Kafası Yüzey Bölgesinde Oluşan Çekme Dayanımı Değerleri Grafiği

Şekil 4.23'te C-C kesitinde ok yönünde gövde-anahtar kafası kesit bölgesinde oluşan çekme dayanımı değerleri grafiği gösterilmiştir.



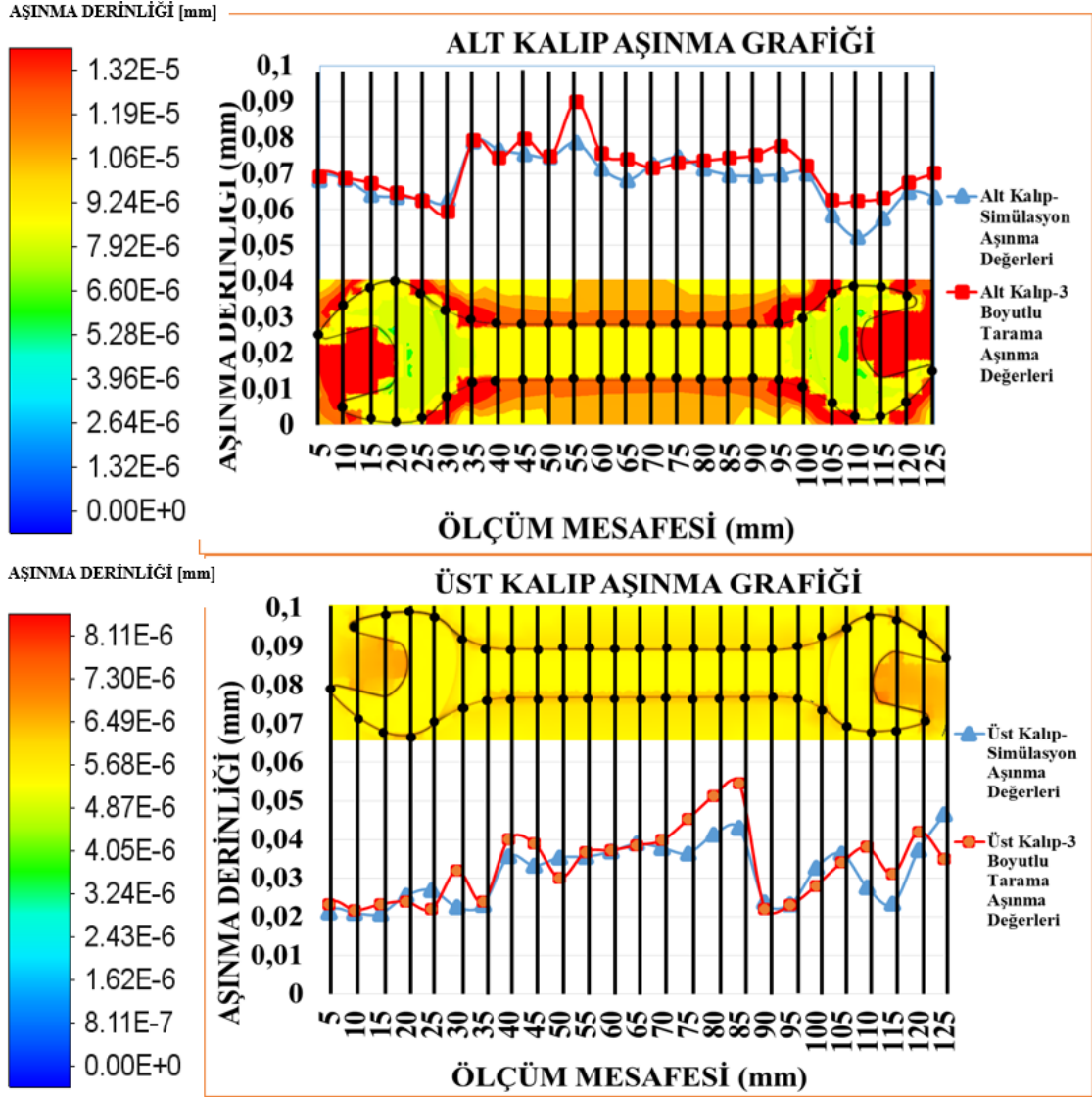
Şekil 4.23.C-C Kesitinde Ok Yönünde Gövde-Anahtar Kafası Kesit Bölgesinde Oluşan Çekme Dayanımı Değerleri Grafiği

Şekil 4.24'te D-D kesitinde ok yönünde gövde-anahtar kafası kesit bölgesinde oluşan çekme dayanımı değerleri grafiği gösterilmiştir.



Şekil 4.24.D-D Kesitinde Ok Yönünde Gövde-Anahtar Kafası Kesit Bölgesinde Oluşan Çekme Dayanımı Değerleri Grafiği

Şekil 4.25'te 10000 şablon dövülmesi sonrası alt ve üst kalıp için elde edilen aşınma değerlerine ait grafikler gösterilmiştir. Grafiklerde simülasyon sonucu elde edilen aşınma derinlikleri ile 3D tarama cihazı ile ölçülen kalıp üzerinden elde edilen aşınma derinlikleri gösterilmiştir.



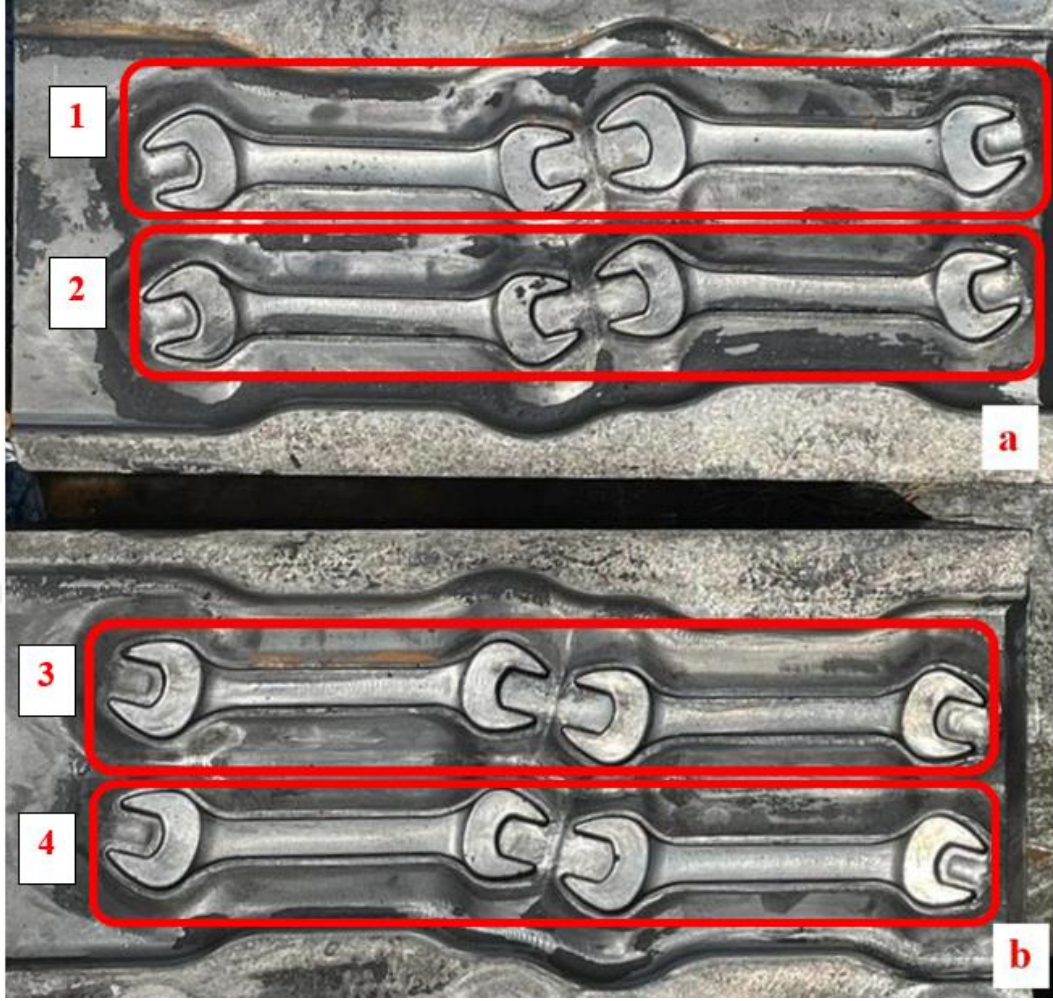
Şekil 4.25.10000 Adet Şablon Sonrası Alt ve Üst Kalıp Aşınma Grafikleri

Tablo 4.6 ‘da alt ve üst kalıptan alınan ortalama aşınma derinlikleri verilmiştir. Aşınma derinlikleri alt ve üst kalıp için Simufact Forming yazılımından elde edilen değerler ve 3D tarama cihazından elde edilen değerler ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar değerlendirildiğinde alt kalıpta ölçülen aşınma derinliğinin üst kalıba oranla daha fazla olduğu görülmüştür. Tarama ve simülasyon verileri arasındaki sapma farkları yüzdesel olarak değerlendirildiğinde bu değer alt kalıp için %4,40, üst kalıp için %1,26 olarak tespit edilmiştir.

Tablo 4.4. Simülasyon ve deneysel aşınma derinlikleri

Kalıp Adı	Ortalama Simülasyon Aşınma Derinliği (mm)	Ortalama Deneysel Aşınma Derinliği (mm)	Sapma (%)
Alt Kalıp	0,0681	0,0711	4,40
Üst Kalıp	0,0317	0,0321	1,26

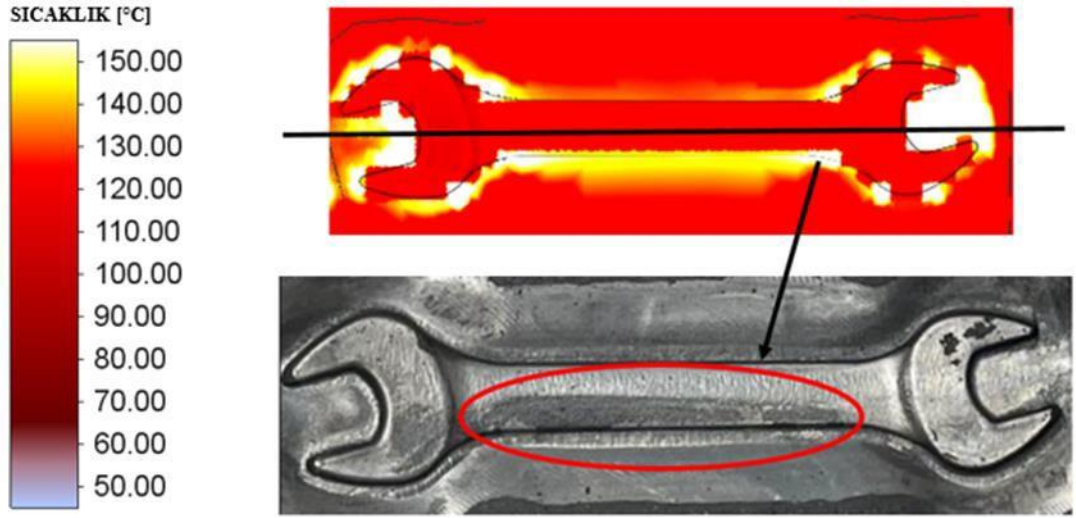
Şekil 4.26’da Sıcak dövme prosesi sonrası a) alt ve b) üst kalıp görselleri verilmiştir. Kalıp görselleri incelendiğinde alt ve üst kalıpta meydana gelen aşınma net bir şekilde görülmektedir.



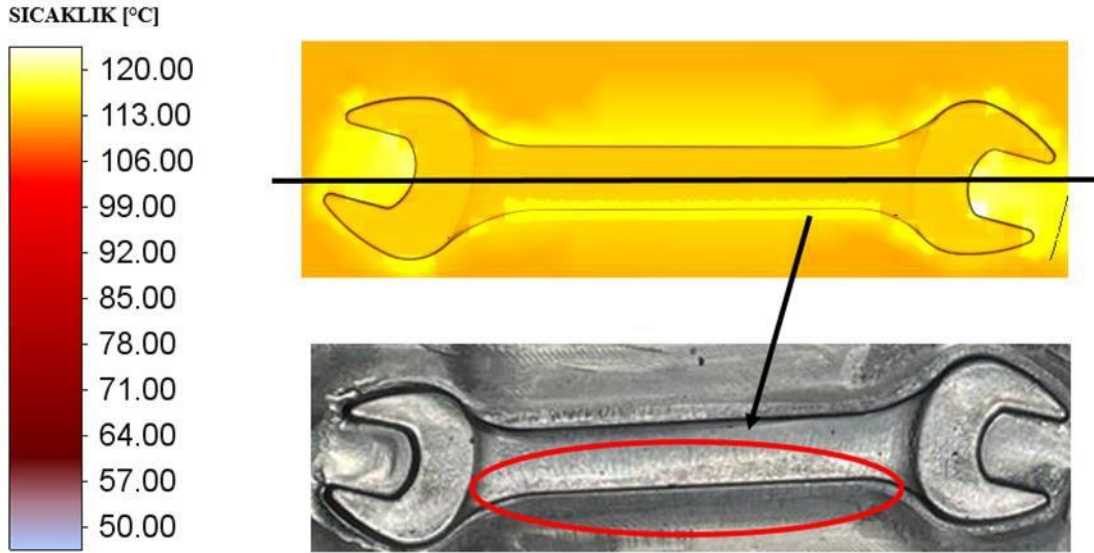
Şekil 4.26. Sıcak Dövme İşlemi Sonrası **a1)** Alt Kalıp Kullanılmamış Göz **a2)** Alt Kalıp Kullanılmış Göz **b3)** Üst Kalıp Kullanılmış Göz **b4)** Üst Kalıp Kullanılmamış Göz

Şekil 4.27’de alt kalıp için Şekil 4.28’de ise üst kalıp için simülasyon sonucu kalıplarda meydana gelen sıcaklık değişimleri ile gerçek proses sonrası sıcak dövme kalıbında meydana gelen yüzey değişiklikleri gösterilmiştir. İncelemeler kalıp yüzeylerinde meydana gelen aşınmalar için yapılmıştır. Görsellerden ve sıcaklık değişimi sonuçlarından da anlaşılacağı üzere simülasyon sonucu sıcaklık artışının fazla olduğu bölgelerde kalıbın radyuslu olan bölgelerinde daha fazla aşınma olduğu görülmüştür. Teorik kalıp aşınması FEM tarafından ve aşınma modelleri uygulanarak tahmin edilmiştir. Daha sonra teorik olarak tahmin edilen profil, aşınan deneysel kalıp profili ile karşılaştırılmıştır.

Simülasyonla tespit edilen yüksek sıcaklığın aşınma direncini zayıflattığı aşınma analizi ile de raporlanmıştır. Bu çalışma için olduğu gibi, mevcut araştırma çalışmalarının çoğu sonlu elemanlar analizini dövme tasarımı için bir araç olarak kullanır. Grass ve diğerlerinin yaptığı gibi bazı araştırma çalışmalarına göre burada bir biyel kolunun termo-mekanik üretim süreci, birkaç haddeleme ve dövme aşamasından oluşan FEM analizleri gerçekleştirilmiştir. Söz konusu çalışmada FEM simülasyonlarının kesinliğinin deneysel testlere göre oldukça yüksek olduğu tutarlı deneysel-nümerik sonuçlar ile görülmüştür. Ayrıca simülasyon boyunca birçok noktayı takip ederek malzeme akışını incelemenin mümkün olduğu görülmüştür [48]. Grass ve diğerleri tarafından yapılan başka bir FEM çalışmada, bu yazarlar, tanımlanan yeniden kristalleşme modellerinin yardımıyla, sadece malzemede ortaya çıkan gerinim üzerindeki sıcaklığın etkisini değil, aynı zamanda sıcaklıkta şekillendirme işlemi sırasında tane boyutu tahminini de incelemişlerdir [49]. Sonuçlar, deneysel olarak elde edilenlerle karşılaştırıldığında bu tez çalışmasındaki gibi çok benzerdir.

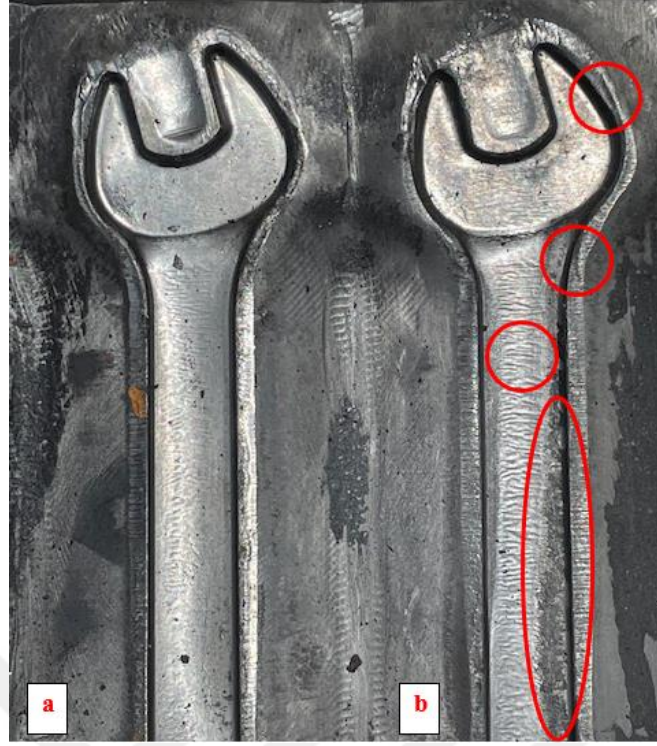


Şekil 4.27.Alt Kalıp İçin Simülasyon Sonucu Oluşan Sıcaklık Verileri ile Gerçek Proses Sonrası Aşınma Yüzeylerinin Karşılaştırılması



Şekil 4.28.Üst Kalıp İçin Simülasyon Sonucu Oluşan Sıcaklık Verileri ile Gerçek Proses Sonrası Aşınma Yüzeylerinin Karşılaştırılması

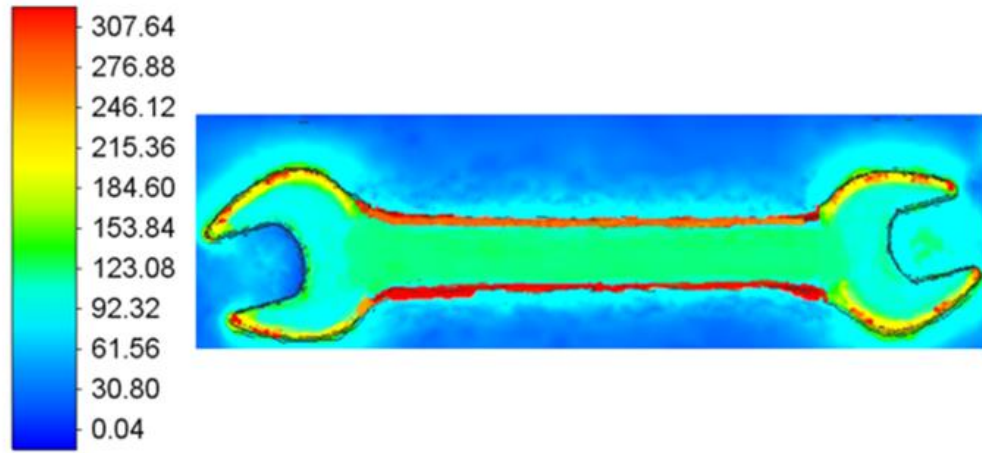
Şekil 4.29’da sıcak dövme işlemi sonrası kalıplarda oluşan hasar bölgeleri gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde çapak bölgesinde plastik deformasyon olduğu görülmüştür. Genel olarak kalıp gravürünün düz bölgelerinde aşınma olduğu görülmüştür. Bahsedilen aşınma malzeme akışının çapak bölgelerine doğru olmasından dolayı olukların oluşmasına yol açmıştır [50]. Bir diğer hasar türü olan ısıl yorulma çizgileri ise yüksek sıcaklık değişimleri ve tekrarlanan mekanik yükler ile ilişkilendirilmektedir. İş parçası ile kalıbın en uzun temas sağladığı noktalarda ısıl yorulmalar görülebilir [2]. Simülasyon sonucu elden edilen verilerde de görüldüğü gibi ısıl yorulma bölgeleri kalıbın en yüksek sıcaklık görülen bölgesinde oluşmuştur.



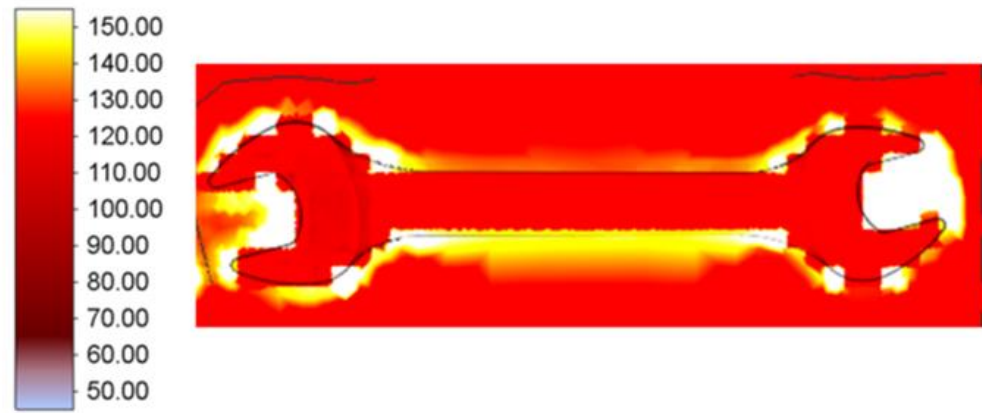
Şekil 4.29.Sıcak Dövme İşlemi Sonrası Kalıp **a)**Henüz Kullanılmamış Dişi Kalıp **b)**10000 Vuruş Sonrası Dişi Kalıpta Oluşan Aşınmalar

Şekil 4.30’da simülasyon ile yapılan kalıp analizi sonucu 1.2714 sıcak iş takım çeliğinden üretilen dövme alt kalıbında meydana gelen eşdeğer gerilme değerleri ve bu bölgelerdeki sıcaklık değişimleri gösterilmiştir. Sonuçlara bakıldığında kalıpta meydana gelen en yüksek eşdeğer gerilmenin iş parçasında en fazla şekil değişimi görülen gövde bölgesinde olduğu görülmüştür. Simülasyon sonuçlarından alına ölçümlere göre bu değer ortalama 292,6 MPa olarak bulunmuştur. Simülasyon sonucu elde edilen bu değer 1.2714 çeliğinin literatürde benzer araştırmalarda yer alan akma dayanımının altında kaldığı için kalıpta herhangi bir kırılma gerçekleşmeyecektir. Elde edilen bu değerler aynı zamanda yüksek gerilmelerin olduğu gövde bölgesinde sıcaklık artışının diğer bölgelere göre daha fazla olduğu görülmüştür. Daha önce Şekil 4.25’te gösterilen aşınma değerleri de bu sonuçları doğrular niteliktedir. İş parçasında oluşan şekil değişimine bağlı olarak yüksek sıcaklıkta akan malzemenin oluşturduğu sürtünme kuvveti dövme kalıbında sıcaklık artışı ve aşınmaya sebep olur. Böylelikle iş parçasında yüksek şekil değişiminin görüldüğü bölgeler sayesinde kalıp üzerinde oluşan gerilmeler ve aşınmalar hakkında belirli çıkarımlarda bulunulabilir.

EŞDEĞER GERİLME (MPa)



SICAKLIK [°C]



Şekil 4.30.Sıcak Dövme Simülasyonu Sonucu 1.2714 Malzeme Alt Kalıpta Oluşan Eşdeğer Gerilme ve Sıcaklık Değerleri

4.5.Farklı Proses Parametreleri ile Yapılan Simülasyon Çalışmalarının Tartışılması

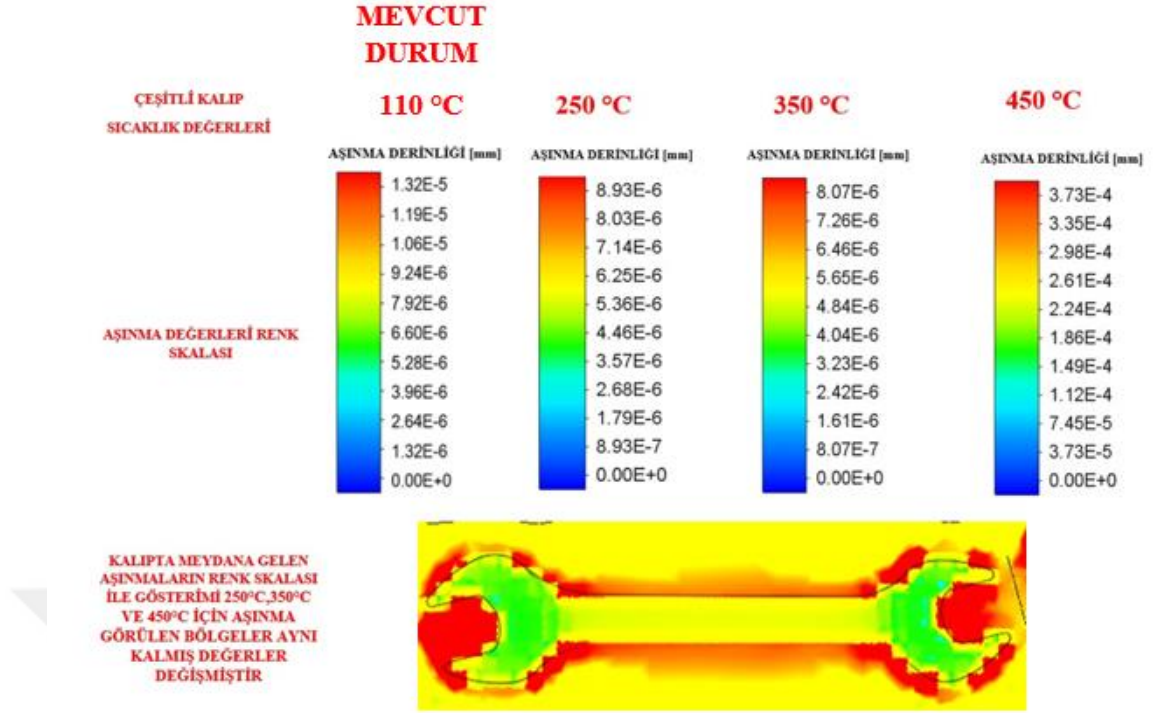
Çalışma kapsamında sıcak dövme simülasyonu Simufact Forming programı kullanılarak gerçek prosese uygun bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçların doğruluğu sıcak dövme yöntemi ile üretilen 16x17 mm İki Ağız Anahtar Kısa Boy ürünü üzerinde yapılan metalografik incelemeler ve sertlik ölçümleri ile doğrulanmıştır. Dahası aşınma analizi ile aşınma üzerine incelemeler yapılmış, deneysel ve nümerik sonuçların oldukça uyumlu olduğu raporlanmıştır. Simülasyon sonuçlarının doğrulanması sonrası sıcak dövme prosesi üzerinde Tablo 3.5'te verilen değişken parametreler ile Simufact forming programı kullanılarak çeşitli analizler yapılmıştır. Dövme koşullarının iyileştirilmesi hedeflenmiştir.

- İş parçası başlangıç sıcaklığı değiştirilmiş ve malzemenin kalıbı doldurma performansını tayin edebilmek için farklı sıcaklık değeri ile simülasyonlar yapılmıştır. İş parçası başlangıç sıcaklığı için 900 °C, 1100 °C ve 1300 °C değerleri ile analizler yapılmıştır. Elde edilen veriler sonucu en verimli şekillenmenin olduğu sıcaklığın 1200 ve 1300 °C olduğu görülmüştür. İş parçası sıcaklığı arttıkça gerinim ve gerilme değerleri azalarak şekillendirme kabiliyeti artmaktadır. 900 °C, 1100 °C ve 1300 °C sıcaklıklarda iş parçasının formu Şekil 4.31’de gösterilmiştir.



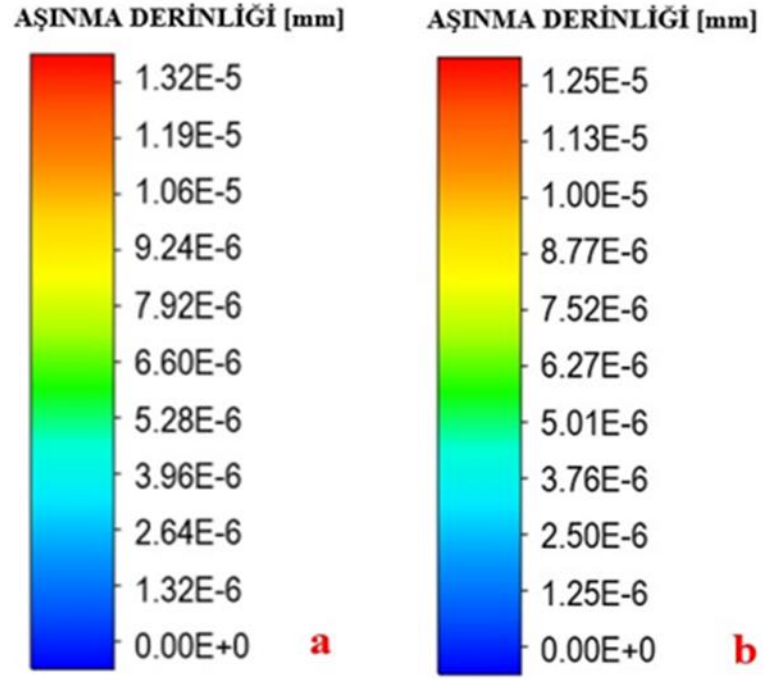
Şekil 4.31. Farklı Şekillendirme Sıcaklıklarında Oluşan Ürünler

- Kalıp başlangıç sıcaklıkları değiştirilerek çeşitli simülasyon çalışmaları yapılmıştır. 250 °C, 350 °C ve 450 °C sıcaklıklarda simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.32’de çeşitli sıcaklıklarda alt dövme kalıbında oluşan aşınma derinlikleri renk skalası ile gösterilmiştir. Şekilde verilen renk skalasında maksimum aşınma miktarları görülmektedir. Aşınmanın kalıp üzerinde dağılımı üç sıcaklık değeri içinde aynıdır, bu sebeple tek görsel kullanılmıştır. Şekilde de görüldüğü gibi aşınma derinliklerinin yoğun olduğu bölgelerin aynı olduğu yalnızca değerlerin değiştiği gözlemlenmiştir. Simülasyon sonuçlarına bakıldığında gerçek proses sıcaklığının 110 °C’den 250 °’ye çıkarılması ile kalıpta meydana gelen aşınma derinliğinin %32,4 oranında azaldığı görülmüştür. Kalıp sıcaklığının 250°C’den 350 °C’ye çıkartılması aşınma derinliğinde daha az oranda iyileştirme sağlamaktadır ve ısı artışı için harcanacak enerji sebebiyle göz ardı edilebilir durumdadır. Fakat kalıp sıcaklığı 350 °C’den 450 °C’ye çıkarıldığında ise aşınma derinliğinin 45 kat arttığı gözlemlenmiştir. Kalıpta meydana gelen termal yükler sebebiyle yüzey tabakasının yumuşadığı böylece sertlik değerinin 48 HRC’den yaklaşık 37 HRC değerlerine kadar düşebildiği Eşitlik (3.4) kullanılarak hesaplanmıştır. Aynı zamanda sıcak dövme işlemi sonrası ölü kalıp sertliği portatif sertlik ölçüm cihazı ile ölçülmüş ve sertlik ortalama 39 HRC olarak bulunmuştur. Aşınma değerleri yalnızca alt kalıp için dikkate alınmıştır. Kalıpta yüksek sıcaklık ve düşük plastik gerinim kalıp aşınma direncini düşürür.

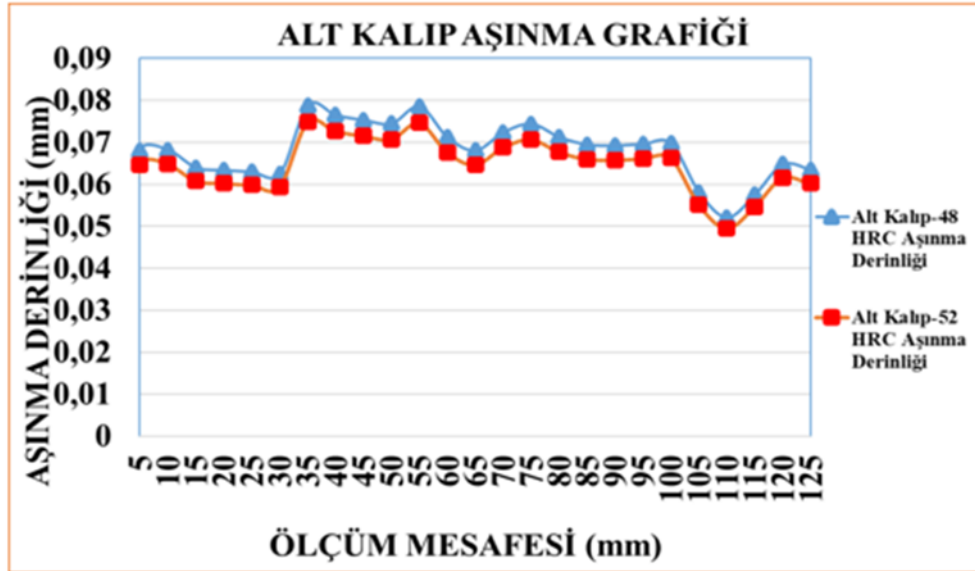


Şekil 4.32.Çeşitli Kalıp Sıcaklıklarına Göre Aşınma Derinliği Değerleri

- Aşınma için simülasyon sonuçları ve deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında tutarlı sonuçlar elde edildiği açıkça görülmüştür. 1.2714 malzeme kalıpta meydana gelecek aşınma değerlerinin değişimini incelemek için ısıl işlem ile sertlik artışı sağlanarak 48 HRC'den 52 HRC'ye değiştirilmiş ve analiz sonuçları Şekil 4.33'te verilmiştir. Şekil 4.34'te alt kalıpta oluşan aşınma derinliği ortalamasının grafiği gösterilmiştir, 48 HRC kalıp sertliğinde yapılan simülasyon sonucuna göre aradaki %5,6 olup fark oldukça küçüktür. Üst kalıpta meydana gelen aşınma derinliği kalıp bozulmasında etkili rol oynamaması sebebiyle dikkate alınmamıştır.



Şekil 4.33.Simülasyon Sonucu 1.2714 Malzeme Kalıpta Oluşan Aşınma Derinlikleri a)48 HRC b)52 HRC



Şekil 4.34.Simülasyon Sonucu 1.2714 Malzeme Kalıpta 48-52 HRC Sertliklerde Aşınma Derinliği Grafiği

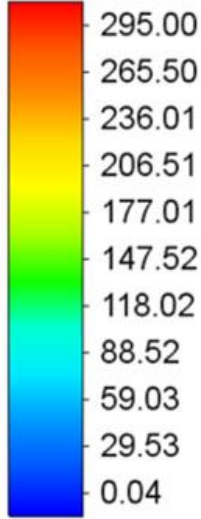
- Dövmeye kalıplarında kullanılan sıcak iş takım çeliği kompozisyonu değiştirilerek 52 HRC sertlikteki 1.2343 sıcak iş takım çeliği kullanılarak standart proseste kullanılan 48 HRC sertliğindeki 1.2714 sıcak iş takım çeliği ile eşdeğer gerilme ve kalıp aşınması açısından kıyaslanmıştır. Her iki çeliğin kimyasal kompozisyonu İzeltaş'ta spektral analiz ile tayin edilmiş ve Tablo 4.7'de gösterilmiştir. Şekil 4.35'te alternatif sıcak iş takım çeliği 1.2343 ile standart proseste kullanılan 1.2714 sıcak iş takım çeliğinin simülasyon sonucu alt kalıpta oluşan eşdeğer gerilme değerleri gösterilmiştir. Elde edilen simülasyon sonuçlarına göre 1.2343 malzeme alt kalıpta meydana gelen ortalama eşdeğer gerilme 270,86 MPa, 1.2714'te ise 292,6 MPa olarak bulunmuştur. Kalıplarda oluşan gerilme bölgeleri malzeme değişimine rağmen aynı kalmış olup yalnızca eşdeğer gerilme değerinde %7,42'lik bir fark söz konusudur.

Tablo 4.5.1.2714 ve 1.2343 Sıcak iş takım çelikleri kimyasal kompozisyonu

Çelik Türü	C %	Si %	Mn %	Cr %	Mo %	Ni %	V %	P_{max} %	S_{max} %
1.2714	0.50-0.60	0.10-0.40	0.60-0.90	0.80-1.2	0.35-0.55	1.50-1.80	0.05-0.15	0,030	0,030
1.2343	0.33-0.41	0.80-1.2	0.25-0.50	4.8-5.5	1.10-1.50	0,235	0.30-0.50	0,030	0,024

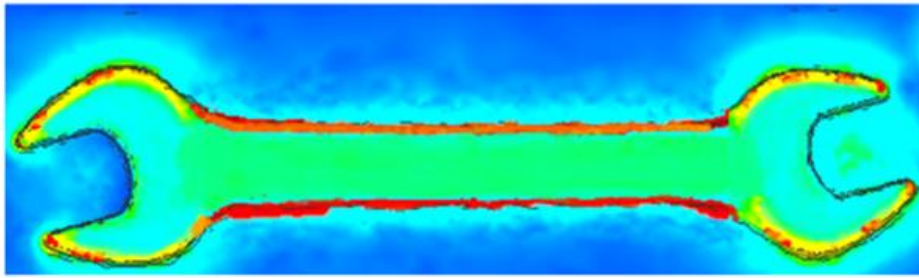
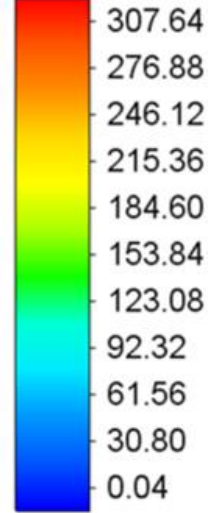
**DIN 1.2343 SICAK İŞ
TAKIM ÇELİĞİ**

EŞDEĞER GERİLME (MPa)



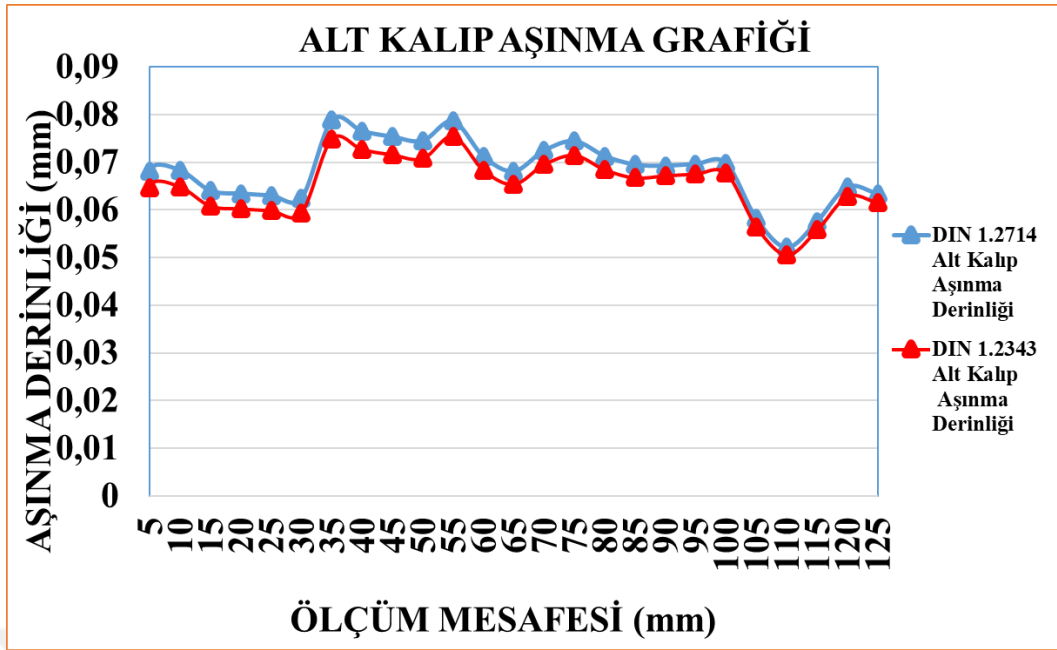
**DIN 1.2714 SICAK İŞ
TAKIM ÇELİĞİ**

EŞDEĞER GERİLME (MPa)



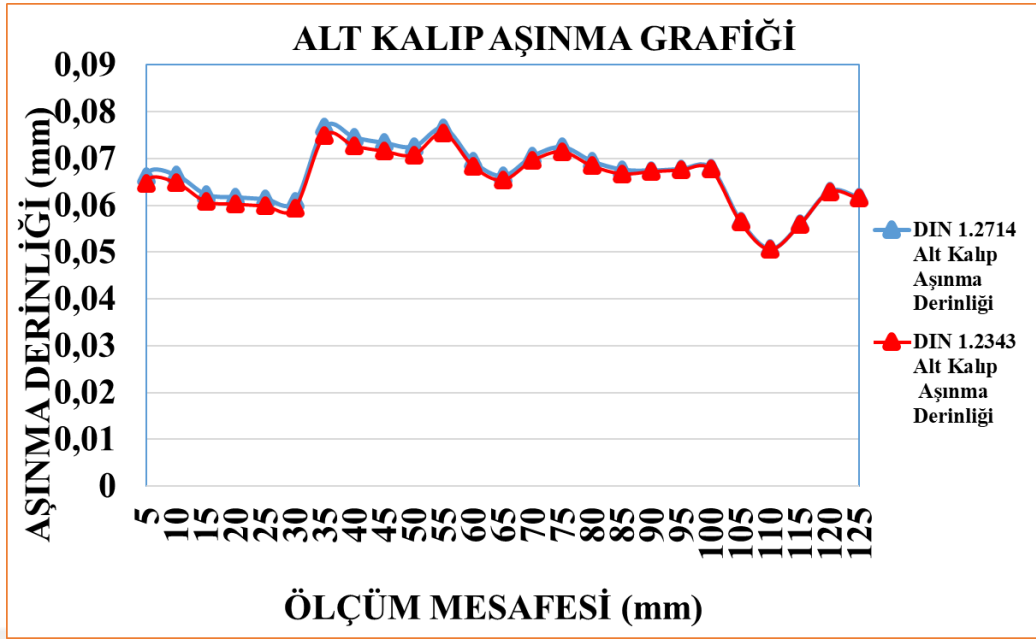
Şekil 4.35.Sıcak Dövme Simülasyonu Sonucu 1.2343 ve 1.2714 Malzeme Alt Kalıpta Oluşan Eşdeğer Gerilme Değerleri Karşılaştırması

Şekil 4.36’da alternatif 52 HRC sertlikteki sıcak iş takım çeliği 1.2343 ile standart proseste kullanılan 48 HRC sertlikteki 1.2714 sıcak iş takım çeliğinin simülasyon sonucu alt kalıpta oluşan aşınma değerleri gösterilmiştir. 1.2343 sıcak iş takım çeliğinde oluşan ortalama aşınma derinliği 0,0628 mm iken 1.2714 sıcak iş takım çeliğinde ortalama 0,0655 mm’dir. Aşınma derinliğinde %4,29 azalma görülmüştür. Çelik sertlikleri ideal çalışma koşullarına göre seçilmiştir.



Şekil 4.36.Sıcak Dövme Simülasyonu Sonucu 1.2343 ve 1.2714 Malzeme Alt Kalıpta Oluşan Aşınma Derinlikleri

- 1.2714 sıcak iş takım çeliğinin sertliği 400 °C’de ilk ön ısıtma 650 °C’de ikinci ön ısıtma işleminin ardından 850 °C’de setleştirilip hava sonrası yağda soğutma işlemi uygulanır ve 300 °C’de menevişlenerek 52 HRC’ye artırılmış ve 1.2343 sıcak iş takım çeliği ile alt kalıpta oluşan aşınma derinlikleri kıyaslanmıştır. Simülasyon sonuçları Şekil 4.37’de gösterilmiştir. Sonuçlara bakıldığında 1.2714 sıcak iş takım çeliğinde %2,74 oranında iyileşme görüldüğü ve 1.2343 sıcak iş takım çeliğine yaklaştığı gözlemlenmiştir. Aynı zamanda şirket bünyesinde deneysel çalışma yürütülmüş olup, totalde 3 kere kalıplar ölünceye kadar kullanılmış ve 3 adet dövme işleminin ortalaması alınmıştır. Sonuçlara göre 52 HRC sertliğindeki 1.2714 ve 1.2343 sıcak dövme kalıpları için şablon dövme adetleri incelenmiş olup 1.2714 kalıbın ölünceye kadar 12000 şablon dövdüğü 1.2343 kalıbın ise 12500 şablon dövdüğü görülmüştür.



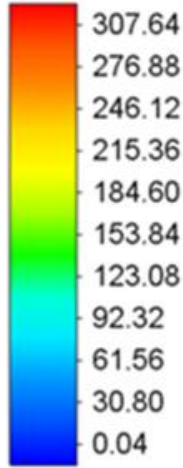
Şekil 4.37.Sıcak Dövme Simülasyonu Sonucu 52 HRC Sertlikteki 1.2343 ve 1.2714 Malzeme Alt Kalıpta Oluşan Aşınma Derinlikleri

- Vuruş oranları tekrar düzenlenerek iyileştirme çalışması yapılmıştır. Tablo 4.8’de iyileştirme öncesi ve sonrası vuruş yüzdeleri gösterilmiştir. Vuruş yüzdeleri son vuruş hariç %5 oranında azaltılmıştır ve kalıpta meydana gelen eşdeğer gerilme değerleri incelenmiştir. Şekil 4.38’de vuruş yüzdelerinde yapılan iyileştirme öncesi ve sonrası kalıpta meydana gelen eşdeğer gerilme değerleri gösterilmiş ve gerilme değerinde %7 oranında düşüş olduğu görülmüştür.

Tablo 4.6.Vuruş yüzdelerinde yapılan iyileştirme tablosu

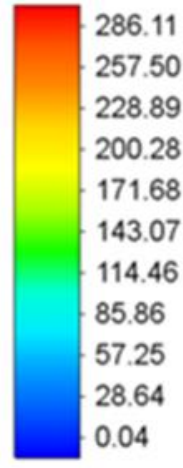
Dövme Aşaması	İyileştirme Öncesi Vuruş (%)	İyileştirme Sonrası Vuruş (%)
Ön Şekillendirme	30	25
Düz Vuruş	30	25
Birinci Vuruş	45	40
İkinci Vuruş	70	65
Üçüncü Vuruş	100	100

EŞDEĞER GERİLME (MPa)

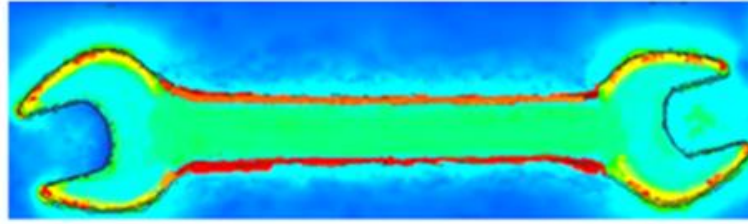


a

EŞDEĞER GERİLME (MPa)

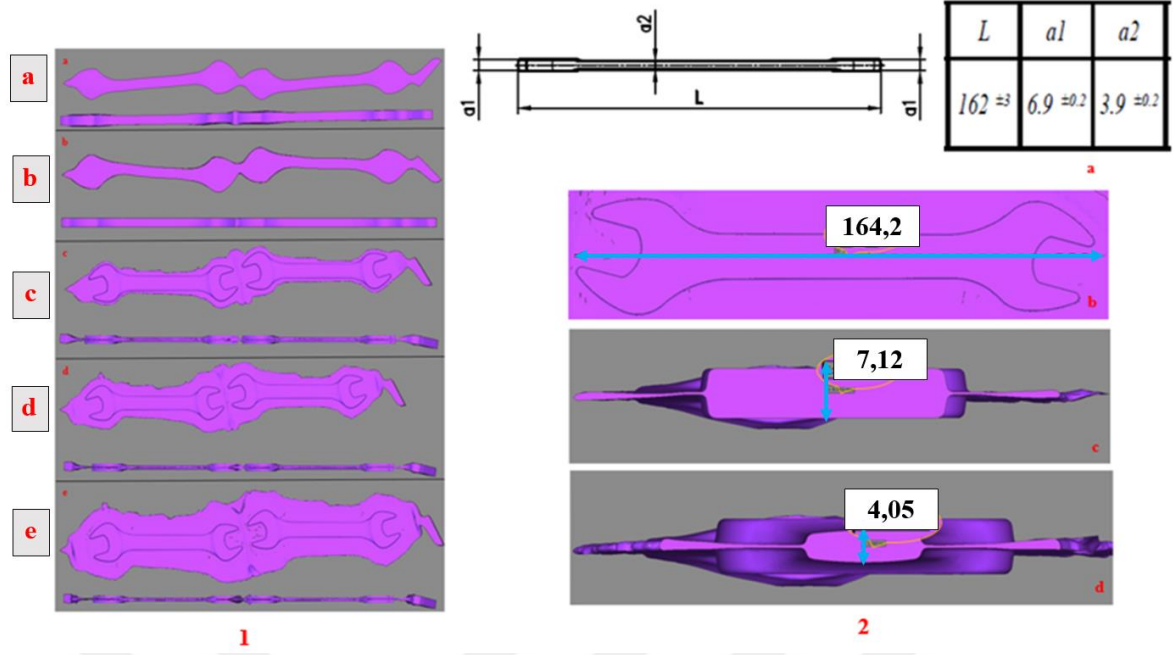


b



Şekil 4.38.Alt Kalıpta Meydana Gelen Eşdeğer Gerilme Değerleri **a)**Vuruş İyileştirmesi Öncesi **b)**Vuruş İyileştirmesi Sonrası

Şekil 4.39’da vuruş yüzlerinde yapılan iyileştirme sonrası oluşan ürün geometrisi gösterilmiştir. Ürünün teknik resme uygunluğu kontrol edilmiş ve vuruş yüzlerinde yapılan %5 oranındaki iyileştirmenin ürünün kalınlığında artışa sebep olduğu fakat bu artışın teknik resimde belirtilen toleranslar aralığında olduğu görülmüştür.



Şekil 4.39. Vuruşlarda Yapılan İyileştirme Sonrası Oluşan Geometriler **1-a)**Ön Şekillendirme **1-b)**Düz Şekillendirme **1-c)**Bitirme Gözü-1. Şekillendirme **1-d)**Bitirme Gözü-2. Şekillendirme **1-e)**Bitirme Gözü-3. Şekillendirme **2-a)**Ürün Teknik Resmi **2-b)**L Ölçüsü **2-c)**a1 Ölçüsü **2-d)**a2 Ölçüsü

4.5.1. En İyileştirilmiş Parametreler ile Yapılan Sıcak Dövme Simülasyonu Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Sıcak dövme prosesini verimli hale getirebilmek, dövme kalıplarının ömrünü uzatarak daha yüksek adetle ürün üretebilmek böylelikle ürün başına düşen maliyeti azaltmak için proses parametrelerinde değişiklikler yapılmıştır. Değiştirilen parametreler Tablo 3.5'te verilmiştir. Bu parametrelerin her biri tek tek değiştirilerek kalıpta oluşan gerilme ve aşınma değerleri incelenmiştir. Sonuçlara bakıldığında her bir parametrenin kalıp gerilmeleri ve aşınmaları üzerinde düşük oranlarda da olsa iyileştirici etkisi olduğu görülmüştür. Bu olumlu etkilere istinaden iyileştirilen parametrelerin tümü tek bir simülasyonda uygulanmış ve sonuçlar sunulmuştur.

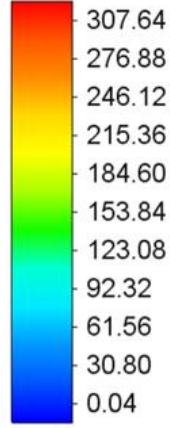
Tablo 4.9’da en iyileştirilmiş parametre değerleri gösterilmiştir. Gösterilen parametre değerleri ile tek bir simülasyon yapılmıştır. En iyileştirilmiş simülasyon sonucunda elde edilen değerler yalnızca alt kalıp için aşınma ve gerilme, ürün içinse ölçü kontrolü ve etkin plastik gerinim açısından değerlendirilmiştir.

Tablo 4.7.En iyileştirilmiş parametre değerleri

Parametreler	En İyileştirilmiş Parametre Değerleri
Vuruş Yüzdeleri	ÖŞ %25 DV %25 BV %40 İV %65 ÜV %100
Kalıp Başlangıç Sıcaklığı	250 °C
İş Parçası Başlangıç Sıcaklığı	1200°C
Kalıp Hammaddesi	1.2343
Kalıp Sertliği	52 HRC

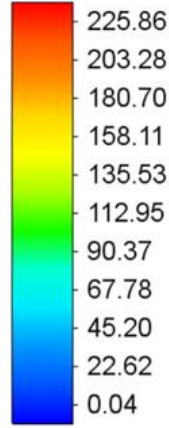
Şekil 4.40’ta alt kalıp için iyileştirme öncesi ve en iyileştirilmiş prosese ait simülasyon sonucu elde edilen eşdeğer gerilme değerleri skalası gösterilmiştir. Şekil 4.41’de alt kalıp için iyileştirme öncesi ve en iyileştirilmiş prosese ait simülasyon sonucu elde edilen aşınma değerleri grafiği verilmiştir. Tablo 4.10’da ise özet olarak iyileştirme öncesi proses ve en iyileştirilmiş prosese ait simülasyon sonucu elde edilen alt kalıp eşdeğer gerilme ve aşınma değerleri sonuçları karşılaştırılmalı olarak gösterilmiştir.

EŞDEĞER GERİLME (MPa)

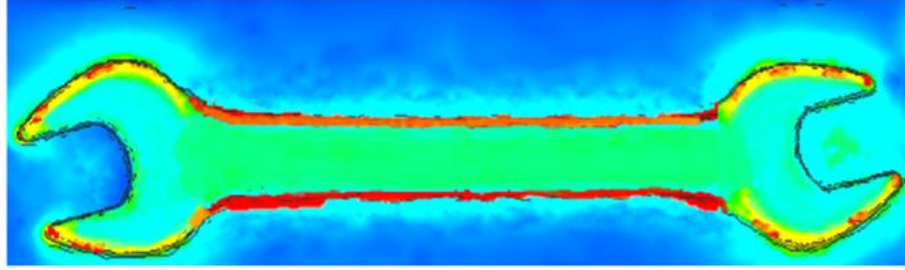


a

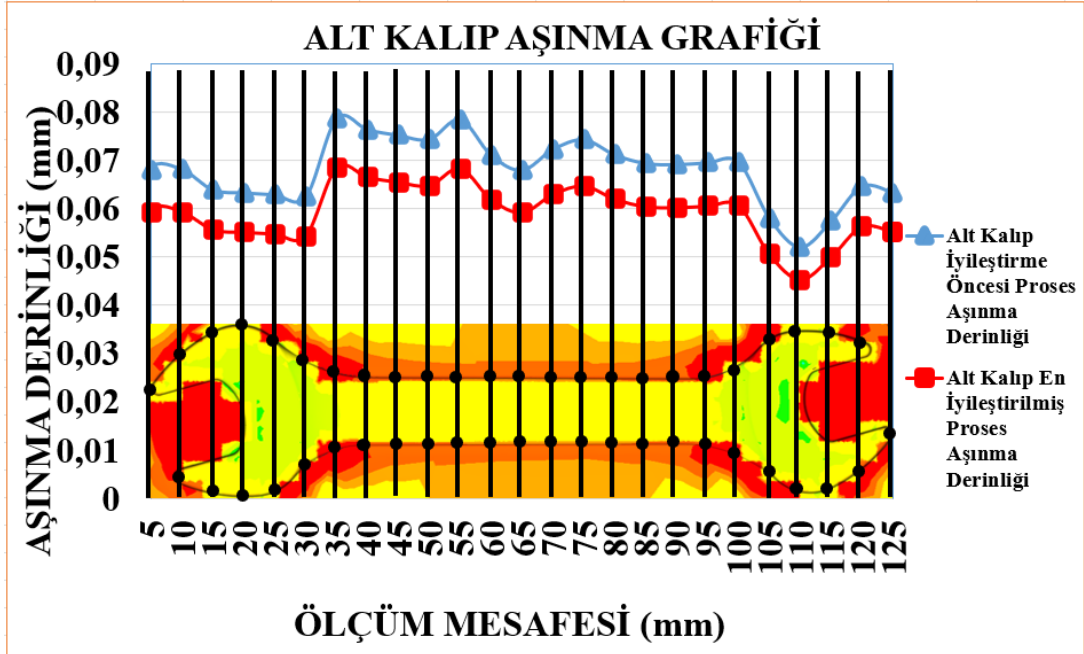
EŞDEĞER GERİLME (MPa)



b



Şekil 4.40.Alt Kalıp İçin a)İyileştirme Öncesi b)En İyileştirilmiş Prosese Ait Simülasyon Sonucu Elde Edilen Eşdeğer Gerilme Değerleri

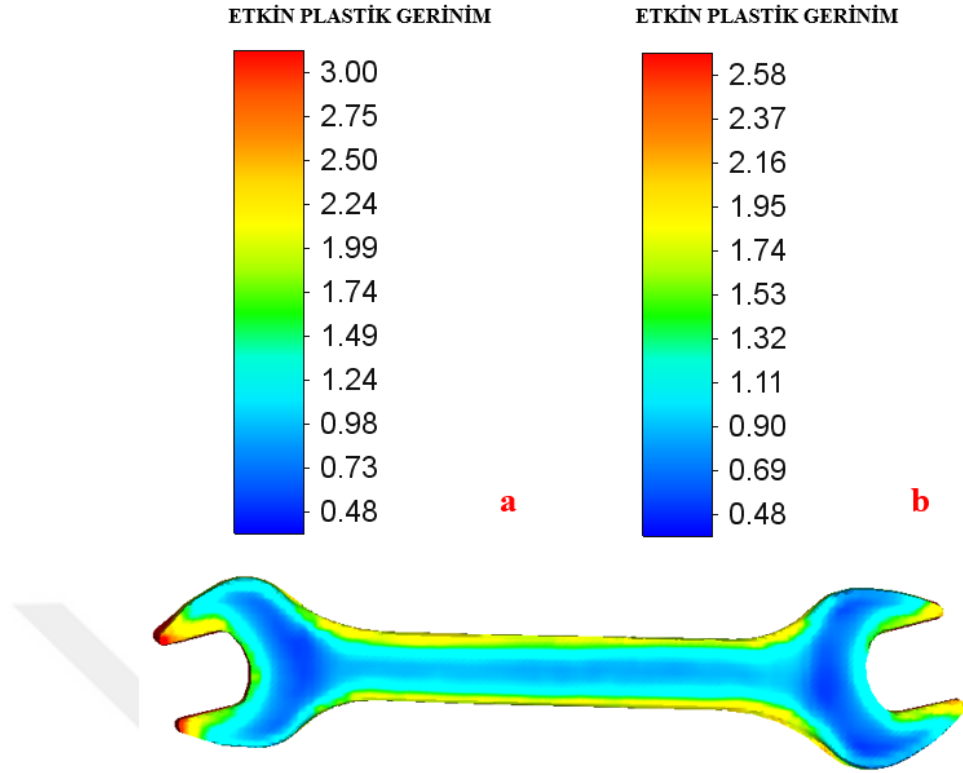


Şekil 4.41.Alt Kalıp İçin İyileştirme Öncesi Ve En İyileştirilmiş Prosese Ait Simülasyon Sonucu Elde Edilen Aşınma Derinlikleri Değerleri

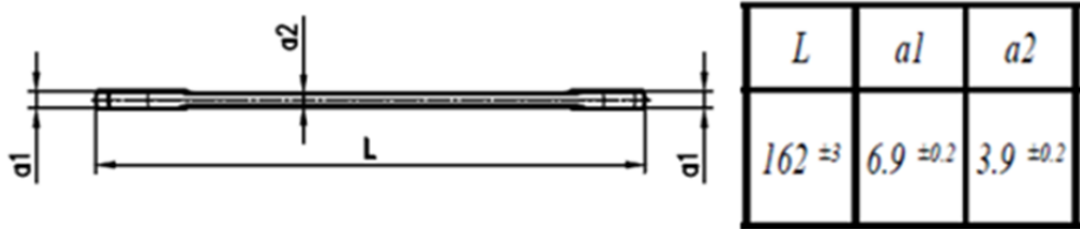
Tablo 4.8.İyileştirme öncesi proses ve en iyileştirilmiş prosese ait simülasyon sonucu elde edilen alt kalıp eşdeğer gerilme ve aşınma değerleri sonuçları

Parametreler	İyileştirme Öncesi Prosese Ait Değer	En İyileştirilmiş Prosese Ait Değer	Fark (%)
Ortalama Aşınma Derinliği (mm) (10000 adet şablon dövülmesi sonrası)	0,0681	0,0592	-13
Ortalama Eşdeğer Gerilme (MPa)	292,6 MPa	219,35 MPa	-15

Şekil 4.42’de el aleti için iyileştirme öncesi ve en iyileştirilmiş prosese ait simülasyon sonucu elde edilen etkin plastik gerinim değerlerine ait genel renk skalası gösterilmiştir. Şekil 4.43’te el aleti için iyileştirme öncesi proses ile en iyileştirilmiş prosesin sonucunda çıkan ürünün simülasyon sonucu oluşan geometri ölçüleri gösterilmiştir. Vuruş yüzdelerinde yapılan iyileştirme sonucu ürünün boyutlarında artış görülmüştür. Tablo 4.11’de iyileştirme öncesi ve en iyileştirilmiş prosese ait simülasyon sonucu elde edilen etkin plastik gerinim değerleri detaylı olarak gösterilmiştir. Tablo incelendiğinde etkin plastik gerinim değerlerinde iş parçasının daha az şekil değişimine uğraması sebebiyle azalma olduğu fark edilmiştir. Bu sebeple en iyileştirilmiş veriler ile gerçek prosese geçildiğinde sıcak dövme işlemi sonrası oluşan ürünün tane boyutunda büyüme ve sertlik değerinde düşüş yaşanabileceği öngörülmektedir. Bunlara istinaden bu ufak olumsuzluklar ısıtıl işlem ile giderilebileceği için iyileştirme parametrelerinin kalıp ömrüne yapacağı olumlu etki daha fazladır.



Şekil 4.42.El Aleti İçin a)İyileştirme Öncesi b)En İyileştirilmiş Prosese Ait Simülasyon Sonucu Elde Edilen Etkin Plastik Gerinim Değerleri



Proses Adı	L(mm)	a1(mm)	a2(mm)
İyileştirme Öncesi Proses Ait Ölçüler	163,7	6,9	3,9
En İyileştirilmiş Proses Ait Ölçüler	164,2	7,12	4,05

Şekil 4.43.El Aleti için İyileştirme Öncesi Proses İle En İyileştirilmiş Prosesin Sonucunda Çıkan Ürünün Simülasyon Sonucu Oluşan Geometri Ölçüleri

Tablo 4.9.El aleti için İyileştirme öncesi ve en iyileştirilmiş prosese ait simülasyon sonucu elde edilen etkin plastik gerinim değerleri

Bölge Adı	İyileştirme Öncesi Proses Ait Simülasyon Sonucu Etkin Plastik Gerinim Değeri	En İyileştirme Sonrası Proses Ait Simülasyon Sonucu Etkin Plastik Gerinim Değeri	Fark (%)
Gövde Yüzey A-A Bölgesi Ok Yönünde	1,432	1,242	-13,26
Anahtar Kafa Yüzey A-A Bölgesi Ok Yönünde	1,00	0,894	-10,6
Gövde Yüzey B-B Bölgesi Ok Yönünde	1,138	0,987	-13,26
Anahtar Kafa Yüzey B-B Bölgesi Ok Yönünde	0,729	0,629	-13,71
Gövde Kesit C- C Kesiti Ok Yönünde	0,963	0,874	-9,24
Anahtar Kafa Kesit C-C Kesiti Ok Yönünde	0,697	0,573	-17,79
Gövde Kesit D- D Kesiti Ok Yönünde	0,919	0,814	-11,42
Anahtar Kafa Kesit D-D Kesiti Ok Yönünde	0,613	0,503	-17,94

5.GENEL SONUÇLAR

Bu çalışmada, kapalı kalıpta çapaklı sıcak dövme ile üretilen bir el aleti için dövme süreci bir dövme simülasyon programıyla bilgisayar destekli olarak analiz edilmiş, gerçekte üretilen ürün ile simülasyon sonuçları ilişkilendirilmiş, doğrulanmış ve sonrasında sadece simülasyon çalışması ile proses parametreleri hakkında çıkarımlar elde edilmiştir. Sıcak dövme ile şekillendirmede etkili olan üretim parametrelerinin ve kalıp hammaddelerinin mekanik ve aşınma özelliklerine etkisi incelenmiştir. Tez çalışmasının motivasyonu deneme yanılma ile zaman ve para harcamak yerine, süreci simüle etmek için bilgisayar yazılımı kullanılmasıdır. Sıcak dövme ile üretilen ürünler metalografik olarak incelenerek tane boyutu ve mikro sertlik ölçümleri deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Sıcak dövme işlemi Simufact Forming programı kullanılarak birebir olarak simüle edilmiş ve simülasyondan elde edilen sonuçlarda iş parçası üzerinde meydana gelen etkin plastik gerinim ve eşdeğer gerilmeler dikkate alınarak bunların kalıpta oluşturduğu deformasyon, yüksek sıcaklık değişimi de değerlendirilerek aşınma özelliklerine olan etkileri incelenmiştir. Elde edilen deneysel ve nümerik sonuçların yanında simülasyon programı kullanılarak performans değerlerinin tahmini aşağıda sunulmuştur:

- Kalıpta çapaklı sıcak dövme ile el aleti şekillendirme işlemleri sonucunda malzemede oluşan gerinim değerlerinin maksimuma ulaştığı bölgelerde, deneysel olarak en küçük tane morfolojileri ve en yüksek mikro sertlikler elde edilmiştir. Ayrıca, elde edilen sonuçlara dayanarak, kritik gerilmelerin en yüksek dağılımının çapağın olduğu alanlarda ve kalıpların geometrisindeki ani değişikliklerin olduğu yerlerde meydana geldiği gözlemlenmiştir.
- Aşınma analizi sonuçlarına göre değişken parametreler içinde kalıp sıcaklığının en büyük etkiye sahip olduğu görülmüştür. Üretimde de kullanılan 110°C kalıp ısıtma sıcaklığının 250°C'ye çıkarılmasıyla %32 oranında kalıp aşınma performansında iyileşme elde edilirken, kalıp sıcaklığının 450°C'ye çıkarıldığında ise aşınma miktarının 45 kat arttığı yani aşınma performansının kötüye gittiği bulunmuştur.

- Kalıplarda meydana gelen gerilmeler ve aşınma miktarları FEM analizi ile belirlenmiştir. Bunlar, kalıp doğruluğunu ve kalıp hizmet ömrünü etkileyen başlıca sınırlayıcı faktörlerden bazıları olduğu için kritik bir öneme sahiptir. Vuruş yüzdelerinin, ilk kalıp sıcaklıklarının, sıcak dövme kalıplarının aşınmasını ve kalıpta meydana gelen gerilmeleri etkilediği görülmüştür. Buna göre kalıp aşınma performansı açısından en iyi sonuçlar 10000 vuruş sonrası 250 °C kalıp sıcaklığı, ÖŞ %25, DV %25, BV %40, İV %65, ÜV %100 vuruş yüzdeleri, 1.2343 kalıp malzemesi, 1200 °C şablon sıcaklığı, sıcak dövme üretim parametrelerinde elde edilmiştir.
- Kalıp sertliğinin, sıcak dövme işlemi sırasında oluşan termal yükler etkisi ile düştüğü görülmüştür. Sertlik düşüşünün yaşandığı bölgelerin özellikle kalıp ile deforme olan malzeme arasındaki uzun temas süresine sahip olan alt kalıbın köşelerindeki radyuslu yüzey, ki bu bölge aynı zamanda ani kesit değişiminin olduğu bölgedir ve çapak bölgelerinde olduğu gözlemlenmiştir. Sertlik düşüşüne sebep olan termal yüklerin aşınma derinliğini arttırarak kalıp hizmet ömrünü önemli ölçüde kısaltabildiği bulunmuştur. Yüksek adetli dövme işlemi sonrası kalıp sıcaklığında meydana gelen artışa bağlı olarak termal yüklerin etkisi artar.
- Simülasyon çalışması ile kalıp hammaddesinin değiştirilerek elde edilen simülasyon sonuçları doğrultusunda DIN 1.2343 hammadde kullanılarak alt kalıpta meydana gelen aşınma derinliği ve eşdeğer gerilme değerleri kısmen azaltılarak kalıp hizmet ömrünün arttırılabileceği bulunmuştur.
- Vuruş oranlarında yapılan %5'lik iyileştirme sonrası (son vuruş hariç) alt kalıpta oluşan gerilme miktarları incelendiğinde %7 oranında azalma olduğu görülmüştür. Gerilme oranındaki azalma sayesinde kalıp ömründe yüksek adetlerdeki dövme işlemi sonucunda iyileşme olabileceği öngörülmüştür.
- İş parçası ve kalıp başlangıç sıcaklıkları, kalıp hammaddesi, kalıp sertliği, parametreleri değiştirilerek gerçek proses öncesi simülasyon çalışmaları yapılarak iyileştirilmiş dövme koşullarının tayin edildiği böylelikle gerçek prosesin daha düşük maliyetle ve yüksek verimlilikle hata oranı düşük olarak gerçekleştirilebileceği öngörülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] Altan, T., Ngaile, G., & Shen, G. (Eds.). (2005). Cold and hot forging: fundamentals and applications (Vol. 1). *ASM international*.
- [2] Üllen, N. B., & Baba, G. (2020). Çeşitli sıcak dövme kalıplarının hasar mekanizmalarının incelenmesi. *In 2nd International Eurasian Conference On Science, Engineering And Technology*, Ocak.
- [3] Navinšek, B., Panjan, P., Urankar, I., Cvahte, P., & Gorenjak, F. (2001). Improvement of hot-working processes with PVD coatings and duplex treatment. *Surface and Coatings Technology*, 142, 1148-1154.
- [4] ASM, I. (1993). *ASM Handbook: forming and forging*. v. 14. USA: *ASM International*.
- [5] Zhan, M., Sun, Z., & Yang, H. (2014). Modeling of hot forging.
- [6] Beadle, J. D. (Ed.). (1971). *Metal Forming*. *Macmillan Education UK*.
- [7] Massivumformung eV, I. (2013). *Massivumformung–kurz und bündig*.
- [8] Çapan, L. (2004). Dövme teknolojisi. *Türkiye Makina Mühendisleri Odası*.
- [9] Makas, T. (2016). Dövmeye Genel Bakış. *Kanca A.Ş. Yayınları*.
- [10] Adiloğlu, S. (2008). *Dövme kalıplarında kalıbın dolmasını etkileyen faktörlerin incelenmesi ve sonlu elemanlar yöntemi ile akış analizlerinin yapılması* (Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi).
- [11] Groover, M. P. (2012). *Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems*. John Wiley & Sons.
- [12] Hocalar, Ç. (2019). *Çeliklerde soğuma hızının etkisinin nümerik ve deneysel yöntemlerle incelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi, Manisa Celal Bayar Üniversitesi)
- [13] Ebara, R., & Kubota, K. (2008). Failure analysis of hot forging dies for automotive components. *Engineering Failure Analysis*, 15(7), 881-893.
- [14] Karagüzel, U., Kuzu, A. T., & Bakkal, M. (2020). Sıcak dövme kalıplarına infrared (kızılötesi) yöntemi ile ön ısıtma uygulanmasına yönelik deneysel ve teorik analiz. *Makina Tasarım ve İmalat Dergisi*, 18(1), 9-23.
- [15] Rathi, M. G., & Jakhade, N. A. (2014). An overview of forging processes with their defects. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 4(6), 1-7.
- [16] Li, Y., Onodera, E. ve Chiba, A. (2010). Friction coefficient in hot compression of cylindrical sample. *Materials Transactions*, 51 (7), 1210-1215.
- [17] Gülbahar, S. (2004). *Ağır vasıta direksiyon mafsalının dövülmesi için preform tasarımı* (Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi).

- [18] Lin, J. ve Dean, TA (2005). Birleşik kurucu denklemler kullanılarak sıcak şekillendirmede mikroyapı gelişiminin modellenmesi. *Malzeme İşleme Teknolojisi Dergisi*, 167 (2-3), 354-362.
- [19] Tekkaya, A. E., Allwood, J. M., Bariani, P. F., Bruschi, S., Cao, J., Gramlich, S., & Yanagimoto, J. (2015). Metal forming beyond shaping: Predicting and setting product properties. *CIRP Annals*, 64(2), 629-653.
- [20] Kilerci, İ. (2017). *Metal Şekillendirmede Üretim Parametrelerinin Mekanik Özelliklere Etkisinin Bilgisayar Destekli Olarak İncelenmesi* (Doktora Tezi, Manisa Celal Bayar Üniversitesi)
- [21] Ghaei, A., & Movahhedy, M. R. (2007). Die design for the radial forging process using 3D FEM. *Journal of materials processing technology*, 182(1-3), 534-539.
- [22] Zhang, Z. J., Dai, G. Z., Wu, S. N., Dong, L. X., & Liu, L. L. (2009). Simulation of 42CrMo steel billet upsetting and its defects analyses during forming process based on the software DEFORM-3D. *Materials Science and Engineering: A*, 499(1-2), 49-52.
- [23] Wilson, W. R. D., Schmid, S. R., & Liu, J. (2004). Advanced simulations for hot forging: Heat transfer model for use with the finite element method. *Journal of Materials Processing Technology*, 155–156(1–3).
- [24] Bang, W., Lee, C. S., & Chang, Y. W. (2003). Finite element analysis of hot forging with flow softening by dynamic recrystallization. *Journal of Materials Processing Technology*, 134(2).
- [25] Hsu, C. C., Chiu, H. Y., Liao, C. C., & Fuh, Y. K. (2020). An investigation on deformation mechanism of non-standard gear teeth forming in the hot impression forging of multicore cable cutter. *Journal of Manufacturing Processes*, 54, 158-168.
- [26] Milutinović, M., Baloš, S., & Plančak, M. (2017). Comparison of some mechanical properties and micro-topography of a component with non-axisymmetric geometry manufactured by cold orbital and hot forging. *Journal of Materials Processing Technology*, 249, 179-192.
- [27] Abachi, S., Akkök, M., & Gökler, M. İ. (2010). Wear analysis of hot forging dies. *Tribology International*, 43(1-2), 467-473.
- [28] Serebriakov, I., Puchi-Cabrera, E. S., Dubar, L., Moreau, P., Meresse, D., & La Barbera-Sosa, J. G. (2021). Friction analysis during deformation of steels under hot-working conditions. *Tribology International*, 158, 106928.
- [29] Ge, X., Ma, Q., Wang, M., Liu, H., Guo, R., & Chen, Y. (2019). Surface Decarburization Behaviour of A Novel Die Steel. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 688(3).
- [30] Ma, Q., Lin, Z. Q., & Yu, Z. Q. (2009). Prediction of deformation behavior and microstructure evolution in heavy forging by FEM. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 40(3–4).
- [31] Pruncu, C. I., Hopper, C., Hooper, P. A., Tan, Z., Zhu, H., Lin, J., & Jiang, J. (2020). Study of the Effects of Hot Forging on the Additively Manufactured Stainless Steel Preforms. *Journal of Manufacturing Processes*, 57.
- [32] Iwadoh, S., Kuwamoto, H., & Sonoda, S. (1989). Investigation about the mechanism of work roll

wear at the cold rolling. *Tetsu-To-Hagane/Journal of the Iron and Steel Institute of Japan*, 75(11).

- [33] Luo, S., Zhu, D., Hua, L., Qian, D., & Yan, S. (2017). Numerical analysis of die wear characteristics in hot forging of titanium alloy turbine blade. *International Journal of Mechanical Sciences*, 123.
- [34] Shelke, R. D., & Rafiuddin, S. A. (2018). Numerical Simulation and Comparison of Carbide and HSS Tool Wear Rate while Drilling with Difficult to Cut Super Alloy Titanium Based on Archard Model. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, 5(10).
- [35] Kang, J. H., Park, I. W., Jae, J. S., & Kang, S. S. (1999). Study on a die wear model considering thermal softening: (I) construction of the wear model. *Journal of Materials Processing Technology*, 96(1–3).
- [36] Behrens, B. A. (2008). Finite element analysis of die wear in hot forging processes. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 57(1)
- [37] Lee, R. S., & Jou, J. L. (2003). Application of numerical simulation for wear analysis of warm forging die. *Journal of Materials Processing Technology*, 140(1-3 SPEC.)
- [38] Emamverdian, A. A., Sun, Y., Cao, C., Pruncu, C., & Wang, Y. (2021). Current failure mechanisms and treatment methods of hot forging tools (dies) - a review. In *Engineering Failure Analysis* (Vol. 129).
- [39] Pavlina, E. J., & Van Tyne, C. J. (2008). Correlation of yield strength and tensile strength with hardness for steels. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 17(6), 888–893.
- [40] *Poligon Mühendislik*. (n.d.). Retrieved April 26, 2023, from <https://www.poligonmuhendislik.com/>
- [41] Li, H. Z., Wang, H. J., Liang, X. P., Liu, H. T., Liu, Y., & Zhang, X. M. (2011). Hot deformation and processing map of 2519A aluminum alloy. *Materials Science and Engineering A*, 528(3).
- [42] Wang, L., Liu, F., Cheng, J. J., Zuo, Q., & Chen, C. F. (2015). Hot deformation characteristics and processing map analysis for Nickel-based corrosion resistant alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 623.
- [43] Yang, Z., Zhang, F., Zheng, C., Zhang, M., Lv, B., & Qu, L. (2015). Study on hot deformation behaviour and processing maps of low carbon bainitic steel. *Materials and Design*, 66(PA).
- [44] Kostić, N., Randelović, S., & Stanković, S. (2022). FEM analysis of the stress strain rate during hot forging of steel non-rotational form. *Advanced Technologies & Materials*, 47(2).
- [45] Wang, X., & Hua, L. (2021). Finite element study on microstructure evolution and grain refinement in the forging process of automotive front axle beam. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 114, 1179-1187.
- [46] Ollilainen, V., Kasprzak, W., & Holappa, L. (2003). The effect of silicon, vanadium and nitrogen on the microstructure and hardness of air cooled medium carbon low alloy steels. *Journal of Materials Processing Technology*, 134(3).

- [47] Grass, H., Krempaszky, C., Reip, T., & Werner, E. (2003). 3-D Simulation of hot forming and microstructure evolution. *Computational Materials Science*, 28(3-4 SPEC. ISS.).
- [48] Grass, H., Krempaszky, C., & Werner, E. (2006). 3-D FEM-simulation of hot forming processes for the production of a connecting rod. *Computational Materials Science*, 36(4).
- [49] Sert, Y., Yeşilyurt, M., Günaydın, O., Emir, L., & Küçükömeroğlu, T. (2021).Dövme Kalıplarında Aşınma Mekanizmaları. *El-Cezeri Fen ve Mühendislik*.

