

**T.C.
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ BİLİM DALI**

**ASİMETRİK KESİTLİ PROFİLİN SICAK HADDELEME ÜRETİM
SÜREÇLERİNİN SİMÜLASYON DESTEKLİ TASARIMI VE
SOĞUMA ŞARTLARININ ÜRÜN ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

Mehmet AKKAŞ

**Danışman
Doç. Dr. Osman ÇULHA**



MANİSA-2019

Mehmet
AKKAŞ

**ASİMETRİK KESİTLİ PROFİLİN SICAK HADDELEME ÜRETİM
SÜREÇLERİNİN SIMÜLASYON DESTEKLİ TASARIMI VE SOĞUMA
ŞARTLARININ ÜRÜN ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

2019

TEZ ONAYI

Mehmet AKKAŞ tarafından hazırlanan "Asimetrik Kesitli Profilin Sıcak Haddeme Üretim Süreçlerinin Simülasyon Destekli Tasarımı Ve Soğuma Şartlarının Ürün Özelliklerine Etkisi" adlı tez çalışması 03/01/2019 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri önünde Manisa Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak başarı ile savunulmuştur.

Danışman

Doç. Dr. Osman ÇULHA
Manisa Celal Bayar Üniversitesi

Jüri Üyesi

Doç. Dr. Hülya DURMUŞ
Manisa Celal Bayar Üniversitesi

Jüri Üyesi

Dr. Öğr. Üyesi Mustafa EROL
Dokuz Eylül Üniversitesi

TAAHHÜTNAME

Bu tezin Manisa Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nde, akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

Mehmet AKKAŞ



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER.....	I
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	III
ŞEKİLLER DİZİNİ	IV
TABLO DİZİNİ.....	VII
TEŞEKKÜR	VIII
ÖZET	IX
ABSTRACT	X
1.GİRİŞ	1
1.1.Tezin Amacı	3
2.LİTERATÜR ÖZETİ.....	4
2.1.Sıcak Haddeleme	4
2.1.1.Hammaddenin Tavlanması.....	5
2.1.1.1. Tav Fırını	6
2.1.1.2. Reküperatör.....	9
2.1.2.Rekristalizasyon.....	11
2.1.3.Tufal Oluşumu ve Etkileri.....	13
2.1.4.Metal Yanması.....	14
2.1.5.Haddehane Tipleri ve Tezgâhların Yerleşimi	15
2.1.6.Haddeleme Parametreleri	19
2.1.7.Haddeleme Kuvvetleri ve Aralarındaki Bağlıntılar	22
2.1.8.Kalibre.....	32
2.1.9.Haddelenmiş Ürünün Kalitesi	35
2.1.10. Sıcak Haddelemenin Fiziksel Metalurjisi	36
2.1.11. Merdane Soğutma Prosesi ve Ürün Soğuması	37
2.1.12. Haddeleme Prosesinde Üründe Ortaya Çıkan Kusurlar	38
2.1.13.Sıcak Hadde Ürünü Profiller ve Kullanım Alanları.....	43
2.2.Simülasyon (Benzetim) Uygulamaları.....	44
2.2.1.Sonlu Elemanlar Metodunun Tarihçesi.....	44
2.2.2.Benzetim Uygulamaları Temel Kavramları	45
2.2.3.Simufact Forming Programı.....	46
3.DENEYSEL KISIM.....	49
3.1.Simülasyon Çalışmaları Materyal ve Yöntemleri.....	49
3.2.Prototip Üretim Çalışmaları Materyal ve Yöntemleri.....	53
3.3.Soğuma Şartlarının Ürün Özelliklerine Etkilerinin İncelenmesi Çalışmaları Materyal ve Yöntemleri	54

3.3.1. Soğuma Ortamları.....	54
3.3.2. Östenitleme İşlemi	54
3.3.3. Çentik Darbe Deneyi.....	55
3.3.4. Çekme Deneyi	56
3.3.5. Sertlik Ölçümü.....	57
3.3.6. Mikro Yapı İncelemeleri	58
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	61
4.1. Simülasyon Sonuçları.....	61
4.2. Prototip Üretim Çalışmaları	76
4.3. Soğuma Şartlarının Ürün Özelliklerine Etkilerinin İncelenmesi.....	79
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	104
KAYNAKLAR.....	106
ÖZGEÇMİŞ.....	109

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	Merdane kesit alanı
b	Hammadde genişliği
CCT	Sürekli soğuma dönüşüm
d	Merdane çapı
D	Parça çapı
d_c	Merdane bilezik çapı
d_e	Merdane efektif çapı
F	Teğetsel sürtünme kuvveti
GES	Güneş enerjisi santrali
h	Malzemenin yüksekliği
HV_{0.1}	Vickers sertliği (100 gram test yükü)
L_p	Temas yayının öngörülen uzunluğu
MPa	Mega pascal
M_T	İki merdanenin torku
P	Haddeleme dikey yük bileşeni
p	Spesifik merdane basıncı
Pr	Radyal kuvvet
R	Merdane yarıçapı
r	Malzemenin kesit daralması
s	Malzemenin özgül ağırlığı
T	Merdanenin torku
TTT	Zaman sıcaklık dönüşüm
v	Herhangi bir kalınlıktaki hız
V	Merdane yüzey genişliği
Vf	Malzemenin son hızı
Vi	Malzemenin ilk hızı
Vr	Merdane yüzeyindeki hız
v₂	Malzemenin çıkış hızı
v₁	Malzemenin giriş hızı
W	Hedeflenen haddeleme oranı
λ	Sabit sayı (Sıcak haddelemede 0,5)

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Zamana bağlı iç ve dış yüzey sıcaklığı.....	8
Şekil 2.2 Reküperatör çalışma prensibi.....	10
Şekil 2.3 Reküperatördeki sıcak duman, soğuk hava ve ısı transferinin şematik gösterimi.....	11
Şekil 2.4 Sıcak haddeleme ve rekristalizasyon.....	12
Şekil 2.5 Ezme, uzama, yayılma ve kapma açısı.....	21
Şekil 2.6 Haddeleme esnasında oluşan kuvvetler.....	24
Şekil 2.7 Haddelemede merdane kapma açısı.....	25
Şekil 2.8 Kalibreli ve düz merdane üzerindeki temas açıları.....	26
Şekil 2.9 Büyük ve küçük çaplı merdane temas açıları.....	27
Şekil 2.10 Maksimum ezme.....	27
Şekil 2.11 Haddeleme esnasındaki sürtünme profili.....	29
Şekil 2.12 Merdaneler üzerindeki pasoların yerleşimi.....	34
Şekil 2.13 Devrik pasolu merdanede kuvvetler.....	35
Şekil 2.14 Ürün kusurları görselleri (a,b,c,d) [42].....	41
Şekil 2.15 Ürün kusurları görselleri (d,e,f,g) [42].....	42
Şekil 2.16 Ürün kusurları görselleri (h,i,j,k) [42].....	42
Şekil 2.17 Ürün kusurları görselleri (l,m,n,o,p) [42].....	43
Şekil 2.18 Sıcak haddeleme yöntemi ile üretilmiş profiller[43].....	43
Şekil 2.19 Sıcak haddelenmiş profillerin kullanım alanları[43].....	44
Şekil 2.20 Sonlu elemanlar düğümü örülmüş bir uçak[44].....	46
Şekil 2.21 Simufact.forming programına ait ekran görüntüsü[47].....	48
Şekil 3.1 Asimetrik kesite ait çıkarılan akış şeması.....	49
Şekil 3.2 Merdane kapması için yay konumu ve yönü.....	50
Şekil 3.3 Hadde paso tasarımı.....	50
Şekil 3.4 Simufact.forming yazılımı iş parçası ve merdane görünümü.....	51
Şekil 3.5 Sürekli soğuma dönüşüm diyagramı.....	51
Şekil 3.6 Zaman sıcaklık dönüşüm diyagramı.....	52
Şekil 3.7 Akış gerilimi ve gerinim değişimi grafiği.....	52
Şekil 3.8 Protherm marka kutu fırın.....	54
Şekil 3.9 U test marka çentik darbe cihazı.....	56
Şekil 3.10 Numuneler ve Tamson marka soğutma cihazı.....	56
Şekil 3.11 TS EN ISO 6892-1'e göre çekme testi numunesi boyutları.....	57
Şekil 3.12 Çekme cihazı.....	57
Şekil 3.13 Mikrosertlik ölçüm cihazı.....	58
Şekil 3.14 Sertlik ölçüm noktaları.....	58
Şekil 3.15 Hazırlanmış numuneler.....	58
Şekil 3.16 Kesme makinesi.....	59
Şekil 3.17 Bakalite alma makinesi.....	59
Şekil 3.18 Zımparalama parlatma makinesi.....	59
Şekil 3.19 Optik mikroskop.....	60
Şekil 3.20 Mikro yapı incelemesi için profilden alınan numunelerin bölgeleri.....	60
Şekil 4.1 7.Tezgâh çıkışı plastik deformasyon miktarı ve gerilme dağılımları.....	61
Şekil 4.2 7.Tezgâh çıkışı sıcaklık dağılımı ve kalıp temas noktaları.....	62

Şekil 4.3 7.Tezgâh iş parçasının seçilen bölgelerinin sıcaklık dağılımı	63
Şekil 4.4 7.Tezgâh merdaneye dik gelen ezme kuvvetleri.....	63
Şekil 4.5 7.Tezgâh merdane tork grafiği.....	64
Şekil 4.6 8.Tezgâh çıkışı plastik deformasyon ve gerilme dağılımları.....	64
Şekil 4.7 8.Tezgâh çıkışı iş parçası sıcaklık ve kalıp temas bölgesi dağılımları.....	65
Şekil 4.8 8.Tezgâh iş parçasının seçilen bölgelerinin sıcaklık dağılımı	66
Şekil 4.9 8.Tezgâh merdane tork grafiği.....	66
Şekil 4.10 8.Tezgâh merdaneye dik gelen ezme kuvvetleri.....	67
Şekil 4.11 9.Tezgâh çıkışı plastik deformasyon ve gerilme dağılımları.....	67
Şekil 4.12 9.Tezgâh çıkışı iş parçası sıcaklık ve kalıp temas bölgesi dağılımları.....	68
Şekil 4.13 9.Tezgâh iş parçasının seçilen bölgelerinin sıcaklık dağılımı	69
Şekil 4.14 9.Tezgâh merdane tork grafiği.....	69
Şekil 4.15 10.Tezgâh çıkışı plastik deformasyon miktarı ve gerilme dağılımları.....	70
Şekil 4.16 10.Tezgâh çıkışı iş parçası sıcaklık ve kalıp temas bölgesi dağılımları ...	70
Şekil 4.17 10.Tezgâh iş parçasının seçilen bölgelerinin sıcaklık dağılımı	71
Şekil 4.18 10.Tezgâh merdane tork grafiği	71
Şekil 4.19 11.Tezgâh çıkışı plastik deformasyon miktarı ve gerilme dağılımları.....	72
Şekil 4.20 11.Tezgâh çıkışı iş parçası sıcaklık ve kalıp temas bölgesi dağılımları ...	72
Şekil 4.21 11.Tezgâh merdane tork grafiği	73
Şekil 4.22 11.Tezgâh iş parçasının seçilen bölgelerinin sıcaklık dağılımı	73
Şekil 4.23 12.Tezgâh çıkışı plastik deformasyon miktarı ve gerilme dağılımları.....	74
Şekil 4.24 12.Tezgâh iş parçasının seçilen bölgelerinin sıcaklık dağılımı	74
Şekil 4.25 12.Tezgâh çıkışı iş parçası sıcaklık ve kalıp temas bölgesi dağılımları ...	75
Şekil 4.26 12.Tezgâh merdane tork grafiği.....	75
Şekil 4.27 12.Tezgâh merdaneye dik gelen ezme kuvvetleri.....	76
Şekil 4.28 Deneme çalışmaları görüntüleri	76
Şekil 4.29 İş parçası numuneleri.....	77
Şekil 4.30 İş parçası numunesi	77
Şekil 4.31 Soğutma platformu	78
Şekil 4.32 Tasarım, simülasyon ve üretim sonuçları kıyaslaması.....	79
Şekil 4.33 TTT diyagramı üzerine eklenmiş edilmiş soğuma grafikleri	80
Şekil 4.34 35,5°C/sn Soğuma hızıyla soğutulmuş numunelerin 1., 2. ve 3. bölge sertlik ölçüm grafiği.....	81
Şekil 4.35 35,5°C/sn Soğuma hızında soğutulmuş numunelerin 4. bölge sertlik ölçüm grafiği	81
Şekil 4.36 10,5°C/sn Soğuma hızıyla soğutulmuş numunelerin 1., 2. ve 3. bölge sertlik ölçüm grafiği.....	82
Şekil 4.37 10,5°C/sn Soğuma hızıyla soğutulmuş numunelerin 4. bölge sertlik ölçüm grafiği.....	82
Şekil 4.38 2,7°C/sn Soğuma hızıyla soğutulmuş numunelerin 1., 2. ve 3. bölge sertlik ölçüm grafiği	83
Şekil 4.39 2,7°C/sn Soğuma hızıyla soğutulmuş numunelerin 4. bölge sertlik ölçüm grafiği	84
Şekil 4.40 0,5°C/sn Soğuma hızıyla soğutulmuş numunelerin 1., 2. ve 3. bölge sertlik ölçüm grafiği	84
Şekil 4.41 0,5°C/sn Soğuma hızıyla soğutulmuş numunelerin 4. bölge sertlik ölçüm grafiği.....	85

Şekil 4.42 Hadde şartlarına göre soğutulmuş numunelerin 1., 2. ve 3. bölge sertlik ölçüm grafiği	85
Şekil 4.43 Hadde şartlarına göre soğutulmuş numunelerin 4. bölge sertlik ölçüm grafiği	86
Şekil 4.44 Soğuma hızı ortalama sertlik verileri grafiği	87
Şekil 4.45 Soğuma hızı ortalama sertlik verileri kıyas grafiği	87
Şekil 4.46 Çekme test numuneleri	88
Şekil 4.47 35,5°C/sn Hızla soğutulan numunelerin çekme test sonuçları	88
Şekil 4.48 10,5°C/sn Hızla soğutulan numunelerin çekme test sonuçları	89
Şekil 4.49 2,7°C/sn Hızla soğutulan numunelerin çekme test sonuçları	90
Şekil 4.50 0,5°C/sn Hızla soğutulan numunelerin çekme test sonuçları	91
Şekil 4.51 Hadde şartlarına göre soğutulan numunelerin çekme test sonuçları	92
Şekil 4.52 Soğuma hızı çekme, akma dayanımı kıyas grafiği.....	93
Şekil 4.53 Çekme testi sonrasında uzamış ve kopmuş numuneler	93
Şekil 4.54 Su ortamında soğutulmuş numune 1.Bölge inceleme görüntüleri	94
Şekil 4.55 Su ortamında soğutulmuş numune 2.Bölge inceleme görüntüleri	95
Şekil 4.56 Su ortamında soğutulmuş numune 3.Bölge inceleme görüntüleri	95
Şekil 4.57 Su ortamında soğutulmuş numune 4.Bölge inceleme görüntüleri	95
Şekil 4.58 Yağ ortamında soğutulmuş numune 1.Bölge inceleme görüntüleri.....	96
Şekil 4.59 Yağ ortamında soğutulmuş numune 2.Bölge inceleme görüntüleri.....	96
Şekil 4.60 Yağ ortamında soğutulmuş numune 3.Bölge inceleme görüntüleri.....	97
Şekil 4.61 Yağ ortamında soğutulmuş numune 4.Bölge inceleme görüntüleri.....	97
Şekil 4.62 Fan ortamında soğutulmuş numune 1.Bölge inceleme görüntüleri	98
Şekil 4.63 Fan ortamında soğutulmuş numune 2.Bölge inceleme görüntüleri	98
Şekil 4.64 Fan ortamında soğutulmuş numune 3.Bölge inceleme görüntüleri	98
Şekil 4.65 Fan ortamında soğutulmuş numune 4.Bölge inceleme görüntüleri	99
Şekil 4.66 Fırın ortamında soğutulmuş numune 1.Bölge inceleme görüntüleri.....	99
Şekil 4.67 Fırın ortamında soğutulmuş numune 2.Bölge inceleme görüntüleri.....	100
Şekil 4.68 Fırın ortamında soğutulmuş numune 3.Bölge inceleme görüntüleri.....	100
Şekil 4.69 Fırın ortamında soğutulmuş numune 4.Bölge inceleme görüntüleri.....	100
Şekil 4.70 Hadde Şartlarında soğutulmuş numune 1.Bölge inceleme görüntüleri...101	
Şekil 4.71 Hadde Şartlarında soğutulmuş numune 2.Bölge inceleme görüntüleri...101	
Şekil 4.72 Hadde Şartlarında soğutulmuş numune 3.Bölge inceleme görüntüleri...102	
Şekil 4.73 Hadde Şartlarında soğutulmuş numune 4.Bölge inceleme görüntüleri...102	

TABLO DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 3.1 Simufact.forming programında kullanılan parametreler	53
Tablo 3.2 Çelik kütüğün kimyasal kompozisyonu	53
Tablo 3.3 Profile ait mekanik özellikler	53
Tablo 3.4 Ürünün ve çelik kütüğün kimyasal kompozisyonu.....	54
Tablo 3.5 Deneyler için östenitleme sıcaklığı ve bekleme süreleri	55
Tablo 4.1 Charpy test sonuçları.....	80
Tablo 4.2 35,5°C/sn Soğuma hızına sahip soğutma prosesi ortalama sertlik verileri	82
Tablo 4.3 10,5°C/sn Soğuma hızına sahip soğutma prosesi ortalama sertlik verileri	83
Tablo 4.4 2,7°C/sn Soğuma hızına sahip soğutma prosesi ortalama sertlik verileri ..	84
Tablo 4.5 0,5°C/sn Soğuma hızına sahip soğutma prosesi ortalama sertlik verileri ..	85
Tablo 4.6 Hadde şartlarındaki soğutma prosesi ortalama sertlik verileri	86
Tablo 4.7 35,5°C/sn Soğuma hızında soğutulan numunelerin çekme test sonuçları..	88
Tablo 4.8 10,5°C/sn Soğuma hızında soğutulan numunelerin çekme test sonuçları..	89
Tablo 4.9 2,7°C/sn Soğuma hızında soğutulan numunelerin çekme test sonuçları....	90
Tablo 4.10 0,5°C/sn Soğuma hızında soğutulan numunelerin çekme test sonuçları..	91
Tablo 4.11 Hadde şartlarına göre soğutulan numunelerin çekme test sonuçları	92
Tablo 4.12 Soğuma ortamlarına göre tane alanı ve çevreleri.....	103

TEŞEKKÜR

Çalışmamın tüm evrelerinin yürütülmesi esnasında desteğini esirgemeyen, yol gösteren ve rehberim olan değerli danışmanım Doç. Dr. Osman ÇULHA'ya öncelikle teşekkür ederim.

Öğrenim hayatımın ilk yıllarından başlayarak, bana yol gösteren ve her daim kapılarını açık tutan ismini yazamadığım değerli hocalarıma da teşekkürü bir borç bilirim.

Eğitim öğretim hayatım boyunca bana hem maddi hem de manevi destek sağlayan, her zaman yanımda olan kıymetli Aileme, sevgili Eşime ve Oğluma teşekkür ederim.

Çalışma hayatımın başlangıcı olan ve halen bünyesinde çalışmaktan gurur duyduğum Kocaer Haddecilik San. Tic. Ve A.Ş.'ye, tüm şirket olanaklarını bu zaman diliminde bana kullanıma açtığı için müteşekkir olduğumu belirtmek isterim. Tüm bunlara ilave olarak, çalışmalarım sırasında yardımlarını esirgemeyen değerli yöneticim Sn. Aytaç BAŞSÜLLÜ'ye ve kıymetli Ar-Ge Merkezi çalışma arkadaşlarıma şükranlarımı sunarım.

Mehmet AKKAŞ
Manisa, 2019

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Asimetrik Kesitli Profilin Sıcak Haddeleme Üretim Süreçlerinin Simülasyon Destekli Tasarımı Ve Soğuma Şartlarının Ürün Özelliklerine Etkisi

Mehmet AKKAŞ

Manisa Celal Bayar Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Osman ÇULHA

Dünya demir-çelik üretiminde ülkemizin önemli aktörler arasında ilk onda olması ve bir ülkenin gelişmişlik seviyesi göstergelerinden birisinin de demir-çelik tüketimi olmasına istinaden bu sektöre yönelik yapılan çalışmalar güç geçtikçe önemini artırmaktadır. Küresel rekabetin önemli derecede arttığı son yıllarda demir-çelik sanayinde kitle üretim için en fazla kullanılan plastik şekil verme yöntemi olan sıcak haddeleme prosesi için de araştırma ve geliştirme çalışmaları yapılması gerekliliği ortaya çıkmıştır. Sıcak haddelemede ana girdi olan hammadde, enerji ve işçilik kayıplarının azaltılması sayesinde artan kalite ve verim avantajıyla uluslararası rakiplerle rekabet edilebileceği öngörülmektedir.

Bu tez çalışmasında, kullanılacak hadde pasoları geleneksel yöntemlerle tasarlanmış ve ardından gemi yapılarında kullanılan düşük karbon-mikro alaşımlı çelik hammadde ile asimetrik bir profil elde etmek için sonlu elemanlar metoduna göre hesaplama yapan bir simülasyon programı kullanılarak kontrollü hadde simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Üretim kusurlarının ortadan kaldırılması, gerilme-gerinim eğrileri, merdanelere etki eden kuvvetler ve merdanelerin giriş ve çıkışlarındaki tork gereksinimlerinin sağlanması için simülasyon destekli üretim çalışmaları yapılmıştır. Nihai ürünün mekanik özelliklerini iyileştirmek için üretim parametrelerinin optimizasyonu çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Simülasyon destekli faaliyetlerden elde edilen üretim parametrelerinin prototip üretimde kullanılması ve üretim sonrasında profilin farklı soğuma ortamlarında soğumaya bırakılması ile mekanik özelliklerin geliştirilmesi sağlanarak elde edilen üretim numunelerine çekme, çentik darbe ve sertlik testleri uygulanmıştır. Genel olarak soğuma hızına paralel olarak çekme, sertlik değerleri artarken çentik darbe değeri düşüş göstermiştir. Numunelerden alınan mikro yapı görüntülerindeki faz dağılımında; artan soğuma hızı ve mekanik değerlerdeki değişimle beraber yapıda çoğalan perlit fazının ana etken olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Simülasyon Destekli Tasarım, Kontrollü Sıcak Haddeleme, Mikro Alaşımlı Çelik, Sonlu Elemanlar Metodu, Asimetrik Profil, Gemi İnşa, Soğuma Ortamı.

2019, 110 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

Simulation-Aided Design of Hot Rolling Production Processes of Asymmetric Sectioned Profile and Effect of Cooling Conditions on Product Properties

Mehmet AKKAŞ

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

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Osman ÇULHA

The fact that iron-steel consumption is one of the most important actors of the country in iron and steel production in the world and that one of the indicators of the development level of a country is iron and steel consumption increases the importance of this sector. In the recent years, where global competition has increased significantly, it has become necessary to carry out research and development activities for the hot rolling process, which is the most commonly used plastic forming method for mass production in the iron and steel industry. It is foreseen that it can compete with international competitors with the advantage of increasing quality and efficiency due to the reduction of raw materials, energy and labor losses which are the main input in hot rolling.

In this thesis, the rolling pass to be used is designed with traditional methods and then controlled rolling simulations are performed by using a simulation program which calculates according to the finite element method to obtain an asymmetric profile with low carbon-micro alloy steel raw material used in ship structures. Simulation supported production studies were carried out to eliminate production defects, stress-strain curves, forces acting on rollers and torque requirements at the inlet and outlet of the rollers. In order to improve the mechanical properties of the final product, optimization of the production parameters was carried out.

The production parameters obtained from the simulation supported activities were used in prototype production and after the production, the profile was applied to the production samples in order to cool down in different cooling environments. In general, the tensile strength, parallel to the cooling rate increased, while the value of the notch impact decreased. In the phase distribution of microstructure images taken from the samples; It has been observed that perlite phase which multiplies in the structure together with the change in cooling rate and mechanical values is the main factor.

Keywords: Simulation Aided Design, Controlled Hot Rolling, Micro Alloyed Steel, Finite Element Method, Asymmetrical Profile, Ship Building, Cooling Media.

2019, 110 pages

1. GİRİŞ

Gemi yapılarının tasarımı, analizi ve değerlendirilmesi gibi öngörülü çalışmalar genellikle sayısal hesaplama yöntemleri ile yapılırken gerekli fiziki bilgi gemi inşa sektöründeki deneysel çalışmalarla sağlanmaktadır. Gemi inşa endüstrisinde gemiyi meydana getiren elemanların mekanik ve metalurjik özellikleri gemi yapılarının belgelendirme sürecinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu nedenle, gemi inşa faaliyetlerinde kullanılan yapısal elemanların üretiminde kullanılan parametrelerin, malzeme özelliklerini geliştirici bir şekilde düzenlenmesi gerekmektedir. Gemi yapımı için kullanılan yapısal elemanların üretiminin sonunda elde edilen yarı mamulün mekanik ve metalurjik özellikleri, yapısal bileşenlerin mekanik performansını yeterince doğrudan etkileyemez. Bu bileşenlerin ayrıca, çevresindeki öğeleri etkileyen stres ve deformasyonun büyüklüğü üzerinde doğrudan etkisi vardır. Bu nedenle, yapısal elemanların üretim süreçlerini optimize etmek esastır.

Gemi inşa sektöründeki teknolojik ilerlemelere paralel yeni tasarımların geliştirilmesi sektördeki rekabeti arttırmıştır. Planlanan ticari tasarımın talebini karşılamak için ekonomik şartlarda deniz taşımacılığının sağlanması büyük önem taşır. Geminin ekonomikliğine ek olarak, uzun servis ömrü ticari gemiden beklenen önemli bir özelliktir[1,6].

Geminin ana boyutlarının belirlenmesi; yüksek taşıma kapasitesi ve yüksek hız, düşük güç gereksinimi ve ölü ağırlık gerektiren karmaşık bir tasarım aşamasına sahiptir. Bu sayılan özellikler gemiden beklenmektedir; bunun için tasarım aşamasında yüksek spesifik mukavemetli elemanları tasarlamak ve kullanmakla mümkündür[1,5].

Sektördeki beklentilerin artması ile birlikte tasarımcılar, tasarım aşamasında simetrik kesitli elemanların gereksiz kullanımının önüne geçilebilmesi amacı ile uygulama tipine yönelik asimetrik kesitlere ihtiyaç duymuşlardır.

Uygulama tipine özgü asimetrik kesitli elemanları temin etmenin zorluğu ise tasarımcıları ya simetrik kesitli eleman kullanımına ya da işçilik ve malzeme maliyetlerini artıran kaynaklı konstrüksiyonlar ile asimetrik kesitli eleman üretimine itmiştir.

Asimetrik kesitli yapı elemanlarının tasarımlarda simetrik kesitli yarı mamul elemanların yerine kullanılması ile malzeme tasarrufu elde edilmesi ve ölü yüklerin azaltılmasıyla enerji verimliliği eldesine imkan sağladığından bu tip ürünlere olan talebi artırmıştır[2,3,7]. Seri üretimine yönelik bir plastik şekil verme yöntemi olan haddeleme tekniği, yeni ürün üretiminde ilk yatırım maliyetleri çok yüksek olsa bile yeterli pazar payının ortaya çıkmasıyla asimetrik kesitli çelik profil üretimini mümkün kılmış ve bu tip profillerin üretimini tetiklemiştir[4,8].

“Pesin ve ark., 2014”, aşırı plastik deformasyon yöntemini kullanarak üç merdaneli haddeleme tekniği ile çubuktan asimetrik kesitli profil üretimiyle ultra ince taneli ürün üretimini incelemiştir. Çalışma kapsamında sonlu elemanlar analizi temelli simülasyon faaliyetleri gerçekleştirmiş ve simülasyon çalışmaları kapsamında gerinim miktarı artışı ile sürtünme değerlerinin değişimi arasındaki ilişkiyi incelemiştir[9].

“Raudensky ve ark., 2002”, sıcak haddeleme ile şekillendirmede kullanılan merdanelerin proses esnasındaki optimum soğuma şartlarının nozul mesafesi, nozul basıncı ve nozul sayısı gibi parametrelerdeki değişimin, haddeleme rejimine ve malzeme termal özelliklerine uygun şekilde belirlenmesi amacı ile sonlu elemanlar analizleri ve deneysel çalışmalar yürütmüşlerdir[10].

“Serajzadeh, 2003”, sıcak haddeleme ile çubuk üretimi esnasında malzemedeki sıcaklık dağılımı ve hızın değişimini öngörebilmek amacı ile matematiksel model oluşturmuş ve oluşturulan modeli sonlu elemanlar metoduna göre analiz etmiştir. Çalışma kapsamında malzemedeki mikro yapısal değişimlerin yanı sıra, sıcaklık ve gerinim oranının akış gerilmesine etkileri de modellenmiştir[11].

“Serajzadeh, 2014”, sıcak haddeleme işleminden sonra profilin soğuma süreçlerine ait analizlere yer verilmiştir. Farklı soğuma hızı ve ortamlarında elde edilen araştırma sonuçları yer almaktadır[12].

“Adameczyk, 2006”, düşük alaşımlı yüksek mukavemetli yapısal çeliklerin hammadde (kütük), ısıl işlem, sıcak haddeleme ve mikro alaşım elementlerinin metalurjik süreçler içinde kontrolü ve mekanik özellikler üzerine etkisini irdlemiştir[13].

“Muniz, 2007”, sıcak ve soğuk haddeleme süreçlerinin non-lineer mekanik yaklaşımla modellenmesi ve süreç analizlerinin yapılması içerikli tez çalışmasını yürütmüştür. Non-lineer yaklaşımla elastoplastik davranış ve yüksek sıcaklık, mekanik özellikler, temas basıncı, sürtünme katsayısı ve model çeşitliliği yaratılarak üretim esnasında kullanılan parametrelerin proses üzerindeki etkilerini incelemiştir[14].

“Kawalla ve ark., 2010”, şekil ve süreç itibari ile paso sayısı sürekli haddeleme süreçlerinde fazlalık arz etmekte ve deformasyon hazırlama, orta grup ve finiş grubunda dağıtılmaktadır. Bu esasta yapılan çalışma sıcak şekillendirme prosesinin modellenmesi konusunda dikkat edilecek hususlar hakkında önemli bulgular içermektedir[15].

“Kawalla ve ark., 2011”, asimetrik kesite sahip profillerin paso-kalibre tasarımı sırasında ortaya çıkan kuvvet, tork, deformasyon enerjisi ve gereksinim duyulan tezgâh özellikleri hakkında teknik bilgiler içermektedir[16].

1.1. Tezin Amacı

Bu çalışmada; ülkemizde ulusal kaynakların kullanılarak gemi projelerinin artış gösterdiği dönem içerisinde, gemi gövdesini oluşturmada kaynaklı birleştirme işlemlerinden, işçilik operasyonlarından tasarruf eldesini sağlayarak simetrik kesitli profil kullanımı ile kıyaslandığında gemi ölü yüklerinin azaltılmasını sağlayarak gemi özgül mukavemetinin artırılmasını sağlayan asimetrik kesite sahip gemi profilinin sıcak haddeleme tekniği ile üretimi hedeflenmiştir. Bu kapsamda ise kuruluş altyapısındaki hadde ekipmanları referans alınarak asimetrik kesitli profile ait hadde-paso tasarımları yapılarak Simufact.forming yazılımı ile modellenerek ve simüle edilerek kalibre tasarımının doğrulanması sağlanmıştır. Simülasyon destekli üretimlerde iş parçası olan kütüğün hadde giriş çıkışlarındaki kesit değişimleri, gerilme-deformasyon miktarları ve sıcaklık dağılımları irdelenerek prosesin hadde kusurlarından arındırılması sağlanmıştır[17,18,19,20]. Simülasyon destekli üretimlerde elde edilen parametrelerin gerçek üretimlerde kullanılması ile asimetrik kesitli profilin üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretimlerden elde edilen numuneler farklı soğuma ortamlarında soğumaya maruz bırakılarak akabinde çekme ve darbe testleri uygulanmış, metalurjik incelemeler gerçekleştirilmiştir.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

2.1. Sıcak Haddelme

Haddelme, metallerin bir çift merdaneden geçirildiği bir şekillendirme işlemidir. İki tür haddelme süreci vardır. Bunlar yassı ve profil haddelmedir.

Yassı haddelme işleminde ürünün nihai şekli şerit (kalınlığı 3mm'den daha az) veya levha (kalınlığı 3mm'den daha fazla) olarak sınıflandırılır. Profil haddelme işleminde nihai ürün yuvarlak çubuk veya diğer şekilli yapısal çelik (Kiriş, kanal, raylar vb.) ürünlerdir. Sıcak haddelmede ilk aşamada kütükler blum ve slab olarak şekillendirilir. Bu işlem metal kütüklerin merdaneler arasından geçirilerek plastik deformasyona uğratmayı içerir[21]. Haddelme metallerin şekillendirilmesinde en yaygın kullanılan metottur, kitle üretim, yüksek üretkenlik ve nihai ürünün diğer şekillendirme proseslerine göre kontrolü daha iyi sağlanır. Özellikle inşaat ve diğer endüstrilerde kullanılacak çeliklerin üretiminde önemlidir.

Haddelme haddelenmiş iş parçalarının sıcaklığına göre sınıflandırılır. Metalin sıcaklığı yeniden kristalleşme sıcaklığının üstündeysen sıcak haddelme olarak adlandırılır. Sıcak haddelme işlemi için metal yumuşak ve sünek kaldıkça büyük deformasyon art arda tekrar edilebilir[22]. Merdane ve metal yüzeyi arasındaki sürtünme sonucu metal ham madde yüksek basınç gerilmelerine maruz kalır. Haddelme, malzemeyi aynı çevresel hızda ancak zıt yönde, örneğin saat yönünde ve saatin ters yönünde döndürülen iki merdaneden geçirilmesini içerir. Merdanelerdeki mesafe boşlukludur, bu da onlara giren metal ham maddenin yüksekliğinden biraz daha azdır[23]. Bu merdaneler, çubuklar veya profillerin sıcak haddelme işlemi için düz veya şekilli (konturlu) olabilir. Bu koşullar altında merdaneler metal hammaddeyi kapar ve kesit alanını düşürür bu sayede malzemenin uzamasında sağlanmış olur[24].

- Çoğu çelik ürünü için ilk sıcak haddelme işlemi kaba haddelmedir. (Blumlar, slablar veya kütükler)
- Boyuta göre dizayn edilen ve genellikle 600-1400 mm. çaplı merdaneye sahip ikili tersinir haddelerdir.

- Blumlar/ slablar başlangıçta 1100°C-1300°C sıcaklığındadır. Çeliklerde sıcak haddeleme işleminde son tezgâh çıkışında ürün sıcaklığı ise 900°C-1000°C arasında değişir. Ve çelik daima üst kritik sıcaklığın üzerindedir.
- Çelik, nihai kalınlık ve şekile ulaşıncaya kadar merdaneler arasında ezilir. Bunu başarmak için merdaneler binlerce ton Newton kuvveti uygular. Merdaneler muazzam rijitlikteki gövdelere monte edilen ve güçlü elektrik motorları ile tahrik edilen büyük muylulu rulmanlarda çalışır. Bunlar hadde ayakları olarak adlandırılır. Bir haddehanenin yerleşimi basit tekli bir tezgâhtan ya da yan yana veya sırayla konumlandırılmış birkaç tezgâhtan oluşur.

Yaygın biçimde roleli yol olarak adlandırılan bir mekanizma, iş parçasını merdanelere yönlendirir ve merdanelerden çıkan parçaların taşınması için bir başka roleli yol kullanılır. Merdanelerin önündeki roleli yol, çeliği merdaneler arasında kapmaya ve çekmeye karşı zorlamaktadır[21]. Çelik, merdaneler arasındaki mesafeye ve eşit kalınlığa göre ezilir, eğer merdaneler pasolu ise paso tasarımına göre şekillenir. Sıcak haddeleme, az miktarda haddeleme döngüsü ile metalin büyük deformasyona uğramasına imkân tanımaktadır.

2.1.1.Hammaddenin Tavlanması

Haddeleme uygulamasının en önemli ön koşullarından biri verilen blumun/kütüğün/slabın oda sıcaklığından haddelenebilir sıcaklığa kadar ısıtılması işlemidir. Bahsedilen bu yüksek sıcaklıkta çelik oda sıcaklığında perlitin ve sementitin ikili fazlarından tek bir östenit fazına dönüşür. %0,68 karbon içeren çelik için böyle bir faz değişiminin sıcaklığı 738°C'dir. Düşük veya daha yüksek karbon yüzdesinde bu faz değişim sıcaklığı artar ve bu nedenle, sıcak haddeleme için çeliğin ısıtıldığı sıcaklık buna göre artırılır. Bununla birlikte, uygulamada çelik, faz değişim sıcaklığının yaklaşık 50°C ile 100°C kadar üzerinde bir sıcaklığa kadar tavllanır. Sıcaklıktaki bu artış çeliğin farklı yüzdelik seviyelerde karbon ve demir içermesinin yanı sıra faz değişim sıcaklığını etkileyen diğer alaşım elementlerini de içermesi nedeniyle olmaktadır[21,24].

Sıcak haddeleme birden fazla aşamada (tezgâhta) gerçekleşir ve her aşamada ezme/uzama yapılır. En büyük ezme yeniden kristalleşme veya faz değişim sıcaklığının üstünde bir sıcaklıktadır. Buna bağlı olarak soğuk hammadde yeniden kristalleşme sıcaklığından daha yüksek bir sıcaklığa ısıtılır. Bu nedenle hammaddenin ihtiyaç duyduğu en yüksek sıcaklık; toplam ezme miktarına, haddelendiği aşamaların (tezgâh) sayısına ve çelik hammaddenin kompozisyonuna bağlıdır. Blum/kütük/slab`lar haddeleme sıcaklığına tav fırının da ısıtılmaktadır. Bu sıcak haddeleme işleminin başlangıç noktasıdır.

2.1.1.1. Tav Fırını

Soğuk hammaddeler yumuşak hale getirilmek için ısıtılır ve böylece haddeleme için uygun olur.

Tav fırını üç bölümden oluşur; duvarlar, çatı ve taban. Fırının içi birkaç kat refrakter tuğla ile kaplanmıştır. Cam yünü ile izole edilmiştir. Fırının ilk ısıtma bölgesi yaklaşık 1000°C sıcaklığa sahiptir. Bu bölge düşük alüminalı refrakter tuğlalarla kaplanmıştır. Fırının tavlama bölgesinin 1200°C üzerinde bir sıcaklığı vardır. Bu bölge için yüksek alüminalı refrakter tuğlalar uygundur[21].

Tavlama, soğuk hammaddenin fırının soğuk ön tarafından yüklendiği ve ısıtıldığı sürekli bir işlemdir. Sıcak blum/kütük/slab (haddelenebilir sıcaklıkta) tav fırınının arka tarafından deşarj edilip haddeleme yönünde ilerlemektedir. Sıcak brülör alevlerinden ve baca gazı kaynaklı ısı enerjisi, fırının ön tarafından deşarj ucuna doğru giden soğuk hammaddeye aktarılır. Bu ısı enerjisi alışverişi, sıcak alevler, sıcak baca gazları ve sıcak ocak duvarları yoluyla iletim, konveksiyon ve radyasyon vasıtasıyla gerçekleşir. Sıcak kütüklerin haddeleme sıcaklığı 1150°C-1200°C arasında değişir[25]. Dolayısıyla fırının içindeki sıcaklık daha yüksektir.

Çeşitli tasarımlara sahip çok sayıda tav fırını bulunmaktadır. Isıtma bir hava üfleme fanı üzerinden sağlanan yanma havası yardımı ile fırın içindeki akaryakıt veya gaz yakılarak gerçekleşir. Hava, yakıtın oksidasyonundan kaynaklanan ekzotermik ısı ısısı için tek oksijen kaynağıdır. Bu tepkime ocakta ısı girdisinin kaynağıdır.

Haddelenebilme sıcaklığının elde edilmesi için tavlama, yakılan yakıt miktarına (akaryakıt / gaz) bağlıdır. Tavlamanın kalitesi aşağıda belirtilen ölçütlere bağlıdır:

- Fırın verimi,
- İstenilen oran, (mevcuttaki haddeleme oranına bağlı olarak)
- Soğuk hammaddenin fırına şarjdan itibaren deşarj sonuna kadar hareket süresi,
- Isıtılacak girdi hammaddenin boyutu ve çelik bileşimi,

Tav fırını yakıt brülörleri; ocak tabanında, tavlama bölgesinde ve fırınının deşarj bölgesinde bulunmaktadır.

Yakıt brülörlerinden çıkan sıcak alevler şarj edilen hammadde üzerinden düzgün bir şekilde yayılır, ısının enerjisini çatı ile duvarlardan gelen iletkenlik ve konveksiyonla aktarırlar. Baca gazı tav fırınının (şarj etme) ucuna doğru çekilir ve duman geçişinden geçerek bacadan reküperatör vasıtasıyla atmosfere geçer. Bu ısı transferinin etkinliği, alevlerin uzunluklarına ve sıcak baca gazının soğuk hammadde ile etkileşime girme süresine bağlıdır. Isı iletkenliği zaman alır ve malzemenin bileşimi ile kuvvetli bir şekilde ilişkilidir. Isı iletkenlik katsayısı birçok çelik kalitesinde birbirine benzerdir ancak paslanmaz çeliklerde çok daha düşüktür. Alevlerin uzunlukları, yakıt girişi miktarına ve içinde üflenen ilgili yanma havası (oksijen) miktarına göre kontrol edilir[26].

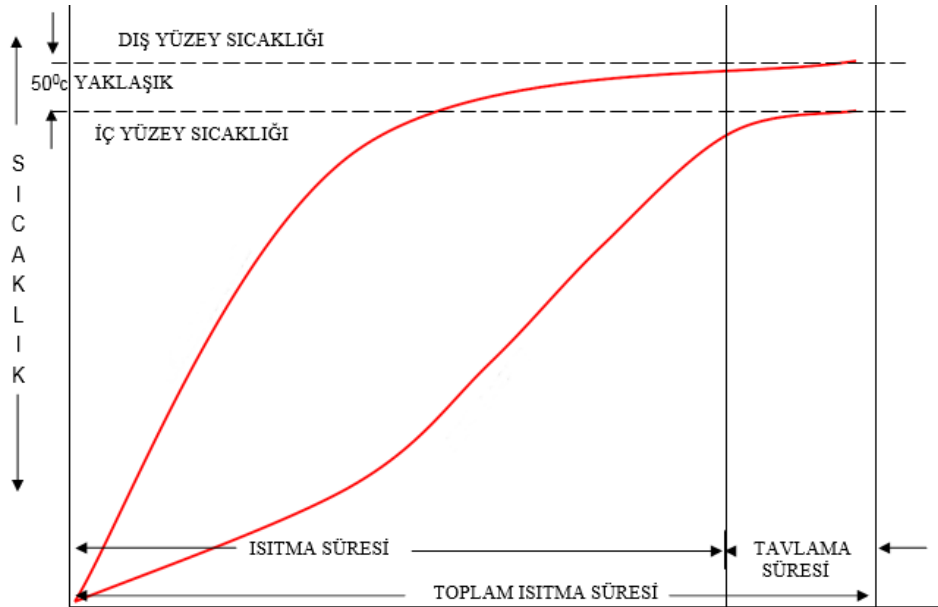
Duman kanalındaki valfler aynı zamanda alevlerin uzunluklarının kontrolünde ve sıcak dumanın hammaddenin üzerinde yayılma süresinde önemli bir rol oynamaktadır. Fırının içindeki sirkülasyon miktarı (emme) , bu valflerin kontrol edilmesi ile muhafaza edilir. Duman kanalındaki valflerin açılması sirkülasyonu arttırır, alevi uzatır ancak dumanın ısı transferi için fırında kalma süresini kısaltır. Bununla birlikte daha düşük sirkülasyon sıcak baca gazının fırın içindeki kalış süresini uzatır ancak alev uzunluğunu azaltır. Valflerin dikkatli kontrol edilmesi sayesinde ısı girişi ve ısı transferinin etkinliği önemli derecede kontrol edilir.

Tav fırınının refrakter kaplı duvarları sıcak alevlerle ısıtılır. Bu sıcak refrakter tuğla duvarlar sıcaklığın sıcak hammaddeden duvarlara dağılmasını önleyerek sıcaklığın korunmasını yani sıcak hammaddenin korunmasını sağlar.

Hammaddenin ısınması fırının şarj ucunda başlamaktadır. Çelik hammaddenin dış yüzeyi sıcak duman ile doğrudan temas halinde bulunur ve bu nedenle sıcaklığı yükselir. Hammadde deşarj sonuna doğru ilerledikçe daha yüksek ısı içeriğine sahip duman ile temas halindedir. Hammaddedeki yüzey sıcaklığı daha hızlı yükselmektedir.

Dış yüzeyden hammaddenin çekirdeğine ısının transferi yavaş ve zaman alan bir işlemle iletilir. Bu nedenle bu ısıtma işlemi süresi boyunca dış yüzey ile çekirdek arasında maksimum sıcaklık farkı vardır.

Çelik deşarj ucuna doğru ilerledikçe en yüksek sıcaklığa sahip duman ile temas halinde kalır. Hammaddenin dış yüzey sıcaklığı kademeli olarak artarken, dış yüzey ile iç çekirdek arasındaki sıcaklık farkı da belirgin bir şekilde toparlanmaktadır[26]. Bu aşamaya kadar ısıtma olarak adlandırılır. Aşağıda verilen Şekil 2.1`de zamana göre iç ve dış yüzeyler arasındaki sıcaklık farkı gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Zamana bağlı iç ve dış yüzey sıcaklığı

Isıtma işleminin sonraki aşaması, dış yüzey ile çekirdek arasındaki sıcaklık farkı kademeli olarak minimuma getirildiğinde bu aşamaya tavlama denir. Bununla birlikte çekirdek ve yüzey arasındaki sıcaklık farkı hiçbir zaman sıfır olmaz. Uygulamada gözlemlenen en düşük sıcaklık farkı yaklaşık 50°C kadardır.

Verilen hava (oksijen), giren yakıtın tamamen yanması için gereken minimum miktardan daha düşükse bir miktar yanmamış yakıt kalır. Bu durum bacanın tepesinden çıkan siyah duman (yanmamış yakıt) ile kolayca tespit edilebilir. Atmosferde bir sürü değerli yakıt bu şekilde kaybolur. Bu fırının ısıtma verimliliğini düşürür ve işletme maliyetini arttırır.

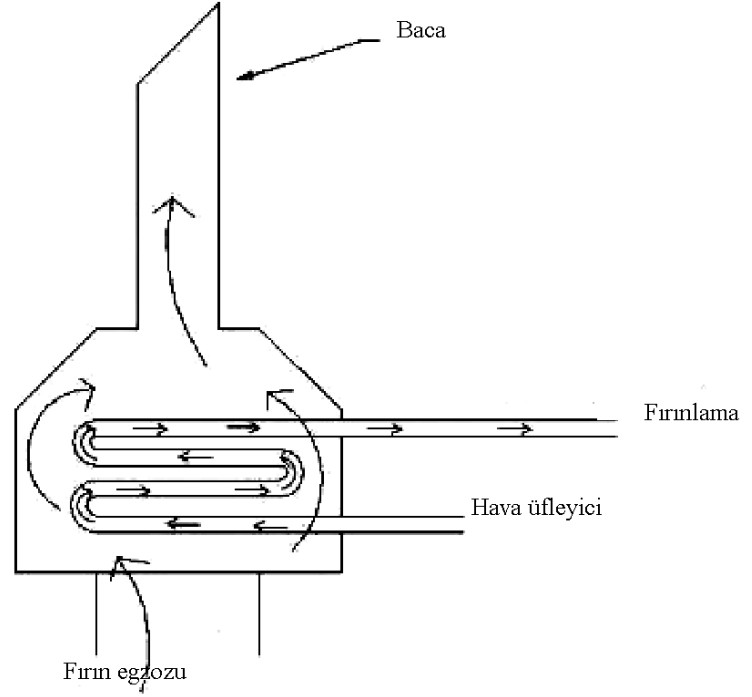
Fazla soğuk hava (oksijen) daha fazla oksijen anlamına gelir. Bu aşırı miktardaki oksijen giriş yakıtının tamamen yanması için yeterli olmanın yanı sıra, arta kalan balans oksijen miktarı kolaylıkla sıcak metal yüzeyinde tufal oluşturmaktadır[26]. Oksidasyon metal çıktısını ve dolayısıyla verim yüzdesini azaltır. Dolayısıyla üretim maliyeti olumsuz etkilenir. Fırın boyunca üflenen aşırı soğuk hava, fırının içindeki ısı enerjisini uzak tutar ve fırının soğuk çalışması dolayısıyla ısıtma verimliliğinin düşmesine sebep olur.

2.1.1.2. Reküperatör

Reküperatör, iki tarafından kuşatılmış birer valfle birlikte (biri reküperatör ve fırın arasında, diğeri reküperatör ve baca arasında yer alan) duman kanalına yerleştirilir.

Yakıtın yanması için gerekli olan üfleyiciden gelen hava, reküperatörün içerisinde yerleştirilmiş boruların içerisinden geçerken sıcak hava ise boruların dışından dik açılı olarak geçmektedir. Reküperatör kutusundan geçen hava borusu düz değildir. Reküperatör kutusu içinde 180° de (küçük yarıçap eğrisi ile) birçok düzgün bükümlü boru kıvrımı yer almaktadır. Bu yüzey alanı artışı ve dolayısıyla sıcak duman ile soğuk havanın verimli ısı transferleri için temas süresini arttırır. Soğuk havaya sahip boru ucu kutunun arka ucundan reküperatör kutusuna girer ve boru ucu sıcak havayla duman kanalındaki kutunun ön ucundan çıkar[27]. Şekil 2.2`de yukarıda anlatılmış olan reküperatörün çalışma prensibi verilmiştir.

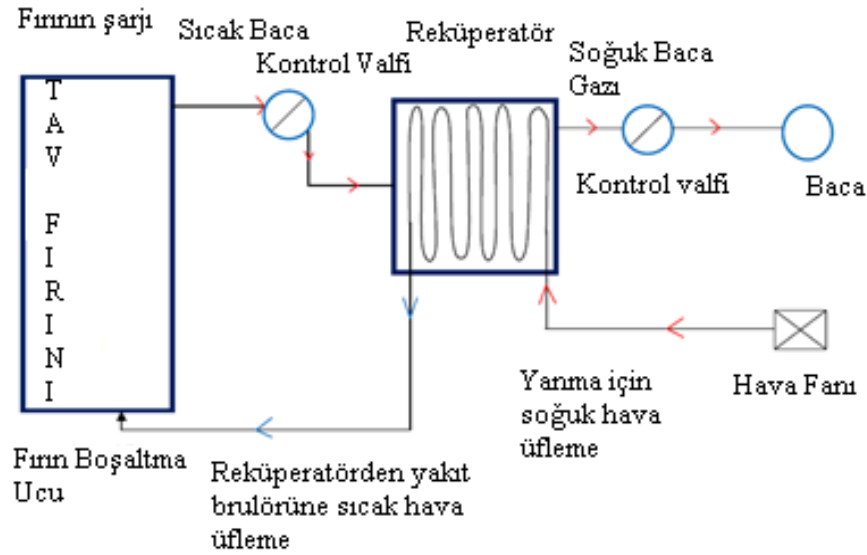
REKÜPERATÖR



Şekil 2.2 Reküperatör çalışma prensibi

Rekuperatör, sıcak dumanda bulunan değerli fiziksel ısıyı geri getirir ve yakıtın yanması için fırına verilen soğuk havaya (hava üfleyiciden) aktarır. Fırına toplam ısı girişi, havanın oksijeni ve yakıt (gaz ve fuel oil) arasındaki oksidasyon reaksiyonunun ısısıdır. Ayrıca rekuperatör yardımı ile baca gazından geri kazanılan fiziksel ısıdır. Bu nedenle, bu tamamlayıcı ısı miktarı aslında yakıt girdisini arttırmadan kullanılabilir hale getirilir. Böylece tav fırınının ısıtma verimi büyük ölçüde iyileştirilir[27].

Valflerin (klapelerin) açılıp kapanmasıyla, rekuperatör içindeki sıcaklık kontrol edilir, yani soğutulur veya sıcaklık artırılır. Rekuperatör içindeki sıcaklık düştüğünde, rekuperatörlerden sonraki valfi kapatılarak baca geçişindeki emme işlemi azaltılır. Bu, kutunun içindeki sıcak baca gazının kalma süresini artırır. Böyle rekuperatör içindeki sıcaklık artar. Şekil 2.3`de rekuperatör fırın ilişkisi gösterilmiştir.



Şekil 2.3 Reküperatördeki sıcak duman, soğuk hava ve ısı transferinin şematik gösterimi

Tam aksine, reküperatör içindeki sıcaklık artarsa, o zaman reküperatörden sonraki vanayı (klapeyi) açarak baca geçişindeki emme işlemi artar. Bu, reküperatörün içindeki sıcak baca gazının kalma süresini azaltır. Böylece reküperatör içindeki sıcaklık düşer.

Reküperasyon borularının erimesinin bir sonucu olarak sızıntılar olduğundan reküperatörün içindeki sıcaklık anormal derecede yükselmesine izin verilmemektedir. Sızıntılar soğuk havanın baca geçişine sızmasına ve yanma için daha az hava olmasına neden olur.

Reküperatörlerin ısı iyileştirme oranları rejeneratif ile karşılaştırıldığında düşüktür. Son gelişmelere rağmen reküperatörler atık ısının %70-%80 'ini iyileştirir ve hava önceden 850°C-900°C 'ye kadar ısıtılabilir.

2.1.2. Rekristalizasyon

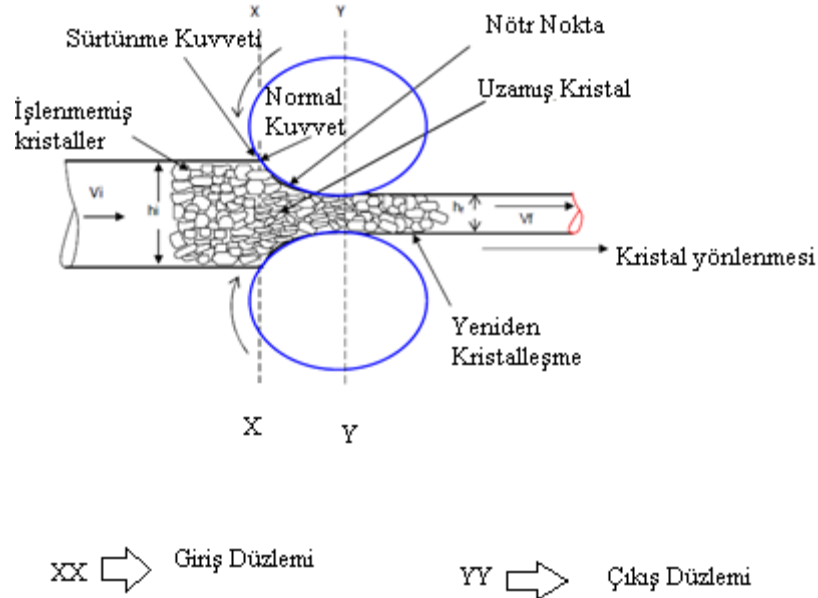
Sıcak ve soğuk haddeleme arasındaki ayrım, malzemenin yeniden kristalleşme sıcaklığına göre işleme sıcaklığına bağlıdır. Haddeleme haddelenmiş metallerin sıcaklığına göre sınıflandırılır. Metal hammadde sıcaklığı yeniden kristalleşme sıcaklığının üstünde ise, işlem sıcak haddeleme olarak adlandırılır. Hammadde

sıcaklığı yeniden kristalleşme sıcaklığının altında ise işlem soğuk haddeleme olarak adlandırılır.

Sıcak haddeleme, çelik metal hammaddenin sıcaklığını, üst kritik sıcaklığına östenitik faza yani yeniden kristalizasyon sıcaklığının üzerine yükseltmek suretiyle gerçekleştirilir. Ardından istenilen profil şekli ve şartlara göre malzemeye oluşturulan kontrollü yük uygulanır.

Malzeme haddelenirken yeniden kristalleşme sıcaklığının üstünde kalmasını sağlamak için sıcaklığı izlenir. Bir emniyet faktörü olarak, son tezgâhta malzeme sıcaklığının genellikle yeniden kristalleşme sıcaklığının 50°C - 100°C üstünde olması sağlanır[28]. Sıcaklık bu kritik seviyenin altına düşerse, sıcak haddeleme olarak adlandırılmaz. Şekil 2.4'de haddelemede tanelerin uzaması gösterilmiştir.

Östenit taneleri haddeleme yönünde deforme olur ve uzar. Bununla birlikte bu ince taneler deformasyon bölgesinden çıktığı anda yeniden kristalleşmeye başlar.



Şekil 2.4 Sıcak haddeleme ve rekristalizasyon

Tek yönlü östenit taneleri, sıcaklık üst kritik sıcaklığın altına düştüğü anda çözünür. Bunların tamamı, ferrit-perlit yapısına çekirdeklenmek/yeniden

kristalleşmek ve büyümek için yeni tanecikler setiyle değiştirilir. Yeniden kristallendirilen ferrit-perlit tanecikleri eşit eksenli mikro yapıyı sürdürür ve metal özelliklerinin tek yönlü ve pekleşmiş olmasını önler[28].

Genellikle mukavemette ve sertlikte azalma ile beraber aynı zamanda süneklik de artar. Yeniden kristalleşme deformasyon sırasında veya sonrasında (soğutma sırasında veya onu takip eden ısıtım sırasında) meydana gelebilir.

Yeniden kristalleşme oranı, uygulanan deformasyon miktarından büyük ölçüde etkilenir. Aşırı deforme olmuş malzemeler, daha az deforme olanlardan daha hızlı yeniden kristalleşir. Nitekim belirli bir yüzde deformasyonun altında yeniden kristalleşme meydana gelmeyebilir. Daha yüksek sıcaklıklarda deformasyon aynı zamanda iyileşmeyi sağlar. Malzemeler, oda sıcaklığında deforme olanlardan daha yavaş yeniden kristalleşir.

Yeniden kristalize edilmiş tanelerin hacim oranı belirli bir süre boyunca sıcaklık ile artar. En önemli endüstriyel kullanımlar arasında daha önceden sünekliğini kaybetmiş, sertleşmiş soğuk iş çeliklerinin yumuşatılması ve son üründe tane yapısının kontrol altına alınmasıdır.

2.1.3. Tufal Oluşumu ve Etkileri

Tufal kalınlığı / oluşumu, ısıtılan hammadde sıcaklığı, hammadde kimyasal kompozisyonu ve fırın atmosferi (aşırı hava olup olmadığı, yani fazla oksijen var mı yoksa mevcut olmadığı ve olduğu zaman) tarafından etkilenir. Fırında yüksek sıcaklık ve oksitleyici atmosferde harcanan zaman arttıkça daha kalın tufallere ve dolayısıyla daha fazla metal kayıplarına neden olur. Uygulamada çelikte maksimum tufal katmanı oluşumunun yaklaşık 800°C gerçekleştiği gözlenir.

Tufal oluşumu, değerli çelik metalin kaybedilmesi demektir. Genellikle hammadde ağırlığının % 1'idir[29]. Bu miktarda çelik metal üretmek için harcanan enerji birkaç adımda kullanılmıştır; cevherin çıkarılması ve kırılması, cevheri indirgeme, izabe, döküm ve tavlama'dır. Tufal kayıplarının azaltılması belirli miktarlarda çelik üretmek için kullanılan toplam enerjinin azalmasına eşdeğerdir.

Fırın atmosferinin geliştirilmiş kontrolü fırın içerisinde daha düşük ve daha kararlı oksijen içeriği ve dolayısıyla tufal oluşumunu azaltarak metal kaybını azaltılır. Bununla birlikte metallerin çoğunda yüzey oksidasyonu yaşanır, bu da malzeme kaybına ve nihai üründe zayıf yüzey kalitesine neden olur. Otomatik fırın kontrolünden dolayı yeniden kristalleşme işleminin kalite iyileştirmesi dolaylı enerji verimliliğine katkıda bulunur ve dolayısıyla direkt yakıt tasarrufu ile aynı şekilde hesaplanır. Ancak birlikte sıcak çeliğin yayılma ısısını önlemek için hammaddenin dış yüzeyinde çok ince bir tufal oluşturulur.

- Tufal, ısı iletkenliği çok düşük olan yalıtım malzemesi örtüsünü oluşturur.
- Hammaddeler tavlandıktan sonra tezgâhlara girmeden tufalinden temizlenir, fakat zamanın bir fonksiyonu olarak ikincil tufal oluşumu hemen başlar.
- Yüksek sıcaklık tufali çok serttir ve merdanelerin aşınmasının ana nedenidir. Düşük sıcaklıkta oluşan daha yumuşaktır. Tufalli haddelemede haddelenmiş ürünlerin kalitesi düşmektedir.
- İkincil demir oksitlerin temizlenmesi daima tavsiye edilir.

2.1.4. Metal Yanması

Metal kaybını büyük ölçüde etkileyen diğer istenmeyen bir özellik de metalin yanmasıdır. Aşırı ısınma nedeniyle giren hammaddenin yanması/erimesiyle sonuçlanarak metal kaybına yol açmaktadır.

Bu fırın deşarjının (tav fırını) düşük olması veya haddelemenin istikrarlı olmadığı fakat ilgili yakıt ve hava girişinin de değiştirilmediği zaman büyük ölçüde olur. Metal yanması nedeniyle metal kaybı olur ve bu da düşük verime neden olur.

Girdi çeliği karbon ve diğer alaşım elementlerinin aşırı oksidasyonu nedeniyle bozunur. Bu durum, tav fırınının içerisindeki yüksek sıcaklığa sahip hammaddenin ilerleyişinin herhangi bir sebepten ötürü uzadığında gerçekleşir[30].

Fırın verimliliği hesaplanırken tüm bu faktörler dikkate alınır. Böylece tavlamanın kalitesi hem enerji girdisi / aktarım açısından hem de metalin oksitlenmesi / yanması sonucu oluşan metal kaybı açısından (cüruf oluşumu) önemlidir[31].

2.1.5.Haddehane Tipleri ve Tezgâhların Yerleşimi

Bir çift yatak içine yerleştirilmiş merdane seti tezgâhı oluşturmaktadır. Tezgâhların tesis yerleşimindeki özel fonksiyonu tezgâhların birden fazla şekilde kombine edilip yerleştirilmesiyle oluşturulmaktadır.

Haddehaneler, merkezler arasındaki mesafeye göre sınıflandırılırlar. Boyut ortalama merdane çapıyla belirlenir.

Kütük, hadde tezgâhlarının her aşamasında farklı hızlarda hareket eder.

Uzun ve yassı ürünlerin üretim lotları belirgin şekilde farklılık göstermektedir. Bu nedenle haddelenen kesitlere ait malzeme akışları bir dereceye kadar farklılık gösterir.

Sürekli döküm teknolojisinden önceki zamanlarda ingot dökümler slab veya blum haddehanelerinde 200 mm kalınlığa kadar haddelenmekteydiler. Blumlar kare şekillidir oysaki slablar dikdörtgen kesitli olmaktadır. Slablar sıcak sac haddeleri veya levha haddehaneleri için hammadde olarak girdi malzemesidir ve blumlar ise kütük haddehanelerinde ve büyük ölçekli yapısal çelik haddehanelerinde kütüğe haddelenmektedirler.

Sac haddehanelerinin ürünleri bobinlere sarılmaktadır ve daha sonrasında soğuk haddehanelerde hammadde olarak kullanılır veya sanayiciler tarafından olduğu gibi kullanılmaktadır. Kütükler tekrardan haddeleme için profil veya çubuk haddehanelerinde hammadde olarak kullanılır.

Profil haddehaneleri köşebent, u profil, h profil, yuvarlak ve altıgen gibi birçok şekle sahip profili üretebilmektedir. Çapı 16 mm den küçük olan yuvarlakların kütükten üretilmesi daha efektifir.

Yassı ürünlerin sıcak haddelenmesi için kaba hadde (genellikle-2`li hadde tezgâhı), orta grup hadde (genellikle-4`lü hadde tezgâhı) ve bitirme grubu hadde (4`lü yüksek tezgâh) tezgâhlarından oluşmaktadır. Sac üretimi için ara makas gerekir ve

levha üretimi için ise bir veya iki tane tersinir 4`lü hadde tezgâhı ile makaslara gereksinim duyulmaktadır.

Uzun ürünlerin üretimi için tesisler genellikle blumları, ürün tamamlanıncaya kadar enine kesitini şekillendiren farklı merdaneler arasında kademeli olarak geçiren bir dizi tersinir 2`li veya 3`lü hadde (Duo ve Trio Tezgâhlar) tezgâhlarından oluşur[32].

Duo Hadde, Çekmeli: Tezgâh üzerinde yatay olarak üst üste iki adet merdane bulunur, bu tip tezgâhlar duo tezgâh olarak adlandırılmaktadır. Hammadde sıralı ezmeler için tezgâh girişine geri getirilmektedir. Bu yalnızca bir yönde (diğer yöne dönemeyen) veya iki yönde dönebilen (geri döndürülebilen) iki merdaneden oluşur.

Duo Hadde, Geri Çevrilebilen; Haddeleme prosesi, malzemeyi merdanelerin dönüş yönlerinin tersine çevrilmesi sağlanarak tezgâhlar arasından ileri ve geri gönderilir. Duo tezgâhlar ya da tersinir tezgâhlarda çelik aynı merdanelerden ileri ve geri giderek veyahut birden fazla sıralı tezgâhlardan kütüğün geçmesi ile sürekli haddehanelerde olmaktadır.

Trio Hadde; Trio haddeler dikey olarak sıralanmış üç merdaneden oluşmaktadır. Çelik hammadde alt ve orta merdane arasından geçerek ileri gitmekte, orta ve üst merdaneden geçerek geri gelmektedir. Üç merdanede de elektrik motoru ile tahrik edilmektedir ve merdanelerin dönme yönü değiştirilmeden birden fazla ezme gerçekleştirilmektedir.

Dörtlü Hadde; Küçük çaplı merdanelerin büyük çaplı merdaneler ile desteklendiği sistemdir. Küçük merdanelerin kullanılması güç tüketimini azaltmaktadır fakat merdanelerin eğilmeye meyili artmaktadır. Bu konfigürasyonda, küçük çaplı olan merdaneler iş merdanesi olarak anılmaktadır, bunlar gücü düşürmek için kullanılmaktadır ve diğer iki merdane destek merdanesi olarak anılmaktadır, bunların görevi de iş merdanelerine destek sağlamaktır. Destek merdaneleri genellikle iş merdanelerinden daha büyüktür, bunların iş merdanelerinden hemen sonra

koyulmalarının sebebi ise çarpılmanın önlenmesidir. Bunlar 4`lü hadde tezgâhı olarak adlandırılmaktadır.

Altılı veya Sendzimir Hadde; Her bir iş merdanesinin iki adet destek merdanesi ile çalıştığı sistemdir. Bu farklı konfigürasyon daha küçük çapta iş merdaneleri ile çalışmaya imkân vermektedir.

Tandem Hadde (Sıralı Hadde); Kontinü hadde tezgâhlarında yapılan sürekli haddeleme işlemidir. Sürekli haddeleme işleminde, kütük merdaneler arasına getirilir ve eşit eksenlerle bir şekle dönüştürülür. Bu şekil daha sonra farklı eksenlerle farklı bir şekle dönüştürülür ve bu şekilde devam eder. Haddeleme kütüğün her tezgâhta 90° döndürülmesinden sonra uygulanmalıdır[32].

Kontinü çubuk haddehaneleri bağımsız birden fazla tezgâhtan oluşur; her birinin kendi motoru bulunur ve dönme hızı serbestçe ayarlanabilmektedir. Çift veya tek sayıda hadde tezgâhından oluşabilirler. Üç grup tezgâh vardır, bunlar; kaba grup, orta grup ve finiş grubudur.

Karşılıklı iki merdane yivi hadde pasosunu oluşturmaktadır. Belirlenmiş pasolar x,y düzlemlerinde iki eşit eksene sahiptirler. Kare-Oval deformasyonlarında çubuğun 90°den daha az döndürülmesi gerekmektedir. Çubuğun sıcak ölçüsü 1,013 çarpanı kadar soğuk ölçüsünden büyüktür. Kare ve yuvarlaklar ara pasolardır. Bir dizilim boyunca sadece belirli pasolar oluşturulur. Kontinü çubuk haddelerinde her 90° çevirmeden sonra ezmenin uygulanması zorunluluğu yoktur. Geleneksel haddehaneler sadece yatay tezgâhları kullanmaktadırlar[32].

Eğer v_1 ve v_2 , bir hadde tezgâhına giren ve çıkan iş parçası hızını ve r , kesit alanındaki azalma ise;

$$v_2 = v_1/(1 - r) \quad (2.1)$$

olarak ifade edilmektedir.

Küçük bir kesit alanı olan uzun bir ürün elde etmek için haddeme işlemi, geniş bir kesit alanına sahip kısa bir çubuktan başlamaktadır. Haddeme işlemi öncesinde ve sonrasında hacim (veya ağırlık) sabit kalır. Yarım tonluk kütüğün haddelenmesi ile yarım tonluk çubuk üretilmektedir fakat haddelenirken tufal oluşumu ile uç-baş kesimleri nedeni ile kayıplar yaşanmaktadır[21].

Bir hadde tezgâhında, iş merdanesinin çevresel hızı sabit kalır. Ancak iş parçasının yüzeyinin bir noktasındaki yüzey hızı haddeden çıkıncaya kadar temas açısı gittikçe artar ve merdaneyi geçer.

Merdane malzemeleri, yüksek mukavemet ve aşınma direnci gereklilikleri nedeniyle dökme demir, dökme çelik ve dövme çeliktir.

Saat Başına Haddelenen Tonajın Belirlenmesi

$$\text{Merdane Çapı} = d \text{ (mm)}$$

$$\text{Merdane Efektif Çapı} = d_e \text{ (mm)}$$

$$\text{Haddelenen Çubuğun RPM'i} = r$$

$$\text{Kesit Alanı} = \pi/4 \cdot d^2 / [10^6] \text{ (m}^2\text{)} \quad (2.2)$$

$$\text{Daire Çevresi} = \pi \cdot d_e / 1000 \text{ (m)} \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned} \text{Dakika Başına Uzunluk} &= \text{Daire çevresi} \times \text{RPM} \\ &= \pi \cdot d_e \cdot [1000 \cdot r] \text{ (m)} \end{aligned} \quad (2.4)$$

$$\begin{aligned} \text{Saat Başına Uzunluk} &= \pi \cdot d_e \cdot \left[1000 \cdot r \cdot \frac{1}{60}\right] \text{ (m)} \\ &= \pi \cdot d_e \cdot r / [6 \times 10^4] \text{ (m)} \end{aligned} \quad (2.5)$$

$$\begin{aligned} \text{Saat Başına Hacim} &= \text{Kesit Alanı} \times \text{Uzunluk} \\ &= \frac{\pi}{4} \cdot d^2 / [10^6] \cdot \pi \cdot d_e \cdot r \cdot 6 \cdot 10^4 \text{ (m)}^3 \\ &= \frac{\pi^2}{4d^2} \cdot d_e \cdot r [6 \times 10^{10}] \text{ (m)}^3 \end{aligned} \quad (2.6)$$

$$\text{Özgül Ağırlık} = s \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right)$$

$$\begin{aligned} \text{Tonaj} &= \frac{\pi^2}{4} d^2 \cdot d_e \cdot r / [6 \times 10^{10}] \cdot s \text{ (ton)} \\ &= [\pi^2/4 / 6 \cdot 10^{10}] [d^2 \cdot d_e \cdot r \cdot s] \text{ (ton)} \end{aligned} \quad (2.7)$$

Efektif Çapın Belirlenmesi

$$\begin{aligned} \text{Bilezik Çapı} &= d_c \text{ (mm)} \\ \text{Yüzey Genişliği} &= V \text{ (mm)} \\ \text{Kesit Alanı} &= A \text{ (mm}^2\text{)} \\ \text{Merdane Efektif Çapı} &= d_c - \left(\frac{A}{V}\right) \end{aligned} \quad (2.8)$$

Çıkış Hızı

$$\begin{aligned} \text{Hedeflenen Haddemeleme Oranı} &= W \left(\frac{\text{Ton}}{\text{Saat}}\right) \\ \text{Kesit Alanı} &= A \text{ (mm}^2\text{)} \\ &= \frac{A}{100} \text{ (cm}^2\text{)} \end{aligned} \quad (2.9)$$

$$\begin{aligned} \text{Saat başına Tonaj} &= W \text{ (Ton)} \\ &= W \cdot 1000 \cdot 1000 \text{ (g)} \end{aligned} \quad (2.10)$$

$$\text{Saat Başına Hacim} = W \cdot 10^6 / s \text{ (cm}^3\text{)} \quad (2.11)$$

$$\begin{aligned} \text{Saat Başına Uzunluk} &= W \cdot 10^6 / s \cdot [A / 100] \text{ (cm)} \\ &= 100 \cdot 10^6 \cdot W / s \cdot A \text{ (cm)} \\ &= [100 \cdot 10^6 \cdot W / s \cdot A] / 100 \text{ (m)} \\ &= W \cdot 10^6 / s \cdot A \text{ (m)} \end{aligned} \quad (2.12)$$

$$\begin{aligned} \text{Saniye Başına Uzunluk} &= [W \cdot 10^6 / s \cdot A] / 60 \cdot 60 \text{ (m)} \\ &= [10^4 \cdot 36] / W / (s \cdot A) \text{ (m)} \end{aligned} \quad (2.13)$$

$$\text{Haddemeleme Hızı} = 277,78 \cdot W / (s \cdot A) \left(\frac{\text{m}}{\text{sn}}\right) \quad (2.14)$$

2.1.6. Haddemeleme Parametreleri

Metalik hammadde iki merdane arasında haddelendiğinde, merdanelerden gelen basma yükleri sebebiyle düşey ve yatay gerilmelerin her ikisine de maruz kalır.

Merdaneler metal hammadde üzerinde dikey bir baskı uyguladıkları zaman, ikincisi aynı miktarda gerilimi merdanelerin üzerine geri gönderir. Bu şekilde, merdaneler, iş parçasının neden olduğu bu strese bağlı olarak elastik deformasyona tabi tutulur.

Kalınlık, merdanelerin uyguladığı basınç gerilmelerinin bir sonucu olarak azalır ve uzunluk yönlerinde kalınlıkta iki boyutlu bir deformasyon olarak muamele edilir veya kesit alanını değiştirir[32]. Deformasyon bölgesinde, giriş hammaddesinin kalınlığı azalır ve uzar. Bu çıkıştaki iş parçasının doğrusal hızını artırır.

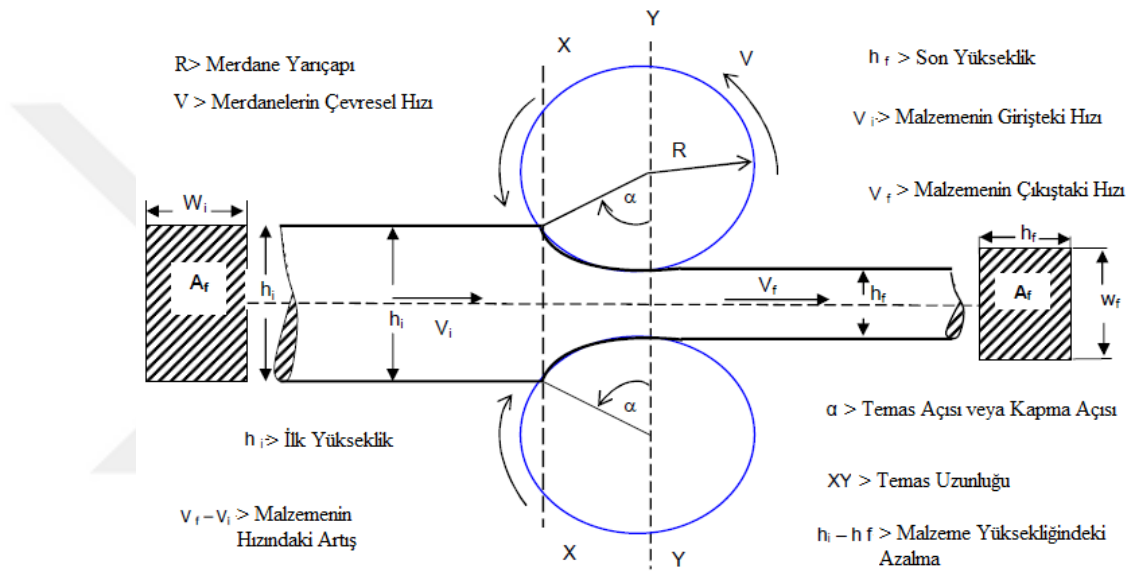
Merdane boşluğunun şekli ürünün geometrisini kontrol eder. Her tezgâhta kalibre dizaynına göre bırakılan boşluğa hava payı denilmektedir. Hava payının ayarı birçok faktöre bağlıdır. En önemlisi de haddehanede kullanılmakta olan tezgâhlardan kaynaklı oluşabilecek sıçrama olayından ötürü hava payı değişebilmektedir[33]. Bu gibi durumlara genellikle geleneksel hadde tezgâhı kullanılan haddehanelerde karşılaşılmaktadır. Hava payı üretime hazırlık aşamasında ayarlanır ve sonrasında ilk hammadde ile denemesi yapılır. Prosesten gelecek olan sıcak ve soğuk ölçülere göre hava payı ilgili tezgâhlarda ayarlanır.

Ezme hammaddenin iki merdane arasında sıkıştırıldığında enine kesit yükseklik / alandaki azalmayı veya dikey yönde yükseklikteki azalmayı ifade eden bir terimdir. Ezme ya doğrudan ya da dolaylı olarak gerçekleşmektedir[33]. Dolaylı ezme hammaddenin dikey olmadığı konumda merdaneler tarafından uygulanan bir türdür. Kalibre tasarımının bir kısmı dikey ve yatay arasında eğimli olduğunda, deformasyon doğrudan ve dolaylı ezmenin bir kombinasyonu olarak uygulanır. 45°'lik eğime kadar yatay doğrudan ezme kuvveti etkilidir. Ancak 45°'lik eğimin üzerinde dolaylı ezme kuvvetleri işin içine girmektedir. 90° civarında deformasyon neredeyse tamamen dolaylı ezmelere bağlıdır[32].

Uzama kütük hacmindeki azalma, alan hacmindeki düşüş ile ilişkilidir. Uzama faktörü, yani nihai uzunluğun başlangıç uzunluğuna olan oranı daima ilkinden daha büyüktür.

Hammadde iki merdane arasına sıkıştırıldığında en az direnç yönünde hareket eder. Sadece uzunlamasına bir akış değil aynı zamanda yayılır. Haddeleme bir eylemdir fakat iki tepkiyi getirmektedir. Merdaneler dikey olarak redüksiyon uyguladıklarında; bu redüksiyon uzama ve yayılmayı oluşturmaktadır. Dikey sıkıştırma altındaki hammadde, yanal yayılmaya neden olan serbest uzamaya karşı

uzunlamasına direncin bir kısmını karşılar. Yayılma, malzemenin yön ve basınç uzamasına doğru açılarda akmasıdır. Yayılma katsayısı, çıkış ve giriş genişliği arasındaki orandır. Sürtünme katsayısı ne kadar yüksekse, uzunlamasına direnç o kadar yüksek ve yayılma daha fazladır. Yayılma kuantumu asla analitik olarak çalışmaz. Yayılmayı ölçmek için herhangi bir formül veya herhangi bir hesaplama yöntemi yoktur. Kalibre tasarımlarında kalibrecilerin deneyimlerine istinaden oluşturulmuş bir öngörüye göre yapılmaktadır. Şekil 2.5`de haddeleme teorisi görülmektedir.



Şekil 2.5 Ezme, uzama, yayılma ve kapma açısı

Uygulamada bazı faktörlerin yayılma miktarını etkilediği bulunmuştur. Hammaddenin sıcaklığı yayılmayı önemli ölçüde etkiler. Hammadde giriş sıcaklığı düşürüldüğünde, yayılma daha büyüktür. Benzer şekilde, daha yüksek sıcaklıkta, daha az yayılma gerçekleşmektedir. Düşük haddeleme hızında daha iyi yayılma olmaktadır. Yayılmanın yaklaşık tahmin edilmesinde merdane çapının önemli bir rolü bulunmaktadır. Yüksek çaplı merdanelerde daha düşük yayılma gerçekleşmektedir. Benzer olarak daha düşük çaplı merdanelerde yayılma daha fazla olmaktadır. Yüzey pürüzlülüğü, yani merdanelerin sürtünmesi, yayılmanın belirlenmesinde önemli bir rol oynar. Daha bozuk merdane yüzeyi daha az yayılmış ve daha düzgün merdane yüzeyi daha fazla yayılma sağlamaktadır. Hammadde yüksekliği ve genişliği yayılmayı etkiler. Daha yüksek ve daha geniş hammadde, daha geniş bir yayılımı sağlar.

Dikdörtgen hammaddeler düz merdanelerden geçtiğinde yayılma "serbest" veya "sınırsız" dır. Bununla birlikte, eğer hammadde paso açılmış merdanelerden geçiyorsa, o zaman geçiş formunun yayılması belli sınırlar içinde kalmaktadır. Buna bilinen şekliyle "sınırlı" yayılma tabiri yapılabilir. Çünkü giren hammaddenin genişliği merdane üzerindeki açılmış pasonun genişliğinden küçüktür. Genişlik / yükseklik:5 oranının ötesinde yayılmanın ihmal edilebilir olduğu kabul edilir[21].

2.1.7.Haddeleme Kuvvetleri ve Aralarındaki Bağlıntılar

Bir h_i kalınlığında blum/slab xx düzlemindeki girişten v_i hızı ile merdaneye girer. Merdaneler arasındaki boşluktan gelerek ve yy çıkış düzleminde h_f 'e azaltılmış kalınlığı, v_f hızı ile geçer. Verilen bu durumda genişlikte bir artış yoktur, düşey ekseninde verilen basma kuvveti ile metal hammadde haddeleme yönünde uzamaktadır. Çünkü işlem boyunca herhangi bir noktada metal birim hacminde bir değişiklik olmaz.

$$bh_i v_i = bh v = bh_f v_f \quad (2.15)$$

Yukarıdaki formül (2.15) de; b hammaddenin genişliği, v herhangi bir kalınlıktaki hız ve h ise h_f ile h_i arasında ortada kalan değerdir.

Eğer, $h_i > h_f$ ve $v_i < v_f$ ise metal hammaddenin hızı girişten çıkışa doğru hammadedeki dikey bir elementin (kesitin) bozulmadan ve bir çizgide kalacağı şekilde sürekli artar[32].

$b_i = b_f$ eşitliği verildiği durumda,

$$h_i \cdot L_i/t = h_f \cdot L_f/t \quad (2.16)$$

Ayrıca

$$h_i \cdot v_i = h_f \cdot v_f \quad (2.17)$$

denklemin den

$$v_i/v_f = h_f/v_f \quad (2.18)$$

elde edilir.

Merdane ile blum/slab arasındaki temas yüzeyi boyunca sadece bir noktada metal üzerinde iki kuvvet etkili oluyor. Radyal kuvvet P_r ve teğetsel sürtünme kuvveti F dir. Eğer merdanenin V_r yüzey hızı iş parçasının hızına eşitse, bu noktaya nötr (N) veya kaymaz nokta denir[21]. Giriş düzlemi (XX) ile N noktası arasında, iş parçası merdane yüzeyinden daha yavaş hareket ederse teğetsel sürtünme kuvveti F , metali merdaneye çekme yönünde hareket eder. Nötr noktanın çıkış tarafında (YY düzlemi), iş parçası merdane yüzeyinden daha hızlı hareket eder. Sürtünme kuvvetinin yönü daha sonra tersine çevrilir ve metalleri merdanenin çıkışına doğru iletir. N noktasının konumu sürtünme kuvvetlerinin yönünün değiştiği yerdir.

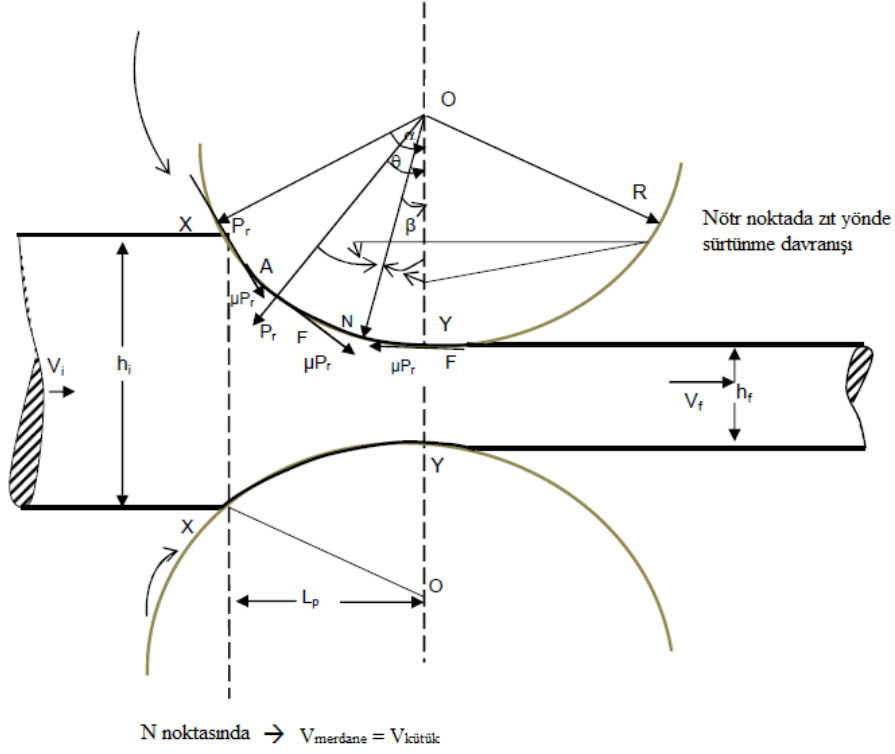
Dikey bileşen P (Haddeleme yükü; Merdanelerin metale karşı uyguladıkları baskı kuvvetidir.) ile P_r radyal kuvvettir. Spesifik merdane basıncı p , haddeleme yükünün temas alanına bölünmesi ile bulunmaktadır[33].

$$p = P/b \cdot L_p \quad (2.19)$$

Burada b , iş parçasının genişliği ve L_p , temas yayının öngörülen uzunluğu olmak üzere;

$$L_p = [R(h_0 - h_f) - \{(h_0 - h_f)^2\} / 4]^{1/2}$$

$$L_p = \sqrt{R\Delta h} \quad (2.20)$$



Şekil 2.6 Haddelme esnasında oluşan kuvvetler

Temas yayında merdane basıncının dağılımı şöyledir; Basınç nötr noktada maksimuma yükselir ve sonra düşer. Basınç dağılımı nötr noktada keskin bir zirveye ulaşmaz; bu nötr noktanın gerçekten merdane yüzeyinde bir çizgi olmadığını ve bir alan gösterdiğini belirtmektedir. Eğri altındaki alan, haddelme yüküyle orantılıdır. Gölge alanı, merdane ile kütük arasındaki sürtünme kuvvetlerini aşmak için gereken kuvveti temsil eder[32]. Şekil 2.6'da kesik çizgi altındaki alan, metali düzlemsel olarak homojen sıkıştırmada deforme etmek için gereken kuvveti temsil eder.

Merdane kapma olayı; iş parçasını merdanenin kavraması için sürtünme kuvvetinin bileşeninin normal kuvvetin yatay bileşenine eşit veya bundan daha büyük olması gerekir. Şekil 2.7'de kapma açısı gösterilmiştir.

$$F \cdot \cos \alpha \geq P_r \sin \alpha$$

$$F/P_r \geq \tan \alpha \quad (2.21)$$

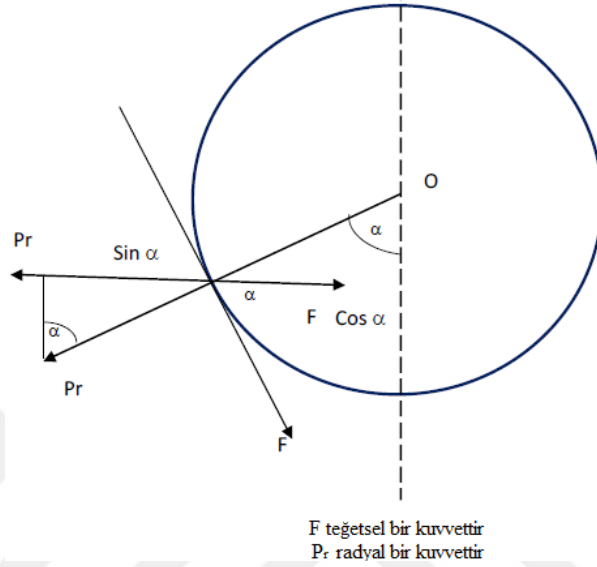
Buradan;

$$F = \mu \cdot P_r \text{ veya } \mu = \tan \alpha$$

F, teğetsel bir sürtünme kuvveti ve P_r radyal bir kuvvettir.

Eğer, $\tan \alpha > \mu$ ise parçası kapılamaz.

Eğer, $\mu = 0$ ise haddeleme gerçekleşemez.

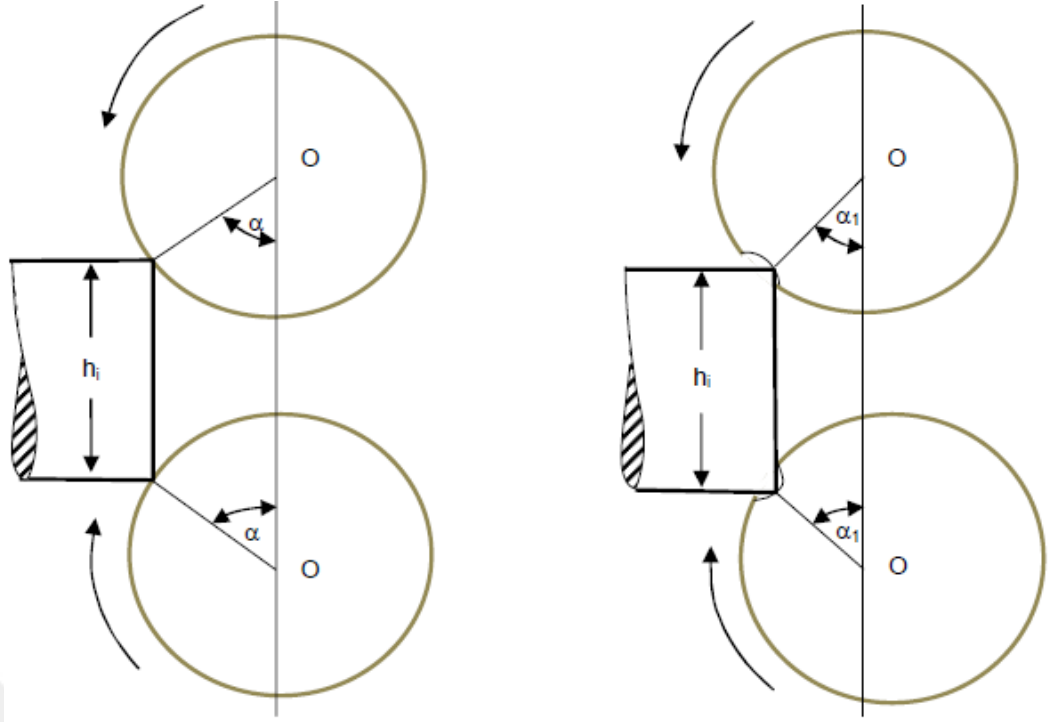


Şekil 2.7 Haddelemede merdane kapma açısı

Serbest kavrama $\mu > \tan \alpha$ koşulu sağlandığında gerçekleşir.

“ μ ” etkili değerini arttırmak için; Pasolar merdane üzerine merdanenin eksenine paralel olacak şekilde açılmalıdır. $\tan \alpha$ 'yı azaltmak için daha büyük çaplı merdaneler kullanılmalıdır. Pratikte kalibre tasarımcıları kapma açısını seçerken en büyük $22,5^\circ$ - 24° aralığında almaktadırlar[32]. Eğer ki merdane çapının belirli olduğu durumlarda giriş yüksekliği “ h_1 ” düşürülebilir.

Merdane üzerinde paso açılması durumunda temas açısı azalacaktır. (Şekil 2.8)



$$\alpha > \alpha_1$$

α -> Kalibre açılması öncesi temas açısı

α_1 -> Kalibre açılması sonrası temas açısı

Şekil 2.8 Kalibreli ve düz merdane üzerindeki temas açıları

Merdane çapının büyütülmesi temas açısını azaltmaktadır.(Şekil 2.8)

MNO üçgeninden

$$\begin{aligned}R^2 &= L_p^2 + (R - a)^2 \\L_p^2 &= 2 \cdot R \cdot a - a^2 \\L_p &= \sqrt{R \cdot \Delta h}\end{aligned}\quad (2.22)$$

Δh gördüğümüz yere $\Delta h = h_i - h_f = 2a$ yazılacaktır.

Büyük çaplı merdaneler küçük çaplı merdanelere göre daha kalın hammadde ile çalışmamıza imkân sağlar.

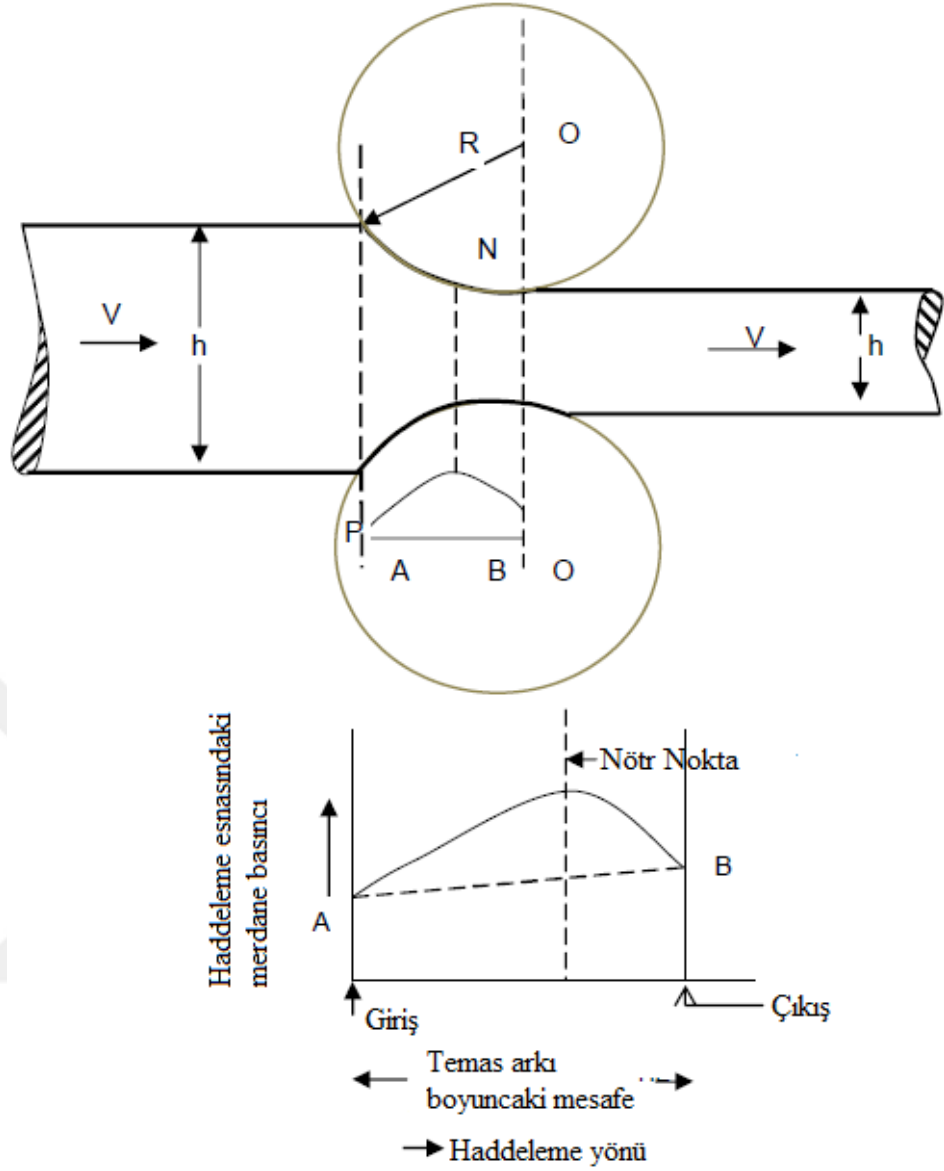
$$\begin{aligned}\mu = \tan \alpha &= L_p / \left[R - \frac{\Delta h}{2} \right] \\ \mu &= \sqrt{\left[\Delta h / 2 \right]}\end{aligned}\quad (2.23)$$

Bu sebepten oluşabilecek maksimum ezme;

$$\Delta h_{max} = \mu^2 \cdot R \quad (2.24)$$

Hadde yükü analiz edildiğinde haddelemedeki ana değişkenler; İş merdanesinin çapı (olabildiğince büyük çaptaki merdaneler ile daha iyi ezmelerin eldesi), temas uzunluğu (merdane yarıçapının azalması ile kapma açısı azalır, düşük kapma açısı ise daha az redüksiyon demektir.), hammaddenin deformasyon direnci (metalurji, sıcaklık ve deformasyon hızından etkilenen) ve merdaneler ile hammadde arasındaki (büyük sürtünme oranı daha fazla ezme potansiyelidir) sürtünmedir.

Haddeleme prosesinde sürtünme ve bunun etkileri; Hammadde merdaneler üzerindeki pasalarda ezmeye girdiğinde kesit alanı azalmaktadır. Giriş düzleminde merdanenin yüzey hızı hammaddenin hızını geçmektedir. Bu yüzden baskı yapan iki merdane arasından geçerken hızı artmaktadır. Merdanenin basıncı temas açısının ark boyunun uzunluğu ile değişmektedir. En büyük pik basıncı nötr noktada olmaktadır. Şekil 2.11`de gösterilen eğrinin altında kalan alan merdanenin gücünü temsil etmektedir.



Şekil 2.11 Haddelenme esnasındaki sürtünme profili

Nötr noktada hammadde üzerine etkiyen ne ileri yönde nede geri yönde bir sürtünme kuvveti bulunmamaktadır. Bu noktada sürtünme kuvvetinin yönü tersine dönmektedir.

Bu noktanın ötesinde hammadde hızı merdane yüzey hızını aşmaktadır. Hammaddenin, merdanelerin çevresel hızından daha büyük bir hızda merdanelerden dışarı çıktığı görülmektedir. Bu "ileri kayma", "hız kazancı" veya "ekstrüzyon etkisi" olarak bilinmektedir.

Haddelenecek malzeme sürtünme vasıtasıyla karşılıklı olarak dönen iki merdane boşluğuna çekilir. Sürtünme kuvveti, metalleri merdanelere çekme ve haddeleme yükünün büyük bir kısmından sorumludur. Yüksek sürtünme yüksek haddeleme yükü, dik bir sürtünme tepesi ve kenar kırma eğilimi ile sonuçlanır. Sürtünme, merdanelerin temas açısı boyunca noktadan noktaya değişir. Bununla birlikte bu değişimi μ' de ölçmek zordur. Tüm haddeleme teorisi sabit bir sürtünme varsayımıyla hesaplanmaktadır. Merdanelerin girişindeki çevresel hız, ara yüzey sürtünmesi yeterince yüksek ise çekilen iş parçasının çevresel hızını aşmaktadır. Sıcak haddeleme merdaneleri pürüzlüdür; yüzey alanındaki yüksek pürüzlülük sayesinde iş parçasını kapmakta/kavramaktadırlar. Sürtünme çalışılan malzemenin yapısına, sıcaklığına ve ezme miktarına bağlıdır. Soğuk haddelemede sürtünme katsayısı 0,1 civarında, ılık haddelemede 0,2 civarında ve sıcak haddelemede ise 0,4 civarındadır[21]. Sürtünme katsayısının azaltılması ve iş merdanesinin çapının azaltılması, nötr noktayı çıkış düzlemine doğru hareket ettirerek ileri kaymayı azaltır. Temas açısı α sürtünmeyi aştığı durumda merdaneler iş parçasını kapamaz ve ezme gerçekleşmez. Kütük yaklaşımı merdanelerin çevresel hızından daha yavaş olduğunda, sürtünme kuvveti kütüğü merdane boşluğuna çekmektedir. Ancak, kütük çevresel hızdan daha yüksek bir hızda hareket ederse, sürtünme kuvveti merdane boşluğuna girmesine karşı gelir. Böyle bir karşıt hareket, kütüğün yaklaşma hızını azaltır ve dolayısıyla sürtünme kuvveti, kütüğün merdane boşluğuna çekilmesini sağlar.

Nötr noktanın konumu, temas arkı boyunca ki sürtünme katsayısına ve merdanelerin çapına bağlıdır.

Çelik, kesit alanı içinde redüksiyona uğradığından ve merdaneler arasında uzatıldığından, bu deformasyona katılan kuvvetlerin dikey bileşenleri, merdaneleri birbirinden ayıran merdane yükünü oluşturur. Bu yük sıçramaya sebep olmaktadır. Toplam haddeleme yükü tipik sürtünme tepesi basınç dağılımındaki temas yayı üzerinden dağıtılır.

Haddeleme yükü birçok değişken tarafından etkilenir;

- Kütüğün sıcaklığında azalma olduğunda haddeleme yükü artar,

- Çeliğin alaşım elementleri ve karbon içeriği akma dayanımını etkiler. Bu nedenle karbon içeriği ve alaşım elementlerinin artışı ile bu çeliğin deforme edilmesi için gereken haddeleme yükünde bir artış gerçekleşir,
- Haddeleme hızındaki artış, deformasyon oranını olumsuz yönde etkiler ve haddeleme yükünü artırır,
- Merdanelerin çapındaki artış, temas arkının uzunluğunu ve kapma açısını artırır. Bu nedenle, daha fazla redüksiyon mümkündür. Böylece haddeleme yükü artar.

Bununla birlikte, toplam haddeleme yükünün, merdanelerin merkezlerinin hattından a mesafesindeki temas eylemi boyunca bir noktada yoğunlaştığı varsayılabilir.

Moment kolu a'nın temas hareketinin öngörülen uzunluğuna oranı L_p olarak;

$$\lambda = a/L_p = \sqrt{R \cdot \Delta h} \quad (2.25)$$

Üst merdanenin bir devri sırasında ortaya çıkan haddeleme yükü P, $2 \cdot \pi \cdot a$ ' ya eşit bir dairenin çevresi boyunca hareket eder. İki merdane olduğundan, iş

$$W = 2 \cdot (2 \cdot \pi \cdot a) \cdot P \quad (2.26)$$

olur[21].

Merdane basıncı, ezme ve temas uzunluğuna bağlıdır. Bu nedenle, merdane yarıçapının azaltılması merdane kuvvetini azaltacaktır.

Tork, dönme hareketini üretmek için uygulanan kuvvetin ölçüsüdür. Merdanenin torku yani haddeleme için gereken güç merdanedeki iş miktarının, temas uzunluğunun ve merdane çapının artması ile artmaktadır.

Haddeleme için gerekli olan yaklaşık tork;

$$T = (0,5) \cdot F \cdot L \quad (2.27)$$

burada; T: Tork (N.m), F: Merdane Basıncı, L: Temas uzunluğu'dur.

Tork M_T , etkili moment kolu a ile çarpılan toplam haddeleme yüküne P eşittir. İki merdane olduğundan, tork

$$M_T = 2 \cdot P \cdot a \quad (2.28)$$

ile verilir.

Tork ve güç, merdane basıncı ve temas uzunluğuna bağlıdır. Bu nedenle, merdane yarıçapının azaltılması hem torku hem de gücü azaltır.

Haddehanelerde uygulanan güç merdanelere tork verilmesiyle elde edilmektedir. Güç merdane basıncı ve temas uzunluğuna bağlıdır. Ayrıca güç merdanelerin çevresel hızına da bağlıdır bu sebeple merdanelerin devir hızı azaltılırsa güç de azalacaktır. Ezme miktarı azaltılırsa haddeleme için gerekecek olan güç de azalacaktır.

Merdane çiftini tahrik etmek için gerekli olan güç;

$$P = 2 \cdot \pi \cdot N \cdot F \cdot L \quad (2.29)$$

Burada, P:Güç (Watt), N: Merdane dönme hızı (Rpm), F: Merdane Basıncı ve L:Temas uzunluğu'dur.

Güç genellikle 4 şekilde harcanır;

- Metali deforme etmek için gerekli olan enerji,
- Sürtünme kuvvetinin üstesinden gelmek için gerekli olan enerji,
- Redüktörlerde ve güç aktarma organlarında kaybolan enerji,
- Çeşitli motor ve jeneratörlerdeki elektrik kayıplarıdır.

2.1.8. Kalibre

Tezgâh, kovanlarda bulunan ve yuva içinde kayan yataklarla desteklenen bir set merdaneye sahiplik eder. Merdaneler vidaların döndürülmesi ile açılıp kapanmaktadır. Karşılıklı bakan iki oluk merdane pasosunu oluşturmaktadır. Merdane

kullanım boyunca olan iki merdane arasındaki mesafeye “nominal merdane boşluğu” veya “teorik merdane boşluğu” denmektedir.

Levha / yassı haddelemede çevresel hız, merdane yüzeyi boyunca aynı ve sabittir. Kalibreli haddelemede böyle bir durum söz konusu değildir. Bir pasonun tabanı, tavandan daha az bir teğetsel hız gösterecektir, bu nedenle, ileri kayma, aynı enine kesitte farklı konumlar için farklıdır. Asimetrik pasolarda bu, iş parçasının yukarı veya aşağı doğru kıvrılma eğilimine yol açar[34]. İş parçasını pasolardan çıkarmak için sıyırıcı kılavuzlarının kullanılmasını gerekli kılmaktadır.

Simetrik pasolar bir x, y düzleminde (örneğin kareler, yuvarlaklar) iki eşit eksene sahiptir. Asimetrik pasolar da bir eksen diğerinden daha büyük (örneğin dikdörtgenler-kutular, elmaslar ve ovaler) eksene sahiptir[35].

Simetrik pasodan bir asimetrik pasoya veya asimetrik pasodan bir simetrik pasoya bir çubuk geçmesi sonucunda deformasyona uğramaktadır. Örneğin bir oval pasodan bir kareye veya bir kare pasodan bir oval pasoya geçiş.

Levha / yassı haddeleme için merdaneler, haddeleme sırasında merdane boşluğunun istenen geometrik şeklinin korunmasını sağlamak için bombelendirilir. Bombelendirme merdanelerin, üniform olmayan ısı genleşmesinden kaynaklanan haddeleme kuvvetlerinin neden olduğu merdanelerin bükülmesini telafi etmek için temin edilmiştir[36].

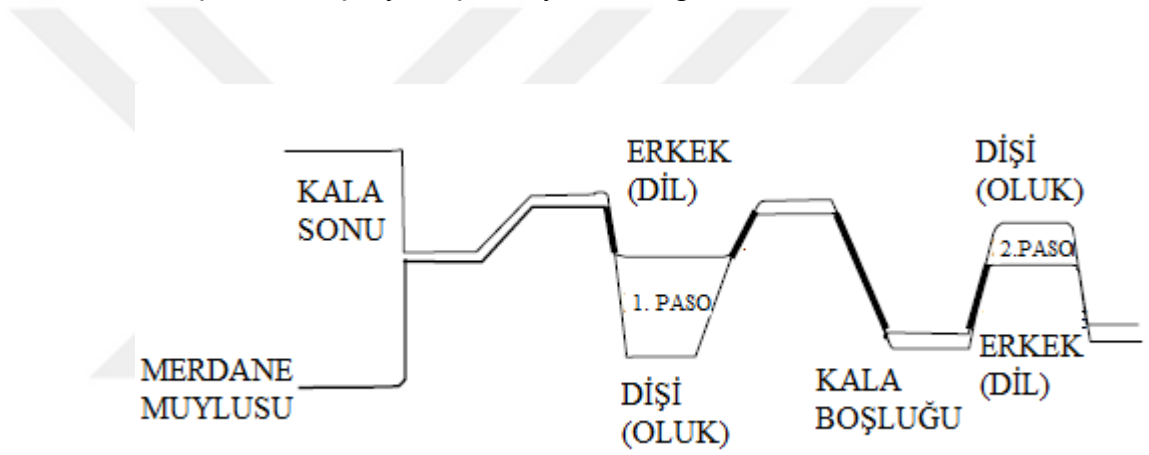
Levha / blum haddelemede iş merdaneleri silindiriktir. Bununla birlikte, profil haddelemede, iş parçasının kesit geometrisi, her bir tezgâhtaki iş merdanesi çiftinin içine kesilen olukların kullanılmasıyla oluşturulur. Bu oluklar pasolar olarak bilinir.

Merdane çiftinde karşılıklı gelen oluk çifti açık pasoyu oluşturmaktadır. Karmaşık ve asimetrik şekilli profillerin merdane tasarımının temel ilkesi, bölümün tüm kısımlarında küçülme şeklindedir.

Blum şekli ve ürün şeklindeki farklılıktan dolayı redüksiyonda herhangi bir homojenlik, erken şekillendirme pasolarında gerçekleşir.

Bükülme eğilimi, çelik daha yüksek sıcaklık nedeniyle daha eğilebilir olduğundan ve kesit alanı da daha büyük olduğundan bu erken aşamada daha az belirgindir.

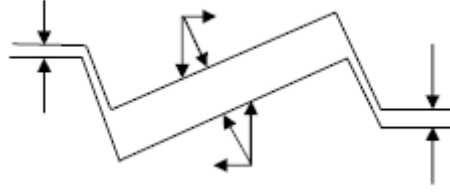
Kusursuz 90°'lik kenarlar için kutu pasolar paso aşınmasına ve iş parçasının pasodan çıkarılmasında zorluklara sebebiyet verir. Bu pasolar, iş parçasının daha kolay bir şekilde çıkmasını kolaylaştırmak ve mekanik baskının bir sonucu olarak kırık tufallerin düşürülmesi için yaklaşık 5°'ye kadar eğim verilmektedir.



Şekil 2.12 Merdaneler üzerindeki pasoların yerleşimi

Şekil 2.12`de şematik olarak gösterildiği gibi erkek ve diş kısımların birbiri ile örtüşecek biçimde oluşturulması halinde buna kapalı paso adlandırılması yapılmaktadır. Pasolar arasında kalan boşluklara kala boşluğu adı verilmektedir.

Doğrudan ezme ile redüksiyon belli bir yükseklik ile dikey doğrultuda olmaktadır. Dolaylı ezmede ise merdanenin hammaddeye uyguladığı basınç dikey olmayan doğrultudadır. Dolaylı haddeleme farklı merdanelerin kalalarının arasında olan sıkıştırma işlemidir. Eğer iş parçasının bir kısmı tek bir merdane üzerine yayıldığında sıkıştırma işlemi gerçekleşmez. Ancak bir merdaneye derin bir oluk yapılırsa bu boşluk ölü oluk olarak adlandırılır. Oluk`un içerisinde ölü olarak adlandırılan kısmında malzemenin akışı kolay olmamaktadır[37].



Şekil 2.13 Devrik pasolu merdane kuvvetler

Şekil 2.13`de verilen devrik bir pasoda, iş parçasının yan tarafları çalışmaz. Malzeme merdanelerden dışarı çıktıkça kesme kuvvetlerine maruz kalır. Pasonun bu durumu altında, iş parçasının merdaneler boyunca geçişi "dolaylı" haddeleme olarak bilinir. Böyle bir haddeleme işleminde, büyük miktarda yan basınç üretilir. Bu gibi devrik pasolarda haddeleme bazen pasonun fazla dolması veya az dolması ile gerçekleşir[38].

2.1.9.Haddelenmiş Ürünün Kalitesi

Malzemenin mukavemeti ve sertliği, kimyasal bileşimin ve sıcak haddelemeden sonraki soğutma hızının bir fonksiyonudur. Daha yüksek karbon ve diğer alaşım elementleri ile daha yüksek mukavemet ve daha fazla sertlik eldesi mümkündür. Sıcak haddelemenin sertliği genellikle soğuk haddelemeden daha düşüktür ve gerekli deformasyon enerjisi de daha azdır. Soğutma oranının artması sertliği ve mukavemeti artırır. Sıcak haddelenmiş metaller genellikle mekanik özelliklerinde ve deformasyona bağlı artık gerilmelerinde az bir yöne sahiptir. Bununla birlikte, bazı durumlarda metalik olmayan inklüzyonlar bazı yönlülükler kazandırır ve 20 mm'den daha az iş parçaları genellikle bazı yön özelliklerine sahiptir. Üniform olmayan soğutma genellikle I profil, U profil ve raylar gibi eşit olmayan bir kesite sahip olan şekillerde ortaya çıkan bir çok artık gerilmeye neden olur. Bitmiş ürün iyi kalitede olmasına rağmen, yüzeyde yüksek sıcaklıklarda oluşan bir oksit olan tufal ile kaplıdır. Genellikle asitleme ile kaldırılır, pürüzsüz bir yüzey ortaya çıkarır. Boyutsal toleranslar genellikle toplam boyutun % 2'si ile % 5'idir[21]. Sıcak haddelenmiş yumuşak çelik soğuk haddelenmiş'e göre karbon miktarı için daha geniş bir toleransa sahip gibi görünmektedir. Mümkün olan en iyi kalitede haddelenmiş ürün elde etmek için, haddeleme işlemini ve tüm parametreleri mümkün olduğunca sabit tutmak gereklidir. Her değişken kalite güvencesinin gerektirdiği şekilde kontrol altında tutulmalıdır.

Sıcak haddeleme sırasında (Yassı / Profil) her parametre değişir:

- Sıcak haddelenmiş malzemenin sıcaklığı ve kesit alanı pasodan pasoya farklılık göstermektedir.
- Kazanılan ısı merdanelere ısı olarak transfer edilir.
- Haddelemedeki arıza zamanlarında merdane yüzeyi soğumaktadır.
- Merdanelerin yüzey yapısı, her bir kampanya sırasında aşınma ve diğer etkiler nedeniyle değişmektedir.
- Kalite, büyük ölçüde yüzey sıcaklıklarına ve sıcaklık gradyanlarına bağlıdır.
- Sıcak haddeleme işleminin stabilize edilmesi için merdaneler soğutulur.

2.1.10. Sıcak Haddelemenin Fiziksel Metalurjisi

Yeniden kristalleştirme nedeniyle sıcak haddeleme, bir metalin ortalama tane büyüklüğünü azaltırken, soğuk haddeleme tek yönlü taneler ile sertleştirilmiş bir mikro yapı üretecek bir eşdeğer mikro yapıyı korur. Haddeleme işlemi taneleri parçaladıkça, eşlenik bir yapıyı koruyarak ve metalin sertleşmesini önleyerek yeniden kristalize olurlar. Sıcak haddelenmiş malzeme tipik olarak ısıl işlem gerektirmez ve yüksek sıcaklık, artık stresin malzemede birikmesini önler ve daha iyi kalitede daha iyi sonuç verir. Kristal yapılar metal işlendikten sonra oluşturulduğundan, bu işlem kendi mikro yapısal özelliklerini etkilemez[39].

Haddelenmiş Çeliğin Mekanik Özellikleri aşağıdakilerin bir fonksiyonudur;

- Metalin kimyasal kompozisyonu,
- Tavlama sıcaklığı,
- Deformasyon sırasında sıcaklık düşüşü oranı,
- Deformasyon oranı,
- Toplam redüksiyon,

- Faz dönüşüm zamanı,
- Yeniden kristalleşme zamanı,
- Deformasyon sonrası soğuma oranı.

2.1.11. Merdane Soğutma Prosesi ve Ürün Soğuması

Merdaneler her zaman sıcaklık değişimine uğramaktadır. Yüzeyde önemli derecede sıcaklık farkı vardır. Çok yüksek termal gradyan, merdane kırılması riskini (termal stres) artırır. Isı merdaneye nüfuz etmemeli ve bu nedenle merdane yüzeyi hadde tezgâhının çıkış tarafında mümkün olan en kısa sürede soğutulmalıdır. Soğutma suyu asla merdane yüzeyinden geri sıçramamalıdır. Soğutma suyu akışı kesilirse, termal stres nedeniyle kırılma olasılığı vardır. Yetersiz su kullanılır ise, yüzey ısısı 100°C'yi geçene kadar merdane sıcaklığını artırır, ısıtma işlemi hızlanırken stabil olmayan haddeleme koşullarına neden olur[40]. Çok fazla su olması problem değildir. Fakat aşırı soğutma, merdane yüzey malzemesinin daha fazla kırılma olmasına ve maksimum ısırma açısı üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olmasına neden olabilir. Bitirme pasosundan önceki pasolarda daha fazla su sağlanmalıdır. Yassı ürünlerde, merdanelerin orta kısmına kenarlardan daha fazla soğutma suyu yoğunlaşmaktadır. Profil üretiminde ise merdanenin geri kalan kısmına göre, oluklara ve kalalara daha fazla su uygulanır. Simetrik olmayan profiller haddelenirken, merdaneler tarafından karşılanması gereken yüksek aksel kuvvetler vardır. Bu aksel kuvvetleri alan kalalar çok yüklüdür, gerilimlidir ve önemli ölçüde aşınma gösterir. Merdane arasındaki sürtünme alanları normal yağ ile değil, düşük viskoziteli (grafit gibi) bir yağla yağlanmalıdır.

Su haddelemenin gerçekleşmesi için gerekli bir girdidir. Sıcaklık kontrolü, direkt ve dolaylı soğutma, tufal sıyırma ve tufal taşınması için kullanılır. Sıcak hammadde haddeleme merdaneleri ile temas ettiğinde, sıcaklığı yükselir ve haddeleme gerçekleştikçe artmaya devam eder. Yüksek sıcaklıkta çelik merdanelerin uzaması her yönde gerçekleşir. Dahası, haddeleme işlemleri sırasında kayda değer ısı üretilir; su ayrıca çelik merdanelerin sıcaklığının korunmasına da hizmet eder. Distorsiyonu önlemek ve merdane yüzeylerinin erozyonunu azaltmak için haddeleme sırasında merdaneye soğutma suyu püskürtülür. Pasolar ısındığında orantısız hale gelir

ve bozulur. Sıcaklığın artmasıyla, merdanelerin kuvveti azalır ve aynı ezme ile merdanelerin kırılması ihtimali olabilir. Haddedeleme sıcaklık artışı, merdane muylu yatağının sıcak olmasına ve sıcak muylu yataklarının herhangi bir noktada durmasına neden olur. Çelik, sıcak haddeleme için istenen yüksek sıcaklığa ısıtıldığında, yüzeyi oksitlenir ve tufal oluşur. Tufal haddelemeden önce çıkarılmamışsa, bu tufal çelikte yüzey kusurlarına sebep olur. Tufal, merdanelere girmeden hemen önce çelik üzerinde basınç altında su püskürtülerek giderilir. Bu şekilde kaldırılan tufal, geri kullanım için bir çukurluğa akıtılır. Bu çukurlara çok ince tufal geçtiği için, kullanılmış soğutma suyu yeniden kullanılmadan önce çökeltme havzalarında veya arıtıcılarda arıtılır. Tufal sıyırma işlemi, deformasyon çalışmaları nedeniyle 1.000°C'nin üzerindeki yüksek sıcaklıklarda haddeleme işlemi sırasında tufal oluşturulduktan sonra, hazırlama ve bitirme tezgâhları içinde yapılır. Fırından hemen sonra tufal sıyırma işlemi için kullanılan proses suyu genellikle yağsızdır.

Haddedeleme işlemi genel olarak A₃ veya A₁'in üzerindeki 30°C-50°C arasında bir sıcaklıkta tamamlanmaktadır. Daha sonra çok hızlı soğutma (su veya yağda) kritik bir değeri aşan soğutma oranı ile gerçekleştirilir. Martensit denilen dengede olmayan bir yapı elde etmek için kritik soğutma hızı gereklidir. Hızlı soğutma sırasında östenit, atomik difüzyon ile ferrit ve perlit'e dönüşmez. Su verme-sertleştirme işlemi ile su verme hızı oluşan martenzit miktarını etkiler[41]. Bu ciddi soğutma oranı, bileşen boyutundan ve soğutma ortamı tipinden (su, yağ) etkilenir. Kritik soğutma hızı, maksimum sertliği (tam martenzit yapısı) sağlayacak olan en yavaş soğutma hızına sahiptir. Martensit, tetragonal gövde merkezli yapıya sahip, α-demir (büyük ölçüde süpersatüre edilmiş ferrit) içinde süper doymuş bir katı karbon çözeltilisidir. Martensit çok sert ve kırılgandır ve “iğne benzeri” bir yapıya sahiptir. Martensit dönüşümünün kinetiği, TTT diyagramlarından anlaşılmaktadır.

2.1.12. Haddedeleme Prosesinde Üründe Ortaya Çıkan Kusurlar

Sıcak haddeleme prosesinde kullanılan makine ekipmanlardan ve üretim öncesi hazırlık aşamasında yapılan hatalardan kaynaklı son üründe kusurlar meydana gelmektedir. Son 20 yıl içerisinde ülkemizde kullanımı yaygınlaşan bilgisayar destekli simüle üretim çalışmaları sayesinde çoğu kusur önlenabilmektedir. Benzetim uygulamaları öncesinde üretim hattında yapılan deneme çalışmaları sonrasında ancak

sorunlar tespit edilip, yüksek maliyetlere ve zaman kaybına katlanılmaktaydı. Benzetim faaliyetleri uygulanması ile üretim ilk olarak sanal ortamda gerçekleştirilip olası kusurlar görülmekte ve müdahale edilmektedir. Bu sayede gerçek üretimlerdeki zaman, hammadde, işçilik kaybı en aza indirilmektedir[42]. Profil haddeciliğinde genel olarak ortaya çıkan kusurlar;

Tırtır (Radyüs Patlağı): Ürünün ayak ve sırt köşe radyüslerinde testere dişi benzeri oluşan yüzey deformasyonudur (ayaklardaki patlamalardır). Sebebi oksitli, gaz boşluklu kütüklerdir. Hammadde girdi kontrolünde yapılan kontroller ile büyük ölçüde önlenmektedir.

Sırt Köşe Çatlağı: Malzeme sırt köşe radyüslerinde kılcal çatlak tarzında yüzey deformasyonudur. Sebebi oksitli, gaz boşluklu kütüklerdir. Girdi kalite kontrol uygulamaları ile önlenmektedir.

Doldurmayan Radyüs : Kalibreye uygun olmayan kütük kullanılmasından kaynaklanmaktadır. Radyüs patlağına benzer görüntüsü vardır. Bilgisayar destekli tasarım uygulamaları ile öngörü yapılarak hata gerçekleşmeden önüne geçilebilmektedir.

Çapak: Çapak haddeleme problemidir, başlıca sebebi malzeme hamurunun fazla gelmesidir. Simülasyon çalışmalarında görülüp, kalibre de iyileştirilmeler yapılarak önlenmektedir.

Laminasyon (Açılma): Haddeleme yoluyla üretilmiş kütükteki katlama vb. sorunların mamulde tabakalaşma oluşturması ve bunların açılması şeklinde meydana gelen hatadır. Giriş hammadde kalite kontrolü safhasında tespit edilmesi mümkündür.

Oyuk: Mamul yüzeyine, haddeleme sırasında düşen skal, curuf, merdane kırığı, ve kaynak atığı vb. batması sonucu oluşan yüzey hatasıdır. Proses öncesi ve sonrasında merdane-ekipman bakımlarının periyodik-kontrollü yapılması sorunu önlemektedir.

Tufal Batığı: Özellikle köşebent üretimlerinde rastlanan bu problem kütüğün tavlınması esnasında oluşan tufalın haddelenme esnasında mamul yüzeyine yapışmasıdır. Bunu önlemek amacıyla kaba grup hadde tezgâhları girişinde basınçlı su ile tufal sıyırma işlemi yapılmaktadır.

Ölçü Bozuğu: İki tezgâh arasındaki devir farklılığından dolayı malzemenin çekmeye girmesi veya hadde ayarlarının doğru yapılmamasından ürün ölçülerinin standart dışında oluşmasıdır. Simülasyon çalışmaları ile üretimin başlangıcında doğru parametreler girilmesiyle önüne geçilmektedir.

Şiling: Haddeleme ayarsızlığından kaynaklanmaktadır. Ayakların oluşmaması ve malzemenin haddeleme esnasında kopması belirtileridir. Genellikle üretim başlangıcında tecrübi bilgilere göre yapılan ayarlardan dolayı gerçekleşmektedir. Simülasyon faaliyetleri neticesinde çıkan parametreler ile önlenmektedir.

Ondülasyon: Tezgâhların devir ayarından (çekmenin az olmasından) ve baskının fazla olmasından oluşmaktadır. Parametre ayarlarının doğru girilememesi kaynaklı olmakta ve benzetim faaliyetleriyle önlenmektedir.

Yatıklık: Yatıklık köşebent ürünlerinde ayakların arasındaki ölçü farkıdır. Sebeplerinin başında merdanelerdeki kaçıklık ve tezgâhların ayarsızlığı gelmektedir. Üretim öncesi tezgâh kontrollerinin öneminin artırılması ve benzetim faaliyetlerinin sonucunda önlenmektedir.

Fitil: Malzeme hamurunun fazla gelmesinden ve kalibreye uygun olmayan kütük kullanımından kaynaklanmaktadır. Benzetim faaliyetlerinde kalibre üzerinde görülmekte ve önlenmektedir.

Paso İzi: Pasonun belli bir çalışma süresinden dolayı aşınmasından yüzey deformasyonu meydana gelir ve paso yüzeyi pürüzlü bir hal alır, bu da o pasodan geçen malzemeye yansır. Paso taşlanarak veya değiştirilerek bu sorun giderilir.

Paso Çatlağı: Pasonun çatlamasından dolayı malzemede oluşan yüzey bozukluğudur. Üretim sonrası merdane kontrollerinde önlenmektedir.

Makara İzi: Malzemenin haddelenmesi sırasında makaralara baskının fazla verilmesi sebebiyle ya da makaranın kırılması sebebi ile oluşan uygunsuzluktur, makara değişimi ve ölçü ayar çalışması ile düzeltilebilir.

Katlama: Tezgâha verilen orantısız baskıdan dolayı yanlara katlama sorunu oluşmaktadır.

Radyüste Kanal-Kademe: Malzeme merdaneden boş geçtiğinde ayak radyüsleri oluşmaz. Fitile benzer bir görüntüsü vardır. Üretim öncesi hazırlık aşamasında ayarlanan kalibre hava paylarının sentil ile kontrolü sorunu önlemektedir.

Şekil 2.14, Şekil 2.15, Şekil 2.16 ve Şekil 2.17’de yukarıda anlatılan kusurlara ait görseller verilmiştir.



a)Tırtır



b)Sırt Köşe Çatlağı



c)Doldurmayan Radyüs



d)Çapak

Şekil 2.14 Ürün kusurları görselleri (a,b,c,d) [42].



d)Laminasyon



e)Sirt Köşe Çatlağı



f)Tufal Batığı



g)Ölçü Bozuğu

Şekil 2.15 Ürün kusurları görselleri (d,e,f,g) [42].



h)Şiling



i)Ondülasyon

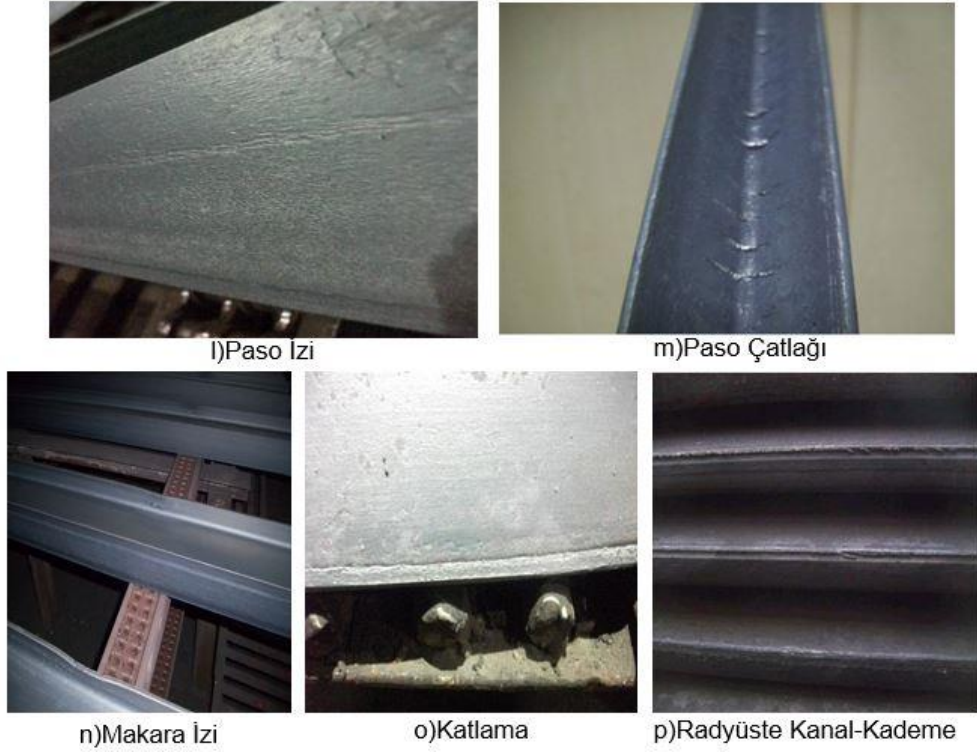


j)Yatıklık



k)Fitol

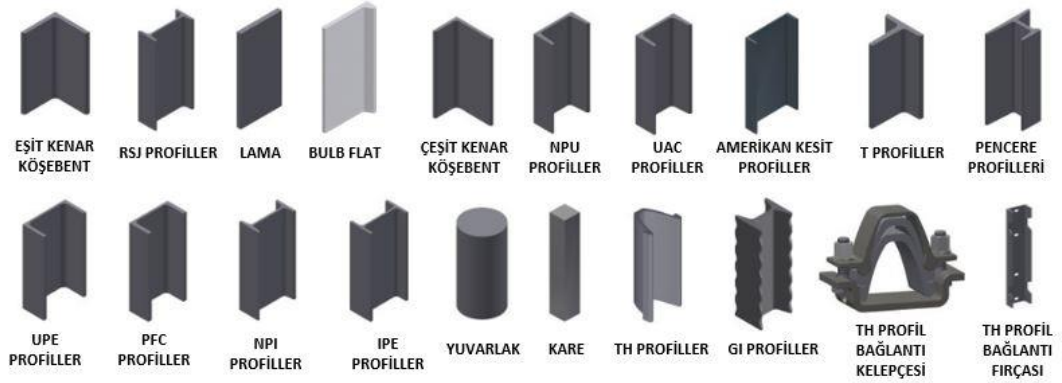
Şekil 2.16 Ürün kusurları görselleri (h,i,j,k) [42].



Şekil 2.17 Ürün kusurları görselleri (l,m,n,o,p) [42].

2.1.13.Sıcak Hadde Ürünü Profiller ve Kullanım Alanları

Sıcak haddeleme yöntemi ile üretilmiş profillerden örnekler Şekil 2.18`de gösterilmiştir.



Şekil 2.18 Sıcak haddeleme yöntemi ile üretilmiş profiller[43].

Şekil 2.18`de verilen profillerin kullanıldığı sektörler; Çelik Yapılar, Gemi İnşa Sanayi & Offshore-Onshore, Enerji (Nakil Hatları ve GES), Madencilik ve Tünel İnşaatları, Otomotiv (Ağır Vasıtalar), Tarım ve İş Makinaları, Demiryolu vb. olarak Şekil 2.19`da sıralanmaktadır.



Şekil 2.19 Sıcak haddelenmiş profillerin kullanım alanları[43].

2.2. Simülasyon (Benzetim) Uygulamaları

2.2.1. Sonlu Elemanlar Metodunun Tarihçesi

Sonlu elemanlar metodunun isimlendirilmesi ve bilinirliği yakın zamanlara dayansa da metodolojisi iki yüzyıl geriye dayanmaktadır. Geçmiş çağlarda yaşamış olan matematik bilimcileri bu yöntemi kullanarak çokgen çevresinden yakınsama yaparak dairenin çevresini bulmuşlardır.

Belirlenen bir kapalı eğri ile sınırlanmış minimum alanın bir yüzeyinin diferansiyel denklemini bulmak için, Schellback yüzeyi birkaç üçgen halinde biçimlendirdi ve tamamen ayrıklaştırılmış alanı bulmak için sonlu bir fark ifadesi kullandı. Mevcut sonlu elemanlar yönteminde, bir diferansiyel denklem, bir takım cebirsel denklemlerle değiştirilerek çözülür. 20.yüzyılın başından itibaren, düzenli bir halde düzenlenmiş birkaç çubuktan oluşan yapısal çerçevelerin davranışı, izotropik bir elastik gövdeninkiyle yaklaşık olarak aynıdır. 1943'te Courant bir yöntem sundu. Bu çalışma, günümüz sonlu elemanlar yönteminin kökeni olduğu düşünülmektedir. 1950'lerin ortalarından beri, uçak endüstrisindeki mühendisler, uçak kanatlarında meydana gelen streslerin tahmini için yaklaşık yöntemler geliştirmeye çalıştılar. 1956'da Turner, Cough, Martin ve Topp, üç düğümlü üçgenler kullanarak kanat yüzeyini modellemek için bir yöntem sundu. Aynı zamanda, Argyris ve Kelsey, yapısal analiz problemlerinin çözümü için sonlu eleman fikirlerinden bazılarını içeren matris prosedürlerini özetleyen birkaç makale sunmuşlardır. Sonlu eleman adı ilk defa, 1960 yılında Clough tarafından oluşturulmuştur. Tam olarak sonlu elemanlar metodu orijinal olarak çoğunlukla sezgisel ve fiziksel argümanlara dayalı olarak geliştirilmiş olsa da, yöntem 1960'ların başlarında klasik Rayleigh-Ritz metodunun bir

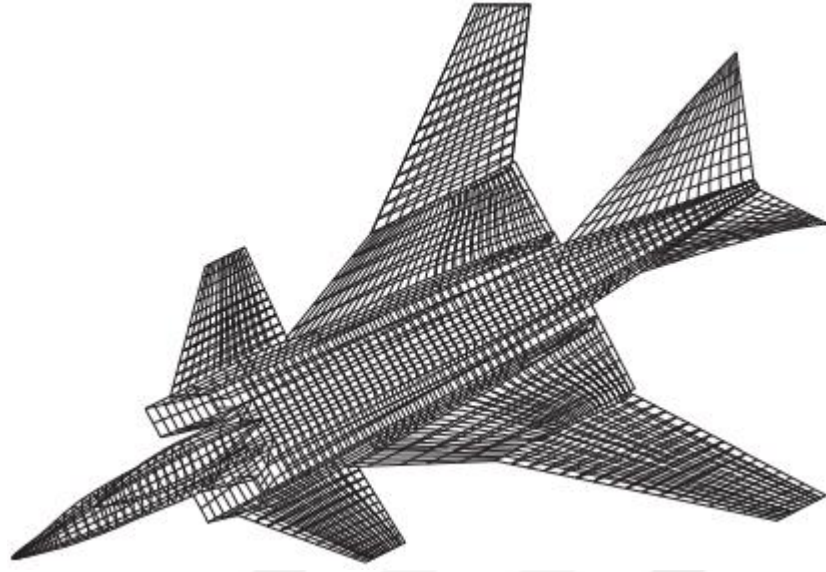
şekli olarak kabul edilmiştir. Yöntemin matematiksel temeli kabul edildiğinde, farklı türden problemler için yeni sonlu elemanların gelişimi ve yöntemin kullanımı çok fazla artmaya başlamıştır. İlk dijital bilgisayarlar, sonlu elemanlar analizinde yer alan birçok hesaplamayı gerçekleştirmek için hızlı bir yol sağladı ve yöntemi uygulanabilir hale getirdi. Süper hızlı bilgisayarların geliştirilmesinin yanı sıra, sonlu elemanlar yönteminin uygulanması da çok etkileyici bir oranda ilerlemiştir. Zienkiewicz ve Cheung, yöntemin geniş yorumu ile birlikte rastgele bir genel alan problemine uygulanabilirliğini açıkladılar.

Sonlu elemanlar yönteminin bu geniş yorumuyla, sonlu eleman denklemleri, Galerkin metodu veya en küçük kareler yaklaşımı gibi ağırlıklı bir kalıntı metodu kullanılarak da elde edilebileceği ortaya koyulmuş. Bu, doğrusal ve doğrusal olmayan diferansiyel denklemlerin çözümü için sonlu elemanlar yönteminin uygulanmasında uygulamalı matematikçiler arasında yaygın ilgiye neden olmuştur. Geleneksel olarak matematikçilerin matris teorisi ve diferansiyel denklemler için çözüm yöntemleri gibi teknikler geliştirdiklerini ve mühendislerin mühendislik analiz problemlerini çözmek için bu yöntemleri kullandıklarını belirtmek gerekir. Yalnızca sonlu elemanlar yönteminde, mühendisler tekniği geliştirmiş ve mükemmelleştirmiş ve uygulamalı matematikçiler karmaşık sıradan ve kısmi diferansiyel denklemlerin çözümü için yöntemi kullanmışlardır. Günümüzde, sonlu elemanlar yöntemini kullanarak pratik mühendislik problemlerini çözmek için endüstri standardı haline gelmiştir[44].

2.2.2. Benzetim Uygulamaları Temel Kavramları

Sonlu elemanlar metodunda ana fikir, karmaşık bir sorunun çözümünü daha basit bir yöntemle değiştirerek bulmaktır. Çözümü bulmakta asıl sorun daha basit bir yerle değiştirildiğinden, tam çözüm yerine sadece yaklaşık bir çözüm bulunabilir. Mevcut matematiksel araçlar, pratik çözümlerin çoğunun kesin çözümünü bulmak için yeterli olmamaktadır. Bu nedenle, belirli bir problemin bile uygun çözümünü bulmak için herhangi bir uygun yöntemin yokluğunda, sonlu elemanlar metodu tercih edilmelidir.

Sonlu elemanlar metodunda, çalışma bölgesi sonlu elemanlar olarak adlandırılan birçok küçük birbirine bağlı alt bölgeden oluşur. Şekil 2.20 bir uçağın sonlu elemanının idealleştirmesini göstermektedir[44].



Şekil 2.20 Sonlu elemanlar düğümü örülmüş bir uçak[44].

Sonlu elemanlarla tasarımda, bahsi geçen elemanlar düğüm setleri ile kısıtlandırılmışlardır. Düğümler tasarımın lokal kütle ve rijitlik özelliklerini tanımlar. Bir problemin çözümündeki doğruluk kullanılan eleman sayısı ile doğrudan ilişkilidir. Doğal olarak kullanılan öge sayısı arttıkça problemin çözümü için kullanılacak olan bilgisayarın işlem kapasitesi ve buna bağlı olarak da işlem süresi değişmektedir[45].

Sonlu elemanlar yöntemi ile çözüm için beş adım şöyle sıralanabilir;

- Ögelerin tanımlanması,
- Ögelerin denklemlerinin oluşturulması,
- Ögelerin özelliklerinin tespiti,
- Sistem denklemlerinin eldesi için öge özelliklerinin birleştirilmesi,
- Uygun sayısal yöntemler kullanarak sistem denklemlerinin çözümlenmesi[46].

2.2.3.Simufact Forming Programı

Simufact; metal şekillendirme, mekanik birleştirme, kaynak ve hızlı prototipleme uygulamaları için benzetim programları geliştiren, Almanya merkezli bir yazılım şirkettir. Sayısal benzetim konusunda sektörün büyük grubu olan MSC

Software bünyesinde yer alan Simufact'in geliştirdiği simufact.forming programıyla soğuk, ılık ve sıcak dövme, sac şekillendirme, hadde, ısıl işlem, mekanik birleştirme ve kaynak prosesleri gerçeğe uygun şekilde analiz edilebilir[47]. Şekil 2.21`de programa ait ekran görüntüsü verilmiştir.

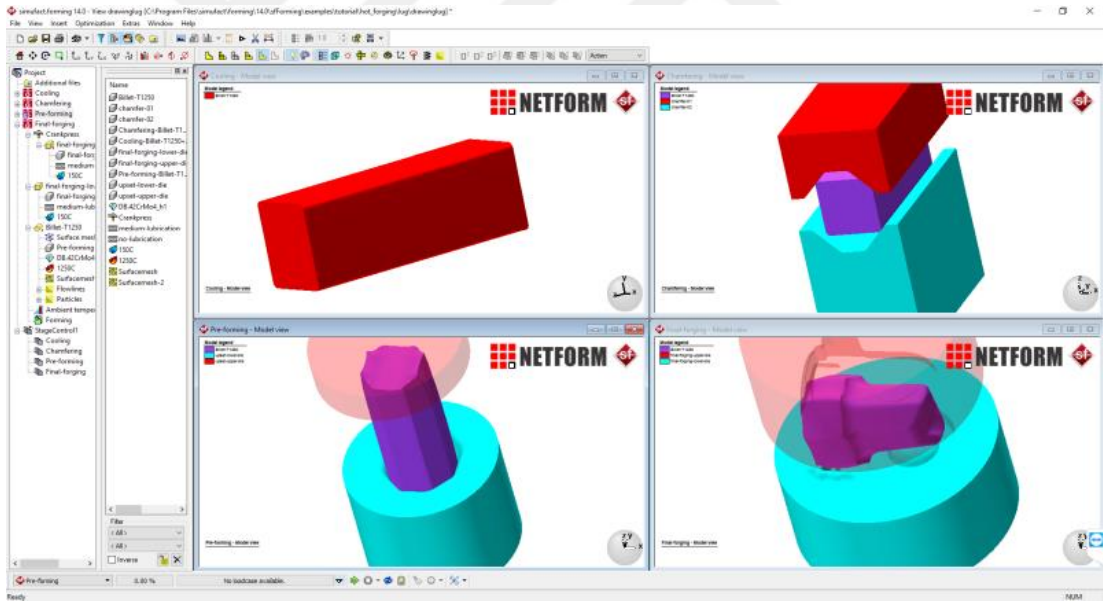
Simufact.forming, imalat sektörü için özel geliştirilmiş bir sayısal benzetim yazılımı olup aşağıdaki prosesler simüle edilebilir;

- Sıcak profil haddeleme,
- Soğuk, ılık ve sıcak dövme,
- Rekvalls ve çapraz kamalı haddeleme,
- Sac şekillendirme,
- Yüzük haddeleme,
- Elektro şişirme,
- Açık kalıpta dövme,
- Profil ekstrüzyonu,
- Mekanik birleştirme,
 - Perçinleme
 - Kenetleme
- Kaynaklı birleştirme,
 - Direnç punta kaynağı
 - Sürtünme karıştırma punta kaynağı
- Sürtünme kaynağı,
- Statik yükleme,
- Isıl işlem.

Simufact.forming ile aşağıdaki parametreleri incelemek mümkündür;

- Şekillendirme kuvveti ve torkları
- Parça üzerindeki:
 - Malzeme akışı
 - Katlanma
 - Kalıp doldurma / doldurmama

- Çapak / fire
- Akız çizgileri (Lif yapısı)
- Sıcaklık dağılımı
- Geri yaylanma
- Kalınlık değişimi
- Artık gerilme
- Sünek kırılma / çatlama
- Faz dönüşümleri
- Sertlik
- Tane boyutu
- Kalıp üzerindeki:
 - Gerilme ve deformasyon dağılımı
 - Sıcaklık dağılımı
 - Aşınma dağılımı

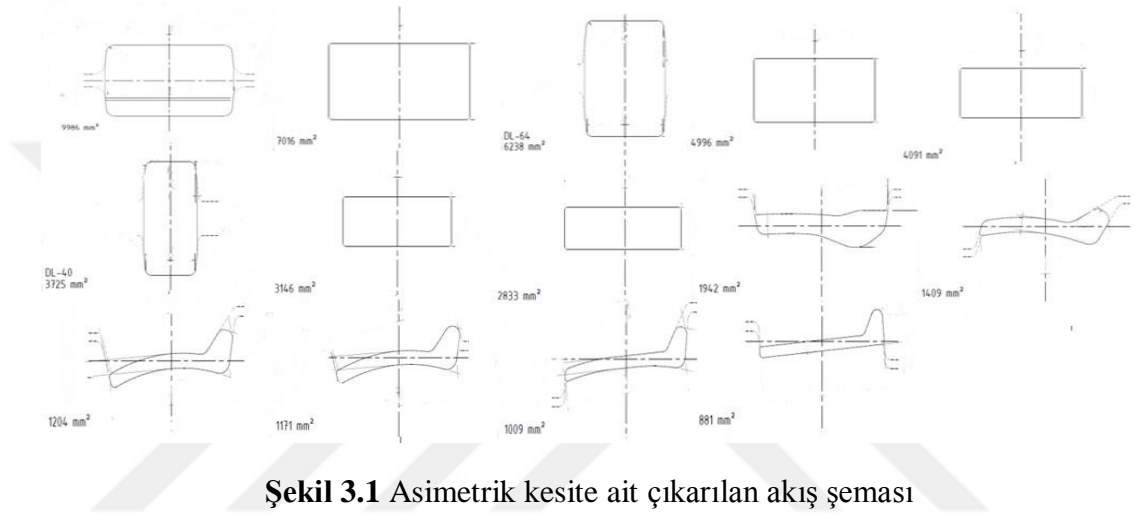


Şekil 2.21 Simufact.forming programına ait ekran görüntüsü[47].

3. DENEYSEL KISIM

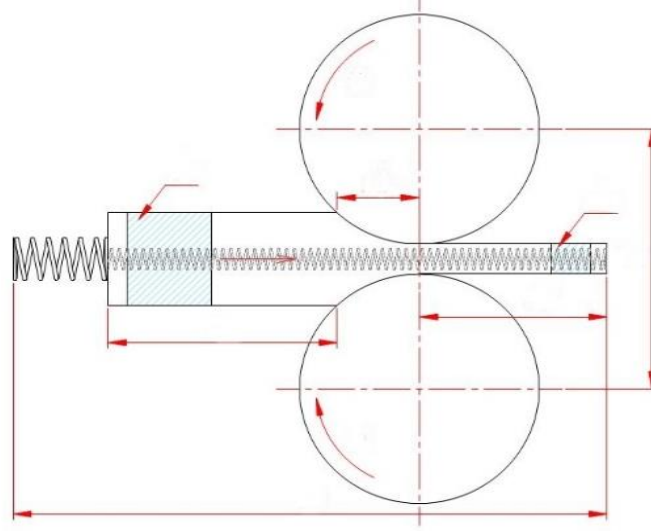
3.1. Simülasyon Çalışmaları Materyal ve Yöntemleri

Çalışmada gerçekleştirilen sıcak haddeleme benzetim uygulamaları sonlu elemanlar metodunu temel alan bir benzetim programı olan simufact.forming vasıtası ile gerçekleştirilmiştir. Benzetim çalışmalarında kullanılacak olan tüm çizimler Autocad Inventor programı aracılığıyla gerçekleştirilmiştir.



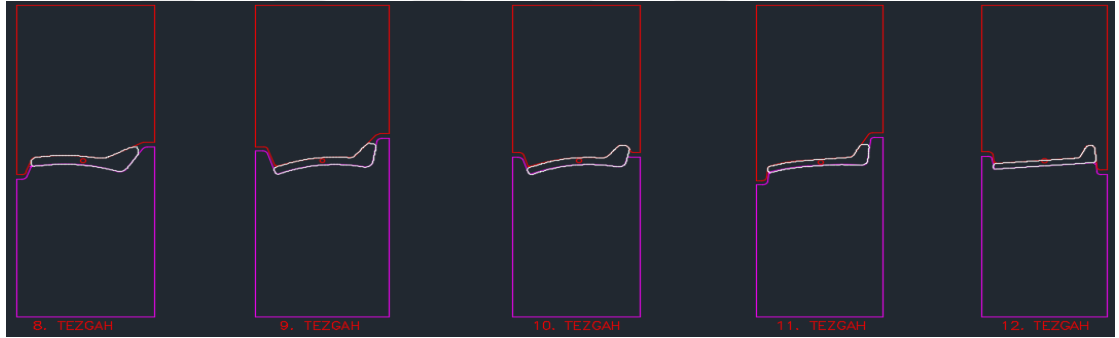
Nihai ürün kesiti referans alınarak, her bir hadde kademesi giriş ve çıkışlarında elde edilmesi öngörülen kesit tasarımları hacim sabitliği ilkesi ve hadde altyapısı limitleri göz önünde bulundurularak haddeleme hesaplamaları gerçekleştirilmiş ve Şekil 3.1`de gösterilen kesit akış şeması nihai ürün kesitinden hammadde kesitine göre tasarlanmıştır.

Bu kapsamda malzemedeki kesit değişimleri hesaplamalarına göre gerekli deformasyonu uygulayabilmek için ilk gereklilik olan merdanenin malzemeyi kapması Şekil 3.2`de verilen yönde ve konumda bir yay kuvveti simufact.forming programında tanımlanmıştır.



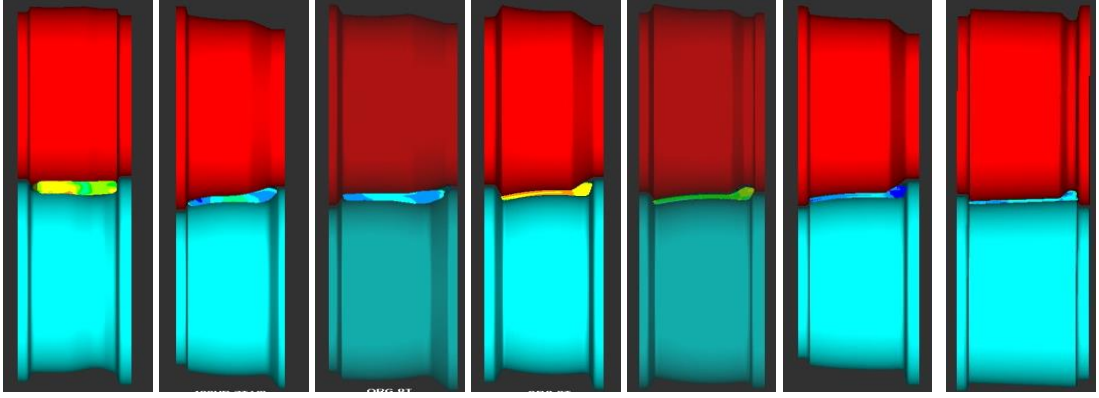
Şekil 3.2 Merdane kapması için yay konumu ve yönü

Üretim altyapısı doğrultusunda elde edilen kesitlere ait haddeleme prosesinde kullanılacak olan merdane kalibreleri tasarlanmış ve elde edilmiş olan hadde-paso tasarımı Şekil 3.3`de gösterilmiştir.



Şekil 3.3 Hadde paso tasarımı

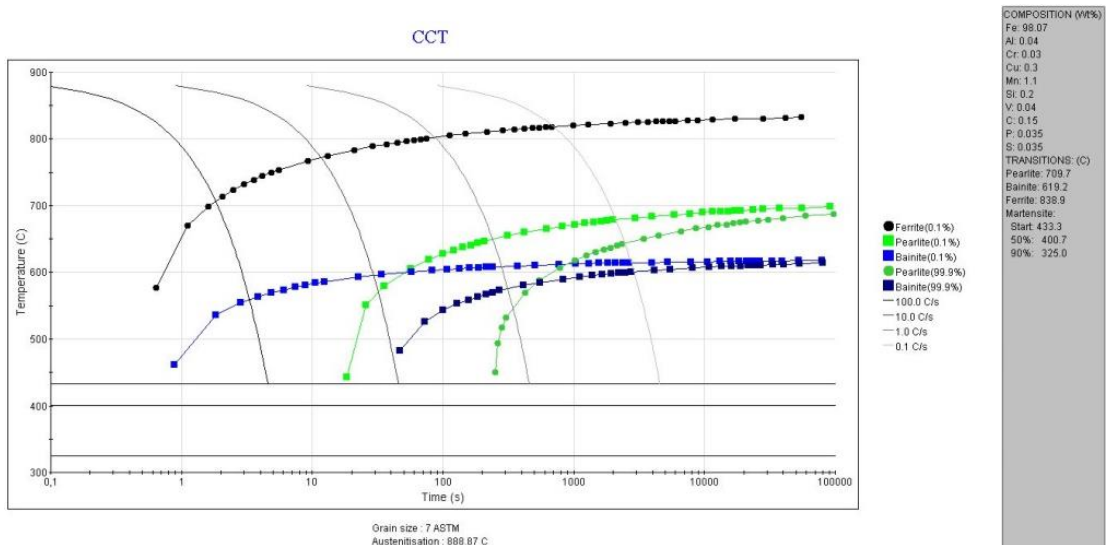
3d modelleme çalışmalarının tamamlanmasını takiben tüm modeller .stl formatına dönüştürülerek Simufact.forming yazılımı içerisine entegre edilmiştir. Merdane ve iş parçalarının görünümü Şekil 3.4`de verilmiştir.



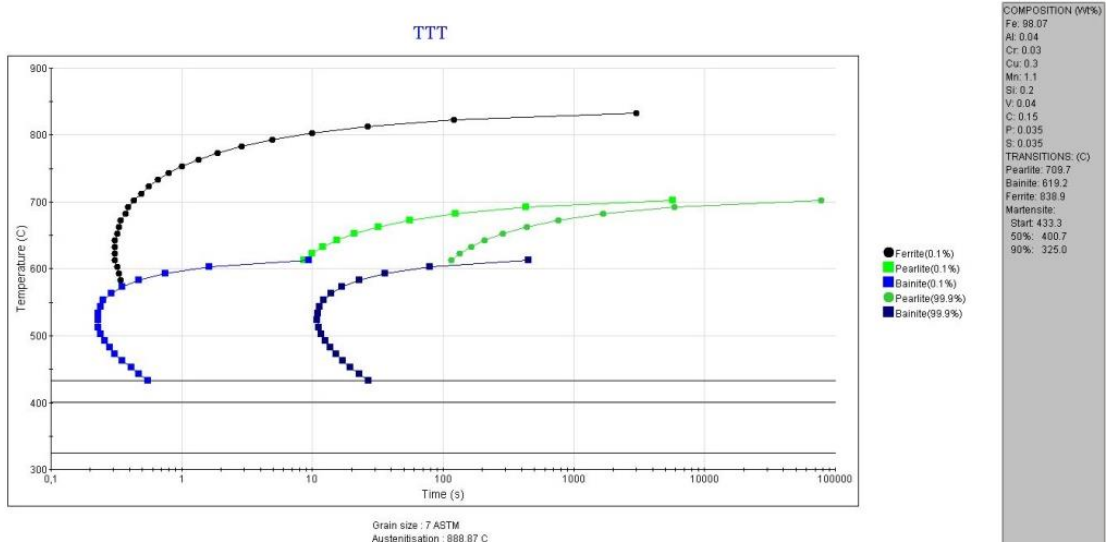
Şekil 3.4 Simufact.forming yazılımı iş parçası ve merdane görünümü

JMatPro, sanayi uygulamalarında kullanılan malzeme ve alaşımların sıcaklık değişimleri göz önüne alınarak, metalurjik ve mekanik özelliklerini analiz eden bir malzeme programıdır. JmatPro ile termo-fiziksel ve fiziksel, kimyasal, mekanik özellikler, faz dönüşümleri, faz denge diyagramları, katılma davranışları ve katılma özellikleri incelenebilmektedir.

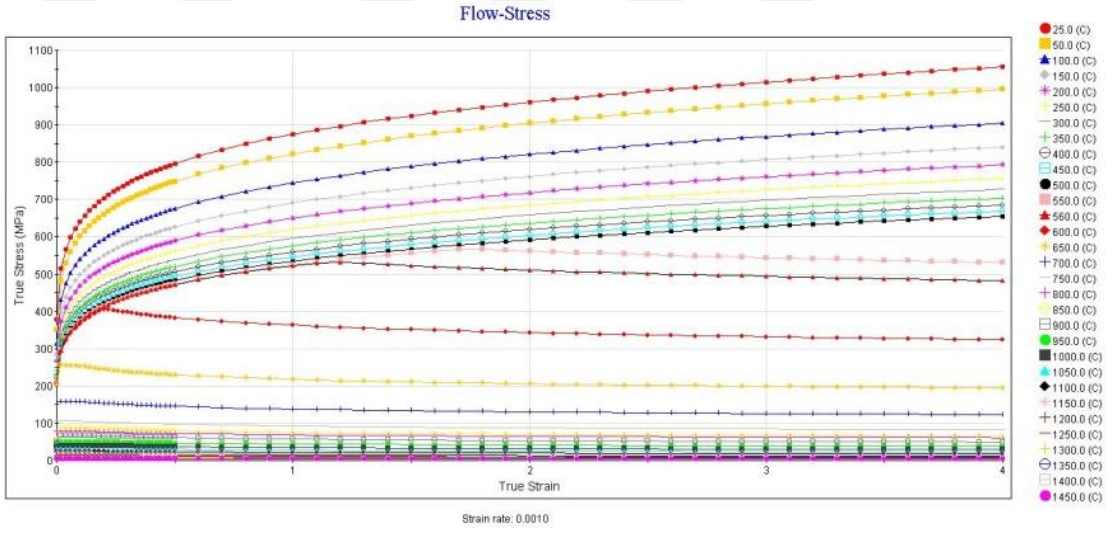
Bu tezde alaşım dizaynı çalışmaları doğrultusunda kullanılacak hammadde kimyasal kompozisyonları JMatPro sayısal simülasyon yazılımı içerisine entegre edilmiş ve Şekil 3.5'de verilen CCT, Şekil 3.6'da verilen TTT diyagramları ile Şekil 3.7'de verilen akış eğrileri elde edilmiştir. Kimyasal kompozisyona ait mekanik ve termal özellikler ile akış eğrileri, Simufact.forming yazılımı içerisine dahil edilmiştir.



Şekil 3.5 Sürekli soğuma dönüşüm diyagramı



Şekil 3.6 Zaman sıcaklık dönüşüm diyagramı



Şekil 3.7 Akış gerilimi ve gerinim değişimi grafiği

Simufact.forming programı içerisine iş parçası ve merdane cad dosyaları aktarımının ardından simülasyon için girilen parametreler Tablo 3.1`de verilmiştir.

Tablo 3.1 Simufact.forming programında kullanılan parametreler

İş Parçası Cinsi	Alaşımli Çelik
İş Parçası Giriş Boyutu	130mm*130mm*300mm
İş Parçası Mesh Tipi	Hexmesh
İş Parçası Mesh Eleman Sayısı	14.950 Eleman
İş Parçası Giriş Sıcaklığı	980 °C
Ortam Sıcaklığı	20 °C
Merdane Sıcaklığı	100 °C
Sürtünme Modeli	Coulomb
Sürtünme Katsayısı	0,25
Merdane Malzeme Tanımlaması	Isı transferine izin veren Rijit Kalıp

Benzetim ve çizim programları Intel(R) Xeon(R) CPU X5650 2.67GHz (12 CPUs) işlemciye, 50 GB belleğe, 2 GB ekran kartı ile Windows 10 Pro 64 bit işletim sistemiyle donatılmış bir Workstation`da çalıştırılmıştır.

3.2. Prototip Üretim Çalışmaları Materyal ve Yöntemleri

Protoip üretim çalışmaları için 130mm*130mm*6000mm ölçülerinde ve Tablo 3.2`de verilen kimyasal kompozisyona sahip kütük kullanılmıştır.

Tablo 3.2 Çelik kütüğün kimyasal kompozisyonu

Kimyasal Kompozisyon (Kütlece Yüzde)								
% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Cu	% V	% Al	% Cr
0,15	0,2	1,1	0,035	0,035	0,3	0,04	0,04	0,03

Tablo 3.3`de prototip ürüne ait sahip olması beklenen mekanik özellikler verilmiştir.

Tablo 3.3 Profile ait mekanik özellikler

Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)	Darbe Enerjisi (J)	
355-410	490-550	21	0	34

Çelik kütük firmaya ait yarı kontinü sıcak hadde tesisinde haddelenerek ilk örnek ürün elde edilmiştir.

3.3. Soğuma Şartlarının Ürün Özelliklerine Etkilerinin İncelenmesi

Çalışmaları Materyal ve Yöntemleri

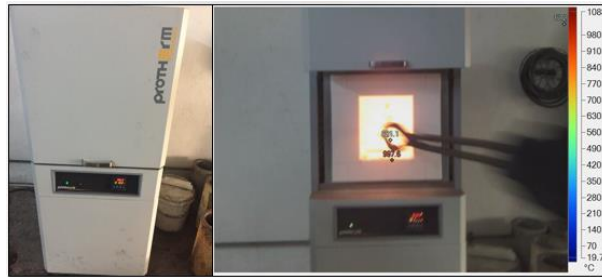
Prototip üretimlerden elde edilen ürünlerden çekme numunesi çıkarılabilecek şekilde 250 mm boyutunda numuneler alınmıştır. 4 farklı soğuma ortamında 3'er adet tekrarlı denemeler yapabilmek ve haddeden çıkan standart ile karşılaştırmak içinde 3 adet olmak üzere anılan boyutlarda toplamda 15 adet numune alınmıştır. Ürün numunesinin kimyasal kompozisyonu, hammaddenin kimyasal kompozisyonu ile karşılaştırmalı olarak Tablo 3.4`de verilmiştir.

Tablo 3.4 Ürünün ve çelik kütüğün kimyasal kompozisyonu

Alaşım No	Kimyasal Kompozisyon (Kütlece Yüzde)								
	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Cu	% V	% Al	% Cr
Kütük Analizi	0,15	0,2	1,1	0,035	0,035	0,3	0,04	0,04	0,03
Mamul Analizi	0,17	0,2	1,1	0,046	0,042	0,35	0,04	0,04	0,03

3.3.1. Soğuma Ortamları

Su, Yağ, Fan, Fırın soğuma ortamlarında soğutulmuştur. Yağ soğuma ortamı olarak "Total Azolla ZS 68" marka yağ kullanılmıştır. Su soğuma ortamı olarak 20°C sıcaklığındaki şebeke suyu kullanılmıştır. Fan soğuma ortamı olarak 25 °C ortam havasında 1x3400 m³/h debili endüstriyel fan kullanılmıştır. Fırın soğuma ortamı olarak Şekil 3.8`de gösterilen östenitleme de kullanılan fırın kullanılmıştır.



Şekil 3.8 Protherm marka kutu fırın

3.3.2. Östenitleme İşlemi

Çalışmada uygulanan ısıl işlemler; Şekil 3.8'de verilen Protherm marka en fazla 1600°C sıcaklığa çıkabilen ve sıcaklığı zamana bağlı olarak kontrol edilebilir kutu fırın ile gerçekleştirilmiştir. Tablo 3.5'de gösterilen sıcaklıkta ve sürede fırında

bekletilen numuneler, daha sonra fırından çıkarılıp verilen ortamlarda soğutulmuşlardır.

Tablo 3.5 Deneyler için östenitleme sıcaklığı ve bekleme süreleri

Soğuma Ortamı	Östenitleme Sıcaklığı (°C)	Bekleme Süresi (Dk.)
Su	960	23,5
Yağ	960	23,5
Fan	960	23,5
Fırın	960	23,5
Standart	-	-

Numuneler fırında istenilen sıcaklığa ulaştıktan sonra bekletme süresinin tespiti için; “Bekletme Süresi= 20+D/2 (Dakika)”, D= Parça Çapı (mm) deneysel formülünden yararlanılmıştır [48].

Numuneler 960°C östenitleme sıcaklığına 16°C/dk. hızla çıkarılmıştır. Numuneler fırında; çentik darbe deneyi, çekme deneyi, sertlik ölçümü ve mikro yapı incelemeleri için belirlenen sıcaklıkta 23,5`er dakika bekletilmiştir.

3.3.3. Çentik Darbe Deneyi

Farklı soğuma hızlarında soğutulmuş numunelere soğuma hızlarına göre çentik darbe tokluklarının belirlenmesi amacı ile TS EN ISO 148-2 standardında belirtilen ölçüler doğrultusunda çentik darbe numuneleri oluşturulmuştur[49]. -40°C, -20°C, 0°C sıcaklıklarına soğutularak deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneyler Şekil 3.9`da gösterilen “U Test” marka 300 Joule kapasiteli cihazda gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan numunelerin soğutulması için Şekil 3.10`daki “Tamson” marka en fazla -50°C`ye soğuma kabiliyetli cihaz kullanılmıştır.



Şekil 3.9 U test marka çentik darbe cihazı

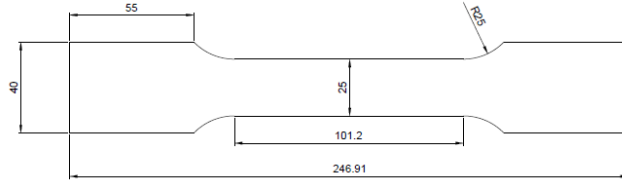


Şekil 3.10 Numuneler ve Tamson marka soğutma cihazı

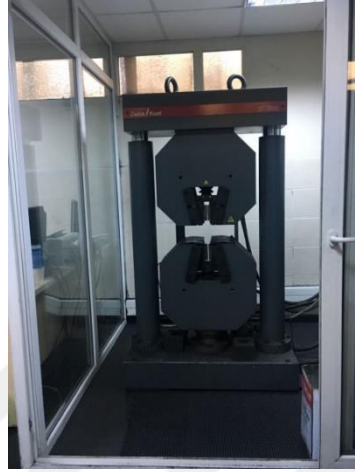
3.3.4. Çekme Deneyi

Mekanik özelliklerin tespit edilmesi amacıyla TS EN ISO 6892-1'e göre çekme numuneleri Şekil 3.11'de verilen boyutlarda, firmaya ait talaşlı imalat bölümünde dik işlem tezgâhın da işlenmiştir[50]. Numunelerin sivri köşeleri, çekme testi esnasında çentik etkisini azaltmak için taşlanmıştır.

Isıl işlem uygulanmış olan tüm numunelerin çekme deneylerinde Şekil 3.12'de verilen "Zwick / SP T600" marka en fazla 60 ton çekme kabiliyetine sahip cihaz ile gerçekleştirilmiştir. Isıl işlem sonrası çekme işlemine tabi tutulan malzemelerde kullanılan çekme hızı 10 mm/dk. ve yük hücresi 600 kN olarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.11 TS EN ISO 6892-1'e göre çekme testi numunesi boyutları



Şekil 3.12 Çekme cihazı

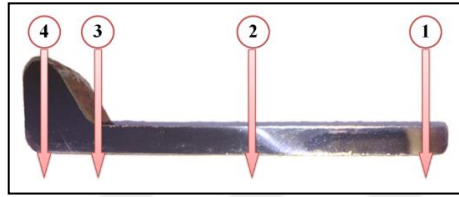
3.3.5. Sertlik Ölçümü

Çalışmada, ısıl işlem sonrası sertlik değişimini belirlemek amacıyla Mikro Vickers sertlik ölçümleri yapılmıştır. Sertlik ölçümlerinde 0,1 kg'lık yük uygulanmıştır. Kullanılan cihaz Şekil 3.13`de gösterilen Qness marka Q10 modeli olup 50 gr.-10 kg.`lık yük aralığında ölçüm yapılabilir. Isıl işlem uygulanmış çekme numunelerinden kesilen dilimlerin 4`er bölgesi üzerinden 0,3 mm`lik aralıklarla ölçümler yapıp değerler kaydedilmiştir, ölçüm bölgeleri Şekil 3.14`de gösterilmiştir.

Ölçüm öncesinde ısıl işlemleri tamamlanan numuneler 180, 320, 600, 800 ve 1200`lik zımparalardan ve keçelerden geçirilerek parlatma işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.13 Mikrosertlik ölçüm cihazı



Şekil 3.14 Sertlik ölçüm noktaları

3.3.6.Mikro Yapı İncelemeleri

Östenitleme sıcaklığında bekletildikten sonra farklı soğuma hızlarında soğutulan numunelerin mikro yapı değişimleri, faz dağılımları, inklüzyon oranlarının ve dekarbürizasyona uğrayıp uğramadığının tespiti amacıyla Şekil 3.15’de verilmiş olan numuneler hazırlanmıştır.



Şekil 3.15 Hazırlanmış numuneler

Mikro yapının incelenebilmesi için 5 deney grubundan birer dilim numune alınarak ısıtma işlemlerinden sonra hazırlama aşamaları; Şekil 3.16’da gösterilen laboratuvar tipi ATM Marka Brillant 200 model testere ile kesilip ardından Şekil 3.17’de gösterilen ATM marka Opal 410 model sıcak bakalitleme makinasında bakalite alınıp, Şekil 3.18’de gösterilen ATM marka Saphir 530 model parlatma makinasında sırasıyla 180, 320, 600, 800 ve 1200’lik zımparalarda işleme tabii tutulmuş ve son olarak 1µm’luk alümina pasta ile parlatılmıştır. Parlatma işlemi

yapılan numuneler % 4'lük nital çözeltisinde 4 saniye tutularak dağlama yapılmıştır. İçyapı görüntüleri Şekil 3.19`da verilen Clemex Marka görüntü işleme sistemine sahip Nikon marka Eclipse MA 100 model optik mikroskop ile 200X büyütme yapılarak alınmıştır.



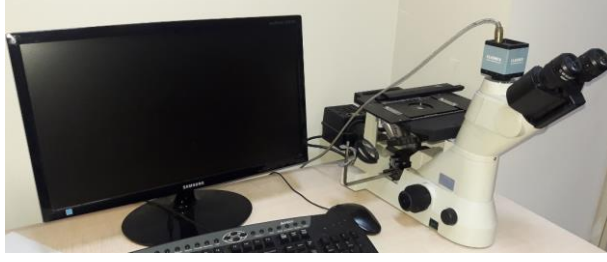
Şekil 3.16 Kesme makinesi



Şekil 3.17 Bakalite alma makinesi

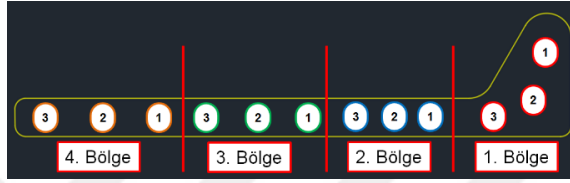


Şekil 3.18 Zımparalama parlatma makinesi



Şekil 3.19 Optik mikroskop

Şekil 3.20`de gösterildiği üzere numunelerin 4`er bölgesinden örnekler alınıp incelemesi yapılmıştır.



Şekil 3.20 Mikro yapı incelemesi için profilden alınan numunelerin bölgeleri

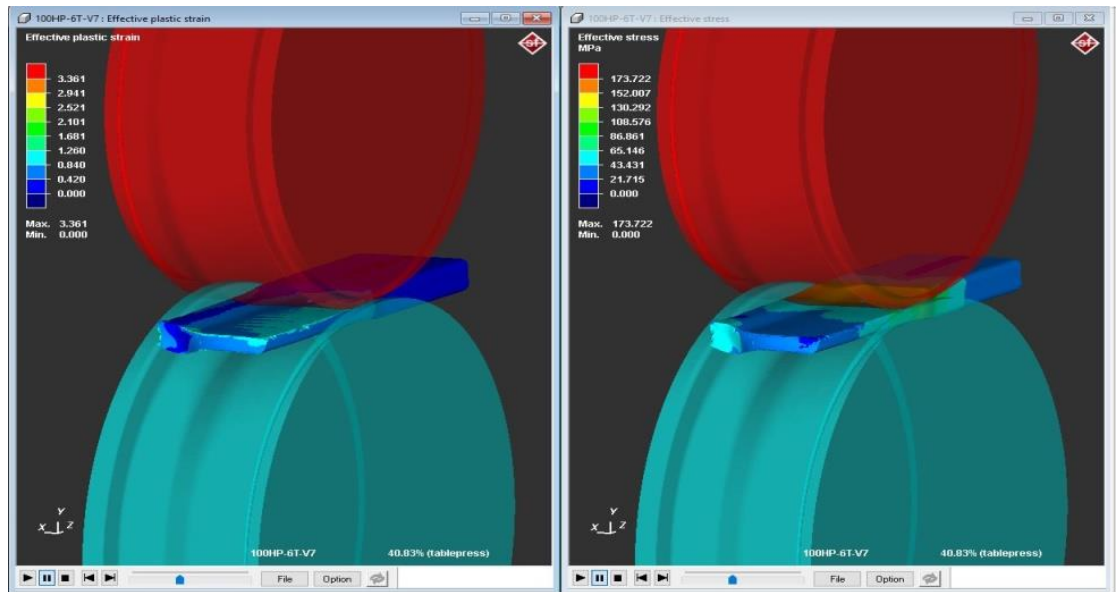
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

4.1. Simülasyon Sonuçları

Bu bölümde her tezgâh için kendine özgü pasosuna göre gerçekleştirilen benzetimlerin sonuçlarına bakılacak. Sonuçlarda çıkabilecek olası kusurlara göre paso tasarımlarına müdahale edilip benzetim baştan çalıştırılacak. Nihai şekillere ulaşıldıktan sonra bir sonraki adım olan prototip üretim gerçekleştirildikten sonra benzetim sonuçları ile ilk üretim çıktısı karşılaştırılacaktır.

6. Tezgâh çıkışına kadar dikdörtgen kesiti kazandırılan hammadde kütük, 6. tezgâh çıkışından itibaren kesit geometrisi boyunca bölgesel olarak farklılık gösteren ezme-basma oranlarına sahip kalibrelerde deforme edilmektedir. Hammaddenin topuk bölgesinde daha düşük ezme miktarları mevcutken, topuğu oluşturacak hacmin; dikdörtgen kesitin üst kısmındaki bölgeye basma kuvvetleri uygulanması sayesinde malzemenin topuk bölgesine doğru yayılması sağlanmaktadır. Şekil 4.1'de gerçekleşen plastik deformasyon ve gerilme dağılımı verilmiştir.

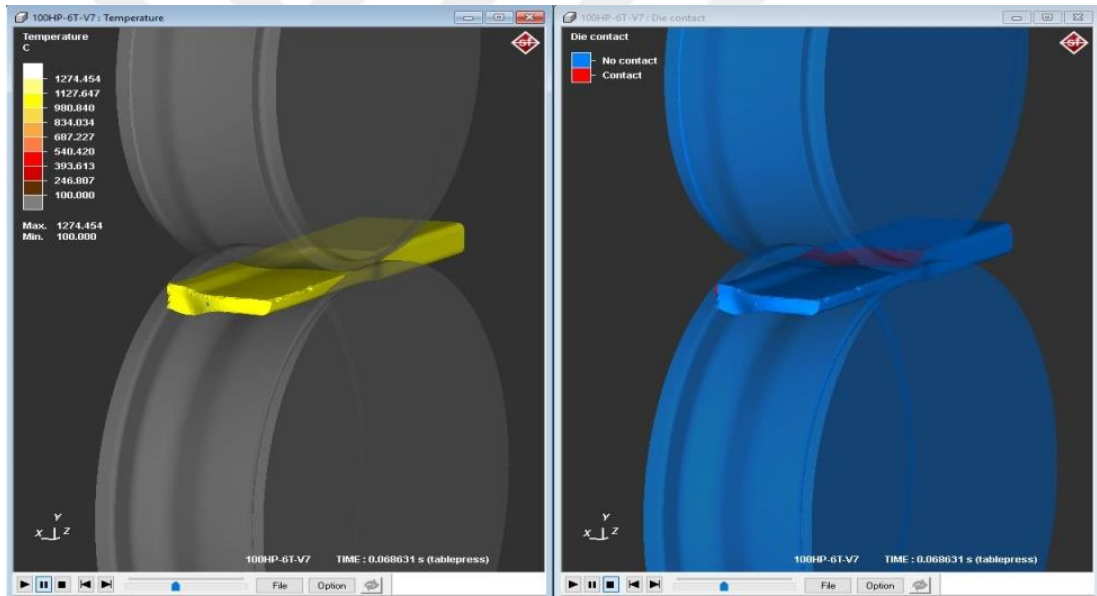
Dolayısıyla deformasyon anındaki plastik deformasyon miktarı ve meydana gelen gerilme miktarları incelendiğinde topuk bölgesinde bu değerlerin daha düşük seviyelerde meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 4.1 7.Tezgâh çıkışı plastik deformasyon miktarı ve gerilme dağılımları

6. Tezgâh çıkışında dikdörtgen şeklini almış olan hammadde kütük, 7. Tezgâh girişine geldiğinde 960°C sıcaklığı seviyelerine düşmekte ve 7. Tezgâha belirtilen sıcaklıkta girmektedir. Bu aşamada basma kuvvetleri etkisi ile deformasyon bölgesinde meydana gelen sürtünme etkileri ile birlikte iş parçası üzerinde bölgesel sıcaklık artışı meydana gelmekte ve bu sıcaklık artışı ise deformasyon miktarının artması ile doğru orantılı olarak artış göstermektedir. Şekil 4.2`de tezgâh çıkış sıcaklığı ve iş parçası merdane temas noktaları gösterilmiştir.

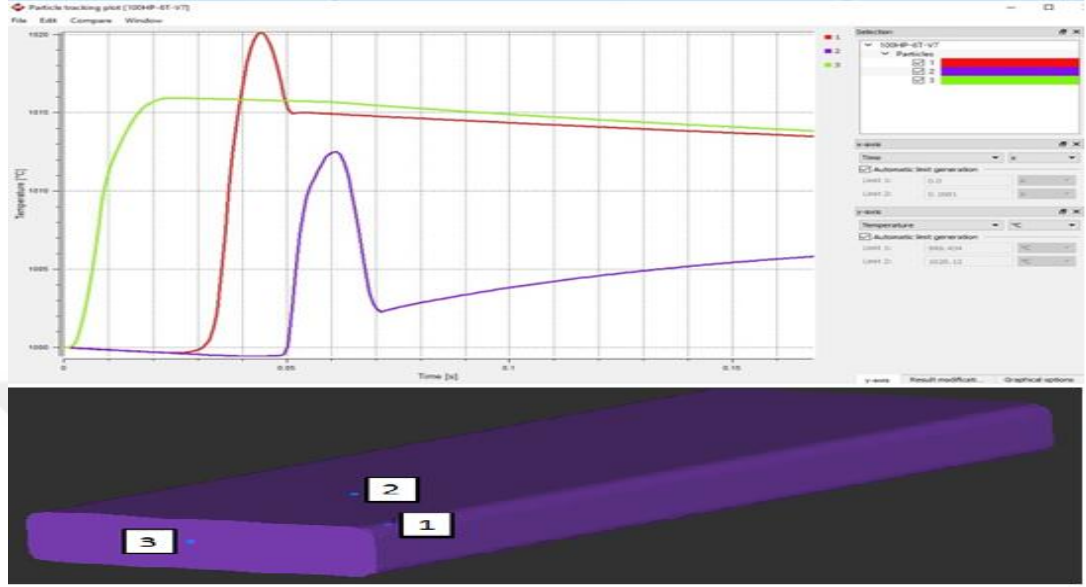
Deformasyonun etkin olduğu merdaneler arası bölgeden deformasyonun tamamlandığı tezgâh çıkışına doğru ilerledikçe sıcaklık düşmekte fakat tezgâh çıkışındaki iş parçası yüzey sıcaklıklarının, tezgâh girişindeki iş parçası yüzey sıcaklıklarına göre yaklaşık 11°C yüksek olduğu görülmektedir.



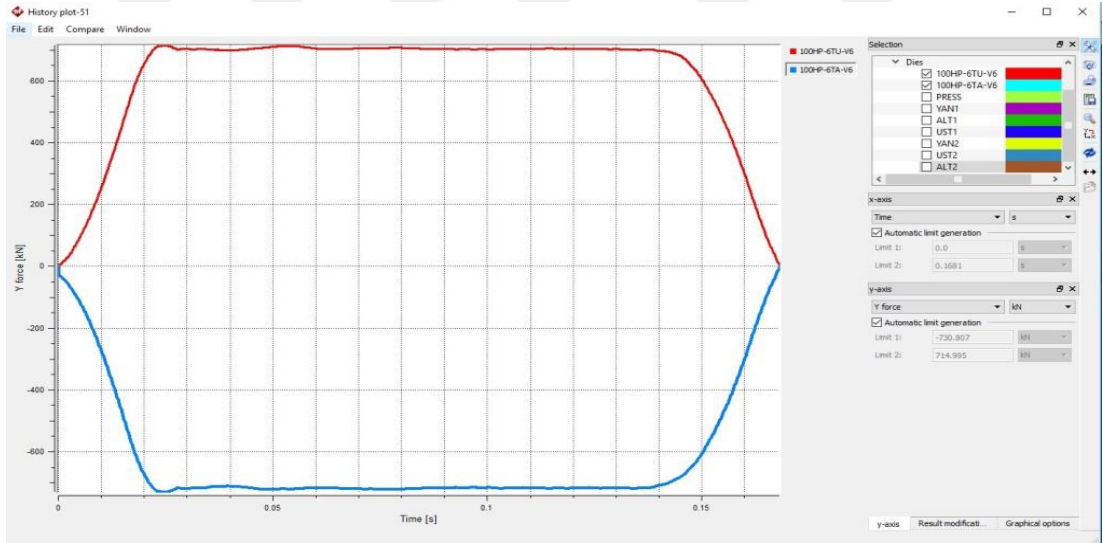
Şekil 4.2 7. Tezgâh çıkışı sıcaklık dağılımı ve kalıp temas noktaları

Şekil 4.3`de gösterildiği gibi 7. Tezgâha 1.000°C sıcaklıkta 3 nolu noktanın bulunduğu bölgeden giriş yapan iş parçası haddeleme esnasında meydana gelen basma kuvvetleri ve sürtünme kuvvetleri etkisi ile ısı açığa çıkarmakta, bu ısı ise iş parçasındaki 3 nolu noktada 16°C`lik bir artışa neden olmaktadır. 3 nolu noktanın bulunduğu bölgeden sonra deformasyona uğrayan ve iş parçasının alt yüzeyinde seçilen 1 nolu noktanın bulunduğu bölgede ise 1.000°C`de giriş yapan iş parçasının deformasyon anında 1.020°C sıcaklık seviyelerine yükseldiği, 2 nolu bölgenin ise 1.000°C sıcaklığında giriş yaparak 1.012°C seviyelerine kadar sıcaklığın arttığı,

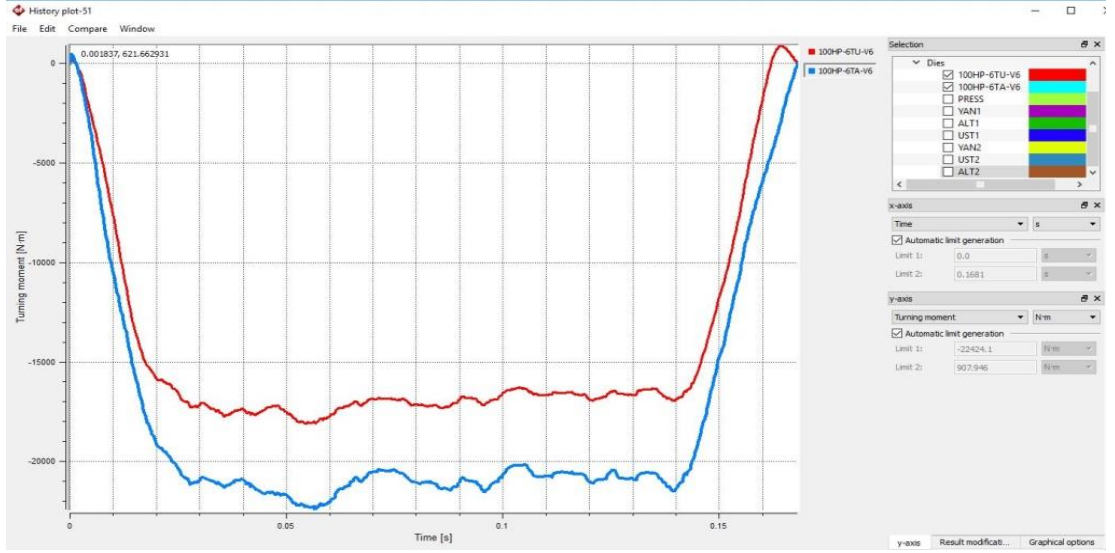
deformasyonun tamamlanması ile birlikte sıcaklıkların düşüş gösterdiği görülmektedir. Şekil 4.4`de merdaneye gelen kuvvetler, Şekil 4.5`de tork değerleri verilmiştir.



Şekil 4.3 7.Tezgâh iş parçasının seçilen bölgelerinin sıcaklık dağılımı

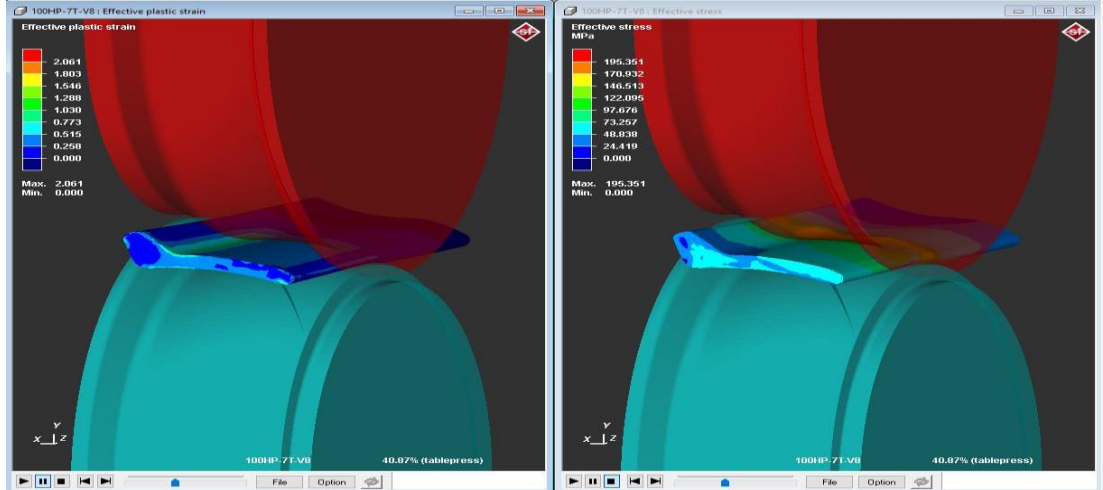


Şekil 4.4 7.Tezgâh merdaneye dik gelen ezme kuvvetleri



Şekil 4.5 7.Tezgâh merdane tork grafiği

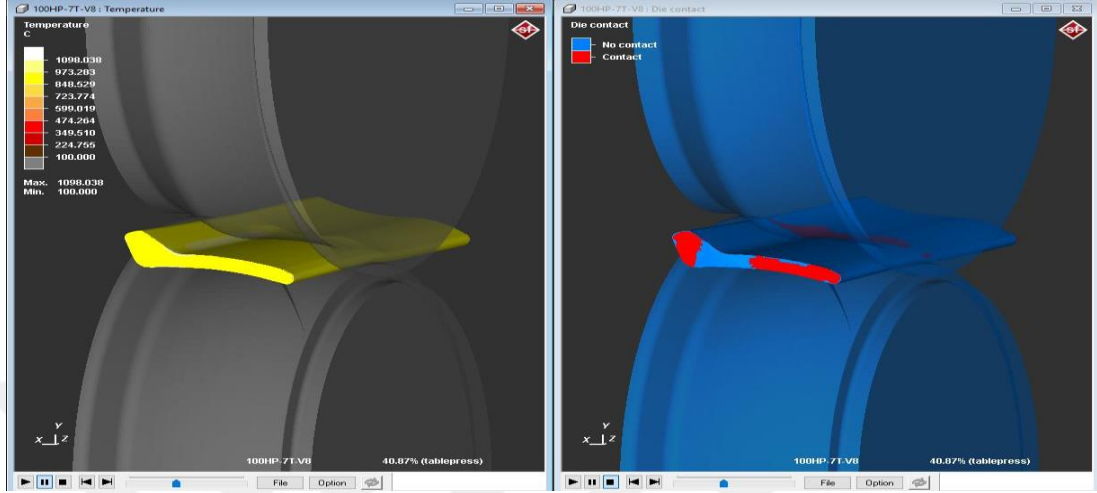
Asimetrik profil kesitini almaya başlayan iş parçası Şekil 4.6`da gösterilen 8. Tezgâhtaki kalibreden geçerken topuk-dikdörtgen bölgesi arasında kalan bölgeye deformasyon uygulanarak birleşme bölgesindeki fazlalık hacmin topuk bölgesini doldurması sağlanmaktadır. Dolayısıyla topuk-dikdörtgen birleşme bölgesinde meydana gelen deformasyon miktarı ve meydana gelen efektif gerilme değerleri belirtilen bölgelerde artış göstermektedir.



Şekil 4.6 8.Tezgâh çıkışı plastik deformasyon ve gerilme dağılımları

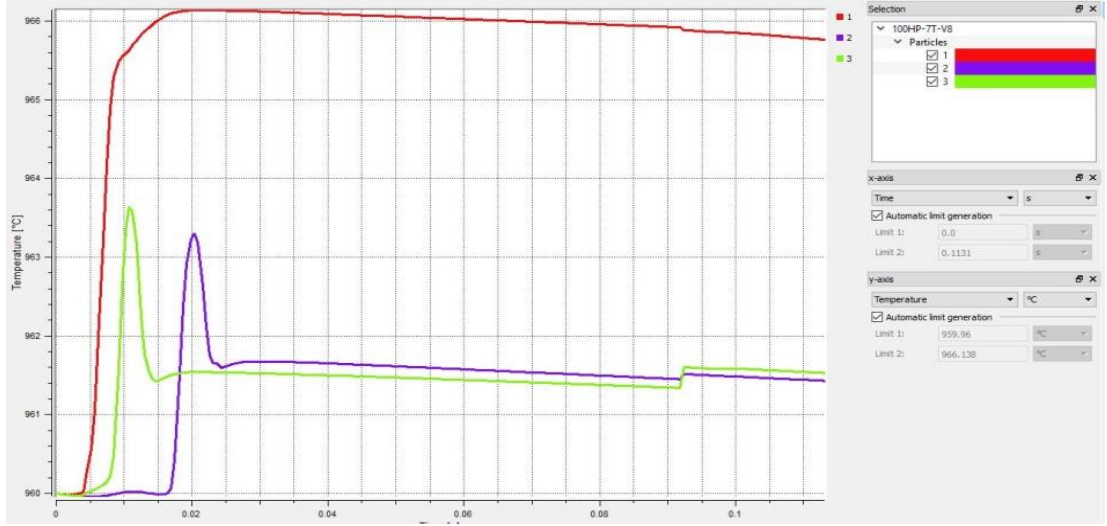
7.Tezgâh çıkışında asimetrik profil kesiti şeklini almaya başlamış olan hammadde kütük, 8. Tezgâh girişine geldiğinde Şekil 4.7`de gösterildiği üzere 960°C sıcaklık seviyelerine düşmekte ve 8.Tezgâha belirtilen sıcaklıkta girmektedir. Bu aşamada basma kuvvetleri etkisi ile deformasyon bölgesinde meydana gelen sürtünme

etkileri ile birlikte iş parçası üzerinde bölgesel sıcaklık artışı meydana gelmekte ve bu sıcaklık artışı ise deformasyon miktarının artması ile doğru orantılı olarak artış göstermektedir.



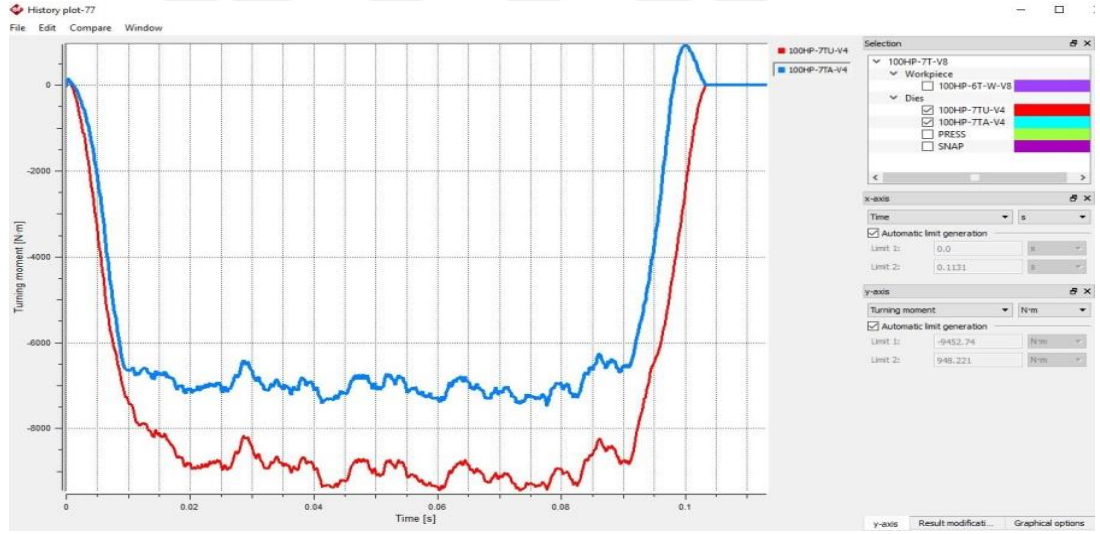
Şekil 4.7 8.Tezgâh çıkışı iş parçası sıcaklık ve kalıp temas bölgesi dağılımları

Şekil 4.8`de gösterildiği üzere 8.Tezgâha 960°C sıcaklıkta giriş yapan iş parçası haddelme esnasında meydana gelen basma kuvvetleri ve sürtünme kuvvetleri etkisi ile ısı açığa çıkarmakta, bu ısı ise iş parçasının giriş kısmında seçilen 1 nolu noktada 6°C`lik bir artışa neden olmaktadır. 1 nolu noktanın bulunduğu bölgeden sonra deformasyona uğrayan ve işparçasının alt yüzeyinde seçilen 3 nolu noktanın bulunduğu bölgede ise 960°C`de giriş yapan iş parçasının deformasyon anında 964°C sıcaklık seviyelerine yükseldiği, 2 nolu bölgenin ise 960°C sıcaklığında giriş yaparak 963°C seviyelerine kadar sıcaklığın arttığı, deformasyonun tamamlanması ile birlikte sıcaklıkların düşüş gösterdiği görülmektedir.



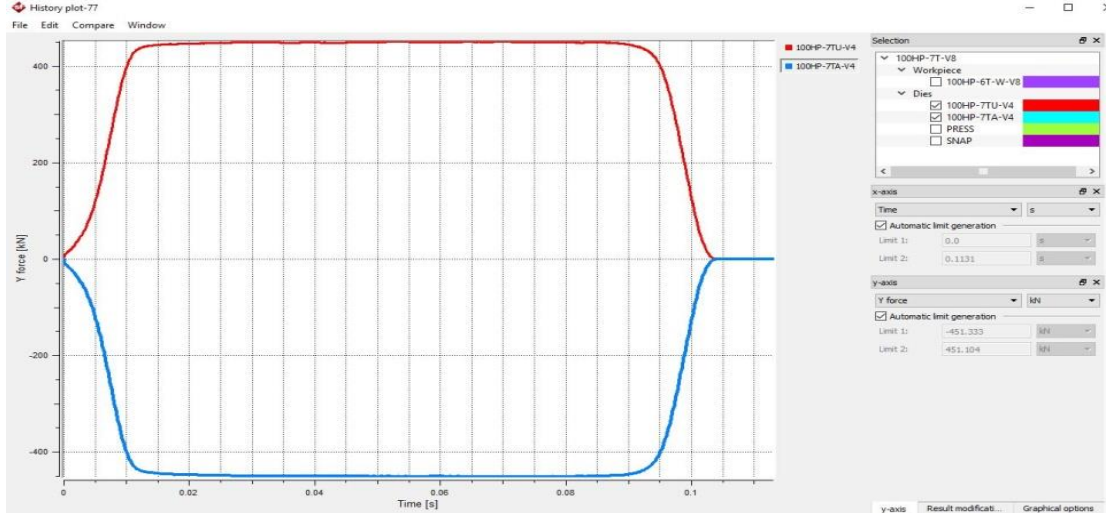
Şekil 4.8 8.Tezgâh iş parçasının seçilen bölgelerinin sıcaklık dağılımı

8.Tezgâhta gerçekleştirilen deformasyon için alt merdanenin 7.000Nm, üst merdanenin ise 9.450 Nm ile tahrik edilmesi gerekliliği Şekil 4.9`da görülmektedir.



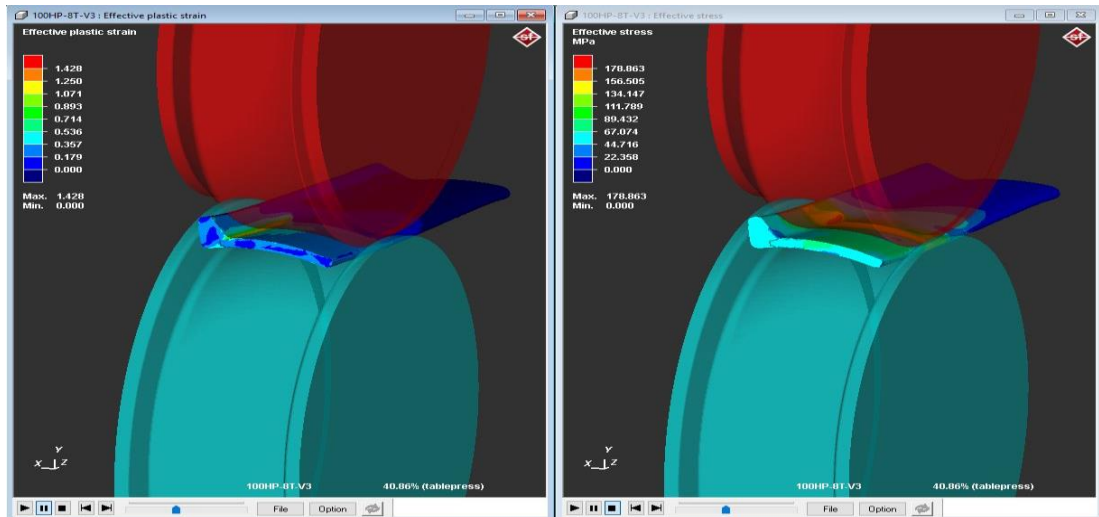
Şekil 4.9 8.Tezgâh merdane tork grafiği

Şekil 4.10`da gösterildiği üzere, tasarımı yapılan plastik deformasyon süreci için ise 8.Tezgâhta alt merdaneye 451 kN, üst merdaneye 451 kN kuvvet etkidiği belirlenmiştir.



Şekil 4.10 8.Tezgâh merdaneye dik gelen ezme kuvvetleri

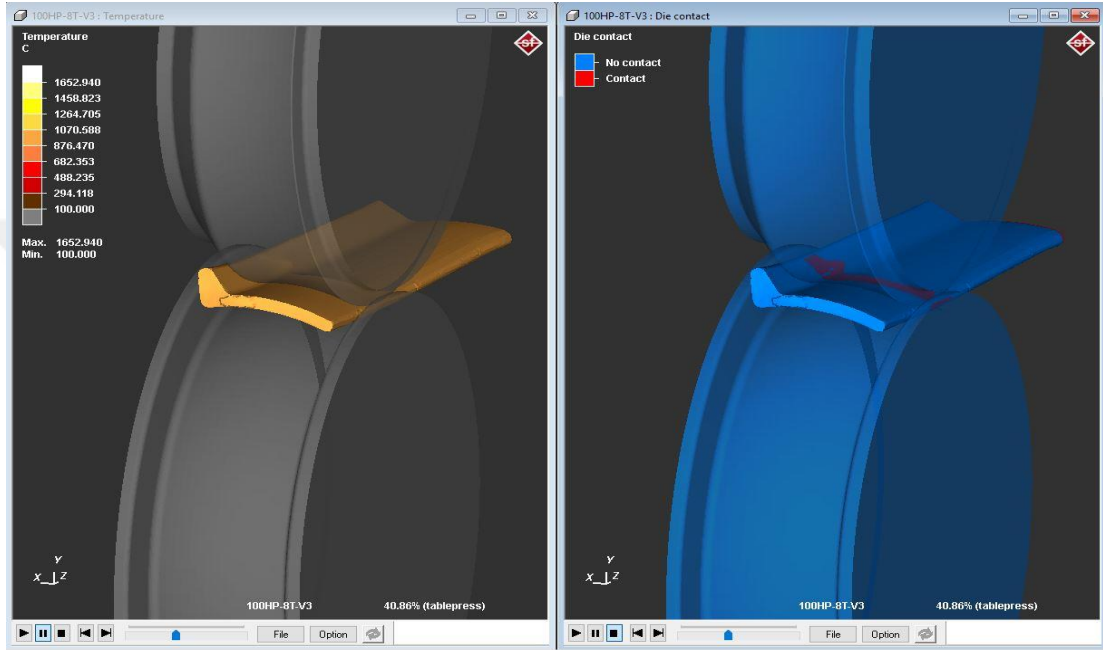
Profil kesitini kabaca almaya başlayan iş parçası 9.Tezgâhtaki kalibreden geçerken topuk-dikdörtgen bölgesi arasında kalan bölgeye daha fazla deformasyon uygulanarak birleşme bölgesindeki fazlalık hacmin topuk bölgesini doldurması sağlanmaktadır. Dolayısıyla topuk-dikdörtgen birleşme bölgesinde meydana gelen deformasyon miktarı ve meydana gelen efektif gerilme değerleri belirtilen bölgelerde artış göstermektedir. Aynı esnada profil kesitine ait işparçasının dikdörtgen bölgesinde de deformasyonun uygulandığı fakat birleşme bölgesiyle kıyaslandığında daha küçük değerlerde meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 4.11 9.Tezgâh çıkışı plastik deformasyon ve gerilme dağılımları

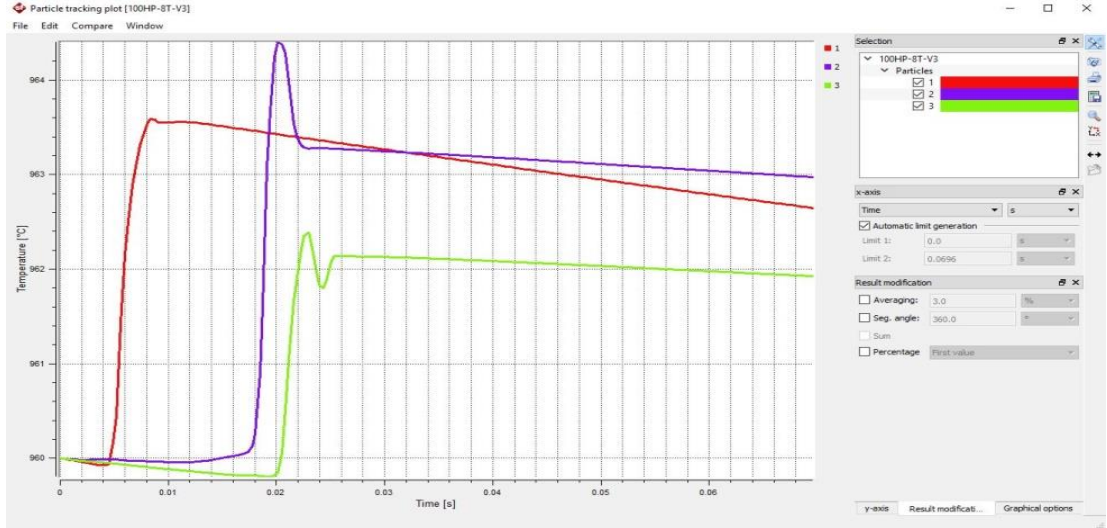
Deformasyonun etkin olduğu merdaneler arası bölgeden deformasyonun tamamlandığı tezgâh çıkışına doğru ilerledikçe sıcaklık düşmekte fakat tezgâh

çıkışındaki iş parçası yüzey sıcaklıklarının, tezgâh girişindeki iş parçası yüzey sıcaklıklarına göre yaklaşık 7°C yüksek olduğu görülmektedir. Deformasyonun etkin olduğu bölgelerde iş parçası ile merdaneler arası temas Şekil 4.12'de incelendiğinde ise merdanelerle temas etmeyen bölgelerin bulunmadığı, kalibrenin tamamen dolduğu ve dolayısıyla fitil/eksik nüfuziyet meydana gelecek bölgelerin oluşmayacağı görülmektedir.



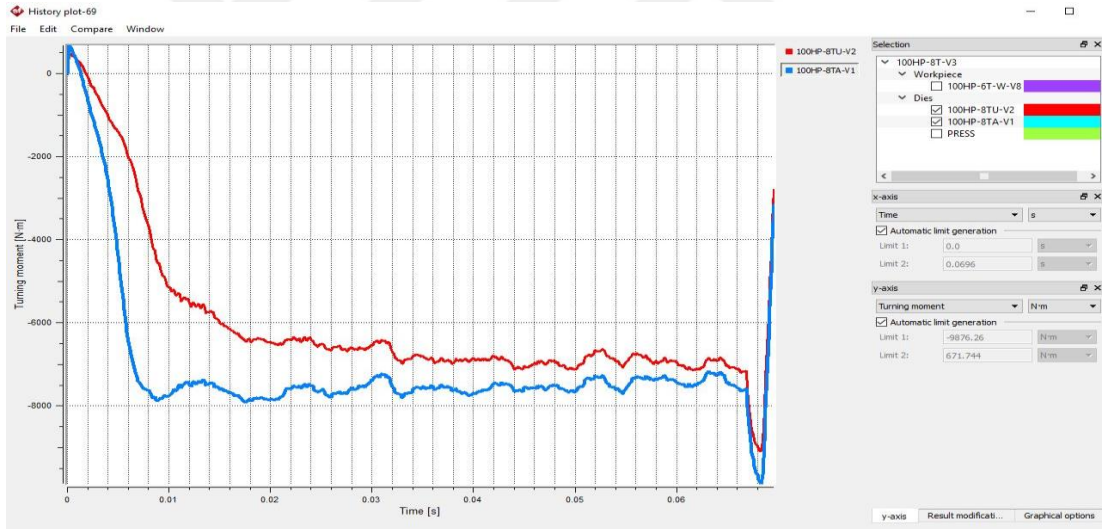
Şekil 4.12 9.Tezgâh çıkışı iş parçası sıcaklık ve kalıp temas bölgesi dağılımları

9.Tezgâha 960°C sıcaklıkta giriş yapan iş parçası haddeleme esnasında meydana gelen basma kuvvetleri ve sürtünme kuvvetleri etkisi ile ısı açığa çıkarmakta, bu ısı ise iş parçasının giriş kısmında seçilen 1 nolu noktada 3°C'lik bir artışa neden olmaktadır. 1 nolu noktanın bulunduğu bölgeden sonra deformasyona uğrayan ve iş parçasının üst yüzeyinde seçilen 2 nolu noktanın bulunduğu bölgede ise 960°C'de giriş yapan iş parçasının deformasyon anında 965°C sıcaklık seviyelerine yükseldiği, 3 nolu alt yüzeyde seçilen bölgenin ise 960°C sıcaklığında giriş yaparak 962°C seviyelerine kadar sıcaklığının arttığı, deformasyonun tamamlanması ile birlikte tüm belirtilen sıcaklıkların düşüş gösterdiği Şekil 4.13'de görülmektedir.



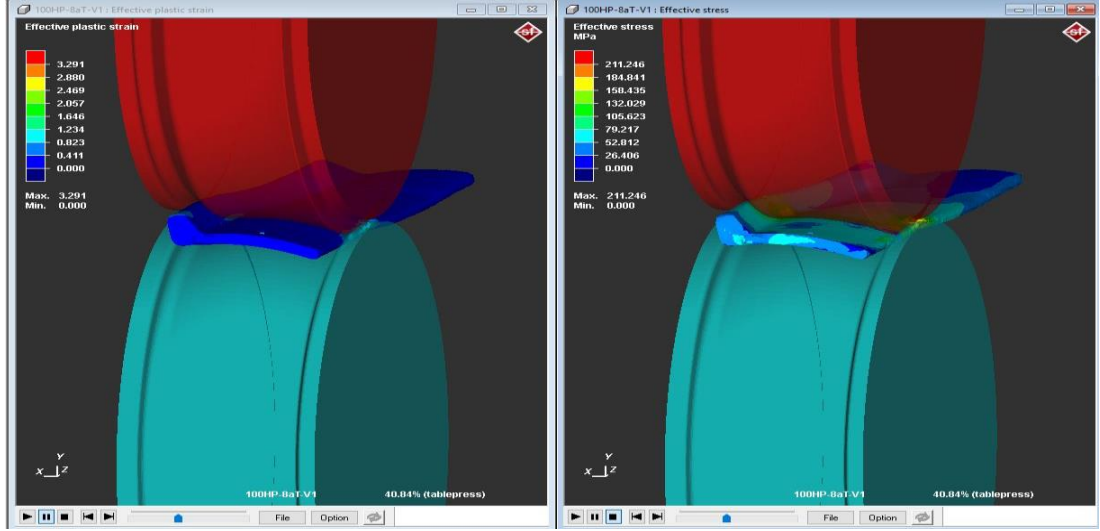
Şekil 4.13 9.Tezgâh iş parçasının seçilen bölgelerinin sıcaklık dağılımı

9.Tezgâhta gerçekleştirilen deformasyon işlemi için alt merdanenin 9.876 Nm, üst merdanenin ise 9.500 Nm ile tahrik edilmesi gerekliliği görülmektedir.



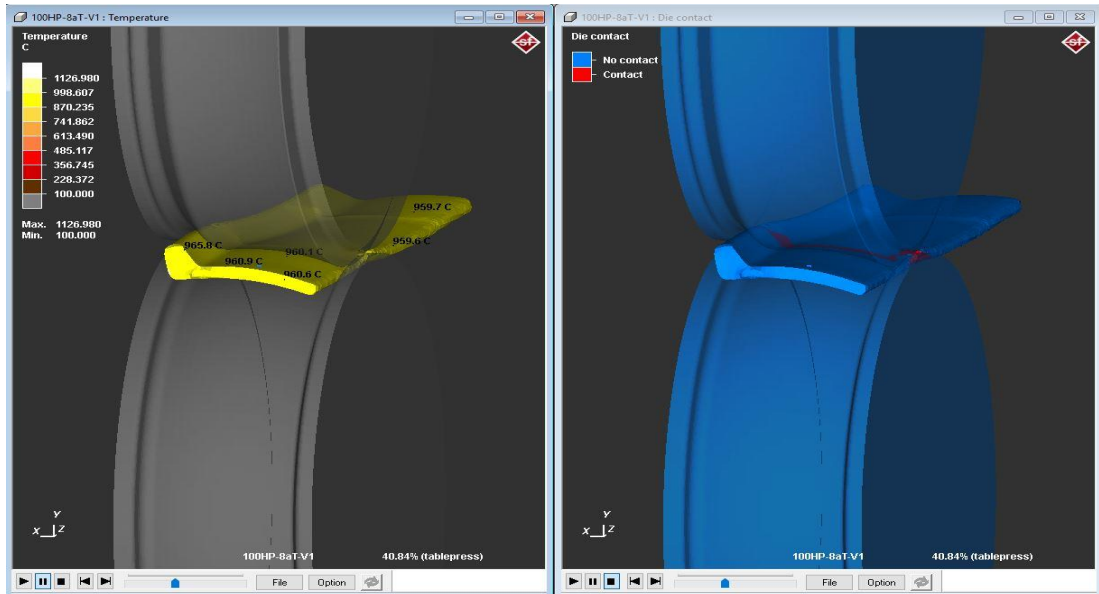
Şekil 4.14 9.Tezgâh merdane tork grafiği

Şekil 4.15`de gösterildiği üzere iş parçası 10. kalibreden geçerken topuk ve dikdörtgen bölgelerine nispeten homojen bir deformasyon uygulanarak son kademe deformasyon süreçlerine hazırlık yapılmaktadır. Topuk ve dikdörtgen bölgesine nihai ürün ölçülerine yakın ezme oranları atanarak bu bölgelerdeki kesit daraltılırken genişlik artırılmakta ve dikdörtgen bölgesindeki eğrilikler giderilmeye başlanmaktadır. Önceki tezgâhlarda uygulanan ezme-basma oranları ile kıyaslandığında 10.Tezgâhta daha düşük ezme-basma oranları ile karşılaşılmaktadır.



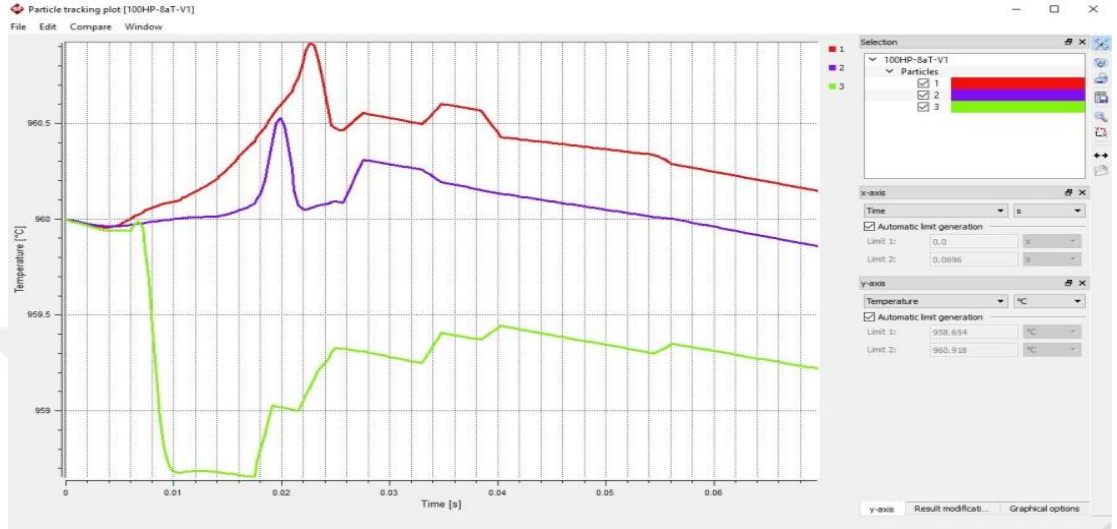
Şekil 4.15 10.Tezgâh çıkışı plastik deformasyon miktarı ve gerilme dağılımları

Deformasyonun etkin olduğu merdaneler arası bölgeden deformasyonun tamamlandığı tezgâh çıkışına doğru ilerledikçe sıcaklık düşmekte fakat tezgâh çıkışındaki iş parçası yüzey sıcaklıklarının, tezgâh girişindeki iş parçası yüzey sıcaklıklarına göre yaklaşık 1°C yüksek olduğu Şekil 4.16`da görülmektedir. Deformasyonun etkin olduğu bölgelerde iş parçası ile merdaneler arası temas incelendiğinde ise merdanelerle temas etmeyen bölgelerin bulunmadığı, kalibrenin tamamen dolduğu ve dolayısıyla fitil/eksik nüfuziyet meydana gelecek bölgelerin oluşmayacağı görülmektedir.



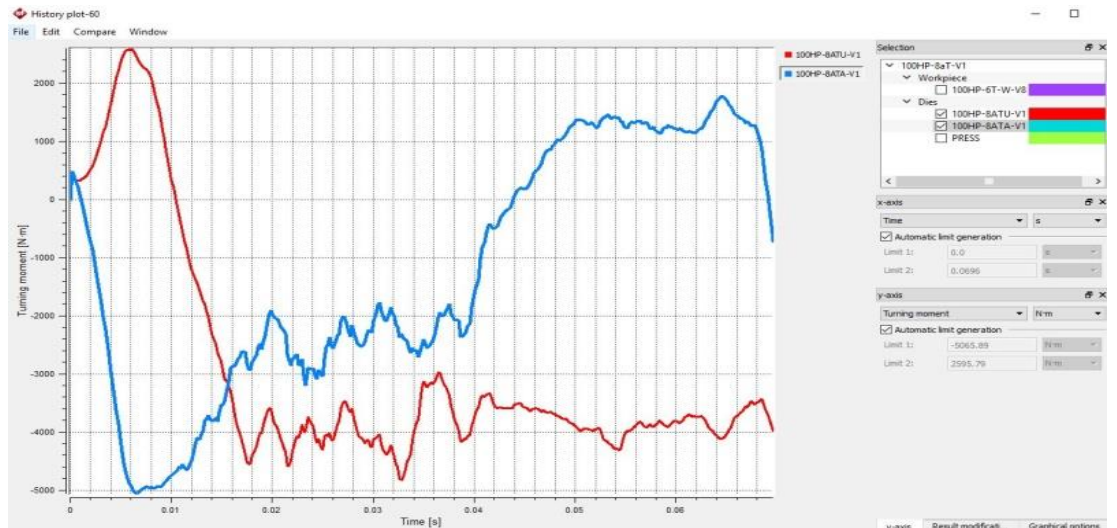
Şekil 4.16 10.Tezgâh çıkışı iş parçası sıcaklık ve kalıp temas bölgesi dağılımları

10.Tezgâha 960°C sıcaklıkta giriş yapan iş parçasında ezme oranlarının çok düşük olmasından dolayı iş parçası yüzey sıcaklıklarında belirgin bir değişim gözlenmemekle birlikte, sıcaklık değişimlerinin sayısal değeri 1°C civarında gerçekleşmiştir. Bu değişim Şekil 4.17'deki grafikte gösterilmiştir.



Şekil 4.17 10.Tezgâh iş parçasının seçilen bölgelerinin sıcaklık dağılımı

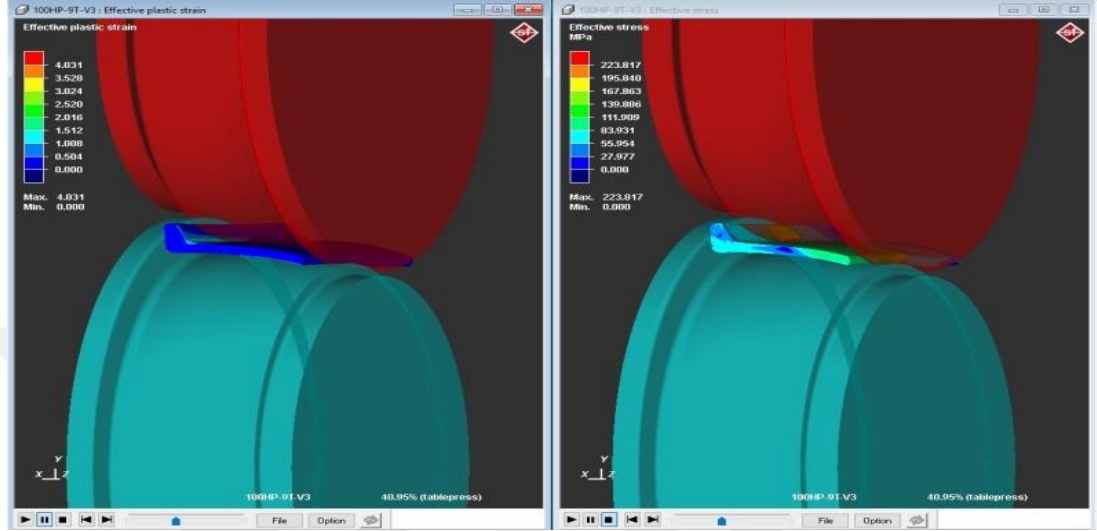
10.Tezgâhta gerçekleştirilen deformasyon işlemi için alt merdanenin 5.065 Nm, üst merdanenin ise 4.950 Nm ile tahrik edilmesi gerekliliği Şekil 4.18'de görülmektedir.



Şekil 4.18 10.Tezgâh merdane tork grafiği

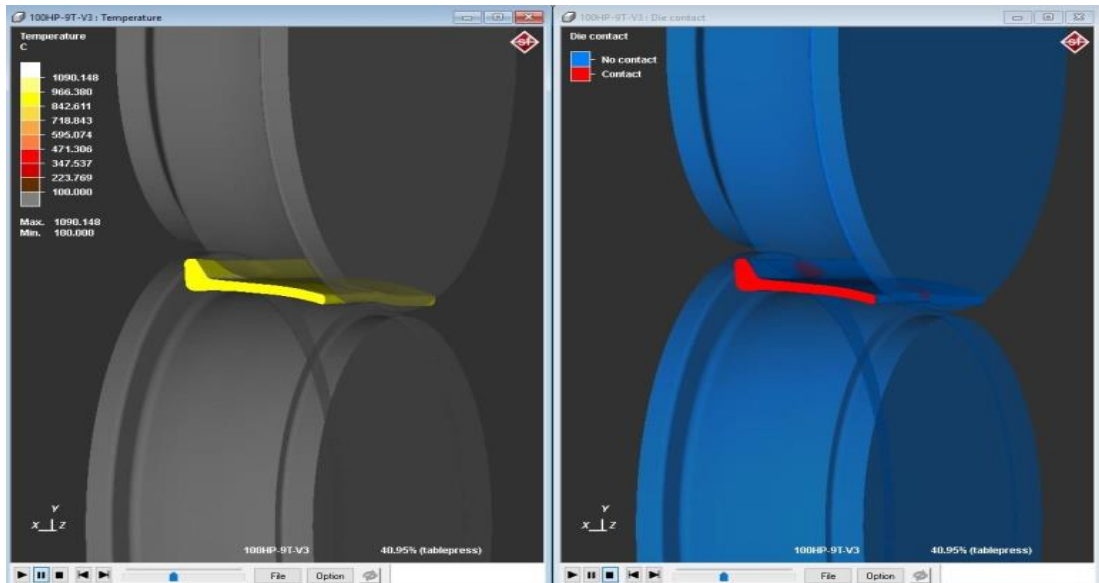
11.Tezgâh girişi ve çıkışında iş parçasında meydana gelen plastik deformasyon miktarı ve meydana gelen efektif gerilmeler incelendiğinde, topuk-dikdörtgen

birleşme bölgesinde deformasyon miktarı ve gerilme değerlerinin arttığı, deformasyon miktarının kesit boyunca sabit olduğu dikdörtgen bölgesinde ise 110 MPa seviyelerinde homojen dağılmış gerilmelerin meydana geldiği Şekil 4.19'da görülmektedir.



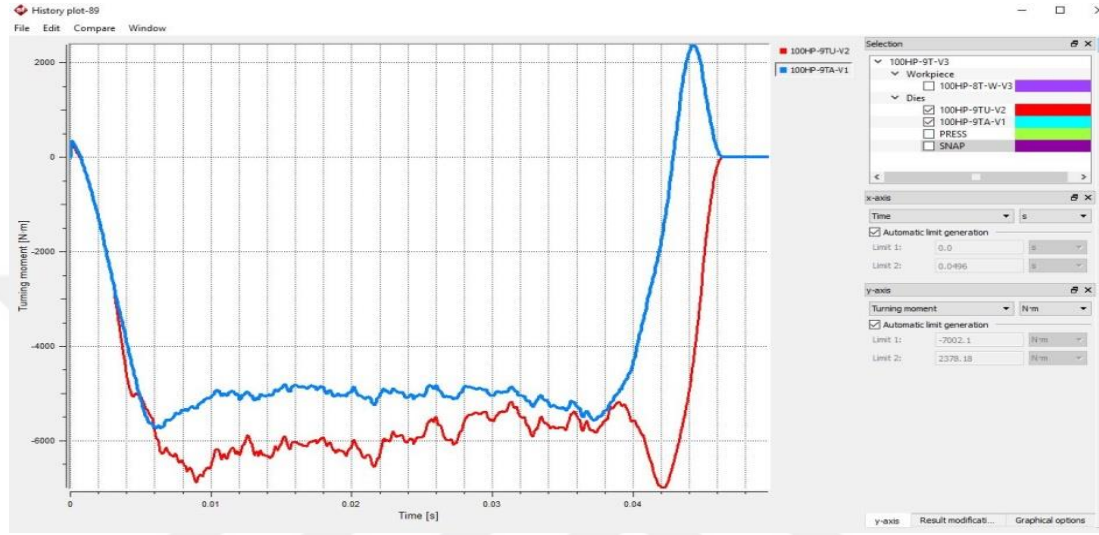
Şekil 4.19 11.Tezgâh çıkışı plastik deformasyon miktarı ve gerilme dağılımları

Deformasyonun etkin olduğu merdaneler arası bölgeden deformasyonun tamamlandığı tezgâh çıkışına doğru ilerledikçe sıcaklık düşmekte fakat tezgâh çıkışındaki iş parçası yüzey sıcaklıklarının, tezgâh girişindeki iş parçası yüzey sıcaklıklarına göre yaklaşık 6°C yüksek olduğu Şekil 4.20'de görülmektedir.

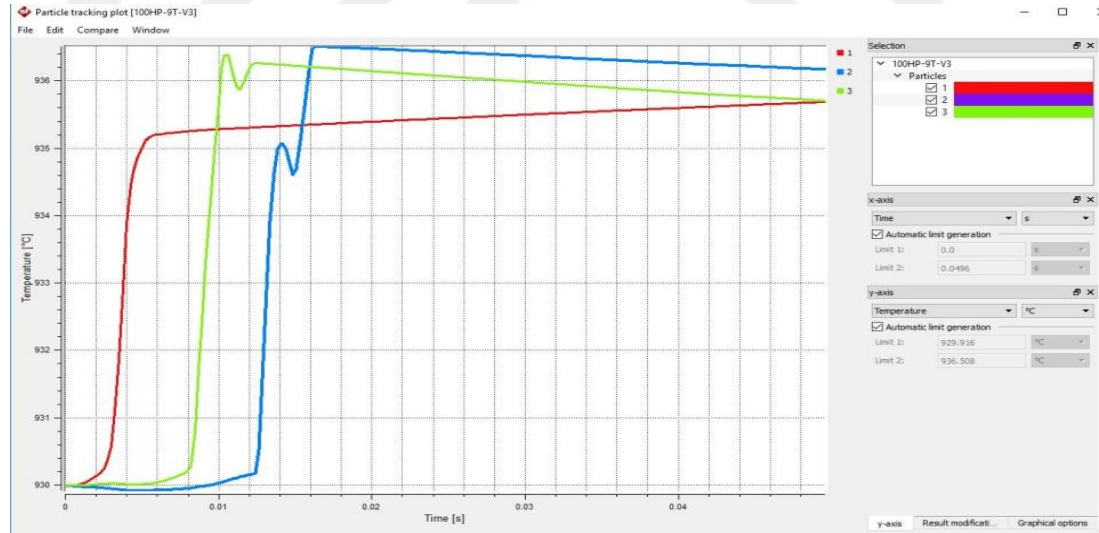


Şekil 4.20 11.Tezgâh çıkışı iş parçası sıcaklık ve kalıp temas bölgesi dağılımları

11.Tezgâhta gerçekleştirilen deformasyon işlemi için alt merdanenin 5.400 Nm, üst merdanenin ise 7.000 Nm ile tahrik edilmesi gerekliliği Şekil 4.21`de görülmektedir. Tezgâh giriş ve çıkışlarında iş parçası sıcaklıkları irdelendiğinde ise 930°C sıcaklık seviyesinde 11.Tezgâha giriş yapan iş parçası sıcaklığının tezgâh çıkışında 936°C seviyelerine yükseldiği Şekil 4.22`de görülmektedir.



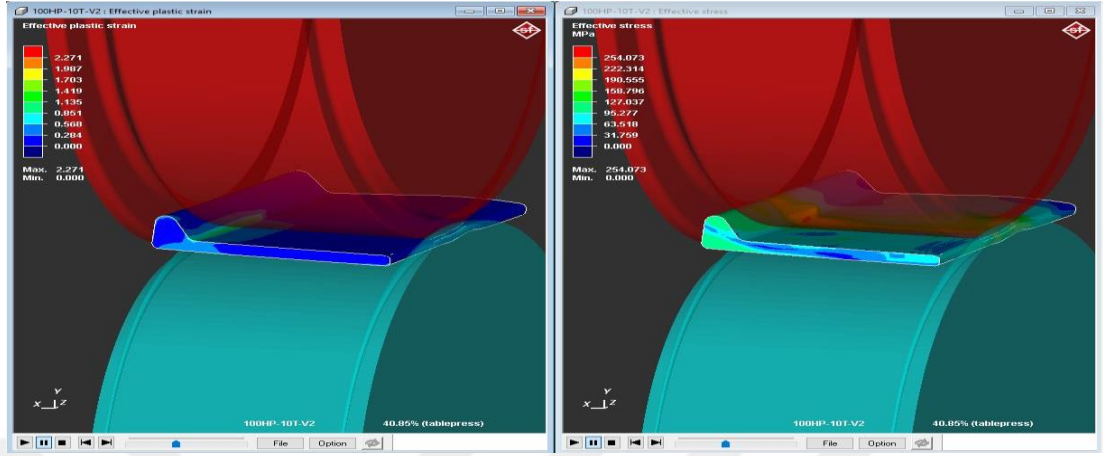
Şekil 4.21 11.Tezgâh merdane tork grafiği



Şekil 4.22 11.Tezgâh iş parçasının seçilen bölgelerinin sıcaklık dağılımı

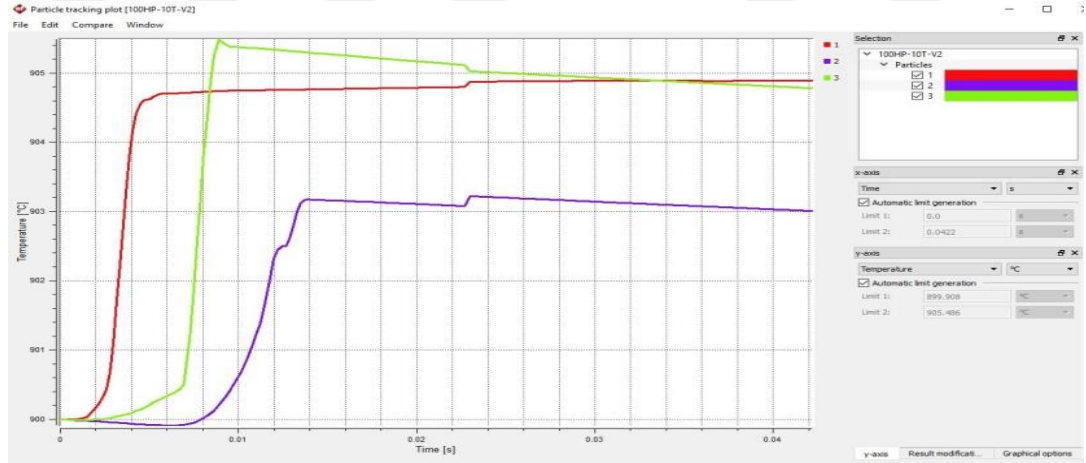
12.Tezgâh (finaş) girişi ve çıkışında iş parçasında meydana gelen plastik deformasyon miktarı ve meydana gelen efektif gerilmeler incelendiğinde, topuk-dikdörtgen birleşme bölgesinde deformasyon miktarı ve gerilme değerlerinin arttığı, lama bölgesindeki eğri geometrinin düzlemselleştirilmesi amacı ile bir miktar baskı

uygulandığı ve kesit geneli irdelendiğinde proses sonucunda yüzeyde homojen bir gerilme dağılımının meydana geldiği Şekil 4.23' de görülmektedir.

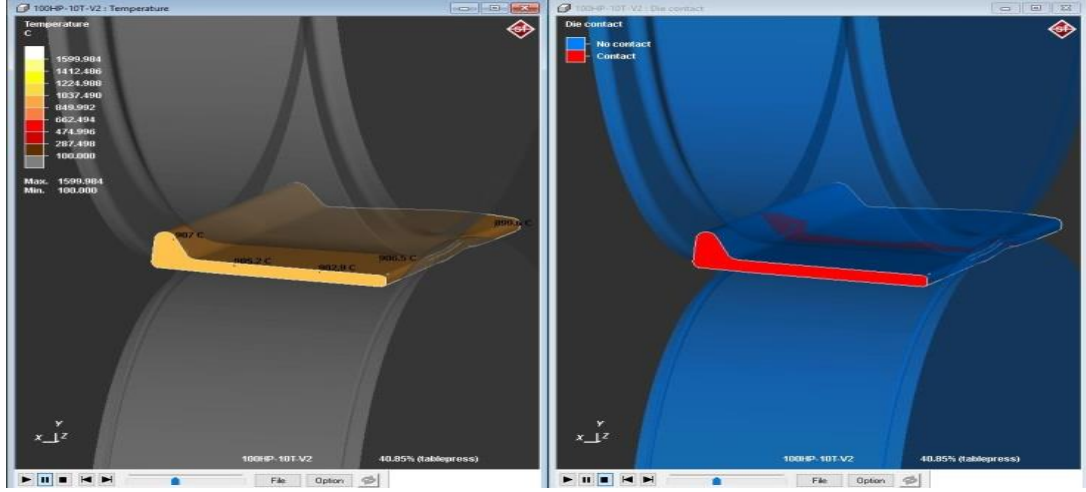


Şekil 4.23 12.Tezgâh çıkışı plastik deformasyon miktarı ve gerilme dağılımları

12.Tezgâh giriş ve çıkışında iş parçası giriş-çıkış sıcaklıkları incelendiğinde yaklaşık 900°C'de finiş tezgâhına giriş yapan iş parçasının çıkış bölgesinde en yüksek sıcaklığa sahip bölgede sıcaklığın 907°C olduğu Şekil 4.24 ve Şekil 4.25'de görülmektedir.

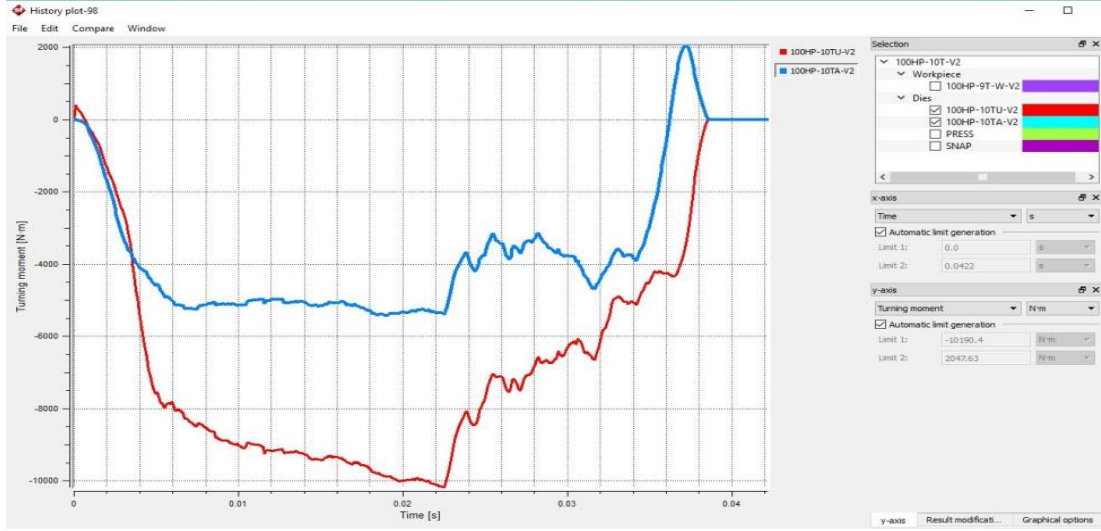


Şekil 4.24 12.Tezgâh iş parçasının seçilen bölgelerinin sıcaklık dağılımı



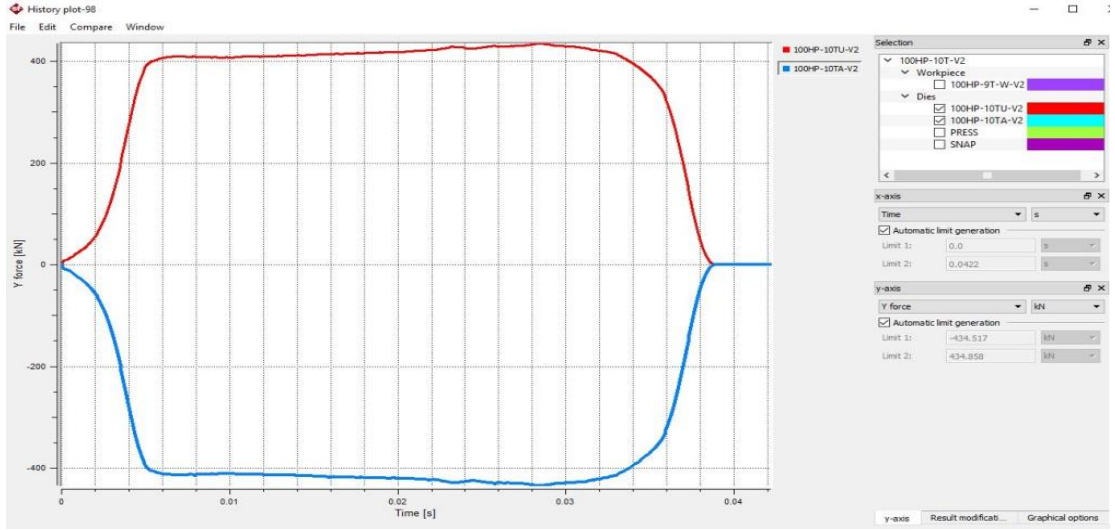
Şekil 4.25 12.Tezgâh çıkışı iş parçası sıcaklık ve kalıp temas bölgesi dağılımları

Finiş haddeme aşamasında gerçekleştirilen deformasyon işlemi için alt merdanenin 5.500 Nm, üst merdanenin ise 10.200 Nm ile tahrik edilmesi gerekliliği Şekil 4.26`da görülmektedir.



Şekil 4.26 12.Tezgâh merdane tork grafiği

Tasarımı yapılan plastik deformasyon süreci için ise finiş tezgâhında alt merdaneye 434 kN, üst merdaneye 434 kN kuvvet etkiği Şekil 4.27`deki grafikten belirlenmiştir.



Şekil 4.27 12.Tezgâh merdaneye dik gelen ezme kuvvetleri

4.2. Prototip Üretim Çalışmaları

Simülasyon sonuçları alındıktan sonra üretim için gerekli hazırlıklar yapılarak ilk ürün üretim denemesi gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.28`de deneme çalışmaları gösterilmiştir.



Şekil 4.28 Deneme çalışmaları görüntüleri

Asimetrik kesitli profilin prototip üretimleri aşamasında Şekil 4.29`da gösterildiği üzere 7. ve 8.Tezgâh çıkışında iş parçasından numune kesilmiş olup, elde edilen numuneler analiz sonuçları ile ölçüsel olarak kıyaslanmış, görsel kontroller yapılarak katlanma, tufal batığı, kalibre dolmama vb. üretim hatalarının mevcudiyeti incelenmiştir. Prototip üretim aşamasında 7.Tezgâh çıkışında herhangi bir hata ve uygunsuzluk ile karşılaşılmamıştır.



Şekil 4.29 İş parçası numuneleri

Şekil 4.30`da görüldüğü üzere 11.Tezgâh çıkışında iş parçasından numune kesilmiş olup, elde edilen numuneler analiz sonuçları ile ölçüsel olarak kıyaslanmış, görsel kontroller yapılarak katlanma, tufal batığı, kalibre dolmama vb. üretim hatalarının mevcudiyeti incelenmiştir. Prototip üretim aşamasında 11.Tezgâh çıkışında ilk denemede iş parçası giriş bölgesinde kalibrenin dolmadığı bölgelerin mevcut olduğu görülmüştür. Hadde personeli ile yapılan yerinde incelemelerde hadde ekipman ayarının gözden geçirilmesi gerekliliği belirlenmiş olup, ekipmanda gerekli pozisyonlama sağlanmış ve uygunsuzluk ilk denemeden sonra giderilmiştir.



Şekil 4.30 İş parçası numunesi

Prototip üretimlerde yapılan termal kamera ölçümlerinde; asimetrik kesite ait iş parçasının finiş çıkış sıcaklığının 990°C olduğu, soğutma platformuna giriş sıcaklığının ise 940°C olduğu bilgisi elde edilmiştir. Şekil 4.31`de soğutma platformunda ilerleyen profiller görülmektedir.



Şekil 4.31 Soğutma platformu

Asimetrik kesite sahip prototip profilin gerçek üretimleri sonunda doğrultma operasyonlarının tamamlanmasını takiben nihai ürünlerden ölçüsel kontroller ve mekanik testler ile metalurjik incelemeler aşamalarında kullanılmak üzere numuneler elde edilmiştir.

Asimetrik kesite ait tasarımı yapılan kalibre akışı ile simülasyon sonucu elde edilen datalar ışığında prototip üretimden elde edilen nihai ürünün karşılaştırılması Şekil 4.32`de yapılmıştır. Sonuçlara bakılacak olursa yüksek oranda örtüşmenin sağlandığı tespit edilmiştir.

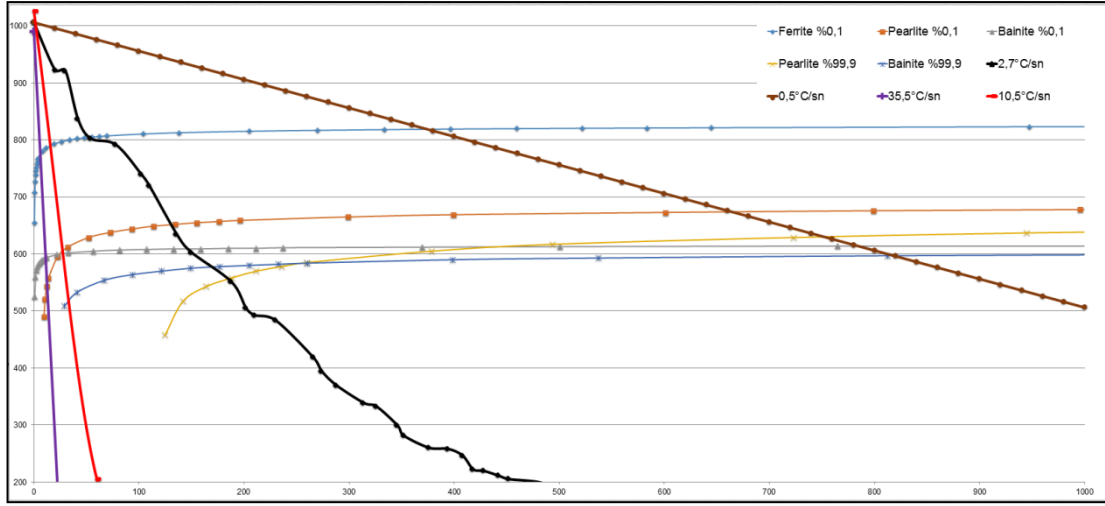


Şekil 4.32 Tasarım, simülasyon ve üretim sonuçları kıyaslaması

4.3. Soğuma Şartlarının Ürün Özelliklerine Etkilerinin İncelenmesi

960°C sıcaklıkta östenitlenen numunelerin fanda, suda, yağda ve fırında soğuma eğrilerinin elde edilmesi amacı ile testler süresince termal kamera kullanılarak sürekli ölçümler alınmıştır. Ölçülen değerlere göre soğuma eğrileri çizdirilmiştir. Buna göre fan ortamında 2,7°C/sn, su ortamında 35,5°C/sn, yağ ortamında 10,5°C/sn ve fırın ortamında 0,5°C/sn hızla soğumaya maruz kaldığı tespit edilmiştir. Şekil 4.33`de elde edilen değerlerin TTT diyagramı üzerine oturtulmuş hali verilmiştir.

Şekil 4.33`den görüleceği üzere 35,5°C/sn soğuma hızına sahip numunelerin metalurjik incelemeleri yapıldığında ferritik-martenzitik fazlar ile karşılaşılacağı, dolayısıyla en yüksek sertlik değerlerine bu numunelerde rastlanılacağı öngörülmüştür. 2,7°C/sn ile 0,5°C/sn soğuma hızlarında soğutulmuş numunelerde ise sırası ile kaba ve ince perlit yapıları ile karşılaşılacağı, yüksek soğuma hızları ile soğutulan numunelere göre sertlik değerlerinin daha düşük çıkacağı öngörülmüştür.



Şekil 4.33 TTT diyagramı üzerine eklenmiş edilmiş soğuma grafikleri

Farklı soğuma hızlarında soğutulmuş asimetrik kesitli profilinin soğuma hızlarına göre çentik darbe tokluklarının belirlenmesi amacı ile çentik darbe numuneleri oluşturulmuş ve -40°C , -20°C ve 0°C sıcaklıklarda Charpy testleri yapılmıştır. Testin sonuçları Tablo 4.1`de verilmiştir.

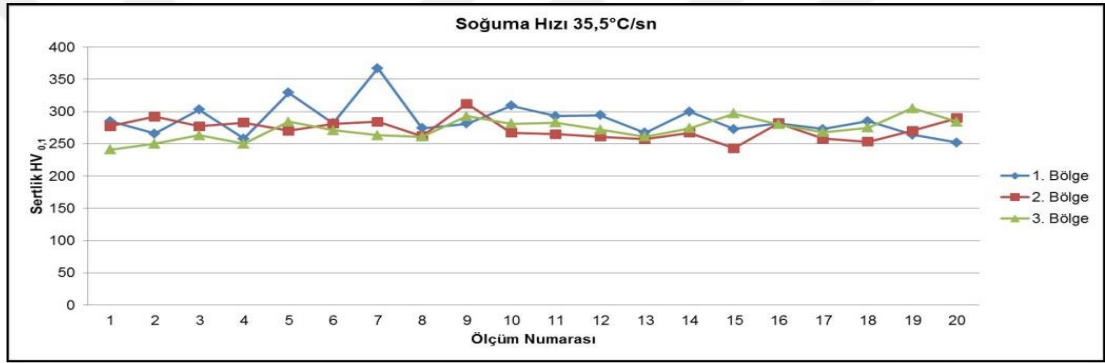
Tablo 4.1 Charpy test sonuçları

Soğuma Hızı	Çentik Darbe Dayanımı											
	-40°C				-20°C				0°C			
	No1	No2	No3	Enerji J	No1	No2	No3	Enerji J	No1	No2	No3	Enerji J
Haddeleme Şartları	31	45	47	41,0	36	48	43	42,3	50	56	48	51,3
2,7°C/sn	84	81	81	82,0	86	85	84	85,0	80	93	88	87,0
0,5°C/sn	63	86	58	69,0	79	75	82	78,7	82	80	81	81,0
35,5°C/sn	25	23	35	27,7	32	62	54	49,3	34	76	73	61,0
10,5°C/sn	59	52	80	63,7	92	80	50	74,0	89	90	92	90,3

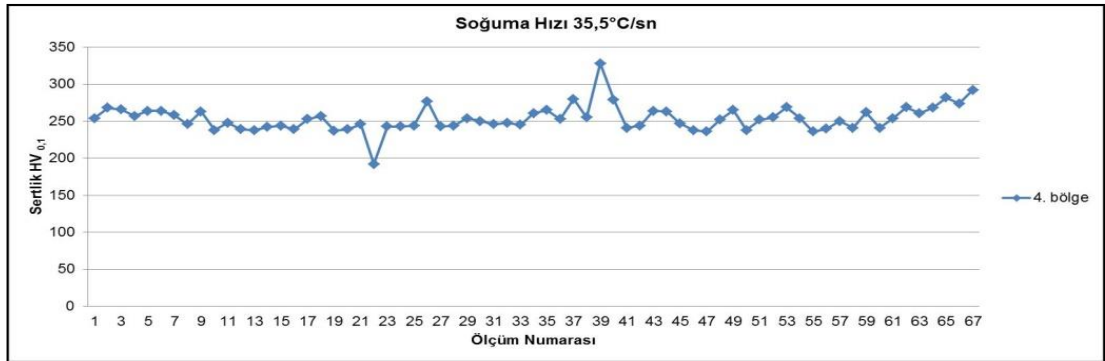
Farklı soğuma hızlarına sahip ortamlarda soğutulan profillerden elde edilen darbe numunelerinin test sonuçları incelendiğinde genel olarak soğuma hızındaki artış ile darbe enerjisinin azalış gösterdiği görülmektedir. CCT diyagramları ile birlikte darbe enerjileri yorumlandığında ise soğuma oranındaki artışın, mikro yapıda daha ince ve sert fazların oluşumuna ve dolayısıyla süneklik değerlerinde ve darbe enerjisinde azalmaya neden olduğu görülmektedir. Soğuma hızındaki azalış ile birlikte diyagramda sağa doğru eğri eğimleneceğinden dolayı yüksek soğuma hızlarındaki yapıya kıyasla daha yumuşak ve kaba ferrit-perlit yapılarının oluşumu ile darbe enerjileri artış göstermektedir.

Farklı soğuma hızlarının malzeme sertliği üzerindeki etkisinin belirlenmesi amacı ile Vickers mikro sertlik testleri gerçekleştirilmiştir.

Östenitleme sıcaklığından suya atılarak hızlı bir şekilde soğutulan malzemede karbon atomlarının hızlı soğumanın etkisiyle kafeslerini terk edecek zamanı bulamadığı, kafes sisteminde çarpılmaların meydana gelerek martenzitik yapının oluştuğundan dolayı sertliğin yüksek çıktığı öngörülmektedir. Su soğuma ortamında soğutulmuş numunelere ait sertlik grafikleri Şekil 4.34 ve Şekil 4.35`de verilmiştir. Ölçülen değerler en yüksek, en düşük ve ortalama olacak şekilde Tablo 4.2`de sunulmuştur.



Şekil 4.34 35,5°C/sn Soğuma hızıyla soğutulmuş numunelerin 1., 2. ve 3. bölge sertlik ölçüm grafiği

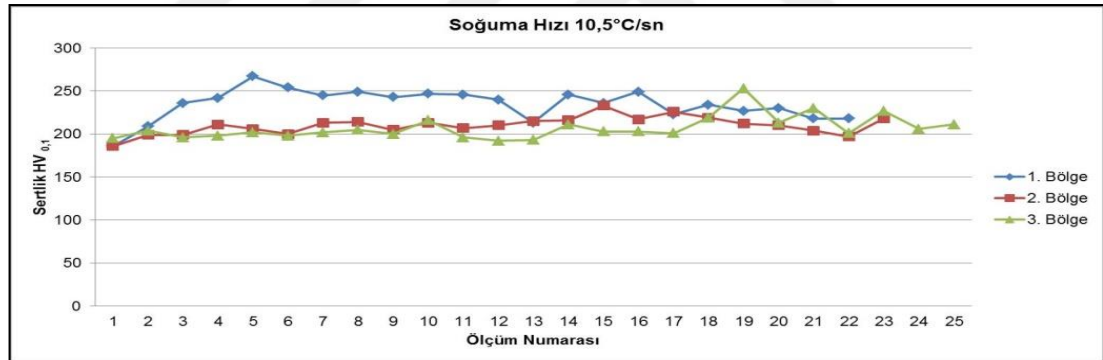


Şekil 4.35 35,5°C/sn Soğuma hızında soğutulmuş numunelerin 4. bölge sertlik ölçüm grafiği

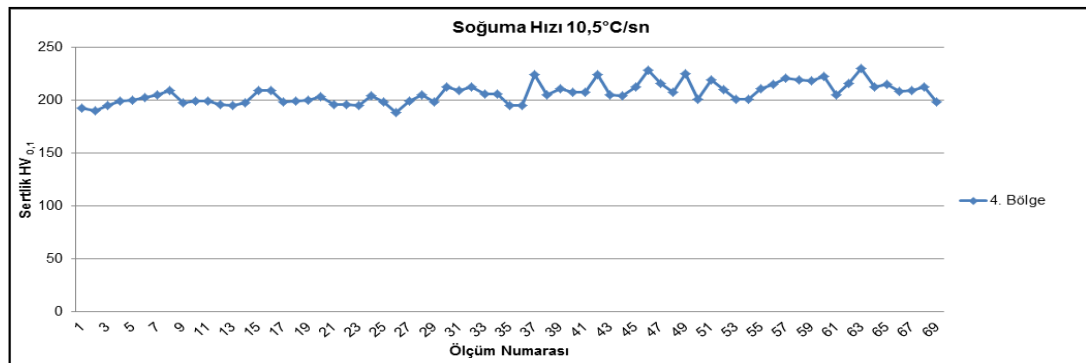
Tablo 4.2 35,5°C/sn Soğuma hızına sahip soğutma prosesi ortalama sertlik verileri

Ölçüm Bölgesi	Ortalama Sertlik HV _{0,1}	En Yüksek Sertlik HV _{0,1}	En Düşük Sertlik HV _{0,1}
1. Bölge	286,8	367	252
2. Bölge	272,5	312	243
3. Bölge	272,8	305	241
4. Bölge	253,7	328	192
GENEL ORT.	271,5	328	232

Yağda soğutma prosesinde ise martenzit miktarının suda soğutma prosesine göre daha düşük seviyelerde oluşacağı CCT diyagramından öngörülmektedir. 960°C’de 23,5 dakika süre ile östenitlenen numunelerin yağda soğutulması sürecinin (soğuma hızı 10,5°C/sn) ardından sertlik dağılımları incelenmiştir. Yağ soğuma ortamında soğutulmuş numunelere ait sertlik grafikleri Şekil 4.36 ve Şekil 4.37’de verilmiştir. Ölçülen değerler en yüksek, en düşük ve ortalama olacak şekilde Tablo 4.3’de sunulmuştur.



Şekil 4.36 10,5°C/sn Soğuma hızıyla soğutulmuş numunelerin 1., 2. ve 3. bölge sertlik ölçüm grafiği



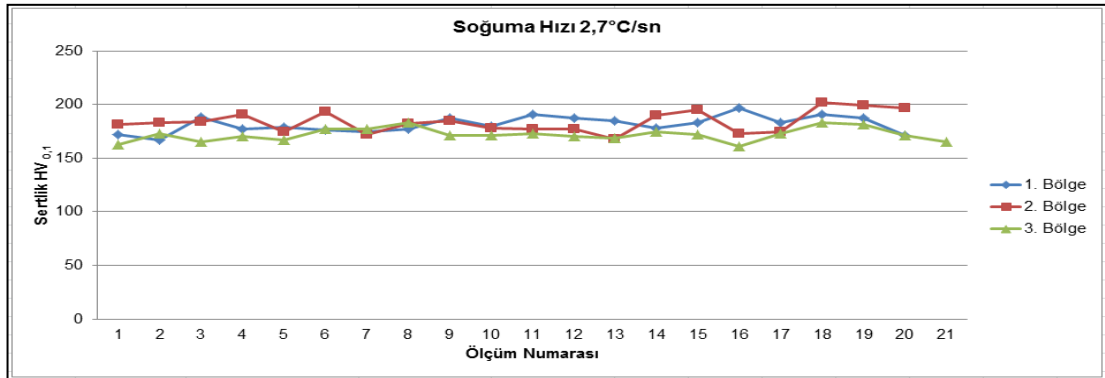
Şekil 4.37 10,5°C/sn Soğuma hızıyla soğutulmuş numunelerin 4. bölge sertlik ölçüm grafiği

Tablo 4.3 10,5°C/sn Soğuma hızına sahip soğutma prosesi ortalama sertlik verileri

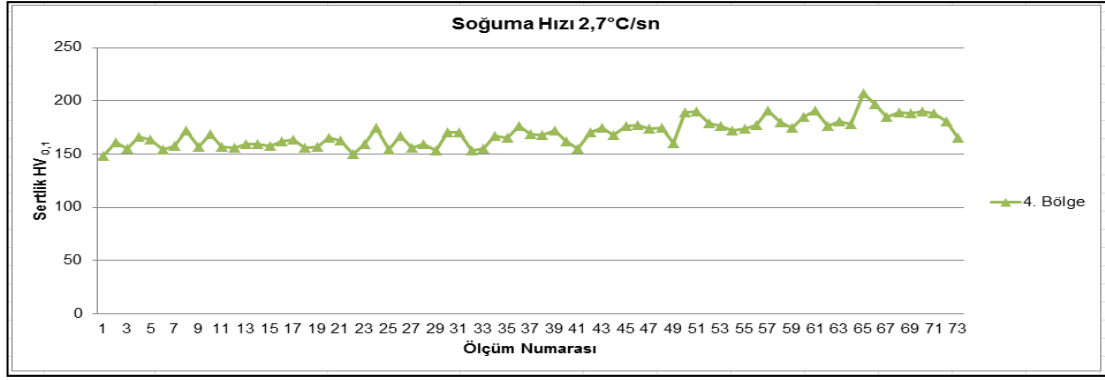
Ölçüm Bölgesi	Ortalama Sertlik HV _{0,1}	En Yüksek Sertlik HV _{0,1}	En Düşük Sertlik HV _{0,1}
1. Bölge	233,74	267	186
2. Bölge	209,64	233	186
3. Bölge	207	253	192
4. Bölge	206,16	230	188
GENEL ORT.	214,1	245,75	188

Yağda soğutma prosesi neticesinde elde edilen numunelerin sertlik dağılımları incelendiğinde; kesit doğrultusu boyunca sertliklerin çok değişmediği görülmektedir. Sertlik dağılımları bölgesel olarak irdelendiğinde ise; 1 nolu bölgeden 4 nolu bölgeye doğru et kalınlıklarındaki artış ile soğuma hızı azaldığından dolayı sertlik değerlerinin bir miktar düşüş gösterdiği belirlenmiştir. Elde edilen bu verilere ek olarak suda soğutma prosesi sonunda ortalama sertlik değeri 271,5 HV_{0,1} iken yağda soğutma prosesi sonunda ortalama sertlik değerinin 214,1 HV_{0,1} seviyesine düştüğü görülmektedir.

960°C’de 23,5 dakika süre ile östenitlenen numunelerin cebri hava ile soğutulması sürecinin (soğuma hızı 2,7°C/sn) ardından sertlik dağılımları incelenmiştir. Yağ soğuma ortamında soğutulmuş numunelere ait sertlik grafikleri Şekil 4.38 ve Şekil 4.39’da verilmiştir. Ölçülen değerler en yüksek, en düşük ve ortalama olacak şekilde Tablo 4.4’de sunulmuştur.



Şekil 4.38 2,7°C/sn Soğuma hızıyla soğutulmuş numunelerin 1., 2. ve 3. bölge sertlik ölçüm grafiği

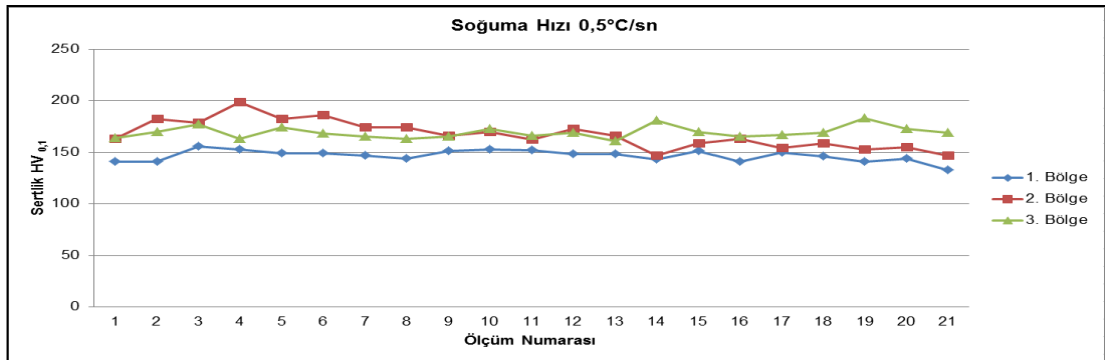


Şekil 4.39 2,7°C/sn Soğuma hızıyla soğutulmuş numunelerin 4. bölge sertlik ölçüm grafiği

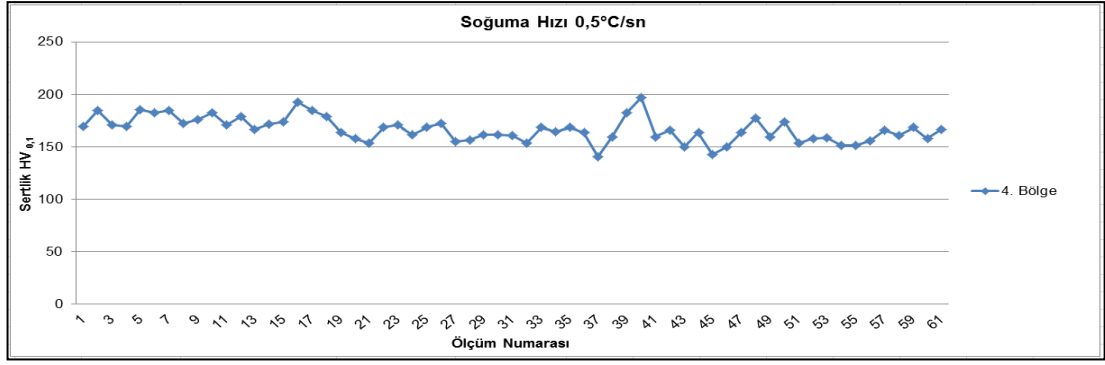
Tablo 4.4 2,7°C/sn Soğuma hızına sahip soğutma prosesi ortalama sertlik verileri

Ölçüm Bölgesi	Ortalama Sertlik HV _{0,1}	En Yüksek Sertlik HV _{0,1}	En Düşük Sertlik HV _{0,1}
1. Bölge	181,55	197	167
2. Bölge	183,85	202	168
3. Bölge	173,52	197	158
4. Bölge	169,85	207	148
GENEL ORT.	177,2	200,75	160,25

960°C’de 23,5 dakika süre ile östenitlenen numunelerin fırında kontrollü soğutulması sürecinin (soğuma hızı 0,5°C/sn) ardından sertlik dağılımları incelenmiştir. Fırın soğuma ortamında soğutulmuş numunelere ait sertlik grafikleri Şekil 4.40 ve Şekil 4.41’de verilmiştir. Ölçülen değerler en yüksek, en düşük ve ortalama olacak şekilde Tablo 4.5’de sunulmuştur.



Şekil 4.40 0,5°C/sn Soğuma hızıyla soğutulmuş numunelerin 1., 2. ve 3. bölge sertlik ölçüm grafiği

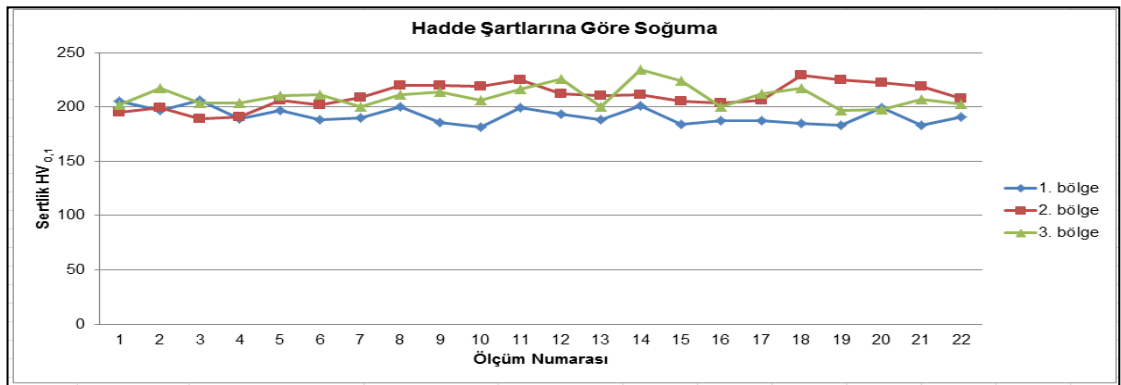


Şekil 4.41 0,5°C/sn Soğuma hızıyla soğutulmuş numunelerin 4. bölge sertlik ölçüm grafiği

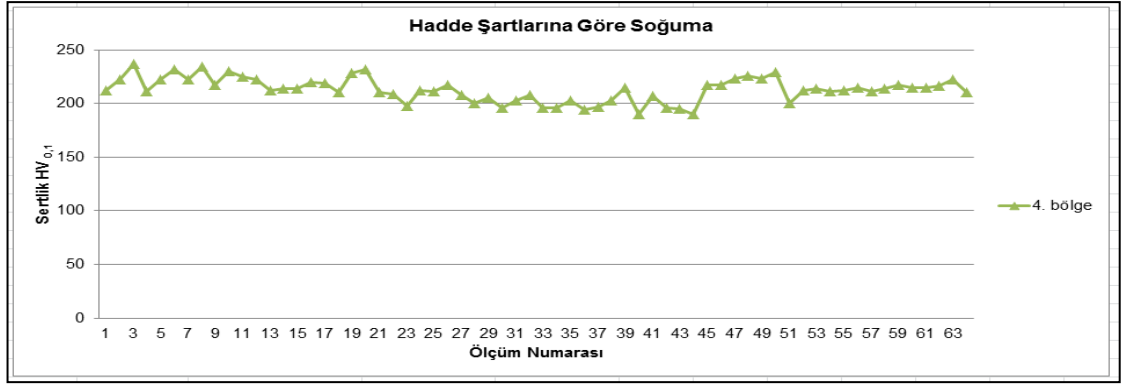
Tablo 4.5 0,5°C/sn Soğuma hızına sahip soğutma prosesi ortalama sertlik verileri

Ölçüm Bölgesi	Ortalama Sertlik HV _{0,1}	En Yüksek Sertlik HV _{0,1}	En Düşük Sertlik HV _{0,1}
1. Bölge	146,85	156	133
2. Bölge	167,29	199	147
3. Bölge	168,58	191	150
4. Bölge	166,92	197	141
GENEL ORT.	162,4	185,75	142,75

Hadde şartlarında (havada + suda soğuma) soğutulan numunelerin sertlik dağılımları incelenmiştir. Hadde soğuma ortamında soğutulmuş numunelere ait sertlik grafikleri Şekil 4.42 ve Şekil 4.43`de verilmiştir. Ölçülen değerler en yüksek, en düşük ve ortalama olacak şekilde Tablo 4.6`da sunulmuştur.



Şekil 4.42 Hadde şartlarına göre soğutulmuş numunelerin 1., 2. ve 3. bölge sertlik ölçüm grafiği



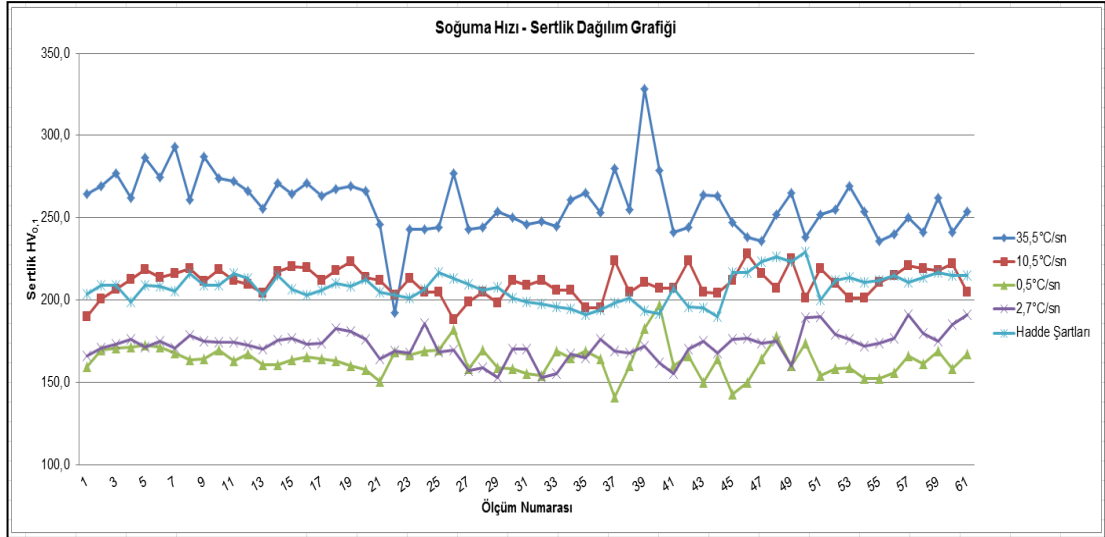
Şekil 4.43 Hadde şartlarına göre soğutulmuş numunelerin 4. bölge sertlik ölçüm grafiği

Tablo 4.6 Hadde şartlarındaki soğutma prosesi ortalama sertlik verileri

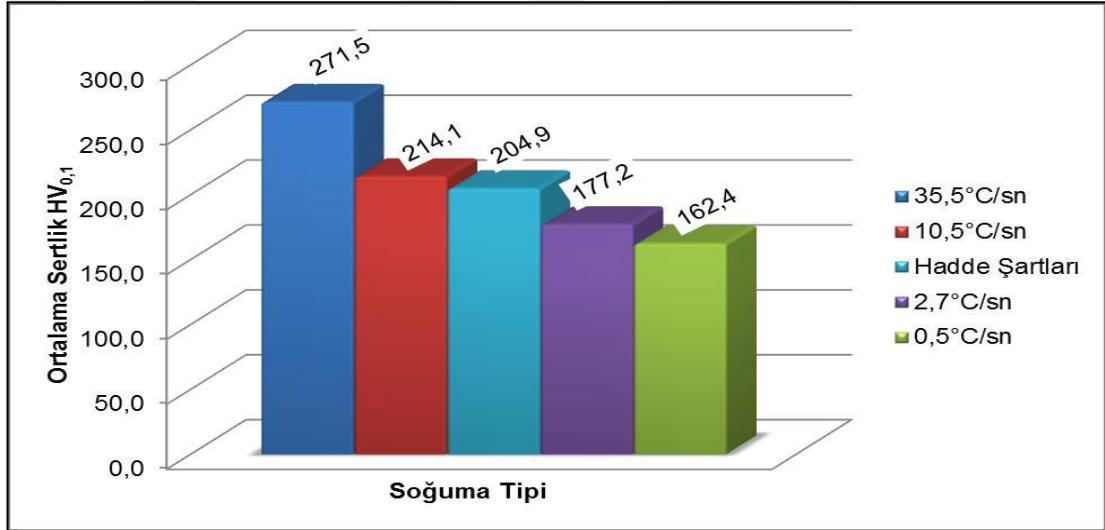
Ölçüm Bölgesi	Ortalama Sertlik HV _{0.1}	En Yüksek Sertlik HV _{0.1}	En Düşük Sertlik HV _{0.1}
1. Bölge	191,77	206	181
2. Bölge	209,96	239	189
3. Bölge	205,21	234	172
4. Bölge	212,57	237	190
GENEL ORT.	204,9	229	183

Hadde şartlarına göre elde edilen numunelerin sertlik dağılımları incelendiğinde yukarıdaki bölümlerde CCT diyagramları ve farklı soğuma hızlarına göre çıkarılan soğuma eğrilerine göre sertlik değerlerinin 0,5°C/sn soğuma hızına göre elde edilen numunelerin sertlikleri ile 35,5°C soğuma hızına göre soğutulan numunelerin sertlik değerlerinin arasında olması gerekliliği belirlenmiştir. Haddeleme şartlarına göre soğutulan numunelerin sertlik dağılımları incelendiğinde sertlik değerlerinin öngörülen değer aralığında gerçekleştiği belirlenmiştir.

Farklı soğuma hızlarına göre soğutulmuş numunelerin ortalama sertlik verileri Şekil 4.44 - 4.45'de gösterildiği üzere birbirleri ile kıyaslandığında; soğuma hızındaki artış ile malzeme sertliğinin arttığı görülmektedir.



Şekil 4.44 Soğuma hızı ortalama sertlik verileri grafiği



Şekil 4.45 Soğuma hızı ortalama sertlik verileri kıyas grafiği

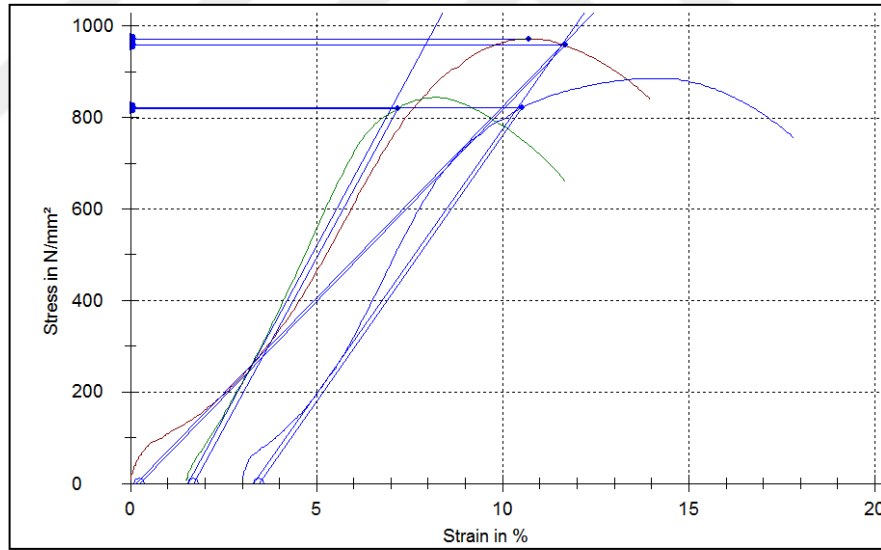
Soğuma hızının artışı ile malzeme içyapısında martenzit fazı gibi sert fazlar meydana gelmekte dolayısıyla sertlik değerlerinde bir artış gözlemlenmektedir. Bunlara ek olarak artan soğuma hızı ile tane boyutu küçülmektedir. Artan tane sınırları ile birlikte dislokasyon hareketine karşı bir direnç oluşmakta; dislokasyonlar tane sınır engeli ile karşılaştığında hareket edememekte ve bunun sonucunda tane sınırlarında dislokasyon yığılmaları oluşmaktadır. Bu sayede sertlikte bir miktar artış gerçekleşirken mukavemet artmaktadır.

Asimetrik kesitli gemi inşa profili olan prototip ürüne ait numunelerin yeniden tavlansın farklı soğuma hızlarında soğutulmasının ardından Şekil 4.46’da gösterildiği üzere çekme test numuneleri hazırlanmıştır.



Şekil 4.46 Çekme test numuneleri

35,5°C/sn soğuma hızında soğutulan numuneler ile gerçekleştirilen 3 adet çekme testlerinin sonuçları Şekil 4.47 ve Tablo 4.7’de gösterilmiştir. Testler neticesinde 35,5°C/sn soğuma hızında soğutulan numunelerin ortalama akma dayanımının 866,7 MPa, Çekme Dayanımının 901 MPa, % Uzamasının ise 8,4 olduğu belirlenmiştir.

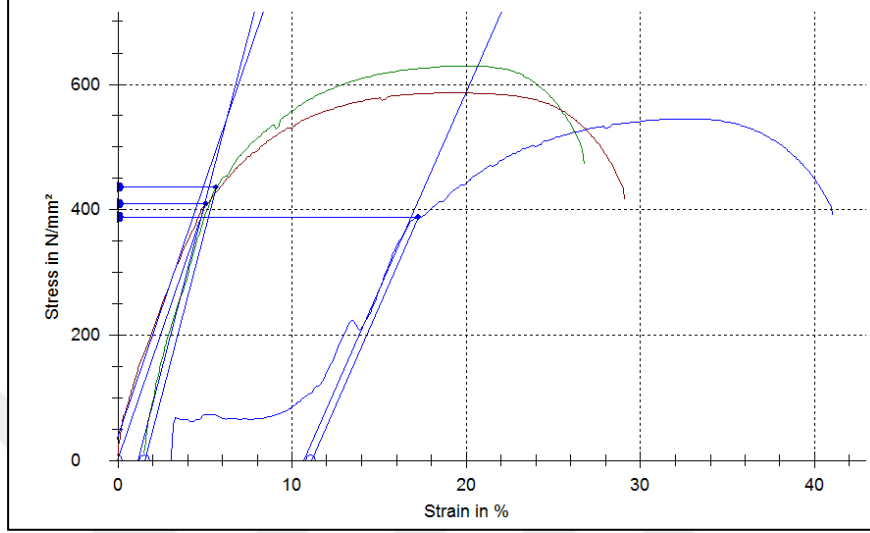


Şekil 4.47 35,5°C/sn Hızla soğutulan numunelerin çekme test sonuçları

Tablo 4.7 35,5°C/sn Soğuma hızında soğutulan numunelerin çekme test sonuçları

Numune No	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	% Uzama
1	958	973	9,7
2	820	844	8,7
3	822	886	6,7
GENEL ORT.	866,7	901,0	8,4

10,5°C/sn soğuma hızında soğutulan numuneler ile gerçekleştirilen 3 adet çekme testinin sonuçları Şekil 4.48 ve Tablo 4.8’de gösterilmiştir. Testler neticesinde 10,5°C/sn soğuma hızında soğutulan numunelerin ortalama akma dayanımının 410,7 MPa, Çekme Dayanımının 587 MPa, % Uzamasının ise 15,1 olduğu belirlenmiştir.

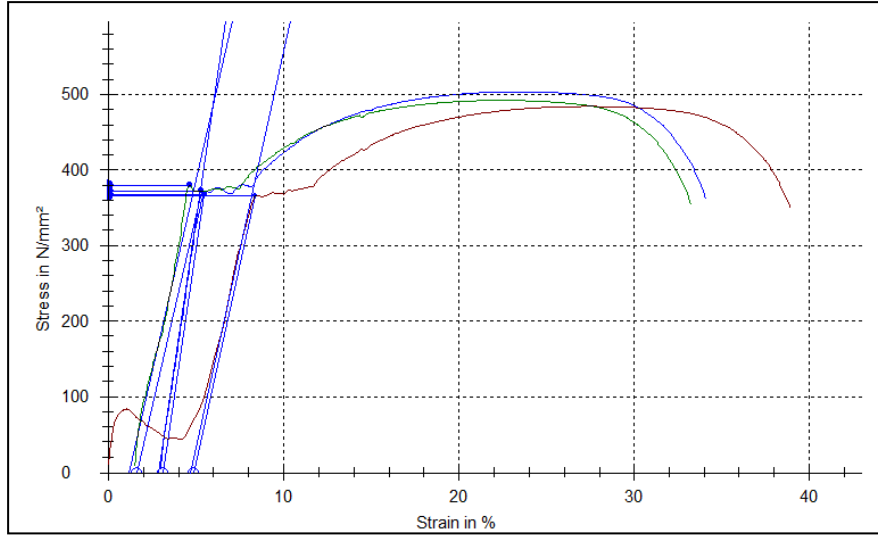


Şekil 4.48 10,5°C/sn Hızla soğutulan numunelerin çekme test sonuçları

Tablo 4.8 10,5°C/sn Soğuma hızında soğutulan numunelerin çekme test sonuçları

Numune No	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	% Uzama
1	409	587	13,1
2	435	629	14,3
3	388	545	17,9
GENEL ORT.	410,7	587,0	15,1

2,7°C/sn soğuma hızında soğutulan numuneler ile gerçekleştirilen 3 adet çekme testlerinin sonuçları Şekil 4.49 ve Tablo 4.9’da gösterilmiştir. Testler neticesinde 2,7°C/sn soğuma hızında soğutulan numunelerin ortalama akma dayanımının 368,7 MPa, Çekme Dayanımının 493 MPa, % Uzamasının ise 26,8 olduğu belirlenmiştir.

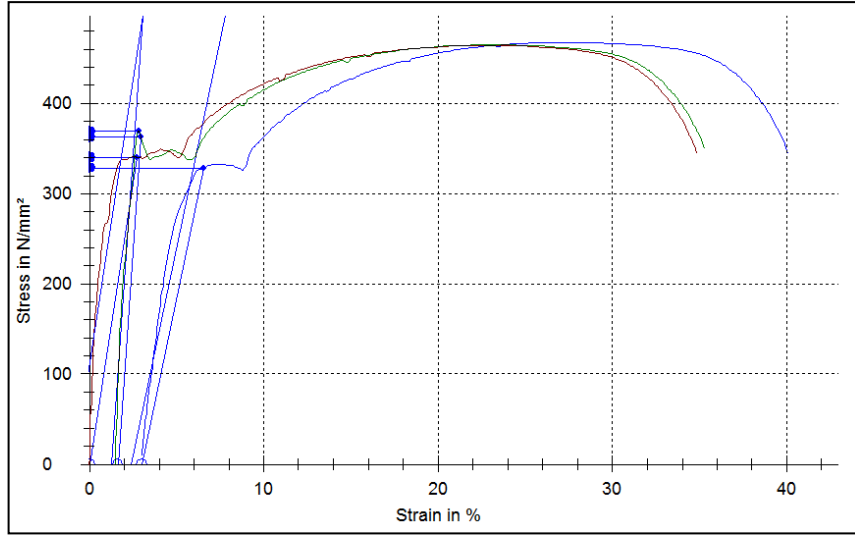


Şekil 4.49 2,7°C/sn Hızla soğutulan numunelerin çekme test sonuçları

Tablo 4.9 2,7°C/sn Soğuma hızında soğutulan numunelerin çekme test sonuçları

Numune No	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	% Uzama
1	366	484	26,9
2	372	492	28,2
3	368	503	25,5
GENEL ORT.	368,7	493,0	26,8

0,5°C/sn soğuma hızında soğutulan numuneler ile gerçekleştirilen 3 adet çekme testlerinin sonuçları Şekil 4.50 ve Tablo 4.10'da gösterilmiştir. Testler neticesinde 2,7°C/sn soğuma hızında soğutulan numunelerin ortalama akma dayanımının 344 MPa, Çekme Dayanımının 465,7 MPa, % Uzamasının ise 28 olduğu belirlenmiştir.

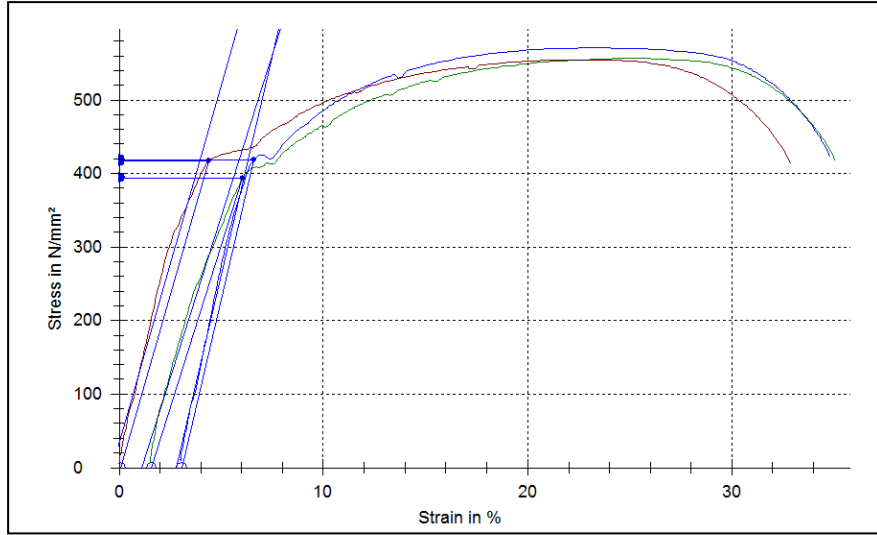


Şekil 4.50 0,5°C/sn Hızla soğutulan numunelerin çekme test sonuçları

Tablo 4.10 0,5°C/sn Soğuma hızında soğutulan numunelerin çekme test sonuçları

Numune No	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	% Uzama
1	340	464	27
2	363	465	28,7
3	329	468	28,3
GENEL ORT.	344	465,7	28,0

Hadde şartlarına göre soğutulan numuneler ile gerçekleştirilen 3 adet çekme testinin sonuçları Şekil 4.51 ve Tablo 4.11’de gösterilmiştir. Testler neticesinde hadde şartlarına göre soğutulan numunelerin ortalama akma dayanımının 410 MPa, Çekme Dayanımının 560,7 MPa, % Uzamasının ise 21,1 olduğu belirlenmiştir.

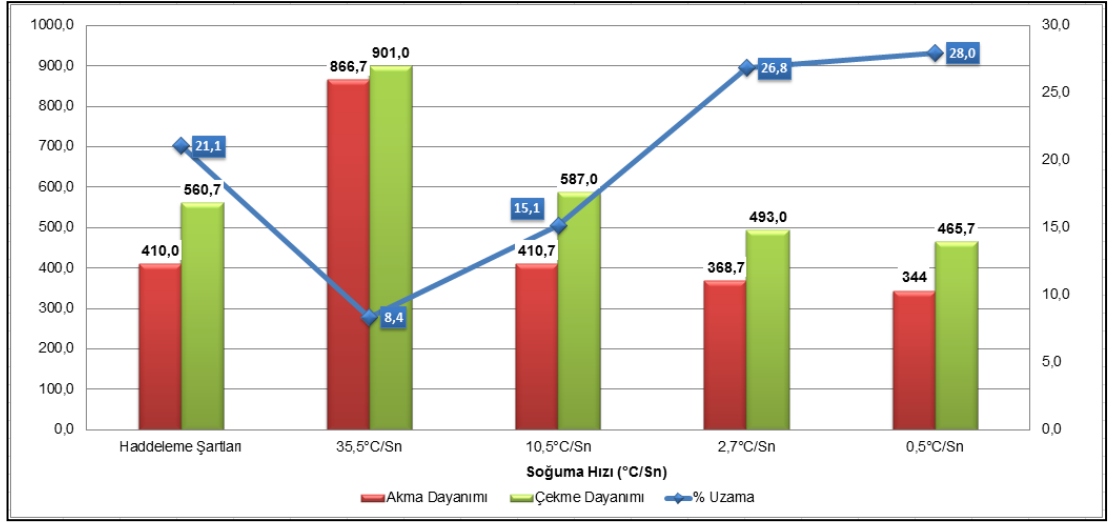


Şekil 4.51 Hadde şartlarına göre soğutulan numunelerin çekme test sonuçları

Tablo 4.11 Hadde şartlarına göre soğutulan numunelerin çekme test sonuçları

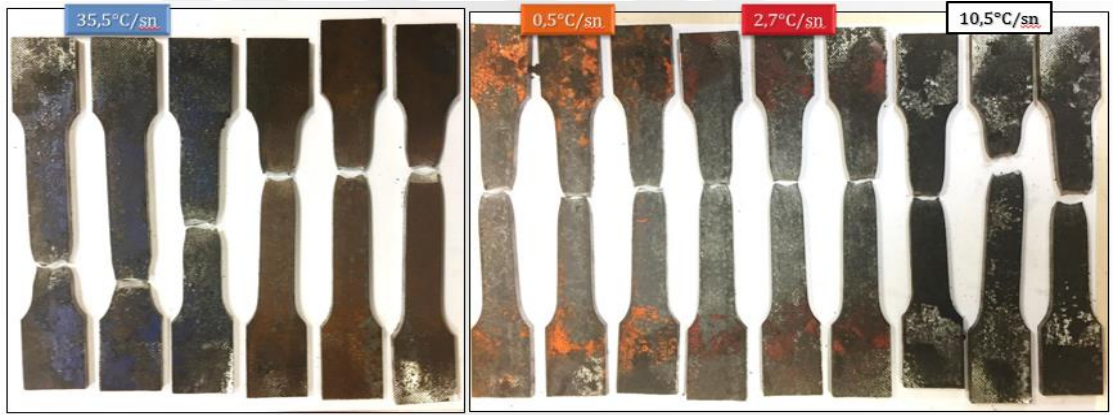
Numune No	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	% Uzama
1	417	555	30,4
2	394	556	21,5
3	419	571	11,2
GENEL ORT.	410,0	560,7	21,1

960°C sıcaklıkta 25 dk süre ile östenitlenen asimetrik kesitli profil numunelerin 35,5°C/sn, 10,5°C/sn, 2,7°C/sn ve 0,5°C/sn soğuma hızları ile soğutulmasını takiben yapılan çekme testleri neticesinde Şekil 4.52’de gösterildiği üzere artan soğuma hızı ile çekme ve akma dayanımları artış gösterirken %uzama değerleri azalış göstermiştir.



Şekil 4.52 Soğuma hızı çekme, akma dayanımı kıyas grafiği

Çekme testleri sonrası uzamış ve kopmuş numuneler Şekil 4.53'de gösterilmiştir.

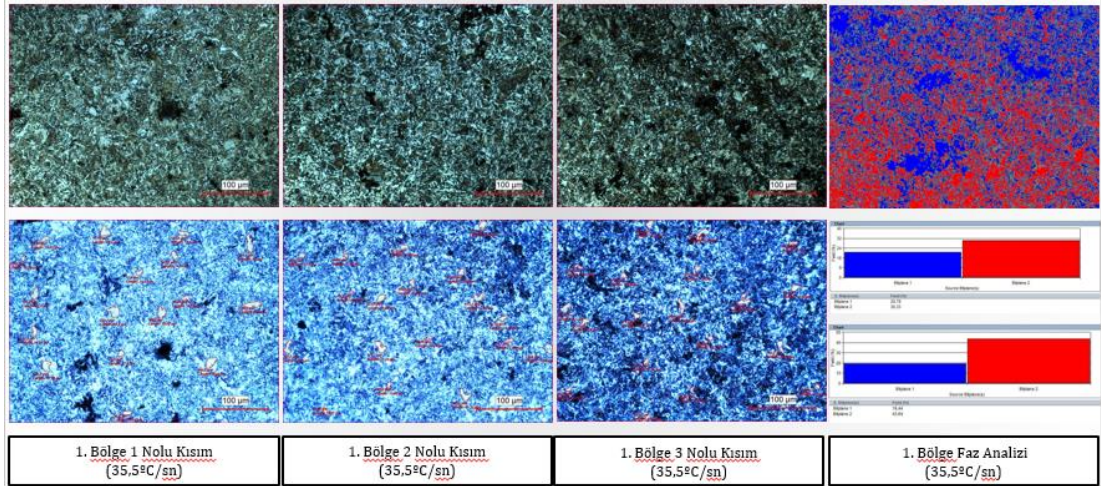


Şekil 4.53 Çekme testi sonrasında uzamış ve kopmuş numuneler

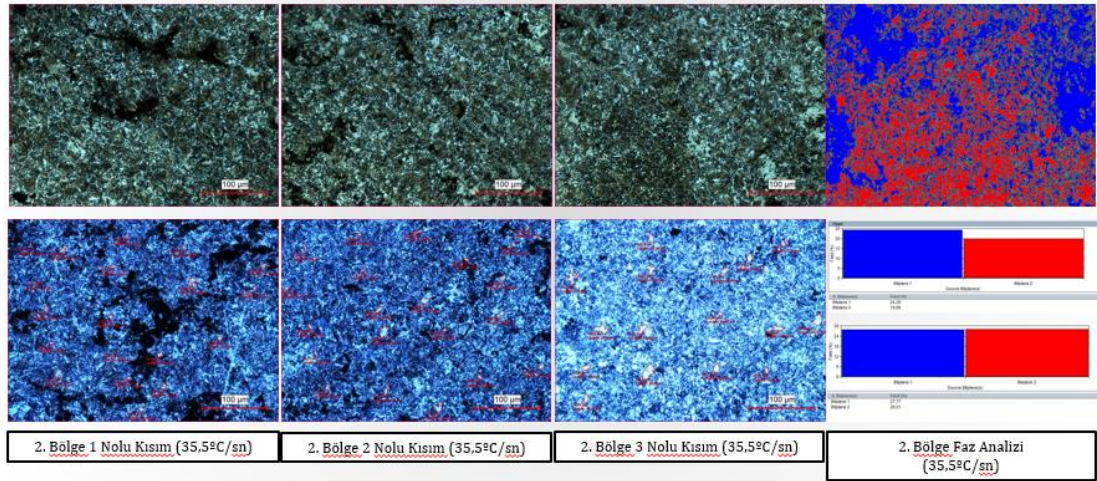
Hadde şartlarındaki soğuma prosesi neticesinde elde edilen numunelerin mukavemet değerlerinin; suda soğutma prosesi (35,5°C/sn) ile havada soğutma prosesi (0,5°C/sn) mukavemet değerleri arasında olması beklenmek ile birlikte, gerçekleştirilen testlerin sonuçlarına göre elde edilen verilerin istenilen seviyede gerçekleştiği görülmektedir.

Östenitleme sıcaklığında bekletildikten sonra farklı soğuma hızlarında soğutulan numunelerin mikro yapı değişimlerinin, faz dağılımları ve inklüzyon oranlarının ve dekarbürizasyona uğrayıp uğramadığının belirlenmesi amacıyla yapılan incelemeler Şekil 4.54'den başlayarak Şekil 4.73'de dahil olmak üzere verilmiştir.

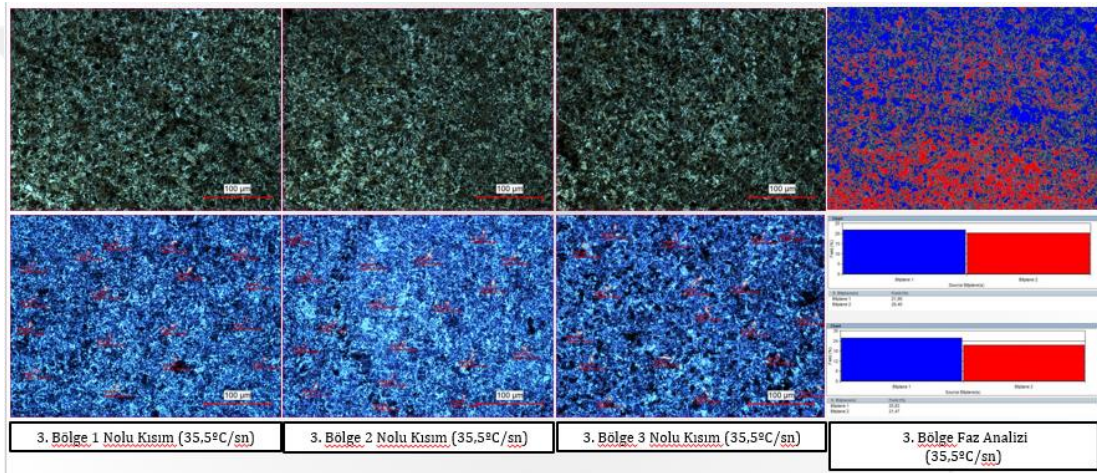
Şekil 4.54 ile Şekil 4.57 aralığında su ortamında soğumaya bırakılmış numunelere ait görüntülerde açık renkte olanlar ferrit fazını, koyu renk olanlar ise perlit fazını belirtmektedir. Numunenin 1.bölgesinden alınan Şekil 4.54`de gösterilen mikro yapı ve faz dağılımına göre ferritik yapının baskın olduğu görülmektedir. Bunun sebebi 1.bölgenin asimetrik profilin en kalın bölgesi olmasıdır. Tablo 4.12`de verilen tane alanları ölçümlerinde su soğuma ortamında 1.bölgenin diğer bölgelerden yaklaşık olarak 2 kat daha büyük tane boyutuna sahip olduğu görülmüştür. 2.bölge`nin 1.kımından itibaren Şekil 4.55`de görüldüğü üzere ferrit oranı ile perlit oranı birbirine eşitlenmektedir. Perlit ve martenzit fazının artışı mikro yapı görüntüleri incelendiğinde koyu bölgelerin artışı ile net bir şekilde tespit edilebilmektedir. 3.ve 4.bölgelerde faz oranı perlit, martenzit baskın olacak şekilde neticelenmiş ve tane boyutu ölçümlerinde de en küçük taneli kısımlar bu bölgelerde yer almaktadır. 2.bölgenin diğerlerine kıyasla 1.bölgeye yakın olması sebebiyle göreceli daha yavaş soğumuştur.



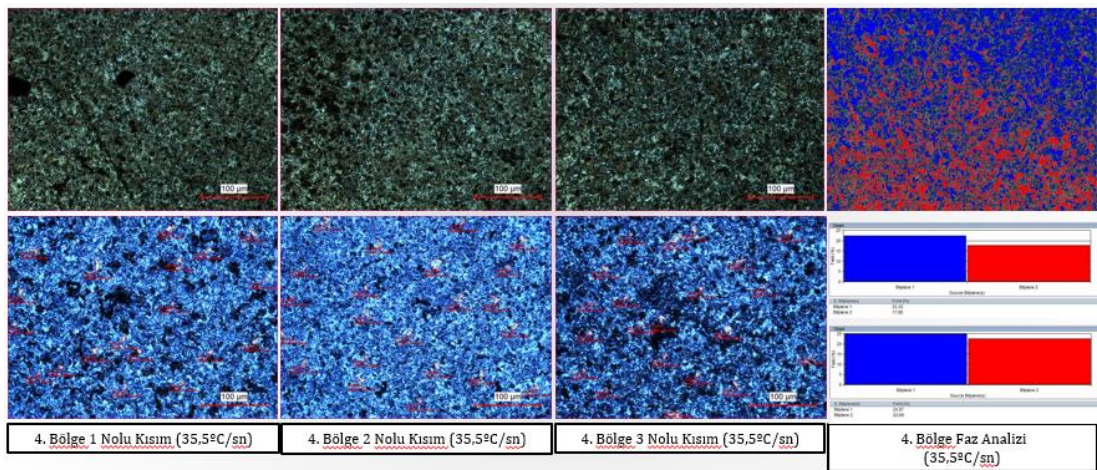
Şekil 4.54 Su ortamında soğutulmuş numune 1.Bölge inceleme görüntüleri



Şekil 4.55 Su ortamında soğutulmuş numune 2.Bölge inceleme görüntüleri



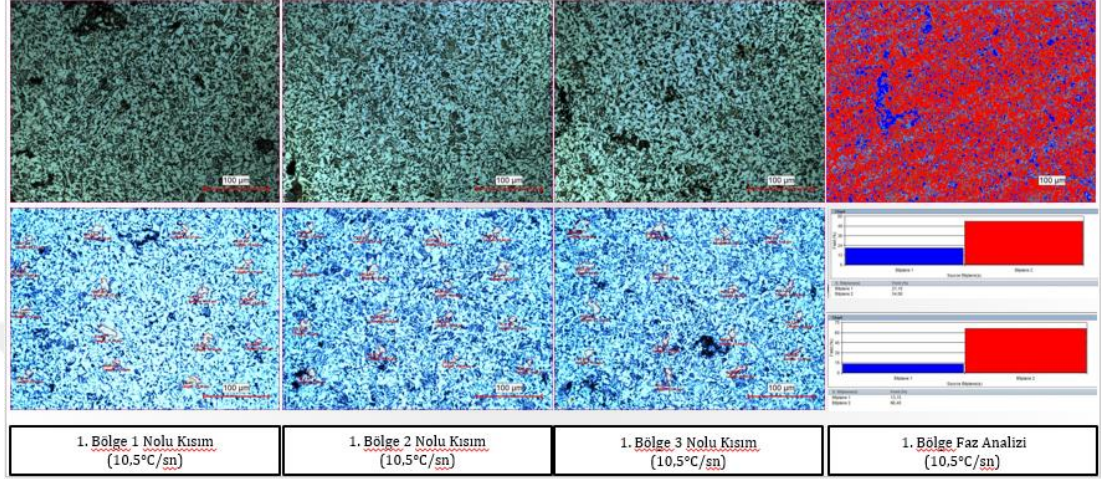
Şekil 4.56 Su ortamında soğutulmuş numune 3.Bölge inceleme görüntüleri



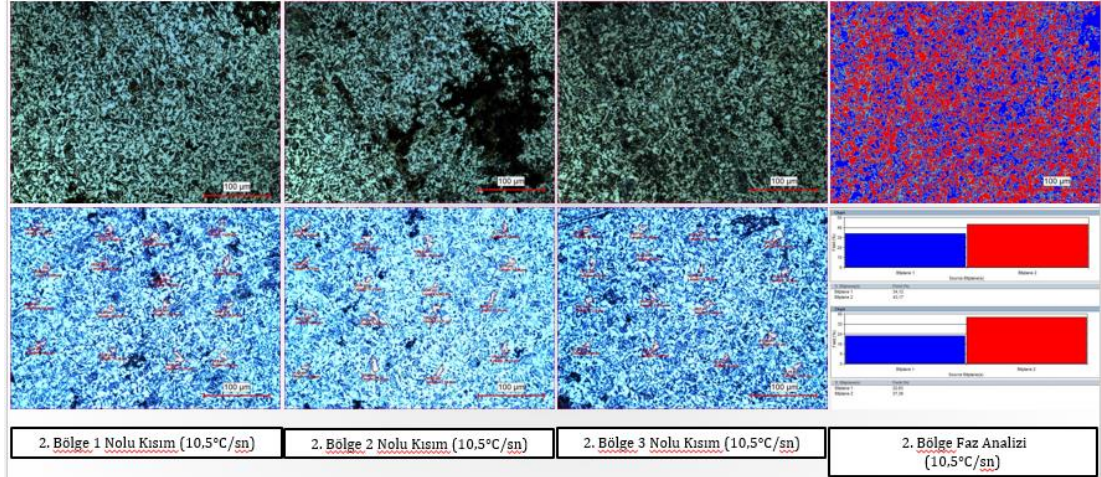
Şekil 4.57 Su ortamında soğutulmuş numune 4.Bölge inceleme görüntüleri

Şekil 4.58 ve Şekil 4.61 aralığında yağ ortamında soğumaya bırakılmış numunelere ait incelemelerde tüm bölgelerde ferrit fazının baskın faz olduğu tespit

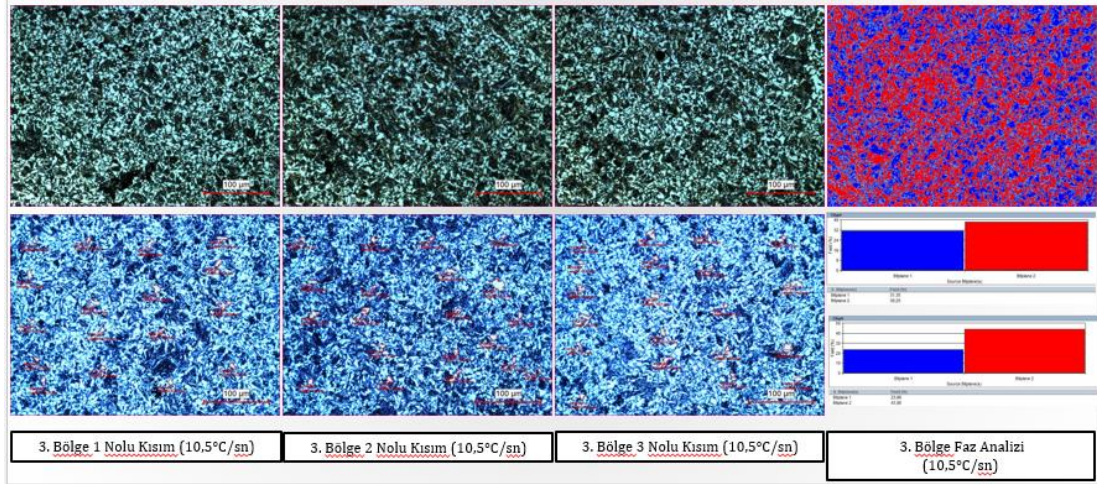
edilmiştir. Soğuma hızının su ortamına göre daha yavaş olmasından kaynaklı tane boyutları da daha büyük çıkmıştır. Yağ ve su soğuma ortamlarında alınan görüntülerde haddeleme yönünde oluşan bantlaşma görülemedi. Bunun sebebinin soğuma hızının bahsedilen bu iki ortamda yüksek olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



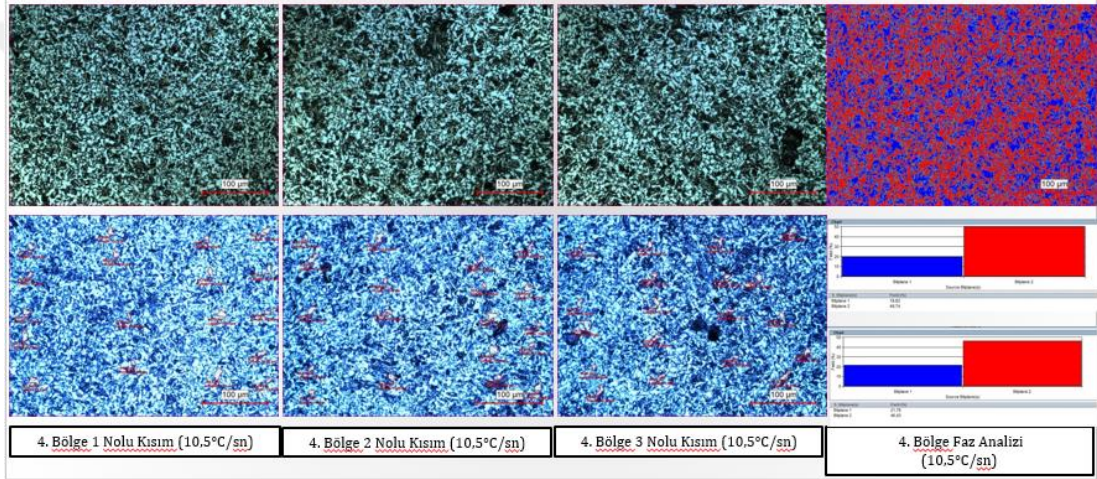
Şekil 4.58 Yağ ortamında soğutulmuş numune 1.Bölge inceleme görüntüleri



Şekil 4.59 Yağ ortamında soğutulmuş numune 2.Bölge inceleme görüntüleri

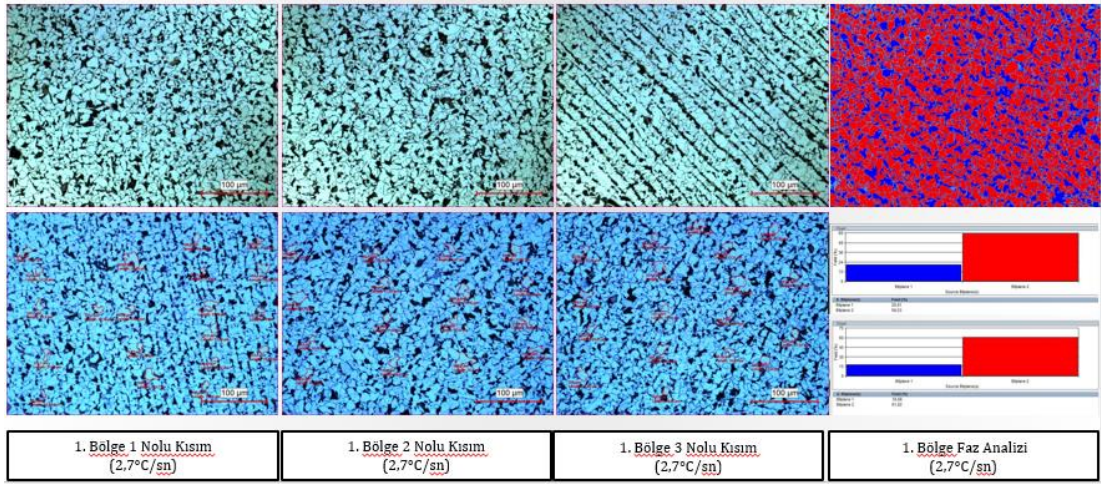


Şekil 4.60 Yağ ortamında soğutulmuş numune 3.Bölge inceleme görüntüleri

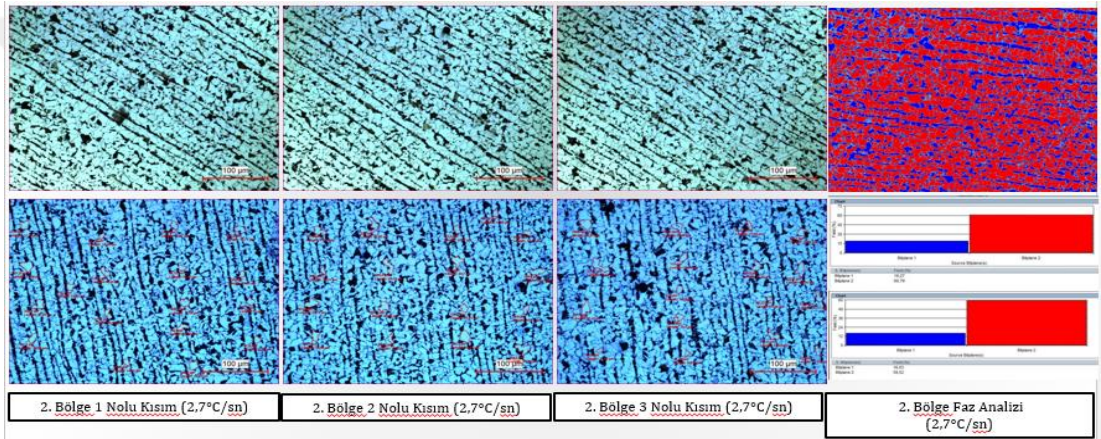


Şekil 4.61 Yağ ortamında soğutulmuş numune 4.Bölge inceleme görüntüleri

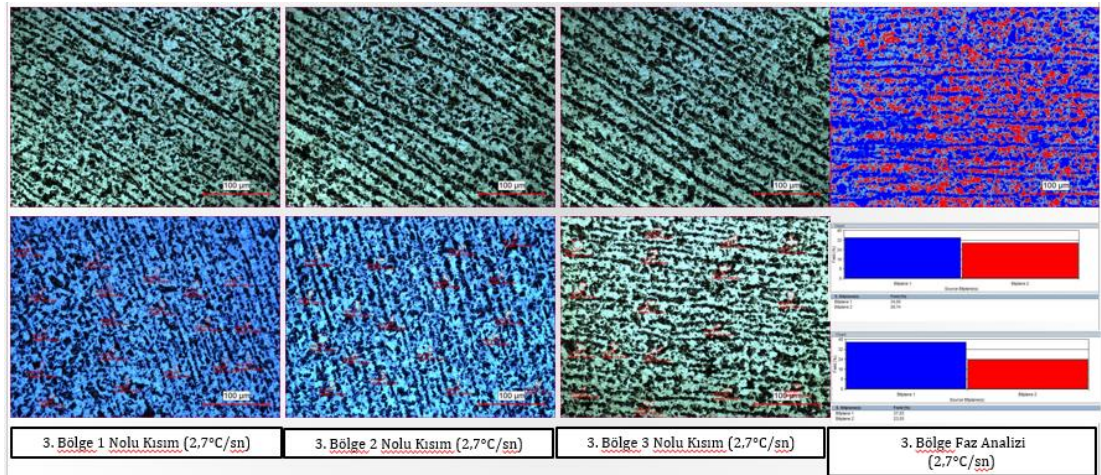
Şekil 4.62 ve Şekil 4.65 aralığında fan ortamında soğumaya bırakılmış numunelerin görüntülerinde 3.bölge haricinde ferrit fazının hakim olduğu görülmüş ve haddelme yönündeki bantlaşma net bir şekilde ortaya çıkmıştır. 3.bölge orta kısımda kaldığı için ısıyı kenarlara iletip en hızlı soğumuş ve perlit fazı hakim gelmiştir.



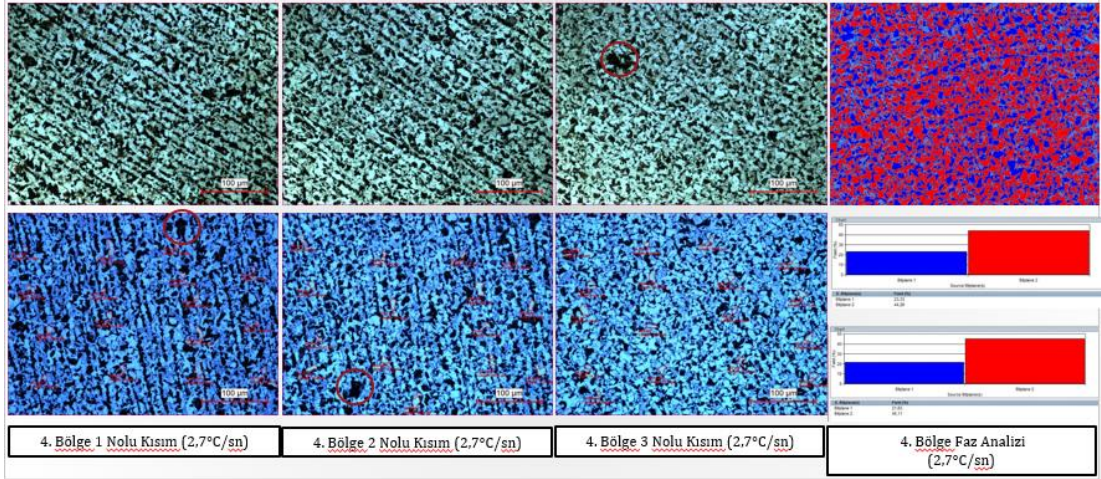
Şekil 4.62 Fan ortamında soğutulmuş numune 1.Bölge inceleme görüntüleri



Şekil 4.63 Fan ortamında soğutulmuş numune 2.Bölge inceleme görüntüleri

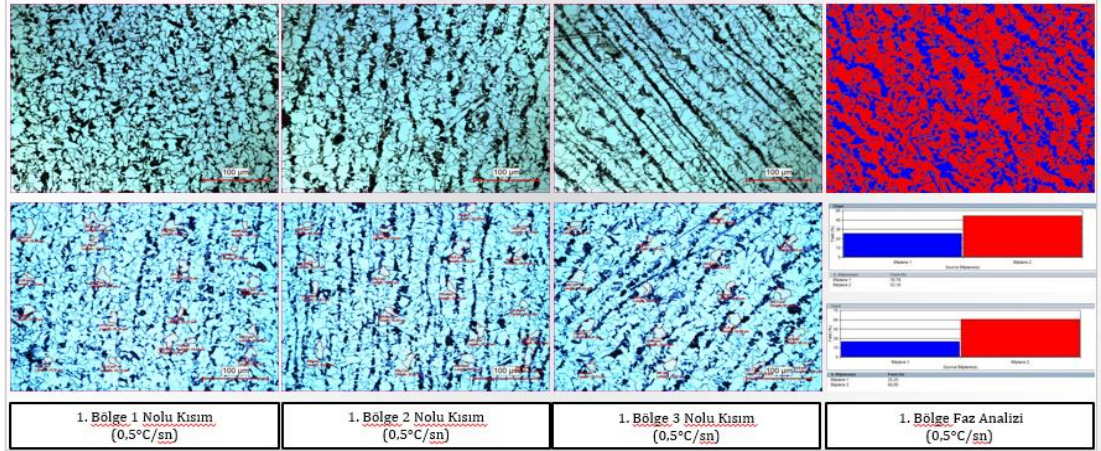


Şekil 4.64 Fan ortamında soğutulmuş numune 3.Bölge inceleme görüntüleri

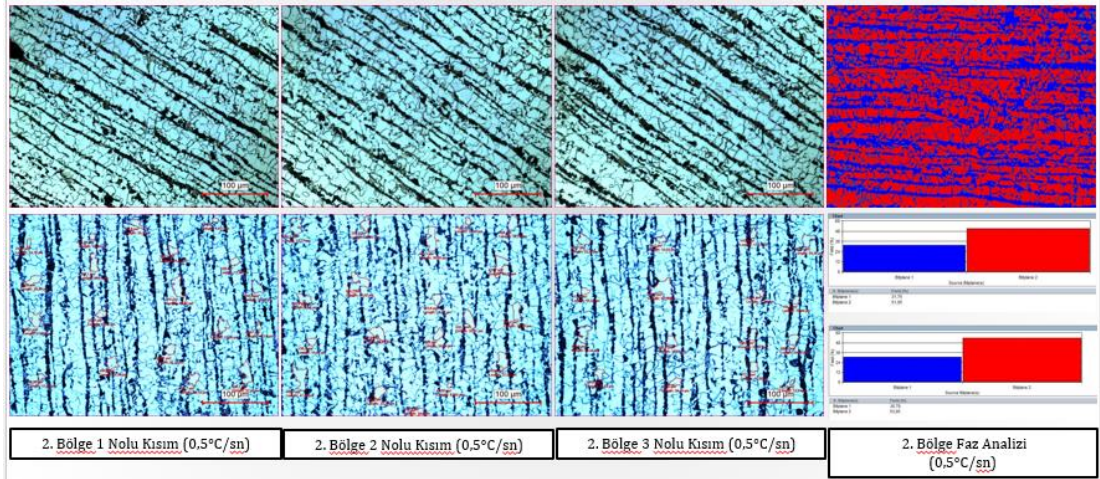


Şekil 4.65 Fan ortamında soğutulmuş numune 4.Bölge inceleme görüntüleri

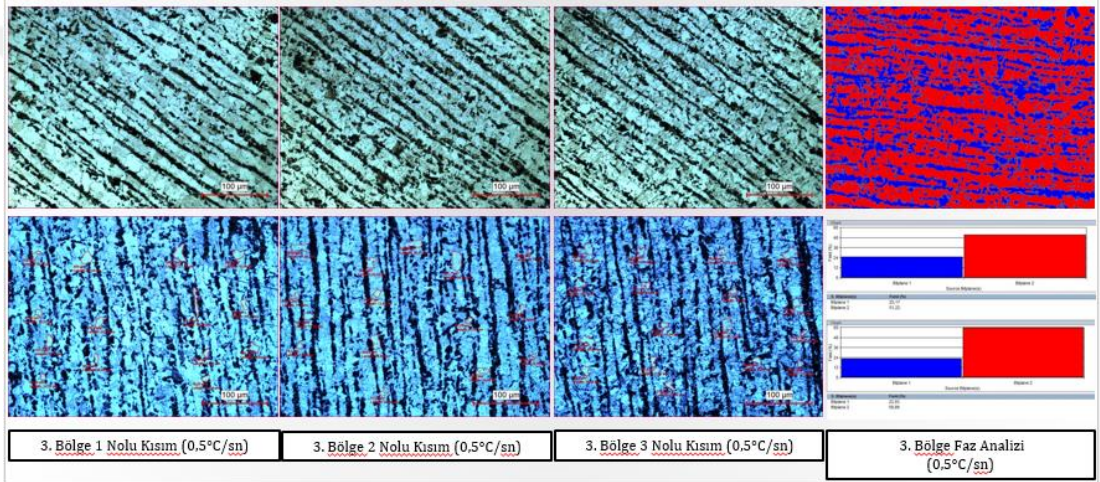
Şekil 4.66 ve Şekil 4.69 aralığında fırın ortamında soğumaya bırakılmış numunelere ait mikro yapı görüntülerinde hadde yönü bantlaşması diğer soğuma ortamlarına göre en net burada görülmüştür. Ferrit faz yapısının hakim olduğu görülmüştür.



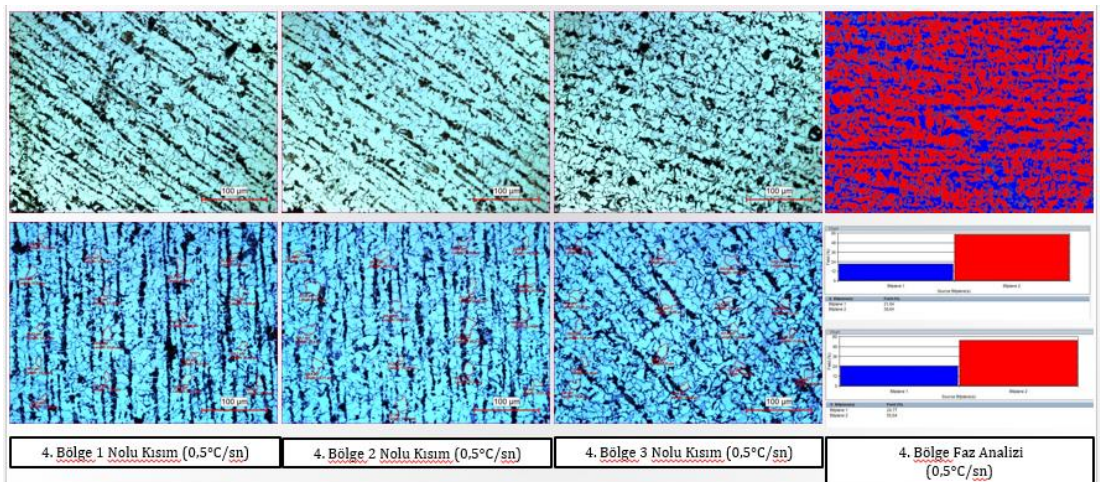
Şekil 4.66 Fırın ortamında soğutulmuş numune 1.Bölge inceleme görüntüleri



Şekil 4.67 Fırın ortamında soğutulmuş numune 2.Bölge inceleme görüntüleri



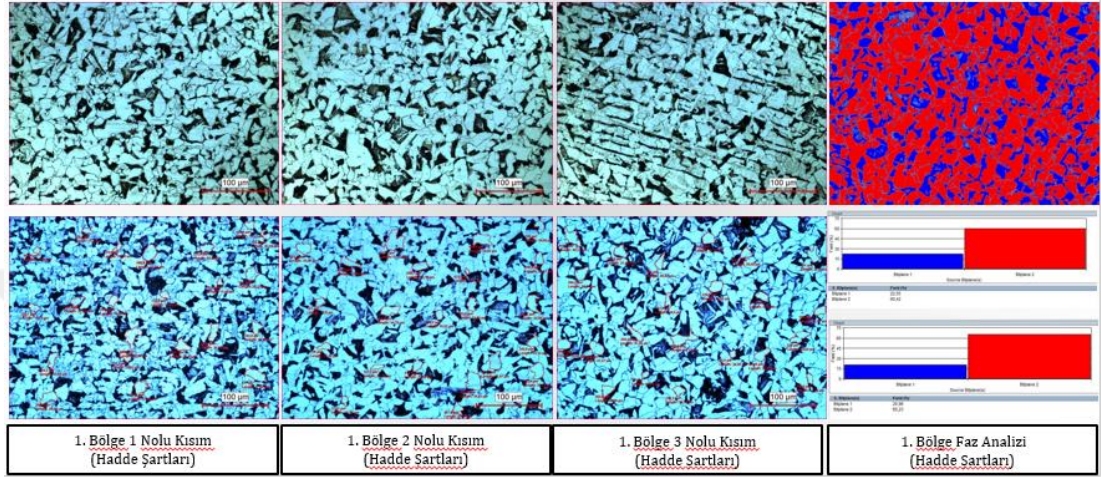
Şekil 4.68 Fırın ortamında soğutulmuş numune 3.Bölge inceleme görüntüleri



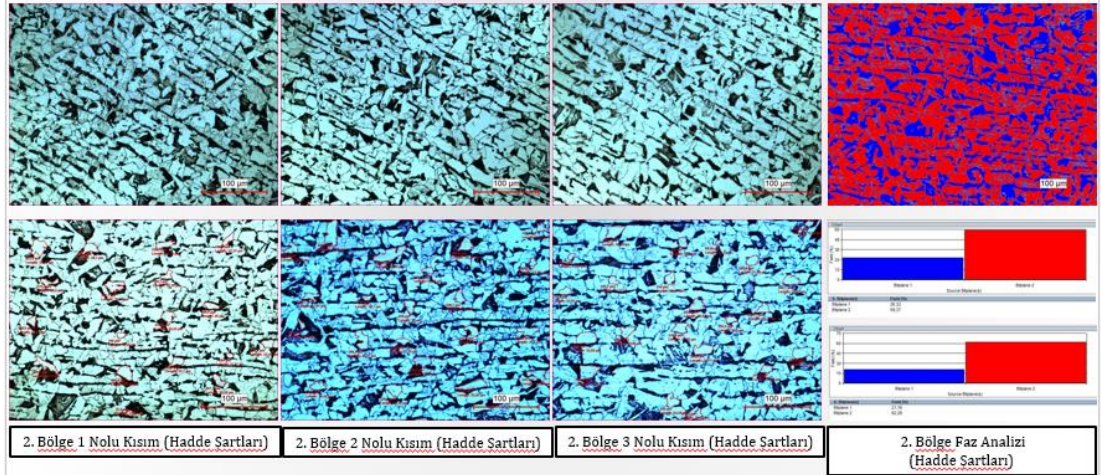
Şekil 4.69 Fırın ortamında soğutulmuş numune 4.Bölge inceleme görüntüleri

Şekil 4.70 ve Şekil 4.73 aralığında hadde şartlarında soğumaya bırakılmış numunelerin ferrit ağırlıklı olduğu görülmüştür. Bu numunelere östenitleme ısı işlemi

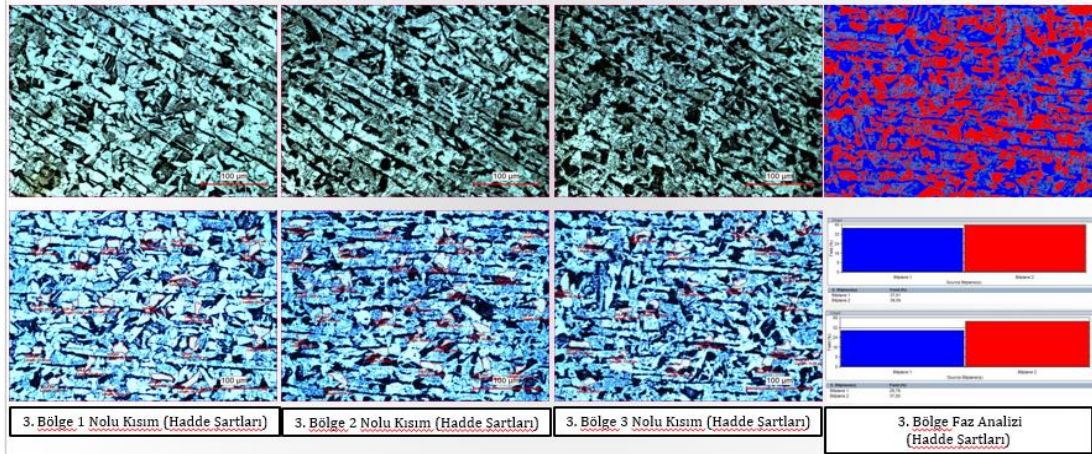
uygulanmamıştır. Numuneler hadde hattında proses şartlarında haddelenip soğumaya bırakılmıştır. Bu sebeple ferrit fazı hakim olarak görülmüş ve 3. ve 4. bölgelerde perlit fazının arttığı görülmektedir. Asimetrik kesitin şekilsel özelliklerinde ötürü bu durum gerçekleştiği düşünülmektedir. Numuneler arasındaki en büyük tane boyutu 1. bölge 2. kısımdan ölçülmesi ile soğumanın en yavaş olduğu nokta olduğu görülmüştür.



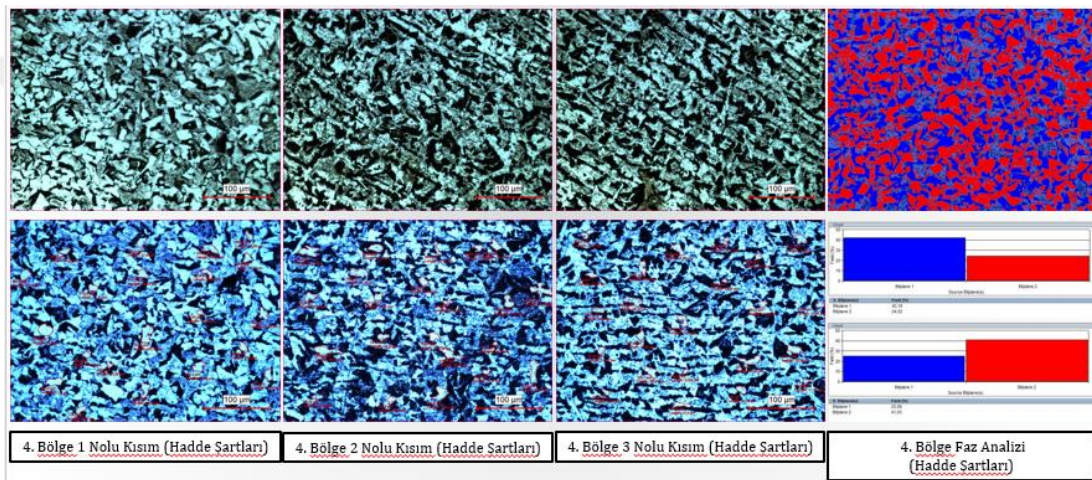
Şekil 4.70 Hadde Şartlarında soğutulmuş numune 1. Bölge inceleme görüntüleri



Şekil 4.71 Hadde Şartlarında soğutulmuş numune 2. Bölge inceleme görüntüleri



Şekil 4.72 Hadde Şartlarında soğutulmuş numune 3.Bölge inceleme görüntüleri



Şekil 4.73 Hadde Şartlarında soğutulmuş numune 4.Bölge inceleme görüntüleri

Östenitin ferrite dönüşümünde soğuma hızının ve soğuma hızına bağlı oluşan farklı ferrit morfolojilerinin çeliğin metalurjik özelliklerine doğrudan etki ettiği görülmektedir. Gerçekleştirilen mekanik testler doğrultusunda da kuruluşun haddeleme prosesi için kullanmakta olduğu soğutma platformu parametrelerinin suda soğuma-havada soğuma prosesleri neticesinde elde edilen ürünlerin sahip olduğu mekanik özelliklerin arasındaki değerlerde mekanik mukavemete sahip ürünlerin elde edildiği görülmektedir. Elde edilen bilgiler ışığında; sıcak haddeleme prosesleri ile ürün üretiminde ezme-basma oranlarının yanı sıra soğuma sürecinin optimize edilmesi ile mekanik özelliklerin geliştirilebileceği görülmüştür.

Tablo 4.12 Soğuma ortamlarına göre tane alanı ve çevreleri

Soğutucu Tipi	Soğuma Hızı	Ölçüm Yeri	Tane Alanı (µm ²)	Tane Çevre Uzunluğu (µm)	Bölgesel Alan Ortalama (µm ²)	Genel Alan Ortalama (µm ²)	Bölgesel Çevre Ortalama (µm)	Genel Çevre Ortalama (µm)
Su	35,5 °C/sn	1 Bölge	140,1	19,3	106,28	67,23	16,28	12,78
			79,7	14,2				
			99,05	15,34				
		2 Bölge	43,7	10,13	70,58			
			53,44	12,04				
			114,6	17,18				
		3 Bölge	34,89	10,18	40,48			
			45,7	10,27				
			40,86	10,9				
		4 Bölge	53,89	11,75	51,57			
			58,48	11,68				
			42,33	10,36				
Yağ	10,7 °C/sn	1 Bölge	87,7	15,43	87,32	94,74	15,34	16,01
			90,47	15,59				
			83,8	15				
		2 Bölge	140	19,7	106,80			
			100,7	17,29				
			79,69	14,08				
		3 Bölge	76,69	14,35	83,96			
			101,3	17,21				
			73,9	14,38				
		4 Bölge	75,7	14,8	100,87			
			125,6	18,17				
			101,3	16,11				
Fan	2,7 °C/sn	1 Bölge	123,78	16,99	141,15	112,35	18,40	16,64
			141,47	18,31				
			158,2	19,91				
		2 Bölge	111,8	16,82	136,10			
			174,35	21,97				
			122,16	17,53				
		3 Bölge	63,43	11,94	76,13			
			81,1	14,98				
			83,87	14,85				
		4 Bölge	86,2	15,4	96,00			
			106,59	15,99				
			95,2	15,02				
Hava	0,5 °C/sn	1 Bölge	211,7	22,62	201,56	184,85	27,02	22,07
			206,77	36,14				
			186,2	22,29				
		2 Bölge	264,4	25,49	235,98			
			226,76	23,44				
			216,77	23,19				
		3 Bölge	129,76	18,18	136,44			
			149,98	18,64				
			129,59	17,04				
		4 Bölge	141,27	18,94	165,41			
			159,76	18,91				
			195,2	19,99				
Hadde Şartları		1 Bölge	218,9	23,3	228,15	215,12	23,25	23,82
			279,6	25,68				
			185,95	20,78				
		2 Bölge	253,18	26,27	262,63			
			272,88	29,76				
			261,84	24,69				
		3 Bölge	213,7	23,48	198,10			
			204,4	24,29				
			176,2	21,86				
		4 Bölge	201,56	21,78	171,60			
			172,9	23,72				
			140,33	20,2				

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında düşük karbonlu alaşımlandırılmış yapısal çelikler için üç aşamalı inceleme kapsamında aşağıdaki faaliyetler gerçekleştirilmiştir;

- a) Sıcak haddeleme prosesinin ilk aşaması olan kalibre tasarımı için geleneksel metotlarda yaşanan deneme yanılma ile tecrübe sürecinin önlenmesi ve geçmişten günümüze kıymeti oldukça artan enerji, işgücü, malzeme, zaman tasarrufu için bilgisayar destekli tasarım ve analiz faaliyetleri gerçekleştirilmiştir.
- b) İlk aşama olan bilgisayar destekli tasarım ve analiz faaliyetleri sonrası ilk üretim denemesi için benzetim sonuçlarına göre hazırlıklar yapıp prototip üretim çalışmaları gerçekleştirilmiştir.
- c) Prototip üretim sonrasında elde edilen ürünü su, yağ, fan, fırın gibi farklı soğuma hızını sahip ortamlara bırakarak hadde koşullarında soğutulmuş ürüne göre mekanik ve metalurjik özelliklerin değişimi incelenmiştir.

Literatürde sıcak haddelemede bilgisayar destekli benzetim çalışmalarının sonuçlarının gerçek üretimler ile karşılaştırılması (Bordonaro ve diğer, 2018)[51], (Sakhaei ve diğer, 2010)[52] konusunda bulunan sonuçların bu tez çalışmasında elde edildiği gibi tatmin edici seviyelerde olduğu görülmüştür. Benzetim çıktıları ile üretim çıktılarının yakınlığının tespiti için analiz ve üretim kesitleri üst üste konulduğunda neredeyse birebir örtüştüğü görülmüştür. Analiz faaliyetleri sayesinde yeni ürün devreye alma maliyet ve süresinde minimum %50 tasarruf edilebileceği görülmüştür. İlk ürün denemeleri sırasında ortaya çıkması muhtemel hatalı ürünler en az %90 oranında önlenmiştir. Asimetrik ürünlerde ürünün tamamının simüle edilmesi gerekliliği sebebi ile literatürdeki çalışmalara kıyasla çözümleme süresi daha uzun olmuştur. Çözüm süresini etkileyen bir diğer etkeninde kullanılan mesh tipi ve büyüklüğüdür. Teknolojinin güncel seviyesine ve firmaların altyapılarına göre bunu azaltmak için yüksek hızlı işlemci gereksinimi ortaya çıkmaktadır. Literatür incelendiğinde simetrik kesitler için parçanın geometrisine göre dörtte birinin analiz edilmesi ile sonuca ulaşımlardır.

Farklı soğuma ortamlarında çelik malzemelerin soğumasına ilişkin literatürdeki çalışmalar (Çalik, 2009)[53] mekanik ve metalurjik incelemeler açısından tezdeki bulgularımızı doğrulamaktadır. Tez çalışmasında incelenen çelik alaşımı düşük karbonlu çeliktir. Mikro yapı, perlit ve ferrit den oluşmaktadır. Genelde karbon miktarının artışı ile birlikte perlit oranı da artmaktadır ve artan perlit oranı ile birlikte çelik, daha güçlü ancak daha az sünek hale gelmektedir. Bu çalışmada karbon oranı değiştirilmeden soğuma hızındaki değişimler ile ferrit-perlit oranının değişimi izlenmiştir. Faz oranlarının değişimine paralel olarak çekme, çentik darbe ve sertlik değerlerinin de değiştiği doğrulanmıştır. Soğuma hızının artmasına istinaden yapılan mekanik testlerde akma, çekme değerlerinin artmasına zıt yönde uzama değeri azalma göstermiştir. Uzama değerlerindeki düşüş ile birlikte çentik darbe değerleri de birbirine paralel olarak düşüş göstermiştir. Ürünün kullanım yerine ve ortam sıcaklığına göre çelik seçiminde profilin ne tip bir yüke maruz kalacağı (çekme, basma, darbe) önemli olacağı görülmüştür. Profildeki mukavemet artışının soğuma süreçlerine göre mi yoksa mikro alaşımlar ile kullanılacak olan hammaddeyle yapılması gerektiği belirlenmelidir. Tane inceltici alaşım elementleri kullanılması veya su vermeyle tane inceltme yapılmasının arasındaki farkın özellikle çentik darbe testlerinde alınan sonuçlarda belirgin olarak görülmektedir. Su ve yağ vererek gerçekleştirdiğimiz hızlı soğumada tanelerimizin incelenmesi yanında martenzit ve diğer karbürlerin oluştuğu görülmüştür.

Sonuç olarak asimetric bir profile ait simülasyonlar yapılmış, ilk deneme üretimi gerçekleştirilmiş ve farklı soğuma hızlarının çelik profil üzerindeki mekanik ve metalurjik etkileri gözlemlenmiştir. Bundan sonraki çalışmalar için numunelere ait EDS ve XRD görüntülerinin alınıp hammaddeden gelen inklüzyonların ve optik mikroskopta göremediğimiz fazların tayin edilmesiyle ürün özelliklerine etkisinin araştırılabileceği düşünülmektedir. Buna ek olarak farklı kaynak parametrelerine göre malzemelerin kaynaklanabilirlik özelliklerinin incelenebileceği de öngörülmektedir.

KAYNAKLAR

1. Eyres D.J., Bruce G. J. Ship Construction. Butterworth-Heinemann, Burlington, 2012, 400s.
2. Rackham J. W., Hicks S. J., Newman G. M. Design Of Asymmetric Slimflor Beam With precast Concrete Slabs, The Steel Construction Institute, Berkshire, 2006, 111s.
3. Um, K., Kim, S., Kang, K., Park, Y., Kwon, O. High Performance Steel Plates For Shipbuilding Applications. 18.th International Offshore and Polar Engineering Conference, 6-11 July, 2008, Vancouver.
4. Yanagimoto, J., Kadomura, Y., Muto, T., Inoue, K. Strategic cae system for the design of calibre in the rolling of complex sections. Steel Research International. 2016. 73(12), 526-530.
5. Suominen M., Romanoff J., Remes H., Kujala P. The Determination Of Ice-Induced Loads On The Ship Hull From Shear Strain Measurements. 5.th International Conference On Marine Structures, 25-27 March, 2015, England (Analysis and Design of Marine Structures V, 375 – 383.)
6. Sundermeyer, W., Fricke, W., Paetzold, H.R. Investigation Of Weld Root Fatigue Of Single-Sided Welded T-Joints. 5.th International Conference On Marine Structures, 25-27 March, 2015, England (Analysis and Design of Marine Structures V, 309.)
7. Guimaraes, P. B., Pedrosa, P. M. A., Yadava, Y. P., Barbosa, J.M.A., Filho, A.V.S., Ferreira, R.A.S. Determination of residual stresses numerically obtained in astm a36 steel welded by tig process. Materials Sciences and Applications. 2013, 4(4), 268- 274.
8. Bintu, A., Vincze, G., Picu, R.C., Lopes, A.B. Effect of symmetric and asymmetric rolling on the mechanical properties of aa5182. Materials & Design. 2016, 100, 151-156.
9. Pesin, A., Chukin, M., Korchunov, A., Pustovoytov, D. Finite element modelling of shear strain in asymmetric and symmetric rolling in multi roll calibers. Procedia Engineering. 2014, 81, 2469-2474.
10. Raudensky, M., Horsky, J., Pohanka, M. Optimal cooling of rolls in hot rolling. Journal of Materials Processing Technology. 2002, 125-126, 700-705.
11. Serajzadeh, S. Prediction of microstructural changes during hot rod rolling. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2003, 43(14), 1487-1495.
12. Serajzadeh, S. Hot rolling and direct cooling. Comprehensive Materials Processing. 2014, 3, 377-396.
13. Adamczyk, J. Development of the microalloyed constructional steels. Journal of Achievement in Materials and Manufacturing Engineering. 2006, 14(1-2), 9-20.
14. Muniz, A.R. Non-Linear Finite Element Method Simulation and Modeling of the Cold and Hot Rolling Processes. State University, Faculty of Virginia Polytechnic Institute, Mechanical Engineering, Virginia, 2007, 170s. (Master of Science)
15. Kawalla, R., Graf, M., Tokmakov, K. Simulation system of multistage hot rolling process of flat products. Metallurgija. 2010, 49, 175-179.
16. Kawalek, A., Dyja, H., Mroz, S., Knapinski, M. Effect of plate asymmetric rolling parameters on the change of the total unit pressure of roll. Metallurgija. 2011, 50(3), 163-166.
17. Choung, J., Shim, C., Song, H. Estimation of failure strain of eh36 high strength marine structural steel using average stress triaxiality. Marine Structures. 2012, 29(1), 1-21.
18. Cristea, B., Mocanu, C.I., Domnisoru, L. Non-Linear Hydroelastic And Fatigue Analyses For A Very Large Bulk Carrier. 5.th International Conference On Marine Structures, 25-27 March, 2015, England (Analysis and Design of Marine Structures V, 83.)
19. Taş, Z. Metallurgical mechanisms for increasing the strength of high-strength-low-alloy-steels. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi. 2012, 28(2), 97-101.

20. Islamgaliev, R K., Nikitina, M.A., Ganeev, A.V., Karavaeva, M.V. Effect Of Grain Refinement On Mechanical Properties Of Martensitic Steel. 7.th International Conference on Nanomaterials by Severe Plastic Deformation, 2-7 July, 2017, Sydney (IOP Conference Series:Materials Science and Engineering, 194.)
21. Dutta, S. Hot rolling practice. Institute for Steel Development & Growth. Kalkota, 2014, 40s.
22. Dieter, G.E. Mechanical Metallurgy. McGraw-Hill, New York, 1986, 646s.
23. Anonymous. Metals Handbook. American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1985, 1535s.
24. Wusatowski, Z. Fundamentals of Rolling. Pergamon Press, Oxford, 1969, 692s.
25. Loshkarev, N.B., Noskov, V.A., Druyhinin, G.M. Mathematical Model Of Metal Heating In The Continuous Walking Beam Reheating Furnace. VII All- Russian Scientific and Practical Conference of Students, Graduate Students and Young Scientists on Heat Engineering and Computer Science in Education, Science and Production, 2018 (KnE Engineering, 287–293.)
26. Han, S.H., Lee, Y.S., Cho, J.R., Lee, K.H. Efficiency analysis of air-fuel and oxy-fuel combustion in a reheating furnace. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2018, 121, 1364-1370.
27. Ilyas, I.U., Afridi, R., Daud, M., Irfan M.A., Wazir, N. Waste heat recovery in steel bars re-rolling mill. European Journal of Scientific Research. 2012, 92(1), 48-55.
28. Humphreys, F.J., Heatherly, M. Recrystallization and Related Annealing Phenomena. Elsevier, Oxford, 2004, 605s.
29. Liu, X., Worl, B., Tang, G., Silaen, A.K., Cox, J., Johnson, K., Bodnar, R., Zhou, C.Q. Numerical simulation of heat transfer and scale formation in a reheat furnace. Steel Research International. 2018, DOI: 10.1002/srin.201800385.
30. Abuluwefa, H. Scale Formation in a Walking-Beam Steel Reheat Furnace. McGill University, Faculty of Graduate Studies and Research, Mining and Metallurgical Engineering, Montreal, 1992, 143s.(the Degree of Master of Engineering).
31. Yıldırım, A. Haddehane Fırınında Isı Kayıpları ve Enerji Analizi. İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği, İskenderun, 2018, 95s.(Yüksek Lisans Tezi).
32. Roberts, W.L., Hot Rolling Of Steel. CRC Press, New York, USA, 1983, 2032s.
33. Öznergiz, E. Kalınlık Kontrolü İçin Sıcak Haddeleme Prosesinin Modellenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği, İstanbul, 2003, 80s.(Doktora Tezi).
34. Spuzic, S., Arachchige, D.H., Kovacic, Z., Abhary, K., Narayanan, R. Some Trends In Roll Design For Manufacture Of Long Products. International Conference on Rolling and Finishing Technology of Steel, 8-10 September, 2015, Ranchi.
35. Kwon, H.C., Im, Y.T. Interactive computer-aided-design system for roll pass and profile design in bar rolling. Journal of Materials Processing Technology. 2002, 123, 399-405.
36. Spuzic, S., Arachchige, D.H., Kovacic, Z., Abhary, K., Narayanan, R. A Contribution To Roll Pass Design Optimisation In Hot Steel Rolling Technology. International Conference on Rolling and Finishing Technology of Steel, 8-10 September, 2015, Ranchi.
37. Spuzic, S., Narayanan, R., Kovacic, Z., Arachchige, D.H., Abhary, K. Roll pass design optimisation. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2017, 91, 999-1005.

38. Turczyn, S., Nowakowski, A., Michalowki, M. Roll Pass Design For Ribbed Bars. 13.th International Metallurgical & Material Conference, 18-20 May, 2004, Hradec nad Moravicí.
39. Çulha, O. Fiziksel Metalurji Ders Notları. Manisa Celal Bayar Üniversitesi. Manisa, 2017, 644s.
40. Tan, E. Dökme Demirden İmal Edilen Hadde Merdanelerinin Aşınma Davranışına Bakır Katkı Oranının Etkisi. Pamukkale Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği, Denizli, 2005, 115s.(Yüksek Lisans Tezi).
41. İkiz, B. Sıcak Haddeleme Tempcore Prosesi. Mustafa Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği, Hatay, 2009, 64s.(Yüksek Lisans Tezi).
42. Anonim. Hata Türleri Referans Kitapçığı, Kocaeli Haddecilik San. Tic. Ve A.Ş., İzmir, 2009, 31s.
43. Anonim. Ürün Bilgileri Kitapçığı, Kocaeli Haddecilik San. Tic. Ve A.Ş., İzmir, 2018, 10s.
44. Rao, S.S. The Finite Element Method in Engineering, Elsevier Inc., Burlington, USA, 2011, 727s.
45. Karadağlı, Ö. Soğuk Dövme ile Üretimde Simülasyon Uygulamaları. Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği, Manisa, 2014, 191s.(Yüksek Lisans Tezi).
46. Valberg, S.H. Applied Metal Forming-Including FEM Analysis, Cambridge University Press, Cambridge, 2010, 471s.
47. Netform Mühendislik Makine Metal San. Tic. Ltd. Şti. (2018). 01.10.2018 tarihinde http://www.netformmetal.com/simufact_forming.asp adresinden erişildi.
48. Topbas, M. A. Isıl işlemler, Prestij Basın, İstanbul, 1993 199s.
49. TS EN 148-2. Metalik malzemeler-Charpy vurma deneyi-Bölüm 2: Deney makinasının doğrulanması (sarkaçla vurma), 2017.
50. TS EN ISO 6892-1. Metalik malzemeler - Çekme deneyi - Bölüm 1: Ortam sıcaklığında deney metodu, 2016.
51. Bordonaro, G.G., Leardi, R., Diviani, L., Berto, F. Design of experiment as a powerful tool when applying finite element method: a case study on prediction of hot rolling process parameters. Frattura ed Integrita Strutturale. 2018, 44, 1-15.
52. Sakhaei, A.H., Salimi, M., Kadkhodaei, M. Investigations into the Roll Pass Design of Channel Section Beams in Conventional Rolling. 18.th Annual International Conference on Mechanical Engineering, 11-13 May, 2010, Tehran.
53. Çalik, A. Effect of cooling rate on hardness and microstructure of aıısı 1020, aıısı 1040 and aıısı 1060 steels. International Journal of Physical Sciences. 2009, 4(9), 514-518.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Mehmet AKKAŞ

Doğum Yeri ve Yılı : Isparta, 1985

Medeni Hali : Evli

Yabancı Dili : İngilizce

E-posta : muh.akkas@gmail.com

Eğitim Durumu

Lise :Şemikler Lisesi (Y.D.A), 2003

Lisans :Dumlupınar Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 2008

2.Lisans :Dumlupınar Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 2009

Y.Lisans :Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Tamamlanamadı

Y.Lisans :Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Halen

Mesleki Deneyim

Kocaeli Haddecilik, İşletme Mühendisi	2010 – 2012
Kocaeli Çelik, Proje Yönetim Uzmanı	2012 – 2014
Kocaeli Haddecilik Ar-Ge Merkezi, Proje Planlama Mühendisi	2014 – 2016
Kocaeli Haddecilik Ar-Ge Merkezi, Proje Planlama Şefi	2016-Halen

Yayınları

Akkaş, M., Çulha, O. Sıcak Haddelenmiş Düşük Karbonlu Gemi İnşa Çeliklerinin Farklı Ortamlarda Soğutulmasının Mekanik Özelliklerin Değişimine Tesirinin İncelenmesi. El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi. 2018, 5(3), 862-874. DOI : 10.31202/ecjse.435251

Akkaş, M., Kilerci, İ., Başsüllü, A., Kocaeli, B., Akıncı, O. Loading Machine Prototype Design For Increasing Carbon Release Reduction, Productivity and Working Environment Safety. 1.th International University Industry Cooperation, R&D and Innovation Congress, 18-19 Dec, 2017, Manisa.

Kilerci, İ., Kocaer, B., Başsüllü, A., **Akkaş, M.**, Sevgi, E. New Section Profiles Which Will Be Used in Steel Construction Bridge Manufacturing. 1.th International Univesity Industry Cooperation, R&D and Innovation Congress, 18-19 Dec, 2017, Manisa.

Başsüllü, A., Kocaer, B., **Akkaş, M.**, İpek, O., Öneş, B. Simulation Aided Analysis of Determining of Load-Carrying Capacity of Yielding Steel Arch Support. 1.th International Univesity Industry Cooperation, R&D and Innovation Congress, 18-19 Dec, 2017, Manisa.

