

**SOĞUK HADDELEMEDE PÜRÜZLÜLÜK
TRANSFERİNİ ETKİLEYEN HADDELEME
PARAMETRELERİNİN VE MALZEME
ÖZELLİKLERİNİN DENEYSEL OLARAK
İNCELENMESİ**

**2018
DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

Bilal ÇOLAK

**SOĞUK HADDELEMEDE PÜRÜZLÜLÜK TRANSFERİNİ ETKİLEYEN
HADDELEME PARAMETRELERİNİN VE MALZEME ÖZELLİKLERİNİN
DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

Bilal ÇOLAK

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalında

Doktora Tezi

Olarak Hazırlanmıştır

KARABÜK

Eylül 2018

Bilal ÇOLAK tarafından hazırlanan “SOĞUK HADDELEMEDE PÜRÜZLÜLÜK TRANSFERİNİ ETKİLEYEN HADDELEME PARAMETRELERİNİN VE MALZEME ÖZELLİKLERİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Doktora Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Naci KURGAN

Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı



Bu çalışma, jürimiz tarafından, oy birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir. 14/09/2018

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

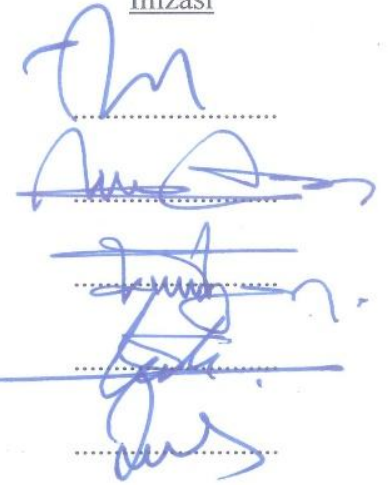
Başkan : Prof. Dr. İbrahim ÇİFTÇİ (ÇAKÜ)

Üye : Prof. Dr. M. Bahattin ÇELİK (KBÜ)

Üye : Doç. Dr. Naci KURGAN (OMÜ)

Üye : Doç. Dr. Yahya ALTUNPAK (BAİBÜ)

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Gökhan SUR (KBÜ)



...../...../2018

KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Filiz ERSÖZ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdür V.





“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Bilal ÇOLAK

ÖZET

Doktora Tezi

SOĞUK HADDELEMEDE PÜRÜZLÜLÜK TRANSFERİNİ ETKİLEYEN HADDELEME PARAMETRELERİNİN VE MALZEME ÖZELLİKLERİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Bilal ÇOLAK

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. Naci KURGAN

Eylül 2018, 93 sayfa

Yassı mamul yüzeylerinin gerek şekillendirme ve gerekse boyama kalitesi açısından belirli bir ölçüde pürüzlülüğe sahip olması gerekmektedir. Bu yüzey pürüzlülüğü malzemeye çoğu zaman pürüzlendirilmiş merdaneler ile verilmektedir ki bu işleme temper haddeleme denmektedir. Temper haddelemede merdane pürüzlülüğü malzemeye, haddeleme parametrelerine bağlı olarak değişen oranlarda sirayet etmektedir. Bu çalışmada, pürüzlülük transferini etkileyen haddeleme parametreleri ve malzeme özellikleri incelenmiştir. Pürüzlülük transferinin nasıl değiştiğinin görülebilmesi için haddeleme kuvvetini ölçen bir yük ölçer teçhiz edilen, farklı hız ve farklı ezme oranlarında haddeleme yapılabilen iki merdaneli bir hadde düzeneği kullanılmıştır. Test numuneleri farklı kalınlıkta ve parlak ERD6112 ve ERD7114 kalite malzemedan dilinerek hazırlanmıştır. Haddeleme düzeneğinde pürüzlendirilen numunelerin yüzey pürüzlülükleri ölçülerek ortalama değerleri bulunmuş, standart

sapmaları hesaplanmış ve üç boyutlu alan tarama görüntüleri incelenmiştir. Elde edilen veriler, haddeleme parametreleri, pürüzlülük transferi, standart sapma ve malzeme özellikleri açısından ele alınmıştır.

Bu çalışmada haddeleme kuvvetini artıran her parametrenin pürüzlülük transferini artırdığı sonucuna ulaşılmıştır. Yüksek ezme oranlarında, pürüzlülüğü yüksek merdane kullanılması durumunda, ince ve dayanımı yüksek malzemelerle yapılan kuru haddeleme testlerinde haddeleme kuvvetinin daha yüksek olduğu ve dolayısıyla pürüzlülük transferinin daha fazla gerçekleştiği görülmüştür.

Haddeleme kuvvetini değiştiren bir diğer parametrenin hız olduğu görülmüştür. Hızın transfer üzerine etkisi ERD6112 kalite malzeme kullanımında artırıcı yönde; ERD7114 kalite malzemedede ise azaltıcı yönde olmuştur. Yağlı yapılan testlerde pürüzlülük sirayetinde azalma gözlenmekle birlikte, malzeme cinsinden ve işlem hızından bağımsız olarak, malzeme yüzeyinde daha homojen pürüzlülük dağılımı elde edilmiştir. Ayrıca yüksek ezme oranlarında standart sapmanın yükseldiği görülmüştür. Bu yükselmenin, pürüzlülüğü yüksek merdanelerde daha belirgin olduğu saptanmıştır.

Anahtar Sözcükler : Merdane pürüzlülüğü, pürüzlülük transferi, temper haddeleme, haddeleme kuvveti, haddeleme hızı, ezme miktarı, standart sapma, yağlama, paso.

Bilim Kodu : 914.1.094

ABSTRACT

Ph. D. Thesis

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF ROLLING PARAMETERS AND MATERIAL PROPERTIES AFFECTING ROUGHNESS TRANSFER IN COLD ROLLING

Bilal ÇOLAK

Karabük University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Thesis Advisor:

Assoc. Prof. Dr. Naci KURGAN

September 2018, 93 pages

The surface of sheet metals should have a certain level of roughness in terms of forming and dyeing quality. Surface roughness is mainly introduced to the material by rolling with rough rolls, which is called temper rolling. The roughness of a roll is transferred to the material, depending on the rolling parameters. In this study, rolling parameters and material properties affecting roughness transfer were investigated. A 2-high rolling setup equipped with a load-cell measuring the rolling force, which can roll at different speeds and reduction ratios, was used to observe the change in the amount of roughness transfer. Surface roughness values of specimens which roughened by the rolling setup were measured, their average and standard deviation values were calculated, and 3-d field scanning images were investigated. The results obtained were evaluated in terms of rolling parameters, roughness transfer, standard deviation and material properties.

In this study: it was concluded that each parameter that increased the rolling force also increased the roughness transfer. It was seen that rolling force, and thus roughness transfer, was higher in the tests conducted at high reduction ratios with thinner and high strength materials and rougher rolls.

Another factor that increases the rolling load is speed. The speed effect on the roughness transfer is positive in the use of ERD6112 grade material. Whereas the effect on the transfer is negative in the use of ERD7114 grade material. Lubricated roughening tests indicated that the introduction of roughness on material surface decreased due to lubrication. Moreover, a more homogeneous roughness distribution was obtained in lubricated rolling compared to dry rolling regardless of material grade and speed. It was observed that the roughness at big amount of reduction ratios was obtained within a wider range. This growth is more evident in the use of very rough rolls.

Key Word : Roll roughness, roughness transfer, temper rolling, rolling force, rolling speed, reduction ratio, standard deviation, lubrication, pass.

Science Code : 914.1.094

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren sayın hocam Doç. Dr. Naci KURGAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca Prof. Dr. M. Bahattin ÇELİK ve Prof. Dr. İbrahim ÇİFTÇİ hocama, vermiş oldukları destek ve katkılarından dolayı teşekkürlerimi arz ederim.

Test malzemelerinin tedarik ve hazırlama sürecinde bana yardımını esirgemeyen, Erdemir Çelik Servis Merkezi (Gebze) İşletme Müdürü Sn. Asım TEMELTAŞ'a müteşekkirim.

KBÜ-BAP-15/1-DR-005, KBÜ-BAP-17-DS-397, KBÜ-BAP-16/2-DS-014 ve KBÜ-BAP-18-DS-045 projeleriyle bana bu süreçte finansal destek sağlayan KBÜ BAP Koordinatörlüğüne ayrıca teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xvi
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	3
HADDELEME.....	3
2.1. SÜRTÜNME KUVVETLERİ.....	4
2.2. HADDELEME KUVVETİ	7
2.3. HADDE MERDANELERİ	9
2.4. HADDE DÜZENLERİ.....	12
2.5. SICAK HADDELEME	15
2.6. SOĞUK HADDELEME	18
2.6.1. Soğuk Haddeleme Teknolojisi.....	21
2.6.2. Soğutma ve Yağlama.....	23
2.6.3. Kalınlık Kontrolü.....	25
2.6.4. Temper Haddeleme.....	26
2.6.4.1. Deformasyon Yaşlanması	26
2.6.5. Pürüzlülük ve Soğuk Haddelemede Yüzey Pürüzlendirme.....	30
2.6.5.1. Merdane Yüzey Pürüzlendirme Yöntemleri	31

	<u>Sayfa</u>
BÖLÜM 3	44
PÜRÜZLÜLÜK TRANSFERİ	44
3.1. HADDELEME KUVVETİ – PÜRÜZLENDİRME İLİŞKİSİ	46
3.2. PİK BASINCI – PÜRÜZLENDİRME İLİŞKİSİ.....	48
3.3. MERDANE ÇAPI VE YÜZDE UZAMANIN PÜRÜZLENDİRME İLE İLİŞKİSİ.....	50
3.4. HIZ, EZME MİKTARI VE YAĞLAMANIN PÜRÜZLENDİRME ÜZERİNE ETKİSİ	52
BÖLÜM 4	59
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	59
4.1. HADDELEME DÜZENEĞİ.....	59
4.1.1. Test Numunelerinin Hazırlanması.....	60
4.1.2. Ezme Miktarının Belirlenmesi.....	62
4.1.3. Ölçümler	64
4.1.3.1. Hadde Kuvveti Ölçümü	64
4.1.3.2. Kalınlık Ölçümü.....	64
4.1.3.3. Pürüzlülük Ölçümü	65
BÖLÜM 5	71
DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	71
5.1. YAĞLAMA İLİŞKİSİ	71
5.2. HIZ İLİŞKİSİ	73
5.3. HADDELEME KUVVETİ İLİŞKİSİ	74
5.4. STANDART SAPMA	80
5.4.1. Standart Sapma – Yağlama İlişkisi.....	80
5.4.2. Standart Sapma – Ezme Miktarı İlişkisi	83
BÖLÜM 6	87
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	87
KAYNAKLAR	89

ÖZGEÇMİŞ 93



ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Haddeleme işlemi.....	3
Şekil 2.2. 4'lü Tandem hadde düzeni.....	4
Şekil 2.3. Yassı mamul haddeleme işlemi.....	5
Şekil 2.4. Haddeleme kuvvetinin dağılımı.....	8
Şekil 2.5. Bir hadde merdanesinin bölümleri.....	9
Şekil 2.6. Muhtelif merdane kaliteleri için temperleme sıcaklık eğrisi.....	10
Şekil 2.7. Çeşitli yassı ve şekil haddeleme işlemleri.....	12
Şekil 2.8. Tipik bir yassı mamul hadde tezgahı. a) yan görünüş, b) ön görünüş.....	13
Şekil 2.9. Merdane düzenleri. a) 2'li, b) 3'lü, c) 4'lü, d) sendzimir.....	14
Şekil 2.10. 6'lı (6-hi) hadde düzeni.....	15
Şekil 2.11. Sıcak haddeleme. a) ingot (uniform olmayan iç yapı), b) işlem sırasında tane yapısı değişimi.....	16
Şekil 2.12. Sıcak haddehane (yassı mamul).....	17
Şekil 2.13. Şerit hadde.....	17
Şekil 2.14. Soğuk haddelemede temas bölgesi.....	20
Şekil 2.15. Bağımsız motorlu yatay hadde tezgahının şematik gösterimi.....	22
Şekil 2.16. Redüktörlü yatay hadde tezgahının şematik gösterimi.....	23
Şekil 2.17. Sürtünme katsayısı-haddeleme kuvveti ilişkisi.....	24
Şekil 2.18. Kesintiye uğramış çekme testinde deformasyon yaşanması etkisi.....	28
Şekil 2.19. Merdane bükme sistemi.....	29
Şekil 2.20. Pozitif merdane bükme sistemi.....	29
Şekil 2.21. Pürüzlendirme parametreleri.....	30
Şekil 2.22. Merdane pürüzlendirme yöntemleri.....	31
Şekil 2.23. Farklı yöntemlerle elde edilen malzeme yüzey topoğrafyaları.....	32
Şekil 2.24. SBT yöntemiyle merdane pürüzlendirme.....	33
Şekil 2.25. WS EDT tezgâhı.....	34
Şekil 2.26. EDT yöntemiyle merdane pürüzlendirme.....	35
Şekil 2.27. PDT tezgâhı.....	36
Şekil 2.28. Pomini Tenova dijital pürüzlendirme kafası.....	37
Şekil 2.29. Topokrom kaplama yüzeyi (damlacık görünümü).....	38

Şekil 2.30. Yüzey topoğrafyası.	38
Şekil 2.31. Geleneksel pürüzlendirme yöntemlerinde çukurcuk oluşumu.	39
Şekil 2.32. Salzgitter topokrom tesisi.	40
Şekil 2.33. Topokrom kaplama reaktörü.	40
Şekil 2.34. 2 reaktörlü bir topokrom kaplama tesisinin şeması.	41
Şekil 2.35. Posco topokrom tesisi.	42
Şekil 2.36. Topokrom yöntemiyle pürüzlendirilmiş malzeme yüzey topoğrafyaları.	42
Şekil 2.37. Farklı yoğunlukta pürüzlendirilmiş malzeme yüzey görünümleri.	43
Şekil 3.1. Merdane aşınması ve transfer modeli.	45
Şekil 3.2. Yüzey topoğrafya görüntüleri. a) Pürüzlendirilmiş merdane yüzey topoğrafyası (haddeleme öncesi) b) Haddeleme sonucu aşınmış merdane yüzey topoğrafyası.	45
Şekil 3.3. Pürüzlülük transferi – haddeleme (sıkıştırma) kuvveti ilişkisi.	47
Şekil 3.4. Pürüzlülük transferi – haddeleme kuvveti ilişkisi. a) 0,80 kN/mm yük altında haddelenmiş malzeme b) 1,45 kN/mm yük altında haddelenmiş malzeme.	47
Şekil 3.5. Temas yayı boyunca basınç dağılımı (pik basınç).	48
Şekil 3.6. Merdane yüzeyindeki pürüzlülük profili modeli.	49
Şekil 3.7. Transfer edilen pürüzlülük yüksekliği (ezme oranı %7).	49
Şekil 3.8. Pürüzlülük transferi – pik basıncı ilişkisi (pürüzlü merdane ile) ($\sigma_0=165,8$ MPa).	50
Şekil 3.9. Merdane çapı – pürüzlülük transferi ilişkisi.	51
Şekil 3.10. Yüzde uzamanın pürüzlülük transferine etkisi.	51
Şekil 3.11. Yağsız olarak farklı hız ve pasolarda yapılan haddeleme sonucu elde edilen yüzey topoğrafyaları. a) Haddeleme öncesi 1 nolu numune (% 8,1 paso, 5 d/dk, $R_a = 0,307 \mu\text{m}$), b) Haddeleme sonrası 1 nolu numune ($R_a = 0,243 \mu\text{m}$), c) Haddeleme öncesi 12 nolu numune (% 18 paso, 60 d/dk, $R_a = 0,280 \mu\text{m}$), d) Haddeleme sonrası 12 nolu numune ($R_a = 0,412 \mu\text{m}$).	54
Şekil 3.12. Yağlı olarak farklı hız ve pasolarda yapılan haddeleme sonucu elde edilen yüzey topoğrafyaları. a) Haddeleme öncesi 13 nolu numune (% 2 paso, 5 d/dk, $R_a = 0,348 \mu\text{m}$), b) Haddeleme sonrası 13 nolu numune ($R_a = 0,253 \mu\text{m}$), c) Haddeleme öncesi 24 nolu numune (% 25 paso, 60 d/dk, $R_a = 0,304 \mu\text{m}$), d) Haddeleme sonrası 24 nolu numune ($R_a = 0,643 \mu\text{m}$). ..	55
Şekil 3.13. Ezme oranı, hız ve yağlama durumunun pürüzlülük transferi üzerine etkisi.	56
Şekil 3.14. Ezme oranı – pürüzlülük ilişkisi.	57
Şekil 4.1. Haddeleme düzeneği.	59

Şekil 4.2. Hadde merdanesi.	60
Şekil 4.3. Numune hazırlama.	61
Şekil 4.4. Numune yağlama işlemi.	62
Şekil 4.5. Haddeleme düzeneği paso ayar mekanizması.	63
Şekil 4.6. Komparatör saati yardımıyla hassas paso ayarı.	63
Şekil 4.7. Kalınlık ölçümü.	65
Şekil 4.8. Merdane yüzey pürüzlülük ölçümü.	66
Şekil 4.9. Malzeme yüzey pürüzlülük ölçümü.	67
Şekil 4.10. Mitutoyo SJ-410 model yüzey pürüzlülük ölçme cihazı.	69
Şekil 4.11. Nanovea marka optik profil ölçme cihazı.	70
Şekil 5.1. Yağlamanın pürüzlülük transferi ve haddeleme kuvveti üzerine etkisi (ERD6112).	71
Şekil 5.2. Yağlamanın pürüzlülük transferi ve haddeleme kuvveti üzerine etkisi (ERD7114).	72
Şekil 5.3. Haddeleme hızının pürüzlülük transferi üzerine etkisi (ERD6112).	73
Şekil 5.4. Haddeleme hızının pürüzlülük transferi üzerine etkisi (ERD7114).	74
Şekil 5.5. Haddeleme kuvvetinin pürüzlülük transferi üzerine etkisi.	75
Şekil 5.6. Hızın haddeleme kuvveti üzerine etkisi.	77
Şekil 5.7. Merdane pürüzlülüğünün haddeleme kuvveti üzerine etkisi.	78
Şekil 5.8. Malzeme tipinin haddeleme kuvveti üzerine etkisi.	79
Şekil 5.9. Malzeme kalınlığının haddeleme kuvveti üzerine etkisi.	79
Şekil 5.10. Düşük hızda deneysel standart sapma değişimi (10 d/dk).	81
Şekil 5.11. Yüksek hızda deneysel standart sapma değişimi (50 d/dk).	81
Şekil 5.12. Yüksek hızda deneysel standart sapma değişimi (50 d/dk).	82
Şekil 5.13. A/0,9/3,4/10/700/Y şartlarında haddeleme.	82
Şekil 5.14. A/0,9/3,4/10/700/K şartlarında haddeleme.	83
Şekil 5.15. Deneysel standart sapma (ERD6112- az pürüzlü merdane ile).	83
Şekil 5.16. Deneysel standart sapma (ERD6112- çok pürüzlü merdane ile).	84
Şekil 5.17. Deneysel standart sapma (ERD7114- az pürüzlü merdane ile).	84
Şekil 5.18. Deneysel standart sapma (ERD7114- çok pürüzlü merdane ile).	84
Şekil 5.19. A/1,8/3,4/10/350/Y şartlarında haddeleme.	85
Şekil 5.20. A/1,8/3,4/10/700/Y şartlarında haddeleme.	86

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 4.1. Hadde Merdaneleri.....	60
Çizelge 4.2. Malzeme Özellikleri.....	61
Çizelge 4.3. Kimyasal Bileşim.....	61
Çizelge 4.4. Haddeme Parametreleri ve Notasyon.....	62
Çizelge 4.5. Merdane Pürüzlülük Ölçümleri.....	66
Çizelge 4.6. Malzeme Pürüzlülük Ölçümleri.....	70

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

R_a : ortalama yüzey pürüzlülüğü

RP_c : Tepecik (pik) sayısı

V_o : malzeme giriş hızı

V_f : malzeme çıkış hızı

V_r : merdane çevre hızı

L : temas yayı uzunluğu

h_o : giriş kalınlığı

h_f : çıkış kalınlığı

μ : sürtünme katsayısı

w : malzeme genişliği

Y_{ort} : ortalama gerilme

e_1 : malzeme giriş kalınlığı

e_2 : malzeme çıkış kalınlığı

t_1 : şerit giriş gergisi

t_2 : şerit çıkış gergisi

σ : malzemenin akma gerilmesi

P : haddeleme basıncı

n : stend sırası

m^3/h : saatte metreküp

c_1, c_2 : eşik değerler

ϕ : çap

$M1$: 1 numaralı merdane

$M2$: 2 numaralı merdane

$M3$: 3 numaralı merdane

$M4$: 4 numaralı merdane

$3d$: 3 boyutlu

KISALTMALAR

- BOF : Basic Oxygen Furnace (Bazik Oksijen Fırını)
- CPL : Continuous Pickling Line (Sürekli Asitleme Hattı)
- CAL : Continuous Annealing Line (Sürekli Tavlama Hattı)
- TCM : Tandem Continuous Mill (Sürekli Tandem Hattı)
- HV : Hardness Vickers (Vickers Sertliği)
- HSM : Hot Strip Mill (Sıcak Şerit Hadde)
- HSS : High Speed Steel (Yüksek Hız Çeliği)
- SHSS : Semi High-Speed Steel (Yarı Yüksek Hız Çeliği)
- ESR : Electro Slag Refining-Remelting (Elektriksel Cüruf Arıtma)
- 2-hi : 2 high (2'li hadde düzeni)
- 3-hi : 3 high (3'lü hadde düzeni)
- 4-hi : 4 high (4'lü hadde düzeni)
- 6-hi : 6 high (6'lı hadde düzeni)
- 4-hi : 4 high (4 merdaneli hadde düzeni)
- DC : Direct Current (Doğru Akım)
- SBT : Shot Blast Texturing (Kumlama - Blastırlama)
- EDT : Electro-Discharge Texturing (Elektriksel Deşarj Pürüzlendirmesi)
- LT : Laser Texturing (Lazerle Pürüzlendirme)
- EBT : Electron-Beam Texturing (Elektron Işınıyla Pürüzlendirme)
- ECD : Electro-Chrome Deposition-TOPOCROM (Krom ile Pürüzlendirme-
Topokrom)
- PDT : Pomini Digital Texturing (Pomini Dijital Pürüzlendirme)
- AFM : Atomic Force Microscope (Atomik Kuvvet Mikroskobu)
- KBÜ : Karabük Üniversitesi
- BAP : Bilimsel Araştırma Projeleri
- PTO : Pürüzlülük Transfer Oranı
- FEM : Finite Element Method (Sonlu Elemanlar Yöntemi)
- IFS : Interstitial Free Steel (Arayer Atomsuz Çelik)
- WS : Waldrich Siegen
- AGC : Automatic Gauge Control (Otomatik Kalınlık Kontrolü)

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Yassı çelik üretimi; elektrik ark ocaklarında hurda demirin elektrik enerjisi yardımıyla ergitilmek suretiyle başlayabileceği gibi, sıvı ham demirin entegre demir-çelik tesislerinde üretilmesi ile de başlayabilir. Yüksek fırınlarda cevherin kok kömürüyle ergitilmesi sonucu elde edilen sıvı ham demir cüruftan arındırılarak torpidolara alınır. Torpidolardaki sıvı ham demir kükürt giderme tesislerinde kükürdü giderildikten sonra çelikhaneye nakledilir. Çelikhane; istenilen kaliteye göre farklılık gösteren çeşitli alaşım elementlerinin yanı sıra hurda eklenerek, saf oksijen üfleme yöntemi ile sıvı ham demirdeki karbon oranı düşürülür. Böylelikle sıvı ham demir, sıvı çeliğe dönüştürülmüş olur. Üretilen sıvı çelik, sürekli döküm tesislerinde kalıplara kesintisiz olarak dökülüp, istenilen ebatlarda katılaştırılarak slab veya kütük halinde yarı mamul haline getirilir. Sürekli döküm tesislerinde slab şeklinde dökülen çelik, fırınlarda yaklaşık 1200 °C sıcaklığa kadar tavlandıktan sonra sıcak haddelenerek tesisin kapasitesine göre 1 mm kalınlığa kadar inceltir ve sarılarak bobin haline getirilir. Sıcak haddeleme esnasında malzeme yüzeyinde oluşan tufalın (scale) soğuk haddeleme öncesinde malzemedan temizlenmesi gerekir. Bobin açılarak sürekli asitleme hattında (CPL) sülfürik asitle ya da hidroklorik asitle muamele edilerek temizlendikten sonra malzeme %25-80 oranında soğuk haddelenerek inceltirilen soğuk ürün, ihtiyaca göre galvanizli ya da kalay-krom kaplı ambalaj çeliği haline getirilir [1,2].

Soğuk haddelenen malzemenin taneleri uzar, deformasyon sertleşmesine uğrar ve şekillendirilebilme kabiliyetini kaybeder. Bu malzeme çok sert (full hard) bir yapıya sahiptir ve ancak süneklik ve düzlemsellik (her yerinde homojen kalınlık) gerekmeyen yerlerde kullanılabilir. Malzemenin bu haliyle bir ısıtma işlemine tabi tutulması gerekmektedir. Sürekli tavlama hattında yaklaşık 600 °C sıcaklıkta tavlansın ve yeniden kristalleşmesi sağlanır. Soğuk haddelemeden dolayı tane yapısı anizotrop bir hal alan

malzeme, tavlama ile izotrop bir yapıya dönüşmüş olur [1,3]. Tavlama sonrası malzeme sıcak çinko banyolarına daldırılarak galvaniz kaplama (Hot Dip Galvanising Process) işlemine tabi tutulur. Kullanım alanına göre malzeme kaplanmadan bu haliyle de kullanılabilir.

Yüzey görünümünün birinci derecede önemli olduğu, düzlemselliğin, yüzey pürüzlülüğünün ve yüzey kalitesinin önemli olduğu yerlerde malzemenin temper haddeden (skin-pass rolling) geçirilmesi gerekmektedir. Temper haddeleme: yaklaşık %1 uzamanın verildiği bir ütüleme haddesidir. Esasen incelmenin olmadığı bu haddede akma gerilmesinin üzerine çıkılarak ezilen malzeme, temper hadde sonrasında deformasyon yaşanmasına uğraması beklenmeden nihai form verilirse belirgin akma görülmeyeceğinden dolayı daha iyi bir yüzey kalitesi elde edilmiş olur. Bobin kırıkları, malzeme yüzeyindeki dalgalı görünüm ve lüders bantlarının izleri bu haddeleme ile ortadan kaldırılır [4]. Bu haddeden sonra malzeme yağlanarak bobin olarak sarılır ve paketlenerek müşteriye sevkedilir. Temper hadde, malzeme yüzeyinin pürüzlü olması istenen durumlarda pürüzlendirilmiş merdaneler ile yapılır.

Bu çalışmada, bir soğuk haddeleme türü olan temper haddeleme sırasında pürüzlü merdaneden malzemeye pürüzlülüğün ne oranda sirayet ettiği incelenmiştir. Bu sirayeti etkileyen birçok faktör söz konusudur. Bu faktörlerden yağlama durumunun, ezme miktarının, merdane pürüzlülük değerinin, haddeleme hızının ve haddeleme kuvvetinin pürüzlülük transferi üzerine etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Haddeleme kuvvetini yükselten her faktörün pürüzlülük sirayetini arttırdığı sonucuna varılmıştır. Literatürde soğuk haddelenmiş sacların pürüzlülük homojenliği üzerine bir araştırma ile karşılaşılmamıştır.

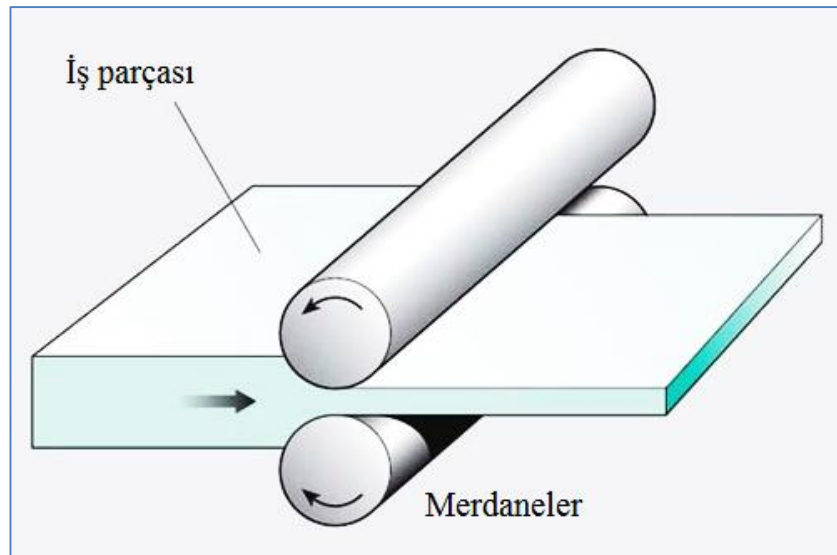
Bu çalışmada ayrıca, soğuk haddelenen malzemelerin yüzeylerinde elde edilen pürüzlülüğün standart sapması da hesaplanmış ve 3 boyutlu yüzey görüntüleri incelenmiştir. Yağlı haddeleme durumunda, küçük ezme oranlarında ve ince malzeme kullanılması halinde standart sapmanın daha küçük çıktığı görülmüştür.

BÖLÜM 2

HADDELEME

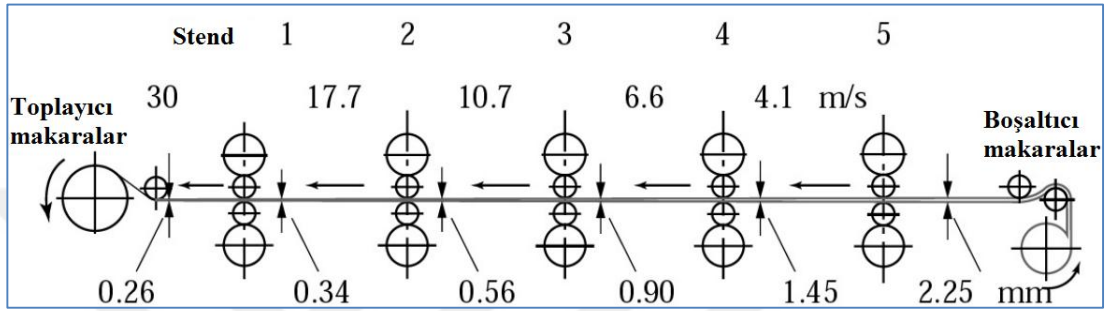
Malzemeleri, eksenleri etrafında dönen iki merdane arasından geçirerek yapılan plastik şekil verme işlemine haddeleme denir. Haddeleme: üretim hızı ve sürekliliği ile işlemin ve ürün kontrolünün kolay oluşu nedeniyle en çok kullanılan plastik şekil verme yöntemidir. Plastik deformasyonun yapıldığı malzemelerin %90 kadarı haddeleme ile şekillendirilir [1,5].

Şekil 2.1’de iki adet merdane den oluşan bir hadde düzeneği görülmektedir. Zıt yönde dönen merdaneler arasındaki açıklık (roll gap) malzemenin giriş kalınlığından daha az olduğundan malzeme kalınlığında azalma olur. Tek geçişte nihai kalınlığa ulaşamadığında birden fazla sayıda geçiş yapılır. Malzemenin merdaneler arasından her geçişine paso denir.



Şekil 2.1. Haddeleme işlemi [6].

Haddeleme işleminin çoğu zaman hadde tezgahlarının (stend) bir hat üzerinde ardarda dizilmesi ile yapılır. Bu düzene tandem (continuous mill) adı verilir. Şekil 2.2’de herbiri 4’lü düzene sahip 5 adet stenden oluşan bir tandem hattı görülmektedir. Tandem hattına 2,25 mm kalınlıkta giren malzeme her stendde biraz daha inceltilecek şekilde 0,26 mm kalınlıkta çıkmaktadır. Malzeme incelidikçe hızı artmaktadır. Girişteki hızı 4,1 m/s olan malzemenin 30 m/s hıza ulaştığı görülmektedir [7].



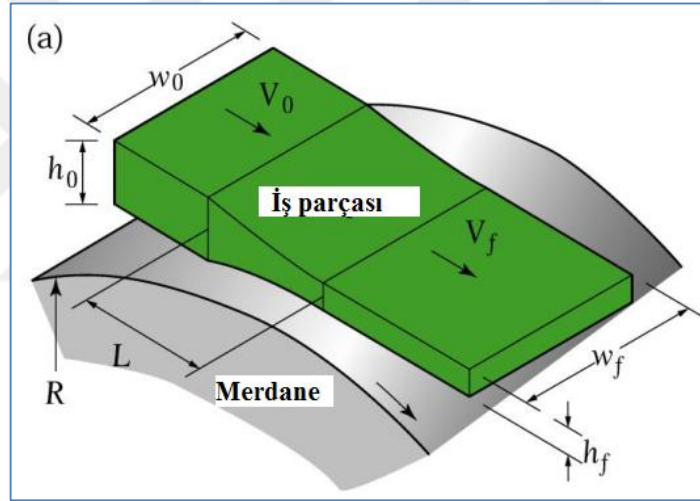
Şekil 2.2. 4’lü Tandem hadde düzeni [7].

Stendler arasında malzeme kopmasını yahut katlanarak yığılmasını önlemek için stendler arası gergi kuvvetinin hassas bir şekilde ayarlanması gerekmektedir. Sıcak haddelemede looper sayesinde ayarlanan bu gergi kuvveti malzemenin boyutsal tamlığı ve ardışık stendler arasında düzgün bir şekilde akması açısından önemlidir. Gerginin gereğinden yüksek olması halinde düzgün bir malzeme akışı sağlanamayacağı yanı sıra enlemesine büzülme, kalınlıkta azalma ve hatta kenar dalgası oluşur. Bu yüzden şerit gergisi, istenen değerde işlem boyunca sabit tutulmalıdır [8]. Haddelenen malzemenin kalınlığı azalırken genişliğinde az da olsa bir artış olur. Genişlikteki bu artışa yayılma (spreading) denir. Yayılmanın miktarı haddelenen malzemenin boyutlarına, uygulanan deformasyon oranına ve merdanelerin çapına bağlı olarak değişir.

2.1. SÜRTÜNME KUVVETLERİ

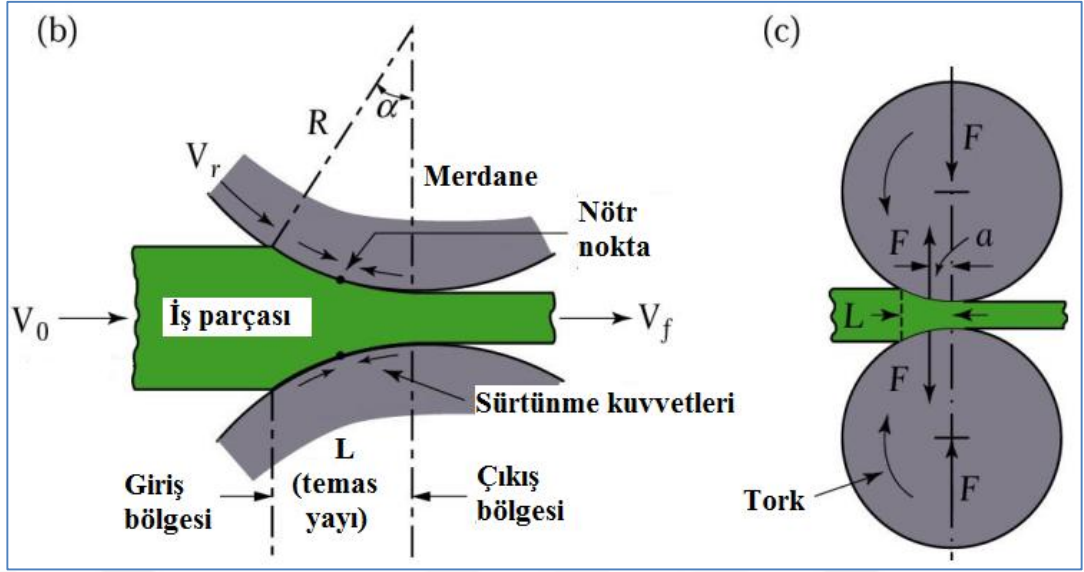
Yassı mamul haddeleme işleminin şematik gösterimi Şekil 2.3’de verilmiştir. Şekil 2.3a’da h_0 kalınlığındaki malzeme, aralarında bu kalınlıktan daha az mesafe olan merdanelerin arasından geçtiğinde h_f kalınlığına düşer. Bu sırada merdaneler sabit V_r çevre hızı ile dönerken malzemenin giriş hızı V_0 giderek artarak V_f çıkış hızına

ulaşmaktadır. Çünkü birim zamanda geçen malzeme miktarı (debi) sabit olmasına rağmen kesit daralmaktadır. Malzemenin merdaneler arasından geçerken hızı, tek bir noktada merdanelerin çizgisel hızına eşit olur. Bu noktaya nötr nokta (no-slip point) denir. Bu noktaya kadar malzeme hızı merdane hızından küçük; bu noktadan sonra ise büyüktür. Bu nedenle merdane ile malzeme arasında nötr nokta hariç L temas yayı boyunca izafi bir sürtünme oluşmaktadır. Sürtünme kuvveti nötr noktadan önce malzemeyi içeri çekecek yönde; sonra ise ters yöndedir (Şekil 2.3 (b)) [7]. Merdanelerin malzemeyi içeri çekebilmeleri için, yani haddeleme işleminin gerçekleşebilmesi için zıt yönlü bu sürtünme kuvvetlerinin bileşkesinin çıkış yönüne doğru olması gerekmektedir. Bu sürtünmeden ve plastik deformasyondan dolayı haddeleme soğuk dahi yapılsa malzeme sıcaklığı 50-65 °C yükselebilir.



a) İşlemin şematik gösterimi (üst merdane gösterilmemiş)

Şekil 2.3. Yassı mamul haddeleme işlemi.



b) Malzeme yüzeyine etki eden sürtünme kuvvetleri, c) Merdanelere etki eden haddeleme kuvveti (F) ve tork [7].

Şekil 2.3. (devam ediyor).

Her ne kadar haddeleme işlemi için sürtünme kuvveti gerekli ise de bu durum haddeleme kuvvetlerini ve enerji gereksinimini artırmaktadır. Ayrıca yüksek sürtünme kuvvetlerinden dolayı malzeme yüzeyinin zarar görmesi söz konusudur. Uygun bir yağlayıcı kullanımıyla sürtünmenin azaltılması sağlanabilir. Ancak bunun sıcak haddelemede pratik bir uygulanabilirliği söz konusu değildir.

Malzemenin giriş ve çıkış kalınlıkları arasındaki fark ($h_o - h_f$) olarak tanımlanan, mümkün olan en büyük paso (ezme miktarı); sürtünme katsayısı (μ) ile merdane çapının (R) bir fonksiyonudur ve Eşitlik 2.1'de verilmiştir.

$$h_o - h_f = \mu^2 R \quad (2.1)$$

Bu eşitliğe göre daha fazla ezme yapabilmek için sürtünme katsayısının ve merdane çapının büyütülmesi gerektiği açıktır. Bu durum kötü arazi şartlarında kaymadan ilerleyebilen büyük çaplı ve kalın dişli traktör ve off-road araç tekerlekleriyle benzerlik göstermektedir [7].

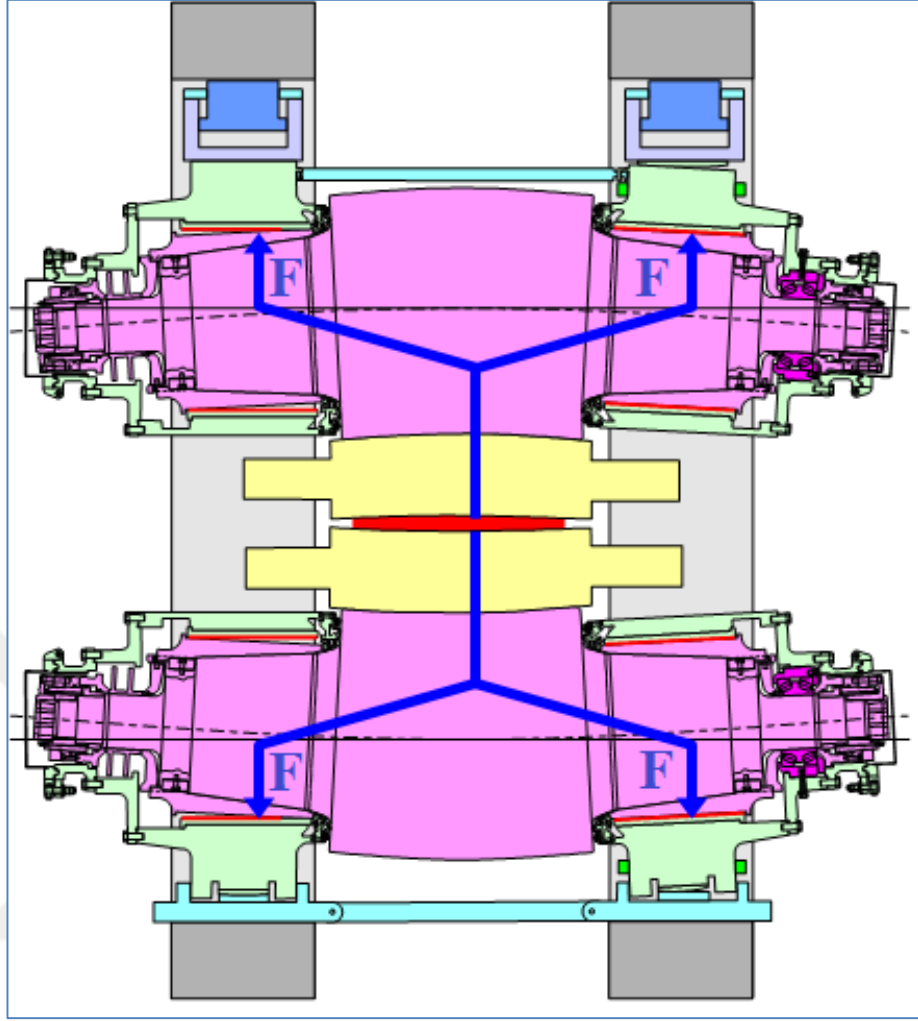
2.2. HADDELEME KUVVETİ

Malzemeyi inceltmek için uygulanması gereken kuvvetin (F) malzemeye dik istikamette etki ettiği kabul edilir (Şekil 2.3 (c) ve Şekil 2.4). Yassı mamul haddede bu kuvvet, Eşitlik 2.2 ile yaklaşık olarak hesaplanabilir.

$$F = L \cdot w \cdot Y_{ort} \quad (2.2)$$

Burada L : temas yayı uzunluğunu, w : malzeme genişliğini (Şekil 2.3 (a)), Y_{ort} ise deformasyon sırasında malzemede oluşan ortalama gerilmeyi (akma dayanımı) göstermektedir. Bu eşitlikte sürtünme hesaba katılmadığından dolayı hesaplanan kuvvet, gerçek kuvvetten daha düşük çıkar ve yüksek sürtünme katsayılarında bu fark daha da artar.

Haddeleme kuvvetleri merdanelerin bükülmesine ve temas bölgesinde düzleşmesine (flattening) neden olur. Bu durum, haddelenen malzemenin düzgün bir kalınlığa sahip olması önünde bir problem teşkil etmektedir. Yüksek hadde yükleri Şekil 2.4'de görüldüğü gibi merdaneler ve yataklar üzerinden gövdeye (housing) iletilir. Gövde yeterince rijit değilse bu yük altında elastik şekil değişimine uğrayarak merdane açıklığının 1mm kadar büyümesine neden olabilir. Bu olaya hadde sıçraması (mill stretch) denir. Malzeme kalınlığına bağlı olarak merdane açıklığı hesaplanırken bu husus göz önünde bulundurulmalıdır. Yani merdane açıklığı, elde edilmek istenen mamul kalınlığından hadde sıçraması kadar daha küçük seçilmelidir [7,9].



Şekil 2.4. Haddелеme kuvvetinin dağılımı [10].

Haddелеme kuvvetini azaltmak için:

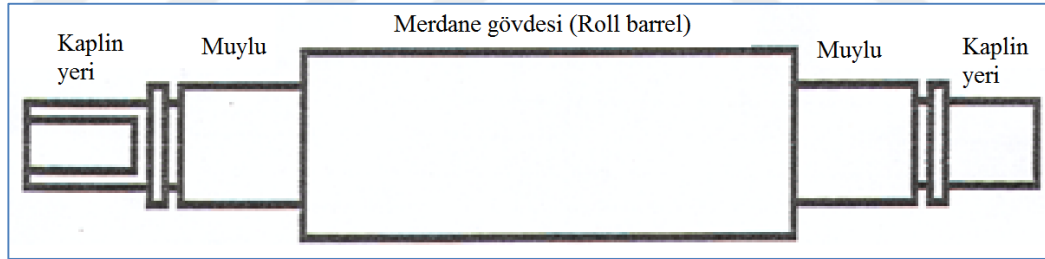
- Sürtünme azaltılmalı,
- Küçük çaplı merdane kullanılmalı (ezilen malzeme hacmini azaltmak için),
- Her bir pasoda daha küçük ezme yapılmalı (ezilen malzeme hacmini azaltmak için),
- Malzemenin dayanımını düşürmek için yüksek sıcaklıkta haddелеme yapılmalı,
- Malzeme gergi altında haddelenmelidir.

Gergili haddелеme sayesinde plastik şekillendirme için malzemede daha düşük basma kuvvetinin oluşturulması yeterli olur. Özellikle yüksek dayanımlı malzemelerin haddelenmesinde gergi kuvvetleri daha önemlidir. Bu gergi kuvveti girişte (back

tension) veya çıkışta (front tension), ya da hem girişte hem de çıkışta verilebilir. Giriş gergisinin hadde kuvvetini düşürmedeki etkisi çıkış gergisine kıyasla yaklaşık 2 kat daha büyüktür. Giriş taraftaki gergi kuvvetinin artırılması için boşaltma makaraları yavaşlatılır; çıkış taraftaki gerginin artırılması için toplayıcı makaralar hızlandırılır (Şekil 2.2). Ayrıca sıcak şerit haddelerde (HSM) stendler arasında malzeme gergi kuvvetini sabit tutmaya ve hızı ayarlamaya yarayan gergi makaraları (looper) vardır. Bu makaralar stendler arasında düzgün bir malzeme akışını sağlayarak malzeme kalitesini ve üretimi artırmakta büyük rol oynar [7,11].

2.3. HADDE MERDANELERİ

Haddeleme işleminin en önemli aracı hadde merdaneleridir. Her bir merdane Şekil 2.5’de görüldüğü gibi üç ana kısımdan meydana gelir. Bunlar: haddeleme işleminin üzerinde yapıldığı gövde, gövdeye destek olan ve haddeleme yüklerini taşıyan muylular ile tahrik motorlarının döndürme momentini karşılayan bağlantı uçlarıdır (kaplin yeri).

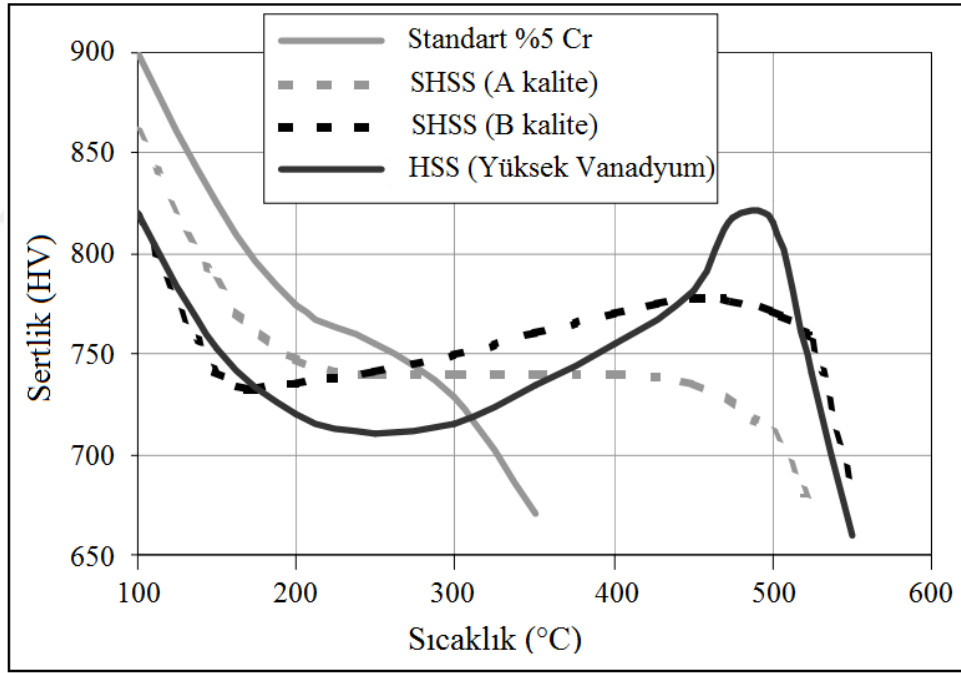


Şekil 2.5. Bir hadde merdanesinin bölümleri.

Merdane malzemesinin yüksek dayanım ve aşınma direncine sahip olması gerekmektedir. En yaygın kullanılan merdane malzemeleri dökme demir, dökme çelik ve dövme çeliktir. Dövme çelik merdaneler yüksek maliyetlerine karşın yüksek dayanıma, rijitliğe ve tokluğa sahiplerdir. Küçük çaplı sendzimir iş merdanelerinin yapımında tungsten karbid kullanılmaktadır.

Soğuk hadde merdanelerinin çoğunluğu standart %3 ya da %5 kromlu dövme çelikten imal edilir. Sıcak ve soğuk hadde merdane imalatında krom, wolfram ve vanadyum gibi kuvvetli karbid yapıcı alaşım elementleri içeren HSS ve SHSS kalite kullanımı

giderek yaygınlaşmaktadır. Yapısındaki bu elementler sayesinde sertliğini kaybetmeden (740-820 HV) yüksek sıcaklıklarda (450-550 °C) temperlenebilmektedir (Şekil 2.6). Bu da merdaneyi bant kopması gibi olası haddeleme kazalarında hasarlanmaya ve ısıl çatlaklara karşı daha dirençli bir hale getirmektedir. Bu kaliteler ESR teknolojisi ile üretilir ve temperlenmiş martenzit yapı içerisinde gömülü halde ve homojen dağılmış karbidler içerir. Sert karbidler merdanenin aşınma direncini artırmaktadır. Bu da merdane pürüzlülüğünün daha uzun soluklu olmasının yanı sıra servis sonrası taşlama miktarının standart kalite merdanelerin %25 mertebelerine düşmesini sağlamaktadır. Bu avantajıyla HSS kalite, merdanelerin krom kaplanmasına ihtiyaç bırakmamaktadır. Ayrıca sertlik derinliği %3-5 kromlu standart merdanelerde yüzeyden 50 mm'ye kadar iken; HSS merdanelerde 60 mm'ye kadar çıkıyor olması, bu merdanelerin daha küçük çaplara kadar kullanılabilmesini sağlamaktadır [12,13].



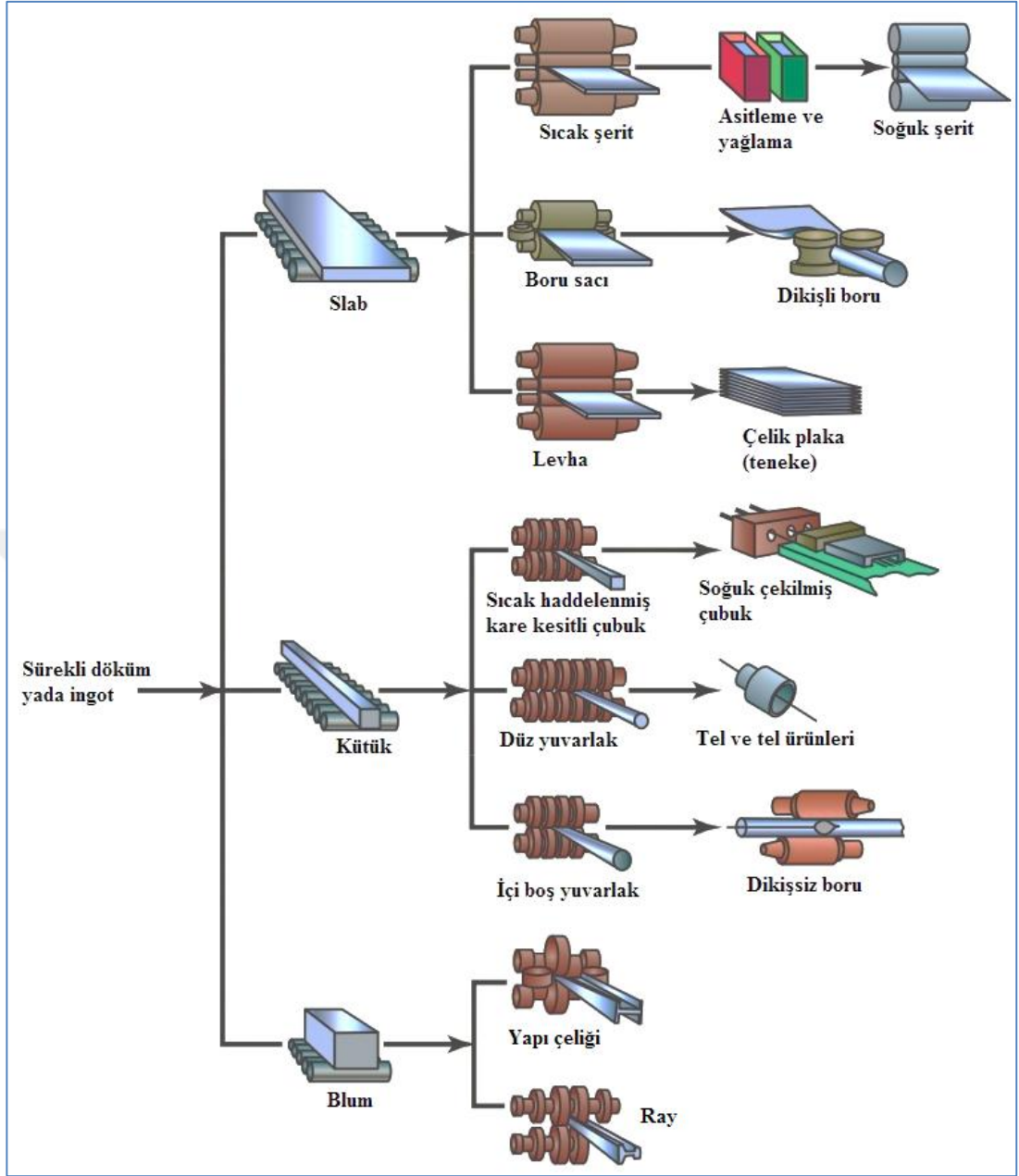
Şekil 2.6. Muhtelif merdane kaliteleri için temperleme sıcaklık eğrisi [12].

Ara stendlerde merdane pürüzlülüğü 0,5 µm civarındadır. Bobin sarılırken teleskobik olmaması için son stendlerde çalışan merdaneler 3-5 µm gibi daha yüksek pürüzlülükte olması gerekir. Bu pürüzlülük taşlama sonrası yapılan ilave pürüzlendirme işlemleri ile sağlanır (bkz. 2.6.5. Pürüzlülük ve Soğuk Haddelemede Yüzey Pürüzlendirme). Malzeme yüzeyindeki pürüzlülük sayesinde galvanizleme sırasında çinko tabakasının

malzeme yüzeyine daha iyi yapışmasının yanı sıra; sürekli tavlama işlemi esnasında şeritle taşıyıcı makaralar arasında hava sirkülasyonunu sağlayarak yapışmanın önüne geçilmiş olur [14].

Haddeleme işleminde ezme yaparak malzemeye istenen şekli merdaneler verir. Bu yüzden merdaneler, malzemeye verilmek istenen şekle uygun olarak işlenmelidir. Yassı mamul haddelemek için kullanılan merdaneler düz ve silindiriktir (Şekil 2.5). Merdanelerin yüzeyleri haddeleme sırasında yüksek oranda deformasyon sertleşmesine uğrar. Sertleşmiş ve yorulmuş bu tabaka servis sonrasında taşlanarak alınır ve istenen yüzey özellikleri tekrar kazandırılır. Eş (beraber) çalışan merdane çaplarının birbirine tam olarak eşit olması son derece önemlidir (Maksimum çap farkı 0,03 mm). Bu yüzden taşlama sonrası alınacak çap ölçüsü hassas olmalıdır.

Ray, yuvarlak yahut yapı çeliği için hadde merdaneleri üzerine kalibreli yivler açılır. Bu haddelemeye şekil haddeleme ya da profil haddeleme denir. Muhtelif haddeleme işlemleri Şekil 2.7'de şematize edilmiştir.

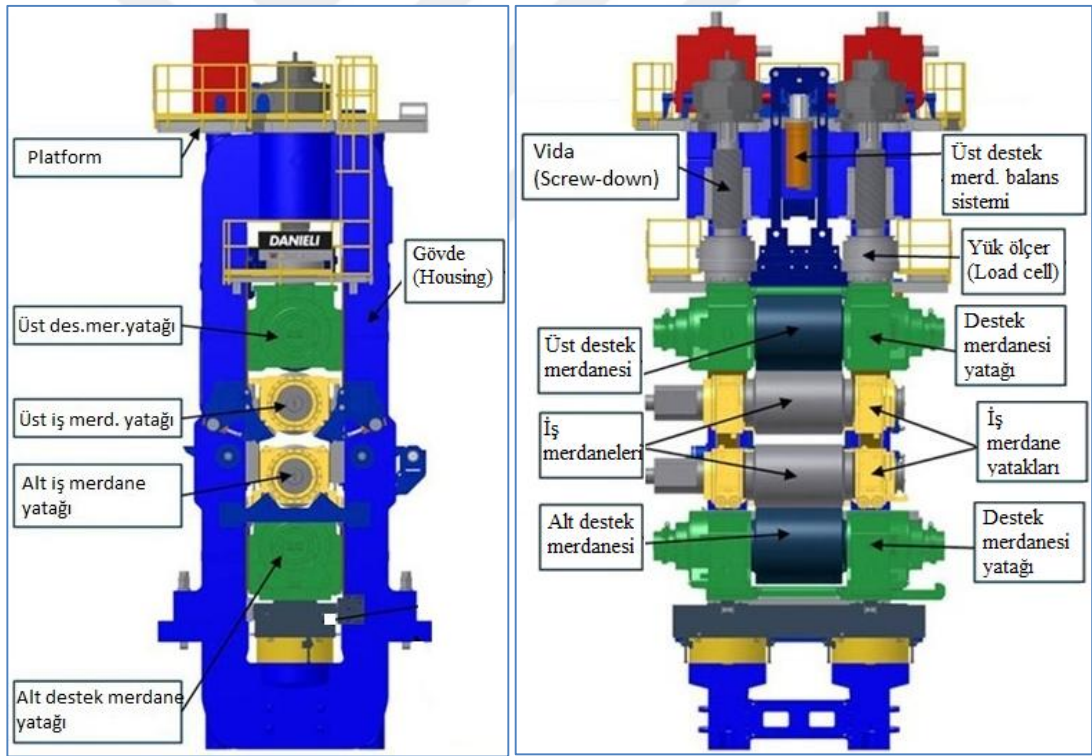


Şekil 2.7. Çeşitli yassı ve şekil haddeleme işlemleri [7].

2.4. HADDE DÜZENLERİ

Bir hadde tezgâhı genel olarak merdaneler ve yatakları ile bunları içeren ve hadde yüklerini karşılayan bir gövdeden oluşur (Şekil 2.8). Bunların dışında merdanelerin istenen hız ve torkta dönmesini sağlayan bir tahrik sistemi (main drive train) gereklidir. Merdaneler arasındaki açıklığı belirlemek için üst merdane takımının aşağı-yukarı yönde hareketini sağlayan vidalı sistem (roll gap actuators) ile haddeleme kuvvetini

ölçen bir yük hücresi (load cell) bulunmaktadır. Malzemenin geçtiği hat (pass line) yüksekliğini ayarlayan bir mekanizma (pass line adjustment mechanism) vardır. Merdaneleri aksel yönde kaydırarak (shifting) ve bükerek (roll bending) malzeme profilini ve düzlemselliğini (flatness) sağlayan sistem (strip profile and flatness actuators), yassı mamul haddehanelerinde mamul kalitesini doğrudan etkilemektedir. Haddelemede çok yüksek kuvvetler söz konusu olduğundan rijit bir konstrüksiyon ve çok güçlü motorlar söz konusudur. Haddehanede ezme işleminin ardarda yapılabilmesi için çok sayıda tezgâhın Şekil 2.2’de şematize edildiği gibi bir hat şeklinde kurulması gerektiğinden modern bir haddehane çok büyük yatırımlar gerektirmektedir [5,15]. Yassı mamul haddelemekte kullanılan, iki adet iş merdanesi ile iki adet destek merdanesinden oluşan 4’lü hadde düzeneği Şekil 2.8 ve Şekil 2.9 (c)’de gösterilmiştir.



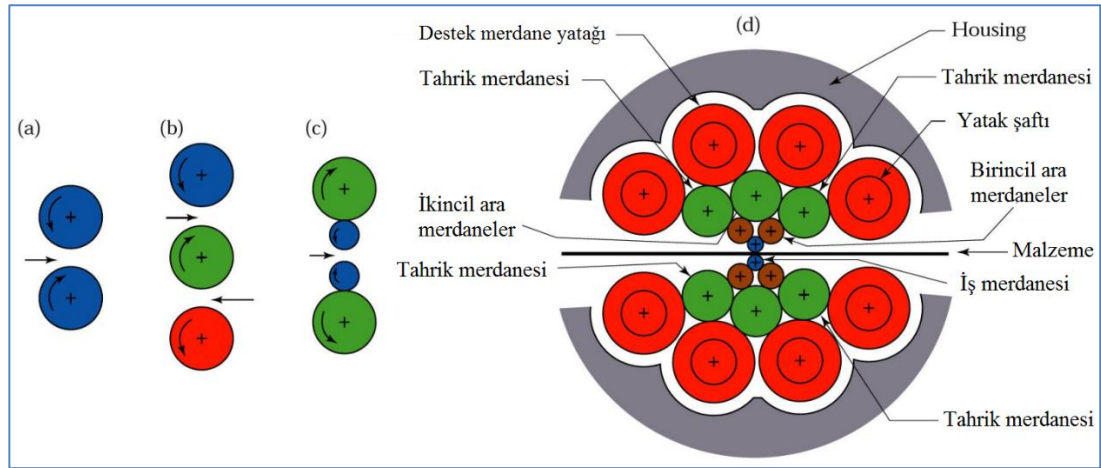
(a)

(b)

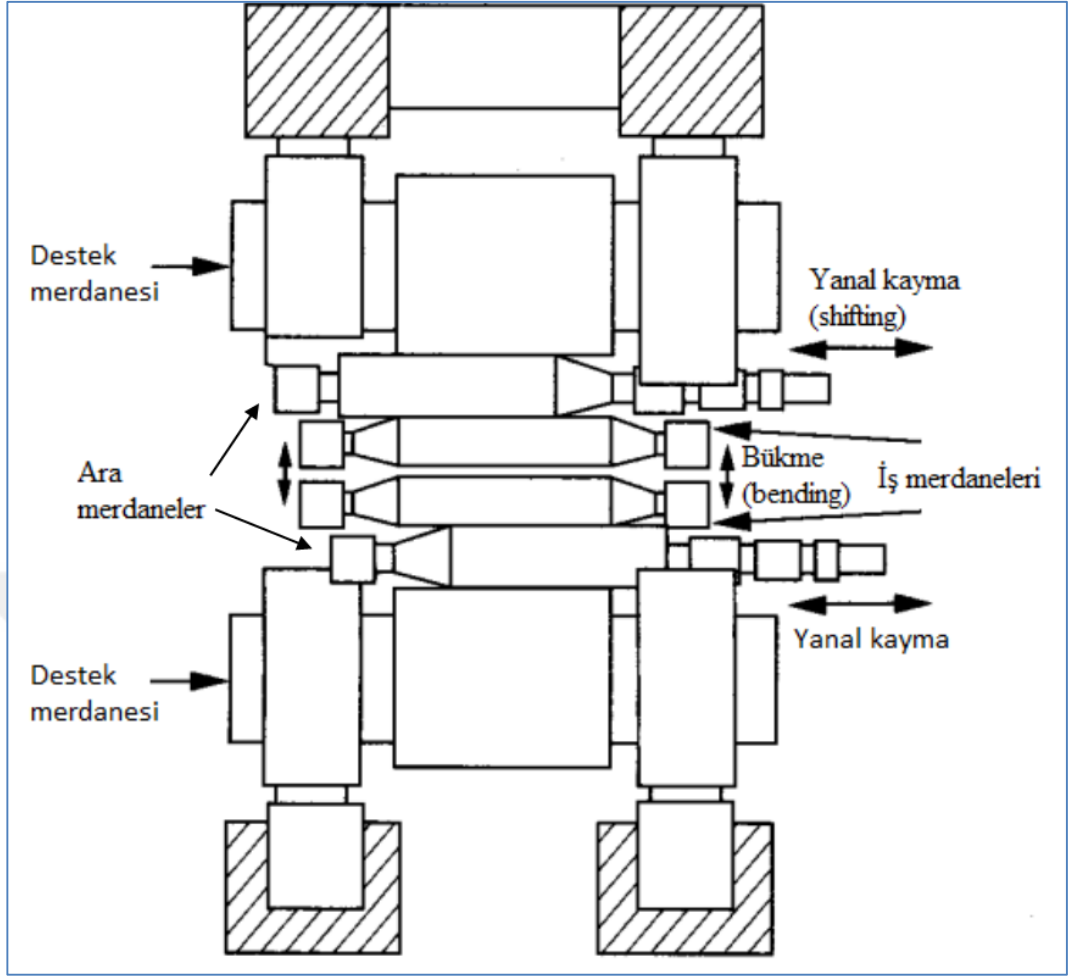
Şekil 2.8. Tipik bir yassı mamul hadde tezgâhı. a) yan görünüş, b) ön görünüş [16].

Hadde tezgâhları genellikle merdanelerin sayısı ve düzenlenişine göre sınıflandırılır. En basit ve en sık rastlanan tip 2’li (2-hi) hadde tezgâhıdır (Şekil 2.9 (a)). Aynı çapta

iki merdaneden oluşan bu düzende malzeme bir yönde geçtikten sonra haddelemeye devam edebilmek için malzemenin giriş tarafa aktarılması gerekmektedir. Bu zorluğu gidermek için her iki yönde de dönebilen tersinir 2'li (steckel mill-reversible mill) hadde kullanılabilir. Sıcak haddehanelerde fırından çıkan malzemenin ilk haddelendiği kaba hadde (roughing mill) bu tiptedir. Ancak dönen merdanelerin durdurulup ters yönde tekrar hızlandırılması zaman ve enerji kaybına yol açar. Bu soruna çözüm olarak 3'lü (3-hi) veya 4'lü (4-hi) merdane düzenleri geliştirilmiştir (Şekil 2.9 (b) ve (c)). 3'lü düzende alt ve üst merdaneler tahrik edilirken orta merdane sürtünme ile döner. Küçük merdanelerin kullanılması ile haddeleme için gerekli kuvvet azalır. Ancak küçük çaplı merdanelerin dayanımları ve rijitlikleri yetersiz olduğundan eğilmeyi önlemek için destek merdanelerinin kullanılması zorunludur. 4'lü merdane düzeninde haddelemeyi gerçekleştiren (malzemeye temas eden) küçük merdaneler iş merdaneleri (work roll), büyükler ise destek merdaneleri (back-up roll) olarak anılır. Soğuk haddelemede kullanılan 6'lı (6-hi) yapıda, iş ve destek merdaneleri arasında ara merdaneler vardır (Şekil 2.10). Yüksek dayanımlı malzemelerin soğuk haddelenmesinde birden fazla destek merdanesinin kullanıldığı sendzimir (cluster) merdane düzeni kullanılır (Şekil 2.9 (d)). Bu düzende iş merdanelerinin çapı küçük olduğundan nispeten düşük haddeleme kuvveti ve güce gereksinim duyulur. Aşındığında küçük çaplı iş merdanelerini değiştirmek daha kolay ve daha ucuzdur [1,5,7].



Şekil 2.9. Merdane düzenleri. a) 2'li, b) 3'lü, c) 4'lü, d) sendzimir [7].



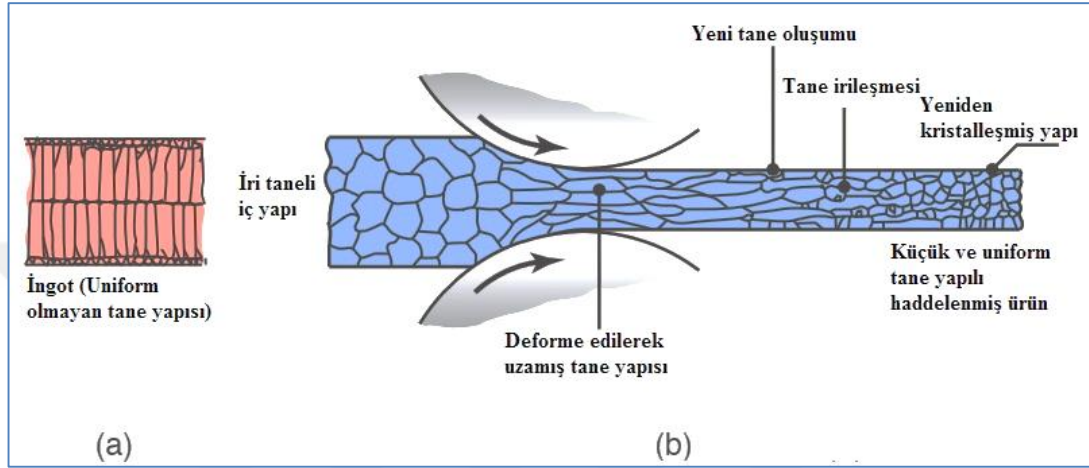
Şekil 2.10. 6'lı (6-hi) hadde düzeni [14].

2.5. SICAK HADDELEME

Yassı mamul üretim sürecinde çelikhaneden sonra sürekli döküm tesisleri ve ardından sıcak haddehane gelir. Sıcak haddelenerek 1 mm'ye kadar inceltilebilir malzeme piyasada siyah-kara sac (black sheet iron) olarak bilinir ve bu haliyle nihai ürün olarak birçok kullanım alanına sahiptir. Çoğunlukla inşaat ve iş makineleri imalatında, genel konstrüksiyon imalatında, kara ve demir yolu araçları imalatında, konteynır, depolama ve LPG tankı imalatında, basınçlı kap ve kazan imalatlarında, gemi içi ve omurgasında kullanılmaktadır. Yahut talebe göre ara ürün olarak soğuk haddeleme, normalizasyon ve kaplama gibi üretim süreçlerine devam edilebilir [17].

İngot ve slab, döküm yoluyla elde edildiğinden dolayı kalın ve uniform olmayan dendritik tane yapısına sahiptir (Şekil 2.11 (a)). Bu yapı gevrek ve kırılmandır ve iç

yapısında birçok porozite içermektedir. Yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerinde haddelenen slabın iç yapısı, taneleri uzatarak yönlendirilmiş ve ufalmış bir hal alır (Şekil 2.11 (b)). Malzemenin daha ince taneli ve şekillendirilebilir bir yapıya sahip olması, haddeleme esnasında gevrek tane sınırlarının kırılması ve poroziteler gibi iç kusurların kapanarak küçülmesinin bir sonucudur [1,7].



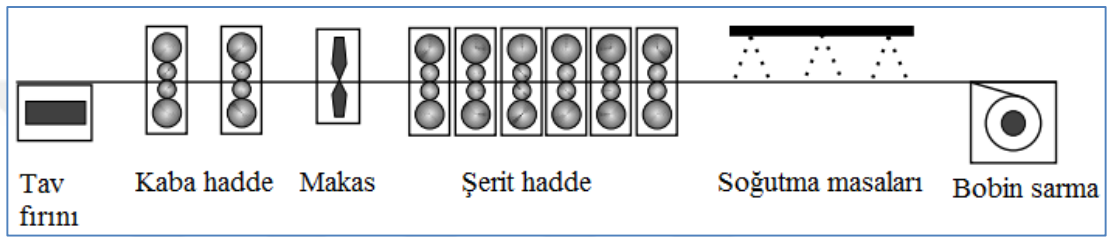
Şekil 2.11. Sıcak haddeleme. a) ingot (uniform olmayan iç yapısı), b) işlem sırasında tane yapısı değişimi [7].

Sıcak haddeleme sürecinde ilk ürün blum, kütük ya da slabdır (Şekil 2.7). Blum: kenarı en az 150 mm olan kare kesitlidir; slab ise dikdörtgen kesitlidir. Kütük (billet) de kare kesitli olup ölçüleri blumdan küçüktür. Slablar levha ya da saca haddelenirken blum şekil haddelemeye tabi tutularak ray veya profil gibi bir yapı çeliğine dönüştürülür. Kütükler de şekil haddeleme ile düz yuvarlak, çubuk ya da kangal (filmaşın) haline getirilir. Sıcak haddelenmiş düz yuvarlak malzemedan tel çekilir ve rod yapılır.

Slab, blum ve kütüğün sıcak haddelemeye tabi tutulmadan önce yüzeyinde oluşan tufal (demir oksit) tabakasının alınması (scarfing) gerekmektedir [3]. Aksi halde yüzeydeki tufal haddeleme esnasında malzemeye gömülerek yapıyı bozar. Ayrıca merdane yüzeylerinde de tahribata neden olur [1].

Sıcak haddehane: tav fırını, kaba hadde, şerit hadde (finishing mill), soğutma masaları (laminar cooling) ve bobin sarma (down coiler) birimlerinden oluşur (Şekil 2.12). Şerit hadde: 4'lü hadde düzenine sahip 6 ya da 7 adet stenden oluşmaktadır (Şekil 2.13).

Fırında yaklaşık 1200 °C'ye ısıtılan slab, kaba haddeden geçtikten sonra yaklaşık 1100 °C sıcaklıkta ve 30 mm kalınlığındadır. Malzeme incelerek uzadığından dolayı şerit haddeye girmeden önce sarılması gerekmektedir. Coil-box'ta sarılarak bobin haline getirilen malzemenin kuyruk tarafı başa getirilmiş ve ayrıca homojen bir sıcaklığa kavuşturulmuş olur. Malzeme şerit haddeden yaklaşık 900 °C'de yüksek hızlarda (30 m/s) sac halinde çıkarak soğutma masalarına gelir. Soğutma masalarında duşlama sistemiyle farklı hızlarda soğutularak istenen mekanik özellikler kazandırılan malzeme, yaklaşık 600 °C'de bobin sarma makinesinde sarılarak bobin haline getirilir.



Şekil 2.12. Sıcak haddehane (yassı mamul) [8].



Şekil 2.13. Şerit hadde [18].

2.6. SOĞUK HADDELEME

Sıcak haddelenmiş malzemeye aşağıda belirtilen nihai özellikleri kazandırmak amacıyla oda sıcaklığında yapılan ve sadece yassı mamule uygulanan bir işlemdir. Soğuk haddeleme ile malzeme:

- Aşırı soğutmadan dolayı sıcak haddeleme ile ulaşılamayan nihai hassas kalınlığa kavuşur.
- Mikroyapının kontrolü sayesinde çekilebilirlik ve dayanım gibi mekanik özellikler kazanır.
- Oksit tabakalarının elimine edilmesi ve istenen seviyede pürüzlülük kazandırılması suretiyle nihai kalitede yüzey görünümü ve parlaklık gibi özellikler kazanır.
- Gerekli düzlemselliğe sahip olur.

Soğuk haddeleme işlemi 2-6 mm kalınlığında sıcak haddelenmiş bobinle başlar. Elde edilen soğuk ürünler iki kısma ayrılır. Birincisi otomotiv, yapı, metalik eşya endüstrisinde kullanılan ve bobin olarak üretilen gruptur (thin strip). Bu grup ürünler müşteriye genelde 0,5 ila 3 mm kalınlığında, 1900 mm genişliğe kadar teslim edilir. Korozyona uğramasını önlemek için yağlı ya da çinko kaplanmış (galvanizli) olarak da servis edilebilir.

Bu grup mamul üretiminde, optimum ürün özelliklerini hassas bir şekilde belirleyebilmek için müşteri ile yakın bir iş birliği içerisinde olmak gerekmektedir. Son yıllarda soğuk haddeleme ve tavlama teknolojisindeki gelişmeler son derece hızlıdır. Çalışmalar, asitleme ve sürekli haddeleme (TCM) gibi mevcut yöntemlerin geliştirilmesinin yanı sıra sürekli tavlama, hızlı ve elektro galvaniz kaplama gibi yeni yöntemlerin geliştirilmesi üzerinedir [14].

Soğuk haddelenmiş ikinci grup ürün; içecek ve konserve kutuları, yağ tenekeleri gibi gıda ambalajları ile sprey tüp üretiminde kullanılır. Bu grup malzeme, korozyon direncinin artırılması için daima kalay ya da kromla kaplanır. Başlangıç malzemesi 2-3 mm kalınlığındaki sıcak haddelenmiş bobindir. 0,13-0,4 mm kalınlığında, 750-1200

mm genişliğinde plakalar halinde paketlenerek servis edilir. Ürün bu haliyle teneke ismini alır.

Soğuk haddeleme süreci: asitle temizleme (pickling), haddeleme, tavlama (annealing), temper haddeleme, gerekiyorsa kaplama, son kontroller ve paketleme şeklindedir.

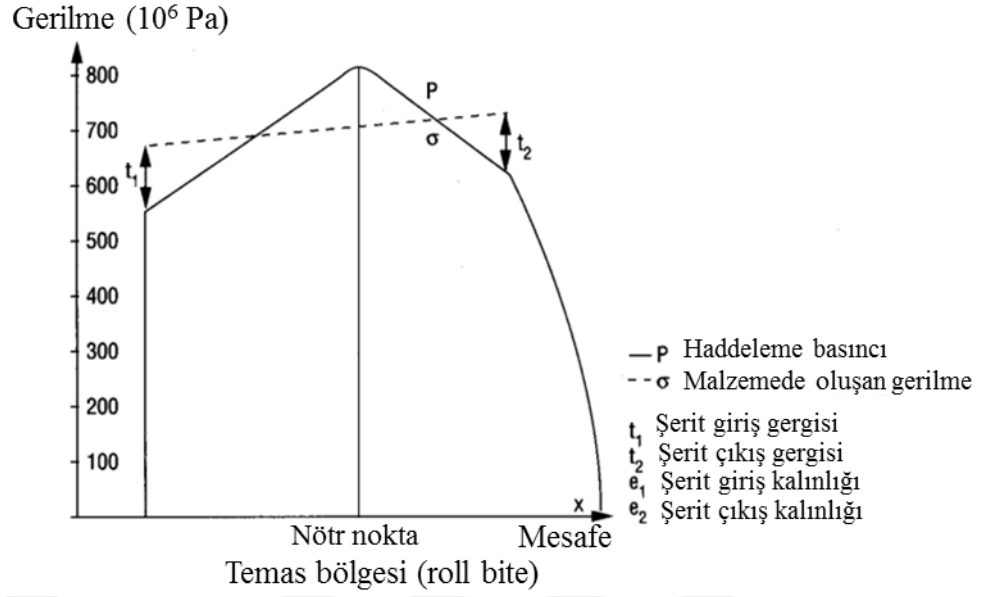
Sıcak haddelenmiş malzemenin üzerindeki tufal, soğuk haddelemede merdane ile malzeme arasına girmiş yabancı bir madde gibi davranır. Haddeleme kuvvetinin etkisiyle malzemeyi markalayabilir hatta delebilir. Bu yüzden malzemenin asit banyosundan geçirilerek tufaldan temizlenmesi gerekmektedir.

Asitle temizlenen malzeme yüksek hadde yüklerinde ve yüksek gergi altında çok sert merdanelerin arasından geçirilir. Bu haddeleme işlemi tersinir bir hadde tezgahında bobin açıcı ve bobin sarıcı yardımıyla her iki yönde defalarca yapılabildiği gibi, daha yaygın olarak ardışık stendlerden oluşan tandem hatlarında yapılmaktadır (Şekil 2.2.). Ardışık yapısından dolayı tandem düzende yapılan üretim çok daha hızlıdır.

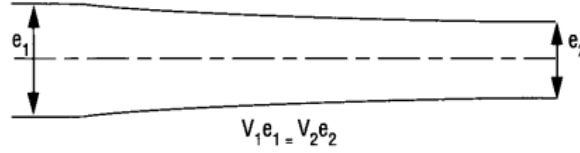
Şekil 2.14 (a)'da temas bölgesinde basınç ve gerilme değişimi gösterilmektedir. Temas başlangıcından itibaren basınç artarak nötr noktada en yüksek değere ulaştıktan sonra temas bitimine kadar azalan bir eğilim göstermektedir [14,19]. Malzemenin merdaneler arasında şekillendirilebilmesi için oluşturulması gereken gerilme değerinin (σ), deformasyon sertleşmesinden dolayı temas boyunca giderek arttığı görülmektedir. Giriş ve çıkış gergileri (t_1 , t_2) malzemede oluşturulan bu gerilme değerini artırarak şekillendirmeye olumlu katkı yapmaktadır. Böylece daha küçük hadde yüklerinde işlem yapılabilir.

Şekil 2.14 (b)'de şeritin temas bölgesinde boylamasına kesiti görülmektedir. Haddeleme sırasında malzemenin genişliği artmaksızın kalınlığı (e) azalırken boyu uzamaktadır. Merdaneler arasından geçen malzeme miktarının sabitliği gereği hız artmakta olduğundan Eşitlik 2.3 yazılabilir. Burada V malzeme hızını; n stend sırasını belirtmektedir.

$$V_{n-1} \cdot e_{n-1} = V_n \cdot e_n \quad (2.3)$$



(a) Haddeme basıncı ve gerilme (σ) değişimi



(b) Kalınlık değişimi

şekil 2.14. Soğuk haddemede temas bölgesi [14].

Temas bölgesinde malzemenin soğuk deformasyonu sırasında yeni dislokasyonlar oluşurken öncelikli düzlemlerde dislokasyonlar kaymaktadır. İç yapı, tanelerin bir taraftan haddeme istikametinde yönlenmesi, diğer taraftan uzaması ve yer değiştirmesi ile yeniden yapılıır. Sementit ve inklüzyonları gibi sert ikinci faz partikülleri belirgin bir şekil değişimine uğramayıp kırılarak haddeme yönünde hizalanırlar. Soğuk işlem, metalin merdaneler arasında akarken belirgin akma gerilmesi değerinin gittikçe yükselmesiyle ilişkilendirilmektedir. Buna paralel olarak çekilebilirliği azalıır ve metal, gevrek davranmaya daha fazla yatkinlık gösterir.

Hadde tezgâhı, merdaneler üzerinden malzemeye çok yüksek basınçları iletebilmelidir. Bu basınç; malzemenin akma dayanımına, giriş ve çıkış gergi kuvvetlerine, malzeme ile merdaneler arasındaki sürtünmeye bağlıdır (şekil 2.14). Birim genişlik başına düşen haddeme kuvveti, bu basıncın temas yayı boyunca

integrali alınarak hesaplanır. Bu yüzden temas bölgesi büyüdükçe hadde kuvveti de artar. Ayrıca merdane çapı, malzeme kalınlığı, ezme miktarının yanı sıra basınca bağlı olarak değişen merdane düzleşmesi ile de artar.

Merdaneler şerit kalınlığını azaltırken aynı zamanda malzemeyi içeri sürebilmeleri gerekmektedir. Bunun için yeterli bir sürtünmeye ihtiyaç vardır. Bu sürtünme, malzemeyi giriş tarafta merdaneler arasına çekerken, merdane basıncının en yüksek olduğu nötr noktadan sonra (çıkış tarafta) malzeme hareketine direnç oluşturmaktadır (Şekil 2.3 (b)). Haddeleme enerjisi, soğuk işlem enerjisinin toplamıdır ve temas bölgesindeki bu sürtünme ile ilişkilidir. Bu çok yüksek bir enerjidir ve hemen hemen tamamı haddeleme esnasında açığa çıkan ısıyla ziyan olur. Az bir miktarı malzemede dislokasyon ve iç gerilme oluştursa da bu gerilme tavlama sırasında yapının yeniden kristalleşmeye uğramasıyla azalır.

İş merdaneleri haddeleme basıncına ve eğilmeye maruz kalırlar. Eğilme olayı, büyük çaplı ve dolayısıyla yüksek rijitliğe sahip destek merdaneleri ile azaltılır (Şekil 2.4, Şekil 2.8 ve Şekil 2.9 (c)). Yukarıda bahsedildiği gibi merdane çapının küçültülmesi temas yayının, dolayısıyla haddeleme kuvvetinin küçülmesine neden olmaktadır. Haddeleme işleminin stabilitesi için bu kuvvet kritik bir öneme sahiptir. Merdaneler malzemeyi sürtünme kuvveti sayesinde sürdüklerinden dolayı temas bölgesinin belirli bir genişlikte olması gerekmektedir. Bu da iş merdane çapının belli bir değerden küçük seçilemeyeceği anlamına gelmektedir.

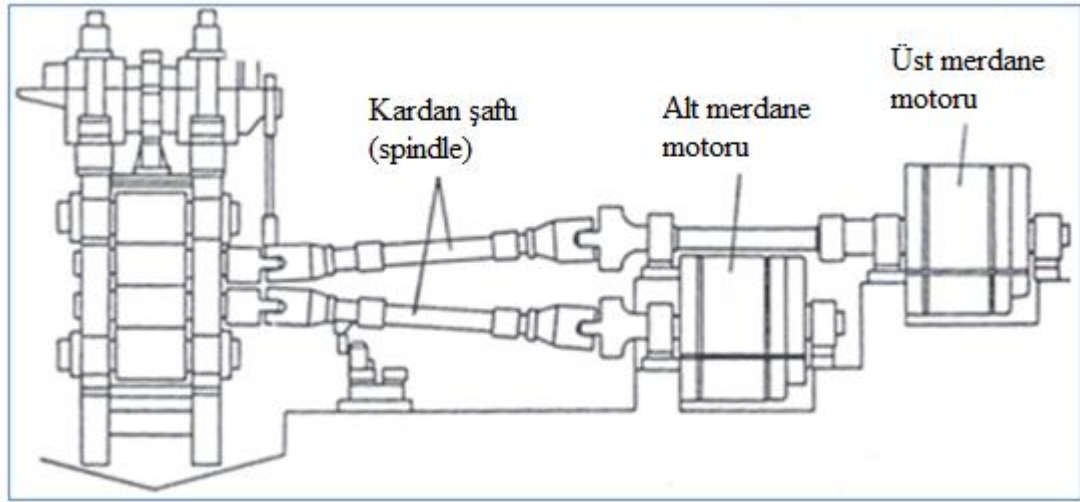
Haddeleme sıcaklığının 60 °C – 130 °C arasında kalması için malzeme ve merdanelerin soğutulması önem arz etmektedir. Nitekim önlem alınmazsa grup 2 ambalaj malzemelerinin haddelenmesinde sıcaklık 180 °C'ye kadar çıkabilmektedir. Soğutma işlemi, içinde az miktarda hadde yağı olan suyun çok büyük soğutma sistemleri kullanılarak sirküle edilmesiyle yapılır [14].

2.6.1. Soğuk Haddeleme Teknolojisi

0,4 ila 3 mm kalınlığında, 1900 mm genişliğe kadar ürünlerin soğuk haddelenmesinde genellikle dört ya da beş stendli tandem sürekli hatları kullanılır (Şekil 2.2).

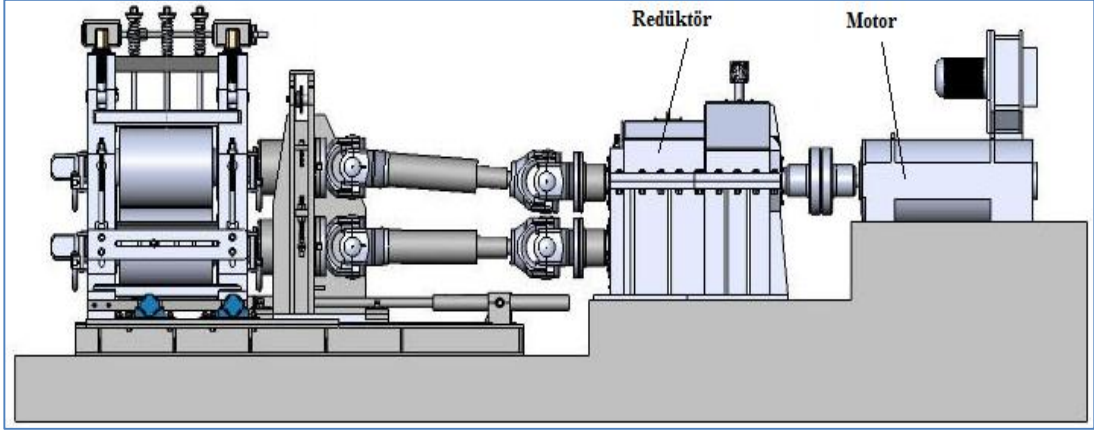
Haddeleme hızı 600-1400 m/dk aralığındadır. 0,13-0,4 mm kalınlığındaki ambalaj malzemeleri gibi çok ince malzeme haddelemek için beş ya da altı stendli ve 1500-2300 m/dk hız aralığında çalışan sürekli hatlar kullanılır. Bu iki tip malzemeyi üretebilen haddehane sayısı pek azdır. Bu haddehaneler ince malzeme çekmek için yeterince hızlı; kalın malzeme çekmek için yeterince güçlü olmalıdırlar.

İş merdaneleri aracılığıyla iletilen haddeleme enerjisi çok yüksek tork gerektirir. Bu nedenle trapajı (merdanenin malzeme üzerinde kayması) önlemek için genelde iş merdaneleri tahrik edilir. İş merdaneleri ayrı birer motor ile tahrik edilebildiği gibi (Şekil 2.15) tek bir motor çıkışı bir redüktör marifetiyle ikiye ayrılabilir (Şekil 2.16). Motorun hareketi merdaneye kardan şaftı ile iletilir. Tandem gibi ardışık stendlerde merdaneler, motorun ürettiği torkun bir redüktör marifetiyle stend sırasına bağlı olarak değişen oranlarda azaltılmak suretiyle tahrik edilir. Motor güçleri stend sırasına göre değişmekle birlikte 3-8 MW aralığındadır. Birçok haddehanede tristörle güçlendirilmiş DC motorlar kullanılmakla birlikte modern haddehanelerde artık AC motorlar tercih edilmektedir.



a)

Şekil 2.15. Bağımsız motorlu yatay hadde tezgahının şematik gösterimi [20].



Şekil 2.16. Redüktörlü yatay hadde tezgahının şematik gösterimi [21].

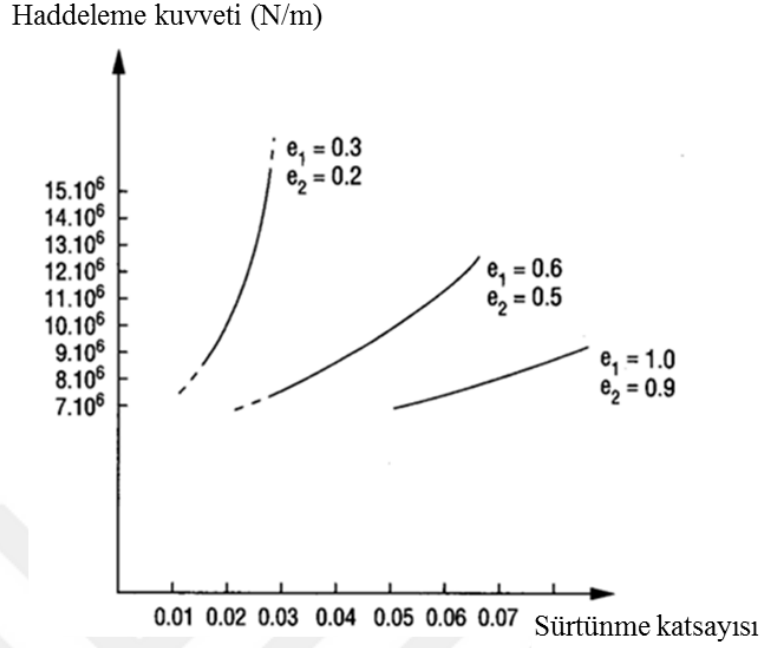
Soğuk haddehanelerde genelde iki farklı stand tipi görülür. Bunlar:

- 1400-1500 mm çaplarında destek merdaneleri ile desteklenen 500-600 mm çapında iş merdaneleri ile tahrik edilen 4'lü düzen (Şekil 2.8).
- Hadde tezgahını şerit genişliğine uydurabilmek için iş ve destek merdanelerinin arasına ara merdanelerin yerleştirildiği 6'lı hadde düzeni (Şekil 2.10). Bu konfigürasyon daha küçük çaplı iş merdanesi kullanımına olanak tanımakla birlikte ara merdanelerin aksel yönde kaydırılması suretiyle iş merdanelerinde homojen bir yük dağılımı elde edilmiş olur. Merdane bükme sistemi ile şeritin genişliği boyunca daha homojen kalınlık elde edilmesi sağlanır.

2.6.2. Soğutma ve Yağlama

Malzeme ile merdaneler arasındaki sürtünme katsayısı büyüdükçe haddeleme kuvveti de büyümektedir. Bu kuvvetin azaltılması ve kontrol edilmesi gerekmektedir. Bunun için yağlama esastır.

Şekil 2.17'de malzeme kalınlığı "e" harfi ile temsil edilmiştir. Her üç eğride ezme miktarı 0,1 mm olmasına rağmen ince malzemelerde haddeleme kuvvetinin sürtünme katsayısına bağlı olarak daha belirgin bir şekilde arttığı görülmektedir. Bu yüzden şerit inceldikçe yağlama daha etkin yapılmalıdır.



Şekil 2.17. Sürtünme katsayısı-haddeme kuvveti ilişkisi [14].

Haddeme işlemi esnasında muazzam bir ısı enerjisi açığa çıkmaktadır. Bunun için yüksek debide soğutma sıvısı gerekmektedir. Birkaç yüz m³/h debide soğutma sıvısı sirkülasyonu bu gerçekleştirilir. Temas sırasında ısınan malzeme temas bölgesinin dışında iken soğur.

Soğuk haddeme yöntemi, birçok parametrenin etkileşimini gerektiren karmaşık bir işlemdir. Bu parametreler şunlardır:

- Malzemenin akma dayanımına ve sürtünme katsayısına, dolayısıyla yağlamaya bağlı olarak değişen ve merdanelerin düzlemselleşmesini belirleyen haddeme kuvveti.
- Temas bölgesinde aşırı sıcaklık yağ filminin kopmasına, malzeme ile merdane arasında gerçekleşen mikro boyutta parça kopmasından (microgalling) dolayı oyuntu izlerin oluşumuna neden olur.
- İş merdanelerine ve yağlamaya bağlı olarak değişen malzeme yüzey pürüzlülüğü. Aşırı yağlama; kalın yağ filmi oluşumuna, malzeme ile merdane temas alanlarının azalmasına ve malzemenin yağ ile izole edilen (yağsız kalan)

bölgelerinde yüksek pürüzlülük oluşumuna yol açmaktadır. Ekstrem durumlarda malzemenin akışında oluşan kararsızlık, trapaja ve merdanelerin hızlı bir şekilde aşınmasına yol açar ki bu da hadde tezgahında titreşime neden olur. Oluşan bu titreşim, merdanelerin her bir döngüsünde şerit kalınlığında düzensizliğin oluşmasına yol açar.

- Isınan merdanelerin gövdeleri şişerek bombeleşir. Haddeleme hızının da tesir ettiği bu olayın etkin bir soğutma ile kontrol edilmesi gerekmektedir. Aksi halde genişlik istikametinde homojen bir kalınlık elde edilemez [14].

2.6.3. Kalınlık Kontrolü

Şerit kalınlığının dar toleranslarda elde edilmesi kalite açısından önemlidir ve şeritin soğuk haddelenmesindeki amaçlardan biridir. İstenen kalınlığı %1 sapmayla elde etmek mümkündür. Ambalaj malzemeleri için bu sapma sadece birkaç mikrometredir.

Haddeleme sırasında malzemede elastik ve plastik şekil değişimi; hadde ekipmanlarında (gövde, yatak, merdane vs.) ise elastik şekil değişimi olur. Haddeleme kuvvetinden dolayı hadde ekipmanlarında gerçekleşen elastik deformasyon (hadde sıçraması) şerit kalınlığının belirlenmesinde göz önünde bulundurulması gereken önemli bir husustur [9]. Malzeme kalınlığı, merdaneler arasındaki mesafeye bağlıdır. Hadde sıçramasının yanı sıra merdanelerin ısıl genişmesi, merdane şekil bozuklukları (koniklik vb.) ve yatak yağ filmi kalınlığı gibi merdaneler arasındaki mesafeyi, dolayısıyla şerit kalınlığını olumsuz etkileyebilecek hususlar AGC tarafından telafi edilir [22]. Kalınlık azaldıkça hız artmakta, ancak debi sabit kalmaktadır. Stendler arasında malzeme yığılmasını ve gerginin aşırı artarak bant kopmasını önlemek için malzeme debisinin her stendde sabit tutulması gerekmektedir. Eşitlik 2.3'e göre bir stenddeki kalınlık azalması (ezme miktarı), o stendle bir önceki stend arasındaki hız oranı ile ayarlanır. Kalınlık ölçüm ve kontrolleri stendler arasına ve çıkışa yerleştirilen X ışını ya da gama ışını ölçüm cihazları ile yapılmaktadır. Bu cihazlardan alınan kalınlık bilgisine göre AGC silindirleri tarafından anlık kalınlık ayarı yapılır. Bu ayar, servo valf kontrollü bir hidrolik silindir olan AGC tarafından ihtiyaca göre üst merdanenin alt merdaneye yaklaştırılması ya da uzaklaştırılması suretiyle gerçekleştirilir. Üst merdane takımının bu hareketi, vidanın (Şekil 2.8) aşağı ve yukarı

hareket ettirilmesiyle sağlanır. Şerit hızı, bazen vida ve merdane dönme hızının kontrolü için geri besleme yapan temassız sensörlerle ölçülür. Böylece merdane-malzeme temas bölgesi bitiminde merdane ile malzeme arasındaki hız farkından dolayı trapaj önlenmiş olur.

Haddeleme yükü malzemenin akma dayanımı, şerit genişliği ve ezme miktarına bağlıdır ve işlem süresince mümkün olduğunca sabit tutulması gerekmektedir. Ancak bu parametreler işlem boyunca değişkendir. Özellikle malzemenin kalınlığı ile akma dayanımı şerit boyunca değişir. Sabit bir kalınlık elde edebilmek ve haddeleme kuvvetini işlem süresince sabit tutabilmek için merdaneler arasındaki boşluk ayarı AGC tarafından dinamik ve hızlı bir şekilde gerçekleştirilir. Ayrıca uniform bir kalınlık ve geometri elde edebilmek için iş merdane gövde profili optimize edilmelidir. 6'lı hadde düzeninde iş merdane yatakları ile ara merdane yataklarında rulman kullanılır. Destek merdanelerinde hidrodinamik yataklar kullanılmakla birlikte, yağ filminin oluşmasında hızın bir etkisinin olmamasından dolayı son yıllarda destek merdanesi yataklarında da rulmanlı yataklar tercih edilmektedir [14].

2.6.4. Temper Haddeleme

Soğuk haddelenmiş saca nihai özellikleri kazandırmak amacıyla uygulanan bitirme haddesidir. Malzemenin nihai şekillendirme öncesinde deformasyon yaşlanmasına uğramaması, yüzey düzgünlüğü ve gerekiyorsa yüzey pürüzlülüğü bu özellikler arasındadır.

2.6.4.1. Deformasyon Yaşlanması

Yumuşatma tavına tabi tutulmuş düşük karbonlu çelik saclar, oda sıcaklığında çekme deneyine tabi tutulduklarında tipik süreksiz akma gösterirler. Alt ve üst akmanın belirgin bir şekilde görüldüğü bu akma olayı, karbon (C) ve azot (N) gibi ara yer atomlarının dislokasyon bölgelerine yayınarak Cottrell atmosferini oluşturmasından kaynaklanmaktadır. Böyle bir malzemede plastik deformasyonu başlatabilmek için, dislokasyonları söz konusu atmosferden kurtararak serbest hale geçirebilecek veya yeni dislokasyonların oluşumunu sağlayacak kadar yüksek bir gerilmeye ihtiyaç

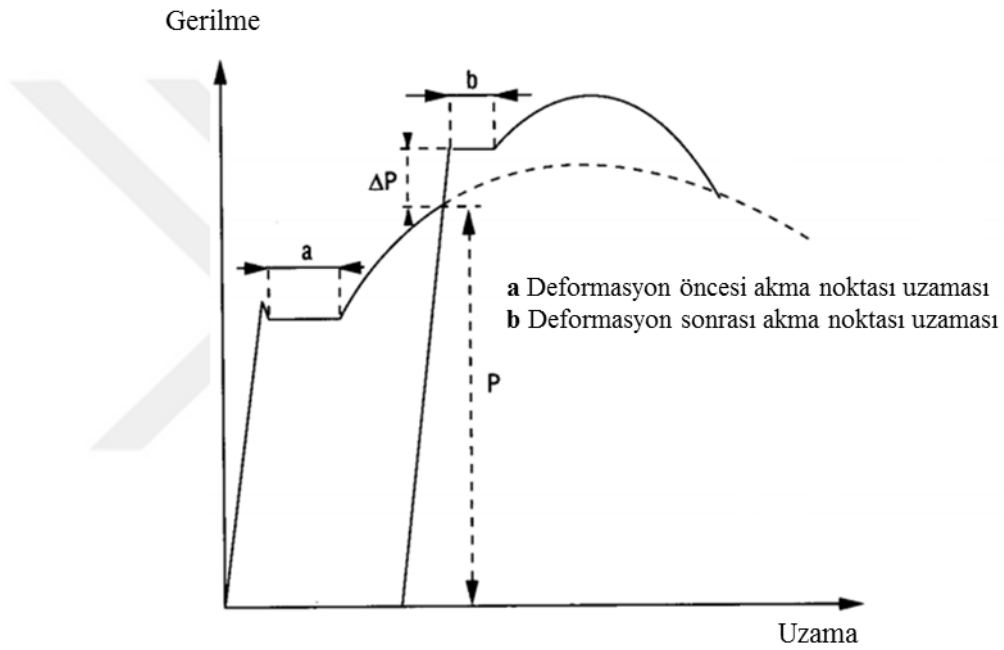
vardır. Bu gerilme üst akma gerilmesi olarak tanımlanmaktadır. İlk akmanın gerçekleştiği kayma bandında hemen pekleşme meydana geldiği için burada deformasyonun ilerlemesi durur ve diğer bölgelerde akma olayı gerçekleşmeye başlar. Üst akma noktasından sonra gelişen ve çekme eğrisinde testere dişi görünümüne sahip bölge, akmanın kayma bantlarında gerçekleştiğini gösterir. Oluşan bu bantlara Lüders bantları; gerçekleşen uzamaya da Lüders uzaması denir. Maksimum kayma gerilmesi çekme eksenine 45°'lik düzlemlerde oluştuğundan dolayı genellikle Lüders bantları bu açıdaki düzlemlerde oluşur. Bu kayma bantları dövme, derin çekme ve sıvama gibi şekillendirme işlemleri sırasında yüzeyde pürüzler oluşturarak kötü bir görünüme yol açarlar. Boya ve kaplamanın iyi tutmamasına, tutsa bile güzel görünmemesine neden olduklarından dolayı parlatma gibi ilave işlemler gerektirmesi işçilik ve maliyeti artırmaktadır [23–25].

Çekme deneyine, akma bölgesi geçildikten sonra yük boşaltılıp beklenmeden tekrar devam edilirse süreksiz akma olayı görülmez. Bunun nedeni dislokasyonların Cottrell atmosferinden kurtulmuş olması ve yüklemenin hemen yapılmasından dolayı karbon ve azot atomlarının yayınarak dislokasyonlar etrafında Cottrell atmosferini oluşturmaya vakit bulamamış olmalarıdır. Ancak ön deformasyon sonrasında belirli bir süre beklenirse çözünmüş karbon ve azot gibi ara yer atomları yayınarak Cottrell atmosferini tekrar oluşturmak suretiyle dislokasyonları kilitlerler ve hareketlerine engel olurlar. Bu durumda belirgin akma olayı yeniden ve daha yüksek gerilme seviyelerinde meydana gelir (Şekil 2.18). Bu olaya statik deformasyon yaşlanması (strain ageing) adı verilir. Bu olayı ısıl aktivasyon (çelik için 100-200 °C) hızlandırır. Soğuk işleme tabi tutulduktan sonra kaynaklanmış kalın sacların ısıdan etkilenen bölgelerinde karşılaşılan gevreklik artışının nedeni budur. Deformasyon yaşlanması, yer alan ve ara yer atomlarının dislokasyon bölgelerine yayınmasına bağlı olduğundan karbon ve azot gibi ara yer atomlarından tamamen arındırılmış bir çelikte belirgin akma olayı görülmez. Bu tür çelikler IFS olarak anılır [23–25].

Lüders bantları ürünün yüzey görünümünü bozduğu için malzemenin belirgin akma göstermesi önlenmeli ya da akma uzaması azaltılmalıdır. Bunun için temper hadde adı verilen ve % 0,5-1,5 oranında ezmenin yapıldığı nihai bir haddeleme işlemine tabi tutulur. Malzeme, işlem öncesinde yığın tavlama yahut sürekli tavlama hatlarında

(CAL) yaklaşık 650 °C’de tavlandıktan sonra 40 °C’den düşük bir sıcaklıkta haddelenir. Bu haddeden sonra malzeme, üreticinin tavsiye ettiği raf ömrü dikkate alınarak, deformasyon yaşlanmasına uğramadan önce imalata alınmalıdır [3,7,23,24].

Sürekli tavlama tabi tutulmuş malzemede deformasyon yaşlanması, otomobil gövde parçalarının dayanımını artırmak için kullanılan bir yöntemdir. Sürekli tavlama sonrası çözültide yeterli miktarda karbon bırakılırsa, boyanın 100-200 °C civarında pişirilmesi sırasında malzemenin yaşlanması sonucu sertlikte ekstra artış meydana gelir.

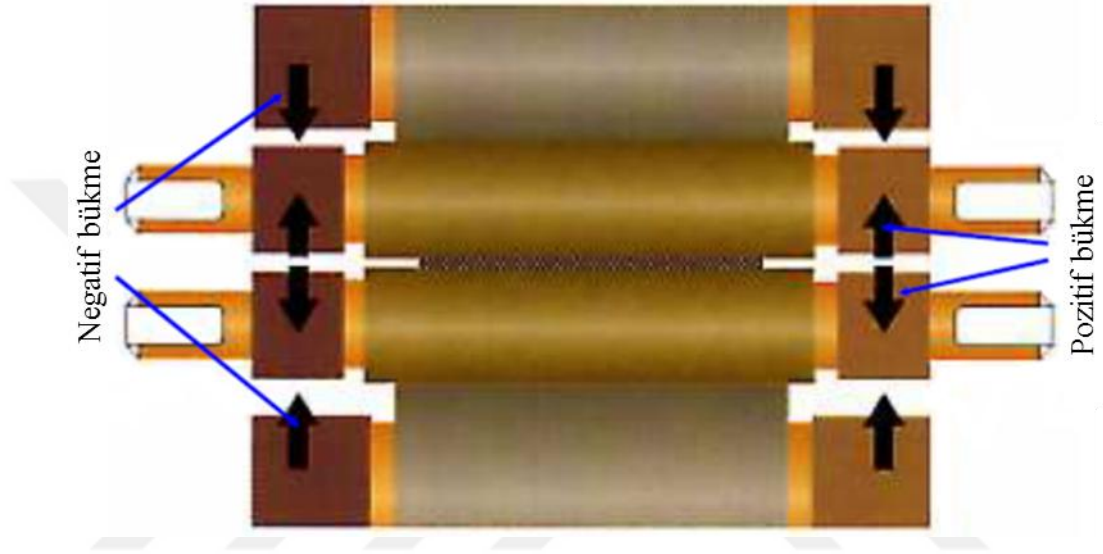


Şekil 2.18. Kesintiye uğramış çekme testinde deformasyon yaşlanması etkisi [14].

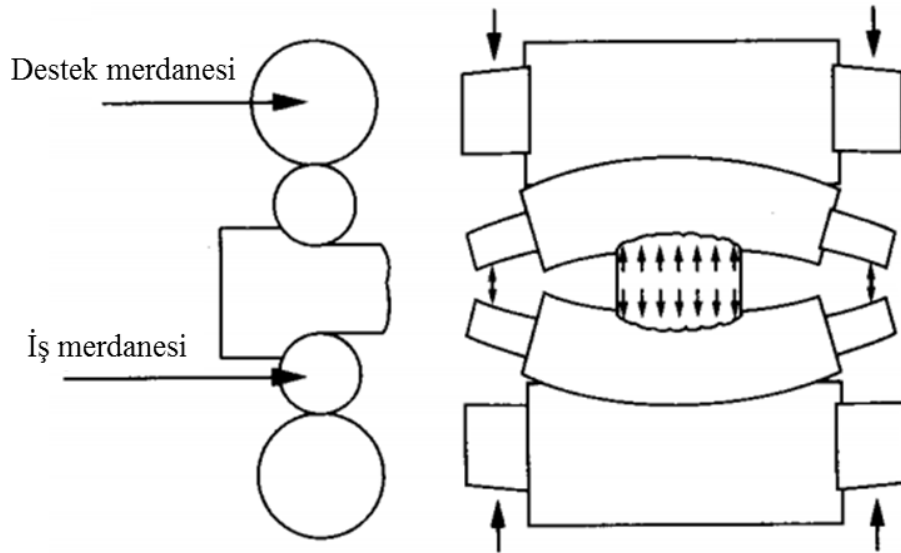
Haddeleme işleminin pürüzlendirilmiş merdanelerle yapılması halinde malzeme yüzeyinde istenen değerde pürüzlülük elde edilmiş olur. Soğuk haddelemeden dolayı tane yapısı anizotrop bir hal alan malzeme, tavlama sonrasında izotrop bir yapıya da kavuşmuş olur.

Temper haddeleme kuru yapılabildiği gibi ıslak da yapılabilmektedir. Islak yapılan temper haddelemede yağlayıcı olarak genellikle su ve deterjan karışımı kullanılır. Gergi kuvvetlerini mümkün olduğunca sabit tutabilmek için iki merdaneli gergi bloklarından faydalanılır. Bunlardan birisi bobin açıcı ile temper hadde arasında, diğeri temper hadde ile bobin sarıcı arasında yerleştirilir [14].

Diğer hadde düzenlerinde olduğu gibi temper haddede de şerit düzlemselliğini sağlamak için merdane bükme sistemi kullanılır (Şekil 2.19). Şerit kalınlığı ortada fazla ise pozitif, kenarlarda fazla ise negatif bükme silindirleri haddeleme işlemi boyunca devreye sokularak iş merdanelerini bükmek suretiyle malzeme düzleştirilir. Şekil 2.20’de malzemenin orta kısmı kalın çıkmasından dolayı pozitif bükmenin yapıldığı bir hadde sistemi görülmektedir.



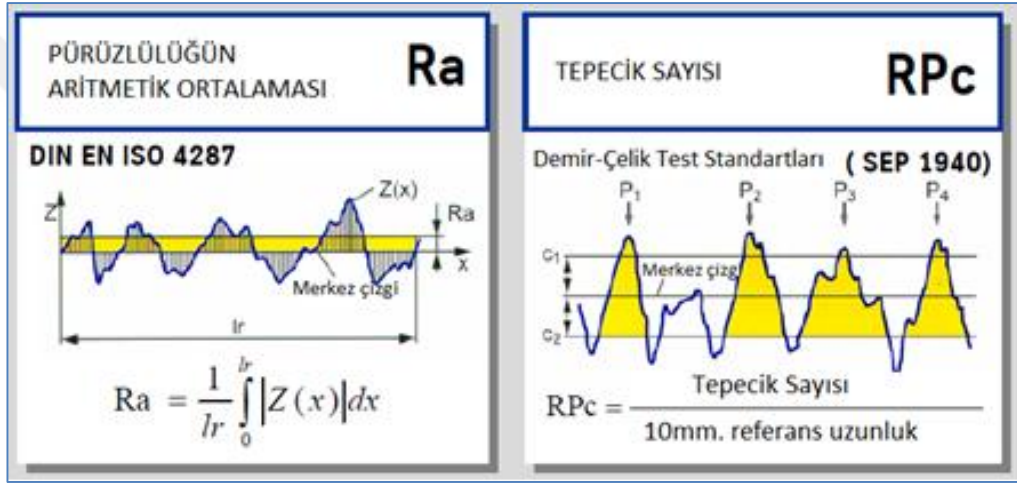
Şekil 2.19. Merdane bükme sistemi [26].



Şekil 2.20. Pozitif merdane bükme sistemi [14].

2.6.5. Pürüzlülük ve Soğuk Haddelenmede Yüzey Pürüzlendirme

Yüzey pürüzlülüğü (Ra): yüzey profilinin merkez çizgiden mesafesinin aritmetik ortalamasıdır ve birimi μm 'dir. Pik sayısı (R_{Pc}): 1 cm'de ölçülen tepecik sayısıdır. Tepecik sayısının hesabında belli bir değer altındaki tepecikler sayılmaz. SEP 1940 standardına göre c₁ ve c₂ ile gösterilen bu eşik değerler, ölçülecek yüzeyin pürüzlülüğüne göre belirlenir. 2 μm 'den düşük pürüzlülük ölçümlerinde $\pm 0,25 \mu\text{m}$; 2 μm 'den yüksek pürüzlülük ölçümlerinde ise bu değer $\pm 0,5 \mu\text{m}$ alınır. Şekil 2.21'de bu parametrelerin matematiksel hesap yöntemi görülmektedir [27,28].

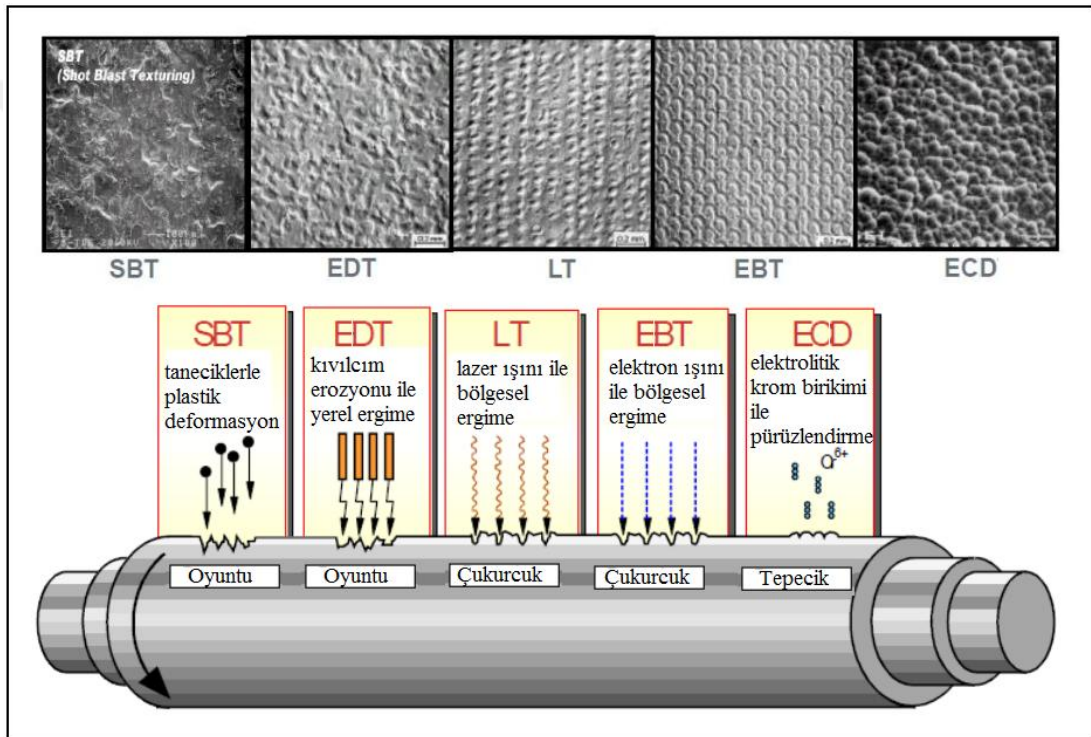


Şekil 2.21. Pürüzlendirme parametreleri [27,28].

Malzeme yüzey pürüzlülüğü ile tepecik sayısı, sacın kalıplama ya da derin çekme yöntemi ile şekillendirilmesine ve boyama kalitesine etki eden en önemli faktörlerdir. Yüzey pürüzlülüğünün yüksek olması, kalıp ile sacın teması esnasında yağlayıcılığı artıracak olan kalıp yağı için cepler oluşturduğundan şekil verme açısından avantajlıdır. Fakat pürüzlülüğün çok fazla olması boyalı yüzeyin mat görünmesine neden olur. Tepecik sayısının fazla olması, boyanın yapışma kabiliyetini artırıcı yönde avantaj sağlamakla birlikte şekillendirme sırasında kullanılan yağın malzeme yüzeyinde tutunabileceği hacimleri azalttığından dolayı şekillendirme için bir dezavantaj olarak karşımıza çıkmaktadır. Malzeme yüzeyinde bu kriterlere göre optimum düzeyde pürüzlülük ve tepecik sayısı belirlenmelidir. Pürüzlülük değeri otomobil dış gövde parçaları için genelde 1,0-1,5 μm ; iç parçalar için ise 1,5-2,0 μm aralığındadır [28–30].

2.6.5.1. Mordane Yüzey Pürüzlendirme Yöntemleri

Mordanelerin pürüzlendirilmesi için farklı yöntemler kullanılmaktadır. Son zamanlara kadar yaygın olarak kullanılmakta olan SBT yöntemi artık yerini EDT, ECD gibi daha modern yöntemlere bırakmıştır. Bu yöntemler Şekil 2.22’de şematik olarak gösterilmiştir. Şekil 2.23’de bu yöntemlerle pürüzlendirilmiş mordanelerle soğuk haddelenmiş ve temper haddelenmiş malzemelere ait yüzey görüntüleri bulunmaktadır.



Şekil 2.22. Mordane pürüzlendirme yöntemleri [30].

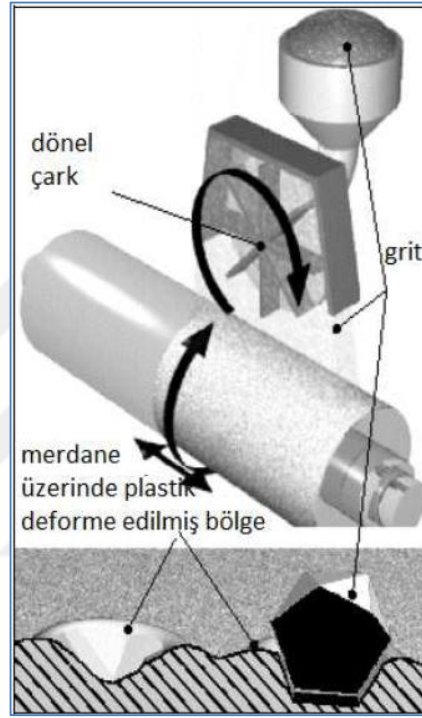


Şekil 2.23. Farklı yöntemlerle elde edilen malzeme yüzey topoğrafyaları [27,28].

Kumlama (SBT)

Bu yöntem: belirli büyüklükte ve sertlikte, küresel olmayan gritlerin (demir tozu), kendi eksenini etrafında belirli bir hızda döndürülen merdaneye belirli bir hızla püskürtülmesi ile gerçekleştirilir. Bu hız, döndürülen bir çark ile verilebildiği gibi bazı tezgâhlarda basınçlı hava ile de kontrol edilebilmektedir. Bu yöntemde, püskürtülen demir tozlarının merdane yüzeyinde plastik deformasyon oluşturması ya da küçük parçacıklar koparması ile merdane yüzeyi pürüzlendirilmiş olur (Şekil 2.24). Elde edilen yüzey pürüzlülüğü; gritin merdaneye çarpma hızına ve çarpma açısına, grit malzemesine, büyüklüğüne, şekline ve sertliğine bağlı olarak değişkenlik gösterir. Çarpmanın etkisiyle ufalanan grit boyutunun zamanla değişiyor olması, merdane yüzeyinde istenen değerde pürüzlülük elde edilmesi açısından bir problem teşkil etmektedir. Bunun için SBT tezgâhlarına bir elek sistemi akuple edilmiştir. Bu yöntemde yüzey pürüzlülüğünü etkileyen parametrelerin kontrolü ve sürekliliğinin sağlanması oldukça zordur. Tüm bu parametrelerin sabit tutulması başarsa dahi elde edilen yüzey pürüzlülük değerinin merdane sertliğine bağlı olması, kalitenin sürdürülmesi açısından bir dezavantaj olarak karşımıza çıkmaktadır.

SBT yöntemiyle elde edilmiş pürüzlü bir yüzeye yakından bakıldığında pürüzlendirmenin tüm yüzey alanınca yapılamadığı, halen yerel olarak pürüzlendirilmemiş bölgelerin kaldığı görülür. Ayrıca bu yöntemle elde edilen pürüzlülük değerinin homojen olmayıp bölgesel olarak büyük farklılıklara sahip olduğu ve tepelik sayısının da oldukça düşük değerlerde seyrederek bekleneni karşılamadığı söylenebilir.



Şekil 2.24. SBT yöntemiyle merdane pürüzlendirme [23].

Elektriksel Deşarj Pürüzlendirmesi (EDT)

EDT tezgâhı; pürüzlendirilmek istenen merdanenin üzerinde döneceği yataklar (steady rest), merdaneyi döndürecek olan ayna (headstock), merdanenin geriye kaymasını önlemek için punta (tailstock-counterstay), pürüzlendirmeyi yapacak olan elektrotlar ve bunları kontrol eden servo silindri, hidrolik ünite ile dielektrik yağı filtre ünitesinden oluşur. Pürüzlendirilmek istenen merdane tezgâha yerleştirildikten sonra tezgâh havuzu yalıtkan ortam sıvısı (dielektrik yağı) ile doldurulur ve işlem bu sıvı içerisinde gerçekleşir. Dielektrik yağının görevi: kıvılcım oluşabilmesi için elektrotlar ile merdane arasında yalıtımı sağlamak, elektrotların sıcaklığının yükselmesini önlemek, işlem sırasında merdaneden kopan partikülleri ortamdan uzaklaştırmak ve

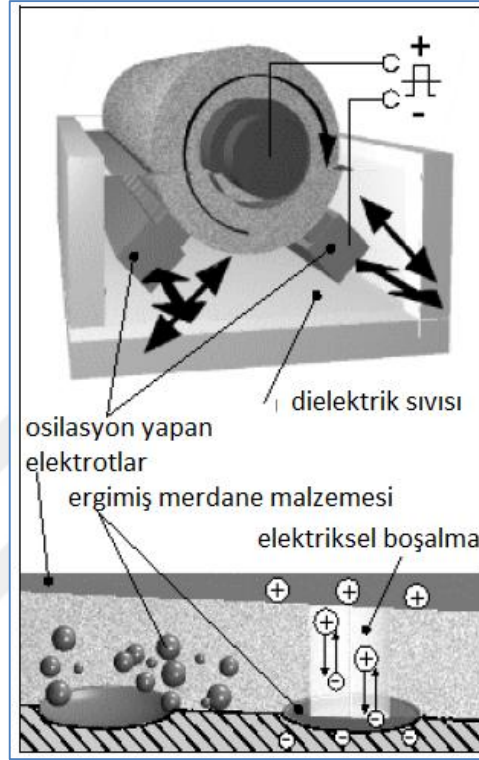
iyonizasyonun oluşmasını sağlamaktır. Şekil 2.25’de Waldrich Siegen marka EDT tezgâhı üzerinde yarısı pürüzlendirilmiş yarısı pürüzlendirilmemiş (parlak) merdane görülmektedir.



Şekil 2.25. WS EDT tezgâhı.

EDT yönteminde, eksenini etrafında dönen ve aynı zamanda osilasyon hareketi yapan merdaneye (bazı tezgahlarda osilasyon hareketini elektrotlar yapabilir), herbiri ayrı bir servo silindir tarafından kontrol edilen elektrotlar 0,02-0,2 mm kadar yaklaşarak kıvılcım oluştururlar. Bu sırada elektrot-merdane ara yüzeyinde sıcaklık 8.000 °C-12.000 °C arasında değişmektedir. Bölgesel olarak ergitilen merdane yüzeyinde katılaşma sırasında krater oluşarak istenen yüzey pürüzlülüğü elde edilmiş olur (Şekil 2.26). Bu elektriksel erozyon işlemi sırasında oluşan metal buharı, dielektrik sıvısında yoğunlaştırılmaktadır. Şarj voltajı, ateşleme süresi, akım adımı, servo referans, kapasitör değeri, merdane dönme hızı, işlem süresi, kutuplama (merdanenin +, elektrotların – kutup olması ya da tam tersi) gibi parametrelerin değiştirilmesi ile istenen pürüzlülük ve tepelik sayısına sahip yüzey elde edilebilir. Bu sayede SBT yöntemine göre çok daha homojen pürüzlülüğe sahip bir yüzeye, daha dar tolerans aralığına (\pm %4) ve daha yüksek tepelik sayılarına ulaşılabilmektedir. Bu yöntemle aynı pürüzlülükte farklı tepelik sayıları elde edilebiliyor olması, SBT’ye göre daha

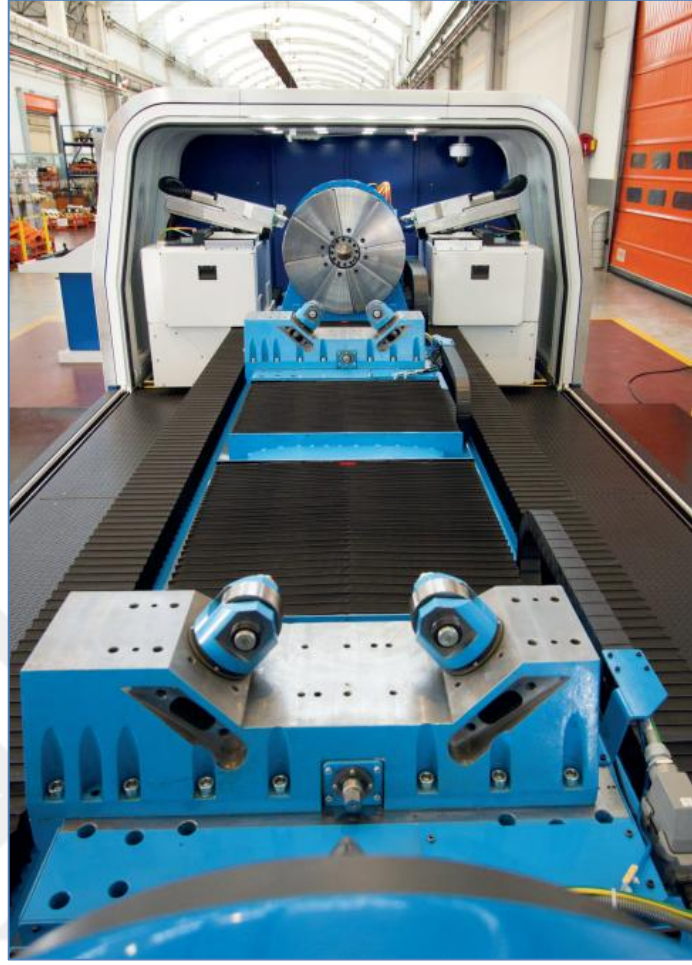
geniş pürüzlülük aralığına sahip olması (SBT: 1,5-6 μm ; EDT: 0,5-10 μm), pürüzlülüğün merdane sertliğine bağlı olmaması ve merdane pürüzlülüğünün daha uzun soluklu olması (pürüzlülük istikrarı) bu yöntemin belli başlı avantajlarıdır [28,30,32].



Şekil 2.26. EDT yöntemiyle merdane pürüzlendirme [23].

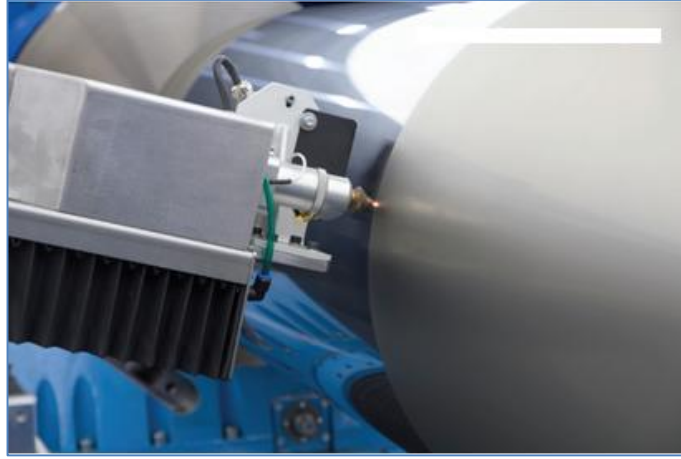
Pomini Dijital Pürüzlendirme (PDT)

PDT yönteminde pürüzlülük istikrarı, malzeme üretimi ve müşteri memnuniyeti açısından aranan özelliklerin en iyi kombinasyonunun sağlanması için, pürüzlendirme parametrelerinin her biri ayrı ayrı kontrol edilmek suretiyle merdane yüzeyinde istenen pürüzlülük değerleri elde edilebilmektedir. Son kullanıcı tarafından talep edilen ve taşlama ile merdaneye verilemeyen yüksek pürüzlülük yahut izotropik yüzey görünümü gibi birçok yüzey özelliği bu yöntemle elde edilebilir. Şekil 2.27’de Pomini firması tarafından tasarlanan ve üretilen PDT tezgâhı görülmektedir.



Şekil 2.27. PDT tezgâhı [33].

Bu yöntemde merdane yüzeyinde pürüzlülük, bir yazılımla kontrol edilen yüksek frekanslı lazer kullanılarak elde edilir. Pürüzlülük ve tepecik sayısının birbirinden bağımsız olarak kontrol edilebildiği bu teknoloji oldukça esnek olup, iş merdanesi performansı ve haddelenen malzemenin kalitesini yükseltebilecek potansiyele sahiptir. Bir fiber optik sistem Şekil 2.28’de görülen pürüzlendirme kafasına yüksek konumlanabilme kabiliyeti sağlarken, hizalama problemlerini ve LT gibi lazer kullanılan eski pürüzlendirme yöntemlerinde karşılaşılan problemleri elimine etmektedir.



Şekil 2.28. Pomini Tenova dijital pürüzlendirme kafası [33].

Bu yöntemde merdane yüzeyinde istenen pürüzlülük deseni, bir bilgisayar simülasyonu kullanılarak tasarlanabilir. Çukurcuk ve tepeciklerin boyutları, lazer sisteme kumanda eden bir yazılım ile kontrol edilir. Herbir çukurcuğun boyutlarının değiştirilebiliyor olmasının yanı sıra tepe ve çukurcukların şeklinin dahi istendiği gibi değiştirilebiliyor olması bu yöntemi öne çıkarmaktadır.

Doku matrisi yazılımı kullanılarak rastgele ya da istenen desene sahip çok çeşitli yüzeyler üretilebilir. Boşluk parametrelerini değiştirerek yüzey dokusunun yoğunluğu "açık" veya "kapalı" yüzeyler üretmek için değiştirilebilir.

Henüz deneme aşamasında olan bu yöntem ilk testlerinde merdanelerden malzemeye pürüzlülük ve tepecik sayısı transferine odaklanmıştır ki bu, pürüzlülük istikrarıyla doğrudan ilişkilidir. Bu yöntemde Ra ve R_{Pc} transferinin EDT yöntemine göre %20 daha fazla olduğu görülmüştür. Yüzey pürüzlendirme parametrelerinin pürüzlülük sirayetinin yanı sıra merdane aşınması üzerine de ciddi etkileri söz konusudur.

Farklı sertlikte malzemelerle ve farklı hadde yüklerinde yapılan testlerde krater çapının transfer oranı üzerine muazzam bir etkisi olduğu görülmüştür. Daha sert malzeme kullanılması durumunda uygun bir transfer oranı sağlamak için daha büyük kraterler gerekmektedir. Küçük çaplı kraterler özellikle yumuşak malzemeler için uygundur. Tepeciklerin daha yuvarlak olması merdane aşınmasını, dolayısıyla maliyeti düşürücü etkiye sahiptir [28,33].

Topokrom (ECD)

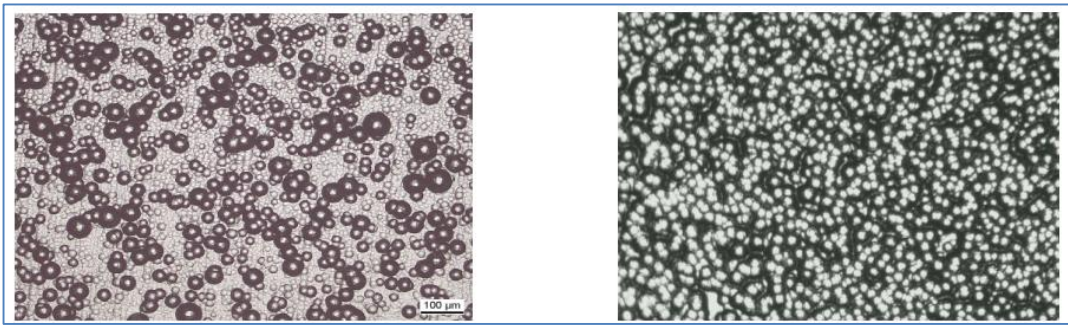
Bu yöntem soğuk hadde iş merdanelerinin krom kaplanması esasına dayanır. Krom tabaka, taşlanmış merdane yüzeyinde çökerek Şekil 2.29’da şematik olarak gösterildiği gibi yarı küresel şekle sahip tümsekler (damlacık) oluşturur.



Şekil 2.29. Topokrom kaplama yüzeyi (damlacık görünümü) [29].

Topokrom yöntemiyle pürüzlendirilmiş merdane yüzeyi şu özelliklere sahiptir:

- Mutlak stokastik dağılımı ile yarı küresel yüzey yapısı.
- Krom kaplanmış yüzey sertliğine sahip.
- İstenen değerde Ra ve R_{Pc} elde edilebiliyor olması. ($0,5 \mu\text{m} < \text{Ra} < 12 \mu\text{m}$)
- Yüksek tepecik sayısının yüksek pürüzlülükte elde edilebiliyor olması.
- İsteğe göre açık ya da kapalı yüzey topoğrafyası elde edilebilmesi (Şekil 2.30).

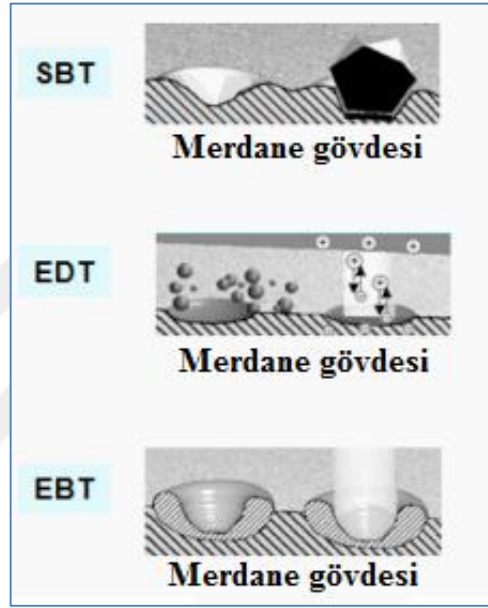


a) Açık yapı

b) Kapalı yapı

Şekil 2.30. Yüzey topoğrafyası [29].

Topokrom pürüzlendirme yöntemi temelde diğer pürüzlendirme yöntemlerinden ayrılır. SBT yönteminde mekanik olarak pürüzlendirme yapılırken; EDT, EBT gibi yöntemlerde elektrik enerjisi kullanılmaktadır. Bu geleneksel yöntemlerle yapılan pürüzlendirme işlemlerinde merdane yüzeyinde çukurcuklar oluşturulur (Şekil 2.31). Bu krater görünümlü yüzeylerin abrazyon aşınma direnci çok düşüktür. Bu yüzden servis ömürlerinin uzatılması için sert krom kaplama gibi ilave işlemlere ihtiyaç duyulmaktadır.



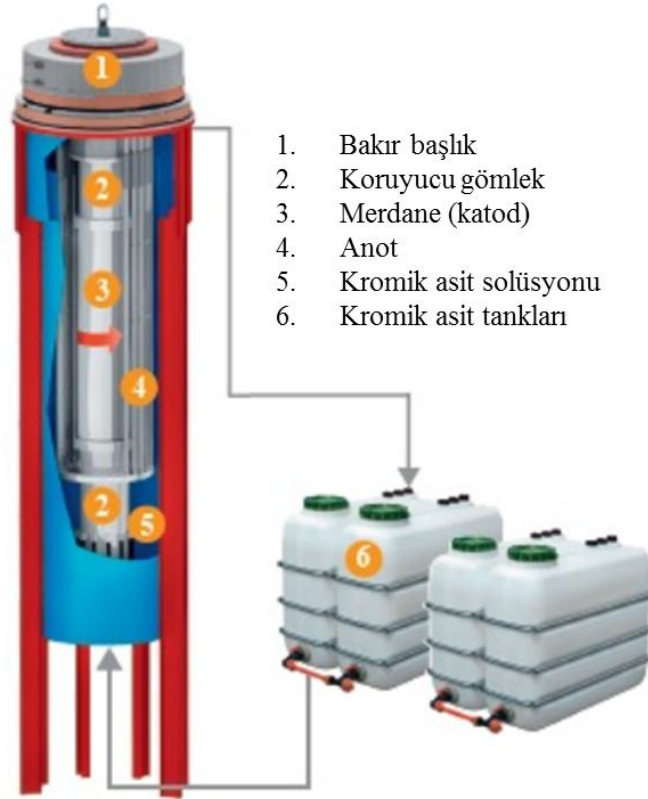
Şekil 2.31. Geleneksel pürüzlendirme yöntemlerinde çukurcuk oluşumu [29].

Kaplama İşlemi

Bu yöntem reaktör teknolojisine dayanmaktadır. Taşlanmış ve üzerindeki yağı alınarak temizlenmiş (degreasing) iş merdaneleri dik konumda reaktöre yerleştirilir. Şekil 2.32’de Salzgitter firmasına ait topokrom tesisinde bu işlem görülmektedir. Reaktör, merdanenin monte edildiği reaktör başlığı ile kapatılır. Kaplama işlemi sırasında katod olarak görev yapan merdane, eş merkezli anot çubuklar ile çevrilidir (Şekil 2.33).



Şekil 2.32. Salzgitter topokrom tesisi [29].

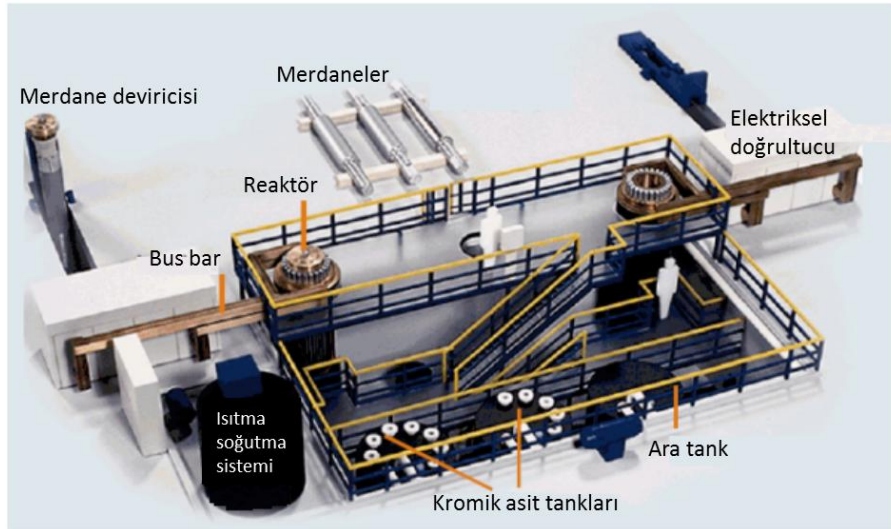


Şekil 2.33. Topokrom kaplama reaktörü [29].

İşlem boyunca elektrolit sıvısı olarak kullanılan kromik asit solüsyonu, reaktör ile elektrolit tankları arasında sürekli olarak devir daim yapmaktadır. Elektrik akımı bakır baralar aracılığıyla doğrultucudan anota ve merdaneye iletilir. İşlem parametrelerinin, özellikle de akım fonksiyonunun uygun bir şekilde kontrol edilmesiyle, birim alana düşen damlacık sayısı ve ortalama yüksekliği, dolayısıyla pürüzlülük ve tepecik sayısı istendiği gibi değiştirilebilmektedir. İşlem parametrelerinin kontrolü son derece kolay olduğundan topokrom teknolojisi basit ve güvenilir bir yöntemdir. Kaplama işlemi sırasında merdanenin kendi ekseninde dönüşü, tüm merdane yüzeyi boyunca pürüzlülük değerlerinin düzgün dağılımını sağlar. Böylece otomobil gövde sacının pürüzlendirilebilmesi için merdane yüzeyindeki ortalama pürüzlülük değerinin $\pm 0,1$ μm 'lik toleransı muhafaza edilebilir. İşlem parametreleri dijital olarak kaydedilir ve daha sonraki üretimler için tekrar aktif hale getirilir. Böylece özelleştirilmiş yüzey yapısı her zaman yeniden üretilmektedir.

Geleneksel elektrokaplama tesislerinin aksine, topokrom reaktör teknolojisi sadece kapalı reaktörlerde çalıştırılmaktadır. Topokrom tesisleri kesinlikle atık su ve emisyon içermez. Tesis, sıkı yasal talepleri ve ayrıca çevre ve çalışanların korunmasına ilişkin yüksek standartları karşılamaktadır [29].

2 reaktörlü bir topokrom tesisinin şeması Şekil 2.34'de verilmiştir. Şekil 2.35'de ise Posco firmasına ait bir topokrom tesisinin kompleksi görülmektedir.



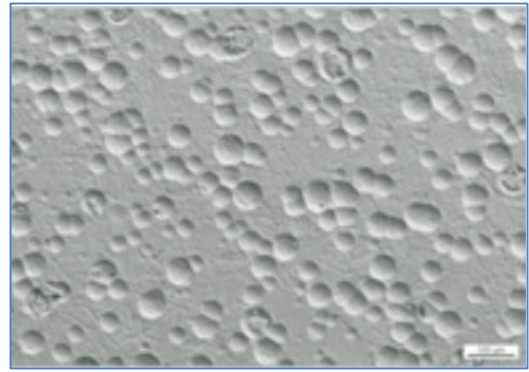
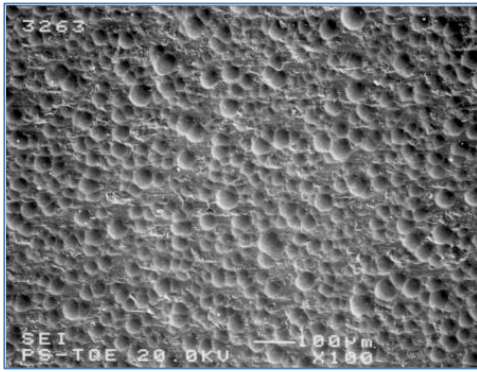
Şekil 2.34. 2 reaktörlü bir topokrom kaplama tesisinin şeması [29].



Şekil 2.35. Posco topokrom tesisi [29].

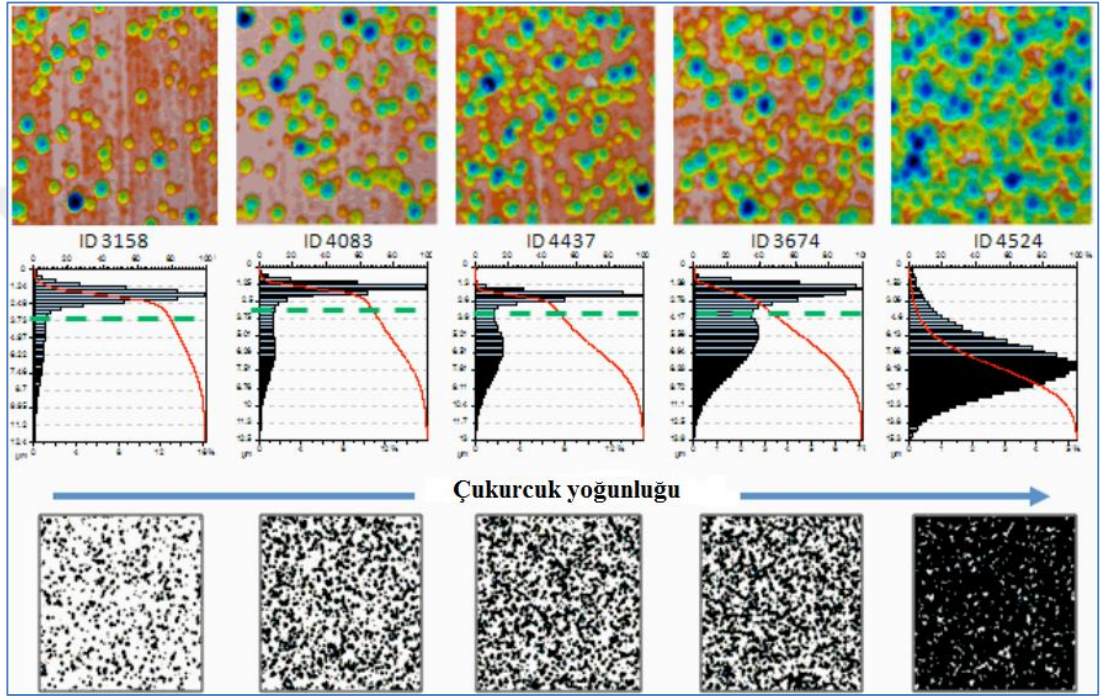
Topokrom Yönteminin Üstün Tarafları

Bu yöntemle merdanede oluşturulan özel yüzey yapısı sayesinde sacların şekillendirilebilme ve boyama kalitesinde kayda değer bir iyileşme görülmektedir. Bu yöntemle pürüzlendirilen saclar, tüm yüzey boyunca düzgün ve stokastik olarak dağılan yarım küre şeklindeki çukurcuk görüntüsüyle kolayca ayırt edilebilmektedir (Şekil 2.36). Bu yüzey yapısı sayesinde çukurcuklar üst üste binseler dahi her zaman hidrostatik yağlama ceplerinin oluşumu sağlar.



Şekil 2.36. Topokrom yöntemiyle pürüzlendirilmiş malzeme yüzey topoğrafyaları [29].

İşlem parametrelerinin uygun bir şekilde kontrol edilmesiyle malzeme yüzeyinde birim alana düşen çukurcuk sayısı ve ortalama pürüzlülük istendiği gibi ayarlanabilmektedir (Şekil 2.37). Yarım kürelerin üst üste bindiği kapalı yüzey yapısı (Şekil 2.30 (b)) elde edilebildiği gibi, birbirlerine mesafeli olarak açık yapılar da (Şekil 2.30 (a)) elde edilebilir. Dış gövde panelleri ve iç bileşenler için hafif açık bir yapı tercih edilir.



Şekil 2.37. Farklı yoğunlukta pürüzlendirilmiş malzeme yüzey görüntüleri [29].

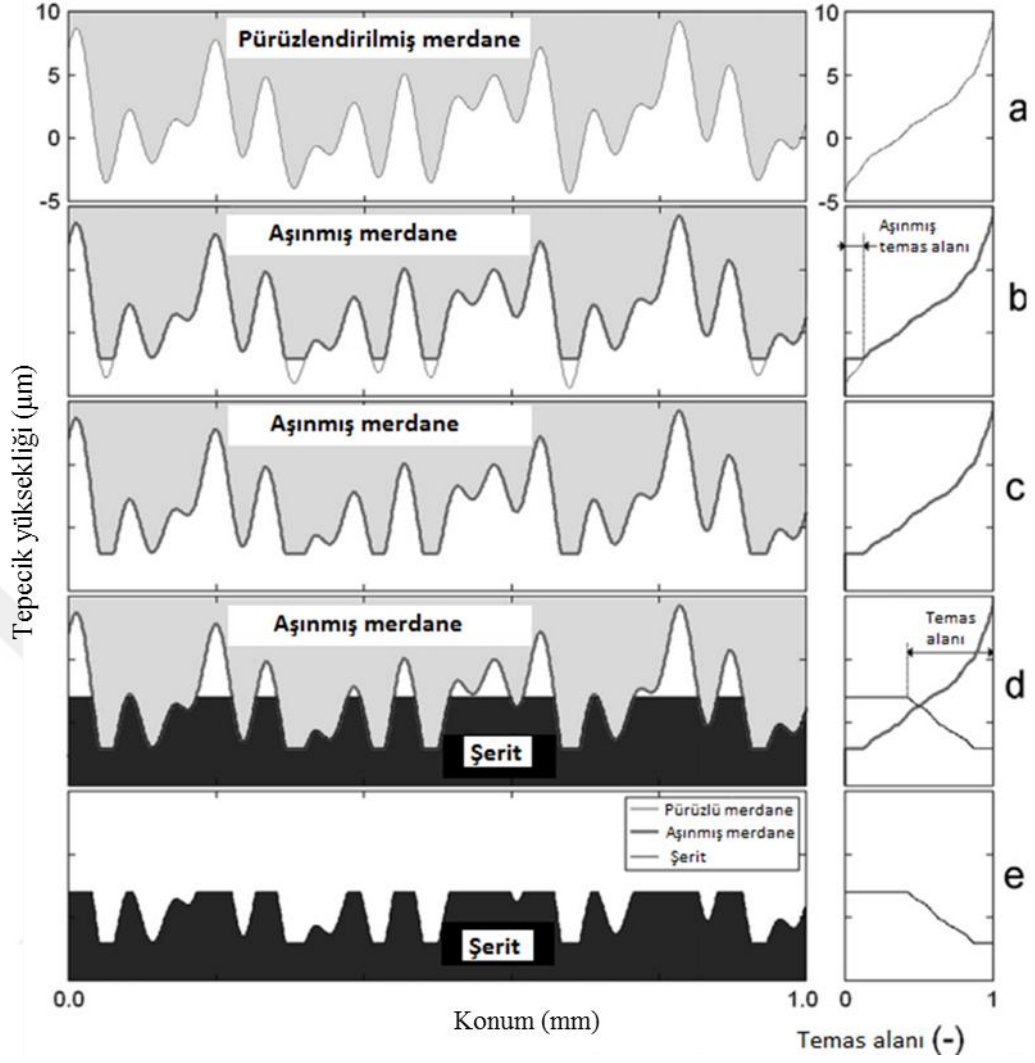
BÖLÜM 3

PÜRÜZLÜLÜK TRANSFERİ

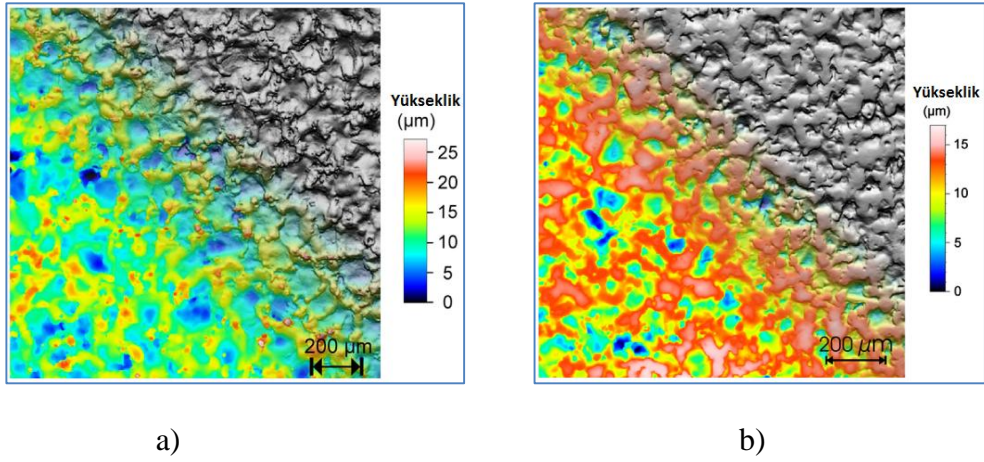
Pürüzlendirilmiş hadde merdanesi ile yapılan haddelemede merdane yüzey pürüzlülüğünün tamamı saca aktarılamaz. Bu oran birçok nedene bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Wentink vd.'ne göre % 1 uzama verilen simülasyonlarda % 92'lere kadar pürüzlülük transferi sağlanabiliyorken bu oran gerçek temper haddelemede % 35 mertebelerindedir.

Şekil 3.1 (a) ve Şekil 3.2 (a)'da görüldüğü gibi pürüzlendirilen merdanenin yüzeyi farklı yükseklikte tepelik ve çukurcuklardan ibarettir. Haddeleme sırasında büyük yük altında en yüksek olanlardan başlayarak tepelikler kırılır ve platolar oluşur (Şekil 3.1 (b), (c) ve Şekil 3.2 (b)). Böylece merdanenin yüzey pürüzlülüğü giderek azalır. Ancak bu azalma haddelemeye başlandığı ilk andaki kadar hızlı değildir ve zamanla kararlı bir azalma eğilimi içerisine girer. Tepelik sayısındaki değişim, pürüzlülükteki bu değişime benzerlik gösterir [34].

İşlem sırasında şerit şeklindeki malzemenin yüzeyi, merdane yüzey profilinin negatif formunu (replika) alır. Yani merdane yüzeyindeki tepelikler şerit yüzeyinde çukurcuk oluştururken çukurcuklar ise tepeliklerin oluşumunu sağlar (Şekil 3.1 (d) ve Şekil 3.1 (e)).



Şekil 3.1. Merdane aşınması ve transfer modeli [34].



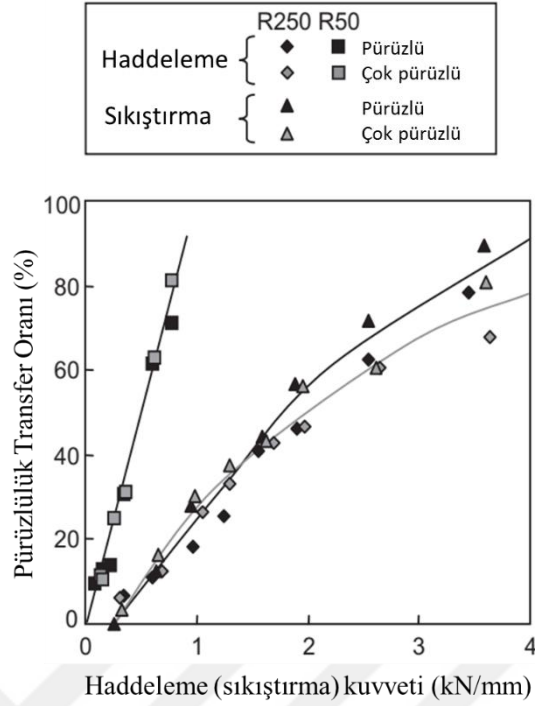
Şekil 3.2. Yüzey topoğrafya görüntüleri. a) Pürüzlendirilmiş merdane yüzey topoğrafyası (haddeme öncesi) b) Haddeme sonucu aşınmış merdane yüzey topoğrafyası [34].

3.1. HADDELEME KUVVETİ – PÜRÜZLENDİRME İLİŞKİSİ

Bölüm 2’de detaylı olarak anlatılan haddeleme kuvveti esasen, metalin ezilirken merdanelerin arasını açmaya çalışan radyal yöndeki direnç kuvvetidir (Şekil 2.4).

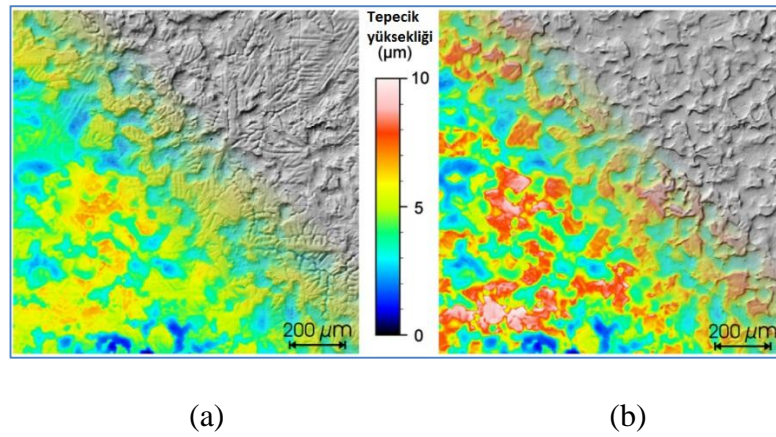
Domanti vd.’nin pürüzlendirilmiş merdane ile kuru temper haddeleme şartlarında yapmış oldukları test sonuçlarına göre haddeleme kuvveti, parlak merdanelerle yapılan haddelemeye nazaran azalmakta olup bu azalma ince malzemelerde daha belirgindir [35]. Oysa Udomphol’a göre yüksek sürtünme (yani yüksek pürüzlülük), yüksek haddeleme yükünü netice vermektedir [19]. Haddeleme kuvvetinin pürüzlülük ile birlikte arttığı bilgisi Erdemir 2. Soğuk Haddehane pratikleriyle de örtüşmektedir.

Kijima (2014) pürüzlülük transferinin haddeleme kuvveti ile doğru orantılı olarak arttığını göstermiştir (Şekil 3.3). 50 mm ve 250 mm yarıçaplarında, 3,1 µm (pürüzlü) ve 8 µm (çok pürüzlü) pürüzlülükte merdanelerle yapmış olduğu testlerde, her iki pürüzlülükte de haddeleme kuvvetinin artması ile birlikte pürüzlülük transfer oranının arttığı sonucuna ulaşmıştır. Grafikte bu artışın 50 mm yarıçaplı küçük merdanelerde daha belirgin olduğu görülmektedir. Bu ilişki sıkıştırma kuvveti için de söz konusudur. Ancak sıkıştırma kuvvetinin transfer üzerine etkisi haddeleme kuvvetininki kadar güçlü olmadığı sonucuna varılmıştır [36]. Konuyla ilgili bir diğer araştırmada ise merdaneden malzemeye transfer edilen profil yüksekliğinin (Ra) esasen, sıkıştırarak ezme (compression reduction) ile tanımlanabileceği, haddeleme işleminin transfer üzerine etkisinin çok daha az olduğu vurgulanmıştır [37].



Şekil 3.3. Pürüzlülük transferi – haddeleme (sıkıştırma) kuvveti ilişkisi [36].

Wentink vd.'nin farklı haddeleme yüklerinde yapılan iki farklı haddeleme deneyi sonucu şeritten aldıkları numunelerin mikroskop görüntüleri Şekil 3.4'de verilmiştir. Şekil 3.4 (a) 0,80 kN/mm, Şekil 3.4 (b) 1,45 kN/mm haddeleme kuvveti altında elde edilen yüzeylere aittir. Şekil 3.4 (b)'de daha fazla haddeleme yapılmış olmasına rağmen (merdane çalıştıkça pürüzlülüğü azalır) haddeleme kuvveti büyük olduğundan daha yüksek şerit pürüzlülüklerine erişildiği görülmektedir [34].

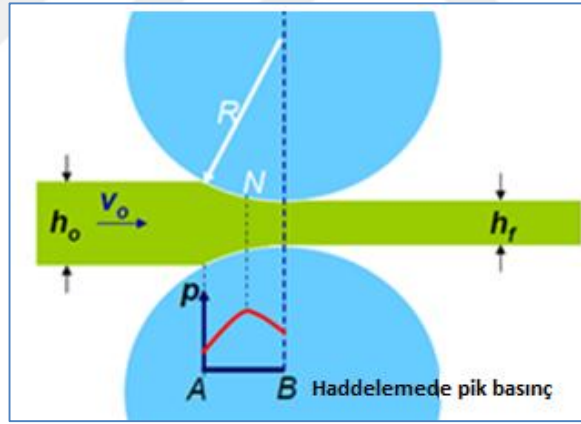


Şekil 3.4. Pürüzlülük transferi – haddeleme kuvveti ilişkisi. a) 0,80 kN/mm yük altında haddelenmiş malzeme b) 1,45 kN/mm yük altında haddelenmiş malzeme [34].

3.2. PİK BASINCI – PÜRÜZLENDİRME İLİŞKİSİ

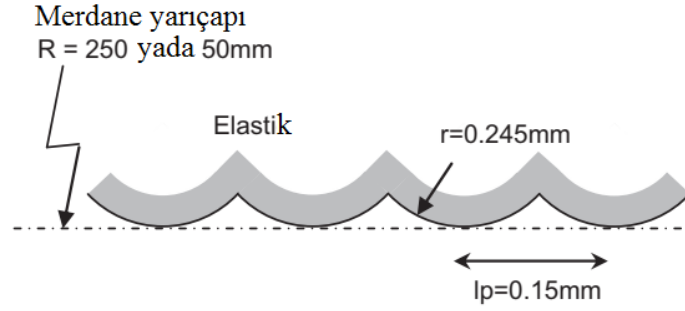
Merdaneler arasına h_o kalınlığı ile giren malzeme incelerek h_f kalınlığına düşerken, V_o giriş hızı da giderek artmaktadır. Temas yayının başlangıç noktasında merdane malzemeden hızlıdır. Malzeme incelerek hızı artar ve belli bir noktadan sonra malzemenin hızı merdanelerin çevre hızını geçer. Sürtünmenin olmadığı kabul edilen bu noktada (N: nötr nokta) temas basıncı en yüksek değerine ulaşmaktadır. Bu basınca pik basınç denir (Şekil 3.5) [19]. Pik basınç Kijima P_{max}/σ_o olarak tanımlamıştır. σ_o : malzemenin haddeleme öncesi akma dayanımını temsil etmektedir [36].

Sürtünme kuvveti normal kuvvet ile doğru orantılıdır. Ara yüzeyde oluşan bu basıncın bileşkesi normal kuvveti oluşturduğundan dolayı sürtünme kuvvetinin basınca bağlı olarak değiştiği söylenebilir. Yani basıncın en yüksek olduğu nötr noktada her ne kadar izafi hareket olmasa da sürtünme kuvveti maksimumdur. Bunda statik sürtünme katsayısının kinetik sürtünme katsayısından yüksek olmasının da etkisi vardır.



Şekil 3.5. Temas yayı boyunca basınç dağılımı (pik basınç) [19].

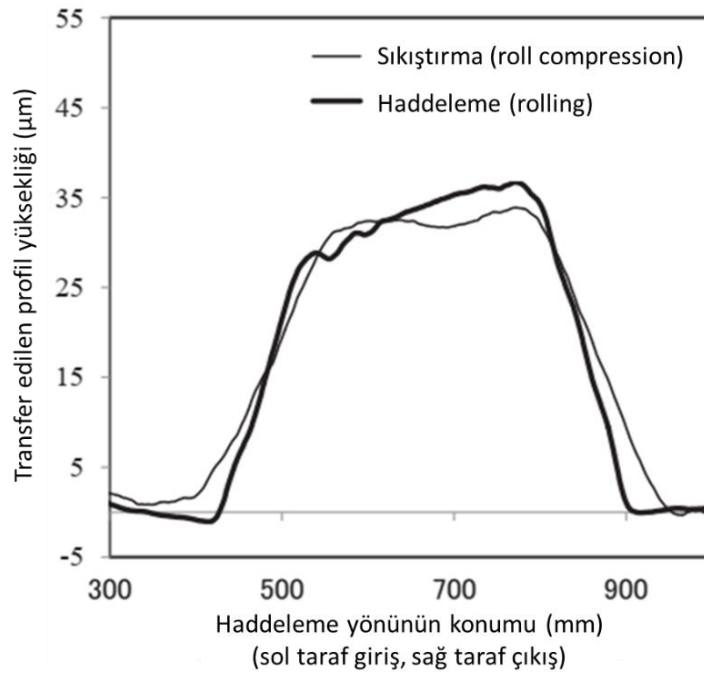
Kijima pik basınç değerini sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplamıştır. Yüzey pürüzlülüğünü, 50 mm ve 250 mm çaplı silindirik yüzey üzerinde bir seri dairesel elementlerle modellemiştir (Şekil 3.6). Analiz sonucuna göre pik basıncın (P_{max}/σ_o), büyük çaplı merdanelerle ($\phi 250$) belirli şartlar altında yapılan temper haddelemede pürüzlülük transferi yaklaşımı için en önemli parametrelerden biri olduğunu ve pik basıncın oluştuğu nötr noktadan (N), temasın bittiği B noktasına kadar olan bölgede pürüzlülük transferinin giderek arttığını belirtmiştir [36].



Şekil 3.6. Merdane yüzeyindeki pürüzlülük profili modeli [36].

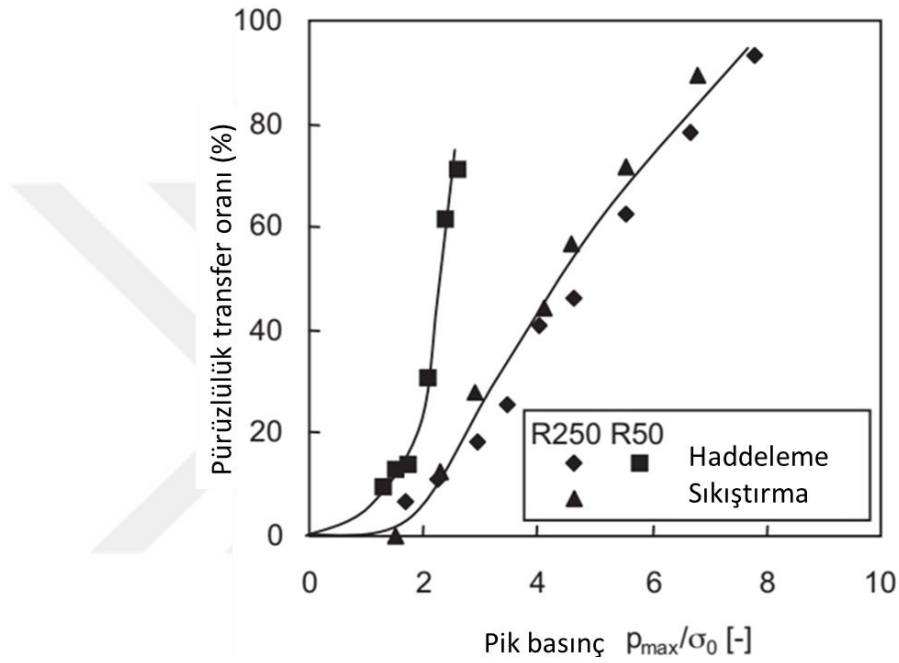
Kijima vd.'nin 2008 yılında yapmış oldukları sonlu elemanlar analiz sonuçlarına göre tepecikler arasındaki mesafenin (Şekil 3.6'da $l_p = 0,15\text{mm}$ 'dir.) büyük olması şartıyla pürüzlülüğü düşük merdane kullanımı halinde transferin daha fazla olduğu vurgulanmıştır. Bu etkinin özellikle 500-750 MPa gibi orta şiddet basınç değerlerinde söz konusu olduğu belirtilmiştir [38].

Fujii vd.'nin bulmuş olduğu sonuçlar buna paraleldir. 2 boyutlu pürüzlendirilmiş yüzeylerle yapılan haddeleme testlerine göre malzeme yüzey pürüzlülüğü çıkış tarafa doğru tedricen bir artış göstermektedir. Bu artış sıkıştırma (roll compression) testlerinde gözlenmemiştir (Şekil 3.7) [37].



Şekil 3.7. Transfer edilen pürüzlülük yüksekliği (ezme oranı %7) [37].

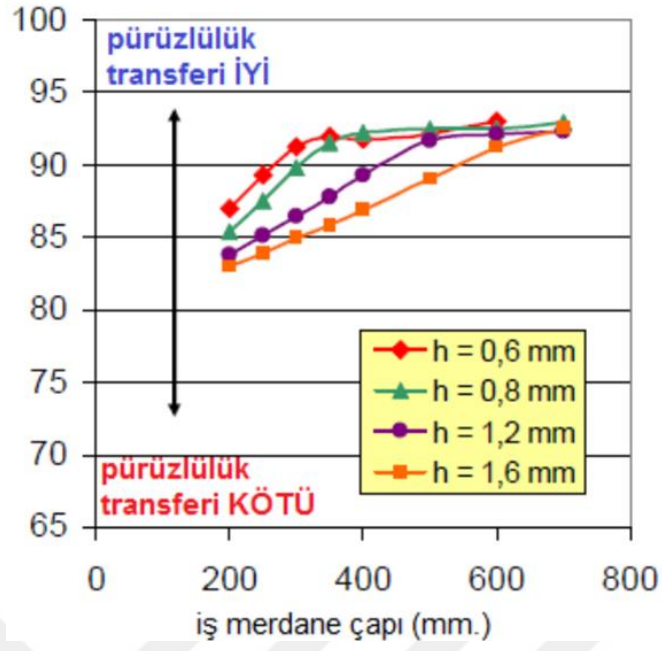
Kijima'nın 2014 yılında yapmış olduğu haddeleme ve sıkıştırma testlerinde, transfer oranının %20'nin altında olduğu durumlarda küçük çaplı merdanenin ($\phi 50$) pürüzlülük transferinin, büyük çaplı merdaneninkine ($\phi 250$) oldukça yakın olduğu sonucuna ulaşmıştır (Şekil 3.8). Kijima'ya göre haddeleme kuvveti arttığında pik basınç değerindeki küçük bir artış dahi pürüzlülük transferini arttırmaya yetmektedir ve bu artışın küçük çaplı merdanelerde daha belirgin olduğu görülmektedir [36].



Şekil 3.8. Pürüzlülük transferi – pik basıncı ilişkisi (pürüzlü merdane ile) ($\sigma_0=165,8$ MPa) [36].

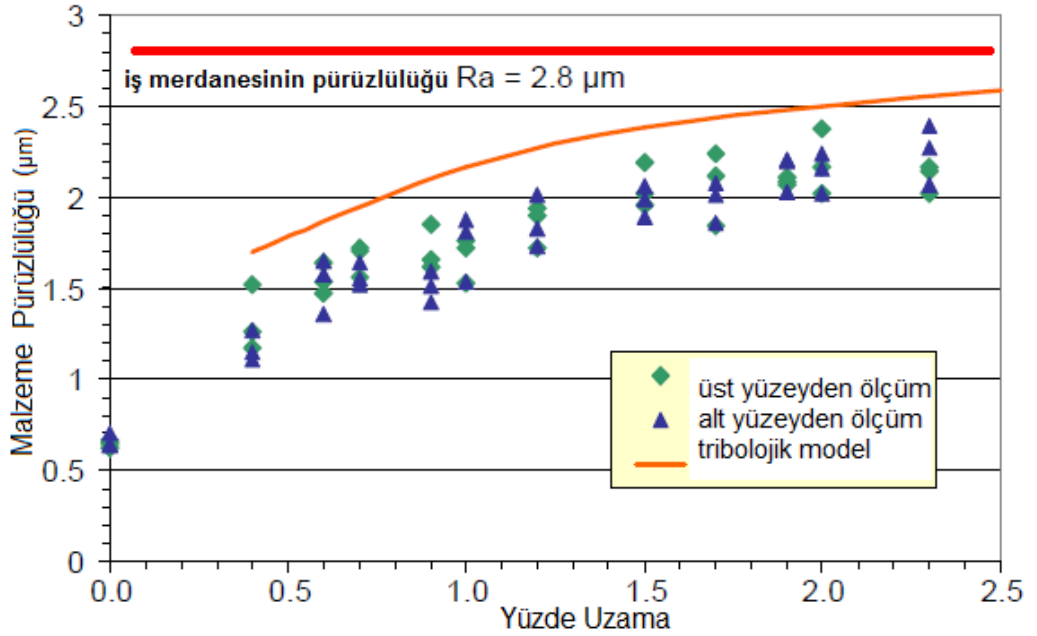
3.3. MERDANE ÇAPI VE YÜZDE UZAMANIN PÜRÜZLENDİRME İLE İLİŞKİSİ

SMS DEMAG'a göre merdane çapı büyüdükçe pürüzlülük transferi artmaktadır. Bu artışın ince malzemelerde (küçük h değerlerinde) daha belirgin olduğu açıktır (Şekil 3.9). Oysa Şekil 3.8'de bunun aksine merdane çapı ile pürüzlülük transferi arasındaki ilişkinin ters olduğu, yani büyük çaplı merdanelerde pürüzlülük transferinin daha az gerçekleştiği görülmektedir.



Şekil 3.9. Merdane çapı – pürüzlülük transferi ilişkisi [39].

Pürüzlülük transferi yüzde uzamaya bağlı olarak artmaktadır [39,40]. Bu durum Şekil 3.10'daki grafikte gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Yüzde uzamanın pürüzlülük transferine etkisi [39].

SMS DEMAG tarafından yapılan testler sonucunda malzemenin her iki yüzeyinde pürüzlülük transferinin yüzde uzama (strain) ile arttığı ve bu artışın ince malzemelerde daha belirgin olduğu sonucuna varılmıştır [39].

Kijima 2014 yılında yapmış olduğu çalışmasında, büyük çaplı ($\phi 250$) merdane kullanımında pürüzlü ($3,1 \mu\text{m}$) merdane ile %0,5 uzama elde ederken, çok pürüzlü ($8 \mu\text{m}$) merdane ile %1 uzama elde etmiştir. Bu uzama değerleri aynı hadde kuvveti altında parlak (taşlanmış fakat pürüzlendirilmemiş) merdanelerle elde edilen uzama değerlerinden daha büyüktür. Bu etkinin küçük çaplı ($\phi 50$) merdaneler için gözlenmediği belirtilmiştir [36].

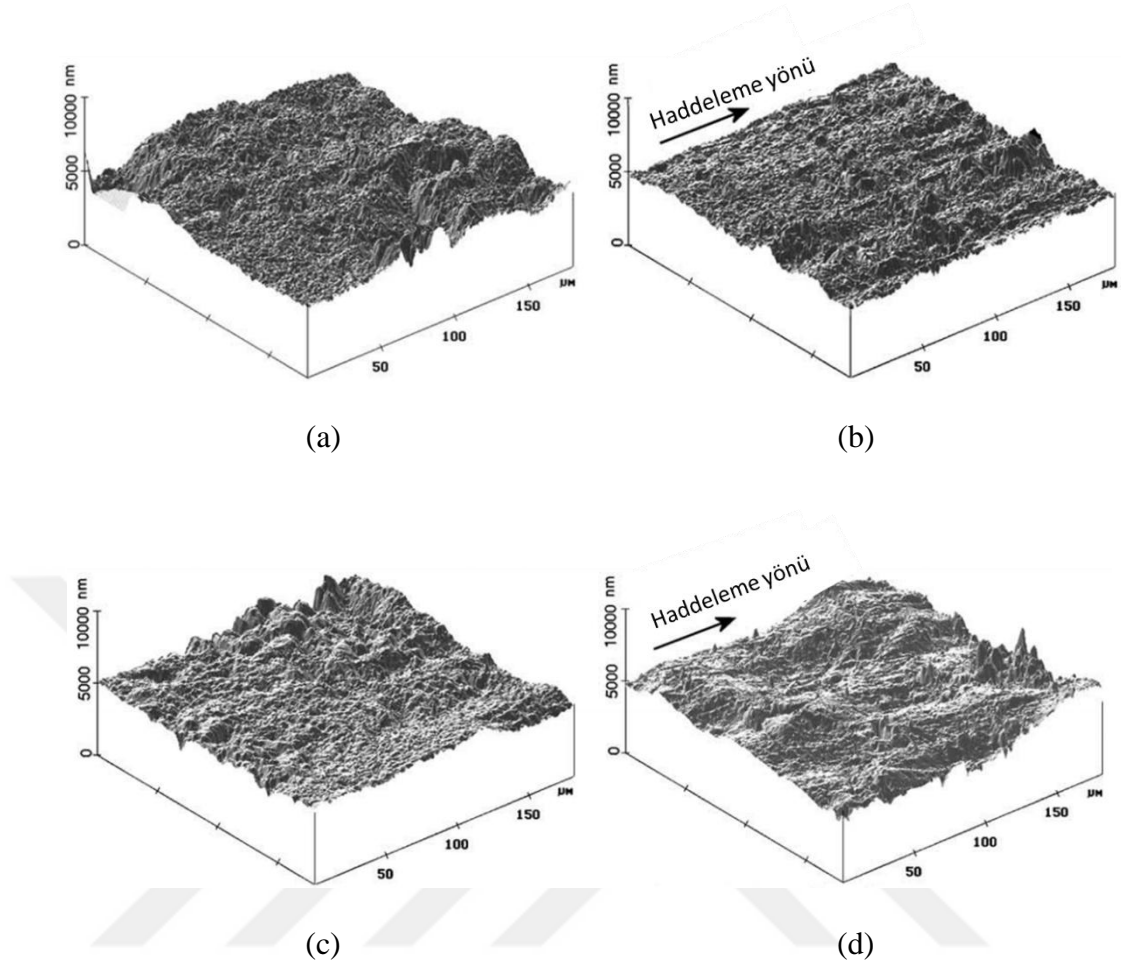
Kijima, pik basıncı: büyük çaplı merdanelerle ($\phi 250$) belirli şartlar altında yapılan temper haddelemede pürüzlülük transferi yaklaşımı için en önemli parametrelerden birisi olarak tanımlamıştır. Küçük çaplı merdanelerde temas yayı kısa olduğundan hidrostatik basınç oluşumu için gerekli şartlar sağlanamamaktadır. Bu yüzden pürüzlü ($3,1 \mu\text{m}$) ve büyük çaplı ($\phi 250$) merdane kullanımında %1 uzama ile %60 pürüzlülük transferi elde edilebiliyorken, aynı oranda transferi pürüzlü ve küçük merdane ($\phi 50$) kullanımında elde edebilmek için %3 uzama verilmesi gerektiğini belirtmiştir [36]. Kimura vd.'nin yapmış olduğu araştırmada uzamanın artmasıyla birlikte bu transferin arttığı, aynı uzama değerlerinde pürüzlülük transferinin artırılabilmesi için merdane çapının büyütülmesi gerektiği gösterilmiştir [40]. Pürüzlülük transferini arttırmak için yüzde uzamayı arttırmak kesin bir çözüm değildir. Çünkü uzamayla birlikte ezme miktarı da artmakta ve bu da şerit yüzey kalitesinin bozulmasına yol açabilmektedir.

3.4. HIZ, EZME MİKTARI VE YAĞLAMANNIN PÜRÜZLENDİRME ÜZERİNE ETKİSİ

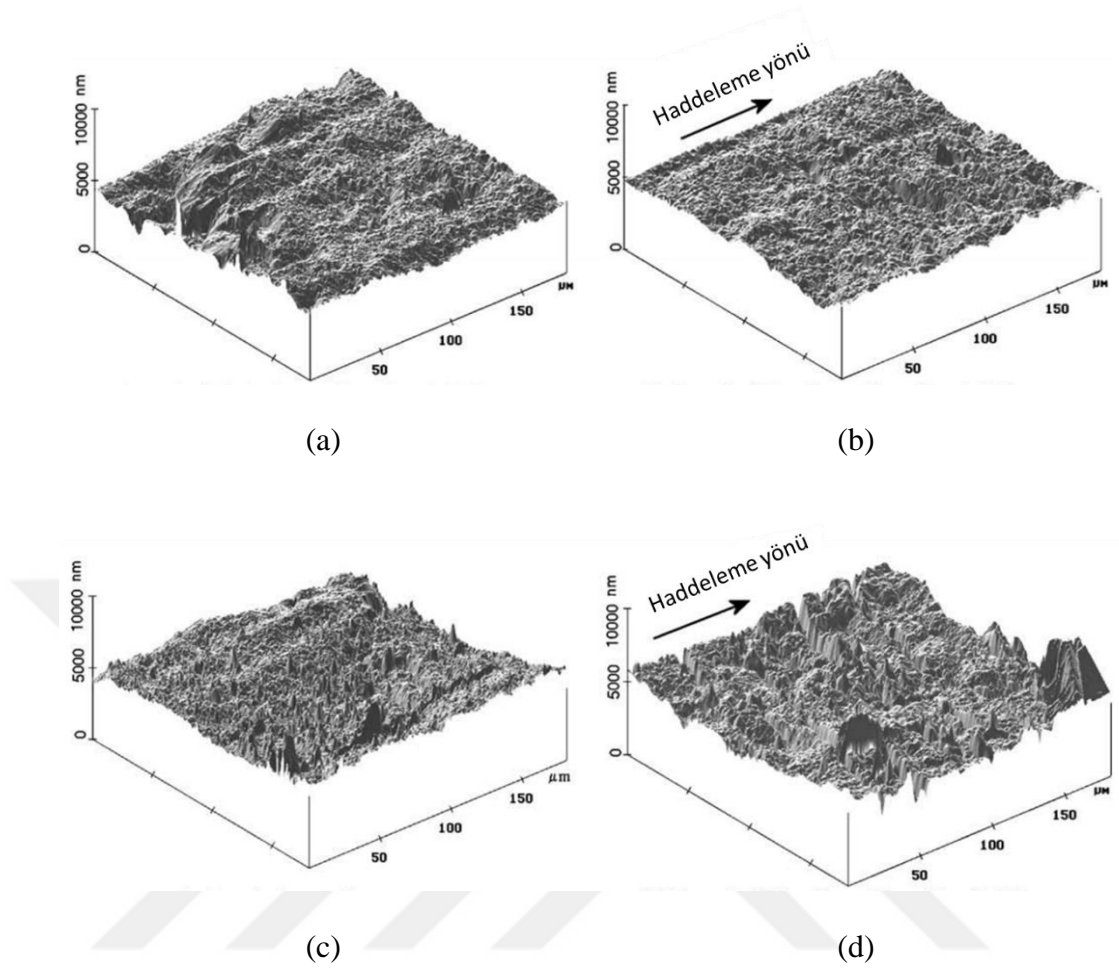
Hız, ezme miktarı ve yağlamanın pürüzlendirme üzerine etkilerinin incelendiği, Ma vd.'nin yapmış olduğu bir çalışmada, sıcak haddelenmiş karbon çeliğinden 2 mm kalınlığında, 75 mm genişliğinde ve 1200 mm uzunluğunda numuneler kesilerek, sensör merdaneli 2'li hadde simülatöründe testler yapılmış olup en yüksek hadde torkunun 1300 kgm olduğu durumda maksimum haddeleme yükünün 150 ton geldiği belirtilmiştir. 225 mm çapında merdanelerin kullanıldığı bu çalışma, %7 ve %20 ezme

oranlarında, 5-30-60 d/dk hızlarında, kuru ve yağlı olarak yapılmıştır. Merdane yüzey pürüzlülüğünün ölçümünde portatif bir yüzey pürüzlülük ölçme cihazı, haddelenen numunelerin yüzey topoğrafyasının ölçüm ve görüntülenmesinde ise 0,08 nm çözünürlüğünde AFM kullanıldığı belirtilmiştir [41].

Ma vd.'nin bu çalışmasında; taşlanarak parlatılmış merdanelerle, farklı hız ve pasolarda, yağlı ve kuru olarak yapılmış haddelenme test sonuçlarından elde ettikleri malzeme yüzeyinin AFM görüntüleri Şekil 3.11 ve Şekil 3.12'de verilmiştir. Şekil 3.11 kuru haddelenen 1 ve 12 nolu numunelere, Şekil 3.12 ise yağlı haddelenen 13 ve 24 nolu numunelere aittir. 1 ve 13 nolu numuneler düşük hız ve küçük pasoda, 12 ve 24 nolu numuneler yüksek hız ve büyük pasoda haddelenmiştir. Düşük hız ve küçük pasoda haddelenen 1 nolu numunenin yüzey pürüzlülüğünün azaldığı (Şekil 3.11 (a) ve (b)), daha yüksek hızda ve pasoda haddelenen 12 nolu numunenin pürüzlülüğünün ise arttığı (Şekil 3.11 (c) ve (d)) görülmektedir. Bu durumun yağlı haddelenmiş 13 ve 24 nolu numunelerde de aynı olduğu görülmektedir. Yani düşük hız ve pasoda, yağlı haddelenme sonucu malzeme yüzey pürüzlülüğünün azaldığı (Şekil 3.12 (a) ve (b)), yüksek hız ve pasoda ise arttığı görülmektedir (Şekil 3.12 (c) ve (d)). Ayrıca AFM görüntüleri incelendiğinde haddelenme sonrasında yüzey pürüzlülüğünün haddelenme istikametinde yönlendiği fark edilmektedir [41].

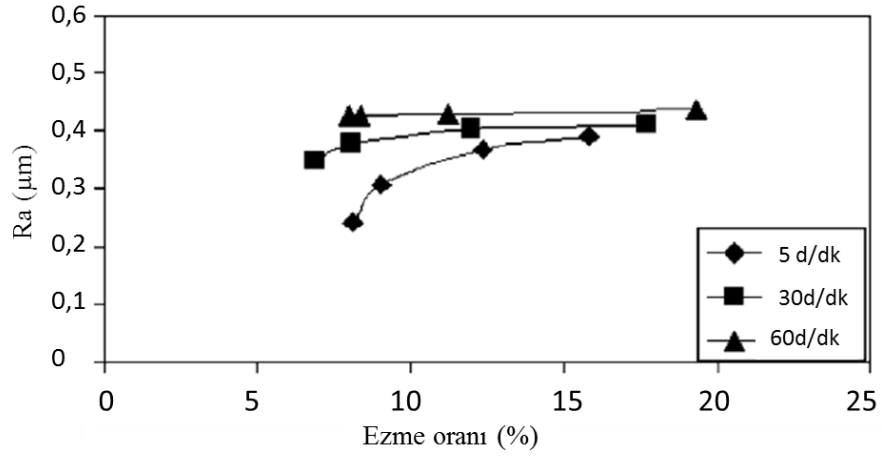


Şekil 3.11. Yağsız olarak farklı hız ve pasolarda yapılan haddelme sonucu elde edilen yüzey topoğrafyaları. a) Haddelme öncesi 1 nolu numune (% 8,1 paso, 5 d/dk, $R_a = 0,307 \mu\text{m}$), b) Haddelme sonrası 1 nolu numune ($R_a = 0,243 \mu\text{m}$), c) Haddelme öncesi 12 nolu numune (% 18 paso, 60 d/dk, $R_a = 0,280 \mu\text{m}$), d) Haddelme sonrası 12 nolu numune ($R_a = 0,412 \mu\text{m}$) [41].

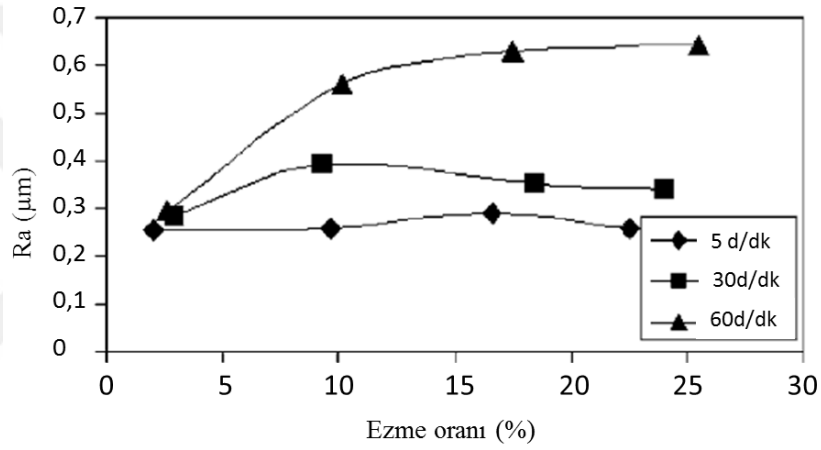


Şekil 3.12. Yağlı olarak farklı hız ve pasalarda yapılan haddeme sonucu elde edilen yüzey topografyaları. a) Haddeme öncesi 13 nolu numune (% 2 paso, 5 d/dk, $R_a = 0,348 \mu\text{m}$), b) Haddeme sonrası 13 nolu numune ($R_a = 0,253 \mu\text{m}$), c) Haddeme öncesi 24 nolu numune (% 25 paso, 60 d/dk, $R_a = 0,304 \mu\text{m}$), d) Haddeme sonrası 24 nolu numune ($R_a = 0,643 \mu\text{m}$) [41].

Ma vd.'nin aynı çalışmasında haddeme hızı arttıkça şerit pürüzlülüğünün arttığı gösterilmiştir (Şekil 3.13 (a) ve (b)). Bu ilişkinin yağlı haddeme şartlarında daha belirgin olduğu açıktır. Nitekim başlangıç pürüzlülüğü $0,280 \mu\text{m}$ olan malzemenin yüksek hız ve yüksek pasoda kuru haddelenmesi sonucunda pürüzlülüğü $0,412 \mu\text{m}$ 'ye çıkarak %47 artış göstermesine karşın (Şekil 3.11 (c) ve (d)), başlangıç pürüzlülüğü $0,304 \mu\text{m}$ olan malzemenin yüksek hız ve yüksek pasoda yağlı haddelenmesi sonucu pürüzlülüğü $0,643 \mu\text{m}$ 'ye yükselerek %111 arttığı görülmektedir (Şekil 3.12 (c) ve (d)).



a) Kuru haddeleme



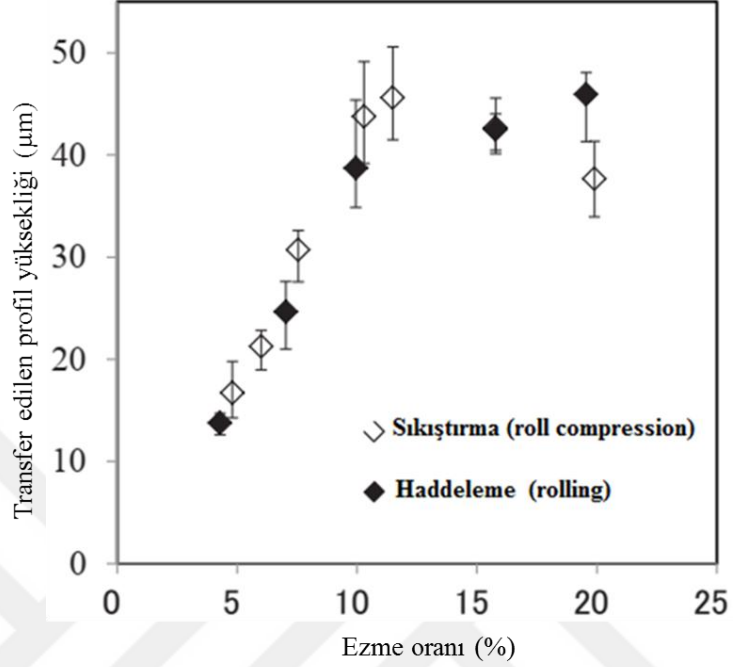
b) Yağlı haddeleme

Şekil 3.13. Ezme oranı, hız ve yağlama durumunun pürüzlülük transferi üzerine etkisi [41].

Çoğu zaman şerit yüzey pürüzlülüğü, artan ezme miktarı ile birlikte artar. Ancak bu artışın Şekil 3.13 (a)'da görüldüğü gibi kuru haddeleme testlerinde yüksek devirlerde çok belirgin olmadığı görülmektedir. Oysa yağlı haddeleme durumunda ezme miktarına bağlı olarak şerit pürüzlülüğünün yüksek devirlerde artışı kayda değerdir. Yağlı haddeleme şartlarında 60 d/dk hızında şerit pürüzlülüğü 0,6 µm değerine ulaşmasına rağmen, kuru haddelemede aynı devirde ancak 0,4 µm mertebelerinde yüzey pürüzlülüğü elde edilebildiği görülmektedir (Şekil 3.13 (b)) [41].

Fujii vd.'nin yapmış olduğu haddeleme ve sıkıştırma test sonuçlarına göre merdaneden malzemeye transfer edilen profil yüksekliği (pürüzlülük), %10'un altında ezme

yapılan durumlarda ezme oranına fevkalade bağlıdır. Ancak ezme oranının %10'un üzerinde olması halinde yüksekliğin sabit olduğu söylenebilir (Şekil 3.14) [37].



Şekil 3.14. Ezme oranı – pürüzlülük ilişkisi [37].

Diğer araştırmacıların sonuçları da farklı değildir. Wu vd. ezme miktarının artmasıyla birlikte haddemele kuvvetinin ve pürüzlülük transferinin arttığı sonucuna ulaşmışlardır. Pürüzlülük transferinin yüzde yüz gerçekleşmesinin mümkün olmadığını, çok küçük ezme oranlarında sadece elastik şekil değişimi olduğundan hemen hemen hiç pürüzlülük transferi gerçekleşmediğini belirtmişlerdir [42]. Chunyu vd. temper haddelenmiş şeritlerin yüzey pürüzlülüğü tahmin modeline göre, malzeme yüzey pürüzlülüğünü etkileyen en önemli faktörün ezme miktarı ve gergi kuvveti olduğu sonucuna varmışlardır [43]. Kimura vd.'ne göre aynı yüzde uzama değerlerinde gergi kuvveti arttıkça pürüzlülük transferi azalmaktadır [40]. Bu durum gergi kuvvetinin haddemele kuvvetini düşürücü etkisiyle açıklanabilir (Şekil 2.14).

Genel olarak söylenebilir ki: pürüzlülük transferi küçük ezme oranlarında azalmaktadır. Bu durum bir ütüleme haddesi olan temper haddelemede göz önünde bulundurulması gereken hususlardandır. Haddemele hızının artırılması ile bu durum telafi edilebilir. Böylece hızın artması ile üretim miktarının da artması sağlanmış olur.

Malzeme yüzeyinde daha homojen bir pürüzlülük elde etmek için Rui vd.'nin varmış oldukları sonuçtan yararlanılabilir. FEM ile modelledikleri iki stendli temper hadde ile yapılan simülasyonlar neticesinde ikinci stend merdane pürüzlülüğünün birinci stend merdane pürüzlülüğünden düşük tutulması halinde malzeme yüzeyinde daha dar bir aralıkta pürüzlülük elde edildiği sonucuna varmışlardır [44].



BÖLÜM 4

DENEYSSEL ÇALIŞMALAR

4.1. HADDELEME DÜZENEGİ

Haddeleme testleri: 5-60 d/dk hız aralığında ayarlanabilen, 1,5 kW gücünde motorla tahrik edilen 2'li haddeleme düzeneği ile yapılmıştır. Haddeleme kuvveti, düzeneğe teçhiz edilen 100 ton kapasiteli bir yük ölçme cihazının dijital ekranından kg cinsinden okunabilmektedir. Kaymalı yataklar, dönme hareketinden bir kam vasıtasıyla tahrik alan bir yağ pompası ile yağlanmaktadır. Malzeme şarj sırasında oluşabilecek muhtemel bir iş kazasının önlenmesi amacıyla düzeneğe turuncu renkteki parmak koruyucu ızgara konulmuştur. Şekil 4.1'de görülen bu düzenek KBÜ-BAP-15/1-DR-005 nolu BAP projesi kapsamında Şekermaksan/Kahramanmaraş firmasına yaptırılmıştır.



a) Komple



b) Ezme sistemi

Şekil 4.1. Haddeleme düzeneği.

Malzeme yüzey pürüzlülüğünün merdane pürüzlülüğüne bağlı olarak nasıl değiştiğinin görülebilmesi için testler, özellikleri Çizelge 4.1’de verilen farklı pürüzlülükte 2 çift merdane ile yapılmıştır. Yüzeyi pürüzlendirilmiş merdanelerden birinin fotoğrafı Şekil 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Hadde merdaneleri.

	Yüzey Pürüzlülüğü (μm) ^a	Merdane Çapı (mm)	Çalışma Gövdesi Uzunluğu (mm)	Pürüzlendirme Yöntemi	Merdane Malzemesi
Az pürüzlü Merdane	3,4	75	50	Elmasla pürüzlendirme	Soğuk takım çeliği (2379)
Çok Pürüzlü Merdane	8,5	75	50	Elmasla pürüzlendirme	Soğuk takım çeliği (2379)

^a Cut-off uzunluğu 2,5mm (SEP 1940 standardına göre)



Şekil 4.2. Hadde merdanesi.

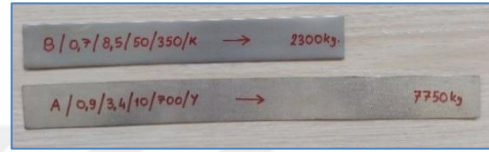
4.1.1. Test Numunelerinin Hazırlanması

Testler, ERD6112 ve ERD7114 Erdemir kaliteleri olmak üzere iki farklı kalite malzeme ile yapılmıştır. ERD6112 kalite malzeme GERSAN’dan 0,9 mm ve 1,8 mm olmak üzere iki farklı kalınlıkta temin edilmiştir. ERD7114 kalite malzeme ise Erdemir Çelik Servis Merkezinden temin edilmiş olup 0,7 mm kalınlığındadır. 6112 kalite malzeme 30 mm genişliğinde, 30 cm uzunluğunda; 7114 kalite malzeme ise 30 mm genişliğinde, 20 cm boyunda (6112 ile karışmaması için) dilinmiştir. 7114 kalite

malzeme Erdemir Çelik Servis Merkezi'nde, 6112 kalite malzeme Çınar Çelik Servis Merkezi/Ereğli'de dildirilmiştir (Şekil 4.3). Bu kalitelere ait özellikler Çizelge 4.2'de, kimyasal bileşimleri Çizelge 4.3'de verilmiştir.



a) Dilme işlemi



b) Test numuneleri

Şekil 4.3. Numune hazırlama.

Çizelge 4.2. Malzeme özellikleri.

Standart	Kalite	Erdemir Kalite No	Akma Dayanımı (N/mm ²)	Çekme Dayanımı (N/mm ²)	Yüzde Uzama (%)	Kalınlık (mm)	Yüzey Pürüzlülüğü (µm) ^a
EN 10130:2006	DC04	7114	169,7	296,2	40	0,70	1,123
EN 10130:2006	DC01	6112	248,1	332,4	32	0,90 1,83	1,416

^a Cut-off uzunluğu 2.5mm (SEP 1940 standardına göre)

Çizelge 4.3. Kimyasal bileşim.

	%C	%Mn	%P	%S	%Si	%Al	%Ti
ERD7114	0,002	0,155	0,005	0,009	0,005	0,055	0,071
ERD6112	0,036	0,204	0,010	0,006	0,007	0,070	

Haddeleme yönü, dilinen test numunelerinin üzerinde ok işareti ile belirtilmiştir. Test parametrelerini gösteren indisler kırmızı renkli silinmez metal kalem ile numune üzerine yazılmıştır (Şekil 4.3 (b)). Kullanılan notasyon Çizelge 4.4'de gösterilmiştir. Bu notasyona göre A/0,9/3,4/10/700/Y ile gösterilen bir testin; 0,9 mm kalınlığında ERD6112 kalite malzemenin, 3,4 µm pürüzlülükte merdane ile 10 d/dk hızda, 700 µm paso (ezme miktarı) verilerek yağlı yapıldığı anlamına gelmektedir.

Çizelge 4.4. Haddeme Parametreleri ve Notasyon.

HADDELEME PARAMETRELERİ X/Z/T/U/V/W				
MALZEME CİNSİ (X)	İndikatör	A		B
	Anlamı	ERD6112		ERD7114
MALZEME KALINLIĞI (Z)	İndikatör	0,9	1,8	0,7
	Anlamı	0,9 mm	1,83 mm	0,7 mm
MERDANE PÜRÜZLÜLÜĞÜ (T)	İndikatör	3,4		8,5
	Anlamı	3,419 µm		8,476 µm
DEVİR SAYISI (U)	İndikatör	10		50
	Anlamı	10 d/dk		50 d/dk
EZME MİKTARI (V)	İndikatör	350		700
	Anlamı	350 µm		700 µm
YAĞLAMA DURUMU (W)	İndikatör	K		Y
	Anlamı	KURU		YAĞLI

Yağlı haddeme testlerinde kullanılan BP Visco 2000 (20W-50) mineral yağ ile test numunelerinin yağlama işlemi Şekil 4.4'de gösterilmiştir. Kuru haddeme testlerinde herhangi bir yağlayıcı kullanılmamıştır.



a) Kullanılan yağlayıcı

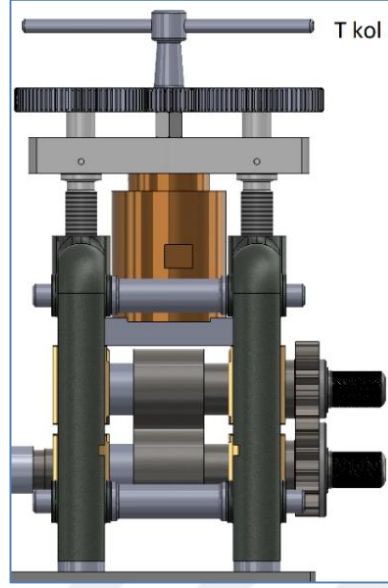


b) Yağlama işlemi

Şekil 4.4. Numune yağlama işlemi.

4.1.2. Ezme Miktarının Belirlenmesi

Düzeneğin üzerindeki T kolun manuel olarak döndürülmesi ile vida (screw down) üst merdaneyi aşağı-yukarı hareket ettirerek merdaneler arası mesafenin (gap) ayarlanmasını sağlamaktadır (Şekil 4.5). İstenen ezme miktarı bu şekilde verilerek malzeme kalınlığı belirlenebilmektedir.



Şekil 4.5. Haddelme düzeneği paso ayar mekanizması.

T ayar kolunun her bir turunda üst merdane alt merdaneye 0,7 mm yaklaşmaktadır. Yani 1 tur 700 μm paso vermektedir. 700 μm paso vermek demek: merdaneler arasındaki açıklığın malzeme kalınlığından 700 μm daha az olduğu anlamına gelmektedir. Verilen pasoların daha hassas olması için testlerde %1 hassasiyette komparatör saati kullanılmıştır. Yüzeydeki pürüzlerin yanlış bir ölçüme sebep olmaması için ölçüm yapılacak bölge (ibrenin temas ettiği muylu bölgesi) bantla sarılmıştır (Şekil 4.6).



Şekil 4.6. Komparatör saati yardımıyla hassas paso ayarı.

T kol yardımıyla üst merdane, araya sokulan test numunesine temas ettirilerek boşluğu alınmak suretiyle sıfırlanmıştır. Sıfırlama işlemi 100 kg ön yük altında yapılmıştır (Şekil 4.1 (a)). Üst merdanenin pozisyonu bu anda hassas komparatör saati ile ölçülerek sıfırlama konumu belirlenmiştir. Merdaneler arası açılarak malzeme çıkarıldıktan sonra üst merdane tekrar 100 kg ön yük altında komparatör saatinde okunan sıfırlama konumuna getirilmiştir. Ezme miktarı komparatör saati yardımıyla bu noktadan itibaren belirlenmiştir. Sıfırlama işleminin yapılmasının nedeni: malzeme kalınlığının olduğundan fazla ölçülmesine sebep olabilecek çapak gibi unsurların ezilerek tam yüzey temasını sağlamaktır. Yani verilen ezme miktarı, 100 kg ön yük altında erişilen noktadan itibaren verilmiştir. Bu sıfırlama işlemi tüm numuneler için aynı şekilde tekrarlanmıştır.

4.1.3. Ölçümler

4.1.3.1. Hadde Kuvveti Ölçümü

Test sırasında yük ölçerin ekranında okunan hadde kuvveti Şekil 4.3 (b)'de görüldüğü gibi test numunelerinin üzerine kg cinsinden yazılmıştır. Haddeleme kuvveti, işlem esnasında % 10'lara kadar varan anlık değişimler göstermekle birlikte, yük ölçerin ekranında okunan en yüksek değer dikkate alınmıştır.

4.1.3.2. Kalınlık Ölçümü

Malzemedeki incelme miktarının görülebilmesi için test öncesinde ve sonrasında TÜRKAK tarafından akredite edilmiş KBÜ Demir-Çelik Enstitüsü Metroloji Laboratuvarındaki kalibreli Mitutoyo marka mikrometrelerle yapılmıştır (Şekil 4.7).



Şekil 4.7. Kalınlık ölçümü.

4.1.3.3. Pürüzlülük Ölçümü

Gerek merdane gerekse malzeme olsun, yüzey pürüzlülükleri ölçülmeden önce gazyağı ile iyice temizlenip silinmek suretiyle yüzeydeki yağ ve kirlerin pürüzlülük değerlerini etkilemesi önlenmiştir.

Merdane Pürüzlülük Ölçümü

Merdaneden malzemeye ne oranda pürüzlülük aktarıldığını görebilmek için merdane yüzey pürüzlülüklerinin bilinmesi gerekmektedir. Elmasla pürüzlendirilmiş merdane yüzeylerinden her 90 derecede 3'er ölçüm alınmıştır (Şekil 4.8). Alınan toplam 12 adet ölçümün aritmetik ortalaması hesaplanarak merdane yüzey pürüzlülükleri bulunmuştur. Ölçüm sonuçları Çizelge 4.5'de verilmiştir. M1, M2, M3 ve M4 numaraları merdaneleri temsil etmekte olup M1 ile M2; M3 ile M4 nolu merdaneler eş çalışan merdanelerdir. 3,4 µm pürüzlülükteki M1-M2 merdane çifti "az pürüzlü merdane"; 8,5 µm pürüzlülükteki merdane çifti "çok pürüzlü merdane" olarak anılacaktır.



Şekil 4.8. Merdane yüzey pürüzlülük ölçümü.

Çizelge 4.5. Merdane pürüzlülük ölçümleri.

M1				M2			
90				90			
ÖLÇÜM-1	ÖLÇÜM-2	ÖLÇÜM-3	ORTALAMA	ÖLÇÜM-1	ÖLÇÜM-2	ÖLÇÜM-3	ORTALAMA
3,253	3,403	3,435	3,364	3,552	3,303	3,542	3,466
180				180			
ÖLÇÜM-1	ÖLÇÜM-2	ÖLÇÜM-3	ORTALAMA	ÖLÇÜM-1	ÖLÇÜM-2	ÖLÇÜM-3	ORTALAMA
3,497	3,391	3,274	3,387	3,218	3,307	3,577	3,367
270				270			
ÖLÇÜM-1	ÖLÇÜM-2	ÖLÇÜM-3	ORTALAMA	ÖLÇÜM-1	ÖLÇÜM-2	ÖLÇÜM-3	ORTALAMA
3,227	3,634	3,564	3,475	3,350	3,376	3,294	3,340
360				360			
ÖLÇÜM-1	ÖLÇÜM-2	ÖLÇÜM-3	ORTALAMA	ÖLÇÜM-1	ÖLÇÜM-2	ÖLÇÜM-3	ORTALAMA
3,692	3,216	3,234	3,381	3,409	3,754	3,548	3,570
M1 ORTALAMA			3,402	M2 ORTALAMA			3,436
M1-M2 ORTALAMASI				3,419			

Çizelge 4.5. (devam ediyor).

M3				M4			
90				90			
ÖLÇÜM-1	ÖLÇÜM-2	ÖLÇÜM-3	ORTALAMA	ÖLÇÜM-1	ÖLÇÜM-2	ÖLÇÜM-3	ORTALAMA
8,677	8,667	8,161	8,502	8,992	8,245	8,842	8,693
180				180			
ÖLÇÜM-1	ÖLÇÜM-2	ÖLÇÜM-3	ORTALAMA	ÖLÇÜM-1	ÖLÇÜM-2	ÖLÇÜM-3	ORTALAMA
8,277	8,250	8,173	8,233	8,125	8,053	8,436	8,205
270				270			
ÖLÇÜM-1	ÖLÇÜM-2	ÖLÇÜM-3	ORTALAMA	ÖLÇÜM-1	ÖLÇÜM-2	ÖLÇÜM-3	ORTALAMA
8,439	8,437	8,879	8,585	9,091	8,522	8,776	8,796
360				360			
ÖLÇÜM-1	ÖLÇÜM-2	ÖLÇÜM-3	ORTALAMA	ÖLÇÜM-1	ÖLÇÜM-2	ÖLÇÜM-3	ORTALAMA
8,159	8,182	7,845	8,062	8,741	8,950	8,508	8,733
M3 ORTALAMA			8,346	M4 ORTALAMA			8,607
M3-M4 ORTALAMASI				8,476			

Malzeme Pürüzlülük Ölçümü

Pürüzlendirilmiş merdanelerden pürüzlülüğün malzemeye ne oranda geçtiğini görebilmek için test sonrasında malzeme yüzey pürüzlülüklerinin ölçülmesi gerekmektedir. Ölçümler malzemenin baş, orta ve sonundan; haddeleme yönüne paralel ve haddeleme yönüne dik olmak üzere 3'er adet yapılmıştır (Şekil 4.9). Her bir malzemenin iki yüzeyinden toplamda 36'şar defa yapılan bu ölçümlerin aritmetik ortalaması alınarak test numunelerinin nihai yüzey pürüzlülüğü ve ayrıca pürüzlülük dağılımının standart sapması excel yardımıyla hesaplanmıştır. Test numunelerinden birine ait ölçüm sonuçları Çizelge 4.6'da görülmektedir.



Şekil 4.9. Malzeme yüzey pürüzlülük ölçümü.

Çizelge 4.6. Malzeme pürüzlülük ölçümleri

A/0,9/3,4/10/700/Y										NİHAİ ORTALAMA PÜRÜZLÜLÜK: 2,352			
ÜST YÜZEY													
BAŞ					ORTA					SON			
BOYUNA					BOYUNA					BOYUNA ORT.		ÜST YÜZEY ORTALAMA	
1.ÖLÇÜM	2.ÖLÇÜM	3.ÖLÇÜM	ORT.	1.ÖLÇÜM	2.ÖLÇÜM	3.ÖLÇÜM	ORT.	1.ÖLÇÜM	2.ÖLÇÜM	3.ÖLÇÜM	ORT.	2,309	2,366
2,321	2,291	2,027	2,213	2,715	2,313	2,327	2,452	2,177	2,088	2,521	2,262		
ENİNE				ENİNE				ENİNE				ENİNE ORT.	
1.ÖLÇÜM	2.ÖLÇÜM	3.ÖLÇÜM	ORT.	1.ÖLÇÜM	2.ÖLÇÜM	3.ÖLÇÜM	ORT.	1.ÖLÇÜM	2.ÖLÇÜM	3.ÖLÇÜM	ORT.	2,422	ÜST YÜZEY STANDART SAPMA
2,639	2,465	2,518	2,541	2,085	2,295	2,489	2,290	2,554	2,374	2,380	2,436	0,192	
ORTALAMA				ORTALAMA				ORTALAMA					
2,377				2,371				2,349					
ALTI YÜZEY													
BAŞ					ORTA					SON			
BOYUNA					BOYUNA					BOYUNA ORT.		ALTI YÜZEY ORTALAMA	
1.ÖLÇÜM	2.ÖLÇÜM	3.ÖLÇÜM	ORT.	1.ÖLÇÜM	2.ÖLÇÜM	3.ÖLÇÜM	ORT.	1.ÖLÇÜM	2.ÖLÇÜM	3.ÖLÇÜM	ORT.	2,216	2,339
2,393	2,423	2,115	2,310	2,093	2,113	2,107	2,104	2,144	2,129	2,424	2,232		
ENİNE				ENİNE				ENİNE				ENİNE ORT.	
1.ÖLÇÜM	2.ÖLÇÜM	3.ÖLÇÜM	ORT.	1.ÖLÇÜM	2.ÖLÇÜM	3.ÖLÇÜM	ORT.	1.ÖLÇÜM	2.ÖLÇÜM	3.ÖLÇÜM	ORT.	2,461	ALTI YÜZEY STANDART SAPMA
2,290	2,420	2,195	2,302	2,232	2,746	2,578	2,519	2,424	2,720	2,547	2,564	0,213	
ORTALAMA				ORTALAMA				ORTALAMA					
2,306				2,312				2,398					

Pürüzlülük Transfer Oranı (PTO)

Merdaneden malzemeye sirayet eden pürüzlülüğe ait transfer oranı (PTO) Eşitlik 4.1 ile hesaplanmıştır [45].

$$PTO [\%] = \frac{Ra_1 - Ra_0}{Ra_r - Ra_0} \times 100 \quad (4.1)$$

Bu eşitlikte Ra_1 malzemenin haddeleme sonrası yüzey pürüzlülüğünü, Ra_r merdane yüzey pürüzlülüğünü göstermektedir. Test öncesi ve sonrası pürüzlülük farkının doğru tespit edilebilmesi için malzemenin test öncesi yüzey pürüzlülüğünün de hesaba katılması gerekmektedir. Bu pürüzlülük Ra_0 indisiyle eşitlikte yerini almıştır. Bu pürüzlülük değerleri Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Hadde merdanelerinin ve test numunelerinin yüzey pürüzlülük ölçümleri KBÜ-BAP-16/2-DS-014, KBÜ-BAP-18-DS-045 nolu BAP projeleri kapsamında TÜRKAK tarafından akredite edilmiş KBÜ Demir-Çelik Enstitüsü Metroloji Laboratuvarı’nda bulunan kalibreli Mitutoyo marka SJ-410 model yüzey pürüzlülük ölçme cihazı ile yapılmıştır (Şekil 4.10).



Şekil 4.10. Mitutoyo SJ-410 model yüzey pürüzlülük ölçme cihazı.

Yüzey görünümünün önemli olduğu kullanım alanlarında, özellikle otomobil ve beyaz eşya üretiminde malzeme yüzey pürüzlülük değerinin belli bir seviyede olmasının yanı

sıra, pürüzlülük dağılımının dar bir aralıkta olması da gerekmektedir. Malzeme yüzeyinde yapılan çok sayıda pürüzlülük ölçümü sayesinde, pürüzlülük transfer oranına ilaveten, pürüzlülük dağılımındaki homojenliğin bir göstergesi olan standart sapma da hesaplanmıştır. Ayrıca Şekil 4.11’de görülen Nanovea marka optik profil ölçme cihazı yardımıyla 3 boyutlu alan tarama görüntüleri alınmıştır. Taramalar 2x2 mm boyutunda bir alan üzerinde 2 µm hassasiyetle yapılmıştır. Tarama görüntüleri üzerinde µm cinsinden belirtilen değerler yüzeyin ortalama pürüzlülüğü (Ra) olmayıp o noktanın, cihazın tarama alanı içerisinde tespit edebildiği en dip noktaya göre yüksekliğini belirtmektedir. 3 boyutlu alan tarama görüntüleri KBÜ-BAP-17-DS-397 nolu BAP destek projesi kapsamında Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Laboratuvarları’nda yaptırılmıştır.



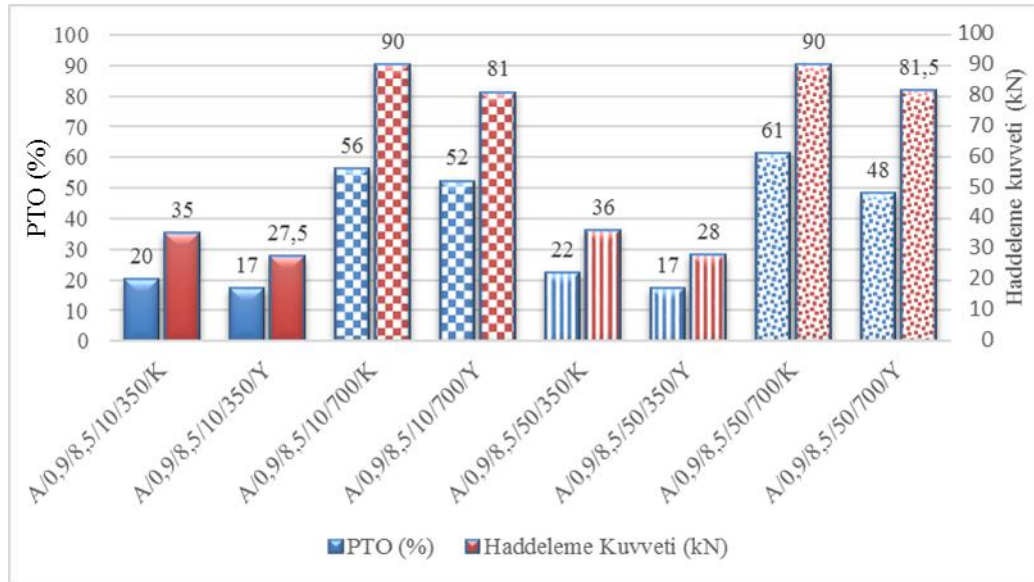
Şekil 4.11. Nanovea marka optik profil ölçme cihazı.

BÖLÜM 5

DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

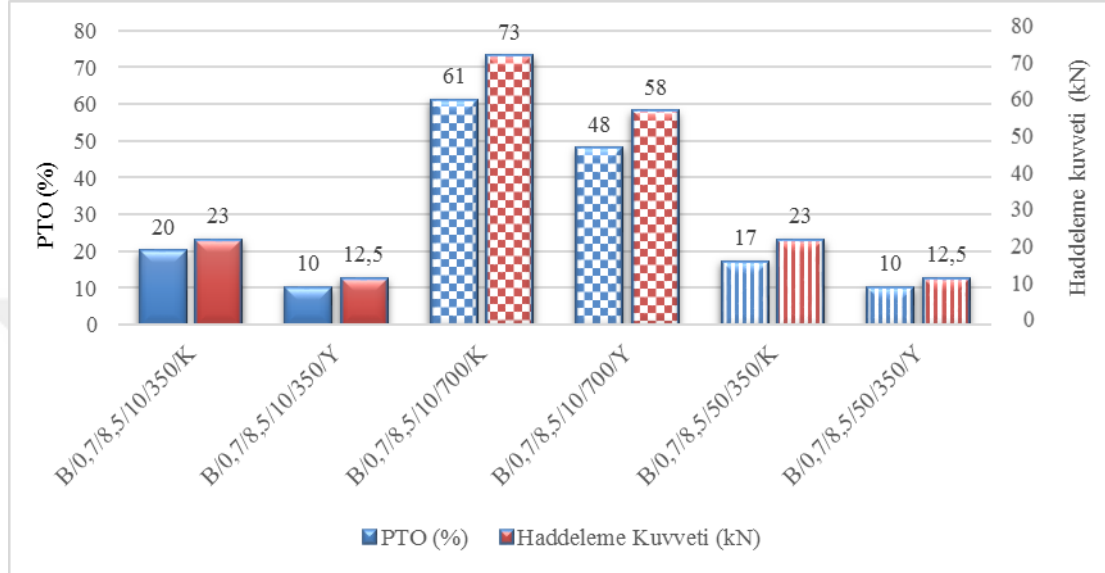
5.1. YAĞLAMA İLİŞKİSİ

A/0,9/8,5/10/350; A/0,9/8,5/10/700; A/0,9/8,5/50/350; A/0,9/8,5/50/700 şartlarında, kuru ve yağlı olmak üzere yapılan pürüzlendirme testlerinde, yağlı haddelemeye kıyasla kuru haddelemede pürüzlülük transferinin daha fazla olduğu görülmektedir (Şekil 5.1). Bu durum haddeleme yükünün kuru haddelemede daha yüksek olması ile açıklanabilir. Kuru haddelemede sürtünme katsayısı daha büyüktür. Bu da haddeleme kuvvetinin yükselmesine neden olmaktadır. Nitekim test sonuçları da buna paraleldir. Haddeleme kuvveti arttıkça malzeme yüzey pürüzlülüğü artmaktadır (Şekil 5.5 (a) ve (b)).



Şekil 5.1. Yağlamanın pürüzlülük transferi ve haddeleme kuvveti üzerine etkisi (ERD6112).

7114 kalite malzemede durumun 6112 ile aynı olduğu görülmüştür. B/0,7/8,5/10/350; B/0,7/8,5/10/700; B/0,7/8,5/50/350 şartlarında, kuru yapılan pürüzlendirme testlerinde, 6112'de olduğu gibi hem transfer oranı hem de haddeleme kuvveti yüksek çıkmıştır (Şekil 5.2).

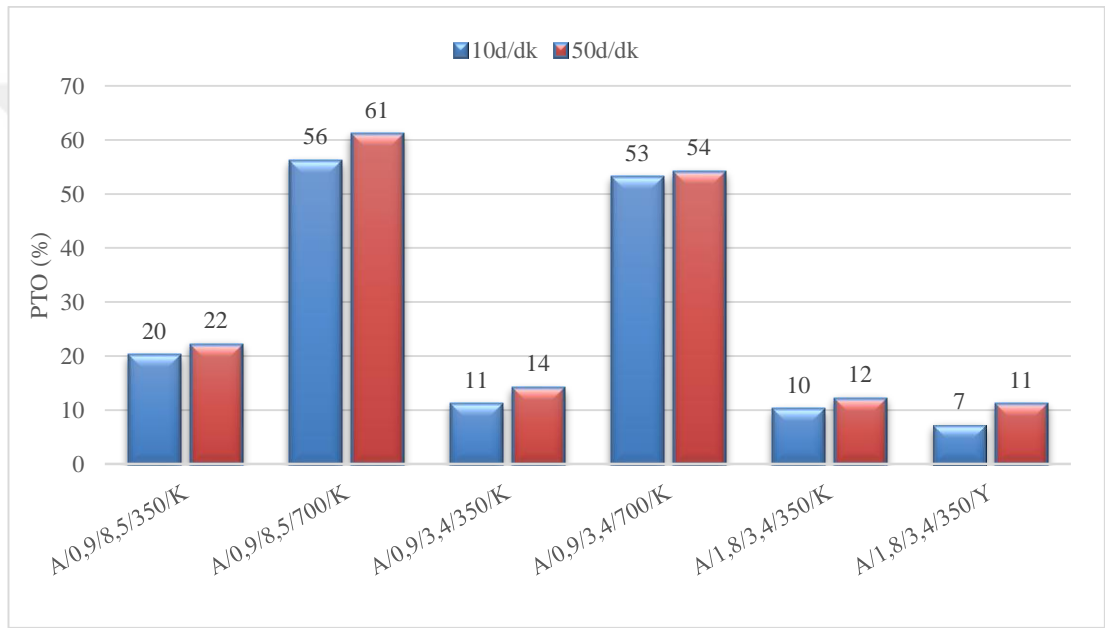


Şekil 5.2. Yağlamanın pürüzlülük transferi ve haddeleme kuvveti üzerine etkisi (ERD7114).

Bu sonuca paralel sonuçlar diğer araştırmacılar tarafından da bulunmuştur. Kijima 2015 yılında yapmış olduğu çalışmasında iki farklı kalite malzemeyi, iki farklı pürüzlülükte merdane ile, iki farklı yağlayıcı (temper hadde yağı-soğuk hadde yağı) kullanarak haddeleme testlerine tabi tutmuş olup bu testler sonucunda aynı haddeleme kuvveti için pürüzlülük transfer oranının kuru haddeleme şartlarında daha yüksek olduğu sonucuna ulaşmıştır [45]. Dick vd. de merdane pürüzlülüğü ve viskozitenin haddeleme yüküne etkisinin araştırıldığı çalışmalarında benzer sonuçlara ulaşmışlardır. %10 oranında 3 farklı yağ emülsiyonu kullanılarak 2,0 μm 'ye kadar pürüzlülükte merdaneler ile yapılan soğuk haddeleme testlerinde malzeme yüzeyinde en yüksek pürüzlülük değerini kuru haddeleme şartlarında elde ettiklerini belirtmişlerdir [46]. Bu sonucun tam tersinin bulunduğu araştırmalar da mevcuttur [41]. Bu araştırmalarla ilgili detaylı bilgi 3.4 nolu başlık altında verilmiştir.

5.2. HIZ İLİŞKİSİ

ERD6112 kalite malzeme kullanılarak merdane pürüzlülüğü, ezme miktarı, yağlama durumu ve malzeme kalınlığı aynı kalmak şartıyla farklı hızlarda (10 d/dk ve 50 d/dk) yapılan pürüzlendirme testlerinde, yüksek hızlarda pürüzlülük transferinin daha fazla gerçekleştiği görülmüştür (Şekil 5.3). Hızın artmasıyla birlikte birim zamanda ezilen malzeme hacmi artmaktan dolayı haddeme kuvveti yükselmekte (Şekil 5.6) ve dolayısıyla daha fazla pürüzlülük transferi gerçekleşmektedir (Şekil 5.5).

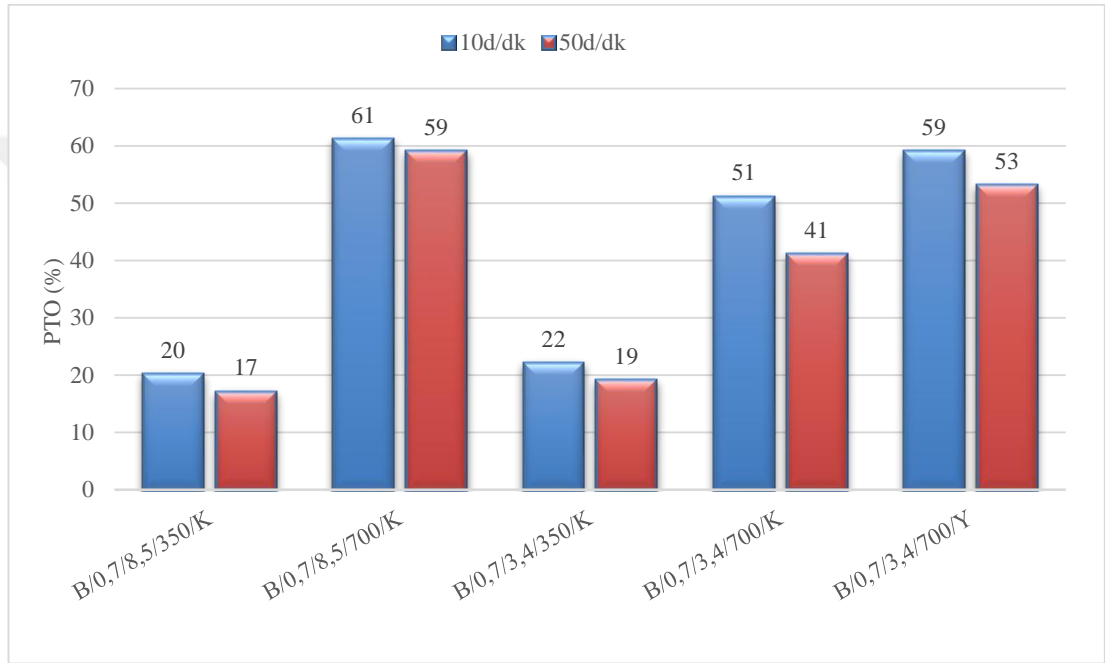


Şekil 5.3. Haddeme hızının pürüzlülük transferi üzerine etkisi (ERD6112).

Diğer araştırmacıların yapmış olduğu çalışmalarda da benzer sonuçlara ulaşıldığı görülmüştür. Ma vd. aynı ezme oranlarında fakat farklı hızlarda (5 d/dk, 30 d/dk ve 60 d/dk) yapmış oldukları deneylerde hız arttıkça malzeme pürüzlülüğünün arttığını bulmuşlar ve bunu AFM görüntüleri ile desteklemişlerdir [41]. Detaylı bilgi 3.4 nolu başlık altında verilmiştir.

Aynı ilişkinin ERD7114 kalite malzeme kullanımında geçerli olduğu söylenemez. 7114 kalite malzeme ile yapılan testlerde hız arttıkça genellikle pürüzlülük transferinde azalma kaydedilmiştir (Şekil 5.4). Bu sonuç: karbon yüzdesi daha fazla, dayanım değerleri daha yüksek ve sünekliliği daha düşük olan 6112 kalite malzemenin

yüksek hızda (50 d/dk) soğuk işlemden dolayı daha fazla deformasyon sertleşmesine uğrama ihtimaliyle açıklanabilir. Nitekim sertleşerek dayanım değerleri artan malzemede, Eşitlik 2.2'ye göre haddeleme kuvveti yükseleceğinden dolayı pürüzlülük sirayetinde artış olacaktır (Şekil 5.5). Öte yandan malzeme sertleştiğinden dolayı transferin azalması gerektiği düşünülse de haddeleme kuvvetindeki artışın transfer üzerine olumlu etkisi, sertliğin transfer üzerine olumsuz etkisine baskın geldiğinden dolayı bu sonucun elde edildiği düşünülmektedir.

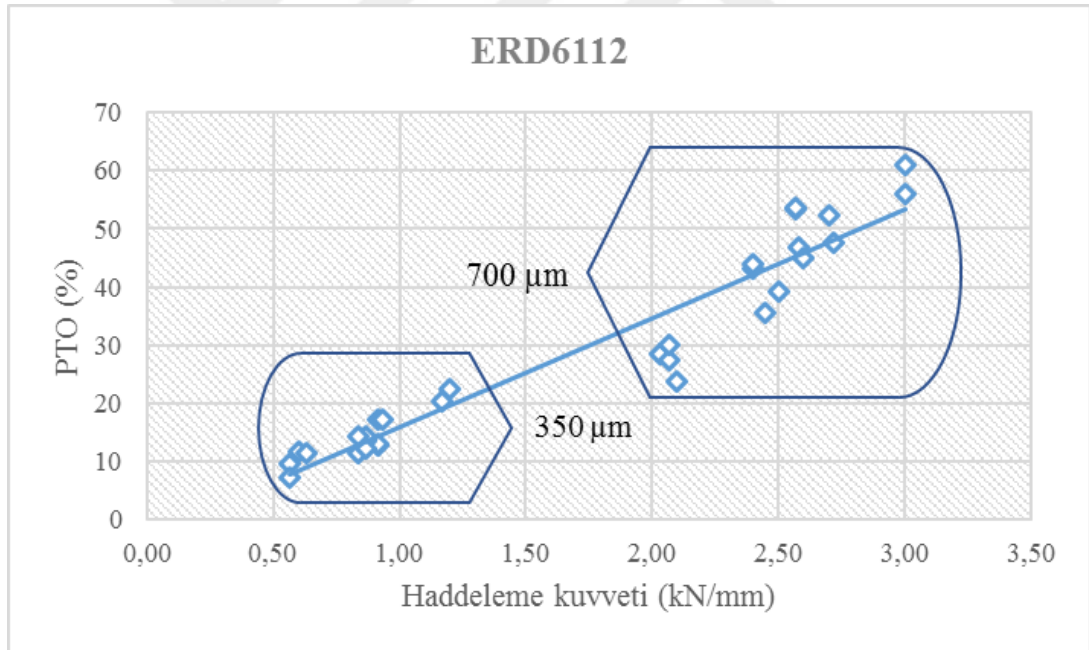


Şekil 5.4. Haddeleme hızının pürüzlülük transferi üzerine etkisi (ERD7114).

5.3. HADDELEME KUVVETİ İLİŞKİSİ

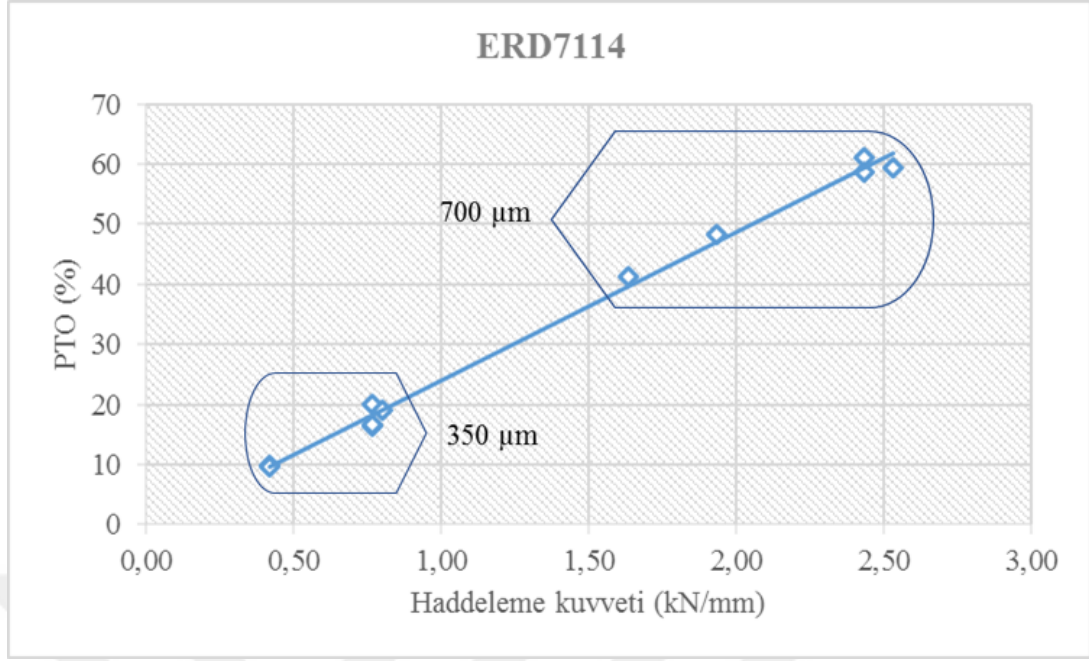
Çizelge 4.4'de belirtilen değişkenlerin farklı varyasyonlarıyla yapılan 32 farklı pürüzlendirme test sonucuna göre, haddeleme kuvveti arttıkça pürüzlülük transferinin arttığı görülmüştür (Şekil 5.5). Haddeleme kuvvetinin büyük olması demek: pürüzlendirilmiş merdane yüzeyindeki sivri tepeciklerin malzeme yüzeyine daha büyük bir kuvvetle bastırılıyor olması anlamına gelmektedir. Sivri tepecikler ile malzeme yüzeyinin temas noktalarında yüksek yük altında daha fazla plastik şekil değişimi gerçekleşmekte ve bu da malzeme yüzeyinde daha derin kraterlerin oluşumuna neden olmaktadır. Dayanımı daha düşük olan, dolayısıyla daha az sert olan

7114 kalite malzemede % 60 pürüzlülük sirayeti 2,5 kN/mm haddeleme kuvvetinde elde edilebilmişken aynı transfer oranı yüksek dayanıma sahip 6112 kalite malzemede ancak 3 kN/mm haddeleme kuvvetinde elde edilebilmiştir (Şekil 5.5). Kijima'nın 2014 yılında yapmış olduğu çalışmada aynı pürüzlülük değeri sadece 0,6 kN/mm haddeleme kuvvetinde elde edilmiştir (Şekil 3.3) [36]. Bunun nedeni testlerde daha düşük dayanıma ve sertliğe sahip tavlanmış düşük karbonlu çelik kullanılmış olmasıdır. Kijima 2015 yılında yapmış olduğu çalışmasında iki farklı kalite malzemeyi, iki farklı pürüzlülükte merdane ve iki farklı yağlayıcı kullanarak haddeleme testlerine tabi tutmuş olup; malzeme kalitesine, merdane pürüzlülük değerine ve yağlı-kuru yüzey durumundan bağımsız olarak, haddeleme kuvvetinin arttığı her durumda pürüzlülük transferinin arttığı sonucuna ulaşmıştır [45]. Wentink vd. yüksek hadde kuvvetlerinde yapmış oldukları testlerde yüksek malzeme pürüzlülüğü elde etmişler ve bu yüzeyleri mikroskop altında görüntülemişlerdir (Şekil 3.4) [34].



a) ERD6112 (1,5 kN/mm'nin altındaki sonuçlar 350 µm; 2,0 kN/mm'nin üstündeki sonuçlar 700 µm ezme yapılan testlere aittir.)

Şekil 5.5. Haddeleme kuvvetinin pürüzlülük transferi üzerine etkisi.

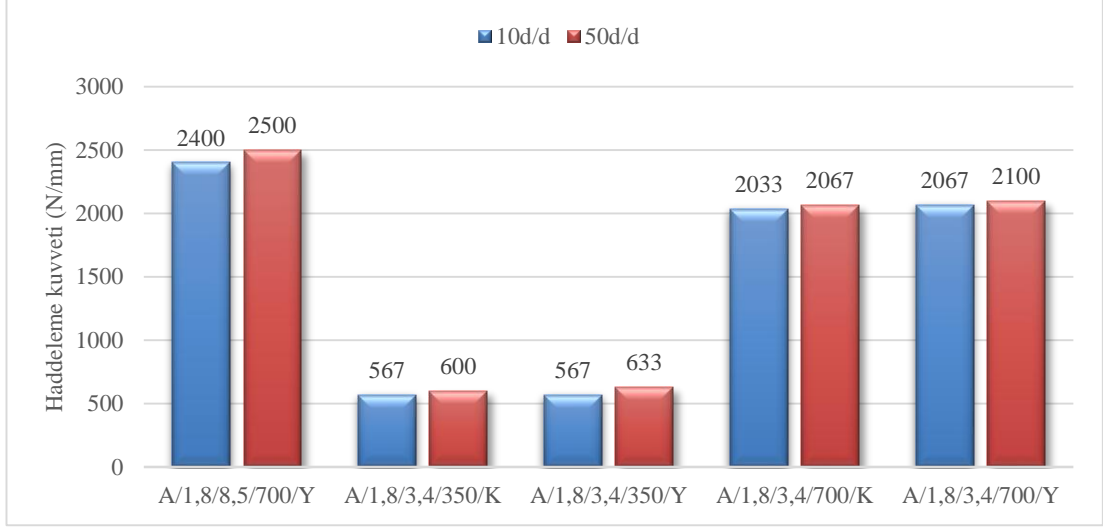


b) ERD7114 (1,0 kN/mm'nin altındaki sonuçlar 350 µm; 1,5 kN/mm'nin üstündeki sonuçlar 700 µm ezme yapılan testlere aittir.)

Şekil 5.5. (devam ediyor).

Artan haddeme kuvveti ile birlikte pürüzlülük transferi artmaktadır. Haddeme kuvveti ezme miktarı ile doğru orantılı olarak değiştiğine göre aynı ilişki ezme miktarı-pürüzlendirme arasında da söz konusudur. Yani ezme miktarı arttıkça pürüzlendirme de artmaktadır. Diğer araştırmacıların bu ilişkiyi doğrulayan çalışmalarına Bölüm 3.4'de yer verilmiştir.

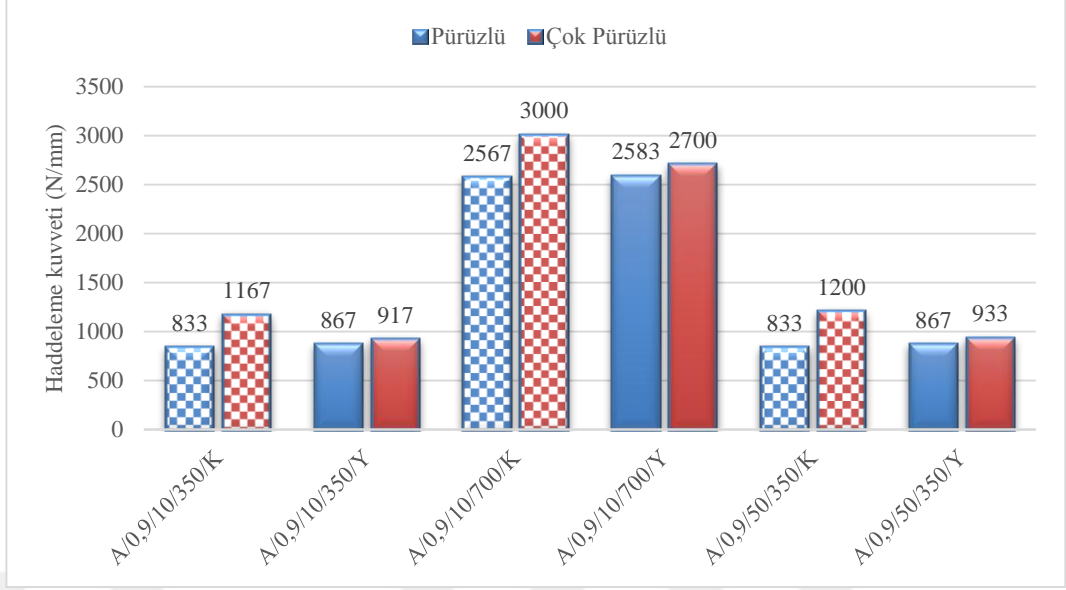
Haddeme esnasında birbirine zıt yönde dönen iki adet merdanenin arasından geçen malzeme, merdaneler tarafından uygulanan kuvvetle akma dayanımının üzerinde zorlanarak plastik olarak şekillendirilir. Haddeme işleminin yüksek hızda yapılması demek: birim zamanda şekillendirilen malzeme hacminin artması anlamına gelmektedir ki bu da haddeme kuvvetinin yükselmesine neden olmaktadır. Yapılan test sonuçlarına göre haddeme hızı ile haddeme kuvveti arasındaki bu ilişki Şekil 5.6'da gösterilmiştir.



Şekil 5.6. Hızın haddeme kuvveti üzerine etkisi.

Oysa Dick vd.'nin yapmış olduğu araştırmada hız arttıkça haddeme kuvvetinin, yüzey pürüzlülüğü $1,0 \mu\text{m}$ 'den fazla olan merdanelerde azaldığı; $1,0 \mu\text{m}$ 'den düşük pürüzlülükteki merdanelerde ise değişmediği belirtilmiştir. Bu durum yüksek pürüzlü merdanelerle yağlı haddeme şartlarında hidrodinamik etkinin daha kolay oluştuğu ve bunun da haddeme kuvvetini düşürdüğü şeklinde açıklanmıştır [46]. Haddeme kuvvetinin azalması, beraberinde pürüzlülük transferinin de azalmasını getirmektedir (Şekil 5.5).

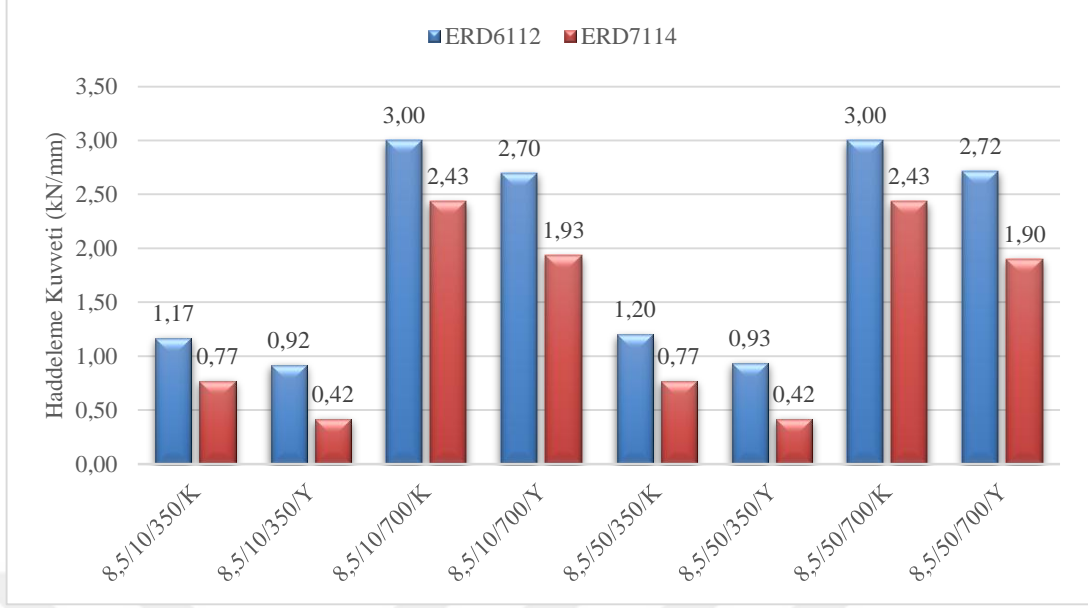
Bu çalışmada, az pürüzlü merdanelerle yapılan testlere nazaran aynı şartlarda çok pürüzlü merdanelerle yapılan testlerde daha yüksek haddeme kuvvetleri ölçülmüştür (Şekil 5.7). Bir başka araştırmada bu farkın düşük hızlarda daha belirgin olduğu gösterilmiştir [46]. Oysa bu çalışmada merdane pürüzlülüğündeki artışın haddeme kuvvetinin artması üzerine tesirinin, düşük hızlarda daha belirgin olduğuna dair bir bulguya rastlanmamıştır.



Şekil 5.7. Merdane pürüzlülüğünün haddeleme kuvveti üzerine etkisi.

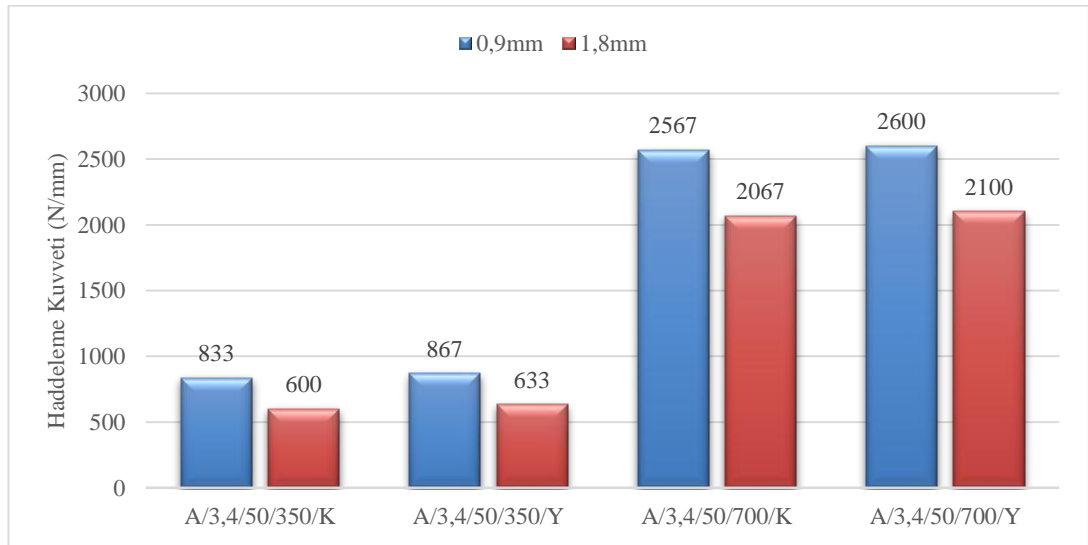
Sürtünme katsayısı ile haddeleme kuvveti doğru orantılı olarak değişmektedir (Şekil 2.16) [14,47]. Kuru haddelemede sürtünme katsayısı daha büyük olduğundan haddeleme kuvveti daha yüksek çıkmıştır (Şekil 5.1 ve Şekil 5.2). Şekil 5.7’de sonuçları gösterilen testlerden yağsız yapılanlarına (A/0,9/10/350/K; A/0,9/10/700/K; A/0,9/50/350/K) ait sonuçların aynı yönde olduğu görülmektedir. Yani merdane pürüzlülüğündeki artıştan dolayı haddeleme kuvvetindeki artış, kuru haddelemede daha belirgindir.

Malzemenin merdaneler arasında plastik şekillendirilmesi anlamına gelen haddeleme işleminin yapılabilmesi için malzemeyi akma dayanımının üzerinde zorlamak gerekmektedir. Eşitlik 2.2’de Y_{ort} ile gösterilen ve malzemenin şekillenebilmesi için gereken gerilme olarak tanımlanan bu gerilme değeri aslında malzemenin akma dayanımından farklı birşey değildir. Bu eşitlikte görüldüğü gibi haddeleme kuvveti malzemenin dayanım değerleriyle doğrudan ilişkilidir. Test sonuçları da bunu doğrular yöndedir. Dayanımı yüksek olan 6112 kalite malzemenin haddeleme kuvveti, aynı şartlarda 7114 kalite malzemeye göre daha yüksek çıkmıştır (Şekil 5.8).



Şekil 5.8. Malzeme tipinin haddeleme kuvveti üzerine etkisi.

Bu tez çalışmasında bulunan bir başka sonuç: ezme miktarı dahil diğer tüm koşulların aynı tutulduğu haddeleme testlerinde, ince malzemelerde haddeleme kuvvetinin daha yüksek olduğudur (Şekil 5.9). İnce ve kalın malzemelerle yapılan testlerde ezme miktarı her ne kadar aynı olsa da deformasyon yüzdesi (ezme oranı) ince malzemelerde daha fazla olduğundan böyle bir sonuçla karşılaşılmıştır. Ayrıca haddeleme kuvvetinin ince malzemelerde sürtünme katsayısından daha fazla etkileniyor olması da bu sonucu destekler yöndedir (Şekil 2.16) [14].



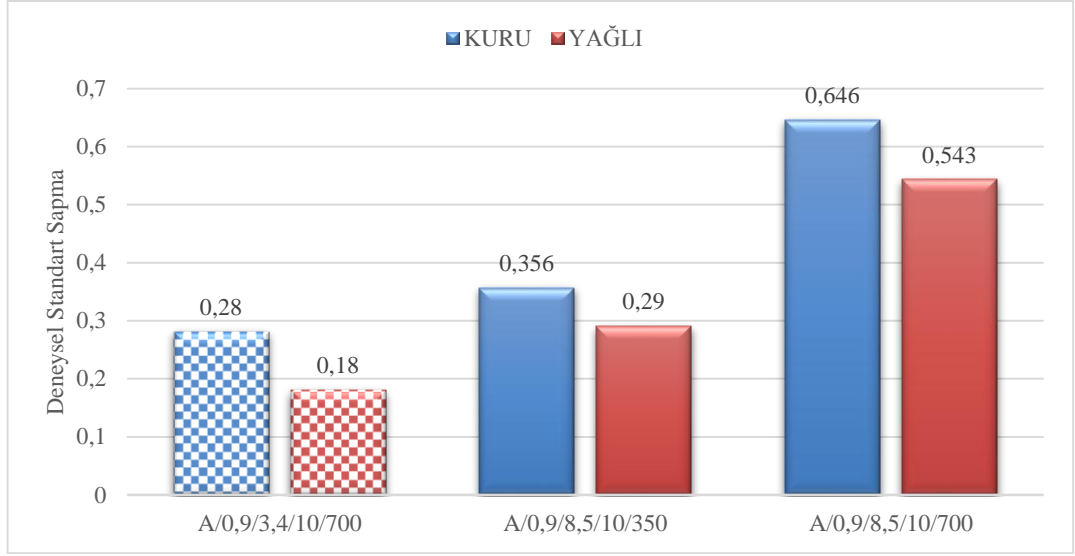
Şekil 5.9. Malzeme kalınlığının haddeleme kuvveti üzerine etkisi.

5.4. STANDART SAPMA

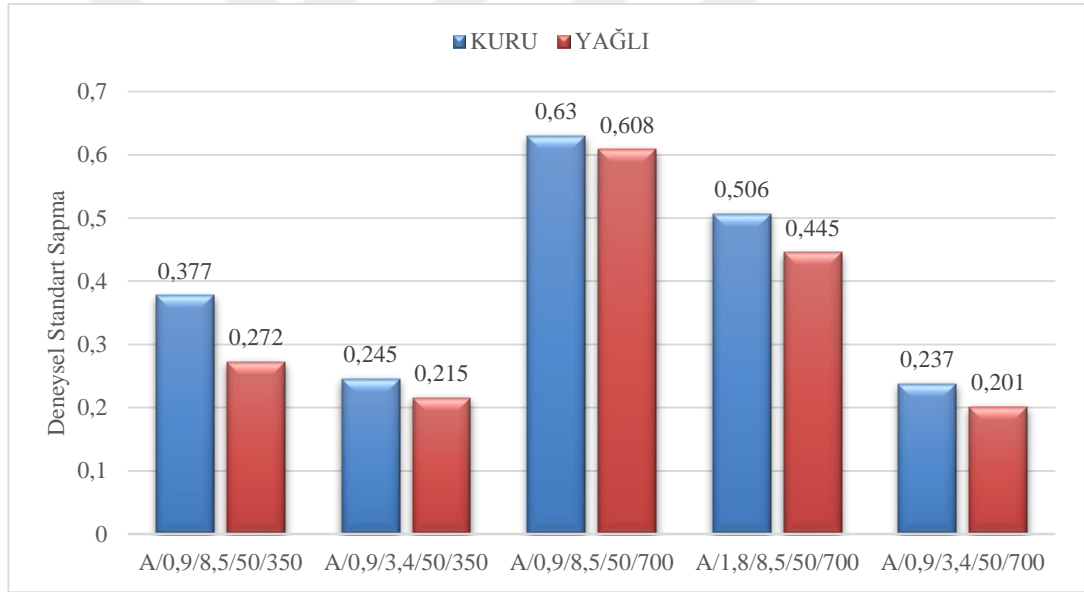
5.4.1. Standart Sapma – Yağlama İlişkisi

Test numunelerinde yüzey pürüzlülüğü olarak, malzeme yüzeyinin muhtelif noktalarından ölçülen pürüzlülük değerlerinin aritmetik ortalaması alınmıştır. Otomobil dış gövdesi gibi, boyanmış sac yüzeylerin görsel kalitesi açısından sadece ortalama pürüzlülük (Ra) şartının yerine getirilmesi yeterli değildir. Tüm yüzey boyunca pürüzlülük değişiminin dar bir aralıkta kalması da önemlidir. Yassı mamule bu özelliklerin kazandırılmasında en etkili unsur merdane yüzey pürüzlülüğüdür. Merdane yüzey pürüzlendirilmede kullanılan en yaygın yöntemlerden biri olan EDT yöntemiyle 3,5 µm'ye kadar pürüzlendirilen merdanelerde \pm % 4; 3,5 µm'den daha pürüzlü merdanelerde ise \pm % 5 farkla yüzey pürüzlülüğü elde edilebilmektedir [30]. SBT yöntemi ile pürüzlendirilen merdanelerin yüzey pürüzlülük aralığı hem daha geniş hem de pürüzlülük istikrarı açısından daha dezavantajlıdır.

Bir yağlayıcının varlığında haddeleme parametreleri, sadece merdane yüzey pürüzlülüğüne ve malzemede istenen pürüzlülüğe göre değil; aynı zamanda yüzey topoğrafyasındaki yönelmeye de bağlı olarak belirlenmesi gerekmektedir. Şerit genişliği istikametinde yırtılmaya kadar varabilecek ilave çekme gerilmelerinin oluşmaması için, merdane eksenince mikro boyutlarda yükseklik farklılıklarından kaynaklanan düzensizliklerin yüzeyde mümkün olduğunca eşit bir dağılıma sahip olması gerekmektedir [48]. Ancak bu da tek başına yeterli değildir. Malzeme yüzeyinin pürüzlülük dağılımını etkileyen parametrelerin bilinmesi ve kontrol edilmesi gerekmektedir. ERD6112 kalite malzeme kullanılarak 10 d/dk hızında yapılan test sonuçları ile (Şekil 5.10), 50 d/dk hızında yapılan test sonuçları (Şekil 5.11) karşılaştırıldığında pürüzlülük dağılımının her iki hızda, yağ kullanımı durumunda daha dar bir aralıkta gerçekleştiği görülmektedir.



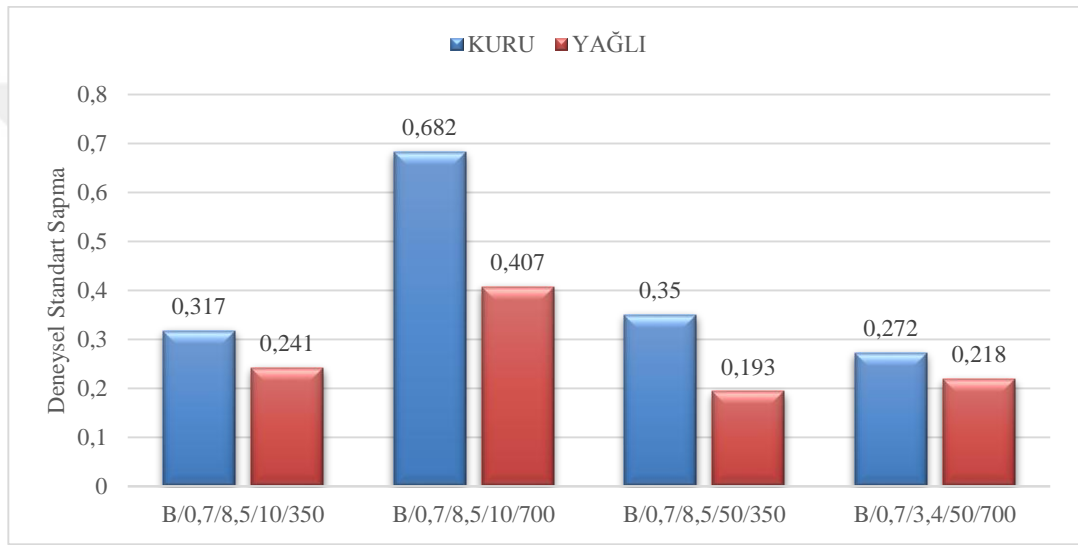
Şekil 5.10. Düşük hızda deneysel standart sapma değişimi (10 d/dk).



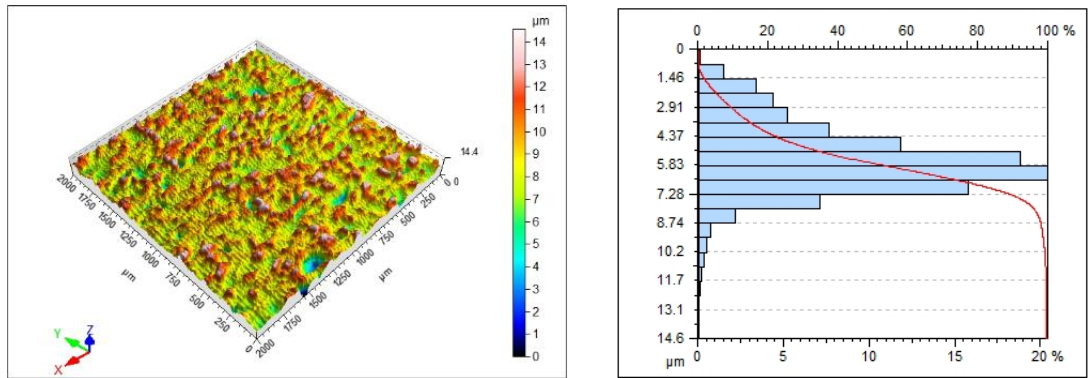
Şekil 5.11. Yüksek hızda deneysel standart sapma değişimi (50 d/dk).

Bu durum ERD7114 kalite malzeme için de söz konusudur (Şekil 5.12). Bu etki 3 boyutlu yüzey taramaları ile görselleştirilmiştir. Şekil 5.13 ve Şekil 5.14'de A/0,9/3,4/10/700 şartlarında yapılan testlere ait 3d yüzey topografya görüntüleri (a)'da, pürüzlülük dağılımı (b)'de gösterilmiştir. Yağlı haddemeye ait Şekil 5.13 (a) ile kuru haddemeye ait Şekil 5.14 (a) karşılaştırıldığında yağlı haddelenen yüzeyin daha homojen pürüzlülük dağılımına sahip olduğu görülmektedir. 3d optik profil ölçme cihazından alınan pürüzlülük dağılım grafikleri Şekil 5.13 (b) ve Şekil 5.14

(b)'de verilmiştir. Bu grafiklerdeki kırmızı eğri pürüzlülük eksenine ne kadar dik ise pürüzlülük dağılım aralığının o kadar dar olduğu anlamına gelmektedir. Bu eğrinin Şekil 5.13 (b)'de daha dik olduğu görülmektedir. Yani yağlı haddelemede yüzey pürüzlülüğü daha homojen bir dağılıma sahiptir. Pürüzlülük ölçme cihazı ile malzeme yüzeyinden manuel olarak ölçülen pürüzlülük değerleri de aynı şekildedir. Bu ölçümlere göre standart sapma yağlı haddelemede 0,18; kuru haddelemede 0,28 olarak hesaplanmıştır. Bu farkın yağlı haddelemede merdane-malzeme ara yüzeyinde ortaya çıkan hidrodinamik etkiden kaynaklandığı düşünülmektedir.

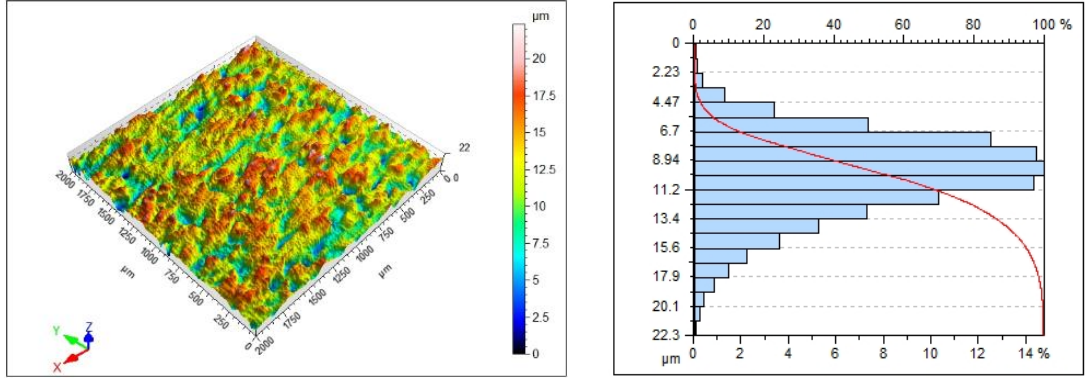


Şekil 5.12. Yüksek hızda deneysel standart sapma değişimi (50 d/dk).



a) 3d optik alan tarama görüntüsü b) Pürüzlülük dağılımı (standart sapma 0,18)

Şekil 5.13. A/0,9/3,4/10/700/Y şartlarında haddeleme.

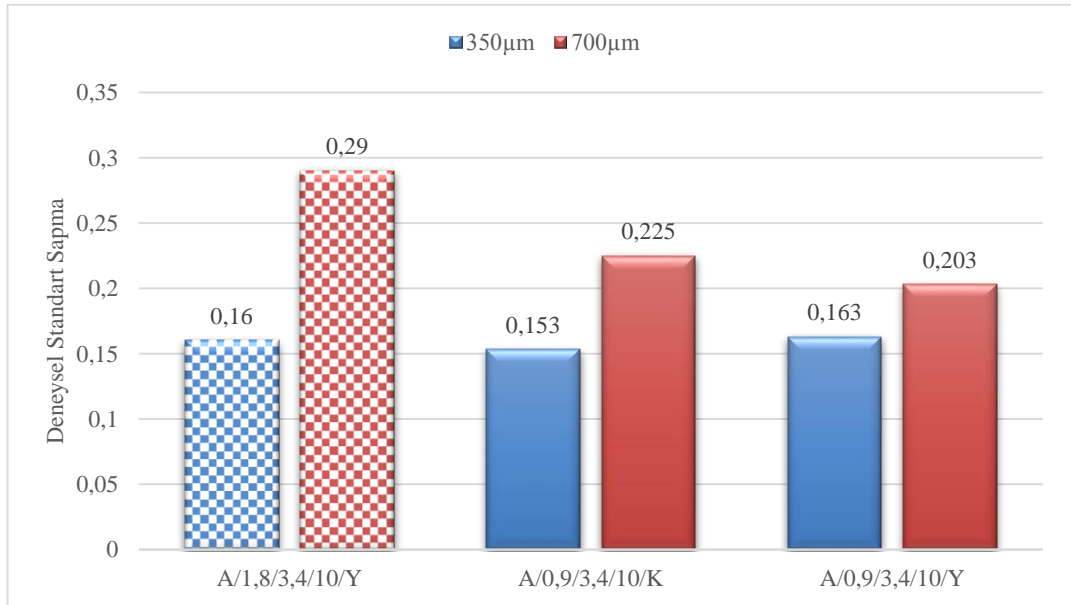


a) 3d optik alan tarama görüntüsü b) Pürüzlülük dağılımı (standart sapma 0,28)

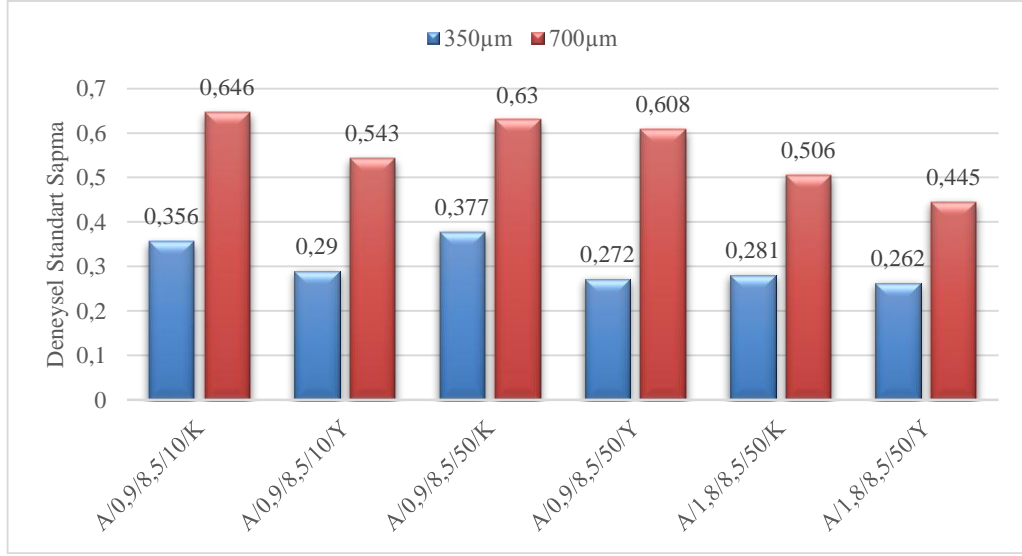
Şekil 5.14. A/0,9/3,4/10/700/K şartlarında haddeleme.

5.4.2. Standart Sapma – Ezme Miktarı İlişkisi

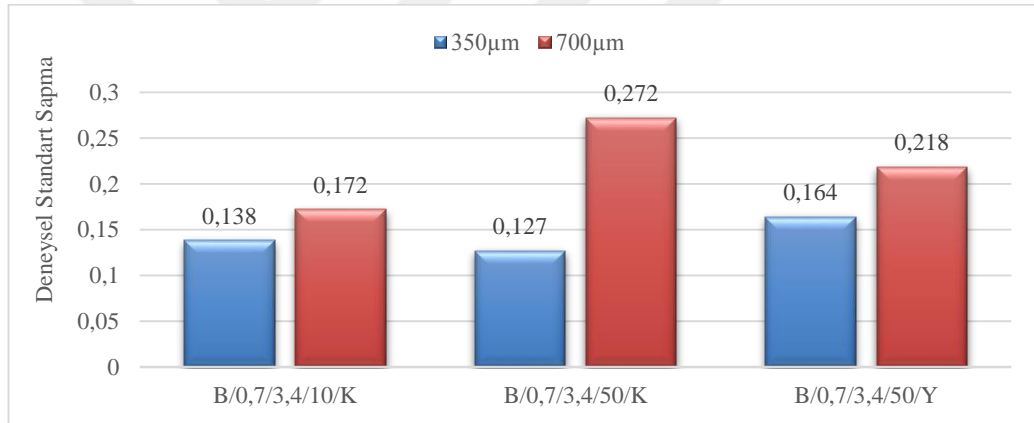
Her iki malzeme kalitesinde ve her iki pürüzlülükte merdane kullanımında, 350 μm ezme yapılan test sonuçları ile 700 μm ezme yapılan test sonuçları karşılaştırıldığında, malzeme yüzeyi pürüzlülük dağılımının küçük pasolarda daha dar bir aralıkta gerçekleştiği görülmektedir (Şekil 5.15, Şekil 5.16, Şekil 5.17, Şekil 5.18).



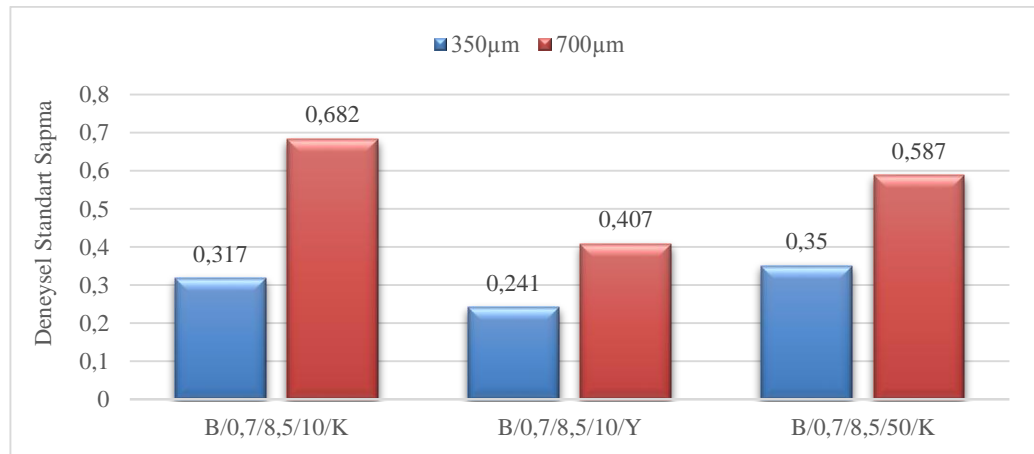
Şekil 5.15. Deneysel standart sapma (ERD6112- az pürüzlü merdane ile).



Şekil 5.16. Deneysel standart sapma (ERD6112- çok pürüzlü merdane ile).

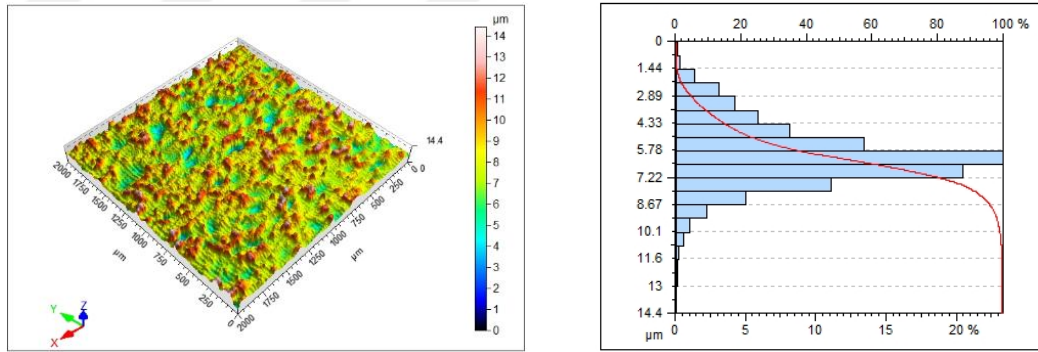


Şekil 5.17. Deneysel standart sapma (ERD7114- az pürüzlü merdane ile).



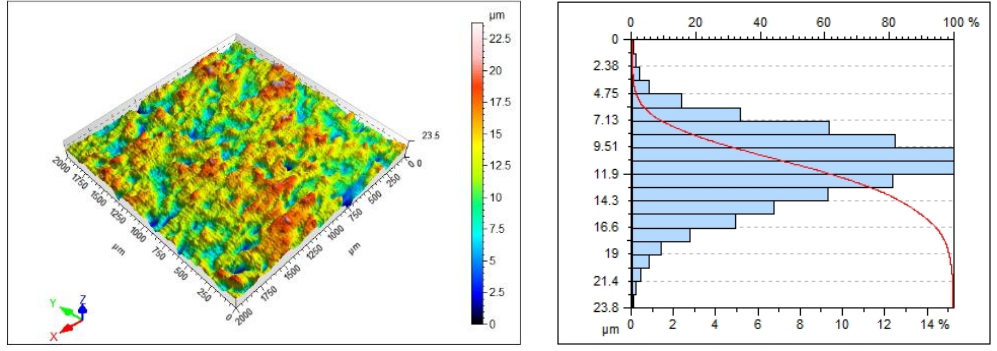
Şekil 5.18. Deneysel standart sapma (ERD7114- çok pürüzlü merdane ile).

Bu etki 3 boyutlu yüzey taramaları ile görselleştirilmiştir. Şekil 5.19 ve Şekil 5.20'de A/1,8/3,4/10/350/Y ve A/1,8/3,4/10/700/Y şartlarında yapılan testlere ait 3d yüzey topoğrafya görüntüleri (a)'da, pürüzlülük dağılımı (b)'de gösterilmiştir. Şekil 5.19 (a) ile Şekil 5.20 (a) karşılaştırıldığında küçük pasalarda yüzeyin daha homojen pürüzlülük dağılımına sahip olduğu görülmektedir. 3d optik profil ölçme cihazından alınan pürüzlülük dağılım grafikleri Şekil 5.19 (b) ve Şekil 5.20 (b)'de verilmiştir. Bu grafiklerdeki kırmızı eğri pürüzlülük eksenine ne kadar dik ise pürüzlülük dağılım aralığının o kadar dar olduğu anlamına gelmektedir. Bu eğrinin Şekil 5.19 (b)'de daha dik olduğu görülmektedir. Yani küçük pasalarda yüzey pürüzlülüğü daha homojen bir dağılıma sahiptir. Pürüzlülük ölçme cihazı ile malzeme yüzeyinden manuel olarak ölçülen pürüzlülük değerleri de aynı şekildedir. Bu ölçümlere göre standart sapma, 350 μm ezme verildiğinde 0,16; 700 μm ezme verildiğinde 0,29 olarak hesaplanmıştır. Ezme miktarı az iken merdane yüzeyindeki küçük tepelikler malzemeye temas edemediğinden pürüzlendirmeye katkıları yoktur. Küçük tepelikler ancak büyük ezme oranlarında (ezmenin artması haddeleme kuvvetini artırır) devreye girerek malzeme yüzeyinde krater oluşturduğundan standart sapmayı olumsuz etkilemektedir.



a) 3d optik alan tarama görüntüsü b) Pürüzlülük dağılımı (standart sapma 0,16)

Şekil 5.19. A/1,8/3,4/10/350/Y şartlarında haddeleme.



a) 3d optik alan tarama görüntüsü b) Pürüzlülük dağılımı (standart sapma 0,29)

Şekil 5.20. A/1,8/3,4/10/700/Y şartlarında haddeleme.

BÖLÜM 6

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada soğuk haddelemede yağlamanın, haddeleme hızının, haddeleme kuvvetinin, ezme miktarının, malzeme tipinin ve kalınlığının pürüzlülük transferi üzerine etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Yapılan çalışmalar neticesinde son kullanıcının aradığı yüzey şartlarına sahip malzeme elde edebilmek için sadece yüzeyi pürüzlendirilmiş merdane kullanımının yeterli olmadığı görülmüştür. Çünkü aynı malzeme, aynı merdane ile farklı haddeleme şartlarında farklı değerlerde yüzey pürüzlülüğü kazanmaktadır.

Parametrelerin tek tek değiştirilerek yapıldığı test sonuçlarına göre haddeleme kuvvetini arttıran her parametrenin pürüzlülük transferini arttırıcı yönde etki ettiği sonucuna ulaşılmıştır. Haddeleme kuvvetini en fazla etkileyen faktörün ise ezme miktarı olduğu saptanmıştır. Ezme miktarının 350 μm 'den 700 μm 'ye çıkarılması ile haddeleme kuvvetinde %600'lere kadar artış olmasına rağmen; haddeleme hızının 10 d/dk'dan 50 d/dk'ya çıkarılması ile %10'lara kadar; merdane pürüzlülüğünün 3,4 μm 'den 8,5 μm 'ye çıkarılması ile %44'lere kadar; ERD7114 kalite malzeme yerine dayanımı daha yüksek ERD6112 kalite malzeme kullanılması durumunda %221'lere kadar; 1,8 mm kalınlığında malzeme yerine 0,9 mm kalınlığında malzeme kullanılması durumunda ise haddeleme kuvvetinde sadece %38'lere varan artış gözlenmiştir.

Ezme miktarı arttırıldığında malzeme yüzey pürüzlülüğündeki artışın yanı sıra pürüzlülük dağılım aralığının genişlediği farkedilmiştir. Bu genişleme çok pürüzlü merdanelerle yapılan testlerde daha belirgindir. Ezme oranı 350 μm 'den 700 μm 'ye çıkarıldığında az pürüzlü merdanelerle yapılan testlerde standart sapma 0,127'den 0,272'ye yükselerek en fazla %114 artış gösterirken; çok pürüzlü merdanelerle yapılan testlerde 0,272'den 0,608'e yükselerek en fazla %123 artış göstermiştir. Bu yüzden malzeme yüzeyinde daha yüksek pürüzlülük istendiğinde ezme miktarını arttırmak ya da yüksek pürüzlülükte merdane kullanmak yerine haddeleme hızının arttırılması

tercih edilmelidir. Böylece üretim de artmış olacaktır. Ancak hız arttırıldığında haddeleme kuvvetinin yükselmesiyle birlikte merdane sarfiyatının da artacağı ve hadde sisteminde hasarlanmalardan dolayı üretimin kesintiye uğrayabileceği göz ardı edilmemelidir.

Çelik sacların, sıcak ve soğuk haddelemeye göre çok daha az ezmenin yapıldığı temper haddelemeye tabi tutulmasındaki amaçlardan biri, malzeme yüzeyinde homojen yüzey pürüzlülüğü elde etmektir. Deneysel çalışmalar neticesinde daha ince malzeme ile daha küçük ezme oranlarında yapılacak temper haddenin homojenliği arttırdığı saptanmıştır. Öte yandan küçük ezme oranlarında haddeleme kuvveti azaldığından pürüzlülük transferinde bir miktar düşme olacaktır. Aynı ezme oranlarında mümkünse ince malzeme ile yüksek hızlarda üretim yapılırsa durum dengelenir ve istenen değerde yüzey pürüzlülüğü elde edilmiş olur.

KAYNAKLAR

1. Davies, D. J. and Oelmann, L. A., "Metallurgical Processes and Production Technology", 2nd. Ed., **PITMAN Publishing Limited**, London, 230 (1985).
2. Internet: ERSEM, "Çeliğin Hikayesi", <https://www.erssem.com.tr/kurumsal/celigin-hikayesi/> (2018).
3. Moniz, B. J., "Metallurgy", 4th. Ed., **American Technical Publisher, Inc.**, Homewood, (2007).
4. Ginzburg, V. B. and Ballas, R., "Classification of Steel", Flat Rolling Fundamentals, **Marcel Dekker, Inc.**, New York, 81–85 (2000).
5. Aran, A. and Demirkol, M., "Haddeleme", Plastik Şekil Verme Teknolojisi, **İTÜ**, İstanbul, (1994).
6. Internet: Metalurji ve Malzeme Mühendisleri, "Haddeleme İşlemi", www.metalurjik.net (2018).
7. Kalpakjian, S. and Schmid, S. R., "Rolling of Metals", Manufacturing Engineering and Technology, **Prentice Hall, Inc**, New Jersey, 320–322 (2001).
8. Choi, I. S., Rossiter, J. A., and Fleming, P. J., "Looper and tension control in hot rolling mills: A survey", **Journal Of Process Control**, 17 (6): 509–521 (2007).
9. Taşkın, A., "Hadde Sıçraması ve Şerit Hadde Çıkış Kalınlığının Hesaplanması", Kdz. Ereğli, (1999).
10. MORGAN, "Morgoil Symposium", Worcester, (2004).
11. Lange, K., "Rolling", Handbook of Metal Forming, **Mc Graw Hill**, Michigan, (1985).
12. Gaspard, C., Batazzi, D., Thonus, P., and Vergne, C., "Manufacture and Updated Grades for Work Rolls and Intermediate Rolls Dedicated to Cold Rolling", **AKERS**, Belçika, (2005).
13. Gaspard, C., Ballani, J., Batazzi, D., and Adams, T., "Use of HSS Rolls to Skip The Chrome Plating in Cold Rolling Applications", **AKERS**, Belçika, (2005).
14. Beranger, G., Henry, G., and Sanz, G., "The Book of Steel", **Lavoisier Publishing**, (1996).

15. Ginzburg, V. B., "Metallurgical Design of Flat Rolled Steels", *Marcel Dekker, Inc.*, New York, 193-223 (2005).
16. Internet: APT International, "Rolling Mill", www.aptint.com (2017).
17. Degarmo, E. P., Black, J. T., and Kohser, R. A., "Materials and Processes in Manufacturing", New York, (1988).
18. Internet: Macha, V., "Hot Strip Mill", www.victormacha.com (2018).
19. Udomphol, T. (Suranaree University of Technology), "Rolling of Metals", Nakhon Ratchasima, (2007).
20. Ginzburg, V. B., "Classification of Rolling Mills", Steel - Rolling Technology, *Marcel Dekker, Inc.*, New York, 777 (1998).
21. Internet: Alibaba, "Rolling Mill", www.alibaba.com (2018).
22. Kucsera, P. and Béres, Z., "Hot Rolling Mill Hydraulic Gap Control (HGC) thickness control improvement", *Acta Polytechnica Hungarica*, 12 (6): 93–106 (2015).
23. Çapan, L., "Metallere Plastik Şekil Verme", 4. Ed., *Çağlayan Yayınevi*, İstanbul, 354-357 (2003).
24. Dieter, G. E., "Mechanical Metallurgy", SI Metric. Ed., *Mc Graw Hill*, Singapur, 586-615 (1988).
25. Pürçek, G., "Metalik Malzemelere Uygulanan Mekanik Deneyler", Trabzon, (2014).
26. Çolak, B., Eren, A., and Kurgan, N., "Revision of The Rolling Mill Roller Bearing", *3rd Iron And Steel Symposium(UDCS'17)*, (37): 2–8 (2017).
27. ThyssenKrupp Stahl, "Roughness Measuring of Metal Surfaces", Essen, (2004).
28. Çolak, B. and Kurgan, N., "EDT ve SBT Yöntemleriyle Pürüzlendirilmiş Soğuk Hadde Merdanelerinin Yüzey Pürüzlülük Etkilerinin Karşılaştırılmasına Dair Bir Çalışma", *1st International Iron And Steel Symposium*, 1–9 (2012).
29. Müll, K. and Routschek, T., "TOPOCROM Texturing: Technology and Advantages", 1–12 (2013).
30. Waldrich Siegen GmbH., "Mechanical and Electrical Maintenance Training for EDT Machines", Siegen, (2018).
31. Kainz, A., Paesold, D., Riha, G., and Zeman, K., "Finite element modelling of temper rolling with particular emphasis on roughness transfer", (March): 1–10 (2005).

32. Bidulská, J., Kvackaj, T., Bodák, V., and Bidulský, R., "The Microgeometry Parameters of Uncoated and Zinc-Coated Cold Rolled Steel Strips", 17 (2): 1–7 (2007).
33. Cavallari, B. M., Gaboardi, P., and Mcwhirter, R., "Roll texturing for cold rolling mills", (October): 24–28 (2016).
34. Wentink, D. J., Matthews, D., Appelman, N. M., and Toose, E. M., "A generic model for surface texture development, wear and roughness transfer in skin pass rolling", *Wear*, 328–329: 167–176 (2015).
35. Domanti, S. and Edwards, J., "Interactions between roll surface and cold Rolling parameters", *2nd Intl. Conf. Model. Met. Roll. Process*, 584–595 (1996).
36. Kijima, H., "Influence of roll radius on roughness transfer in skin-pass rolling of steel strip", *Journal Of Materials Processing Technology*, 214 (5): 1111–1119 (2014).
37. Fujii, Y., Maeda, Y., and Ifuku, R., "Prediction of surface roughness on rolled sheet by texture roll", *Procedia Engineering*, 81 (October): 161–166 (2014).
38. Kijima, H. and Bay, N., "Skin-pass rolling I-Studies on roughness transfer and elongation under pure normal loading", *International Journal Of Machine Tools And Manufacture*, 48 (12–13): 1313–1317 (2008).
39. SMS DEMAG, "Influence of temper rolling on material properties", Zürich, (2003).
40. Kimura, Y., Ueno, M., and Mihara, Y., "調質圧延における亜鉛めっき鋼板への表面テクスチャーの転写挙動Printing behavior of roll surface texture to hot-dip galvanized steel sheet in temper rolling", *鉄と鋼*, 95 (5): 399–405 (2009).
41. Ma, B., Tieu, A. K., Lu, C., and Jiang, Z., "An experimental investigation of steel surface characteristic transfer by cold rolling", *Journal Of Materials Processing Technology*, 125–126: 657–663 (2002).
42. Wu, C., Zhang, L., Qu, P., Li, S., and Jiang, Z., "A simple approach for analysing the surface texture transfer in cold rolling of metal strips", *International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 95 (1–4): 597–608 (2018).
43. Chunyu, X., Xin, Z., and Jie, Z., "Evolution on Topography of Textured Work Rolls and Steel Strips during Cold Rolling and Temper Rolling", *Steel Research International*, 88 (9): (2017).
44. Rui, L. I., Qingdong, Z., Xiaofeng, Z., Meng, Y. U., and Bo, W., "Control Method for Steel Strip Roughness in Two-stand Temper Mill Rolling", 28:

(2015).

45. Kijima, H., "An experimental investigation on the influence of lubrication on roughness transfer in skin-pass rolling of steel strip", *International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 96 (9–12): 3321–3330 (2015).
46. Dick, K. and Lenard, J. G., "The effect of roll roughness and lubricant viscosity on the loads on the mill during cold rolling of steel strips", *J. Mat. Proc. Technol.*, 16–24 (2005).
47. Lenard, J. G., "Primer on Flat Rolling", Chapter 5-Tribology, Second. Ed., *Elsevier Science*, Amsterdam, 193–266 (2014).
48. Mazur, V. L., "Production of rolled steel with specified surface roughness", *Steel In Translation*, 45 (5): 371–377 (2015).



ÖZGEÇMİŞ

Bilal ÇOLAK 1974 yılında Kdz.Ereğli’de doğdu; ilk, orta ve lise öğrenimini aynı şehirde tamamladı. 1991’de Zonguldak Ereğli Lisesi’nden mezun oldu. Yüksek öğrenim hayatına 1992 yılında Hacettepe Üniversitesi Zonguldak Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü’nde başlayan yazar, öğrenimine 1994 yılından itibaren İstanbul Teknik Üniversitesi’nde devam ederek 1999 yılında İTÜ Makine Fakültesi’nden mezun olmuştur. Uzun dönem askerlikten sonra 2001-2003 yıllarında Kocaeli Üniversitesi Asım Kocabıyık MYO’nda öğretim görevliliği yapmıştır. 2005 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda yüksek lisansını tamamlamıştır. 2003-2009 yıllarında Erdemir Hadde Atelyeleri’nde, 2009-2010 yıllarında Tosçelik Yassı Mamul Haddehanesi’nde mühendis olarak çalışmıştır. Aralık 2010’dan itibaren Karabük Üniversitesi Eskipazar MYO’nda öğretim görevlisi olarak görev yapmaktadır. İşyeri hekimliği ve iş güvenliği uzmanlığı eğitici belgesine sahip olup A sınıfı iş güvenliği uzmandır. Evli ve 2 çocuk sahibidir.

ADRES BİLGİLERİ

Adres : Karabük Üniversitesi
Eskipazar MYO
Bahçepınar Mah. / Eskipazar / KARABÜK
Tel : (507) 842 1176
E-posta : bilalcolak@karabuk.edu.tr