



**T.C.  
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**TEMPER HADDELEMEDE MEKANİK ÖZELLİK-YÜZEY  
PÜRÜZLENDİRME İLİŞKİSİNİN İNCELENMESİ**

Doktora Tezi

**Batuhan ÖZAKIN**

Danışman  
**Prof. Dr. Naci KURGAN**

SAMSUN  
2021

T.C.  
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI



TEMPER HADDELEMEDE MEKANİK ÖZELLİK-YÜZEY  
PÜRÜZLENDİRME İLİŞKİSİNİN İNCELENMESİ

Doktora Tezi

**Batuhan ÖZAKIN**

Danışman

**Prof. Dr. Naci KURGAN**

Bu çalışma, Ondokuz Mayıs Üniversitesi tarafından PYO.MUH.1904.19.013 proje numarası ile desteklenmiştir.

SAMSUN  
2021

## TEZ KABUL VE ONAYI

Batuhan ÖZAKIN tarafından, Prof. Dr. Naci KURGAN danışmanlığında hazırlanan “Temper Haddedeleme Mekanik Özellik-Yüzey Pürüzlendirme İlişkisinin İncelenmesi” başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından 14.4.2021 tarihinde yapılan sınav sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

	Unvanı Adı Soyadı Üniversitesi Ana Bilim/Ana Sanat Dalı	İmza	Sonuç
Başkan	Doç. Dr. Kemal YILDIZLI Ondokuz Mayıs Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalı		<input checked="" type="checkbox"/> Kabul <input type="checkbox"/> Ret
Üye (Danışman)	Prof. Dr. Naci KURGAN Ondokuz Mayıs Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalı		<input checked="" type="checkbox"/> Kabul <input type="checkbox"/> Ret
Üye	Doç. Dr. Özgür DEMİRCAN Ondokuz Mayıs Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı		<input checked="" type="checkbox"/> Kabul <input type="checkbox"/> Ret
Üye	Doç. Dr. İlhan ÇELİK Samsun Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalı		<input checked="" type="checkbox"/> Kabul <input type="checkbox"/> Ret
Üye	Dr. Öğr. Üyesi Bilal ÇOLAK Karabük Üniversitesi Eskipazar Meslek Yüksekokulu		<input checked="" type="checkbox"/> Kabul <input type="checkbox"/> Ret

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunca belirlenen ve yukarıda adları yazılı jüri üyeleri tarafından uygun görülmüştür.

ONAY  
... / ... / ...  
Prof. Dr. Ali BOLAT  
Enstitü Müdürü

## **BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI**

Hazırladığım yüksek lisans/doktora/sanatta yeterlik tezinin bütün aşamalarında bilimsel etiğe ve akademik kurallara riayet ettiğimi, çalışmada doğrudan veya dolaylı olarak kullandığım her alıntıya kaynak gösterdiğimi ve yararlandığım eserlerin Kaynaklar'da gösterilenlerden oluştuğunu, her unsurun enstitü yazım kılavuzuna uygun yazıldığını ve TÜBİTAK Araştırma ve Yayın Etiği Kurulu Yönetmeliği'nin 3. bölüm 9. maddesinde belirtilen durumlara aykırı davranılmadığını taahhüt ve beyan ederim.

14 / 04 / 2021  
Batuhan ÖZAKIN

## **TEZ ÇALIŞMASI ÖZGÜNLÜK RAPORU BEYANI**

**Tez Başlığı :** Temper Haddelirmede Mekanik Özellik-Yüzey Pürüzlendirme İlişkisinin İncelenmesi

Yukarıda başlığı belirtilen tez çalışması için şahsım tarafından 03.03.2021 tarihinde intihal tespit programından alınmış olan özgünlük raporu sonucunda;

Benzerlik oranı : % 6

Tek kaynak oranı : % 4 çıkmıştır.

14 / 04 / 2021  
Prof. Dr. Naci KURGAN

## ÖZET

### TEMPER HADDELEMEDE MEKANİK ÖZELLİK-YÜZEY PÜRÜZLENDİRME İLİŞKİSİNİN İNCELENMESİ

Batuhan ÖZAKIN

Ondokuz Mayıs Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Doktora, Nisan/2021

Danışman: Prof. Dr. Naci KURGAN

Temper haddeleme, soğuk haddeleme imalat sürecinin son aşamasıdır. Bu aşamada şerit/sac malzeme yüzeyine özel pürüzlülük profiline sahip merdanelerle pürüzlülük transfer edilir. Pürüzlendirilen son ürünün mekanik özellikleri artarken aynı zamanda boyanabilme ve şekillendirme kabiliyeti de iyileştirilmiş olur. Temper haddeleme işleminde birçok haddeleme parametresi sac malzemenin pürüzlülük transferini etkilemektedir. Bu çalışma deneysel olarak yürütülmüş olup farklı akma mukavemeti sergileyen sac malzemelerin farklı haddeleme parametreleri ile temper haddeleme işleminde pürüzlendirilmesi neticesinde pürüzlülük transfer oranları karşılaştırılmıştır. Ayrıca otomotiv ve beyaz eşya sektöründe boyanabilme ve şekillendirme kabiliyeti açısından sac malzeme üzerine transfer edilen pürüzlülük profilinin homojen dağılım gösterip göstermediği 3D pürüzlülük ölçümlerinden elde edilen pürüzlülük parametreleri ve malzeme oranı eğrileri ile değerlendirilmiştir. Tüm bunlara ilaveten sac malzemenin kalınlığı boyunca kesitinden mikrosertlik ve mikroyapı davranışları da incelenmiştir. Temper haddelemede mekanik özellik-yüzey pürüzlendirme ilişkisinin belirlenmesine yönelik kapsamlı bir çalışma yürütülerek imalat endüstrisine fayda sağlamaya yönelik sonuçlar elde edilmeye çalışılmıştır.

Bu çalışmada malzemelerin artan akma mukavemeti ile pürüzlülük transfer oranının azaldığı sonucuna varılmıştır. Bununla birlikte ezme oranı arttıkça pürüzlülük transfer oranı artmıştır. Düşük akma mukavemetine sahip malzemedeki düşük ezme miktarlarında daha homojen pürüzlülük dağılımı elde edilmiştir. Haddeleme hızındaki artış pürüzlülük transfer oranını etkilemediği gibi malzemelerin tümünde pürüzlülük dağılımları da benzer davranış sergilemiştir. Yağlayıcı kullanılan şartlarda, merdane pürüzlülüğü ve malzeme kalınlığındaki artış, pürüzlülük transfer oranının azalmasına sebep olmuştur. Yağlayıcı kullanılan şartlarda düşük akma mukavemetine sahip malzemedeki daha homojen pürüzlülük dağılımı elde edilmiştir. Merdane pürüzlülüğü arttıkça düşük akma mukavemetine sahip malzemedeki ve malzeme kalınlığı arttıkça yüksek akma mukavemetine sahip malzemedeki pürüzlülük dağılımında daha az bozulma meydana gelmiştir. Mikrosertliğin malzemelerin kalınlık kesiti boyunca yüzeyden merkeze azaldığı, ezme miktarı arttıkça mikrosertliğin arttığı ve bu artışın düşük akma mukavemetine sahip malzemedeki daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. Mikroyapı görüntülerinde ise yüzey ve merkezde farklı tane yapıları gözlenmiştir. Düşük akma mukavemetine sahip malzemedeki yüzeyde ve merkezde tanelerin daha fazla miktarda uzayıp incelendiği sonucuna ulaşılmıştır.

**Anahtar Sözcükler:** Temper haddeleme, haddeleme parametreleri, mekanik özellik, pürüzlülük transferi, mikroyapı.

## ABSTRACT

### INVESTIGATION OF THE RELATION OF MECHANICAL PROPERTIES- SURFACE ROUGHENING IN SKIN-PASS ROLLING

Batuhan ÖZAKIN

Ondokuz Mayıs University

Institute of Graduate Studies

Department of Mechanical Engineering

Ph.D, April/2021

Supervisor: Prof. Dr. Naci KURGAN

Skin-pass (temper) rolling is the final stage of the cold rolling manufacturing process. At this stage, the roughness is transferred to the surface of the strip / sheet material with rollers with a special roughness profile. While the mechanical properties of the roughened final product increase, the ability to be dyed and shaped is also improved. In the skin-pass rolling process, many rolling parameters affect the roughness transfer of the sheet material. This study was carried out experimentally and the roughness transfer rates were compared as a result of the roughening of sheet materials with different yield strength in the skin-pass rolling process with different rolling parameters. In addition, in terms of dyeing and shaping capability in the automotive and white goods industry, whether the roughness profile transferred on the sheet material shows a homogeneous distribution or not, the roughness parameters and material ratio curves obtained from the 3D roughness measurements were evaluated. In addition to all these, microhardness and microstructural behaviors of the sheet material through its cross-section were also investigated. By conducting a comprehensive study to determine the relationship between mechanical properties and surface roughening in skin-pass rolling, it has been tried to obtain results that will benefit the manufacturing industry.

In this study, it was concluded that roughness transfer ratio decreases with increasing yield strength of materials. In addition, as the reduction ratio increased, the roughness transfer ratio increased. A more homogeneous roughness distribution was obtained at low reduction ratios in the material with low yield strength. The increase in rolling speed did not affect the roughness transfer ratio, and the roughness distributions displayed similar behavior in all of the materials. Under the conditions where lubricants were used, the increase in roll roughness and material thickness caused a decrease in the roughness transfer ratio. A more homogeneous roughness distribution was obtained in the material with low yield strength under the conditions where the lubricant was used. As the roll roughness increased in the material with low yield strength and as the material thickness increased in the material with high yield strength was occurred less deterioration in the roughness distribution. It was concluded that the microhardness decreases from the surface to the center along the thickness section of the materials, the microhardness increases as the reduction ratio increases and this increase is higher in the material with low yield strength. In the microstructure images, different grain structures were observed in the surface and center. It was concluded that in the material with low yield strength, the grains elongated and thinned more at the surface and in the center.

**Keywords:** Skin-pass (temper) rolling, rolling parameters, mechanical properties, roughness transfer, microstructure.

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Doktora tez çalışmamın yürütülmesinde ve akademik olarak her türlü yardım ve desteklerini hiçbir zaman eksik bırakmayan tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Naci KURGAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca deneysel çalışmamın yürütülmesinde altyapı desteklerinden faydalandığımız Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Dekanlığına ve çalışmamın şekillenmesine büyük katkı sunan Sayın Dr. Öğr. Üyesi Bilal ÇOLAK'a teşekkür ederim.

Tez çalışmamın yürütülmesinde tez izleme raporlarını titizlikle inceleyen ve yapıcı, yönlendirici öneriler sunan Sayın Doç. Dr. Kemal YILDIZLI ve Sayın Doç. Dr. Özgür DEMİRCAN'a teşekkürü bir borç bilirim. Yine deneysel çalışmalarda desteklerini esirgemeyen Sayın Doç. Dr. İlhan ÇELİK'e, Sayın Doç. Dr. Mevlüt GÜRBÜZ'e, Sayın Dr. Öğr. Üyesi Kürşat GÜLTEKİN'e, Sayın Öğr. Gör. Mustafa PEHLİVAN ve Sayın Arş. Gör. Erkan ÖZTÜRK başta olmak üzere emeği geçen ismini sayamadığım tüm arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım. Deneysel çalışmamın malzeme tedarik sürecinde sac malzeme bağışlarından dolayı ERDEMİR T.A.Ş'ne ve deneysel çalışmalarda laboratuvar imkânlarından faydalandığım Samsun Metal Metroloji ve Kalibrasyon Laboratuvarı çalışanlarına ayrıca teşekkür ederim.

Doktora eğitimim süresince "TÜBİTAK 2211 Yurtiçi Lisansüstü Burs Programı" desteklerinden faydalandığım Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK)'na teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasının hazırlanmasında PYO.MUH.1904.19.013 proje numarası ile destekleyen Ondokuz Mayıs Üniversitesi Proje Yönetim Ofisi'ne teşekkür ederim.

Tüm eğitim hayatım boyunca bu günlere gelmemde büyük emeği olan kıymetli annem Asuman ÖZAKIN'a, değerli babam Behzat ÖZAKIN'a ve kardeşlerime şükranlarımı sunarım. Ayrıca her koşulda desteğini esirgemeyen eşim Damla ÖZAKIN'a ve çalışmalarımın dolaylı kendisine zaman ayırmakta güçlük çektiğim kızım Asel ÖZAKIN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Batuhan ÖZAKIN

## İÇİNDEKİLER

<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1. Temper Haddeme İşlemi ve Endüstrideki Önemi .....	1
1.2. Tez Çalışmasının Amacı .....	4
1.3. Tez Çalışmasında Kullanılan Malzemelerin Seçiminde İzlenen Yol.....	5
1.4. Tezin Organizasyonu .....	7
<b>2. KURAMSAL TEMELLER</b> .....	<b>8</b>
2.1. Haddeme .....	8
2.1.1. Sıcak Haddeme .....	11
2.1.2. Soğuk Haddeme .....	12
2.1.3. Hadde Tezgâhları ve Merdaneleri.....	14
2.1.4. Haddemenin Karakteristikleri .....	17
2.1.4.1. Ezme Miktarı ve Redüksiyon.....	18
2.1.4.2. Uzama .....	19
2.1.4.3. Temas Açısı, Kapma Açısı, Temas Alanı .....	19
2.1.4.4. Haddeme Sürtünmesi .....	20
2.1.4.5. Nötr Nokta ve İleri Kayma .....	24
2.1.4.6. Merdane Düzleşmesi.....	25
2.1.5. Haddeme Kuvveti .....	26
2.1.6. Merdane Döndürme Momenti.....	30
2.1.7. Haddeme Gücü.....	30
2.1.8. Temper Haddemede Yüzey Pürüzlendirme .....	30
2.1.8.1. Merdane Pürüzlendirme Yöntemleri.....	32
2.1.8.2. Pürüzlülük Transferini Etkileyen Haddeme Parametreleri .....	38
2.1.9. Yüzey Pürüzlülük Profili ve Parametreleri .....	39
2.1.9.1. Malzeme Oranı Eğrileri (MRC, BAC, Abbott-Firestone) .....	41
<b>3. KAYNAK ÖZETLERİ</b> .....	<b>43</b>
<b>4. MATERYAL ve YÖNTEM</b> .....	<b>54</b>
4.1. Malzeme.....	54
4.1.1. Malzemelerin Kimyasal Bileşimleri .....	54
4.1.2. Malzemelerin Çekme Özellikleri .....	56
4.2. Yöntem.....	58
4.2.1. Haddeme Düzenegi .....	58
4.2.1.1. Temper Haddemede Pürüzlendirme Amaçlı Üretilen Merdaneler.....	60
4.2.1.2. Haddeme Parametreleri.....	61
4.2.1.3. Ezme Miktarının Ayarlanması.....	63
4.2.2. Pürüzlülük Ölçümleri.....	66
4.2.2.1. Merdane Yüzeylerinin Pürüzlülük Ölçümleri.....	66

4.2.2.2. Malzeme Yüzeylerinin Pürüzlülük Ölçümleri .....	68
4.2.2.3. Pürüzlülük Transfer Oranının Hesaplanması .....	69
4.2.2.4. 3D Pürüzlülük Ölçümleri .....	69
4.2.3. Mikrosertlik ve Mikroyapı Karakterizasyonu .....	70
4.2.3.1. Numune Hazırlama .....	70
4.2.3.2. Mikrosertlik Ölçümleri .....	73
4.2.3.3. Mikroyapı Görüntüleme .....	75
<b>5. BULGULAR VE TARTIŞMA .....</b>	<b>77</b>
5.1. Pürüzlülük Ölçümlerinden Elde Edilen Bulgular .....	77
5.1.1. Malzemelerin Akma Mukavemetinin Pürüzlendirme ile İlişkisi .....	77
5.1.2. Ezme Miktarı-Mekanik Özellik İlişkisi .....	79
5.1.3. Haddeme Hızı-Mekanik Özellik İlişkisi .....	81
5.1.4. Yağlama Koşulu-Mekanik Özellik İlişkisi .....	84
5.1.5. Merdane Pürüzlülüğü-Mekanik Özellik İlişkisi .....	86
5.1.6. Malzeme Kalınlığı-Mekanik Özellik İlişkisi .....	88
5.2. 3D Alan Tarama Görüntüleri ve Pürüzlülük Dağılımının Değerlendirilmesinden Elde Edilen Bulgular .....	90
5.2.1. Ezme Miktarı-Mekanik Özellik İlişkisinde Pürüzlülük Dağılımı .....	90
5.2.2. Haddeme Hızı-Mekanik Özellik İlişkisinde Pürüzlülük Dağılımı .....	94
5.2.3. Yağlama Koşulu-Mekanik Özellik İlişkisinde Pürüzlülük Dağılımı .....	97
5.2.4. Merdane Pürüzlülüğü-Mekanik Özellik İlişkisinde Pürüzlülük Dağılımı .....	100
5.2.5. Malzeme Kalınlığı-Mekanik Özellik İlişkisinde Pürüzlülük Dağılımı .....	103
5.3. Mikrosertlik ve Mikroyapı Karakterizasyonu ile Elde Edilen Bulgular .....	106
5.3.1. Mikrosertlik Ölçümlerinden Elde Edilen Bulgular .....	106
5.3.2. Mikroyapı Görüntülerinden Elde Edilen Bulgular .....	109
<b>6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....</b>	<b>116</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>121</b>
<b>EKLER .....</b>	<b>128</b>

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### SİMGELER

a	Haddeleme kuvveti ile merdane merkezi arasındaki mesafe
$A_1$	Malzemenin haddeleme öncesi kesit alanı
$A_1$	Pürüzlülük profilinde tepelerin oluşturduğu alan
$A_2$	Malzemenin haddeleme sonrası kesit alanı
$A_2$	Pürüzlülük profilinde vadilerin oluşturduğu alan
$A_g$	Görünen temas alanı
$A_r$	Gerçek temas alanı
$A_t$	Metal ile merdane arasındaki toplam temas alanının izdüşümü
$\alpha$	Temas veya kapma açısı
$\alpha_n$	Nötr nokta ile malzemenin merdaneden çıktığı nokta arasındaki açı
$\beta$	Kuvvetin uygulama noktasını karakterize eden açı
$^{\circ}\text{C}$	Santigrat
d	Merdane muylu çapı
d/dk	Devir/dakika
D	Merdane çapı
$\Delta h$	Ezme miktarı
$\Delta h_{\max}$	Maksimum ezme miktarı
$\Delta_1$	Haddelenmiş metalin elastik deformasyonu
$\Delta_2$	Merdanenin elastik deformasyonu
$\Delta_a$	Profilin ortalama eğimi
$\Delta_q$	Profilin ortalama sapsmalarının karekökünün eğimi
gf	Gram-kuvvet
$h_1$	Malzemenin haddeleme öncesi kalınlığı
$h_2$	Malzemenin haddeleme sonrası kalınlığı
H	Malzemenin sertliği
k	Döndürme kolu katsayısı
$k_a$	Aşınma katsayısı
kHz	Kilohertz
kg	Kilogram
kW	Kilowatt
$l_t$	Temas yayının yatay izdüşümü
$l_1$	Malzemenin haddeleme öncesi uzunluğu
$l_2$	Malzemenin haddeleme sonrası uzunluğu
$L_m$	Pürüzlülük ölçüm uzunluğu
$\lambda_a$	Ortalama dalga boyu
$\lambda_c$	Kesim dalga boyu
$\lambda_q$	Ortalama sapsmaların karekökünün dalga boyu
m	Metre
$\mu$	Sürtünme katsayısı
mm	Milimetre
$\mu\text{m}$	Mikrometre
M	Döndürme momenti
MPa	Megapascal
MW	Megawatt
n	Merdanenin bir dakikadaki devir sayısı
N	Normal kuvvet
nm	Nanometre

Q	Haddeleme gücü
$p_n$	Normal basınç
P	Haddeleme kuvveti
$P_r$	Radyal kuvvet
R	Merdane yarıçapı
$R_a$	Aritmetik ortalama profil pürüzlülüğü
$R_{a_e}$	Haddeleme öncesi malzemenin aritmetik ortalama profil pürüzlülüğü
$R_{a_f}$	Haddeleme sonrası malzemenin aritmetik ortalama profil pürüzlülüğü
$R_{a_m}$	Merdanenin aritmetik ortalama profil pürüzlülüğü
$R_q$	Aritmetik ortalama sapmaların karekökü
$R_{ku}$	Profil sapmalarının dördüncü kuvvetleri ortalaması
$R_k$ veya $S_k$	Çekirdek pürüzlülüğü
$R_p$	Maksimum tepe yüksekliği
$R_{pc}$ veya $P_c$	Tepe sayısı
$R_{pk}$ veya $S_{pk}$	Çekirdek pürüzlülüğü üzerindeki tepe noktalarının yüksekliği
$R_{sk}$	Profil sapmalarının küpleri ortalaması
$R_v$	Maksimum vadi derinliği
$R_{vk}$ veya $S_{vk}$	Çekirdek pürüzlülüğü altındaki vadilerin derinliği
$R_z$ veya $R_{max}$	Tepeden vadiye maksimum yükseklik
s	Saniye
$s_d$	Kayma mesafesi
S	Bitişik tepelerin ortalama aralığı
$S_f$	İleri kayma hızı
$S_m$	Ortalama çizgideki ortalama aralık
$S_{mr1}$ veya $M_{r1}$	Tepe başlangıcını gösteren malzeme oranı
$S_{mr2}$ veya $M_{r2}$	Vadi başlangıcını gösteren malzeme oranı
$\sigma_m$	Akma gerilmesi
T	Teğetsel kuvvet
$T_1$	Geri kayma bölgesinde oluşan sürtünme kuvveti
$T_2$	İleri kayma bölgesinde oluşan sürtünme kuvveti
$T_{ergime}$	Malzemenin ergime sıcaklığı
$v_1$	Malzemenin merdaneye giriş hızı
$v_2$	Malzemenin merdaneden çıkış hızı
$v_n$	Merdane çevre hızı
$w_a$	Aşınma miktarı
$w_1$	Malzemenin haddeleme öncesi genişliği
$w_2$	Malzemenin haddeleme sonrası genişliği
$w_m$	Malzemenin ortalama temas genişliği
W	Merdanenin bir dönüşünde yapılan iş
$W_a$	Dalgalılık
z	Tepeden vadiye yükseklik

### KISALTMALAR

3D	Üç boyutlu
AC	Alternatif akım
AFM	Atomik kuvvet mikroskobu
BAC	Temas alanı eğrisi
BAP	Bilimsel araştırma projeleri
CNC	Bilgisayar nümerik kontrol
DM	Düşük akma mukavemetine sahip malzeme

EBT	Elektron ışını ile pürüzlendirme
ECD	Elektrolitik krom birikimi ile pürüzlendirme
EDT	Elektro deşarj pürüzlendirme
FEM	Sonlu elemanlar yöntemi
HSC	Yüksek nokta sayısı
HSD	Yüksek mangan kalite çelikler
HSLA	Yüksek mukavemet düşük alaşım
HSS	Yüksek mukavemetli çelik
HV	Vickers sertliği
LT	Lazer ile pürüzlendirme
MRC	Malzeme oranı eğrisi
OM	Orta düzey akma mukavemetine sahip malzeme
SBT	Kumlama ile pürüzlendirme
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
SiC	Silisyum karbür
TÜRKAK	Türk Akreditasyon Kurumu
YM	Yüksek akma mukavemetine sahip malzeme

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Temper haddeleme yöntemiyle pürüzlendirme işlemi .....	2
Şekil 1.2. Aynı aritmetik ortalama pürüzlülük ( $R_a$ ) değerine sahip üç yüzey .....	4
Şekil 1.3. Otomotiv endüstrisinde kullanılan çelik sınıfları .....	6
Şekil 2.1. Haddeleme işleminin basit bir şematik diyagramı .....	8
Şekil 2.2. Haddeleme yöntemiyle üretilen ürünlere ait şematik gösterim .....	9
Şekil 2.3. Haddeleme başlangıcında oluşan kuvvetler .....	10
Şekil 2.4. Sıcak haddehanenin şematik görseli .....	11
Şekil 2.5. Yassı ürünlerin soğuk haddelenmesi işlemine ait proses şeması .....	13
Şekil 2.6. 4'lü merdane düzenine sahip 5 adet stanttan oluşan bir tandem hadde tezgahının şematik görünümü .....	15
Şekil 2.7. Redüktör ile tahrik edilen bir haddeleme tezgahının şematik görünümü .....	15
Şekil 2.8. Merdaneler: a) düz ve b) kalibreli. 1) merdane gövdesi, 2) muylu, 3) kaplin yeri .....	16
Şekil 2.9. Haddeleme işleminde sıklıkla kullanılan merdane düzenleri .....	17
Şekil 2.10. Düz haddeleme işlemi ve bazı kabulleri .....	18
Şekil 2.11. İki yüzey birbirine yaklaştığında gerçekleşen temasın görünümü .....	20
Şekil 2.12. Merdane boşluğuna malzeme girişi ve oluşan kuvvetler .....	23
Şekil 2.13. Nötr noktanın konumu .....	24
Şekil 2.14. Merdane düzleşme etkisi .....	26
Şekil 2.15. Merdanenin haddelenmiş metal üzerine uyguladığı temel kuvvetler .....	27
Şekil 2.16. Basit bir haddeleme işleminde merdanenin haddelenmiş metal üzerine uyguladığı toplam kuvvetlerin yönü .....	28
Şekil 2.17. Basit bir haddeleme işleminde merdanelere uygulanan kuvvetlerin yönü .....	29
Şekil 2.18. Pürüzlülük transfer modeli .....	32
Şekil 2.19. Merdane pürüzlendirme yöntemleri ve doku görselleri .....	33
Şekil 2.20. Kumlama ile pürüzlendirme (SBT) yöntemiyle merdane yüzeyinin pürüzlendirilmesi .....	34
Şekil 2.21. Elektrodeşaj ile pürüzlendirme (EDT) yöntemiyle merdane pürüzlendirme .....	35
Şekil 2.22. Lazer pürüzlendirme (LT) yöntemiyle merdane pürüzlendirme .....	36
Şekil 2.23. Elektron ışını ile pürüzlendirme (EBT) yöntemiyle merdane pürüzlendirme .....	37
Şekil 2.24. Elektrolitik krom birikimi ile pürüzlendirme (ECD) yöntemiyle merdane pürüzlendirme .....	38
Şekil 2.25. $R_a$ , aritmetik yüzey pürüzlülüğünün hesaplanması .....	40

Şekil 2.26. $R_z$ , tepeden vadiye ortalama yüksekliğin hesaplanması .....	41
Şekil 2.27. Malzeme oranı eğrisi ve pürüzlülük parametreleri.....	42
Şekil 4.1. Optik emisyon spektrometresi.....	55
Şekil 4.2. Sac malzeme çekme deney numuneleri geometrisi ve imal edilmiş görseli.....	56
Şekil 4.3. Çekme özelliklerini tayin etmek amacıyla kullanılan üniversal çekme cihazı.....	57
Şekil 4.4. Sac malzemelere ait gerilme-şekil değiştirme eğrisi.....	58
Şekil 4.5. Deneysel çalışmalarda kullanılan haddelme düzeneği .....	60
Şekil 4.6. Pürüzlendirme amacıyla üretilen pürüzlü merdane.....	61
Şekil 4.7. Belirlenen notasyonun deney numuneleri üzerine işlenmesi .....	62
Şekil 4.8. Mineral yağlayıcı ile yapılan yağlama işlemi.....	63
Şekil 4.9. Ezme miktarının ayarlanması için kullanılan vidalı T-kol mekanizması .....	64
Şekil 4.10. Komparatör saati yardımıyla ezme miktarının hassas ayarlanması.....	65
Şekil 4.11. Temper haddelme ile pürüzlendirme deneylerinde kullanılan parametrelere ait örnek bir şematik gösterim .....	66
Şekil 4.12. Merdane pürüzlülük ölçümlerinde kullanılan pürüzlülük ölçüm cihazı .....	67
Şekil 4.13. Merdane pürüzlülük ölçüm noktalarının şematik görünümü .....	67
Şekil 4.14. Malzeme pürüzlülük ölçümlerinde kullanılan pürüzlülük ölçüm cihazı .....	68
Şekil 4.15. 3D pürüzlülük ölçüm cihazı .....	70
Şekil 4.16. Malzemelerin kesilmesinde kullanılan metal kesme cihazı .....	71
Şekil 4.17. Malzemelerin kalıplanmasında metalografik kalıplama presi.....	72
Şekil 4.18. Mikrosertlik ve mikroyapı karakterizasyonu amacıyla hazırlanan sac malzeme numuneleri .....	72
Şekil 4.19. Numunelerin hazırlanmasında kullanılan zımparalama ve parlatma cihazı .....	73
Şekil 4.20. Deney numunelerinin A-A kalınlık kesiti ve A-A kesiti boyunca mikrosertlik ölçümü alınan noktalar.....	74
Şekil 4.21. Vickers mikrosertlik ölçüm cihazı .....	75
Şekil 4.22. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) .....	76
Şekil 5.1. Akma mukavemeti ile pürüzlendirme ilişkisi .....	77
Şekil 5.2. Akma mukavemeti ile pürüzlendirme ilişkisi .....	79
Şekil 5.3. Ezme miktarı-mekanik özellik ilişkisi.....	80
Şekil 5.4. Düşük ezme miktarlarında yapılan temper haddelme ile pürüzlülük transferinde haddelme hızı-mekanik özellik ilişkisi .....	82

Şekil 5.5. Yüksek ezme miktarlarında yapılan temper haddeleme ile pürüzlülük transferinde haddeleme hızı-mekanik özellik ilişkisi .....	84
Şekil 5.6. Yağlama koşulunun mekanik özellik ile ilişkisi.....	85
Şekil 5.7. Merdane pürüzlülüğünün mekanik özellik ile ilişkisi .....	87
Şekil 5.8. Malzeme kalınlığının mekanik özellik ile ilişkisi .....	89
Şekil 5.9. Farklı ezme miktarlarında yapılan temper haddeleme ile pürüzlülük transferi sonrasında yüzeylerden alınan 3D alan tarama görüntüleri .....	91
Şekil 5.10. Üç farklı malzeme için profil yüksekliği-malzeme oranı eğrileri .....	93
Şekil 5.11. Farklı haddeleme hızlarında yapılan temper haddeleme ile pürüzlülük transferi sonrasında yüzeylerden alınan 3D alan tarama görüntüleri .....	94
Şekil 5.12. Üç farklı malzeme için profil yüksekliği-malzeme oranı eğrileri .....	96
Şekil 5.13. Kuru ve yağlı ortam koşullarında yapılan temper haddeleme ile pürüzlülük transferi sonrasında yüzeylerden alınan 3D alan tarama görüntüleri .....	97
Şekil 5.14. Üç farklı malzeme için profil yüksekliği-malzeme oranı eğrileri .....	99
Şekil 5.15. Farklı pürüzlülükte merdaneler ile yapılan temper haddeleme ile pürüzlülük transferi sonrasında yüzeylerden alınan 3D alan tarama görüntüleri.....	100
Şekil 5.16. Üç farklı malzeme için profil yüksekliği-malzeme oranı eğrileri .....	102
Şekil 5.17. Farklı kalınlıkta malzemeler ile yapılan temper haddeleme ile pürüzlülük transferi sonrasında yüzeylerden alınan 3D alan tarama görüntüleri .....	103
Şekil 5.18. Üç farklı malzeme için profil yüksekliği-malzeme oranı eğrileri .....	105
Şekil 5.19. Kalınlık kesiti boyunca nokta numaralarından alınan Vickers mikrosertlik ( $HV_{0.05}$ ) ölçümlerini gösteren grafiksel ilişki .....	108
Şekil 5.20. ERD7114 kalite malzeme için temper haddeleme ile pürüzlendirmede farklı ezme miktarları ile yapılan testlerden elde edilen mikroyapı görüntüleri .....	110
Şekil 5.21. AISI304 kalite malzeme için temper haddeleme ile pürüzlendirmede farklı ezme miktarları ile yapılan testlerden elde edilen mikroyapı görüntüleri.....	112
Şekil 5.22. ERD7140 kalite malzeme için temper haddeleme ile pürüzlendirmede farklı ezme miktarları ile yapılan testlerden elde edilen mikroyapı görüntüleri .....	114

## TABLolar DİZİNİ

Tablo 4.1. Temper haddeleme ile pürüzlendirme işlemine hazırlanan malzemelerin ölçüleri .....	54
Tablo 4.2. Sac malzemelere ait kimyasal bileşimler .....	55
Tablo 4.3. Sac malzemelerin çekme özellikleri.....	58
Tablo 4.4. Haddeleme düzeneğine ait teknik özellikler .....	59
Tablo 4.5. Özel olarak üretilen pürüzlü merdanelerin teknik özellikleri .....	61
Tablo 4.6. DeneYlerde kullanılan parametreler ve notasyon .....	62
Tablo 4.7. Deneysel çalışmalarda kullanılan iki farklı merdane çiftinin pürüzlülük ölçüm sonuçları .	68
Tablo 4.8. DM/1.5/4.4/250/10/K koşullarında temper haddeleme ile pürüzlendirilen malzemenin yüzey pürüzlülük ölçüm sonuçları .....	69

# 1. GİRİŞ

## 1.1. Temper Haddeme İşlemi ve Endüstrideki Önemi

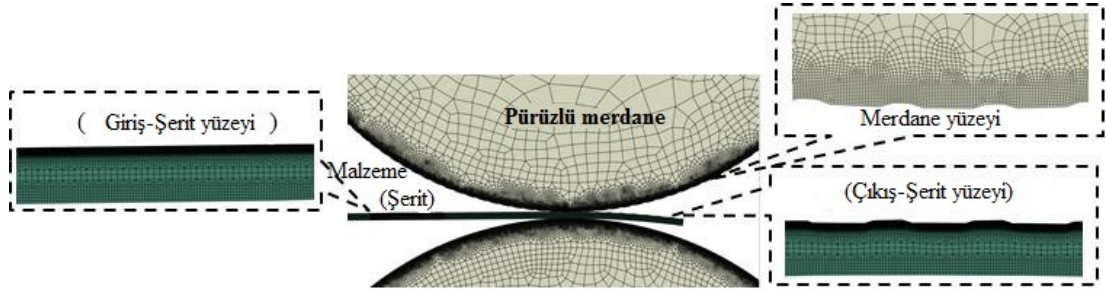
Haddeme, metallerin şekillendirilmesinde en önemli imalat yöntemidir. Demir ve demir dışı metal ve alaşımlarının % 95'inden fazlası, haddeme yoluyla endüstriyel uygulamalarda kullanılabilir şekillerine işlenir. Endüstriyel uygulamalarda kullanılabilir haddelenmiş metal şekilleri plaka, levha, şerit, folyo, ray, kiriş, profil, çubuk, lama ve dikişsiz boru gibi ürünlerdir. Haddeme işleminde malzemenin iki dönen silindirik merdane arasındaki boşluktan geçmesine izin verilir ve meydana gelen yüksek basınç gerilmesiyle birlikte malzemede kalıcı şekil değişimi elde edilir (Ray, 2016).

Soğuk haddeme işlemi, malzemelerin bir fırında ısıtıldığı veya sürekli bir sıcak metal döküm işleminde üretildiği ve daha sonra ilave işlemler için uygun olan düşük kalınlıkta bobinler halinde haddelendiği sıcak haddeme işleminden sonra gerçekleşir (Pittner ve Simaan, 2010). Soğuk haddeme işlemi oda sıcaklığında gerçekleştirilen bir haddeme türü olup kalınlık azalması sıcak haddeme işlemine göre daha azdır ve malzemelerin yüzey kalitesi ile mekanik özelliklerini iyileştirmek için yapılır. Soğuk haddeme işlemi sac, bant ve folyo gibi ürünlerin elde edilmesinde kullanılan geleneksel imalat yöntemidir (Aran ve Demirkol, 1995; Pittner ve Simaan, 2010).

Soğuk haddemede yüzey pürüzlendirme, soğuk haddeme işleminin son basamağında gerçekleştirilir (Xia vd., 2017). Temper haddeme olarak bilinen bu proses, genellikle tavlama işleminin ardından yapılır ve soğuk haddelenmiş çelik malzemelerin üretiminde son operasyon aşamasıdır. Lüders bandı (gerilme-şekil değiştirme eğrisinde düzensiz akma bölgesi) önleme, nihai yüzey topografyası, sacın düzlüğü vb. özellikler üzerinde büyük bir etkiye sahiptir (Kijima, 2013; Mazur ve Nogovitsyn, 2018). Temper haddemede değişken özellikleri, sac malzemenin kalınlığına göre büyük temas uzunluğu, yüksek sürtünme ve büyük merdane çapına bağlı olarak az miktarda kalınlık azalmasından (uygulama % 1) dolayı geleneksel sac haddeme işleminden oldukça farklıdır (Kijima, 2013).

Temper haddeme işleminin en önemli kullanım alanlarından biri kalınlıkları 0.20-2.00 mm aralığında değişen sac şeklindeki yassı malzemelerin otomotiv, dayanıklı ev aletleri, mutfak eşyaları, radyatör ve havalandırma ekipmanları imalatı gibi endüstriyel uygulamalarda kullanılmak üzere nihai pürüzlülüğünün

kazandırılmasıdır (Xu vd., 2020; Erdemir, 2020). Temper haddeleme işleminde merdaneler, haddeleme işlemi sırasında kısmen malzeme yüzeyine aktarılan özel bir pürüzlülük profiline sahiptir (Jeulin ve Laurence, 1996). Merdanelerin yüzeylerinin pürüzlülük profili özel birtakım yöntemler (elektro deşarj pürüzlendirme (electro discharge texturing, EDT), kumlama ile pürüzlendirme (shot blast texturing- SBT), lazer pürüzlendirme (laser texturing, LT), elektron ışını ile pürüzlendirme (electron beam texturing, EBT), elektrolitik krom birikimi ile pürüzlendirme (electro-chrome deposition, ECD)) kullanılarak pürüzlendirilir (Sun vd., 2006; Hilgenberg ve Steinhoff, 2015; Köhler vd., 2016). Söz konusu yöntemlerle pürüzlendirilen merdane çifti kullanılarak temper haddeleme işlemiyle malzeme üzerine pürüzlülük transfer edilir. Şekil 1.1’de temper haddeleme yöntemiyle pürüzlendirme işlemi gösterilmiştir (Fujii vd., 2014).



Şekil 1.1. Temper haddeleme yöntemiyle pürüzlendirme işlemi (Fujii vd., 2014)

Temper haddeleme işlemi ile yüzeyin pürüzlendirme davranışına bakılacak olursa, özel pürüzlülük profiline sahip merdanelerin malzeme yüzeyine pürüzlülük transferi süreci birçok haddeleme parametresinden etkilenmektedir. Literatür taraması göz önüne alındığında bu parametreler; haddeleme uzaması, haddeleme kuvveti, pik basınç, merdane özellikleri (geometrisi, malzemesi, pürüzlülüğü, pürüzlendirilme yöntemi vb.), haddeleme hızı, ezme miktarı, tribolojik koşullar ve malzeme özellikleridir (Devarajan vd., 2012; Çolak, 2018; Özakın ve Kurgan, 2019). Bu parametrelerin her birinin tek tek değişimi veya birkaçının birlikte değişimi pürüzlülük transferini etkilemektedir ve bu parametrelerin değişimi ile gerçekleştirilen temper haddeleme işlemi neticesinde nihai pürüzlülüğe sahip yassı ürün elde edilmiş olur.

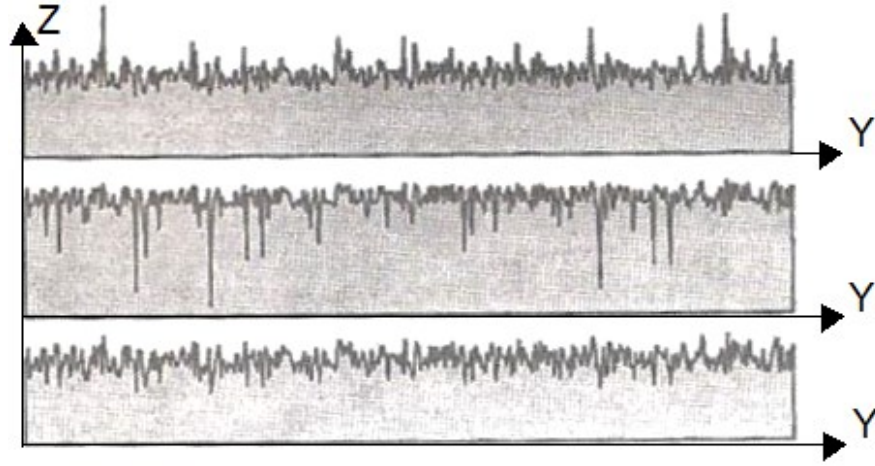
Pürüzlendirilmiş yüzeye sahip yüksek kaliteli soğuk haddelenmiş saclara olan talep otomobil endüstrisi, beyaz eşya vb. ev aletleri üretimi ve diğer yüksek teknoloji sektörlerinin genişlemesiyle artmaktadır (Gorbunov vd., 2009). Otomobil endüstrisine

bakılacak olursa, hemen hemen tüm otomobil karoseri sacları özel bir pürüzlendirilmiş yüzey topografyası ile donatılmaktadır. Pürüzlendirilmiş sac malzeme yüzeylerinin standart haddelenerek bitirilmiş yüzeylere göre avantajları şunlardır (Bloeck, 2012):

- a. Şerit yüzeyine uygulanan yağlama maddelerinin daha eşit dağılımı ve daha iyi yapışması sağlanır.
- b. Taşıma, ambalajlama ve depolama sırasında sac veya şerit malzemenin performansının artırılması, yani yıpranma nedeniyle yüzey kusurlarının oluşması riski azaltılır.
- c. Atölye ortamlarında daha uzun süreli depolama ve istifleme sağlanır.
- d. Şekillendirilebilme yeteneği iyileştirilir.
- e. Boyama sonrası homojen yüzey görünümü elde edilir.

Genel olarak, “*Avrupa Otomobil Endüstrisi*” üreticileri için SEP 1940 standardına göre otomotiv endüstrisinde kullanılan yassı ürün çelik sac malzeme yüzeyinin, aritmetik ortalama pürüzlülük ( $R_a$ ) değeri  $1.5 \mu\text{m}$ 'den az ve standartta tanımlanan tepe sayısının ( $R_{pc}$ )  $50 \text{ cm}^{-1}$  değerinden fazla olması istenir (SEP 1940, 2002; Scheers vd., 1998).

Aritmetik ortalama pürüzlülük ( $R_a$ ) değeri, yüzey bitirme işlemlerinde diğer parametrelere göre genel olarak kullanılan pürüzlülük parametresidir (Wilson, vd., 1995). Buna karşılık aritmetik ortalama pürüzlülük ( $R_a$ ) değeri, yüzeyin pürüzlülük profilini tam olarak anlatmak için yeterli değildir. Şekil 1.2’de aynı aritmetik ortalama pürüzlülük ( $R_a$ ) değerine sahip üç yüzey bulunmaktadır ancak görülen bu üç yüzeyin aritmetik ortalama pürüzlülük değerleri ( $R_a$ ) aynı olsalar dahi bu üç yüzey farklı yüzeylerdir (Butler, 1957).



Şekil 1.2. Aynı aritmetik ortalama pürüzlülük ( $R_a$ ) değerine sahip üç yüzey (Yıldız, 2011)

Şekil 1.2’de verilen üç yüzeyin profil şekilleri birbirlerinden farklıdır. Üstte bulunan profil keskin tepelere, ikinci profil derin vadilere ve üçüncü profil ise düzenli dağılımı olan tepe ve vadilere sahiptir. Bu üç yüzey aynı aritmetik ortalama pürüzlülük ( $R_a$ ) değerine sahip olsalar bile birbirlerinden farklı yüzeylerdir (Yıldız, 2011). Otomobil dış gövdesi, beyaz eşya vb. boyanmış sac yüzeylerin görsel kalitesi açısından sadece aritmetik ortalama pürüzlülük ( $R_a$ ) şartının yerine getirilmesi yetersiz olarak görülmektedir. Tüm yüzey boyunca pürüzlülük profilinin değişiminin dar bir aralıkta kalması yani homojen olması da önemlidir (Nakhoul, 2014). Dolayısıyla sac, şerit gibi bir yassı ürünün yüzeyinin şekillendirilebilme ve boyanabilme kabiliyetinin iyi düzeyde sağlanabilmesi için hem optimum seviyede yüzey pürüzlülüğüne hem de homojen bir pürüzlülük dağılımına sahip olması önemlidir (Xin vd., 2014; Çolak ve Kurgan, 2018; Teknotherm, 2020).

## 1.2. Tez Çalışmasının Amacı

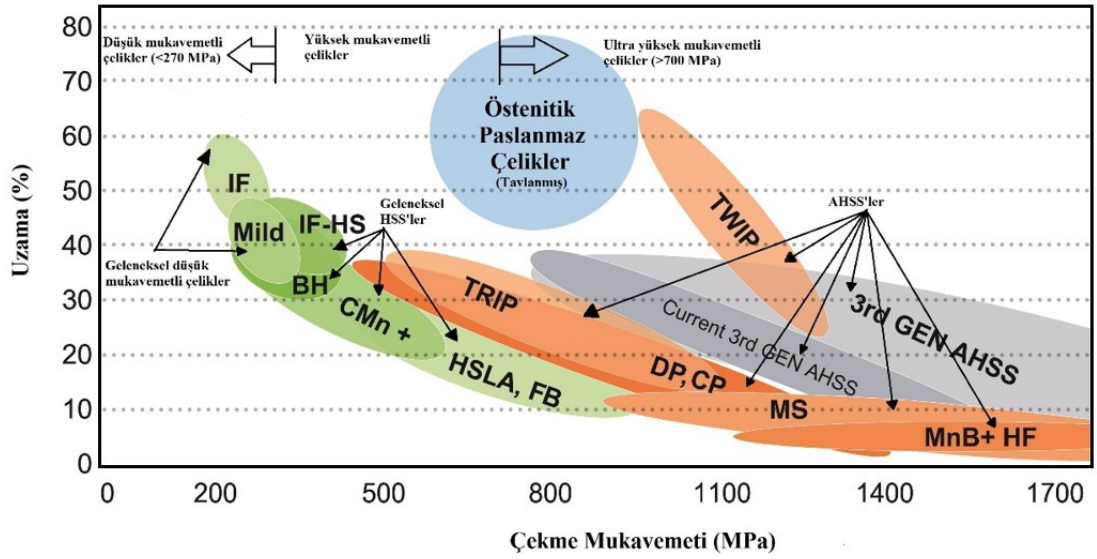
Bu çalışmanın seçilmesine yönlendiren en önemli unsur, günümüze kadar malzemelerin mekanik özelliklerinin pürüzlendirme ve pürüzlülük transferini ne şekilde etkilediği ile ilgili yapılan herhangi bir deneysel çalışmaya rastlanmamış olması ve literatürde belirgin bir boşluk algılanması sayılabilir. Ayrıca özgün bir çalışma olarak bilime, teknolojiye katkı sağlayacak ve literatürde önemli bir boşluğu dolduracaktır. Bu tez çalışmasının amaçları aşağıdaki gibidir.

- i. Bu çalışma ile sac, şerit vb. malzemelerin mekanik özelliklerinin pürüzlülük transferi ile ilişkisinin deneysel olarak incelenmesi amaçlanmıştır.

- ii. Temper haddeleme işleminde metal malzeme yüzeyine pürüzlülük transferini etkileyen haddeleme hızı, merdane pürüzlülüğü, ezme miktarı, yağlama şartları, malzeme kalınlığı vb. değişken parametrelerin pürüzlülük transferine etkileri, malzemelerin mekanik özellikleri ile pürüzlülük transferindeki değişimin uygulamalı bir şekilde gerçekleştirilmesi ve literatüre yeni katkılar yapılması amaçlanmıştır.
- iii. Sac, şerit gibi bir yassı ürün yüzeyinin şekillendirilebilme ve boyanabilme kabiliyetinin iyi düzeyde sağlanabilmesi için hem optimum seviyede yüzey pürüzlülüğüne hem de homojen bir pürüzlülük dağılımına sahip olması gerekliliğinden ötürü mekanik özellik-haddeleme parametrelerinin pürüzlülük transferine etkilerinin karşılaştırılmasıyla birlikte yüzeylerden optik mikroskop ile hassas olarak elde edilen pürüzlülük dağılımının hangi durumlarda homojen olup olmadığının belirlenmesi amaçlanmıştır.
- iv. Haddeleme parametrelerinden ezme miktarının temper haddeleme ile pürüzlendirme işleminde sac malzemenin kalınlık boyunca kesitinde meydana getirdiği mikrosertlik ve mikroyapısal değişimin belirlenmesi amaçlanmıştır.

### **1.3. Tez Çalışmasında Kullanılan Malzemelerin Seçiminde İzlenen Yol**

Bu tez çalışmasında otomotiv sektöründe kullanılan çelik sac malzemeler referans olarak alınmıştır. Şekil 1.3'de otomotiv endüstrisinde kullanılan çelik sınıfları görülmektedir (Hayat, 2010; World Auto Steel, 2020). Piyasa koşullarından temin edilebilme ve farklı mekanik özelliklerin seçilebilmesi adına birçok değişken değerlendirilmiş, akma mukavemeti ve yüzde uzama değerleri farklılık gösteren üç kalite sac malzemenin temini yoluna gidilmiştir.



Şekil 1.3. Otomotiv endüstrisinde kullanılan çelik sınıfları (Hayat, 2010; World Auto Steel, 2020)

İlk malzeme otomotiv endüstrisinde yoğun olarak kullanılan yüksek miktarda süneklik ve iyi şekillendirilebilirliğe sahip yumuşak (mild) çelik türünden DC04 kalite sac malzemedir (Mulay vd., 2018). Bu malzeme ülkemizde Erdemir sac kalitelerinden ERD7114 kalite türünden bir sac malzemedir ve seçilen malzemeler arasında en düşük akma mukavemetine ve orta düzeyde uzama kabiliyetine sahiptir.

İkinci malzeme ise otomotiv endüstrisinde son yıllarda gelişen ve araçların ağırlığını azaltarak egzoz emisyonlarını düşürmek amacıyla kullanılan yeni nesil çelik jenerasyonlarından yüksek mukavemet ve yüksek uzama yeteneği sergileyen östenitik paslanmaz çelik sac malzemedir (Chatterjee, 2020). Bu malzeme AISI 304 paslanmaz çelik olup seçilen malzemeler arasında orta düzeyde akma mukavemetine ve en yüksek uzama kabiliyetine sahiptir.

Üçüncü malzeme ise yine otomotiv endüstrisinde yakıt tüketimi, CO<sub>2</sub> emisyonları ve araçların ağırlıklarının azaltılabilmesi amacıyla kullanılan geleneksel yüksek mukavemetli çeliklerden (HSS), yüksek mukavemet düşük alaşım (HSLA) kalite çelik sac malzemedir (Rodionova vd., 2020). Bu malzeme HC420LA kalite sac malzemedir ve ülkemizde Erdemir sac kalitelerinden ERD7140 kalite türündendir. Seçilen malzemeler arasında en yüksek akma mukavemetine ve en düşük uzama kabiliyetine sahiptir.

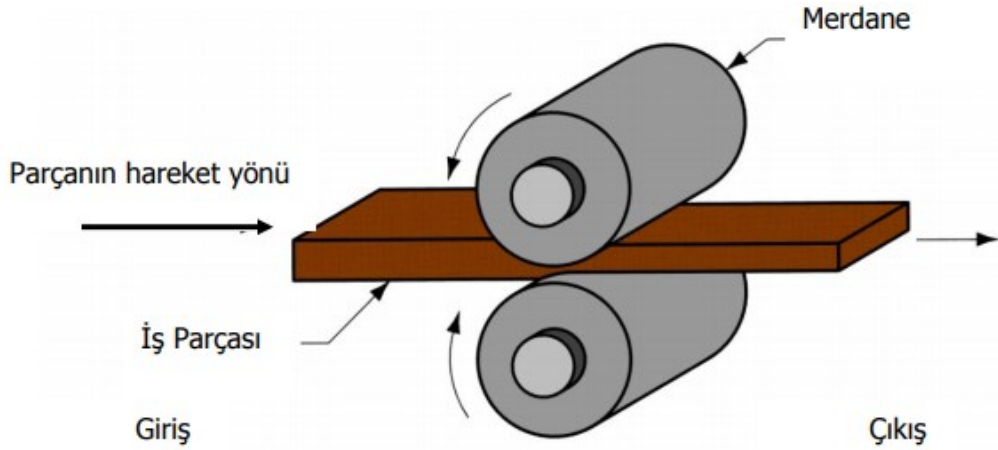
#### **1.4. Tezin Organizasyonu**

Bu tez çalışması altı bölüm halinde hazırlanmıştır. Çalışmanın birinci bölümünde temper haddeleme işleminin endüstrideki önemine ve tez çalışmasının amacına yer verilmiştir. Ayrıca çalışmaya yönlendiren ana unsur olarak kullanılan malzemelerin seçiminde izlenen yol hakkında kısa bir bilgide bu bölümde verilmiştir. İkinci bölümde haddeleme işlem süreci ve soğuk haddelemenin son aşaması olan temper haddeleme işleminde pürüzlülük transferi ile ilgili birtakım teorik bilgiler açıklanmıştır. Ayrıca pürüzlülük dağılımı incelenirken kullanılan yüzey pürüzlülük parametreleri hakkında teorik bilgilerde yine bu bölümde sunulmuştur. Üçüncü bölümde temper haddelemede pürüzlülük transferi ile ilgili kaynak özetleri geniş bir şekilde irdelenmiştir. Dördüncü bölümde tez çalışmasında kullanılan materyal ve izlenen yöntemler detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Beşinci bölümde tez çalışmasında elde edilen bulgular tüm hatlarıyla gözler önüne serilmiş ve altıncı bölümde elde edilen bulguları özetleyen sonuçlar ve endüstriye yönelik birtakım önerilere yer verilmiştir.

## 2. KURAMSAL TEMELLER

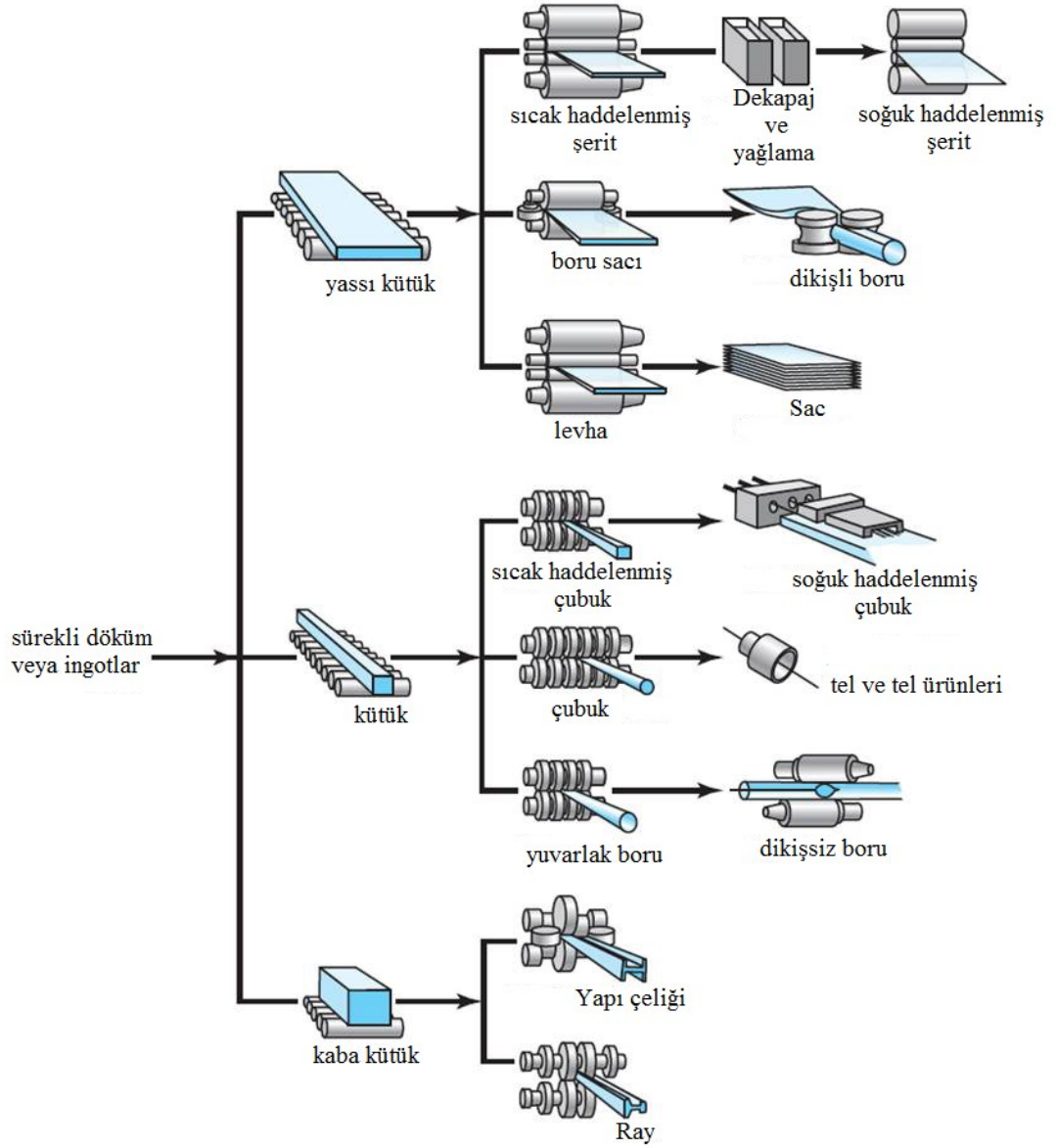
### 2.1. Haddeleme

Metalik malzemelerin kalınlığını, zıt y6nlerde d6nen bir çift iş merdanesi arasından geçirerek azaltmak için basınç tipi bir plastik deformasyon işlemi "uzunlamasına haddeleme" veya basitçe "haddeleme" olarak bilinir. İlk olarak 1500'lerin sonlarında geliştirilen haddeleme, ekonomik ve hızlı üretim gibi nedenlerden dolayı günümüzde belki de en yaygın kullanılan metal işleme sürecidir. Haddeleme, d6vme gibi diğer metal işleme y6ntemlerinden nispeten daha hızlıdır ve uzun iş parçalarından çok yüksek bir hızda, sürekli olarak istenen çeşitli Şekiller ve boyutlar üretilebilir. Üretim sürecinde bakır, alüminyum ve çeliğin % 90'ından fazlası en az bir kez haddeleme işlemine tabi tutulur (Bhaduri, 2018). Şekil 2.1'de haddeleme işleminin basit bir Şematik diyagramı g6rlmektedir.



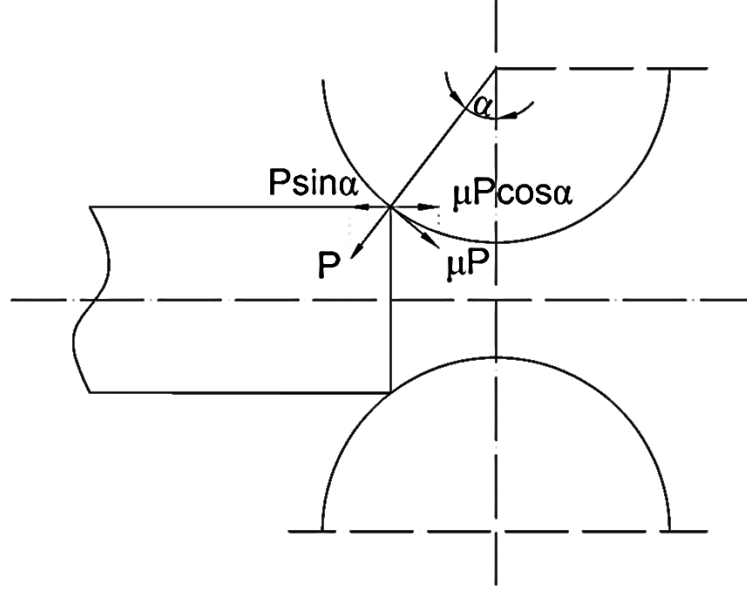
Şekil 2.1. Haddeleme işleminin basit bir Şematik diyagramı (Talwar, 2015; Groover, 2020)

Haddelenmiş elikler genel olarak yapı, otomobil, demiryolu, kolonlar ve kirişler yapmak için kullanılır. Uak g6vdeleri yapmak için haddelenmiş titanyum ve alüminyum alaşımları kullanılır. Haddelenmiş sac malzemeler otomobillerde, birçok ev ve mutfak aletlerinde kullanılır. Haddelenmiş ubuklar, birçok otomobil parçasını yapmak için sıcak, ılık, soğuk d6vme ve soğuk çekme için belirleyici malzeme olarak kullanılır (Bhaduri, 2018). Şekil 2.2'de haddeleme y6ntemiyle üretilen ürünlere ait Şematik bir g6sterim sunulmuştur.



Şekil 2.2. Haddeme yöntemiyle üretilen ürünlere ait şematik gösterim (Nakhoul, 2014; Steel, 2020)

Şekil 2.3’de haddeme başlangıcında oluşan kuvvetler gösterilmiştir. Haddeme işleminin gerçekleşebilmesi için merdane ile iş parçası arasındaki sürtünme katsayısının ( $\mu$ ), merdanenin kapma açısının ( $\alpha$ ) tanjant değerinden büyük olması gerekir.



Şekil 2.3. Haddelene başlangıcında oluşan kuvvetler (Çapan, 2010)

Haddelene başlangıcında malzeme üzerine merdane tarafından bir normal kuvvet ve merdane ile iş parçası arasında ise bir sürtünme kuvveti meydana gelir. Malzeme üzerine etki eden kuvvetleri yatay bileşenlerine ayırıp gerekli sadeleştirmeleri yaptığımız zaman merdane ile iş parçası arasındaki sürtünme katsayısının ( $\mu$ ), merdanenin kapma açısının ( $\alpha$ ) tanjant değerinden büyük olması gerekir.

$$\mu P \cos \alpha \geq P \sin \alpha \quad (2.1)$$

$$\mu \geq \tan \alpha \quad (2.2)$$

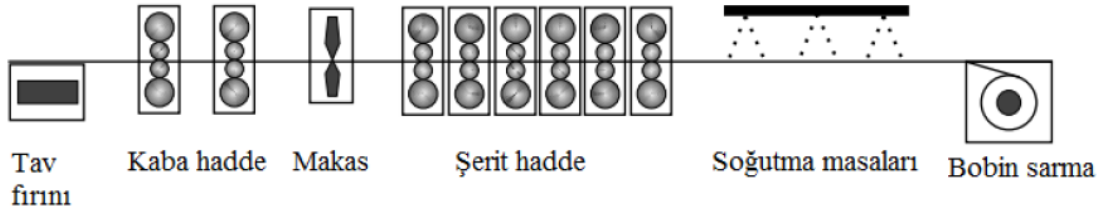
Bu şart sağlandığı takdirde haddelene işlemi gerçekleşir (Kalpakjian ve Schmid, 2009; Demirkol, 2010; Groover, 2020).

Haddelenecek malzemeye ve haddelenmiş ürünün uygulamasına bağlı olarak haddelene işlemi, sıcak veya soğuk olarak gerçekleştirilebilir. İş parçasının şeklindeki değişikliğin hızlı ve ekonomik olarak elde edilebilmesinin amaçlandığı durumlarda sıcak haddelene çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Yakın boyut toleransı ile iyi bir yüzey kalitesi elde etmek ve/veya deformasyon sertleşmesinin (pekleşme) neden olduğu gelişmiş mukavemet ve sertliğe sahip olmanın amaçlandığı durumlarda ise soğuk haddelene gerçekleştirilir. Haddelenenin temel amacı ister sıcak ister soğuk gerçekleştirilsin, malzemenin kalınlığını azaltmaktır. Haddelene işleminde malzemenin genişliği bir miktar artar böylece kalınlıktaki azalma malzemenin haddelene yönünde uzamasıyla sonuçlanır (Bhaduri, 2018).

### 2.1.1. Sıcak Haddelme

Sıcak haddelme için sıcaklık aralığı çok kesin olarak tanımlanmamıştır ancak  $0.5T_{ergime}$ 'nin üzerindeki sıcaklıklara kadar çıkılarak yapılan haddelme işlemi olarak tanımlanır. Sıcak haddelme işleminin gerçekleştirildiği sıcaklık aralığının birtakım avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Sıcak haddelmenin gerçekleştirildiği yüksek sıcaklıklarda metal daha yumuşaktır, bu nedenle belirli bir ezme miktarı için daha az güç gerekebilir. Ayrıca, haddelme işlemi parametrelerinin mekanik ve metalürjik nitelikler üzerindeki etkilerinin anlaşılması, belirli mühendislik özelliklerine sahip metallerin geliştirilmesine izin verir. Sıcak haddelme işlemi ısı- mekanik işlem olarak adlandırılır. Yüksek sıcaklıklarda haddelmenin dezavantajı, yüzey üzerinde bir cüruf tabakasının gelişmesi ve bunun proses üzerindeki etkisi sonucunda elde edilen ürünün yüzey kalitesi ile ilgilidir. Metallerin sıcak haddelmesi genellikle entegre bir çelik fabrikasında sıcak şerit hadde tezgahlarında veya son yıllarda yapılan bazı değişiklikler ile mini hadde tezgahlarında gerçekleştirilebilir (Lenard, 2013).

Sıcak haddelme işleminde haddehane; tav fırını, kaba hadde, şerit hadde, soğutma masaları ve bobin sarma birimlerinden oluşur. Şekil 2.4'de geleneksel şerit hadde ile sıcak haddehanenin şematik görseli görülmektedir.



Şekil 2.4. Sıcak haddehanenin şematik görseli (Choi vd., 2007; Çolak, 2018)

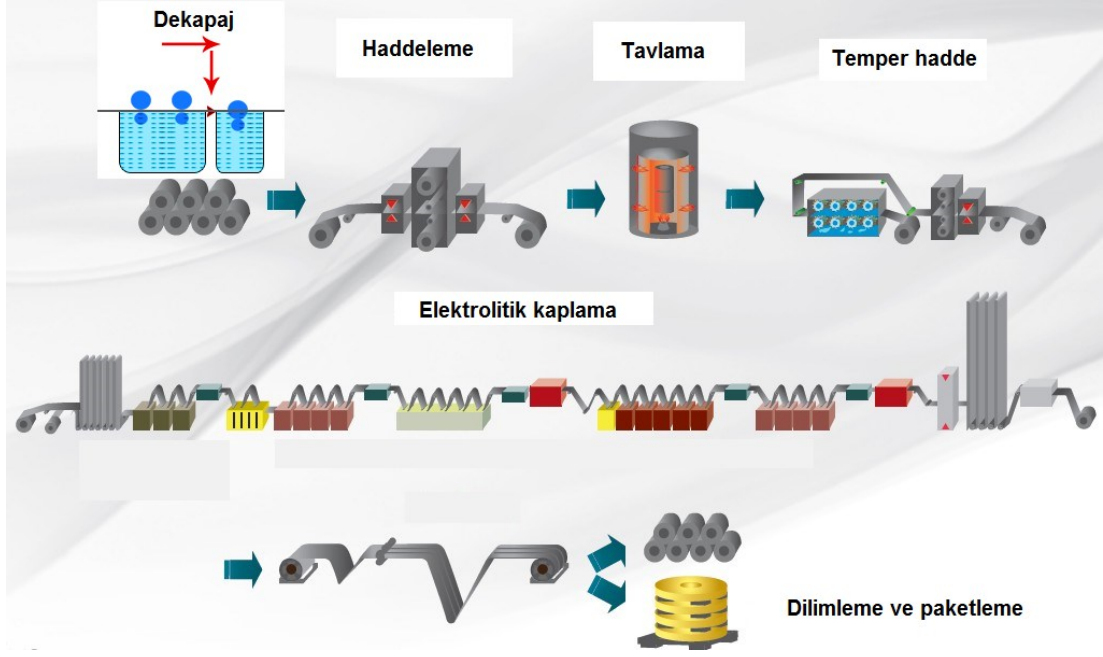
1200 °C'ye kadar tav fırınında ısıtılan slab ürün, kaba haddeden geçirilir. Bu işlem sonrasında ürün, yaklaşık 1100 °C sıcaklıkta ve 30 mm kalınlığındadır. Malzemenin kalınlığının azalması ile uzama gerçekleşmesinden dolayı kaba haddeden çıkan ürün şerit haddeye girmeden önce sarılır. Şerit hadde öncesinde sarılarak bobin haline getirilen malzeme aynı zamanda bobin sarma işlemi ile homojen bir sıcaklığa getirilir. Malzeme şerit haddeden geçirilir, ardından 900 °C civarında ve yüksek hızlar (30 m/s) ile sac ürün şekliyle çıkarak soğutma masalarına doğru ilerler. Soğutma masalarına gelen ürün, soğutma işlemi (su duşu) ile farklı hızlarda soğutularak istenen

mekanik özellikler kazandırılır. Soğutma masalarından ilerleyen ürün, 600 °C civarındaki sıcaklıklara gelir ve ardından bobin sarma makineleri yardımıyla bobin halinde sarılır (Çolak, 2018).

### **2.1.2. Soğuk Haddelme**

Basit bir ifadeyle soğuk haddelme, metal şerit veya sac malzemelerin özelliklerini değiştirmek için kullanılan endüstriyel bir işlemdir. Metal, iki silindirik merdane arasında onu sıkıştıran basınç kuvvetleri etkisi altındadır. Ortaya çıkan mekanik özellikler, malzeme üzerine uygulanan gerilmenin büyüklüğüne bağlı olarak değişir. Soğuk haddelenmenin temel avantajları, daha pürüzsüz bir yüzey, daha iyi boyutsal doğruluk ve mekanik özellikler ile sonuçlanmasıdır. Soğuk haddelme işleminde sıcak haddelenmiş ürün daha ileri haddelme işlemlerine tabi tutulur. Sıcak haddelenmeden çıkan metalik malzeme oda sıcaklığına kadar soğutulur, ardından soğuk merdaneler arasından geçirilir. Soğuk haddelenmede merdaneler arasından her geçiş (paso) ile malzemenin kalınlığı % 50 - % 90 arasında azaltılır. Yüksek basınç kuvvetleri ve sürtünme nedeniyle her geçişte malzemenin sıcaklığı 250 ° C'ye kadar çıkabilir. Bu nedenle, merdaneleri ve metali soğuk ve yağlı tutmak için bir soğutma maddesi kullanılmalıdır. Yağ veya su genellikle bu amaçla kullanılır. Elde edilen metal tipik olarak 0.12 - 2.5 mm arasında bir kalınlığa sahiptir. Soğuk haddelenmiş yassı ürünlerin ince olmasından dolayı araç panelleri vb. birçok endüstriyel uygulamada kullanılır (Mitchell, 2019).

Yassı ürünlerin soğuk haddelenmesi işlemine ait proses şeması Şekil 2.5'de verilmiştir ve soğuk haddelme işlemi aşağıda tanımlanan aşamaları içerir (Değirmenci, 2006).



Şekil 2.5. Yassı ürünlerin soğuk haddelenmesi işlemine ait proses şeması (TI Strip, 2020)

- **Dekapaj (Asitleme hattı):** Sıcak haddelenmiş şerit üzerinde, üç tabaka halinde oksit vardır. En üst tabakada hematit, bunun altında manyetit ve en altta ise demir oksit tabakası bulunur. Yassı ürün üzerinde bulunan bu oksit tabakaları, soğuk haddeme için uygun olmayan farklı bir kabuk teşkil ederler. Dolayısıyla bu oksit tabakaları haddeme işlemi sırasında yassı ürünün iç kısmına karışabileceğinden dolayı yok edilmesi gerekmektedir. Bu tufali yok etmek için çeşitli asit ve alkali çözeltileri içerisinde yassı ürün daldırılır. Genellikle bu çözelti sülfürik asit çözeltisi olup çözelti içerisinde istenmeyen oksit tabakalarının temizliği gerçekleştirilir.

- **Haddeme:** Dekapaj işleminden çıkan oksitlerinden arındırılmış, kenarları kesilmiş ve yağlanmış sac (yassı ürün) rulolar, tersinir tek tezgâhta ileri-geri yönlerde veya beş stanttan oluşan sürekli tandem tezgâhlarda, tek yönde soğuk olarak inceltilecek sıcak haddelenmiş bobinlere nazaran çok daha düzgün bir yüzey elde edilir.

- **Tavlama:** Düşük miktarda karbon içeren yassı ürünler; soğuk işlem sertliğini (pekleşme) gidermek, sünekliliği artırmak, ince taneli bir içyapı elde etmek ve uygun mekanik özellikleri kazandırmak amacıyla, soğuk haddeme işleminden sonra 650-720°C sıcaklıkları arasında yeniden kristalleşme tavlamasına tabi tutulurlar.

İki farklı yöntemle yassı ürün tavlanaabilmektedir. Bunlar; yassı ürünün rulo halinde sarılmış olarak kontrollü bir fırın içinde birkaç bobin üst üste tavlандığı yığın

tavlama yöntemi ve rulo sacın açılıp bir fırından geçirildiği sürekli tavlama yöntemi şeklindedir.

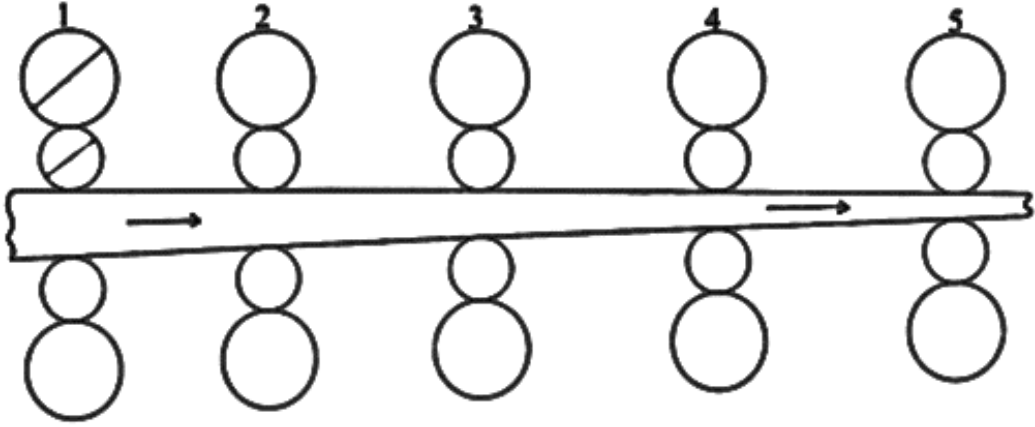
- **Temper haddeleme:** Tavlama işlemlerinden sonra yapılan ve yassı üründe düşük kalınlık azalmasına neden olan bir haddeleme işlemidir. Temper haddelemede işlenen ürünün cinsine bağlı olarak birçok amacı olabilmektedir. Örneğin; karbon, azot gibi elementlerin bulunduğu arayer katı çözeltilerini içeren çeliklerde temper haddelemenin birinci amacı yeterli deformasyon miktarı oluşturarak dislokasyon yoğunluğunu arttırmak ve dolayısıyla düzensiz akma dayanımı uzaması bölgesini (Lüders bandı) ortadan kaldırmaktır. Diğer amaçları, tavllanmış çelik sacın yüzey düzgünlüğünü sağlamak ve yüzeye matlık ya da parlaklık gibi istenilen nihai özellikleri vermektir.

- **Kaplama:** Temper hadde işleminden geçen yassı ürünlerin paslanmaya ve korozyona karşı dayanımlarının artırılması için çinko, kalay, krom, alüminyum gibi elementler ve bazı organik bileşikler vb. başlıca kaplama malzemeleri kullanılarak kaplanması işlemidir. Örneğin; elektrolitik kalay veya krom kaplanması işleminde yassı ürün kalay/krom kaplama hattında sırasıyla; temizleme, asitleme, elektrolitik kalay veya krom kaplama, indüksiyon ısıtma, pasivasyon, yağlama aşamalarından geçmesiyle nihai kalay/krom kaplama üretilir.

- **Kontrol ve Paketleme:** Hadde ürünleri son aşamada birtakım (yüzey, kalıntı, kalınlık vb.) kontrollerden geçirilerek paketlenir ve piyasaya sunulur.

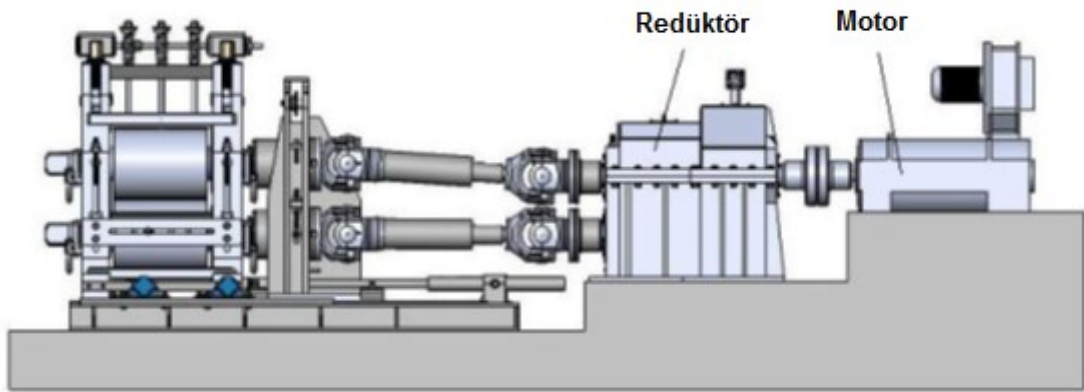
### 2.1.3. Hadde Tezgâhları ve Merdaneleri

Haddeleme işleminde kullanılan birçok hadde tezgâhı türü çeşitli şekillerde kategorize edilmiştir. Stant (ayak) sayısına veya ticari kullanımına göre tek stantlı, çok stantlı tezgâhlar ve üreticinin adına veya tezgâhın genel tanımına göre birçok hadde tezgâhı mevcuttur (Roberts, 1978). Çok stantlı tezgâhların uygulamada en sık karşılaşılan türü, tandem (continuous mill) hadde tezgâhıdır. Şekil 2.6'da her biri 4'lü merdane düzenine sahip 5 adet stanttan oluşan bir tandem hadde tezgâhının şematik görünümü gösterilmiştir.



Şekil 2.6. 4'lü merdane düzenine sahip 5 adet stanttan oluşan bir tandem hadde tezgahının şematik görünümü (Reddy ve Suryanarayana, 2001)

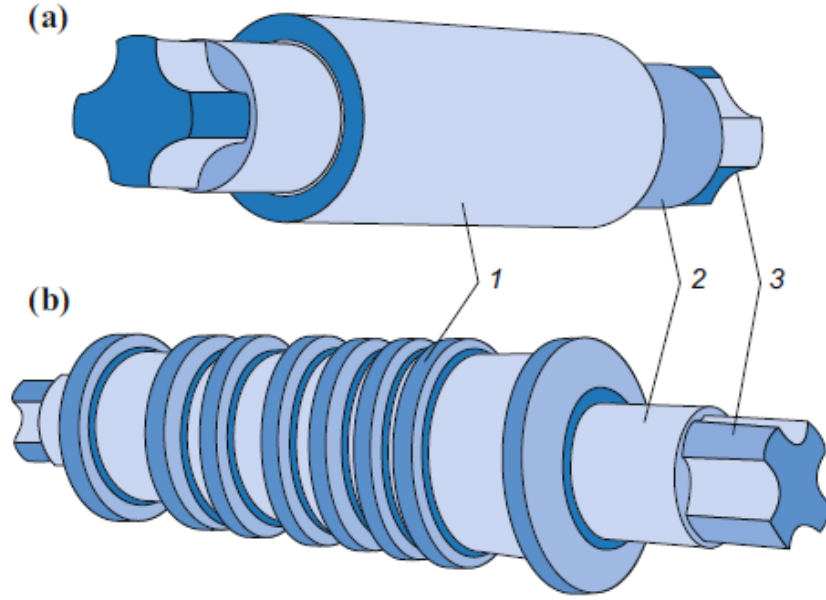
Haddeleme yönteminde iş merdaneleri aracılığıyla iletilen haddeleme enerjisi için çok yüksek torklar gerekir. Bu nedenle haddeleme esnasında merdanelerin, malzeme üzerinde kaymasını önlemek için genellikle iş merdaneleri tahrik edilir. Her bir iş merdanesinin tahrik işlemi, ayrı ayrı motorlarla gerçekleştirilebileceği gibi tek bir motor çıkışında redüktör sayesinde de gerçekleştirilebilir. Tek bir motor çıkışında redüktör ile tahrik edilen haddeleme tezgahı, Şekil 2.7'de gösterilmiştir. Motor ve redüktörden alınan hareket merdaneye kardan mili aracılığıyla iletilir. Haddeleme tezgâhlarında kullanılan motor güçleri genel olarak stant sırasına göre değişim göstermekle birlikte 3-8 MW aralığındadır. Birçok modern haddehanelerde genellikle AC motorlar tercih edilmektedir (Ginzburg, 1989; Çolak, 2018).



Şekil 2.7. Redüktör ile tahrik edilen bir haddeleme tezgahının şematik görünümü (Çolak, 2018)

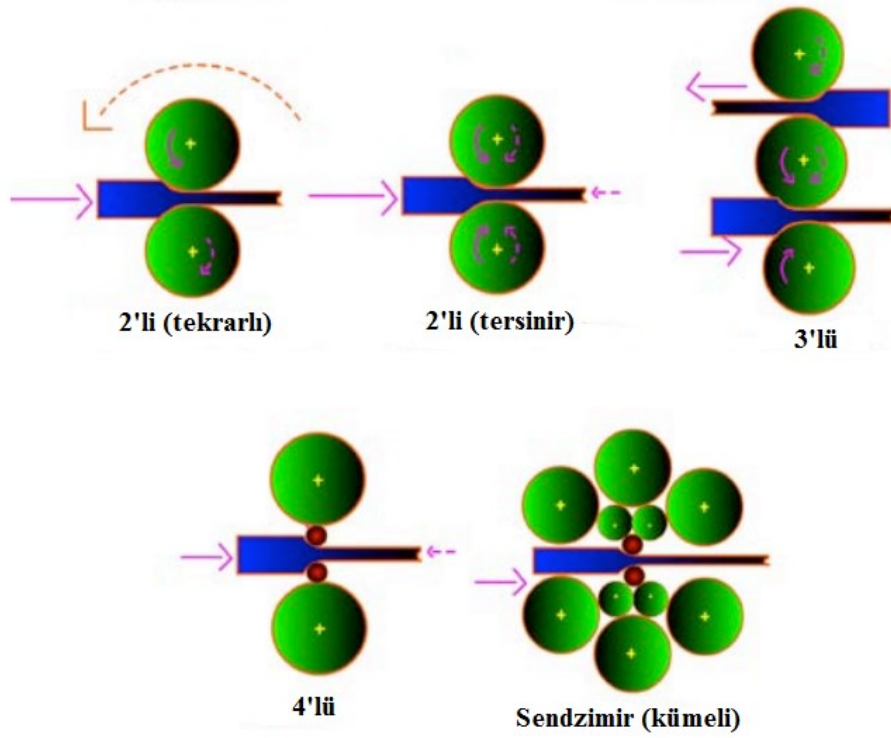
Haddeleme işleminde merdaneler genellikle çelik, dökme demir veya tungsten karbürden yapılmış düz veya kalibreli şekle sahiplerdir. Merdanelerin yüzeylerinde yüksek sertlik, iç kısımlarında ise yüksek kırılma tokluğu istenir. Şekil 2.8'de

gösterildiği gibi bir merdanenin üç parçası vardır: (1) merdane gövdesi veya merdane kovani veya haddeme yapılan kısım, (2) yataklarda dönen ve merdane gövdesini destekleyen merdane muyluları ve (3) tahrik kuvvetinin uygulandığı merdanenin uçlarını ifade eden kaplin yerleridir (Bhaduri, 2018).



Şekil 2.8. Merdaneler: a) düz ve b) kalibreli. 1) merdane gövdesi, 2) muylu, 3) kaplin yeri (Bhaduri, 2018)

Haddeme işleminde kullanılan tek stantlı hadde tezgâhlarında genellikle 2'li, 3'lü, 4'lü ve sendzimir tipi kümelenmiş merdane düzenleri mevcuttur. 2'li merdane düzeni, yassı ürün üzerinde meydana gelen kırışıklık, eziklik, dalgalanma gibi birtakım sorunların önüne geçer ve pürüzsüz yüzey elde etmek için kullanılır. Diğer merdane düzenlerinde ise amaç genellikle işi yapan merdanelere destek olarak rijitliği artırmak ve haddeme işleminde yaşanabilecek birtakım olumsuzlukların (merdanelerin eğilmesi, deformasyonu vb.) önüne geçebilmektir (Roberts, 1978). Şekil 2.9'da haddeme işleminde sıklıkla kullanılan merdane düzenleri gösterilmiştir.



Şekil 2.9. Haddelme işleminde sıklıkla kullanılan merdane düzenleri

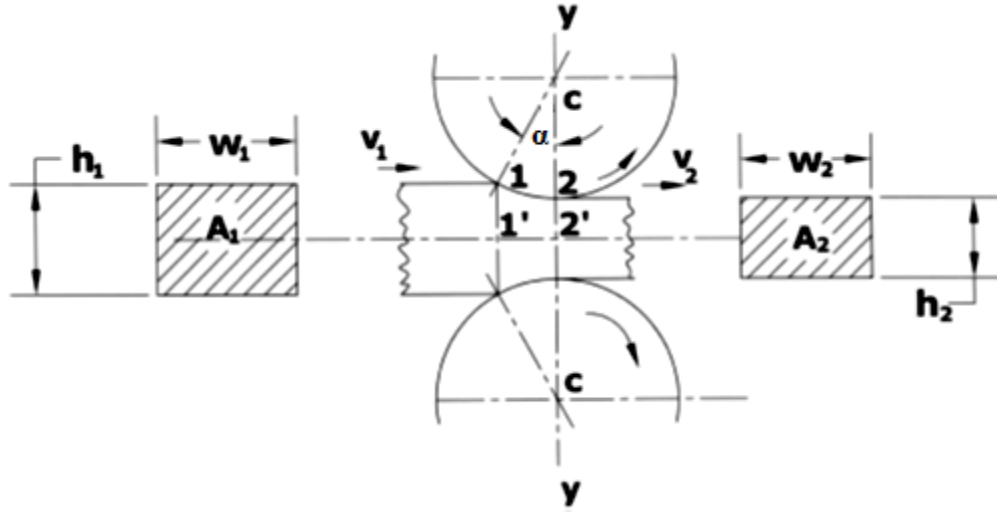
#### 2.1.4. Haddelmenin Karakteristikleri

Haddelme sürecini anlamak için haddelme işleminin karakteristikleri olarak adlandırılan ve haddelme işlemini karakterize eden bazı terimleri anlamak önemlidir. Bunlar aynı zamanda haddelme işlemi parametreleri olarak da bilinir. Bu özellikleri açıklarken veya tanımlarken, aşağıdaki haddelme koşulları dikkate alınır:

- (i) Basit haddelme durumu
- (ii) Merdaneler düz yüzeyli, silindriktir.
- (iii) Malzeme, enine kesit boyunca dikdörtgendir.

Haddelme karakteristiklerini tartışırken veya haddelme mekaniğini analiz ederken (haddelme kuvvetinin belirlenmesi, vb.), malzemenin enine kesitte dikdörtgen olarak kabul edileceği ve düz haddelme olarak bilinen yani merdanelerin yassı ürünün iki düz yüzeyi ile temas halinde olacağı kabullerine göre belirlenecektir. Dikdörtgen kesitli malzeme ile haddelme özelliklerinin anlaşılması ve haddelme mekaniğinin analizi daha kolay hale gelir. Bu nedenle yukarıdaki üç koşul dikkate alınmıştır. Şekil 2.10'da yukarıda anlatılan üç koşulun dikkate alındığı haddelme işlemi gösterilmektedir. Malzemenin ilk kalınlığı ve genişliği sırasıyla " $h_1$ " ve " $w_1$ " olup merdaneye " $v_1$ " hızıyla girer. Çıkan haddelenmiş malzemeye karşılık gelen son

kalınlık, genişlik ve çıkış hızı değerleri sırasıyla " $h_2$ ", " $w_2$ " ve " $v_2$ " dir. Giren ve çıkan malzemelerin uzunlukları sırasıyla " $l_1$ " ve " $l_2$ " olarak kabul edilir (Ray, 2016).



Şekil 2.10. Düz haddeme işlemi ve bazı kabulleri (Ray, 2016)

#### 2.1.4.1. Ezme Miktarı ve Redüksiyon

Ezme miktarı, bir paso geçişinde kalınlıkta azalma anlamına gelir. Mutlak ezme miktarı, giriş kalınlığı ile çıkış kalınlığı arasındaki farktır.

$$\text{Ezme miktarı} = h_1 - h_2 \quad (2.3)$$

Yüzde ezme miktarı ise, ilk kalınlığın yüzdesi olarak ifade edilen mutlak ezme miktarıdır.

$$\text{Yüzde ezme miktarı} = \frac{h_1 - h_2}{h_1} \times 100 \quad (2.4)$$

Haddeme sırasında kalınlık azalırken, malzemenin kesit alanı da azalır. Redüksiyon, bir paso geçişinde alandaki  $A_1$ 'den  $A_2$ 'ye azalma anlamına gelir.

$$\text{Yüzde redüksiyon} = \frac{A_1 - A_2}{A_1} \times 100 \quad (2.5)$$

Malzeme, farklı şekillerin haddelenmesi durumunda olduğu gibi dikdörtgen değilse ezme miktarı herhangi bir anlam ifade etmez. Böyle bir durumda redüksiyon, haddemenin anlamlı parametresi haline gelir.

Ezme miktarı doğrudan veya dolaylı olabilir. Yukarıda tanımlandığı gibi doğrudan ezme miktarı, iki merdanenin merkez hatlarını içeren düzlemde uzanan yönde kalınlıktaki azalmadır. Merdaneler, merdane merkez hatlarını içeren düzlemde olmayan malzemeye baskı uyguladığında dolaylı ezme oluşur. (Ray, 2016).

#### 2.1.4.2. Uzama

Haddeleme işleminde merdaneler arasına giren malzeme hacmi, çıkan malzemenin hacmine eşittir. Bu nedenle, alandaki küçülme esas olarak malzemenin uzaması anlamına gelir (Ray, 2016).

$$\text{Yüzde uzama} = \frac{l_2 - l_1}{l_1} \times 100 \quad (2.6)$$

Dolayısıyla yüzde redüksiyon ile yüzde uzama değerleri eşittir.

$$\text{Yüzde uzama} = \text{Yüzde redüksiyon} = \frac{A_1 - A_2}{A_1} \times 100 = \frac{l_2 - l_1}{l_1} \times 100 \quad (2.7)$$

#### 2.1.4.3. Temas Açısı, Kapma Açısı, Temas Alanı

Şekil 2.10'a bakıldığında, merdane girişinde malzemenin '1' noktasında merdaneye temas ettiği görülmektedir. Bu nokta, merdanenin merkezi "C" noktası ile birleştirilirse bir " $\alpha$ " açısı, "1C" yarıçapı ve "YY" merdanelerinin ekseni arasında meydana gelir. Bu açıya *temas açısı* denir. Tezgâhın her iki merdanesi de eşit boyutlarda ise alt merdanedeki temas açısı da aynı " $\alpha$ " değerine sahip olacaktır. Bu temas açısı, gelen yassı ürünün kalınlığı artarsa veya merdanenin çapı azalır artacaktır.

Merdanelerin malzemeyi kavrayamayacağı veya kapamayacağı ve merdanelerin içine besleyemeyeceği bir maksimum temas açısı vardır. Bu sınırlama açısı, malzeme ile merdaneler arasındaki sürtünme katsayısına bağlı olan *kapma açısı* olarak adlandırılır (Şekil 2.3).

Şekil 2.10'dan, malzemenin sıkışmasına bağlı deformasyonun "YY" çıkış düzleminde sona erdiği ve haddelenmiş malzemenin "2" noktasında merdaneyi terk ettiği görülebilir. 1'den 2'ye kadar olan yay, temas yayı olarak adlandırılır ve uzunluğu,  $\alpha \times R$ 'ye eşittir, burada " $\alpha$ " radyan cinsinden ve R, merdane yarıçapıdır. Merdanenin malzemeyle temas halinde olduğu alan,  $\alpha \times R \times w_m$ 'dir. Bu alan *temas alanı* olarak adlandırılır; burada  $w_m$ , 1 ve 2 noktaları arasındaki malzemenin ortalama genişliğidir. Yuvarlanan düzlemdeki temas yayının izdüşümü 1' - 2' (YY eksenine dik düzlem) *öngörülen temas yayı* olarak adlandırılır.

$$\text{Öngörülen temas yayı} = \sqrt{R^2 - \left(R - \frac{h_1 - h_2}{2}\right)^2} \quad (2.8)$$

$$\text{Öngörülen temas yayı} = \sqrt{R(h_1 - h_2) + \frac{1}{4}(h_1 - h_2)^2} \quad (2.9)$$

R,  $(h_1 - h_2)$  'den çok daha büyük olduğundan,  $(h_1 - h_2)$ 'nin 2. dereceden değerini ihmal ederek, öngörülen temas yayı yaklaşık olarak aşağıdaki şekliyle yazılabilir.

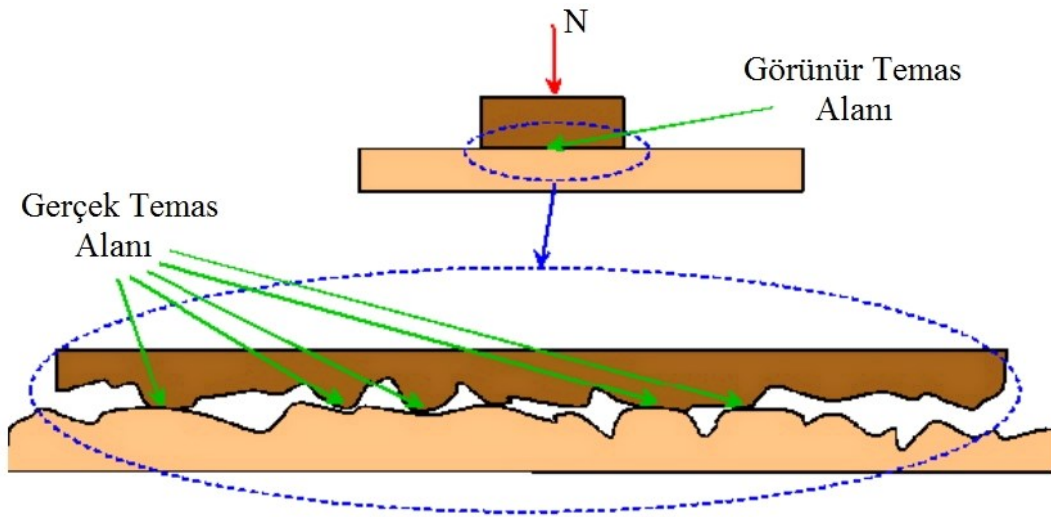
$$\text{Öngörülen temas yayı} = \sqrt{R(h_1 - h_2)} \quad (2.10)$$

Dolayısıyla buradan öngörülen temas alanı da yaklaşık olarak aşağıdaki denklemde belirtildiği gibidir. Bu denklem haddeleme için gereken merdane ayırma kuvveti olarak bilinen haddeleme kuvvetini hesaplamak için önemli bir faktördür (Ray, 2016).

$$\text{Öngörülen temas alanı} = w_m \times \sqrt{R(h_1 - h_2)} \quad (2.11)$$

#### 2.1.4.4. Haddeleme Sürtünmesi

Haddeleme sürtünmesini ve sürtünme mekanizmalarını tartışmadan önce iki kavramın tanımlanması gerekir. Görünen temas alanı ( $A_g$ ), temas yüzeyinin görünen alanıdır ve temas eden yüzeyin dış boyutları görünen temas alanını verir. Gerçek temas alanı ( $A_r$ ) ise sürtünme olayını çok daha temel şekilde etkiler ve pürüzlülük uçlarında temas halindeki alanların toplamı olarak tanımlanır. Şekil 2.11'de gösterilen iki yüzey birbirine yaklaştığında ilk temas bu uçlardan gerçekleşir (Lenard, 2013).



Şekil 2.11. İki yüzey birbirine yaklaştığında gerçekleşen temasın görünümü (MCT, 2021)

Pürüzlülük uçları temas ettiğinde ve birbirlerine yaklaşıırken iki cisme belirli bir miktarda normal kuvvet (her iki cismin akma mukavemetinin çok altında olabilir) uygulandığında, pürüz uçlarındaki çok küçük gerilmeler her zaman kalıcı

deformasyon oluşturabilir. Pürüzlülük uçları daha sonra deforme olacak ve taşınan yük (N), her iki cisimde akma gerilmesi cinsinden gerçek temas alanını şu şekilde belirleyecektir. Denklemde verilen akma gerilmesi ( $\sigma_m$ ), deformasyon sertleşmesine bağlı olarak deformasyon arttıkça artar (Bowden ve Tabor, 1964; Lenard, 2013).

$$A_r = \frac{N}{\sigma_m} \quad (2.12)$$

Bir parçayı diğerine göre hareket ettirmek için gereken teğetsel kuvvetin (T) büyüklüğü, temas yüzeylerinin doğasına bağlı olarak kesme gerilmesine ( $\tau$ ) bağlıdır.

$$T = A_r \tau = \frac{N}{\sigma_m} \tau \quad (2.13)$$

Kütlesel şekil değiştirmedeki normal gerilmeler çok yüksek olduğundan pürüzlerin plastik deformasyonu yüzey kalitesine önemli bir katkıda bulunur (Lenard, 2013).

Temas halindeki bağıl hareket ve basınç altındaki iki yüzey arasında sürtünme olayı Amontom ve Coulomb tarafından tanımlanan ve şekillendirme problemlerinin çoğu analizinde uygulanan sürtünme katsayısı, ara yüzey kayma gerilmesinin normal basınca oranı olarak tanımlanır (Lenard, 2013).

$$\mu = \tau/N \quad (2.14)$$

Metaller arasındaki kayma sürtünmesi nedeniyle adheziv aşınma meydana gelir. Aşınan parçacıklar yumuşak malzemeden kopar. Bu tür süreçlerde aşınma miktarı ( $w_a$ ), birim alana uygulanan yüzey basıncı ( $p_n$ ) ile doğru orantılı ve malzemenin sertliği (H) ile ters orantılı olarak değişir (Archard, 1953). Denklemde  $k_a$ , aşınma katsayısını ve  $s_d$  ise kayma mesafesini belirtmektedir.

$$w_a = k_a \frac{p_n s_d}{H} \quad (2.15)$$

Haddeleme işleminde, temas eden yüzey pürüzlülükleri ve merdane pürüzlendirme yöntemi önemlidir. Metal haddeleme endüstrisinde geleneksel yaklaşım olan aşınma yöntemiyle üretilen merdanelerde nispeten sığ açılarda pürüzlülük meydana gelirken kumlama yönteminde ise keskin pürüzler meydana gelir. Kum püskürtülmüş merdanelerin sürtünme katsayısı ve haddelenmiş yüzeyler üzerindeki etkisinde sürtünme kuvvetlerine katkıda bulunan ve adhezyon etkisini baskılayan sürtünmenin ana bileşen olduğu görülmüştür (Lenard, 2004; Dick ve Lenard, 2005). Haddeleme işleminde deformasyon, temas başlangıcında elastik bir

gerilme ile başlar. Gerilmeler büyür ve akma koşulu karşılandığında, malzeme hızı arttıkça kayma koşulu altında plastik deformasyon meydana gelir. Eğer haddeleme yükleri çok artarsa ve bununla birlikte kayma hızı sıfır olursa merdane ile malzeme ara yüzeyinde düz bir yapılaşma bölgesi meydana gelebilir (Le ve Sutcliffe, 2001; Shigaki vd, 2015).

Coulomb sürtünme katsayısı, kuvvetlerin oranı olduğundan doğrudan ölçülemez. Sürtünme katsayısının büyüklüğünü belirlemek için deneysel, yarı analitik ve ampirik metotlar mevcuttur. Deneysel metotlarda farklı yaklaşımlar (Hum vd., 1996; Januskiewicz ve Sulek, 1998) olmakla birlikte, yarı analitik metotlardan en bilineni ileri kayma-sürtünme katsayısı ilişkisidir. İleri kaymanın ( $S_f$ ) denklemi aşağıdaki gibidir ve denklemde  $v_2$ , malzemenin merdanelerden çıktığı andaki hız iken  $v_n$  ise merdanelerin çevre hızıdır.

$$S_f = \frac{v_2 - v_n}{v_n} \quad (2.16)$$

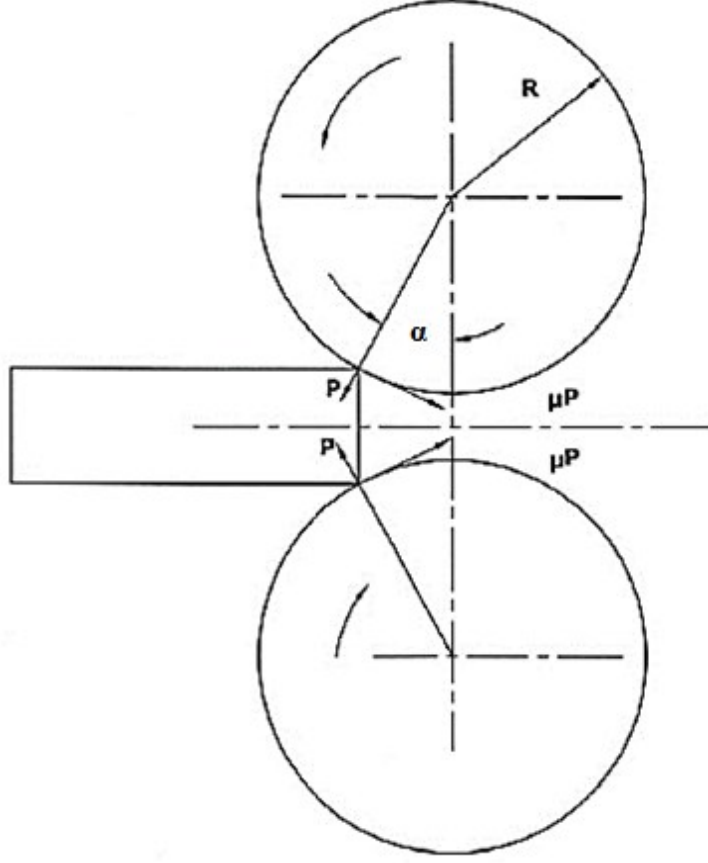
Sürtünme katsayısı, kapma açısı ( $\alpha$ ), merdane yarıçapı ( $R$ ) ve ileri kaymadan ( $S_f$ ) şu şekilde belirlenir (Ekelund, 1933).

$$\mu = \frac{\left(\frac{\alpha}{2}\right)^2}{\frac{\alpha}{2^2} - \sqrt{\frac{2S_f}{\frac{2R}{h_2} - 1}}} \quad (2.17)$$

Ampirik formüllerden üç tane iyi bilinen formül bilinmekle birlikte Hill tarafından kullanılan formül aşağıda verilmiştir (Hoffman ve Sachs, 1953). Denklemde  $P$ , birim genişlik başına haddeleme kuvvetidir.

$$\mu = \frac{\frac{P}{\sigma_m \sqrt{R \Delta h}} - 1.08 + 1.02 \left(1 - \frac{h_2}{h_1}\right)}{1.79 \left(1 - \frac{h_2}{h_1}\right) \sqrt{\frac{R}{h_1}}} \quad (2.18)$$

Haddeleme işleminde, malzemenin giriş kısmında merdaneye ilk temasında etki eden kuvvetler Şekil 2.12'de gösterilmektedir. Merdanelerin radyal kuvveti malzemeyi merdanelerden uzaklaştırmaya çalışırken sürtünme kuvvetleri malzemeyi merdane boşluğuna çekmeye çalışır. " $\alpha$ " temas açısı kabulüyle haddeleme yönünde net pozitif kuvvet varsa malzeme merdane boşluğuna girecektir (Denklem 2.2).



Şekil 2.12. Merdane boşluğuna malzeme girişi ve oluşan kuvvetler (Ray, 2016)

Burada, P merdaneler tarafından uygulanan kuvvet,  $\mu$  sürtünme katsayısı ve  $\alpha$  temas açısıdır. Maksimum  $\alpha$  değeri için sınırlayıcı durumda, yani  $\alpha_{\max}$  için 2.2 nolu denklemin iki tarafı eşitlenebilir, bu da  $\alpha_{\max}$  ve  $\mu$  arasındaki aşağıdaki ilişkiyi verir.

$$\alpha_{\max} = \tan^{-1} \mu \quad (2.19)$$

Yassı üründe mümkün olan maksimum ezme miktarı,

$$\Delta h_{\max} = (h_1 - h_2)_{\max} \quad (2.20)$$

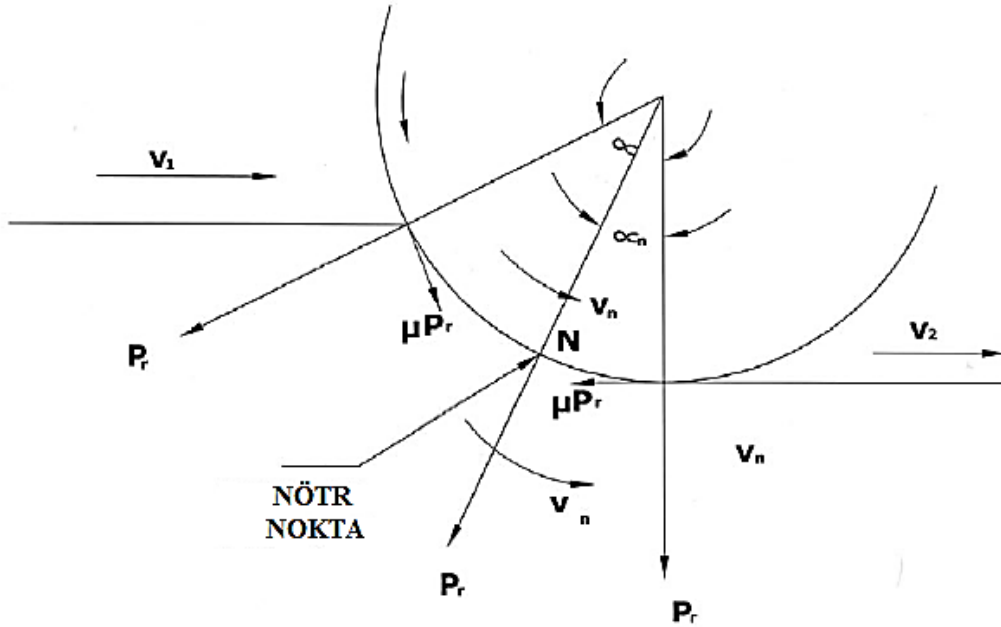
$$\Delta h_{\max} = D (1 - \cos \alpha_{\max}) \quad (2.21)$$

$$\Delta h_{\max} = \mu^2 R \quad (2.22)$$

D ve R sırasıyla merdanelerin çapını ve yarıçapını belirtir. Ezme miktarı ( $\Delta h_{\max}$ ) daha da artırmak isteniyorsa; sürtünme katsayısını artırmak, merdanelerin çapını artırmak ya da her ikisini de artırmak gerekir. Soğuk haddelemede sürtünme katsayısının ( $\mu$ ) değeri küçüktür. Sıcak haddelemede sürtünme katsayısı ( $\mu$ ) genellikle yüksektir (Ray, 2016).

### 2.1.4.5. Nötr Nokta ve İleri Kayma

Bir malzeme, merdane boşluğu altında ezilmeye uğradığında enine kesit alanı azalır. Bu nedenle merdaneler arasından geçerken malzemenin hızı kademeli olarak artar. Merdaneler düzgün açısal hızda dönerken merdanelerin çevre hızı giriş bölümündeki hızını aşar. Merdane kapmasıyla ilerleyen malzemenin hızı arttıkça iki hızın aynı olacağı bir nokta olacaktır. Malzeme hızının merdane çevre hızına eşit olduğu bu noktaya *nötr nokta* denir. Nötr noktada sürtünme kuvveti olmayacaktır ancak bu noktanın ötesinde sürtünme kuvvetinin yönü tersine döner ve malzemenin ileri doğru hareketini engellemeye çalışır. Şekil 2.13’de nötr noktanın konumu gösterilmiştir.



Şekil 2.13. Nötr noktanın konumu (Ray, 2016)

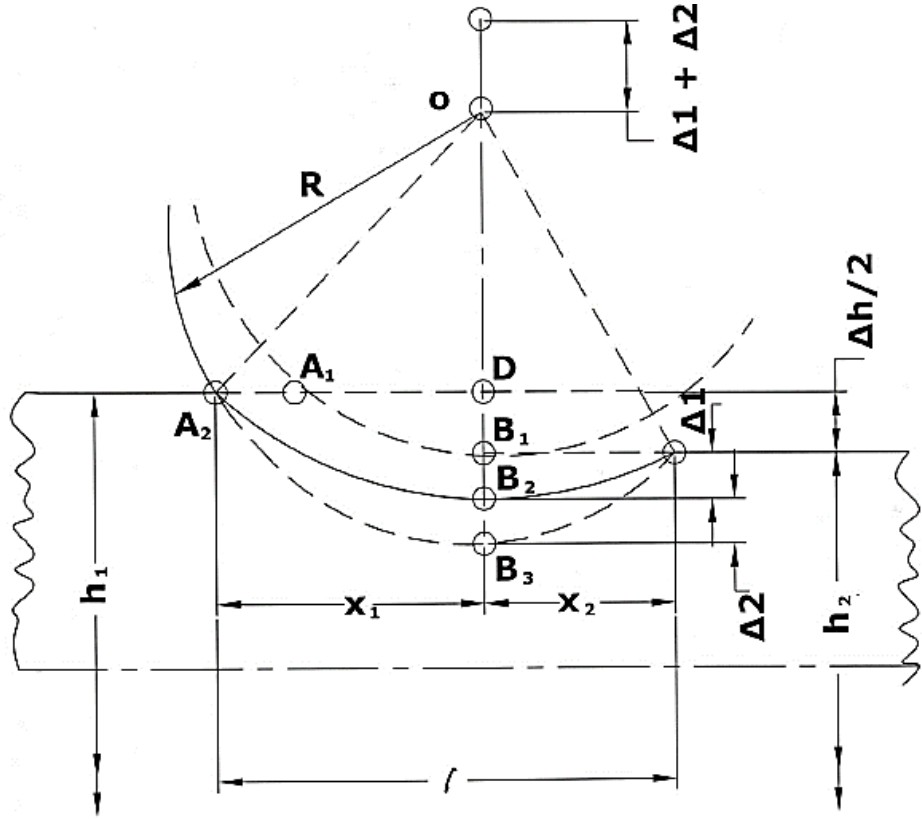
Malzemenin hızı nötr noktanın ötesinde artmaya devam ettikçe malzemenin merdanelerden çıktığı andaki hızı, merdanelerin çevre hızından daha fazla olacaktır. Bu ek hıza ( $v_2 - v_n$ ), *ileri kayma* veya *hız kazancı* veya *haddelenin ekstrüzyon etkisi* denir. İleri kayma ( $S_f$ ), denklem 2.16 yardımıyla hesaplanır. Nötr noktanın konumu, ileri kayma miktarına göre belirlenir ve sürtünme katsayısı ile ezme miktarına bağlıdır. Sürtünme katsayısı ' $\mu$ ' ve radyal kuvvetin ' $P_r$ ' temas yayı boyunca sabit kaldığı varsayılarak nötr nokta ile malzemenin merdaneleri terk ettiği nokta arasında kapsanan ' $\alpha_n$ ' açısını, Ekelund (1933) aşağıda belirtildiği gibi hesapladı.

$$\alpha_n = \sqrt{\frac{\Delta h}{2D}} - \frac{1}{\mu} \frac{\Delta h}{2D} \text{ (rad)} \quad (2.23)$$

Bu denklemde D, merdane çapıdır ve denklem,  $\alpha_n$  açısının sürtünme katsayısı ( $\mu$ ) ve ezme miktarına ( $\Delta h$ ) bağlı olduğunu gösterir (Ray, 2016).

#### 2.1.4.6. Merdane Dzleğmesi

Malzemelerin soğuk haddelenmesi iğleminde, metalin plastik deformasyonu için gereken yüksek basıncın bir sonucu olarak malzeme ile temas eden merdane, elastik olarak deformasyona uğrar. Buna *merdane dzleğmesi* denir. Merdane dzleğmesinin etkisi, merdane deformasyonunun artması ile sürekli ayarlanan merdane boğluğunun ayarı sonucunda istenen ezme miktarının bu ölçüde azalmasıdır. İstenen ezme miktarını elde etmek için merdane boğluğunun, merdane deformasyonunu telafi ettikten sonra nihai merdane boğluğunun istenen boğluğa eğit olacağı şekilde yeterince azaltılması gerekir. Bu durum esasen, deforme olmuğ pozisyonda yassılağma nedeniyle merdanenin etkin yarıçapının artması ve aynı zamanda temas yayının da artması anlamına gelir. Her iki etki de haddeleme kuvvetini artırma eğilimindedir. Şekil 2.14, haddeleme sırasında merdane dzleğme etkisini göstermektedir. Her merdanenin elastik deformasyonu  $\Delta_2$  ile gösterilirken  $\Delta_1$  ise her iki taraftaki haddelenmiğ metalin elastik deformasyonunu gösterir (Ray, 2016).

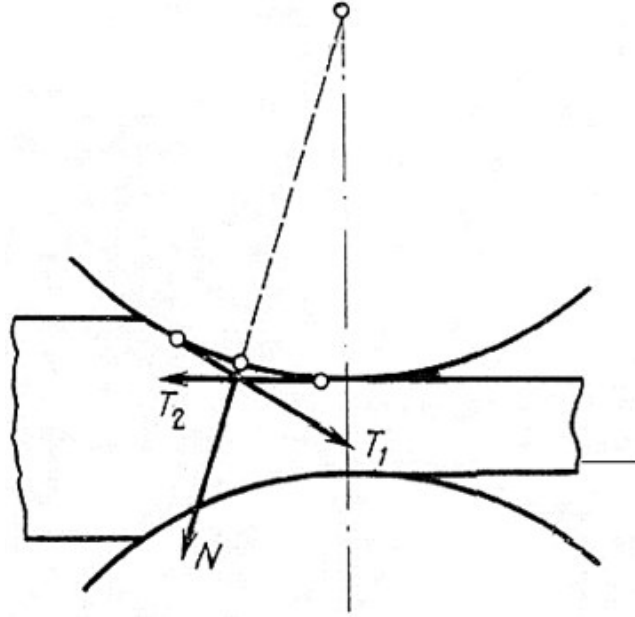


Şekil 2.14. Merdane düzleşme etkisi (Ray, 2016)

### 2.1.5. Haddelme Kuvveti

İki merdaneyi birbirinden ayırmaya çalışan, merdaneler üzerine yuvarlanan metalin uyguladığı kuvvet, *merdane ayırma kuvveti* veya kısaca *haddelme kuvveti* olarak adlandırılır. Bir hadde tezgâhının tasarımı, özellikle merdane çapı, merdane boyutu, merdane yatakların seçimi vb. parametreler, haddelme yüküne bağlıdır. Bu nedenle, bir girdi malzemesini istenen çıktı boyutuna getirmek için haddelme kuvvetini belirlemek çok önemlidir.

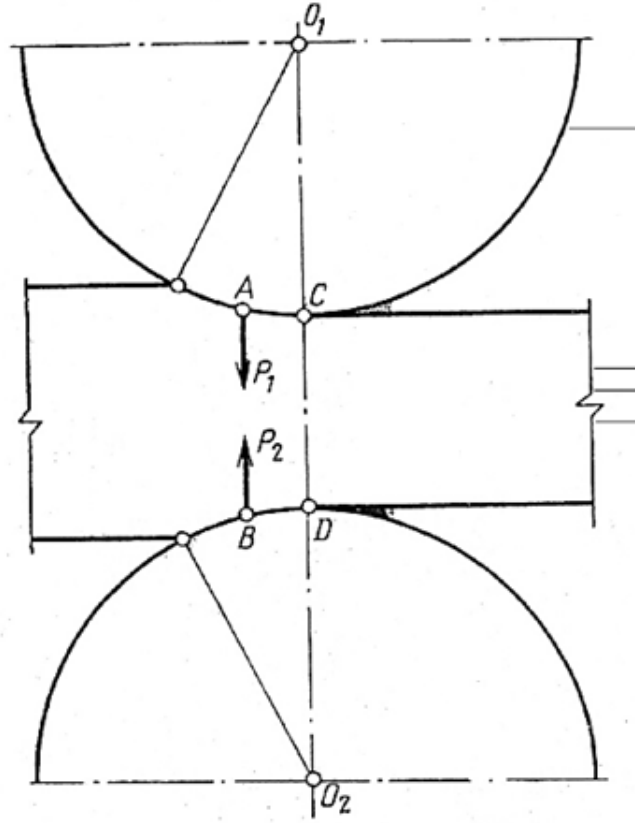
Basit bir haddelme işlemi düşünüldüğünde, merdanelerden gelen kuvvetlerden başka hiçbir dış kuvvetin metale etki etmediği anlamına gelir ve her iki merdane, tek tip dairesel enine kesite, eşit çapa sahiptir, ayrıca aynı çevresel hızda dönerler. Bu, haddelme işleminin merdanelere göre tamamen simetrik olmasını sağlar. Her bir merdanenin haddelenen metal üzerine uyguladığı kuvvetlerin, Şekil 2.15'de gösterildiği gibi üç kuvvet ile temsil edilebileceği belirtilebilir.



Şekil 2.15. Merdanenin haddelenmiş metal üzerine uyguladığı temel kuvvetler (Ray, 2016)

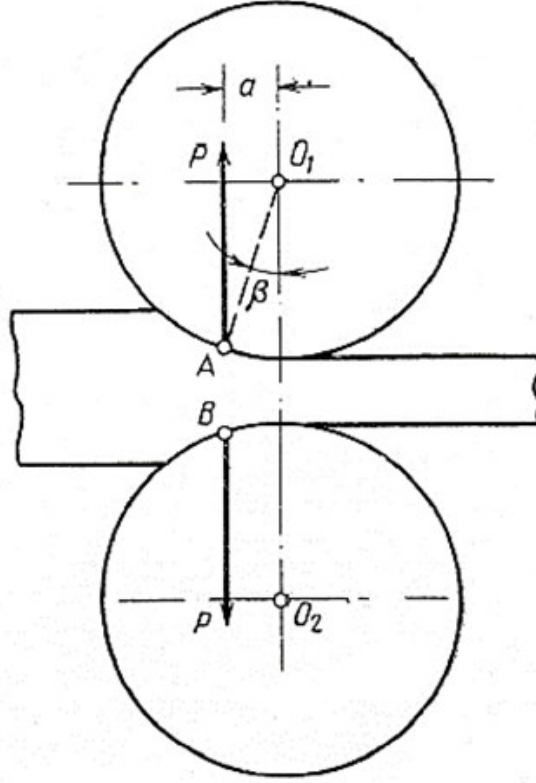
Basit bir haddeleme işleminde kuvvetler, temas alanı üzerine uygulanan basıncın sonucu olan normal kuvvet "N"dir ve haddeleme sonucunda ortaya çıkan iki sürtünme kuvveti " $T_1$ " ve " $T_2$ ", biri kayma bölgesinden ileri doğru ve diğeri kayma bölgesinden geriye doğru temas yayı ile teğetsel olarak hareket eder. Haddeleme işlemi merdanelere göre simetrik olduğundan diğeri merdaneden gelen kuvvetler de üç benzer kuvvet olarak ifade edilebilir.

Basit haddeleme varsayımına göre metale etki eden herhangi bir dış kuvvet yoktur ve metalin hızı giriş ve çıkış kısımlarında aynıdır. Deformasyon bölgesindeki (merdanelerle temas alanı altındaki) metal kısmı, hızdaki değişim nedeniyle haddeleme yönünde bir eylemsizlik kuvvetine sahiptir. Bununla birlikte, bu kuvvet "N" kuvvetine kıyasla çok küçüktür ve bu nedenle ihmal edilebilir. Daha sonra, metale etki eden kuvvetlerin iki merdaneyi dengelemesi gerektiği sonucuna varabiliriz. Bu, üst merdaneden elde edilen "N", " $T_1$ " ve " $T_2$ "nin, alt merdaneden karşılık gelen kuvvetlerin sonucuna eşit ve zıt yönlü olduğunda mümkündür. Bu durum Şekil 2.16'da gösterilmektedir, burada ortaya çıkan " $P_1$ " ve " $P_2$ " kuvvetleri eşit ve zıt yönlüdür, iki merdanenin merkezlerini birleştiren hatta paralel hareket eder. A ve B uygulama noktaları, sırasıyla C ve D noktalarından eşit uzaklıktadır.



Şekil 2.16. Basit bir haddeleme işleminde merdänenin haddelenmiş metal üzerine uyguladığı toplam kuvvetlerin yönü (Ray, 2016)

Metalin merdaneler üzerine uyguladığı kuvvetin merdanelerin metal üzerine uyguladığı kuvvetle aynı olduğu düşünülürse, merdaneler üzerindeki haddeleme kuvveti "P", Şekil 2.17'deki gibi gösterilebilir.



Şekil 2.17. Basit bir haddeleme işleminde merdanelere uygulanan kuvvetlerin yönü (Ray, 2016)

Uygulamada çoğunlukla metal ile merdane arasındaki toplam temas alanı ( $A_t$ ), kuvvet yönüne dik açılarla izdüşümü alınarak belirlenir.

$$A_t = l \times w_m \quad (2.24)$$

Burada " $w_m$ ", merdane altındaki metalin ortalama genişliğidir. " $l$ ", temas yayının yatay izdüşümüdür. Haddeleme işleminde temas yayının yatay izdüşümü aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$l_t = \sqrt{R\Delta h} \quad (2.25)$$

Yukarıda verilen denklemde " $R$ ", merdane yarıçapı ve " $\Delta h=h_1-h_2$ " ise kalınlıktaki azalmadır. Dolayısıyla uygulamada kullanılan haddeleme kuvveti ( $P$ ), aşağıdaki denklemde belirtildiği gibi hesaplanır. Denklemde verilen " $\sigma_m$ " ise haddeleme boyunca merdaneler üzerindeki ortalama gerilme veya deformasyon boyunca artan akma gerilmesidir (Ray, 2016).

$$P = \sigma_m w_m \sqrt{R\Delta h} \quad (2.26)$$

### 2.1.6. Merdane Döndürme Momenti

Şekil 2.17'den, her bir merdaneyi döndürmek için merdanede olması gereken döndürme momenti hesaplanabilir.

$$M = Pa \quad (2.27)$$

$$M = P \frac{D}{2} \sin \beta \quad (2.28)$$

$D$  = merdane çapı ve  $\beta$  = ortaya çıkan kuvvetin uygulama noktasını karakterize eden açıdır. "a", haddeleme kuvvetinin uygulama noktası ile merdane arasındaki mesafedir ve  $a=k \times l_t$  formülü ile hesaplanır. Burada "k" döndürme kolu katsayısı ve " $l_t$ " ise temas yayının izdüşümüdür. "k" katsayısı, 0.3-0.5 aralığında değişir ve haddelenen malzeme, merdane yüzeyinin pürüzlülüğü, merdane geometrisi, merdane düzleşmesi vb. birçok faktörden etkilenir.

Her iki merdanenin dönüşü için gereken toplam döndürme momenti, merdane muylu sürtünmesini ihmal ederek  $2M = 2Pa$ 'dır. "d" merdane muylu çapı ve " $\mu$ " yatak sürtünme katsayısı, haddeleme yüküne bağlı muylu sürtünmesi " $P\mu$ " ve döndürme momenti " $P\mu d/2$ " olacaktır. Bu nedenle, yatak sürtünmesi dikkate alındığında toplam döndürme momenti aşağıdaki gibi hesaplanır (Ray, 2016).

$$M = P(D \sin \beta + d\mu) \quad (2.29)$$

### 2.1.7. Haddeleme Gücü

Haddeleme kuvveti (P) ve haddeleme kuvvetinin uygulama noktası ile merdane merkezi arasındaki mesafe (a), Şekil 2.17'de gösterilmişti. Merdanenin her bir dönüşünde yapılan iş aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$W = 2\pi aP \quad (2.30)$$

Her iki merdane düşünüldüğünde, malzemenin merdaneler arasından bir geçişinde ve merdanelerin dönüş hızı (n, d/dk) ile haddeleme gücü, aşağıda verilen denklemden hesaplanır (Ray, 2016).

$$Q = 4\pi aPn \quad (2.31)$$

### 2.1.8. Temper Haddelemede Yüzey Pürüzlendirme

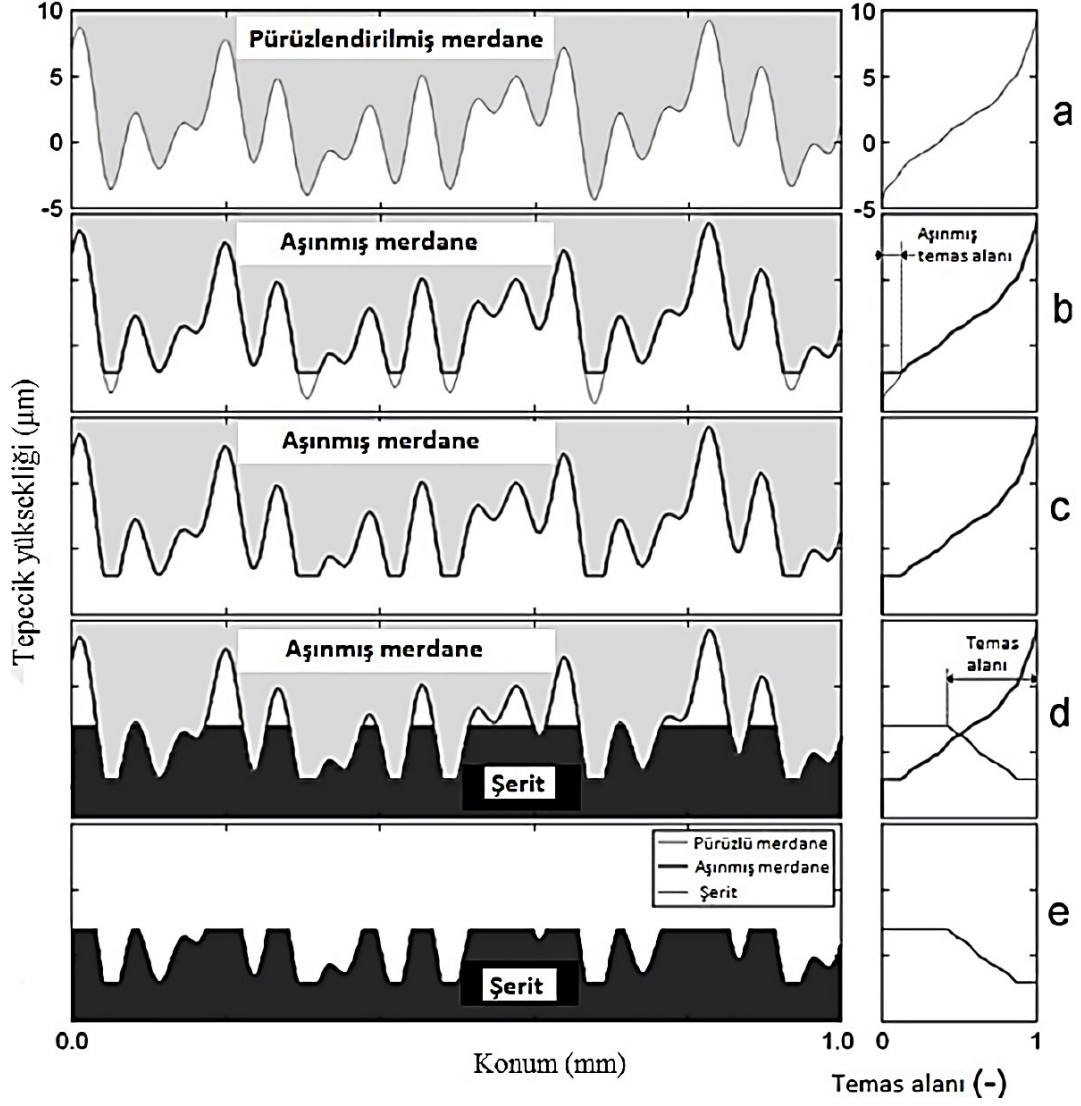
Temper haddeleme, genellikle tavlama işleminin ardından soğuk haddelenmiş çelik sacların üretiminde son şekillendirme aşamasıdır.

Birincil amacı, malzemede yüzey kusuru biçimi olan Lüders bantlarını (belirgin akma çizgileri) oluşturacak olan akma dayanımı noktası uzantılarını ortadan kaldırmaktır. Sac metal şekillendirme işlemlerinde bu kusurun varlığı derin çekme, gererek şekillendirme ile üretilen ürünler üzerinde çok zararlı etkilere sahip olacaktır (Lenard, 2013).

Diğer önemli amaçları ise, müşteri isteklerini karşılayacak şekilde mekanik özellikler, şerit düzgünlüğü, yüzey pürüzlülük profili sağlamaktır. Temper haddeleme koşulları, az miktarda kalınlık azalması, malzeme kalınlığındaki değişime göre büyük temas uzunluğu, temas uzunluğuna göre büyük merdane yarıçapı ve yüksek sürtünme nedeniyle bir malzeme haddeleme işlemi olarak benzersizdir. Bu özelliklere ek olarak, gerekli bir şerit yüzey pürüzlülüğünü elde etmek için iş merdanesi yüzeyi bazı durumlarda kasıtlı olarak pürüzlendirilir. Bu koşullar geleneksel sıcak ve soğuk haddelemeden oldukça farklı olduğu için geleneksel haddeleme teorisi temper haddeleme işleminin analizi için uygun değildir. (Kijima, 2019).

Temper haddeleme esnasında yalnızca yüzeyin akma gerilmesi artar. Metal içerisindeki fiziksel özelliklerde herhangi bir değişim meydana gelmez. Temper haddeleme tüm metallere uygulanabilen bir yöntem olup şekil değişim esnasında yüzeyin şekli ve kalitesi iyileşir.

Temper haddeleme işleminde sac malzemelerin pürüzlendirilmesi özel yöntemlerle pürüzlendirilen merdaneler aracılığıyla gerçekleştirilir. Hadde merdanesine ait pürüzlülük malzeme üzerine transfer edilir. Pürüzlülük transferi için Şekil 2.18'de gösterilen model incelendiğinde, Şekil 2.18 (a)'da pürüzlendirilmiş merdanenin yüzeyi farklı yükseklikte tepe ve çukurlardan meydana gelir. Haddeleme esnasında büyük yük altında en yüksek tepeler kırılır ve düzlük platolar oluşur (Şekil 2.18 (b), (c)). Düzlüklerin oluşmasıyla birlikte merdanenin yüzey pürüzlülüğü giderek azalır. Pürüzlülükteki azalma, haddeleme işlemi başlangıcındaki kadar hızlı değildir ve zamanla kararlı bir şekilde azalma eğilimi gösterir. Tepe sayısındaki değişime benzer şekilde pürüzlülükteki değişim de paraleldir. İşlem sırasında haddelenen malzemenin yüzeyi, merdane yüzey profilinin negatif şeklini alır. Yani merdanenin yüzeyinde bulunan tepeler malzemenin yüzeyinde çukur kısımlar oluşturur ve merdanenin yüzeyindeki çukurlar ise malzeme yüzeyinde tepelerin oluşmasını sağlayarak malzemeyi pürüzlendirir (Şekil 2.18 (d) ve Şekil 2.18 (e)) (Wentink, 2015; Çolak, 2018; Özakın ve Kurgan, 2019).



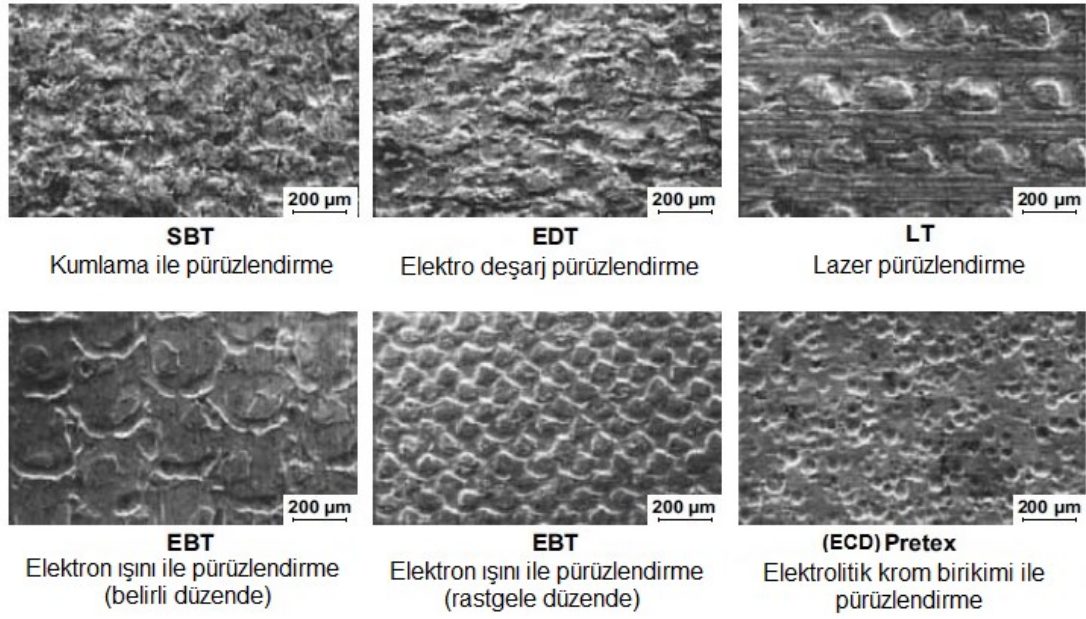
Şekil 2.18. Pürüzlülük transfer modeli (Wentink, 2015)

Sertliği yüksek olan merdanenin pürüzlülük profilindeki tepe noktaları, daha yumuşak olan malzemeyi deforme ederek malzemenin pürüzlülüğünü değiştirir. Ancak haddeleme esnasında tanelerin yeniden düzenlenmesi veya merdane ile doğrudan temas halindeki yüksek gerilmelerin varlığı pürüzlülük transferinin tamamıyla gerçekleşmesini engeller (Hardy vd., 2005).

### 2.1.8.1. Merdane Pürüzlendirme Yöntemleri

İş parçalarının yüzey topografyasının elde edilmesinde, merdane yüzeyinin tasarımı da sürtünme ve aşınma üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Merdane yüzeyinin pürüzlendirilmesinde farklılık gösteren yüzey pürüzlendirme yöntemleri bulunmaktadır. Son birkaç yıldır, merdane yüzeylerini pürüzlendirmek için çok sayıda farklı işlem yapıldığı söylenebilir. Bununla birlikte merdane pürüzlendirme

yöntemlerinden birçok çalışmada tribolojik özellikleri test edilen yöntemler Şekil 2.19’da gösterilmiş ve aşağıda listelenmiştir (Klocke ve König, 2006).



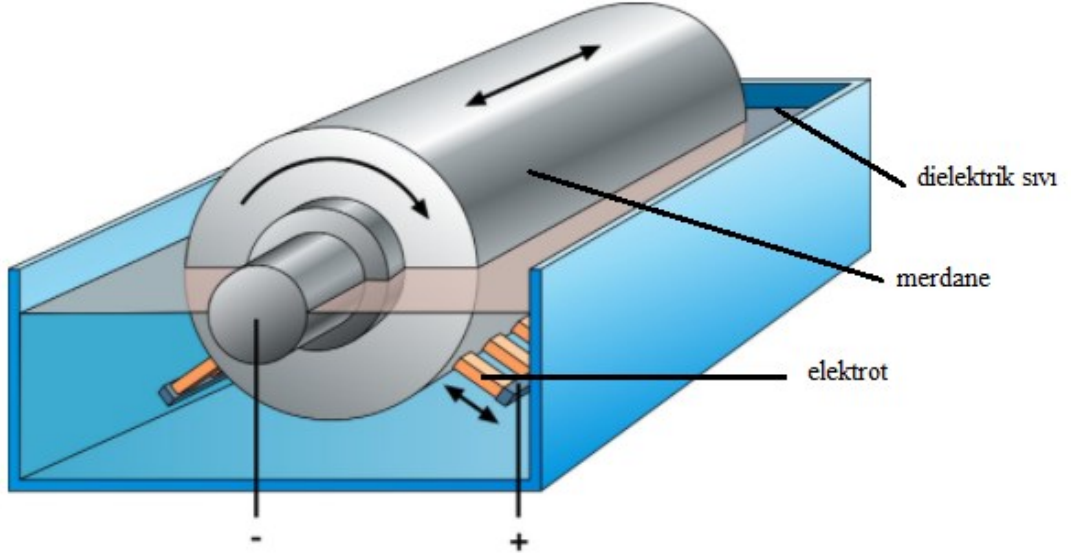
Şekil 2.19. Merdane pürüzlendirme yöntemleri ve doku görselleri (Klocke ve König, 2006)

***Kumlama ile pürüzlendirme (SBT, Shot Blast Texturing):*** SBT yönteminde merdanenin yüzey yapısındaki değişiklik, ince taneli bir parçacığın neden olduğu dönen merdane yüzeyini aşındırarak gerçekleştirdiği plastik deformasyon neticesinde sağlanan pürüzlendirme yöntemidir (Pawelski vd., 1994). Soğuk hadde tezgahı merdanelerini pürüzlendirmek için en sık kullanılan yöntemdir. Merdane yüzey kalitesi, püskürtmenin şekli ve hacmi, püskürtülen parçacıkların kinetik enerjisi ve pürüzlendirme öncesi malzeme yüzeyinin kalitesine bağlıdır (Bidulska vd., 2007). Şekil 2.20’de kumlama yöntemiyle merdane yüzeyinin pürüzlendirilmesi gösterilmiştir.



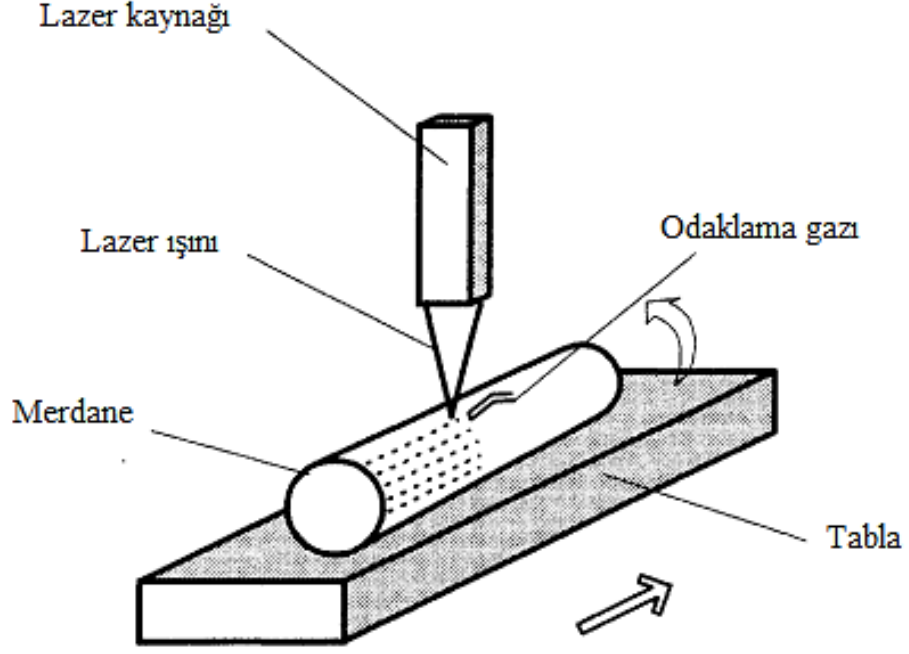
Şekil 2.20. Kumlama ile pürüzlendirme (SBT) yöntemiyle merdane yüzeyinin pürüzlendirilmesi (Gorbunov vd., 2009)

***Elektro deşarj ile pürüzlendirme (EDT, Electro Discharge Texturing):*** EDT yönteminde bir dielektrik ortamda (tipik olarak parafin gibi bir hidrokarbon yağı), bir elektrotun (+), merdanenin (-) yüzeyinde kıvılcım oluşturduğu ve elektrik boşaltma işlemi ile gerçekleştirildiği pürüzlendirme yöntemidir. Merdane üzerinde çok küçük yüzey kraterlerinin oluşumu, bir servo silindir mekanizması vasıtasıyla çalışan iki elektrot arasındaki enerjinin bir darbe üreticisine boşaltılmasından kaynaklanır. Bu pürüzlendirme yönteminde bölgesel olarak ergitilen merdane yüzeyinde katılma sırasında krater oluşarak istenen yüzey pürüzlülüğü elde edilmiş olur. EDT, akım ve darbe süresi gibi çalışma değişkenlerinin uygun şekilde seçilmesiyle birlikte yüzey tepe noktalarının yüksekliğini ve sayısını bağımsız olarak kontrol etme imkânı sunar. Bu nedenle, belirli bir pürüzlülük değeri için çok daha yüksek bir tepe yoğunluğuna sahip pürüzlü bir yüzey üretmek mümkündür. Elektrik deşarjı ile pürüzlendirme, 20.000°C'ye kadar yüksek olduğu tahmin edilen yerel sıcaklıkları içeren bir termal işlemdir. Bu, merdanelerin yüzey tabakasının mikroyapısının, EDT sırasında daha fazla arzu edilen aşınma özellikleri verecek şekilde değiştirilebileceği anlamına gelir ancak tüm elektrik boşaltma işlemlerinde olduğu gibi yüzey hasarını en aza indirmek için işlem değişkenlerinin kontrol edilmesi gerekir (Aspinwall vd., 1992). Şekil 2.21'de EDT yöntemiyle merdane pürüzlendirilmesi işlemi gösterilmiştir.



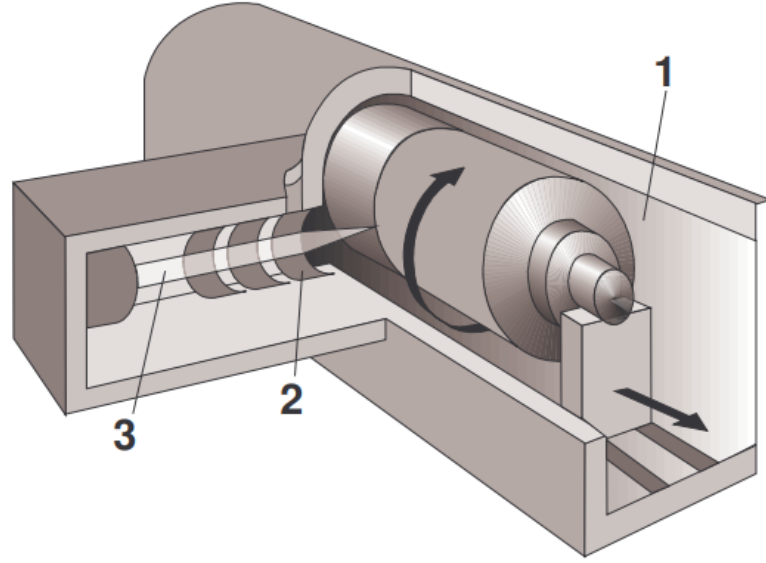
Şekil 2.21. Elektro deşarj ile pürüzlendirme (EDT) yöntemiyle merdane pürüzlendirme (WSC, 2020)

**Lazer pürüzlendirme (LT, Laser Texturing):** Lazer pürüzlendirme işleminde merdane yüzeyinin küçük bir alanını hızla eritmek için yüksek enerjili lazer kullanılır ve oluşan yüzey gerilimi ile merdane deforme olarak bir metal havuzu meydana gelir. Bu erimiş havuz, lazerden gelen ışın kapatıldığında çevredeki alana yüksek ısı yayılım oranı nedeniyle anında katılaşıp krater haline gelir ve pürüzlü merdane yüzeyi elde edilir (Du vd., 2005). Bu yöntemin önemli eksiklikleri; yonteme uygun lazerlerin verimliliğinin % 5'i geçmemesi, ekipman karmaşıklığı ve lazerlerin yüksek enerji tüketimi sayılabilir. Bu nedenle, lazer pürüzlendirme işlemi ekonomik olmayabilir. Sonuç olarak bu yöntem, iyi yüzey pürüzlülüğü sağlamasına ve düzenleme için büyük bir kapsam sunmasına rağmen çok yaygın olarak kullanılmamaktadır (Gorbunov vd., 2009). Şekil 2.22'de lazer pürüzlendirme işlemi gösterilmektedir.



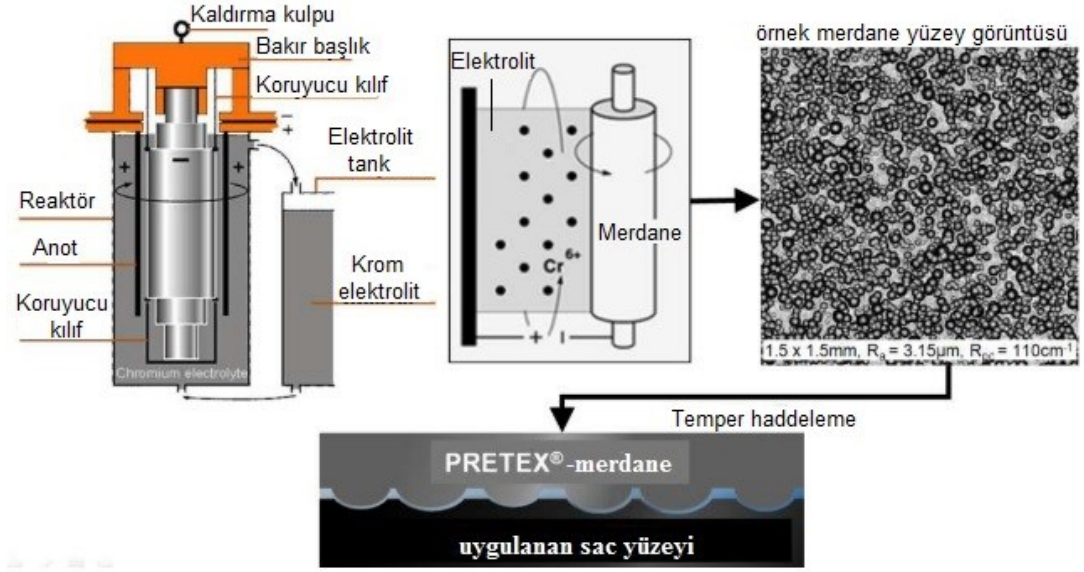
Şekil 2.22. Lazer pürüzlendirme (LT) yöntemiyle merdane pürüzlendirme (Du vd., 2005)

**Elektron ışını ile pürüzlendirme (EBT, Electron Beam Texturing):** Şekil 2.23'de şematik olarak gösterildiği gibi bu işlemde merdane yüzeyinin yerel erimesini oluşturmak için bir elektron ışını (3) tabancası kullanılır. Merdane bir vakum odasına (1) yerleştirildiğinden erimiş malzemenin oksitlenmesi engellenerek merdanenin yüzeyine daha iyi yapışması sağlanır. Yüksek frekanslı (200 kHz'e kadar) elektromanyetik odaklama sistemi (2), merdanenin dönme ve kayma hareketi ile senkronize edilerek merdane yüzeyi pürüzlendirilir. Diğer pürüzlendirme yöntemleri ile karşılaştırıldığında EBT, üstün biçimlendirme ve boyama performansına yol açan bir özellik olan kraterler arasında iyi tanımlanmış boyutlara ve mesafelere sahip tam deterministik (belirli bir düzene sahip) bir krater modeli sağlar. (Clarysse vd., 2008).



Şekil 2.23. Elektron ışını ile pürüzlendirme (EBT) yöntemiyle merdane pürüzlendirme (Clarysse vd., 2008)

***Elektrolitik krom birikimi ile pürüzlendirme (Pretext, ECD, Electro-chrome Deposition Texturing):*** Topocrom veya Pretext olarak da adlandırılır. Şekil 2.24’de elektrolitik krom birikimi ile merdane pürüzlendirme işlemi gösterilmiştir. Merdane yüzeyinin pürüzlendirilmesi işlemi sırasında krom, merdane yüzeyinde karakteristik yarım kubbe şekilleri elde edilecek şekilde elektrolitik olarak biriktirilir (Köhler, 2016). Bu pürüzlendirme yönteminde merdane, krom kaplama elektroliti bulunan bir reaktör içerisine yerleştirilir. Elektrot ve merdane yüzeyi arasında düzgün bir elektrik alanı üretilir. Elektrolit elektrolize edilir, krom iyonları içeriği azaltılır ve merdane üzerinde katı krom biriktirilir. Elektrot (anot) ve merdane (katot) arasındaki voltajın sık sık değişmesi, merdane yüzeyinde oluşturulmaya çalışılan yarım kubbe çıkıntılarının üniform oluşumuna yol açar. Elektrolitik biriktirme parametrelerini değiştirerek krom yarım küre sayısı ve boyutları ayarlanabilir. Bu yöntemde merdane yüzey topografyasının genliği ve frekansı çok az dağılımla geniş bir aralıkta değişebilir (Gorbunov vd., 2009).



Şekil 2.24. Elektrolitik krom birikimi ile pürüzlendirme (ECD) yöntemiyle merdane pürüzlendirme (Köhler vd., 2016)

### 2.1.8.2. Pürüzlülük Transferini Etkileyen Haddeme Parametreleri

Temper haddeme işleminde pürüzlendirilmiş merdanelerden malzeme yüzeyine transfer edilen pürüzlülük profili, birçok haddeme parametresinden etkilenmektedir. Temper haddeme işleminde pürüzlülük transferi, malzeme ile ilgili faktörler ve haddeme işlem koşulları ile ilgili parametreler olmak üzere genel olarak iki türdür. Malzeme ile ilgili faktörler genel olarak; tane boyutu, kimyasal bileşim, malzeme özellikleri gibi parametrelerdir. Haddeme koşulları ile ilgili parametreler ise ezme miktarı, merdane çapı, merdane pürüzlendirme yöntemi, merdane malzemesi, malzeme kalınlığı, malzemenin pürüzlülüğü, yağlama uygulamaları, sürtünme koşulları, ön gerilmenin varlığı, haddeme hızı gibi parametrelerdir (Mazur ve Nogovitsyn, 2018).

Sac malzemeyi yüksek kalitede elde etmek için temper haddemede optimum parametreleri seçmek çok önemlidir. Tavlanmış malzeme, mümkün olan en düşük ezme miktarı ile temper haddelenmiş olmalıdır. Bu durumda metal daha fazla plastisiteyi koruyacaktır. Bununla birlikte deformasyon derecesi belirgin akma bölgesini ortadan kaldırmak için yeterli olmalıdır. Bu belirtilenlere bağlı olarak bir dizi önemli soru ortaya çıkmaktadır: Temper haddemede optimum ezme miktarının değeri nedir? Optimal ezme miktarı, temper haddeme işleminin parametrelerinin bir fonksiyonu olarak değişiyor mu? Optimal aralıkta ezme miktarı stabilizasyonu elde etmek için hangi araçlar kullanılabilir (Mazur ve Nogovitsyn, 2018)? Dolayısıyla bu

sorular günümüzde temper haddeleme işlemi ile pürüzlülük transferinde açığa çıkarılması gereken önemli sorular olarak görülmekte ve bu yönde araştırmalar sürdürülmektedir.

Temper haddeleme sürecinde pürüzlülük transferini etkileyen haddeleme parametreleri ile ilgili kaynak özetleri üçüncü bölümde daha detaylı olarak irdelenmiştir.

### 2.1.9. Yüzey Pürüzlülük Profili ve Parametreleri

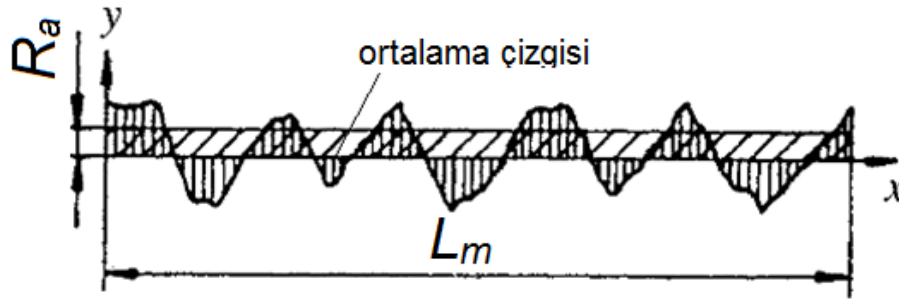
Mühendislik çizimlerinde kullanılan yüzey pürüzlülüğü için sayısal parametreler; tasarım, üretim, işlevsel performans ve bir tedarikçi ile müşteri arasındaki iletişim araçlarıdır. Bu parametreler sadece üretim ve yüzey toleransı için bir kıyaslama olarak değil aynı zamanda özellikle fonksiyonel özellikleri tahmin etmek içinde 3D yüzey pürüzlülüğü gibi parametrelerde kullanılır (Blunt ve Jiang, 2003).

Yüzey pürüzlülüğü için kullanılan pürüzlülük parametreleri genel olarak üç gruba ayrılır. Bu parametreler aşağıda tanımlandığı gibidir (Gadelmawla vd., 2002).

- i) Genlik parametreleri ( $R_a$ ,  $R_q$ ,  $R_z$ ,  $R_p$ ,  $R_v$ ,  $R_{sk}$ ,  $R_{ku}$ , .....): Yüzey topografyasını karakterize etmek için kullanılan en önemli parametrelerdir. Yüzey sapmalarının dikey karakteristiklerini ölçmek için kullanılır.
- ii) Aralık parametreleri ( $HSC$ ,  $P_c$ ,  $S$ ,  $S_m$ , .....): Yüzey sapmalarının yatay karakteristiklerini ölçmek için kullanılan parametrelerdir. Çoğunlukla sac malzemelerin preslenmesi gibi imalat süreçlerinde çok önemlidir.
- iii) Hibrit parametreler ( $\Delta_a$ ,  $\Delta_q$ ,  $\lambda_a$ ,  $\lambda_q$ , .....): Genlik ve aralık parametrelerinin kombinasyonu olan parametrelerdir. Tribolojik analiz, arayüzler, yüzey eğimi, yüzey eğriliği gibi yüzeyin tribolojik özelliklerini etkileyen önemli parametreler olarak kabul edilir.

Yüzey pürüzlülüğü parametrelerinin ölçümünde, kesim dalga boyunun ( $\lambda_c$ ) belirlenmesinde ve pürüzlülük dağılımının değerlendirilmesinde birtakım uluslararası standartlar yol göstericidir. ISO 4287 ve ISO 25178 standartları yüzey yapısına ait pürüzlülük parametrelerinin belirlenmesinde kullanılır. ISO 4288 standardında ise yüzey yapısının değerlendirilmesinde izlenecek kurallar tanımlanmıştır.

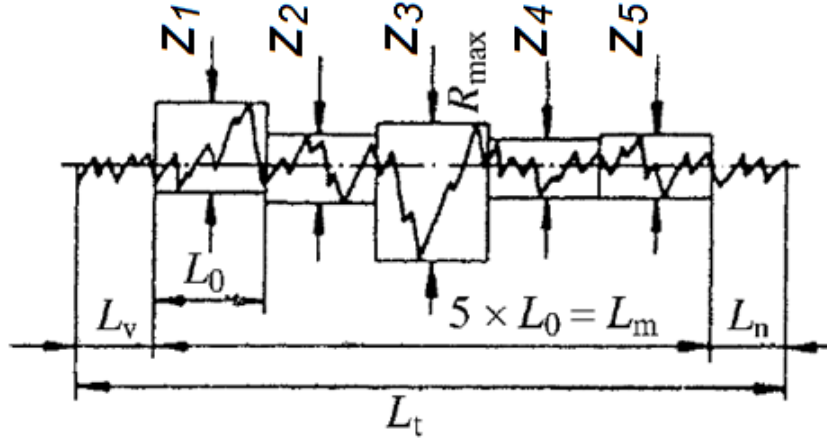
Yüzey pürüzlülüğünün ana parametresi, aritmetik ortalama profil pürüzlülüğünü veya pratikte pürüzlülük profilinin ortalama bir çizgisinin üzerinde yer alan malzeme dolgu profil bölgelerinin yüzey alanını sınırlayan iki paralel çizgi arasındaki aralığı ve ortalamanın altında bulunan malzemeden bağımsız profil bölgelerini tanımlayan  $R_a$ 'dır (Rudawska, 2019). Şekil 2.25'de gösterilen yüzey pürüzlülük profiline göre aritmetik ortalama profil pürüzlülüğünün ( $R_a$ ) değeri aşağıda verilen denklem yardımıyla hesaplanır (Sancaktar ve Gomatam, 2001).



$$R_a = \frac{1}{L_m} \int_{x=0}^{x=L_m} |y| dx$$

Şekil 2.25.  $R_a$ , aritmetik yüzey pürüzlülüğünün hesaplanması (Sancaktar ve Gomatam, 2001)

Pürüzlülük parametrelerinden ayrıca "tepeden vadiye ortalama yükseklik,  $R_z$ " ve "maksimum bireysel tepeden vadiye yükseklik,  $R_{max}$ " değerleri de önemli pürüzlülük parametrelerindedir.  $R_z$  değeri, beş ardışık örnekleme uzunluğunun tepeden vadiye yüksekliklerinin aritmetik ortalamasıdır.  $R_{max}$  değeri, toplam ölçüm uzunluğu içindeki mutlak maksimum tepeden vadiye yüksekliktir. Şekil 2.26'da  $R_z$  ve  $R_{max}$  değerleri gösterilmiştir. Bu pürüzlülük parametrelerinden  $R_z$ , verilen denklem yardımıyla hesaplanır (Sancaktar ve Gomatam, 2001).



$$R_z = \frac{1}{5} (z_1 + z_2 + z_3 + z_4 + z_5)$$

Şekil 2.26.  $R_z$  tepeden vadiye ortalama yüksekliğin hesaplanması (Sancaktar ve Gomatam, 2001)

Diğer pürüzlülük parametrelerinden  $R_p$ , bir örnekleme uzunluğu içindeki pürüzlülük profilinin maksimum tepe yüksekliğidir.  $R_v$  ise bir örnekleme uzunluğu içindeki pürüzlülük profilinin maksimum vadi derinliğidir (Rudawska vd., 2016).

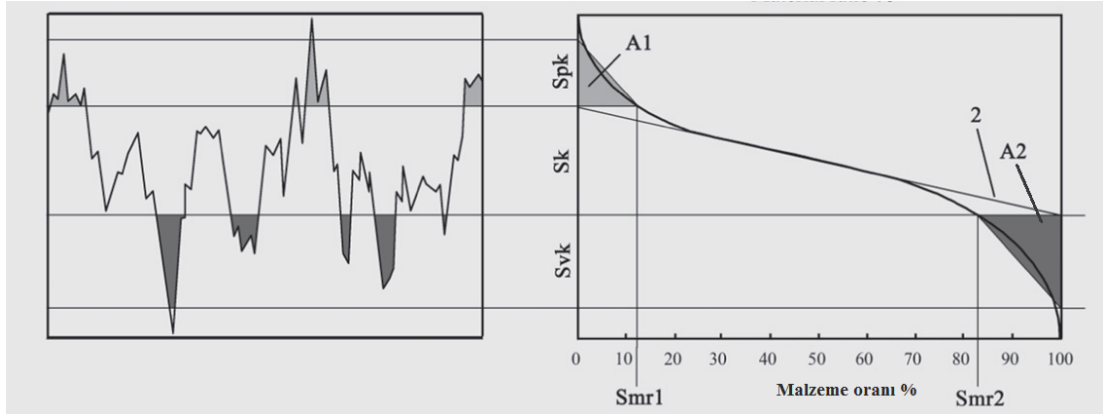
### 2.1.9.1. Malzeme Oranı Eğrileri (MRC, BAC, Abbott-Firestone)

Malzeme oranı eğrileri, pürüzlülük dağılımının değerlendirilmesinde kullanılan eğriler olup yüzey pürüzlülüğu yüksekliğinin kümülatif frekans dağılımını temsil eder ve pürüzlü yüzeylerin tribolojik performansını değerlendirmek için yararlı bir araç sağlar (Bitelli vd., 2012; Jeng vd., 2020). Malzeme oranı eğrileri, yüzey pürüzlülüğu ölçümlerinden elde edilen hibrit parametrelerdendir ve yüzey pürüzlülük profilinin değerlendirmesinde, hem dikey hem de yatay ölçümlerin sapmalarını birlikte analiz etmeye yönelik pürüzlülük dağılımı ölçüm işlevi sunarak daha tutarlı sonuçlar elde edilmesine imkân tanımaktadır.

Malzeme oranı eğrileri, pürüzlü yüzeyde ölçülen en düşük vadiden en yüksek tepeye kadar pürüzlülük dağılımını gösteren eğrilerdir ve eğri oluşturmak için kullanılan parametreler ISO 13565-2 standardında tanımlanmaktadır.

İki boyutlu  $R_k$  veya üç boyutlu  $S_k$  parametresi, malzeme yüzey pürüzlülük profilinin çekirdek pürüzlülük derinliği olarak tanımlanmaktadır ve bu tanımlanan derinlikle birlikte malzeme yüzeyindeki vadiler ve tepeler eşit bir alana yayılarak birbirini dengeler. İki boyutlu  $R_{pk}$  veya üç boyutlu  $S_{pk}$  parametresi, çekirdek pürüzlülük profili olarak tanımlanan parametrenin ( $R_k$  veya  $S_k$ ) üzerinde bulunan tepe

noktalarının yüksekliği olarak tanımlanmaktadır. İki boyutlu  $R_{vk}$  veya üç boyutlu  $S_{vk}$  parametresi ise çekirdek pürüzlülük profili olarak tanımlanan parametrenin ( $R_k$  veya  $S_k$ ) altındaki vadilerin derinliği olarak tanımlanmaktadır.  $S_{mr1}$  ve  $S_{mr2}$  değerleri, tepe ve vadilerin başlangıç noktalarını gösteren malzeme oranlarının sınırlarını göstermektedir. A1 ve A2 ise sırasıyla tepelerin ve vadilerin pürüzlülük profili tarafından oluşturulan alanı göstermektedir. Standartta tanımlanmış olan malzeme oranı eğrilerini oluşturmak için kullanılan parametreleri içeren malzeme oran eğrisi Şekil 2.27'de gösterilmiştir.



Şekil 2.27. Malzeme oranı eğrisi ve pürüzlülük parametreleri (Walton vd., 2015)

### 3. KAYNAK ÖZETLERİ

Bu tez çalışması kapsamında temper haddeleme ile pürüzlülük transferi işleminde literatüre katkı sağlayan kaynaklar tüm detaylarıyla incelenmiş ve bu bölümde özetlenmeye çalışılmıştır. Bu amaç doğrultusunda taranan kaynakların özeti aşağıda sunulmuştur.

Metalik malzemelere temper haddeleme ile pürüzlülük transferinde, birçok parametre malzemeye aktarılan pürüzlülük transferini etkilemektedir. Literatür incelendiğinde temper haddeleme ile pürüzlülük transferini etkileyen parametreler aşağıda sıralanmıştır.

- **Ezme miktarı** (Çolak ve Kurgan, 2018; Wu vd., 2018; Wu vd., 2019),
- **Haddeleme uzaması** (Pawelski vd., 1994; SMS DEMAG, 2003; Hardy, 2005; Kijima, 2015a),
- **Haddeleme kuvveti** (Dick ve Lenard, 2005; Asgari vd., 2008; Köhler vd., 2016; Çolak, 2018; Çolak ve Kurgan, 2018; Başoğlu, 2019),
- **Merdane özellikleri (geometrisi, malzemesi, pürüzlülüğü, pürüzlendirme yöntemi vb.)** (Pawelski vd., 1994; Lenard, 2004; Kijima ve Bay, 2008a; Kijima ve Bay, 2008b; Kijima ve Bay, 2009; Kijima, 2014; Kijima, 2015b; Başoğlu ve Kurgan, 2019),
- **Haddeleme hızı** (Simao vd., 1996; Ma vd., 2002; Mekicha vd., 2020),
- **Tribolojik koşullar (yağlayıcı ve sürtünmenin etkisi)** (Plicht vd., 2007; Holz vd., 2010; Kijima, 2015a; Kijima, 2015b; Özakın ve Kurgan, 2020),
- **Malzeme özellikleri** (Hardy, 2005; Rodriguez-Vidal vd., 2020) vb.'dir.

Zhang ve Lenard (1992), alüminyum malzemede soğuk haddeleme işlemi sırasında ezme miktarı, merdane hızı, yağlayıcı tipi ve viskozitesinin haddelenmiş numunenin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Yağlayıcı tipinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisinin önemli olmadığını, yağlayıcı kullanılmasının merdanede meydana gelen kuvvetlerin azalmasına katkı sağladığını ve malzemede ileri yönlü kaymanın, sürtünme katsayısının ve merdanede meydana gelen kuvvetlerin, artan yağ viskozitesi ile azaldığını belirtmişlerdir.

Pawelski vd. (1994), haddeleme uzamasının, kalınlık azalması veya ezme miktarının bir fonksiyonu olduğunu göstermişler ve haddeleme uzamasının artmasıyla birlikte sac malzeme yüzeyine pürüzlülük transferinin arttığını belirlemişlerdir. Ayrıca

EDT yöntemi ile pürüzlendirilmiş merdanelerle yapılan temper haddeleme işleminde pürüzlülük transfer oranının, LT yöntemine göre daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir.

Simao vd. (1996), merdane pürüzlendirme yöntemlerinin pürüzlülük transferine olan etkilerini araştırmışlardır. EDT yöntemiyle pürüzlendirilen merdanenin SBT yöntemi gibi alternatif merdane pürüzlendirme yöntemlerine göre temel avantajlarından birinin, malzeme yüzey topografyasının daha düzgün elde edilebilmesi ve merdane ile yeniden üretilebilir dokular oluşturulabilmesi olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Ma vd. (2002), karbonlu çelik şerit malzemenin soğuk haddelemesinde, pürüzlülük transferinin ve haddeleme parametrelerinin etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Yüzeye ait pürüzlülük özelliklerini, bir atomik kuvvet mikroskobu (AFM) yardımıyla ölçmüş ve sayısal olarak analiz etmişlerdir. Yüzey profilinin üç boyutlu (3D) görüntülerinin, pürüzlülük transferinin belirlenmesinde daha açık bir görünüm sergilediğini belirtmişlerdir. Yüzey pürüzlülük analizlerinden elde ettikleri sonuçlardan, düşük ezme miktarıyla yapılan haddelemenin şerit yüzey kalitesini iyileştirebileceğini ve ayrıca haddeleme hızındaki artışla birlikte malzemenin daha yüksek miktarda pürüzlendiğini göstermişlerdir.

SMS DEMAG (2003) grubu tarafından gerçekleştirilen temper haddeleme ile pürüzlendirme testlerinin sonuçlarına bakılacak olursa, malzemenin her iki yüzeyinde de temper haddeleme sonrasında pürüzlülük transferinin, yüzde uzama ile artış gösterdiği ve pürüzlülük transferindeki bu artışın, kalınlığı daha az olan malzemelerde daha gözlemlenebilir olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Hardy vd. (2005) yaptıkları çalışmada, haddeleme sırasındaki temas alanı veya uzama ne kadar yüksek ise malzemeye aktarılan pürüzlülüğün o kadar fazla olacağını ve malzeme pürüzlülüğünün, merdane pürüzlülük profiline daha fazla uyum sağlayacağını belirtmişlerdir. Temas alanı ile haddeleme uzaması arasında doğrusal ilişki bulunduğunu, sıfır uzama için temas alanının sıfır olduğunu ve ürünün pürüzlülüğünün malzemenin ilk pürüzlülük değeri olduğunu, temas alanındaki artışla birlikte yani malzeme ile merdane tam temas halindeyken üründeki pürüzlülük değerinin merdanenin pürüzlülük değerine çok yaklaşacağını belirtmişlerdir. Dolayısıyla uzama veya temas alanı büyük değerler aldığı anda merdanenin tepeleri,

malzemede derin vadiler meydana getirerek bu sayede yüzeyde pürüzlülük transferini artırdığını belirtmişlerdir.

Plicht vd. (2007), kuru koşullar, su bazlı yağlayıcı ve sıvı nitrojen yağlayıcı kullanılarak yapılan temper haddeleme neticesinde oluşan yüzey görünümünü inceledikleri bir çalışmada, elde ettikleri SEM (taramalı elektron mikroskobu) görüntülerini değerlendirmişlerdir. Su bazlı yağlayıcı ile gerçekleştirilen temper hadde neticesinde elde edilen yüzeyin az miktarda parlak olduğunu belirtmişlerdir. Kuru şartlarda gerçekleştirilen temper hadde neticesinde elde edilen yüzeyinde, su bazlı yağlayıcı kullanılan yüzeye benzer bir yüzey dokusuna sahip olduğunu göstermişlerdir. Sıvı nitrojen kullanılarak gerçekleştirilen temper hadde neticesinde elde edilen yüzeyin ise daha parlak ve daha düzgün olduğunu ifade etmişlerdir.

Asgari vd. (2008), sıcak daldırma galvanizli çelik sac malzemelerde kuvvet değişikliklerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Elde ettikleri bulgular neticesinde artan haddeleme kuvvetinin yüzey pürüzlülüğünü artırdığı sonucuna varmışlardır.

Kijima ve Bay (2008a), takım pürüzlülüğünün çelik şeridin temper haddelemesinde yüzey pürüzlülüğüne etkisini, normal yükleme altında yani takım ve iş parçası arasında teğetsel kesme olmadan, pürüzlülük transferine ve şeridin uzamasına odaklanılarak araştırmışlardır. Süreci, kuru sürtünme koşulu altında idealleştirilmiş yüzey pürüzlülüğü profilleri ile sağlanan düzlem şekil değiştirme şartlarında elastik-plastik bir sonlu elemanlar (FE) simülasyonu ile simüle etmişlerdir. Takım pürüzlülüğünü, farklı ortalama pürüzlülüklerde ve bir dizi daire parçası olarak modellemişlerdir. Elde ettikleri sonuçları değerlendirdiklerinde, çeşitli basınç seviyelerinde takım pürüzlülüğünün pürüzlülük transferi üzerindeki önemli etkisini istatistiksel olarak analiz ederek göstermişlerdir.

Kijima ve Bay (2008b), takım pürüzlülüğünün çelik şeridin temper haddelemesinde yüzey pürüzlülüğüne etkisini, iş parçasına birleşik normal yükleme ve teğetsel yer değiştirmesi altındaki yüklemeye odaklanarak araştırmışlardır. Elde ettikleri nümerik sonuçları değerlendirmek için düzlem şekil değiştirme içeren deneysel çalışmaya da yer vermişlerdir. Deneysel çalışmada, iş parçasının temas ve kayma bölgesindeki teğetsel yer değiştirmesinin pürüzlülük transferi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermişlerdir. Aynı zamanda iş parçası ile takım arasındaki

temas uzunluğunun yüksek olmasının pürüzlülük transferini artıracığını belirtmişlerdir.

Kimura vd. (2009), temper haddeleme işleminde farklı merdane yüzeyleri kullanarak sıcak daldırma galvanizli çelik yüzeyler üzerine pürüzlülük transfer davranışlarını deneysel olarak incelemişlerdir. Bu deneysel çalışmadan elde edilen yüzeylerin ortalama pürüzlülük, tepe noktası ve dalgalılık parametrelerini karakterize etmişler ve ayrıca bu parametreler arasındaki karşılıklı ilişkileri tartışarak yüzey parametrelerini tahmin etmek için olası yöntem önermişler ve değerlendirmelerde bulunmuşlardır.

Nagase vd. (2009a), 4'lü merdane düzenine sahip hadde tezgâhı kullanılarak kuru şartlar altında temper haddeleme işleminde yüzey pürüzlülük transferini incelemişlerdir. Tavlanmış düşük karbonlu çelik şeritler ve tavlanmış yüksek karbonlu çelik şeritler için temper haddeleme deneylerini % 1 ile 11 kalınlık azaltma oranları aralığında gerçekleştirmişlerdir. Temper haddeleme ile pürüzlülük transferinde EDT ve SBT yöntemiyle üretilen merdaneleri kullanmışlardır. Temper haddelenmiş şeritlerin yüzey mikroyapılarının yanı sıra yüzey pürüzlülüklerini karşılaştırmak için değerlendirilen profillerin, ( $R_a$ ) aritmetik ortalaması, malzeme oranı eğrileri ve olasılık yoğunlukları açısından yüzey dokularını doğrudan gözlemlemişlerdir. Sonuç olarak, EDT ile üretilen merdanelerin, SBT ile üretilen merdanelerden daha iyi yüzey pürüzlülük transferi sağladığını göstermişlerdir.

Nagase vd. (2009b), temper haddelemede merdanelerin mikro aşınmasını, 4'lü merdane düzenine sahip hadde tezgâhında üç yağlama durumu (suda çözünebilir yağlayıcı, kuru bir koşul ve mineral yağ) altında değerlendirmişlerdir. EDT yöntemi ve SBT yöntemi ile üretilen merdanelerin kullanıldığı, tavlanmış düşük karbonlu çelik şeritler ve tavlanmış yüksek karbonlu çelik şeritler için temper haddeleme deneylerini % 1 ile 3 kalınlık azaltma oranları aralığında gerçekleştirmişlerdir. Sonuç olarak EDT ile üretilen merdanelerin, kuru koşulda SBT ile üretilen merdanelerden daha büyük bir mikro aşınma gösterdiğini belirtmişlerdir. Suda çözünür yağlayıcı ve mineral yağlayıcı kullanımının EDT ile üretilen merdanelerin mikro aşınmasını azalttığını tespit etmişlerdir.

Nagase vd. (2009c), yüksek karbonlu çelik malzemeler için suda çözünebilir yağlayıcı kullanılarak yapılan temper haddeleme ile pürüzlendirme işleminde, kuru ve

mineral yağ kullanılan temper haddeleme ile pürüzlendirme koşullarına göre daha yüksek miktarda pürüzlülük transferi elde edildiğini belirtmişlerdir. Ek olarak, düşük karbonlu çelik malzemeler için suda çözünebilir yağlayıcı ve kuru koşullarda yapılan temper haddeleme ile pürüzlendirme işleminde eşdeğer pürüzlülük transferi elde edildiğini, mineral yağlayıcı kullanıldığı koşullarda ise daha düşük miktarda pürüzlülük transferi elde edildiği bulgusuna ulaşmışlardır.

Kijima (2013), merdane yarıçapının temper haddeleme işleminde temas durumu ve malzeme deformasyonu üzerindeki etkisini incelemiş ve elastik-plastik bir sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ile sayısal analizler ve bu analizlerin sonucunu doğrulamak için yapılan deneysel haddeleme testleri ile netleştirmeye çalışmıştır. Temper haddeleme koşulları dikkate alınarak basitleştirilmiş modeller kullanan iki durum yani presleme ve dairesel rijit bir merdane ile haddeleme analizini karşılaştırmıştır. Basınç dağılımı, temas durumu ve malzeme deformasyonu ile ilgili bazı temper haddeleme özelliklerinin, küçük yarıçaplı merdaneler kullanılarak uygun şekilde simüle edilemediği sonucuna varmıştır.

Kijima (2014), temper haddeleme ile pürüzlülük transferi sürecine merdane parametrelerinden olan merdane yarıçapının etkisini, deneysel pürüzlendirme testleri ve beraberinde sonlu elemanlar yöntemini kullanarak sayısal olarak araştırmıştır. Merdane yarıçapındaki artışın malzemenin yüzeyindeki temas uzunluğunda artışa sebebiyet vererek bu sayede daha yüksek oranda pürüzlülük transferi elde edilebileceği sonucuna ulaşmıştır.

Fujii vd. (2014) yaptıkları çalışmada, pürüzlü merdane ile pürüzlülük transferi mekanizmasını anlamak için haddeleme ve presle sıkıştırma işlemleri ile pürüzlülük transferinde deneyler ve sayısal simülasyonları karşılaştırmışlardır. Sorunu basitleştirmek için iki boyutlu pürüzlü bir merdane kullanmışlar ve geniş aralıklı kalınlık azaltma koşulları uygulamışlardır. Haddeleme işlemi ile transfer edilen profilin merkez yüksekliği, presle sıkıştırma işlemindeki ile aynı olduğunu ve bununla birlikte, daha düşük kalınlık azaltma miktarlarında ikisi arasında (haddeleme ve presle sıkıştırma) transfer edilen profilde bazı farklılıkların olduğunu gözlemlemişlerdir.

Wentink vd. (2015) yaptıkları çalışmada, elektro deşarj pürüzlendirme (EDT) için literatüre ve deneysel gözlemlere dayanan bir iş merdanesi yüzeyinin topografyasının temel bir modelini açıklamaya çalışmışlardır. Pürüzlülük transferi

işleminin mikroskobik analizini, şerit pürüzlendirme sırasında merdane aşınmasını, pürüzlülük transferini dahil ederek doğrulamışlar ayrıca pürüzlendirilmiş çelik şerit yüzeyine temper haddeleme işlem adımlarının etkisini açıklayan bir modelin geliştirilmesini ve doğrulanmasını açıklamışlardır.

Burdek (2015) yaptığı çalışmada, temper haddeleme işleminde kullanılan haddeleme merdanelerinin bu süreç içerisinde yüzey topografyasında meydana gelen değişimleri incelemiştir. Merdanelerin aşınmasının merdane yüzeyi topografyasına bağlı olarak farklı olduğunu belirtmiştir. Daha fazla sayıda tepe noktası ve nispeten daha fazla pozitif profil içeren yüzey topografyasına sahip merdaneler, daha az tepe noktası ve negatif profilden oluşan yüzey topografyasına sahip merdanelere kıyasla daha fazla aşındığını göstermiştir. Merdane yüzeylerinde sert krom kaplama kullanımının hadde merdanelerinin aşınma şeklini değiştirdiğini ve merdanelerin ömrünün üç katını aştığı sonucunu elde etmiştir.

Kijima (2015a), merdane çapının, haddeleme uzaması ile pürüzlülük transferine olan etkilerini belirlemeye çalışmıştır. Küçük yarıçaplı merdanelerde malzemeye etki eden temas alanı daha az olduğundan hidrostatik basınç oluşumu için gerekli şartlar sağlanamadığını ifade etmiştir. Sonuçlar büyük ve küçük yarıçaplı merdaneler için kuru şartlar referans alınarak değerlendirilmiştir. Böylelikle pürüzlü (3.1 µm) ve büyük yarıçaplı (R250) merdane yardımıyla % 1 uzama ve % 60 pürüzlülük transferi elde edilirken aynı oranda pürüzlülük transferi elde edebilmek için aynı pürüzlülükte ve küçük yarıçaplı merdane (R50) yardımıyla malzemeye % 3 uzama miktarı verilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Aynı çalışmada merdane çapı, yağlayıcı tipinin uzamaya ve pürüzlülük transferine olan etkileri araştırılmıştır. Pürüzlü (3.1 µm), küçük yarıçaplı merdane (R50) ile kuru ve iki farklı yağlayıcı kullanılarak malzemeye pürüzlülük transferi gerçekleştirilirken pürüzlülük transferinin yağlayıcı türünden fazla etkilenmediği tespit edilmiştir. Bununla birlikte pürüzlü (3.1 µm), büyük yarıçaplı merdane (R250) ve kuru şartlarda malzemeye % 1 uzama ile % 60 oranında pürüzlülük transferi sağlanırken yağlayıcı kullanılan şartlarda aynı oranda pürüzlülük transferi elde edebilmek için % 1.5-% 2 uzama verilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

Kijima (2015b) yaptığı çalışmada, yağlamanın temper haddelemede pürüzlülük transferi üzerindeki etkisini, özellikle merdane yarıçapına bağlı olarak yağlama davranışındaki farklılıklara odaklanarak elastik-plastik sonlu elemanlar yöntemi

(FEM) ile sayısal analizlerin yanı sıra deneysel haddeleme testleri ile araştırmıştır. Büyük yarıçaplı merdane kullanıldığında sonuçların pürüzlülük parametreleri ile uyum içinde olduğunu ancak yağlama ile ilgili temper haddelemenin bazı özelliklerinin, yetersiz temas uzunluğu nedeniyle küçük yarıçaplı merdaneler kullanılarak uygun şekilde simüle edilemediğini ifade etmiştir.

Köhler vd. (2016) yaptıkları çalışmada ise Pretex yöntemi ile özel olarak pürüzlendirilmiş bir merdane kullanarak yüksek mangan (HSD) kalite çeliklerin temper haddeleme işleminde pürüzlülük transferine, malzeme özellikleri (yüksek mangan kalite çelikler) ve haddeleme kuvvetinin etkisini araştırmışlardır. HSD çeliklerinin belirli bir haddeleme kuvvetindeki pürüzlük transferinin artan akma mukavemeti ile azaldığını göstermişlerdir.

Xia vd. (2017) yapmış oldukları çalışmada, soğuk haddeleme ve temper haddelemenin çelik şeritlerin yüzey topografyası üzerindeki etkilerini analiz etmişler ve merdane yüzeyi topografyasının değişim özelliklerini araştırmak için karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak, iş merdanesi yüzeyindeki pürüzlülük zirveleri açıkça düzleşirken çukurların haddeleme sonrasında neredeyse aynı kaldığını ve temper haddeleme işleminde elde edilen şeridin yüzey topografyasının dağılımının tandem soğuk haddeleme işleminde elde edilen şeridin yüzey topografyasının dağılımına göre daha üniform olduğunu belirtmişlerdir.

Çolak ve Kurgan (2018), temper haddeleme ile pürüzlülük transferinde haddeleme kuvvetini artıran haddeleme parametrelerinin malzeme yüzeyine transfer edilen pürüzlülüğü artırdığı sonucuna varmışlardır. Pürüzlülük transferinin ve bununla birlikte haddeleme kuvvetinin yüksek hızlarda ve ince malzemelerle yapılan pürüzlendirme testlerinde daha yüksek olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca sac malzeme yüzeyine transfer edilen pürüzlülüğün yağlayıcı kullanılan şartlarda azaldığını göstermişler ve yüzey pürüzlülük ölçümlerinden elde ettikleri deneysel standart sapma değerlerini kullanarak yağlayıcı kullanılan şartlarda yapılan temper haddeleme ile pürüzlülük transferinde daha homojen bir pürüzlülük dağılımı elde edildiği sonucuna ulaşmışlardır.

Wu vd. (2018), sonlu elemanlar yöntemini ve nümerik yöntemleri kullanarak soğuk haddeleme sürecinde yüzey pürüzlülük transferini araştırmak amacıyla basit bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Sonuç olarak, pürüzlü olan merdaneden yassı ürün olan sac

veya şerit malzemeye ani pürüzlülük transferi gerçekleştiğini ve bu süreçte haddeleme kuvvetinin zamanla bir bağlantı halinde olduğunu belirtmişlerdir. Bununla birlikte ezme oranındaki artışın haddeleme kuvvetinde önemli ölçüde bir artışla sonuçlanacağını ifade etmişlerdir.

Wu vd. (2019), metal sac veya şerit malzemelerin temper haddelemesinde üç boyutlu olarak yüzeye transfer edilen pürüzlülük miktarını tahmin etmek amacıyla sonlu elemanlar yöntemini kullanarak yeni bir yöntem üzerinde çalışmışlardır. Sac veya metal şerit malzeme yüzeyinin pürüzlülüğünün iş merdanesinin yüzey pürüzlülüğünden önemli ölçüde etkilendiğini ve iş merdanesi yüzey pürüzlülüğünün pürüzlendirilmiş sac veya şerit malzeme yüzeylerinin elde edilmesinde kritik bir parametre olduğunu belirtmişlerdir. Sac veya şerit malzeme yüzeyine daha büyük bir ezme miktarı kullanılarak yapılan pürüzlülük transferinde daha yüksek bir pürüzlülük transfer oranı elde edildiğini tespit etmişlerdir ve ayrıca haddeleme hızında meydana gelen artma ve azalmaların pürüzlülük transferine etkisinin göz ardı edilebileceği sonucuna varmışlardır. Ezme miktarının, metal sac veya şerit malzemelere temper haddeleme ile pürüzlülük transferinde arzu edilen yüzey pürüzlülüğünü elde edebilmek için diğer parametrelere göre etkili bir haddeleme parametresi olduğunu belirtmişlerdir.

Başoğlu ve Kurgan (2019), temper haddelemede merdane pürüzlülüğünün ve haddeleme hızının ERD6112 kalite sac malzemelerin pürüzlülük transferine etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Pürüzlülük değeri yüksek merdane kullanılması durumunda pürüzlülük transferinin arttığını ve yüksek haddeleme hızlarında temper haddeleme ile pürüzlülük transferinde ERD6112 kalite sac malzemenin pürüzlülük transferinin arttığını tayin etmişlerdir.

Rodriguez-Vidal vd. (2020) yaptıkları çalışmada, kısa darbeli lazer pürüzlendirme (Short-Pulse Laser Texturing) tekniğini, otomotiv sektörü için galvanizli metal sac malzemelerin temel işlevsellik özelliklerinden boya görünümünü iyileştirmeye yönelik bir teknoloji olarak analiz etmişlerdir. Bu amaçla, teorik yöntemlerden deterministik modeller seçmişler ve nanosaniye darbeli lazer işleme ile baskı kalıpları üzerinde pürüzlülük profilini üretmişlerdir. Yüzey pürüzlendirme işlemi sırasında pürüzlülük transferini, farklı temas basınçları ve farklı sac malzemeler için normal yükleme altında presle sıkıştırma testleri ile sağlamışlardır. Darbeli lazer pürüzlendirme tekniğinin istenen boya görünümü işlevselliğine bağlı ana faktörler

olarak pürüzlülük ( $R_a$ ), pik sayısı ( $R_{pc}$ ) ve dalgalılık ( $W_a$ ) değerleri açısından uygun tekrarlanabilirlik ve yüzey özellikleri ile yüksek düzeyde kontrol edilebilir olduğu göstermişlerdir. Metal sac malzemelerin mekanik özelliklerinin pürüzlülük transfer kabiliyetine güçlü bir bağımlılığa sahip olduğunu belirlemişlerdir.

Mekicha vd. (2020) yaptıkları çalışmada, soğuk haddelenmiş şeritlerin yüzey pürüzlülüğünü tahmin etmek için temas modellerini kullanarak nümerik analizler ve doğrulamak için deneysel birtakım çalışmalar yapmışlardır. Bu amaçla, kalınlık azaltma miktarı, haddelene hızı, merdane ve şerit pürüzlülüğünün çeşitli kombinasyonlarında ikili merdane düzeneğine sahip haddelene tezgâhında sınırlı yağlanmış koşullar altında deneyler yapmışlardır. Belirli bir haddelene koşulu için haddelenmiş şeridin yüzey pürüzlülüğünü, seçilen temas modellerini kullanarak tahmin etmeye çalışmışlardır. Haddelenmiş şeritlerin üç boyutlu yüzey topografyasının istatistiksel özelliklerini, seçilen temas modelleri kullanılarak tahmin edilen yüzey topografyalarıyla karşılaştırmışlardır. Ölçülen ve model tarafından tahmin edilen yüzeylerin pürüzlülüğü, pürüzsüz bir merdane ile haddelenen şeritler için çok iyi bir uyum gösterdiğini, bununla birlikte pürüzlü merdanelerle haddelenen şeritler için ölçülen ve model tarafından tahmin edilen yüzeyler arasındaki yüzey pürüzlülük dağılımında ise önemli bir fark gözlemlenmediğini belirtmişlerdir.

Jeng vd. (2020), farklı çalışma koşulları altında işlenen alüminyum levhaların yüzey pürüzlülüğünü ve yüzey parlaklığını değerlendirmek için hem teorik hem de laboratuvar ölçekli yüksek hızlı soğuk haddelene düzeneğinde haddelene deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Genel olarak elde etmiş oldukları teorik ve deneysel sonuçlar ile soğuk haddelenmiş alüminyum malzemelerin yüzey kalitesinin daha yüksek bir ezme miktarı veya daha düşük bir merdane hızı kullanılarak geliştirilebileceğini göstermişlerdir.

Özakın ve Kurgan (2020) yaptıkları çalışmada, DC04 kalite sac malzemelere temper haddelene ile pürüzlülük transferinde yağlayıcının etkisini (mineral yağ) deneysel olarak incelemişlerdir. 500  $\mu\text{m}$  ezme miktarında yaptıkları deneylerde yağlayıcı kullanılan şartlarda daha az miktarda pürüzlülük transfer edildiği sonucuna ulaşmışlardır. Ayrıca 3D alan tarama görüntüleri ve malzeme oranı eğrilerini (MRC) inceleyerek kuru şartlara göre daha homojen bir pürüzlülük profili elde edildiğini belirtmişlerdir. Yağlayıcının hem haddelene kuvvetini azaltarak yüzeyde bir film tabaka oluşturup pürüzlülük transferinin azalmasına hem de malzeme yüzeyinde

homojen bir pürüzlülük profili transferi meydana gelmesine sebep olduğu sonucuna varmışlardır.

Xu vd. (2020), yaptıkları çalışmada farklı kalınlık azaltma oranlarının ve merdane ilk yüzey topografyasının şerit yüzey topografyası oluşumu üzerindeki etkilerine ilişkin teorik ve deneysel analizler yapmışlardır. Haddeme işleminde kalınlık azaltma oranındaki bir artışla transferin arttığını ve şerit yüzeyi topografyasının merdane yüzeyi topografyasına daha yakın olduğunu belirtmişlerdir. Aynı merdane pürüzlülüğü koşulu ve küçük miktarda kalınlık azaltma oranı (% 5'e kadar) altında pürüzlülük transferinin önemli ölçüde arttığını ve kalınlık azaltma oranı artmaya devam ettikçe (% 7'den % 10'a) yavaşça arttığı sonucuna ulaşmışlardır.

Wu vd. (2021), temper haddeme işleminde elastik olarak deforme olmuş iş merdaneleri ile pürüzlülük transferini araştırmak için yeni bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Merdane yarıçapı ve malzemenin akma mukavemetinin pürüzlülük transfer verimliliği üzerinde benzer etkilere sahip olduğunu ve daha büyük bir merdane yarıçapı veya malzemenin daha büyük bir akma mukavemetinin pürüzlülük transferini düşürme eğiliminde olduğu sonucuna varmışlardır. Ayrıca azalan merdane rijitliğinin belirli bir haddeme kuvveti altında pürüzlülük transfer oranında bir azalmaya yol açtığını belirtmişlerdir.

Kaynak özetleri değerlendirildiğinde, temper haddeme ile pürüzlülük transferinde malzemelerin mekanik özelliklerinin etkisi üzerine çözüm arayan çalışmaların sınırlı olduğu görülmüştür. Tez çalışmasına en yakın çalışmada, malzemelerin mekanik özelliklerini konu alan çalışmayı kısa darbeli lazerle pürüzlendirilen bir presle ezme işlemi ile araştırmışlardır (Rodriguez-Vidal vd., 2020). Yapılan tez çalışması, malzemelerin mekanik özelliklerinin temper haddeme işlemi ile pürüzlülük transferine etkisini inceleyen çalışma olması özgün değeridir. Yine literatür çalışmalarının geneli, haddeme parametrelerinin (ezme miktarı, haddeme hızı, haddeme kuvveti vb.) pürüzlülük transferine olan etkilerini incelemektedirler. Sunulan çalışmalarda pürüzlülük dağılımının homojen bir dağılım sergileyip sergilemediğini konu alan çalışmalar da oldukça sınırlıdır. Söz konusu çalışmalar alan tarama görüntülerini karşılaştırmakta (Ma vd., 2002) ve pürüzlülük ölçümlerinin standart sapmalarını (Çolak ve Kurgan, 2018) değerlendirmektedir. Bu çalışma, temper haddeme neticesinde farklı haddeme parametreleri ile pürüzlendirilen yüzeylerde elde edilen pürüzlülük dağılımlarının homojen dağılım sergileyip

sergilemediğini farklı bir çözüm sunan malzeme oranı eğrileri kullanarak değerlendirmektedir. Yine haddeleme parametrelerinden malzeme kalınlığı parametresinin pürüzlülük transferine olan etkilerini inceleyen ve pürüzlülük dağılımlarını değerlendirerek literatüre yeni katkılar sağlayan özgün bir çalışmadır. Ayrıca, temper haddeleme parametrelerinden ezme miktarının sac malzeme kalınlık kesiti boyunca meydana getirdiği mikrosertlik ve mikroyapısal değişimini inceleyen çalışmalarda yok denecek kadar azdır. Bu tez çalışmasının bu türden malzeme davranışlarını araştırarak literatüre sağladığı önemli katkıda çalışmanın özgün değerini ortaya koymaktadır. Tüm bu sunduğu çözümler ile bulduğu sonuçların hem endüstriye hem de bilime faydalar sunan bir çalışma olması umut edilmektedir.

## 4. MATERYAL VE YÖNTEM

### 4.1. Malzeme

Bu tez çalışması kapsamında üç farklı mekanik özelliğe sahip malzeme kullanılması planlanmış ve bu doğrultuda malzemelerin akma gerilmeleri referans alınarak; yüksek mukavemetli (HC420LA kalite, ERD 7140), orta mukavemetli (AISI 304) ve düşük mukavemetli (DC04 kalite, ERD 7114) çelik malzemelerin kullanımına karar verilmiştir. Her üç malzemedenden de 1 ve 1.5 mm olmak üzere iki farklı kalınlık olarak temin edilmesi planlanmış, böylece kalınlığın da pürüzlendirmeye etkisinin belirlenmesi amaçlanmıştır. ERD 7140 ve ERD 7114 malzemeleri için ERDEMİR T.A.Ş. ile yapılan resmi yazışmalar neticesinde her iki malzemedenden de 1 ve 1.5 mm olmak üzere iki farklı kalınlıkta temini gerçekleştirilmiştir. AISI 304 malzeme ise BAP 1904 nolu proje kaynaklarından yurt içinde faaliyet gösteren İmza Paslanmaz firmasından 1 ve 1.5 mm olmak üzere iki farklı kalınlıkta temini gerçekleştirilmiştir.

Bu üç malzemenin temin işlemlerinden sonra aşağıda Tablo 4.1’de belirlenen ölçülerde CNC kontrollü giyotin makinesi yardımıyla kesim işlemleri gerçekleştirilerek temper haddeleme ile pürüzlendirme işlemine hazır hale getirilmiştir. Üç malzemenin de birbiriyle karışmalarını engellemek adına boylarının farklı ölçülerde kesilmesi sağlanmıştır.

Tablo 4.1. Temper haddeleme ile pürüzlendirme işlemine hazırlanan malzemelerin ölçüleri

Malzeme kalitesi	Malzeme standardı	Erdemir kalite	En (mm)	Boy (mm)	Kalınlık (mm)
DC04	EN10130	ERD 7114	30.00	200.00	1.00
					1.50
AISI 304	EN10088-2	-	30.00	300.00	1.00
					1.50
HC420LA	EN10268	ERD 7140	30.00	250.00	1.00
					1.50

#### 4.1.1. Malzemelerin Kimyasal Bileşimleri

Deneylerde kullanılan sac malzemelerin spektral analizi, TÜRKAK tarafından akredite edilmiş Samsun Metal Metroloji ve Kalibrasyon Laboratuvarı bünyesinde bulunan Şekil 4.1’de gösterilen Spektrolab marka optik emisyon spektrometresi ile tespit edilmiştir.



Şekil 4.1. Optik emisyon spektrometresi

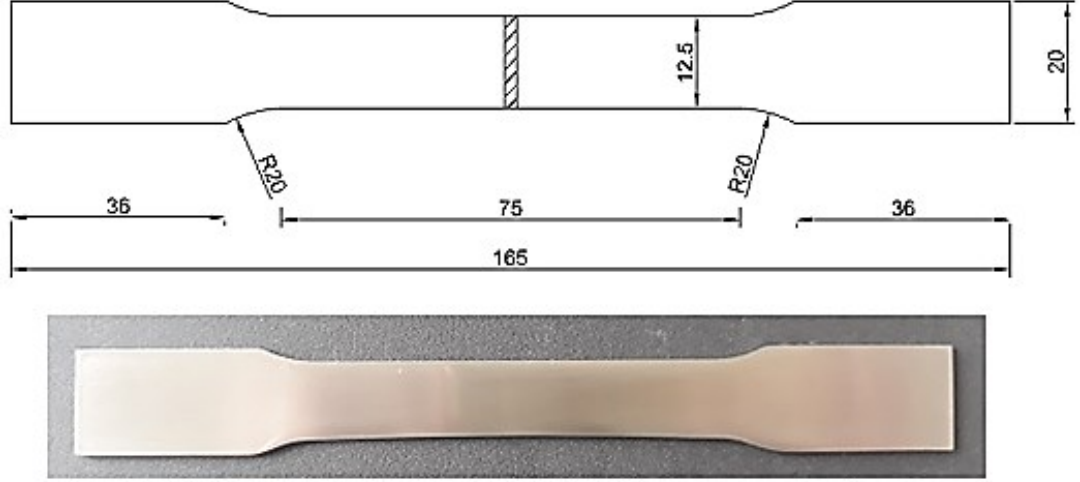
Deneylerde kullanılan sac malzemelerin spektral analizi sonucunda elde edilen kimyasal bileşimler Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.2. Sac malzemelere ait kimyasal bileşimler

<b>Malzeme</b>								
<b>ERD7140</b>	<b>Fe</b>	<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Al</b>	<b>Cr</b>
	Denge	0.084	0.014	1.017	0.019	0.010	0.053	0.035
	<b>Ni</b>	<b>Cu</b>	<b>Ti</b>	<b>V</b>	<b>Nb</b>	<b>Mo</b>		
	0.032	0.053	0.056	0.042	0.057	0.004		
<b>ERD7114</b>	<b>Fe</b>	<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Al</b>	<b>Cr</b>
	Denge	0.027	0.006	0.152	0.015	0.013	0.045	0.033
	<b>Ni</b>	<b>Cu</b>	<b>Mo</b>					
	0.031	0.044	0.005					
<b>AISI304</b>	<b>Fe</b>	<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Al</b>	<b>Cr</b>
	Denge	0,016	0.412	1.466	0.040	0.007	0.007	18.273
	<b>Ni</b>	<b>Cu</b>	<b>V</b>	<b>Mo</b>	<b>Co</b>	<b>W</b>		
	7.887	0.196	0.084	0.125	0.230	0.011		

#### 4.1.2. Malzemelerin Çekme Özellikleri

Malzemelerin çekme özelliklerinin belirlenmesi amacıyla üç farklı malzeme için Şekil 4.2’de geometrisi ve imal edilmiş görseli verilen çekme deney numunesi hazırlanmıştır. Deneyleerde kullanılan sac malzemelerin çekme özelliklerinin belirlenmesi için TS EN ISO 6892-1 standardına uygun, haddeleme yönüne paralel olarak test numuneleri hazırlanmıştır.



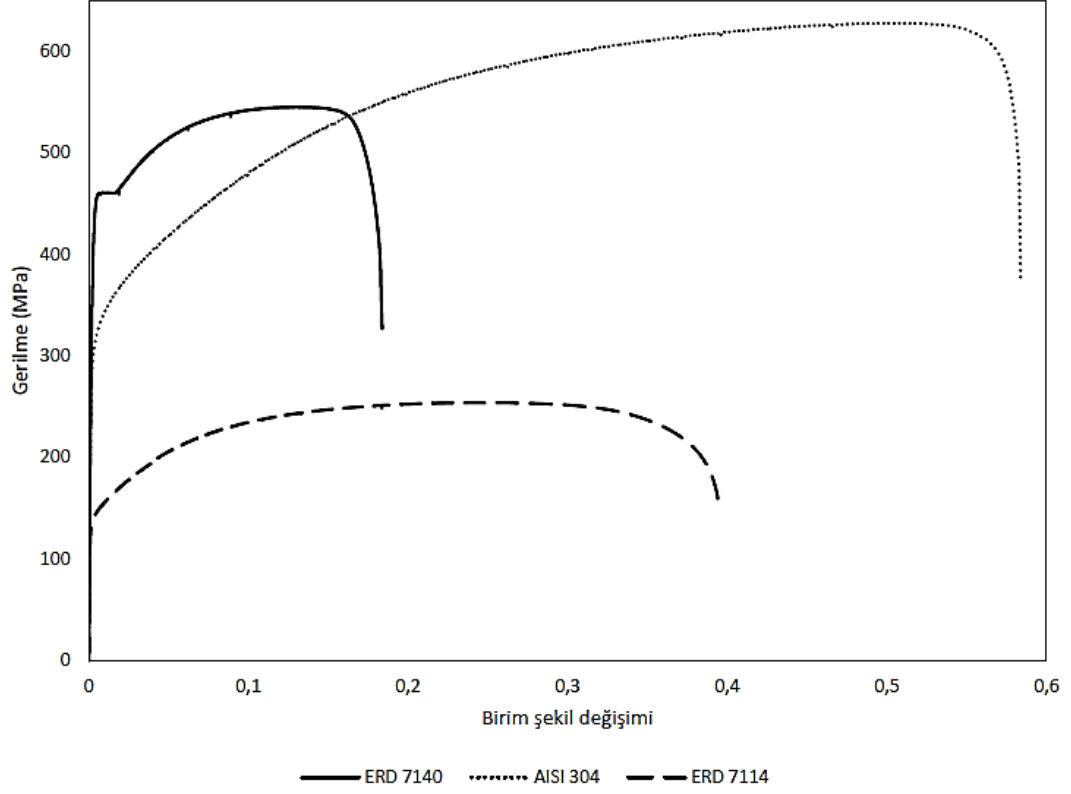
Şekil 4.2. Sac malzeme çekme deney numuneleri geometrisi ve imal edilmiş görseli

İmal edilen test numunelerine çekme deneyleri, Karadeniz İleri Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi bünyesinde bulunan Şekil 4.3’de gösterilen Instron marka üniversal çekme cihazı kullanılarak oda sıcaklığında ve TS EN ISO 6892-1 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Çekme testi, her bir malzeme numunesine üçer adet uygulanmış ve malzemeye ait mekanik özellikler, üç deney numunesinden elde edilen sonuçların ortalaması alınarak belirlenmiştir.



Şekil 4.3. Çekme özelliklerini tayin etmek amacıyla kullanılan üniversal çekme cihazı

Sac malzemelere uygulanan çekme deneylerinden elde edilen gerilme-birim şekil değişimi eğrileri Şekil 4.4’de gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Sac malzemelere ait gerilme-şekil değiştirme eğrisi

Sac malzemelere uygulanan çekme deneylerinden elde edilen çekme özellikleri ise Tablo 4.3’de verilmiştir.

Tablo 4.3. Sac malzemelerin çekme özellikleri

Malzeme kalitesi	Erdemir kalite	Akma Gerilmesi (MPa)	Çekme Gerilmesi (MPa)	Toplam Uzama (%)
DC04	ERD7114	154 ± 8	270 ± 11	39.2 ± 0.3
HC420LA	ERD7140	445 ± 10	549 ± 8	18.4 ± 0.2
AISI304	-	306 ± 5	638 ± 16	58.4 ± 0.8

## 4.2. Yöntem

### 4.2.1. Haddelme Düzenegi

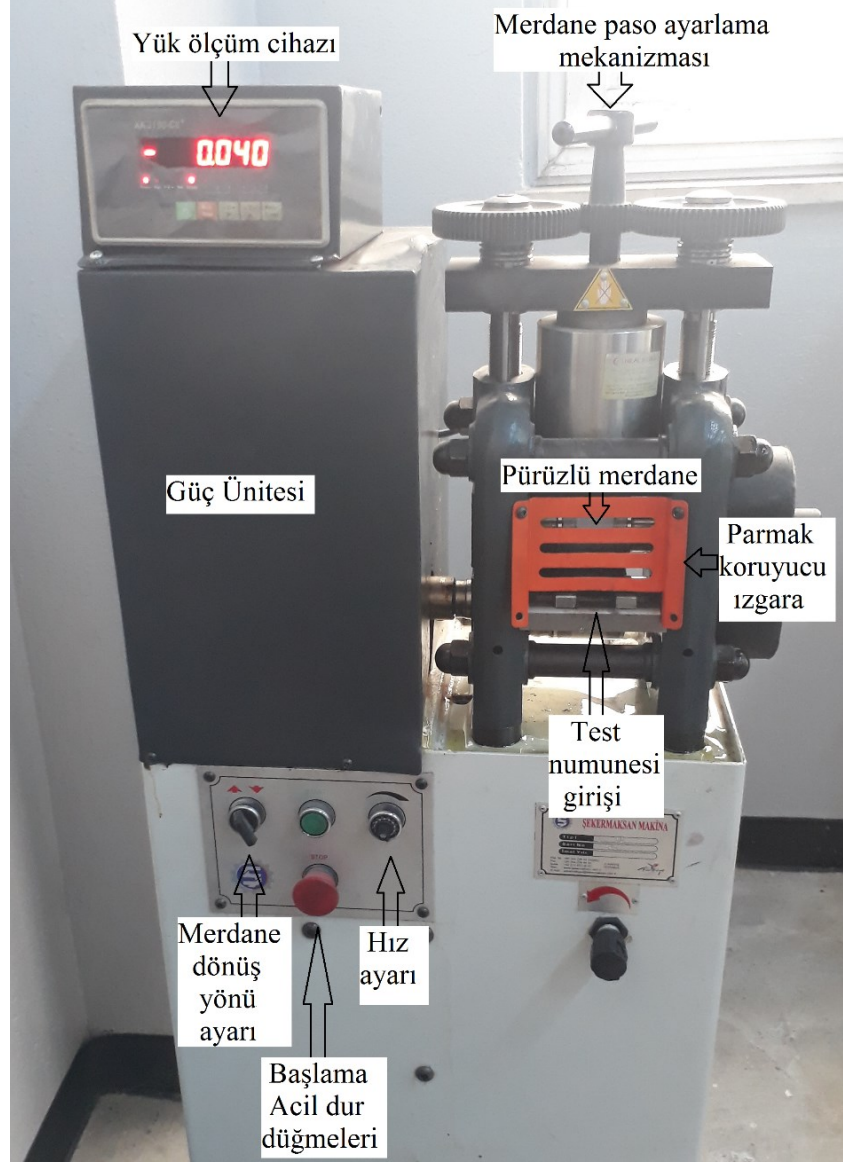
Haddelme testleri, 0-100 d/dk hız aralığında ayarlanabilen 1.5 kW gücünde motorla tahrik edilen 2’li merdane düzenine sahip olan haddelme düzenegi ile yapılmıştır. Haddelme kuvveti, düzeneğe teçhiz edilen 100 ton kapasiteli bir yük ölçme cihazının dijital ekranından “kg” cinsinden okunabilmektedir. Kaymalı yataklar, dönme hareketinden bir kam vasıtasıyla tahrik alan bir yağ pompası ile

yağlanmaktadır. Haddeme düzeneğine ait teknik özellikler Tablo 4.4’de verilmektedir.

Tablo 4.4. Haddeme düzeneğine ait teknik özellikler

<b>Stant sayısı</b>	Tek stantlı
<b>Merdane tipi</b>	2’li merdane düzeni
<b>Merdane ölçüleri</b>	075 mm × 50 mm
<b>Merdane malzemesi</b>	Soğuk iş takım çeliği (2379)
<b>Haddeme hızı aralığı</b>	0-100 d/dk
<b>Motor gücü</b>	1.5 kW
<b>Merdane pürüzlülükleri</b>	Pürüzlü merdane: 4.4 µm (R <sub>a</sub> ) Çok pürüzlü merdane: 6.8 µm (R <sub>a</sub> )
<b>Merdane pürüzlendirme yöntemi</b>	Elmasla pürüzlendirme

Şekil 4.5’de görülen haddeme düzeneği, Karabük Üniversitesi-Teknoloji Fakültesinde bulunmaktadır. Malzemelerin haddelenmesi esnasında oluşabilecek muhtemel bir iş kazasının önlenmesi amacıyla düzenekte turuncu renkli parmak koruyucu ızgara bulunmaktadır. Haddeme düzeneği özel istekler doğrultusunda Kahramanmaraş’ta faaliyet gösteren Şekermaksan firmasına yaptırılmıştır (Çolak, 2018).



Şekil 4.5. Deneysel çalışmalarda kullanılan haddeleme düzeneği

#### 4.2.1.1. Temper Haddelemede Pürüzlendirme Amaçlı Üretilen Merdaneler

Temper haddeleme işleminde malzeme yüzeyine pürüzlülük transfer edilebilmesi için özel olarak pürüzlendirilmiş merdane çiftlerine ihtiyaç bulunmaktadır. Ayrıca farklı merdane pürüzlülüklerinin pürüzlendirmeye etkisini araştırmak amacıyla iki çift pürüzlü merdane üretimi gerçekleştirilmiştir. Temper haddeleme işleminde malzeme yüzeyinin pürüzlendirilmesi amacıyla özel olarak üretilen pürüzlü merdane Şekil 4.6'da gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Pürüzlendirme amacıyla üretilen pürüzlü merdane

Özel olarak üretilen bu iki çift pürüzlü merdanenin teknik özellikleri ise Tablo 4.5’de verilmiştir.

Tablo 4.5. Özel olarak üretilen pürüzlü merdanelerin teknik özellikleri

	Yüzy pürüzlülüğü ( $\mu\text{m}$ )	Merdane çapı (mm)	Merdane çalışma uzunluğu (mm)	Pürüzlendirme yöntemi	Malzemesi
<b>Pürüzlü merdane</b>	4.408	75	50	Elmasla pürüzlendirme	2379 soğuk iş takım çeliği
<b>Çok pürüzlü merdane</b>	6.820	75	50	Elmasla pürüzlendirme	2379 soğuk iş takım çeliği

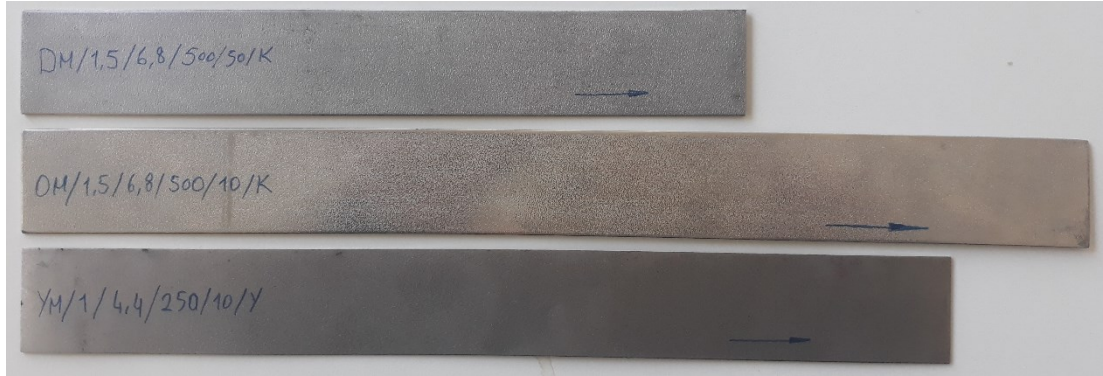
#### 4.2.1.2. Haddelme Parametreleri

Haddelme deneyleri, kesilmiş deney numunelerine Tablo 4.6’da gösterilen notasyon kullanılarak haddelme düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Bu notasyona göre sac malzeme üzerinde DM/1/4,4/250/10/Y şeklinde gösterilen bir testin; 1 mm kalınlığında ERD7114 kalite sac malzemeye, 4.4  $\mu\text{m}$  pürüzlülüğe sahip merdane ile 250  $\mu\text{m}$  ezme miktarı verilerek 10 d/dk haddelme hızında ve yağlayıcı kullanılan koşullar altında yapıldığı anlamına gelmektedir. Bu doğrultuda Ek-1’de tez çalışmasında yapılan deneyler ve yapıma amacı belirtilmiştir.

Tablo 4.6. Deneylerde kullanılan parametreler ve notasyon

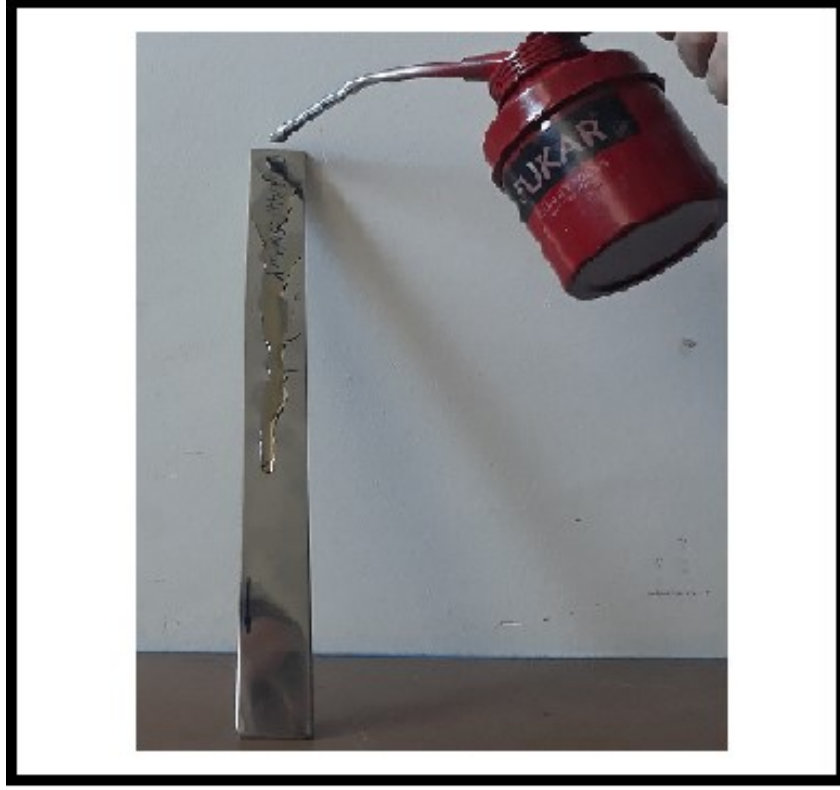
HADDELEME PARAMETRELERİ (C/K/P/E/H/Y)				
Malzeme Cinsi (C)	Belirteç	DM	OM	YM
	Anlamı	Düşük akma mukavemeti (ERD7114)	Orta akma mukavemeti (AISI304)	Yüksek akma mukavemeti (ERD7140)
Malzeme Kalınlığı (K)	Belirteç		1	1.5
	Anlamı		1.0 mm	1.5 mm
Merdane Pürüzlülüğü (P)	Belirteç		4.4	6.8
	Anlamı		4.408 $\mu\text{m}$	6.820 $\mu\text{m}$
Ezme Miktarı (E)	Belirteç		250	500
	Anlamı		250 $\mu\text{m}$	500 $\mu\text{m}$
Merdane Hızı (H)	Belirteç		10	50
	Anlamı		10 d/dk	50 d/dk
Yağlama Durumu (Y)	Belirteç		K	Y
	Anlamı		Kuru	Yağlı

Temper haddeleme ile pürüzlendirme testleri için haddeleme parametrelerine bağlı olarak belirlenen notasyon, Şekil 4.7’de gösterildiği gibi bütün deney numuneleri üzerine işlenmiş ve deneyler gerçekleştirilmiştir. Deney numuneleri üzerine işlenen ok işareti haddeleme yönünü göstermektedir.



Şekil 4.7. Belirlenen notasyonun deney numuneleri üzerine işlenmesi

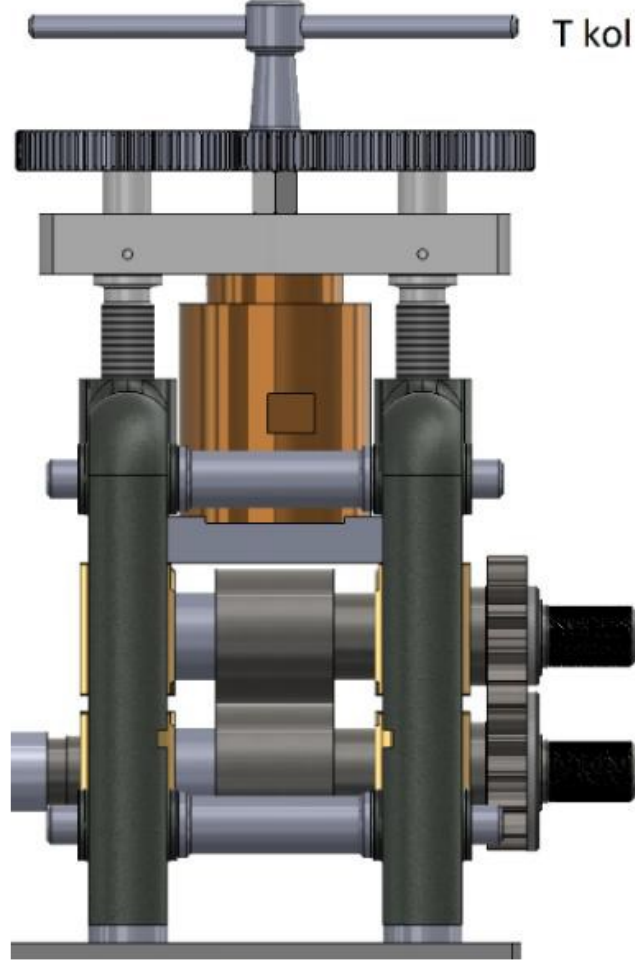
Temper haddeleme ile pürüzlendirme deneylerinde yağlayıcının değişken parametre olarak kullanıldığı şartlarda deney numuneleri, 40 °C’de 1.57 cm<sup>2</sup>/s viskoziteye sahip mineral yağ kullanılarak (Özakın ve Kurgan, 2020), Şekil 4.8’de gösterilen deney numunesinin alt ve üst yüzeyinde yüksek viskoziteye sahip olan yağlayıcı ile film tabakası oluşacak şekilde yağlanmıştır. Temper haddeleme ile pürüzlendirme deneylerinde kuru şartlarda herhangi bir yağlayıcı kullanılmamıştır.



Şekil 4.8. Mineral yağlayıcı ile yapılan yağlama işlemi

#### 4.2.1.3. Ezme Miktarının Ayarlanması

Haddeleme düzeneğinde ezme miktarı ayarı, düzeneğin üzerinde bulunan T kolun manuel olarak döndürülmesi ile sağlanmaktadır. Bu kol, vidalı türden bir mekanizma olup döndürülmesi ile vida üst merdaneyi aşağı-yukarı hareket ettirerek merdaneler arasındaki boşluğun ayarlanmasını sağlamaktadır. Bu şekilde istenen boşluk miktarı ayarlanarak ezme miktarı verilmektedir. Şekil 4.9'da vidalı kol mekanizması şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.9. Ezme miktarının ayarlanması için kullanılan vidalı T-kol mekanizması (Çolak,2018)

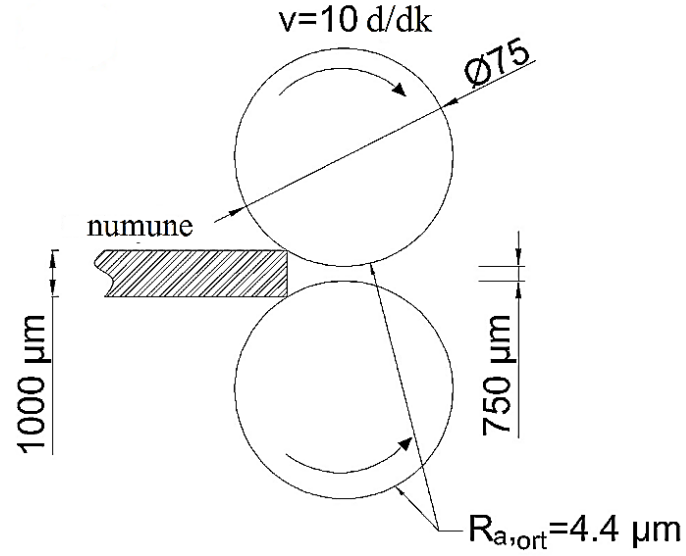
T kolunun döndürülmesi ile gerçekleşen bir turda üst merdane alt merdaneye 0,7 mm yaklaşmaktadır. Yani kolun 1 tur döndürülmesiyle malzemeye 700 µm ezme verilmektedir. Ezme miktarlarının hassas ayarlanabilmesi için % 1 hassasiyete sahip komparatör saati kullanılmıştır. Komparatör saati merdane milinin muylu bölgesine yerleştirilmiş ve T kolunun döndürülmesiyle birlikte istenilen ezme miktarları komparatör saatinden okunarak hassas bir şekilde ayarlanmıştır. Muylu yüzeyindeki pürüzlerin yanlış bir ölçüme sebep olmaması için muylu bölgesi (komparatör saati ibresinin temas ettiği muylu bölgesi) bantla sarılmıştır. Şekil 4.10'da komparatör saati yardımıyla ezme miktarı ayarlama işlemi gösterilmiştir.



Şekil 4.10. Komparatör saati yardımıyla ezme miktarının hassas ayarlanması

Ezme miktarı verilirken ilk olarak T kol yardımıyla üst merdane, hadde merdaneleri arasına sokulan sac malzeme numunesine temas ettirilir ve boşluğu alınmak suretiyle sıfırlama işlemi gerçekleştirilir. Sıfırlama işlemi 100 kg ön yük altında yapılmıştır. Üst merdanenin pozisyonu bu anda hassas komparatör saati ile ölçülerek sıfırlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Merdaneler arası açılarak temas ettirilen malzeme çıkarıldıktan sonra üst merdane tekrar sıfırlama konumuna getirilmiştir. Deneysel parametrelerden olan ezme miktarı, komparatör saati yardımıyla hassas bir şekilde bu konumdan itibaren ayarlanmıştır. Gerçekleştirilen sıfırlama işleminin amacı, malzeme kalınlığının fazla ölçülmesine sebep olabilecek toz, pislik, çapak gibi istenmeyen parçacıkların ezilerek tam yüzey temasını sağlamaktır. Bu sıfırlama işlemi, test numunelerinin tamamına belirtilen şekilde uygulanmıştır.

Deneylerde kullanılan parametrelere ilişkin bir örnek teşkil etmesi açısından, 1 mm kalınlığında sac malzemeye, 4.4  $\mu\text{m}$  pürüzlülüğe sahip merdane ile 250  $\mu\text{m}$  ezme miktarı verilerek 10 d/dk haddeleme hızında ve kuru koşullar altında gerçekleştirilen temper haddeleme ile pürüzlendirmeye ilişkin şematik gösterim Şekil 4.11’de gösterildiği gibidir. Ek-2’de deneylerde kullanılan haddeleme parametreleri ve deney düzeneğinde bulunan yük ölçerden okunan haddeleme kuvvetleri verilmiştir.



Şekil 4.11. Temper haddeme ile pürüzlendirme deneylerinde kullanılan parametrelere ait örnek bir şematik gösterim

#### 4.2.2. Pürüzlülük Ölçümleri

Deneyel çalışmada pürüzlülük ölçümlerinden önce hem malzemelerin hem de merdanelerin yüzeylerinde meydana gelebilecek toz, kir, çapak gibi istenmeyen parçacıkların uzaklaştırılması için gazyağı ile temizlenerek pürüzlülük ölçümlerine hazır hale getirilmiştir.

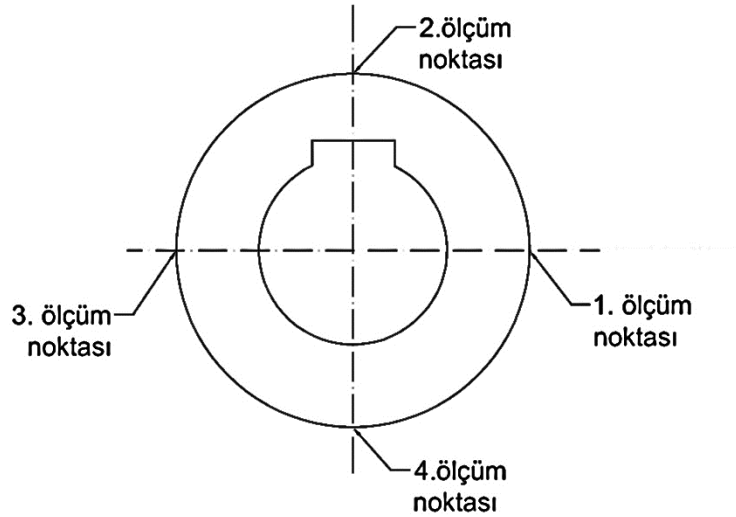
##### 4.2.2.1. Merdane Yüzeylerinin Pürüzlülük Ölçümleri

Hadde merdanelerinin yüzey pürüzlülük ölçümleri, TÜRKAK tarafından akredite edilmiş Karabük Üniversitesi Demir-Çelik Enstitüsü Metroloji Laboratuvarı bünyesinde bulunan Şekil 4.12'de gösterilen Mitutoyo marka SJ-410 model kalibrasyonu yapılmış pürüzlülük ölçme cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Merdane yüzeyinin pürüzlülük ölçümleri, pürüzlendirme deneylerinin öncesinde gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde SEP1940 standardında belirtilen yönergeler izlenmiş ve ölçümlerden elde edilen aritmetik ortalama pürüzlülük ( $R_a$ ) değerleri kullanılmıştır.



Şekil 4.12. Merdane pürüzlülük ölçümlerinde kullanılan pürüzlülük ölçüm cihazı

Merdane pürüzlülük ölçümlerinde Şekil 4.13’de gösterilen merdane yüzeylerinden  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $270^\circ$  açılardan alınan pürüzlülük ölçümlerinin ortalaması belirlenerek her bir merdanenin pürüzlülüğü tayin edilmiştir. Merdane çiftinin pürüzlülüğünü tayin etmek için ise alt ve üst her iki merdanenin bu ortalama pürüzlülük değerlerinin ortalaması alınarak merdane çiftlerinin aritmetik ortalama pürüzlülük ( $R_a$ ) değerleri belirlenmiştir.



Şekil 4.13. Merdane pürüzlülük ölçüm noktalarının şematik görünümü

Deneyisel çalışmalarda iki farklı merdane çifti kullanılmıştır. İki farklı merdane çiftinin yüzeylerinden elde edilen pürüzlülük ölçüm sonuçları Tablo 4.7’de verilmiştir.

Tablo 4.7. Deneysel çalışmalarda kullanılan iki farklı merdane çiftinin pürüzlülük ölçüm sonuçları

Pürüzlü merdane çifti	Konum	90° (R <sub>a</sub> )	180° (R <sub>a</sub> )	270° (R <sub>a</sub> )	360° (R <sub>a</sub> )	Ortalama (R <sub>a</sub> )	Ortalama merdane pürüzlülüğü (R <sub>a</sub> )	
	Alt		4.070	4.848	4.438	4.851	4.552	4.408
Üst		4.172	4.219	4.279	4.383	4.263		
Çok pürüzlü merdane çifti	Konum	90° (R <sub>a</sub> )	180° (R <sub>a</sub> )	270° (R <sub>a</sub> )	360° (R <sub>a</sub> )	Ortalama (R <sub>a</sub> )	Ortalama merdane pürüzlülüğü (R <sub>a</sub> )	
	Alt		9.060	7.048	7.106	7.590	7.701	6.820
	Üst		5.182	5.640	7.461	5.474	5.939	

#### 4.2.2.2. Malzeme Yüzeylerinin Pürüzlülük Ölçümleri

Temper haddeleme ile pürüzlendirme öncesi ve sonrasında malzemelerin yüzey pürüzlülüklerinin ölçümleri, Şekil 4.14’de gösterilmiş olan PCE marka RT-2000 model yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Pürüzlülük ölçümlerinin öncesinde cihazın pürüzlülük ölçen probunun kalibrasyon bloğu yardımıyla kalibrasyon işlemi gerçekleştirilmiş ve SEP1940 standardında belirtilen yönergeler izlenerek ölçümlerden elde edilen aritmetik ortalama profil pürüzlülük (R<sub>a</sub>) değerleri kullanılmıştır.



Şekil 4.14. Malzeme pürüzlülük ölçümlerinde kullanılan pürüzlülük ölçüm cihazı

Temper haddeleme işlemi ile pürüzlendirme öncesi ve sonrasında sac malzeme yüzeylerine transfer edilen yüzey pürüzlülük ölçümlerinde deney numunelerinin alt ve üst kısımlarından yüzeyin başı, ortası ve sonundan olmak üzere haddeleme

doğrultusunda alınan yüzey pürüzlülük ölçümlerinin ortalaması alınarak deney numunelerinin aritmetik ortalama pürüzlülük ( $R_a$ ) değerleri belirlenmiştir. Örnek olarak; DM/1.5/4.4/250/10/K koşullarında yani 1.5 mm kalınlıkta ERD7114 kalite sac malzemenin 4.4  $\mu$ m pürüzlü merdane ile 10 d/dk haddeleme hızı ve kuru şartlar altında temper haddeleme ile pürüzlendirilmesi sonrasında malzeme yüzeyinden elde edilen pürüzlülük ölçüm sonuçları Tablo 4.8’de verilmiştir. Ayrıca Ek-3’te tez çalışmasında yapılan deneyler sonrasında yüzeylerden alınan pürüzlülük ölçümlerinin ortalamaları verilmiştir.

Tablo 4.8. DM/1.5/4.4/250/10/K koşullarında temper haddeleme ile pürüzlendirilen malzemenin yüzey pürüzlülük ölçüm sonuçları

	Konum	1	2	3	Ortalama
DM/1.5/4.4/250/10/K	Alt	1.582	1.715	1.764	1.572
	Üst	1.466	1.563	1.342	

#### 4.2.2.3. Pürüzlülük Transfer Oranının Hesaplanması

Pürüzlülük transfer oranı (t), aşağıda verilen denklem yardımıyla hesaplanmıştır (Kijima, 2014). Denklemde  $R_{a_e}$ ; sac malzemenin temper haddeleme ile pürüzlendirme işlemi sonrasında yüzeyden alınan aritmetik ortalama pürüzlülük değerini,  $R_{a_f}$ ; sac malzemenin temper haddeleme ile pürüzlendirme işlemi öncesinde yüzeyden alınan aritmetik ortalama pürüzlülük değerini ve  $R_{a_m}$ ; merdanenin aritmetik ortalama pürüzlülük değerini gösterir.

$$t (\%) = \frac{R_{a_e} - R_{a_f}}{R_{a_m} - R_{a_f}} \times 100 \quad (4.1)$$

#### 4.2.2.4. 3D Pürüzlülük Ölçümleri

Temper haddeleme işlemi ile pürüzlendirilen malzeme yüzeylerinde dağılım gösteren pürüzlülük profilinin daha detaylı incelenmesi ve değerlendirilmesi amacıyla 3D alan tarama görüntüleri alınmış ve pürüzlülük ölçümleri gerçekleştirilmiştir. 3D alan tarama görüntüleri ve pürüzlülük ölçümleri, Erzurum Teknik Üniversitesi Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi bünyesinde bulunan Bruker marka Contour GT-K model optik profilometre cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.15’de temper haddeleme işlemi ile pürüzlendirilen yüzeylerin daha hassas olarak değerlendirilmesi için kullanılan 3D pürüzlülük ölçüm cihazı görülmektedir.



Şekil 4.15. 3D pürüzlülük ölçüm cihazı

Pürüzlendirilen sac malzeme numuneleri, yüzey pürüzlülük profilini tam olarak yansıtılabilmeleri için numunelerin orta bölgesinden 30 mm × 30 mm ölçülerinde kesilmiş ve bu yüzeylerden ölçümler alınmıştır. 3D alan tarama görüntüleri 0.95×1.25 mm<sup>2</sup> yüzey alanı üzerinden yüksek hassasiyette görüntülenmiştir. Ölçümler beşer defa tekrarlanmıştır. Bu beş ölçümün ortalamasına en yakın aritmetik ortalama pürüzlülük ( $R_a$ ) değerine sahip olan ve pürüzlendirilen malzeme yüzeylerinden elde edilen 2D pürüzlülük ölçümlerinin sonuçları ile uyum içerisinde olan görüntüler sunulmuştur. Aynı zamanda yüzeylerin 3D pürüzlülük parametreleri de cihazın özel yazılımı olan Vision-Software yardımıyla belirlenmiştir. Temper haddeleme ile pürüzlendirilmiş olan yüzeylerden alınan pürüzlülük profilinin homojen dağılım sergileyip sergilemediği yine Vision-Software programında gerçekleştirilen analizler ile elde edilen malzeme oranı eğrilerini (MRC) çizmek için kullanılan pürüzlülük parametrelerinin ( $S_k$ ,  $S_{pk}$ ,  $S_{vk}$ ,  $M_{r1}$ ,  $M_{r2}$ ,  $A_1$  ve  $A_2$ ) elde edilmesini takiben malzeme oranı eğrileri yardımıyla değerlendirilmiştir.

### **4.2.3. Mikrosertlik ve Mikroyapı Karakterizasyonu**

#### **4.2.3.1. Numune Hazırlama**

1.5 mm kalınlıkta sac malzemeye, 10 d/dk haddeleme hızında, 4.4 µm aritmetik ortalama pürüzlülüğe ( $R_a$ ) sahip pürüzlü merdane kullanılarak kuru şartlarda gerçekleştirilen temper haddeleme ile pürüzlendirme sonrasında, malzemenin kalınlık kesiti boyunca mikrosertlik ve mikroyapı değişimini incelemek için haddeleme öncesi, 250 µm ve 500 µm ezme miktarlarında temper haddeleme ile pürüzlendirilen sac malzeme numuneleri 10 mm × 10 mm ölçülerinde kesilmiştir. Numunelerin kesilmesinde Ondokuz Mayıs Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği

Bölümü Laboratuvarında bulunan Şekil 4.16’da gösterilen Metkon marka Metacut-M250 model metal kesme cihazı kullanılmıştır. Kesme diski ile numunelerin kesilmesi sırasında içyapının ısıdan etkilenmemesi için kesim bölgesi soğutma sıvısı ile kesim süresi boyunca soğutulmuştur.



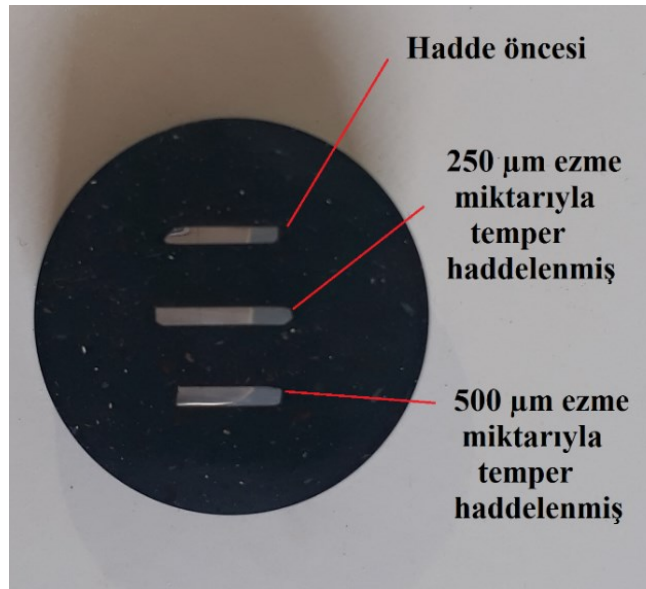
Şekil 4.16. Malzemelerin kesilmesinde kullanılan metal kesme cihazı

Kesilen sac malzeme numuneleri sıcak kalıplama yöntemiyle kalıplanma işlemine tabi tutulmuştur. Siyah renkli bakalit tozu kullanılarak Şekil 4.17’de gösterilen Ondokuz Mayıs Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Laboratuvarında bulunan Metkon marka Metapress-A model metalografik kalıplama presi yardımıyla numuneler kalıplanmıştır. Numunelerin bakalite alma işlemi 5 dakika süreyle 180 °C sıcaklık uygulanarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.17. Malzemelerin kalıplanmasında metalografik kalıplama presi

Temper haddeleme ile pürüzlendirme sonrasında kesme ve ardından kalıplanan mikrosertlik ve mikroyapı değişimini incelemek amacıyla hazırlanan sac malzeme numuneleri Şekil 4.18’de gösterilmiştir.



Şekil 4.18. Mikrosertlik ve mikroyapı karakterizasyonu amacıyla hazırlanan sac malzeme numuneleri

Numunelerin kalıplama işlemi tamamlandıktan sonra mikrosertlik ölçümleri ve mikroyapı görüntüleri alınmadan önce zımparalama ve parlatma işlemlerine tabi

tutulmuştur. Zımparalama ve parlatma işlemleri, Şekil 4.19’da gösterilen Brightway marka MT-2 model zımparalama ve parlatma cihazında gerçekleştirilmiştir. Zımparalama işleminde döner disk üzerine yerleştirilen SiC aşındırıcı tanelere sahip zımpara kâğıtları kullanılmıştır. Numuneler sırasıyla 1000, 1200 ve 2400 numaralı zımpara kâğıtları ile 15’er dakika süreyle numunelerin üzerindeki çizikler ve deformasyonlar ortadan kaldırılıncaya kadar zımparalandı. Numunelerin aşırı ısınmalarını önlemek adına zımparalama işlemi sulu ortamda gerçekleştirilmiştir.



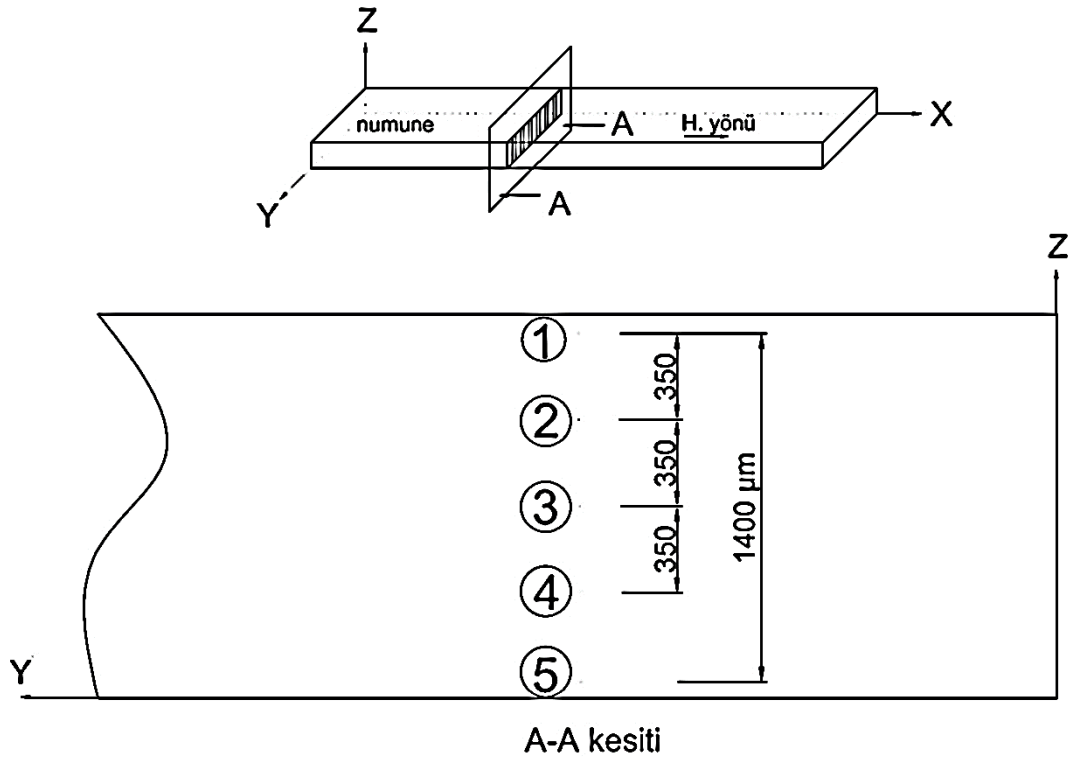
Şekil 4.19. Numunelerin hazırlanmasında kullanılan zımparalama ve parlatma cihazı

Zımparalama işlemi sonrasında parlatma işlemleri, Şekil 4.19’da gösterilen zımparalama ve parlatma cihazında döner disk üzerine yerleştirilen çuha üzerine elmas solüsyon sürülerek gerçekleştirilmiştir. Parlatma işleminde numuneler diskin dönme yönüne ters yönlü hareket ettirilerek yüzeyin homojen bir şekilde parlaması sağlanmıştır. Parlatma işleminin tamamlanmasını takiben numuneler su ve alkol ile yıkanmış ve sonrasında ılık havada kurutulmuştur.

#### 4.2.3.2. Mikrosertlik Ölçümleri

Vickers mikrosertlik testi; numunenin, kare tabanlı 136° açığa sahip dik piramit şeklinde bir elmas uç ile iz haline getirilmesinden oluşur. Vickers sertlik ölçümünde genelde 0.05 gf - 200 gf aralığında yük, 10 ile 15 saniye süreyle uygulanır. Yükün kaldırılmasından sonra malzeme yüzeyinde kalan izin iki köşegeni bir mikroskop ile ölçülür ve ölçümlerin ortalaması hesaplanır. Vickers sertliği, uygulanan yükün iz alanına bölünmesi ile elde edilen değerdir (Shi vd., 2017; Gordon England, 2020).

Haddeleme işlemi öncesi, 250  $\mu\text{m}$  ve 500  $\mu\text{m}$  ezme miktarlarında temper haddeleme ile pürüzlendirme işlemi sonrasında malzemenin kalınlık kesiti boyunca mikrosertlik değişimini incelemek için kalıplanan, zımparalanan ve ardından parlatılan deney numunelerinin kalınlık kesiti ve kalınlık kesiti boyunca mikrosertlik ölçümü alınan noktalar Şekil 4.20’de gösterilmiştir.



Şekil 4.20. Deney numunelerinin A-A kalınlık kesiti ve A-A kesiti boyunca mikrosertlik ölçümü alınan noktalar

Vickers mikrosertlik ölçümleri, Samsun Metal Metroloji ve Kalibrasyon Laboratuvarı bünyesinde bulunan Şekil 4.21’de gösterilen Struers Duramin-50 test cihazı kullanılarak 50 gr yükün 10 sn süreyle uygulanması sonucunda tayin edildi. Şekil 4.20’de gösterilen noktalar cihaza tanıtıldıktan sonra uygulanan yükün kaldırılması sonrasında numune üzerinde oluşan izin köşegen uzunluklarını test cihazı otomatik olarak ölçerek Vickers sertlik değerini ( $HV_{0.05}$ ) ekranda göstermiştir.



Şekil 4.21. Vickers mikrosertlik ölçüm cihazı

#### 4.2.3.3. Mikroyapı Görüntüleme

Taramalı elektron mikroskobu (scanning electron microscope, SEM), odaklanmış elektron demeti kullanılarak numune yüzeyini tarayıp görüntü elde eden bir elektron mikroskobudur. Elektronlar numunedeki atomlarla etkileşip numunenin yüzey topografyası ve kompozisyonu hakkında bilgiler içeren sinyaller üretir. Elektron demeti yüzeyi tarar ve elektron demetinin konumu algılanan sinyalle eşleşerek görüntü oluşturulur. Taramalı elektron mikroskobu yardımıyla 1 nm gibi boyutlar hassas bir çözünürlükte görüntülenebilmektedir (Şenel, 2018).

Temper haddelene ile pürüzlendirme işleminde malzemenin kalınlık kesiti boyunca mikroyapı davranışını incelemek için haddelene öncesi, 250 µm ve 500 µm ezme miktarlarında temper haddelenen numuneler, Vickers mikrosertlik incelemelerinden sonra tekrar 1000, 1200 ve 2400 grid zımpara kağıtları ile zımparalandı ve ardından elmas solüsyon ile parlatıldı.

Ardından düşük karbon içeriğine sahip olan ERD7114 ve ERD7140 malzeme numuneleri % 2 nital çözeltisinde tane yapıları gözlemleninceye kadar kısa süreli dağlama işlemine tabi tutuldu. AISI304 malzeme numuneleri ise ASTM E407 standardında 87 numaralı Glysergia (15 cc HCl + 10 cc Gliserol + 5 cc HNO<sub>3</sub>) çözeltisinde tane yapıları gözlemleninceye kadar kısa süreli olarak dağlandı (Vander Voort vd., 2004; Salman ve Gülsoy, 2004; ASTM E407, 2007).

Mikroyapı görüntüleri ise Karadeniz İleri Araştırma ve Uygulama Merkezi bünyesinde bulunan Şekil 4.22’de gösterilen 20 kV’de çalıştırılan Jeol JSM-7001F alan emisyonu taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile elde edildi.



Şekil 4.22. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

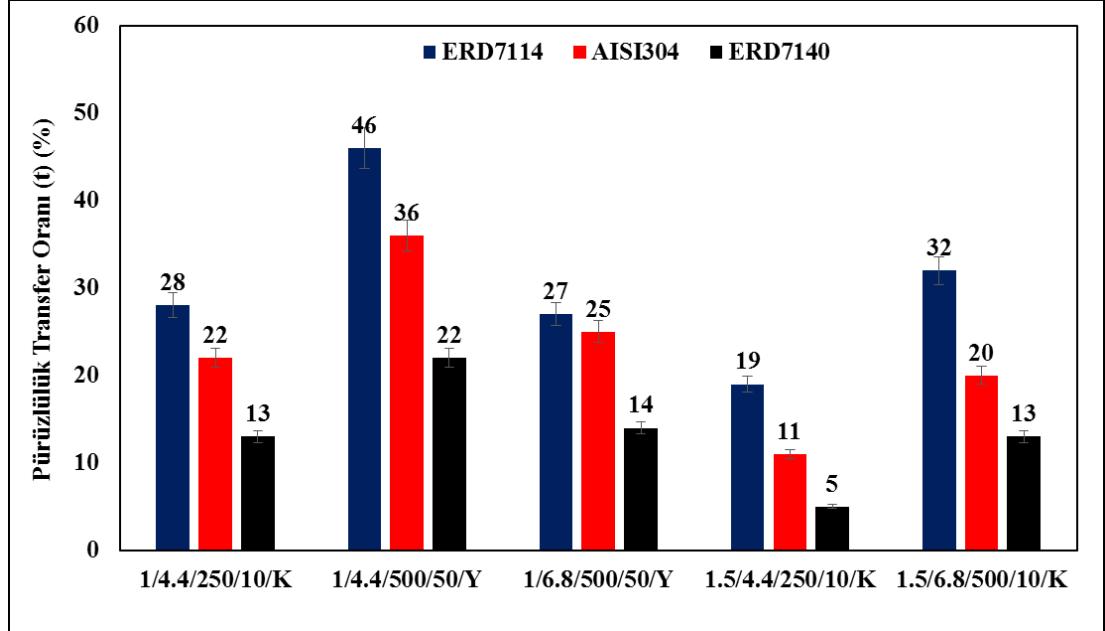
## 5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, temper haddelemede mekanik özellik ile pürüzlendirme ilişkisini açıklığa kavuşturmak için pürüzlülük ölçümlerinden elde edilen bulgular, 3D alan tarama görüntüleri ve pürüzlülük dağılımını değerlendirmede kullanılan malzeme oranı eğrilerinden (MRC) elde edilen bulgular verilmiştir. Ayrıca temper haddeleme ile pürüzlendirme sürecinde malzemenin kalınlık kesiti boyunca mikrosertlik davranışı ve mikroyapı görüntüleri de karşılaştırılmıştır.

### 5.1. Pürüzlülük Ölçümlerinden Elde Edilen Bulgular

#### 5.1.1. Malzemelerin Akma Mukavemetinin Pürüzlendirme ile İlişkisi

Üç farklı mekanik özellik sergileyen sac malzemelere farklı haddeleme parametreleri kullanılarak yapılan temper haddeleme ile pürüzlendirme işlemi sonrasında malzeme numunelerinin yüzeylerinden pürüzlülük ölçümleri gerçekleştirilmiş ve pürüzlülük transfer oranları (t) hesaplanmıştır. Şekil 5.1’de pürüzlülük transfer oranıyla deneysel notasyona ait ilişkiyi gösteren akma mukavemeti ile pürüzlendirme ilişkisinin grafiği verilmiştir.

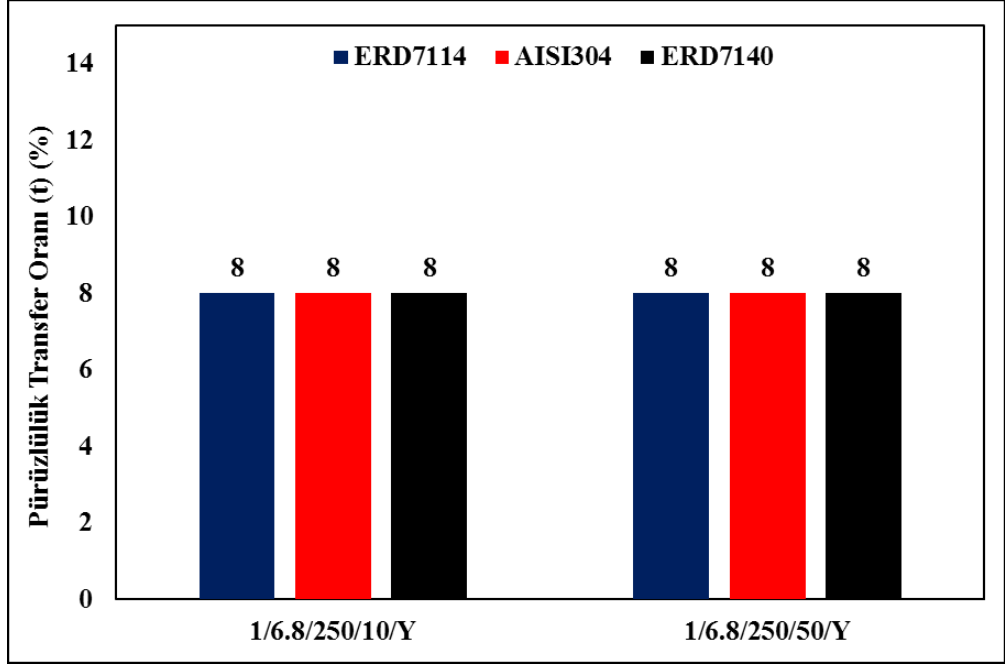


Şekil 5.1. Akma mukavemeti ile pürüzlendirme ilişkisi

Bu çalışmada yapılan 24 farklı deneysel koşulun 22’sinde ve bu koşullardan grafikte gösterilen deneylerin (1/4.4/250/10/K, 1/4.4/500/50/Y, 1/6.8/500/50/Y, 1.5/4.4/250/10/K, 1.5/6.8/500/10/K) tümünde düşük akma mukavemetine sahip malzemenin (ERD7114) en yüksek oranda pürüzlendiği gözlemlenmiştir. Bu durumu

orta akma mukavemetine sahip malzeme (AISI304) takip etmektedir. Yine yüksek akma mukavemetine sahip malzemenin (ERD7140) en düşük oranda pürüzlendiği gözlemlenmiştir. Düşük kalınlığa sahip malzemelere (1 mm) yapılan pürüzlendirme testlerinde, düşük akma mukavemetli (ERD7114) malzemenin yüksek akma mukavemetli malzemeye göre yaklaşık 2 kat pürüzlendiği bulgusuna ulaşılmıştır. Bununla birlikte kalınlığı fazla olan malzemelere (1.5 mm) yapılan pürüzlendirme testlerinde, düşük akma mukavemetli (ERD7114) malzemenin yüksek akma mukavemetli malzemeye göre 2 katından daha fazla pürüzlendiği bulgusuna ulaşılmıştır. Bu durumun oluşmasında, 1 mm kalınlığında malzemenin 1.5 mm kalınlığa sahip malzemeye göre daha fazla deformasyon sertleşmesine maruz kalmasının etkili olduğu tahmin edilmektedir.

Temper haddeleme ile pürüzlendirme testlerinde, malzemenin artan akma mukavemeti ile pürüzlülük transfer oranının (t) azaldığı bulgusuna yapılan iki deneysel koşulda (1/6.8/250/10/Y, 1/6.8/250/50/Y) rastlanılmamıştır. Şekil 5.2’de bu duruma ait pürüzlülük transfer oranı ile deneysel notasyon arasındaki bağlantıyı gösteren akma mukavemeti ile pürüzlendirme ilişkisinin grafiği verilmiştir. Her üç malzemenin de benzer oranlarda pürüzlendiği görülmektedir. Bu durumun oluşmasının nedeninin düşük ezme miktarı dolayısıyla yüksek pürüzlülüğe sahip merdanenin pürüzlülük profilinin tam olarak malzemeye sirayet edememesi ve yağlayıcının ara yüzeyde film tabaka oluşturarak yine benzer etki oluşturmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

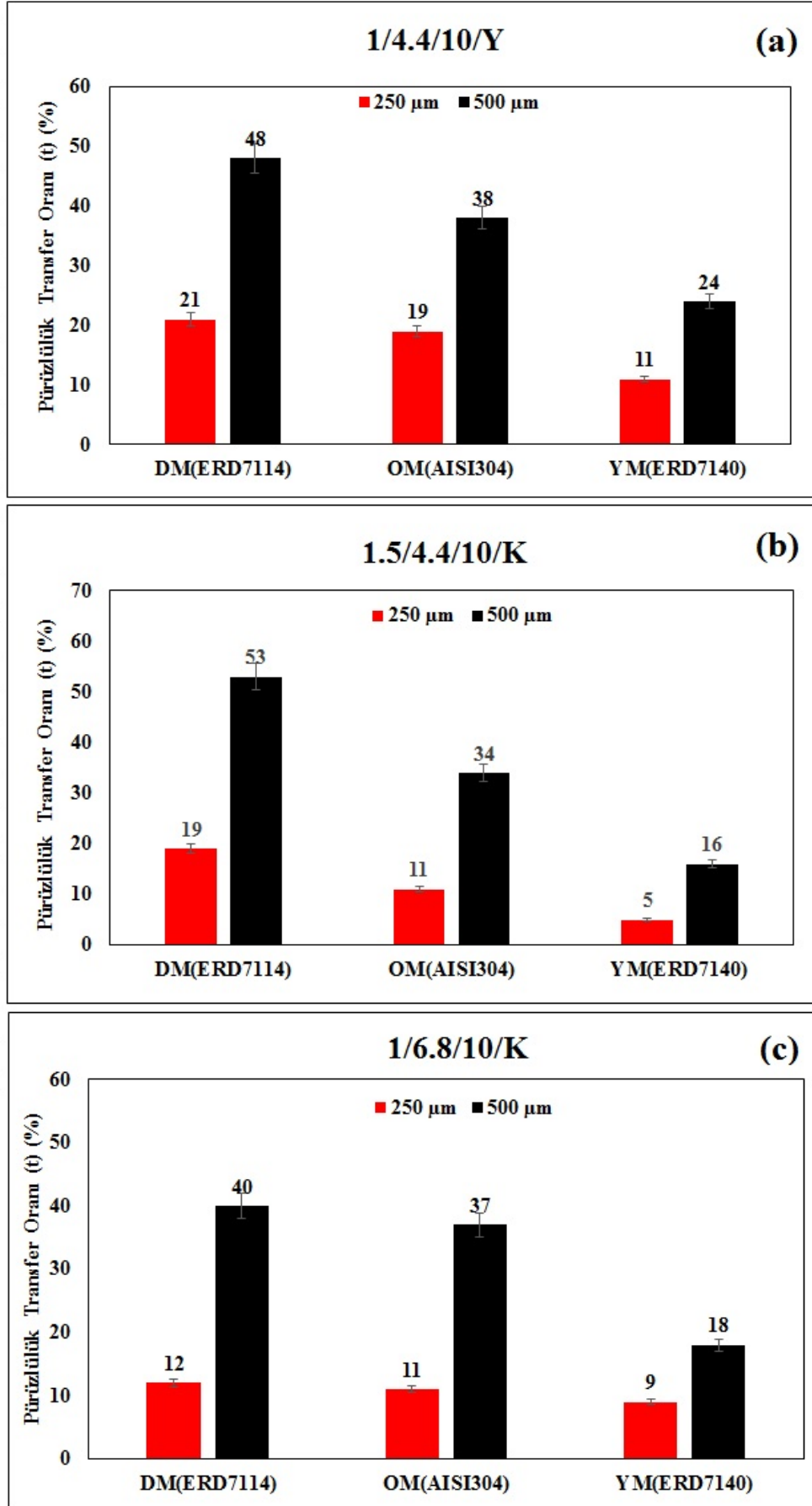


Şekil 5.2. Akma mukavemeti ile pürüzlendirme ilişkisi

Üç farklı akma mukavemetine sahip sac malzemeye gerçekleştirilen temper haddelemede pürüzlendirme testlerinin neredeyse tamamına yakın bir bölümünde malzemenin artan akma mukavemeti ile pürüzlülük transfer oranının (t) azaldığı bulgusuyla karşılaşılmıştır. Köhler vd. (2016), HSD (yüksek mangan kalite) çeliklerinin belirli bir haddeleme kuvvetindeki pürüzlülük transferinin artan akma mukavemeti ile azaldığını göstermişlerdir. Bu çalışmada pürüzlendirme testleri ile elde edilen bulgular, Köhler vd. (2016) tarafından elde edilen bu sonucu destekler niteliktedir.

### 5.1.2. Ezme Miktarı-Mekanik Özellik İlişkisi

Ezme miktarı-mekanik özellik ilişkisini belirlemek üzere üç farklı mekanik özellik sergileyen sac malzemelere farklı haddeleme parametreleri kullanılarak yapılan temper haddeleme ile pürüzlendirme işlemi sonrasında malzeme numunelerinin yüzeylerinden pürüzlülük ölçümleri gerçekleştirilmiş ve pürüzlülük transfer oranları (t) hesaplanmıştır. Şekil 5.3'de pürüzlülük transfer oranı ile ezme miktarı-mekanik özellik ilişkisinin grafiği verilmiştir.



Şekil 5.3. Ezme miktarı-mekanik özellik ilişkisi

Üç farklı mekanik özelliğe sahip 1 mm kalınlığındaki sac malzemelere, 4.4 µm pürüzlülükte merdane kullanılarak, 10 d/dk haddeleme hızında, yağlayıcı kullanılan koşullarda (1/4.4/10/Y) ve farklı ezme miktarlarıyla yapılan temper haddeleme ile pürüzlendirme işleminde, pürüzlülük transfer oranı ile ezme miktarı-mekanik özellik ilişkisinin grafiği Şekil 5.3 (a)'da gösterilmiştir.

Üç farklı mekanik özelliğe sahip 1.5 mm kalınlığındaki sac malzemelere, 4.4 µm pürüzlülükte merdane kullanılarak, 10 d/dk haddeleme hızında, kuru koşullarda (1.5/4.4/10/K) ve farklı ezme miktarlarıyla yapılan temper haddeleme ile pürüzlendirme işleminde, pürüzlülük transfer oranı ile ezme miktarı-mekanik özellik ilişkisinin grafiği Şekil 5.3 (b)'de sunulmuştur.

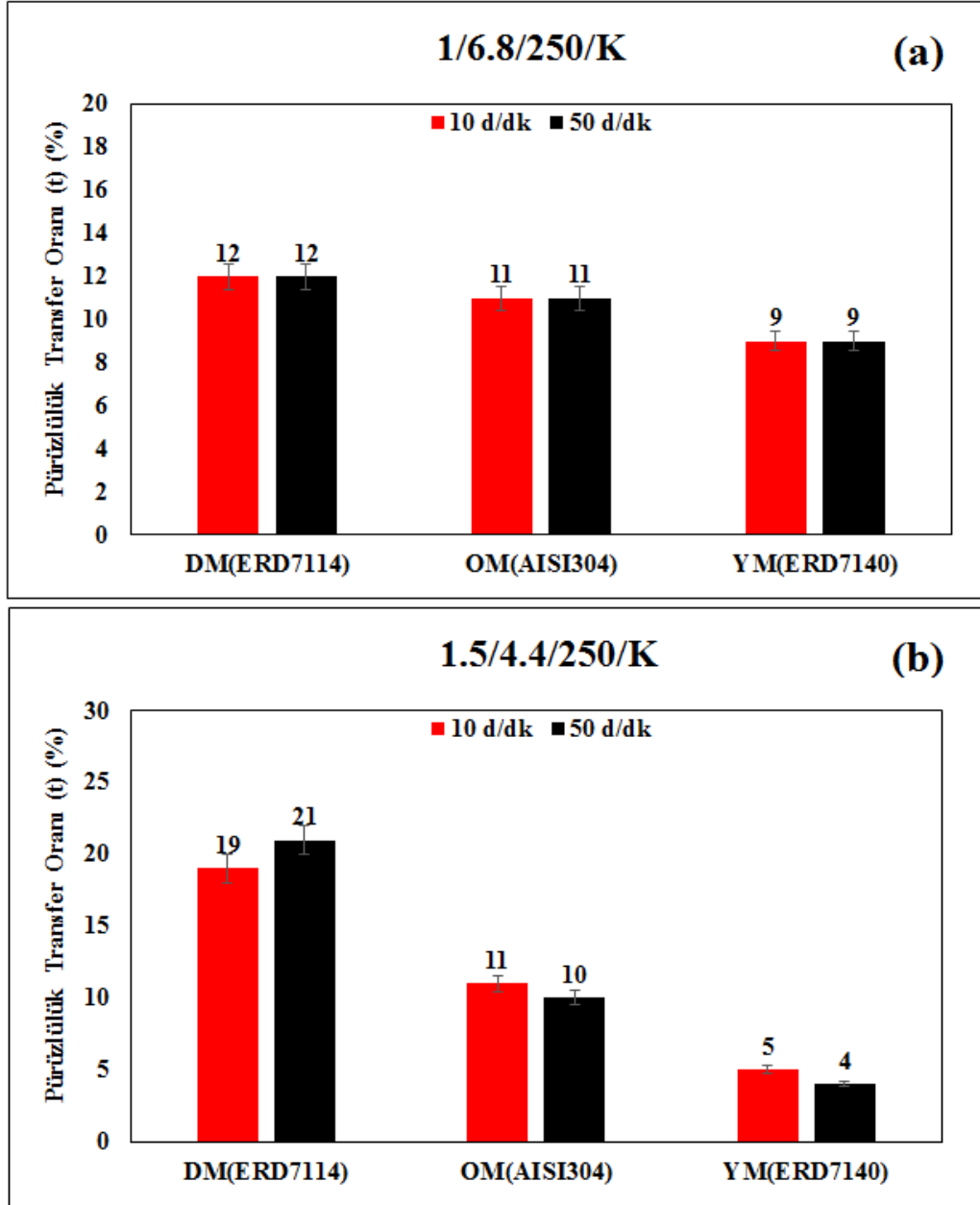
Üç farklı mekanik özelliğe sahip 1 mm kalınlığındaki sac malzemelere, 6.8 µm pürüzlülükte merdane kullanılarak, 10 d/dk haddeleme hızında, kuru koşullarda (1/6.8/10/K) ve farklı ezme miktarlarıyla yapılan temper haddeleme ile pürüzlendirme işleminde, pürüzlülük transfer oranı ile ezme miktarı-mekanik özellik ilişkisinin grafiği ise Şekil 5.3 (c)'de verilmiştir.

Şekil 5.3'de gösterilen bütün durumlarda ezme miktarı arttıkça malzemenin mekanik özelliği fark etmeksizin pürüzlülük transfer oranının arttığı görülmektedir. Ezme oranındaki artışın iki katına çıkmasıyla (250 µm'den 500 µm'ye) birlikte her üç malzeme de yaklaşık olarak 2 ile 3 katı kadar pürüzlülük transfer oranında bir artış gerçekleştiği görülmektedir. Wu vd. (2019), sac veya şerit malzeme yüzeyine daha büyük bir ezme miktarı kullanılarak yapılan pürüzlülük transferinde daha yüksek bir pürüzlülük transfer oranı elde edildiğini tespit etmişlerdir. Dolayısıyla elde edilen sonuçlar, ezme miktarındaki artışın pürüzlülük transferini artırdığı yönündeki bulguları doğrulamaktadır. Bununla beraber malzemelerin mekanik özelliğindeki farklılıklar, ezme miktarındaki artış ile birlikte pürüzlülük transfer oranında önemli düzeyde farklılık oluşturmamıştır.

### **5.1.3. Haddeleme Hızı-Mekanik Özellik İlişkisi**

Haddeleme hızı-mekanik özellik ilişkisini belirlemek üzere üç farklı mekanik özellik sergileyen sac malzemelere farklı haddeleme parametreleri kullanılarak yapılan temper haddeleme ile pürüzlendirme işlemi sonrasında malzeme numunelerinin yüzeylerinden pürüzlülük ölçümleri gerçekleştirilmiş ve pürüzlülük transfer oranları (t) hesaplanmıştır. Şekil 5.4'de pürüzlülük transfer oranı ile

haddelenme hızı-mekanik özellik ilişkisinin grafiği verilmiştir.



Şekil 5.4. Düşük ezme miktarlarında yapılan temper haddelenme ile pürüzlülük transferinde haddelenme hızı-mekanik özellik ilişkisi

Üç farklı mekanik özelliğe sahip 1 mm kalınlığındaki sac malzemelere, 6.8 µm pürüzlülükte merdane kullanılarak, 250 µm ezme miktarıyla, kuru şartlarda (1/6.8/250/K) ve farklı haddelenme hızlarıyla yapılan temper haddelenme ile pürüzlendirme işleminde, pürüzlülük transfer oranı ile haddelenme hızı-mekanik özellik ilişkisinin grafiği Şekil 5.4 (a)'da gösterilmiştir.

Üç farklı mekanik özelliğe sahip 1.5 mm kalınlığındaki sac malzemelere, 4.4 µm pürüzlülükte merdane kullanılarak, 250 µm ezme miktarıyla, kuru şartlarda

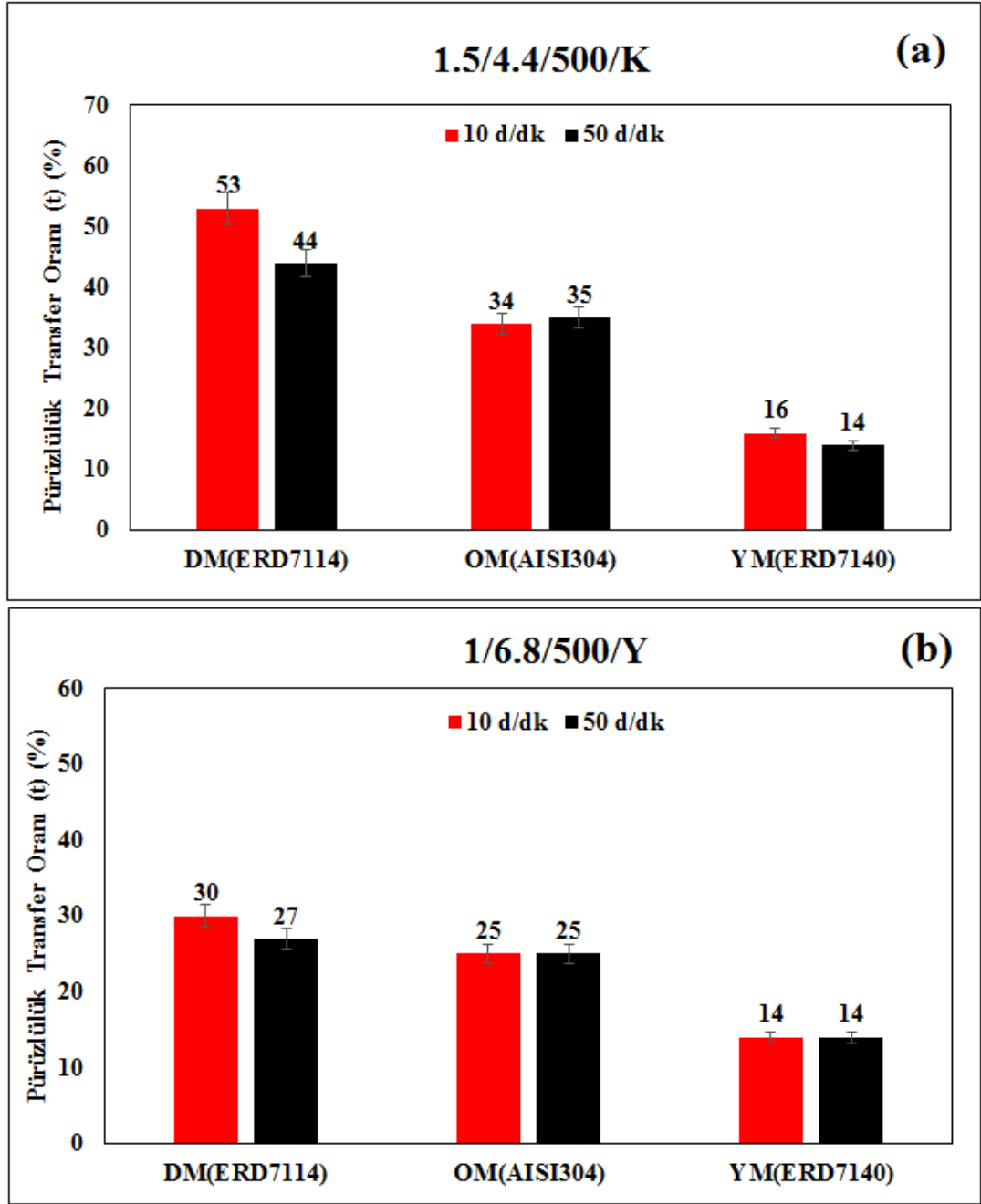
(1.5/4.4/250/K) ve farklı haddeleme hızlarıyla yapılan temper haddeleme ile pürüzlendirme işleminde, pürüzlülük transfer oranı ile haddeleme hızı-mekanik özellik ilişkisinin grafiği ise Şekil 5.4 (b)'de sunulmuştur.

Şekil 5.4'de gösterilen düşük ezme miktarlarında (250  $\mu\text{m}$ ) yapılan temper haddeleme ile pürüzlülük transferinde, haddeleme hızının artırılmasıyla (10 d/dk'dan 50 d/dk'ya) birlikte çok küçük oranlarda artma ve azalmalar gözlenmesine rağmen her üç sac malzemeye de birbirine yakın değerlerde pürüzlülük transfer oranı sağlandığı belirlenmiştir. Mekicha vd. (2020), haddeleme hızının pürüzlülük transferine etkisinin çok az miktarda olduğu sonucuna varmaları bu bulguyu doğrulamaktadır.

Üç farklı mekanik özelliğe sahip 1.5 mm kalınlığındaki sac malzemelere, 4.4  $\mu\text{m}$  pürüzlülükte merdane kullanılarak, 500  $\mu\text{m}$  ezme miktarıyla, kuru şartlarda (1.5/4.4/500/K) ve farklı haddeleme hızlarıyla yapılan temper haddeleme ile pürüzlendirme işleminde, pürüzlülük transfer oranı ile haddeleme hızı-mekanik özellik ilişkisinin grafiği Şekil 5.5 (a)'da gösterilmiştir.

Üç farklı mekanik özelliğe sahip 1 mm kalınlığındaki sac malzemelere, 6.8  $\mu\text{m}$  pürüzlülükte merdane kullanılarak, 500  $\mu\text{m}$  ezme miktarıyla, yağlayıcı kullanılan şartlarda (1/6.8/500/Y) ve farklı haddeleme hızlarıyla yapılan temper haddeleme ile pürüzlendirme işleminde, pürüzlülük transfer oranı ile haddeleme hızı-mekanik özellik ilişkisinin grafiği ise Şekil 5.5 (b)'de verilmiştir.

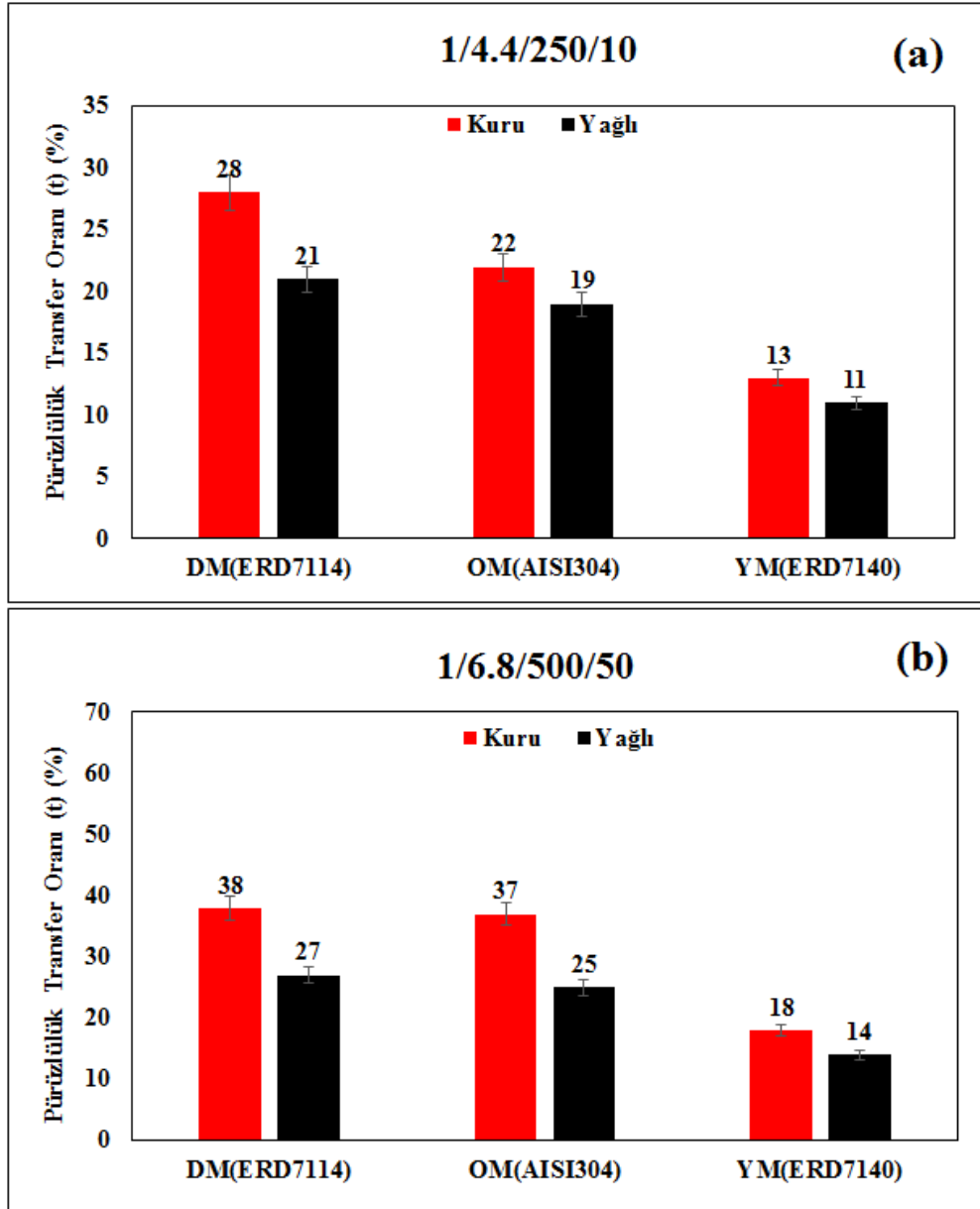
Şekil 5.5'de gösterilen yüksek ezme miktarlarında (500  $\mu\text{m}$ ) yapılan temper haddeleme ile pürüzlülük transferinde, haddeleme hızı artırılmasıyla (10 d/dk'dan 50 d/dk'ya) birlikte ERD7114 kalite sac malzemede pürüzlülük transfer oranının azaldığı, AISI304 ve ERD7140 kalite sac malzemelerde ise her iki hızda da birbirine yakın değerlerde pürüzlülük transfer oranının sağlandığı gözlemlenmiştir. Bu durumun, ERD7114 kalite sac malzemenin 500  $\mu\text{m}$  ezme miktarında AISI304 ve ERD7140 kalite sac malzemelere göre daha fazla deformasyon sertleşmesine maruz kalması ve haddeleme hızı arttıkça merdane pürüzlülük profilinin yüksek haddeleme hızlarında kaymanın artışından ötürü malzeme yüzeyine daha az sirayet etmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Ancak akma mukavemeti daha fazla olan AISI304 ve ERD7140 kalite sac malzemelerde ise ERD7114 kalite sac malzemeye göre daha az deformasyon sertleşmesi ile sonuçlanmasından dolayı haddeleme hızındaki artışın yüzey pürüzlülüğüne etkisinin çok fazla olmadığı tahmin edilmektedir.



Şekil 5.5. Yüksek ezme miktarlarında yapılan temper haddeleme ile pürüzlülük transferinde haddeleme hızı-mekanik özellik ilişkisi

#### 5.1.4. Yağlama Koşulu-Mekanik Özellik İlişkisi

Yağlama koşulu-mekanik özellik ilişkisini belirlemek üzere üç farklı mekanik özellik sergileyen sac malzemelere farklı haddeleme parametreleri kullanılarak yapılan temper haddeleme ile pürüzlendirme işlemi sonrasında malzeme numunelerinin yüzeylerinden pürüzlülük ölçümleri gerçekleştirilmiş ve pürüzlülük transfer oranları (t) hesaplanmıştır. Şekil 5.6'da pürüzlülük transfer oranı ile yağlama koşulu-mekanik özellik ilişkisinin grafiği verilmiştir.



Şekil 5.6. Yağlama koşulunun mekanik özellik ile ilişkisi

Üç farklı mekanik özelliğe sahip 1 mm kalınlığındaki sac malzemelere, 4.4  $\mu\text{m}$  pürüzlülükte merdane kullanılarak, 250  $\mu\text{m}$  ezme miktarında, 10 d/dk haddeleme hızında (1/4.4/250/10), kuru ve yağlayıcı kullanılan koşullarda yapılan temper haddeleme ile pürüzlendirme işleminde, pürüzlülük transfer oranı ile yağlama koşulu-mekanik özellik ilişkisinin grafiği Şekil 5.6 (a)'da gösterilmiştir.

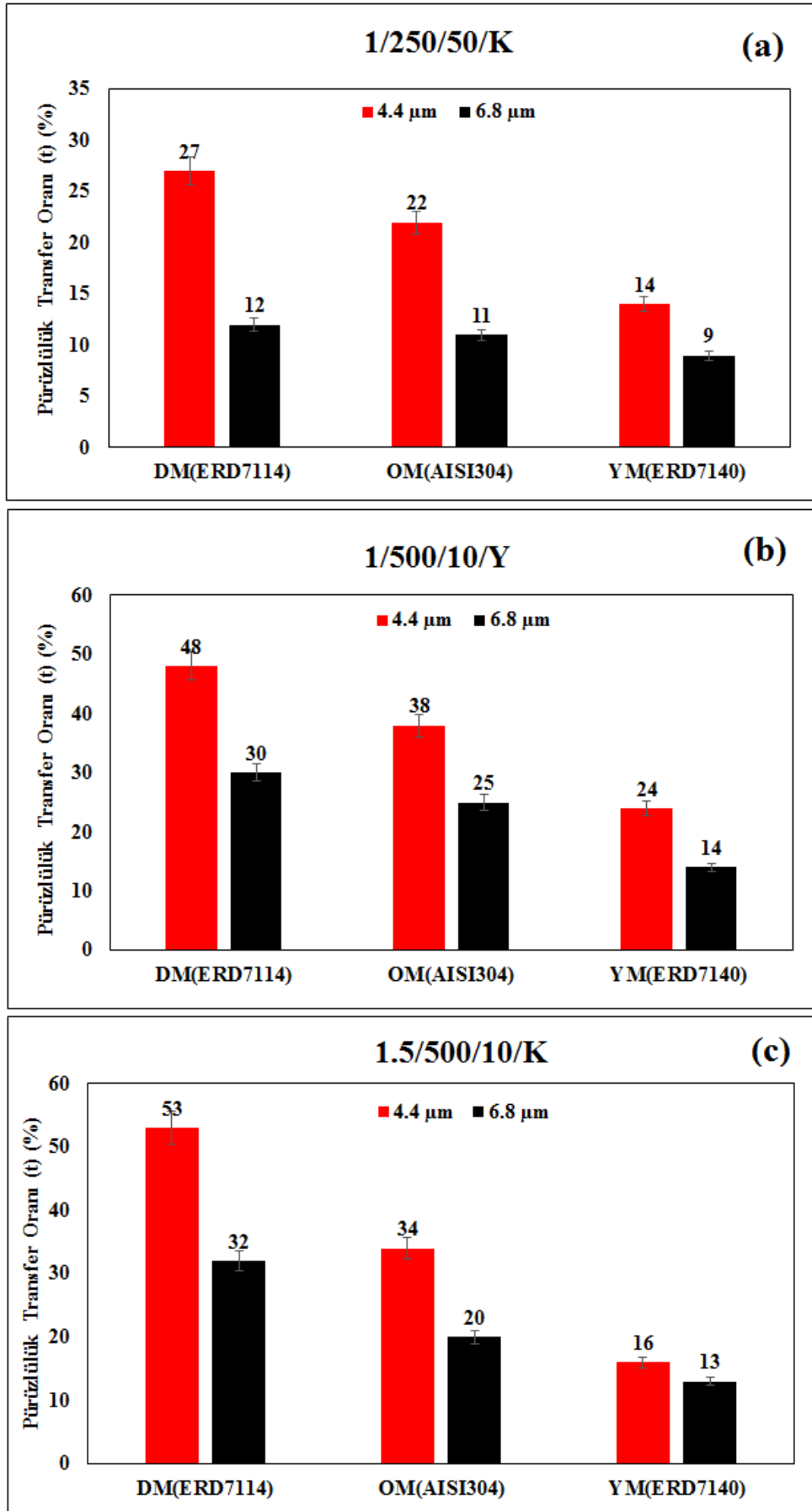
Üç farklı mekanik özelliğe sahip 1 mm kalınlığındaki sac malzemelere, 6.8  $\mu\text{m}$  pürüzlülükte merdane kullanılarak, 500  $\mu\text{m}$  ezme miktarında, 50 d/dk haddeleme hızında (1/6.8/500/50), kuru ve yağlayıcı kullanılan koşullarda yapılan temper

haddeleme ile pürüzlendirme işleminde, pürüzlülük transfer oranı ile yağlama koşulu-mekanik özellik ilişkisinin grafiği ise Şekil 5.6 (b)'de sunulmuştur.

Şekil 5.6'da gösterilen bütün durumlarda yağlayıcı kullanılan koşullarda malzemenin mekanik özelliği fark etmeksizin pürüzlülük transfer oranının belirgin düzeyde azaldığı görülmektedir. Bu bulgunun nedeninin yağlayıcı kullanılması durumunda yüzeydeki sürtünme kuvvetinin azalması ve yağlayıcının merdane ile sac malzemede temasın önüne geçebilecek bir film tabaka oluşturmasından ötürü gerçekleştiği tahmin edilmektedir. Kijima (2015), yaptığı çalışmada almış olduğu sonuçlar bu bulguyu destekler niteliktedir. Pürüzlülük transfer oranında meydana gelen azalma en çok ERD7114 kalite sac malzemede gözlemlenirken en az ERD7140 kalite sac malzemede gözlemlenmiştir. Yani yağlayıcı kullanılan koşullarda düşük akma mukavemetine sahip malzemede pürüzlülük transfer oranı yüksek akma mukavemetli malzemeye göre daha fazla azalmıştır. Bu durumun oluşmasının sebebinin ise en çok pürüzlünen malzemenin yağlayıcı sayesinde mekanik etkiden en çok korunmasıdır ve en çok pürüzlünen düşük akma mukavemetine sahip olan malzemenin (ERD7114) ara yüzeyinde meydana gelen film tabakası sayesinde en fazla korunmasından dolayı bu azalmadan daha fazla oranda etkilendiği düşünülmektedir.

#### **5.1.5. Merdane Pürüzlülüğü-Mekanik Özellik İlişkisi**

Merdane pürüzlülüğü-mekanik özellik ilişkisini belirlemek üzere üç farklı mekanik özellik sergileyen sac malzemelere farklı haddeleme parametreleri kullanılarak yapılan temper haddeleme ile pürüzlendirme işlemi sonrasında malzeme numunelerinin yüzeylerinden pürüzlülük ölçümleri gerçekleştirilmiş ve pürüzlülük transfer oranları (t) hesaplanmıştır. Şekil 5.7'de pürüzlülük transfer oranı ile merdane pürüzlülüğü-mekanik özellik ilişkisinin grafiği verilmiştir.



Şekil 5.7. Merdane pürüzlülüğünün mekanik özellik ile ilişkisi

Üç farklı mekanik özelliğe sahip 1 mm kalınlığındaki sac malzemelere, 250 µm ezme miktarında, 50 d/dk haddeleme hızıyla, kuru şartlarda (1/250/50/K) ve farklı pürüzlülükte merdane kullanılarak yapılan temper haddeleme ile pürüzlendirme işleminde, pürüzlülük transfer oranı ile merdane pürüzlülüğü-mekanik özellik ilişkisinin grafiği Şekil 5.7 (a)'da sunulmuştur.

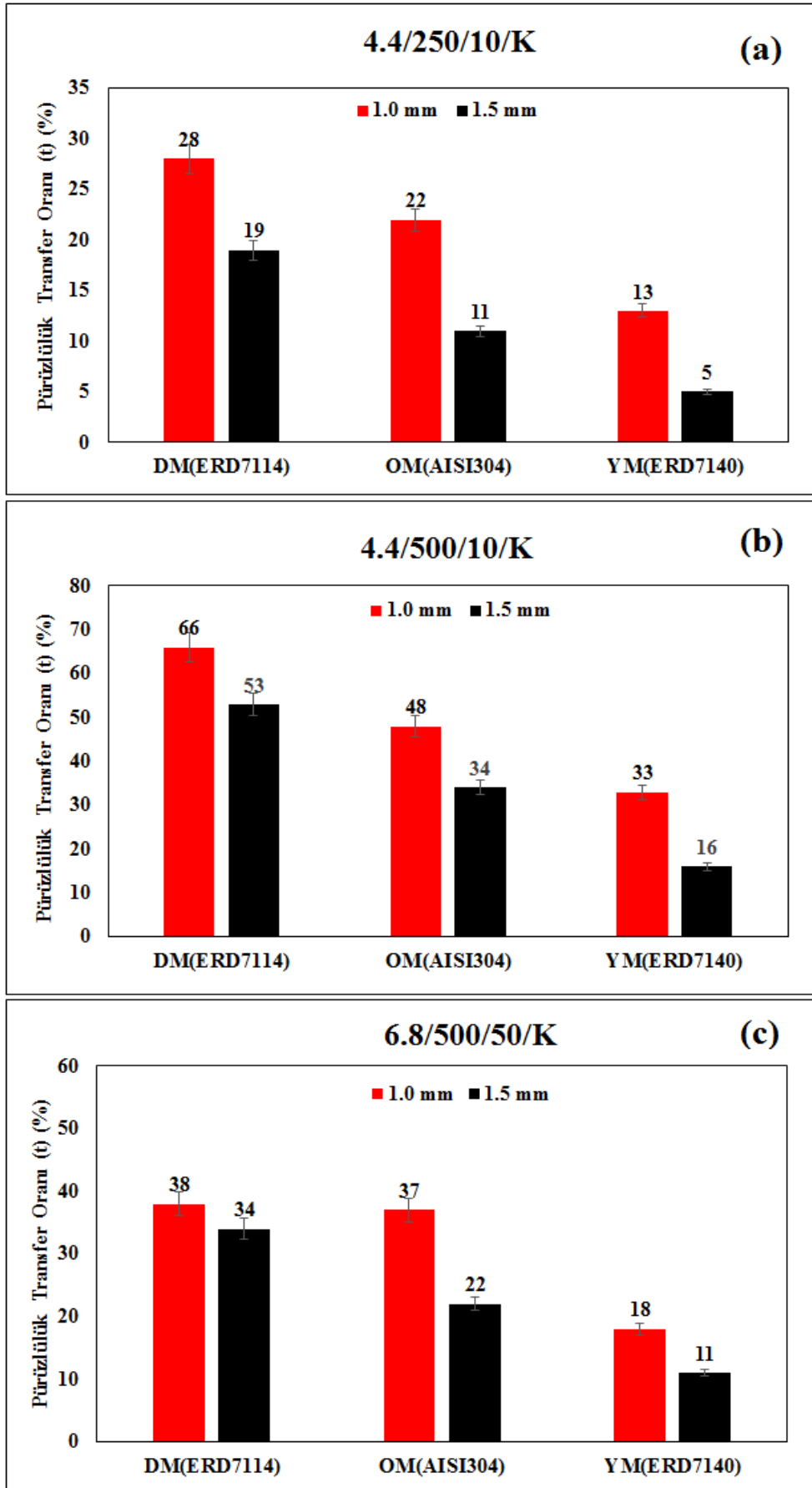
Üç farklı mekanik özelliğe sahip 1 mm kalınlığındaki sac malzemelere, 500 µm ezme miktarında, 10 d/dk haddeleme hızıyla, yağlı şartlar altında (1/500/10/Y) ve farklı pürüzlülükte merdane kullanılarak yapılan temper haddeleme ile pürüzlendirme işleminde, pürüzlülük transfer oranı ile merdane pürüzlülüğü-mekanik özellik ilişkisinin grafiği Şekil 5.7 (b)'de gösterilmiştir.

Üç farklı mekanik özelliğe sahip 1.5 mm kalınlığındaki sac malzemelere, 500 µm ezme miktarında, 10 d/dk haddeleme hızıyla, kuru şartlarda (1.5/500/10/K) ve farklı pürüzlülükte merdane kullanılarak yapılan temper haddeleme ile pürüzlendirme işleminde, pürüzlülük transfer oranı ile merdane pürüzlülüğü-mekanik özellik ilişkisinin grafiği ise Şekil 5.7 (c)'de verilmiştir.

Şekil 5.7'de gösterilen bütün durumlarda merdane pürüzlülüğü arttıkça malzemenin mekanik özelliği fark etmeksizin pürüzlülük transfer oranının belirgin düzeyde azaldığı görülmektedir. Bu durumun, çok pürüzlü merdanenin (6.8 µm) haddeleme esnasında pürüzlü merdaneye (4.4 µm) nazaran sac malzeme yüzeyine temas eden alanının daha az olmasının, pürüzlülük transfer oranının da daha az olmasına sebebiyet verdiği düşünülmektedir. Dick ve Lenard (2005) yaptıkları çalışmada, yüksek pürüzlülüğe sahip merdane ile haddelemede metalin deformasyona karşı yüksek direnç gösterdiği sonucuna varması bu bulguya destek olarak verilebilir. Pürüzlülük transfer oranında meydana gelen azalma en çok ERD7114 kalite sac malzemede gözlenirken en az ERD7140 kalite sac malzemede gözlenmiştir.

#### **5.1.6. Malzeme Kalınlığı-Mekanik Özellik İlişkisi**

Malzeme kalınlığı-mekanik özellik ilişkisini belirlemek üzere üç farklı mekanik özellik sergileyen sac malzemelere farklı haddeleme parametreleri kullanılarak yapılan temper haddeleme ile pürüzlendirme işlemi sonrasında malzeme numunelerinin yüzeylerinden pürüzlülük ölçümleri gerçekleştirilmiş ve pürüzlülük transfer oranları (t) hesaplanmıştır. Şekil 5.8'de pürüzlülük transfer oranı ile malzeme kalınlığı-mekanik özellik ilişkisinin grafiği verilmiştir.



Şekil 5.8. Malzeme kalınlığının mekanik özellik ile ilişkisi

Üç farklı mekanik özelliğe sahip olan sac malzemelere, 4.4 µm pürüzlülükte merdane kullanılarak, 250 µm ezme miktarında, 10 d/dk haddeleme hızında, kuru şartlarda (4.4/250/10/K) ve farklı kalınlık koşullarında yapılan temper haddeleme ile pürüzlendirme işleminde, pürüzlülük transfer oranı ile malzeme kalınlığı-mekanik özellik ilişkisinin grafiği Şekil 5.8 (a)'da sunulmuştur.

Üç farklı mekanik özelliğe sahip olan sac malzemelere, 4.4 µm pürüzlülükte merdane kullanılarak, 500 µm ezme miktarında, 10 d/dk haddeleme hızında, kuru şartlarda (4.4/500/10/K) ve farklı kalınlık koşullarında yapılan temper haddeleme ile pürüzlendirme işleminde, pürüzlülük transfer oranı ile malzeme kalınlığı-mekanik özellik ilişkisinin grafiği Şekil 5.8 (b)'de verilmiştir.

Üç farklı mekanik özelliğe sahip olan sac malzemelere, 6.8 µm pürüzlülükte merdane kullanılarak, 500 µm ezme miktarında, 50 d/dk haddeleme hızında, kuru şartlarda (6.8/500/50/K) ve farklı kalınlık koşullarında yapılan temper haddeleme ile pürüzlendirme işleminde, pürüzlülük transfer oranı ile malzeme kalınlığı-mekanik özellik ilişkisinin grafiği ise Şekil 5.8 (c)'de gösterilmiştir.

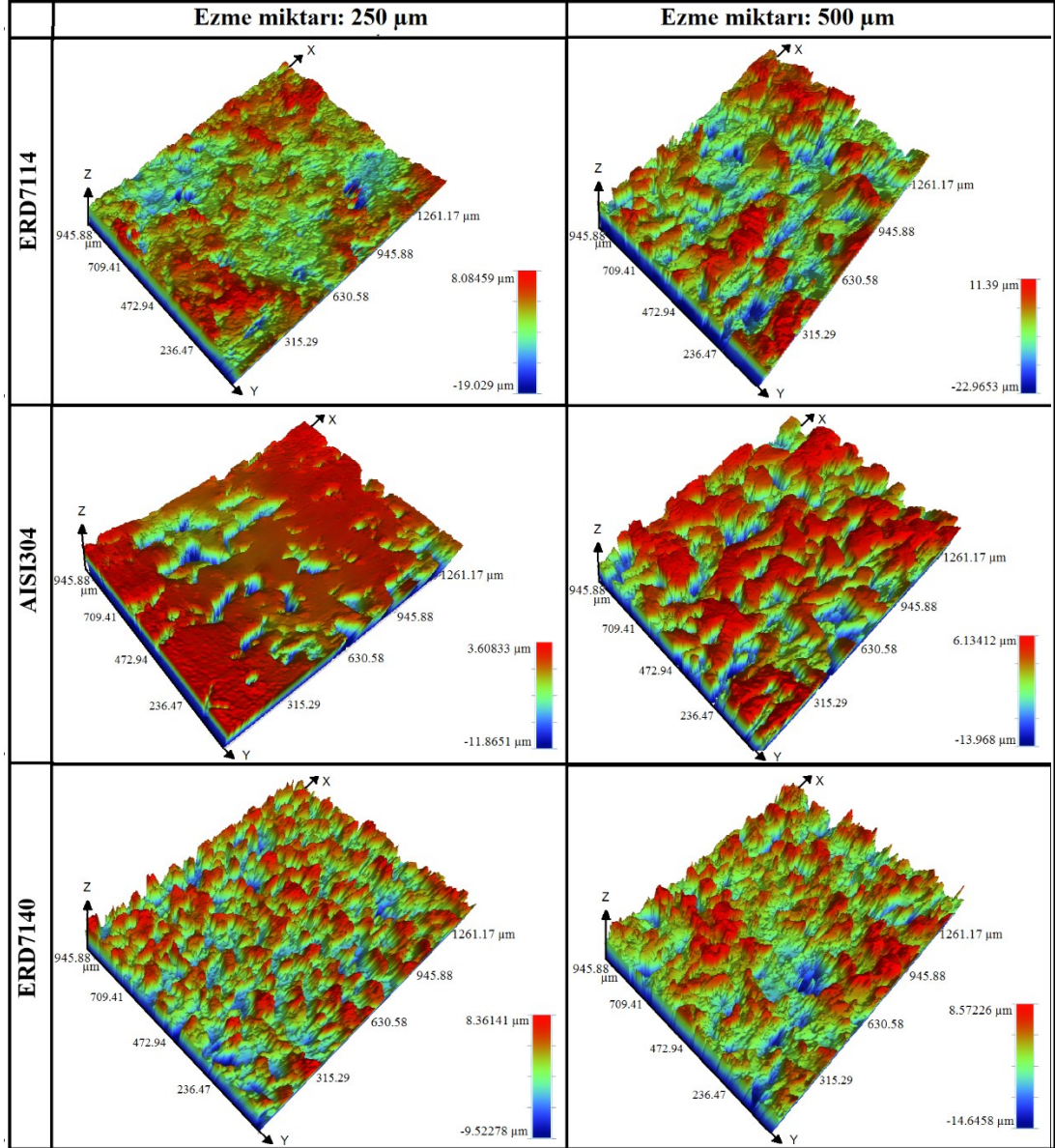
Şekil 5.8'de gösterilen bütün durumlarda malzeme kalınlığı arttıkça malzemenin mekanik özelliği fark etmeksizin pürüzlülük transfer oranının azaldığı görülmektedir. Bu durumun oluşmasında kalın malzemenin ince malzemeye göre daha az ezilmesinin etkili olduğu düşünülmektedir. Bu bulguya benzer sonuçlara Çolak ve Kurgan (2018) tarafından da ulaşılmıştır. Pürüzlülük transfer oranında meydana gelen azalma en çok ERD7140 kalite sac malzemedeki gözlenmişken en az ERD7114 kalite sac malzemedeki gözlenmiştir ve bu durumun malzemelerin akma mukavemetlerinden kaynaklandığı sonucuna varılmıştır. Yani ERD7114 kalite sac malzemenin kalınlığı arttıkça akma mukavemetinin düşük olmasından dolayı daha fazla oranda ezilmesinden kaynaklı, yüksek akma mukavemetli ERD7140 kalite sac malzemeye göre daha az oranda pürüzlülüğü azalmıştır.

## **5.2. 3D Alan Tarama Görüntüleri ve Pürüzlülük Dağılımının Değerlendirilmesinden Elde Edilen Bulgular**

### **5.2.1. Ezme Miktarı-Mekanik Özellik İlişkisinde Pürüzlülük Dağılımı**

Şekil 5.9'da üç farklı mekanik özelliğe sahip 1 mm kalınlığındaki sac malzemelere, 4.4 µm pürüzlülükte merdane kullanılarak, 10 d/dk haddeleme hızıyla, kuru şartlarda (1/4.4/10/K), 250 µm ve 500 µm ezme miktarlarında yapılan temper

haddeleme ile pürüzlülük transferi sonrasında yüzeylerden alınan 3D alan tarama görüntüleri görülmektedir. Üç farklı malzeme içinde 3D alan tarama görüntülerinde ezme miktarının artışıyla birlikte maksimum tepe yükseklikleri ve vadi derinliklerinde artış kaydedilmiştir.

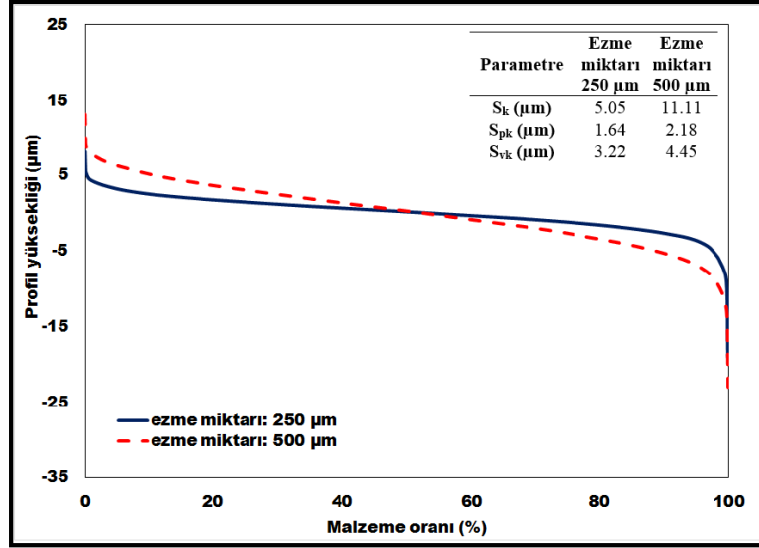


Şekil 5.9. Farklı ezme miktarlarında yapılan temper haddeleme ile pürüzlülük transferi sonrasında yüzeylerden alınan 3D alan tarama görüntüleri

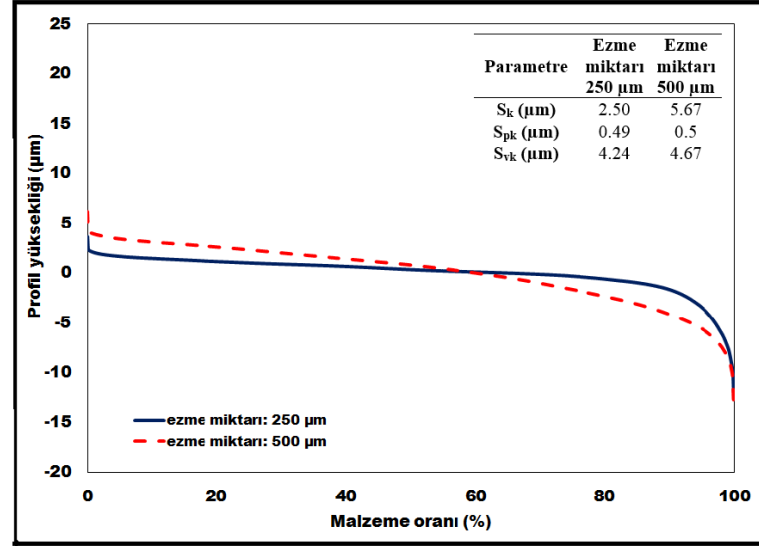
Şekil 5.10'da üç farklı mekanik özelliğe sahip malzemeler için profil yüksekliği-malzeme oranı eğrileri görülmektedir. Bu eğriler pürüzlülük dağılımının değerlendirilmesinde kullanılan eğriler olup yüzey pürüzlülüğü yüksekliğinin kümülatif frekans dağılımını temsil eder ve pürüzlü yüzeylerin tribolojik performansını değerlendirmek için yararlı bir araç sağlar (Jeng vd., 2020). Her üç

malzeme içinde ezme miktarının 250  $\mu\text{m}$ 'den 500  $\mu\text{m}$ 'ye çıkarılmasıyla birlikte tüm pürüzlülük parametrelerinde ( $S_k$ ,  $S_{pk}$ ,  $S_{vk}$ ) artış meydana gelmiştir. ERD7114 kalite sac malzemeye 250  $\mu\text{m}$  ezme miktarı kullanılarak yapılan temper haddeleme ile pürüzlülük transferinde 500  $\mu\text{m}$  ezme miktarına göre çekirdek pürüzlülüğü ( $S_k$ ) % 220 artmıştır. Bununla birlikte tepe yüksekliği ( $S_{pk}$ ) ve vadi derinliği ( $S_{vk}$ ) parametreleri sırasıyla % 33 ve % 38 artmıştır. AISI304 kalite sac malzemeye 250  $\mu\text{m}$  ezme miktarı kullanılarak yapılan temper haddeleme ile pürüzlülük transferinde 500  $\mu\text{m}$  ezme miktarına göre çekirdek pürüzlülüğü ( $S_k$ ) % 227 artmıştır. Ayrıca tepe yüksekliği ( $S_{pk}$ ) ve vadi derinliği ( $S_{vk}$ ) parametreleri sırasıyla % 2 ve % 10 artmıştır. ERD7140 kalite sac malzemeye 250  $\mu\text{m}$  ezme miktarı kullanılarak yapılan temper haddeleme ile pürüzlülük transferinde 500  $\mu\text{m}$  ezme miktarına göre çekirdek pürüzlülüğü ( $S_k$ ) çok az miktarda artış göstermiştir. Tepe yüksekliği ( $S_{pk}$ ) ve vadi derinliği ( $S_{vk}$ ) parametreleri sırasıyla % 225 ve % 208 artmıştır.

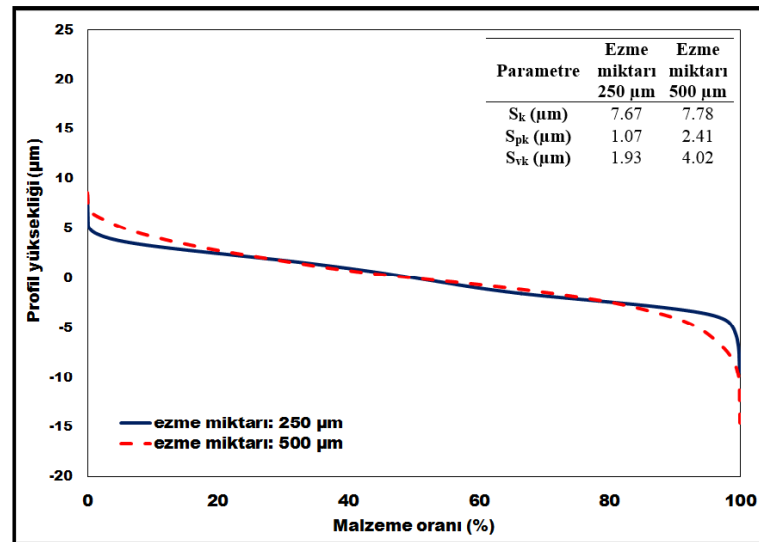
Ezme miktarı arttıkça her üç malzeme içinde tepe yükseklikleri ile vadi derinliklerinin arttığını ve dolayısıyla homojen pürüzlülük dağılımının bozulduğu görülmüştür. Bu bozulma, Şekil 5.10'da verilen eğriler arasındaki yükseklik farklılıklarından da açık bir şekilde görülmektedir. Çolak ve Kurgan (2018), ezme miktarı artışının homojen pürüzlülük dağılımını bozduğu sonucuna yüzeyden alınan pürüzlülük ölçümlerinin standart sapmalarını değerlendirerek varmışlardır. Nagase vd. (2009a), ezme oranının artışıyla birlikte sac malzeme yüzeyindeki tepelerin şeklinin merdane yüzeyinin yükseklik değerlerine yaklaştığını belirtmişlerdir. Dolayısıyla düşük ezme miktarlarında üç malzeme içinde tepe yükseklikleri ile vadi derinliklerinin daha az olduğu ve homojen pürüzlülük dağılımının düşük ezme miktarları kullanılarak yapılan temper haddeleme ile pürüzlendirme koşullarında daha iyi olduğu söylenebilir. Pürüzlülük dağılımının homojenliğinde meydana gelen bozulma, düşük akma mukavemetli (ERD7114) malzemede en fazla iken bunu sırayla orta akma mukavemetli (AISI304) malzeme ve yüksek akma mukavemetli (ERD7140) malzeme takip etmektedir.



**ERD7114**



**AISI304**

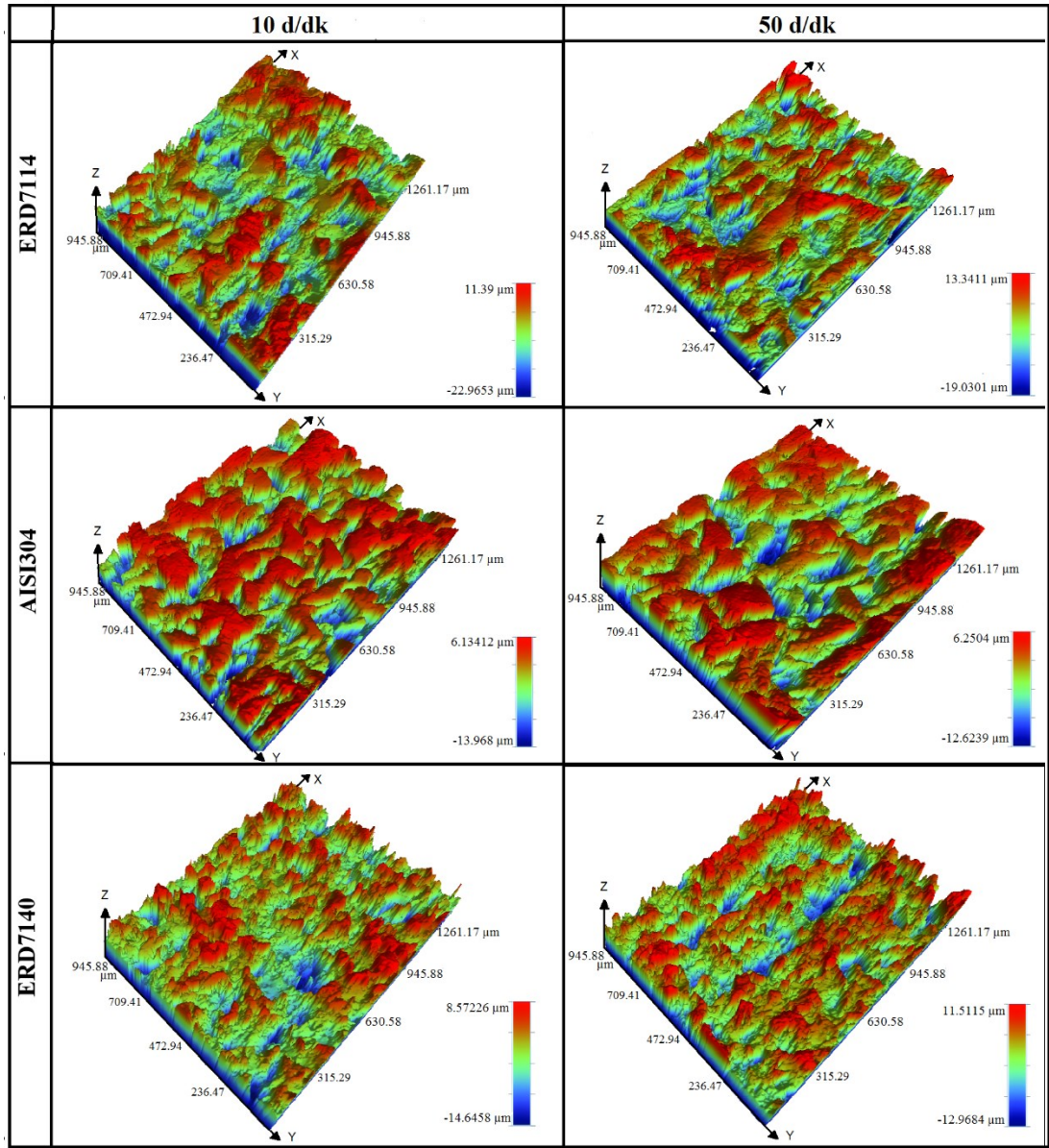


**ERD7140**

Şekil 5.10. Üç farklı malzeme için profil yüksekliği-malzeme oranı eğrileri

## 5.2.2. Haddeme Hızı-Mekanik Özellik İlişkisinde Pürüzlülük Dağılımı

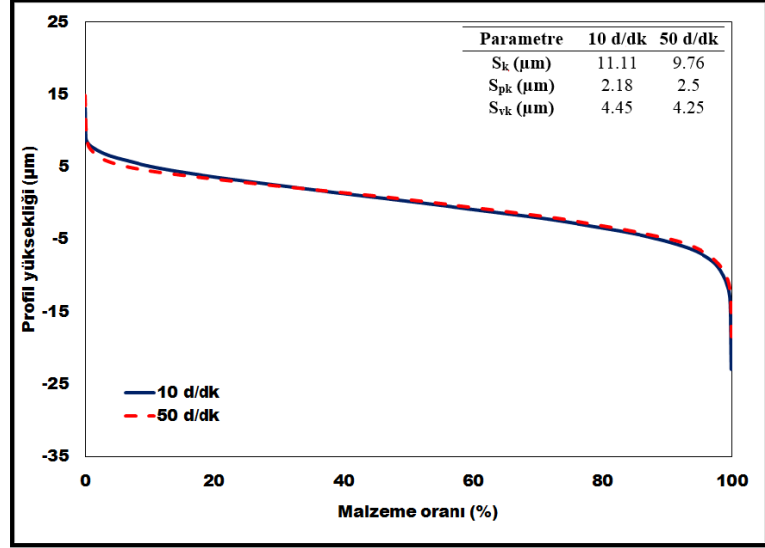
Şekil 5.11’de üç farklı mekanik özelliğe sahip 1 mm kalınlığındaki sac malzemelere, 4.4 µm pürüzlülükte merdane kullanılarak, 500 µm ezme miktarıyla, kuru şartlarda (1/4.4/10/K), 10 d/dk ve 50 d/dk haddeme hızlarında yapılan temper haddeme ile pürüzlülük transferi sonrasında yüzeylerden alınan 3D alan tarama görüntüleri görülmektedir. Üç farklı malzeme içinde 3D alan tarama görüntülerinde haddeme hızının artışıyla birlikte maksimum tepe yüksekliklerinde artış ve vadi derinliklerinde azalma kaydedilmiştir.



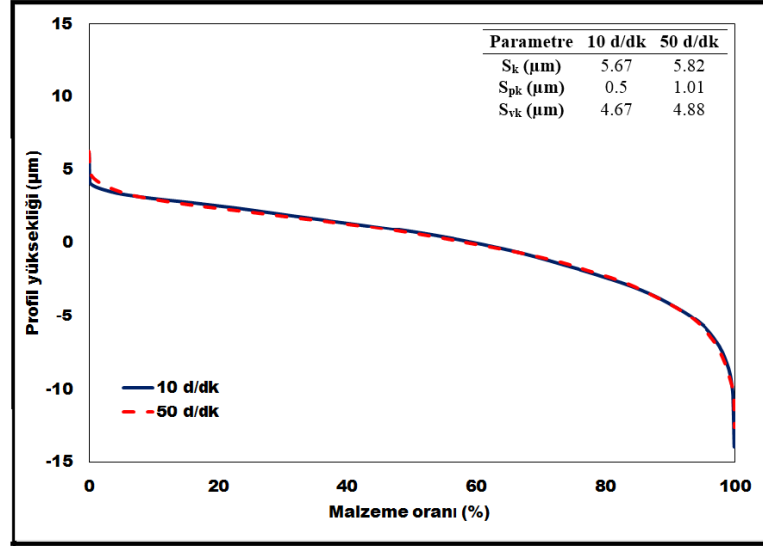
Şekil 5.11. Farklı haddeme hızlarında yapılan temper haddeme ile pürüzlülük transferi sonrasında yüzeylerden alınan 3D alan tarama görüntüleri

Şekil 5.12’de üç farklı malzeme için profil yüksekliği-malzeme oranı eğrileri görülmektedir. ERD7114 kalite sac malzemeye 10 d/dk haddeleme hızı kullanılarak yapılan temper haddeleme ile pürüzlülük transferinde 50 d/dk kullanılarak yapılan haddeleme hızına göre çekirdek pürüzlülüğü ( $S_k$ ) % 12 azalmıştır. Bununla birlikte tepe yüksekliği ( $S_{pk}$ ) ve vadi derinliği ( $S_{vk}$ ) parametreleri sırasıyla % 15 artış ve % 4 azalma göstermiştir. AISI304 kalite sac malzemeye 10 d/dk haddeleme hızı kullanılarak yapılan temper haddeleme ile pürüzlülük transferinde 50 d/dk kullanılarak yapılan haddeleme hızına göre çekirdek pürüzlülüğü ( $S_k$ ) % 3 artmıştır. Ayrıca tepe yüksekliği ( $S_{pk}$ ) ve vadi derinliği ( $S_{vk}$ ) parametreleri sırasıyla % 202 ve % 5 artış göstermiştir. ERD7140 kalite sac malzemeye 10 d/dk haddeleme hızı kullanılarak yapılan temper haddeleme ile pürüzlülük transferinde 50 d/dk kullanılarak yapılan haddeleme hızına göre çekirdek pürüzlülüğü ( $S_k$ ) % 9 artmıştır. Tepe yüksekliği ( $S_{pk}$ ) ve vadi derinliği ( $S_{vk}$ ) parametreleri ise sırasıyla % 20 azalma ve % 12 artış sergilemiştir. Jeng ve arkadaşları alüminyum malzemedeki azalan haddeleme hızının tepe miktarında azalma gösterdiği bulgusuna varmışlardır (Jeng vd., 2020). Elde ettikleri bu bulguya benzer davranış, AISI304 kalite malzemedeki meydana gelmiştir.

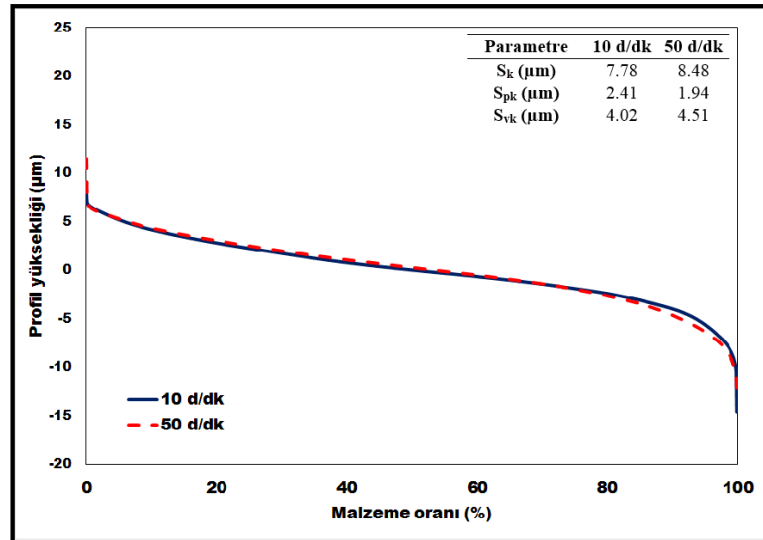
Şekil 5. 12’de verilen eğrilerden de görüldüğü gibi haddeleme hızının artmasıyla (10 d/dk’dan 50 d/dk’ya) birlikte her üç malzeme içinde birbirlerine yakın eğriler elde edildiği görülmektedir. Dolayısıyla temper haddelemede pürüzlendirme işleminde haddeleme hızının pürüzlülük transferine belirgin derecede etkisi olmadığı söylenebilir (Mekicha vd., 2020).



### ERD7114



### AISI304

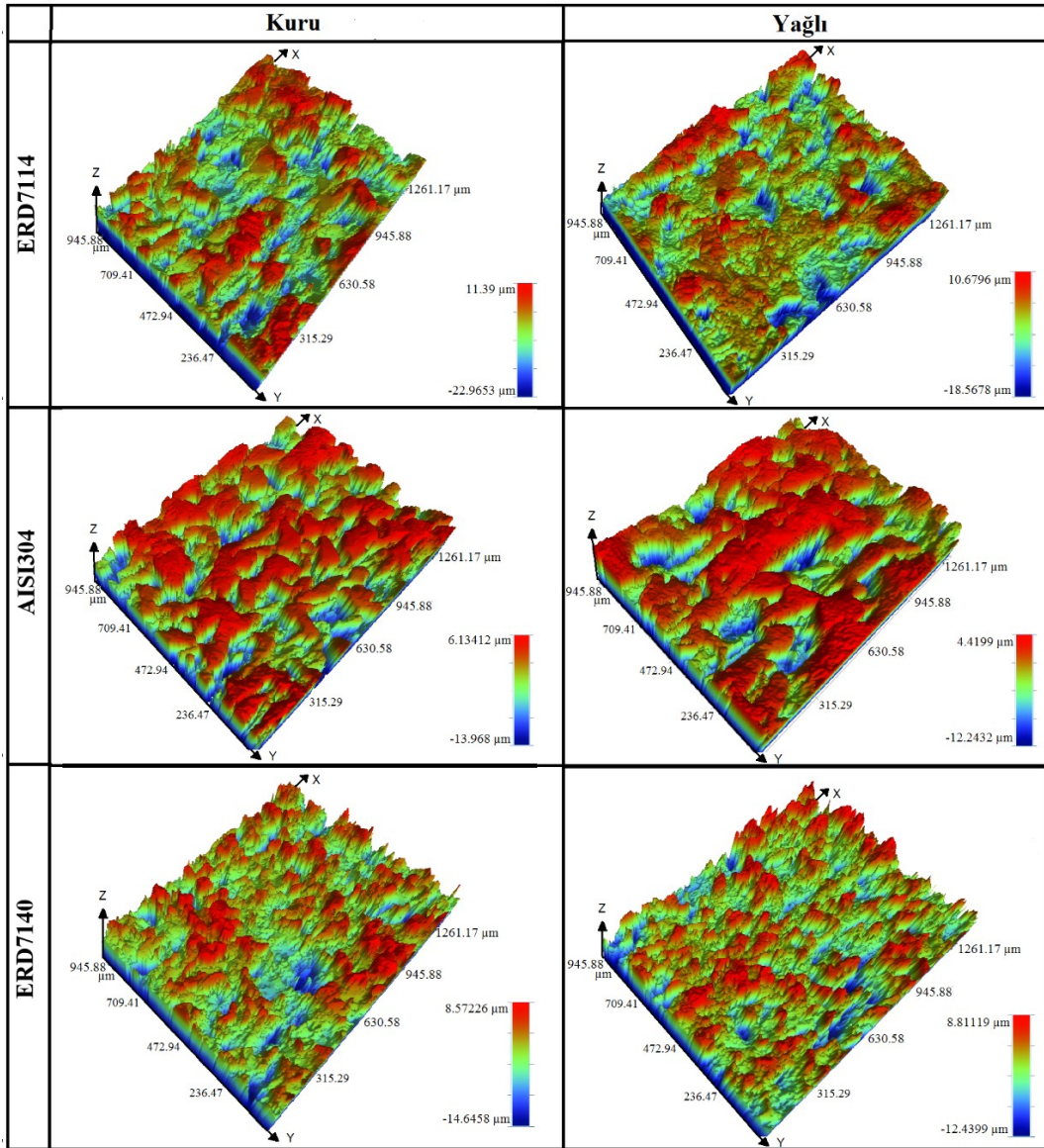


### ERD7140

Şekil 5.12. Üç farklı malzeme için profil yüksekliği-malzeme oranı eğrileri

### 5.2.3. Yağlama Koşulu-Mekanik Özellik İlişkisinde Pürüzlülük Dağılımı

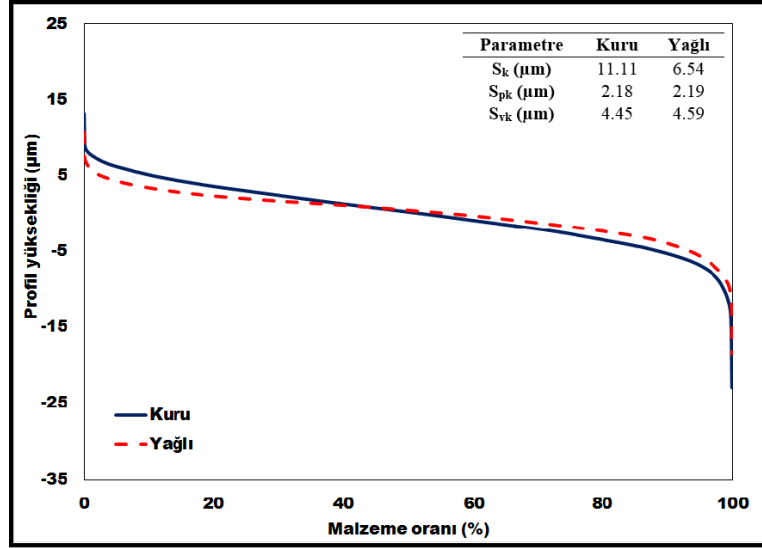
Şekil 5.13’de üç farklı mekanik özelliğe sahip 1 mm kalınlığındaki sac malzemelere, 4.4 µm pürüzlülükte merdane kullanılarak, 500 µm ezme miktarıyla, 10 d/dk haddeleme hızında (1/4.4/500/10), kuru ve yağlı şartlar altında yapılan temper haddeleme ile pürüzlülük transferi sonrasında yüzeylerden alınan 3D alan tarama görüntüleri görülmektedir. Üç farklı malzeme içinde 3D alan tarama görüntülerinde yağlayıcı kullanılan koşullar için maksimum vadi derinliklerinde azalma kaydedilirken maksimum tepe yüksekliklerinde ERD7114 ve AISI304 kalite sac malzemelerde azalma kaydedilmiştir. ERD7140 kalite sac malzemedeki ise maksimum tepe yüksekliği yağlayıcı kullanılan koşullarda yaklaşık olarak aynı kalmıştır.



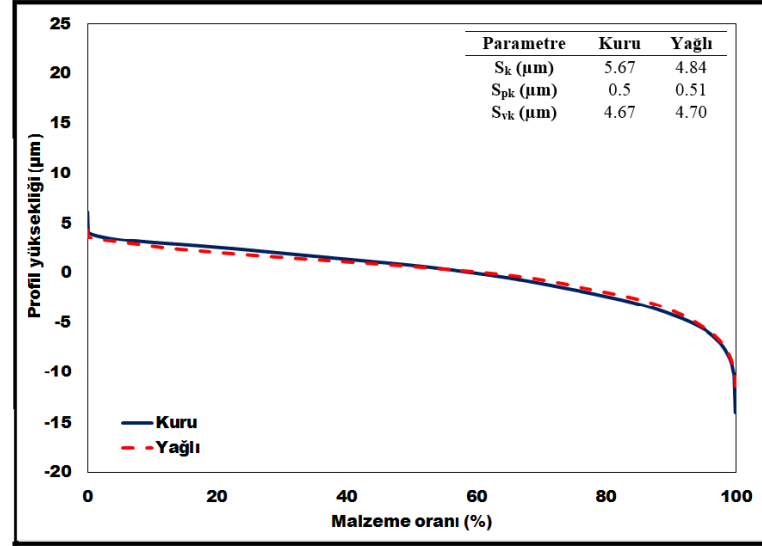
Şekil 5.13. Kuru ve yağlı ortam koşullarında yapılan temper haddeleme ile pürüzlülük transferi sonrasında yüzeylerden alınan 3D alan tarama görüntüleri

Şekil 5.14’de üç farklı malzeme için profil yüksekliği-malzeme oranı eğrileri görülmektedir. Kuru ortam koşullarına kıyasla yağlı ortam koşullarında çekirdek pürüzlülük profili ( $S_k$ ) değerlerinde, ERD7114 kalite malzemede % 40’lık bir azalma gözlemlenirken AISI304 kalite malzemede bu azalma % 15 olarak gözlemlenmiştir. ERD7140 kalite malzemede ise kuru ortam koşullarına göre yağlı ortam koşullarında çekirdek pürüzlülüğünün ( $S_k$ ) benzer değerler aldığı görülmüştür. Bu bulgular, Kijima tarafından elde edilen sonuçlar ile örtüşmektedir (Kijima, 2015). Yine kuru ortam koşullarına kıyasla yağlı ortam koşullarında tepe yükseklikleri ( $S_{pk}$ ) ve vadi derinlikleri ( $S_{vk}$ ), ERD7114 ve AISI304 kalite sac malzeme için çok yakın değerler alırken ERD7140 kalite sac malzeme için tepe yüksekliği ( $S_{pk}$ ) ve vadi derinliği ( $S_{vk}$ ) parametrelerinde sırasıyla % 15 ve % 18 azalma tespit edilmiştir.

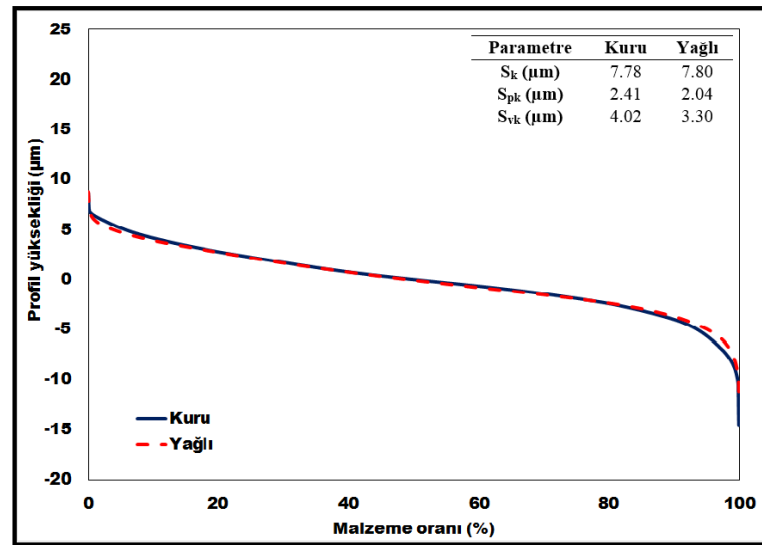
Şekil 5.14’de verilen eğrilerden de görüldüğü üzere yağlı ortam koşullarında, üç malzeme içinde çekirdek pürüzlülük profili değerleriyle birlikte tepe yükseklikleri ve vadi derinliklerinin azaldığı ve dolayısıyla homojen pürüzlülük dağılımının kuru ortam koşullarına göre daha iyi olduğu söylenebilir. Bununla birlikte yağlı koşullar altında kuru koşullara göre homojen pürüzlülük dağılımı düşük akma mukavemetli (ERD7114) malzemede en fazla iken yüksek akma mukavemetli (ERD 7140) malzemede ise en az olduğu tespit edilmiştir.



ERD7114



AISI304

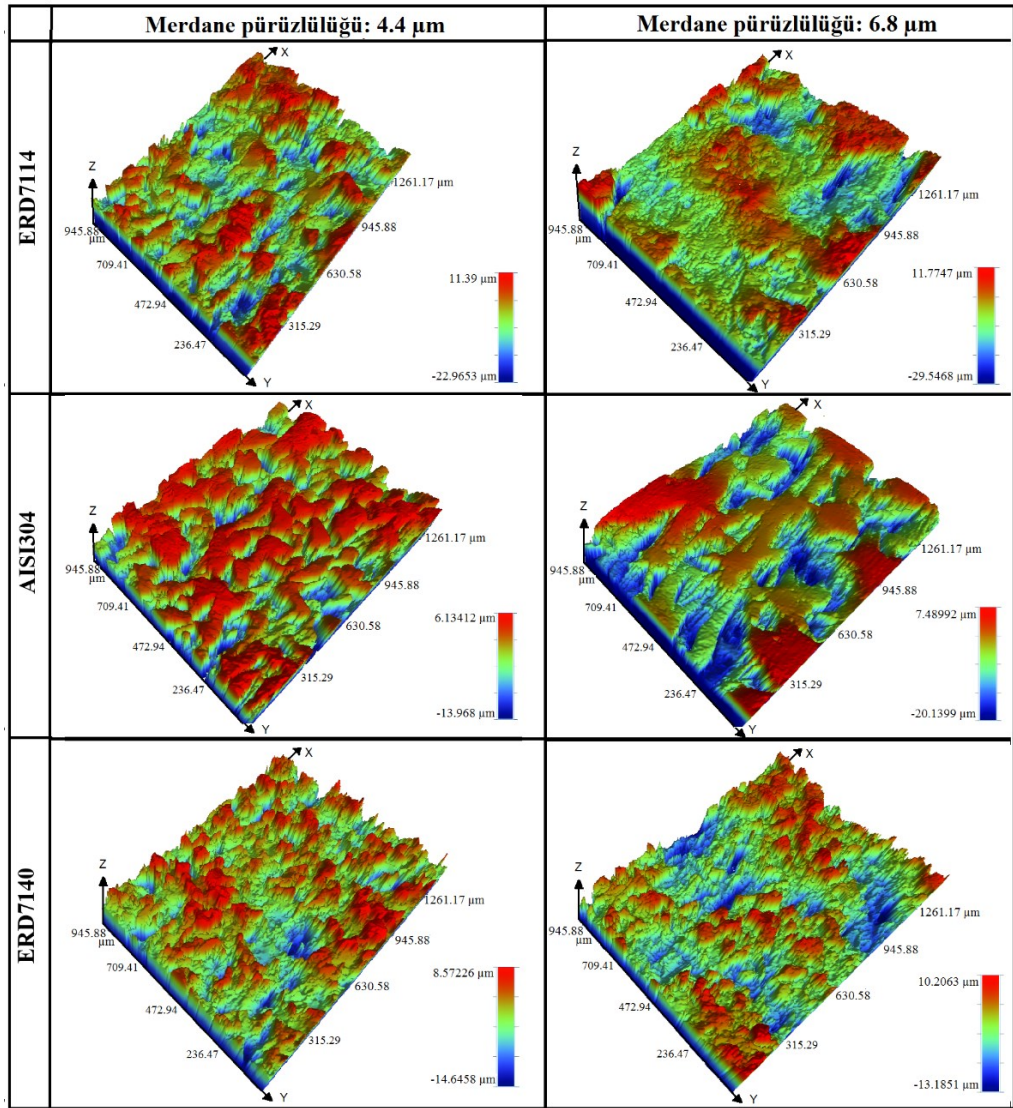


ERD7140

Şekil 5.14. Üç farklı malzeme için profil yüksekliği-malzeme oranı eğrileri

#### 5.2.4. Merdane Pürüzlülüğü-Mekanik Özellik İlişisinde Pürüzlülük Dağılımı

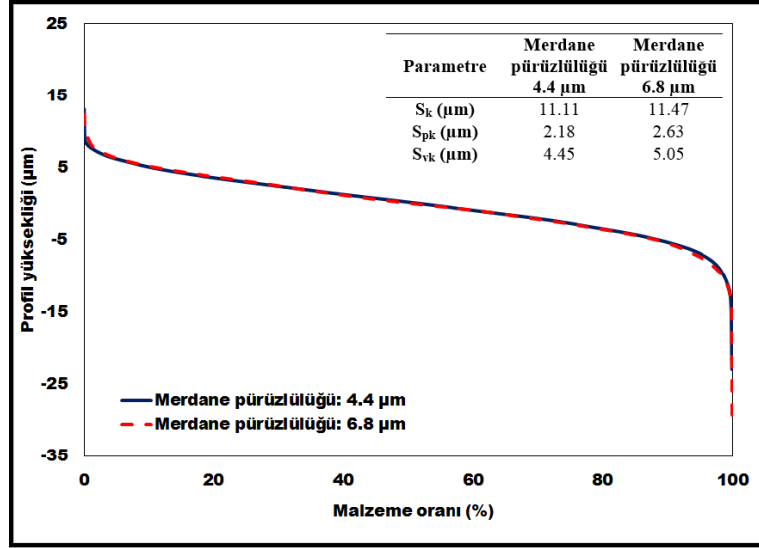
Şekil 5.15’de üç farklı mekanik özelliğe sahip 1 mm kalınlığındaki sac malzemelere, 500 µm ezme miktarıyla, 10 d/dk haddeleme hızında, kuru şartlarda (1/500/10/K), 4.4 µm ve 6.8 µm pürüzlülükte merdaneler kullanılarak yapılan temper haddeleme ile pürüzlülük transferi sonrasında yüzeylerden alınan 3D alan tarama görüntüleri görülmektedir. Üç farklı malzeme içinde 3D alan tarama görüntülerinde, merdane pürüzlülüğü arttıkça maksimum tepe yüksekliklerinde artış kaydedilirken maksimum vadi derinliklerinde ERD7114 ve AISI304 kalite sac malzemelerde artış kaydedilmiştir. ERD7140 kalite sac malzemedede ise maksimum vadi derinliği merdane pürüzlülüğü arttıkça bir miktar azalmıştır.



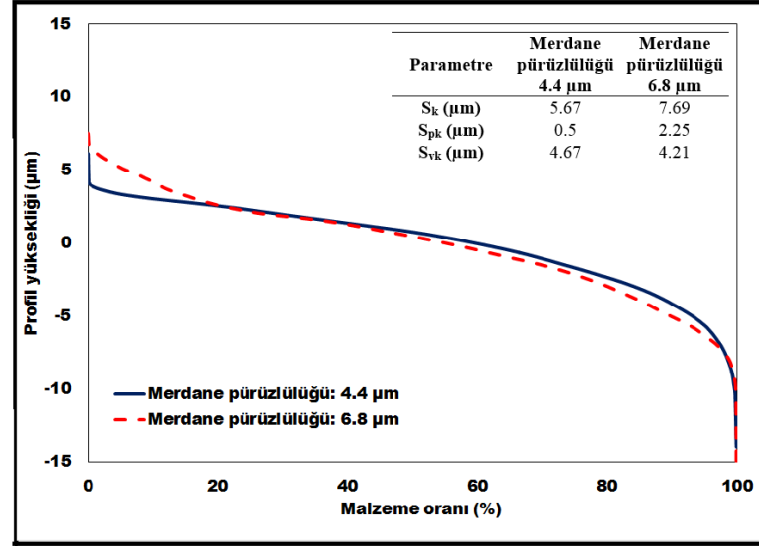
Şekil 5.15. Farklı pürüzlülükte merdaneler ile yapılan temper haddeleme ile pürüzlülük transferi sonrasında yüzeylerden alınan 3D alan tarama görüntüleri

Şekil 5.16'da üç farklı malzeme için profil yüksekliği-malzeme oranı eğrileri görülmektedir. Çok pürüzlü merdane (6.8  $\mu\text{m}$ ) kullanılarak yapılan temper haddeleme ile pürüzlendirme, pürüzlü merdane (4.4  $\mu\text{m}$ ) kullanılarak yapılan temper haddeleme ile pürüzlendirme işlemine kıyasla ERD7114 kalite sac malzeme için pürüzlülük parametreleri  $S_k$ ,  $S_{pk}$ ,  $S_{vk}$  sırasıyla % 3, % 21, % 13 olmak üzere çok az miktarda artmıştır. AISI304 kalite sac malzeme için pürüzlülük parametreleri  $S_k$ ,  $S_{pk}$ ,  $S_{vk}$  sırasıyla % 36 artış, % 450 artış, % 10 azalma sergilemiştir. ERD7140 kalite sac malzemede ise pürüzlülük parametreleri  $S_k$ ,  $S_{pk}$ ,  $S_{vk}$  sırasıyla % 23 artış, % 10 azalma, % 17 azalma meydana gelmiştir. AISI304 ve ERD7140 kalite sac malzemede çekirdek pürüzlülüğü ( $S_k$ ), ERD7114 kalite malzemeye göre daha fazla artış göstermiştir. Bununla birlikte AISI304 kalite sac malzemede çok pürüzlü merdane ile yapılan pürüzlülük transferinde pürüzlü merdaneye göre daha yüksek tepe oluşumu gözlenmiştir.

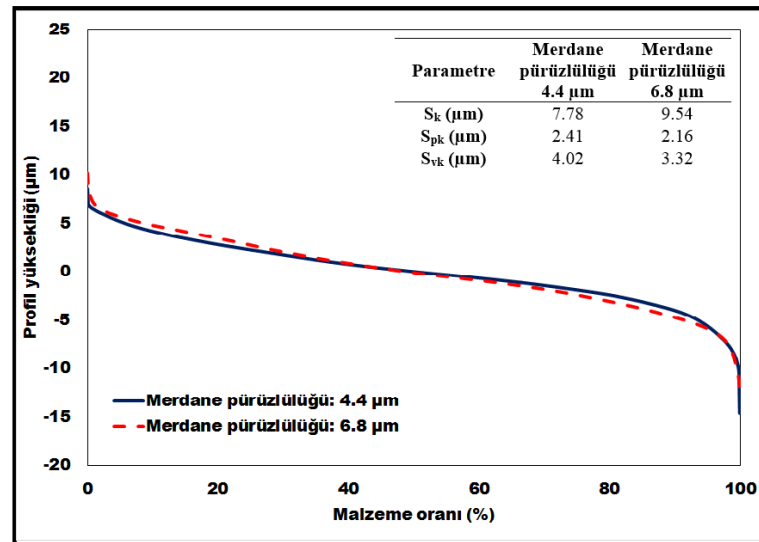
Dolayısıyla 5.16'da verilen eğrilerden de görüldüğü üzere pürüzlülük değeri yüksek olan merdane (6.8  $\mu\text{m}$ ) ile yapılan pürüzlülük transferinde her üç malzeme içinde tepe yükseklikleri ile vadi derinliklerinin arttığını ve dolayısıyla homojen pürüzlülük dağılımının düşük pürüzlülük değerine sahip merdane (4.4  $\mu\text{m}$ ) kullanılarak yapılan pürüzlülük transferinde daha iyi olduğu söylenebilir. Ayrıca ERD7140 ve AISI304 kalite sac malzemede merdane pürüzlülüğü arttıkça pürüzlülük dağılımının homojenliği daha fazla bozulurken ERD7114 kalite sac malzemede ise daha az bozulma meydana gelmiştir.



**ERD7114**



**AISI304**

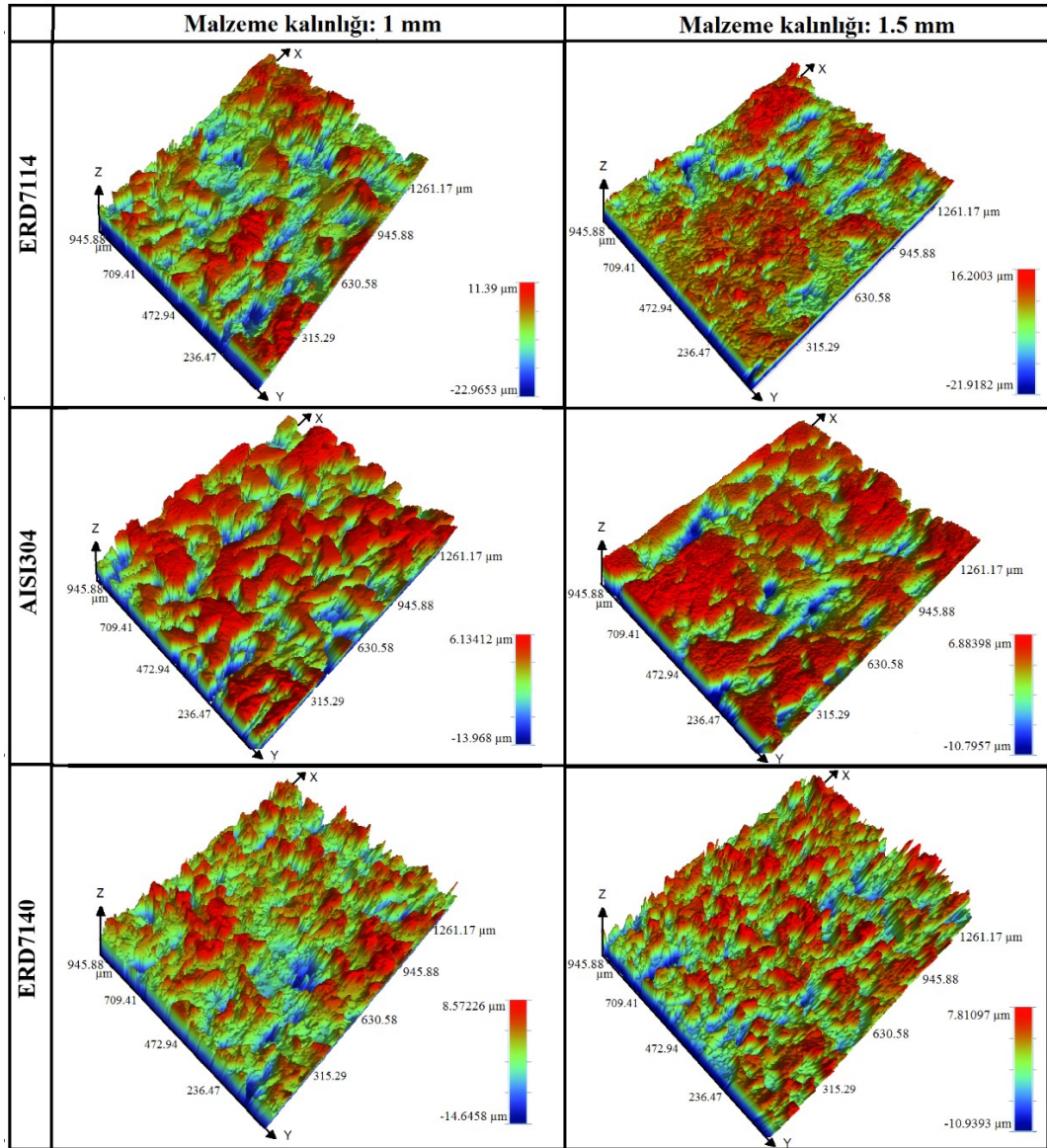


**ERD7140**

Şekil 5.16. Üç farklı malzeme için profil yüksekliği-malzeme oranı eğrileri

### 5.2.5. Malzeme Kalınlığı-Mekanik Özellik İlişkisinde Pürüzlülük Dağılımı

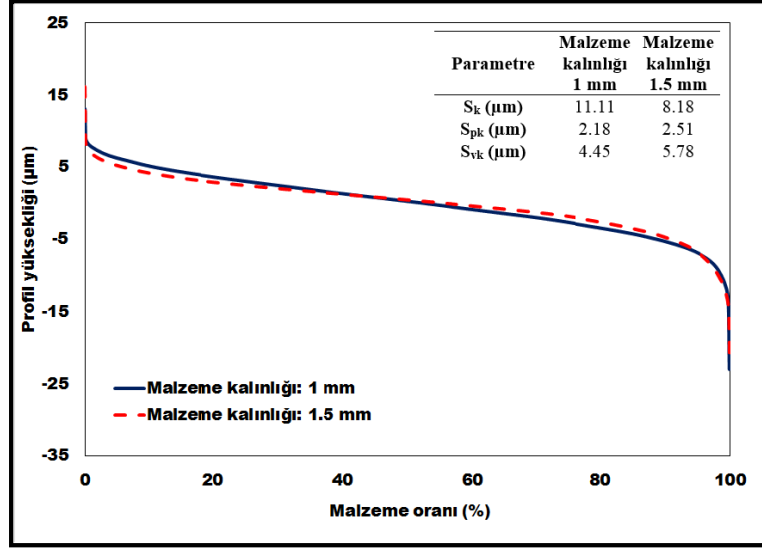
Şekil 5.17’de üç farklı mekanik özelliğe sahip sac malzemelere, 4.4 µm pürüzlülükte merdane kullanılarak, 500 µm ezme miktarıyla, 10 d/dk haddeleme hızında ve kuru şartlarda (4.4/500/10/K), 1 mm ve 1.5 mm kalınlıktaki malzemelere yapılan temper haddeleme ile pürüzlülük transferi sonrasında yüzeylerden alınan 3D alan tarama görüntüleri görülmektedir. Üç farklı malzeme içinde 3D alan tarama görüntülerinde malzeme kalınlığının artışıyla birlikte maksimum vadi derinliklerinde azalma kaydedilirken maksimum tepe yüksekliklerinde ERD7114 ve AISI304 kalite sac malzemelerde artış kaydedilmiştir. ERD7140 kalite sac malzemedede ise maksimum tepe yüksekliği malzeme kalınlığı arttıkça bir miktar azalmıştır.



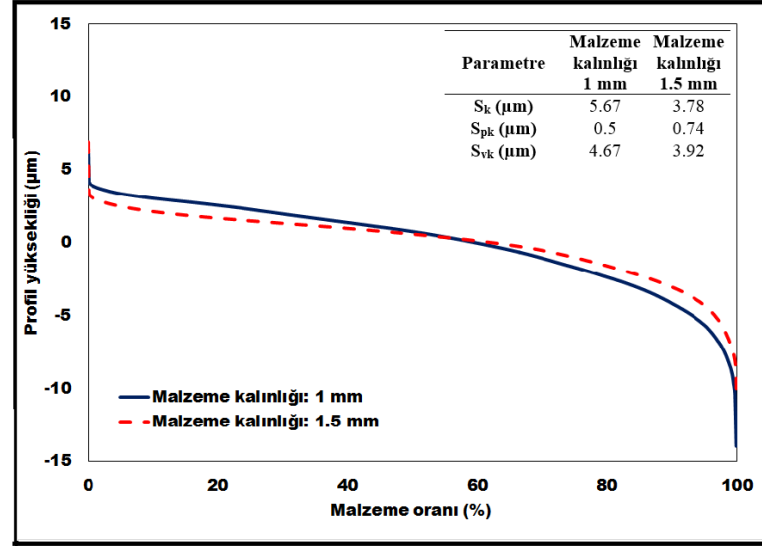
Şekil 5.17. Farklı kalınlıkta malzemeler ile yapılan temper haddeleme ile pürüzlülük transferi sonrasında yüzeylerden alınan 3D alan tarama görüntüleri

Şekil 5.18’de üç farklı malzeme için profil yüksekliği-malzeme oranı eğrileri görülmektedir. Pürüzlülük ölçümlerinden elde edilen malzeme kalınlığı arttıkça malzemenin mekanik özelliği fark etmeksizin pürüzlülük transfer oranının azaldığı bulgusu burada doğrulanmaktadır. Pürüzlülük transfer oranında meydana gelen azalma en çok ERD7140 kalite sac malzemedeki gözlenirken en az ERD7114 kalite sac malzemedeki olduğu bulgusuna daha önce ulaşılmıştı. Burada yine elde edilen bu bulguya benzer sonuçlar tespit edilmiştir. ERD7114 kalite sac malzemedeki 1.5 mm kalınlıkta malzeme kullanılarak yapılan temper haddeleme ile pürüzlülük transferinde 1 mm kalınlıkta malzemeye göre çekirdek pürüzlülüğü ( $S_k$ ) % 26 azalmıştır. Bununla birlikte tepe yüksekliği ( $S_{pk}$ ) ve vadi derinliği ( $S_{vk}$ ) parametreleri sırasıyla % 15 ve % 30 artmıştır. AISI304 kalite sac malzemedeki 1.5 mm kalınlıkta malzeme kullanılarak yapılan temper haddeleme ile pürüzlülük transferinde 1 mm kalınlıkta malzemeye göre çekirdek pürüzlülüğü ( $S_k$ ) % 33 azalmıştır. Ayrıca tepe yüksekliği ( $S_{pk}$ ) ve vadi derinliği ( $S_{vk}$ ) parametreleri sırasıyla % 50 artış ve % 16 azalma göstermiştir. ERD7140 kalite sac malzemedeki ise 1.5 mm kalınlıkta malzeme kullanılarak yapılan temper haddeleme ile pürüzlülük transferinde 1 mm kalınlıkta malzemeye göre çekirdek pürüzlülüğü ( $S_k$ ) % 14 artmıştır. Tepe yüksekliği ( $S_{pk}$ ) ve vadi derinliği ( $S_{vk}$ ) parametreleri yaklaşık % 50 azalma sergilemiştir.

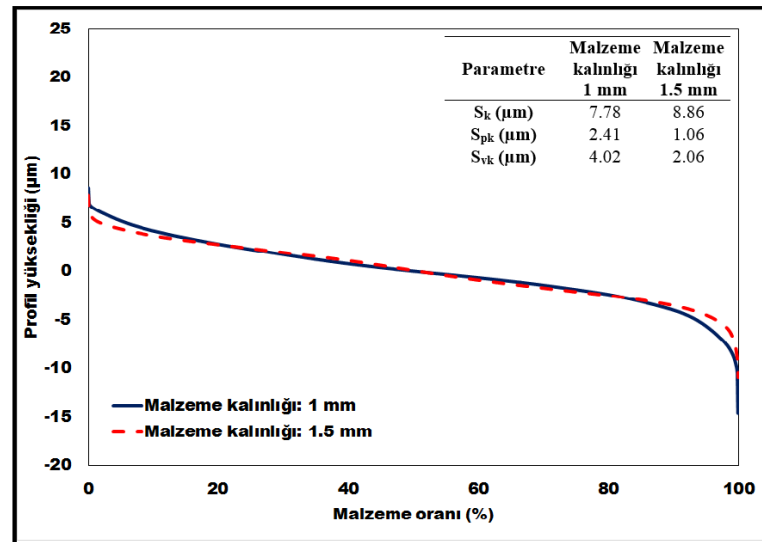
Şekil 5.18’de verilen eğrilerden de açıkça görüldüğü üzere 1.5 mm kalınlığa sahip sac malzemelere temper haddeleme ile yapılan pürüzlülük transferinde, her üç malzeme içinde tepe yükseklikleri ile vadi derinliklerinin azaldığı ve dolayısıyla homojen pürüzlülük dağılımının, kalınlığı fazla olan malzemelere yapılan pürüzlülük transferinde daha iyi olduğu söylenebilir. Bu bulgu, Çolak (2018) tarafından elde edilen sonuçlar ile örtüşmektedir. Ek olarak, ERD7114 ve AISI304 kalite sac malzemedeki malzeme kalınlığı arttıkça daha homojen pürüzlülük dağılımı elde edilmiştir. ERD7140 kalite sac malzemedeki ise malzeme kalınlığı arttıkça pürüzlülük dağılımında daha az oranda bozulma meydana geldiği görülmüştür.



ERD7114



AISI304



ERD7140

Şekil 5.18. Üç farklı malzeme için profil yüksekliği-malzeme oranı eğrileri

### 5.3. Mikrosertlik ve Mikroyapı Karakterizasyonu ile Elde Edilen Bulgular

#### 5.3.1. Mikrosertlik Ölçümlerinden Elde Edilen Bulgular

Şekil 4.20’de gösterilen kalınlık kesiti boyunca nokta numaralarından alınan Vickers mikrosertlik ( $HV_{0.05}$ ) ölçümlerini gösteren grafiksel ilişki Şekil 5.19’da görülmektedir. Temper hadde öncesi, 250  $\mu\text{m}$  ezme miktarı ve 500  $\mu\text{m}$  ezme miktarlarında gerçekleştirilen deneylerin tümünde yüzeye yakın noktalarda mikrosertlik değerlerinin daha yüksek olduğu, merkeze yakın noktalarda ise daha az değerlerde olduğu görülmüştür. Bu durumun oluşmasında malzemenin sıcak işlenmesi esnasında yüzeye yakın kısımların merkeze oranla daha hızlı soğumasından dolayı yüzeylerde daha ince taneli bir bölge oluşumu gerçekleştiği bulunmuştur (Grassino vd, 2012). Aynı zamanda yüzeye yakın bölgelerdeki yüksek sertliğin, dislokasyon yoğunluğundaki artış ve tane boyutundaki küçülme ile birlikte tane sınırlarının dislokasyon hareketini zorlaştırmasından ötürü meydana geldiği söylenebilir (Fuloria vd., 2016). Ayrıca küçük merdane çapları kullanılarak yapılan haddeleme işleminde büyük merdane çapları kullanılarak yapılan haddeleme işlemine nazaran merdanelerin malzeme ile daha az bir alan dahilinde teması sonucunda yüzeye yakın bölgelerde kalıntı çekme gerilmeleri, merkez bölgelerde ise kalıntı basma gerilmeleri meydana gelmesinin böyle bir bulgu elde edilmesine sebebiyet verdiği düşünülmektedir (Ding vd., 2017).

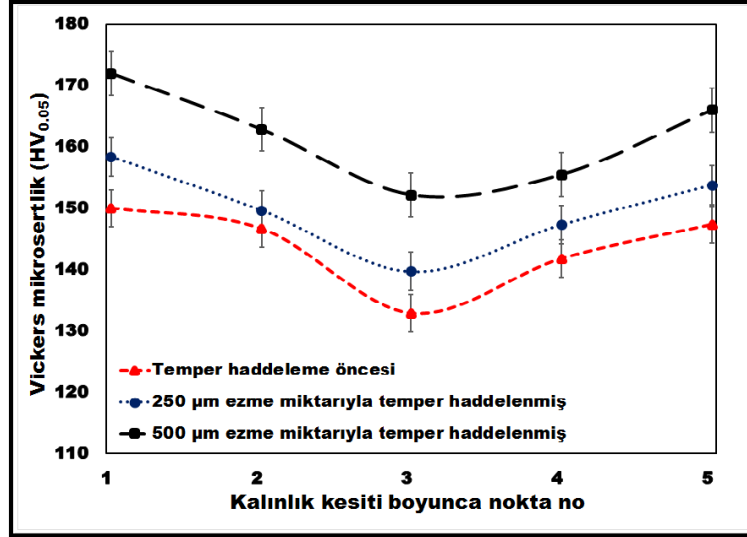
ERD7114 kalite sac malzemedede 250  $\mu\text{m}$  ezme miktarıyla yapılan temper haddeleme işleminde temper haddeleme öncesine göre yaklaşık % 5 artış meydana gelmiştir. 500  $\mu\text{m}$  ezme miktarıyla yapılan temper haddeleme işleminde temper haddeleme öncesine göre meydana gelen artış yaklaşık % 15 olarak belirlenmiştir.

AISI304 kalite sac malzemedede 250  $\mu\text{m}$  ezme miktarıyla yapılan temper haddeleme işleminde temper haddeleme öncesine göre meydana gelen artışın yaklaşık % 4 olduğu görülmüştür. 500  $\mu\text{m}$  ezme miktarıyla yapılan temper haddeleme işleminde temper haddeleme öncesine göre yaklaşık % 11 artış meydana gelmiştir.

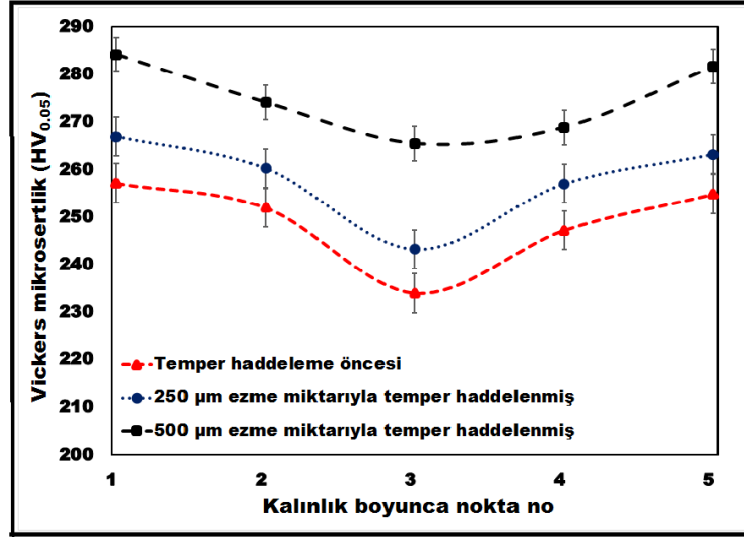
ERD7140 kalite sac malzemedede ise 250  $\mu\text{m}$  ezme miktarıyla yapılan temper haddeleme işleminde temper haddeleme öncesine göre meydana gelen artış yaklaşık % 3 olarak belirlenmiştir. 500  $\mu\text{m}$  ezme miktarıyla yapılan temper haddeleme işleminde temper haddeleme öncesine göre yaklaşık % 9 artışın gerçekleştiği saptanmıştır.

Tüm bu elde edilen bulgular değerlendirildiğinde ezme miktarının artışıyla birlikte mikrosertlik değerinin arttığı tespit edilmiştir. Bu artış, 250  $\mu\text{m}$  ezme miktarında temper haddeleme öncesi duruma göre daha az iken 500  $\mu\text{m}$  ezme miktarında temper haddeleme öncesi duruma göre daha fazla olduğu görülmüştür. Ko vd. (2020), kalınlık azalmasındaki artışın sertlik değerini artırmadaki en önemli etkenin ince taneli bir içyapı evrimi ve düşük açılı tane sınırlarının oluşmasından ötürü kaynaklandığını belirtmişlerdir.

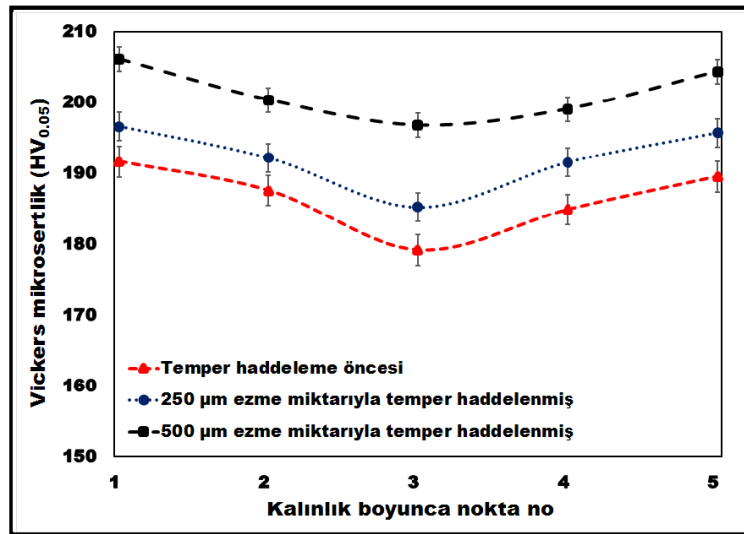
Üç farklı mekanik özelliğe sahip sac malzemenin temper haddeleme ile pürüzlendirme işlemi sonrasında kalınlık boyunca kesitinden alınan mikrosertlik değerindeki artışın düşük akma mukavemetli (ERD7114) malzemede en fazla olduğu, bu artış sırasıyla orta akma mukavemetli malzeme (AISI304) ve yüksek akma mukavemetli malzemenin (ERD7140) takip ettiği görülmüştür.



**ERD7114**



**AISI304**



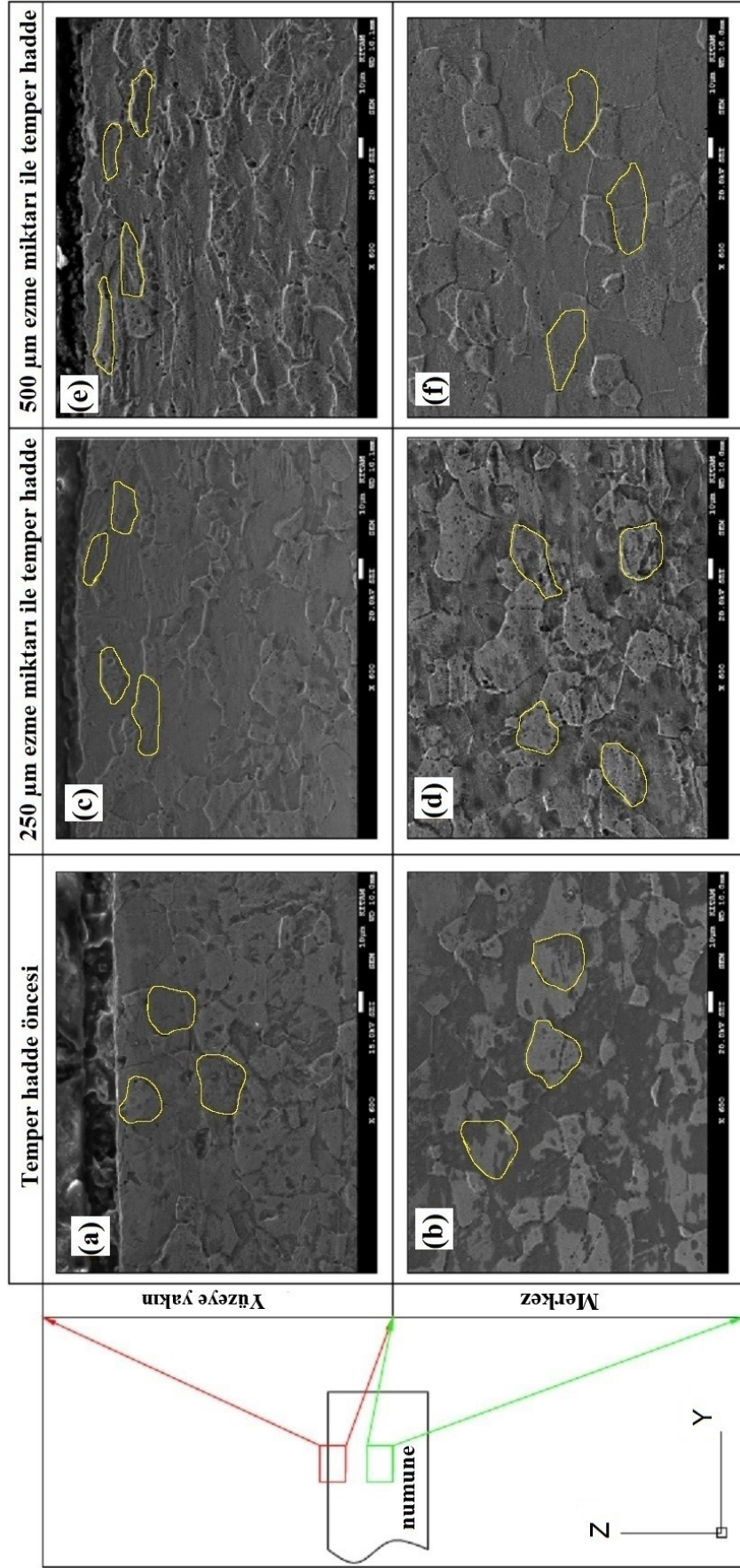
**ERD7140**

Şekil 5.19. Kalınlık kesiti boyunca nokta numaralarından alınan Vickers mikrosertlik ( $HV_{0.05}$ ) ölçümlerini gösteren grafiksel ilişki

### 5.3.2. Mikroyapı Görüntülerinden Elde Edilen Bulgular

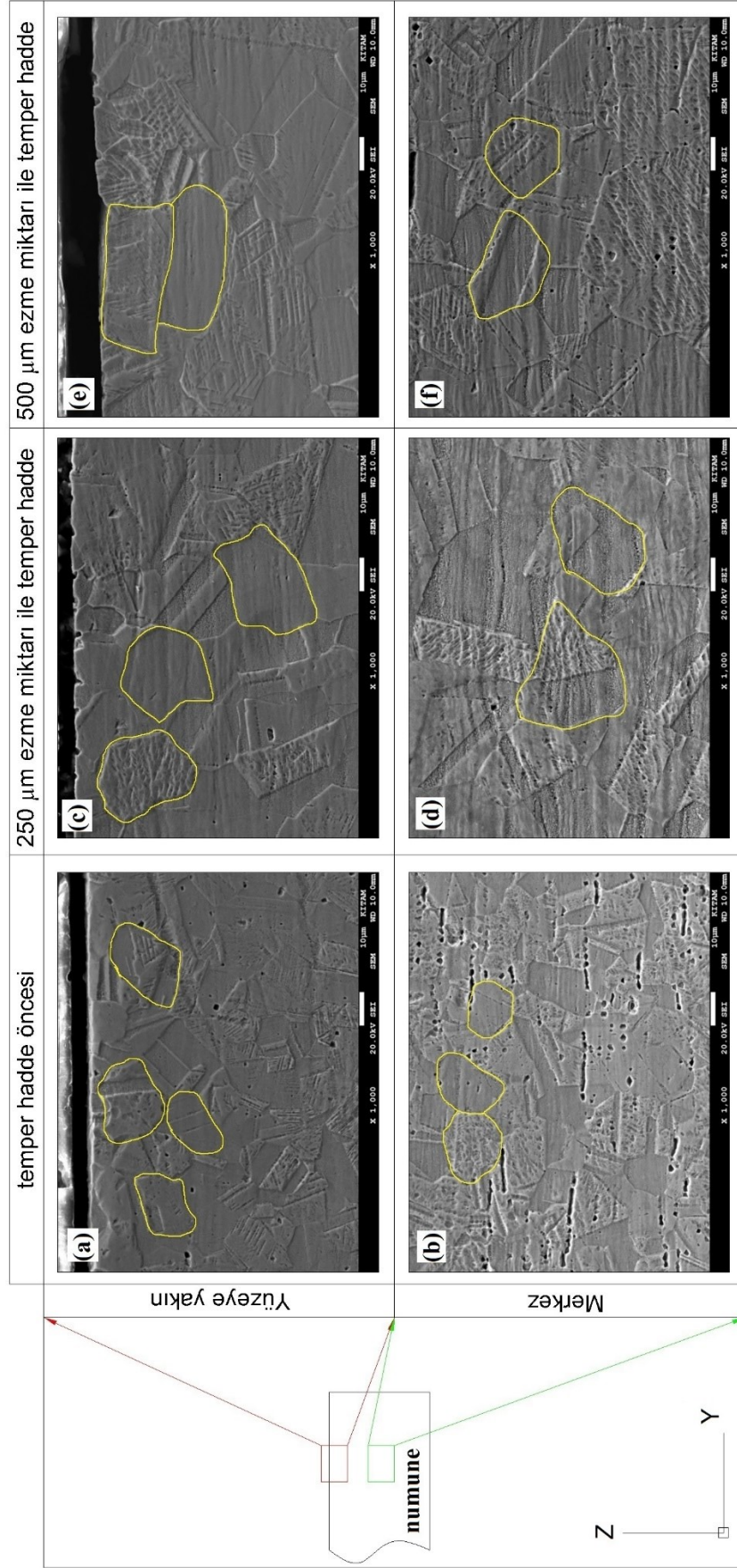
Temper haddeleme ile pürüzlülük transferi işleminde mikroyapının değişimini incelemek için temper hadde öncesi, 250  $\mu\text{m}$  ezme miktarı ve 500  $\mu\text{m}$  ezme miktarlarında temper haddeleme ile yapılan pürüzlendirme işlemi sonrasında sac malzemelerin kalınlık boyunca kesitinden yüzeye yakın ve merkez bölgelerinden alınan taramalı elektron mikroskop (SEM) görüntüleri değerlendirilmiştir.

ERD7114 kalite sac malzemenin temper hadde öncesi, 250  $\mu\text{m}$  ezme miktarı ve 500  $\mu\text{m}$  ezme miktarlarında temper haddeleme ile yapılan pürüzlendirme işlemi sonrasında malzemenin kalınlık boyunca kesitinde yüzeye yakın ve merkez bölgelerden alınan SEM görüntüleri Şekil 5.20’de görülmektedir. ERD7114 (DC04) kalite sac malzemenin ortalama tane boyutunun yaklaşık 20  $\mu\text{m}$  civarında olduğu söylenebilir (Komerla vd., 2018). Temper haddeleme öncesinde yüzeye yakın ve merkez bölgelerde (Şekil 5.20 (a) ve Şekil 5.20 (b)), tanelerin şeklinin küresel forma benzer bir görünüme sahip olduğu görülmektedir. 250  $\mu\text{m}$  ezme miktarıyla yapılan temper haddelemede pürüzlendirme işlemi sonrasında yüzeye yakın bölgede (Şekil 5.20 (c)), tanelerde “y” doğrultusunda uzama ve “z” doğrultusunda ise kısalma başladığı görülmektedir. Merkez bölgede ise (Şekil 5.20 (d)) yüzeye yakın bölgelerde görülen bu durumun henüz tam oluşum sağlamadığı söylenebilir. 500  $\mu\text{m}$  ezme miktarıyla yapılan temper haddelemede pürüzlendirme işlemi sonrasında yüzeye yakın bölgede (Şekil 5.20 (e)), tanelerde “y” doğrultusunda uzama ve “z” doğrultusunda ise kısalmanın çok yüksek miktarda meydana geldiği görülmektedir. Merkez bölgede (Şekil 5.20 (f)), tanelerde “y” doğrultusunda uzama ve “z” doğrultusunda kısalmanın yüzeye yakın bölgede meydana gelen uzama ve kısalmaya göre daha az olduğu söylenebilir.



Şekil 5.20. ERD7114 kalite malzeme için temper haddeleme ile pürüzlendirmede farklı ezme miktarları ile yapılan testlerden elde edilen mikroyapı görüntüleri

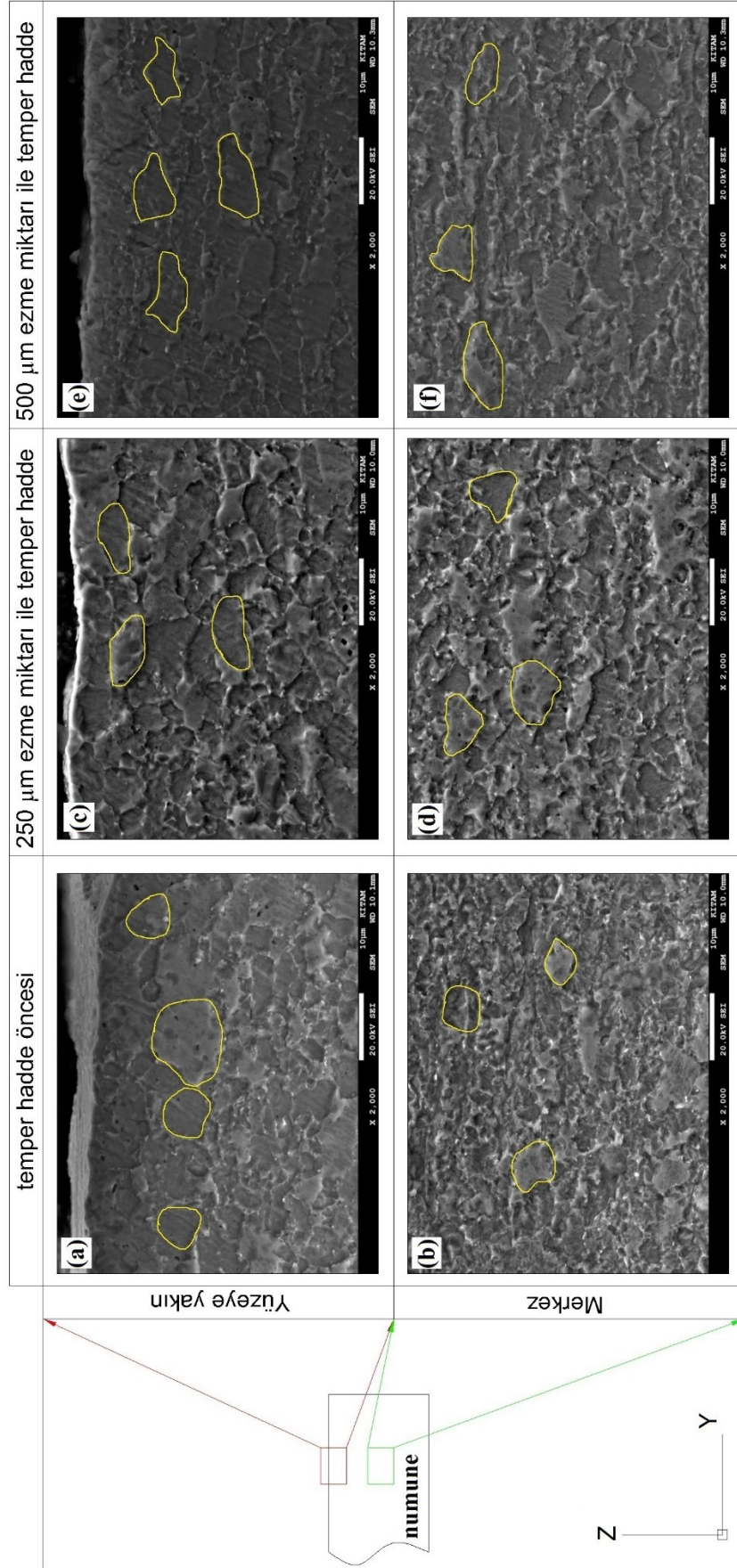
AISI304 kalite sac malzemenin temper hadde öncesi, 250  $\mu\text{m}$  ezme miktarı ve 500  $\mu\text{m}$  ezme miktarlarında temper haddeleme ile yapılan pürüzlendirme işlemi sonrasında malzemenin kalınlık boyunca kesitinde yüzeye yakın ve merkez bölgelerden alınan SEM görüntüleri Şekil 5.21’de görülmektedir. AISI304 kalite sac malzemenin ortalama tane boyutunun yaklaşık 20  $\mu\text{m}$  civarında olduğu söylenebilir (Naghizadeh ve Mirzadeh, 2019). Temper haddeleme öncesinde yüzeye yakın ve merkez bölgelerde (Şekil 5.21 (a) ve Şekil 5.21 (b)), tanelerin şeklinin küresel forma benzer bir görünüme sahip olduğu görülmektedir. 250  $\mu\text{m}$  ezme miktarıyla yapılan temper haddeleme ile pürüzlendirme işlemi sonrasında yüzeye yakın ve merkez bölgelerde (Şekil 5.21 (c) ve Şekil 5.21 (d)), tanelerin fazla deformasyona uğramadığı ve küresel formunu korudukları görülmektedir. 500  $\mu\text{m}$  ezme miktarıyla yapılan temper haddelemede pürüzlendirme işlemi sonrasında yüzeye yakın bölgede (Şekil 5.21 (e)), tanelerde “y” doğrultusunda uzama ve “z” doğrultusunda ise kısılmanın meydana geldiği görülmektedir ve ERD7114 kalite sac malzemelerde oluşan uzama ve kısılma kadar fazla değildir. Merkez bölgede (Şekil 5.21 (f)) ise tanelerde “y” doğrultusunda uzama ve “z” doğrultusunda kısılmanın yüzeye yakın bölgede meydana gelen uzama ve kısılmaya göre daha az olduğu ve tanelerin yine küresel formlarını korumaya devam ettikleri söylenebilir.



Şekil 5.21. AISI304 kalite malzeme için temper haddeleme ile pürüzlendirmede farklı ezme miktarları ile yapılan testlerden elde edilen mikroyapı görüntüleri

ERD7140 kalite sac malzemenin temper hadde öncesi, 250  $\mu\text{m}$  ezme miktarı ve 500  $\mu\text{m}$  ezme miktarlarında temper haddeleme ile yapılan pürüzlendirme işlemi sonrasında malzemenin kalınlık boyunca kesitinde yüzeye yakın ve merkez bölgelerden alınan SEM görüntüleri Şekil 5.22’de görülmektedir. ERD7140 (HC420LA) kalite sac malzemenin ortalama tane boyutunun yaklaşık 5  $\mu\text{m}$  olduğu söylenebilir (Rodionova vd., 2020). Temper haddeleme öncesinde yüzeye yakın ve merkez bölgelerde (Şekil 5.22 (a) ve Şekil 5.22 (b)), tanelerin şeklinin küresel forma benzer bir görünüme sahip olduğu görülmektedir. 250  $\mu\text{m}$  ezme miktarıyla temper haddeleme ile pürüzlendirme işlemi sonrasında yüzeye yakın bölgede (Şekil 5.22 (c)), tanelerde “y” doğrultusunda uzama ve “z” doğrultusunda ise kısalma başladığı görülmektedir. Merkez bölgede (Şekil 5.22 (d)) ise yüzeye yakın bölgelerde görülen bu durumun henüz tam oluşum sağlamadığı söylenebilir. 500  $\mu\text{m}$  ezme miktarıyla temper haddeleme ile pürüzlendirme işlemi sonrasında yüzeye yakın bölgede (Şekil 5.22 (e)), tanelerde “y” doğrultusunda uzama ve “z” doğrultusunda ise kısalmanın temper haddeleme öncesi duruma göre daha fazla olduğu görülmektedir. Merkez bölgede (Şekil 5.22 (f)) ise tanelerde “y” doğrultusunda uzama ve “z” doğrultusunda kısalmanın yüzeye yakın bölgede meydana gelen uzama ve kısalmaya göre daha az olduğu söylenebilir.

Meydana gelen bu uzama ve kısalma miktarlarının ERD7114 kalite sac malzemeye göre daha az olduğu görülebilir. Bununla birlikte tane boyutunda meydana gelen deformasyonun AISI304 kalite sac malzemeye göre daha fazla olduğu görülebilir.



Şekil 5.22. ERD7140 kalite malzeme için temper haddeleme ile pürüzlendirmede farklı ezme miktarları ile yapılan testlerden elde edilen mikroyapı görüntüleri

Bu bulgular doğrultusunda ezme miktarı artışıyla birlikte yüzeye yakın bölgelerde tanelerin uzayıp incelendiği, merkezde ise yüzeye yakın bölgelere nazaran bu değişimin daha az olduğu sonucuna ulaşılabılır. Engler (1996), tanelerde meydana gelen deformasyonun temper haddeleme derecesinin artışıyla birlikte arttığını belirtmiştir. Koh vd. (2010) ise yüzeye yakın bölgelerde orta tabakaya göre tanelerin uzadığını ve orta tabakada ise heterojen deformasyondan dolayı tam olarak iletimin sağlanamadığını ve deformasyonun büyük oranda gerçekleşmediğini bulmuşlardır.

Üç farklı mekanik özelliğe sahip sac malzemenin temper haddeleme ile pürüzlendirme işlemi sonrasında kalınlık boyunca kesitinden alınan mikroyapı görüntüleri değerlendirildiğinde, ezme miktarı artışıyla birlikte ERD7114 kalite sac malzemede kalınlık kesiti boyunca tanelerde meydana gelen deformasyonun, bu üç malzeme içerisinde en yüksek olduğu gözlemlenmiştir. ERD7114 kalite sac malzemede kalınlık kesiti boyunca tanelerde meydana gelen deformasyonu, ERD7140 kalite sac malzeme takip etmiştir ve ERD7114 kalite sac malzemeye göre ezme miktarı arttıkça daha az miktarda tanelerin deformasyona uğradığı görülmüştür. Ezme miktarı arttıkça kalınlık kesiti boyunca tanelerde meydana gelen deformasyonun ise en az AISI304 kalite sac malzemede olduğuna rastlanılmıştır. Bu durumun oluşmasına, ERD7114 ve ERD7140 kalite sac malzemelerin düşük mukavemetli ferrit fazı içermeleri sebep olabilir. ERD7114 kalite sac malzemenin tane boyutunun ERD7140 kalite sac malzemeye göre fazla olmasından dolayı ERD7114 kalite sac malzemenin tanelerinin daha yüksek miktarda deformasyona uğradığı söylenebilir. AISI304 kalite sac malzemenin bu iki malzemeye göre tanelerinin daha az miktarda deformasyona uğrama sebebinin ise yüksek mukavemetli ostenit fazı içermesinden kaynaklı olduğu belirtilebilir.

## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### Sonuçlar

Bu çalışma deneysel olarak yürütülmüş olup farklı mekanik özellikler sergileyen sac malzemelerin farklı haddeleme parametreleri kullanılarak temper haddeleme işlemi ile pürüzlendirilmesi neticesinde pürüzlülük transfer oranları karşılaştırılmıştır. Ayrıca otomotiv ve beyaz eşya sektöründe boyanabilme ve şekillendirme kabiliyeti açısından sac malzeme üzerine transfer edilen pürüzlülük profilinin homojen dağılım gösterip göstermediği 3D pürüzlülük ölçümlerinden elde edilen pürüzlülük parametreleri ve malzeme oranı eğrileri ile değerlendirilmiştir. Tüm bunlara ilaveten sac malzemenin kalınlığı boyunca kesitinden mikrosertlik ve mikroyapı davranışları da incelenmiştir. Temper haddelemede mekanik özellik-yüzey pürüzlendirme ilişkisinin belirlenmesine yönelik kapsamlı bir çalışma yürütülerek imalat endüstrisine fayda sağlamaya yönelik sonuçlar elde edilmeye çalışılmıştır. Deneysel olarak yürütülen bu çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Temper haddeleme ile pürüzlendirme işleminde malzemelerin mekanik özelliklerinin pürüzlülük transferini etkiledikleri ve malzemelerin akma mukavemetinin önemli olduğu sonucu elde edilmiştir.
- Üç farklı akma mukavemetine sahip sac malzemeye farklı haddeleme parametreleri (ezme miktarı, haddeleme hızı, merdane pürüzlülüğü, yağlama şartları, malzeme kalınlığı) ile uygulanan pürüzlendirme deneylerinin neredeyse tamamına yakın bir bölümünde malzemenin artan akma mukavemeti ile pürüzlülük transfer oranının azaldığı tespit edilmiştir.
- Temper haddeleme ile pürüzlendirme işleminde haddeleme parametrelerinden ezme miktarı arttıkça malzemenin mekanik özelliği fark etmeksizin pürüzlülük transfer oranının arttığı belirlenmiştir. Ezme miktarı arttıkça malzemelerin tümünde homojen pürüzlülük dağılımının bozulmuştur. Pürüzlülük dağılımı en çok düşük akma mukavemetine sahip malzeme (ERD7114) bozulurken en az yüksek akma mukavemetli malzeme (ERD7140) bozulduğu sonucuna varılmıştır.
- Temper haddeleme ile pürüzlendirme işleminde düşük ezme miktarlarında (250  $\mu\text{m}$ ), haddeleme hızı arttıkça malzemenin mekanik özelliği fark etmeksizin her üç sac malzemeye de birbirine yakın oranlarda pürüzlülük

transferi sağlanmıştır. Bununla birlikte yüksek ezme miktarlarında (500 µm) ise haddeleme hızı arttıkça düşük akma mukavemetine sahip malzemede (ERD7114) pürüzlülük transfer oranının azaldığı orta ve yüksek akma mukavemetine sahip malzemelerde (AISI304 ve ERD7140) birbirine yakın oranlarda pürüzlülük transfer edildiği gözlemlenmiştir. Haddeleme hızı arttıkça pürüzlülük dağılımının homojenliği her üç malzeme içinde çok fazla etkilenmemekle birlikte düşük akma mukavemetine sahip malzemede (ERD7114) pürüzlülük dağılımı daha homojen iken orta ve yüksek akma mukavemetine sahip malzemelerde (AISI304 ve ERD7140) ise haddeleme hızı arttıkça pürüzlülük dağılımının bozulduğu sonucuna ulaşılmıştır.

- Temper haddeleme ile pürüzlendirme işleminde yağlayıcı kullanılan koşullarda malzemenin mekanik özelliği fark etmeksizin pürüzlülük transfer oranı belirgin düzeyde azalmıştır. Bu azalmanın en çok düşük akma mukavemetine sahip malzemede (ERD7114), en az yüksek akma mukavemetine sahip malzemede (ERD7140) olduğu görülmüştür. Yağlayıcı kullanılan koşullarda kuru şartlara göre daha homojen bir pürüzlülük dağılımı elde edildiği ve pürüzlülük dağılımının düşük akma mukavemetine sahip malzemede (ERD7114) daha homojen olduğu sonucu elde edilmiştir.
- Temper haddeleme ile pürüzlendirme işleminde merdane pürüzlülüğü arttıkça malzemenin mekanik özelliği fark etmeksizin pürüzlülük transfer oranının belirgin düzeyde azaldığı ve bu azalmanın en çok düşük akma mukavemetine sahip malzemede (ERD7114), en az yüksek akma mukavemetine sahip malzemede (ERD7140) olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Merdane pürüzlülüğü arttıkça homojen pürüzlülük dağılımının bozulduğu ve düşük akma mukavemetine sahip malzemede (ERD7114) daha az oranda meydana geldiği tespit edilmiştir.
- Temper haddeleme ile pürüzlendirme işleminde malzeme kalınlığı arttıkça malzemenin mekanik özelliği fark etmeksizin pürüzlülük transfer oranının belirgin düzeyde azaldığı ve bu azalmanın en çok yüksek akma mukavemetine sahip malzemede (ERD7140), en az düşük akma mukavemetine sahip malzemede (ERD7114) olduğu görülmüştür. Malzeme kalınlığı arttıkça daha homojen bir pürüzlülük dağılımı elde edildiği ve yüksek akma mukavemetine sahip malzemede (ERD7140) pürüzlülük

dağılımında daha az oranda bozulma meydana gelmiştir.

- Temper haddeleme ile pürüzlendirme işleminde kalınlık boyunca kesitte yüzeye yakın noktalarda mikrosertlik değerinin daha yüksek, merkeze yakın noktalarda ise daha az olduğu ve ezme miktarı arttıkça mikrosertlik değerinin arttığı gözlemlenmiştir. Ezme miktarı artışıyla birlikte kalınlık kesiti boyunca mikrosertlik değerlerinde meydana gelen bu artış, düşük akma mukavemetine sahip malzemede (ERD7114) en fazla iken yüksek akma mukavemetine sahip malzemede (ERD7140) en az olduğu sonucuna ulaşılmıştır.
- Temper haddeleme ile pürüzlendirme işleminde kalınlık boyunca kesitte mikroyapı görüntülerinin değerlendirilmesi sonucunda, ezme miktarı arttıkça yüzeye yakın bölgelerde tanelerin uzayıp incelendiği, merkezde ise yüzeye yakın bölgelere nazaran bu değişimin daha az olduğu belirlenmiştir. Ezme miktarı artışıyla birlikte kalınlık kesiti boyunca tanelerde meydana gelen deformasyon, düşük akma mukavemetine sahip malzemede (ERD7114) en fazla iken orta akma mukavemetine sahip malzemede (AISI304) en az olduğu sonucuna varılmıştır.

## Öneriler

Bu çalışmada temper haddelemede mekanik özellik-yüzey pürüzlendirme ilişkisinin belirlenmesine yönelik kapsamlı bir çalışma yürütülmüştür ve temper haddelemede pürüzlendirme işlemini etkileyen haddeleme parametrelerinden ezme miktarı, haddeleme hızı, merdane pürüzlülüğü, malzeme kalınlığı ve yağlama şartları incelenmiştir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde temper haddeleme ile sac malzemelerin pürüzlendirilmesi işlemlerini gerçekleştiren imalat endüstrisine yönelik birtakım öneriler sunulabilir.

Temper haddelemede pürüzlendirme işleminde malzemelerin mekanik özelliklerinin oldukça etkili olduğu ve bu mekanik özelliklerin imalat sürecinde dikkate alınması önerilir.

Düşük akma mukavemetli malzemelerde (<200 MPa), temper haddeleme ile pürüzlendirme işleminde düşük ezme miktarı pürüzlülük dağılımının homojen olması açısından önemlidir. Mikrosertlik ve mikroyapı bulguları ile birlikte değerlendirildiğinde, düşük akma mukavemetli malzemeler yüksek ezme

miktarlarında daha fazla deformasyon sertleşmesine uğraması sonucunda pürüzlülük transferi stabil hale gelirken öte yandan da pürüzlülük dağılımının homojenliği bozulmuştur. Haddeleme hızı arttıkça kısmen daha homojen bir pürüzlülük dağılımı elde edilmiştir ancak haddeleme hızı ayarında kesinlikle düşük hızların seçilmesi önerilir. Yüksek haddeleme hızlarının yüksek ezme miktarı ile birlikte kullanılması durumunda pürüzlülük transfer oranının azalacağı göz önünde bulundurulmalıdır. Ayrıca yüksek haddeleme hızları merdanenin ömrünü azaltacağı için yine düşük hızlar seçilmelidir. Merdane pürüzlülüğünün artışı pürüzlülük transfer oranını azaltmış ancak pürüzlülük dağılımı çok etkilenmemiştir. Yağlayıcı kullanılan şartlarda kuru şartlara göre çok daha homojen bir pürüzlülük dağılımı elde edilmiştir. Malzeme kalınlığı arttıkça daha homojen bir pürüzlülük dağılımı meydana gelmiştir. Dolayısıyla düşük akma mukavemetli malzemelerin yağlayıcı kullanılan haddeleme koşullarında, düşük ezme miktarı, düşük haddeleme hızı, düşük pürüzlülüğe sahip merdane kullanarak ve kalınlığı az olan malzemeler için belirtilen hususlara dikkat edilerek pürüzlendirilmesi tavsiye edilir.

Orta değerlerde akma mukavemetine sahip malzemelerde (200-400 MPa), temper haddeleme ile pürüzlendirme işleminde yine düşük ezme miktarı pürüzlülük dağılımının homojen olması açısından önemlidir. Haddeleme hızı artışı ile birlikte pürüzlülük transfer oranı hemen hemen aynı kalırken pürüzlülük dağılımının homojenliği yüksek hızlarda bozulmuştur. Yüksek haddeleme hızları merdanenin ömrünü azaltacağı göz önüne alındığında düşük hızların seçilmesi tavsiye edilir. Merdane pürüzlülüğünün artışı pürüzlülük transfer oranını azaltmıştır ve pürüzlülük dağılımında tepe ve vadi oluşumunda artış görülmüştür. Bu durum göz önüne alındığında kesinlikle düşük pürüzlülüğe sahip merdane kullanılması önerilir. Yağlayıcı kullanılan şartlarda kuru şartlara göre daha homojen bir pürüzlülük dağılımı sağlanmıştır. Malzeme kalınlığı arttıkça daha homojen bir pürüzlülük dağılımı meydana gelmiştir. Orta akma mukavemetli malzemelerinde düşük akma mukavemetli malzemeler gibi yağlayıcı kullanılan haddeleme koşullarında, düşük ezme miktarı, düşük haddeleme hızı, düşük pürüzlülüğe sahip merdane kullanarak ve kalınlığı az olan malzemeler için belirtilen hususlara dikkat edilerek pürüzlendirme işlemi yapılabilir.

Yüksek akma mukavemetli malzemelerde (>400 MPa) ise temper haddeleme ile pürüzlendirme işleminde ezme miktarı artışıyla pürüzlülük transfer oranı artmıştır,

bununla birlikte tepe ve vadi oluşumu belirgin düzeyde arttığından dolayı pürüzlülük dağılımının homojenliği bozulmuştur. Haddeme hızı artışı ile birlikte pürüzlülük transfer oranı hemen hemen aynı kalırken pürüzlülük dağılımının homojenliği yüksek hızlarda bozulmuştur. Yüksek haddeme hızlarının yine merdanenin ömrünü azaltacağı göz önüne alındığında düşük hızların seçimi tercih edilebilir. Merdane pürüzlülüğünün artışı ile birlikte pürüzlülük transfer oranı azalmıştır ve pürüzlülük dağılımının homojenliği bozulmuştur. Bu durum göz önüne alındığında kesinlikle düşük pürüzlülüğe sahip merdane kullanılması tavsiye edilir. Yağlayıcı kullanılan şartlarda kuru şartlara göre daha homojen bir pürüzlülük dağılımı elde edilmiştir ancak çok bariz bir farklılık olmadığı için pürüzlendirme işlemi kuru şartlar altında da yapılabilir. Malzeme kalınlığı arttıkça daha homojen bir pürüzlülük dağılımı elde edilmiştir ve yine pürüzlülük dağılımında çok belirgin bir farklılık gözlenmediği için pürüzlendirme işlemi ince malzemelere de sorunsuz bir şekilde yapılabilir. Yüksek akma mukavemetli malzemelerinde kuru veya yağlayıcı kullanılan haddeme koşullarında, düşük ezme miktarı, düşük haddeme hızı, düşük pürüzlülüğe sahip merdane tercih edilerek malzeme kalınlığı fark etmeksizin pürüzlendirme işlemi yapılabileceği önerilir.

## KAYNAKLAR

- Aran, A. ve M. Demirkol (1995). *Plastik şekil verme ve teknolojisi*. İstanbul: İ.T.Ü. Makine Fakültesi.
- Archard, J. (1953). "Contact and rubbing of flat surfaces". *Journal of Applied Physics*, 24 (8), 981-988.
- Asgari, H., Bakhtiari, A. R., Toroghinejad, M. R. ve F. Ashrafizadeh (2008). "Influence of force variations in skin pass rolling on texture and surface reactivity of hot dip galvanised low carbon steel sheets". *Ironmaking & Steelmaking*, 35 (7), 545-548.
- Aspinwall, D. K., Wise, M. L. H., Stout, K. J., Goh, T. H. A., Zhao, F. L. ve M.F. El-Menshawey (1992). "Electrical discharge texturing". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 32 (1-2), 183-193.
- A. S. T. M. (2007). E407, *Standard practice for microetching metals and alloys*.
- Baçoğlu, F. ve N. Kurgan (2019). "Temper haddelemede merdane parametrelerinin ERD6112 kalite sac malzemelerin pürüzlülük transferine etkisinin deneysel incelenmesi". *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 6 (2), 344-356.
- Baçoğlu, F. (2019). "Temper haddelemede merdane parametrelerinin sac malzemelerin pürüzlülük transferine etkisinin deneysel incelenmesi". Basılmamış Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 62, Samsun.
- Bhaduri, A. (2018). *Mechanical properties and working of metals and alloys* (Vol. 264). Berlin: Springer.
- Bidulska, J., Kvackaj, T., Bodak, V. ve R. Bidulska (2007). "The microgeometry parameters of uncoated and zinc-coated cold rolled steel strips". *Journal of Metals, Materials and Minerals*, 17 (2), 1-7.
- Bitelli, G., Simone, A., Girardi, F. ve C. Lantieri (2012). "Laser scanning on road pavements: A new approach for characterizing surface texture". *Sensors*, 12 (7), 9110-9128.
- Bloeck, M. (2012). "Aluminium sheet for automotive applications". Jason Rowe (eds.). in: *In advanced materials in automotive engineering* (s. 85-108). Woodhead Publishing.
- Blunt, L. ve X. Jiang (2003). *Advanced techniques for assessment surface topography: development of a basis for 3D surface texture standards "surfstand"*. Elsevier.
- Burdek, M. (2015). "The change of work roll surface topography during skin pass rolling of steel sheets". *Industrial Lubrication and Tribology*, 67 (6), 630-638.
- Butler, L. H. (1957). "The effects of lubricants on the surface appearance of aluminum after plastic deformation". *Metallurgia*, 2, 63-66.
- Chatterjee, D. (2020). "Effect of cryorolling–annealing and bake-hardening on the microstructure and mechanical properties of AISI 301LN grade austenitic stainless steel". *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 9 (5), 695-708.
- Choi, I. S., Rossiter, J. A. ve P. J. Fleming (2007). "Looper and tension control in hot rolling mills: A survey", *Journal of Process Control*, 17 (6), 509-521.
- Clarysse, F., Vermeulen, M., Gijs, J., Van De Velde, F. ve P. Vranken (2008). "Aesthetic surfaces created with the Electron Beam texturing technology". In *Galvanized Steel Sheet Forum: Functional properties*.
- Çapan, L. (2010). *Metallere plastik şekil verme*. İstanbul: Çağlayan Kitabevi.

- Çolak, B. ve N. Kurgan (2018). “An experimental investigation into roughness transfer in skin-pass rolling of steel strips”. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 96 (9-12), 3321-3330.
- Çolak, B. (2018). *Soğuk haddelemede pürüzlülük transferini etkileyen haddeleme parametrelerinin ve malzeme özelliklerinin deneysel olarak incelenmesi*. Basılmamış Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 93, Karabük.
- Değirmenci, H. (2006). *Çelik sacların mekanik özelliklerinde ortaya çıkan değişimler ve nedenleri ile bunların şekillendirme prosesi üzerindeki etkileri*. Basılmamış Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 220, İstanbul.
- Demirkol M. (2010). *Plastik şekil verme teknolojisi ders notları*. İ.T.Ü. Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul.
- Devarajan, K., Marimuthu, K. P. ve A. Ramesh (2012). “FEM analysis of effect of rolling parameters on cold rolling process”. *Bonfring International Journal of Industrial Engineering and Management Science*, 2 (1), 35-40.
- Dick, K. ve J. G. Lenard (2005). “The effect of roll roughness and lubricant viscosity on the loads on the mill during cold rolling of steel strips”. *Journal of Materials Processing Technology*, 168 (1), 16-24.
- Ding, Z. H., Cui, F. K., Liu, Y. B., Li, Y. ve K. G. Xie (2017). “A model of surface residual stress distribution of cold rolling spline”. *Mathematical Problems in Engineering*, 2017.
- Du, D., He, Y. F., Sui, B., Xiong, L. J. ve H. Zhang (2005). “Laser texturing of rollers by pulsed Nd: YAG laser”. *Journal of Materials Processing Technology*, 161 (3), 456-461.
- Ekelund, S. (1933). *Analysis of factors influencing rolling pressure and power consumption in the hot rolling of steel*.
- Engler, O. (1996). “Nucleation and growth during recrystallisation of aluminium alloys investigated by local texture analysis”. *Materials Science and Technology*, 12 (10), 859-872.
- Erdemir T.A.Ş. (2020). Yassı ürün kataloğu. Erişim: 8 Aralık 2020, <https://www.erdemir.com.tr/Sites/1/upload/files/yassi-urun-katalogu-eylul-2020-tr-4677.pdf>
- Fujii, Y., Maeda, Y. ve R. Ifuku (2014). “Prediction of surface roughness on rolled sheet by roll”. *Procedia Engineering*, 81, 161-166.
- Fuloria, D., Kumar, N., Goel, S., Jayaganthan, R., Jha, S. ve D. Srivastava (2016). “Tensile properties and microstructural evolution of Zircaloy-4 processed through rolling at different temperatures”. *Materials & Design*, 103, 40-51.
- Gadelmawla, E. S., Koura, M. M., Maksoud, T. M. A., Elewa, I. M. ve H. H. Soliman (2002). “Roughness parameters”. *Journal of Materials Processing Technology*, 123 (1), 133-145.
- Ginzburg, V. B. (1989). “Steel-rolling technology: theory and practice”. New York: Marcel Dekker, Inc.
- Gorbunov, A. V., Belov, V. K. ve D. O. Begletsov (2009). “Texturing of rollers for the production of auto-industry sheet”. *Steel in Translation*, 39 (8), 696.
- Gordon England (2020). Microhardness test. Retrieved December 27, 2020, from <https://www.gordonengland.co.uk/hardness/microhardness.htm>

- Grassino, J., Vedani, M., Vimercati, G. ve G. Zanella (2012). “Effects of skin pass rolling parameters on mechanical properties of steels”. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 13 (11), 2017-2026.
- Groover, M. P. (2020). *Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems*. John Wiley & Sons.
- Hardy, Y., Kurzinsky, J., Jacobs, L., Hörnström, S. E. ve U. Richter (2005). *Hot and cold rolling processes charecterization and control of roughness transfer in temper rolling*. Lüksemburg: Office for Official Publications of the European Communities.
- Hayat, F. (2010). “TRIP çeliklerinin otomotiv endüstrisinde kullanımının incelenmesi”. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 25 (4), 701-712.
- Hilgenberg, K. ve K. Steinhoff (2015). “Texturing of skin-pass rolls by pulsed laser dispersing”. *Journal of Materials Processing Technology*, 225, 84-92.
- Hoffman, O. ve G. Sachs (1953). *Introduction to the Theory of Plasticity for Engineers*. McGraw-Hill.
- Holz, R., Hoen, K. ve K. Weiss (2010). “Advanced technology in skin pass rolling”. *Millenium Steel*, 82-88.
- Hum, B., Colquhoun, H. W. ve J. G. Lenard (1996). “Measurements of friction during hot rolling of aluminum strips”. *Journal of Materials Processing Technology*, 60 (1-4), 331-338.
- ISO 4287 (2013). Geometrical Product Specifications (GPS)—Surface texture: Profile Method—Terms, definitions and surface texture parameters.
- ISO 4288 (1999). Geometrical Product Specifications (GPS)—Surface texture: profile method—rules and procedures for the assessment of surface texture.
- ISO 13565-2 (1997). Geometrical Product Specifications (GPS)- Surface texture: Profile method- Surfaces having stratified functional properties- Part 2: Height characterization using the linear material ratio curve.
- ISO 25178 (2012). Geometric Product Specifications (GPS)—Surface texture: areal.
- Januszkiwicz, K. R. ve Sulek, H. H. (1988). “Effects of the thiophenic contamination of the hot rolling lubricant in breakdown mill rolling”. *Lubrication Engineering*, 44(5), 454-458.
- Jeng, Y. R., Lee, J. T., Hwu, Y. J., Liu, L. C. ve C. Y. Lu (2020). “Effects of operation parameters of cold rolling on surface finish of aluminum”. *Tribology International*, 106321.
- Jeulin, D. ve P. Laurence (1996). “Morphological simulation of the roughness transfer on steel sheets”. *Microscopy Microanalysis Microstructures*, 7 (5-6), 541-547.
- Kalpakistan, S. ve S. R. Schmid (2009). *Manufacturing Engineering*. USA: Pearson Prentice Hall: Upper Saddle River.
- Kijima, H. ve N. Bay (2008a). “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.
- Kijima, H. ve N. Bay (2008b). “Skin-pass rolling II—Studies of roughness transfer under combined normal and tangential loading”. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48 (12-13), 1308-1312.
- Kijima, H. ve N. Bay (2009). “Influence of tool roughness and lubrication on contact conditions in skin-pass rolling”. *Journal of Materials Processing Technology*, 209 (10), 4835-4841.

- Kijima, H. (2013). "Influence of roll radius on contact condition and material deformation in skin-pass rolling of steel strip". *Journal of Materials Processing Technology*, 213 (10), 1764-1771.
- Kijima, H. (2014). "Influence of roll radius on roughness transfer in skin-pass rolling of steel strip". *Journal of Materials Processing Technology*, 214 (5), 1111-1119.
- Kijima, H. (2015a). "An experimental investigation on the influence of lubrication on roughness transfer in skin-pass rolling of steel strip". *Journal of Materials Processing Technology*, 225, 1-8.
- Kijima, H. (2015b). "Influence of lubrication on roughness crushing in skin-pass rolling of steel strip". *Journal of Materials Processing Technology*, 216, 1-9.
- Kijima, H. (2019). *Mechanism of roughness profile transfer in skin-pass rolling of thin steel strip*. JFE Technical Report, 129-134.
- Kimura, Y., Ueno, M. ve Y. Mihara (2009). "Printing behavior of roll surface texture to hot-dip galvanized steel sheet in temper rolling". *Tetsu to Hagane*, 95 (5), 399-405.
- Klocke, F. ve W. König (2006). *Fertigungsverfahren 4* (Vol. 5). Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Ko, Y. G., Chaudry, U. M. ve K. Hamad (2020). "Microstructure and mechanical properties of AA6061 alloy deformed by differential speed rolling". *Materials Letters*, 259, 126870.
- Koh, Y. H., Lee, M. H. ve S. K. Kim (2010). "Texture evolution in low-C flat rolled steels on the physical properties". *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 11 (3), 445-452.
- Komerla, K., Naumov, A., Mertin, C., Prah, U. ve W. Bleck (2018). "Investigation of microstructure and mechanical properties of friction stir welded AA6016-T4 and DC04 alloy joints". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94 (9-12), 4209-4219.
- Köhler, K., Kwiaton, N. ve M. Bretschneider (2016). "Skin pass rolling of high manganese steels". *Materials Science Forum*, 854, 93-98.
- Le, H. R. ve M. P. F. Sutcliffe (2001). "A robust model for rolling of thin strip and foil". *International Journal of Mechanical Sciences*, 43 (6), 1405-1419.
- Lenard, J. G. (2004). "The effect of roll roughness on the rolling parameters during cold rolling of an aluminum alloy". *Journal of Materials Processing Technology*, 152 (2), 144-153.
- Lenard, J. G. (2013). *Primer on flat rolling*. Newnes.
- Ma, B., Tieu, A. K., Lu, C. ve Z. Jiang (2002). "An experimental investigation of steel surface characteristic transfer by cold rolling". *Journal of Materials Processing Technology*, 125, 657-663.
- Mazur, V. L. ve O.V. Nogovitsyn (2018). *Theory and technology of sheet rolling: Numerical analysis and applications*. USA: CRC Press.
- MCT (2021). Why is static friction greater than kinetic friction. Retrieved April 14, 2021, from <https://www.motioncontroltips.com/why-is-static-friction-greater-than-kinetic-friction/>
- Mekicha, M. A., de Rooij, M. B., Jacobs, L., Matthews, D. T. A. ve D. J. Schipper (2020). "Experimental validation of contact models for cold-rolling processes". *Journal of Materials Processing Technology*, 275, 116371.
- Mitchell, J. (2019). Cold rolling-process overview. Retrieved December 13, 2020, from <https://www.engineeringclicks.com/cold-rolling/>

- Mulay, A., Ben, B. S., Ismail, S., Kocanda, A. ve C. Jasiński (2018). “Performance evaluation of high-speed incremental sheet forming technology for AA5754 H22 aluminum and DC04 steel sheets”. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 18, 1275-1287.
- Nagase, N., Shido, S. ve I. Yarita (2009a). “Imprinting of dull roll surface texture to carbon steel strips in temper rolling by dry condition”. *ISIJ International*, 49 (4), 539-545.
- Nagase, N., Shido, S. ve I. Yarita (2009b). “The effect of lubricant on microwear of dull rolls in temper rolling by 4 hi rolling mill”. *ISIJ International*, 49 (6), 874-880.
- Nagase, N., Shido, S. ve I. Yarita (2009c). “The effect of soluble lubricant on surface imprinting in temper rolling by 4 hi rolling mill”. *ISIJ International*, 49 (6), 881-889.
- Naghizadeh, M. ve H. Mirzadeh (2019). “Effects of grain size on mechanical properties and work-hardening behavior of AISI 304 austenitic stainless steel”. *Steel Research International*, 90 (10), 1900153.
- Nakhoul, R. (2014). *Multi-scale method for modeling thin sheet buckling under residual stress: In the context of cold strip rolling*. Unpublished Ph.D. thesis, Mines ParisTech, Paris.
- Özakın, B. ve N. Kurgan. (2019). “Temper haddelemede pürüzlülük transferini etkileyen parametrelerin incelenmesine yönelik bir derleme çalışması”. *International Periodical of Recent Technologies in Applied Engineering*, 1 (2), 67-78.
- Özakın, B. ve N. Kurgan (2020). “DC04 kalite sac malzemelere temper haddeleme ile pürüzlülük transferinde yağlayıcının etkisinin incelenmesi”. *Uluslararası Doğu Anadolu Fen Mühendislik ve Tasarım Dergisi*, 2 (2), 325-336.
- Pawelski, O., Rasp, W., Zwick, W., Nettelbeck, H. J. ve K. Steinhoff (1994). “The influence of different work-roll texturing systems on the development of surface structure in the temper rolling process of steel sheet used in the automotive industry”. *Journal of Materials Processing Technology*, 45 (1-4), 215-222.
- Pittner, J. ve M.A. Simaan (2010). *Tandem cold metal rolling mill control: Using practical advanced methods*. USA: Springer Science & Business Media.
- Plicht, G., Schillak, H., Lin, M., Edwards, R., Mebrahtu, T., Hofinghoff, H. ve T. Demski (2007). “Skin-pass rolling of steel strip using liquid nitrogen”. *Materials Science and Technology-Association for Iron and Steel Technology*, 6, 149-157.
- Ray, S. (2016). *Principles and applications of metal rolling*. India: Cambridge University Press.
- Reddy, N. V. ve G. Suryanarayana (2001). “A set-up model for tandem cold rolling mills”. *Journal of Materials Processing Technology*, 116 (2-3), 269-277.
- Roberts, W. L. (1978). *Cold rolling of steel*. Dekker.
- Rodionova, I. G., Amezhnov, A. V., D'yakonov, D. L., Shaposhnikov, N. G., Baklanova, O. N. ve Y. S. Gladchenkova (2020). “Study of the effect of microstructure characteristics on corrosion resistance of cold-rolled micro-alloyed sheet steels (HSLA) of strength classes 340–420 for automobile building”. *Metallurgist*, 63 (11-12), 1165-1177.
- Rodriguez-Vidal, E., Matthews, D. T. A., de Viteri, V. S., Korver, F., Wentink, D. J. ve I. Quintana (2020). “Surface design and texturing of strip steel using nanosecond pulsed lasers for simulated roughness transfer and paint appearance”. *Journal of Materials Processing Technology*, 275, 116365.
- Rudawska, A. (2019). “Mechanical treatment”. Anna Rudawska (eds.). in: *Surface Treatment in Bonding Technology* (s. 87-128). London: Academic Press.

- Rudawska, A., Danczak, I., Müller, M. ve P. Valasek (2016). "The effect of sandblasting on surface properties for adhesion". *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 70, 176-190.
- Salman, S. ve Ö. Gülsoy (2004). *Metalografi Bilimi*. Ankara: Nobel Yayın Dağıtım.
- Sancaktar, E. ve R. Gomatam (2001). "A study on the effects of surface roughness on the strength of single lap joints". *Journal of Adhesion Science and Technology*, 15 (1), 97-117.
- Scheers, J., Vermeulen, M., De Mare, C. ve K. Meseure (1998). "Assessment of steel surface roughness and waviness in relation with paint appearance". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 38 (5-6), 647-656.
- SEP 1940 (2002). Measurement of roughness average  $R_a$  and peak count  $R_{pc}$  on cold rolled steel sheet with stochastic surface textures.
- Shi, W., Ren, D., Wan, Y., Li, Y. ve J. Li (2017, April). "STUDY on relationship between micro vickers hardness and indentation hardness". In *IMEKO TC3, TC5 and TC22 International Conference 2017*, Helsinki.
- Shigaki, Y., Nakhoul, R. ve P. Montmitonnet (2015). "Numerical treatments of slipping/no-slip zones in cold rolling of thin sheets with heavy roll deformation". *Lubricants*, 3 (2), 113-131.
- Simao, J., Apinwall, D. K., Wise, M. L. H. ve K. Subari (1996). "Surface texture transfer in simulated tandem and temper mill rolling using electrical discharge textured rolls". *Journal of Materials Processing Technology*, 56 (1-4), 177-189.
- SMS DEMAG (2003). Influence of temper rolling on material properties. Zürich: İsviçre.
- Steel (2020). <https://www.steel.org>
- Sun, D., Yao, L., Fan, Q. ve J. Zhang (2006). "Research on service performances between different textured cold rolls". *AISTech Proceedings*, 285-289.
- Şenel, M. C. (2018). "Grafen-seramik tanecik takviyeli alüminyum matrisli hibrit kompozitlerin toz metalurjisi yoluyla üretimi, mekanik ve mikroyapı özelliklerinin incelenmesi". Basılmamış Doktora Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 164, Samsun.
- Talwar, G. (2015). *Surface roughness, hardness and microstructure charecterization of cold rolled sheet*. Unpublished M.S. thesis, Mechanical Engineering of Department, Thapar University, Patiala.
- Teknotherm Metal Sanayi Ticaret A.Ş. (2020). Yüzey profili tespiti (Pürüzlülük Testi). Erişim: 5 Aralık 2020, <http://www.teknotherm.com.tr/surface-profile-gages-yuzey-profil-olcum-cihazlari>
- TI Strip (2020). The entire production process is integrated in our Liege facilities. Retrieved December 13, 2020, from <http://www.tistrip.be/Front/c1-317/Production-Process.aspx>
- TS EN ISO 6892-1 (2019). Metalik malzemeler – Çekme deneyi-Bölüm 1: Ortam sıcaklığında deney yöntemi.
- TS EN ISO 10088-2 (2014). Paslanmaz çelikler – Bölüm 2: Genel amaçlar için korozyona dayanıklı çeliklerden yapılan sac/levha ve şeritlerin teknik teslim şartları.
- TS EN ISO 10130 (2008). Soğuk haddelenmiş, düşük karbonlu çelik yassı mamuller-Soğuk şekillendirme için - Teknik teslim şartları.
- TS EN ISO 10268 (2008). Soğuk şekillendirmeye uygun, yüksek akma dayanımlı soğuk haddelenmiş çelik yassı mamuller - Teknik teslim şartları.

- Vander Voort, G. F., Lampman, S. R., Sanders, B. R., Anton, G. J., Polakowski, C., Kinson, J., ... ve W. W. Scott Jr (2004). "ASM handbook". *Metallography and Microstructures*, 9, 44073-0002.
- Walton, K., Blunt, L. ve L. Fleming (2015). "The topographic development and areal parametric characterization of a stratified surface polished by mass finishing". *Surface Topography: Metrology and Properties*, 3 (3), 035003.
- Wentink, D. J., Matthews, D., Appelman, N. M. ve E. M. Toose (2015). "A generic model for surface texture development, wear and roughness transfer in skin pass rolling". *Wear*, 328, 167-176.
- Wilson, W. R. D., Hsu, T. C. ve X. B. Huang (1995). "A realistic friction model for computer simulation of sheet metal forming processes". *Journal of Engineering for Industry*, 117 (2), 202-209.
- WSC (2020). Electro discharge texturing. Retrieved December 19, 2020, from <http://www.wscgmbh.de/en/edt.html>
- World Auto Steel (2020). Advanced high-strength steel (AHSS) definitions. Retrieved December 09, 2020, from <https://www.worldautosteel.org/steel-basics/automotive-advanced-high-strength-steel-ahss-definitions/>
- Wu, C., Zhang, L., Qu, P., Li, S. ve Z. Jiang (2018). "A simple approach for analysing the surface texture transfer in cold rolling of metal strips". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 95 (1-4), 597-608.
- Wu, C., Zhang, L., Qu, P., Li, S. ve Z. Jiang (2019). "A new method for predicting the three-dimensional surface texture transfer in the skin pass rolling of metal strips". *Wear*, 426, 1246-1264.
- Wu, C., Zhang, L., Qu, P., Li, S. ve Z. Jiang (2021). "Effect of the elastic deformation of rolls on the surface texture transfer in skin-pass rolling". *International Journal of Mechanical Sciences*, 198, 106358.
- Xia, C., Zhang, X., Zhang, J., Li, H. ve S. Jia (2017). "Evolution on topography of textured work rolls and steel strips during cold rolling and temper rolling". *Steel Research International*, 88 (9), 1600469.
- Xu, D., Yang, Q., Wang, X., He, H., Sun, Y. ve W. Li (2020). "An experimental investigation of steel surface topography transfer by cold rolling". *Micromachines*, 11 (10), 916.
- Xin, L. I. U., Yu, W. G., Zhang, Q. F. ve S. M. Jiang (2014). "Influence of surface roughness of galvanized steel sheet on self-lubricated coating". *Journal of Iron and Steel Research International*, 21 (3), 342-347.
- Yıldız, Y. (2011). *Alüminyum folyo haddelemede kullanılan merdanelerin taşlama operasyonu ile kazandıkları yüzey özelliklerinin haddeleme prosesine etkileri*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 101, İstanbul.
- Zhang, S. ve J. G. Lenard (1992). "The effects of the reduction, speed and lubricant viscosity on friction in cold rolling". *Journal of Materials Processing Technology*, 30 (2), 197-209.

## EKLER

### Ek-1: Tez çalışmasında yapılan deneyler ve yapılma amacı

<b>Deney Listesi</b>	<b>Deneyin Amacı</b>
DM/OM/YM	Mekanik özelliklerin etkisini incelemek
1/4.4/250/10/K	Ezme miktarının etkisini incelemek
1/4.4/500/10/K	
1/4.4/250/50/K	Haddeleme hızının etkisini incelemek
1/4.4/500/50/K	
1/4.4/250/10/Y	Yağlayıcının etkisini incelemek
1/4.4/500/10/Y	
1/4.4/250/50/Y	
1/4.4/500/50/Y	
1/6.8/250/10/K	Merdane pürüzlülüğünün etkisini incelemek
1/6.8/500/10/K	
1/6.8/250/50/K	
1/6.8/500/50/K	
1/6.8/250/10/Y	
1/6.8/500/10/Y	
1/6.8/250/50/Y	
1/6.8/500/50/Y	
1.5/4.4/250/10/K	Malzeme kalınlığının etkisini incelemek
1.5/4.4/500/10/K	
1.5/4.4/250/50/K	
1.5/4.4/500/50/K	
1.5/6.8/250/10/K	
1.5/6.8/500/10/K	
1.5/6.8/250/50/K	
1.5/6.8/500/50/K	

**Ek-2:** Deneylerde kullanılan haddeleme parametreleri ve deney düzeneğinde bulunan yük ölçerden okunan haddeleme kuvvetleri

Deney Listesi /Parametre	Malzeme kalınlığı (mm)	Merdane pürüzlülüğü (µm)	Ezme miktarı (µm)	Haddeleme hızı (d/dk)	Yağlama koşulu	DM P (kN/mm)	OM P (kN/mm)	YM P (kN/mm)
1/4.4/250/10/K	1.0	4.4	250	10	Kuru	0.773	0.903	0.867
1/4.4/500/10/K	1.0	4.4	500	10	Kuru	1.941	2.163	1.993
1/4.4/250/50/K	1.0	4.4	250	50	Kuru	0.857	0.950	0.840
1/4.4/500/50/K	1.0	4.4	500	50	Kuru	1.856	2.188	2.011
1/4.4/250/10/Y	1.0	4.4	250	10	Yağlı	0.541	0.600	0.540
1/4.4/500/10/Y	1.0	4.4	500	10	Yağlı	1.599	1.843	1.710
1/4.4/250/50/Y	1.0	4.4	250	50	Yağlı	0.544	0.571	0.538
1/4.4/500/50/Y	1.0	4.4	500	50	Yağlı	1.643	1.826	1.728
1/6.8/250/10/K	1.0	6.8	250	10	Kuru	0.556	0.679	0.621
1/6.8/500/10/K	1.0	6.8	500	10	Kuru	1.472	1.663	1.570
1/6.8/250/50/K	1.0	6.8	250	50	Kuru	0.513	0.577	0.535
1/6.8/500/50/K	1.0	6.8	500	50	Kuru	1.504	1.602	1.570
1/6.8/250/10/Y	1.0	6.8	250	10	Yağlı	0.419	0.479	0.456
1/6.8/500/10/Y	1.0	6.8	500	10	Yağlı	1.331	1.566	1.439
1/6.8/250/50/Y	1.0	6.8	250	50	Yağlı	0.446	0.507	0.432
1/6.8/500/50/Y	1.0	6.8	500	50	Yağlı	1.373	1.568	1.439
1.5/4.4/250/10/K	1.5	4.4	250	10	Kuru	0.564	0.538	0.589
1.5/4.4/500/10/K	1.5	4.4	500	10	Kuru	1.635	1.735	1.772
1.5/4.4/250/50/K	1.5	4.4	250	50	Kuru	0.558	0.535	0.562
1.5/4.4/500/50/K	1.5	4.4	500	50	Kuru	1.658	1.722	1.799
1.5/6.8/250/10/K	1.5	6.8	250	10	Kuru	0.463	0.456	0.437
1.5/6.8/500/10/K	1.5	6.8	500	10	Kuru	1.368	1.442	1.491
1.5/6.8/250/50/K	1.5	6.8	250	50	Kuru	0.419	0.420	0.455
1.5/6.8/500/50/K	1.5	6.8	500	50	Kuru	1.362	1.467	1.494

**1.** Haddeleme kuvvetleri, haddeleme düzeneğinden ölçülen yüklerin sac malzemelerin genişliğine (30mm) oranlanması ile birim genişlik cinsinden hesaplanmıştır.

**Ek-3:** Temper haddelemede pürüzlendirme deneyleri sonrasında sac malzeme yüzeylerinden PCE-RT2000 cihazı ile alınan pürüzlülük ölçüm sonuçları

<b>Deney Listesi/Malzeme</b>	<b>DM R<sub>a,ort</sub> (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>OM R<sub>a,ort</sub> (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>YM R<sub>a,ort</sub> (<math>\mu\text{m}</math>)</b>
1/4.4/250/10/K	1.862	1.093	1.907
1/4.4/500/10/K	3.202	2.197	2.499
1/4.4/250/50/K	1.827	1.116	1.928
1/4.4/500/50/K	2.906	2.095	2.496
1/4.4/250/10/Y	1.624	0.963	1.864
1/4.4/500/10/Y	2.58	1.789	2.241
1/4.4/250/50/Y	1.582	0.914	1.892
1/4.4/500/50/Y	2.517	1.681	2.178
1/6.8/250/10/K	1.572	0.933	2.008
1/6.8/500/10/K	3.243	2.618	2.464
1/6.8/250/50/K	1.469	0.923	1.992
1/6.8/500/50/K	3.119	2.605	2.369
1/6.8/250/10/Y	1.353	0.722	1.985
1/6.8/500/10/Y	2.681	1.813	2.261
1/6.8/250/50/Y	1.384	0.735	1.962
1/6.8/500/50/Y	2.466	1.824	2.296
1.5/4.4/250/10/K	1.572	0.594	1.88
1.5/4.4/500/10/K	2.767	1.596	2.186
1.5/4.4/250/50/K	1.638	0.561	1.851
1.5/4.4/500/50/K	2.447	1.637	2.116
1.5/6.8/250/10/K	1.455	0.587	1.82
1.5/6.8/500/10/K	2.807	1.481	2.387
1.5/6.8/250/50/K	1.614	0.571	1.817
1.5/6.8/500/50/K	2.927	1.597	2.310

## ÖZ GEÇMİŞ



Batuhan ÖZAKIN, 08.12.1989 tarihinde Erzurum’da doğdu. 2006 yılında Erzurum Lisesi’ni bitirdikten sonra 2011 yılında Atatürk Üniversitesi Makine Mühendisliği ve 2012 yılında Atatürk Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünden başarıyla mezun oldu. 2014 yılında Atatürk Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Mekanik Bilim Dalında yüksek lisansını tamamladı. 2013-2015 tarihleri arasında Atatürk Üniversitesi, Doğu Anadolu Gözlemevi projesinde “Uzman” olarak görev yaptı. 2015 yılından beri Samsun Üniversitesi, Kavak Meslek Yüksekokulu, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümünde “Öğretim Görevlisi” olarak çalışmaktadır. Evli ve 1 çocuk babasıdır.

### İletişim Bilgileri

E mail: batuhan.ozakin@samsun.edu.tr

Tel: 0(537) 988 15 17

ORCID ID: 0000-0003-1754-949X

### Yayınlanmış Çalışmalar

1. Özakin, B., Çolak B. ve N. Kurgan (2021). “Effect of material thickness and reduction ratio on roughness transfer in skin-pass rolling to DC04 grade sheet materials”. *Industrial Lubrication and Tribology*. (Accepted)
2. Özakin, B. ve N. Kurgan (2020). “DC04 kalite sac malzemelere temper haddeleme ile pürüzlülük transferinde yağlayıcının etkisinin incelenmesi”. *Uluslararası Doğu Anadolu Fen Mühendislik ve Tasarım Dergisi*, 2 (2), 325-336.
3. Özakin, B. ve N. Kurgan (2019). “Temper haddelemede pürüzlülük transferini etkileyen parametrelerin incelenmesine yönelik bir derleme çalışması”. *International Periodical of Recent Technologies in Applied Engineering*, 1 (2), 67-78.

### Kazanılan Ödüller, Teşvikler ve Burslar

1. TUBİTAK, 2211-C, Öncelikli Alanlara Yönelik Yurtiçi Doktora Burs Programı, Bursiyer, 2017.