



**T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



DOKTORA TEZİ

**LAZERLE SERTLEŞTİRME YÖNTEMİYLE DEMİRYOLU
RAYLARININ MANTARININ MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
GELİŞTİRİLMESİ**

Ozan YAZICI

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Programı

DANIŞMAN
Prof. Dr. Suat YILMAZ

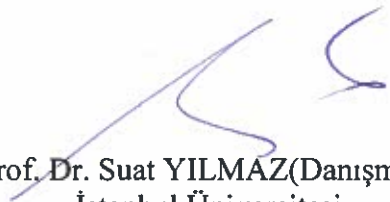
II. DANIŞMAN
Yrd. Doç. Dr. Selim YILDIRIM

Nisan, 2018

İSTANBUL

Bu çalışma, 4.04.2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Programında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi



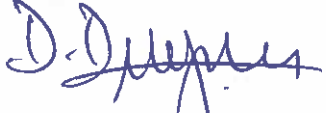
Prof. Dr. Suat YILMAZ (Danışman)
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi



Prof. Dr. Şerafettin EROĞLU
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi



Prof. Dr. Ahmet KARAASLAN
Yıldız Teknik Üniversitesi
Kimya-Metalurji Fakültesi



Doç. Dr. Derya DISPINAR
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi



Doç. Dr. Erdem ATAR
Gebze Teknik Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi



20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü’nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

Bu tez, İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yürütücü Sekreterliğinin 49081 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Bu çalışma İstanbul Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Program'ında doktora tezi olarak hazırlanmıştır. Lisans, Yüksek Lisans ve Doktora süreçlerimde bana yol gösteren ve her alanda kendisini örnek almış olduğum çok değerli danışman hocam Prof. Dr. Suat YILMAZ'a teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Ayrıca yine çalışmalarım kapsamında yardımlarını esirgemeyen ikinci danışmanım olan hocam Yard. Doç. Dr. Selim YILDIRIM'a çok teşekkür ederim.

Tez izleme süresince değerli katkılarından dolayı Doç. Dr. Derya DIŞPINAR ve Doç. Dr. Erdem ATAR'a çok teşekkür ederim.

Bu süreçte çok değerli desteklerinden dolayı TCDD 1. Bölge Müdürlüğü Demiryolu Bakım Servis Müdürü Mümin KARASU ve Demiryolu Bakım Servis Müdür Yardımcısı Nizamettin ARAS'a çok teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalar kapsamında çok değerli yardımlarından ötürü Prof. Dr. Murat BAYDOĞAN, Dr. Yük. Müh. Yusuf ÖZTÜRK, Uzman Yük. Müh. Faiz MUHAFFEL, Müh. Nuray ÜÇÜNCÜ, Müh. Sinan ARAS, Karabük Demir Çelik Fabrikasından Metallograf Tuncer ÇELEBİ 'ye ve MATİL Malzeme Test ve İnovasyon Laboratuvarı AŞ'ye çok teşekkür ederim.

Bu uzun süreçte bana her anlamda destek olan eşim Camia ve oğlum Mehmet Altay'a özellikle sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu doktora tezimi sevgili annem Nesibe YAZICI 'ya ve doktora programına başlayıp bitirmemi benden daha fazla isteyen rahmetli babam Atay Dağlar YAZICI 'ya ithaf ediyorum.

Nisan 2018

Ozan YAZICI

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
ŞEKİL LİSTESİ	viii
TABLO LİSTESİ.....	xiii
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ	xiv
ÖZET	xvi
SUMMARY	xviii
1. GİRİŞ	1
1.1. AKADEMİK ÇALIŞMALARIN İNCELENMESİ	2
2. GENEL KISIMLAR.....	6
2.1. DEMİRYOLLARININ TANIMI.....	6
2.2. DEMİRYOLLARININ SINIFLANDIRILMASI	7
2.3. DEMİRYOLLARINI OLUŞTURAN BİLEŞENLER.....	8
2.3.1. Demiryolu Altyapısı	8
2.3.2. Demiryolu Üstyapısı.....	9
2.3.2.1. Demiryolu Üstyapısının Görevleri	9
2.3.2.2. Ray	10
2.3.2.3. Ray Kısımları	10
2.3.2.4. Rayların Kimyasal Bileşimleri.....	11
2.3.2.5. Ray Çeliğinin Mikro yapısı	12
2.4 RAY SINIFLARI VE RAY MANTARI SERTLEŞTİRME METODLARI.....	13
2.4.1. Ray Sınıfları.....	13
2.4.1.1. Doğal Setlikteki Raylar	14
2.4.1.2. Yüksek Alaşımli Raylar	14
2.4.1.3. Beynitik Raylar	14
2.4.1.4. Korozyona Karşı Dirençli Raylar	14
2.4.2. Ray Mantarı Sertleştirme Yöntemleri ve Gerekliliği	14
2.4.2.1. Ray Mantarı Sertleştirme Gereksinimi	14
2.4.2.2. Isıl işlem ile Mantarı Sertleştirilmiş Raylar	17
2.4.2.3. Plazma Kaplama.....	18

2.4.2.4. Lazer Kaplama.....	18
2.4.2.5. Lazer Sertleştirme	18
2.4.2.6. Yüksek Güçlü Diyot Lazerle Sertleştirme	19
3. MALZEME VE YÖNTEM.....	22
3.1. YÜKSEK GÜÇLÜ DİYOT LAZER	22
3.2. KULLANILAN RAY ÇELİĞİ VE GERÇEKLEŞTİRİLEN TESTLER	24
3.2.1. Ray Çeliklerinden Tel Erozyon ve Talaşlı İmalat Yöntemleri ile Test Numuneleri Hazırlanması.....	25
3.2.2. Ön Test Çalışmaları.....	25
3.2.3. Sertlik Testi	29
3.2.4. Çekme Testi.....	31
3.2.5. Çentikli Darbe Deneyi.....	31
3.2.6. Yorulma Testi.....	33
3.2.7. Aşınma Testi.....	35
3.2.8. Yüzey Pürüzlülüğü Testi	36
3.2.9. Optik Mikroskop İncelemesi	36
3.2.10. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Elektron Dispersiyonu X-Işını Spektroskopisi (EDS) İncelemeleri	38
3.2.11. X-Işınları Difraksiyonu (XRD) Analizleri	38
3.2.12. Kalıntı Gerilme Analizi	39
3.2.12.1. X-Işını (XRD) Yöntemi ile Kalıntı Gerilme Analizi Tanımı	40
3.2.12.2. XRD Yöntemi ile Kalıntı Gerilme Analizi.....	41
4. BULGULAR.....	42
4.1. ÖN TEST ÇALIŞMASI BULGULARI.....	42
4.2. SERTLİK TESTİ BULGULARI	43
4.3. ÇEKME TESTİ BULGULARI.....	45
4.4. ÇENTİKLİ DARBE DENEYİ BULGULARI.....	48
4.4.1. Çentikli Darbe Deneyi Numuneleri SEM İncelemesi	49
4.4.2. Çentikli Darbe Deneyi Numuneleri EDS İncelemesi	56
4.5. YORULMA TESTİ BULGULARI.....	61
4.5.1. Yorulma Deneyi SEM İncelemeleri Bulguları	63
4.6. AŞINMA TESTİ BULGULARI	72
4.6.1. Yüzey Pürüzlülüğü Testi Bulguları	79
4.6.2. XRD Analizi Bulguları.....	79
4.6.3. Aşınma Deneyi Numunelerinin SEM İncelemeleri Bulguları.....	81

4.7. OPTİK MİKROSKOP İNCELEME BULGULARI	87
4.8. KALINTI GERİLME ANALİZİ BULGULARI	92
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	96
KAYNAKLAR.....	104
ÖZGEÇMİŞ	108



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: Tipik bir çift hatlı demiryolu en kesiti	7
Şekil 2.2: Demiryolu hattı alt ve üstyapısı	8
Şekil 2.3: Demiryolu altyapısı	8
Şekil 2.4: Demiryolu üstyapısı.....	9
Şekil 2.5: Vinyol (vignole) tipi ray bölümleri	11
Şekil 2.6: Perlitik mikro yapı görüntüsü	12
Şekil 2.7: Fe-C Denge diyagramında çeliklere ait soğuma esnasında oluşan içyapılar	13
Şekil 2.8: Ray çeliği sertliğine bağlı olarak aşınma miktarları karşılaştırılması	16
Şekil 2.9: Farklı kalitedeki ray çeliklerinin aşınmaya karşı dirençleri.....	17
Şekil 2.10: Diyot lazer, Nd: YAG lazer ve CO ₂ lazerin enerji absorpsiyonu karşılaştırılması	19
Şekil 2.11: Lazerle sertleştirme işlemi	20
Şekil 3.1: Testler kapsamında kullanılan yüksek güçlü diyot lazer (Reis GmbH & Co Maschinenbau-Fabric GmbH, Germany)	23
Şekil 3.2: Temin edilen R260 kalitede ray çelikleri (UIC 60E1).....	24
Şekil 3.3: Farklı hız ve lazer güçlerinde işlem gören ray çeliği numuneleri.....	26
Şekil 3.4: 2 mm/sn. hızla işlem gören ray çeliği numuneleri.....	26
Şekil 3.5: 4 mm/sn. hızla işlem gören ray çeliği numuneleri.....	26
Şekil 3.6: 6 mm/sn. hızla işlem gören ray çeliği numuneleri.....	27
Şekil 3.7: 6 mm/sn. hızla işlem gören ray çeliği numuneleri.....	27
Şekil 3.8: Taşlama işleminden sonraki numunelerin görünümü	28
Şekil 3.9: 1.100°C, 1.200°C ve 1.300°C de lazerle sertleştirme işlemine tabi tutulmuş numuneler	29
Şekil 3.10: Numunelerin hazırlanması süreci	30

Şekil 3.11: Yüzey hazırlama ve yüzey sertlik ölçüm cihazları	30
Şekil 3.12: a) EN 13674-1 standardına göre numune alınan yerler, b) TS EN ISO 6892-1 standardına göre çekme numunesi boyutları.....	31
Şekil 3.13: Darbe deneyi numunesi boyutları	32
Şekil 3.14: PSW 30/15 model Mohr & Federhaff A.G. markalı darbe deneyi cihazı	33
Şekil 3.15: Darbe deneyine giren lazerle işlenmiş ve işlenmemiş numuneler	33
Şekil 3.16: EN 13674-1 standardına göre ray mantarından numune alınan bölge, b) numune boyutları.....	34
Şekil 3.17: w+b walter + bai ag CH-8224 markalı döner eğilmeli (rotary bending) test cihazı.....	35
Şekil 3.18: Aşınma deneyi cihazı fotoğrafları.....	36
Şekil 3.19: Optik mikroskop numune hazırlama süreci	37
Şekil 3.20: Nikon ECLIPSE MA200 markalı optik mikroskop cihazı	38
Şekil 3.21: JEOL JSM-5600 marka ve modelli taramalı elektron mikroskobu	38
Şekil 3.22: PANalytical X'Pert PRO MPD model X-ışını difraktometresi	39
Şekil 3.23: d_n ve d_i ölçümü	40
Şekil 4.1: 1.100°C, 1.200°C ve 1.300°C de lazerle sertleştirme işlemine tabi tutulmuş numunelerin yüzey sertlik sonuçları.....	44
Şekil 4.2: 1.100°C, 1.200°C ve 1.300°C de lazerle sertleştirme işlemine tabi tutulmuş numunelerin derinlik sertlik sonuçları.....	44
Şekil 4.3: 1.100°C, 1.200°C ve 1.300°C de lazerle sertleştirme işlemine tabi tutulmuş numunelerin 0,2 mm derinlikten alınan sertlik sonuçları.....	44
Şekil 4.4: Lazerle işlenmiş ve işlenmemiş numunelerin çekme testi grafikleri.....	46
Şekil 4.5: a) %0,2 Akma dayanımı sonucu, b) Çekme dayanımı sonucu, c) % Kopma uzaması sonucu, d) Tüm sonuçları	47
Şekil 4.6: Çentikli darbe deneyi sonuçları grafiksel gösterim	48
Şekil 4.7: İşlenmemiş numunenin darbe testi sonucu kırılma yüzeylerinin SEM görüntüsü	50
Şekil 4.8: 1.100°C'de işlenmiş numunenin darbe testi sonucu kırılma yüzeylerinin SEM görüntüsü.....	50

Şekil 4.9: 1.200°C’de işlenmiş numunenin darbe testi sonucu kırılma yüzeylerinin SEM görüntüsü.....	51
Şekil 4.10: 1.300°C’de işlenmiş numunenin darbe testi sonucu kırılma yüzeylerinin SEM görüntüsü.....	52
Şekil 4.11: Lazerle 1.100°C, 1.200°C ve 1.300°C’de işlenmiş numunelerin işlem derinlikleri SEM incelemesi	53
Şekil 4.12: 1.100°C’de işlem gören derinlik sertlik dağılımı sonucu	54
Şekil 4.13: 1.200°C’de işlem gören derinlik sertlik dağılımı sonucu	55
Şekil 4.14: 1.300°C’de işlem gören derinlik sertlik dağılımı sonucu	55
Şekil 4.15: 1.100°C’de işlenmiş darbe testi numunesinin EDS analizi.....	56
Şekil 4.16: 1.100°C’de işlenmiş darbe testi numunesinin 1. bölge EDS sonucu.....	57
Şekil 4.17: 1.100°C’de işlenmiş darbe testi numunesinin 2. bölge EDS sonucu.....	57
Şekil 4.18: 1.200°C’de işlenmiş darbe testi numunesinin EDS analizi.....	58
Şekil 4.19: 1.200°C’de işlenmiş darbe testi numunesinin 1. bölge EDS sonucu.....	58
Şekil 4.20: 1.200°C’de işlenmiş darbe testi numunesinin 2. bölge EDS sonucu.....	59
Şekil 4.21: 1.300°C’de işlenmiş darbe testi numunesinin EDS analizi.....	59
Şekil 4.22: 1.300°C’de işlenmiş darbe testi numunesinin 1. bölge EDS sonucu.....	60
Şekil 4.23: 1.300°C’de işlenmiş darbe testi numunesinin 2. bölge EDS sonucu.....	60
Şekil 4.24: Yorulma deneyi sonuçları.....	61
Şekil 4.25: İşlenmemiş ve 1300°C’de lazerle işlenmiş numunelerin S-N diyagramı	62
Şekil 4.26: Lazerle işlem görmemiş ve 5.388 çevrim sayısında 691 MPa ’da kopan numuneye ait kopma yüzeyi SEM görüntüleri.....	63
Şekil 4.27: Lazerle işlem görmemiş ve 5.388 çevrim sayısında 691 MPa’ da kopan numunenin kopma mekanizması	64
Şekil 4.28: Lazerle işlem görmemiş ve 355.871 çevrim sayısında 391 MPa’ da kopan numuneye ait kopma yüzeyi SEM görüntüleri.....	65
Şekil 4.29: Lazerle işlem görmemiş ve 355.871 çevrim sayısında 391 MPa’ da kopan numunenin kopma mekanizması	66
Şekil 4.30: Lazerle 1.300°C’de işlem görmüş ve 14.635 çevrim sayısında 736 MPa’ da kopan numuneye ait kopma yüzeyi SEM görüntüleri	67

Şekil 4.31: Lazerle 1.300°C’de işlem görmüş ve 14.635 çevrim sayısında 736 MPa’ da kopan numunenin kopma mekanizması	68
Şekil 4.32: Lazerle 1.300°C’de işlem görmüş ve 527.281 çevrim sayısında 414 MPa’ da kopan numuneye ait kopma yüzeyi SEM görüntüleri	69
Şekil 4.33: Lazerle 1.300°C’de işlem görmüş ve 527.281 çevrim sayısında 414 MPa’ da kopan numunenin kopma mekanizması.....	70
Şekil 4.34: Yorulma hasar yüzeyi gösterimi	71
Şekil 4.35: Girinti ve çıkıntıların oluşumu	71
Şekil 4.36: Alansal aşınma kaybı grafiksel sonuç.....	73
Şekil 4.37: Hacimsel aşınma kaybı grafiksel sonuç.....	73
Şekil 4.38: Aşınma oranı grafiksel sonuçlar	73
Şekil 4.39: Ağırlık kaybı grafiksel sonuçları	74
Şekil 4.40: Lazerle işlenmemiş numunenin 2 boyutlu aşınma profili.....	74
Şekil 4.41: Lazerle 1.100°C’de işlenmiş numunenin 2 boyutlu aşınma profili	74
Şekil 4.42: Lazerle 1.200°C’de işlenmiş numunenin 2 boyutlu aşınma profili	75
Şekil 4.43: Lazerle 1.300°C’de işlenmiş numunenin 2 boyutlu aşınma profili	75
Şekil 4.44: İşlemsiz ve lazerle işlenmiş numunelere ait 2 boyutlu aşınma profilleri.....	75
Şekil 4.45: Lazerle işlem görmemiş numunenin sürtünme katsayısı grafiği	76
Şekil 4.46: Lazerle 1.100°C’de işlenmiş numunenin sürtünme katsayısı grafiği	76
Şekil 4.47: Lazerle 1.200°C’de işlenmiş numunenin sürtünme katsayısı grafiği	77
Şekil 4.48: Lazerle 1.300°C’de işlenmiş numunenin sürtünme katsayısı grafiği	77
Şekil 4.49: Tüm numunelere ait sürtünme katsayısı grafikleri	78
Şekil 4.50: Lazerle işlenmemiş numunenin XRD analiz sonucu.....	79
Şekil 4.51: Lazerle 1.100°C’de işlenmiş numunenin XRD analiz sonucu.....	80
Şekil 4.52: Lazerle 1.200°C’de işlenmiş numunenin XRD analiz sonucu.....	80
Şekil 4.53: Lazerle 1.300°C’de işlenmiş numunenin XRD analiz sonucu.....	80
Şekil 4.54: Tüm numunelere ait XRD analiz sonucu.....	81
Şekil 4.55: Lazerle işlem görmemiş numunenin yüzey kesit SEM görüntüsü	82

Şekil 4.56: Lazerle 1.100°C’de işlem gören numunenin yüzey kesit SEM görüntüsü	82
Şekil 4.57: Lazerle 1.200°C’de işlem gören numunenin yüzey kesit SEM görüntüsü	83
Şekil 4.58: Lazerle 1.300°C’de işlem gören numunenin yüzey kesit SEM görüntüsü	83
Şekil 4.59: Lazerle işlem görmemiş aşınma numunesi aşınma yüzeyi SEM görüntüsü.....	84
Şekil 4.60: Lazerle 1.100°C’de işlem gören aşınma yüzeyi SEM görüntüsü	84
Şekil 4.61: Lazerle 1.200°C’de işlem gören aşınma yüzeyi numunesi SEM görüntüsü.....	85
Şekil 4.62: Lazerle 1.300°C’de işlem gören aşınma yüzeyi numunesi SEM görüntüsü.....	85
Şekil 4.63: 500X büyütmede farklı bölgelerin gösterimi.....	87
Şekil 4.64: 500X büyütmede martensit yapı gösterimi	88
Şekil 4.65: 500X büyütmede martensitten perlite geçiş noktası görünümü.....	88
Şekil 4.66: 500X büyütmede perlitik bölge görünümü	89
Şekil 4.67: 1.500X büyütmede sertleştirilmiş bölgede kalıntı östenit gösterimi	90
Şekil 4.68: 1.500X büyütmede geçiş bölgesinde kalıntı östenit gösterimi	90
Şekil 4.69: 500X büyütmede lazer işleminden önce Fe ₃ C lamelleri arası mesafe ölçümü	91
Şekil 4.70: 1.500X büyütmede geçiş bölgesinin altında Fe ₃ C lamelleri arası mesafe ölçümü	92
Şekil 4.71: İşlenmemiş numunenin kalıntı gerilme analiz sonucu d-sin ² (psi) eğrisi	93
Şekil 4.72: 1.100°C’de Lazerle işlenmiş numunenin Kalıntı Gerilme Analiz Sonucu d-sin ² (psi) Eğrisi	93
Şekil 4.73: 1.100°C’de lazerle işlenmiş numunenin kalıntı gerilme analiz sonucu d-sin ² (psi) eğrisi (2. Taşlamadan sonra)	94
Şekil 4.74: 1.200°C’de lazerle işlenmiş numunenin kalıntı gerilme analiz sonucu d-sin ² (psi) Eğrisi	94
Şekil 4.75: 1.300°C’de lazerle işlenmiş numunenin kalıntı gerilme analiz sonucu d-sin ² (psi) Eğrisi	95

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 3.1: Lazer kaynağı özellikleri ve işlem parametreleri	23
Tablo 3.2: Kullanılan ray çeliği kimyasal içeriği (%)	24
Tablo 3.3: Kullanılan ray profili	25
Tablo 3.4: Ön test çalışmaları kapsamında kullanılan parametreler.....	25
Tablo 3.5: Aşınma deneyi şartları.....	35
Tablo 4.1: Ön test yüzey sertlik sonuçları	42
Tablo 4.2: Çekme testi sonuçları	45
Tablo 4.3: Çentikli darbe deneyi sonuçları.....	48
Tablo 4.4: Aşınma testi neticesinde elde edilen veriler	72
Tablo 4.5: Ağırlık kaybı sonuçları.....	72
Tablo 4.6: Yüzey pürüzlülüğü testi sonuçları.....	79
Tablo 4.7: Elde edilen kalıntı stres değerleri	95

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
d	: Numune çapı
d_i	: Açılı hkl düzlemlerine ait düzlemler arası mesafe
d_n	: Yüzeye paralel hkl düzlemleri arası mesafe
d₀	: Gerilmesiz malzemede düzlemler arası mesafe
E	: Elastisite modülü
F	: Kuvvet
Fe₃C	: Sementit
HB	: Brinell Sertlik
HV	: Vickers Sertlik
kV	: Kilovolt
kW	: Kilowatt
L	: Kuvvet kolu uzunluğu
N_p	: Difraksiyon düzlemine dik
N_s	: Numune yüzeyine dik
Ra	: Değerlendirilen profilin aritmetik ortalama sapması
Rp	: En büyük profil tepe noktası
Rq	: Değerlendirilen profilin ortalama karekök sapması
Rt	: Toplam profil yüksekliği
Rv	: En büyük profil çukur noktası
Rz	: En büyük profil yüksekliği
S	: Gerilme
α-fe	: Ferrit
γ	: Östenit
ν	: Poisson oranı
σ₀	: Yüzeye paralel gerilme

Kısaltmalar	Açıklama
EDS	: Elektron Dispersiyonu X-Işınları Spektroskopisi
HT	: Hızlı Tren
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
Sn.	: Saniye
TCDD	: Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları
UIC	: Uluslararası Demiryolu Organizasyonu
XRD	: X-Işınları Difraksiyonu
YHT	: Yüksek Hızlı tren



ÖZET

LAZERLE SERTLEŞTİRME YÖNTEMİYLE DEMİRYOLU RAYLARININ MANTARININ MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

DOKTORA TEZİ

Ozan YAZICI

İstanbul Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Prof. Dr. Suat YILMAZ

II. Danışman : Yrd. Doç. Dr. Selim YILDIRIM

Demiryolu taşımacılığı hem yolcu hem de yük taşımacılığı açısından ulaştırma modlarından en önemlilerinden bir tanesidir. Özellikle şehir içi taşımacılığında (intercity transportation) taşıyabileceği yüksek yolcu sayısı, kısa sürelerde bu taşımanın güvenli bir şekilde gerçekleştirilebilmesi, hatların elektrifikasyonlu olması nedeniyle düşük enerji tüketimi bu taşıma modunun diğer taşıma modlarına göre üstünlükleri olarak söylenebilir. Demiryollarına ilgi gün geçtikçe tüm dünyada artmakta ve buna paralel olarak demiryolu ağları genişlemektedir. Demiryollarının kullanımının artması ile birlikte dingil basıncı, trafik yoğunluğu ve ulaşılan hızlar da artmakta bu durumlar ise hem demiryolu altyapısını hem de üstyapısını oluşturan malzemelerin daha yüksek performans göstermesi gereksinimini doğurmaktadır. Raylar demiryolu üstyapısını oluşturan elemanların başında gelmekte olup demiryollarındaki çeken ve çekilen araçların tekerlekleri ile doğrudan temas halindedirler. Rayların tekerlekler ile temas etmesi neticesinde ray yüzeyinde bazı ray hasar sorunları ortaya çıkmaktadır. Örneğin aşınma ve temas yorulması raylarda görülen en önemli sorunların başında gelmektedir. Rayların mantar kısımlarının mekanik özelliklerini geliştirerek, bu hasarların oluşumunu azaltma ve ortaya çıkma sürelerini geciktirerek ray ömürlerini uzatabilmek hedeflenmektedir. Raylarda görülen hasarlar en yüksek oranda ray mantarı

denilen kısımda ortaya çıktığından ray mantarının mekanik özelliklerinin geliştirilmesi önem arz etmektedir.

Bu çalışmamız yüksek güçlü diyet lazer uygulaması ile yüzey sertleştirme işleminin R260 kalitesindeki rayların mekanik özelliklerine olan etkisini ve işlenmemiş R260 kalitedeki raylarla mukayesesini içermektedir.

Nisan 2018, 128. sayfa.

Anahtar kelimeler: R260 kalite ray çeliği, yüksek güçlü diyet lazer, yüzey sertleştirme, demiryolu, mekanik özellikler.



SUMMARY

IMPROVEMENT OF MECHANICAL PROPERTIES OF HEAD OF RAILWAY RAILS BY LASER HARDENING METHOD

Ph.D. THESIS

Ozan YAZICI

İstanbul University

Institute of Graduate Studies in Science and Engineering

Department of Metallurgical and Materials Engineering

Supervisor : Prof. Dr. Suat YILMAZ

Co-Supervisor : Assist. Prof. Dr. Selim YILDIRIM

Railway transportation is one of the most important transport modes and especially it becomes more of an issue in the intercity transportation. Compared to the other transportation modes this transportation mode has some superiorities such as, more passenger and freight capacity, less transportation times in safe, less energy consumption etc. The tendency of usage of railway increases day by day and this situation provides the improvement of railway networks. Along with the increase in the use of railways, axle load, traffic density and speeds increase and these factors necessitates that the materials constituting both the railway infrastructure and the superstructure should show better performance. Rails are the leading components constituting railway superstructure and they are directly in contact with the wheels of rolling stocks. As the rails come into contact with the wheels, some rail damage

problems arise on the rail surface. Wear and contact fatigue are the most important problems on the rails. It is one of the most important aims in the railway sector is to improve the mechanical properties of the rail head, to reduce the occurrence of these damages and to delay the emergence times in order to extend the rail lifetime. That is why it is important to improve the mechanical properties of the rail heads as the damage is most likely to occur in this region.

This study includes the effect of surface hardening on the mechanical properties of R260 grade rails with the application of high power diode laser and the comparison with untreated R260 rails.

April 2018, 128 pages.

Keywords: R260 grade rail steels, high power diode laser, surface hardening, railways, mechanical properties.

1. GİRİŞ

Dünyada Yüksek Hızlı Tren olgusuyla birlikte ortaya çıkan yüksek seyir hızları ve artan dingil yükleri nedeniyle mantarı sertleştirilmiş ray kullanımı önem kazanmış olup, Uluslararası Demiryolu Birliği (UIC) özellikle aşınmanın daha fazla meydana geldiği dar yarıçaplı kurplarda bu rayların kullanılmasını önermektedir. UIC'nin Mart 2005 tarihli 721 numaralı talimatı [1], kullanılacak ray çeliği kaliteleri için tavsiyeler vermektedir. Bu talimat, yıllık tonajı 20 milyon tondan fazla ve yarıçapı 400 metreden az kurplar (dönemeçler) için kesinlikle mantarı sertleştirilmiş ray kullanımını tavsiye ederken, yarıçapı 400–700 metre arası olan kurplarda ise yerel parametrelere bağlı olarak normal (R260) veya mantarı sertleştirilmiş ray kullanılabileceğini belirtmektedir.

Düz hatlarda (Aliyman) ray ömrü 20–25 yıl iken, dar yarıçaplı kurplu (dönemeç) kesimlerde 2–3 yılda iç rayların değiştirilmesi gerekmekte ve bunun sonucu olarak trafikte gecikmeler ile yüksek malzeme ve işçilik bedelleri ortaya çıkmaktadır. Mantarı sertleştirilmiş ray kullanımı iç raylarda aşınmayı geciktirip ray ömrünü uzatmayı mümkün kılmaktadır.

Ray mantarı sertleştirme için ısıtma işlemle sertleştirme, plazma sertleştirme, plazma kaplama, lazer kaplama ve lazer sertleştirme yöntemleri literatürde geçmekte olup bunlar arasında ısıtma işlem ile sertleştirme yöntemi endüstriyel olarak en yaygın kullanılanıdır [2].

Lazerle yüzey sertleştirme gelecek vadeden bir teknoloji olup çeşitli endüstriyel alanlarda (otomotiv, enerji üretimi ve genel mühendislik uygulamaları vb.) başarılı bir şekilde uygulanmakta olmasına rağmen bu yöntemin demiryollarındaki uygulanabilirliği açısından yeterli çalışma bulunmamaktadır [3].

Lazerle yüzey sertleştirme yönteminin uygulama açısından diğer yüzey sertleştirme yöntemlerine göre gösterdiği üstünlükler endüstriyel açıdan önem arz etmekte olup bu yöntemin giderek kullanımının artmasına neden olmaktadır. Bu yöntemin sahip olduğu üstünlüklere bakıldığında bunlar kompleks parçalar üzerinde lokal uygulama yapılabilmesi, yüksek verimlilik, ön işlem prosesinin olmayışı, tahribatta yüksek oranda düşüş, harici soğutmaya ihtiyaç duyulmaması, yüksek hareket edebilme kabiliyeti, endüstriyel ortamda manevra edilebilirlik ve yerinde uygulanabilirlik özellikleridir. Lazerle yüzey sertleştirme

yönteminde sadece sertleştirilmek istenen bölgeler lazer ışınının bu bölgeyi taramasıyla sertleştirilir. Isıl işlem yapılan parçanın diğer bölgelerinin mekanik özelliklerinde herhangi bir değişim olmaz [3].

Bu doktora çalışmasında lazer kaynağı olarak yüksek güçlü diyot lazer kullanılmış olup R260 kalitesindeki ray çeliklerinin uygun çalışma parametrelerinin optimizasyonu sonucu yüzey sertleştirilme işlemi gerçekleştirilmiştir. Lazerle işleme tabi tutulan ve tutulmayan R260 kalitesindeki ray çelikleri sertlik, çekme, darbe, aşınma, yüzey pürüzlülüğü ve yorulma gibi mekanik testlere tabi tutulmuş ayrıca X-ışınları difraksiyonu (XRD), SEM/EDS, ve optik mikroskop incelemeleri yapılmıştır. Yüksek güçlü diyot lazer uygulaması ile yüzey sertleştirme işleminin R260 kalitesindeki rayların mekanik özelliklerine olan etkisi ve işlenmemiş R260 kalitedeki raylarla mukayesesi gerçekleştirilmiştir. Yapılan literatür araştırmaları neticesinde lazerle malzemelerin işlenmesi ve özelliklerinin incelenmesi kapsamında genellikle lazer gücü ve işlem hızının etkileri üzerine durulduğu görülmüş olup bu nedenden ötürü de diğer önemli bir parametre olan işlem sıcaklığı etkisinin ne ölçüde malzeme üzerine etkiye bulunduğunu araştırılması hedeflenmiş olup bu nedenden ötürü farklı işlem sıcaklıklarında (1.110°C, 1.200°C ve 1.300°C) lazerle işlenmiş olan ray çeliği numunelerin hem mekanik hem de karakterizasyon deneyleri yapılmıştır.

1.1. AKADEMİK ÇALIŞMALARIN İNCELENMESİ

Hussain ve arkadaşları [4] yiv şeklinde olan 3Cr13 paslanmaz çeliği üzerinde 500 W'lık 2.5x3 mm² dikdörtgen şeklinde olan CO₂ lazer tabancası kullanarak yüzey sertleştirme işlemini gerçekleştirmişlerdir. Yapılan deneylerde proses hızı 150–500 mm/dakika arasında değişmiştir. Değişik lazer etkileşim sürelerinde yapılan çalışmalar neticesinde, sertleştirme derinliğinin lazer etkileşim süresi arttıkça arttığı anlaşılmış olup maksimum 1 mm sertleştirme derinliğine ulaşmışlardır. Lazerle işlem gören bölgenin mikro sertlik değeri normal malzeme sertliğine göre 2,5 misli artığı görülmüş olup çalışmacılar tarafından XRD ve mikro yapı testleri de gerçekleştirilmiştir.

Li ve arkadaşları [5] AISI 1045 çeliğinin yüzey sertleştirmesi için iki farklı lazer yöntemi olan Yüksek Güçlü Diyot lazerle CO₂ Lazer kaynağını karşılaştırmışlardır. Proses parametrelili olarak, lazer gücü, işlem parçası üzerindeki çalışma hızı, işlem derinliği ve mikro sertliği incelemiştir bu çalışmada. Çoğu durumda yüzey altında ısıdan etkilenmiş bölgenin (HAZ;

heat affected zone) oluştuğunu belirlemişlerdir. Yapılan çalışmalar neticesinde Yüksek Güçlü Diyet lazerle CO₂ lazer kaynakları ile yapılan sertleştirme işlemleri neticesinde büyük farklılıklar bulunmuştur. Yüksek Güçlü Diyet lazer kullanılarak yapılan sertleştirme işleminde ısıdan etkilenen bölgenin derinliği hemen hemen her yerde aynı olmasın karşın CO₂ lazer kullanımıyla gerçekleştirilen işlemde ise ısıdan etkilenen bölgenin derinliğinde farklılıkların olduğu saptanmıştır. Ayrıca CO₂ lazer kullanımıyla yüzeyde kısmi olarak eriyen bölgenin oluştuğu ama Yüksek Güçlü Diyet lazer kullanımıyla bu oluşumun olmadığı görülmüştür. Yapılan ANSYS çalışmaları neticesinde uniform enerji dağılımının daha Yüksek Güçlü Diyet lazer kullanımıyla CO₂ lazer kullanımına göre daha kararlı olduğu belirlenmiştir.

Pawlowicz yaptığı çalışmada ise [6], Yüksek Güçlü Diyet lazer kullanımıyla yüzey sertleştirme işlemi görece parça yüzeyi üzerinde istenilen seçili bölgelerin ya da diğer sertleştirme yöntemleriyle sertleştirilmesi mümkün olmayan çok karmaşık yüzeylerin yüzeyde erimiş yüzey oluşturmada sertleştirilebileceğini göstermiştir.

Wang ve arkadaşları [7] Lazerle sertleştirme işlemi gerçekleştirerek özellikle ağır yük taşımacılığı sırasında Tekerlek/Ray teması neticesinde meydana gelen aşınma ve hasarların azaltılması üzerine çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çalışmalar neticesinde lazer işleminin belirli bir derinlikte sert martensitik yapı oluşturduğu gözlemlenmiştir. Lazerle sertleştirme gerçekleştirilmiş tekerlek/ray silindirleri yuvarlanma – kayma test aparatörü kullanılarak aşınma deneylerine tabi tutulmuşlardır. Lazerle sertleştirilen malzemelerde aşınma direncinde artış kaydedilmiş ve bu artan aşınma direnci sayesinde tekerlek/ray silindirleri yüzeyindeki aşınma hacminde azalma kaydedilmiştir. Lazerle sertleştirilmiş tekerlek ve ray malzeme yüzeylerinde sırasıyla % 92, 9 ve %89,5 oranlarında aşınmada azalma gözlemlenmiştir. Ayrıca aşınan tekerlek/ray silindir yüzeylerinin sertlik farklılıklarından dolayı farklı yüzey morfolojisi ile hasar mekanizmaları gösterdiği anlaşılmıştır. Tekerlek/ray silindirleri lazer sertleştirme ile sertleştirildiklerinde her ikisinin hasar mekanizmasının farklı olduğu görülmüştür. Yapılan çalışma neticesinde, tekerlek/ray teması neticesinde aşırı aşınmanın görüldüğü ray kenarları ve tekerlek flanşının lazer sertleştirme ile sertleştirilerek bu kısımlarda sağlanan sertlik ile aşınma direncinin artırılabilirliğine dikkat çekilmiş olup, lazer sertleştirme işleminin aşınma oranını azalttığı belirtilmektedir.

Yapılan diğ er bir çalışma ise [8] Lazerle kaplama yapılarak R260 kalitesindeki ray çeliğinin yüzey sertleştirmesi üzerinedir. Lazerle kaplama malzemesi olarak toz formlarında olan Nikel alaşımı, Stellite 6, maraging  eliğ  ile handfield çelikleri kullanılmıştır. Çalışma kapsamında her bir farklı kaplama alaşım elementi için kaplama/yüzey alt  etkileşimi, mikro yapı ve sertlik değ erleri incelenmiştir. Yapılan  alışmalar neticesinde lazer kaplama için seçilen her bir malzemenin ray malzemesi yüzeyinin hem gelişiminde hem de onarımında etkili olduğu sertlik ve mikro yapı deneyleri sonucu belirlenmiştir.

DiMelfi ve arkadaşları tarafından yapılan diğ er bir çalışma [9] lazer yüzey modifikasyonu ile ray yüzeylerindeki çatlak ilerlemesinin azaltılması üzerinedir. Hem kullanılmamış hem de yüksek oranda kullanılan raylar üzerinde mikro sertlik ve çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Demiryolu aracının ray üzerinde hareketi boyunca tekerlek/ray teması neticesinde ray kenarlarında çevrimsel plastik deformasyon neticesinde çatlak oluşumları meydana gelir. Tekerlek/ray sürtünmesi azaltılarak bu oluşuma katkıda bulunan ray yüzeyi altında meydana gelen kesme kuvvetleri azalmaktadır. Yapılan  alışma neticesinde, lazerle sertleştirme ile ince bir yüzeyin hızlı bir şekilde eritilmesi ve hızlı bir şekilde yeniden katılaştırılmasıyla ray çeliğinin sürtünme katsayısı azaltılmaktadır. Yapılan uygulamalar neticesinde lazer sertleştirme ile 100 m'den küçük ince bir yüzey tabakası oluşmakta, bu ince tabakanın altında ince martensitik yapıda olan ısıdan etkilenmiş bölge ve bunun altında kendisiyle sıkı sıkıya bağlı perlitik yapıda olan ray  eliğ  alt yüzeyi bulunmaktadır. Mikro sertlik sonuçlarına bakıldığında lazerle ergimiş bölge 655–800 HV, ısıdan etkilenmiş bölge 472–1.072 HV ve perlitik  eliğ  yüzeyi sertliği ise 300 HV olarak bulunmuştur. Yapılan sürtünme deneyleri neticesinde lazerle işlem gören yüzeylerin sürtünme katsayısının işlem görmeyen ray yüzeyine oranla % 25' e varan oranlarda azalma olduğu belirlenmiştir. Yapılan X-ışınları testleri neticesinde lazerle sertleştirilen bölgenin yapısı hakkında sertleştirilen bu ince tabakanın yapısı nedeniyle bir sonuç elde edememişlerdir.

Diğ er bir çalışmada ise [3] üç farklı demiryolu çeliğinde kimyasal yapının ve mikro sertliğin diyot lazerle yüzey sertleştirme üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışmada perlitik, ferritik-perlitik ve beynitik ray çelikleri kullanılmıştır. Kullanılan diyot lazer enerjisinin etkisini anlayabilmek için işlem gören parçalarda yüzey topolojisi, işlem derinliği, mikro yapı ve mikro sertlik deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan  alışmalar sertleştirilen tabaka kalınlığının hem proses parametrelerine hem de alt yüzey çeliğinin yapısına bağlı olduğunu

göstermiştir. Lazerle sertleştirmede yüzeyde meydana gelen erimeyle kalıntı östenitin artışı ve kabalaşan martensitik yapı neticesinde sertlikte önemli bir azalış fark edilmiştir.

Yüzey işlemleri için diyot lazer kullanımının varlığı oldukça geniş olarak yapılan çalışmalarda bahsedilmektedir [10]. Pashby ve çalışma arkadaşları diyot lazer kullanarak hem sade hem de alaşımlı çeliklerin sertleştirilebilirliğinin teknik açıdan mümkün olduğunu kanıtlamışlardır [11]. Panster ve Kunjappa, düşük alaşımlı martensitik paslanmaz çeliklerin diyot lazerle yüzey sertleştirilmesi neticesinde temiz parlatılmış yüzeylerin oluşturulduğunu ve bu nedenden ötürü bu prosesin işlemten sonra temiz yüzey eldesi için harici bir taşlama işlemine ihtiyaç duyulmadığını belirtmişlerdir [12]. Syed ve arkadaşları diyot lazer sertleştirme yönteminin otomotiv sektöründe yaygın bir şekilde kullandığını belirtmişlerdir [13]. Sridhar ve çalışma arkadaşları tarafından yapılan çalışma neticesinde ise diyot lazer sertleştirme ile sade karbon ve orta karbon düşük alaşımlı çeliklerin proses parametrelerine bağlı olarak aşınma dirençlerinin iki misline kadar arttığı belirtilmektedir [14].

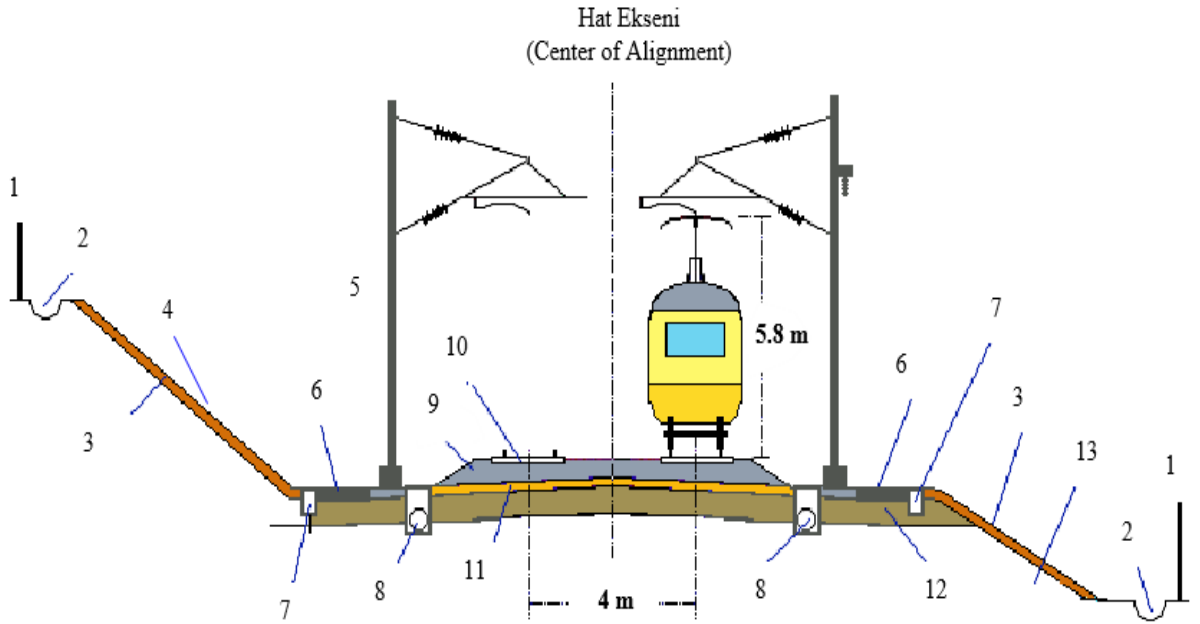
2. GENEL KISIMLAR

2.1. DEMİRYOLLARININ TANIMI

Belirli bir yerden başka bir yere çeken ve çekilen araçların üst yapıyı oluşturan elemanlardan biri olan raylar üzerinde mekanik bir güç ile hareket etmesi ile insan ve yük taşımacılığı yapılmasını sağlayan tesislerin tümüne birden demiryolu denir [15].

Yukarıdaki tanımından anlaşılacağı gibi demiryolları yalnızca üstyapı ve altyapı elemanlarından ibaret olmayıp, iki nokta arasında yer alan istasyon, gar, emniyet, sinyalizasyon ve elektrifikasyon tesisleri ile birlikte raylar üstünde hareket eden çeken ve çekilen araçların tamamının meydana getirdiği bütün bir yapıdır [15].

Demiryolları şehirlerarası olduğu gibi şehir içi (kent içi) de olabilmektedir. Şehirlerarası demiryolu, kent içi raylı sistemlere göre daha ağır dingil yüklerine sahiptir, hızlar daha yüksektir ve kapasitesi daha fazladır. Aşağıdaki şekilde çift hatlı demiryoluna ait tipik bir en kesit gösterilmektedir.



Şekil 2.1: Tipik bir çift hatlı demiryolu en kesiti [15].

1. Kamulaştırma genişliği sonunu belirten tel çit (Fence)
2. Hendek (Ditch)
3. Şev (Batter slope)
4. Şev üst yüzeyi (Topsoil)
5. Kataner direkleri (Catenary mast)
6. Emniyet yolu (Cess)
7. Kablo kanalı (Cable trough)
8. Drenaj sistemi (Drain)
9. Balast (Ballast)
10. Travers (Sleepers)
11. Alt balast (Sub ballast, sand layer)
12. Temel tabakası (toprak gövde, doğal zemin) (Foundation)
13. Dolgu (Embankment)

2.2. DEMİRYOLLARININ SINIFLANDIRILMASI

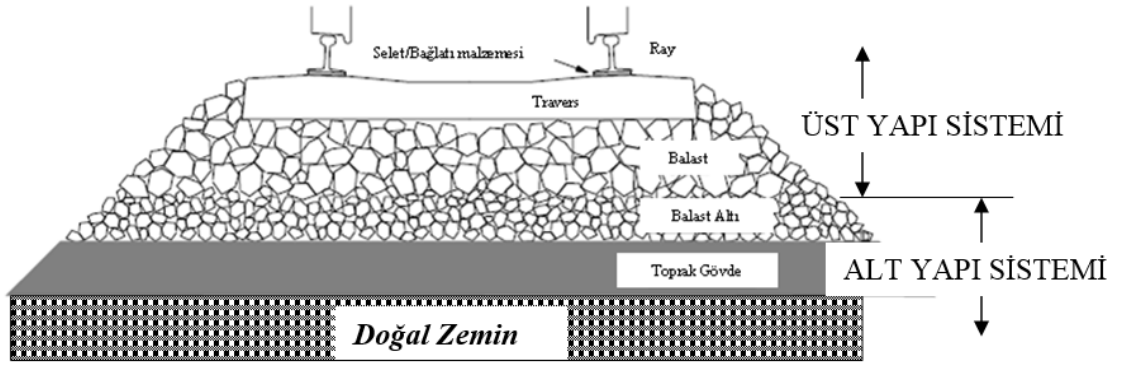
Demiryolları genel olarak aşağıdaki gibi sınıflandırılır bilinir [15];

- Bölgesel demiryolu hatları/Konvansiyonel Tren Taşımacılığı (Regional railways): Bu demiryolu hatlarında hızlar ve dingil ağırlıkları yüksektir. Bu hatlar konvansiyonel hatlar olarak ta bilinmekte olup, maksimum 160km/saat hızlara çıkan taşımacılığı kapsamaktadır.
- Banliyö taşımacılığı (Suburban railways): Şehir içi taşımacılığını kapsamaktadır.
- Hafif raylı sistemler (Light railway systems): Banliyö taşımacılığına nazaran daha düşük hızlara ve hafif dingil ağırlığına sahiptirler.
- Hızlı tren taşımacılığı (HT): Hız aralığı 160 km/saat ile 250 km/saat arasında olan demiryolu yolcu taşımacılığıdır
- Yüksek hızlı demiryolu taşımacılığı (High speed rail) (YHT): $Hız \geq 250$ km/saat olan demiryolu yolcu taşımacılığıdır
- Monoraylar (Monorails): Kent içinde hafif raylı sistemlerin yerine kullanılan bir demiryolu türüdür.

- Maglev: Geleneksel demiryolu hattı ve araçların dışında olan, yüksek teknolojiye sahip elektrikli ve mıknatıslı sistemlerdir.
- Rak demiryolu (Rack railways): özel bir dişli mekanizmaya sahip olup dağlık kesimlerde kullanılan demiryoludur. Buna İsviçre Luzern’de bulunan Pilatus demiryolu örnek verilebilir.
- Endüstri demiryolları (Industrial railways): Genellikle fabrika sahaları içinde kullanılan demiryollarıdır. Buna demir-çelik fabrika sahaları içerisindeki demiryolları örnek verilebilir.

2.3. DEMİRYOLLARINI OLUŞTURAN BİLEŞENLER

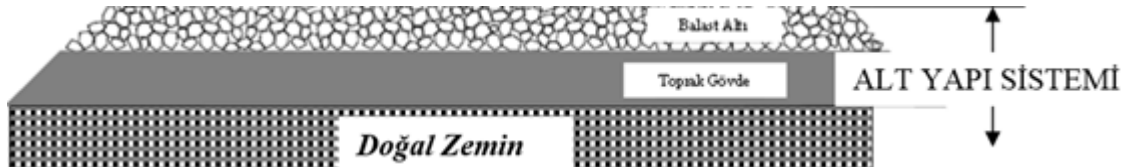
Demiryollarında yol kesimi altyapı ve üstyapı bileşenlerinden oluşmakta olup Şekil 2.2.’de bu bileşenler gösterilmektedir.



Şekil 2.2: Demiryolu hattı alt ve üstyapısı [16].

2.3.1. Demiryolu Altyapısı

Demiryollarında altyapı, Şekil 2.3’te görüleceği üzere alt balast, toprak gövde ve doğal zeminden oluşmaktadır.

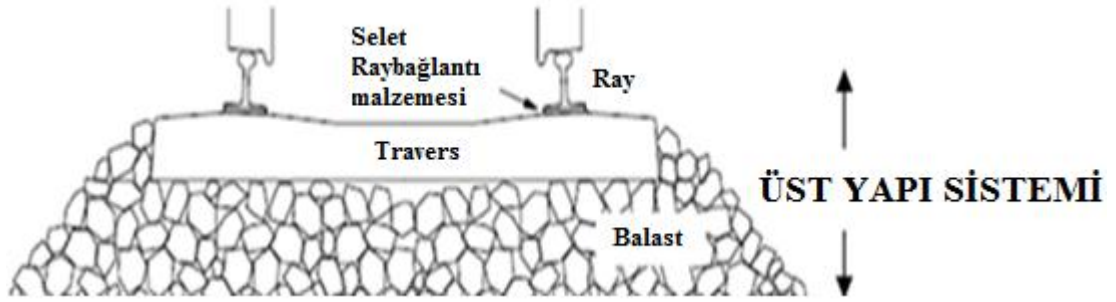


Şekil 2.3: Demiryolu altyapısı [16].

2.3.2. Demiryolu Üstyapısı

Altyapı platformu üstünde bulunan, üzerinde demiryolu araçlarının hareket etmesini sağlayan ve demiryolu araçlarından etki eden kuvvetleri (dinamik ve statik) platforma aktaran kısma demiryolu üstyapısı denilmektedir. Demiryolu üstyapı bileşenlerini [17];

- En altta balast tabakası
- Balastın üstüne konulan ve demir, ahşap ve beton olarak üç farklı malzemeden üretilen travers
- Traversin üstünde ray
- Ve ray ile travers arasındaki bağlantıları sağlayan ray bağlantı malzemeleri oluşturmaktadır.



Şekil 2.4: Demiryolu üstyapısı.

2.3.2.1. Demiryolu Üstyapısının Görevleri [17]

Demiryolu üst yapısının üstlendiği görevlere bakıldığında bunların;

- Çeken (lokomotif) ve çekilen (vagon) demiryolu araçlarının hareket etmesini sağlayan düzgün ve pürüzsüz bir yuvarlanma yüzeyi sağlamak
- Çeken ve çekilen araçlardan gelen yüklerin platforma aktarılmasını sağlamak
- Demiryolu hattının yatay ve düşey eksenleri ile yol açıklığının korunmasını sağlamak
- Üzerinde hareket eden demiryolu araçlarına kılavuzluk görevi yapması olarak söylenebilir.

2.3.2.2. Ray

Demiryolu araç tekerleklerinden gelen yükleri traversler üzerine dağıtan, boylamasına yönde tekerleklerle kılavuzluk ederek araçlar için düzgün bir hareket yüzeyi sağlayan, 0,6-0,82 C içeren çelik bir malzemedir. Ray, demiryolu hattı üstyapı inşasında kullanılan malzemelerden biri olup ekonomik açıdan demiryolu hatlarında yol kilometresine düşen en büyük yatırımı oluşturmaktadır. Dünyada ray üretiminin iki yüz yıl üzerinde bir geçmişi olup Türkiye'de ray üretimine Kardemir tarafından 1950'lerde başlanılmış ve hala devam edilmektedir. Ray üretimi iki aşamada gerçekleşir. İlk olarak çelikhane de yarı mamul halinde olan blumlar (kütükler) üretilir ve daha sonra bu blumlar haddehaneye gönderilerek ilk önce tavlama işleminden sonra hadde işlemlerine girerek son şeklini alır. Rayın taşıdığı görevler aşağıda sıralanmıştır.

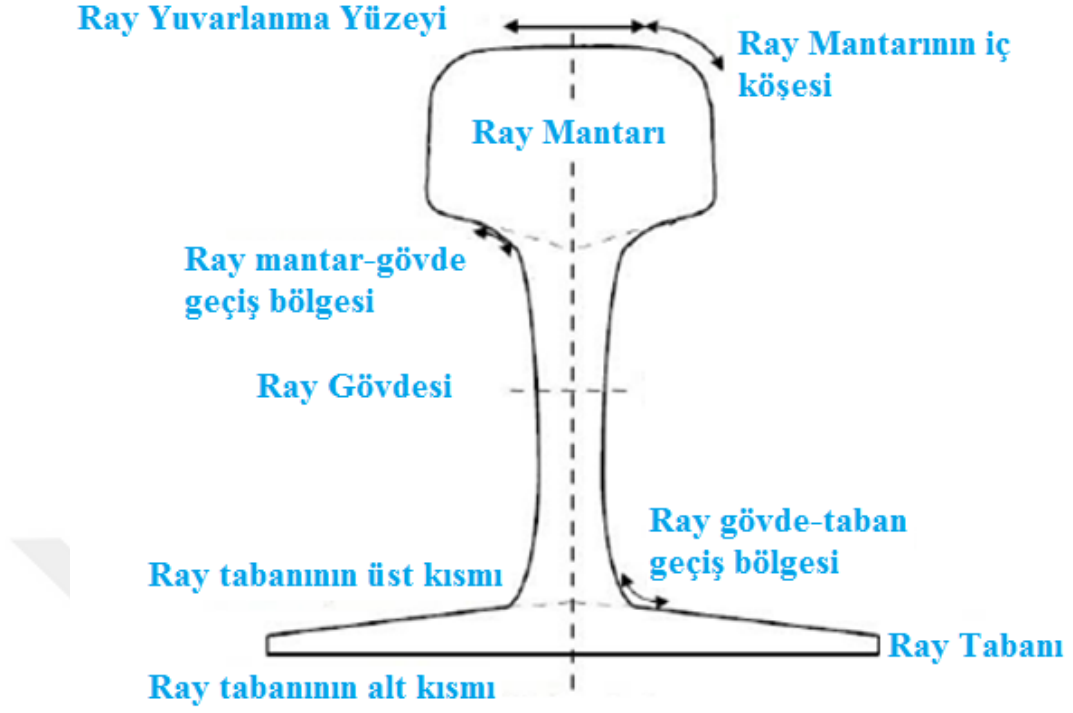
- Sürtünmenin en aza indirildiği bir yuvarlanma yüzeyi sağlamak,
- Tekerlekleri kılavuzlamak,
- Tekerleklerden gelen kuvvetleri traverse aktarmaktır.

Rayların karşılaşması gereken gereksinimler ise;

- Aşınmaya karşı yüksek dayanım
- Basınca karşı yüksek dayanım
- Yorulmaya karşı yüksek dayanım
- Yüksek akma dayanımı ve gerilme mukavemeti
- Gevrek kırılmaya karşı yüksek dayanım
- Kaynaklanma kolaylığı
- Yüksek derecede saflık
- İyi yüzey kalitesi [18]

2.3.2.3. Ray Kısımları

Raylar aşağıdaki şekilden de görüleceği üzere, mantar (rail head), gövde (web) ve taban (foot) olmak üzere 3 kısımdan oluşmaktadır.



Şekil 2.5: Vinyol (vignole) tipi ray bölümleri [19].

Ray Mantarı:

Demiryolu araçları tekerleklerine yuvarlanma yüzeyi sağlayan ray üst kısmıdır.

Gövde:

Mantar ile taban arasında kalan kısımdır. Bu kısım ayrıca rayların bir birine cebire ile bağlanmasını sağlar.

Taban:

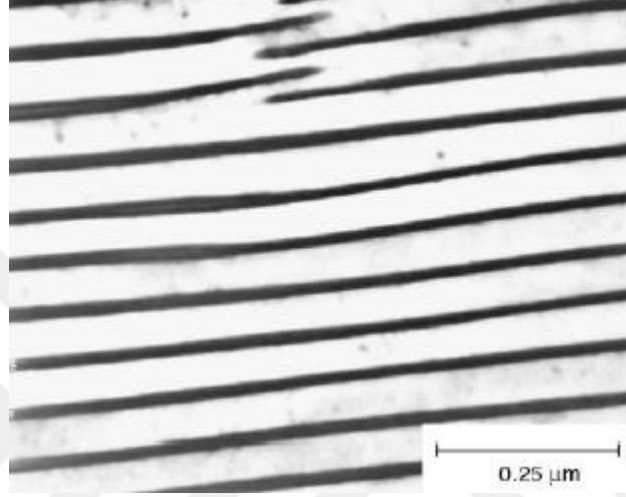
Rayların traverse oturan kısmıdır. Ray tabanının genişliği rayın traversin üstünde bulunan plastik selete sağlam bir şekilde oturmasını ve devrilmemesini sağlamaktadır. Ayrıca geniş tabanlı olması nedeni ile traverse binen gerilmeler azalmasını sağlar.

2.3.2.4. Rayların Kimyasal Bileşimleri

Ray çeliğinin genel kimyasal yapısını demir, karbon, silis, manganez, fosfor ve kükürt oluşturmakta, bunlardan karbon, silis ve manganezin belli miktarlarda bulunması, rayı daha mukavemetli hale getirmesi açısından faydalı olup, fosfor ve kükürt ise çelik bünyesinden tamamen çıkarılamayan istenmeyen elementlerdir.

2.3.2.5. Ray Çeliğinin Mikro yapısı

Demiryollarında kullanılan ray çeliği perlitik mikro yapıda olup, perlitik mikro yapıya alternatif olarak beyritik, östenitik ve martensitik mikro yapıda ray çeliklerini geliştirme çalışmaları devam etmektedir. Perlitik yapı, yumuşak yapıda olan ferrit (α -Fe) ve sert yapıda olan sementitlerden (Fe_3C) oluşmaktadır [20].



Şekil 2.6: Perlitik mikro yapı görüntüsü [21].

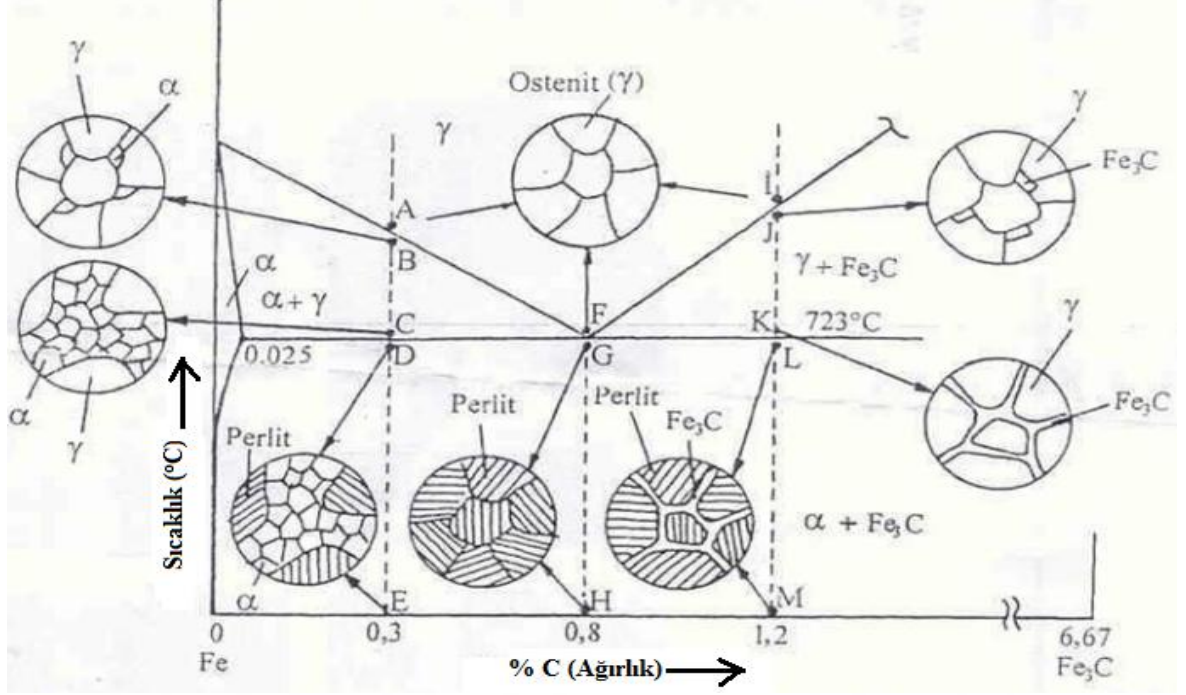
Perlitik mikro yapıdaki ray çeliklerinin demiryollarında kullanım nedenlerine bakıldığında bunlar;

- Yüksek dayanıklılık
- Düşük maliyet
- Aşınmaya karşı dayanım
- Yorulmaya karşı dayanım
- Sunmuş olduğu yüksek sertlik değerleridir [22].

Perlitik yapının mekanik özellikleri sementit lamelleri arası mesafe, lamel kalınlığı ve tane boyutuna bağlı olup, sementit lamelleri arası mesafe malzemenin sertliğini, çekme ve akma dayanımını önemli ölçüde etkilemektedir. Isıl işlem uygulaması ile lameller arası mesafe azaltılarak ince perlitik yapı elde edilmekte ve bu sayede ray çeliğinin aşınma dayanımı ile sertliği artmaktadır [20].

Perlitik dönüşüm

% 0,8C içeren çelik, östenit (γ) bölgesinden yavaş soğutulması sırasında 723°C sıcaklıkta ötektoid reaksiyon sonucu sementit ve ferrite dönüşür ve bu şekilde oluşan yapıya perlitik yapı denmektedir [20].



Şekil 2.7: Fe-C Denge diyagramında çeliklere ait soğuma esnasında oluşan içyapılar [23].

Ötektoid dönüşüm neticesinde ferrit ve sementit fazları oluşmaktadır. Gerçekleşen reaksiyon sırasında atomlar yayılırlar ve bu durum neticesinde östenit içindeki karbonunun çoğu sementite, demir atomlarının büyük bir kısmı ise ferrite yayınma gösterirler. Soğuma hızı arttırıldığında ise yayınının gerçekleşebileceği süre miktarı azalmakta olup bu nedenden ötürü karbon atomlarının yayına bileceği mesafe kısalmır. Mesafenin kısılması ile gerçekleşen reaksiyon sırasında oluşan sementit lamelleri arasındaki mesafe azalır ve daha ince lameller elde edilir. Oluşan bu ince perlitik mikro yapı ile malzemenin mekanik özellikleri artar [24].

2.4. RAY SINIFLARI VE RAY MANTARI SERTLEŞTİRME METODLARI

2.4.1. Ray Sınıfları

Türkiye’de ve dünyada en fazla kullanılan ray çeliği perlitik mikro yapılı raylar olup, rayların mekanik özelliklerini geliştirmek için farklı türde ray üretimi çalışmaları da bulunmaktadır.

Doğal sertlikte olan perlitik ray çeliklerinin dışında, yüksek alaşımlı raylar ve korozyona karşı dirençli rayların üretimi mevcut olup özellikle beynitik mikro yapılı ray çeliklerinin üretilmesi için çalışmalar mevcuttur.

2.4.1.1. Doğal Sertlikteki Raylar

Raylar genellikle doğal sertliklerinde üretilirler. Haddelme işleminden sonra soğutma ve doğrultma sırasında kazanılan mekanik özellikler ray çeliğinin nihai özellikleri olup, bu şekilde üretilen raylar perlitik yapıdadır.

2.4.1.2. Yüksek Alaşımlı Raylar

Yüksek alaşımlı raylarda asıl amaç malzemede yüksek çekme mukavemeti eldesi olup, alaşımlı raylarda çekme mukavemetleri 1.300 N/mm^2 'ye kadar ulaşmaktadır. Yüksek alaşımlı raylarda kaynak hassasiyetinin artması ve kırılma sertliğinin azalması gibi dezavantajlarından dolayı demiryolu ağlarında pek tercih edilmemektedirler [2].

2.4.1.3. Beynitik Raylar

Beynitik rayların mikro yapısı tabakalardan oluşmayan topaklanmış sementit ve plaka halinde olan ferritten oluşmaktadır [2]. Bu raylar düşük karbonlu ve düşük alaşımlı çeliklerden üretilmekte olup bu sebepten dolayı kaynaklara birirlikleri de daha yüksektir [25].

2.4.1.4. Korozyona Karşı Dirençli Raylar

Bu tür raylar bakır, silisyum, krom ve alüminyumun ilavesiyle üretilmekte olup, yüzeylerinde yapışık bir oksit filmi bulunmaktadır. Korozyon direnci bu oksit filmin rayların yüzeyi ile ortamın temasının kesilmesi ile sağlanır [24].

2.4.2. Ray Mantarı Sertleştirme Yöntemleri ve Gerekliliği

2.4.2.1. Ray Mantarı Sertleştirme Gereksinimi

Demiryolu trafiğindeki artış, daha ağır dingil yükleri, ulaşılan yüksek hızlar ve yeni demiryolu araçları raylara binen yüklerin özellikle kurp kesimlerinde artmasına neden olmaktadır [1].

Rayların mekanik özelliklerindeki iyileşmeyi sağlayabilmek için doğal sertlikteki ray çeliği yerine farklı mikro yapı ve alaşımlı çeliklerin üretilmesi çalışmalarından çok, son yıllarda doğal sertlikte kullanılan R260 olarak bilinen kaba perlitik yapıda olan rayların mekanik özelliklerini, geliştirebilmek için ray mantarına (yüzeyine) ısıtma işlemi uygulama çalışmaları gerçekleştirilmektedir. Buradaki amaçlanan diğer önemli husus ise, malzemenin mekanik özelliklerini geliştirip meydana gelen ray yüzey problemlerini aza indirerek ray servis ömrünü arttırmaktır.

R260 kalitesinde olan ray çeliği 260-300 HB sertlik aralığındadır. Bu kalitedeki rayların mekanik özellikleri özellikle dar yarıçaplı kurplar ve makas bölgeleri gibi daha yüksek gerilmelere maruz kalan kısımlarda yetersiz kalmakta bu nedenden ötürü de bu bölgedeki raylar, alıyman (düz hat) kısma göre daha kısa sürelerde hasara uğramaktadırlar.

Ayrıca, hızlı tren ve yüksek hızlı tren işletmeciliği kapsamında artan dingil yükleri, işletmecilik hızı ve trafik yoğunluğuna istinaden bu hatlarda kullanılan rayların maruz kaldıkları gerilmeler artmakta bu sebepten ötürü de kullanılan rayların daha yüksek mekanik özellikler göstermesi istenilmektedir.

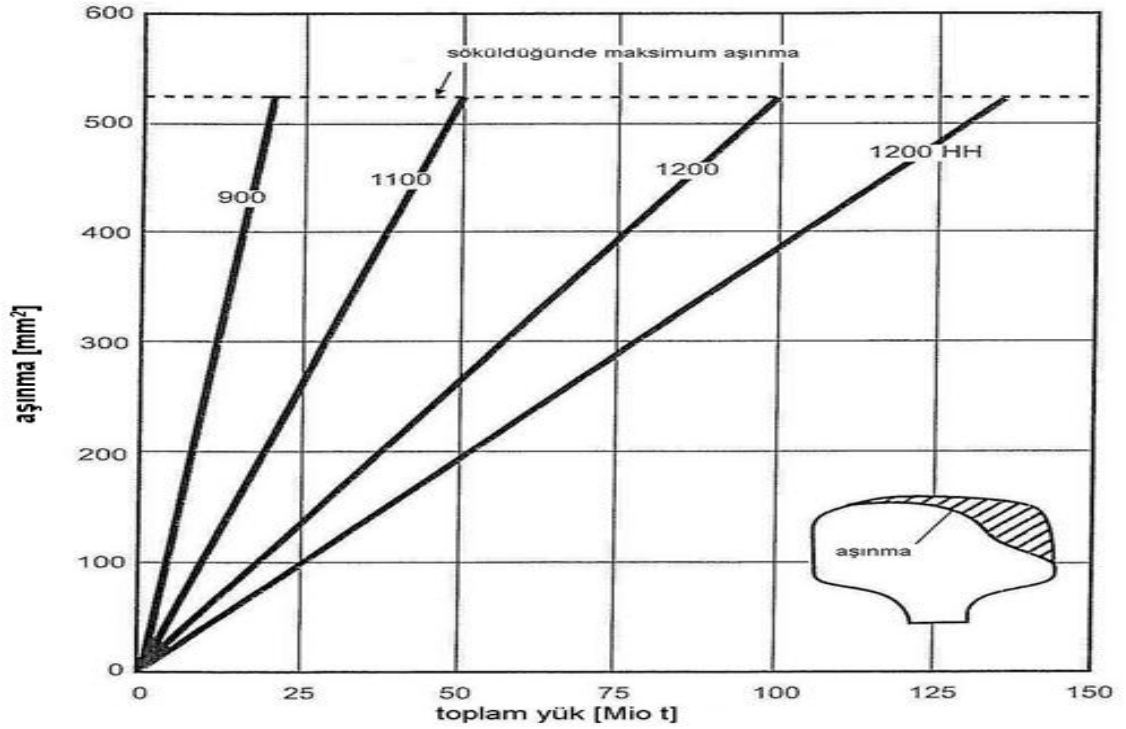
Ülkemiz demiryollarında 200-500 m arası olan toplam 1.934 metre dar yarıçaplı kurp bulunmakta olup bu miktar konvansiyonel hatların % 21,6'sını oluşturmaktadır [26]. Bu dar yarıçaplı kurplarda meydana gelen aşırı sürtünme nedeniyle iç ve dış raylar daha kısa sürede aşınmakta, bu durum ise ray ömrünü azaltmaktadır.

Özellikle dar yarıçaplı kurplarda meydana gelen bu aşınma problemini azaltabilmek için şu an dünyada yaygın olarak kullanılan işlem, perlitik yapı R260 kalitesindeki ray çeliğinin mantar kısmına ısıtma işlemi uygulayarak sıkı dizilimli ince perlitik yapı elde edilmesidir. Bu şekilde elde edilen ray R350HT olarak kalitelendirilmektedir. Bu kalite raylarda perlit lamelleri arasındaki mesafe azalır daha sıkı bir yapı elde edildiğinden ötürü mantar sertliği 350-390 HB değerine sahip olmaktadır.

Uluslararası Demiryolları Birliği olan UIC'nin Mart 2005 tarihindeki talimatında, yarıçapı 400 metreden daha az olan kurp bölgelerinde yüksek aşınmadan dolayı mantarı sertleştirilmiş

ray kullanımı zorunluluk derecesinde, yarıçapı 400 - 700 metre olan kurplarda ise tercihi olarak kullanılması tavsiyesinde bulunmaktadır [1].

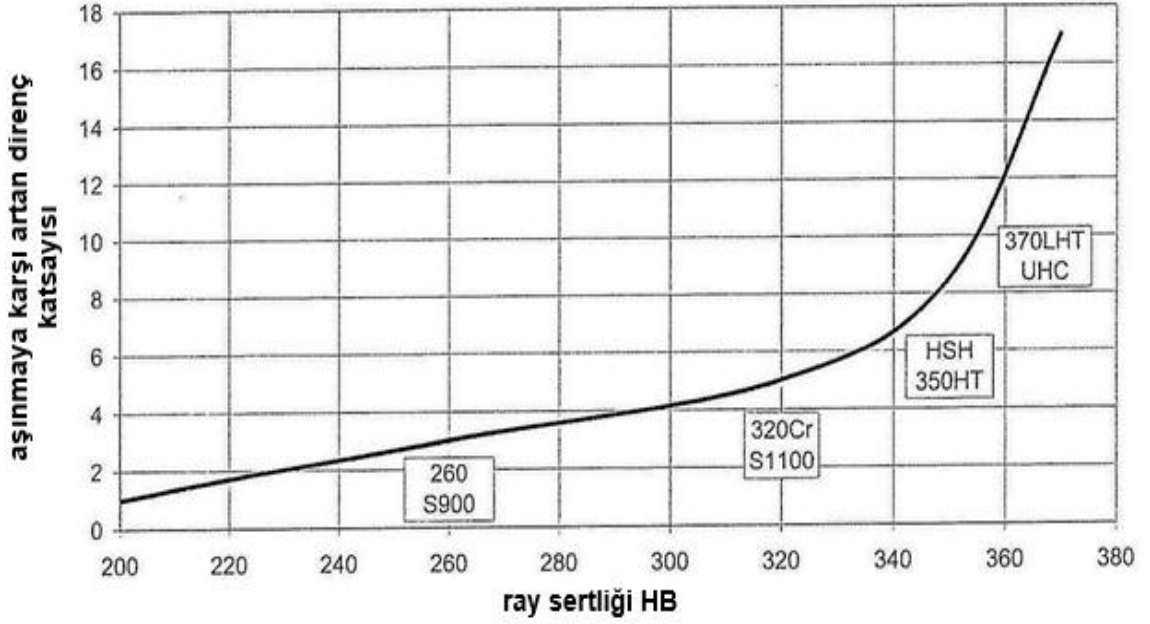
Yapılan çalışmalara göre, mantarı sertleştirilmiş olan rayların kullanım ömrünün R260 (900) kalitesindeki rayların kullanım ömründen 7 kat daha uzun olduğu tespit edilmiştir. Aşağıdaki şekil 300 metrelik yarıçaplı kurp bölgesinde yapılan testler neticesinde farklı sertlikte olan rayların aşınma oranlarını karşılaştırmaktadır [2].



Şekil 2.8: Ray çeliği sertliğine bağlı olarak aşınma miktarları karşılaştırılması [2].

Yukarıdaki Şekil 2.8'den de görüleceği üzere, R350 HT (1.200 HH) kalitesindeki mantarı sertleştirilmiş rayların aşınması, R260 (900) kalitesindeki normal raylara göre çok daha düşük olup bu durum ise hem bakım ve onarım açısından hem de kullanım ömrü açısından büyük bir önem arz etmektedir [2].

Aşağıdaki Şekil 2.9'da, aşınmaya karşı R260 kalitesindeki rayın direnci ile diğer kalitedeki rayların aşınmaya karşı dirençlerinin kıyaslaması verilmektedir. Şekil 2.9'dan da görüleceği üzere, mantarı sertleştirilmiş olan rayın aşınmaya karşı direnci doğal sertlikte olan raya göre çok daha fazladır [2].



Şekil 2.9: Farklı kalitedeki ray çeliklerinin aşınmaya karşı dirençleri [2].

Ray mantarı sertleştirme yöntemleri için dünyada en çok kullanılan yöntem ısıtma işlemi ile mantarı sertleştirme yöntemi olup, bu yöntem dışında plazma kaplama ile sertleştirme, lazer kaplama ile sertleştirme ve bu tez çalışmamız konusu olan lazerle sertleştirme yöntemleri literatürlerde geçmektedir [1].

2.4.2.2. Isıl işlem ile Mantarı Sertleştirilmiş Raylar

Bu metotla mantarı sertleştirme işlemindeki en önemli hususlardan birisi çok dikkatli soğutmanın uygulanmasıdır. Soğutma öncesi rayın sıcaklığı, soğutma hızı ve ortamı, TTT diyagramlarına göre soğutma ortam sıcaklığı ve soğutma bekletme süreleri dikkat edilmesi gereken önemli hususlardır [25].

Isıl işlem ile sertleştirme prosesi için 2 ayrı yöntem uygulanmakta olup bunlar daldırma ve püskürtme yöntemleridir. Daldırma yönteminde, yaklaşık olarak 900°C’de haddeden çıkan raylar ilk önce biriktirilir, ardından ısıtılarak daldırma istasyonunda sıcak banyoya daldırılarak izotermal işlem uygulaması gerçekleştirilir. Püskürtme işleminde ise, haddeden çıkan raylara bir ara ısıtma uygulaması yapılır ve ardından sıvı püskürtme işlemiyle soğutulur ve sıkı dizili ince taneli perlitik yapı oluşturulur [25].

2.4.2.3. Plazma Kaplama

Plazma ile ray mantarı sertleştirme yönteminde rayı koruyucu tabakayla kaplayacak olan tozun yanında iyonize gaz doldurulur. Bu kaplama düşük yağlama sıklığı sağlayarak sürtünme katsayısının düşmesine neden olur [2].

2.4.2.4. Lazer Kaplama

Bu kaplamada, alaşım içerikleri ve seramik katkıları yüksek performanslı bir lazer yardımıyla raya uygulanarak aşınmaya karşı dayanıklı bir tabaka elde edilir. Lazer kaplama ile ray mantarı sertleştirme çalışmaları kapsamında gerçekleştirilen bir AB projesinde 24 mm geniş tabakada kaplama gerçekleştirilmiş yapılan incelemeler neticesinde çatlamaya karşı yüksek direnç, düşük sürtünme katsayısı ve yüksek bir aşınma direnci elde edilmiştir [2].

2.4.2.5. Lazer Sertleştirme

Bu sertleştirme işlemi % 0,2 den fazla C içeren çeliklere ve dökme demirlere uygulanan bir yöntem olup diğer uygulanan yöntemlerden esasen çok farklı değildir. Bu yöntemde de amaçlanan sertlik ve mukavemetteki artış, ısıtılarak çıkılan östenit fazının hızlı bir soğuma ile martensite dönüştürülmesi ile elde edilmektedir [27].

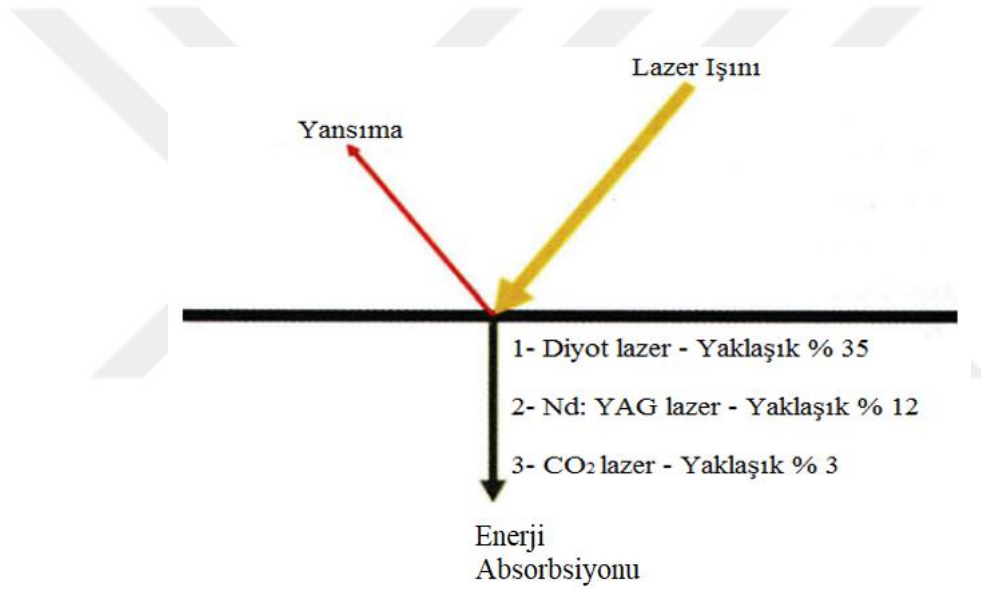
Lazerle sertleştirme işleminde genellikle CO₂, Nd: YAG ve diyot lazerleri kullanılmaktadır. CO₂ ve Nd: YAG lazerleri kullanarak farklı kimyasal kompozisyonlarındaki çeliklerin aşınma dirençlerinde lazer sertleştirme yöntemiyle önemli artışlar sağlandığı yapılan çalışmalarda belirtilmiştir [28]. Shariff ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen çalışmada, CO₂ lazeri kullanılarak perlitik raylar üzerinde yapılan lazer sertleştirme sonucu aşınma direncinde gelişme kaydedildiği belirtilmiştir [29].

Lazer sertleştirme yöntemi, avantajları sayesinde güncel olarak çoğu endüstri alanında kullanılmakta ve demiryollarında ray mantarı sertleştirme yöntemleri arasında gelecek vaat ederek ihtiyacı karşılayabilecek bir yöntem olarak düşünülmektedir. Güncel olarak en çok uygulama alanı bulduğu yerler, otomotiv endüstrisi ve güç üretimi endüstrisidir. Demiryolu endüstrisinde kullanımı için bazı çalışmalar mevcut olup bu çalışmalara daha da önem verilmesi gerekmektedir [3].

2.4.2.6. Yüksek Güçlü Diyet Lazerle Sertleştirme

Tez çalışmamız kapsamında kullanılan yüksek güçlü diyet lazer sağladığı üstün özellikleri açısından CO₂ ve YAG lazer türlerine göre son zamanlarda endüstriyel anlamda daha fazla ilgi görmektedir. Pashby ve çalışma arkadaşları diyet lazer kullanarak teknik olarak hem sade karbonlu çeliklerin hem de alaşımlı çeliklerin sertleşme bilirlğini göstermişlerdir [30].

Bu yüzey sertleştirme işleminde ışın kaynağı olarak yüksek güçlü diyet lazer kullanılmaktadır. Enerji absorbsiyonu açısından Nd: YAG lazer ve CO₂ lazere göre çok daha iyi olması bu lazer kaynağını diğer lazer kaynakları arasında ön plana çıkarmaktadır.

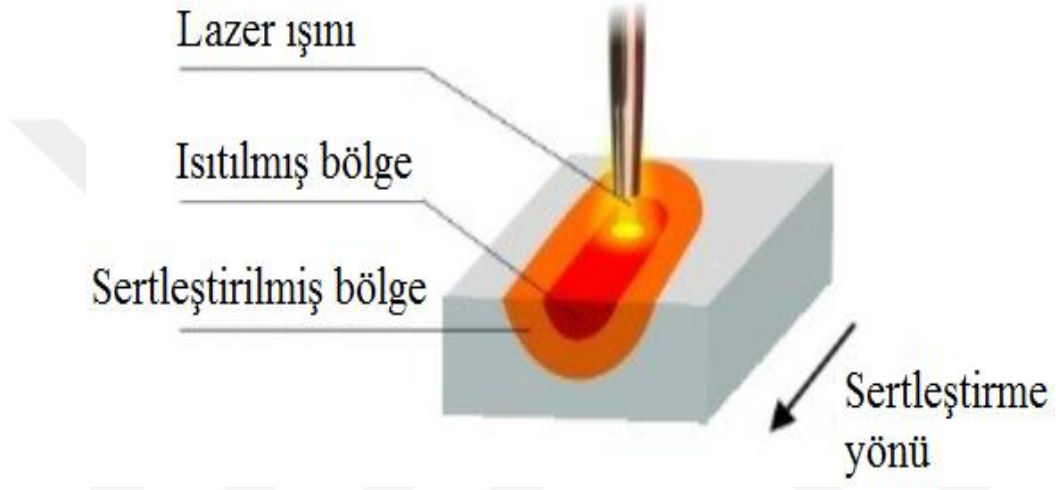


Şekil 2.10: Diyet lazer, Nd: YAG lazer ve CO₂ lazerin enerji absorbsiyonu karşılaştırılması [6].

Yüksek güçlü diyet lazer sisteminde lazer ışını orantılı olarak kullanılabilmekte olup, diyet güç sağlayıcısı ani olarak değiştirildiğinde lazer çıkış gücü de aynı hızla değişmektedir. Bunun gerçekleşmesi için sisteme bir kamera entegre edilir. Bu kamera malzeme yüzeyinde önceden tanımlanmış olan östenitleme sıcaklığını son derece hassas bir şekilde kontrol etmekte ve bu sıcaklık değerini toleranslar içerisinde sabit tutmaktadır. Östenitleme sıcaklık değerinin sabit kalması, güç değişimi ile sağlanmaktadır [31].

Bu yöntemde malzeme yüzeyi ergime sıcaklığının altında bir değere kadar 1.000 K/sn. ile ısıtılır. İstenilen sıcaklığa ulaşıldığında lazer ışını sertleştirilmesi istenen hat üzerinde belirli

bir hızda ilerler. İşlem süresince işlem sıcaklığı sistem tarafından kontrol edilir ve lazer gücündeki değişiklikler ile sabit tutulur. Lazer hat boyunca ilerledikçe malzeme yüzeyinde işlem yönü boyunca homojen bir ısı dağılımı meydana gelerek, çıkılan yüksek sıcaklık ile östenitik yapı meydana gelir. Lazer ışını ısıtılan bölgeyi terk ettiği anda, çok yüksek hızda ısınma sebebiyle hala soğuk olarak kalmış olan malzemenin iç kısmına doğru ısı transferi gerçekleşir ve malzeme yüzeyi aniden soğur. Kendiliğinden gerçekleşen bu hızlı soğuma ile malzeme yüzeyinde martensitik yapı oluşur [32, 33].



Şekil 2.11: Lazerle sertleştirme işlemi [34].

Yüzey sertleştirme işlemlerinde bu sistemin kullanılmasının diğer yöntemlere göre birçok üstünlüğü bulunmaktadır. Bu işlemde sıcaklık hızı çok yüksek olup, sıcaklık artış hızı 1.000K/s olarak gerçekleşmekte ve çok kısa bir sürede işlem görecekt olan parça yüzeyi çok yüksek sıcaklıklara ulaşmaktadır. Malzeme yüzeyinde 900°C ile 1400°C arasında sıcaklık kontrolü, geçici ve lokal olarak belirlenen ısı girişleri sağlar ve bu şekilde düşük stress ve distorsiyon olmayan malzemelerin üretilmesini mümkün kılar [31].

Yüksek güçlü diyot lazerle sertleştirme işleminin avantajları genel olarak aşağıdaki gibi sıralanabilir.

Prosesin avantajları;

- Isıl işlem hattı boyunca enerji yoğunluğunun aynı kalmasının sağlanabilmesi
- Hassas ve kısmi yüzey sertleştirme yapılabilmesi
- İdeal kristal yapı küçük tane boyutu ve homojen mikro yapı eldesi
- Prosesin kontrolünün kolay olması
- Harici soğutma sistemlerine gerek duyulmaması
- Minimum deformasyon ve az stress oluşturması
- İşlem gören malzemede homojen sertlik eldesi
- Parça yüzeyinde termal kamera sayesinde sıcaklık kontrolünün sağlanabilmesi
- İşlem yapılan parçanın diğer bölgelerinin mekanik özelliklerinde herhangi bir değişimin olmaması
- Malzeme yüzeyinde termal sıcaklık kontrolü ile erimenin ortadan kaldırılması [31]

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1. YÜKSEK GÜÇLÜ DİYOT LAZER

Lazerle yüzey sertleştirme işlemi için Miltaş Rukosen firmasınca ALOtec Dresden GmbH firmasından temin edilen Şekil 3.1’de fotoğrafı gösterilen ve Tablo 3.1’de bilgileri bulunan robotik cihaz kullanılmıştır.

Lazerle yüzey sertleştirme işlemi ALOtec Dresden GmbH’den firmasınca üretilmiş olan robotik cihazla lazer ışını 1.020 ± 10 nm ışın dalga boyunda ve argon ortamında numunelere uygulanmıştır. Argon gazı tüm işlem boyunca çıkılan yüksek sıcaklık neticesinde atmosferik kirlenmelerden (yüksek sıcaklıkta oksitlenme) uzak durulması amacıyla kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılan lazer maksimum 3.3 kW lazer gücüne sahip olup, sistem bir optik kafaya sahip ve ayrıca kendiliğinden (in-situ) Lampocpro–EMaqs camera sistemine sahip 8 eksenli robotik sistem (Reis GmbH & Co Maschinenbau-Fabric GmbH, Germany) üzerine yerleştirilmiştir.

Lazer işlemi süresince, lazer gücünü kontrol edebilmek ve yüzeyi istenilen sıcaklıkta tutabilmek için Fraunhofer enstitüsü malzeme ve ışın teknolojisi IWS tarafından geliştirilen lazer online izleme ve güç kontrol programı (LompocPro) kullanılmıştır.



Şekil 3.1: Testler kapsamında kullanılan yüksek güçlü diyot lazer (Reis GmbH & Co Maschinenbau-Fabric GmbH, Germany).

Tablo 3.1: Lazer kaynağı özellikleri ve işlem parametreleri.

Lazer Tipi	Diyot Lazer
Çalışma Türü	8 Eksenli Robotik Sistem
Lazer Dalga boyu	1.020 ± 10nm
Yüzey sıcaklığı ölçüm sistemi	Lampocpro–EMaqs kamera
Lazer ışın spotu	10 mm x 5 mm
Çalışma mesafesi	135 mm
Koruyucu gaz tabakası	7 Bar basıncında Argon
İşlem hızı	6 mm/sn.
Test süresi	20 sn.
Lazer gücü	1.750 Watt
İşlem sıcaklığı	1.100°C, 1.200°C, 1.300°C

3.2. KULLANILAN RAY ÇELİĞİ VE GERÇEKLEŞTİRİLEN TESTLER

Testler kapsamında aşağıda kimyasal, mekanik ve profil özellikleri verilen ve TCDD tarafından Yüksek Hızlı ve Konvansiyonel hatlarda kullanılmak üzere KARDEMİR'den temin edilmiş perlitik yapıda R260 kalitesinde 60 E1 ray çelikleri kullanılmıştır.



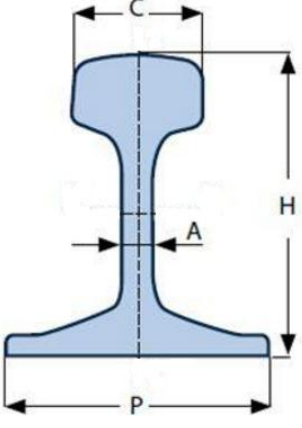
Şekil 3.2: Temin edilen R260 kalitede ray çelikleri (UIC 60E1).

Şekil 3.2, tel erozyon ve talaşlı imalat yöntemleriyle test numuneleri hazırlanmadan önce rayların fabrika sahasında istiflenmesi görünmektedir.

Tablo 3.2: Kullanılan ray çeliği kimyasal içeriği (%).

C	Mn	Si	S	P	V	Cr	Ni	Mo	Al
0,71	1,05	0,37	0,010	0,017	0,0028	0,028	0,054	0,038	00,15

Tablo 3.3: Kullanılan ray profili.

	Kesit Ağırlığı (kg)	Ray Boyu (H) mm
	60,21	172
	Ray Başı Genişliği (C) mm	Ray gövde Kalınlığı (A) mm
	72	16,50
	Ray Ayağı Genişliği (P) mm	
	150	

3.2.1. Ray Çeliklerinden Tel Erozyon ve Talaşlı İmalat Yöntemleri ile Test Numuneleri Hazırlanması

Test numunelerinin hazırlanmasında, malzemenin mekanik özelliklerinin en az şekilde etkilenmesi göz önünde bulundurularak tel erozyon yöntemi ile kesim işlemleri gerçekleştirilmiş ve daha sonra EN 13674-1 [35] standardında belirtilen yerlerden talaşlı imalat yöntemleriyle mekanik testler için deneysel numuneler hazırlanmıştır.

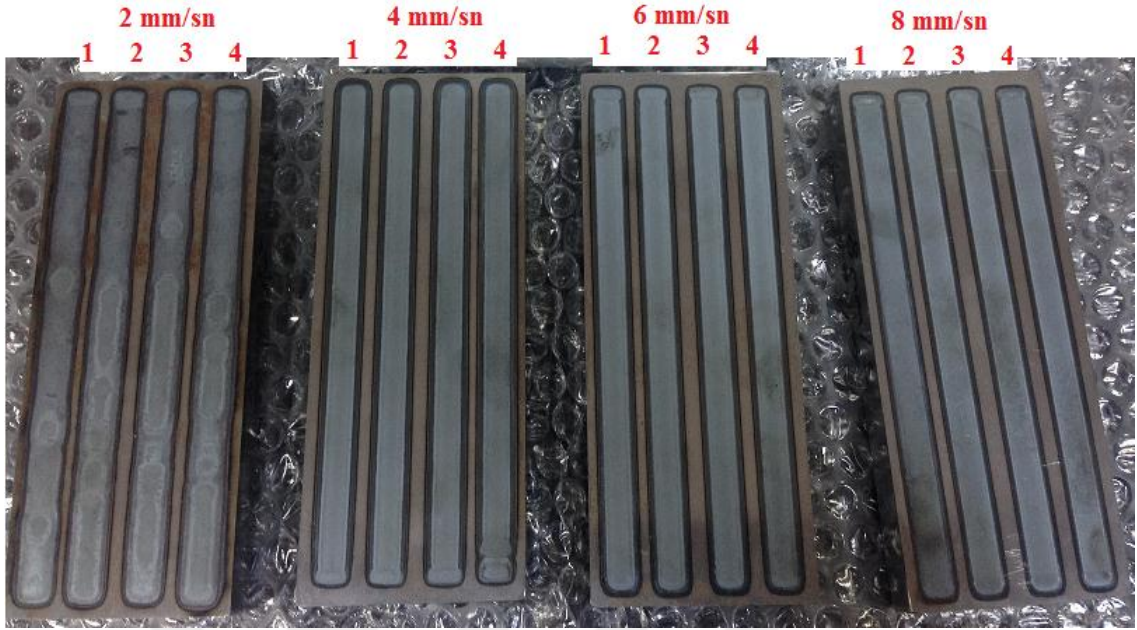
3.2.2. Ön Test Çalışmaları

Hazırlanan test numunelerine lazer işlemi uygulanmadan önce, en uygun lazer uygulama parametrelerini belirlemek için Şekil 3.3'te gösterildiği gibi ray çeliğinden 70x150 mm boyutlarında dört adet örnek numune hazırlanmıştır.

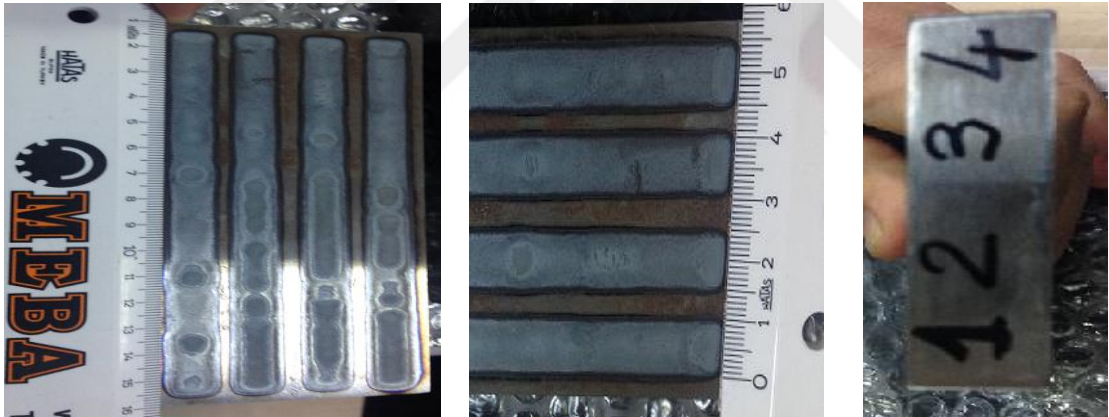
Hazırlanan her bir numune yapılan literatür araştırmaları ve endüstriyel uygulamalar ışığında 1.250°C'de farklı hız ve farklı başlangıç lazer gücü parametreleri ile dört farklı işleme tabi tutulmuş ve ideal işlem hızı ve başlangıç gücü parametreleri belirlenmiştir.

Tablo 3.4: Ön test çalışmaları kapsamında kullanılan parametreler.

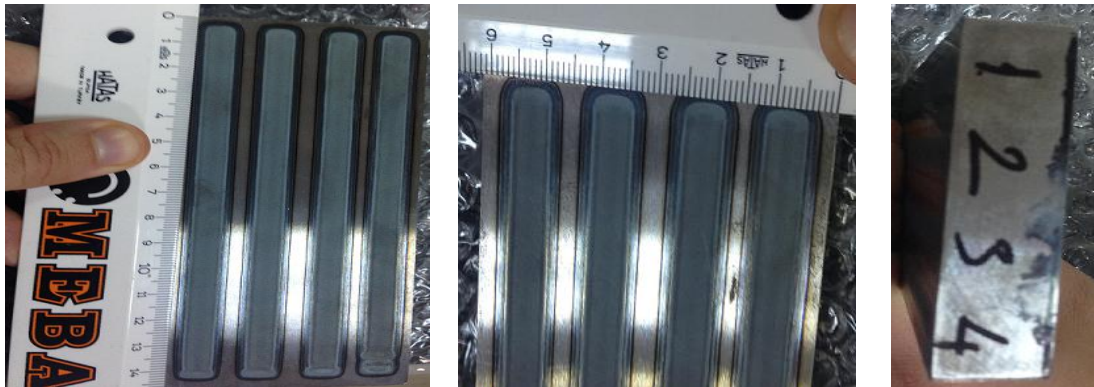
Numuneler	Sıcaklık (°C)	Hız (mm/sn.)	Güç (Watt)	Güç (Watt)	Güç (Watt)	Güç (Watt)
1	1.250	2	1.750	2.000	2.250	2.500
2	1.250	4	1.750	2.000	2.250	2.500
3	1.250	6	1.750	2.000	2.250	2.500
4	1.250	8	1.750	2.000	2.250	2.500



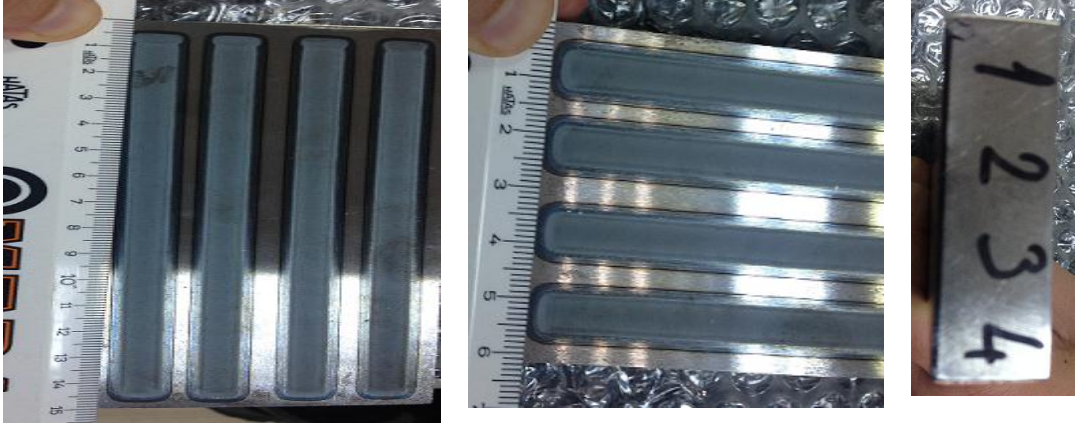
Şekil 3.3: Farklı hız ve lazer güçlerinde işlem gören ray çeliği numuneleri.



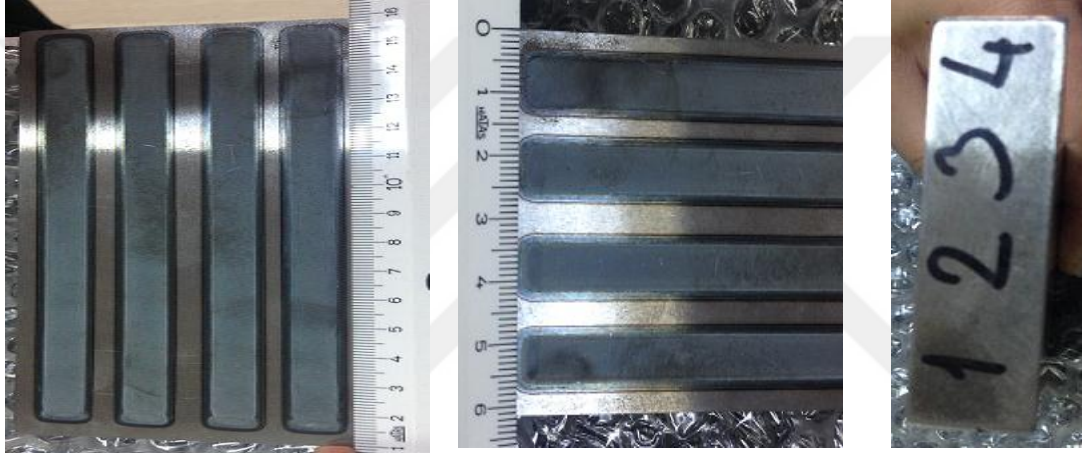
Şekil 3.4: 2 mm/sn. hızla işlem gören ray çeliği numuneleri.



Şekil 3.5: 4 mm/sn. hızla işlem gören ray çeliği numuneleri.

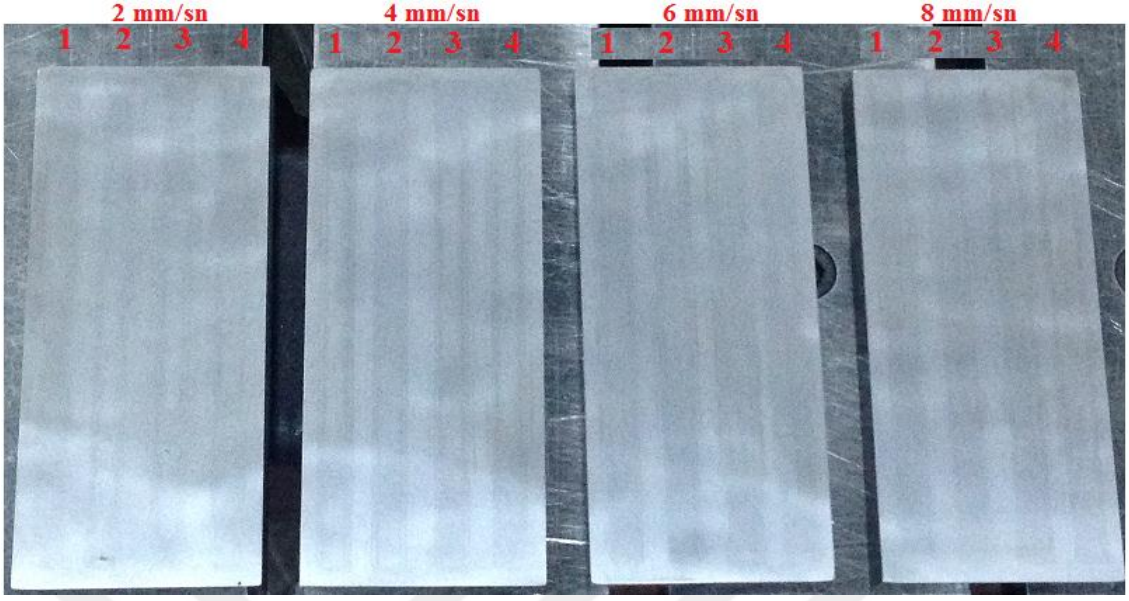


Şekil 3.6: 6 mm/sn. hızla işlem gören ray çeliği numuneleri.



Şekil 3.7: 6 mm/sn. hızla işlem gören ray çeliği numuneleri.

Şekil 3.3'ten de görüleceği üzere işlem gören numuneler üzerinde oksit tabakaları oluşmuştur. Bu oluşan oksit tabakasını ortadan kaldırmak için bütün numuneler taşlama işlemine tabi tutulmuştur. Ön test çalışmaları kapsamında, hazırlanan numunelerin yüzey sertlik değerleri üzerinden incelemeler gerçekleştirilip uygulanacak lazer gücü ve işlem hızı parametreleri belirlenmiştir.



Şekil 3.8: Taşlama işleminden sonraki numunelerin görünümü.

İşlem hızı ve başlangıç lazer gücü gibi işlem parametrelerini belirleme için yapılan ön deneme çalışmaları kapsamında ideal lazer gücü ve işlem hızı belirlendikten sonra (6 mm/sn. ve 1.750 watt) tez kapsamında ana deneylere geçilmiştir. Gerçekleştirilen literatür çalışmalarının çoğunun farklı lazer gücü ve işlem hızlarının malzemenin özelliklerine etkisi üzerine yapıldığı farklı işlem sıcaklığı etkisinin malzeme özelliklerine nedenli bir etkisinin tespiti üzerine ayrıntılı bir çalışma olmadığı tespit edilmiştir. Bu nedenden ötürü bu tez çalışması kapsamında hazırlanan numunelere farklı işlem sıcaklıkları (1.100°C, 1.200°C ve 1.300°C) uygulanmıştır. Bu sıcaklıkların seçiminde endüstriyel anlamda yüksek güçlü diyot lazer uygulamalarında kullanılan sıcaklıklar ile kullanılan ray çeliğinin içerdiği karbon oranına bağlı olarak östenit bölgede çalışıla bilinecek maksimum sıcaklıklar göz önünde bulundurulmuştur. Tez çalışmaları kapsamında yüksek güçlü diyot lazerle yüzey sertleştirmede malzemenin mekanik özellikleri üzerine farklı işlem sıcaklıklarının etkisinin tespit edilerek ideal işlem sıcaklığının belirlenmiş ve ayrıca lazerle yüzeyi sertleştirilmiş numuneler ile sertleştirilmemiş numuneler mekanik, tribolojik ve karakterizasyon testlerine tabi tutularak elde edilen sonuçlar detaylı bir şekilde irdelenmiştir.

3.2.3. Sertlik Testi

Mikro sertlik deneyi için 30x20x15 mm boyutlarında numuneler hazırlanmış olup, bu numuneler ön test çalışmaları kapsamında belirlenen 1.750 watt lazer gücü ve 6mm/s. işlem hızında 1.100°C, 1.200°C ve 1.300°C’de lazerle sertleştirme işlemine tabi tutulmuşlardır.



Şekil 3.9: 1.100°C, 1.200°C ve 1.300°C de lazerle sertleştirme işlemine tabi tutulmuş numuneler.

Hazırlanan numuneler ilk önce Metkon FORCIPOL 2V markalı zımparalama ve parlatma cihazında yüzeyi hazırlandıktan sonra Zwick – ZHV μ M Mikrosertlik Cihazında yüzey sertlik taramasına tabi tutulmuşlardır. Lazerle yüzey sertleştirme işlemi neticesinde meydana gelen sertleştirme derinliğini ve sertlik dağılımlarını belirleyebilmek için kesit sertlik taraması yapılmıştır. Bunun için, numuneler ilk önce Metcon marka SERVOCUT 301-AA cihazında kesilmiş sonra yine Metcon markalı ECOPRESS 50 bakalite alma cihazında bakalite alınmışlardır.



(a) Kesme Cihazı



(b) Bakalite Alma Cihazı



(c) Hazırlanan Numuneler

Şekil 3.10: Numunelerin hazırlanması süreci.

Bakalite alınan numuneler yine Metkon FORCIPOL 2V markalı zımparalama ve parlatma cihazında yüzey hazırlama işleminden sonra kesit sertlik taraması işlemine tabi tutulmuşlardır.



(a) Yüzey Hazırlama Cihazı

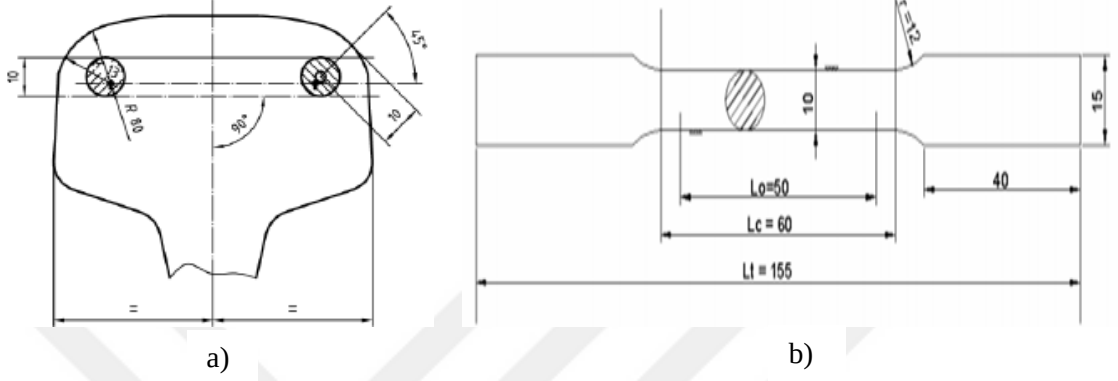


(b) Mikro sertlik Ölçüm Cihazı

Şekil 3.11: Yüzey hazırlama ve yüzey sertlik ölçüm cihazları.

3.2.4. Çekme Testi

EN 13674-1 [35] standardına göre ray mantarından aşağıdaki şekilde belirtilen yerlerden çekme numuneleri için taslaklar çıkartılmıştır. Çıkartılan bu taslaklar TS EN ISO 6892-1 [36] standardında belirtilen ölçülere göre CNC’de hazırlanmışlardır.



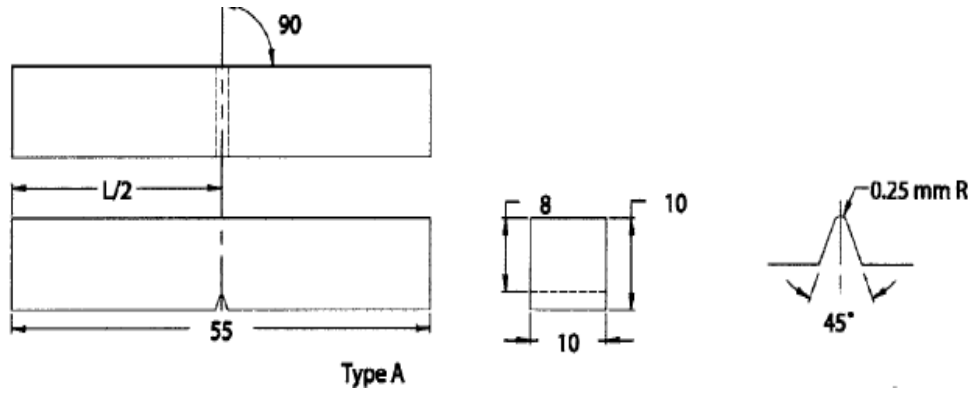
Şekil 3.12: a) EN 13674-1 standardına göre numune alınan yerler, b) TS EN ISO 6892-1 standardına göre çekme numunesi boyutları.

Hazırlanan bu çekme numunelerinin bir kısmı 6 mm/sn. işlem hızı ve 1.750 watt’lık başlangıç lazer gücünde 1.100°C, 1.200°C ve 1.300°C işlem sıcaklıklarında lazerle sertleştirme işlemine tabi tutulmuş olup geri kalan çekme numunelerine herhangi bir işlem uygulanmamıştır. Lazerle yüzey sertleştirme işlemine tabi tutulan ve tutulmayan çekme numuneleri MTS Landmark 370 marka çekme cihazında test edilmiş olup çekme dayanımı, % 0,2 akma dayanımı ve % kopma uzamasına ilişkin sonuçlar elde edilmiştir.

3.2.5. Çentikli Darbe Deneyi

Çentikli darbe deneyi, metallerin özellikle gevrek kırılmaya uygun şartlardaki mekanik özellikleri hakkındaki bilginin elde edilmesi ve numunenin dinamik bir zorlama altında kırılması için lüzumlu enerji miktarını (darbe direncini) tespit etmek amacıyla yapılmaktadır. Kırılma enerjileri yüksek olan malzemelerin kırılma toklukları da yüksek olur.

Ray mantarından tel erezyon yöntemi ile çıkartılan taslaklardan çentikli darbe deneyi numuneleri ASTM E23-12c [37] standardında belirtilen ölçülere göre CNC’de hazırlanmışlardır.



Şekil 3.13: Darbe deneyi numunesi boyutları [37].

Darbe deneyi testleri için yukarıdaki şekilde gösterilen boyutlarda çentikli numuneler hazırlanmıştır. Bu hazırlanan numunelerden bir kısmı 6 mm/sn. işlem hızında ve 1.750 watt başlangıç lazer gücünde 1.100°C, 1.200°C ve 1.300°C’de lazerle yüzey sertleştirme işlemlerine tabi tutulmuşlardır. Geri kalan numunelere ise herhangi bir işlem uygulanmamıştır.

Darbe deneyi için hazırlanan numuneler PSW 30/15 model Mohr & Federhaff A.G. markalı Şekil 3.14’te gösterilen cihazda deneye tabi tutulmuşlardır.



Şekil 3.14: PSW 30/15 model Mohr & Federhaff A.G. markalı darbe deneyi cihazı.

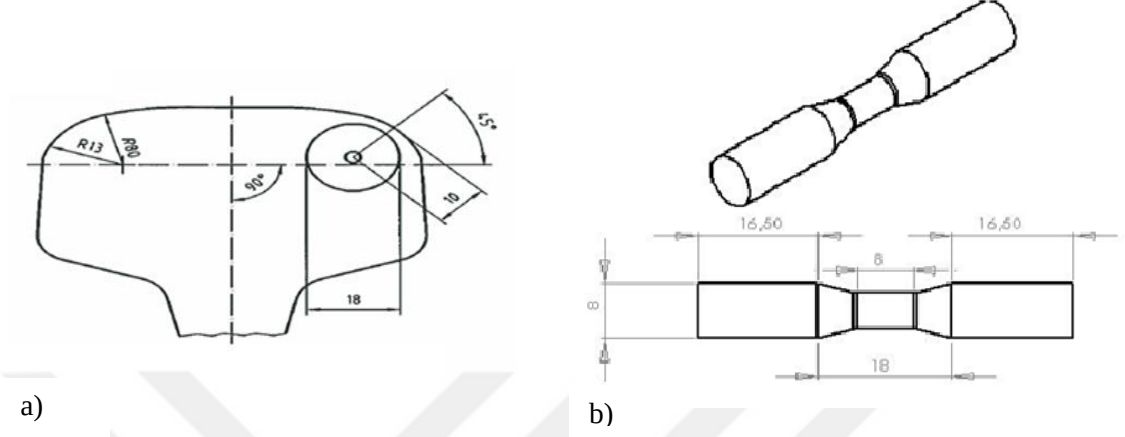


Şekil 3.15: Darbe deneyine giren lazerle işlenmiş ve işlenmemiş numuneler.

3.2.6. Yorulma Testi

Gerçekleştirilen sertlik, çekme testi ve çentikli darbe deneyi sonuçlarına bakıldığında 1.300°C de lazerle işlenmiş numunenin 1.100°C ve 1.200°C 'de işlenmiş numunelere göre daha iyi sonuçlar vermiş olduğu görülmüştür. Bu nedenden ötürü lazerle sertleştirme işleminin malzemenin yorulma davranışı üzerindeki etkisini anlayabilmek ve işlenmemiş olan malzeme ile kıyaslamak için diğer lazerle işlenmiş olan numunelere göre daha iyi sonuçlar elde edilmiş olan 1.300°C 'de işlem gören numune ile işlem görmemiş numuneler yorulma testine tabi tutulmuşlardır.

EN 13674-1 standardına göre ray mantarından aşağıdaki Şekil 3.16 (a)'da belirtilen yerlerden tel erezyon ile yorulma numuneleri için taslaklar çıkartılmıştır. Çıkartılan bu taslaklar, Şekil 3.16 (b)'de ki teknik çizime göre CNC de işlenerek yorulma test numuneleri hazırlanmıştır.



Şekil 3.16: a) EN 13674-1 standardına göre ray mantarından numune alınan bölge, b) numune boyutları.

Ray mantarından çıkartılan yorulma numunelerinden bir kısmı 6 mm/sn. işlem hızında ve 1.750 watt başlangıç gücünde 1.300°C'de lazerle işleme tabi tutulmuş, çıkartılan diğer numunelere herhangi bir işlem uygulanmamıştır.

Hazırlanan numuneler yükleme oranı $R = -1$ ve frekansı 50 Hz olan aşağıda Şekil 3.17'de gösterilen w+b walter + bai ag CH-8224 markalı döner eğilmeli (rotary bending) test cihazında yorulma deneyine tabi tutulmuşlardır.



Şekil 3.17: w+b walter + bai ag CH-8224 markalı döner eğilmeli (rotary bending) test cihazı.

Deney numunelerine ne kadar yüklemenin yapılacağını saptamak için çekme deneyi verilerinden yararlanılmış olup uygulanacak olan gerilmelerin hesaplanmasında ISO 1143 [38] (döner eğilmeli yorulma deneyi) standardında verilen formül kullanılmıştır.

$$F = (S \times \pi \times d^3) / 23 \times L \quad (3.1)$$

F: Uygulanan kuvvet (N)

d: Numune çapı (mm)

L: Kuvvet kolu uzunluğu (mm)

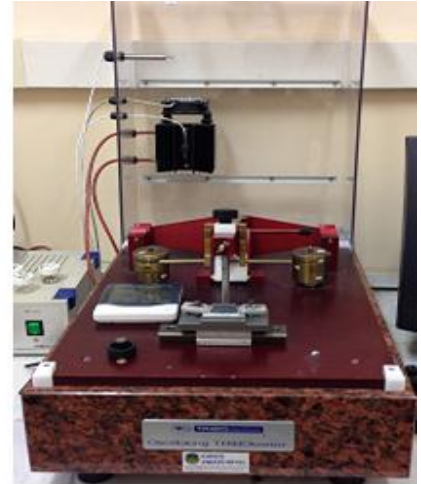
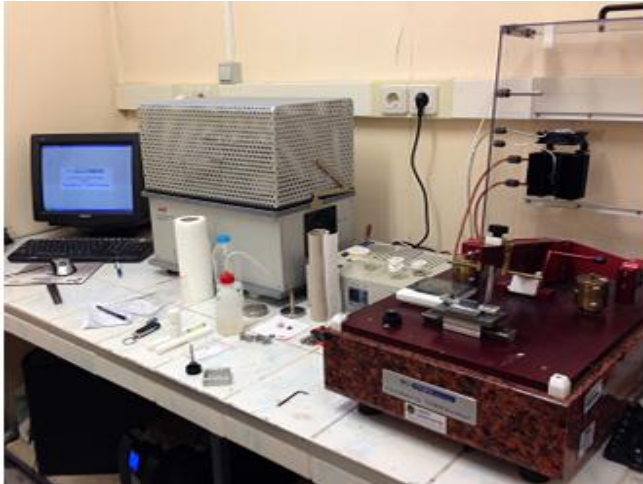
S: Gerilme (MPa)

3.2.7. Aşınma Testi

TRIBO technic Oscillating TRIBO Tester markalı cihazda 1.100°C, 1.200°C ve 1.300°C’de lazerle yüzeyi sertleştirilmiş ve sertleştirilmemiş numuneler Tablo 3.5’te verilen işlem parametreleri ile eksenel olarak (reciprocating test) aşınma testlerine tabi tutulmuşlardır.

Tablo 3.5: Aşınma deneyi şartları.

Yük	5N
Kayma Mesafesi	50 metre
Aşındırıcı	6mm çapında alümina bilye
Kayma Hızı	10 mm/sn.
Oda Sıcaklığı	24 °C ±1
Nem Oranı	% 35±5



Şekil 3.18: Aşınma deneyi cihazı fotoğrafları.

Aşınma deneyine tabi tutulacak olan ısıtılmış numune yüzeyinde oksit tabakası oluştuğu tespit edilmiş olduğundan bu malzeme için zımparalama ve parlatma işlemleri yapılarak yüzey hazırlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Lazerle işlenmiş numunelerin yüzeyinde ise oksit tabakası oluşumu gözlemlenmediği ve ayrıca mekanik olarak yüzey hazırlama işleminin numunelerin mekanik özelliklerine zarar verebileceğinden ötürü bu numuneler yüzey hazırlama işlemlerine tabi tutulmamışlardır.

Daha sonra hem deneye girecek tüm numune yüzeyleri hem de aşındırıcı olarak kullanılan Alümina bilye yüzeyi, aşınma davranışını etkileyebilecek olan bulunabilecek kirliliklerin temizlenmesi için aseton ile silinerek yüzey temizleme işlemine tabi tutulmuşlardır.

Aşınma deneyi Tablo 3.5'te verilen şartlar altında gerçekleştirilmiş olup deney süresince sürtünme katsayıları kaydedilmiştir. Deney sonrasında Veeco Dektak 6M yüzey profilometre cihazı kullanılarak aşınmış olan numunelerin 2 boyutlu profillerinden alansal ve hacimsel aşınma miktarları bulunmuştur.

3.2.8. Yüzey Pürüzlülüğü Testi

Lazerle yüksek sıcaklıklarda yüzey sertleştirme işleminin numuneler yüzeyinde oluşturmuş olduğu etkiyi anlayabilmek için ayrıca aşınma testine tabi tutulan numuneler üzerinde ISO 4287 standardına göre [39] yüzey pürüzlülüğü testleri Veeco Dektak 6M yüzey profilometre cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

3.2.9. Optik Mikroskop İncelemesi

Yapılan mekanik testler neticesinde, sonuçları diğer numunelere oranla daha iyi sonuç veren 1300°C'de işlem gören numunenin mikro yapı incelemesi Nikon ECLIPSE MA200 markalı optik mikroskop cihazında gerçekleştirilmiştir. 1300°C'deki numunenin mikroskobik incelenmesi için numune ilk önce Struers Discotom-6 markalı kesme cihazında kesilmiş ardından yine Struers CitoPress-10 markalı cihazda bakalite alınmıştır. Bakalite alınma işleminden sonra Struers TegraPol-21 markalı zımparalama ve parlatma cihazında MD Piano markalı 220 Nolu zımparada suda zımparalama işlemi ardından MD Allegro markalı 220

Nolu zımparada bu markalı zımparanın kendine ait solüsyonunda zımparalama işlemine tabi tutulmuştur. Zımparalama işleminden sonra numune sırasıyla 9 μm , 3 μm ve 1 μm 'luk ayrı ayrı ke elerde parlatma işlemine tabi tutulmuştur. Parlatılan numune % 2'lik Nital çözeltisinde dağlandıktan sonra optik mikroskop incelemesine geçilmiştir.



Struers Discotom-6 markalı kesme cihazı



Struers CitoPress-10 markalı bakalite alma cihazı



Struers TegraPol-21 markalı zımparalama ve parlatma cihazı



%2'lik Nital   zeltisi

  kil 3.19: Optik mikroskop numune hazırlama süreci.



Şekil 3.20: Nikon ECLIPSE MA200 markalı optik mikroskop cihazı.

3.2.10. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Elektron Dispersiyonu X-Işını Spektroskopisi (EDS) İncelemeleri

Aşınma, darbe ve yorulma deneylerine tabi tutulan numunelerin kopma yüzeylerinin SEM incelemesi ile EDS analizlerinin gerçekleştirilmesi için JEOL JSM-5600 marka ve modeli cihaz kullanılmıştır.



Şekil 3.21: JEOL JSM-5600 marka ve modeli taramalı elektron mikroskobu.

3.2.11. X-Işınları Difraksiyonu (XRD) Analizleri

Şekil 3.22’de gösterilen PANalytical X’Pert PRO MPD model X-ışını difraktometre cihazı kullanılarak yüksek güçlü diyot lazerle işlem görmüş ve işlem görmemiş numunelerin XRD analizleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.22: PANAlytical X'Pert PRO MPD model X-ışını difraktometresi.

3.2.12. Kalıntı Gerilme Analizi

Kalıntı gerilmeleri genellikle; malzemelerin üretimi, ısıtım işlem uygulamaları, mekanik işlemler, plastik şekil verme, kaynak yapımı ve kaplama uygulamaları sırasında meydana gelmektedir. Örneğin ısıtım işlem sırasında malzeme içerisinde bir sıcaklık dağılımı oluşmakta yani malzemenin farklı kısımlarında farklı sıcaklıklar olmaktadır. Buda malzeme içerisinde oluşan bu ısısal farklılıktan dolayı kalıntı gerilme oluşumuna neden olmaktadır. Kaynak işlemi yapıldığında da yine bir sıcaklık farklılığı oluşmakta buda yine kalıntı gerilimi oluşumuna neden olmaktadır. Kalıntı gerilimin yüksek miktarlarda bulunması malzemenin kullanımı sırasında ani çatlak oluşumu ile çatlak ilerlemesi ve malzemede beklenmedik ani kırılmalara neden olabilmektedir. Temelde malzemede kalıntı gerilimi oluşumunun üç nedeni vardır [40];

- Kimyasal
- Isıl
- Mekanik etkenler.

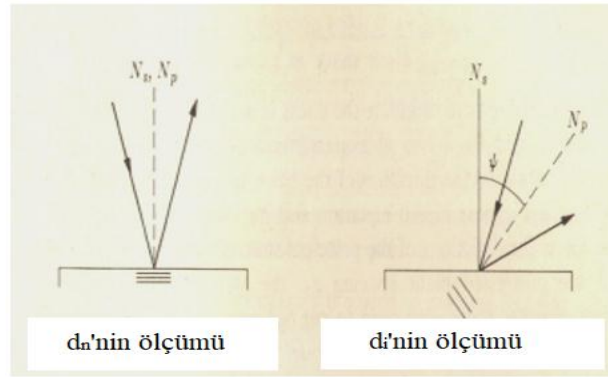
Kimyasal etkenler; kimyasal reaksiyonlar neticesi ile hacimsel değişimler, faz dönüşümleri, kimyasal olarak yapılan yüzey ve kaplama işlemleri gibi etkenlerdir [41]. Isısal etkenler; üretim sırasında ve yapılan ısı işlemler neticesinde malzemede meydana gelen ısısal farklılıklardan kaynaklanan homojen olmayan ısınma ve soğuma gibi etkenlerdir [42]. Mekanik etkenler ise genellikle malzeme üretimi sürecinden, kaynak, talaşlı imalat, haddeleme, kumlama vb. gibi işlemler neticesinde meydana gelen etkenlerdir [40, 42].

Kalıntı gerilme ölçümü için birçok ölçüm yöntemi geliştirilmiş olup bu kapsamda en fazla tanınan yöntemler X-ışınları kırınımı (XRD), plaka eğme, manyetik, kör delik, synchrotron radyasyon, nötron kırınımı, tabaka kaldırma, mikro-Raman spektroskopisi yöntemleridir [40, 43 – 49].

3.2.12.1. X-Işını (XRD) Yöntemi ile Kalıntı Gerilme Analizi Tanımı

Uniform deformasyon, difraksiyon açısının değişerek difraksiyon çizgisinde kaymaya sebep olur. Difraksiyon açısında meydana gelen bu değişimden deformasyon yani düzlemler arası mesafedeki değişim bulunur ve bulunan bu deformasyondan kalıntı stres tespit edilir [50].

Deformasyon miktarının tespit edilebilmesi için asgari iki ölçüme gerek vardır. İlk ölçüm yüzeye paralel olan bir (hkl) düzlemine sahip tanelere ait difraksiyon çizgisinden elde edilir ve bu difraksiyon açısından d_n (yüzeye paralel hkl düzlemleri arası mesafe) belirlenir. İkinci ölçümde ise yine aynı (hkl) düzlemine sahip ama yüzey ile farklı açıda (ψ) bulunan tanelerden alınarak d_i (açılı hkl düzlemlerine ait düzlemler arası mesafe) bulunur [50].



Şekil 3.23: d_n ve d_i ölçümü [50].

Elastisite teorisi sayesinde çıkartılan aşağıdaki bağıntı kullanılarak deformasyon hesaplanır.

$$(d_i - d_n) / d_n = [(1 + \nu) \sin^2 \psi \sigma_\theta] / E \quad (3.2)$$

ν : poisson oranı

E: Elastisite modülü

σ_θ : Yüzeye paralel gerilme

Bu tez kapsamında ikiden fazla ψ açısında ölçüm yapılmış olup $d - \sin^2 \psi$ grafiği oluşturularak elde edilen doğrunun eğiminden ($\sin^2 \psi$ metodu) stres σ_θ hesaplanmıştır.

$$\text{Eğim: } (1 + \nu) * \sigma_\theta / E \quad (3.3)$$

3.2.12.2. XRD Yöntemi ile Kalıntı Gerilme Analizi

X-ışınları kırınımı ile kalıntı gerilme analizleri, PANalytical X'Pert PRO MPD model X-ışını difraktometre cihazı kullanılarak, 6 mm/sn. işlem hızında ve 1.750 watt başlangıç lazer gücünde 1.100°C, 1.200°C, 1300°C'de lazerle işlenmiş ve işlenmemiş numuneler için gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu analiz ile gerçekleştirilen ısıtılmanın meydana getirdiği kalıntı gerilimin belirlenmesi ve bu durumun malzemenin mekanik performansı üzerindeki etkisini anlamak hedeflenmiştir. XRD yöntemi ile kalıntı gerilmesi analizi, seçilmiş tek bir {hkl} düzlemi özelinden gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmada, demir fazına ait en şiddetli difraksiyonun alındığı (110) düzleminden ölçüm alınmıştır. Kalıntı gerilmesi analizi Omega veya $\sin^2 \psi$ yöntemi olarak adlandırılan, $\sin^2 \psi$ 'ye karşı çeşitli ψ açılarında elde edilen düzlemler arası mesafe (d) değerleri arasında çizilen grafiğin eğiminden bulunmuştur. Buradaki ψ açısı psi yönünde (dikey yönlü düşüş) malzemenin döndürüldüğü açıdır. Hesaplamalar için, malzemenin elastik özellikleri Young Modülü= 210.000 MPa ve Poisson değeri= 0,3 kullanılmıştır. Kalıntı gerilme hesaplamalarında pik yerleştirme işleminde Pearson VII matematiksel metodu kullanılmıştır. X-ışını radyasyonu olarak Cu X-ışını tüpünün ($\lambda=1.5405$ Angstrom) kullanıldığı deneylerde, 45kV potansiyel fark ve 40mA akım uygulanmıştır.

4. BULGULAR

4.1. ÖN TEST ÇALIŞMASI BULGULARI

Ön test çalışmaları kapsamında Şekil 3.8’de gösterildiği gibi taşlama işlemi gerçekleştirildikten sonra her bir işlenmiş numune için yüzey sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiş olup elde edilen sonuçlar Tablo 4.1’de verilmektedir.

Tablo 4.1: Ön test yüzey sertlik sonuçları.

Numuneler	İşlem Sıcaklığı (°C)	İşlem Hızı (mm/sn.)	Başlangıç Gücü (Watt)	Elde Edile Ortalama Yüzey Sertliği (HV)
1	1.250	2	1.750	816±30
2	1.250	2	2.000	832±26
3	1.250	2	2.250	823±20
4	1.250	2	2.500	838±24
1	1.250	4	1.750	887±10
2	1.250	4	2.000	888±8
3	1.250	4	2.250	892±5
4	1.250	4	2.500	885±10
1	1.250	6	1.750	880±5
2	1.250	6	2.000	902±8
3	1.250	6	2.250	908±5
4	1.250	6	2.500	899±6
1	1.250	8	1.750	908±5
2	1.250	8	2.000	902±8
3	1.250	8	2.250	897±10
4	1.250	8	2.500	896±6

İşlenmiş numunelerin gözlem incelenmeleri sırasında, 2 mm/sn. hızla lazer işlemine tabi tutulan numunenin yüzeyinde yüksek oranda dalgalanmaların olduğu görülmüştür (Şekil 3.4). Meydana gelen bu dalgalanmaların, yetersiz işlem hızı nedeniyle malzemenin her yerinde homojen olarak ısıtılmasının gerçekleşmemesinden (malzeme/işlem hızı uyumsuzluğu) kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca lazer işleminin başlangıç noktasından bitiş noktasına

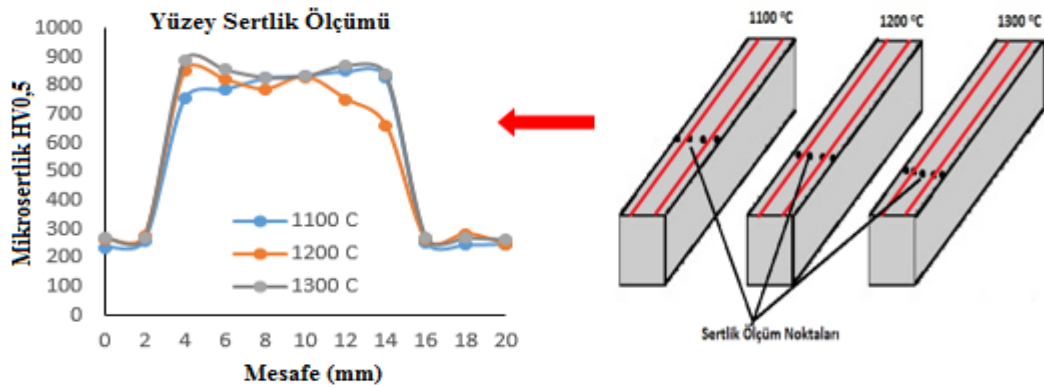
kadar olan hat boyunda yapılan sertlik ölçümlerinde homojen olmayan sertlik dağılımları da görülmüştür.

4, 6 ve 8 mm/sn. hızlarla farklı başlangıç güçleri ile işleme tabi tutulan numunelerde ise sertlik sonuçlarının birbirlerine yakın olduğu tespit edilmiştir. Bu hızlarla işleme tabi tutulan numunelere bakıldığında (Şekil 3.5, Şekil 3.6 ve Şekil 3.7) 2 mm/sn. hızla işleme tabi tutulan numunelerde olduğu gibi dalgalanma hatalarının olmadığı bu durum ise bu işlem hızlarının R260 kalitesindeki ray çelikleri için uygulanabilir işlem hızı parametreleri olduğunu göstermiştir.

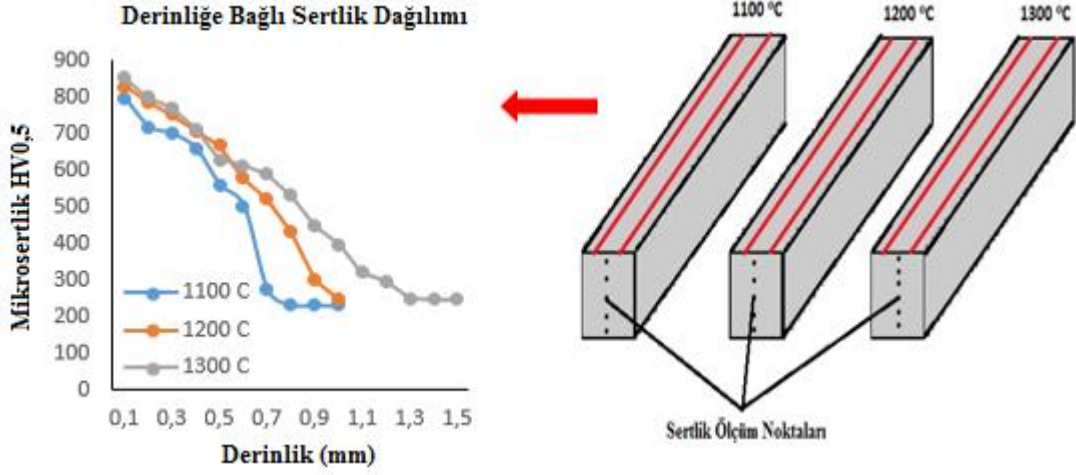
Elde edilen sonuçlar, yapılan literatür araştırmaları [11, 14, 29, 30] ve endüstriyel uygulamalar göz önünde bulundurularak işlem hızı olarak 6 mm/sn. seçilmiştir. 1.750 - 2.500 watt'lık başlangıç lazer güçlerine tabi tutulan ve 6 mm/sn. işlem hızıyla işlem gören numunelerin yüzey sertlik ölçüm sonuçlarına bakıldığında (Tablo 4.1) bu sonuçlarda çok büyük bir fark görülmemiştir. Seçilecek olan parametrelerin demiryollarına uygulanabilirliği açısından düşünüldüğünde, enerji verimliliği açısından sertlik değerlerinde çok büyük bir değişim göstermemesi nedeniyle 1.750 watt'lık başlangıç gücü seçilmiştir.

4.2. SERTLİK TESTİ BULGULARI

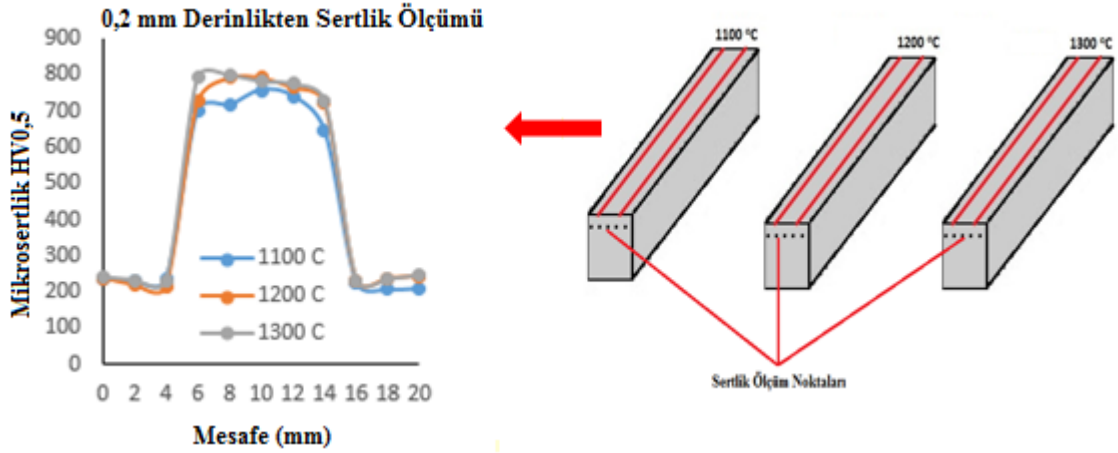
Yapılan hem yüzey hem de kesit sertlik analizleri neticesinde elde edilen bilgiler grafiksel olarak aşağıda verilmektedir. Ayrıca işlem görmeyen numune üzerinde de sertlik ölçümü yapılmış olup ortalama yüzey sertlik değeri 277 HV olarak bulunmuştur.



Şekil 4.1: 1.100°C, 1.200°C ve 1.300°C de lazerle sertleştirme işlemine tabi tutulmuş numunelerin yüzey sertlik sonuçları.



Şekil 4.2: 1.100°C, 1.200°C ve 1.300°C de lazerle sertleştirme işlemine tabi tutulmuş numunelerin derinlik sertlik sonuçları.



Şekil 4.3: 1.100°C, 1.200°C ve 1.300°C de lazerle sertleştirme işlemine tabi tutulmuş numunelerin 0,2 mm derinlikten alınan sertlik sonuçları.

Yüzey sertlik sonuçlarına bakıldığında 1.100°C'de işlem gören numunenin ortalama yüzey sertlik değerinin 814 HV, 1.200°C'de işleme tabi tutulan numunenin ortalama yüzey sertlik değerinin 784 HV ve 1.300°C'de işlem gören numunenin ortalama yüzey sertlik değerinin ise 854 HV olduğu tespit edilmiştir.

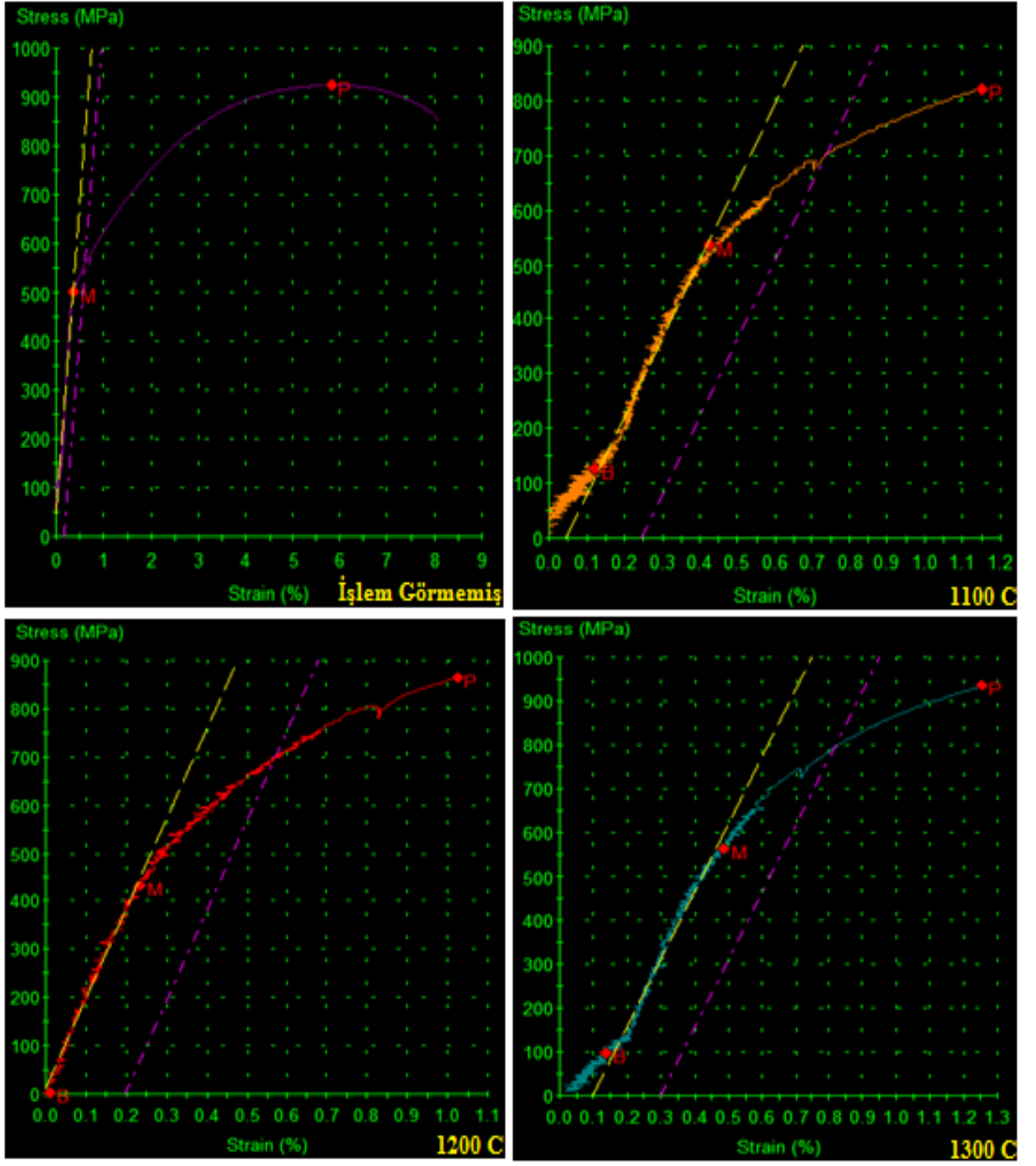
Her üç işlem sıcaklığında işleme tabi tutulan numunelerin yüzey sertlik sonuçlarına bakıldığında, lazerle sertleştirme gerçekleştirilen yüzeylerin sertliğinin ana malzeme sertliğine oranla yaklaşık olarak 3 katı kadar arttığı görülmektedir. Lazerle yüzey sertleştirme neticesinde meydana gelen sertleştirme derinlikleri ise Şekil 4.2’de görüleceği üzere 1.100°C’de işleme tabi tutulan numune için yaklaşık 650 μm , 1.200°C’de işleme tabi tutulan için yaklaşık 950 μm ve 1.300°C’de işleme tabi tutulan numune için ise yaklaşık 1.200 μm olarak görülmektedir. Ayrıca ana malzeme sertliğinde bir miktar azalmanın da meydana geldiği görülmüştür. Bunun nedeni ise, ısıdan etkilenmiş bölgede işlem sıcaklığının yeterli östenitleme sıcaklığına ulaşamamasından ötürü temperleme etkisi ile malzeme yapısında bir miktar yumuşamanın meydana gelmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

4.3. ÇEKME TESTİ BULGULARI

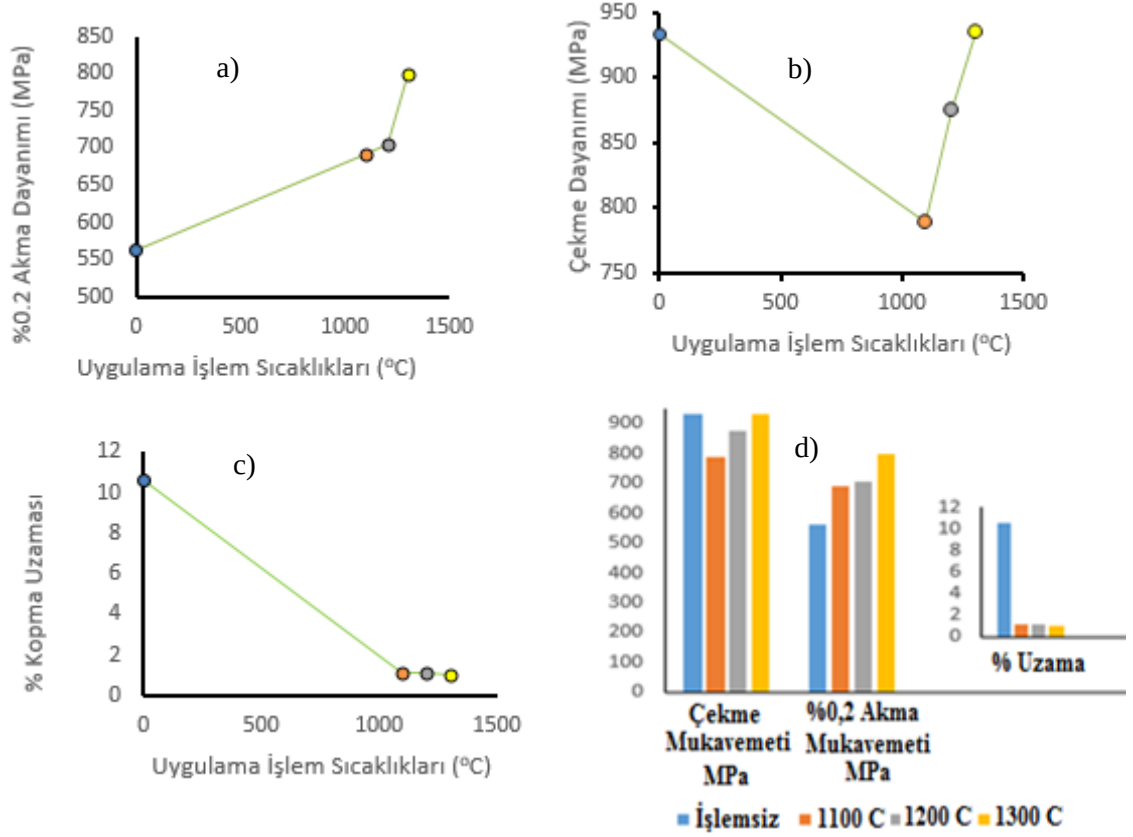
Gerçekleştirilen çekme deneyi neticesinde elde edilen bulgular Tablo 4.2’de verilmekte olup bu sonuçların grafiksel gösterimi de Şekil 4.4 ve Şekil 4.5’te verilmektedir.

Tablo 4.2: Çekme testi sonuçları.

		İşlem Hızı (V): 6 mm/sn.		
		Başlangıç diyot lazer gücü (P): 1.750 Watt		
Numuneler	İşlem Görmeyen	1.100°C	1.200°C	1.300°C
σ_a (%0.2 Akma Dayanımı, MPa)	564 $\pm$ 8	692 $\pm$ 10	704 $\pm$ 8	800 $\pm$ 5
σ_{φ} (Çekme Dayanımı, MPa)	934 $\pm$ 10	789 $\pm$ 10	875 $\pm$ 15	935 $\pm$ 10
ε (Kopma Uzaması, %)	10,6 $\pm$ 0,6	1,13 $\pm$ 0,5	1,15 $\pm$ 0,4	1 $\pm$ 0,2



Şekil 4.4: Lazerle işlenmiş ve işlenmemiş numunelerin çekme testi grafikleri.



Şekil 4.5: a) %0,2 Akma dayanımı sonucu, b) Çekme dayanımı sonucu, c) % Kopma uzaması sonucu, d) Tüm sonuçları.

Şekil 4.5 (a)'da gösterilen sonuçlardan, 1.100°C, 1.200°C ve 1.300°C'de lazerle işlenmiş olan numunelerin akma mukavemetlerinin işlenmemiş olan numuneye göre sırasıyla % 22, % 24 ve % 41 artmış olduğu görülmektedir.

Çekme dayanımı sonuçları incelendiğinde 1.100°C ve 1.200°C'de işlem gören numunelerin çekme mukavemetlerinin işlenmemiş olan numuneye göre daha düşük olduğu görülmektedir. Bu durumun nedeni olarak, yüzey sertleştirme işlemi neticesinde bu malzemelerin akma dayanımlarında artış elde edilmiş olmasına rağmen yüzey sertleştirme işlemi ile malzemelerin yüzeyinin daha sert hale gelmesi (gevrekleşmesi) ve buna bağlı olarak % uzama miktarlarındaki azalma nedeniyle daha düşük gerilmelerde kopma olayının yaşanması olduğu düşünülmektedir.

Elde edilen sonuçlardan bu durumun 1.300°C'de işlem görmüş olan ray çeliğinde biraz daha farklı olduğu anlaşılmaktadır. Çünkü 1.300°C'de işlem gören numunenin % kopma

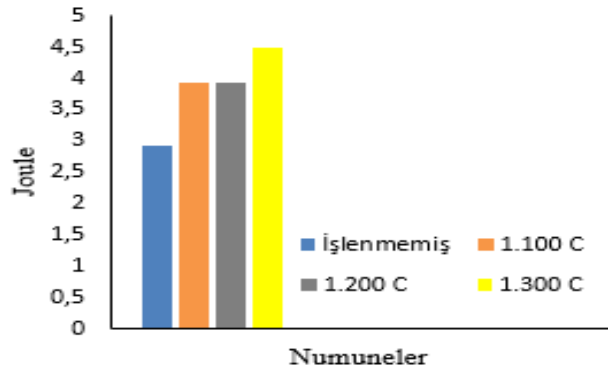
uzamasında işlenmemiş olan numuneye göre yine önemli oranda düşüş olmasına rağmen, çekme dayanımı sonucunun işlenmemiş olan numuneye göre bir miktar daha iyi olduğu görülmüştür (Tablo 4.2). Bunun nedeni olarak ise malzemenin % uzama miktarı azalmasına rağmen elde edilen yüksek akma dayanımı sonucu sayesinde bu sıcaklıkta sertleştirme işleminin malzemenin % uzama üzerindeki olumsuz etkisini tolere etmiş olduğu düşünülmektedir.

4.4. ÇENTİKLİ DARBE DENEYİ BULGULARI

Çentikli darbe deneyi neticesinde işlenmemiş ve lazerle işlenmiş numunelere ait elde edilen sonuçlar Tablo 4.3'te ve Şekil 4.6'da verilmektedir.

Tablo 4.3: Çentikli darbe deneyi sonuçları.

İşlenmemiş numune (ortalama) joule	1.100°C'de işlenmiş numune (ortalama) joule	1.200°C'de işlenmiş numune (ortalama) joule	1.300°C'de işlenmiş numune (ortalama) joule
2,94	3,92	3,92	4,50



Şekil 4.6: Çentikli darbe deneyi sonuçları grafiksel gösterim.

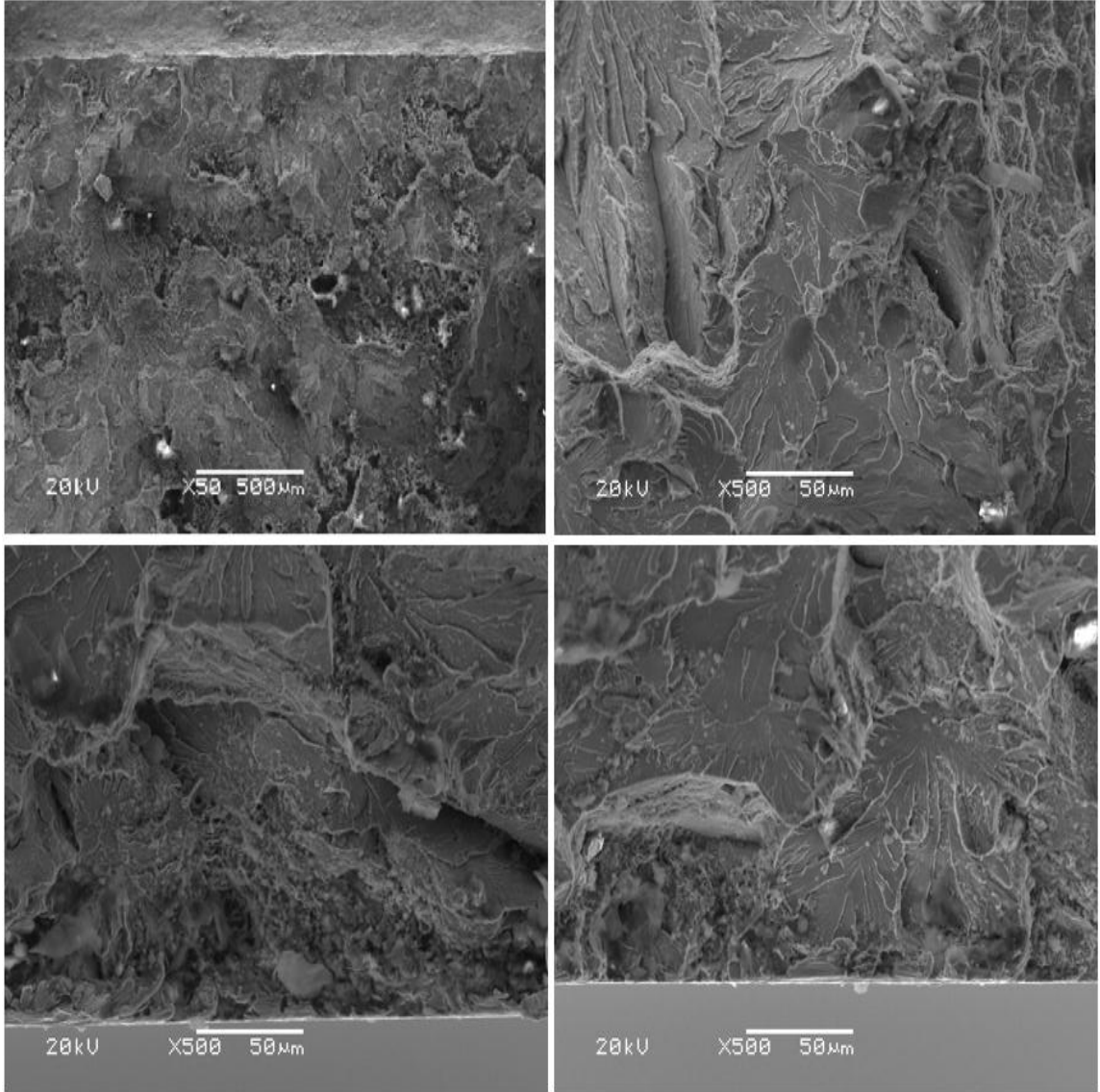
Elde edilen sonuçlardan, 6 mm/s. işlem hızında, 1.750 Watt lazer gücünde 1.100°C ve 1.200°C' de işlem gören numunelerin işlenmemiş olan numuneye göre kırılma enerjilerinde %33 ve 1.300°C'de işlem gören numune de ise %52 artış olduğu görülmüştür.

Kırılma enerjileri yüksek olan malzemelerin kırılma toklukları da yüksek olduğundan, lazerle sertleştirme işlemi neticesinde daha tok malzemeler elde edildiği görülmektedir.

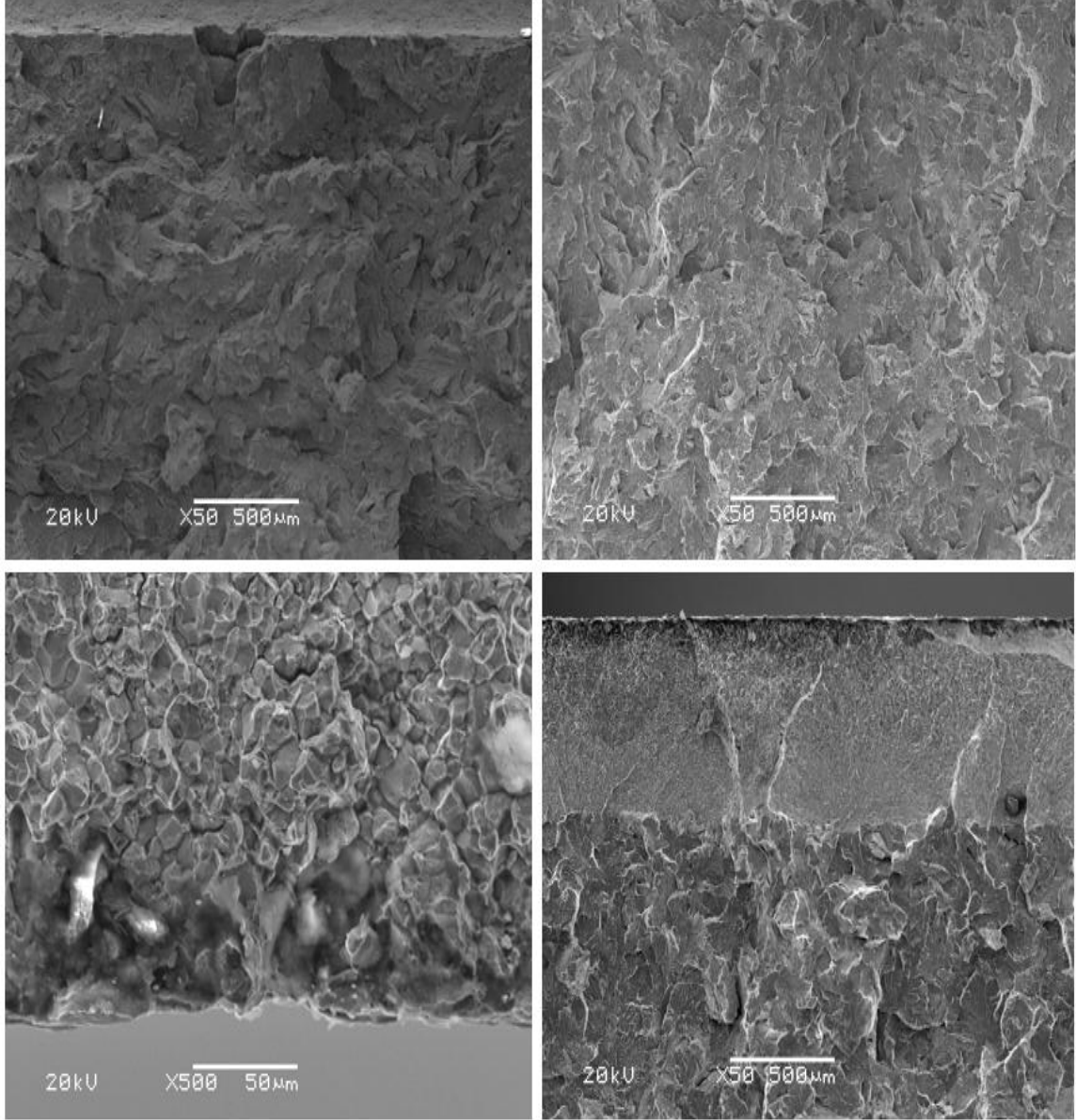
Gerçekleştirilen sertlik ve çekme testleri sonuçları dikkate alındığında en iyi sonuçların 1.300°C’de işlem gören numuneden elde edildiği Bölüm 4.2 ve 4.3’te verilmektedir. Yapılan bu çentikli darbe deneyi kapsamında da benzer bir sonuç ortaya çıkmış ve tokluğu en yüksek yine 1.300°C’de işlem gören numunenin olduğu tespit edilmiştir.

4.4.1. Çentikli Darbe Deneyi Numuneleri SEM İncelemesi

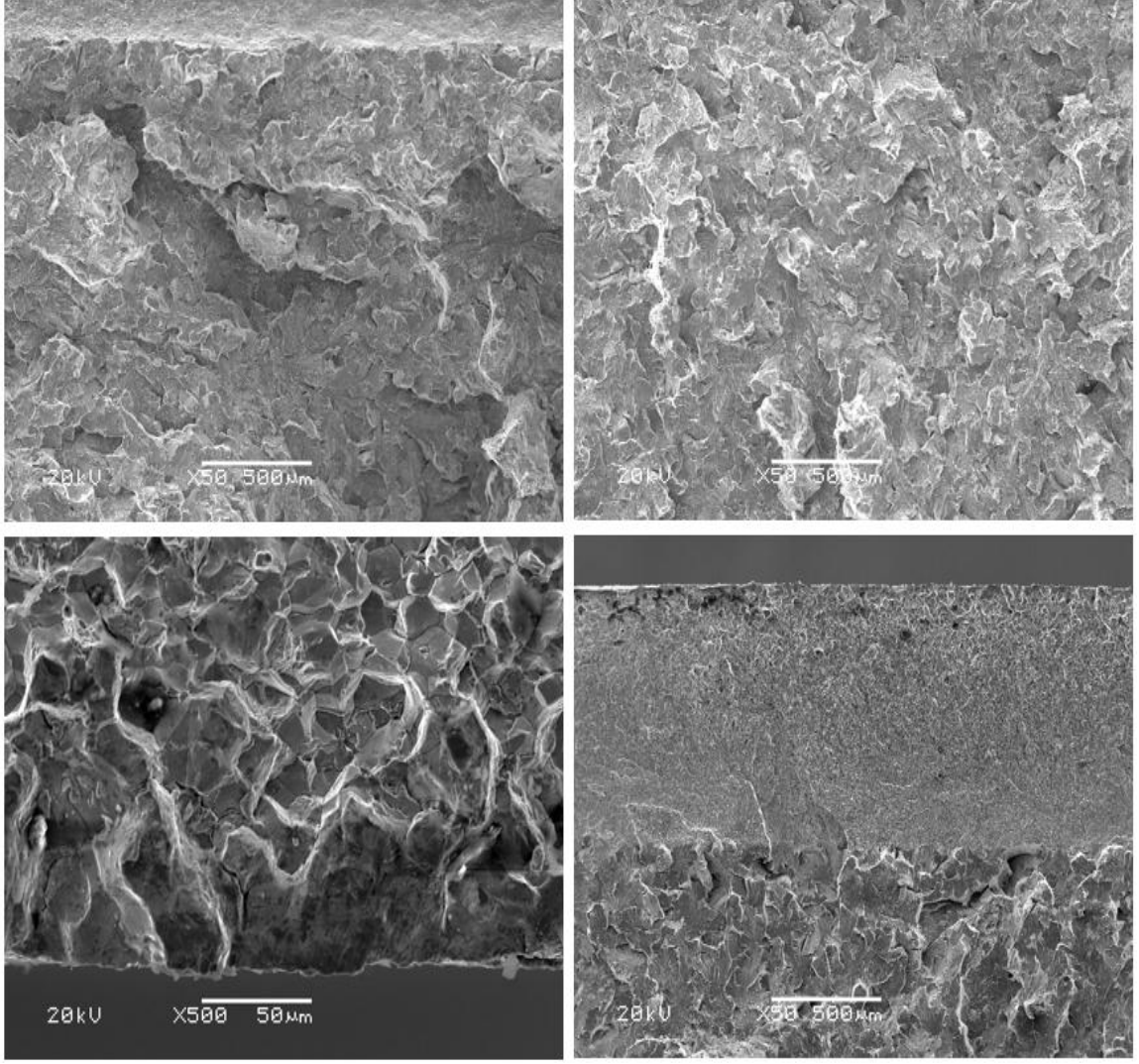
Aşağıdaki şekillerde (Şekil 4.7, Şekil 4.8, Şekil 4.9 ve Şekil 4.10) 1.100°C, 1.200°C ve 1.300°C’de lazerle işlenmiş ve işlenmemiş numunelerin darbe testine tabi tutulduktan sonra kopma yüzeylerinin SEM görüntüleri bulunmaktadır.



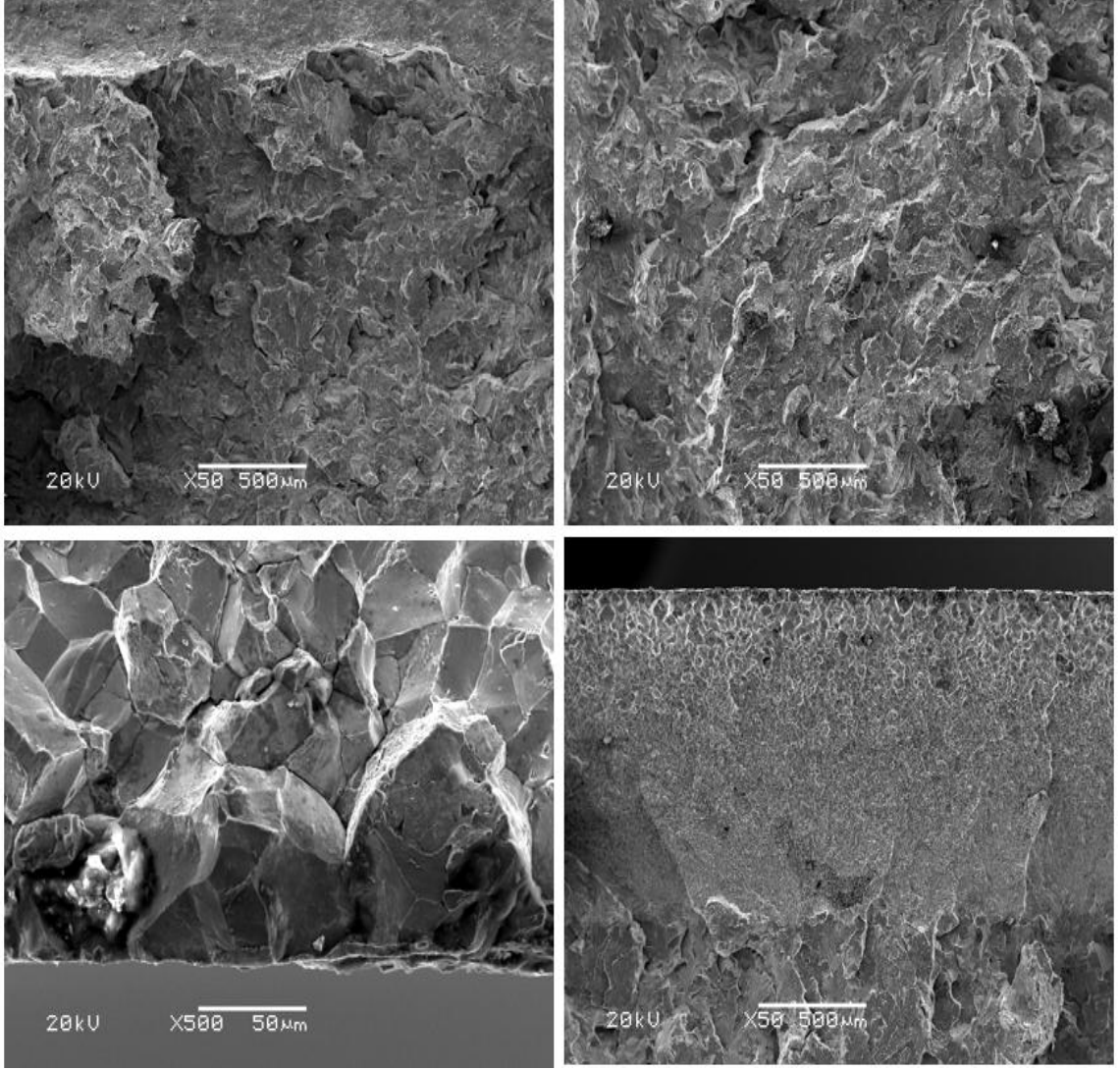
Şekil 4.7: İşlenmemiş numunenin darbe testi sonucu kırılma yüzeylerinin SEM görüntüsü.



Şekil 4.8: 1.100°C’de işlenmiş numunenin darbe testi sonucu kırılma yüzeylerinin SEM görüntüsü.



Şekil 4.9: 1.200°C’de işlenmiş numunenin darbe testi sonucu kırılma yüzeylerinin SEM görüntüsü.

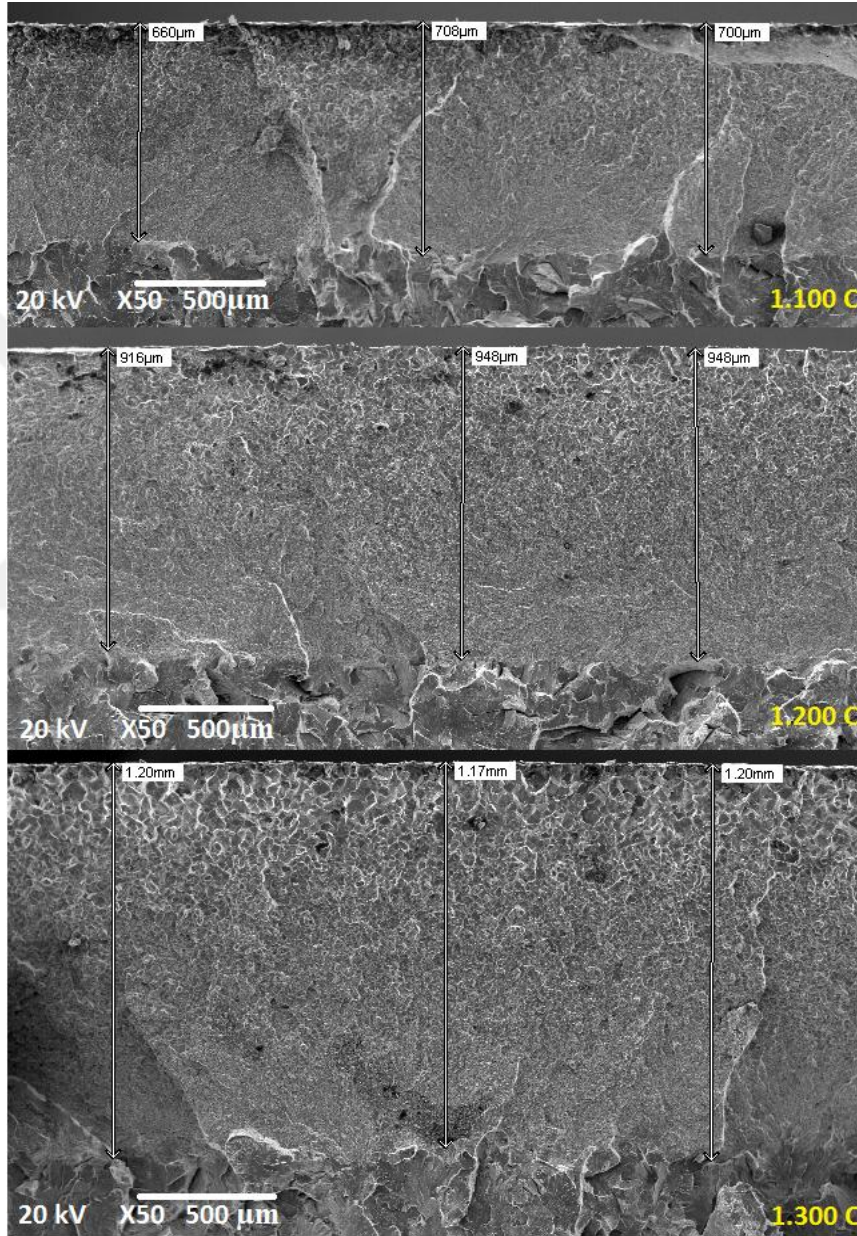


Şekil 4.10: 1.300°C’de işlenmiş numunenin darbe testi sonucu kırılma yüzeylerinin SEM görüntüsü.

Hem işlenmemiş hem de lazerle yüzeyi sertleştirilmiş numunelerin yüzey kırılma mekanizmaları incelendiğinde, kırılma yüzeylerinin parlak ve kristal bir görünüme sahip olmalarından [51] bu kırılmaların gevrek klivaj (ayrılma) kırılması şeklinde gerçekleştikleri anlaşılmaktadır. Şekil 4.10’a bakıldığında ayrıca kırılmanın taneler arası çatlak ilerlemesi şeklinde olduğu görülmektedir. Klivaj kırılmada, düşük sıcaklıklarda kırılmanın taneler arası çatlak ilerlemesi şeklinde gerçekleştiğinden [51] burada beklenen şekilde bir kırılma mekanizmasının gerçekleştiği görülmüştür. Çatlağın taneler içi değil de taneler arası ilerlemesinin nedeni olarak, tane sınırlarında hem dislokasyon yığılmaları hem de Fe_3C fazının bulunmasının [52] tane sınırlarının gevrekleşmesine yol açarak mikro çatlak

oluşumuna neden olduğu [53] bu nedenden ötürü de çatlağın tane sınırları boyunca ilerlemesini gerçekleştirdiği düşünülmektedir.

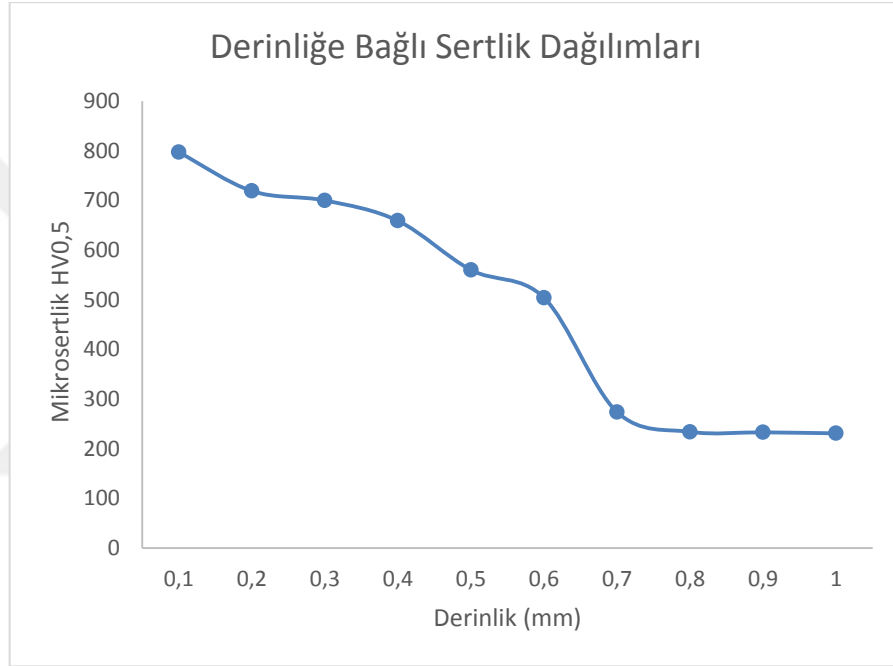
Şekil 4.11’de lazerle işlenmiş numunelerin sertleştirme derinliği ölçüm sonuçları verilmektedir.



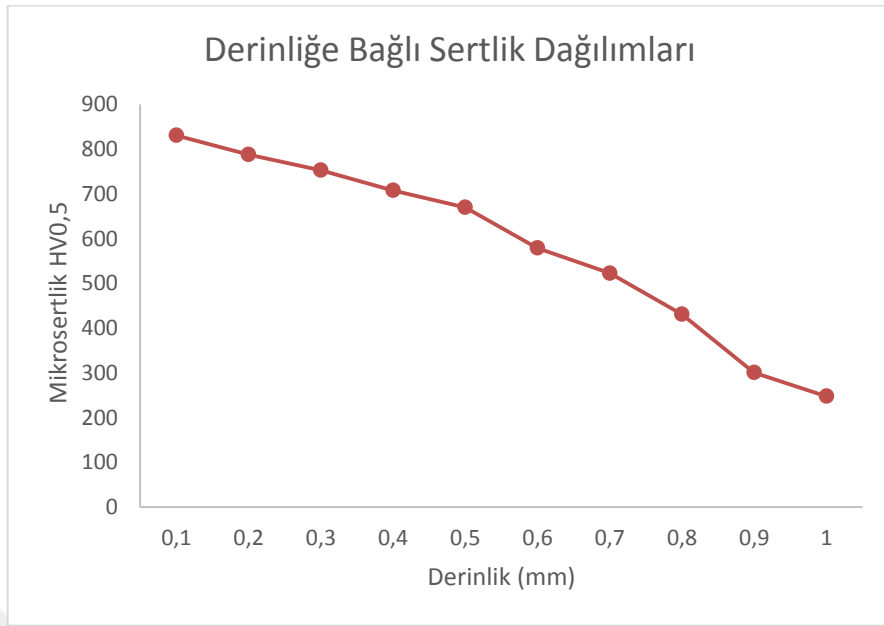
Şekil 4.11: Lazerle 1.100°C, 1.200°C ve 1.300°C’de işlenmiş numunelerin işlem derinlikleri SEM incelemesi.

Darbe testine giren numunelerin SEM kesit incelemeleri neticesinde Şekil 4.11’de görüldüğü üzere işlem derinliklerinin işlem sıcaklıklarındaki artışa istinaden $700\text{ }\mu\text{m}$ ’dan $1.200\text{ }\mu\text{m}$ ’a kadar artmış olduğu görülmektedir. Bu durum ise uygulama işlem sıcaklığının işlem derinliği üzerinde artışa neden olduğunu göstermektedir.

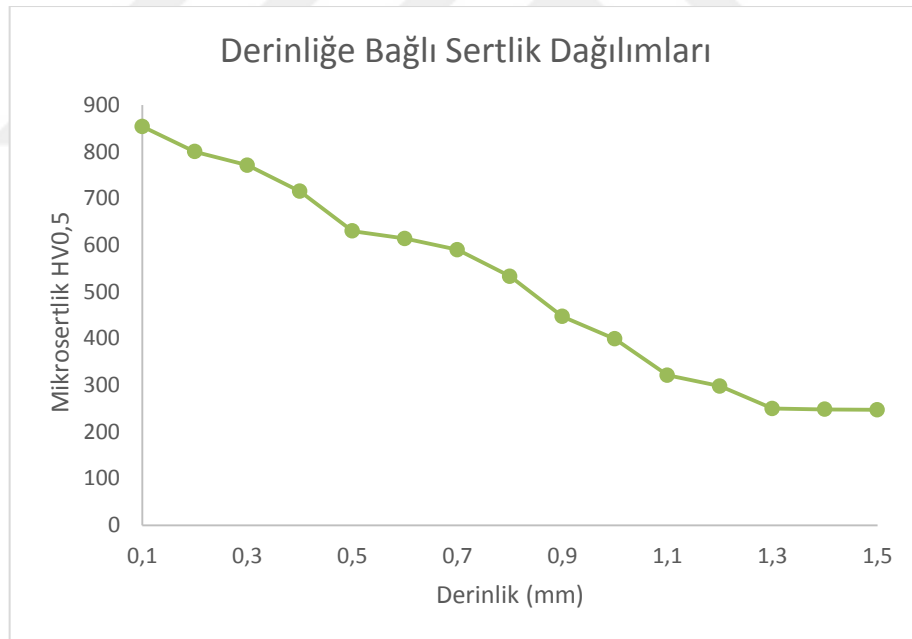
Şekil 4.12, Şekil 4.13 ve Şekil 4.14, Bölüm 4.2’deki sertleştirme derinlikleri sonuçlarının verilmiş olduğu Şekil 4.2’nin her bir numune için ayrı ayrı görünümünü içermektedir.



Şekil 4.12: 1.100°C ’de işlem gören derinlik sertlik dağılımı sonucu.



Şekil 4.13: 1.200°C’de işlem gören derinlik sertlik dağılımı sonucu.



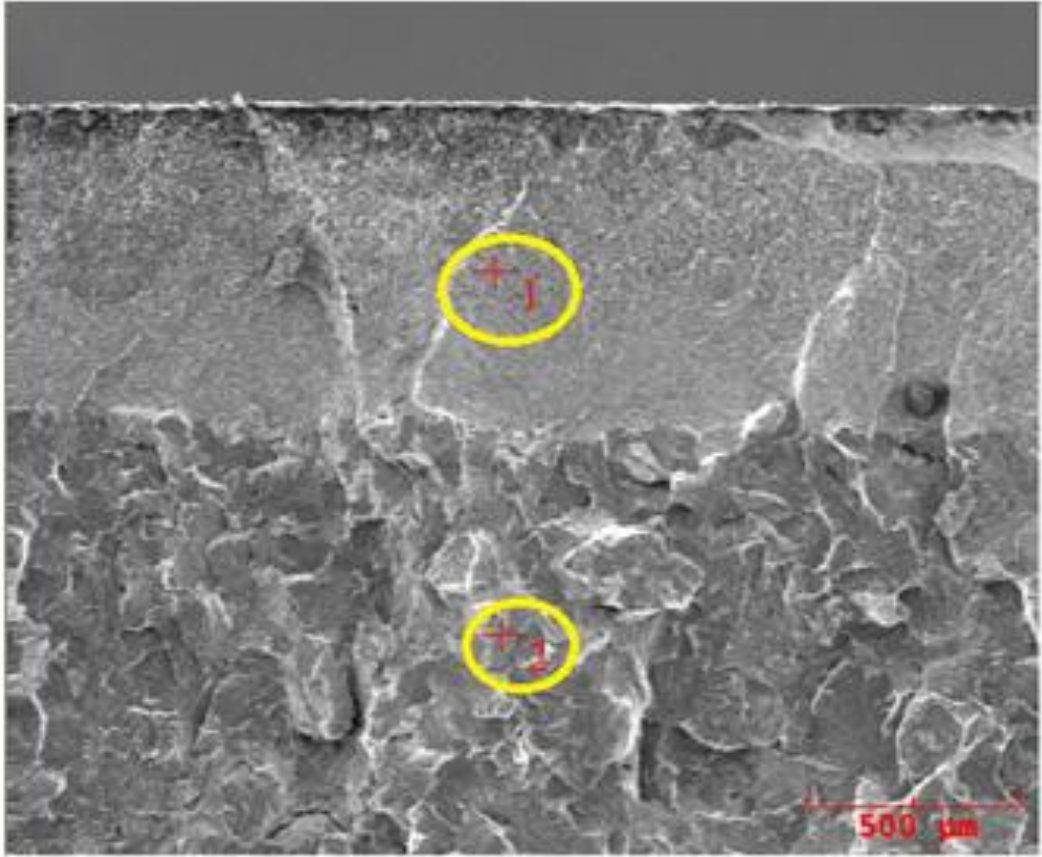
Şekil 4.14: 1.300°C’de işlem gören derinlik sertlik dağılımı sonucu.

Şekil 4.12, 4.13 ve 4.14’teki sonuçlar incelendiğinde sertleştirme derinliklerinin, 1.100°C’de lazerle işlem gören numune için yaklaşık 650 μm , 1.200°C’de işlem gören numune için yaklaşık 950 μm ve 1.300°C’de işlem gören numune için ise yaklaşık 1.200 μm olduğu görülmektedir.

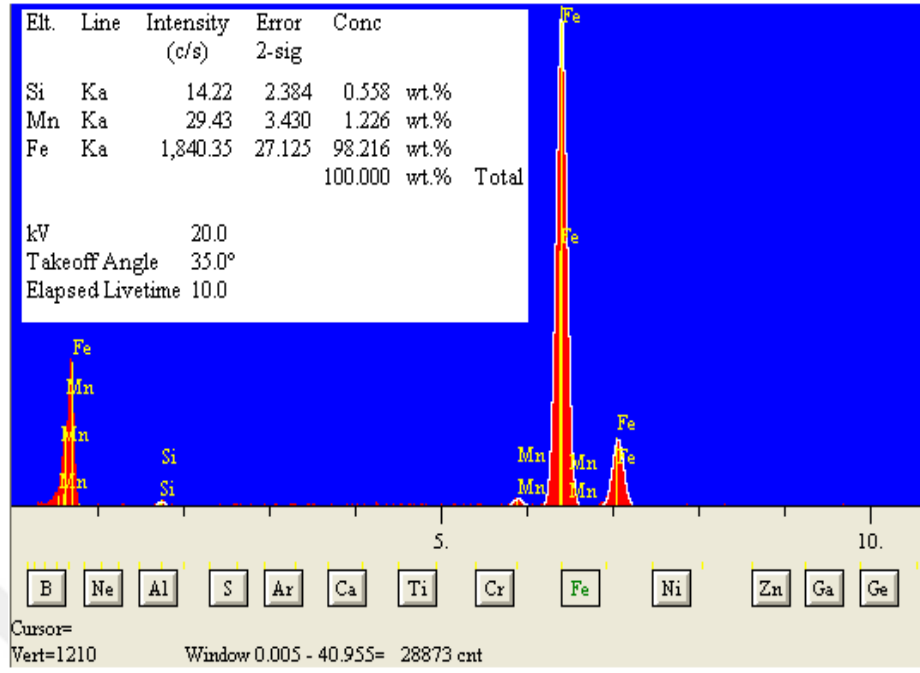
Bu sonuçlardan, SEM incelemesi neticesinde elde edilen veriler ile mikro-sertlik incelemesinde elde edilen sonuçların birbirlerini destekleyici (korrele edici) nitelikte oldukları ayrıca işlem sıcaklığındaki her 100°C deki artışın yaklaşık %50 işlem derinliğinde artışa neden olduğu tespit edilmiştir.

4.4.2. Çentikli Darbe Deneyi Numuneleri EDS İncelemesi

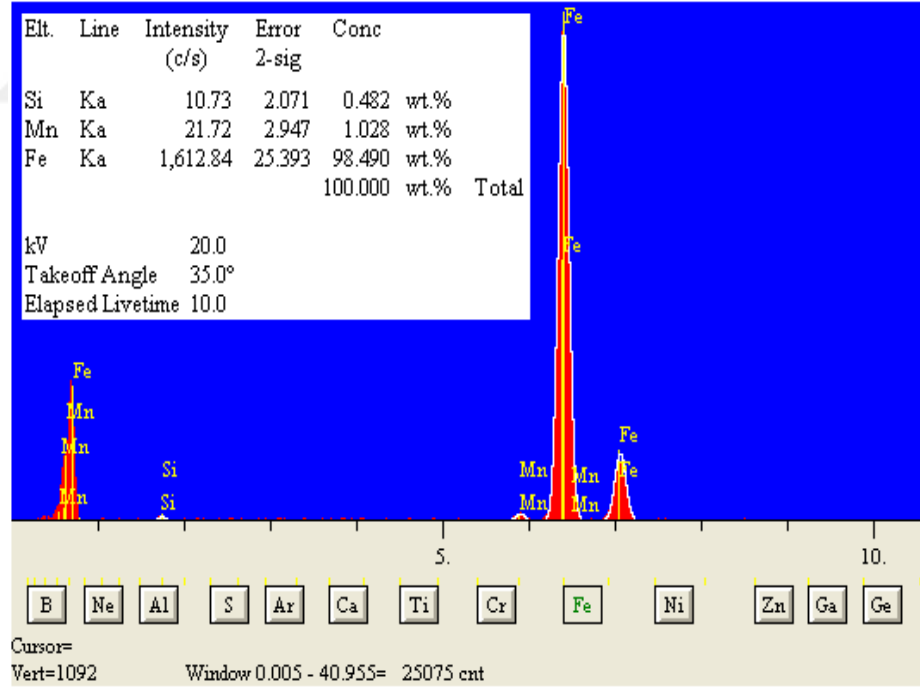
Yüksek güçlü diyot lazerle işlenmiş olan numunelerde gerçekleştirilen EDS analizleri sonuçları aşağıdaki şekillerde verilmektedir.



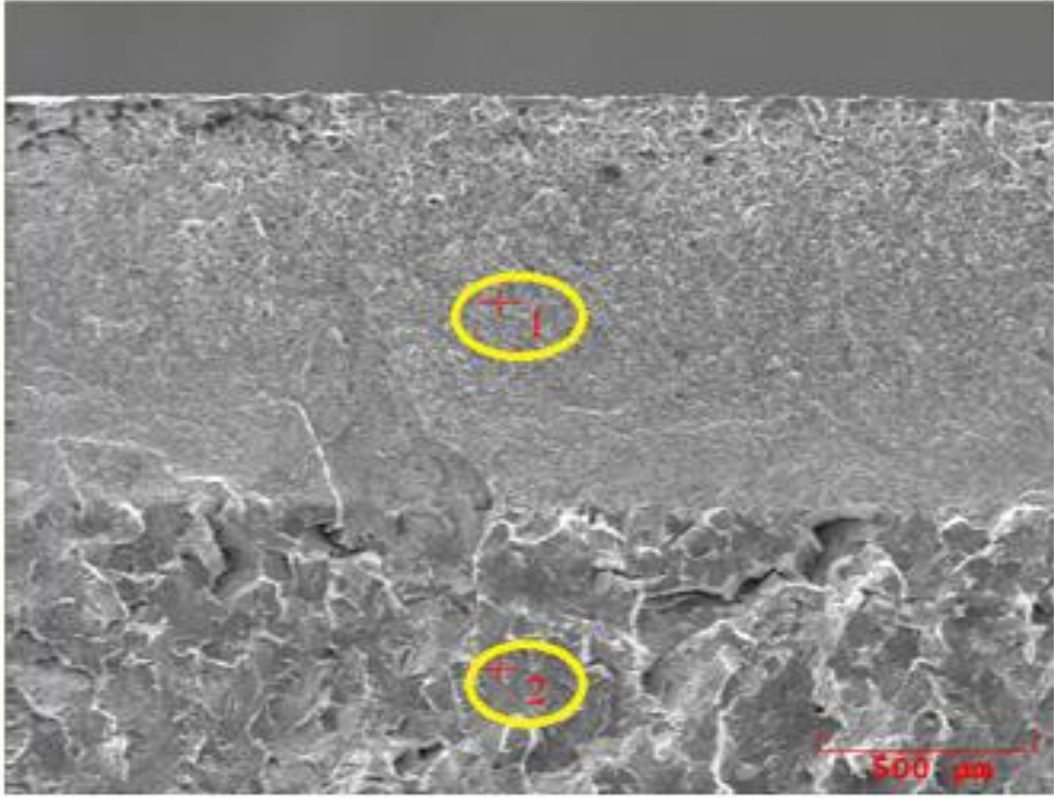
Şekil 4.15: 1.100°C’de işlenmiş darbe testi numunesinin EDS analizi.



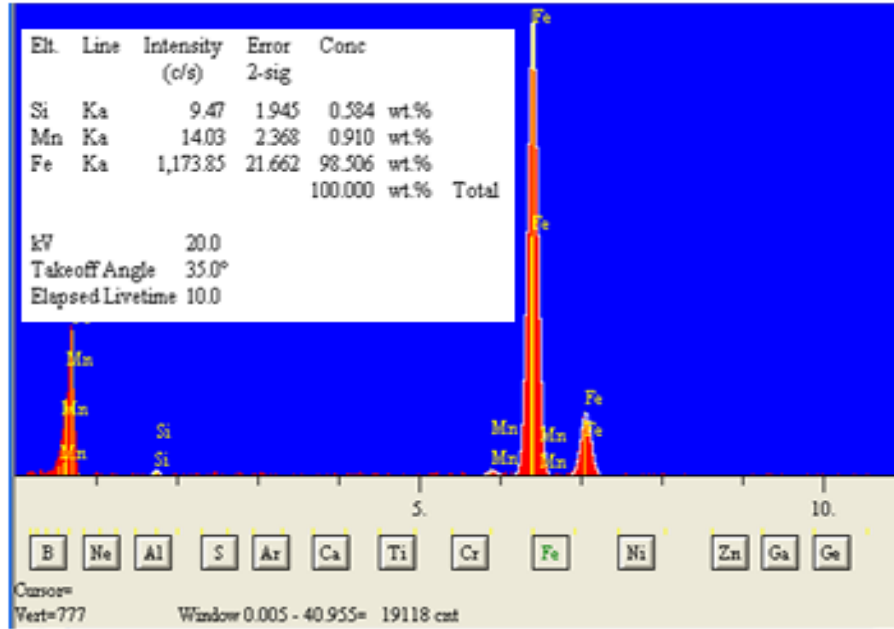
Şekil 4.16: 1.100°C’de işlenmiş darbe testi numunesinin 1. bölge EDS sonucu.



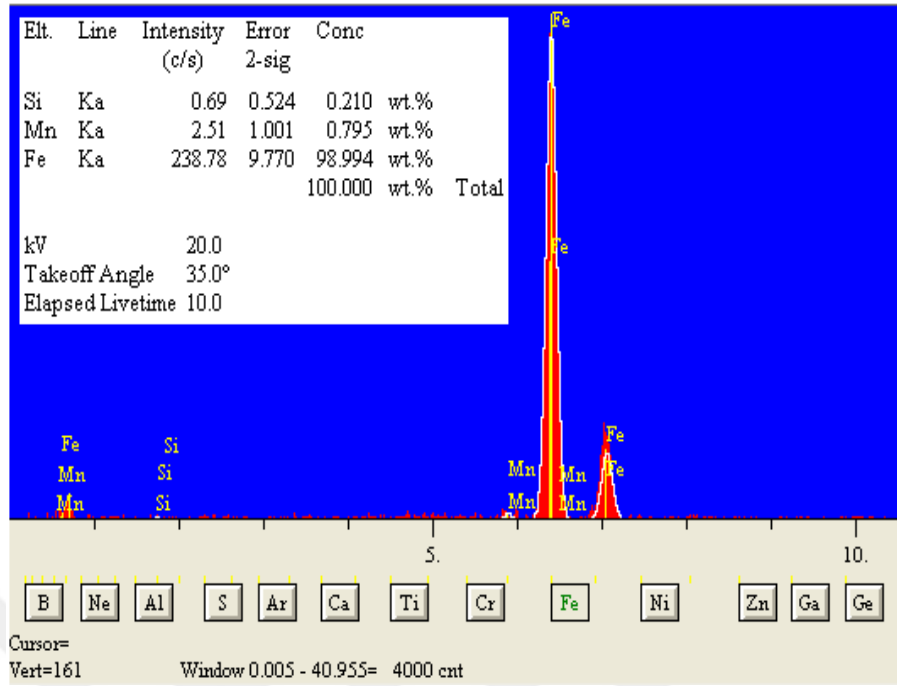
Şekil 4.17: 1.100°C’de işlenmiş darbe testi numunesinin 2. bölge EDS sonucu.



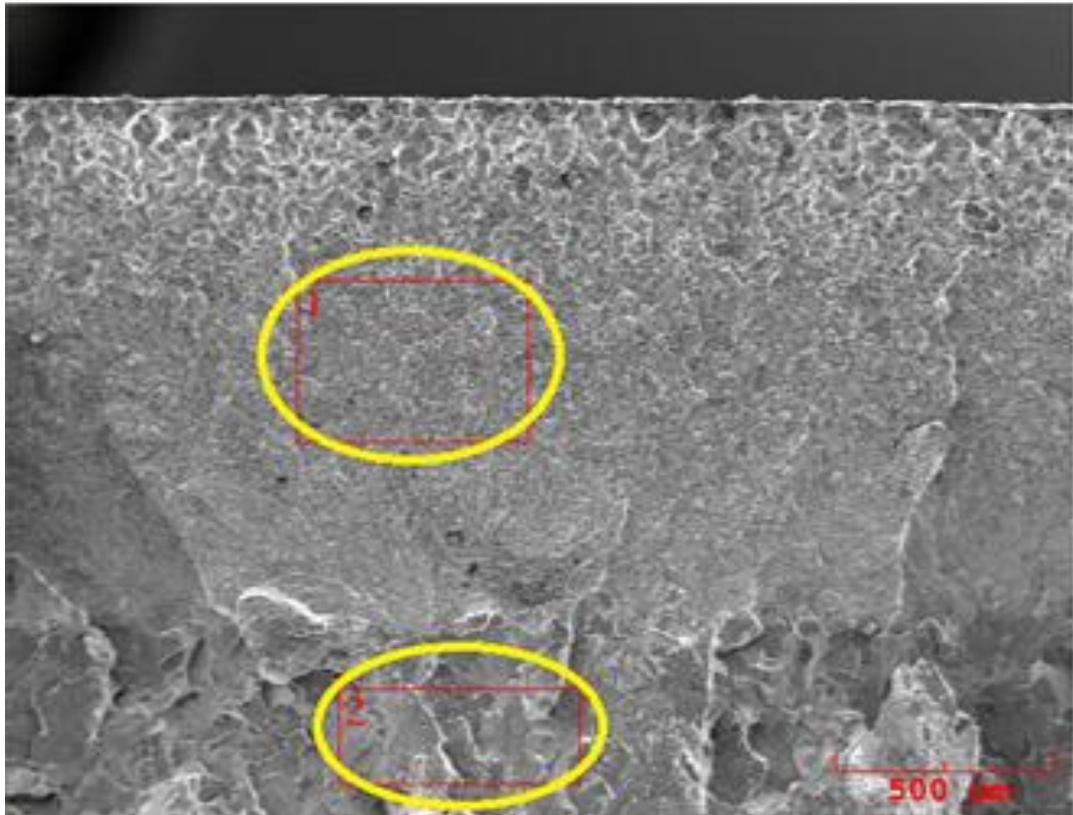
Şekil 4.18: 1.200°C’de işlenmiş darbe testi numunesinin EDS analizi.



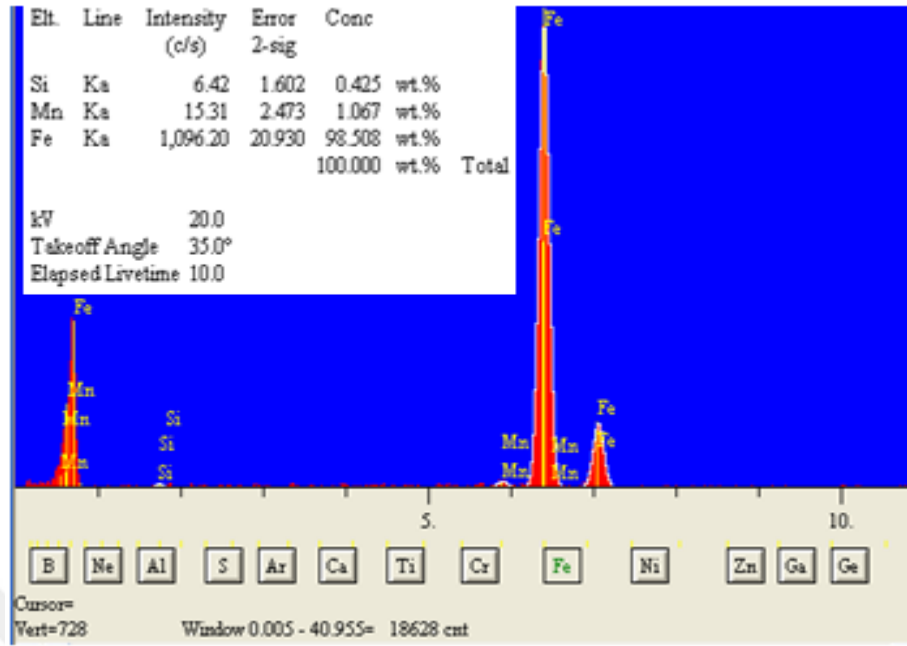
Şekil 4.19: 1.200°C’de işlenmiş darbe testi numunesinin 1. bölge EDS sonucu.



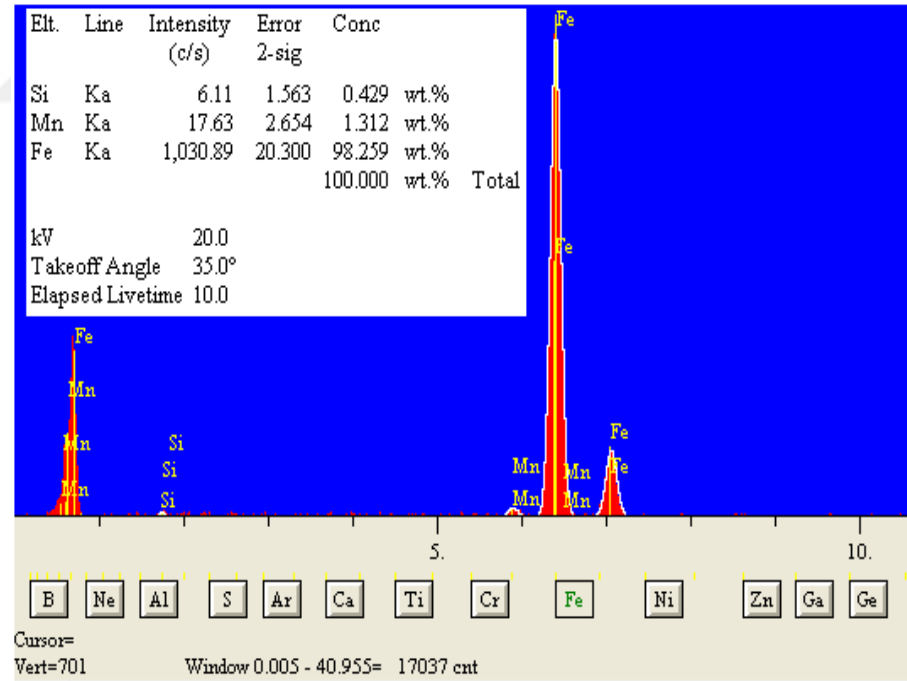
Şekil 4.20: 1.200°C’de işlenmiş darbe testi numunesinin 2. bölge EDS sonucu.



Şekil 4.21: 1.300°C’de işlenmiş darbe testi numunesinin EDS analizi.



Şekil 4.22: 1.300°C’de işlenmiş darbe testi numunesinin 1. bölge EDS sonucu.



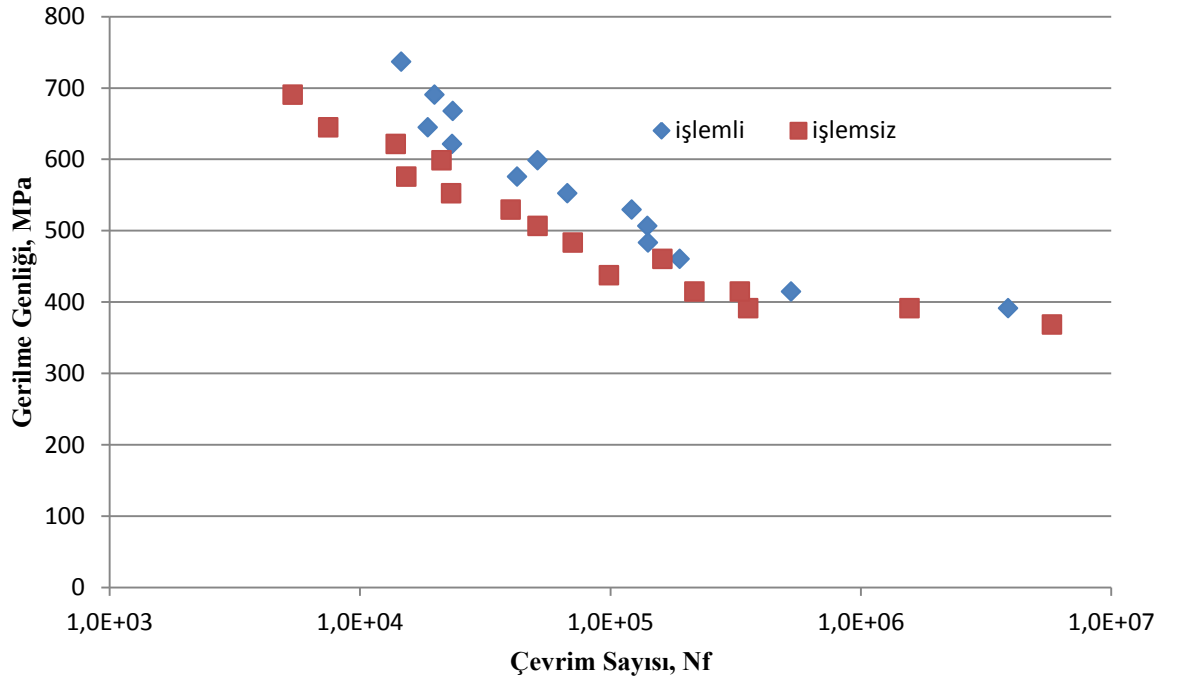
Şekil 4.23: 1.300°C’de işlenmiş darbe testi numunesinin 2. bölge EDS sonucu.

Gerçekleştirilen EDS sonuçları incelendiğinde kullanılan ray çeliğinin kimyasal yapısında beklenen sonuçların hem 1. hem de 2. bölgeler de elde edildiği görülmüştür.

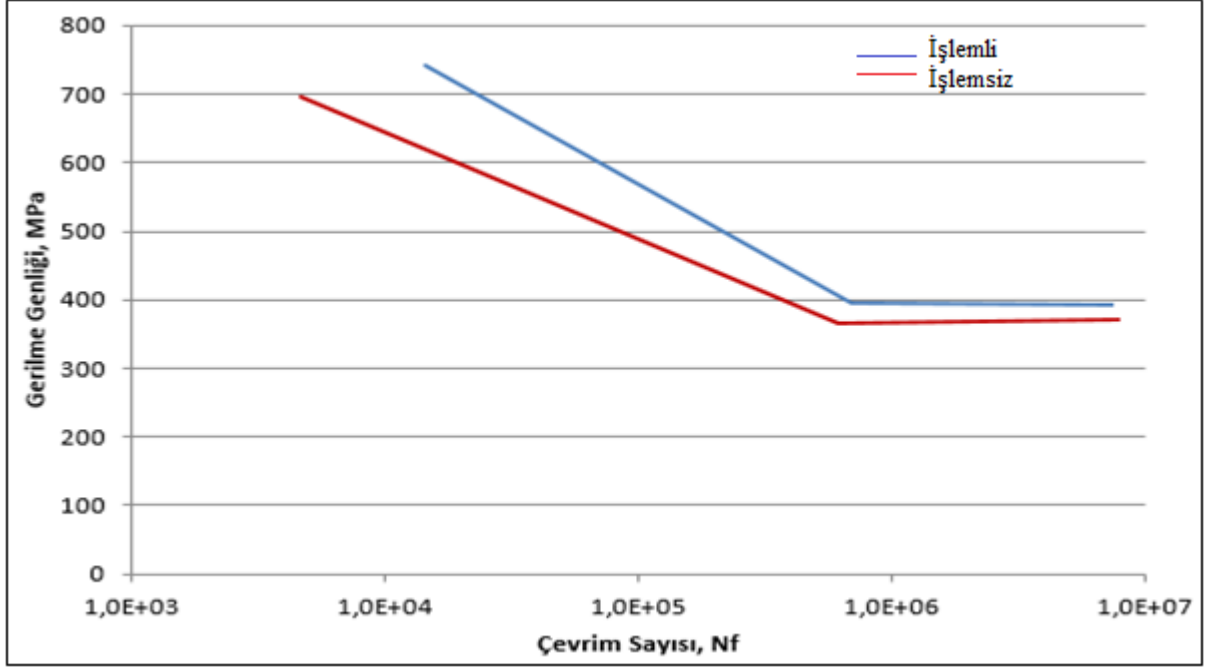
4.5. YORULMA TESTİ BULGULARI

Gerçekleştirilen sertlik, çekme ve çentikli darbe testi sonuçları neticesinde, 1.300°C’de işlem gören numunenin 1.100°C ve 1.200°C’de lazerle işlem gören numunelere göre daha iyi sonuçlar vermiş olduğu görülmüştür. Bu nedenden ötürü lazerle sertleştirme işleminin malzemenin yorulma davranışı üzerindeki etkisini anlayabilmek ve işlenmemiş olan malzeme ile kıyaslamak için 1.300°C’de işlem gören numune ile işlem görmemiş numuneler yorulma testine tabi tutulmuşlardır.

Gerçekleştirilen yorulma deneyleri sonucu 6 mm/s. işlem hızında ve 1.750 watt başlangıç lazer gücünde 1.300°C’de lazerle işleme tabi tutulmuş ve işlenmemiş olan numunelerin S-N diyagramları çıkartılmıştır.



Şekil 4.24: Yorulma deneyi sonuçları.



Şekil 4.25: İşlenmemiş ve 1300°C’de lazerle işlenmiş numunelerin S-N diyagramı.

Yapılan yorulma deneylerinden 1.300°C’de lazerle işleme tabi tutulmuş olan numunenin yorulma dayanım sınırının işlenmemiş olan numuneye göre daha yüksek olduğu görülmektedir.

Buradaki göze çarpan en önemli kazanım ise yüksek gerilmelerde olmuştur. Grafikten açıkça görülmektedir ki, yüksek gerilmelerde lazerle işlenmiş olan numune işlenmemiş olan numuneye göre daha yüksek çevrim sayılarında kırılmış olup, numunelere uygulanan gerilmeler azaldıkça çevrim sayılarındaki fark azalıp çizgiler birbirine yaklaşmıştır. Bu durum ise lazerle sertleştirme işleminin malzemenin özellikle yüksek gerilmelere maruz kalacağı demiryolu kesimlerinde (dar yarıçaplı kurplar gibi) yorulma davranışı üzerine olumlu katkı sağlayarak demiryollarının en önemli masraflarından birini oluşturan bakım ve onarım masraflarına olumlu katkıda bulunacağı düşünülmektedir.

Ayrıca S-N eğrileri, yüksek çevrim bölgelerinde Basquin eşitliği ile tanımlandığından [54] 1.300°C’de lazerle işleme tabi tutulmuş numune ve işlenmemiş numuneler için elde edilen gerilme ve çevrim sonuçlarından Basquin bağıntıları da çıkartılmıştır.

$$\Delta\sigma \cdot Nf^a = C \text{ [54]}$$

$$(4.1)$$

Burada, $\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \text{Gerilme Aralığı}$, Nf: Çevrim Sayısı, a ve C: Sabitlerdir.

1.300°C’de lazerle işleme tabi tutulmuş numune için bulunan Basquin eşitliği:

$$\Delta\sigma = 5.992 \times N_f^{0,1513} \text{ (MPa)}$$

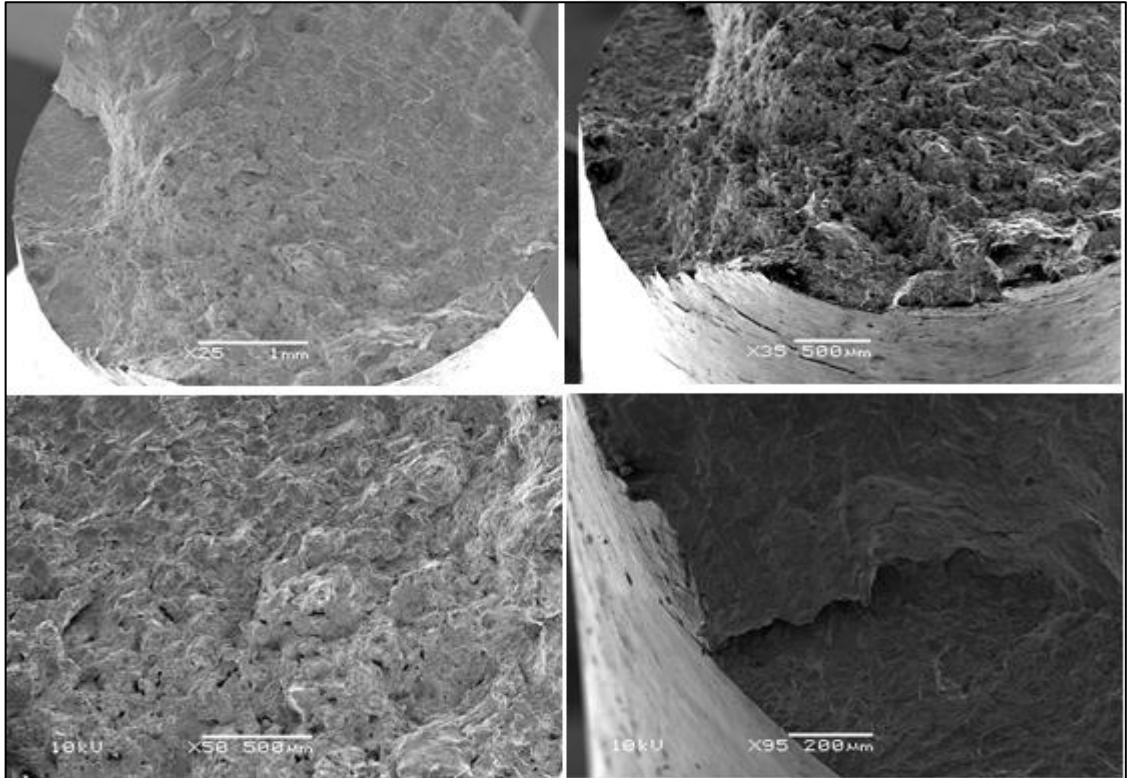
İşlenmemiş numune için bulunan Basquin eşitliği:

$$\Delta\sigma = 3.514 \times N_f^{0,1133} \text{ (MPa) olarak bulunmuştur.}$$

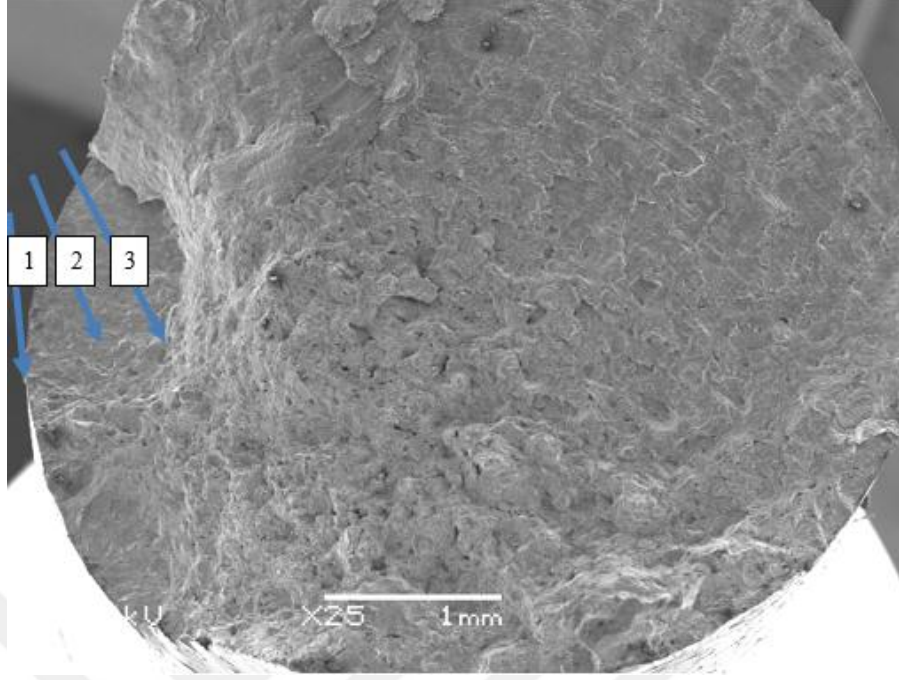
Elde edilen Basquin bağıntısı sonuçlarından da 1.300°C’de lazerle yüzeyi sertleştirilmiş numunenin işlenmemiş olan numuneye göre daha yüksek gerilme aralığına sahip olduğu da görülmüştür.

4.5.1. Yorulma Deneyi SEM İncelemeleri Bulguları

Bu inceleme kapsamında hem yüksek gerilme altında düşük çevrim sayısında kopan hem de düşük gerilme altında yüksek çevrim sayısında kopan numunelerin kopma yüzeylerinin SEM incelemeleri gerçekleştirilmiştir.



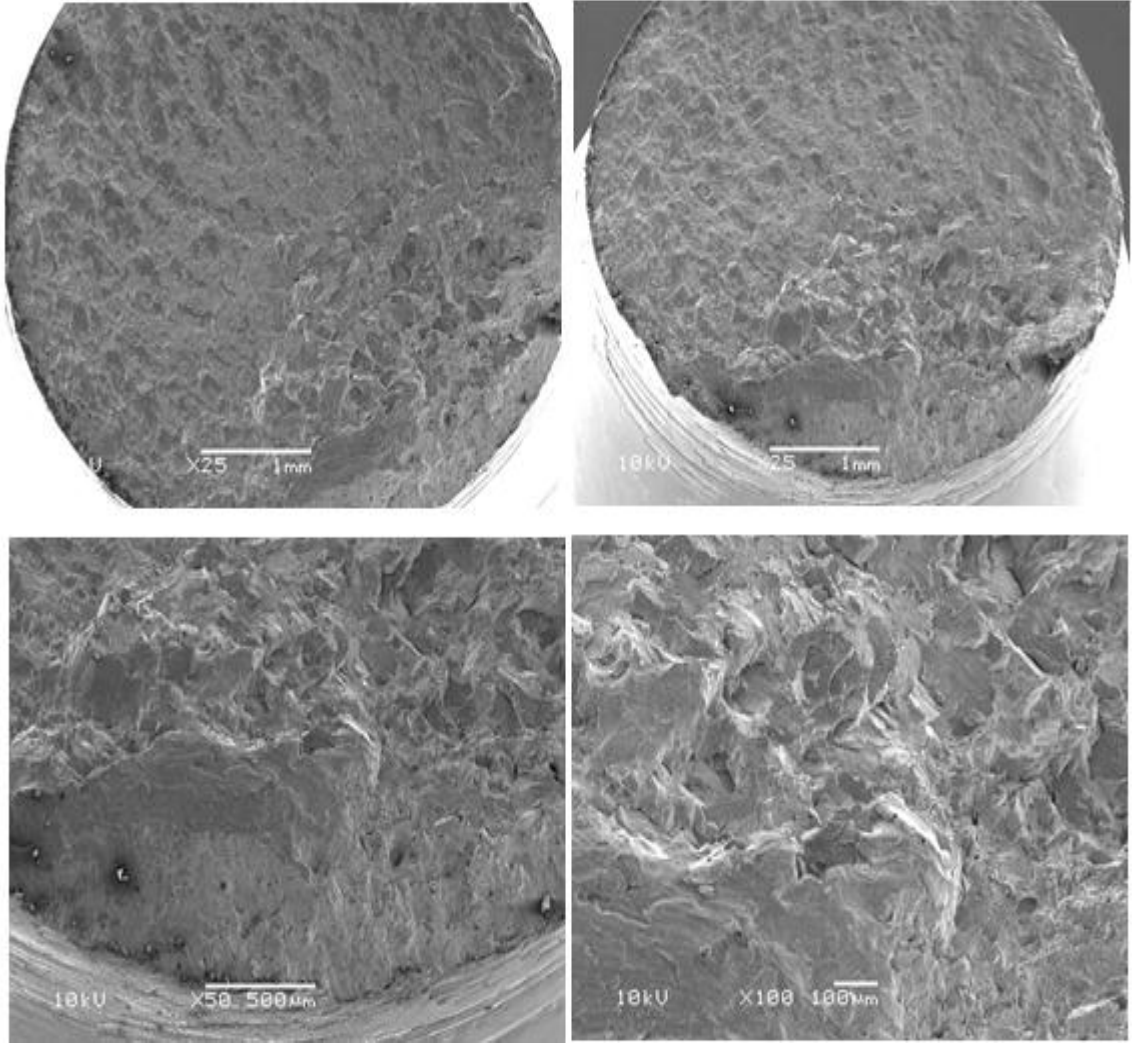
Şekil 4.26: Lazerle işlem görmemiş ve 5.388 çevrim sayısında 691 MPa ’da kopan numuneye ait kopma yüzeyi SEM görüntüleri.



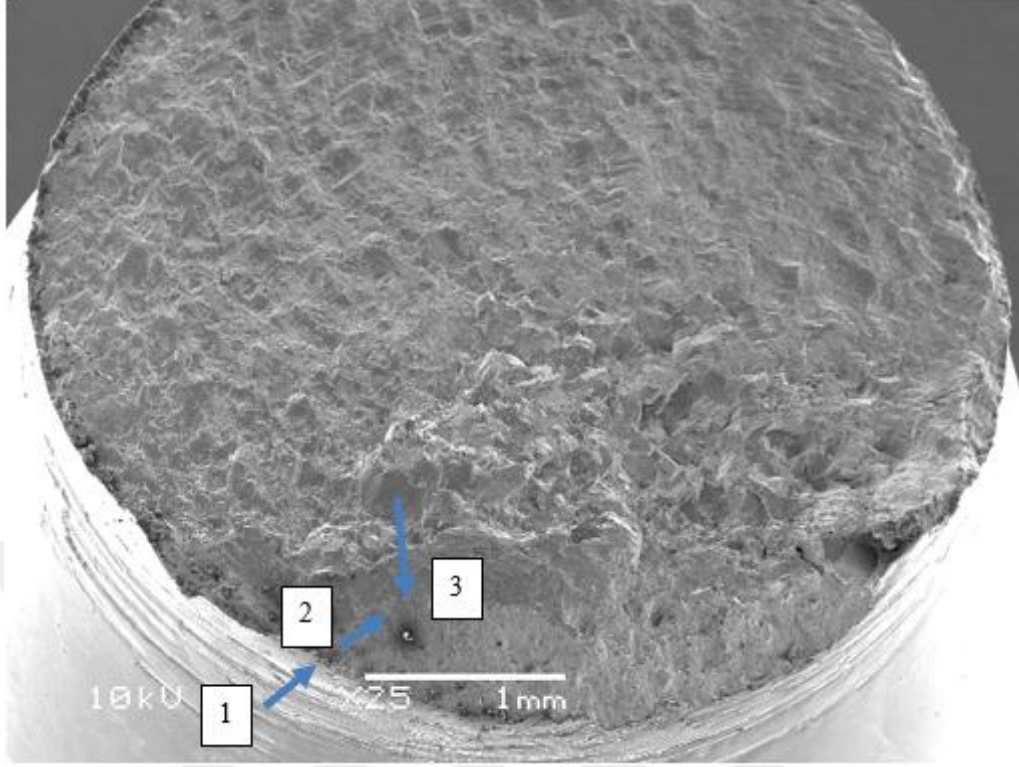
Şekil 4.27: Lazerle işlem görmemiş ve 5.388 çevrim sayısında 691 MPa’ da kopan numunenin kopma mekanizması.

Şekil 4.27, lazerle işlem görmemiş ve 5.388 çevrim sayısında 691 MPa’ da kopan numunenin SEM görüntüsünü içermektedir. Yorulma çatlak yorulma numunesinde yüzey (1.bölge) de başlamış olup 2.bölge içerisinde devam etmiş ve 3. bölgede ise uygulanan gerilme neticesinde numunenin artık yükü taşıyamaması nedeniyle yorulma çatlak kritik seviyeye ulaşarak ani kırılma olayının meydana geldiği görülmektedir

Şekil 4.28, lazerle işlem görmemiş ve 355.871 çevrim sayısında 391 MPa’ da kopan numunenin kopma yüzeyine ait SEM görüntüleri içermektedir.



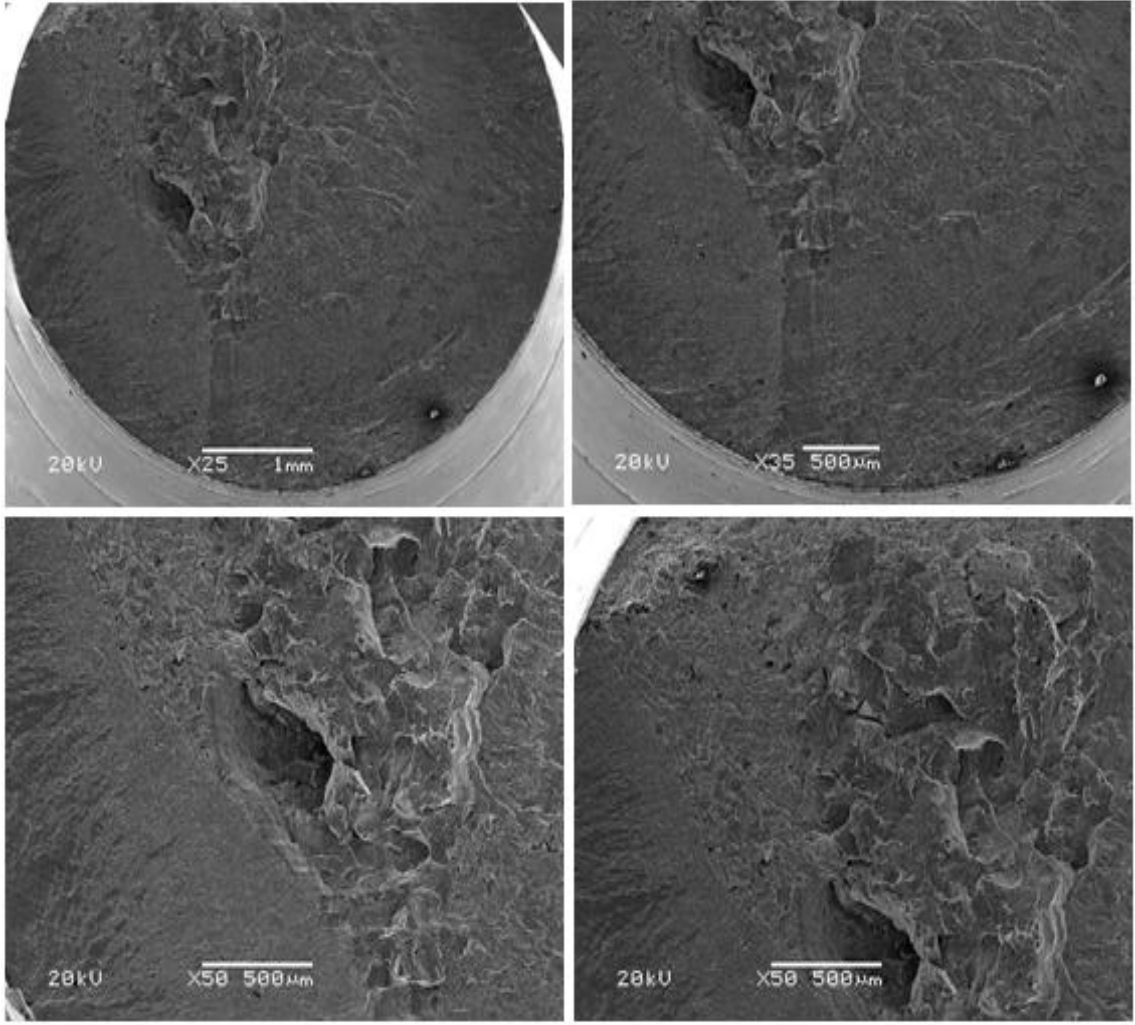
Şekil 4.28: Lazerle işlem görmemiş ve 355.871 çevrim sayısında 391 MPa’ da kopan numuneye ait kopma yüzeyi SEM görüntüleri.



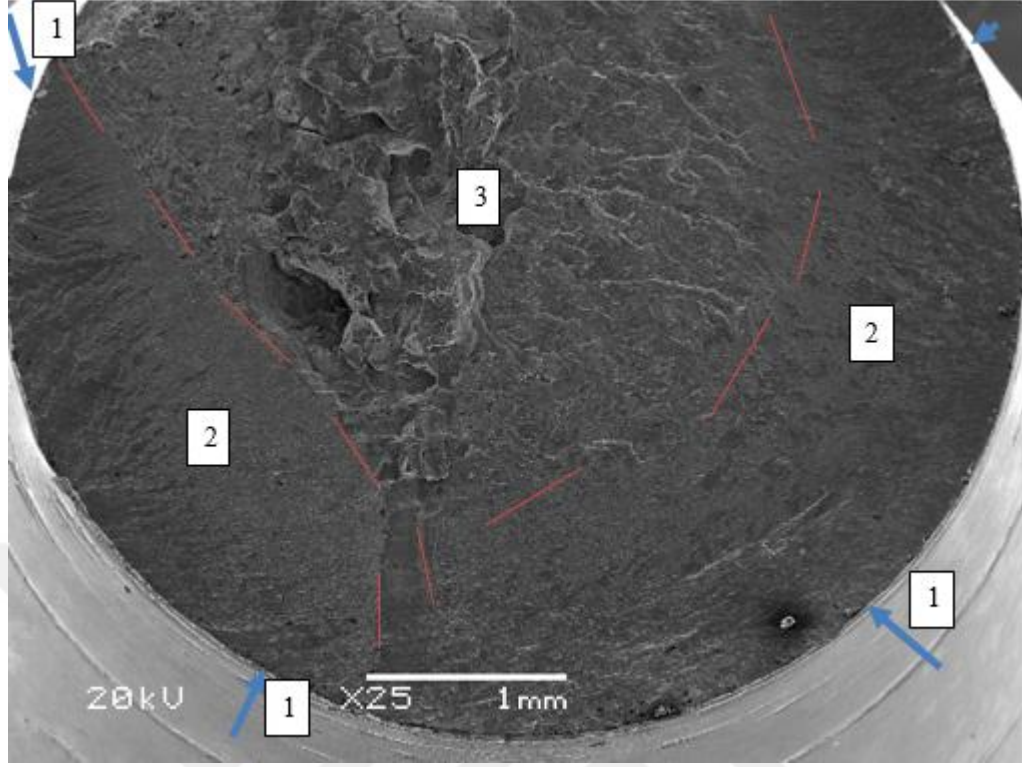
Şekil 4.29: Lazerle işlem görmemiş ve 355.871 çevrim sayısında 391 MPa’ da kopan numunenin kopma mekanizması.

Şekil 4.29, lazerle işlem görmemiş ve 355.871 çevrim sayısında 391 MPa’ da kopan numunenin kopma yüzeyi SEM görüntüsünü içermektedir. Burada da yorulma çatlakları numune yüzey bölgesinde başlamış olup tekrarlı gerilmeler altında 2.bölge içerisinde büyüyerek devam etmiş ve 3. bölgede ise uygulanan gerilme neticesinde yorulma çatlakları kritik seviyeyi geçerek ani kırılma meydana gelmiştir.

Şekil 4.30, lazerle 1.300°C’de işlem görmüş ve 14.635 çevrim sayısında 736 MPa’ da kopan numunenin kopma yüzeyine ait SEM görüntülerini içermektedir.



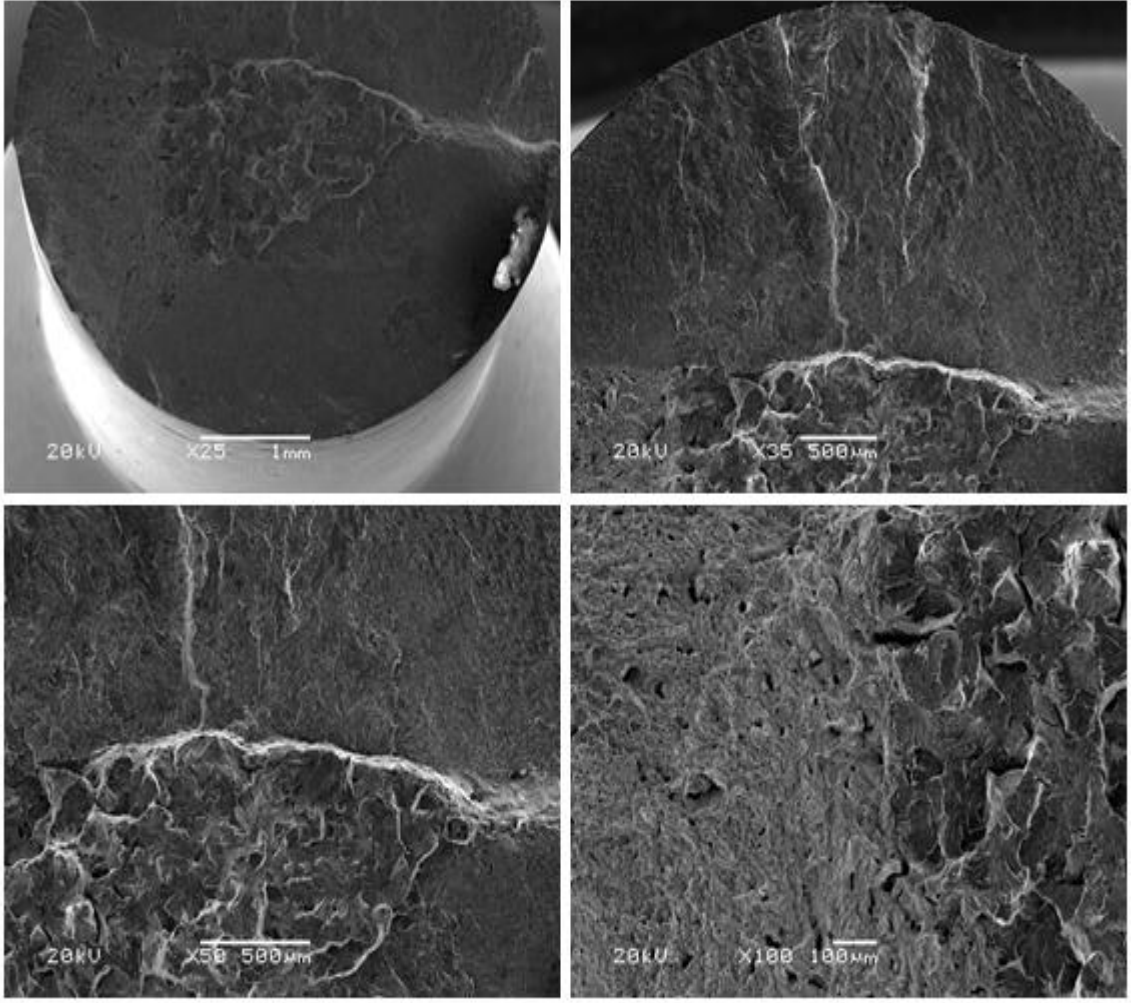
Şekil 4.30: Lazerle 1.300°C’de işlem görmüş ve 14.635 çevrim sayısında 736 MPa’ da kopan numuneye ait kopma yüzeyi SEM görüntüleri.



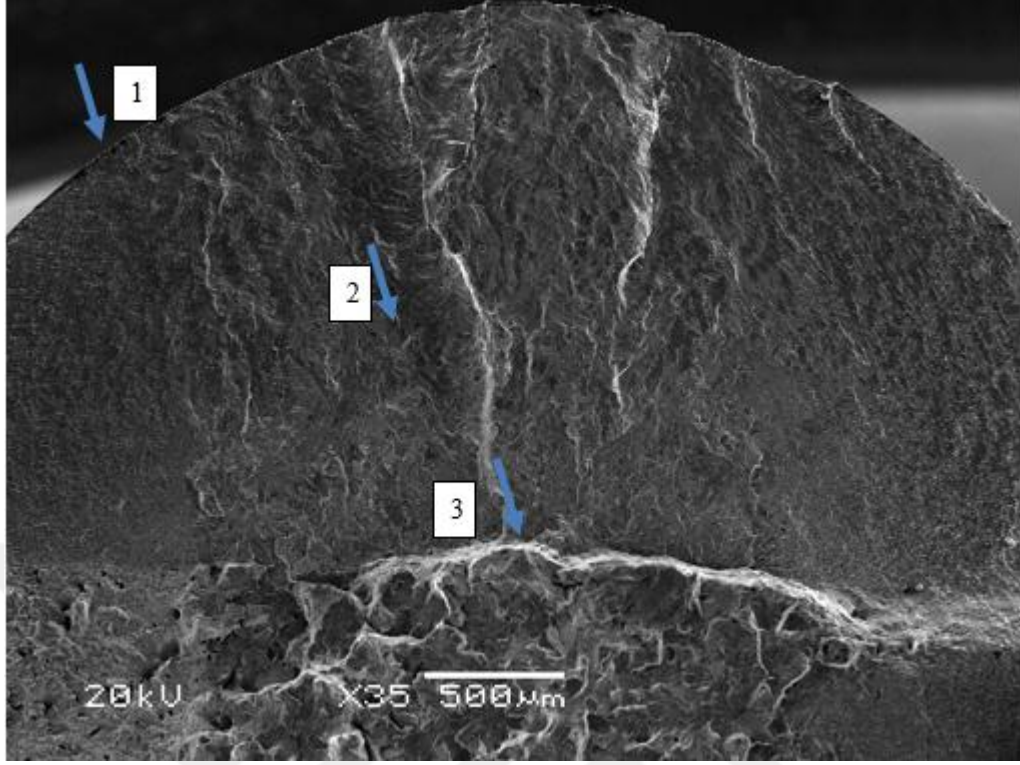
Şekil 4.31: Lazerle 1.300°C’de işlem görmüş ve 14.635 çevrim sayısında 736 MPa’ da kopan numunenin kopma mekanizması.

Şekil 4.31, lazerle 1.300°C’de işlem görmüş ve 14.635 çevrim sayısında 736 MPa’ da kırılan numunenin kopma yüzeyi SEM görüntüsünü göstermektedir. Yorulma çatlak oluşumu yüzey çatlak orijinli olup uygulanan yüksek tekrarlı sabit gerilme altında çatlak ilerlemesi ve çatlak büyümesi meydana gelmiş (2.bölgeler) ve 3.bölgede ise numune artık uygulanan gerilmeyi kaldıramayarak ani kırılmıştır.

Şekil 4.32, lazerle 1.300°C’de işlem görmüş ve 527.281 çevrim sayısında 414 MPa’ da kopan numuneye ait kopma yüzeyine ait SEM görüntüleri göstermektedir.



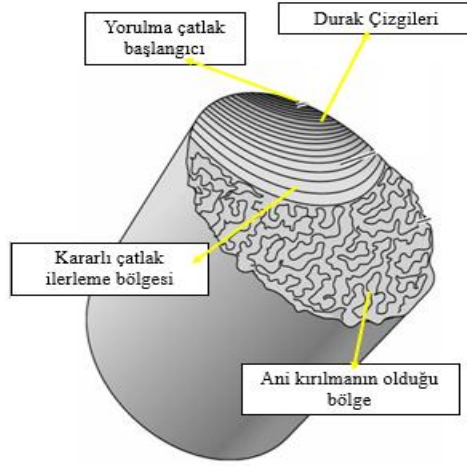
Şekil 4.32: Lazerle 1.300°C’de işlem görmüş ve 527.281 çevrim sayısında 414 MPa’ da kopan numuneye ait kopma yüzeyi SEM görüntüleri.



Şekil 4.33: Lazerle 1.300°C’de işlem görmüş ve 527.281 çevrim sayısında 414 MPa’ da kopan numunenin kopma mekanizması.

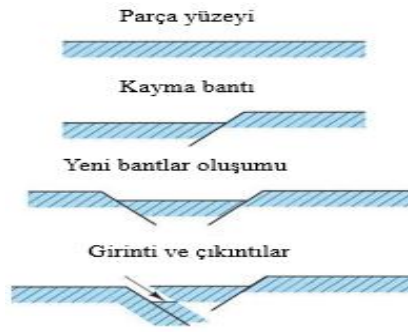
Şekil 4.33, lazerle 1.300°C’de işlem görmüş ve 527.281 çevrim sayısında 414 MPa’ da kopan numunenin kırılma yüzeyi SEM görüntüsünü göstermektedir. Yorulma çatlak oluşumu diğer numunelerde olduğu gibi bu numunede de yüzeyde başlamış olup daha sonra çatlak büyümesi ve ilerlemesi meydana gelmiş diğer numunelerde olduğu gibi yine benzer şekilde kırılma olayı gerçekleşmiştir.

Genel olarak hem lazerle işlenmiş hem de işlenmemiş numunelerin yorulma hasar yüzeyleri incelendiğinde, çatlak oluşumunun yüzey orjinli olarak başladığı Şekil 4.34’da gösterildiği gibi bir kırılma mekanizmasının gerçekleştiği görülmüştür. Yüzeyde çatlak oluşumunun, numunelerin yüzeylerinde bulunabilecek yüzey kusurları (yüzeyde bulunabilecek bir çatlak, bir çizik, kılcal çatlak, pürüzlülük, ani kesit değişimi gibi) ve ayrıca yorulma testi süresince malzeme yüzeyinde oluşan kayma bantlarından kaynaklanmış olabileceği düşünülmektedir.



Şekil 4.34: Yorulma hasar yüzeyi gösterimi [55].

Kayma bantları, elastik sınır altında dislokasyonların yerel olarak hareket etmesi nedeniyle oluşur. Bu kayma bantlarının yüzeye ulaşması ve bunların geri dönememesi nedeni ile Şekil 4.35'te görüldüğü gibi girinti çıkıntılar oluşur. Bu çıkıntılarda yüzeyde çentik etkisi oluşturarak bu bölgelerde gerilme yığılmalarına neden olur ve bu bölgelerde çatlak çekirdeklenmesi ile mikro çatlaklar oluşmasını sağlarlar.



Şekil 4.35: Girinti ve çıkıntılar oluşumu [55].

Kayma bantları neticesinde kırılma mekanizmasına bakıldığında, oluşan mikro çatlaklar yorulma deneyi süresince uygulanan tekrarlı gerilmeler altında makro çatlak halini alır ve her bir çevrimde bu çatlak içeri doğru kararlı bir şekilde ilerler ve çatlakın kritik bir boyaya ulaşması ile numuneler ani olarak koparlar.

Yorulma deneyine tabi tutulan numunelerin kopma yüzeylerinin görünümüne bakıldığında ise oluşan çatlakın zamanla yavaş yavaş ilerlemesi sırasında karşılıklı yüzeylerin bir birlerine

sürtünmesi neticesinde kırılma yüzeyinin düzgün bir görüntüye, ani kırılma neticesinde oluşan kırılma yüzeyinin ise taneli bir görüntüye sahip olduğu görülmektedir.

4.6. AŞINMA TESTİ BULGULARI

Aşınma testi neticesinde elde edilen veriler Tablo 4.4'te verilmektedir.

Tablo 4.4: Aşınma testi neticesinde elde edilen veriler.

Numune	Aşınma alanı (ortalama) (mm ²)	Aşınma hacmi (ortalama) (mm ³)	Aşınma oranı (ortalama) (mm ³ /Nm)
İşlemsiz	0,002752179	0,0013760893	5,50436E-05
1.100°C	0,004894177	0,024470884	9,78835E-05
1.200°C	0,005117148	0,025585741	0,000102343
1.300°C	0,005336420	0,026682098	0,000106728

Numunelerin hacimsel kayıpları (ΔV) ve yoğunlukları (ρ) kullanılarak bağıntı 4.2'den ağırlık kayıpları da hesaplanmıştır.

$$\Delta V = \Delta G / \rho \quad [56, 57] \quad (4.2)$$

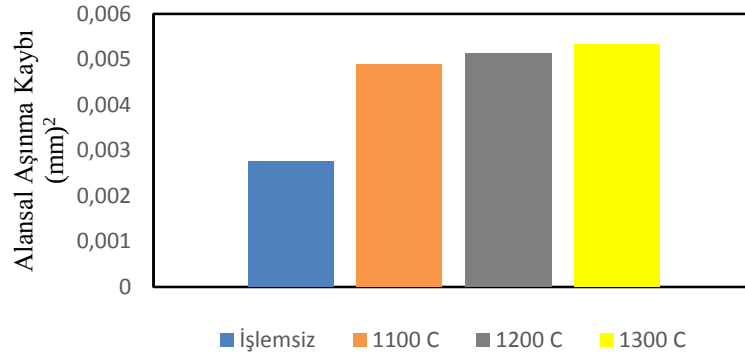
ΔV : Hacimsel kayıp (cm³)

ΔG : Ağırlık kaybı (g)

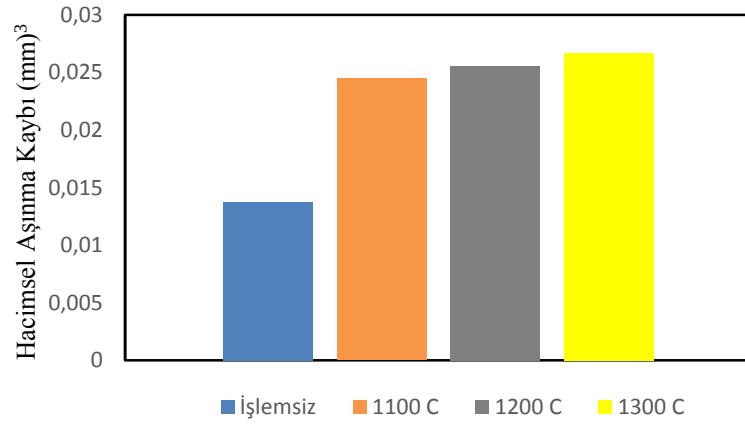
ρ : Yoğunluk (g/cm³)

Tablo 4.5: Ağırlık kaybı sonuçları.

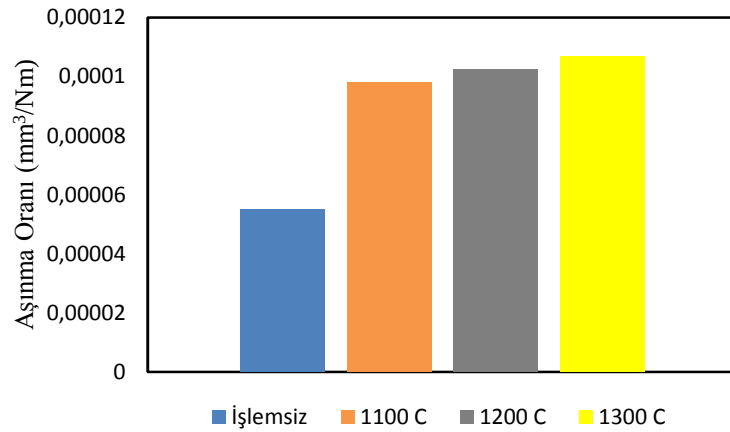
Numuneler	(ΔV) cm ³	ρ (g/cm ³)	ΔG (g)= $\Delta V \cdot \rho$
İşlenmemiş	1,37609E-05	7,8	0,000107335
1.100°C	2,44709E-05	7,8	0,000190873
1.200°C	2,55857E-05	7,8	0,000199569
1.300°C	2,66821E-05	7,8	0,000208120



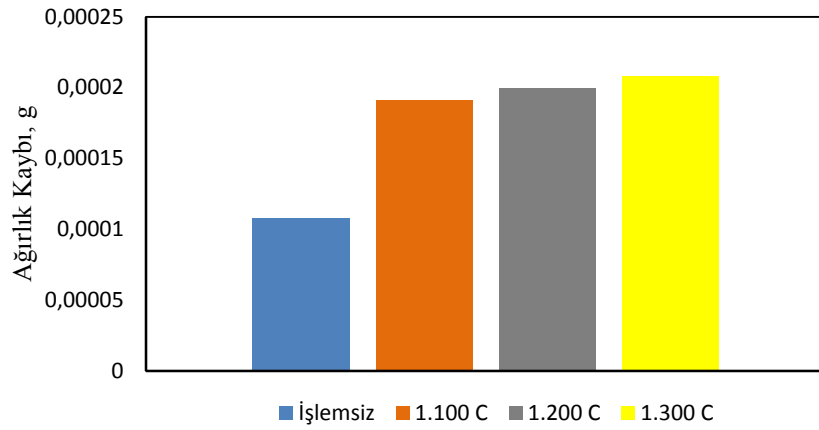
Şekil 4.36: Alansal aşınma kaybı grafiksel sonuç.



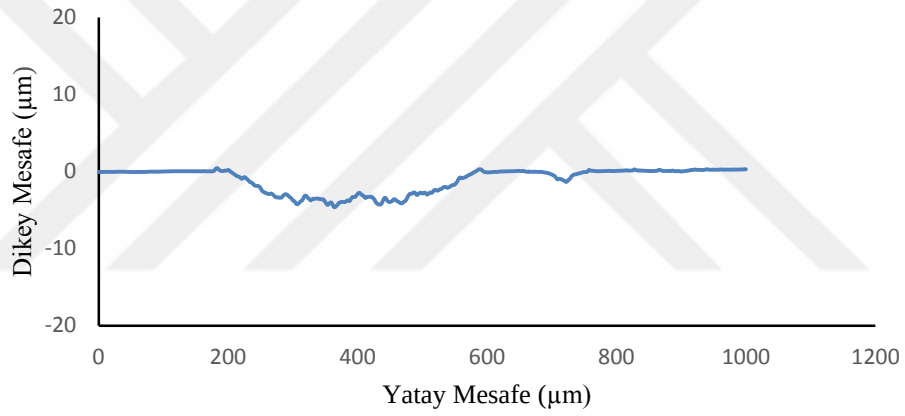
Şekil 4.37: Hacimsel aşınma kaybı grafiksel sonuç.



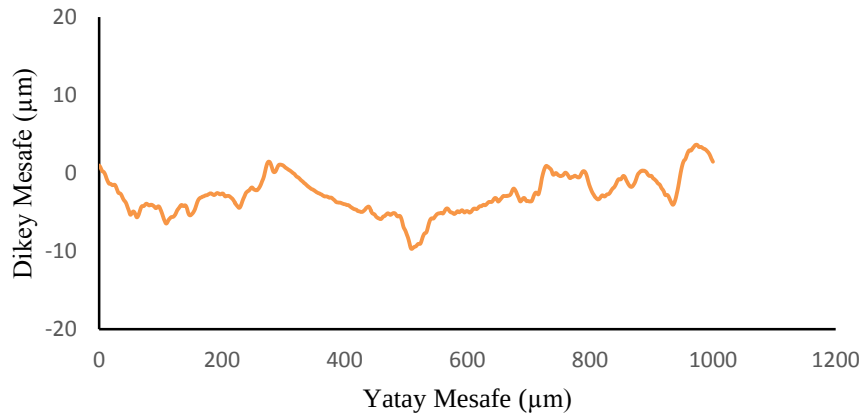
Şekil 4.38: Aşınma oranı grafiksel sonuçlar.



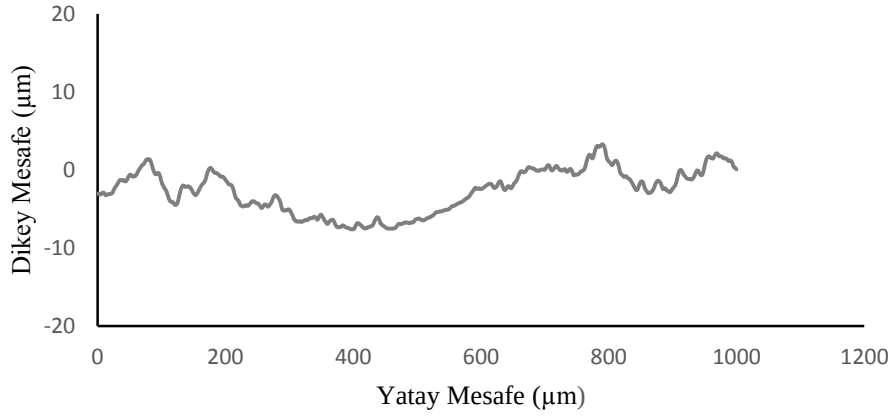
Şekil 4.39: Ağırlık kaybı grafiksel sonuçları.



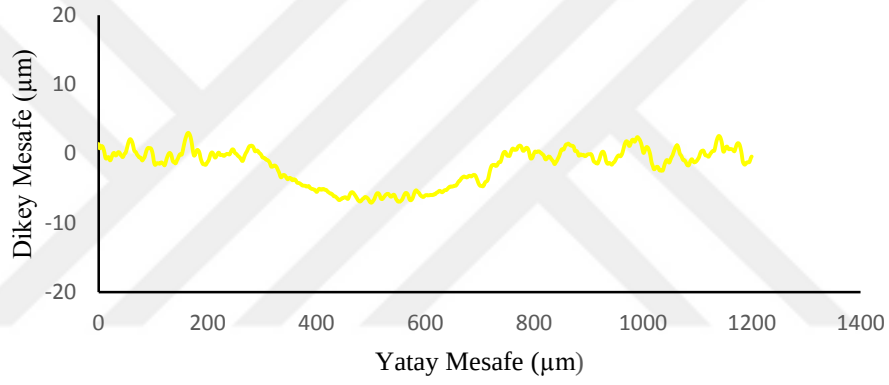
Şekil 4.40: Lazerle işlenmemiş numunenin 2 boyutlu aşınma profili.



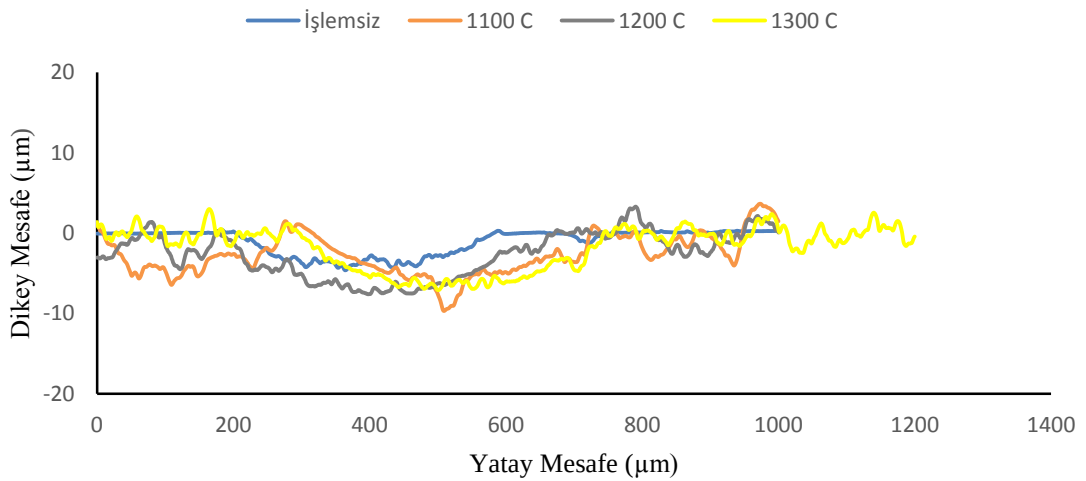
Şekil 4.41: Lazerle 1.100°C’de işlenmiş numunenin 2 boyutlu aşınma profili.



Şekil 4.42: Lazerle 1.200°C’de işlenmiş numunenin 2 boyutlu aşınma profili.

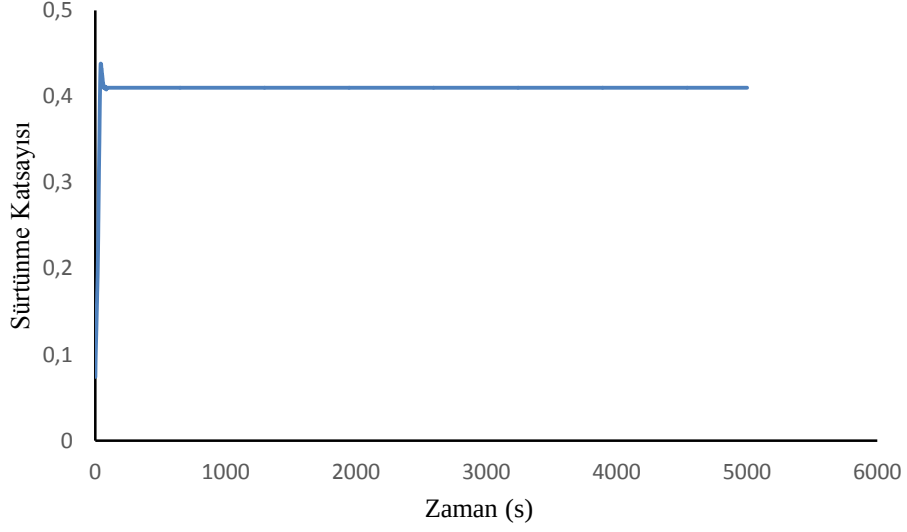


Şekil 4.43: Lazerle 1.300°C’de işlenmiş numunenin 2 boyutlu aşınma profili.

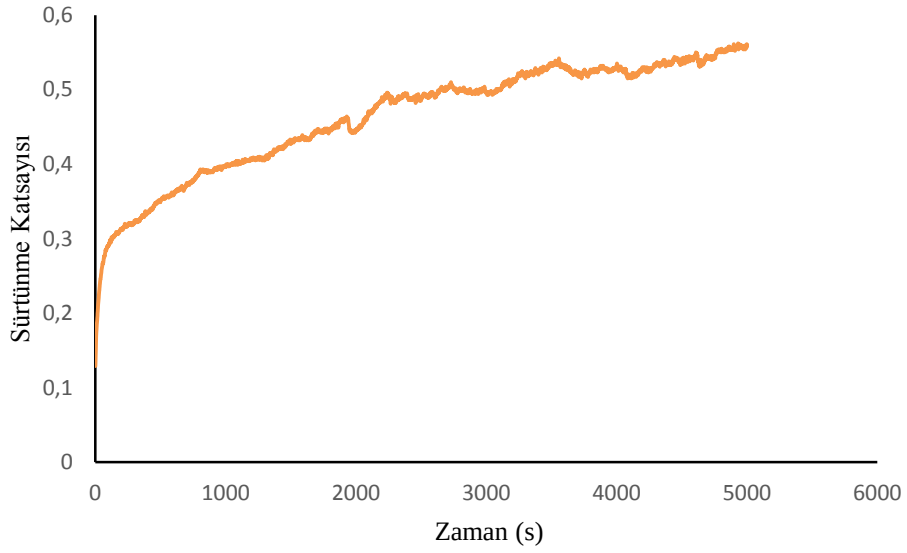


Şekil 4.44: İşlemsiz ve lazerle işlenmiş numunelere ait 2 boyutlu aşınma profilleri.

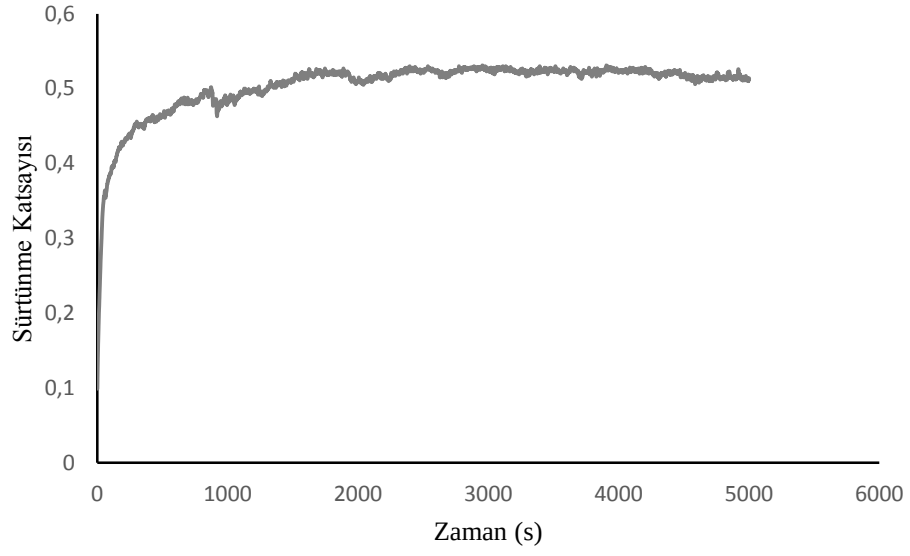
Lazerle işlem görmemiş ve lazerle işlenmiş numunelerin sürtünme katsayılarına ilişkin elde edilen veriler neticesinde çizilen grafikler aşağıdaki şekillerde (Şekil 4.45, Şekil 4.46, Şekil 4.47, Şekil 4.48 ve Şekil 4.49) gösterilmektedir.



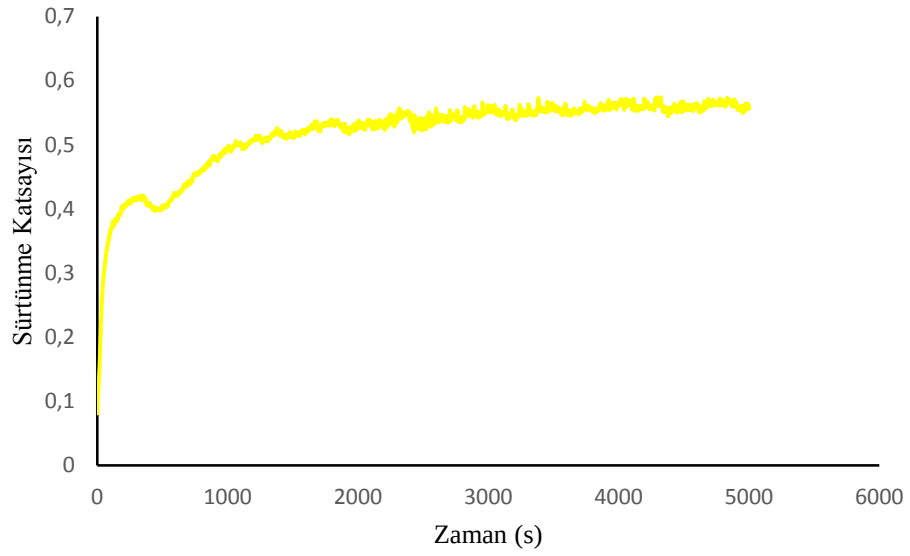
Şekil 4.45: Lazerle işlem görmemiş numunenin sürtünme katsayısı grafiği.



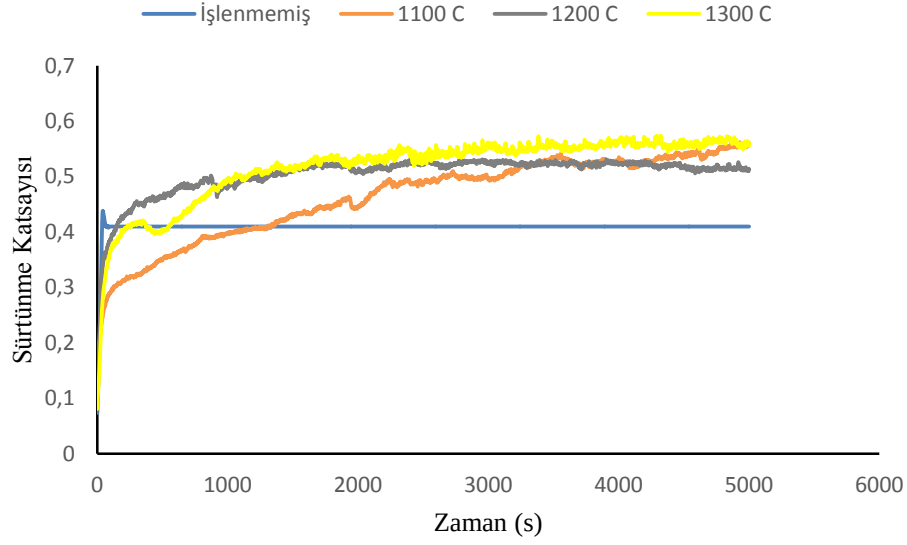
Şekil 4.46: Lazerle 1.100°C'de işlenmiş numunenin sürtünme katsayısı grafiği.



Şekil 4.47: Lazerle 1.200°C’de işlenmiş numunenin sürtünme katsayısı grafiği.



Şekil 4.48: Lazerle 1.300°C’de işlenmiş numunenin sürtünme katsayısı grafiği.



Şekil 4.49: Tüm numunelere ait sürtünme katsayısı grafikleri.

Aşınma deneyi sonuçları incelendiğinde, en düşük aşınmanın işlenmemiş numunede meydana geldiği, en yüksek aşınmanın ise 1.300°C'de lazerle işlem gören numunede meydana geldiği görülmüştür. 1.100°C'de ve 1.200°C'de lazerle işlem gören numunelerde ise benzer aşınma davranışı sonuçları görülmüştür [57].

Şekil 4.49, lazerle 1.100°C, 1.200°C ve 1.300°C'de işlenmiş ve işlenmemiş numunelerin sürtünme katsayısı eğrilerini göstermektedir. Şekil 4.49 incelendiğinde işlenmemiş numunede sürtünme katsayısının hemen 0,4'te çıktığı ve işlem süresince 0,4'te sabit kaldığı görülmektedir. 1.100°C'de işlem gören numunede ise sürtünme katsayısının 0,25'e hemen çıktığı daha sonra ise kademeli bir şekilde 0,56'lara kadar arttığı görülmektedir. 1.100°C'de işlem gören numune incelendiğinde sürtünme katsayısının 0,35'e aniden çıktığı daha sonra ise kademeli olarak 0,53'lere çıktığı görülmektedir. 1.300°C'de işlem gören numune incelendiğinde katsayısının yaklaşık 0,4'e hemen çıkmış olduğu ve daha sonra ise kademeli olarak artarak işlem süresince 0,57'ye ulaşmış olduğu görülmektedir [57].

Sürtünme katsayısı grafikleri sonuçları incelendiğinde işlenmemiş numunenin sürtünme katsayısının en düşük olduğu, lazerle işlem gören numunelerde ise beklendiği gibi sürtünme katsayılarının artmış olduğu ve sürtünme katsayısı sonuçlarının bir birine çok yakın olduğu görülmüştür [57].

4.6.1. Yüzey Pürüzlülüğü Testi Bulguları

Gerçekleştirilen yüzey pürüzlülüğü testine ait sonuçlar aşağıdaki tabloda verilmektedir.

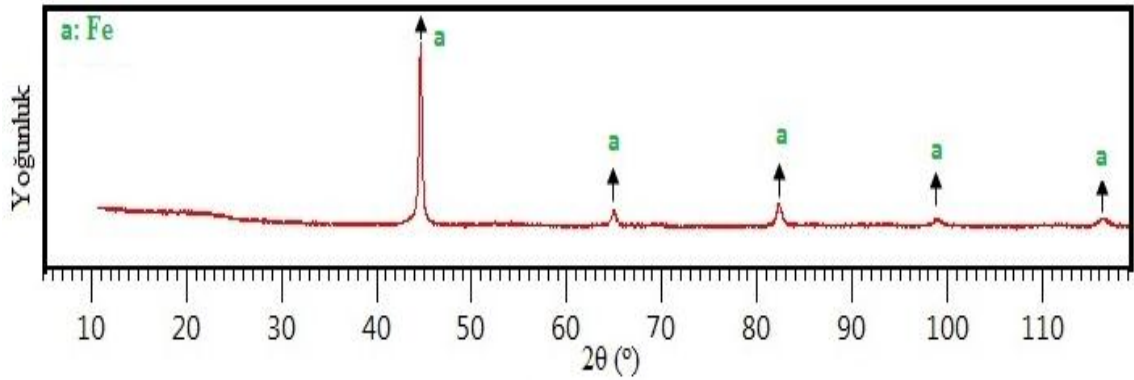
Tablo 4.6: Yüzey pürüzlülüğü testi sonuçları.

Numuneler	Ra, μm	Rq, μm	Rv, μm	Rp, μm	Rt, μm	RzDin, μm
İşlem görmeyen	0,099400000	0,128453	-0,62929	0,223407	0,852693	0,424500
1.100°C	1,790336667	2,196097	-6,37444	5,051753	11,42619	8,971760
1.200°C	1,638310000	2,083950	-6,14598	6,262967	12,40895	8,502083
1.300°C	1,905043333	2,364460	-6,65027	6,059217	12,70949	9,653203

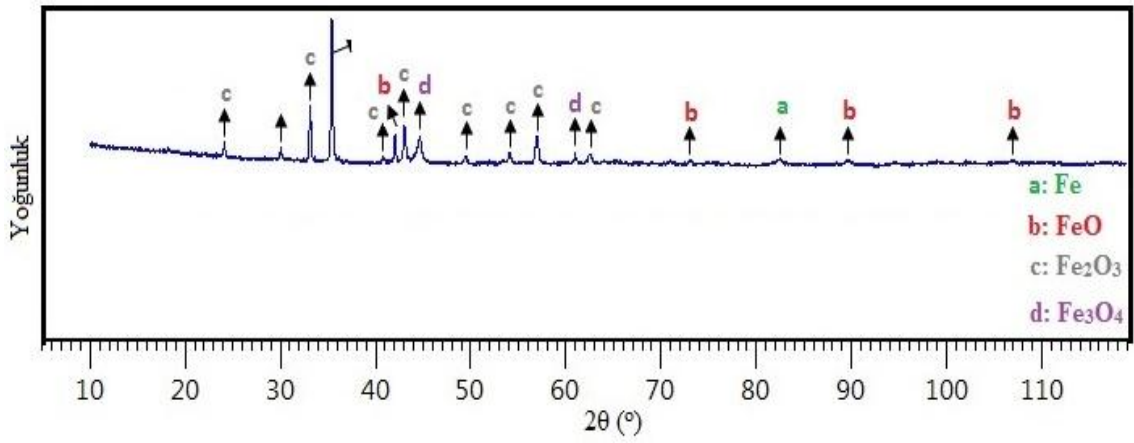
Elde edilen sonuçlar incelendiğinde en düşük ortalama yüzey pürüzlülük değerine (Ra) sahip olan numunenin lazerle işlenmemiş olan numunenin, en yüksek ortalama yüzey pürüzlülük değerine (Ra) ise lazerle 1.300°C’de işlem gören numunenin sahip olduğu görülmüştür.

4.6.2. XRD Analizi Bulguları

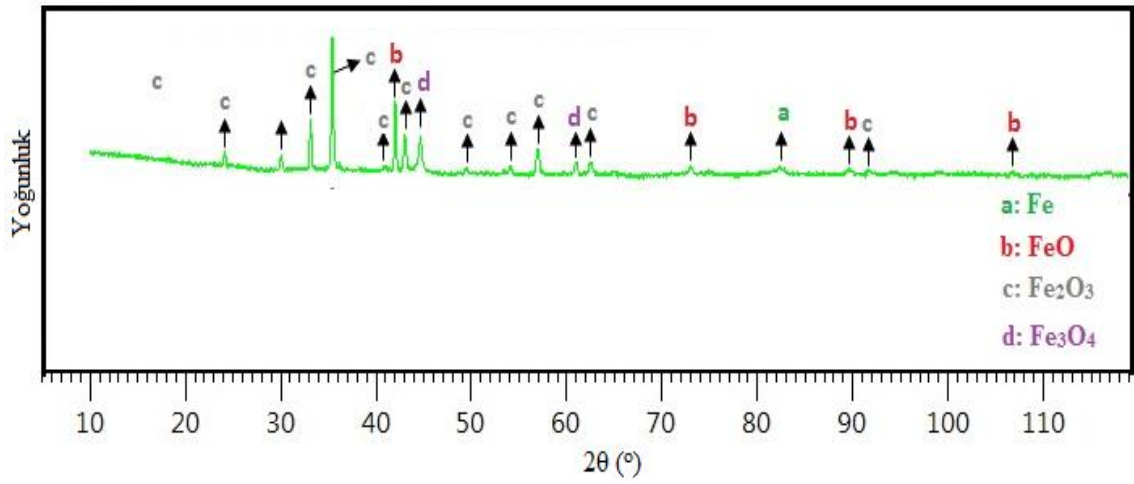
XRD analizleri neticesinde elde edilen sonuçlar aşağıdaki şekillerde verilmektedir.



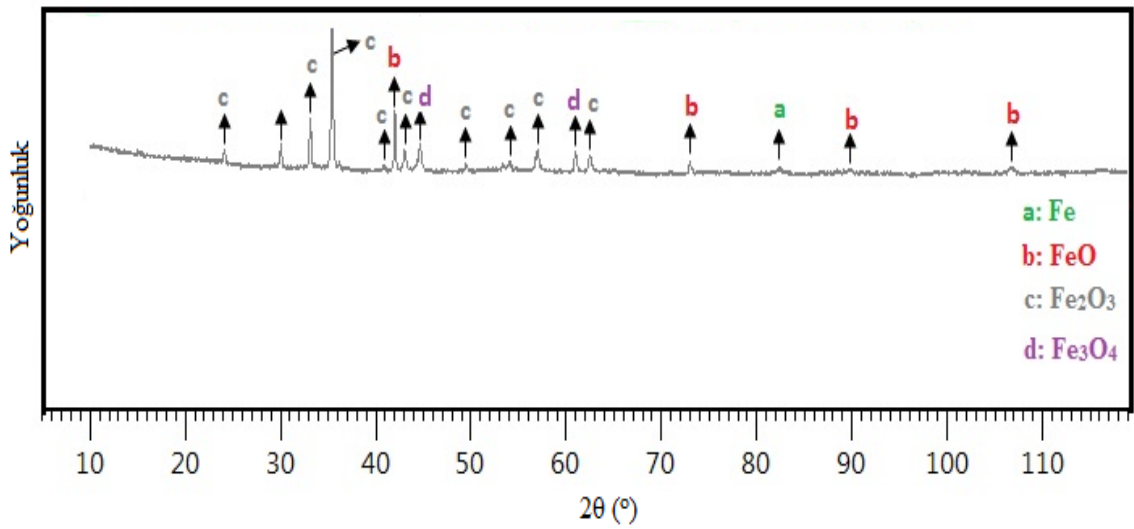
Şekil 4.50: Lazerle işlenmemiş numunenin XRD analiz sonucu.



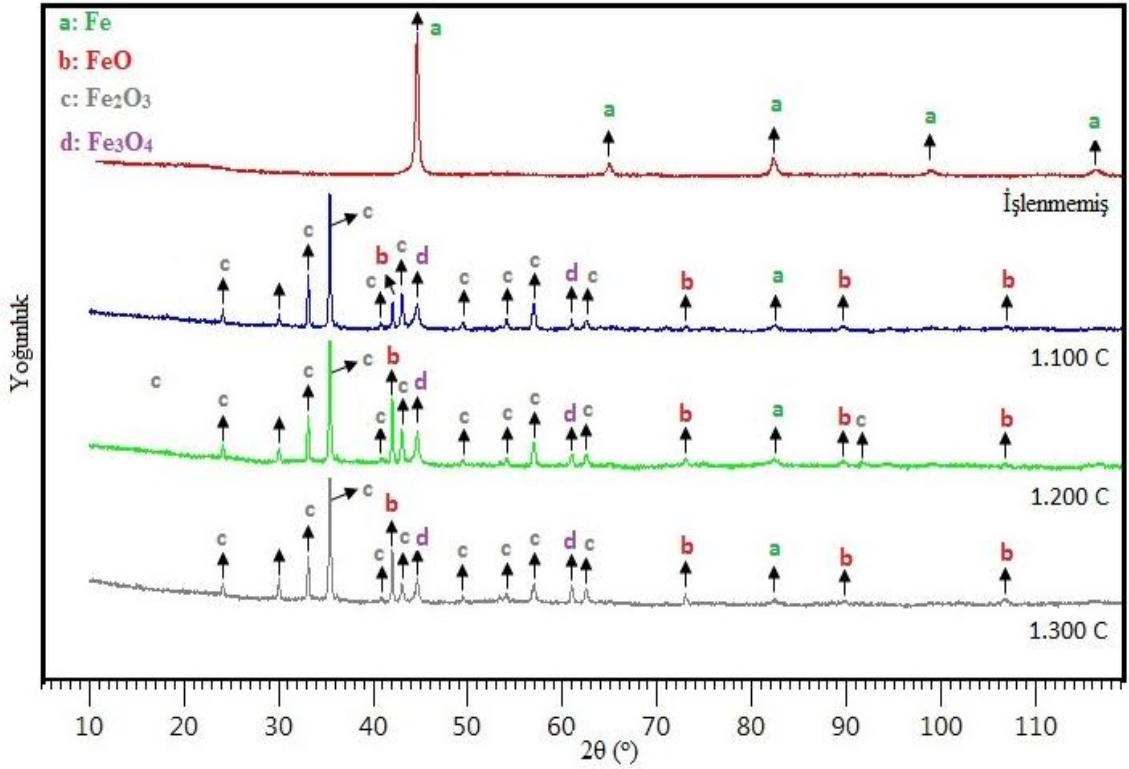
Şekil 4.51: Lazerle 1.100°C’de işlenmiş numunenin XRD analiz sonucu.



Şekil 4.52: Lazerle 1.200°C’de işlenmiş numunenin XRD analiz sonucu.



Şekil 4.53: Lazerle 1.300°C’de işlenmiş numunenin XRD analiz sonucu.

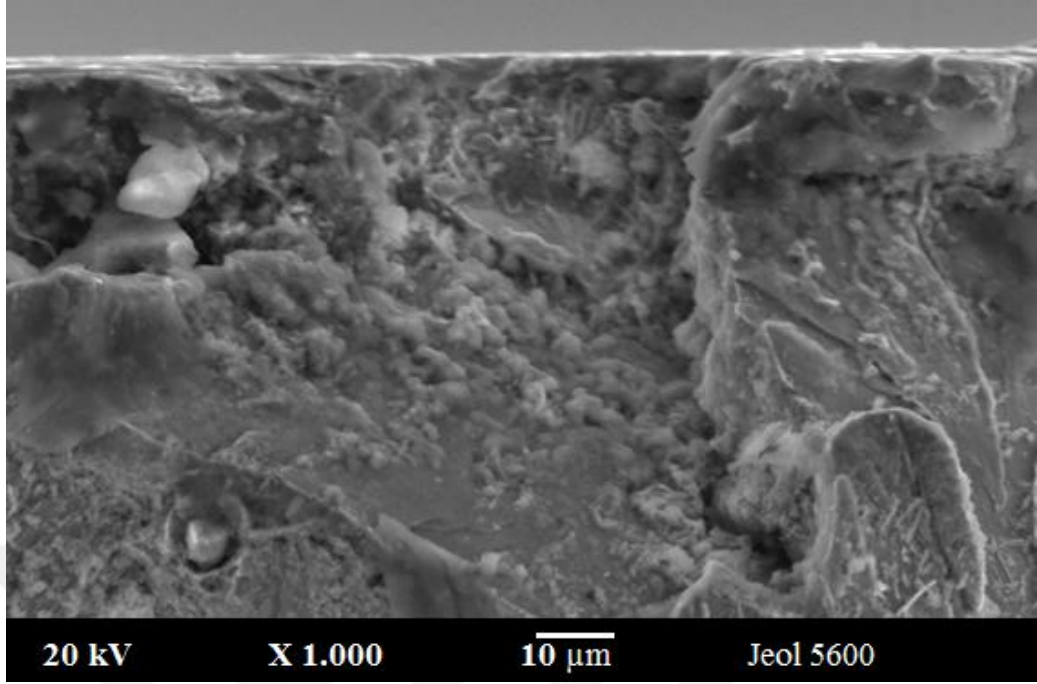


Şekil 4.54: Tüm numunelere ait XRD analiz sonucu.

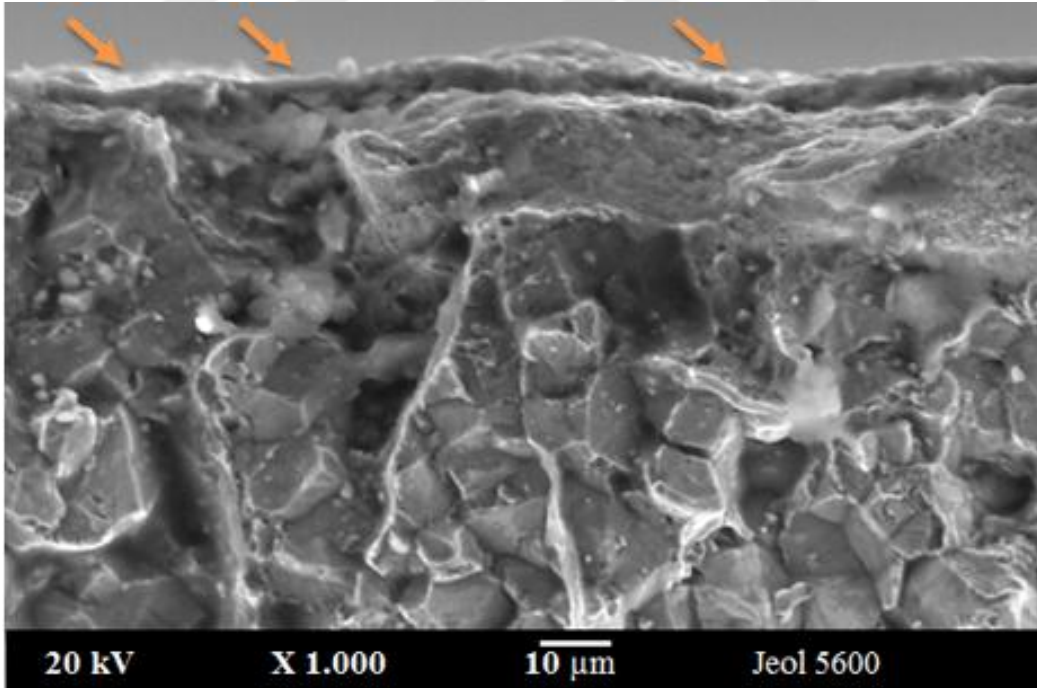
XRD analizi sonuçlarına bakıldığında, lazer işlemi inert gaz ortamında gerçekleştirilmesine rağmen lazerle işlem görmüş numunelerin yüzeyinde FeO, Fe₂O₃, ve Fe₃O₄ gibi oksit yapılarının oluştuğu görülmektedir. Bunun nedeni ise inert gaz ortamına rağmen çıkılan yüksek işlem sıcaklıkları nedeniyle malzemenin oksitlenmeye karşı yatkınlığı olduğu düşünülmektedir. İşlem görmeyen numune yüzeyinde (Şekil 4.50) ise bu oksit yapılarının oluşmadığı görülmektedir.

4.6.3. Aşınma Deneyi Numunelerinin SEM İncelemeleri Bulguları

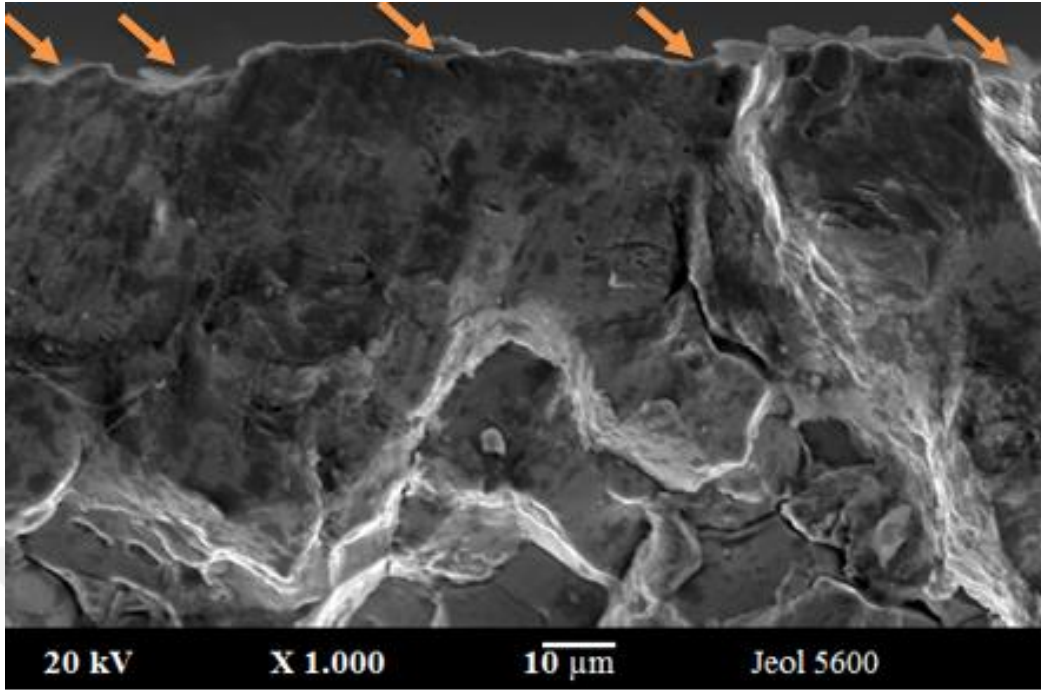
Yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilen lazer işleminin malzemenin yüzey yapısına etkisini daha iyi anlayabilmek için aşınma numuneleri üzerinde ayrıca SEM incelemeleri gerçekleştirilmiş olup sonuçlar aşağıdaki şekillerde gösterilmektedir.



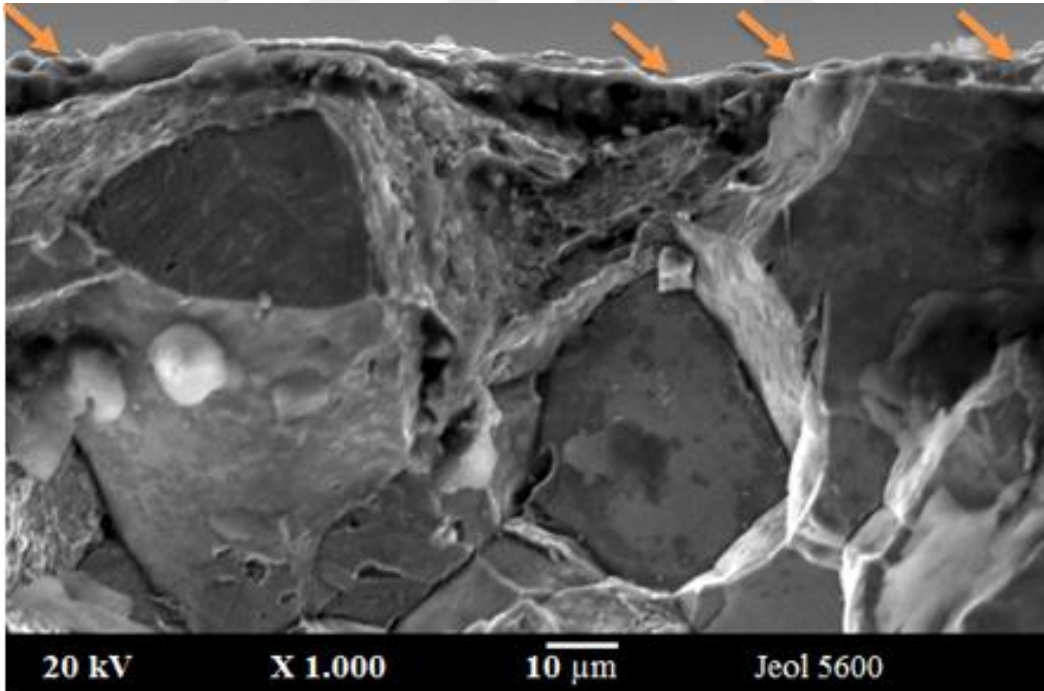
Şekil 4.55: Lazerle işlem görmemiş numunenin yüzey kesit SEM görüntüsü.



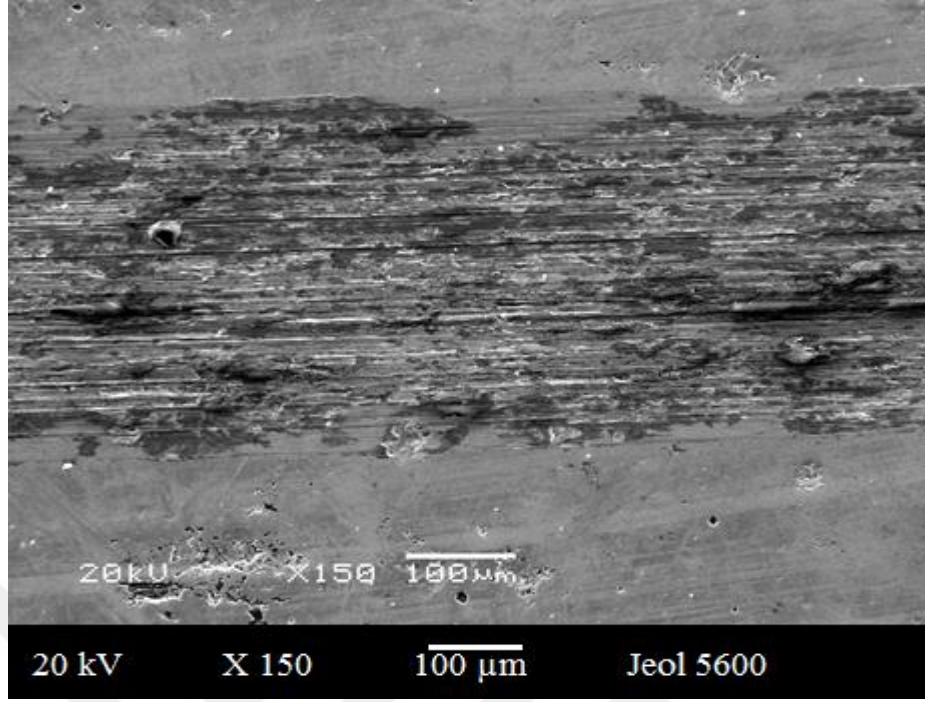
Şekil 4.56: Lazerle 1.100°C’de işlem gören numunenin yüzey kesit SEM görüntüsü.



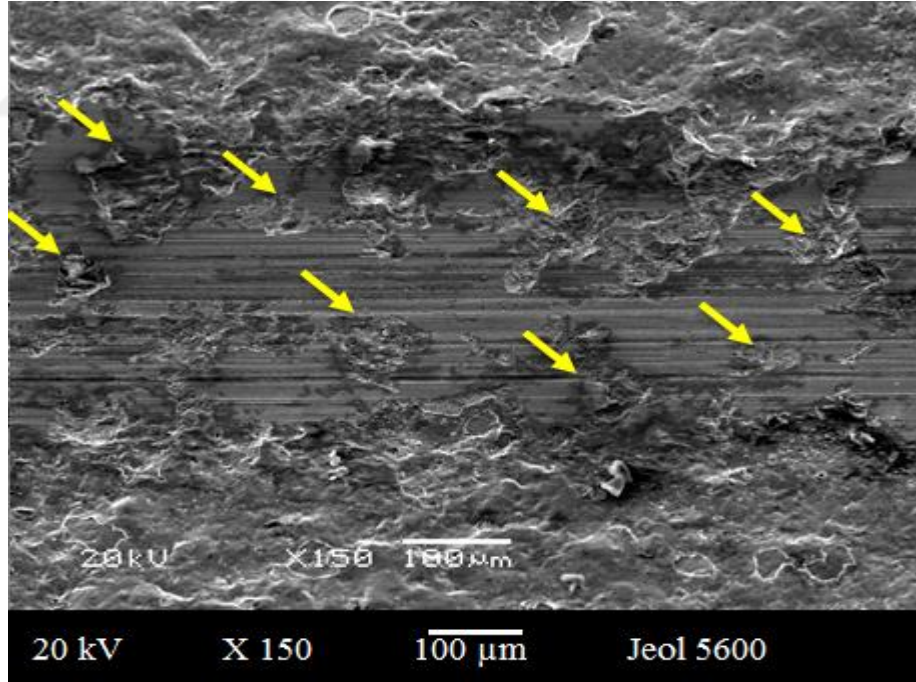
Şekil 4.57: Lazerle 1.200°C’de işlem gören numunenin yüzey kesit SEM görüntüsü.



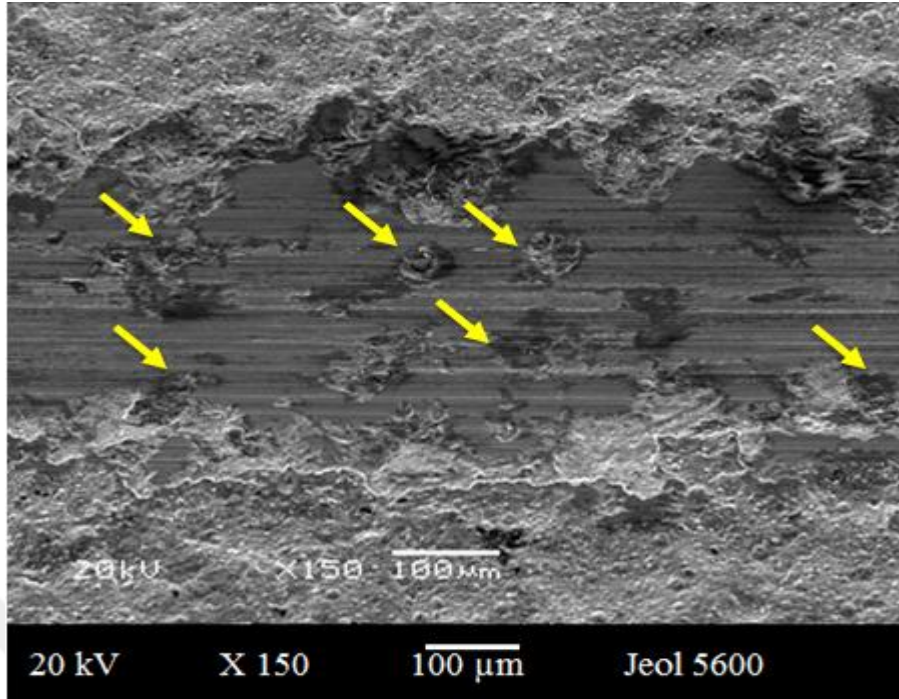
Şekil 4.58: Lazerle 1.300°C’de işlem gören numunenin yüzey kesit SEM görüntüsü.



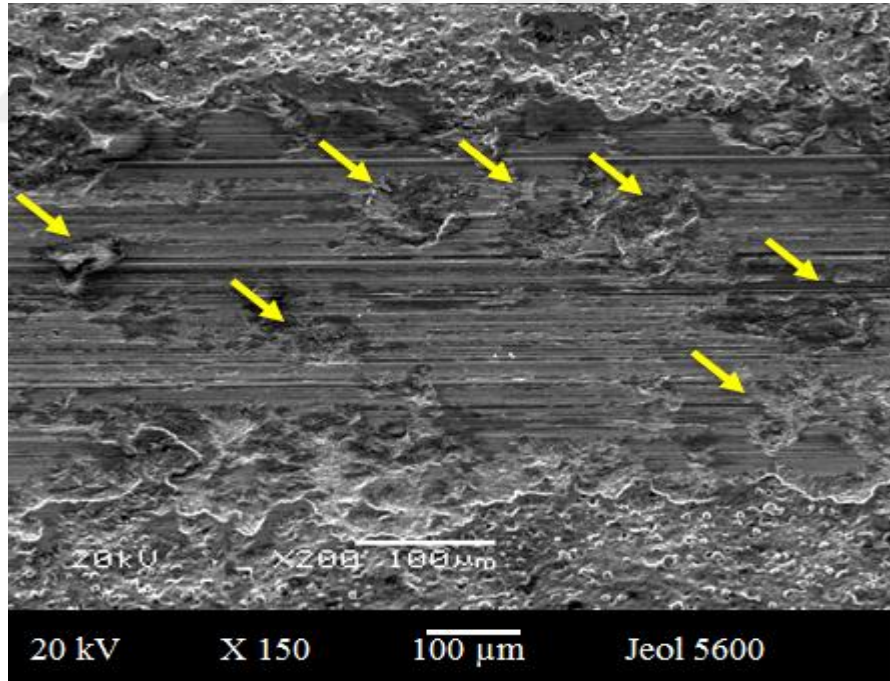
Şekil 4.59: Lazerle işlem görmemiş aşınma numunesi aşınma yüzeyi SEM görüntüsü.



Şekil 4.60: Lazerle 1.100°C’de işlem gören aşınma yüzeyi SEM görüntüsü.



Şekil 4.61: Lazerle 1.200°C’de işlem gören aşınma yüzeyi numunesi SEM görüntüsü.



Şekil 4.62: Lazerle 1.300°C’de işlem gören aşınma yüzeyi numunesi SEM görüntüsü.

Lazerle işlenmemiş ve işlenmiş aşınma numunelerine ait yüzey kesit SEM fotoğraflarından lazerle işlem görmemiş numunenin yüzeyinin daha düzgün olduğu, lazerle işlem gören

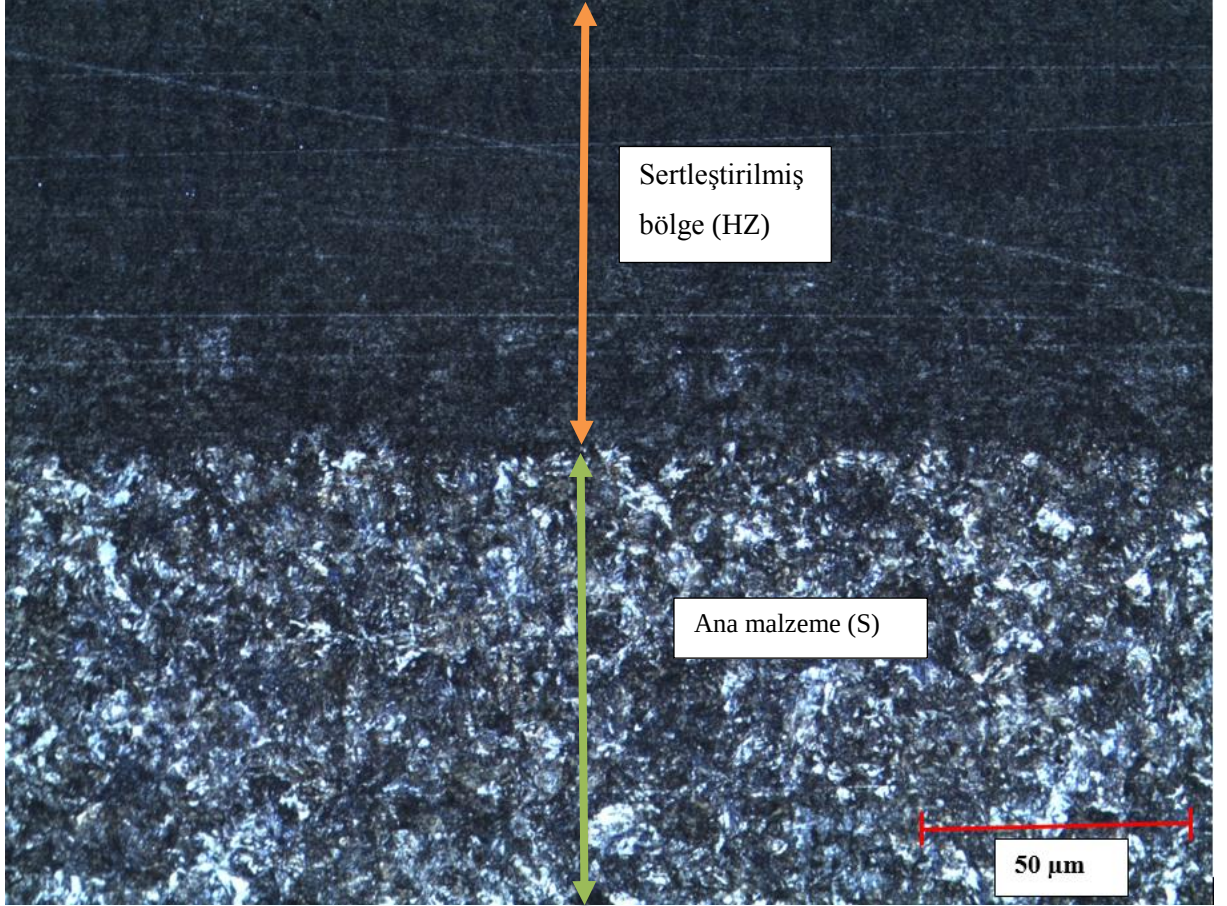
numunelerin ise yüzey topografyalarının uygulanan ısı işlem neticesinde değişerek pürüzlü ve engebeli hale geldiği görülmüştür.

Şekil 4.59 Şekil 4.60, Şekil 4.61 ve Şekil 4.62, aşınma deneyine tabi tutulan lazerle işlem görmüş ve görmemiş numunelerin aşınma yüzey SEM görüntülerini göstermektedirler. Bu şekillerden de yine işlem görmemiş numune yüzeyinin daha homojen ve düzgün bir aşınma yüzeyine sahip olduğu görülmektedir. Lazerle işlem görmüş numunelerin aşınma yüzeylerinde ise pürüzlülüklerin olduğu hem yüzey pürüzlülüğü testi hem de SEM incelemeleri neticesinde tespit edilmiştir. Ancak lazerle yüzey sertleştirme işlemi, yüksek sıcaklıkta yapılan tahribatlı yüzey işlemi olduğundan dolayı bu beklenen bir sonuçtur. Zira lazer yüzeyi tararken geçtiği bölgeyi mikroskobik ölçekte engebeli hale getirmektedir. Bu sırada oluşan yüksek sıcaklıklar engebelerin uç bölgelerinde kırılan oksit tabakalarının oluşmasına neden olmuştur. Bu durum engebeli kısımların aşınma testi boyunca aşındırıcı malzeme tarafından kırılarak yüzeyden daha fazla malzeme kaldırmasından kaynaklanmış olduğu düşünülmektedir. 1.300°C’de lazerle işlem gören numunenin en yüksek aşınma oranına sahip olmasının nedeni olarak bu numunenin yüzeyinin daha fazla ısı etkileşime maruz kalarak yüzeyin daha fazla engebeli ve pürüzlü hale gelmiş olması bu nedenden ötürü de aşındırıcı malzemenin yüzeyden daha fazla malzeme kaldırması olduğu düşünülmektedir.

Sürtünme katsayısı sonuçlarına bakıldığında (Şekil 4.49), işlenmemiş numunenin sürtünme katsayısının işlenmiş olan numunelere göre daha düşük olduğu ve 1.300°C’de lazerle işlem gören numunenin en yüksek sürtünme katsayısına sahip olduğu görülmektedir. Bu durumun nedeni olarak yine ısı işlem nedeniyle malzeme yüzeyinin pürüzlülüğünün artması (yüzey morfolojisindeki değişim) olduğu düşünülmektedir.

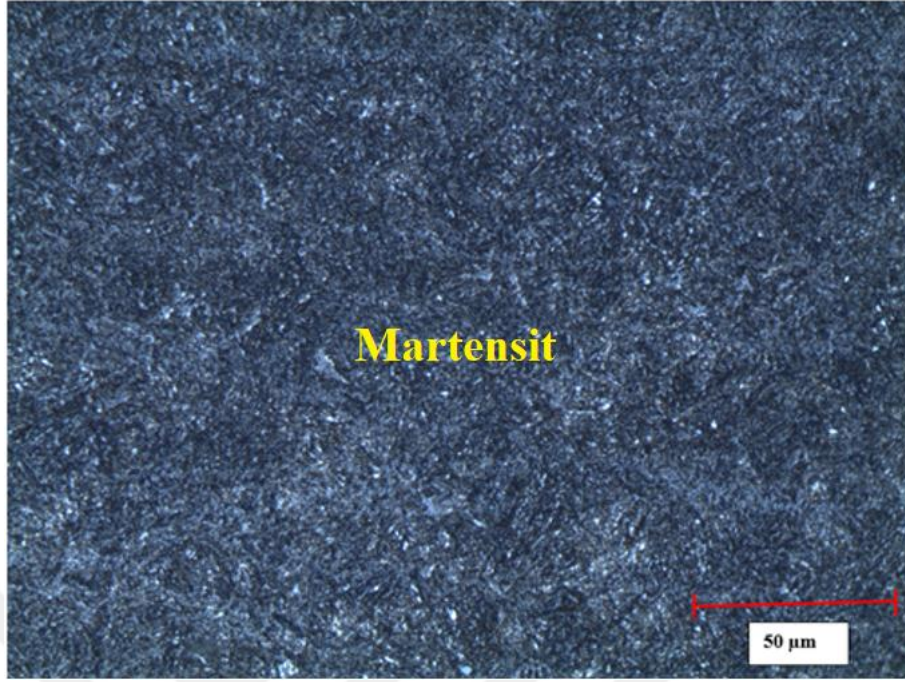
4.7. OPTİK MİKROSKOP İNCELEME BULGULARI

Optik mikroskop incelemelerine bakıldığında, gerçekleştirilen lazerle sertleştirme işlemi neticesinde üstte sertleştirilmiş bir bölgenin olduğu, bu bölgenin altında ise ana yapı olan perlitik yapının olduğu tespit edilmiş olup bu durum Şekil 4.58’te gösterilmektedir.

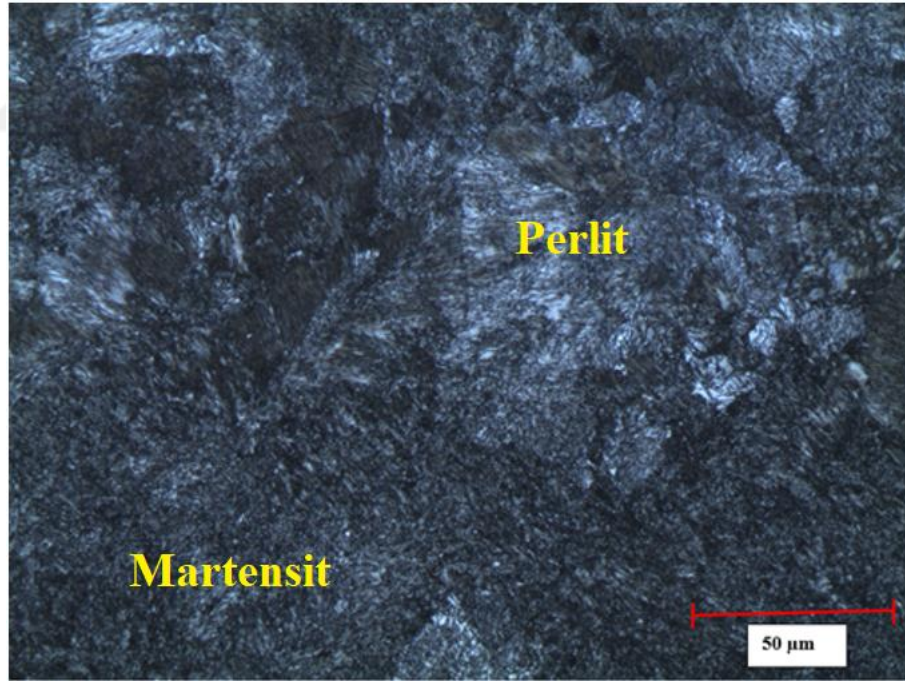


Şekil 4.63: 500X büyütmede farklı bölgelerin gösterimi.

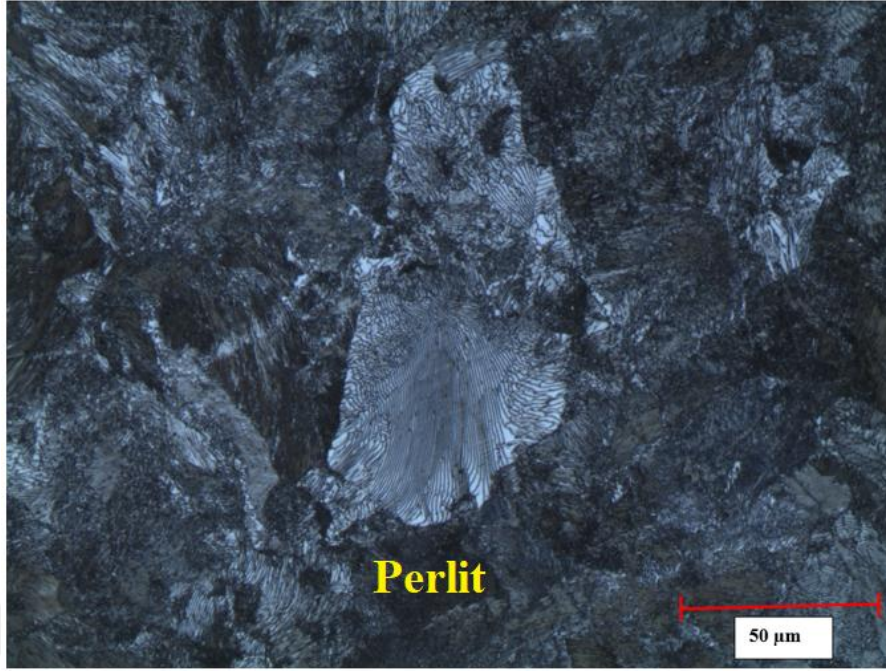
Sertleştirilmiş bölge ve perlitik yapının detaylı optik mikroskop görüntüsü incelemeleri aşağıdaki şekillerde gösterilmektedir.



Şekil 4.64: 500X büyütmede martensit yapı gösterimi.



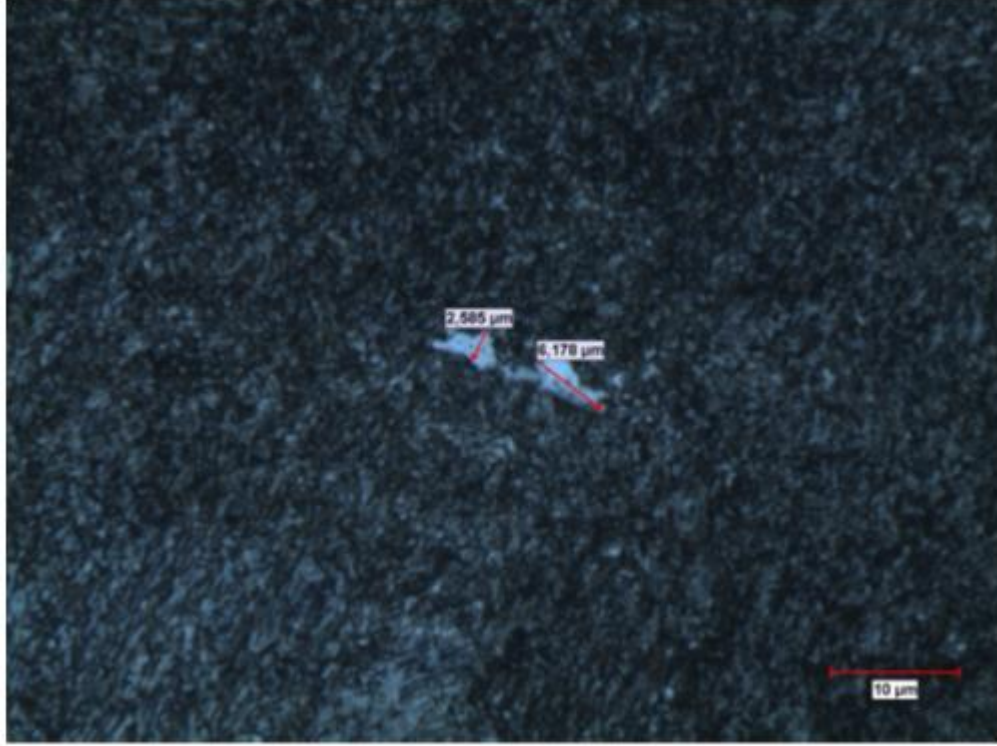
Şekil 4.65: 500X büyütmede martensitten perlite geçiş noktası görünümü.



Şekil 4.66: 500X büyütmede perlitik bölge görünümü.

Yapılan literatür çalışmalarına bakıldığında [3] elde edilmiş olan optik mikroskop sonuçlarına benzer sonuçların elde edilmiş olduğu görülmüştür.

Sertleştirilmiş bölgede ve geçiş bölgelerinde yapılan optik mikroskop incelemelerinde bu bölgelerde bir miktar kalıntı östenite'de rastlanılmış olup aşağıdaki Şekil 4.67 ve Şekil 4.68'te gösterilmektedir.



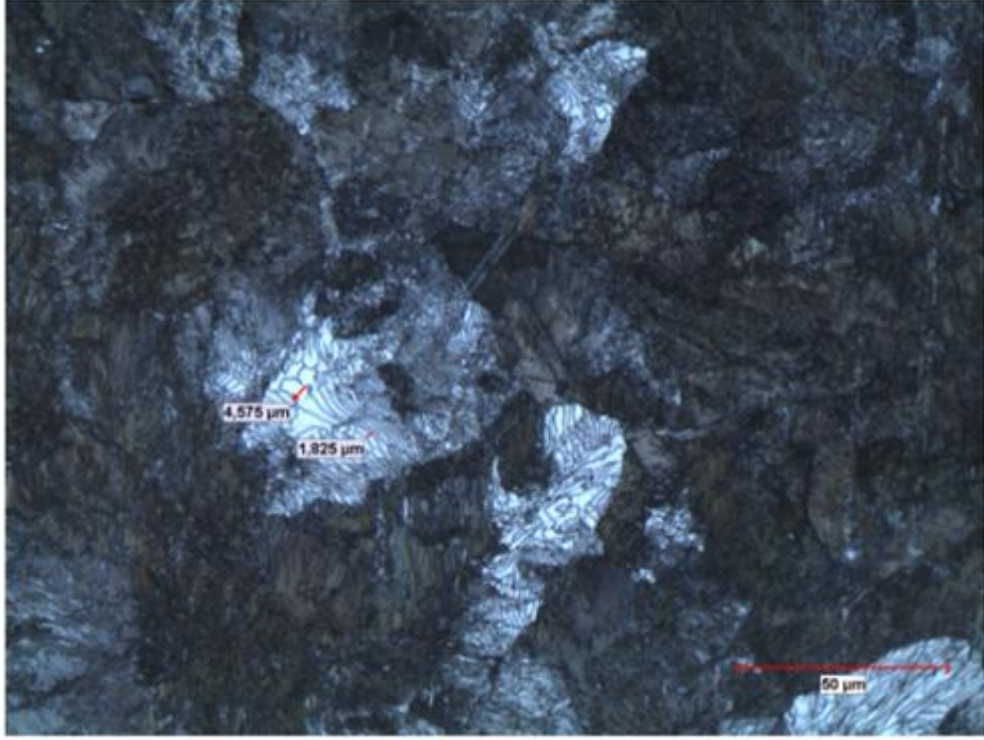
Şekil 4.67: 1.500X büyütmede sertleştirilmiş bölgede kalıntı östenit gösterimi.



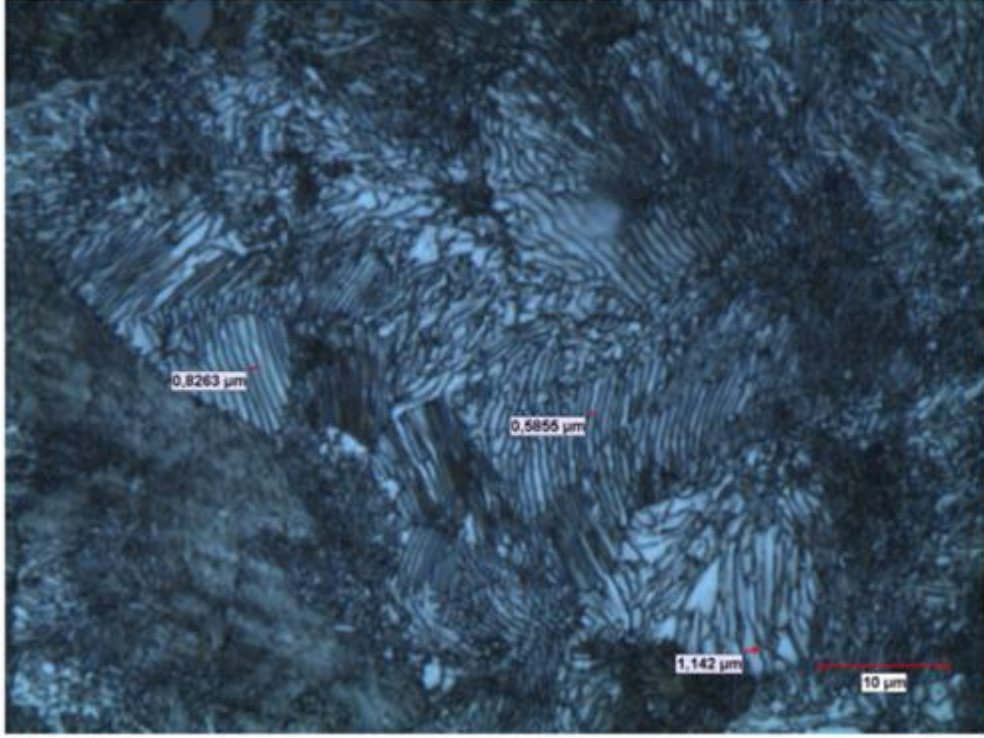
Şekil 4.68: 1.500X büyütmede geçiş bölgesinde kalıntı östenit gösterimi.

Kalıntı östenit miktarı ve boyutlarının sertleşmiş bölgeden geçiş bölgesine doğru geçişte azaldığı görülmüştür. Bunun nedeni olarak, yüzeyde hızlı gerçekleşen soğuma neticesinde östenitin martensite dönüşebilmesi için yeterli zaman bulamaması ve martensit yapı içerisinde hem miktar hem de boyut olarak daha yüksek miktarda kalmış olduğu düşünülmektedir. Alt kısımlarda ise yüzey kısma göre daha yavaş bir soğuma gerçekleştiğinden daha yüksek oranda östenit-martensit dönüşümü meydana gelmiş ve bu nedenden ötürü hem kalıntı östenit miktarının hem de boyutunun azalmış olduğu düşünülmektedir.

Gerçekleştirilen lazerle yüzey sertleştirme işleminin perlitik mikro yapı üzerinde her hangi etkisinin olup olmadığını anlamak için lazer işlemi gerçekleştirilmeden önce ve sonra perlitik yapı içerisindeki Fe_3C (sementit) lamelleri arası mesafe ölçümü gerçekleştirilmiş olup aşağıdaki Şekil 4.69 ve Şekil 4.70’te gösterilmektedir.



Şekil 4.69: 500X büyütmede lazer işleminden önce Fe_3C lamelleri arası mesafe ölçümü.



Şekil 4.70: 1.500X büyütmede geçiş bölgesinin altında Fe_3C lamelleri arası mesafe ölçümü.

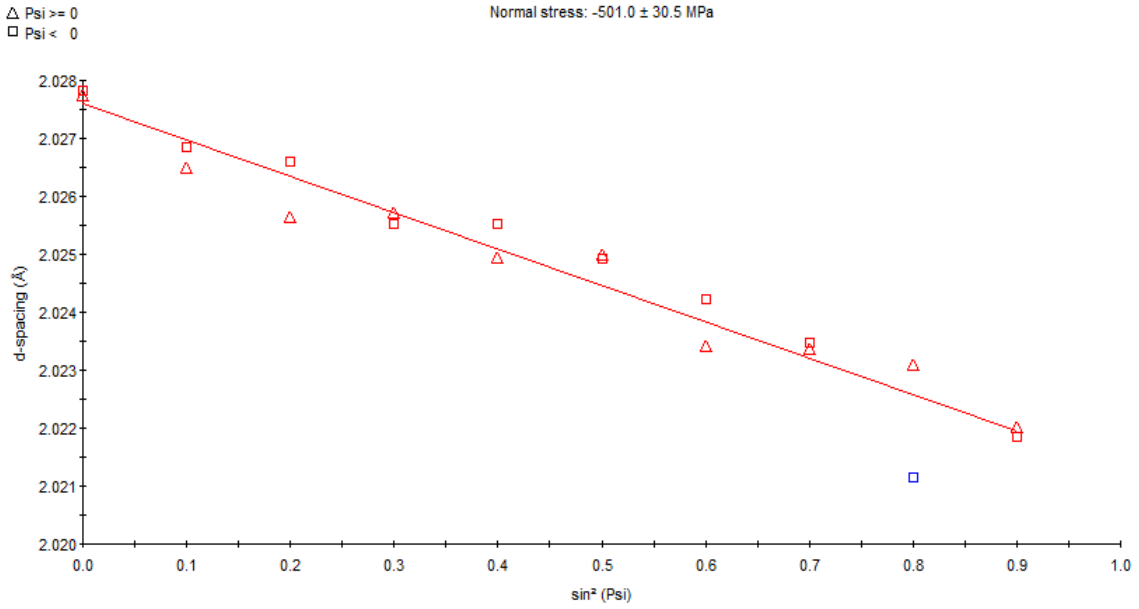
Şekil 4.69 ve Şekil 4.70 incelendiğinde lazerle yüzey sertleştirme işleminin sementit lameller arası mesafe üzerinde pozitif etki oluşturduğu ve bunun sonucunda Fe_3C lamelleri arası mesafesinin azalmış olduğu görülmüştür.

Elde edilen bu sonuç, gerçekleştirilen lazerle yüzey sertleştirme işlemi ile sadece yüzeyden belirli bir mesafeye kadar sertleştirilmiş bir tabakanın elde edilmediğini ayrıca bu sert tabakanın (martensitik yapı) altında Fe_3C lameller arası mesafesi daha az olan bir perlitik yapının oluşmasını sağladığını göstermektedir.

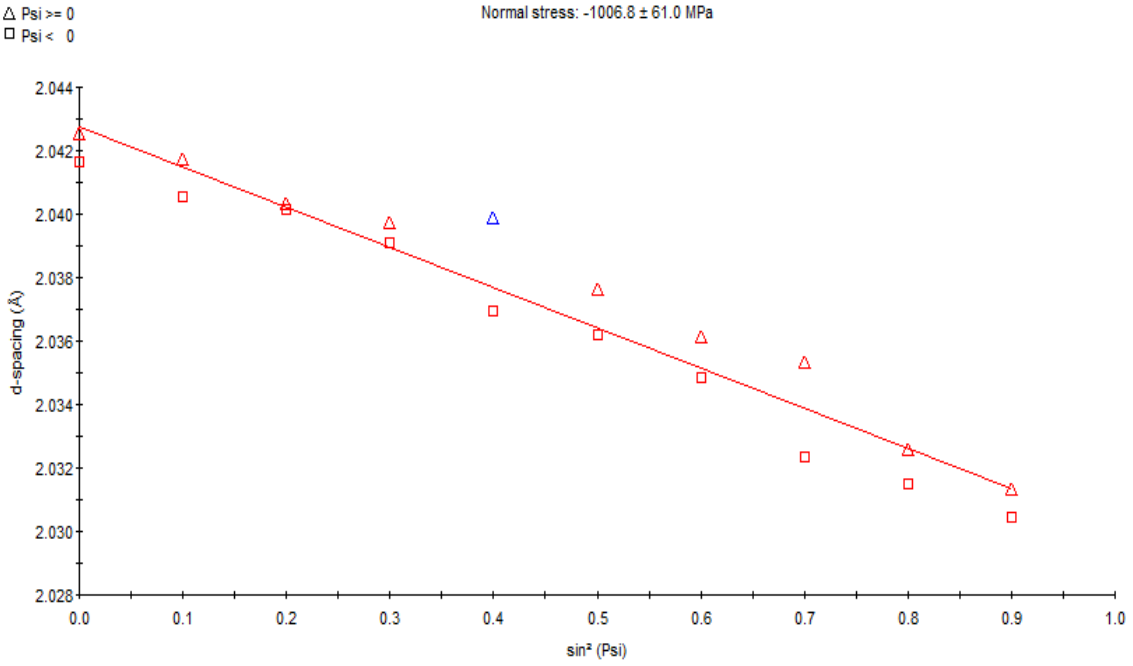
4.8. KALINTI GERİLME ANALİZİ BULGULARI

XRD analizleri sonuçlarından da görüldüğü üzere (Bölüm 4.6.2) lazerle işlenmiş olan numunelerin yüzeyinde oksitli yapılar oluşmuştur. Bu oksitli yüzeylerin kalıntı gerilme analizi için uygun olmaması nedeniyle lazerle işlem görmüş numunelerin yüzeyi yaklaşık 5 sn. zımparalanarak yüzeyde oluşan bu oksit tabakası ortadan kaldırılmış ve bundan sonra kalıntı gerilme analizleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca zımparalama işleminin gerilme üzerindeki etkisinin kantitatif olarak anlaşılması için 1.100°C 'de işlem gören numunenin

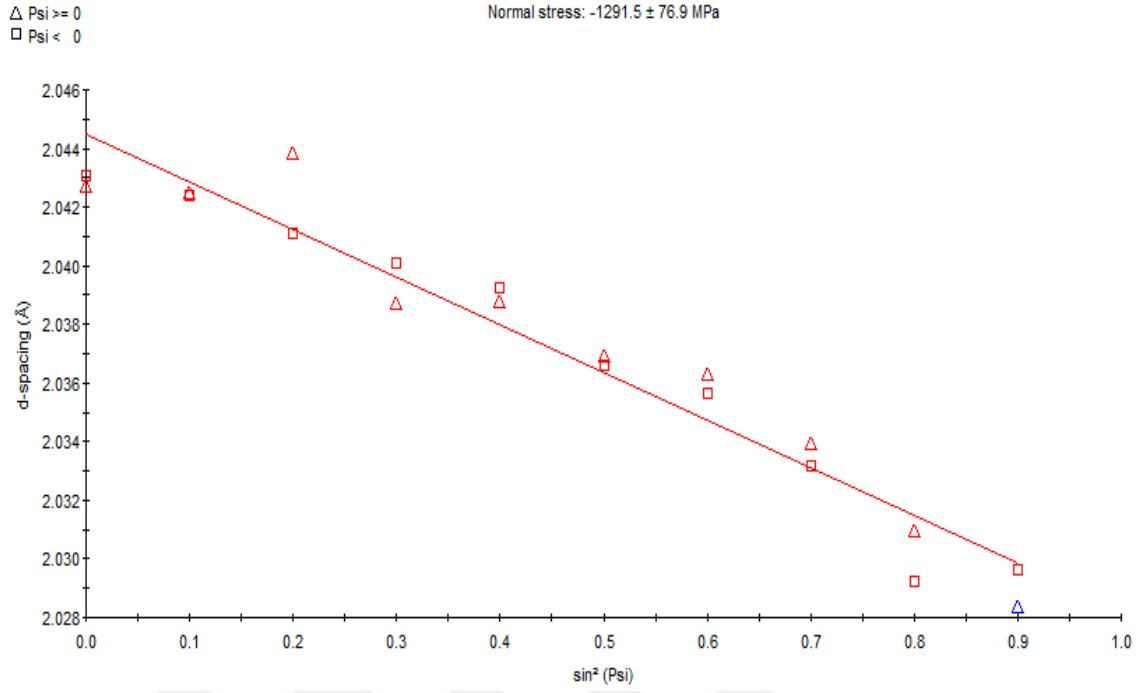
ikinci zımparalama işlemi sonrası tekrar kalıntı gerilme analizleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar " $d\text{-sin}^2(\psi)$ " eğrisi şeklinde aşağıda verilmektedir. Her eğrinin üzerinde gerilim değeri ve hata payları yer almaktadır.



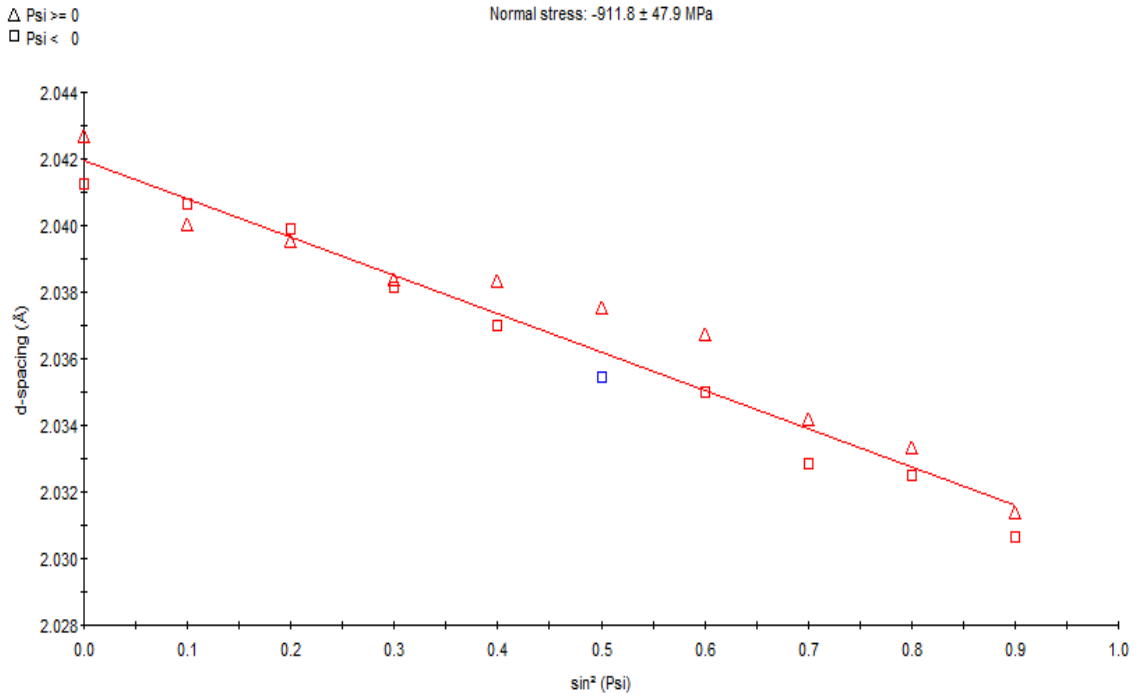
Şekil 4.71: İşlenmemiş numunenin kalıntı gerilme analiz sonucu $d\text{-sin}^2(\psi)$ eğrisi.



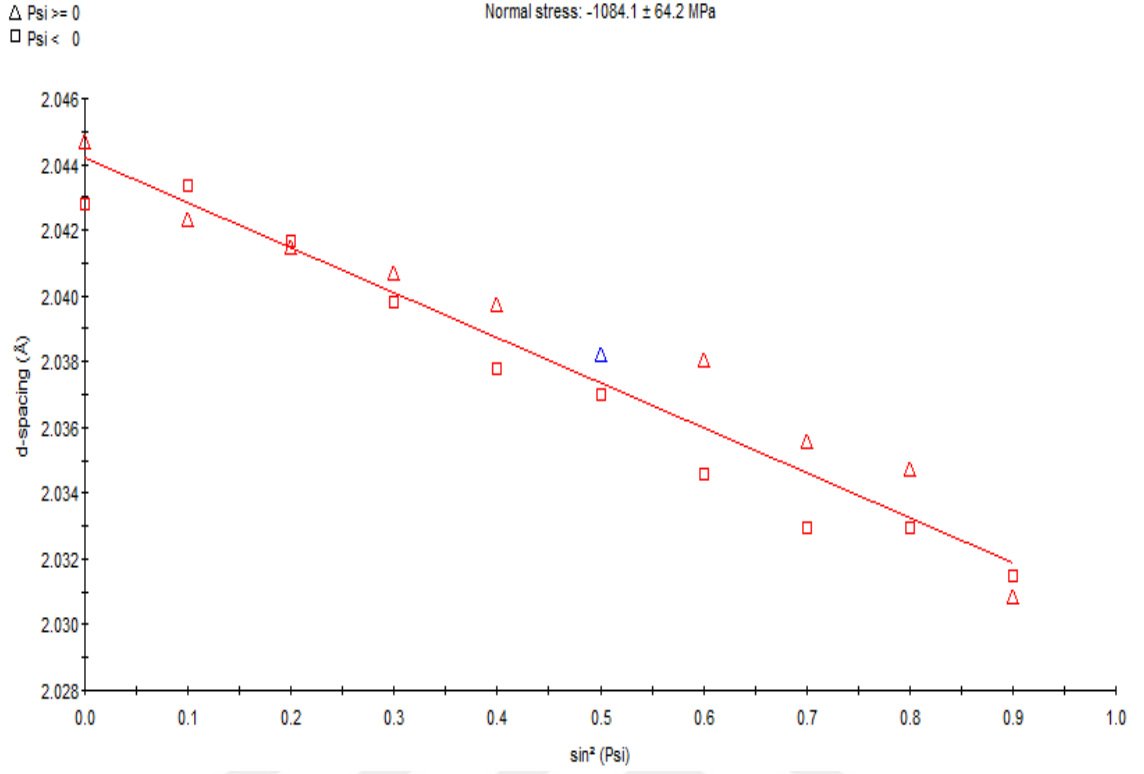
Şekil 4.72: 1.100°C'de lazerle işlenmiş numunenin kalıntı gerilme analiz sonucu $d\text{-sin}^2(\psi)$ eğrisi.



Şekil 4.73: 1.100°C’de lazerle işlenmiş numunenin kalıntı gerilme analiz sonucu d-sin²(psi) eğrisi (2. taşlamadan sonra).



Şekil 4.74: 1.200°C’de lazerle işlenmiş numunenin kalıntı gerilme analiz sonucu d-sin²(psi) eğrisi.



Şekil 4.75: 1.300°C’de lazerle işlenmiş numunenin kalıntı gerilme analiz sonucu $d\text{-}\sin^2(\text{psi})$ eğrisi.

Tablo 4.7: Elde edilen kalıntı stres değerleri.

Kalıntı Stres Değerleri	
1.100°C zımpara sonrası stres değeri	1.006,8 ± 61,0 MPa
1.100°C çift zımpara sonrası stres değeri	1.291,5 ± 76,9 MPa
1.200°C zımpara sonrası stres değeri	911,8 ± 47,9 MPa
1.300°C zımpara sonrası stres değeri	1.084,1 ± 64,2 MPa
İşlem görmemiş numunenin stres değeri	501,0 ± 30,5 MPa

Yukarıdaki Tablo 4.7’de verilen sonuçlardan görüleceği üzere yapılan ısıl işlem ile kalıntı gerilmedeki artış açıkça görülmektedir. İşlenmemiş numunedeki kalıntı gerilmesi 501 MPa iken, 1.100°C, 1.200°C ve 1.300°C’de lazerle işlem görmüş olan numunelerdeki kalıntı gerilmesi değerleri sırasıyla 1.006,8 MPa, 911,8 ve 1084,1 MPa olarak bulunmuştur.

Zımparalama işleminin gerilme üzerindeki etkisini görebilmek için yapılan deneyler neticesinde elde edilen sonuçlara bakıldığında ikinci zımparalama işleminin kalıntı gerilme değeri üzerinde yaklaşık % 28,27 oranında artışa neden olduğu da görülmektedir.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Demiryollarında artan hızlar, dingil yükleri, trafik yoğunluğuna paralel olarak kullanılan perlitik yapılı ray çelikleri daha şiddetli çalışma koşullarına maruz kalmakta ve özellikle rayın mantar (yüzey) kısmında oluşan yüzey problemleri artmaktadır. Demiryollarında özellikle dar yarıçaplı kurplarda, ivmelenme ve frenleme bölgelerinde ve makas bölgelerinde ray yüzeyi problemleri alıyman (düz) yola göre daha sıklıkla görülmektedir.

Artan işletme koşulları nedeniyle en önemli üstyapı malzemesi olan ray çeliklerinde meydana gelen problemlerin azaltılması için ray çeliklerinin mekanik özelliklerinin gelişimi için çeşitli çalışmalar tüm dünyada devam etmektedir.

Bu çalışmamızda literatürde ray mantarı sertleştirme yöntemlerinden biri olarak bilinen ve çeşitli endüstriyel sektörlerde başarılı bir şekilde kullanılmasıyla sertleştirme yöntemleri arasında dikkat çeken yüksek güçlü diyot lazer kullanılarak yüzey sertleştirme işlemi gerçekleştirilmiştir.

Bu amaç doğrultusunda R260 kalitesindeki ray çeliklerinin mantar kısmından EN 13674-1 (46kg ve üzerindeki demiryolu rayları) hakkındaki standartta belirtilen yerlerden numuneler çıkartılarak numunelerin bir kısmına ön test çalışmaları kapsamında belirlenen ideal lazer işlem parametreleri uygulanmıştır.

Tren raylarıyla ilgili yapılan literatür incelemesinde “lazer gücü” ve “işlem hızı” parametrelerinin etkilerinin saptanmasına yönelik birkaç bazı çalışmalar görülmüştür [7, 14, 30]. Bu tez çalışmasında ise lazerle yüzey sertleştirmede diğer önemli bir parametre olan “işlem sıcaklığının” proses üzerine etkisi araştırılmıştır. Bu nedenle ön test çalışmaları kapsamında uygulanacak olan lazer gücü ve işlem hızı parametreleri belirlenmiş olup daha sonra numuneler üç farklı sıcaklıkta 1.100°C, 1.200°C ve 1.300°C’de lazerle sertleştirme işlemine tabi tutulmuşlardır.

Lazerle sertleştirilmemiş ve sertleştirilmiş ray çeliklerine; sertlik, çentikli darbe, çekme, abrasif aşınma, yüzey pürüzlülüğü ve yorulma gibi mekanik testler uygulanmıştır. Tüm numune yüzeylerinden alınan örnekler XRD incelemesine tabi tutulmuş ve ayrıca XRD

yöntemi ile uygulanan lazer işleminin malzemede oluşturduğu kalıntı gerilme miktarı belirlenmiştir. Numuneler ayrıca detaylı bir şekilde SEM/EDS ve optik mikroskop incelemelerine tabi tutulmuşlardır.

Mekanik mukavemet özellikleri incelendiğinde; 1.100°C, 1.200°C ve 1.300°C’de lazerle sertleştirilmiş numunelerin, sertleştirilmemiş numunelere göre önemli ölçüde daha iyi mukavemet özellikleri sergilediği görülmüştür. Elde edilen sonuçlar kıyaslandığında; 1.300°C’de lazerle sertleştirilmiş numunenin, sertleştirilmemiş ve 1.100°C ile 1.200°C’de sertleştirilmiş numunelere göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

Perlitik yapı bir malzeme olan ray çeliğinin lazerle yüzey sertleştirilmesi ile mekanik özelliklerinde önemli oranda artış sağlanabilmiştir, zira gerçekleştirilen işlem ile yüzeyden itibaren belirli derinliğe kadar sertleştirilmiş (martensitik) bölge sağlanarak yüzeyi sert ve içi daha yumuşak olan bir yapı elde edilmiştir. Lazerle yüzey sertleştirmenin sağladığı olumlu etkiye ilave olarak, Bölüm 4.7’de açıklandığı gibi, lazerle yüzey sertleştirme işlemi sonucu oluşan martenzitik yapının ulaştığı derinliğinin hemen altında ve yakınında ince lamelli perlitik yapılar tespit edilmiş ve bunun da mukavemet artışına katkı sağladığı düşünülmektedir.

Aşağıda mekanik ve karakterizasyon testleri neticesinde elde edilen sonuçlar özetlenmiştir.

- ❖ Yüzey sertlik sonuçları incelendiğinde 1.100°C’de işlem gören numunenin ortalama yüzey sertlik değerinin 814 HV, 1.200°C de işleme tabi tutulan numunenin ortalama yüzey sertlik değerinin 784 HV ve 1.300°C de işlem gören numunenin ortalama yüzey sertlik değerinin ise 854 HV olduğu görülmüştür. Her üç işlem sıcaklığında işleme tabi tutulan numunelerin yüzey sertlik sonuçlarına bakıldığında, lazerle sertleştirme gerçekleştirilen yüzeylerin sertliğinin ana malzemenin ortalama yüzey sertliğine 277 HV oranla yaklaşık olarak 3 katı kadar arttığı görülmüştür.
- ❖ Optik mikroskop incelemelerine bakıldığında, gerçekleştirilen lazerle sertleştirme işlemi neticesinde üstte sertleştirilmiş bir bölgenin olduğu, bu bölgenin altında ise ana yapı olan perlitik yapının olduğu tespit edilmiştir.

Optik mikroskop incelemeleri neticesinde lazerle yüzey sertleştirme işleminin sementit lameller arası mesafe üzerinde pozitif etki oluşturduğu ve bunun sonucunda Fe_3C lamelleri arası mesafesinin azalmış olduğu görülmüştür. Elde edilen bu sonuç gerçekleştirilen lazerle yüzey sertleştirme işlemi ile sadece yüzeyden belirli bir mesafeye kadar sertleştirilmiş bir tabakanın elde edilmediğini ayrıca bu sert tabakanın altında sementit lamelleri arası mesafesi daha az olan bir perlitik yapının da elde edilebileceğini göstermektedir. Bu sebepten ötürü lazerle yüzeyi sertleştirilmiş ray çeliklerinin mekanik özelliklerindeki artışa, diğer etkenlerin yanında elde edilen bu sıkı dizilimli yapının da katkı sağladığı düşünülmektedir.

Sementit lamelleri arası mesafe perlitik yapı bir malzemenin mekanik özellikleri açısından önem arz etmektedir. Bu nedenden ötürü ısı işlem ile üretilen R350HT gibi rayların üretiminde asıl amaç, sementit lamelleri arasındaki mesafeyi azaltarak sıkı dizilimli perlitik bir yapı oluşturarak malzemenin mekanik özelliklerini geliştirmektedir. Çünkü bu işlem ile sementit lamelleri arası mesafe azalarak mikro yapı içerisinde daha homojen bir karbon dağılımı sağlanarak malzemenin sertliğini ve mukavemetini arttırmaktadır.

- ❖ Çekme testi sonuçları incelendiğinde, 1.100°C, 1.200°C ve 1.300°C’de lazerle işlenmiş olan numunelerin akma mukavemetlerinin işlenmemiş olan numuneye göre sırasıyla % 22, % 24 ve % 41 artmış olduğu, % uzama miktarlarında ise yüzey sertleştirme neticesinde malzemelerin yüzeyinin daha sert hale gelmesi (gevrekleşmesi) nedeniyle sertleştirilmemiş numuneye göre azalma meydana geldiği görülmüştür.

Bilindiği üzere, akma dayanımı noktası elastik deformasyon sınırından plastik deformasyon sınırına geçiş noktası olması sebebiyle malzemeler açısından büyük önem arz etmektedir. Bir malzemelerin akma dayanımındaki artış o malzemenin daha yüksek gerilmelerde plastik deformasyona uğramasına neden olacaktır. Bu durum ise malzemenin daha yüksek gerilmeler altında çalışmasını mümkün kılacaktır. Çekme testi sonuçlarından da görülmektedir ki lazerle sertleştirme işlemi malzemenin akma mukavemetini önemli ölçüde arttırmıştır.

- ❖ Çentikli darbe testi sonuçları incelendiğinde, 1.100°C ve 1.200°C’ de işlem gören numunelerin işlenmemiş olan numuneye göre kırılma enerjilerinde %33 ve 1.300°C işlem gören numune de ise %52 artış meydana geldiği görülmüştür.

Kırılma enerjileri yüksek olan malzemelerin kırılma toklukları da yüksek olduğundan, lazerle sertleştirme işlemi neticesinde daha tok malzemeler elde edildiği tespit edilmiştir. Gerçekleştirilen sertlik ve çekme testleri sonuçlara dikkate alındığında en iyi sonuçların 1.300°C’de işlem gören numuneden elde edildiği görülmüştür. Yapılan bu çentikli darbe deneyi kapsamında da tokluğu en yüksek yine 1.300°C’de işlem gören numunenin olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlara bakılarak, lazerle yüzey sertleştirme işlemi neticesinde yüzeyi sert ama iç kısmı daha tok bir malzemenin elde edildiği görülmüştür.

Darbe testine tabi tutulan numuneler üzerinde gerçekleştirilen SEM incelemeleri neticesinde, işlem sıcaklığının işlem derinliği üzerinde önemli bir etkisi olduğu görülmüştür. Sonuçlara göre 1.100°C’de işlem gören numunenin işlem derinliği 700 µm, 1.200°C’de işlem gören numunenin işlem derinliği 948 µm ve 1.300°C’de işlem gören numunenin işlem derinliği 1.200 µm olarak tespit edilmiştir.

Bu numunelerin yüzey kırılma mekanizmaları incelendiğinde kırılmaların gevrek klivaj (ayrılma) kırılması şeklinde gerçekleştikleri anlaşılmaktadır. Ayrıca taneler arası çatlak ilerlemesi şeklinde kırılmanın meydana gelmiş olduğu da görülmüştür. Klivaj kırılmada, düşük sıcaklıklarda kırılmanın taneler arası çatlak ilerlemesi şeklinde gerçekleşmesi beklenildiğinden, burada beklenen şekilde bir kırılma mekanizmasının gerçekleştiği de tespit edilmiştir. Çatlağın taneler içi değil de taneler arası ilerlemesinin nedeni olarak, tane sınırlarında hem dislokasyon yığılmaları hem de sementit fazının bulunmasının tane sınırlarının gevrekleşmesine yol açarak mikro çatlak oluşumuna neden olduğu bu nedenden ötürü de çatlağın tane sınırları boyunca ilerlemesini gerçekleştirdiği düşünülmektedir.

- ❖ Yorulma deneyi sonuçlarına bakıldığında, 1.300°C’de lazerle yüzeyi sertleştirilmiş numunenin işlenmemiş olan numuneye göre yorulma dayanım sınırının daha yüksek olduğu görülmüştür.

Yorulma deneyi sonucunda lazerle yüzey sertleştirme işleminin özellikle yüksek gerilmelerde malzeme üzerine olumlu etkide bulunduğu görülmüştür. Gerçekleştirilen testler neticesinde elde edilen S-N diyagramından yüksek gerilmelerde, işlenmiş olan numunenin işlenmemiş olan numuneye göre daha yüksek çevrim sayılarında kırılmış olduğu belirlenmiştir. Ayrıca numunelere uygulanan gerilmeler azaldıkça çevrim sayılarındaki farkın azalarak çizgilerin birbirine yaklaştığı görülmüştür.

Çıkarılan Basquin bağıntısından da, lazerle yüzeyi sertleştirilmiş olan numunenin sertleştirilmemiş olan numuneye göre daha yüksek gerilmelerde çalışabileceği görülmüştür.

Hem lazerle yüzeyi sertleştirilmiş hem de sertleştirilememiş numunelerin yorulma hasar yüzeylerinin SEM incelemesi neticesinde, çatlak oluşumunun yüzey orjinli olarak başladığı ve tipik bir yorulma kırılma mekanizmasının gerçekleşmiş olduğu görülmüştür. Yüzeyde çatlak oluşumunun nedeni olarak numunelerin yüzeylerinde bulunabilecek yüzey kusurlarından ve ayrıca yorulma testi süresince malzeme yüzeyinde oluşan kayma bantlarından kaynaklanmış olabileceği düşünülmektedir.

- ❖ Aşınma deneyi sonuçları incelendiğinde en düşük aşınmanın işlenmemiş numunede meydana geldiği, en yüksek aşınmanın ise 1.300°C’de lazerle yüzeyi sertleştirilmiş numunede olduğu tespit edilmiştir. 1.100°C’de ve 1.200°C’de lazerle işlem gören numunelerde 1300°C’de işlem gören numuneye göre daha düşük aşınma, işlenmemiş numuneye göre ise daha yüksek aşınma görülmüştür [57].

Sürtünme katsayısı sonuçlarına bakıldığında yine işlenmemiş numunenin sürtünme katsayısının en düşük olduğu lazerle işlem gören numunelerde sürtünme katsayılarının artmış olduğu ve sürtünme katsayısı sonuçlarının bu numunelerde bir birine çok yakın olduğu görülmüştür [57].

Aşınma deneyine tabi tutulan numuneler üzerinde gerçekleştirilen yüzey pürüzlülüğü testi sonuçları incelendiğinde, en düşük ortalama yüzey pürüzlülük değerine sahip olan numunenin lazerle işlenmemiş olan numunenin, en yüksek ortalama yüzey pürüzlülük değerine ise lazerle 1.300°C’de işlem gören numunenin sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca lazerle yüzeyi işlenmiş ve işlenmemiş numunelerde gerçekleştirilen XRD analizi sonuçlarına bakıldığında, lazer işlemi inert gaz ortamında gerçekleştirilmesine rağmen lazerle işlem görmüş numunelerin yüzeyinde FeO, Fe₂O₃, ve Fe₃O₄ gibi oksit yapılarının oluştuğu tespit edilmiştir. Bunun nedeni ise inert gaz ortamına rağmen çıkılan yüksek işlem sıcaklıkları nedeniyle malzemenin oksitlenmeye karşı yatkınlığı olduğu düşünülmektedir. İşlem görmeyen numune yüzeyinde ise bu oksit yapılarının oluşmadığı görülmüştür [57].

Aşınma deneyine tabi tutulan lazerle işlem görmüş ve görmemiş numunelerin aşınma yüzey SEM görüntülerinden, işlem görmemiş numune yüzeyinin daha homojen ve düzgün bir aşınma yüzeyine sahip olduğu görülmektedir. Lazerle işlem görmüş numunelerin aşınma yüzeylerinde ise pürüzlülüklerin oluştuğu hem yüzey pürüzlülüğü testi hem de SEM incelemeleri neticesinde tespit edilmiştir. Ancak lazerle yüzey sertleştirme işlemi, yüksek sıcaklıkta yapılan tahribatlı yüzey işlemi olduğundan dolayı bu beklenen bir sonuçtur. Zira lazer yüzeyi tararken geçtiği bölgeyi mikroskobik ölçekte engebeli hale getirmektedir. Bu sırada oluşan yüksek sıcaklıklar engebelerin uç bölgelerinde kırılğan oksit tabakalarının oluşmasına neden olmuştur. Bu durum engebeli kısımların aşınma testi boyunca aşındırıcı malzeme tarafından kırılarak yüzeyden daha fazla malzeme kaldırmasından kaynaklanmış olduğu düşünülmektedir. 1.300°C’de lazerle işlem gören numunenin en yüksek aşınma oranına sahip olmasının nedeni olarak bu numunenin yüzeyinin daha fazla ısı etkileşime maruz kalarak yüzeyin daha fazla engebeli ve pürüzlü hale gelmiş olması bu nedenden ötürü de aşındırıcı malzemenin yüzeyden daha fazla malzeme kaldırması olduğu düşünülmektedir.

Bilindiği üzere aşınma deneyi laboratuvar şartlarında gerçekleştirilmiştir. Lazer yüzey sertleştirmesinin hattaki mevcut raylara uygulanması ile normal işletme koşulları altında oluşan bu pürüzlü yüzeyin, ray/tekerlek teması sonucu ortadan kalkarak düzgün bir yüzeyin ortaya çıkacağı göz önünde bulundurulduğunda lazerle yüzeyi

sertleştirilmiş olan malzemenin yüzeyi sertleştirilmemiş olan malzemeye oranla daha düşük bir aşınma miktarına sahip olacağı düşünülmektedir. Bu düşüncemizi destekleyici olarak yapılan diğer çalışmalara bakıldığında [7, 14, 30] bu çalışmalarda çalışılan aşınma şartlarının daha yüksek olmasından ötürü yüzeyde oluşan bu pürüzlü yapının ortadan kalkarak ortaya çıkan düzgün ve sert yüzeyin aşınma davranışına olumlu katkıda bulunmuş olduğu görülmektedir.

- ❖ XRD yöntemi ile gerçekleştirilen kalıntı gerilmesi analizi sonuçları incelendiğinde, yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilen lazerle yüzey sertleştirme işleminin kalıntı gerilme üzerine etkisi olduğu tespit edilmiş olup artan işlem sıcaklıkları ile birlikte kalıntı gerilme miktarının da artmış olduğu tespit edilmiştir. İşlenmemiş numunedeki kalıntı gerilmesi 501 MPa iken, 1.100, 1.200 ve 1.300°C’de lazerle işlem görmüş olan numunelerdeki kalıntı gerilmesi değerleri sırasıyla 1.006,8 MPa, 911,8 ve 1084,1 MPa olarak tespit edilmiştir.

Bilindiği üzere kalıntı gerilme yorulma mekanizmasının etkileyen faktörlerden bir tanesi olup yüksek kalıntı gerilmesine sahip olan bir malzemenin daha düşük yorulma davranışı göstermesi beklenilmektedir. Ama yorulma deneyi sonuçları incelendiğinde 1.300°C’de lazerle yüzeyi sertleştirilmiş olan numunenin yüzeyi sertleştirilmemiş olan numuneye göre iki misli daha fazla kalıntı gerilmesine sahip olmasına rağmen daha iyi bir yorulma davranışı sergilediği görülmüştür. Bunun nedeni olarak lazerle yüzey sertleştirme işleminin kalıntı gerilme miktarını arttırmış olmasına rağmen malzemeye kazandırdığı yüksek mukavemet ve yüksek tokluğun neden olduğu düşünülmektedir.

Lazerle yüzey sertleştirilmiş konvansiyonel “R260” kalitesindeki raylar ile özel ısıtma işlem tesisinde sürekli üretilmiş yeni nesil “R350 HT” kalitesindeki raylar kıyaslandığında; lazerle sertleştirmenin bakım/onarım amaçlı uygulamalar açısından pratik ve daha ekonomik bir çözüm sunmakta olduğu düşünülmektedir. Çünkü R350 HT kalitesindeki rayların mevcut olan hatlara entegrasyonu için ilk önce hatta serili olan rayın sökümü ve yerine bu rayların kaynaklanarak hatta konulması gerekir. R350 HT kalitesindeki rayın demiryollarında bakım/onarım amacıyla kullanılması ile meydana gelebilecek olumsuzluklara baktığımızda; yüksek insan ve ekipman gücü gereksinimi, hattın belirli bir süre kapatılması ile tren trafiğinde yaşanacak gecikmeler, ilave kaynak masrafları gibi durumlar söylenebilir. Geliştirilecek bir portatif cihaza lazer kaynağının entegre edilmesi ile mevcut rayların mantarının istenilen bölgelerde sertleştirilmesi sağlanacak ve R350 HT kalitesindeki rayın hatta konulmasında yaşanacak olan problemleri ortadan kaldırarak hem bakım/onarım masraflarını daha az indireceği hem de daha kısa sürelerde hattın bakım/onarımının yapılmasını mümkün kılacağı düşünülmektedir.

Sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde; 1.100°C, 1.200°C ve 1.300°C’de lazerle sertleştirilmiş numunelerin, sertleştirilmemiş numunelere göre önemli ölçüde daha iyi özellikler sergilediği görülmüştür. 1.300°C’deki lazerle sertleştirilmiş numunenin mekanik özellikleri en yüksek olmakla birlikte 1.100°C ve 1.200°C’deki uygulamalarda da kayda değer gelişme sağlandığı gösterilmiştir. Bu durum, işlem sıcaklığının yüksek güçlü diyot lazerle yüzey sertleştirme işleminde önemli bir parametre olduğunu göstermektedir. Elde edilen sonuçlara bakılarak, lazerle yüzey sertleştirme işleminin demiryolu hattındaki ray çeliklerinin mantar kısmına uygulanması neticesinde özellikle ray yüzeyinin yüksek gerilmelere maruz kaldığı yerlerde (dar yarıçaplı karp bölgeleri, makas bölgeleri vb. gibi) sertleştirme işlemi görmemiş olan numuneye göre daha üstün mekanik özellikler göstereceği söylenebilir. Mekanik özelliklerdeki gelişimin malzemenin dayanım süresinde artış sağlayacağı (kullanım ömrünün artması gibi), bu durumun ise demiryollarının giderlerinde önemli bir yer tutan bakım onarım masraflarında azalmaya neden olacağından demiryollarında büyük bir önem arz edeceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1]. UIC International Union of Railways, 2005, *UIC Leaflet 721R*, Recommendations for the use of rail grades, 2nd Edition.
- [2]. Lichtberger, B., 2005, *Formation, Permanent Way, Maintenance, Economics*, Track Compendium, Eurail press, Hamburg, ISBN: 3-7771-0320-9.
- [3]. Shariff, S.M., Pal, T.K., Padmanabham, G., Joshi, S.V., 2013, Influence of chemical composition and prior microstructure on diode laser hardening of railroad steels, *Surface and Coating Technology*, 228, 14-26.
- [4]. Hussain, A., Hamdani, A.H., Akhter, R., Aslam, M., 2013, Laser Surface Hardening of Groove Edges, *Journal of Physics*, 439, 012006.
- [5]. Li, R., Jin, Y., Li, Z., Qi, K., 2014, A comparative study of high-power diode laser, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23(9), 3085.
- [6]. Pawlowicz, W., 2011, Hardening with High-Power Diode Laser, *Welding International*, 28, 679-682.
- [7]. Wang, W.J., Guo, J., Liu, Q.Y., Zhu, M.H., 2013, Effect of laser quenching on wear and damage of heavy-haul wheel/rail materials, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: *Journal of Engineering Tribology*, 228, 114-122.
- [8]. Claire, A., Oyelola, O., Folkes, J. and Farayibi, P., 2012, Laser cladding for railway repair, and preventative maintenance, *Journal of Laser Applications*, 12.
- [9]. DiMelfi, R.J., Sanders, P.G., Hunter, B., Eastman, J.A., Sawley, K.J., Leong, K.H. and Kramer, J.M., 1998., Mitigation of subsurface crack propagation in railroad rails by laser surface modification, *Surface and Coatings Technology*, 106, 38-43.
- [10]. Kennedy E, Byrne G, Collins D.N., 2004, A review of the use of high power diode lasers in surface Hardening, *J. Mater. Process*, 1855, 155-6.
- [11]. Pashby I.R, S. Barnes, Bryden B.G., 2003, Surface hardening of steel using a high power diode laser diode laser, *J. Mater. Process Technology*, 139, 585-588.
- [12]. Panster, H., Kujanppaa, V., 2006, *Surface coating Technology*, 200, 2627.
- [13]. Syed, B., Halder, A., Shariff, S.M., Padmanabham, G. and Manna, I., 2010, *Proc. International Conference on "Automotive Materials & Manufacturing*, Pune, India 6–8 October, 105.
- [14]. Sridhar, K., Katkar, V.A., Singh, P.K., and Haake, J.M., 2007, Dry sliding friction wear behaviour of high power diode laser hardened steel and cast iron, *Surface Engineering*, 23, 129-141.

- [15]. Güler, H., 2012/2013, *Demiryolu mühendisliği ders notları*, Demiryolu I, Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Ulaştırma Anabilim Dalı, 1.Hafta Ders Notları.
- [16]. Güler, H., 2014/2015, *Demiryolu mühendisliği ders notları*, Demiryolu I, Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Ulaştırma Anabilim Dalı, 4 ve 5. Hafta Ders Notları.
- [17]. MEGEP, 2013, *Mesleki Eğitim ve Öğretim Sistemini Güçlendirme Projesi*, Raylı sistemler Teknolojisi, Raylar ve Bağlantılar, Ankara.
- [18]. Özden, M.A., 2011, *Demiryolu Raylarının Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [19]. Kerr, M., (2012), *Rail Defects Handbook*, Australian Rail Track Corporation, Avustralya.
- [20]. Işık, Y., 2013, *Perlitik ray çeliklerinde yüzey pürüzlülüğünün abrasiv aşınmaya etkisi*, Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- [21]. ASM International, 2005, High-carbon steels: fully pearlitic microstructures and Applications, steels: processing, *Str. and Perf.*, 281-295.
- [22]. Cvetkovski K, Ahlström J and Karlsson B, 2010, Thermal softening of fine pearlitic steel and its effect on the fatigue behaviour, *Proc. Eng.*, 2: 541-545.
- [23]. <http://makine2.kocaeli.edu.tr/malzeme/Demir.pdf> – *Fe-Fe₃C Denge diyagramındaki çeliklere ait soğuma esnasında oluşan içyapılar hakkında* [Ziyaret tarihi: 24 Mayıs 2016]
- [24]. Askeland D. R., 1998, *Malzeme bilimi ve mühendislik malzemeleri* Cilt 1, Nobel Yayınları, Ankara, 364.
- [25]. Başkonuş, M., Erdoğan, T., 2012, Yüksek hızlı tren olgusu, mantarı sertleştirilmiş ve beynitli ray çelikleri, *International Iron&Steel Symposium*, 234-240.
- [26]. *Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları İstatistik Yıllığı*, 2012-2016.
- [27]. Ruifeng Li, Yajuan Jin, Zhuguo Li, Kai Qi, 2014, A comparative study of high-power diode laser and CO₂ laser surface hardening of AlSi 1045 steel, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23, 3085-3091.
- [28]. Li, Q., Zhang, D., Lei, T., Chen, C., Chen, W., 2001, Comparison of laser clad and furnace-melted Ni-based alloy microstructures, *Surface Coating Technology*, 137, 122– 135.
- [29]. Shariff, S.M., Pal, T.K., Padmanabham, G. and Joshi, S.V., 2010, Sliding wear behaviour of laser Surface modified pearlitic rail steel, *Surface Engineering*, 26:3, 199-208.

- [30]. Pashby, I.R., Barnes, S., Bryden and B.G., 2003, Surface Hardening of steel using a high power diode laser, *Journal Materials Processing Technology*, 139, 585-588.
- [31]. Şahin, F., 2017, *Kalıp ve makine parçalarının sertleştirilmesinde yüksek-güçlü diyet lazer*, Kalıp Dünyası, www.kalipdunyasi.com.tr, [Ziyaret tarihi: 24 Kasım 2017].
- [32]. <http://uniquetech.com.tr/lazer-sertlestirme/>, *lazerle sertleştirme yöntemi için*, Ulaşma tarihi: 06 Ocak 2018.
- [33]. Wojciech P., 2014, Hardening with high-power diode laser, *Welding International*, 28, 679-682.
- [34]. <https://www.htcourses.com/laser-heat-treatment-laser-hardening/>, *lazerle ısıtım işlem ve sertleştirme için*, [Ziyaret tarihi: 06 Ocak 2018].
- [35]. EN 13674-1, 2003, European Standard, *Railway applications - Track - Rail - Part 1: Vignole railway rails 46 kg/m and above*, ICS 45.080.
- [36]. TS EN ISO 6892-1, 2016, *Metalik Malzemeler-Çekme Deneyi-bölüm1: Oda sıcaklığında deney metodu*.
- [37]. ASTM E23-12c, 2012, *Standard test methods for notched bar impact testing of metallic materials*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [38]. ISO 1143, 2010, *Metallic materials-Rotating bar bending fatigue testing*, International Organization for Standardization.
- [39]. ISO 4287, 1997, International Organization for Standardization, *Geometrical product specification (GPS) - Surface texture: Profile method – Terms, definitions and surface texture parameters*.
- [40]. Noyan, I. C. and Kohen, J. B., 1987, *Residual Stress: Measurement by Diffraction and Interpretation*, Springer-Verlag New York Inc., Printed in Germany.
- [41]. Demirler, U., 2003, *Fiziksel Buhar Biriktirme TiN CrN ve ZrN Kaplamalarda Proses Parametreleri ve Taban Malzemenin Kalıntı Gerilme Üzerine Etkisi*, Doktora Tezi, İTÜ. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [42]. Van Acker, K., 1996, *Internal Stress State in Cold Worked Metals and in Metal Matrix Composites*, PhD Thesis, Katholieke Universiteit Leuven.
- [43]. Kandil, F. A., Lord, J. D., Fry, A. T., Grant, P. V., 2001, A review of residual stress measurement methods-A guide to technique selection, NPL Report MATC(A)04, *Project CPM4.5 Measurement of Residual Stress in Components*, NPL Materials Centre, Middlesex, UK.
- [44]. Lord, J., 2000, Hole drilling techniques, *BCA Structural Materials Workshop*, NPL Materials Centre, Middlesex, UK.

- [45]. Nolan, M., Perova, T., Moore, R.A., Moore, C. J., Berwick, K. and Gamble, H.S., 2000, MicroRaman study of stress distribution generated in silicon during proximity rapid thermal diffusion, *Materials Science and Engineering*, B73, 168 - 172.
- [46]. Suresh, S. and Giannakopoulos, A. E., 1998, A new method for estimating residual stresses by instrumented sharp indentation, *Acta Materiala*, 46, 16, 5755 - 5767.
- [47]. Gauthier, J., Krause, T. W. and Atherton, D. L., 1998, Measurement of residual stress in steel using the magnetic barkhausen noise technique, *NDT&E International*, 31, 1, 23 - 31.
- [48]. Schoenig, F. C., 1995, Eddy current measurement of residual stress induced by shot peening in Titanium Ti-6Al-4V, *Materials Evaluation*, 22-26.
- [49]. Hognestad, H., Honne, A., 1998, Determination of stress in ferromagnetic steel by potential drop measurements, *Materials Science and Technology*, 14, 1109 – 1114.
- [50]. Eroğlu, Ş., 2018, <http://aves.istanbul.edu.tr/seref/dokumanlar>, Malzeme Karakterizasyonu bölüm 5, [Ziyaret Tarihi: 15 Ocak 2018].
- [51]. Yayla, P., 2007, *Kırılma Mekaniği*, Çağlayan Kitapevi, ISBN: 978-975436-070-7, İstanbul.
- [52]. Onat, Ö., 2012, *Mantarı Sertleştirilmiş R260 Kalite Rayların Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- [53]. Çimenoglu, H., Kayalı, E.S., 1991, *Malzemelerin Yapısı ve Mekanik Davranışları*, İ.T.Ü. Kimya-Metalurji Fakültesi Ofset Atölyesi, İstanbul.
- [54]. Dowling N. E., 2006, *Mechanical Behaviour of Materials*, 3rd edition, Prentice-Hall, USA.
- [55]. <http://ninova.itu.edu.tr/tr/dersler/kimya-metalurji/1600/mal-201/ekkaynaklar?g160201>, *yorulma kopma mekanizması için*, [Ziyaret tarihi: 29 Kasım 2017].
- [56]. Erzi, E., Dispınar, D., Yılmaz, S., Yılmaz, 2017, Friction and wear properties of plasma sprayed YSZ/Ni-Cr-Al coated 6063-T6 Aluminum alloy, *Achieves of Foundry Engineering*, 17, 168-174.
- [57]. Yazıcı, O., Yılmaz, S., 2018, Investigation of effect of various processing temperatures on abrasive wear behaviour of high power diode laser treated R260 grade rail steels, *Tribology International*, 119, 222-229.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Ozan YAZICI
Doğum Yeri	Şişli/İstanbul
Doğum Tarihi	06.09.1983
Uyruğu	☒ T.C. ☐ Diğer:
Telefon	0506 301 37 81
E-Posta Adresi	2602080019@ogr.iu.edu.tr
Web Adresi	



Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Fakülte	Mühendislik Fakültesi
Bölümü	Metalurji ve Malzeme Mühendisliği
Mezuniyet Yılı	20.06.2005

Yüksek Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Enstitü Adı	Fen Bilimleri Enstitüsü
Anabilim Dalı	Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı
Programı	Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Programı
Mezuniyet Tarihi	23.09.2008

Doktora	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Enstitü Adı	Fen Bilimleri Enstitüsü
Anabilim Dalı	Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı
Programı	Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Programı
Mezuniyet Tarihi	04.04.2018

Makale ve Bildiriler	
Yazici, O., Yilmaz, S., 2018, Investigation of effect of various processing temperatures on abrasive wear behaviour of high power diode laser treated R260 grade rail steels, <i>Tribology International</i> , 119, 222-228.	
Yazici, O., Yilmaz, S., 2017, Determination of ideal high power diode laser parameters to improve rail steels, MTM 2016; <i>International Materials Technologies and Metallurgy Conference 2017</i> , Proceeding Book, 233-236.	
Yazici, O., Yilmaz, S., 2016, Surface hardening of R260 grade rail steels with high power diode laser, IMMC 2016, <i>18th International Metallurgy & Materials Congress</i> , Proceeding Book, 982-985.	

- Yazici, O., Yilmaz, S., 2010, Production and characterisation of ldh meixnerite powders, *Advances in applied Ceramics*, 109, 341-345.
- Yilmaz, S., Yazici, O., 2009, Sol-Jel yöntemiyle Alümina/MgAl₂O₄-Spinel tozu üretimi ve karakterizasyonu, *Seramik Türkiye*, 27, 126-130.
- Yilmaz, S., Yazici, O., Birtane, Y.F., 2009, Synthesis and characterisation of boehmitic sol coated Y-Psz micro powders, *11th Int. Conf. of European Ceramic Society*, Euroceramics XI, Polonya.
- Yilmaz, S., Yazici, O., 2009, MgO containing alumina low cement castables in relation to sol-gel derived boehmitic sol as bonding agent, *11th Int. Conf. of European Ceramic Society*, Euroceramics XI, Polonya.
- Yilmaz, S., Yazici, O., 2008, CO₂ emisyonunu düşüren meixneritin sentezlenmesi ve karakterizasyonu, *14. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi*, Türkiye.
- Yilmaz, S., Yazici, O., Kutmen-Kalpakli, Y., Birtane, Y.F., 2008, Investigation of properties of graphite added alumina low-cement castables, *2nd Int. Conference on Ceramics*, ICC2, İtalya.
- Yilmaz, S., Yazici, O., Birtane, Y.F., Karal-Yilmaz, O., 2005, Y-Psz disperse edilmiş pmma-pea kopolimer kompozit filmlerin fiziksel özelliklerinin incelenmesi, *12. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi*, Türkiye.