



**GGG50 KÜRE GRAFİTLİ DÖKME DEMİRİN
Cr-Mo TAKVİYESİ İLE AŞINMA DİRENCİNİN
İYİLEŞTİRİLMESİ**

İsmail MANDACI

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi
Danışman: Prof. Dr. Serdar Osman YILMAZ**

2022

T.C.
TEKİRDAĞ NAMIK KEMAL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



GGG50 KÜRE GRAFİTLİ DÖKME DEMİRİN Cr-Mo TAKVİYESİ İLE AŞINMA
DİRENCİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ

İSMAİL MANDACI

ORCID: 0000-0001-7574-5427

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Danışman: Prof. Dr. Serdar Osman YILMAZ

OCAK-2022

Her hakkı saklıdır.

ÖZET

GGG 50 KÜRE GRAFİTLİ DÖKME DEMİRİN Cr-Mo TAKVİYESİ İLE AŞINMA DİRENCİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ

İsmail MANDACI

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Serdar Osman YILMAZ

Proje kapsamında Molibden-Krom katkılı GGG50 malzemesi üretilip, bu malzeme belirli aşamalardan geçtiğinde, gerekli analiz, görüntüleme ve test sonuçları elde edildiğinde, küre grafitli dökme demirin değişken şartlarda kazandığı farklı mekanik özellikler doğrultusunda bazı takım çeliklerinin yerine yüksek aşınma direnci, yüksek darbe direnci katarak ağır işletme şartlarına haiz birçok alanda kullanılabilecek yeni bir malzeme sunulması anlatılmıştır.

Anahtar Kelimeler: GGG 50, Dökme Demir, Molibden-Krom, Mekanik Özellikler, Aşınma Direnci

ABSTRACT

ABRASION RESISTANCE IMPROVEMENT OF GGG50 SPHERICAL CAST IRON BY CR-MO ADDITION

İsmail MANDACI

Department of Mechanical Engineering

MSc. Thesis

Supervisor: Prof. Serdar Osman YILMAZ

Within the scope of the project, production of molybdenum-chromium added GGG50 material, presenting it as a new material when the necessary analysis, imaging and test results are obtained after passing through certain stages, that can be used in many areas with heavy operating conditions instead of some tool steels, in line with the different mechanical properties that spheroidal graphite cast iron acquires under variable conditions, are explained.

Keywords: GGG 50, Molybdenum-Chrome, Mechanical Properties, High Wear Resistance

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
SİMGELER DİZİNİ	xiii
KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiv
TEŞEKKÜR.....	xv
1. GİRİŞ	16
1.1. Literatür Özeti.....	16
1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	18
2. DÖKME DEMİRLER	18
2.1. Dökme Demirin Kimyasal Bileşimi	19
2.2. Beyaz Dökme Demirler	20
2.3. Temper Dökme Demirler.....	20
2.4. Gri Dökme Demirler.....	21
2.5. Yüksek Alaşımli Dökme Demirler	21
2.6. Küre Grafitli Dökme Demirler	21
2.6.1. Küresel Grafitli Dökme Demirin Kimyasal Bileşimi	23
2.6.2. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Çeşitleri	23
2.6.3. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Kullanım Alanları.....	24
3. KGDD’LERE UYGULANAN YÜZEY SERTLEŞTİRME İŞLEMLERİ	24
3.1. Alev, İndüksiyon veya Lazerle Yüzey Sertleştirme	24
3.2. Nitrürleme.....	25
3.3. Borlama.....	25
3.4. Östemperleme Isıl İşlemi.....	25
3.4.1. Östemperleme Isıl İşlem Süreci	25
3.4.2. Östemperleme Sürecini Etkileyen Faktörler	30
4. ALAŞIM ELEMENTLERİNİN ÖZELLİKLERE ETKİSİ	30
4.1. Karbon	30
4.2. Silisyum	30

4.3. Krom.....	31
4.4. Molibden.....	31
4.5. Nikel	31
4.6. Manganez.....	31
4.7. Bakır	32
4.8. Fosfor.....	32
4.9. Kükürt.....	32
5. TRİBOLOJİ İÇİN TEMEL ESASLAR.....	32
5.1. Sürtünme.....	34
5.1.1. Sürtünme Kanunları	34
5.1.2. Sürtünme Katsayısı	35
5.1.3. Sürtünme Çeşitleri	37
5.1.4. Kuru sürtünme	38
5.2. Aşınma.....	39
5.2.1. Aşınma Türleri	40
5.2.2. Aşınma Test Yöntemleri	42
5.2.3. Aşınma Ölçüm Metotları	43
5.2.3.1. Ağırlık Kaybı Metodu.....	43
5.2.3.2. Kalınlık Farkı Metodu.....	44
5.2.3.3. İz Değişimi Metodu	44
5.2.3.4. Radyoizotop Metodu.....	44
6. MATERYAL VE METOT	45
6.1. Çalışmada Kullanılan Malzemeler	45
6.2. Numunelerin Hazırlanması.....	46
6.2.1. Tel Erezyon Tezgâhı	46
6.2.2. Malzeme Yüzey Pürüzlülüğü Temizleme.....	46
6.2.3. Östemperleme İşlemi ve Numune Numaralandırma	46
6.2.4. Zımparalama, Yüzey Parlatma ve Dağlama	48
6.2.5. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri	49
6.3. Metalografi ve Mikro Yapı Kontrolü	49
6.3.1. Optik Mikroskop ile Görüntü Alma.....	49
6.3.2. Deney Öncesi Taramalı Elektron Mikroskobu ile Görüntü Alma (SEM)	67
6.4. Mekanik Deneyler	85
6.4.1. Sertlik Ölçümü	85

6.4.2. Aşınma Deneyinin Yapılışı ve Test Tezgâhı Bilgileri.....	86
6.5. Aşınma Deneyi	90
6.5.1. Sürtünme Kuvveti Deneyi	90
6.5.2. Aşınma Direnci Deneyi	100
6.5.3. Deney Sonrası Taramalı Elektron Mikroskobu ile Görüntü Alma (SEM) ...	109
7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	127
KAYNAKLAR.....	128



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. KGDD' nin mekanik özelliklerinin diğer döküm metaller ile karşılaştırılması ...	22
Çizelge 2.2. KGDD' nin kimyasal bileşimi.....	23
Çizelge 2.3. KGDD' lerin çeşitleri ve mikro yapısı	24
Çizelge 6.1. Numunelerin ısıtma işlemi, soğutma ve temperlenme durumları	47
Çizelge 6.2. Mikro yapı analizi	67
Çizelge 6.3. Numunelerin farklı ısıtma işlem durumlarına göre sertlik değerleri.....	86
Çizelge 6.4. Numunelerin farklı ısıtma işlem durumlarına göre sürtünme katsayısı	99
Çizelge 6.5. 20 N ve 30 N yük altında 4 farklı kayma mesafesine göre aşınma miktarı	109

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Demir-Karbon denge diyagramı.....	19
Şekil 2.2. Demir alaşımlarında yaklaşık karbon ve silisyum içerik aralıkları.....	20
Şekil 2.3. Küresel dökme demir mikro yapısı-dağlamalar %2'lik nital ile yapılmış ve görüntüler X100 büyütme ile alınmıştır. (a) döküm ferritik, (b) döküm perlitik, (c) 700 °C / 3 saat tavlınmış ferritik yapı, (d) Perlitik demirin yağda soğutulmuş-temperlenmiş	22
Şekil 3.1. Küresel grafitli dökme demirin izotermal dönüşüm (IT) diyagramı.....	27
Şekil 3.2. (a) Alt beynit (250-330°C) ve (b) Üst beynit (330-400°C) oluşum mekanizması ...	28
Şekil 5.1. Tribosistemin yapısı	33
Şekil 5.2. (a) Kuru sürtünme modeli ve sürtünme katsayısı, (b) Kayma hızına bağlı kinetik sürtünme katsayısı (c) Temas süresine bağlı statik sürtünme katsayısı.....	35
Şekil 5.3. Kay-dur (stick-slip) modeli	36
Şekil 5.4. Sürtünme çeşitleri; (a) Kuru sürtünme, (b) Sınır sürtünme ve (c) Sıvı sürtünme ...	37
Şekil 5.5. Sürtünme çeşitleri.....	37
Şekil 5.6. Bir kayma çifti.....	38
Şekil 5.7. Aşınma zaman bağıntısı	40
Şekil 5.8. En çok görülen aşınma mekanizmaları	40
Şekil 5.9. En çok görülen temas şekilleri	43
Şekil 6.1. Çalışmada kullanılan malzemeler	45
Şekil 6.2. Spektrometre analiz cihazı	45
Şekil 6.3. Çalışmada kullanılan malzemelerin spektrometre cihazı ile kimyasal analizi.....	46
Şekil 6.4. Bakalit kaplı numune.....	48
Şekil 6.5. Zımparalama işleminde kullanılan 120'lik ve 400'lük zımparalama cihazı	48
Şekil 6.6. Zımparalama işleminde kullanılan 600'lük ve 1000'lik zımparalama cihazı	48
Şekil 6.7. Numunelerin parlatma işleminde kullanılan parlatma cihazı.....	49
Şekil 6.8. Mitutoyo sj 400 yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı	49
Şekil 6.9. Optik mikroskop ile numunelere uygulanan iç yapı kontrolü.....	49

Şekil 6.23. S14 optik mikroskoptan alınan (a) dağlama işlemi öncesi X100 büyütme li mikro yapı görüntüsü, (b) dağlama sonrası X200 büyütme li mikro yapı görüntüsü ve dağlama sonrası X500 büyütme li mikro yapı görüntüsü.....	63
Şekil 6.24. S15 optik mikroskoptan alınan (a) dağlama işlemi öncesi X100 büyütme li mikro yapı görüntüsü, (b) dağlama sonrası X200 büyütme li mikro yapı görüntüsü ve dağlama sonrası X500 büyütme li mikro yapı görüntüsü.....	64
Şekil 6.25. S16 optik mikroskoptan alınan (a) dağlama işlemi öncesi X100 büyütme li mikro yapı görüntüsü, (b) dağlama sonrası X200 büyütme li mikro yapı görüntüsü ve dağlama sonrası X500 büyütme li mikro yapı görüntüsü.....	65
Şekil 6.26. S17 optik mikroskoptan alınan (a) dağlama işlemi öncesi X100 büyütme li mikro yapı görüntüsü, (b) dağlama sonrası X200 büyütme li mikro yapı görüntüsü ve dağlama sonrası X500 büyütme li mikro yapı görüntüsü.....	66
Şekil 6.27. S1 taramalı elektron mikroskobu ile alınan X200 (a), X500 (b), X1000 (c), X2500 (d), X5000 (e) ve X20000 (f) büyütülmüş mikro yapı görüntüleri	68
Şekil 6.28. S2 taramalı elektron mikroskobu ile alınan X200 (a), X500 (b), X1000 (c), X2500 (d), X5000 (e) ve X20000 (f) büyütülmüş mikro yapı görüntüleri	69
Şekil 6.29. S3 taramalı elektron mikroskobu ile alınan X200 (a), X500 (b), X1000 (c), X2500 (d), X5000 (e) ve X20000 (f) büyütülmüş mikro yapı görüntüleri	70
Şekil 6.30. S4 taramalı elektron mikroskobu ile alınan X200 (a), X500 (b), X1000 (c), X2500 (d), X5000 (e) ve X20000 (f) büyütülmüş mikro yapı görüntüleri	71
Şekil 6.31. S5 taramalı elektron mikroskobu ile alınan X200 (a), X500 (b), X1000 (c), X2500 (d), X5000 (e) ve X20000 (f) büyütülmüş mikro yapı görüntüleri	72
Şekil 6.32. S6 taramalı elektron mikroskobu ile alınan X200 (a), X500 (b), X1000 (c), X2500 (d), X5000 (e) ve X20000 (f) büyütülmüş mikro yapı görüntüleri	73
Şekil 6.33. S7 taramalı elektron mikroskobu ile alınan X200 (a), X500 (b), X1000 (c), X2500 (d), X5000 (e) ve X20000 (f) büyütülmüş mikro yapı görüntüleri	74
Şekil 6.34. S8 taramalı elektron mikroskobu ile alınan X200 (a), X500 (b), X1000 (c), X2500 (d), X5000 (e) ve X20000 (f) büyütülmüş mikro yapı görüntüleri	75
Şekil 6.35. S9 taramalı elektron mikroskobu ile alınan X200 (a), X500 (b), X1000 (c), X2500 (d), X5000 (e) ve X20000 (f) büyütülmüş mikro yapı görüntüleri	76
Şekil 6.36. S10 taramalı elektron mikroskobu ile alınan X200 (a), X500 (b), X1000 (c), X2500 (d), X5000 (e) ve X20000 (f) büyütülmüş mikro yapı görüntüleri	77
Şekil 6.37. S11 taramalı elektron mikroskobu ile alınan X200 (a), X500 (b), X1000 (c), X2500 (d), X5000 (e) ve X20000 (f) büyütülmüş mikro yapı görüntüleri	78
Şekil 6.38. S12 taramalı elektron mikroskobu ile alınan X200 (a), X500 (b), X1000 (c), X2500 (d), X5000 (e) ve X20000 (f) büyütülmüş mikro yapı görüntüleri	79

Şekil 6.39. S13 taramalı elektron mikroskobu ile alınan X200 (a), X500 (b), X1000 (c), X2500 (d), X5000 (e) ve X20000 (f) büyütülmüş mikro yapı görüntüleri	80
Şekil 6.40. S14 taramalı elektron mikroskobu ile alınan X200 (a), X500 (b), X1000 (c), X2500 (d), X5000 (e) ve X20000 (f) büyütülmüş mikro yapı görüntüleri	81
Şekil 6.41. S15 taramalı elektron mikroskobu ile alınan X200 (a), X500 (b), X1000 (c), X2500 (d), X5000 (e) ve X20000 (f) büyütülmüş mikro yapı görüntüleri	82
Şekil 6.42. S16 taramalı elektron mikroskobu ile alınan X200 (a), X500 (b), X1000 (c), X2500 (d), X5000 (e) ve X20000 (f) büyütülmüş mikro yapı görüntüleri	83
Şekil 6.43. S17 taramalı elektron mikroskobu ile alınan X200 (a), X500 (b), X1000 (c), X2500 (d), X5000 (e) ve X20000 (f) büyütülmüş mikro yapı görüntüleri	84
Şekil 6.44. Numunelerin sertlik ölçümü için kullanılan sertlik ölçüm cihazı	85
Şekil 6.45. Deneysel olarak sertlik ölçümü alınan numune	85
Şekil 6.46. Aşınma test cihazı şematik gösterimi.....	87
Şekil 6.47. Aşınma test cihazı	87
Şekil 6.48. Aşındırıcı disk yüzey pürüzlülüğü ölçümü	89
Şekil 6.49. 15 N kuvvetin altında S1 numunesinin F_R değerinin mesafeye bağlı grafiği	90
Şekil 6.50. 15 N kuvvetin altında S2 numunesinin F_R değerinin mesafeye bağlı grafiği	91
Şekil 6.51. 15 N kuvvetin altında S3 numunesinin F_R değerinin mesafeye bağlı grafiği	91
Şekil 6.52. 15 N kuvvetin altında S4 numunesinin F_R değerinin mesafeye bağlı grafiği	92
Şekil 6.53. 15 N kuvvet altında S5 numunesinin F_R değerinin mesafeye bağlı grafiği.....	92
Şekil 6.54. 15 N kuvvetin altında S6 numunesinin F_R değerinin mesafeye bağlı grafiği	93
Şekil 6.55. 15 N kuvvetin altında S7 numunesinin F_R değerinin mesafeye bağlı grafiği	93
Şekil 6.56. 15 N kuvvetin altında S8 numunesinin F_R değerinin mesafeye bağlı grafiği	94
Şekil 6.57. 15 N kuvvetin altında S9 numunesinin F_R değerinin mesafeye bağlı grafiği	94
Şekil 6.58. 15 N kuvvetin altında S10 numunesinin F_R değerinin mesafeye bağlı grafiği	95
Şekil 6.59. 15 N kuvvetin altında S11 numunesinin F_R değerinin mesafeye bağlı grafiği	95
Şekil 6.60. 15 N kuvvetin altında S12 numunesinin F_R değerinin mesafeye bağlı grafiği	96
Şekil 6.61. 15 N kuvvetin altında S13 numunesinin F_R değerinin mesafeye bağlı grafiği	96
Şekil 6.62. 15 n kuvvetin altında S14 numunesinin F_R değerinin mesafeye bağlı grafiği	97

Şekil 6.63. 15 N kuvvetin altında S15 numunesinin F_R değerinin mesafeye bağlı grafiği	97
Şekil 6.64. 15 N kuvvetin altında S16 numunesinin F_R değerinin mesafeye bağlı grafiği	98
Şekil 6.65. 15 N kuvvetin altında S17 numunesinin F_R değerinin mesafeye bağlı grafiği	98
Şekil 6.66. S1 numunesinin farklı yüklerde kayma mesafesine bağlı aşınma grafiği	100
Şekil 6.67. S2 numunesinin farklı yüklerde kayma mesafesine bağlı aşınma grafiği	101
Şekil 6.68. S3 numunesinin farklı yüklerde kayma mesafesine bağlı aşınma grafiği	101
Şekil 6.69. S4 numunesinin farklı yüklerde kayma mesafesine bağlı aşınma grafiği	102
Şekil 6.70. S5 numunesinin farklı yüklerde kayma mesafesine bağlı aşınma grafiği	102
Şekil 6.71. S6 numunesinin farklı yüklerde kayma mesafesine bağlı aşınma grafiği	103
Şekil 6.72. S7 numunesinin farklı yüklerde kayma mesafesine bağlı aşınma grafiği	103
Şekil 6.73. S8 numunesinin farklı yüklerde kayma mesafesine bağlı aşınma grafiği	104
Şekil 6.74. S9 numunesinin farklı yüklerde kayma mesafesine bağlı aşınma grafiği	104
Şekil 6.75. S10 numunesinin farklı yüklerde kayma mesafesine bağlı aşınma grafiği	105
Şekil 6.76. S11 numunesinin farklı yüklerde kayma mesafesine bağlı aşınma grafiği	105
Şekil 6.77. S12 numunesinin farklı yüklerde kayma mesafesine bağlı aşınma grafiği	106
Şekil 6.78. S13 numunesinin farklı yüklerde kayma mesafesine bağlı aşınma grafiği	106
Şekil 6.79. S14 numunesinin farklı yüklerde kayma mesafesine bağlı aşınma grafiği	107
Şekil 6.80. S15 numunesinin farklı yüklerde kayma mesafesine bağlı aşınma grafiği	107
Şekil 6.81. S16 numunesinin farklı yüklerde kayma mesafesine bağlı aşınma grafiği	108
Şekil 6.82. S17 numunesinin farklı yüklerde kayma mesafesine bağlı aşınma grafiği	108
Şekil 6.83. S1 taramalı elektron mikroskobu ile alınan X200 (a), X500 (b), X1000 (c), X2500 (d), X5000 (e) ve X20000 (f) büyütülmüş mikro yapı görüntüleri	110
Şekil 6.84. S2 taramalı elektron mikroskobu ile alınan X200 (a), X500 (b), X1000 (c), X2500 (d), X5000 (e) ve X20000 (f) büyütülmüş mikro yapı görüntüleri	111
Şekil 6.85. S3 taramalı elektron mikroskobu ile alınan X200 (a), X500 (b), X1000 (c), X2500 (d), X5000 (e) ve X20000 (f) büyütülmüş mikro yapı görüntüleri	112
Şekil 6.86. S4 taramalı elektron mikroskobu ile alınan X200 (a), X500 (b), X1000 (c), X2500 (d), X5000 (e) ve X20000 (f) büyütülmüş mikro yapı görüntüleri	113

Şekil 6.87. S5 taramalı elektron mikroskobu ile alınan X200 (a), X500 (b), X1000 (c), X2500 (d), X5000 (e) ve X20000 (f) büyütülmüş mikro yapı görüntüleri	114
Şekil 6.88. S6 taramalı elektron mikroskobu ile alınan X200 (a), X500 (b), X1000 (c), X2500 (d), X5000 (e) ve X20000 (f) büyütülmüş mikro yapı görüntüleri	115
Şekil 6.89. S7 taramalı elektron mikroskobu ile alınan X200 (a), X500 (b), X1000 (c), X2500 (d), X5000 (e) ve X20000 (f) büyütülmüş mikro yapı görüntüleri	116
Şekil 6.90. S8 taramalı elektron mikroskobu ile alınan X200 (a), X500 (b), X1000 (c), X2500 (d), X5000 (e) ve X20000 (f) büyütülmüş mikro yapı görüntüleri	117
Şekil 6.91. S9 taramalı elektron mikroskobu ile alınan X200 (a), X500 (b), X1000 (c), X2500 (d), X5000 (e) ve X20000 (f) büyütülmüş mikro yapı görüntüleri	118
Şekil 6.92. S10 taramalı elektron mikroskobu ile alınan X200 (a), X500 (b), X1000 (c), X2500 (d), X5000 (e) ve X20000 (f) büyütülmüş mikro yapı görüntüleri	119
Şekil 6.93. S11 taramalı elektron mikroskobu ile alınan X200 (a), X500 (b), X1000 (c), X2500 (d), X5000 (e) ve X20000 (f) büyütülmüş mikro yapı görüntüleri	120
Şekil 6.94. S12 taramalı elektron mikroskobu ile alınan X200 (a), X500 (b), X1000 (c), X2500 (d), X5000 (e) ve X20000 (f) büyütülmüş mikro yapı görüntüleri	121
Şekil 6.95. S13 taramalı elektron mikroskobu ile alınan X200 (a), X500 (b), X1000 (c), X2500 (d), X5000 (e) ve X20000 (f) büyütülmüş mikro yapı görüntüleri	122
Şekil 6.96. S14 taramalı elektron mikroskobu ile alınan X200 (a), X500 (b), X1000 (c), X2500 (d), X5000 (e) ve X20000 (f) büyütülmüş mikro yapı görüntüleri	123
Şekil 6.97. S15 taramalı elektron mikroskobu ile alınan X200 (a), X500 (b), X1000 (c), X2500 (d), X5000 (e) ve X20000 (f) büyütülmüş mikro yapı görüntüleri	124
Şekil 6.98. S16 taramalı elektron mikroskobu ile alınan X200 (a), X500 (b), X1000 (c), X2500 (d), X5000 (e) ve X20000 (f) büyütülmüş mikro yapı görüntüleri	125
Şekil 6.99. S17 taramalı elektron mikroskobu ile alınan X200 (a), X500 (b), X1000 (c), X2500 (d), X5000 (e) ve X20000 (f) büyütülmüş mikro yapı görüntüleri	126

SİMGELER DİZİNİ

Cr	Krom
Mo	Molibden
FeSi	Ferro Alaşım
C	Karbon
Mg	Magnezyum
Fe	Demir
Si	Silisyum
P	Fosfor
S	Kükürt
Mn	Mangan
N	Newton
Fe ₃ C	Sementit
Pb	Kurşun
Bi	Bizmut
Sb	Antimon
As	Arsenik
V	Vanadyum
Cu	Bakır
°C	Santigrat
γ	Östenit
Ni	Nikel
FeB	Demir Borür
Fe ₂ B	Demir İki Borür
mm	Milimetre
μm	Mikrometre
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
M _s	Martenzit başlangıç sıcaklığı

KISALTMALAR DİZİNİ

GGG 50	Küresel Grafitli Dökme Demir Sınıfı
KGDD	Küresel Grafitli Dökme Demir
ÖKGDD	Küresel Grafitli Dökme Demir
GGG 40	Küresel Grafitli Dökme Demir Sınıfı
HRC	Rockwell Sertlik birimi
GDD	Gri Dökme Demir
BDD	Beyaz Dökme Demir
TDD	Temper Dökme Demir
MPa	Mega Pascal
HV	Vickers Sertlik Ölçü Birimi
IT	İzotermal Dönüşüm
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
ASLE	American Society of Lubrication Engineers

TEŞEKKÜR

Cr-Mo takviyeli GGG 50 malzemesinin farklı ısıl işlem varyasyonları aşınma direncine etkisi başlı başına bir süreç ve işleyiş gerektirmektedir. Belirtilen bu süreçler ile ilgili nasıl bir yol izlenmesi gerektiği ve numuneler hangi parametreler altında incelendiği ‘materyal ve yöntem’ bölümünde detaylı olarak anlatılmıştır.

Öncelikle hayatımın her döneminde beni destekleyen ailem olmak üzere, bilgi ve birikimleri ile bana destek veren değerli çalışma arkadaşlarıma, numune hazırlamama imkân sağlayan HEMA ENDÜSTRİ A. Ş. ‘ye, bu çalışma sırasında desteğini esirgemeyen ve yönlendiren tez danışmanım sayın Prof. Dr. Serdar Osman YILMAZ’ a, test sırasında bilgi birikimi ile yönlendiren Sayın Doç. Dr. İbrahim Savaş DALMIŞ’ a, test imkanlarını kullanmama sağlayan ÇORLU MÜHENDİLİK FAKÜLTESİ’ ne, tez çalışmamda bilgi ve birikim desteğiyle yardımcı olan Makine Mühendisliği Bölümü değerli öğretim üyelerine ve aşınma test tezgahının yapımında emeği geçen Halit ERCAN’ a teşekkürü borç bilirim.

İsmail MANDACI

Makine Mühendisi

1. GİRİŞ

Bu çalışmada gelişen teknoloji sayesinde bilim adamlarının üzerinde çalıştığı en önemli konulardan birisi de oluşturulan ürün üzerinde maliyeti düşürerek kar oranını artırmaktır. Kullanılan malzememin alternatifini oluşturmak, daha uygun şekilde tedarikini sağlamak yüksek önem kazanmaktadır. Bir parçanın verimli ve uzun ömürlü olması bu parçanın doğru seçilmesi ile sağlanmaktadır. Seçilen malzeme çalışma ortamına uygun olmalıdır. Nitekim seçilen malzemenin düşük maliyetli ve uzun ömürlü olması, verimliliği arttırmaktadır.

Günümüzde birçok endüstride yüksek kaliteli malzeme kullanılsa da yorulma, aşınma gibi durumlara bağlı olarak malzemenin çalıştığı koşullarda, yüksek ve yahut düşük sıcaklıkta çalışması, yüksek basınç altında çalışması gibi durumlarda parçaya veya birleşenlere zarar verebilmektedir. Bunun yanı sıra tedarik edilecek ürünlerin fiyatını düşürmek, periyodik bakım ömrünü uzatmak, parça değişim ömrünü uzatarak parça değişimini en az indirmek için malzemelerinin yapı bileşenlerinin geliştirilmesi gerekir.

Endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanan takım çelikleri, metal malzemelerin dövme, döküm, enjeksiyon ve ekstrüzyon işleminin gerçekleştiği kalıplarda kullanılmaktadır. Tüm bu alanlarda kullanılan malzemelerin özelliklerinin bozulmasının kök sebebi darbe ve sürünme deformasyonudur. Malzemenin mikro yapısı ve bileşenleri malzemenin mekanik özelliklerini özellikle sürünme, yüksek sıcaklıkta çekme ve darbe dayanımını etkilemektedir.

Yapılan birçok literatür taramasında da Cr-Mo dökme demirlerinin mikro yapı ve mekanik özellikleri projelerde de görülebilecektir. Bu çalışmada da Cr-Mo alaşımlı dökme demirlerin farklı ısıl işlem varyasyonları ile aşınma özelliklerine etkisi incelenmiştir.

Bu çalışmada, küre grafitli dökme demirin değişken şartlarda kazandığı farklı özellikler doğrultusunda bazı takım çeliklerinin yerine yüksek aşınma direnci, yüksek darbe direnci katarak ağır işletme şartlarına haiz birçok alanda kullanılabilecek yeni bir malzeme sunulması hedeflenerek, verilerin toplanması sağlanmıştır.

1.1. Literatür Özeti

Cr-Mo katkılı dökme demirlerinin farklı ısıl işlem varyasyonları ile ağır işletme şartlarında ve bazı takım çelikleri yerine kullanılabilecek olması; literatürde çok fazla yer almamaktadır. Yine de alt uygulamalarla bağdaştırıldığında bazı kaynaklara ulaşılabilmektedir.

J. Zimba ve arkadaşları [1] yaptıkları deneysel çalışmada toprak işleme aletleri üzerinde çelik yerine ÖKGDD kullanmayı hedeflemişlerdir. Bu doğrultuda 340-375 °C arasındaki östemplleme sıcaklıklarında çeliğe göre çok daha iyi aşınma direnci ve çekme direnci elde etmişlerdir. Fakat çeliğin sertliği ÖKGDD' nin sertlik değerinin iki kati olduğunda aşınma dirençleri neredeyse aynı olduğunu gözlemlemişlerdir.

Aslan [2] yaptığı çalışmada abrazif aşınma da aşınan malzeme üzerindeki yükün artmasıyla birlikte aşınma oranının ve buna bağlı olarak ağırlık kaybının doğru oranda arttığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca uygulanan yük miktarı ile yüzey pürüzlülüğünün değiştiğini, ağırlık artmasıyla pürüzlülüğün arttığını tespit edilmiştir.

Gül ve Şenel [3] yaptıkları bir çalışmada perlitik KGDD' nin abrazif aşınma testinde, ferritik olan bir KGDD den daha iyi bir aşınma direncine sahip olduğunu görmüşlerdir. Ayrıca FeSi aşılama uygulamasının KGDD' nin abrazif aşınma direncini olumlu katkısı olduğunu yaptıkları testler ile doğrulamışlardır.

Devecili ve Uymaz [4] yaptıkları testler neticesinde GGG60 numunesi üzerinde östemplleme işlemi ile birlikte döküm malzemeye göre çekme mukavemetinde, darbe direncinin kırılma mukavemetinin ve uzama özellikleri üzerinde olumlu yönde iyileşmeler olduğunu gözlemlemişlerdir.

Çetinkaya [5] yaptığı deneysel çalışmalar sonucunda yüksek kromlu beyaz dökme demir malzemesi üzerinde Cr, Mo ve Ni elementinin malzemelerin özellikle abrazif aşınma dirençlerine olumlu yönde katkı sağladığını görmüştür.

Kuş [6] yaptığı deneysel çalışmalarda GGG 40 KGDD malzemesine 900 °C' 90 dakika östenitleme işleminden sonra, 315, 375 °C 'de 120 dakika östemplleme işlemine tabi tutulup aşınma davranışını ve mekanik özelliklere etkisini incelemiştir. Aşınma deneyinde aşınmanın sertlik ile doğru orantılı olduğu görülmüştür. En fazla aşınmanın sertliği en düşük olan döküm üzerinde meydana gelmiştir. Deneyde başlangıçtaki sürtünme katsayısı hızla yükselip belli bir mesafe sonrası düşme eğilimi göstermiştir. İlaveten yüke bağlı olarak aşınma ve yüzey pürüzlülüğün doğru orantı ile değiştiği gözlenmiştir.

Akay [7] yaptığı deneysel çalışmada GGG 40 KGDD'nin östemplleme ısıl işlemi ile döküm haline göre aşınmasının daha iyi olduğunu gözlemlemiş yapılan çalışmada östemplleme sıcaklığı yükseldikçe sertlik ters orantılı olarak azaldığı sonucuna varmıştır.

Ertürk [8] deneysel çalışmada destabilizasyon işlemleri ile abrasif aşınma kabiliyetinin iyileştirildiği ilaveten kayma hızının artmasıyla birlikte aşınma direncinin azaldığını gözlemlemiştir. Tüm bunlarla birlikte yapıda dönüşmeyen östenitin sertlik ve aşınma özellikleri üzerinde etkili olduğunu ve kalıntı östenitin belirli aşınma hızlarına kadar aşınma direncini arttırdığı görülmüştür.

Şahin ve arkadaşları [9] yaptıkları bir çalışmada östemper uygulanmış numuneler için, östemperleme süresi arttıkça çekme dayanımı ve sertliği azalırken, uzama önemli ölçüde artmıştır. Ayrıca östemperleme süresinin azalmasıyla aşınma direnci artmıştır.

Rebasa ve arkadaşları [10] yaptıkları deneysel araştırmalarda küre sayısındaki artışın abrasif aşınmanın arttığını gözlemlemiştir.

Bahmani ve arkadaşları [11] yaptıkları deneysel çalışmada farklı sıcaklıklardaki östenitleme ısı işlemleri ile farklı östemperleme süresinin mikro yapıya etkisini araştırmışlar buna bağlı olarak da mekanik özelliklere etkisini incelemiştir.

Zou ve arkadaşları [12] yapmış olduğu çalışmalarda farklı varyasyonlu ısı işlemlerden sonra, mikro yapı analizini, sertlik ölçümlerini ve çekme testleri deneylerini gerçekleştirilerek. En iyi ısı işlem prosesini analiz etmişlerdir.

1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Proje kapsamında Molibden-Krom katkılı GGG50 malzemesi üretilip, bu malzeme belirli aşamalardan geçtikten sonra, gerekli analiz, görüntüleme ve test sonuçları elde edildiğinde, küre grafitli dökme demirin değişken şartlarda kazandığı farklı özellikler doğrultusunda bazı takım çeliklerinin yerine yüksek aşınma direnci katarak ağır işletme şartlarına haiz birçok alanda kullanılabilecek yeni bir malzeme sunulması hedeflenmiştir.

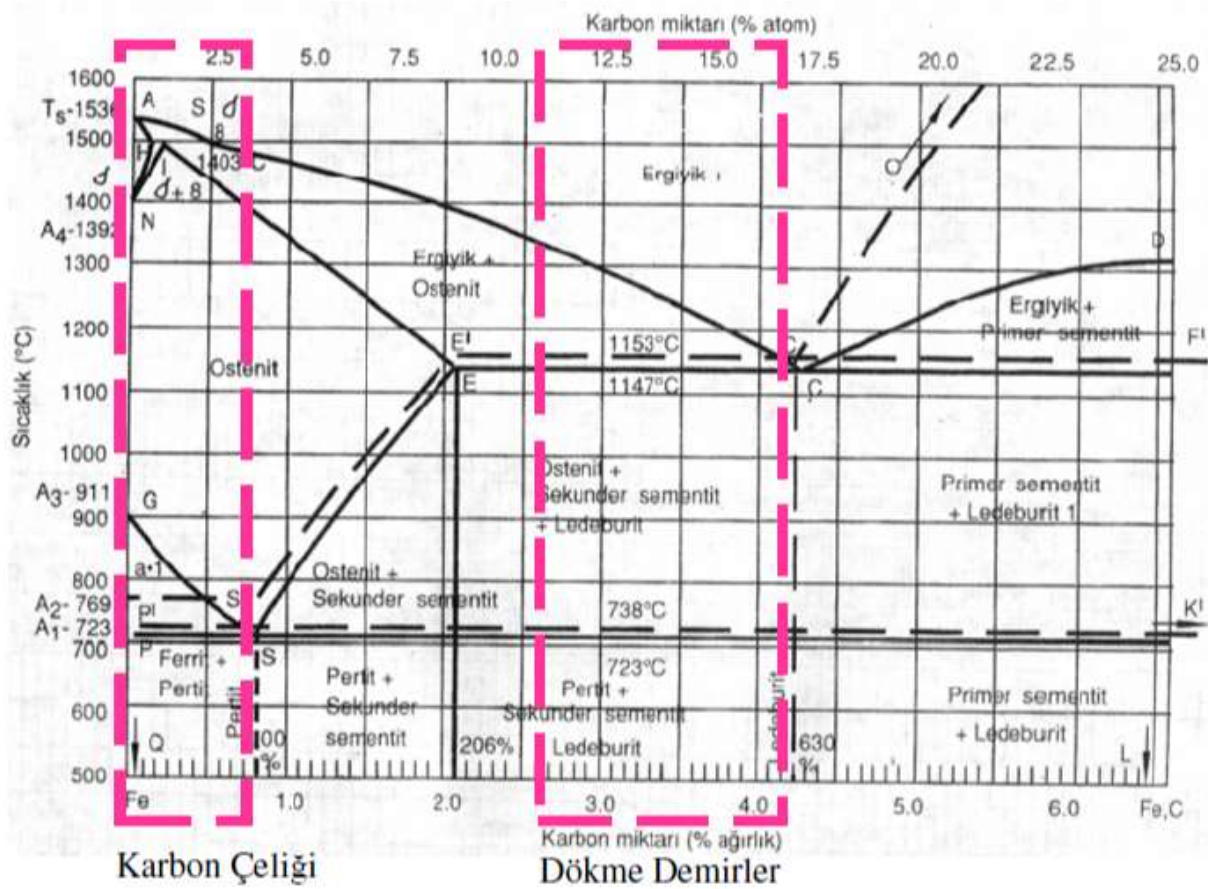
2. DÖKME DEMİRLER

Düşük maliyetin dökülebilirlik ile çeşitli kombinasyonları, mukavemet, işlenebilirlik, sertlik, aşınma direnci, korozyon direnci, termal iletkenlik ve döküm alaşımları arasında sönümlenme benzersizdir. Dökme demir veya 'demir', daima Fe-C-Si alaşımıdır. Dökme demir terimi, çelik terimi gibi, geniş bir demir alaşımları ailesini tanımlar. Dökme demirler çok bileşenli demir alaşımlarıdır. Ana (demir, karbon, silisyum), küçük (<%0.01) ve genellikle

alaşım (>%0.01) elementleri içerirler. Yüksek C (%2-4) ve Si (%1-3) içerik dökülebilirlik sağlar [13].

Dökme demir; kimyasal bileşimine ve soğuma hızına bağlı olarak geniş aralıkta değişen özelliklere sahiptir. Bu özelliklerden başlıcaları mukavemet, sönüm kapasitesi, süneklik, ısı iletkenlik ve sertliktir.

Şekil 2.1’de karbon denge diyagramı üzerinde dökme demir ile karbon çeliğinin yerleri görülmektedir. Diyagram incelendiğinde; dökme demirlerin karbon oranının karbon çeliklerinden yüksek olduğu rahatlıkla görülmektedir [14].

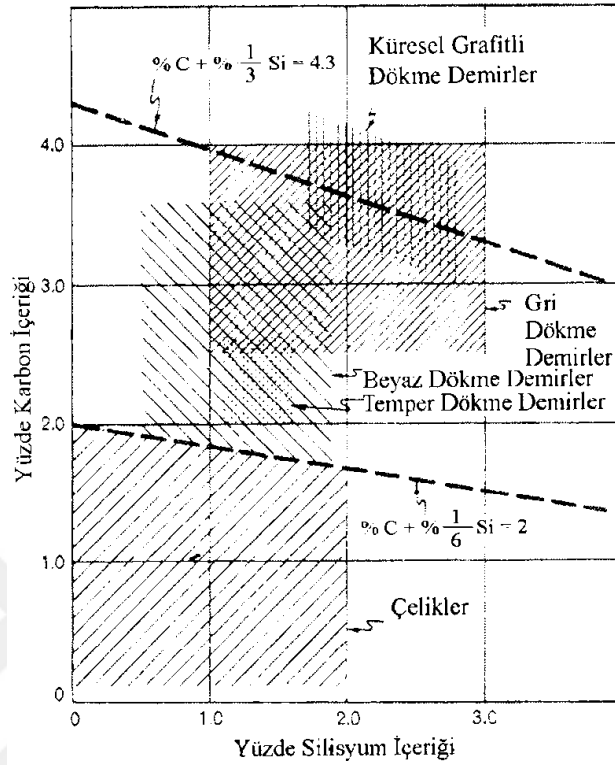


Şekil 2.1. Demir-Karbon denge diyagramı [14]

2.1. Dökme Demirin Kimyasal Bileşimi

Dökme demirlerin sınıflandırılmasında en önemli rolü mikro yapıdaki karbon elementinin alaşım içerisindeki dağılımı belirlemektedir. Dökme demirler beyaz dökme demir, temper dökme demir, gri dökme demir ve küresel grafitli dökme demir olarak 4 temel ana gruptan oluşmaktadır. Bunların dışında ayrı bir başlık altında incelenmek üzere beşinci olarak

yüksek alaşımlı dökme demirleri de göz nünde bulundurulmalıdır. Şekil 2.2’de dökme demir çeşitlerinin çeliklere kıyasla karbon ve silisyum oranlarının incelenmesi gösterilmiştir [15].



Şekil 2.2. Demir alaşımlarında yaklaşık karbon ve silisyum içerik aralıkları [15]

2.2. Beyaz Dökme Demirler

Beyaz dökme demirlerin içyapısı incelendiğinde karbon, sementit (Fe_3C) formunda olup mikro yapı perlit ve sementittir. Bu durum katılaşma sıcaklığında hızlı soğuma işlemi ile sağlanır. Ötektik altı alaşım olan tüm beyaz dökme demirler yüksek miktarda sementite sahiptirler, bundan dolayı sert yapılarının yanı sıra aşınmaya karşı dayanıklıdırlar. Bu sebeple, aşınma direncinin önemli olduğu sünekliğin olmasının istenmemesi durumlarında kullanılan bu dökme demirler gevrek bir yapıdadır ve işlenmeleri zahmetlidir. Tüm bunlar toparlandığında, beyaz dökme demirlerin darbe dayanımları düşüktür ve işlenme yetenekleri iyi değildir, bu sebep ile kullanım alanları belirli yerler olup, azdır [16].

2.3. Temper Dökme Demirler

Sert ve kırılğan olan ayrıca içerisinde grafit bulundurmeyen beyaz dökme demirin temperlenmesi sonucu oluşur. Sementit yapı içerisindeki kararsız karbon bir araya toplanarak

temper grafiti denilen ferrit ve temper karbonundan meydana gelen rozet şekilli grafitlerden oluşur [17].

2.4. Gri Dökme Demirler

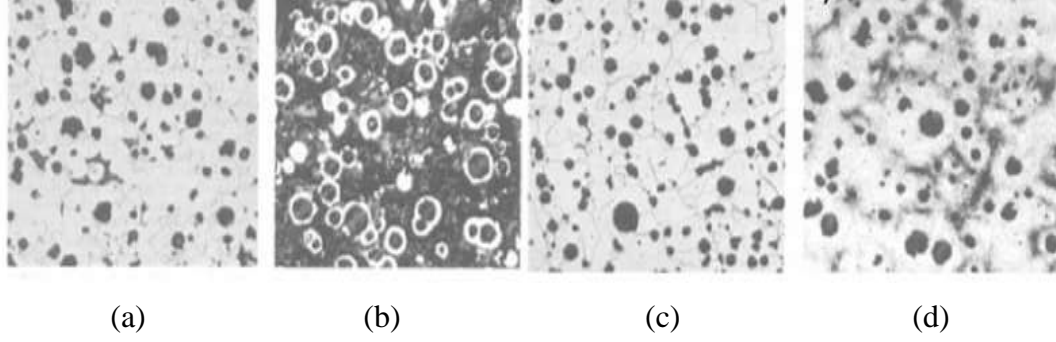
Gri dökme demir; ötektik sıcaklıkta katı çözelti içerisinde çözebileceğinden fazla karbon içeren demir, karbon, silisyum alaşımıdır. Gri dökme demirler, genelde %2,5-4 oranında karbon içerirler. Ayrıca yapılarında kompozisyona bağlı olarak mangan, kükürt ve fosfor bulunmaktadır. Kırılma yüzeylerindeki gri görüntüden dolayı “gri dökme demir” olarak adlandırılmaktadırlar. GDD’ nin mikro yapısı perlit matris içerisine dağılmış grafit lamellerinden oluşmaktadır. Grafit lamellerinin sayısı ve mikro yapı içerisindeki düzeni malzeme özelliklerini etkilemektedir. Grafitin sayısı, dağılımı ve boyutu malzeme özelliklerini belirlemede önem taşımakta olup mikro yapı içerisindeki şekli ve dağılımına göre farklı tipte gri dökme demirler bulunmaktadır [13].

2.5. Yüksek Alaşımli Dökme Demirler

Küre grafitli dökme demir ile birlikte gri dökme demirin yüksek oranlarda alaşımlandırılmış halleridir. Aşınma, korozyon ve ısı dirençleri gibi bazı özelliklerinin diğer dökme demir gruplarından oldukça farklı olmasından dolayı yüksek alaşımli dökme demirlerin diğer grupların dışında olmasını sağlamaktadır [16].

2.6. Küre Grafitli Dökme Demirler

Grafitin, küresel (nodüler) olarak yapıda bulunduğu dökme demirlerdir. Ötektik sıvı demir içerisinde bulunan grafit, küresel olarak yapı içerisinde dağılmaktadır. Sıvı fazdaki demir alaşımına eklenen minör alaşım elementleri ile grafit tipik lameler yapı yerine küresel form almaktadır. Küresel form, yüksek akışkanlık, işlenebilirlik, tokluk ve mukavemet özellikleri kazandırmaktadır. Küresel form gri dökme demire göre daha yüksek mekanik özellikler elde edilmesini sağlamaktadır. Küresel dökme demirlerin tipik mikro yapısı Şekil 2.3’de gösterilmiştir. Küresel grafitli dökme demirlerde küresel form elde edilebilmek ve hızlı soğumayı sağlamak amacıyla yapıya alaşım elementleri ilave edilmektedir. Eklenen minör alaşım elementleri ile grafitin lameler yapı oluşturması engellenerek küresel olarak yapıda kalması sağlanmaktadır.



Şekil 2.3. Küresel dökme demir mikro yapısı-dağlamalar %2'lik nital ile yapılmış ve görüntüler X100 büyütme ile alınmıştır. (a) döküm ferritik, (b) döküm perlitik, (c) 700 °C / 3 saat tavlanmış ferritik yapı, (d) Perlitik demirin yağda soğutulmuş-temperlenmiş [13]

Endüstri alanından Küresel grafitli dökme demirin payı çoktur. Pazardaki payının fazla olmasının başlıca nedenleri arasında statik dayanım, süneklik, yorulma, elastik davranış, kırılma tokluğu ve kolay şekil verilebilirlik gibi özelliklerinin iyi olmasıdır. Mekanik özellikler ile beraber termal genleşme, ısı kapasitesi, manyetik ve elektriksel özellikler ve termal iletkenlik küresel grafitli dökme demirleri ön plana çıkarmaktadır.

Bahse konu olan özelliklerin benzer metaller ile karşılaştırılması Çizelge 2.1' de gösterilmiştir [17].

Çizelge 2.1. KGDD' nin mekanik özelliklerinin diğer döküm metaller ile karşılaştırılması [18]

Özellik	GDD	BDD	TDD	KGDD	Çelik D.
Dökülebilirlik	1	3	2	1	4
İşlenebilirlik	1	3	2	1	4
Güvenirlik	1	-	2	2	3
Titreşim Söndürme	5	4	3	1	2
Yüzey Sertleştirilebilirliği	1	-	1	1	3
Elastite Modülü	3	-	2	1	1
Darbe Direnci	5	-	3	2	1
Aşınma Direnci	3	1	4	2	5
Korozyon Direnci	1	2	2	1	4
Mukavemet/Ağırlık Oranı	5	-	4	1	3
Üretim Maliyeti	1	1	3	2	4

1 → En iyi. 5 → En kötü

2.6.1. Küresel Grafitli Dökme Demirin Kimyasal Bileşimi

C ve Si elementi artan yüzdelerde grafit oluşumunu artırıcı önemli rol oynadığından en önemli iki elementtir. Çizelge 2.2 'de KGDD' in bileşiminde bulunan elementler ve bileşim yüzdesi yer almaktadır.

Çizelge 2.2. KGDD' nin kimyasal bileşimi [19]

%BİLEŞİM		
Karbon	C	3.00-4.00
Silisyum	Si	2.00-3.00
Mangan	Mn	0.10-0.90
Kükürt	S	0.03 Maks.
Fosfor	P	0.10maks
Magnezyum	Mg	0.030-0.080

Karbon elementi dökme demirlerde karbür yani sementit halde bulunabilir veya serbest şekilde grafit halinde de oluşmuş olabilirler. Grafitleşme serbest karbonun çökmesi ya da kimyasal bileşik halindeki karbonun serbest hale dönüşmesi olayıdır. Grafitleştirici elementler ile de grafit oluşumu teşvik edilir.

Grafitleştirici elementlerin ve kükürdün dışında bileşimdeki (C), silisyum (Si), mangan (Mn) ve fosforun (P) alaşımın KGGD' nin özelliklerine etkileri gri dökme demirin özelliklerine olan etkileri gibidir. Bileşimdeki karbon miktarı arttıkça alaşımın dayanımı azalır. Fosfor gri dökme demirde olduğu gibi küresel grafitli dökme demirde de alaşıma kırılmalık veren bir elementtir. Bu nedenle fosfor alaşım içinde bulunabildiği minimum miktarda yani %0,10 civarında tutulması zorunludur [20].

2.6.2. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Çeşitleri

KGDD' nin gruplandırılması iç yapıya bağlıdır. Döküm işlemi sonrasında ısı işlem ile farklı iç yapıya oluşturulacağı gibi döküm işlemin de yapılacak uygulamalar ile iç yapı da değişiklikler meydana getirmektedir. Bu içyapılar KGDD' lerin sınıflandırılmasında belirler.

Yüksek sıcaklıklarda östenit yapıya sahip olan KGGD'nin 735°C altındaki sıcaklıklarda değişik iç yapıya sahip olur. Bunun temel sebebi östenitin katı eriyik yapısında olmasıdır. 1147 °C' de en fazla %1,7 oranında karbon çözüdürebilirken Östenit, sıcaklık düştükçe

çözündürebileceği karbon oranı da düşmektedir. 723 °C’ de çözündürebileceği karbon oranı ise, %0,85 oranındadır. Bundan dolayı östenitin ferrite dönüşümü sırasında %0,85 karbon östenitten ayrışır. Ayrışan karbonlar karbür oluşturur ve küresel grafitler üzerinde katılır. Östenit içinde çözünen karbonun tamamı küresel grafitte dönüşmeye zaman bulursa yapı ferritik ve bu yapı içinde gelişi güzel dağılmış küresel grafitlerden oluşur. Birçok hallerde östenitten ayrılan karbon grafitlerin bulunduğu bölgelere kadar hareket edemez ve orada katılaşmaya zaman bulamaz [21]. Çizelge 2.3’de küresel grafitli dökme demirlerin çeşitleri ve bunların mikro yapıları gösterilmiştir.

Çizelge 2.3. KGDD’ lerin çeşitleri ve mikro yapısı

Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Mikro Yapı ve Kimyasal Özellikleri						
Malzeme Cinsi	GGG 40	GGG 50	GGG 60	GGG 70	GGG 80	
Mikro Yapı	Ferritik	←————→				Perlitik

2.6.3. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Kullanım Alanları

KGDD’ nin mekanik özelliklerinin diğer dökme demirlere göre daha iyi olması gerek kolay şekil verdirilebilmesi gerekse kolay işlenebilmesi özelliklerinin avantajları sayesinde birçok alanda kullanıla bilmeye olanak sağlamıştır. En yaygın kullanımı yine otomotiv sanayisinde görebiliriz. Bunlara örnek olarak; araba direksiyon kutuları, krank milleri ile motor bağlantıları gibi güç iletim parçaları, basınçlı hatta çalışan silindir ve valf gibi parçalarda rastlamak mümkündür. Ayrıca madencilik ve metaruliji sektöründe kırıcı gövdeler, kalıp, pres makineleri, ergitme potaları ile cüruf potaları gibi parçalarda rastlanılması mümkündür [23].

3. KGDD’LERE UYGULANAN YÜZEY SERTLEŞTİRME İŞLEMLERİ

KGDD’ nin yüzey sertleştirme işlemleri dört gruptan oluşur bunlar nitürleme, alev, indüksiyon veya lazerle tavlama, sertleştirme ve borlamadan meydana gelmektedir.

3.1. Alev, İndüksiyon veya Lazerle Yüzey Sertleştirme

Genellikle perlitik tiplere uygulanır. Çünkü tamamen sertleşmesini engellemek için östenit sıcaklığı çok kısa tutulmalıdır. Ferrit olmayan yapı su alabilme kabiliyetinden dolayı perlitik KGDD’ ler seçilir.

3.2. Nitrüleme

Nitrüleme, küresel grafitli dökme demirlerin parçalanmış amonyak içerisinde 2–3 saat tutulması ile gerçekleştirilir. Bu işlem sonucunda, 60 HRC sertlik elde edilebilmektedir. İşlem sonrasında, küresel grafitli dökme demirlerin 108 devire kadarki yapılan yorulma deneyleri sonucunda göstermiş oldukları yorulma dirençleri, 172–210 MPa’ dan 276–289 MPa’ ya ulaşmaktadır.

3.3. Borlama

Küresel grafitli dökme demirlerin borlanması, 750–1000°C arasında katı, sıvı veya gaz ortamda 1-10 saat süre ile gerçekleşmektedir. Borlanmış dökme demirler, çeliklerden daha düşük sürtünme katsayısına sahiptir. Yüzey sertliği ise, FeB ve Fe₂B fazları sebebiyle, 1200–2000 HV arasındadır. Tekstil makinalarının dramlarında, hareketli makine parçalarında, kollarda ve birçok kalıpta, yüzeyi borlanmış küresel grafitli dökme demirler kullanılmaktadır [24].

3.4. Östemperleme Isıl İşlemi

3.4.1. Östemperleme Isıl İşlem Süreci

Döküm 850-950°C sıcaklığa çıkarılarak tamamen östenit (γ) matris elde edilene kadar bekletilir bu süre genellikle 1-2 saattir. Bekleme tamamlandıktan sonra 200-400 sıcaklıktaki bir ortama hızlıca daldırılır burada ya hızlıca soğutulur ya da istenilen iç yapıya göre 1-4 saat arası bekletilir. En son oda sıcaklığında çıkartılarak soğumaya bırakılır. Östemperlemenin temel amacında karbürsüz ferritten oluşan beynit yapı elde etmektir [25].

Östemperleme 2 kademeli bir işlemdir. İlk aşama östenitleme aşamasıdır. Östenitleme belirtildiği gibi 850-950°C arasında tamamen östenit olana kadar yapılmaktadır. Normal şartlar da 1-2 saatte desek yine de malzeme içindeki kimyasal durum için içine girince süre 4 saate kadar çıkabilir. Burada bileşimdeki malzeme önemlidir [26].

İkinci aşamada östemperleme işlemi yer almaktadır. Normal şartlarda genellikle 250–400°C arasında değişen 1-4 arasında yapılır fakat yapıda ilave bir alaşım varsa süre ve sıcaklıklar beynit noktasına göre değişir [27]. Hızlı soğutulmak istenirse tuzlu su ortamına daldırılır [28].

Östenitleme sıcaklığından östemperleme sıcaklığındaki izotermal tuz banyosuna geçiş, perlitik ve ferritik dönüşüme meydan vermeyecek kadar hızlı olmalıdır [25]. Alaşımız küresel grafitli dökme demir, perlit dönüşümünü önlemek için yaklaşık 20 saniye içinde östenitleme sıcaklığından östemperleme banyosuna aktarılmalıdır. %0,5 Mo bu süreyi 2 dakikaya, %5 Mo ve %2,37 Ni ilavesi ise 10 dakikaya çıkartmaktadır. Böylece daha kalın parçalar östemperlenebilir.

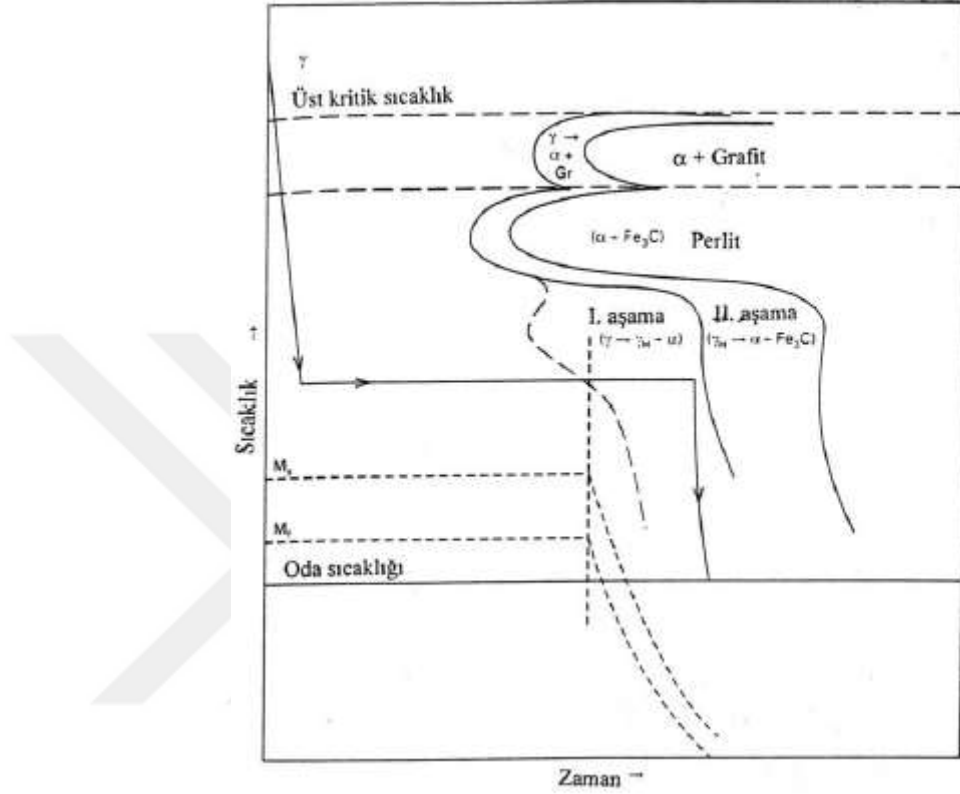
Küresel grafitli dökme demirin östemperlenmesi sonucu elde edilen beynit yapısı ile çeliklerdeki izotermal tavlama ya da sürekli soğuma ile elde edilen beynit yapısı farklı dönüşüm süreçlerinin sonucunda meydana gelirler. Çeliklerden elde edilen beynit yapısı, martenzit ve perlit oluşum sıcaklıkları arasında meydana gelmektedir. Buna göre çeliklerde alt beynit ve üst beynit olarak iki ayrı beynit yapısı tanımlanmıştır. Alt ve üst beynit yapıları arasındaki esas farklılık, her iki yapının oluşum sıcaklıkları ile ferrit ve karbür fazının konumundan ileri gelir. Alt beynit, martenzit dönüşüm sıcaklığına yakın sıcaklıklarda oluşmaktadır ve sementit, ferrit tabakçıklarının içinde bulunmaktadır. Ayrıca alt beynit yapısında ϵ -karbür gibi karbürlerde bulunur. Üst beynit yapısı ise perlit oluşum bölgesine yakın sıcaklıklarda meydana gelir ve sementit, ferrit tabakçıklarının arasında bulunmaktadır. Ferrit ve sementit fazlarının beynit içinde bulunma şekline bağlı olarak alt beynit tok, üst beynit ise gevrek karakterdedir [28].

Küresel grafitli dökme demirin östemperlenmesi sonucu oluşan beynit yapısı ise iki aşamalı bir dönüşüm sürecinin ürünüdür. Küresel grafitli dökme demirin izotermal banyoda tutulması esnasında oluşan beynitik yapı, çelikte oluşan beynit yapısından farklı olması açısından (çeliklerdeki beynitik yapı sementit içeren ferrit tabakalarından oluşur) “ausferrit” olarak isimlendirilir ve iki aşamalı bir dönüşüm sürecinin ürünü olarak östemperleme sıcaklık aralığında meydana gelir. Bu aşamalar şunlardır:

Çoğu zaman beynitik ferritin, ferrit-küre (matriks-nodül) ara yüzeyinde çekirdekleşmesi ve daha sonra,

Küçüklüğü büyük ölçüde östemperleme sıcaklığının bir fonksiyonu olan beynitik ferritin östenit içinde büyümesi. Beynitik ferritin büyümesi esnasında ferrit tabakçıklarının bünyesindeki karbonun bir kısmı östenite doğru yayılır. Sonuçta artan östemperleme süresine bağlı olarak, östenit karbonca zenginleşir ve böylece kararlılığı yükselir. Karbonca zenginleşmiş östenit, “yüksek karbonlu östenit” olarak bilinir [25-28]. Şekil 3.1’ de östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin üretimini belirten bir işlem dizisi ile birlikte, küresel grafitli bir dökme

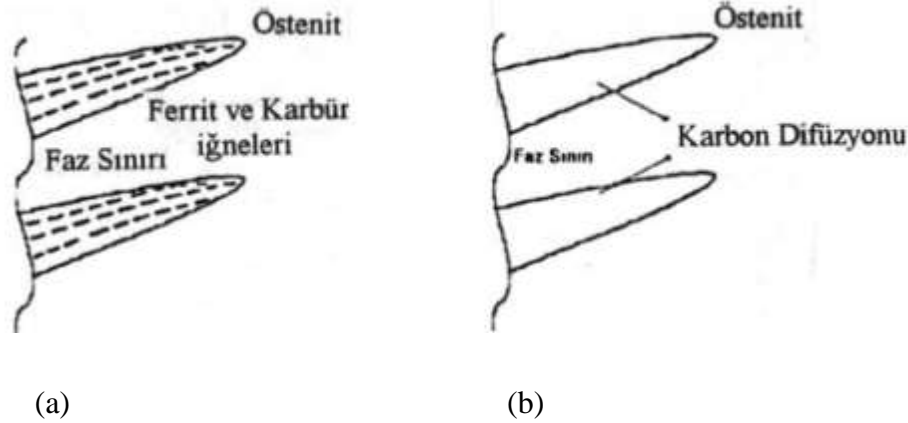
demir için IT (İzotermal Dönüşüm) diyagramını göstermektedir. Şekilde, M_s sıcaklığının hemen üzerindeki bir izotermal işlem sonrası oluşan beynit yapısı alt beynit, perlitik dönüşüm sıcaklığının hemen altında ve alt beynit oluşum sıcaklığından daha yüksek bir sıcaklıkta oluşan yapı ise üst beynit olarak adlandırılır [28-29].



Şekil 3.1. Küresel grafitli dökme demirin izotermal dönüşüm (IT) diyagramı [29]

İzotermal dönüşümü takip eden mikro yapı büyük ölçüde östemperleme sıcaklığı T_A 'ya bağlıdır [30]. Yaklaşık $330^\circ C$ 'nin altındaki ($240-330^\circ C$ sıcaklık aralığı) düşük bir östemperleme sıcaklığı T_A , östenitin çok aşırı soğumasına ve karbonun difüzyon hızının düşük olmasına sebep olur. Bu yüzden, beynitik ferritten östenite doğru yayılan karbon miktarı çok azdır ve karbonun geri kalanı ferrit tabakçıklarında sementit (Fe_3C) olarak çöker (Şekil 3.2a) [13]. Sonuçta, ferrit tabakçıklarının çekirdeklenme hız, ferrit tabakçıklarının büyüme hızından daha yüksek olduğu için $240-330^\circ C$ sıcaklık aralığındaki izotermal dönüşüm "alt beynit" olarak bilinen yapıyı ortaya çıkartır. Bu yapı, her ne kadar beynitik ferrit ve yüksek C' lu östenitten ibaret olarak kabul edilse de çok düşük oranda martenzit içermektedir [18]. Maksimum tokluğun elde edildiği şartlarda %10 ile 20 oranında yüksek karbonlu östenit ihtiva eder [31]. Benzer şekilde, komşu ferrit tabakçıklarının arasında oluşan iğne şeklindeki yüksek karbonlu östenit bölgesi de ince bir görünümde [28-30].

330–400°C sıcaklık aralığında değişen daha yüksek östempereleme sıcaklıklarında karbonun difüzyon hızı bir önceki duruma göre (östempereleme sıcaklığı TA'nın 240–330°C arasında değiştii durum) oldukça yüksektir ve böylece karbon büyüyen ferrit tabakçıklarından östenite doğru hızla yayınabilir. Bu durum, özellikle büyüyen ferrit tabakçıkları arasındaki östenitin karbonca zenginleşmesine sebep olur [32]. Östempereleme sıcaklığının yükselmiş olması, martenzit oranını düşürürken kalıntı östenit miktarını artırır [27]. Bütün bu değişiklikler hep birlikte “üst beynit” yapısının oluşmasına sebep olur (Şekil 3.2b) [26-27]. Dönüşüm süresi ilerledikçe, östenitin karbon miktarı artar ve beynit reaksiyonunun itici gücü azalır. Bu esnada yapıda bulunan yüksek silisyum miktarı (%2–3 Si), karbür oluşumunu engeller [29]. Ayrıca, yüksek karbon oranı Ms (martenzit başlangıç sıcaklığı) sıcaklığını düşürür ve bu yüzden ortam sıcaklığına soğuma esnasında östenit kararlı bir surumdadır. Üst beynit yapısında, östempereleme sıcaklığı TA 330–440°C aralığında bir değer aldığı için nihai mikro yapı, alt beynit yapısına göre daha kaba ve karbürsüz ferrit tabakçıkları ve kalıntı östenit yapısından ibarettir [30]. Yüksek karbonlu östenit, kütleli bir şekle sahiptir (blocky austenite), yapı rasgele dağılmış durumdadır ve maksimum tokluğu elde edildiği şartlarda %45 oranında bulunduğu bildirilmiştir. [16,18].



Şekil 3.2. (a) Alt beynit (250-330°C) ve (b) Üst beynit (330-400°C) oluşum mekanizması [13]

330–400°C arasında östemperelenen ve üst beynit yapısı gösteren bir küresel grafitli dökme demir parça ise, yüksek süneklik ve toklukla ilişkili olarak nispeten yüksek mukavemet, orta derecede bir sertlik değeri gösterir. Maksimum aşınma direnci ve deformasyon sertleşmesi, ortamda yüksek miktarda kalıntı östenit olduğunda, yani üst beynit yapısı gösteren bir malzemede görülür [21].

Östenit karbon bileşimi Fe-C denge diyagramındaki maksimum karbon çözünürlüğü oranına (%1.7–2) ulaştığında yüksek karbonlu östenit, ferrit ve karbüre ayrışır. Sonuç olarak küresel grafitli dökme demirlerde izotermal işlem sırasında meydana gelen dönüşümler östemperleme zamanına bağlı olarak iki aşamalı bir reaksiyon ile meydana gelmektedir [31].

Östemperleme işlemi esnasında mikro yapıda meydana gelen değişimler, bir alt beynit yapısının (Şekil 3.2a) ve bir üst beynit yapısının (Şekil 3.2b) değişen östemperleme sıcaklığına bağlı olarak ortaya çıkmasını sağlar [33].

Birinci aşamada (numunen izotermal işlem banyosuna daldırılması ile başlamıştır), düşük karbonlu östenit, yüksek östemperleme sıcaklıklarında beynitik ferrit (α) ve yüksek karbonlu östenite (γ_{yk}) düşük östemperleme sıcaklıklarında ise beynitik ferrit/karbür ve yüksek karbonlu östenite dönüşür. Östemperleme işleminin birinci aşaması,



Eşitliği ile ifade etmek mümkündür [14]. Bu işlem süresinin artması ile daha sonra I. aşamada oluşan yüksek karbonlu östenit, östemperleme prosesinin II. aşamasında,



Reaksiyonu gereğince termodinamik olarak daha kararlı olan ferrit ve karbüre (Fe_3C) ayrışır [20].

I. aşamanın sonunda ferrit oluşumundan dolayı, östenit karbonca doyar ve oda sıcaklığına soğuma sırasında martenzite dönüşemeyecek kadar kararlı bir hal alarak “tam östemperlenmiş” küresel grafitli dökme demir yapısını oluşturur. Oysa I. aşamanın herhangi bir yerinde östemperleme işlemine son verildiğinde (yani östemperleme süresi azaltıldığında) yapıdaki östenit henüz karbonca doygunluğa erişmediği için oda sıcaklığına soğuma sırasında martenzite dönüşecektir. I. aşama sonunda ortaya çıkan mikro yapı, karbürsüz ferrit ve yüksek karbonlu östenitten ibarettir (Kovacs tarafından I. aşama ürünleri “ausferrite” olarak adlandırılır) [27-28].

I. aşamada martenzitin mevcudiyeti ve II. aşamada ise ürün olarak karbürün oluşması mekanik özelliklere zararlıdır [31-32]. Karbür oluşumun özellikle mukavemet, süneklik ve

tokluğu düşürmesinden dolayı II. aşama ürünleri kullanışlı değildir [27]. Maksimum mekanik özelliklere, yapıda %60–80 oranında beyitik ferrit ve %20–40 oranında kalıntı östenit olduğunda ulaşılmaktadır. Başlangıçta oluşan ferrit tabakçıklarının sayısı, şekli ve boyutu I. aşama ile belirlenir. Dolayısıyla, faydalı nihai mikro yapıyı kontrol edebilmek ve arzulanan özellikleri elde edebilmek için I. kademeyi kontrol etmek gerekir. Bu kademenin kontrolü, seçilen östemperleme sıcaklığında östemperleme süresinin kontrolüyle gerçekleşir [33].

3.4.2. Östemperleme Sürecini Etkileyen Faktörler

Alaşım elementlerinin segregasyonu, östemperleme süre ve sıcaklığı, östenitleme sıcaklığı ve süresi ile dökümün kalitesi östemperlemeyi etkileyen faktörlerdir [34].

4. ALAŞIM ELEMENTLERİNİN ÖZELLİKLERE ETKİSİ

Küresel grafitli dökme demire eklenen alaşım elementleri matris yapıya, küre sayısı ve dağılımı, mekanik özelliklere etkisi ve işlenebilirlik üzerine etkili olduğu söylemek mümkündür. Fakat iyi yönde etki eden elementler olduğu gibi özellikler üzerine zararlı olan elementlerde vardır. Zararlı elementlerin yapıda görülmesi pek istenmez. Ni, Mo, Cr, Mn, V, Cu gibi elementler karbürlerin dağılımı ve yüzdesini, grafit şeklini ve matris yapı etkilediğinden yararlı olarak ön planda gösterilirken zararlı olarakta Pb, Bi, Sb, As, P, S gibi elementler gösterilebilir. Alaşım elementleri tek başına ya da başka element veya elementler ile alaşımlandırılmış olarak sıvı dökme demir içerisine ilave edilir. Bu elementler, özelliklerini etkilerler [35].

4.1. Karbon

İstenen katılma şartlarının sağlanabilmesi için KGDD'lerin bileşiminde genellikle %3,6'dan daha az oranda bulunur. Sayısız avantajları yanında karbon miktarı %1,5 'u aştığı takdirde malzeme mukavemeti düşer. Mukavemetin düşmesi serbest karbonun bünyede grafit şeklinde olduğundan [36].

4.2. Silisyum

Sünek demir matrisindeki Si, perlitik olandan ferritik matris sağlar. Si, ferritik matrisi stabilize ederek, oksidasyonu engelleyerek ve Si erişim yüzey tabakasını oluşturarak, sünek demirin yüksek sıcaklıktaki performansını arttırmaktadır. Artan Si muhtevasının potansiyel olarak sakıncalı etkileri şunlardır:

- Artırılmış darbe geçiş sıcaklığı.
- Azalan ısı iletkenliği.

Si, ferritin desteklenmesi ve ferritin güçlendirilmesi için kullanılır. Bu nedenle Si, ferritik kaliteler üretilirken genellikle %2,2'nin altında ve perlitik kaliteler üretilirken %2,5 ila %2,8 arasında tutulur [37].

4.3. Krom

Krom, dökme demirlerde üç temel amaç için kullanılmaktadır:

- Karbür oluşturmak
- Korozyon direncini iyileştirmek
- Yüksek sıcaklık uygulamaları için yapıyı kararlı hale getirmek.

Düşük yüzdelerde krom ilavesinin (%2-3) sertleşebilirlik üzerine çok az etkisi vardır. Nedeni ise kromun büyük bölümünün karbür oluşturuçu olarak yapıda bulunmasıdır. Dökme demir içerisinde bulunan krom oranı oluşan karbür tipleri üzerinde etkili olmaktadır. %10'dan yüksek krom oranlarında M_3C tipi karbür matrisi oluşurken, yüksek krom içeriklerinde M_7C_3 tipinde ötektik karbürler oluşmaktadır. M_7C_3 tipi karbürler, M_3C tipi karbürlerden daha sert ve tok yapıdadırlar.

4.4. Molibden

Yüksek görevli dökme demirlerin mekanik özelliklerini geliştirmek ve asiküler dökme demirler gibi özel bileşimler elde etmek için eklenir. Bu perlitin güçlü bir geliştiricisidir. Karbür/östenit ötektik oluşumunda tercih edilir. Kararlı karbür oluşturur ve yaklaşık %0,35 Si grafitleştirici etkisini ötelere [38].

4.5. Nikel

Darbe dayanımından etkilenmeden nihai çekme dayanımını arttırmaya yardımcı olur, bunun için metal bileşiminde uygun ve mükemmel mekanik özellikleri korumak için %0,5 ila %2,0 arasında eklenir. Ferritleri güçlendirir, sünekliliği azaltmada Si' den çok daha az etkiye sahiptir. Ni malzemelere %2'den fazla katılırsa gevrekleşme tehlikesi vardır [39].

4.6. Manganez

Mn, bir alaşım görevi görür, perlit rafine eder ve stabilize olur, böylece döküm numunesinde ferriti azaltır. Karbürü stabilize eder ve perlitin ferrite parçalanmasını önler ve

ferritik yapıların üretimi için tavlama döngüsünü uzatır. Bu nedenle istenen maksimum Mn miktarı %0,5'tir, bununla birlikte tamamen perlitik kalitelere biraz daha yüksek bir yüzdeye izin verilir. Çekme ve akma dayanımları özellikle tavllanmış numunelerde, dökme numune olarak Mn içeriğindeki artışla artar. Normalize edilmiş örnekte Mn iyi miktarda sertleşebilirlik sağlar [40].

Mangan, kükürtün kötü etkisini dengeleyebilmek için kullanılır. Eğer yapıda mangan bulunmaz ise tane sınırında istenmeyen demir-sülfür ötektiği oluşur ve bu ötektik yaklaşık 985 °C de ergir. Kükürt miktarı mangan ile dengelenirse mangan sülfür tane içerisinde dağılmış halde bulunur. Mangan segregasyonu soğuma hızı ne kadar yavaş ise o kadar çok olur [22].

4.7. Bakır

KGDD' lerde en yaygın kullanılan alaşım elementlerinden biridir. Cu, orta derecede bir grafitleştiricidir ve serbest ferriti desteklemeden soğutma eğilimini en aza indirmek için Si yerine kullanılabilir. Grafitin teşvik edici etkisi, kararlı ve yarı kararlı ötektik sıcaklıklar arasındaki aralığın bir artışının sonucudur. Cu, östenite karbon difüzyonunu geciktirerek perlit oluşumunu teşvik eder. Mo ve/veya Ni ile kombine edildiğinde sertleşebilirliği artırır [41].

4.8. Fosfor

Küresel grafitli dökme demirde fosfor "steadit" olarak bilinen çok kırılabilir bileşiğin oluşumuna neden olur. Tokluğu, sünekliği, kaynak edilebilirliği ve plastik şekil değiştirmeyi kötü yönde etkiler. Çekme mukavemeti, akma mukavemeti ve sertlik fosforun artmasıyla artış gözlenirken uzama değerinde düşüş gözlenir [22].

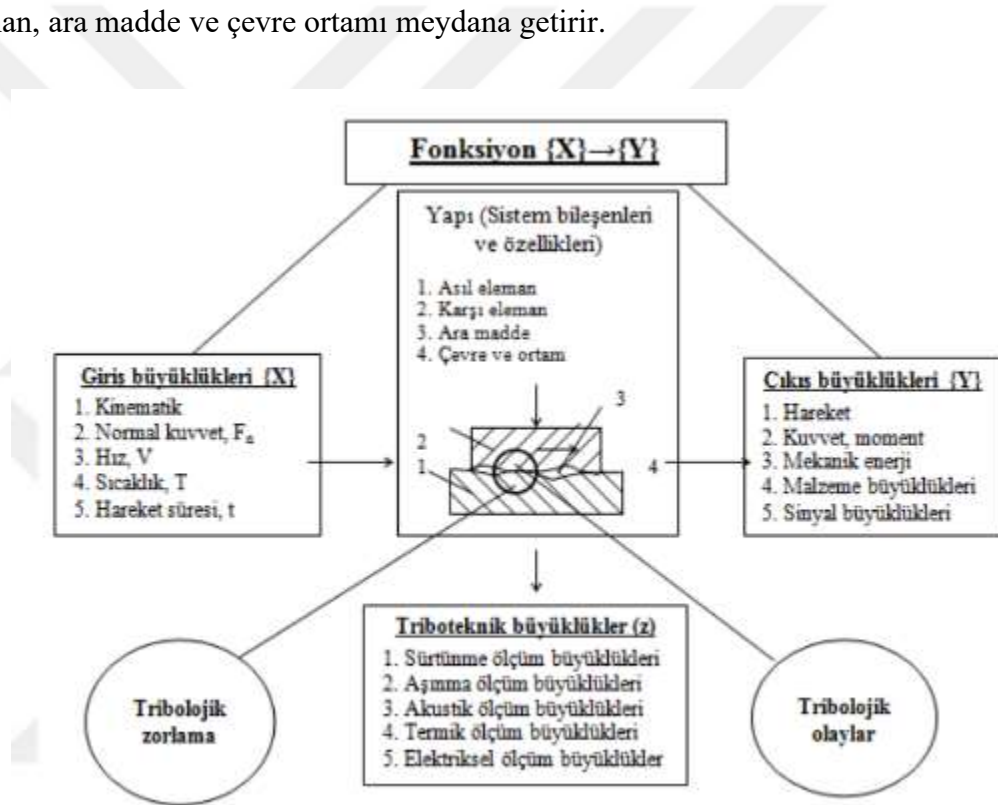
4.9. Kükürt

Kükürt miktarının artması küreleştirici amaçlı ilave edilen FeSiMg miktarını artırıcı etki yapar. Mn/S oranı ferritleşme eğilimini etkiler ve MnS grafit oluşumunda çekirdek görevi görür [22].

5. TRIBOLOJİ İÇİN TEMEL ESASLAR

Sürtünme ve aşınma, cisimlerin birbirine göre izafi hareket etmesiyle ortaya çıkar. Sürtünme kuvveti birbirine temas eden ve hareket halinde olan cisimlerin hareketini engellemeye çalışan kuvvettir. Aşınma ise, mekanik olaylar neticesinde küçük parçacıkların

ana gövdeden ayrılması neticesinde yüzeyde oluşan ve istenmeyen değişimlerdir. Ancak bu tanımlar, günümüzde biraz değişmektedir. Sürtünme, sadece kuvvet ve moment olayı değil, ayrıca mekanik enerjinin, başta ısı olmak üzere diğer enerji türlerine dönüşmesine neden olur. Dolayısıyla, Fleischer (1986)'e göre sürtünme kavramı, izafi harekette, hareketin başında ve sonunda, temas bölgesinde meydana gelen mekanik enerji kaybı olarak incelenmelidir. Aşınan bölgenin morfolojik yapısı yüzeyden sadece parçacıkların kopmasından değil bunun yanında sürtünme sırasında yüzeyde kaynak oluşumu, yapışma, pekleşme, ergime, adsorbsiyon ve absorpsiyon, oksitlenme gibi nedenlerden değişikliğe uğrayacaktır. Bu 2 nedenle aşınma olayı bu durumlar da göz önüne alınarak yeni bir yaklaşımla izah edilmelidir. Sürtünme ile başlayan tribolojik olayları açıklayabilmek ve amaçlanan malzeme çiftini seçebilmek için çoğunlukla Şekil 5.1'de gösterildiği gibi sistem analizine gidilir. Bir tribosistemin yapısını asıl eleman, karşı eleman, ara madde ve çevre ortamı meydana getirir.



Şekil 5.1. Tribosistemin yapısı [42]

Tribolojik bir sistemde farklı etkenler olabilir ve malzeme çiftinin yüzeyinde önemli değişikliklere sebep olabilir. Harici yük, hız, hareket türü, sıcaklık, hareket mesafesi ve süresi gibi değerler tribosistemin yapısı üzerinde arzu edilen büyüklüklere dönüşebilir. Bu duruma örnek olarak hareketin ya da dönme momentinin aktarıldığı mekanizmalarda kullanılan kaymalı taşıyıcılar, yataklar, burçlar ve frenler söylenebilir. Bu tür mekanizmalarda sürtünme ve

aşınmadan kaynaklanan kayıp büyüklükler görülebilir ve tribosistem üzerinde gerekli düzenlemeler yapılabilir [42-43-44].

5.1. Sürtünme

Sürtünme, birbiriyle temas hâkinde olarak hareket eden iki nesnenin arasında oluşan ve harekete karşı koyan dirençtir. Malzeme çiftinin yüzeyleri arasında farklı hareket türü olarak kayma, yuvarlanma ya da bunların birleşimi şeklinde olabilir. Sürtünme genellikle kuvvete ait büyüklükler ile tarif edilir. Bu büyüklükler şu şekildedir [42]:

Sürtünme kuvveti (F_R): Hareketin yönüne zıt olarak ortaya çıkan bu büyüklüğün iki şekli vardır:

- Statik sürtünme (izafi hareketsiz durumda)
- Dinamik sürtünme (izafi hareket olması durumunda)

Sürtünme katsayısı (μ): Sürtünme kuvvetinin normal kuvvete bölünmesi ile hesaplanır.

$$\mu = F_R / F_N \quad (5.1)$$

Sürtünme ölçü büyüklüğü sadece malzemeye ait bir özellik olmayıp tribolojik sisteme ait bir büyüklüktür ve basitçe şu şekilde ifade edilebilir:

$$\text{Sürtünme ölçü büyüklüğü} = f(\text{sistemin yapısı, zorlama bileşenleri})$$

Sistemin yapısında sürtünme olayına doğrudan katılan cisimler ve özellikleri bulunur. Zorlama bileşenleri ise normal kuvvet, kayma hızı, sıcaklık ve süredir. Sürtünme büyüklüklerini teorik olarak hesaplamak, tribosistemin karmaşık olması nedeniyle imkânsızdır [45].

5.1.1. Sürtünme Kanunları

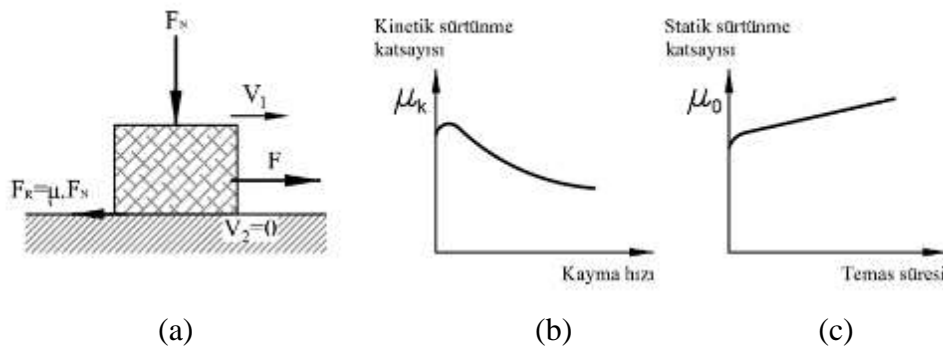
Eğer cisim hareket ettirmek için uygulanan kuvvet sürtünme kuvvetine eşit veya düşük ise cisim hareket etmez. Sürtünme kuvvetinden yüksek ise ancak hareket sağlanabilir. Cismin hareketini sağlayan kuvvet veya kuvvet bileşkesi paralel olduğu için sürtünme kuvveti de paraleldir.

Temas eden iki cismin klasik sürtünme kanunlarını Amontus (I. ve II. kanun, 1699) ve Coulomb (III. kanun, 1781) ortaya çıkarmıştır. Bu kanunların doğruluk kontrolü bir mikroskop ile rahatça görülebilir. Kuru sürtünme kanunları olarak da bilinen bu kanunlar şu şekildedir:

- Sürtünme kuvveti normal kuvvet ile orantılıdır.
- Sürtünme kuvveti malzeme çiftinden bağımsızdır.
- Kayma hızı küçükse sürtünme kuvveti kayma hızına bağlı değildir [45].

5.1.2. Sürtünme Katsayısı

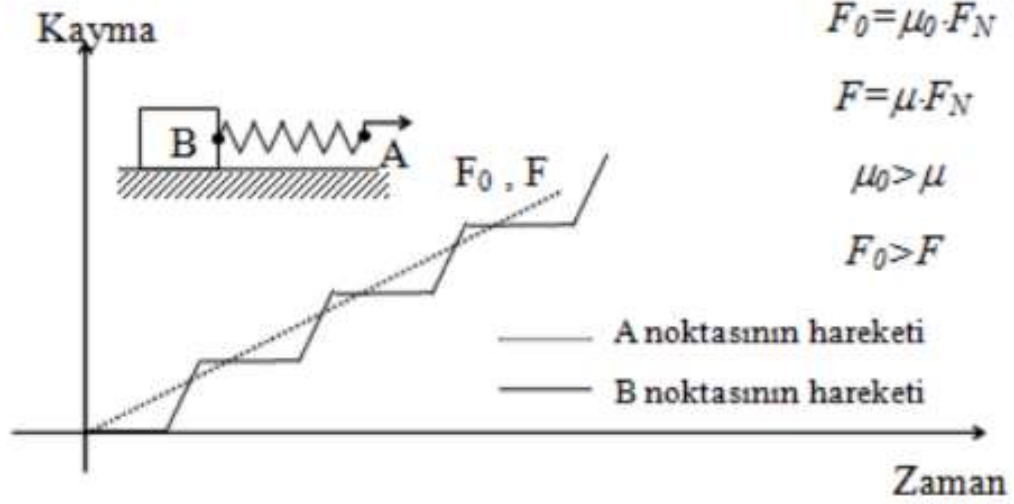
Sürtünme katsayısını (μ) etkileyen birçok parametre vardır. Yapılan bir farklı deneylerde sürtünme katsayısının ortamda sürtünmeye etki edecek maddelere örnek olarak yağ ve benzeri maddelere, yüzey pürüzlülüğüne, tane büyüklüğüne, cismin sertliğine, kayma süresine ve kayma mesafesine bağlı olduğu görülmüştür. Burada kayma süresi, ortalama tane büyüklüğü ve kayma mesafesi arttıkça sürtünme katsayısı da belli bir değere kadar arttıktan sonra o değerde yaklaşık olarak aynı kalır. Sürtünmenin statik ve dinamik olmak üzere 2 farklı çeşidi olduğundan bahsetmiştik. Statik sürtünme katsayısı (μ_0) kinematik sürtünme katsayısı (μ_k) den genelde daha büyüktür. Statik sürtünme katsayısı temas süresinin bir fonksiyonu olarak değişir. Şekil 5.2c de görüldüğü gibi temas süresine bağ olarak artar. Kinematik sürtünme katsayısı ise kayma hızının bir fonksiyonu olarak değişir. Şekil 5.2b’de görüldüğü gibi hareketin ilk anında sürtünme katsayısı en büyük değere sahiptir. Fakat normal kayma hızlarında sürtünme katsayısındaki azalış az olduğundan sürtünme katsayısı da sabit kabul edilir [46].



Şekil 5.2. (a) Kuru sürtünme modeli ve sürtünme katsayısı, (b) Kayma hızına bağlı kinetik sürtünme katsayısı (c) Temas süresine bağlı statik sürtünme katsayısı [47]

Sürtünmeli bir ortamda harekete başlandığında bir kay-dur olayı meydana gelir. Bu durumun temel sebebi statik sürtünmenin kinematik sürtünmeden büyük olmasından ve

şürtünme olayı mevcutken cismi harekete geçiren ara elemanın şekil değıştirme kabiliyetine sahip olmasındandır. Ara eleman olarak bir yay sistemde kullanıldığı varsayarsak böyle bir durum için Şekil 5.3'teki gibi bir grafik ortaya çıkartabilir.



Şekil 5.3. Kay-dur (stick-slip) modeli [46]

Hareketsiz olan cismi (B elemanını) hareket ettirebilmek için yaya,

$$F_0 = \mu_0 \cdot N \quad (5.2)$$

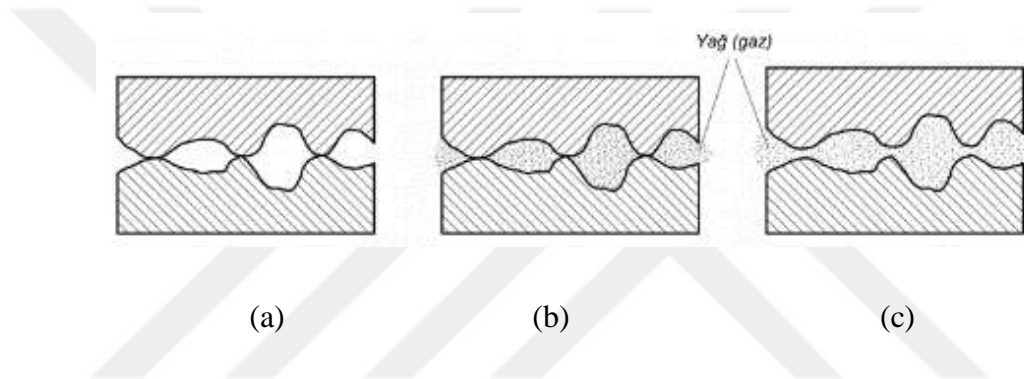
büyüküğün de bir çekme kuvveti uygulamak gerekir. Hareket başladıktan sonra çekme kuvvetinin değeri ise

$$F = \mu \cdot F_N \quad (5.3)$$

olur, $\mu_0 > \mu$ olduğundan da $F_0 > F$ dir. İlk anda kuvvet şürtünme kuvvetini yenmeden yani F_0 değeri ulaşmadan harekete geçemez. Bu sürede yayda (ara elemanda) şekil değışimi meydana gelir. Hareket başlar başlamaz şürtünme aniden azalır ve yayda biriken şekil değıştirme enerjisi B yükünü bir sıçratma hareketi ile ileri kaydırır. Fakat B yükünün hareketi fazla uzun sürmez, atalet momentinden ötürü hemen durur. Kay-dur şeklindeki bu hareket defalarca tekrarlanır. Yayın A noktası doğrusal bir yol izlerken B noktasına kay-dur hareketi ile kademeli bir yol izler.

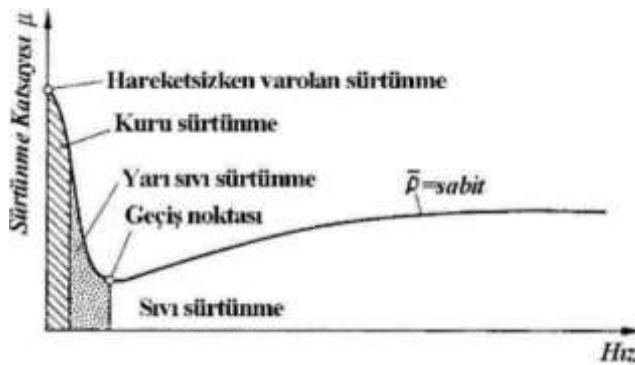
5.1.3. Sürtünme Çeşitleri

Tribolojide sınır sürtünmesi, sıvı sürtünme, gaz sürtünmesi, kuru sürtünme ve karışık sürtünme olmak üzere beş gruba ayrılır. Şekil 5.4a’da gösterildiği gibi kuru sürtünmede sürtünen cisimler arasında yağlayıcı bir tabaka olmadan doğrudan birbiriyle sürtünmesidir. Şekil 5.4b’de gösterildiği gibi sınır sürtünmede ise sürtünme çiftinin yüzeylerinde moleküler boyutta ince bir yağ filminin olması ile yapılan sürtünme grubudur. Sıvı sürtünme ile gaz sürtünmesinde cisimler arasında sıvı veya gaz olması durumudur. Bu durumda cisimler birbiriyle temas etmez. Hidrostatik veya hidrodinamik olarak meydana gelen sürtünme çeşidi sıvı sürtünmeye örnektir (Şekil 5.4). Gaz sürtünmesinde ise gaz filmi aerostatik veya aerodinamik haldedir. Karışık sürtünmede ise sıvı veya gaz sürtünmesi ile beraber kuru sürtünmenin olması durumudur.



Şekil 5.4. Sürtünme çeşitleri; (a) Kuru sürtünme, (b) Sınır sürtünme ve (c) Sıvı sürtünme [46]

Şekil 5.5’de verilen Stribeck eğrisinde temas çiftinin izafi hareketinde sürtünme hızı ve sürtünme katsayısı arasındaki ilişkiyi bir sürtünme çeşidinden diğer sürtünme çeşidine geçişi ve sürtünme katsayısının değişimi gösterilmektedir.



Şekil 5.5. Sürtünme çeşitleri [48-49]

Gerçek bir kuru sürtünme yapılması sadece laboratuvar ortamında olabilir. Bu durumun temel sebebi açık hava ortamında bulunan bazı gazların temas çifti arasına absorbe edilmesidir.

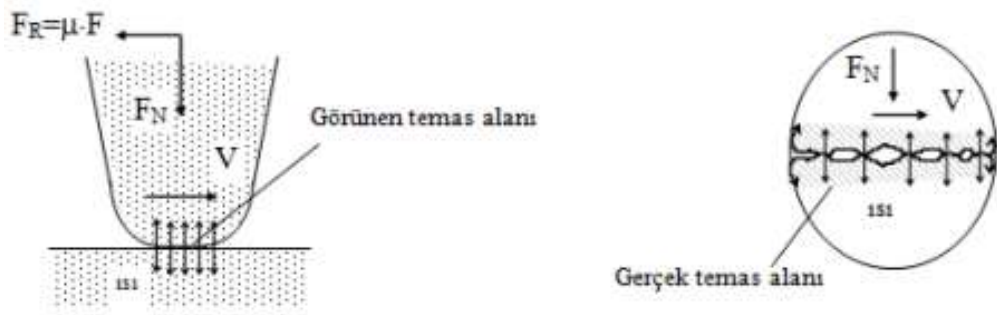
Bu gazlar sayesinde birtakım yağ, oksitler ve pislikler gibi bileşikler meydana gelebilir. Böylece bu bileşikler sistemde kayganlaştırıcı bir ortam hazırlayıp sürtünmeye azda olsa etki eder. Gerçek metal-metal teması ancak laboratuvar ortamında vakumlu bir ortamda temizlenmesiyle gerçekleşir.

Kuru sürtünmede izafi hareket nedeniyle noktasal metal-metal temasının olduğu kısımlarda soğuk kaynak hali meydana gelebilir. Sürtünme sırasında noktasal olarak kaynayan bu noktalar ya yüzey tabakasından partiküller kopararak tabakanın yırtılmasına neden olur ya da hareketi durdurur. Bu sebeplerden dolayı kuru sürtünmeye engel olabilecek herhangi bir bileşik temas yüzeyi arasında bulunmamalıdır.

Sürtünme içinde metal kaynak bağları ile içeride birtakım kimyasal bileşikler bulunan tabakalar arasındaki bağların meydana getirdiği direnç diyebiliriz. Aynı zamanda sürtünme kuvveti için ise oluşan bu tabaka ve bağları koparmaya çalışan kuvvettir denilebilir. O halde sürtünme kuvveti temas çifti arasındaki hem düzensizliklerden doğan ve hem de moleküler çekme kuvvetlerinden dolayı temas yüzeylerine etkiyen pek çok kuvvetten oluşur [50].

5.1.4. Kuru sürtünme

Aşınmanın meydana geldiği temas çiftinin yüzey alanı önemlidir. Temas alanının görünen hali ile gerçek hali birbirinden farklıdır. Şekil 5.6'da görüleceği gibi gerçek temas alanı her zaman gözle görünen temas alanından küçüktür. Çünkü hangi üretim prosesi yapılsa yapılsın pürüzsüz bir yüzey elde etmek mümkün değildir. Bunun temel sebebi yüzeydeki atomların yapısından dolayı en az birkaç mikron büyüklüğünde pürüzler ortaya çıkmaktadır. Temas çiftinde de zaten bu pürüzler birbirine temas ederek sürtünme meydana getirir. Gerçek temas alanı sadece temas halindeki pürüzlerin yüzey alanları toplamıdır [42].



Şekil 5.6. Bir kayma çifti [22]

Temas alanının büyüklüğüne yüzey pürüzlülüğü, yük miktarı ve yükleme şekli etki eder. Yüzey pürüzlülüğü ne kadar az olursa temas o fazla olacaktır. Yük miktarı büyük olursa temas halindeki pürüz tepelerine baskı uygulayarak ezme şeklinde şekil değişikliği sağlar ve mesafe azalır ve kısa olan pürüz tepeleri de artık temas etmeye başlar. Kısacası gerçek temas alanı uygulanan yük ile doğru orantılıdır. Temas halindeki pürüzsüz olan yüzeylerde meydana gelen adhezyon yapışması soğuk metal kaynağına benzer bir olaydır.

5.2. Aşınma

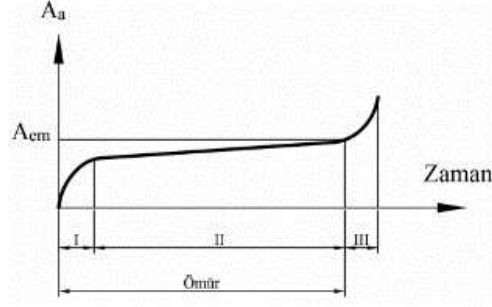
Temas halindeki malzeme çiftlerin yüzeyinden parçalar koparak uzaklaşır yeni temas yüzeyleri de meydana gelir. Parçanın malzeme üzerinden yüzey koparmasıyla aşınma meydana gelir.

Her yıpranma aşınma değildir. Mühendislik malzemelerinde yıpranmaların aşınma sayılabilmesi için aşağıdaki şartların var olması gereklidir [42].

- Mekanik bir etken olmalıdır.
- İzafi hareket ve dolayısıyla sürtünme olmalıdır.
- Yavaş seyretmeli ve sürekli olmalıdır.
- Cismın yüzeyinde bir değişiklik olmalıdır.
- İsteğimiz dışında meydana gelmelidir

Aşınma sadece malzemeye bağlı bir özellik değil, sistemin bir özelliğidir. Makine elemanlarının kullanım ömrünü önemli derecede etkilemektedir ve tamamen giderilememektedir. Çok sayıda değışkene sahip olan bir fonksiyondur ve sürekli takip edilmesi gereken bir meseledir [50-51-52].

Aşınma, meydana geliş süresi açısından, zamanla gelişen ve aniden ortaya çıkan aşınmalar olarak iki grupta toplanır. Şekil 5.7' de görüldüğü gibi zamanla gelişen aşınmaların üç aşaması vardır. Birinci aşama temas çiftinin birbirine alıştığı aşamadır. Bu aşamada temas çiftindeki aşınma hızı yüksektir. Daha sonraki aşınma da ise aşamasına etkisi büyüktür. İkinci aşama yüzeylerin temas eden noktalarında gerçekleştiğinden uzun sürelidir. Üçüncü aşama ise ikinci aşamada yavaş olarak aşınma gerçekleşen ama zaman miktarı fazla olan aşınmanın bir neticesi olarak temas çiftinin verimsiz çalışması ile aşınma hızının tekrar artarak makine parçasının ömrünü tamamladığı aşamadır.



Şekil 5.7. Aşınma zaman bağıntısı [45]

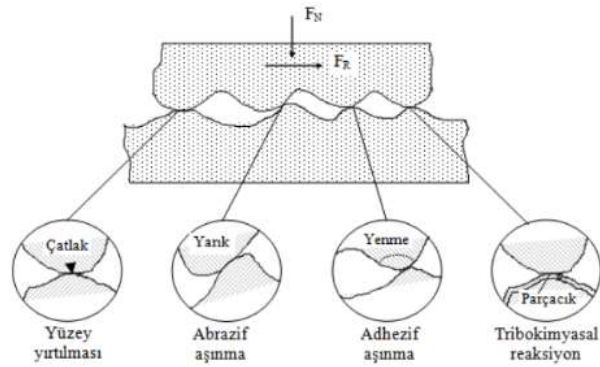
İlk aşamada aşınma en hızlı şekilde başlayıp temas çiftinin yüzeylerini bozar. İkinci aşamada yüzeyi bozulan temas çiftleri artarak stabil hale gelir aşınma azalır. Üçüncü aşamada artık ürün verimsiz çalışacak veya duracaktır. Eğer malzeme çifti yanlış seçildiği ve yeterli yağlama olmadığı durumlarda olursa ürün çalışamaz hale gelerek kilitlenmeye neden olabilir.

5.2.1. Aşınma Türleri

Aşınma üzerine yapılan çalışmalarda birçok farklı aşınma çeşidi ortaya çıkmıştır. Aşınma türleri şu şekildedir:

- Adhezif aşınma
- Abrazif aşınma
- Korozif aşınma
- Tabaka ve yenme aşınması
- Yorulma aşınması
- Difüzyon aşınması
- Erozyon aşınması
- Kavitasyon aşınması

En çok görülen aşınma türleri Şekil 5.8'de gösterilmektedir.



Şekil 5.8. En çok görülen aşınma mekanizmaları [42]

Adhezif aşınma: Metalografik yapıları birbirine benzeyen malzemeler arasında genellikle kayma sürtünmesi sırasında adhezif çekim oluşur. Birbirine temas eden malzemelerin pürüzleri arasında olduğun dış kuvvet veya malzeme ağırlığı ile pürüzlülükler üzerinde baskı oluşur. Oluşan baskı şekildeğişimine sebebiyet verip bölgede kaynak oluşturur. [53]. Yapılan deneylerden alınan sonuçlar için şunlar söylenebilir:

Adhezif aşınma birbirine benzeyen ya da daha kolay alaşım yapabilen malzemeler arasında oluşmaktadır. Adhezif aşınma genellikle yüksek sürtünme hızlarının olduğunda ve fazla yük uygulandığında görülür. Oksit veya nemden oluşan tabakaların etkisi adhezif aşınma üzerinde büyüktür. Malzemeler arsında sertlikler arasındaki fark büyükse yumuşak malzemedeki kaynak bağları koparak sert malzeme yüzeyine yapışır buda yumuşak malzemenin daha hızlı aşındığını göstermektedir. Adhezif aşınmada yüzeyde yağ veya benzer kayganlaştırıcı madde olması aşınmasını engelleme yönünde çalışır. Temas eden malzemeler arasında abrasif aşınma durumu yoksa oluşan aşınma türü adheziftir.

Abrasif aşınma: adhezif aşınmanın tersine farklı kristalografik yapılara sahip malzeme çiftlerinde görülür. Sert veya keskin köşeli minerallin metal yüzeye yaptıkları mikroskobik ölçüde çizikler ile talaş kaldırmasından oluşur. Kuvvetin etkisiyle sert cisimdeki pürüz tepeleri yumuşak cismin yüzeyinden küçük parçacıkları kesip atıyorsa abrasif aşınma var demektir. Abrasif aşınmanın olmaması için yüzeylerin sertleştirilmesi gerekir. Sızdırmazlık elemanları kullanılarak sert maddelerin temas çifti arasına girmesi önlenmelidir. Makinelerin talaş ve diğer pisliklerden uzak tutulması için sık sık temizlenmesi gerekir [54].

Korozif aşınma: Birbirine temas eden yüzeyler arasında kimyasal ya da elektro kimyasal ilişkiler ile yüzey yapısında çeşitli katmanlar oluşur. Sürtünme hareketi ile yüzeydeki tabakaları yüzeyden parçalayarak atılmasına denir.

Tabaka ve yenme aşınması: Malzeme yüzeyinin hava ile reaksiyona girerek oluşturduğu oksit tabakası aşınmayı azaltmasına rağmen, ortamda bulunan kimyasal maddeler ile tepkimeye girerek ince ve sert tabakalar oluşturur. Aşındıkça tekrar oluşan tabakalar etkileşime girer. Bu tür olaylara oksidasyon aşınması da denir.

Yorulma aşınması: Genellikle Titreşim gibi frekanslı zorlamalarda meydana gelen yorulma kırılmasıyla meydana gelen aşınmalardır. Yorulma kırılmalarıyla yüzeyden parçalar halinde yırtılmalar oluşur.

Difüzyon aşınması: Sürtünmeden doğan temas ile sıcaklık artar. Buna bağlı olarak atomlar kristal kafes içerisinde yüksek yoğunluklu bölgelerden düşük yoğunluklu bölgelere hareket ederek difüzyona uğramaktadır. Yapılan araştırmalara göre pullanmayı başlatan çatlakların gerek yüzeyde ve gerekse yüzeyin hemen altında ortaya çıktığı tespit edilmiştir [38-40-49].

Erozyon aşınması: Akışkan maddelerin meydana getirdiği aşınma çeşididir. Sıvılar, gazlar akış hareketi sırasında yüzeye çarparak yüzeyde aşınmalar meydana getirmesiyle oluşur.

Kavitasyon aşınması: Pompa gibi hidrolik basınç ile çalışan ürünler gerek sistemin hava emmesi gerekse sıvı buharlaşma ile ortaya sıvı zerreciklerinin yüzeye çarparak yatıkları aşınmadır.

Aşınmayı etkileyen birçok unsur bulunmaktadır. Bu unsurlar, genellikle ana malzemeye bağlı unsurlar, aşındırıcının etkisi ve karşı malzemeye bağlı unsurlar, ortam şartları ve servis şartları olmak üzere dört ana grup üzerinde yoğunlaşmaktadır.

Ana malzemeye bağlı unsurlar arasında malzemenin deformasyon davranışı, yüzey pürüzlülüğü, malzemenin boyutu, kristal yapısı, malzemenin sertliği ve elastite modülü, gösterilebilir. Aşındırıcının etkisi ve karşı malzemeye bağlı unsurlar olarak malzemeyi aşındıran parçanın özellikleri esas alınmaktadır. Ortam şartları olarak sıcaklık, nem ve atmosfere bağlı iken, servis şartları olarak da basınç, hız ve kayma yolu gösterilir [51].

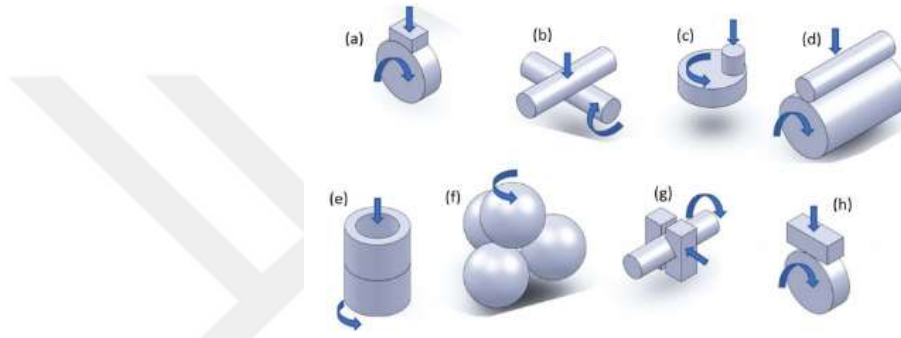
5.2.2. Aşınma Test Yöntemleri

Kuru temaslı sürtünmelerde dinamik sürtünme katsayısı uygulanan yüke, kayma hızına, yüzey pürüzlülüğüne, sıcaklığa ve temas bölgelerinin elastik ve plastik şekil değiştirme özelliklerine bağlıdır. Çalışma şartlarının ve temas parametrelerinin dinamik sürtünme katsayısına etkileri üzerinde bazı teorik modellemeler yapılmakla birlikte deneysel çalışmaların yerini tutmamaktadır.

Tribolojik deneylerin yapılması konusunda çok farklı deney düzenekleri geliştirilmiştir. Tribometri ismi verilen bu düzeneklerde basit geometrik deney numuneleri kullanılmaktadır. Çeşitli deneyler için oluşturulan bu laboratuvar tribometrileri American Society of Lubrication Engineers (ASLE) araştırmaları kapsamında incelenmiştir. Yaklaşık olarak 250 laboratuvar tribometrisinin ele alındığı bu incelemede deneylerde kullanılan bazı numunelerin geometrileri ve temas türleri şu şekilde sınıflanmıştır:

- Pim – disk (yüzeysel)
- Disk – disk (çizgisel)
- Yüzey – yüzey (yüzeysel)
- Küre – küre (noktasal)
- Çapraz silindir (noktasal)
- Disk – dönen pim (yüzeysel)
- Pim – dönen disk (yüzeysel)
- Bilezik – bilezik (yüzeysel)
- Bilezik – dönen silindir (çizgisel)

Şekil 5.9’da tribolojide yaygın bir şekilde kullanılan deney numune temas geometrilerinden bazıları gösterilmiştir [42].



Şekil 5.9. En çok görülen temas şekilleri [42]

5.2.3. Aşınma Ölçüm Metotları

5.2.3.1. Ağırlık Kaybı Metodu

Ölçülen büyüklüğün kolay tayini, ekonomik ve ölçümü yapılan parçanın hassasiyet değerlerini karşılaştırılması özellikleri göz önünde bulundurulduğunda en çok kullanılan ölçüm şekli olarak karşımıza çıkmaktadır. Test öncesi ağırlık alındıktan sonra test bitiminde alınarak istenilen gr veya miligram ağırlık birimine göre karşılaştırılma yapılmaktadır. Yapılan ölçüm metodunda aşınan yüzey alanlarının aynı olması gerekmektedir.

Ağırlık farkı ölçümünde en çok aşağıda verilen bağıntı kullanılmaktadır [55].

$$W_a = \frac{G}{d \cdot M \cdot S} \quad (5.4)$$

Bu bağıntıda;

W_a = Aşınma oranı (mm³ / Nm)

$G = \text{Ağırlık kaybı (mg)}$

$M = \text{Yükleme ağırlığı (N)}$

$S = \text{Aşınma yolu (m)}$

$d = \text{Malzeme yoğunluğu (mg / mm}^3\text{)}$

olarak verilmiştir. Aşınma oranının ters değeri de aşınma direnci (W_r) olarak kabul edilmiştir.

$$W_r = \frac{1}{W_a} \quad (5.5)$$

Bu yöntemde hassas malzeme tartımlarında malzeme yüzeyi ve tartan terazi devamlı temiz olmasına önemlidir.

5.2.3.2. Kalınlık Farkı Metodu

Başlangıçta alınan malzeme kalınlığı ile test sonunda alınan malzeme kalınlığı karşılaştırılarak hacimsel değişime bağlı olarak ölçüm metodudur. Hassas ölçü aleti kullanılarak +1 μm duyarlılıkta ölçülmelidir [56]. Kalınlık farkı ölçümüne bağlı olarak çoğu zaman aşınmanın eğik mi yoksa düz bir şekilde mi ne oranda hangi elemanda olduğunu net bir bilgi vermediğinden hacimce değişimler dikkate alınır [57].

5.2.3.3. İz Değişimi Metodu

Parça aşınma öncesi aşınacak olan yüzeye belirli bir iz açılır İz bırakmak için genellikle Brinell veya Vickers sertlik cihazları (bilye veya elmas piramit uç) kullanılmaktadır [58]. Aşınma sonrası iz ölçülerek aşınma tayin edilir.

5.2.3.4. Radyoizotop Metodu

Proton, nötron ve yüklü α parçacıklarıyla bombardımana uğrayan sürtünme yüzeyi bölgesinin radyoaktif hale getirilmesi esasına dayanmaktadır. Bu yöntemde aşınmanın yüksek bir hassasiyetle ölçülebilmesine karşın uygulanmasının pahalı olması sebebiyle kullanım alanı yaygın değildir [50].

6. MATERYAL VE METOT

Deneilerin tamamlanabilmesi, istenen oranlarda hazırlanan malzemenin dökümü, katılaştırılması, uygun tezgâhlarda kesilerek numune hazırlanması, 900 °C - 950 °C sıcaklıklarda ısıl işlem varyasyonlarının uygulanarak tuzlu su ortamında 200 °C - 400 °C'lerde 30 ile 360 dk. arasında farklı sürelerde soğutulması, numune yüzeylerinin kademeli zımpara ve ileri yüzey parlatma ekipmanları ile parlatılması sonrasında sertlik değerlerinin ölçülmesi akabinde test öncesi uygun çözeltiler ile dağlanarak faz farklılıklarının optik mikroskop ve elektron mikroskobu vasıtası ile görüntülenmesi gerçekleşmiştir. Daha sonra testte alınarak farklı sıcaklık ve östemperleme süresinin aşınma direnci, sertlik ve sürtünme katsayısı üzerine incelemelerde bulunulmuştur.

6.1. Çalışmada Kullanılan Malzemeler

Laboratuvar testleri için 17 adet Cr-Mo takviyeli GGG-50 döküm malzeme kullanılmıştır (Şekil 6.1). Hazırlanan numunelerin Foundry Master marka spektrometre analiz cihazı ile Şekil 6.2'de görüldüğü gibi kimyasal yapı kontrol edilmiş olup, Şekil 6.3'de numunelerin kimyasal analiz sonucu yer almaktadır.



Şekil 6.1. Çalışmada kullanılan malzemeler



Şekil 6.2. Spektrometre analiz cihazı,

Element	Analiz %
Fe	82,77
C	2,390
Si	2,244
Mn	0,342
P	0,106
S	0,124
Cr	0,900
Mo	0,135
Ni	0,297
Al	0,029
Cu	0,090
Zn	0,030
Mg	0,133
Nb	0,007
Ti	0,028
V	0,003
Sn	0,004
Bi	0,023
Sr	0,003
Ba	0,004

Şekil 6.3. Çalışmada kullanılan malzemelerin spektrometre cihazı ile kimyasal analizi

Deneylerde kullanılan malzemelerin yapısında %0,8 Cr ve yaklaşık olarak %0,2 Mo ve 0,4 Ni bulunmaktadır.

6.2. Numunelerin Hazırlanması

6.2.1. Tel Erezyon Tezgâhı

Çalışmada kullanılan malzemenin tokluk, sertlik, aşınma direnci gibi mekanik özellikler göz önünde bulundurularak en ergonomik ve ekonomik imalat yönteminin tel erezyon kesimi olduğuna karar verilmiştir.

6.2.2. Malzeme Yüzey Pürüzlülüğü Temizleme

Malzeme yüzeyin bulunan döküm bölgeleri freze tezgâhında temizlenip ısıtma işlem öncesi yüzeylerin hazır hale gelmesi sağlanmıştır.

6.2.3. Östemperleme İşlemi ve Numune Numaralandırma

Östemperleme iki aşamadan oluşan bir ısıtma işlem sürecidir. İşlemin ilk aşamasında, östenitlenen numuneler, son aşamada izotermal olarak tavlansınlar. Bu amaçla numuneler, 950° ve 900° C’de 60 ve 45 dakika süreyle östenitlendikten sonra, östemperleme için hızlıca, sabit sıcaklıktaki bir tuz banyosuna aktarılmış, bu sıcaklıkta 30,45,60,90,120,240 ve 360 dakika süreyle tutulmuş, daha sonra çıkarılıp havada soğutularak östemperleme işlemi tamamlanmıştır. Östemperleme işlemi, 200°, 250°, 300°,350° ve 400°C olmak üzere 5 farklı

sıcaklıkta yapılmıştır. Numunelerin ısıtma işlemi, soğutma ve temperlenme durumları Çizelge 6.1’de verilmiştir. Isıtma işlemi sonrası numuneleri kolay ve düzgün bağlanabilmesi amacıyla numunelere bakalit kaplanıp, testte girecek olan bölgeler test değerlerine etkilememesi için sürtünen bölge etrafı Şekil 6.4’ de gösterildiği gibi bakalitten arındırılmıştır.

Çizelge 6.1. Numunelerin ısıtma işlemi, soğutma ve temperlenme durumları

Numune numarası	Sıcaklık (°C)	Zaman (dakika)	Su verme Ortamı	Alt kritik difüzyon sıcaklığı (°C)	Alt kritik difüzyon süresi (dakika)	Soğutma Ortamı
S1	Döküm Numune	-	-	-	-	-
S2	950	60	Tuz	200	60	Hava
S3	950	60	Tuz	200	120	Hava
S4	950	60	Tuz	200	240	Hava
S5	950	60	Tuz	200	360	Hava
S6	900	45	Tuz	250	30	Hava
S7	900	45	Tuz	250	45	Hava
S8	900	45	Tuz	300	30	Hava
S9	900	45	Tuz	300	45	Hava
S10	900	45	Tuz	300	90	Hava
S11	900	45	Tuz	350	30	Hava
S12	900	60	Tuz	350	45	Hava
S13	900	60	Tuz	350	90	Hava
S14	950	60	Tuz	400	60	Hava
S15	950	60	Tuz	400	120	Hava
S16	950	60	Tuz	400	240	Hava
S17	950	60	Tuz	400	360	Hava



Şekil 6.4. Bakalit kaplı numune

6.2.4. Zımparalama, Yüzey Parlatma ve Dağlama

Isıl işlem ve soğutma işlemlerinden geçen numunelerin daha sonraki aşamalarda iyi bir şekilde görüntülerinin alınabilmesi için zımpara ve yüzey parlatma ekipmanları kullanılarak numune yüzeyleri pürüzsüz bir hale getirilmiştir. Bu işlemler için kullanılan ekipmanlar; bir yüzey parlatma makinesi, Şekil 6.5 ve Şekil 6.6' da görülen Mikrotest marka zımpara makineleri (120, 400, 600 ve 1000'lik), ve Şekil 6.7' da görülen Struers Rotopol-1 marka parlatma cihazında 3 µm' luk keçe kullanılarak parlatma işlemi uygulanmıştır. Parlatma öncesi mikro yapılar bakıldıktan sonra, parlatma işlemi için %2 nital ve saf su ile 2 saniye süre ile dağlama ve dağlama işlemi sonrası numune yüzeyleri temizlenmiştir.



Şekil 6.5. Zımparalama işleminde kullanılan 120'lik ve 400'lük zımparalama cihazı



Şekil 6.6. Zımparalama işleminde kullanılan 600'lük ve 1000'lik zımparalama cihazı



Şekil 6.7. Numunelerin parlatma işleminde kullanılan parlatma cihazı

6.2.5. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri

Yüzey pürüzlülüğü Şekil 6.8’ de gösterilen Mitutoyo SJ 400 marka yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı ile ölçüldü. Ölçüm sonucu bütün numunelerin yüzeyi 0.35 pürüzlülük değerinde gelmiş olup birbirine eşit olduğundan emin olundu.



Şekil 6.8. Mitutoyo sj 400 yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı

6.3. Metalografi ve Mikro Yapı Kontrolü

6.3.1. Optik Mikroskop ile Görüntü Alma

Malzemelerin mikro yapısını incelemek için kullanılan en yaygın araç olan optik mikroskopu ile malzemelerin döküm hali ve dağlama sonrası hali olmak üzere her bir numunenin görüntüsü alındı. Çalışmada Nikon marka optik mikroskobun (Şekil 6.9) mercekleri yardımıyla görüntüler X100, X200 ve X500 oranlarında büyütülerek fotoğraflanmıştır.

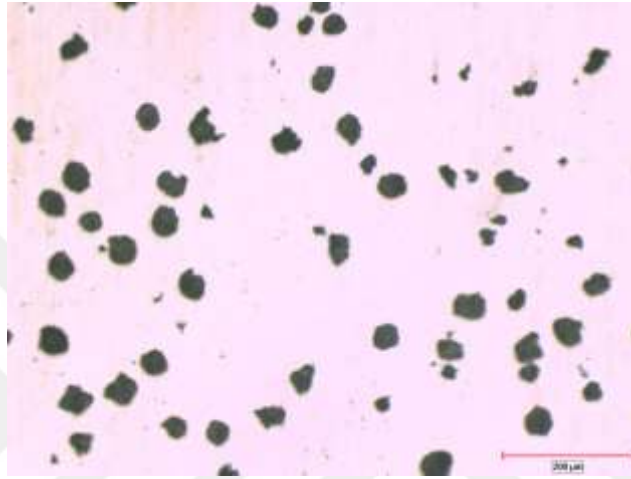


Şekil 6.9. Optik mikroskop ile numunelere uygulanan iç yapı kontrolü

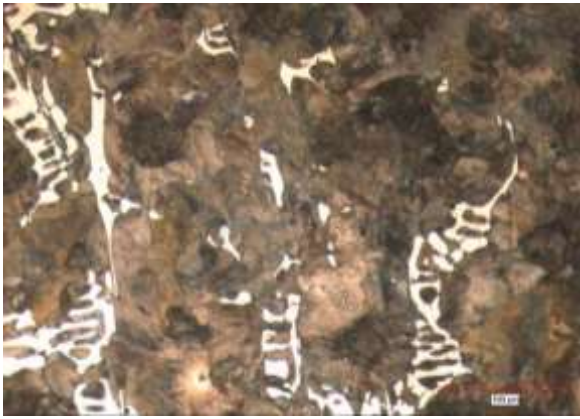
S1 numunesi ısıtıl işlem yapılmamış döküm malzemesinden oluşmaktadır. Şekil 6.10a' daki gibi dağlama öncesi X100 büyütülerek görüntüsü alındıktan sonra, dağlama sonrası Şekil 6.10b' de X200 ve Şekil 6.10c' de X500 büyütülerek görüntüler alınmıştır.

İnceleme neticesinde küreselliğin %92, 1 mm² alandaki küre sayısı 70, küre alanı %8 ve grafit boyutu 26-45 µm olarak bulunmuştur.

Dağlama sonrası yapının perlit ve ledeburit yapı olduğu tespit edilmiştir.



(a)



(a)

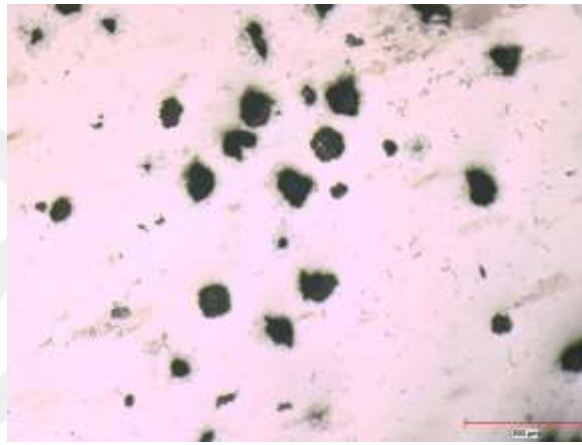


(c)

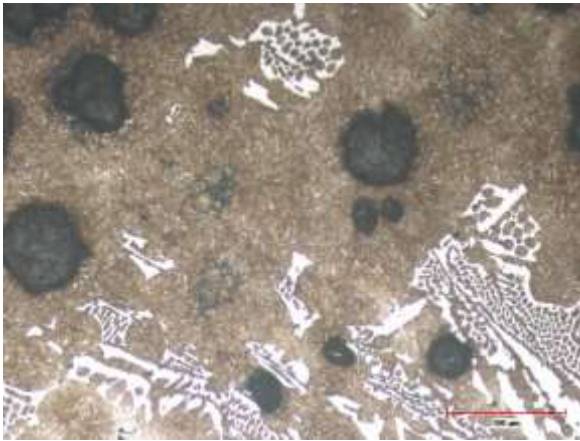
Şekil 6.10. S1 optik mikroskoptan alınan (a) dağlama işlemi öncesi X100 büyütmeli mikro yapı görüntüsü, (b) dağlama sonrası X200 büyütmeli mikro yapı görüntüsü ve dağlama sonrası X500 büyütmeli mikro yapı görüntüsü

S2 numunesine 950 °C' de 60 dakika östenitleme işleminden sonra 200 °C' de 60 dakika östemperleme işlemi yapılmıştır. Şekil 6.11a' daki gibi dağlama öncesi X100 büyütülerek görüntüsü alındı. Dağlama sonrası ise Şekil 6.11b' de X200 ve Şekil 6.11c' de X500 büyütülerek görüntüler alınmıştır.

İnceleme neticesinde küreselliğin %74, 1 mm² alandaki küre sayısı 40, küre alanı %6 ve grafit boyutu 30-66 µm olarak bulunmuştur. Mikro yapıda, beynit çizgileri ve yüksek karbonlu östenit (açık-koyu kahverengi), kalıntı östenit (aydınlık, beyaz) ilaveten küresel grafitlerden (siyah) oluştuğu görülmektedir. Beyaz olarak görünen faz ledeburitteki sementit olup iç kısımlar beynitik matriksi göstermektedir.



(a)



(b)

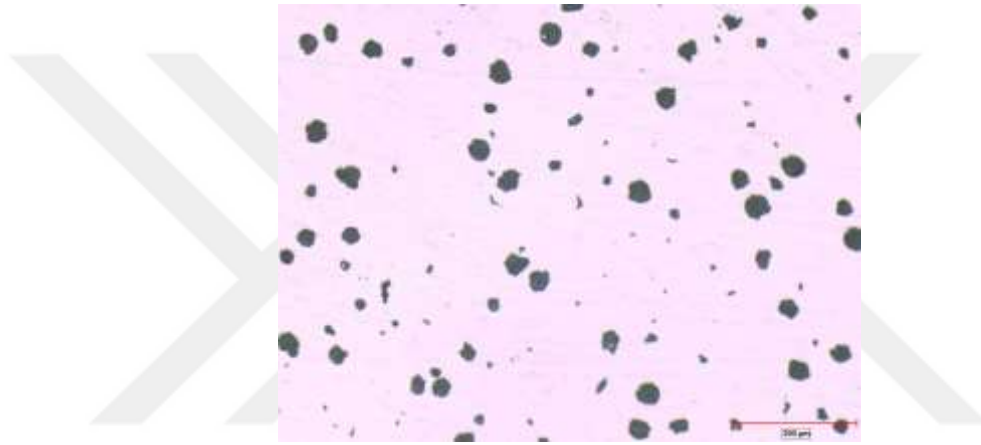


(c)

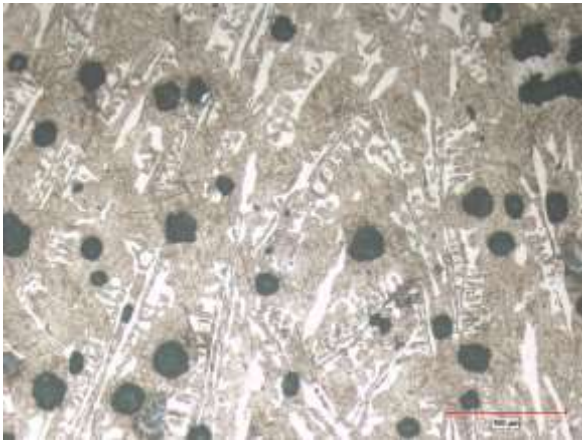
Şekil 6.11. S2 optik mikroskoptan alınan (a) dağlama işlemi öncesi X100 büyütmeli mikro yapı görüntüsü, (b) dağlama sonrası X200 büyütmeli mikro yapı görüntüsü ve dağlama sonrası X500 büyütmeli mikro yapı görüntüsü

S3 numunesine 950 °C' de 60 dakika östenitleme işleminden sonra 200 °C' de 120 dakika östemperleme işlemleri yapılmıştır. Şekil 6.12a' daki gibi dağlama öncesi X100 büyütülerek görüntüsü alındı. Dağlama sonrası ise Şekil 6.12b' de X200 ve Şekil 6.12c' de X500 büyütülerek görüntüler alınmıştır.

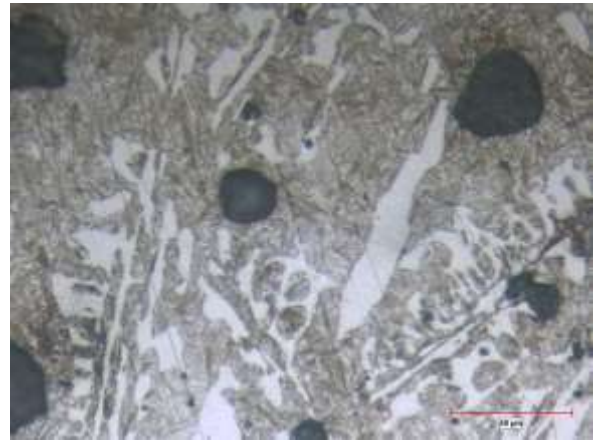
İnceleme neticesinde küreselliğin %83, 1 mm² alandaki küre sayısı 70, küre alanı %5 ve grafit boyutu 21-39 µm olarak bulunmuştur. Mikro yapıda, beynit çizgileri ve yüksek karbonlu östenit (açık-koyu kahverengi), kalıntı östenit (aydınlık, beyaz) ilaveten küresel grafitlerden (siyah) oluştuğu görülmektedir. Beyaz olarak görünen faz ledeburitteki sementit olup iç kısımlar beynitik matriksi göstermektedir.



(a)



(b)

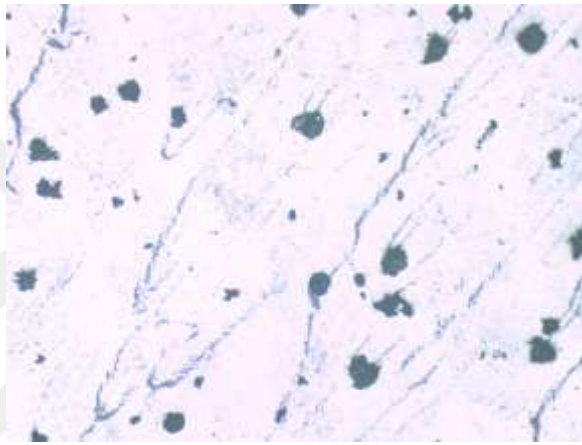


(c)

Şekil 6.12. S3 optik mikroskoptan alınan (a) dağlama işlemi öncesi X100 büyütme mikro yapı görüntüsü, (b) dağlama sonrası X200 büyütme mikro yapı görüntüsü ve dağlama sonrası X500 büyütme mikro yapı görüntüsü

S4 numunesine 950 °C' de 60 dakika östenitleme işleminden sonra 200 °C' de 240 dakika östemperleme işlemi yapılmıştır. Şekil 6.13a' daki gibi dağlama öncesi X100 büyütülerek görüntüsü alındı. Dağlama sonrası ise Şekil 6.13' de X200 ve Şekil 6.14' de X500 büyütülerek görüntüler alınmıştır.

İnceleme neticesinde küreselliğin %77, 1 mm² alandaki küre sayısı 35, küre alanı %3 ve grafit boyutu 31-51 µm olarak bulunmuştur. Mikro yapıda, beynit çizgileri ve yüksek karbonlu östenit (açık-koyu kahverengi), kalıntı östenit (aydınlık, beyaz) ilaveten küresel grafitlerden (siyah) oluştuğu görülmektedir. Beyaz olarak görünen faz ledeburitteki sementit olup iç kısımlar beynitik matriksi göstermektedir.



(a)



(b)

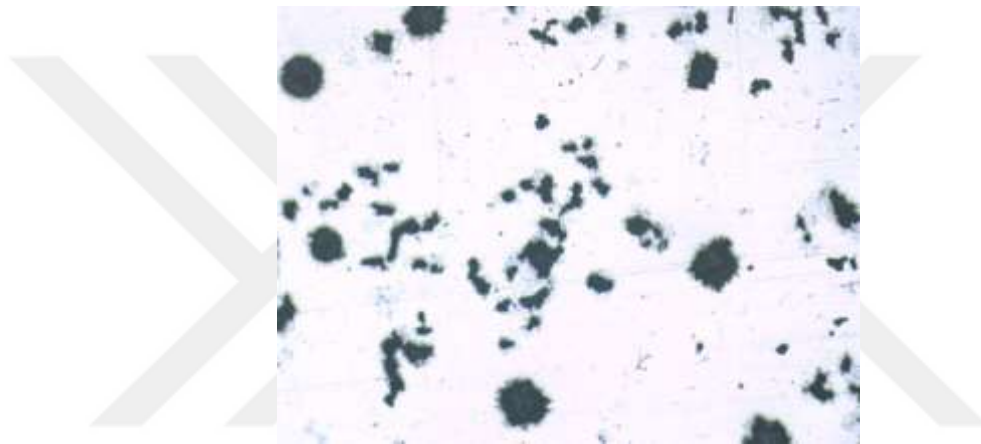


(c)

Şekil 6.13. S4 optik mikroskoptan alınan (a) dağlama işlemi öncesi X100 büyütmeli mikro yapı görüntüsü, (b) dağlama sonrası X200 büyütmeli mikro yapı görüntüsü ve dağlama sonrası X500 büyütmeli mikro yapı görüntüsü

S5 numunesine 950 °C' de 60 dakika östenitleme işleminden sonra 200 °C' de 360 dakika östemperleme işlemleri yapılmıştır. Şekil 6.14a' daki gibi dağlama öncesi X100 büyütülerek görüntüsü alındı. Dağlama sonrası ise Şekil 6.14b' de X200 ve Şekil 6.14c' de X500 büyütülerek görüntüler alınmıştır.

İnceleme neticesinde küreselliğin %63, 1 mm² alandaki küre sayısı 74, küre alımı %10 ve grafit boyutu 30-82 µm olarak bulunmuştur. Mikro yapıda, beynit çizgileri ve yüksek karbonlu östenit (açık-koyu kahverengi), kalıntı östenit (aydınlık, beyaz) ilaveten küresel grafitlerden (siyah) oluştuğu görülmektedir. Beyaz olarak görünen faz ledeburitteki sementit olup iç kısımlar beynitik matriksi göstermektedir.



(a)



(b)

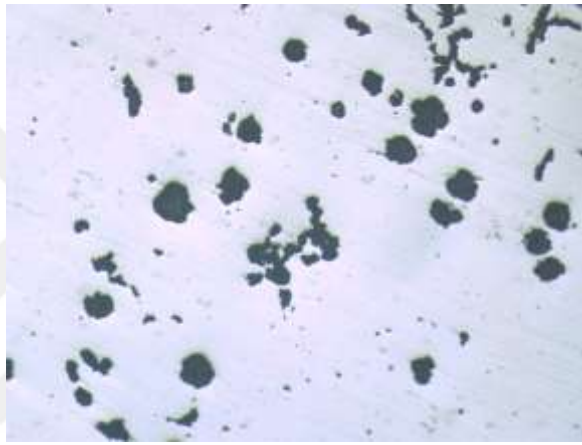


(c)

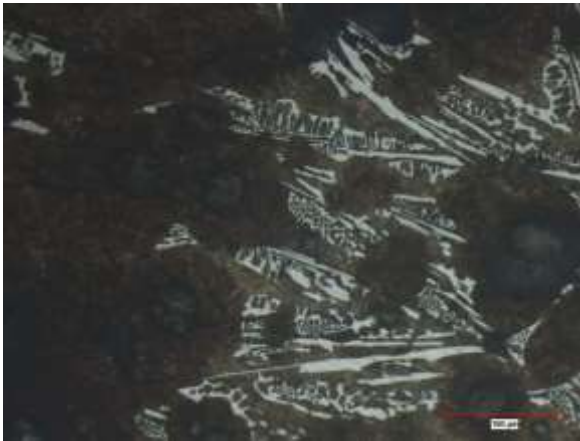
Şekil 6.14. S5 optik mikroskoptan alınan (a) dağlama işlemi öncesi X100 büyütme mikro yapı görüntüsü, (b) dağlama sonrası X200 büyütme mikro yapı görüntüsü ve dağlama sonrası X500 büyütme mikro yapı görüntüsü

S6 numunesine 950 °C' de 60 dakika östenitleme işleminden sonra 200 °C' de 30 dakika östemperleme işlemi yapılmıştır. Şekil 6.15a' daki gibi dağlama öncesi X100 büyütülerek görüntüsü alındı. Dağlama sonrası ise Şekil 6.15b' de X200 ve Şekil 6.15c' de X500 büyütülerek görüntüler alınmıştır.

İnceleme neticesinde küreselliğin %71, 1 mm² alandaki küre sayısı 52, küre alanı %7 ve grafit boyutu 21-66 µm olarak bulunmuştur. Mikro yapıda, beynit çizgileri ve yüksek karbonlu östenit (açık-koyu kahverengi), kalıntı östenit (aydınlık, beyaz) ilaveten küresel grafitlerden (siyah) oluştuğu görülmektedir. Beyaz olarak görünen faz ledeburitteki sementit olup iç kısımlar beynitik matriksi göstermektedir.



(a)



(b)

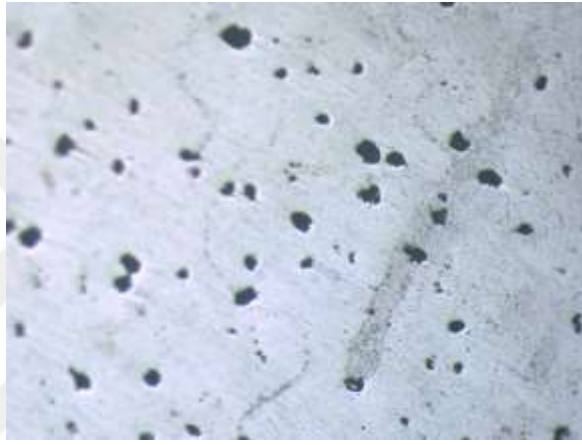


(c)

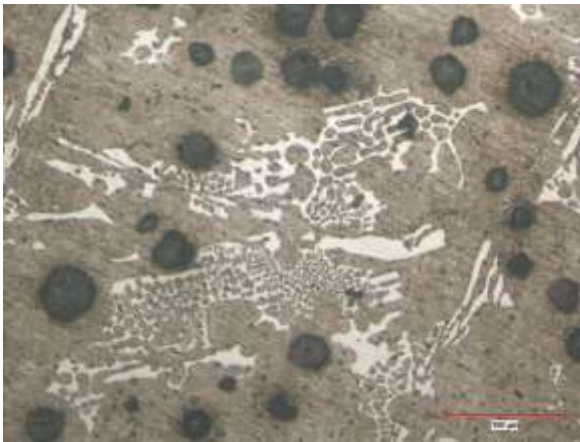
Şekil 6.15. S6 optik mikroskoptan alınan (a) dağlama işlemi öncesi X100 büyütmeli mikro yapı görüntüsü, (b) dağlama sonrası X200 büyütmeli mikro yapı görüntüsü ve dağlama sonrası X500 büyütmeli mikro yapı görüntüsü

S7 numunesine 900 °C' de 45 dakika östenitleme işleminden sonra 200 °C' de 45 dakika östemperleme işlemi yapılmıştır. Şekil 6.16a' daki gibi dağlama öncesi X100 büyütülerek görüntüsü alındı. Dağlama sonrası ise Şekil 6.16b' de X200 ve Şekil 6.16c' de X500 büyütülerek görüntüler alınmıştır.

İnceleme neticesinde küreselliğin %70, 1 mm² alandaki küre sayısı 43, küre alanı %3 ve grafit boyutu 14-50 µm olarak bulunmuştur. Mikro yapıda, beynit çizgileri ve yüksek karbonlu östenit (açık-koyu kahverengi), kalıntı östenit (aydınlık, beyaz) ilaveten küresel grafitlerden (siyah) oluştuğu görülmektedir. Beyaz olarak görünen faz ledeburitteki sementit olup iç kısımlar beynitik matriksi göstermektedir.



(a)



(b)

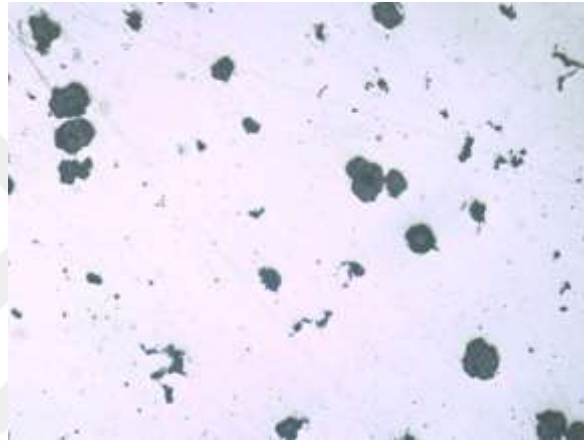


(c)

Şekil 6.16. S7 optik mikroskoptan alınan (a) dağlama işlemi öncesi X100 büyütmeli mikro yapı görüntüsü, (b) dağlama sonrası X200 büyütmeli mikro yapı görüntüsü ve dağlama sonrası X500 büyütmeli mikro yapı görüntüsü

S8 numunesine 900 °C' de 45 dakika östenitleme işleminden sonra 300 °C' de 30 dakika östemperleme işlemi yapılmıştır. Şekil 6.17a' daki gibi dağlama öncesi X100 büyütülerek görüntüsü alındı. Dağlama sonrası ise Şekil 6.17b' de x200 ve Şekil 6.17c' de x500 büyütülerek görüntüler alınmıştır.

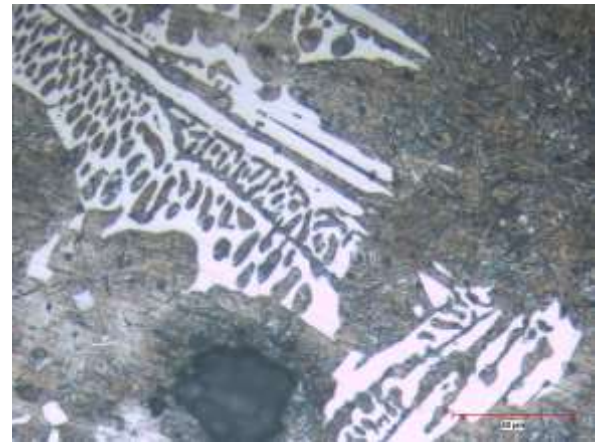
İnceleme neticesinde küreselliğin %65, 1 mm² alandaki küre sayısı 32, küre alanı %4 ve grafit boyutu 35-75 µm olarak bulunmuştur. Mikro yapıda, beynit çizgileri ve yüksek karbonlu östenit (açık-koyu kahverengi), kalıntı östenit (aydınlık, beyaz) ilaveten küresel grafitlerden (siyah) oluştuğu görülmektedir. Beyaz olarak görünen faz ledeburitteki sementit olup iç kısımlar beynitik matriksi göstermektedir.



(a)



(b)

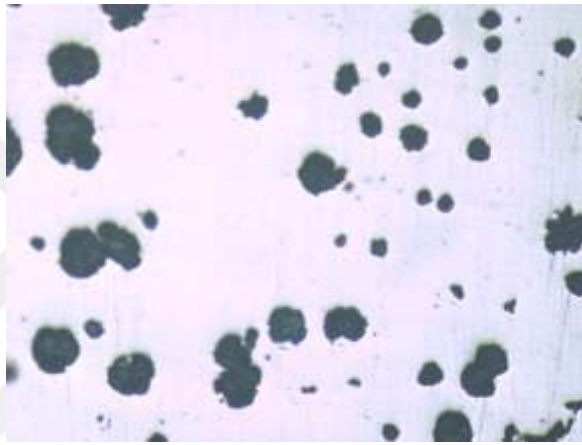


(c)

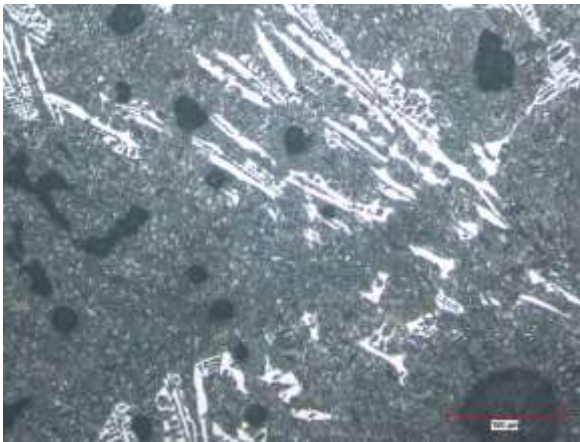
Şekil 6.17. S8 optik mikroskoptan alınan (a) dağlama işlemi öncesi X100 büyütmeli mikro yapı görüntüsü, (b) dağlama sonrası X200 büyütmeli mikro yapı görüntüsü ve dağlama sonrası X500 büyütmeli mikro yapı görüntüsü

S9 numunesine 900 °C’ de 45 dakika östenitleme işleminden sonra 300 °C’ de 45 dakika östemperleme işlemi yapılmıştır. Şekil 6.18a’ daki gibi dağlama öncesi X100 büyütülerek görüntüsü alındı. Dağlama sonrası ise Şekil 6.18b’ de X200 ve Şekil 6.18c’ de X500 büyütülerek görüntüler alınmıştır.

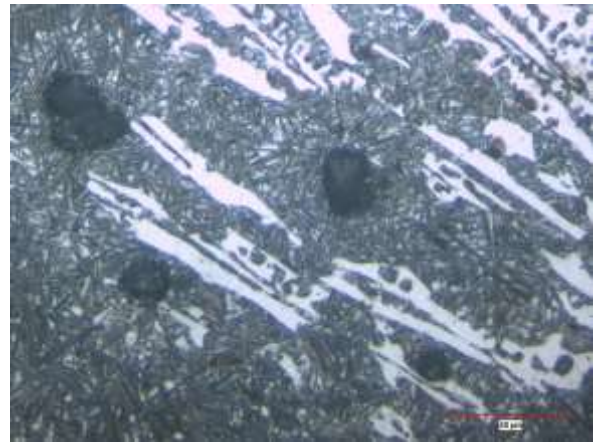
İnceleme neticesinde küreselliğin %81, 1 mm² alandaki küre sayısı 65, küre alanı %13 ve grafit boyutu 30-105 µm olarak bulunmuştur. Mikro yapıda, beynit çizgileri ve yüksek karbonlu östenit (açık-koyu kahverengi), kalıntı östenit (aydınlık, beyaz) ilaveten küresel grafitlerden (siyah) oluştuğu görülmektedir. Beyaz olarak görünen faz ledeburitteki sementit olup iç kısımlar beynitik matriksi göstermektedir.



(a)



(b)

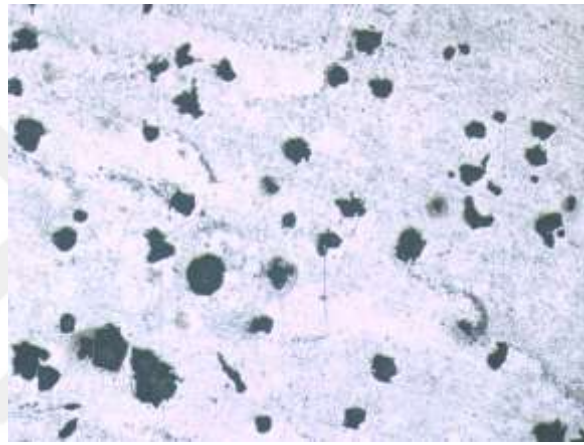


(c)

Şekil 6.18. S9 optik mikroskoptan alınan (a) dağlama işlemi öncesi X100 büyütmeli mikro yapı görüntüsü, (b) dağlama sonrası X200 büyütmeli mikro yapı görüntüsü ve dağlama sonrası X500 büyütmeli mikro yapı görüntüsü

S10 numunesine 900 °C’ de 45 dakika östenitleme işleminden sonra 300 °C’ de 90 dakika östemperleme işlemi yapılmıştır. Şekil 6.19a’ daki gibi dağlama öncesi X100 büyütülerek görüntüsü alındı. Dağlama sonrası ise Şekil 6.19b’ de X200 ve Şekil 6.19c’ de X500 büyütülerek görüntüler alınmıştır

İnceleme neticesinde küreselliğin %71, 1 mm² alandaki küre sayısı 70, küre alanı %9 ve grafit boyutu 19-82 µm olarak bulunmuştur. Mikro yapıda, beynit çizgileri ve yüksek karbonlu östenit (açık-koyu kahverengi), ötektik karbürler ile kalıntı östenit (aydınlık, beyaz) ilaveten küresel grafitlerden (siyah) oluştuğu görülmektedir. Beyaz olarak görünen faz ledeburitteki sementit olup iç kısımlar beynitik matriksi göstermektedir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 6.19. S10 optik mikroskoptan alınan (a) dağlama işlemi öncesi X100 büyütmeli mikro yapı görüntüsü, (b) dağlama sonrası X200 büyütmeli mikro yapı görüntüsü ve dağlama sonrası X500 büyütmeli mikro yapı görüntüsü

S11 numunesine 900 °C’ de 45 dakika östenitleme işleminden sonra 350 °C’ de 30 dakika östemperleme işlemleri yapılmıştır. Şekil 6.20a’ daki gibi dağlama öncesi X100 büyütülerek görüntüsü alındı. Dağlama sonrası ise Şekil 6.20b’ de X200 ve Şekil 6.20c’ de X500 büyütülerek görüntüler alınmıştır.

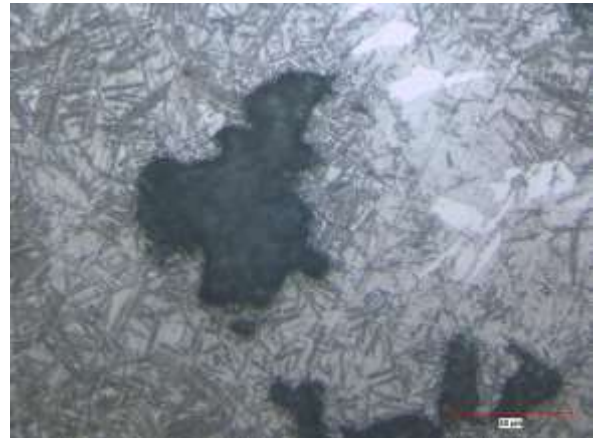
İnceleme neticesinde küreselliğin %68, 1 mm² alandaki küre sayısı 62, küre alanı %8 ve grafit boyutu 31-120 µm olarak bulunmuştur. Mikro yapıda, beynit çizgileri ve yüksek karbonlu östenit (açık-koyu kahverengi), ötektik karbürler ile kalıntı östenit (aydınlık, beyaz) ilaveten küresel grafitlerden (siyah) oluştuğu görülmektedir. Beyaz olarak görünen faz ledeburitteki sementit olup iç kısımlar beynitik matriksi göstermektedir.



(a)



(b)

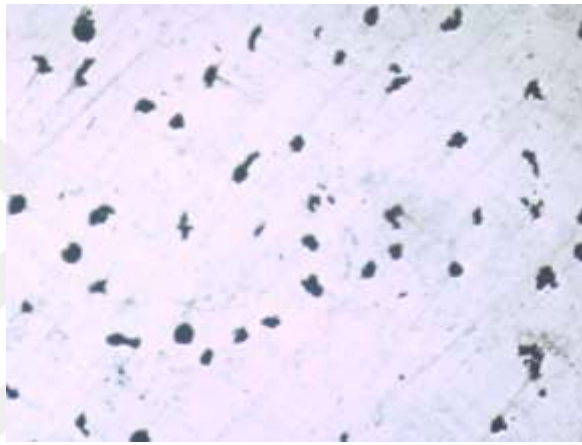


(c)

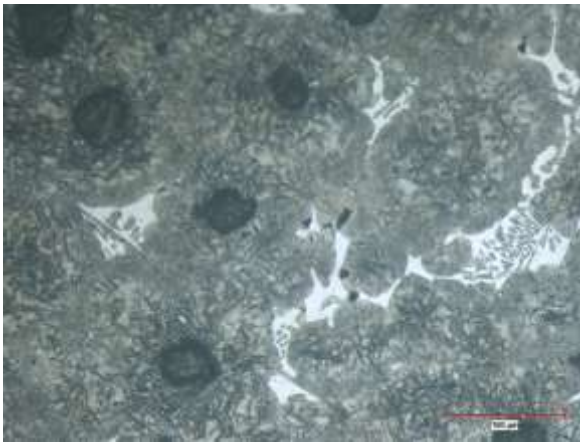
Şekil 6.20. S11 optik mikroskoptan alınan (a) dağlama işlemi öncesi X100 büyütme mikro yapı görüntüsü, (b) dağlama sonrası X200 büyütme mikro yapı görüntüsü ve dağlama sonrası X500 büyütme mikro yapı görüntüsü

S12 numunesine 900 °C’ de 45 dakika östenitleme işleminden sonra 350 °C’ de 30 dakika östemperleme işlemi yapılmıştır. Şekil 6.21a’ daki gibi dağlama öncesi X100 büyütülerek görüntüsü alındı. Dağlama sonrası ise Şekil 6.21b’ de X200 ve Şekil 6.21c’ de X500 büyütülerek görüntüler alınmıştır.

İnceleme neticesinde küreselliğin %65, 1 mm² alandaki küre sayısı 60, küre alanı %4 ve grafit boyutu 18-32 µm olarak bulunmuştur. Mikro yapıda, beynit çizgileri ve yüksek karbonlu östenit (açık-koyu kahverengi), kalıntı östenit (aydınlık, beyaz) ilaveten küresel grafitlerden (siyah) oluştuğu görülmektedir. Beyaz olarak görünen faz ledeburitteki sementit olup iç kısımlar beynitik matriksi göstermektedir.



(a),



(b)

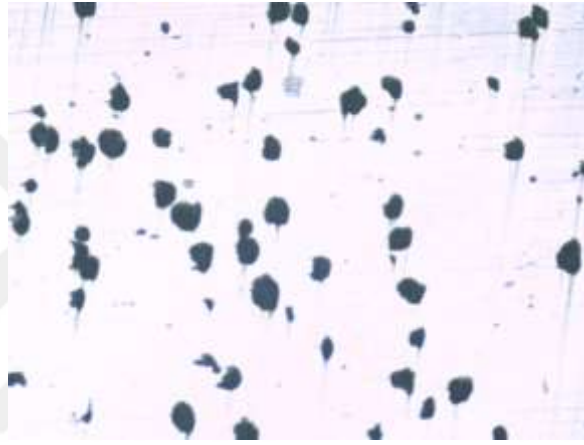


(c)

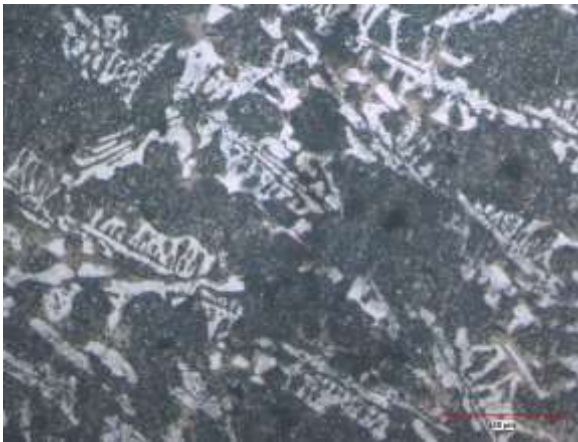
Şekil 6.21. S12 optik mikroskoptan alınan (a) dağlama işlemi öncesi X100 büyütmeli mikro yapı görüntüsü, (b) dağlama sonrası X200 büyütmeli mikro yapı görüntüsü ve dağlama sonrası X500 büyütmeli mikro yapı görüntüsü

S13 numunesine 900 °C’ de 45 dakika östenitleme işleminden sonra 350 °C’ de 30 dakika östemperleme işlemi yapılmıştır. Şekil 6.22a’ daki gibi dağlama öncesi X100 büyütülerek görüntüsü alındı. Dağlama sonrası ise Şekil 6.22b’ de X200 ve Şekil 6.22c’ de X500 büyütülerek görüntüler alınmıştır.

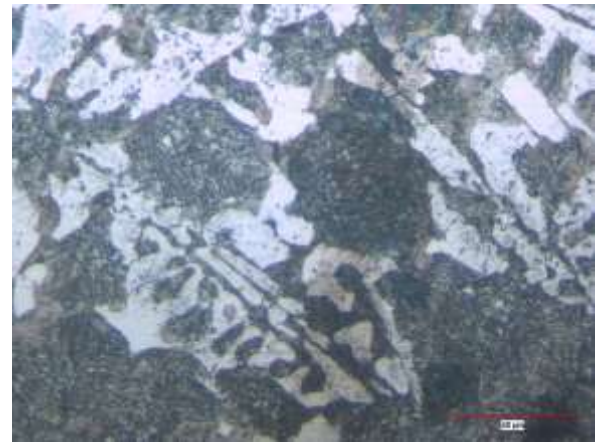
İnceleme neticesinde küreselliğin %76, 1 mm² alandaki küre sayısı 70, küre alanı %7 ve grafit boyutu 18-49 µm olarak bulunmuştur. Mikro yapıda, beynit çizgileri ve yüksek karbonlu östenit (açık-koyu kahverengi), kalıntı östenit (aydınlık, beyaz) ilaveten küresel grafitlerden (siyah) oluştuğu görülmektedir. Beyaz olarak görünen faz ledeburitteki sementit olup iç kısımlar beynitik matriksi göstermektedir.



(a)



(b)

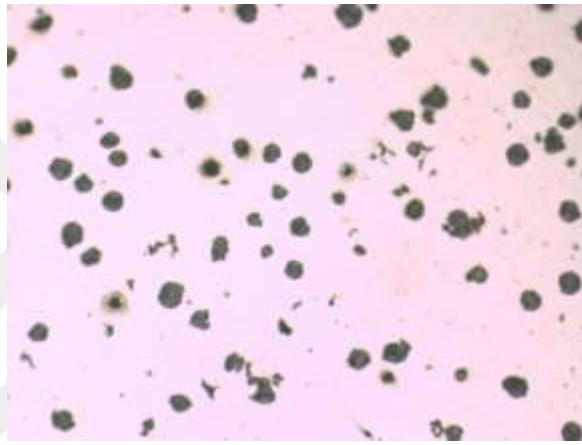


(c)

Şekil 6.22. S13 optik mikroskoptan alınan (a) dağlama işlemi öncesi X100 büyütmeli mikro yapı görüntüsü, (b) dağlama sonrası X200 büyütmeli mikro yapı görüntüsü ve dağlama sonrası X500 büyütmeli mikro yapı görüntüsü

S14 numunesine 950 °C’ de 60 dakika östenitleme işleminden sonra 400 °C’ de 60 dakika östemperleme işlemi yapılmıştır. Şekil 6.23a’ daki gibi dağlama öncesi X100 büyütülerek görüntüsü alındı. Dağlama sonrası ise Şekil 6.23b’ de X200 ve Şekil 6.23c’ de X500 büyütülerek görüntüler alınmıştır.

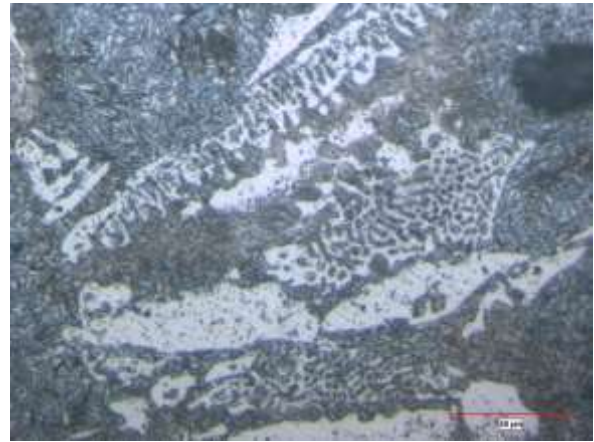
İnceleme neticesinde küreselliğin %68, 1 mm² alandaki küre sayısı 58, küre alanı %8 ve grafit boyutu 40-66 µm olarak bulunmuştur. Mikro yapıda, beynit çizgileri ve yüksek karbonlu östenit (açık-koyu kahverengi), kalıntı östenit (aydınlık, beyaz) ilaveten küresel grafitlerden (siyah) oluştuğu görülmektedir. Beyaz olarak görünen faz ledeburitteki sementit olup iç kısımlar beynitik matriksi göstermektedir.



(a)



(b)

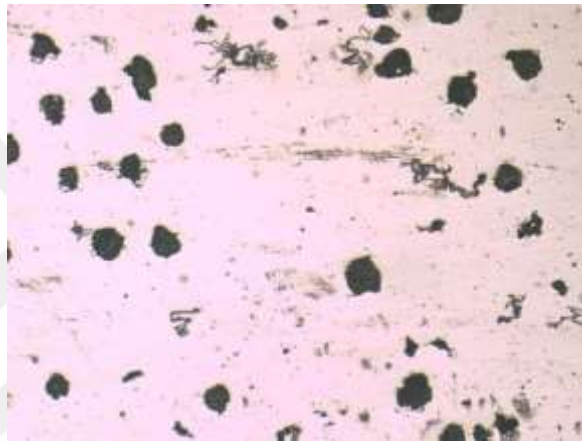


(c)

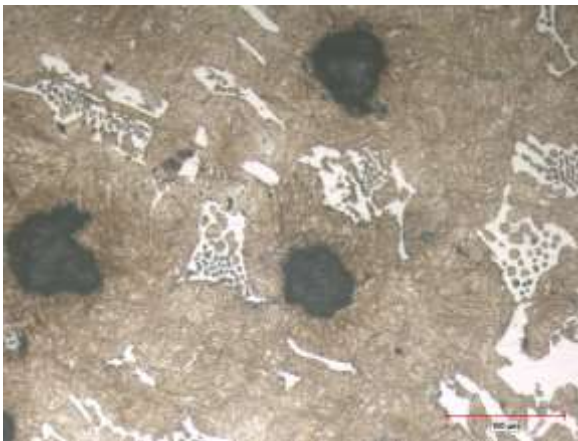
Şekil 6.23. S14 optik mikroskoptan alınan (a) dağlama işlemi öncesi X100 büyütmeli mikro yapı görüntüsü, (b) dağlama sonrası X200 büyütmeli mikro yapı görüntüsü ve dağlama sonrası X500 büyütmeli mikro yapı görüntüsü

S15 numunesine 950 °C’ de 60 dakika östenitleme işleminden sonra 400 °C’ de 120 dakika östemperleme işlemi yapılmıştır. Şekil 6.24a’ daki gibi dağlama öncesi X100 büyütülerek görüntüsü alındı. Dağlama sonrası ise Şekil 6.24b’ de X200 ve Şekil 6.24c’ de X500 büyütülerek görüntüler alınmıştır.

İnceleme neticesinde küreselliğin %69, 1 mm² alandaki küre sayısı 56, küre alanı %8 ve grafit boyutu 35-64 µm olarak bulunmuştur. Mikro yapıda, beynit çizgileri ve yüksek karbonlu östenit (açık-koyu kahverengi), kalıntı östenit (aydınlık, beyaz) ilaveten küresel grafitlerden (siyah) oluştuğu görülmektedir. Beyaz olarak görünen faz ledeburitteki sementit olup iç kısımlar beynitik matriksi göstermektedir.



(a)



(b)

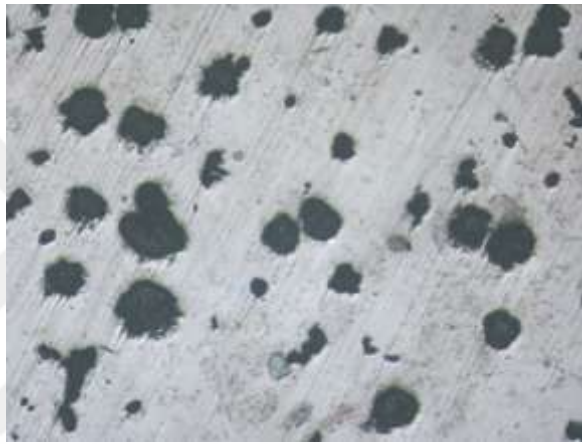


(c)

Şekil 6.24. S15 optik mikroskoptan alınan (a) dağlama işlemi öncesi X100 büyütmeli mikro yapı görüntüsü, (b) dağlama sonrası X200 büyütmeli mikro yapı görüntüsü ve dağlama sonrası X500 büyütmeli mikro yapı görüntüsü

S16 numunesine 950 °C' de 60 dakika östenitleme işleminden sonra 400 °C' de 240 dakika östemperleme işlemleri yapılmıştır. Şekil 6.25a' daki gibi dağlama öncesi X100 büyütülerek görüntüsü alındı. Dağlama sonrası ise Şekil 6.25b' de X200 ve Şekil 6.25c' de X500 büyütülerek görüntüler alınmıştır.

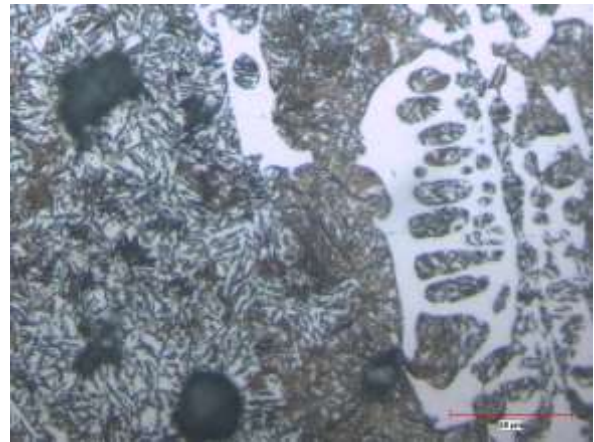
İnceleme neticesinde küreselliğin %76, 1 mm² alandaki küre sayısı 64, küre alanı %15 ve grafit boyutu 35-100 µm olarak bulunmuştur. Mikro yapıda, beynit çizgileri ve yüksek karbonlu östenit (açık-koyu kahverengi), kalıntı östenit (aydınlık, beyaz) ilaveten küresel grafitlerden (siyah) oluştuğu görülmektedir. Beyaz olarak görünen faz ledeburitteki sementit olup iç kısımlar beynitik matriksi göstermektedir.



(a)



(b)

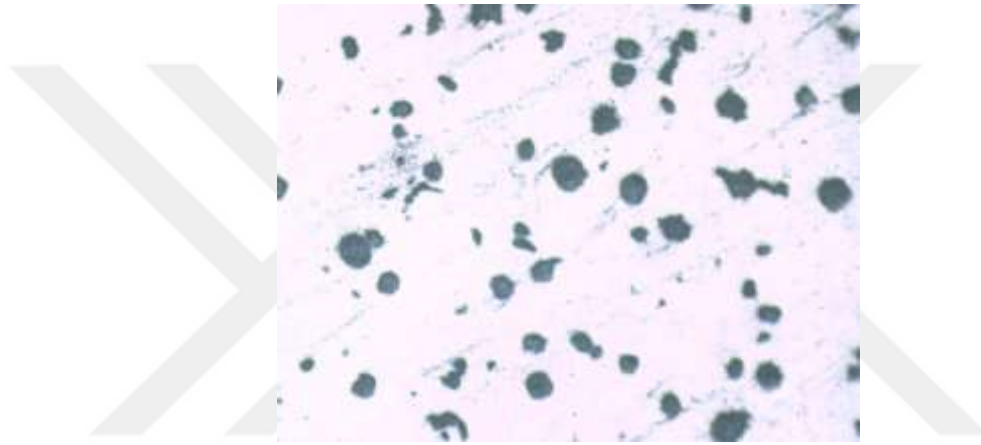


(c)

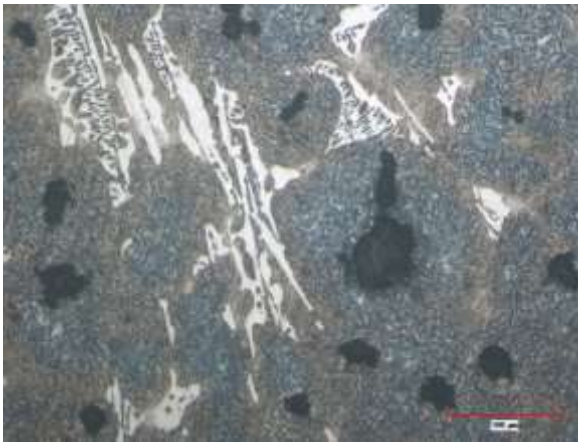
Şekil 6.25. S16 optik mikroskoptan alınan (a) dağlama işlemi öncesi X100 büyütme mikroyapı görüntüsü, (b) dağlama sonrası X200 büyütme mikroyapı görüntüsü ve dağlama sonrası X500 büyütme mikroyapı görüntüsü

S17 numunesine 950 °C’ de 60 dakika östenitleme işleminden sonra 400 °C’ de 360 dakika östemperleme işlemi yapılmıştır. Şekil 6.26a’ daki gibi dağlama öncesi X100 büyütülerek görüntüsü alındı. Dağlama sonrası ise Şekil 6.26b’ de X200 ve Şekil 6.26c’ de X500 büyütülerek görüntüler alınmıştır.

İnceleme neticesinde küreselliğin %70, 1 mm² alandaki küre sayısı 74, küre alanı %9 ve grafit boyutu 30-55 µm olarak bulunmuştur. Mikro yapıda, beynit çizgileri ve yüksek karbonlu östenit (açık-koyu kahverengi), kalıntı östenit (aydınlık, beyaz) ilaveten küresel grafitlerden (siyah) oluştuğu görülmektedir. Beyaz olarak görünen faz ledeburitteki sementit olup iç kısımlar beynitik matriksi göstermektedir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 6.26. S17 optik mikroskoptan alınan (a) dağlama işlemi öncesi X100 büyütmeli mikro yapı görüntüsü, (b) dağlama sonrası X200 büyütmeli mikro yapı görüntüsü ve dağlama sonrası X500 büyütmeli mikro yapı görüntüsü

Yapılan ısıtım işlem durumlarına göre mikro yapı analiz sonuçlarının çizelge hali Çizelge 6.2' de yer almaktadır.

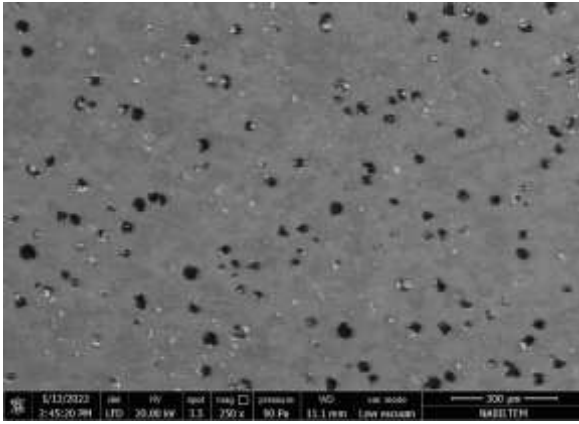
Çizelge 6.2. Mikro yapı analizi

Numune	Sıcaklık (°C)	Zaman (dakika)	Su verme ortamı	Alt kritik difüzyon sıcaklığı(°C)	Alt kritik difüzyon süresi (dakika)	Soğutma ortamı	Küresellik %	Küre sayısı Adet/mm ²	Küre alanı %	Grafit boyutu µm
S1	Döküm	-	-	-	-	-	92	70	8	26-45
S2	950	60	Tuz	200	60	Hava	74	40	6	30-66
S3	950	60	Tuz	200	120	Hava	83	70	5	21-39
S4	950	60	Tuz	200	240	Hava	77	35	3	31-51
S5	950	60	Tuz	200	360	Hava	63	74	10	30-82
S6	900	45	Tuz	250	30	Hava	71	52	7	21-66
S7	900	45	Tuz	250	45	Hava	70	43	3	14-50
S8	900	45	Tuz	300	30	Hava	65	32	4	35-75
S9	900	45	Tuz	300	45	Hava	81	65	13	30-105
S10	900	45	Tuz	300	90	Hava	71	70	9	19-82
S11	900	45	Tuz	350	30	Hava	68	62	8	31-120
S12	900	60	Tuz	350	45	Hava	65	60	4	18-32
S13	900	60	Tuz	350	90	Hava	76	70	7	18-49
S14	950	60	Tuz	400	60	Hava	68	58	8	40-66
S15	950	60	Tuz	400	120	Hava	69	56	8	35-64
S16	950	60	Tuz	400	240	Hava	76	64	15	35-100
S17	950	60	Tuz	400	360	Hava	70	74	9	30-55

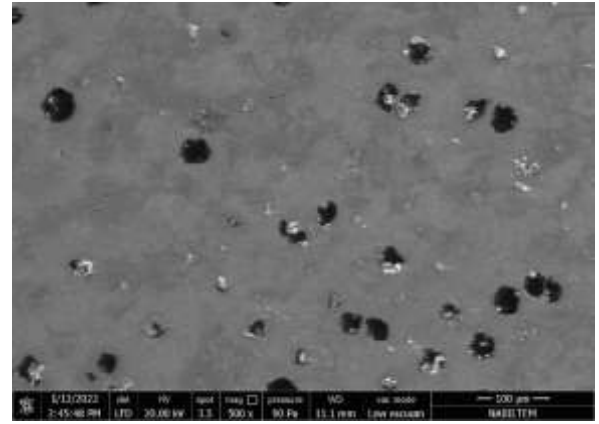
6.3.2. Deney Öncesi Taramalı Elektron Mikroskobu ile Görüntü Alma (SEM)

Aşınma deneyinden önce Elektron mikroskobu ile her bir numuneden X250, X500, X1000, X2500, X5000 ve X20000 olmak üzere 6 adet görsel alınmıştır. Alınan görüntüler ile grafit kürelerin şekli daha net olarak gözükmekte olup karbürlerde yapıda yer almaktadır. Bunlar ile birlikte beynit iğneleri daha detaylı gözükmekte olup aynı östemperleme sıcaklığında

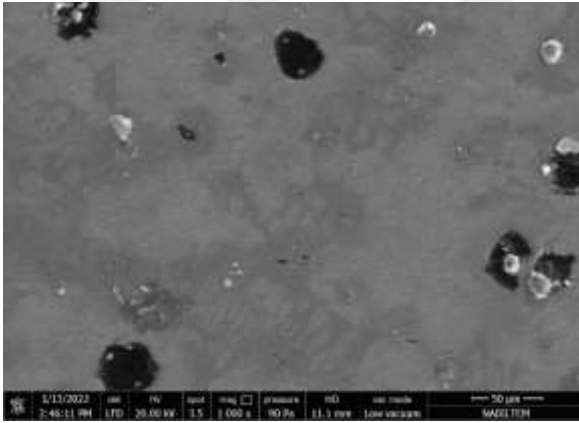
sıklaştığı görülmüştür. Ayrıca 200°C östemperleme sıcaklığındaki beynit iğneleri inceyken östemperleme sıcaklığı artıkça kabaştığı görülmüştür.



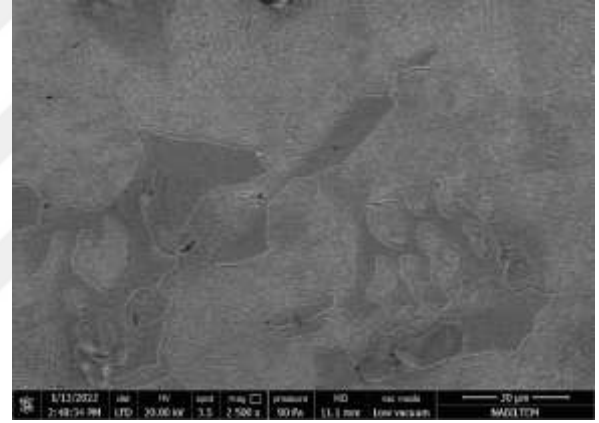
(a)



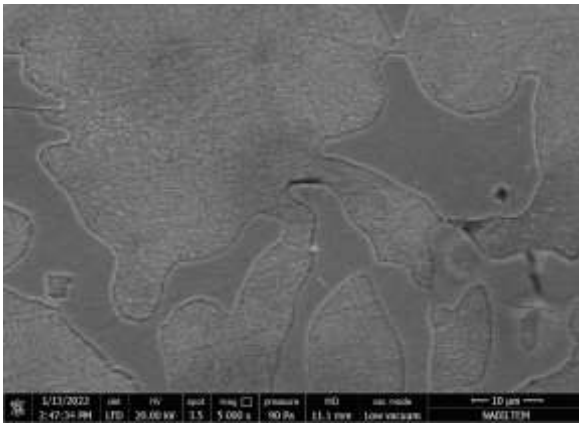
(b)



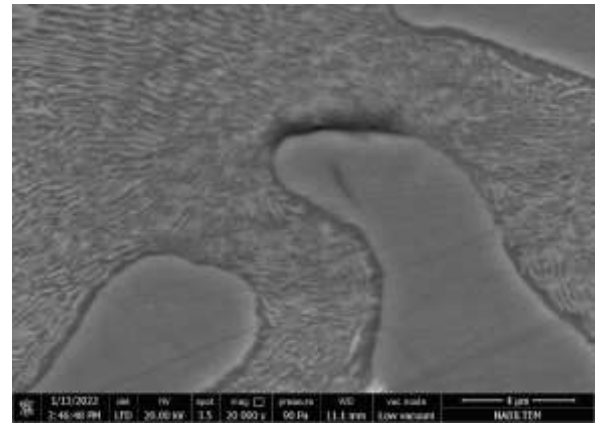
(c)



(d)

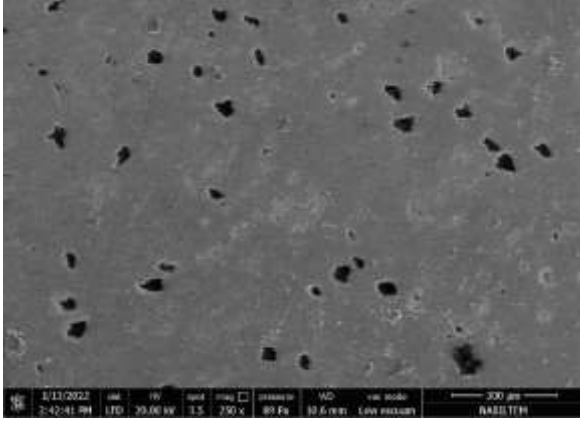


(e)

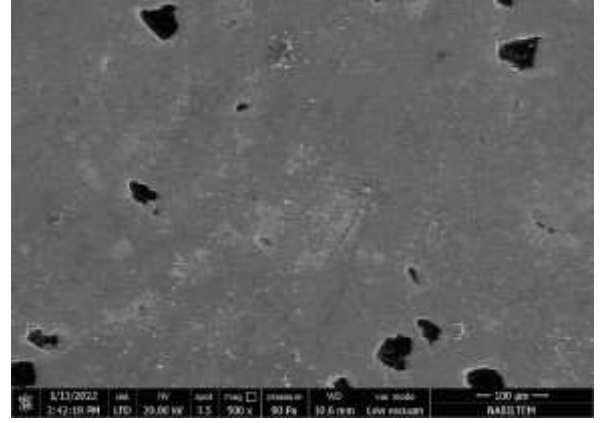


(f)

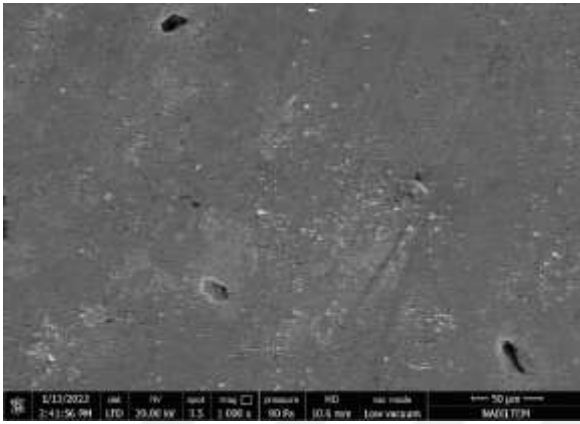
Şekil 6.27. S1 taramalı elektron mikroskobu ile alınan X200 (a), X500 (b), X1000 (c), X2500 (d), X5000 (e) ve X20000 (f) büyütülmüş mikro yapı görüntüleri



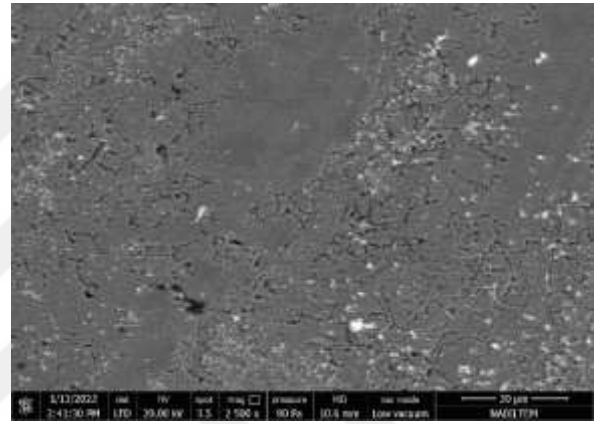
(a)



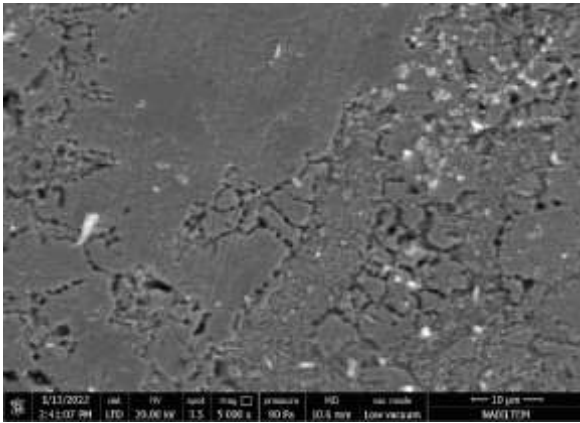
(b)



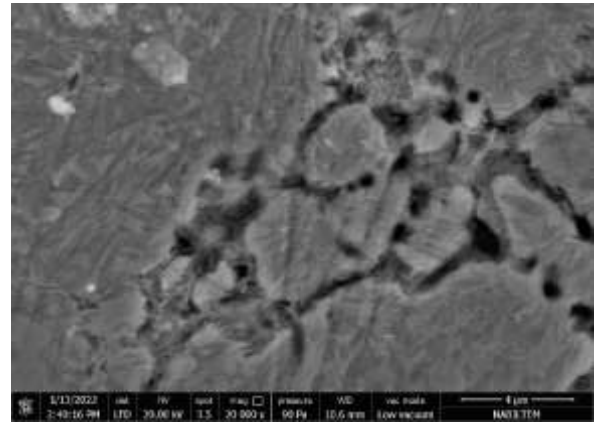
(c)



(d)

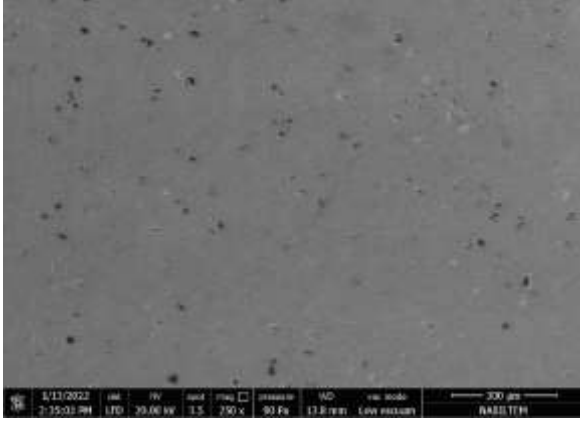


(e)

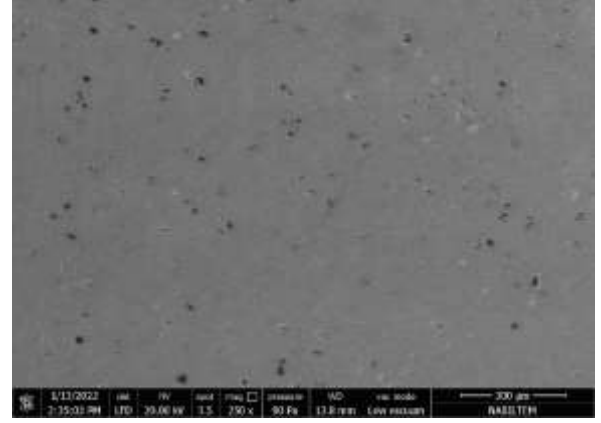


(f)

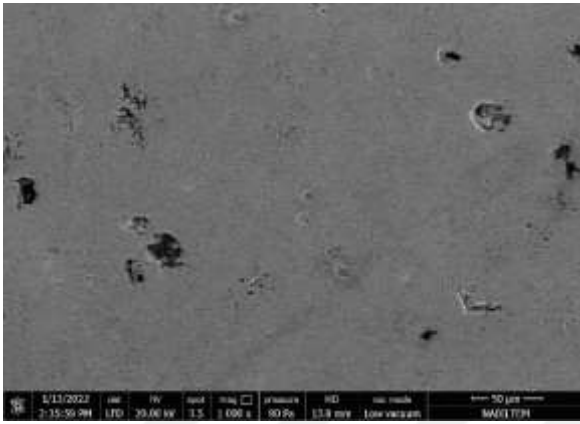
Şekil 6.28. S2 taramalı elektron mikroskobu ile alınan X200 (a), X500 (b), X1000 (c), X2500 (d), X5000 (e) ve X20000 (f) büyütülmüş mikro yapı görüntüleri



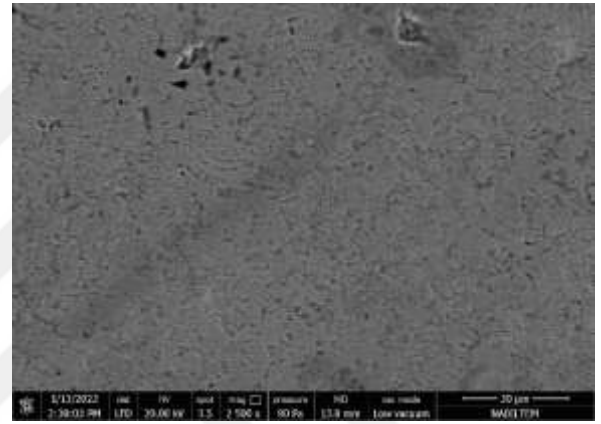
(a)



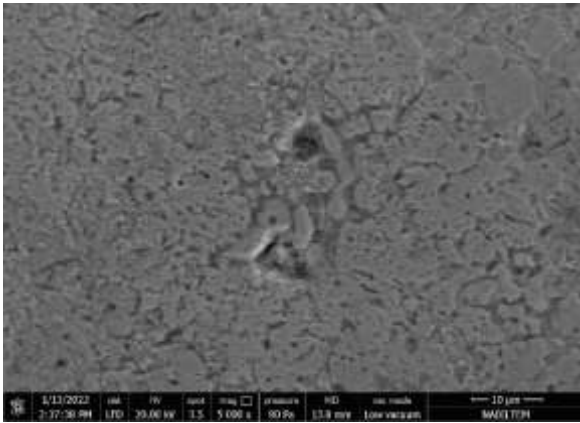
(b)



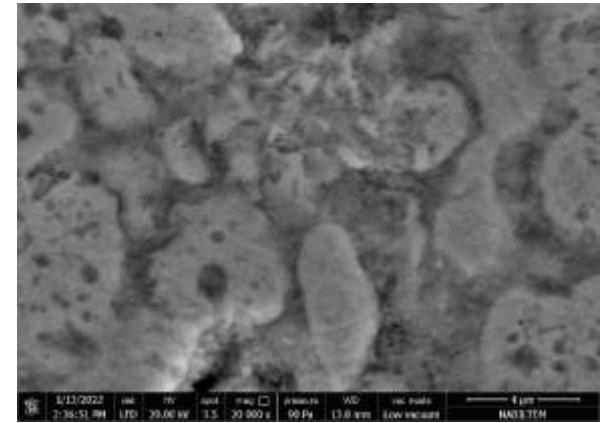
(c)



(d)

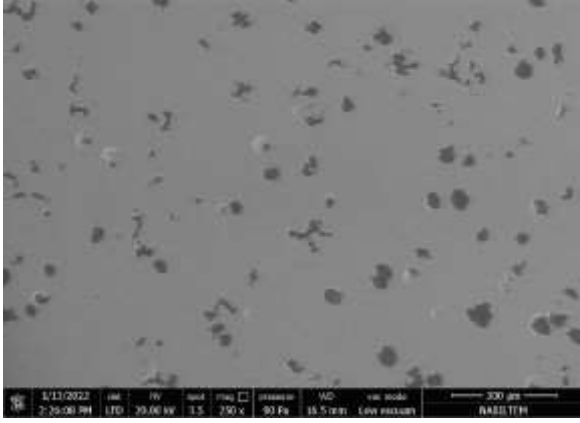


(e)

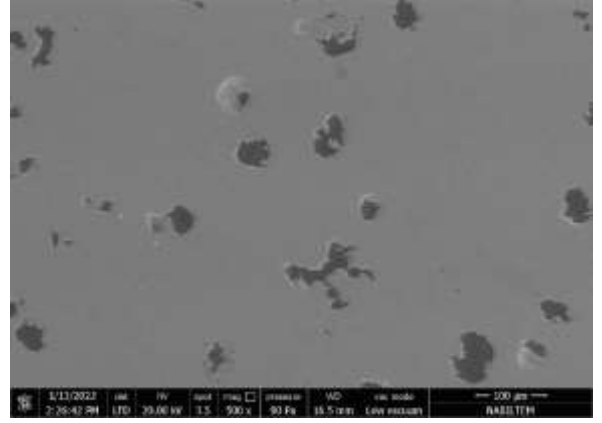


(f)

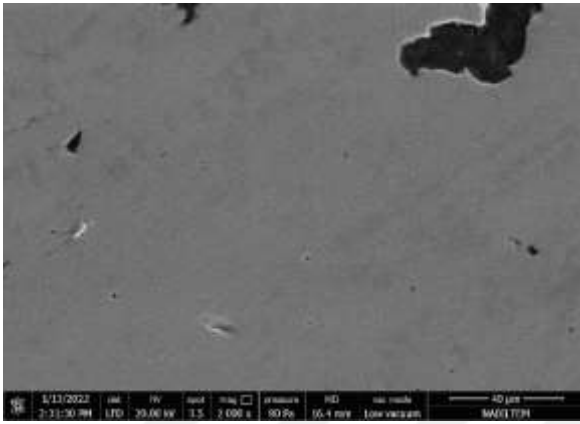
Şekil 6.29. S3 taramalı elektron mikroskobu ile alınan X200 (a), X500 (b), X1000 (c), X2500 (d), X5000 (e) ve X20000 (f) büyütülmüş mikro yapı görüntüleri



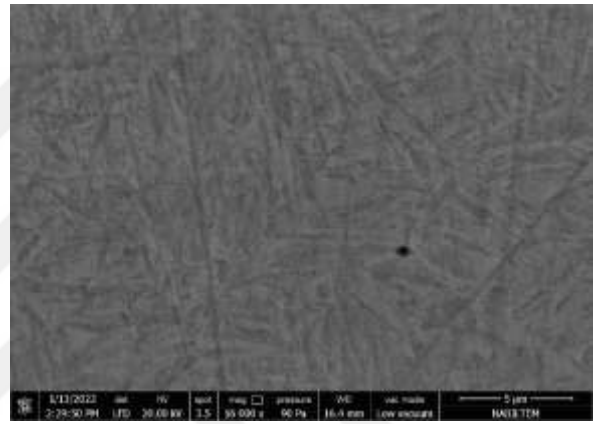
(a)



(b)

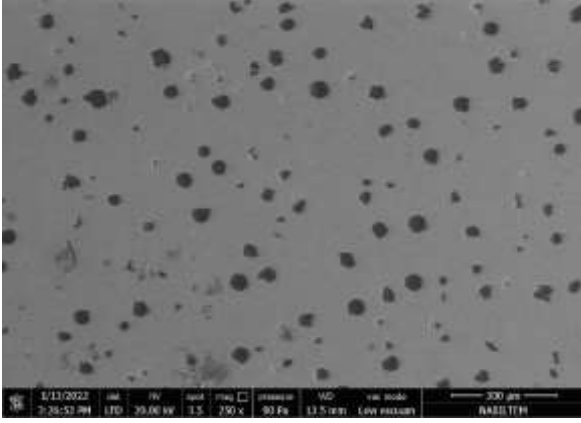


(c)

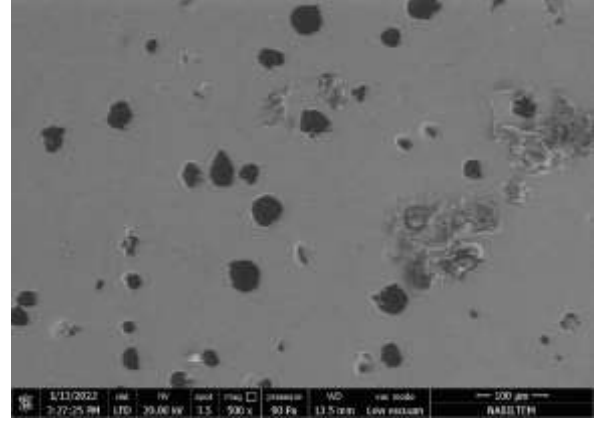


(d)

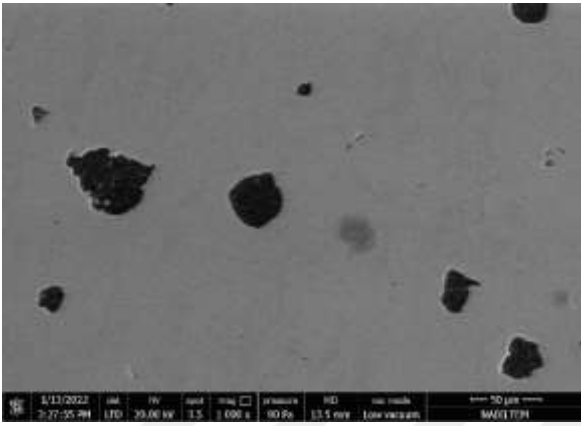
Şekil 6.30. S4 taramalı elektron mikroskobu ile alınan X200 (a), X500 (b), X1000 (c), X2500 (d), X5000 (e) ve X20000 (f) büyütülmüş mikro yapı görüntüleri



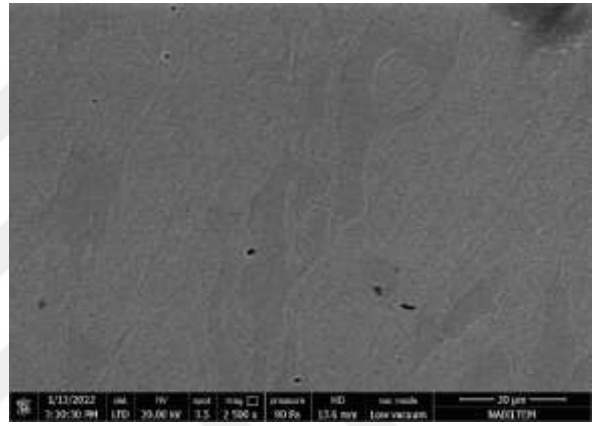
(a)



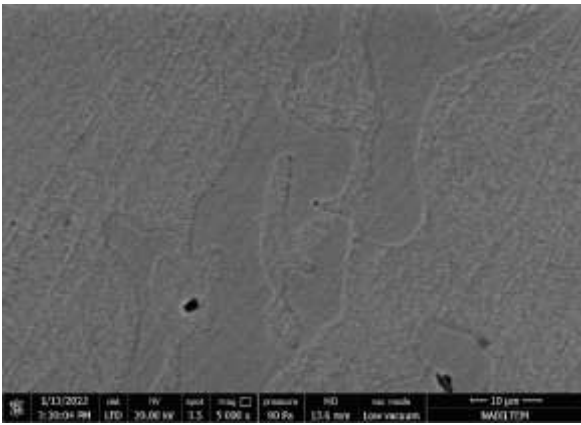
(b)



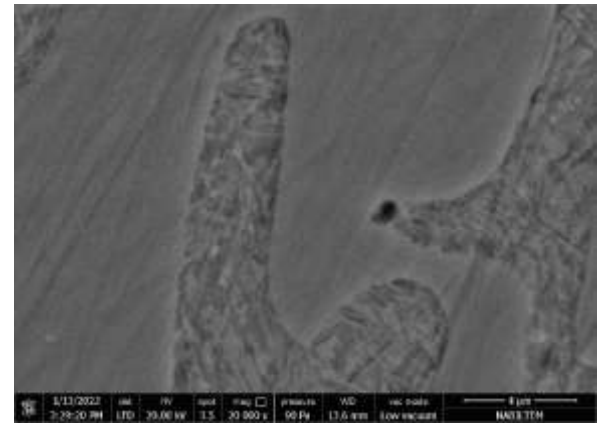
(c)



(d)

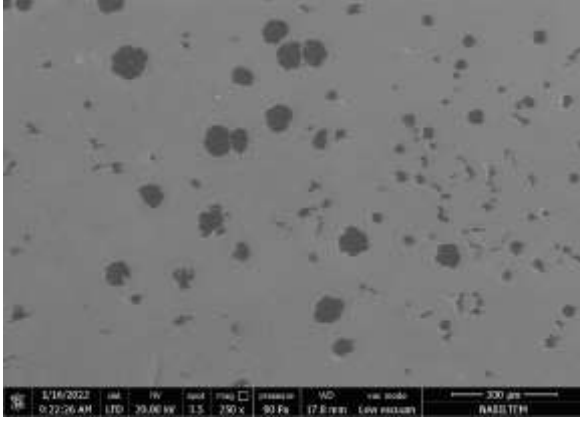


(e)

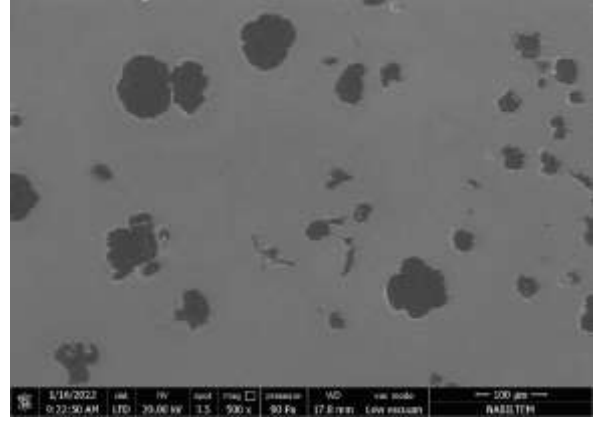


(f)

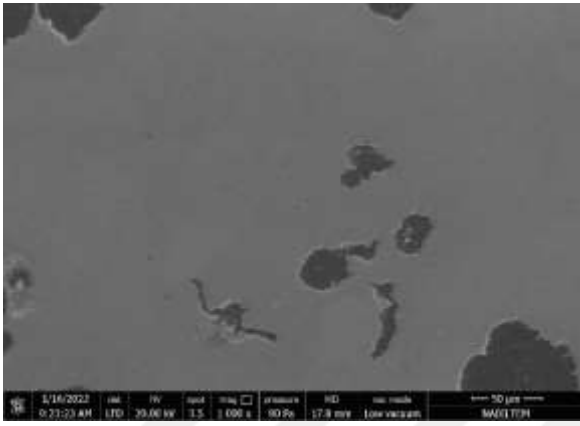
Şekil 6.31. S5 taramalı elektron mikroskobu ile alınan X200 (a), X500 (b), X1000 (c), X2500 (d), X5000 (e) ve X20000 (f) büyütülmüş mikro yapı görüntüleri



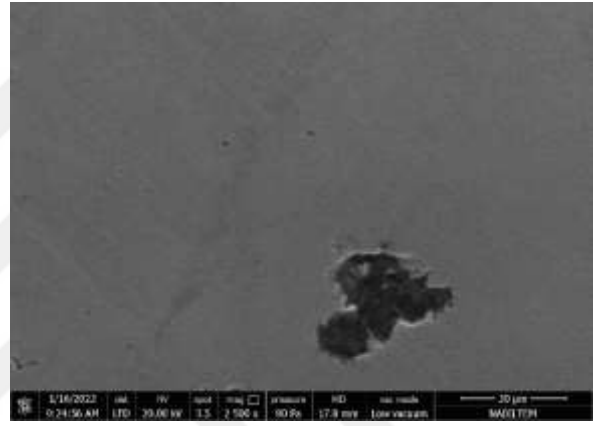
(a)



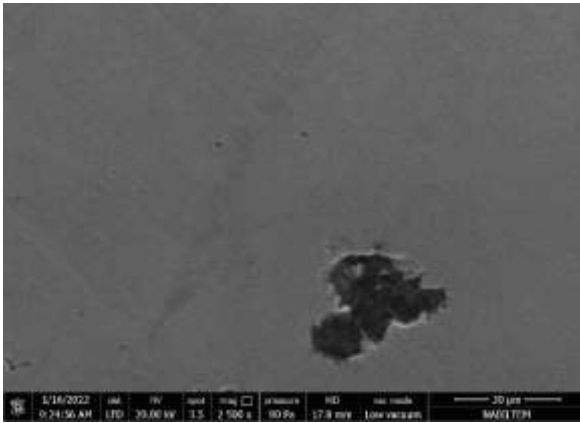
(b)



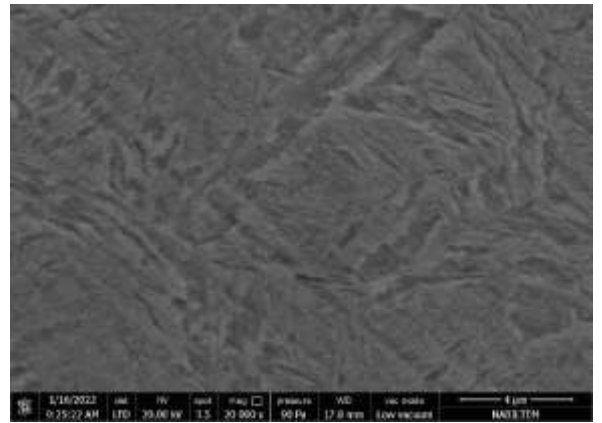
(c)



(d)

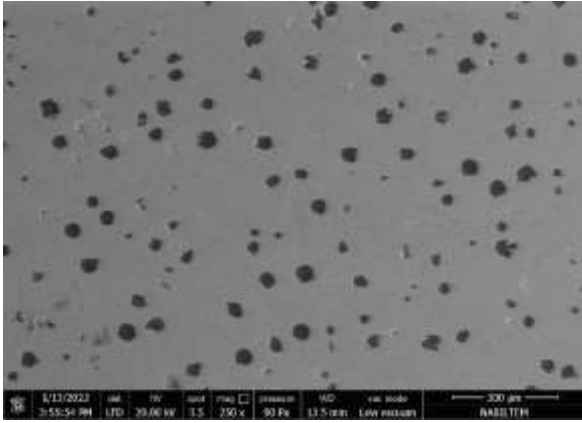


(e)

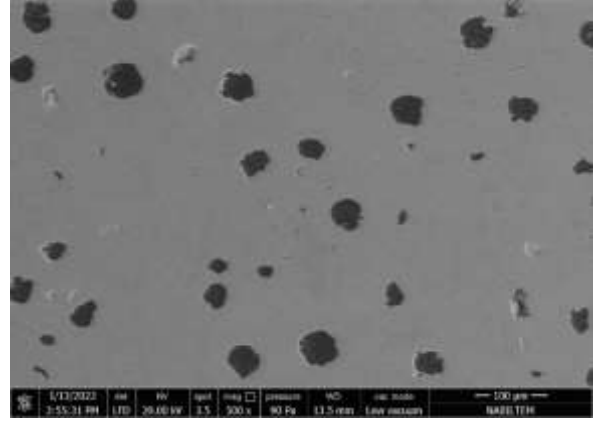


(f)

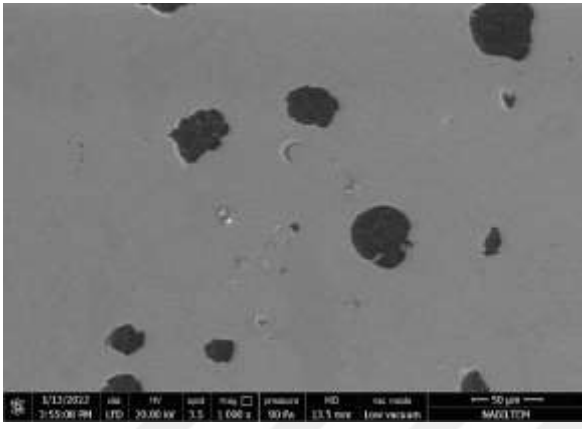
Şekil 6.32. S6 taramalı elektron mikroskobu ile alınan X200 (a), X500 (b), X1000 (c), X2500 (d), X5000 (e) ve X20000 (f) büyütülmüş mikro yapı görüntüleri



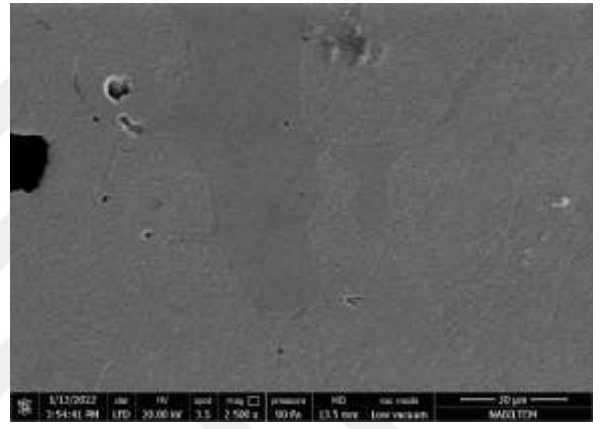
(a)



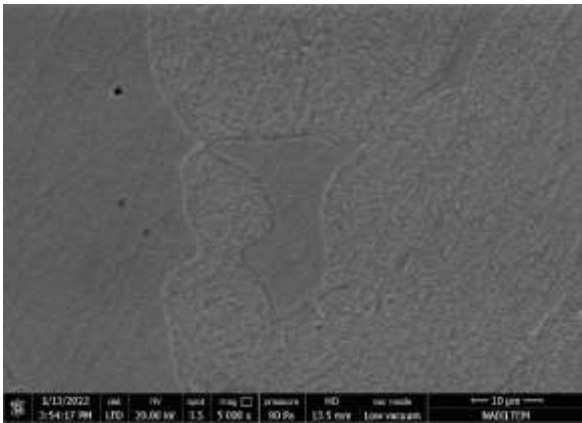
(b)



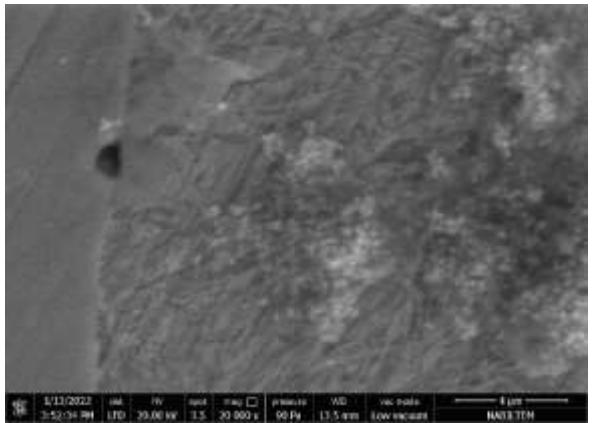
(c)



(d)

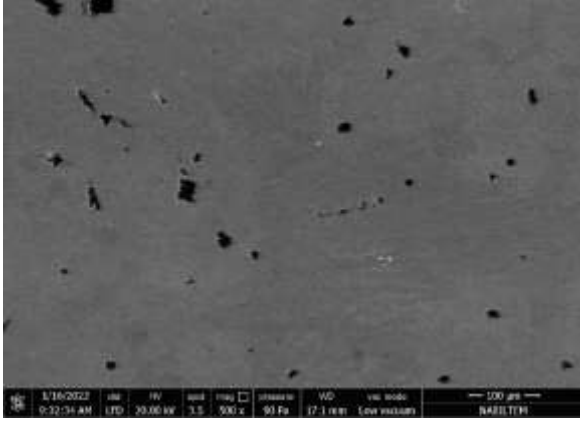


(e)

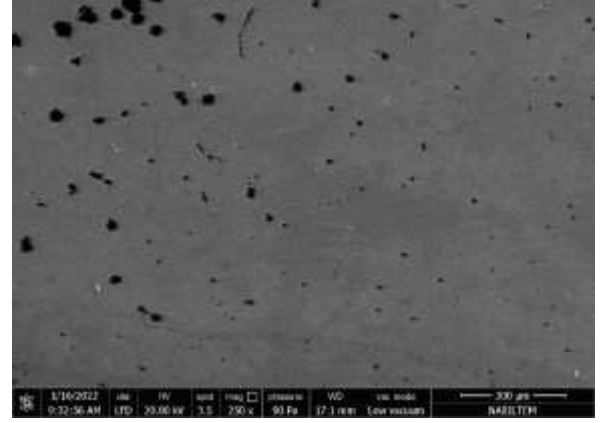


(f)

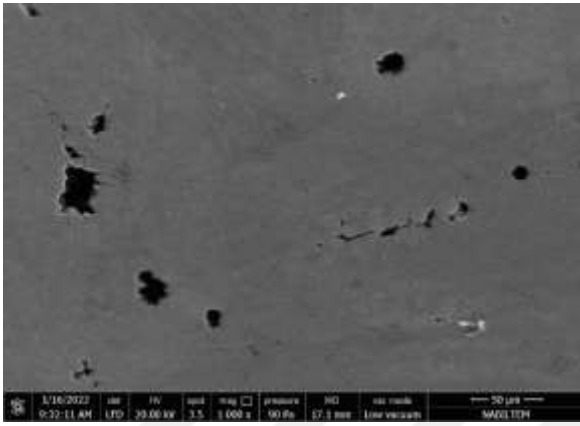
Şekil 6.33. S7 taramalı elektron mikroskobu ile alınan X200 (a), X500 (b), X1000 (c), X2500 (d), X5000 (e) ve X20000 (f) büyütülmüş mikro yapı görüntüleri



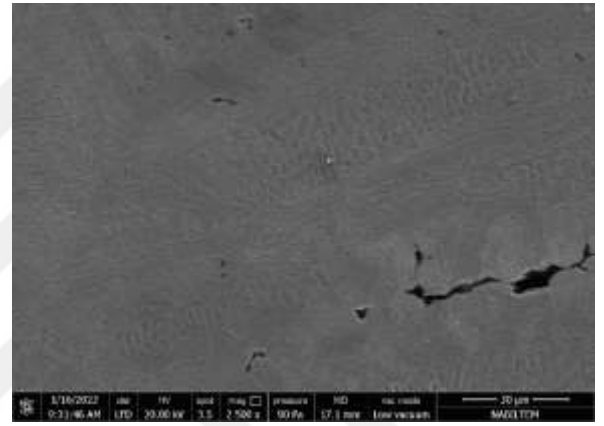
(a)



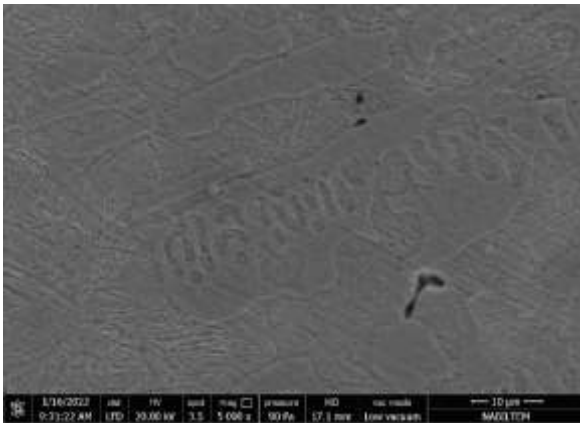
(b)



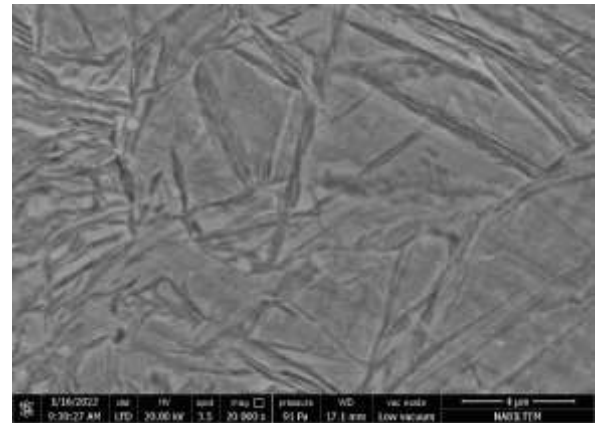
(c)



(d)

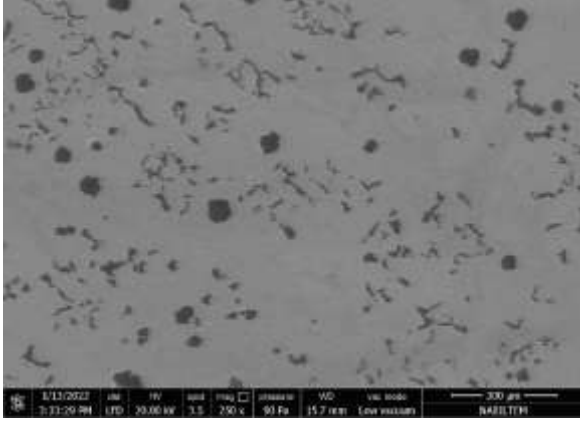


(e)

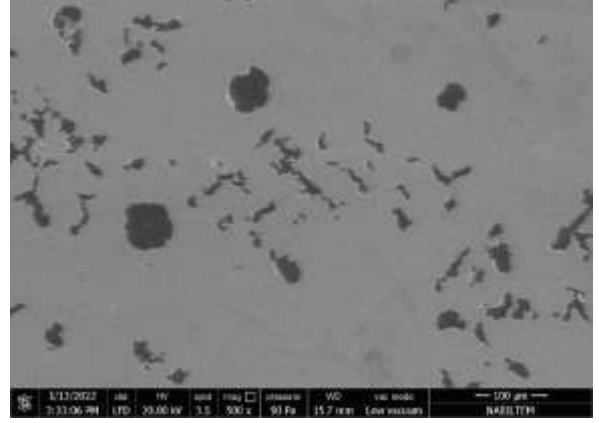


(f)

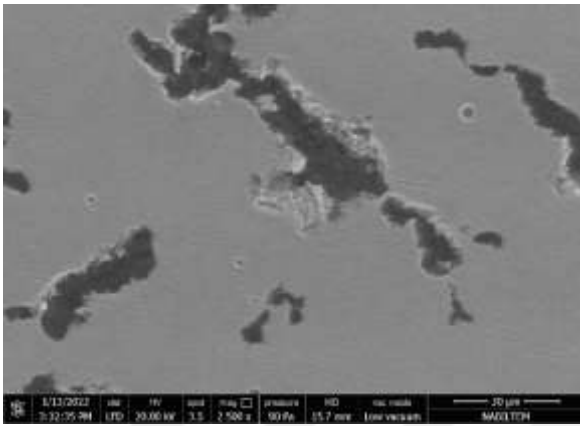
Şekil 6.34. S8 taramalı elektron mikroskobu ile alınan X200 (a), X500 (b), X1000 (c), X2500 (d), X5000 (e) ve X20000 (f) büyütülmüş mikro yapı görüntüleri



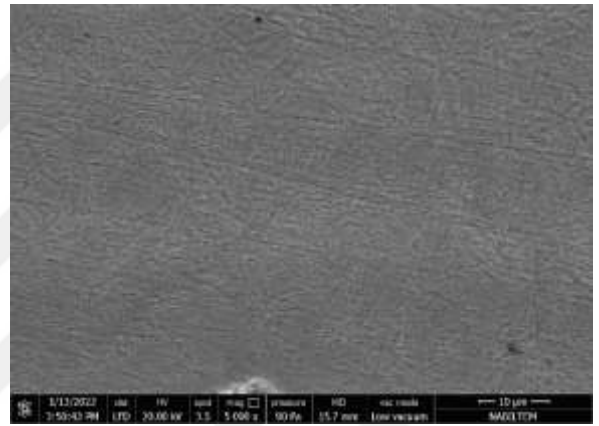
(a)



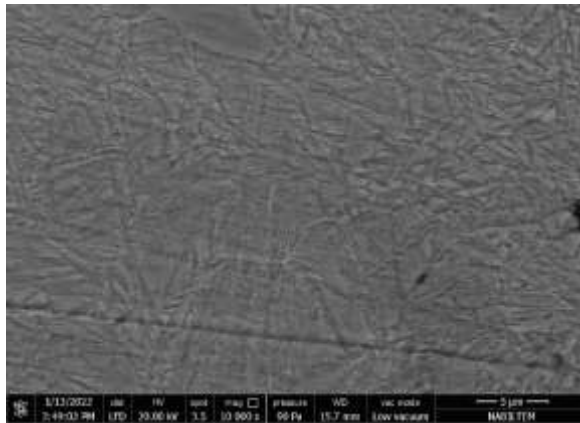
(b)



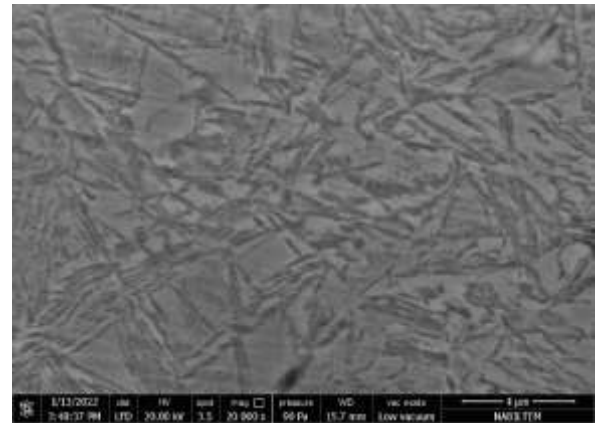
(c)



(d)

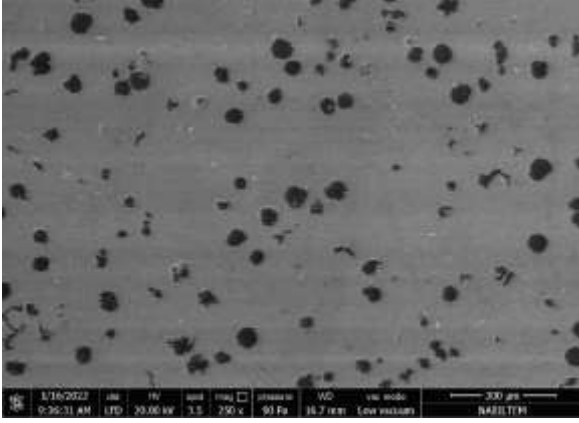


(e)

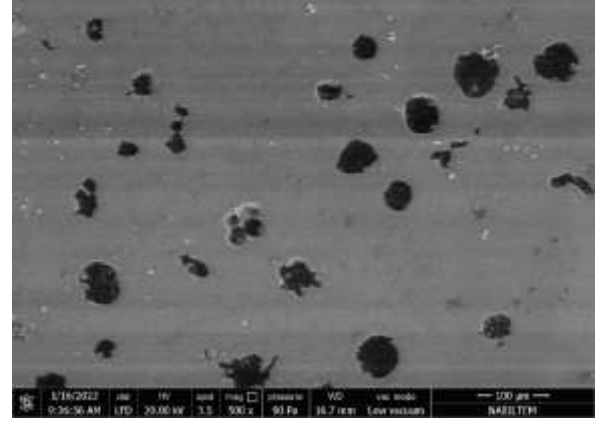


(f)

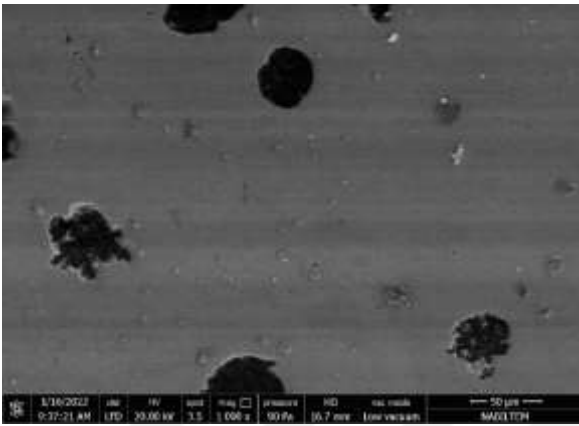
Şekil 6.35. S9 taramalı elektron mikroskobu ile alınan X200 (a), X500 (b), X1000 (c), X2500 (d), X5000 (e) ve X20000 (f) büyütülmüş mikro yapı görüntüleri



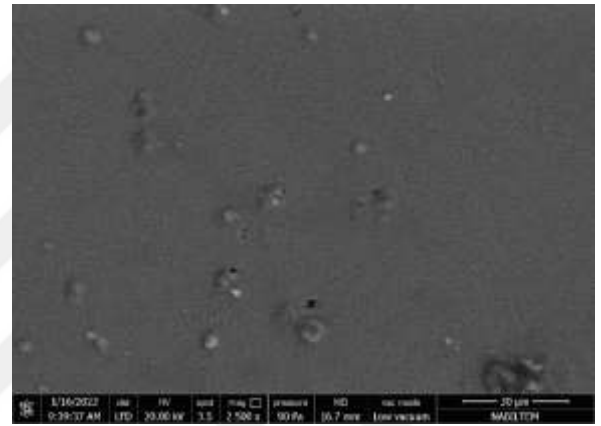
(a)



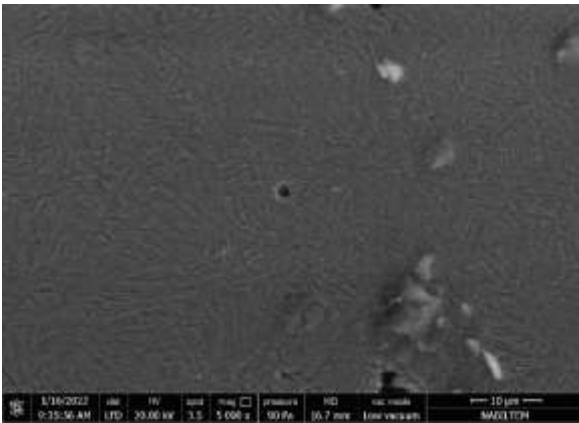
(b)



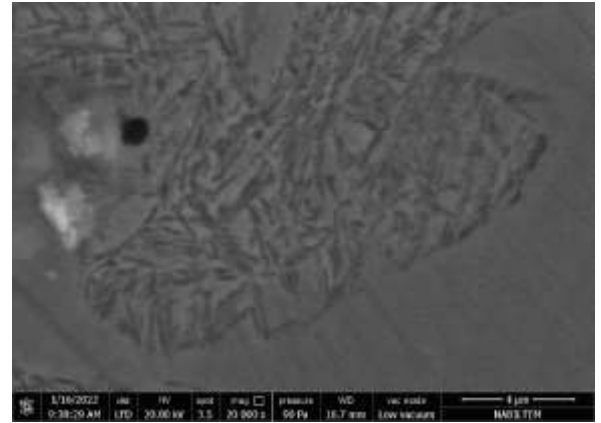
(c)



(d)

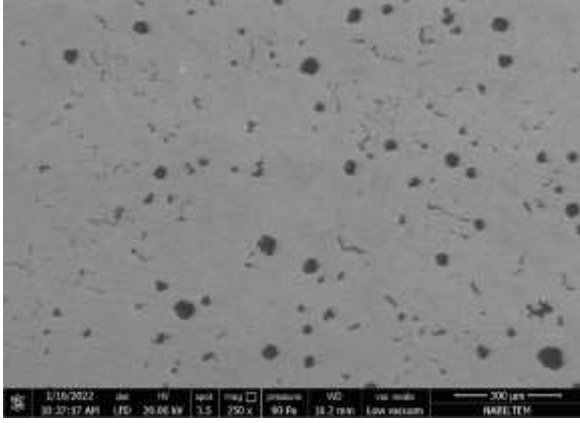


(e)

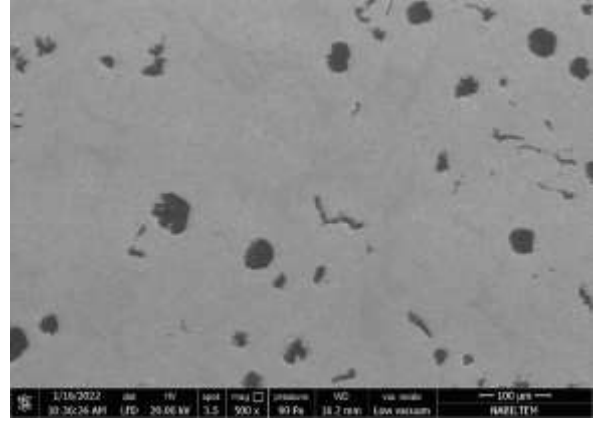


(f)

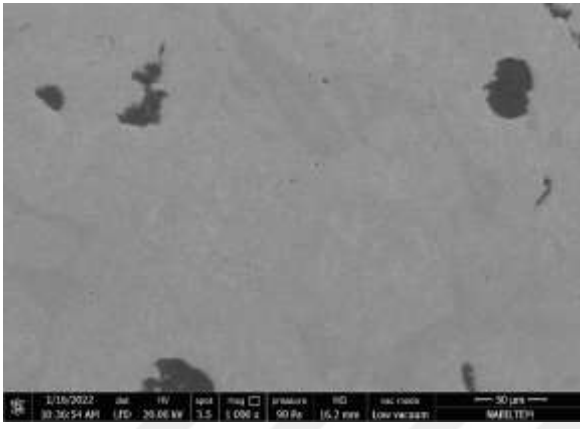
Şekil 6.36. S10 taramalı elektron mikroskobu ile alınan X200 (a), X500 (b), X1000 (c), X2500 (d), X5000 (e) ve X20000 (f) büyütülmüş mikro yapı görüntüleri



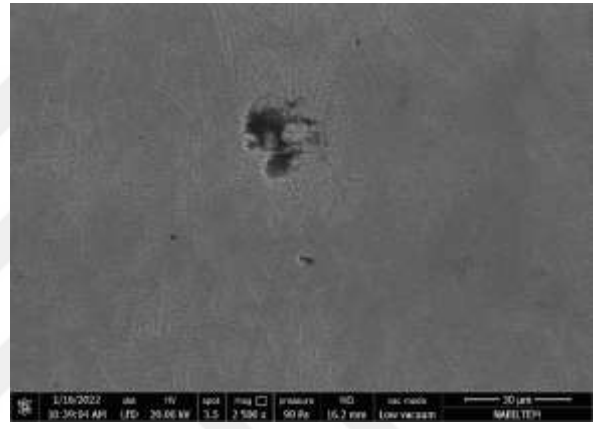
(a)



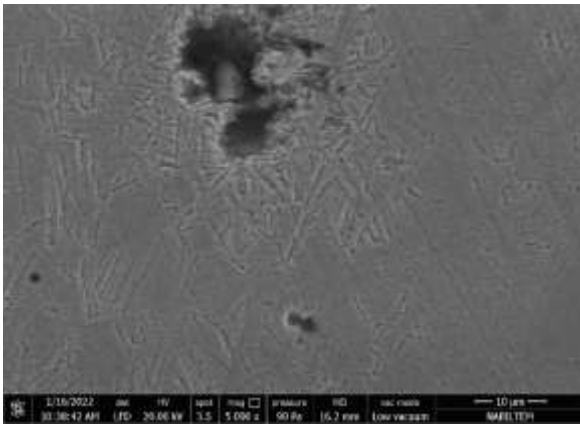
(b)



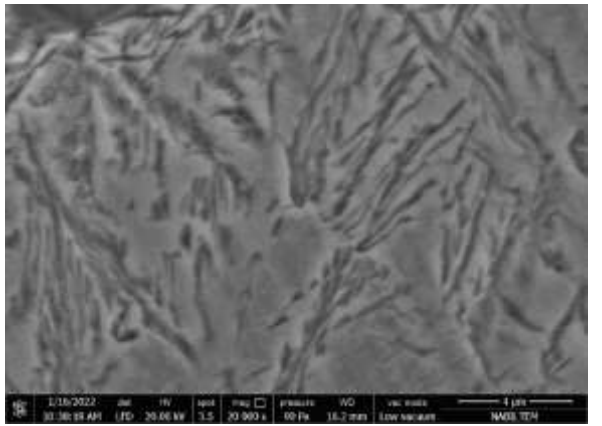
(c)



(d)

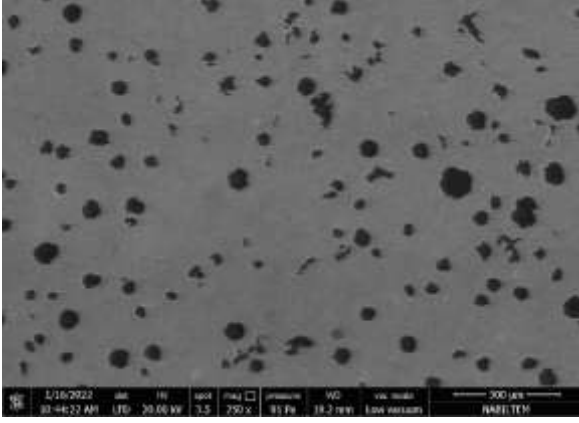


(e)

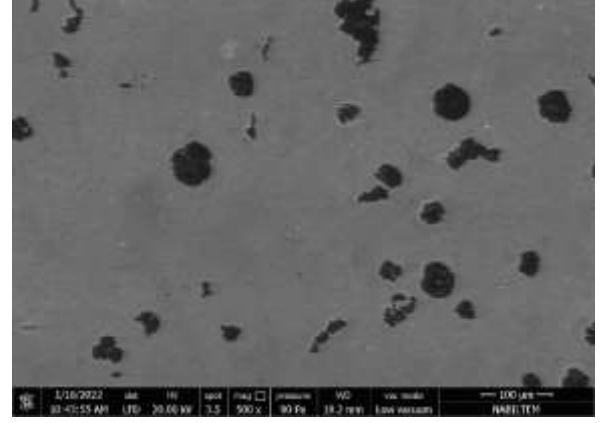


(f)

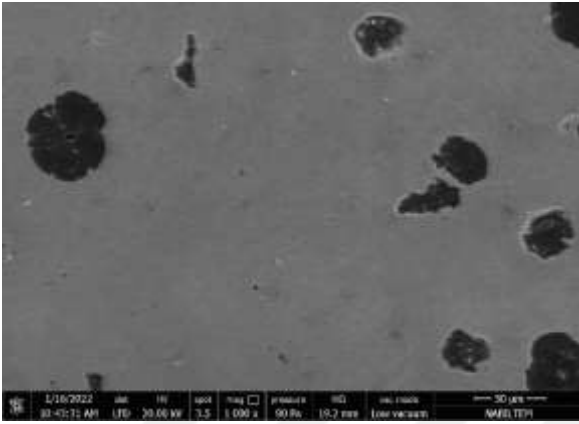
Şekil 6.37. S11 taramalı elektron mikroskobu ile alınan X200 (a), X500 (b), X1000 (c), X2500 (d), X5000 (e) ve X20000 (f) büyütülmüş mikro yapı görüntüleri



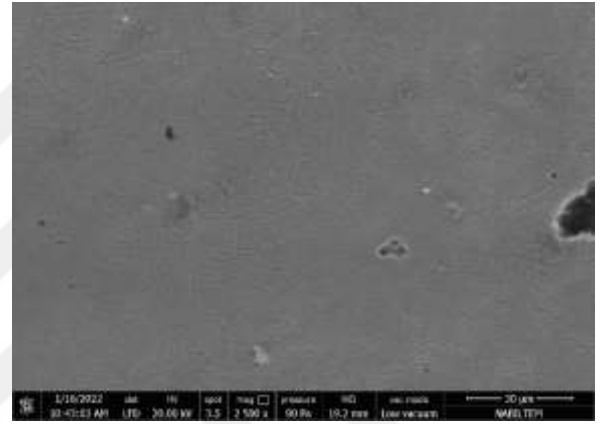
(a)



(b)



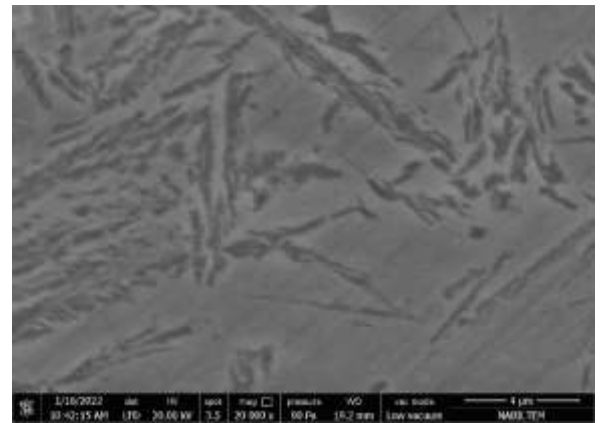
(c)



(d)

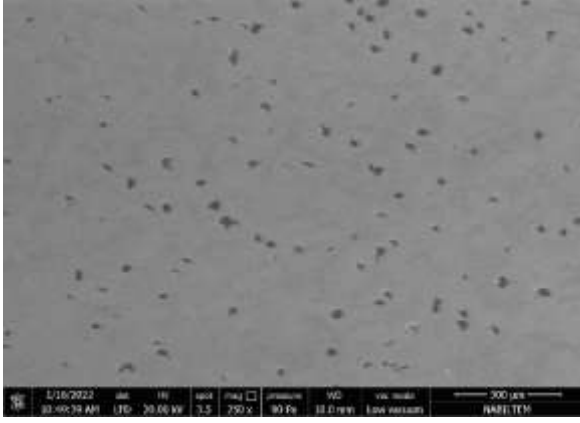


(e)

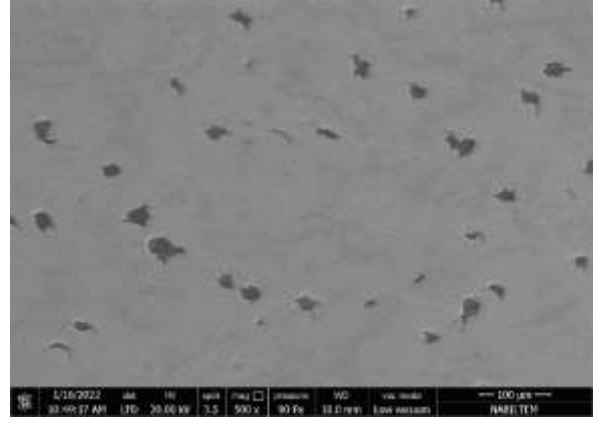


(f)

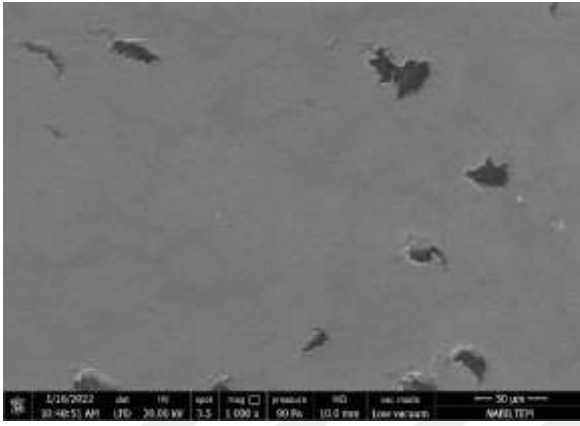
Şekil 6.38. S12 taramalı elektron mikroskobu ile alınan X200 (a), X500 (b), X1000 (c), X2500 (d), X5000 (e) ve X20000 (f) büyütülmüş mikro yapı görüntüleri



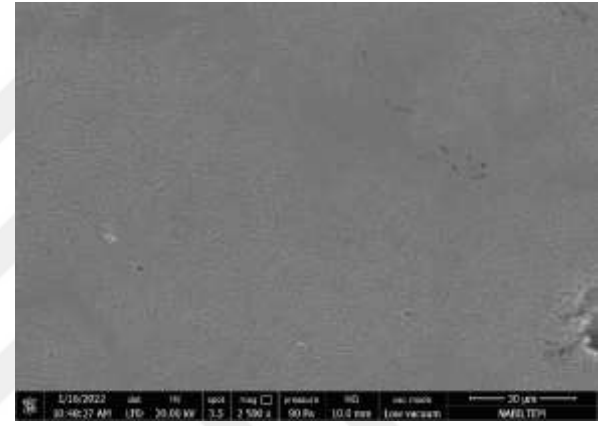
(a)



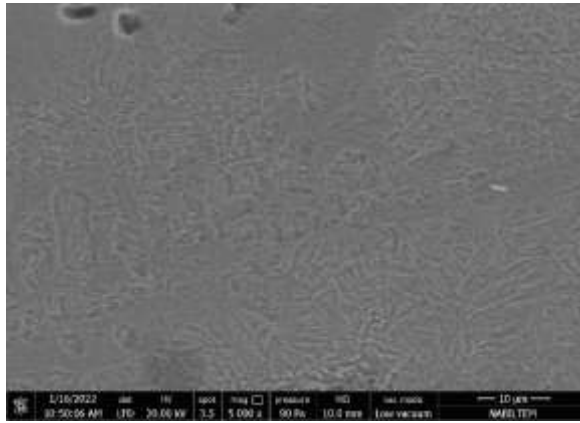
(b)



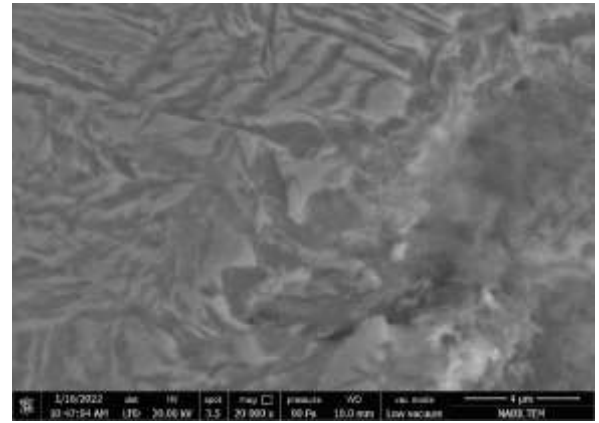
(c)



(d)

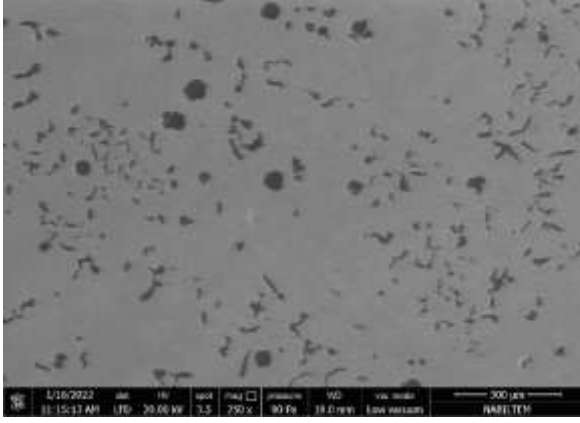


(e)

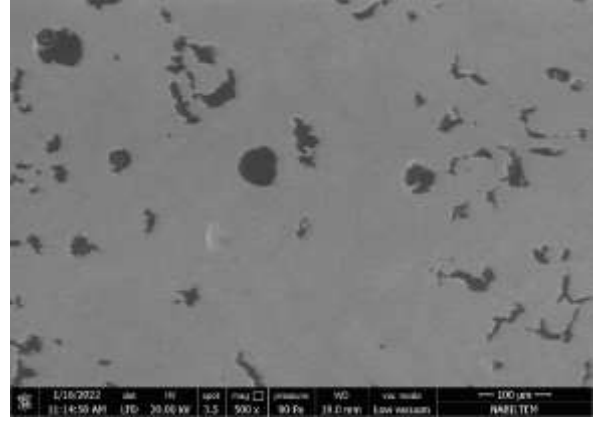


(f)

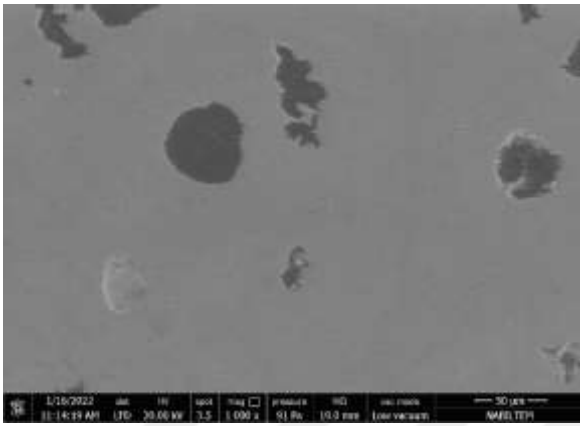
Şekil 6.39. S13 taramalı elektron mikroskobu ile alınan X200 (a), X500 (b), X1000 (c), X2500 (d), X5000 (e) ve X20000 (f) büyütülmüş mikro yapı görüntüleri



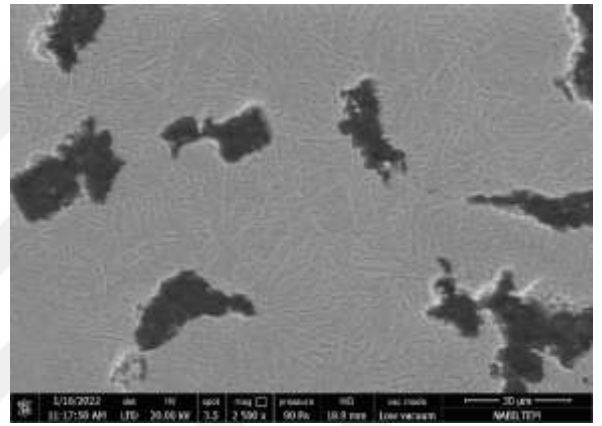
(a)



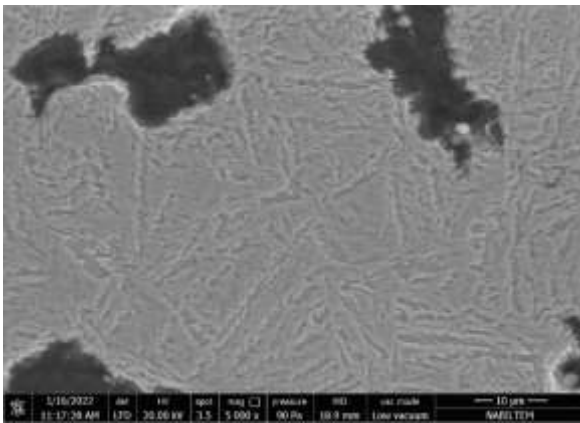
(b)



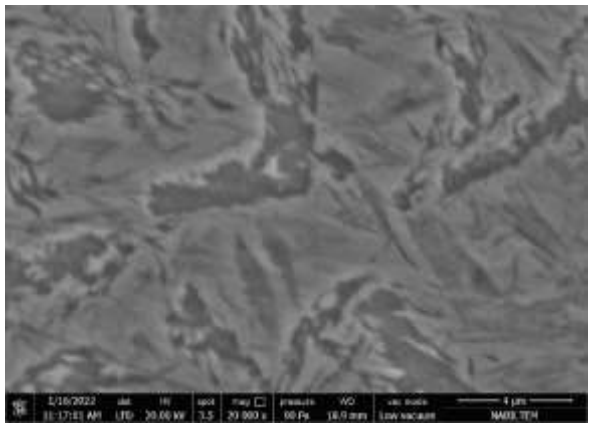
(c)



(d)

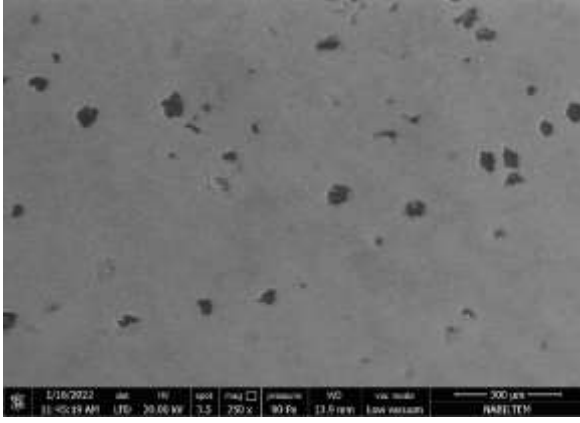


(e)

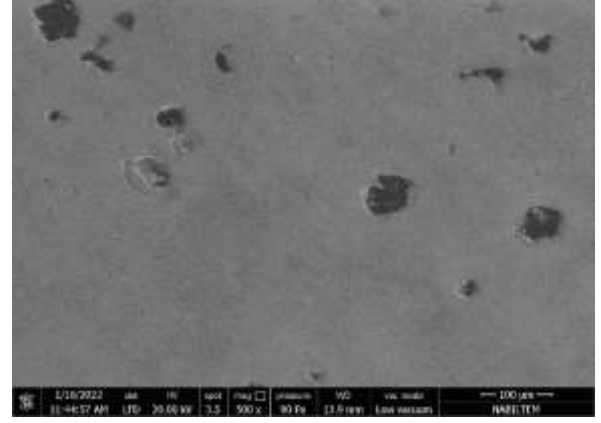


(f)

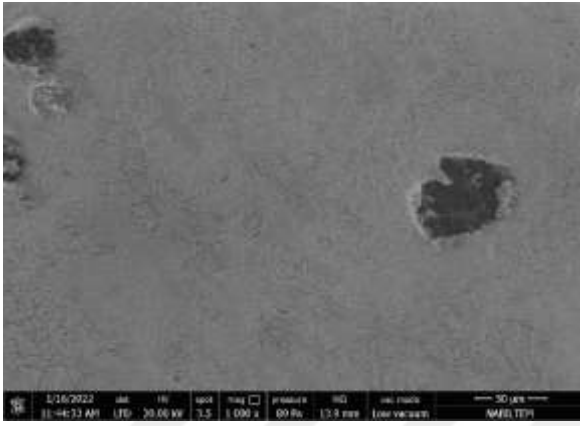
Şekil 6.40. S14 taramalı elektron mikroskobu ile alınan X200 (a), X500 (b), X1000 (c), X2500 (d), X5000 (e) ve X20000 (f) büyütülmüş mikro yapı görüntüleri



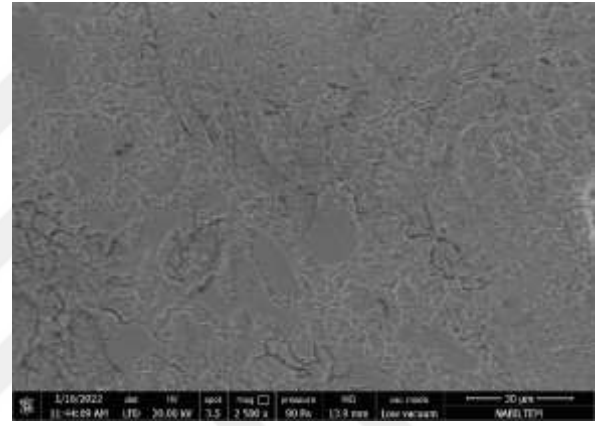
(a)



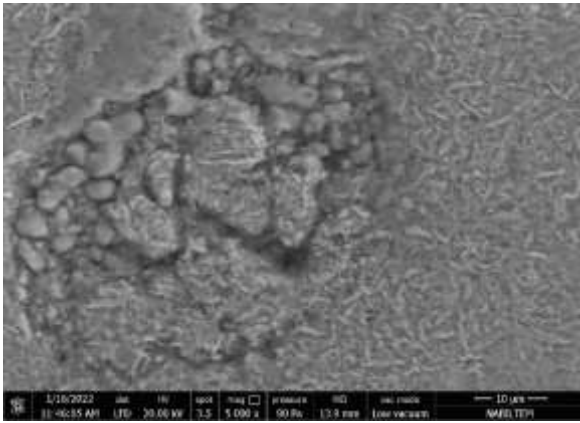
(b)



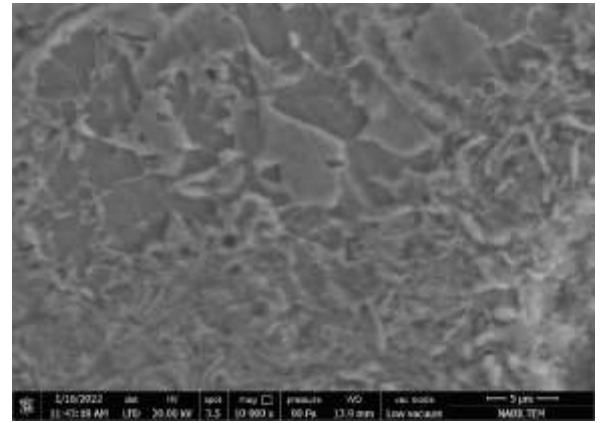
(c)



(d)

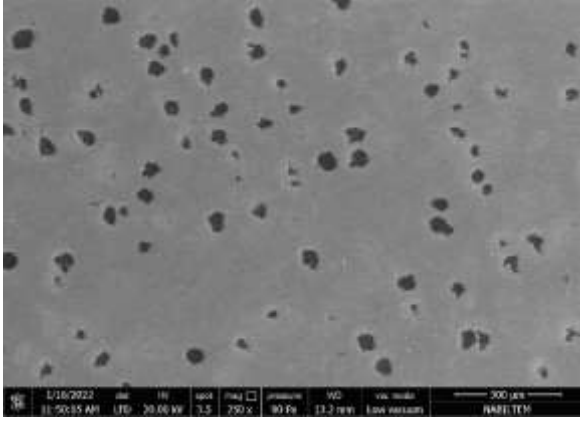


(e)

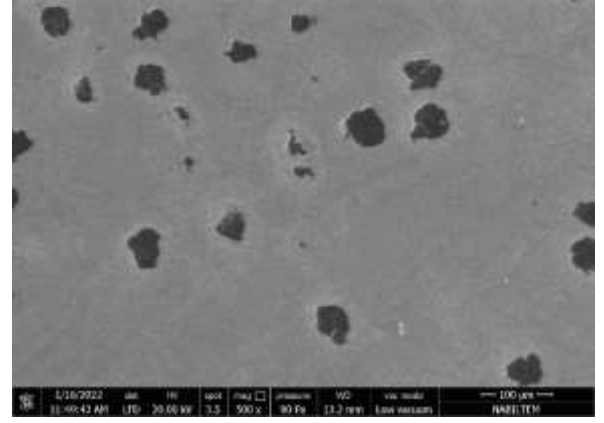


(f)

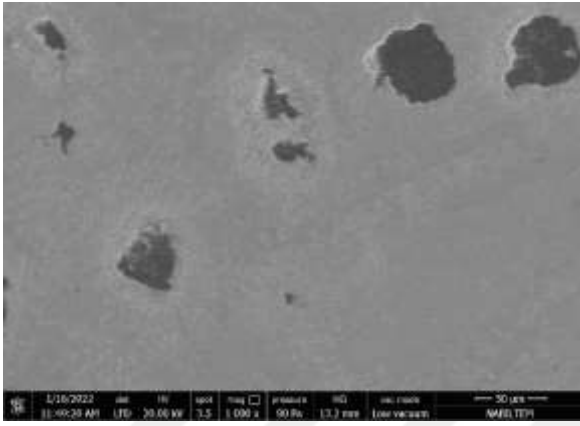
Şekil 6.41. S15 taramalı elektron mikroskobu ile alınan X200 (a), X500 (b), X1000 (c), X2500 (d), X5000 (e) ve X20000 (f) büyütülmüş mikro yapı görüntüleri



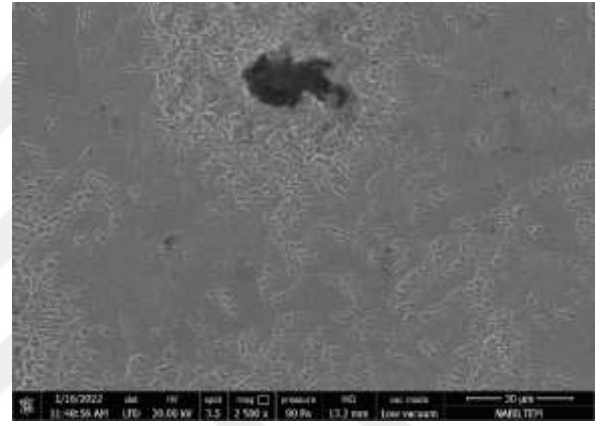
(a)



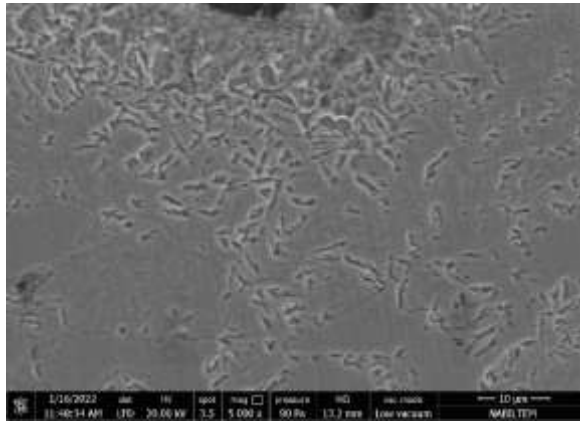
(b)



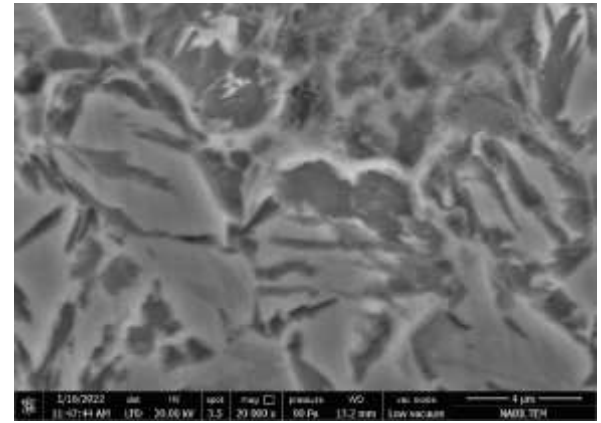
(c)



(d)

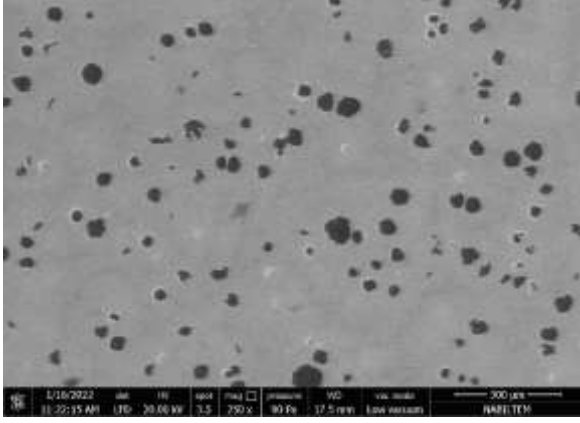


(e)

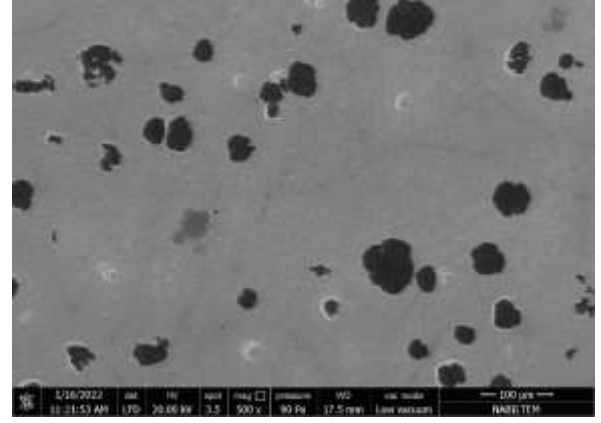


(f)

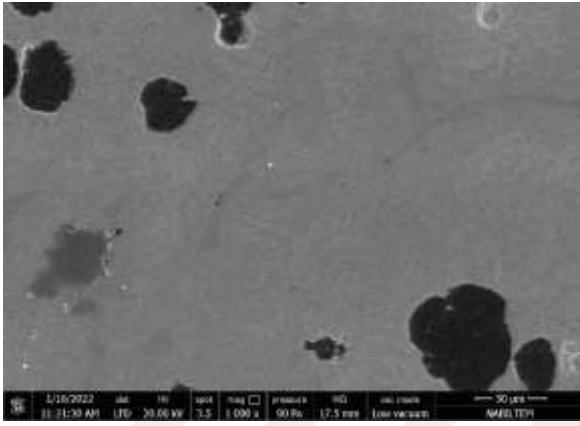
Şekil 6.42. S16 taramalı elektron mikroskobu ile alınan X200 (a), X500 (b), X1000 (c), X2500 (d), X5000 (e) ve X20000 (f) büyütülmüş mikro yapı görüntüleri



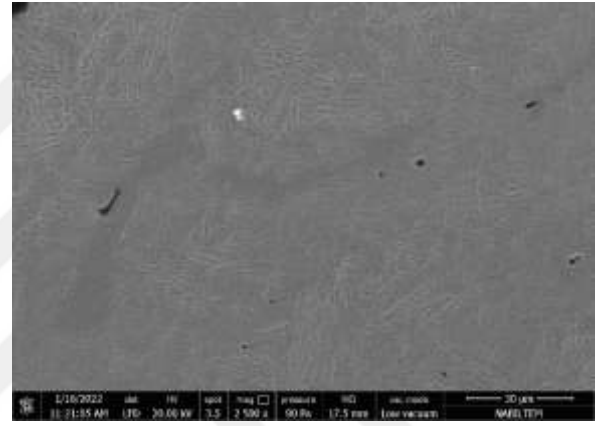
(a)



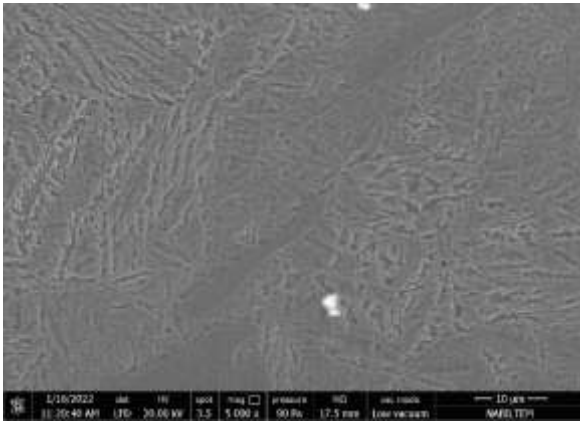
(b)



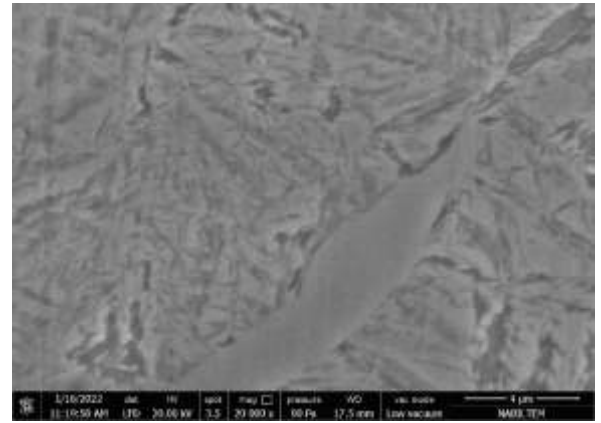
(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 6.43. S17 taramalı elektron mikroskobu ile alınan X200 (a), X500 (b), X1000 (c), X2500 (d), X5000 (e) ve X20000 (f) büyütülmüş mikro yapı görüntüleri

6.4. Mekanik Deneyler

6.4.1. Sertlik Ölçümü

Sertlik deneyleri Şekil 6.44'de de görülen Instron Wolpert marka sertlik ölçme cihazında HRC cinsinden ölçmek suretiyle yapılmıştır. Her bir malzeme için Şekil 6.45' de görüldüğü gibi numunelerin merkezinden dışa doğru üç farklı bölgeden sertlik değerleri ölçülmüştür. Sertlik deneyi sonuçlarına çizelge 6.3'de yer verilmiştir.



Şekil 6.44. Numunelerin sertlik ölçümü için kullanılan sertlik ölçüm cihazı



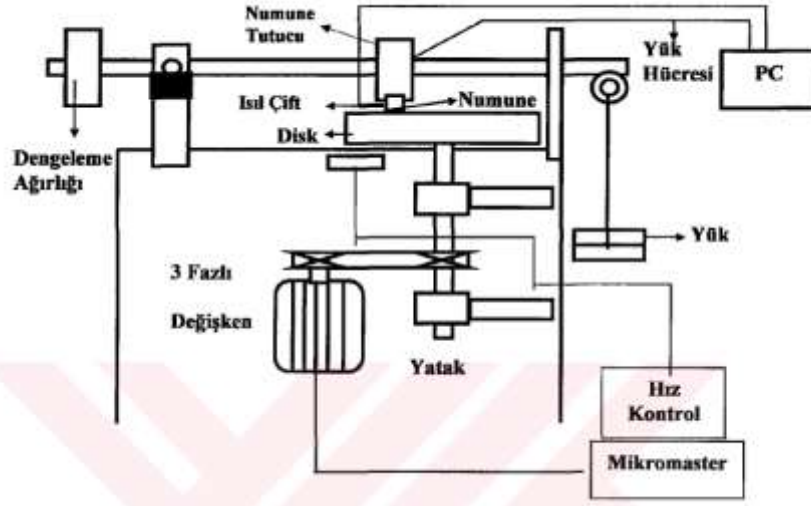
Şekil 6.45. Deneysel olarak sertlik ölçümü alınan numune

Çizelge 6.3. Numunelerin farklı ısıtma işlem durumlarına göre sertlik değerleri

Numune Numarası	Sıcaklık (°C)	Zaman (dakika)	Su verme ortamı	Alt kritik difüzyon sıcaklığı (°C)	Alt kritik difüzyon süresi (dakika)	Soğutma Ortamı	Sertlik (HRC)
S1	Döküm Numune	-	-	-	-	-	34
S2	950	60	Tuz	200	60	Hava	60
S3	950	60	Tuz	200	120	Hava	59
S4	950	60	Tuz	200	240	Hava	55
S5	950	45	Tuz	200	360	Hava	56
S6	900	45	Tuz	250	30	Hava	58
S7	900	45	Tuz	250	45	Hava	57
S8	900	45	Tuz	300	30	Hava	48
S9	900	45	Tuz	300	45	Hava	47
S10	900	45	Tuz	300	90	Hava	46
S11	900	45	Tuz	350	30	Hava	45
S12	900	60	Tuz	350	45	Hava	44
S13	900	60	Tuz	350	90	Hava	56
S14	950	60	Tuz	400	60	Hava	45
S15	950	60	Tuz	400	120	Hava	43
S16	950	60	Tuz	400	240	Hava	39
S17	950	60	Tuz	400	360	Hava	36

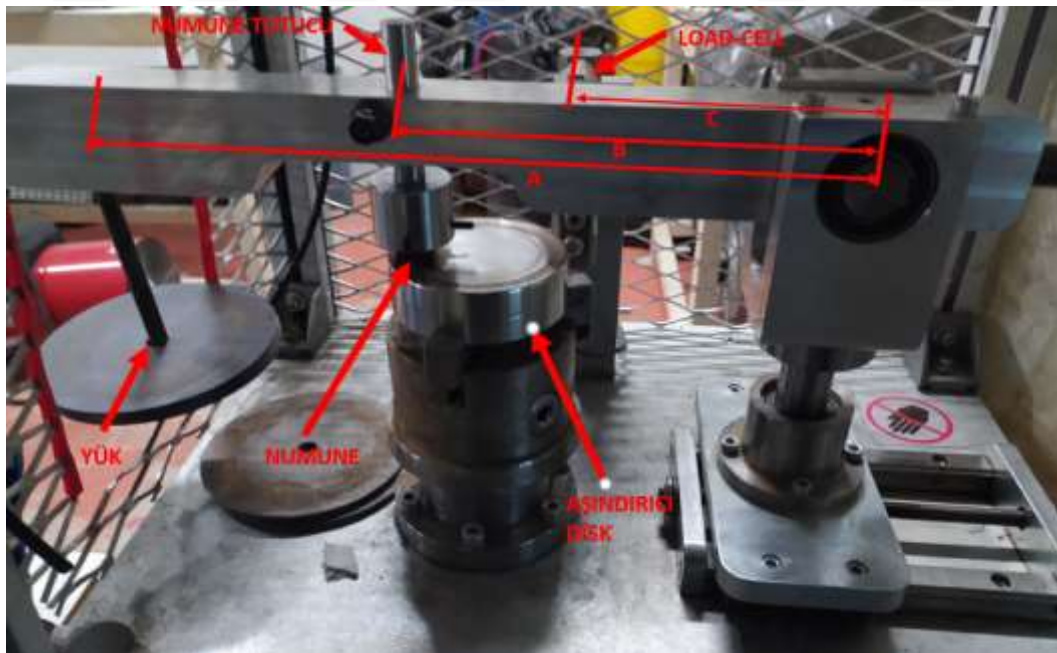
6.4.2. Aşınma Deneyinin Yapılışı ve Test Tezgâhı Bilgileri

Aşınma deneyleri standart pin-disk tipi deney cihazında gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemde disk üzerinde sürtünen pim yöntemi de denilmektedir. Aşınma deney cihazının şematik görünüşü Şekil 6.46'da gösterilmiştir.



Şekil 6.46. Aşınma test cihazı şematik gösterimi.

Aşınma testi yapılan cihazının parçaları; şematik gösterimden de anlaşıldığı gibi 0,37 kW' lık AC motorun çıkış miline bütünleşmiş edilen redüktörün iletim oranı 5, numunenin üzerine sürttüğü disk, destekleme kolu, pens mekanizması, tabla, kızak mekanizması, ağırlıkları dengeleme parçası, değişken ağırlıklar, yük hücresi (load cell), bilgisayar, verilerin bilgisayara aktarımını sağlayan karttan oluşmaktadır (Şekil 6.47).



Şekil 6.47. Aşınma test cihazı

Burada yük ile numune farklı konumda olduğundan numune üzerine gelen yük hesaplanmıştır.

$$M = \frac{(M_Y \cdot A)}{B} \quad (6.1)$$

Formülünden bulunur. Burada;

M_Y : Sisteme eklenen kg cinsinden ağırlık (kg)

M: Numune üzerine gelen ağırlık (kg)

A: Sisteme eklenen ağırlığın moment merkezine mesafesi (mm)

B: Numunenin moment merkezine mesafesi (mm)' dir.

Ayrıca numune bağlanan tutucunun konum ile yük hücresi konumu farklı olduğundan burada sürtünme kuvvetini (F_R) bulmak için;

$$F_R = \frac{(F_{YH} \cdot A)}{B} \quad (6.2)$$

Formülünden bulunur. Burada;

F_{YH} : Yük hücresi tarafından bilgisayara aktarılan kuvvet (kgf) dir.

Bağlantı ile her bir numunenin sürtünme kuvveti bulunmuştur. Dijital el terazisi ile numune tutucu bölgesinden kuvvet uygulanmış olup bilgisayar ekranında çıkan sonuç ile hem yük hücresinin kalibrasyonundan emin olunmuş hem de denklemlerin doğruluğu kontrol edilmiştir.

Her bir numune 0,895 m/s sabit kayma hızı ve 3600 m sabit kayma mesafesinde yağsız ortamda 1,5; 2,25 ve 3 kg yükler altında üç farklı testte tabi tutulmuş ve test sonunda aşınma dirençleri ve kütle kayıpları karşılaştırılmıştır.

Kullanılarak aşındırılan herhangi bir yüzeyin bir daha kullanılmadığından emin olunarak sonuçların güvenilirliği sağlanmıştır. Yapılan testlerde diskin bir yüzeyinde iki adet farklı test yapıp bir diskte toplam 4 adet test yapılmıştır (Şekil 6.50). Bundan dolayı deney sabit kayma hızında yapılması ilkesine bağlı kalınarak, her izde çap değiştiğinden çevresel hızdan dolayı kayma hızı da değişmektedir. Kayma hızının sabit olabilmesi için diskin devir

sayısının değişmesi gerekir. Bu nedenle disk üzerindeki numunelerin temas edeceği noktaların çapları ölülerek her bir iz için ayrı ayrı devir sayıları hesaplanmıştır.

(N) Devir sayısı (dev/dak.),

$$N = \frac{(V \cdot 1000 \cdot 60)}{\pi \cdot D} \quad (6.3)$$

Formülünden bulunur. Burada;

V: Kayma hızı (m/s)

D: İz apı (mm) dir.

Her aşınma sonrası numune yüzeyleri temizlenerek aynı hizaya getirilmiştir. Aşınma öncesi ve sonrası ağırlık değerleri 10-5 g hassasiyet değeri olan terazide ölülerek kaydedilmiştir. Her bir deney aşaması 2 kez tekrarlanmış olup aşınma miktarları ortalama olarak hesaplanmıştır.

Karşı yüzey olarak kullanılan makine aşındırıcı diski ise, 1.2379-X155CrVMo12-1 soğuk iç takımı çeliği malzemeden Ø90x30 mm ölülerinde imal edilmiştir. Isıl işlem ile aşındırıcı disk 64 HRC yüzey sertliği elde edilmiştir. Isıl işlem sonrası aşındırıcı disk yüzeyleri taşlama tezgahında 0,16 µm yüzey pürüzlölük değerine sahip olacak şekilde temizlenmiştir (şekil 6.48).



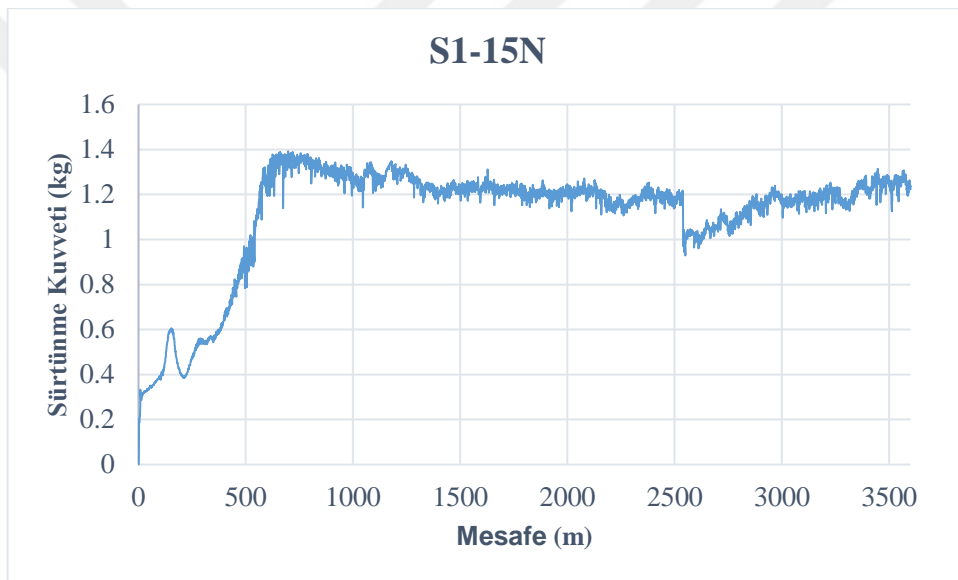
şekil 6.48. Aşındırıcı disk yüzey pürüzlölüğü ölümü

6.5. Aşınma Deneyi

Aşınma deneyi yapılma amacıyla 2 temel verinin bulunması gerekmektedir. Bunlardan bir tanesi sürtünme kuvvetlerindeki değişimi görmek diğer ise farklı numuneler üzerinde aşınma direncinin tayinini yapmaktır.

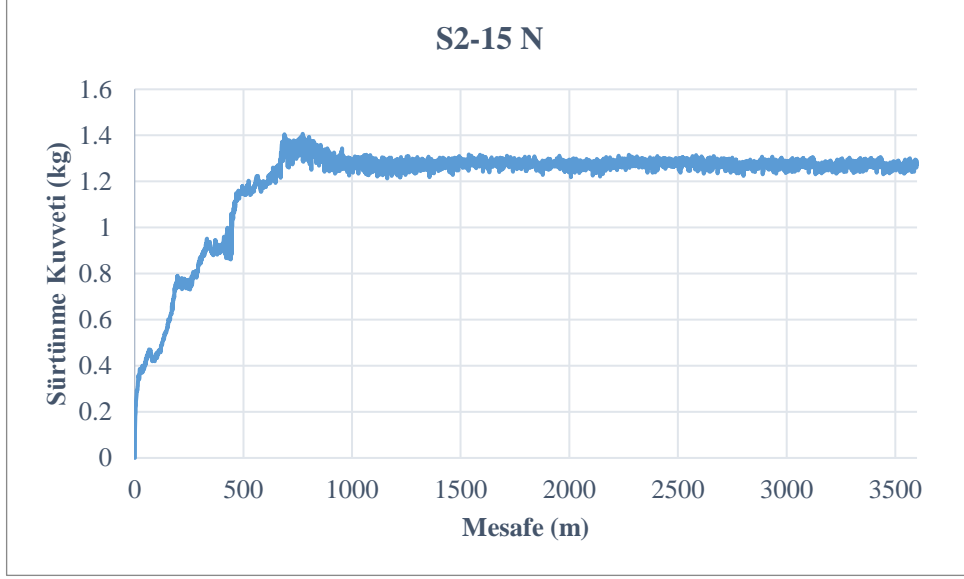
6.5.1. Sürtünme Kuvveti Deneyi

17 adet numuneye sırasıyla 15 N yük uygulanmış ve sürtünme kuvvetleri ve adhezif başlama mesafeleri bulunup incelenmiştir. Bulunan değerler mukayese edilmiştir, ayrıca bilgisayara aktarılan veriler kg üzerinden olduğundan sürtünme kuvveti değerleri kg olarak verilmiştir.



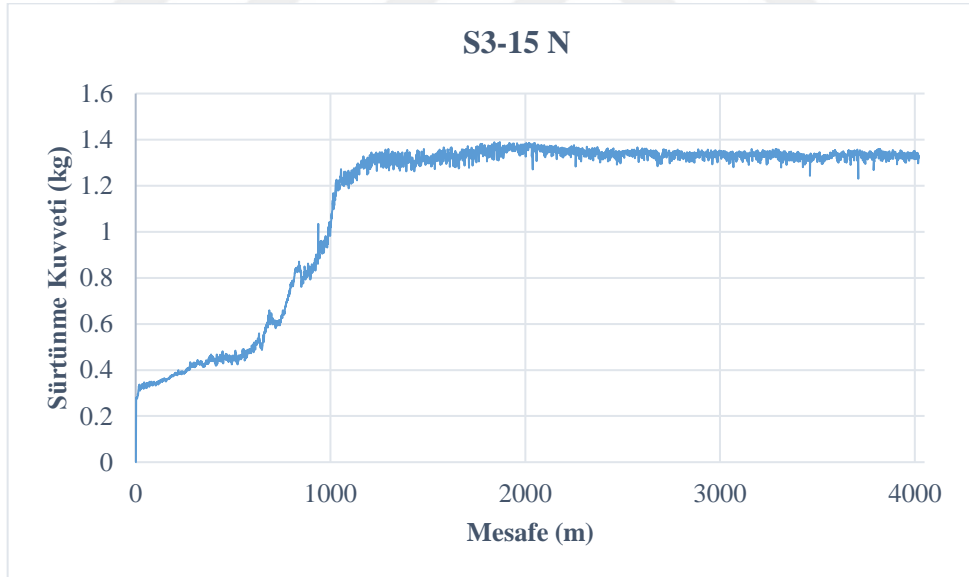
Şekil 6.49. 15 N kuvvetin altında S1 numunesinin F_R değerinin mesafeye bağlı grafiği

Alınan toplam veriler neticesinde 15 N kuvvet altında F_R ortalama değeri 1,2505 kg olarak bulunmuştur. $F_R = \mu \cdot F_N$ ' den $\mu = 0,8337$ olarak elde edilmiştir. Aşınma 710 metreye kadar hızlı gerçekleşmiş olup bu mesafeden sonra olarak adhezif aşınmaya başlamıştır.



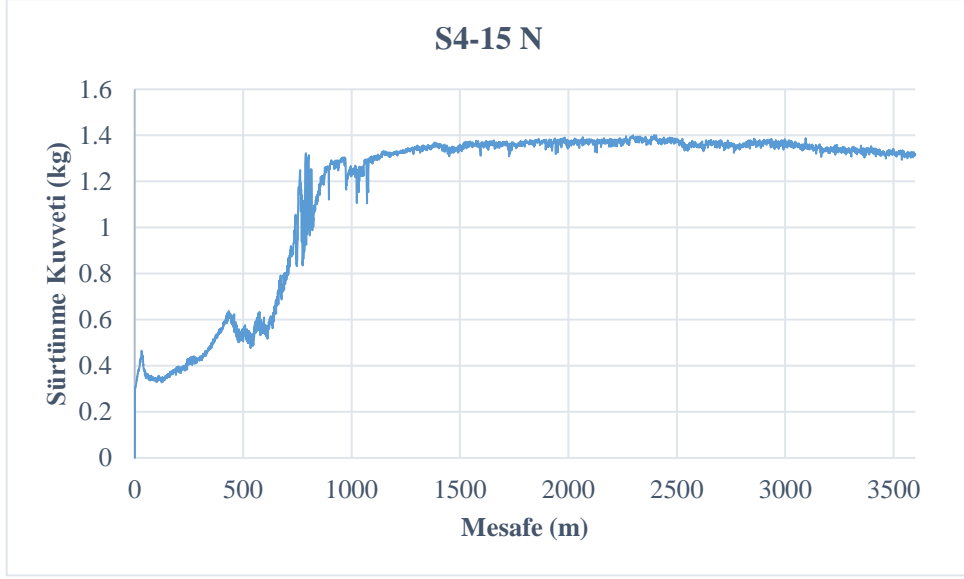
Şekil 6.50. 15 N kuvvetin altında S2 numunesinin F_R değerinin mesafeye bağlı grafiği

Alınan toplam veriler neticesinde 15 N kuvvet altında F_R ortalama değeri 1,2681 kg olarak bulunmuştur. $F_R = \mu \cdot F_N$ ' den $\mu = 0,8454$ olarak elde edilmiştir. Aşınma 780 metreye kadar hızlı gerçekleşmiş olup bu mesafeden sonra olarak adhezif aşınmaya başlamıştır.



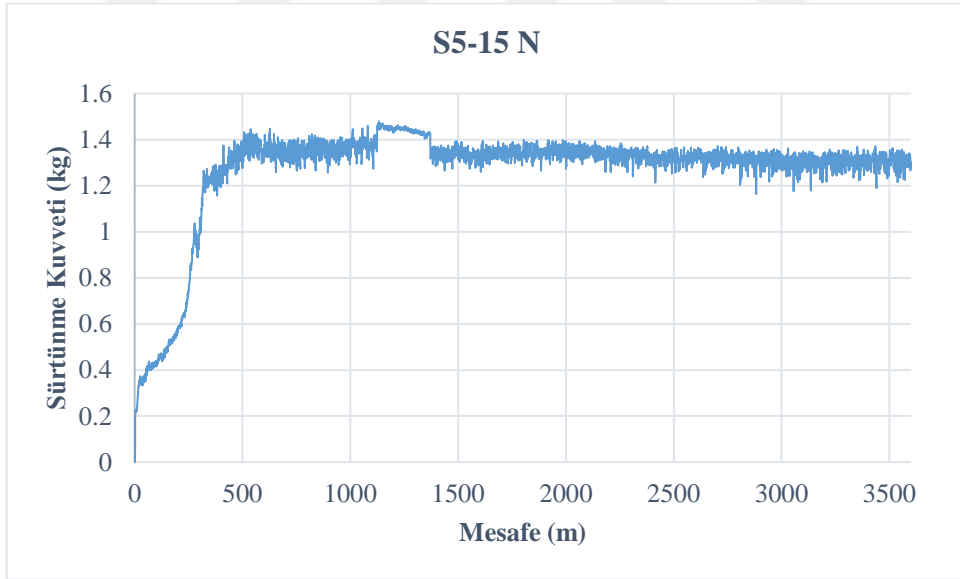
Şekil 6.51. 15 N kuvvetin altında S3 numunesinin F_R değerinin mesafeye bağlı grafiği

Alınan toplam veriler neticesinde 15 N kuvvet altında F_R ortalama değeri 1,3304 kg olarak bulunmuştur. $F_R = \mu \cdot F_N$ ' den $\mu = 0,8869$ olarak elde edilmiştir. Aşınma 710 metreye kadar hızlı gerçekleşmiş olup bu mesafeden sonra olarak adhezif aşınmaya başlamıştır.



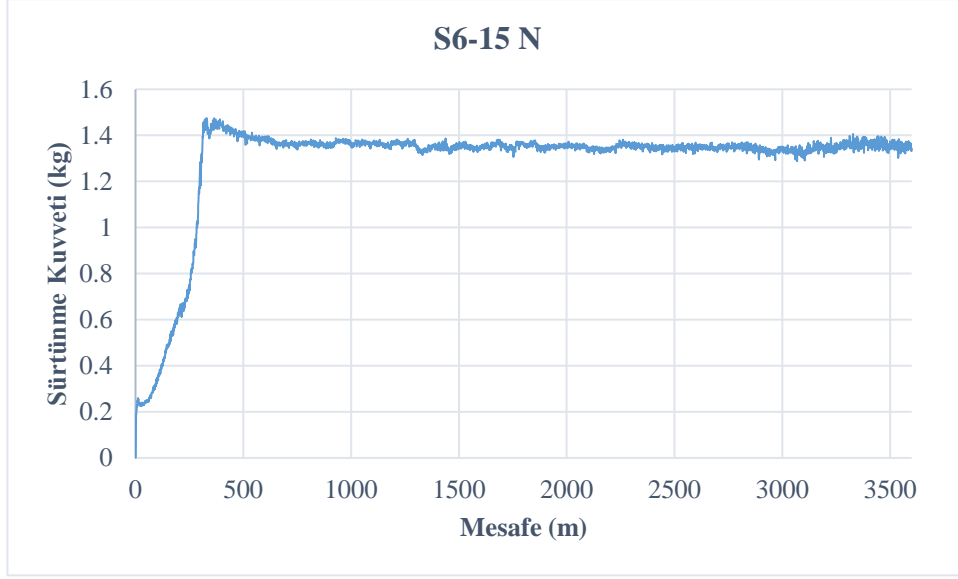
Şekil 6.52. 15 N kuvvetin altında S4 numunesinin F_R değerinin mesafeye bağlı grafiği

Alınan toplam veriler neticesinde 15 N kuvvet altında F_R ortalama değeri 1,3216 kg olarak bulunmuştur. $F_R = \mu \cdot F_N$ ' den $\mu = 0,8811$ olarak elde edilmiştir. Aşınma 1200 metreye kadar hızlı gerçekleşmiş olup bu mesafeden sonra olarak adhezif aşınmaya başlamıştır.



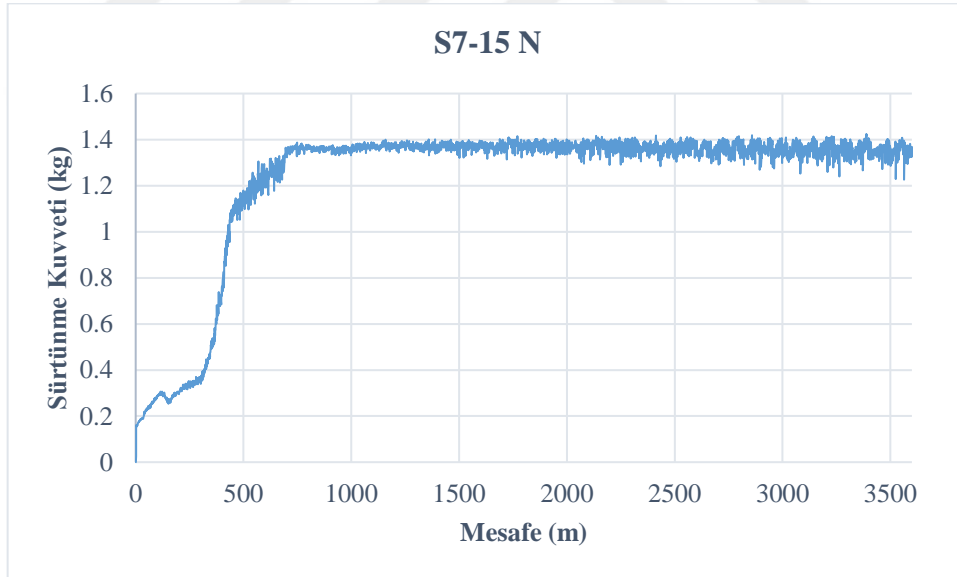
Şekil 6.53. 15 N kuvvet altında S5 numunesinin F_R değerinin mesafeye bağlı grafiği

Alınan toplam veriler neticesinde 15 N kuvvet altında F_R ortalama değeri 1,3063 kg olarak bulunmuştur. $F_R = \mu \cdot F_N$ ' den $\mu = 0,8709$ olarak elde edilmiştir. Aşınma 500 metreye kadar hızlı gerçekleşmiş olup bu mesafeden sonra olarak adhezif aşınmaya başlamıştır.



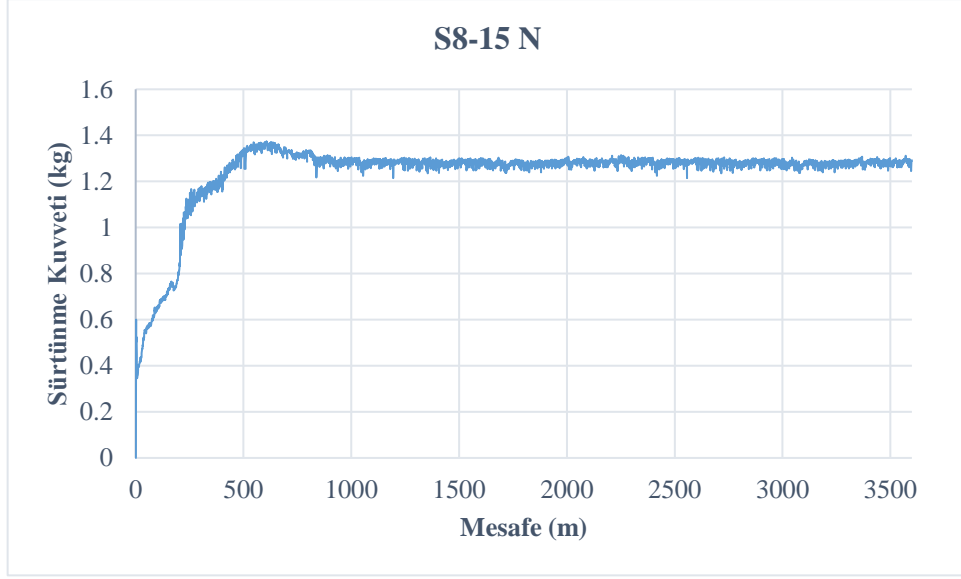
Şekil 6.54. 15 N kuvvetin altında S6 numunesinin F_R değerinin mesafeye bağlı grafiği

Alınan toplam veriler neticesinde 15 N kuvvet altında F_R ortalama değeri 1,3575 kg olarak bulunmuştur. $F_R = \mu \cdot F_N$ ' den $\mu = 0,905$ olarak elde edilmiştir. Aşınma 420 metreye kadar hızlı gerçekleşmiş olup bu mesafeden sonra olarak adhezif aşınmaya başlamıştır.



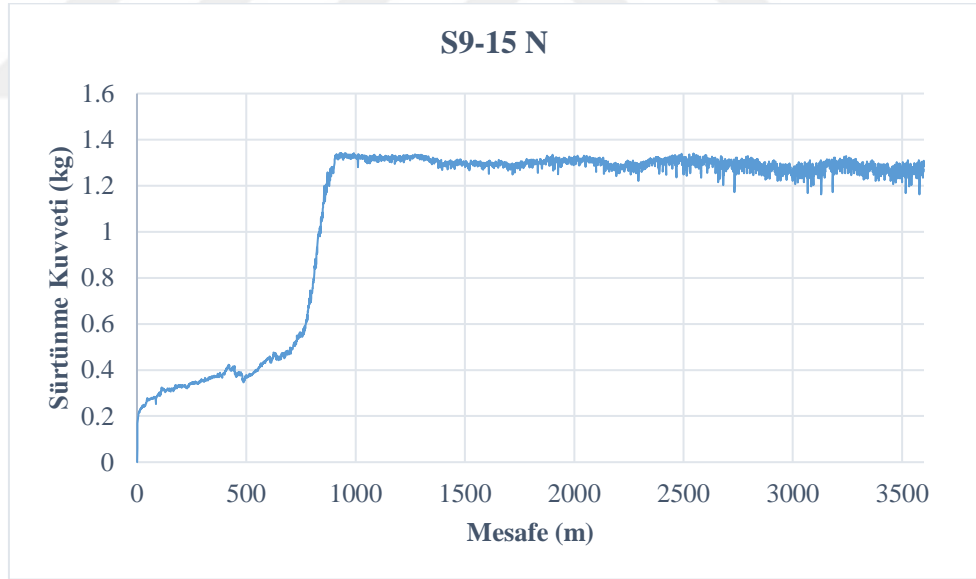
Şekil 6.55. 15 N kuvvetin altında S7 numunesinin F_R değerinin mesafeye bağlı grafiği

Alınan toplam veriler neticesinde 15 N kuvvet altında F_R ortalama değeri 1,35 kg olarak bulunmuştur. $F_R = \mu \cdot F_N$ ' den $\mu = 0,9$ olarak elde edilmiştir. Aşınma 450 metreye kadar hızlı gerçekleşmiş olup bu mesafeden sonra olarak adhezif aşınmaya başlamıştır.



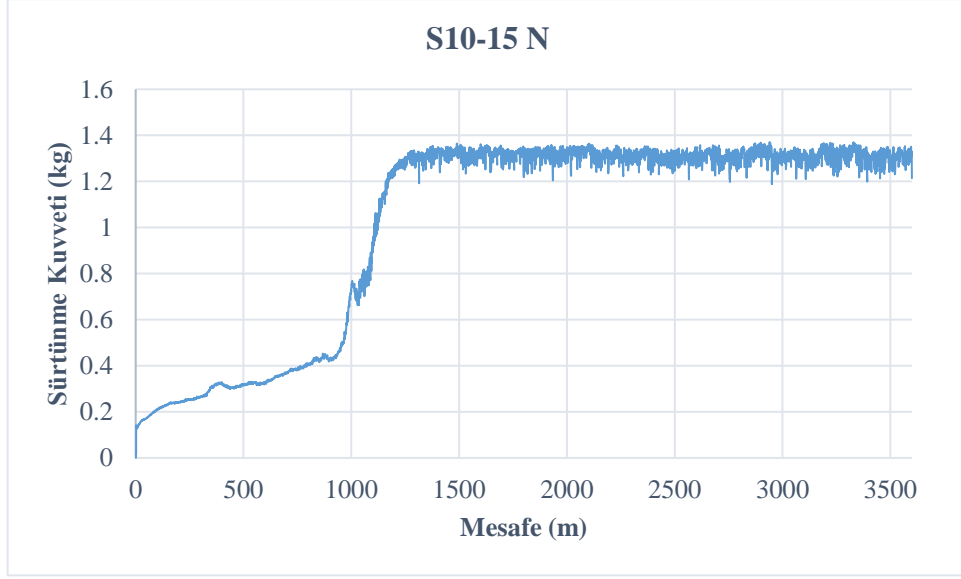
Şekil 6.56. 15 N kuvvetin altında S8 numunesinin F_R değerinin mesafeye bağlı grafiği

Alınan toplam veriler neticesinde 15 N kuvvet altında F_R ortalama değeri 1,2822 kg olarak bulunmuştur. $F_R = \mu \cdot F_N$ ' den $\mu = 0,8548$ olarak elde edilmiştir. Aşınma 615 metreye kadar hızlı gerçekleşmiş olup bu mesafeden sonra olarak adhezif aşınmaya başlamıştır.



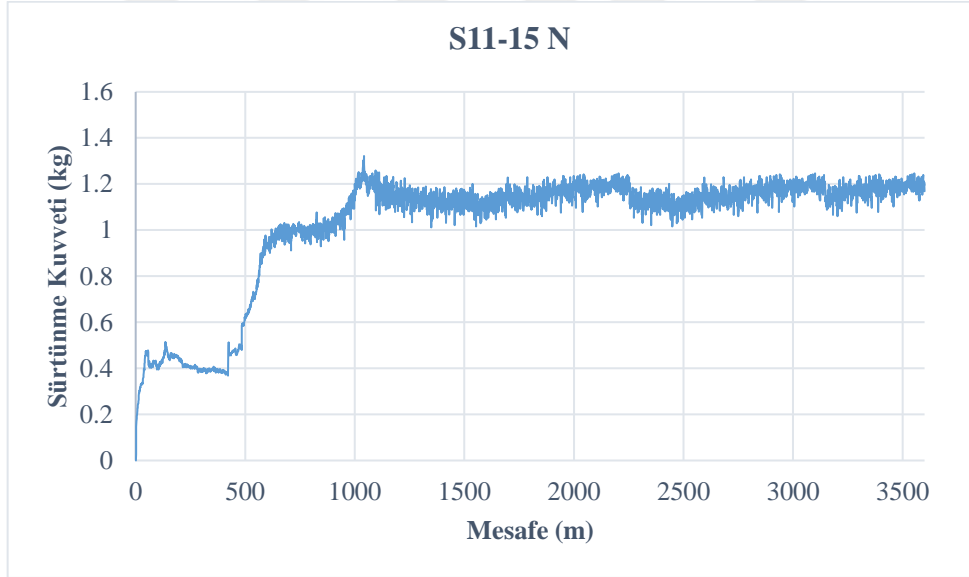
Şekil 6.57. 15 N kuvvetin altında S9 numunesinin F_R değerinin mesafeye bağlı grafiği

Alınan toplam veriler neticesinde 15 N kuvvet altında F_R ortalama değeri 1,2653 kg olarak bulunmuştur. $F_R = \mu \cdot F_N$ ' den $\mu = 0,8435$ olarak elde edilmiştir. Aşınma 920 metreye kadar hızlı gerçekleşmiş olup bu mesafeden sonra olarak adhezif aşınmaya başlamıştır.



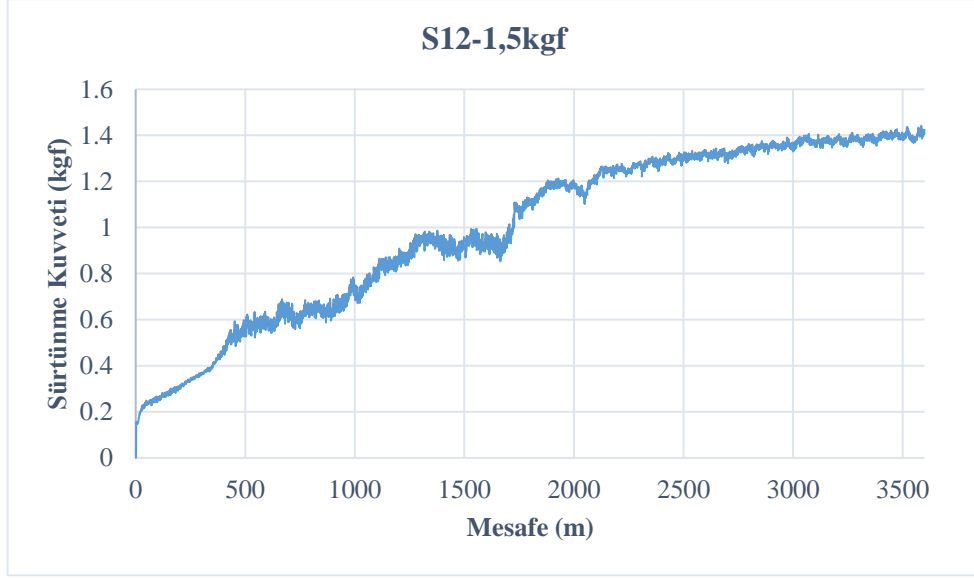
Şekil 6.58. 15 N kuvvetin altında S10 numunesinin F_R değerinin mesafeye bağlı grafiği

Alınan toplam veriler neticesinde 15 N kuvvet altında F_R ortalama değeri 1,2642 kg olarak bulunmuştur. $F_R = \mu \cdot F_N$ ' den $\mu = 0,8428$ olarak elde edilmiştir. Aşınma 1320 metreye kadar hızlı gerçekleşmiş olup bu mesafeden sonra olarak adhezif aşınmaya başlamıştır.



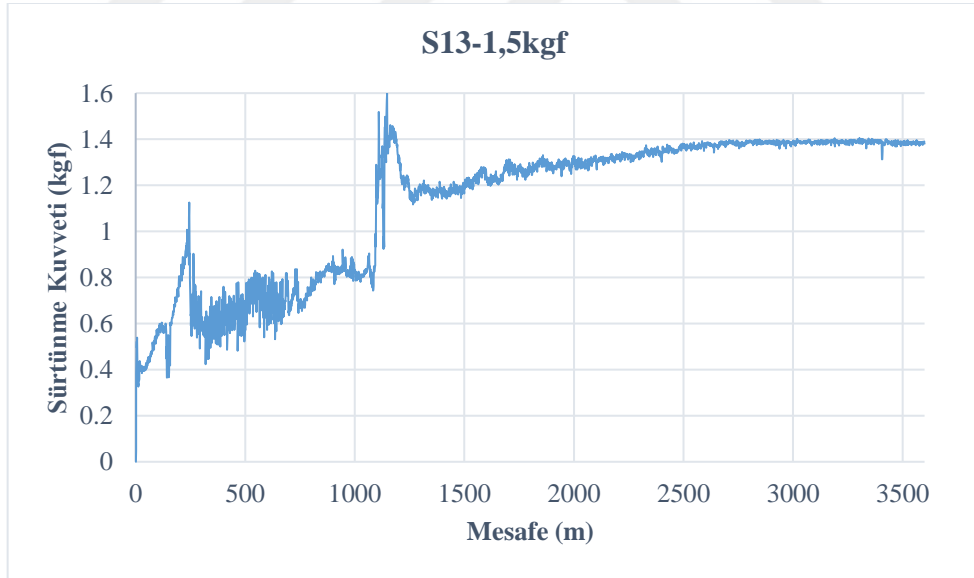
Şekil 6.59. 15 N kuvvetin altında S11 numunesinin F_R değerinin mesafeye bağlı grafiği

Alınan toplam veriler neticesinde 15 N kuvvet altında F_R ortalama değeri 1,1912 kg olarak bulunmuştur. $F_R = \mu \cdot F_N$ ' den $\mu = 0,7941$ olarak elde edilmiştir. Aşınma 1040 metreye kadar hızlı gerçekleşmiş olup bu mesafeden sonra olarak adhezif aşınmaya başlamıştır.



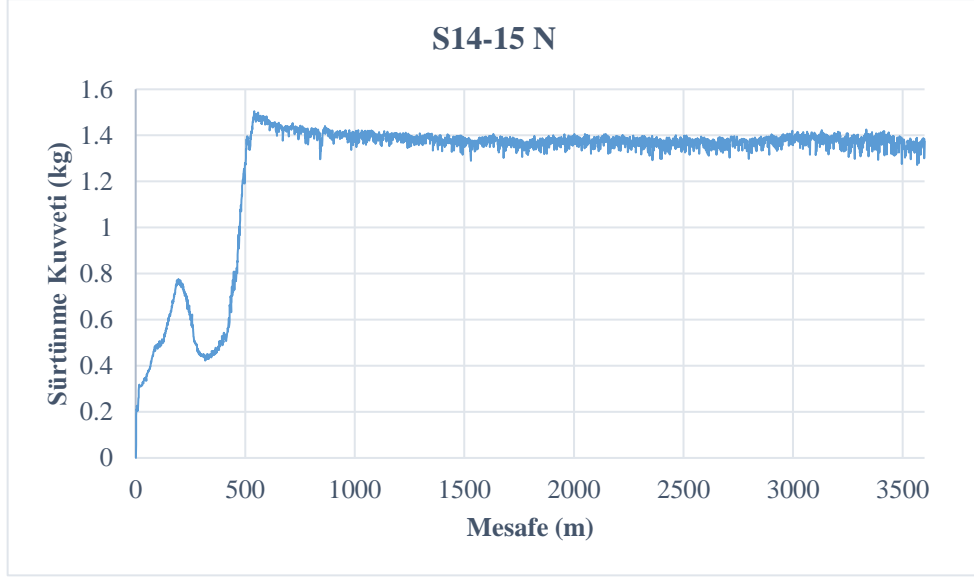
Şekil 6.60. 15 N kuvvetin altında S12 numunesinin F_R değerinin mesafeye bağlı grafiği

Alınan toplam veriler neticesinde 15 N kuvvet altında F_R ortalama değeri 1,4004 kg olarak bulunmuştur. $F_R = \mu \cdot F_N$ ' den $\mu = 0,9333$ olarak elde edilmiştir. Aşınma 3080 metreye kadar hızlı gerçekleşmiş olup bu mesafeden sonra olarak adhezif aşınmaya başlamıştır.



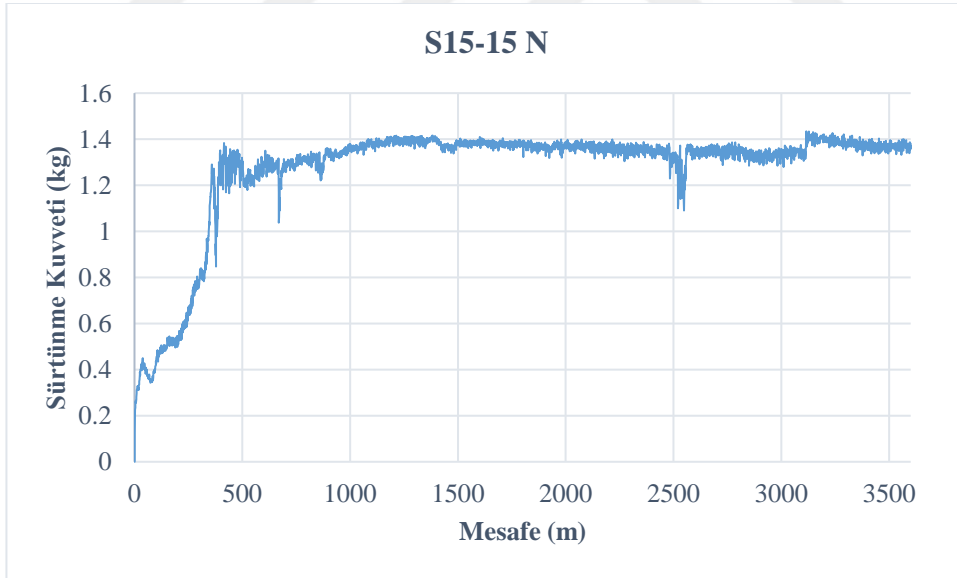
Şekil 6.61. 15 N kuvvetin altında S13 numunesinin F_R değerinin mesafeye bağlı grafiği

Alınan toplam veriler neticesinde 15 N kuvvet altında F_R ortalama değeri 1,3844 kgf olarak bulunmuştur. $F_R = \mu \cdot F_N$ ' den $\mu = 0,9229$ olarak elde edilmiştir. Aşınma 2500 metreye kadar hızlı gerçekleşmiş olup bu mesafeden sonra olarak adhezif aşınmaya başlamıştır.



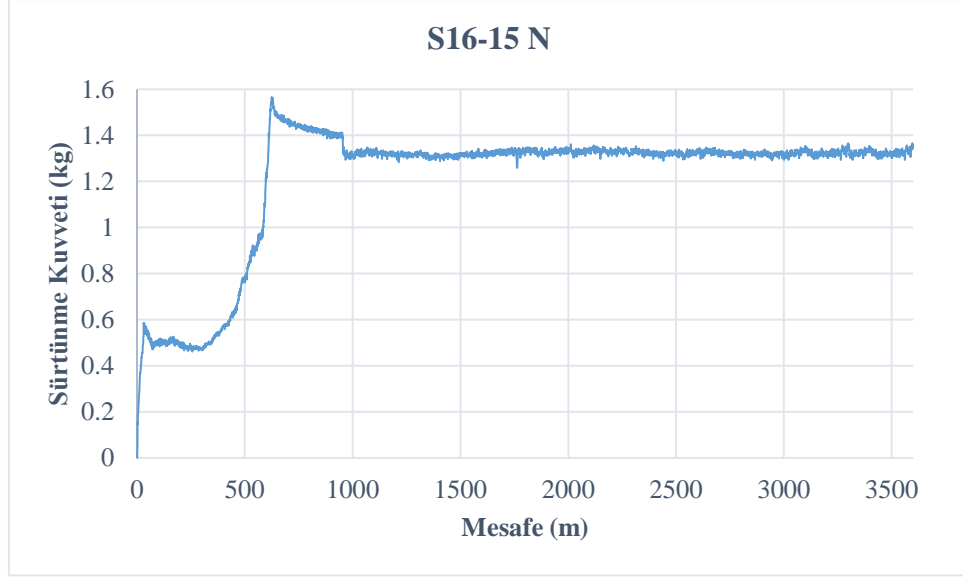
Şekil 6.62. 15 n kuvvetin altında S14 numunesinin F_R değerinin mesafeye bağlı grafiği

Alınan toplam veriler neticesinde 15 N kuvvet altında F_R ortalama değeri 1,3605 kg olarak bulunmuştur. $F_R = \mu \cdot F_N$ ' den $\mu = 0,907$ olarak elde edilmiştir. Aşınma 540 metreye kadar hızlı gerçekleşmiş olup bu mesafeden sonra olarak adhezif aşınmaya başlamıştır.



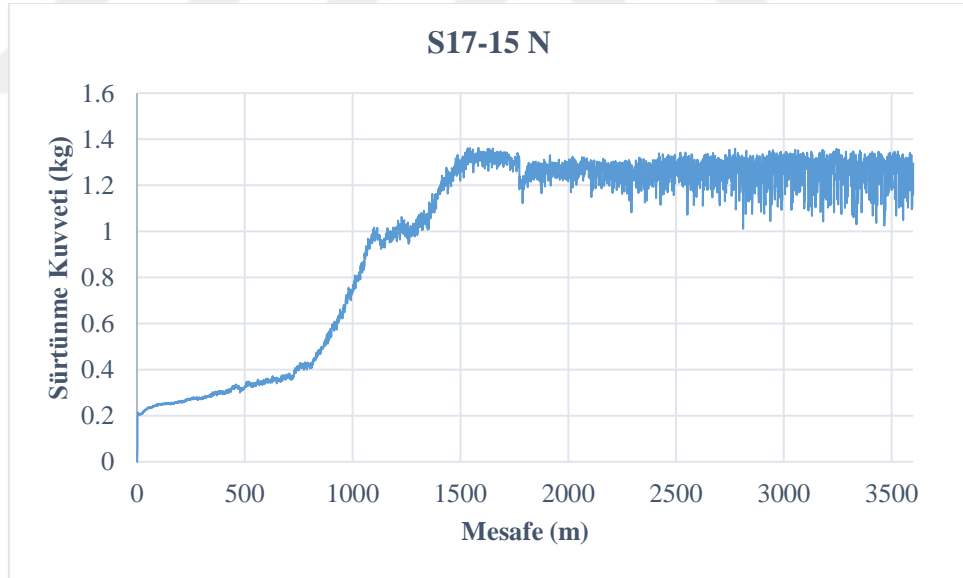
Şekil 6.63. 15 N kuvvetin altında S15 numunesinin F_R değerinin mesafeye bağlı grafiği

Alınan toplam veriler neticesinde 15 N kuvvet altında F_R ortalama değeri 1,3701 kg olarak bulunmuştur. $F_R = \mu \cdot F_N$ ' den $\mu = 0,9134$ olarak elde edilmiştir. Aşınma 1100 metreye kadar hızlı gerçekleşmiş olup bu mesafeden sonra olarak adhezif aşınmaya başlamıştır.



Şekil 6.64. 15 N kuvvetin altında S16 numunesinin F_R değerinin mesafeye bağlı grafiği

Alınan toplam veriler neticesinde 15 N kuvvet altında F_R ortalama değeri 1,2572 olarak bulunmuştur. $F_R = \mu \cdot F_N$ ' den $\mu = 0,8381$ olarak elde edilmiştir. Aşınma 635 metreye kadar hızlı gerçekleşmiş olup bu mesafeden sonra olarak adhezif aşınmaya başlamıştır.



Şekil 6.65. 15 N kuvvetin altında S17 numunesinin F_R değerinin mesafeye bağlı grafiği

Alınan toplam veriler neticesinde 15 N kuvvet altında F_R ortalama değeri 1,25 kg olarak bulunmuştur. $F_R = \mu \cdot F_N$ ' den $\mu = 0,8333$ olarak elde edilmiştir. Aşınma 1500 metreye kadar hızlı gerçekleşmiş olup bu mesafeden sonra olarak adhezif aşınmaya başlamıştır.

Sürtünme katsayılarına göre sıralama yapılmış Çizelge 6.4' de verilmiştir. Verilen tabloya göre sürtünme katsayısı en iyi S11 en kötü S12 olarak gözükmektedir.

Çizelge 6.4. Numunelerin farklı ısıl işlem durumlarına göre sürtünme katsayısı

NUMUNE	ÖSTEMPERLEME	SÜRE	TUZ BANYOSU	SÜRE	SERTLİK	SÜRTÜNME KUVVETİ
S11	900 °C	45 dk	350	30 dk	45 HRC	1,1912
S17	950 °C	60 dk	400	360 dk	36 HRC	1,25
S1	ISIL İŞLEMSİZ	-	-	-	34 HRC	1,2505
S16	950 °C	60 dk	400	240 dk	39 HRC	1,2572
S10	900 °C	45 dk	300	90 dk	46 HRC	1,2642
S9	900 °C	45 dk	300	45 dk	47 HRC	1,2653
S2	950 °C	60 dk	200	60 dk	60 HRC	1,2681
S8	900 °C	45 dk	300	30 dk	48 HRC	1,2822
S5	950 °C	60 dk	200	360 dk	56 HRC	1,3063
S4	950 °C	60 dk	200	240 dk	55 HRC	1,3216
S3	950 °C	60 dk	200	120 dk	59 HRC	1,3304
S7	900 °C	45 dk	250	45 dk	57 HRC	1,35
S6	900 °C	45 dk	250	30 dk	58 HRC	1,3575
S14	950 °C	60 dk	400	60 dk	45 HRC	1,3605
S15	950 °C	60 dk	400	120 dk	43 HRC	1,3701
S13	900 °C	45 dk	350	90 dk	56 HRC	1,3844
S12	900 °C	45 dk	350	45 dk	44 HRC	1,4004

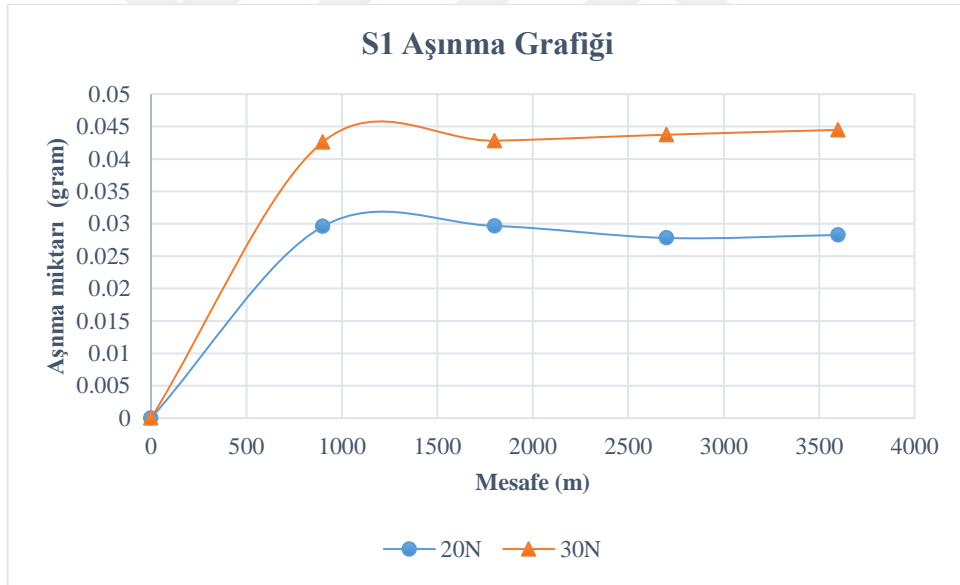
6.5.2. Aşınma Direnci Deneyi

Bu deneyde numunelere 20 N ve 30 N olmak üzere iki farklı yük uygulanıp 3600 m kayma mesafesinde, test öncesi ve test sonrası 10^{-5} hassasiyetli terazi ile ölçülerek ağırlık kaybı hesaplanıp aşınma direnci bulunmuştur.

Burada dikkat edilmesi gereken konu deney numunelerin aşınan yüzey boyutları farklı olduğundan her numunenin 100 mm^2 alandaki aşınma miktarı bulunmuştur. Krom- Molibden GGG 50 malzemeden üretilmiş numuneler 20 N ve 30 N yükler altında 3600 m mesafede aşınma grafikleri ayrı ayrı verilmiştir.

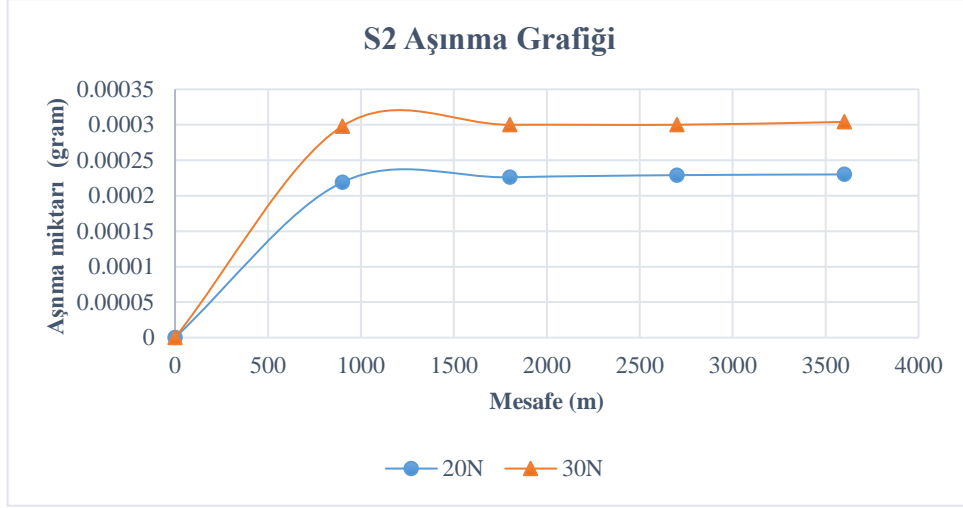
Yapılan testler esnasında her bir numune 900m, 1800m, 2700m ve 3600m sonralarında ölçülen ağırlık başlangıçta ölçülen ağırlıktan çıkartılarak oluşan farklar ile grafikler çizilmiştir.

Test esnasında dikkat edilmesi gereken temel esaslardan bir tanesi de tüm testlerde aynı kayma hızı ile yapılmıştır.



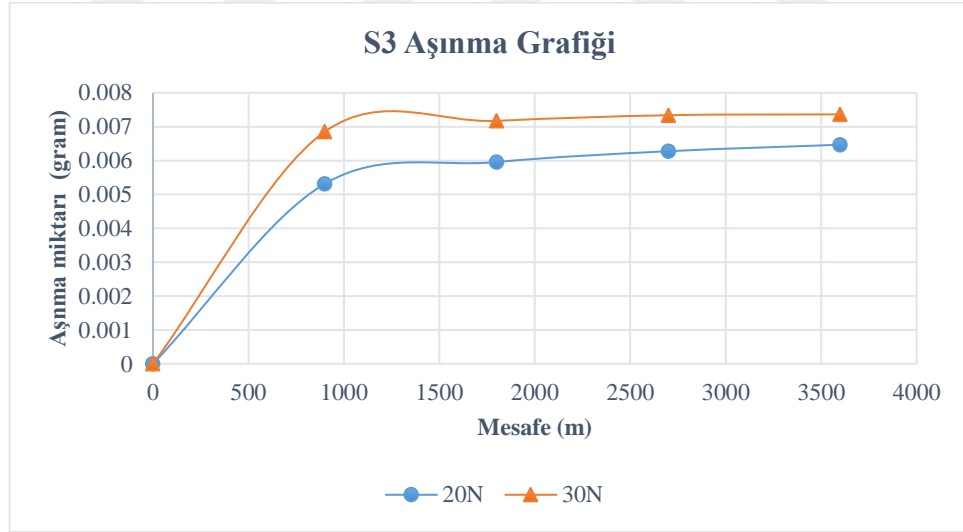
Şekil 6.66. S1 numunesinin farklı yüklerde kayma mesafesine bağlı aşınma grafiği

S1 numunesi ısıtılmamış ve sertliği 34 HRC gelmektedir. Sürtünme katsayısı nispetten iyi olmasına karşın aşınma direnci düşüktür. Yükün ağırlığına bağlı olarak ise doğru orantılı olacak şekilde değişmektedir.



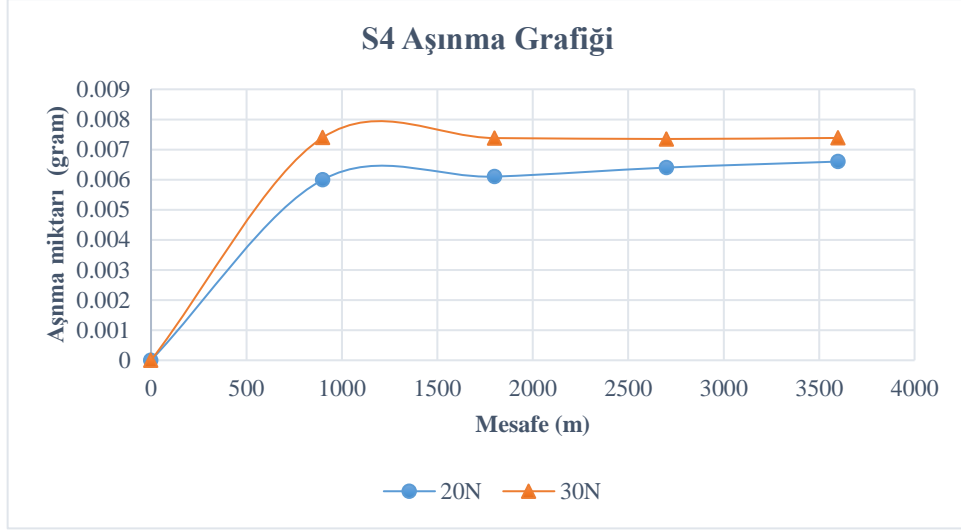
Şekil 6.67. S2 numunesinin farklı yüklerde kayma mesafesine bağlı aşınma grafiği

S2 numunesi 950 °C sıcaklıkta 60 dakikaka östenitlendikten sonra 200 °C' de 60 dakika östemperlenme yapıp sertliği 60 HRC gelmektedir. Yüke bağlı olarak ise doğru orantılı olarak artmaktadır. Cisim ilk temasında hızlı bir şekilde aşınmaya maruz kalıp belirli bir noktadan sonra düz çizgiler halinde aşınmasını devam ettirmektedir. Isıl işlemsiz döküm olan S1 e göre aşınması kıyasla aşınma direnci daha iyidir.



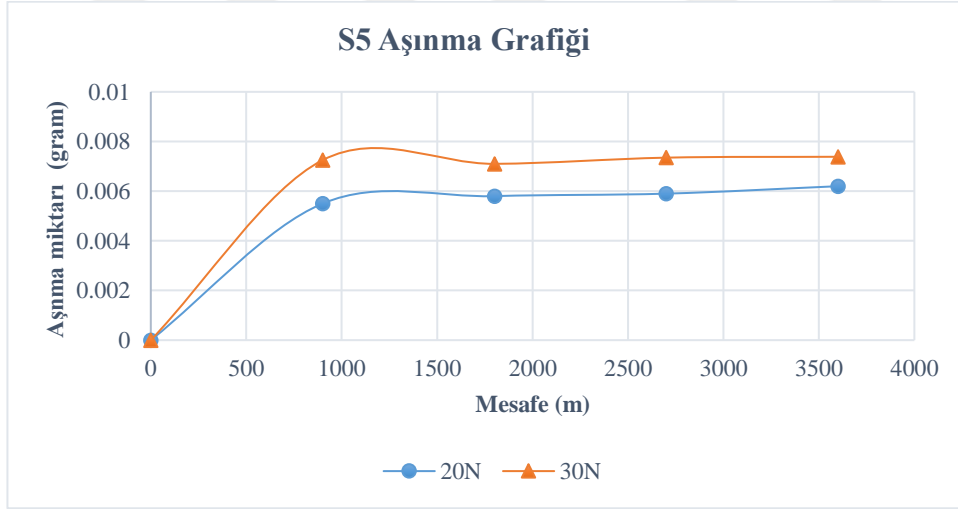
Şekil 6.68. S3 numunesinin farklı yüklerde kayma mesafesine bağlı aşınma grafiği

S3 numunesi 950 °C sıcaklıkta 60 dakikaka östenitlendikten sonra 200 °C' de 120 dakikaka östemperlenme yapıp sertliği 59 HRC gelmektedir. Yüke bağlı olarak ise doğru orantılı olarak artmaktadır. Cisim ilk temasında hızlı bir şekilde aşınmaya maruz kalıp belirli bir noktadan sonra düz çizgiler halinde aşınmasını devam ettirmektedir. Isıl işlemsiz döküm olan S1 e göre aşınması kıyasla aşınma direnci daha iyidir.



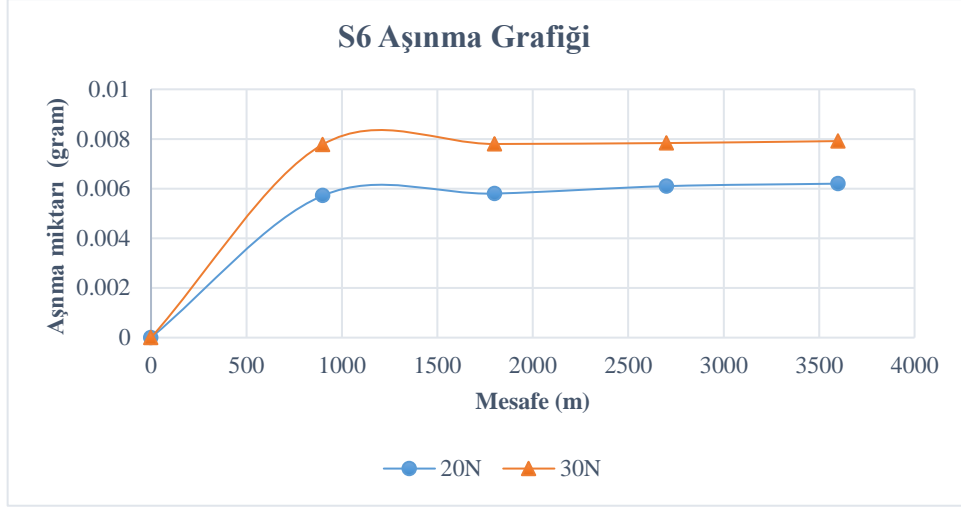
Şekil 6.69. S4 numunesinin farklı yüklerde kayma mesafesine bağlı aşınma grafiği

S4 numunesi 950 °C sıcaklıkta 60 dakikaka östenitlendikten sonra 200 °C' de 240 dakikaka östemperlenme yapıp sertliği 55 HRC gelmektedir. Yüke bağlı olarak ise doğru orantılı olarak artmaktadır. Cisim ilk temasında hızlı bir şekilde aşınmaya maruz kalıp belirli bir noktadan sonra düz çizgiler halinde aşınmasını devam ettirmektedir. Isıl işlemsiz döküm olan S1 e göre aşınması kıyasla aşınma direnci daha iyidir.



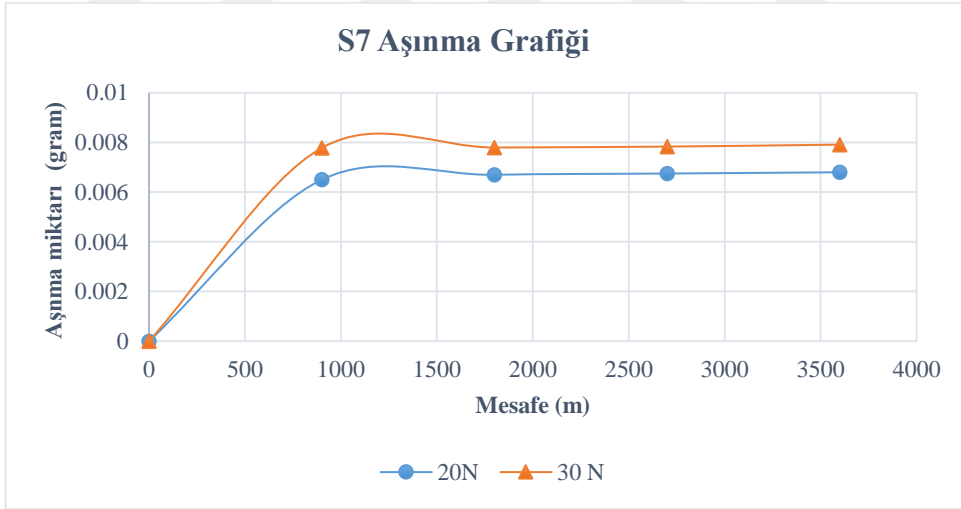
Şekil 6.70. S5 numunesinin farklı yüklerde kayma mesafesine bağlı aşınma grafiği

S5 numunesi 950 °C sıcaklıkta 60 dakikaka östenitlendikten sonra 200 °C' de 240 dakikaka östemperlenme yapıp sertliği 56 HRC gelmektedir. Yüke bağlı olarak ise doğru orantılı olarak artmaktadır. Cisim ilk temasında hızlı bir şekilde aşınmaya maruz kalıp belirli bir noktadan sonra düz çizgiler halinde aşınmasını devam ettirmektedir. Isıl işlemsiz döküm olan S1 e göre aşınması kıyasla aşınma direnci daha iyidir.



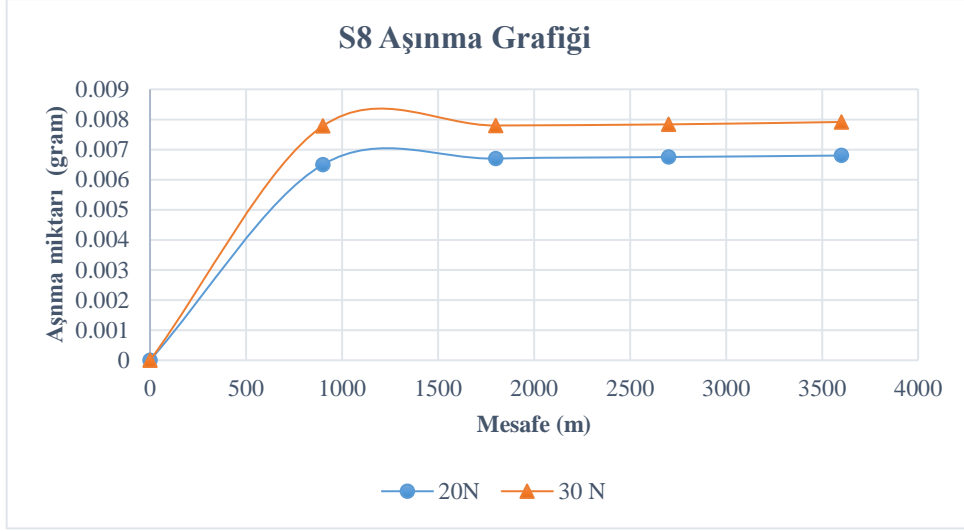
Şekil 6.71. S6 numunesinin farklı yüklerde kayma mesafesine bağlı aşınma grafiği

S6 numunesi 900 °C sıcaklıkta 45 dakika östenitlendikten sonra 250 °C’ de 30 dakika östemperlenme yapıp sertliği 58 HRC gelmektedir. Yüke bağlı olarak ise doğru orantılı olarak artmaktadır. Cisim ilk temasında hızlı bir şekilde aşınmaya maruz kalıp belirli bir noktadan sonra düz çizgiler halinde aşınmasını devam ettirmektedir. Isıl işlemsiz döküm olan S1 e göre aşınması kıyasla aşınma direnci daha iyidir.



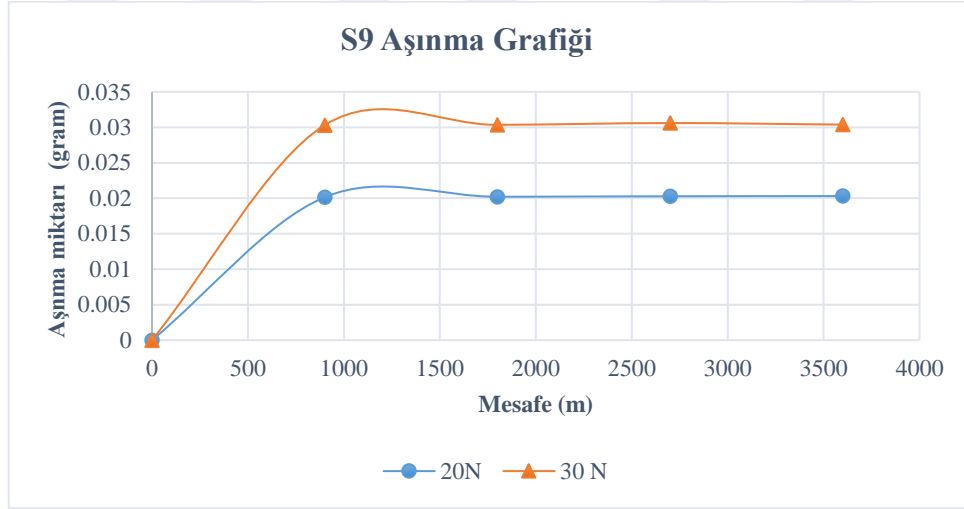
Şekil 6.72. S7 numunesinin farklı yüklerde kayma mesafesine bağlı aşınma grafiği

S7 numunesi 900 °C sıcaklıkta 45 dakika östenitlendikten sonra 300 °C’ de 45 dakika östemperlenme yapıp sertliği 57 HRC gelmektedir. Yüke bağlı olarak ise doğru orantılı olarak artmaktadır. Cisim ilk temasında hızlı bir şekilde aşınmaya maruz kalıp belirli bir noktadan sonra düz çizgiler halinde aşınmasını devam ettirmektedir. Isıl işlemsiz döküm olan S1 e göre aşınması kıyasla aşınma direnci daha iyidir.



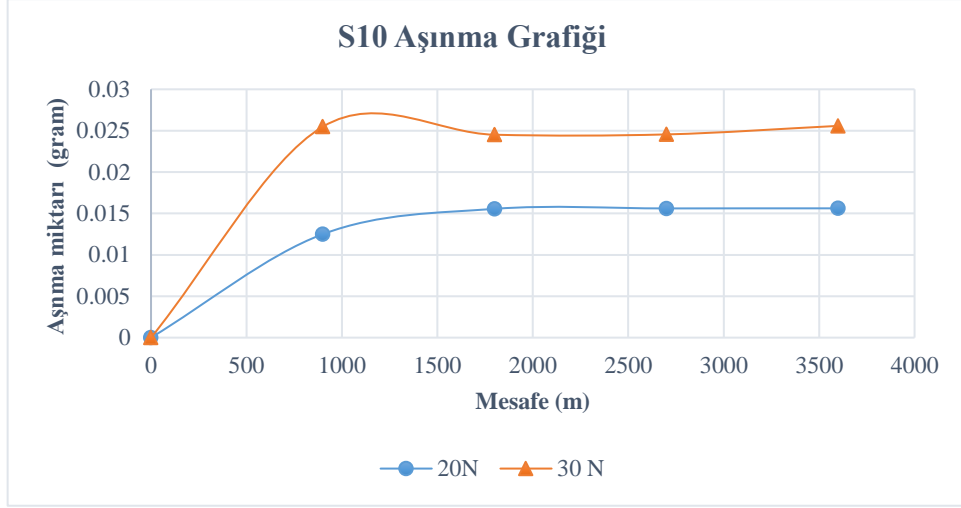
Şekil 6.73. S8 numunesinin farklı yüklerde kayma mesafesine bağlı aşınma grafiği

S8 numunesi 900 °C sıcaklıkta 45 dakika östenitlendikten sonra 300 °C’ de 30 dakika östemperlenme yapıp sertliği 48 HRC gelmektedir. Yüke bağlı olarak ise doğru orantılı olarak artmaktadır. Cisim ilk temasında hızlı bir şekilde aşınmaya maruz kalıp belirli bir noktadan sonra düz çizgiler halinde aşınmasını devam ettirmektedir. Isıl işlemsiz döküm olan S1 e göre aşınması kıyasla aşınma direnci daha iyidir.



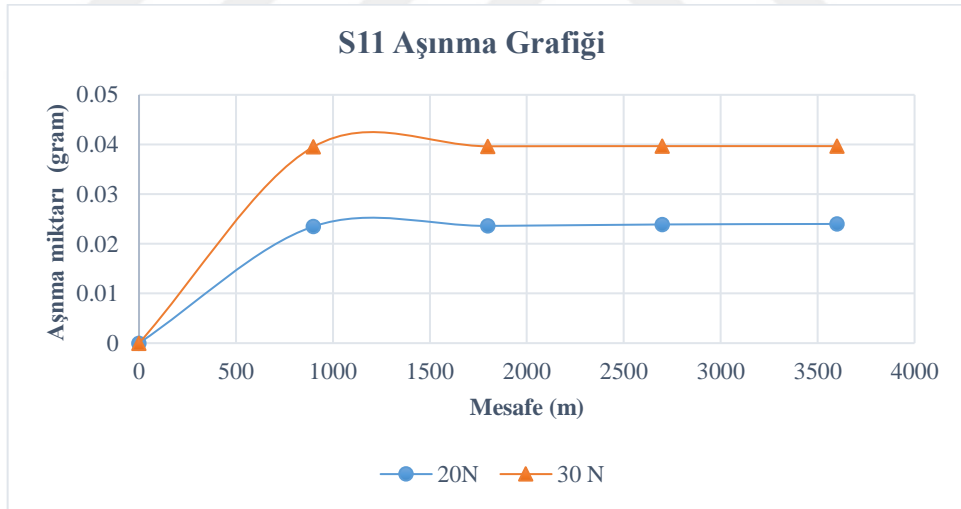
Şekil 6.74. S9 numunesinin farklı yüklerde kayma mesafesine bağlı aşınma grafiği

S9 numunesi 900 °C sıcaklıkta 45 dakika östenitlendikten sonra 300 °C’ de 45 dakika östemperlenme yapıp sertliği 47 HRC gelmektedir. Yüke bağlı olarak ise doğru orantılı olarak artmaktadır. Cisim ilk temasında hızlı bir şekilde aşınmaya maruz kalıp belirli bir noktadan sonra düz çizgiler halinde aşınmasını devam ettirmektedir. Isıl işlemsiz döküm olan S1 e göre aşınması kıyasla aşınma direnci daha iyidir.



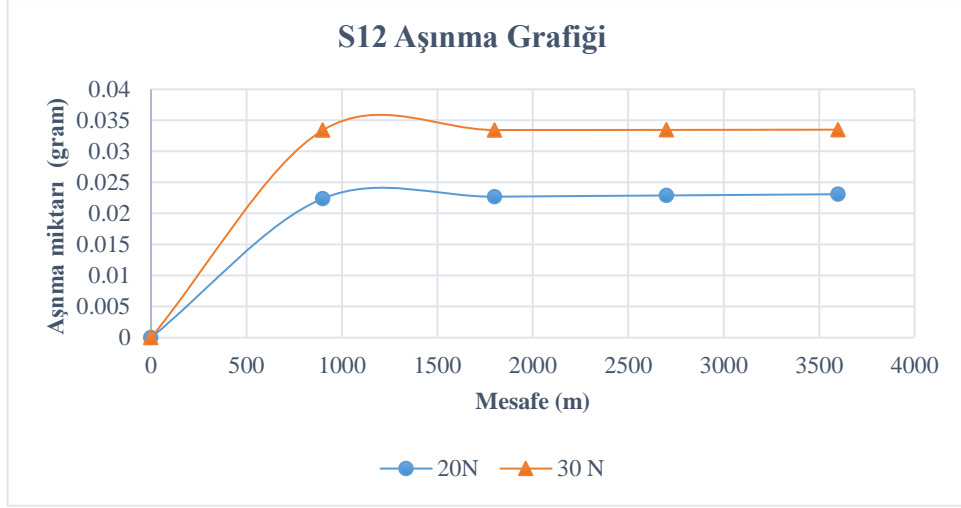
Şekil 6.75. S10 numunesinin farklı yüklerde kayma mesafesine bağlı aşınma grafiği

S10 numunesi 900 °C sıcaklıkta 45 dakika östenitlendikten sonra 300 °C’ de 90 dakika östemperlenme yapıp sertliği 46 HRC gelmektedir. Yüke bağlı olarak ise doğru orantılı olarak artmaktadır. Cisim ilk temasında hızlı bir şekilde aşınmaya maruz kalıp belirli bir noktadan sonra düz çizgiler halinde aşınmasını devam ettirmektedir. Isıl işlemsiz döküm olan S1 e göre aşınması kıyasla aşınma direnci daha iyidir.



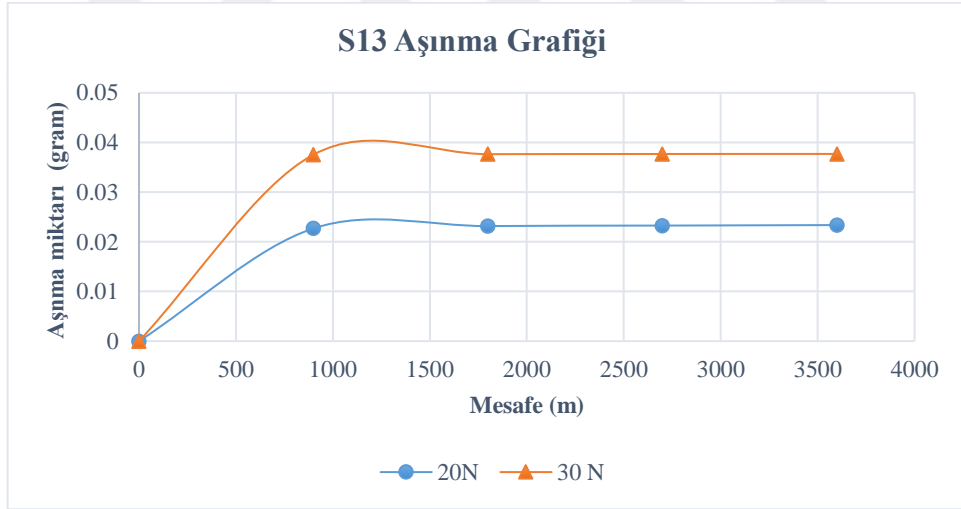
Şekil 6.76. S11 numunesinin farklı yüklerde kayma mesafesine bağlı aşınma grafiği

S11 numunesi 900 °C sıcaklıkta 45 dakika östenitlendikten sonra 350 °C’ de 90 dakika östemperlenme yapıp sertliği 45 HRC gelmektedir. Yüke bağlı olarak ise doğru orantılı olarak artmaktadır. Cisim ilk temasında hızlı bir şekilde aşınmaya maruz kalıp belirli bir noktadan sonra düz çizgiler halinde aşınmasını devam ettirmektedir. Isıl işlemsiz döküm olan S1 e göre aşınması kıyasla aşınma direnci daha iyidir.



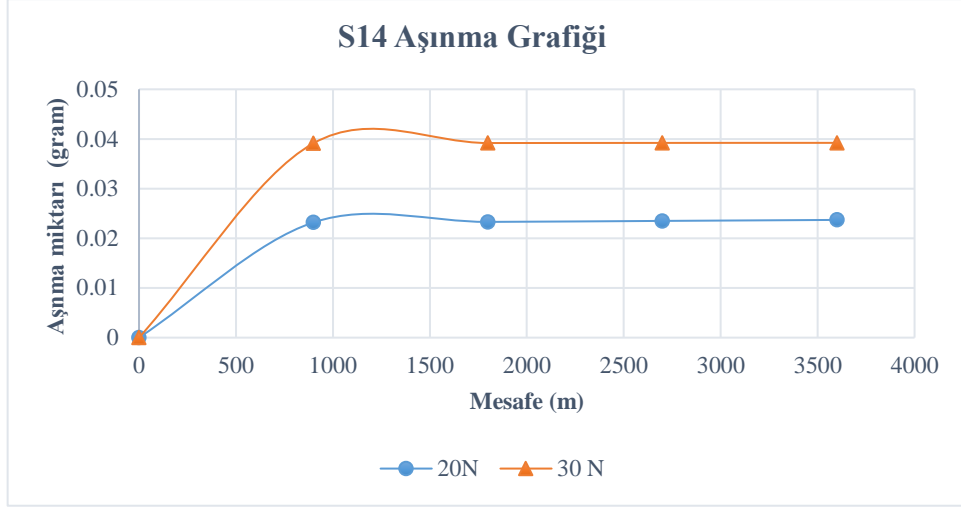
Şekil 6.77. S12 numunesinin farklı yüklerde kayma mesafesine bağlı aşınma grafiği

S12 numunesi 900 °C sıcaklıkta 45 dakika östenitlendikten sonra 350 °C’ de 45 dakika östemperlenme yapıp sertliği 44 HRC gelmektedir. Yüke bağlı olarak ise doğru orantılı olarak artmaktadır. Cisim ilk temasında hızlı bir şekilde aşınmaya maruz kalıp belirli bir noktadan sonra düz çizgiler halinde aşınmasını devam ettirmektedir. Isıl işlemsiz döküm olan S1 e göre aşınması kıyasla aşınma direnci daha iyidir.



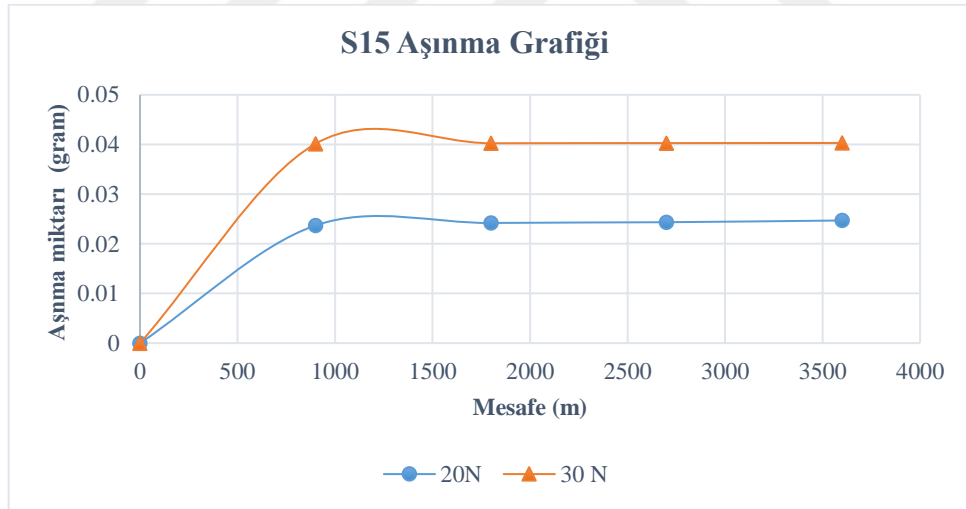
Şekil 6.78. S13 numunesinin farklı yüklerde kayma mesafesine bağlı aşınma grafiği

S13 numunesi 900 °C sıcaklıkta 45 dakika östenitlendikten sonra 300 °C’ de 90 dakika östemperlenme yapıp sertliği 56 HRC gelmektedir. Yüke bağlı olarak ise doğru orantılı olarak artmaktadır. Cisim ilk temasında hızlı bir şekilde aşınmaya maruz kalıp belirli bir noktadan sonra düz çizgiler halinde aşınmasını devam ettirmektedir. Isıl işlemsiz döküm olan S1 e göre aşınması kıyasla aşınma direnci daha iyidir.



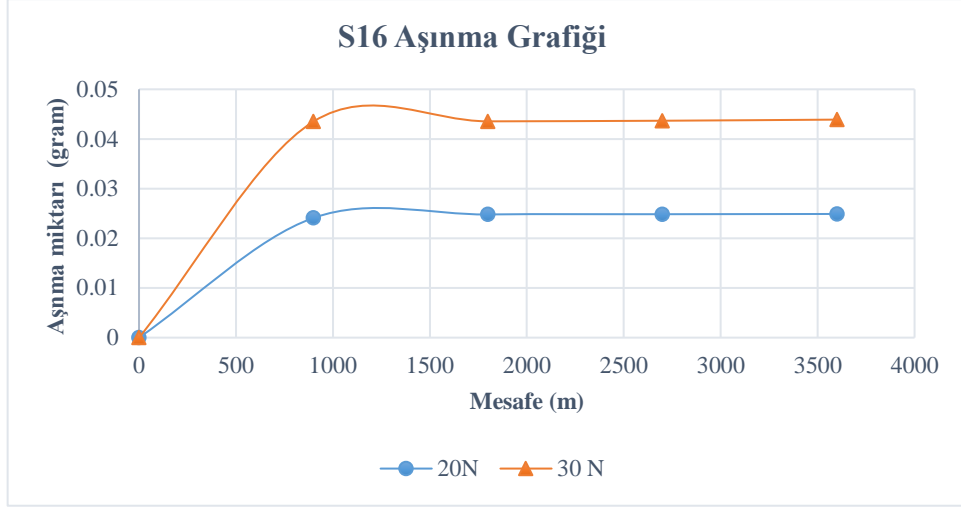
Şekil 6.79. S14 numunesinin farklı yüklerde kayma mesafesine bağlı aşınma grafiği

S14 numunesi 90 °C sıcaklıkta 60 dakika östenitlendikten sonra 400 °C' de 60 dakika östemperlenme yapıp sertliği 45 HRC gelmektedir. Yüke bağlı olarak ise doğru orantılı olarak artmaktadır. Cisim ilk temasında hızlı bir şekilde aşınmaya maruz kalıp belirli bir noktadan sonra düz çizgiler halinde aşınmasını devam ettirmektedir. Isıl işlemsiz döküm olan S1 e göre aşınması kıyasla aşınma direnci daha iyidir.



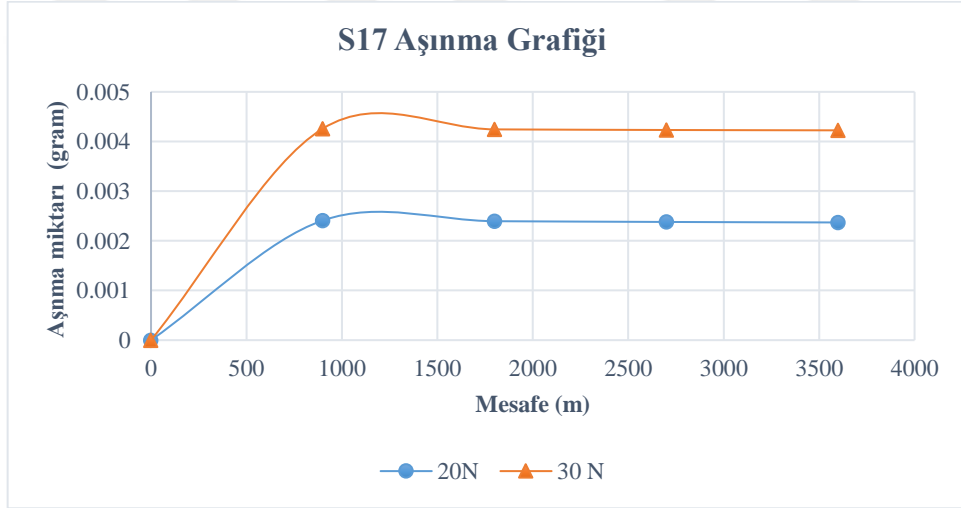
Şekil 6.80. S15 numunesinin farklı yüklerde kayma mesafesine bağlı aşınma grafiği

S15 numunesi 90 °C sıcaklıkta 60 dakika östenitlendikten sonra 400 °C' de 120 dakika östemperlenme yapıp sertliği 45 HRC gelmektedir. Yüke bağlı olarak ise doğru orantılı olarak artmaktadır. Cisim ilk temasında hızlı bir şekilde aşınmaya maruz kalıp belirli bir noktadan sonra düz çizgiler halinde aşınmasını devam ettirmektedir. Isıl işlemsiz döküm olan S1 e göre aşınması kıyasla aşınma direnci daha iyidir.



Şekil 6.81. S16 numunesinin farklı yüklerde kayma mesafesine bağlı aşınma grafiği

S16 numunesi 950 °C sıcaklıkta 60 dakika östenitlendikten sonra 400 °C’ de 240 dakika östemperlenme yapıp sertliği 39 HRC gelmektedir. Yüke bağlı olarak ise doğru orantılı olarak artmaktadır. Cisim ilk temasında hızlı bir şekilde aşınmaya maruz kalıp belirli bir noktadan sonra düz çizgiler halinde aşınmasını devam ettirmektedir. Isıl işlemsiz döküm olan S1 e göre aşınması kıyasla aşınma direnci daha iyidir.



Şekil 6.82. S17 numunesinin farklı yüklerde kayma mesafesine bağlı aşınma grafiği

S17 numunesi 950 °C sıcaklıkta 60 dakika östenitlendikten sonra 400 °C’ de 360 dakika östemperlenme yapıp sertliği 39 HRC gelmektedir. Yüke bağlı olarak ise doğru orantılı olarak artmaktadır. Cisim ilk temasında hızlı bir şekilde aşınmaya maruz kalıp belirli bir noktadan sonra düz çizgiler halinde aşınmasını devam ettirmektedir. Isıl işlemsiz döküm olan S1 e göre aşınması kıyasla aşınma direnci daha iyidir.

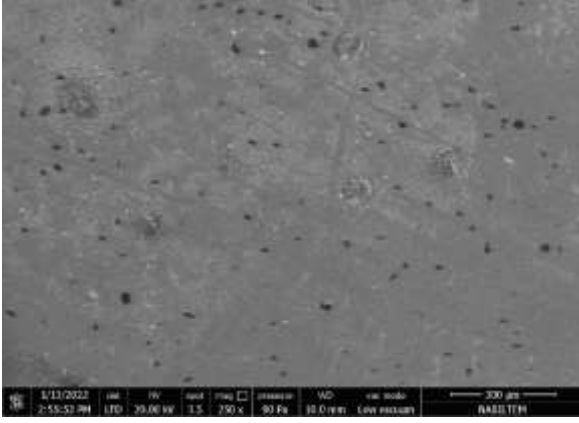
Aşınma miktarına göre sıralama yapılmış Çizelge 6.5’ de verilmiştir. Verilen tabloya göre aşınma direnci en iyi S2 en kötü S1 olarak gözükmektedir.

Çizelge 6.5. 20 N ve 30 N yük altında 4 farklı kayma mesafesine göre aşınma miktarı

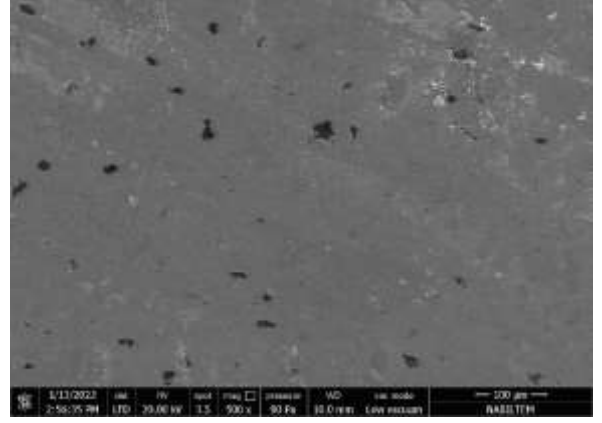
Numune	Sertlik (HRC)	20 N yük altında kayma mesafesine bağlı gram cinsinden başlangıç ağırlığına göre aşınma farkı (gr)				30 N yük altında kayma mesafesine bağlı gram cinsinden başlangıç ağırlığına göre aşınma farkı (gr)			
		900 m	1800 m	2700 m	3600 m	900 m	1800 m	2700 m	3600 m
S1	34	0.029584	0.029657	0.027804	0.028267	0.042611	0.042817	0.043744	0.044486
S17	36	0.02554	0.02595	0.0258	0.026	0.04223	0.0431	0.0437	0.044
S16	39	0.0241	0.0248	0.02485	0.0249	0.04351	0.04355	0.04367	0.0439
S15	43	0.0237	0.0242	0.02435	0.0247	0.04015	0.04025	0.04028	0.04031
S11	45	0.0235	0.0236	0.0239	0.024	0.03954	0.03964	0.03967	0.03967
S14	45	0.0232	0.0233	0.0235	0.0237	0.03914	0.03918	0.03921	0.03922
S13	56	0.0227	0.02317	0.02327	0.02337	0.03756	0.03765	0.03769	0.0377
S12	44	0.0224	0.0227	0.0229	0.0231	0.03341	0.03344	0.03346	0.0335
S9	47	0.02015	0.02021	0.02028	0.02031	0.03031	0.03034	0.0306	0.03038
S8	48	0.01549	0.01561	0.01566	0.01572	0.02965	0.02966	0.02979	0.02985
S10	46	0.0125	0.015557	0.01561	0.01562	0.02548	0.02451	0.02455	0.02558
S7	57	0.0065	0.0067	0.00675	0.0068	0.025491	0.02505	0.02558	0.02591
S4	55	0.006	0.0061	0.0064	0.0066	0.0074	0.00738	0.00735	0.007385
S6	58	0.00572	0.0058	0.0061	0.0062	0.00778	0.007798	0.007835	0.007915
S5	56	0.0055	0.0058	0.0059	0.0062	0.0087	0.0091	0.0092	0.0093
S3	59	0.005315	0.005956	0.006276	0.006468	0.006852	0.007173	0.007339	0.007365
S2	60	0.000219	0.000226	0.000229	0.00023	0.000298	0.0003	0.0003	0.000304

6.5.3. Deney Sonrası Taramalı Elektron Mikroskobu ile Görüntü Alma (SEM)

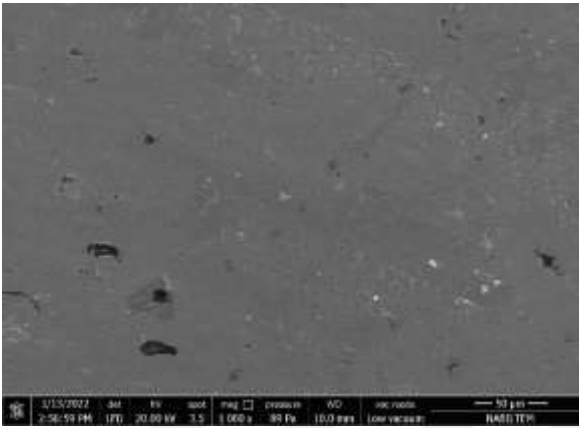
Aşınma testleri sonrasında aşınan bölgeye sem analizi yapıp tekrardan elektron mikroskobu ile her numuneden X250, X500, X1000, X2500, X5000 ve X20000 olmak üzere 6 adet görsel alınmıştır. Sem mikrosgrafında S1 numunesinde yüzeyden kazınarak parçalar kalktığı ve ısıl işlem gören numunelerde ise aşınma tabaka kopartarak oluştuğu görüldü.



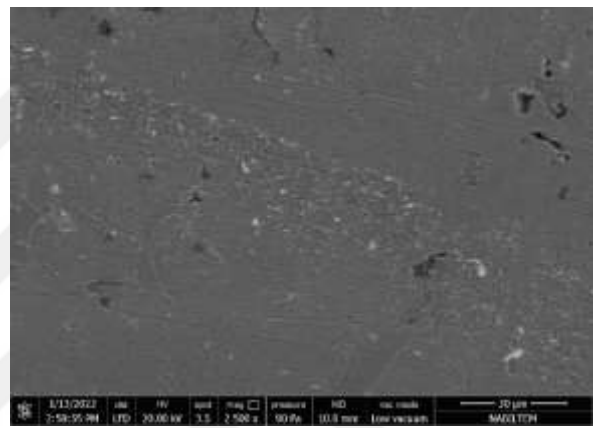
(a)



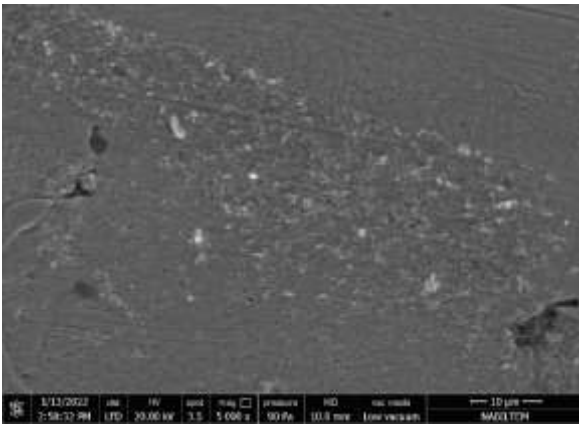
(b)



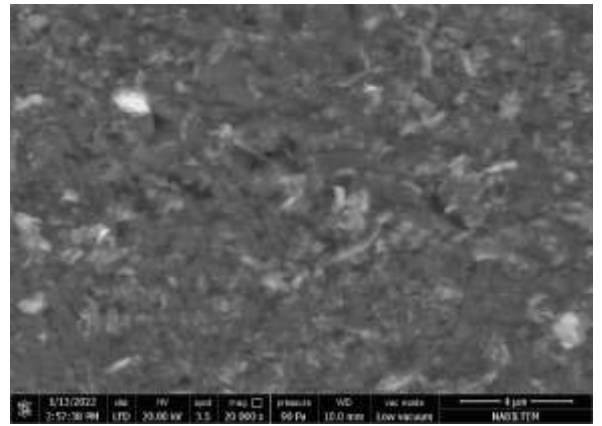
(c)



(d)

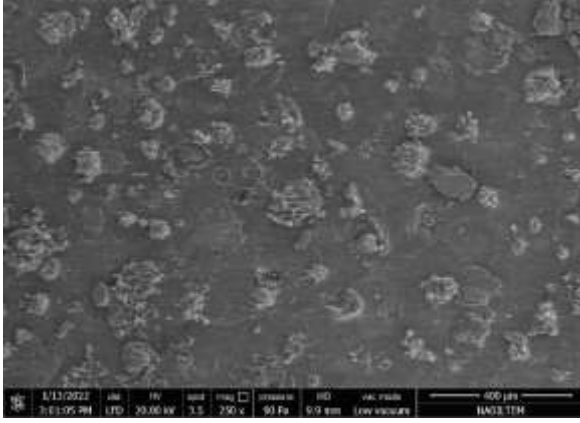


(e)

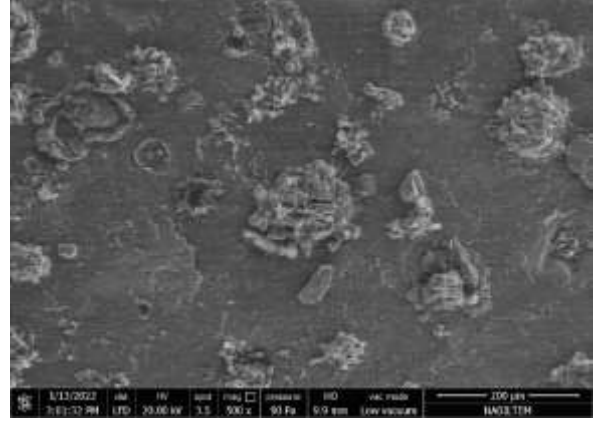


(f)

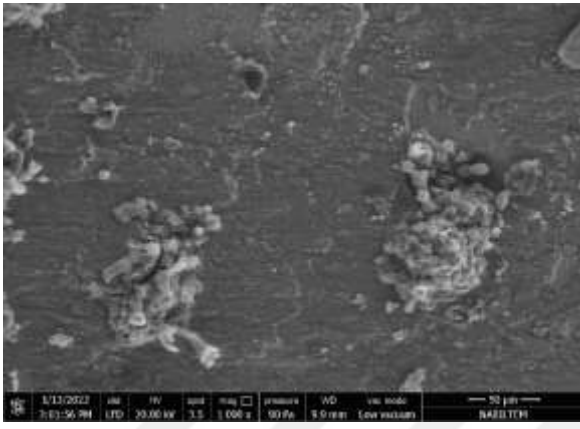
Şekil 6.83. S1 taramalı elektron mikroskobu ile alınan X200 (a), X500 (b), X1000 (c), X2500 (d), X5000 (e) ve X20000 (f) büyütülmüş mikro yapı görüntüleri



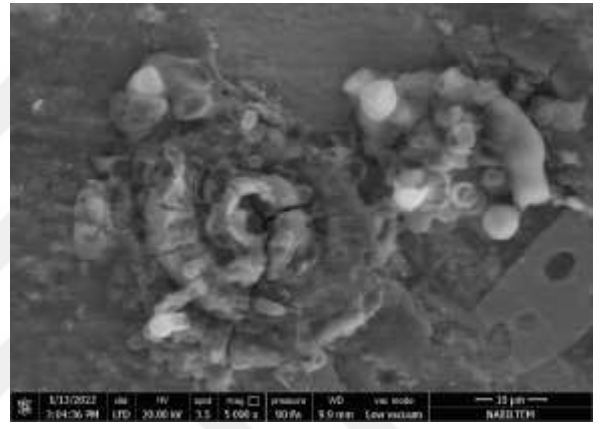
(a)



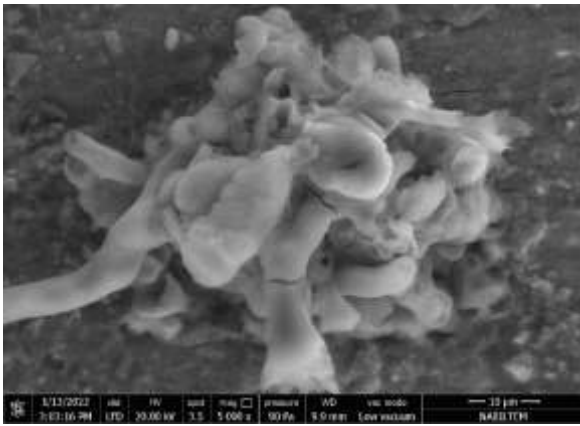
(b)



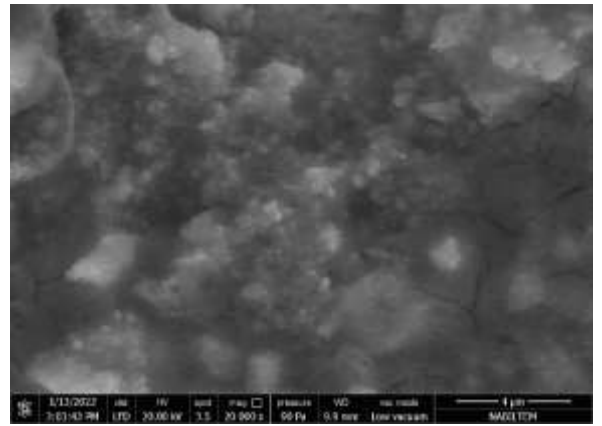
(c)



(d)

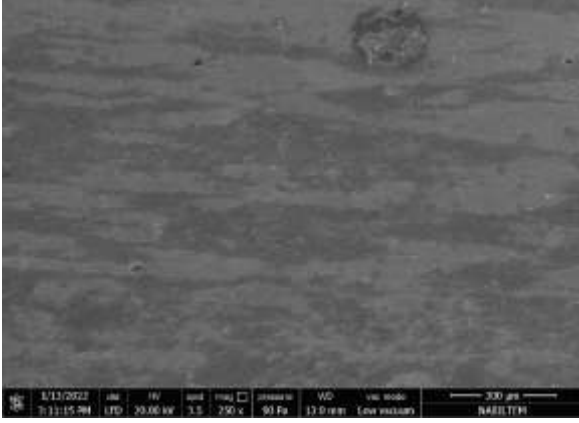


(e)

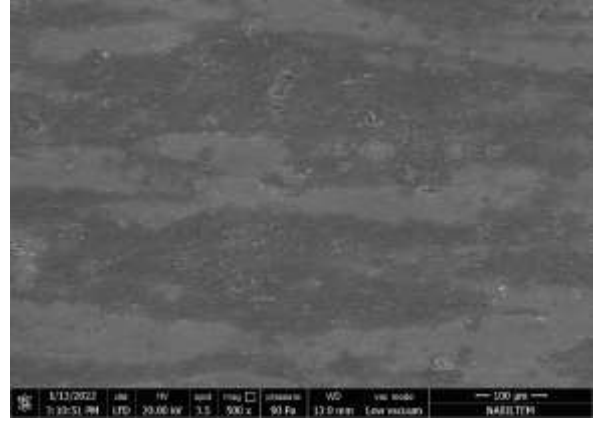


(f)

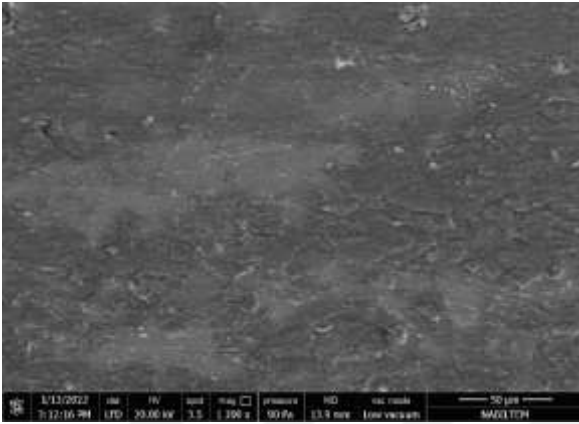
Şekil 6.84. S2 taramalı elektron mikroskobu ile alınan X200 (a), X500 (b), X1000 (c), X2500 (d), X5000 (e) ve X20000 (f) büyütülmüş mikro yapı görüntüleri



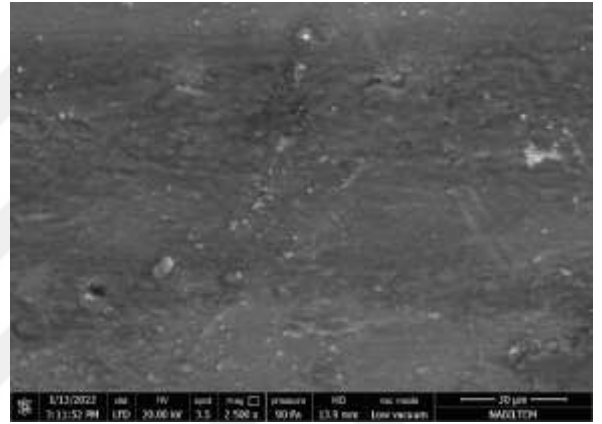
(a)



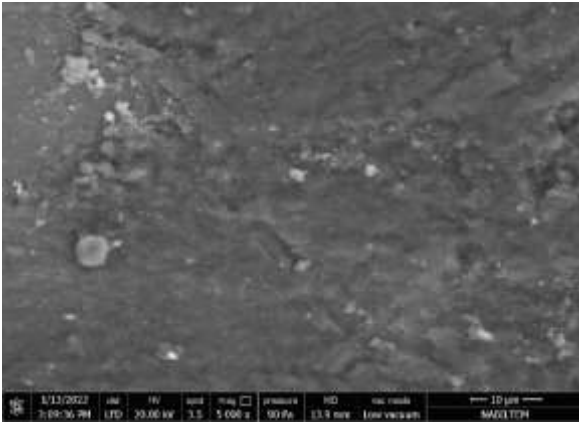
(b)



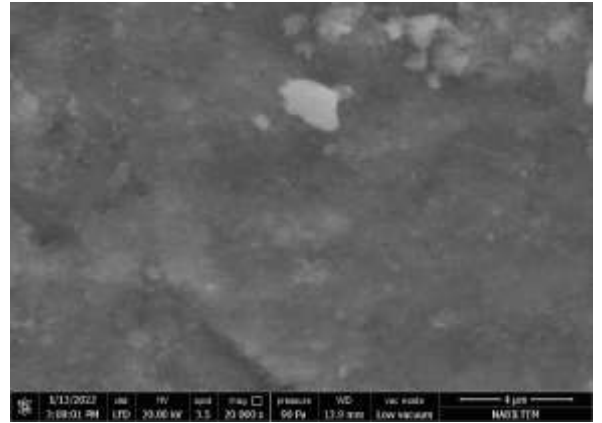
(c)



(d)

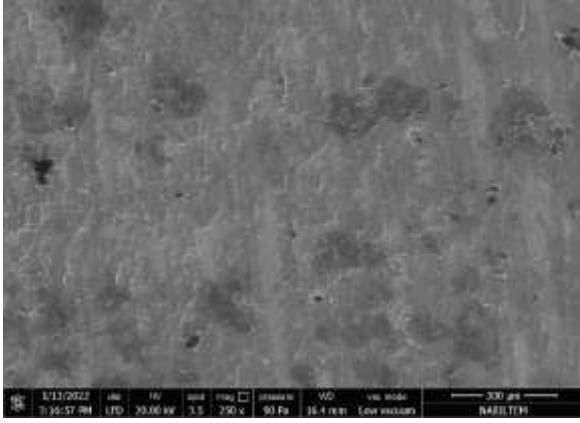


(e)

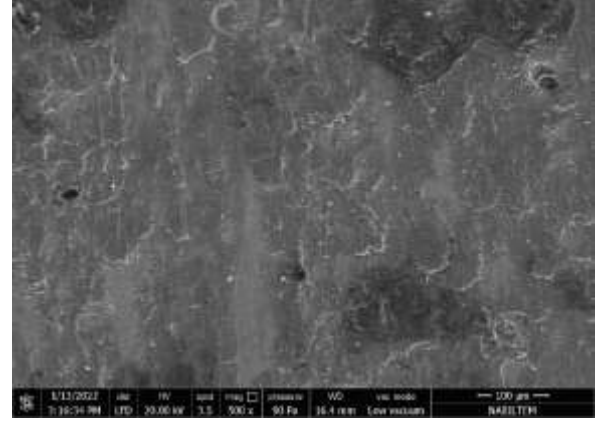


(f)

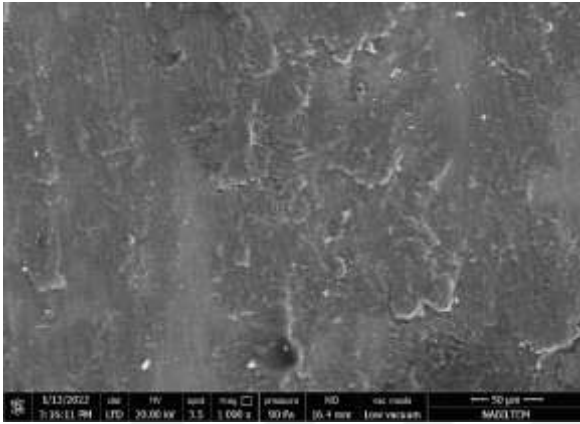
Şekil 6.85. S3 taramalı elektron mikroskobu ile alınan X200 (a), X500 (b), X1000 (c), X2500 (d), X5000 (e) ve X20000 (f) büyütülmüş mikro yapı görüntüleri



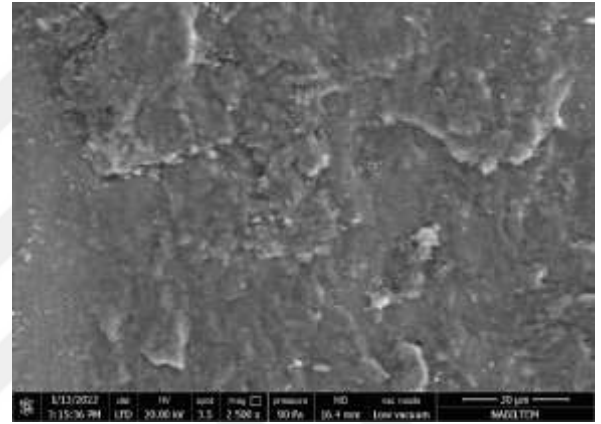
(a)



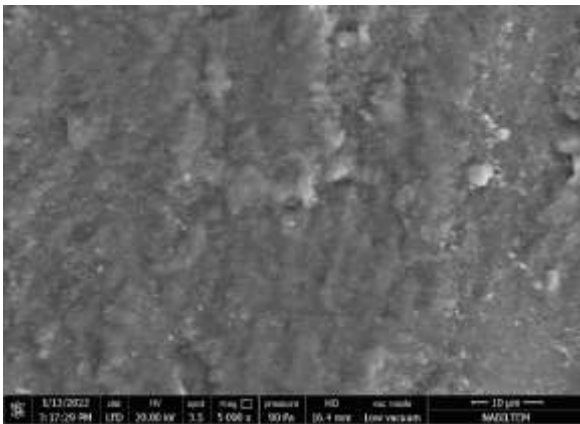
(b)



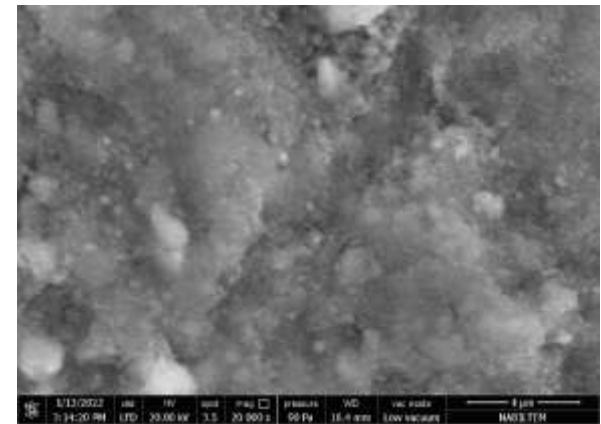
(c)



(d)

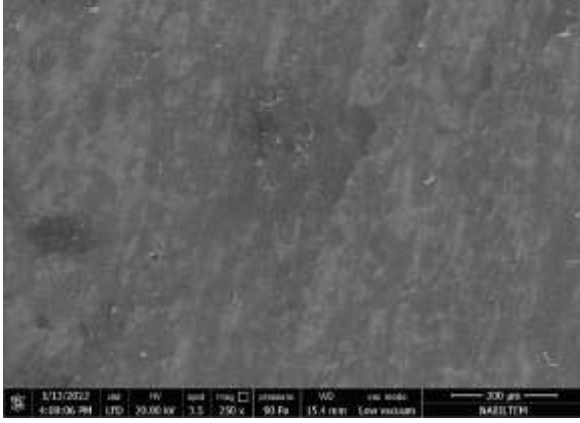


(e)

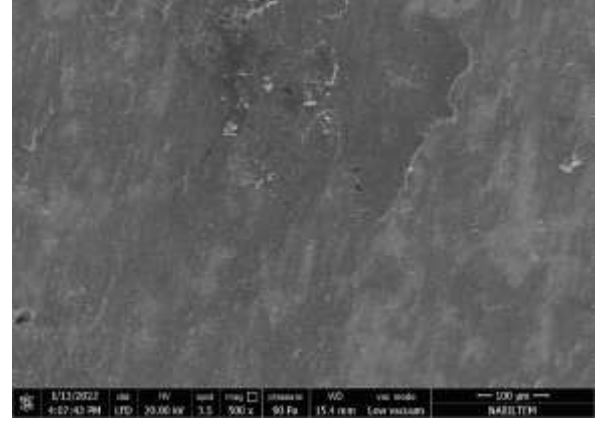


(f)

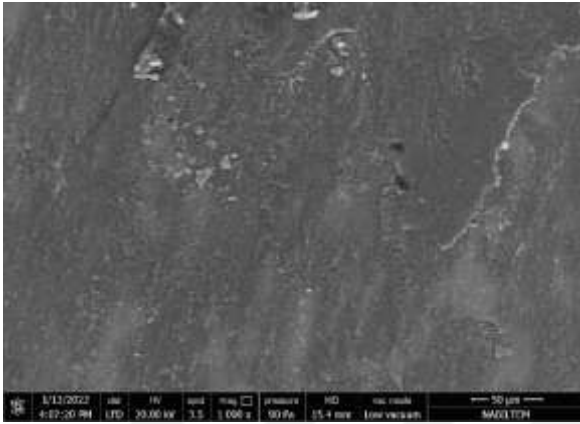
Şekil 6.86. S4 taramalı elektron mikroskobu ile alınan X200 (a), X500 (b), X1000 (c), X2500 (d), X5000 (e) ve X20000 (f) büyütülmüş mikro yapı görüntüleri



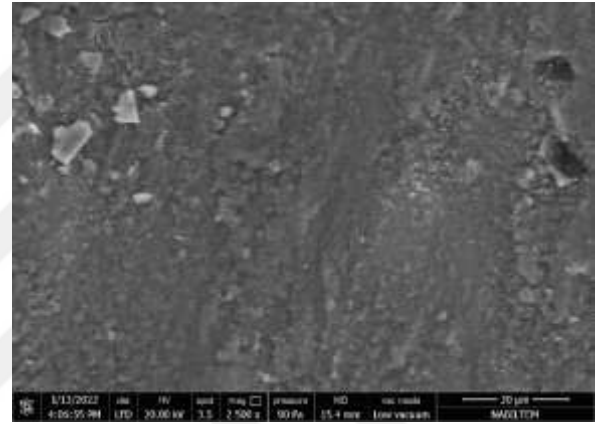
(a)



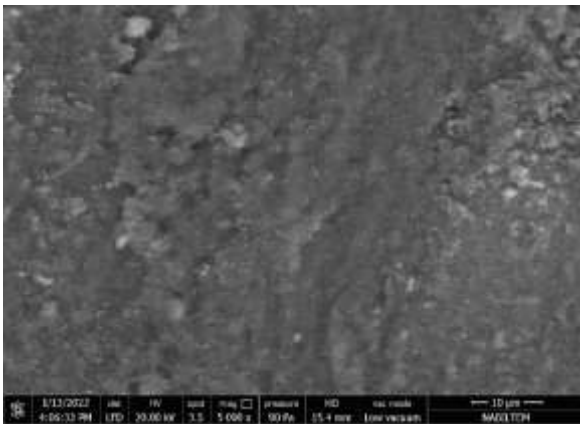
(b)



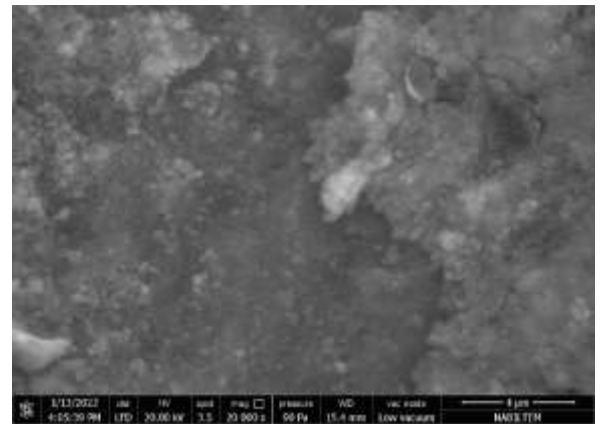
(c)



(d)

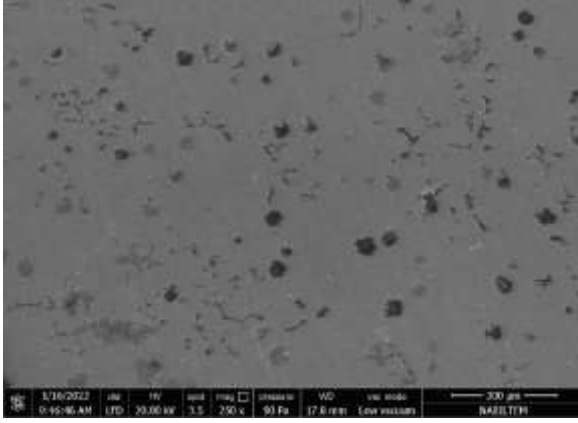


(e)

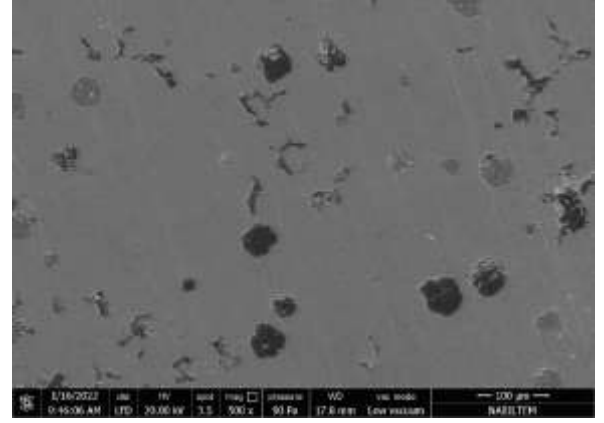


(f)

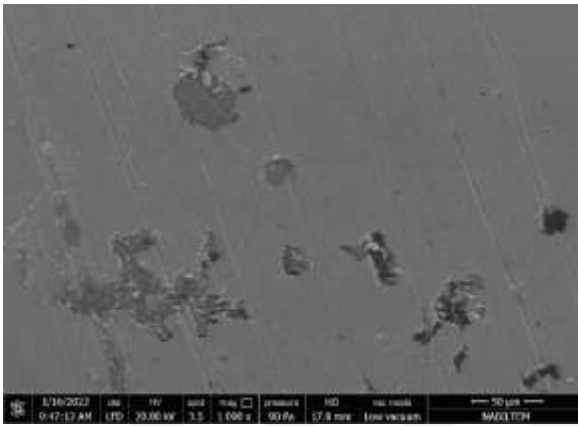
Şekil 6.87. S5 taramalı elektron mikroskobu ile alınan X200 (a), X500 (b), X1000 (c), X2500 (d), X5000 (e) ve X20000 (f) büyütülmüş mikro yapı görüntüleri



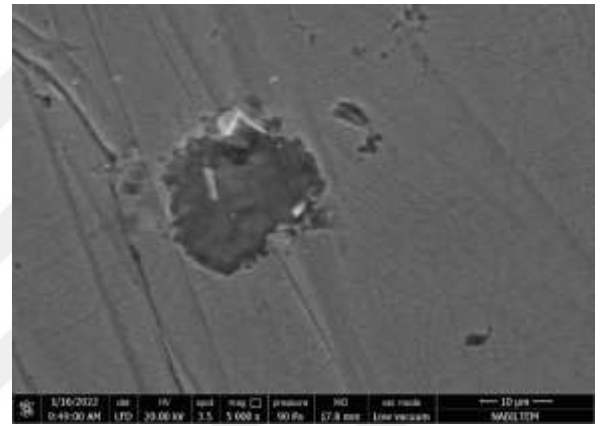
(a)



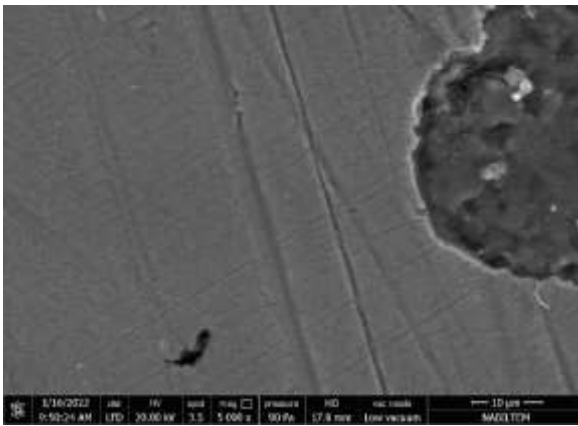
(b)



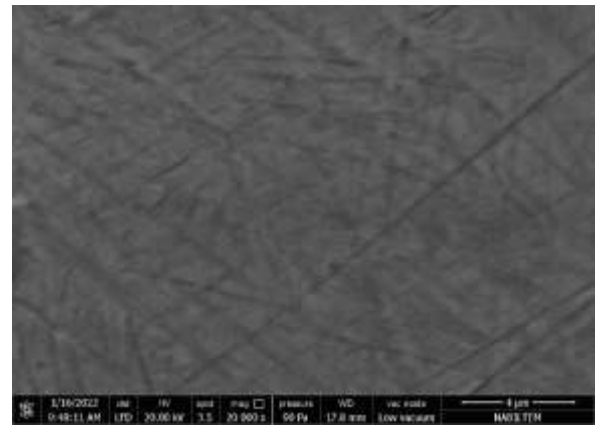
(c)



(d)

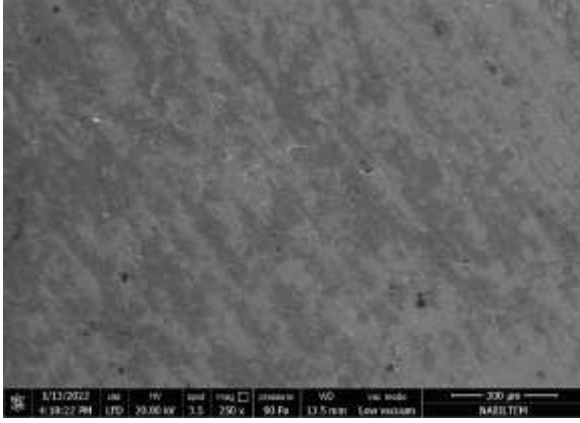


(e)

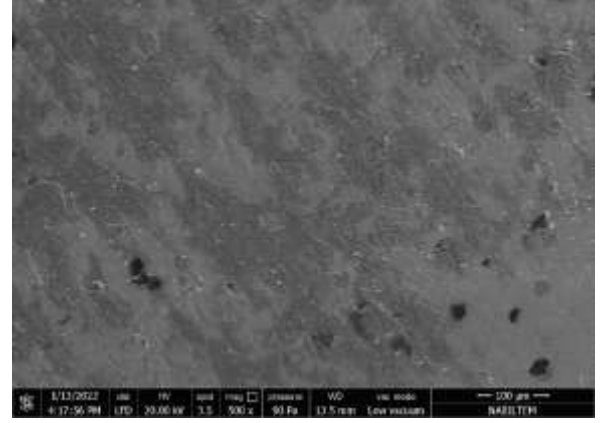


(f)

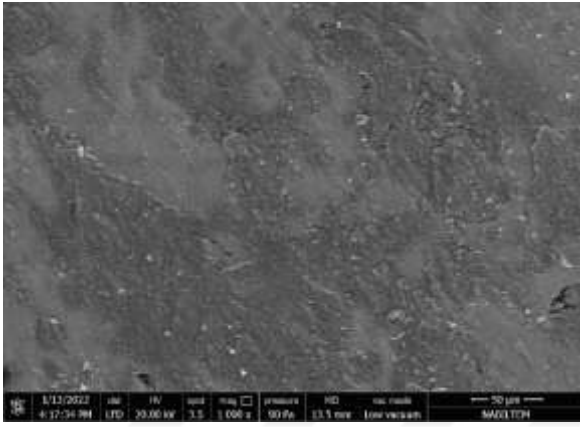
Şekil 6.88. S6 taramalı elektron mikroskobu ile alınan X200 (a), X500 (b), X1000 (c), X2500 (d), X5000 (e) ve X20000 (f) büyütülmüş mikro yapı görüntüleri



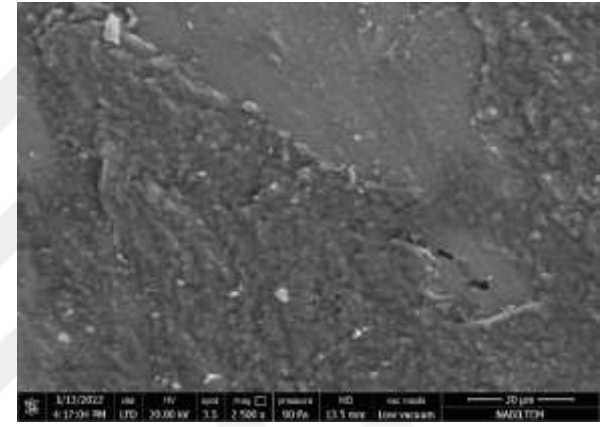
(a)



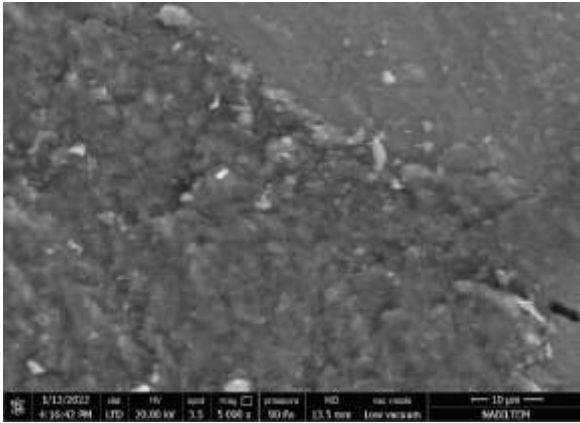
(b)



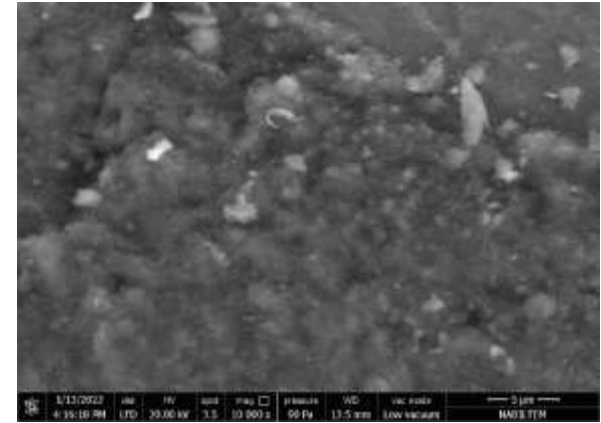
(c)



(d)

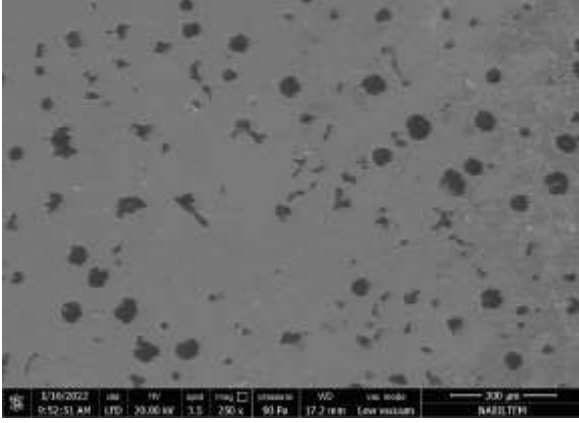


(e)

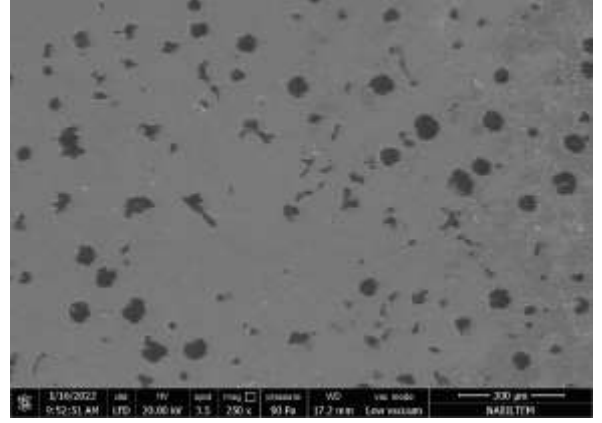


(f)

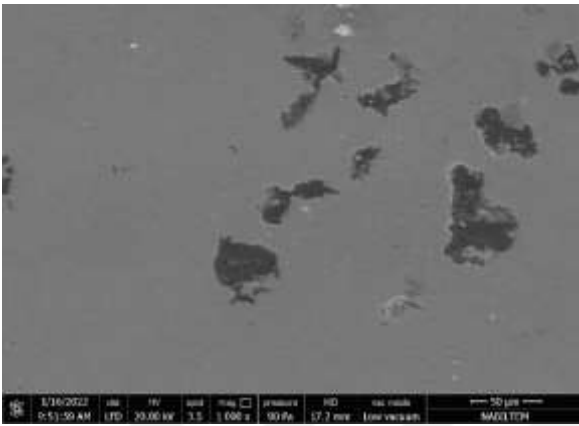
Şekil 6.89. S7 taramalı elektron mikroskobu ile alınan X200 (a), X500 (b), X1000 (c), X2500 (d), X5000 (e) ve X20000 (f) büyütülmüş mikro yapı görüntüleri



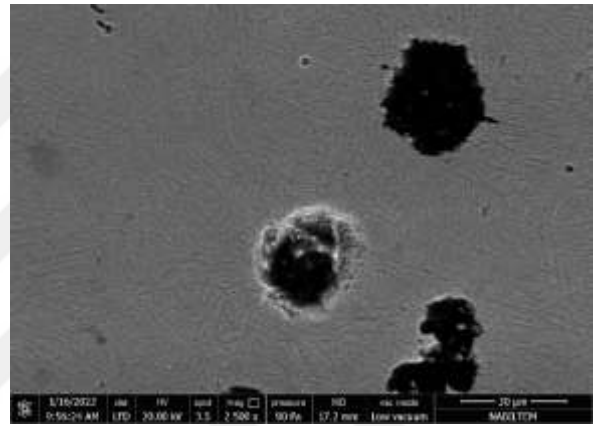
(a)



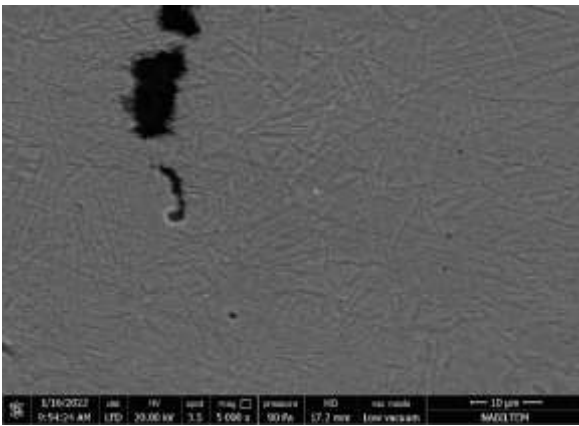
(b)



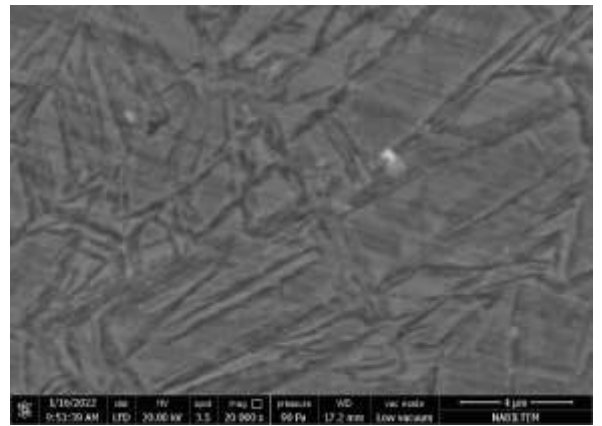
(c)



(d)

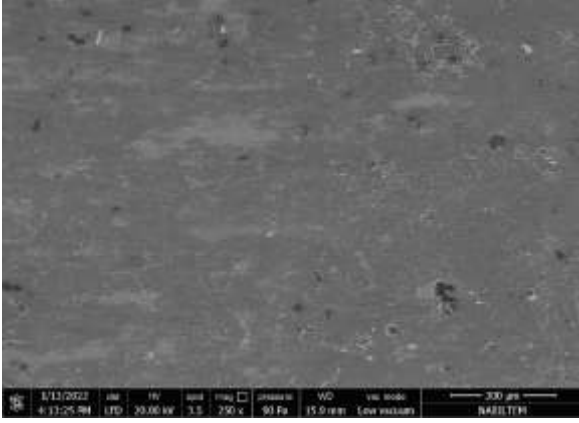


(e)

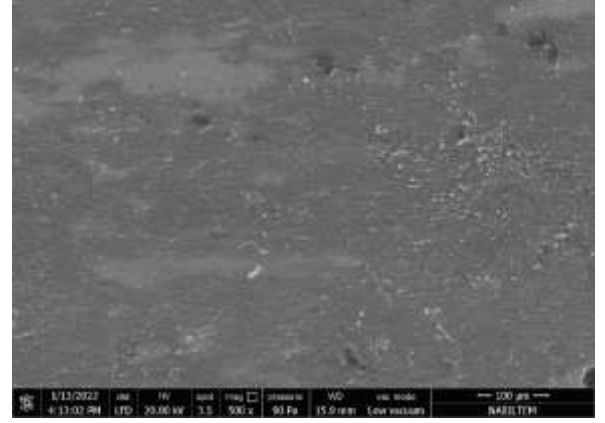


(f)

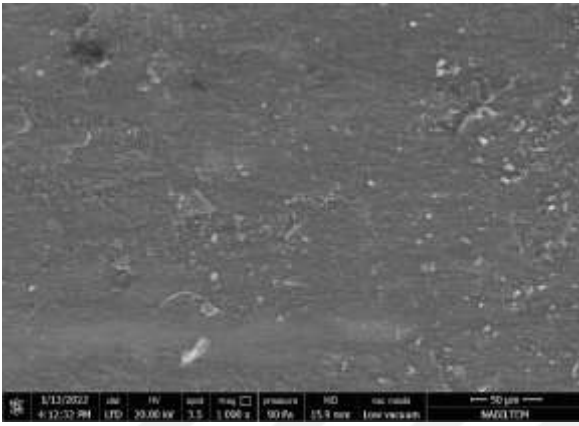
Şekil 6.90. S8 taramalı elektron mikroskobu ile alınan X200 (a), X500 (b), X1000 (c), X2500 (d), X5000 (e) ve X20000 (f) büyütülmüş mikro yapı görüntüleri



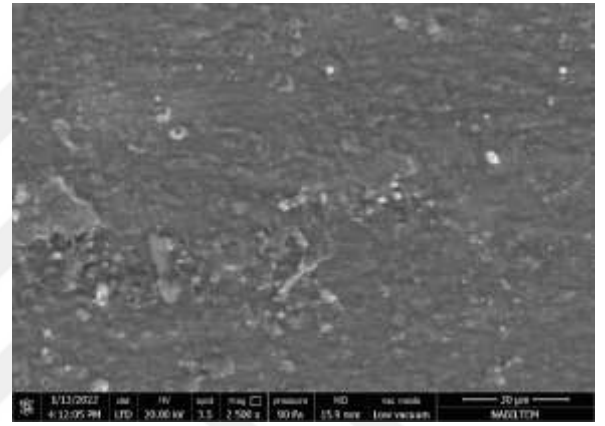
(a)



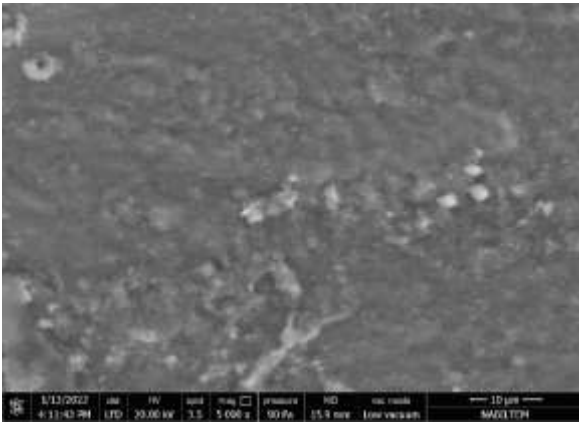
(b)



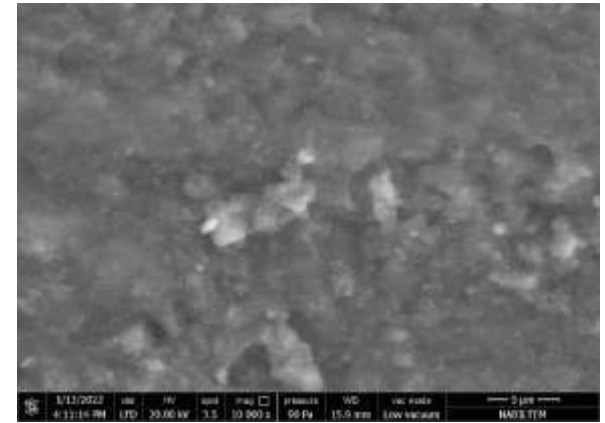
(c)



(d)

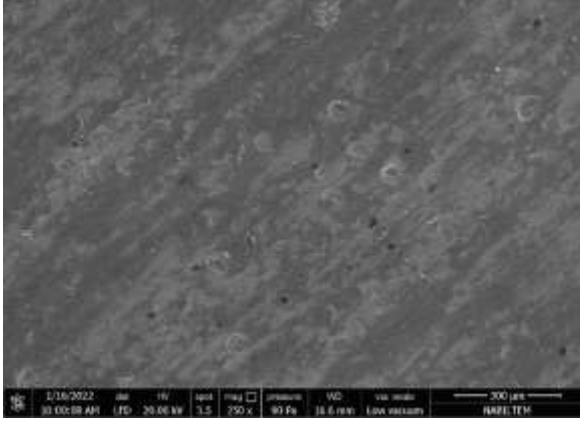


(e)

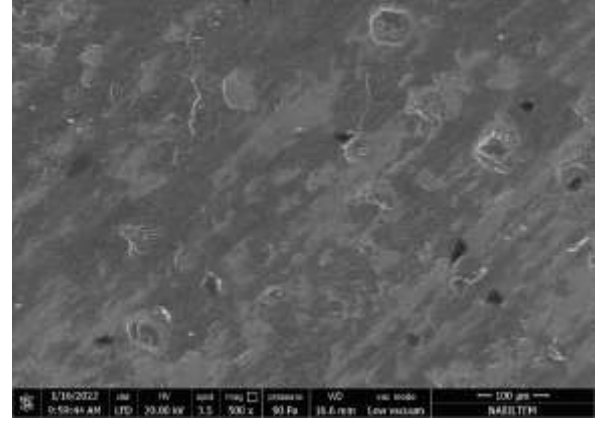


(f)

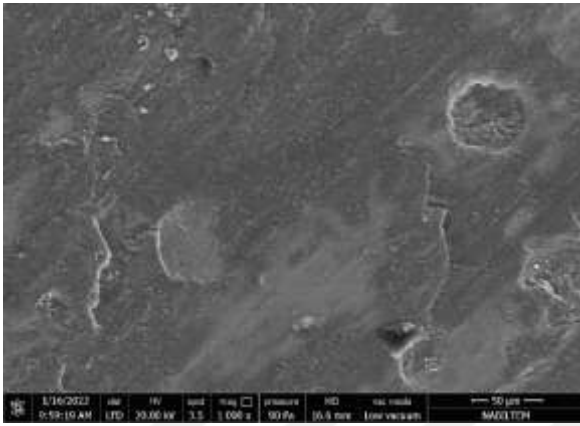
Şekil 6.91. S9 taramalı elektron mikroskobu ile alınan X200 (a), X500 (b), X1000 (c), X2500 (d), X5000 (e) ve X20000 (f) büyütülmüş mikro yapı görüntüleri



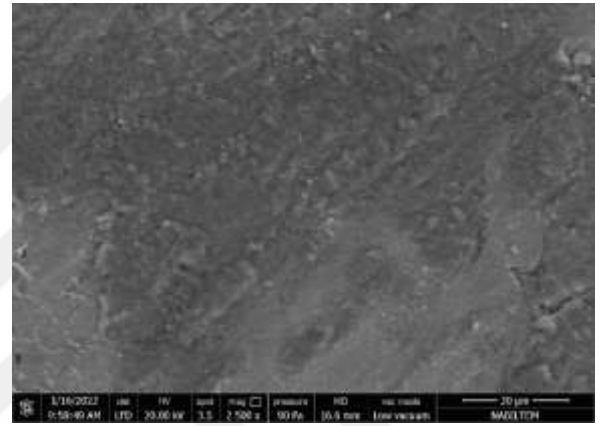
(a)



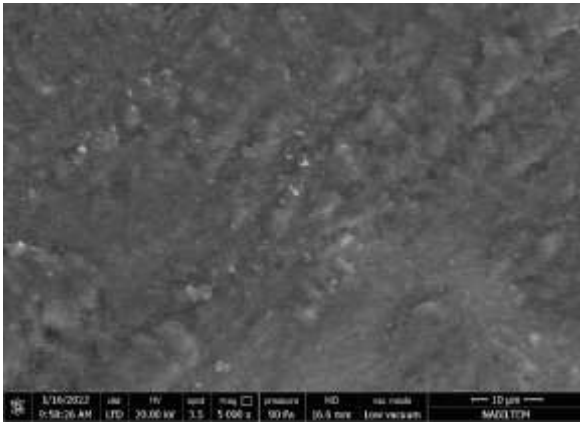
(b)



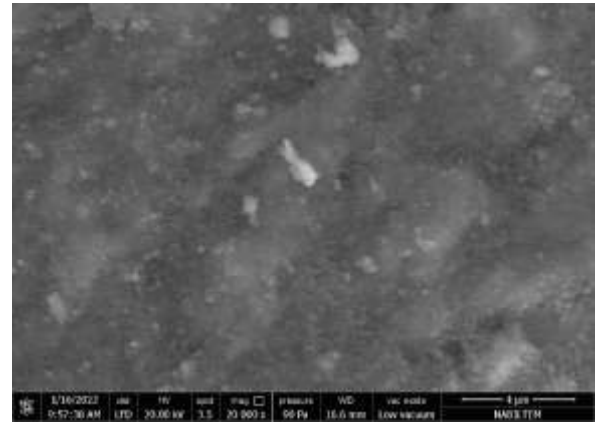
(c)



(d)

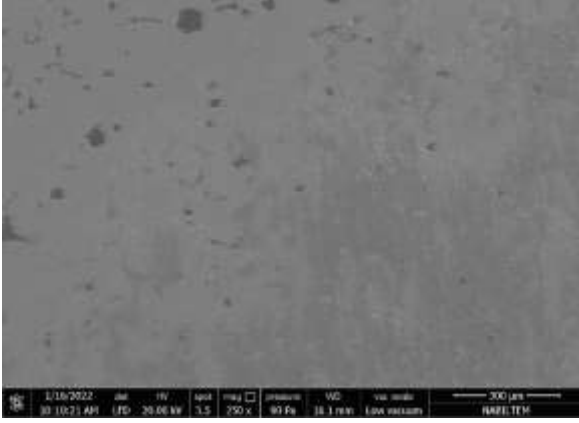


(e)

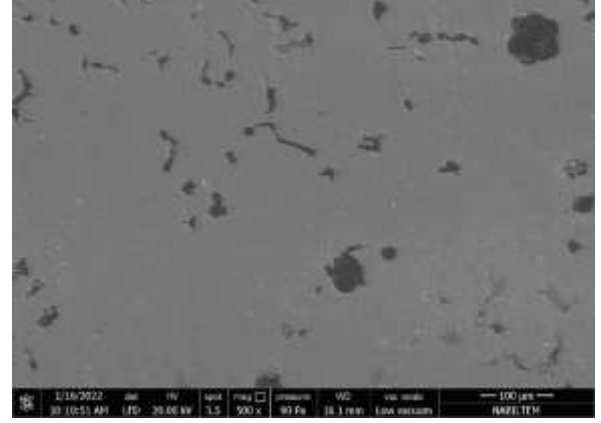


(f)

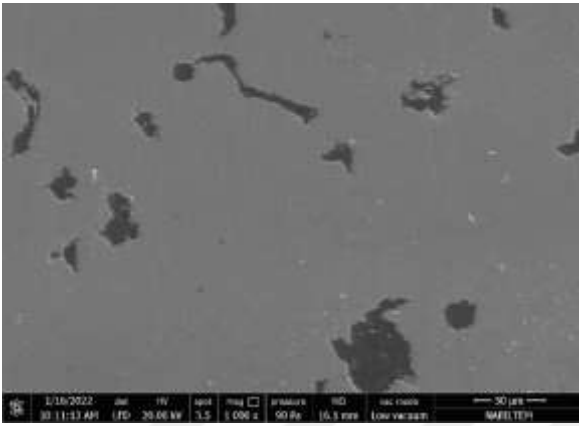
Şekil 6.92. S10 taramalı elektron mikroskobu ile alınan X200 (a), X500 (b), X1000 (c), X2500 (d), X5000 (e) ve X20000 (f) büyütülmüş mikro yapı görüntüleri



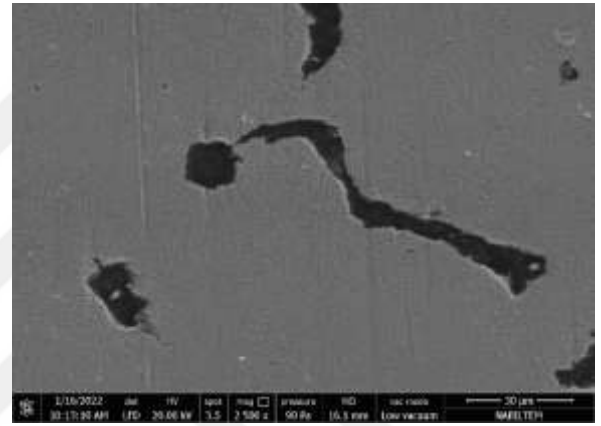
(a)



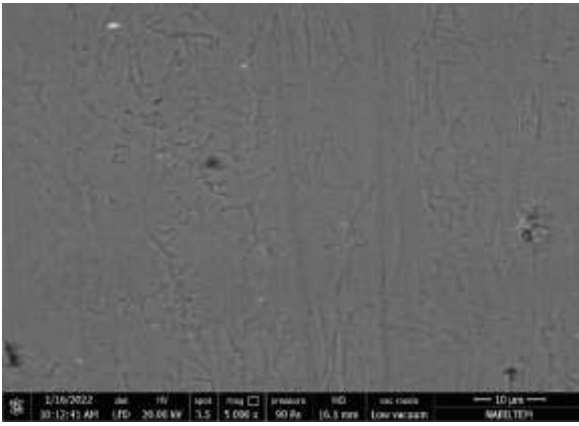
(b)



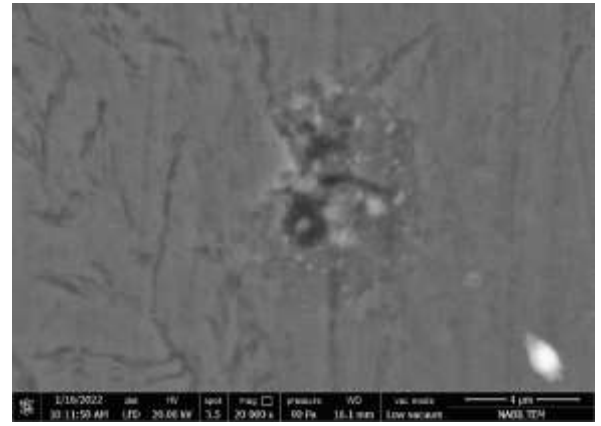
(c)



(d)

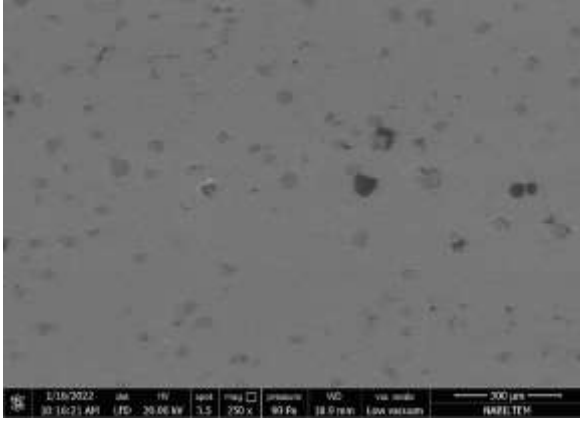


(e)

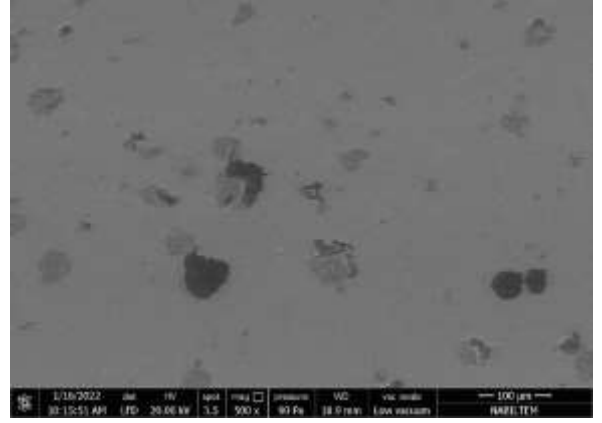


(f)

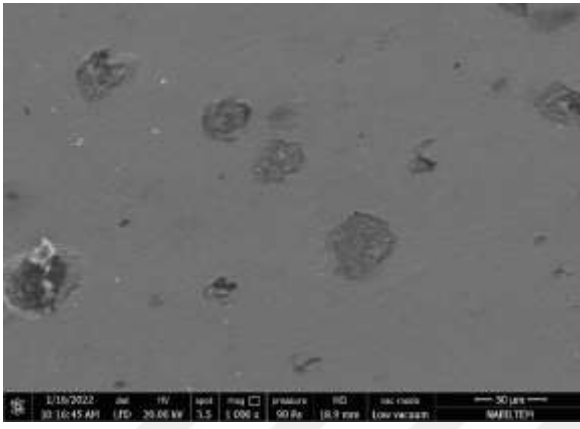
Şekil 6.93. S11 taramalı elektron mikroskobu ile alınan X200 (a), X500 (b), X1000 (c), X2500 (d), X5000 (e) ve X20000 (f) büyütülmüş mikro yapı görüntüleri



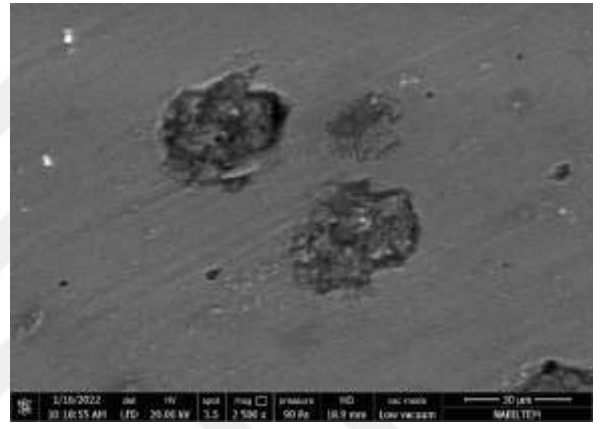
(a)



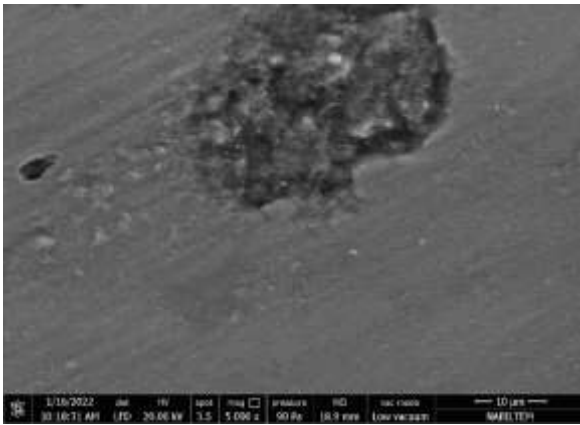
(b)



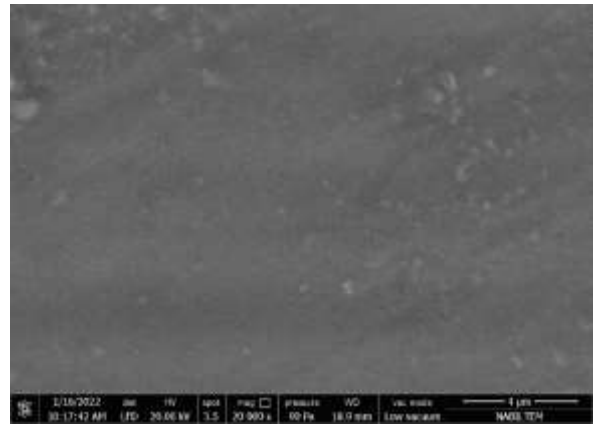
(c)



(d)

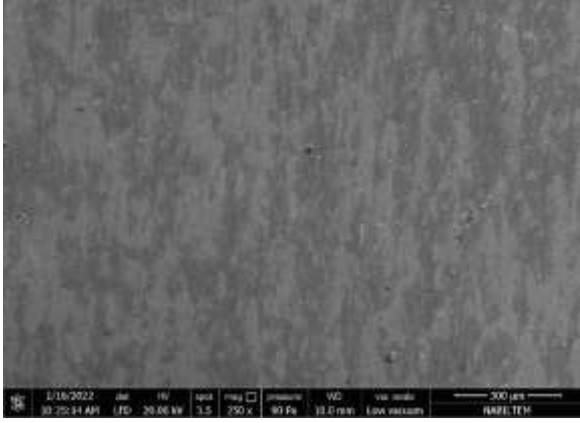


(e)

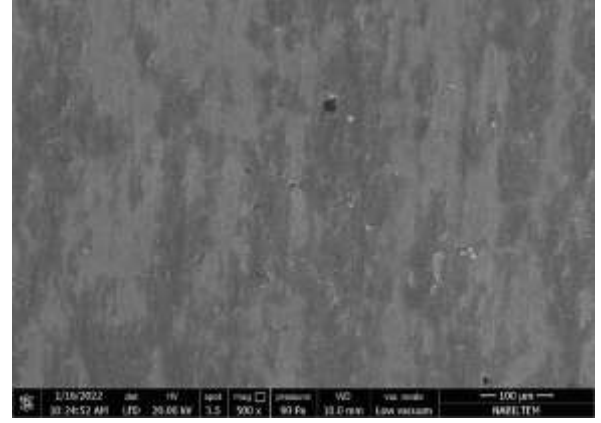


(f)

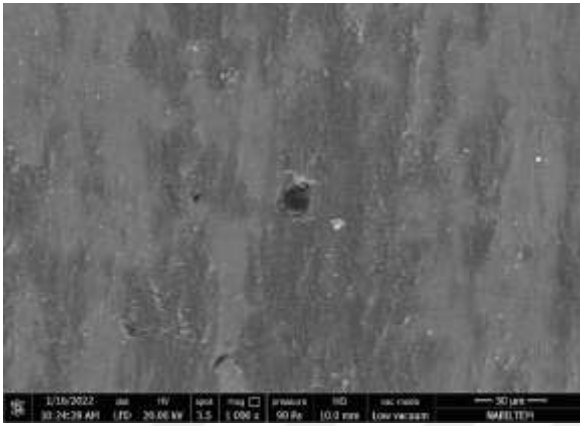
Şekil 6.94. S12 taramalı elektron mikroskobu ile alınan X200 (a), X500 (b), X1000 (c), X2500 (d), X5000 (e) ve X20000 (f) büyütülmüş mikro yapı görüntüleri



(a)



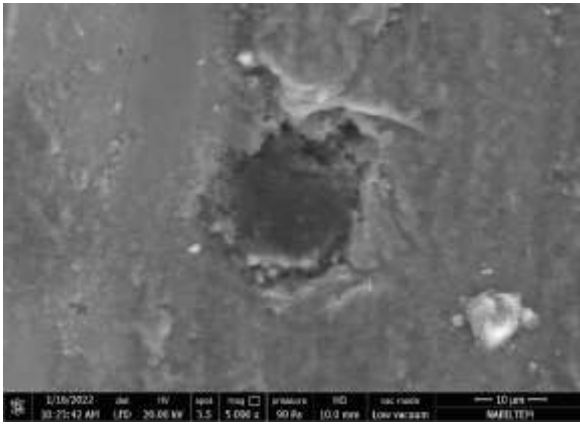
(b)



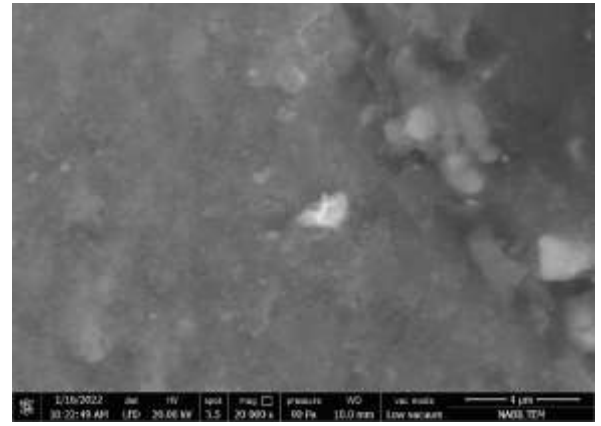
(c)



(d)

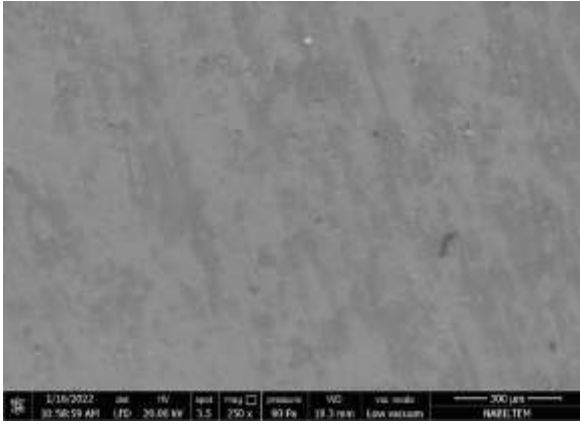


(e)

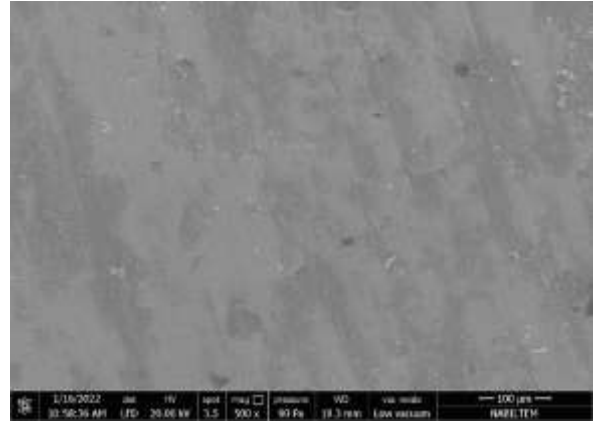


(f)

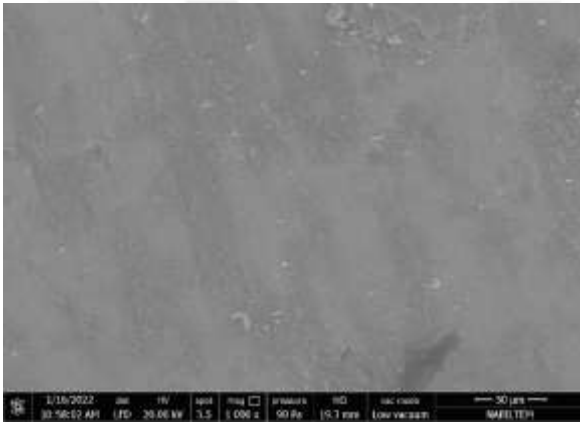
Şekil 6.95. S13 taramalı elektron mikroskobu ile alınan X200 (a), X500 (b), X1000 (c), X2500 (d), X5000 (e) ve X20000 (f) büyütülmüş mikro yapı görüntüleri



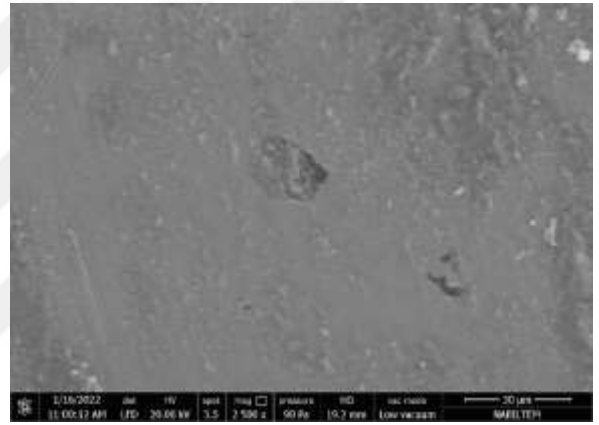
(a)



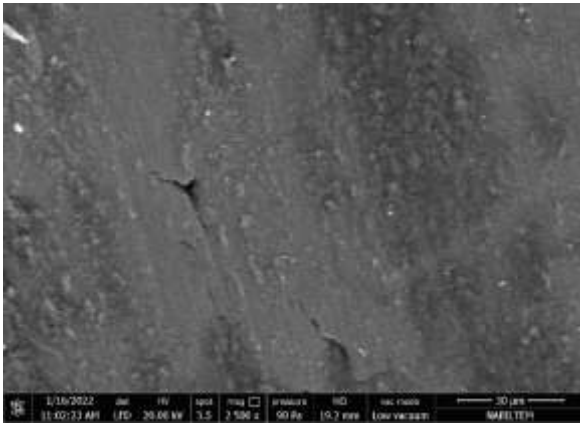
(b)



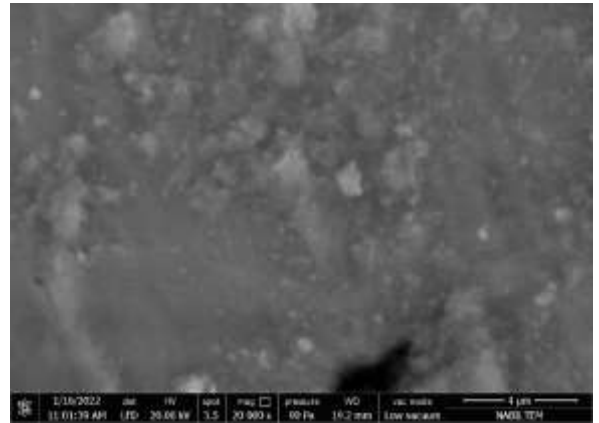
(c)



(d)

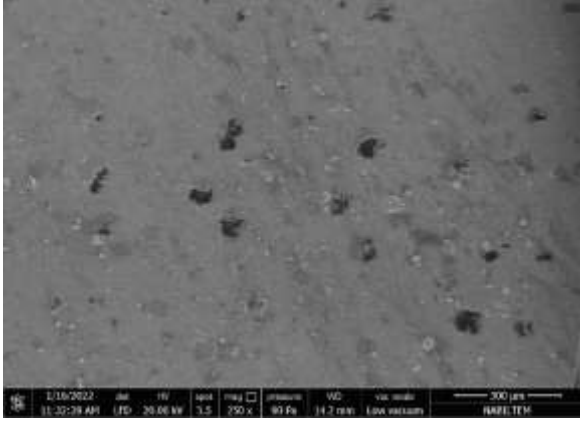


(e)

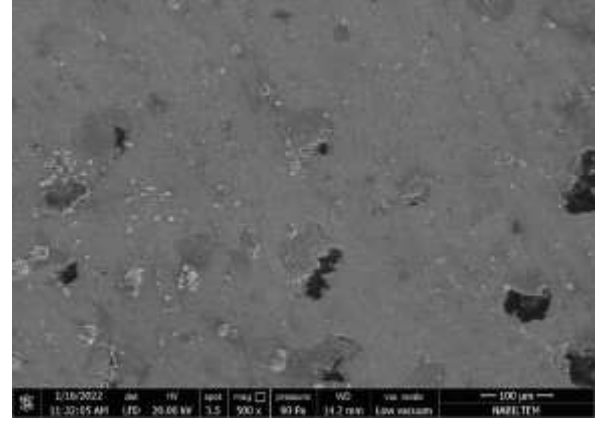


(f)

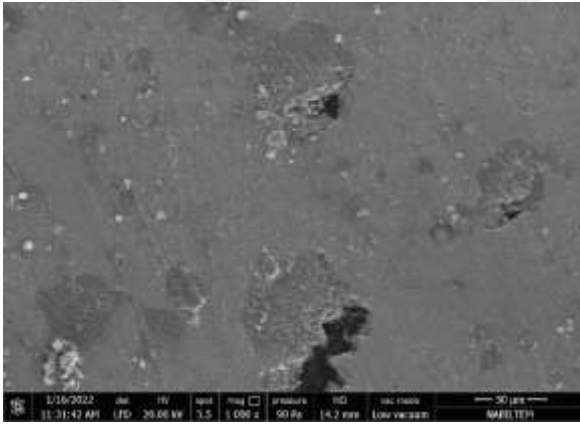
Şekil 6.96. S14 taramalı elektron mikroskobu ile alınan X200 (a), X500 (b), X1000 (c), X2500 (d), X5000 (e) ve X20000 (f) büyütülmüş mikro yapı görüntüleri



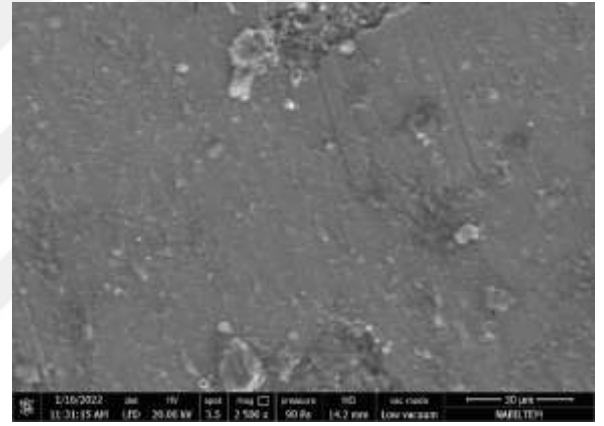
(a)



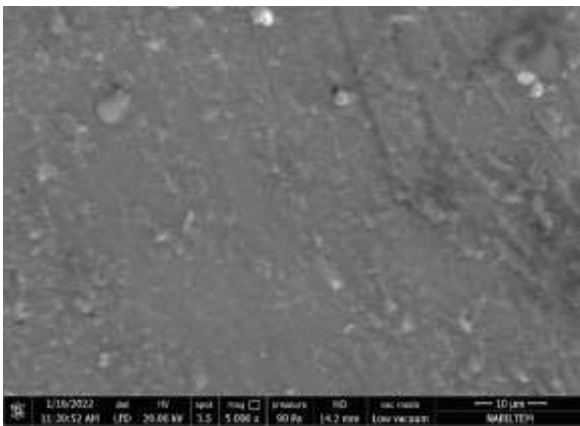
(b)



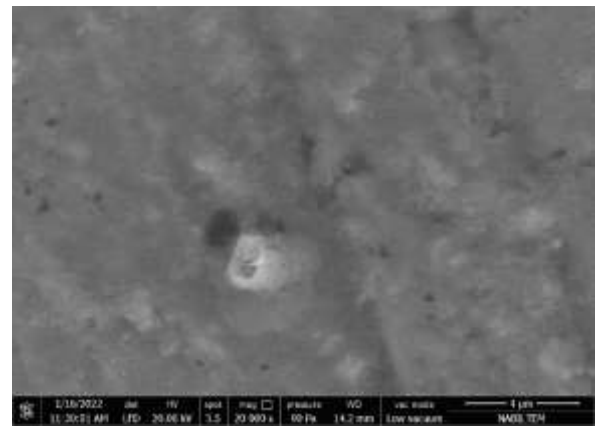
(c)



(d)

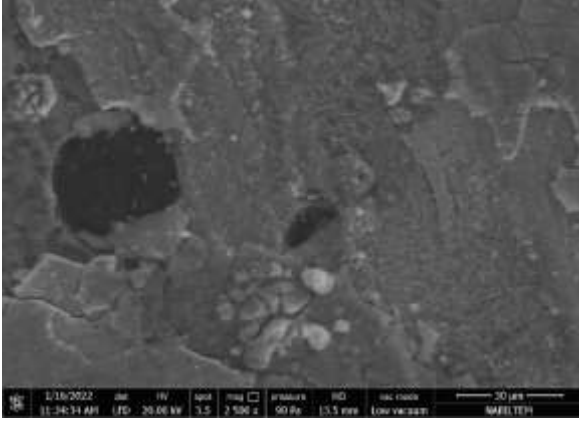


(e)

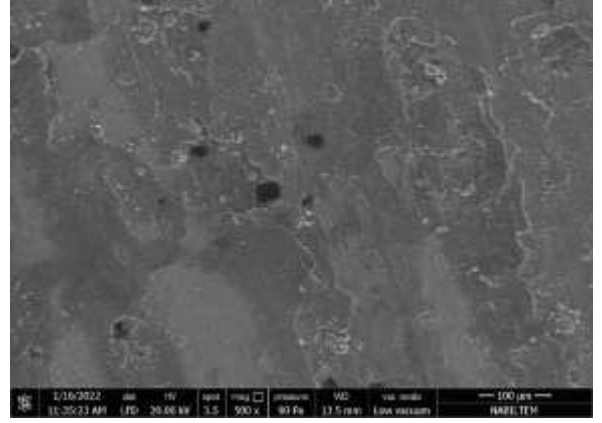


(f)

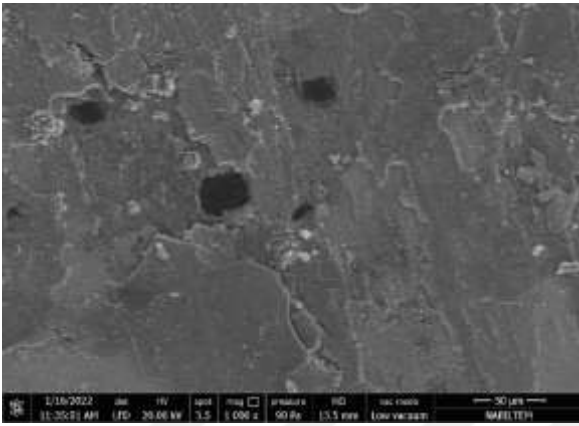
Şekil 6.97. S15 taramalı elektron mikroskobu ile alınan X200 (a), X500 (b), X1000 (c), X2500 (d), X5000 (e) ve X20000 (f) büyütülmüş mikro yapı görüntüleri



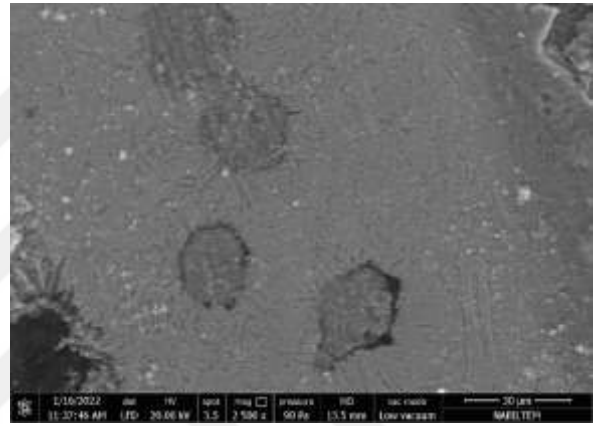
(a)



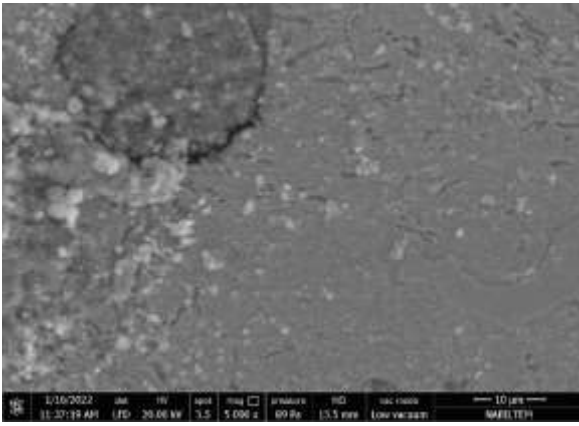
(b)



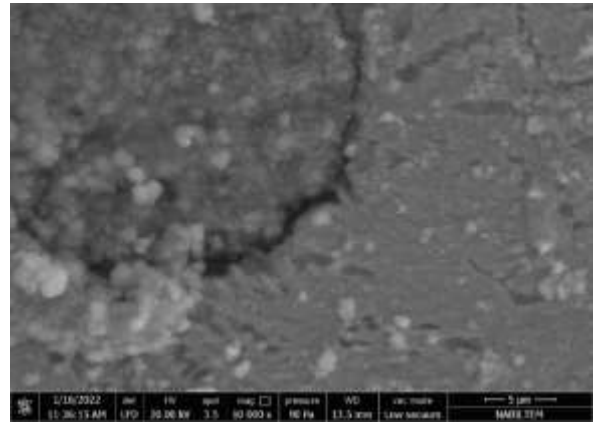
(c)



(d)

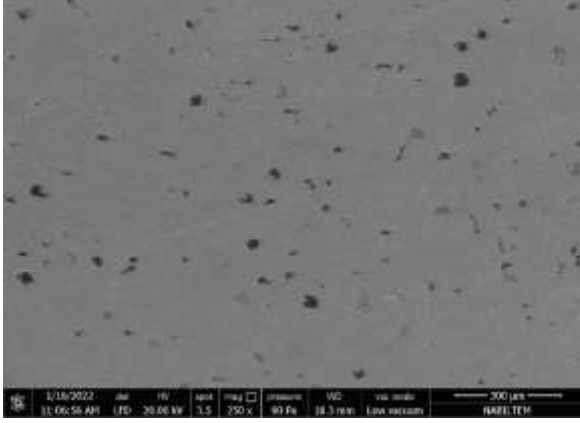


(e)

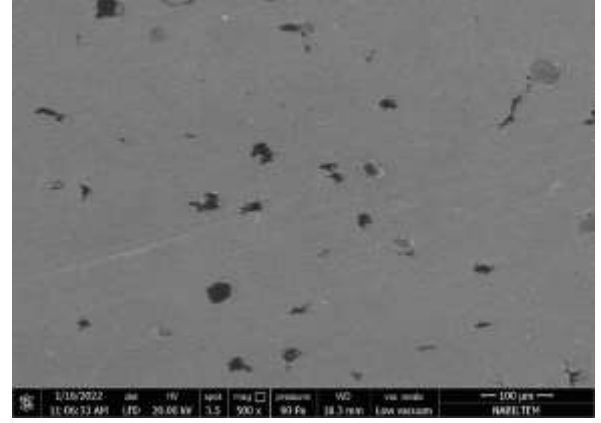


(f)

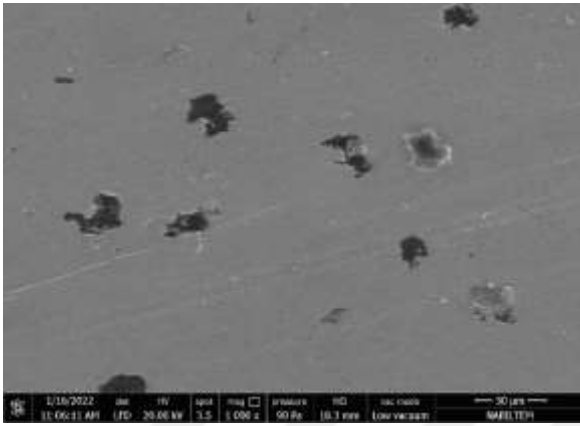
Şekil 6.98. S16 taramalı elektron mikroskobu ile alınan X200 (a), X500 (b), X1000 (c), X2500 (d), X5000 (e) ve X20000 (f) büyütülmüş mikro yapı görüntüleri



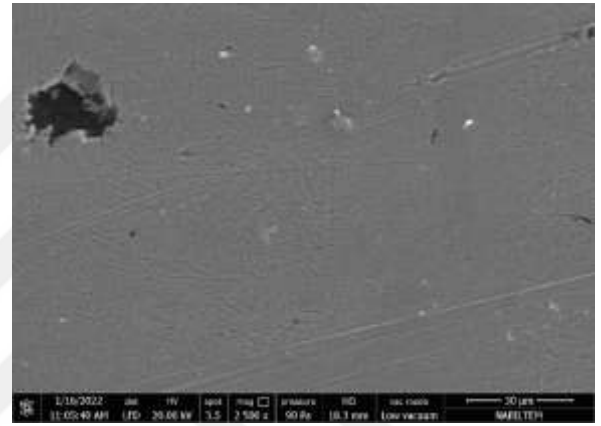
(a)



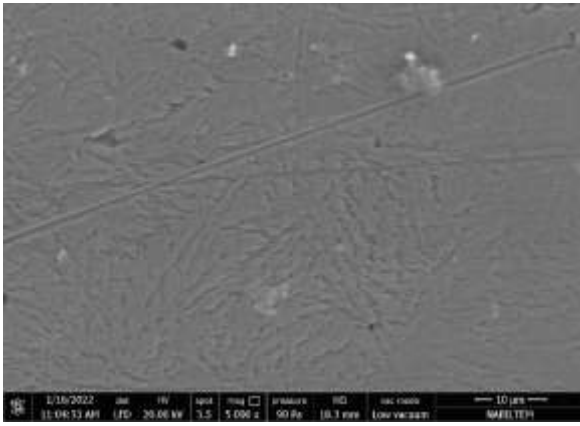
(b)



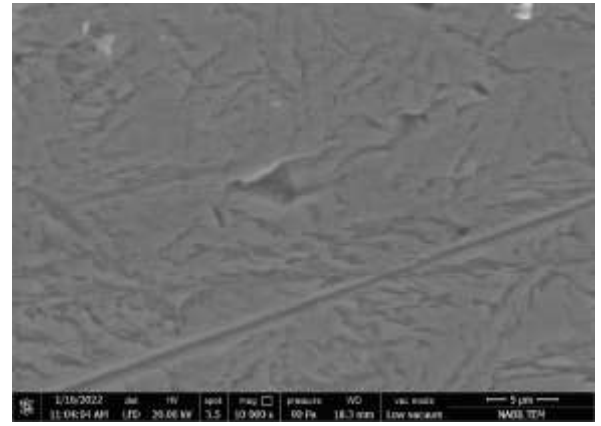
(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 6.99. S17 taramalı elektron mikroskobu ile alınan X200 (a), X500 (b), X1000 (c), X2500 (d), X5000 (e) ve X20000 (f) büyütülmüş mikro yapı görüntüleri

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada yapısında yaklaşık olarak %0,8 Cr, 0,2 Mo ile 0,4 Ni bulunduran Küresel grafitli dökme demire (GGG 50) 900°C ve 950°C sıcaklıklarda 60 dakika ve 45 dakikalar da östenitleme işlemi uygulanıp sonrasında, 200 °C -400 °C sıcaklıklar arasında 30 ile 360 dakikalar arasında östemperleme işlemi uygulanıp malzemeye mekanik özellikler kazandırılması sağlanmıştır.

Yapılan östemperleme işlemleri sonrasında en yüksek sertlik 950°C 60 dakika östenitleme işleminden sonra 200°C' de 60 dakika tuzlu su banyosu ile östemperleme işlemi yapılan S2 numaralı numune 60 HRC, en düşük sertliğin ise ısılsız işlemsiz dökme demir üzerinde 34 HRC görülmüştür.

Yapılan sürtünme testleri sonucunda sürtünme katsayısı en düşük olarak 900°C ve 45 dakika östenitleme işlemine ait 350°C de tuzlu su banyosunda östemperlenmesi ile ulaşılan 45 HRC sertliğe sahip olan S11 numunesidir. En yüksek olan ise S12 olduğu görülmüştür. Ayrıca Döküm numune aşınmada yetersiz olsa da, sürtünme katsayısı birçok ısılsız işlemli parçadan düşük çıkmıştır. Burada ısılsız işlemde grafit yapı deforme olduğu için malzeme katı yağlama özelliğini kaybetmiştir. Isılsız işlem yapılırken göz önünde bulundurularak doğru işlemin yapılması son derece önemlidir.

Aşınma testleri neticesinde alan başına en büyük aşınma sertliği en düşük olan ısılsız işlemsiz S1 döküm numunesinde meydana gelmiştir. Ayrıca sertlik yükseldikçe aşınma direnci yükseldiği görülmüştür.

Aşınma testinde ağırlık yükseldikçe %20-%90 arasında aşınma miktarı da yükselmektedir.

Östemperleme sıcaklığının en düşük seviyede ince beynit çizgileri varken sıcaklık arttıkça kabalaştığı görülmüştür.

200 °C östemperleme sıcaklığında, 60 dakika bekleme süresinde sertlik 60 HRC bulunurken, sürenin 240 dakikaya çıkarılmasıyla sertliğin 55 HRC' ye düştüğü görülmüştür. Süre 360 dakikaya çıkartıldığında ise sertlik değeri 56 HRC olarak bulunmuştur. 240 dakikadan sonra sertlik değerlerinin düşmeye devam etmediği ve stabil kaldığı görülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] J. Zimba, D. J. Simbi, E. Navara, "Austempered Ductile Iron: An Alternative Material for Moving Components," in *Cement and Concrete Composites*, Ed. Vancouver, British Columbia, Canada: Materials Today, 2003, vol. 25, pp. 643-649.
- [2] A. I. Arsalan, "ASTM F75 Co-Cr-Mo alaşım çeliğinin abrasiv aşınma davranışlarının incelenmesi," Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2019.
- [3] F. Gül ve L. şenel, "Ferritik ve Perlitik Küresel Grafitli Dökme Demirin Üç-Gövdeli Abrasiv Aşınma Davranışı Üzerine Aşındırıcı Parçacık Boyutunun Etkisi," Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, c. 1, s. 1, ss. 57-64, 2012.
- [4] A. O. Devecili ve G. Uymaz, "Östemperleme ısıl işlem sıcaklığının EN GJS 600-3 Sfero döküm malzemede mekanik özelliklere etkisi ve hidrolik direksiyon kutusuna uygulanması," Makina Tasarım ve İmalat Dergisi, c. 14, s. 2, ss. 48-53, 2016.
- [5] C. Çetinkaya, "Yüksek Kromlu Beyaz Dökme Demir Malzemelerin Al₂O₃ ile Aşınma Davranışlarının İncelenmesi," Politeknik Dergisi, c. 6, sayı 3, ss. 559-567, 2003.
- [6] H. Kuş, "Östemperlenmiş Küresel grafitli dökme demirlerin aşınma davranışı," Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2007.
- [7] S. İ. Akray, "Küresel grafitli dökme demirlere uygulanan yüzey işlemlerinin aşınma direncine etkisinin incelenmesi," Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2007.
- [8] F. Ertürk, "Yüksek kromlu beyaz dökme demirde abrasiv aşınma dayanımı-mikroyapı ilişkisinin incelenmesi," Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2012.
- [9] Y. şahin and O. Durak, "Abrasive Wear Behaviour of Austempered Ductile Iron," *Materials and Design*, vol. 28, no. 6, pp.1844-1850, 2007.
- [10] N. Rebasea, R. Dommarco and J. Sikora, "Wear Resistance of High Nodule Count Ductile Iron," *Wear*, vol. 253, no. 7, pp. 855-861, 2002.
- [11] M. Bahmani, R. Elliott and N. Varahram, "The Austempering Kinetics and Mechanical Properties of An Austempered Cu-Ni-Mo-Mn Alloyed Ductile Iron," *Journal of Materials Science*, vol. 32, no. 18, pp. 4783-4791, 1997.
- [12] R. Zhou, Y. Jiang, D. Lu and Z. Li, "Development and Characterization of A Wear Resistant Bainite/Martensite Ductile Iron by Combination of Alloying and A Controlled Cooling Heat Treatment," *Wear*, vol. 250, pp. 529-534, 2001.
- [13] R. Elliott, *Cast Iron Technology*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1988.
- [14] C. Akman, "GG22 lamel grafitli dökme demirden üretilen motor silindir gömleklerinin cnc torna tezgahında işlenebilirliğinin incelenmesi," Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, 2006.

- [15] S. Fidaner, S. Çelik, H. Doğmuş, C. Süzen ve A. Duran, *Genel Dökümcülük Bilgisi*, İstanbul: Milli Eğitim Basımevi, 1979.
- [16] M. Toptaş, “Farklı ısı işlemlerin küresel grafitli dökme demirin yorulma davranışına etkisi,” Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar, 2006.
- [17] M. Erdoğan, *Mühendislik Alaşımaları Yapı ve Özellikleri*. 1. Baskı, Ankara: Nobel Yayın Dağıtım, 2000.
- [18] M. U. Kökten, “GGG 50 ve GGG 80 sınıfı küresel grafitli dökme demirlerin abrazif aşınma davranışına östemperleme işleminin etkisi,” Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1998.
- [19] *EN 1563 Founding-Spheroidal Graphite Cast Irons*, European Standard, 2018.
- [20] K. K. Kırcalı, “Farklı matris yapılarına sahip küresel grafitli dökme demirlerin mekanik ve işlenebilirlik özelliklerinin araştırılması,” Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 2006.
- [21] E. Piwowarsky, *Hochwertiges Gusseisen*. Berlin: Springer-Verlag, 1961.
- [22] Ö. Özdemir, “Parametrelerin otomotiv sektöründe kullanılan küresel grafitli dökme demir üretimine etki eden teorik incelenmesi ultrasonik ses hızı yöntemiyle tahribatsız kontrolü,” Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2007.
- [23] D. M. Stefanescu, “Classification and Basic Metallurgy of Cast Iron,” in *ASM Specialty Handbook: Cast Irons*, ASM Handbook Committee, USA: ASM International, 1990, pp. 3-11.
- [24] A. K. Sinha, “Boriding (boronizing) of metals,” in *ASM Handbook Volume 4 Heat Treating*, ASM Handbook Committee, USA: ASM International, 1991, pp. 965-970.
- [25] C. H. Chang ve T. S. Shih, “Study On Isothermal Transformation of Austempered Ductile Iron,” *AFS Transactions*, vol. 94, no. 102, pp. 357-385, 1994.
- [26] D. M. Stefanescu, *ASM Handbook Volume 15 Casting*, USA: ASM International, 1992.
- [27] N. Darwish and R. Elliott, “Austempering of low manganese ductile irons,” *Materials Science and Technology*, vol. 9, no. 7, pp. 572-585, 1993.
- [28] M. Baydoğan, “GGG 60 sınıfı küresel grafitli dökme demirde östemperleme ısı işleminin çekme, yorulma ve aşınma özelliklerine etkisi,” Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1996.
- [29] ASM Handbook Committee, *ASM Handbook Volume 4 Heat Treating*, USA: ASM International, 1991.
- [30] M. Grech and J. M. Young, “Effect Of Austenitizing Temperature on Tensile Properties of Cu-Ni Austempered Ductile Iron”, *Materials Science and Technology*, vol. 6, no. 5, pp.415-421, 1990.

- [31] A. Özel, “GGG 40-80 sınıfı küresel grafitli dökme demirlerde östemperleme ısı işleminin darbe direnci ve geçiş sıcaklığına darbe etkisinin incelenmesi,” Doktora Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1994.
- [32] H. Bayati, R. Elliott and G.W. Lorimer, “Influence of Austenitizing Temperature on Austempering Kinetics of High Manganese Alloyed Ductile Cast Iron,” *Materials Science and Technology*, vol.11, no. 8, pp. 776-786, 1995.
- [33] A. S. Hamid Ali and R. Elliott, “Austempering of An Mn-Mo-Cu Alloyed Ductile Iron, Part 1 Austempering Kinetics and Process Window,” *Materials Science and Technology*, vol. 12, no. 8, pp. 679-690. 1966.
- [34] H. L. Morgan, “Introduction to foundry production and control of austempered ductile iron,” *The British Foundryman*, vol. 80, no. 2, pp. 98-108, 1987.
- [35] T. Skaland, “A new method for chill and shrinkage control in ladle treated ductile iron,” *Proceedings of the 66th World Foundry Congress*, İstanbul, Türkiye, 2004, pp. 975–987.
- [36] S. İ. Akray, “Küresel grafitli dökme demirlere uygulanan yüzey işlemlerinin aşınma direncine etkisinin incelenmesi,” Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2007.
- [37] P. M. Ingole, A. U. Awate and S. V. Saharkar, “Effect of Basic Chemical Element in Sgi (Ductile Iron),” *International Journal of Engineering Research & Technology*, vol. 1, no. 7 pp.1-7, 2012.
- [38] S. Shama, “Comparison of mechanical properties of austenitic ductile cast iron with ferritic/pearlitic ductile cast iron,” Doctoral Thesis, Department of Metallurgical and Materials Engineering National Institute of Technology Rourkela Odisha, India, 2017.
- [39] R. Kumar, “Effect of tempering temperature and time on strength and hardness of ductile cast iron” M. S. Thesis, Department of Metallurgical and Materials Engineering National Institute of Technology Rourkela Odisha, India, 2015.
- [40] B. P. Mahto, “Characterization of ductile iron through fractographic study,” M. S. Thesis, Department of Mechanical Engineering National Institute of Technology Rourkela Odisha, India, 2014.
- [41] C. Labrecque and M. Gagné, “Ductile iron: fifty years of continuous development,” *Canadian Metallurgical Quarterly*, vol. 37, no 5, pp. 343-378, 1998.
- [42] H. Czichos and K. Habig, *Tribologie Handbuch-Reibung und Verschleiss*, Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg Verlag, 1992.
- [43] D. Dowson, *History of Tribology*. London; Longman, 1979.
- [44] M. Topbaş, *Endüstri Malzemeleri Cilt II*, İstanbul: Prestij Basın Yayın ve Hizmetleri 1993.
- [45] M. Weck and C. Brecher, *Werkzeug Maschinen Fertigungssysteme 2*, Berlin: Springer-Verlag, 1991.
- [46] M. Akkurt, *Makine Elemanları Cilt I*, İstanbul: Birsen Yayınevi, 1990.

- [47] E. Koç, *Makine Elemanları Cilt II*, Adana: Nobel Kitabevi, 2004.
- [48] F. C. Babalık ve K. Çavdar, *Makine Elemanları ve Konstrüksiyon Örnekleri*, Bursa: Dora Yayıncılık, 2013.
- [49] İ. Bahşiyev and B. Selçuk, *Makine Elemanları Problemleri*, Ankara: Nobel Akademik Yayıncılık, 2017.
- [50] I. M. Hutchings *Tribology: Friction and Wear Engineering Materials*, London: Butterworth-Heinemann, 1992.
- [51] I. V. Kragelskii, *Frictioned Wear*, Washington: Butterworths, 1965.
- [52] P. Blau, "Fifty years of research on the wear of metals," *Tribology International*, vol. 30, no. 5, pp. 321-331, 1997.
- [53] K. Onaran, *Malzeme Bilgisi*, İstanbul: İTÜ Çağlayan Basımevi, 1985.
- [54] M. Akkurt, *Makina Elemanları- Cilt II*, İstanbul: Birsen Yayınevi, 2012.
- [55] İ. Anlaş, *Şasi Temel Ders Kitabı*, İstanbul: M.E.B. Yayınları, 1988.
- [56] L. Şişman, "Bir aşınma deney cihazının tasarım ve imalatı," Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 1999.
- [57] Y. Soydan ve L. Ulukan, *Triboloji: Sürtünme, Aşınma, Yağlama Bilimi ve Teknolojisi*, Sakarya; Tagem Kopisan, 2013.
- [58] Y. Akçin, O. Asi ve Ö. Yeşil, "Kompozit Malzemelerin Kaplanabilirliğinin İncelenmesi," *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, c. 19, sayı 7, ss. 319-322, 2013.