

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KOBALT ESASLI ALAŞIMLARIN TOZ METALURJİSİ
YÖNTEMİYLE ÜRETİMİ, MİKROYAPI VE MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

İlyas SOMUNKIRAN

Tez Yöneticisi
Prof. Dr. Halis ÇELİK
Doç. Dr. Mehmet EROĞLU

DOKTORA TEZİ
METALURJİ EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

2006
ELAZIĞ

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KOBALT ESASLI ALAŞIMLARIN TOZ METALURJİSİ
YÖNTEMİYLE ÜRETİMİ, MİKROYAPI VE MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

İlyas SOMUNKIRAN

DOKTORA TEZİ
METALURJİ EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

Bu tez, tarihinde aşağıda belirtilen jüri tarafından oybirliği /oyçokluğu ile başarılı / başarısız olarak değerlendirilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Halis ÇELİK

Üye:

Üye:

Üye:

Üye:

Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/...../..... tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

TEŞEKKÜR

Doktora çalışmamda fikir ve önerileriyle beni yönlendiren ve her konuda yardımlarını esirgemeyen Sayın Hocam Prof.Dr. Halis ÇELİK'e, ikinci danışmanım, Sayın Doç.Dr. Mehmet EROĞLU'na teşekkürlerimi ve saygılarımı sunmayı bir borç bilirim.

Ayrıca çalışmalarım sırasında destek ve yardımlarını gördüğüm Metal Eğitimi Bölüm Başkanı Sayın Prof.Dr. M. Mustafa YILDIRIM'a, tüm bölüm öğretim elemanlarına ve çalışmalarım süresince bana moral kaynağı olan eşime ve oğluma teşekkür ederim.

İlyas SOMUNKIRAN

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
TEŞEKKÜR	I
İÇİNDEKİLER	II
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	V
ÇİZELGELER (TABLOLAR) LİSTESİ.....	X
ÖZET	XI
ABSTRACT	XII
1. GİRİŞ	1
2. TOZ METALURJİSİ	4
2.1. Tanım	4
2.2. Toz Metalurjisinin Tarihçesi	4
2.3. Toz Metalurjisi Yönteminin Temel Basamakları.....	7
2.3.1. Toz Metalurjisinde Kullanılan Tozların Üretimi	7
2.3.1.1. Mekaniksel Metot	7
2.3.1.2. Atomizasyon	9
2.3.1.2.1. Su Atomizasyonu	10
2.3.1.2.2. Gaz Atomizasyonu	11
2.3.1.2.3. Döner Disk Atomizasyonu	14
2.3.1.2.4. Döner Elektrot Atomizasyonu	14
2.3.1.3. Elektrokimyasal Yöntemler	15
2.3.1.4. Kimyasal Yöntemler	16
2.3.2. Kobalt Esaslı Tozların Üretimi	18
2.3.3. Toz Özellikleri ve Karakterizasyonu.....	19
2.3.3.1. Toz Akıcılığı	20
2.3.3.2. Görünür Yoğunluk	21
2.3.3.3. Sıkıştırılabilirlik	22
2.3.3.4. Tane büyüklüğü	24
2.3.3.5. Toz Şekli.....	25
2.3.4. Tozların Karıştırılması	26
2.3.5. Kullanılan Yağlayıcılar.....	26
2.3.6. Tozların Preslenmesi (Sıkıştırılması)	27
2.3.6.1. İzostatik Sıkıştırma	31
2.3.6.2. İzostatik Preslemede Yoğunlaşma.....	32

2.3.6.3. Tozların Haddelenmesi	33
2.3.7. Sinterleme	34
2.3.7.1. Katı Hal Sinterlemesi	34
2.3.7.2. Boyun Büyümesi ve Şekillenmesi	36
2.3.7.3. Kütle Transfer Mekanizması	38
2.3.7.4. Sıvı Faz Sinterlemesi	40
2.3.7.4.1. Sıvı Akışı ile Yeniden Düzenlenme	42
2.3.7.4.1. Çözünme - Yeniden Çökelme Aşaması	44
2.3.7.5. Katı Hal Sinterlemesi	45
2.3.7.5. Geçici Sıvı Faz Sinterlemesi	46
2.3.7.6. Sinterleme İşleminde Kullanılan Fırınlr ve Fırın Atmosferleri	46
3. METAL İMPLANT MALZEMELER	49
3.1. Paslanmaz Çelikler	50
3.2. Kobalt Esaslı Alaşımlar	50
3.3. Dental Amalgam	51
3.4. Nikel-Titanyum Alaşımları	51
3.5. Titanyum ve Titanyum Alaşımlar	52
3.6. Metalik İmplant Malzemelerin Mekanik Özellikleri	54
3.7. Toz Metal Teknolojisinin Biyomalzemelere Sağladığı Katkılar	55
3. 8. Biyomalzemelerin Toz Metalurjisi ile Şekillendirilmesi	58
4. AŞINMA MEKANİZMALARI VE AŞINMAYI ETKİLEYEN FAKTÖRLER	60
4.1. Aşınma Mekanizmaları	60
4.1.1. Abrasiv Aşınması	60
4.1.2. Adhesiv Aşınma	61
4.1.3. Erozyon Aşınması	62
4.1.4. Kavitasyon Aşınması	64
4.1.5. Korozyon Aşınması	65
4.1.6. Oksidasyon Aşınması	66
4.1.7. Yorulma Aşınması	66
4.2. Aşınmayı Etkileyen Faktörler	67
5. KOBALT ALAŞIMLARININ İKİLİ VE ÜÇLÜ FAZ DİYAGRAMLARI VE YAPILARI	68
6. LİTERATÜR ÖZETLERİ	71
7. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	75
7.1. Deneyde kullanılan Malzemeler	75
7.2. Numune Üretimine Hazırlık Aşamaları	76

7.2.1. Toz Miktarının Hesaplanması	76
7.2.2. Sıkıştırma Basıncının Hesabı	77
7.2.3. Tozların Karıştırılması	77
7.2.4. Sıkıştırma Kalıbının Üretilmesi	78
7.2.5. Toz Metal Numunelerinin Soğuk Preslenmesi.....	79
7.2.6. Sinterleme	80
7.3. Yapılan Deney ve İncelemeler	81
7.3.1. Yoğunluk Ölçümü (Gözeneklik Oranının Belirlenmesi)	81
7.3.2. Basma Deneyi	82
7.3.3. Aşınma Deneyi.....	83
7.3.4. Sertlik Deneyi	84
7.3.5. Optik Mikroskop Mikroyapı İncelemeleri	85
7.3.6. Taramalı Elektrom Mikroskopu (SEM) ve Noktasal Analiz (EDS) ölçümleri Çalışmalar	85
8. DENEY SONUÇLARI	86
8.1. Yoğunluk Ölçüm Sonuçları.....	86
8.2. Basma Deney Sonuçları	87
8.3. Aşınma Deney Sonuçları.....	96
8.4. Optik Mikroskop Sonuçları.....	122
8.5. SEM ve EDS Sonuçları	126
8.6. Sertlik Ölçüm Deney Sonuçları	142
9. GENEL SONUÇ VE ÖNERİLER	143
KAYNAKLAR	147
ÖZGEÇMİŞ	154

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Toz metal parçaların üretim aşamaları.....	6
Şekil 2.2. Mekanik metotla öğütme	8
Şekil 2.3. Çarpışmanın etkisi: a) Gevrek parçacık, b) Sünek parçacık.....	8
Şekil 2.4. Yassı hüzmeli V jetleri I	10
Şekil 2.5. Gaz atomizasyonu ile üretim şeması.....	12
Şekil 2.6. Çift sıvı atomizasyon dizaynları: α , serbest düşen ergimiş metal ile gazın açısı; A: Ergimiş metal ile gaz lülesi arasındaki mesafe, D: Sınırlandırılarak düşen ergimiş metal çapı	13
Şekil 2.7. Döner disk atomizasyonu	14
Şekil 2.8. Döner elektron atomizasyonu	15
Şekil 2.9. Hall akış hunisi	20
Şekil 2.10. Şev Açısı.....	21
Şekil 2.11. Küresel ve pul şeklindeki parçalar	24
Şekil 2.12. Toz tane şekilleri	25
Şekil 2.13. Kalıp duvarına etki eden sürtünme kuvvetleri.....	29
Şekil 2.14. Tek eksenli presleme	30
Şekil 2.15. Çift etkili presleme	31
Şekil 2.16. İzostatik presleme yöntemleri; a) Islak, b) Kuru	32
Şekil 2.17. Toz haddeleme; a) Tek Metal, b) İki Metal	33
Şekil 2.18. Katı durumda sinterleme aşaması	35
Şekil 2.19. İki küresel parçacığın sinterlenmesi esnasındaki oluşan basamaklar	36
Şekil 2.20. İki parçacığın temas yüzeyindeki gözeneklerin görünümü: a) preslemeden önce, b) preslemeden sonra, c) sinterlemeden sonra.....	37
Şekil 2.21. Boyun bölgesindeki muhtelif atom taşınım yolları.....	39
Şekil 2.22. Sıvı faz sinterleme aşamalarının şematik olarak gösterimi.....	41
Şekil 2.23. Sıvı faz sinterlemesinde zamana bağlı olarak yoğunlaşma	42
Şekil 2.24. Sinterleme fırını	47
Şekil 4.1. Abrasiv aşınma mekanizmaları.....	61
Şekil 4.2. Adhezyondan dolayı malzeme taşınımı.....	62
Şekil 4.3. Erozyon aşınma mekanizmaları.....	63
Şekil 4.4. Kavitasyon aşınma mekanizmasında kabarcık çökme mekanizması.....	64
Şekil 4.5. Korozyon oluşturmalar ve aşınan yüzey arasındaki etkileşim modelleri.....	65
Şekil 4.6. Yorulma aşınma mekanizmasının şematik görüntüsü	67

Şekil 5.1. 1200 °C’de Co-Cr-Mo alaşımının üçlü faz diyagramı	68
Şekil 5.2. Mo-Cr ikili alaşımın denge diyagramı.....	69
Şekil 5.3. Co-Cr ikili alaşımın denge diyagramı.....	69
Şekil 5.3. Mo-Co ikili alaşımın denge diyagramı.....	70
Şekil 7.1. Taslak numune şekli ve boyutları	77
Şekil 7.2. Karıştırıcı	78
Şekil 7.3. Basma kalıbı	79
Şekil 7.4. Presleme işleminin yapıldığı kalıp ve makine resmi	80
Şekil 7.5. Sinterleme işleminin yapıldığı fırın	85
Şekil 7.6. Basma deney numunesi	82
Şekil 7.7. Basma deneyinin yapıldığı çekme-basma test makinası.....	83
Şekil 7.8. Tornaya monte edilmiş aparatın resmi.....	84
Şekil 7.9. Sertlik ölçümün şematik gösterimi	84
Şekil 8.1. Artan % Cr miktarının gözenekliliğe olan etkisi	86
Şekil 8.2. % 15 Cr içeren numunenin ($\sigma_c - \epsilon$) diyagramı.....	88
Şekil 8.3. % 20 Cr içeren numunenin ($\sigma_c - \epsilon$) diyagramı.....	88
Şekil 8.4. % 25 Cr içeren numunenin ($\sigma_c - \epsilon$) diyagramı.....	89
Şekil 8.5. % 27.5 Cr içeren numunenin ($\sigma_c - \epsilon$) diyagramı.....	89
Şekil 8.6. % 30 Cr içeren numunenin ($\sigma_c - \epsilon$) diyagramı.....	90
Şekil 8.7. % 35 Cr içeren numunenin ($\sigma_c - \epsilon$) diyagramı.....	90
Şekil 8.8. Artan Cr miktarına bağlı olarak kuvvet değişimi	91
Şekil 8.9. %15 Cr içeren numunenin kırık yüzey SEM resmi	92
Şekil 8.10. Kırık yüzeyi verilen % 15 Cr içerikli numunenin 1 noktasındaki EDS analizi	92
Şekil 8.11. Kırık yüzeyi verilen % 15 Cr içerikli numunenin 2 noktasındaki EDS analizi	93
Şekil 8.12. Kırık yüzeyi verilen % 15 Cr içerikli numunenin 3 noktasındaki EDS analizi	93
Şekil 8.13. Kırık yüzeyi verilen % 15 Cr içerikli numunenin alan EDS analizi.....	94
Şekil 8.14. % 27.5 Cr içeren numunenin kırık yüzey SEM resmi	94
Şekil 8.15. Kırık yüzeyi verilen % 27.5 Cr içerikli numunenin 1 noktasındaki EDS analizi	95
Şekil 8.16. Kırık yüzeyi verilen % 27.5 Cr içerikli numunenin 2 noktasındaki EDS analizi	95
Şekil 8.17. Kırık yüzeyi verilen % 27.5 Cr içerikli numunenin alan EDS analizi	96

Şekil 8.18. % 15 Cr içeren numunenin yük ve alınan yola bağlı olarak ağırlık kaybı değişimi	96
Şekil 8.19. % 20 Cr içeren numunenin yük ve alınan yola bağlı olarak ağırlık kaybı değişimi	97
Şekil 8.20. % 22.5 Cr içeren numunenin yük ve alınan yola bağlı olarak ağırlık kaybı değişimi	98
Şekil 8.21. % 25 Cr içeren numunenin yük ve alınan yola bağlı olarak ağırlık kaybı değişimi	99
Şekil 8.22. % 27.5 Cr içeren numunenin yük ve alınan yola bağlı olarak ağırlık kaybı değişimi	99
Şekil 8.23. % 30 Cr içeren numunenin yük ve alınan yola bağlı olarak ağırlık kaybı değişimi	100
Şekil 8.24. % 35 Cr içeren numunenin yük ve alınan yola bağlı olarak ağırlık kaybı değişimi	100
Şekil 8.25. 10 N'luk yük altında Cr ve yol değişiminin kütle kaybına olan etkisi	101
Şekil 8.26. 20 N'luk yük altında Cr ve yol değişiminin kütle kaybına olan etkisi	102
Şekil 8.27. 30 N'luk yük altında Cr ve yol değişiminin kütle kaybına olan etkisi	103
Şekil 8.28. % 15 Cr içeren numunenin yük ve alınan yola bağlı olarak aşınma oranı değişimi	104
Şekil 8.29. % 20 Cr içeren numunenin yük ve alınan yola bağlı olarak aşınma oranı değişimi	105
Şekil 8.30. % 22.5Cr içeren numunenin yük ve alınan yola bağlı olarak aşınma oranı değişimi	106
Şekil 8.31. % 25 Cr içeren numunenin yük ve alınan yola bağlı olarak aşınma oranı değişimi	106
Şekil 8.32. % 27.5 Cr içeren numunenin yük ve alınan yola bağlı olarak aşınma oranı değişimi	107
Şekil 8.33. % 30 Cr içeren numunenin yük ve alınan yola bağlı olarak aşınma oranı değişimi.....	108
Şekil 8.34. % 35 Cr içeren numunenin yük ve alınan yola bağlı olarak aşınma oranı değişimi	108
Şekil 8.35. 10 N'luk yük altında Cr ve yol değişiminin aşınma oranına olan etkisi.....	109
Şekil 8.36. 20 N'luk yük altında Cr ve yol değişiminin aşınma oranına olan etkisi.....	110
Şekil 8.37. 30 N'luk yük altında Cr ve yol değişiminin aşınma oranına olan etkisi.....	111
Şekil 8.38. % 15 Cr içeren numunenin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü	112

Şekil 8.39. % 20 Cr içeren numunenin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü	112
Şekil 8.40. % 22.5 Cr içeren numunenin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü	113
Şekil 8.41. % 25 Cr içeren numunenin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü	113
Şekil 8.42. % 27.5 Cr içeren numunenin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü	114
Şekil 8.43. % 30 Cr içeren numunenin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü	114
Şekil 8.44. % 30 Cr içeren numunenin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü	115
Şekil 8.45. % 15 Cr içeren numunenin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü	116
Şekil 8.46. % 20 Cr içeren numunenin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü	117
Şekil 8.47. % 22.5 Cr içeren numunenin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü	117
Şekil 8.48. % 25 Cr içeren numunenin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü	118
Şekil 8.49. % 27.5 Cr içeren numunenin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü	118
Şekil 8.50. Aşınma yüzeyi verilen % 27.5 Cr içerikli numunenin 1 noktasındaki EDS analizi	119
Şekil 8.51. Aşınma yüzeyi verilen % 27.5 Cr içerikli numunenin 2 noktasındaki EDS analizi	119
Şekil 8.52. Aşınma yüzeyi verilen % 27,5 Cr içerikli numunenin 3 noktasındaki EDS analizi	120
Şekil 8.53. Aşınma yüzeyi verilen % 27.5 Cr içerikli numunenin 4 noktasındaki EDS analizi	120
Şekil 8.54. Ağırlıkça % 30 Cr içeren numunenin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü	121
Şekil 8.55. Ağırlıkça % 35 Cr içeren numunenin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü	121
Şekil 8.56. Dağlanmamış ağırlıkça % 15 Cr içeren numunenin optik görüntüsü (100x)	122
Şekil 8.57. Dağlanmamış ağırlıkça % 20 Cr içeren numunenin optik görüntüsü (100x)	123
Şekil 8.58. Dağlanmamış ağırlıkça % 22.5 Cr içeren numunenin optik görüntüsü (100x) ..	123
Şekil 8.59. Dağlanmamış ağırlıkça % 25 Cr içeren numunenin optik görüntüsü (100x)	124
Şekil 8.60. Dağlanmamış ağırlıkça % 27.5 Cr içeren numunenin optik görüntüsü (100x) ..	124
Şekil 8.61. Dağlanmamış ağırlıkça % 30 Cr içeren numunenin optik görüntüsü (100x)	125
Şekil 8.62. Dağlanmamış ağırlıkça % 35 Cr içeren numunenin optik görüntüsü (100x)	125
Şekil 8.63. % 27.5 Cr içeren Toz halindeki numunenin SEM görüntüsü	126
Şekil 8.64. % 27.5 Cr içerikli Toz halindeki numunenin 1 noktasındaki EDS analizi	127
Şekil 8.65. % 27.5 Cr içerikli Toz halindeki numunenin 2 noktasındaki EDS analizi	127
Şekil 8.66. % 27.5 Cr içerikli Toz halindeki numunenin 3 noktasındaki EDS analizi	128
Şekil 8.67. % 27.5 Cr içeren preslenmiş sinterlenmemiş numunenin SEM görüntüsü	128
Şekil 8.68. % 27.5 Cr içerikli preslenmiş sinterlenmemiş numunenin 1 noktasındaki EDS analizi	129

Şekil 8.69. % 27.5 Cr içerikli preslenmiş sinterlenmemiş numunenin 2 noktasındaki EDS analizi	129
Şekil 8.70. % 27.5 Cr içerikli preslenmiş sinterlenmemiş numunenin 3 noktasındaki EDS analizi	130
Şekil 8.71. % 27.5 Cr içerikli preslenmiş sinterlenmemiş numunenin 4 noktasındaki EDS analizi	130
Şekil 8.72. % 27.5 Cr içerikli preslenmiş sinterlenmemiş numunenin alan EDS analizi	131
Şekil 8.73. % 15 Cr içeren sinterlenmiş numunenin SEM görüntüsü	131
Şekil 8.74. %15 Cr içerikli sinterlenmiş numunenin a noktasının EDS analizi.....	132
Şekil 8.75. %15 Cr içerikli sinterlenmiş numunenin b noktasının EDS analizi	132
Şekil 8.76. % 15 Cr içerikli sinterlenmiş numunenin c noktasının EDS analizi.....	133
Şekil 8.77. % 27.5 Cr içeren sinterlenmiş numunenin SEM görüntüsü	134
Şekil 8.78. % 27.5 Cr içerikli sinterlenmiş numunenin a noktasının EDS analizi.....	134
Şekil 8.79. % 27.5 Cr içerikli sinterlenmiş numunenin b noktasının EDS analizi	135
Şekil 8.80. % 27.5 Cr içerikli sinterlenmiş numunenin d noktasının EDS analizi	135
Şekil 8.81. % 27.5 Cr içerikli sinterlenmiş numunenin e noktasının EDS analizi.....	136
Şekil 8.82. % 15 Cr içeren numunenin SEM görüntüsü	137
Şekil 8.83. % 20 Cr içeren numunenin SEM görüntüsü	137
Şekil 8.84. % 22.5 Cr içeren numunenin SEM görüntüsü	138
Şekil 8.85. % 25 Cr içeren numunenin SEM görüntüsü	138
Şekil 8.86. % 27.5 Cr içeren numunenin SEM görüntüsü	139
Şekil 8.87. % 30 Cr içeren numunenin SEM görüntüsü	139
Şekil 8.88. % 35 Cr içeren numunenin SEM görüntüsü	140
Şekil 8.89. Basma deneyine maruz kalan numunenin yüzeyinde oluşan çatlak	141
Şekil 8.90. Basma deneyine maruz kalan numunenin kırık yüzey resmi.....	141
Şekil 8.91. Artan krom (Cr) miktarına bağlı olarak sertlik değişimi	142

ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge 2.1. Hidrometalurjik yöntemlerle üretilen kobalt tozlarının tipik özellikleri.....	18
Çizelge 2.2. Gereksinim duyulan kobalt tozlarının tipik özellikleri	19
Çizelge 2.3. Ticari demir tozlarının sıkıştırılabilme özelliği	23
Çizelge 2.4. Standart elek takımı	24
Çizelge 2.5. Tozun önemli özellikleri ve etki ettiği bazı faktörler.....	29
Çizelge 3.1. Metallerin bazı tıbbi uygulamaları	50
Çizelge 3.2. Kobalt bazlı alaşımların kimyasal bileşimleri.....	51
Çizelge 3.3. TiAl6V4 malzemesinin kompozisyonu	53
Çizelge 3.4. TiAl6V4 malzemesinin mekanik davranışları	53
Çizelge 7.1. Hazırlanan toz karışımları ve ağırlıkça % miktarları.....	75
Çizelge 7.2. Kobalt tozunun kimyasal analizi.....	75
Çizelge 7.3. Kobalt tozunun elek analizi	75
Çizelge 7.4. Kobalt tozunun fiziksel özellikleri.....	76
Çizelge 8.1. Artan krom (Cr) miktarının (%) gözeneklilik miktarıyla değişimi.....	86

ÖZET

Doktora Tezi

KOBALT ESASLI ALAŞIMLARIN TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİYLE ÜRETİMİ, MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

İlyas SOMUNKIRAN

Fırat Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Metalurji Eğitimi Anabilim Dalı

2006, Sayfa: 154

Günümüzde, insan vücudunda meydana gelen sakatlanmaların ve fonksiyonunu kaybeden organların yerine genellikle implant malzemeler kullanılmaktadır. Bu nedenle kullanılacağı yere uygun fiziksel özelliklere ve kimyasal dayanıma sahip malzeme arayışına girilmiştir. İmplant malzemeler arasında kobalt esaslı alaşımlar iyi aşınma dayanımı, korozyon ve ısı dayanımı gerektiren yerlerde geniş uygulama alanı bulmuştur.

Bu çalışmada, farklı krom içerikli kobalt esaslı Cr-Mo toz alaşımının aşınma ve mekanik özelliklerine krom ilavesinin etkisi araştırılmış; imal edilen numunelerin mekanik ve aşınma özelliklerinin belirlenmesi için, numunelere bazı mekanik ve aşınma deney testleri uygulanmıştır. Toz metalurjisi yöntemiyle malzeme kaybı olmaksızın üretilen numuneler, ASTM F75’de verilen bazı mekanik özelliklere sahip implantlarla karşılaştırılarak sonuçların mukayeseli yorumları yapılmıştır. Sıkıştırma basıncının yoğunluğa ve mikroyapıya etkisi, sinterleme sıcaklığının mekanik ve aşınma dayanımına etkileri araştırılarak incelenmiştir. Üretilen numunelerin mikroyapılarının ayrıntılı olarak tanımlanması için metalografik çalışmalar yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Toz Metalurjisi, Abrasiv Aşınma, Co Esaslı Alaşımlar, İmplant

ABSTRACT

PhD Thesis

THE PRODUCTION OF COBALT BASED ALLOYS WITH POWDER METALLURGY PROCESS, AND THE INVESTIGATION OF MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF THESE ALLOYS

İlyas SOMUNKIRAN

Fırat University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Metallurgy Education

2006, Page: 154

Nowadays, The usage of implant materials instead of the limbs which lose their function and all sorts of disablement is rapidly grown. For this reason, a research for the material which is suitable to the condition of usage, physical characteristics and chemical resistance is done. Cobalt based alloys are extensively used in application requiring good wear resistance, corrosion and heat resistances.

This study based on a research about the wear and mechanical behavior of Co-based Co-Cr-Mo powder alloys with different chromium contents. In order to determine the some mechanical properties and wear resistance of the produced samples, they are applied to some mechanical and abrasive wear tests. The samples produced by using “Powder Metallurgy Method” without any material loss are compared with the implant possessing the mechanical properties as stated in ASTM F75 and the results of comparing are interpreted. The effects of compression pressure to the density and microstructure, the ones of sintering to the some mechanical properties and wear resistance are researched. Metallographic studies are performed in order to determine the microstructure of the produced implant (samples) in detail.

Keywords: Powder Metallurgy, Abrasive Wear, Co Based Alloys, Implant Alloys

1. GİRİŞ

Toz metalurjisi teknikleri (T/M) çok farklı alanlarda yaygın olarak kullanılmasına rağmen; tıbbi amaçlı kullanımı teknolojinin uzay ve havacılık biliminden tıp bilimine transferi ile başlamıştır. Özellikle döküm ve işlenebilirliklerinde zorluklar bulunan çok sert bazı malzemelerin keşif ve kullanımı, bu alandaki pek çok yeniliği de ardından getirmiştir. Yüksek kaliteli ve karmaşık şekildeki gözeneklerin üretilmesinde, geleneksel yöntemlerin yetersiz kaldığı durumlarda T/M teknolojisinin kullanımı, problemleri büyük ölçüde çözebilmektedir. T/M yöntemi ile üretilen gözeneklerde; biyomalzemelerden beklenen fonksiyonellik, biyolojik uyumluluk, aşınma ve korozyon direnci gibi özelliklerin iyileştirilmesi de mümkün olmaktadır. Bu yöntemin kazandırdığı bir diğer avantaj da istenilen biyomalzemelerin gözenekli yapıda üretilmesi imkanındır.

Toz metalurjisi teknolojisi (T/M) kullanılarak metalik malzemeden implant üretimi ile ilgili ilk çalışmalar 1960'lı yıllara dayanmaktadır. İlk çalışmalar Co-Cr-Mo alaşımından gözenekli kalça protezi üretimi üzerine yapılmıştır. Bu araştırmalarda, üretilen T/M implantların mekanik ve bazı fiziksel özelliklerinin geliştirilmesi amaçlanmıştır (Dabrowski ve Oksiuta, 2000).

Gözenekli yapıdaki protezler, titreşimleri absorbe edilebilme özelliklerinin yanı sıra, protezle temas yüzeyi oluşturan kemik doku için güçlü bir tutunma yüzeyi ve kolay kaynaşma imkanı sağlamaktadır. T/M'nin biyomalzemelere sağladığı bir diğer avantaj da son boyut ve tolerans ölçülerinde, ek bir talaş kaldırmaya ihtiyaç duyulmaksızın, ekonomik olarak üretilmesi imkanındır. Yalnızca, T/M teknolojisinin uygulama tekniklerinden olan kontrollü gözenek yapısında üretilip şekil verilebilen tozlar için; özel toz üretim teknikleri, sıcak/soğuk izostatik şekillendirme, yoğunluk artırma işlemleri, iyon aşılama ve plazma teknolojisi gibi farklı uygulamalar sayesinde de istenilen boyut ve şekildeki toz çeşitleri kullanılarak, yüksek korozyon dayanımına sahip, yüksek mukavemetli, pürüzsüz yüzeyde sürtünme artıklarının oluşmadığı biyomalzelerin ekonomik olarak üretimi mümkün olmaktadır.

Alaşımlı tozlardan T/M teknolojisinin sağladığı imkanlarla, "Sıcak İzostatik Presleme" yöntemi ile üretilen çoğu protezler, mükemmel bir mekanik yapıya sahip olurken; titanyum, grafit ve benzeri biyomalzemelerin tozlarından kontrollü olarak sinterlenmiş yapıda üretilen protezlerle yapılan deneysel çalışmalarda sonuçlarda da kendi kendini yağlayabilme mekanizması sayesinde bu malzemelerin kırılma ve aşınma direncindeki olumlu gelişmeler bilinmektedir.

Biyomalzemelerin kullanımı, tarihte çok eski zamanlardan beri vardır. Mısır mumyalarında bulunan yapay göz, burun ve dişler bunun en güzel kanıtlarıdır. Altının diş

hekimliğinde kullanımı ise 2000 yıl öncesine kadar uzanmaktadır. Bronz ve bakır kemik implantlarının kullanımı da milattan önceye kadar gitmektedir (Park ve Lakes, 1992).

Canlı dokuya doğrudan temas halinde bulunan ve vücudun herhangi bir organı ile yer değiştirip onun fonksiyonunu yerine getirmeye yarayan yapay malzemelere biomalzemeler denir. Bu malzemede aranılan en önemli özellik, onun vücutla uyumlu olması, yani farmakolojik olarak soy olmasıdır.

Doğal ve yapay yollardan elde edilebilen farklı türlerdeki biomalzemelerin, özellikle son 40 yılda insan vücudunda eksilen, bozulan veya yıpranan organların yerine, insan yaşamının daha sağlıklı ve konforlu sürdürülebilmesi için, fonksiyonel ya da sadece görünüm amaçlı yaygın kullanımı söz konusudur.

Metalik implant uygulamasının, 16. yüzyıl ortalarında çatlak damak tedavisi için, altın plaka kullanımı ile başladığı sanılmaktadır. Demir, altın, gümüş, kurşun, bronz ve platin gibi metaller 19. yüzyılın başlarında çatlak kemiklerin tedavisi için, çivi ve tel halinde kullanılmaya başlanmıştır. Yük taşıyıcı olarak en yaygın kullanılan metalik implant malzemeler; paslanmaz çelikler, Co-Cr-Mo'lu alaşımlar ve Ti ve alaşımlarıdır.

Genel işlevleri bakımından implantlar, belli kimyasal ve mekanik özelliklere sahip olmalıdır. Bugün biomalzeme ile doku arasında gelişen olayların çok önemli olduğu bilinmektedir. Metalik implant ile canlı dokunun uyum içinde birbirine zarar vermeden çalışıp çalışmayacağını (biyolojik uyum) bu olaylar tayin eder. Vücuttaki kalıcı implantların başarısı vücut sıvısı içinde minimum düzeyde çözünmesine ve vücutta istenmeyen reaksiyonlar meydana getirmemesine bağlıdır.

Metaller, kas-iskelet sisteminin biyomekanik koşullarına en iyi uyum gösteren malzemelerdendir. Metaller, belirli sınırlarda ağır, uzun süreli, değişken ve ani yüklenmelere karşı özelliklerini kaybetmeden dayanabilmeleri nedeni ile tercih edilmektedirler.

En yaygın olarak kullanılan saf ya da alaşım halindeki biyometaller; Co, Ti, V, Al, Cr, W, Mo, Ni'nin farklı kombinasyonundaki alaşımları ile saf titanyum ve paslanmaz çelik çeşitleridir. Metallerin saf halde kullanımının uygunluğu çok nadirdir. Bir metalin tek başına sağlayamadığı bazı özellikler, diğerlerinin katkısıyla oluşturulabileceğinden, metallerin alaşım olarak kullanımı tercih edilir. Buna rağmen, istenilen özelliklerin tümü tam olarak alaşımlarda bulunmayabilir. Ticari metalik malzemelerin pek çoğu alaşım halindedir. Günümüzde başlıca üç metal grubu ve bunların değişik türevleri, ortopedi ameliyatlarında fabrikasyon protez malzemesi olarak kullanılmaktadır. Bunlar paslanmaz çelikler, kobalt-krom esaslı alaşımlar ve titanyum esaslı alaşımlardır. En yaygın olarak kullanılan saf ya da alaşım halindeki protezler ise; Co-Cr-Mo, Co-Ni-Cr-Mo-Ti, Co-Cr-W-Ni, Ti-Al-V alaşımları ile saf titanyum ve paslanmaz çelik çeşitleridir (Langer, 1990).

Tıp alanında oldukça geniş bir kullanım alanı bulan metaller şekillendirilmeleri ve üretilmelerindeki güçlüğe rağmen sert dokuları ve yüksek dayanımları nedeniyle kemik yerine kullanımları uygun bulunmuştur. Metallerden kırık kemik parçalarının birleştirilmesinde; plaka yada vida olarak, parçalı veya tek parça halinde kalça kemiği veya diz kapağı protezleri olarak, dişçilikte ise protez ve dolgu malzemesi olarak yararlanılır.

Biyouyumluluğu olan Co esaslı metalik alaşımların temelde iki tipi vardır. Bunlardan birincisi olan Co-Cr-Mo alaşımı dökümle şekillendirilir, ikincisi ise Co-Cr-Ni-Mo alaşımı olup sıcak haddelenmeyle işlenir.

Dökülebilir Co-Cr-Mo alaşımı dişçilik alanında uzun süreden beri kullanılmaktadır. Son zamanlarda bu alaşımın suni eklem yapımında kullanıldığı da görülmektedir. Co-Cr-Ni-Mo alaşımı ise, yükün fazla olduğu bacak ve kol eklemlerinde kullanılmaktadır (Park ve Lakes, 1992).

Bu çalışmada farklı kimyasal kompozisyona sahip Co esaslı Cr-Mo toz karışımına farklı oranlarda krom ilave edip, krom katkısının bazı mekanik ve abrasiv aşınma özelliklerine etkileri incelenmiştir. Çalışmada üretilen tozlar, ASTM F75 standartlarına uygun olarak hazırlanmıştır. Bu konuyla ilgili yapılan araştırmada, implant üretim yöntemleri içerisinde toz metalurjisi tekniklerinin, implantların mikroyapılarını ve mekanik özelliklerini iyileştirerek, dökümle üretilen implantlarda görülen muhtemel döküm kusurlarını da ortadan kaldırdığı sonucuna varılmıştır. Bu bulgu literatür sonuçlarıyla büyük bir uyum göstermiştir (Anonymous, 2000).

2. TOZ METALURJİSİ

2.1. Tanım

Toz metalurjisi; kütsel gereçler ve şekilli objeler elde etmek için metal tozları üretme ve üretilen tozları kullanma sanatıdır (MPIF, 1995). Malzeme imalat yöntemlerinden biri olan toz metalurjisi; ileri teknoloji malzemelerinin üretilmesinde oldukça uygun ve çok sayıda küçük parçaların ekonomik üretimini sağlayan önemli bir teknolojidir. “Son şekle yakın” (near-net shape) parça üretim teknolojisi olan (T/M), diğer imalat yöntemlerinden oldukça farklı üretim aşamalarına sahiptir. Son şekle yakın ürünler elde etmede kullanılan süreçler; sinterleme, sıcak presleme, sıcak izostatik presleme, toz metal enjeksiyonu, nano parçacık teknikleri ve mekanik alaşımlamadır. Kısaca bu metot çok karmaşık şekilli ürünlerin elde edilmesinde uygulanan ileri bir teknolojidir (Kılınç ve Uslan, 2003).

Toz metalurjisi, bir imalat yöntemi olmanın ötesinde aynı zamanda önemli bir malzeme ve yan mamul üretim yöntemidir. Periyodik cetvelde metal olarak sayabileceğimiz 86 kadar elementten yaklaşık 8.000 kadar alaşım üretilebilmektedir. Halbuki bu 86 elementten ikili, üçlü, dörtlü ve çoklu kombinasyonlar ile kurumsal olarak $7,7 \times 10^{25}$ tür malzeme üretmek mümkündür. Bu da düşünce sınırlarını aşan çok büyük bir imkandır. Bu imkan toz metalurjisi yönteminde mekanik alaşımlama ile uygulanabilir hale gelmiştir (Yılmaz, 1999).

Toz metalurjisi (T/M) yöntemiyle yüksek kaliteli ve karmaşık parçaları ekonomik olarak üretmek, bu üretim tekniğini cazip kılmaktadır. T/M farklı boyut, şekil ve paketlenme özelliğine sahip metal tozlarını sağlam, hassas ve yüksek performanslı parçalara dönüştürür. Bu işlem temel olarak; tozların şekillendirilmesi (preslenmesi) ve daha sonra sinterleme yoluyla, ısı yoldan bağlanması basamaklarını içerir. T/M yöntemi ile üretim; malzeme kaybını en aza indirmesi, iyi bir boyut toleransı sağlaması, geniş alaşım sistemlerine izin vermesi, kendinden yağlama amacıyla kontrollü gözenek imkanı ve diğer imalat yöntemleriyle üretilmesi zor olan karışık şekilli parçaların üretebilmesi gibi bir çok avantaja sahiptir. Bu avantajları ile verimlilik, ekonomiklik, az enerji kullanımı, hammadde tasarruf ve çevreye daha az zarar verme bakımından ortaya çıkan olumsuz etkenleri her geçen gün ortadan kaldırır. Bunların sonucu olarak T/M teknolojisi sürekli gelişmekte ve bir çok alanda diğer geleneksel metal şekillendirme yöntemlerinin yerini almaktadır. Başta otomotiv endüstrisi olmak üzere elektronik, tıbbi cihaz ve çeşitli makine parçalarının imalatında T/M teknolojinin kullanımı giderek genişlemektedir.

2.2. Toz Metalurjisinin Tarihçesi

İnsanoğlu akıl ve bilim sayesinde evrendeki mevcut imkanları kendi yararına kullanmasını bilmiştir. Bilim ve teknoloji, insanın ihtiyaçlarını sağlama, kendisine daha iyi

yaşam şartları oluşturma ve merak duygusunu giderme çabalarının bir sonucu olarak, sürekli ve ivmesi artan bir şekilde gelişmektedir.

Doğada bulunan çeşitli malzemeler, uygulanan bir dizi işlemten sonra kullanılabilir hale gelmektedir. Böylece, seçilen özelliklerdeki malzemelerden, göreceği işleme uygun çeşitli makine parçaları, alet, eşya ve donanımlar elde edilmektedir (Yılmaz, 1999). Malzemelerin ürün haline gelmesinde çok çeşitli imalat yöntemleri geliştirilmiş ve kullanılmıştır. Bu imalat yöntemlerinden biri de T/M'dir.

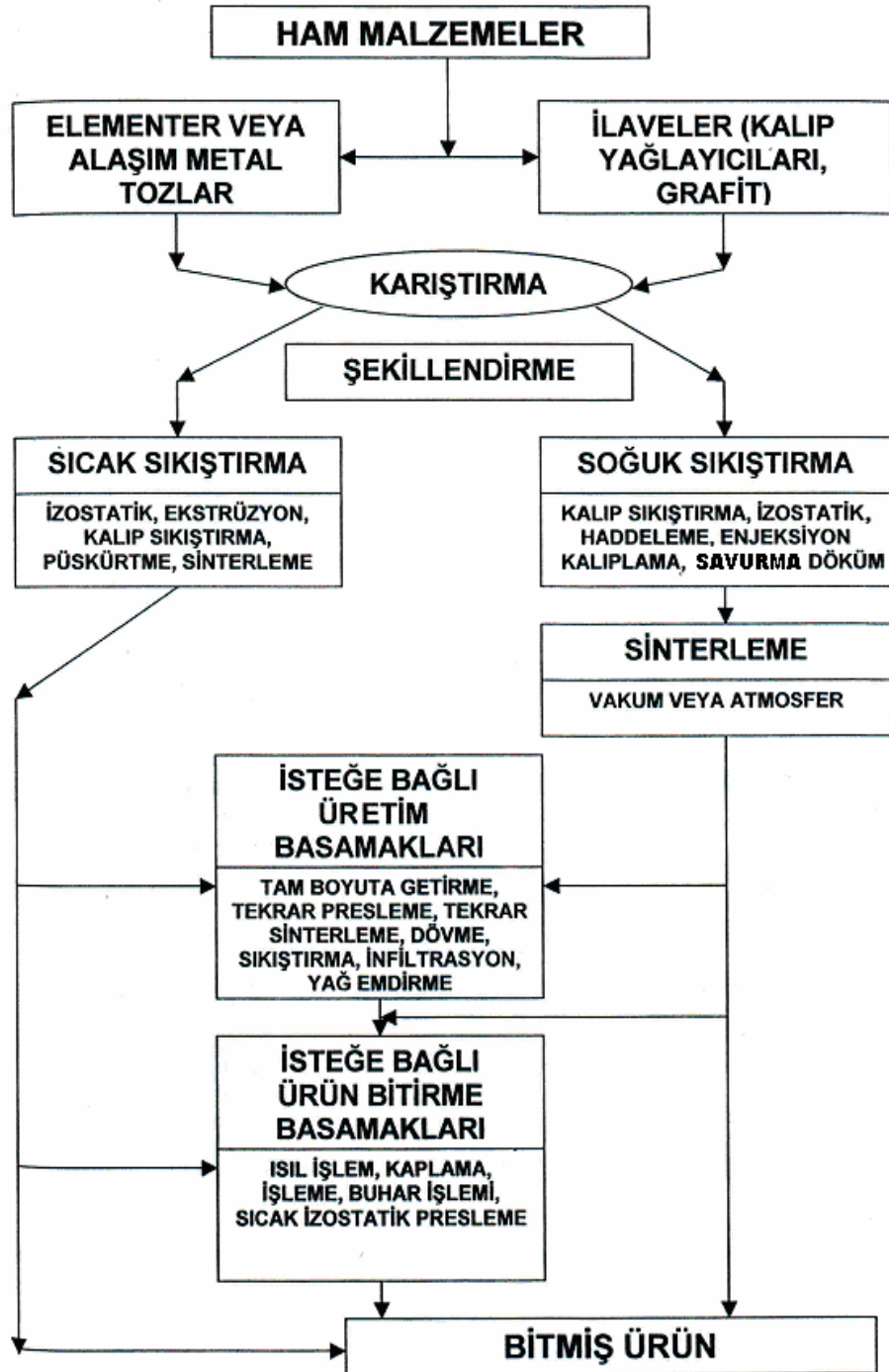
Toz metalurjisi bilinen en eski metal şekillendirme yöntemidir. Kil ve diğer seramik malzemelerin aksine ergitme yoluyla ve ateşle şekillendirilen sanatsal ya da dekoratif amaçlı parçalar tarihin ilk dönemlerinden beri sıklıkla uygulanmıştır. İlk insanlar doğada saf haliyle bulunduğu metalleri ergitemediğinden onları çekiçe döverek birleştirmeyi gerçekleştirmişlerdir. 1800'li yıllara gelene kadar T/M yöntemi endüstriyel olarak değer kazanmış ve o yıllarda, örneğin altın tozları bir sanat dalı olarak, mücevher yapımında kullanılmıştır. Bu tozların nasıl üretildiği tam olarak bilinmemektedir fakat, tozların bazılarının metallerin ergitilerek taneleştirildiği olasılığı üzerinde durulmaktadır. Düşük ergime noktası ve oksitlenmeye karşı dayanımı bu tozlardan yapılan üretim de aranan ve istenen özelliklerdir. Bu koşulları en iyi altın tozları sağlar. Pigment olarak ve dekoratif amaçlar için bu tozların kullanılması doğru bir toz metalurjisi tekniği değildir. Çünkü modern sanatta asıl amaç tozun üretilmesi, üretilen tozun preslenerek katı durumda ısıtılması ve kullanılan metal tozlarının ergime sıcaklığının altındaki bir sıcaklıkta birleştirilmesidir.

İnsan oğlu metallerin ergime noktalarına kadar çıkan fırınlar geliştirmeden önce, toz metalurjisi yöntemini kullanmıştır. Yaklaşık M.Ö. 3000 yılında Mısırlılar el aletleri yapımında günümüz "sünger demiri" ne benzer tozlar ve parçacıklar kullanmışlardır. T/M'sinin 1800'lü yılların başında Amerika'da flaman şekilli parçaların üretiminde kullanılması ile endüstriyel olarak uygulamaya girmiş ve 1826 yılında Rusya'da tedavüle çıkarılan bir platin paranın T/M ile üretilmesiyle, ilk kez geniş çaplı endüstriyel uygulama alanı bulmuştur (Sarıtış, 1994).

Ergitme yöntemlerinin geliştirilmesiyle bakır, gümüş ve demir gibi metallerin şekillendirilmesinde T/M yöntemi önemini kaybetmiştir. Ancak, platin gibi çok yüksek sıcaklıklarda ergiyen metallerden üretim yapmanın ve bu metalleri işlemenin en önemli yollarından biri T/M yöntemidir. İspanyolların Güney Amerika'yı keşfinden çok önce İnka'ların platin işlemeyi bildikleri anlaşılmıştır. Wollaston, 1829 yılında platini endüstriyel olarak üretmeyi başarmıştır. Geotzel'e göre bu başarı T/M teknolojisinin başlangıcıdır. 19. yüzyılın ortalarında tungsten, molibden ve osmiyum tozlarından elektrik lambası filamanı üretilmiştir. İlk kendi kendini yağlayan yatağın üretimi 1870'li yıllarda gerçekleştirilmiştir. Krupp firması

1914 yılında bu yolla sert metal üretimini denemiş ve 1927 yılında ürettiği ürünler piyasaya sürmüştür.

T/M yönteminde modern gelişmeler I. Dünya Savaşı yıllarında başlamıştır. Gözenekli gereçler, mıknatıslar ve yağ emdirilmiş demir tozu parçalar ilk kez bu yıllarda üretilmiştir (Sarıtış, 1994).



Şekil 2.1.Toz metal parçaların üretim aşamaları (Kurt, 2004)

2.3. Toz Metalurjisi Yönteminin Temel Basamakları

T/M uygulamalarında genel işlemler şematik olarak Şekil 2.1'deki akış şemasında gösterilmiştir. Parçayı oluşturan tozlar ve yağlayıcılar homojen bir karışım elde edilinceye kadar karıştırılırlar. Elde edilen karışım daha sonra kalıbın içerisine doldurulur ve basınç altında sıkıştırılır. Son işlem olarak parçalar sinterlenir. Küresel ve iri bronz tozlarından imal edilen filtre elemanlarının, basınç kullanılmadan üretimi, istisnai bir durumdur. Bu işlemde tozlar uygun şekilli kalıp içerisine doldurulur ve kalıpla birlikte sinterlenir. Tozları sıkıştırmanın tek eksenli presleme, haddeleme, ekstrüzyon, enjeksiyon kalıplama, izostatik presleme gibi bir çok metotlar vardır. Bu metotların seçimi parça geometrisine ve üretim miktarına bağlıdır (Kurgaz, 2005).

2.3.1. Toz Metalurjisinde kullanılan tozların üretimi

Ürünler T/M ile imal edilirken değişik metotlarla hazırlanmış tozlar kullanılır. Metal tozlarının üretiminde kullanılan teknikler, tozların birçok özelliklerini tayin edeceğinden, genellikle tozlardan söz edilirken, karakter ve özelliklerine ait deneysel bilgi vermek yerine, üretim tekniklerine değinilir. Toz özellikleri direkt olarak; tozların preslenme davranışlarını, sinterleme davranışlarını ve son ürün özelliklerini etkiler. Bu nedenle, uygun tipte toz ve sinter parçalar üretmek için kullanılan değişik üretim teknikleri hakkında bilgi sahibi olmak, çok önem teşkil etmektedir (Yılmaz, 1999).

Temel olarak dört değişik toz üretim tekniği vardır. Bunlar;

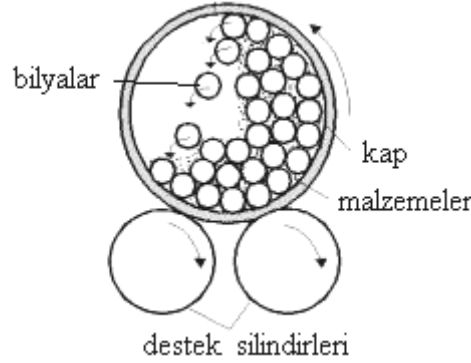
- Mekaniksel metot,
- Atomizasyon metotları,
- Elektrokimyasal metot,
- Kimyasal metot.

2.3.1.1. Mekaniksel Metot

Bu yöntemle metal tozlarının üretilmesi, bir darbeli öğütücü içerisinde metal tel ve tanelerinin kırılması esasına dayanır. Elde edilen metal tozların şekli pul puldur ve bunların kullanılmadan önce tavlanarak gerginliğinin giderilmesi gerekir.

Öğütme, parçalanacak ana malzeme ile sert bir cisim arasında bir darbe meydana getirilmesiyle yapılan bir işlemdir. Yöntem, hem bir metal tozu üretim tekniğidir ve hem de diğer tekniklerle üretilmiş ancak, kümeleşmiş olan tozların kırılma işlemidir. Öğütme, Şekil 2.2'de verildiği gibi en çok bilyeli değirmenlerde yapılmaktadır. Öğütülecek metal, içinde büyük çaplı ve aşınmaya dirençli bilyelerin bulunduğu kaba önceden iri taneli olarak yerleştirilir. Kap dönerek veya titreştirilerek bilyeleri harekete geçirir. Bilyelerin çarpışması sırasında tozlara ne olacağı parçacığın şekline bağlıdır (Saritaş,1994). Şekil 2.3'de görüldüğü

gibi parçacık gevrek ise çarpışma neticesinde çok küçük tozlara bölünür. Ancak, iri taneli sünek taneler çarpışma sonucunda parçacık şeklini değiştirerek yassılaştır. Küçük taneli sünek malzemeler ise, öğütücü cidarına ve bilyelere yapışır.



Şekil 2.2. Mekanik metotla öğütme (Salak, 1995)



Şekil 2.3. Çarpışmanın etkisi: a) gevrek parçacık, b) sünek parçacık (Medding, 1998)

Mekanik metotla öğütülerek elde edilen tozun özeliğini kabın dönme hızı önemli ölçüde etkiler. Dönme hızının fazla olması, malzeme ve bilyeler arasındaki relatif hareketlerin azalmasına neden olur. Hızın çok yavaş olması ise, kabın alt kısmında hareketin yavaş olmasına neden olur. İdeal dönme hızı; bilyelerin ve malzemenin kabın en üst kısmına kadar yükselerek, geriye kalan malzemenin üzerine düşmesini sağlar. Bu tekniğin dezavantajlarından biri elde edilen tozun bilyelerden ve öğütücünün çeperlerinden kirlenmesidir. Öğütücülerin titreştirilmesi de mümkündür. Titreşimli öğütücüler döner tiplere nazaran çok daha kısa zamanda, eşdeğerde bir öğütme sağladıklarından daha verimlidirler.

Saf malzemelerin tozları pervaneli öğütücülerde taneler birbirleriyle karşılıklı olarak çarpıştırılarak elde edilir. Bu öğütücüler, esas olarak çok süratli dönen iki veya daha fazla pervaneden ve parçacıkların istenilen miktarını toplamak için kapalı bir gaz akım devresinden meydana gelir.

Öğütme süresince, sıcaklık artmasından dolayı, aşırı derecede oksitlenme meydana gelebilir. Oksitlenmeyi önlemek için öğütücüye konulan sıvılar ve asal atmosferler kullanılır. Bu hem öğütme süresini kısaltır hem de ince toz elde edilmesini sağlar (Saritaş, 1994).

2.3.1.2. Atomizasyon

Bu işlemde ergiyik şeklindeki metal, birbirleri ile veya katı yüzeylerle temas etmeden çok küçük damlacıklara parçalanır ve soğutulurlar (Kurt, 2004). Temel prensip, ergiyik haldeki metalin çok ince şerit halinde akıtılması ve bu esnada bir su veya gaz jeti ile çok küçük parçacıklara ayrılarak soğutulması esasına dayanır. Burada ayırıcı olarak hava, azot (N_2) ve argon gazı kullanılırken, su veya gazyağı- parafinde sıklıkla tercih edilen sıvılardır. Atomizasyon, metal tozu üretiminde kullanılan en yaygın toz üretim yöntemidir. Bu üretim tekniği üç ana bölüme ayrılır.

1. Ergitme,
2. Atomizasyon (eriyik metal damlalarını daha küçük boyutlarda parçalamak),
3. Katılaşma ve soğuma.

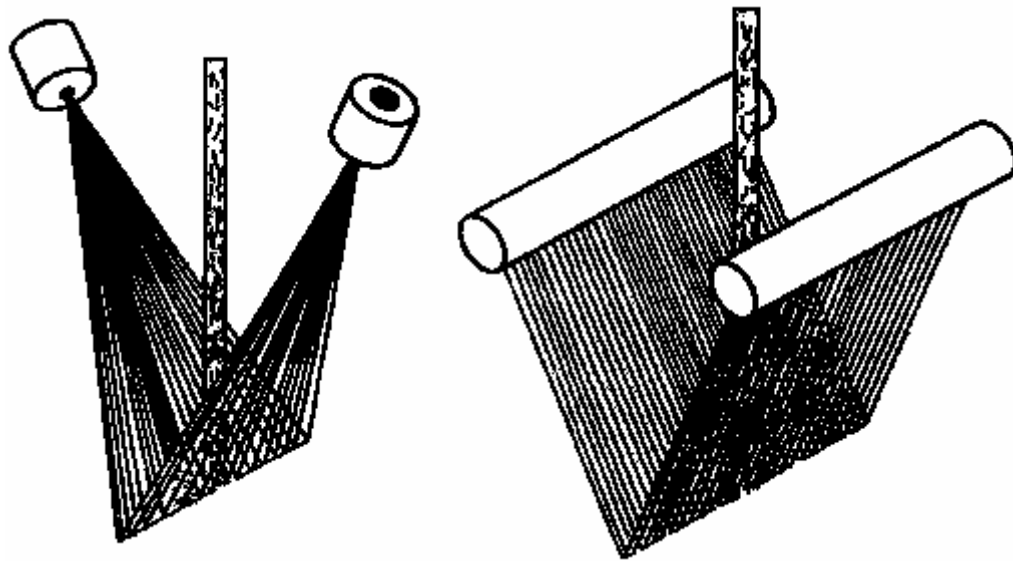
Bu işlemlerden sonra çoğu zaman yüzey oksitlerinin azaltılması, gazlardan uzaklaştırma ve toz boyutu dağılımı gibi ürünün istenen niteliklere getirilmesi için ek işlemler yapılmaktadır. Enerjinin sıvı metali parçalama yöntemi atomizasyonda ana sınıflama kriterini teşkil etmektedir. Bunlar; kılcal kuvvetler (ergiyik damla olayı), mekaniksel darbe (darbe ile parçalama yöntemi), elektro statik kuvvetler (elektrodinamik atomizasyon), sıvı, gaz akışı veya jeti (sıvı veya gaz atomizasyonu), santrifüj kuvvetler (santrifüj atomizasyonu), ergiyiğin aşırı gaz doygunluğu (vakum atomizasyonu) yöntemleri veya ultrasonik (ultrasonik atomizasyon) yöntemidir. Bu sistemlerde ergiyik banyo için bir potaya ihtiyaç duyulup duyulmadığı çok önemlidir. Potalar, atomizasyonlu sistemlerde yapı kirlenmelerinin ana kaynaklarından biridir. İkinci önemli kriter ise ısı kaynağıdır. Metalurjik uygulamalarda bilinen tüm ergitme teknikleri; örneğin, indüksiyon, ark, plazma ve elektron ışıını ısıtması yöntemi uygulanabilir. Arkla ısıtma olduğu gibi bunlardan bazıları da yeni kirlenmelere yol açabilir. Soğuma hızı, katılaşma ve soğuma aşamalarında en önemli faktördür. Bu, sıvı damlacığın veya katı toz partikülün boyutları ve ayrıca partikül ile onu çevreleyen atmosfer arasındaki ısı transferinin şekli ile yakından ilgilidir. Çekirdeklenmeye müteakip alt soğuma ve soğuma hızı ile damlaların temas etmeden katılaşmasına izin veren atomizasyon ünitesinin tasarımı ve boyutları partikül mikro yapısını belirleyen faktörlerdir. Jet tasarımı ve konfigürasyonu, atomize tozun basıncı ve hacmi, akan sıvının kalınlığı ve diğer bazı parametreler değiştirilmek suretiyle partikül boyut dağılımını istenilen oranlarda değiştirmek mümkün olabilmektedir. Katılaşma hızı ağırlıklı olarak partikül şekline etki etmektedir. Prensipde ısıtılabilen tüm metallere uygulanabilmekle beraber daha çok ve yaygın olarak demir ve bakır ve ayrıca takım çelikleri, alaşımlı çelikler, pirinç, bronz ve düşük ısıtma sıcaklığına sahip alüminyum, kalay, kurşun ve kadmiyum gibi hafif metallere de uygulanmaktadır. Kolayca oksitlenebilen krom burç ve yatak alaşımları koruyucu pasif gaz

özellikle argon ortamında atomize edilmektedir. İçeriği oluşturan tüm bileşiklerin ergiyik halde bulunması nedeniyle atomizasyon yöntemi, özellikle alaşımlı tozların üretiminde çok kullanışlıdır. Bu yolla tüm toz partikülleri aynı kimyasal bileşime sahiptir. Ayrıca bu yöntemle bakır-kurşun bileşimli tozlar da oluşturulabilir. Burada kurşunun sıvı halde bakır içerisinde çözüldüğü ve katılaşma sonucunda katı eriyik oluşturduğu kabul edilmiştir. Şayet döküm yöntemi ile bakır-kurşun alaşımı oluşturulmak istenseydi kurşun problemleri bir şekilde ayrışacak ve homojen olmayan bir faz oluşumuna neden olacaktı. Halbuki atomizasyonla elde edilen bakır toz tanecikleri içerisinde kurşun çok ince ve homojen olarak dağılma göstermektedir.

Atomize tozun en önemli özelliği; ortalama toz boyut dağılımı, toz şekli, kimyasal bileşimi ve mikroyapının uygunluğudur. Bu temel toz özellikleri; tozun görünen yoğunluk, akabilirlik, sinterlenebilirlik gibi teknolojik özelliklerini etkiler (Avner, 1994).

2.3.1.2.1. Su Atomizasyonu

Endüstriyel manada düşük kuruluş ve işletme giderleri nedeniyle, atomizasyonla toz üretim yönteminde su jeti sıvı atomizasyonu üretim miktarı açısından kullanılan en yaygın toz üretim yöntemidir. Su atomizasyonunda kimyasal çökeltme problemi yoktur. Ancak toz yüzeyinde oluşan oksitlenme bu metodun problemi olarak görülebilir. Şekil 2.4’de su atomizasyonda yaygın şekilde kullanılan iki jet sistemi kullanılmaktadır. Bu iki sisteme yassı huzmeli V jetleri denir (Beddow, 1979).



Şekil 2.4. Yassı huzmeli V jetleri (Huo, 1998)

Pota çıkış ağzını terkeden ergiyik metal düşey yönde akıtılırken, yüksek basınçlı ve özel tasarımlı su jetleri ile parçalanır. Suyun basıncı genellikle 6-21 MPa arasındadır. Bu değerler saniyede 70-250 m³’lük bir hız sağlar. 10-100 kg/dk metal akışı için 0.1-0.4 m³/dk’lık sıvı akışı

tüketimi söz konusudur. Genel olarak verimlilik mekaniksel yöntemlerle öğütmeye oranla yüksek olmakla birlikte % 1'e eşit veya onun altındadır. Uygulamalı çalışmalar sonucu elde edilen ampirik ilişkiler bu yöntemle elde edilen toz malzemelerin ortalama tane boyutu ve dağılımına; suyun basıncı ve hızı, metal ergiyik akış açısı, ergiyik viskozitesi, ergiyik yoğunluğu, ergiyik yüzey gerilimi ve sıvı metal akış hızının soğutma suyu akış hızına oranı gibi parametreler etki etmektedir. Örneğin ince metal akışı, yüksek yoğunluk, sıvı metalin düşük viskozite ve yüzey gerilim değerleri ince toz üretimini arttırmaktadır. Su atomizasyon yöntemi ile elde edilen tozların genelde ortalama tane boyutu 30-1000 µm arasında olmaktadır. Yöntem parametrelerinin değiştirilmesi suretiyle toz şekli farklılık gösterebilir. Tipik toz şekli düzensizdir. Tozların sıkıştırılma sonrası ham dayanımları yüksektir ve yapısal parçaların imalinde kullanılır. Atomize edilen metal ve kullanılan suyun reaksiyonu ise sistemin dezavantajlarından biridir. Bu nedenle yöntem, oksijenin sorun olmadığı veya küçük miktarlarda oksijenin önemsenmediği ya da sistemden atomizasyon sonrası işlemlerle kolayca uzaklaştırılabildiği metal ve alaşımlarda kullanılabilir. Örneğin demir ve düşük alaşımlı çelik tozları sulu atomizasyon sonrası hidrojen içeren atmosfer ortamlarında redüklenir. Bazı özel durumlarda yüksek hız takım çelikleri de su atomizasyonu ile elde edilebilir. Böyle durumlarda karbon miktarının ayarlanması, ergiyik ve tozların vakum redüksiyonunun yapılması gibi bazı ayarlamalara dikkat edilmesi gerekmektedir. Sıvı atomizasyonu ile üretilen tozların sıkıştırılabilirliği çok yüksek olmaktadır. Oksijen problemine karşı son zamanlarda sentetik yağlar suyun yerini almıştır. Ancak bu durumda da üretilen tozların bileşimine yağdan kaynaklanan karbon girişi olmaktadır. Bu nedenle fazla karbonun üretim sonrası sistemden uzaklaştırılması ek maliyet getirmektedir. Yağlı atomizasyon daha çok düşük alaşımlı Mn-Cr çelik tozlarının üretiminde önem taşımaktadır.

2.3.1.2.2. Gaz Atomizasyonu

Gaz atomizasyonu en çok tercih edilen atomizasyonla toz üretim sistemleri arasında ikinci sıradadır. Hava, azot (N₂), argon ve helyum arzu edilen özellikler göz önünde bulundurularak metal ergiyik sıvısının parçalanması ve soğutulması için kullanılırlar. Atomizasyon düşey ve yatay pozisyonunda uygulanabilir. Ortalama toz boyutu ve partikül şekli su atomizasyonuna benzer şekilde değişik işlem parametrelerine bağlıdır. Gaz atomizasyonunun verimliliği su atomizasyonu ile aynı düzeyde olmakla birlikte işletim ve ürün maliyeti daha fazladır. Atomizasyon tankı içerisindeki gaz, sisteme bağlı bir siklon aracılığıyla toplanır. Beraberinde çok ince tozları da taşıyan gaz siklon içerisinde tozlardan arındırılarak tekrardan kullanılır. Gaz suya oranla daha düşük soğutma hızı sağladığından atomizasyon tankı daha büyük boyutlarda imal edilmek durumundadır. Şekil 2.5'de gaz atomizasyon yöntemi şematik

olarak gösterilmektedir. Ergimiş metal tandış adı verilen bölgeye dökülür. Tandış, sıvı metali kısa süreli dinlendiren bir haznedir. Ergiyiğin uniform ve kontrollü olarak lüle içine akmasını sağlar. Tandışın hemen altında yer alan lüle, metal akımının şekil ve boyutunu kontrol eder. Lüle tasarımları Şekil 2.6'da görüldüğü gibi iki temel şekilde bulunur (Lee, diğ, 1998)

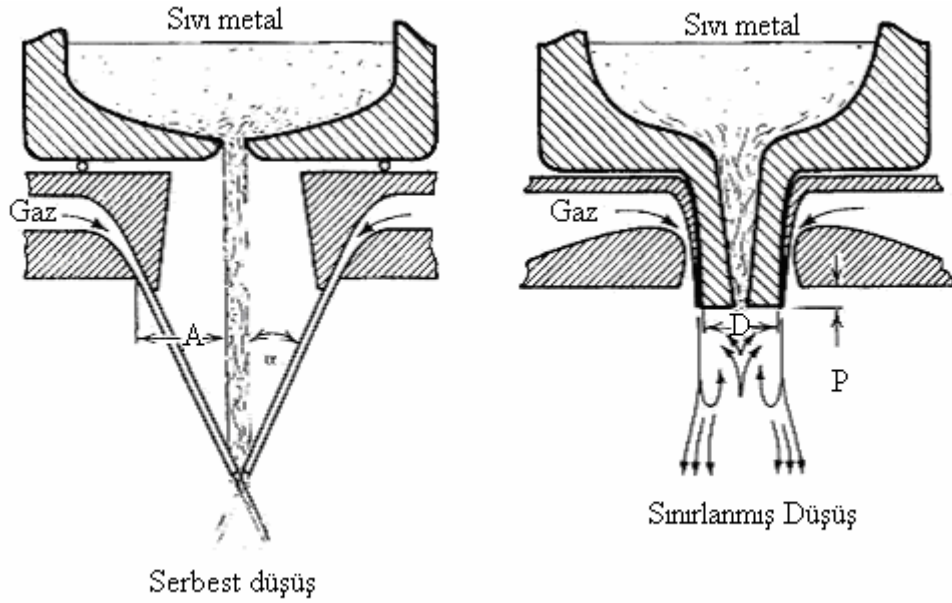


Şekil 2.5. Gaz atomizasyonu ile üretim şeması (Lee, diğ, 1998)

Gaz sıvı metal arası enerji transferinin çok etkili olmasından dolayı yaygın olarak gaz atomizasyonunda uygulama alanı bulan "sınırlanmış" lülelerde orifis içerisinden yerçekimi etkisi ile akan sıvı metal hüzmesi, çevresel atomizasyon ortamı ile hemen orifis ağzında atomize edilmektedir. Serbest akma düzeneklerinde ise lüle, tandışın altında metali serbestçe aktığı bir delik halinde bulunan orifis ve metal hüzmesine yüksek basınçlı atomizasyon ortamı fışkırtan iki ya da çoklu üfleçlerden oluşur. Böylece bir düzenekte, sıvı metali orifis ağzından atomizasyon ortamı ile çarpışana kadar kat ettiği 5-20 cm'lik serbest düşüş miktarı göz önünde tutulduğunda, üfleçler ile sıvı metal ara mesafesi büyük olduğundan yüksek katılma hızlarına neden olan sıvı ortamları, yani su kullanılır (Ünver, 1992).

Lüle içinde sıvı metali aktığı meme olan orifisin yapısı da toz özellikleri için belirleyici olabilmektedir. Orifis geometrisi, silindirik ve yüksek sıcaklıkta aşınmaya dayanıklı refrakter malzemelerden yapılır. Küçük çaplı orifisler metal akış miktarının düşük

olmasına neden olacağından ince toz parçacıklarının üretilmesine yol açacaktır. Bu durum düşük üretim hızlarının seçiminin temel nedenidir.



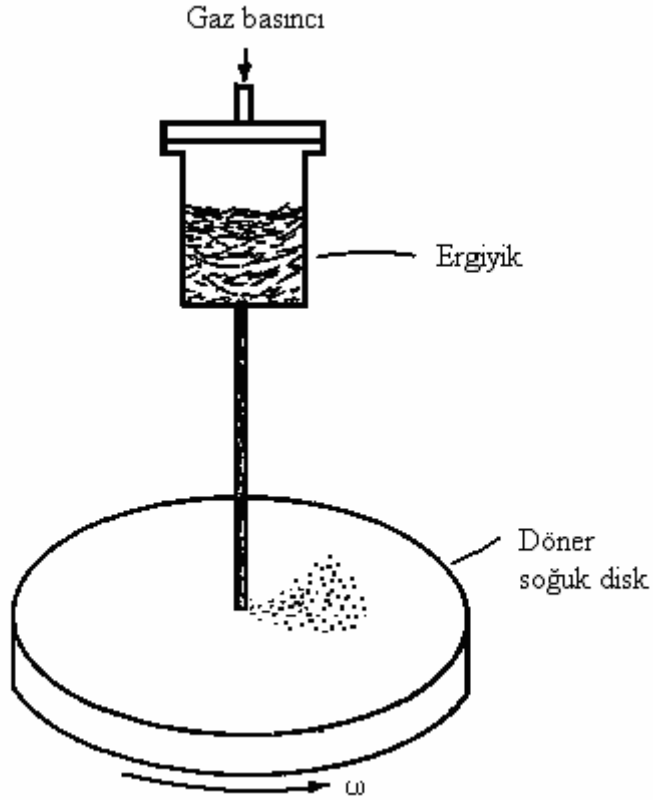
Şekil 2.6. Çift sıvı atomizasyon tasarımları: α , serbest düşen ergimiş metal ile gazın açısı; A: ergimiş metal ile gaz lülesi arasındaki mesafe, D: Sınırlandırılarak düşen ergimiş metal çapı (Lee, diğ, 1998)

Lüleden akan yüksek hızlı ergiyik metal kütlesi, atomizasyon ortamı ile karşılaşınca ısı enerjisini vererek soğurken kinetik enerjisini vererek de damlacıklara parçalanır ve atomizasyon tankı dibinde toplanır. Gaz atomizasyonunda toz, kuru toz olarak toplanabileceği gibi, tank dibinde toz parçacıklarının birbirlerine, atomizasyon tankına ve toplayıcı çeperlerine yapışmasını önlemek için su içinde de toplanır. Sürekli çalışan ya da büyük çaplı üretim yapan sistemlerde atomizasyon tankının alt kısmı dıştan soğutmalı olabilir.

Gaz ve su ile atomizasyonun toz şekline ve tozun mikroyapısına olan etkileri farklıdır. Gaz atomizasyonunda en çok azot gazı kullanılır. Su ile sıvı metal arasındaki ısı geçişinin gazlar ile sıvı metal arasındaki ısı geçişinden daha şiddetli oluşu nedeniyle su, atomizasyonunda su, sıvı metali daha hızlı katılaştırabilmektedir. Su basıncı artırılırsa, ortamın soğutma gücü de artacak ve tozun katılaşma zamanı kısalmaktadır. Gaz ya da su atomize tozların mikroyapısı, amorf tanecikler ya da dendritik tanelere kadar değişmektedir. Mikroyapı karakteristiğini belirleyen ana etken soğuma hızıdır. Artan soğuma hızı ile kristalin bölgede, katılaşan metal tozlarında dendritik kollar arasındaki mesafe kısalmaktadır. Gaz atomizasyonu ile üretilen tozların tipik mikroyapıları dendritiktir.

2.3.1.2.3. Döner Disk Atomizasyonu

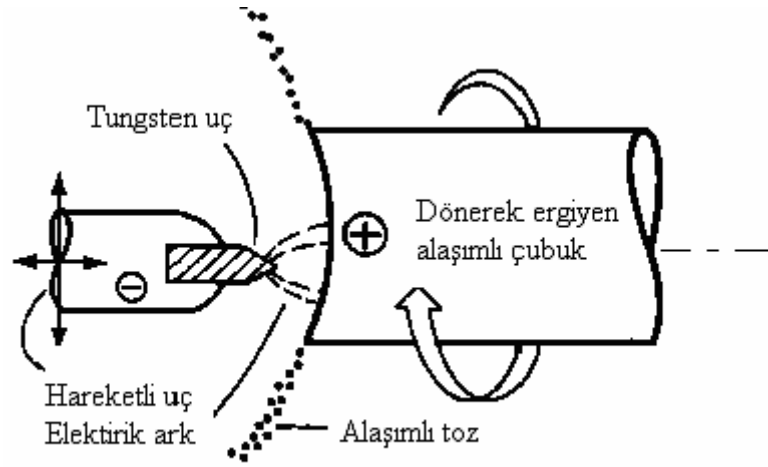
Bu yöntemde sıvı metal, bir potadan, dönmekte olan bir disk üzerine akar. Diskin dönme hareketinden dolayı metal, hüzmeye merkez kaç kuvveti etkisi ile, saçılacak bir potaya toplanır. Döner disk atomizasyonunda düz disk, çanak disk ve kanat disk gibi değişik diskler kullanılır. Bu metodun tek problemi sıvı metal ile disk arasındaki sürtünmenin kontrol güçlüğüdür. Şekil 2.7’de döner disk modeli görülmektedir (Lee, diğ., 1998).



Şekil 2.7. Döner disk atomizasyonu (Lee, diğ., 1998)

2.3.1.2.4. Döner Elektrot Atomizasyonu

Tozu üretilecek metal elektrot bir ark plazma ile ısıtılır. Isıtılan çubuğun çok hızlı döndürülmesi ile (1000 dev/dak veya daha fazla) ergimiş damlacıklar yine merkez kaç kuvvet etkisiyle savrulurlar. Bunlar özel bir odacıkta toplanır. Bu metotta tane iriliği 30- 500 mikron arasında olan tozlar elde edilir (Uygur, 1979). Şekil 2.8’de döner elektrot yöntemi ile toz üretimi görülmektedir.



Şekil 2.8. Döner elektron atomizasyonu

2.3.1.3. Elektrokimyasal Yöntemler

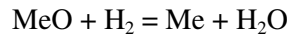
Bu yöntemlerde metal tozu üretimi sulu çözeltiden veya sıvı tuz banyosundan metallerin elektroliz yöntemi ile ayrıştırılmasıyla yapılmaktadır. Sulu çözeltilerin elektrolizi, özellikle Cu, Fe, Ni, Co, Zn, S ve Pb tozlarının üretilmesi için uygundur. Reaksiyon sulu çözeltiler için düşük sıcaklıklarda ($\sim 60^{\circ}\text{C}$) gerçekleşiyor olmakla birlikte ikili veya üçlü ötektik tuz banyoları için çok daha yüksek sıcaklıklarda yapılmaktadır. Bu yöntemle tozlar doğrudan veya elektrotta birikmiş gevrek kütle öğütülmek suretiyle dolaylı olarak elde edilebilir. Yöntemi etkileyen ana parametreler; ortamdaki metal iyonlarının konsantrasyonu, elektrotun iletkenliği, sıcaklık, gerilim değeri ve akım yoğunluğu, sıvı banyonun kinetiği ve tane büyümesini engellemeye yönelik olarak çekirdeklenme için parçacık ilavesi olarak sıralanabilir.

Sulu çözeltiden elektroliz yoluyla bakır tozu üretimi önemli bir üretim şeklidir. İşlem, yaklaşık 5 m³'lik kapasiteye sahip, içerisi plastik kaplı paslanmaz çelik kaplarda gerçekleştirilir. Elektrot 5-35 g/l Cu^{++} ve 120-250 g/l sülfürik asitli ortamda, 7500-10000 A akım şiddeti altında ve 50°C 'de işlem görür. Katot akım yoğunluğu ~ 4000 A olup anot akım yoğunluğu sadece bu değerin onda biri kadardır. Dolayısıyla toplam negatif elektrod yüzey alanı pozitif elektrodun onda biri kadardır. Anot ve katodun her ikisi de yüksek özgül kütleye sahip saf elektrolitik bakırdan imal edilmiştir. Tozlar elektrolitin hareket etmesi nedeniyle veya katodun toplanması suretiyle tank tabanında toplanır. Yeteri miktarda toz, tank tabanında biriktikten sonra elektrolit tanktan uzaklaştırılır ve tozlar asitten yıkanarak temizlenir. Son olarak tozlar hava içerisinde 100°C 'de kurutulur. Bu yöntemle yüksek saflıkta gözenekli tozlar değişik toz boyutlarında imal edilebilmektedir. Çok yaygın olmamakla birlikte bakırda olduğu gibi benzer şekilde demir tozları da FeSO_4 ve FeCl_2 çözeltilerinden üretilmektedir. Elektrolitik yöntemle üretilen tozların sıkıştırılabilirlikleri ve presleme sonrası dayanımları yüksek olmaktadır (Kurt, 2004).

2.3.1.4. Kimyasal Yöntemler

Toz metalurjisinde ana kimyasal işlemleri metal oksit, karbonatlar, nitratlar veya halojenli (VII Grup Element, F, Cl, Br, I) bileşiklerin bir gaz (genellikle H₂) veya katı (karbon veya yüksek oranda reaktif metal) yardımıyla indirgenmesi oluşturur. Çoğu kez indirgenecek bileşik katı haldedir. Bununla özellikle nikel ve kobalt çözeltilerinin basınçlı hidrojenle indirgenmesi amacıyla hidrometalurjik yöntemler de geliştirilmiştir. Reaksiyonun katı faz veya katı-gaz fazda gerçekleştirilmesi sonrası saflaştırma yapılamadığından reaksiyona yeterince saf hammadde girişi sağlanmalıdır. Kinetik nedenlerden dolayı indirgemesi yapılacak bileşim yeterince ince tanelerden (tozlardan) oluşmalıdır. Aksi halde reaksiyon süresince difüzyon sürecinin kontrolü istenmeyen şekilde uzar. İndirgeme süreci negatif olan reaksiyon serbest enerjisi tarafından kontrol edilir. Bileşiğin kararlılığı arttıkça daha güçlü indirgeme ortamı seçilmelidir

Hidrojen İndirgemesi Oksitlerin veya diğer bileşiklerin hidrojen ile indirgemesi metallerin ergime sıcaklığının çok altında gerçekleşebilmektedir. Teknik önem arz eden bazı örnekler orta derecede kararlı olan refrakter metaller, tungsten ve molibden ile ferro alaşımları ve bakırdır. Çok ince ve saf tozlar elde edilebilir. İşlem genellikle tüp fırınlarda gerçekleştirilmektedir. Bir konteyner içerisine yerleştirilen oksit tozları tüp içerisinden geçirilirken, aksi yönde hidrojen akışı sağlanır. Genel reaksiyon basit şekilde aşağıdaki gibidir.



Gerçekte işlem kullanılan oksit bileşiğin kararlı alt fazları ve Me-O çeşitlerine bağlı olarak birkaç reaksiyon aşamasında gerçekleşebilir. Elde edilecek tozun özellikleri ve buna bağlı olarak ürünün yeniden üretilebilirliği indirgeme koşullarına yakından ilişkilidir.

Genel bazı kurallar aşağıda verilmiştir.

-İndirgeme sıcaklığı ve süre arttıkça daha büyük toz boyutu, düşük birim yüzey alanı, düşük kalıntı oksijen ve (belkide) sinterlenmiş kek formasyonu elde edilir.

- Düşük indirgeme sıcaklığı ve süresi toz boyutunun küçük ve ince olmasına, birim yüzey alanının yüksek olmasına ve daha yüksek kalıntı oksijen içeriğine neden olur.

-Hidrojen akış hızının yüksek olması ve yoğunlaşma ısısı noktasının düşük olması yüksek indirgeme hızına, düşük kalıntı oksijen ve soğuma esnasında çok az yeniden oksitlenme durumuna neden olabilir.

- Hidrojenle yapılacak çalışmalarda gazın fırın tüpüne verilmesinde, hidrojenin saf ve muhtemel oksijen gazı kalıntılarından arındırılmış olması ve yine gazın iletimi esnasında sistemin gaz sızdırmazlığının tam olarak sağlanması gerekir (Yıldırım, 1974).

Hidrojenle indirgeme yöntemi kullanılarak üretilen diğer bazı metal tozları ise Cu, Co, Ni ve Re'dur. Renyum (Re) yüksek ergime sıcaklığına sahip bir metal olup yüksek dayanımlı Mo ve W alaşımlarında katkı elementi olarak kullanılır.

Hidrokimyasal İndirgeme: Bazı metaller doğrudan sıvı (veya organik) durumdayken, indirgeyici bir gaz (genellikle H_2) kullanılarak indirgenir ve toz olarak üretilirler. Bu işlem içerisinde Cu, Ni, Co, Fe ve S bulunan maden cevherlerinden daha çok nikel ve kobalt tozlarının üretimine yönelik olarak Kanada'da faaliyet gösteren Sheritt Gordon Mines Ltd şirketi tarafından geliştirilmiştir.

Hidrokimyasal indirgeme sonucu üretilen tozların saflık oranı % 99.8'e kadar çıkmaktadır. Ni tozları içerisinde Co, Co tozları içerisinde de bir miktar Ni bulunabilir. İşlem aşamalarına bağlı olarak kaba veya ince toz boyutu dağılımı elde edilebilir. Bu yöntemin özel kullanım alanlarından birisi kompozit tozların üretilmesine imkan tanınmasıdır. İkinci fazı oluşturacak metal tozlar sürekli hareketli olan çözelti içerisinde homojen olarak dağıtılır. Her bir tanecik çekirdeği oluşturur ve çökelti ile kaplanır. Örnek olarak oksit kaplı-Ni veya grafit ve Co-kaplı elmas verilebilir. Kompozit tozların kullanımı, ayrışmanın (segregasyon) önlenmesi, ikinci fazın ana yapı içerisinde homojen olarak dağılması (diğer bir deyişle partiküllerin bir biri ile temasının önlenmesi), ergiyiğin ıslatma kabiliyetinin artırılması ve benzeri nedenlerden dolayı tercih edilmektedir. Kompozit tozlar kimyasal buhar çöktürme (CVD), fiziksel buhar çöktürme (PVD) ve sol-jel işlemleri gibi diğer bazı yöntemlerle de üretilirler.

Karbon İndirgemesi: En önemli toz üretim yöntemlerinden birisi karbon kullanılarak magnetit (Fe_3O_4) filizinin indirgenmesidir. Bu işlem ile elde edilen süngerimsi Fe tozları büyük miktarlarda üretilen sinterlenmiş demir ve çelik parçalar için başlangıç malzemesini oluşturmaktadır. Kullanılan demir tozlarının yaklaşık % 50'si bu yöntemle üretilmektedir. Bu yöntemde maden < 0.5 mm'nin altında tane boyutuna öğütmek suretiyle getirilir.

Metalle İndirgeme: Metalle-termik indirgeme standart metalurjik yöntemlerden olup bazı refrakter ve yüksek reaktif metal (Ti, Zr, U, Th vb) tozlarının üretiminde kullanılır. Bu işlem için tercih edilen indirgeme metalleri ise Na, Ca ve Mg'dur. Metalurjik uygulamalarda teknik olarak metalle-termik indirgeme sürecinde en önemli işlem tantalın (Ta) aşağıda verilen ekzotermik reaksiyonla K_2TaF_7 'den Na kullanılarak redüklenmesi (indirgenmesi) suretiyle üretilmesidir. $K_2TaF_7 + 5Na = 2KF + 5NaF + Ta$ reaksiyonu argon atmosferinde veya vakum ortamında 800 - 900 °C sıcaklıkta sıvı ve gaz Na ortamında gerçekleşir. Bu yöntemle elde edilen Ta tozları 1-2 µm boyutlarında ve % 99.6 saflıktadır. Tozlar yüksek saflıkta, ince ve yüksek birim yüzey alanına sahiptirler ve elektronik endüstrisinde kondansatör yapımında kullanılırlar. Uygulamada kullanılan Ta tozlarının büyük bir çoğunluğu bu yöntemle elde edilir.

2.3.2. Kobalt Esaslı Tozların Üretimi

Kobalt tozları; toz metalürjisi endüstrisinde süperalaşımlar (yüksek sıcaklık ve sürünmeye dayanımlı alaşımlar), aşınmaya dayanıklı yüzey sertleştirme alaşımları, takım ve kalıp çeliklerinde alaşım elementi olarak kullanılmaktadır. Kobalt alaşımlarının dünyada üretiminin yaklaşık olarak % 60'ı Zaire ve Zambiya'da gerçekleştirilmektedir.

Kobalt; süperalaşımların yüksek sıcaklıklara dayanabilme özelliğini, sinter karbürlerinin ve yüksek hız takım çeliklerinin kesme kabiliyetini ve yüksek mukavemetli çeliklerin tokluğunu artırdığından; T/M endüstrisinde önemli bir malzemedir (Lee, diğ, 1998). Kobalt tozları üç yöntemle üretilmektedir. Bunlar; hidrometalurjik yöntemler, oksit indirgeme yöntemi ve atomizasyondur (Meddings, 1998).

Hidrometalurjik yöntem: Kobaltın bu yöntemle üretimi ana üretim yönteminin ilk basamağını oluşturmaktadır. Kobalt tozlarının bu yöntemle üretimi her yıl 2400 tonu bulmaktadır, bu da dünya kaynaklarının % 10'unu oluşturmaktadır. Hidrometalurjik yöntemlerde toz üretimi de kendi içersinde üç gruba ayrılmaktadır. Bunlar; kimyasal çözülme(liç), çözelti ayrıştırma ve metal indirgemeyle toz üretim teknikleridir. Çizelge 2.1'de hidrometalurjik yöntemlerle üretilen kobalt tozlarının kimyasal özellikleri, tane büyüklüğü ve yoğunluğu verilmiştir.

Çizelge 2.1. Hidrometalurjik yöntemlerle üretilen kobalt tozlarının tipik özellikleri (Meddings, 1998).

Kimyasal Bileşiği	%
Co	Co
Ni	Ni
Cu	Cu
Fe	Fe
S	S
C	C
Tane büyüklüğü (mesh)	
+100	0-15
-100 + 150	5-25
-150 + 200	5-15
-200 + 250	5-15
-250 + 325	20-45
-325	10-50
Fiziksel özelliği	
Görünür yoğunluk, g/cm ³	2.5-3.5

Oksit indirgeme (Kobalt oksitlerin ısıyla bozulması): Kobalt tozlarının temel uygulamalarından biri de sementik karbürlerin üretimidir. Bu tozların çoğu genellikle 800 °C nin altında düşük sıcaklıklarda hidrojen ile kobalt oksitlerin indirgenmesiyle üretilir.

Sementit karbürlerde kullanılan tozun büyüklüğü 325 mesh olmalıdır. Kobalt tozları tungsten karbürli parçacıklarla karıştırılarak küçük taneli tozlara dönüşür. Çizelge 2.2’de bu yöntemle üretilen tozların özellikleri verilmiştir.

Çizelge2.2. Gereksinim duyulan kobalt tozlarının tipik özellikleri (Meddings, 1998).

Kimyasal bileşimi	%
Kobal	99.60
Nikel	0.08
Femir	0.08
Silikon	0.035
Kalsiyum	0.020
Manganez	0.020
Karbo	0.015
Çinko	0.010
Sülfür	0.008
Bakır	0.001
Kurşun	0.003
Hidrojen kaybı	0.20
Fiziksel özellikleri	
Görünür yoğunluk, g/cm ³	1.8
Ham yoğunluk, g/cm ³	3
Elek analizi,	%
+100 mesh	0.01
-100+200 mesh	0.04
-200+300 mesh	0.15
-300+400 mesh	0.20
-400 mesh	99.60

Atomizasyon: Kobalt esaslı alaşımların atomizasyonla elde edilmiş tozları yüksek sıcaklık alaşımlarında her ne kadar geniş olarak yer bulmamışsa da, yüzey sertleştirme tozları olarak oldukça kullanılmaktadır. Co-Cr-W-Ni-C yüzey sertleştirme uygulamalarında kullanılan kobalt esaslı alaşımlardır.

Kobalt esaslı alaşımların atomizasyonla elde edilmesinde vakumla ergitme ve pasif gaz atomizasyonu tercih edilir. Bu atomize tozlarının oksijenle temasında ortamdaki oksijen konsantrasyonunun en fazla 1000 ppm den küçük olması istenirken, ortamın azot içeriği 600 den 2000 ppm’e kadar değişen seviyelerde olabilir. Bu tip ürünler yüksek kalitede ürün istenen yerlerde tercih edilir.

2.3.3. Toz Özellikleri ve Karakterizasyonu

Toz metalurjisi ile imal edilen parçaların özelliklerini büyük oranda bu parçaların imalinde kullanılan tozların sahip olduğu özellikler belirlemektedir. Bu nedenle tozların

özelliklerinin önemi ve aldıkları rolün iyi anlaşılması ve bazı uygun nicelikli karakterizasyon metotlarının uygulanması önemlidir. Toz özellikleri iki ana alt bölümde ele alınabilir.

Teknolojik özellikler:

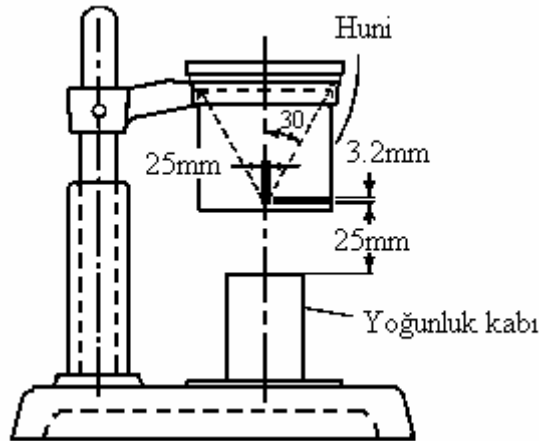
- Toz akıcılığı,
- Görünür yoğunluk,
- Sıkıştırılabilirlik.

Fiziksel özellikler:

- Toz şekli,
- Toz boyutu dağılımı,
- Özgül yüzey alanı,
- Saflıkları (oksijen, karbon, Na, Ca, Fe miktarı) (Kurt, 2004).

2.3.3.2. Toz Akıcılığı

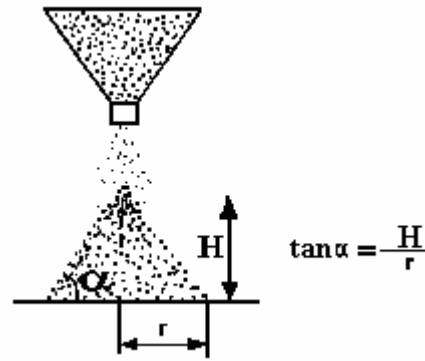
Bir tozun akıcılık özeliği o tozun doldurma davranışı ile belirlenir. Akıcılık, bir kaba doldurmak için gerekli zamana ve özellikle dar aralıklara dolum derecesine bakılarak belirlenir. Akış hızı; 50 g kuru tozun Şekil 2.9’da görülen Hall akış hunisinden kendi halinde akış zamanıdır (TS 1985). Akış hızı seri parça imalinde kalıbın doldurma zamanı ile doğrudan ilgili olduğundan önemlidir. En iyi akış özeliğini küresel tozlar verir. Pul şeklinde tozlar kolay akmazlar ve kalıpları bu tozlarla doldurmak zordur (MPIF, 1995).



Şekil 2.9. Hall akış hunisi

Toz taneciklerinin şekli, ebadı, dağılımı, üretim metodu, tozun nemli veya kuru olması ve toz yüzeyinde oluşan oksitler akma özeliğini büyük ölçüde etkiler. Örneğin toz yüzeyindeki alüminyum oksit kaymaya etki ederken, magnezyum oksit tutucu tesir yapar. Tozun akıcılık özeliğini artırmak için toza yağlayıcılar ilave edilir. Tozun akma özeliği şev açısından yararlanılarak da tayin edilebilir. Genellikle akış özeliği iyi olmayan tozlar bu yöntemle akış

hızları bulunur. Şev açısı; Şekil 2.10’de görüldüğü gibi tozun belli şartlar altında yatay bir yüzey üzerine bir huniden serbestçe döküldüğünde oluşturduğu yığının taban açısıdır (Huo, 1998).



Şekil 2.10. Şev açısı

2.3.3.2. Görünür yoğunluk

Belirli hacimde sıkıştırılmamış toz kütesinin ağırlığıdır ve g/cm^3 olarak ifade edilir. Pres kalıbı tasarımında bilinmesi gereken en önemli toz özelliğidir. Görünen yoğunluk toz şekline, tane büyüklüğüne ve metalin yoğunluğuna bağlıdır. Küçük taneli ve karmaşık taneli tozlar görünür yoğunluğu azaltır.

Görünür yoğunluğun tespiti ASTM B212 ye göre Şekil 2.10’da verilen Hall hunisi ile yapılır. 30-35 cm^3 kuru toz Hall hunisine doldurulur ve altına yerleştirilen 25 cm^3 hacimli kaba belli yükseklikten akıtılır, kap dolunca düz bir cetvel ile silinir 25 cm^3 ’lük kaptaki tozlar tartılıp, ve g/cm^3 olarak görünür yoğunluk tespit edilir (Yılmaz, 1993 ve Somunkıran, 1999).

Görünür yoğunluk bilinmesi kalıp dizaynlarında ve sıkıştırma mesafesinin belirlenmesinde önemli bir faktördür Tozların görünür yoğunluğu arttıkça, sıkıştırma için gerekli kalıp yüksekliği azalır. Yüksek görünür yoğunlukta tozların kullanılmasıyla, kalıp konstrüksiyonu için gerekli malzeme ve zamandan tasarruf etmek, kalıp ömrünü arttırmak ve kırılma riskini azaltmak mümkündür. Yüksek görünür yoğunlukta tozlar kaba tanelere sahip olduğundan, iyi sinterleme özelliğine sahip değillerdir. Bunun sonucu olarak bu tozlardan yapılan parçaların çekme mukavemeti ve uzama değerleri özellikle de tek sinterleme uygulandığında düşük olur.

Yüksek görünür yoğunluklu tozlarda kalıp ve pres ayarları için gösterilen itina, düşük görünür yoğunluklu tozların sıkıştırma işleminde ise bazı dezavantajlar vardır. Düşük yoğunluklu tozlarda plastik deformasyon başlamadan önce yüksek yoğunluklu tozlardan daha

uzun sıkıştırma hareketi ve buna bağlı daha büyük sıkıştırma uzunluğu olduğundan yana doğru malzeme transferi olur. Bu da kalıp setinin hassasiyetinden kaynaklanan, düzensiz yoğunluk dağılımını düzenler. Kalıp ve pres dizaynlarına imkan sağladığından bu olay, özellikle yüksekliği küçük ve presleme yoğunluğu düşük parçalar üretilmek istendiğinde uygulamada büyük avantajlar sağlar.

Maddeler halinde özetlenirse;

- Yüksek görünür yoğunluklu tozlar, yüksek yoğunlukta ve büyük yükseklik gerektiren parçaların üretildiği bütün durumlarda tercih edilir.
- Yüksek görünür yoğunluklu tozlar daha çok kalıp hassasiyeti gerektirirler.
- Düşük görünür yoğunluklu tozlar sıkıştırma sırasında daha iyi yoğunluk dağılımı yaparak kalıp setine daha az hassasiyette tolerans tanınabilir.
- Düşük görünür yoğunluklu tozlar daha büyük kalıp yüksekliği ve daha uzun pres hareketi gerektirirler. Bu nedenle yüksek yoğunluk ve büyük parçaların yapımına uygun değildir (Housner, 1978).

2.3.3.3. Sıkıştırılabilirlik

Sıkıştırılabilirlik veya preslenebilirlik, ASTM B243-94 standartlarına göre metal tozun kapalı bir kalıp içerisinde tek yönlü olarak yoğunluk kazandırılabilme kapasitesi şeklinde tanımlanmaktadır. Sayısal olarak istenilen yoğunluğu elde etmek için gerekli basınç değeri veya verilen basınç değeri için elde edilen yoğunluk olarak belirtilir. Yüksek sıkıştırılabilirlik, presleme (yoğunluk kazandırma) ve sinterleme (pişirme) yöntemi ile yapılan parça imalatında birincil öneme sahip faktördür. Bir tozun sıkıştırılabilirliği tozun şekline, tane büyüklüğüne, dağılımına, tozun sertliğine ve yağlayıcılara bağlıdır. Sıkıştırılabilirlik yoğunlaşma parametresi ile belirlenir.

$$\text{Yoğunluk Parametresi} = \frac{\text{Parça Yoğunluğu} - \text{Görünür yoğunluk}}{\text{Teorik Yoğunluk} - \text{Görünür Yoğunluk}}$$

Toz metalurjisiyle parça imalinde görüldüğü gibi görünür yoğunluğu yüksek tozlar kullanmak daha uygundur. Böylece daha yüksek parça yoğunluğu elde edilir. Çoğunlukta düşük sıkıştırma oranı tercih edilir.

Çizelge 2.3. Ticari demir tozlarının sıkıştırılabilirlik özelliği

Tip	Görünür Yoğunluk (gr/cm ³)	Parça Yoğunluğu (465 MPa'da gr/cm ³)	Yoğunlaşma Parametresi
İndirgenmiş	2,35	6,10	6,10
İndirgenmiş	2,35	6,35	6,35
Sünger	2,40	6,20	6,20
Atomize İndirgenmiş	2,45	6,45	6,45
Sünger Atomize	2,47	6,55	6,55
İndirgenmiş	2,50	6,50	6,50
Sünger	2,60	6,60	6,60
Atomize	2,90	6,70	6,70

Düşük sıkıştırma oranlarının tercih sebepleri:

- Kalıp boşluğu ve takım boyutları küçüktür.
- Takımın kırılması ve aşınması azalır.
- Pres hareketi azalır.
- Kalıbın daha hızlı doldurulması ve sonuçta daha hızlı üretim sağlanır (Alpugam, 1981).

Sıkıştırmaya etki eden bazı faktörler:

- Metal veya alaşımların doğal sertlikleri: Bazı metaller fazla miktarda soğuk işlem sertleşmesi eğilimindedirler. Presleme sırasında tozlarda deformasyon meydana geldiğinden tozun işlemle sertleşme özelliği sıkışabilmeye çok etki eder.
- Tane şekli; genellikle ne kadar düzensiz olursa onun sıkıştırılabilirliği de o kadar düşük olur.
- İç gözeneklilik; bir toz içindeki küçük iç gözeneklilik presleme esnasında kapalı gözeneklerin olmasına sebep olur ve taneler içinde hava hapseder. Bu nedenle taneleri gözenekli olmayan tozlar daha yüksek sıkışabilirlik özelliğine sahiptir.
- Tane boyutu dağılımı; eşit boyut dağılımlı tozlar nispeten düşük sıkışma özelliği gösterirler. En fazla boşluğu elde eden tane boyut karışımları yüksek sıkıştırma özelliğine sahiptir.
- Ametallerin varlığı; indirgenmemiş oksitler gibi ametaller sert ve düşük özgül ağırlıkta olduklarından sıkıştırılabilirliği azaltırlar.
- Katı yağlayıcıların kullanımı; metal tozların preslenmesine yardım etmesi için araştırılan katı yağlayıcılar hafif ve fazla yer kaplamalarından dolayı sıkışabilmeye etki eder (Wilyman, 1985).

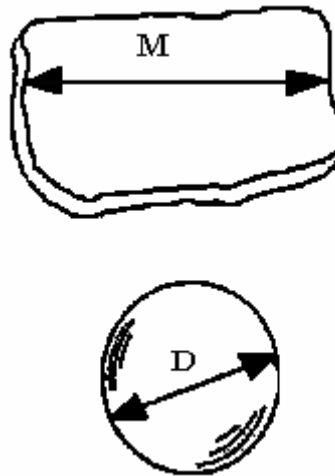
2.3.3.4. Tane Büyüklüğü

Metal tozların tane büyüklüğü genellikle elek analizi ile yapılmaktadır. Tane büyüklüğünde esas olan parçacık boyutlarının belirlenmesidir. Tozların tamamının aynı boyutta olduğu söylenemez ancak, ortalama tane boyutundan söz edilebilir. 1970’de ASTM tarafından kabul edilen standart elek Çizelge 2.4’de verilmiştir. Deney döküm kumu tane büyüklüğü tespiti ile yapılmaktadır. 45 μm nin altındaki tane büyüklüğü için elek metodu iyi sonuç vermez çok ince tozlar için sedimentasyon, ışık dağılımı ve Fisher elek metotları kullanılır.

Çizelge 2.4. Standart elek takımı (Thumler ve Thomma, 1967)

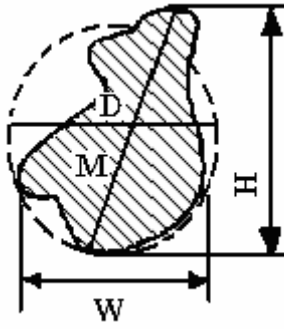
mesh	Delik(μm)
30	600
40	425
50	300
60	250
80	180
100	150
140	106
200	75
230	63
325	45

Tozun şekli tane büyüklüğünün tespitine çok etki eder. Küresel tozlarda sadece çapın bilinmesi yeterli iken pul şeklindeki toz parçacıklarının pul kalınlığı ile düzlem yönündeki boyutun ölçülmesi gerekir.



Şekil 2.11. Küresel ve pul şeklindeki parçalar

Karmaşık şekilli tozlarda yüzey alanından gidilerek tane ebadı tespit edilebilir. Yüzey alanı (izdüşüm alanı) küreye denkleştirilerek tanecik büyüklüğü bulunur.



H- İzdüşüm boyu

M- Maksimum kort boyu

W- izdüşüm genişlik

Eşdeğer küresel çap

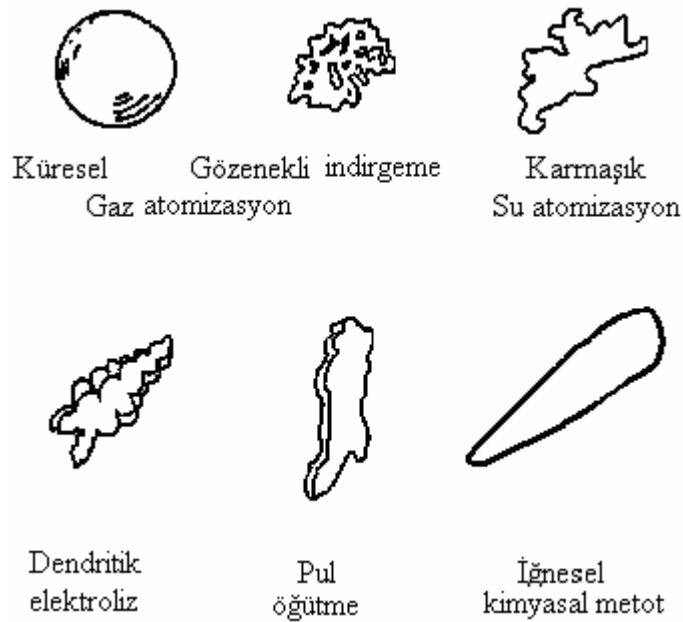
$DA = (4A/\pi)^{1/2}$, A=İzdüşüm alanı

$DS = (S/\pi)^{1/2}$, S=Yüzey alanı

$DV = (6V)^{1/3}$, V=Hacim

2.3.3.5. Tane Şekli

Metal tozlarının en önemli iki özelliği toz tane şekli ve büyüklüğüdür. Tozların tane şeklinin tayini ışık ve elektron mikroskobu ile yapılmaktadır. Taneciklerin şekli tozların akış, görünür yoğunluk, sıkıştırılabilirlik, ham mukavemet gibi özellikleri etkileyen önemli bir etkindir. Toz tane şekilleri tozların üretim metoduna göre değişik şekillerde oluşur. Genelde, küresel toz taneleri gaz atomizasyonu ile elde edilirken, gaza oranla daha hızlı soğutucu olan su atomizasyonunda karmaşık tane yapılı toz elde edilir. Şekil 2.12’de üretim metotlarına göre toz tane şekilleri verilmiştir.



Şekil 2.12. Toz tane şekilleri (Salak, 1995)

2.3.4. Tozların Karıştırılması

Tozlar dengeli homojen karışım verecek şekilde karıştırılmalı ve bu karışım, kalıbın bütün bölgelerinden akacak şekilde olmalıdır. Bunu başarmak için toz karışımının içerisine grafit gibi metal olmayan element katılıp hassas bir şekilde tartılarak bir karıştırıcıya konulmalı ve ilave edilecek yağlayıcı da oran itibarıyla % 0,5- 1,5 arasında bulunmalıdır. Karıştırma zamanı, sonradan gelecek işlemlerdeki malzeme davranışlarına ve üretilen parçanın özelliklerine etki eder. Kalıp aşınmasını en aza indirmek ve sıkıştırma basıncını azaltmak için yağlayıcıların bütün tanelere yapıştırılması gerekir (Dixon ve Clayton 1971).

Tozların karıştırılması V veya Y tipi karıştırıcılar adıyla bilinen çift konili karıştırıcılarda yapılır. Karıştırma; tozların tane boyutuna ve şekline göre birikmesini önlerken, akış karakteristiğini ve görünen yoğunluğunu da değiştirir. Ayrıca taneciklerin nispeten kırılmasına, yuvarlatılmasına ve yüzey pürüzlülüğünün giderilmesine sebep olur. Gerektiğinden fazla karıştırma taneciklerin plastik deformasyonuna sebep olur. Bu da tozun sıkıştırılabilirliğini azaltıp, şekillendirme sırasında gereğinden fazla soğuk işlem gerektirir.

Karıştırma genellikle toza yağlayıcı veya alaşım elemanı ilavesi gerektiğinde yapılır. Temel amaç farklı yapıdaki malzemelerden tek düze bir karışım elde edilmesidir. Sinterleme dahil bütün işlem kademelerindeki değerlendirmeler yapılmadan yeteri derecede karıştırma yapıp yapılmadığına karar vermek oldukça güçtür (Alpugan 1981)

Tozlar karıştırıldıktan ve sinterlendikten sonra, boşluk oluşturabilecek herhangi bir yabancı maddenin veya yağlayıcı birikintisinin, tozun içine girmemesi için korunmalıdır. Toz karışımları preslenmeye gönderilmeden önce iki önemli özelliği olan; akma hızı ve görünür yoğunluğu kontrol edilmelidir (Sarıtış, 1985).

2.3.5. Kullanılan Yağlayıcılar

Toz ile kalıp yüzeyi arasındaki sürtünme nedeniyle, şekillendirme enerjisinde büyük kayıplar oluşur. Bunun yanı sıra bitişik tanecikler arasında, toz ile zimbalar ve maşalar arasında, zimbalar ile kalıp yüzeyi arasında da sürtünme vardır. Ayrıca kalıptan çıkarma sırasında parça ile kalıp iç yüzeyleri arasındaki sürtünme de önemlidir. Bundan dolayı hem şekillendirme hem de kalıptan çıkarmada etkili olacak ve sinterlemeyi bozmayacak bir yağlama düzenine ihtiyaç vardır.

Metal tozuna toz şeklinde yağlayıcı karıştırıldığında bu yağlayıcı, tozun her tarafına dağılmış olur. Ancak bu durumda yağlayıcının toz kütlesi içinde kaldığı ve etkisiz olduğu görüşü yaygındır. Ayrıca yağlayıcılar sıkıştırılmış tozun özelliklerini kötü yönde etkiler.

Metal stearatlar, stearik asit ve balmumu olarak kullanılan yağlayıcılar, ergime sıcaklığı düşük organik bileşiklerdir. Bu bileşiklerin yoğunlukları düşük olduğundan, yüzde ağırlıkça küçük miktarlarda ilave edilmeleri büyük hacimlere karşılık gelir.

Yağlamanın diğer bir şeklide, sadece kalıp yüzeylerinin yağlanmasıdır. Böylece yağlayıcı, gereksinme duyulduğu yerde kullanılmış ve tozun özelliklerini de etkilememiş olur. Yağlayıcı kalıba elle uygulanabileceği gibi püskürtülerek de verilebilir. Endüstriyel uygulamada otomatik yağlama işlemi yapılır. Kalıp yağlamada kullanılan yağlayıcı malzeme, genellikle süspansiyon şeklindedir.

Etkili bir yağlayıcı, parçayı kalıptan çıkarma basıncını azaltır. Yağlayıcı oranı arttıkça sıyırma basıncı o derecede azalma gösterir. Sıkıştırma basıncı ve dolayısıyla parça yoğunluğu ne kadar yüksek olursa, sıyırma basıncı da o derece büyük olur. Ayrıca kalıp malzemesinin bileşimi, sertliği ve yüzey özellikleri de sıyırma basıncını etkiler. Aynı sıkıştırma basıncı ve aynı yağlayıcı şartlarında sıyırma basıncı karbür kaplarda çelik kaplara göre daha düşük olmaktadır. Sıyırma basıncı tozun tane büyüklüğü ile yakından ilişkilidir. Küçük tane boyutu sıyırma basıncını artırır. Çünkü bazı tanecikler kalıptaki küçük boşluklara girerek sürtünmeyi artırır (Alpugan, 1981).

2.3.6. Tozların Preslenmesi (Sıkıştırılması)

Toz metalurjisinde imalat sürecinde parçanın imalat süresi ve oranı önemli bir faktördür. Sıkıştırma bir yük altında serbest yapıdaki toz partiküllerinin istenilen şekle ve forma dönüştürülmesi için yoğunluk kazandırma işlemi olarak tanımlanabilir.

T/M üretim yöntemi ile elde edilen malzemenin dayanımı presleme ve sinterleme sonrası yoğunluğu ile doğrudan ilgilidir. Sinterleme de esas olan istenilen yoğunluğun (çoğu zaman tam yoğunluk) ve dolayısıyla fiziksel dayanımın elde edilmesidir. İdeal yoğunluk % 100 teorik yoğunluğa erişmektir (Kurt, 2004).

Sıkıştırma üç aşamada ele alınabilir:

1. Sıkıştırma basıncının ilk uygulanmasına müteakip partiküllerin yer değiştirmesi ve yeniden pozisyon belirlemesi gerçekleşir. Plastik şekil değiştirme yoktur. Kısmi olarak bazı partiküllerde mekaniksel kırılmalar olabilir. Bu aşamada partikül boyutu, toz boyut dağılımı, partikül şekli ve yüzey özellikleri ile partiküller arası sürtünme önemli rol oynar.

2. Toz sıkıştırmanın ikinci aşamasında elastik ve plastik deformasyon faktörleri baskındır. Bu aşamada tanecikler arası soğuk şekillendirmeye bağlı bağlar oluşabilir. Ayrıca partiküllerin mekaniksel kilitlenmeleri ile partikül-partikül etkileşimleri bu aşamada önem kazanan durumlardır.

3. Presleme basıncının arttığı sıkıştırmanın son aşamasında toz taneciklerinin kırılması ve plastik deformasyon ile boşlukların doldurulması sağlanmış olur. Bu aşamada toz tanecikleri arasında soğuk kaynak olabilir.

Kalıp içerisindeki tozun ham yoğunluğa bağlı başlangıç yüksekliği, onun sıkıştırılabilirliğinde belirleyici rol oynar. Tozun kalıp içerisine sorunsuz ve hızlı akması da önemlidir. Toz boyutu ve şekli tozun kalıba akış hızına etki eder. Örneğin toz tanelerinin çok ince oluşu toz akış hızının ve presleme yoğunluğun düşük olmasına neden olur. Toz dağılımı ise, kalıpta preslenen tozun yoğunluk dağılımının homojen olup olmamasına etki eder. Bununla birlikte ortalama tane boyutu küçük olan toz malzemelerin sıkıştırılabilirliği yüksek olmaktadır.

Presleme öncesi kalıba serbest düşen tozların yoğunluğu (ham yoğunluk) kalıbın titreştirilmesiyle büyük oranda arttırılmış olur. Titreşimle kazanılan yoğunluk artışı tozun şekli ve toz dağılımı ile ilişkilidir. Örneğin düzensiz şekilli tozlarda küresel ve düzgün yüzeyli tozlara göre bu artış çok daha fazladır. Bunun nedeni küresel şekilli tozların bağıl yoğunluklarının yüksek, düzensiz şekilli ve dar toz boyut dağılımına sahip tozların ise bağıl yoğunluklarının düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Bağıl yoğunluk, ham yoğunluk değerinin teorik yoğunluk değerine oranı olarak tanımlanabilir. Tozların yüzey şekli akıcılık davranışlarını etkilemektedir. Genel olarak tozların yüzey şekli düzensizdir. Ayrıca küresel veya küresele yakın yüzey yapısındaki toz malzemelerin kalıp içerisine akış davranışları ile kalıp içerisinde paketlenme özellikleri daha iyi olmaktadır. Ayrıca aynı malzeme türü için küresel şekilli tozların yaprak levha şekilli tozlara oranla preslemede basıncı daha etkili ilettikleri söylenebilir. Burada belirtilenlerin dışında tozların fiziksel ve mekaniksel özelliklerinin de presleme yolu ile sıkıştırılabilirliğe (yoğunlaştırılmaya) etkileri vardır. Çizelge 2.5'te tozların önemli özellikleri ve bunların etki ettiği faktörler özetlenmiştir.

Çizelge 2.5. Tozun önemli özellikleri ve etki ettiği bazı faktörler

Önemli Özellikler	Etkisi
Tozun boyutu (tanecik boyutu)	Görünen (ham) yoğunluk
Boyut dağılımı	Akış davranışı
Toz şekli (tanecik şekli)	Ham dayanım
Kimyasal bileşim	Sıkıştırılabilirlik
Yüzey özellikleri	Sinterleme
Mikro yapı	Şekillendirilebilirlik, tokluk

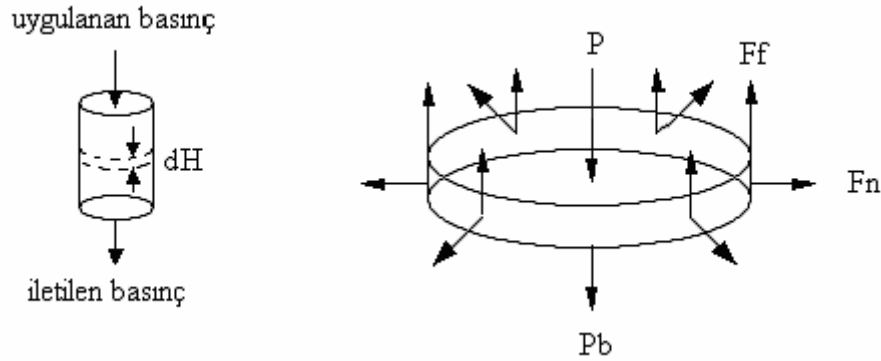
Dendrit şeklindeki toz partikülleri yüksek sıkıştırılabilirlik özelliği göstermektedir. Bu nedenle özellikle bronz burç yataklar, bakır içeren karbon motor fırçaları ve sürtünen

malzemeler ile kesme takımlarının, özellikle elmas kesici uçların üretiminde bu tip tozlar tercih edilmektedir.

Toz sıkıştırma, önemli bir problem toz ile kalıp duvarı sürtünmesidir. Bu sürtünme, uygulanan basıncın tozun kalıp içindeki derinlik mesafesiyle azalmasına sebep olur. Şekil 2.13'te çapı D ve yüksekliği H olan silindirik bir katı toz metalin sıkıştırılmasında, yüksekliğin ince bir kesitini incelemek, elemanın tepedeki P basıncı ile elemanın tabanı içine iletilen Pb basıncının sürtünmeye karşı etki eden dikey kuvvet ile farklılaşacağını gösterir. Kuvvetler dengesi aşağıdaki gibi ifade edilir (Bututaki, 1997).

$$F = 0 = A (P - P_b) + U \cdot F_n$$

Burada; Fn: normal (dikey) kuvvettir, U: toz ve kalıp duvarı arasındaki sürtünme katsayısı ve A: kesit alanıdır.



Şekil 2.13. Kalıp duvarına etki eden sürtünme kuvvetleri

Normal kuvvet bir orantı sabiti olan Z ile uygulanan basıncın terimleri olarak verilebilir. Z faktörü, radyal gerilimin aksel gerilime oranıdır. Böylece,

$$F_n = \pi Z P D \cdot dH \text{ olur.}$$

Ff sürtünme kuvveti, normal kuvvet ve sürtünme katsayısından şöyle hesaplanır.

$$F_f = U \cdot \pi Z \cdot P \cdot D \cdot dH$$

Toz elemanın üst ve altı arasındaki basınç farkı dP' yi şöyle verir.

$$dP - P - P_b = - F_f / A = - 4 U Z \cdot P dH / D$$

Sıkıştırma yüksekliği açısından basınç teriminin entegrasyonu sıkıştırma elemanı altındaki herhangi bir x pozisyonundaki basınç aşağıda gibi ifade edilir.

$$P_x / P = \exp (-4 U Z x / D)$$

Bu ifade tek hareketli preslemeye uygulanabilir. Basıncın kalıp derinliği ile azaldığını gösterir. Tek etkili presleme için ortalama sıkıştırma gerilimi;

$$\sigma = P (1 - 2 U Z H / D)$$

Çift hareketli presleme için ortalama gerilim yaklaşık

$$\sigma = P (1 - 4 U Z H / D)$$

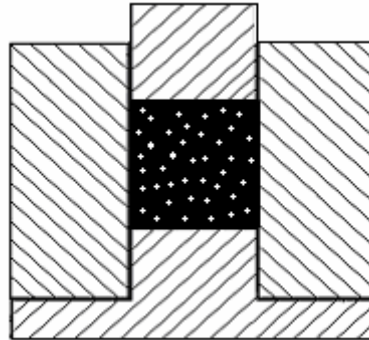
Ortalama gerilim ise boy/çap oranına tanecikler arası sürtünmeye (Z), kalıp duvarı sürtünmesi'ne (U) bağlıdır. Kalıp duvarlarının yağlanması sürtünme kuvvetini düşürerek sıkıştırmaya yardımcı olur.

T/M yöntemleri ile üretilen makine parçalarının şekil ve boyu üzerindeki temel kısıtlamalar sıkıştırma işlemleri ile olur. Metal tozlarını preslemek için birçok uygun yöntem vardır. Fakat bunlardan çok azı eş dağılımlı yoğunluk sağlayabilir. Özellikle karışık şekilli parçalarda bu daha azdır (Somunkıran, 1999). Metal tozların kalıp içersinde preslenmesi;

a- Tek hareketli sıkıştırma,

b- çift hareketli sıkıştırma olarak iki guruba ayırabiliriz.

a-Tek hareketli sıkıştırma: Tek hareketli sıkıştırmada dikey doğrultuda deformasyonun başlamasıyla tozlar arası ve toz kalıp çeperi arasında oluşan sürtünme boy ve çap arasındaki düzensiz bir basınç dağılımına sebep olur. Sonuç olarak uygulanan yük, iş parçasına düzenli olarak uygulanmaktadır. Dolayısıyla iş parçasındaki yoğunluk homojen bir dağılım göstermektedir. Yoğunluk hareketli zımbaya doğru giderek azalmaktadır. Yoğunluktaki bu azalma iş parçasının boy/çap oranına bağlıdır. Bu etki disk ya da rondela gibi ince parçalarda problem olmamasına karşın kalın parçalarda önemli bir problemdir (Saritaş, 1988).



şekil 2.14. Tek hareketli presleme (Saritaş, 1988).

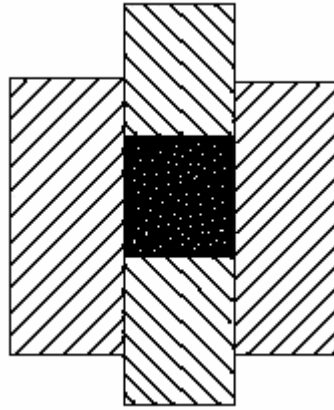
Bu kalıp tipinin basitliği kalıp fiyatı yönünden önemli bir avantajdır. Bununla birlikte briketi kalıptan çıkarmak diğer yöntemlere göre daha zordur. Parçanın kalıptan çıkarılması şu iki temel üzerine olur. Kalıp sabit olup, alt zımba yükselerek parçayı kalıp boşluğundan dışarı atar. Alt zımba sabit kalırken kalıp aşağı çekilerek parça çıkarılır.

Tek yönlü sıkıştırma istenilen yoğunluk dağılımını vermediğinden parçanın alt ve st bölgelerinde eşit sıkıştırmayı sağlamak, çift hareketli sıkıştırma ile mümkün olur (Alpugan, 1981).

b-çift hareketli sıkıştırma: Çift hareketli sıkıştırmada toz, birbirine zıt yönde hem alt hem de st zımba tarafından ayrı ayrı sıkıştırılmaktadır. Bu yöntemde, her bir yönden eşit veya farklı miktarda hareket veya basınç uygulanabilir (Somunkıran, 1999). Çift hareketli sıkıştırma ile

kalıp içerisinde boydan boya dengeli bir sıkıştırma temin edilir. Kalıp alttan bir yayla desteklenerek çift yönlü sıkıştırma gerçekleştirilebilir. Buradaki yay kuvveti pres kuvvetine adapte edilmektedir. Preslenecek parçaların dik kesitlerinin kademeli olması preslemede güçlük çıkarır. Bir parçanın kalıptan rahatlıkla çıkarılması da parçanın şekline bağlıdır. Çift hareketli sıkıştırmanın en önemli avantajı, briket kesitinin her yüksekliği için pres kontrolü uygun kalıp hareketinin olabilirliği (Herman, 1978).

Çift hareketli sıkıştırmada alt ve üst zımbanın her ikisine de Şekil 2.15 de gösterildiği gibi basınç uygulanır. Bu çift yönlü hareket eden özel bir pres gerektirir. Toz metalurjisinde kullanılan özel pres kalıpları, önceden belirlenen toz miktarının hassasiyetle yerleştirilmesine, ardından sıkıştırılmasına ve preslenen briketin çıkarılmasına uygun olmalıdır. Bu nedenle bütün preslerin doldurma ve çalışma pozisyonlarının olması ve bunların her ikisinin de otomatik olarak arka arkaya gelmesi gerekir.



Şekil 2.15. Çift etkili presleme

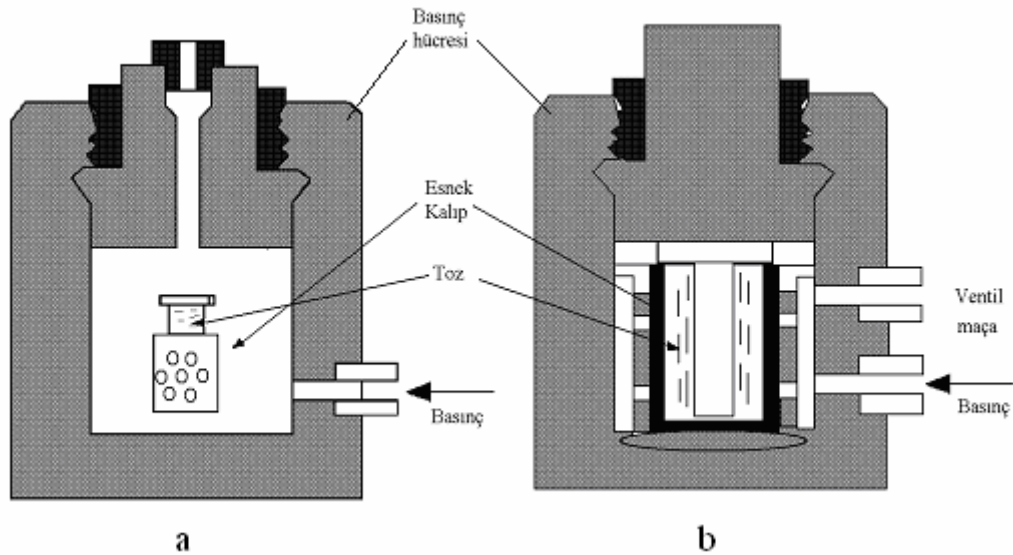
2.3.6.1. İzostatik Sıkıştırma

İzostatik sıkıştırma, tozların bir akışkan basıncıyla sıkıştırılmasına denir. Presleme genellikle bir yağ veya su içerisinde ve oda sıcaklığında (CIP) (Cold Isostatik Pressing) yapılır. Parçanın şeklinde esnek bir kalıp hazırlanır ve içi tozla doldurulur. İçindeki hava boşaltılır ve gerekli sızdırmazlık sağlandıktan sonra basınç kazanına atılır. İzostatik preslerde kalıp sürtünmeleri olmadığından ve basınç her yerde eşit olduğundan yoğunluk dağılımları ve mekanik özellikleri izotropiktir. Yöntemin dezavantajları hassas boyutsal tolerans elde edilememesi ve yavaş olmasıdır. Bununla birlikte 700 Mpa kadar basınçlardan ve 1200 °C'ye kadar sıcaklıklarda (HIP) İzostatik presleme ile her türlü refrakter metal ve seramik

biçimlendirilir. Süper alaşımlar uçak türbini diskleri ve takım çeliği kütükleri bunlara başlıca örnektir.

İzostatik presleme basıncın uygulandığı ortam, çevre ve oda sıcaklığında olduğunda "soğuk izostatik presleme" olarak ve ortamın yüksek sıcaklıkta olmasında ise "sıcak izostatik presleme" olarak ikiye ayrılır. Soğuk izostatik presleme ile yapılan yoğunlaştırma işleminden sonra sinterleme işlemi yapılır. Diğer taraftan sıcak izostatik preslemede yoğunlaştırma ve sinterleme birlikte olur (Ünlü ve Öveçoğlu 1995).

Soğuk izostatik preslemede (CIP) tozlar iki şekilde sıkıştırılabilir. Islak kalıp olarak bilinen yöntemde tozlar bir esnek kalıba doldurulup, basınç ortamının içine atılır. Kuru kalıp yönteminde ise tozlar sabit bir esnek kalıbın içersine doldurulur ve dıştan basınç uygulanır. Islak kalıp yöntemi kolay olup deneysel araştırmalar için çok uygundur, ancak yavaştır. Diğer taraftan kuru kalıp hızlıdır.



Şekil 2.16. İzostatik presleme yöntemleri; a) ıslak, b) kuru

2.3.6.2. İzostatik Preslemede Yoğunlaşma

İzostatik presleme de basınç toz kütleline bütün yönlerden dik olarak uygulandığında diğer presleme yöntemlerine benzememekte ve daha yüksek ham yoğunluk oluşmaktadır. Daha da önemlisi yoğunluk, sıkıştırılan toz kütleline ebadı ve biçimi etkili olmaksızın, bütün yönlerde daha homojendir. Preslemede meydana gelen yoğunlaşma safhaları izostatik presleme için de geçerlidir. Bu safhalar düşük basınç için 2. aşama, yüksek basınç için 3. aşama olarak bilinir.

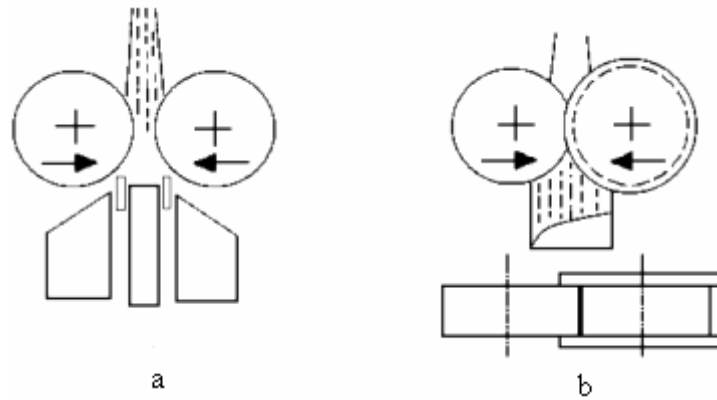
1. Aşama: Yoğunlaşma miktarı biçim, yüzey alanı ve oksit gibi dış geometrik karakteristiklere bağlıdır. Basınç 0.03 MPa'ı geçmez. Taneciklerin yeniden düzenlenmesi ile tozlar daha yoğun bir hal alır. Bu aşama ile başlayan yoğunlaşma, düzgün şekilli taneciklerin kolayca düzenlenmesi ile % 10 civarında artar. Buna paralel olarak temas sayıları artmış olur. Düşük yoğunluklu toz kütlelerinde tanecikler arası temas azdır. Bu nedenle taneciklerin hareket edecekleri hacim fazla olmayacağından toz kütle hareketi daha kolay olur. Bu aşama küresel tozların yoğunlaşmasında önemli bir katkıda bulunmaz.

2. Aşama: Orta basınçlarda, tanecikler arası temasta daha fazla elastik-plastik deformasyon olur. Taneciklerin soğuk kaynaşması veya birbirine mekanik olarak kenetlenmesi, ham mukavemete katkı yapar. CIP sırasında taneciklerin plastik deformasyona uğraması ile şekillendirilen parçadaki gözenek sayısı kütle akışı ile azalır, yoğunluk artar. Temas büyümeleri ile beraber iş sertleşmesi olur. Ne kadar plastik deformasyonun olduğu, metallerin şekillendirilme kabiliyetine bağlıdır.

3. Aşama: Sıkıştırma basıncı arttıkça artan temas noktaları daha fazla sertleşmeye ve neticede kırılmaya sebep olabilirler. Soğuk izostatik preslemede, plastik deformasyon sonucu gözenekliliğin yok edilmesi ile küresel tozlar son biçimlerini alırlar (Okumuş ve Öveçoğlu, 1995).

2.3.6.3. Tozların Haddelenmesi

Şekil 2.17'de gösterildiği gibi tozlar bir besleyiciden haddelerin arasına akıtılarak sıkıştırılabilirler ve böylece sürekli biçimlendirme gerçekleştirilebilir. İstendiği taktirde ikili üçlü sandviç haddeleme mümkündür. Hadde silindirlerinden sonra yerleştirilecek bir fırında sürekli ve kontrollü bir sinterleme ve onu takiben sıcak haddeleme işlemleri yapılarak sac malzemeler üretilir (Sarıtaş, 1995).



Şekil 2.17. Toz haddeleme; a) tek metal, b) İki metal

2.3.7. Sinterleme

Preslenmiş toz malzemeye istenilen fiziksel ve mekanik özellikler kazandırmak amacıyla yüksek sıcaklıklarda yapılan bir işlemdir. Tek bileşik sistemin sinterleme sıcaklığı ergime noktasının veya katılma sıcaklığın Kelvin cinsinden değerinin $2/3-4/5$ 'i kadardır. Çok bileşikli toz karışımlarında ise sinterleme sıcaklığı genellikle en düşük ergime noktasına sahip bileşiğin ergime noktasının hemen altında veya civarında seçilir. Sinterleme işlemi genellikle kontrollü atmosfer ortamında yapılır. Sinterlenen parçaların sinterleme sıcaklığına çıkış hızları, sinterleme sıcaklığında kalma süreleri ve soğuma hızları ürün özelliklerini doğrudan etkilemektedir (James, 1985; Stosuy, 1993; Crawson, 1993).

Sinterleme işlemi en kaba hatlarıyla "Katı hal sinterlemesi" (KHS), "Sıvı faz sinterlemesi" (SFS) şeklinde sınıflandırılabilir. Bu sinterleme mekanizmalarının hapsinde metal taşınım mekanizmaları farklılık gösterir. Tek fazlı metal tozlarından oluşan kompaktlar sinterlendiğinde olası metal taşınım mekanizmaları tanımlanabilir. Fakat temelde iki farklı süreçten oluşan sıvı faz sinterlemesinde bu metal taşınım mekanizmalarını tanımlamak daha zordur. Sıvı faz sinterlemesinde iki farklı süreçten birinde, kompaktlar sinterleme sıcaklığındayken bütün işlem süresince sıvı faz vardır. Bu süreçte örnek olarak % 10 veya daha az miktarda nikel ve bakır veya nikel ve demir içeren volfram alaşımı ve sementit karbürlerinin sinterlenmesi verilebilir. Kompaktlar, alaşım sisteminin sıvılaşma ve katılma eğrileri arasında sinterlenir ve sinterleme çevriminin tamamında heterojen bir yapıya sahiptirler. Bu mekanizma "Sürekli sıvı faz sinterlemesidir" ve ağır alaşım mekanizması olarak adlandırılır. Diğer sıvı faz sinterleme mekanizması "Geçici sıvı faz sinterlemesi" mekanizmasıdır ve bu mekanizmada sinterleme sıcaklığında sıvı fazın varlığı sinterleme süresince değil, sadece belirli bir süre için söz konusudur. Bazı metal tozlarına küçük miktarlardaki alaşımlandırıcı elementlerin ilavesi sinterleme hızında 100 katına kadar ulaşan bir artışa neden olur. Bu işlem "aktivasyonlu sinterleme" ve "aktive edilmiş sinterleme" olarak adlandırılır (James, 1985; Şulan, 1993; Özkal, 1994).

2.3.7.1. Katı Hal Sinterlemesi

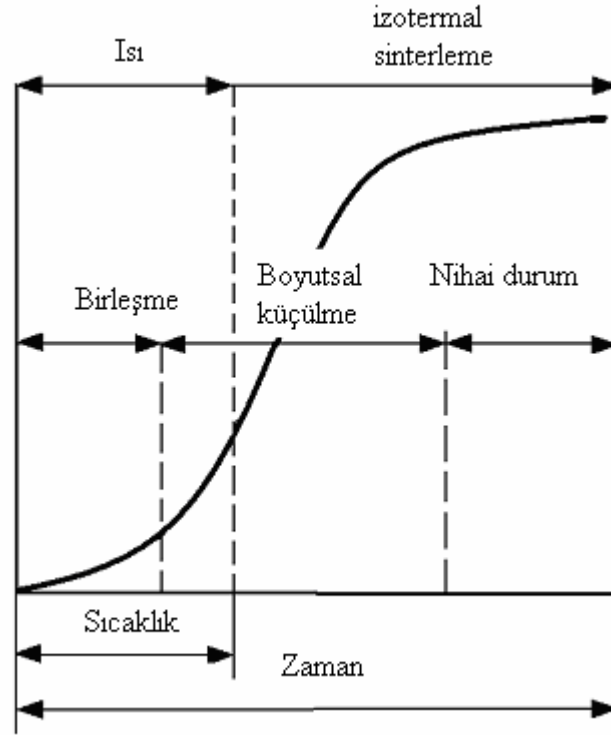
Genellikle katı hal sinterleme mekanizması Şekil 2.18'de olduğu gibi artan sıcaklık ve zamana bağlı olarak üç aşamada açıklana bilir.

1. Aşama: Tozların ergime sıcaklığının yaklaşık % 20-40'ına kadar ısıtılır. Bu aşamada tozlar birbirinden bağımsızdır. Presleme ile oluşmuş temas, ısının etkisiyle oluşmuş temas alanları "boyun" diye adlandırılan sinter köprülerine dönüşür. Bu durumda sistemin dayanımı düşer. Redükleyici bir atmosferde sıcaklıktaki daha fazla bir artışla boyun oluşumu da artar. İki

tanecik arasındaki temas düzlemlerinde tane sınırı oluşumu başlar. Toz parçacıkların merkezleri çok küçük miktarda birbirlerine yanaşır.

2. Aşama: Yüzey, hacim ve tane sınırı gibi tüm difüzyon etkileriyle, metal atomlarının daha fazla değişikliğe uğramasının bir sonucu olarak temas noktasındaki boyun oluşumu artar. Boyutsal küçülme en fazla bu bölgede görülür ve teorik yoğunluğa yavaşça yaklaşır. Başlangıç parçacığın şekli, yüzeyi ve boşluk şekli değişir. Boşluk küresel olup kısmen daralır.

3. Aşama: Kapalı gözenek oranı hızla azalır. Birbirinden izole edilen gözenekler küresel şekil kazanmaya başlar. Eğer gözenekler içerisinde hapsolmuş ve dışarıya çıkması (difüze olması) mümkün olmayan gaz varsa ve gözenekteki gazın basıncı ile yüzey geriliminden doğan basınç denge halini alırsa sinterlenmiş yapıda teorik yoğunluğa çıkmak mümkün olamaz. Şayet vakumla sinterleme yönteminde olduğu gibi gözeneklerde gaz yok ise veya gözenekteki gaz ana yapıdan kolayca difüze olup sistemden uzaklaşabiliyorsa yoğunluk artışı devam eder ve % 100 teorik yoğunluğa ulaşılabilir.



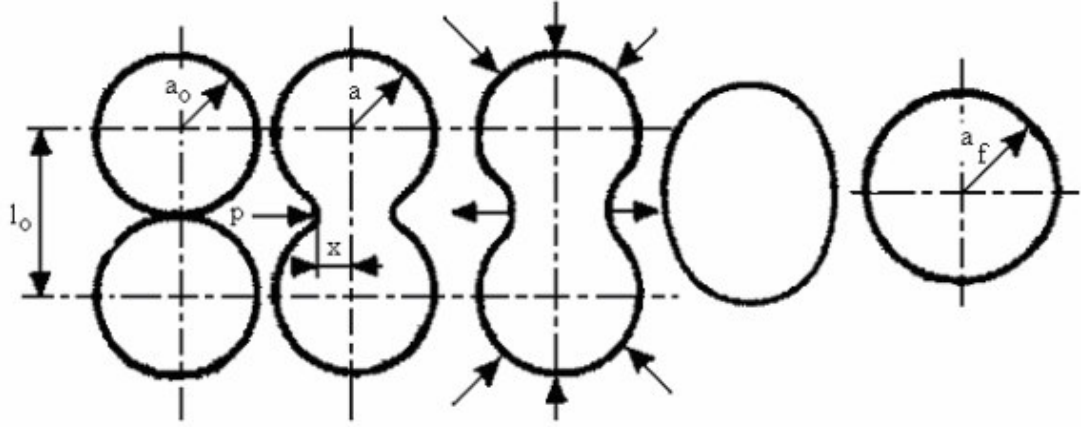
Şekil 2.18. Katı durumda sinterleme aşaması (Salak. 1995)

Yüksek yoğunluk ve dayanım gerektiren çelikler, manyetik malzemeler, sementit karbürler gibi toz metalurjisi ürünlerinde çoğu kez 3. aşamaya çıkılabilir veya en azından ara aşamanın (2. aşama) sonuna ulaşılabilir. Daha çok kaba toz boyutunda ve küresel şekilli tozlardan mamul yüksek gözenekli yapıda, gaz veya sıvı geçirgenlik özellikleri aranan filtre türü toz metalurjisi ürünlerinde sadece 1. aşama yeterli sinterleme prosesini oluşturur. Çok ince toz boyuttaki tozlarla yapılan sinterlemede sinterleme işlemini (özellikle 1. aşamayı) tanımlamak

oldukça zordur. Boyutsal küçülme ve tane büyümesi düşük sıcaklıklarda başlar ve sinterleme sıcaklık artışı ile birlikte gerçekleşir. Bu arada özellikle çelik gibi malzemelerin çok yüksek yoğunluklarda preslenmesi sonucu sinterlenmesin de çok küçük boyutsal küçülme vukubulur. Bu durumda 1. ve 2. aşamaları birbirinden ayırmak mümkün olmayabilir.

2.3.7.2. Boyun Büyümesi ve Şekillenmesi

Tek fazlı (saf metal) parçacıklardan oluşan preslenmiş parçaların sinterlenmesi sırasında mikroyapıdaki değişimler, boyutla beraber parçanın fiziksel ve mekaniksel özelliklerinde değişimler meydana getirir. Sinterlemenin ilk aşamasında toz partikülleri arasındaki temas “boyun” olarak adlandırılan sinter köprüleri oluşur. Sinterleme esnasında parçacıklar arasında oluşan metalik boyunun şekli ve büyüklüğü kütle transferi mekaniği ile karakterize edilir. Şekil 2.19’da iki küresel parçacığın sinterleme esnasındaki çeşitli aşamaları gösterilmektedir.



Şekil 2.19. İki küresel parçacığın sinterlenmesi esnasındaki oluşan basamaklar

Burada;

a_0 = Başlangıç kürenin yarı çapı

ρ = Boyun dış yarı çapı

a_f = Oluşan kurenin yarı çapı

x = Boyundaki eğrilik yarı çapı buda da

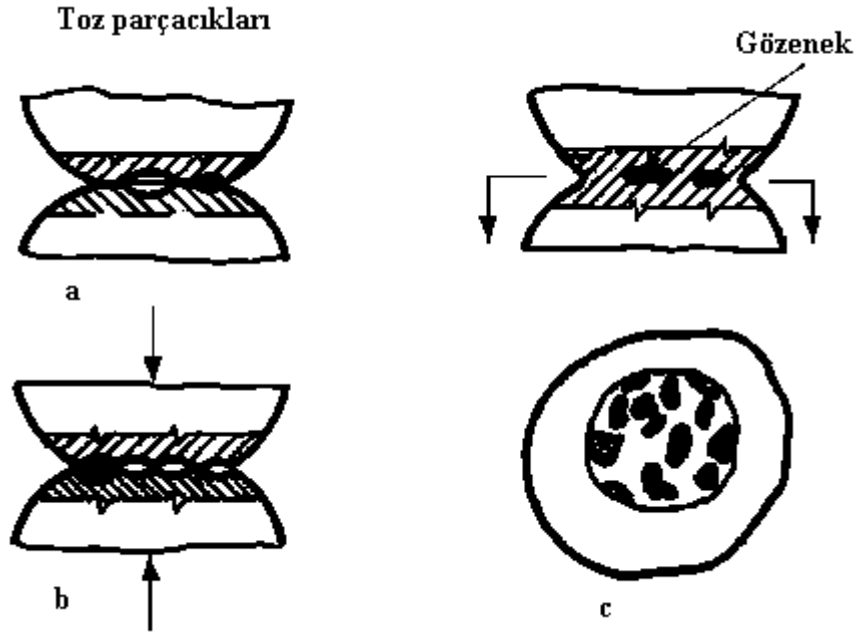
$a_f = a_0 2^{1/3}$ eşittir.

Boyun oluşumu esnasında yapıdaki mevcut gözenekler küreselleşir, partiküllerin merkezleri arasındaki mesafe azalır ve bunun sonucu olarak parçada çekilme meydana gelerek yoğunluk artar. Daha sonraki aşamada taneciklerin birbirleri ile birleşmesi son bulur ve sonuçta izole gözenekler oluşur. Yapıda malzeme taşınımı ile gözeneklerin boyutları küçülür ve tane büyümesi meydana gelir. Bazı sinterleme oluşumları sırasında parçalarda genleşme görülebilir. Bu genleşme presleme sırasında gözeneklerde kalan gazların sinterleme sıcaklığında basınç artışı sonucu görülür. Yapıdaki gazın genleşmeye neden olabilmesi için sinterleme sırasında parça

içerisinde yayınmaması veya metal ile reaksiyona girmemesi gerekir (örneğin oksijen metallerle oksit oluşturabilir). Preslemenin atmosferik koşullar altında yapılması halinde gözeneklerde sıkışıp kalan havadaki oksijen, hidrojen gazı altında yapılan sinterleme sırasında su buharı oluşumuna neden olabilir. Gözenek boyutu küçük olduğundan hacimsel bir genleşme meydana gelemez (Kayser, 1991; Demir, 1992; Thümmle, 1993).

Sinterleme sonrası değerleri kontrol edip değerlendirmede bulunabilmek için taneler arası oluşan boynun şekil ve formunun kinetiğini bilmek gerekir. Boynun şekli ve büyüklüğünü tespit etmek için numuneleri kırık yüzey analizine tabi tutmak gerekir. Temas eden yüzeylerde oluşan boyun bölgelerindeki boşluk ve bu boşluğun boyutsal analizi Şekil 2.20’de görüldüğü gibi şekillenir. Preslemenin etkisiyle temas eden parçaların temas noktasında mekanik bir temas vardır. Bu temas sinterlemenin etkisiyle değişir (Slesar, 1992).

Sinterleme durumuna ve tozun özeliğine bağlı olarak sinterlenmiş numunelerin kırık yüzeyinde noktasal, çizgisel boşluklar ve yabancı maddeler ya da gözeneklerin birleştiği ve boşluk olarak tanımlanan çukurlar oluşur (Slesar, 1992).



Şekil 2.20. İki parçacığın temas yüzündeki gözeneklerin görünümü: a) preslemeden önce, b) preslemeden sonra, c) sinterlemeden sonra (Salak, 1995)

Sinterleme için itici güç, sistemin serbest enerjisinin düşürülmesidir. Toz parçacıklarının veya tanelerin büyümesi, toplam tane sınırı alanının azalması serbest enerjide düşmeye neden olur. Metallerde tane sınırı hareketi, eğrilik merkezine doğru olan yönde meydana gelir. Tane sınırlarının konkav tarafında (iç büküye) yer alan atomlar konveks (dış büküye) taraftaki atomlara göre

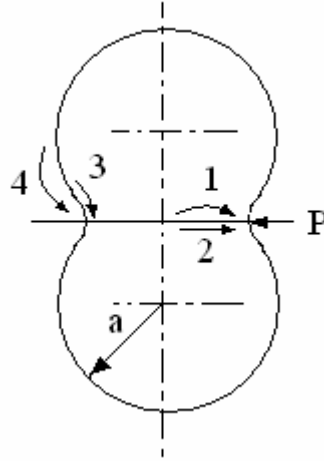
daha sıkı bir sıralanma gösterdiklerinden atomsal hareket (sınır hareketi) sınırın konkav tarafına doğrudur.

2.3.7.3. Kütle Transfer Mekanizması

Sinterleme esnasında gözenekler dolar ya da büyüklüğü azalır. Malzemeler ısıнын etkisiyle atomların hareketini artırmak için belirlenen sıcaklıkta ısıtılır. Kristal malzemelerde atomların düzenli dizilişinde bozulma olur ve sonucunda da boşluk oluşur. Kafesteki boşluk miktarı artan sıcaklıkla artar. Çünkü sıcaklığın artması atom hareketini hızlandırır bu da difüzyonu hızlandırır. Tane sınırının artması kusur oranının arttığını gösterir, yüzeydeki kusur oranının artması yüzey gerilimini artırır ve bu da yüzeydeki difüzyon oranını yükseltir.

Sinterleme sırasında meydana gelen boyutsal değişimler (çekilme veya şişme), gözeneklerin şekil ve boyut değişimi, tane büyümesi gibi olaylar yapı içinde sıcaklıkla aktive edilen atomsal taşınım mekanizmasıyla gerçekleşir. Atomsal taşınımında en önemli mekanizma difüzyon taşınımıdır. Hacim ve yüzey difüzyonu olmak üzere iki tür difüzyon mekanizması vardır. Sinterlemeyi kontrol eden yüzey difüzyonu tane yüzeyinden kütle akışı meydana getirir. Yaygın sinterleme özelliklerinin yüzey difüzyonu ile geliştirilmesine rağmen boyutsal değişim olmaz ve yoğunluk sabit kalır. Sinterlemeyi kontrol eden yüzey taşınımı sırasında yüzey difüzyonu ve buharlaşma-yoğunlaşma en önemli iki yardımcıdır. Yüzey difüzyonu neticesinde hacimsel büyüme meydana gelmezken, hacim difüzyonu boyutsal büyümeye neden olur. Hacim difüzyonu mekanizması; hacim difüzyonu, tane sınırı difüzyonu, plastik akış ve viskoz akışı kapsamaktadır. Plastik akışın önemsiz olduğu düşünülmektedir. Viskoz akış ise bir taşınım mekanizması olmasına rağmen kristalin yapılı malzemelerde pek görülmez. Genellikle hacim difüzyonu sinterlemenin sonlarına doğru daha aktifleşmektedir.

Boyun bölgesinin büyümesi ve bunun sonucu tanecikler arası temasın artması ve bölgeye malzeme transferi ile olur. Boyun bölgesine malzeme transferi, yüzeyden buharlaşan gazın boyun bölgesinde yoğunlaşması, hacim ve yüzey difüzyonu, plastik akma ile meydana gelir. Kristal yapılı katılarda dislokasyonların hareketi ile (dislokasyon tırmanması) meydana gelen plastik akmanın taşınımına olan etkisi yüksek değildir. Sinterlemenin başlangıç aşamasında atomsal taşınım değişik şekillerde meydana gelir. Muhtemel taşınım yolları Şekil 2.21’de görülmektedir. Burada, iki küresel partikül modellenerek, kesit üzerinde boyun oluşumu gösterilmiştir. Bu şekilde yüzey difüzyonu yüzey difüzyonu nasıl meydana geldiği görülmektedir. Tane sınırlarından difüzyon 2 yoluyla gerçekleşirken, 1 yoluyla tane sınırlarından boyun bölgesine hacimsel difüzyon oluşmaktadır.



Şekil 2.21. Boyun bölgesindeki muhtelif atom taşınım yolları (Yılmaz 1999)

Küresel şekilli partiküller göz önüne alındığında eğrilik yarıçapı δ olan konveks bir yüzey ile buna komşu olan düz bir yüzey arasında $N-N_0$ değerinde bir kimyasal potansiyel farkı vardır. Bu potansiyel fark;

$$N - N_0 = -\gamma\Omega / \delta = RT (\ln P - \ln P_0)$$

değerinde bir basınç faktörü doğurur. Burada;

γ : Yüzey gerilimi

R : Gaz sabiti

Ω : Atomik hacmi

T : Mutlak sıcaklık

P : Eğri yüzeydeki buhar basıncı

P_0 : Düz yüzeydeki buhar basıncı

Buhar basınçlarındaki fark malzemenin parçacık yüzeyinden buharlaşıp boyun bölgesinde yoğunlaşmasına neden olur. Bu tür taşınım buhar faz taşınımını tanımlar ve ergime sıcaklığına yakın sıcaklıklarda buhar basıncı yüksek olan metallerde görülür. Buhar basıncı düşük olan metallerde buharlaşma yoğunlaşma mekanizmasıyla taşınım pek etkin rol oynamaz. Bu yüzden bu taşınım mekanizması buhar basıncı düşük olan metaller için önemli değildir. Viskoz akma ile taşınım, camların sinterlenmesinde önemli bir taşınım mekanizması olduğundan, bu tez çalışmasında, bu mekanizmaya değinilmeyecektir.

Difüzyon ile meydana gelen atomsal taşınım esas olarak küresel mekanizmasıyla olur. Boşluk konsantrasyonu ise sıcaklığın, kimyasal potansiyelin veya malzemeye uygulanan gerilmelerin bir fonksiyonudur. Eğri bir yüzey ile düz bir yüzey arasındaki kimyasal potansiyel farkı şu şekilde yazılabilir:

$$N - N_0 = -\gamma\Omega / \delta = RT (\ln C - \ln C_0)$$

C_0 : Düz yüzeydeki boşluk konsantrasyonu

C : Eğri yüzeydeki boşluk konsantrasyonu

C - Co boşluk konsantrasyon farkı boşlukların boyun bölgesinden (eğri yüzeyden) düz yüzeye doğru akışını sağlarken, buna ters olan yönde atom akışı olur; yani düz yüzeyden eğri yüzeye atomlar taşınır. Bu akış sonucu boyun bölgesi büyürken, taneler arası temas alanı da büyür.

Sinterlemenin son aşamalarında tane büyümesi meydana gelir. Küçük tanelerin kaybolup büyük tanelerin oluşması ile toplam tane sınırı alanındaki azalma büyüme için itici gücü oluşturur. Sinterleme sırasında çözünen atomlar tane sınırlarında toplanma eğilimi gösterirler. Bu elementer kalıntılar (empüriteler) tane sınırının hareket hızını düşürür. Aynı etkiyi yapıdaki bileşiktürü kalıntılar (inklüzyonlar) gösterebilir. Inklüzyonların bu etkisi boyutlarının küçük olması oranında artar. Tane büyümesini etkileyen diğer etkenler yapıdaki gözeneklilik ve sıvı faz mevcudiyetidir. Sinterlemenin ilk aşamalarında tane büyümesi için itici güç büyük iken tane sınırları gözenekleri aşp geçebilirler. Daha sonraki aşamalarda tane boyutu arttığından sınır hareketi için itici güç azalır ve gözenekler sınır hareketini engelleyebilir. Tane sınırlamalarında sinterleme koşullarında oluşan sıvı faz sınır hareketini azaltma eğilimi gösterir. Başlangıç tane boyutunun küçük olması büyüme hızını artırır. Küçük taneler, büyük taneler için çekirdeklenme merkezi etkisi gösterir.

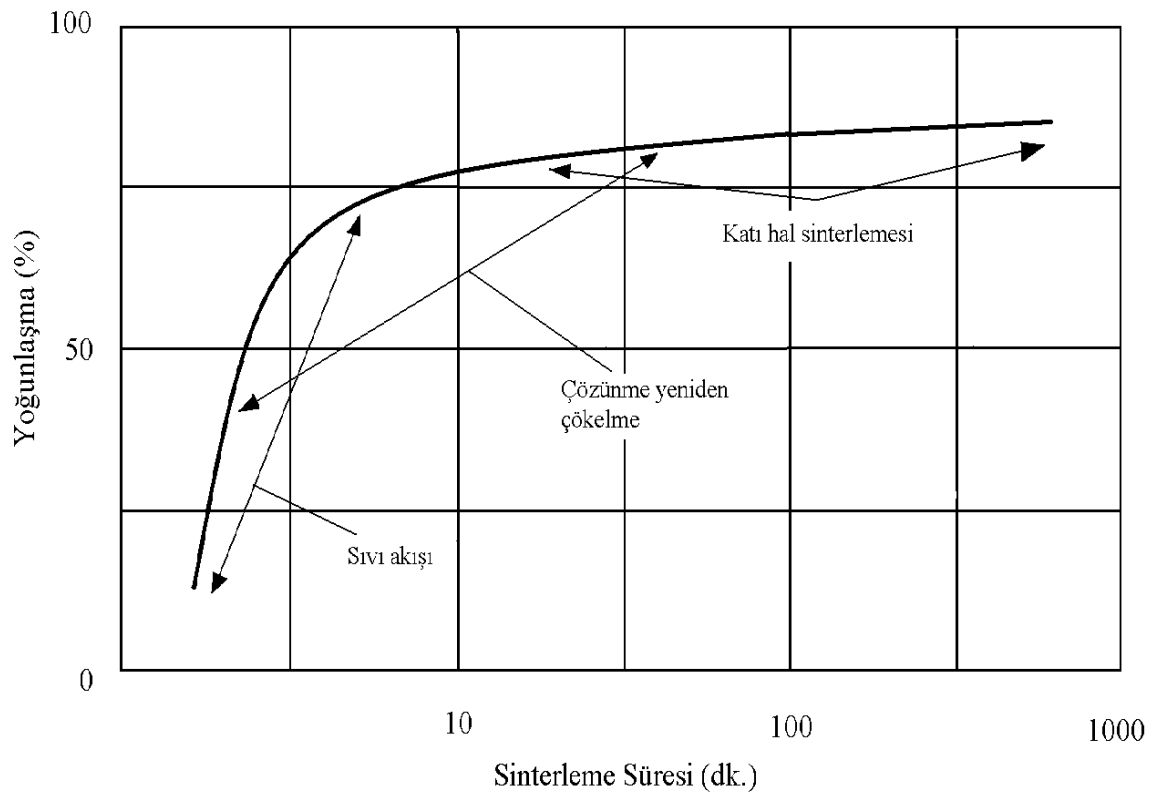
2.3.7.4. Sıvı Faz Sinterlemesi

Sıkıştırılan metal tozları, mutlak ergime sıcaklıklarının yarısı üzerindeki sıcaklıklara kadar ısıtıldıklarında sıkı bağ oluştururlar. Sinterleme şekillerinin hepsinde bulunan ortak bir özellik tane yüzey alanında meydana gelen bir azalma ve bunu takiben parça mukavemetinin artmasıdır. Bu durum sinterleme sıcaklığındaki atomik hareketlerin neden olduğu parçacıklar arası bağların oluşumu ile meydana gelir.

Sıvı faz sinterlemesi sırasında, sıvı bir faz sinterleme sıcaklığında katı bir toz kümesiyle aynı anda bulunur. Genellikle sıvı faz, sinterleme esnasında parçacıklar arası bağ oluşumunu artırır. Parçacıklar arası bağlanmaya eşlik eden mukavemet, süneklik, iletkenlik, manyetik geçirgenlik ve korozyon direnci gibi faktörler gözenek yapısında ve parça özelliklerindeki önemli değişikliklerdendir.

Sıvı faz sinterlemesi esnasında sıvı faz elde etmenin iki temel yolu vardır. Bunlardan ilki farklı kimyasal yapılardaki tozların kullanımıdır. İki tozun birbiriyle etkileşimi sinterleme sırasında bir sıvının oluşumuna yol açar. Ayrıca daha önce de belirtildiği gibi oluşan bu sıvı faz çözünürlük ilişkilerine bağlı olarak sinterleme boyunca sürekli ya da geçici olabilmektedir. Diğer bir yöntemde ise ön alaşımlandırılmış bir metal tozu sıvılaştırma ve katılaşma eğrileri arasındaki bir sıcaklığa kadar ısıtılabilir. Sonuçta oluşan sıvı ve katı fazların karışımı "süpersolidüs" sinterlemesine yol açar. (James, 1985; Garman, 1991; Özkal, 1994). Yukarıda söz edilen sıvı faz sinterlemesinin ana sınıfları içerisinde malzeme özelliklerine bağlı olarak yer alan birkaç

olası taşınım mekanizması söz konusudur. Örneğin katı, oluşan sıvı faz içerisinde çözünebilir veya çözünemez. Böyle bir farklılık sinterleme hızını ve mikroyapı değişimini büyük ölçüde etkiler. Diğer temel etkenler, sıvı ve katı fazlar arasındaki ara yüzey enerjileri (ıslatan sıvıya karşı, ıslatılmayan sıvılar) ve katı-katı tane sınırları boyunca sıvının nüfuz etme yeteneği ile ilgilidir. Parça büyüklüğü, sinterleme sıcaklığı, sinterleme süresi, sinterleme atmosferi ve ham yoğunluk gibi değişkenler bir araya geldiklerinde; sıvı faz sinterlemesiyle oluşan malzeme tipi üzerinde daha geniş etkilere sahip olmaktadır. Bu etkenlerin hepsinin birbirleriyle çapraz etkileşimi, sıvı faz sinterlemesinin incelenmesindeki güçlüğe katkıda bulunmaktadır.

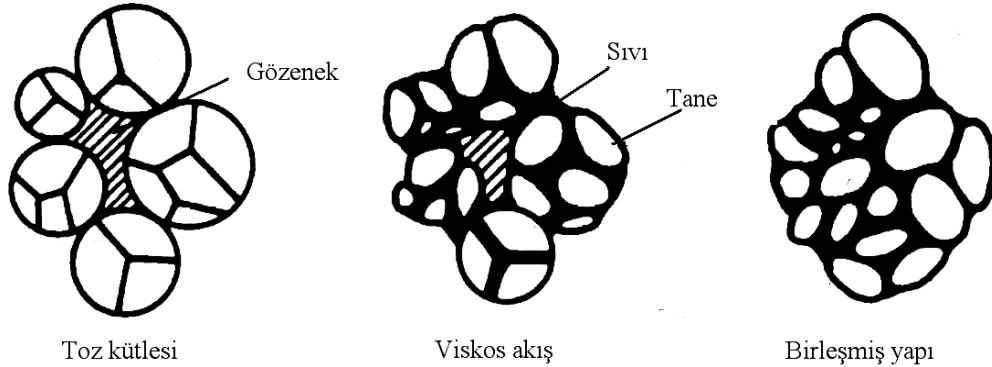


Şekil 2.22. Sıvı faz sinterleme aşamalarının şematik olarak gösterimi

Geleneksel sıvı faz sinterleme süreçleri birbiri üzerine binen üç aşama ile açıklanabilir. Şekil 2.22’de tüm bu aşamaların şematik gelişimi gösterilmektedir. İlk aşamada toz karışımları bir sıvının olduğu sıcaklığa kadar ısıtılır. Sıvı oluşumu ile katı parçacıklar üzerinde sıvının ortaya koyduğu kuvvete bağlı olarak hızlı bir şekilde başlangıç yoğunlaşması söz konusudur. Sistem yüzey enerjisinin en düşük duruma indirmeye çalışırken gözeneklerin giderilmesi gerçekleştirilir. Yeni düzenlenme boyunca kompakt kılcal hareketler doğrultusunda viskoz bir katı olarak davranır. Gözeneklerin giderilmesi sinterlenen kompaktın viskozitesi ile artar. Sonuç olarak yoğunlaşma hızı sürekli olarak azalır.

Yeniden düzenlenme ile yoğunlaşma yavaşladıkça, çözünürlük ve yayınma etkileri baskın hale gelir. Geleneksel sıvı faz sinterlemesinin ikinci aşaması çözünme-yeniden çökelme aşaması olarak bilinir. Çözünme-yeniden çökelme aşamasının sinterlemeye genel katkısı mikroyapısal irileşmedir. Bir tane onu çevreleyen sıvı çerisindeki tane boyutu ile ters orantılıdır. Küçük taneler, büyük tanelere göre daha yüksek bir çözünürlüğe sahiptirler. Çözünürlük arasındaki farklar konsantrasyon değişimini oluşturur. Malzeme yayınma yoluyla küçük tanelerden büyük tanelere iletilir. Bu süreç "irileşme" veya "oswald irileşmesi" olarak isimlendirilir. Yayınma yoluyla değiştirilen tane şekli, tanelerin daha sıkı paketlenmesine izin verir.

Sıvı faz sinterlemesinin son aşaması katı hal kontrollü sinterlemedir. Katı iskelet yapının varlığı sebebiyle yoğunlaşma bu aşamada yavaştır. Bu aşamada baskın olan süreçler aslında, tüm sıvı faz sinterlemesi boyunca aktiftirler, fakat yavaş oluşumları nedeniyle katı hal sinterlemesi, sinterleme çevriminin son aşamasına kadar önem teşkil etmez. Mikroyapısal irileşme, yayınma yoluyla devam etmesine rağmen katı iskelet yapının direnci daha ileri seviyede yeniden düzenlenmeyi engeller. Gözenekler eğer hapsolmuş gaz içeriyorsa, kompakta şişme meydana gelecek şekilde genişleyecektir. Geleneksel sıvı faz sinterlemesinin üç temel kademesi ve zamana bağlı olarak yoğunlaşma değişimi Şekil 2.23'de gösterilmiştir (Garmen, 1994).



Şekil 2.23. Sıvı faz sinterlemesinde zamana bağlı olarak yoğunlaşma

2.3.7.4.1. Sıvı Akışı ile Yeniden Düzenlenme

Sıvı faz sinterlemesinin ilk aşaması olan sıvı akışı ile yeniden düzenlenme aşamasında, sıcaklıktaki artışla birlikte düşük ergime sıcaklığına sahip bileşenler ergime sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda sıvı hale geçerler. Sıkıştırma sonunda toz taneleri mümkün olduğu kadar birbirleri içlerine girmişlerdir ve aralarında kılcal boşluklar mevcuttur. Sıvı faz

oluşumuyla birlikte bu kılcal boşluklar nedeniyle oluşan kuvvetler, oluşan sıvı fazın bu boşluklara ilerlemesine yol açar. Islatıcı sıvıya bağlı olarak kılcal kuvvetler, parçacıklar üzerinde ve parçacıklara yakın bir çevreye çekecek şekilde rol oynarlar. Bir taraftan oluşan sıvı faz katı parçacıklar arasına sızarken, bir taraftan da katı parçacıkların birbirleri üzerinde kaymalarına neden olur. Böylece mikroyapı, preslenmiş mikro yapıdan farklı olarak yeniden düzenlenmeye başlar. Parçacıklar, birbirini izleyen ve bir arada büyüyen parçacıklar gibi yakın olarak yeniden paketlenir ve viskoz akış ile mevcut gözenekler giderilir. Gözeneklerin giderilmesinden sonra yapı daha sıkı paketlenmiş bir hal alır.

Sinterleme sırasında oluşan sıvı faz bir arada bulunan parçacıklara atak yaparak bu çok kristalli parçacıkları ayırır ve bu şekilde paketlenmeyi artırır. Yeniden paketleme büyük parçacıklar arasında küçük parçacıkların yeniden dağılımı yoluyla takip edilir. Kingery bu süreci modellemiş ve zamana bağlı olarak yeniden düzenlenme çekilmesi olarak şöyle formüle etmiştir:

$$\text{Burada; } \Delta L/L_0 = R^{-1} t^{1+y}$$

R : Katı parçacık yarıçapı

t : İzotermal sinterleme süresi

L /L₀: Numune boyutundaki değişim

Sinterleme esnasında kapiler ve viskoz akıştaki azalmayı düzeltmek için 1+y üssü kullanılmıştır. Sıvı akış ile yeniden düzenlenme aşamasını etkileyen faktörler; parçacık boyutu, dihedral açısı, ıslatma, ham yoğunluk ve gözenekliliktir. Eşitlikten de anlaşılabileceği gibi küçük parça boyutunun çekilmeyi arttırdığı açıkça görülebilir. Düşük dihedral açılarda yüksek çekilme hızları görülür. Kaba parçacık yüzeyleri mekanik olarak birbirine bağlanma ile sonuçlanır ve dolayısıyla gözenekli bir yapıya neden olacak şekilde ya yeniden düzenlenmeyi geciktirir ya da engel olur. Ham yoğunlukların etkisi çok daha karışıktır. Yüksek ham yoğunluklarda parçacıklar hareket etmek için serbest değildirler ve kılcal kuvvetler yeniden düzenlenmeye çok az katkıda bulunabilirler. Düşük bir yaş yoğunlukta ise yapı gözeneklidir ve yüksek yoğunluklara ulaşmak için uzun sinter sürelerine ve/veya sinter sıcaklıklarına ihtiyaç duyulur.

Hacimce % 30-35 gibi yüksek sıvı faz içeriklerinde tam yoğunlaşma yeniden düzenlenme aşamasında sağlanabilir. Sıvı faz içeriği azaldıkça çözünme-yeniden çökme gibi diğer sıvı faz sinterleme süreçleri devreye girer (Şulan, 1993; Özkal, 1994).

2.3.7.4.1. Çözünme - Yeniden Çökelme Aşaması

Artan sıcaklıkla oluşan sıvı fazın etkisiyle katı parçacıkların yeniden düzenlenmesi aşamasında, sıvı faz miktarına bağlı olarak yoğunlaşmanın büyük bir kısmı tamamlanır. Bu aşamadan sonra yoğunlaşmanın daha da artması, katı parçacıkların boyutlarının büyümesi ve katı parçacıkların şekillerinin değişimi gibi mikroyapısal değişimler için farklı bir sürece ihtiyaç vardır. Sıvı faz içerisinde katı parçacıkların çözünmesi, sıvı film aracılığıyla taşınım ve bir başka yerde çökelmeden oluşan çözünme-yeniden çökelme aşamasında itici gücün ne olduğu, malzeme taşınımının nasıl gerçekleştiği, bu mekanizmanın yoğunlaşma ve mikroyapısal değişikliklere nasıl katkıda bulunduğu konusunda birçok deneysel çalışmalar yapılmış ve değişik modellemeler oluşturulmuştur.

Bu aşama boyunca çözünme ve yeniden çökelme aktif haldedir. Fakat sıvı faz sinterlemesinin aşamaları birbirinden net olarak ayrılmadığı için sürecin son kısımlarında bu mekanizma aktif değildir. Çözünme-yeniden çökelme aşaması ile ilgili olarak ilk çalışmaları gerçekleştiren Price, Smithells ve Williams'ın ağır alaşımlar üzerinde gerçekleştirdiği çalışmalarda, küçük ve büyük parçacıkların sıvı faz içerisindeki farklı yüzey gerilimlerinden kaynaklanan farklı çözünürlükler nedeniyle, küçük parçacıkların sıvı faz içerisinde çözünüp, sıvı faz aracılığıyla taşınarak parçacıklar üzerinde yeniden çökdikleri bir süreçle katı parçacıkların hızlı bir şekilde büyümelerinin gerçekleştiğini varsayımlardır. Öncedende belirtildiği gibi mikroyapıdaki bu irileşme "Oswald büyümesi" veya "Oswald irileşmesi" olarak adlandırılır. Price ve arkadaşları yaptıkları deneysel çalışmalar sonunda, katı parçacıklar için kritik bir x boyutu belirlemiş ve bu boyuttan daha büyük olan tanelerin büyüdüğü, daha küçük tanelerin ise çözündüğü sonuçlarına varmışlardır (Şulan, 1993).

Sıvı faz sinterlemesi sürecinde yoğunlaşma ve mikroyapısal gelişmenin ikinci aşaması olan çözünme-yeniden çökelme aşamasında hakim olan mekanizmaya yönelik oswald büyümesinden farklı bir yaklaşım da Kingery'in ileri sürdüğü "temas sonucu yassılaşıma" yaklaşımıdır. Oswald büyümesinde itici güç, yüzey enerjisindeki farktan kaynaklanan farklı yarıçaplara sahip parçacıkların sıvı faz içerisindeki farklı çözünürlükleri iken ve mekanizma özünde yoğunlaşma ile ilgili değil mikroyapısal büyüme ile ilgili iken, temas sonucu yassılaşmada itici güç temas eden parçacıkların temas bölgelerindeki çözünürlükleriyle temas dışındaki çözünürlüklerin farklı olmasıdır ve mekanizma yoğunlaşmayla daha yakından ilgilidir (Park, 1984; Şulan, 1993; Özkal, 1994).

Kingery'e göre sıvı akışı ile yeniden düzenlenme aşaması tamamlandığında, ince sıvı filmlerle birbirinden ayrılan yoğun paketlenmiş tanelerin temas ettikleri noktalarla, sıvı fazla temas eden noktalar karşılaştırılmıştır. Buna göre temas noktalarındaki çözünürlük, temas dışındaki katı yüzeyin çözünürlüğünden daha yüksektir. Bu durum, parçacıklar arası merkezden

merkeze mesafeyi azaltacak ve yoğunluğunu arttıracak şekilde, temas bölgelerinden malzeme taşınımına neden olacaktır.

Sıvı faz sinterlemesinin ikinci aşaması olan çözünme-yeniden çökelme aşamasında mikroyapısal gelişimde etkili olan bir başka mekanizma da çoğu sistemlerde gözlenen ve çözünme-yeniden çökelme aşamasını hızlandırdığı düşünülen "parçacık parçalanması" yaklaşımıdır. Parçacık parçalanması yaklaşımında sıvı faz, sinterleme sıcaklığındaki katı parçacığın içerisindeki tane sınırlarına sızar. Sıvı faz tane sınırlarında ilerlerken katı faz atomlarını çözeltiye alır ve ilerleyen sıvı faz sonunda parçacığın parçalanmasına neden olur. Böylece çözünme-yeniden çökelme mekanizmasına katkıda bulunur. Sıvı faz sinterlemesi uygulamalarında parçacık parçalanması gösteren ve üzerinde en fazla çalışılan sistem demir-bakır sistemidir. Kayser ve Petzow'un ortaklaşa gerçekleştirdikleri çalışmalarda hacimce % 10 bakır içeren demir tozu karışımı, 800 MPa basınç altında preslenmiş ve 1165 °C'de sinterlenmiştir. Demir ve bakır tozları küresel şekilli olup yaklaşık 100'üm civarında alınmıştır. 3 dakikalık tavlama sonrasında, tane sınırı hareketi temas alanları geometrisinde değişimlere neden olmuştur. Başlangıçtaki düz parçacıklar arası temas bölgeleri yerine, dalgalı sıvı tabakaları oluşmuş ve her bir tane sınırına ters yönde Fe-Cu katı ergiyiklerinden oluşan yumrular oluşmuştur (Yılmaz, 1999).

2.3.7.5. Katı Hal Sinterlemesi

Cannon ve Level sıvı faz sinterlemesinde katı parçacıkların birleşmesiyle oluşan çok taneli yapının, daha ileri yoğunlaşmasıyla rijit bir iskelet oluşumuna neden olacağını öne sürmüşlerdir. Rijit iskelet oluştuktan sonra daha ileri yoğunlaşma sinterlemenin üçüncü bir aşaması olabilir. Süreç, katı hal sinterlemesine benzer olduğu için hızı ikinci aşamadan çok daha yavaştır.

Aynı şekilde Kingery de sinterleme sürecinde kimi tanelerin yüzey enerjilerinin, sıvı katı yüzey enerjisinin iki mislinden daha az olacak şekilde yönlenebileceklerini ve bu yüzden sıvının taneler arasından tam olarak sızmayacağını belirtmiştir. Bu durumda, taneler arasındaki malzeme tamamen katı olacak ve malzeme taşınımı katı faz aracılığıyla gerçekleşecektir.

İskelet yapı oluştuktan ve sıvı aracılığıyla boyun bölgeleri yeterince büyüdüktan sonra oluşan tanecikler arası köprücükler aracılığıyla katı halde difüzyonla yoğunlaşmada bir miktar daha artış sağlanabilir. Ancak yoğunlaşmadaki bu artış ilk iki aşamaya göre son derece yavaş gerçekleşecektir (Gülsoy, 1996).

2.3.7.5. Geçici Sıvı Faz Sinterlemesi

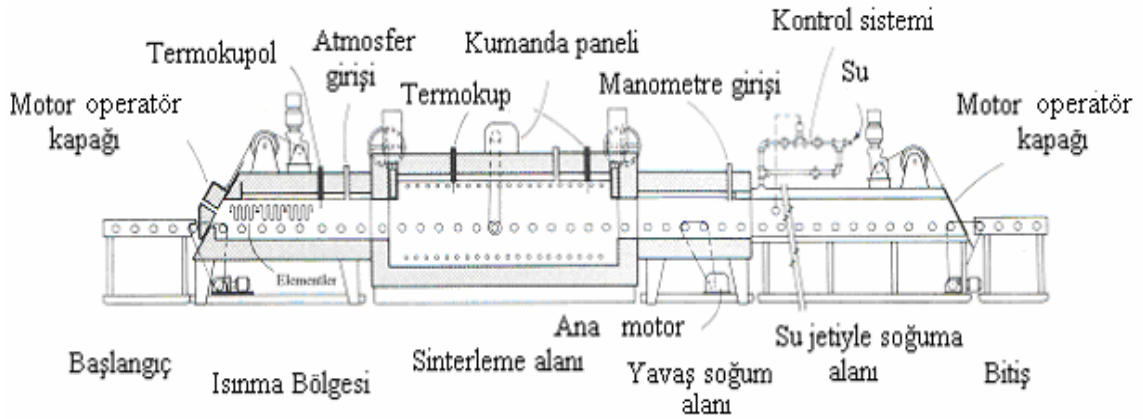
Sıvı faz sinterlemesinin iki farklı alternatifinden biri geçici sıvı faz sinterlemesidir. Yüksek ergime sıcaklığına sahip katı faz çözünme oranının yüksek olduğu durumlarda geçerli olan bu mekanizmada preslenmiş kompakt sinterleme sıcaklığına çıkartılırken sıvı faz oluşur ve kompakt sinterleme sıcaklığında bekletilirken sürecin sonunda oluşan homojen bir katı ergiyik veya iki veya daha fazla katı fazdan oluşan heterojen bir alaşım olabilir. Sinterleme sırasında homojen katı bir alaşımın oluşumuna örnek olarak, alaşım katılaşma sıcaklığının altında sinterlenen % 90 Cu ve % 10 Sn karışımlarından oluşan kendinden yağlamalı yataklar, Al-Cu, Mg-Si alaşımları uygun örneklerdir. Değişik katı fazdan oluşan heterojen alaşımlara ise diş hekimliğinde kullanılan ve oda sıcaklığında sinterlenen gümüş, kalay ve civa amalgamları örnek verilebilir. Metal tozlarının karışımından oluşan bir kompaktın sinterlenmesi, toz karışımının tam bileşimine, çözübilirlik sınırına, sıvı faz miktarına, sinterleme sıcaklığına, faz diyagramına veya sinterleme sıcaklığına, ısıtma hızına bağlı olarak sürekli sıvı faz sinterlemesi (ağır alaşım mekanizması), süreksiz sıvı faz sinterlemesi veya katı hal sinterlemesi yöntemlerinden herhangi biri içinde tanımlanabilir. Bu durumu açıklamak için birkaç örnek vermek gerekirse; % 90 Cu ve % 10 Sn toz karışımlarından oluşan bir kompakt katılaşma ve sıvılaşma sıcaklıkları arasında sinterlendiğinde, bakırca zengin bir katı ve kalayca zengin bir faz oluşur. Eğer oluşan bu alaşım hızlı katılaştırılırsa yapısı tungsten-bakır ağır alaşımın yapısına benzer ve sinterleme sürekli sıvı faz sinterlemesi mekanizmasıyla açıklanabilir. Sinterleme sıcaklığında ostenit içerisinde bakırın katı çözünürlük sınırının altında bakır içeren (örneğin 1105 °C de % 93 Fe - % 7 Cu) demir-bakır toz karışımından oluşan kompaktlar, bakırın demir içerisinde homojen bir katı çözelti oluşturabileceği şekilde yavaş ısıtılarak sinterleme sıcaklığına çıkartılması durumunda, parçacık boyutu küçük dolayısıyla yayınma mesafesi kısa ise herhangi bir sıvı oluşmayacaktır. Bu durumda işlem iç yayınmayla katı hal sinterlemesi olacaktır. Eğer aynı kompaktlar hızlı bir şekilde ısıtılırsa, yani sinterleme sıcaklığında ostenit içerisinde bakır katı çözünürlük sınırının üstünde bakır içerecek şekilde demir bakır alaşımı seçilirse (örneğin 1100 °C de % 7.5 Cu) bu durumda sıvı faz sinterlemesi (ağır alaşım mekanizması) söz konusu olacaktır (Gülsoy, 1996).

2.3.7.6. Sinterleme İşleminde Kullanılan Fırınlr ve Fırın Atmosferleri

Demir esaslı ürünlerin sinterleme işlemi sırasında, sinterlemenin sağlıklı yapılabilmesi için kontrollü atmosfer altında çalışan fırınlara ihtiyaç vardır. Sinterleme işlemi sırasında sinterleme sıcaklığına çıkma hızı, sinterleme sıcaklığında kalma süresi ve bu sıcaklıktan soğuma işlemleri kontrol edilebilir olmalıdır. Sinterleme esnasında fırın içerisindeki sıcaklık profili ve gaz akışı diğer tüm etkenler kadar önem arz eder. Sinterleme sırasında uygun bir atmosfer

seçilmediği takdirde, sinterlenen ürünün özellikleri beklenildiği gibi olmayacaktır. Seçilen sinter atmosferine bağlı olarak ürünün mekanik özellikleri (mukavemet, süneklik, sertlik) ve fiziksel özellikleri (boyutsal kararlılık, işlenebilirlik) değişecektir. Demir esaslı malzemelerin sinterlenmesinde genellikle endotermik, ekzotermik, parçalanmış amonyak, saf hidrojen ve nitrojen atmosferli fırınlar kullanılır. Kullanılan bu atmosferler içerisinde ekonomik nedenlerden dolayı en çok endotermik ve parçalanmış amonyak atmosferi ile çalışan fırınlar tercih edilmektedir.

Sinter fırınlar genellikle ön ısıtma bölgesi (yağlayıcıların uzaklaştırıldığı ısıtma bölgesi), sinter bölgesi (sinterlemenin gerçekleştirildiği bölge) ve soğutma bölgesi olmak üzere üç adet kontrollü bölgeden oluşur. Buna benzer bir fırının kesiti (şematik olarak) Şekil 2.24'de verilmiştir. İyi bir sinter fırınında bu üç bölgedeki sıcaklık profilleri, malzeme geçiş hızları ve atmosfer kontrolleri iyi bir şekilde yapılabilmelidir. Fırın içerisindeki malzemeler konveyör bantlarla ilerleyerek fırını terk ederler (Nayar, 1993).



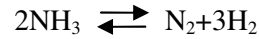
Şekil 2.24. Sinterleme fırını

Sinterlemede kullanılan kontrollü atmosfer seçimi de ürün özellikleri açısından önemlidir. Seçilecek olan atmosfer sinterleme sırasında toz tanecikleri arasında oksidasyona yol açmamalıdır. Oksijen, su buharı ve karbondioksit demir esaslı parçaların sinterlenmesinde oksidasyon ve karbürizasyona neden olurlar. Karbürizasyonun asıl nedeni ise, metan gibi hidrokarbon gazları ve karbonmonoksittir. Partiküllerin yüzeyinde oluşacak olan oksit tabakası sinterlenmeyi geciktireceği gibi mikroyapıyı olumsuz yönde etkiler.

Endotermik ve ekzotermik atmosferlerin elde edilmesinde metan ve propan gibi önemli hidrokarbon gazları kullanılır. Bu atmosferler içerisindeki nitrojen, su buharı, karbonmonoksit, hidrojen, karbondioksit ve metan gazı ve/veya gaz karışımları bulunur. Atmosfer içerisindeki hidrojen, yapıda çözünen oksijen ile tepkimeye girer ve bu tepkime sonucunda su kabarcıkları

oluşur. İlk su buhar damlacığının oluştuğu sıcaklık literatürde çığlenme noktası olarak bilinir. Su buharından oluşan bu damlacıklar malzeme bünyesinde şişkinliklere ve gözeneklere yol açar. Atmosfer içerisindeki su buharı hacmi arttıkça çığlenme noktası artış gösterir. Endotermik ve ekzotermik atmosferlerdeki karbon potansiyeli arttıkça çığlenme noktası düşüş gösterir. Sinterleme işlemlerinde ise, çığlenme noktası düşük olan kuru atmosferler tercih edilir. Endotermik atmosfer demir ve çelik esaslı parçaların sinterlenmesinde kullanılırken, ekzotermik atmosfer ise bronz ve bakır esaslı parçaların sinterlenmesinde kullanılır.

Parçalanmış amonyak atmosferi altında çalışan fırınlarda ise hacimce % 75 hidrojen ve % 25 nitrojen şu reaksiyona göre parçalanır;



Parçalanmış amonyak atmosferi düşük bir çığlenme noktasına sahip olup (-40 °C ve daha düşük sıcaklarda) gayet kuru bir atmosferdir. Atmosfer içerisindeki kalıntı parçalanmamış amonyak miktarı ise yaklaşık 250 ppm civarındadır. 1 kg sıvı amonyak parçalandığında 2,8 m³, yani 1/3 oranında parçalanmış amonyak gazı (hidrojen-nitrojen) ortaya çıkar. Bu parçalanma ise 925 °C ile 1040 °C arasında gerçekleşir. Bu atmosferin ısı iletkenliği diğer sinter atmosferlerine göre daha iyidir (Yılmaz,1996).

3. METAL İMPLANT MALZEMELER

Metaller, kas-iskelet sisteminin biyomekanik koşullarına en iyi uyum gösteren malzemelerdendir. Metaller; belirli sınırlarda ağır, uzun süreli, değişken ve ani yüklenmelere karşı özelliklerini kaybetmeden dayanabilmeleri nedeni ile tercih edilmektedirler.

En yaygın olarak kullanılan saf ya da alaşım halindeki biyometaller; Co, Ti, V, Al, Cr, W, Mo, Ni'in farklı kombinasyonundaki alaşımları ile saf titanyum ve paslanmaz çelik çeşitleridir. Metallerin saf haldeki kullanımının uygunluğu çok nadirdir. Bir metalin tek başına sağlayamadığı bazı özellikler, diğerlerinin katkısıyla oluşturulabileceğinden metallerin alaşım olarak kullanımı tercih edilir. Buna rağmen, istenilen özelliklerin tümü tam olarak alaşımlarda bulunmayabilir. Ticari metalik malzemelerin de pek çoğu alaşım halindedir. Günümüzde başlıca üç metal grubu ve bunların değişik türevleri ortopedi ameliyatlarında fabrikasyon protez malzemesi olarak kullanılmaktadır. Bunlar paslanmaz çelikler, kobalt-krom esaslı alaşımlar ve titanyum esaslı alaşımlardır. En yaygın olarak kullanılan saf ya da alaşım halindeki protezler ise; Co-Cr-Mo, Co-Ni-Cr-Mo-Ti, Co-Cr-W-Ni, Ti-Al-V alaşımları ile saf titanyum ve paslanmaz çelik çeşitleridir (Langer, 1990).

Metal protezlerin biyoyumluluğu, vücut içerisinde (in-vivo environment) korozyona uğramalarıyla ilgilidir (Williams, 1982). Korozyon, metallerin çevreleriyle istenmeyen bir kimyasal reaksiyona girerek oksijen, hidroksit ve diğer başka bileşikler oluşturarak bozunmasıdır. İnsan vücudundaki akışkan, su, çözülmüş oksijen, protein, klorür ve hidroksit gibi çeşitli iyonlar içerir (Taş, 2000). Bu nedenle, insan vücudu biyomalzeme olarak kullanılan metaller için oldukça koroziv bir ortamdır. Malzeme, korozyon sonucunda zayıflar, daha da önemlisi korozyon ürünleri doku içerisine girerek hücrelere zarar verebilirler. Bu yüzden in-vivo kullanılacak metal protezlerin, serum, tükürük veya farklı sentetik tampon çözeltiler içinde test edilmeleri gereklidir (Van Noort, 1987; Browne ve Gregson 1993). Biyomalzeme olarak kullanılan metallerin önemli olanları aşağıda sıralanmaktadır.

Tıp alanında oldukça geniş bir kullanım alanı bulan metaller (Çizelge 3.1) şekillendirilmeleri ve üretilmelerindeki güçlüğe rağmen sert dokuları ve yüksek dayanımları nedeniyle kemik yerine kullanımları uygun bulunmuştur. Metallerden kırık kemik parçalarının birleştirilmesinde; plaka ya da vida olarak, parçalı veya tek parça halinde kalça kemiği veya diz kapağı protezleri olarak, dişçilikte ise protez ve dolgu malzemesi olarak yararlanılır (Sarsılmaz, 2003).

Çizelge 3.1. Metallerin bazı tıbbi uygulamaları (Sarsılmaz, 2003)

Uygulamalar	Metal Alaşımları
Dişçilik uygulamaları	Co-Cr Alaşımları
Kınk plakları	Paslanmaz çelik (Ostenitik), Co-Cr
Kalp kapakçıkları	Co-Cr Alaşımları
Mafsal parçaları	Co-Cr Alaşımları, Ti alaşımları
Vidalar	Co-Cr Alaşımları, Ti alaşımları

3.1.Paslanmaz Çelikler

Çelikler genel olarak iki ana gruba ayrılırlar. Demir, karbon, silisyum, manganez ve az miktarda fosfor ve kükürtten oluşan çelik, karbon çeliği olarak adlandırılır. % 1'den daha düşük karbon içeriğine sahip ve diğer metaller ve ametalleri de içerecek şekilde hazırlanan çelik ise alaşımlı çelik olarak isimlendirilir. Bu gruptaki çelikler, karbon çeliğine göre daha pahalıdır ve işlenmeleri de daha zordur. Ancak, korozyon ve ısıl dirençleri çok daha yüksektir. Alaşımlı çelikler; alüminyum, krom, nikel, kobalt, manganez, molibden, silisyum, titanyum, tungsten, vanadyum ve az oranda da bakır, kükürt ve fosfor içerebilirler. Alüminyum, aşınmaya karşı direnci artırırken, yüksek miktarlarda eklenen krom, korozyon direncini ve ısıl direnci artırır. Bu tür çelikler, “paslanmaz çelik” olarak adlandırılırlar. Biyomalzeme olarak yaygın kullanılan paslanmaz çelik 316L olarak bilinir. “L”, karbon içeriğinin düşük olduğunu belirtmek için eklenmiştir. Bu çelik, 1950’li yıllarda 316 paslanmaz çeliğin karbon içeriği, ağırlıkça % 0.08’den % 0.03’e düşürülerek hazırlanmıştır. 316L’nin, % 60-65’i demir olup, % 17-19 krom ve % 12-14 nikelden oluşur. Yapısında az miktarda azot, mangan, silisyum, kükürt, fosfor ve molibden de bulunur (Pasinli, 2004).

3.2.Kobalt Bazlı Alaşımlar

Bu tip alaşımlar Co-Cr alaşımları olarak nitelendirilirler. Temelde iki tipi vardır. Bunlardan birincisi Co-Cr-Mo alaşımı olup dökümle şekillendirilir. İkincisi ise, Co-Cr-Ni-Mo alaşımıdır ve sıcak haddelenmeyle işlenir.

Dökülebilir Co-Cr-Mo alaşımı dişçilik alanında uzun süreden beri kullanılmaktadır. Son zamanlarda ise suni eklem yapımında kullanıldığı görülmektedir. Co-Cr-Ni-Mo alaşımı ise yükün fazla olduğu bacak ve kol eklemlerinde kullanılmaktadır. Çizelge 3.2’de 2 tip alaşımın bileşimi verilmiştir (Park ve Lakes, 1992).

Çizelge 3.2. Kobalt bazlı alaşımların kimyasal bileşimleri

	Co-Cr-Mo (F75)		Co-Ni-Cr-Mo (F562)	
Element	Min.	Max.	Min.	Mas.
Cr	27.0	30.00	19.0	21.000
Mo	5.0	7.00	9.0	10.500
Ni	-	2.50	33.0	37.000
Fe	-	0.75	-	1.000
C	-	0.35	-	0.025
Si	-	1.00	-	0.150
Mn	-	-	-	0.150
P	-	-	-	0.015
S	-	-	-	0.010
Ti	-	-	-	1.000
Co	Matris			

3.3. Dental Amalgam

Amalgam; bakır, gümüş, kalay ve çinkodan oluşan alaşımın civa ile karıştırılması sonucu hazırlanan sert ve dayanıklı bir malzemedir. Civa, oda sıcaklığında sıvı fazda olur ve diğer metallerle reaksiyona girmesi sonucu, bir oyuk içini doldurulabilecek plastik kütle halini alır. Bu özelliğinden dolayı amalgam, diş dolgu maddesi olarak kullanılır. Estetik olmaması ve civa içermesi, başlıca olumsuz yanlarıdır. Son yıllarda amalgamın içerdiği civanın çevresel etkileri önem kazanmış ve civanın doğa için zararlı bir atık olmasından dolayı, bir çok Avrupa ülkesinde amalgam kullanımı, büyük ölçüde kısıtlanmıştır. Ancak, tüm tartışmalara karşın, diş dolgusunda kullanılan amalgamdaki civanın sistemik toksin etkisi gösterilebilmiş değildir.

3.4. Nikel-Titanyum Alaşımları

Bu alaşımlar, deforme edildikten sonra, ısıtıldıkları zaman ilk şekillerine dönebilme özelliğine sahiptirler. Bu özellik, (Shape Memory Effect-SME) "şekil hafıza etkisi" olarak adlandırılır. Bu alaşımın SME etkisi, ilk olarak Buehler ve arkadaşları tarafından gözlemlenmiştir (Buehler, 1963). Şekil hafıza etkisinin gerekli olduğu bazı biyomalzeme

uygulamaları, diş köprüleri, kafatası içerisindeki damar bağlantıları, yapay kalp için kaslar ve ortopedik protezlerin üretiminde kullanılmaktadır (Duerig, 1990).

3.5. Titanyum ve Titanyum Alaşımlar

Titanyumun, biyomalzeme üretiminde kullanımı 1930'lu yılların sonlarıdır (Park 2000). Fiziksel ve kimyasal açıdan üstün özellikler gösteren titanyum, 316 paslanmaz çelik ve kobalt alaşımlarına göre daha hafif bir malzemedir. Özgül ağırlığı 4.5 gr/cm^3 , Ergime sıcaklığı 1680°C olan ve oda sıcaklığında sıkı dizilmiş hekzagonal kafes yapısına sahip bir metaldir. Adını Yunan mitolojisinin güçlü tanrıları titanlardan alır. Saf metalde oksitlenmenin ilerlemesini ve korozyon kimyasal maddelerle tepkimeyi engelleyici katı bir oksit tabakası oluşturması sonucu, titanyum korozyona karşı direnç kazanmıştır. Titanyum implant yüzeyinde oluşan oksit tabakasının, titanyum oksit (TiO_2)'ye benzediği ve metal-oksit ara yüzeyindeki oksitlerin karışımını değiştirdiği rapor edilmiştir (Sutherland, 1993; Kasemo, 1983). Titanyumun elde edilmesi ve işlenmesi çok zor olduğundan metal olarak kullanılması çok özel alanlarla sınırlandırılmıştır. Buna karşılık gerek titanyum mineralleri gerekse titanyum oksidin (TiO_2) geniş kullanım alanları vardır. En önemli titanyum mineralleri; rutil, anatase ve ilmenit'tir. TiO_2 (rutil ve anatase), tetragonal sisteme sahiptir. Fe_2TiO_3 (ilmenit) ise trigonal sistemde kristallenir.

Titanyumun avantajları:

- Uzun süreli implantasyonda (deri içine yerleştirme) en iyi biyouyumluluk gösterir,
- Enjekte edilen maddelerle birlikte, kimyasal reaksiyona girme olasılığı en azdır,
- Manyetik olmadığından, MR (manyetik rezonans) için uyumludur,
- Yoğunluğu düşük olduğundan dolayı, hafiftir,
- Hipoalerjiktir (alerjik özelliği az).

Son yıllarda titanyum ve titanyum alaşımlarının, tıp ve dişçilikte uygulamasında ciddi bir artış görülmektedir. Geleneksel olarak titanyum kullanımı uzay, uçak ve deniz sanayi alanlarında yoğunlaşmıştır. Metalin, dayanıklılık ve rijit yapısı, düşük özgül ağırlığı ve göreceli hafif oluşu, yüksek ısılara dayanıklılığı ve korozyona karşı direnci kullanımın bu özel alanlarda yaygınlaşmasına neden olmuştur. Son otuz yılda metalin yeni işleme yöntemlerinin gelişimine paralel olarak biyomedikal ürünlerdeki kullanımı artmaktadır. Bugün titanyum ve alaşımları protez eklem, cerrahi splint, damar stentler ve bağlayıcıları, dental implant, kron köprü ve kısmi protez yapımında

kullanılmaktadır. Metalin mekanik özelliklerini geliştirmek için; örneğin, alüminyum, vanadyum ve demir gibi metallerle alaşımı yapılır. Uluslararası ASTM, dört çeşit ticari saf titanyumu ve Ti6Al4V, "Ti6Al4V ekstra az boşluklu" ve TiAlNb olmak üzere, üç titanyum alaşımını standart olarak tanımlamaktadır (Davidson; 1994). Titanyum çok reaktif bir metal olup, korozyona karşı yüksek direncini, hızla oluşan bu koruyucu oksit tabakasına borçludur. Kimyasal kompozisyonu Çizelge 3.3, mekanik özellikleri de Çizelge 3.4'de verilen, düşük yoğunluklu ve yüksek dayanımlı titanyum, hafif protezlerin yapımında kullanılmaktadır.

Çizelge3.3. TiAl6V4 malzemesinin kompozisyonu (ASTM, 1992)

Element	V	Al	C	H	Fe	O	N	Ti	Diğer.
%	3.5-4.5	5.5-6.5	0.08	0.0125	0.25	0.13	0.05	Kalan	0.1-0.4

Çizelge3.4. TiAl6V4 malzemesinin mekanik davranışları (ASTM, 1992)

Malzeme	Akma Ger. (MPa)	Çekme Ger. (MPa)	% Uzama Oran	% Büz. Oranı
Ti6Al4V	795	860	10	25

Yüksek reaksiyona meyilli olma özelliği aynı zamanda titanyumun arzu edilen birçok özelliğinin oluşumuna neden olmaktadır. Neredeyse anında oksit olarak, metal yüzeyinde yaklaşık 10 nanometre kalınlığında dirençli ve stabil oksit katmanı oluşur. Bu oksit katmanı kıymetli metallerde olduğu gibi yüksek biyouyumlu bir yüzey ve korozyona karşın direnç özelliği sağlar. Ayrıca bu oksit katmanı porselene kaynaşma, polimere yapışma ve implantlarda plazma püskürtme veya çekirdek apatit ile kaplama yöntemlerine katkıda bulunmaktadır. Titanyum uzun süreden beri kemik içi implantı olarak kullanılmaktadır. Kemik içi implantlar çubuk, post ve blade şeklinde saf veya alaşımlı titanyumdan yapılmaktadır, implant yüzeyindeki oksit tabakasının inert etkisi, fizyolojik sıvı, protein, sert ve yumuşak dokunun metal yüzeyini kavramasını sağlar.

Canlı doku ve implantın statik ve fonksiyonel olarak bu birleşme işlemine, osteointegration denilmektedir (Branemark, 1983). Kemik ile titanyum yüzey arasındaki bağı tanımlamak için "osteointegration" terimini ilk kez ortaya koymuştur. "Bio-integration", biyoaktif bir yüzeyde kemik gelişimini tetiklemek anlamına gelir. Bu da kemik ile implant arasındaki bağı direktörler. Biyoaktivite, lifli doku arasına girmeksizin bir malzemenin canlı dokuya bağlanma özelliğidir (Williams, 1991). Kemikle bağlanması iyi ve doku tarafından kabul edilirliliği yüksek olan titanyum, yerleştirildikten sonra vücudun bir parçası haline gelir. Bu da implanta maksimum dayanım sağlamaktadır.

3.6. Metalik İmplant Malzemelerin Mekanik Özellikleri

Biyomalzemeler vücutta oldukça yüksek kuvvetlere ve gerilmelere maruz kalabilirler. Bu yüklenmeler vücudun hareketine bağlı olarak hem statik hem de dinamik olabilirler. Kırık bir kemiğin tamiri için uygulanmış bir biyomalzeme, eklem ve kas zorlanmalarında meydana gelen yüklenmelere karşı dayanıklı olmalıdır. Tipik yüklenmeleri değerlendirmek için bazı basit statik durum hesaplamaları yapılabilir. Örneğin tek bacak üzerinde durulduğunda temurbaşı üzerine düşen yük miktarı yaklaşık olarak vücut ağırlığının 2.5 katıdır. Vücut hareket ettiğinde yüklenmeler artar. Yürüme sırasında kalçadaki yük, vücut ağırlığını 4 katına, dizdeki ise 3 katına çıkar. Koşma ve zıplama sırasında kalça-diz eklemlerinde yüklenmeler daha da artar. Bu yüklenmelerin sıklığı (birim zamandaki sayısı) da önemlidir. Hızlı bir yürüme saniyede tam bir yürüme çevrimine (iki adım) karşılık gelir. Ortalama bir insan yılda iki milyon adım atabilir. Aktif bir insan için bu sayı iki yada üç katına çıkabilir (Kurgan, 2005). Metalik malzemeler, mekanik özellikler bakımından diğerlerine göre daha üstün niteliktedirler. Metalik malzemelerin mekanik özellikleri üretim yöntemlerine göre farklılık gösterirler. Soğuk şekillendirilmiş biyometalik malzemeler akma, çekme, yorulma mukavemetleri ve % uzama bakımından mükemmel mekanik özellik gösterirler. Ti-6Al-4V alaşımının mekanik özellikleri implant edilebilen diğer metal alaşımlarının mekanik özellikleriyle rahatlıkla karşılaştırılabilir. Elde edilen mukavemet yaklaşık olarak 316L paslanmaz çelik ile aynı ve Co-Cr-Mo alaşımının mukavemetinin hemen hemen iki katıdır. Elastisite modülü ise cerrahide kullanılan diğer alaşımların yarısı kadardır. Modülün küçük olması malzemenin daha az sert olmasına ve yük uygulandığında elastik olarak deforme olmasına neden olur. Bahsedilen bu özellikler bir kemiğin elastik özellikleriyle, cerrahi implant malzemelerinin uyumluluğunun gerektiği ortopedik ürünlerin geliştirilmesinde önemli roller oynayabilir.

Ortopedik implant malzemelerindeki kırılmaların en önemli nedeninin yorulma olduğuna inanılır. Paslanmaz çeliklerde, gerilme direncinin arttırılması ve tane boyutunun küçültülmesi ile malzemenin yorulma direnci artar. İmplantlar üzerinde yapılan araştırmalar; yorulma hatalarının öncelikle malzeme hataları, tasarım, kararlı olamayan iç düzensizlikler gibi faktörlerden kaynaklandığını göstermiştir (Fındık ve Coşan, 2002).

Protez malzemelerindeki en ufak zayıflık ve yetersizlik, ardışık cerrahi müdahaleleri de ardından gerektireceğinden, protez malzemelerinin yerine göre, aşağıda da sıralanan özellikleri taşıması beklenilmektedir.

-Akma, çekme-basma dayanımı, süneklik, tokluk ve elastisite modülü gibi mekanik davranışlar bakımından üstün özellikler gösterebilmelidir.

-Milyonlarca sayıdaki titreşim ve darbelere karşı yeterli dayanım için, yorulma dayanım süreleri arzu edilen sınırlar içinde olmalıdır.

-Korozyon direncini, korozi ortamda da uzun dönem sürdürebilmelidir. Çünkü, insan vücudu yüksek doygunlukta oksijenli çözelti (% 0,9 NaCl) ve protein içeren, oldukça etkili bir korozi ortama sahiptir.

-Vücut dokusu ile temas halinde iken, herhangi bir alerjik reaksiyona neden olmaksızın, biyolojik uyumluluk gösterebilmelidir.

-Eklem hareketleri nedeniyle oluşacak, sürtünme ve aşınma davranışları sonucu ortaya çıkan artık ve parçacıklar, vücutta büyük tehlikelere yol açabileceğinden, sürtünme ve aşınma davranışları üstün niteliklerde olmalıdır.

-Kemik dokunun gelişimini önlemeksizin tutunma yüzeyi oluşturabilen, aynı zamanda kan ve vücut sıvılarının dolaşımına engel oluşturmayacak özellikteki, gözenekli bir iç ve yüzeysel yapıya sahip olmalıdır.

-Manyetik alanlardan etkilenmeme ve hafiflik, estetik olma gibi özelliklere de sahip olmalıdır.

Yukarıda söz edilen tüm bu özelliklerin, tek tip bir biyomalzemede bulunması mümkün değildir. Metal, polimer, seramik, veya kompozit çeşitleri bulunan biyomalzemelerin, yerine göre saf, alaşımlı ya da kompozit halde üretilip, fonksiyonunu yerine getireceği uzva göre tasarlanıp üretilmesi söz konusudur.

Günümüzde halen devam etmekte olan biyomalzeme ile ilgili araştırma çalışmaları giderek artan yoğunlukta devam etmektedir. Her geçen gün, vücut ve dokularla daha uyumlu, daha az aşınma ve korozyon davranışı gösteren, daha uzun süre dayanabilen, daha ekonomik ve gerektiğinde de daha estetik görünüm taşıyabilen biyomalzemelerin keşif ve kullanım imkanı artmaktadır. İnsanların yaşam kalitesini artırmaya yönelik olan bu çalışmalara T/M'nin katkısı da açıkça görülmektedir (Kurgan, 2005).

3.7. Toz Metal Teknolojisinin Biyomalzemelere Sağladığı Katkıları

T/M nin halen çok farklı alanlarda yaygın olarak kullanılmasına rağmen tıbbi amaçlı kullanımı, teknolojinin Uzay ve Havacılık Biliminden, Tıp Bilimine transferi ile başlamıştır. Özellikle döküm ve işlenebilirliklerinde zorluklar bulunan çok sert bazı malzemelerin keşif ve kullanımı, bu alandaki pek çok yeniliği de ardından getirmiştir. Yüksek kaliteli ve karmaşık şekildeki protezlerin üretilmesinde, geleneksel yöntemlerin yetersiz kaldığı durumlarda T/M teknolojisinin kullanımı, problemleri büyük ölçüde çözebilmektedir. T/M yöntemi ile üretilen protezlerde; biyomalzemelerden beklenen fonksiyonellik, biyolojik uyumluluk, aşınma ve korozyon direnci gibi özelliklerin iyileştirilmesi de mümkün olmaktadır. Yine, sadece bu yöntemin

kazandırdığı bir diğer avantaj da, istenilen biyomalzemelerin gözenekli yapıda üretilmesi imkanıdır.

Gözenekli yapıdaki protezler, titreşimleri absorbe edilebilme özelliklerinin yanı sıra, protezle temas yüzeyi oluşturan kemik doku için güçlü bir tutunma yüzeyi ve kolay kaynaşma imkanı sağlamaktadır.

T/M'nin biyomalzemelere sağladığı bir diğer avantaj da son boyut ve tolerans ölçülerinde, ek bir talaş kaldırmaya ihtiyaç duyulmaksızın, ekonomik olarak üretilmesi imkanıdır. Yalnızca, T/M teknolojisinin uygulama tekniklerinden olan kontrollü gözenek yapısında üretilip şekil verilebilen tozlar için; özel toz üretim teknikleri, sıcak/soğuk izostatik şekillendirme, yoğunluk artırma işlemleri, iyon aşılama ve plazma teknolojisi gibi farklı uygulamalar sayesinde de, istenilen boyut ve şekildeki toz çeşitleri kullanılarak, yüksek korozyon dayanımına sahip, yüksek mukavemetli, pürüzsüz yüzeyde sürtünme artıklarının oluşmadığı, biyomalzelerin ekonomik olarak üretimi mümkün olmaktadır.

Kobalt ve krom gibi sert metallerin ve titanyumun, metal alaşım veya fiber katkılı kompozitleri, zirkonya ve hidroksiapatit gibi sert seramikler ve bunların metal veya polimer katkılı kompozitleri, daldırmalı ya da püskürtmeli yöntemle yapılmış kaplamaya sahip malzemeler, çok farklı tür ve çeşitlilikteki kontrollü gözenek yapısına sahip kompozitlerden oluşan protez malzemeleri mevcuttur. Bunlar ihtiyaca göre üstün dayanım, ayarlanabilir elastisite modülü, talaşsız imalat tekniğinin sağladığı çentiksiz şekillendirilebilme¹ ve yorulma dayanımındaki gelişmelerin de katkısı ile, kemik ya da kıkırdak dokunun birleştirilmesinde ve rekonstrüksiyonunda yaygın olarak kullanılabilmektedir (Kurgan, 2005).

Alaşımlı tozlardan T/M teknolojisinin sağladığı imkanlarla, "Sıcak İzostatik Presleme" yöntemi ile üretilen çoğu protezler, mükemmel bir mekanik yapıya sahip olurken; titanyum, grafit ve benzeri biyomalzemelerin tozlarından kontrollü olarak sinterlenmiş yapıda üretilen protezlerle yapılan deneysel çalışmalarda sonuçlarda da kendi kendini yağlayabilme mekanizması sayesinde bu malzemelerin kırılma ve aşınma direncindeki olumlu gelişmeler bilinmektedir.

T/M yöntemi ile üretilcek protez parçalar, geleneksel yöntemlerle üretilcek ürünlerle karşılaştırıldığında aşağıda sıralanan pek çok potansiyel avantajlara da sahip olurlar.

- T/M kullanılan ürünlerde seri haldeki kütle üretimleri için büyük imkanlar mevcuttur.
- Diğer üretim metotlarında mümkün olmayan, metal ve metal dışı malzemelerin bir arada kullanılabilirliği, zengin ürün çeşitliliği ve esnekliğe sahip olma imkanları söz konusudur.

- T/M yöntemi, protezler için gereken en son boyut ve tolerans ölçülerinde üretilebilme imkanını da ekonomik olarak sağlayabilmektedir.

- Hammaddenin nispeten daha kolay ve ucuz elde edilebilme imkanı söz konusudur.

- Diğer yöntemlerle üretilen parçalara oranla, ikinci bir işlem ihtiyacının gerekliliği nispeten daha azdır.

- Farklı erime sıcaklıklarına sahip ayrı ayrı malzemelerden elde edilen farklı boyutlardaki tozların, değişik oranlardaki karışımı ile üretilen kontrollü gözenek yapısına sahip protez parçaların üretilebilmesi mümkündür.

- İşlemlerin yapısı gereği çok az sayıda ıskarta parçaya sebep olurlar.

- Özellikle talaşlı imalat yöntemine oranla büyük üretim kapasitesine sahiptirler.

- Parçalar, mükemmel aşınma direnci ve sürtünme katsayısına sahip özellikte üretilebilirler.

- Parçalar titreşim ve gürültüyü emici özelliğe sahiptir.

- Diğer işleme ve imalat yöntemlerinde mümkün olmayan geometrik yapıyı bu yöntemle çok kolay sağlama imkanı vardır.

- Protezlerin kullanım yerlerine göre, parçaların her biri kimyasal olarak homojen olan ya da olmayan bir yapıda üretilebilmesi imkanına sahiptir.

- T/M ile üretilmiş parçaların; dövme işlemi ile üretilmiş parçalara göre % 75 daha fazla çekme dayanımına sahip olması, özellikle ortopedik amaçlı protezlerde önem kazanmaktadır (Akdoğan ve Sarıtaş, 2002).

Toz metalürjisi (T/M) teknolojisi kullanılarak metalik malzemeden implant üretimi ile ilgili ilk çalışmalar 1960'lı yıllara dayanmaktadır. İlk çalışmalar Co-Cr-Mo alaşımından gözenekli kalça protezi üretimi üzerine yapılmıştır. Bu araştırmalarda üretilen T/M implantların mekanik ve bazı fiziksel özelliklerini geliştirmek amaçlanmıştır (Dabrovski ve Oksiuta, 2000).

Toz metalürjisi işlem metotları son 20-30 yıldır, cerrahi implantların etkili olarak gelişmesine önemli ölçüde katkıda bulunmuştur. Özellikle ortopedi ve dişçilik alanında, yük taşıma kabiliyetinin önemli olduğu ve sağlam ve güvenilir implant-kemik bağlantılarının gerekli olduğu durumlarda çok önemli yer tutmuştur (Kurgan, 2005). Toz metalürjisi teknikleri ortopedik implantların üretiminde etkili olarak kullanılmaktadır. Ön alaşımlı tozların sıcak izostatik preslenmesiyle elde edilen tam yoğun implantlar, mükemmel mekanik özelliklere sahiptirler. Ayrıca toz metal teknolojilerinin kullanımı; ince tane boyutunu sağlar, malzeme homojenliğini geliştirir ve son ölçü formunda üretim ile yüksek kaliteli, etkin maliyetli implantların üretimine öncülük etmektedir (Andersen, 1982).

3. 8. Biyomalzemelerin Toz Metalurjisi ile Şekillendirilmesi

Biyomalzemelerin üretimi için kullanılacak metal ve seramik tozlarının yanı sıra, yapıştırıcı rol oynaması bakımından bazı polimer çeşitlerinin de kullanımı söz konusudur. Tozların sıkıştırılıp şekillendirilmesi; tek eksenli presleme, haddeleme, ekstrüzyon, enjeksiyon kalıplama ve sıcak veya soğuk izostatik presleme gibi pek çok farklı metotlardan biri olabilir. Bunların içinden, protez parçasının fonksiyonuna, geometrik karmaşıklığına ve üretim miktarına bağlı olarak uygun metot seçilir (Kurgan, 2005).

Genelde karışım halindeki ana metal tozları ile yapıştırıcı rolündeki tozların birlikte kullanıldığı enjeksiyon kalıplama yöntemi tıbbi amaçlı protezlerde özellikle tercih edilen bir yöntemdir. Bu yöntemde, bir kalıba enjekte edilmiş ham haldeki parçanın kalıptan çıkarılıp kontrollü atmosfere sahip bir fırında tutulması sırasında, yapıştırıcı olarak etkin bir rol oynayan tozun da etkisi ile, parça katı hal difüzyonu ile sinterlenmiş olur. Plastik enjeksiyonla kalıplama veya yüksek basınçlı döküm işlemlerine de çok benzeyen bu yöntem sayesinde; çok küçük, karmaşık ve tamamen birbirinin eş değeri olan parçaların seri haldeki üretimlerini de mümkün olmaktadır. Bu yöntem sonunda; diğer metal işleme, şekil verme ve bitirme işlemlerine nadiren ihtiyaç duyulur.

Protezlerin üretimi için tercih edilen bir diğer metot da, soğuk izostatik presleme metodudur. Bu yöntemde, genelde taşıyıcı bir kap içindeki tozlar basınç altında, oda sıcaklığında veya soğuk bir ortamda iken sıkıştırılır. Bu metot için; sızdırmaz metal veya plastik bir kap ve basınç altındaki ortamı oluşturmak için de değişik gazlar kullanılır. Bu sıvı ya da gazlı ortamın basınç kontrolü, homojen dağılım ve yoğunluktaki parçaların üretilmesi imkanını da sağlar.

Soğuk izostatik presleme metodu ile üretilen parçanın, kalıptan çıkarıldıktan sonra sinterlenmesi gerekirken, sıcak izostatik preslemede tekrar bu ilave işleme ihtiyaç duyulmaz. Bu metot, diğer T/M yöntemleri ile üretilen protez parçalarına göre, daha büyük boyutta olanlar için de uygundur. Aynı zamanda, titanyum ve diğer zor işlenebilen süper alaşımlar türünden malzemeler için de ideal bir yöntemdir ve hemen hemen son bitirilme boyut ve toleranslarında üretilme imkanını da sağlarlar.

Soğuk izostatik presleme ile üretilmiş parçalar, kaliteli döküm ya da dövme parçalara göre daha üstün ya da eşit mekanik davranış gösterirler. Diğer T/M yöntemlerinden daha ekonomik olma gibi bir diğer avantajı da bulunan yöntem, daha önceleri; otomobil silindirlerinde, kesme takımlarında, uçak ve gemi gaz türbinlerinde, korozyon direnci gerektiren petrokimya tesisinde yaygın kullanım alanı bulurken, daha sonraları tıbbi protezler için de kullanılır olmuştur.

Kalsiyum fosfat türündeki hidroksiapatit (HA) seramik biyomalzemelerde uygulanan seçici lazer sinterlemesi (Selective Laser Sintering-SLS) metodu ile üretilen karmaşık gözenekli biyoseramiklerde korozyon ve aşınmaya karşı direncin artırılmasının yanı sıra bu özelliğin sürekliliğinin korunması sayesinde mükemmel bir biyouyumluluk ve kemik doku ile oldukça kolay kaynaşma gözlenmektedir (Akdoğan ve Sarıtaş, 2002).

Böylelikle doğal dokuların yeniden yapılanmasını sağlayacak biyomalzemelerin kullanılabilir protezlerin kullanım süresi artırılabilir. Doku yenilenmesi, son derece kapsamlı bir olaydır. Doku yapısının yeniden inşasının doku işlevinin, metabolik ve biyokimyasal davranışların ve biyomekanik performansın yeniden kazanılmasını içermektedir. Bu nedenle, doku yenilenmesi, biyoloji, genetik mühendisliği, hücre ve doku mühendisliği, görüntüleme teknikleri ve teşhis, mikro-optik ve mikro-mekanik cerrahideki ilerlemelerin ışığında gerçekleşecektir. Gözenekli, inorganik-organik hibrid malzemelerden, kontrol edilebilir hızlarda bozunabilen, kontrol edilebilir yüzey özelliklerine sahip doku iskeleleri hazırlanarak doku yenilenmesi sağlanabilmektedir.

İnorganik ve organik bölümlerin miktarı değiştirilerek, malzeme üzerindeki hücre üremesi ve farklılaşması kontrol edilebilir. Biyoaktif cam jeller, kalsiyum oksitfosfor pentaoksit-silisyum dioksit bileşimine sahip inorganik malzemelerdir. Hayvan deneyleri, bu malzemenin kemik dokusunun yenilenmesinde başarılı olduğunu göstermiştir Şu anda doku yenilenmesi için büyük bir gelecek vadetmektedir. Bileşiminde yapılacak değişimler, istenilen üç-boyutlu mimariye ulaşacak şekilde işlenmesini sağlayacak fabrikasyon tekniklerindeki gelişmelerle, bu malzemenin, yumuşak bağ dokusu ve kalp-damar dokularının yenilenmesinde de kullanımı hedeflenmektedir (Akdoğan ve Sarıtaş, 2002).

Biyomalzemelerin doku yenilenmesinden farklı yöndeki geleceği ise nanoteknolojiye dayalı uygulamalardır. Bu teknolojinin ürünü olarak geliştirilecek nanorobotların bakteri ve virüs enfeksiyonlarını tedavi etmesi, kanser hücrelerini saptayıp yok etmesi, dolaşım sistemindeki zararlı maddeleri temizlemesi, hasarlı dokulara oksijen sağlama ve çeşitli hastalıkların izlenmesi ve teşhisinde kullanımı amaçlanmaktadır (Gümüşderelioğlu 2002).

4. AŞINMA MEKANİZMALARI VE AŞINMAYI ETKİLEYEN AKTÖRLER

4.1. Aşınma Mekanizmaları

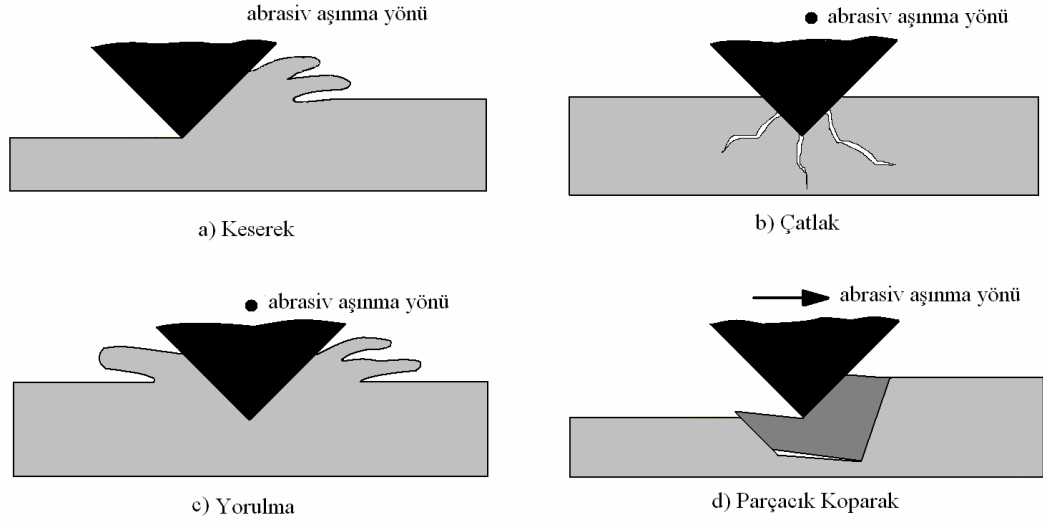
Bazı mekanik etkiler sonucunda yüzeyde meydana gelen malzeme kaybına aşınma denir. Aşınma tribolojik sistemin elemanları arasında karşılıklı zorlanmalar neticesinde meydana gelir (Çelik, 1991). Aşınmaya maruz kalan makine parçalarının ömürlerinin kısa olması; üretilen malın maliyetini artırdığı gibi bundan dolayı geçen süre ve harcama maliyetlerini de önemli ölçüde etkilenmektedir. Bu etkiye maruz kalan makine parçalarının aşınmaya dirençli malzemelerden, doğru tespit yapılarak seçilmesi gerekir. Kullanılan malzemelerin yüzeylerine gaz, sıvı ve katıların teması sonucunda çeşitli etkenlerle malzemenin yüzeyi farklı aşınma çeşitlerinden birine maruz kalır (Turhan, 1998). Aşınma çeşitleri;

- a- Abrasiv aşınma,
- b- Adhesiv aşınma,
- c- Erozyon aşınması,
- d- Kavitasyon aşınması,
- e- Korozyon aşınması,
- f- Oksidasyon aşınması,
- g- Yorulma aşınması.

4.1.1. Abrasiv Aşınması

Katı bir yüzeyden tersi yönde kuvvetlerle sert parçacıkların ve sert çıkıntıların taşınması sonucu oluşan aşınmadır. Daha genel bir ifadeyle abrasiv aşınma; katı bir objeye eşit ya da daha sert taneli bir malzeme aksi yönde yüklenildiği zaman oluşan aşınmadır. Bu aşınmaya genel bir örnek olarak küreğin aşınması verilebilir. Abrasiv aşınmanın kontrolü ve önlenmesinde temel zorluk abrasiv aşınma terimi, abrasiv aşınma mekanizmasını tam olarak tanımlayamamasındandır. Gerçekte ahenkli bir aşınma hareketi farklı birkaç mekanizmanın biriyle gerçekleşir. Tüm bu mekanizmalar farklı karakteristiklere sahiptir. Abrasiv aşınma mekanizması onları kontrol eden çeşitli yöntemleri gözden geçirerek tanımlanır.

Abrasiv aşınma mekanizması, sert tanelerin oluşturduğu aşınmayı bir eğenin malzeme yüzeyini aşındırması gibi tanımlar. Mikroskopik deneyler, kesme yöntemini sadece keskin taneler yaklaşımıyla açıklansa da birçok indirek mekanizmalar aşınmada etkindir. Şekil 4.1’de görüldüğü gibi abrasiv aşınma mekanizmaları parçacık veya taneler mikroskopik kesme, mikroskopik kırılma, tanelerin bireysel olarak ayrılıp malzemedan taşınımı veya deformasyonun tekrarlanması ile yorulmanın ivme kazanması şeklinde olur.



Şekil 4.1. Abrasiv aşınma mekanizmaları (Stachowiak and Batchelor, 2001).

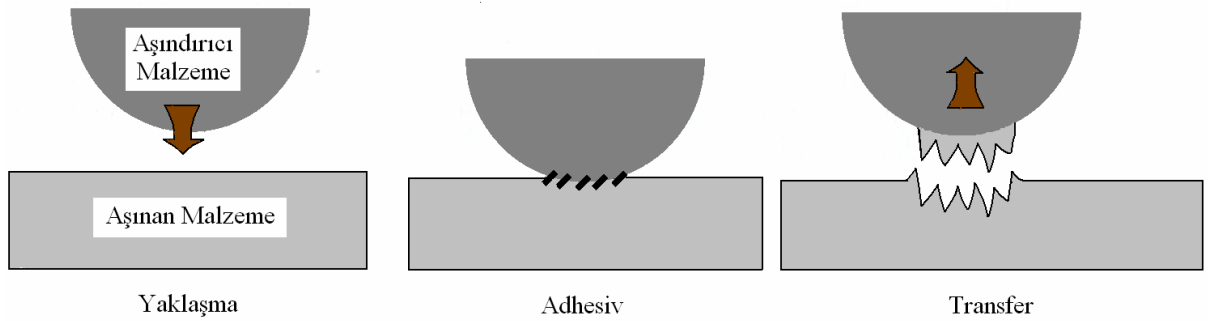
Şekil 4.1.a da gösterilen ilk mekanizmada kesme; klasik metotlarla tanımlanan sert ve keskin tanelerin yumuşak bir yüzeyi kesmesi şeklindedir. Burada malzeme aşınma derinliği kadar aşınır, aşındıran taneciklerin sıvanması ve deformasyonu önemlidir. Aşınan malzeme seramiklerde olduğu gibi sert ise şekil 4.1.b’de görüldüğü gibi gerçekleştirilirse aşınma yüzeyinde çatlaklar oluşur. Sünek bir malzeme, körleşmiş tanelerle aşındırıldığı zaman kesmenin aksine aşınma yüzeyi Şekil 4.1.c de olduğu gibi tekrarlanarak deformasyona uğrar. Bu durumda aşınma derinliği metal çatlamasıyla meydana gelen derinliktir. Şekil 4.1.d’de gösterilen son mekanizma tanelerin yerinden sökülmesi ya da tanelerin kopması şeklindedir. bu mekanizma temel olarak seramiklerde görülür. İşlem diğerlerine göre zayıf olan tanelerin sınırlarından kopar, bu mekanizmada aşınma derinliği kopan tanenin büyüklüğü kadardır.

4.1.2. Adhesiv Aşınma

Adhesiv aşınma yüksek aşınma oranı ve yüksek dengesiz sürtünme katsayısından dolayı aşınma karakteristiğinin çok önemli bir biçimidir. Kayma noktaları adhesiv aşınmayla hızla bozulabilir ve bunun sonucunda kayma hareketi çok büyük sürtünme katsayısından dolayı önlenir ve tutulur. Metal malzemeler özellikle adhesiv aşınmaya meyillidir, bundan dolayı pratikte önem arz eder. Çoğu yağlayıcılar adhesiv aşınmada kayan metallerin temas noktalarında başarısızdır. Şayet kayan yüzeylerde adhesiv ayrılma olmasa da sonraki aşınmada daima kaçınılmazdır.

Yapışma mekanizması olarak da adlandırılan adhesive aşınma, en sık rastlanan aşınma türü olmasına rağmen, genellikle hasarları hızlandırıcı etkide bulunmaz. Adhesiv aşınma bir

metal yüzeyinin bir başka metal yüzeyindeki bağıl hareketi sırasında birbirlerine kaynamış veya yapışmış yüzeydeki pürüzlerin kırılması sonucu ortaya çıkar. Adhesiv aşınma özellikle metaller arasındaki kayma sürtünmesi nedeniyle meydana gelir ve aşınma parçacıkları yumuşak bir metalden kopar (Çelik, 1991). Eğer iki metal aynı sertlikte ise aşınma her iki yüzeyde de meydana gelir. Metaller arasındaki sürtünmenin mükemmel olması, yüzeye etki eden yükün azaltılması ve malzemenin sertliğinin artırılması adhesiv aşınmayı azaltır. Sonuç olarak adhesiv aşınma; yüzeye etkiyen normal kuvvet, kayma yolu ve aşınan malzemenin yüzey sertliği ile orantılıdır. Aşağıdaki şekilde metal taşınımı şematik olarak gösterilmektedir.

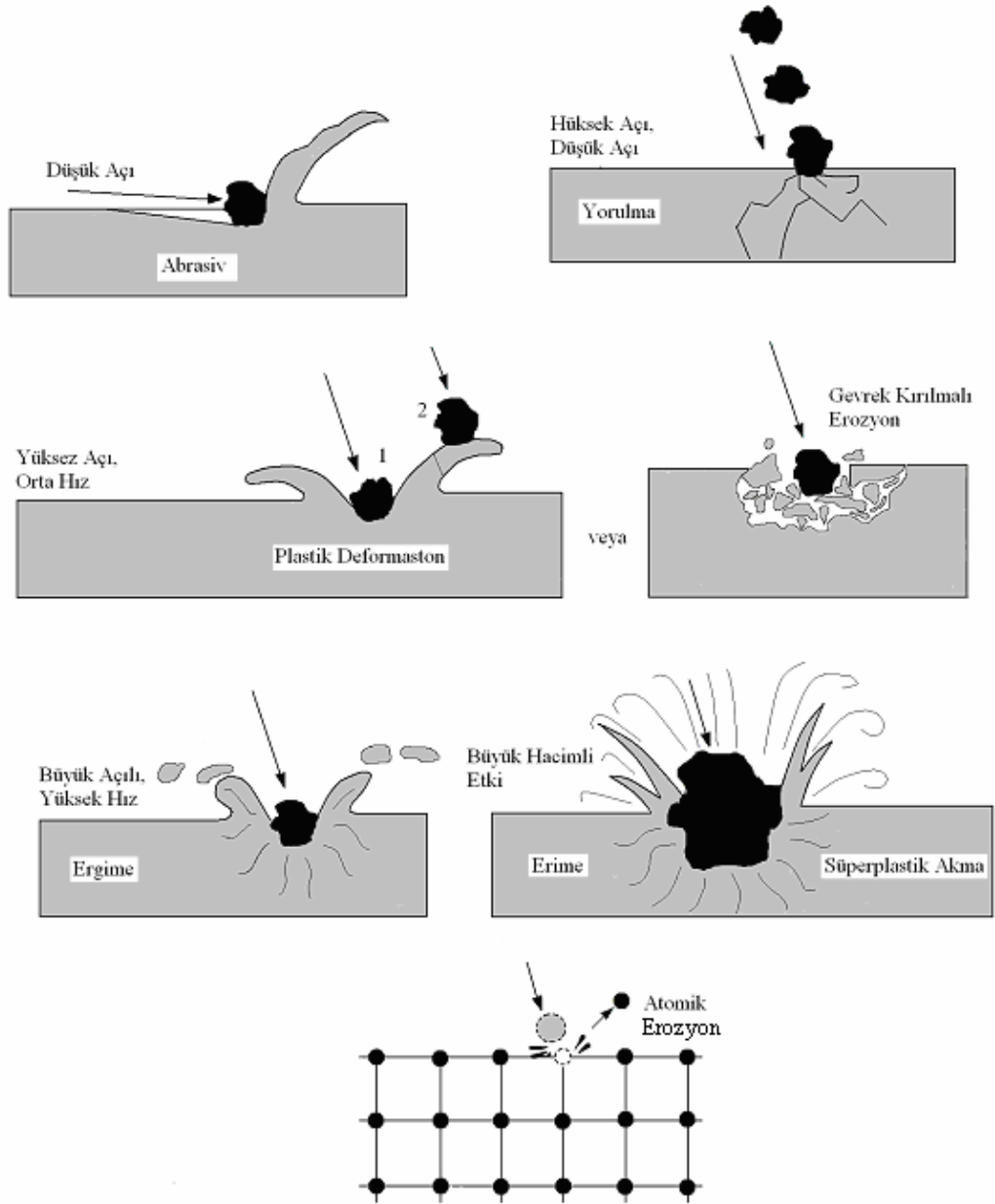


Şekil 4.2. Adhezyondan dolayı malzeme taşınımı (Stachowiak ve Batchelor, 2001).

4.1.3. Erozyon Aşınması

Bir objenin yüzeyine katı ve sıvı parçacıkların çarpmasıyla oluşan aşınmaya erozyon aşınması denir. Erozyon aşınması makine parçalarında bir çok şekillerde meydana gelebilir ve bir uçağın bir buluttan geçerken gaz türbün kanatlarının zarara uğraması buna tipik bir örnek olarak gösterilebilir. Diğer aşınma formlarının genelinde mekaniksel kuvvetler aşınma dayanımını garanti etmez ve malzeme biçimlerinin yapılan çalışmalar aşınmayı azaltmak için yapılmıştır. Aşınan parçanın özellikleri aşınmanın bu tipini kontrol etmek için önemlidir ve böylelikle ilişkili parametreler gittikçe tanımlanmış olur (Stachowiak ve Batchelor, 2001).

Korozyon aşınmasının oluşabilmesi için; malzeme parçacığı, etkileme açısı, çarpma hızı ve parçacık büyüklüğü gibi birkaç aşınma mekanizması gerekmektedir. Parçacık sert ve katı ise, abrasiv aşınmaya benzer bir yöntemle oluşması olasıdır. Sıvı parçacıklı bir aşındırıcı ise abrasiv söz konusu değildir ve aşınma mekanizması çarpma ile tekrarlanan gerilmeler sonucunda oluşur. Mekanik bileşiğe karşıdan birbirleriyle ilişkili küçük parçacıklar çarptığında oluşturduğu bilinmeyen sayıdaki aşınma mekanizmasını tanımlayan terime, erozyon aşınması denir. Erozyon aşınmasının bilinen mekanizması aşağıdaki şekilde gösterildiği gibidir.



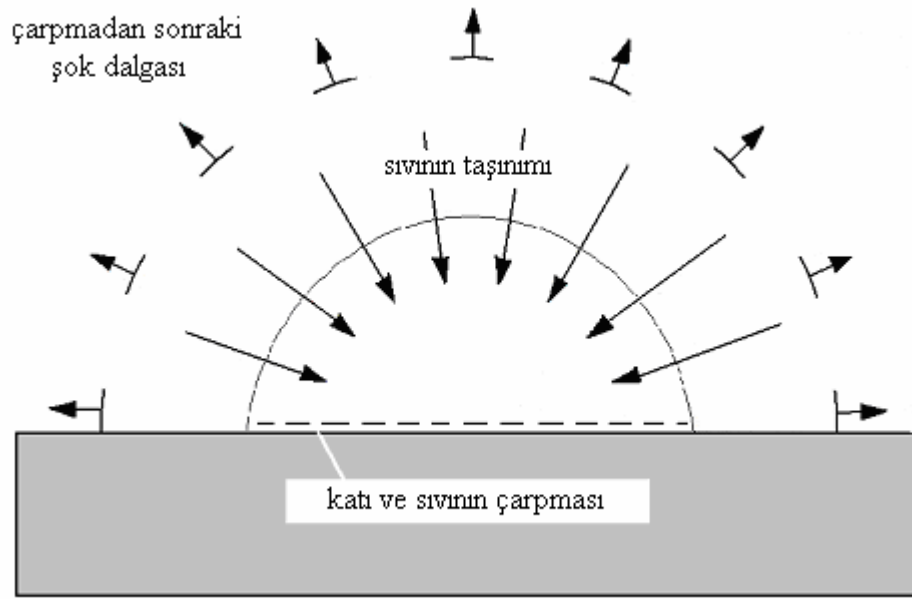
Şekil 4.3. Erozyon aşınma mekanizmaları (Stachowiak ve Batchelor, 2001).

Çapma açısı Şekil 4.3.a’da gösterildiği gibi çarpmadan hemen öncesi yüzey ve parçacığın yörüngesi arasındaki açıdır. Düşük açılı çarpımlar abrasive benzer aşınma yöntemiyle tanımlanır. Büyük açılı bir çarpa açısı tipik bir erozyon aşınma mekanizmasına neden olur. Aşındırıcı parçacığın hızı aşınma yönteminde çok güçlü etkiye sahiptir. Şayet hız plastik deformasyon oluşturmayacak kadar çok yavaş ise, aşınma yüzeyi yorulmasıyla devam eder. Çoğu mühendislik malzemeleri için geçerli olan bir hız olan 20m/s ve üzerindeki hızlarda, çarpan parçacıkla aşınan malzeme, tekrarlanan plastik deformasyon etkisiyle aşınmaya uğrar. Şayet aşınan parça düzleşmiş veya küreselleşmiş ise, plastik deformasyon sonucu aşınan

yüzeyin formu aşınan malzemede çok ince bir tabaka şeklinde olur. Parçacık keskin ise, büyük bir ihtimalle gevrek ve kırılgandır. Diğer bir ifade ile gevrek malzeme alt tabakayı çatlatarak aşınır. Bir diğer mekanizma ise çok yüksek hızlarda parçacığın yüzeye çarparak eritmesi şeklinde gerçekleşir. Atomik erozyona örnek olarak uydura hidrojen ve oksijen atomlarının çarpması ile erozyonun ortaya çıkması verilebilir.

4.1.4. Kavitasyon Aşınması

Kavitasyon aşınması buhar ortamlarında çalışan türbün kanat ve türbün ekipmanlarının zarara uğraması olarak bilinir. Aşınma kavitasyona maruz kalan yüzeyde belli bir düzende delik ve çukurların şekillenmesiyle ilerler.



Şekil 4.4. Kavitasyon aşınma mekanizmasında kabarcık çökme mekanizması (Stachowiak ve Batchelor, 2001).

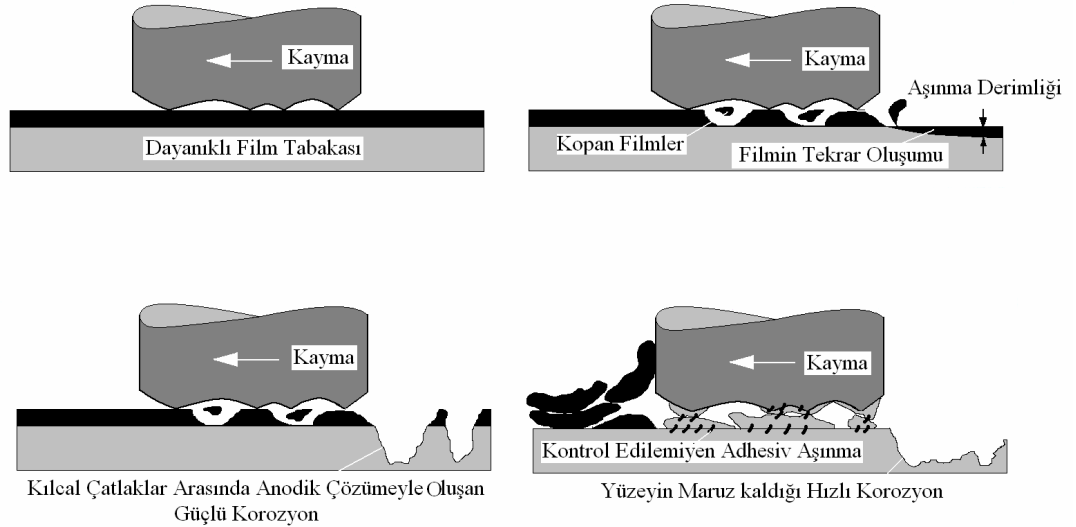
Kavitasyonun karakteristik özelliği bir akışkan ile temasda olan katı bir yüzeyin üzerinde kabarcıkların çökmesi ve çevrimsel olarak şekillenmesidir. Kabarcığın şekillenmesine sıfıra yakın veya negatif bir basınç çökmesini önleyen yerdeki sıvıdan ayrılan gazın serbest kalması neden olur. Negatif basınç örneğin akışkan sıvının küçük çaptaki borudan geniş çaptaki bir boruya geçtiği zaman oluşması gibidir. Sıvının keskin köşeli objelerin yüzeyinden hızla akması, kavitasyon aşınmasını doğurur örneğin keskin köşeli pervaneler özellikle kavitasyona eğilimlidir. Kavitasyonu önlemedeki ideal yol yüzeyde oluşan negatif basıncı önlemektir fakat bu pratikte mümkün değildir. Yüzeyde kabarcık çöktüğü zaman kabarcığa bitişik sıvı ilk etapta ivme kazanır ve daha sonra yüzeye çarpması ile azalır. Katı ve sıvı arasındaki bu çarpışma katıya zarar verebilecek büyük gerilmelere yol açabilir, basınç kısa sürede 1,5 GPa'a kadar yükselebilir.

4.1.5. Korozyon Aşınması

Korozyon aşınması hem yağlı hem de yağsız olarak birçok durumda oluşur. Aşınmanın bu aşınma türünün temel nedeni aşınan malzeme ve koroziv bir ortam arasında kimyasal bir reaksiyondur. Hızlı aşınma oranı sürtünme katsayısının düşük olmasına neden olur. Sürtünme ve aşınma arasındaki bu farklılık aşınma yöntemini belirleyen önemli bir faktördür Adhesiv aşınmayı önlemede kullanılan yüzeydeki kimyasal reaksiyon kontrol edilemezse altlık malzemede önemli kayıplara yol açar. Bir malzeme yüzeyindeki film tabakasının oluşturduğu korozyon aşağıda belirtilen yöntemlerin biriyle gerçekleşir.

- Korozyonu ve aşınmayı önleyecek güçlü bir yağlayıcı film tabakası şekillenebilir,
- Kayma temaslarının altında kısa ömürlü zayıf film tabakası oluşabilir ve hızlı bir aşınma oranı düzenli bir şekillenmeden dolayı oluşur ve film katını parçalar.
- Koruyucu yüzey filmi, yüzeydeki aşınan alanın hızlı bir şekilde korozyona uğraması sonucunda kalan film tabakası ve alt malzeme arasında galvanik bir bağlanmaya ve çukurlardan dolayı aşınma yol açabilir.

-Korozyon ve aşınma yöntemleri temelde bir araya geldiklerinde malzeme kaybına neden olan bağımsız, malzeme hasarlarına yol açan özelliklerdir. Korozyon aşınmasının modelleri aşağıdaki şekilde gösterildiği gibidir;



Şekil 4.5. Korozyon oluşturucular ve aşınan yüzey arasındaki etkileşim modelleri (Stachowiak ve Batchelor, 2001).

4.1.7. Oksidasyon Aşınması

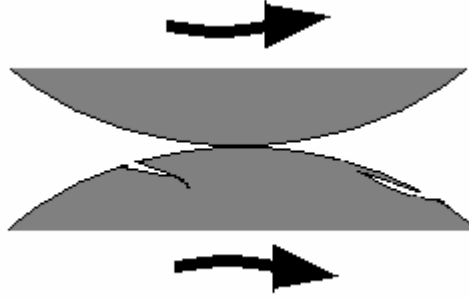
Oksidasyon aşınması hava ve oksijen bulunduran bir ortamda kuru yağsız metallerin aşınması olarak tarif edilir. Atmosferdeki oksijen kuru olarak kayan bir metalin aşınma oranını ve sürtünme katsayısını değiştirir. Yöntemde birkaç farklı mekanik gereksinimler vardır. Oksitlenme aşınması farklı yükler ve aşınma oranları altında gerçekleşen çeliklerdeki kuru kaymalı aşınma, genelde aşınma derinliğindeki kimyasal bileşiği değiştirdiği zaman gerçekleşir. Burada yük ve kayma hızı, sürtünen temas noktalarındaki sıcaklığı birkaç yüz derece artırırsa gerçekleşir. Daha sonraki oluşumlar kalın film tabakaların yumuşak aşınmanın oluşturduğu yüzey aşınma şekilleridir. Kalın film tabakası yok ve malzeme kırılğan ise adhesiv aşınma formu olan aşınma oluşur. Oksid ile etkili ve yumuşak aşınmada ortalama sürtünme katsayısı 0.3-0,6 arasında bulunur. Sert aşınmada daha yüksek bir iniş çıkış gözlenir. Oksitlenme aşınmasının karakteristik özelliklerine bakıldığında, bunlarda pürüzsüz bir aşınma yüzeyi ve küçük oksitlere sahip bir aşınma izi bulunur.

Oksidasyon aşınma durumları kalın oksit filminin şekillenmesi ve yüksek üretim sıcaklıklarında oluşan hızlı oksitlenme durumlarda meydana gelir. Sıcak hadeleme ve çeliklerin tel haline getirilmesi gibi bazı metal şekillendirme işlemleri buna birer örnek olarak verilebilir. Oksitlenme aşınmasına daha genel bir örnek verilecek olunursa tren tekerleklerinin dökme demir bir fren balatasıyla fren yaptığında oluşan aşınmadır. Yüksek sıcaklıklar yüzeysel oluşabilir veya yüksek hız ve yüklerde yüksek sürtünme ısısı şeklinde ortaya çıkabilir.

4.1.6. Yorulma Aşınması

Yorulma aşınması değişken, tekrarlı yükler sonucu ortaya çıkar. Tribolojik zorlanmalar genel olarak yüzeyde görülür. Büyüklüğü zamana ve konuma göre değişen mekanik gerilmeler sonucu meydana geldiklerinden yorulma aşınması birçok aşınma prosesinde görülür. Neticede malzeme yüzeyinde çatlaklar oluşur ve bu da yüzeyden parçacıkların ayrılması, çukur ve oyukların meydana gelmesine sebep olur.

Maksimum kayma gerilmelerinin bulunduğu yerde plastik deformasyon ve dislokasyon olaylarına bağlı olarak çok küçük boşluklar meydana gelir. Bu boşlukların zamanla yüzeye doğru ilerleyerek büyümesi yüzeyde küçük çukurların ortaya çıkmasına neden olur. Bu tür aşınma genellikle rulmanlı yataklarda ve yuvarlanma hareketi yapan mekanizmaların yüzeylerinde görülür.



Şekil 4.6. Yorulma aşınma mekanizmasının şematik görüntüsü (Buytoz , 2004)

4.2. Aşınmayı Etkileyen Faktörler

Aşınmayı etkileyen faktörler, farklı şekillerde sınıflandırılabilir. Bu faktörler, aşağıda dört grup halinde verilmiştir (Çelik, 1991).

1- Ana malzemeye bağlı faktörler:

- a. Malzemenin kristal yapısı,
- b. Malzemenin sertliği,
- c. Elastisite (Young) modülü,
- d. Deformasyon davranışı,
- e. Yüzey pürüzlüğü,
- f. Malzemenin boyutu.

2- Karşı malzemeye bağlı faktörler ve aşındırıcının etkisi.

3- Ortamın etkisi:

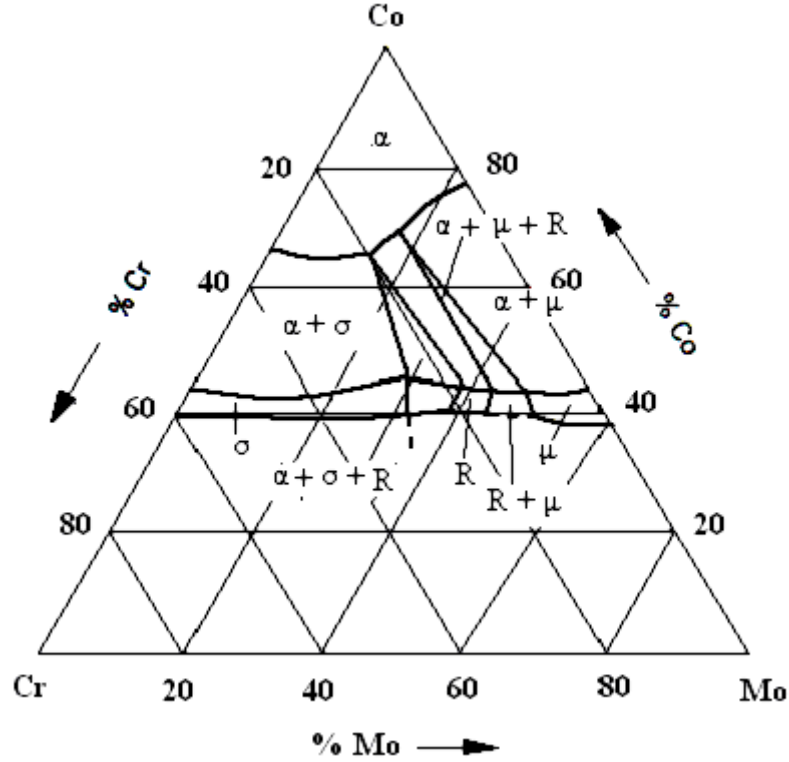
- a. Sıcaklık,
- b. Nem,
- c. Atmosfer.

4- Servis koşulları:

- a. Basınç,
- b. Hız,
- c. Kayma yolu.

5. KOBALT ALAŞIMLARININ İKİLİ VE ÜÇLÜ FAZ DİYAGRAMLARI VE YAPILARI

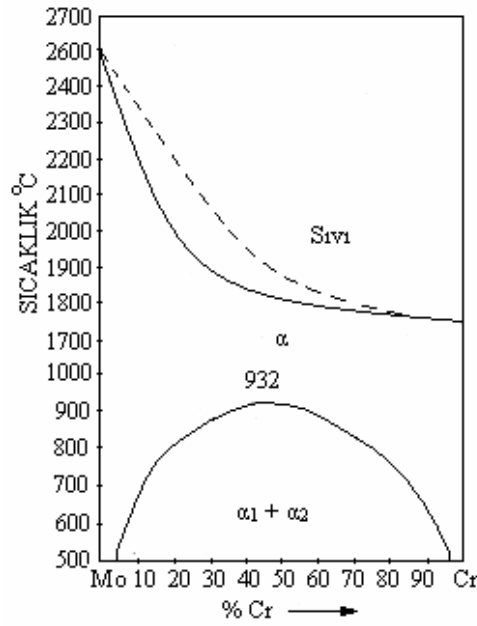
Şekil % 5.1’de Co-Cr-Mo alaşımlarının üçlü faz diyagramı incelendiğinde; α fazı sünek ve ince taneli katı eriyik faz olarak dikkat çekmektedir. Plastik deformasyon yeteneği diğer fazlara göre daha iyidir. Molibden miktarı sabit tutularak krom artırılırsa, α homojen fazından $\alpha + \sigma$ fazına geçilir. Gevrek olan σ fazının yapıda çoğalması, malzemenin sertlik ve mukavemetini az çok artıracak, sünekliliğini ise azaltarak ve onu gevrekleştirecektir. Diğer yandan bileşik karakterli sert yapılar olan σ , R ve μ fazlarında, % 40-50 Co içeriğinde bu üç bileşenli sistemde oluşmaktadır. Her üç yapı da gevrek ve kırılgan fazlar olup, bu fazlardan oluşan üçlü alaşımlar kullanılabilir özellik göstermezler. % 30 Cr oranlarını aşan Co-Cr-Mo alaşımlarında α fazının yanı sıra yapıda artan oranlarda σ fazı da görülmekte ve bu fazın yapıda çoğalması ile artan oranlarda süneklik düşmektedir. Dolayısıyla % 35’i aşan oranlarda Cr içerikleri ile çalışılması halinde yapıda R fazının da ortaya çıkacağı dikkate alınarak böyle bir alaşımların teknolojik kullanımı olanaksız görülmektedir.



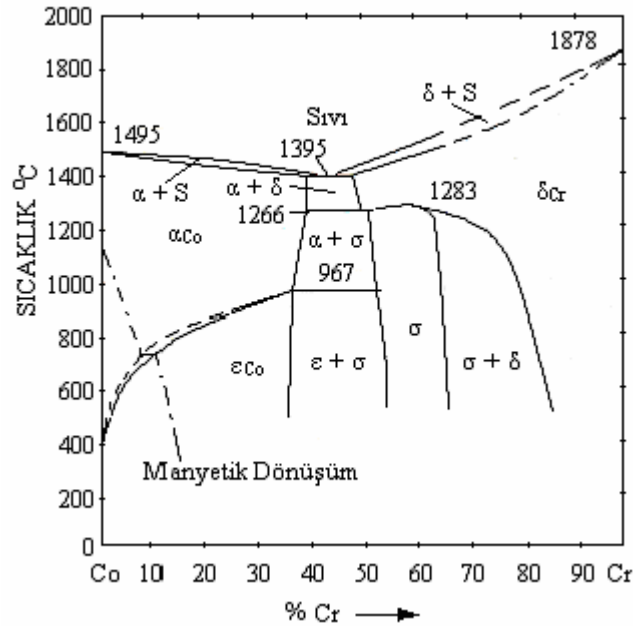
Şekil 5.1. 1200 °C’de Co-Cr-Mo alaşımlarının üçlü faz diyagramı

Zaten % 55-60 Cr katkılarında yaklaşık formülü Cr_3Co_2 olan sert ve kırılgan σ fazı oluşmaktadır. Bu faz sert ve kırılgan bir faz olup oluşması istenmez ve teknolojik kullanıma uygun değildir. % 60’ı aşan krom içeriklerinde karışamama aralığı fazları oluşmaktadır. Bu

fazların oluşması bu tür yapılara sahip alaşımların kullanımını olanaksızlaştırmaktadır. Krom'un % 10 civarında tutulup molibdenin artırılması ile; öncelikle % 80'nin üzerindeki kobalt içeriklerinde yapıda α fazı tek ve homojen bir faz olarak ortaya çıkmaktadır. % 20'yi aşan Mo oranlarında $\alpha + \mu$ 'nün oluşturduğu iki fazlı yapı görülmekte ve bu yapılar % 55'in üzerindeki Mo değerlerine kadar devam etmektedir. Bileşik karakterli μ fazı % 55-60 Mo değerlerinde oluşmakta ve daha yüksek değerlerdeki Mo katkılarında ise karışamayan fazlar oluşmaktadır (Yıldırım, 1989).

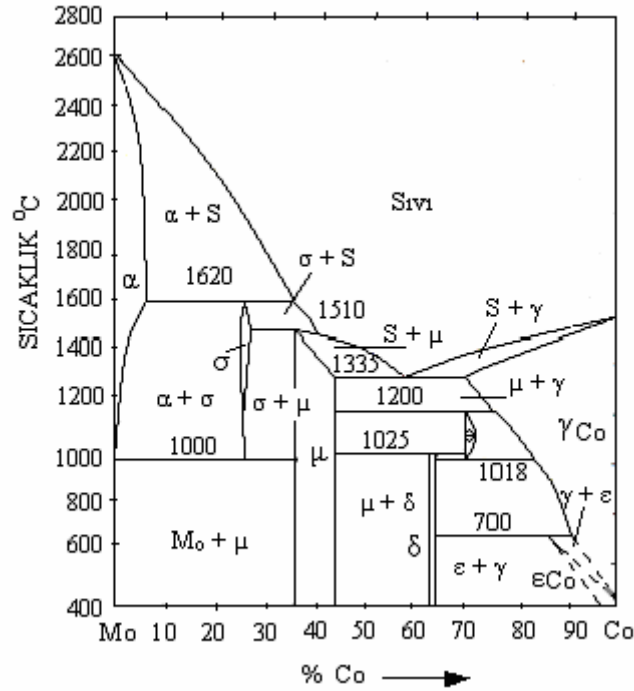


Şekil 5.2 Mo-Cr ikili alaşımların denge diyagramı



Şekil 5.3. Co-Cr ikili alaşımların denge diyagramı

Co-Cr alaşımının iki bileşenli faz diyagramı incelendiğinde; yüksek sıcaklıklarda % 0-40 Cr içeriklerinde α Co fazı, alçak sıcaklıklarda % 0-36 Cr miktarlarında ϵ Co katı eriyik fazı, 1200- 1400 $^{\circ}\text{C}$ 'lerde, Cr miktarı 44-100 arasında olursa, δ_{Cr} fazı ve Cr miktarı 51-63 arasında ise σ bileşik oluşur. Co-Cr ikili faz diyagramında ötektik reaksiyon 1395 $^{\circ}\text{C}$ 'de ve yaklaşık % 40 Cr içeriğinde gerçekleşmektedir.



Şekil 5.3. Mo-Co ikili alaşımın denge diyagramı

Mo-Co alaşımının iki bileşenli faz diyagramı incelendiğinde; 1100 $^{\circ}\text{C}$ 'nin üzerinde % 0-6 Co ilavelerinde α_{Mo} , 1000-1500 $^{\circ}\text{C}$ 'nin arasında % 38 Co oranına kadar σ fazları karışımı, %25 Co içeriğinde 1000 $^{\circ}\text{C}$ 'nin üzerinde σ bileşik fazı oluşmaktadır. % 35-45 Co katkılarında μ bileşik fazı meydana gelirken, 1200-1300 $^{\circ}\text{C}$ 'lerde bu fazla birlikte yapıda γ_{Co} fazı ve 1025 $^{\circ}\text{C}$ 'de θ fazı 1025 $^{\circ}\text{C}$ 'nin altında δ fazı görülmektedir. % 65 Co katkılarında δ bileşiğı, 1018 $^{\circ}\text{C}$ 'nin üzerinde yaklaşık % 70 Co içeriğinde de θ bileşik fazı oluşmaktadır. Ayrıca % 70'i aşan Co içeriklerinde yapıda γ_{Co} katı eriyik fazının yanı sıra θ ve δ bileşikleri de ortaya çıkmaktadır. 1200 $^{\circ}\text{C}$ 'nin altında düşen sıcaklıkla Co içerisinde eriyen Mo miktarı azalmaktadır. Düşük sıcaklıklarda gerçekleşen dönüşümler pritektoidik olarak gerçekleşmektedir.

6. LİTERATÜR ÖZETLERİ

Bu bölümde Co esaslı Cr-Mo alaşımları üzerine yapılmış çalışmalar incelenerek literatür özetleri verilmiştir.

Ping Huang ve Lopez (1998)'in yaptıkları çalışmada Co-Cr-Mo alaşımında tane büyüklüğünün atermal ϵ - martenzitin etkisini incelemişlerdir.

Liu ve arkadaşları (2005) çalışmalarında sünekliği artırmak için yeni bir tribolojik alaşım geliştirmişlerdir. Burada T-400 alaşımının Cr oranını artırıp, Mo ve Si oranını düşürerek sünekliği artan T-401 adında yeni bir Tribaloy alaşım geliştirmişler ve bu alaşımın mekanik, aşınma ve korozyon özelliklerini incelemişlerdir. Yapılan deneyler T-401 alaşımının sünekliğinin T-400 alaşımından daha iyi olduğunu, ancak Sertlik ve aşınma davranışının T-400 alaşımından daha kötü olduğunu tespit etmişlerdir.

Yao ve arkadaşları (2005); Yüksek C içeriğine sahip Stellite 706K alaşımının metalografik ve aşınma davranışları incelemişlerdir. Stellite 707K'nın temel alaşım elementi Cr ve Mo'dir. Bu alaşımın korozyon ve aşınma direncinin Stellite 6K'dan daha iyi olduğu belirlenmiştir. Stellite 6K ve Stellite 6B'den daha yüksek bir çekme dayanımına sahip olduğu tespit edilmiştir. Araştırmacılar; Stellite 706K'nın bu özeliğe sahip olmasını karbür parçacıklarının miktarına ve ilave edilen Mo'den dolayı oluşan sert matrise dayandırmışlardır.

Opris ve arkadaşları (2005); aşınmaya dayanıklı numuneler elde etmek için HIP tekniği kullanılarak Stellite alaşımları geliştirilmesi üzerine çalışmışlardır. Çalışmada Cobalt esaslı süperalaşımlardan olan Stellite 694 ve Stellite 712 bileşiklerine aşınmaya dayanıklı uygulamalar için TiC parçacıkları takviye edilmiştir. Üretim yöntemi olarak HIP yöntemi, mikroyapıdaki faz şeklini belirlemek için SEM, X-ray ve EDS analiz yöntemleri kullanılmıştır. Sonuç olarak, sıcak izostatik presleme tekniği kullanılarak üretilen numunelerde titanyum karbürlerin ilave edilmesinin aşınma direnciniavranışını artırdığını tespit etmişlerdir.

Wang ve arkadaşları (1999) çalışmalarında; demir esaslı bir malzemenin Mo içeriğini değiştirerek artan Mo oranının aşınmaya etkisini incelemişlerdir. İşlem basamakları olarak çalışmada, 1 ile 5 ms⁻¹ arasında kayma mesafesi ile 10 N ile 30 N arasında yük uygulanmıştır. Deneyler için dört farklı numune hazırlanmış; bunlardan birincisi 1120⁰C sıcaklıktan hızla soğutulmuş, ikincisi aynı sıcaklıktan soğutulup ve 500 ⁰C'de temperlenmiş, üçüncüsü 1200⁰C'de hızla soğutulmuştur ve dördüncüsü de numune 1200 ⁰C'den hızla soğutulup 500 ⁰C'de temperlenerek uygulanmıştır. Daha sonra aşınma deneyleri yapılarak aşınma değerlerine bakılmıştır.

Shin ve arkadaşları (2002) kobalt esaslı stellite yüzey sertleştirme alaşımının mikroyapı ve aşınma davranışı üzerine molibdenin etkisini incelemişler. Çalışmada; farklı molibden

içerikli Stallite 6 yüzey sertleştirilmiş alaşımları, bir plazma ark kaynak makinesi kullanılarak AISI 1045 çeliğine kaplanmıştır. Stellite 6 yüzey sertleştirme alaşımının mikro yapı ve aşınma dayanımı özelliklerine molibdenin etkisi; optik mikroskop, SEM ve X –ray kullanılarak incelenmiştir. Molibden içeriğindeki artış ile $M_{23}C_6$ ve M_6C karbür tipleri kromca zengin M_7C_3 karbürlerinin yerinde oluşmuş ve $M_{23}C_6$ karbür tipleri serbest haldeki molibden dendrikleri arası alanında gözlenmiştir. Dendritler arası alanda kromca zengin karbürler azalırken, M_6C tipi karbürlerin arttığı tipleri arttığını tespit edilmiştir.

Przybylowicz ve Kusinski (2004) yaptıkları çalışmada; demir ve nikelden oluşan alt tabakaya tirbaloy T-400 tozlarını lazer kaynak yöntemi kullanılarak kaplamışlardır. Kaplanan tabaka çapraz kesilerek optik mikroskop, SEM, TEM, EDS, XRD sertlik ve mikrosertlik test metotları ile gözden geçirilerek incelenmiştir. Diğer kaplama teknikleri ile karşılaştırıldığında lazer kaplamadaki mikroyapıların kimyasal homojenliğinin en yüksek düzeyde olduğu ve ITAP bölgesinde tane büyümesinin olduğunu belirlenmiştir. Kaplamanın erozyon aşınma davranışı araştırılmış ve genelde lazerle yapılan kaplamada erozyon aşınmasının iyi olmadığı tespit edilmiştir.

Hsang-Chung Hsu ve arkadaşları (2004); plazma alevi ile ergiterek elde edilen Co-Cr-Mo-N implant alaşımının aşınma özelliklerini araştırmışlardır. Çalışmada; HPPM (yüksek basınçlı plazma ergitme) yöntemi, yüksek azotlu Co-Cr-Mo implant alaşımı yapmak için kullanılmıştır. Ergitilerek elde edilen ingotlar daha sonra ısıtılma işlemine tabi tutulmuştur. Deney numunelerin çekme ve aşınma özellikleri değerlendirilmiştir. Deneysel sonuçlar; azot içerikli numunenin en çok % 0.288 oranında azot içerdiğini göstermiştir. Aşınma davranışı ve çekme dayanımının azot oranı yüksek olan numunelerde az olanlardan daha iyi olduğunu tespit etmişlerdir.

Matkovi ve arkadaşları (2003); Co-Cr dental alaşımlarının mikroyapı ve diğer bazı özelliklerine Mo ve Ni'nin etkisini incelemişlerdir. Co-Cr alaşımının mikro yapı ve özelliklerine Ni ve Mo ilavesinin etkisi biomedical uygulamalar için en iyi şekilde karakterize etmek amacıyla bu çalışma yapılmıştır. Ark kaynak tekniği kullanılarak argon gazı atmosferinde üretilen Co-Cr-Ni alaşımlarından hazırlanan numunelere optik mikroskop ve SEM kullanılarak mikroyapı incelemesi yapılmıştır. Üretilen numunelerden $Co_{55}Cr_{40}Ni_5$ ve $Co_{60}Cr_{30}Ni_{10}$ alaşımları dentitrik katılaşma mikroyapısında ortaya çıkmıştır. Sertlik sonuçları ve korozyon dayanımı mikroyapı ve farklı kimyasal alaşım elemanlarının etkisiyle ilişkilendirilmiştir. Nikel içeriği katkısıyla alaşımın sertliği azalmış, fakat krom içeriği ile artma göstermiştir. Dolayısı ile Co-Cr-Ni alaşımlarının sertliği Co-Mo-Cr alaşımlarından daha düşüktür. En yüksek korozyon karakteristiği tipik dendritik mikroyapılı numunelerde, daha yüksek krom içeriklerinde görülür.

Lucien Reclarua ve arkadaşları (2004); değerli metaller ilave edilmiş Co-Cr dişçilik alaşımının korozyon davranışını incelemişlerdir. Dişçilik alaşımlarına ilave edilen değerli metaller, Co-Cr gibi fazla değerli olmayan alaşımlara karşılaştırıldığında; özellikle çizgi ve oyuk korozyonu bakımından mükemmel bir aşınma davranışı gösterdiğini tespit etmişlerdir. Araştırmacılar ayrıca farklı oranlarda ilaveli çeşitli ticari alaşımların korozyon davranışını incelemek için, elektrokimyasal teknikler kullanmışlardır. İlaveten çalışmada mikroyapı incelemesi için SEM ve faz kompozisyon analizi için de EDX kullanılmıştır. Sonuç olarak, Co-Cr alaşımlarına altın ve platinin eklenmesi bu alaşımların korozyon davranışını kötüleştirmektedir. Co-Cr esaslı alaşıma ilave edilen bir miktar In,Au,Pt yapıda küresel olarak Au-In ve Au-In-Pt çökeltileri oluşturarak heterojen bir mikroyapı oluşuna yol açtığı, % 10 oranında ilave edilen Pt-Ru'un CoCr matrisinde çökeldiği ve korozyon davranışını etkilemediği gözlemlenmiştir. Değerli metalar ilave edilen CoCr dişçilik alaşımları geleneksel CoCr alaşımları ile karşılaştırıldığında, bu alaşımın bir mekanik davranışlarında önemli bir değişikliğe rastlanılmamıştır.

Petersson (2004) çalışmasında; farklı karbon içerikli WC-Co ve WC-(Ti,W)C-Co ve WC-Co toz metal ürünlerinin sinterleme kayıplarını incelemişlerdir. Sementit karbürlerin sinterlemesinde farklı karbon içerikli WC-Co esas alınmış. Kayıplar WC-Co için 1000°C sıcaklıkta ve WC-(Ti,W)C-Co için de 1100°C - 1250°C arasındaki sıcaklıklarda başlamaktadır. Yüksek karbon içerikli WC-Co başlangıçta sinterleme kayıplarını geciktirmiştir. Pratikte düşük ve orta karbon içerikleri arasında pek fark bulunmadığı, WC-(Ti,W)C-Co için kayıpların başlangıçta bileşiğin sertliğine bağlı olduğu ve düşük karbon içeriği ile artma gösterdiği. Belirlenmiştir.

Kuzucu ve arkadaşları(1996); Cr, Ni, W ve C elementlerinin ilave edildiği Co esaslı bir alaşımında oluşan fazı nı incelemişlerdir. Çalışmada, döküm yöntemiyle elde edilmiş Co-27.74Cr-19.27Ni-6.11W-1.1C alaşım döküm yöntemiyle elde edildikten sonra, sıvı N ve suda soğutulmuştur. Metalografik araştırmalar; sonucunda dendritik kollar arasında ötektik karbürlerin çökeldiğini göstermiş, dendritik bir mikroyapıya sahip bir döküm numunesi elde edilmiştir. Farklı soğutma ortamlarında hızla soğutulan numunelerde, dendritik kollar arasında çökelmiş karbür fazının bulunduğu ve bunun sonucunda daha küçük dendrit tanelerinin ve daha ince dendritik kollarının oluştuğu belirlenmiştir.

Jacobs ve arkadaşları (1990); dökümle elde edilmiş Co-Cr-Mo cerrahi implantlarının korozyon davranışı üzerine gözenekli kaplama yönteminin etkisini incelemişlerdir.

Becker ve arkadaşları (1995); cerrahi implant uygulamalarında kullanılan sinterlemeyle elde edilmiş Co-Cr-Mo gözenekli alaşımların preslenmesi, sinterlenmesiyle bunların davranış ve özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmacılar, aynı yıl yayınlanan başka bir çalışmalarında bu

malzemenin korozyon davranışını incelemişlerdir. Yine Becker ve arkadaşları (1999); cerrahi implantlar için kullanılan, toz metalurjisi tekniği ile elde edilmiş Co-Cr-Mo alaşımlarının yapısal özellikleri üzerine sinterleme atmosferi ve toz morfolojisinin etkisini incelemişlerdir.

Compton ve Shetty (2003); yaptıkları çalışmada Co-Cr-Mo alaşımlarda sinterlenmiş gözenekli tabakanın karakterizasyonunu incelemişlerdir.

Boeck ve arkadaşları (1999) Co-Cr-Mo alaşımlarının çekme ve mikroyapı özellikleri arasındaki ilişkiyi belirlemeye çalışmıştır.

Dobbs ve Robertson(1982), Co-Cr-Mo esaslı ortopedik alaşımların laboratuvar ortamında korozyon davranışını tespit etmişlerdir.

7.DENEYSEL ÇALIŞMALAR

7.1. Deneyde kullanılan Malzemeler

Bu çalışmada su atomizasyonu ile üretilmiş - 325 mesh tane boyutuna sahip krom (Cr), - 400 mesh'lik kobalt (Co) ve molibden (Mo) tozları kullanılmıştır. Bu tozlar % 99.8 saflıkta olup hazırlanan toz karışımlarının ağırlıkça % miktarları aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Çizelge 7.1. Hazırlanan toz karışımları ve ağırlıkça % miktarları

Numune No.	Numune İsmi.	Karışım Oranları (%)
1	CoCr15Mo5	% 80 Co, % 15 Cr, % 5 Mo
2	CoCr20Mo5	% 75 Co, % 20 Cr, % 5 Mo
3	CoCr22.5Mo5	% 72.5 Co, % 22.5 Cr, % 5 Mo
4	CoCr25Mo5	% 70 Co, % 25 Cr, % 5 Mo
5	CoCr27.5Mo5	% 67.5 Co, % 27.5 Cr, % 5 Mo
6	CoCr30Mo5	% 65 Co, % 30 Cr, % 5 Mo
7	CoCr35Mo5	% 60 Co, % 35 Cr, % 5 Mo

Çizelge 7.2. Kobalt tozunun kimyasal analizi

Kimyasal Analizi	% oranı
Kobalt	99.60
Nikel	0.08
Demir	0.08
Silisyum	0.035
Kalsiyum	0.023
Mangan	0.020
Karbon	0.015
Çinko	0.010
Kükürt	0.008
Bakır	0.001
Hidrojen Kaybı	0.200

Çizelge 7.3. Kobalt tozunun elek analizi

Elek Analizi	%
+100 mesh	0.01
-100 + 200 mesh	0.04
-200 +300 mesh	0.15
-300 +400 mesh	0.20
-400 mesh	99.60

Çizelge 7.4. Kobalt tozunun fiziksel özellikleri

Görünür Yoğunluğu, g/cm ³	2.5-3.5
Akıcılık Oranı, s/50g	23

Çalışmada kullanılan tozlar Alfa Aesar firmasından temin edilmiştir.

7.2. Numune Üretimine Hazırlık Aşamaları

7.2.1. Toz Miktarının Hesaplanması

Deneyde kullanılan toz metalurjisi teknikleriyle üretilen Co esaslı Co-Cr-Mo malzemelerinin üretiminde, tozların soğuk presleme sonrası oluşacak ham yoğunluk $d=6.28\text{g/cm}^3$ olacak şekilde tasarlanmıştır. Hedeflenen bu yoğunluk ve taslak numunenin hacmine göre, kalıba konulması gereken toz miktarı belirlenmiştir. Co ve Cr miktarı her numunede değişmesine rağmen, karışımda kullanılan toz miktarı bütün numuneler için eşit olarak alınmıştır. Hazırlanan taslak numunenin resmi ve ölçüleri Şekil 7.1’de verildiği gibidir. Bu ölçüler dikkate alınarak, kalıp tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Hedeflenen ham yoğunluk;

$$d = 6,28\text{Mg} / \text{m}^3$$

Taslak hacmi;

$$V = A.h$$

$$V = (\pi.r^2).h$$

$$V = (\pi.7^2).10$$

$$V = 1539,3804\text{mm}^3 \cong 1,5394\text{cm}^3$$

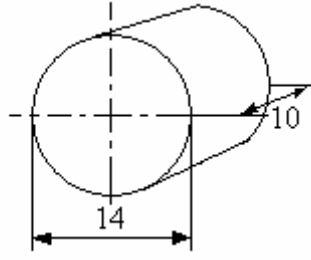
Toz Miktarı;

$$m = d.V$$

$$m = 6,28 \frac{\text{Mg}}{\text{mm}^3} \times 1,5894\text{cm}^3$$

$$m = 6,28.10^6 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \times 1,5394\text{cm}^3$$

$$m = 9,6674\text{g}$$



Şekil 7.1. Taslak numune şekli ve boyutları

7.2.2. Sıkıştırma Basıncının Hesabı

Deney için kullanılan numunenin boyutları küçük olduğundan, deneylerde tek eksenli dikey bir basma kuvveti kullanılmıştır. Co esaslı Cr-Mo katkılı toz alaşımı için sıkıştırma basıncı literatür yardımıyla farklı kuvvet aralıkları denenerek 10 mm numune yüksekliği ve 6.28 Mg/m³ yoğunluk için yaklaşık 120 kN'luk bir yük uygulanmıştır. Yoğunluk değeri, presleme basıncında bağlı olarak artmaktadır.

Bu çalışmada kullanılan tozlar için sıkıştırma basıncı aşağıda verildiği gibi belirlenmiştir.

$$A = \pi \cdot r^2$$

Sıkıştırma yüzey alanı;

$$A = \pi \cdot 7^2$$

$$A = 154 \text{ mm}^2$$

$$P = \frac{\text{Sıkıştırma Kuvveti}}{\text{Sıkıştırma Alanı}}$$

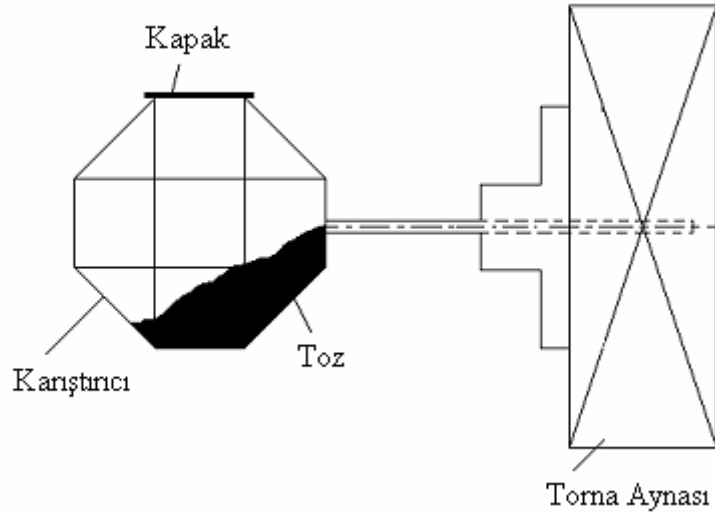
Sıkıştırma basıncı ;

$$P = \frac{120000 \text{ N}}{154 \text{ mm}^2} \cong 780 \text{ MPa}$$

7.2.3. Tozların Karıştırılması

Tozlar preslenmeden evvel aşağıda belirtildiği krom oranı farklı toz karışımlarının her birinden 50 g olarak hazırlanmış, hazırlanan bu tozlara % 0.8 oranında Çinko Stearat yağlayıcı ilave edilerek konik bir karıştırıcıda, 45 devir/dak. hızda dönecek şekilde ayarlanmış bir torna tezgahı yardımıyla 1 saat süre ile karıştırılmıştır.

1	CoCr15Mo5	50g + % 0.8 Zn - Stearat
2	CoCr20Mo5	50g + % 0.8 Zn - Stearat
3	CoCr22.5Mo5	50g + % 0.8 Zn - Stearat
4	CoCr25Mo5	50g + % 0.8 Zn - Stearat
5	CoCr27.5Mo5	50g + % 0.8 Zn - Stearat
6	CoCr30Mo5	50g + % 0.8 Zn - Stearat
7	CoCr35Mo5	50g + % 0.8 Zn - Stearat



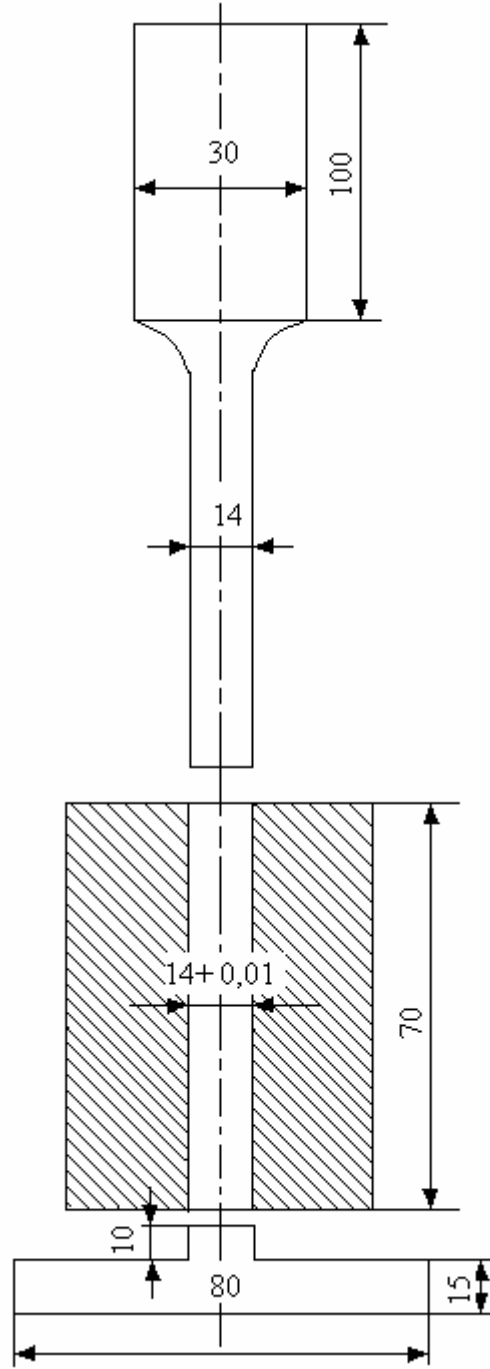
Şekil 7.2. Karıştırıcı

7.2.4. Sıkıştırma Kalıbının Üretilmesi

Üretimi yapılacak numune için bir sıkıştırma kalıbı tasarlanmış ve üretilmiştir. Kalıp malzemesi seçilirken parçaların ham yoğunluğu ve şekli göz önünde bulundurulmuştur. Bu kriterleri göz önüne alınmasındaki amaç, kalıp baskı sonucunda deformasyona maruz kalmamasıdır.

Kalıp parçaları ve plakaları Fırat Üniversitesi Meslek Yüksek Okulu'nda bulunan torna tezgahları kullanılarak hazırlanmıştır. Kalıp aksamı birbiri içinde rahat hareket ederken sürtünme ve aşınmaya maruz kalmamaları için 1-3 µm boşluk oluşacak şekilde hazırlanmıştır. Daha sonraki aşamada kalıp malzemeleri ısıtılma tabi tutulmuştur.

Dişi ve erkek kalıp için; bileşiminde % 2.1 C, % 11.5 Cr, % 7 W bulunduran X210CrW12 standart formüllü K107 kalıp çeliği kullanılmıştır. 800-850 °C'de yumuşatma tavlama uygulanan bu çelikte, tavlama sonrası 250 HB'lik bir sertliğe ulaşılmıştır. Daha sonra 650 °C'de gerginlik giderme tavı gören kalıplar, 950 °C'de 30 dakika tutulduktan sonra dişi kalıp yağda, erkek kalıp suda soğutulmuş sertleştirilme yapılmıştır. Erkek kalıbın makineye bağlanan aparatı ise, açık havada kompresör kullanılarak sertleştirme işlemi yapılmıştır.

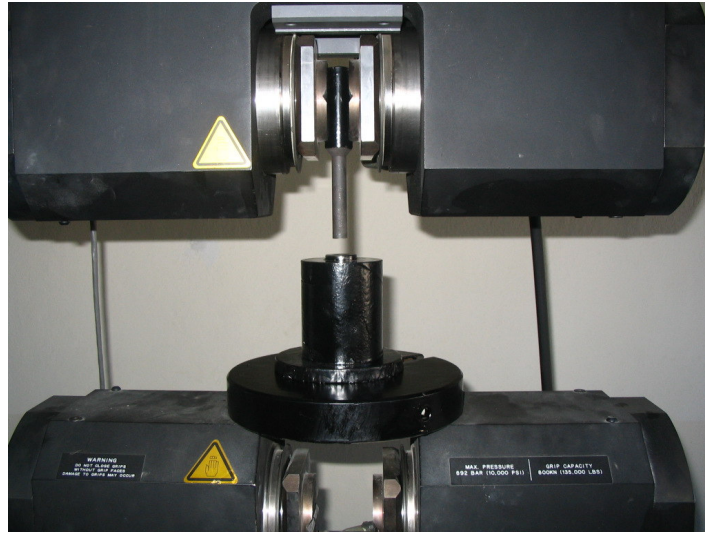


Şekil 7.3. Basma Kalıbı

7.2.5. Toz Metal Numunelerinin Soğuk Preslenmesi

Tozlar preslenmeden önce, krom oranı farklı toz karışımlarının her birinden 50 g, hazırlanan tozlara %0.8 oranında Zn-Stearat ilave edilmiştir. Tartma işlemi; Fırat Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Metal Bölümü laboratuvar'ında bulunan 10^{-5} g duyarlılıkta elektronik tartı cihazında 10'ar gram alınarak hazırlanmıştır.

Toz metalurjisinde en önemli adım preslemedir. Yapılan hesaplamalar sonucunda sıkıştırılacak toz miktarı ve sıkıştırma miktarı belirlenerek, bu verilere göre, sıkıştırma gerçekleştirilmiştir. Presleme işlemi, Fırat Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Bölümünde bulunan 50 ton kapasiteli Instron 8500 üniversal çekme- basma deney cihazında 120 kN sıkıştırma kuvveti uygulanarak yapılmıştır. Presleme işlemi tek etkili bir pres işlevi gören çekme- basma deney cihazında yapılmış, kalıbın kırılmaması için kuvvet kademeli olarak artırılarak asıl uygulanacak kuvvet bulunmuştur. Bu pres kuvvetinde birkaç numune basıldıktan daha sonra bu parçaların boyut ölçüleri kontrol edilmiştir. Parçaların yoğunluk kontrolü yapılarak yoğunluğu 6.28 g/cm^3 olarak belirlenmiş ve tüm toz karışımları bu pres kuvveti kullanılarak basılmıştır.



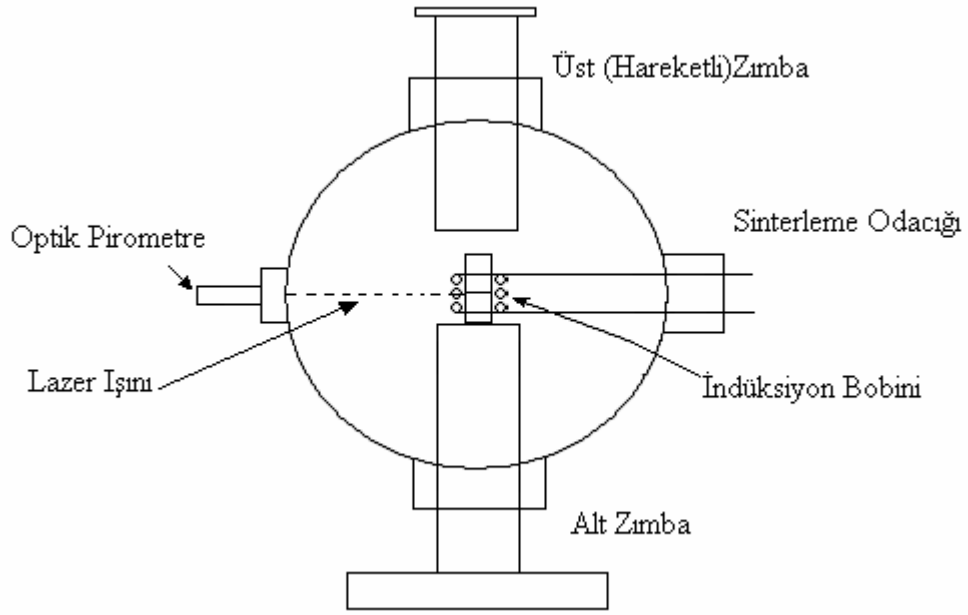
Şekil 7.4. Presleme işleminin yapıldığı kalıp ve makine resmi

7.2.6. Sinterleme

Sinterleme, preslenmiş parçalara kontrollü bir atmosferde ve yüksek sıcaklıkta istenilen nihai özelliklerin kazandırılması amacıyla yapılan bir işlemdir.

Sinterleme işlemi tüm numuneler için 1200°C de 60 dakika bekletilerek yapılmıştır. Gaz atmosferi olarak argon gazı kullanılırken, sinterleme sıcaklığı ve bekleme süresi literatür yardımıyla toz karışımlarının ergime sıcaklığının %80 alınarak belirlenmiştir.

İşlem; atmosfer korumalı indüksiyon fırınında gerçekleştirilmiştir. Numuneler önce elektrik fırınında 750°C de ön ısıtmaya tabi tutulduktan sonra, elektrik indüksiyon fırının da her bir numune ayrı ayrı $5^\circ\text{C}/10 \text{ s}$ ısıtma hızıyla sinterleme yapılmıştır. Sinterleme sırasında yüksek sinter yoğunluğunun ve iyi mekanik özelliklerin elde edilmesi için numuneler sinterleme sıcaklığında 60 dakika bekletildikten sonra aynı soğutma hızı kullanılarak oda sıcaklığına kadar soğutulmuştur.



Şekil 7.5. Sinterleme işleminin yapıldığı fırın

7.3. Yapılan Deney ve İncelemeler

7.3.1. Yoğunluk Ölçümü (Gözeneklik Oranının Belirlenmesi)

Krom oranı farklı bileşimlere sahip numunelerin sinterleme işlemi sonunda kazandıkları yoğunlukları ölçmek için piknometre kullanılmıştır. Her bir numunenin yoğunluğu aşağıda verilen yoğunluk formülü kullanılarak tespit edilmiştir. Daha sonra her bir numunenin tam yoğunlukları tespit edilmiş ve elde edilen bu yoğunluk değerlerinden hareket edilerek % gözeneklik miktarları belirlemiştir.

$$\rho_k = \frac{m_2 - m_1}{(m_4 - m_1) - (m_3 - m_2)} \rho_L$$

ρ_k : Katı maddenin yoğunluğu,

ρ_L : Referans sıvının yoğunluğu, su için 1 g/cm^3

m_1 : Piknometrenin ağırlığı,

m_2 : Piknometre + katı maddenin ağırlığı,

m_3 : Piknometre + katı madde+referans sıvının ağırlığı,

m_4 : Piknometre + referans sıvının ağırlığı,

Gözeneklilik:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{Görünür}}{\rho_{Tam}}$$

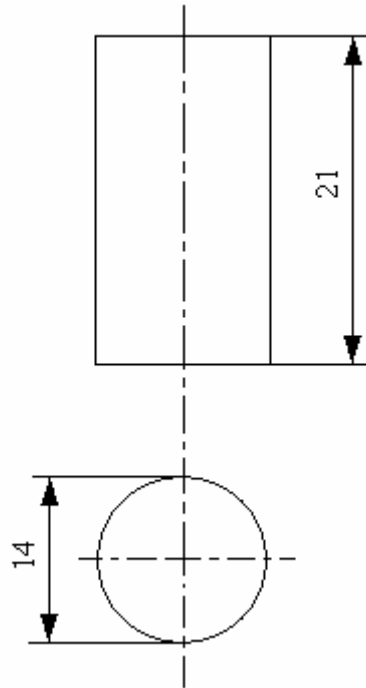
ε : % gözeneklilik miktarı

$\rho_{Görünür}$: Görünür Yoğunluk (g/mm³)

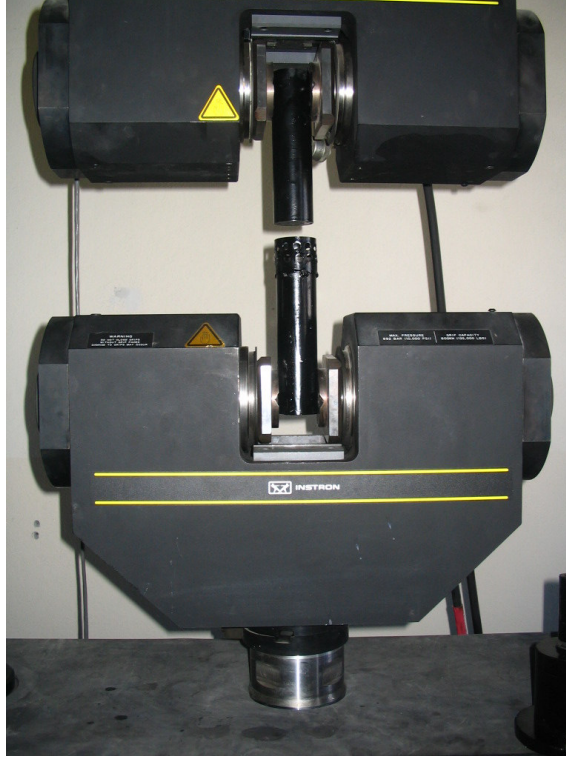
ρ_{Tam} : Tam Yoğunluk(g/mm³)

7.3.2. Basma Deneyi

Basma deneyleri; Fırat Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Metal Eğitimi Bölümü Atölyesinde bulunan Instron 8500 universal çekme – basma makinesinde yapılmıştır. Basma deneyleri için krom oranı farklı her numunenin her birinden üçer adet olmak üzere toplam 21 adet hazırlanmıştır. Numune boyutları TS 6936 EN 24506 standardına göre ve oda sıcaklığında elde edilmiştir. Basma deneyi için hazırlanan standart basma çubuğunun şekli ve boyutları Şekil 7.6 da verilmiştir.



Şekil 7.6. Basma deney numunesi



Şekil 7.7. Basma deneyinin yapıldığı çekme-basma test makinası

7.3.3. Aşınma Deneyi

Abrasiv aşınma deneyleri oda sıcaklığında torna tezgahına monta edilen kayma sistemli pin-on-disk deney aparatıyla gerçekleştirilmiştir.

Geliştirilen bu düzenekte; abrasiv aşındırıcı olarak 80 mesh'lik silisyum karbür (SiC) zımpara kağıdı kullanılmıştır. Kullanılan aşındırıcı diske ve bu disk de tornanın aynasına monte edilmiştir. Abrasiv aşınma testlerinde 10x10x10 mm ebatlarında, aşınma numuneleri kullanılmıştır. Aşınma deneyleri öncesi her numune, abrasiv aşınma yüzeyine tam olarak temas etmesi için kademeli olarak 240, 600, 800, 1200 mesh'lik silisyum karbür (SiC) taneli abrasiv aşındırıcıya tabi tutulmuştur. Abrasiv aşınma testine tabi tutulacak numune 45 dev/dak ile dönen aşındırıcı üzerine 2 mm/dev adım ile dıştan merkeze doğru 5, 10, 15, 20 m'lik dört farklı spiral yol denenmiş ve uygulanan yükler her yol için 10 N, 20 N, 30 N olarak değiştirilmiştir.

Deney numunelerinin ağırlık kaybı; aşınma aparatına bağlanmadan önce 10^{-5} hassasiyetteki Scaltec marka bir dijital terazide tartılarak not edilmiş, aşınma işleminden sonra numuneler alkol ve basınçlı hava ile temizlendikten sonra tekrar tartılarak ağırlık kaybı belirlenmiştir. Aşınma oranı ise aşağıda verilen formül ile belirlenmiştir.

$$W_a = \Delta G / d.M.S \text{ (mm}^3\text{/Nm)}$$

W_a :Aşınma oranı (mm³/Nm),

ΔG :Ağırlık kaybı (g),

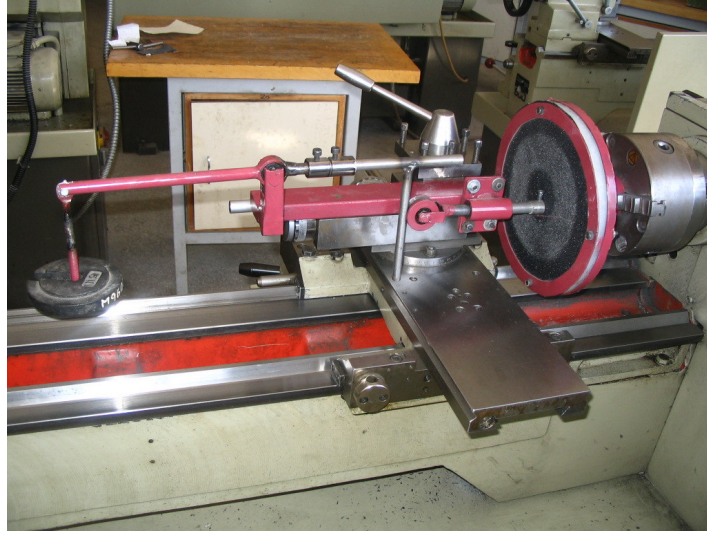
M :Yükleme ağırlığı (N),

S :Aşınma yolu (m),

d :Yoğunluk (g/cm³)

Aşınma oranının (W_a) tersi aşınma direncini (W_r) verir.

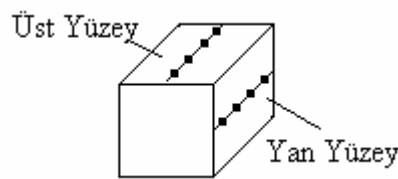
$$W_r = 1/W_a \text{ (Nm/mm}^3\text{)}$$



Şekil 7.8. Tornaya monta edilmiş aparatın resmi

7.3.4. Sertlik Deneyi

Bu çalışmada ağırlıkça krom (Cr) oranı farklı her numune 1200 mesh'lik zımparayla zımparalanıp elmas pasta ile parlatıldıktan sonra numunelerin üst ve yan yüzeylerinden 10 adet sertlik değeri alınıp alınan sertlik değerlerinin aritmetik ortalaması bulunmuştur. Sertlik ölçümleri Fırat Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Metal Eğitimi Bölümü laboratuvar'ında bulunan Instron marka sertlik ölçme cihazında 30 kg yük altında Vickers skalasında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 7.9. Sertlik ölçümün şematik gösterimi

7.3.5. Optik Mikroskop Mikroyapı İncelemeleri

Farklı krom (Cr) içeriğine sahip numunelerin sinterleme sonrası oluşan gözenekli yapılarını incelemek için optik mikroskop ile çalışmalar yapılmıştır. Optik mikroskop çalışmaları, Prior marka optik mikroskopta gerçekleştirilmiştir.

Optik mikroskop çalışmasında yüksek kalitede görüntü elde edebilmek için bütün numunelerden görüntü almadan önce ön hazırlık aşamaları yapılmıştır. Öncelikle her numune ayrı ayrı bakalite alınmış ve 220, 400, 600, 800, 1200 mesh'lik zımparayla zımparalanmış ve sonra alümina çözeltisi kullanılarak çuhada parlatılmıştır. Daha sonra dağlanan numunelerin mikroyapı fotoğrafları çekilmiştir.

7.3.6. Taramalı Elektrom Mikroskopu (SEM) İncelemeleri ve Noktasal Analiz (EDS) Ölçümleri

Taramalı elektron mikroskobu (SEM)'de krom (Cr) oranı farklı numunelerin farklı büyütme oranlarında mikroyapı resimleri çekilmiştir. 1200 °C de 60 dakika süreyle siterlenmiş Cr oranı farklı toz metal alaşımların mikroyapılarını daha iyi belirleyebilmek için numunenin farklı kesitlerinden 200, 400, 2000 büyütmelerde mikroyapı resimleri çekilmiştir. SEM ve EDS çalışmaları Erciyes Üniversitesi Teknoloji Araştırma Merkezin'de bulunan LEO marka taramalı elektron mikroskobunda yapılmıştır. Numuneler ön hazırlık aşamasında; Fırat Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Metal Eğitimi Bölümü laboratuvarlarında bulunan Struers Accutom marka hassas kesme cihazında numuneler kesilmiş. Parlatma işlemi 400, 600, 800, 1200 mesh'lik zımparada zımparalandıktan sonra elmas pasta kullanılarak çuhada yapılmıştır. Dağlama işlemi olarak önce molibdeni (Mo) açığa çıkarmak için 95 ml su, 5 ml HCl çözeltisi 5-10 V ve DC akım elektrolitik dağlayıcıda birkaç dakika dağlanmış, daha sonra kobalt (Co), dağlayıcıya (5ml HNO₃, 200 ml HCl, 65g FeCl₂) birkaç saniye daldırılarak numuneler hazırlanmıştır.

Toz dağılımı, presleme sonrası yoğunluk şekli, basma deneyi sonrası kırık yüzey ve aşınma yüzey analizi için SEM ve EDS analizi kullanılmıştır.

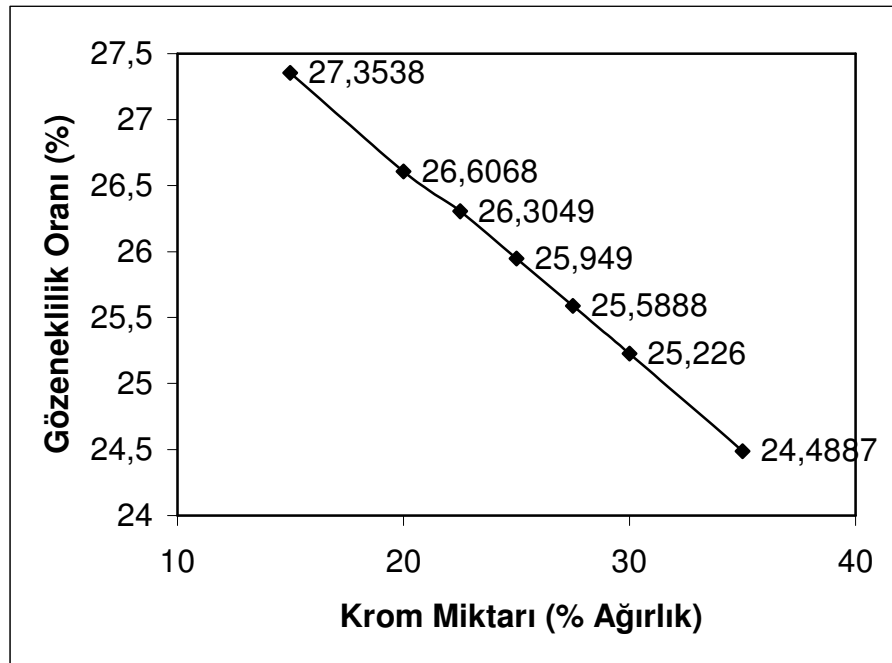
8. DENEY SONUÇLARI

8.1. Yoğunluk Ölçüm Sonuçları

Piknometreyle ham yoğunluk değerleri tespit edilmiş numunelerin gözeneklilik miktarı (%) ve tam yoğunlukları Çizelge 8.1’de, artan krom miktarına göre elde edilen gözeneklilik miktarı (%) ise Şekil 8.1’de verilmiştir.

Çizelge 8.1: Artan krom(Cr) miktarının gözeneklilik miktarıyla (%) değişimi.

Numune No	Alaşım (% Ağırlık)	Gözeneklilik Miktarı (%)	Tam Yoğunluk (g/cm ³)
1	CoCr ₁₅ Mo ₅	27.3552	8.6551
2	CoCr ₂₀ Mo ₅	26.6071	8.5670
3	CoCr _{22.5} Mo ₅	26.3049	8.5319
4	CoCr ₂₅ Mo ₅	25.9490	8.4909
5	CoCr _{27.5} Mo ₅	25.5888	8.4498
6	CoCr ₃₀ Mo ₅	25.2260	8.4088
7	CoCr ₃₅ Mo ₅	24.4887	8.3267



Şekil 8.1. Artan % Cr miktarının gözenekliliğe olan etkisi

Deneyde kullanılan farklı Cr oranına sahip Co esaslı Cr, Mo tozları tek etkili soğuk presleme tekniğiyle 120 kN luk presleme sonrası ham yoğunluğu piknometreyle ölçülerek

$d=6.28\text{g/cm}^3$ olarak bulunmuştur. Presleme esnasında kalıba aynı miktarda toz doldurulmuş, presleme basıncı Cr oranı değişmesine rağmen her numune için 120 kN olarak alınmıştır.

Krom (Cr) oranı farklı Co esaslı Cr Mo katkılı toz alaşımlarının % gözeneklilik oranı; ham yoğunlukları tam yoğunluklarla karşılaştırıldığı zaman Şekil 8.1 de gösterildiği gibi artan % Cr oranıyla birlikte % gözeneklilik miktarının azaldığı gözlenmiştir. Çizelge 8.1 de %15 Cr içeren numunenin tam yoğunluk değeri 8.65Mg/mm^3 iken %35 Cr içeren numune için tam yoğunluk değeri %8.32 dir. Artan Cr miktarıyla birlikte tam yoğunluk değerlerinin liner olarak azaldığı izlenmiştir.

8.2. Basma Deney Sonuçları

Basma deney sonucunda gerilme-birim uzama ($\sigma - \epsilon$) diyagramı Şekil 8.2, 3, 4, 5, 6, 7 Basma deney numunelerinin kırık yüzeylerinden elde edilen EDS ve SEM görüntüleri ise Şekil 8.8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15,16, 17 de verilmiştir.

Gözenek mevcudiyeti toz metalurjisi ile üretilen (T/M) malzemelerin tabiatında var olan bir fiziksel özelliktir ve sinterlenmiş toz metallerin karakteristik özelliğidir (Kurgan, 2005). Keskin köşeli gözenek özelliği ve dengesiz sinterlenmiş toz, tane sınırlarında çatlak başlangıçlarının habercisi olarak görülebilir. Gözenek geometrisi daha uzun süre veya daha yüksek sıcaklıklar gibi sinterleme çevriminin geliştirilmesi ile değiştirilebilir bu da daha iyi gözenek oluşumunu sağlar. Bu düzgün şekilli gözenekler kopma direncini önemli ölçüde geliştirir.

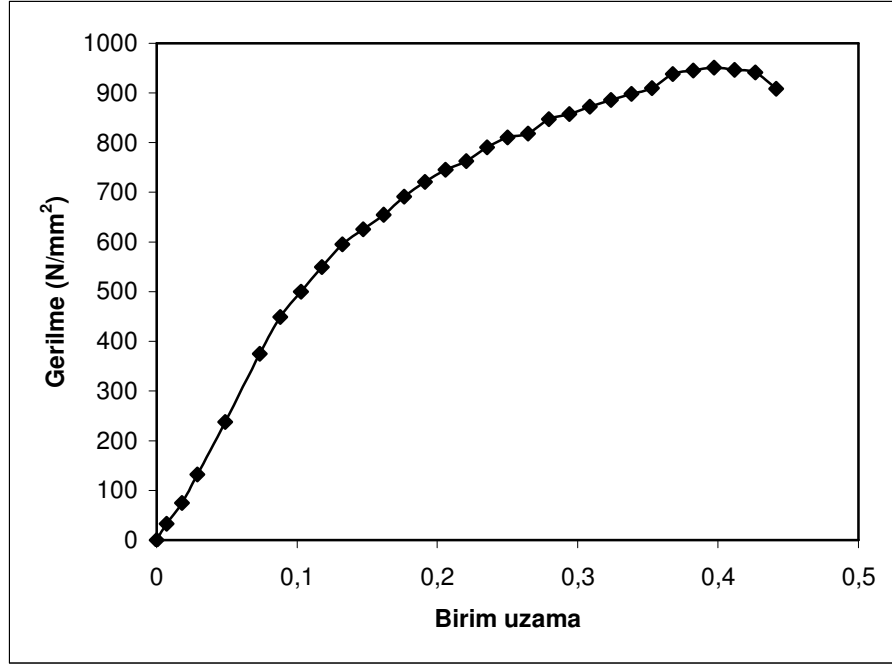
Bu çalışmada elde edilen yoğunluğun tam yoğun malzemelere göre daha düşük olması mekanik özellikleri de etkilemektedir. Düşük yoğunluklarda, mukavemet taneler arası bağ büyüklüğü ile sınırlıdır. Daha yüksek yoğunluktaki mukavemet, tane sınırlarındaki gözenek yapısına ve inklüzyonların mevcudiyetine bağlıdır. T/M malzemelerde soğuk presleme yöntemiyle bir defada %100 yoğunluğa çıkmak mümkün değildir. Fakat sinterleme ve presleme şartlarının iyileştirilmesiyle mekanik özellikler ve yoğunluk açısından çok yüksek değerlere ulaşılabilir (Velasco ve diğ., 1996).

Basma diyagramında elde edilen sonuçlar irdelendiğinde; % 15 Cr ve % 35 Cr içerikli numunelerin sırasıyla 951.21 N/mm^2 , 957.13 N/mm^2 ile en düşük basma gerilmesine sahip olduğu gözlenmiştir. % 27.5 Cr içerikli numune 1072 N/mm^2 'lik basma gerilmesiyle en yüksek gerilme değerine sahiptir.

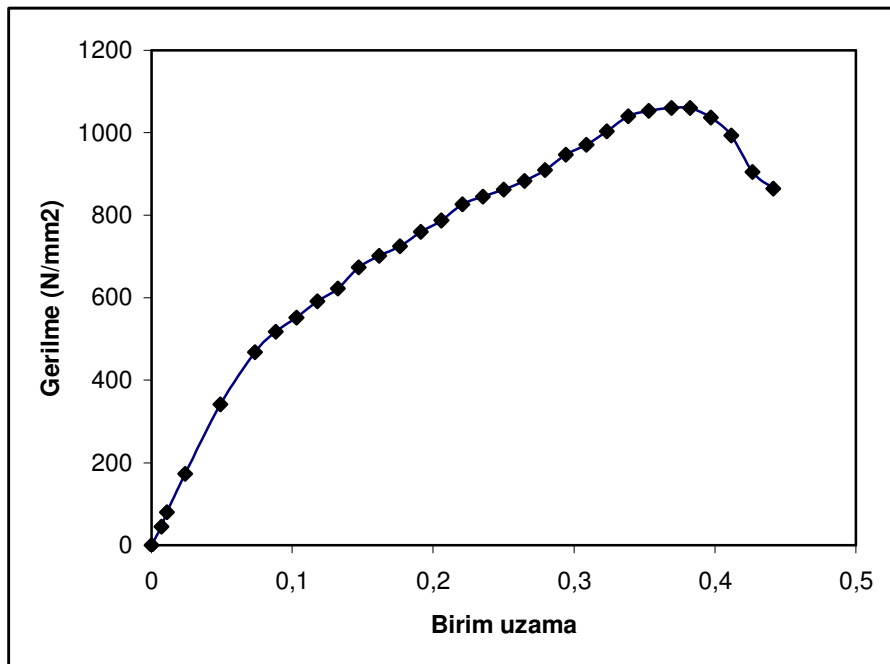
Numunelerin daha fazla gözeneklilik ve daha düşük mukavemet özelliği göstermesi presleme basıncının yetersiz olmasından kaynaklanmaktadır. Yetersiz sinterleme ise sinterleme zamanının kısa olmasından ya da sıcaklığın düşük olmasından ileri gelir. Yetersiz sinterleme sonucunda toz taneleri birbirleriyle tam olarak bağ oluşturamaz, yani tane sınırlarında zayıf bir

bağ gerçekleşir. Keskin biçimli ve açısız gözenekler meydana gelir. Bunun sonucunda taneler arası boyunlarda sünek kırılmalar meydana gelir.

Şekil 8.2, 8.3, 8.4, 8.5, 8.6, 8.7’deki diyagramlarda birim uzama kısmı incelendiğinde % 27.5 Cr içeriğine sahip numunenin birim uzaması % 0.54 ile en yüksek değere sahipken, % 35 Cr içerikli numunenin birim uzaması % 0.48 ile en düşük değerlerden birine sahiptir.

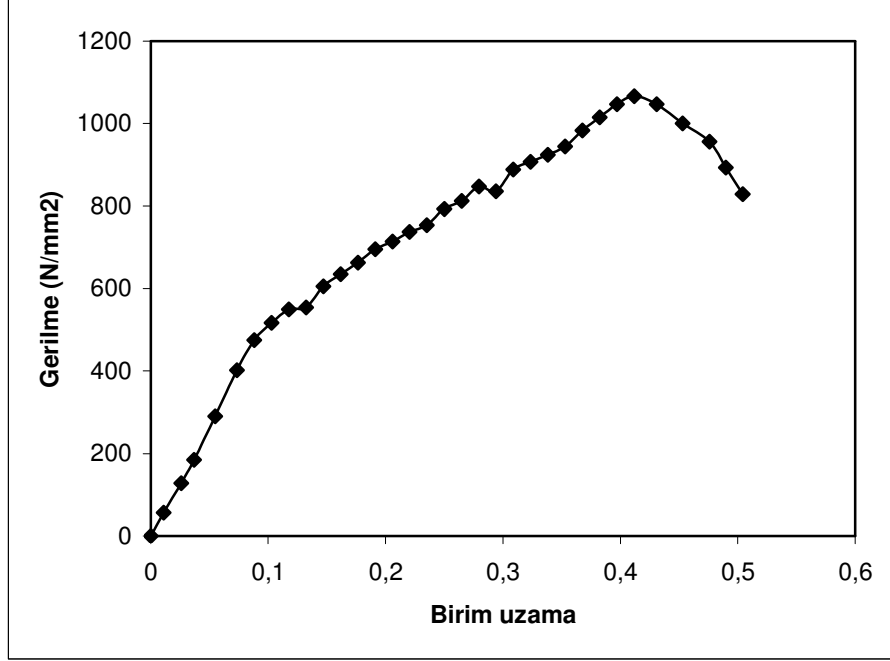


Şekil 8.2. % 15 Cr içeren numunenin ($\sigma_{\epsilon} - \epsilon$) diyagramı

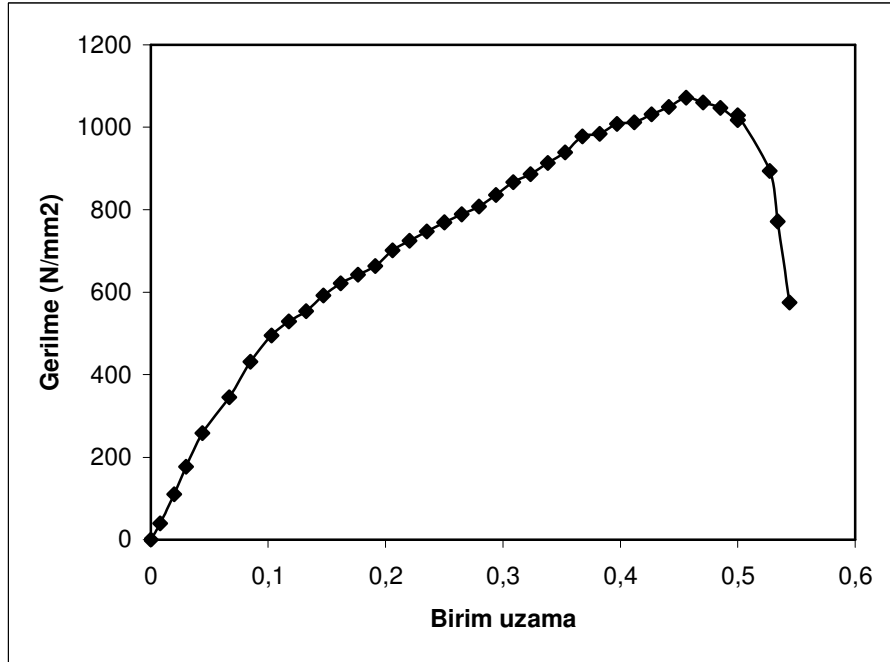


Şekil 8.3. % 20 Cr içeren numunenin ($\sigma_{\epsilon} - \epsilon$) diyagramı

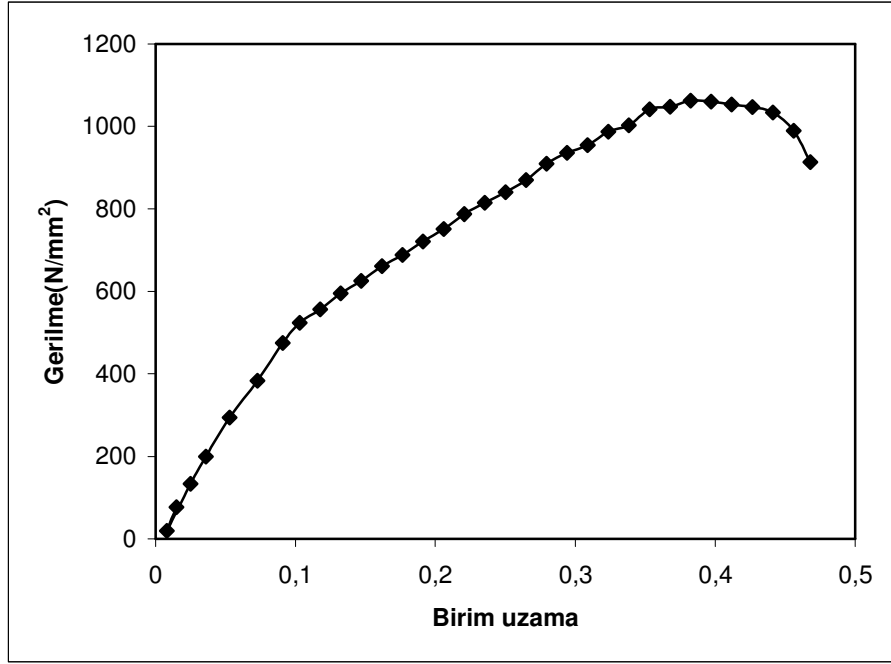
Tüm numuneler için % uzama değeri ortalama 0.5 olarak verilebilir. Mukavemet, tanelerin boyutuna, şekline ve dağılım durumuna bağlıdır. Yetersiz sinterlenmiş T/M malzemeler düşük mekanik ve düşük korozyon direnci gösterirler.



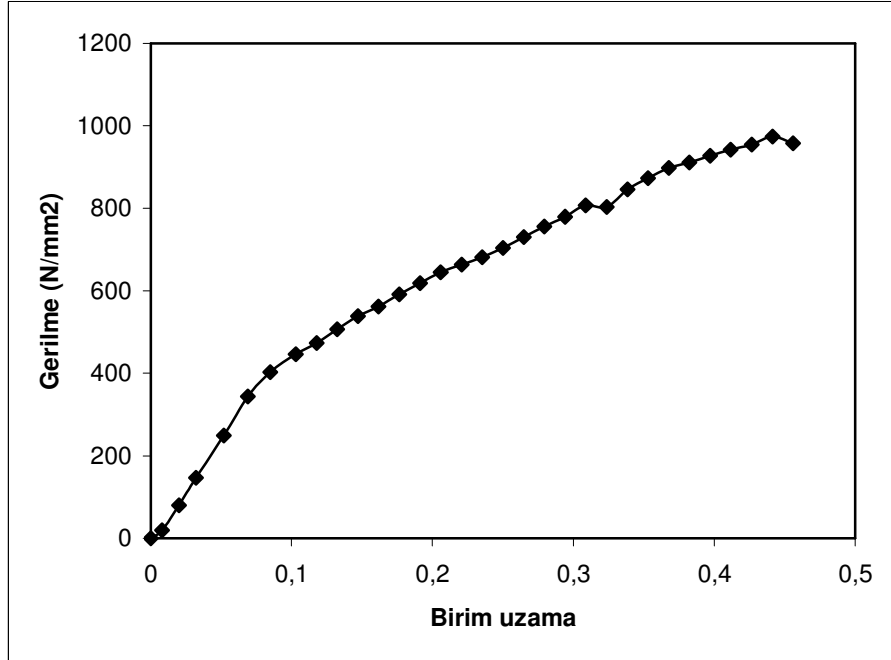
Şekil 8.4. % 25 Cr içeren numunenin ($\sigma_{\epsilon} - \epsilon$) diyagramı



Şekil 8.5. % 27.5 Cr içeren numunenin ($\sigma_{\epsilon} - \epsilon$) diyagramı

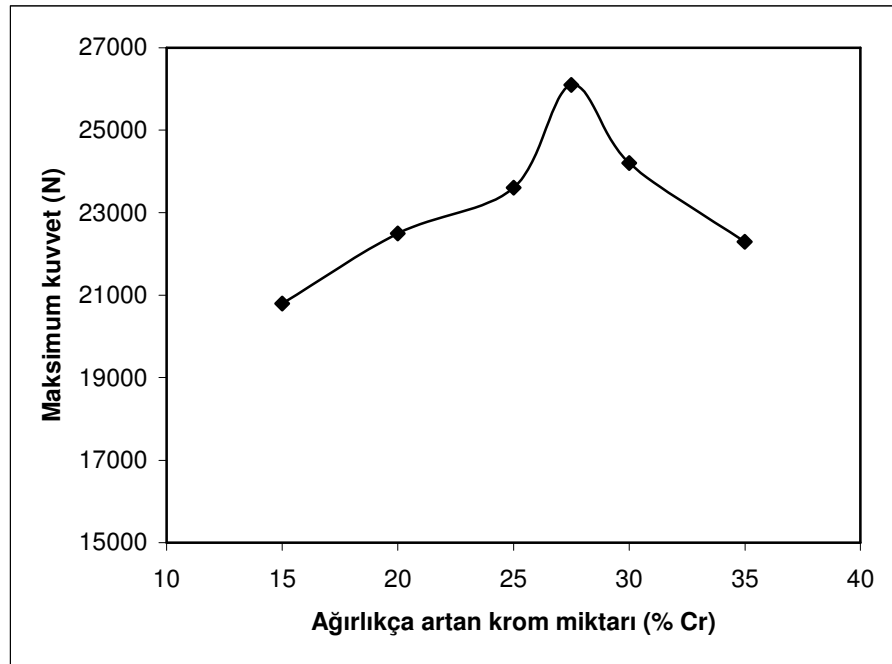


Şekil 8.6. % 30 Cr içeren numunenin ($\sigma_{\epsilon} - \epsilon$) diyagramı



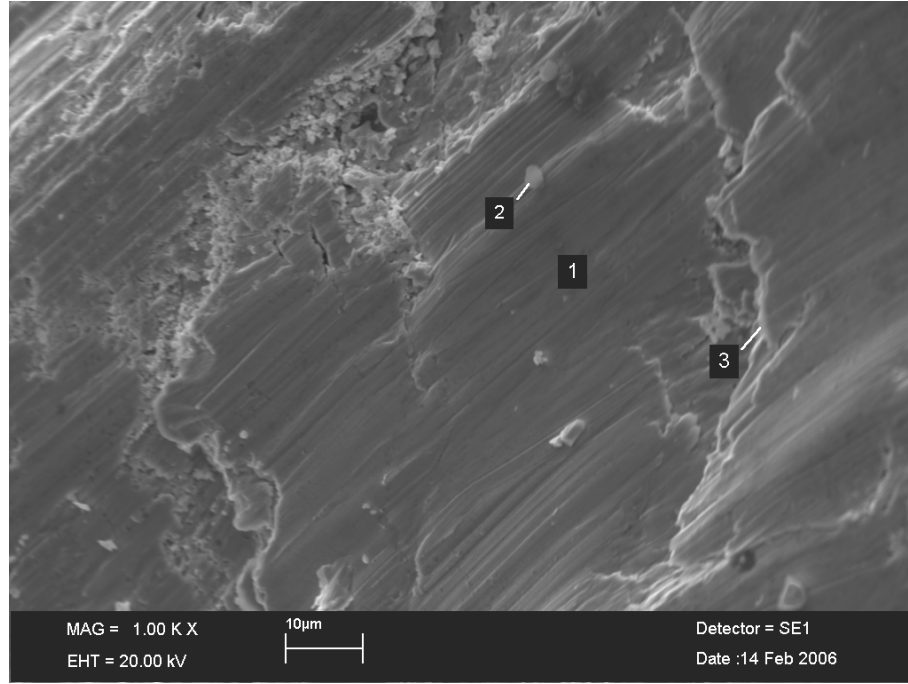
Şekil 8.7. % 35 Cr içeren numunenin ($\sigma_{\epsilon} - \epsilon$) diyagramı

Şekil 8.8’de görüldüğü gibi % 27.5 Cr oranına sahip numune en yüksek basma kuvvetine sahip olup maksimum basma kuvveti 26100 N, % 35 Cr oranına sahip numunenin basma kuvveti 22300 N olarak ölçülmüştür. Basma deneylerinde elde edilen gerilme ve birim uzama diyagramlarında görüldüğü gibi belli bir Cr içeriğine kadar basma dayanımı artarken, % 25 Cr içeriğinden sonra artışın fazla değişmediği ve % 30 Cr içeriğinden sonra azaldığı gözlenmiştir. Artan krom miktarı ile basma dayanımının belli bir orana kadar artması; % gözeneklilik oranının azalmasından kaynaklandığı, % 27.5 krom oranından sonra basma mukavemetinin azalması ise yapıda kobalt oranının düşmesi ve krom oranının artmasından dolayı sinterleme sıcaklığının düşük ve yetersiz kaldığı düşünülmektedir. Ayrıca döküm yöntemiyle elde edilmiş tam yoğun implant malzemelerin çekme dayanımı 880 MPa iken soğuk presleme sonrasında elde edilmiş % 27.5 Cr içeren T/M malzemenin basma dayanımı daha yüksek ve 1072 MPa olarak tespit edilmiştir.



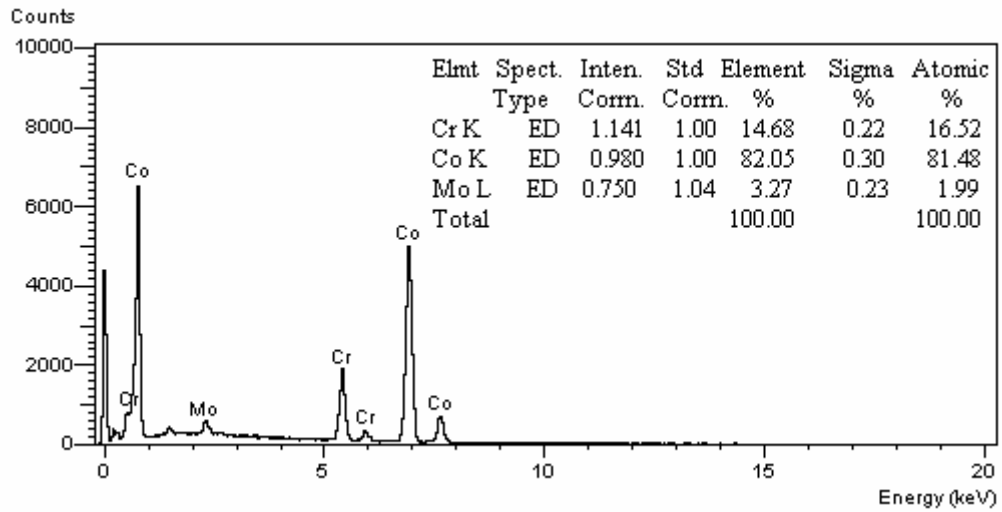
Şekil 8.8. Artan Cr miktarına bağlı olarak kuvvet değişimi

% 15 Cr içeriğine sahip Co esaslı toz metal alaşımının SEM görüntüsü Şekil 8.9'da ve bu SEM görüntüsünden alınmış EDS analizi ise Şekil 8.10, 8.11, 8.12 ve 8.13 de verilmiştir.

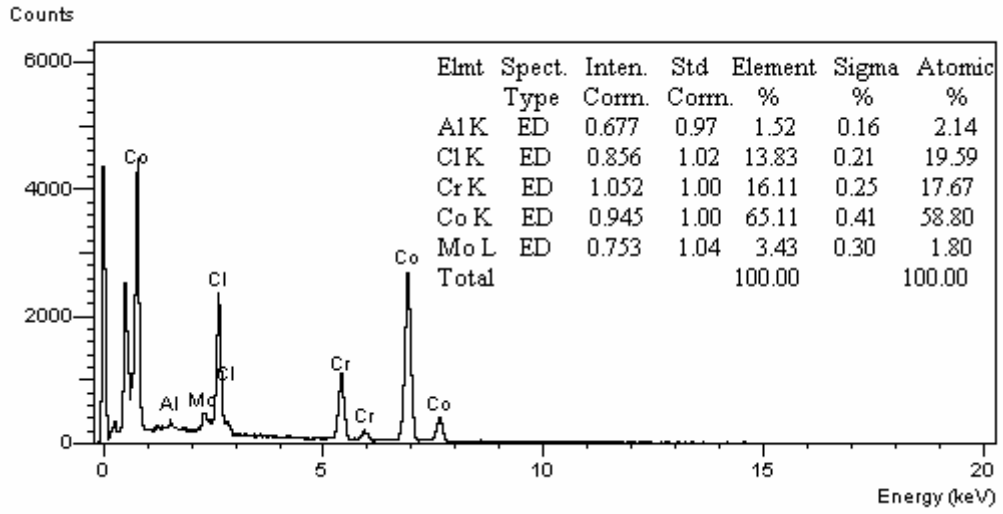


Şekil 8.9. % 15 Cr içeren numunenin kırık yüzey SEM resmi

Toz alaşımlarının element konsantrasyon profilini veren EDS analizleri incelendiğinde 1 nolu EDS analizinde; Cr oranında çok az bir düşme, Co oranında bir artış ve Mo oranında ise azalma görülmüştür. 1 nolu nokta kırık yüzeyden alınmıştır. 1 nolu noktanın bileşimi, üretilmek istenen alaşıma çok yakın değerlerdedir. Bu nokta esas itibari ile Co ağırlıklı Co-Cr-Mo üçlü alaşıma ait α katı eriyik fazının yapı ve fiziksel özelliklerine sahiptir.

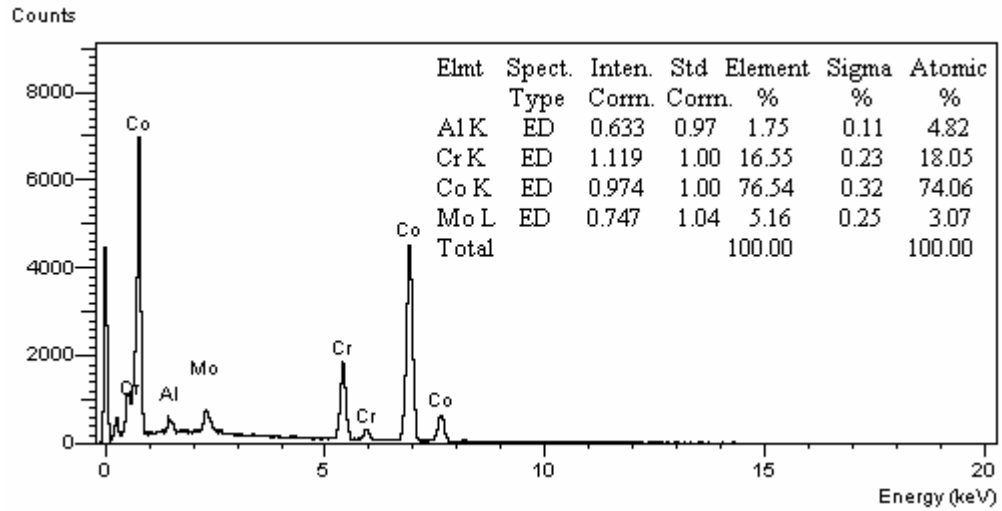


Şekil 8.10. Kırık yüzeyi verilen % 15 Cr içerikli numunenin 1 noktasındaki EDS analizi



Şekil 8.11. Kırık yüzeyi verilen % 15 Cr içerikli numunenin 2 noktasındaki EDS analizi

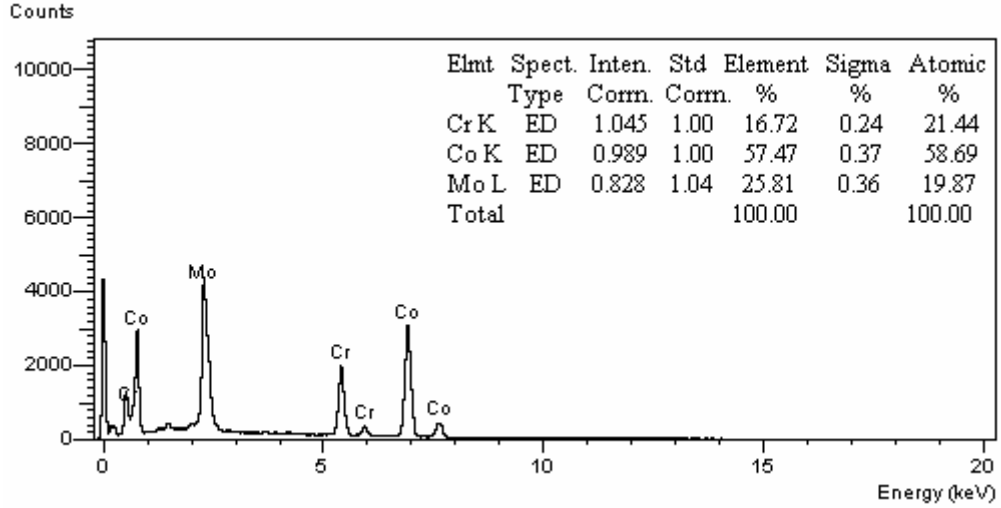
2 nolu nokta ise SEM görüntüsünde farklı bir görünüm arz ettiği için tercih edilmiştir. Bu noktada Cr oranı artış gösterirken, Mo ve Co oranında bir miktar azalma görülmektedir. Ayrıca 2 nolu noktanın EDS analizinde Cl gibi yabancı elementler de görülmüş bu elementlerin dağlama esnasında yüzeye yapışma şeklinde oluştuğu düşünülmektedir. 2 nolu nokta kromca daha zengin, yine kobalt ağırlıkça Co-Cr-Mo üçlü alaşımının α katı eriyik fazının yapı ve fiziksel özelliklerine sahip bir noktadır.



Şekil 8.12. Kırık yüzeyi verilen % 15 Cr içerikli numunenin 3 noktasındaki EDS analizi

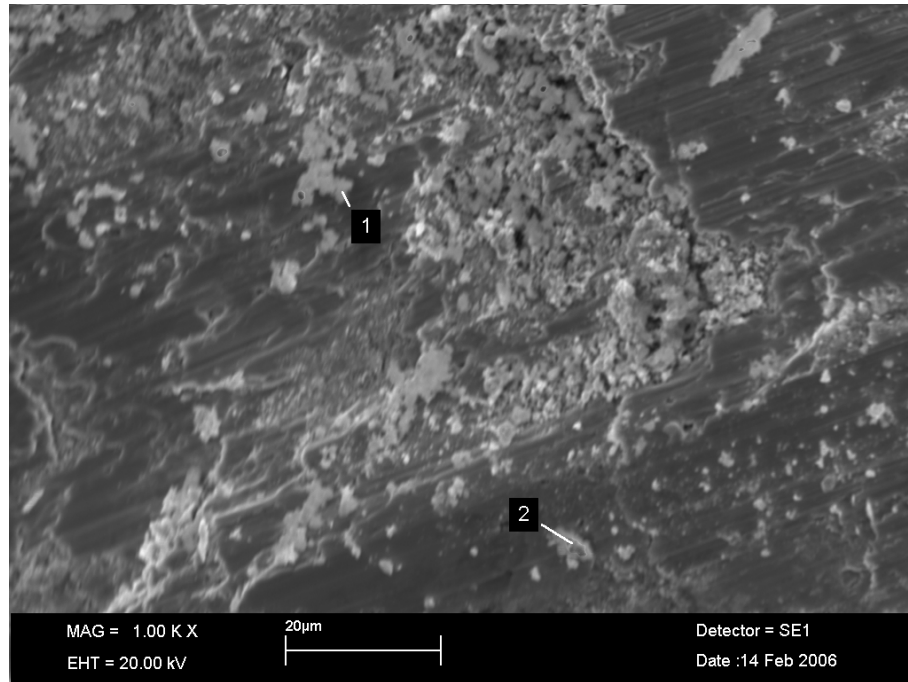
3 nolu nokta kırılmanın meydana geldiği sınırdan alınmış bir EDS analizidir. 3 nolu noktada Cr ve Mo oranında azalma Co oranında ise artma gözlenmiştir. 3 nolu nokta da kromca biraz daha zengin, kobalt ağırlıklı Co-Cr-Mo üçlü alaşımının α katı eriyik fazının yapı ve özelliklerine sahip bir noktadır. SEM’de görülen tüm alandan alınan EDS analizinde de Mo ve Cr oranında

artış, Co oranında azalma gözlenmiştir. Alandan alınan EDS analizinden, alanın esas itibarı ile, kobalt esaslı Co-Cr-Mo üçlü alaşımının α katı eriyik fazı ve ayrıca az oranda bu faz içerisinde yer alan ve katı eriyikle birlikte bulunan σ bileşik fazından oluştuğu göstermektedir.



Şekil 8.13. Kırık yüzeyi verilen % 15 Cr içerikli numunenin alan EDS analizi

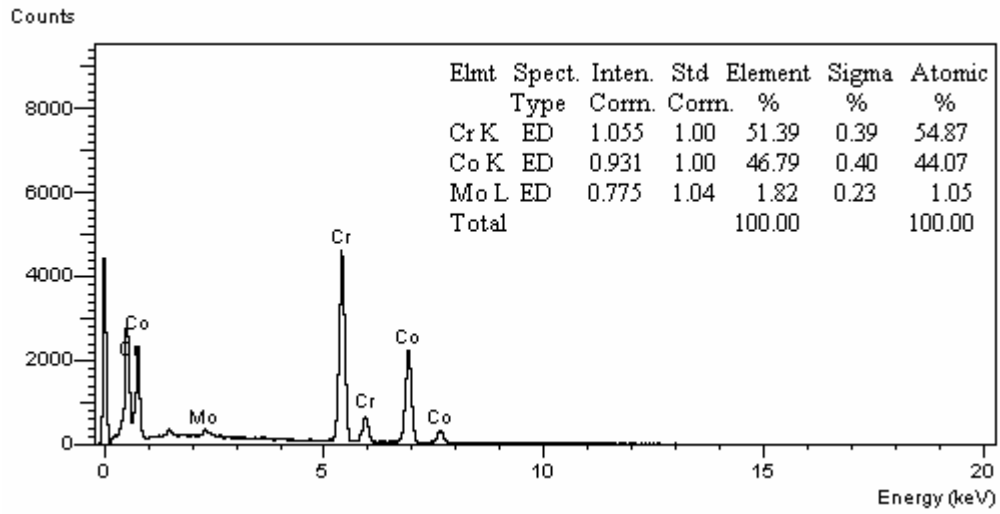
% 27.5 Cr oranına sahip numunenin basma deneyi sonrasında kırık yüzeyinden alınan SEM fotoğrafı Şekil 8.14 de verilmiştir.



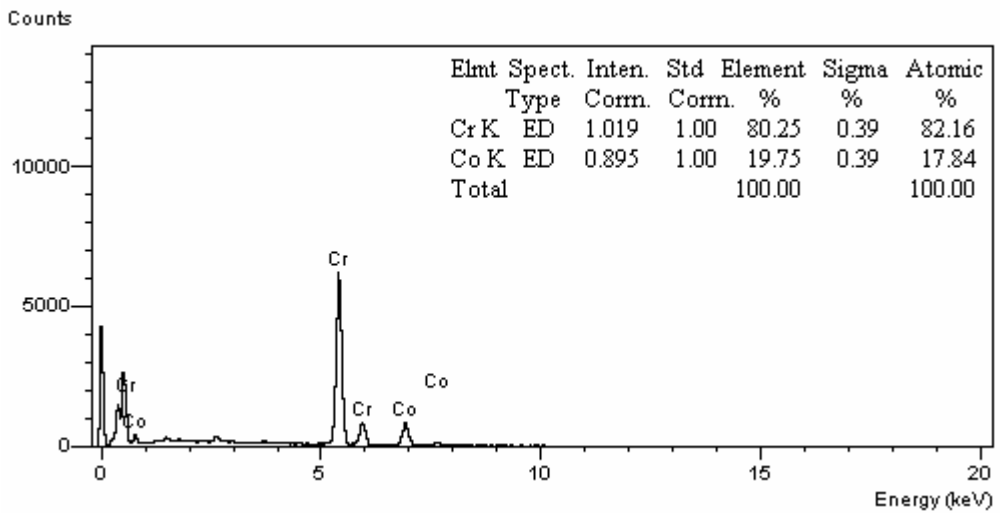
Şekil 8.14. % 27.5 Cr içeren numunenin kırık yüzey SEM resmi

% 27.5 Cr ve % 5 Mo içerikli kobalt esaslı Co-Cr-Mo üçlü alaşımından alınan 1 nolu SEM görüntüsünün iki farklı noktasından alınan EDS analizleri incelendiğinde her iki noktada da Cr

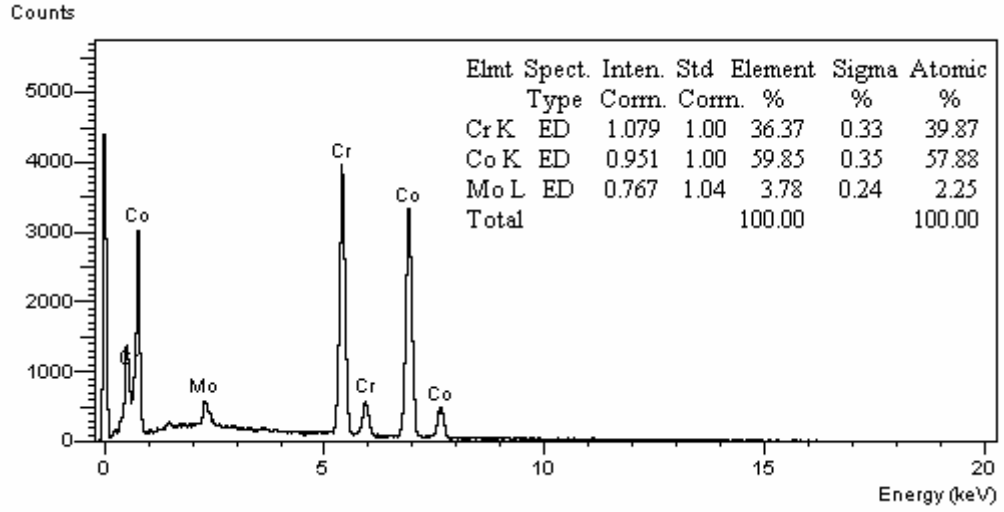
oranının arttığı ve Co, Mo oranlarının azaldığı kromca zengin bölgeleri olduğu gözlenmiştir. SEM görüntüsünün genelinden alınan EDS analizi, 1 ve 2 nolu noktadan alınan EDS analizi ile benzerlik göstermiştir. noktanın EDS analizinden, bu noktanın esas itibarı ile α ve σ faz ve özelliklerini taşıyan bir noktada olduğunu göstermektedir. 2 nolu nokta, bünyesinde % 19.75 Co çözülmüştür δ Cr katı eriyik fazını göstermektedir. Alandan alınan EDS analizine bakıldığında, alaşımda Co-Cr-Mo üçlü alaşımında ortaya çıkan α katı eriyik fazı dışında σ bileşik fazının da az oranda bulunabileceği sonucuna varılmıştır.



Şekil 8.15. Kırık yüzeyi verilen % 27.5 Cr içerikli numunenin 1 noktasındaki EDS analizi



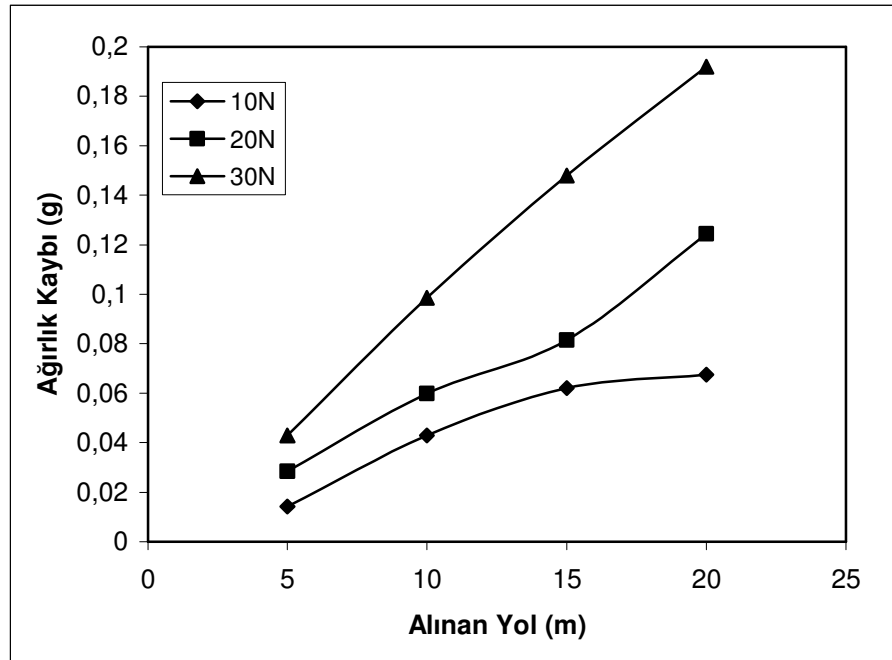
Şekil 8.16. Kırık yüzeyi verilen % 27.5 Cr içerikli numunenin 2 noktasındaki EDS analizi



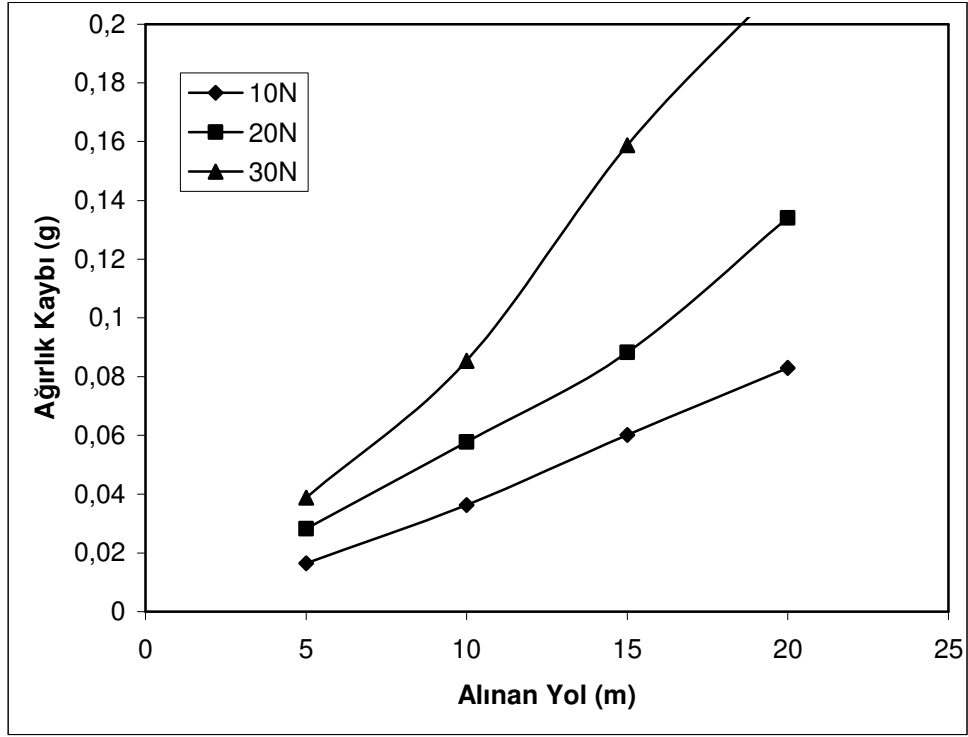
Şekil 8.17. Kırık yüzeyi verilen % 27.5Cr içerikli numunenin alan EDS Analizi

7.3. Aşınma Deney Sonuçları

Krom oranı farklı Co esaslı Mo, Cr toz alaşımları 1200 °C de sinterlendikten sonra abrasiv aşınmayla farklı yük ve yollardaki ağırlık kaybı Şekil 8.18, 8.19, 8.20, 8.21, 8.22, 8.23, 8.24 de verilmiştir.



Şekil 8.18. % 15 Cr içeren numunenin yük ve alınan yola bağlı olarak ağırlık kaybı değişimi

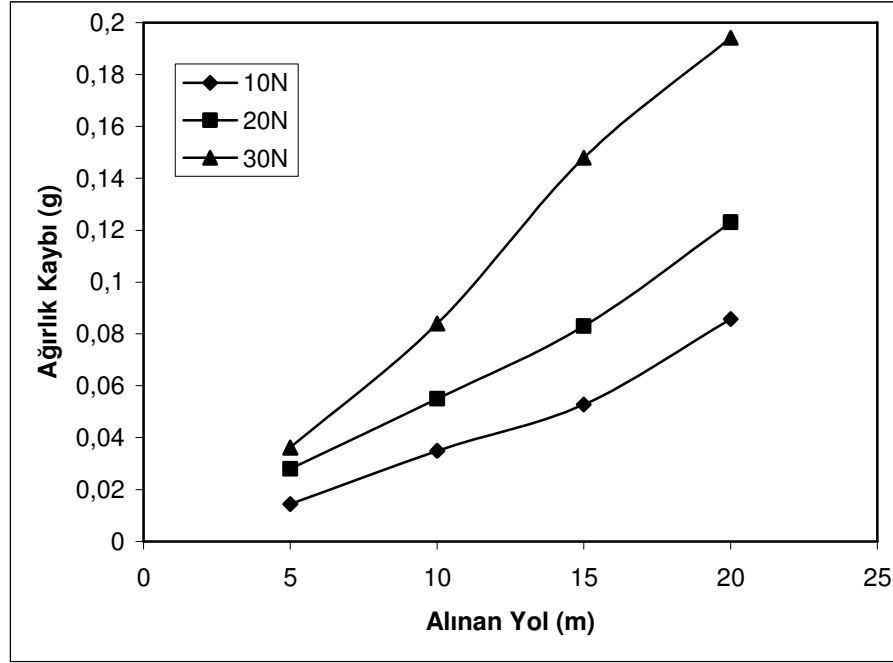


Şekil 8.19. % 20 Cr içeren numunenin yük ve alınan yola bağlı olarak ağırlık kaybı değişimi

%15 Cr içeren numunenin Şekil 8.18’de, farklı yük ve yol mesafelere bağlı olarak ağırlık kayıpları verilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi 10 N’luk yüke maruz kalan numunenin 5 ile 20 m’lik değişen yollardaki ağırlık kayıpları incelendiğinde; 10’ m lik mesafede doğrusal bir artış görüldüğü 10 m ile 20 m arasında da aşınmanın arttığı, fakat bu artışın doğrusal olarak devam etmediği görülmüştür. Ağırlık kaybı artışının oran itibarı ile azalarak sürdüğü gözlenmiştir. 20 N’luk yük altında 10 m’ye kadar olan yol mesafe artışının doğrusal olduğu, 10-15m lik mesafelerde ağırlık kaybının daha yavaş, 20 m’lik mesafede ise ağırlık kaybının iyice arttığı gözlenmiştir. 30N luk yük için Şekil 8.18 incelendiğinde artan yol ile ağırlık kaybının tüm aşınma yolu boyunca orantılı olarak arttığı gözlenmiştir.

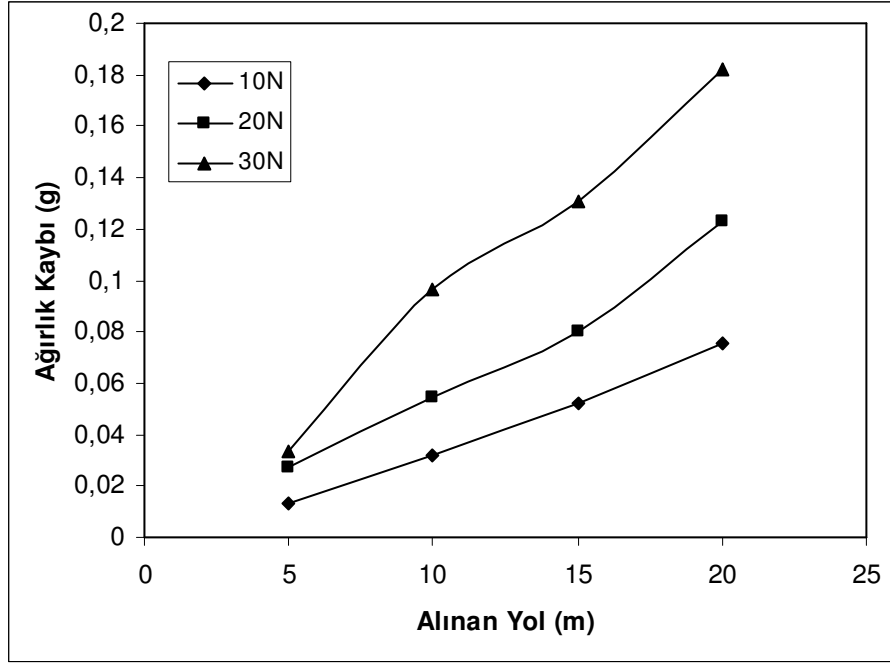
Şekil 8.19 da % 20 Cr içeren numunenin abrasiv aşınma deneyi sonrasında ağırlık kayıpları verilmiştir. 10 N’luk yüke maruz kalan numune 20 m’lik mesafe sonrasında ağırlık kaybının artan mesafeyle arttığı gözlenmiştir. 20 N’luk yük için ağırlık kaybının artan mesafeyle arttığı ve 15 m lik mesafeden sonra ağırlık kaybında daha hızlı bir artışın ortaya çıktığı gözlenmiştir. 30 N’luk yük için Şekil 8.19 incelendiğinde 10 m’lik mesafede numunenin 10 ve 20 N’luk yüklerdeki ağırlık kaybına benzer doğrusal bir artış gösterdiği ve daha sonra artan mesafeyle ağırlık kaybının daha da arttığı görülmüştür.

% 22.5 Cr içeren numunenin Şekil 8.20’de farklı yük ve alınan yola bağlı olarak ağırlık kayıplarının değişimi verilmiştir. Şekil de görüldüğü gibi, numune 10 ve 20 N’luk yüke maruz kaldığında 20 N’luk yükün ağırlık kaybı 10 N’luk yüke göre daha fazla olmasına ve doğrusal artmasına rağmen, artan mesafeyle beraber ağırlık kayıplarındaki artış paralellik göstermiştir. 30 N’luk yük için de yine, 5 m’lik mesafeye kadar ağırlık kaybının fazla olmadığı ve daha sonra bunu takip eden mesafelerde ise ağırlık kaybında hızlı bir artış olduğu gözlenmiştir.



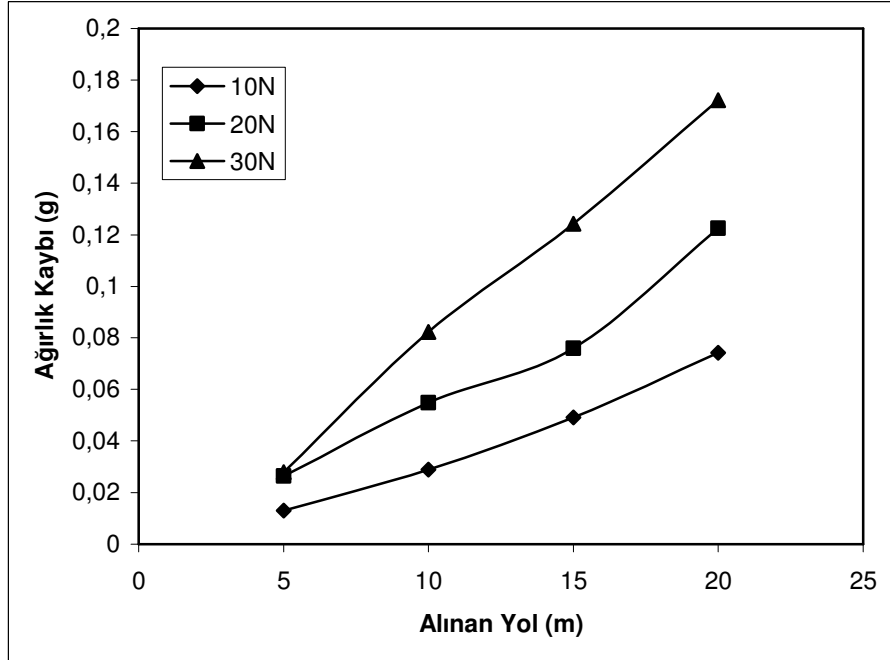
Şekil 8.20. % 22.5 Cr içeren numunenin yük ve alınan yola bağlı olarak ağırlık kaybı değişimi

% 25 Cr için Şekil 8.21 incelendiğinde 20 m’lik yol sonrasında en az ağırlık kaybı beklenildiği 10 N’luk yükle yüklenmesi esnasında gözlenmiştir. 20 N’luk yükte, ağırlık kaybı 10 N’luk yükte ki ağırlık kaybıyla paralellik göstermesine rağmen, 15 m lik mesafeden sonra ağırlık kaybı 20 N’luk yükte artarak devam etmiştir. 30 N’luk yükte ise Şekil 7.20’dekine benzer şekilde 5 m’lik alınan yolda ağırlık kaybının diğer yüklerle elde edilen değerlerden, fazla olmadığı 5-10 metre arasında ağırlık kaybının hızla artışı ve 10-15 m’lik mesafede 20 N’luk yükteki ağırlık kaybına paralellik gösterdiği 15-20 m’lik mesafelerde de yine ağırlık kaybının artarak devam ettiği belirlenmiştir.

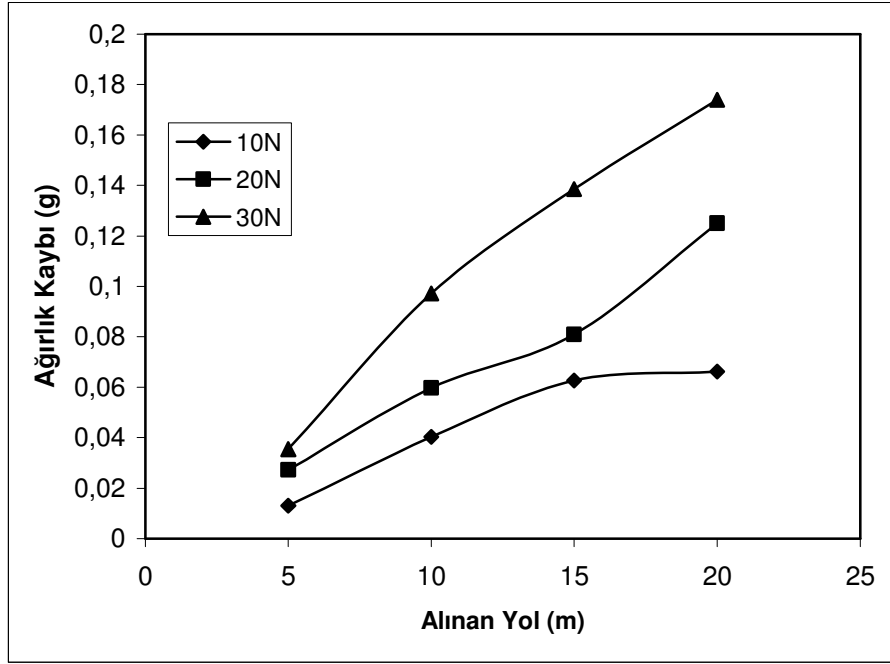


Şekil 8.21. % 25 Cr içeren numunenin yük ve alınan yola bağlı olarak ağırlık kaybı değişimi

Şekil 8.22’de verilen ağırlıkça % 27.5 Cr içeren numunenin abrasiv aşınma deneyi sonunda oluşturulan grafik incelendiğinde, 20-30 N’luk yüklerdeki 5 m sonunda oluşan ağırlık kayıplarının yaklaşık olarak aynı olduğu gözlenmiştir. Diğer bulgular % 25 Cr’lu numunelerle büyük benzerlikler göstermektedir.

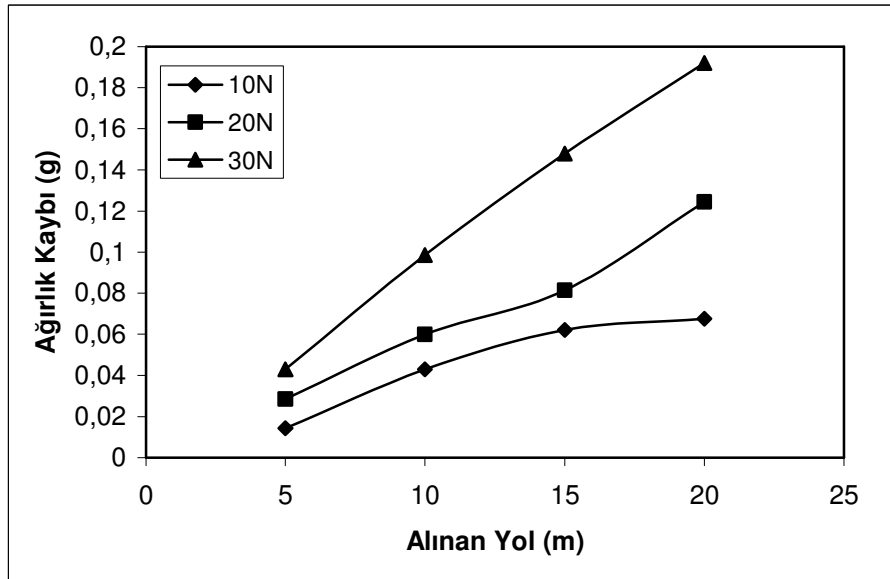


Şekil 8.22. % 27.5 Cr içeren numunenin yük ve alınan yola bağlı olarak ağırlık kaybı değişimi



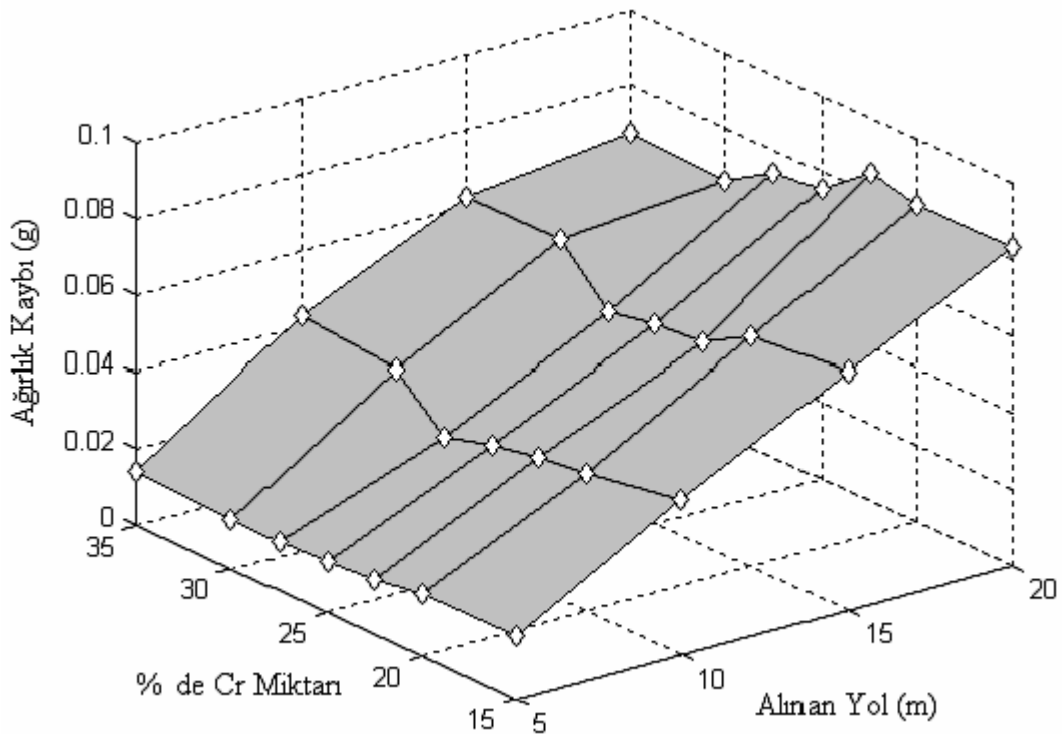
Şekil 8.23. % 30 Cr içeren numunenin yük ve alınan yola bağlı olarak ağırlık kaybı değişimi

% 30 ve % 35 Cr içeren numunelerin abrasiv aşınma sonrası artan yük ve yola bağlı olarak oluşan ağırlık kayıpları incelendiğinde; 10 N'luk yük için artan yolla beraber ağırlık kaybının da azalarak arttığı, 20 N'luk yük için 15 m'den sonra ağırlık kaybında daha hızlı bir artış gözlenmiş, 30 N'luk yükde ise ağırlık kaybında 10 m'lik yoldan sonra doğrusal bir artış ortaya çıkmıştır.



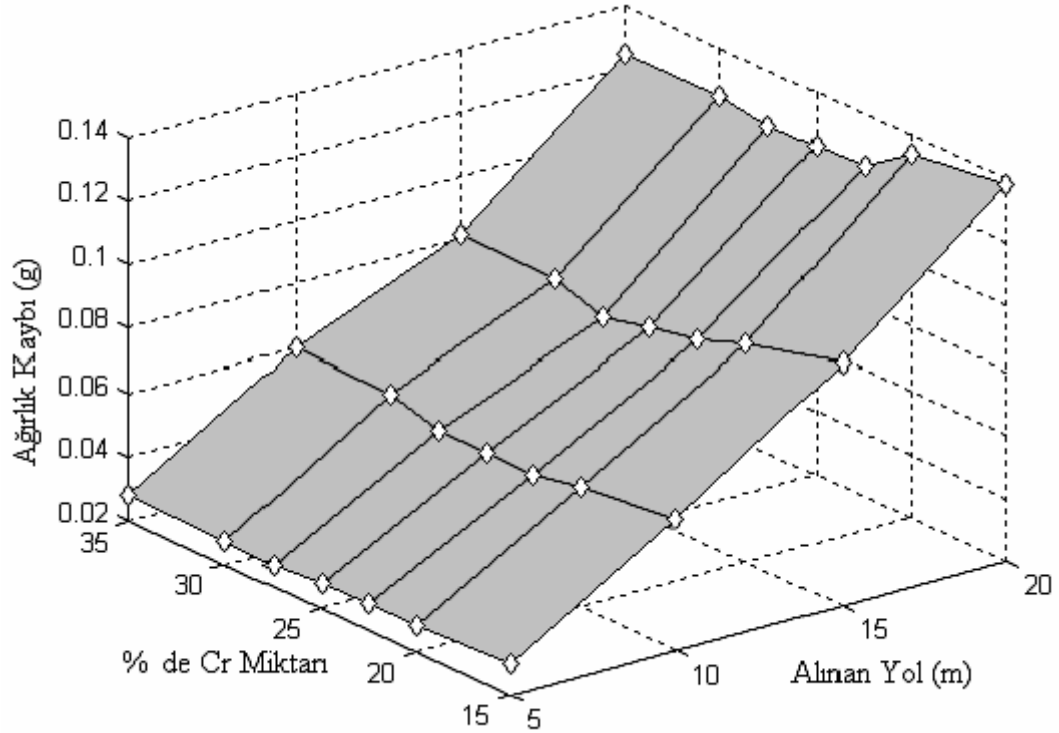
Şekil 8.24. % 35 Cr içeren numunenin yük ve alınan yola bağlı olarak ağırlık kaybı değişimi

10 N'luk yükün uygulandığı krom içeriği farklı yedi numunenin abrasiv aşınma yollarının artmasıyla gram cinsinden ağırlık kaybı Şekil 8.25'de gösterildiği gibidir. Şekilde de görüldüğü gibi 5 m'lik bir aşınma mesafesinin sonunda elde edilen ağırlık kayıpları incelendiğinde krom oranı arttıkça ağırlık kaybının da azaldığı 4 ve 5 nolu numunenin ağırlık kaybının birbirine yakın olduğu gözlenmiştir. Ağırlık kayıplarındaki azalma 5 nolu numuneden sonra artan Cr içeriğiyle artışı gözlenmiştir. Aynı şekilde 10 m'lik abrasiv aşınma sonrasında elde edilen ağırlık kaybı incelendiğinde, artan % Cr miktarıyla ağırlık kaybının azaldığı ve 5 nolu numunen sonra ağırlık kaybında hızlı bir artışın ortaya çıktığı gözlenmiştir. 15 m'lik aşınma mesafesi sonrasındaki ağırlık kaybının 5 nolu numuneye kadar azaldığı, fakat bu azalmanın doğrusal olmadığı, 2 nolu numunenin aşınma direncinin daha yüksek olduğu 3 ve 4 nolu numunelerin ağırlık kaybının birbirine yakın olduğu ve 5 nolu numuneden sonra ağırlık kaybında hızlı bir artışın ortaya gözlenmiştir. 20 m'lik aşınma yolu sonrasında ağırlık kaybı bakımından elde edilen sonuçlar incelendiğinde Cr oranı arttıkça ağırlık kaybında azalmalar gözlenmesine rağmen, 3 nolu numunede ağırlık kaybında bir artış, 6 nolu numunede de hızlı bir düşüş gözlenmiştir.



Şekil 8.25. 10 N'lük yük altında Cr ve yol değişiminin kütle kaybına olan etkisi

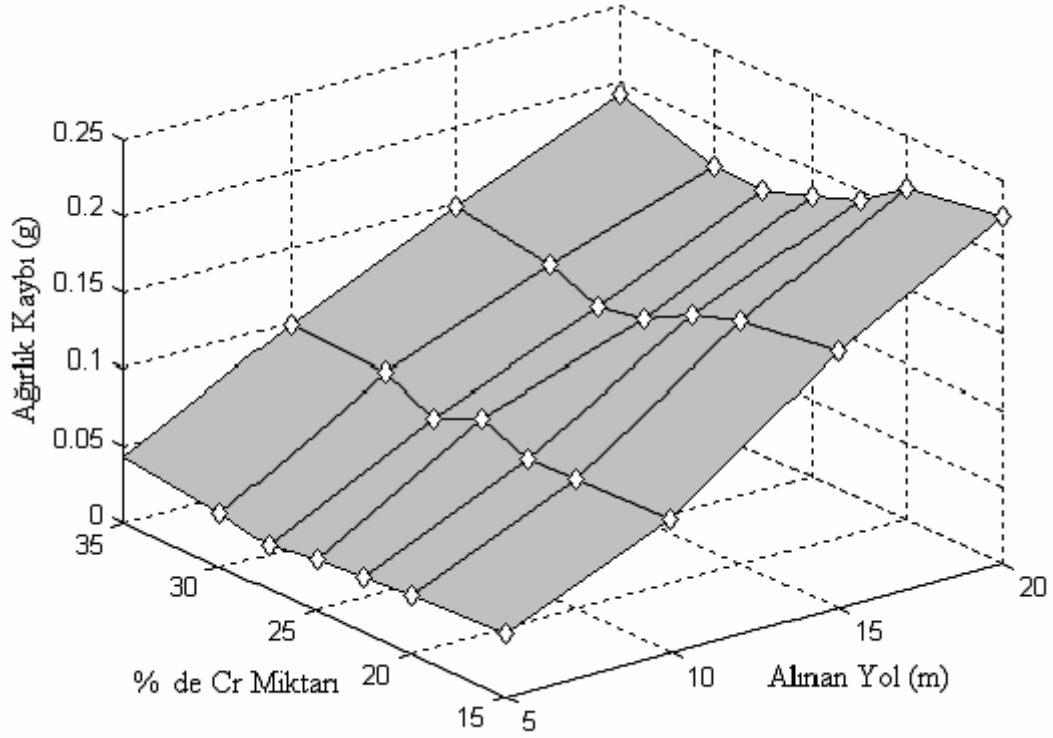
20 N'luk yük altında Cr içeriği farklı numunelerin abrasiv aşınma yolunun artmasıyla oluşan ağırlık kaybı Şekil 8.26'da gösterildiği gibidir. Şekilde de görüldüğü gibi, 5m'lik bir aşınma mesafesinin sonunda elde edilen ağırlık kayıpları artan Cr oranıyla birlikte çok az bir değişim göstermiş % 27.5 Cr içeren 5 nolu toz alaşımından sonra ağırlık kaybında bir artış gözlenmiştir. Aynı şekilde 10 m'lik abrasiv aşınma sonrasında elde edilen ağırlık kaybı incelendiğinde artan % Cr miktarıyla ağırlık kaybının azaldığı ve 5 nolu Cr içeriğine sahip numuneden sonra ağırlık kaybında daha hızlı bir artış gözlenmiştir. 10 m'ye benzer bir ilişki de 15 m lik aşınma mesafesi sonrasında gözlenmiştir. 20 m lik aşınma mesafesinde ise 1 ve 2 nolu numunede aşınma azalarak devam ederken 2 nolu numuneden sonra ağırlık kaybında daha hızlı bir artış gözlenmiştir.



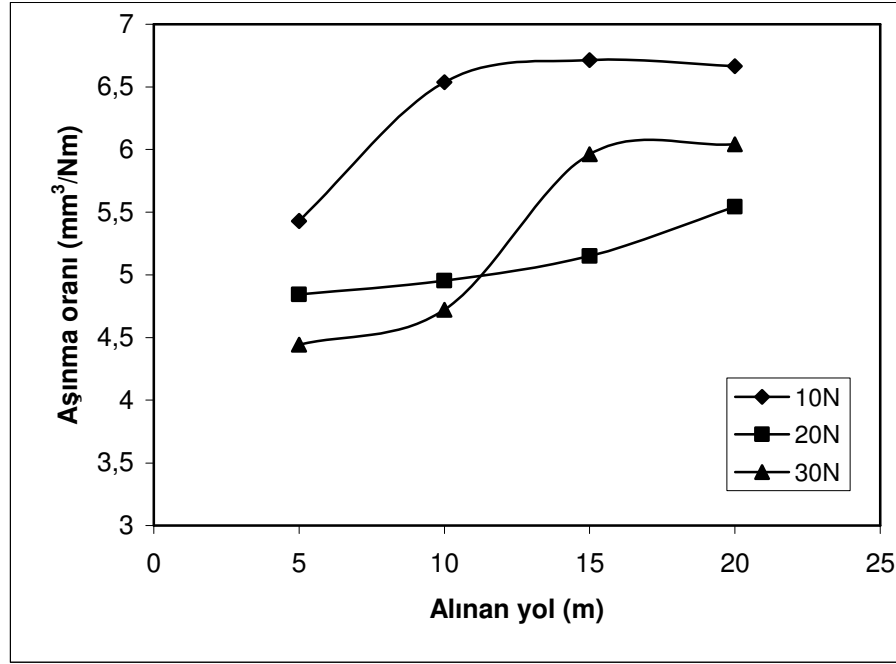
Şekil 8.26. 20N'lük yük altında Cr ve yol değişiminin kütle kaybına olan etkisi

Şekil 8.27'de de 30 N'luk yük için artan Cr miktarı ve mesafesiyle birlikte ağırlık kaybındaki değişim verilmiştir. 5 m'lik aşınma mesafesinde 5 nolu numuneye kadar ağırlık kaybında bir azalma ve 5 ve 7 nolu numuneler için ağırlık kaybın da bir artma olmuştur. Benzer ilişkiler diğer aşınma mesafelerinde de gözlenmiştir. Fakat 10 m'lik mesafedeki 4 nolu numunede aşınma kaybında azalma beklenirken artma gözlenmiştir. Şekil 8.25, 8.26, 8.27'de

görüldüğü gibi yükleme artıka ağırlık kaybında yükle ilişkili olarak bir artış gözlenmiş, aşınma mesafelerinde de artan yolla birlikte artış söz konusu olmuştur. Cr miktarı artınca ağırlık kaybında azalma görüldüğü, %27,5 Cr içeriğinden sonra ağırlık kaybında bir artış gözleendiği görülmüştür. Bazı yük ve aşınma yolları için genel ağırlık kaybı, göstergelerin aksine bir sonuç göstermeleri o numunelerde belli bölgelerde aynı içerikli numunelerin belli bölgelerde yığılmalar gösterdiği yani bazı bölgelerde homojen bir karışımın olmadığı düşünülmektedir.



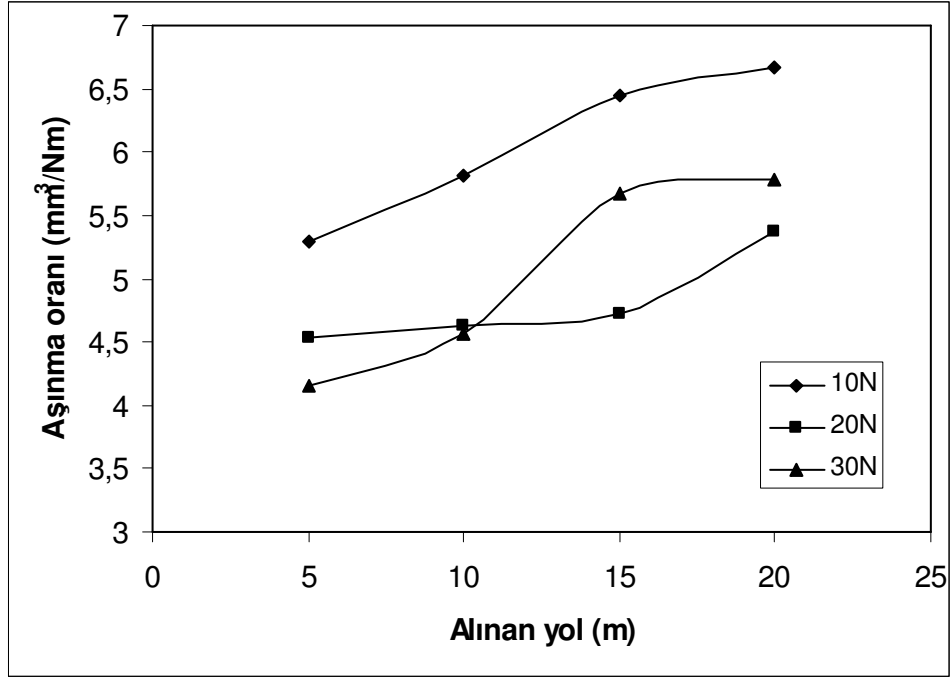
Şekil 8.27. 30 N'lük yük altında Cr ve yol değişiminin kütle kaybına olan etkisi



Şekil 8.28. % 15Cr içeren numunenin yük ve alınan yola bağlı olarak aşınma oranı değişimi

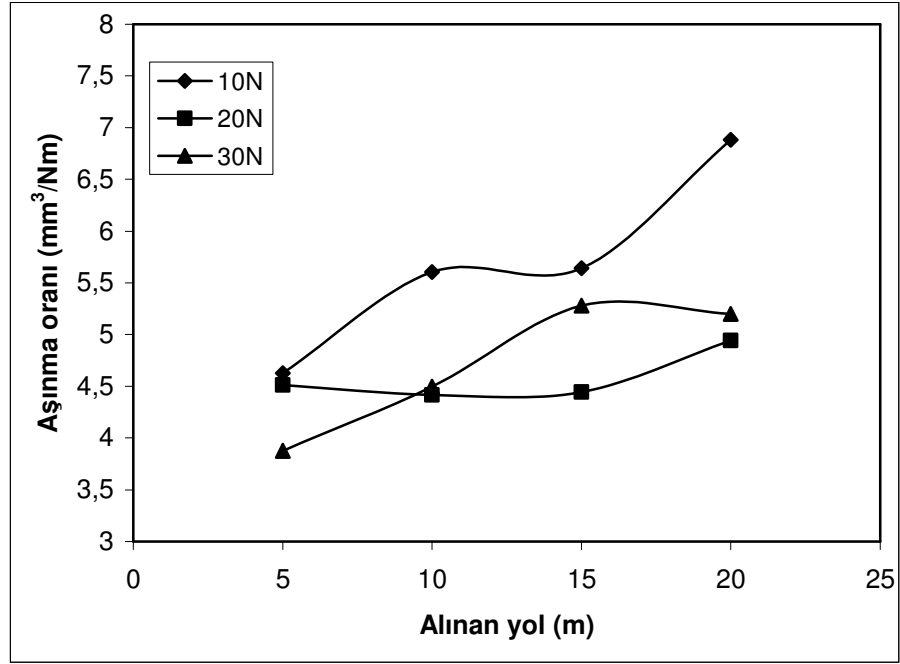
Değişen krom miktarı, yük ve aşınma yoluna bağlı olarak $W_a = \Delta G/d.M.s$ (mm^3/Nm) formülü kullanılarak aşınma oranları belirlenmiştir. Şekil 8.28’de % 15 Cr içeriğine sahip Co esaslı Cr-Mo toz alaşımının aşınma yoluna bağlı olarak aşınma oranı değişimi verilmiştir. 5 m’lik yol sonunda aşınma oranlarının yük artıka azaldığı, 10 m’lik mesafeden sonra 30 N’luk yükte aşınma oranında hızlı bir artış gözlenmiştir. Bunun nedeni, aşınma oranını veren formülden anlaşılacağı gibi 10 metrelik yoldan sonra ağırlık kaybının yüksek olmasıdır. 10 N’luk yük altında abrasiv aşınmaya maruz kalan numunede 10 m’lik aşınma mesafesi sonrasında aşınma oranındaki artışın yavaş olduğu gözlenmiştir. Benzer durum 30 N’luk yükde 15 ile 20 m’lik mesafe aralığında da gözlenmiştir.

% 20 Cr içerikli numunenin abrasiv aşınma yoluna bağlı olarak aşınma oranı Şekil 8.29’da verilmiştir. Aşınma yolu 5 m’ye ulaştığında artan yükte aşınma oranının azaldığı, 10 m’lik mesafe için 20 ile 30 N’luk yüklerde aşınma oranının yaklaşık aynıdır. 30 N’luk yüklemde 15 m’ye kadar hızlı bir artış gösterdiği belirlenmiştir. 20 N luk yük için Şekil 8.29’daki diyagram incelendiğinde 15 m’ye kadar aşınma oranında hızlı bir artış gözlenmemiş 15 m’den sonra bir aşınma oranında hızlı bir artış gözlenmiştir. 30 N’luk yük ise aşınma oranı artan aşınma mesafesiyle birlikte artarak devam etmekte 15 ile 20 m’lik mesafe aralığında aşınma oranının fazla değişmediği dikkat çekmiştir.

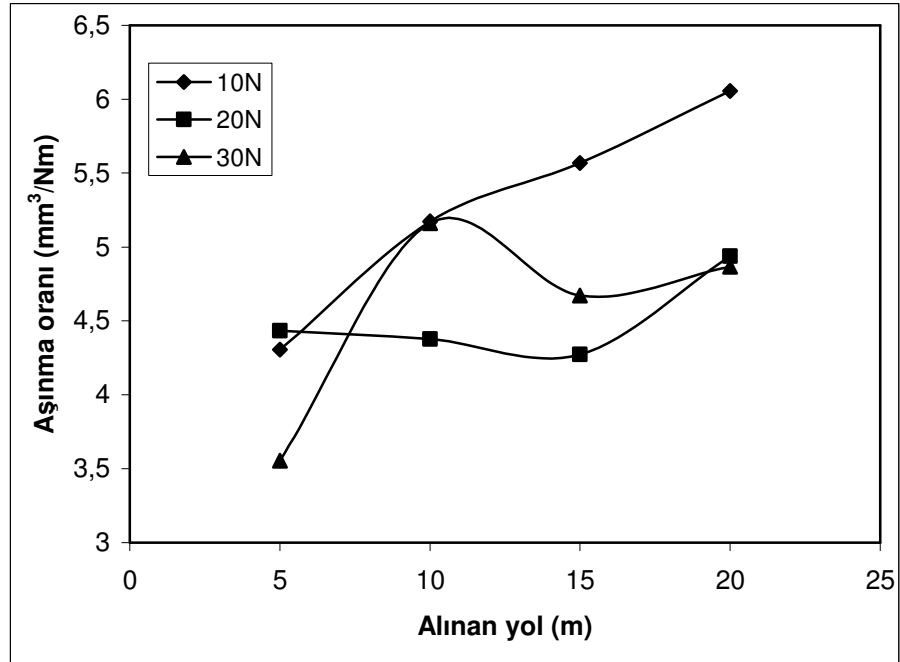


Şekil 8.29. % 20Cr içeren numunenin yük ve alınan yola bağlı olarak aşınma oranı değişimi

Şekil 8.30'da % 22.5 Cr içeriğine sahip toz alaşımının yola bağlı olarak aşınma oranı değişimi verilmiştir. 5 m'lik yol sonunda aşınma oranlarının yük artıka azaldığı, 10 ve 20 N'luk yüklemelerde başlangıçta aşınma oranlarının birbirine yakın olduğu, 10 m'lik mesafede 20 ile 30 N'luk yüklerdeki aşınma oranlarının birbirine çok yakınlaştığı görülmüştür. 10 N'luk yükleme için 10 ile 15 m arasında 10 ve 30 N'luk yüklemelerde aşınma oranının birbirine yakın olduğu ve 15 m sonunda 10 N'luk yükte aşınmanın hızlı bir artış gösterdiği, 30 N'luk yükte ise hızla düşüp 20 N'luk yükte elde edilen değerlere ulaştığı sonucuna varılmıştır.



Şekil 8.30. % 22.5 Cr içeren numunenin yük ve alınan yola bağlı olarak aşınma oranı değişimi

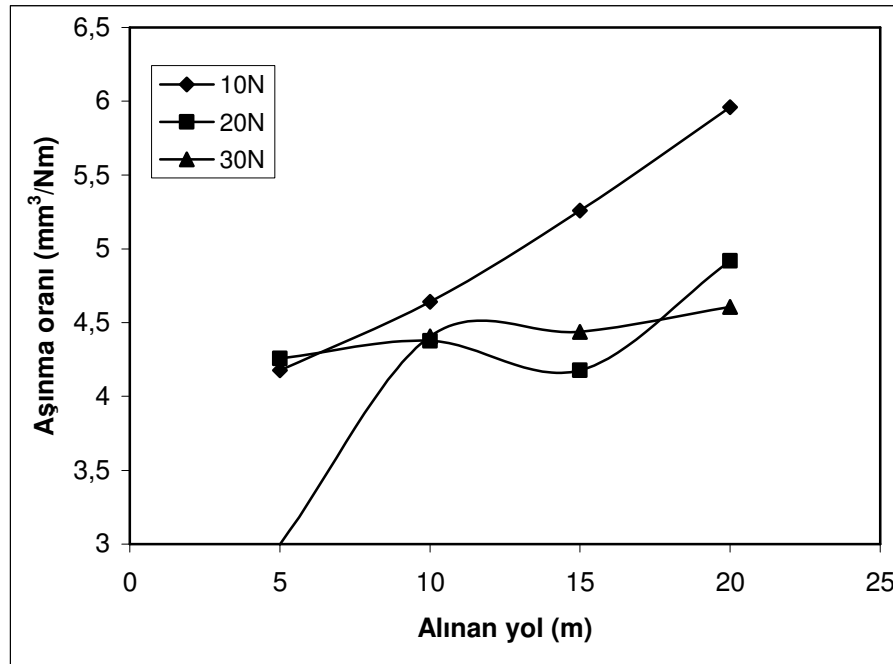


Şekil 8.31. % 25Cr içeren numunenin yük ve alınan yola bağlı olarak aşınma oranı değişimi

% 25 Cr içerikli numunenin alınan yola bağlı olarak aşınma oranı Şekil 8.31' de verilmiştir. Alınan yol 5 m'ye ulaştığında artan yük ile aşınma oranının azaldığı, 20 N'luk yük de

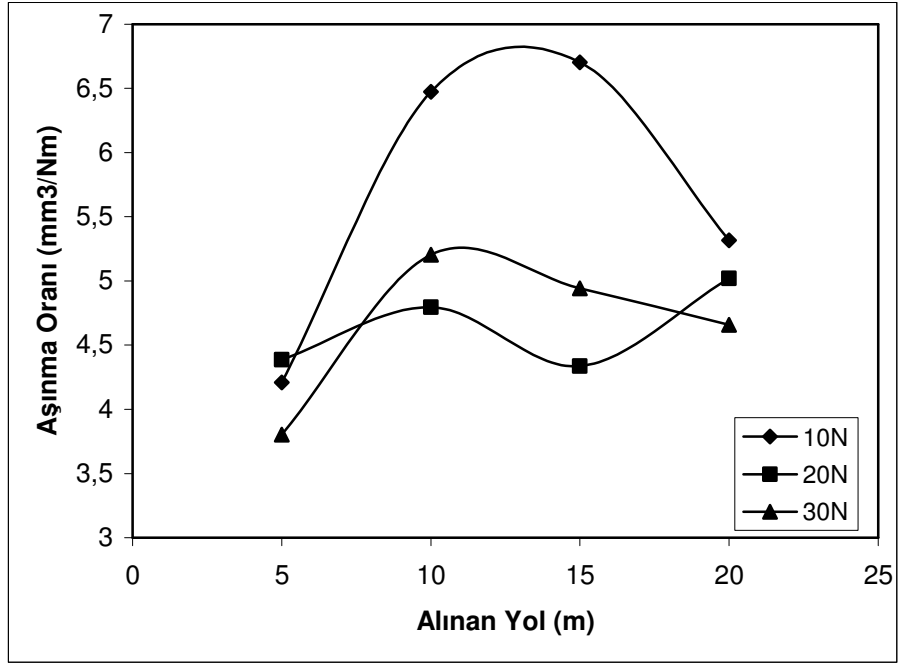
aşınma oranı 10 N'luk aşınma oranından daha yüksek olduğu 15 m'lik mesafeye kadar aşınma oranının fazla değişmediği, ancak daha sonra az oranda arttığı görülmüştür. 10 m'lik aşınma mesafesinin de ise 10 N ile 30 N luk yükler için aşınma oranlarının birbirine yakın olduğu; 30 N'luk yük için 5 ile 10 m arasında aşınma oranı hızla artarken 10 ile 15 m arasında aşınma oranının azaldığı ve daha sonra fazla değişmediği saptanmıştır.

% 27.5 Cr içeren toz alaşımının aşınma oranı Şekil 8.32'de gösterildiği gibidir. Şekil 8.32'de 5 m'lik yol sonunda aşınma oranları incelendiğinde en düşük aşınma oranı 30 N'luk yükte olduğu, 10 m'lik yol sonunda 20 ve 30 N'luk yüklerde aşınma oranlarının aynı olduğu hatta her üç yük için de aynı değerlere yaklaştığı, 10 ve 20 N'luk düşük yüklerde aşınma oranının hızla arttığı tespit edilmiştir.



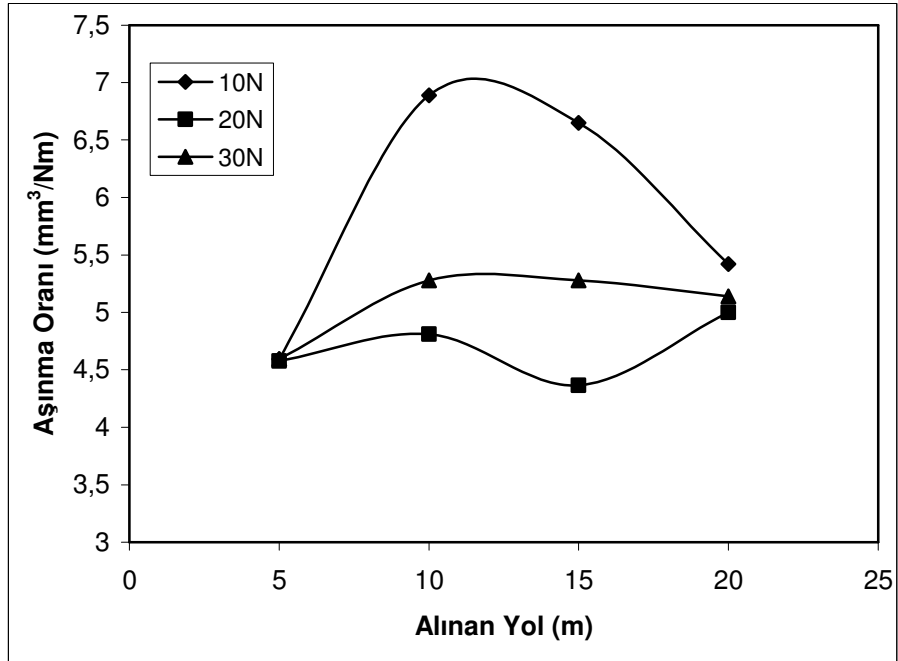
Şekil 8.32. % 27.5 Cr içeren numunenin yük ve alınan yola bağlı olarak aşınma oranı değişimi

Şekil 8.33'de % 30 Cr oranına sahip numunenin abrasiv aşınma sonrasında elde edilmiş aşınma oranı görülmektedir. 5 m sonunda en yüksek aşınma direncine sahip yükün 30 N'luk yük olduğu ve 10 N'luk yüklemede ise, 10 m'lik yol aşıldıktan sonra aşınma direncinin hızla düştüğü gözlenmiştir. 20 m sonunda aşınma oranları uygulanan yüklerle karşılaştırıldığında; 30 N'luk yükleme için en düşük aşınma oranı, 10 N'luk yük için ise en yüksek aşınma oranının elde edildiği görülmüştür. Ancak her üç yük değerinde de 20 m mesafe sonunda ulaşılan aşınma oranları birbirine oldukça yakındır.



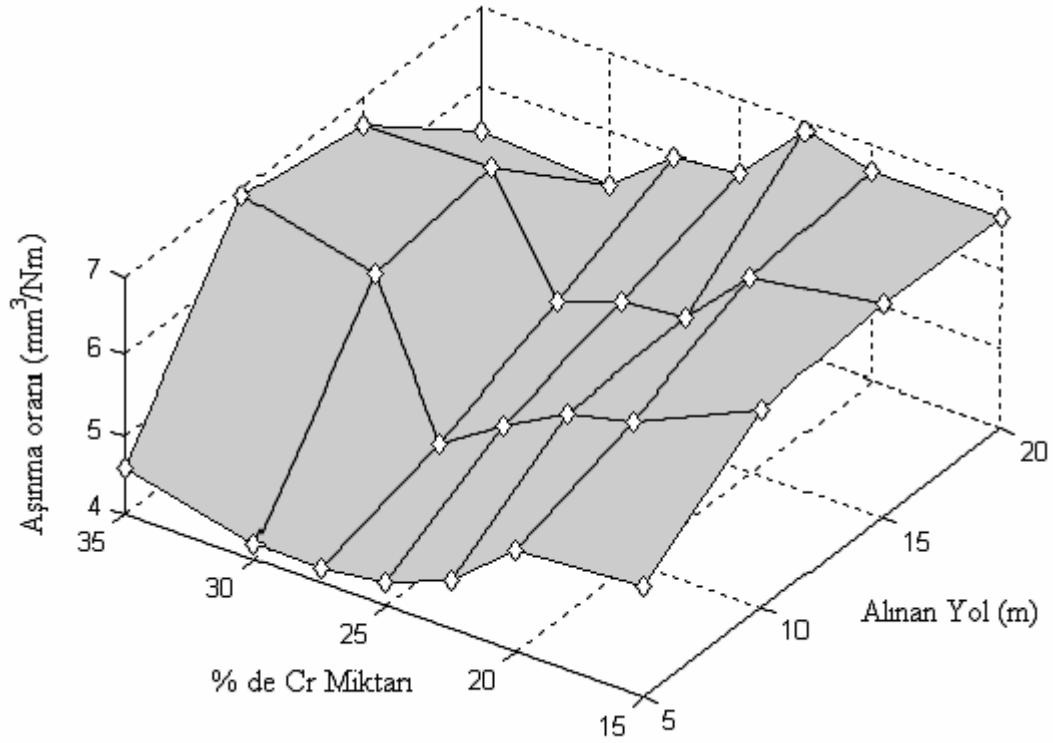
Şekil 8.33. % 30 Cr içeren numunenin yük ve alınan yola bağlı olarak aşınma oranı değişimi

Şekil 8.34'de % 35 Cr içeriğine sahip numunenin değişen yük ve yollardaki aşınma oranları verilmiştir. 5 m mesafede aşınma kayıplarının birbirine çok yakın olduğu ve hatta üç farklı yük için de aynı değerleri aldığı, mesafenin artmasıyla 10 N luk yük için aşınma oranının da hızlı bir artış gösterdiği, aşınma yolunun artması ile aşınma oranının hızla azaldığı 20 m'lik mesafe sonrasında 20 ile 30 N'luk yüklerde aşınma oranının birbirine yaklaştığı ve 10 N'luk yükte ise aşınma oranının daha yüksek olduğu görülmüştür.



Şekil 8.34. % 35 Cr içeren numunenin yük ve alınan yola bağlı olarak aşınma oranı değişimi

10 N'luk yükün uygulandığı Cr içeriği farklı numuneler yola bağlı olarak aşınma oranındaki değişim Şekil 8.35 de verilmiştir. Şekilde de gösterildiği gibi, 5 m'lik bir aşınma mesafesinin sonunda elde edilen aşınma oranları incelendiğinde Cr oranı artıka aşınma oranının azaldığı 2 nolu Cr içeriğine sahip numuneden sonra aşınma oranının daha hızlı bir şekilde düşme göstermiştir. Aşınma oranındaki azalmanın 5 nolu numuneden sonra artan Cr içeriğiyle artığı gözlenmiştir. 10 m'lik abrasiv aşınma sonrasında elde edilen aşınma oranları incelendiğinde, artan % Cr miktarıyla aşınma oranının aynı şekilde azaldığı ve 5 nolu Cr içeriğine sahip numuneden sonra ağırlık kaybında hızlı bir artış gözlenmiştir. 15 m'lik aşınma mesafesi sonrasındaki aşınma oranları 5 nolu numuneye kadar azaldığı fakat bu azalmanın doğrusal olmadığı, 2 nolu numunede aşınma direncinin daha düşük olduğu ve 5 nolu numuneden sonra aşınma oranında hızlı bir artışın varlığı gözlenmiştir.

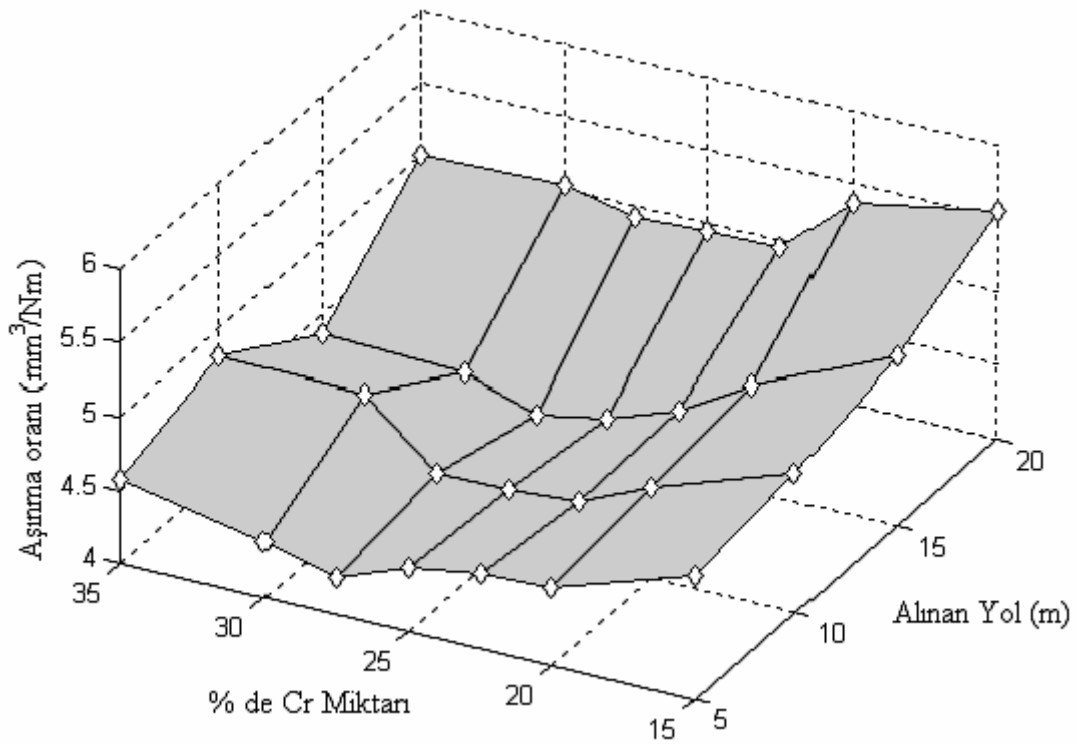


Şekil 8.35. 10 N'luk yük altında Cr ve yol değişiminin aşınma oranına olan etkisi

20 m'lik yol sonrası aşınma oranı bakımından elde edilen sonuçlar incelendiğinde Cr oranı artıka ağırlık kaybında azalmalar gözlenmesine rağmen; 3 nolu numunedeki aşınma oranında bir artış, 6 ve 7 nolu numunelerde ise hızlı bir düşüş gözlenmiştir. 10 N'luk yükün uygulandığı Cr içeriği farklı bu numunelerin aşınma oranları genel olarak incelendiğinde artan yolla birlikte aşınma oranlarında bir artış gözlenmiş ve aşınma direncinin en iyi olduğu numune

5 nolu numune olduğu gözlenmiştir. Aşınma oranlarındaki bazı belirsiz artış ve azalmalar aşınma oranını veren formülde paydada bulunan yol ile, payda bulunan ağırlık kaybındaki artış ve azalmalardan ileri geldiği ve bunun da bazı bölgelerde toz karışımının homojen olmamasından kaynakladığı düşünülmektedir.

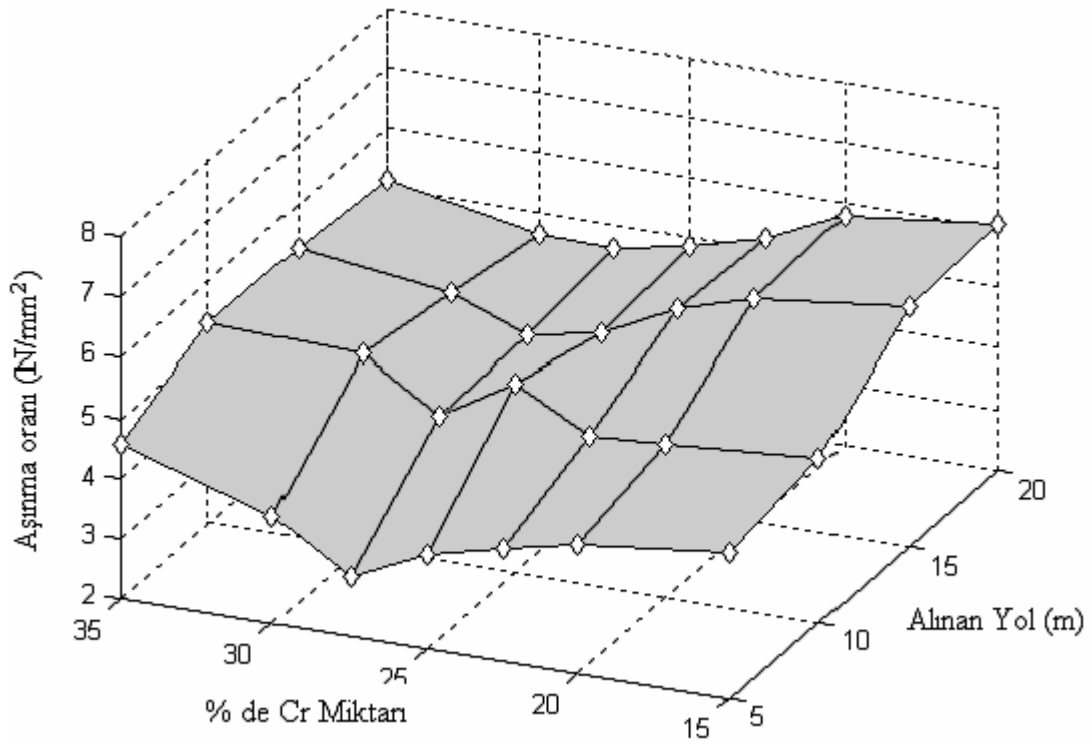
20 N'luk yük altında Cr içeriği farklı numunelerin yolun artmasıyla oluşan aşınma oranı Şekil 8.36'da gösterildiği gibidir. Şekilde de görüldüğü gibi 5m'lik bir aşınma mesafesinin sonunda elde edilen aşınma oranının artan Cr oranıyla birlikte azaldığı, % 27.5 Cr içerikli 5 nolu toz alaşımından sonra aşınma oranında bir artışın ortaya çıktığı gözlenmiştir. Aynı şekilde 10 m lik abrasiv aşınma sonrasında elde edilen aşınma oranı incelendiğinde, artan % Cr miktarıyla aşınma oranının azaldığı ve 5 nolu Cr içeriğine sahip numuneden sonra aşınma oranında bir artış dikkat çekmektedir. 10 m'ye benzer bir ilişki 15 m'lik aşınma mesafesi sonrasında gözlenmiştir. 20 m'lik aşınma mesafesinde ise, 2 nolu numunede aşınma azalarak devam ederken 2 nolu numuneden sonra aşınma oranında daha hızlı bir azalma ortaya çıkmıştır.



Şekil 38.36. 20 N'lük yük altında Cr ve yol değişiminin aşınma oranına olan etkisi

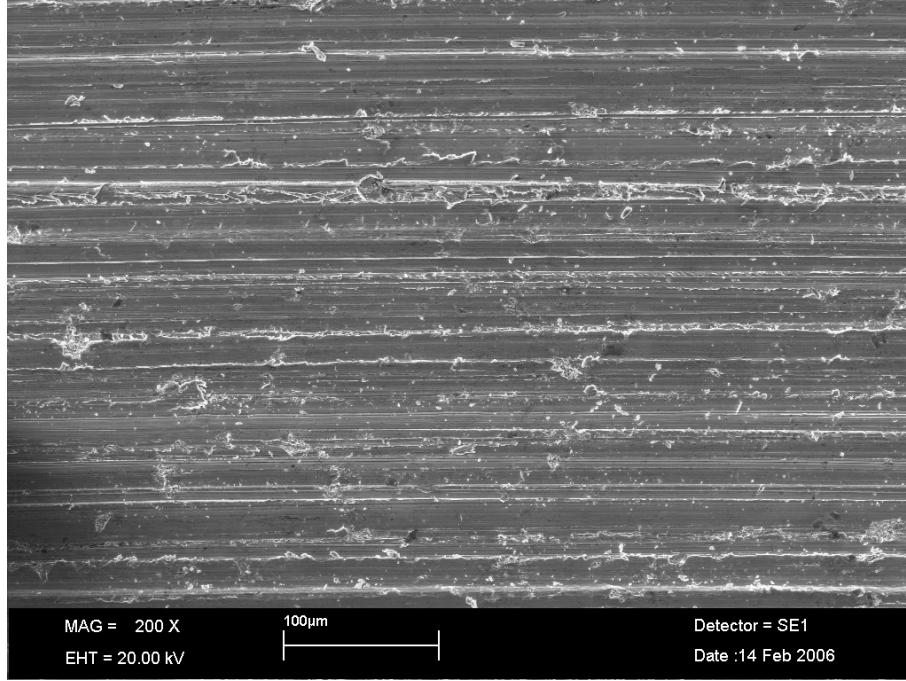
Şekil 8.37'de, 30 N'luk yük için artan Cr miktarı ve katedilen yol mesafesiyle birlikte aşınma oranındaki değişim verilmiştir. 5 m'lik aşınma mesafesinde 5 nolu numuneye kadar ağırlık kaybında bir azalma ve 6 ve 7 nolu numunelerde ise bir artma gözlenmiştir.

Benzer ilişkiler diğer aşınma mesafelerinde de elde edilmiştir. Fakat 10 m’lik mesafedeki 4 nolu numunede aşınma oranında azalma beklenirken artma gözlenmesi dikkat çekmiştir. Şekil 8.35, 8.36 ve 8.37 de görüldüğü gibi yükleme artıkça aşınma oranında yükle ilişkili olarak bir artış gözlenmiş ve aşınma mesafelerinde de artan yolla birlikte aynı durum söz konusu olmuştur. Cr miktarı artınca aşınma oranında azalma görüldüğü, % 27.5 Cr içeriğinden sonraki aşınma oranında bir artış ortaya çıktığı görülmüştür. Bazı yük ve aşınma yolları, genel aşınma oranı aksine bir sonuç göstermeleri o numunelerin belli bölgelerinde homojen karışım olmadığı düşünülmektedir.

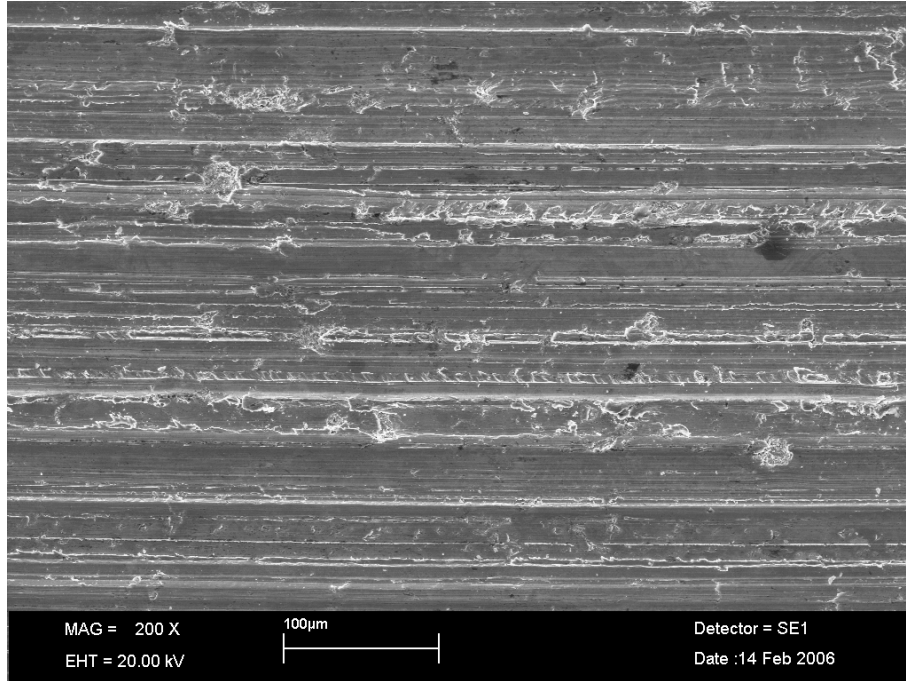


Şekil 8.37. 30 N’lük yük altında krom ve yol değişiminin aşınma oranına olan etkisi

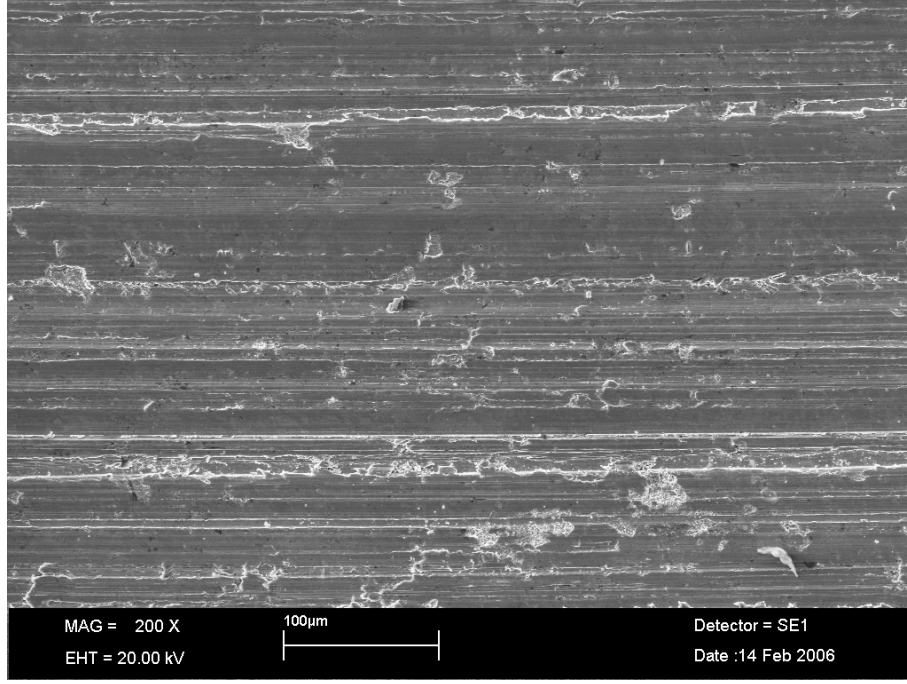
Krom oranı farklı kobalt esaslı Cr-Mo katkılı toz alaşımlarının SEM aşınma yüzey fotoğrafları
Şekil 8.38, 8.39, 8.40, 8.41, 8.42, 8.43, 8.44 verilmiştir.



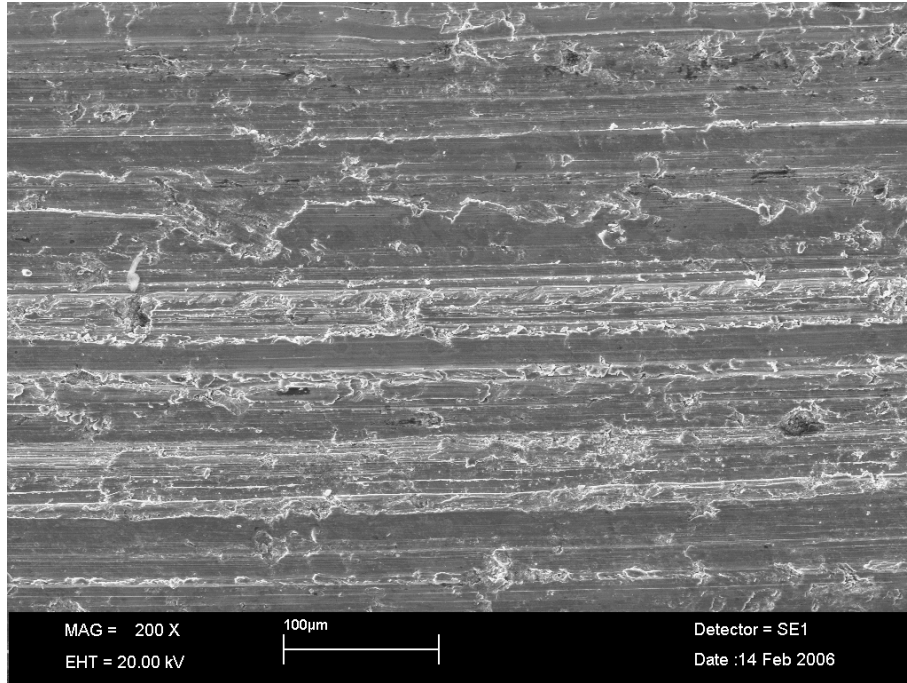
Şekil 8.38. % 15 Cr içeren numunenin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü



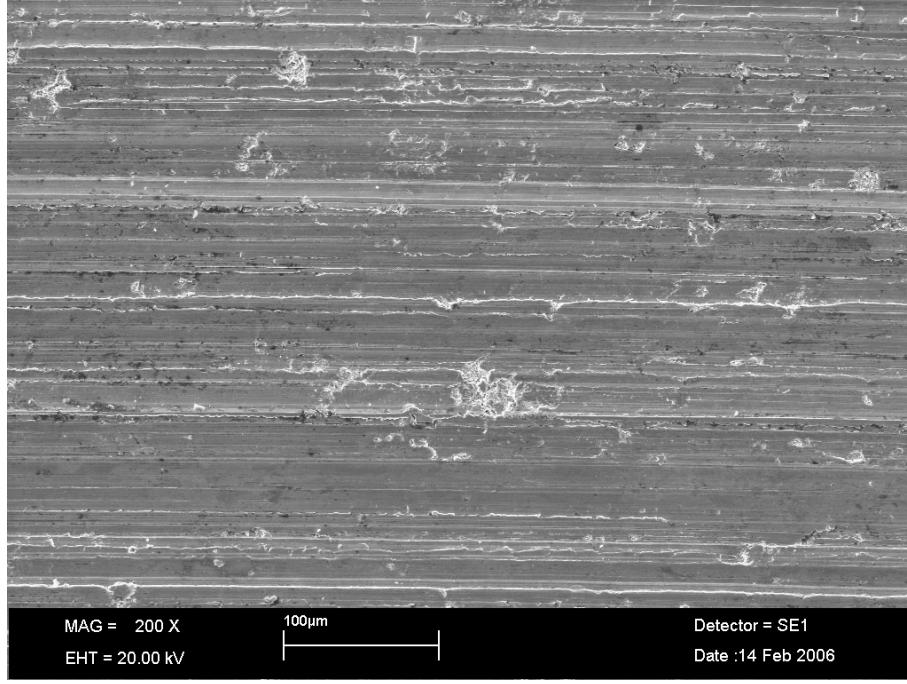
Şekil 8.39. % 20 Cr içeren numunenin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü



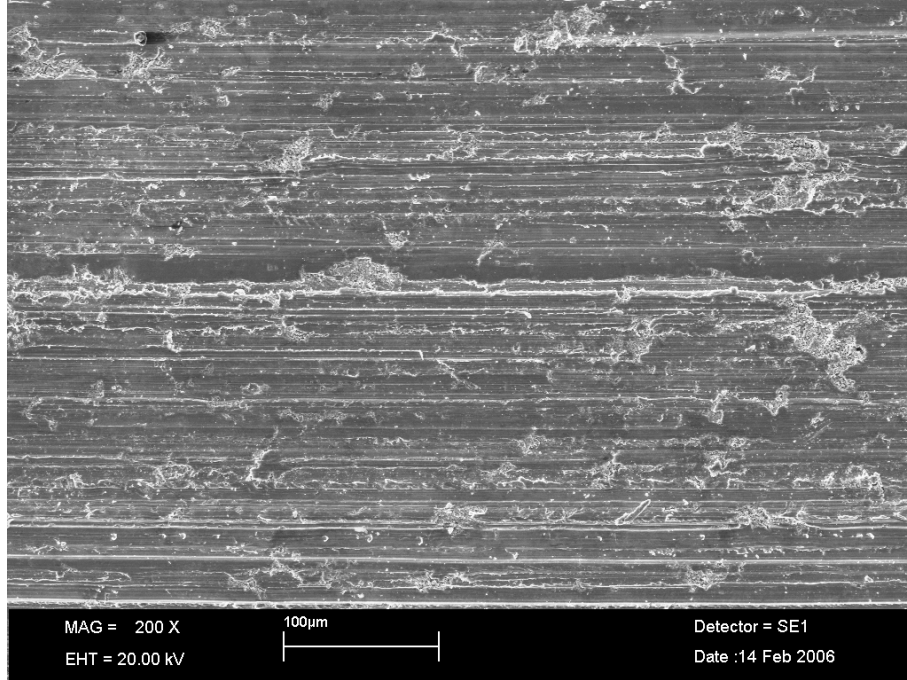
Şekil 8.40. % 22.5 Cr içeren numunenin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü



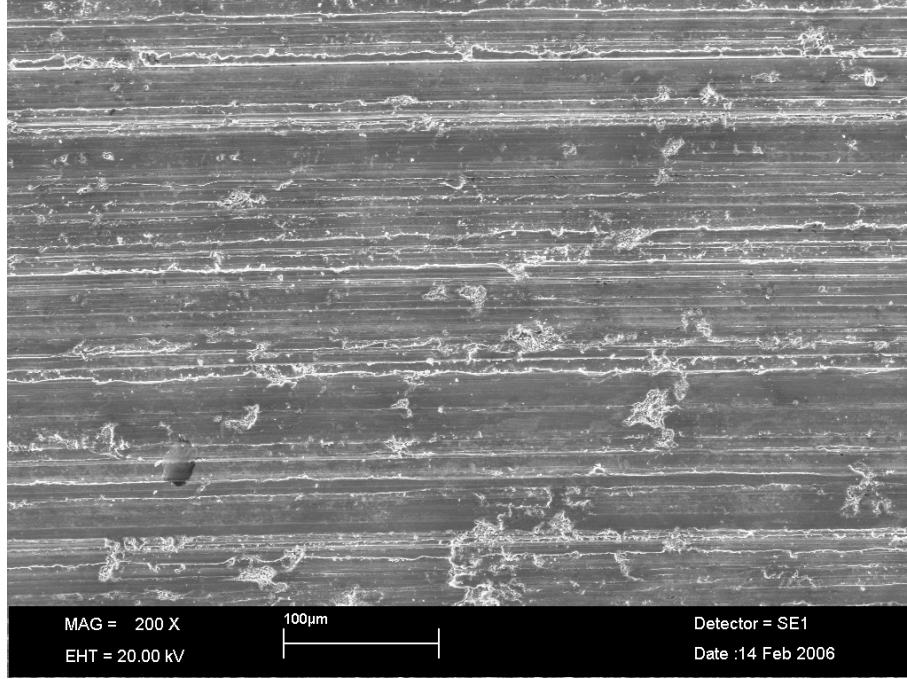
Şekil 8.41. % 25 Cr içeren numunenin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü



Şekil 8.42. % 27.5 Cr içeren numunenin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü

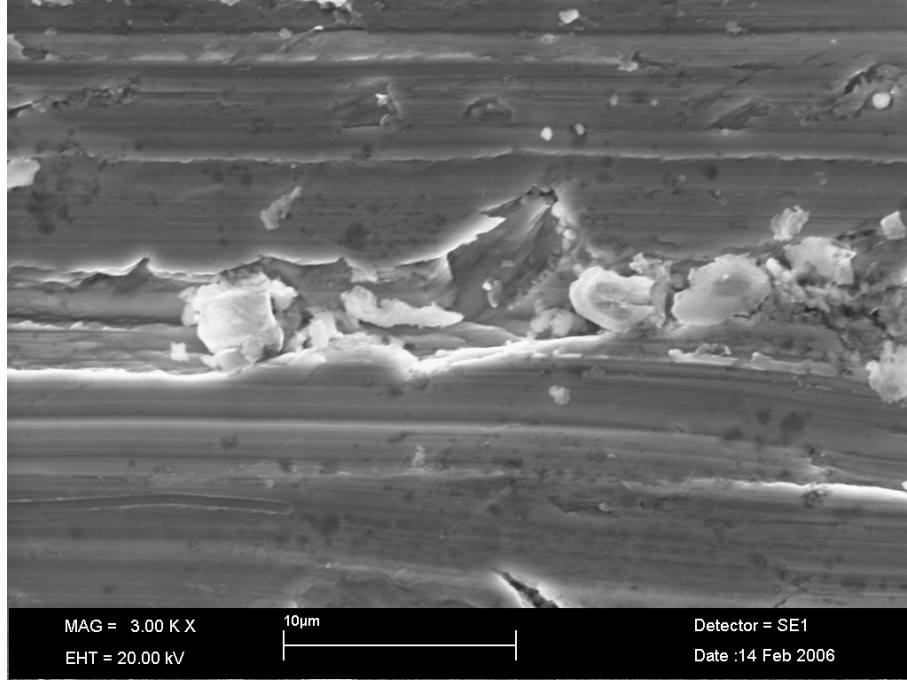


Şekil 8.43. % 30 Cr içeren numunenin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü



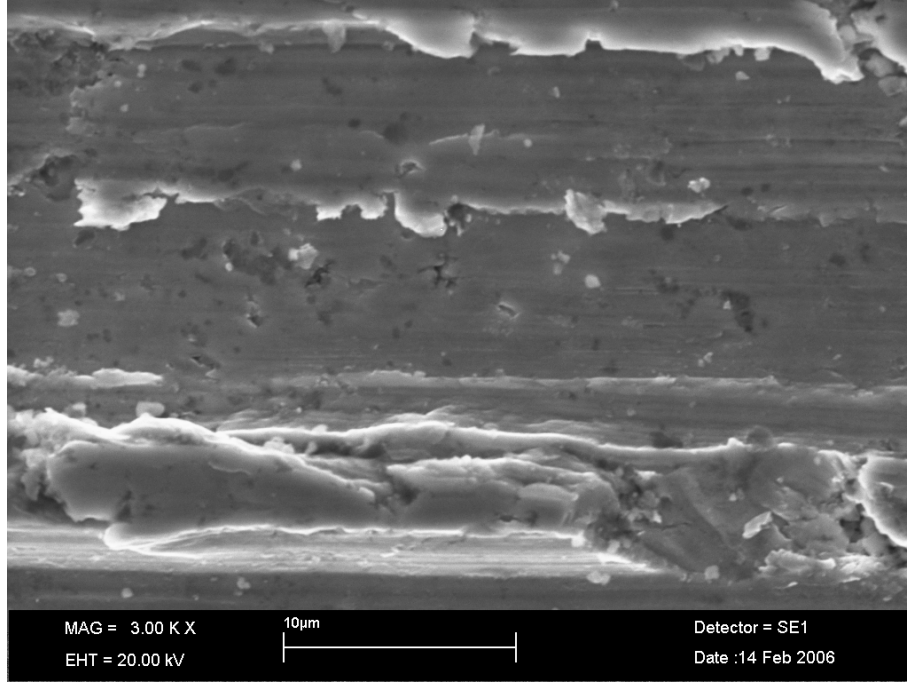
Şekil 8.44. % 35 Cr içeren numunenin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü

Aşınma yüzeylerinden alınan SEM fotoğrafları, elde edilen ağırlık kaybı sonuçlarını desteklemektedir. Değişen yükler altında abrasiv aşınma testine tabi tutulan farklı Cr içeriğine sahip numunelerin aşınma yüzeylerinden alınan SEM fotoğrafları göstermiştir; plastik deformasyonun en az görüldüğü ve aşınma izlerinin en dar ve en yüzeysel şekilde meydana gelen numune 5 nolu numunedir. % 27.5 Cr içeriğine sahip numuneye kadar aşınma izlerinin ve aşınma derinliğinin gittikçe azaldığı fakat daha sonra artışı gözlenmiştir. 6 ve 7 nolu Cr içeriğine sahip numunelerin artan krom miktarıyla birlikte aşınma derinliği ve aşınma iz genişliklerinin arttığı dikkat çekmiştir. Bu sonuçlar, belli bir Cr içeriğine kadar aşınma direncinin artması ve gözenekliliğin azalmasından kaynaklanmış olabileceğini göstermektedir. 5 nolu numuneden sonra, artan Cr miktarı ile birlikte aşınma oranında artma gözlenmiştir. Cr'un ergime sıcaklığının Co elementine göre yüksek olması sinterleme sıcaklığını artırmıştır. Deneylerde sinterleme sıcaklığının her numune için aynı seçilmesi ve 5 nolu numuneden sonra sinterleme sıcaklığının yetersiz olması aşınma direncinin azalmış olabileceğini göstermektedir.

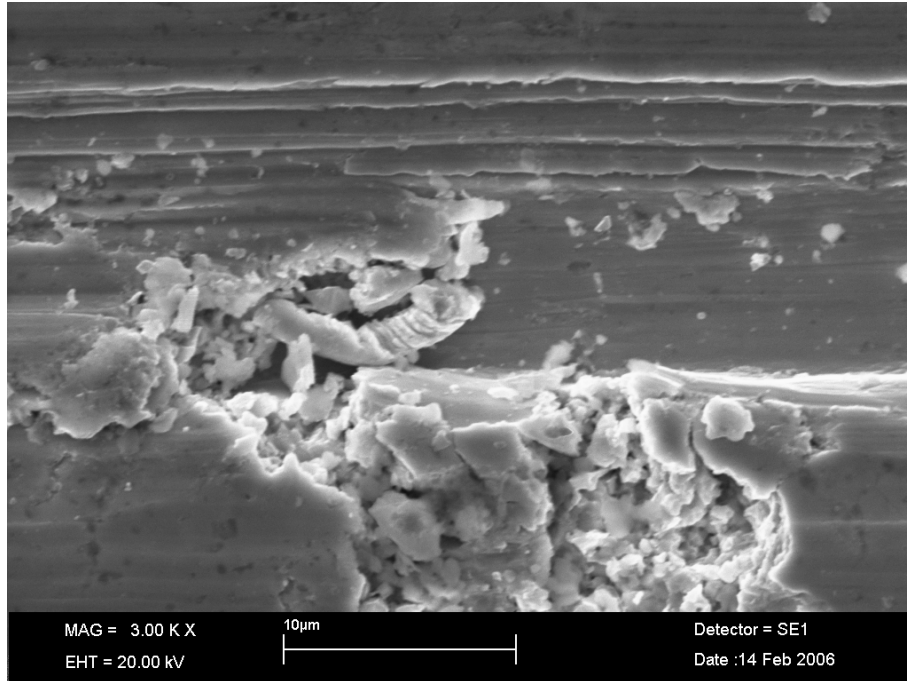


Şekil 8.45. % 15 Cr içeren numunenin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü

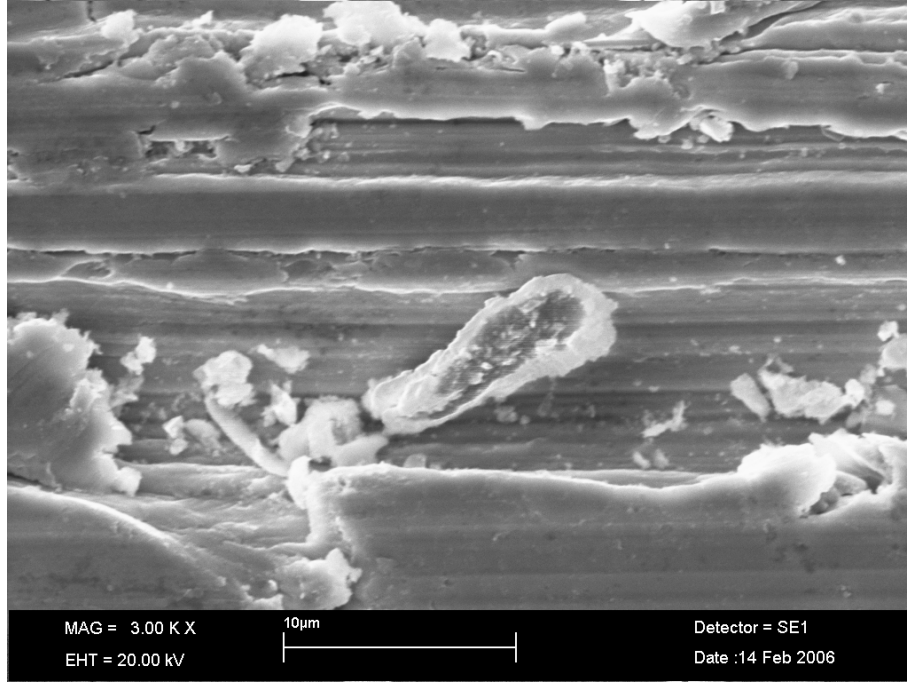
Şekil 8.45’de 1 nolu numunenin aşınma yüzeyindeki SEM görüntüleri görülmektedir. Aşınma derinliği ve aşınma genişliği Şekil 8.45’de gösterilmiş olan % 15 Cr içerikli numunede aşınmanın, yüzeyden tane koparak gerçekleştiği belirlenmiştir. Benzer SEM görüntüleri Şekil 8.46, 8.47, 8.48, 8.49, 8.54 ve 8.55’de görülmektedir. 5 nolu numuneden sonraki 6 ve 7 nolu numunelerin aşınma yüzeylerinde daha fazla plastik deformasyon olduğu görülmüştür.



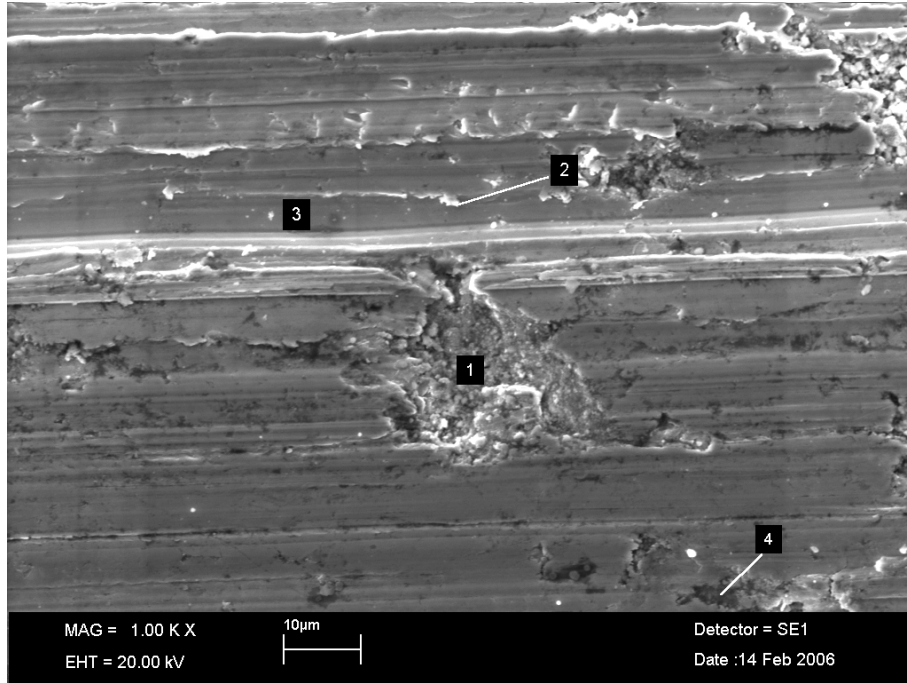
Şekil 8.46. % 20 Cr içeren numunenin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü



Şekil 8.47. % 22.5 Cr içeren numunenin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü

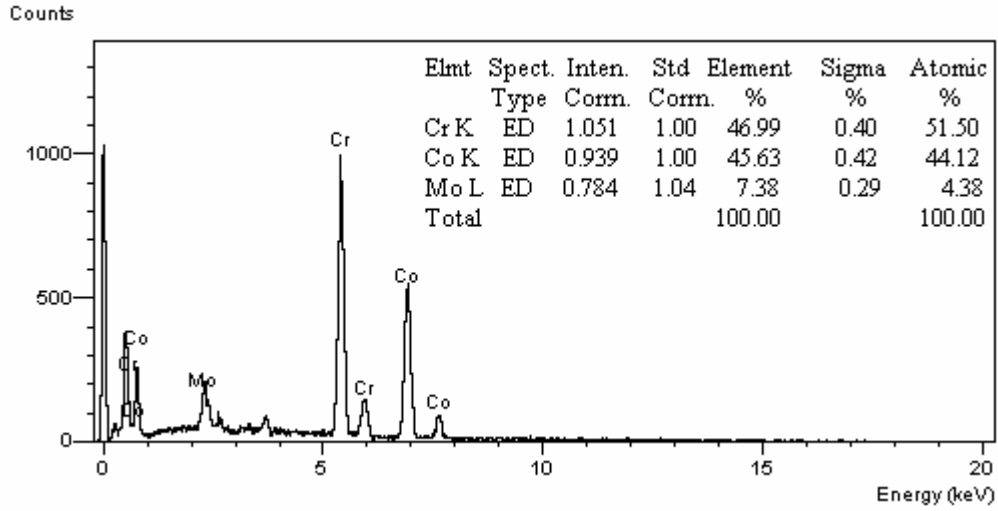


Şekil 8.48. % 25 Cr içeren numunenin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü



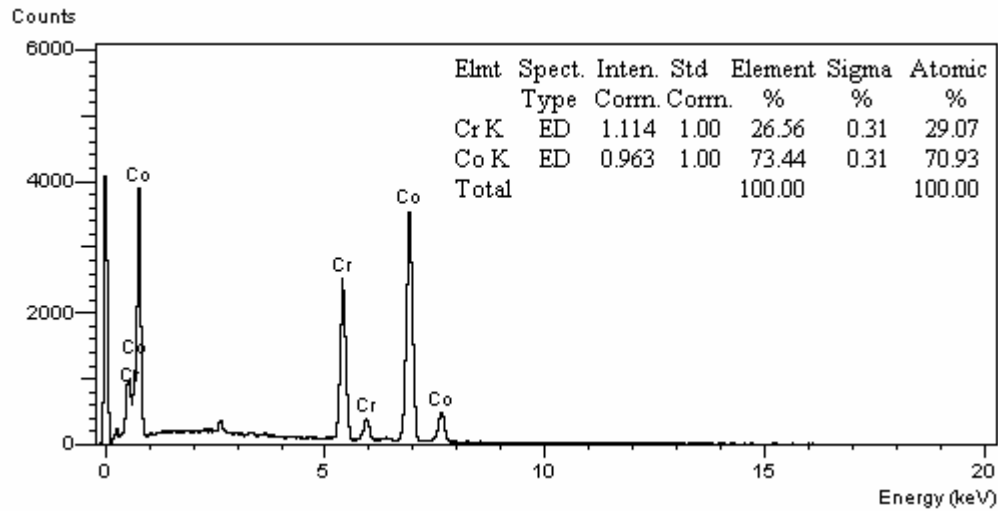
Şekil 8.49. % 27.5 Cr içeren numunenin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü

Şekil 8.49'da % 27.5 Cr içeriğine sahip toz alaşımının abrasiv aşınma sonrasında SEM görüntüsü verilmiştir. SEM görüntüsünün 4 farklı noktasından alınan EDS sonuçları incelendiğinde 1 noktasındaki EDS analizine bakıldığı zaman EDS analizi alınan bölgede Co oranını azaldığı Cr-Mo miktarında bir artış gözlenmiştir.



Şekil 8.50. Aşınma yüzeyi verilen % 27.5 Cr içerikli numunenin 1 noktasındaki EDS analizi

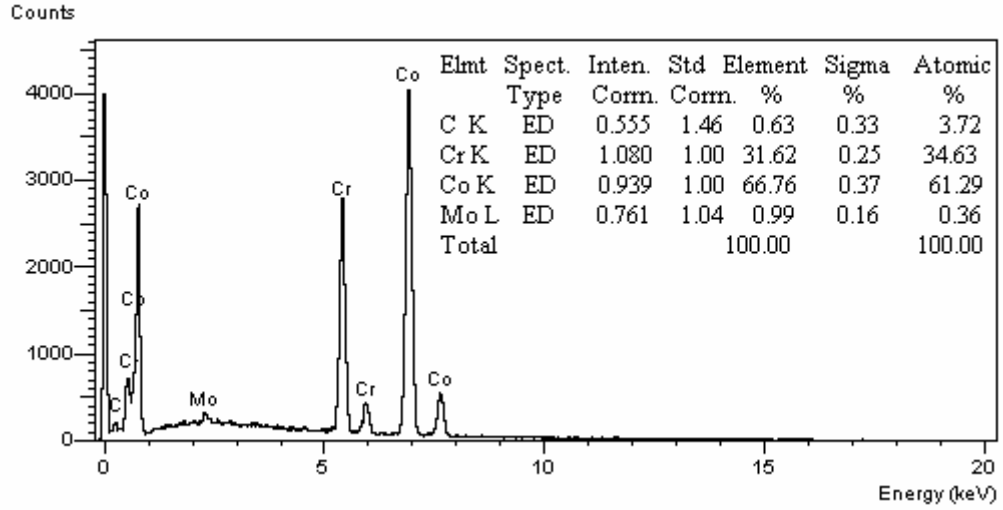
1 noktasının EDS analizinde bu noktanın Co-Cr-Mo üçlü alaşımındaki α ve σ faz yapılarından oluştuğu ve bu üç fazların özelliklerini de taşıdığı düşünülmektedir. SiC aşındırıcının temas ettiği 2 numaralı bölgeden alınan EDS sonuçlarında Mo nin hiç görülmeği ve Cr miktarında bir azalma görüldüğü izlenmiştir.



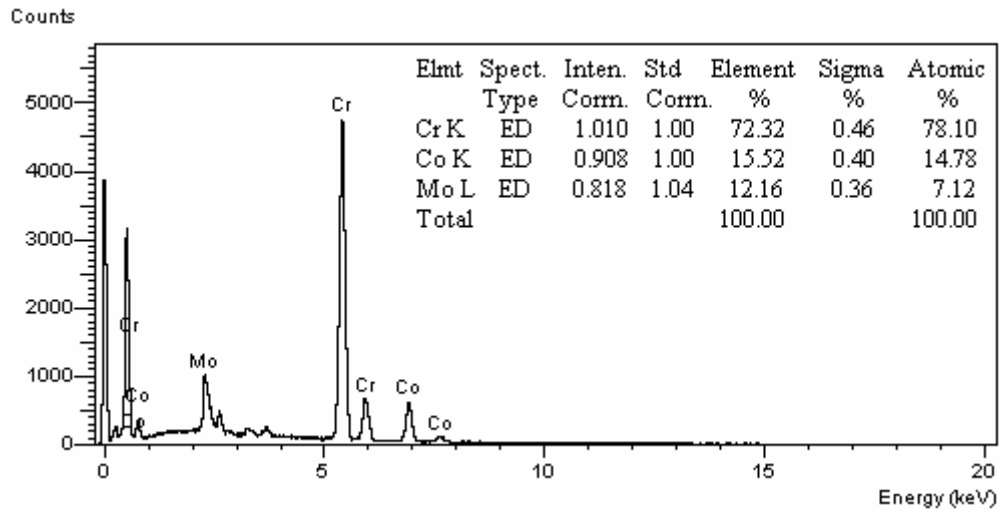
Şekil 8.51. Aşınma yüzeyi verilen % 27.5 Cr içerikli numunenin 2 noktasındaki EDS analizi

2 nolu noktanın tamamen Co-Cr ikili alaşımının α katı eriyik fazının özelliklerini taşıdığı belirlenmiştir. 3 numaralı noktanın EDS sonuçlarında Mo miktarının azaldığı Cr miktarının arttığı gözlenmiştir. 3 nolu noktada Co-Cr-Mo arasında oluşan α katı eriyik fazı dışında az

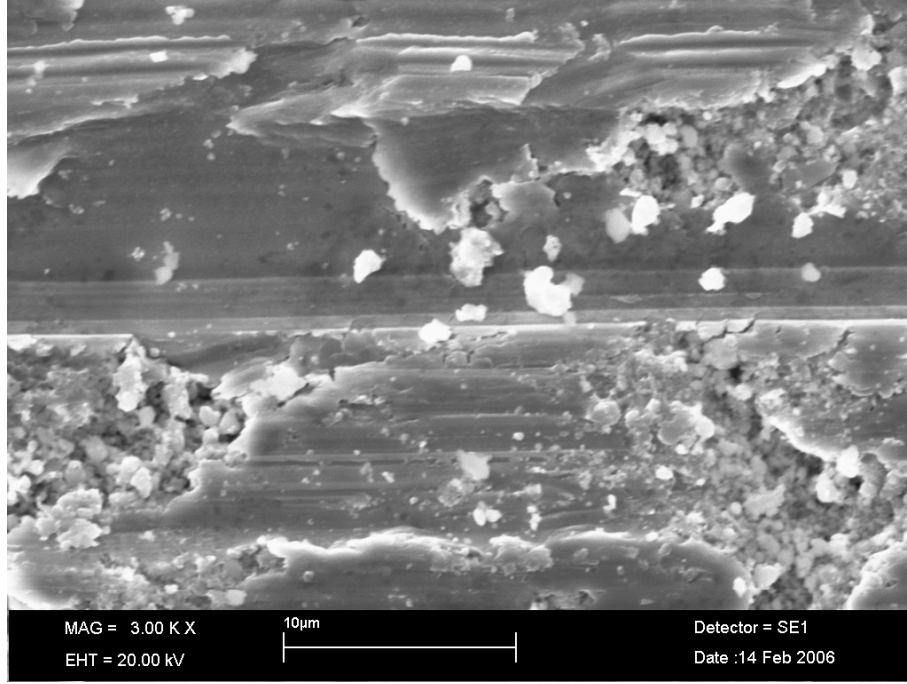
oranda σ bileşik fazı yapısının bulunduğu düşünülmektedir. 4 numaralı EDS analizi sonunda Co'ın azaldığı Cr ve Mo miktarının arttığı gözlenmiştir. Alaşımın 4 noktasından alınan EDS analizi bu noktada yapı Co ve Mo çözündürmüş δ_{Cr} katı eriyik fazından oluştuğunu ve alaşımın bu fazın özelliklerini taşıdığını göstermektedir. Bu sonuçlar, tane kopması şeklinde oluşan aşınmalarda Mo ve Cr'un aşındığı ve kesme şeklinde oluşan aşınmada ise Co tozlarının aşındığı sonucuna varılmıştır.



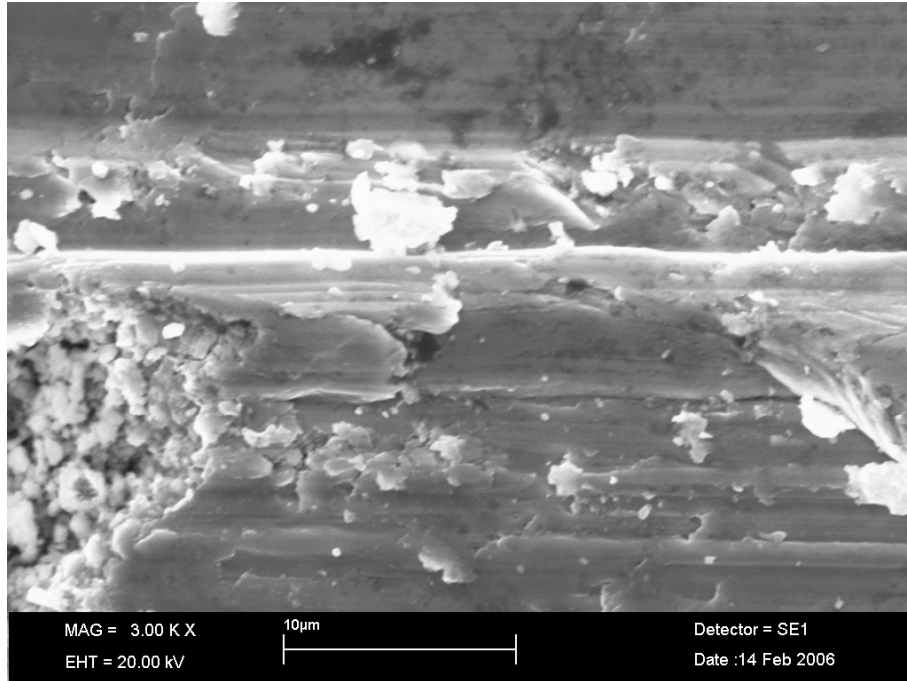
Şekil 8.52. Aşınma yüzeyi verilen % 27.5 Cr içerikli numunenin 3 noktasındaki EDS analizi



Şekil 8.53. Aşınma yüzeyi verilen % 27.5 Cr içerikli numunenin 4 noktasındaki EDS analizi



Şekil 8.54. % 30 Cr içeren numunenin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü



Şekil 8.55. % 35 Cr içeren numunenin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü

% 35 Cr içeren abrasiv aşınmış numunelerde, aşınmış yüzeyler incelendiğinde, tanelerin gevrek kopmalar şeklinde yüzeyden ayrıldıkları ve ayrılan tanelerin koptukları noktalarda oyuk şeklinde boşluk bıraktıkları belirlenmiştir

8.4. Optik Mikroskop Sonuçları:

1200 °C de 60 dakika süreyle sinterlenmiş krom oranı farklı Co esaslı Cr-Mo içerikli T/M alışımlı parlatılmış dağlanmamış olarak çekilen 100 büyütmedeki optik mikroskop resimleri Şekil 8.56, 8.57, 8.58, 8.59, 8.60, 8.61, 8.62’de verilmiştir.

Parlatılmış numunelerin optik mikroskop görüntülerinden, gözenek dağılımı ve toz tanelerinin durumu görülebilmektedir. Gözenek tipi, dağılımı, şekli ve büyüklüğü T/M parçalarının mekanik özellikleri üzerine önemli etkilere sahiptir. Aynı zaman toz tane boyutları da mekanik özellikler açısından önem teşkil eder.

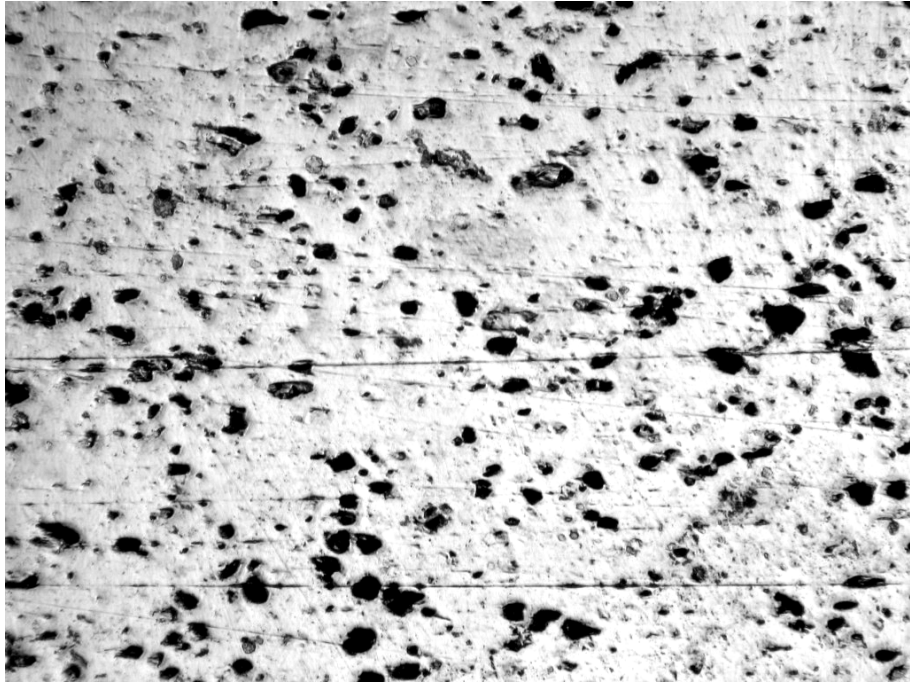
Gözenek miktarının azalması mekanik özelliklerin iyileşmesi anlamına geleceğinden, söz konusu gözenek miktarının azalması için çeşitli işlemler uygulanmaktadır. Malzemeler statik ve dinamik yüklere maruz kalmakla birlikte, en çok dinamik yüklerin etkisinde maruz kalırlar ve bu yükler haricinde korozyon gibi fiziksel etmenlere maruz kalmaktadırlar. Bu mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi gereklidir (Kurgan, 2005). Bu iyileştirmeler T/M malzemelerde gözeneklerin azaltulmasını da kapsamaktadır. T/M malzemelerde gözenek miktarının azalmasıyla tüm mekanik özelliklerde iyileşme gözlenir (Tunay ve diğ. 2002).



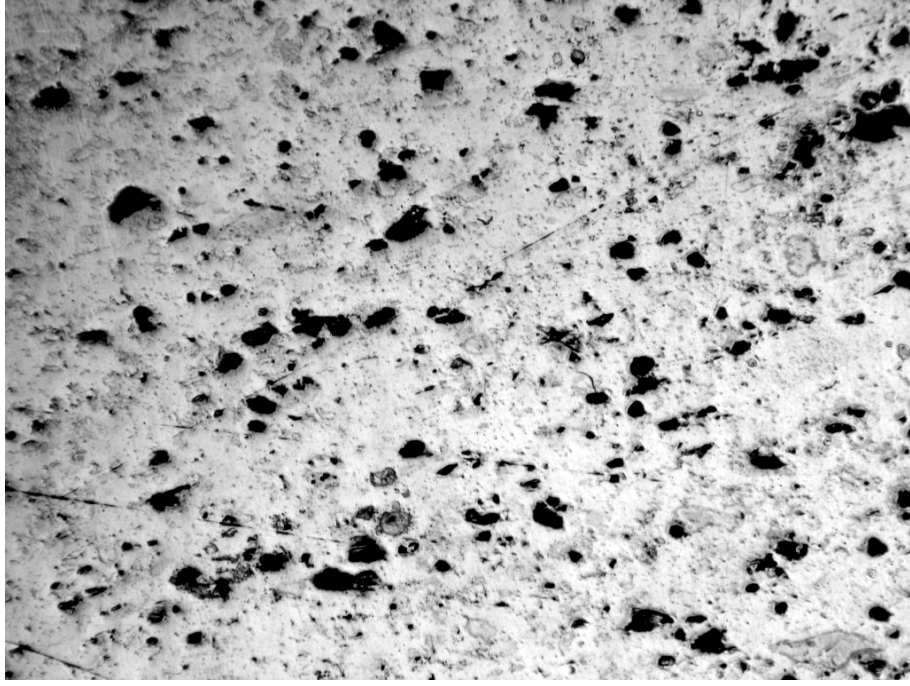
Şekil 8.56. Dağlanmamış % 15 Cr içeren numunenin optik görüntüsü (100x)



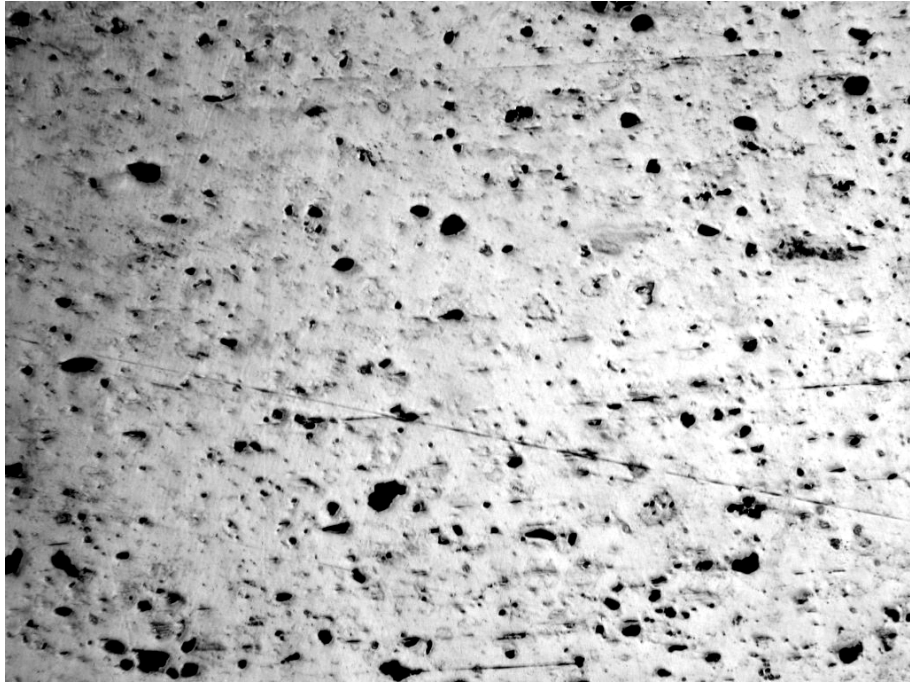
Şekil 8.57. Dağlanmamış % 20Cr içeren numunenin optik görüntüsü (100x)



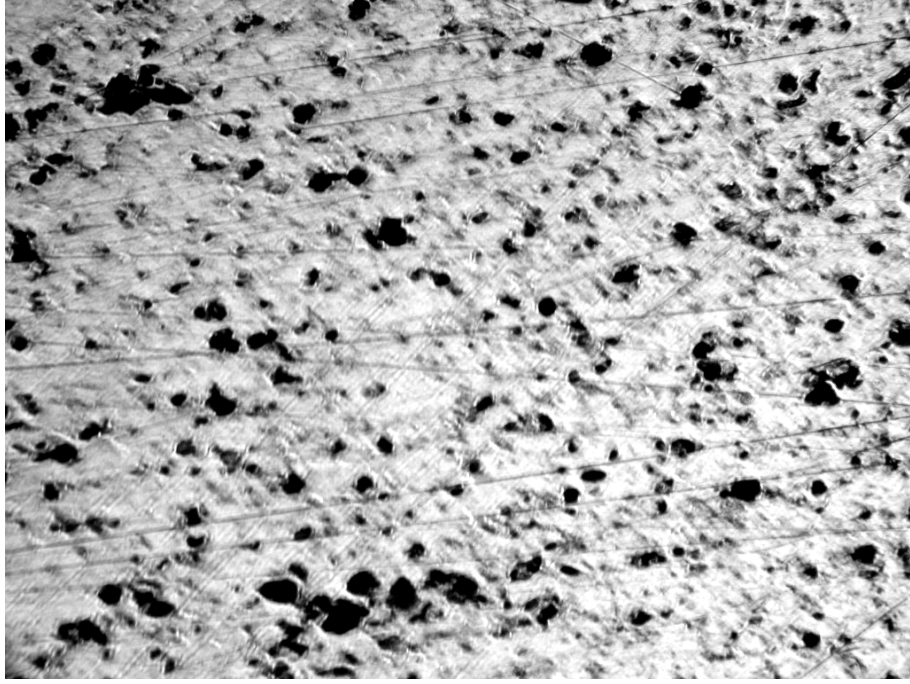
Şekil 8.58. Dağlanmamış % 22.5 Cr içeren numunenin optik görüntüsü (100x)



Şekil 8.59. Dağlanmamış % 25 Cr içeren numunenin optik görüntüsü (100x)



Şekil 8.60. Dağlanmamış % 27.5 Cr içeren numunenin optik görüntüsü (100x)



Şekil 8.61. Dağlanmamış % 30 Cr içeren numunenin optik görüntüsü (100x)

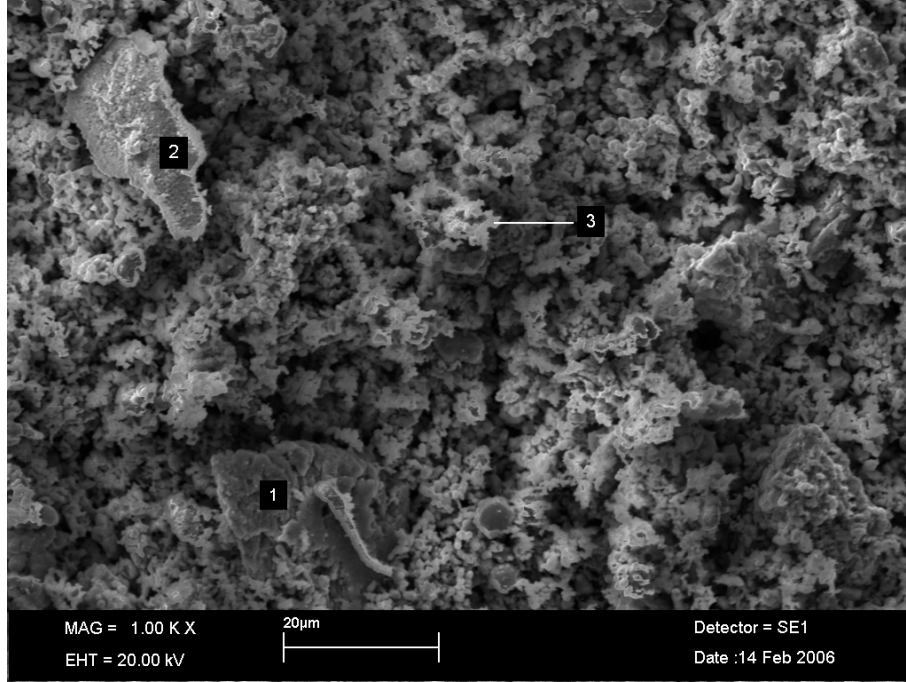


Şekil 8.62. Dağlanmamış % 35 Cr içeren numunenin optik görüntüsü (100x)

1 nolu numuneden itibaren artan krom oranlarıyla gözeneklerin değişimleri gözlemlendiğinde, krom miktarı az olan numunelerde gözenekler çok sayıda düzensiz şekilli ve keskin köşelidir. Krom oranı düşük numunelerdeki bu görüntülerden anlaşılabileceği üzere presleme basıncının yetersiz olduğu ve bunun da mekanik özelliği kötüleştireceği düşünülmektedir. Krom oranı artıkça gözenek miktarlarının azaldığı ve gözeneklerde köşelerin küreselleştiği gözlenmiştir. % 27.5 Cr oranından fazla Cr içeren 6 ve 7 nolu numunelerde gözeneklik miktarı fazladır. Bunun da yetersiz sinterlemeden kaynaklandığı düşünülmektedir.

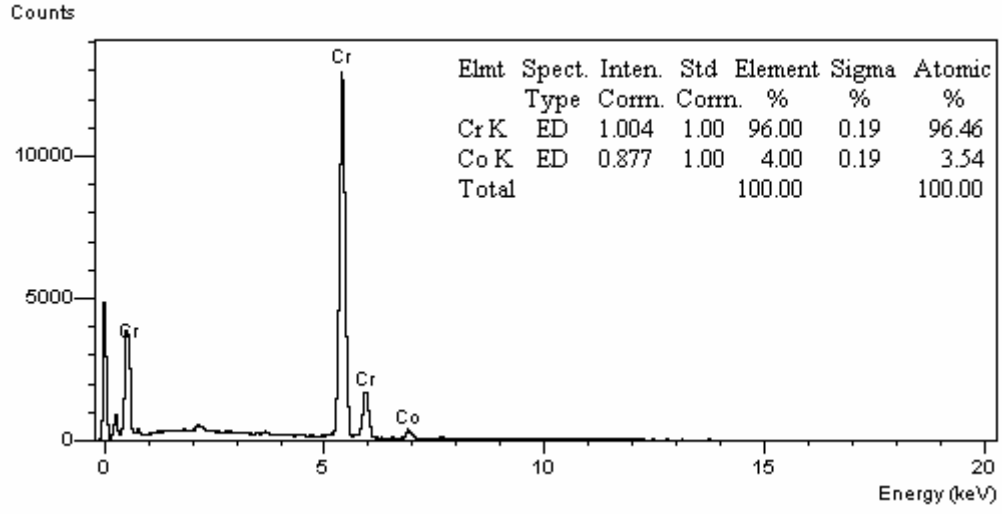
8. 5. SEM ve EDS Sonuçları

Şekil 8.63’de % 27.5 Cr içeren toz karışımından çekilmiş SEM fotoğrafı görülmektedir. SEM görüntüsü üzerinde belirlenen 3 noktanın EDS analizi ise Şekil 8.64, 8.65, 8.66’da verilmiştir.

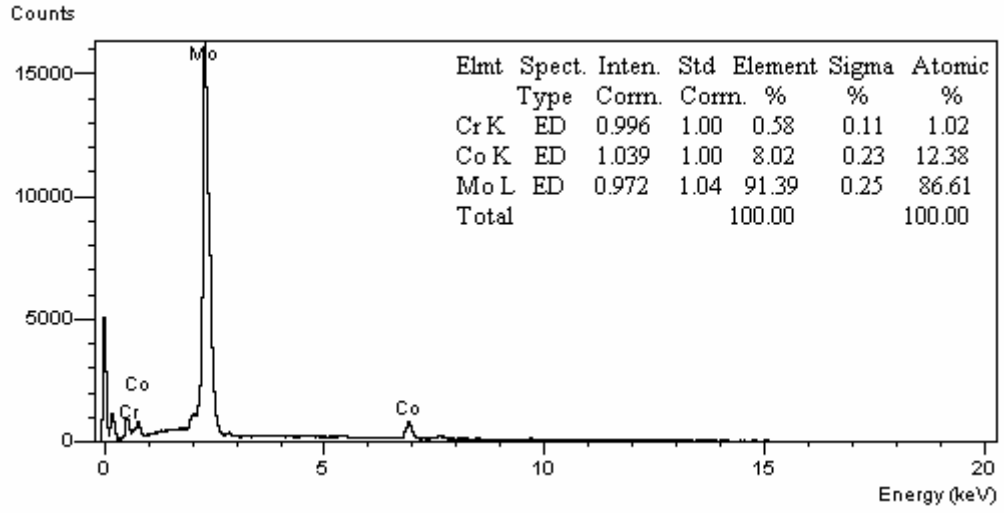


Şekil 8.63. % 27,5 Cr içeren Toz halindeki numunenin SEM görüntüsü

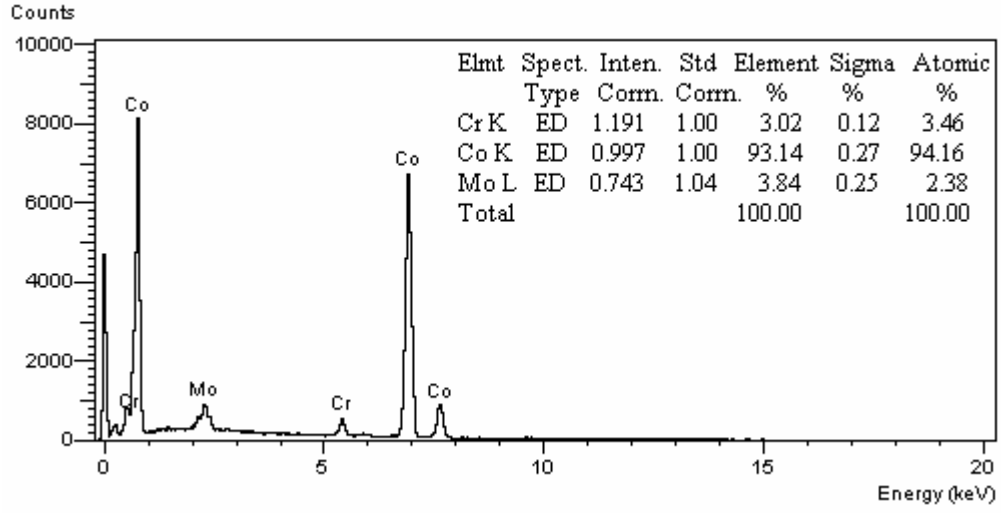
Şekil 8.63’deki 1 noktasından alınan EDS analizi incelendiğinde bu noktanın % 96 oranında krom tozundan oluştuğu, 2 noktasından alınan EDS analizinde, bu noktanın % 91.39 Mo yaklaşık % 8 Co ve % 0.50 Cr’den oluşan toz tanesi olduğu ve 3 nolu noktanın EDS analizinde de % 93 Co toz tanesi % 3 Cr, % 3.8 Mo görülmektedir.



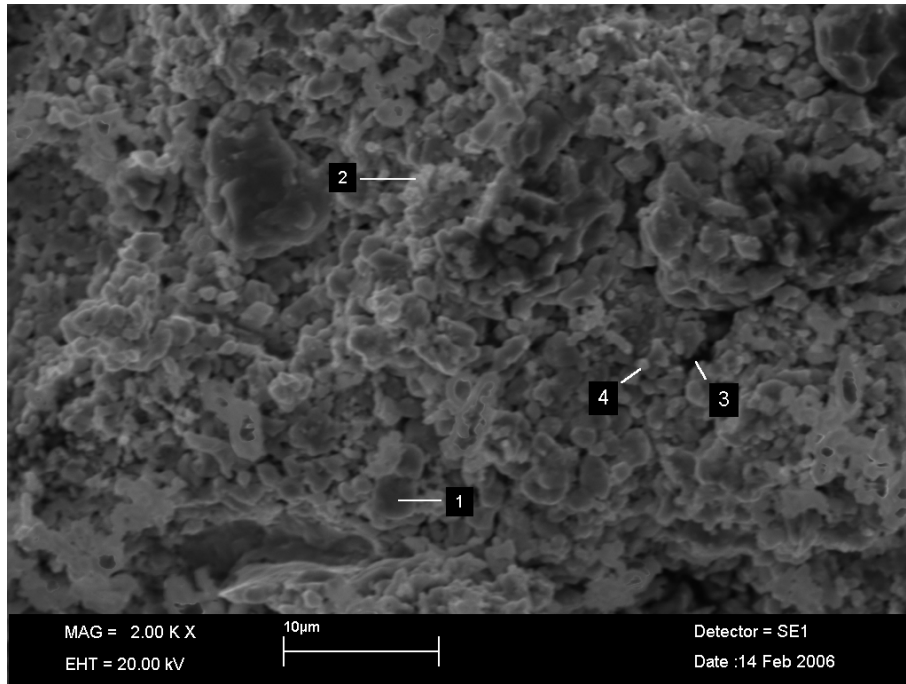
Şekil 8.64. % 27.5Cr içerikli Toz halindeki numunenin 1 noktasındaki EDS analizi



Şekil 8.65. % 27.5Cr içerikli Toz halindeki numunenin 2 noktasındaki EDS analizi

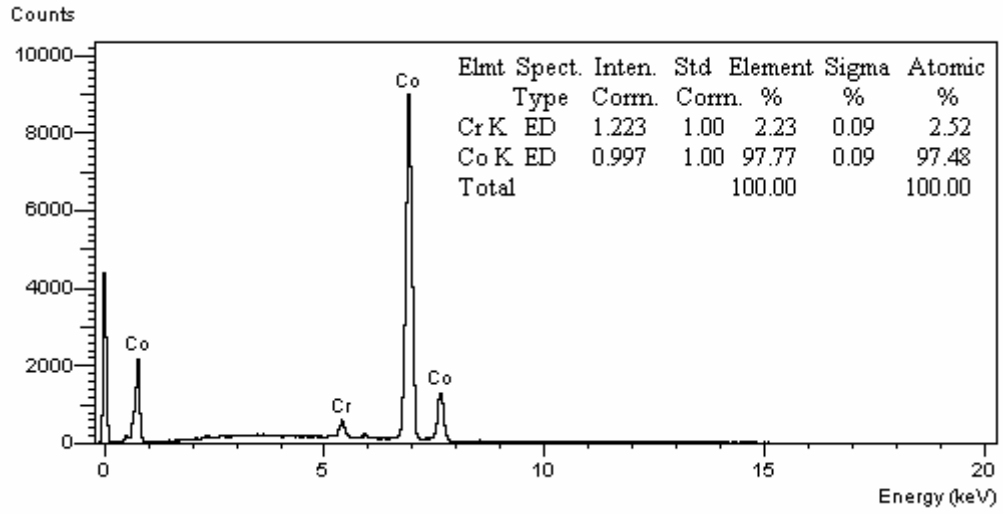


Şekil 8.66. % 27.5 Cr içerikli Toz halindeki numunenin 3 noktasındaki EDS analizi



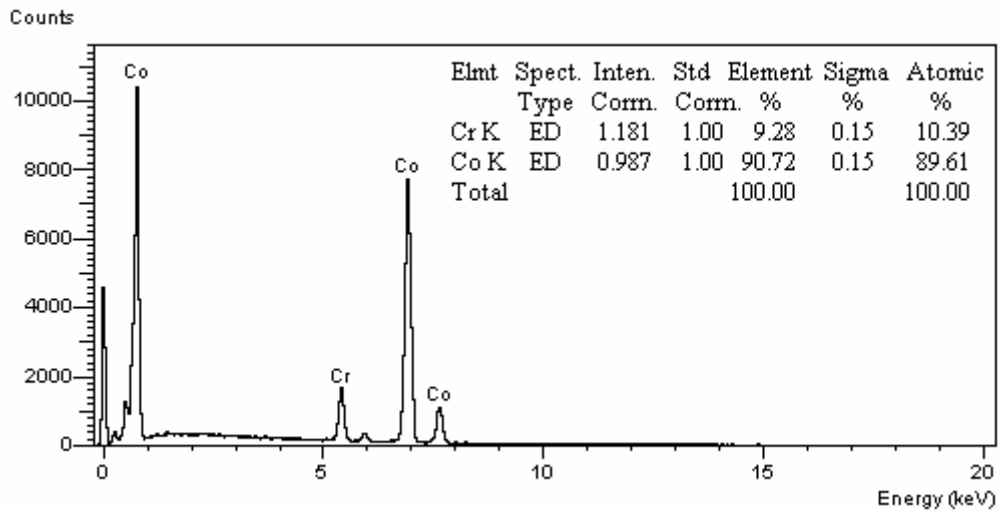
Şekil 8.67. % 27.5 Cr içeren preslenmiş sinterlenmemiş numunenin SEM görüntüsü

Şekil 8.67’de % 27.5 Cr içeren preslenmiş, fakat sinterlenmemiş numunenin SEM fotoğrafı ve Şekil 8.68, 8.69, 8.70, 8.71’dede bu fotoğrafın dört farklı noktasından alınan EDS analizleri verilmiştir.

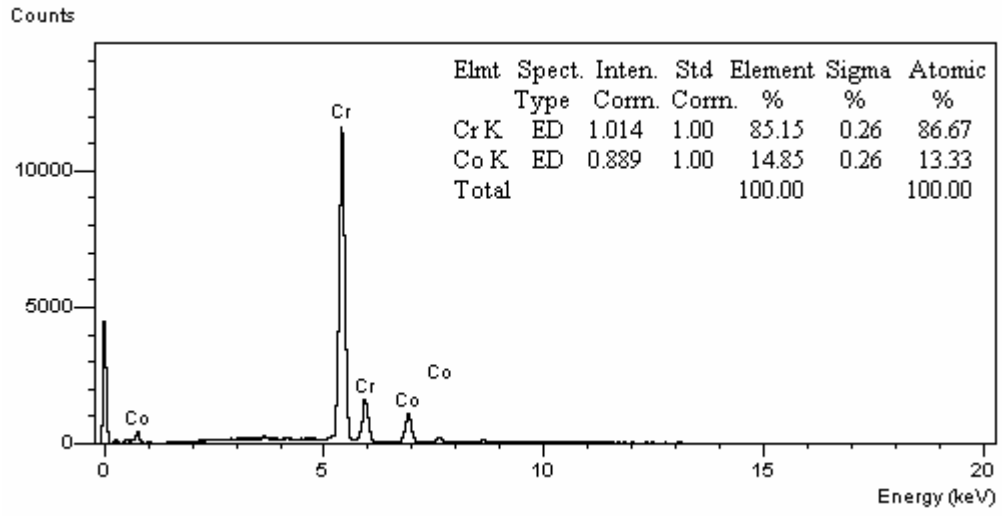


Şekil 8.68. Ağırlıkça % 27.5 Cr içerikli preslenmiş sinterlenmemiş numunenin 1 noktasındaki EDS analizi

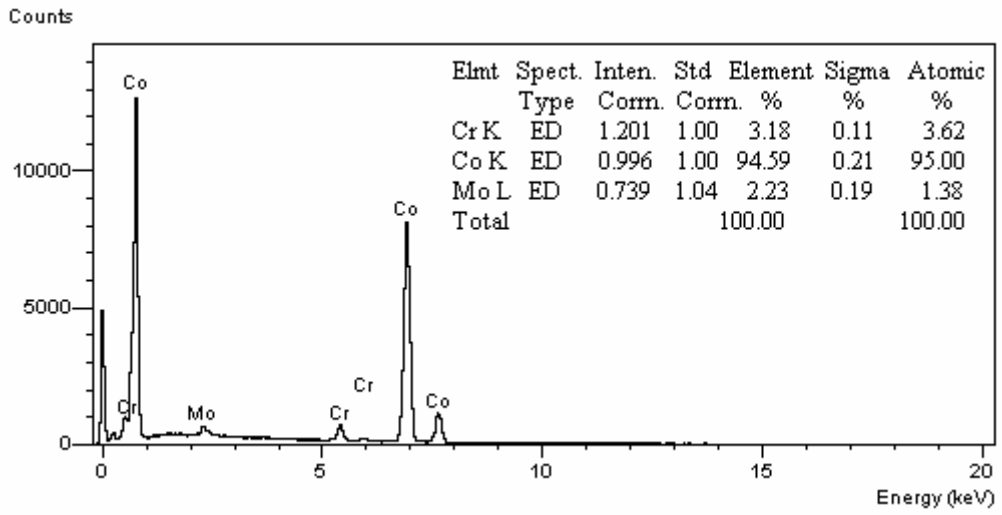
SEM görüntüsünde belirtildiği gibi 1 nolu noktadan alınan EDS analizinde gösterilen tane %97.77 Co ve %2.23Cr içermektedir. 2 noktasından alınan EDS analizinde ise, ağırlıkça % 90 Co ve % 9.28 Cr tozu bulunduğu anlaşılmıştır. 3 noktasından alınan EDS analizinde, noktanın % 85.15 Cr tozu ve % 14.85 ise Co tozu içerdiği belirlenmiştir. 4 nolu noktada ise % 94.59 Co, % 3.18 Cr ve % 2.23 Mo tozları bulunmaktadır. Şekil 8.67’de gösterilen tüm yüzeyden alınan EDS analizi incelendiğinde Co, Cr, Mo oranları sırasıyla % 68.24 Co, % 27.10 Cr, % 4.66 Mo şeklindedir. Alandan alınan yüzey analizi, preslenmeden önce yapılan toz karıştırma süresinin ve toz karıştırıcının şeklinin bu toz karışımı için yeterli olduğunu ve homojen bir karışım elde edildiği göstermiştir.



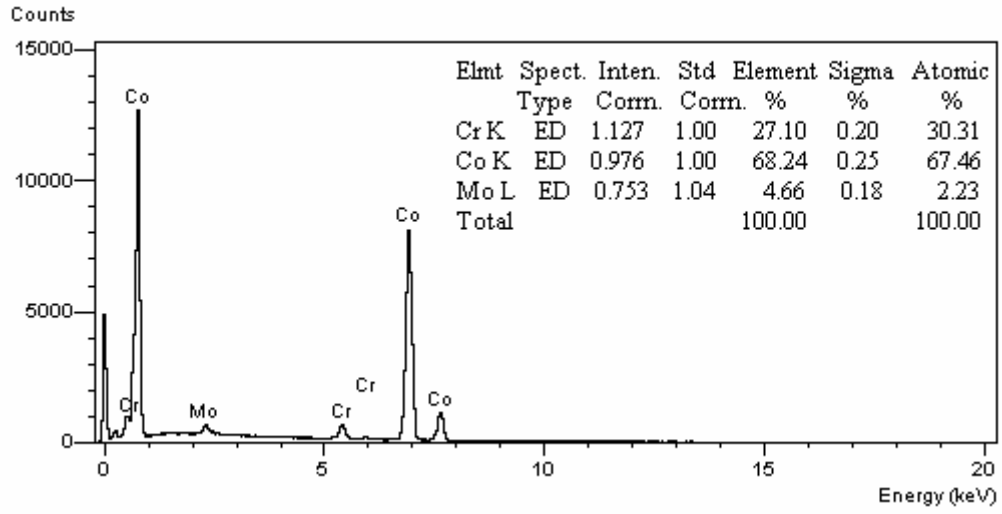
Şekil 8.69. % 27.5 Cr içerikli preslenmiş sinterlenmemiş numunenin 2 noktasındaki EDS analizi



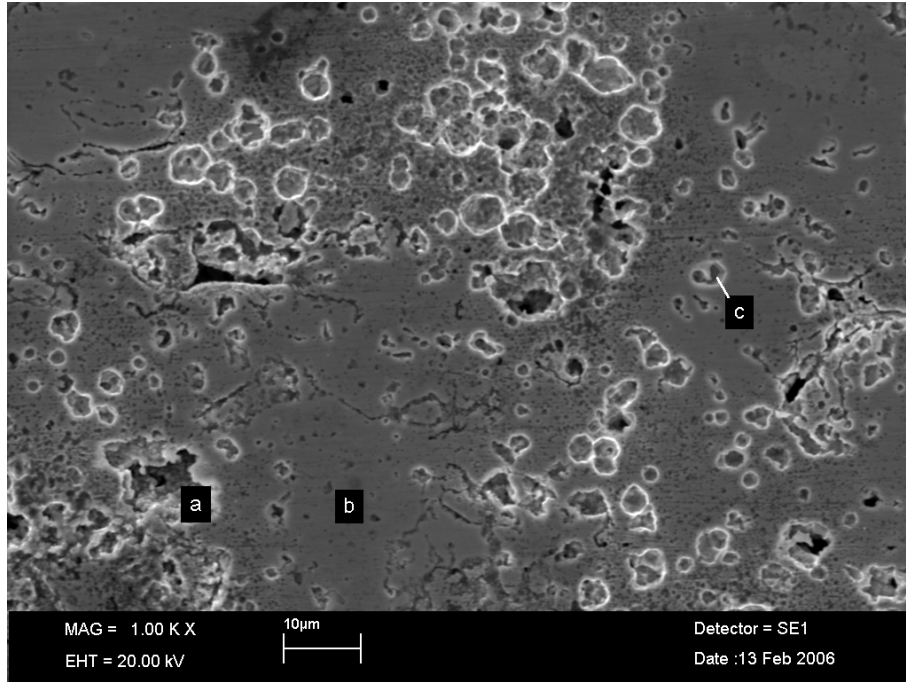
Şekil 8.70. % 27.5 Cr içerikli preslenmiş sinterlenmemiş numunenin 3 noktasındaki EDS analizi



Şekil 8.71. % 27.5 Cr içerikli preslenmiş sinterlenmemiş numunenin 4 noktasındaki EDS analizi



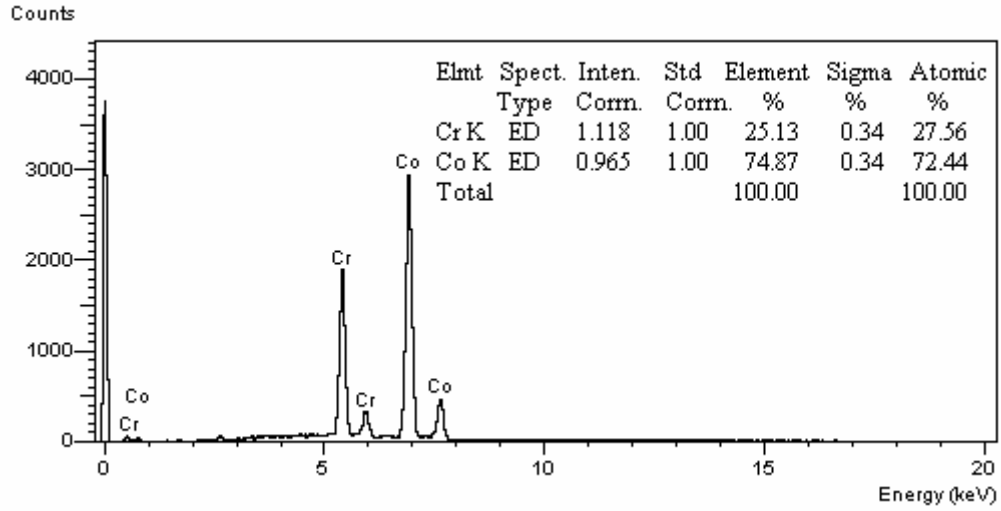
Şekil 8.72. % 27.5 Cr içerikli preslenmiş sinterlenmemiş numunenin alan EDS analizi



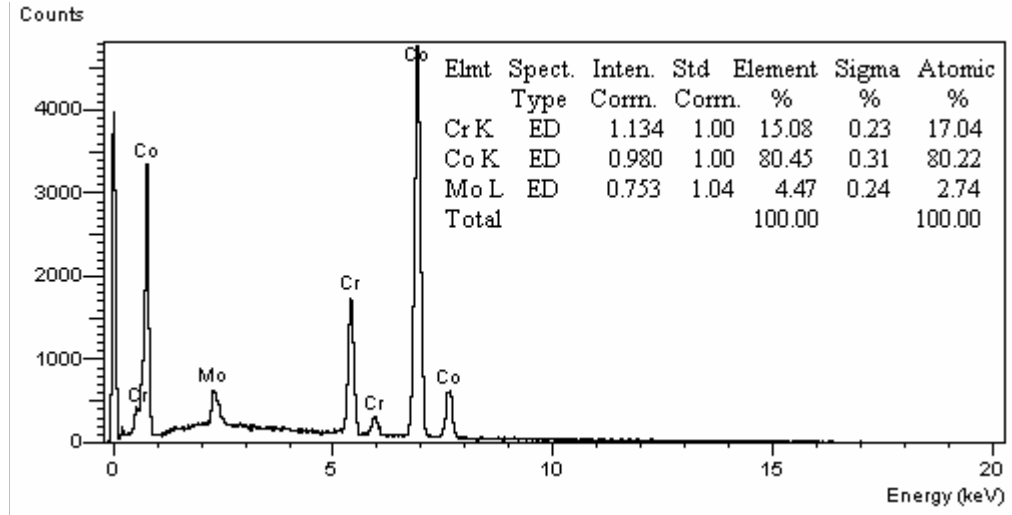
Şekil 8.73. % 15 Cr içeren sinterlenmiş numunenin SEM görüntüsü

Şekil 8.73’de % 15 Cr içeren sinterlenmiş numunenin SEM görüntüsü ve bu görüntü nün 3 farklı noktasından alınan EDS analizleri Şekil 8.74, 8.75, 8.76’de verildiği gibidir. % 15 Cr’lu Co-Cr-Mo üçlü alaşımlarından alınan a, b, c noktalarının EDS analizlerinin incelenmesinde, bu oranlardaki krom içeriklerinde yapının esas itibari ile Co-Cr-Mo üçlü

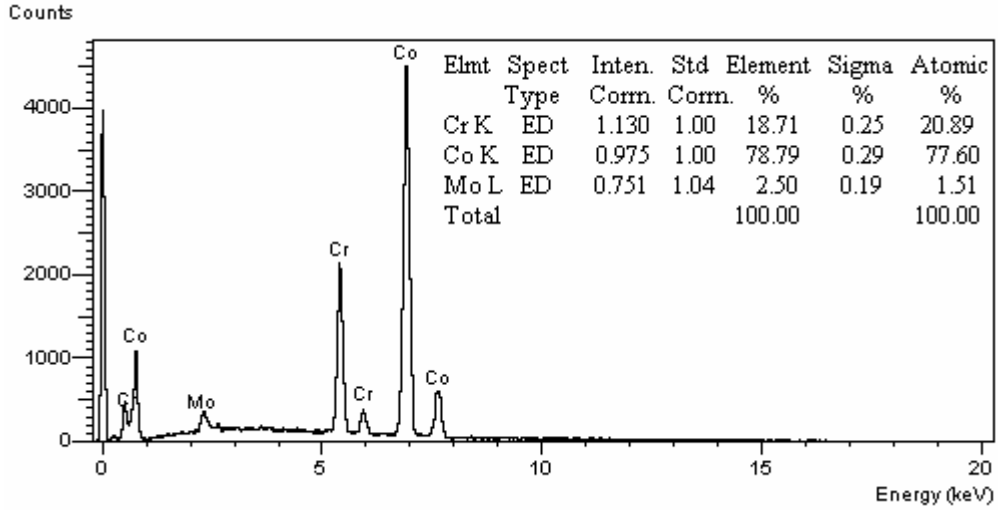
sistemindeki homojen α katı eriyik fazından oluştuğunu ve bu yapının özelliklerini taşıdığını göstermektedir.



Şekil 8.74. % 15Cr içerikli sinterlenmiş numunenin a noktasının EDS analizi



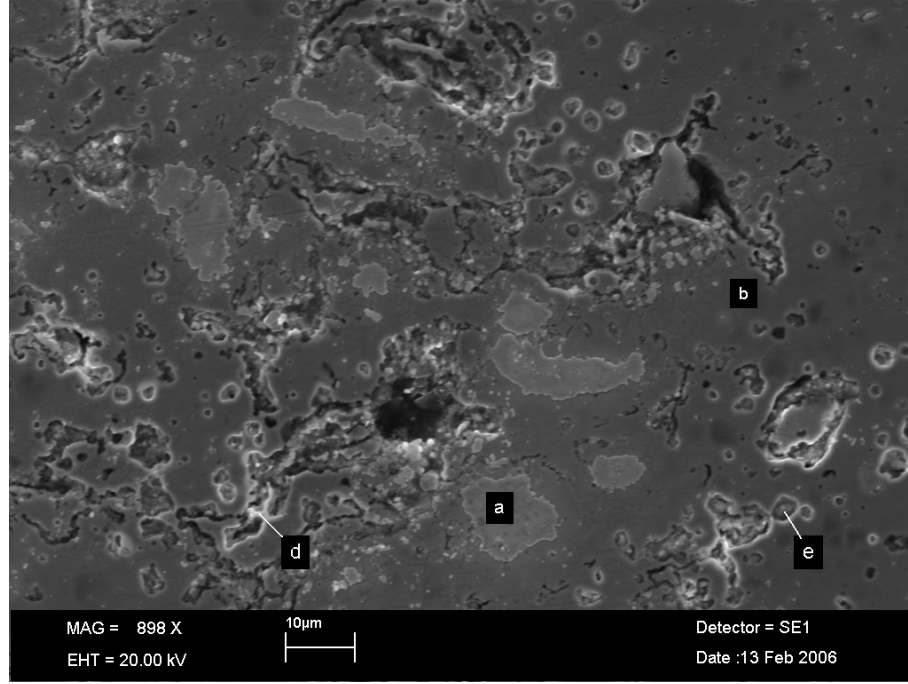
Şekil 8.75. % 15 Cr içerikli Sinterlenmiş numunenin b noktasının EDS analizi



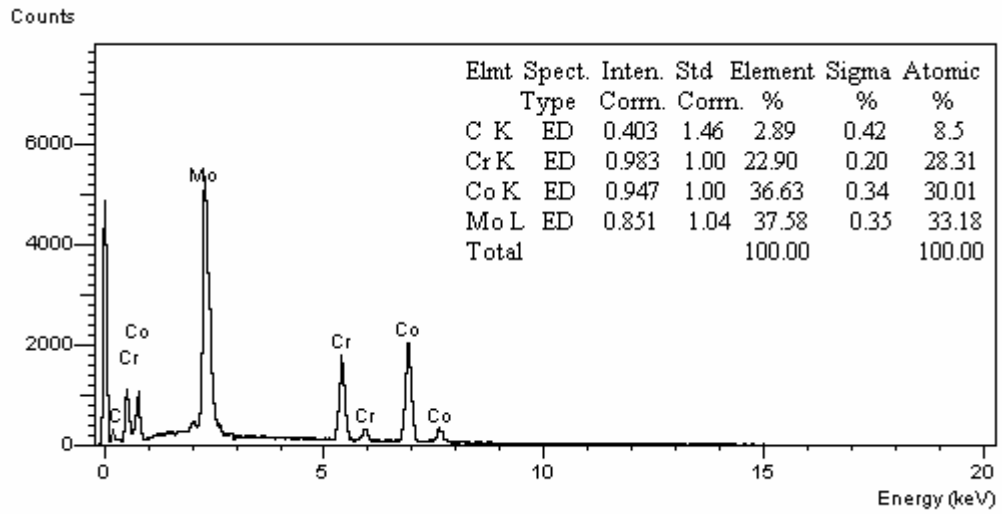
Şekil 8.76. % 15 Cr içerikli sinterlenmiş numunenin c noktasının EDS analizi

SEM görüntüsünde belirtildiği gibi a) noktadan alınan EDS analizi incelendiğinde, bu noktada % 74.87 Co ve % 25.13 Cr içeriğinden teşekkül etmektedir. SEM fotoğrafı ve EDS analizi, a) noktasında kromun yığıldığını ve molibden ise hiç bulunmadığını göstermiştir. b) noktasından alınan EDS analizinde, bu noktanın ağırlıkça % 80.45'ini Co'nı oluşturduğunu, Cr tozunun % oranının 15.08 olduğunu ve Mo %'de 4,66 dolaylarında bulunduğu görülmüştür. b) noktasından alınan EDS sonuçlarına bakıldığında, zaman toz alaşımının bu noktada homojen bir karışın gösterdiği kolaylıkla söylenebilir. c) noktasından alınan EDS analizi incelendiğinde, Co ve Mo oranlarında bir azalmanın Cr oranında ise bir artışın olduğu.

Şekil 8.77'de ağırlıkça % 27.5 Cr içeren sinterlenmiş numunenin SEM görüntüsü ve bu görüntüyü daha iyi analiz etmek için 4 farklı noktasından alınan EDS analizleri Şekil 8.78, 8.79, 8.80, 8.81'de verilmiştir. % 27.5 Cr içeren alaşımların a, b, d ve e noktalarından alınan EDS analizleri incelendiğinde; a noktasında Co, Cr ve Mo'nin miktarca birbirine yakın olduğu, bu noktaların bileşimine sahip alaşımlarının R fazını ve az orandada α ve σ fazların göstereceği R fazı ağırlıkça üç farklı faz yapısından oluşmuştur. b ve d noktalarında α ve σ fazlarının bulunacağı, ancak d noktasının Co-Cr ikili alaşım bileşiminde oluşmuş. e noktasının ise tamamen σ fazı bileşimine sahip olduğu sonuçlarına ulaşılmıştır.



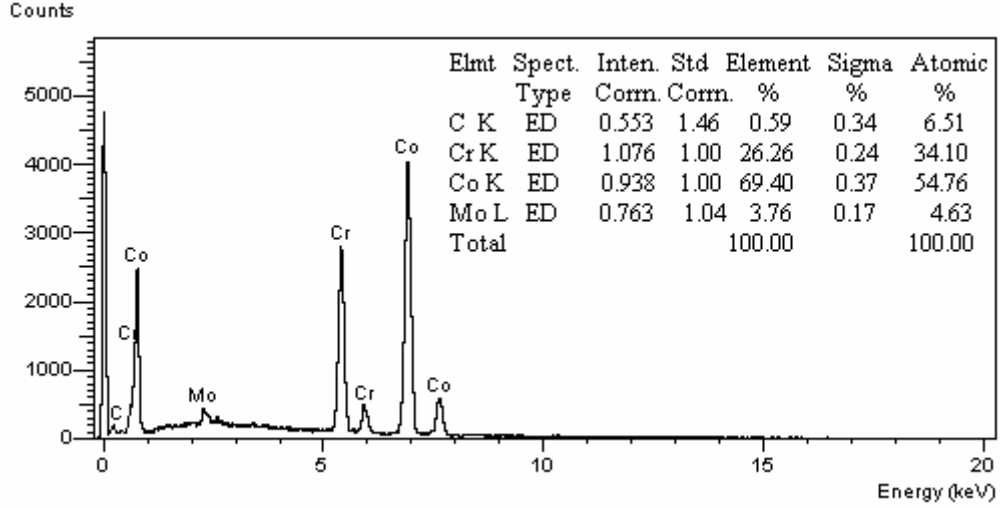
Şekil 8.77. % 27.5 Cr içeren sinterlenmiş numunenin SEM görüntüsü



Şekil 8.78. % 27.5 Cr içerikli sinterlenmiş numunenin a noktasının EDS analizi

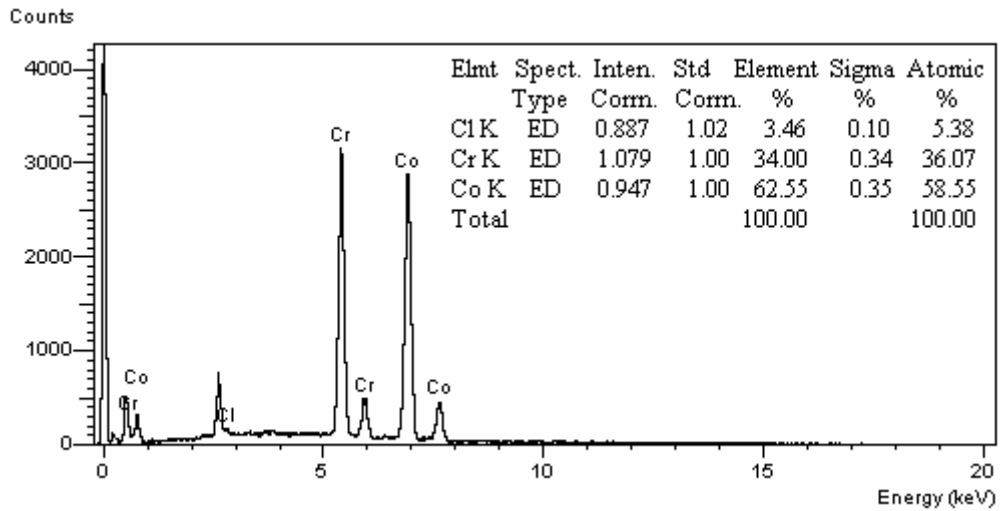
SEM görüntüsünde de görüleceği üzere a noktasından alınan EDS analizi incelendiğinde bu noktanın % 36.22 Co, % 36.63 Cr, % 37.58 Mo ve % 2.89 C toz karışımından oluştuğu anlaşılmaktadır. SEM fotoğrafı ve EDS analizi a noktasında ki Mo miktarında hızlı bir artışın olduğunu göstermiştir ve ayrıca yapıda bu toz alaşımı için istenmeyen C elementine rastlanmıştır. b noktasından alınan EDS analizinde, bu noktanın ağırlıkça % 69.40'ını Co'nun

oluşturduğu, Cr tozunun % oranının 26,26 olduğu ve bu noktada Mo'nin % 3.76 dolaylarında bulunduğu sonucuna varılmıştır. b noktasından alınan EDS sonuçlarına bakıldığında toz alaşımının bu noktada homojene yakın bir karışım gösterdiği dikkat çekmektedir.

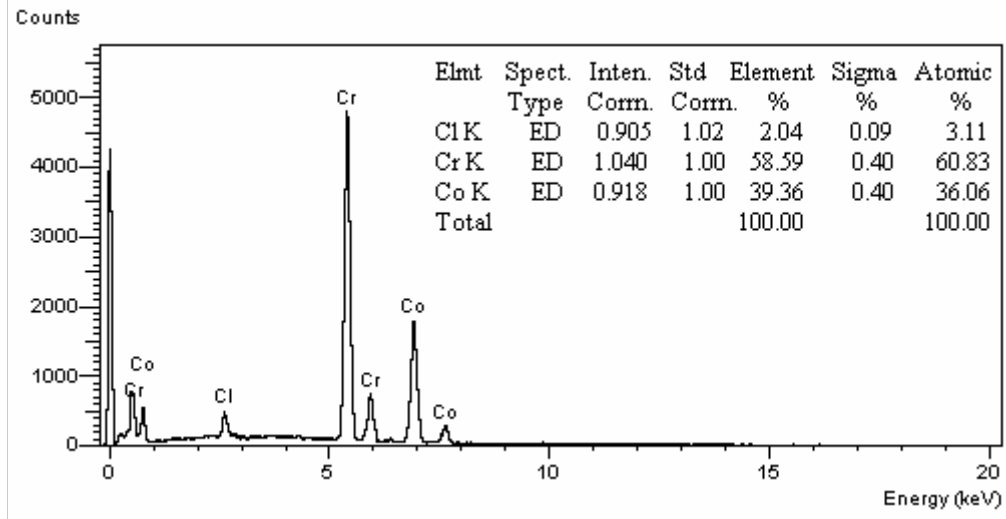


Şekil 8.79. % 27.5 Cr içerikli sinterlenmiş numunenin b noktasının EDS analizi

d noktasından alınan EDS analizi incelendiğinde, bu noktada Mo elementine rastlanmamış ancak Cr içeriğinde bir artış olmuş ve ayrıca % 3,46 oranındada Cl elementinin varlığı tespit edilmiştir. Yapıdaki Cl elementinin varlığının dağılayıcıdan kaynaklandığı düşünülmektedir. e noktasından alınan EDS analizi incelendiğinde, bu noktada Cr'un % oranında artış, Co'nun oranında bir düşüş olduğu belirlenmiştir.



Şekil 8.80. % 27.5 Cr içerikli sinterlenmiş numunenin d noktasının EDS analizi



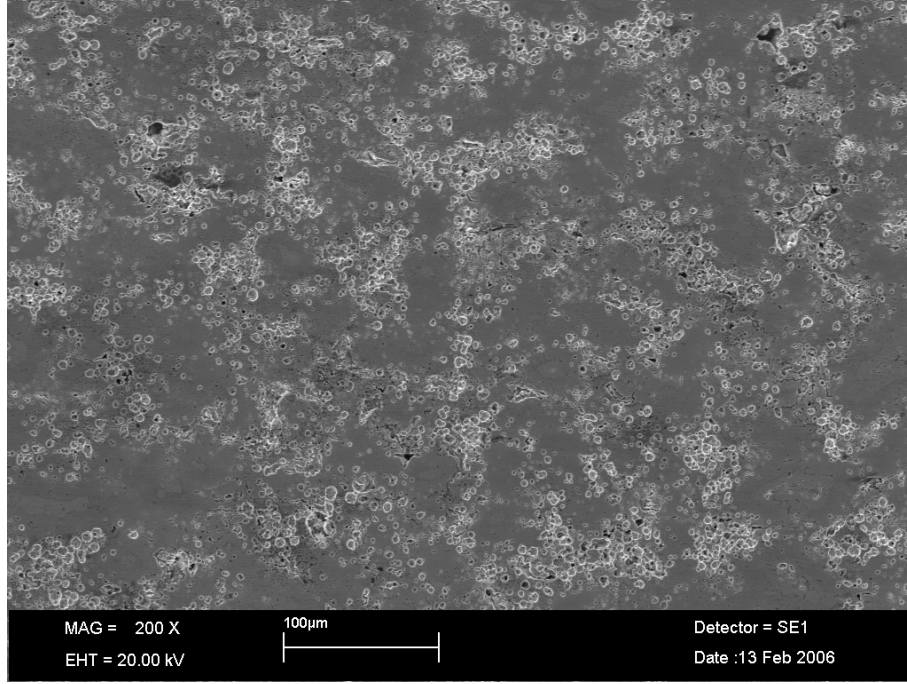
Şekil 8.81. % 27.5 Cr içerikli sinterlenmiş numunenin e noktasının EDS analizi

Şekil 8.82 ile 8.88 arasında farklı krom içeriğine sahip numunelerin 1200 °C de 60 dakika sinterlendikten sonra SEM görüntüleri yer almaktadır. Bu SEM görüntülerinden, gözeneklerin karakteristiği ve toz dağılımları tespit edilmeye çalışılmıştır.

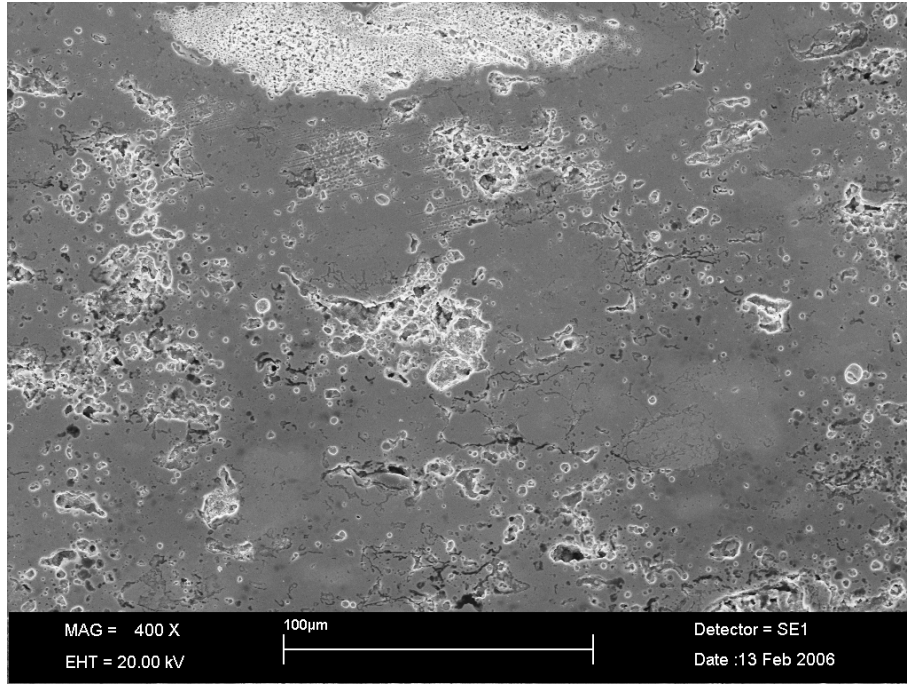
Şekil 8.82’de SEM görüntüleri incelendiğinde, yapıda gözeneklerin mevcut olduğu, boyutlarının küçük ve gözeneklerin küresel şekilde meydana geldiği gözlenmiştir. Bir nolu numune için toz dağılımının homojen olduğu söylenebilir.

Şekil 8.83’de belli bir bölgeden alınan SEM görüntüleri incelendiğinde toz dağılımının homojen olmadığı, gözeneklerin küresel ve az olduğu görülmektedir. Şekil 8.84’deki SEM görüntüsünde, görüntünün alındığı bölgede gözeneklerin küresel ve yüzeyde yabancı kalıntı taneler denilen inklüzyonların bulunduğu. Şekil 8.85’de SEM görüntüsü incelendiğinde benzer görüntülerin oluştuğu, gözeneklerin oldukça azaldığı ve küreselleştiği gözlenmiş, SEM görüntüsü alınan % 27.5 Cr içeren numunede yapıda yabancı kalıntı elementlerin bulunduğu belirlenmiş ayrıca bu inklüzyonlar alınan EDS ile kirleticiler tespit edilmiş ve bunların C ve Cl elementlerinin oluşturduğu bileşikler olduğu sonucuna varılmıştır.

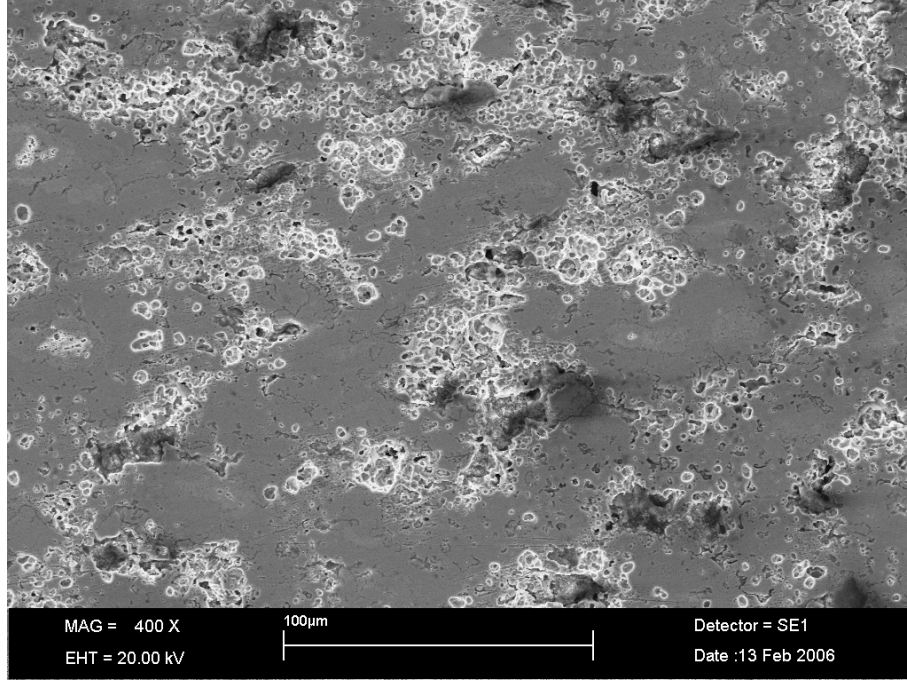
Şekil 8.87 ve 8.88 incelendiğinde, buradaki sinterlenmiş toz tanelerinin düzensiz ve keskin köşeli olduğu görülmektedir. Bu durumun yetersiz sinterleme sonrası meydana geldiği ve bununla ürünün aşınma ve bazı mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkileyeceği sonucuna ulaşılmıştır.



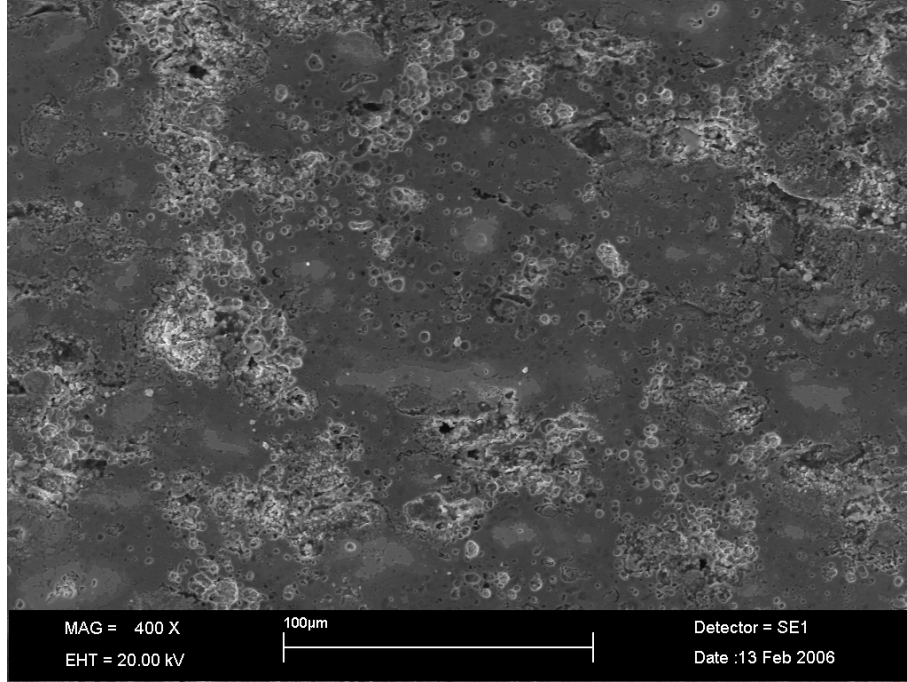
Şekil 8.82. % 15 Cr içeren numunenin SEM görüntüsü



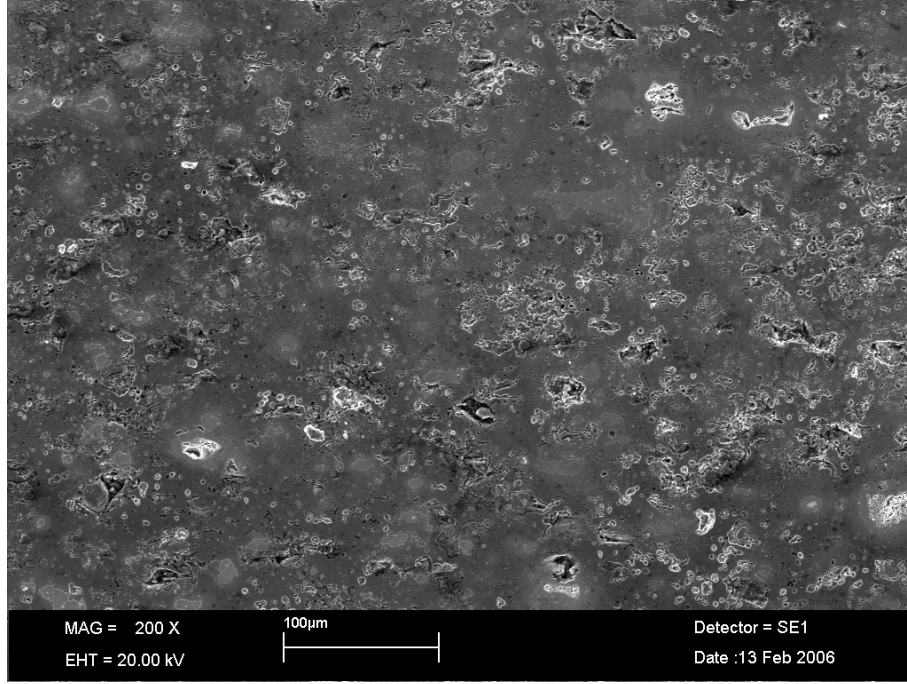
Şekil 8.83. % 20 Cr içeren numunenin SEM görüntüsü



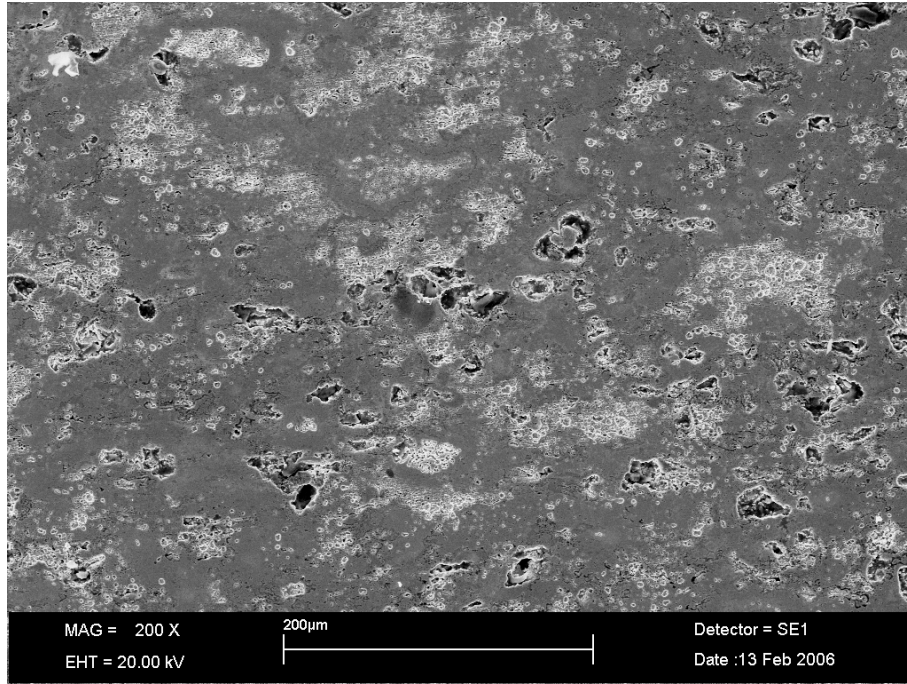
Şekil 8.84. % 22.5 Cr içeren numunenin SEM görüntüsü



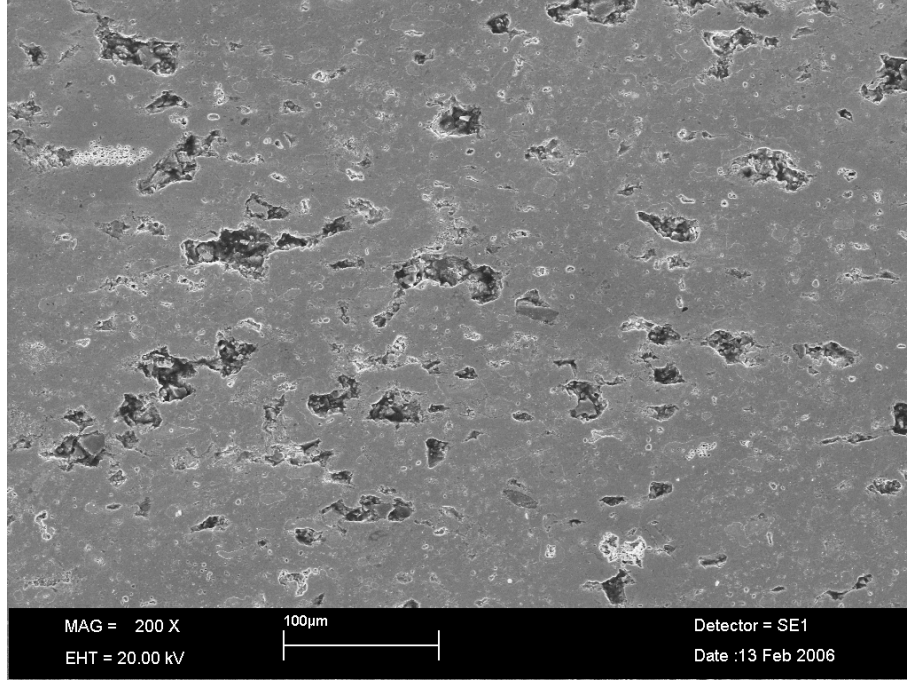
Şekil 8.85. % 25 Cr içeren numunenin SEM görüntüsü



Şekil 8.86. % 27.5 Cr içeren numunenin SEM görüntüsü

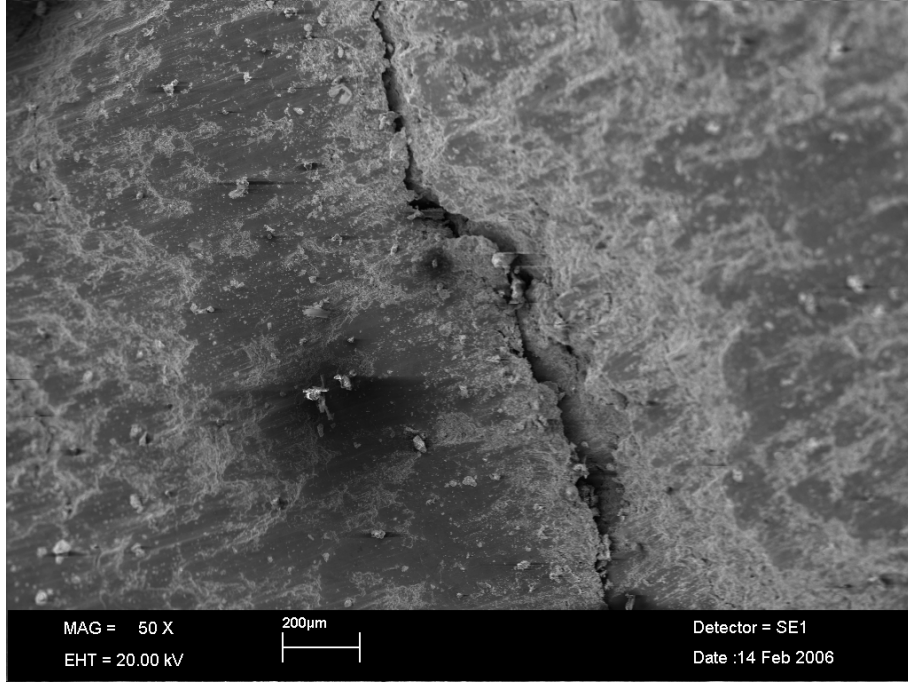


Şekil 8.87. % 30 Cr içeren numunenin SEM görüntüsü

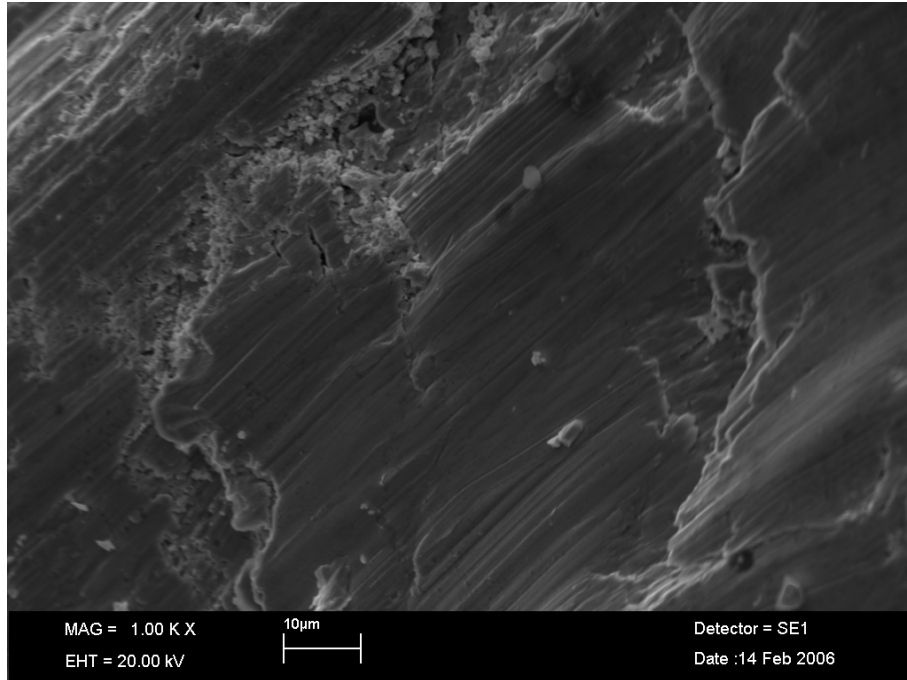


Şekil 8.88. % 35 Cr içeren numunenin SEM görüntüsü

Şekil 8.89 ve 8.90 da % 27.5 Cr içeren numunemin basma deneyi sonrasında oluşan çatlak ve kırılma yüzeyinin fotoğrafı görülmektedir. İlk fotoğrafta çatlak oluşumunu görüntülemek amacı ile basma deneyi bitmeden deney sonlandırılmıştır. İkinci SEM fotoğrafında ise basma deneyinden sonra kayma yüzeyi görüntüsü verilmiştir. Bu görüntüden kırılmanın sünek bir kırılma olduğu kolaylıkla görülmektedir.



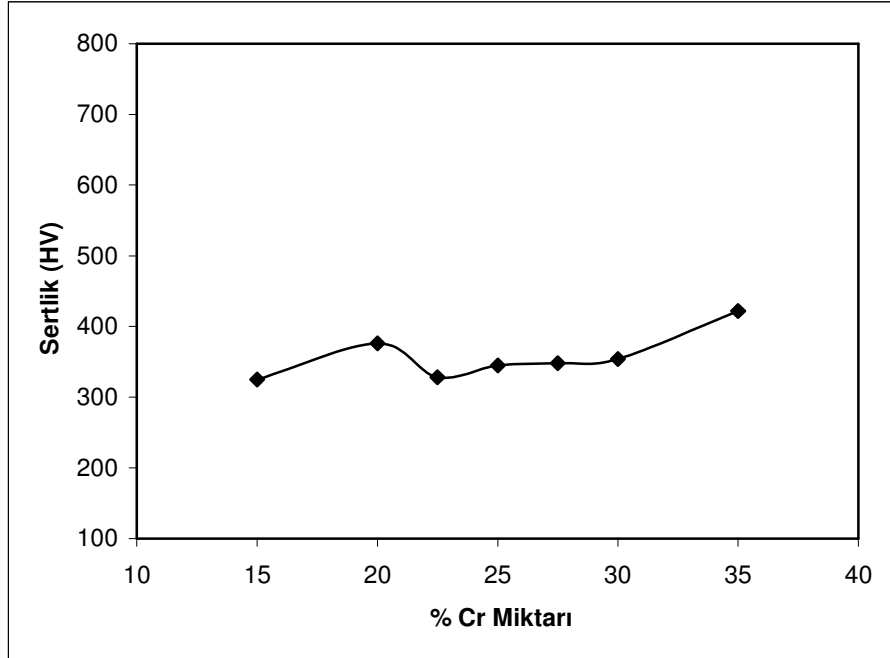
Şekil 8.89. Basma deneyine maruz kalan numunenin yüzeyinde oluşan çatlak



Şekil 8.90. Basma deneyine maruz kalan numunenin kırık yüzey resmi

8.6 Sertlik Ölçüm Deney Sonuçları

Sertlik ölçümleri; T/M numuneler gözenekli bir yapıya sahip olduğundan dolayı numunelerin yan yüzeyleri ve alın yüzeylerinin 5 farklı noktasından HV ve 300 N yükte ve 136^0 tepe açılı elmas piramit uç kullanılarak sertlik değeri ölçülmüştür. Bu konuda yapılan çalışmalarda T/M malzemelerin yapılarındaki gözeneklerden dolayı malzeme üzerinde ortalama beş veya daha fazla noktadan sertlik ölçümü yapılarak ortalama sertlik değeri elde edilir. Sertlik ölçümleri yapı gözenekli olduğundan dolayı elmas veya knoop uç tercih edilir (Lee diğ, 1998). 30 kg lik yük altında numunelerden alınan HV cinsinden sertlik değerleri Şekil 7.91’de verildiği gibidir. Şekilde de görüleceği üzere bir nolu numunenin sertlik değeri 328 HV iken, iki nolu numunede 378 HV ve üç nolu numunede de 345 HV sertlik değeri elde edilmiştir. Sertlik değerindeki bu küçük iniş ve çıkışlar, toz metal malzemelerinin gözenekli olmasından veya tam bir homojen karışım sağlanmamasından kaynaklanmaktadır. % 20 toz katkılarına kadar sertlik artarken, % 20-22.5’lik katkılarda sertlik düşmüş ve % 30 Cr içeriğine kadar sertlik yeniden az oranda artış gözlenmiştir. % 30’un üzerindeki katkılarda ise, sertlik değerinde yeniden bir artış gözlenmiştir. Dökümle elde edilen Co esaslı bu alaşımda sertlik değerinin ortalama 350 HV olduğu ve toz metalurjisi yöntemi kullanılarak elde edilen numunelerde bu sertliğin % 27.5 -30 katkılarda sağlandığı görülmüştür



Şekil 8.91. Artan krom (Cr) miktarına bağlı olarak sertlik değişimi

8. GENEL SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada; ortopedik ve dişçilik alanında yaygın olarak kullanılan ve ASTM F75 standartlarına göre döküm yöntemiyle üretilen Co esaslı Cr-Mo alaşımının T/M yöntemiyle üretimini araştırılmıştır. T/M yöntemiyle üretilen Co-Cr-Mo toz alaşımında bazı mekanik özellikleri ve aşınma karakteristikleri açısından uygun krom aralığı tespit edilmiş ve ürünün mekanik özellikleri döküm yöntemiyle üretilen Co-Cr-Mo alaşımının mekaniksel özellikleriyle karşılaştırılmıştır.

Çalışmada toz metalurjisi yöntemiyle, krom oranı farklı kobalt esaslı Co-Cr-Mo toz alaşımları tek etkili bir preste de soğuk presleme ve 1200 °C de sinterleme yapılarak üretilmiş; sıkıştırma yapılan kalıbının özellikleri, tozun fiziksel ve kimyasal özellikleri, yoğunluğu etkileyen parametreler, optimum sinterleme sıcaklığının belirlenmesi, mekanik özellikler, abrasiv aşınma karakteristiği ve mikroyapısal değişimler araştırılmıştır. Yapılan araştırma ve incelemelerden şu sonuçlara ulaşılmıştır.

1- Toz metalurjisi yönteminde kullanılan tozların fiziksel ve kimyasal özelliklerinin çok önemli olduğu, sıkıştırma ve yoğunluk parametrelerini etkilediği görülmüştür. Çalışmada su atomizasyonu ile üretilmiş - 325 mesh tane boyutuna sahip krom (Cr), - 400 mesh'lik kobalt (Co) ve molibden (Mo) tozları kullanılmıştır. Tozların saflık derecesi % 99.5 dolaylarındadır. Önce 80 µ büyüklüğünde toz tanesi kullanılmış, fakat tanelerin iri olması nedeniyle, istenilen sonuç alınamamıştır.

2- Tozların görünür yoğunluklarının 2.5-3.5 g/cm³ arasında olduğu, akıcılığı ise 23 s/50g olarak belirlendiği ve bu değerlerin literatür ve tozların temin edildiği alfa firmasının katalog değerleriyle paralellik gösterdiği belirlenmiştir.

3- Farklı Cr oranına sahip Co-Cr-Mo toz karışımı kalıp boşluğuna aynı miktarda doldurularak tek etkili soğuk presleme tekniğiyle 120 kN'luk presle preslenme sonrası piknometreyle ölçülerek ham yoğunluğunun $d = 6.28 \text{ Mg/m}^3$ olarak tespit edilmiştir. Krom (Cr) oranı farklı Co esaslı Cr Mo katkılı toz alaşımlarının % gözeneklilik oranı tam yoğunluk değerleriyle karşılaştırıldığında; % 15 Cr içeren numunenin teorik yoğunluk değeri 8.6551 Mg/mm³ iken, % 35 Cr içeren numune için teorik yoğunluk değeri % 8.3267 dir. Artan krom oranı miktarıyla birlikte, teorik yoğunluk değerlerinin sürekli azaldığı izlenmiştir. Presleme basıncı ve kalıba doldurulan toz miktarı sabit tutulup, artan Cr miktarıyla birlikte teorik yoğunluk değerlerinin azalmasıyla % 15 Cr içeren 1 nolu toz alaşımının gözeneklilik miktarı % 27.3552 iken % 35 Cr içeren 7 nolu toz alaşımının gözeneklilik miktarı % 24.4887 olarak elde edilmiş ve artan krom miktarıyla gözeneklilik miktarının da azaldığı sonucuna ulaşılmıştır.

4- Basma deneyinde elde edilen sonuçlar incelendiğinde, 1 ve 7 nolu numunelerin basma gerilme değerleri sırasıyla 951.2176 N/mm², 957.1337 N/mm² ile en düşük basma gerilmesi değerine sahip olduğu, 5 nolu numunenin ise 1072 N/mm²'lik basma gerilmesi değeriyle en yüksek gerilme değeri gösterdiği belirlenmiştir. Basma deneyleri sonrasında birim uzama sonuçları irdelendiğinde 1 nolu numunenin 0.44 ile en düşük birim uzama, 5 nolu numunenin ise 0.52 ile en yüksek birim uzama değerine sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca, 6 ve 7 nolu numunelerin birim uzama değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmüştür. Numunelerin daha fazla gözeneklik ve daha düşük mukavemet özelliği göstermeleri presleme basıncının yetersiz olmasından kaynaklanmıştır. Yetersiz sinterleme ise, sinterleme zamanının kısa olmasından ya da sıcaklığın düşük olmasından kaynaklanır. Yetersiz sinterleme sonucunda toz taneleri birbirleriyle tam olarak bağ oluşturamaz, yani tane sınırlarında zayıf bir bağ oluşur. Keskin biçimli ve açısız gözenekler meydana gelir. Bunun sonucunda taneler arası boyunlarda sünek kırılmalar meydana gelir. Bu sonuçlar ASTM F75 standartlarında verilen döküm yöntemi ile elde edilmiş Co esaslı Cr-Mo alaşımının çekme sonuçlarıyla karşılaştırıldığında; alaşımının çekme dayanımı 880 N/mm², T/M ile elde edilmiş 5 nolu malzemenin basma dayanımı ise 1072 N/mm² olup, ergitme yöntemiyle elde edilen alaşımdan daha yüksek olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

5- Kobalt esaslı Co-Cr-Mo toz alaşımının abrasiv aşınma sonuçları incelendiğinde; 10 N'lük yük için artan aşınma yoluyla ağırlık kaybının arttığı, ağırlıkça artan % Cr miktarıyla birlikte 5 nolu numuneye kadar ağırlık kaybında azalma olduğu, 6 ve 7 nolu numunelerde ise ağırlık kaybında yeniden artış gözlemlendiği sonucuna ulaşılmıştır. 20 N ve 30 N'lük yüklerde artan abrasiv aşınma yoluyla birlikte ağırlık kayıplarının da arttığı, 1 nolu numuneden 7 nolu numuneye doğru % Cr miktarı arttıkça 5 nolu numuneye kadar ağırlık kaybının önce azaldığı ve daha sonraki numunelerde ise ağırlık kaybının yeniden arttığı gözlemlenmiştir. Yükler kendi arasında karşılaştırıldığında, artan yük miktarıyla birlikte ağırlık miktarında da artış gözlemlendiği sonucuna ulaşılmıştır. Aşınma oranlarının yüke bağlı olarak incelenmesinde iyi aşınma direncine sahip numunenin 5 nolu numune olduğu ve düşük aşınma direncine sahip numunelerin ise 1 ve 7 nolu numuneler olduğu, aşınma oranının yola bağlı olarak en yüksek aşınma direncine sahip olan numune yine 5 nolu numune ve en düşük aşınma direncine sahip numunelerin de 1 ve 7 nolu numuneler olduğu sonucuna varılmıştır. Bazı numunelerin ağırlık kaybındaki ve aşınma oranlarındaki hızlı artış ve azalmalar numunelerin bazı bölgelerinde toz karışımı açısından yeterli homojenliğin sağlanamadığı sonucunu vermiştir.

6- Parlatılmış numunelerin optik mikroskop görüntülerinden elde edilen sonuçlar incelendiğinde; gözeneğin tipi, dağılımı, şekli ve büyüklüğünün T/M parçalarının mekanik özellikleri üzerinde önemli etkilere sahip olduğunu göstermiştir. 1 nolu numuneden itibaren

artan krom oranıyla gözeneklerin şekil ve dağılımlarında değişimlerin gözlemlendiği; Cr miktarı az olan numunelerde gözeneklerin çok sayıda, düzensiz şekilli ve keskin köşeli olduğu; Cr oranı arttıkça gözenek miktarlarının azalmış ve gözeneklerde küreleştiği sonucuna varılmıştır. Cr oranı düşük numunelerdeki görüntüler; presleme basıncının yetersiz olduğunu ve sonuçta da mekanik özellikleri düşmesine yol açtığı gözlenmiştir.

7- Krom (Cr) oranı farklı Co esaslı Co-Cr-Mo toz alaşımlarının toz halinde ve presleme sonrası SEM ve EDS analiz teknikleriyle, sinterleme sonrası abrasiv aşınma yüzeylerinden ve basma deneyi kırık yüzeylerinden alınan farklı büyütme ölçeklerindeki SEM görüntüleriyle EDS analizleri incelendiğinde; toz halinde 1000x büyütmede SEM görüntüsü alınan numunelerde toz dağılımlarının genel olarak homojen olduğu, bazı bölgelerde sadece heterojen bir karışımın bulunduğu gözlenmiş ve buradan da tozların karıştırma süresinin yeterli olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Basma deney numunesinin kırık yüzeylerinden alınan SEM mikroyapı görüntülerinde, en iyi basma mukavemeti gösteren 5 nolu numunedeki kırılmanın sünek kırılma şeklinde gerçekleştiği ve kırılmaların, iki toz tanesinin birleştiği yer olan boyun bölgesinde meydana geldiği düşünülmektedir. 7 nolu numunede ise yetersiz sinterleme meydana gelmiş ve böylelikle toz taneleri arasında düzensiz bağlar ve düzensiz gözenekler oluşmuş ve bunun sonucunda basma mukavemeti daha düşük çıkmıştır. SEM ile abrasiv aşınmaya uğratılmış yüzeylerin mikroyapı fotoğrafları incelendiğinde Cr oranı arttıkça aşınmanın 5 nolu numuneye kadar azaldığı ve daha sonra tekrar arttığı gözlenmiştir. Abrasiv aşınma yüzeyden tane kopması şeklinde gerçekleşmiştir. Cr oranı az olan numunede abrasiv aşınma izlerinin daha geniş ve derinliğinin daha fazla olduğu gözlenmiştir.

8- HV cinsinden makro sertlikleri alınan Cr oranı farklı numunelerin sertlik değerleri karşılaştırıldığında, 7 nolu numunenin sertlik değerlerinin yüksek olduğu, 5 nolu numunede ise sertliğin 348 HV dolaylarında olduğu ASTM F75 standartlarından alınan döküm yöntemiyle elde edilmiş Co esaslı Co-Cr-Mo alaşımında bu sertliğin 350 HV olduğu ve ölçülen sertlik değerine oldukça yakın bir değerde bulunduğu gözlenmiştir. 7 nolu numunede sertlik değerinin yüksek olmasının, alaşımın Cr oranının yüksek olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Bu çalışmada; yapılan ölçüm ve deney sonuçları göz önünde bulundurularak, yedi farklı Cr oranına sahip Co esaslı toz metal numunelerde en iyi mekanik ve aşınma özelliği gösteren numunenin % 27.5 Cr içeren 5 nolu Co-Cr-Mo'lu toz metal alaşımlı numune olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Bunların haricinde ileride yapılacak çalışmalarda;

- Bu tozların mekanik alaşımlamayla daha homojen bir karışım elde edilebilirliği incelenebilir.

- Sıkıştırma şartlarının iyileştirilmesi amacıyla çift etkili bir preste farklı presleme basınçlarının toz metal alaşımına etkileri,
- % 27.5 Cr içeren 5 nolu numune için en uygun sinterleme sıcaklığı ve bekleme süresi incelenebilir,
- Alaşım elementlerinden Mo'nin aşınmaya ve Ni elementinin ise korozyon davranışı üzerine etkileri araştırılabilir,
- Toz metalurjisi yöntemiyle elde edilmiş 5 nolu alaşımının uygun boyutlarda üretilip, alaşımının biouyumluluğu incelenebilir.

KAYNAKLAR

- Alpugan, Z., 1981 T/M de Presleme Tekniği ve Nükleer Yakıt Üretim Uygulamaları, Marmara Bilimsel ve Endüstriyel Araştırmalar Enstitüsü, TÜBİTAK.
- Avner, S.H., 1994, Introduction to Physical Metallurgy, 4.ed., Published by Ankara University, Ankara/Turkey, 605-632.
- Akdoğan, G., Sarıtaş, S., 2002, Toz Metallurjisinin Biomalzemelerin Gelişmesine Katkısı, 3rd International Powder Metallurgy Conference, September 4-6, Turkish Powder Metallurgy Association, Gazi Üniversitesi, Ankara, , TURKEY, 1244-1262.
- Akdoğan, G., 1998, Ti-6Al-4V Alaşımının Biokorozyon ve Biouyumluluk Özelliklerinin Araştırılması”, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Ankara, 1-15, 9-10, 14-21, 71-72, 91-95.
- Andersen, P.J., 1982, Medical and Dental Application, Journal of Powder System and Applications, 657-663.
- ASTM F-67-89, 1992, Chemical Composition of Ti and Its Alloys, 39
- Bacan, H.J., 2006, A Novel Water Leaching and Sintering Process for Manufacturing Highly Porous Stainless Steel, Scripta Materialia, 55(2006) 2, 203-206.
- Bedow, J.K., 1978, The Production of Metal Powders by Atomization, Heiden Ltd, London.
- Bututaki, T., 1997, Toz Metalurjisi ile Üretilen Çelik Malzemelerin Mekanik Özelliklerine Etki Eden Faktörler, Yüksek Lisans Tezi, S.D.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 29-31.
- Browne, M., and Gregson, P.J., 1993, Surface Modification of Titanium Alloy Implants, Biomaterials, 15, 11, 894-898.
- Buehler, W.J., Gilfrich, J.V., and Wiley, R.C., 1963, Effect of Low Temperature Phase Changes on The Mech. Properties of Alloys Near Composition Ti-Ni, Jour. Appl. Phys. Vol.34,1475-1477.
- Becker, B.S., Bolton, J.D., Youseffi, M., 1995, Production of Porous Sintered Co-Cr-Mo Alloys for Possible Surgical Implant Applications, Powder Metallurgy, 38, 3, 201-208.
- Becker, B.S., Bolton, J.D., 1995, Production of Porous Sintered Co-Cr-Mo Alloys for Possible Surgical Implant Applications, Powder Metallurgy, 38,4, 305-313.
- Becker, B. S., Bolton J. D., 1999, Effect of Powder Morphology and Sintering Atmosphere on The Structure-Property Relationships in PM Processed Co-Cr-Mo Alloys Intended for Surgical, Implants ASTM Special Technical Publication, 1365, 47-61.
- Branemark, P.I., 1983, Osseointegration and its Experimental Background, Jour. Prosthet.Dent., 50, 399-410.

- Becker, B.S. Bolton, J.D., Youseffi, M., 1995, Production of Porous Sintered Co-Cr-Mo Alloys for Possible Surgical Implant Applications, Powder Metallurgy, 38, 3, 201-208
- Boeck, B.A., Senders, T.H., Anand, V., Hickl, A.J., Kumar, P., 1985, Relationships Between Processing, Microstructure, And Tensile Properties of Co-Cr-Mo Alloy, powder Metallurgy, 28,2, 1985,97-104
- Browne, M., and Gregson, P.J., 1993, Titanium; The Implant Mater.of Today, Jour. Mater. Sci., 22 (1993) 3801-3811.
- Buytoz, S., 2004, AISI 4340 Çeliğın Nitrürasyon ve GTA Kaynak Yöntemi ile Yüzey Modifikasyonu İşlemleri Sonrası Mekaniksel Davranışlarının Araştırılması, Doktora Tezi, F.Ü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Compton, R.C., Shetty, R.H., 2003, Characterization of A Sintered Porous Coated Co-Cr-Mo Alloy, Medical Device Materials - Proceedings of The Materials and Processes for Medical Devices Conference, 399-40.
- Crawson, A., 1993, P/M Ferrous Materials, Metal Handbook, Volume 7, 623, New York/U.S.A
- Çelik, H., 1991, Kaynak Edilebilen Kobalt ve Demir Esaslı Alaşımların Yüksek Sıcaklıkdaki Aşınma Davranışları, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi,İstanbul, 11-12.
- Dixoz, R.T.H and Clayton, A., 1997, Powder Metallurgy for Engineers, The Mechanicery Publishing Co, London.
- Demir, A., 1992, Toz Metal Bir Çeliğın Mekanik Özellikleri , Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans, Ankara.
- Duerig, T.W., Melton, K.N., Stockel, D., and Wayman, C.M., 1990, Engineering Aspects of Shape Memory Alloys, Butterworth-Heinemann, London/UK., Eds.
- Davidson, J.A., Mishra, A.K., Kovacs, P., and Poggie, R.A., 1994, New Surf. Hardened, Low Modul., Corros. Resist. Ti Alloy For Total Arthroplasty, Biomed. Mater. Eng. 4, 231-243.
- Dabrowski, J.R., Oksiuta, Z., 2000, Poros Implantation Material from Vitalium Alloy Powder, Material Engineering, 4 (200)174-178.
- Dabrowski, J.R., 2001, Anwendung der Sintertechnik Fu&Die;R Die Entwicklung on Implantation aus Co-Cr-Mo-Legierungspulver (The Application of Powder Metallurgy For The Development of Implants From Co-Cr-Mo Alloy Powder), Biomedizinische Technik, 46,4,106-108.
- Dobbs, H. S., Robertson, J. L. M., 1982, Alloys For Orthopedic Implant Use., Engineering in Medicine, 11(1982)4, 10, 175-182,

- Fındık, F., Coşan M., 2002, Biomedikal Uygulamalarda Metalik Malzeme Secimi, Makine ve Metal Teknolojisi Dergisi, 129 (2002) 9, 32-40.
- German, R.M., 1991, A Quantitive Theory for Super Solidus Liquid Phase Sintering, Powder Metallurgy, 34, 2, New York/U.S.A.
- German, R.M., 1994 , Powder Metallurgy Science, MPIF Princeton
- Guo, S., Qu, X., He, X., Zhou, T., Duan, B., 2006, Powder Injection Molding of Ti-6Al-4V Alloy , Journal of Materials Processing Technology, 173 (2006) 3, 310-314.
- Gülsoy, H.Ö., 1996, Toz Metalurjisi Süreçleriyle Üretilen Demir Esaslı Yapısal Parçaların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, M.Ü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Gümüşderelioğlu, M., 2002, Biomalzemeler, Bilim ve Teknik Dergisi, 7 (2002) 2-4, 23, TÜBİTAK.
- Herman, S., 1981, Sintering an Economical Process for The Manufacture of Metallic Precision Parts, Mannesmann Conference, Germany.
- Huo, H.L., 1998, Angle of Repose, ASM, Handbook,7, 282-285,
- Housner, H.H, and Kempton, H.R., and Johnson, F.K., 1978, Iron Powder Metallurgy, 3. MPIF, Newyork.
- Lee, P.W., 1998, Powder Metal Technologies and Application, ASM Handbook 7, 478-481, ASM International New York/USA.
- Long, M., Rack, H.J., 1998, Titanium Alloys inTotal Joint Replacement,, A Material Science Perspective, Biomaterial 19,1621-1639.
- Liu, R., Xu, W., Yao, M.X., Patnaik, P.C., Wu, X.J., 2005, A Newly Developed Tribaloy Alloy With İncresed Ductility, Scripta Materialia 53 (2005) 1351–1355
- Langer R., Cima L.G., Tamada J.A., and Wintermantel E., 1996, Future Directions in Biomaterials, Biomaterials,vol:11, s:742
- James, B.A., 1985, Liquid Phase Sintering in Ferrous Powder Metallurgy, Powder Metallurgy, 28 (1985) 3.
- Jacobs, J.J., Latanision, R.M., Rose, R.M., Veeck, S.J.,1990, Effect of Porous Coating Processing on The Corrosion Behavior of Cast Co-Cr-Mo Surgical İmplant Alloys, Journal of Orthopaedic Research, 8 (1990) 6, 874-882.
- Shin, J.C., Doh, J.M., Yoon, J.K., Lee, D.Y., Kim, J.S., 2003, Effect of molybdenum on the microstructure and wear resistance of cobalt-base Satellite hardfacing alloys, Surface and Coatings Technology 166 (117–126).
- Kurt, A.O., 2004, Toz Üretim Yöntemleri ve Sinterleme, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, 15-19.

- Kurgan, N., 2005, T/M Paslanmaz Çelik İmplantlarının Üretimi ve Teknolojik Özellikleri Üzerine Bir Araştırma, Celal Bayer Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa, Doktora Tezi , 9, 25-46.
- Kurt, A.O., 2004, Toz Üretim Yöntemleri ve Sinterleme, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, 1-2.
- Klar, E , Fesko, J.W., 1998, Atomization, ASM, handbook, 7, 27-28, New York/U.S.A.
- Kayser, W.A., 1991, Solid State Sintering, Powder Metallurgy on Overview, U.S.A.
- Kasemo, B., 1983, Biocompatibility of Ti Implants. Jour. Prosth. Dent., 6, 832-837.
- Kuzucu, V., Ceylan, M., Çelik, H., Aksoy, I., 1998, Phase Investigation of a Cobalt Base Alloy Containing Cr, Ni, W and C, , Journal of Materials Processing Technology, 74 (1-3), 137-141.
- Kuzucu, V., Ceylan M., Çelik , H., Aksoy, I.,1997, Microstructure ant phase of Stellite 6 Plus Wt. % Mo alloy, Journal of Materials Processing Technology , 69 (1-3), 257-263.
- Matkovi, T., Slokar, L., Matkovi, P., 2005, Structure and properties of biomedical Co–Cr–Ti alloys, Journal of Alloys and Compounds, 9 June 2005
- Meddings, B., 1998, Production of Cobalt and Cobalt Alloy Powders, ASM, Handbook, 7, 144-146.
- MPIF, 1995, Standard Test Methods for Metal Powders and Powder Metallurgy Products, Metal Powder Industries Federation, 3-11, New Jersey/ U.S.A
- Montea, J.M., Cuevas, F.G., Cintas, J., 2006, A New Expression for The Effective Pressure on Powder Under Compression, Computational Materials Science, 36 (2006)3, 329-337.
- Nayar, S.H., 1993, Production Sintering Atmospheres, Metals Handbook, Volume 7, U.S.A.
- Opris, C.D. , Liu, R. , Yao, M.X., Wu, X.J., 2005, Development of Stellite Alloy Composites with Sintering/Hiping Technique for Wear-Resistant Applications, Materials and Design, Basında
- Oksiuta, Z., Dabrowski, J.R., 2002, Rotary Cold Re-Pressing and Heat Treatment of Sintered Materials from Co-Cr-Mo Alloy Powder, Powder Metallurgy, 45 (2002)1, 63- 66.
- Okumuş, S.C ve Öveçoğlu, L., 1995, Toz Metalurjisinde Atomizasyon Yöntemi ve Bu Yöntemle Üretilen Fe Malzemeler, Metal Dünyası, Teknik Yazı , İstanbul, 26-31,.
- Opris, C.D. , Liu R. , Yao, M.X., Wu, X.J., 2005, Development of Stellite alloy composites with sintering/HIPing technique for wear-resistant applications, Materials and Design, Basında
- Özkal, B.,1993, Volfram Ağır Alaşımlarında Başlangıç Toz Özelliklerinin Sıvı Faz Sinterlemesi Yoluyla Yoğunlaşma Süreçlerine olan Etkileri, İ.T.Ü., Yüksek Lisans Tezi,İstanbul.
- Park, H.H., Cho, S.J., Yoon, D.N., 1984, Pore Filling Process in Liquid Phase Sintering, Metallurgical Transaction, Vol.15A.

- Peckner, D., Bardos D. I., 1977, Stainless Steels in Medical Devices, Handbook of Stainless Steels, McGraw Hill, N. York, Chapter 42, 1-10.
- Pasinli, A., 1999, Biyomedikal Uygulamalarda Kullanılan Biyomalzemeler, Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, Sayı 4, TÜRKİYE, 25-34.
- Park, J.B., Lakes R.S., 1992 “Biomaterials”, Plenum Press, New York and London, 66-115,
- Park, J.B., Kim, Y.K., 2000, Metallic Biomaterials, The Biomedical Engineering Handbook,
- Runkle, J.C. , Nicholson, J., Rice, J., 1985, Comparison of The Fatigue Performances of Cast Wrought and HIP P/M Cobalt-Chromium Prosthetic Alloy Modern Development in Powder Metallurgy, 16, 705-725
- Salak, A., 1995, Ferrous Powder Metallurgy, Cambridge International Science Publishing, 9-10, London/ England.
- Sarsılmaz F., 2003, Polimer- Hidroksiapatit Kompozitlerinin Ortopedik Biyomalzeme Olarak Kullanılmasının Araştırılması, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, , Elazığ, Yüksek Lisans Tezi, 5-6.
- Sarıtaş. S., 1994, Toz Metalurjisi, Makine Mühendisliği el Kitabı, Cilt 1-2 Baskı, Ankara, 64-82, MMO.
- Sarıtaş, S., 1985, Çelik Toz Dövmecilik, ODTÜ, Uygulamalı Araştırmalar Dergisi, Sayı 3, Ankara, 1-26,.
- Sarıtaş, S ve Çınar, H., 1988, Metal Tozlarının Çift Hareketli Zımbalarla Briketlenmesi, 3.Ulusal Mak. Tes. İmalat Kongresi, Bildiri Kitabı, 615-621.
- Sarıtaş, S., 1995, Toz metalurjisi , 36 (1988) 421, Ankara, 41-47
- Somunkıran, İ., 1999, Demir Esaslı Molibden, Nikel, Bakır Katkılı Toz Metal Alaşımının Mekanik Özelliklerine Bakır oranının etkisi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, Yüksek Lisans Tezi, 8-10, 40-45.
- Stosuy, A., 1993, Microstructures of Ferrous Powder Metallurgy Alloys, Atlas of Microstructures of Industrial Alloys, U.S.A.
- Şulan, T., 1993, Toz Metalurjisi Yöntemiyle Geliştirilen 90W7Ni3Fe Ağır Alaşımlarının Sıvı Faz Sinterlemesi Süreçleriyle Üretilmesi ve Karakterizasyonu, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Yüksek Lisans Tezi.
- Sutherland, D.S., Forshaw, P.D., Allen, G.C., Brown, I.T., and Williams, K.R., 1993, Surface Analysis of Titanium Implants. Biomaterials, 14(1993) 12, 893-899.
- Stachowiak, G.W. and Batchelor A.W., 2001, Engineering Tribology, U.S.A., 433- 616.
- Türk Standartları, 1985, Metalik tozların Görünür Toğunluğunun Huni Metodu ile Tayini, TS 4483.

- Ünlü, N., Çavuşoğlu, L., 1995, Toz Metalurjisinin Yaygın Kullanım Alanları, Metal Dünyası, Teknik Yazı, İstanbul, sayı:11-12.
- Thümmel, F., Oberacker, R., 1993, Introduction to Powder Metallurgy, 6, New York/ U.S.A.
- Taş, A.C., 2000, Synthesis of Biomimetic Ca-Hydroxyapatite Powders at 37 °C in Synthetic Body, Fluids, Biomaterials, 21(2000), 1429–1438.
- Turhan, H., 1998, Düşük Katkılı Kalay İçerikli Bronz Yatakların Aşınma ve Yorulma Davranışlarının Araştırılması, F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Elazığ.
- Tunay, R.F., Vural R., Yılmaz S.S., 2002, Borlamanın T/M Çelik Parçaların Mekanik Özelliklere Etkisi, Gazi Üniversitesi 3. Uluslararası Toz Sempozyumu, Ankara, 1221-1228
- Uygur, E.M., 1979, Metal Tozların İmalı, ODTÜ Uygulamalı Araştırmalar Dergisi, Sayı.2, Ankara.
- Ünver, K., 1992, Atomizasyon ve Elektroliz Sistemleri ile Metal Tozu Üretimi, Makine ve Metal Teknolojisi, Sayı: 6, İstanbul, 41-45.
- Velasco, F., 1995, Effect of Infiltration on The Mechanical Properties and Corrosion Resistance of Austenitic Stainless Steels, The International Journal of Powder Metallurgy, 31(1995) 4, 306-314, APMI International.
- Williams, D.F., 1982, Biocompatibility in Clinical Practice, Boca Raton, F.L. CRC Press.,
- Williams, D.F., 1991, Materials for Surgical Implants. Met. Mater. 1(1991), 24-29.
- Wang, K.K., Berlin, R.M., Gustavson, L.J., 1999, Dispersion Strengthened Co-Cr-Mo Alloy for Medical Implants, ASTM Special Technical Publication, 1365, 89-97.
- Webster, O., 1982, Effect of Lithium on the Mechanical Properties and Microstructure of SiC Whisker Reinforced Aluminum Alloys, Met.Trans., Vol 13A, Aug, 1516.
- Wilyman, P.R., 1985, Sintering with Nitrogen Based Atmospheres, Powder Metallurgy, Vol. 28, 85-87.
- Wojnar, L., Dabrowski, J.R., Oksiuta, Z., 2001, Porosity Structure And Mechanical Properties of Titanium-Type Alloy For Implants Materials Characterization, 46, 2-3, February/Match, 221-225
- www.turkishpm.org online yayını ,2003
- Yao, M.X., Wu, J.B.C., Xu, W., Liu, R., 2005, Metallographic Study and Wear Resistance of A High-C Wrought Co-Based Alloy Stellite 706K, Materials Science And Engineering A, 407 291–298
- Yılmaz, B., 1999, Toz Metalurjisi İle Üretilen, Bağlı Grafitli Demir Parçalarda Kullanılan, Farklı Demir Tozu Cinslerinin Parçalardaki Mekanik Özelliklere Etkisi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Yüksek Lisans Tezi, 3-4.

- Yıldırım, M.M., 1974, Theoretische Untersuchungen über Abbaureaktionen an Dichten Festkörpern mit einem Gemisch aus vier reagierenden Gasen, Doktorarbeit, TU Clausthal, 33-38
- Yıldırım, M.M., 1989, Alaşım Tekniğı, F.Ü., Teknik Eğitim Faköltesi Yayınları, 132, Elazığ, 39-50
- Yıldırım M.M., Doğıantan Z.S., Çakan A., Pakdil M., 2001, Mühendislik Malzemeleri III, Mustafa Kemal Üniversitesi Yayınları , No:10, İskenderun, 40.
- Zeren, A., 2001, Total Kalça Artroplastisinde Kullanılan İmplantların Mekanik Özellikleri, Metal Dünyası, Sayı: 98, 12-18.

ÖZGEÇMİŞ

1973 Elazığ doğumlu İlyas SOMUNKIRAN, İlkokulu Palu Atatürk ilkokulunda, orta okulu Palu lisesinde ve liseyi de Palu Endüstri Meslek Lisesinde tamamladı. 1992’de Fırat Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Metal Eğitimi Bölümün’de lisans eğitime başladı ve 1996 yılında mezun oldu. Aynı yıl Bayburt Çıraklık Eğitim Merkezinde metal öğretmeni olarak mesleki hayatına başladı. 1997 yılında Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mekanik Metalurji Anabilim Dalında da yüksek lisans eğitime başlayıp, 1999 da yüksek lisansını tamamladı. 1998 ve 1999 yıllarında Gazi Endüstri Meslek Lisesinde metal öğretmeni olarak çalıştı. Araştırma görevlisi olarak Süleyman Demirel Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesinde 1999’da çalışmaya başlayıp; 1,5 yıl bu kurumda çalıştıktan sonra, Fırat üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesinde araştırma görevlisi olarak çalışmalarını devam ettirdi. 2001 yılında doktora çalışmasına başlayan İlyas SOMUNKIRAN, evli ve 1 çocuk babasıdır.