

**T.C.
CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
KONSTRÜKSİYON VE İMALAT BİLİM DALI**

**TOZ METAL PARÇALARIN ORTA VE DÜŞÜK FREKANSLI
İNDÜKSİYON İLE SİNERLENMESİNDE SİNERLEME
PARAMETRELERİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN
İNCELENMESİ**

Can ÇİVİ

**Danışman
Prof. Dr. Enver ATİK**



MANİSA-2016

TEZ ONAYI

Can CİVİ tarafından hazırlanan "Toz Metal Parçaların Orta Ve Düşük Frekanslı İndüksiyon İle Sinterlenmesinde Sinterleme Parametrelerinin Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi" adlı tez çalışması 17/02/2016 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri önünde Manisa Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda DOKTORA TEZİ olarak başarı ile savunulmuştur.

Danışman **Prof. Dr. Enver ATİK**
Manisa Celal Bayar Üniversitesi



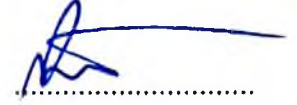
Jüri Üyesi **Prof. Dr. Rasim İPEK**
Ege Üniversitesi



Jüri Üyesi **Doç. Dr. B. Sadık ÜNLÜ**
Manisa Celal Bayar Üniversitesi



Jüri Üyesi **Prof. Dr. Nurşen SAKLAKOĞLU**
Manisa Celal Bayar Üniversitesi



Jüri Üyesi **Yrd. Doç. Dr. Serdar KARAOĞLU**
Ege Üniversitesi



TAAHHÜTNAME

Bu tezin Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde, akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

Can ÇIVI

İÇİNDEKİLER

İÇİNDEKİLER	1
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	4
ŞEKİLLER DİZİNİ	5
TABLO DİZİNİ	14
TEŞEKKÜR.....	15
ÖZET	16
ABSTRACT.....	17
1. GİRİŞ	18
1.1 Tezin Amacı	21
2. GENEL BİLGİLER	23
2.1. Toz Metalurjisi İle Parça Üretimi İşlem Adımları	23
2.1.1. Toz Üretim Yöntemleri	25
2.1.2. Tozların Karıştırılması	33
2.1.3. Presleme	34
2.1.4. Sinterleme	36
2.2. Sinterlemenin Temel Kavramları.....	40
2.2.1. Katı Hal Sinterleme.....	40
2.2.2. Toz Karışımlarının Katı Hal Sinterlenmesi.....	43
2.2.3. Sıvı Faz Sinterleme	44
2.2.4. Basınç Destekli Sinterleme	48
2.3. Sinterleme Atmosferleri	50
2.4. Sinterleme Uygulamaları	52
2.5. Yeni Sinterleme Teknikleri.....	54
2.6. Sinterlemede Yeni Isıtma Teknikleri	56
2.6.1. Mikrodalga Isıtma	56
2.6.2. Plazma Isıtma.....	57
2.6.3. Elektriksel Boşaltım Isıtma	58
2.6.4. Lazer Isıtma	59
2.6.5. İndüksiyon ile Isıtma.....	59
2.7. İndüksiyon İle Sinterleme	60
2.7.1. İndüksiyon.....	60
2.7.2. İndüksiyon ile Sinterleme Uygulamaları	65

2.8. Toz Metalurjisinde Demir ve Demir Alaşımaları	68
3. DENEYSEL KISIM.....	70
3.1. Materyal	70
3.2. Yöntemler	73
3.2.1. Tozların Tartılması ve Karıştırılması	73
3.2.2. Tozların Preslenmesi.....	74
3.2.3. Numunelerin Sinterlenmesi.....	78
3.2.4. Üç Nokta Eğme Deneyi	84
3.2.5. Basma Deneyi	84
3.2.6. Rockwell-B Sertlik Ölçümü.....	85
3.2.7. Mikro Vickers sertlik Ölçümü	85
3.2.8. Yoğunluk Ölçümü.....	86
3.2.9. Optik Mikroskop ile Mikro Yapı İncelemeleri	86
3.2.10. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile Mikro Yapı İncelemeleri.....	86
3.2.11. Numunelerin XRD (X-Işınları Difraktometresi) İncelemeleri.....	87
3.2.12. Özgül direnç Ölçümleri.....	87
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	88
4.1. Ticari Safılıktaki Demir Tozu ile Yapılan Çalışmalardaki Sonuçlar	88
4.1.1.Üç Nokta Eğme Deneyi Sonuçları	89
4.1.2. Rockwell-B Sertlik Ölçümü Sonuçları.....	91
4.1.3. Yoğunluk Ölçümü Sonuçları	93
4.1.4. Optik Mikroskop İle Mikroyapı İnceleme Sonuçları	96
4.1.5. SEM İle Mikroyapı İnceleme Sonuçları	100
4.1.6. XRD Analizi Sonuçları	102
4.1.7 Özgül direnç Ölçümü Sonuçları.....	103
4.2. % 0,5 Grafitli Demir Tozu ile Yapılan Çalışmalardaki Sonuçlar	104
4.2.1.Üç Nokta Eğme Deneyi Sonuçları	104
4.2.2. Rockwell-B Sertlik Ölçümü Sonuçları.....	106
4.2.3. Yoğunluk Ölçümü Sonuçları	108
4.2.4. Optik Mikroskop İle Mikroyapı İnceleme Sonuçları	111
4.2.5. SEM Mikroskobu İle Mikroyapı İnceleme Sonuçları	115
4.2.6. XRD Analizi Sonuçları	117
4.2.7. Özgül direnç Ölçümü Sonuçları.....	118
4.3. % 3 Bakır ve % 0,5 Grafit'li Demir Tozu ile Yapılan Çalışmalardaki Sonuçlar	119

4.3.1. Üç Nokta Eğme Deneyi Sonuçları	119
4.3.2. Rockwell-B Sertlik Ölçümü Sonuçları.....	121
4.3.3. Vickers Sertlik Ölçümü Sonuçları	123
4.3.4. Yoğunluk Ölçümü Sonuçları	126
4.3.5. Optik Mikroskop İle Mikroyapı İnceleme Sonuçları	129
4.3.6. SEM Mikroskobu İle Mikroyapı İnceleme Sonuçları	133
4.3.7. XRD Analizi Sonuçları	141
4.3.8. Özgül direnç Ölçümü Sonuçları.....	142
4.4. Farklı Toz Bileşimlerinin Numunelerin Özelliklerine Etkileri	143
4.5. Farklı Boyut ve Şekillerdeki Demir Esaslı Burç ve Dişli Çarklar ile Yapılan Çalışmalarda Elde Edilen Sonuçlar.....	151
4.5.1. Burç 1.....	152
4.5.2. Burç 2.....	153
4.5.3. Burç 3.....	154
4.5.4. Düz Dişli Çark 1	155
4.5.5. Düz Dişli Çark 2	157
4.5.6. Konik Dişli Çark	159
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	163
KAYNAKLAR.....	167
ÖZGEÇMİŞ.....	175

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

TM	Toz Metalurjisi
HRB	Rocwell-B Sertlik Değeri
HV	Vickers Sertlik Değeri
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
XRD	X Işınları Difraksiyonu
EDS	Enerji dağılımlı X ışınları analizi
PLC	Programlanabilir Mantıksal Denetleyici

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Toz metal parça üretimi genel akış şeması.....	23
Şekil 2.2. Örnek bir parça için dövme ile toz metalurjisi proseslerinin karşılaştırılması	24
Şekil 2.3. Toz metalurjisi işlem adımları	25
Şekil 2.4. Bilyalı öğütme.....	27
Şekil 2.5. Mekanik alaşımlama	28
Şekil 2.6. Gaz atomizasyonu.....	29
Şekil 2.7. Sıvı atomizasyonu.....	30
Şekil 2.8. Sıvı atomizasyonu ile parçacık oluşumu.....	31
Şekil 2.9. Döner elektrot ile savurmalı atomizasyon yöntemi	32
Şekil 2.10. Döner elektrot ile sıvı filminin parçalanması ve küresel parçacık oluşumu	32
Şekil 2.11. Toz sıkıştırma kademeleri.....	35
Şekil 2.12. Tozların preslenmesi.....	36
Şekil 2.13. Sinterlemede boyun oluşumu.....	38
Şekil 2.14. Sinterlemenin aşamaları.....	39
Şekil 2.15. Katı hal sinterlemede parçacıklar arası bağ oluşumu	40
Şekil 2.16. Kristalin malzemelerde boyun bölgesinde tane sınırı oluşumu	41
Şekil 2.17. Yüze ve hacim taşınım mekanizmaları	42
Şekil 2.18. Sinterleme aşamaları ile gözenek yapısının değişimi	43
Şekil 2.19. Sıvı faz sinterleme sonucu elde edilebilecek farklı özellikler	45
Şekil 2.20. Sıvı faz sinterlemenin kavramsal aşamaları.....	46
Şekil 2.21. Sıvı faz sinterleme sonucu oluşan yapı	47
Şekil 2.22. Fe-Cu sisteminde şişme olayının gösterilişi	48
Şekil 2.23. Tek eksenli sıcak presleme	50
Şekil 2.24. Parti fırında sinterleme.....	52
Şekil 2.25. Geleneksel sinterlemenin şematik gösterimi	53
Şekil 2.26. Konveyör bantlı sinterleme fırını.....	53
Şekil 2.27. İticili sinterleme fırını	54
Şekil 2.28. Emdirme Sinterleme	55
Şekil 2.29. Plazma ısıtma ile sinterleme	58
Şekil 2.30. Elektriksel boşaltım ısıtma.....	58
Şekil 2.31. İndüksiyon ile ısıtmanın şematik gösterilişi	61
Şekil 2.32. Bakır bobin vasıtası ile meydana gelen manyetik akım çizgileri	62
Şekil 2.33. Bazı yaygın metallerin sıcaklığa bağlı olarak değişen özgül direnç değerleri.....	63
Şekil 2.34. İndüksiyonda ve gaz ısıtmalı fırında yapılan ısıl işlemin süre olarak karşılaştırılması	64
Şekil 2.35. İndüksiyon ile dişli çark sertleştirme	64
Şekil 2.36. İndüksiyon ile ısıtma ile sıkı geçme.....	65

Şekil 2.37. İndüksiyon ile kaynak	65
Şekil 2.38. Yüksek frekanslı indüksiyon ile sinterleme yönteminin şematik gösterilişi	66
Şekil 2.39. a)Yüksek frekanslı indüksiyon ile sinterleme düzeneğinin ayrıntılı şematik gösterilişi b) Düzenekte gerçekleştirilen sinterleme işleminin görüntüsü	67
Şekil 2.40. Saf demirin soğuma eğrisi ve allotropik dönüşümleri	68
Şekil 2.41. Demir Bakır Faz Diyagramı.....	69
Şekil 3.1. Deneysel çalışmalarda uygulanan işlem adımları	73
Şekil 3.2. a)100 tonluk hidrolik pres, b) Kalıp.....	74
Şekil 3.3. Saf demir tozundan preslenen numunelerin presleme sonrası görüntüsü ..	74
Şekil 3.4. Preslenen numunelerin teknik resmi	75
Şekil 3.5. Burç 1	75
Şekil 3.6. Farklı boyut ve şekillerdeki preslenmiş parçalar	76
Şekil 3.7. Burç 2.....	76
Şekil 3.8. Burç 3	76
Şekil 3.9. Düz dişli çark 1	77
Şekil 3.10. Düz Dişli Çark 2	77
Şekil 3.11. Konik dişli çark.....	77
Şekil 3.12. Deney numunelerinde kullanılan sinterleme parametreleri	78
Şekil 3.13. İndüksiyon ile sinterleme düzeneği	79
Şekil 3.14. İndüksiyon ile sinterleme düzeneğinin 3 boyutlu çizimi	80
Şekil 3.15. 10x10x 55 mm deney numunelerinin indüksiyon ile sinterlenmesi	81
Şekil 3.16. Çeşitli şekil ve boyutlardaki numunelerinin indüksiyon ile sinterlenmesi	81
Şekil 3.17. İndüksiyon ile sinterleme esnasında termal kamera görüntüsü (Ön sinterleme gerçekleştirilmeyen sinterleme işlemi).....	82
Şekil 3.18. İndüksiyon ile sinterleme esnasında termal kamera görüntüsü (Ön sinterleme gerçekleştirilen sinterleme işlemi).....	82
Şekil 3.19. İndüksiyonla sinterleme düzeneğinde ön sinterlemesiz işlemde sinterleme aşamaları.....	83
Şekil 3.20. İndüksiyonla sinterleme düzeneğinde ön sinterlemeli işlemde sinterleme aşamaları	83
Şekil 3.21. Üç nokta eğme deney düzeneğinin şematik gösterilişi	84
Şekil 3.22. Burçlara uygulanan basma testinin şematik gösterilişi	85
Şekil 4.1. Saf demir numunelerde indüksiyon ile sinterlemede sinterleme süresi- üç nokta eğme dayanımı değişimi.....	89
Şekil 4.2. Saf demir numunelerde indüksiyon ile sinterlemede farklı sinterleme sıcaklıklarının numunelerin üç nokta eğme dayanımlarına etkisi.....	90
Şekil 4.3. Saf demir numunelerde farklı sinterleme yöntemlerinin ve ön sinterlemenin numunelerin 3 nokta eğme dayanımlarına etkisi.....	90

Şekil 4.4. Saf demir numunelerde farklı sinterleme yöntemlerinin ve ön sinterlemenin numunelerin 3 nokta eğme deneyi ile elde edilen % sehimlerine etkisi	91
Şekil 4.5. Saf demir numunelerde indüksiyon ile sinterlemede farklı sinterleme sürelerinin numunelerin sertliklerine etkisi	92
Şekil 4.6. Saf demir numunelerde indüksiyon ile sinterlemede farklı sinterleme sıcaklıklarının numunelerin sertliklerine etkisi	92
Şekil 4.7. Saf demir numunelerde farklı sinterleme yöntemlerinin ve ön sinterlemenin numunelerin sertliklerine etkisi	93
Şekil 4.8. Saf demir Numunelerde İndüksiyon ile sinterlemede farklı sinterleme sürelerinin ve yöntemlerinin numunelerin yoğunluklarına etkisi	94
Şekil 4.9. Saf demir numunelerde indüksiyon ile sinterlemede farklı sinterleme sürelerinin ve yöntemlerinin numunelerin bağıl yoğunluklarına etkisi	94
Şekil 4.10. Saf demir numunelerde indüksiyon ile sinterlemede farklı sinterleme sıcaklıklarının numunelerin yoğunluklarına etkisi	95
Şekil 4.11 . Saf demir numunelerde indüksiyon ile sinterlemede farklı sinterleme sıcaklıklarının numunelerin bağıl yoğunluklarına etkisi	95
Şekil 4.12. İndüksiyon ile 900 °C’de 15 dakika sinterlenen saf demir numunenin mikro yapı görüntüsü	96
Şekil 4.13. İndüksiyon ile 1000 °C’de 15 dakika sinterlenen saf demir numunenin mikro yapı görüntüsü	96
Şekil 4.14. İndüksiyon ile 1120 °C’de 15 dakika sinterlenen saf demir numunenin mikro yapı görüntüsü	97
Şekil 4.15. İndüksiyon ile 1120 °C’de 6 dakika sinterlenen saf demir numunenin mikro yapı görüntüsü	97
Şekil 4.16. İndüksiyon ile 1120 °C’de 10 dakika sinterlenen saf demir numunenin mikro yapı görüntüsü	97
Şekil 4.17. İndüksiyon ile 600 °C’de 15 dakika ön sinterlemenin ardından 1120 °C’de 15 dakika sinterlenen saf demir numunenin mikro yapı görüntüsü	98
Şekil 4.18. Fırında geleneksel olarak ile 1120 °C’de 30 dakika sinterlenen saf demir numunenin mikro yapı görüntüsü	98
Şekil 4.19. Fırında 45 dakika 600 °C’de ön sinterlemenin ardından 1120 °C’de 30 dakika sinterlenen saf demir numunenin mikro yapı görüntüsü	98
Şekil 4.20. İndüksiyon ile ve fırında ve ön sinterlemesiz olarak sinterlenen saf demir numunelerin mikro yapı görüntüleri a) İndüksiyon ile 15 dakika sinterlenen numune b) Fırında 30 dakika sinterlenen numune	99
Şekil 4.21. İndüksiyon ile ve fırında ve ön sinterlemeli olarak sinterlenen saf demir numunelerin mikro yapı görüntüleri a) İndüksiyon ile 15+15 dakika sinterlenen numune b) Fırında 45+30 dakika sinterlenen numune	99
Şekil 4.22. İndüksiyon ile 600 °C’de 15 dakika ön sinterlemenin ardından 1120 °C’de 15 dakika sinterlenen saf demir numunenin SEM görüntüsü	100
Şekil 4.23. İndüksiyon ile 600 °C’de 15 dakika ön sinterlemenin ardından 1120 °C’de 15 dakika sinterlenen saf demir numunenin çizgisel EDS analizi görüntüsü	100

Şekil 4.24. Fırında 45 dakika 600 °C’de ön sinterlemenin ardından 1120 °C’de 30 dakika sinterlenen saf demir numunenin SEM görüntüsü	101
Şekil 4.25. Fırında 45 dakika 600 °C’de ön sinterlemenin ardından 1120 °C’de 30 dakika sinterlenen saf demir numunenin çizgisel EDS analizi görüntüsü	101
Şekil 4.26. İndüksiyon ile 600 °C’de 15 dakika ön sinterlemenin ardından 1120 °C’de 15 dakika sinterlenen saf demir numunenin XRD analiz sonucu	102
Şekil 4.27. Fırında 600 °C’de 45 dakika ön sinterlemenin ardından 1120 °C’de 30 dakika sinterlenen saf demir numunenin XRD analiz sonucu	102
Şekil 4.28. % 0,5 Grafit içerikli demir numunelerde indüksiyon ile sinterlemede farklı sinterleme sürelerinin numunelerin üç nokta eğme dayanımlarına etkisi	104
Şekil 4.29. % 0,5 Grafit içerikli demir numunelerde indüksiyon ile sinterlemede farklı sinterleme sıcaklıklarının numunelerin üç nokta eğme dayanımlarına etkisi	105
Şekil 4.30. % 0,5 Grafit içerikli demir numunelerde farklı sinterleme yöntemlerinin ve ön sinterlemenin numunelerin 3 nokta eğme dayanımlarına etkisi	105
Şekil 4.31. % 0,5 Grafit içerikli demir numunelerde farklı sinterleme yöntemlerinin ve ön sinterlemenin numunelerin 3 nokta eğme deneyi ile elde edilen % sehimlerine etkisi	106
Şekil 4.32. % 0,5 Grafit içerikli demir numunelerde indüksiyon ile sinterlemede farklı sinterleme sürelerinin numunelerin sertliklerine etkisi	107
Şekil 4.33. % 0,5 Grafit içerikli demir numunelerde indüksiyon ile sinterlemede farklı sinterleme sıcaklıklarının numunelerin sertliklerine etkisi	107
Şekil 4.34. % 0,5 Grafit içerikli demir numunelerde farklı sinterleme yöntemlerinin ve ön sinterlemenin numunelerin sertliklerine etkisi	108
Şekil 4.35. % 0,5 Grafit içerikli demir numunelerde indüksiyon ile sinterlemede farklı sinterleme sürelerinin ve yöntemlerinin numunelerin yoğunluklarına etkisi	109
Şekil 4.36. % 0,5 Grafit içerikli demir numunelerde indüksiyon ile sinterlemede farklı sinterleme sürelerinin ve yöntemlerinin numunelerin bağıl yoğunluklarına etkisi	109
Şekil 4.37. % 0,5 Grafit içerikli demir numunelerde indüksiyon ile sinterlemede farklı sinterleme sıcaklıklarının numunelerin yoğunluklarına etkisi	110
Şekil 4.38. % 0,5 Grafit içerikli demir numunelerde indüksiyon ile sinterlemede farklı sinterleme sıcaklıklarının numunelerin bağıl yoğunluklarına etkisi	110
Şekil 4.39. İndüksiyon ile 900 °C’de 15 dakika sinterlenen % 0,5 grafit içerikli demir numunenin mikro yapı görüntüsü	111
Şekil 4.40. İndüksiyon ile 1000 °C’de 15 dakika sinterlenen % 0,5 grafit içerikli demir numunenin mikro yapı görüntüsü	111
Şekil 4.41. İndüksiyon ile 1120 °C’de 15 dakika sinterlenen % 0,5 grafit içerikli demir numunenin mikro yapı görüntüsü	112
Şekil 4.42. İndüksiyon ile 1120 °C’de 6 dakika sinterlenen % 0,5 grafit içerikli demir numunenin mikro yapı görüntüsü	112
Şekil 4.43. İndüksiyon ile 1120 °C’de 10 dakika sinterlenen % 0,5 grafit içerikli demir numunenin mikro yapı görüntüsü	112

Şekil 4.44. İndüksiyon ile 600 °C’de 15 dakika ön sinterlemenin ardından 1120 °C’de 15 dakika sinterlenen % 0,5 grafit içerikli demir numunenin mikro yapı görüntüsü	113
Şekil 4.45. Fırında geleneksel olarak ile 1120 °C’de 30 dakika sinterlenen % 0,5 grafit içerikli demir numunenin mikro yapı görüntüsü	113
Şekil 4.46. Fırında 45 dakika 600 °C’de ön sinterlemenin ardından 1120 °C’de 30 dakika sinterlenen % 0,5 grafit içerikli demir numunenin mikro yapı görüntüsü ...	113
Şekil 4.47. İndüksiyon ile ve fırında ve ön sinterlemesiz olarak sinterlenen % 0,5 grafit içerikli demir numunelerin mikro yapı görüntüleri a) İndüksiyon ile 15 dakika sinterlenen numune b) Fırında 30 dakika sinterlenen numune	114
Şekil 4.48. İndüksiyon ile ve fırında ön sinterlemeli olarak sinterlenen % 0,5 grafit içerikli demir numunelerin mikro yapı görüntüleri a) İndüksiyon ile 15+15 dakika sinterlenen numune b) Fırında 45+30 dakika sinterlenen numune	114
Şekil 4.49. İndüksiyon ile 600 °C’de 15 dakika ön sinterlemenin ardından 1120 °C’de 15 dakika sinterlenen % 0,5 grafit içerikli demir numunenin SEM görüntüsü.....	115
Şekil 4.50. İndüksiyon ile 600 °C’de 15 dakika ön sinterlemenin ardından 1120 °C’de 15 dakika sinterlenen % 0,5 grafit içerikli demir numunenin çizgisel EDS analizi görüntüsü.....	115
Şekil 4.51. Fırında 45 dakika 600 °C’de ön sinterlemenin ardından 1120 °C’de 30 dakika sinterlenen % 0,5 grafit içerikli demir numunenin SEM görüntüsü.....	116
Şekil 4.52. Fırında 45 dakika 600 °C’de ön sinterlemenin ardından 1120 °C’de 30 dakika sinterlenen % 0,5 grafit içerikli demir numunenin çizgisel EDS analizi görüntüsü.....	116
Şekil 4.53. İndüksiyon ile 600 °C’de 15 dakika ön sinterlemenin ardından 1120 °C’de 15 dakika sinterlenen % 0,5 grafit içerikli demir numunenin XRD analiz sonucu..	117
Şekil 4.54. Fırında 600 °C’de 45 dakika ön sinterlemenin ardından 1120 °C’de 30 dakika sinterlenen % 0,5 grafit içerikli demir numunenin XRD analiz sonucu.....	117
Şekil 4.55. % 3 Bakır, % 0,5 Grafit, içerikli demir numunelerde indüksiyon ile sinterlemede farklı sinterleme sürelerinin numunelerin üç nokta eğme dayanımlarına etkisi	119
Şekil 4.56. % 3 Bakır, % 0,5 Grafit içerikli demir numunelerde indüksiyon ile sinterlemede farklı sinterleme sıcaklıklarının numunelerin üç nokta eğme dayanımlarına etkisi	120
Şekil 4.57. % 3 Bakır, % 0,5 Grafit içerikli demir numunelerde farklı sinterleme yöntemlerinin ve ön sinterlemenin numunelerin 3 nokta eğme dayanımlarına etkisi	120
Şekil 4.58. % 3 Bakır, % 0,5 Grafit içerikli demir numunelerde farklı sinterleme yöntemlerinin ve ön sinterlemenin 3 nokta eğme deneyi ile elde edilen % sehimlerine etkisi	121
Şekil 4.59. % 3 Bakır, % 0,5 Grafit içerikli demir numunelerde indüksiyon ile sinterlemede farklı sinterleme sürelerinin numunelerin Rockwell-B sertliklerine etkisi	122

Şekil 4.60. % 3 Bakır, % 0,5 Grafit içerikli demir numunelerde indüksiyon ile sinterlemede farklı sinterleme sıcaklıklarının numunelerin Rockwell-B sertliklerine etkisi	122
Şekil 4.61. % 3 Bakır, % 0,5 Grafit içerikli demir numunelerde farklı sinterleme yöntemlerinin ve ön sinterlemenin numunelerin Rockwell-B sertliklerine etkisi ...	123
Şekil 4.62. % 3 Bakır, % 0,5 Grafit içerikli demir numunelerde indüksiyon ile sinterlemede farklı sinterleme sürelerinin numunelerin Vickers sertliklerine etkisi	124
Şekil 4.63. % 3 Bakır, % 0,5 Grafit içerikli demir numunelerde indüksiyon ile sinterlemede farklı sinterleme sıcaklıklarının numunelerin Vickers sertliklerine etkisi	124
Şekil 4.64. % 3 Bakır, % 0,5 Grafit içerikli demir numunelerde farklı sinterleme yöntemlerinin ve ön sinterlemenin numunelerin Rockwell-B sertliklerine etkisi ...	125
Şekil 4.65. % 3 Bakır, % 0,5 Grafit içerikli demir numunelerde indüksiyon ile sinterlemede farklı sinterleme sürelerinin ve yöntemlerinin numunelerin yoğunluklarına etkisi	127
Şekil 4.66. % 3 Bakır, % 0,5 Grafit içerikli demir numunelerde indüksiyon ile sinterlemede farklı sinterleme sürelerinin ve sinterleme yöntemlerinin numunelerin bağıl yoğunluklarına etkisi	127
Şekil 4.67. % 3 Bakır, % 0,5 Grafit içerikli demir numunelerde indüksiyon ile sinterlemede farklı sinterleme sıcaklıklarının numunelerin yoğunluklarına etkisi ..	128
Şekil 4.68. % 3 Bakır, % 0,5 Grafit içerikli demir numunelerde indüksiyon ile sinterlemede farklı sinterleme sıcaklıklarının numunelerin bağıl yoğunluklarına etkisi	128
Şekil 4.69. İndüksiyon ile 900 °C'de 15 dakika sinterlenen % 3 Cu, % 0,5 grafit içerikli demir numunenin mikro yapı görüntüsü.....	129
Şekil 4.70. İndüksiyon ile 1000 °C'de 15 dakika sinterlenen % 3 Cu, % 0,5 grafit içerikli demir numunenin mikro yapı görüntüsü.....	129
Şekil 4.71. İndüksiyon ile 1120 °C'de 15 dakika sinterlenen % 3 Cu, % 0,5 grafit içerikli demir numunenin mikro yapı görüntüsü.....	130
Şekil 4.72. İndüksiyon ile 1120 °C'de 6 dakika sinterlenen % 3 Cu, % 0,5 grafit içerikli demir numunenin mikro yapı görüntüsü.....	130
Şekil 4.73. İndüksiyon ile 1120 °C'de 10 dakika sinterlenen % 3 Cu, % 0,5 grafit içerikli demir numunenin mikro yapı görüntüsü.....	130
Şekil 4.74. İndüksiyon ile 600 °C'de 15 dakika ön sinterleme + 1120 °C'de 15 dakika sinterlenen % 3 Cu, % 0,5 grafit içerikli demir numunenin mikro yapı görüntüsü .	131
Şekil 4.75. Fırında geleneksel olarak ile 1120 °C'de 30 dakika sinterlenen % 3 Cu, % 0,5 grafit içerikli demir numunenin mikro yapı görüntüsü	131
Şekil 4.76. Fırında 45 dakika 600 °C'de ön sinterleme + 1120 °C'de 30 dakika sinterlenen % 3 Cu, % 0,5 grafit içerikli demir numunenin mikro yapı görüntüsü .	131
Şekil 4.77. İndüksiyon ile ve fırında ve ön sinterlemesiz olarak sinterlenen % 3 Cu, % 0,5 grafit içerikli demir numunelerin mikro yapı görüntüleri a) İndüksiyon ile 15 dakika sinterlenen numune b) Fırında 30 dakika sinterlenen numune.....	132

Şekil 4.78. İndüksiyon ile ve fırında ve ön sinterlemeli olarak sinterlenen % 3 Cu, % 0,5 grafit içerikli demir numunelerin mikro yapı görüntüleri a) İndüksiyon ile 15+15 dakika sinterlenen numune b) Fırında 45+30 dakika sinterlenen numune	132
Şekil 4.79. İndüksiyon ile 600 °C’de 15 dakika ön sinterlemenin ardından 1120 °C’de 15 dakika sinterlenen % 3 Cu, % 0,5 grafit içerikli demir numunenin SEM görüntüsü	133
Şekil 4.80. İndüksiyon ile 600 °C’de 15 dakika ön sinterlemenin ardından 1120 °C’de 15 dakika sinterlenen % 3 Cu, % 0,5 grafit içerikli demir numunenin çizgisel EDS analizi görüntüsü	133
Şekil 4.81. İndüksiyon ile 600 °C’de 15 dakika ön sinterlemenin ardından 1120 °C’de 15 dakika sinterlenen % 3 Cu, % 0,5 grafit içerikli demir numunenin bölgesel EDS analizi görüntüsü	134
Şekil 4.82. Fırında 45 Dakika 600 °C’de ön sinterlemenin ardından 1120 °C’de 30 dakika sinterlenen % 3 Cu, % 0,5 grafit içerikli demir numunenin mikro yapı görüntüsü.....	134
Şekil 4.83. Fırında 45 dakika 600 °C’de ön sinterlemenin ardından 1120 °C’de 30 dakika sinterlenen % 3 Cu, % 0,5 grafit içerikli demir numunenin çizgisel EDS analizi görüntüsü	135
Şekil 4.84. Fırında 45 dakika 600 °C’de ön sinterlemenin ardından 1120 °C’de 30 dakika sinterlenen % 3 Cu, % 0,5 grafit içerikli demir numunenin bölgesel EDS analizi görüntüsü	136
Şekil 4.85. İndüksiyon ile 900 °C sıcaklıkta 15 dakika sinterlenen % 3 Cu, % 0,5 grafit içerikli demir numunenin kırık yüzeyi SEM fotoğrafları (x500; x1000; x2500)	137
Şekil 4.86. İndüksiyon ile 1000 °C sıcaklıkta 15 dakika sinterlenen % 3 Cu, % 0,5 grafit içerikli demir numunenin kırık yüzeyi SEM fotoğrafları (x500; x1000; x2500)	137
Şekil 4.87. İndüksiyon ile 1120 °C sıcaklıkta 15 dakika sinterlenen % 3 Cu, % 0,5 grafit içerikli demir numunenin kırık yüzeyi SEM fotoğrafları (x500; x1000; x2500)	138
Şekil 4.88. İndüksiyon ile 1120 °C’de 6 dakika sinterlenen % 3 Cu, % 0,5 grafit içerikli demir numunenin kırık yüzeyi SEM fotoğrafları (x500; x1000; x2500).....	138
Şekil 4.89. İndüksiyon ile 1120 °C’de 10 dakika sinterlenen % 3 Cu, % 0,5 grafit içerikli demir numunenin kırık yüzeyi SEM fotoğrafları (x500; x1000; x2500)....	139
Şekil 4.90. İndüksiyon ile 600 °C’de 15 dakika ön sinterlemenin ardından 1120 °C’de 15 dakika sinterlenen % 3 Cu, % 0,5 Grafit içerikli demir kırık yüzeyi SEM fotoğrafları (x500; x1000; x2500).....	139
Şekil 4.91. Fırında geleneksel olarak ile 1120 °C’de 30 dakika sinterlenen % 3 Cu, % 0,5 grafit içerikli demir numunenin kırık yüzeyi SEM fotoğrafları (x500; x1000; x2500)	140
Şekil 4.92. Fırında 45 dakika 600 °C’de ön sinterlemenin ardından 1120 °C’de 30 dakika sinterlenen % 3 Cu, % 0,5 grafit içerikli demir numunenin kırık yüzeyi SEM fotoğrafları (x500; x1000; x2500).....	140

Şekil 4.93. İndüksiyon ile 600 °C’de 15 dakika ön sinterlemenin ardından 1120 °C’de 15 dakika sinterlenen % 3 Cu, % 0,5 grafit içerikli demir numunenin XRD analiz sonucu	141
Şekil 4.94. Fırında 600 °C’de 45 dakika ön sinterlemenin ardından 1120 °C’de 30 dakika sinterlenen % 3 Cu, % 0,5 grafit içerikli demir numunenin XRD analiz sonucu	142
Şekil 4.95. İndüksiyon ile 600° C’de 15 dakika ön sinterlemenin ardından 1120 °C’de 15 dakika sinterlenen numunenin dayanımlarının karşılaştırılması	143
Şekil 4.96. Fırında 600 °C’de 45 Dakika Ön Sinterlemenin Ardından 1120 °C’de 30 Dakika Sinterlenen Numunenin Dayanımlarının Karşılaştırılması.....	144
Şekil 4.97. İndüksiyon ile 600 °C’de 15 dakika ön sinterlemenin ardından 1120 °C’de 15 dakika sinterlenen numunenin sertliklerinin karşılaştırılması.....	144
Şekil 4.98. Fırında 45 Dakika 600 °C’de ön sinterlemenin ardından 1120 °C’de 30 dakika sinterlenen numunenin sertliklerinin karşılaştırılması.....	145
Şekil 4.99. Demir ve bakır tozunun bobindeki görüntüsü	146
Şekil 4.100. Demir tozunun üzerine bakır tozunun preslenmesiyle oluşan numunenin indüksiyon ile sinterleme sonrası mikro yapı görüntüsü	146
Şekil 4.101. Farklı bileşimdeki tozlardan oluşan parçaların sinterleme öncesi yoğunluklarının kıyaslanması	147
Şekil 4.102. İndüksiyon ile 600 °C’de 15 dakika ön sinterlemenin ardından 1120 °C’de 15 dakika sinterlenen farklı bileşimdeki tozlardan oluşan parçaların sinterleme sonrası yoğunluklarının kıyaslanması	147
Şekil 4.103. Fırında 45 Dakika 600 °C’de ön sinterlemenin ardından 1120 °C’de 30 dakika sinterlenen farklı bileşimdeki tozlardan oluşan parçaların sinterleme sonrası yoğunluklarının kıyaslanması	148
Şekil 4.104. İndüksiyon ile 600 °C’de 15 dakika ön sinterlemenin ardından 1120 °C’de 15 dakika sinterlenen farklı bileşimdeki tozlardan oluşan parçaların sinterleme sonrası mikro yapıları a) Saf demir numune, b) % 0,5 grafit içerikli demir numune, c) %3 Cu, % 0,5 grafit içerikli demir numune	149
Şekil 4.105. Farklı boyut ve şekillerdeki sinterlenmiş parçalar	151
Şekil 4.106. Burç 1 basma testi sonuçları	152
Şekil 4.107. Burç 1 Rockwell-B sertlik ölçümü sonuçları	153
Şekil 4.108. Burç 2 basma testi sonuçları	154
Şekil 4.109. Burç 3 basma testi sonuçları	155
Şekil 4.110. Düz dişli çark 1 basma testi şematik görüntüsü.....	156
Şekil 4.111. Düz dişli çark 1 basma testi sonuçları.....	156
Şekil 4.112. Düz dişli çark 1 Rockwell-B testinin sonuçları	157
Şekil 4.113. Düz dişli çark 2 basma testi şematik görüntüsü.....	158
Şekil 4.114. Düz dişli çark 2 basma testi sonuçları.....	158
Şekil 4.115. Düz dişli çark 2 Rockwell-B sertlik ölçümü sonuçları	159
Şekil 4.116. Konik dişli çark Rockwell-B testi sonuçları	160
Şekil 4.117. 8,4 dakika İndüksiyon ile sinterlenen burç 1’in mikro yapı görüntüleri (x200-x1000).....	161

Şekil 4.118. 15 dakika İndüksiyon ile sinterlenen burç 1'in mikro yapı görüntüleri (x200-x1000).....	161
Şekil 4.119. 30 dakika geleneksel yöntemle sinterlenen burç 1'in mikro yapı görüntüleri (x200-x1000).....	161
Şekil 4.120. 15 dakika İndüksiyon ile sinterlenen düz dişli çark 1'in mikro yapı görüntüleri.....	162
Şekil 4.121. 30 dakika İndüksiyon ile sinterlenen düz dişli çark 1'in mikro yapı görüntüleri.....	162
Şekil 4.122. 30 dakika geleneksel yöntemle sinterlenen düz dişli çark 1'in mikro yapı görüntüleri.....	162

TABLO DİZİNİ

Sayfa

Tablo 3.1. Högenas AHC 100.29 demir tozu kimyasal özellikleri, fiziksel özellikleri ve elek analizi.....	70
Tablo 3.2. Högenas ASC 100.29 demir tozu kimyasal, fiziksel özellikleri ve elek analizi	70
Tablo 3.3. Sinterleme işlemi gerçekleştirilen çeşitli şekil ve boyutlardaki demir esaslı numunelerin içerikleri (% Ağırlık)	71
Tablo 3.4. NC 100.24 saf demir tozu kimyasal, fiziksel özellikleri ve elek analizi ..	72
Tablo 3.5. Distaloy AE tozu kimyasal, fiziksel özellikleri ve elek analizi	72
Tablo 3.6. Distaloy ACu tozu kimyasal, fiziksel özellikleri ve elek analizi	72
Tablo 4.1. Saf demir numunelerin sinterleme öncesi ve sonrası özgül direnç ölçüm değerleri.....	103
Tablo 4.2. % 0,5 Grafit İçerikli demir numunelerin sinterleme öncesi ve sonrası özgül direnç ölçüm değerleri.....	118
Tablo 4.3. İndüksiyon ile 15 dakika süresince Sinterlenen % 3 Cu, % 0,5 Grafit İçerikli demir numunelerde Vickers Sertlik Ölçüm Sonuçları.....	125
Tablo 4.4. İndüksiyon ile 15 dakika süresince Sinterlenen % 3 Cu, % 0,5 Grafit İçerikli demir numunelerde Rockwell-B Sertlik Ölçüm Sonuçları.....	126
Tablo 4.5. % 3 Cu, % 0,5 Grafit İçerikli demir numunelerin sinterleme öncesi ve sonrası özgül direnç ölçüm değerleri	143
Tablo 4.6. Farklı içerikteki numunelerin sinterleme öncesi özgül direnç ölçüm değerleri.....	150
Tablo 4.7. Tüm numunelerin sinterleme sonrası özgül direnç ölçüm değerleri.....	150

TEŞEKKÜR

Lisansüstü eğitimim süresince danışmanlığımı yapan, lisans ve lisansüstü eğitimim boyunca bilgisi, tecrübesi ve kişiliği ile bana örnek teşkil eden ve doktora tezimin her aşamasında bana destek olan hocam Sayın Prof. Dr. Enver ATİK'e, özellikle teşekkürlerimi sunarım.

Bilgi ve tecrübesi ile beni aydınlatan ve bana birçok konuda yol gösteren Sayın Prof. Dr. Rasim İpek'e, çalışmalarım da her zaman yanımda hissettiğim Sayın Doç. Dr. Bekir Sadık ÜNLÜ'ye, çalışmalarım esnasında yardımlarını esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Erhan PESEN'e, Sayın Yrd. Doç. Dr. Gökhan AKPINAR'a ve Sayın Laboratuvar Sorumlusu Gökhan EYİCİ'ye teşekkür ederim.

Doktora tezime 2013-040 ve 2014-040 numaralı projeler ile sağladıkları destekten dolayı CBÜ Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmamda kullandığım metal tozlarını ve preslenmiş parçaları temin etmemde yardımcı olan, çalışmalarım esnasında sürekli irtibatta olduğumuz ve bu süreçte desteğini benden esirgemeyen Sintek A.Ş. ve özellikle Sayın Şahin KAYA'ya ve yine çalışmalarda kullanılan metal tozlarının ve preslenmiş parçaların bir bölümünü temin eden, Toz Metal A.Ş. firmasına ve Aytaç ATAŞ'a teşekkür ederim.

Çalışmalarım sırasında manevi desteğini her zaman hissettiğim değerli eşime ve öğrenim hayatım boyunca destekleyen aileme yürekten teşekkür ederim.

Can ÇİVİ
Manisa, 2016

ÖZET

Doktora Tezi

Toz Metal Parçaların Orta Ve Düşük Frekanslı İndüksiyon İle Sinterlenmesinde Sinterleme Parametrelerinin Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi

Can ÇİVİ

**Celal Bayar Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Prof. Dr. Enver ATİK

Toz Metalurjisi ile parça üretiminin en önemli işlem basamaklarından biri sinterlemedir. Sinterleme, sıkıştırma işlemi gerçekleştirilmiş metal tozlarına, kullanım alanlarında parçalardan istenen mekanik dayanımlarının kazandırıldığı, önemli derecede enerji ve zaman tüketiminin olduğu ısıl işlemdir.

Son yıllarda, üretim proseslerinde zaman ve enerjinin, dolayısı ile maliyetlerin azaltılması önemli bir amaç haline gelmiştir. Bu amaca uygun olarak geleneksel sinterleme yöntemine alternatif yöntemler araştırılmakta ve uygulanmaktadır. Tez kapsamında, daha az süre ve daha az enerji tüketiminin gerçekleştiği indüksiyon ile sinterleme yöntemi araştırılmıştır. Sinterleme prosesine getirdiği avantaj ve dezavantajlar detaylı şekilde incelenerek yöntemin geleneksel sinterleme yöntemine ikame edilebilirliği incelenmiştir.

Çalışma kapsamında toz metal numunelerin üretiminde, saf demir tozu; %0,5 grafit içeren demir tozu ve % 3 Cu, % 0,5 Grafit içeren demir tozu kullanılmıştır. Tez çalışması süresince sinterleme parametrelerinden sinterleme yönteminin, süresinin, sinterleme sıcaklığının ve ön sinterleme uygulanmasının numunelerin mekanik özellik ve mikro yapılarına etkileri incelenmiştir. İndüksiyon ile sinterlemenin etkilerinin anlaşılması amacı ile numuneler geleneksel olarak sinterlenerek, üretilen numunelerin mekanik özellikleri ve mikro yapıları karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda, aynı sinterleme sıcaklığı ve süresinde İndüksiyon ile sinterleme yöntemi ile geleneksel sinterlemeye göre daha iyi mekanik özellik değerlerinin elde edilebileceği görülmüştür.

Çalışma kapsamında öncelikle mekanik deneylere uygun deney numuneleri, farklı bileşimlerde toz ve farklı sinterleme parametreleri uygulanarak geleneksel ve indüksiyon ile sinterleme yöntemleri ile üretilmiştir. Çalışmanın diğer kısımlarında ise farklı şekil ve boyutlardaki preslenmiş toz metal parçaların indüksiyon ile sinterleme yöntemiyle sinterlenmesi başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Toz Metalurjisi, Sinterleme, İndüksiyon ile Sinterleme

2016, 178 sayfa

ABSTRACT

PhD Thesis

Investigation of Effect of Sintering Parameters to Mechanical Properties at Medium and Low Frequency Sintering of Powder Metal Parts

Can ÇIVI

**Celal Bayar University
Graduate School of Applied and Natural Sciences
Department of Mechanical Engineering**

Supervisor: Prof. Dr. Enver ATİK

Sintering is one of the most important steps of the production of powder metal parts. Sintering is a heat treatment which has significant energy and time consumption and it brings into desired mechanical property values of the pressed metal powder according to usage areas.

In recent years, reducing costs by reducing time and energy has become an important goal in the production process. According to this object, alternative methods of conventional sintering are investigated and used. In the thesis, induction sintering method which has low energy and time consumption was investigated. The advantages and disadvantages of this method was investigated in detail and substitutability to conventional sintering was researched.

In the study, pure iron powder; 0.5 % graphite included iron powder and % 3 Cu, % 0.5 graphite included iron powder (by weight) was used. Effect of sintering method, sintering duration, sintering temperature and pre-sintering on mechanical properties and microstructure was investigated. In order to understand the effect of induction sintering, conventional sintering was applied to the samples and micro structural and mechanical properties of samples were compared. As the result of the studies, it was seen that, better mechanical property values were obtained at the same sintering duration and temperature compared to the conventional sintering.

In the study, firstly test samples which has different powder compositions were produced for mechanical testing by induction and conventional sintering methods, with different sintering parameters. In the following sections, the pressed powder metal parts which were different shapes and sizes were produced successfully with induction sintering.

Keywords: Powder Metallurgy, Sintering, Induction Sintering,

2016, 178 pages

1. GİRİŞ

Toz Metalurjisi, metal tozlarının işlemde geçirilerek yararlı mühendislik parçalarına dönüştürülmesi ile ilgilendir. Toz metalurjisinin ana adımları toz teknolojisi, toz işleme ve üretilen malzemelerin özelliklerinin belirlenmesidir [1]. Toz metalurjisi yöntemi tarihte çok eski zamanlarda kullanılmaya başlanan bir teknolojidir. Milattan önce 3000 yılında mısırlılar tarafından demir tozları ve sünger demir, şekillendirme amaçlı kullanılmıştır. Daha sonra çok kullanım alanı bulmayan toz metalurjisi teknikleri 1700'lü yıllardan itibaren tekrar kullanılmaya başlanmıştır [2]. Modern toz metalurji (T/M) teknolojisi tungsten karbürlerin ve gözenekli bronz yatakların üretimi ile 1920'li yıllarda başlamıştır. İkinci Dünya Savaşı sırasında üretim teknikleri ve ürün çeşitliliği bakımından büyük ölçüde gelişmeler yaşanmış ve 1960'lı yıllara kadar özellikle demir ve demir esaslı olmayan kompozitlerin üretimlerinin yaygınlaşması söz konusu olmuştur. Bu tarihten itibaren de toz metalurjisi teknikleri ekonomik üretim ve kendine has özellikleri sebebi ile giderek artan bir kullanım alanına sahip olmuştur [3].

Toz metalurjisi teknikleri ile üretilen parçalar, dişliler, kamlar, burçlar, kesme takımları, poroziteye sahip malzemeler, kendinden yağlamalı yataklar ve segman, valf yatağı, biyel gibi otomotiv parçalarıdır. Gelişen toz metal teknolojileri ile uçak sanayiinde iniş takımı ve motorda kullanılan bazı parçalar da toz metalurjisi yöntemi ile üretilmeye başlanmıştır. Metal veya metal olmayan malzemeler, saf, alaşım ya da karışım halinde toz metalurjisinde kullanılmaktadır. Demir, bakır, alüminyum, kalay, titanyum ve çeşitli refrakter malzemeler, toz metalurjisinde en çok kullanılan malzemelerdir. Tozların alaşımlanmasıyla pirinç, bronz, çelik, paslanmaz çelik gibi malzemeler üretilmektedir. Toz metalurjisi, döküm, plastik şekil verme ve talaşlı imalat gibi bir üretim teknolojisidir. Bu yöntemle üretilen parçalar yüksek boyut hassasiyetine sahiptir ve üretilen parçalar 50 kg ağırlığa kadar ulaşabilmektedir. Ancak genel olarak 2,5 kg ağırlığa kadar olan parçalar bu yöntemle üretilmektedir [4].

Toz metalurjisinin en önemli avantajlarından biri, bir üretim yöntemi olarak işlem adımlarının diğer üretim yöntemlerine nazaran çok daha az olmasıdır. Toz metalurjisi ile üretim genel olarak parçanın istenen şekle sıkıştırılması ve ardından uygun atmosfer ortamında sinterlenmesi proseslerini içerir [5].

Toz Metalurjisinin birçok alanda oldukça geniş bir kullanım alanına sahip olmasının birçok sebebi bulunmaktadır. Karmaşık geometrili parçaların ekonomik olarak üretimi bu metotla gerçekleştirilebilir. Özellikle otomotiv endüstrisinde kullanılan yataklar, supap yuvaları, bujiler, piston kolları, zincir dişlileri ve pek çok parça otomasyona uygun ve hassas boyut toleranslarında üretilebilir. Gözenekli filtreler, sermetler (seramik-metal kompozitleri), tungsten karbürden veya elmas içeren kompozitlerden sert kesici takımların üretilebilmesi, yöntemin üstünlüğü olarak değerlendirilebilir. Bu malzemeleri diğer tekniklerle üretmede yetersizlik söz konusudur. Bir diğer faktör zorunluluk uygulamalarıdır. Bazı malzemelerin diğer tekniklerle üretilmeleri oldukça zordur. Örnekler arasında seramikler, pek çok reaktif ve refrakter metaller, ergitilmesi pratikte uygun olamayan bazı polimerler gibi sert ve yüksek sıcaklık malzemeleri vardır [1].

Tozlar farklı gerilmeler altında sıvılar gibi davranırlar ve şekillendirilebilirler. Bu özelliklerinden dolayı karmaşık şekilli parçalar kolaylıkla üretilebilir. Şekillendirilen tozlar, istenen mukavemete sinterleme yapılmaksızın sahip olamazlar. Sinterleme sıcaklığı malzemelerin ergime sıcaklığına göre belirlenir. Bu nedenle malzeme çeşitleri göz önüne alındığında geniş bir aralıkta sinterleme işlemi gerçekleştirilebilir. Örneğin buz küpleri göreceli olarak düşük sıcaklıklarda sinterlenirken, kil parçaları yüksek sıcaklıkta sinterlenir. Sinterleme parçacıklar arasında bağ oluşmasıyla gerçekleşen ve parçacıkların mukavemet kazandığı ısıl işlemdir. Sinterleme işleminde parçacık yüzey alanının azaltılması ile yüzey enerjisi düşer ve parçacıklar arası bağ oluşur. Genel olarak parçacıklar 1 mm boyutundan küçük, kare, küp, fiber, pul, disk, kar taneleri veya farklı şekillerdeki yapılarıdır. Oluşan bağ farklı atomik seviyedeki taşınım mekanizmaları ile gerçekleşir. Bazı metal ve seramiklerin sinterlenmesinde katı hal difüzyonu aktif haldedir. Alternatif olarak bazı malzemelerde parçacıkların ergimesi ile sıvı faz sinterleme mekanizması aktif hale gelir ve bunun sonucunda katı sıvı karışımı oluşur. Oluşan sıvı faz bağları kuvvetlendirir, kılcal kuvvetleri daha aktif hale getirir ve genellikle kütle taşınım mekanizmalarını hızlandırarak katı hal sinterleme mekanizmasına kıyasla daha gelişmiş yapılar oluşturur. Sinterleme esnasında parçacıklar arası bağ oluşumu ile yapı içerisinde gözenek yapısının değişimi doğrudan ilişkilidir. Ayrıca mukavemet, süneklik, iletkenlik, manyetik geçirgenlik, korozyon direnci gibi özellikler sinterleme ile çok büyük ölçüde değişir [6].

Sinterleme geleneksel olarak sinterleme fırınlarında gerçekleştirilir. Sinterleme fırınlarının çoğu elektriksel ısıtmaya dayanır. Elektriksel ısıtma, enerji üretmek için ısıtma unsurlarından (dirençlerden) geçen yüksek akımı kullanır. Yakma fırınları az da olsa kullanılmaktadır. Yakma fırınlarında hidrokarbonların oksijen ile reaksiyon ısısından yararlanır. Geleneksel ısıtmanın yanı sıra son zamanlarda yeni ısıtma teknikleri üzerinde çalışmalar sürmektedir. Yeni ısıtma teknikleri arayışı, sinterleme işlemini hızlandırmak ya da homojen taşınım ile sinterleme verimliliğini artırmaya dayanır. İndüksiyon ile ısıtma, mikrodalga ısıtma, plazma ısıtma, elektriksel boşaltım ısıtma, lazer ısıtma bu amaca uygun olarak geliştirilen yeni sinterleme teknikleridir. Isıtmanın hızlı gerçekleşmesi sayesinde enerji tüketiminin azaltılması ile birlikte numunenin iç ve dış bileşenleri arasındaki ısı farklarını azaltarak, ısı taşınımı sorunundan dolayı parçadaki olumsuzlukları azaltma etkileri de bu teknikler üzerindeki arayışların nedenlerindedir [6].

İndüksiyon ile sinterleme yönteminin en önemli avantajı malzemenin teorik yoğunluğuna yakın yoğunluk elde edilmesi ve tane büyümesinin geleneksel sinterleme yöntemine oranla önemli ölçüde engellemesidir [7]. Özellikle nano yapıdaki kompozitlerin sinterlenmesi prosesinde geleneksel sinterleme yöntemi büyük ölçüde tane büyümesine yol açmaktadır. Yüksek frekanslı indüksiyon ile sinterleme gerçekleştirildiğinde teorik yoğunluk değerlerine çok yakın yoğunluk değerleri, çok daha kısa sinterleme sürelerinde elde edilmektedir [8]. Yüksek frekanslı indüksiyon ile sinterleme (HFIHS) seramik ve kompozit üretimi için son yıllarda geliştirilen yeni bir hızlı sinterleme yöntemidir [9-12]. Bu yöntemde numune üzerine basınç ile yüksek sıcaklık, kısa süre içerisinde birlikte uygulanır. Yüksek frekanslı sinterleme esnasında numune ve numunenin tutulduğu grafit kalıp üzerinde büyük bir akım indüklenir ve sonuç olarak numune uniform ve hızlı bir şekilde sinterlenmiş olur [13]. Yüksek frekanslı indüksiyon ile sinterleme uygulamalarında kullanılan düzeneğin şematik gösterilişi İndüksiyon ile sinterleme uygulamaları kısmında yer almaktadır.

İndüksiyonla sinterleme daha önce yapılan çalışmalarda genel olarak yüksek frekanslı indüksiyon cihazlarında presleme ile aynı anda gerçekleştirilmiştir. Yapılan uygulamalarda benzer düzenekler kullanılmış ve sinterleme prosesi, presleme ile aynı anda gerçekleştirilmiştir [7-29]. Yüksek frekanslı sinterleme çalışmalarında

sinterleme vakum ortamında gerçekleştirilmektedir. Vakum, toz malzemeyi atmosferin olumsuz etkilerinden korumaktadır. Presleme esnasında uygulanan sinterleme ile sıcak presleme uygulamasına benzer olarak geleneksel sinterlemeye oranla çok daha büyük yoğunluklar elde edilebilir [30]. Sinterleme esnasında numunenin kendini çekmesi bir “strain gauge” yardımıyla ölçülmektedir. Sinterleme sıcaklığı grafit kalıp yüzeyine odaklanmış bir sıcaklık ölçer ile (Pirometre) ölçülmektedir. Numune kalıbın içerisinde yer almaktadır. Bu yöntemle başta nano seramikler ve nano kompozitler olmak üzere birçok malzemenin sinterleme işlemi gerçekleştirilmiştir [31].

Literatürde 1-50 kHz arası frekanslara orta, 50 kHz'den yüksek frekanslara yüksek frekans adı verilmektedir [32]. Yüksek frekanslı indüksiyon ile presleme esnasında sinterleme işleminin yukarıda sayılan avantajlarının yanısıra, yöntemin bazı dezavantajları da mevcuttur. Sıcaklık ölçümü dışarıda kalan kalıp üzerinden yapıldığından numunenin gerçek sıcaklık değerlerini yansıtmama olasılığı yüksektir. Bunun yanı sıra, numunelerin presleme basıncı, grafit kalıbın dayanımı ölçüsündedir. Bu nedenle yalnızca düşük basınçta preslenen malzemelerin sinterleme işlemlerine uygun bir işlemdir. Yöntemle yalnızca küçük boyutlu deney numunelerinin sinterlenmesi mümkün olabilmektedir. Yöntem ile farklı şekillerde numunelerin sinterlenmesi ve ön sinterleme uygulamasının yapılması zordur. Ayrıca her seferinde tek bir parça sinterlenmektedir.

1.1 Tezin Amacı

Tez çalışmasında ana amaç, demir esaslı malzemelerde orta ve düşük frekanslı indüksiyon ile sinterleme işleminin mekanizmasının irdelenmesidir. Orta ve düşük frekanslı indüksiyonla sinterlemenin gayesi, sinterleme esnasında toz metal malzemelerin tüm kesitinin hızlı şekilde ve üniform olarak ısınmasını sağlamaktır. Daha önce yapılan çalışmalarda [33, 34], indüksiyon ile sinterleme işleminin demir esaslı malzemelere uygulanabildiği gösterilmiştir. Ancak yapılan çalışmalarda numunelerde noktasal ergime, yapıda bozulmalar ve sinterlenen numunelerin birbirine kaynaklanması gibi olumsuzluklarla karşılaşmıştır. Sistemin seri imalata uygun olmaması gibi birtakım eksiklikler bulunmaktadır. Tez kapsamında, işlemin toz metal malzemelere getirdiği avantaj ve dezavantajlarının detaylı şekilde ortaya koyulması yönünde çalışmalar gerçekleştirilmiştir. İndüksiyon ile ısıtma işleminin

numune üzerinde oluşturduğu etkiler incelenmiş, farklı sinterleme parametrelerinin numune dayanımına ve mikro yapısına etkileri ortaya koyulmaya çalışılmıştır.

Daha önceki çalışmalardan farklı olarak tez kapsamında indüksiyon ile sinterleme işleminde iki ayrı indüksiyon cihazı ile ön sinterleme ve sinterleme işlemleri gerçekleştirilmiştir.

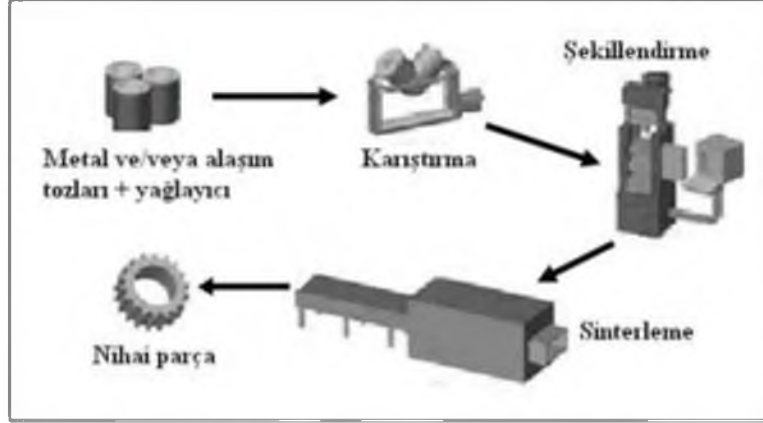
Tez çalışmasının diğer bir amacı, indüksiyon ile sinterleme işlemini seri imalata uygun hale getirmektir. Konveyör bantlı, PLC hız kontrollü, 2 adet lazerli pirometre ile sıcaklıkların ölçülüp sabit tutulduğu indüksiyon ile sinterleme düzeneği oluşturulmuş, böylece işlem seri imalata uygun hale getirilmiştir. Sistem farklı sıcaklık ve sürelerde sinterleme işlemine izin vermektedir. Sistemde, tüm numune kesitinde uniform ısıtmanın olabilmesi amacı ile düşük ve orta frekanslı indüksiyon cihazları (2,5 kHz, 45 kHz) kullanılmıştır.

Çalışmanın ayrıca amacı, deney numunelerinin yanı sıra dişli çark, burç gibi çeşitli otomotiv ve makine parçalarında kullanılan toz metal parçalarının sinterlemesinin indüksiyon ile ısıtma yöntemiyle gerçekleştirilmesidir. Farklı boyut ve şekildeki birçok toz metal parça, yöntemle başarılı şekilde sinterlenmiş, üretilen parçaların mekanik dayanım ve mikro yapıları geleneksel sinterleme yöntemi ile elde edilen değerler ile karşılaştırılmıştır. Yapılan incelemeler sonucunda indüksiyon ile sinterleme yöntemiyle daha az süre, hacim ve enerji tüketimi ile daha iyi mekanik özellik değerleri elde edilmiştir.

2. GENEL BİLGİLER

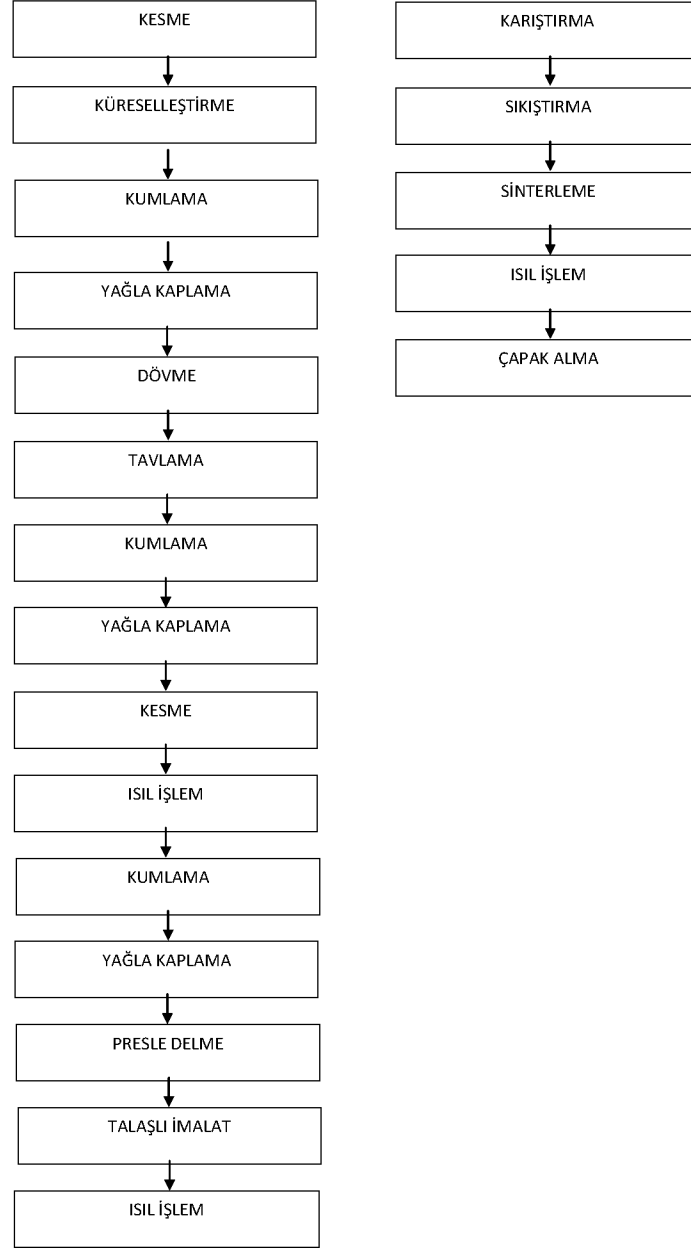
2.1. Toz Metalurjisi İle Parça Üretimi İşlem Adımları

Genel olarak toz metalurjisinde parça üretim adımları Şekil 2.1’de verilmiştir.



Şekil 2.1. Toz metal parça üretimi genel akış şeması [35].

Toz metalurjisi, diğer üretim yöntemlerine göre işlem adımları daha az olan bir üretim teknolojisidir. Şekil 2.2’de örnek olarak otomotiv endüstrisinde üretilen bir parçanın dövme yöntemi ile toz metalurjisi yöntemleriyle üretim aşamaları karşılaştırılmalı olarak verilmiştir [5].



Şekil 2.2. Örnek bir parça için dövme ile toz metalurjisi proseslerinin karşılaştırılması [5]

Toz metalurjisinde iş akış adımları Şekil 2.3'te gösterilmiştir. Toz teknolojisinin ilgi alanı, tozların yapısı, şekli, üretim teknikleri, sınıflandırılması, karakterizasyonu ve tozların taşınmasıdır. Toz işleme, sıkıştırma, şekil verme ve sinterlemeyi kapsar [1].



Şekil 2.3. Toz metalurjisi işlem adımları [1]

Toz metalurjisinde ilk aşama, tozların üretilmesidir. Bir tozun nasıl üretildiğinin bilinmesi o tozun boyut ve şekli gibi özelliklerinin başlangıçta tahmin edilmesini sağlar [1]. Bundan dolayı öncelikle toz üretim yöntemlerine ve sonrasında toz metal parçaların bu metal tozlarından nihai ürün haline getirilmesi için gerçekleştirilen işlemlere değinilmiştir.

2.1.1. Toz Üretim Yöntemleri

Hemen hemen her malzeme toz haline getirilebilir. Fakat belli bir malzemeyi toz haline getirmek için yöntem; maliyet, tepkimeler ve istenilen özellikler gibi faktörlere göre belirlenir. Toz üretim yöntemleri;

1. Mekanik üretim yöntemleri
2. Elektrolizle üretim yöntemleri
3. Kimyasal üretim yöntemleri
4. Atomizasyon yöntemleri
5. Buharlaştırma yöntemleri

Şeklinde sınıflandırılabilir [1]. Bir metal tozunu üretmek için bu tekniklerden birkaçı bir arada da kullanılabilir. Örneğin kimyasal indirgenerek üretilen tozlar sonradan öğütülerek daha da küçültülebilirler [36]. Toz üretim yöntemleri, aşağıda kısaca açıklanmıştır.

2.1.1.1. Mekanik Üretim Yöntemleri

Talaşlı üretim; öğütme, mekanik alaşımlama ve diğer darbeli teknikler olmak üzere dört grupta incelenebilir.

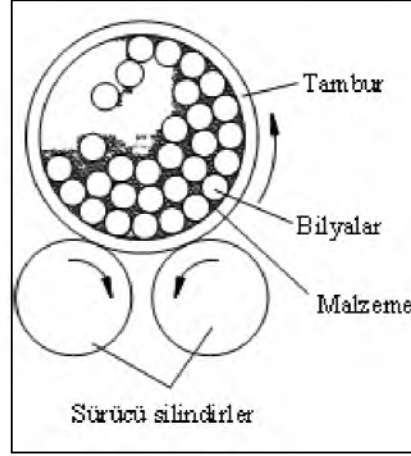
2.1.1.1.1. Talaşlı Üretim

Malzemelerin talaşlı imalatı sonucunda düzensiz şekilli iri tozlar elde edilir. Metal işleme tekniklerinde çok miktarda ortaya çıkan bu talaş hurdaları, metal tozu için büyük bir kaynaktır. Bu hurdalar kimyasal tekniklerle temizlenir ve boyut küçültmek için öğütülürler. Öğütme ile parçacık boyutu ve şekli değiştirilir. Hava ve işleme sıvılarından kaynaklanan kirlilikleri de içeren toz özelliklerinin kontrolünün zayıflığı, bu tekniğin olumsuz yönüdür. Talaşlı imalat toz üretimi için birinci seçenek değildir, verimsiz ve yavaştır fakat elde edilen talaş hurdalarının değerlendirilmesinde uygun bir yöntemdir. Talaşların öğütülüp toz haline getirilmesinde Şekil 2.4'te gösterilen bilyalı öğütme değirmenleri kullanılabilir [1].

2.1.1.1.2. Öğütme

Öğütme hem bir metal tozu üretim tekniğidir, hem de diğer tekniklerle üretilmiş ancak kümeleşmiş tozların kırılması için kullanılır. Öğütme en çok bilyalı değirmenlerde yapılmaktadır. Önceden kaba şekilde kırılmış öğütülecek metal, içinde büyük çaplı sert ve aşınmaya dirençli bilyaların bulunduğu kaba yerleştirilir. Kap dönerek veya titreştirilerek bilyaları harekete geçirir. Bilyaların çarpışması sırasında tozlara ne olacağı parçacığın özelliğine bağlıdır. Parçacık gevrek ise çarpışma neticesinde çok küçük tozlara bölünür. Ancak, parçacık sünek ise çarpışma neticesinde şekil değiştirerek yassılaştır. Sünek maddeler gevrekleşerek küçük tozlara bölündüklerinden bunların öğütülmeleri uzun sürer. Öğütmenin bir sıvı içinde ıslak yapılması hem öğütme süresini kısaltır, hem de daha ince toz elde edilmesini sağlar. Sıvı olarak, su, alkol ve herhangi bir hidrokarbon bileşiği kullanılabilir [36].

Öğütmeyle elde edilen tozlar sert, düzensiz şekilli, zayıf akma ve paketlenme özelliğine sahiptir [1].



Şekil 2.4. Bilyalı öğütme [1]

2.1.1.1.3. Mekanik Alaşım

Mekanik alaşım yönteminde, çeşitli element tozları karışımı bilyeli değirmene konularak, mikroskobik ölçekte çarpışma, soğuk kaynak ve kırılma olayları oluşturulur. Bu sayede farklı bileşimlerdeki, mekanik olarak alaşımlandırılan tozların üretimi gerçekleştirilir. Başlangıçta karışım halinde olan parçacıklar, fazların dağılımı ile kaplanmış parçacık haline gelirler. Şekil 2.5'te mekanik alaşım şematik olarak görülmektedir. Yöntemle elde edilen tozlar aşırı sertleşmiş ve köşeli yapıdadır [1].



Şekil 2.5. Mekanik alaşımlama [1]

2.1.1.1.4. Diğer Darbeli Teknikler

Gevrek malzemeler için yüksek hızlı gerinme darbesi uygulayan toz üretim teknikleri de bulunmaktadır. Çeneli kırıcılar ile parçacık boyutları 1 mm' ye kadar indirilirken parçacık boyutunu daha da küçültmek amacıyla sert kanatçıklı yüksek hızlı darbeli öğütücüler kullanılabilir [1].

2.1.1.2. Elektrolizle Üretim Yöntemleri

Çeşitli metallerin tozları elektroliz yöntemiyle elde edilebilir. Elektroliz hücresinde, katot üzerinde metal birikmesi ya gevşek bağlantılı tozlar halinde veya sıkı ancak gevrek bir tabaka halinde oluşur. Her iki halde de, katotta toplanan metal kolaylıkla öğütülerek ince toz haline getirilebilir [36]. Yöntemin ana üstünlüğü yüksek ürün saflığıdır. Yöntemle üretilen tozlar genelde dendritik ve süngerimsi yapıdadır [1].

2.1.1.3. Kimyasal Üretim Yöntemleri

Metal tozlarının kimyasal yöntemle üretimi, metal oksitlerin (demir, bakır, tungsten, molibden, nikel ve kobalt) CO veya hidrojen gibi indirgeyici gazlarla oksitlerinden kimyasal olarak indirgenmesi esasına dayanır [37]. Kimyasal yöntemle

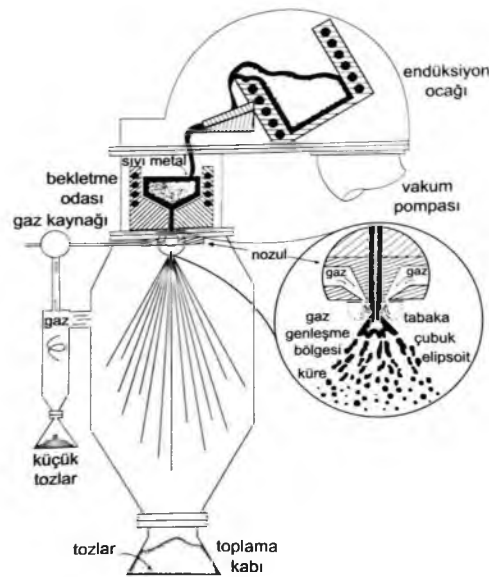
üretilen sünger-demir tozu bu yöntemin önemli bir uygulama örneğidir. Sünger demir, demir oksit cevherinin uygun nitelikte indirgeyici elemanlarla indirgenerek süngerimsi bir kütleye dönüştürülmesiyle elde edilir [36].

2.1.1.4. Atomizasyon Yöntemleri

Atomizasyon, bir sıvı demetinin farklı boyutlardaki çok sayıda damlacıklara ayrılmasıdır. Damlacıklar donarak parçacık haline gelirler [38]. Metal tozlarının üretiminde atomizasyon yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Yöntem, yüksek saflıkta metallerin ya da ön alaşımlı tozların elde edilebilmesine imkân verdiği için yaygın olarak kullanılmaktadır [3]. Paslanmaz çelik, pirinç, demir, alüminyum, çinko, kalay ve kurşun gibi metal ve alaşım tozlarının üretilmelerinde yöntem oldukça iyi sonuçlar vermektedir [39]. Gaz atomizasyonu, sıvı ve su atomizasyonu, savurmalı atomizasyon, plazma atomizasyonu ve diğer yöntemler atomizasyon teknikleridir.

2.1.1.4.1. Gaz Atomizasyonu

Hava, azot, argon ve helyumun sıvı metal demetini parçalayan gaz olarak kullanılması, gaz atomizasyonu olarak adlandırılır. Sıvı malzeme, nozul çıkışında parfümün püskürtülmesi gibi hızlı gaz genişlemesi sayesinde parçalanır [1]. Gaz atomizasyonu yönteminin gösterilişi Şekil 2.6'da görülmektedir.

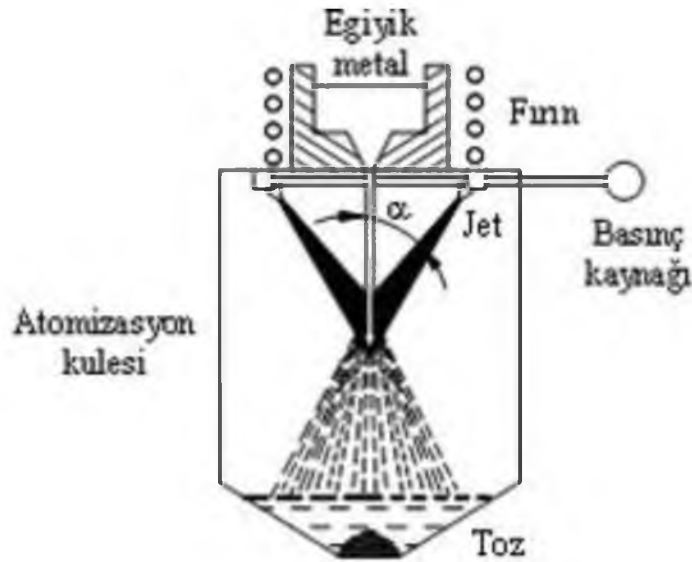


Şekil 2.6. Gaz atomizasyonu [1]

Gaz atomizasyonu tamamen asal gaz ortamında gerçekleştirilebilir ve böylece yüksek saflıkta toz elde edilebilir [1]. Ancak asal gazların kullanıldığı durumda yöntem pahalı bir yöntem haline gelir [3]. Parçacık şekli küreseldir ve genellikle geniş boyut dağılımlıdır [3]. Çoğunlukla 10 mikrometrenin üzerinde boyutlarda parçacık üretilir. Küresel gaz iyi paketleme özelliği sağlar [1].

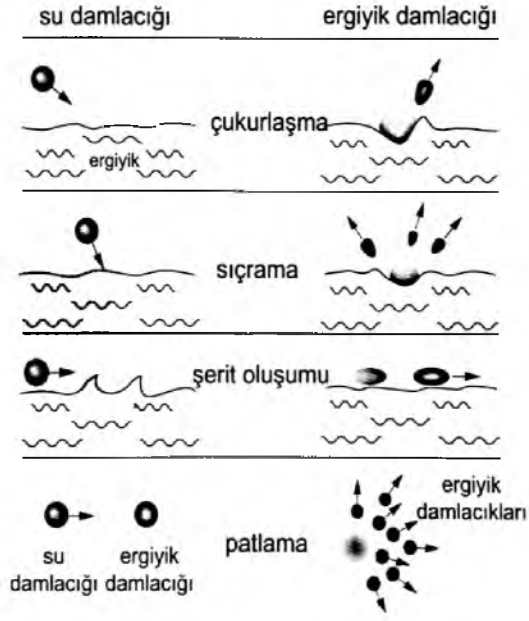
2.1.1.4.2. Sıvı ve Su Atomizasyonu

Gaz atomizasyonu yönteminde kullanılan gaz yerine, su veya sıvı ile tozların parçalanarak üretiminin gerçekleştiği yöntem sıvı veya su atomizasyonu adı verilir. Yöntemin şematik gösterimi Şekil 2.7’de görülmektedir.



Şekil 2.7. Sıvı atomizasyonu [37]

1600 °C’den düşük sıcaklıklarda ergiyen az reaktif malzemeler için su kullanılır. Yöntemde yüksek basınçlı su jetleri eriyik demetine gönderilerek ergimiş metali parçalar ve parçaların hızlı katılaşmasını sağlar. Yöntem gaz atomizasyonuna benzer ancak farklı olarak parçacıklar daha hızlı soğur [1, 3, 36]. Su atomizasyonunda parçacık oluşumu Şekil 2.8’de görülmektedir.

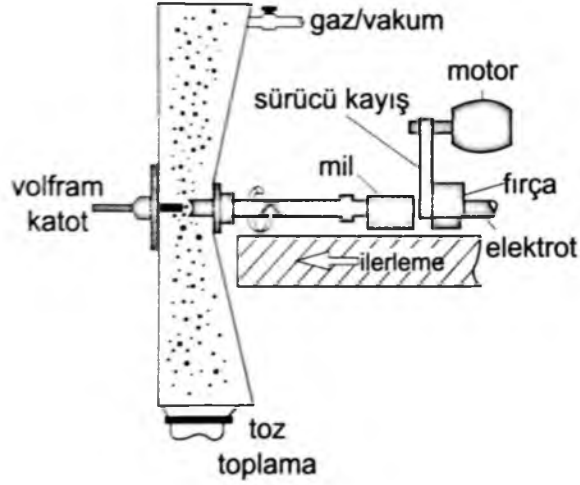


Şekil 2.8. Sıvı atomizasyonu ile parçacık oluşumu [1]

Hızlı soğutma nedeni ile su atomizasyonu yöntemiyle üretilen parçacıkların şekli düzensiz ve pürüzlüdür. Birçok malzeme su ile tepkimeye girdiği için işlem sonrası tozların temizlenmesi gerekir. Sentetik yağların kullanılması bunu bir miktar engeller. Özellikle maliyetin düşük olmasından dolayı, toz üretiminde yöntem geniş bir aralıkta kullanılmaktadır [1]. Su çok iyi bir soğutucu olduğundan, gaz atomizasyonu tankları 6 metre civarında iken, suyla atomizasyon tankları 1 metre civarında uzunluklara sahiptir [36].

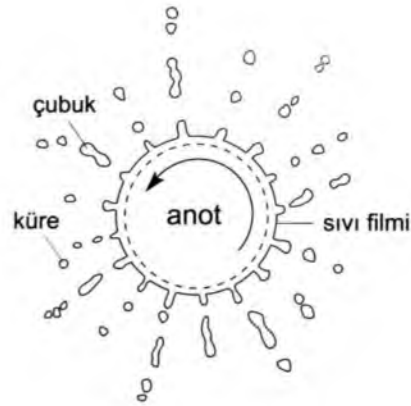
2.1.1.4.3. Savurmalı Atomizasyon

Savurmalı atomizasyon, eriyiğin döndürülmesi sonucu parçacıkların savrulması ve katılaşması sonucu toz üretimi esasına dayanır. Merkezkaç kuvveti erimiş malzemeyi damlacıklar halinde fırlatır ve parçacıklar soğuyarak katılaşır. Şekil 2.9'da yöntemin şematik gösterimi yer almaktadır.



Şekil 2.9. Döner elektrot ile savurmalı atomizasyon yöntemi [1]

Şekil 2.10'da parçacık oluşumu görülmektedir. Savurmalı atomizasyon yöntemi ile yüksek paketlenme yoğunluğu ve kolay akış özelliklerine sahip temiz ve küresel şekilli parçacıklar oluşturulur. Ancak düşük üretim hızı, yüksek donanım, yüksek işletme maliyeti ve büyük parçacık boyutu elde edilebilmesi yöntemin olumsuz yönleri olarak göze çarpmaktadır [1].



Şekil 2.10. Döner elektrot ile sıvı filminin parçalanması ve küresel parçacık oluşumu[1]

2.1.1.4.4. Plazma Atomizasyonu ve diğer atomizasyon yöntemleri

Plazma atomizasyonu yönteminde tel veya iri tozlar, plazma üflecine beslenerek burada ergitilir ve ani ivmelendirilir. Ergimiş damlacıklar üflecine dışına püskürtülerek katılaştır. Alaşım üretmek amacı ile de bu yöntem kullanılabilir.

Kullanılacak tozlar karıştırılıp topaklandırılarak plazma içerisinde ergitilirse plazma arkının yüksek hızı ve sıcaklığı sayesinde alaşımli toz elde edilebilir [1]

Vakum atomizasyonu yöntemi, basınçlı gaz altındaki sıvı metale ani olarak vakum uygulanması sonucu gazın genişmesi ve metalin atomize olmasıyla gerçekleştirilen bir yöntemdir [40].

Ultrasonik gaz atomizasyon yönteminde, yüksek basınçlı gaz rezonans boşluklarının birinden diğerine ivmelendirilerek ultrasonik ses dalgaları oluşturulur. Yüksek katılma hızına bağlı olarak çok ince ve küresel şekilli tozlar üretilir [41]. Bunların haricinde eriyiği enerji aktararak parçalamak amaçlı kullanılan atomizasyon yöntemleri de bulunmaktadır [1].

2.1.1.5. Buharlaştırma Yöntemleri

Buhar fazından homojen çekirdeklenme ile tozların oluşturulmasına dayanan tekniklerdir. Nano ölçekli parçacıkların oluşturulmasında çok yararlıdır. Günümüzde 0.01µm boyuta kadar çeşitli tozlar bu yöntemle üretilmektedir. Atmosfer basıncının % 10'u civarında düşük basınçlı argon içinde malzemeler buharlaştırılır. Düşük basınçta, ısı kaynağından uzaklaştıkça sıcaklık hızla düşer, böylece buharlaşan malzeme ısı kaynağından uzaklaştıkça soğur ve aşırı soğutulmuş olur. Sonuçta küçük katı parçacıklar buhardan doğrudan çekirdeklenir. Bu parçacıklar soğuk bir altlık üzerine toplanır. Buhardan üretilen parçacıkların ilgi çekici tarafı yüksek saflık ve küçük boyutu bir arada sunmasıdır. Bu yaklaşım bakır, gümüş, altın platin, kobalt ve çinko gibi birçok metalin oluşturulmasında uygulanmaktadır [1].

2.1.2. Tozların Karıştırılması

Toz üretim teknikleri vasıtası ile üretilen tozlar, yeni bileşimler oluşturmak üzere karıştırılır. Karıştırılmış tozlar, sinterleme esnasında homojen bir alaşım elde edilmesini sağlar [1]. Bu işlemten önce toz boyutunun ve dağılımının tespiti amacıyla elek analizi gibi işlemler gerçekleştirilebilir. Toz boyut dağılımının bilinmesi, taşıma yoğunluğu, akışkanlık, birleştirilebilme özellikleri, sinterleme oranı, boyutsal değişim ve mukavemet gibi özelliklerin, tozun boyut dağılımına direkt olarak bağlı olmasından dolayı önemlidir. Toz metal sanayiinde parçacık

boyut dağılımında en yaygın kullanılan metot elemedir. Toz parçacıklar farklı aralıklardaki elek açıklıkları ile mekanik olarak sınıflandırılırlar. Elekler geçergeçmez mastarı gibi görev yaparlar [1]. Bunun haricinde tozların üzerindeki kirlilikleri giderebilmek amacı ile tavlama işlemi gerçekleştirilebilir [3,42].

Tozların karıştırması ve harmanlaması, sıkıştırma öncesi sıklıkla uygulanır. Her iki işlem de tozları homojen kütle haline getirir. Harmanlama, farklı boyutlarda aynı bileşime sahip malzemelerin karıştırılma işlemi, karıştırma ise farklı bileşime sahip tozlara uygulanan işlemdir [1,3].

Toz şekillendirmede yağlayıcı, bağlayıcı ve topaklayıcı adı verilen organik polimer maddeler kullanılabilir. Yağlayıcılar, presleme sonrası kalıptan parça çıkarmak için gerekli gerilmelerin azaltılmasını sağlayan maddelerdir. Şekillendirme esnasında kalıba karşı viskoz bir tabaka oluşturarak sürtünmeyi azaltırlar. Genel olarak % 0,4 ile % 1,5 oranında katılırlar. Öğütülmek veya atomize edilmek sureti ile küçük parçacık boyutuna indirilerek katı olarak tozlara eklenen yağlayıcıların en yaygın kullanılanı stereat tozlarıdır. Toz sertliği ve kalıp aşınması artarsa gerekli yağlayıcı miktarı da artar. Bağlayıcılar ise etkili yapıştırıcılar olup ham kütlelerin dayanımını sağlarlar. Ucuz olmaları ve kolayca uzaklaştırılmaları nedeniyle mum benzeri polimerler bağlayıcı olarak kullanılır. İyi bağlayıcılar kolay dağılma, kararlı vizkosite, tozlara yapışma ve şekillendirilmiş parçalara iyi dayanım sağlama özelliklerini gösterir. Topaklayıcılar ise küçük tozları küresel şekilde topaklayıp kalıp boşluğunu homojen doldurma amaçlı kullanılabilir [1].

Sonuç olarak karıştırmanın amacı parçacık dağılımının homojen olmasını, presleme öncesi eklenen ve sinterleme sonrası parçadan uzaklaştırılacak olan yağlayıcı vb. maddelerin homojen olarak toz karışımına eklenmesini ve parçacıkların sonraki aşama olan sıkıştırma işlemine hazır olmasını sağlamaktır.

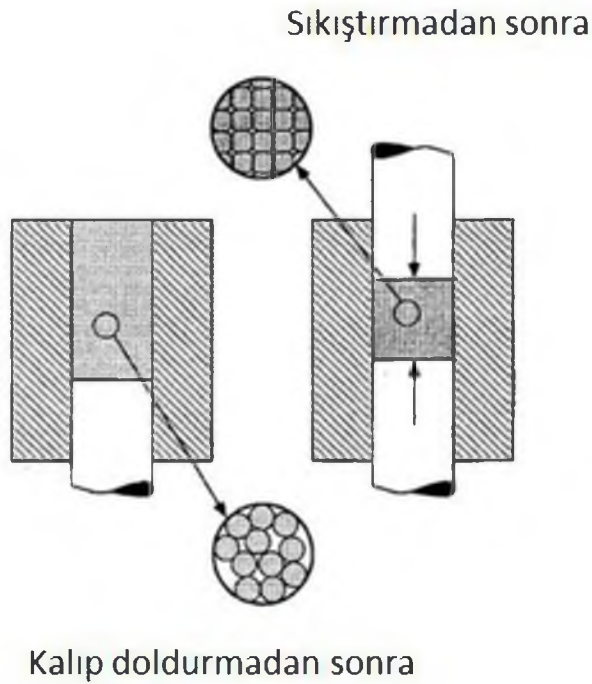
2.1.3. Presleme

Tozlar, arzu edilen şekil ve yoğunluğa sıkıştırma veya şekillendirme işlemleri vasıtası ile getirilir. Toz parçacıklar soğuk olarak veya sıcak presleme yöntemleri ile preslenebilir. Bunun haricinde istenen şekil ve yoğunluk enjeksiyon kalıplama, ekstrüzyon, haddeleme ve ergitme yöntemleri vasıtası ile de elde edilebilir [43]. Toz

sıkıştırmanın ana amaçları 4 madde halinde incelenebilir. Toz sıkıştırmanın birinci amacı tozları istenen şekilde birleştirebilmektir. İkinci amacı sinterleme sonrasında meydana gelecek olan boyutsal değişimi minimuma indirmektir. Üçüncü amacı gözenekliliği istenen seviyelerde tutmaktır. Son amacı ise sinterleme öncesindeki taşıma için parçaya gerekli dayanımı sağlamaktır [3].

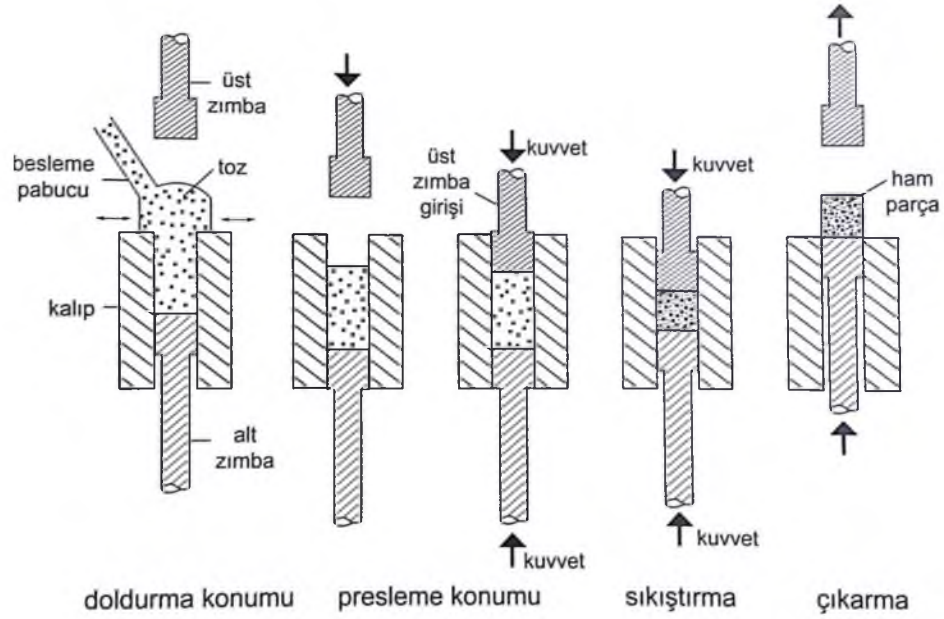
Tozları şekillendirmenin en yaygın yöntemi kalıpta sıkıştırma"dır. Kalıpta sıkıştırma, bir tozu istenilen şekle getirmek için alt ve üst zımbalar yardımı ile basınç uygulama suretiyle yapılan presleme işlemidir. Parça, sıkıştırma işlemi ile elle tutulabilir bir mukavemet kazanmış olsa da, esas mukavemet sinterleme işleminden sonra kazanılabilir [1].

Toz sıkıştırma kademeleri Şekil 2.11'de görülmektedir.



Şekil 2.11. Toz sıkıştırma kademeleri [43]

Şekil 2.12'de kalıpta presleme çevrimi görülmektedir. Kalıpta presleme çevriminde kalıp boşluğuna tozlar doldurulur, üst zımba kalıba girer, üst zımba veya alt ve üst zımbanın ikisinin birden yardımı ile sıkıştırma gerçekleştirilir. Daha sonra üst zımbanın geri çekilmesi ile ham parça kalıptan çıkartılır.



Şekil 2.12. Tozların preslenmesi [1]

Sıkıştırma genellikle mekanik preslerde yapılır. Kalıpta presleme işlemlerinde ekzantrik ve hidrolik presler kullanılmaktadır.

Sıkıştırma ve şekillendirme, sonuç olarak, gevşek tozu taşınabilecek mukavemette olan parçaya dönüştürür. Genellikle sıkıştırma tek eksenli presleme işlemleri ile gerçekleştirilir. İzostatik presleme işlemi de büyük ve karmaşık parçaların sinterlenmesinde kullanılan ve sızdırmaz esnek bir kalıp içerisinde bulunan tozun, bir sıvı ile sıkıştırılmasına dayanan yöntemdir. Bunun haricinde yoğunluğun daha da artırılması için ılık ve sıcak presleme gerçekleştirilebilir. Tipik sıkıştırma basınçları 200-700 MPa aralığındadır ve tozların sıkıştırılmasında genel olarak presleme ve kalıptan çıkarma esnasında kalıp aşınmasını engelleme ve yoğunluk farklarını azaltma amacı ile parçacık yapıdaki ve genellikle sıkıştırma öncesi tozla karıştırılan polimer yağlayıcılar kullanılır [1, 3].

2.1.4. Sinterleme

Sinterleme işlemi binlerce yıldır bilinmektedir [44]. İlk sinterlenmiş ürünler açık ocaklarda pişirilmiş ve mukavemet kazandırılmış tuğlalardır. Günümüzde bile beyaz seramik eşyalar, refrakterler, tuğlalar, aşındırıcılar, porselenler ve inşaat malzemelerinin üretiminde sinterleme birincil üretim prosesidir. Milattan önce 300

yıllarında İnkalar ve Mısırlılar tarafından üretilen altın-platin takı eşyaları sinterlenerek üretilmiştir. Başka bir örnek ise Hindistan'da milattan sonra 300 yılında üretilen yaklaşık 6,5 ton ağırlığındaki ve demir oksit indirgenmesi ile üretilen Delhi sütunlarıdır. Sinterlemenin modern çağı Coolidge olarak bilinen Edison'un Tungsten tozlarından ürettiği dayanıklı lamba filamentleri ile başlar ve karbürler, gözenekli bronz yataklar, elektrik izolatörleri ve bakır-grafit elektrik kontakları ile devam eder. 1900'lü yıllardan sonra özellikle teknik seramiklerin üretiminde sinterlemenin kullanılması, sinterlemenin gelişimi açısından önem arz etmiştir. Günümüzde diş implantları, roket başlıkları, yarı iletken malzemeler, golf çubukları, amortisör pistonu, hız kutusu senkromeşleri, zincir dişlileri, çeşitli sektörlerde kullanılan dişliler ve daha yüzlerce parça sinterleme ile kolaylıkla üretilebilmektedir [6, 36].

Sinterleme işlemi atomik ölçekte oluşan kütle taşınım olayları aracılığı ile basınç altında sıkıştırılmış ya da basitçe şekil verilmiş parçaların ısı etkisi altında kimyasal bağlar yaparak, parçacıkların ağırlıklı olarak katı bir yapıya dönüştürüldüğü ısıl işlemdir. Bu bağlanma, mukavemeti artırırken sistem enerjisini düşürür [3, 6]. Sinterleme genel olarak tekrarlanabilir parça üretimini amaçlar. Bunun yanında sinterleme parametrelerinin kontrolü ile istenen mikroyapı özelliklerinin elde edilmesi amaçlanır. Mikroyapı kontrolü tane büyüklüğü, dağılımı, sinterlenmiş yoğunluk ve fazların kontrolünü belirtmektedir. Birçok durumda amaç mümkün olabilecek en yüksek yoğunluk değerlerinin elde edilmesidir. Genel olarak sinterleme katı hal ve sıvı hal olmak üzere iki ana gruba ayrılır. Katı hal sinterleme, toz parçacıkların tamamen katı halde yoğunlaşmasını ifade ederken, sıvı faz sinterlemede fazlardan herhangi biri sinterleme esnasında sıvı halde bulunur [45].

Sinterleme, yüksek sıcaklıkta atomların yayınımları ve küçük parçacıkların yüzey enerjisinin azalmasıyla gerçekleşir [1]. Yüzey enerjisi genellikle yüzey alanı ile değerlendirilir. Küçük parçacık, yüksek yüzey alanlarına sahiptir ve bu parçacıklar sinterlemenin daha hızlı gerçekleşmesini sağlayan yüksek enerjilere sahiptirler. Mikroyapısal ölçekte parçacık temas noktalarında boyun büyümesi sinterlemede bağ oluşumunun bir kanıtıdır. Şekil 2.13'de Sinterlenen parçacıklar arasındaki katı hal boyun oluşumunun, taramalı elektron mikroskobu ile çekilmiş

fotoğrafi görülmektedir. Parçacıklar yüzey enerjisini ortadan kaldıran atomik düzeydeki olaylar ile sinterlenir.



Şekil 2.13. Sinterlemede boyun oluşumu [6]

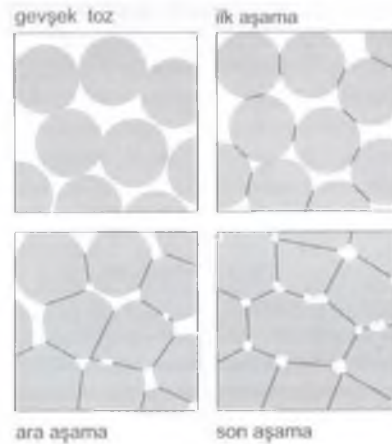
Toz üretimi, malzemeye enerji vererek yüzey alanı veya yüzey enerjisi oluşturma işlemidir. Sinterleme ile bu yüzey enerjisi giderilir. Birim hacimdeki yüzey enerjisi parçacık boyutu ile ters orantılı olduğundan küçük boyutlu parçacıklar daha hızlı sinterlenir. Fakat yüzey enerjisinin tamamı sinterlemeye harcanmaz. Kristal yapı katılarda, hemen hemen bütün parçacık temas noktalarının sınırlarını, yüksek enerjiye sahip olan tane sınırları oluşturur. Bu malzemelerde boyun büyümesi yüzey enerjisini azaltırken, tane sınırını enerjisini artırır [1]. Çoğu inorganik toz için tane sınırlarının yanı sıra serbest yüzeyler üzerinden akış veya kristal kafes mertebesindeki difüzyon mekanizması baskındır. Diğer mekanizmalar buhar taşınımı, plastik akış, vizkoz akış ve dislokasyon tırmanmasıdır. Çoğu malzeme için sinterleme esnasında bir mekanizma baskın olmakla birlikte genel olarak sinterleme bir çok işlemin aynı anda meydana gelmesi ile oluşur [6].

Sinterlemede parçacıklar ile kütle akışı arasında doğal bir itici güç vardır. Sinterleme gerilmesi küçük toz boyutlarında fazladır, fakat sinterleme mevcut gerilmeye tepki verecek kütle akışı gerektirir. Sıcaklık ile beraber atom hareketi gerilme ve akışı yönetir. Bir batarya düşünülürse bataryanın sahip olduğu voltaj sinterleme gerilmesini temsil eder. Batarya uç noktalarından iletken bir telle bağlanırsa akım oluşur. Sinterlemede gerilme ve hareket önemlidir. Yüksek sıcaklık da hareketi sağlar. Bu sayede kütle akışı için gerekli ısı sinterleme işlemi sağlanarak difüzyon oluşumu ve atomun mevcut bölgeden kopup yeni bir bölgeye

hareketi sağlar. Bu yüzden sıcaklık sinterleme işleminde başlıca bir parametredir. Bunun haricinde parçacık boyutu, uygulanan basınç, sıvı faz oluşumu, sinterleme süresi, ısıtma hızı ve sinterleme atmosferi başlıca diğer önemli parametrelerdir [6].

Sinterleme esnasında yüksek sıcaklıklarda, sıçrayan atomlar rastgele gezinirler. Bu rastgele gezinme sırasında atomlar bazen parçacıkların birleşme yerlerine giderek yüzey alanını ve yüzey enerjisini azaltır. Bu olay meydana geldikten sonra atomların uzaklaşması zordur. Çünkü ayrılma enerjisi arttırır. Buna göre sinterleme; çok azının sinterleme bağımlı arttırdığı ve yüzey enerjisini azalttığı çok sayıda atom sıçramalarının toplamıdır. Atomlar çok küçüktür, dolayısı ile ölçülebilir sinterleme bağlarının büyümesi çok sayıda başarılı atom sıçraması gerektirir. Isıtmanın amacı, küçük bir kısmın başarılı olacağını bilerek, toplam atom sıçramalarının sayısını arttırmaktır. Sinterleme saniyede 10^{14} defa titreşen çok sayıdaki küçük atomların rol aldığı istatistiksel bir olaydır. Sinterleme sıcaklığında, her atom her saniye birçok defa yer değiştirir. Otuz dakika (1800 saniye) veya daha uzun sinterleme sürelerinde mikro yapıda, parçacıklar arası bağlanmada ve mukavemette önemli değişimler meydana gelir [1]. Sinterlemeden sonra toz metal parçalarının mukavemet değerleri, sinterleme öncesi mukavemet değerlerinin 100 katından fazlasına ulaşır [36].

Şekil 2.14'te gevşek toz ile başlayan ve sinterlemenin değişik aşamalarını gösteren kavramsal çizim yer almaktadır. İlk aşamada boyunlar küçük ve gözenekler köşeli iken, ara aşamada gözenekler daha düzgün hale gelir, son aşamada gözenekler küçülmüş, izole edilmiş ve kapalıdır, aynı zamanda da tane boyutu artış göstermiştir.



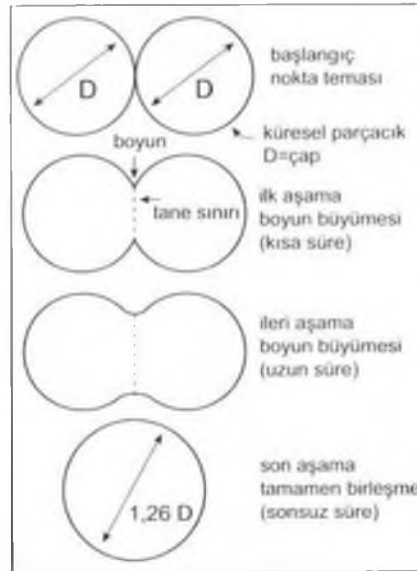
Şekil 2.14. Sinterlemenin aşamaları [6]

2.2. Sinterlemenin Temel Kavramları

Sinterleme işlemi daha önce bahsedildiği üzere katı halde veya sıvı faz oluşumu ile gerçekleşebilir. Ayrıca sinterleme işlemi, yoğunluğun artırılması amacı ile basınç destekli olarak gerçekleştirilebilmektedir. Temel sinterleme kavramları bu kısımda incelenmiştir.

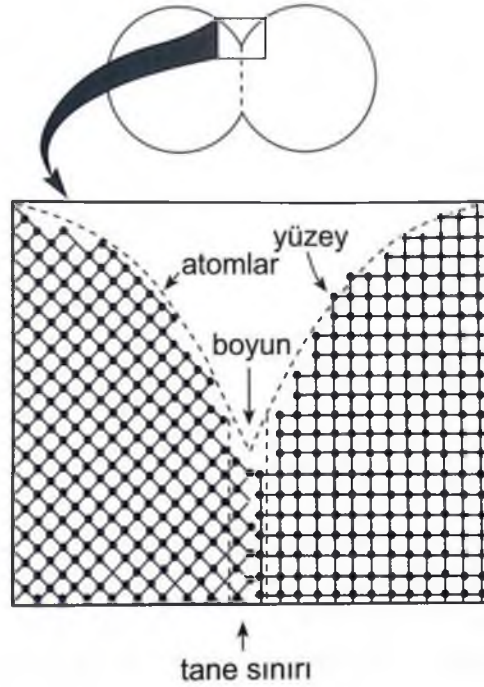
2.2.1. Katı Hal Sinterleme

Toz metal parçanın sinterleme sıcaklığında tamamen katı halde yoğunlaşması katı hal sinterlemeyi ifade eder [45]. Parçacıklar ısıtıldığı zaman, sinterleme mekanizmalarında parçacıklar arası bağlar oluşturulur. Taneler büyür, bu büyüme ile tane sınırları ve serbest yüzeyler azalarak yüzey enerjisi düşer. Temas eden parçacıklar arasındaki boyun büyümesi, sinterlemenin göstergesidir. Hacmin korunması ve yüzey enerjisinin en aza indirilmesi küre şeklindeki parçacığın son geometrisini belirler. Her parçacık üzerinde birçok temas bulunur. Bu temas genişler ve parçacıklar birleşir. Sürenin artması ile beraber iki parçacık en sonunda birleşerek, daha büyük boyutlu tek bir parçacık haline gelir [6]. Şekil 2.15'te sinterlemede bağ oluşumunun modeli gösterilmiştir.



Şekil 2.15. Katı hal sinterlemede parçacıklar arası bağ oluşumu [6].

Kristal kafes yapısına sahip kristalin malzemelerde parçacık temas ve bağlanma bölgelerinde kafes uyumsuzlukları sebebi ile tane sınırları oluşur. Bu tane sınırı oluşumunun şematik gösterimi Şekil 2.16'da yer almaktadır.



Şekil 2.16. Kristalin malzemelerde boyun bölgesinde tane sınırı oluşumu [1]

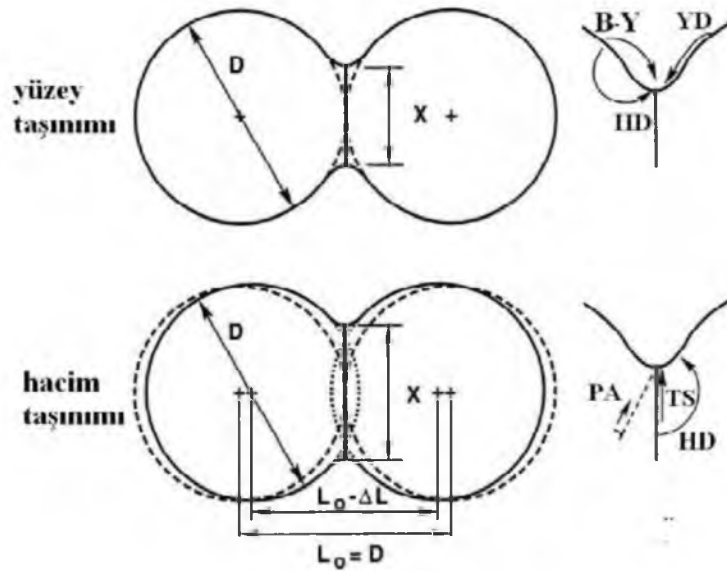
Katı hal sinterlemede kütle hareketi, çeşitli kütle taşınım mekanizmaları ile açıklanır. Bunlar yüzey difüzyonu, hacim difüzyonu, tane sınırı difüzyonu, viskos akış, plastik akış ve buhar taşınımıdır. Kütle taşınım olayları ile birlikte, sinterleme esnasında çeşitli geometrik aşamalar bulunur. Öncelikle sinterleme esnasında parçacıklar arasında bir temas oluşumu ile bağlanma başlar, parçacıklar arası boyunun hızlı bir şekilde büyümesi ile devam eder. Buna ilk aşama adı verilir. Ara aşamada gözenek yapısı silindirik şekle sahiptir ve bu aşamanın sonunda tane büyümesi gerçekleşir. Son aşamada gözenekler kapanır ve yavaş yoğunlaşma meydana gelir [6].

Sinterlemenin itici gücü yüzey enerjisinin azaltılmasıdır. Laplace denkleminin göre;

$$\sigma = \frac{\gamma}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} \quad (2.1)$$

Burada γ yüzey enerjisi, R_1 ve R_2 ise yüzeyin eğrilik temel yarıçaplarıdır. Küçük parçacıkların daha hızlı sinterlenmesini de bu teori açıklar. Yüzey gerilmesi yüksek parçacıklar hızla birleşerek yüzey gerilmelerini düşürmeye çalışırlar, bu da sinterleme süresini kısaltır [1]. Yüzey enerjisindeki azalma ya gözeneklerin ortadan kaldırılması ile ya da birleşmesi ile meydana gelir [6].

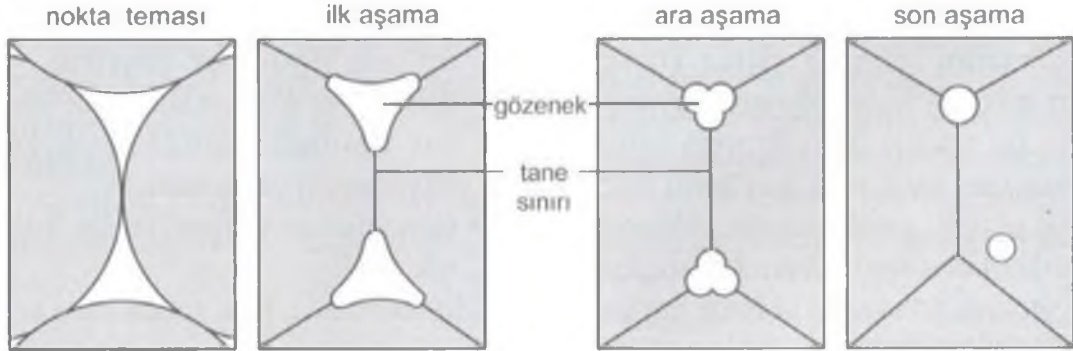
Kütle taşınım mekanizmaları, yukarıda açıklanan itici güce tepki olarak nasıl taşındığını belirler. İki küre modeli ele alındığında, yüzey taşınımı ve hacimsel taşınım olmak üzere iki tip taşınım mevcuttur. Gözenek gidermeyi anlayabilmek için boşlukların hareketi de incelenebilir. Yüzey taşınımında parçacık yüzeyinde başlayıp biten kütle akışı nedeni ile çekme veya yoğunlaşma olmadan boyun büyümesi gerçekleşirken, hacimsel taşınımında yoğunlaşma meydana gelir. Yüzey taşınımı buharlaşma-yoğuşma, yüzey difüzyonu ve hacim difüzyonu, hacimsel taşınım ise plastik akış, tane sınırı difüzyonu ve hacimsel difüzyonu içerir. Ayrıca, amorf yapı malzemelerde sıcaklıkla azalan viskozite ve artan akışkanlık vasıtası ile vizkoz akış denilen olay görülür [6]. Bu Mekanizmaların şematik gösterimi Şekil 2.17'de yer almaktadır.



Şekil 2.17. Yüzey ve hacim taşınım mekanizmaları [6]

Sinterleme aşamaları daha önce de belirtildiği gibi ham parçaların mukavemetli ve yoğun parçalara dönüştürülmesinde meydana gelen geometrik

ilerlemeyi temsil eder. Aşamalar ile gözenek yapısının değişimi Şekil 2.18'de görülmektedir.



Şekil 2.18. Sinterleme aşamaları ile gözenek yapısının değişimi [1]

Sinterleme ilerledikçe, gözenek tane sınır etkileşimi üç şekil alabilir; gözenekler tane sınırlarında kalarak tane büyümesini engelleyebilir, hareket eden tane sınırları tarafından sürüklenerek tane büyümesini yavaşlatabilir veya tane sınırları gözeneklerden koparak ayrılabilir. Gözenekler tane içlerinde olursa yoğunlaşma olmaz. Özellikle yüksek sıcaklıklarda tane sınırı hareketi gözeneği tane sınırından ayırmaya yol açar. Bu da erişilebilecek son yoğunluğu sınırlar. Bundan dolayı sinterleme sıcaklıkları çok iyi bir şekilde ayarlanmalıdır. Ayrıca ham yoğunluk da sinterleme ile elde edilebilecek yoğunluğu etkiler. Presleme ile elde edilen yüksek yoğunluk, sinterleme sonrası daha yüksek yoğunluk değerlerinin elde edilmesini sağlar [1].

2.2.2. Toz Karışımlarının Katı Hal Sinterlenmesi

Karışım tozlar, alaşımların, kompozitlerin veya yüksek paketlenme yoğunluklu yapıların üretimi amacı ile kullanılır [1]. Karışımların fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlı olarak karışımların sinterlenmesi esnasında birçok farklı mekanizmalar meydana gelir. Karışımlar arasında çözünürlük mevcutsa, kimyasal değişim gradyanları sinterleme ile elde edilen değişimin de ötesine geçebilir. Örneğin demir nikel ve krom sinterlendiğinde paslanmaz çelik oluşturur. Bu oluşum esnasında başlangıçta gerçekleşen kimyasal olaylar yüzey enerjisinin etkisine karşı çıkar, böylece sinterleme mekanizmalarının yanı sıra kimyasal mekanizmalar da

burada önemlidir. Yine belli toz karışım sistemleriyle birlikte sinterleme hızı artırılabilir [6].

Karışım toz sinterlemede farklı boyuttaki tozların karıştırılıp sinterlenmesi vasıtası ile yüksek paketleme yoğunluğuna sahip malzemeler elde edilebilir. Ancak parçacıklardan oluşan karışımlar olumsuz sinterleme davranışları gösterebilir [46-48] Örneğin karıştırılan iki bileşenin yayınma katsayılarının çok farklı olmaları durumunda bileşenlerin eşit olmayan yayınma durumları sebebi ile boşluk oluşumu meydana gelebilirken, yine iki bileşenin ergime noktalarının birbirine göre çok farklı olması durumunda şişme meydana gelebilir. Bunun da ötesinde gevrek intermetalik fazlar oluşabilir [1].

Tüm toz karışım yapılarında temel olarak üzerinde durulması gereken konu, parçacık boyutlarının doğru seçilmesi ve her tozun sinterleme esnasındaki rolünün doğru belirlenmesi olmalıdır [6].

2.2.3. Sıvı Faz Sinterleme

Sinterleme esnasında bir sıvı faz oluşumu sinterleme hızını genel olarak artırır. Milattan önce 4000 yılından beri porselenlerin veya cama bağlı seramiklerin üretilmesinde sıvı faz sinterleme kullanılmıştır. Modern olarak sıvı faz sinterlemenin uygulanması ise sinterleme ve toz metalurjisinde olduğu gibi 1920'li yıllarda sementit karbürlerin bronz yatakların ve manyetik alaşımların geliştirilmesine dayanır [6]. Sıvı faz sinterleme, toz metal parçayı oluşturan bileşenlerin herhangi birinin ergime derecesini aşan sıcaklıkta yapılan sinterleme işlemidir. Bu sebepten, bir sıvı varlığında gerçekleştirilir. Katı hal sinterlemeden farklı olarak, taşınmanın sıvı içerisinde daha hızlı olması sebebiyle yöntem katı hal sinterlemeye göre daha hızlıdır [45].

Esas olarak sıvı faz oluşumu ile hem taneleri birbirine bağlayan hem de içerisinde hızlı yayılımın oluşmasına olanak veren lehim oluşur. Sıvı faz sinterlemenin temel mekanizması ıslatmadır. Islatan bir sıvı filmi, yoğunlaşmaya yardımcı olan ve kılcal olarak tanımlanan yüzey gerilmesini sağlar. Genellikle katının sıvı içinde çözüldüğü durumlarda gerçekleşir ve bu çözünürlük katının sıvı içerisinden yayılmasını sağlar. Bu şartlardaki yayılım hızlarının katı hal

yayınımından çok daha yüksek olması sebebiyle pek çok sistemde kullanılan sıvı faz sinterleme ile sinterleme süresi büyük ölçüde kısaltılabilir [1].

Çoğu sistemde, sinterleme sıcaklıklarında ikinci bir faz sıvı olarak bulunur ve hem meydana getirdiği çözünürlük, hem kılcal kuvvetler hem de oluşturduğu yüksek difüzyon hızı vasıtası ile mikroyapısal irileşme sayesinde istenilen yoğunlaşmanın elde edilmesini sağlar [6]. Sıvı faz oluşumu sırasında bileşikler meydana gelirse kimyasal faktörler ayrıca değerlendirilmelidir [49]. Şekil 2.19'da sıvı faz sinterleme sırasında oluşabilecek farklı çözünürlükler ile sinterleme sonucu elde edilen özelliklerin değişimi yer almaktadır. Buna göre, sinterleme sonucu yoğunlaşma meydana gelebileceği gibi şişme de meydana gelebilir [6].

		sıvıdaki katı çözünürlüğü	
		düşük	yüksek
katıdaki sıvı çözünürlüğü	düşük	sınırlı yoğunlaşma yeniden düzenlenme	aşırı yoğunlaşma
	yüksek	şişme, geçici sıvı	karşık etkili şişme yoğunlaşma

Şekil 2.19. Sıvı faz sinterleme sonucu elde edilebilecek farklı özellikler [6]

Şekil 2.20'de sıvı faz sinterlemenin kavramsal aşamaları yer almaktadır. Burada işlem sırasında ana metal katı durumdadır ve sıvı faz oluşumu, ergime derecesi sinterleme sıcaklığından daha düşük olan katkı malzemesinin ergimesinden kaynaklanır.



Şekil 2.20. Sıvı faz sinterlemenin kavramsal aşamaları [1]

Sıvı faz sinterlemede Şekil 2.22’de görüldüğü gibi, başlangıçta henüz sıvı oluşumu olmadığından, taneler katı hal sinterlemesi ile birbirine bağlanır. İlk sıvı oluştuğunda taneler yeniden düzenlenir ve hızlı bir yoğunlaşma olur. Oluşan sıvı, katıyı ıslatarak önceden oluşmuş olan katı bağlarını çözer ve yeniden düzenlenmeyi sağlar. Sonrasında çözelti tekrar çökme denen işlemle sıvı, katı parçacıkları taşır. Sıvının hacim oranı arttıkça, gözenekleri dolduracak sıvı miktarı arttığından yoğunlaşma kolaylaşır, ancak yer çekiminden dolayı parça şekli bozulabilir [1]. Sıvı faz sinterlemenin son aşaması, katı yapının yoğunlaşması tarafından kontrol edilir ve bu aşamada katı hal sinterleme mekanizmaları aktiftir [6].

Şekil 2.21’de görüldüğü gibi sinterleme sonrasında oluşan yapıda katı taneleri birbirine bağlayan sıvı faz mevcuttur. Şekilde de görüldüğü gibi bütün taneler birbirine sıvı faz ile bağlanmıştır.

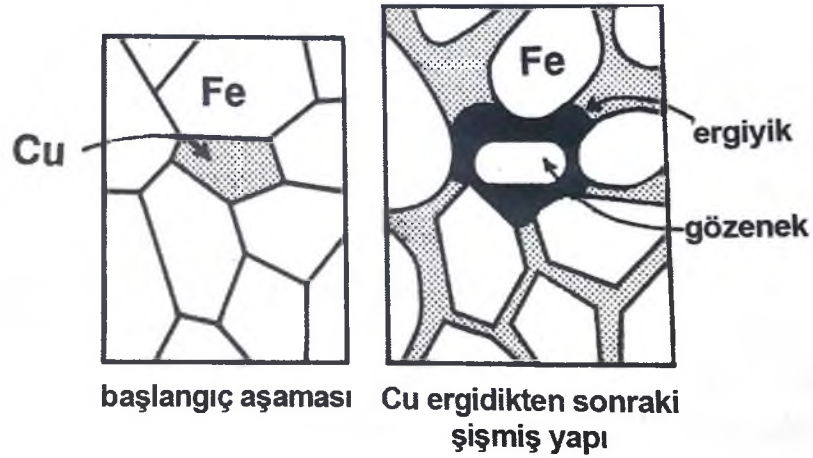


Şekil 2.21. Sıvı faz sinterleme sonucu oluşan yapı [1]

Tane irileşmesi, sıvı faz sinterlemenin bir parçasıdır. Ortalama tane boyutu sinterleme süresinin $1/3$ veya $1/2$ üssü ile artar. Bunun büyük sebebi çözelti-tekrar çökme olayıdır. Başlangıçta, ısıtma sırasında taneler katı hal sinterleme ile birbirine bağlanır. İlk sıvı oluştuğunda, taneler yeniden düzenlenir ve büyük bir yoğunluk artışı olur. Daha sonra çözelti-tekrar çökme denilen olguda sıvı, katı atomların taşıyıcısı olur. Daha küçük tane kütleleri sıvı içinde çözünür ve sıvı içinden yayınarak, büyük tanelerin üzerine çöker. Zamanla tane sayısı azalır ve tane boyutu artar [1].

Sinterleme işlemlerinin çoğu, sıvı faz sinterlemenin varlığı sonucu oluşur. Ticari olarak, sinterlenen malzemelerin % 80'den fazlasında sıvı faz sinterleme uygulanmaktadır. Karışım tozlar ile sıvı faz sinterleme gerçekleştirilebilirken, ön alaşımlı tozlar ile de gerçekleştirilebilir. Sıvı faz sinterleme kimi uygulamalarda geçici olarak oluşabilir. Bu sistemlerde ısınma sırasında sıvı oluşup, bu sıvı alaşımlama ile kaybolabilir. Tepkimeli sinterleme uygulamalarında sıvı, yeni bir bileşik oluşturma amacıyla katıyla tepkimeye girebilir. Bu sayede ısı oluşumu sağlanıp, bu ısı sinterlemeye yardımcı olabilir. Sinter döküm adıyla bilinen sıvı emdirme uygulamaları da mevcut uygulamalardandır. Ayrıca gözenekli iskelet ile emdirilen sıvı, tepkimeye sokularak elmas tozunda ham parçanın $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de sıvı silisyum ile tepkimesi sonucu SiC oluşturulması örneğinde olduğu gibi kompozit üretimi gerçekleştirilebilir [1].

Sıvı faz sinterlemede uygulamaya yönelik en önemli kompozisyonlardan biri Fe-Cu-C kompozisyonudur. Otomobil bağlantı elemanlarında kullanılan bu kompozisyon önemli ticari değer taşımaktadır. Fe-Cu-C kompozisyonlarında ilk ergiyik, tane sınırlarına nüfuz eden sıvı bakır nedeniyle Şekil 2.22’de gösterildiği gibi sinterleme şişmesini başlatır. Demir tane sınırı boyunca sıvı bakır nüfuz eder. Bu olay katı tanelerin ayrılmasına ve bakır parçacık bölgesi içerisinde gözenek oluşumuna neden olur. Önce Cu parçacığının bulunduğu bölgelerde gözenek oluşur. Fe parçacığının boyutu arttıkça şişme bir sınıra doğru ilerler. Gevşek toz yoğunlaşırken, yüksek ham yoğunluk, sinterleme şişmesine neden olur. Bu sistemde karbon ilavesi sinterleme şişmesini bir ölçüde de olsa azaltır. Karbon 910 °C’nin üzerinde demirde yüksek oranda çözüldüğünden ergimiş bakırın tane sınırına nüfuz etmesi dolayısı ile sinterleme şişmesini azaltır. Fe tozunun iç gözenekliğindeki bir artış veya ilk yoğunluğundaki bir düşüş de şişmeyi azaltır. Bu olay, katı taneler arasındaki eriyik nüfuziyetini engeller ve eriyiğin küçük gözeneklere çekilmesini sağlar [6, 50-52].



Şekil 2.22. Fe-Cu sisteminde şişme olayının gösterilişi [1]

Özellikle Fe-% 2 Cu-% 0,8 C tozlarından oluşan karışım, otomobilin mekanik parçalarında kullanılmaktadır [6].

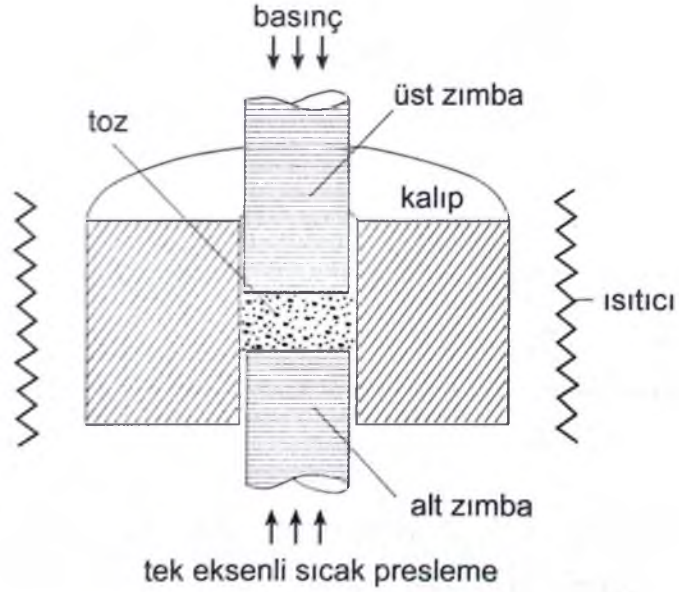
2.2.4. Basınç Destekli Sinterleme

Sinterlemenin en büyük amaçları net şekillendirme ve yüksek yoğunluk elde edilmesinin gerçekleştirilmesidir. Yüzey enerjisi genel olarak sinterleme için küçük bir itici güçtür. Yoğunlaşmayı desteklemenin bir yolu sinterleme esnasında gerilme

uygulanmasıdır. Özellikle düşük sinterleme sıcaklıkları, iri tozlar ve yoğunlaşmaya dayanıklı kompozitler için basınç destekli sinterleme, önemli bir yöntemdir [1, 6].

Küçük boyutlu tozlar ile dışarıdan basınç uygulanmasa da sinterleme esnasında yoğunlaşma meydana gelir. Sıvı faz oluşumu da yoğunlaşmayı destekleyen bir faktördür. Yine de sinterleme sonrasında geride gözenekler kalır. Bu gözeneklerin giderilmesinin bir yolu çok uzun sinterleme süreleridir. Ancak özellikle gözenekler gaz ile doluysa, difüzyon ile gözeneklerin azalması engellenir. Kompozit malzemeler içinde mukavemeti sağlayan fazlar yoğunlaşmayı engeller. Tam yoğunluk kazandırmadaki bu sorunlar, sinterleme esnasında basınç uygulanarak giderilebilir. Basınç, sinterlemede karşılaşılan bu çeşitli sorunların ortadan kaldırılmasına yardımcı olur. Daha düşük sıcaklıklarda ve sürelerde yüksek yoğunluklara ulaşılmasını sağlar. Bu sinterleme tekniğinin en önemli özelliği, basınç yardımıyla, gözeneklerin azaltılmasıdır. Yoğunluk haricinde mukavemet, sertlik, süneklik, kırılma tokluğu, optik iletim, aşınma direnci gibi özellikler artış gösterir. Özellikle takım çeliği üretiminde basınç destekli sinterleme kullanılmaktadır [6].

Basınç destekli sinterlemenin en önemli uygulaması tek eksenli sıcak preslemedir. Şekil 2.23'de yöntemin şematik gösterilişi mevcuttur. Yöntemde kalıp genel olarak rezistans ile ısıtılır. İndüksiyon ile ısıtmaya uygun olan grafit kalıplar da mevcuttur. En yüksek sıcaklık kalıp malzemesine bağlı olarak 2200 °C ve uygulanabilecek en yüksek basınç 50 MPa'dır. Parçanın kirlenmesini engellemek için genellikle işlem vakum ortamında yapılır. Kalıplar ve ekipmanlar pahalıdır. Birçok kompozit bu yöntemle sinterlenebilmektedir [1, 6].



Şekil 2.23. Tek eksenli sıcak presleme [1]

Sıcak presleme dışında toz dövme, toz ekstrüzyonu, şok dalgası ile yoğunlaştırma, sıcak izostatik presleme, üç eksenli basınçlandırma ve reaksiyonlu işlemler basınç destekli sinterleme uygulamalarıdır. Basınç destekli sinterleme, kazandırdığı avantajların yanında geleneksel sinterlemeye göre çok daha zor ve maliyetlidir. Numune yüzeyinde oluşabilecek kirlilikler ve karmaşık şekilli parçalardaki zorluklar, bu yöntemin zayıf taraflarındandır [6].

2.3. Sinterleme Atmosferleri

Sinterleme atmosferinin en önemli görevi, yüksek sıcaklıklarda gerçekleşen sinterleme işleminde, işlem sırasında meydana gelen yüksek sıcaklıktaki kimyasal tepkimeleri kontrol etmektir. Bunun yanı sıra, bağlayıcı veya yağlayıcıların giderilmesi, numunede oluşan oksit tabakasının giderilmesi, zararlı katışıqların engellenmesi, numunelere ısı yayılımının gerçekleştirilmesi, karbon ve azot seviyeleri gibi kimyasal bileşimlerin kontrolünün gerçekleştirilmesi, işlem atmosferinin görevlerindedir [1, 3].

Sinterleme atmosferi herhangi bir tür gaz veya vakum olabilir. Özellikle sementit karbürler ya da çelikler gibi birçok malzemede sinterleme esnasında karbonun hassas olarak kontrol edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle bu gibi malzemelerin sinterlenmesinde atmosfer içeriğinde oksijen, su, karbonmonoksit,

karbondioksit ve metan gibi gazlar kullanılabilir [6]. Sinterleme atmosferi olarak hava, azot, argon, oksijen, hidrojen ve çeşitli gaz karışımları kullanılır. Atmosfer bileşimi, malzeme ve istenen kimyasal tepkimelere bağlıdır. Oksit seramiklerin hava ortamında sinterlenebilmesine rağmen genel olarak malzemelerin çoğu için sinterleme esnasında koruyucu atmosfer gereklidir. Sinterleme atmosferi oksitleyici (karbondioksit, su veya oksijen), nötr (argon, helyum ya da vakum), indirgeyici (hidrojen veya karbondioksit), hidritleyici (hidrojen veya amonyak) veya hidrit giderici (vakum veya argon), nitrürleyici (azot veya amonyak), karbürleyici (metan veya propan), karbon giderici (karbondioksit, su veya oksijen) olabilir. Belirli karışımlarla belirli etkiler birleştirilebilir [1].

Hidrojen gazı, çok iyi bir indirgeyici atmosfer meydana getirir. Ancak ekonomik bir seçim olmamakla birlikte, oldukça yanıcı bir gazdır [3]. Bu sebeple saf hidrojen yerine hidrojen içeren atmosferlerin kullanılması çoğu malzeme için daha uygun olur. Endotermik veya ekzotermik gaz adı verilen ve su, karbonmonoksit, karbondioksit, doğal gaz, yüksek azot ve hidrojen içeren ve doğal gaz ile havanın kısmen ya da tam olarak yanması ile oluşturulan atmosferler, sinterleme uygulamalarında oldukça fazla kullanılmaktadır. Yine parçalanmış amonyak adı verilen atmosfer çoğu metalik malzemenin sinterlenmesinde kullanılır. Amonyak molekülünün H_2 ve N_2 gazlarına ayrılması ile elde edilir. Hidrojen ve azot karışımı oksit indirgemek için kullanılır. Argon ve helyum gibi soy gazlar ise reaktif malzemeler sinterlenirken çok elverişlidir. Azot da çoğu durumda nötr olduğu için çoğu endüstriyel atmosfer azot esaslıdır. Üretim masrafının düşük oluşu, gazın sinterleme uygulamalarında kullanılmasını teşvik eden bir etmendir [3, 6].

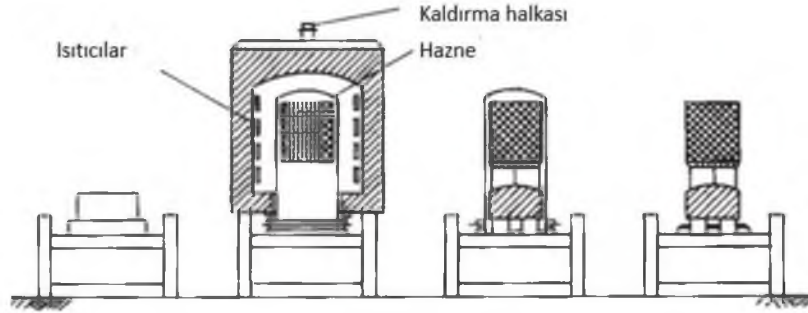
Vakum işlemi atmosferinin yokluğunu ifade eder ve düşük basınçtaki sinterleme işlemidir. Çünkü işlem atmosferindeki tüm gazları gidermek mümkün değildir. Pompa vasıtası ile vakum oluşturulur. Vakum ortamındaki düşük basınç oksitin çözünmesine ve indirgenmesine neden olur, ayrıca vakum gözeneklerin içerisinde kalan gazların ve dolayısı ile gözenek miktarının da azalmasını sağlar [1, 3, 6].

Atmosferler içerisinde en yüksek maliyet hidrojendir. En düşük maliyetli sistemler endotermik ve ekzotermik gaz adı verilen gazlardır. Parçalanmış amonyağın maliyeti bunların biraz üzerindedir ve azot esaslı atmosferlerin de

maliyetleri diğer atmosferlere göre yüksektir. Vakumun gaz maliyeti yoktur, ancak gerçekleştirmek için kullanılan donanım ve vakum sırasında çevrim oluşturabilmek için malzeme giriş çıkışının engellenmesi ile işlemin kendisinin maliyeti vakumu pahalı bir alternatif kılar.

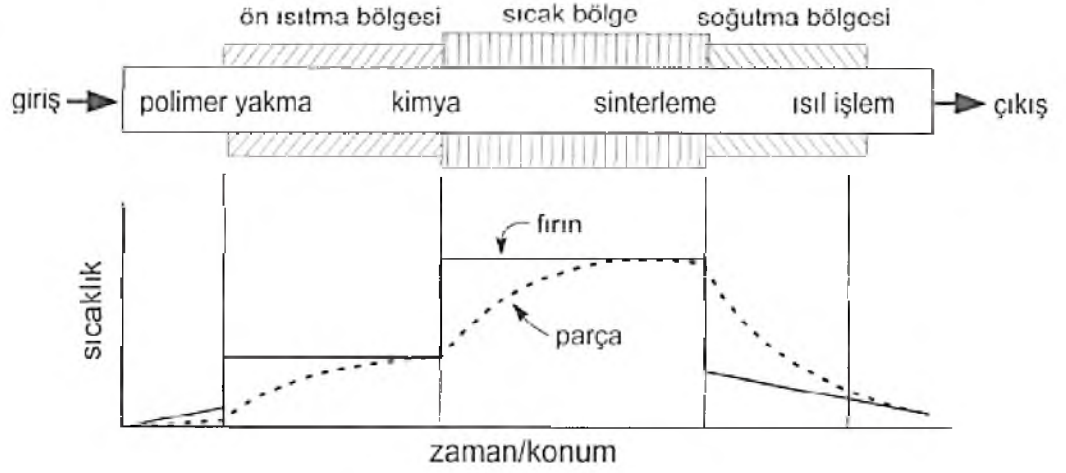
2.4. Sinterleme Uygulamaları

Geleneksel sinterleme prosesi parti ya da sürekli fırınlarda gerçekleştirilir. Parti fırınlarda toz metal numuneler parti şeklinde koruyucu gaz atmosferi içeren fırına yüklenir ve sinterleme gerçekleştirilir. Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen sinterleme uygulamaları, parti fırınlardaki sinterleme işlemine benzerlik göstermektedir. Geleneksel sinterleme yöntemindeki vakum sinterleme ve basınç takviyeli sinterleme, sadece bu yöntemle gerçekleştirilebilir. Örnek bir parti fırını Şekil 2.24’te görülmektedir [1, 3].



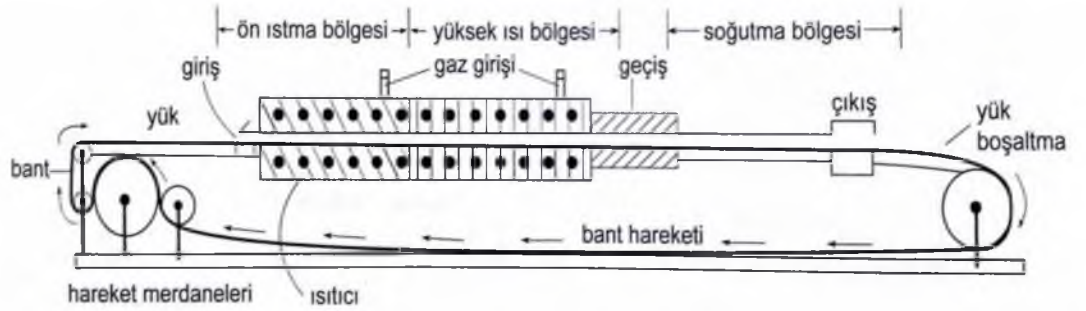
Şekil 2.24. Parti fırında sinterleme [3]

Çoğu ticari sinterleme uygulamasında sürekli fırınlar kullanılır. Bu fırınlarda yağlayıcı giderme, sinterleme ve soğuma işlemlerinin gerçekleştirildiği 3 ana bölüm mevcuttur [3]. Geleneksel sinterleme aşamaları Şekil 2.25’te yer almaktadır.



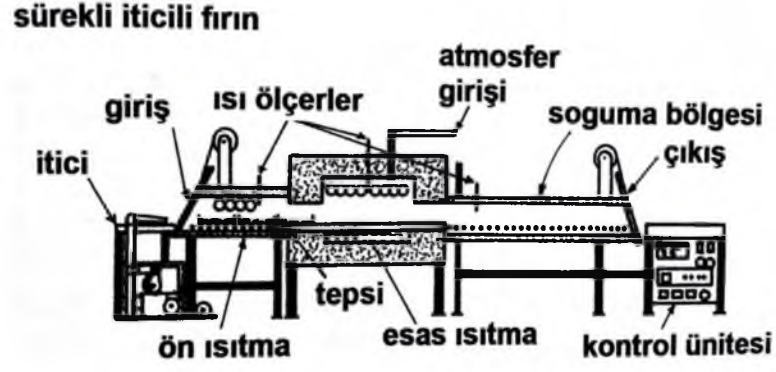
Şekil 2.25. Geleneksel sinterlemenin şematik gösterimi [1, 53]

Sürekli fırınlarda, parçanın konumu zaman ile değişir ve parçaların taşınmasında taşıyıcı bant veya itici konveyör kullanılır. Konveyörler genelde tel örgü, seramik, grafit ya da refrakter banttandır. Şekil 2.26'da konveyör bantlı sinterleme fırını yer almaktadır.



Şekil 2.26. Konveyör bantlı sinterleme fırını [1]

Başka bir yol ise iş parçalarını tepsi denen elemanlara yüklemektir. Bir itme düzeneği kullanılarak tepsiler itilir. Bu düzenek yüksek sıcaklıklara karşı konveyör aşınmasını engelleme amaçlı kullanılır. Şekil 2.27'de bu prensibe sahip bir sinterleme fırını görülmektedir.



Şekil 2.27. İtici sinterleme fırını [6]

Sinterlemenin ilk aşaması, malzeme içerisinde bulunan yağlayıcı veya bağlayıcı polimerlerin uzaklaştırıldığı ön sinterleme aşamasıdır. Bu aşamada numunede hasar oluşumunu engellemek için, ısıtma işlemi yavaş ısıtma oranlarında uygulanmalıdır ve işlem süresi, yağlayıcı maddelerin malzeme içerisinden tam olarak uzaklaşmasını sağlayacak kadar uzun olmalıdır. Koruyucu gaz atmosferi, işlem esnasında ortaya çıkan polimerlerin uzaklaştırılmasına da etki yapar. Yüksek sıcaklık bölgesinde sinterleme gerçekleştirilir ve bu bölgedeki süre de sinterleme işleminin tam olarak gerçekleşmesine yetecek kadar uzun olmalıdır. Soğuma bölgesinde numunelerin termal şoka uğramasını engelleme amacı ile numuneler yavaş bir hızda soğutulur. Sıcaklık düştükçe soğuma hızı azaldığından, soğutmanın son bölümünde fan kullanılabilir [3].

2.5. Yeni Sinterleme Teknikleri

Sinterleme ile üretilen ürünlerin özelliklerini iyileştirme ve üretim maliyetlerini geliştirme çabaları ile gelişmiş özellik eldesi ve bunun yanı sıra sinterlenerek üretilmiş malzemelerin pazar payını artırma çabaları, gün geçtikçe artmaktadır. Sinterleme fırınlarında gelişmiş kontrol özelliklerinin kullanılması boyutsal değişim ve çarpılmaların en aza indirilmesi için uygun ortam hazırlarken, yeni ısıtma teknikleri ile sinterleme sıcaklığına hızlı ulaşım, numunelerden daha iyi özelliklerin elde edilmesine yardımcı olur [6, 54]. Aşağıda yeni sinterleme tekniklerinden en çok uygulanan yöntemlere değinilmiştir.

Süper katı üstü sıvı faz sinterleme (SKSFS), sıvı faz sinterlemeye benzer şekilde sinterleme esnasında sıvı faz oluşumuna dayanır. Sıvı faz sinterlemeden

farkı, sıvı fazın ön alaşımli tozlarda sıvının parçacıklar içinde oluşturulmasıyla hızlı yoğunlaşmanın elde edilmesidir. Parçacıklar içindeki sıvı formu, parçacıkların tanelere parçalanmasına neden olur. Islatıcı sıvıdan doğan kılcal kuvvetin altında parçacıkların sonradan paketlenmesi hızlı yoğunlaşmaya yol açar [6, 55].

Emdirme sinterleme, sinter-döküm olarak da bilinir ve bu yöntemle minimum yoğunlaşma ile tam yoğunluklu kompozitler üretilebilir. Emdirme, sinterlenmiş gözenekli yapının açık gözeneklerinde ergimiş fazın katılaştırıldığı işlemdir [56-58]. Şekil 2.28’de emdirme sinterlemenin şematik gösterilişi yer almaktadır. Şekilde de görüldüğü gibi sinterleme işleminin sonrasında dışarıdan eklenen bir sıvı faz gözenekleri doldurur. Gözenek doldurma işlemi sıvı fazın açık gözenek yapısına kendiliğinden çekilmesi vasıtası ile ya da basınçlı döküm olarak isimlendirilen dış basınç yardımı ile gerçekleşir [6].



Şekil 2.28. Emdirme Sinterleme [6]

Aktifleştirilmiş sıvı faz sinterlemesi de emdirme sinterlemeye benzer bir yöntemdir. Emdirme sinterlemeden farkı, katının sıvıda çözünürlüğünün olmadığı sistemlere uygulanır ve katı faz, gözeneklerde bulunan sıvı ile temas ederek sinterlenir ve enerjisini katıya aktaran sıvı durağanlaşır [6].

Sinterleme uygulamalarında bir başka yöntem de geçici sıvı oluşumudur. Birçok malzeme sisteminde karışım toz kullanılması ile geçici sıvı faz oluşur. En bilinen örneklerinden biri bakır kalay sisteminde 232 °C’de kalayın ergimesi ve bakır ile birleşip bronz oluşturmasıdır. Geçici sıvı faz oluşumu ardından katı halde bulunan

bronz oluşur. Aynı şekilde bileşikler arası ötektik reaksiyon ile de geçici sıvı faz oluşumu meydana gelebilir [6, 59].

Reaktif sinterleme yönteminde, sinterleme esnasında meydana gelen reaksiyon vasıtası ile ısı üretilir ve bu ısı sinterleme işlemine yardımcı olur. Reaktif sinterleme, yanma sentez işlemi ile beraber yoğunlaşmanın meydana geldiği bir sinterleme uygulamasıdır. Bileşenler arasındaki ekzotermik reaksiyon, sinterleme sıcaklığı ile sağlanır [6, 60, 61]. Reaktif sinterleme, yeni ortaya çıkmış bir sinterleme şeklidir. Bu yüzden çok az sayıda malzeme bu yöntemle üretilmektedir. WC-Ni₃Al₃, NiAl, MoSi₂ ve TiB₂ bu malzemelerin örnekleri arasında sayılır [62].

2.6. Sinterlemede Yeni Isıtma Teknikleri

Sinterleme işleminde yeni ısıtma teknikleri arayışı ve kullanılması, sinterleme işlemini hızlandırmak ya da daha hızlı ısı taşınımı ile sinterleme verimliliğini artırmaya dayanır. Hızlı ısıtma vasıtası ile yüzeyden ısıtmanın meydana getirdiği olumsuzlukların önüne geçilmekle birlikte yoğunlaşma hızı da artırılır. Yeni ısıtma teknikleri ile yapılan uygulamalarda iletken malzemeler doğrudan akım ile veya indüksiyon ile sinterlenebilirken, yalıtkan malzemeler mikrodalga ve plazma ısıtma yöntemleri ile sinterlenebilir [6].

2.6.1. Mikrodalga Isıtma

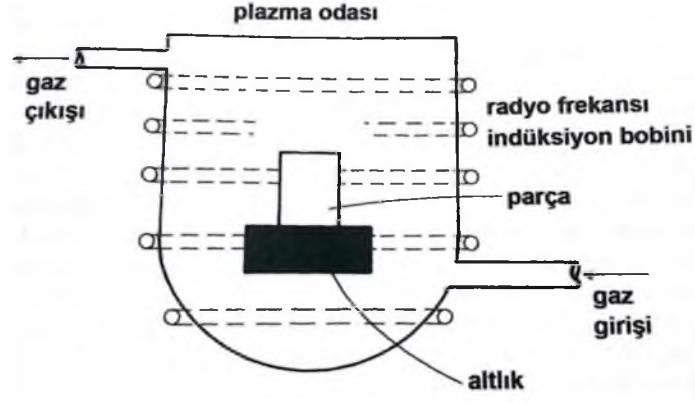
Mikrodalga enerjisi, 300 MHz ile 300GHz arasında değişen frekansa, 1 mm ve 1 m aralığında dalga boyuna sahip elektromanyetik enerji formudur. Mikrodalga ısıtma, malzemelerin mikrodalgalar ile etkileşime girerek hacimsel olarak elektromanyetik enerjiyi absorbe ederek bunu ısıya dönüştürme yöntemidir. Geleneksel ısıtmada ısı iletimi, radyasyon ve konveksiyon mekanizmaları ile gerçekleşmektedir. Önce malzemenin yüzeyi ısınır ve ısının malzemenin içine doğru ilerlemesiyle devam eder. Yani yüzeyden iç kısma doğru bir sıcaklık gradyanı oluşur. Fakat mikrodalga ısıtmada, mikrodalga malzemenin iç kısmına penetre olarak girdiği tüm hacmi ısıtır. Bu ısıtma mekanizması etkin difüzyon prosesleri, düşük enerji kullanımı, çok hızlı ısıtma rejimleri ve nispeten düşük proses süreci, daha düşük sinterleme sıcaklıkları, geliştirilmiş fiziksel ve mekanik özellikler, kolaylık, homojen özellikler ve düşük çevresel zarar gibi avantajlarından dolayı tercih edilmektedir. Bu avantajlar konvansiyonel yöntemlere üstünlük sağlamaktadır [35].

Mikrodalga ısıtma, genellikle seramiklerin sinterlenmesinde kullanılan bir yöntemdir [6, 63-65]. Malzemeye bağlı olarak mikrodalga radyasyonu sonucu nüfuziyet derinliği değişir. Mikrodalga ile ısıtma yöntemiyle sinterleme uygulamalarında geleneksel sinterleme ile kıyaslandığında daha düşük sıcaklıklarda daha yüksek yoğunluk değerlerinin elde edildiği görülmüştür [6, 66].

Mikrodalga sinterleme alanında yapılan araştırmalarda, işlemin yüksek enerji verimliliğine sahip olmasından dolayı avantajlı bir yöntem olduğu belirtilir ancak geleneksel sinterlemeye nazaran yaklaşık 10 kat pahalı bir yöntemdir [6, 67]. İşlemin herhangi farklı bir etkiye neden olup olmadığı bilinmemektedir ve doğrudan açıklanamayan avantajlara sahip olduğu düşünülmektedir. Çeşitli görüşlere göre özellikle sinterleme için gerekli olan aktivasyon enerjisi mikrodalga ısıtmada düşüktür ve mikrodalgalar tane sınırı difüzyonunu artırır. Bir başka görüşe göre de yüzeyden içeri doğru büyük ısıl konsantrasyon farklılığı oluşturan yöntem hızlı difüzyon akışına neden olmaktadır. Yöntemin zayıf kaldığı noktalar ise her seferde tek parçaya uygulanabilmesi ve geleneksel sinterleme gibi seri imalata uygun bir yöntem olmamasıdır [6].

2.6.2. Plazma Isıtma

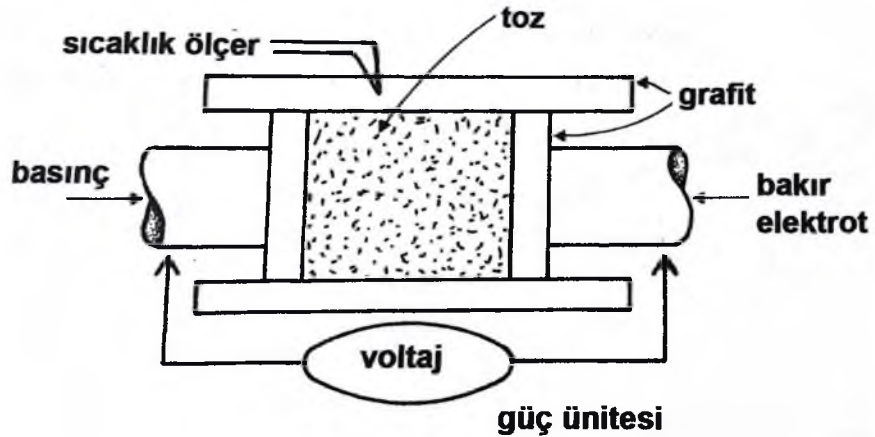
Plazma ısıtma yönteminde, düşük basınçlı gaz kullanılarak mikrodalga veya indüksiyon alanı ile elektronun atomdan ayrılması vasıtası ile plazma oluşturulur. Plazmada var olan yüksek sıcaklık dolayısı ile düşük güç kaybı ile ani ısıtma meydana gelir. Diğer ısıtma teknolojileri ile kıyaslandığında, plazma ısıtma oldukça etkileyici bir yöntemdir. Yöntem bölgesel ısıtma ile birlikte yüksek konsantrasyon gradyanına yol açar ve yeni bir taşınım mekanizmasına neden olur [6]. Yöntemin uygulandığı düzenek Şekil 2.29'da görülmektedir.



Şekil 2.29. Plazma ısıtma ile sinterleme [6]

2.6.3. Elektriksel Boşaltım Isıtma

Elektriksel boşaltım ısıtma ham parça üzerinden elektrik akımı geçirilmesi yöntemine dayanır. Ham parça boyunca akım geçişi, parçacık temas noktalarında bölgesel ısınmalara neden olur. Şekil 2.30'da gösterildiği gibi sıkıştırma esnasında da akım uygulanabilir. Uygulanan akım sinterlenen malzemelerin iletken veya yalıtkan olmasına bağlı olarak doğru veya alternatif akım şeklindedir. İletken malzemelerde doğru akım, yalıtkanlarda alternatif akım kullanılır. Ancak grafit kalıbın malzemeler üzerinde kirlilik yaratmasından ötürü çoğu durumda malzemelerin ilk aşamadaki ısıtmasında alternatif akım kullanılır [6]. Demir, çelik, bakır, paslanmaz çelik, tungsten, tantalyum, pirinç ve titanyum gibi çoğu malzeme elektriksel boşaltım sinterleme yöntemi ile sinterlenebilmektedir [68].



Şekil 2.30. Elektriksel boşaltım ısıtma [6]

Seramik malzemeler için elektrik akımı, bölgesel ısıtma sağlanması ve grafit kalıp tarafından meydana gelen kirliliğin ortadan kaldırılması amacıyla darbeli olarak uygulanır. Bunun da parçacıklar arasında çok kısa süreli akım darbeleri ile aktif olan plazma oluşumuna neden olabildiği düşünülmektedir. Son zamanlarda yapılan çalışmalarda bu durum plazma aktifleştirilmiş sinterleme olarak adlandırılmıştır [6].

2.6.4. Lazer Isıtma

Yüksek ısı ve güç konsantrasyonu oluşturması sebebiyle, birçok uygulamada kullanılan lazer ısıtma, sinterleme uygulamaları için de araştırma konusu olmuştur [6, 69-71]. Lazer ısıtma ile 2400 °C sıcaklıklara kadar çıkılabilmekle beraber sadece yüzeye yakın bölgeler ısıtılabilir. Bu nedenle sinterleme derinliği azdır ve yüzeyden itibaren mikro yapıda, boyutlarda ve yoğunluk değerlerinde önemli derecelerde farklılık mevcut olur. Lazer sinterlemenin zayıf ısı taşınım karakterine rağmen seçmeli lazer sinterleme (Selective Laser Sintering) adı verilen uygulama ile toz katmanlarının bilgisayar ile yönetilen bir tarama şablonu yardımıyla sinterlenerek katmanlar halinde üç boyutlu parça üretimi gerçekleştirilebilmektedir. Yöntem lazer görüntü taraması ile kullanıldığında, üç boyutlu yazıcılara benzer biçimde kopyalama gerçekleştirilebilmektedir [6, 72]

2.6.5. İndüksiyon ile Isıtma

İndüksiyon ile ısıtma yönteminde ham parça, alternatif akım taşıyan bir iletken bobinle sarılır [6, 73, 74]. Su soğutmalı iletken bobin içerisindeki akımın oluşturduğu manyetik alan, ham parçada Eddy akımını başlatır. İşlem frekansı 50 Hz ile Megahertz mertebelerine kadar değişen bir aralıkta olabilir. Yalıtkan malzemeler için malzemeyi saran ve Eddy akımı ile sıcaklık üretebilmek için elektromanyetik enerjiyi ısıya çevirebilen malzemeler gereklidir ve bunun için genellikle grafit kullanılır. Sinterleme uygulamalarında ön ısıtmanın avantajlarına rağmen, büyük oranda tek seferde tek parça sinterlenebildiği için, indüksiyon ile sinterleme yönteminde uygulanması zordur [6]. Tez konusu olan “İndüksiyon ile Sinterleme” yöntemi, ayrıntılı olarak incelenecektir.

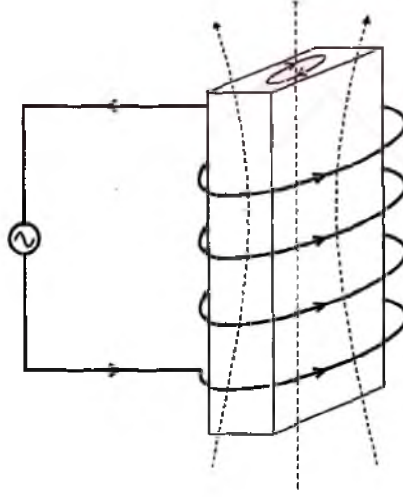
2.7. İndüksiyon İle Sinterleme

İndüksiyonla ısıtma uygulamaları, çeşitli avantajları dolayısıyla gün geçtikçe önem kazanmaktadır ve sinterleme işleminin indüksiyonla gerçekleştirilmesi de, bahsedilen bu avantajlar dolayısı ile diğer indüksiyonla ısıtma uygulamaları gibi önemli bir yere sahip olma sürecindedir. İndüksiyon ile sinterlemenin mekanizmasının anlaşılması için öncelikle “indüksiyon” açıklanmıştır.

2.7.1. İndüksiyon

Elektromanyetik indüksiyon ya da kısa adıyla indüksiyon, metal gibi iletken malzemeler için önemli bir ısıtma yöntemidir. Metal işleme (dövme, ekstrüzyon, haddeleme), kaynak, ergitme ve ısıl işlem uygulamalarında yaygın olarak kullanım alanı bulur. Ayrıca ambalajlama ve kütleme gibi sanayi uygulamalarında da oldukça kullanışlı bir yöntemdir. Endüstriyel kullanım alanları, yöntemin getirdiği büyük avantajlardan dolayı hızlı bir gelişim içerisindedir [32].

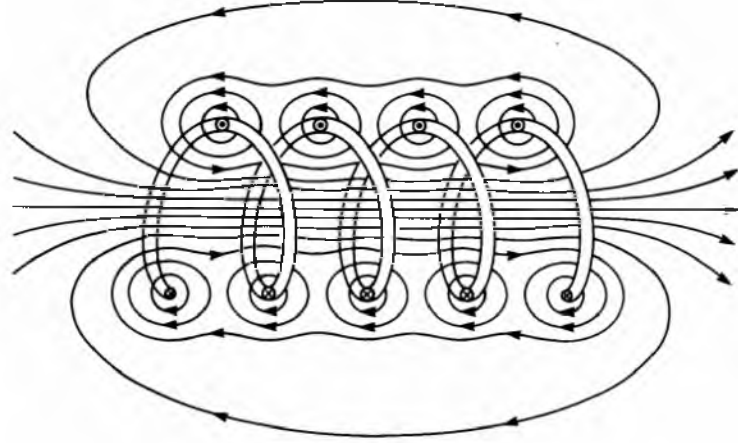
İndüksiyon ile ısıtma, metalin içerisinde oluşan elektrik akımlarına dayanır. Oluşan elektrik akımları, numune üzerinde ısı oluşumuna neden olur. Bir indüksiyon ile sinterleme sisteminin ana bileşenleri; indüksiyon bobini, alternatif akım sağlayan güç kaynağı ve iş parçasıdır. Bobinler alternatif akım üreten güç kaynağı ile bağlantılıdır ve ısıtılacak olan iş parçasının şekline göre biçimlendirilir. Bobin aracılığı ile alternatif akım geçişi, iş parçası üzerinde manyetik alan oluşturur. Bu da parçalar üzerinde Eddy (girdap) akımlarını tetikler. Şekil 2.31’de indüksiyon ile ısıtmanın şematik resmi görülmektedir. Eddy akımlarının şiddeti yüzeyden uzaklaştıkça azalır. Bu nedenle indüksiyon, yüzey ısıtmada daha yaygın kullanım alanı bulur. Ancak ısı transferi ile ısı tüm malzemeye iletilebilir [32]. Isı transferi geleneksel yöntemle ısıtmaya göre 3000 kat daha iyidir [6]. Ayrıca bobin tasarımı veya frekansın doğru seçilmesi ile ısıtılan kesitin ve ısıtma hızının belirlenmesi ve artırılması mümkündür [32].



Şekil 2.31. İndüksiyon ile ısıtmanın şematik gösterilişi [75]

İndüksiyon uygulamalarında ısının yüzeyde daha yüksek şekilde meydana gelmesini açıklayan en önemli olgu deri etkisi (skin effect) denilen etkidir. Bu etki, alternatif akımlarda meydana gelir. Akım en yoğun şekilde yüzeye yakın bölgelerde teşekkül eder. Gücün % 86'sı yüzey bölgesinde oluşur ve bu bölgeye penetrasyon derinliği adı verilir [76].

İndüksiyon akımı ile ısı meydana gelişini açıklayan iki olgu mevcuttur. Bunlar manyetik histerisiz ve joule ısınmasıdır. Manyetik histerisiz, Joule ısınmasına göre daha az önemli bir faktör olduğundan çoğunlukla göz ardı edilir. Histerisiz'in basit açıklaması, manyetik alan altındaki moleküllerin titreşiminden meydana gelen enerjidir ve curie sıcaklığının altındaki çelikler gibi manyetik malzemelerde görülür. Joule ısınmasının sebebi ise, girdap akımlarının tam bir çevrim oluşturma isteğiyle malzemenin özdirenci vasıtası ile meydana gelen ısınmadır. Joule ısınması alüminyum, bakır ve curie sıcaklığının üzerindeki çelikler gibi manyetik olmayan malzemelerde meydana gelen mekanizmadır. Bu iki olgu büyük ölçüde ısınmayı açıklar [32]. Şekil 2. 32'de elektrik akımı taşıyan bir bakır bobinin meydana getirdiği manyetik alan görülmektedir.



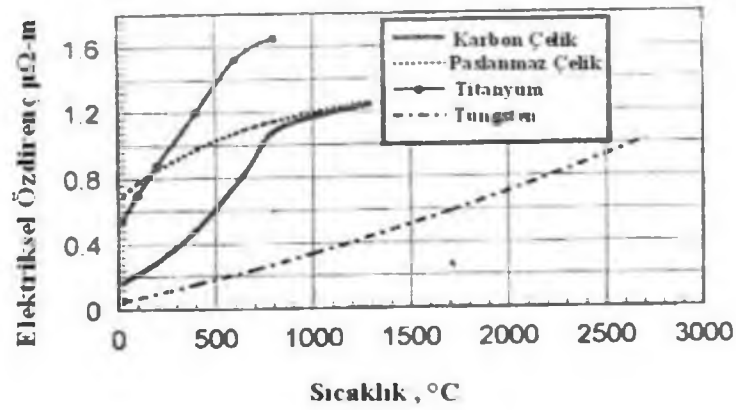
Şekil 2.32. Bakır bobin vasıtası ile meydana gelen manyetik akım çizgileri [32]

İndüksiyon ile ısıtma uygulamalarında, bir diğer önemli olgu da özgül dirençtir. 1 m uzunluğundaki ve 1 mm^2 kesitindeki bir malzemenin elektrik akımına karşı gösterdiği dirence “özgül direnç” veya “özdirenç” denir. Özgül direnç “ ρ ” harfi ile gösterilir ve birimi “ $\Omega.m$ ”dir. Her malzemenin özgül direnç değeri farklıdır. Özgül direnç, malzemenin uzunluğu ve elektrik iletkenliği ile doğru, enine kesiti ile ters orantılıdır. Gümüş, bakır, altın gibi metallerin özgül dirençleri çok düşüktür, yani elektriği çok iyi iletirler. Ayrıca malzemelerin özgül dirençleri sıcaklıkla değişim gösterir. Sıcaklık değeri arttıkça birçok metalin özgül direnci artar [77, 78]. Yaygın olarak kullanılan bazı malzemelerin özgül direnç değerleri Tablo 2.1’de verilmiştir.

Tablo 2.1. Yaygın olarak kullanılan bazı malzemelerin özgül direnç değerleri [77]

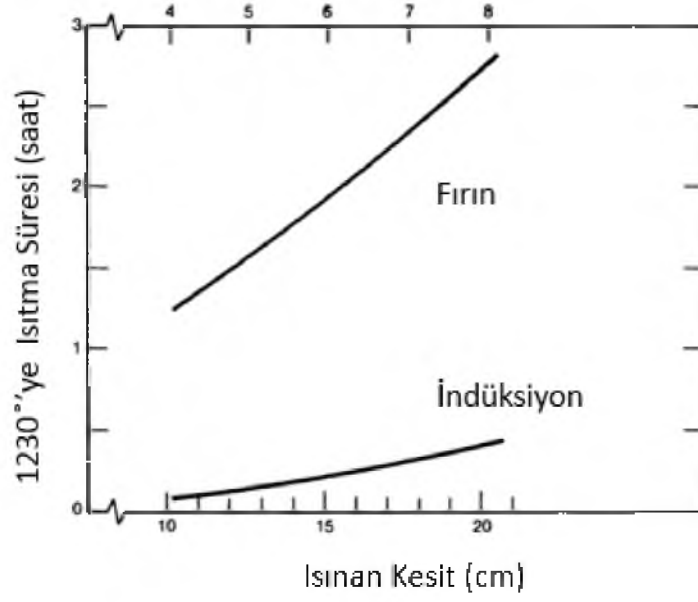
Malzeme	Özgül direnç ($\mu\Omega.m$)
Gümüş	0,015
Bakır	0,017
Altın	0,024
Alüminyum	0,027
Tungsten	0,054
Çinko	0,059
Nikel	0,068
Kobalt	0,09
Az Karbonlu Çelik	0,16
Paslanmaz Çelik	0,7
Kurşun	0,21
Titanyum	0,42
Nikel-Krom Alaşımı	1
Grafit	14
Tahta	$10^{14}-10^{17}$
Cam	$10^{16}-10^{20}$
Mika	$10^{17}-10^{21}$
Teflon	$>10^{19}$

Şekil 2.33'te ise yine yaygın kullanılan bazı metallerin sıcaklığa bağlı olarak değişen özgül direnç değerleri yer almaktadır.



Şekil 2.33. Bazı yaygın metallerin sıcaklığa bağlı olarak değişen özgül direnç değerleri [41, 77]

İndüksiyonun birçok ısıtma işleminde kullanılmasının en önemli nedenlerinden biri hızlı ısıtmadır. Şekil 2.34'te fırında geleneksel ısıtma uygulaması ve indüksiyon ile ısıtmanın zaman bakımından karşılaştırılması yer almaktadır.



Şekil 2.34. İndüksiyonda ve gaz ısıtmalı fırında yapılan ısıl işlemin süre olarak karşılaştırılması [32]

Bahsedilen avantajlarından dolayı birçok uygulamada kullanılan indüksiyonun çeşitli uygulama örnekleri Şekil 2.35, 2.36 ve 2.37’de yer almaktadır.



Şekil 2.35. İndüksiyon ile dişli çark sertleştirme [79]



Şekil 2.36. İndüksiyon ile ısıtma ile sıkı geçme [79]



Şekil 2.37. İndüksiyon ile kaynak [79]

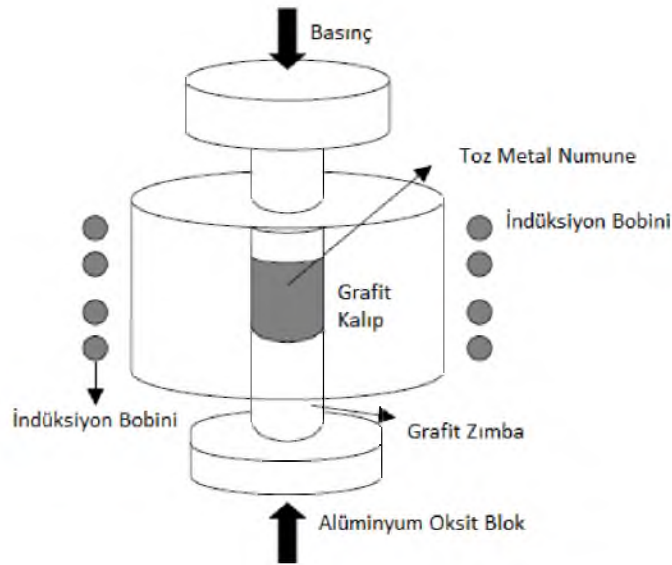
İndüksiyon ile ısıtma, oldukça hızlı şekilde gelişen bir ısıtma yöntemidir. Sanayinin birçok kolunda geleneksel ısıtma yöntemlerinin yerini alması konusunda araştırmalar yapılmaktadır.

2.7.2. İndüksiyon ile Sinterleme Uygulamaları

İndüksiyon ile sinterleme yöntemi, yukarıda açıklanan, indüksiyon akımı vasıtası ile oluşan ısı enerjisinin kullanılarak sinterlemenin gerçekleştirildiği ve hızlı sinterleme yöntemleri adı verilen yöntemlerden bir tanesidir. Hızlı sinterleme

yöntemleri, yaygın olarak sinterleme uygulamalarında kullanılmaktadır. Yöntemlerin en önemli avantajı hızlı ısıtma/soğuma oranlarına sahip olmaları ve malzemelerin yüksek sıcaklıklara uzun süre maruz kalmasını engelleyerek İnce taneli ve yüksek yoğunluklu yapıların elde edilebilmesidir. Ayrıca ısının geleneksel ısıtmada yüzeyden içeriye doğru yayılması dolayısı ile oluşan sıcaklık gradyanları hızlı sinterleme yöntemleri vasıtası ile önlenir. [80-83].

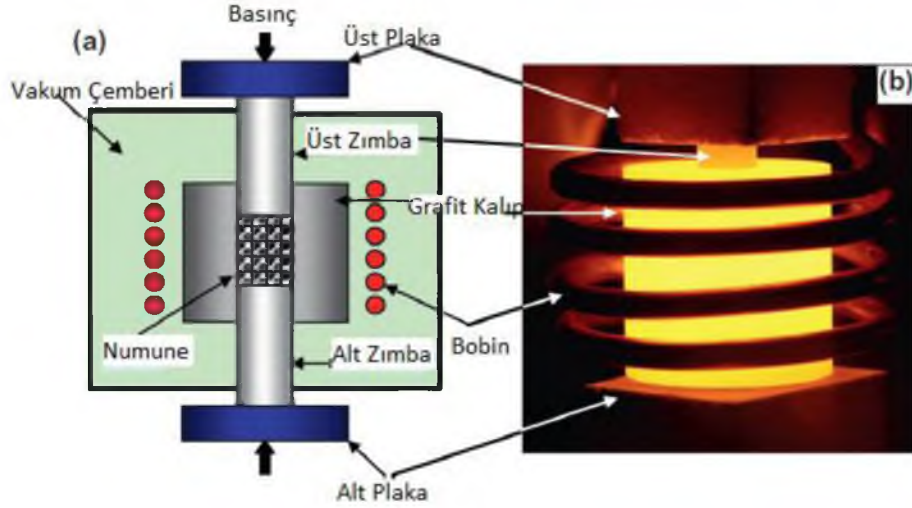
İndüksiyon ile sinterleme yöntemi genellikle yüksek frekanslı olarak uygulanır. Yüksek frekanslı indüksiyon ile sinterleme metal ve seramik tozlarının sinterlenmesinde, mümkün olabilecek en az tane büyümesine neden olmasından dolayı kullanışlıdır. Daha düşük sinterleme sıcaklıklarının kullanılabilmesi ve daha kısa sürelerde sinterlemenin gerçekleştirilebilmesi, tane büyümesini engellemektedir [84]. Literatürdeki çalışmalarda kullanılan indüksiyon ile sinterleme düzeneğinin şematik gösterimi Şekil 2.38’de yer almaktadır.



Şekil 2.38. Yüksek frekanslı indüksiyon ile sinterleme yönteminin şematik gösterilişi [14]

Yüksek frekanslı indüksiyon ile sinterleme yönteminin avantajlarının yanı sıra, yöntemin dezavantajları da mevcuttur. Her seferinde işlem tek parçaya uygulanır. Genellikle nüfuz etme derinlikleri parça kalınlıklarından azdır ve yüksek sıcaklık ve frekanslarda azalış gösterir. Oda sıcaklığında 100 mm’ye kadar nüfuziyet sağlanabilirken sıcaklığın artışı ile derinlik azalır. Bunun yanı sıra yöntemde ön

ısıtmanın gerçekleştirilmesi, her seferinde tek bir malzeme sinterlendiğinden dolayı zordur [6]. Bunun haricinde yöntemin diğer avantaj ve dezavantajlarından tezin giriş kısımlarında bahsedilmiştir. Şekil 2.39'da yüksek frekanslı indüksiyon ile sinterleme yönteminin gerçekleştirildiği düzeneğin ayrıntılı şematik resminin yanı sıra düzenekte gerçekleştirilen sinterleme işleminin görüntüsü yer almaktadır.

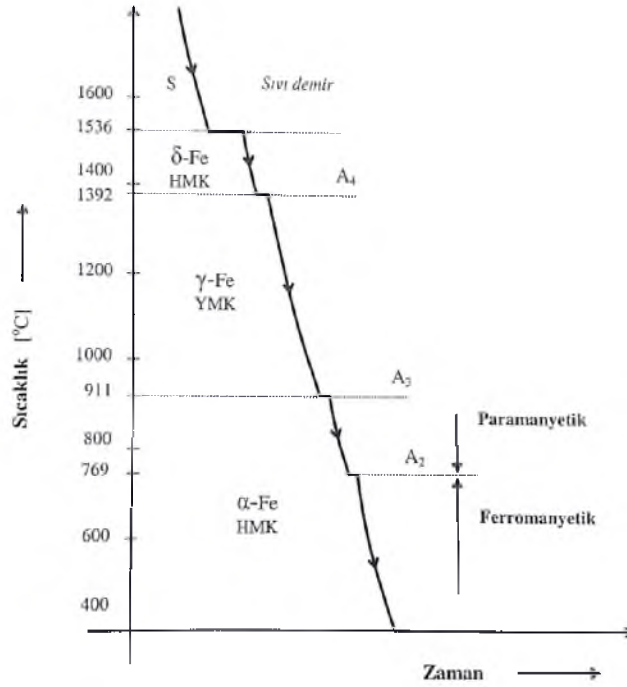


Şekil 2.39. a)Yüksek frekanslı indüksiyon ile sinterleme düzeneğinin ayrıntılı şematik gösterilişi **b)** Düzenekte gerçekleştirilen sinterleme işleminin görüntüsü [29]

Yüksek frekanslı indüksiyon ile sinterleme çalışmalarının yanında son yıllarda tarafımızca da gerçekleştirilen ve bu tez kapsamındaki deneysel çalışmaların yayınlara aktarılması ile de literatüre katkıda bulunulan orta ve düşük frekanslı indüksiyon ile sinterleme çalışmaları mevcuttur [85-94]. Bu çalışmalarda orta ve düşük frekans indüksiyon ile demir esaslı toz metal malzemelerin sinterlenmesi gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmalarda preslenmiş toz metal malzemenin kendisinin ısıtılması ve daha düşük frekans uygulanması vasıtası ile daha üniform bir ısıtmanın gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca yöntemde preslemeden sonraki sinterleme işlemiyle farklı şekildeki parçalar sinterlenebilmekte, sinterleme esnasında ön sinterleme uygulanabilmekte ve seri imalata uygun şekilde sinterleme işlemi gerçekleştirilebilmektedir. Deneysel kısımda, gerçekleştirilen bu çalışmalara ayrıntılı şekilde yer verilmiştir.

2.8. Toz Metalurjisinde Demir ve Demir Alaşımları

Demir esaslı malzemeler, mühendislik malzemelerinin en önemli gurubunu teşkil eder. Saf demirin oda sıcaklığındaki yapısı hacim merkezli kübiktir ve demir sıcaklığa bağlı olarak kristal yapısını değiştirir [95]. Saf demirin soğuma eğrisi Şekil 2.40'da yer almaktadır.

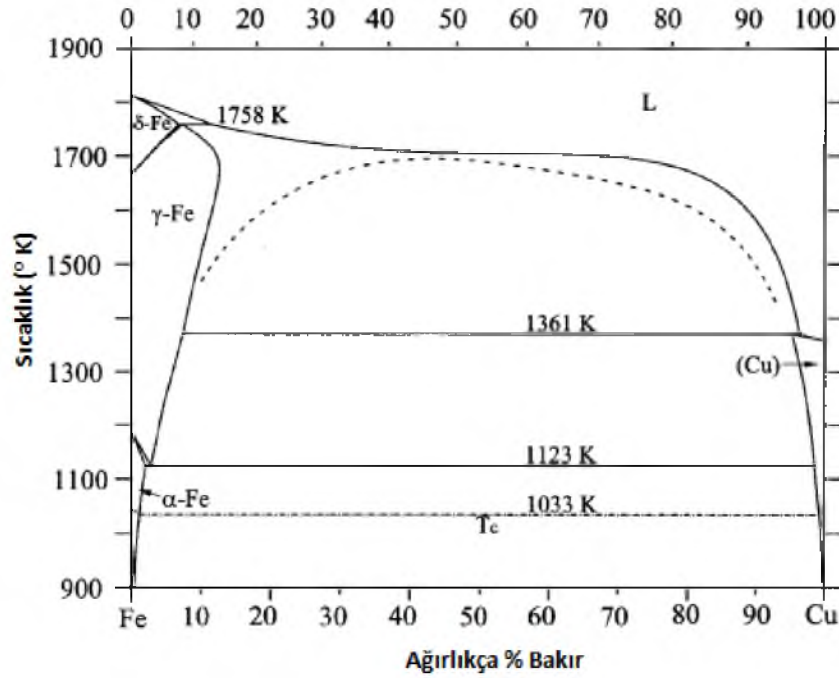


Şekil 2.40. Saf demirin soğuma eğrisi ve allotropik dđnüşümleri [95]

Demirin toz metal uygulamalarında kullanılmasına bakıldığında, kalıpta preslenmiş, iri ve su atomize tozlardan oluşan saf demirin yüksek ham yoğunluklara sahip olmasından dolayı sinterleme esnasında kuvvetli sinter bağlara ihtiyaçı vardır. Genellikle demir tozları, presleme ve sinterleme öncesi alaşımlandırılır [35]. Örneğin demir tozlarına az miktarlarda dahi yapılan bakır ilaveleri, sinterlenen malzemelerin mukavemet değerlerini önemli ölçüde artırır [96]. Demir tozlarına bakır ilavesi, malzemelerde boyutsal artışa neden olur. Sinterleme esnasında malzemede gelen büzülmeyi takviye etmek için, % 1÷2,5 oranlarında bakır ilavesi yapılabilir [6, 35].

Düşük alaşımlı toz metal çelikler otomotiv endüstrisinde ve diğer endüstrilerde oldukça yüksek bir kullanım alanı bulur. Bu malzemeler de genel olarak % 1 ile % 8 aralığında bakır içerirler. Düşük miktarlarda bakır ilaveleri yaşlandırma yolu ile sertleşmeyi sağlarken, daha yüksek miktarlar sıvı faz sinterleme

oluşumu ile yoğunlaşmanın hızlı ve homojen şekilde oluşmasını sağlar [97]. Demir-bakır faz diyagramı Şekil 2.41’de yer almaktadır.



Şekil 2.41. Demir-Bakır faz diyagramı [98]

Demir esaslı tozlara karbon ilave edilmesi, sinterleme kinetiklerini ergime sıcaklığı, viskozite ve yüzey gerilimlerini değiştirerek artırır. Karbon ilavesi ile sinterleme esnasında ferrit ve perlit fazları oluşurken, mikroyapıda yer yer martenzit oluşumu da gerçekleşebilir [99]. Fosfor, nikel, bor, silisyum, krom, mangan ve molibden, demir tozuna yapılan diğer alaşım elementi katkılarıdır. Burada dikkat edilmesi gereken konu homojen bir yapının oluşturulabilmesidir. Bunun için de sinterleme işleminin yeterli sıcaklık ve sürelerde gerçekleştirilmesi sağlanmalıdır [35].

Demir esaslı toz malzemeler, toz metalurjisi ile üretilen malzemelerin en büyük grubunu temsil ederler. Dolayısı ile toz metalurjisindeki gelişmeler doğrudan demir esaslı toz metal malzemelerdeki gelişmelerle bağlantılıdır. Otomotiv endüstrisinde ve diğer endüstrilerde demir esaslı toz metal malzemeler oldukça yaygın bir kullanım alanı bulmaktadır ve diğer üretim yöntemleri ile üretilen demir esaslı malzemeler gibi kendine özgü fiziksel ve kimyasal avantajlara sahiptir [100].

3. DENEYSEL KISIM

3.1. Materyal

Tez kapsamında yapılan çalışmalarda, deney numunelerinin elde edilmesinde, saf demir tozu ve iki farklı demir tozu karışımı (% 0,5 grafit içerikli demir tozu, % 3 bakır ve % 0,5 grafit içerikli demir tozu) kullanılmıştır. Saf demir ve % 0,5 grafit içerikli demir tozu karışımların ana içeriği olan demir tozu, Högenas AHC 100.29 kodlu su atomize demir tozudur. Toz özellikleri Tablo 3.1’de yer almaktadır.

Tablo 3.1. Högenas AHC 100.29 demir tozu kimyasal özellikleri, fiziksel özellikleri ve elek analizi

Kimyasal Özellikler (%)		Fiziksel Özellikler		Boyut Analizi (%)	
C	0,003	Görünür Yoğunluk	2,98 g/cm ³	45 µ m <	24,9
O	0,13			45-75 µ m	28,6
Demir	Balans	Akış	25 s/50 g	75-106 µ m	21,8
				106-150 µ m	19,2
				150-212 µ m	5,5
				>212 µ m	0

% 3 Bakır ve % 0,5 Grafit içerikli toz ise Högenas ASC 100.29 demir tozudur (Tablo 3.2). Kullanılan tozların içeriğinde yağlayıcı olarak % 0,8 Çinko Stereat bulunmaktadır.

Tablo 3.2. Högenas ASC 100.29 demir tozu kimyasal, fiziksel özellikleri ve elek analizi

Kimyasal Özellikler (%)		Fiziksel Özellikler		Boyut Analizi (%)	
C	0,5	Görünür Yoğunluk	2,42 g/cm ³	45 µ m <	23
O	0,7			45-150 µ m	69
Cu	3	Akış	31s/50 g	150-180 µ m	8
Demir	Balans			>180 µ m	0

Deneysel çalışmalarda % 0,5 Grafit içerikli demir tozu kullanılmasının amacı Fe₃C fazının ve perlit yapısının oluşması vasıtası ile çelik oluşumunun geleneksel ve indüksiyon ile sinterlemede numune dayanımına ve mikro yapılarına etkilerinin karşılaştırılmasıdır. Sinterlenen diğer numunelerde % 3 Bakır ve % 0,5 grafit içerikli demir tozu kullanılmasının amacı da yukarıdaki amaçla birlikte, sıvı faz sinterlemenin her iki sinterleme yöntemlerinde numune dayanımlarına ve mikro yapılarına etkilerinin gözlenmesidir. Ayrıca kullanılan bakır ve grafit içerikli bu toz, birçok sektörde kullanılan toz metal parçaların üretiminde yaygın olarak yararlanılan bir karışımdır.

Deney numunelerinin yanı sıra, yaygın kullanım alanı bulan çeşitli şekillerdeki ve içeriklerdeki demir esaslı numunelerin sinterleme işlemleri de gerçekleştirilmiştir. Bu numunelerin toz içerikleri Tablo 3.3'te görülmektedir.

Tablo 3.3. Sinterleme işlemi gerçekleştirilen çeşitli şekil ve boyutlardaki demir esaslı numunelerin içerikleri (% Ağırlık)

Numune	Toz İçeriği
BURÇ 1	ASC 100.29 (% 2 Cu, % 0,6 Grafit, % 1 Çinko Stearat İçeren Demir Tozu)
BURÇ 2	% 100 NC 100.24 Saf Demir + % 0,6 Kenolube P11 (% 2.2-% 2.4 Zn)
BURÇ 3	%100 Distaloy AE (% 4 Ni + % 1,5 Cu + % 0,5 Mo) + % 0,6 Grafit+% 0,6 Kenolube
DÜZ DİŞLİ ÇARK 1	% 85 NC 100.24 Saf Demir Tozu + % 15 Distaloy ACu (% 10,4-11Cu) +% 0,6 Kenolube
DÜZ DİŞLİ ÇARK 2	% 100 AHC 100.29 Demir Tozu+% 0,6 Kenolube
KONİK DİŞLİ ÇARK	% 80 AHC 100.29+ % 20 Distaloy ACu (% 10,4-11 Cu) Karışımı (% 99,2)+ % 0,8 Grafit+% 0,4 Kenolube

Numunelerin seçilmesinde demir esaslı ve yaygın kullanım alanlarına sahip olmalarına dikkat edilmiştir. Numunelerin tamamı seri olarak üretilen ve otomotiv endüstrisinde kullanılan parçalardır. Numunelerde kullanılan tozların özellikleri, Tablo 3.4, Tablo 3.5 ve Tablo 3.6'da yer almaktadır.

Tablo 3.4. NC 100.24 saf demir tozu kimyasal, fiziksel özellikleri ve elek analizi

Kimyasal Özellikler (%)		Fiziksel Özellikler		Boyut Analizi (%)	
H ₂	0,15	Görünür Yoğunluk	2,43 g/cm ³	45 µ m<	18,5
Cu	0			45-75 µ m	20,5
Mo	0			75-106 µ m	25,9
C	0			106 µ m-150 µ m	33,9
O	0,08			150 µ m-212 µ m	2,3
Demir	Balans			180 µ m-212 µ m	0,1
		Akış	32 s/50 g	>212 µ m	0

Tablo 3.5. Distaloy AE tozu kimyasal, fiziksel özellikleri ve elek analizi

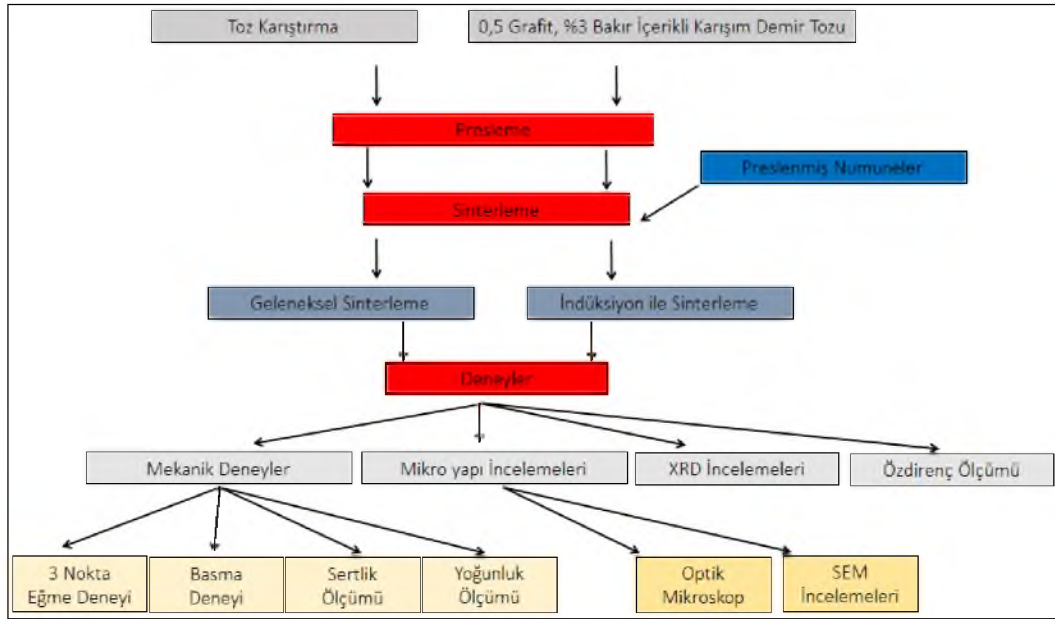
Kimyasal Özellikler (%)		Fiziksel Özellikler		Boyut Analizi (%)	
Ni	4,07	Görünür Yoğunluk	3,02 g/cm ³	45 µ m<	27,1
Cu	1,52			45-75 µ m	29,5
Mo	0,50			75-106 µ m	20,4
O	0,08			106 µ m-150 µ m	17,2
C	0			150 µ m-180 µ m	4,7
Demir	Balans			180 µ m-212 µ m	1,1
		Akış	26 s/50 g	>212 µ m	0

Tablo 3.6. Distaloy ACu tozu kimyasal, fiziksel özellikleri ve elek analizi

Kimyasal Özellikler (%)		Fiziksel Özellikler		Boyut Analizi (%)	
Cu	10,8	Görünür Yoğunluk	3,04 g/cm ³	45 µ m<	22,8
O	0,09			45-75 µ m	29
C	0			75-106 µ m	20,9
Demir	Balans			106 µ m-150 µ m	20,5
				150 µ m-180 µ m	5,8
				180 µ m-212 µ m	1
		Akış	24 s/50 g	>212 µ m	0

3.2. Yöntemler

Tez çalışmasında genel aşamalar olarak toz karıştırma, tartma, presleme, sinterleme ve sinterlenen malzemelerin deneylere tabi tutulması işlem adımları yer almaktadır. Ayrıca deney numuneleri haricinde çeşitli şekil ve boyutlardaki malzemeler Sintek A.Ş. ve Toz Metal A.Ş'den preslenmiş şekilde temin edilip sinterlenerek deneysel analizlere tabi tutulmuştur. Yapılan deneylerde, deney güvenilirliklerinin yüksek olması amacıyla her deney parametresi için en az 8 adet ölçüm gerçekleştirilmiştir. Deneylerin güvenilirlikleri, elde edilen değerlerin, fazla sayıda numune üretimi gerçekleştirileceği durumda tüm kümeyi temsil etmesi açısından büyük önem teşkil eder. Her deney parametresinde standart sapmalar hesaplanarak, belirli değerler aralığında normal dağılıma uymayan sonuçlar iptal edilmiş, deney adedini tamamlamak amacıyla yeni deneyler gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen deneylerin işlem adımları Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1. Deneysel çalışmalarda uygulanan işlem adımları

3.2.1. Tozların Tartılması ve Karıştırılması

Numune hazırlama işlemleri için öncelikle saf demir ve ağırlıkça % 0,5 grafit içerikli demir tozları yağlayıcı olarak yine ağırlıkça % 0,8 Çinko stearat içerecek şekilde karıştırılmıştır. Ağırlıkça % 3 bakır ve % 0,5 grafit içerikli demir tozları,

hazır karışım toz olarak temin edilmiştir. Karıştırma sonrası numuneler, sinterleme sonrası 37 g numune ağırlığı olacak şekilde, yağlayıcı olarak kullanılan ve sinterleme esnasında malzemeden uzaklaşacak olan ağırlıkça % 0,8 Kenolube'u da göz önüne alarak 0,001 gram hassasiyetli Radwag PS 100-c-2 marka hassas tartıda 37,296 g olarak tartılmıştır.

3.2.2. Tozların Preslenmesi

Tozlar, karıştırma işleminin ardından Şekil 3.2'de gösterilen 100 tonluk Hidrokar Hidrolik Atölye Presi ve toz metal kalıbında 600 MPa basınç altında preslenmiş ve 10x10x55 mm boyutlarında numune elde edilmiştir. Güvenirlikli sonuç elde edebilme amacı ile her deney parametresi için ortalama 10, minimum 9 numune üretilmiştir.



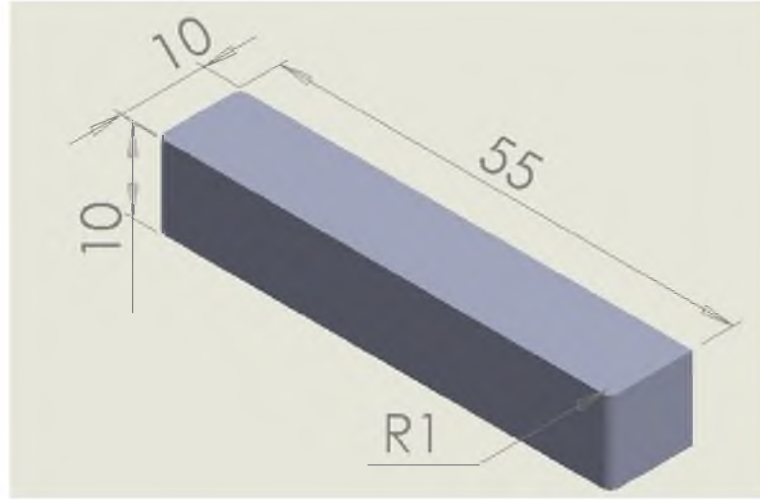
Şekil 3.2. a) 100 tonluk hidrolik pres, b) Kalıp

Numunelerin presleme sonrası görüntüleri Şekil 3.3'te yer almaktadır.



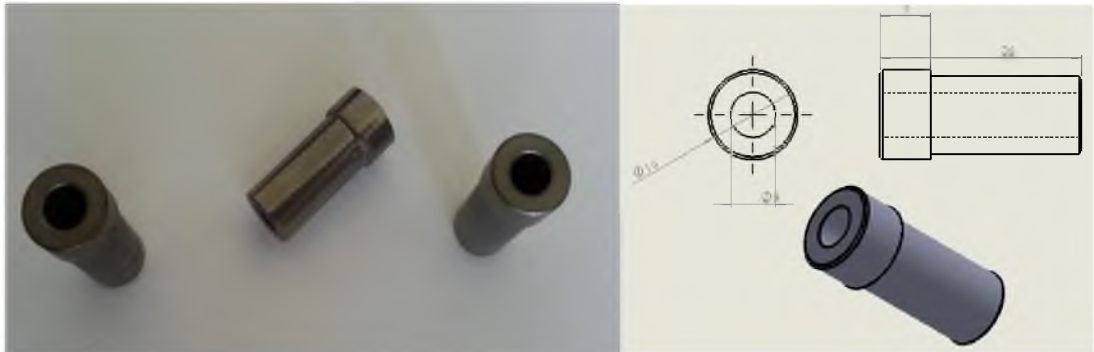
Şekil 3.3. Saf demir tozundan preslenen numunelerin presleme sonrası görüntüsü

Preslenen numunelerin teknik resmi Şekil 3.4'te yer almaktadır.



Şekil 3.4. Preslenen numunelerin teknik resmi

10x10x55 mm kare kesitli deney numunelerinde indüksiyon ile sinterleme prosesinde başarılı sonuçlar elde edilmesinin ardından, deneylerin son kısmında, çeşitli boyut ve şekillerdeki demir esaslı toz metal malzemelerin İndüksiyon ile sinterleme işlemlerinin gerçekleştirilip gerçekleştirilemeyeceği araştırılmıştır. Bunun için, öncelikle Toz Metal A.Ş.'den alınan ve 600 MPa basınç altında çift etkili preste üretilen Burç 1 adı verilen numuneler ile ilk denemeler gerçekleştirilmiş (Şekil 3.5) ve elde edilen başarılı sonucun ardından Sintek A.Ş.'den temin edilen ve çift etkili preste 400 MPa basınç altında preslenerek üretilen çeşitli boyut ve şekillerdeki numunelerin sinterleme işlemine geçilmiştir. Numunelerin resimleri Şekil 3.6'da yer almaktadır.

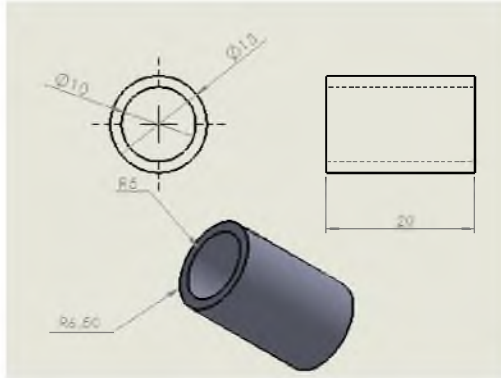


Şekil 3.5. Burç 1

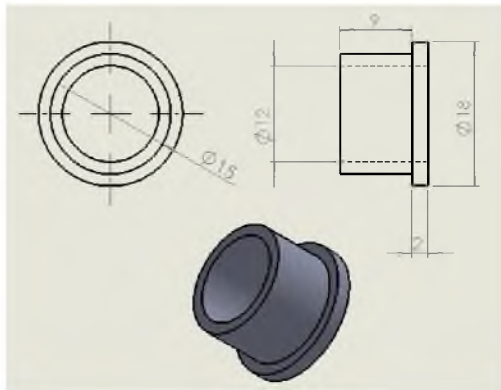


Şekil 3.6. Farklı boyut ve şekillerdeki preslenmiş parçalar

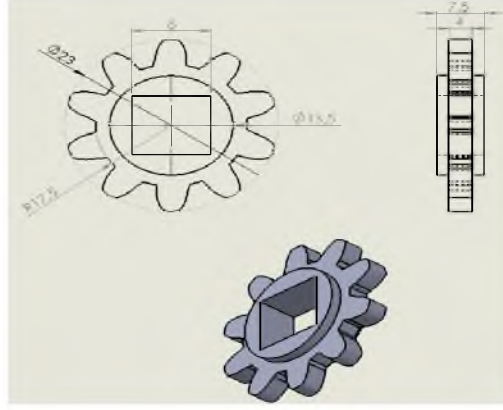
Deneylerde kullanılan parçaların teknik resimleri Şekil 3.7- 3.11’de yer almaktadır.



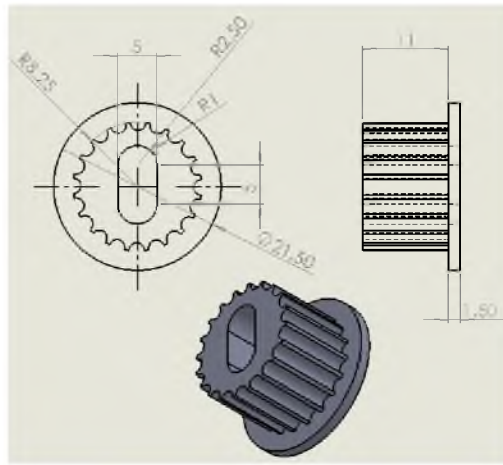
Şekil 3.7. Burç 2



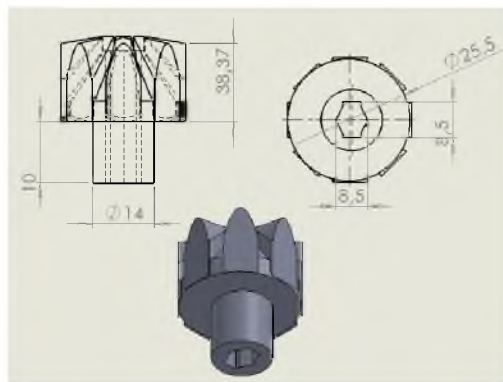
Şekil 3.8. Burç 3



Şekil 3.9. Düz dişli çark 1



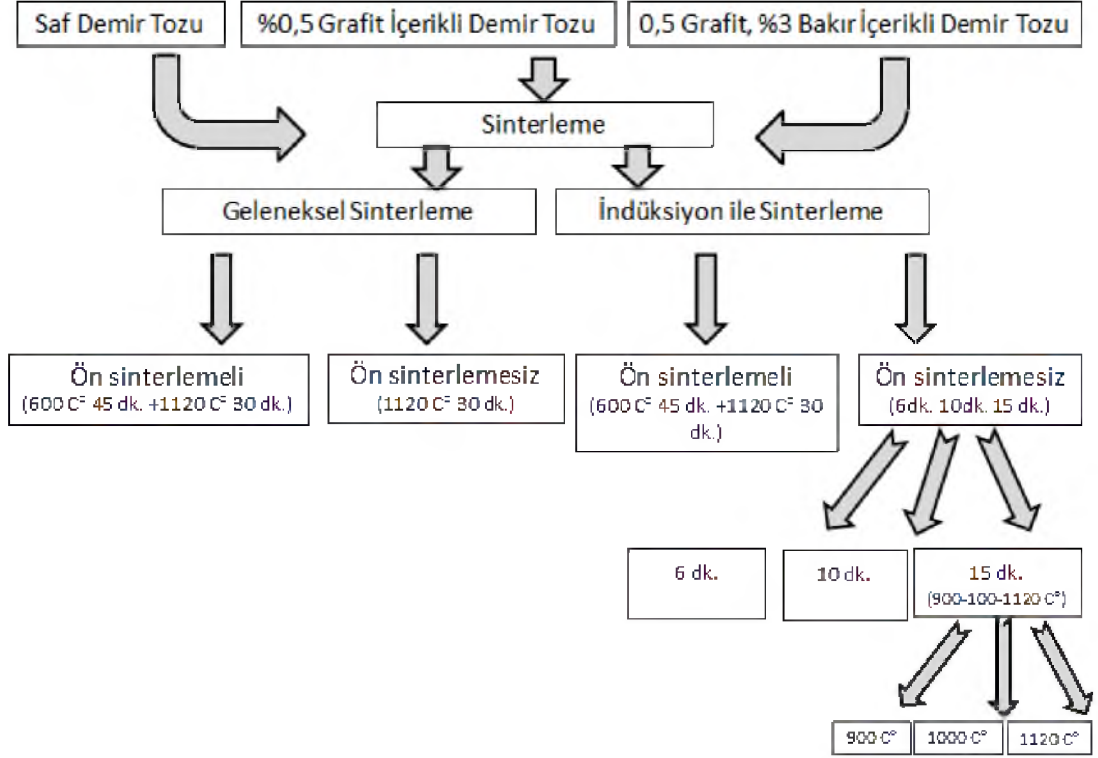
Şekil 3.10. Düz Dişli Çark 2



Şekil 3.11. Konik dişli çark

3.2.3. Numunelerin Sinterlenmesi

Numuneler, presleme işleminin ardından sinterleme işlemine tabi tutulmuştur. Sinterleme işleminde deney numunelerine uygulanan parametreler, Şekil 3.12’de yer almaktadır.

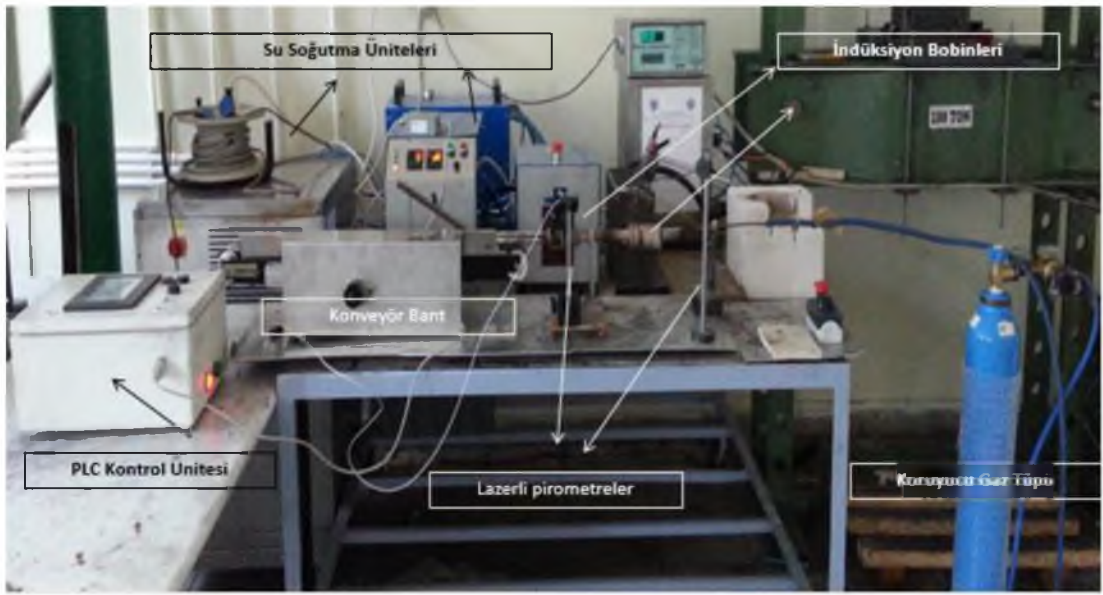


Şekil 3.12. Deney numunelerinde kullanılan sinterleme parametreleri

Demir esaslı toz metal malzemelerin sinterleme işlemi genellikle 1120 °C sinterleme sıcaklığında gerçekleştirilmektedir [100-105]. Ticari uygulamalarda, kullandığımız deney numunelerine yakın boyutlardaki numuneler için 45 dakika ön sinterlemenin ardından sinterleme süresi 30 dakika olarak uygulanmaktadır. Numunelerin soğuma süresi de yaklaşık 75 dakikadır. Deney parametrelerinde seçilen sıcaklık ve süre değerleri, bu süre ve sıcaklıklara dayanılarak belirlenmiştir. İndüksiyon ile ısıtma uygulamasında hızlı ısıtmadan dolayı ön sinterleme ve sinterleme süreleri geleneksel sinterlemeye nazaran daha düşük tutulmuştur.

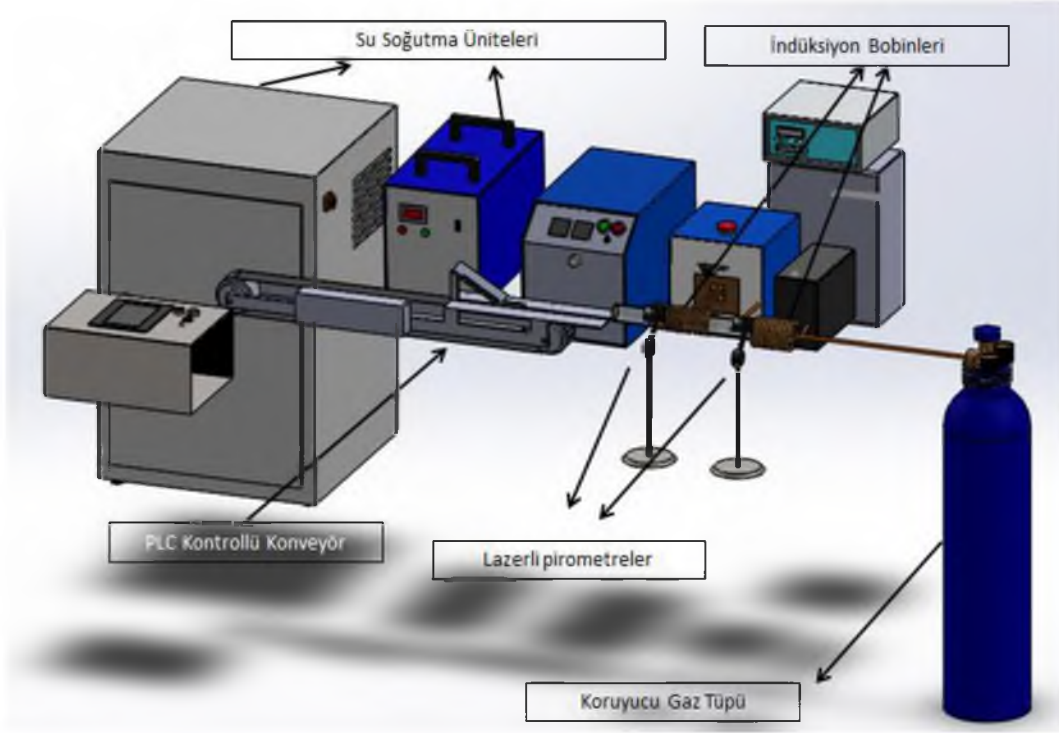
Numuneler Şekil 3.13’te de şematik olarak gösterildiği gibi, indüksiyon ile sinterleme düzeneğinde sıcaklık: 1120 °C sabit tutularak 3 farklı sürede (6 dakika, 10

dakika ve 15 dakika), süre: 15 dakika ile sabit tutularak üç farklı sıcaklıkta (900 °C, 1000 °C, 1120 °C) ve ön sinterlemenin etkisini inceleme amaçlı 600 °C’de 15 dakika ön sinterlemenin ardından 1120 °C’de 15 dakika süresince sinterlenmiştir. İndüksiyon ile sinterlemede sinterleme süresi bazı numuneler için geleneksel sinterleme süresi olan 30 dakika’ya kadar yükseltip, sonuçları gözlenmiştir. Karşılaştırma amaçlı olarak yapılan geleneksel sinterleme işleminde, direnç fırınında 30 dakika ve ön sinterlemeli olarak 45 dakika 600 °C’de ön sinterlemenin ardından 1120 °C’de 30 dakika olmak üzere sinterleme işlemleri gerçekleştirilmiştir. İndüksiyon ile sinterleme düzeneğinin resmi Şekil 3.13’te görülmektedir.



Şekil 3.13. İndüksiyon ile sinterleme düzeneği

Ön sinterleme işlemi, 5 kW gücünde, 2,5 kHz frekansa sahip indüksiyon cihazında gerçekleştirilmiştir. Bobin uzunluğu 93 mm, bobin çapı 4 mm, bobin sarım sayısı 14 ve sarım dış çapı 35 mm’dir. Sinterleme işlemi ise 12 kW gücünde 45 kHz frekanslı indüksiyon cihazında gerçekleştirilmiştir. Bobin çapı 8 mm, bobin uzunluğu 100 mm, bobin sarım sayısı 9, sarım dış çapı 48 mm’dir. Sinterleme Düzeneğinin 3 boyutlu çizimi Şekil 3.14’te yer almaktadır.



Şekil 3.14. İndüksiyon ile sinterleme düzeneğinin 3 boyutlu çizimi

Sinterleme prosesi, hem indüksiyon sinterleme hem de geleneksel sinterleme işleminde argon atmosferi altında gerçekleştirilmiştir. Dişli çark ve burçların sinterlenmesi, atmosfer ortamında gerçekleştirilmiştir. Aynı parçaların karşılaştırma amaçlı sinterlenmesinde ise Sintek firmasında geleneksel sinterleme fırınları ve parçalanmış amonyak atmosferi kullanılmıştır.

Sinterleme esnasındaki ön sinterleme işlemi, numune içerisindeki yağlayıcı veya bağlayıcı polimerlerin uzaklaştırılması amacıyla gerçekleştirilmektedir [1]. Direnç fırınında ön sinterleme işlemi, fırının programlanarak gerçekleştirilmiştir. İndüksiyon ile sinterleme düzeneğinde ön sinterleme işlemi, ikinci indüksiyon cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Deney numunelerinin ve çeşitli şekil ve boyutlardaki gerçek makine parçalarının indüksiyon ile sinterleme esnasındaki görüntüleri Şekil 3.15 ve 3.16'da görülmektedir.

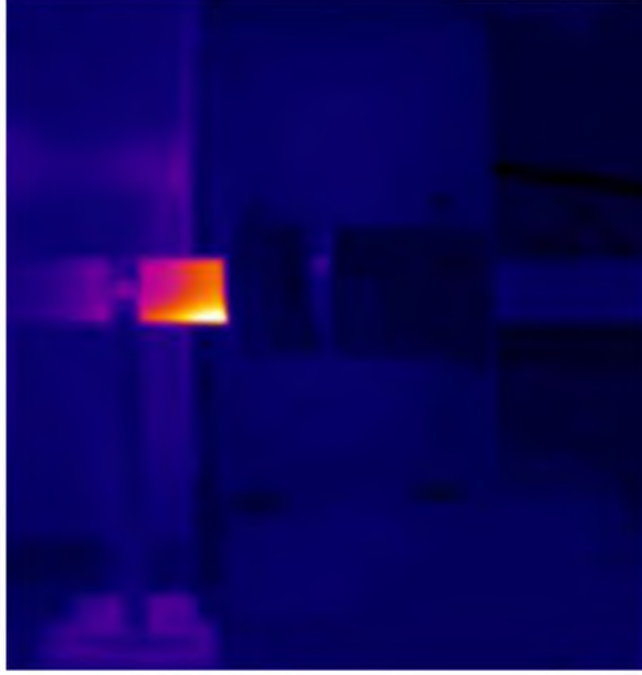


Şekil 3.15. 10x10x 55 mm deney numunelerinin indüksiyon ile sinterlenmesi

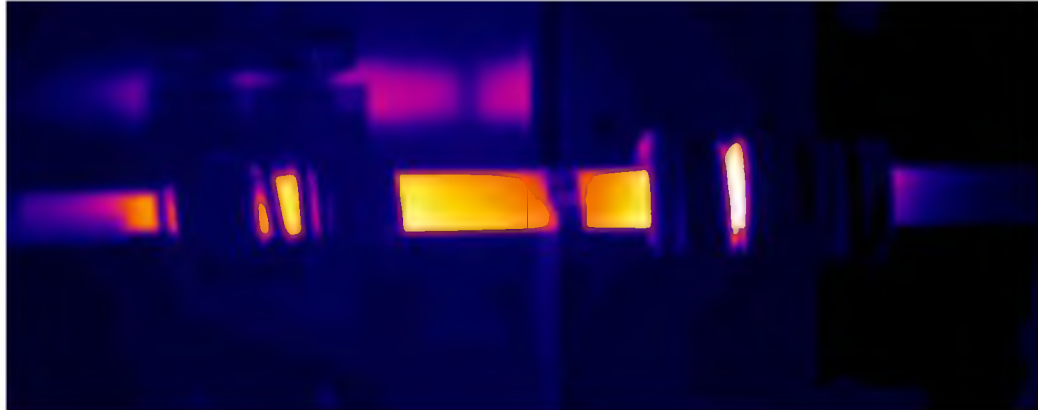


Şekil 3.16. Çeşitli şekil ve boyutlardaki numunelerinin indüksiyon ile sinterlenmesi

Numunelerin sinterleme sırasındaki termal kamera görüntüleri Şekil 3.17 ve 3.18'de görülmektedir.

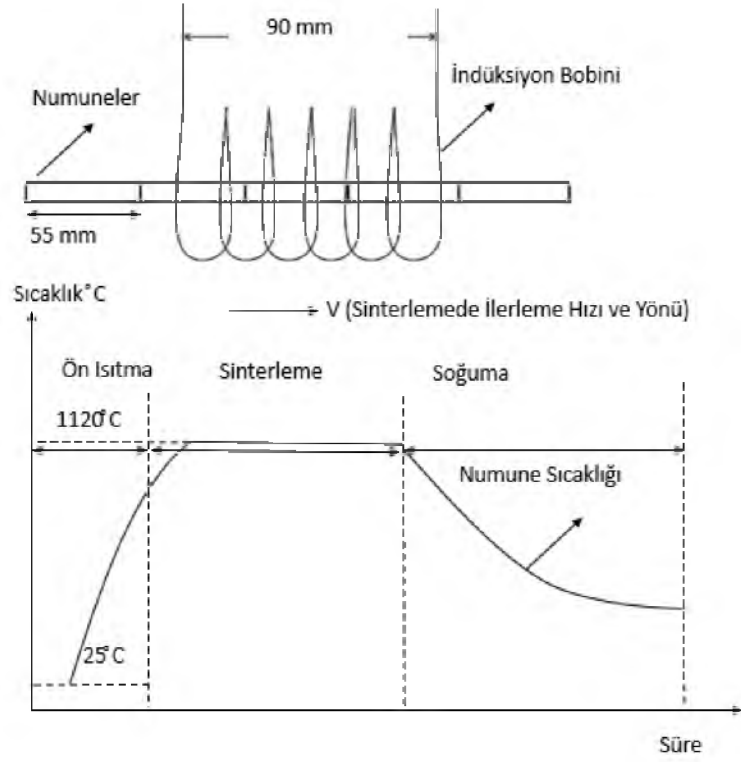


Şekil 3.17. İndüksiyon ile sinterleme esnasında termal kamera görüntüsü (Ön sinterleme gerçekleştirilmeyen sinterleme işlemi)

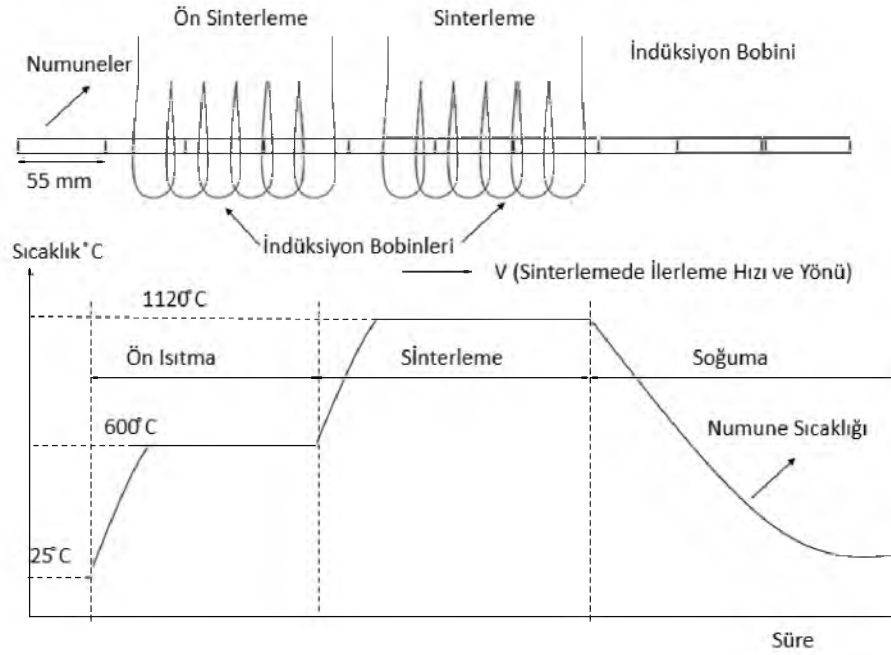


Şekil 3.18. İndüksiyon ile sinterleme esnasında termal kamera görüntüsü (Ön sinterleme gerçekleştirilen sinterleme işlemi)

Numunelerin indüksiyon düzeneğinde sinterleme işlemi, Şekil 2.26'da verilen geleneksel sinterleme aşamalarına benzer şekilde gerçekleştirilmektedir. İndüksiyon ile sinterleme esnasında ön sinterlemesiz ve ön sinterlemeli olarak gerçekleştirilen sinterleme işlemlerinde sinterleme esnasındaki sıcaklık ve sürenin grafiksel gösterilişi Şekil 3.19 ve Şekil 3.20'de yer almaktadır.



Şekil 3.19. İndüksiyonla sinterleme düzeneğinde ön sinterlemesiz işlemde sinterleme aşamaları



Şekil 3.20. İndüksiyonla sinterleme düzeneğinde ön sinterlemeli işlemde sinterleme aşamaları

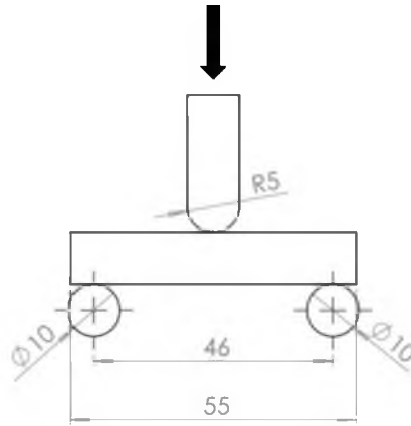
Şekil 3.19 ve Şekil 3.20'den de görüldüğü gibi ön sinterleme uygulanmadığında da sinterleme sıcaklığına yükselişte bir ön ısıtma mevcuttur, ancak ısınma çok hızlı şekilde meydana gelmektedir. Bu da numunelerdeki yağlayıcı çıkışının buharlaşmadan ziyade yanma şeklinde olmasına sebebiyet vermektedir. Bu olgunun numunelerin mekanik özellikleri üzerindeki etkileri, deneysel kısımda incelenmiştir.

Numuneler sinterleme işleminden sonra çeşitli mekanik deneylere ve mikro yapı incelemelerine tabi tutulmuşlardır. Bu deneyler ve sonuçları, izleyen aşamalarda aktarılmıştır.

3.2.4. Üç Nokta Eğme Deneyi

Numunelerin üç nokta eğme testi 100 kN kapasiteli SHIMADZU-AG marka cihazda 1 mm/dk hızda yapılmıştır. Test, 10x10x55 mm numune boyutlarına uygun şekilde yaptırılan aparatta gerçekleştirilmiştir.

Deneyde kullanılan 3 nokta eğme aparatının şematik gösterilişi Şekil 3.21'de görülmektedir.

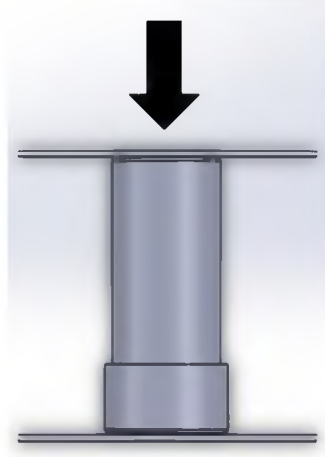


Şekil 3.21. Üç nokta eğme deney düzeneğinin şematik gösterilişi

3.2.5. Basma Deneyi

Deney numunelerinin haricinde, sinterlenen dişli çark ve burçların mukavemetlerini saptayabilmek amacıyla, numunelere basma testi uygulanmıştır. Basma testi, Şekil 3.23'te gösterilen Autograph Shimadzu AG-IS 100 kN universal

test cihazında ASTM E9-09 standartlarına uygun şekilde gerçekleştirilmiştir. Örnek olarak Burç 1'e uygulanan basma testinin şematik görüntüsü Şekil 3.22'de yer almaktadır.



Şekil 3.22. Burçlara uygulanan basma testinin şematik gösterilişi

3.2.6. Rockwell-B Sertlik Ölçümü

Numunelerin Rockwell-B sertlik ölçümleri BMS 200 RB marka cihazda 100 kg (981 Newton) kuvvet ile ASTM E18-12 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir.

3.2.7. Mikro Vickers sertlik Ölçümü

Toz metal numunelerin sertlik ölçümünde daha önce yaptığımız çalışma sonucunda, numunelerde mevcut olan boşluk, alaşım elementleri ve Mikro Vickers ucunun boyutlarının küçük olmasından dolayı bu noktalara temas edebilme olasılığının yüksekliği sebebi ile Vickers sertlik ölçümünün çok uygun bir metot olmadığı sonucuna ulaşılmıştır [87]. Sertlik ölçümü esnasında, sertlik ucunun daha fazla yüzeyle temas halinde bulunmasından dolayı, Brinell ve Rockwell sertlik ölçüm metotları, toz metal numunelerin sertlik ölçümünde daha tutarlı sonuçların elde edilmesini sağlar. Tez kapsamında deneyleri gerçekleştirilen demir esaslı numuneler için, yumuşak çeliklerin sertliklerinin ölçülmesinde kullanılan Rockwell-B sertlik ölçüm yöntemi kullanılmıştır. Ancak grafit ve bakır içeren numunelere Vickers sertlik ölçümü de uygulanarak sonuçları irdelenmiştir.

Numunelerin Vickers sertlik ölçümleri, 10 saniye süre ile uygulanan 50 g yük ile Future-Tech FM-700 micro sertlik test cihazında ASTM: E384-11e1 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir.

3.2.8. Yoğunluk Ölçümü

Sinterleme işleminin öncesi ve sonrasında numunelerin yoğunlukları Arşimet prensibi ile çalışan ASTM B962-08 standardına uygun olarak yoğunluk ölçümünü gerçekleştiren tartı ile ölçülmüştür. Numunelerin yoğunluk ve bağıl yoğunluk değerleri hesaplanmıştır. Yoğunluk değerleri g/cm^3 cinsinden elde edilen gerçek yoğunluklarıdır. Bağıl yoğunluk değerleri ise, numunelerin yoğunluklarının, içeriklerindeki malzemelerin dolu (bulk) haldeki yoğunluk değerlerine oranlanması ile elde edilen değerlerdir. Bağıl yoğunluğun hesaplanmasında aşağıdaki formül kullanılmıştır.

$$\text{Bağıl yoğunluk (\%)} = \frac{\text{Ölçülen yoğunluk (g/cm}^3\text{)}}{\text{Dolu (bulk) haldeki yoğunluk (g/cm}^3\text{)}} \times 100 \quad (3.1)$$

3.2.9. Optik Mikroskop ile Mikro Yapı İncelemeleri

Numunelerin Mikro yapı incelemeleri için numuneler Struers labotom-3 marka hassas kesme cihazı ile kesildikten sonra çeşitli gridlerdeki zımparalar ile Struers Labopol 5 parlatma cihazında zımparalanıp 3 ve 1 mikronluk elmas solüsyon ile parlatılmıştır.

Parlatma işleminin ardından numuneler % 3'lük Nital (% 3 Nitrik Asit-% 97 Etanol) çözeltisinde dağlanıp, mikro yapı görüntüleri Nikon Eclipse LV150 marka optik mikroskopta çekilmiştir.

3.2.10. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile Mikro Yapı İncelemeleri

Numunelerin taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile yapılan incelemeleri, Dokuz Eylül Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümünde bulunan JEOL JSM 6060 marka cihazda gerçekleştirilmiştir. Numunelere EDS-Enerji dağılımlı X ışınları analizi (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) SEM cihazına

bağlı olarak çalışan IXRF System Inc.marka cihazda gerçekleştirilerek, numune üzerindeki belirli nokta, çizgi ve alanlarda elementel kompozisyonlar belirlenmiştir. Bu sayede sinterleme parametrelerinin ve özellikle indüksiyon ile sinterleme işleminin numune mikroyapısı üzerindeki etkileri belirlenmeye çalışılmıştır.

Numunelerin SEM analizinde, geleneksel sinterleme ve indüksiyon ile sinterleme ile üretilen numunelerden görüntüler alınıp karşılaştırılmıştır. Tüm numunelere noktasal ve çizgisel EDS analizleri yapılmıştır. Ayrıca bakır ve grafit içerikli numunelerde yapılan haritalama (mapping) ile numune içerisinde bulunan elementlerin dağılımları belirlenmiştir. İndüksiyon ile sinterleme yönteminin geleneksel sinterleme yönteminden farklı olan mekanizmaları irdelenmiştir. Bu numunelerin kırık yüzeyleri de incelenerek sinterleme sıcaklık ve süresi gibi parametrelerin numunelere etkileri araştırılmıştır.

3.2.11. Numunelerin XRD (X-Işınları Difraktometresi) İncelemeleri

Numunelerin XRD incelemeleri ASTM D3906–03 standardına uygun şekilde, Celal Bayar Üniversitesi Deneysel Fen Bilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezinde bulunan Panalytical Empyrean marka XRD cihazında gerçekleştirilmiştir. XRD analizleri ile demir esaslı numunelerde sinterleme sonrası oluşan bileşik ve fazlar ve bunların sinterleme parametreleriyle ilişkilerinin saptanmasına çalışılmıştır.

3.2.12. Özgül direnç Ölçümleri

İndüksiyon ile sinterleme vasıtası ile üretilen numunelerde elde edilen mekanik dayanım ve mikroyapı özelliklerinin nedenlerinin irdelenmesi amacıyla Celal Bayar Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde yer alan 2013-040 Numaralı BAP projemiz vasıtası ile alınan Hioki 3541 direnç ölçüm cihazı ile numunelerin özgül direnç ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Çalışma kapsamında sinterleme parametreleri ve indüksiyon ile sinterleme yönteminin, farklı içeriklerdeki demir esaslı toz metal malzemeler üzerine etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla numuneler, argon atmosferinde indüksiyon ile sinterleme yöntemiyle ve karşılaştırma amacıyla geleneksel sinterleme yöntemi farklı parametrelerde üretilmiş ve önceki bölümde aktarıldığı gibi çeşitli deneylere tabi tutulmuştur. Numune içeriklerinde saf demir tozu; % 0,5 grafit içerikli demir tozu; % 0,5 grafit, % 3 bakır içerikli demir tozu olmak üzere 3 ana bileşim mevcuttur.

Çalışmanın son kısmında 10x10x55 mm deney numuneleri haricinde çeşitli şekil ve boyutlardaki numuneler de indüksiyon ile sinterleme yöntemiyle üretilmiştir. Bu numunelerin dayanım değerleri ve mikro yapıları da geleneksel sinterleme yöntemi ile elde edilen değerlerle karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmaların sonuçları, ticari saflıktaki demir tozu ile yapılan çalışmalar, grafit içerikli demir tozu ile yapılan çalışmalar, bakır ve grafit içerikli demir tozu ile yapılan çalışmalar, farklı toz bileşimlerinin numuneler üzerine etkileri, çeşitli boyut ve şekildeki parçalarla yapılan çalışmalar olarak 5 ana kısma ayrılmıştır.

4.1. Ticari Saflıktaki Demir Tozu ile Yapılan Çalışmalardaki Sonuçlar

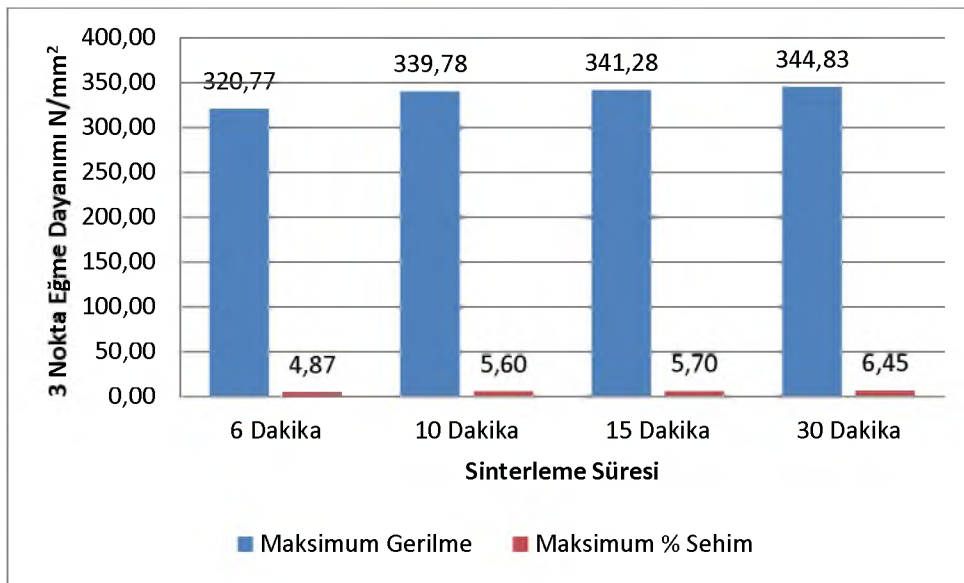
Ticari saflıktaki, Högenas AHC 100.29 demir tozundan üretilen % 100 demir içerikli numunelerin içeriğinde yağlayıcı olarak % 0,8 oranında Kenolube bulunmaktadır. Numuneler, indüksiyon ile sinterleme yönteminde sıcaklık 1120 °C'de sabit tutularak 4 farklı sürede (6, 10, 15, 30 dakika), süre 15 dakikada sabit tutularak 3 farklı sıcaklıkta (900, 1000, 1120 °C) ön sinterlemesiz olarak sinterlenmiştir. İndüksiyon ile sinterleme süresi diğer toz içerikleri için 15 dakikada sınırlanırken, ticari saflıktaki demir tozundan üretilen numunelerde süre, geleneksel sinterleme süresine eşit olan 30 dakikaya kadar çıkartılmıştır.

Numuneler ön sinterlemeli olarak 600 °C'de 15 dakika sinterlemenin ardından 1120 °C'de 15 dakika süre ile sinterlenmiştir. Karşılaştırma amacıyla yapılan geleneksel sinterleme işlemi, direnç fırınında ön sinterlemesiz olarak 30 dakika; ön sinterlemeli olarak 45 dakika 600 °C'de ön sinterlemenin ardından 1120 °C'de 30 dakika olmak üzere gerçekleştirilmiştir. Sinterleme işlemleri Argon

atmosferinde gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda elde edilen bulgular aşağıda yer almaktadır.

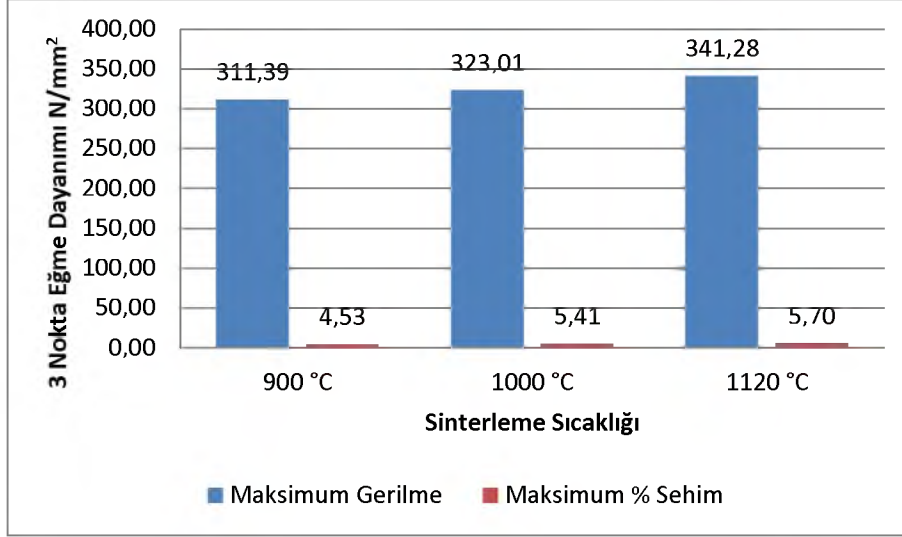
4.1.1.Üç Nokta Eğme Deneyi Sonuçları

Sinterlenen numunelere uygulanan 3 nokta eğme deneyinin sonuçları aşağıda verilmiştir. Deney, güvenilirlikli sonuç elde edilmesi amacı ile her parametre için en az 8 numuneye uygulanmıştır. Şekil 4.1'de indüksiyon ile sinterleme yönteminde sabit 1120 °C sıcaklıkta farklı sinterleme sürelerinin dayanıma etkileri görülmektedir.



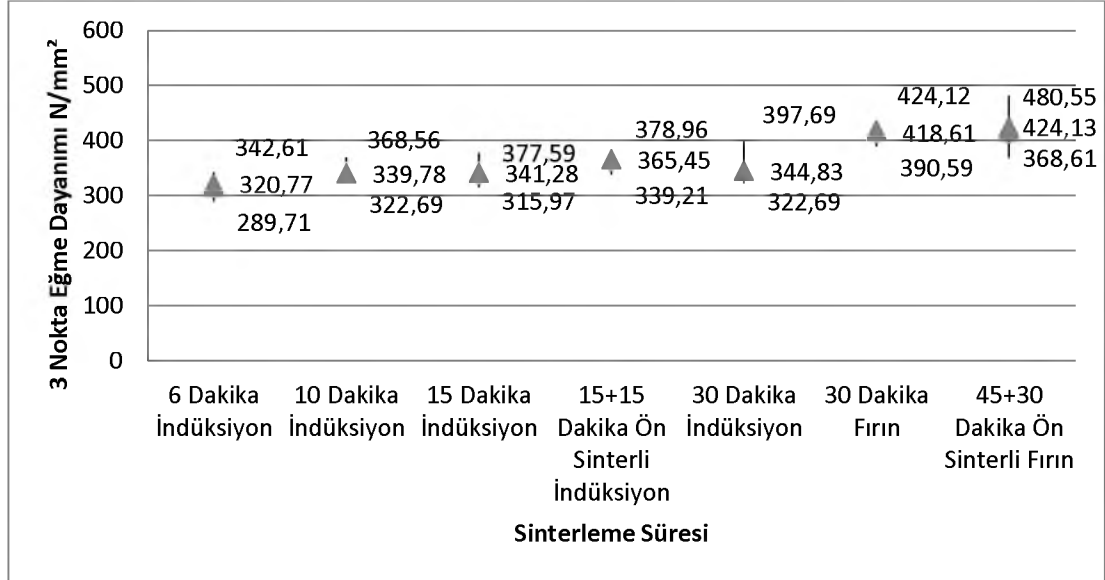
Şekil 4.1. Saf demir numunelerde indüksiyon ile sinterlemede sinterleme süresi- üç nokta eğme dayanımı değişimi

Şekil 4.2'de 15 dakika sabit sinterleme süresinde farklı sinterleme sıcaklıklarının numunelerin üç nokta eğme dayanımlarına etkisi görülmektedir.

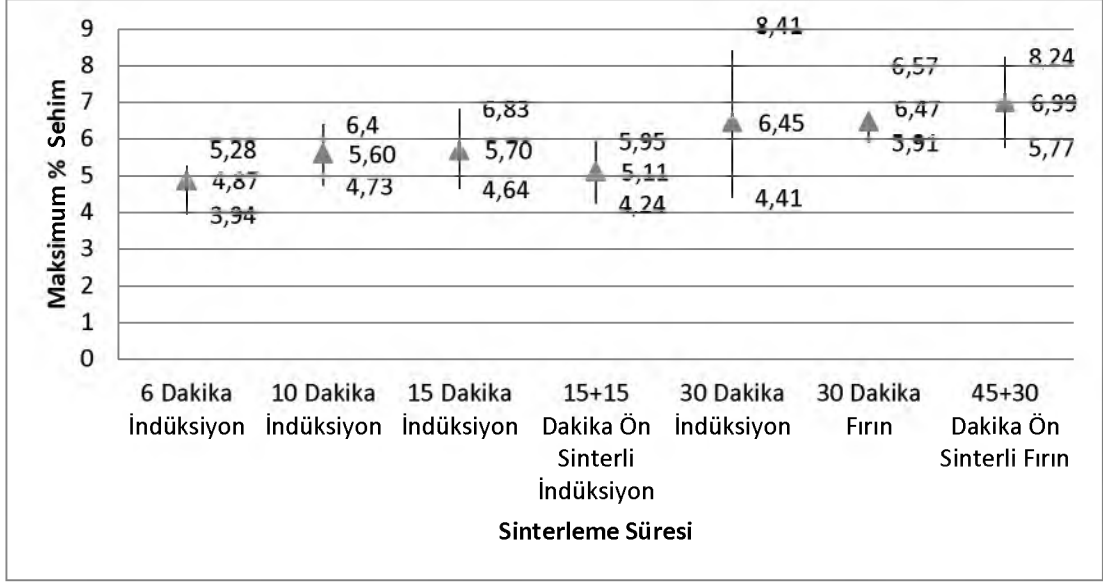


Şekil 4.2. Saf demir numunelerde indüksiyon ile sinterlemede farklı sinterleme sıcaklıklarının numunelerin üç nokta eğme dayanımlarına etkisi

Şekil 4.3'te ve 4.4'te farklı sinterleme yöntemlerinin ve ön sinterleme uygulanmasının numunelerin 3 nokta eğme dayanımlarına etkisi ve en yüksek, en düşük ve ortalama değerler görülmektedir.



Şekil 4.3. Saf demir numunelerde farklı sinterleme yöntemlerinin ve ön sinterlemenin numunelerin 3 nokta eğme dayanımlarına etkisi

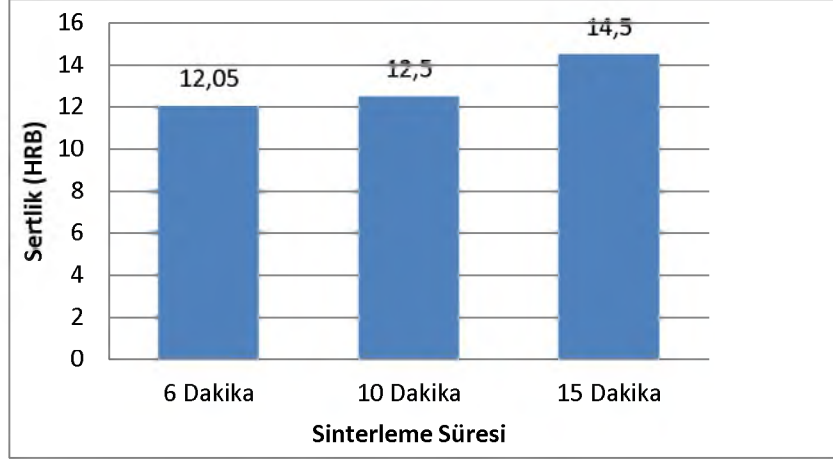


Şekil 4.4. Saf demir numunelerde farklı sinterleme yöntemlerinin ve ön sinterlemenin numunelerin 3 nokta eğme deneyi ile elde edilen % sehımlerine etkisi

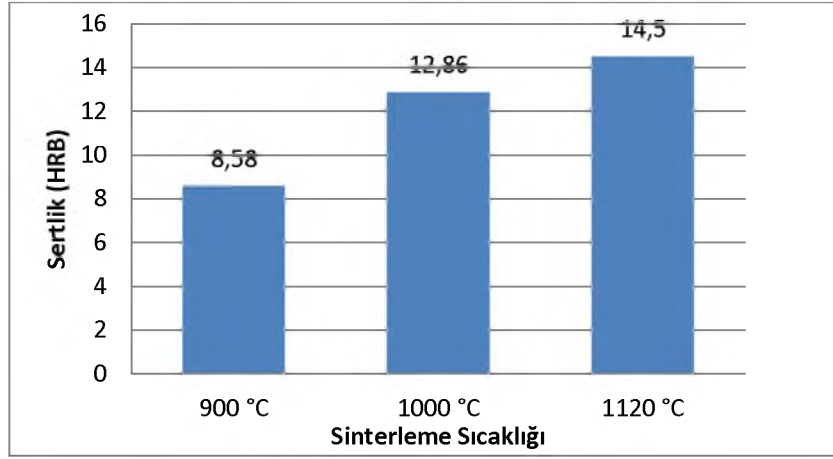
3 nokta eğme deneyi sonuçlarına bakıldığında, saf demir tozu ile üretilen numunelerde indüksiyon ile sinterleme süre ve sıcaklıklarının artışı ile numune dayanımında yükselme olduğu görülmektedir. Ancak 30 dakika indüksiyon ile sinterleme süresi ile 30 dakika geleneksel sinterleme sonucu elde edilen dayanım değerlerine ulaşamadığı görülmüştür. Bunun sebebinin araştırılması için indüksiyon ile ısıtma olayı göz önüne alınmış ve numunelerin özgül dirençleri ölçülmüştür. Özgül direnç ölçüm sonuçları da göz önünde bulundurularak, elde edilen bulgunun nedenleri sonuç ve öneriler kısmında irdelenmiştir.

4.1.2. Rockwell-B Sertlik Ölçümü Sonuçları

Sinterlenen numunelere uygulanan Rocwell-B sertlik ölçümünün sonuçları Şekil 4.5-4.7'de yer almaktadır. Sertlik ölçümü, her parametre için en az 8 numuneye uygulanmıştır ve her numune üzerinden en az 4 noktadan ölçüm yapılarak ortalamaları alınmıştır.

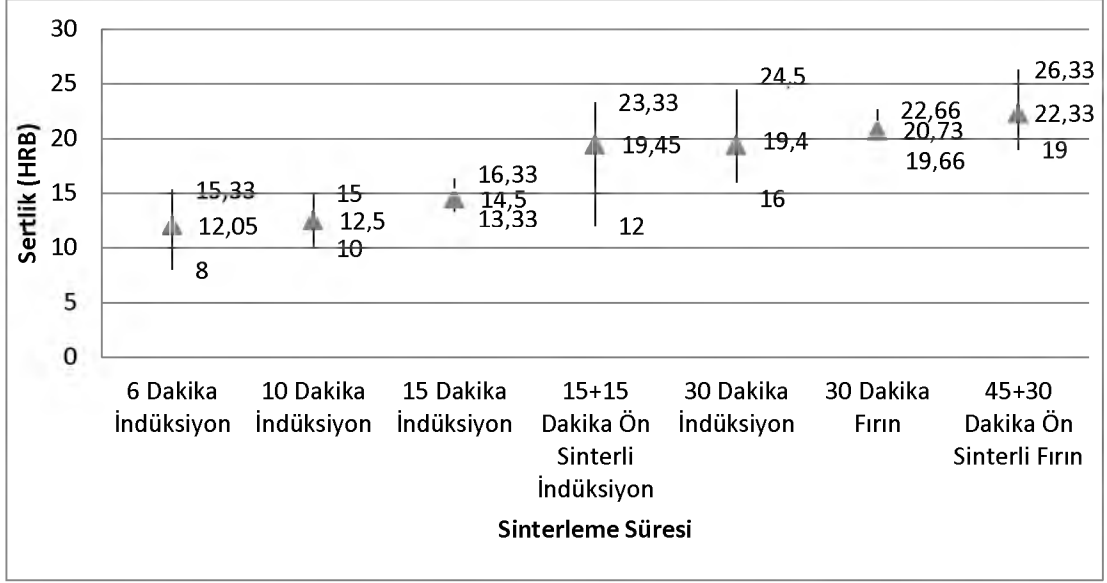


Şekil 4.5. Saf demir numunelerde indüksiyon ile sinterlemede farklı sinterleme sürelerinin numunelerin sertliklerine etkisi



Şekil 4.6. Saf demir numunelerde indüksiyon ile sinterlemede farklı sinterleme sıcaklıklarının numunelerin sertliklerine etkisi

Şekil 4.7’de farklı sinterleme yöntemlerinin ve ön sinterleme uygulanmasının numunelerin sertliklerine etkisi ve en yüksek, en düşük ve ortalama değerler olarak görülmektedir.



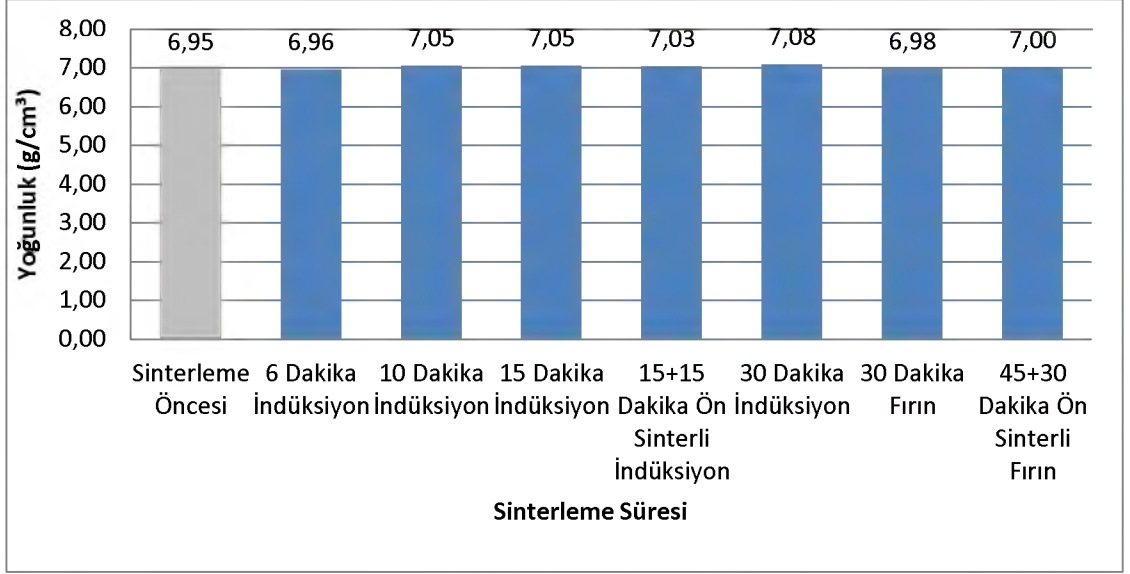
Şekil 4.7. Saf demir numunelerde farklı sinterleme yöntemlerinin ve ön sinterlemenin numunelerin sertliklerine etkisi

Sertlik incelemesi sonuçları göz önüne alındığında, üç nokta eğme dayanım değerleri gibi, 30 dakika indüksiyon ile sinterleme sonucunda, geleneksel sinterlemede elde edilen sertlik değerlerine ulaşamadığı görülmektedir. Ayrıca sinterleme süre ve sıcaklıklarının artışı ile numunelerin sertlik değerlerinin artış gösterdiği görülmektedir.

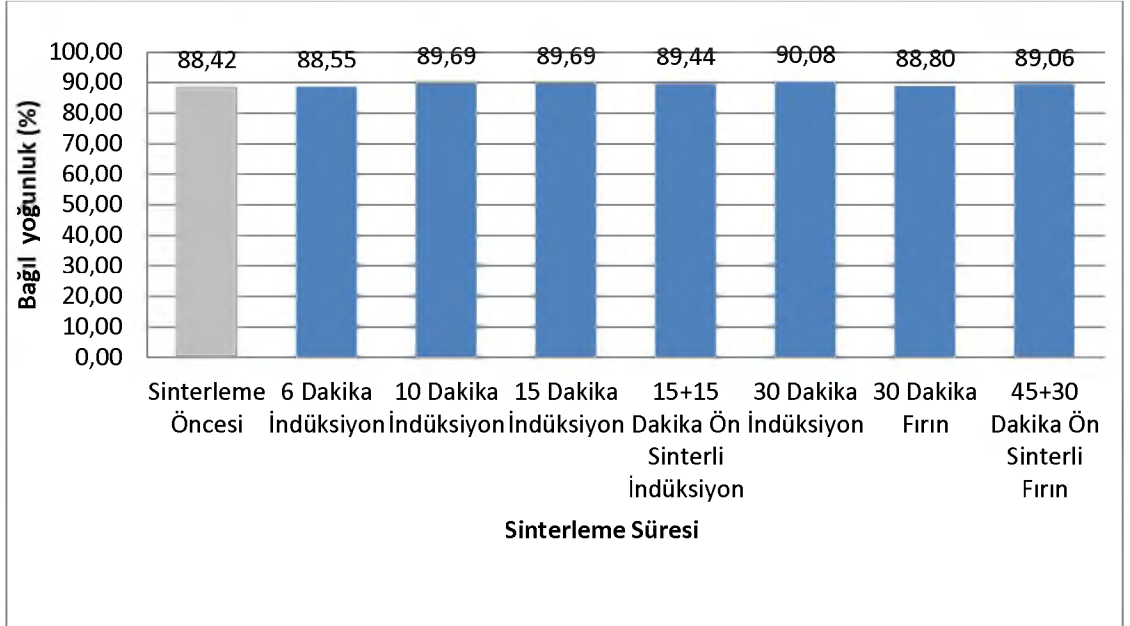
4.1.3. Yoğunluk Ölçümü Sonuçları

Numunelerin Arşimet prensibi ile yapılan yoğunluk ölçümlerinin sonuçları Şekil 4.8-4.11'de yer almaktadır. Yoğunluk ölçümünde demirin yoğunluğu $7,86 \text{ g/cm}^3$ olarak alınmıştır. Bağıl yoğunluk aşağıdaki formülle hesaplanmıştır.

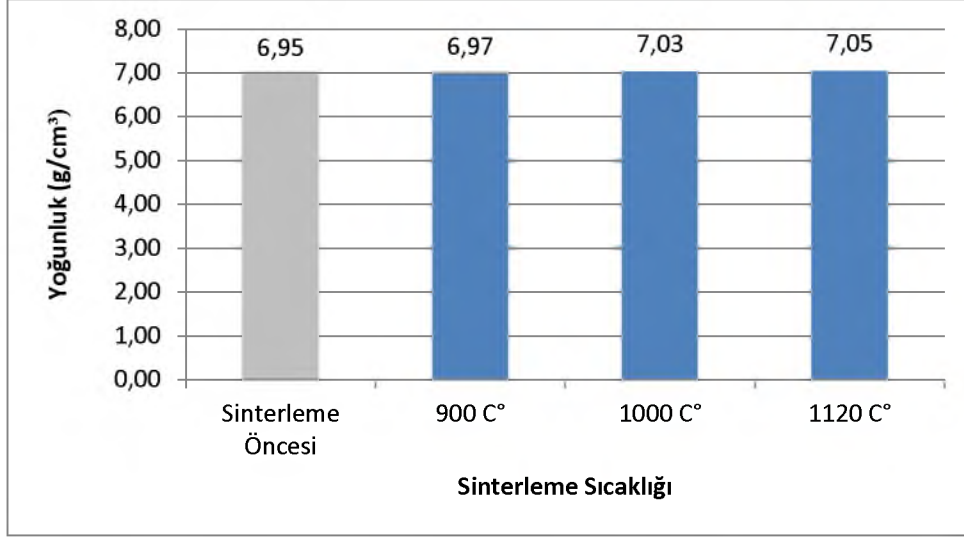
$$\text{Bağıl yoğunluk (\%)} = \frac{\text{Ölçülen yoğunluk (g/cm}^3\text{)}}{7,86(\text{g/cm}^3)} \times 100 \quad (4.1)$$



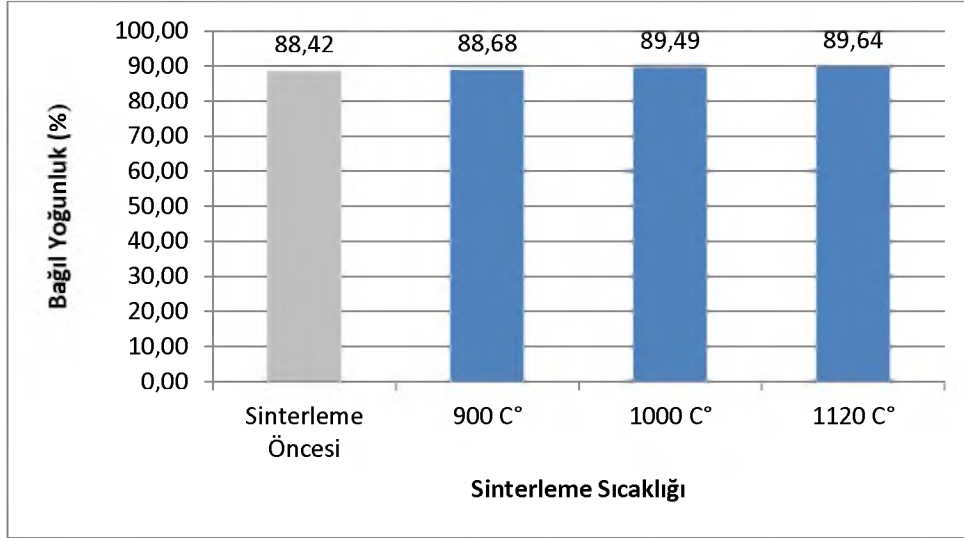
Şekil 4.8. Saf demir Numunelerde İndüksiyon ile sinterlemede farklı sinterleme sürelerinin ve yöntemlerinin numunelerin yoğunluklarına etkisi



Şekil 4.9. Saf demir numunelerde indüksiyon ile sinterlemede farklı sinterleme sürelerinin ve yöntemlerinin numunelerin bağıl yoğunluklarına etkisi



Şekil 4.10. Saf demir numunelerde indüksiyon ile sinterlemede farklı sinterleme sıcaklıklarının numunelerin yoğunluklarına etkisi

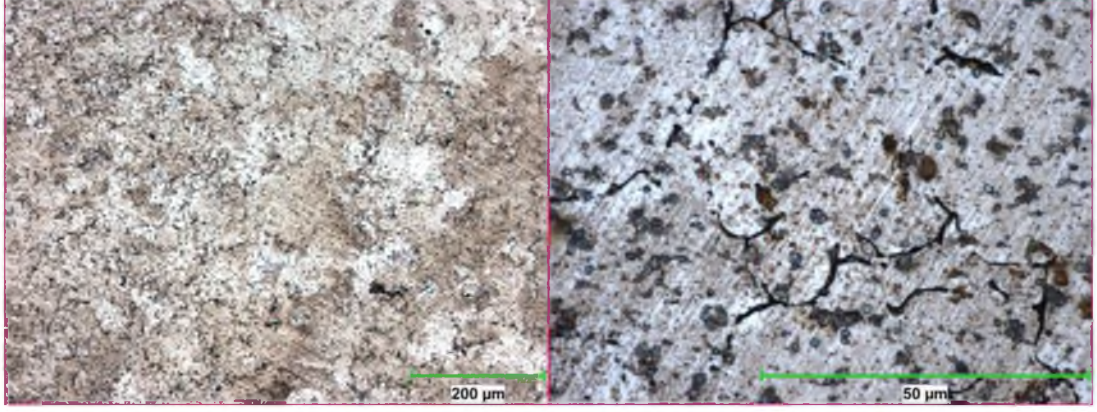


Şekil 4.11 . Saf demir numunelerde indüksiyon ile sinterlemede farklı sinterleme sıcaklıklarının numunelerin bağıl yoğunluklarına etkisi

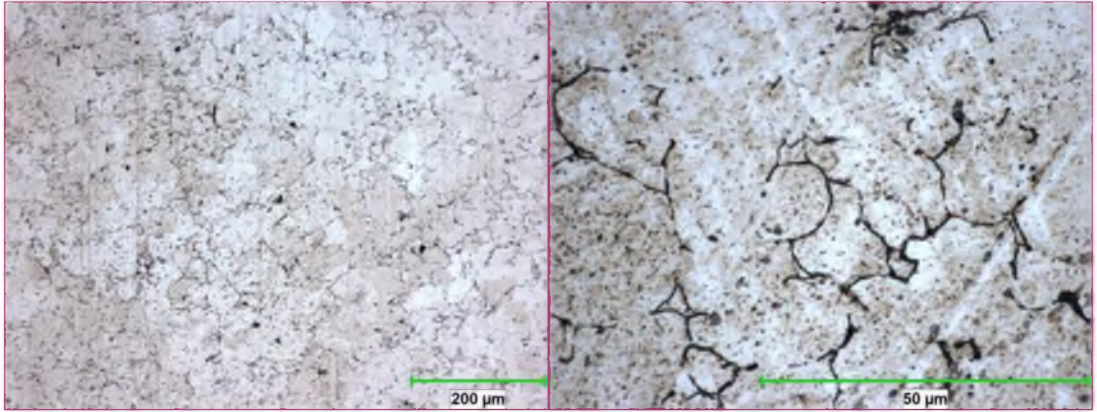
Elde edilen yoğunluk değerleri incelendiğinde, indüksiyon ile sinterleme işleminde, geleneksel sinterleme işlemine yakın ve biraz daha yüksek yoğunluklar elde edildiği görülmüştür. Ancak elde edilen yoğunluk değerleri mukavemet değerleri ile uyumlu değildir.

4.1.4. Optik Mikroskop İle Mikroyapı İnceleme Sonuçları

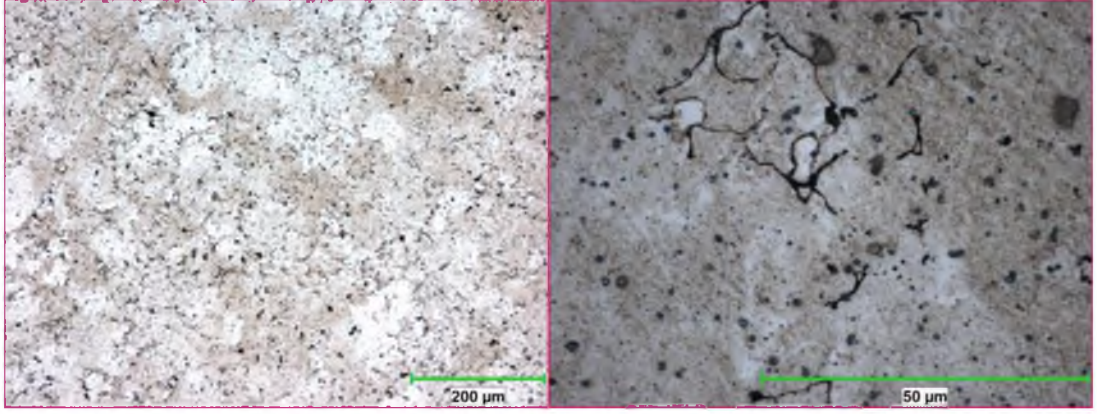
Numunelerin optik mikroskop görüntüleri Şekil 4.12-4.21’de yer almaktadır.



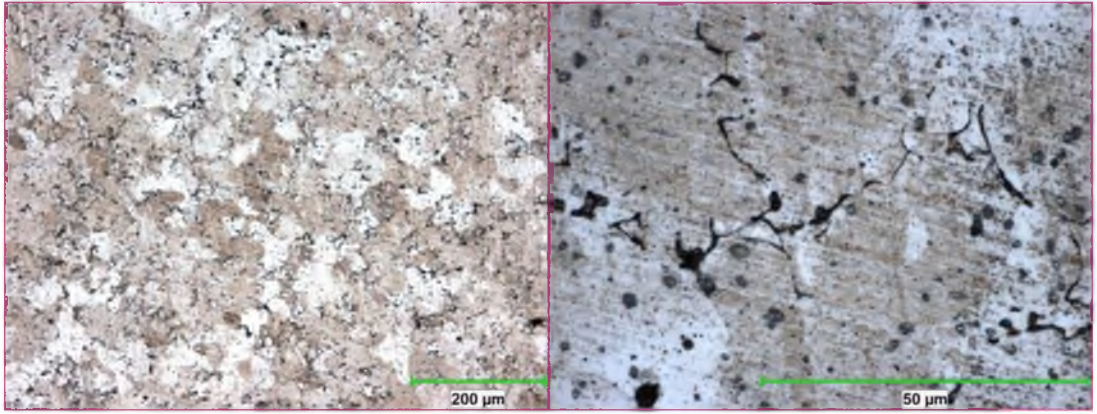
Şekil 4.12. İndüksiyon ile 900 °C’de 15 dakika sinterlenen saf demir numunenin mikro yapı görüntüsü



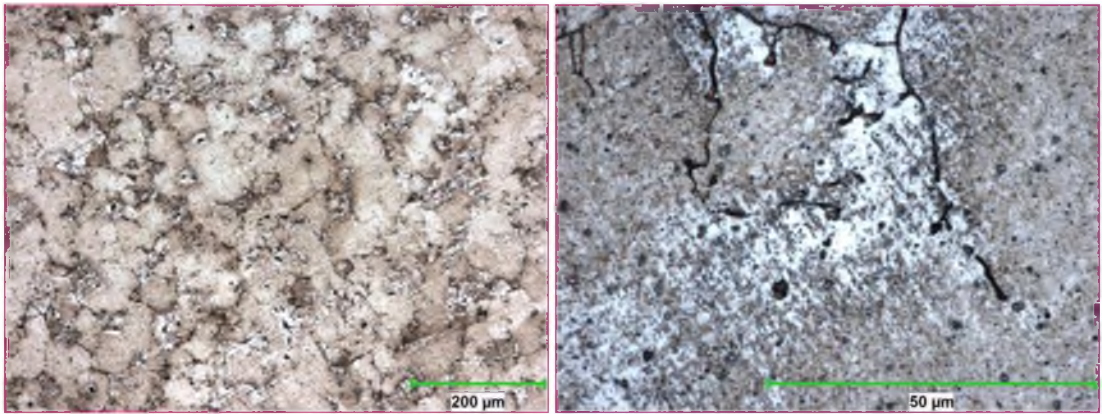
Şekil 4.13. İndüksiyon ile 1000 °C’de 15 dakika sinterlenen saf demir numunenin mikro yapı görüntüsü



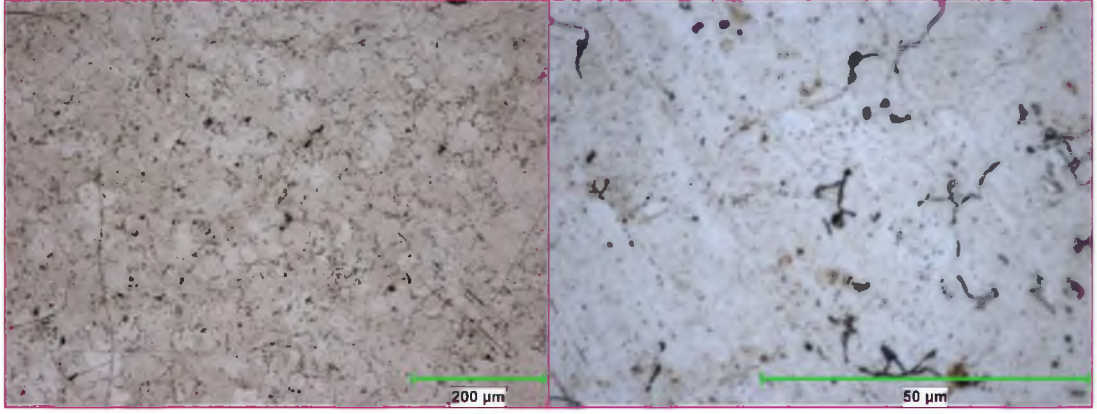
Şekil 4.14. İndüksiyon ile 1120 °C’de 15 dakika sinterlenen saf demir numunenin mikro yapı görüntüsü



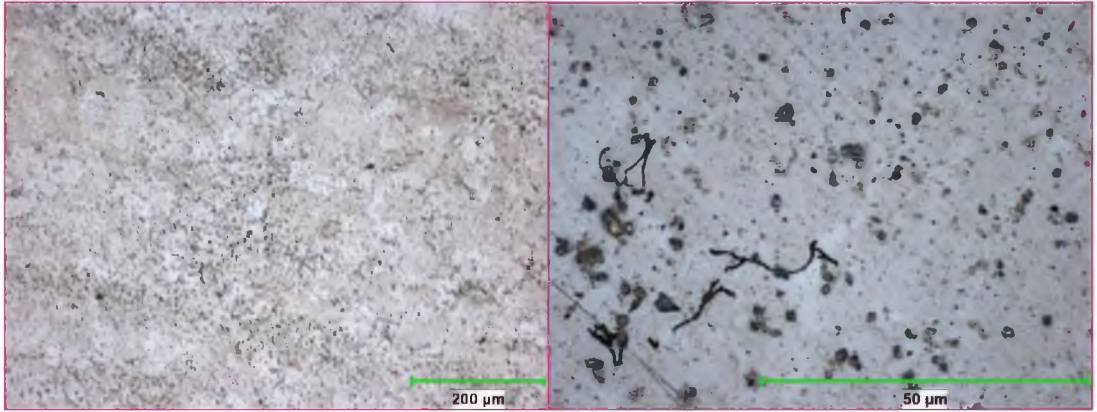
Şekil 4.15. İndüksiyon ile 1120 °C’de 6 dakika sinterlenen saf demir numunenin mikro yapı görüntüsü



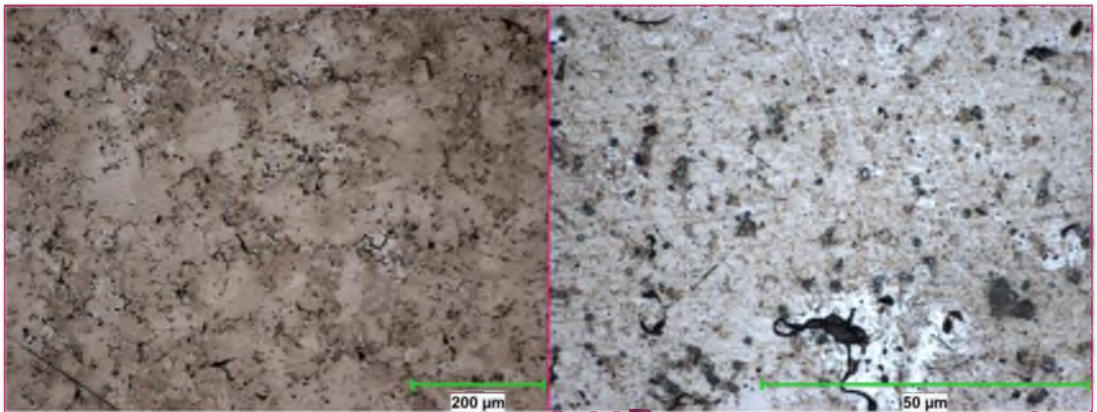
Şekil 4.16. İndüksiyon ile 1120 °C’de 10 dakika sinterlenen saf demir numunenin mikro yapı görüntüsü



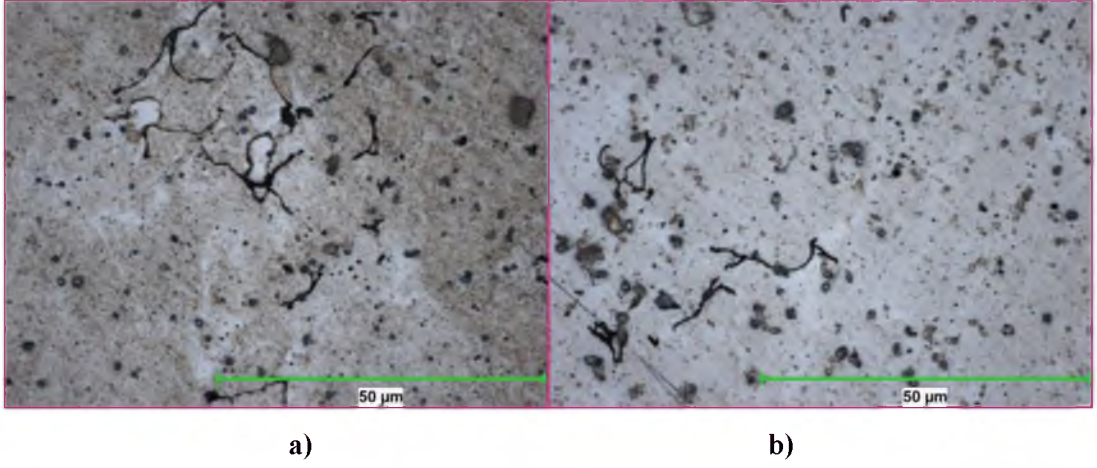
Şekil 4.17. İndüksiyon ile 600 °C’de 15 dakika ön sinterlemenin ardından 1120 °C’de 15 dakika sinterlenen saf demir numunenin mikro yapı görüntüsü



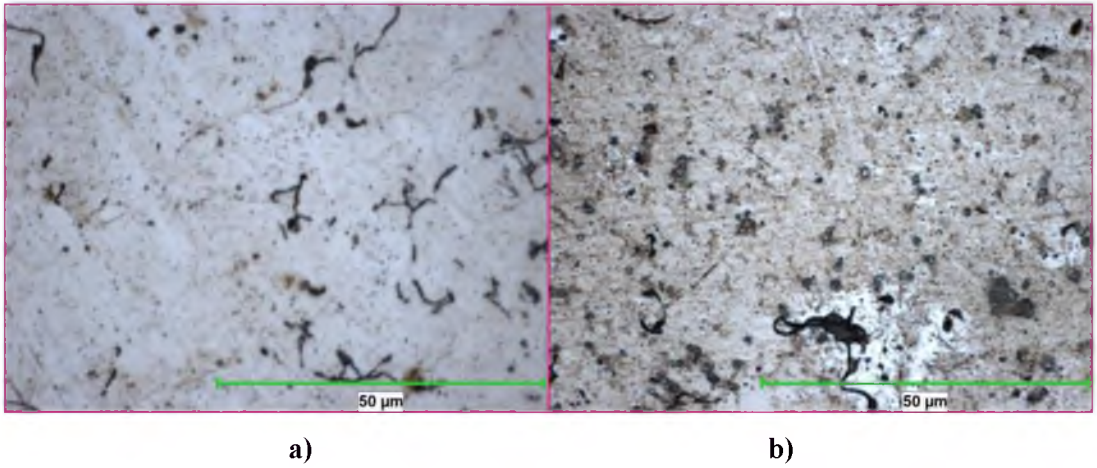
Şekil 4.18. Fırında geleneksel olarak ile 1120 °C’de 30 dakika sinterlenen saf demir numunenin mikro yapı görüntüsü



Şekil 4.19. Fırında 45 dakika 600 °C’de ön sinterlemenin ardından 1120 °C’de 30 dakika sinterlenen saf demir numunenin mikro yapı görüntüsü



Şekil 4.20. İndüksiyon ile ve fırında ve ön sinterlemesiz olarak sinterlenen saf demir numunelerin mikro yapı görüntüleri **a)** İndüksiyon ile 15 dakika sinterlenen numune **b)** Fırında 30 dakika sinterlenen numune

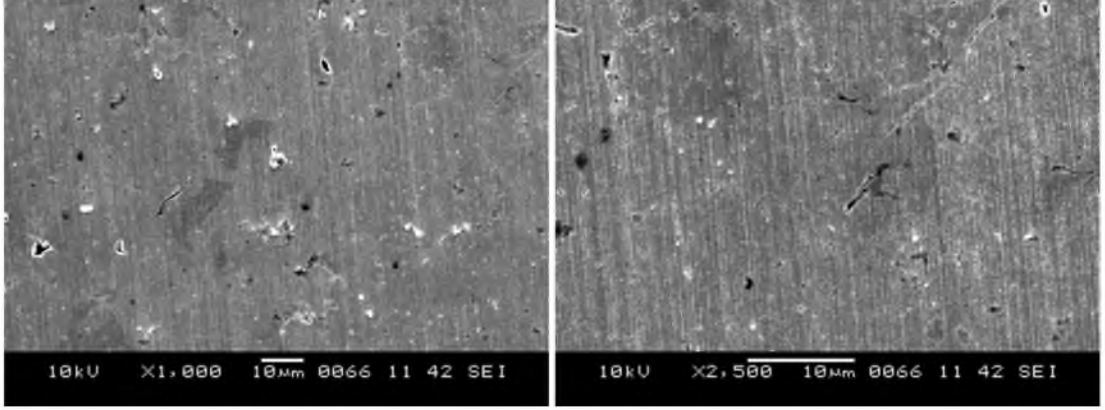


Şekil 4.21. İndüksiyon ile ve fırında ve ön sinterlemeli olarak sinterlenen saf demir numunelerin mikro yapı görüntüleri **a)** İndüksiyon ile 15+15 dakika sinterlenen numune **b)** Fırında 45+30 dakika sinterlenen numune

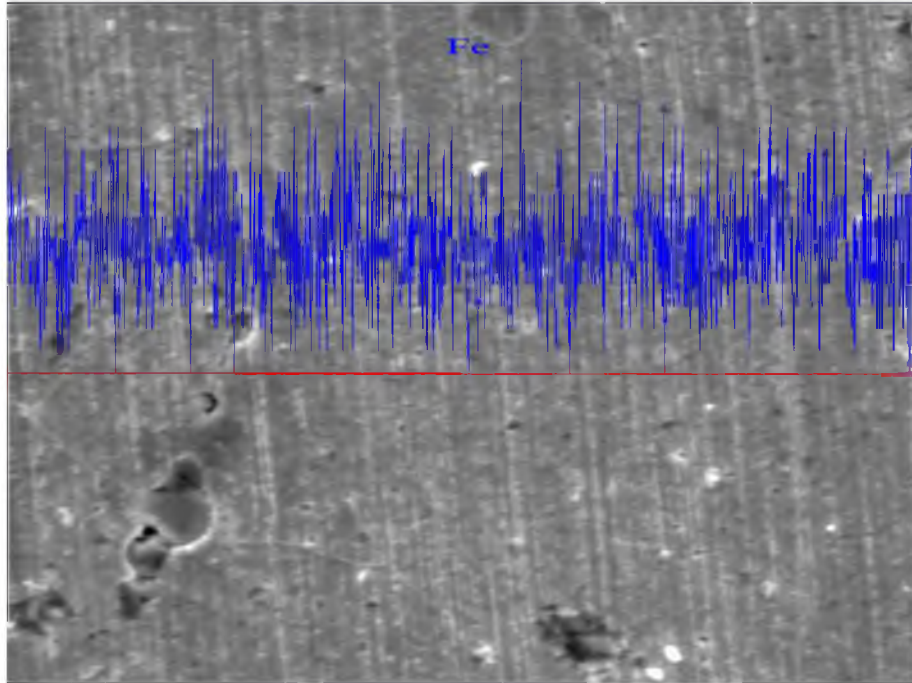
Numunelerin mikroyapı fotoğrafları incelendiğinde, herhangi bir sıvı faz oluşumu olmadığından, toz partiküller arasında çizgisel boşlukların olduğu ve grafit içeriği olmadığından Sementit (Fe_3C) gibi herhangi bir faz oluşumu meydana gelmediği görülmektedir.

4.1.5. SEM İle Mikroyapı İnceleme Sonuçları

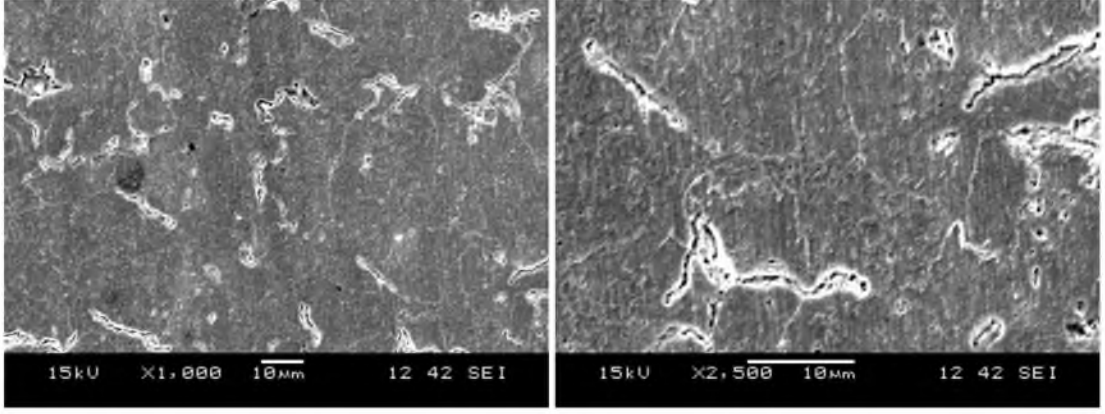
Numuneler üzerinden taramalı elektron mikroskobu ile alınan mikroyapı görüntüleri Şekil 4.22-4.25'te yer almaktadır.



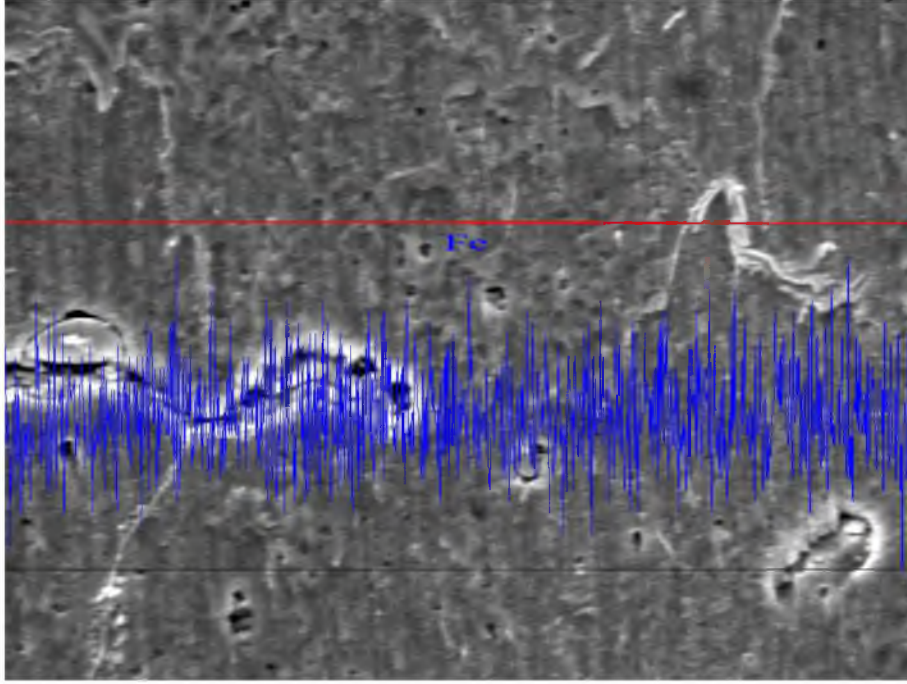
Şekil 4.22. İndüksiyon ile 600 °C'de 15 dakika ön sinterlemenin ardından 1120 °C'de 15 dakika sinterlenen saf demir numunenin SEM görüntüsü



Şekil 4.23. İndüksiyon ile 600 °C'de 15 dakika ön sinterlemenin ardından 1120 °C'de 15 dakika sinterlenen saf demir numunenin çizgisel EDS analizi görüntüsü



Şekil 4.24. Fırında 45 dakika 600 °C’de ön sinterlemenin ardından 1120 °C’de 30 dakika sinterlenen saf demir numunenin SEM görüntüsü

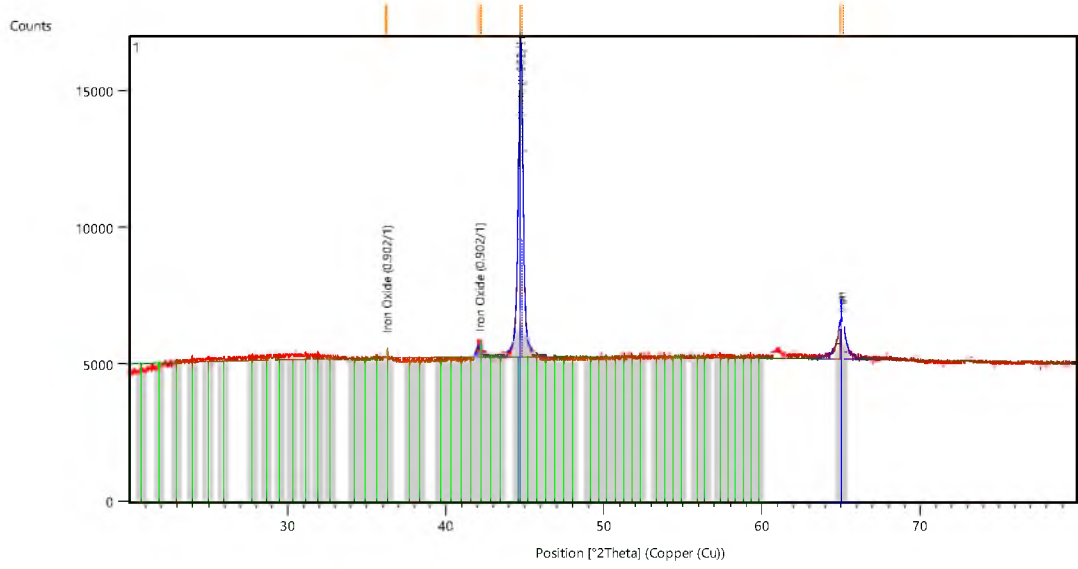


Şekil 4.25. Fırında 45 dakika 600 °C’de ön sinterlemenin ardından 1120 °C’de 30 dakika sinterlenen saf demir numunenin çizgisel EDS analizi görüntüsü

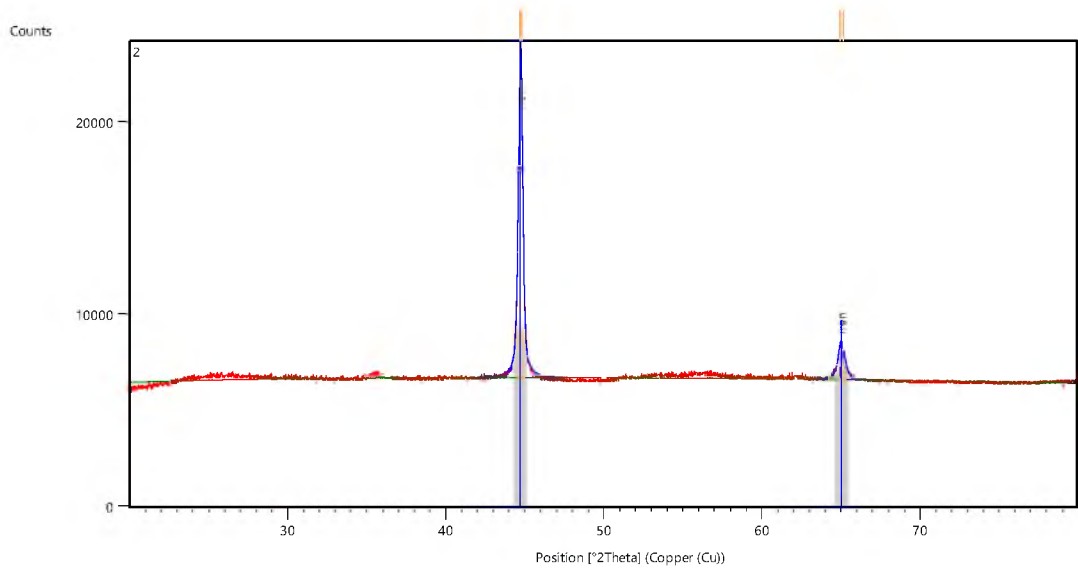
Yapılan SEM analizi ile numune mikro yapıları ayrıntılı şekilde görüntülenmiş ve EDS analizinde numunelerin içeriği olan demir elementi dışında herhangi bir elemente rastlanmamıştır.

4.1.6. XRD Analizi Sonuçları

Numunelere gerçekleştirilen XRD analizi sonuçları Şekil 4.26 ve Şekil 4.27’de yer almaktadır.



Şekil 4.26. İndüksiyon ile 600 °C’de 15 dakika ön sinterlemenin ardından 1120 °C’de 15 dakika sinterlenen saf demir numunenin XRD analiz sonucu



Şekil 4.27. Fırında 600 °C’de 45 dakika ön sinterlemenin ardından 1120 °C’de 30 dakika sinterlenen saf demir numunenin XRD analiz sonucu

Yapılan XRD incelemesinde de az miktarlarda demir oksidin dışında herhangi bir bileşiğe rastlanmamıştır. Bu da numune içerisinde herhangi bir kalıntı ya da farklı bir bileşik olmadığını göstermektedir.

4.1.7. Özgül direnç Ölçümü Sonuçları

Numunelerin sinterlenmesi sonucu elde edilen sonuçların yorumlanması amacıyla gerçekleştirilen özgül direnç ölçüm değerleri Tablo 4.1’de yer almaktadır. Özgül direnç değerleri mikro ohm metre ($\mu \Omega m$) cinsindedir. Özgül direnç değerleri, direnç ölçüm cihazından okunan direnç değerlerinin, numunenin kesit alanı ile çarpılıp uzunluğuna bölünmesi ile elde edilmiştir. Özgül direncin elde edildiği denklem aşağıda yer almaktadır.

$$\rho = \frac{R.A}{l} \quad (4.2)$$

Tablo 4.1. Saf demir numunelerin sinterleme öncesi ve sonrası özgül direnç ölçüm değerleri

Sinterlenmemiş Numune Özdirenci ($\mu \Omega m$)	Sinterleme Parametresi	Sinterleme Sonrası Özgül direnç ($\mu \Omega m$)
972,24	1120 °C 6 dk. İndüksiyon	2,11
	1120 °C 10 dk. İndüksiyon	2,08
	1120 °C 15 dk. İndüksiyon	2,05
	1000 °C 15 dk. İndüksiyon	16,61
	900 °C 15 dk. İndüksiyon	33,72
	600 °C’de 15 dk. Ön Sinterlenmiş 1120 °C 15 dk. İndüksiyon	2,04
	30 Dakika 1120 °C Fırın	2,07
	600 °C’de 45 dk. Ön Sinterlenmiş 1120 °C 15 dk. Fırın	2,08

Sonuçlardan da görüldüğü gibi, sinterleme ile özgül direnç büyük ölçüde düşmektedir. Özgül direnç sonucunun 900 °C’de Sinterlenen numunelerde yüksek oluşu, bu sıcaklıkta sinterleme işleminin tam olarak gerçekleşmediğini

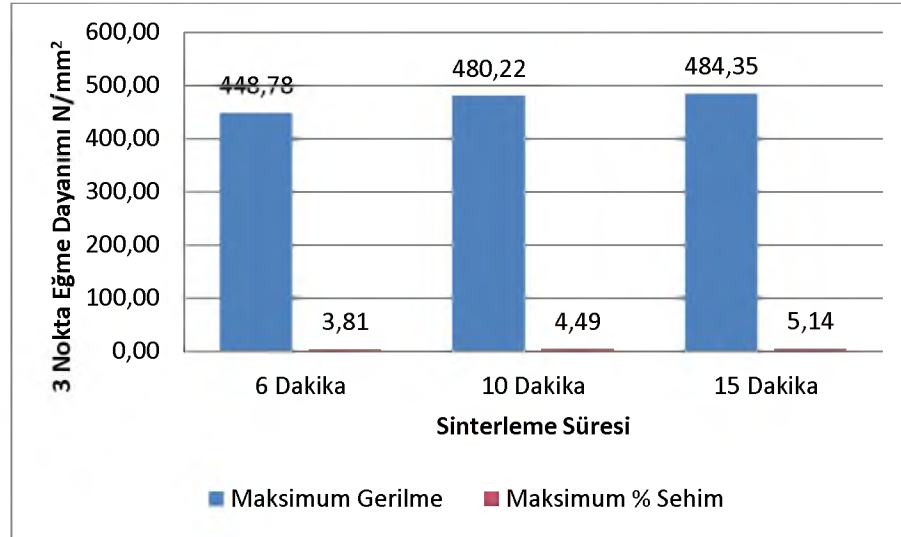
göstermektedir. Özgül direnç sonuçları ilerleyen kısımlarda diğer malzemelerin özgül direnç değerlerinin ölçülmesi ve karşılaştırılması ile daha ayrıntılı olarak yorumlanmıştır.

4.2. % 0,5 Grafitli Demir Tozu ile Yapılan Çalışmalardaki Sonuçlar

Grafit içerikli numuneler, ticari saflıktaki Högenas AHC 100.29 demir tozuna % 0,5 grafit eklenmesi ile üretilmiştir. İçeriğinde yağlayıcı olarak, saf demir numuneler gibi % 0,8 oranında Kenolube bulunmaktadır. Numuneler saf demir numunelerle aynı parametrelerde sinterlenmiştir. Sinterleme işlemleri Argon atmosferinde gerçekleştirilmiştir. Deneyle sonuçunda elde edilen bulgular aşağıda yer almaktadır.

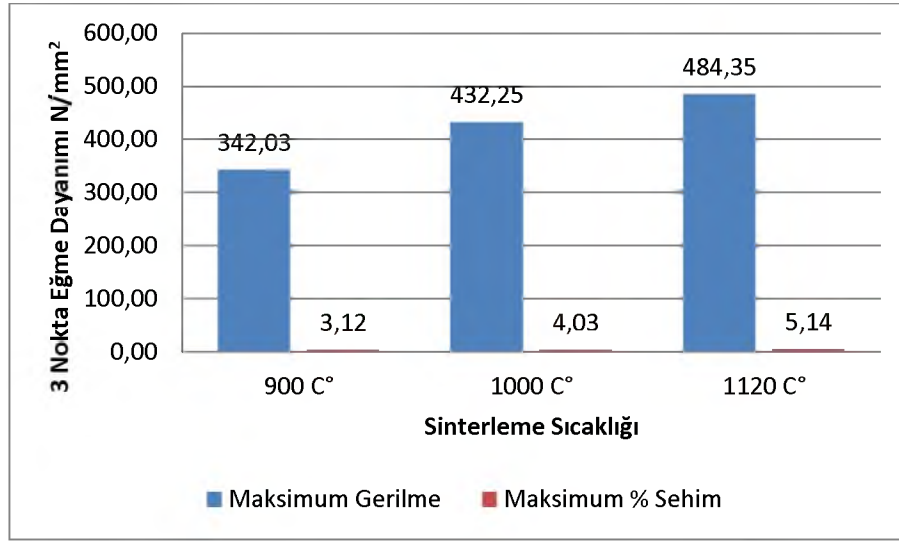
4.2.1.Üç Nokta Eğme Deneyi Sonuçları

Sinterlenen numunelere uygulanan 3 nokta eğme deneyinin sonuçları Şekil 4.28-4.31'de yer almaktadır. Şekil 4.28'de indüksiyon ile sinterleme yönteminde farklı sinterleme sürelerinin dayanıma etkileri görülmektedir.



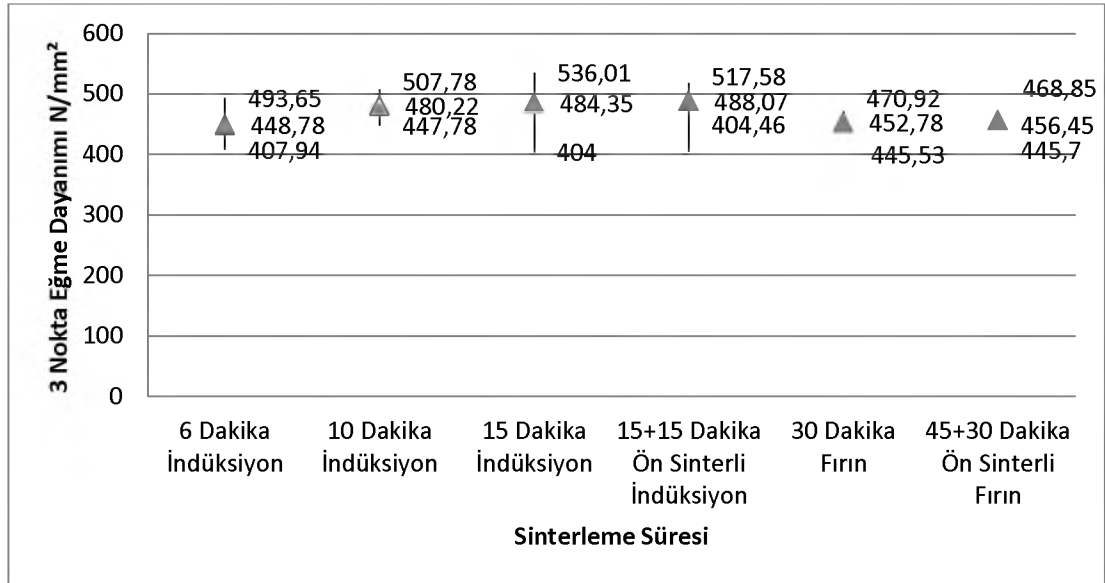
Şekil 4.28. % 0,5 Grafit içerikli demir numunelerde indüksiyon ile sinterlemede farklı sinterleme sürelerinin numunelerin üç nokta eğme dayanımlarına etkisi

Şekil 4.29'da farklı sinterleme sıcaklıklarının numunelerin üç nokta eğme dayanımlarına etkisi görülmektedir.

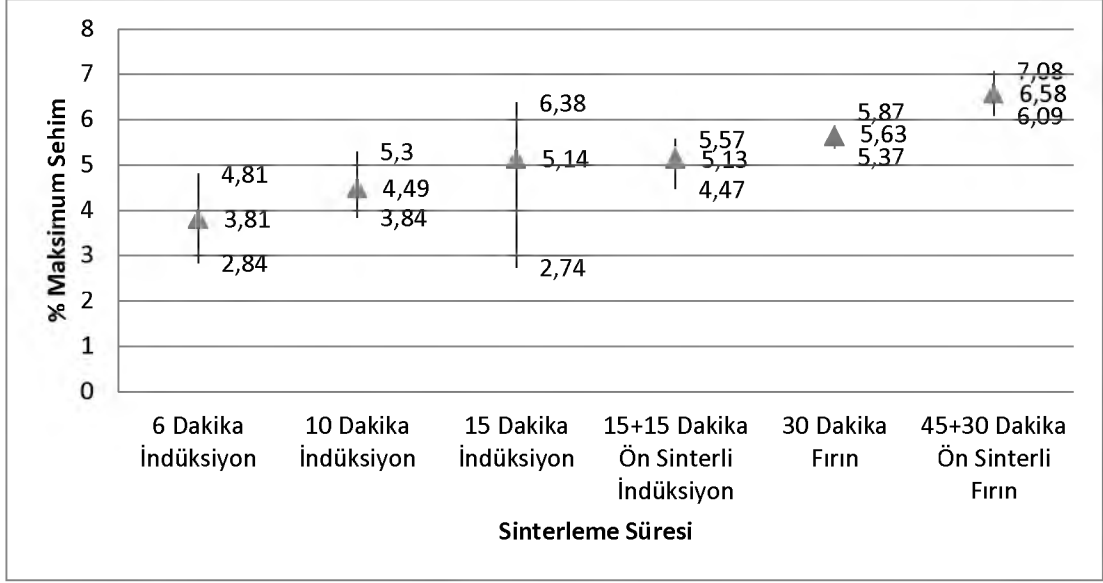


Şekil 4.29. % 0,5 Grafit içerikli demir numunelerde indüksiyon ile sinterlemede farklı sinterleme sıcaklıklarının numunelerin üç nokta eğme dayanımlarına etkisi

Şekil 4.30'da ve 4.31'de farklı sinterleme yöntemlerinin ve ön sinterleme uygulanmasının numunelerin 3 nokta eğme dayanımlarına etkisi görülmektedir.



Şekil 4.30. % 0,5 Grafit içerikli demir numunelerde farklı sinterleme yöntemlerinin ve ön sinterlemenin numunelerin 3 nokta eğme dayanımlarına etkisi

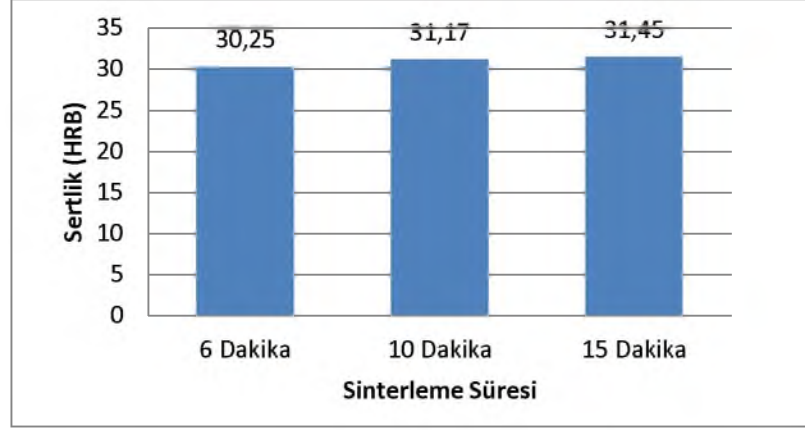


Şekil 4.31. % 0,5 Grafit içerikli demir numunelerde farklı sinterleme yöntemlerinin ve ön sinterlemenin numunelerin 3 nokta eğme deneyi ile elde edilen % sehımlerine etkisi

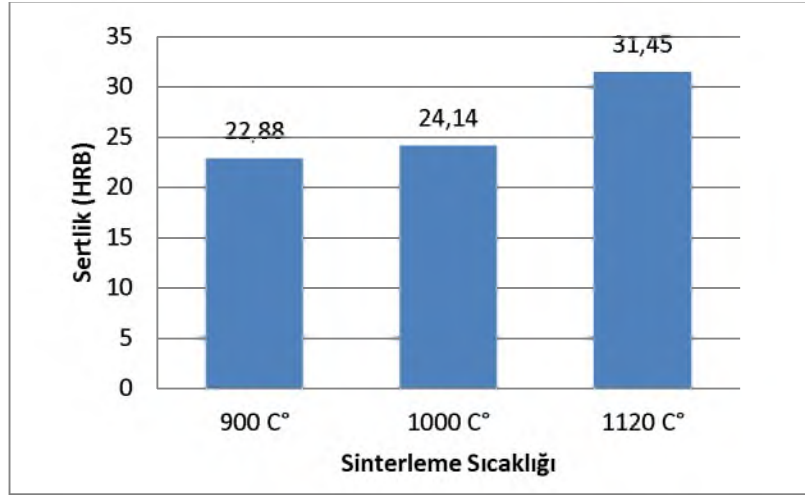
3 nokta eğme deneyi sonuçlarına bakıldığında, grafit içerikli numunelerde indüksiyon ile sinterleme süre ve sıcaklıklarının artışı ile numune dayanımında yükselme olduğu görülmektedir. 10 dakika indüksiyon ile sinterleme süresi ile 30 dakika geleneksel sinterleme sonucu elde edilen dayanım değerlerinin aşıldığı görülmüştür. Saf demir tozu içerikli numunelerin aksine, indüksiyon ile sinterleme sonucunda, geleneksel sinterleme sonucu elde edilen değerlerden daha yüksek dayanım değerleri elde edilmiştir. Geleneksel sinterleme ile elde edilen değerler karşılaştırıldığında da, grafit eklenmesi ile daha yüksek dayanım değerlerine ulaşıldığı görülmektedir.

4.2.2. Rockwell-B Sertlik Ölçümü Sonuçları

Sinterlenen numunelere uygulanan Rocwell-B sertlik ölçümünün sonuçları Şekil 4.32-4.34'de yer almaktadır.

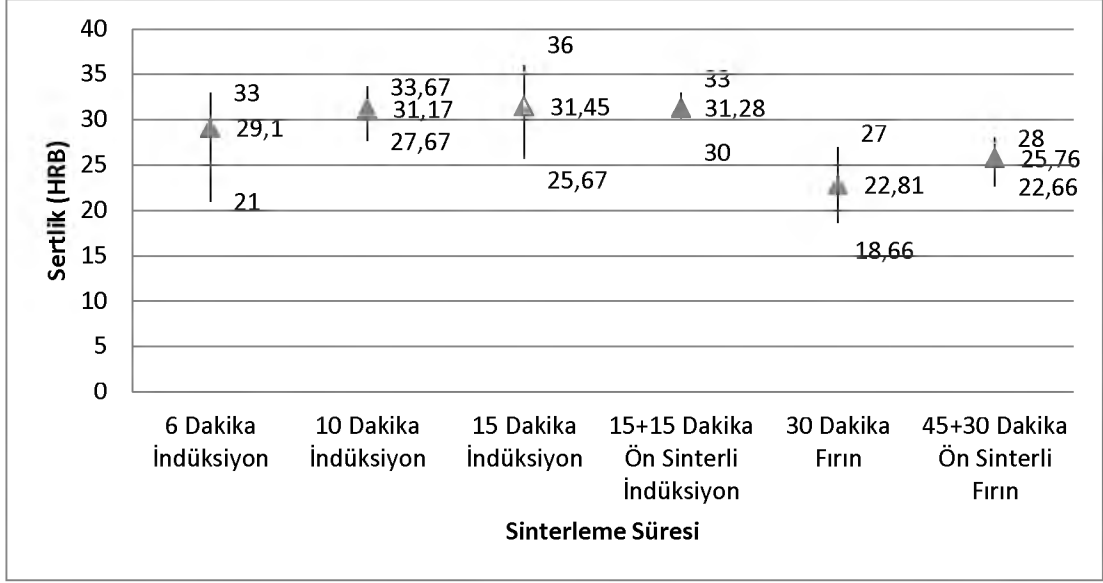


Şekil 4.32. % 0,5 Grafit içerikli demir numunelerde induksiyon ile sinterlemede farklı sinterleme sürelerinin numunelerin sertliklerine etkisi



Şekil 4.33. % 0,5 Grafit içerikli demir numunelerde induksiyon ile sinterlemede farklı sinterleme sıcaklıklarının numunelerin sertliklerine etkisi

Şekil 4.34'te farklı sinterleme yöntemlerinin ve ön sinterleme uygulanmasının numunelerin sertliklerine etkisi ve en yüksek, en düşük ve ortalama değerler olarak görülmektedir.



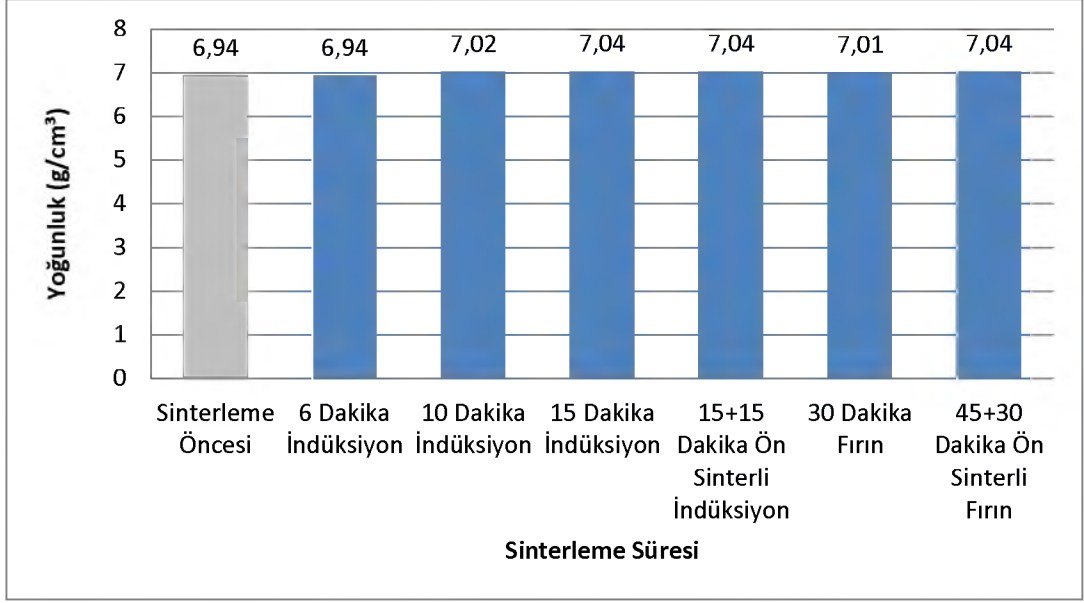
Şekil 4.34. % 0,5 Grafit içerikli demir numunelerde farklı sinterleme yöntemlerinin ve ön sinterlemenin numunelerin sertliklerine etkisi

Sertlik incelemesi sonuçları göz önüne alındığında, üç nokta eğme dayanım değerleri gibi, daha kısa indüksiyonla sinterleme süreleri ile geleneksel sinterlemede elde edilen sertlik değerlerine ulaşılmış ve bu değerler aşılmıştır. Bunun yanı sıra, sinterleme süre ve sıcaklıklarının artışı ile numunelerin sertlik değerlerinin artış gösterdiği görülmektedir.

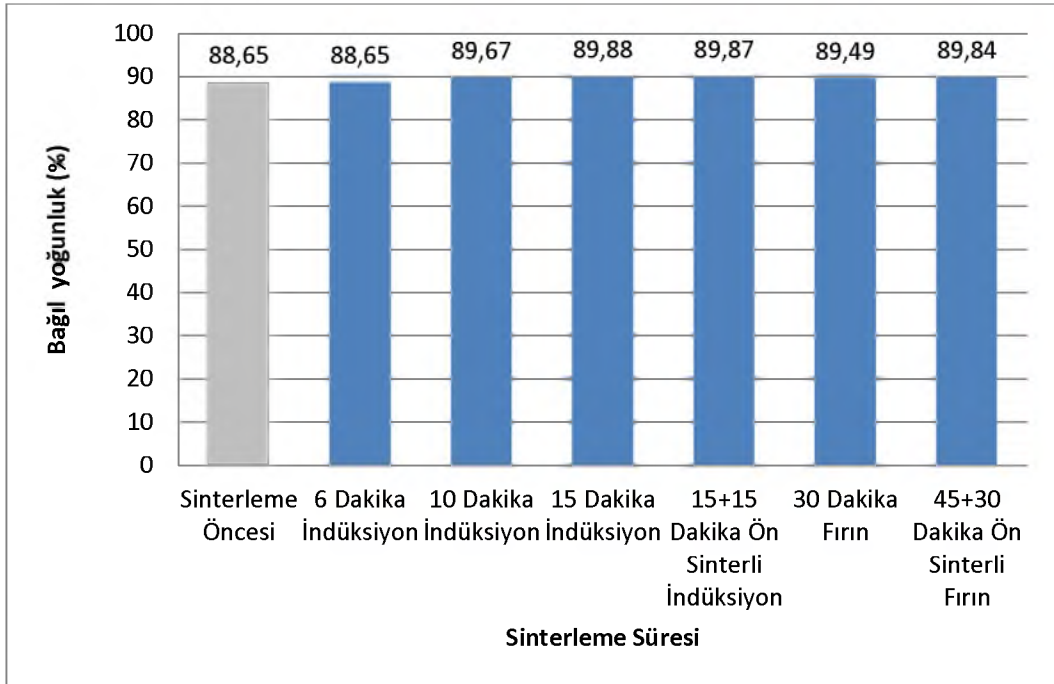
4.2.3. Yoğunluk Ölçümü Sonuçları

Numunelerin Arşimet prensibi ile yapılan yoğunluk ölçümlerinin sonuçları Şekil 4.35-4.38'de yer almaktadır. Yoğunluk ölçümünde demirin yoğunluğu 7,86 g/cm³, grafitin yoğunluğu 2,1 g/cm³ olarak alınmıştır. Bağıl yoğunluk aşağıdaki formülle hesaplanmıştır.

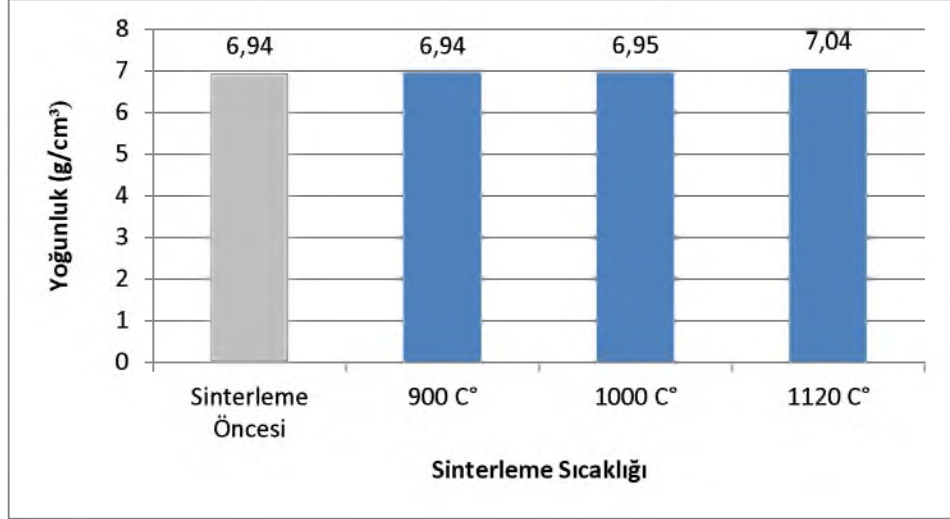
$$\text{Bağıl yoğunluk (\%)} = \frac{\text{Ölçülen yoğunluk (g/cm}^3\text{)}}{[7,86 \times 0,995 + 2,1 \times 0,005] \text{ (g/cm}^3\text{)}} \times 100 \quad (4.3)$$



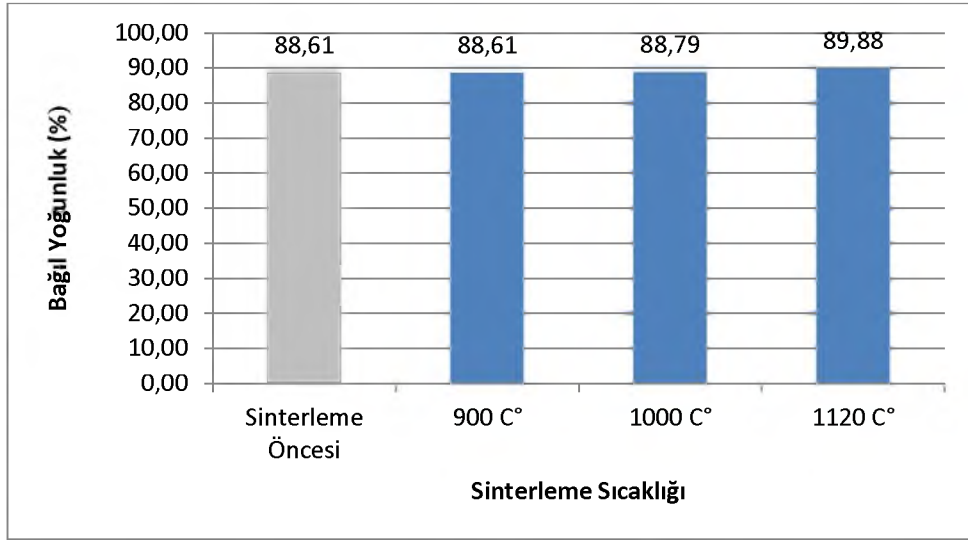
Şekil 4.35. % 0,5 Grafit içerikli demir numunelerde indüksiyon ile sinterlemede farklı sinterleme sürelerinin ve yöntemlerinin numunelerin yoğunluklarına etkisi



Şekil 4.36. % 0,5 Grafit içerikli demir numunelerde indüksiyon ile sinterlemede farklı sinterleme sürelerinin ve yöntemlerinin numunelerin bağıl yoğunluklarına etkisi



Şekil 4.37. % 0,5 Grafit içerikli demir numunelerde indüksiyon ile sinterlemede farklı sinterleme sıcaklıklarının numunelerin yoğunluklarına etkisi

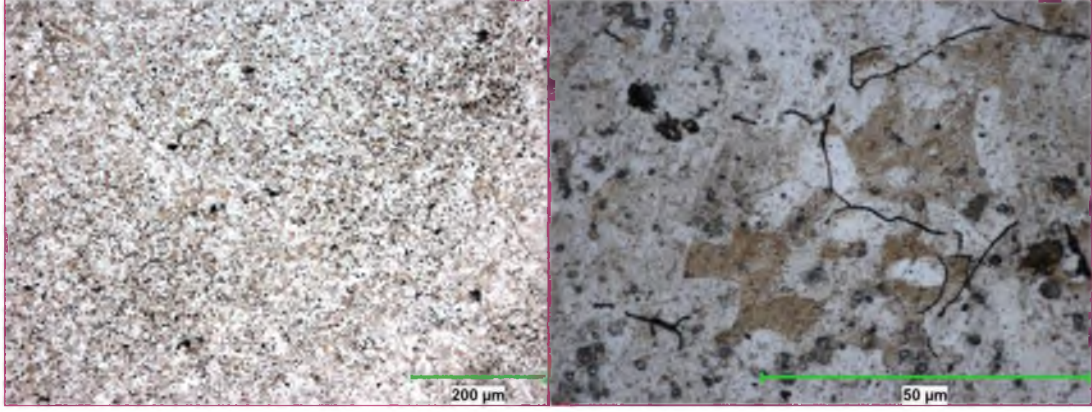


Şekil 4.38. % 0,5 Grafit içerikli demir numunelerde indüksiyon ile sinterlemede farklı sinterleme sıcaklıklarının numunelerin bağıl yoğunluklarına etkisi

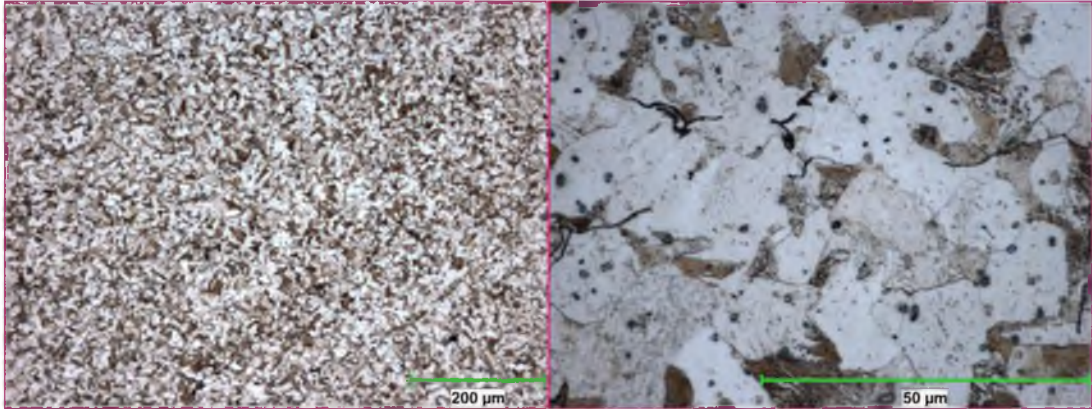
Elde edilen yoğunluk değerleri incelendiğinde, indüksiyon ile sinterleme işleminde, geleneksel sinterleme işleminden biraz daha yüksek yoğunluk değerlerinin elde edildiği görülmüştür.

4.2.4. Optik Mikroskop İle Mikroyapı İnceleme Sonuçları

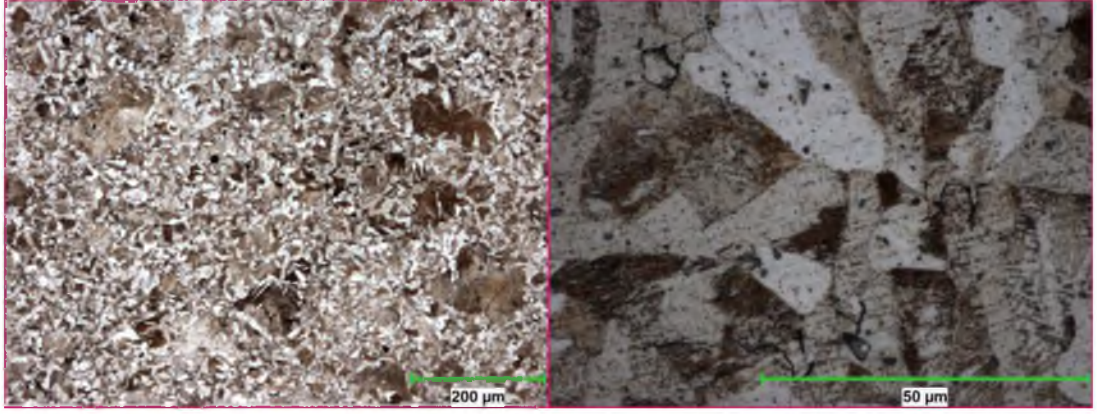
% 0,5 Grafit içerikli demir numunelerin optik mikroskop görüntüleri Şekil 4.39-4.48'de yer almaktadır.



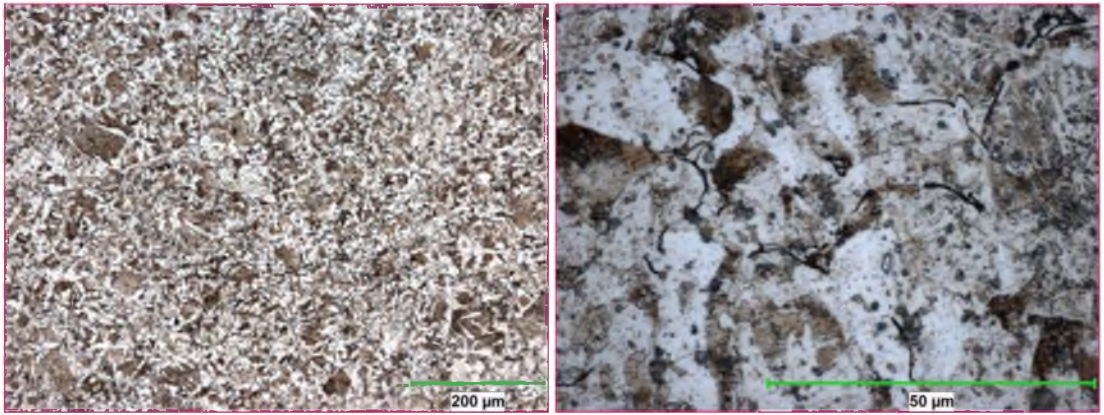
Şekil 4.39. İndüksiyon ile 900 °C'de 15 dakika sinterlenen % 0,5 grafit içerikli demir numunenin mikro yapı görüntüsü



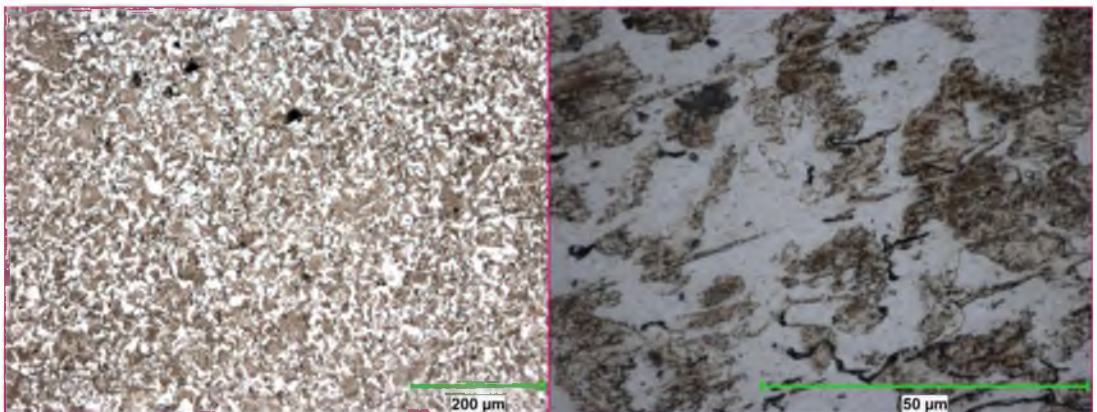
Şekil 4.40. İndüksiyon ile 1000 °C'de 15 dakika sinterlenen % 0,5 grafit içerikli demir numunenin mikro yapı görüntüsü



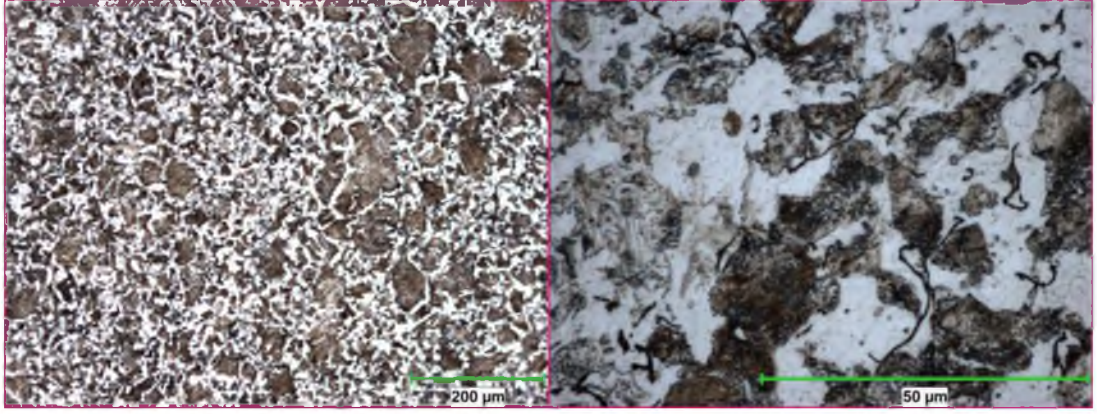
Şekil 4.41. İndüksiyon ile 1120 °C’de 15 dakika sinterlenen % 0,5 grafit içerikli demir numunenin mikro yapı görüntüsü



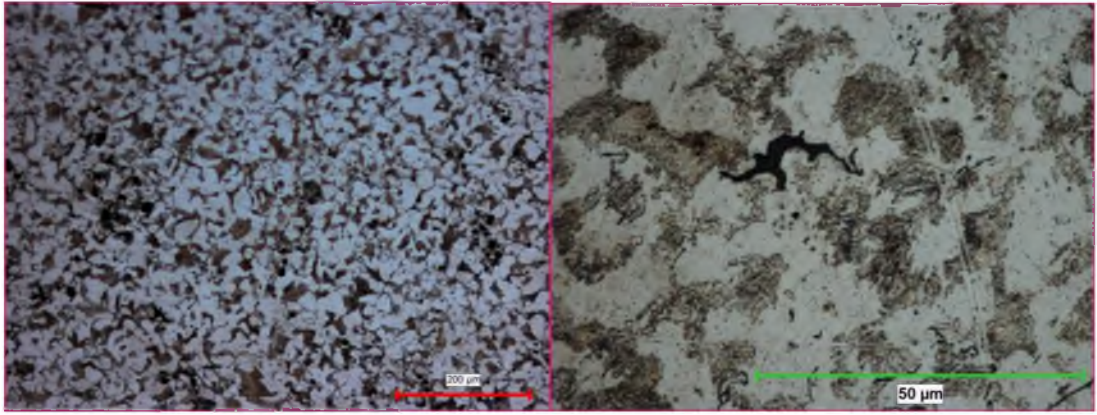
Şekil 4.42. İndüksiyon ile 1120 °C’de 6 dakika sinterlenen % 0,5 grafit içerikli demir numunenin mikro yapı görüntüsü



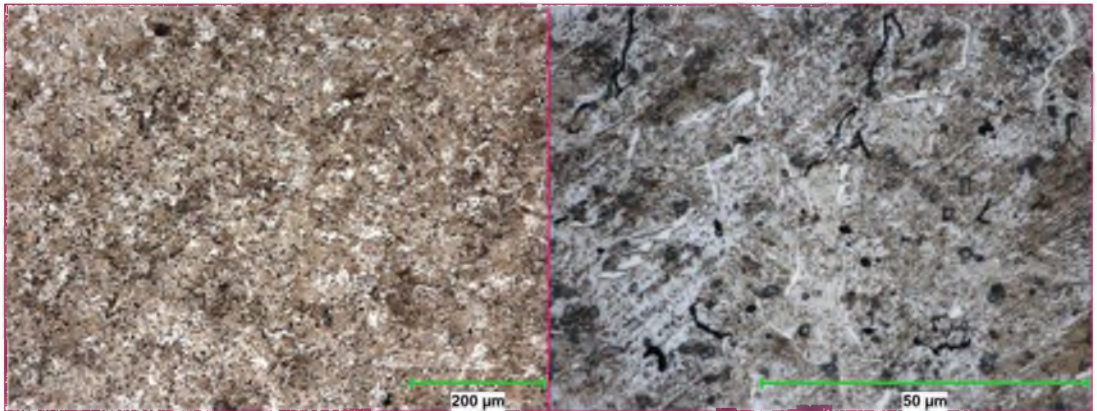
Şekil 4.43. İndüksiyon ile 1120 °C’de 10 dakika sinterlenen % 0,5 grafit içerikli demir numunenin mikro yapı görüntüsü



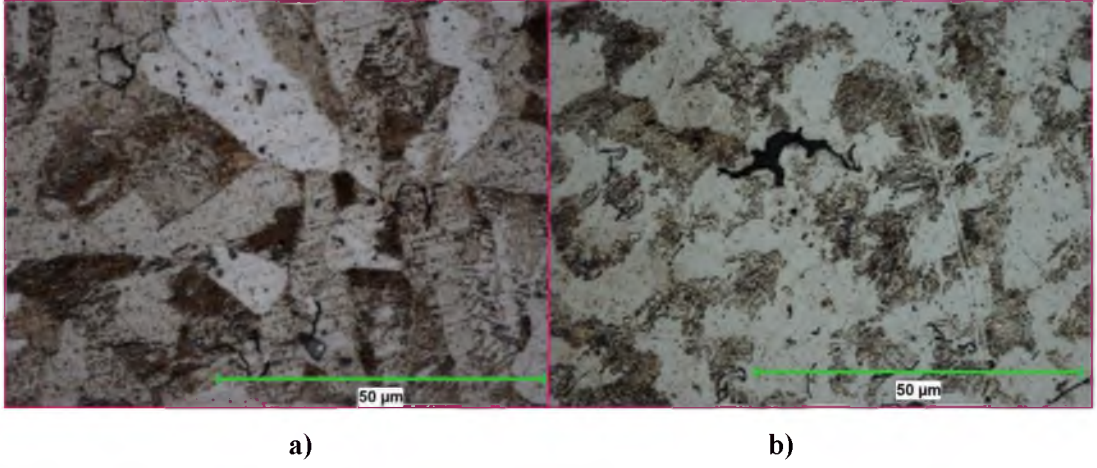
Şekil 4.44. İndüksiyon ile 600 °C’de 15 dakika ön sinterlemenin ardından 1120 °C’de 15 dakika sinterlenen % 0,5 grafit içerikli demir numunenin mikro yapı görüntüsü



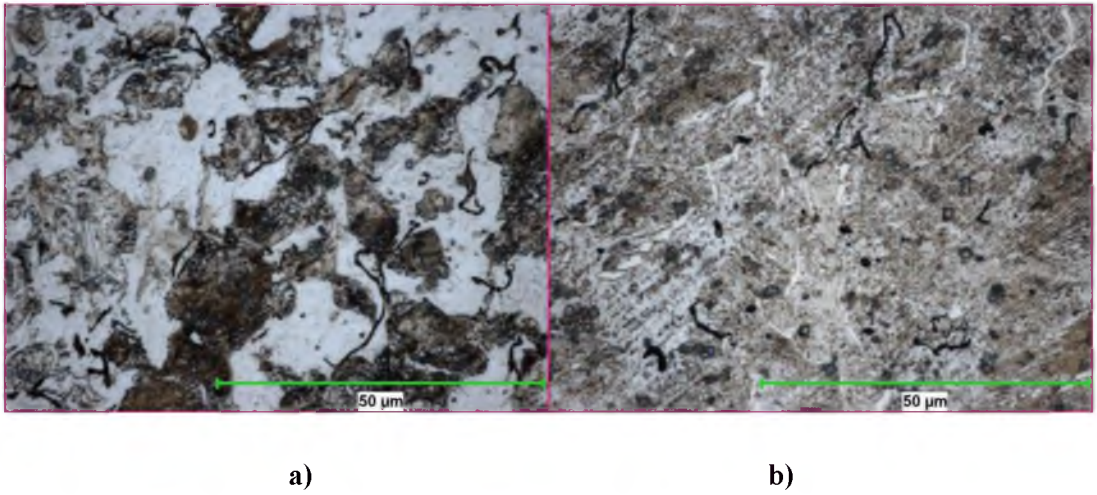
Şekil 4.45. Fırında geleneksel olarak ile 1120 °C’de 30 dakika sinterlenen % 0,5 grafit içerikli demir numunenin mikro yapı görüntüsü



Şekil 4.46. Fırında 45 dakika 600 °C’de ön sinterlemenin ardından 1120 °C’de 30 dakika sinterlenen % 0,5 grafit içerikli demir numunenin mikro yapı görüntüsü



Şekil 4.47. İndüksiyon ile ve fırında ve ön sinterlemesiz olarak sinterlenen % 0,5 grafit içerikli demir numunelerin mikro yapı görüntüleri **a)** İndüksiyon ile 15 dakika sinterlenen numune **b)** Fırında 30 dakika sinterlenen numune

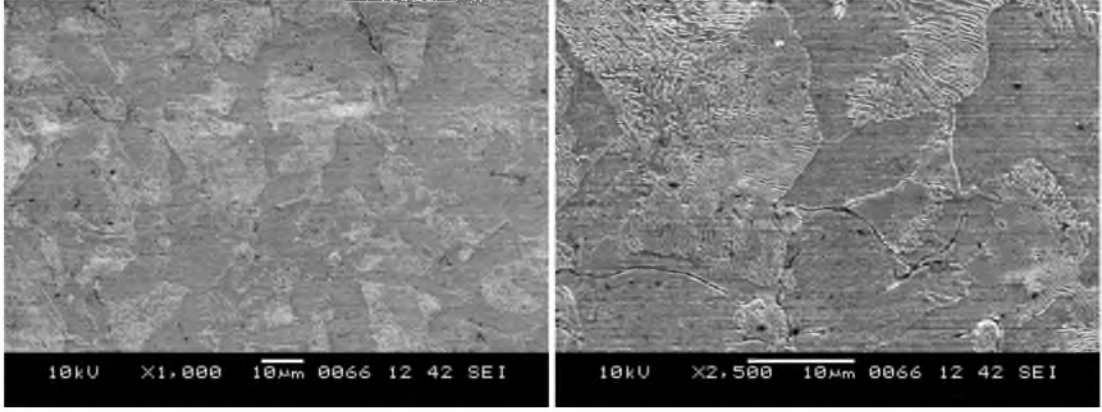


Şekil 4.48. İndüksiyon ile ve fırında ön sinterlemeli olarak sinterlenen % 0,5 grafit içerikli demir numunelerin mikro yapı görüntüleri **a)** İndüksiyon ile 15+15 dakika sinterlenen numune **b)** Fırında 45+30 dakika sinterlenen numune

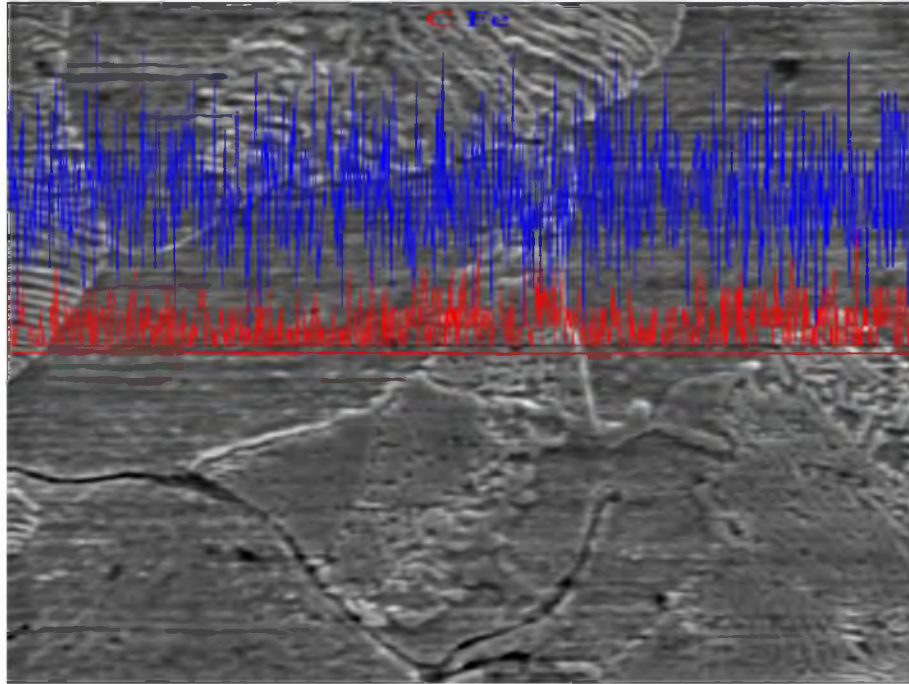
Mikroyapı fotoğrafları incelendiğinde, sinterlenen numunelerin içeriğindeki grafitten dolayı, saf demir numunelerden farklı olarak, numunelerin mikro yapılarında çelik numune yapısına benzer şekilde fazlar oluştuğu görülmektedir. Bu yapının oluşmasının mukavemet değerlerini önemli derecede artırdığı görülmüştür.

4.2.5. SEM Mikroskobu İle Mikroyapı İnceleme Sonuçları

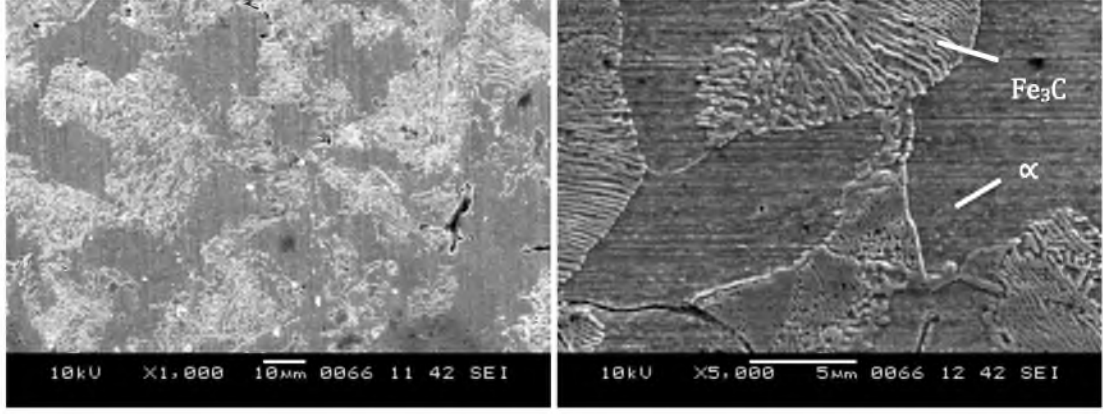
% 0,5 Grafit içerikli Numuneler üzerinden taramalı elektron mikroskobu ile alınan mikroyapı görüntüleri Şekil 4.49-4.52’de yer almaktadır.



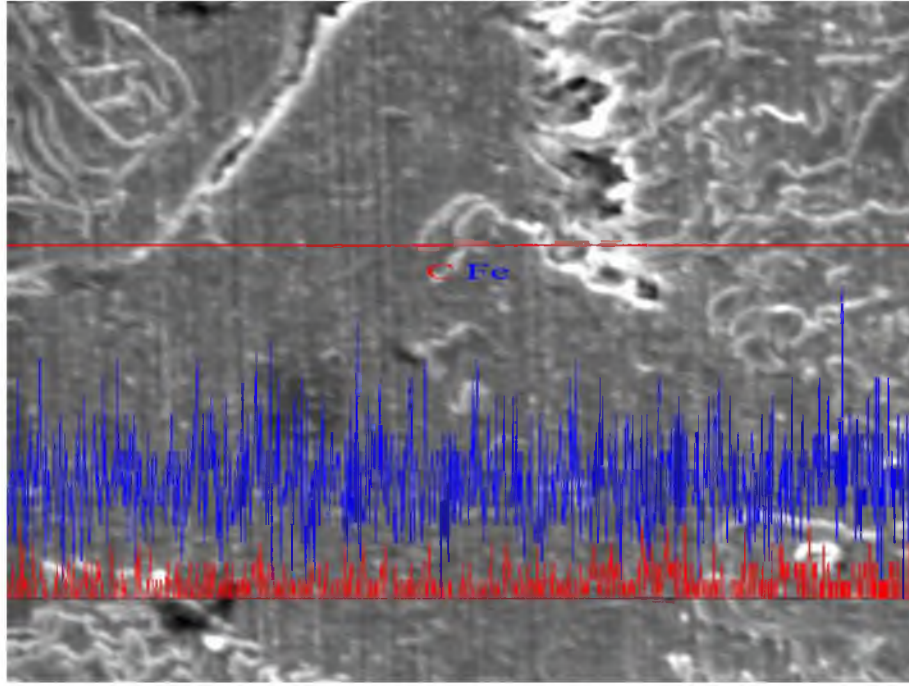
Şekil 4.49. İndüksiyon ile 600 °C’de 15 dakika ön sinterlemenin ardından 1120 °C’de 15 dakika sinterlenen % 0,5 grafit içerikli demir numunenin SEM görüntüsü



Şekil 4.50. İndüksiyon ile 600 °C’de 15 dakika ön sinterlemenin ardından 1120 °C’de 15 dakika sinterlenen % 0,5 grafit içerikli demir numunenin çizgisel EDS analizi görüntüsü



Şekil 4.51. Fırında 45 dakika 600 °C’de ön sinterlemenin ardından 1120 °C’de 30 dakika sinterlenen % 0,5 grafit içerikli demir numunenin SEM görüntüsü

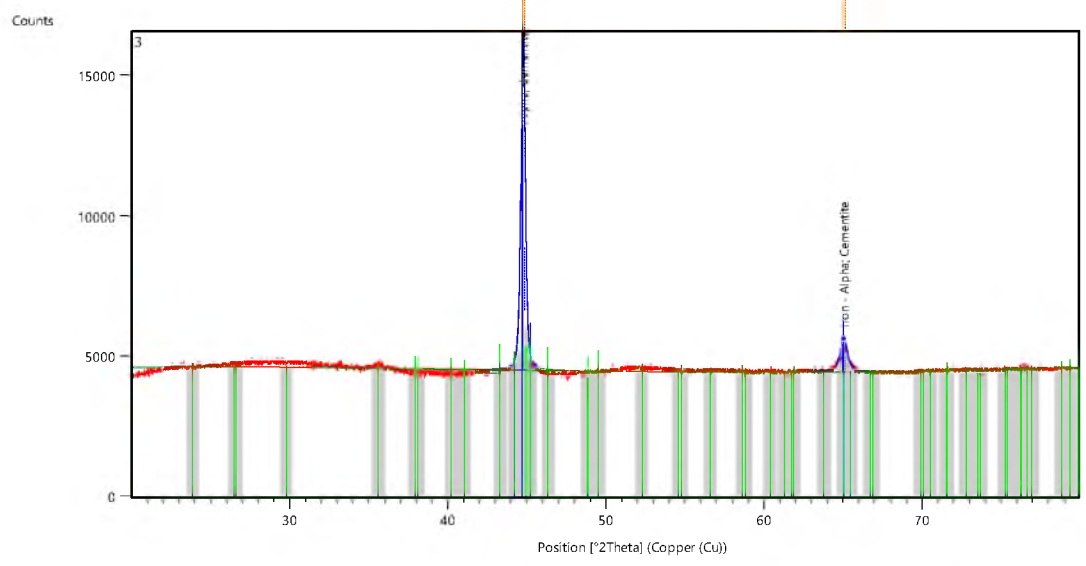


Şekil 4.52. Fırında 45 dakika 600 °C’de ön sinterlemenin ardından 1120 °C’de 30 dakika sinterlenen % 0,5 grafit içerikli demir numunenin çizgisel EDS analizi görüntüsü

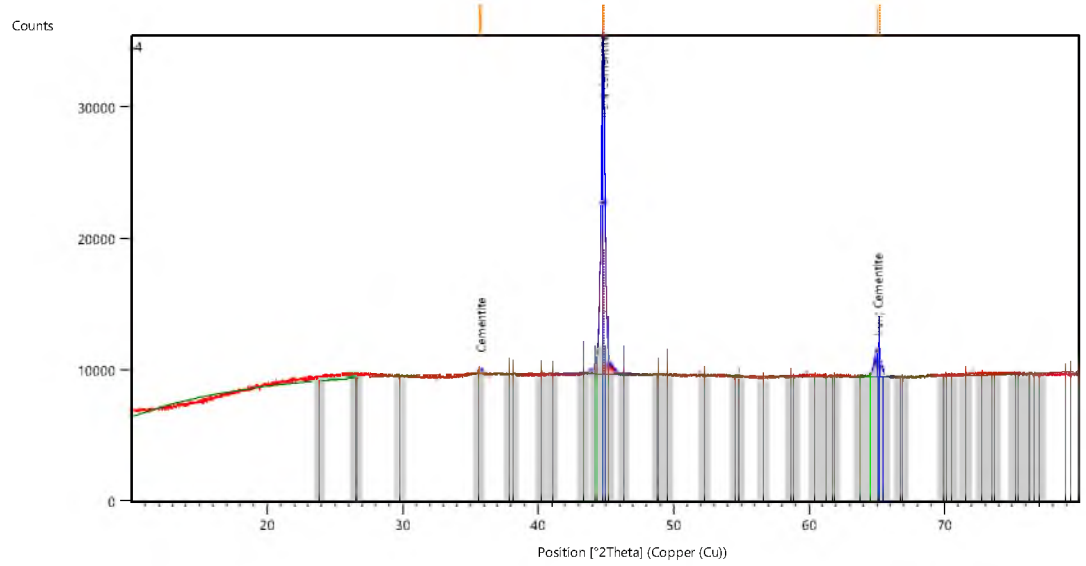
Numune üzerinden alınan SEM fotoğraflarında numune içerisinde yer alan ve Fe_3C lamelleri ve perlit fazı görülmektedir. Yapılan EDS analizi ile de numunelerin içeriği olan demir ve karbon elementi ve bunların çizgisel dağılımı mikroyapı fotoğraflarında gösterilmiştir.

4.2.6. XRD Analizi Sonuçları

Grafit içerikli demir numunelere gerçekleştirilen XRD analizi sonuçları aşağıdaki şekillerde yer almaktadır.



Şekil 4.53. İndüksiyon ile 600 °C’de 15 dakika ön sinterlemenin ardından 1120 °C’de 15 dakika sinterlenen % 0,5 grafit içerikli demir numunenin XRD analiz sonucu



Şekil 4.54. Fırında 600 °C’de 45 dakika ön sinterlemenin ardından 1120 °C’de 30 dakika sinterlenen % 0,5 grafit içerikli demir numunenin XRD analiz sonucu

Yapılan XRD incelemesinde elde edilen sonuçlara göre, indüksiyon ile sinterleme yönteminde yapı içerisinde bulunan grafit, numunede α -Fe fazı ve Sementit (Fe_3C) yapısının oluşmasına neden olmuştur.

4.2.7. Özgül direnç Ölçümü Sonuçları

Grafit içerikli numunelerin sinterlenmesi sonuçlarının yorumlanması amacıyla gerçekleştirilen özgül direnç ölçümünün sonuçları Tablo 4.2'de yer almaktadır. Özgül direnç değerleri $\mu\Omega m$ cinsindedir.

Tablo 4.2. % 0,5 Grafit İçerikli demir numunelerin sinterleme öncesi ve sonrası özgül direnç ölçüm değerleri

Sinterlenmemiş Numune Özdirenci ($\mu\Omega m$)	Sinterleme Parametresi	Sinterleme Sonrası Özgül direnç ($\mu\Omega m$)
2130,21	1120 °C 6 dk. İndüksiyon	2,54
	1120 °C 10 dk. İndüksiyon	2,21
	1120 °C 15 dk. İndüksiyon	2,17
	1000 °C 15 dk. İndüksiyon	23,04
	900 °C 15 dk. İndüksiyon	41,47
	600 °C'de 15 dk. Ön Sinterlenmiş 1120 °C 15 dk. İndüksiyon	2,37
	30 Dakika 1120 °C Fırın	2,36
	600 °C'de 45 dk. Ön Sinterlenmiş 1120 °C 15 dk. Fırın	2,38

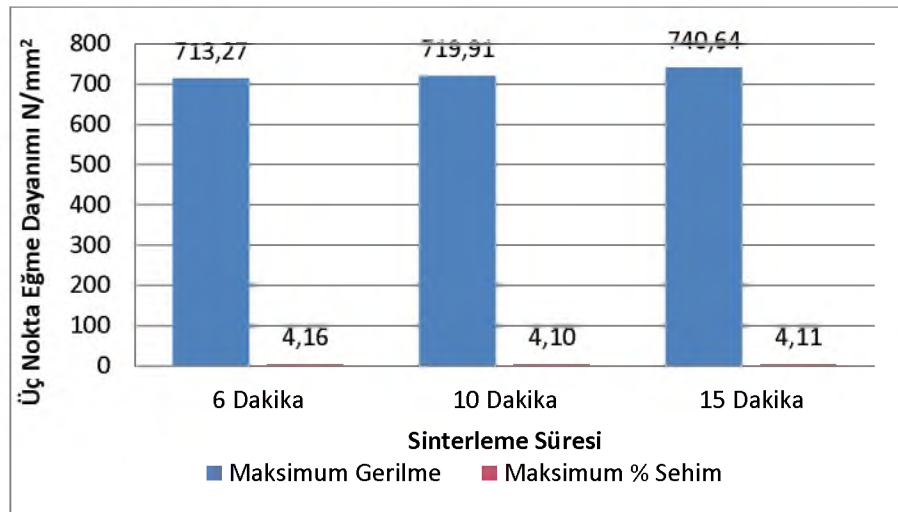
Sonuçlardan da görüldüğü gibi, grafit içerikli numunelerin sinterlemeden önceki özgül dirençleri saf demir numunelere kıyasla çok daha yüksektir (2130,21-972,27 ($\mu\Omega m$)). Sinterleme ile özgül direnç saf demir numunelerde olduğu gibi yine büyük ölçüde düşmüştür ancak sinterleme sonrası grafit içerikli numunelerin özdirenci saf demir numunelere göre biraz daha yüksektir.

4.3. % 3 Bakır ve % 0,5 Grafit'li Demir Tozu ile Yapılan Çalışmalardaki Sonuçlar

Bakır ve grafit içerikli numuneler, ticari saflıktaki Högenas ASC 100.29 demir tozuna % 0,5 Grafit ve % 3 Bakır eklenmesiyle elde edilen İçeriğinde yağlayıcı olarak, % 0,8 oranında Çinko Stereat bulunan karışım tozdan üretilmiştir. Numuneler saf demir ve grafit içerikli demir numunelerle aynı parametrelerde sinterlenmiştir. Sinterleme işlemleri, saf demir ve grafit içerikli demir numunelerde olduğu gibi argon atmosferinde gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda elde edilen bulgular aşağıda yer almaktadır.

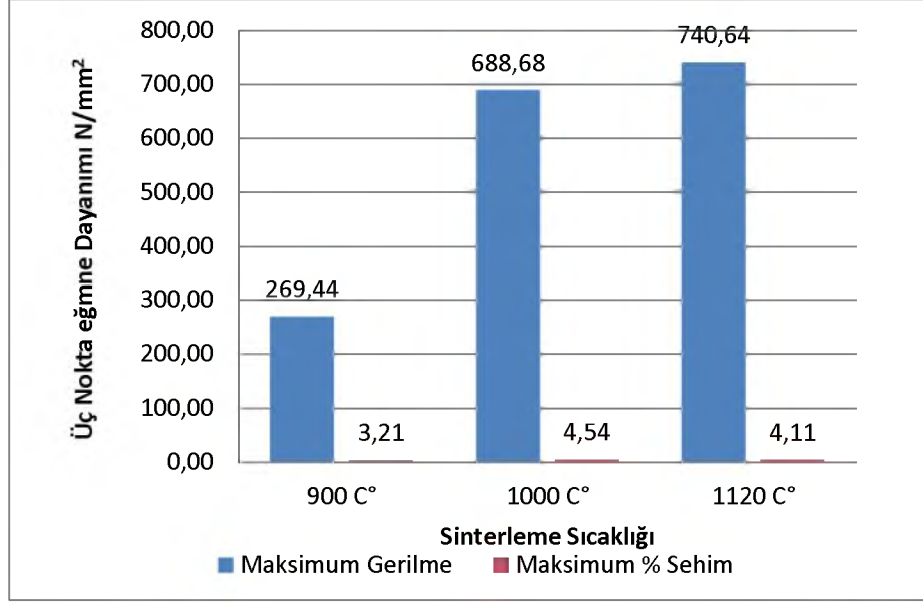
4.3.1. Üç Nokta Eğme Deneyi Sonuçları

Sinterlenen % 3 bakır ve % 0,5 grafit içerikli demir numunelere uygulanan 3 nokta eğme deneyinin sonuçları Şekil 4.55-4.58'de yer almaktadır. Şekil 4.55'te indüksiyon ile sinterleme yönteminde farklı sinterleme sürelerinin dayanıma etkileri görülmektedir.



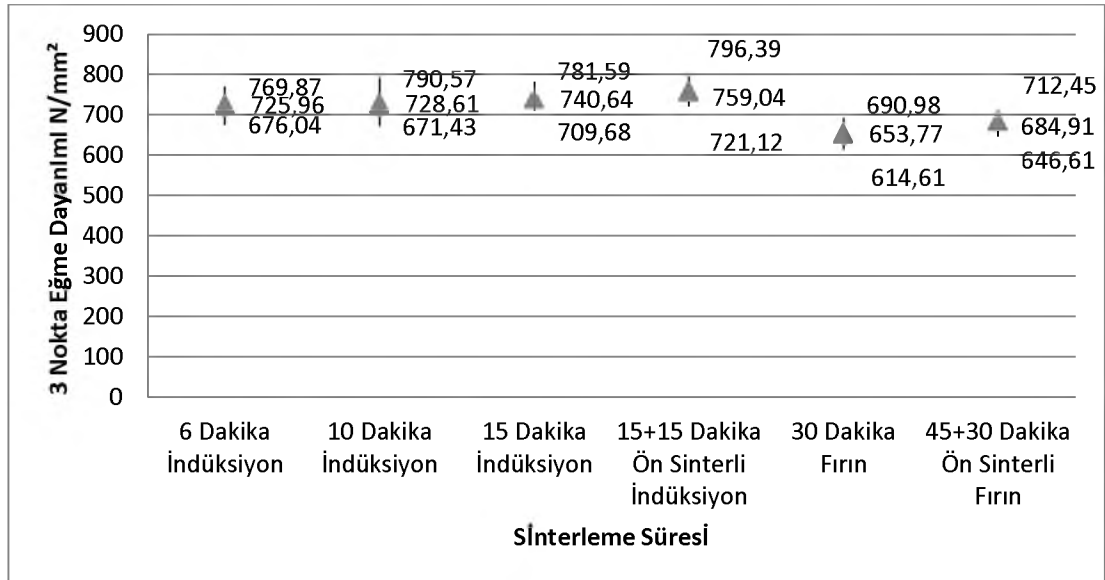
Şekil 4.55. % 3 Bakır, % 0,5 Grafit, içerikli demir numunelerde indüksiyon ile sinterlemede farklı sinterleme sürelerinin numunelerin üç nokta eğme dayanımlarına etkisi

Şekil 4.56'da farklı sinterleme sıcaklıklarının numunelerin üç nokta eğme dayanımlarına etkisi görülmektedir.

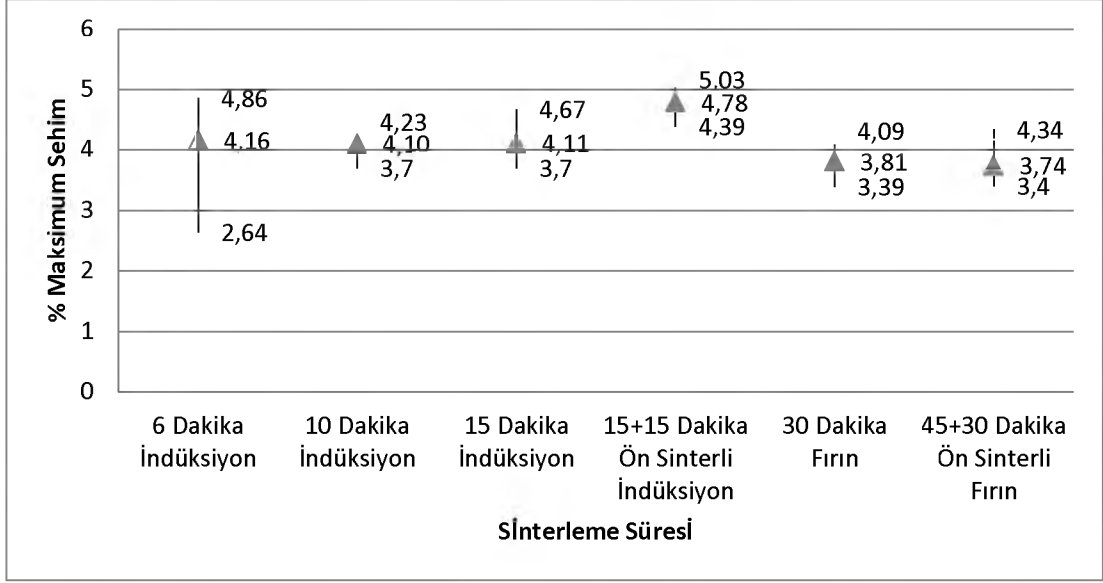


Şekil 4.56. % 3 Bakır, % 0,5 Grafit içerikli demir numunelerde indüksiyon ile sinterlemede farklı sinterleme sıcaklıklarının numunelerin üç nokta eğme dayanımlarına etkisi

Şekil 4.57’de ve 4.58’de farklı sinterleme yöntemlerinin ve ön sinterleme uygulanmasının numunelerin 3 nokta eğme dayanımlarına etkisi görülmektedir. Grafiklerde maksimum, minimum ve ortalama değerler yer almaktadır.



Şekil 4.57. % 3 Bakır, % 0,5 Grafit içerikli demir numunelerde farklı sinterleme yöntemlerinin ve ön sinterlemenin numunelerin 3 nokta eğme dayanımlarına etkisi

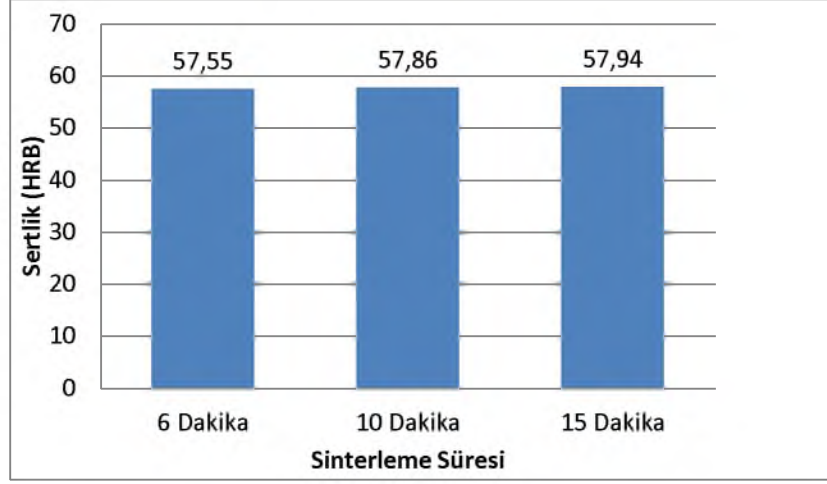


Şekil 4.58. % 3 Bakır, % 0,5 Grafit içerikli demir numunelerde farklı sinterleme yöntemlerinin ve ön sinterlemenin 3 nokta eğme deneyi ile elde edilen % sehımlerine etkisi

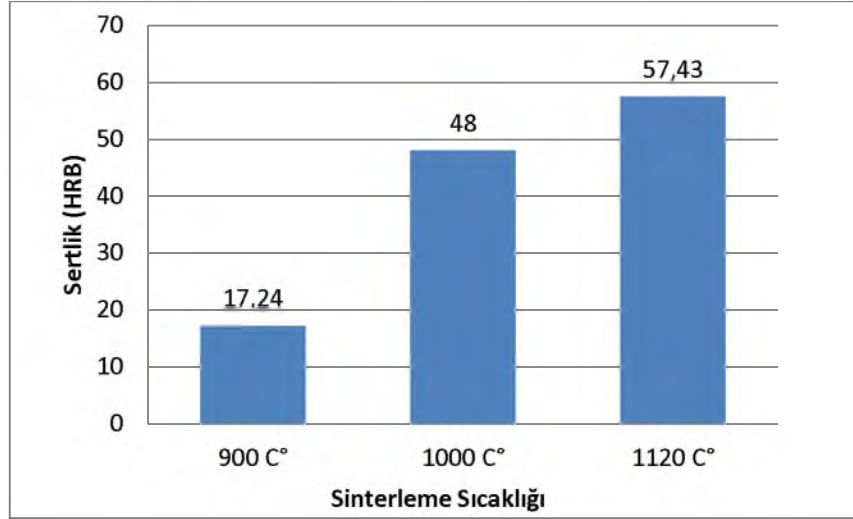
3 nokta eğme deneyi sonuçlarına bakıldığında, bakır ve grafit içerikli numunelerde de indüksiyon ile sinterleme süre ve sıcaklıklarının artışı ile numune dayanımında yükselme olduğu görülmektedir. 6 dakika indüksiyon ile sinterleme süresiyle 30 dakika geleneksel sinterleme sonucu elde edilen dayanım değerlerinin aşıldığı görülmüştür. Geleneksel sinterleme yönteminde de indüksiyon ile sinterleme yönteminde de dayanım değerleri bakır ve grafit içeriği ile artış gösterirken, indüksiyon ile sinterleme sonrası dayanımın daha çok artış gösterdiği görülmektedir.

4.3.2. Rockwell-B Sertlik Ölçümü Sonuçları

Sinterlenen % 3 bakır ve % 0,5 grafit içerikli numunelere uygulanan Rockwell-B sertlik ölçümünün sonuçları Şekil 4.59-4.61'de yer almaktadır.

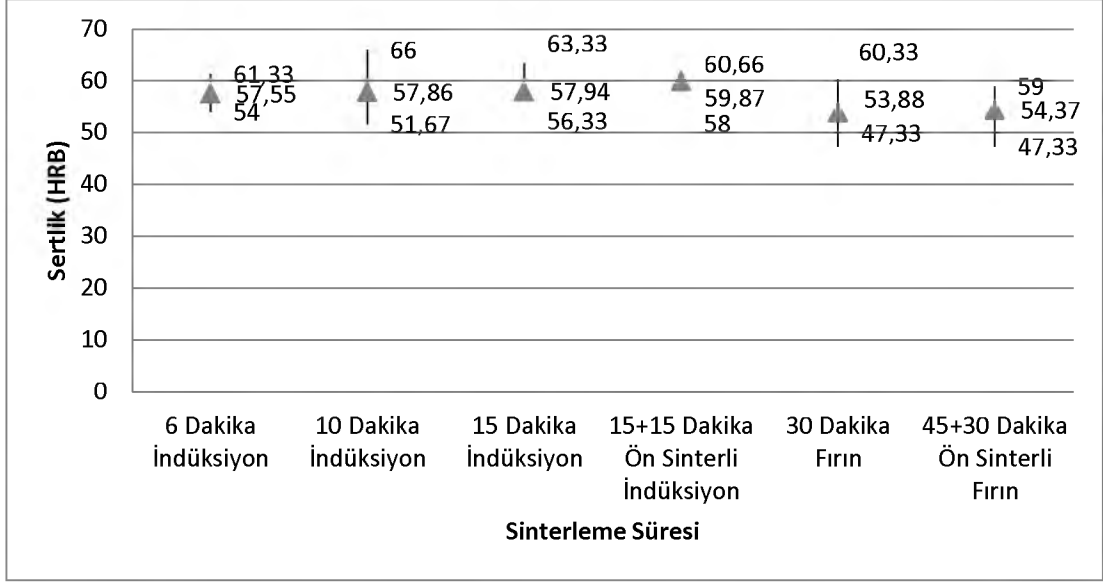


Şekil 4.59. % 3 Bakır, % 0,5 Grafit içerikli demir numunelerde indüksiyon ile sinterlemede farklı sinterleme sürelerinin numunelerin Rockwell-B sertliklerine etkisi



Şekil 4.60. % 3 Bakır, % 0,5 Grafit içerikli demir numunelerde indüksiyon ile sinterlemede farklı sinterleme sıcaklıklarının numunelerin Rockwell-B sertliklerine etkisi

Şekil 4.61’de ölçülen Rockwell-B sertlik değerlerinin maksimum, minimum ve ortalama değerleri yer almaktadır.

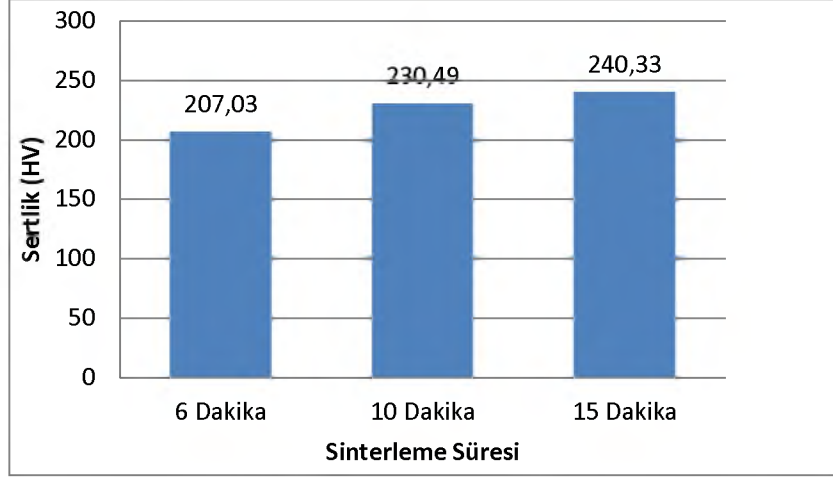


Şekil 4.61. % 3 Bakır, % 0,5 Grafit içerikli demir numunelerde farklı sinterleme yöntemlerinin ve ön sinterlemenin numunelerin Rockwell-B sertliklerine etkisi

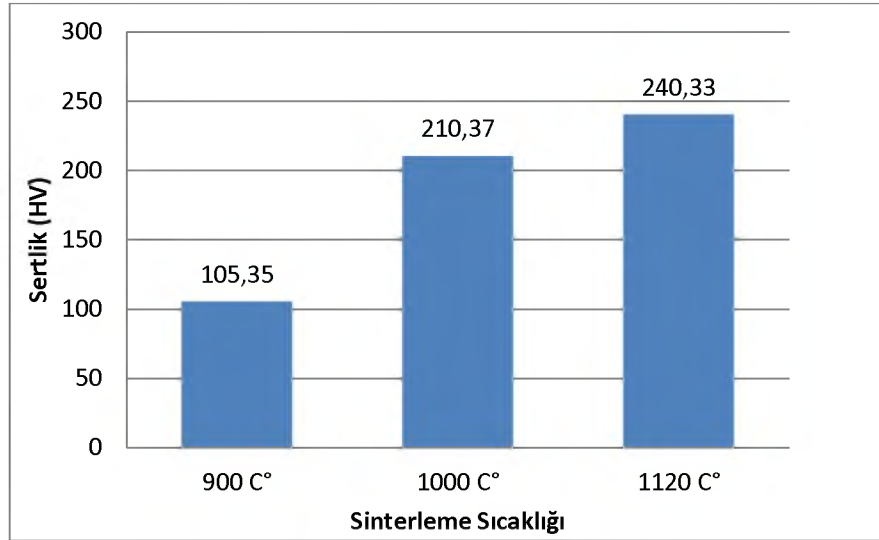
Rockwell-B Sertik incelemesi sonuçları göz önüne alındığında, üç nokta eğme dayanım değerleri gibi, daha kısa sinterleme süreleri ile geleneksel sinterlemede elde edilen sertlik değerlerine ulaşılmış ve bu değerler aşılmıştır. Beklendiği gibi sinterleme süre ve sıcaklıklarının artışı ile numunelerin sertlik değerlerinin artış gösterdiği görülmektedir.

4.3.3. Vickers Sertlik Ölçümü Sonuçları

Yöntem kısmında da bahsedildiği gibi, % 0,5 grafit ve % 3 bakır içeren numunelere Rockwell-B sertliğinin yanı sıra Vickers sertlik ölçümü de uygulanmıştır. Ölçüm sonuçları Şekil 4.62-4.64'te yer almaktadır.

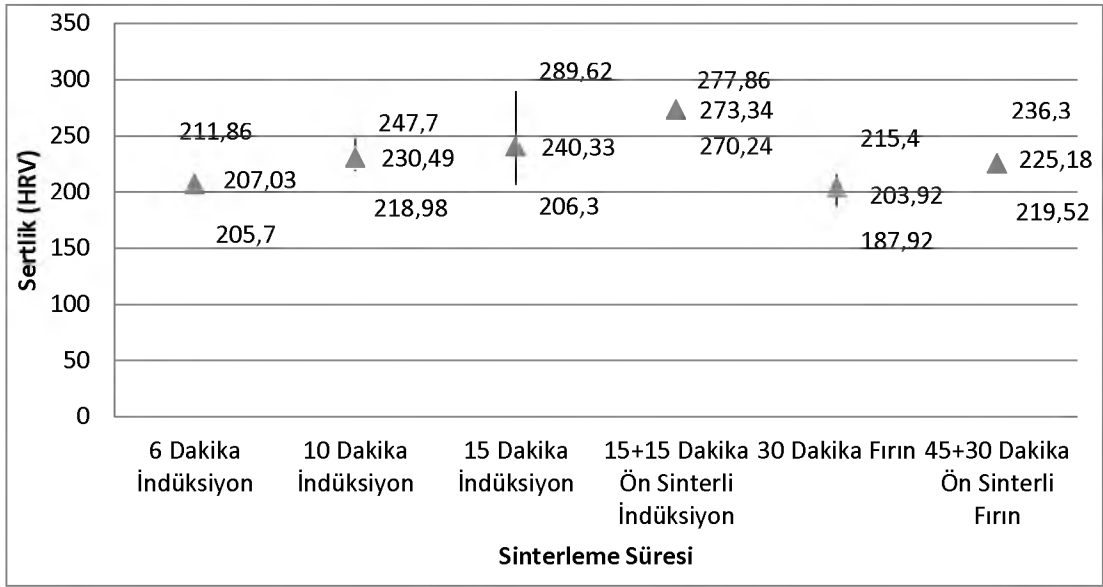


Şekil 4.62. % 3 Bakır, % 0,5 Grafit içerikli demir numunelerde indüksiyon ile sinterlemede farklı sinterleme sürelerinin numunelerin Vickers sertliklerine etkisi



Şekil 4.63. % 3 Bakır, % 0,5 Grafit içerikli demir numunelerde indüksiyon ile sinterlemede farklı sinterleme sıcaklıklarının numunelerin Vickers sertliklerine etkisi

Şekil 4.64'te Vickers sertliklerinin maksimum, minimum ve ortalama değerleri yer almaktadır.



Şekil 4.64. % 3 Bakır, % 0,5 Grafit içerikli demir numunelerde farklı sinterleme yöntemlerinin ve ön sinterlemenin numunelerin Rockwell-B sertliklerine etkisi

Sertlik değerlerinin ölçümünde elde edilen sapmaların daha iyi görülebilmesi amacıyla örnek bir sertlik ölçüm tablosu olarak indüksiyon ile 15 dakika Sinterlenen numunelerin Vickers sertlik ölçümleri Tablo 4.3'te verilmiştir.

Tablo 4.3. İndüksiyon ile 15 dakika süresince Sinterlenen % 3 Cu, % 0,5 Grafit İçerikli demir numunelerde Vickers Sertlik Ölçüm Sonuçları

Numune	Sertlik Ölçülen Noktalar						
	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	Ort.	Std. Sapma
1	160	236,90	274,90	211,40	242,10	225,06	38,30
2	339	332	306	191,20	279,90	289,62	53,45
3	199	191,50	196,40	194,60	250	206,30	21,99

Karşılaştırma amaçlı olarak aynı numunelerin Rockwell-B sertlik ölçüm değerleri Tablo 4.4'te yer almaktadır.

Tablo 4.4. İndüksiyon ile 15 dakika süresince Sinterlenen % 3 Cu, % 0,5 Grafit İçerikli demir numunelerde Rockwell-B Sertlik Ölçüm Sonuçları

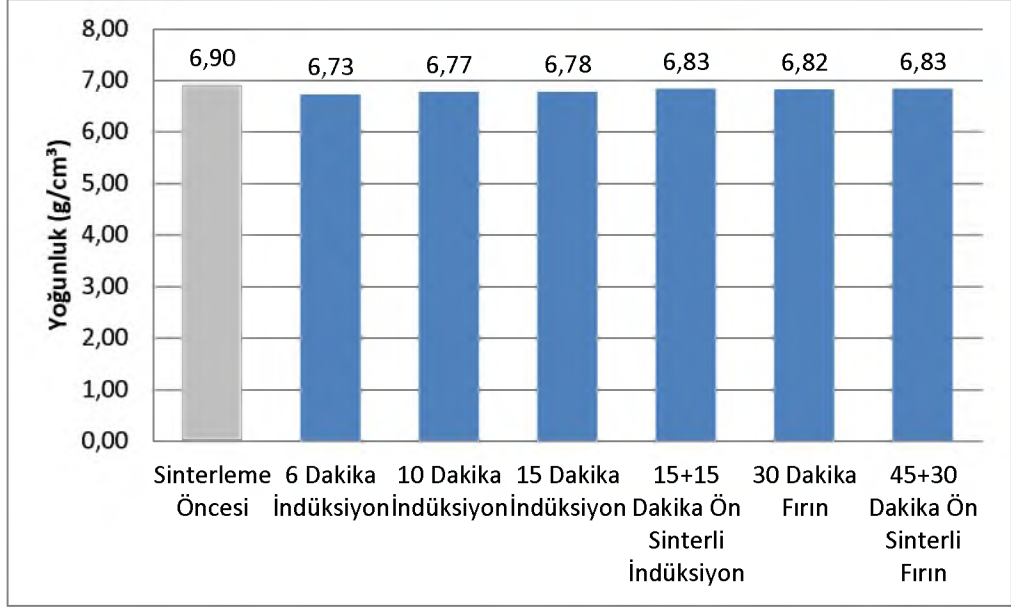
Numune	Sertlik Ölçülen Noktalar				
	1,00	2,00	3,00	Ort.	Std. Sapma
1	65	62	63	63,33	1,25
2	58	60	58	58,67	0,94
3	54	56	57	55,67	1,25
4	60	54	55	56,33	2,62
5	58	61	54	57,67	2,87
6	55	60	53	56	2,94

Tablo 4.3 ve 4.4'ten görüldüğü gibi, Vickers sertlik ölçümünde numunelerin sertlik değerlerinde, Rockwell-B sertliğine kıyasla çok büyük sapmalar mevcuttur. Bu nedenle yüzey alanı daha geniş olan Rockwell-B ya da Brinell gibi sertlik ölçüm yöntemleri, alaşım elementleri, boşluk ve çeşitli fazları bünyelerinde bulunduran toz metal malzemeler için çok uygun bir yöntem olmaktadır.

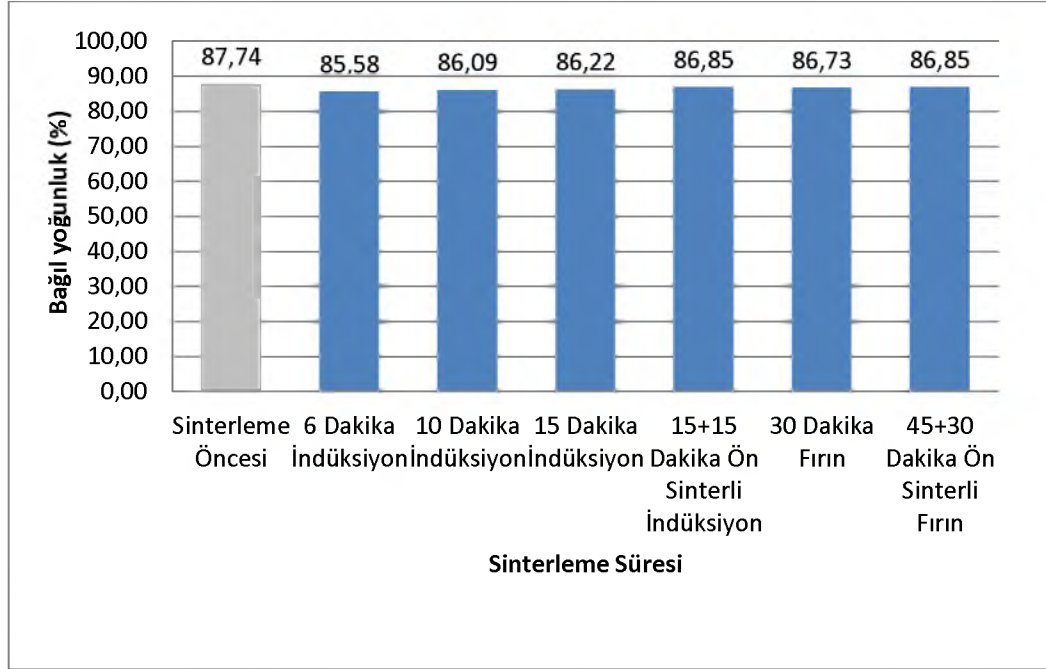
4.3.4. Yoğunluk Ölçümü Sonuçları

% 0,5 grafit ve % 3 bakır içeren numunelerin Arşimet prensibi ile yapılan yoğunluk ölçümlerinin sonuçları Şekil 4.65-4.68'de yer almaktadır. Yoğunluk ölçümünde demirin yoğunluğu $7,86 \text{ g/cm}^3$, grafitin yoğunluğu $2,1 \text{ g/cm}^3$, bakırın yoğunluğu $8,95 \text{ g/cm}^3$ olarak alınmıştır. Bağıl yoğunluk aşağıdaki formülle hesaplanmıştır.

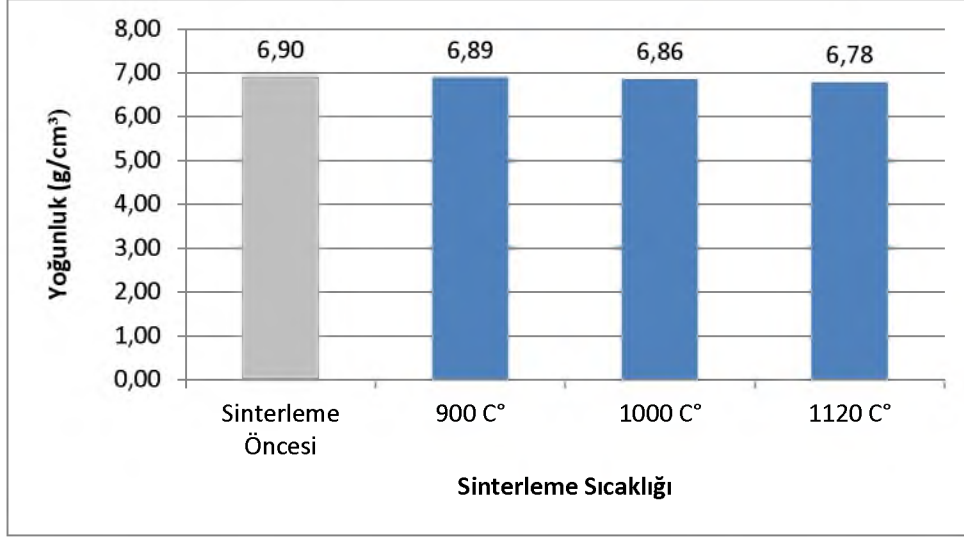
$$\text{Bağıl yoğunluk (\%)} = \frac{\text{Ölçülen yoğunluk (g/cm}^3\text{)}}{[7,86 \times 0,965 + 8,95 \times 0,03 + 2,1 \times 0,005] \text{ (g/cm}^3\text{)}} \times 100 \quad (4.4)$$



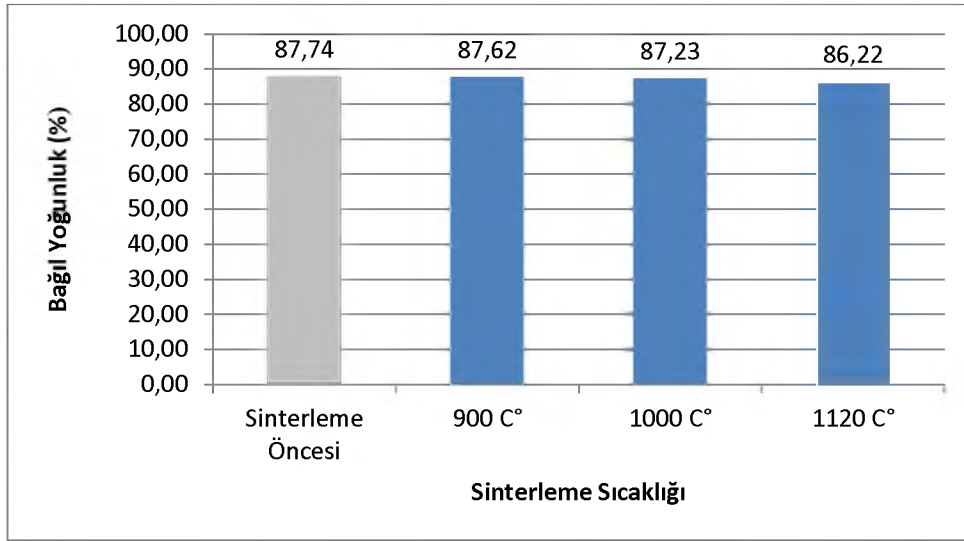
Şekil 4.65. % 3 Bakır, % 0,5 Grafit içerikli demir numunelerde indüksiyon ile sinterlemede farklı sinterleme sürelerinin ve yöntemlerinin numunelerin yoğunluklarına etkisi



Şekil 4.66. % 3 Bakır, % 0,5 Grafit içerikli demir numunelerde indüksiyon ile sinterlemede farklı sinterleme sürelerinin ve sinterleme yöntemlerinin numunelerin bağıl yoğunluklarına etkisi



Şekil 4.67. % 3 Bakır, % 0,5 Grafit içerikli demir numunelerde indüksiyon ile sinterlemede farklı sinterleme sıcaklıklarının numunelerin yoğunluklarına etkisi



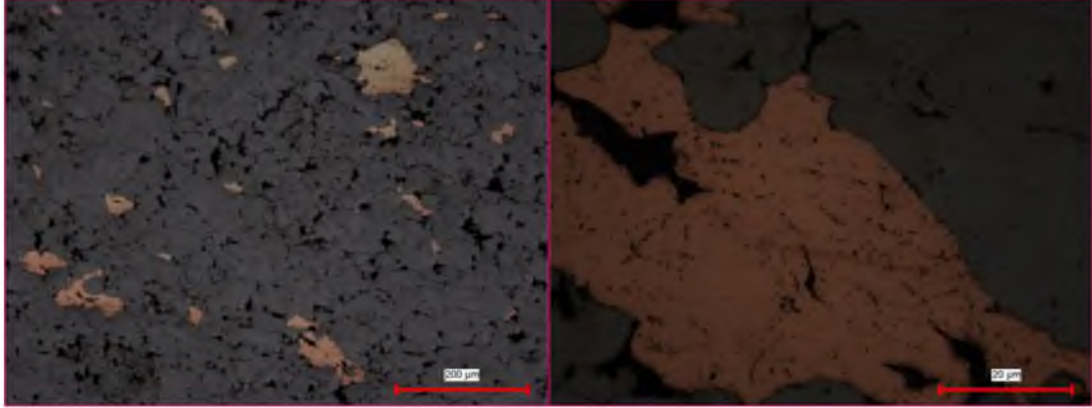
Şekil 4.68. % 3 Bakır, % 0,5 Grafit içerikli demir numunelerde indüksiyon ile sinterlemede farklı sinterleme sıcaklıklarının numunelerin bağıl yoğunluklarına etkisi

Sonuçlardan görüldüğü gibi sinterleme sonrası yoğunluk değerleri, bakır içerikli numunelerde azalmıştır. Ancak sinterleme süresi arttıkça yoğunluk değerleri yeniden artış göstermiştir. Sıcaklıklar incelendiğinde ise, sinterleme sıcaklığı arttıkça yoğunluk değerleri azalmıştır Bunun nedeni bakır içeren demir numunelerde sinterleme sırasında meydana gelen şişmedir. Bölüm 2.2.3 Sıvı faz sinterlemede,

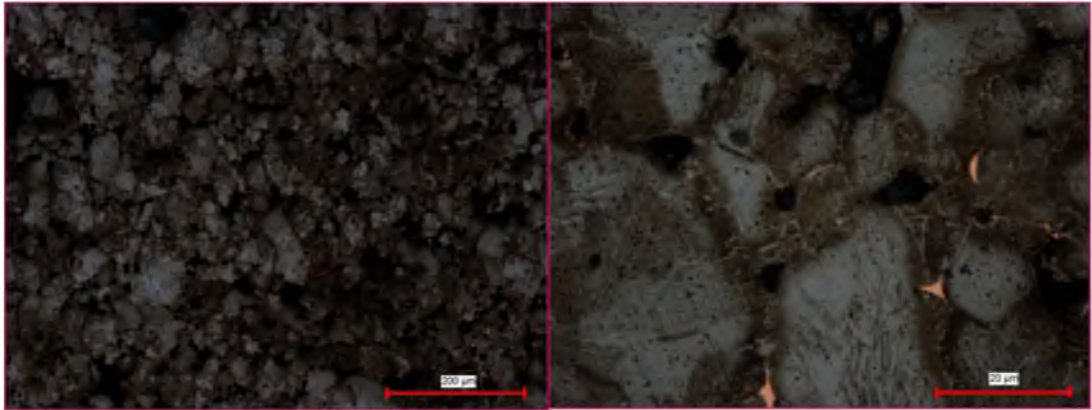
Bölüm 4.4 Farklı toz bileşimlerinin numunelerin üzerine etkileri ve sonuç ve öneriler kısmında bu hususlardan bahsedilmiştir.

4.3.5. Optik Mikroskop İle Mikroyapı İnceleme Sonuçları

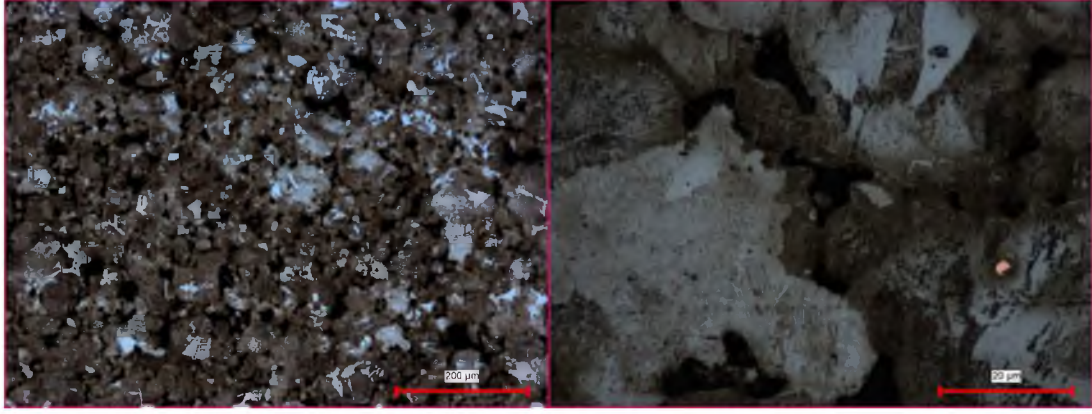
% 0,5 grafit ve % 3 bakır içeren demir numunelerin optik mikroskop görüntüleri Şekil 4.69-4.78’te yer almaktadır.



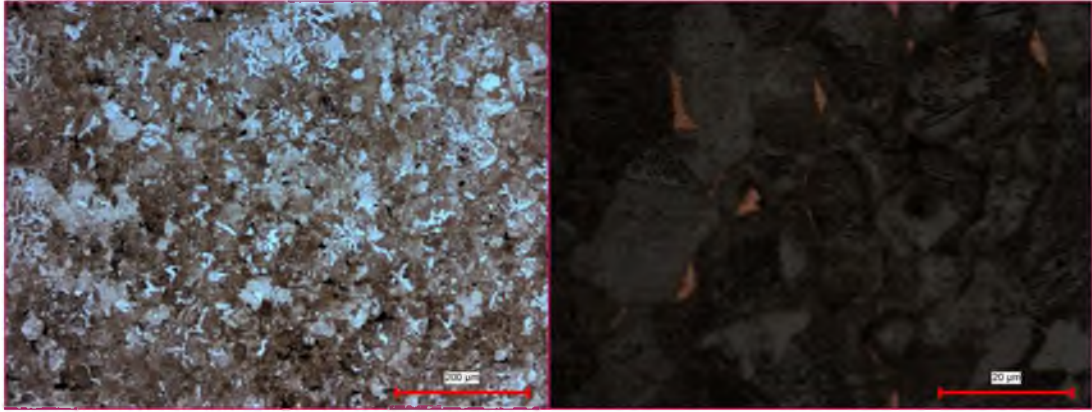
Şekil 4.69. İndüksiyon ile 900 °C’de 15 dakika sinterlenen % 3 Cu, % 0,5 grafit içerikli demir numunenin mikro yapı görüntüsü



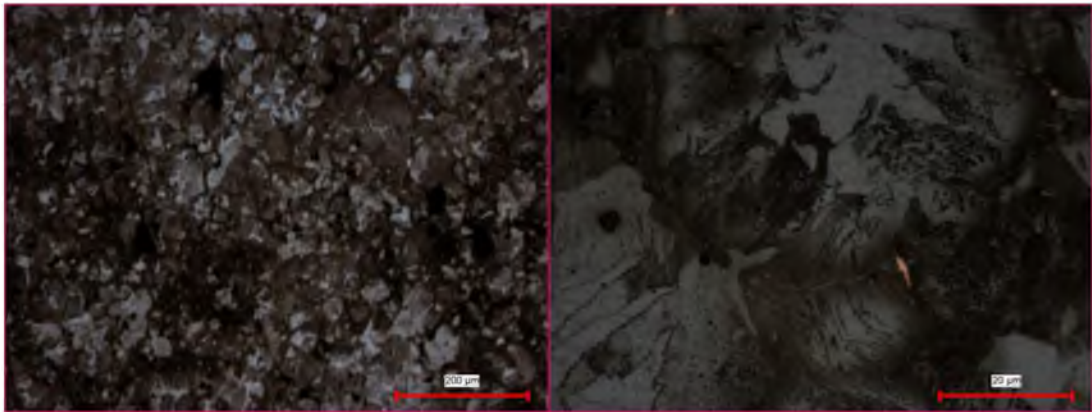
Şekil 4.70. İndüksiyon ile 1000 °C’de 15 dakika sinterlenen % 3 Cu, % 0,5 grafit içerikli demir numunenin mikro yapı görüntüsü



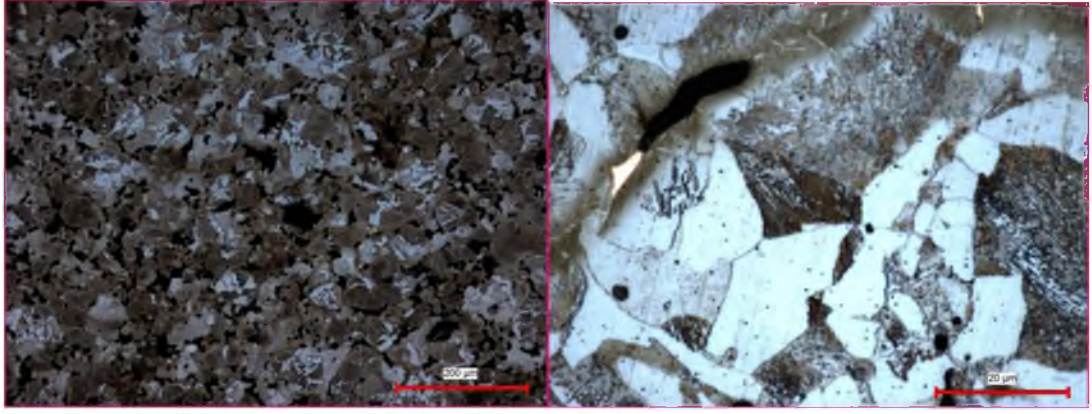
Şekil 4.71. İndüksiyon ile 1120 °C’de 15 dakika sinterlenen % 3 Cu, % 0,5 grafit içerikli demir numunenin mikro yapı görüntüsü



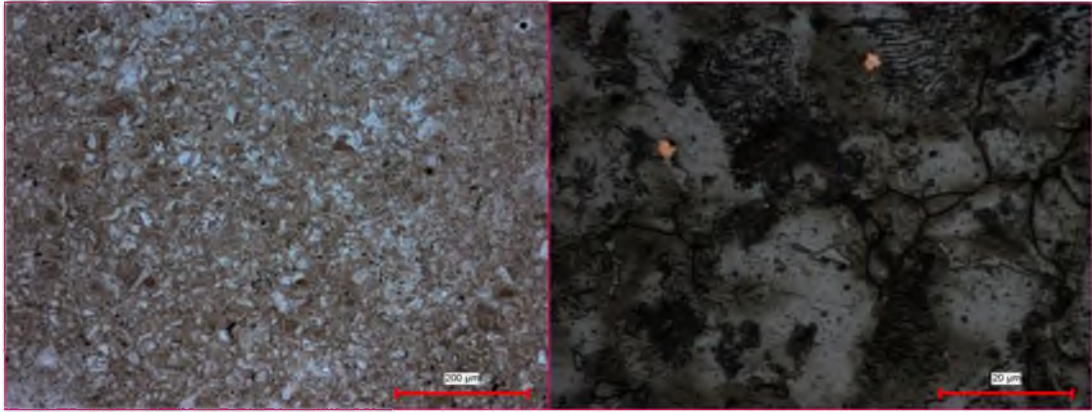
Şekil 4.72. İndüksiyon ile 1120 °C’de 6 dakika sinterlenen % 3 Cu, % 0,5 grafit içerikli demir numunenin mikro yapı görüntüsü



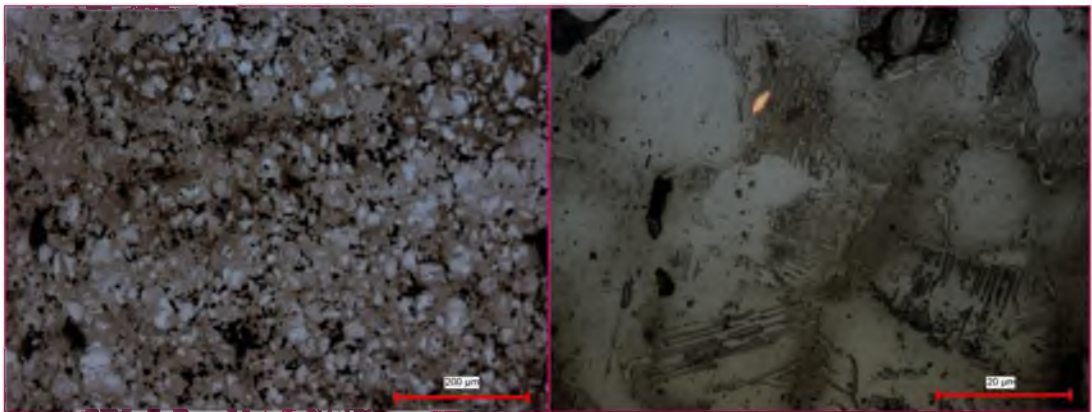
Şekil 4.73. İndüksiyon ile 1120 °C’de 10 dakika sinterlenen % 3 Cu, % 0,5 grafit içerikli demir numunenin mikro yapı görüntüsü



Şekil 4.74. İndüksiyon ile 600 °C’de 15 dakika ön sinterleme + 1120 °C’de 15 dakika sinterlenen % 3 Cu, % 0,5 grafit içerikli demir numunenin mikro yapı görüntüsü



Şekil 4.75. Fırında geleneksel olarak ile 1120 °C’de 30 dakika sinterlenen % 3 Cu, % 0,5 grafit içerikli demir numunenin mikro yapı görüntüsü



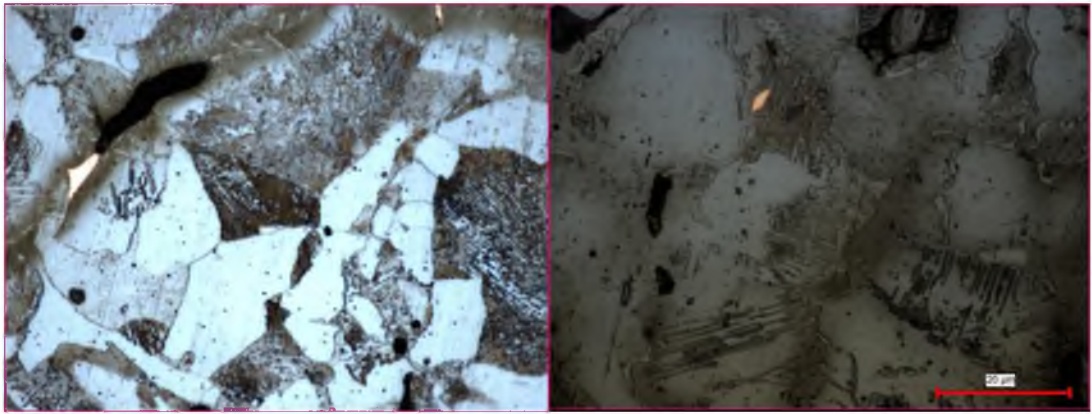
Şekil 4.76. Fırında 45 dakika 600 °C’de ön sinterleme + 1120 °C’de 30 dakika sinterlenen % 3 Cu, % 0,5 grafit içerikli demir numunenin mikro yapı görüntüsü



a)

b)

Şekil 4.77. İndüksiyon ile ve fırında ve ön sinterlemesiz olarak sinterlenen % 3 Cu, % 0,5 grafit içerikli demir numunelerin mikro yapı görüntüleri **a)** İndüksiyon ile 15 dakika sinterlenen numune **b)** Fırında 30 dakika sinterlenen numune



a)

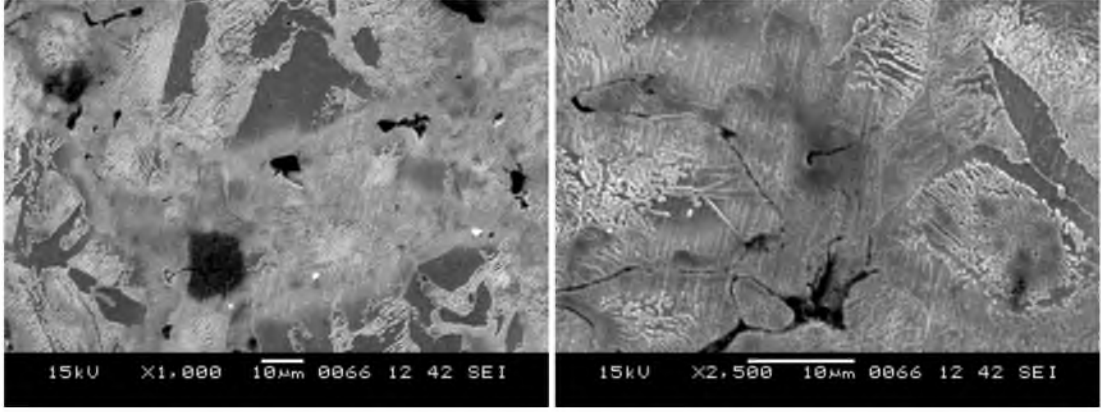
b)

Şekil 4.78. İndüksiyon ile ve fırında ve ön sinterlemeli olarak sinterlenen % 3 Cu, % 0,5 grafit içerikli demir numunelerin mikro yapı görüntüleri **a)** İndüksiyon ile 15+15 dakika sinterlenen numune **b)** Fırında 45+30 dakika sinterlenen numune

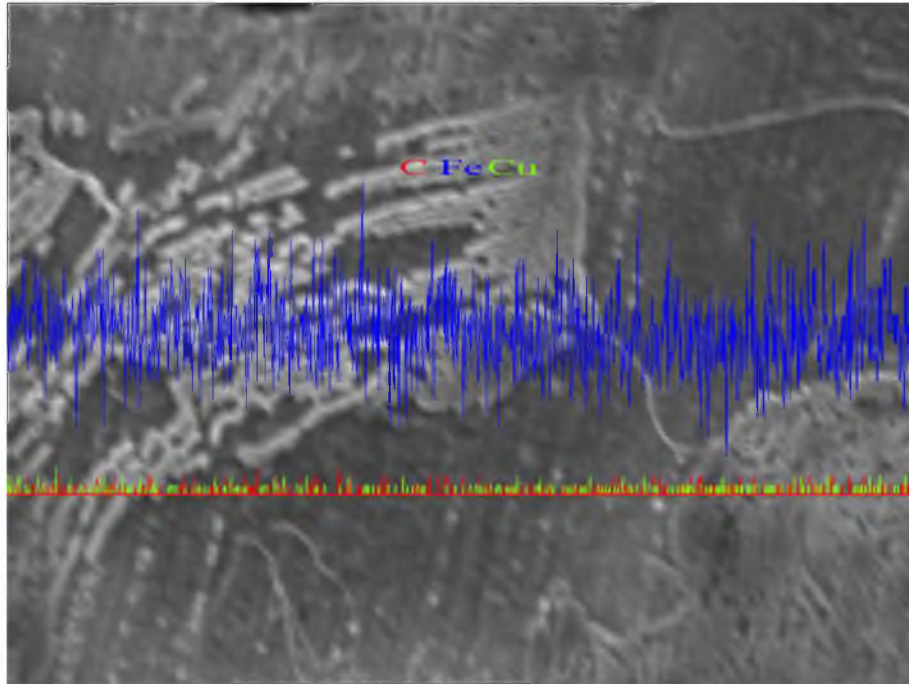
Numunelerin mikroyapı fotoğraflarından da görüldüğü gibi, saf demir ve grafit içerikli numunelerden farklı olarak, sıvı faz sinterlemeden dolayı partiküller arası çizgisel boşluklar önemli derecede azalma göstermiştir. Ayrıca, mevcut olan bakırdan dolayı numunelerin mikro yapıları görüntüleri, grafit içerikli numunelere kıyasla önemli derecede farklıdır.

4.3.6. SEM Mikroskobu İle Mikroyapı İnceleme Sonuçları

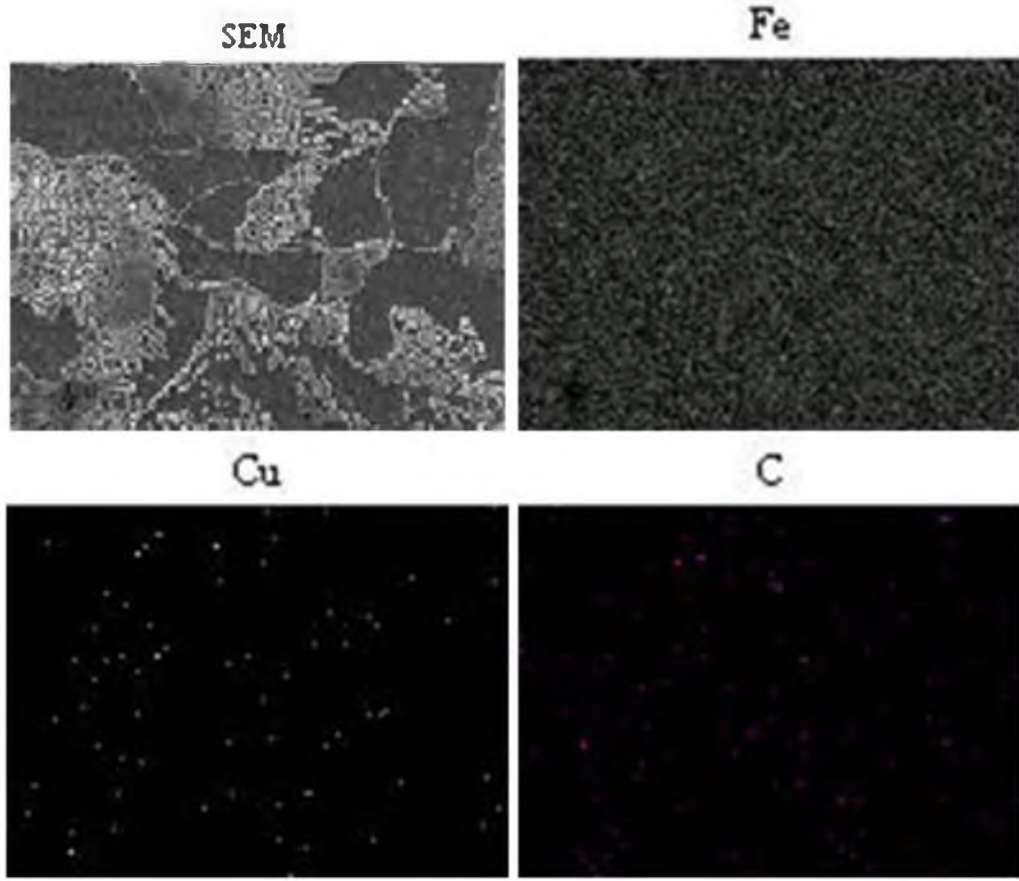
% 3 Cu ve % 0,5 Grafit içerikli numuneler üzerinden taramalı elektron mikroskobu ile alınan mikroyapı görüntüleri Şekil 4.79-4.84’de yer almaktadır.



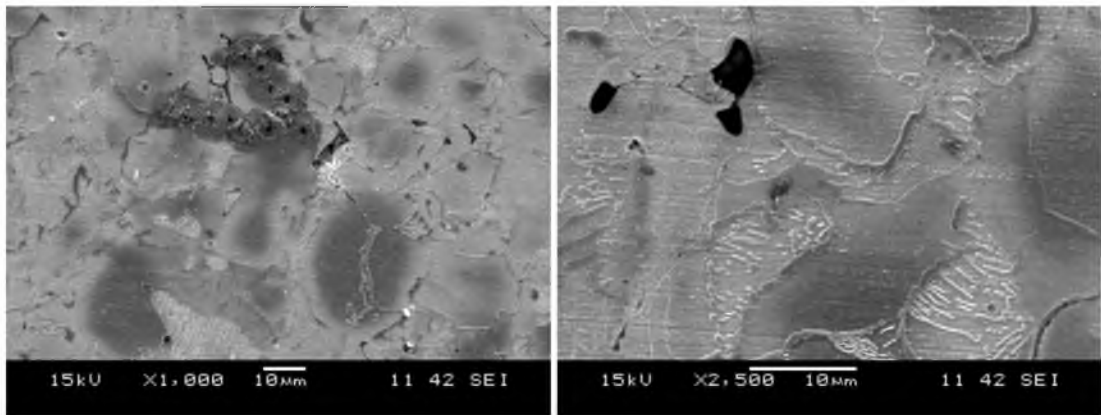
Şekil 4.79. İndüksiyon ile 600 °C’de 15 dakika ön sinterlemenin ardından 1120 °C’de 15 dakika sinterlenen % 3 Cu, % 0,5 grafit içerikli demir numunenin SEM görüntüsü



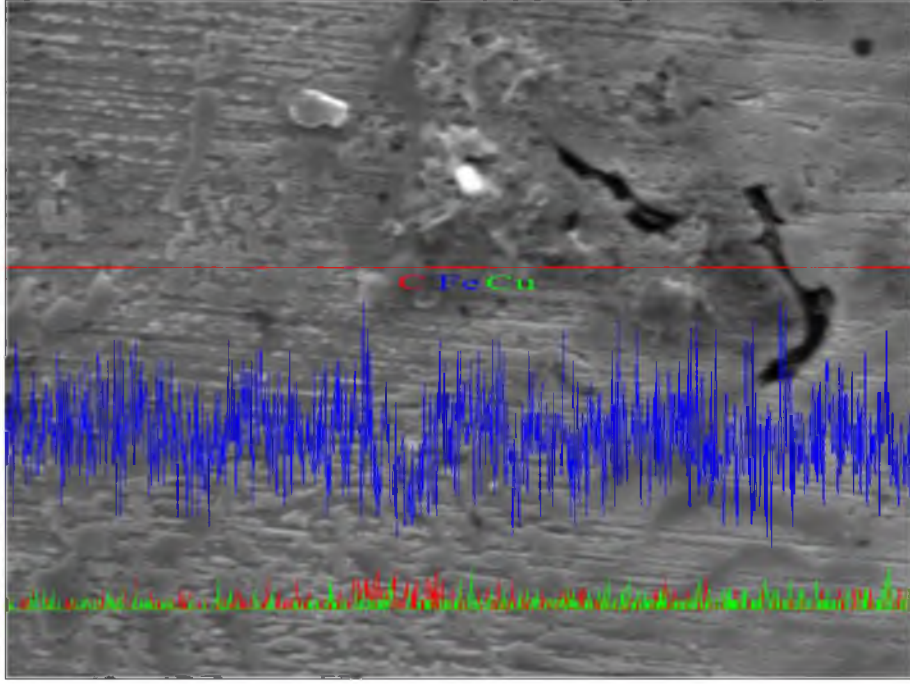
Şekil 4.80. İndüksiyon ile 600 °C’de 15 dakika ön sinterlemenin ardından 1120 °C’de 15 dakika sinterlenen % 3 Cu, % 0,5 grafit içerikli demir numunenin çizgisel EDS analizi görüntüsü



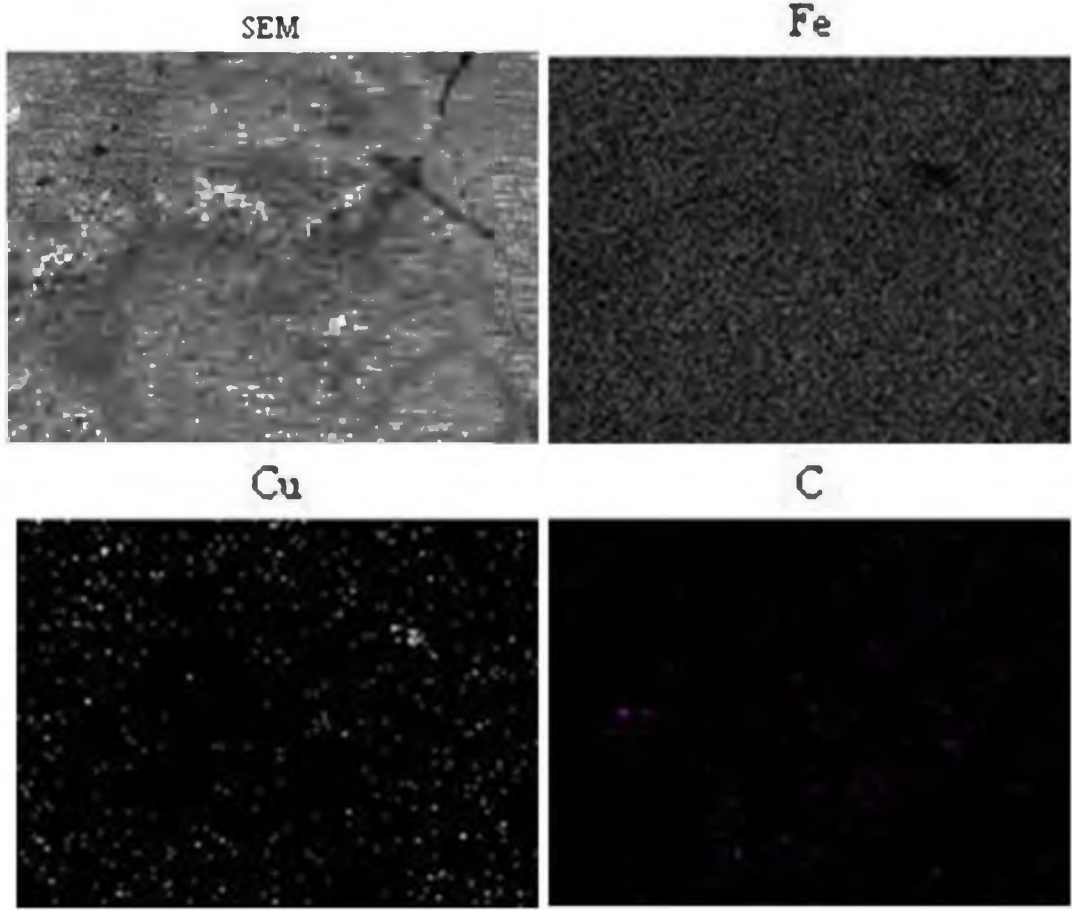
Şekil 4.81. İndüksiyon ile 600 °C’de 15 dakika ön sinterlemenin ardından 1120 °C’de 15 dakika sinterlenen % 3 Cu, % 0,5 grafit içerikli demir numunenin bölgesel EDS analizi görüntüsü



Şekil 4.82. Fırında 45 Dakika 600 °C’de ön sinterlemenin ardından 1120 °C’de 30 dakika sinterlenen % 3 Cu, % 0,5 grafit içerikli demir numunenin mikro yapı görüntüsü



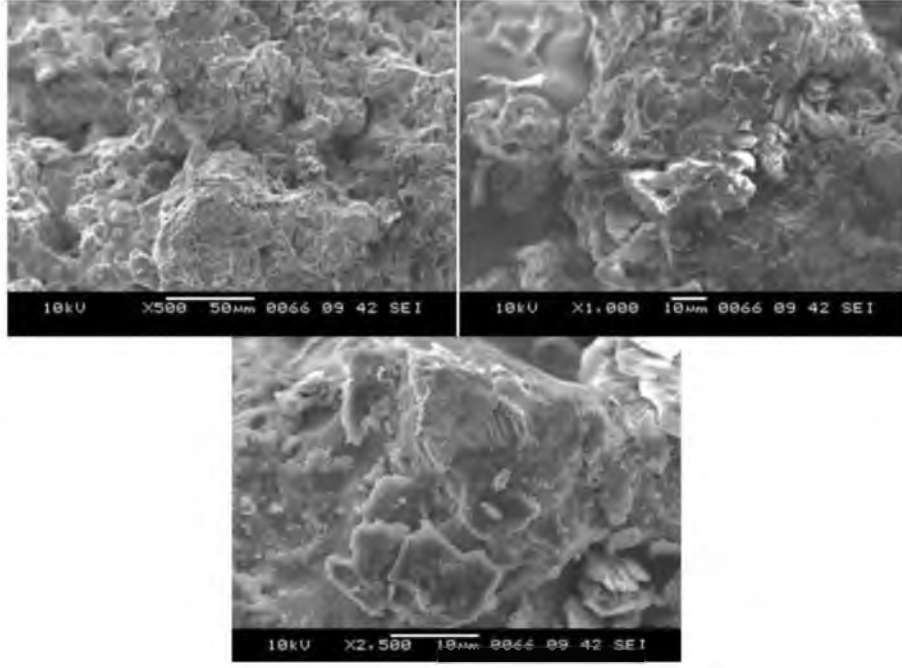
Şekil 4.83. Fırında 45 dakika 600 °C’de ön sinterlemenin ardından 1120 °C’de 30 dakika sinterlenen % 3 Cu, % 0,5 grafit içerikli demir numunenin çizgisel EDS analizi görüntüsü



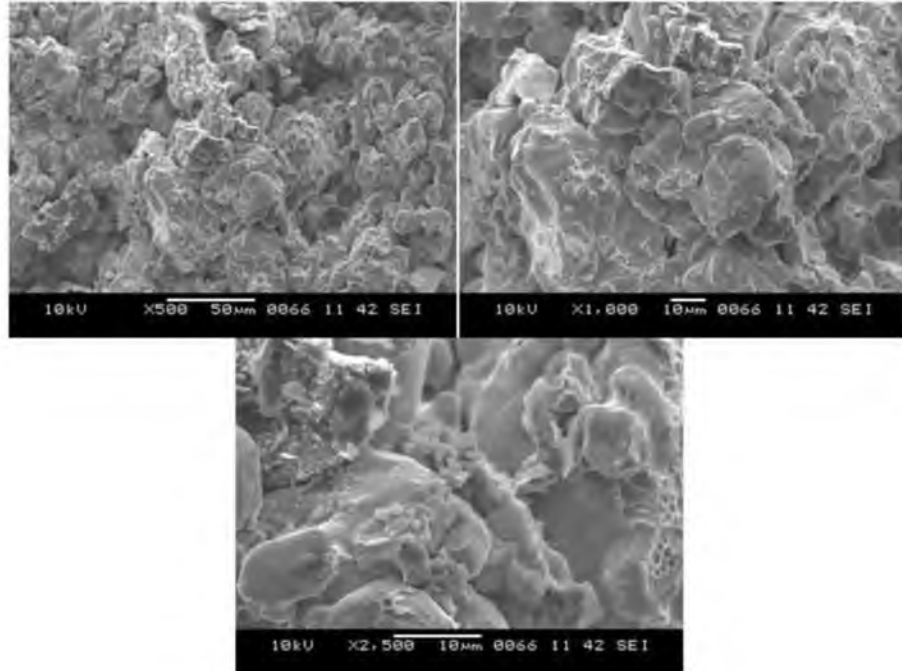
Şekil 4.84. Fırında 45 dakika 600 °C’de ön sinterlemenin ardından 1120 °C’de 30 dakika sinterlenen % 3 Cu, % 0,5 grafit içerikli demir numunenin bölgesel EDS analizi görüntüsü

Yapılan EDS analizi ile numunelerin içeriği olan demir, bakır ve grafit elementleri ve bunların çizgisel dağılımı mikroyapı fotoğraflarında görülmektedir. Ayrıca yapılan bölgesel EDS analizi ile indüksiyon ile sinterleme yönteminde bakır ve grafitin daha homojen dağıldığı, geleneksel sinterlemede ise mikro yapıda belli yerlerde daha çok heterojen toplandığı görülmektedir.

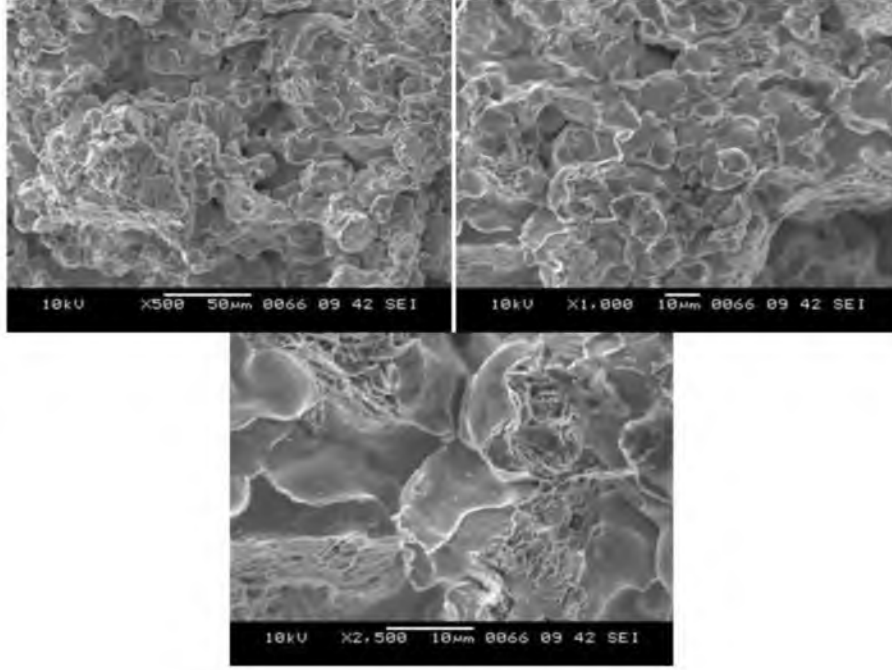
Sinterlenen bakır ve grafit içerikli numunelere uygulanan 3 nokta eğme deneyi sonrası numune kırık yüzeylerinden de SEM ile fotoğraflar alınmıştır. Bu fotoğraflar Şekil 4.85- 4.92’ de görülmektedir.



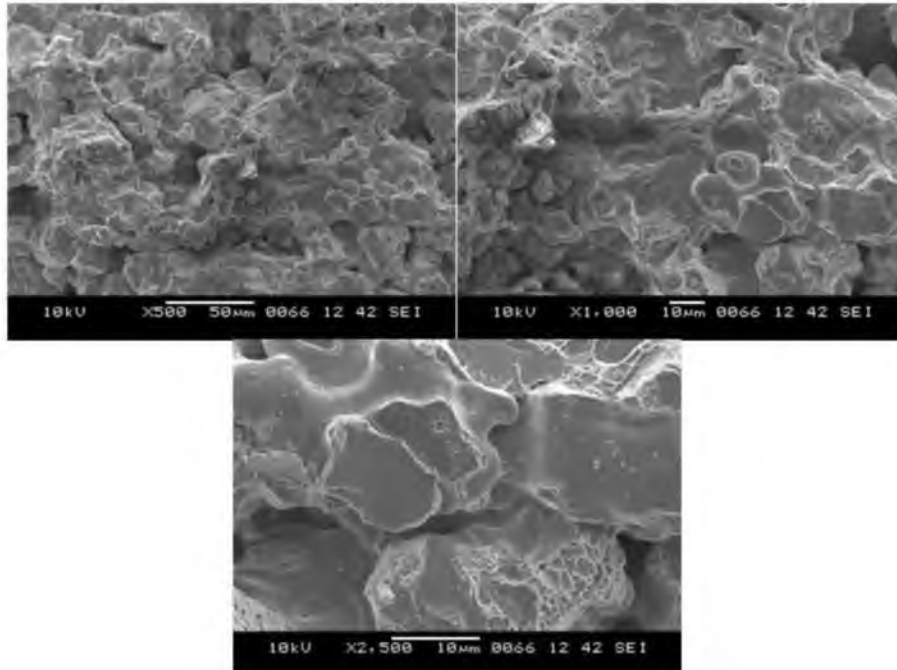
Şekil 4.85. İndüksiyon ile 900 °C sıcaklıkta 15 dakika sinterlenen % 3 Cu, % 0,5 grafit içerikli demir numunenin kırık yüzeyi SEM fotoğrafları (x500; x1000; x2500)



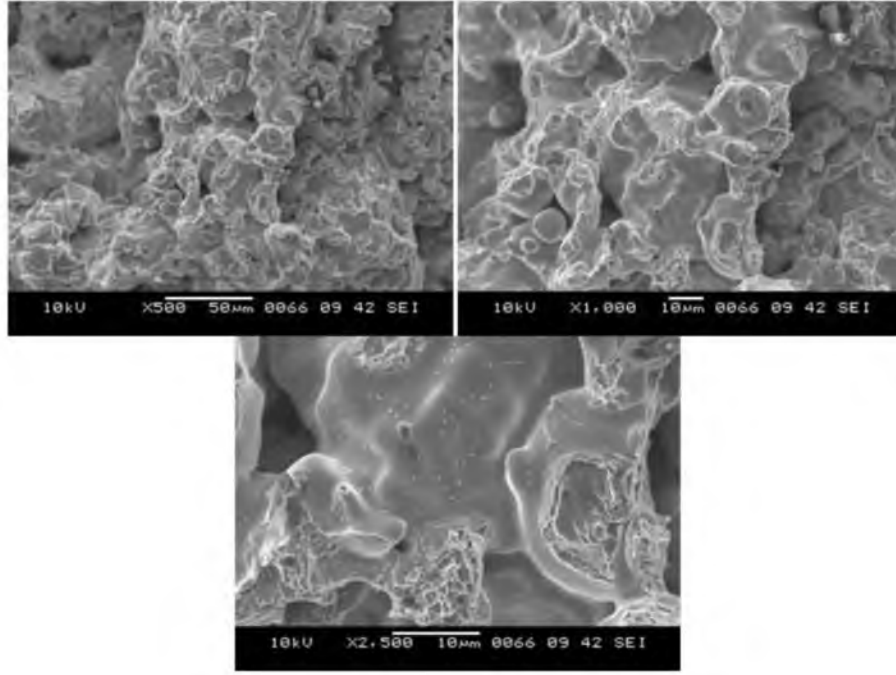
Şekil 4.86. İndüksiyon ile 1000 °C sıcaklıkta 15 dakika sinterlenen % 3 Cu, % 0,5 grafit içerikli demir numunenin kırık yüzeyi SEM fotoğrafları (x500; x1000; x2500)



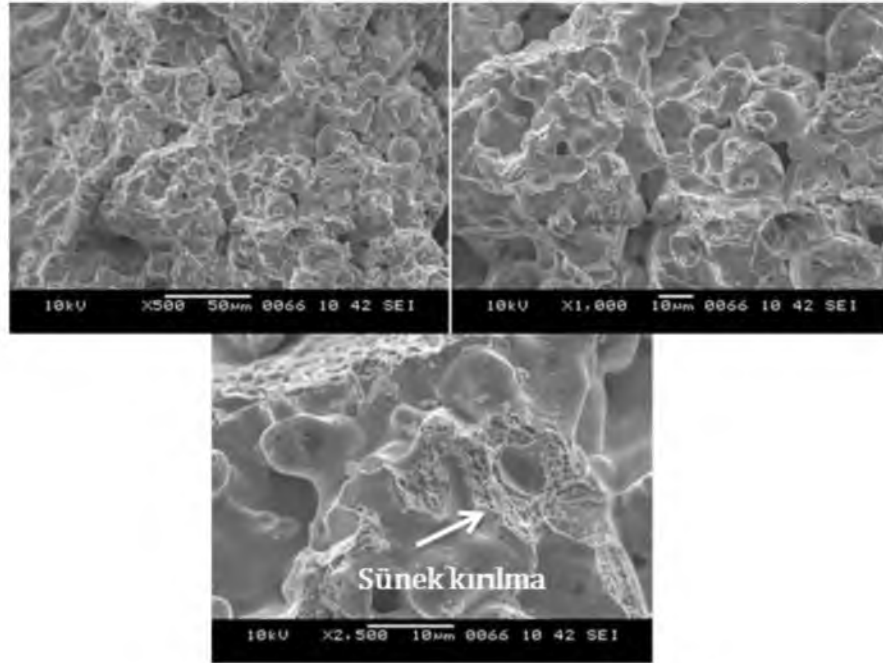
Şekil 4.87. İndüksiyon ile 1120 °C sıcaklıkta 15 dakika sinterlenen % 3 Cu, % 0,5 grafit içerikli demir numunenin kırık yüzeyi SEM fotoğrafları (x500; x1000; x2500)



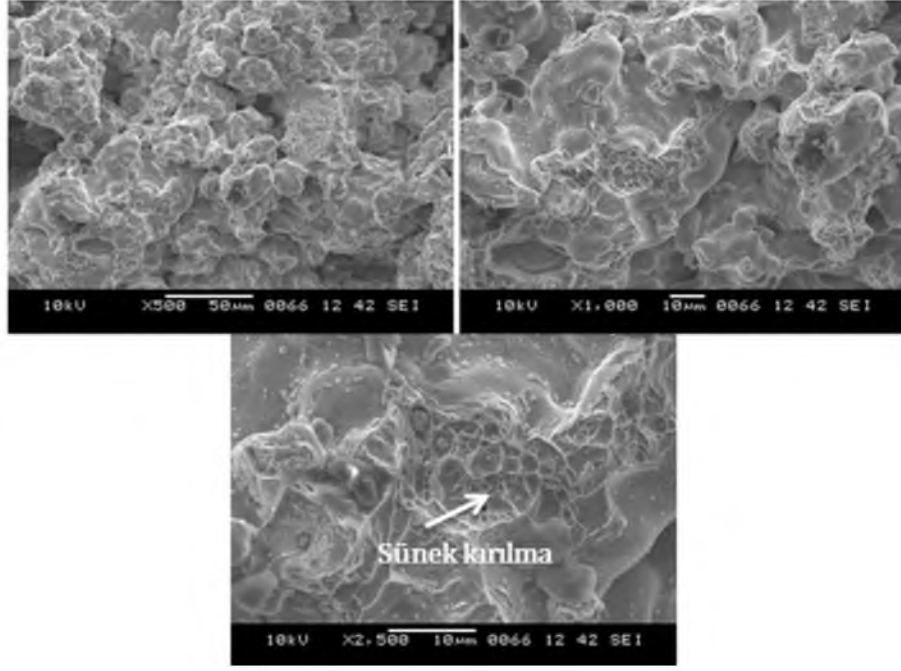
Şekil 4.88. İndüksiyon ile 1120 °C'de 6 dakika sinterlenen % 3 Cu, % 0,5 grafit içerikli demir numunenin kırık yüzeyi SEM fotoğrafları (x500; x1000; x2500)



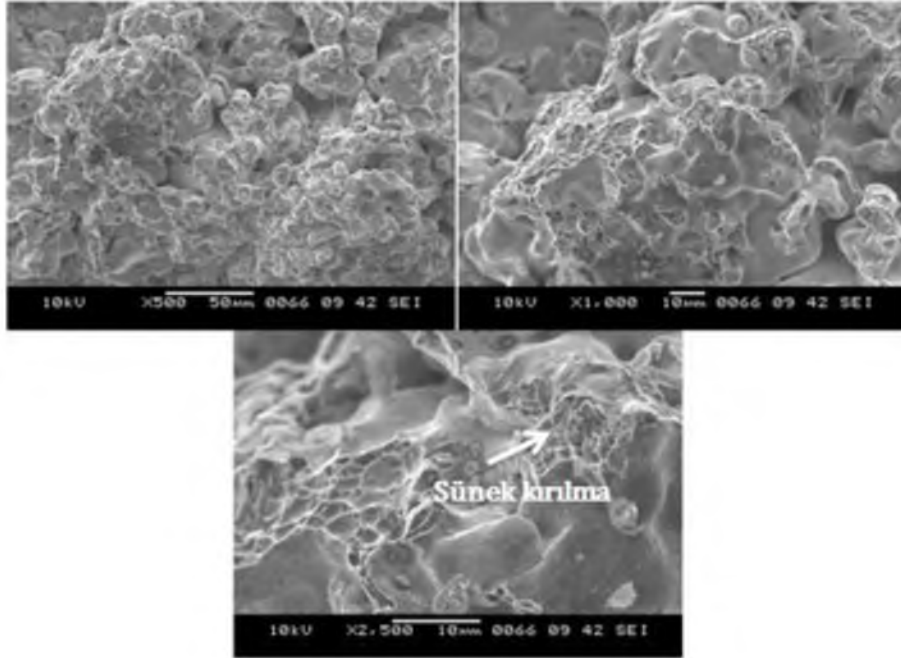
Şekil 4.89. İndüksiyon ile 1120 °C’de 10 dakika sinterlenen % 3 Cu, % 0,5 grafit içerikli demir numunenin kırık yüzeyi SEM fotoğrafları (x500; x1000; x2500)



Şekil 4.90. İndüksiyon ile 600 °C’de 15 dakika ön sinterlemenin ardından 1120 °C’de 15 dakika sinterlenen % 3 Cu, % 0,5 Grafit içerikli demir kırık yüzeyi SEM fotoğrafları (x500; x1000; x2500)



Şekil 4.91. Fırında geleneksel olarak ile 1120 °C’de 30 dakika sinterlenen % 3 Cu, % 0,5 grafit içerikli demir numunenin kırık yüzeyi SEM fotoğrafları (x500; x1000; x2500)

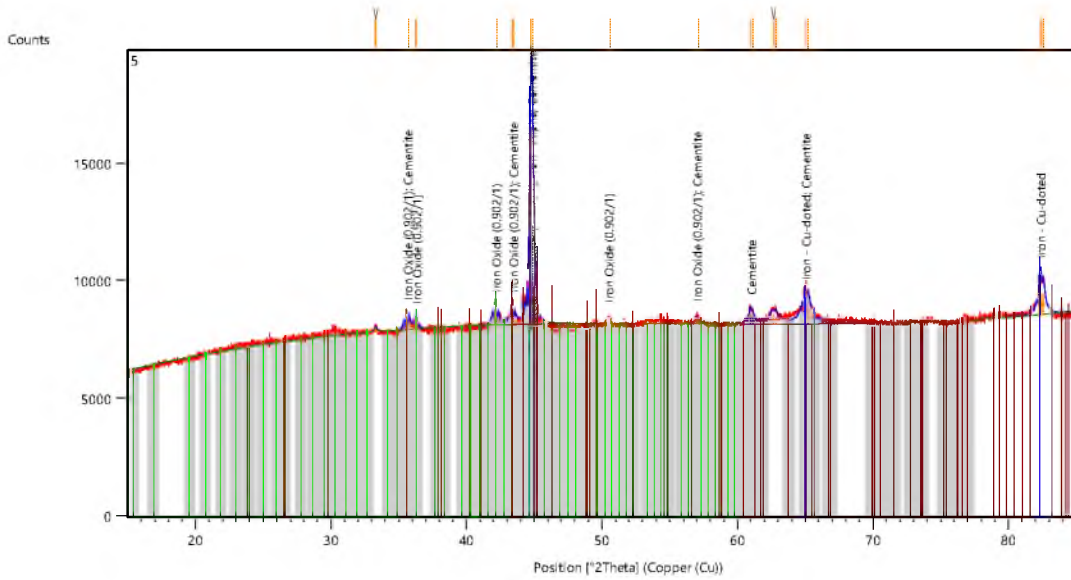


Şekil 4.92. Fırında 45 dakika 600 °C’de ön sinterlemenin ardından 1120 °C’de 30 dakika sinterlenen % 3 Cu, % 0,5 grafit içerikli demir numunenin kırık yüzeyi SEM fotoğrafları (x500; x1000; x2500)

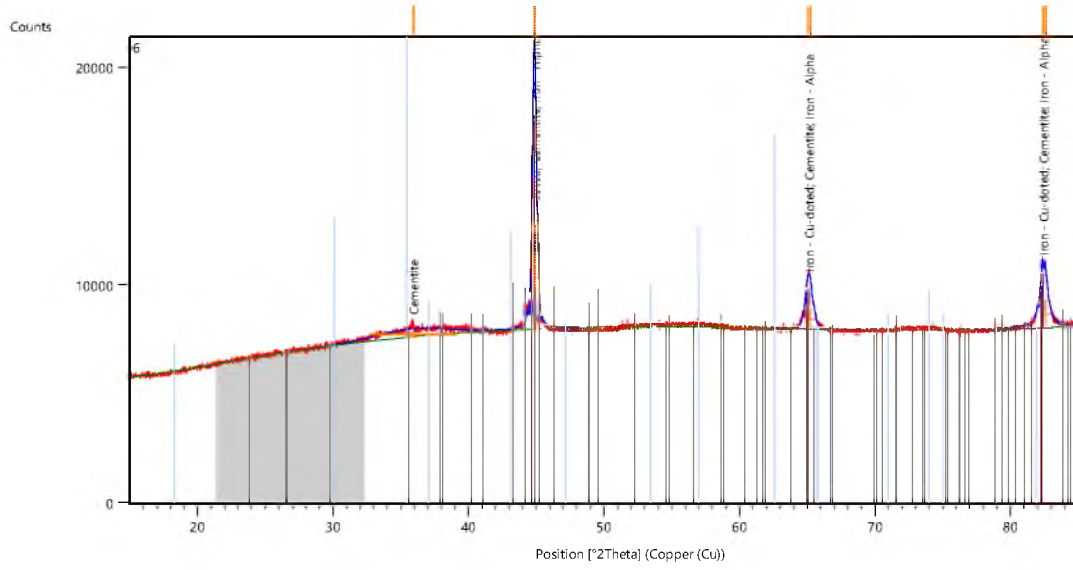
Numunelerin kırık yüzeyleri incelendiğinde gevrek ve sünek kırılma bölgeleri açıkça görülmektedir. Bu bölgeler sinterleme parametrelerinin numunelere etkileri hakkında bilgi sahibi olmamızı sağlamaktadır. Fotoğraflardan da görüldüğü gibi, sinterleme sıcaklıkları ve süreleri arttıkça sünek kırılma bölgeleri artış göstermiştir. Ayrıca 900 °C sıcaklıkta sünek kırılma bölgelerinin azlığı, bu sıcaklıkta sinterlemede bağlanma ve boyun oluşturma işleminin tam olarak gerçekleşmediğini göstermektedir.

4.3.7. XRD Analizi Sonuçları

% 3 Bakır ve % 0,5 grafit içerikli demir numunelere gerçekleştirilen XRD analizi sonuçları aşağıdaki şekillerde yer almaktadır.



Şekil 4.93. İndüksiyon ile 600 °C’de 15 dakika ön sinterlemenin ardından 1120 °C’de 15 dakika sinterlenen % 3 Cu, % 0,5 grafit içerikli demir numunenin XRD analiz sonucu



Şekil 4.94. Fırında 600 °C’de 45 dakika ön sinterlemenin ardından 1120 °C’de 30 dakika sinterlenen % 3 Cu, % 0,5 grafit içerikli demir numunenin XRD analiz sonucu

Yapılan XRD incelemesinde, numune içeriklerinde yer alan bakır fazı görülmüştür. Yine numune içeriklerinde bulunan grafitin, sinterleme sonrasında sementit fazını oluşturduğu görülmüştür.

4.3.8. Özgül direnç Ölçümü Sonuçları

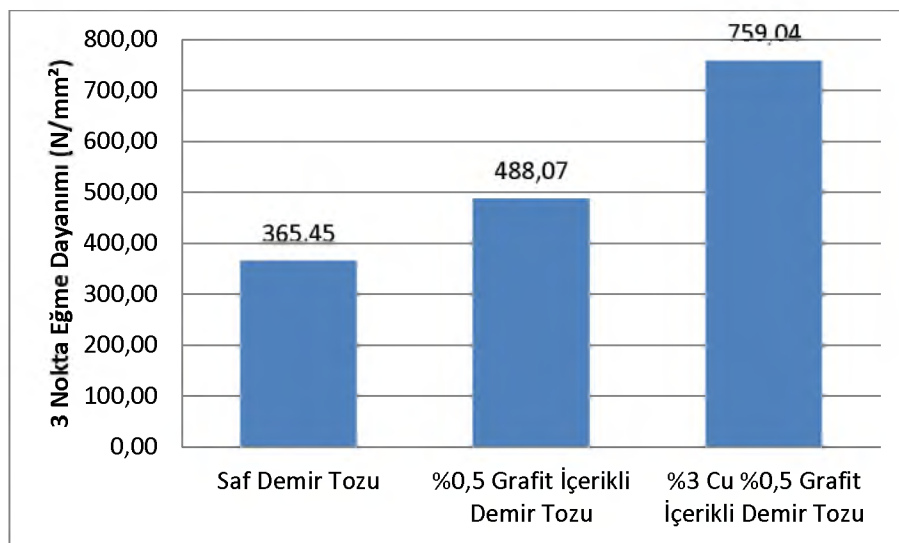
Bakır Grafit içerikli numunelerin Sinterlenmesi sonucu elde edilen sonuçların yorumlanması amacıyla gerçekleştirilen özgül direnç ölçümünün sonuçları Tablo 4.5’te yer almaktadır.

Tablo 4.5. % 3 Cu, % 0,5 Grafit İçerikli demir numunelerin sinterleme öncesi ve sonrası özgül direnç ölçüm değerleri

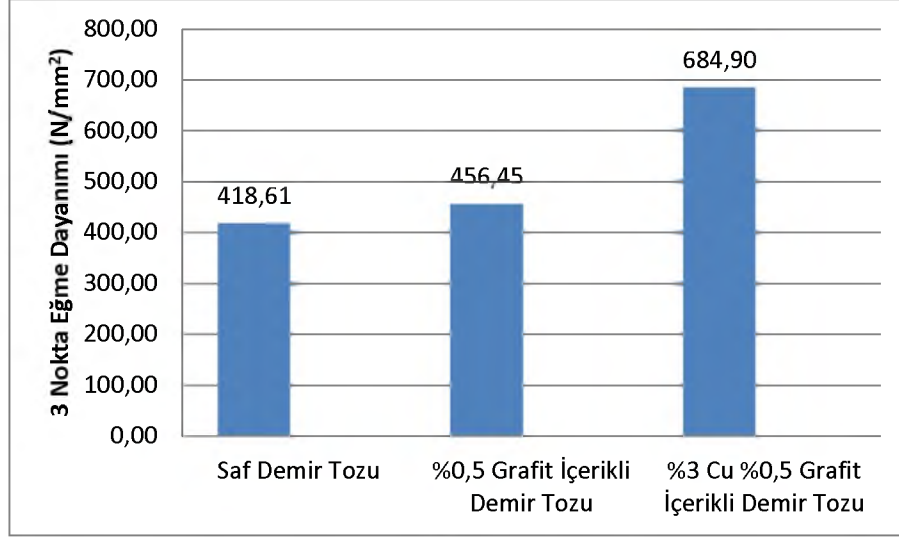
Sinterlenmemiş Numune Öz direnci ($\mu\Omega m$)	Sinterleme Parametresi	Sinterleme Sonrası Özgül direnç ($\mu\Omega m$)
2130,21	1120 °C’de 6 dk. İndüksiyon	2,19
	1120 °C’de 10 dk. İndüksiyon	2,11
	1120 °C’de 15 dk. İndüksiyon	2,03
	1000 °C’de 15 dk. İndüksiyon	25,92
	900 °C’de 15 dk. İndüksiyon	27,73
	600 °C’de 15 dk. Ön Sinterlenmiş 1120 °C’de 15 dk. İndüksiyon	2,01
	30 Dakika Fırın	2,19
	600 °C’de 45 dk. Ön Sinterlenmiş 1120 °C 15 dk. Fırın	1,93

4.4. Farklı Toz Bileşimlerinin Numunelerin Özelliklerine Etkileri

Deneysel çalışmalarda temel olarak saf demir, % 0,5 grafit içerikli demir ve % 0,5 grafit + % 3 bakır içerikli demir tozu olmak üzere 3 farklı toz bileşimi kullanılmıştır. Bu bileşimlerin numunelerin 3 nokta eğme dayanımlarına etkileri Şekil 4.95 ve Şekil 4.96’da yer almaktadır.

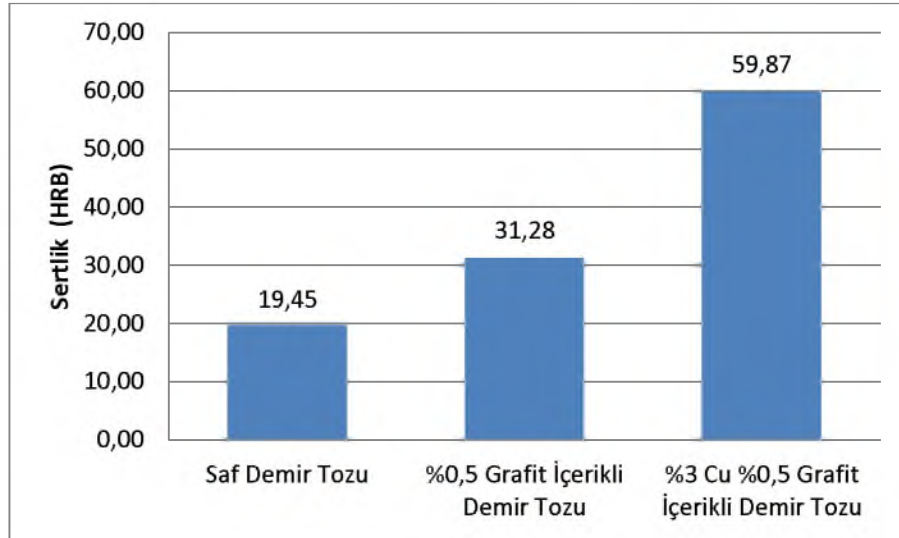


Şekil 4.95. İndüksiyon ile 600 °C’de 15 dakika ön sinterlemenin ardından 1120 °C’de 15 dakika sinterlenen numunenin dayanımlarının karşılaştırılması

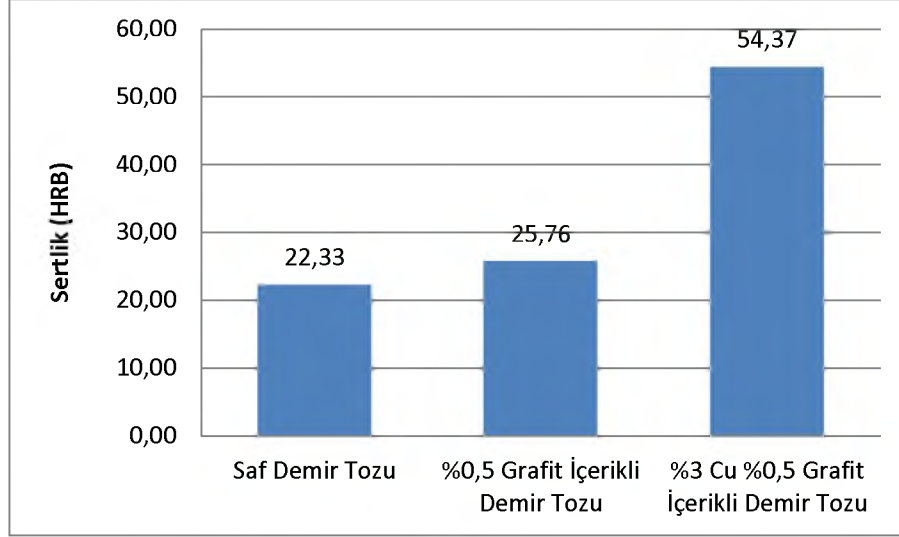


Şekil 4.96. Fırında 600 °C’de 45 Dakika Ön Sinterlemenin Ardından 1120 °C’de 30 Dakika Sinterlenen Numunenin Dayanımlarının Karşılaştırılması

Farklı toz içeriklerinin numunelerin Rockwell-B sertliklerine etkileri Şekil 4.97’de ve Şekil 4.98’de yer almaktadır.

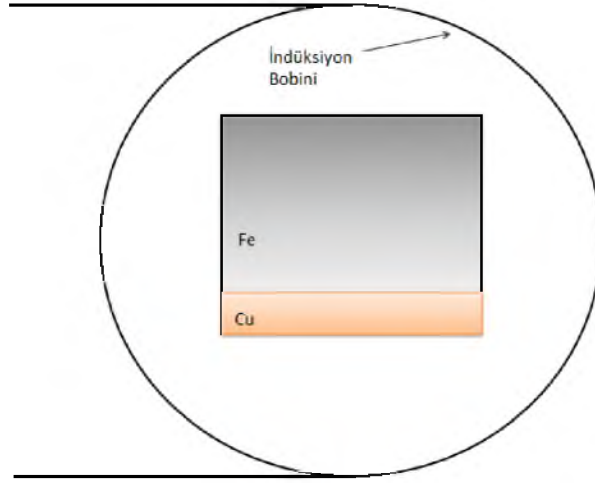


Şekil 4.97. İndüksiyon ile 600 °C’de 15 dakika ön sinterlemenin ardından 1120 °C’de 15 dakika sinterlenen numunenin sertliklerinin karşılaştırılması



Şekil 4.98. Fırında 45 Dakika 600 °C’de ön sinterlemenin ardından 1120 °C’de 30 dakika sinterlenen numunenin sertliklerinin karşılaştırılması

Demir esaslı malzemelere karbon eklenmesi ile perlit fazı oluşur ve numunelerin dayanım değerleri artar. Bakır ilavesi ile de sıvı faz oluşumu vasıtasıyla hem mikro yapıyı birbirine bağlayan lehim yapısı oluşmakta, hem de oluşan sıvı fazdan dolayı sinterleme dinamikleri önemli derecede değişip bağlanma olayı artmaktadır [1,6]. Sonuçlar incelendiğinde grafit, numunelerde sinterleme esnasında XRD analizlerinden de görüldüğü gibi çelik yapı (α +Fe₃C) oluşumunu gerçekleştirdiğinden numunelerin dayanımları ve sertlik değerleri önemli ölçüde artmıştır. Bunun yanı sıra, demir esaslı malzemelerde bakır ilavesi ile oluşan sıvı faz sinterlemenin, dayanım ve sertliği önemli ölçüde artırdığı görülmektedir. Bu artış indüksiyon ile Sinterlenen numunelerde, geleneksel sinterleme yöntemine göre çok daha büyük değerlerde olmuştur. Bunun nedenlerinin anlaşılabilmesi için indüksiyon ile sinterlemenin numuneler üzerinde oluşturduğu etki anlaşılmaya çalışılmıştır. Bu amaçla Şekil 4.99 ’da görülen numunenin üzerine bakır tozu eklenerek numune preslenmiş ve yer çekiminin tersi yönde indüksiyon bobininde sinterlenmiştir. Sonuçta oluşan mikro yapı fotoğrafı Şekil 4.100’de görülmektedir.



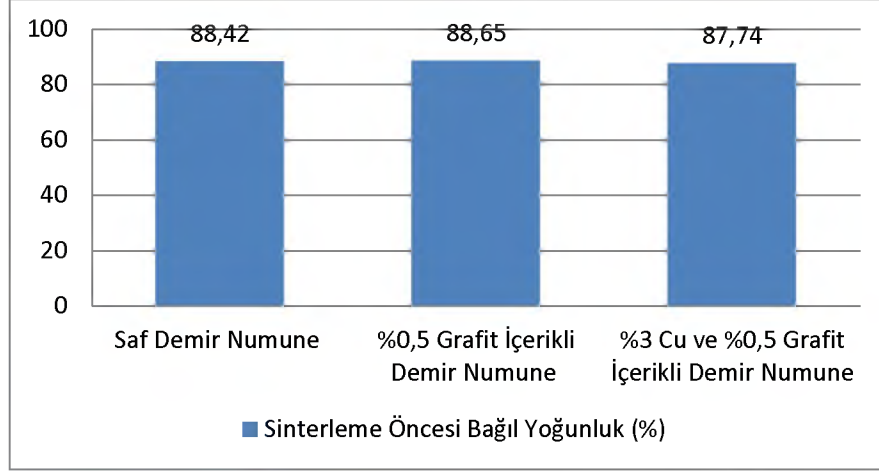
Şekil 4.99. Demir ve bakır tozunun bobindeki görüntüsü



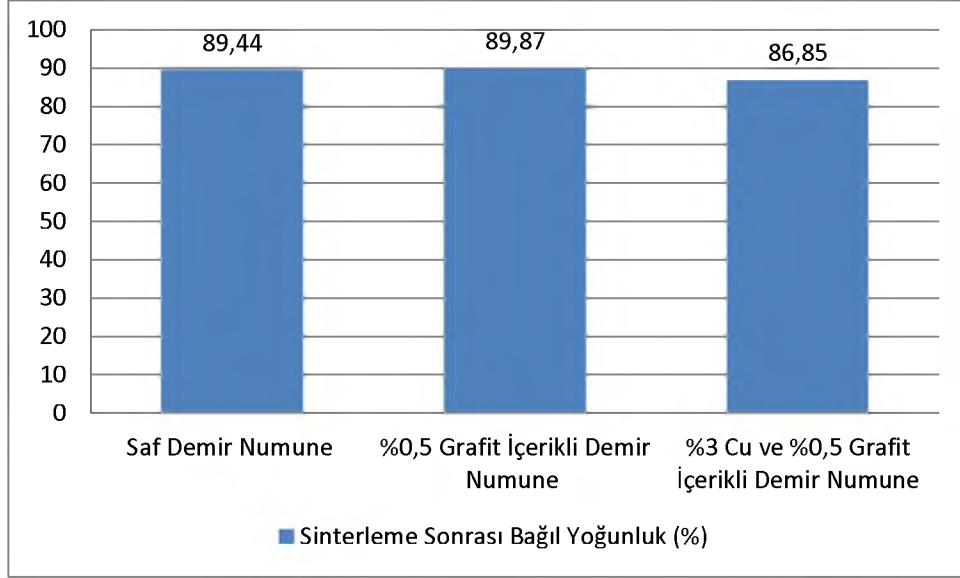
Şekil 4.100. Demir tozunun üzerine bakır tozunun preslenmesiyle oluşan numunenin indüksiyon ile sinterleme sonrası mikro yapı görüntüsü

Fotoğraftan da görüldüğü gibi, bakır ergiyip yer çekiminin tersi yönde demir partikülleri arasına yayılmıştır. Bu da indüksiyon akımının, sıvı fazın homojen dağılımına etki ettiğini göstermektedir.

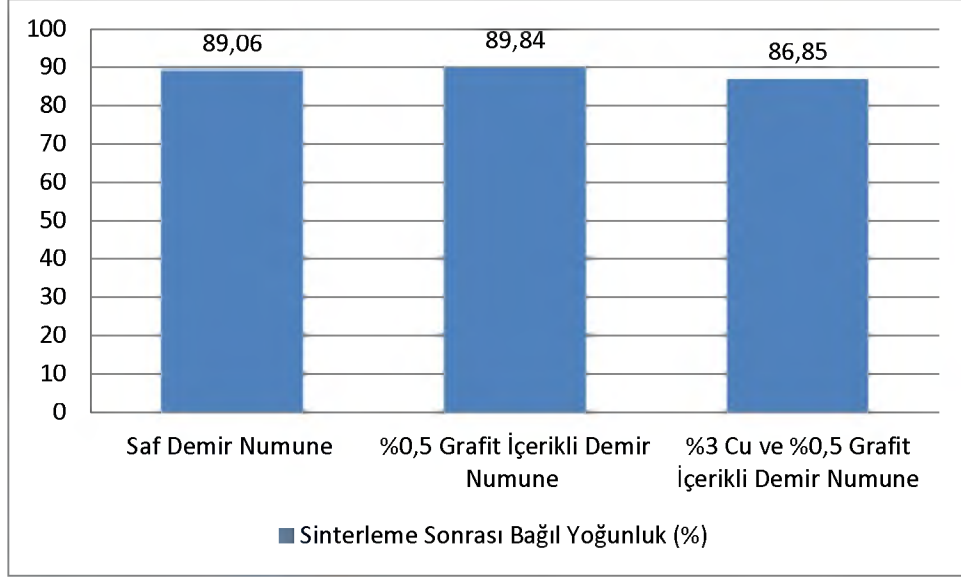
Mukavemetlerin ardından farklı toz içeriklerine sahip numunelerin sinterleme öncesi ve sonrası yoğunluklarının kıyaslanması gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar Şekil 4.101- 4.103'te yer almaktadır.



Şekil 4.101. Farklı bileşimdeki tozlardan oluşan parçaların sinterleme öncesi yoğunluklarının kıyaslanması



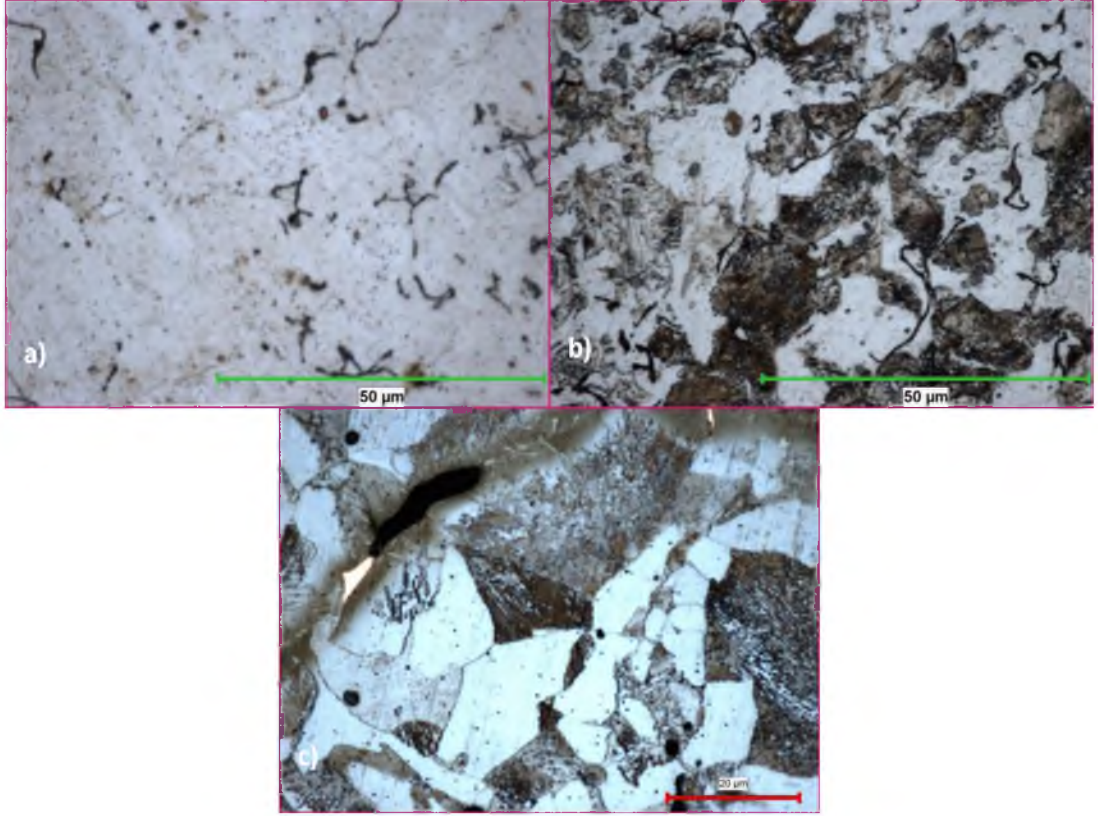
Şekil 4.102. İndüksiyon ile 600 °C’de 15 dakika ön sinterlemenin ardından 1120 °C’de 15 dakika sinterlenen farklı bileşimdeki tozlardan oluşan parçaların sinterleme sonrası yoğunluklarının kıyaslanması



Şekil 4.103. Fırında 45 Dakika 600 °C’de ön sinterlemenin ardından 1120 °C’de 30 dakika sinterlenen farklı bileşimdeki tozlardan oluşan parçaların sinterleme sonrası yoğunluklarının kıyaslanması

Yoğunluk değerleri kıyaslandığında, sinterleme öncesi bağıl yoğunluk değerlerinin hemen hemen aynı olduğu ve sinterleme sonrasında en düşük yoğunluğa sahip numunelerin bakır içeren numuneler olduğu görülmüştür. Ayrıca bu numunelerde yoğunluk değerlerinin, sinterleme sonrasında azaldığı görülmektedir. Bunun sebebi bakır eklenmesinin demir esaslı malzemelerde meydana getirdiği hacim artışıdır [6, 50-52].

Farklı bileşimlerin numune üzerindeki etkilerinin bir sonucu da numune mikro yapılarıdır. Şekil 4.104’te farklı indüksiyon ile sinterlenen farklı numunelerin sinterleme sonrası mikro yapı fotoğrafları görülmektedir. Fotoğraflar incelendiğinde, saf demir numunelerde taneler arasında çizgi şeklinde boşlukların yer aldığı, grafit içerikli numunelerde azalmakla birlikte bu boşlukların yine var olduğu, bakır içerikli numunelerde sıvı faz oluşumunun bu boşlukları ortadan kaldırdığı görülmüştür. Ayrıca grafit içerikli numunelerde oluşan çelik fazı mikro yapıda oldukça belirgin şekilde görülmektedir.



Şekil 4.104. İndüksiyon ile 600 °C’de 15 dakika ön sinterlemenin ardından 1120 °C’de 15 dakika sinterlenen farklı bileşimdeki tozlardan oluşan parçaların sinterleme sonrası mikro yapıları **a)** Saf demir numune, **b)** % 0,5 grafit içerikli demir numune, **c)** %3 Cu, % 0,5 grafit içerikli demir numune

Daha önce 2.7.1 kısmında indüksiyon konusunda değinildiği üzere, indüksiyon ile ısıtmada, ana olarak ısıtma, Joule ısınması denilen, numunenin özgül direncine dayanan ısıtmadır [32]. Bu sebeple farklı içeriğe sahip tozların sinterlemeden sonraki özelliklerini etkileyen bir başka etken de numune özgül dirençleridir. Özgül dirençle ısıl iletkenlik ters orantılıdır. Özgül direncin azalması geleneksel sinterlemede ısı transferinin kolaylaşmasından dolayı olumlu etki sağlarken, indüksiyon ile sinterlemede ısınma dirençle olduğundan, negatif etki yapabilir. Özgül direnç ölçüm değerleri incelenip karşılaştırıldığında, Tablo 4.6 ve 4.7’de görüldüğü gibi, % 3 bakır ve % 0,5 grafit içerikli numunelerin özgül dirençlerinin sinterleme öncesi ve sonrasında % 0,5 grafit içerikli numunelere yakın olduğu ve sinterleme öncesi özgül direnç değerlerinin saf demir numunelere göre çok daha yüksek olduğu görülmektedir.

Tablo 4.6. Farklı içerikteki numunelerin sinterleme öncesi özgül direnç ölçüm değerleri

Sinterlenmemiş Numune		
Özdirenci ($\mu\Omega\text{ m}$)		
Saf demir numune	% 0,5 grafit içerikli demir numune	% 3 Cu, % 0,5 Grafit içerikli demir numune
972,27	2130,21	3204,46

Tablo 4.7. Tüm numunelerin sinterleme sonrası özgül direnç ölçüm değerleri

Sinterleme Parametresi	Sinterleme Sonrası Özgül direnç ($\mu\text{m}\Omega$)		
	Saf demir numune	% 0,5 Grafit İçerikli demir numune	% 3 Cu, %0,5 Grafit İçerikli demir numune
1120 °C 6 dk. İndüksiyon	2,11	2,54	2,19
1120 °C 10 dk. İndüksiyon	2,08	2,21	2,11
1120 °C 15 dk. İndüksiyon	2,05	2,17	2,03
1000 °C 15 dk. İndüksiyon	16,61	23,04	25,92
900 °C 15 dk. İndüksiyon	33,72	41,47	27,73
Ön Sinterlenmiş İndüksiyon	2,04	2,37	2,01
30 Dakika Fırın	2,07	2,36	2,19
Ön Sinterlenmiş Fırın	2,08	2,38	1,93

İndüksiyonun ferromanyetik malzemelerde meydana getirdiği diğer etki histerisiz denilen titreşim etkisidir [32]. Bu titreşim ayrıca sinterlemede boyun oluşumunu engelleme etkisi gösterebilir. Saf demir malzemelerin sinterlenmesinde geleneksel sinterleme kadar yüksek değerler elde edilememesinin bir sebebi de bu

olgu olarak düşünölmektedir. Fakat grafit eklenmesi ile, indüksiyonun çelik fazın oluşumunu kolaylaştırmasın, bu etkisini kompanse ettiği düşünölmektedir.

Sıvı fazın indüksiyon ile sinterlemede homojen şekilde dağılmasının bir başka sebebi de indüksiyonun karıştırma etkisidir. Meydana gelen manyetik alan çizgileri indüksiyon işleminde sıvı fazın karışmasını ve mikro yapıya homojen şekilde dağılmasını sağlar. Sıvı faz oluşumunu sağlayan bakır içerikli numunelerde, bakır fazın homojen dağılımını açıklayan etkilerden birisinin de bu olgu olduğu düşünölmektedir.

4.5. Farklı Boyut ve Şekillerdeki Demir Esaslı Burç ve Dişli Çarklar ile Yapılan Çalışmalarda Elde Edilen Sonuçlar

Deney numuneleri ile gerçekleştirilen çalışmalar sonrasında elde edilen olumlu sonuçların ardından, indüksiyon ile sinterleme işlemi gerçekleştirilebilecek parçalar araştırılmıştır. Toz metal parça üretimi alanında faaliyette bulunan Toz Metal A.Ş. ile Sintek A.Ş. firmaları ile iletişime geçilip, bu firmalarda imalatı gerçekleştirilen farklı şekildeki numunelerin indüksiyon ile sinterleme işlemleri araştırılmıştır. Firmalarda üretilen Yöntem kısmında fotoğrafları ve teknik resimleri yer alan ve indüksiyon ile sinterlenen farklı şekil ve boyutlardaki parçaların sinterleme sonrası görüntüsü Şekil 4.105'te yer almaktadır.

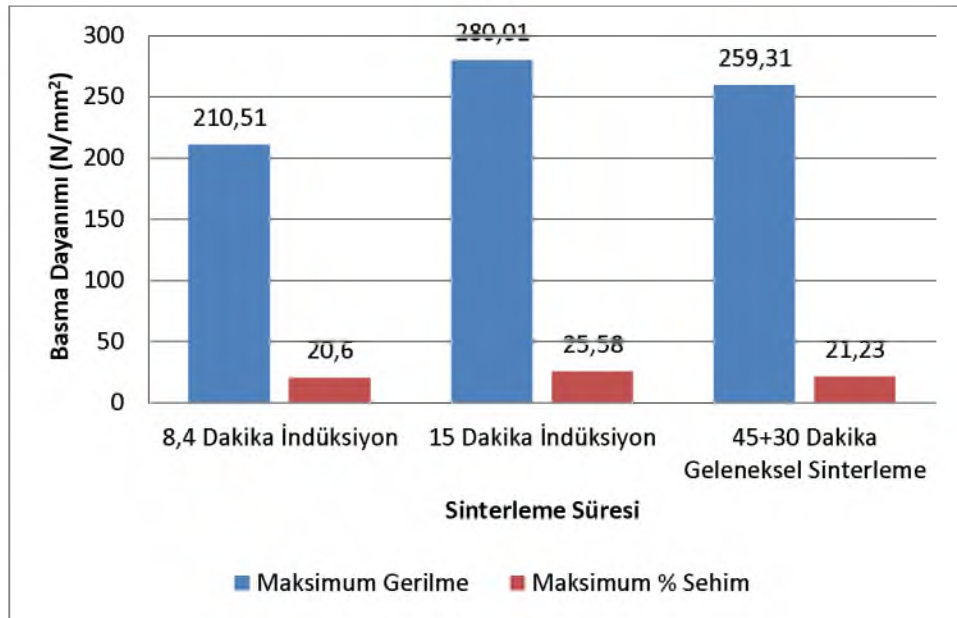


Şekil 4.105. Farklı boyut ve şekillerdeki sinterlenmiş parçalar

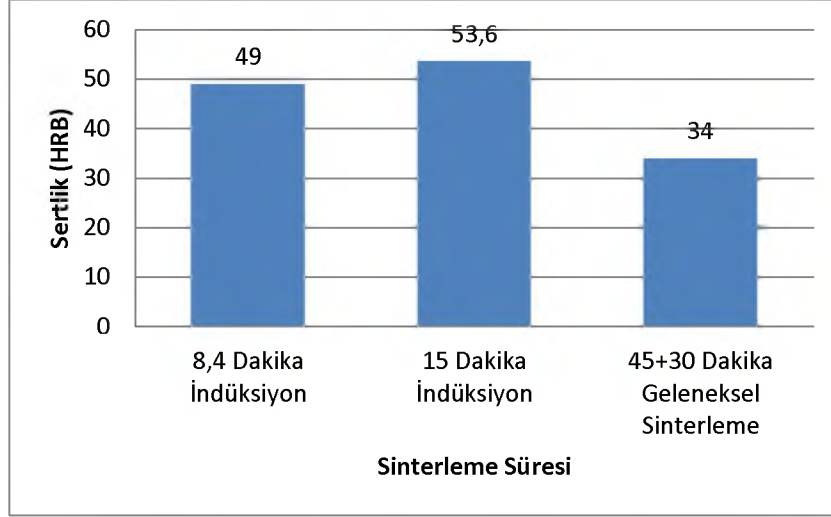
Numunelerin sinterleme işlemleri 1120 °C’de gerçekleştirilmiştir. İndüksiyonla sinterleme işleminde ön sinterleme uygulanmamıştır. Sinterleme işleminden sonra, dayanım ve sertlik değerlerinin belirlenebilmesi ve geleneksel sinterleme yöntemi ile karşılaştırılması amacıyla numunelere, yöntem kısmında da belirtildiği gibi, basma testi ve sertlik incelemeleri uygulanmıştır. Ayrıca Burç 1 ve Düz Dişli Çark 1 adı verilen numunelere mikro yapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Numunelere uygulanan testlerin sonuçları aşağıda yer almaktadır.

4.5.1. Burç 1

Farklı şekil ve boyutlardaki parçalardan, ilk olarak burç 1 olarak adlandırılan, Şekil 3.5’te resmi bulunan, % 2 Cu, % 0,6 Grafit, % 1 Çinko Stearat içeren demir tozu içerikli numune indüksiyon ve geleneksel yöntemle sinterlenmiştir. Numunelere sinterleme sonrasında basma testi uygulanmış, Rockwell-B sertlikleri ölçülerek kıyaslanmış ve numunelerin mikro yapıları incelenmiştir. Sinterleme işlemi ilk aşamada indüksiyonda 8,4 ve 15 dakika süre ile uygulanmıştır. Geleneksel sinterleme işlemi elektrik direnç fırınında gerçekleştirilmiştir. Sinterleme işlemleri atmosfer ortamında gerçekleştirilmiştir. Basma testi sonuçları Şekil 4.106’da yer almaktadır. Rockwell-B testi sonuçları ise Şekil 4.107’de görülmektedir.



Şekil 4.106. Burç 1 basma testi sonuçları

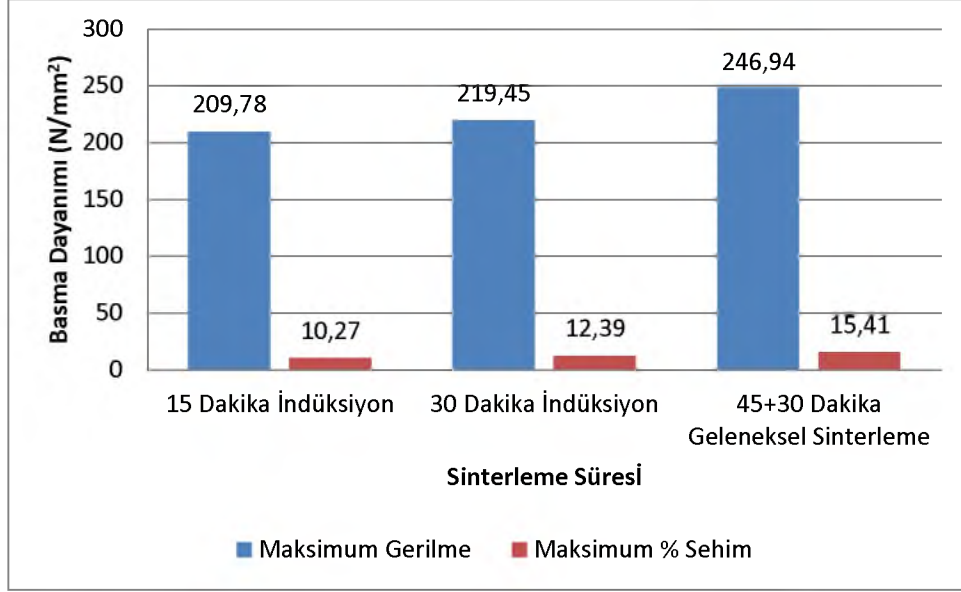


Şekil 4.107. Burç 1 Rockwell-B sertlik ölçümü sonuçları

Basma testi ve sertlik ölçüm sonuçlarından da görüldüğü gibi, deneysel çalışmalarda kullanılan bakır içerikli numunelere benzer biçimde, indüksiyon ile sinterleme işlemi ile çok daha kısa sürede geleneksel sinterleme yöntemi ile elde edilen dayanım ve sertlik değerlerine ulaşılmıştır.

4.5.2. Burç 2

Burç 2 adı verilen Şekil 3.7’de yer alan % 100 saf demir (NC 100.24) ve % 0,6 Kenolube yağlayıcı tozu içerikli numunelerin Sinterlenmesi indüksiyon ve karşılaştırma amacıyla geleneksel sinterleme fırınında gerçekleştirilmiştir. İndüksiyon ile sinterleme süresi olarak bu kez 15 dakika ve 30 dakikalık süreler seçilmiştir. Geleneksel sinterleme 900 °C’de 45 dakika ön sinterlemenin ardından 1120 °C’de 30 dakika olarak toplamda 75 dakika süreyle gerçekleştirilmiştir. İndüksiyon ile sinterlemede ön sinterleme işlemi gerçekleştirilmemiştir. Burçlara sinterleme işleminin ardından basma testi uygulanmıştır. Burçların kesiti çok dar olduğundan sertlik ölçümü gerçekleştirilememiştir. Basma testi sonuçları Şekil 4.108’de yer almaktadır.

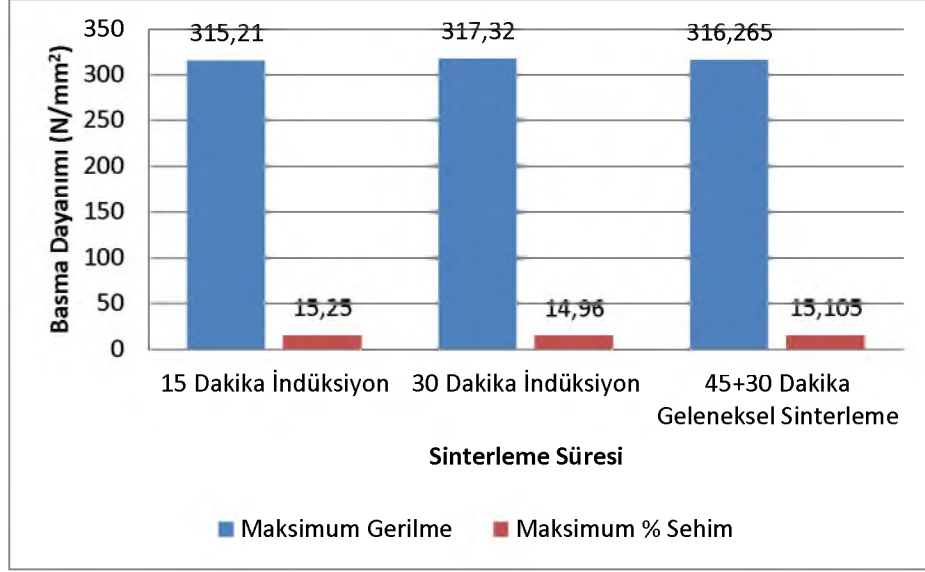


Şekil 4.108. Burç 2 basma testi sonuçları

Saf demir içerikli Burç 2 verilen numunelerde de, saf demir içerikli deney numunelerinin sonuçlarına paralel olarak geleneksel sinterleme ile elde edilen dayanım değerlerine indüksiyon ile sinterleme yönteminde ulaşamamıştır. Bunun nedenleri sonuç ve öneriler kısmında irdelenmiştir.

4.5.3. Burç 3

Burç 3 adı verilen Şekil 3.8’de görülen numunelerin içeriği, % 99,4 Distaloy AE (% 4 Ni + % 1,5 Cu + % 0,5 Mo) + 0,6 Grafit + 0,6 Kenolube içeriğindeki demir tozundan oluşmaktadır. İndüksiyon ile sinterleme süresi olarak yine 15 dakika ve 30 dakikalık süreler seçilmiştir. Geleneksel sinterleme 900 °C’de 45 dakika ön sinterlemenin ardından 1120 °C’de 30 dakika olarak toplamda 75 dakika süreyle gerçekleştirilmiştir. Numunelerin sinterleme sonrası dayanımlarını kıyaslama amacıyla, numunelere basma testi uygulanmıştır. Burç 3’e ait basma testi sonuçları Şekil 4.109’da yer almaktadır. Bu numunelerde de kesit dar olduğundan sertlik incelenmemiştir.

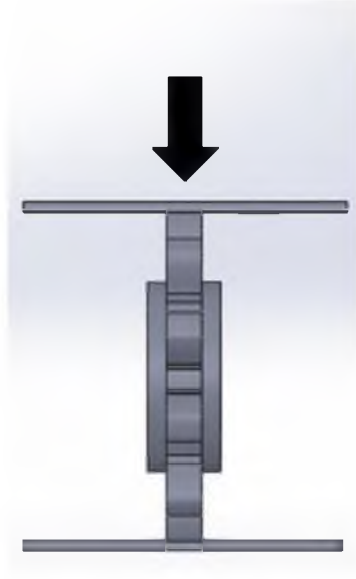


Şekil 4.109. Burç 3 basma testi sonuçları

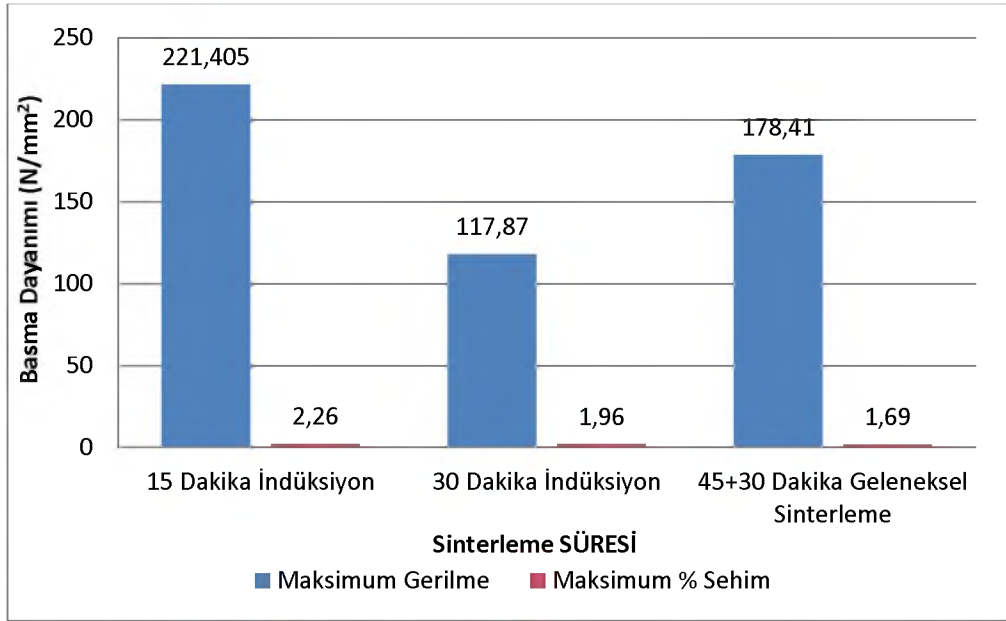
Basma testi sonuçlarından görüldüğü gibi, indüksiyon ile sinterleme işlemi ile 15 dakika sürede geleneksel sinterleme yöntemiyle elde edilen dayanım değerlerine ulaşılmıştır.

4.5.4. Düz Dişli Çark 1

Düz Dişli Çark 1 adı verilen ve Şekil 3.9'da ölçüleri yer alan numuneler, % 85 NC 100.24 (Saf Demir Tozu) + % 15 Distaloy ACu (% 10,4-11 Cu) +0,6 Kenolube içeriğine sahiptir. İndüksiyon ile sinterleme süresi olarak 15 dakika ve 30 dakikalık süreler seçilmiştir ve geleneksel sinterleme yine 900 °C'de 45 dakika ön sinterlemenin ardından 1120 °C'de 30 dakika olarak toplamda 75 dakika süreyle gerçekleştirilmiştir. Numunelere Şekil 4.110'daki gibi alınlarından basma testi uygulanmıştır ve numunelerin mikro yapıları incelenmiştir. Sinterlenmiş numunelere uygulanan basma testi sonuçları Şekil 4.111'de yer almaktadır.

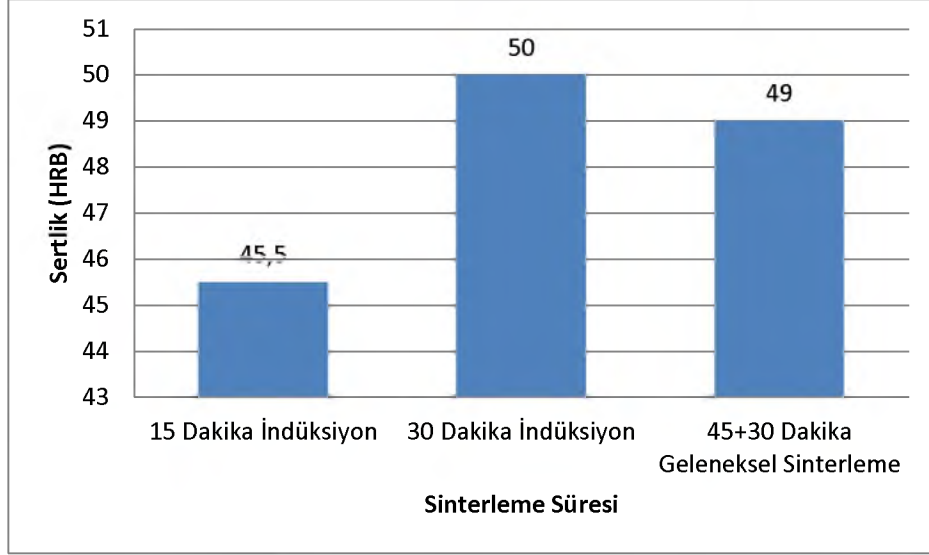


Şekil 4.110. Düz dişli çark 1 basma testi şematik görüntüsü



Şekil 4.111. Düz dişli çark 1 basma testi sonuçları

Numunelere uygulanan Rockwell-B testinin sonuçları Şekil 4.112’de yer almaktadır.

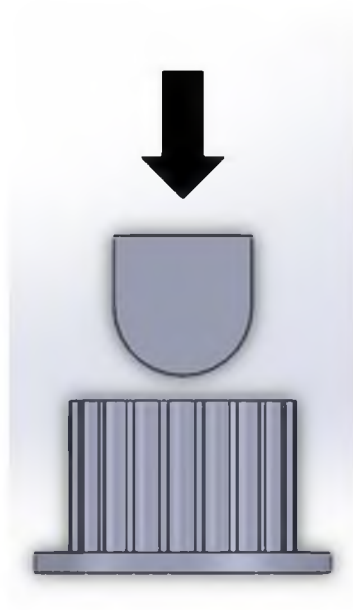


Şekil 4.112. Düz dişli çark 1 Rockwell-B testinin sonuçları

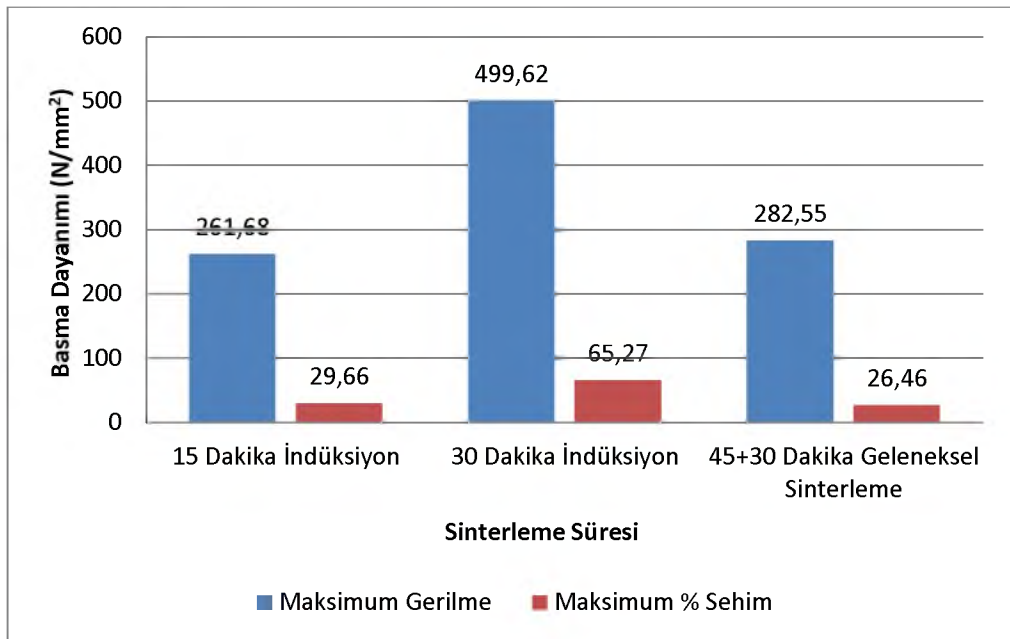
Basma testi sonuçlarından görüldüğü gibi, 15 dakika sürede indüksiyon ile sinterleme işlemi ile geleneksel sinterleme yöntemiyle elde edilen dayanım değerlerine ulaşılırken, sertlik değerlerine 30 dakika indüksiyon ile sinterleme ile ulaşılmıştır.

4.5.5. Düz Dişli Çark 2

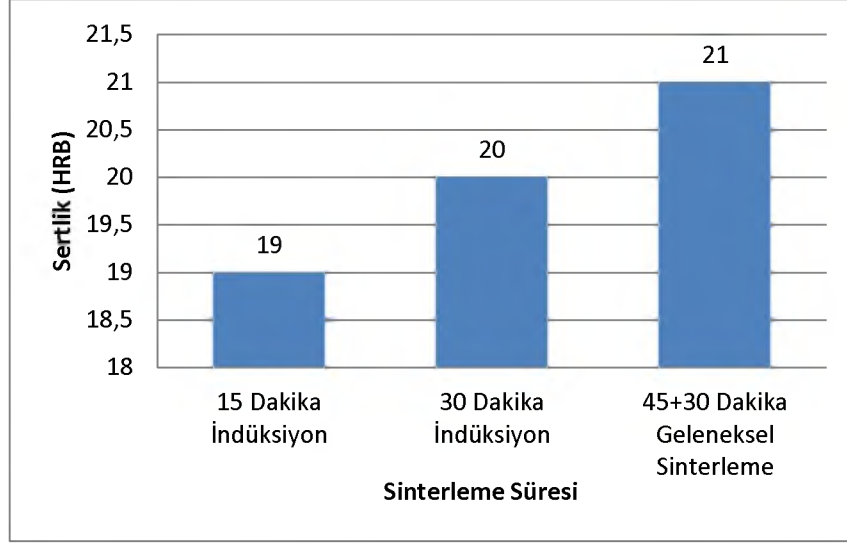
% 100 saf demir (AHC 100.29) ve % 0,6 Kenolube yağlayıcı tozu içerikli Şekil 3.10 da teknik resmi ve ölçüleri yer alan Düz Dişli Çark 2 adı verilen numuneler de indüksiyon ile 15 dakika ve 30 dakika sinterlenmiştir. Geleneksel sinterleme yine 900 °C’de 45 dakika ön sinterlemenin ardından 1120 °C’de 30 dakika olarak toplamda 75 dakika süreyle gerçekleştirilmiştir. Numunelere sinterleme sonrası uygulanan alından basma testinin şematik gösterilişi ve sonuçları Şekil 4.113 ve Şekil 4.114’te yer almaktadır. Numunelere uygulanan Rockwell-B sertlik ölçümü sonuçları da Şekil 4.115’te görülmektedir.



Şekil 4.113. Düz dişli çark 2 basma testi şematik görüntüsü



Şekil 4.114. Düz dişli çark 2 basma testi sonuçları

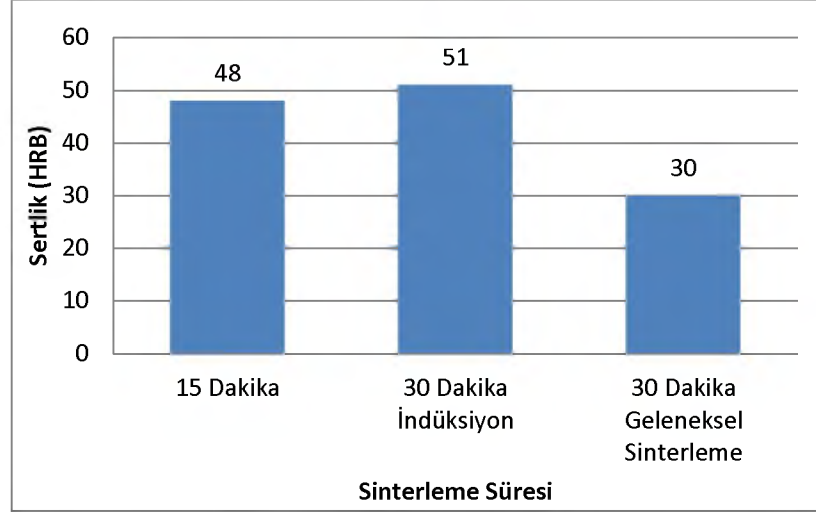


Şekil 4.115. Düz dişli çark 2 Rockwell-B sertlik ölçümü sonuçları

Basma testi, numunelere önce diğer numunelerde olduğu gibi standart şekilde uygulanmış, ancak bu test ile numuneler hasara uğramadığından, mukavemetleri kıyaslayabilme amaçlı olarak, Şekil 4.113'te gösterildiği gibi, zımba ile alından basma şeklinde uygulanmıştır. Sonuçlar kıyaslandığında, 30 dakika indüksiyon ile sinterleme ile maksimum dayanım değerleri elde edilmiştir. Maksimum sertlik değeri ise geleneksel sinterlenen numunelerde elde edilmiştir.

4.5.6. Konik Dişli Çark

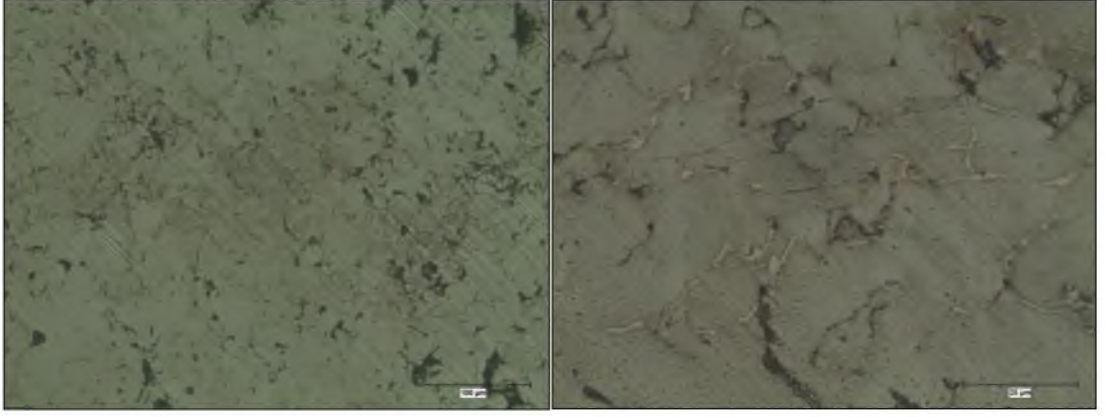
Şekil 3.11'de teknik resmi ve ölçüleri bulunan, % 80 AHC 100.29 + % 20 Distaloy ACu (% 10,4-11 Cu) karışımı (% 99,2) + % 0,8 Grafit+% 0,4 Kenolube içerikli konik dişli çarklar da diğer numunelere benzer biçimde indüksiyon ile 15 dakika ve 30 dakikalık sürelerde sinterlenmiştir. Geleneksel sinterleme yine diğer numunelerle aynı parametrelerde, 900 °C'de 45 dakika ön sinterlemenin ardından 1120 °C'de 30 dakika olarak toplamda 75 dakika süreyle gerçekleştirilmiştir. Bu numunelerde basma testi ile mukavemet incelemesi, dayanımlarının cihazın uygulayabileceği maksimum kuvvetten fazla olması dolayısı ile yapılamamıştır. Numunelerin mekanik özelliklerini geleneksel sinterleme ile kıyaslama amaçlı Rockwell-B sertlik ölçümü gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar Şekil 4.116'da yer almaktadır.



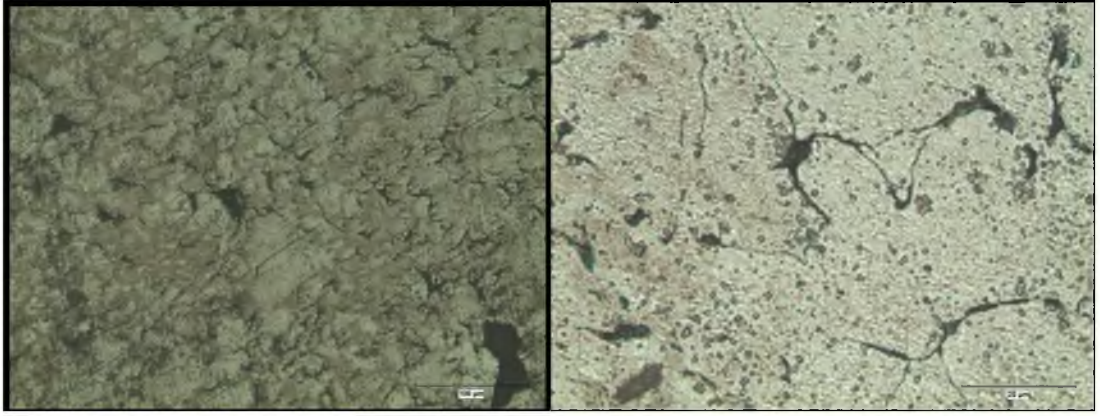
Şekil 4.116. Konik dişli çark Rockwell-B testi sonuçları

Sertlik sonuçlarından görüldüğü gibi, indüksiyon ile sinterleme işlemi ile 15 dakika sürede geleneksel sinterleme yöntemiyle elde edilen sertlik değerleri aşılmıştır ve çok daha yüksek sertlik değerleri elde edilmiştir.

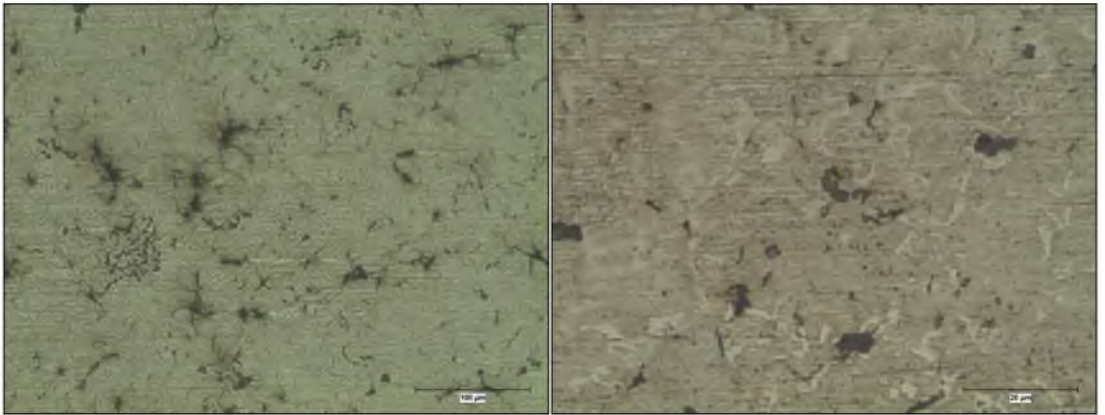
Farklı boyut ve şekillere sahip dişli çark ve burçların indüksiyon ile sinterlenmesinde genel olarak noktasal ergime, şekil ve boyutların bozulması gibi problemler ile karşılaşılmamıştır. Numuneler, aynı bant üzerinde sinterlenmiştir ve saf demir tozu içerikli numuneler haricindeki numunelerde indüksiyonla sinterleme sonucunda daha iyi dayanım ve sertlik değerleri elde edilmiştir. Dayanım ve sertlik değerlerinin haricinde, numunelerin bir kısmının mikro yapı incelemeleri de gerçekleştirilmiştir. Burç 1 ve Düz Dişli Çark 1 isimli numunelerden alınan mikroyapı fotoğrafları Şekil 4.117-Şekil 4.122’de yer almaktadır. Mikroyapı fotoğraflarından görüldüğü gibi, geleneksel sinterleme ve indüksiyon ile sinterleme yöntemiyle üretilen numuneler benzer mikro yapılara ve hemen hemen aynı boşluk miktarlarına sahiptir.



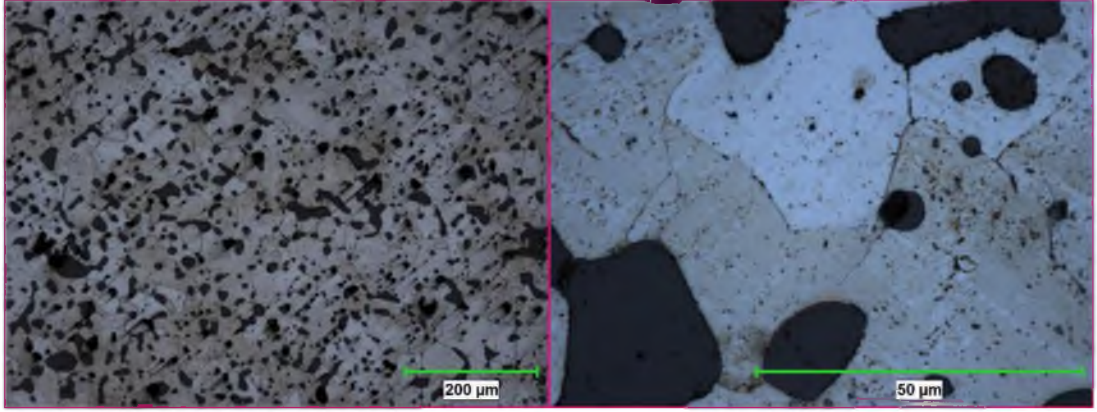
Şekil 4.117. 8,4 dakika İndüksiyon ile sinterlenen burç 1'in mikro yapı görüntüleri (x200-x1000)



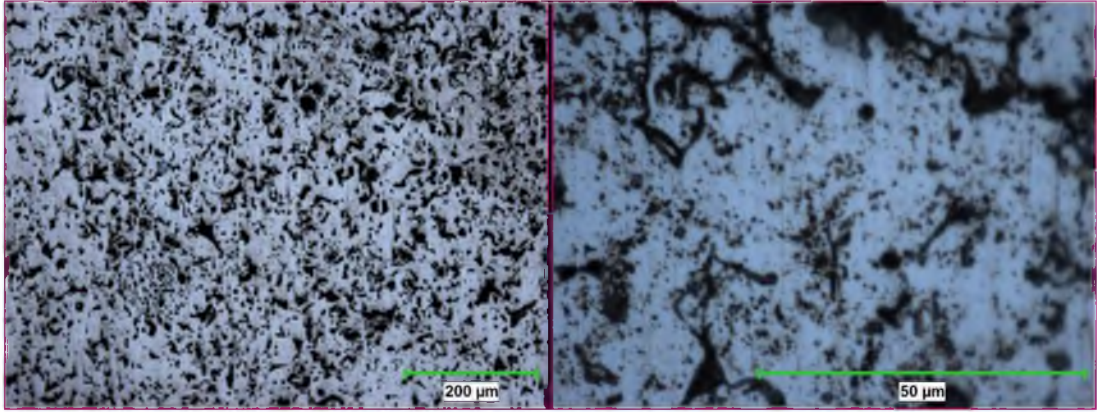
Şekil 4.118. 15 dakika İndüksiyon ile sinterlenen burç 1'in mikro yapı görüntüleri (x200-x1000)



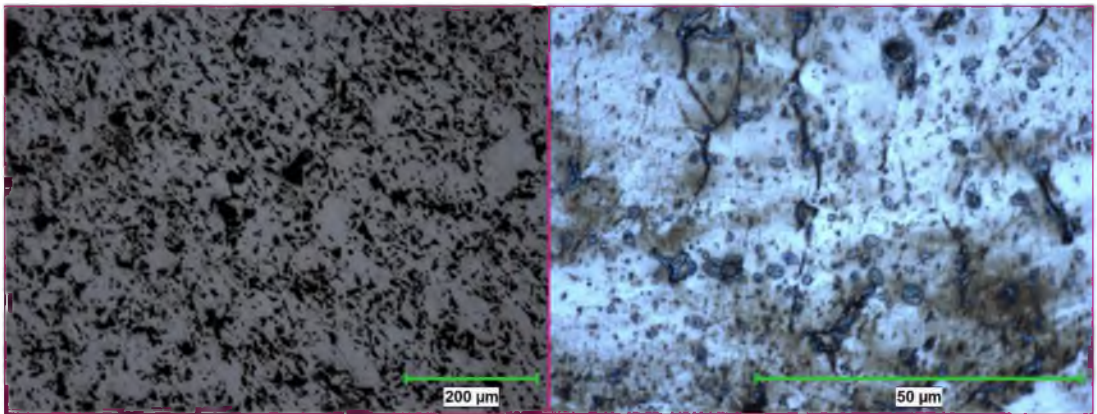
Şekil 4.119. 30 dakika geleneksel yöntemle sinterlenen burç 1'in mikro yapı görüntüleri (x200-x1000)



Şekil 4.120. 15 dakika İndüksiyon ile sinterlenen düz dişli çark 1'in mikro yapı görüntüleri



Şekil 4.121. 30 dakika İndüksiyon ile sinterlenen düz dişli çark 1'in mikro yapı görüntüleri



Şekil 4.122. 30 dakika geleneksel yöntemle sinterlenen düz dişli çark 1'in mikro yapı görüntüleri

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tez çalışması kapsamında, demir esaslı toz metal malzemelerin sinterleme prosesinde orta ve düşük frekanslı indüksiyon cihazları ile gerçekleştirilen sinterleme işleminin, toz metal parçaların mekanik dayanımlarına ve mikro yapılarına etkileri incelenmiştir. Ayrıca sinterleme parametrelerinin ve ön sinterleme işleminin uygulanmasının numunelere etkileri de hem indüksiyon ile sinterleme hem de geleneksel sinterleme işlemlerinde irdelenmiştir. Çalışmaların genel amacı orta ve düşük frekanslı indüksiyon ile sinterleme işleminin geleneksel sinterleme işlemine göre avantaj ve dezavantajlarının araştırılması, yöntemin verimli olarak uygulanabileceği malzemelerin veya makine parçalarının belirlenmesi ve mekanizmasının ortaya koyulmasıdır. Tez çalışması kapsamında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Demir esaslı numunelerin indüksiyon ile sinterlenmesi, geleneksel sinterleme yöntemine kıyasla çok daha az (yaklaşık üçte biri) sürelerde, çok daha düşük enerji tüketimleriyle, çok daha düşük maliyetlerde (geleneksel sinterleme fırınlarının yaklaşık 5'te biri maliyetlerde), çok daha az bir hacimde (geleneksel sinterleme fırınlarının yaklaşık 13'te biri mertebelerde) gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte % 11'e varan düzeyde daha iyi mekanik özellik değerleri elde edilmiştir.
- İndüksiyon ile sinterleme prosesinde, 2,5 kHz ve 45 kHz'lik iki ayrı bobin ile ön sinterleme ve sinterleme işlemleri art arda uygulanmıştır. Ön sinterleme uygulanmasının hem geleneksel metotta hem de indüksiyon ile sinterleme yönteminde, numunelerin mekanik özelliklerinin önemli derecede iyileştiği belirlenmiştir.
- İndüksiyon ile sinterleme yönteminde, geleneksel sinterlemeye göre daha kısa sürelerde daha yüksek dayanım değerlerinin elde edilmesinin yanı sıra daha düşük sıcaklıklarda da sinterleme gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla 900° C ve 1000° C sıcaklıklarda da işlem uygulanmıştır. Numunelerden beklenen dayanım değerleri göz önüne alınarak sinterleme sıcaklığının indüksiyon ile sinterleme yönteminde düşürülebileceği belirlenmiştir.

- İndüksiyonla sinterlemede, 1120 °C sinterleme sıcaklığında, geleneksel olarak fırında 45 dakika ön sinterleme işleminin ardından 30 dakika sinterleme süresinde elde edilen dayanım ve sertlik değerlerine, ticari saflıktaki demir tozundan üretilen numunelerin haricindeki numunelerde, % 0,5 Grafit içerikli numunelerde yaklaşık 10 dakikada, % 0,5 Grafit + % 3 Cu içerikli demir tozundan elde edilen numunelerde yaklaşık 6 dakikada ulaşılmıştır.
- Ticari saflıktaki demir tozundan üretilen numunelerde, indüksiyon ile sinterleme işleminde, geleneksel sinterleme işlemine göre daha düşük dayanım değerleri elde edilmiştir. Bunun nedenlerinin anlaşılması için indüksiyon ile ısıtma mekanizması irdelenmiştir. Numunelerin sinterleme öncesi ve sonrası özgül dirençleri ölçülüp karşılaştırılmıştır. Saf demir tozlarının sinterleme öncesi özgül direnç değerlerinin (972,27 $\mu\Omega\text{ m}$) grafit (2130,21 $\mu\Omega\text{ m}$) ve bakır içerikli (3204,46 $\mu\Omega\text{ m}$) numunelere göre çok daha düşük değerlerde olduğu görülmüştür.
- Hem geleneksel sinterleme yönteminde, hem de indüksiyon ile sinterleme yönteminde grafit ve bakır ilavesi, numune dayanımlarını önemli derecede artırmıştır. İndüksiyon ile sinterleme yönteminde grafit ilavesinden dolayı % 33 civarlarında dayanım artışı meydana gelmiştir. Meydana gelen bu dayanım artışı, yapılan XRD analizi ile de görüldüğü gibi numune içerisinde çelik yapısının ($\alpha+\text{Fe}_3\text{C}$) meydana gelmesidir. Bakır ilavesi ise, % 55 oranında dayanım artışı meydana getirmiştir. Geleneksel sinterleme yönteminde de grafit eklenmesi, % 10 dolaylarında dayanım artışına yol açar iken, bakır ilavesi, % 50 oranında dayanım artışı sağlamıştır.
- İndüksiyonun ferromanyetik malzemelerde meydana getirdiği titreşim etkisi, elementlerin homojen dağılımını sağlar. Bu titreşim etkisinin, ergiyen sıvı fazı homojen olarak dağıtırken, grafit toz partiküllerini parçalayarak Fe_3C oluşumunu hızlandırdığı düşünülmektedir. EDS analizlerinden de görüldüğü gibi, indüksiyon ile sinterlemede, numune yapısında bulunan elementler geleneksel sinterleme yöntemine göre daha homojen dağılımdadır. Bu da

mikro yapıdaki gradyanların ve segregasyonların önüne geçilmesini sağlamaktadır.

- Bakır ilavesi ile oluşan sıvı faz sinterleme, numune dayanımlarını hem geleneksel sinterleme yönteminde hem de indüksiyon ile sinterleme yönteminde artırmış, ancak indüksiyon ile sinterleme yönteminde bu artış geleneksel sinterlemeye göre % 5 dolaylarında yüksek şekilde meydana gelmiştir. Bunun nedeni irdelendiğinde; EDS analizinde bakırın homojen dağıldığı görülürken, gerçekleştirilen deneme ile de sıvı bakırın, indüksiyon akımının etkisi ile yerçekiminin aksi yönde numune içerisine penetre olduğu ve dağıldığı görülmüştür.
- Numunelerin yoğunlukları incelendiğinde, bakır içerikli numunelerin sinterleme sonrasında yüksek mekanik özelliklere sahip olmasına rağmen, en az yoğunluğa sahip oldukları görülmüştür. Bunun sebebi bakır eklenmesinin demir esaslı malzemelerde meydana getirdiği hacim artışıdır.
- SEM kırık yüzeyi görüntüleri incelemesinde; 900 °C’de sünek kırılma bölgelerinin çok az olduğu dolayısı ile sinterleme işleminin yeterince gerçekleşmediği görülmüştür. 1000 °C’de sünek kırılma bölgeleri artış göstermiş, 1120 °C’de ise en fazla sünek kırılma bölgesine rastlanmıştır. Numunelerin dayanım ve sertlik değerleri de bu sonuçla orantılıdır.
- Çalışmanın son kısmında, farklı boyut ve şekillerdeki burç ve dişli çarkların sinterleme işlemleri indüksiyon ile başarılı bir biçimde gerçekleştirilmiştir. Bu da, indüksiyon ile sinterleme prosesinin, ticari uygulamalarda da kullanılabileceğini göstermektedir.
- Bu çalışma sürecinde saf demir tozu, % 0,5 grafit içerikli demir tozu ve % 0,5 grafit, % 3 Cu içerikli demir tozundan üretilen toz metal numunelerin sinterleme öncesi ve sonrası öz direnç değerleri literatüre kazandırılmıştır.
- Gerçekleştirilen deneysel çalışmaları haricinde öneri olarak; geleneksel ve indüksiyon ile sinterlemenin tane boyutuna (grain size) ve bunun da mekanik özelliklere etkileri, ilerleyen çalışmalarda incelenebilir. Ticari uygulamalarda

kullanılan parçalanmış amonyak veya parçalanmış doğalgaz atmosferleri, hem maliyet hem de seri imalata uygunluk göz önüne alınarak ilerleyen çalışmalarda indüksiyon ile sinterlemeye entegre edilebilir.

KAYNAKLAR

1. German, R. M. Toz ve Parçacıklı Malzeme İşlemleri. Editörler; Süleyman Sarıtaş, Mehmet Türker, Nuri Durlu, TMMD, Ankara/Türkiye, 2007, 574 s
2. Davis J.R. (Ed.), Metals handbook (Desk ed.). ASM, International, Materials Park, OH, 1998, 1521 s.
3. Upadhyaya G.S., Powder metallurgy technology. Cambridge International Science Publishing, Cambridge, 1997, 160 s.
4. Kalpakjian, S., Manufacturing Engineering and Technology 2nd Ed. Wesley, Reading, MA. Eb, 1992, 1197 s.
5. Jang, G.B., Hur, M.D., Kang, S.S. A study on the development of a substitution process by powder metallurgy in automobile parts. Journal of Materials Processing Technology. 2000, 100, 110-115
6. German, R. M., Çeviri H. Özkan GÜLSOY, Sinterleme Teorisi ve Uygulamaları, Nobel Yayınevi, Ankara/Türkiye, 2014. 554 s.
7. Shon, I.J., Jeong, I.K., Ko, I., Doh, J.M., Woo, K.D. Sintering behavior and mechanical properties of WC-10Co, WC-10Ni and WC-10Fe hard materials produced by high-frequency induction heated sintering. Elsevier Science, Ceramics International. 2009, 35:339-344.
8. Shon, I.J., Jo, S.H., Doh, J.M., Yoon, J.K., Park, B.J. Mechanical synthesis and rapid consolidation of nanostructured FeAl-Al₂O₃ composites by high-frequency induction heated sintering. Ceramics International. 2012, 38:7: 635-639.
9. Kim, H.C., Shon, I.J., Munir, Z.A. Rapid sintering of ultra-fine WC-10 wt% Co by high-frequency induction heating. Journal of Materials Science. 2005, 40, 2849-2854.
10. Kim, H.C., Shon, I.J., Yoon, J.K., Lee, S.K., Munir, Z.A. One step synthesis and densification of ultra-fine WC by high-frequency induction combustion. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. 2006, 24, 202-209.
11. Kim, H.C., Shon, I.J., Yoon, J.K., Doh, J.M., Munir, Z.A. Rapid sintering of ultrafine WC-Ni cermets. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. 2006, 24, 427-431.
12. Kim, H.C., Yoon, J.K., Doh, J.M., Ko, I.Y., Shon, I.J. Rapid sintering process and mechanical properties of binderless ultra fine tungsten carbide. Materials Science and Engineering: A. 2006, 435- 436, 717-724.
13. Kim, H. C., Park, H. K., Jeong, I. K., Ko, I. Y., Shon, I. J. Sintering of binderless WC-Mo₂C hard materials by rapid sintering process. Ceramics International. 2008, 34, 1419-1423.
14. Kim H. C., Oh, D. Y., Shon, I. J. Synthesis of WC and dense WC-xvol. %Co hard materials by high-frequency induction heated combustion method. International Journal of Refractory Metals & Hard Materials. 2004, 22, 41-49.

15. Kim, H.C., Shon, I.J., Munir, Z.A. Rapid sintering of ultra-fine WC-10 wt% Co by high-frequency induction heating *Journal of Materials Science*. 2005, 40, 2849–2854.
16. Kim, H.C., Shon, I.J., Yoon, J.K., Lee, S.K., Munir, Z.A. One step synthesis and densification of ultra-fine WC by high-frequency induction combustion. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2006, 24, 202–209.
17. Kim, H.C., Shon, I.J., Yoon, J.K., Doh, J.M., Munir, Z.A. Rapid sintering of ultrafine WC–Ni cermets *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2006, 24, 427–431.
18. Kim, S.W., Khalil, K.A., Cockcroft, S.L., Hui, D., Lee, J. H. Sintering behavior and mechanical properties of HA-X% mol 3YSZ composites sintered by high frequency induction heated sintering. *Composites: Part B*. 45, 2013, 1689–1693
19. Kim, H. C., Park, H. K., Jeong, I. K., Ko, I. Y., Shon, I. J. Sintering of binderless WC–Mo₂C hard materials by rapid sintering process. *Ceramics International*. 2008 34, 1419–1423.
20. Kim H. C., Oh, D. Y., Shon, I. J. Synthesis of WC and dense WC–xvol.%Co hard materials by high-frequency induction heated combustion method. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*. 2004, 22, 41–49.
21. Doh, J.M., Jeong, I. K., Kim, H. C., Ko, I. Y. Shon, I. J., Yon I. J. Rapid sintering of ultra-fine WC and WC-Co hard materials by high frequency induction heated sintering and their mechanical properties. *Metals And Materials International*. 2007, 13, 1, 39-45.
22. Park, H.K., Shon, I.J., Yoon, J.K., Doh, J.M., Ko, I.Y., Munir, Z.A. Simutaneous synthesis and consolidation of nanostructured NbSi₂-Si₃N₄ composite from mechanically activated powders by high frequency induction-heated combustion. Elsevier, *Journal of alloys and compounds*. 2008, 461, 560-564.
23. Khalil, K.A., Kim, S.W. Mechanical wet-milling and subsequent consolidation of ultra-fine Al₂O₃-(ZrO₂+Y₂O₃) bioceramics by using high-frequency induction heat sintering. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2007, 17, 21-26.
24. Kim, H.C., Shon, I. J., Munir, Z. A. Rapid sintering of ultra-fine WC-10 wt % Co by high frequency induction heating. *International Journal of Refractory metals & HardMaterials*. 2006, 24, 427-431.
25. Kim, H.C., Oh, D.Y., Shon, I.J. Sintering of nanophase WC-15 vol. %Co hard metals by rapid sintering process. *Refractory Metals & Hard Materials*. 2004, 22, 197-203.
26. Mazaheri, M., Zahedi, A.M., Haghghatzadeh, M., Sadrnezhad, S.K., Sintering of titania nanoceramic: Densification and grain growth. *Ceramics International*. 2009, 35, 685–691.

27. Kim C. H., Yoon J. K., Doh J.M., Ko I. Y., Shon I. J. Rapid sintering process and mechanical properties of binderless ultra fine tungsten carbide. *Materials Science and Engineering A*. 2006, 435–436, 717–724.
28. Abbasi B. J., M. Zakeri, S. A. Tayebifard , High frequency induction heated sintering of nano structured Al₂O₃-ZrB₂ composite produced by MASHS technique *Ceramics International* 40 (2014) pp. 9217-9224
29. Khalil, A.K., Almajid, A.A., Effect of high-frequency induction heat sintering conditions on the microstructure and mechanical properties of nanostructured magnesium/hydroxyapatite nanocomposites. *Materials and Design*. 2012, 36, 58–68.
30. Ren, X., Peng, Z., Peng, Y., Fu, Z., Wang, C., O, L., M, H. Effect of SiC nano-whisker addition on WC–Ni based cemented carbides fabricated by hot-press sintering. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2013, 36, 294–299.
31. Çivi, Can, Atik, Enver. İndüksiyon ile Sinterleme. II. Ulusal Ege Kompozit Malzemeler Sempozyumu Kompege 2013, 07 – 09 Kasım, 2013, Kuşadası Türkiye.
32. Zinn, S., Semiatin, S.L. *Elements of Induction Heating Design, Control and Applications*. EPRI, ASM International, USA, 1988, 3, 12-13.
33. Çavdar, U. Demir Esaslı Toz Metal Parçaların İndüksiyonla Sinterlenmesinde Parametrelerin Belirlenmesi. Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Manisa, 2009, 160 s. (Doktora Tezi, Danışman: Prof. Dr. Enver ATİK).
34. Çivi, C. Demir Esaslı T/M Parçaların Düşük Frekanslı İndüksiyonla Sinterlenmesinde Sürenin Etkisi. Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Manisa, 2011, 69 s. (Yüksek Lisans Tezi, Danışman: Prof. Dr. Enver ATİK).
35. Kuşoğlu, İ.M. Demir Esaslı Metal Tozlarından Geleneksel Ve Mikrodalga Sinterleme Yöntemleri İle Malzeme Üretimi Ve Özelliklerinin Karşılaştırılması. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Malzeme Bilimi Anabilim Dalı, İzmir, 2011, 140 s. (Doktora Tezi).
36. Sarıtaş, S. Toz Metalürjisi. Makine müh. el kitabı Cilt 1 Üretim ve Tasarım, MMO, 2.Baskı, I.Cilt, 1994, 64-82 s.
37. German, R.M., *Powder metallurgy science*, 2nd edition, Metal Powder Industries Federation, USA, 1994.
38. Kaysser W.A., Rzesnitzek, K. Principles of atomization. *Science of Sintering*, Ed. D.P. Uskokovic, Plenum Press. 1990, 157 – 174.
39. Sarıtaş, S., Doğan C. Metal powder production by centrifugal atomization. *International Journal of Powder Metallurgy*. 1994, 30, 419 – 427
40. Champagne, B., Angers, R., Fiset, M. Characteristics of powders produced by rotating electrode process, MPR. 1984.
41. Rai, G., Lavernia, E., Grant, N.J. Powder size distribution in ultrasonic gas atomization. *Journal of Metals*. 1985, 22 – 26.

42. Akpınar, G. Toz Metal Parçaların İndüksiyonla Sinterleme Prosesinin Deneysel Ve Teorik Olarak Modellenmesi. Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Manisa, 2011, 127 s. (Doktora Tezi, Danışman:Prof. Dr. Enver ATİK).
43. Thummler, F.i Oberacker, R. An introduction to powder metallurgy Institute of Materials, London, 1993.
44. Kingery, W.D., Sintering from prehistoric times to the present, Sintering 91, A.C.D Chaklader and J.A. Lund (eds.), Trans Tech, Brookfield, VT, 1992, pp:1-10
45. Suk-Joong L. Kang Sintering Densification, Grain Growth, and Microstructure, Elsevier, Oxford, 2005.
46. Rahaman, M. N. De Jonghe, L.C. Effect of rigid inclusions on the sintering of glass powder compacts. Journal American Ceramic Society. 1987, Vol:70, pp. 348-351
47. Mataga, P.A. Retardation of sintering in heterogeneous powder compacts. Sintering of advanced seramics. C.A. Handwerker, J.E.Blendell and W.A. Kaysser (eds.) American Ceramic Society Westerville, OH, 1990, pp. 689-709
48. Cho, W.S., Hayashi, K. Effect of unidirectional orientation of SiC whiskers on pressureless-sintering densification of SiC whisker/Si₃N₄ ceramics composite. Journal of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy, 1993, Vol:40 pp: 16-19
49. Savitskii, A.P., Liquid phase sintering of the systems with interacting components. Russian Academy of sciences, Tomsk, Russia, 1993.
50. Kaysser, W.A., Petzow, G. Recent conceptions on liquid phase sintering. Proceedings sintering theory and practice conference, The metals society, London, 1984, UK, 101-106 s
51. Jamil, S.J., Chadwick, G.A. Investigation and analysis of liquid phase sintering pf FeCu and FeCuC compacts. Proceedings sintering theory and practice conference. The metals society, London, 1984, UK, 131-134 s
52. Griffo, A., German, R.M., Nayar, H. Effect of processing variables on the dimensional behavior of FC-0208 alloys. Advances in powder metallurgy and particulate materials vol:2. A. Lawley and A. Swanson (eds.) Metal Powder Industries federation, Princeton, NJ, 1993, 63-76s
53. Atik, E., Çavdar, U. Geleneksel ve Hızlı Sinterleme Yöntemleri. CBÜ Soma Meslek Yüksekokulu Teknik Bilimler Dergisi,2011, 1, 15, 1-10
54. Mizuno, Y., Kawasaki, A., Watanable,R. In-situ Measurement of nonuniform sintering shrinkage of complex-shaped compacts. Journal of The Japan Institute of Metals. 1994, vol:58, 1184-1190
55. German, R. M. Supersolidus Liquid phase sintering part I Process Review. International Journal of Powder Metallurgy, 1999, vol. 26, 23-24
56. German, R.M. Liquid phase sintering. Plenum Press, New York, 1985,240 s
57. Shaler, A.J. Theoretical Aspects of the Infiltration of Powder Metallurgy Producs. International Journal of Powder Metallurgy, 1965, 1, 1, 3-14

58. Lumpkins, E.R. A Theoretical Review of the Copper Infiltration of PM Components. Powder metallurgy international journal. 1985, 17, 120-123.
59. Berry, D.F. Factors affecting the growth of 90/10 copper/tin mixes based on atomised powders. Powder Metallurgy. 1972 Vol:15, 247-266
60. Bose, A., Rabin, B.H., German, R. M. Reactive sintering on nickel-aluminade to near full density. Powder metallurgy international journal. 1988, vol:20, no:3, 25-30
61. Wenning, L.A., Lebrat, J.P., Varma, A. Some observations on unstable self-propagating high temperature synthesis on Nickel Aluminides. Journal of Materials Synthesis and Processing. 1994, vol:2, 125-132
62. Debely, P.E., Barringer, E., Bowen, H.K. Preparation and sintering behavior of fine grained Al₂O₃-SiO₂ composite. Journal American Ceramic Society. 1985, Vol:68, C76-C78
63. Katz, J.D. Microwave sintering of ceramics. Annual Reviews in Materials Science. 1992, vol. 22, 153-170
64. Katz, J.D., Blake, R.D, Scherer, C. P. Microwave sintering of Titanium diboride. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. 1989, vol. 8, 175-178
65. Clark, D.E., Folz, D.C., Schulz, R. L., Fathi, Z., Cozzi, D. Recent developments in the microwave processing of ceramics. MRS Bulletin Journal. 1993, vol. 18, no:11, 41-46
66. Janney, M.A, Kimrey, H. D., Microwave sintering of alumina at 28 GHz, Ceramic Transactions, vol. 1, G. L. Messing, E. R. Fuller and H. Hausner (eds) American Ceramic Society, Westerville, OH, 1987, 919-924 s
67. Katz, J.D., Blake, R. D. Microwave sintering of multiple alumina composite components. Ceramic Bulletin Journal. 1991, vol. 70, 1304-1308
68. Okazaki, K. Electro-discharge consolidation of particulate materials. Reviews in particulate materials, vol. 2, A. Bose, R. M. German and A. Lawley (eds.), Metal powder industries federation, Princeton, NJ., 1994, 215-268 s
69. Kasai, T., Ozaki, Y., Noda, H., Kawasaki, K. Tenamoto, K. Laser sintered barium titanate. Journal American Ceramic Society. 1989, Vol:72, 1716-1718
70. Weiss, W. L. Bourell, D. L. Selective laser sintering of intermetallics. Metallurgical and Materials Transactions. 1993, vol 24A, 757-759
71. Yuki, M., Yamaoka, H., Nakanishi, Y., Kawasaki, A., Watanabe, R. Experimental study of laser sintering process of ceramics, Proceedings of 1993 powder metallurgy word congress, part 2, Y. Bando and K. Kosuge (eds.) Japan society of powder and powder metallurgy, Kyoto, 1993, Japan, 939-942 s
72. Deckart, C.R. Beaman, J. J. Recent advances in selective laser sintering. Manufacturing process, systems and machines, S. K. Samanta (ed.) University of Michigan Conference Proceedings, National Science Foundation, 1987, Washington, DC, 447-451
73. May, J. Prozessüberwachung beim flüssigphasensintern mit hilfe des elektrischen widerstandes. Planseeber, Pulwernet, 1979, vol 24, 207-214

74. Euler, K. J., May, J. Inductive liquid phase sintering of Cu-Al bronzes. powder metallurgy international journal. 1980, vol. 12, 138-140.
75. Öncü, S., Bir Fazlı Yüksek Verimli Ev Tipi Bir İndüksiyon Isıtma Sistemi, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli 2005, 91s. (Yüksek Lisans Tezi)
76. Rapoport, E., Pleshivtseva, Y., Optimal Control of Induction Heating Processes. Taylor&Francis, 2006.
77. Rudnev, V., Loveless D, Cook R., Black M., Handbook of induction heating, 2003, New York, Marcel Dekker.
78. Dereci, S. İndüksiyonla ısıtma sistemlerinin incelenmesi ve bir uygulama devresinin gerçekleştirilmesi Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik müh. İstanbul, 2010, 79 s (Yüksek Lisans Tezi)
79. Sert, Ş. İndüksiyon Isıl Yükleme İle Bir Çatlak Etrafında Oluşan Gerilmelerin Modellenmesi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Eğitimi, 2008, 66 s (Yüksek Lisans Tezi)
80. Li, W. Gao, L. Rapid sintering of nanocrystalline ZrO₂(3Y) by spark plasma sintering. Journal of the European Ceramic Society. 2000, 20, 2441-2445
81. Hamer, M. P., Brook, R. J., Fast firing-microstructural benefits. Journal of the British Ceramic Society. 1981, 80, 147-149.
82. Hamer, M. P., Roberts, E. V., Brook, R. J., Rapid sintering of pure and doped α -Al₂O₃. Transactions of the British Ceramic Society. 1979, 78, 22-25.
83. Morell, A., Mermosin, A. Fast sintering of soft Mn-Zn and Ni-Zn ferrite pot cores. Bulletin : American Ceramic Society., 1980, 59, 626-629
84. Dewidar, M. Microstructure and mechanical properties of biocompatible high density Ti - 6Al - 4V/W produced by high frequency induction heating sintering. Materials and Design. 2010, 31, 3964-3970
85. Çivi, C.; Atik, E., Comparison Of Effect Of Induction And Classical Sintering To Mechanical Properties Of Powder Metal Components. AIP Conference Proceedings. 2012, Volume:1476, 119-122.
86. Çivi, C., Akpınar, G., Atik, E., Effects of the sintering parameters on mechanical properties of fe-based powder metal parts. International Porous Powder Materials Symposium (PPM 2013), 2013, İzmir Turkey, (Proceedings Book, 180-185 s).
87. Çivi, C., Atik, E. Fırında Klasik Olarak Ve İndüksiyonla Sinterleme Yöntemiyle Sinterlenerek Üretilen Toz Metal Burçların Mekanik Özelliklerinin Karşılaştırılması, Bursa OTEKON 2012, 04 – 05 Haziran 2012, Bursa (6. Otomotiv Teknolojileri Kongresi Bildiri Kitapçığı)
88. Çivi, C., Tahrali, N., Atik, E. Reliability Of Mechanical Properties Of Induction Sintered Iron Based Powder Metal Parts. Materials & Design. 2014, 53, 383-397
89. Akpınar, G.; Çivi, C. ; Atik, E. An Investigation Of Induction And Classical Sintering Effect On Powder Metal Parts By Finite Element Method journal Materiali in Tehnologije / Materials and Technology, 2014, 48(2), 305-312

90. Çivi, C.; Akpınar, G.; Atik, E. Mechanical properties of conventionally and induction sintered Fe-based powder metal bushings. *Materials Testing*. 2015, Vol. 57, No. 6, 518-523.
91. Akpınar, G., Aydın, Y., Çivi, C., Atik, E. Demir Esaslı Toz Metal Malzemelerin İndüksiyonla Sinterlenmesinde Sinterleme Sıcaklığının Mekanik Özelliklere Etkisinin Deneysel Ve Nümerik Olarak İncelenmesi. 7. Uluslararası Toz Metalurjisi Sempozyumu, 24-28 Haziran 2014, Ankara.
92. Çivi, C., Akpınar, G., Atik, E., Demir Esaslı Toz Metal Malzemelerin İndüksiyonla ve Geleneksel Olarak Sinterlenmesinde Ön Sinterlemenin Mekanik Özelliklere Etkisi, 7. Uluslararası Toz Metalurjisi Sempozyumu, 24-28 Haziran 2014, Ankara
93. Akpınar, G., Çivi, C., Atik, E. Farklı Sürelerde İndüksiyonla Sinterlenen Demir Esaslı Toz Metal Burçların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. *Mühendis ve Makine Dergisi*, 2014 Cilt:55 Sayı:649, 31-37
94. Akgül, M.B., Akpınar, G., Çivi, C., Atik, E. Toz Metal Parçaların İndüksiyonla Sinterlenmesi'nin Nümerik Analizi, 6. Uluslararası Toz Metalurjisi Sempozyumu, 5-8 Ekim 2011, Ankara, (Bildiri Özetleri Kitabı, 449-455 s)
95. Demirci, H., Mühendislik Malzemeleri Önemli Endüstriyel Malzemeler ve Isıl İşlemleri. Aktüel yayınları, 2004, 252 s.
96. Wang, W. F. Effect of alloying elements and processing factors on the microstructure and hardness of sintered and induction-hardened Fe-C-Cu alloys. *Materials Science and Engineering*, 2005, Volume 402, Issues 1-2, 15, 92-97.
97. Upadhyaya, R.G.S. Effect of copper and VCN additions on sintering of low alloy steel. *Materials and Design*, 200, 22, 359-367.
98. Wang, C. P., Liu, X. J., Ohnuma, I., Kainuma, R., Ishida, K. Thermodynamic database of the phase diagrams in Cu-Fe base ternary systems. *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*, 2004, Volume 25, Issue 4, 320-328.
99. Simchi, A. Effect of C and Cu addition on the densification and microstructure of iron powder in direct laser sintering process. *Materials Letters* Volume, 2008, 62, Issues 17-18, 2840-2843.
100. Rol, H., Johnson, P. K. *Perspective in powder metallurgy volume 3: Iron Powder Metallurgy*. Kempton, Springer-Science+Business Media, B.V. 1968, 379 s
101. Narasimhan, K. S. Sintering of powder mixtures and the growth of ferrous powder metallurgy. *Materials Chemistry and Physics*, 2001, Volume 67, Issues 1 -3, 56-65
102. Zarebski, K., Putyra, P. Iron powder-based graded products sintered by conventional method and by SPS. *Advanced Powder Technology*, 2015, 26, 401-408
103. Hryha, E., Dudrova, E., Nyborg, L. On-line control of processing atmospheres for proper sintering of oxidation-sensitive PM steels. *Journal of Materials Processing Technology*, 2012, 212. 977-987.

104. Çavdar, U., Ünlü, B. S., Pinar, A. M., Atik, E., Mechanical properties of heat treated iron based compacts. *Materials and Design*. 2015, 65, 312–317
105. Babakhani , A., Haerian, A., Ghambri , M. Effect of heat treatment, lubricant and sintering temperature on dry sliding wear behavior of medium alloyed chromium PM steels. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 204, 192–198

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Can ÇIVI
Doğum Yeri ve Yılı : İzmir, 1987
Medeni Hali : Evli
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : can.civi@cbu.edu.tr

Eğitim Durumu

Lise : Vali Nevzat Ayaz Lisesi Lisesi, İzmir, 2004
Lisans : Celal Bayar Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 2009
İkinci Lisans : Anadolu Üniversitesi (AÖF) İşletme bölümü, 2010
Yüksek Lisans : Celal Bayar Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 2011

Mesleki Deneyim

Manisa Celal Bayar Üniversitesi 2011-..... (halen)

Yayımları

SCI Expanded Dergilerde Yayımlanan Makaleler

1. Çivi,C.; Akpınar, G.; Atik, E. Mechanical properties of conventionally and induction sintered Fe-based powder metal bushings. Materials Testing. 2015, Vol. 57, No. 6, 518-523
2. Akpınar, G., Çivi, C., Atik, E. An Investigation Of Induction And Classical Sintering Effect On Powder Metal Parts By Finite Element Method. journal Materiali in Tehnologije / Materials and Technology. 2014, 48(2), 305-312
3. Çivi, C., Tahrali, N., Atik, E. Reliability Of Mechanical Properties Of Induction Sintered Iron Based Powder Metal Parts. Materials & Design. 2014, 53, 383-397
4. Çivi, C., Atik, E. Comparison of Effect of Induction and Classical Sintering To Mechanical Properties Of Powder Metal Components. AIP Conference Proceedings. 2012, Volume:1476, 119-122

Ulusal Hakemli Dergilerde Yayımlanan Makaleler

1. Akpınar, G., Çivi, C., Atik, E., Farklı Sürelerde İndüksiyonla Sinterlenen Demir Esaslı Toz Metal Burçların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Mühendis ve Makine Dergisi. 2014, Cilt:55 Sayı:649, 31-37
2. ÇİVİ, C., KÖKSAL, N. S. Rüzgâr türbinlerinde oluşan hasarların İncelenmesi., C B Ü Soma Meslek Yüksekokulu Teknik Bilimler Dergisi, 2011 Cilt: 2 Sayı:16,45-56

Uluslararası Bilimsel Toplantılarda Sunulan ve Bildiri Kitabında (Proceedings) Basılan Bildiriler

1. Akpınar, G., Aydın, Y., Çivi, C., Atik, E. Demir Esaslı Toz Metal Malzemelerin İndüksiyonla Sinterlenmesinde Sinterleme Sıcaklığının Mekanik Özelliklere Etkisinin Deneysel Ve Nümerik Olarak İncelenmesi. 7. Uluslararası Toz Metalurjisi Sempozyumu, 24-28 Haziran 2014, Ankara.
2. Çivi, C., Akpınar, G., Atik, E. Demir Esaslı Toz Metal Malzemelerin İndüksiyonla ve Geleneksel Olarak Sinterlenmesinde Ön Sinterlemenin Mekanik Özelliklere Etkisi. 7. Uluslararası Toz Metalurjisi Sempozyumu, 24-28 Haziran 2014, Ankara.
3. Ünlü, B. S., Çivi, C., Sargın, F., Güneş, Ç. Ocak Izgaralarında Kullanılan Punto Ve Alın Direnç Kaynağı Yöntemlerinin Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi. 3. International Conference on Welding Technologies and Exhibition, 21-23 May 2014, Manisa, Turkey, 1073-1080
4. Ünlü, B.S., Sargın,F., Çivi, C. Elektrik Ark Kaynağı İle Farklı Akımlarda Birleştirilmiş Ts-Fe 37 Çeliğinin Kaynak Bölgesinin Mikroyapı Ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. 3. International Conference on Welding Technologies and Exhibition, 21-23 May 2014, Manisa, Turkey, 1081-1090
5. Ünlü, B.S., Çivi, C., Yılmaz, S.S., Uzkut, M. Mıg/Mag Kaynağı İle Birleştirilmiş Sae 316l Ve Ts Fe 37-2 Çeliğinin Kaynak Bölgesinin Mikroyapı Ve Mekanik Özellikleri. 3. International Conference on Welding Technologies and Exhibition, 21-23 May 2014, Manisa, Turkey, 1090-1099
6. Akgül, M.B., Akpınar, G., Çivi, C., Atik, E. Toz Metal Parçaların İndüksiyonla Sinterlenmesi'nin Nümerik Analizi, 6. Uluslararası Toz Metalurjisi Sempozyumu, 5-8 Ekim 2011, Ankara, pp 449-455
7. Ünlü, B. S., Çivi, C., Bölük, B. Ark-Tıg Ve Mıg/Mag Kaynakları Yapılmış Ts Fe 37-2 Çeliğinin Kaynak Bölgesinin Mikroyapı Ve Mekanik Özelliklerinin Karşılaştırılması. 2. International Conference on Welding Technologies and Exhibition, 23-25 May 2012, Ankara, Turkey, pp 539-546
8. Ünlü, B. S., Çivi, C., İrizalp, S., Özçelik, T. Farklı Hızlarda Lazer Kaynağı Yapılmış C45 Çeliğinin Kaynak Bölgesinin Mikroyapı Ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. 2. International Conference on Welding Technologies and Exhibition, 23-25 May 2012, Ankara, Turkey, 242-248

9. Ünlü, B.S. Yılmaz,S.S., Uzku, M. ,Çivi, C. MIG/MAG Kaynağı İle Farklı Akımlarda Birleştirilmiş Fe 37 Çeliğinin Kaynak Bölgesinin Mikroyapı Ve Mekanik Özellikleri. 2. International Conference on Welding Technologies and Exhibition, 23-25 May 2012, Ankara, Turkey, 383-391
10. Çivi, C., Atik, E. Comparison Of Effect Of Induction And Classical Sintering To Mechanical Properties Of Powder Metal Components. 2. International Advances in Applied Physics & Materials Science Congress April 26-29 2012, Antalya, Turkey, AIP Conference Proceedings. 1476, 119-122
11. Çivi, C.,Ünlü, B.S., Türkmen, İ., Sütçüoğlu, İ. Atik, E. Vakum İnfüzyon Yöntemiyle Üretilen Cam Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerin Tabaka Sayısına Ve Yöne Bağlı Olarak Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, 14. International Materials Symposium (İMSP 2012), 10-12 October 2012, Pamukkale University,Denizli Turkey, 1436-1442
12. Çivi, C, Sütçüoğlu, İ. Atik, E. Vakum İnfüzyon Yöntemiyle Üretilen Karbon Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerin Tabaka Sayısına Ve Yöne Bağlı Olarak Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. 14. International Materials Symposium (İMSP 2012), 10-12 October 2012, Pamukkale University,Denizli Turkey, 1443-1449
13. Çivi, C., Akpınar, G., Atik, E. Effects of the sintering parameters on mechanical properties of fe-based powder metal parts. International Porous Powder Materials Symposium (PPM 2013), İzmir Turkey, Proceedings Book, 180-185

Ulusal Bilimsel Toplantılarda Sunulan ve Bildiri Kitabında Basılan Bildiriler

1. Çivi, C., Atik, E., Koyuncu, E. İndüksiyon İle Sinterleme Yöntemi Fonksiyonel Derecelendirilmiş Parça Üretimi. III. Ulusal Ege Kompozit Malzemeler Sempozyumu Kompege 2015, 05 – 07 kasım 2015, Kuşadası Türkiye.
2. Çivi, C., Atik, E. İndüksiyon İle Sinterleme Yöntemi İle Farklı Boyut Ve Şekillerde Dişli Çark Üretimi III. Ulusal Ege Kompozit Malzemeler Sempozyumu Kompege 2015. 05 – 07 kasım 2015, Kuşadası Türkiye.
3. Çivi, C., Tahralı, N., Atik, E., Otomotiv Sanayinde Dinamik Gerilmeler Altında Zorlanan Elemanların Ömürlerinin Birikimli (Kümülatif) Hasara Göre Değerlendirilmesi. Bursa OTEKON 2014, 26 – 27 Mayıs 2014, 7. Otomotiv Teknolojileri Kongresi Bildiri Kitapçığı, Bursa, TURKEY.
4. Çivi, C., Atik, E. Fırında Klasik Olarak Ve İndüksiyonla Sinterleme Yöntemiyle Sinterlenerek Üretilen Toz Metal Burçların Mekanik Özelliklerinin Karşılaştırılması. Bursa OTEKON 2012, 04 – 05 Haziran 2012, 6. Otomotiv Teknolojileri Kongresi Bildiri Kitapçığı, Bursa, TURKEY.
5. Çivi, C., Atik, E. İndüksiyon ile Sinterleme. II. Ulusal Ege Kompozit Malzemeler Sempozyumu Kompege 2013, 07 – 09 kasım 2013, Kuşadası Türkiye.

6. Akpınar, G., Çivi, C., Atik, E. Farklı Sürelerde İndüksiyonla Sinterlenen Demir Esaslı Toz Metal Burçların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. II. Ulusal Ege Kompozit Malzemeler Sempozyumu Kompege 2013, 07 – 09 kasım 2013, Kuşadası Türkiye