

CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TOZ METAL PARÇALARIN İNDÜKSİYONLA SİNERLEME PROSESİNİN
DENEYSEL VE TEORİK OLARAK MODELLENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Mak. Yük. Müh. Göksan AKPINAR

Anabilim Dalı : Makine Mühendisliği

Programı : Konstrüksiyon ve İmalat

Danışman: Prof. Dr. Enver ATİK

MANİSA 2013

CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TOZ METAL PARÇALARIN İNDÜKSİYONLA SİNERLEME PROSESİNİN
DENEYSEL VE TEORİK OLARAK MODELLENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Mak. Yük. Müh. Göksan AKPINAR

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 20 Kasım 2013

Tezin Savunulduğu Tarih : 25 Aralık 2013

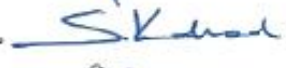
Tez Danışmanı :Prof.Dr. Enver ATİK



Tez İzleme Komitesi :Doç.Dr. Mustafa TOPARLI



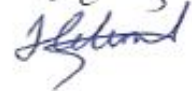
:Doç.Dr. N. Sinan KÖKSAL



Diğer Jüri Üyeleri :Doç.Dr. Bekir Sadık ÜNLÜ



:Doç.Dr. Hakan ÇETİNEL



MANİSA 2013

İçindekiler

İçindekiler	i
SEMBOLLER LİSTESİ	iv
ŞEKİL LİSTESİ	v
ÇİZELGE LİSTESİ	ix
KISALTMALAR LİSTESİ	x
TEŞEKKÜR	xi
ÖZET	xii
ABSTRACT	xiii
1.GİRİŞ	1
2.TOZ METALURJİSİ	11
2.1 Toz Üretim Teknikleri	13
2.1.1. Mekanik Yöntemler	13
2.1.1.1 Talaşlı Üretim	14
2.1.1.2 Öğütme	14
2.1.1.3 Mekanik Alaşımlama	15
2.1.2. Kimyasal Yöntemler	16
2.1.3. Elektroliz Yöntmi	17
2.1.4. Atomizasyon Yöntemleri	17
2.1.5. Buharlaştırma Teknikleri	21
2.1.6. Mikron-altı ve Nano Ölçekli Tozlar İçin Teknikler	21
2.2. Metal Tozlarına Uygulanan Ön İşlemler	22
2.2.1. Metal Tozlarının Elek Analizi	22
2.2.2. Tavlama	22
2.3. Metal Tolarının Karıştırılması	23
2.3.1. Kuru Toz Karıştırma	23
2.3.2. Sıvı Bağlayıcılarla Karıştırma	24
2.4. Tozların Preslenip Şekil Alması	25
2.5. Sinterleme	27
2.5.1. Sinterleme Esasları	27
2.5.2. Polimer Yakma	31
2.6. Katı Hal Sinterleme Teorisi	32

2.6.1.	İlk Aşama	39
2.6.2.	Ara Aşama	41
2.6.3.	Son Aşama	43
2.7.	Gözenek Yapı Gelişimi.....	45
2.8.	Yoğunlaşma Bağlanma Olayları	48
2.9.	Karışım Toz Sinterlenmesi.....	50
2.10.	Destekli Sinterleme.....	50
2.11.	Sıvı Fazlı Sinterleme	51
2.12.	Sinterleme Atmosferleri.....	56
2.13.	Fırın Tasarımı	60
2.14.	Toz Metal Malzemelerin Mekanik Özellikleri.....	62
2.15.	Toz Metal Uygulamaları	62
2.16.	Toz Metal Ürünlerin Endüstriyel Önemi	66
2.17.	Toz Metalurjisinin Avantaj ve Dezavantajları.....	67
3.	İNDÜKSİYON HAKKINDA GENEL BİLGİLER	69
3.1.	İndüksiyon	69
3.2.	Elektromanyetik İndüksiyon.....	70
3.3.	Histerezis Kayıpları.....	70
3.4.	Deri Etkisi	71
3.5.	Elektriksel Özdirenç	72
3.6.	Isı Transferi.....	73
3.7.	Manyetik Alan	74
3.8.	İndüksiyonla Isıtmanın Matematiksel Temelleri	76
3.8.1.	Elektromanyetik Alanın Matematiksel Modeli	77
3.8.2.	Isı İletiminin Matematiksel Modeli	80
3.8.3.	Gerilmenin Matematiksel Modeli.....	81
4.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	84
4.1.	Deney Düzenəğinin Hazırlanması	87
4.2.	Toz Metalin Sinterleme İşlemleri.....	90
4.3.	Mekanik Testler	91
4.3.1.	TM numunelerin 3 Nokta eğme deney sonuçları	91
4.3.2.	Sertlik testi sonuçları.....	93
4.4.	Elektriksel Analizler.....	93

4.5. Metalografik incelemeler.....	95
5.TEORİK ÇALIŞMALAR	100
5.1. Mekanik Analizler	100
5.2. Mikro Mekanik Analizler	102
5.3. Tm Burçların indüksiyonla sinterlenmesinin nümerik analizi.....	105
5.4. Nümerik ısı oluşumu	109
5.4.1. Ön ısıtma bölgesi	110
5.4.2. Sinterleme Bölgesi	112
5.5. İşleme derinliği nümerik analizi.....	114
6.SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	116
7.TARTIŞMA.....	120
8.KAYNAKLAR.....	121
ÖZGEÇMİŞ.....	127

SEMBOLLER LİSTESİ

B	Manyetik akı (W/m^2)
B_0	Malzeme, sıcaklık ve geometrik sabitlerin toplamı
C	Kondansatör kapasitesi
C_0	Denge durumundaki boşluk yoğunluğu
c	Özgül ısı ($J/m^3 \cdot C$)
D	Elektriksel akış yoğunluğu (Coulomb/ m^2)
d_g	Tane boyutu
E	Elektrik alan şiddeti (V/m)
E	Elastisite modülü (N/m^2)
ε	Gözenek oranı
ε	Dielektrik sabiti (F/m)
α	Konveksiyon yüzey ısı iletim katsayısı ($W/m^2 \cdot C$)
F	Güç iletim faktörü
f	Frekans (Hertz)
f_0	Rezonans frekansı (Hertz)
G	Ortalama tane büyüklüğü
$\bar{\sigma}$	Kavisli yüzey gerilmesi (MPa)
δ	Dalma derinliği (mm)
σ	Elektriksel iletkenlik (Siemens)
H	Manyetik alan yoğunluğu (A/m)
J	İletilen akım yoğunluğu (A/m^2)
k	Boltzman sabiti ($m^2 kg/s^2 K$)
k	Isıl aktivasyon parametresi
L	Parça boyu (m)
L	Bobin indüktansı (H)
N	Hareket eden atom sayısı
N_0	Toplam atom sayısı
P	Güç iletimi
ρ	Özgül direnç ($\Omega \cdot mm$)
ρ	Elektrik şarj yoğunluğu (Coulomb)
q	ısı akısı (W/m^2)
R	Gaz sabiti
r	Direnç (W.m)
v	Poisson oranı
T	Mutlak sıcaklık (Kelvin)
t	Süre (s)
μ	Manyetik geçirgenlik (Wb/A.t-m)
ρ	Yoğunluk (g/cm^3)
Q	Aktivasyon enerjisi (Kj/mol)
ψ	Kısmi yoğunluk değişiminin katı yoğunluk değişimine oranı
Υ	Yüzey enerjisi
X/D	Boyun büyüklüğü oranı
Ω	Atom hacmi
Υ_{SV}	Katı-buhar yüzey enerjisi
Υ_{SL}	Katı-sıvı yüzey enerjisi
Υ_{Lv}	Sıvı-buhar yüzey enerjisi

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1. Değişik malzemelerin akma mukavemeti	2
Şekil 1.2. Gözenek miktarı relatif özellikler.....	3
Şekil 2.1. Toz metalurjisi yöntemi ile parça üretim aşamaları	11
Şekil 2.2. Öğtölmüş demir borür ve talaşlı imal edilen Alüminyum	14
Şekil 2.3. Bilyalı öğütme	14
Şekil 2.4. Mekanik alaşımlama	15
Şekil 2.5. Toz küre darbe etkileşimi	16
Şekil 2.6. Kimyasal yöntemle Demir tozu üretimi	16
Şekil 2.7. Elektroliz ile toz üretimi	17
Şekil 2.8. Düşey gaz atomizasyon ünitesi.....	18
Şekil 2.9. Su atomizasyon işlemi.....	18
Şekil 2.10. Küresel şekilli gaz atomize kalay tozları genel yüzey görüntüleri.....	19
Şekil 2.11. Döner disk atomizasyon yöntemi	19
Şekil 2.12. Döner elektrod atomizasyon yöntemi	20
Şekil 2.13. Vakum atomizasyon yöntemi	20
Şekil 2.14. Ultrasonik gaz atomizasyon.....	21
Şekil 2.15. Izgara eleği.....	22
Şekil 2.16. Karıştırma yöntemleri	23
Şekil 2.17. İki farklı tip parti karıştırıcı.....	24
Şekil 2.18. Çift vidalı karıştırıcı.....	25
Şekil 2.19. Tek ve çift yönlü presleme	25
Şekil 2.20. Metalurjik açıdan sıkıştırma işlemi	26
Şekil 2.21. Yoğunluk-basınç ilişkisi.....	26
Şekil 2.22. 1 saat sinterlenen bronz tozlarının SEM görüntüsü a)45-63µm b)30-25µm.....	27
Şekil 2.23. Sinterlemede mikroyapı değişimini gösteren fotoğraflar	29
Şekil 2.24. Boyun çapı X olan iki küresel parçacığın sinterleme profili.....	29
Şekil 2.25. Sinterleme süresi boyun büyüklüğü oranı.....	30
Şekil 2.26. % 0,4 bağlayıcı içeren paslanmaz çelik parçanın polimer yanması sırasındaki ağırlık kaybı.....	31
Şekil 2.27. Kavisli bir yüzey üzerinde bulunan bir nokta.....	32
Şekil 2.28. Parçalar arası sinter bağının atom düzeyinde şematik gösterimi.....	33
Şekil 2.29. Boyutları 50, 5, 0,05 µm olan Nikel tozlarının Sinterleme yoğunluğunun sıcaklıkla değişimi	34

Şekil 2.30. Sinterlemede nokta temasıyla başlayan parçacıklar arası bağ gelişimini gösteren iki küre sinterleme modeli	35
Şekil 2.31. Yoğunluk Tane boyutu ilişkisi	35
Şekil 2.32. Gevşek toz ile başlayan sinterlemenin değişik aşamalarını gösteren çizimler	36
Şekil 2.33. Sinterleme sırasında yoğunluk artışı ve tane büyümesini gösteren dört mikro fotoğraf	37
Şekil 2.34. İki sınıf sinterleme mekanizması.....	38
Şekil 2.35. Boyutları 43-74 µm olan bakır tozlarının 4 °C/dak. ısıtma hızında sinterleme çekmesinin sıcaklığa bağlı olarak değişiminin dilometre ile belirlenmesi.....	41
Şekil 2.36. Sinterlemenin ara aşamasında gözenek ağının şematik gösterimi.....	41
Şekil 2.37. Bakır parçacıklarının 927 °C de sinterlenmesi	42
Şekil 2.38. Tane köşelerinde küresel gözenekler bulunan tetrakaidekahedron tanecikler	43
Şekil 2.39. Karbonil demir tozunun farklı sürelerde sinterlenmesi sırasında gözeneklilik, gözenek boyutu ve tane boyutu değişimi	44
Şekil 2.40. Sinterleme mekanizmasının belirlenmesi için boyun büyüklüğü oranının kullanımı.....	45
Şekil 2.41. Parçacıkların sinterleme sırasındaki yapı değişiminin şematik gösterimi	46
Şekil 2.42. -325 elek boyunda olan 316L paslanmaz çelik tozunun artan sıcaklıklarda ısıtılması ile elde edilen üç optik mikroyapı fotoğrafı.....	46
Şekil 2.43. Sinterlemenin son aşamasında gözenek izolasyonu ve küreselleşme adımları.....	47
Şekil 2.44. Sinterlemede olası iki gözenek tane sınırı düzenlenmesi.....	47
Şekil 2.45. Teorik yoğunluğa yakın sinterlenmiş ince taneli Alüminyum mikro yapısı	48
Şekil 2.46. Demir-Bakır tozu parçacıklarının iki sinterleme mikro yapısı	49
Şekil 2.47. Sıvı katı tanelerinin üzerine yayılması.....	51
Şekil 2.48. İki toz karışımı kullanılarak sıvı faz sinterlemesinin kavramsal aşamaları.....	52
Şekil 2.49. Çözelti tekrar çözünme işlemi	53
Şekil 2.50. Yoğunluk-sıvı oranı haritası	53
Şekil 2.51. Sıvı fazlı sinterlemede tane-tane teması dengesi için iki tane modeli	54
Şekil 2.52. Ni-Al toz karışımının ekzotermik tepkimeli sinterlenmesinde oluşan yapının optik görüntüsü	55
Şekil 2.53. 4µm Tungsten tozu için sinterleme haritası	55
Şekil 2.54. Tungsten ağır alaşımından üretilen ters t şeklinde bir parçanın sinterlenmesinde çekme ve çarpılmanın bilgisayar benzeşim ile tahmini karşılaştırılması.....	56
Şekil 2.55. İndirgeyici atmosferde sinterleme sırasında oluşabilen çiğlenme noktası ve sıcaklık şartları	57
Şekil 2.56. Birsinterleme fırınındaki işlemler zincirinin şematik gösterimi	60

Şekil 2.57. TM ile farklı amaçlar için üretilen çeşitli parçalar	63
Şekil 2.58. TM ile üretilen çeşitli parçalar	63
Şekil 2.59. Gözenekli bakır mikro kanal soğutucu	65
Şekil 3.1. İndüksiyon akımı şematik gösterimi	70
Şekil 3.2. Çeşitli malzemelerin frekans ve sıcaklığa bağlı işleme derinliği	72
Şekil 3.3. Çelik çalışma parçasının indüksiyonla ısıtma esnasında yüzey nüfuz derinliği değişimi	72
Şekil 3.4. Metallerin sıcaklığa bağlı olarak değişen özgül direnç değerleri	73
Şekil 3.5. Metallerin çeşitli frekanslarda çalışma durumunda dış yüzey ile merkez arasında ısı değişimi	74
Şekil 3.6. B-H histerisiz eğrisi	75
Şekil 4.1. Deneysel ve Nümerik çalışma özeti	84
Şekil 4.2. Hidrolikpres ve kalıp görüntüsü	85
Şekil 4.3. 10x10x55 mm boyutlarında üretilen ham numune	85
Şekil 4.4. İndüksiyon deney cihazı	86
Şekil 4.5. PLC kontrollü konveyör bant ön görünüşü	87
Şekil 4.6. PLC kontrollü konveyör bant encoder bağlantısı	88
Şekil 4.7. PLC kontrol panosu	88
Şekil 4.8. Ön ısıtma indüksiyon cihazı	89
Şekil 4.9. 45 kHz frekanslı indüksiyon cihazı	90
Şekil 4.10. Üç nokta eğme cihazı	91
Şekil 4.11. a) ön ısıtmalı Ar. atmosferinde b) ortam atmosferinde fırında sinterlenen numune ..	91
Şekil 4.12. Fırında ve ön ısıtma yapılmamış numuneler 3 N eğme deneyi	92
Şekil 4.13. Ön ısıtma yapılan indüksiyonla sinterlenen numuneler 3 N eğme deneyi	92
Şekil 4.14. Numunelerin Brinell sertlik değerleri	93
Şekil 4.15. Sıcaklık fonksiyonlu öz direnç cihazı	94
Şekil 4.17. Parlatma işlemi yapılmış 10x10x10mm boyutlarındaki TM numuneler	95
Şekil 4.18. K0.2 kodlu numune Sem görüntüsü 5000 büyütme	96
Şekil 4.19. K0.3 kodlu numune Sem görüntüsü 2500 büyütme	96
Şekil 4.20. K0.5 kodlu numune Sem görüntüsü 5000 büyütme	97
Şekil 4.21. Ö0.3 kodlu numune Sem görüntüsü 2500 büyütme	97
Şekil 4.22. Ö0.5 kodlu numune Sem görüntüsü 2500 büyütme	98
Şekil 4.23. F2 kodlu numune Sem görüntüsü 2500 büyütme	98

Şekil 4.24. F2 kodlu numune Sem görüntüsü 1000 büyütme	99
Şekil 5.1. Üç nokta eğme-şekil değiştirme nümerik analizi.....	100
Şekil 5.2. İndüksiyonla sinterlenen TM numunelerin gerilme şekil değiştirme eğrileri.....	101
Şekil 5.3. Ö0.3 kodlu numune deneysel nümerik 3 N eğme şekil değiştirme dayanım sonuçları	101
Şekil 5.4. TM numunlerin gerçek mikroyapı sınır şartları	102
Şekil 5.5. k0.2 kodlu numune 3 N eğme nümerik analizi	102
Şekil 5.6. k0.3 kodlu numune 3 N eğme nümerik analizi	102
Şekil 5.7. k0.5 kodlu numune 3 N eğme nümerik analizi	103
Şekil 5.8. Ö0.3 kodlu numune 3 N eğme nümerik analizi	103
Şekil 5.9. Ö0.5 kodlu numune 3 N eğme nümerik analizi	104
Şekil 5.10. TM burç gerçek mikroyapı sınır şartları	105
Şekil 5.11. 30dk fırında sinterlenen tm burcun mikro yapı ve mikro gerilmesi.....	106
Şekil 5.12. 8.4 dk indüksiyonla sinterlenen tm burcun mikro yapı ve mikro gerilmesi	106
Şekil 5.13. 15 dk indüksiyonla sinterlenen tm burcun mikro yapı ve mikro gerilmesi	106
Şekil 5.14. Tm burçlar	107
Şekil 5.15. İndüksiyon ve fırın görüntüsü.....	107
Şekil 5.16. İndüksiyonla sinterlenen numuneler üzerinde oluşan ısı dağılımı	109
Şekil 5.17. Ön ısıtma bölgesi tek numune için sıcaklık dağılımı.....	110
Şekil 5.18. Ön ısıtma bölgesi tek numune için sıcaklık grafiği	110
Şekil 5.19. Ön ısıtma bölgesi tüm numuneler için sıcaklık dağılımı	111
Şekil 5.20. Ön ısıtma bölgesi tüm numuneler için sıcaklık grafiği.....	111
Şekil 5.21. Sinterleme bölgesi tek numune için sıcaklık dağılımı.....	112
Şekil 5.22. Sinterleme bölgesi tek numune için sıcaklık grafiği	112
Şekil 5.23. Sinterleme bölgesi tüm numune için sıcaklık dağılımı	113
Şekil 5.24. Sinterleme bölgesi tüm numune için sıcaklık grafiği.....	113
Şekil 5.25. TM numunelerin indüksiyonla ön ısıtma ve sinterleme bölgeleri sıcaklı-konum grafiği	114
Şekil 5.26. Ön ısıtma ve sinterleme bölgesinde oluşan manyetik alan çizgileri	115

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 1.1. Sinterlenmiş makina parçalarının özelliklerini belirlemede kullanılan faktörler	2
Çizelge 2.1. Elek açıklıkları ve bunlara bağlı toz boyutları.....	23
Çizelge 2.2. Demir, % 2 Bakır, %1 Grafit ve %1 yağlayıcı içeren parça için fırın bölgeleri, sinterleme aşamaları ve atmosfer gerksinimleri	58
Çizelge 2.3. Metal tozlarının ana uyguama alanları.....	65
Çizelge 2.4. Kuzey Amerikda 2011 ve 2012 yıllarına ait yıllık metal tozu üretimi	66
Çizelge 3.1. Çeşitli ısıtma tiplerinin güç aktarımı	70
Çizelge 3.2. Çeşitli malzemelerin frekans ve sıcaklığa bağlı değişen işleme derinliği	71
Çizelge 3.3. Bazı malzemelerdeki özgül direnç ve sıcaklık katsayı değerleri	73
Çizelge 3.4. Seçilen bazı malzemelerin izafi geçirgenlik değerleri.....	76
Çizelge 4.1. TM numunelerin kodları ve uygulanan işlemler	86
Çizelge 4.2. ASC 100.29 demir tozunun kimyasal, fiziksel özellikleri ve elek analizi	87
Çizelge 4.3. ASC 100.29 TM numuneleri özdirenç-sıcaklık değerleri	95
Çizelge 5.1. ASC 100.29 TM numunelerin yoğunluk, gözenek miktarı, Elastisite modülü, mikro gerilme analizi sonuçları.....	102
Çizelge 5.2. TM burçların termal genleşme katsayısı ve uygulanan yük	107
Çizelge 5.3. TM burçların gözenek çevresinde oluşan en yüksek ve en düşük gerilme değerleri, yoğunluk, gözeneklilik miktarı ve elastisite modülleri	108
Çizelge 5.4. Hesaplamalarda kullanılan parametreler	115

KISALTMALAR LİSTESİ

AC	Alternatif Akım
B-Y	Buharlaşma-Yoğuşma
CTE	Termal Genleşme Katsayısı
FE	Sonlu Eleman
FEM	Sonlu Eleman Modeli
HMK	Hacim Merkezli Kübik
HIP	Sıcak İzostatik Presleme
HRC	Rocwell Sertlik Değeri
HY	Hacim Yayınımı
MIM	Metal Enjeksiyon Kalıplama
MMC	Metal Matriksli Kompozit
PA	Plastik Akış
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
TM	Toz Metalurjisi
TMA	Termomekanik Analiz Cihazı
XMT	X ışını mikro tomografi
XRD	X Işını Kırınım Cihazı
YMK	Yüzey Merkezli Kübik
YY	Yüzey Yayınımı

TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarımın sonuca ulaştırılmasında ve karşılaşılan güçlüklerin aşılmasında yön gösterici olan ve her zaman büyük yardım ve desteğini gördüğüm değerli Danışman Hocam Prof. Dr. Enver ATİK' e saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca hiçbir zaman desteğini esirgemeyen Doç. Dr. Sinan KÖKSAL ve değerli müdürüm Doç. Dr. Harun ÇOBAN hocalarıma teşekkürü bir borç bilirim. DEÜ Malzeme ve Metalurji Bölümündeki çalışmalarım sırasında desteğini esirgemeyen Doç. Dr. Mustafa TOPARLI hocama teşekkür ederim.

Malzeme temininde yardımcı olan Sentas-bir A.Ş. firmasına ve Kalite Kontrol ve Ar-Ge Mühendisi Samet YILMAZ' a, ayrıca 2013-040 numaralı projelerimize verdikleri desteklerden dolayı CBÜ BAP Komisyonu'na teşekkürlerimi sunarım.

Çalışma arkadaşlarım olan Arş. Gör. Can ÇİVİ, Öğr. Gör. Yasin AYDIN, Öğr. Gör. Dr. M. Bahattin AKGÜL ve Öğr. Gör. Serhat FİLİZ' e teşekkürü borç bilirim.

Çalışmalarım sırasında bana destek olan iş arkadaşlarım ve oda arkadaşım Öğr. Gör. Cüneyt KARA' ya teşekkür ederim.

Her zaman maddi ve manevi olarak destekleyen aileme ve çalışmalarımda her zaman yardımcı ve destek olan eşime teşekkürü bir borç bilirim.

ÖZET

TOZ METAL PARÇALARIN İNDÜKSİYONLA SİNERLEME PROSESİNİN DENEYSEL VE TEORİK OLARAK MODELLENMESİ

Bu tez çalışmasında, demir esaslı toz metal parçaların indüksiyonla sinterleme işlemi deneysel ve teorik olarak incelenmiştir. Çalışma kapsamında %3 Cu, % 0,5 Grafit ve yağlayıcı olarak %0,8 Kenolube içeren Höpfer ASC 100.29 demir tozu kullanılmıştır. Ön ısıtma, sinterleme süresi, konveyör bant hızı ve kademeli soğumanın, indüksiyonla sinterlemeye etkileri ve bu sinterleme parametrelerinin numunelerin mekanik özelliklerine etkileri deneysel ve nümerik olarak araştırılmıştır.

Toz metal malzemelerin iç yapılarındaki gözenekliliğe bağlı mikro-mekanik özelliklerinin deneysel olarak saptanması oldukça güçtür. Bu özellikleri araştırmak amacıyla numunelerin SEM BEC modundaki iç yapı fotoğrafları görüntü işleme yöntemi kullanılarak gerçek mikro yapı görüntülerinin nümerik analizleri yapılmıştır. Toz metallerin sinterleme parametrelerinin değişimi mikro yapıyı ve dolayısıyla mekanik ve mikro mekanik özelliklerini oldukça etkilediği görülmüştür. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, endüstriyel toz metal parçalarda, indüksiyonla sinterlemede kontrollü iç yapı oluşumu sağlanarak üstün mekanik ve fiziksel özelliklerin elde edilebileceği görülmüştür.

İndüksiyonla sinterlemede malzemeler üzerindeki ısı kontrolü oldukça güçtür. Çalışmada, indüksiyonla ayarlanabilir düşük-orta (2,5-5 kHz) frekansta ön ısıtma işlemi denenmiştir. Bununla birlikte, indüksiyonla ısıtma işlemi nümerik olarak modellenerek numuneler içerisinde oluşan ısı dağılım grafikleri çıkarılarak, deneysel verilerle aktarılmıştır. İndüksiyonla sinterlenen numunelere; 10 Amper akım değerinde, düşük frekansta (2,5 kHz), 600 °C derecede, 5 Kw gücünde ön ısıtma ve 17.5 Amper akım değerinde orta frekansta (45 kHz) 1120 °C derecede, 12 Kw gücünde, Argon gazı atmosferinde sinterleme işlemi uygulanarak numuneler üzerindeki ısı şok engellenmiş ve üstün fiziksel ve mekanik özellikler sağlanmıştır.

İndüksiyonla sinterlemede geliştirilen PLC kontrollü konveyör bant ile optimum ısınma şartları gerçekleştirilmiştir. Hızı kontrol edilebilen konveyör bant ile seri üretime uygun bir sistem tasarlanmıştır. İndüksiyonla sinterleme ile 10x10x55 mm boyutlarındaki numuneye göre en uygun sinterleme konveyör hızı saptanmıştır. Deneysel ve nümerik sonuçlara göre en uygun sinterleme parametreleri elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Toz Metalurjisi, İndüksiyon ile Sinterleme, Görüntü İşleme Analizi

ABSTRACT

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL MODELING OF INDUCTION SINTERING PROCESS OF POWDER METAL PARTS

In this study, induction of iron-based powder metal parts sintering process were investigated experimentally and theoretically. In the working used Högenas ASC 100.29 iron powder containing 3% Cu, 0.5% graphite and lubricant 0.8% Kenolube. Pre-heating, sintering time, the conveyor belt speed and gradually cooling, induction sintering and sintering parameters of the effects of macro-and micro size effects on mechanical properties of the samples were investigated experimentally and numerically.

Powder materials micro-mechanical properties is very difficult to determine experimentally of depending on the inner porosity. Because of searching this features, photos of the internal structure of the samples using the method of image processing, obtained real microstructure images were numerical analyzed. The sintering parameters changes is greatly affected the micro and the macro mechanical properties. Obtained the results, in the industrial powder metal parts, induction sintering controlled by providing superior mechanical and physical properties was obtained of the internal structure.

Induction is very difficult to control the heat of materials. In the study, adjustable medium-low (2.5-5 kHz) frequencies induction pre-heating process were tested. Besides, induction heating process, the heat generated in the samples scatter graphs were modeled numerically and tried to get the most accurate results with the experimental data transferred. Induction sintered samples, preheating with 5 Kw power, 10 Amp. current value, a low frequency (2.5 kHz), 600 °C and also, sintering process with 12 Kw power, 17.5 Amp. current value of medium frequency (45 kHz), 1120 °C on the argon gas atmosphere, the samples by applying superior physical and mechanical properties and thermal shock has been blocked.

PLC-controlled conveyor belt for optimum induction heating sintering conditions were developed. Speed of the conveyor belt can be controlled with a system that is designed for mass production. With the induction sintering sintering, dimensions of 10x10x55 mm specimen was found the most suitable sintering conveyor speed. The appropriate sintering parameters were obtained by experimental and numerical results.

Keywords: Powder Metallurgy, Induction Sintering, Image Processing Analysis.

1. GİRİŞ

Toz metalurjisi (TM), çeşitli metal işleme teknolojileri arasında en farklı üretim tekniğidir. Yüksek kaliteli ve karmaşık parçaların ekonomik olarak üretilebilmesi, toz metalurjisini cazip kılmaktadır. TM farklı boyut, şekil ve paketlenme özelliğine sahip metal tozlarını sağlam, hassas ve yüksek performanslı parçalara dönüştürür. Bu işlem; şekillendirme veya presleme ve daha sonra parçacıkların sinterleme yolu ile ısıtılma ve bağlanması basamaklarını içerir. TM nispeten düşük enerji tüketimine, yüksek malzeme kullanımına ve düşük maliyete sahip otomatikleşmiş işlemleri verimli kullanır. Sahip olunan bu özellikler ile TM verimlilik, enerji ve hammadde gibi günümüz kaygılarını ortadan kaldırır (İnt. Kay. 1).

Bunların sonucu olarak, TM konusu sürekli gelişmekte ve geleneksel metal şekillendirme operasyonlarının yerini almaktadır. TM' nin uygulamaları oldukça geniştir; Dört tekerlekten çekiş tork transfer sistemi için karmaşık planet taşıyıcı, dişli ve laparoskopik cerrahi makası, paslanmaz çelik bıçaklar, petrol platformunda kullanılan 6.5 ton ağırlığında offshore manifoldu, V-8 motorda kullanılan çelik bağlantı çubuğu, Tungsten lamba filamentleri, dişli çarklar, yağlamasız yataklar, elektrik kontaktları, nükleer güç yakıt elemanları, ortopedik gereçler, ofis makineleri parçaları, yüksek sıcaklık filtreleri, uçak fren balataları, akü elemanları jet motor parçaları ve mikro işlemcilerin soğutma işlemlerinde kullanılan sinterlenmiş bakır kanal metal tozlarından üretilen parçalara örnek olarak verilebilir. Ayrıca, metal tozları boyalar, gözenekli betonlar, basılmış devre levhaları, zenginleştirilmiş un, patlayıcılar, kaynak elektrotları, roket yakıtları, baskı mürekkepleri, lehimleme aletleri ve katalizörlerin üretilmesinde de kullanılmaktadır (İnt. Kay. 1 ve 2).

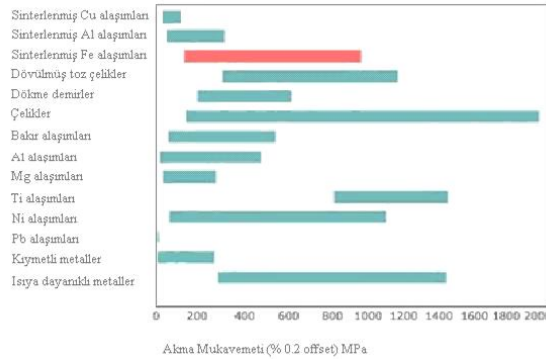
Süreç 100'den fazla yıldır var olmasına rağmen, geçtiğimiz çeyrek yüzyıl boyunca önemli uygulamalar için çeşitli yüksek kaliteli parçalar üretiminde yaygın olarak kullanılmıştır. Bu başarı süreci, dövme, döküm ve diğer metal şekillendirme teknolojileri arasında, malzeme kullanımı, şekil karmaşıklığı, yakın-net-şekli, boyut kontrolü gibi sağladığı avantajlardan kaynaklanmaktadır. Bu da, TM tanınmış yeşil bir teknoloji yapmaya katkı sağlamıştır. Son yıllarda Toz Metalurjisi (TM) yöntemi ile üretilen parça sayısında ve parça çeşidinde artışlar olmuştur. Özellikle yüksek mukavemet ve yeterli tokluk değerlerine sahip TM parçaların üretilebilir duruma gelmesi bu konudaki çalışmalara ağırlık verilmesine neden olmaktadır. TM parçaların üretiminden sonra herhangi bir ek işleme gerek duyulmaması ve tam yoğun parçalara uygulanan tüm ısıtılma ve mekanik yüzey işlemlerinin uygulanabilirliği çok önemli gelişmelere neden olmaktadır. Özellikle dünyadaki otomobil üretimindeki artışlara paralel olarak TM parçaların üretim miktarında da artışlar yaşanmaktadır. Son yıllarda otomobil üretici firmaların TM yöntemi ile üretilmiş parça ağırlığının otomobil başına 15 kg mertebesine yükseltilmiş olmasını çok önemli görmektedirler (Demir ve Sarıtaş,1993). TM yarı-yoğun ve

tamamen yoğun bileşenlerin imal edilmesi için çeşitli teknolojiler içermektedir. Malzemelerin çalışma şartlarına göre farklı süreçler takip edilmektedir. Sinterleme olarak adlandırılan süreç, planet taşıyıcısı üretmek için kullanılır, bağlantı çubuğu dövme tozu kullanılarak üretilir iken cerrahi makas parçaları metal enjeksiyon kalıplama (MIM) yöntemiyle üretilir, manifold ise (HIP) presleme sıcak izostatik presleme ile üretilmiştir. Ayrıca günümüz TM teknolojisi ile Sermetler, intermetalik bileşikler, metal matriksli kompozitler, nano yapıli malzemeler, yüksek hız çelikleri de üretilmektedir (İnt. Kay. 2). Sinterlenmiş malzemelerin özellikleri bir çok faktöre bağlıdır ve özel talepleri karşılamak için optimize edilebilir. Belirli bir uygulama için bir malzeme seçiminde, kimyasal bileşim ve parçaların yoğunluğu dikkate alınması gereken önemli faktörlerdir. Kimyasal bileşim ve mekanik özellikler sinterlenmiş makina parçalarının özelliklerini belirlemede yaygınca kullanılan faktörlerdendir. Bazı örnekler aşağıda verilmiştir (İnt. Kay. 1).

Çizelge 1.1. Sinterlenmiş Makina Parçalarının Özelliklerini Belirlemede Kullanılan Faktörler (İnt. Kay. 1)

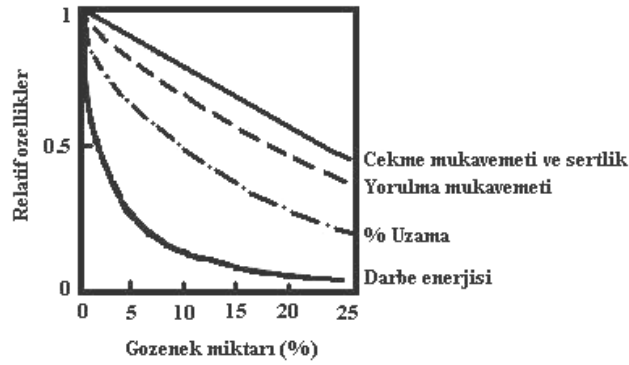
Kimyasal bileşim	Mekanik özellikler
Fe	Sertlik
Fe-Cu	Yoğunluk
Fe-Cu-C	Çekme ve akma mukavemeti
Fe-Ni-Cu-Mo-C	Çapraz kırılma mukavemeti
Fe-P	Young modülü
Fe-P-C	Young modülü

TM malzemelerin mekanik özellikleri gözeneklerin varlığından dolayı düşer. Çekme mukavemeti ve sertlik gözenek miktarı ile doğrusal olarak düşerken, % uzama ve darbe enerjisi eğrisel olarak düşerler. Mekanik özellikler ya zorunlu değerler veya tipik değerler olarak verilirler. Sinterlenmiş malzemelerin döküm-dövme malzemeler ile karşılaştırılması ve değişik malzemelerin akma mukavemetleri ve gözeneklilik miktarının relatif özelliklerdeki değişim grafiği Şekil 1.1 ve Şekil 1.2. de verilmiştir.



Şekil 1.1. Değişik Malzemelerin Akma Mukavemeti (İnt. Kay. 1)

Daha otuz yıl öncesine kadar TM denilince gözenek miktarı fazla, yoğunluğu düşük, gevrek malzemeler akla gelirken, bugün TM çok kompleks parçaları çok hızlı ve çok daha ucuza üretmeyi sağlayan bir üretim yöntemi olarak endüstrideki yerini almıştır (Saritaş, 1999). TM, parçaların mekanik özellikleri kalıcı gözenek miktarına, dağılımına, gözenek tipine, büyüklüğüne ve şekline bağlıdır. TM parçalarda gözenek miktarı düştükçe yorulma dayanımının yanı sıra diğer bütün mekanik özellikler de iyileşmektedir. Bu genelleme kabaca kabul görürken iyileşme oranının hangi parça yoğunluğu değerleri üzerinde önem kazandığı tam açık değildir. Ancak düşük parça yoğunluklarında toplam gözeneklilik miktarı ana faktör olarak gözlenirken, yüksek yoğunluklarda gözenek boyutu, şekli ve dağılımı ile birlikte matris malzeme mikro yapısı daha önemli faktörler olarak önem kazanmaktadır.



Şekil 1.2. Gözenek Miktarı-Relatif Özellikler (İnt. Kay. 1)

Toz metalurjisi yöntemleri ile üretilen kalıcı gözenekli sıradan makine parçalarının toklukları yeteri seviyede olmadıkları gibi mukavemetleri de ancak döküm malzemelerin mukavemet değerleri mertebesinde olabilmektedir. Bundan dolayı makine parçası olarak kullanıldıklarında çelikler kadar dayanıma sahip olmamaktadırlar. Özellikle yorulma yüklemeleri durumunda daha da önem yitirmelerinden dolayı TM üretilmiş parçaların yorulma dayanımlarının artırılması için yoğunlukta önemli bir artış meydana getirmeden nitrürasyon, karbonitrürasyon, su verme-temperleme gibi ısı işlemlerinin yanında bilyeli dövme, soğuk haddeleme gibi mekanik yüzey işlemlerinin uygulanmasıyla yorulma özelliklerinin iyileştirilmesine çalışılmaktadır (Saritaş, 1999).

Sinterlenmiş parçaların yoğunluğunu veya boyutsal hassasiyetini arttırmak amacıyla yeniden presleme uygulanabilir. İstenirse yeniden presleme sonrasında sinterleme işlemi tekrarlanarak hem presleme sırasında oluşan artık gerilmeler giderilir, hem de yayınma bağı kuvvetlendirilir. Bazı durumlarda sinterlenmiş parçalara plastik şekil verme yöntemleri de uygulanabilir. Toz metalurjisi ile üretilen parçaların büyük kısmında elde edilen boyutsal hassasiyet ve yüzey kalitesi talaşlı işlem gibi ilave işlemlere olan ihtiyacı ortadan kaldırmaktadır (Aran, 1987).

Bilindiği üzere, bulk malzemelerin iç yapısı ile toz metal malzemelerin iç yapıları ve mekanik özellikleri birbirinden oldukça farklıdır. Toz metallerin, indüksiyonla sinterleme parametrelerinin değişimine göre mikro yapısının değişimi ve dolayısıyla mekanik özelliklerini belirlemede oldukça önemli rol oynar. Literatürde bu konu üzerine yapılan çalışmalarda:

Can ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada demir esaslı toz metal parçaları orta frekanslı indüksiyon sinterleme mekanizması sinterlemişlerdir ve mekanik özelliklerin güvenilirliğini araştırmışlardır. Bileşenlerin mekanik özellik değerlerini, değişen sinterleme zamanına göre belirlemişlerdir ve üç nokta eğme ,maksimum gerilme, Microvickers sertlik (HV) ve Rockwell-B sertlik testlerini uygulanmıştır. Deneylerin bir sonucu olarak, Microvickers sertliğinin toz metal malzeme sertliği için güvenilir olmadığı sonucuna varılmıştır (Çivi ve diğerleri, 2014).

Can ve arkadaşları yaptıkları diğer bir çalışmada, toz metal parçaların fırında ve farklı sürelerde indüksiyonla sinterlenmesinin mekanik özelliklere etkisini araştırmışlardır. Çalışmalarında, %3 Cu, % 0,5 Grafit ve yağlayıcı olarak %0,8 Kenolube içeren Högenas ASC 100.29 demir tozu kullanılmıştır. Numuneler, karşılaştırma amacı ile elektrik direnç fırınında 30 dakika klasik yöntemle ve indüksiyonla sinterleme düzeneğinde 8,33 ve 15 dakika sürelerle 1120 °C' de sinterlenmiştir. İndüksiyonla 8,33 dakika sinterleme ile 30 dakika klasik sinterlemede elde edilen maksimum mukavemet ve çökme miktarlarından daha yüksek değerler elde edilmiştir. İndüksiyonla sinterleme süresi arttıkça bu değerlerin de arttığı belirlenmiştir. Mikro yapı incelemelerinde, klasik sinterlemeye benzer şekilde indüksiyonla sinterleme süresi arttıkça bakırın demir tozları arasında ve etrafında daha fazla ergidiği belirlenmiştir (Çivi ve Atik, 2012, Çivi, 2011).

Uğur tarafından yapılan çalışmada, Demir, ağırlıkça %3 bakır+demir ve ağırlıkça %3 bronz+demir tozlarından oluşan numuneler 5 Kw gücünde 25 kHz frekanslı ve 12 Kw gücünde 30 kHz frekanslı indüksiyon cihazlarıyla sinterlenmiştir. Demir esaslı toz metal numunelerin geleneksel sinterlemeyle 1120°C sıcaklıkta 30 dakika sinterleme süresiyle ulaşılan üç nokta eğme dayanım değerlerine, indüksiyonla sinterlemede aynı sıcaklıkta 8,33 dakikada (500 saniye) ulaşılmıştır (Çavdar, 2009).

Hwan ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, yüksek frekanslı indüksiyonla sinterleme sistemi ve 60 MPa basıncın aynı anda uygulanması ile nano WC-15vol.% Co sert metalini bir dakika gibi kısa bir sürede üretmişlerdir. Sonuç olarak, üretilen sert metalde % 99.4 kadar bir bağıl yoğunluk, 258 nm ortalama tane büyüklüğü, 11.9 MPa kırılma tokluğu ve 1992 HV sertlik değeri elde etmişlerdir (Kim et al, 2004).

Wonbaek ve arkadaşları, ticari TiC0.5N0.5 tozunu kullanarak, değişik sürelerde yüksek frekanslı indüksiyonla sinterleme yöntemi kullanarak nano yapılu yoğun bir malzeme üretmişlerdir. Öğütme işleminin, kristal boyutuna, sinterleme davranışına ve mekanik özelliklere etkisini araştırmışlardır. % 98 bağıl yoğunluğu olan bir nanoyapılı TiCN malzemesi 3 dakika içerisinde elde edilmiştir. 10 saat boyunca öğütme işleminin, sinterleme sıcaklığını önemli

ölçüde azalttığı görülmüştür. Öğütme süresinin artışının, yoğunluğu arttırdığı bulunmuştur. Ayrıca, malzemenin kristal boyutunun değişiminin, sertlik ve yoğunluğu ile orantılı değiştiği tespit edilmiştir (Kim et al, 2013).

Na-Ra ve arkadaşları, yüksek frekanslı indüksiyonla sinterleme ile nano kristal Al_2O_3 takviyeli Ni-Fe kompozit malzemesini mekanik alaşımlama ile üretmişlerdir. Nano kristal tozlar $5Ni0.6Fe0.4-Al_2O_3$ kompoziti yüksek frekanslı indüksiyon ısıtılmalı sinterleme ile 2 dakika içinde mekanik alaşımlandırılmıştır. Ortalama tane büyüklüğü ve mekanik özellikleri incelenmiştir (Park et al, 2009).

Xu ve arkadaşları, sinterleme aşamalarında nano boyutlu WC tane büyümesi sıcaklık ve zamanın bir fonksiyonu olarak incelemiştir. İlk tane boyutu, kobalt içeriği ve tane büyümesi inhibitörü gibi diğer faktörlerin etkileri araştırılmıştır ve ısıtma sırasında WC tanelerinin morfolojisi ve evrimi yüksek çözünürlüklü taramalı elektron mikroskobu kullanılarak incelenmiştir. Sonuçlarda, ilk aşamada hızlı bir tane büyüme sürecine olduğu saptanmıştır. izotermal ısınma sırasında ise genellikle normal tane büyümesi gösterdiği görülmüştür. Bileşim içindeki WC tanelerinin, hızlı tane büyümesini olumlu olarak etkilediği görülmüştür (Wang et al, 2008).

Montasser tarafından yapılan çalışmada, yüksek frekans indüksiyon ısıtma sinterleme yöntemi kullanılarak metal ve seramik tozu içeren yüksek yoğunluklu ve biyouyumlu Ti-6Al-4V / W kompozit malzemesi üretilmiştir. Ti-6Al-4V alaşımına % 2.5, %5 ve %10 Tungsten eklenerek modifiye edilmiştir. Ti-6Al-4V / W yüksek enerjili mekanik öğütme ile hazırlanmıştır. Yüksek frekanslı indüksiyon sinterleme tekniğinin kullanımı nispeten düşük sıcaklıklarda kısa zamanda yaklaşık tam yoğunluk sağlamıştır. Sinterleme sıcaklığı ve uygulanan basınç gibi farklı işlem parametreleri araştırılmıştır. Elde edilen bileşiklerin, yoğunlukları, tane boyutu morfolojileri, sertlikleri ve gözenek dağılımları açısından karakterize edilmiştir. Ti-6Al-4V / W bileşiği, % 98.8 aşan yoğunluklarda üretilmiştir. En yüksek dayanım gücünü sinterleme sıcaklığı 1000 ° C olan ve % 5 W içeren numunelerde elde edilmiştir. En yüksek sertlik değeri ise, 1100 ° C 'de sinterlenen ve % 10 W içeren numunede 45 HRC olarak bulunmuştur (Dewidar, 2010).

Baolong ve arkadaşları, mekanik öğütülmüş toz Mg-Cu-Gd metalik malzemenin, plazma sinterleme üzerinde yüksek basınç etkisini araştırmışlardır. $Mg_{65}Cu_{25}Gd_{10}$ malzemesini 500 MPa basınç altında ve farklı sinterleme sıcaklıklarında (443, 433 ve 423 °K) mekanik davranışlarını incelenmiştir. Mikro yapı özellikleri SEM ve XRD analizleri ile edilmiştir. Sonuç olarak plazma sinterleme sırasında yüksek basınç uygulanması ile, amorf faz yüzeyleri arasına yapışan oksitleri gidermiştir ve toz gevşemelerini önlemiştir. Plazma sinterleme sırasında, toz paketleme yoğunluğu, lokal ısınma ve sıcaklık dağılımını araştırmak ve açıklamak için COMSOL yazılımı ile sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Sonuç olarak, daha yüksek bir toz paketleme yoğunluğu ile daha düzgün bir sıcaklık dağılımı olduğu gözlemlenmiştir (Zheng et al, 2013).

Drobenko ve arkadaşları, çelik bir silindirin, indüksiyonla ısıtılmasında matematiksel bir simülasyon yapmışlardır. İşlem parametrelerini, malzeme özelliklerinin sıcaklığa bağımlılığı ile tanımlanmıştır ve problem sonlu elemanlar yöntemi ile çözülmüştür. Sonuç olarak, malzemenin elektrik ve manyetik özelliklerinin indüksiyonla ısınma sıcaklığına etki ettiği görülmüştür. Ayrıca kullanılan çelik malzeme için, bazı kriterlere göre, optimum indüksiyonla sinterleme parametreleri olabileceği bulunmuştur. İndüksiyon ısıtma parametrelerinin, elektriksel iletken olan malzemeler için geliştirilerek, özellikle ısıtma homojenliği sağlanarak, güç giderlerinin en aza indirilmesi, kalıntı gerilmelerin azaltılmasının sağlanabileceği görülmüştür (Drobenko et al, 2007).

Kranjc ve arkadaşları, indüksiyon ısıtma işlemini nümerik ve deneysel olarak incelenmiştir. Silindirik şekilli çelik parçasının, farklı ısıtma parametreleri ile ısıtılmıştır. Elektromanyetik ve termofiziksel olaylar sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak çözülmüştür. Sıcaklığa bağımlı ve bağımsız çelik malzeme özelliklerinin, simülasyon sonuçları üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Aynı zamanda simülasyon sonuçları, termografik bir algoritma kullanarak deneysel ölçümler ile karşılaştırılmıştır. Uyumlu deneysel ve nümerik sonuçlar elde edilmiştir. Sıcaklık dağılımlarını gözlemek için, termal kamera ve termokuplun uygun olduğu gözlemlenmiştir (Matej et al, 2010).

Sadeghipour ve arkadaşları, bir çeliğin yüksek frekansta indüksiyonla ısıtma sürecini deneysel ve nümerik olarak araştırmışlardır. Yaptıkları çalışmada ısıtma sırasında yüksek frekans kullanımı (40-200 kHz), karmaşık bir döngü optimizasyonu sağladığı için nümerik analizlerden faydalanılmıştır. İndüksiyonla ısıtmada manyetik ve termal döngüler hesaplanmıştır. Manyetik ve termal özelliklere ısıtma süresinin etkisi incelenmiştir. Nümerik modellerden penetrasyon derinlikleri ve sıcaklık dağılımları hesap edilip tartışılmıştır. Uyumlu deneysel ve nümerik sonuçlar elde edilmiştir (Sadeghipour et al, 1996).

Michailidis ve arkadaşları, mekanik yükleme yapılan gözenekli metal köpük malzemenin mekanik özelliklerini deneysel ve nümerik olarak incelemişlerdir. İki farklı yaklaşımlar sırasıyla incelendiğinde Ni ve Al gözenekli malzemenin 3 boyutlu iç yapı görüntülerini elde etmek için X-ışını bilgisayarlı tomografi ve seri kesit görüntü olmak üzere iki farklı yaklaşım kullanmışlardır. Gözenekli malzemenin mekanik özelliklerini, mikro-gerilme sonuçlarını ve mikro deformasyonlarını elde edebilmek için SEM elektron mikroskobu görüntüleri kullanılmıştır. Sonuçlarda, gözenekli hücresel yapıların mekanik davranışlarının, kendi iç yapısı tarafından yönetildiği saptanmıştır. Deneysel ve FEM simülasyonları sonuçları, von Mises lokal gerilme ve gerinimlerin malzemenin iç yapısındaki gözenek boyutu, dağılımı ve yönüne bağlı olarak değiştiği görülmüştür (Michailidis et al, 2011).

Veyhl ve arkadaşları, hücresel alüminyumun mekanik özelliklerini, mikro-tomografi görüntülerini kullanarak sonlu elemanlar analizi ile incelemişlerdir. Makroskopik mekanik özellikleri açık hücreli (91-93%) ve kapalı hücreli köpük (80-86%) için incelenmiştir. Bu hücresel

materyallerin karmaşık geometrilerini elde etmek için mikro-bilgisayarlı tomografi ile taranan ve sonlu elemanlar (FE) analizi kullanılmıştır. Dikey olarak tek eksenli yükleme simülasyonları ile x, y ve z doğrultusunda Mekanik özellikleri belirlenmiştir. Her iki durumda da, anizotropi, Young modülü değişimleri gözlenmektedir. Ayrıca, bağıl yoğunluk ve mekanik özellikleri arasında doğrusal bir bağımlılık bulunmuştur (Veyhl et al, 2011).

Xiaoqiang ve arkadaşları, demir bazlı tozların plazma sinterlenmesinde 0 ila 3.93MA.m⁻¹ aralığında değişen manyetik alan tetikleme etkisinin, mikro yapıya ve mekanik özelliklere etkisini incelemişlerdir. Sonuçlarda, darbeli bir manyetik alan ile numune kesiti üzerindeki daha düzgün bir sıcaklık dağılımı bağlantısı olduğunu görülmüştür. Uygun tetiklemeli bir manyetik alan ile sinterlenmiş numuneler de, 7.75 g/cm³ yoğunluk, 55 HRC sertlik ve 1235 MPa eğilme mukavemet değeri elde edilmiştir. Manyetik alan tetiklemesinin artırılmasıyla sinterleme yoğunluğunda dikkate alınır bir değişim olmamasına rağmen, numunenin sertliği ve eğilme dayanımı azalmıştır. Plazma sinterlemede tetiklemeli manyetik alan elektrik alanı ile ilişkilendirilerek, tozlar arasında kıvılcım yoğunlaştırmak, tozlar yeniden düzenlenmesi kolaylaştırmak, sinterleme sıcaklığı yükselterek alaşım elementlerinin difüzyon ve reaksiyonlarını hızlandırmak, yeni boyun oluşumu, büyüme, gelişimini sağlamak ve kesit üzerinde uygun bir sinterleme sıcaklık gradyanı sağlanabilmesi amaçlanmıştır (Li et al, 2010).

Chawla ve Deng, sinterlenmiş gözenekli mikro yapıya sahip Fe-Ni-0.85Mo çeliğinin, mekanik özelliklerini deneysel ve nümerik olarak incelemiştir. Tozlar 90 dakika 1120 ° C 'de N-10% H₂ atmosferinde sinterlenmiştir. 7.0 g/cm³, 7.4 g/cm³ ve 7.5 g/cm³ olmak üzere 3 farklı yoğunlukta numune üretilmiştir. Mikro yapıdaki gözenek şekli, boyutu ve dağılımının çekme ve kırılma mukavemeti üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Gözenek miktarının azalışı ile, çekme dayanımı, kırılma dayanımı ve Young modülünü artırmıştır. Gözenek miktarının artışı Young modülünü düşürdüğü analitik çözüm ile gösterilmiştir. Mikro yapının 2 boyutlu sonlu elemanlar çözümü sonuçlarında, çeliğin yoğunluğunun artışının çekme ve kırılma dayanımını artırdığı ve daha küçük, daha küresel ve homojen dağılmış gözeneklerin çeliğin mikro yapısında daha homojen deformasyon ve lokal mikro gerilmeleri azalttığı gözlemlenmiştir. Gözenek boyutu morfolojisi, TM çeliklerin mekanik davranışı ve kırık yüzeylerinde dağılım etkileri tartışılmıştır (Chawla and Deng, 2005).

Roberto ve arkadaşları, tanecikli malzeme analizi için, X-ışını mikro tomografi (XMT) yöntemini bilgisayar simülasyonu oluşturmuşlardır. Fiziksel ya da geometrik parametreleri kullanarak, 3D XMT dijital görüntülerin doğrudan kullanımı veya değişimine dayalı iki ana yöntem karşılaştırılmıştır. Uygulamaları örnekleri kayalar, parçacık ambalaj, mekanik yükleme taşıma özellikleri ve sinterleme için gösterilmiştir. Bu çalışma özetle, gözenekli ve taneli malzemelerin davranışını araştırmak için XMT ve bilgisayar simülasyonları kombinasyonu kullanmanın yararlarını ön plana çıkarmak ve bir kriter kurmak için yapılmıştır. Ayrıca, mikro

tomografi analizleri elde edilen bilgileri optimize etmek, daha sağlam ve nicel bir yaklaşım sağlamak için yapılmıştır (Moreno-Atanasio et al, 2010).

Veljovića ve arkadaşları, HAP tabanlı gözenekli biyoseramiklerin, gözeneklerin şekli ve boyutunun mekanik özelliklere etkisini araştırmışlardır. Gözenekli biyoseramikler, küresel kalsiyum hidroksiapatit tozunun hidrotermal sentezi ile elde edilmiştir. Sinterleme sıcaklığı 1100°C den 1250°C artırılması ile, gözenek sayısı azalmış ve küresel gözeneklerin miktarı arttığı görülmüştür. Gözeneklerin şeklinin ısı işlem ile değiştirilebileceği anlaşılmıştır. Büyük gözenekler, şekil olarak daha küresel olduğu görüntü işleme analizi ile kanıtlanmıştır. Üç-boyutlu, sonlu eleman birim hücre modeli, biyoseramik malzemenin, mekanik özelliklerine gözenek şeklinin etkisini değerlendirmek için uygulanmıştır. Sonlu elemanlar analizi küre benzeri gözeneklerin, küresel olmayan gözenek şekillere göre daha iyi mukavemet özelliklerine sahip olduğunu doğrulamıştır. Sinterlenmiş gözenekli HAP biyoseramiklerin kırılma tokluğu için gözenek şekilleri analiz edilerek, daha küresel gözeneklerin artışının kırılma tokluğunu artırdığı görülmüştür. 1250°C' de 2 saat sinterleme işleminden sonra, olarak biyoseramikler için nispeten yüksek bir kırılma tokluk değeri elde edilmiş olup, $1.31 \text{ MPa m}^{1/2}$ değerindedir. Biyoseramiklerin kırılma dayanıklılığı doğrudan gözeneklilik türü ile ilgili olduğu anlaşılmıştır (Veljovića et al, 2011).

Chawla ve arkadaşları yaptıkları bir diğer çalışmada, %10, %20 ve %30 SiC takviyeli 2080 alüminyum alaşımının termal genişlemesini görüntü işleme ve sonlu elemanlar yöntemi ile incelemişlerdir. Isıl genleşme davranışı metal matriks kompozitler (MMK) önemli bir fiziksel özelliktir. Ekstrüde Al / SiC için kompozitler, kalıptan çekme doğrultusuna göre, tanecik yönü ve bir termal genleşme (CTE) katsayısı üzerinde önemli etkileri vardır. Bu çalışmada, ekstrüde SiC takviyeli 2080 Al kompoziti termal genleşme katsayısı, bir termo mekanik analiz cihazı (TMA) kullanarak ölçülmüştür. SiC parçacıkların anizotropik dağılımı Al / SiC kompozitinin anizotropik termal davranışını belirlediği bulunmuştur. Aynı SiC içeriği için, kısa enine yönde olan numuneler (kalıptan çekme eksenine dik), uzunlamasına yönde (çekme eksenine paralel) olanlardan daha yüksek termal genleşme katsayısı göstermiştir. Al / SiC gerçek mikro dayalı sonlu elemanlar modelleme ile (FEM), kompozitlerin, termal davranışları simüle edilmiştir. Kompozitin CTE için deney sonuçları iki boyutlu bir sayısal modeller tarafından tahmin edilen değerler ile çok iyi bir korelasyon göstermiştir. Kompozitlerin FEM sonuçları SiC parçacıkların yönünü değişiminin malzemenin anizotropik termal davranışını ve iç stres değiştirdiğini göstermiştir. Çeşitli analitik modellerin Deneysel sonuçları ve FEM sonuçları karşılaştırılmıştır (Chawla et al, 2006).

Peng ve Fuguo, partikül destekli metal matriksli kompozitlerin, partikül özelliklerinin deformasyon üzerine etkisini görüntü işleme ve sonlu elemanlar yöntemi ile araştırmışlardır. Metal matriks kompozit (MMC) % 15 SiC takviyeli parçacıklarının, parçacık özellikleri istatistiksel bir yöntem kullanılarak çalışılmıştır. Analizde, parçacıkların özellikleri tahmin edebilmek için bir

yaklaşım sunulmuştur. Her parçacığın alan ve çevresini hesaplayabilmek için Matlab yazılımı kullanılarak görüntü işleme tekniği uygulanmıştır. Hesaplamalara göre, her parçacığın boyut ve şekil faktörleri sırasıyla incelenmiştir. Ayrıca, sonlu elemanlar modeli (FEM), gerçek mikro yapıları üzerinde, Metal matriks içerisindeki von Mises gerilim ve gerinim değerleri MMC' in mikro deformasyon davranışı üzerinde etkisi hesaplamalarda sunulmuştur. Ayrıca, mikro yapı içerisinde, parçacıkların maksimum stres haritaları ve maksimum plastik deformasyon değerleri sunulmuştur. Görüntü işleme tekniği vasıtasıyla, SiC parçacık boyutları 3-18 mikron genişlik aralığında dalgalanma gösterdiği gözlemlenmiştir ve şekil faktörleri 1,003 -2,875 genişliği içinde dağılmaktadır. Sonuçlarda, en yüksek gerilmenin, 1.6-3.0 parçacık şekil faktörü aralığında ve 10-18 μm arasında partikül büyüklüğü aralığında oluştuğunu göstermektedir; matris içinde yüksek deformasyonun 1.0-3.0 şekil faktörü aralığında ve 13-18 μm partikül büyüklüğü aralığında gerçekleştiği görülmüştür. Metal matriksli kompozitlerin mekanik özelliklerinde parçacık boyut ve şekil faktörlerinin önemli rol oynadığı anlaşılmıştır (Zhang and Li, 2010)

Michael ve Baosheng, Sinterleme işlemi sırasında toz bileşiğin ısınma ve soğuma işlemleri esnasında malzemenin termo mekanik davranışını, elasto-viskoplastik teoriye göre deneysel ve teorik olarak incelemişlerdir. WC-% 6 Co toz bileşiğinin, termal elasto-viskoplastik teorisine dayalı sinterleme sürecini araştırılmıştır. Sinterleme işlemi sırasında WC-% 6 Co toz bileşiğinin çekme ve gerilme değişikliklerin ABAQUS programı kullanarak simüle edilmiştir. Deformasyon miktarları için, simülasyon sonuçları ve deneysel verilerin uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Gerilmeler için deneysel ve simülasyon sonuçlarına bakıldığında, maksimum çekme her zaman soğutma aşamasının başında ortaya çıktığı görülmektedir. Sinterleme sürecinde silindir numune çekme çevresel gerilme (FEM simülasyonu), deneysel gözlem ile karşılaştırıldığında büyük bir gerilme oluştuğu gözlemlenmiştir ve bu gerilmenin yüzey çatlaklarına neden olabileceği düşünülmüştür (Gasik and Zhang, 2000).

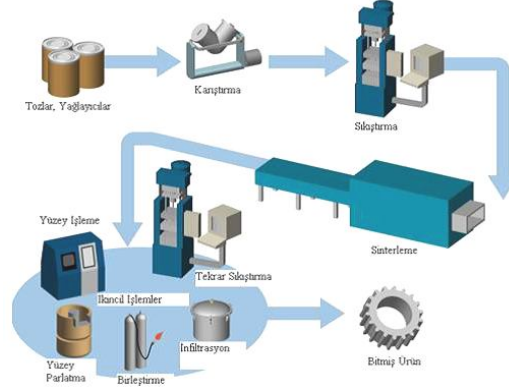
Son yıllarda toz metalurjisi, çelik bileşenleri için rekabetçi üretim maliyetleri ve daha fazla mekanik özellikler talebini karşılamak amacıyla farklı alanlarında önemli yeniliklere yol açmıştır. Son araştırmalar, düşük maliyetle yüksek performansa ulaşan malzemeler üzerine odaklanmıştır. Bu amaçla, belirli bir toz bileşimi için, sinterleme öncesi, sinterleme esnası ve sinterleme sonrası, işlemlerin sürekli geliştirilmektedir. Yüksek yoğunluklu TM parçaların, indüksiyonla sinterleme işlemi yapılan bu araştırmaların bir sonucudur. Toz metal malzemelerin iç yapılarının gözenekli olmasından dolayı elektriksel özellikleri bulk malzemelere göre oldukça farklıdır. Toz metal malzemelerin iç yapılarında bulunan gözeneklilik miktarı aynı zamanda, malzemenin yoğunluğunu ve Young modülünü düşürerek mekanik özelliklerine kuvvetle etki etmektedir. Bu çalışmada, indüksiyonla sinterleme parametrelerinin değişiminin toz metal malzemelerin iç yapısına nasıl etki ettiği ve yükleme şartlarına göre malzemenin iç yapısında oluşan mikro gerilmelerin davranışları incelenerek en uygun sinterleme şartlarının oluşturduğu iç yapı ve gerilme şartları tespit edilmiştir. Bu bağlamda bu çalışmanın, endüstride toz metal

parçaların indüksiyonla sinterleme parametrelerine ve kullanım şartlarına ışık tutacağı düşünülmektedir.

Deneysel çalışmada, %3 Cu, % 0,5 Grafit ve yağlayıcı olarak %0,8 Kenolube içeren Högenas ASC 100.29 demir tozu kullanılmıştır ve sinterleme parametrelerine göre değişen yoğunluklarda numuneler üretilmiştir. Üretilen numunelerin mekanik özellikleri, sertlik ve üç nokta eğme deneyleri ile belirlenmiştir. Deneysel çalışmalara ek olarak, numuneler modellenerek mekanik özellikleri incelenmiştir ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Ayrıca indüksiyonla sintenterleme esnasında numuneler içerisinde oluşan ısı dağılımları ve işleme derinliği numunelerin deneylerden elde edilen gerçek fiziksel özellikleri kullanılarak Comsol Multiphysics programında modellenmiştir. Nümerik sonuçlar deneysel çalışmalara aktarılmış ve karşılaştırılmıştır. Buna ek olarak, TM numunelerin farklı yükleme şartlarında mekanik özelliklerini belirleyen gözeneklerin, mikro gerilme ve deformasyon miktarlarını görebilmek için numunelerin iç yapı fotoğrafları görüntü işleme tekniği kullanılarak nümerik olarak modellenmiştir. Böylelikle, sinterleme parametrelerinin numunelerin mikro yapılarına, yoğunluklarına, mikro-mekanik özelliklerine nasıl etki ettiği ve yükleme şartlarında nasıl davranış gösterdiği anlaşılmıştır. İndüksiyonla sinterlemede en uygun sinterleme şartlarının sağladığı, üstün mekanik özelliklere sahip malzemelerin, seri üretime uygun ve düşük maliyetle elde edilmesi amaçlanmıştır.

2. TOZ METALURJİSİ

TM üretim yöntemi metal tozlarının üretimi ve üretilen bu tozların imalatı istenilen parçaların şekline dönüştürülmesi işlemidir. Bu yöntem toz üretimi, üretilen tozların karıştırılması, tozların preslenmesi, sinterleme ve isteğe bağlı işlemler (infiltrasyon, yağ emdirme, çapak alma, vb..) olmak üzere belirli aşamalardan oluşur (Lawley, 1992). Bu yönteme ait imalat basamakları Şekil 2.1 de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Toz Metalürjisi yöntemi ile parça üretim aşamaları (İnt. Kay. 3)

Toz, boyutu 1 mm' den daha küçük, ince olarak bölünmüş katı parçacıklardır. Tozlar genel olarak metaliktir. Bir tozun en önemli karakteristiği yüzey alanının hacmine göre yüksek olmasıdır (Lawley, 1992). Toz metalurjisi yöntemi demir ve demir dışı metallerden parça üretiminde kullanılan gelişmiş bir üretim yöntemidir. Toz metal parça üretiminde genellikle tozlar öncelikle soğuk sıkıştırma ile şekillendirilir ve sinterleme işleminden sonra bitirme işlemleri uygulanır. TM yöntemi ile tozların soğuk şekillendirilmesi ve kalıptan çıkarılması sırasında metal tozları ile kalıp yüzeyi arasındaki sürtünmeyi azaltarak kalıp ömrünü artırmak amacıyla yağlayıcılar kullanılır. Malzemeye uygun yağlayıcılar ağırlık olarak % 0.5-2 oranlarında ilave edilerek karıştırılırlar. Bu süreçte tozların başarılı bir şekilde sıkıştırılarak şekillendirilmesi birinci basamaktır (Saritaş, 1994, TS 3087, 1978). Karışımı hazırlanan tozlar istenilen geometrideki kalıplarda preslenir. Presleme işlemi esnasında dağınık halde bulunan tozlar kalıp içerisinde parçanın şeklini alır. Bu aşamada elde edilen parçalar düşük mukavemet değerine sahiptir. Bu mukavemet değerine ham mukavemet (green strength) denir. Ham mukavemet değeri parçanın kalıptan çıkartılıp sinterleme ortamına yerleştirilmesine olanak verecek değerlerde olmalıdır fakat bu değer parça üzerine uygulanacak yüksek değerlerdeki kuvvetleri taşımak için yeterli değildir. Kalıptan çıkartılan parçaların mukavemet değerlerini artırmak için parçalara sinterleme işlemi uygulanır (Lawley, 1992).

Sinterleme genellikle atomik ölçekte gerçekleşen, kütle taşınımları yoluyla katı parçacıkları birbirine yoğun bir yapı oluşturacak şekilde bağlayan ısı işlemi veya sürecidir.

Sinterlenecek malzeme tek çeşit saf metal veya seramik gibi bir malzemeden oluşuyorsa tek bileşenli sistem, birden çok malzemeden oluşuyorsa çok bileşenli sistem adını alır. Tek bileşenli sistemlerde sinterleme sıcaklığı malzemenin ergime sıcaklığının 0,8 katıdır. Çok bileşenli sistemlerde ise sinterleme sıcaklığı bileşimde en düşük ergime sıcaklığına sahip malzemenin ergime sıcaklığın hemen altındadır. Ergime sıcaklığının altında yapılan sinterlemeye katı faz sinterlemesi, çok bileşenli sistemlerde ise bileşenlerden en az birinin ergime sıcaklığının üzerinde yapılan sinterlemeye ise sıvı faz sinterlemesi denir (Ünal, 1995). Sinterleme sonrasında parçalar isteğe bağlı olarak bazı işlemlerden geçerek (infiltrasyon, birleştirme, tekrar sıkıştırma) kullanıma hazır hale getirilirler (İnt. Kay. 3).

TM, parçaların mekanik özellikleri kalıcı gözenek miktarına, dağılımına, gözenek tipine, büyüklüğüne ve şekline bağlıdır. TM parçalarda gözenek miktarı düştükçe yorulma dayanımının yanı sıra diğer bütün mekanik özellikler de iyileşmektedir. Bu genelleme kabaca kabul görürken iyileşme oranının hangi parça yoğunluğu değerleri üzerinde önem kazandığı tam açık değildir. Ancak düşük parça yoğunluklarında toplam gözeneklilik miktarı ana faktör olarak gözlenirken, yüksek yoğunluklarda gözenek boyutu, şekli ve dağılımı ile birlikte matris malzeme mikro yapısı daha önemli faktörler olarak önem kazanmaktadır. Sinterlenmiş parçaların yoğunluğunu veya boyutsal hassasiyetini arttırmak amacıyla yeniden presleme uygulanabilir. İstenirse yeniden presleme sonrasında sinterleme işlemi tekrarlanarak hem presleme sırasında oluşan artık gerilmeler giderilir, hem de yayınma bağı kuvvetlendirilir. Bazı durumlarda sinterlenmiş parçalara plastik şekil verme yöntemleri de uygulanabilir. Toz metalurjisi ile üretilen parçaların büyük kısmında elde edilen boyutsal hassasiyet ve yüzey kalitesi talaşlı işlem gibi ilave işlemlere olan ihtiyacı ortadan kaldırmaktadır (Başaran, 2007).

TM küçük, karmaşık ve boyutsal hassasiyeti yüksek parçaların seri imalatına son derece uygundur. Belirli derecede porozite (gözenek) ve geçirgenlik elde edilir. TM ile üretilen parçaların büyük bir kısmında elde edilen boyutsal hassasiyet ve yüzey kalitesi talaşlı işlem gibi ekstra operasyonlara olan gereksinimleri ortadan kaldırması ve malzeme kaybının çok az olması TM yönteminin ekonomik bir üretim yöntemi olduğunun göstergesidir (Sarıtaş and Doğan, 1994). Toz metalurjisi sıvı fazda hiç çözünmeyen elementlerden mekanik alaşımlama ile yüksek dayanımlı parça üretimine imkân verdiği gibi, mıknatıs, filtre, kesici takım uçları, kontaktörler, vb. birçok özel doku ve yapıdaki parçalarında en uygun üretim yöntemidir. Bazı metallerin ergime sıcaklığı çok yüksek olması ve bu sıcaklıklara ulaşılamaması (tungsten, molibden gibi), bazı özelliklerin ancak TM ile sağlanabilmesi (kendi kendine yağlanan yataklar), süper alaşım ve sert metaller gibi önemli malzemelerin bu yöntem ile üretilmesi toz metalurjisini zorunlu kılan başlıca sebeplerdir. Çok sayıda üretim söz konusu olduğunda en iyi uygulanabilen bir metot olması, boyut kontrolü ve şekil karmaşıklığı TM yönteminin en bariz avantajlarıdır (Aran, 1987, Baksan ve Gürler, 2003). TM yönteminin genel olarak avantajları aşağıda maddeler halinde verilmiştir :

- Yüksek malzeme kullanım oranı, düşük malzeme kaybı.
- Yüksek üretim hızları.
- Düşük maliyet
- Düzgün yüzey, yakın tolerans değerlerinin elde edilmesi.
- Karmaşık şekilli parçaların imalatı.
- Yüksek ergime sıcaklığına sahip metallerin imalatı.
- Yüksek yoğunluğa sahip parça üretimi.
- Metal matriks kompozit ve metal alaşımları üretimi.
- Üstün mikro yapısal özelliklere sahip parça üretimi.
- Belirli derecede gözeneklilik ve geçirgenlik (Kaysser and Rzesnitzek, 1990)

2.1. Toz Üretim Teknikleri

Genel olarak elde edilen bir tozun üretim yöntemini bilmek, tozun karakteristik özelliklerini kolaylıkla anlamamıza sağlar. Günümüzde çoğu malzemenin toz olarak eldesi mümkün olmasına rağmen tozu üretirken seçilen yöntem malzemenin spesifik özelliklerine bağlıdır. Üretim yöntemini bilmek; Tozun boyutu, şekli, mikro yapısal özelliklerinin önceden bilinmesi için önemlidir. Metal tozlarının imalinde kullanılan teknikler, tozların birçok özelliklerini tayin eder. Tozun geometrik şekli üretim yöntemine bağlı olarak küreselden, karmaşık şekle kadar çok farklı olabilmektedir. Tozun yüzey durumu da üretim yöntemine göre değişiklik göstermektedir. Malzemelerin çoğu, özelliklerine uygun bir teknik kullanılarak toz haline getirilebilir. Bir çok toz üretim tekniği arasından, ticari olarak şu teknikler kullanılmaktadır (Lawley, 1992, German, 1994, Zeren, 2013):

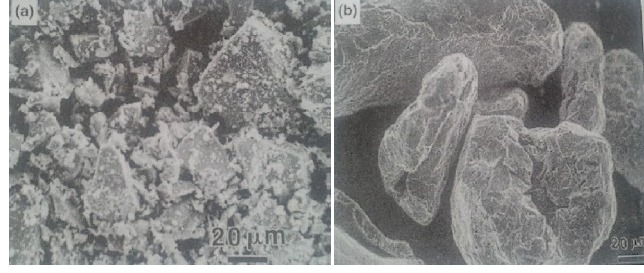
- Mekanik yöntemler
- Kimyasal yöntemler
- Elektroliz yöntemi
- Atomizasyon yöntemleri
- Buharlaştırma teknikleri
- Mikron-altı ve nano ölçekli toz üretim teknikleri

2.1.1. Mekanik yöntemler

Mekanik yöntemler talaşlı üretim, öğütme ve mekanik alaşımlama olmak üzere üç grupta incelenebilir.

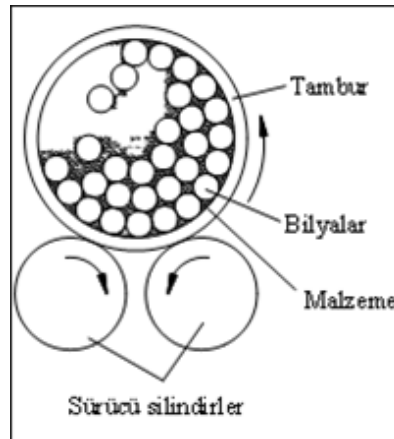
2.1.1.1. Talaşlı Üretim:

Bu yöntemle tornalama, frezeleme ve taşlama gibi talaş kaldırma teknikleri kullanılarak çok iri ve karmaşık tozlar üretilir. Üretilen tozlar, öğütülerek ince tozlar haline getirilebilir. Toz özelliklerinin kontrolündeki zorluk, oksitlenme, yağlanma, kir tutma ve diğer malzeme hurdaları ile karışarak kirlenme problemleri olabilir. Yüksek karbonlu çelik tozları bu yöntemle üretilir (İnt. Kay. 3).



2.1.1.2. Öğütme:

Bir metal tozu üretim tekniği olmakla birlikte, diğer tekniklerle üretilmiş tozların kırılması için de kullanılan öğütme, en çok bilyeli değirmenlerde yapılmaktadır. Kırılgan malzeme tozlarının üretiminin yapıldığı bu yöntemde, temel prensip parçalanacak malzeme ile sert bir cisim arasında bir darbe meydana gelmesini sağlamaktır.



Öğütülecek metal, içinde büyük çaplı sert ve aşınmaya karşı dayanıklı bilyelerin bulunduğu kaba, önceden kaba bir biçimde kırılmış olarak yerleştirilir. İri taneli öğütülecek

malzeme öğütücü kap içinde büyük çaplı, sert ve aşınmaya karşı dayanıklı bilyeler ile birlikte döndürülerek veya titreştirilerek darbe etkisiyle çok küçük tozlara bölünür (Şekil 2.3).

Eğer öğütülen malzeme gevrek ise, bilyelerle çarpışmanın etkisiyle çok küçük tozlara bölünür. Öğütülen malzeme sünek parçacıklardan oluşuyor ise, çarpışma sonucunda şekil değiştirerek yassılaşırlar (Sarıtaş and Doğan, 1994). Homojen bir karışım için kaba konulacak bilyelerin hacmi ve öğütülecek malzeme miktarı çok önemlidir. Bilyelerin hacmi kap hacminin yaklaşık yarısı ve öğütülecek malzeme miktarı kap hacminin yaklaşık % 25'i oranında olmalıdır (German, 1994). Demir alaşımları, demir – krom, demir – silisyum v.b. kırılgan malzemeler mekanik olarak bilyeli değirmenlerde öğütülürler.

2.1.1.3. Mekanik alaşımlama:

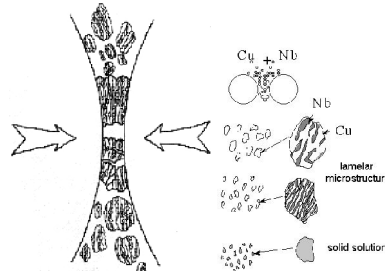
Mekanik alaşımlama (M.A.) yöntemi, kuru ve katı haldeki tozların birbirlerine periyodik olarak kaynaklanmasını ve tekrar bu kaynakların kırılmasını sağlayarak daha ince ve homojen bir mikro yapıya sahip yüksek dayanımlı kompozit malzemelerin üretilmesinde kullanılır (Çiftçi, 2003). M.A. yönteminde tozlar kapalı bir kap içerisine konulur ve şaft döndürülür (Şekil 2.4). Tozlar, şaft kolları ve bilyeler yardımı ile deforme edilir ve bu tozlarda kırılma ve soğuk kaynaklaşmalar meydana gelir.



Şekil 2.4. Mekanik Alaşımlama Yöntemi (Zeren, 2013).

Enerji açısından verimli değildir, fakat ürün özel bir kompozit olabilir. Belirli şartlar altında nano ölçekli veya amorf tozlar mekanik alaşımlama ile üretilir. Tozlar köşeli olsa dahi sıcak yoğunlaştırma ile yüksek özellikte malzeme elde etmek mümkündür. Öğütme teknikleri mikron altı boyutlardaki oksitlerin oldukça ince bir dispersiyonunu sağlar. Bu açıdan bakıldığında uygulanabilecek en iyi yöntem mekanik alaşımlamadır. Mekanik alaşımlama yöntemle hareketli bilyeler arasında kalan malzemeye etki eden sürtünme kuvvetleri ile alaşımlı kompozit partiküller elde edilir. Bu yöntemle hareketli bilyeler arasında kalan malzemeye etki eden sürtünme kuvvetleri ile alaşımlı kompozit partiküller elde edilir. Tekrarlanan darbe, soğuk kaynak ve kırılmalar sonucunda istenen kompozit tozları mikroskobik bir seviyede elde edilir. Diğer mekanik toz üretim teknikleri gibi mekanik alaşımlama açısından da kirlenme riski önemli

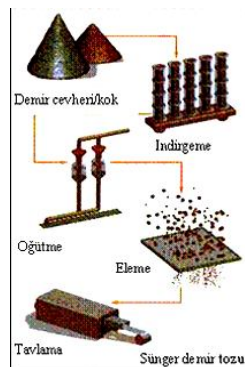
bir problemidir. Bu problem bilye, karıştırma çubuğu ve üretilcek toz ile aynı malzemeden yapılmış tank kullanımı ile minimize edilebilir. Öğütme sırasında organik bir akışkanın seçilmesi, öğütme ve mekanik alaşımlama için gerekli olan kaynaklanma arasında bir dengenin kurulması açısından önemlidir. Tozların işlem sırasında yüksek oranda sertleşmesine ve kabalaşmasına rağmen sıcak yoğunlaştırma teknikleri ile nihai yoğunlaştırma gerçekleştirilebilir (Zeren, 2013).



Şekil 2.5. Toz-küre darbe etkileşimi (solda) ve sünek Cu-Nb tozlarının mekanik alaşımlama ile üretimi (Zeren, 2013).

2.1.2. Kimyasal yöntemler

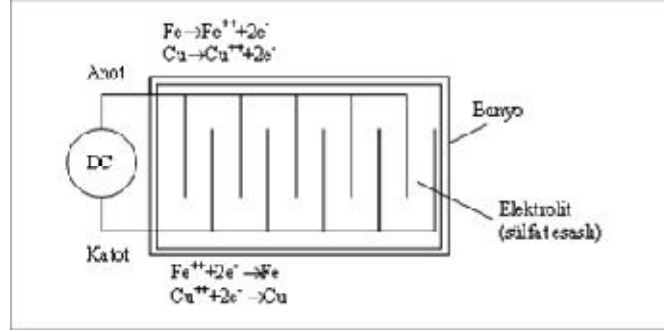
Metal tozlarının kimyasal yöntemle üretimi, metal oksitlerin (demir, bakır, tungsten, molibden, nikel ve kobalt) CO veya hidrojen gibi indirgeyici gazlarla oksitlerinden kimyasal olarak indirgenmesidir (German, 1994). Kimyasal yöntemle üretilen sünger-demir tozu bu yöntemin önemli bir uygulama örneğidir. Sünger demir, demir oksit cevherinin uygun nitelikte indirgeyici elemanlara indirgenerek süngerimsi bir kütleye dönüştürülmesiyle elde edilir. Magnetit (Fe_3O_4), kok ve kireç taşı ile karıştırılır ve seramik kaplara doldurulur. Karışım seramik kaplar içerisinde $1260\text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıktaki fırınlarda 68 saat bekletilir (Saritaş and Doğan, 1994). İndirgenmenin tamamlanması ile sünger demir elde edilir. Şekil 3'de kimyasal yöntemle demir tozu imalatı görülmektedir. Elde edilen sünger demir külçeleri yüksek sıcaklıkta ($1260\text{ }^\circ\text{C}$) birbirine kaynak olmuş tozlardan oluştuğundan öğütülerek istenilen tane büyüklüğüne getirilir. Hidrojen gazı altında $870\text{ }^\circ\text{C}$ 'de tavlansak oksijen ve karbondan mümkün olduğu kadar arıtılır ve son olarak elekten geçirilir (Turan, 1993).



Şekil 2.6. Kimyasal yöntemle demir tozu üretimi (İnt. Kay. 4).

2.1.3. Elektroliz yöntemi

Elektroliz yöntemiyle, oksitlerden oluşan tozlar katoda akım vermek suretiyle elektrolitik banyoda çökertilir ya da iyi kırılabilme özelliğinde katot da toplanır (Şekil 2.7.). Banyo teknesi kurşun kaplıdır. Elektrolitik olarak bakır sülfat ve sülfürik asit kullanılır. Anot bakır katot ise antimuanlı kurşundur (Ersümer, 1970). Elektroliz yöntemi ile genel olarak bakır tozları imal edilir.

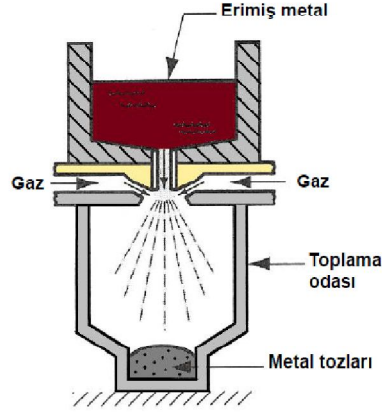


Şekil 2.7. Elektroliz ile toz üretimi (Baksan ve Gürler, 2003).

Elektroliz yönteminde, elektrolitik banyoda çökertilen veya katotta toplanan metal kolaylıkla öğütülerek ince toz haline getirilir ve üretilen tozlar yıkanarak elektrolitten iyice temizlenir. Kurutma asal gazlar altında yapılarak oksitlenme önlenir (Saritaş, 1994). Elektroliz sırasında oluşan parçacıklar dendritik bir yapı gösterirlerse de daha sonraki işlemlerle bu yapı kaybolur. Elektrolitik tozların en büyük avantajı yüksek safiyetleri, dolayısıyla iyi sıkıştırabilme özelliklerine sahip olmalarıdır.

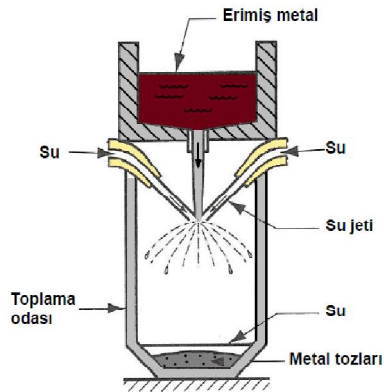
2.1.4. Atomizasyon Yöntemleri

Atomizasyon, bir sıvı demetinin farklı boyutlardaki çok sayıda damlacıklara ayrılmasıdır (Kaysser and Rzesnitzek, 1990). Temel prensip, bir potanın dibindeki delikten akmakta olan ergimiş metalin üzerine yüksek basınçlı gaz veya sıvı püskürtülmesidir (Şekil 2.8.). Hava, azot ve argon sıklıkla kullanılan gazlardandır ve su ise çok sık tercih edilen sıvıdır. Burada gaz veya sıvı, ergiyik haldeki metal demetini farklı boyutlarda çok sayıda damlacıklara ayırır. Damlacıklar daha sonra katılaşarak metal tozlarını oluştururlar. Bu üretim yöntemi Ergitme, Atomizasyon Katılaşma ve soğuma olmak üzere üç ana bölüme ayrılır.



Şekil 2.8. Düşey gaz atomizasyon ünitesi.

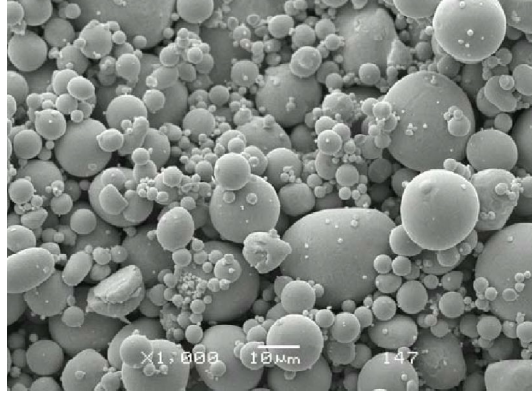
Bu işlemlerden sonra çoğu zaman yüzey oksitlerinin azaltılması, gazlardan uzaklaştırma ve toz boyutu dağılımı gibi ürünün istenen niteliklere getirilmesi için ek işlemler yapılmaktadır. Metal tozlarının üretiminde yaygın olarak kullanılan atomizasyon yöntemleri paslanmaz çelik, pirinç, demir, alüminyum, çinko, kalay ve kurşun gibi metal ve alaşımları için oldukça iyi sonuçlar vermektedir (Saritaş and Doğan, 1994). Ayrıca atomizasyon yöntemleri, alüminyum ve alaşımlarının tozlarının üretiminde en yaygın ve en ekonomik olan yöntemlerdir. Atomizasyon yöntemlerinden su atomizasyonu, sıvı metalin su jeti ile parçalanması, gaz atomizasyonu ise gaz jeti ile parçalanması olarak tanımlanır. Tipik bir suyla atomizasyon tankı Şekil 2.9.'da verilmiştir. Çevresel olarak yerleştirilmiş olan memelerde oluşan basınçlı su jetleri sıvı metali keserek parçalar. Oluşan damlacıklar tankın dibine doğru hareket ederken soğuyarak katılaşır ve dibe çökerler. Su çok iyi bir soğutucu olduğundan, suyla atomizasyon tankları kısadır (1m civarında). Gazla atomizasyonda benzeri şekilde oluşur. Ancak gazlar iyi soğutucu olmadıklarından gazla atomizasyon tankları 6 m den uzundur (Saritaş, 1994).



Şekil 2.9. Su atomizasyon işlemi (German, 1994).

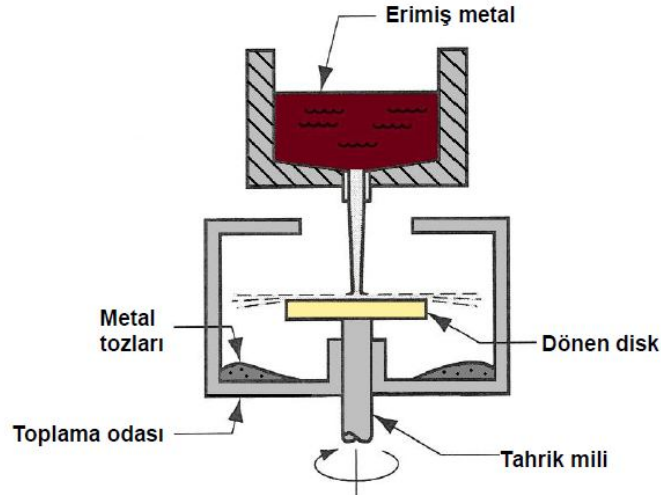
Gaz atomize tozlar küresel veya küresele yakın şekillidirler (Şekil 2.10.). Bu yöntemle üretilen tozların tane boyutu 20 – 300 mm arasındadır. Su atomize tozlar genel olarak karmaşık

şekilli olup, bu tozların sıkıştırılabilirlikleri ve sıkıştırılma sonrası ham mukavemetleri yüksektir. Su atomizasyon yöntemiyle elde edilen tozların ortalama tane boyutu 30 – 1000 μm arasındadır (Kurt, 2010).



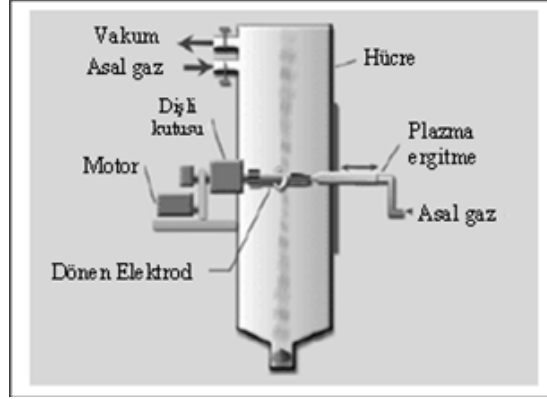
Şekil 2.10. Küresel şekilli gaz atomize kalay tozlarının genel yüzey görüntüleri (Kurt, 2010).

Ergiyik metalden toz üretimi için merkezkaç kuvvetinin kullanılması olarak bilinen döner disk santrifüj atomizasyon yönteminde, sıvı metal dönen bir disk üzerine akıtılır (Şekil 2.11.). Disk üzerindeki set ve yarıklara çarpan sıvı metal parçalanarak şekildeki gibi saçılır. Saçılan metal parçacıklar soğutularak katılaşmaları sağlanır (Baksan ve Gürler, 2003, Sarıtaş and Doğan, 1994).



Şekil 2.11. Döner disk atomizasyon yöntemi (Baksan ve Gürler, 2003)

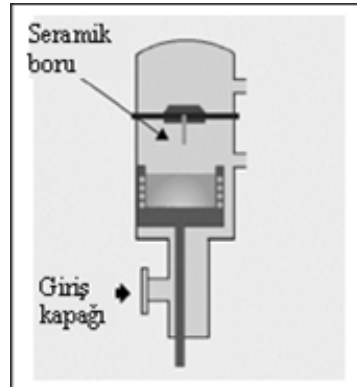
Döner elektrot kullanılarak yapılan santrifüj atomizasyon yöntemi ise, dönmekte olan elektrotun ergiyen ucundaki sıvı metal damlaların atomize olması esasına dayanır (Şekil 2.11.) (Lawley, 1977).



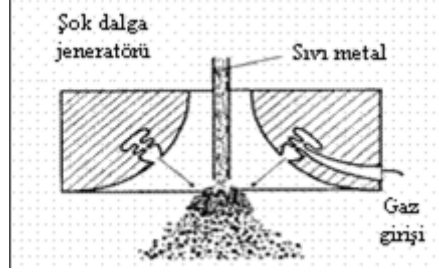
Şekil 2.12. Döner elektrot atomizasyon yöntemi (Baksan ve Gürler, 2003).

Döner elektrot kullanılarak yapılan santrifüj atomizasyon yönteminde tozu elde edilecek metalden yapılmış elektrot ile ergimeyen tungsten elektrot arasında ark oluşturulur. Ergiyen elektrotun döndürülmesiyle, elektrik arkı altında oluşan damlacıklar savrulur ve parçalanır ve tankta toplanır. Oksidasyonu önlemek için toz toplama tankı helyum, argon gibi asal gazlarla doldurulur (Baksan ve Gürler, 2003). Döner elektrot yöntemiyle, kobalt, krom ve titanyum alaşım tozları üretilmektedir (Lawley, 1992).

Vakum atomizasyonu yöntemi, basınçlı gaz altındaki sıvı metale ani olarak vakum uygulanması sonucu gazın genişmesi ve metalin atomize olmasıyla gerçekleştirilen bir metottur (Champange et al, 1984). Bu yöntemde, Şekil 2.12’de görüldüğü gibi silindirik bir tankın alt kısmında sıvı metal potası, üst kısmında da vakum atomizasyon odası bulunmaktadır. Vakum altındaki sıvı metal önce belirli bir sıcaklığa kadar ısıtılır, bundan sonra bu bölüme hidrojen gazı doldurulur. Potadaki sıvı metalde hidrojen gazı çözündükten sonra potayı yukarı taşıyan mil potayı yukarı iterek seramik boruyu potaya daldırır. Üst kısımda vakum olduğu için sıvı metal memeden geçerek parçalanır. Böylece metal ve alaşımlarından ince küresel tozlar üretilir (Baksan ve Gürler, 2003).



Şekil 2.13. Vakum atomizasyon yöntemi (Baksan ve Gürler, 2003).



Şekil 2.14. Ultrasonik gaz atomizasyonu (Klar and Fesko, 1984)

Ultrasonik gaz atomizasyon yönteminde ise, yüksek basınçlı gaz rezonans boşluklarının birinden diğerine ivmelendirilerek Ultrasonik ses dalgaları oluşturulur (Şekil 2.14.) ve yüksek katılma hızına bağlı olarak çok ince ve küresel şekilli tozlar üretilir (Rai et al, 1985). Atomizasyon yöntemleriyle bir tozun ortalama boyutu, toz boyutu dağılımı, toz şekli, yüzey kompozisyonu da dahil olmak üzere kimyasal bileşimi ve mikro yapısı kontrol edilebilir. Bu temel özellikler, tozların ve bitmiş parçaların görünür yoğunluk, sıkıştırılabilirlik ve tokluk gibi özelliklerini belirler (Klar and Fesko, 1984). Bunların yanı sıra, atomizasyon yöntemlerindeki yüksek toz üretim hızı, ekonomik olarak bir üstünlüktür. Her atomize partikül bir ön alaşım veya küçük bir kütük gibidir ve her partikülde bileşim aynıdır (Lawley, 1992).

2.1.5. Buharlaştırma Teknikleri

Buhar fazından homojen çekirdeklenme ile tozların oluşturulmasında oldukça ilerleme kaydedilmiştir. Bu tip yaklaşımlar nano ölçekli parçacıkların oluşturulmasında çok yararlıdır. günümüzde 10nm (0.01 μ m) 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 parçacık dumanı 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 bir çok metalin oluşturulmasında uygulanmaktadır (German, 2007).

2.1.6. Mikron-altı ve Nano ölçekli Toz için Teknikler

Nano ölçekli toz oluşturulmasının bir yolu da buhar fazından yoğunlaştırmadır. Buhar türleri altlık ısıtılarak, elektron ışın, lazer, plazma, alev, veya çözelti, toz, sıvı veya buhar gibi

girdi malzemeleri etkileyen endüksiyon alanları ile üretilir. Malzeme kaynama noktasına ısıtılır ve sonra 10nm-1µm boyut aralığında parçacık topak halinde çekirdeklendirmek üzere yoğunlaştırılır. Bu tozlar ortam atmosferi ile tepkimeye girerek oksitler ve nitrürler oluşturabilir. Bu yöntemler pahalı toz üretim yöntemleridir. Örneğin etilen glikol içerisinde 200 °C' de çözünmüş gümüş nitrat (AgNO_3), gümüş parçacıklar çekirdeklenmek üzere tepkimeye girer. Mikrodalga ile ısıtılırsa tepkime 10 kat daha hızlı meydana gelir. Etilen glikol su içerisinde çözündüğünden, karışım yıkanarak gümüş parçacıklar ayrıştırılır. Yüksek verim (%99) ile 100nm altında parçacık üretmek için yaklaşık 30 dakika ısıtmak gerekir. Nano ölçekli silik, titanya ve karbon karası gıdalarda, boyalarda ve otomobil lastiklerinde sıkça kullanılmaktadır. Nano ölçekli oksitler en çok boya renklendiricisi, kozmetik, kağıt renklendirme, su süzme, katalizör, parlatma bileşikler ve mıknaatıslarda kullanılmaktadır (German, 2007).

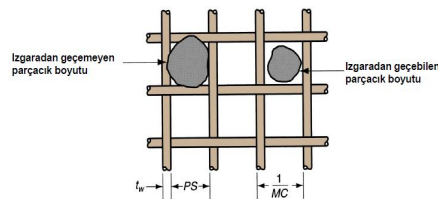
2.2. Metal Tozlarına Uygulanan Ön İşlemler

2.2.1. Metal Tozların Elek Analizi

Birçok metal tozu üretim prosesinde, en yakından kontrol edilmesi gereken, özellikle toz boyut dağılımıdır. Çünkü, taşıma yoğunluğu, akışkanlık, birleştirilebilme özellikleri, sinterleme oranı, boyutsal değişim ve mekanik mukavemet gibi tozun özellikleri kuvvetle tozun boyut dağılımına bağlıdır. TM sanayinde parçacık boyut dağılımında en yaygın kullanılan metot elemedir. Toz parçacıklar farklı aralıklardaki elek açıklıkları ile mekanik olarak sınıflandırılırlar. Elekler geçer-geçmez mastarı gibi görev yaparlar.

2.2.2. Tavlama

Metal tozların tavlama, en yaygın ısıl işlemlerden biridir. Birçok toz, üretim aşamasında, üretim yöntemine de bağlı olarak kirlenir. Karbon, oksijen ve azot gibi kirlilikler, ürünün sinterlenmemiş mukavemetini ve sıkıştırılabilirliğini olumsuz yönde etkiler. Metal tozlarına uygulanan tavlama işlemi ile hedeflenen, parçacıkların üzerindeki ince oksit film tabakasını ve nemi almaktır (Mastrangelo, 1984). Çizelge 2.1 ve Şekil 2.15 'de elek açıklıkları ile bunlara bağlı toz boyutu arasındaki ilişki ve ızgara eleği gösterilmektedir (Mastrangelo, 1984).



Şekil 2.15. Parçacık boyutunun belirlenmesi için ızgara eleği (Dikicioğlu, 2013).

Çizelge 2.1. Elek açıklıkları ve bunlara bağlı toz boyutları (Mastrangelo, 1984).

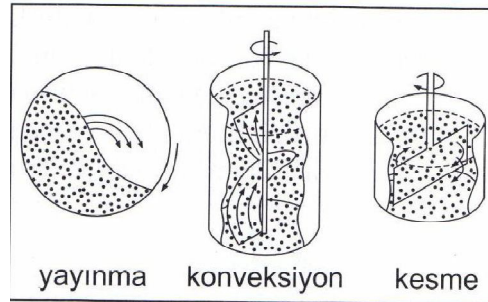
Elek		ABD Standardı Elek Açıklıkları		Tyler Standart Mesh No.
Mesh No	μm	İnch	mm	
80	177	0,007	0,177	80
100	149	0,0059	0,149	100
120	125	0,0049	0,125	115
140	105	0,0041	0,105	150
170	88	0,0035	0,088	170
200	74	0,0029	0,074	200
230	63	0,0024	0,063	250
270	53	0,0021	0,053	270
325	44	0,0017	0,044	325
400	37	0,0015	0,037	400

2.3. Metal Tozlarının Karıştırılması

Karıştırma işlemi; özel parçacık boyut dağılımı hazırlanması, sinterleme esnasında yeni alaşımların oluşturulması amacıyla tozların birleştirilmesi, sıkıştırma için yağlayıcıların eklenmesi ve şekillendirme için toz-bağlayıcı karışımının hazırlanması için gereklidir (German, 2007). Yaygın olarak kullanılan 2 tip karıştırma şekli vardır: 1. Kuru toz karıştırma, 2. Sıvı bağlayıcılarla karıştırma:

2.3.1. Kuru toz karıştırma

Toz karıştırma mekanizmaları Şekil 2.16 'da gösterildiği gibi yayınma, konveksiyon ve kesmedir.

**Şekil 2.16.** Karıştırma yöntemleri (German, 2007).

Yayınma ile karışım dönen silindir içerisinde, konveksiyon ile karışım vidalı karıştırıcıda ve kesme ile karışım ise bıçaklı karıştırıcıda yapılmaktadır. Yayınma ile karışım her parçacığın

toz kütlesinde hareketi ile oluşur. Toz yatak düzlemi dış kenarda kırılarak yüzeyden akışın gerçekleşmesini sağlar. Sürekli dönen silindir taze tozları ve kesme düzlemlerini ortaya çıkarır ve bu durum parçacıkların birbiri içerisinde karışımlarını teşvik eder. Konveksiyon karışım toz gruplarının bir yerden diğer yere taşınması ile karışımlarını içerir. Vida küçük toz grubunu alt yüzeyden keserek harman içerisinde üstlerde bir yere taşır. Kesme ile karıştırmada sürekli ayrışma ve tozların kayma düzlemleri üzerinde akmaları ile oluşur (Wanibe and Itoh, 1998). Bir karıştırıcı için en uygun dönme hızı N_0 (dakikadaki dönme sayısı) aşağıdaki şekilde hesaplanır:

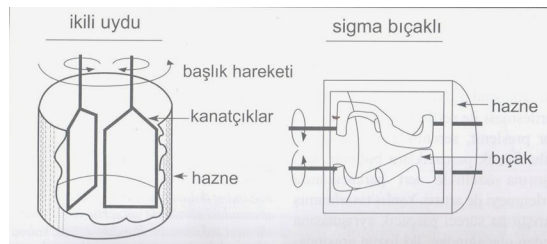
$$N_0 = 32 / \sqrt{d} \quad (2.1)$$

d- haznenin metre olarak dış yay çapıdır. Bu eşitliğe göre 1 metre çapında bir silindir için en uygun dönme hızı 32 d/dk olacaktır. Küçük çaplarda eşit optimizasyon için yüksek hızlar gerekmektedir (German, 2007).

Tozun karıştırılmasında bazı olumsuz durumlar söz konusudur. Metal parçacıkların iş sertleşmesi ile sertliği arttığından daha zor sıkıştırılır. Karıştırma özellikle sert parçalarda kirlenmeyi de artırır. Yanlış tasarlanmış karıştırma süreci parçacık ayrışmasına neden olacağından, iki tozun arasındaki boyut, şekil ve yoğunluk farkı arttıkça sorun yaratır (Shanefield, 1995).

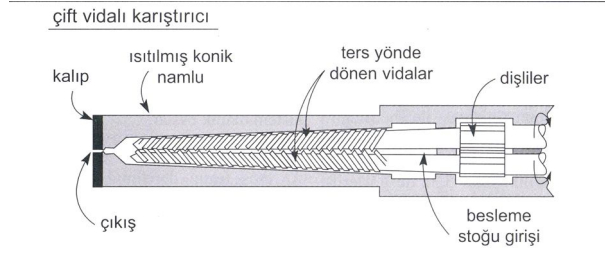
2.3.2. Sıvı bağlayıcılarla karıştırma

Kuru tozlar için yaygın olarak kullanılan karıştırıcılar toz-bağlayıcı karışımlarının hazırlanması için uygun değildir. Eriyik bağlayıcıların tozlarla karıştırılması için kullanılan birleşik hazırlayıcıları parti tipi veya sürekli dirler. Parti karıştırıcı tozu ve polimeri ısıtırken yüksek darbeli kesme hareketleri uygular. Şekil 2.17'de gösterildiği gibi parti karıştırıcının pedalları Z şekilli kanatçıklardan oluşur, tipik bir parti 50 kg kadar olabilmektedir (Conley, 1996).



Şekil 2.17. İki farklı tip parti karıştırıcı (German, 2007).

Sürekli karıştırıcı toz ve polimeri ısıtılmış namlu içerisinde besler. Burada polimer kesilirken ergime sıcaklığına çıkartılmaktadır. Bu tip karıştırıcıya ise örnek olarak Şekil 2.18'de gösterilen çift vidalı karıştırıcıdır.

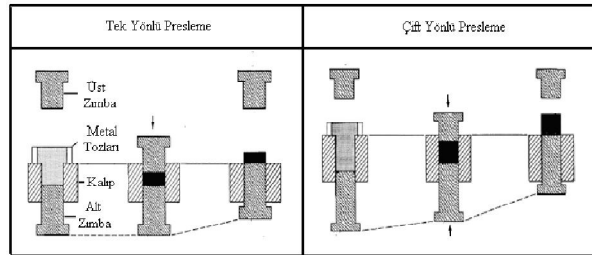


Şekil 2.18. Çift vidalı karıştırıcı (German, 2007).

Karıştırma esnasında oluşan homojensizlikler sonradan zorluklara neden olmaktadır. Karışımın her bir bölümü aynı toz miktarına sahip olmalı ve tozun parçacık boyut dağılımı da her bir bölümde aynı olmalıdır. Karışımın iyi olmadığı bir bölümün viskozitesi daha yüksek olur. Bu nedenle viskozite muhtemelen homojenliğin doğrudan en iyi ölçüsüdür (Metals Handbook, 1998).

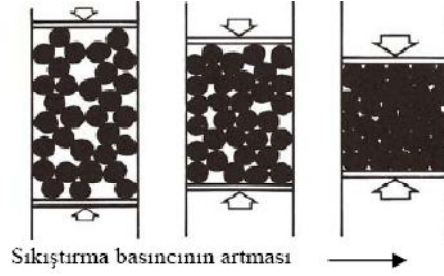
2.4. Tozların Preslenip Şekil Alması

Toz metalürjisindeki en önemli ve üçüncü işlem basamağı sıkıştırma (sıkıştırma) olarak kabul edilir. Metal tozlar, özel olarak hazırlanmış kalıp içersinde basınç etkisiyle briket hale getirilir. Sıkıştırmanın (sıkıştırma) temel amacı, toz partiküllerinin istenilen şekle dönüştürülmesi için, yapıya kendi ağırlığını taşıyabilecek kadar yoğunluk kazandırılmasıdır. Sıkıştırma, eksenel, izostatik ve hacim deformasyonu olarak üç farklı yöntemde gerçekleştirilir. Eksenel sıkıştırma; tek ve çift etkili olabildiği gibi soğuk, sıcak ve ılık sıkıştırma şeklinde de olabilmektedir. İzostatik sıkıştırma soğuk ve sıcak olmak üzere iki farklı şekilde uygulanabilir. Hacimsel deformasyon işlemleri ise, toz dövme, toz extrüzyon ve toz haddeleme olarak uygulanmaktadır (Metals Handbook, 1998). Genelde tozların preslenmesinde tek ve çift yönlü olmak üzere iki tür kalıp kullanılır. Şekil 2.19'da sol tarafta gösterildiği gibi, tek yönlü preslemede tozun dolumu ve sıkıştırılması sırasında alt zimba sabit kalır ve sadece preslenen ham parçayı kalıptan çıkartmak için hareket eder. Sağ tarafta gösterilen çift yönlü preslemede ise, alt ve üst zimba tozların sıkıştırılması esnasında hareket halindedir. Presleme, çift taraflı yapıldığı için daha düzenli bir yoğunluk dağılımı elde edilir.



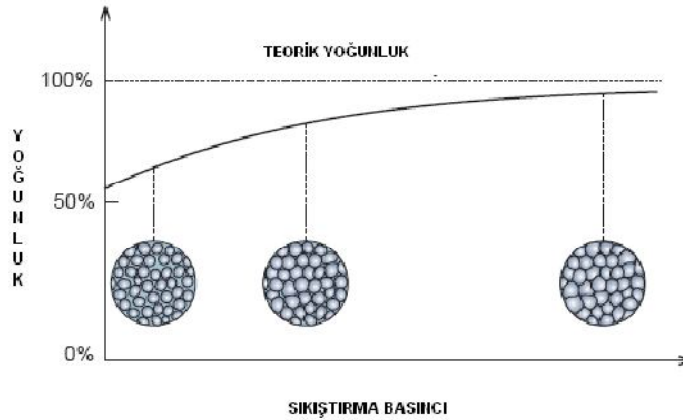
Şekil 2.19. Tek ve çift yönlü presleme çeşitleri (Metals Handbook, 1998).

Değişik sıkıştırma teknikleri olmakla beraber en yaygın kullanılanı tek eksenli bir kalıp ile basma işlemidir. Tek eksenli kalıp ile sıkıştırma tekniği kesintisiz üretim, otomasyon sistemleri, yüksek miktarlarda metal ve seramik parçalar ile ilaç ve patlayıcı endüstrisinde yaygın kullanım alanına sahiptir. Bu nedenlerden dolayı endüstriyel uygulamalardaki çoğu TM parçaları bu teknik kullanılarak üretilirler (Kurt, 2010).



Şekil 2.20. Metalürjik açıdan sıkıştırma işlemi (German, 1989).

İlk aşamada, sıkıştırma basıncının uygulamasından sonra, toz tanelerinin yer değiştirmesi ve yeniden pozisyon belirlemesi sağlanır. Bu aşamada, plastik şekillendirme yoktur, ancak bir kısım toz tanelerinde kırılma olabilir. Partikül boyutu, şekli, toz boyut dağılımı ve taneler arası sürtünme önemli rol oynar. İkinci aşamada elastisite ve plastik deformasyon faktörleri baskındır. Partiküller arası soğuk şekillendirmeye bağlı olarak bağlar oluşabilir. Ayrıca, tanelerin mekaniksel kilitlenmeleri ve tane-tane etkileşimleri bu aşamada gerçekleşir. Sıkıştırma basıncının arttığı ve sıkıştırmanın son aşamasında, toz tanelerinin kırılması, boşlukların dolması ve toz taneleri arasında soğuk kaynaklanma oluşmakta ve ham yoğunluk kazandırılmış olur (Yalçın, 2007).



Şekil 2.21. Yoğunluk – Basınç ilişkisi (Engin, 2011)

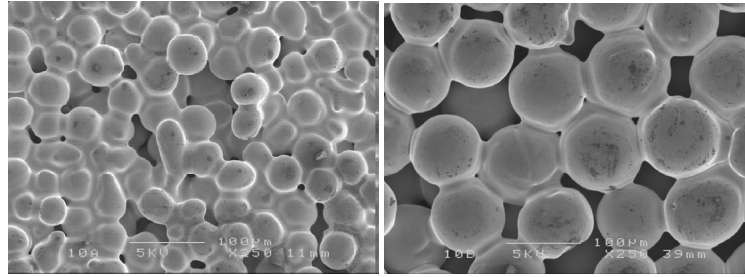
Şekillendirme ve sıkıştırma yöntemine karar verilirken aşağıdaki parametreler dikkate alınır (Yalçın, 2007):

- Kullanılacak tozun tipi (küresel, sünger, pul) ve toz imalat yöntemi
- Bağlayıcı ve yağlayıcı kullanımı
- Rijit kalıp kullanımı
- Üretilcek malzemeden istenilen özellikler

2.5. Sinterleme

2.5.1. Sinterleme Esasları

Sinterleme, parçacıkların birbirine bağlanmasını sağlayarak önemli ölçüde mukavemet artışına ve özelliklerin iyileşmesine sebep olan ısıtma işlemidir. Sinterleme, birbirine temas eden parçacıkların yüksek sıcaklıklarda birbirine bağlanmasını sağlar. Bu bağlanma, ergime sıcaklığının altında katı halde atom hareketleriyle oluşabilir. Fakat pek çok durumda sıvı faz oluşumu ile birlikte gerçekleşir (German, 2007). Mikro yapı ölçeğinde, bağlanma temas eden parçacıklar arasında boyunlaşma ile kendini gösterir. Şekil 2.22 a) ve b) de verilen taramalı elektron mikroskobu görüntüsünde küresel parçacıklar arasında katı halde boyun oluşumu görülmektedir. Bu tür boyunlaşma mukavemetin ham mukavemete oranla artmasını ve diğer bir çok faydalı özelliğin gelişmesini sağlar. Sinterleme, yüksek sıcaklıkta atomların yayınımlarını ve küçük parçacıkların yüzey enerjisinin azalmasıyla gerçekleşir. Sinterleme ile bu yüzey enerjisi giderilir. Birim hacimdeki yüzey enerjisi parçacık boyutu ile ters orantılıdır. Bu nedenle daha yüksek özgül yüzey alanına sahip olan küçük boyuttaki parçacıklar daha yüksek enerjiye sahiptir ve daha hızlı sinterlenir. Fakat yüzey enerjisinin tamamı sinterlemeye harcanmaz. Kristal yapı katılarda, hemen hemen bütün parçacık temas noktaları sınırlarını, enerjisine sahip olan tane sınırı oluşur. Böylece boyun büyümesi yüzey enerjisini azaltırken, tane sınırını enerjisini artırır. Doğal olarak bu sadece yüzey enerjisindeki azalmanın tane sınırı enerjisindeki artıştan yüksek olması durumunda meydana gelir (German, 2007).



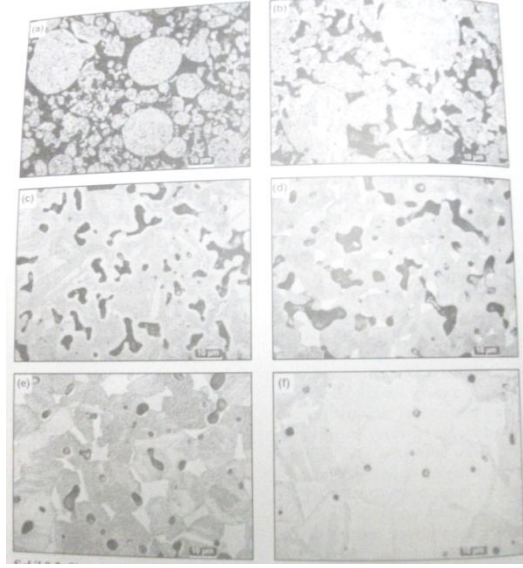
Şekil 2.22. a) 1 saat sinterlenen 45–63 µm Bronz tozlarının SEM görüntüsü **b)** 1 saat sinterlenen 90–125 µm Bronz tozlarının SEM görüntüsü (Roberts et al, 2011)

Sinterleme esas olarak itici güçler, mekanizmalar ve aşamalar açısından incelenir. Sinterlemenin itici güçleri bağlanmaya neden olan mikroskobik eğrilikleri tanımlar. Sinterleme mekanizmaları itici güçlere tepki olarak oluşan atom hareketlerinin yolunu tanımlar. Sinterleme aşamaları atom hareketleri sonucu oluşan geometrik gelişimi tanımlar. Bu aşamalar diğer taraftan itici güçleri değiştirir. İtici güçler veya sinterleme gerilmeleri mikro yapıdaki eğriliklerden kaynaklanır. Sinterleme mekanizmaları genellikle yüzey, tane sınırı veya kristal kafesinde oluşan yayılım işlemleridir. Sinterleme aşamaları etkin itici gücün ve kinetiğin açıklanmasına yardımcı olur ve işlemin matematik modellemesinde kullanılır. Şekil 2.5.2. de sinterleme sırasında meydana gelen, parçacıklar arası bağlanma, gözenek giderilmesi ve tane irileşmesini gösteren bir dizi optik görüntü verilmiştir. Sinterlemedeki geometrik değişimler atomların hareketini sağlayan ısıtmadan kaynaklanır. Yüksek sıcaklıklarda, çok sayıda atom komşuları ile bağlarını koparacak ve yeni yerlere gidecek düzeyde veya daha yüksek enerjiye sahiptir. Yüksek sıcaklıkta hareket edebilmek için yeterli enerjiye sahip olan atomların sayısı Arrhenius sıcaklık eşitliğinde verilen istatistiksel kavramlar ile tanımlanır,

$$N/N_0 = \exp(-Q/RT) \quad (2.2)$$

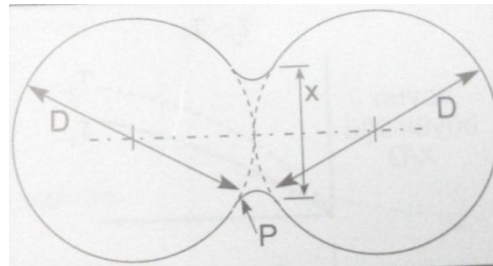
Burada; (N/N_0) hareket eden atomların sayısının toplam atom sayısına oranı, (Q) aktivasyon enerjisi, (R) gaz sabiti ve (T) ise mutlak sıcaklıktır. Aktivasyon enerjisi malzemeye ve atomlar arası bağ kuvvetine bağlıdır. Bu nedenle Q ergime sıcaklığı T_M ile ölçeklidir (yaklaşık olarak $Q(\text{kJ/mol})=0,145T_M$, Kelvin). Sinterleme sıcaklığı erime noktasına yaklaştıkça, hareket eden atomların sayısı arttığından, sinterleme hızı artar. Erime sıcaklığında atomların sıçrama hızı saniyede 1 milyon düzeyindedir. Ancak sinterlemenin ergime sıcaklığının %1'i düzeyindeki atom sıçrama hızlarında başladığı gözlenmiştir. Bu nedenle sinterleme sıcaklıklarının ergime sıcaklıkları ile ölçeklendirilmesi sürpriz olmaz. Örneğin, kar tanecikleri -15°C de buz, demir ve grafit tozları 1120°C 'de çelik, Alümina-krom oksit ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3$) tozları ise 1850°C ' de sinterlenerek yakut oluşturur (German, 2007). Yüksek sıcaklıklarda, sıçrayan atomlar nereye gideceklerini bilmediklerinden 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 artırır. Buna göre sinterleme; çok azının sinter bağını artırdığı ve yüzey enerjisini azalttığı çok sayıda atom sıçramalarının toplamıdır. Atomlar çok küçüktür, hacmi 10^{-29} m^3 dolayısı ile ölçülebilir sinter bağlarının büyümesi çok sayıda başarılı atom sıçraması gerektirir. Isıtmanın amacı, küçük bir kısmın başarılı olacağını bilerek, toplam atom sıçramalarının sayısını artırmaktır. Sinterleme saniyede 10^{14} defa titreşen çok sayıdaki küçük atomların rol aldığı istatistiki 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.



Şekil 2.23. Sinterlemede mikro yapı değişimini gösteren fotoğraflar. Bu fotoğraflar 17-4PH paslanmaz çelik tozların, 1365 °C' e kadar olan sıcaklıklara ısıtılmasından sonra, farklı sıcaklıklardan hızlı soğutulması ile elde edilmiştir. a) 1000 °C b) 1100 °C c) 1200 °C d) 1260 °C e) 1300 °C f) 1365 °C (German, 2007).

Sinterleme sırasında atom hareketi görülmez, ancak hacim değişimleri meydana geldiğinden, işlem genelde bu değişimler ile izlenir. Boyun büyümesi bunlardan bir tanesidir. Sinterlemenin temel ölçülerinden biri Şekil 2.23' de tanımlandığı gibi boyun büyüklük oranıdır. X/D , boyun çapının parçacık çapına oranıdır. Ayrıca, sinterleme sırasında yüzey alanı hızla azalır ve $\Delta S/S_0$ (yüzey alanındaki değişimin başlangıç yüzey alanına oranı) boyutsuz parametresiyle izlenir.



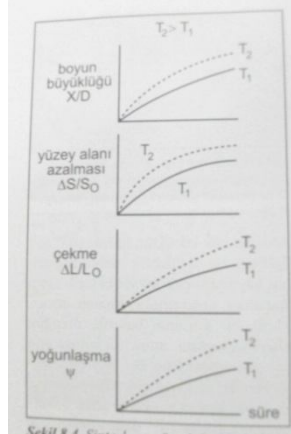
Şekil 2.24. boyun çapı X olan iki küresel parçacığın sinterleme profili. Küre çapı D ve boyunun dairesel profilinin yarıçapı P' dir (German, 2007).

Yüzey alanı mikroskop analizi, gaz adsorpsiyonu veya gaz geçirgenliği teknikleriyle ölçülür. Bunların yanı sıra, bir çok ham parçada sinterleme sırasında boyut, yoğunluk,

mukavemet, sertlik, elektrik ve ısı iletkenli, elastik modülü gibi özellik değişimleri olur. Bu nedenle, sinterleme işlemini izlemek için hacim özellikleri kullanılabilir ve Şekil 2.24.' de gösterildiği gibi sıcaklık ve zamanla benzer özellikler gösterir. Yaygın bir izleme yöntemi parçacıdaki boyut değişimidir. Sinterleme çekmesi yoğunluk artışı ve gözenek azalmasına bağlıdır (ancak sinterleme yöntemlerinin tamamının yoğunlaşmaya yol açmadığını, hatta bazılarında şişme olduğunu unutmamak gerekir). Çekme $\Delta L/L_0$, parça uzunluğunun ilk boya oranıdır. Çekmeden dolayı, parçanın yoğunluğunun kısmi ham yoğunluktan (ρ_h) sinterlenmiş kısmi yoğunluğa (ρ_s) artışı aşağıdaki eşitlik ile verilir:

$$\rho_s = \rho_G / (1 - \Delta L/L_0)^3 \quad (2.3)$$

Bu, kütle kaybının olmadığı varsayılarak yazılan kütle korunumu eşitliğidir. Gerçekte, ham parçada kirlilikler ve sinterleme sırasında yanan bir miktarda polimer vardır. Bu nedenle, ham yoğunluğun bu tür kütle kayıpları için düzeltilmesi gerekir. Yüksek ham yoğunluklar küçük sinterleme çekmeleri için ve yüksek son yoğunluklar verir (German, 2007).



Şekil 2.25. Sinterleme süresinin (iki farklı sıcaklıkta $T_2 > T_1$) boyun büyüklüğü oranı (X/D), yüzey alanı azalması ($\Delta S/S_0$), çekme ($\Delta L/L_0$), ve yoğunlaşma (Ψ) (German, 2007).

Diğer bir parametre yoğunlaşmadır, Ψ ve sinterleme ile olan kısmi yoğunluk değişiminin gözeneksiz katı yoğunluğuna erişmek için gerekli olan yoğunluk değişimine oranı olarak tanımlanır:

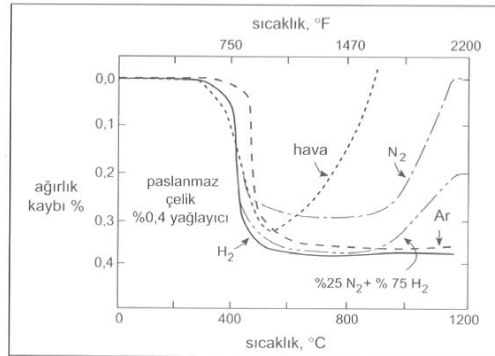
$$\Psi = (\rho_s - \rho_G) / (1 - \rho_G) \quad (2.4)$$

Yoğunlaşma, son yoğunluk, boyun büyüklüğü, yüzey alanı ve çekme oranı sinterleme sırasında parçacıklar arası bağlanma ve gözeneklerin giderilmesi ile ilgili ölçülerdir (German, 2007).

2.5.2. Polimer Yakma

Sinterleme öncesi, bağlayıcı veya yağlayıcı olarak kullanılan polimerler uzaklaştırılmalıdır. Polimer yakma işlemi, ham parçanın polimerin kararlılığını kaybedip bileşenlerine ayrıştığı sıcaklıklara ısıtılması sırasında gerçekleşir. Isı, polimeri önce eritir ve daha sonra molekül bağlarını kopararak ham parçadan buharlaşarak ayrılan küçük moleküllerin oluşmasını sağlar. Toz metalurjisinde kullanılan polimerlerin çoğu karbon-karbon, karbon-oksijen, ve karbon-hidrojen bağı gibi aynı tür temel bağları içerir. Bu nedenle, polimerlerin çoğu aynı sıcaklık aralığında yanar. Buharlaşan moleküller metan CH_4 , karbondioksit CO_2 , karbonmonoksit CO , su H_2O ve diğer yanmayan ürünlerin karışımından oluşur. Polimer yanması fırın atmosferine oksijen gibi aktif elementlerin katılmasıyla hızlandırılabilir. Argon gibi nötr atmosferler bütün ayrışma ürünlerinin doğrudan polimerlerden oluşmasını gerektirir. Oksijen ve hidrojen yetersizliği kurum oluşmasına ve karbon kirlenmesine yol açar.

Yanma işleminde atmosfer önemlidir, çünkü aktif gazlar polimerin kolaylıkla ayrılmasına veya tozlarla tepkimeye girmesine neden olur. Ağırlık değişimi, preslenmiş paslanmaz çelik tozu kütlesinin $10^\circ\text{C}/\text{dak}$ hızla ısıtılması sırasında yağlayıcı polimerin kütleden aşamalı olarak ayrılmadığını göstermektedir. Toz metalurjisinde kullanılan yağlayıcıların çoğu 1500°C 'nin altında ergirler, ancak $300-500^\circ\text{C}$ sıcaklığına kadar buharlaşmazlar. Şekil 2.26.'da verilen polimerde 400°C 'ye kadar çok az ağırlık kaybı olduğu, fakat 550°C 'a kadar yağlayıcının hemen hepsinin uzaklaştığı görülmektedir. Ham parçanın zarar görmemesi için hızlı ağırlık kaybı olan aşamada ısıtma hızı yavaş olmalıdır. Yanma işlemi değişik atmosferlerde sabit ısıtma hızında gösterilmiştir. Argon ve hidrojen tam yanma gerçekleştirilirken, hava ve azot malzemeye tepkimeye girdiğinden yanma sonrası ağırlık artışı olur. Ham yoğunluğun çok yüksek olduğu uygulamalarda açık gözenekliliğin az olması nedeniyle polimer/yağlayıcı buharlaşması zorlaştığından, ısıtma hızı yavaş olmalıdır (German, 2007).



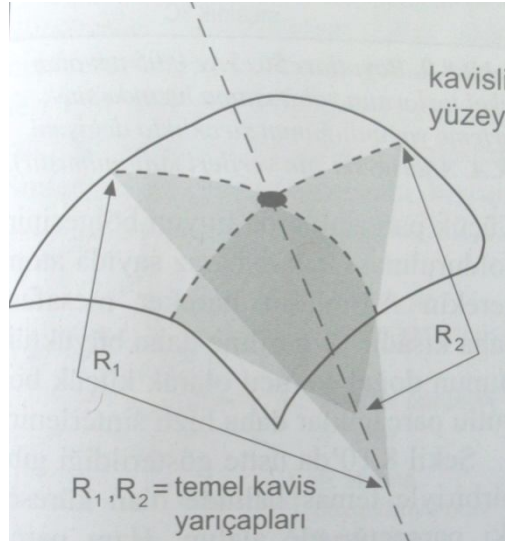
Şekil 2.26. % 0.4 bağlayıcı içeren paslanmaz çelik ham parçalarının polimer yanması sırasındaki ağırlık kaybı (İnt. Kay. 1)

2.6. Katı Hal Sinterleme Teorisi

Sinterlemenin itici gücü yüzey enerjisinin azaltılmasıdır. Rastgele atom hareketleri sırasında, atomlar mikro yapıdaki boşlukları doldurur. Kavisli yüzeylerin atom yerleşmeleri üzerine etkisini göstermenin bir yolu gerilmeye bakmaktır. Laplace eşitliği kavisli yüzey ile ilgili gerilmeyi, δ , verir:

$$\delta = \gamma / (1/R_1 + 1/R_2) \quad (2.5)$$

Burada γ yüzey enerjisi, R_1 ve R_2 ise yüzeyin eğrilik temel yarıçaplarıdır. Kavisli bir yüzey üzerinde genel bir nokta ve iki yarıçap R_1 ve R_2 Şekil 2.27' de gösterilmiştir.



Şekil 2.27. Kavisli bir yüzey üzerinde bulunan bir nokta (German, 2007).

Yarıçap buhar fazının içinde ise, bu içbükey yüzeye karşılık gelir, kabule göre negatif işaretlidir ve yüzey basınç altındadır. Düz bir yüzeyde gerilme yoktur. Böylece, sinterleme sırasında iç bükey yüzeyler basma gerilmesi altında, dış bükey yüzeyler ise çekme gerilmesi altındadır. Doğal eğilim rastgele atom sıçramalarının zamanla gerilmesiz düz yüzeylere doğru olması yönündedir. Dış bükey bölgelerin iç bükey bölgeleri doldurması, tıpkı yol yapımında tepelerin vadileri doldurmasında olduğu gibi, sürpriz değildir. Bu durum Şekil 2.27. de görüldüğü gibi sinterleme sırasındaki kavis değişiminden anlaşılabilir. Laplace eşitliğinin kullanılmasına örnek olarak sinterlemenin başlangıç aşamasında, boyun bölgesi atom düzeyinde Şekil 2.28.' de gösterilmiştir. Dikkat edilirse, yüzeyin bozulmuş atom bağı ile tanımlandığı ve tane sınırının da kusurlu olduğu görülür. Dolayısıyla, boyun bölgesi önemli ölçüde bozulmuş haldedir.

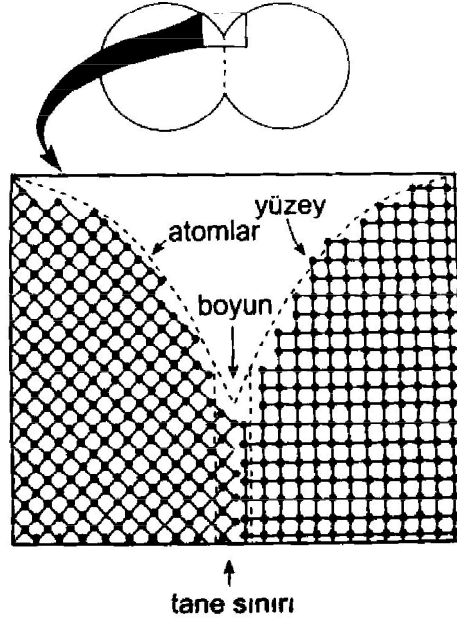
Parçacık yüzeyi boyunca boyun bölgesinden uzaktaki bir mesafede kavis sabittir. R_1 ve R_2 nin her ikisi de kür yarıçapına, $D/2$, eşittir.

$$\delta = \gamma / (2/D + 2/D) = 4\gamma / D \quad (2.6)$$

Ancak, boyun bölgesindeki eyer şekli içbükey ve dışbükey kavislerinin karışımlarından oluşan bir yüzey oluşturur. Boyun şeklini yaklaşık olarak göstermek için yarıçapı X^2/D ye eşit olan bir daire kullanılır. Buna göre, boyun bölgesindeki kavis, gerilmeyi aşağıdaki eşitlikle verebilir:

$$\delta = \gamma \cdot (2/X - 4D/X^2) \quad (2.7)$$

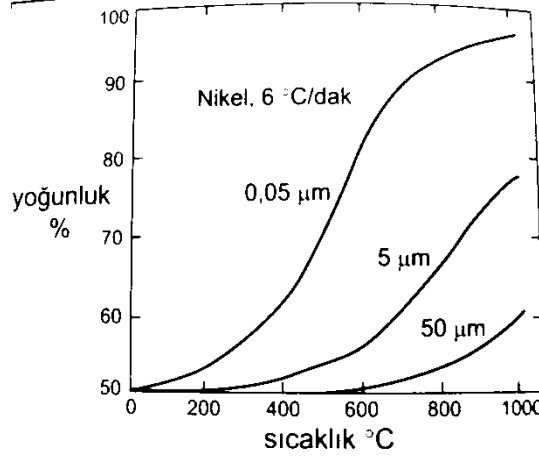
Bu gerilme sinterleme gerilmesi olarak adlandırılır. Örneğin, yüzey gerilmesi 1J/m^2 , toz çapı $10\mu\text{m}$ ve boyun uzunluğu da $2\mu\text{m}$ ise, gerilme basma gerilmesi olup değeri 9MPa ' dır. En önemlisi parçacık temas noktaları herhangi bir dış basınç olmadan basma gerilmesi altındadır. Dolayısıyla, sinterlemeye bağlı olarak doğal basma gerilmesi veya yoğunlaşma olur.



Şekil 2.28. Parçacıklar arasındaki sinter bağının atom düzeyinde şematik gösterimi (German, 2007).

Eşitlik 2.6 ve 2.7 karşılaştırılacak olursa, boyun bölgesinde bir gerilme gradyanı olduğunu gösterir. Örnek olarak, $10\mu\text{m}$ boyutlarındaki parçacıklar eşitlik 2.6 ya göre $0,4\text{MPa}$ çekme gerilmesi; eşitlik 2.7 ye göre 9MPa basma gerilmesi verir. Küçük bir boyunda gradyan oldukça büyük olabilir. Bunun sonucu olarak, parçacık boyutundan çok küçük olan boyunda dış

bükey bölgeden iç bükey bölgeye kütle taşınımı için önemli itici güç oluşturan gerilme gradyanı oluşur. Bunun sonucu olarak, küçük parçacıklar daha düşük sıcaklıklarda sinterlenir. Şekil 2.29' de 6 C/dak hızda ısıtılan nikel parçacıkları için bu davranışın bir örneği gösterilmektedir.

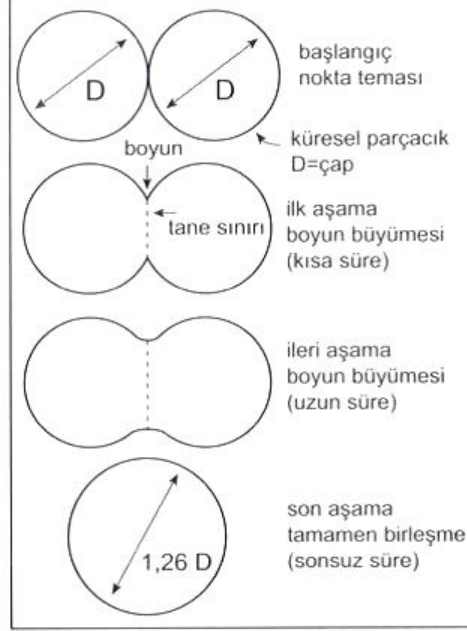


Şekil 2.29. Boyutları 50, 5 ve 0,05 µm olan nikel tozlarının sabit ısıtma hızında sinterleme yoğunluğunun sıcaklıkla değişimi (German, 2007).

Küçük parçacıklarda boyun bölgesinin doldurulması için daha az sayıda atom gerekir. Atomların hareket mesafesi daha kısadır ve gerilme daha büyüktür. Bunun doğal sonucu olarak küçük boyutlu parçacıklar daha hızlı sinterlenir. Şekil 2.30. 'da gösterildiği gibi birbiriyle temas halinde olan küresel iki parçacığı ele alındığında, ham parça içinde her bir parçacık üzerinde bu tür birçok temas noktası vardır. Sinterleme işlemi ilerledikçe birbirine temas eden parçacıklar arasındaki bağ büyür ve birleşir. Her temas noktasında bir tane sınırı büyür ve katı-buhar ara yüzeyinin yerini alır. Uzun süre sinterleme iki parçacığın tamamen birleşerek çapı başlangıç çapının 1,26 katı olan tek küresel parçacık oluşumuna yol açar. Preslenmiş ham parça içinde her parçacığın bir komşusu vardır. Böylece, her parçacığın birkaç değişik noktasında bağ oluşur (German, 2007).

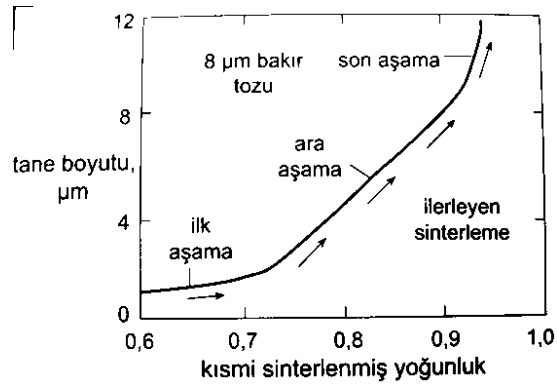
Sinterlemenin ilk aşaması, her parçacık üzerinde birkaç noktada boyun büyümesi ile tanımlanır. Fakat boyunlar biberinden bağımsız olarak büyür. Bu durum Şekil 2.31'de gösterilmiştir. Sıkıştırma olmadan parçacıklarda temas küçük noktalarıyla başlar. Başlangıçta gözenekler düzensiz ve küresel şekildedir. Boyun zamanla dışbükey bölgedeki atomlar tarafından doldurulan bir içbükeyi temsil eder. Boyun büyüdükçe kavis azalır ve işlem yavaşlar. Sinterlemenin ara aşamasında gözenekler yuvarlaklaşır, fakat gözenekler etrafındaki kavis kütle transferi için itici güç oluşturmaya devam ederek içbükey bölgeleri doldurur. Sinterlemenin ara aşamasında, boyunlar birbirleriyle etkileşecek ve örtüşecek ölçüde büyümüştür. Sinterlemenin ilerlemesiyle taneler büyür ve gözenekler küçülür. Sinterlemenin son aşamasında gözenekler kapalı ve küreseldir. Tam yoğunluğa yaklaşırken tane sınırı hareketini zorlaştıran gözenek

sayısı azaldığından tane büyümesi hızlanır. Gözenekler, sadece önemli oranda bulunduklarında tane büyümesini engeller.



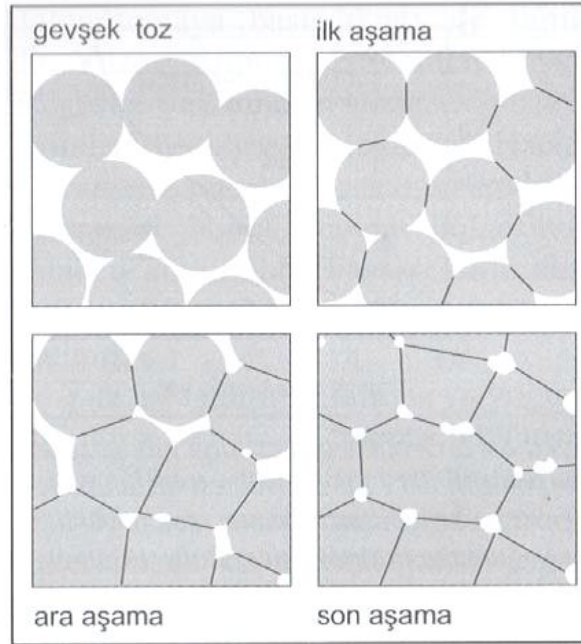
Şekil 2.30. Sinterlemede nokta temasıyla başlayan ve parçacıklar arası bağ gelişimini gösteren iki küre sinterleme modeli (German, 2007).

Şekil 2.31' de bakırın sinterleme yoğunluğuna bağlı olarak tane boyutunun değişimi verilmiştir. Aynı şekilde gözenek içinde gazın olduğu durumlarda, gözeneklerin küçülmesi durur ve irileşmeye başlar. Bu enteresant durumda, yoğunluk azalır, ortalama gözenek boyutu artar, gözenek sayısı azalır, gözenek izolasyonu oluşur ve sinterleme yavaşlar. Son aşamada, küresel gözenekler etrafındaki kavis çekmeye neden olur.



Şekil 2.31 Yoğunluk-Tane Boyutu ilişkisi (German, 2007).

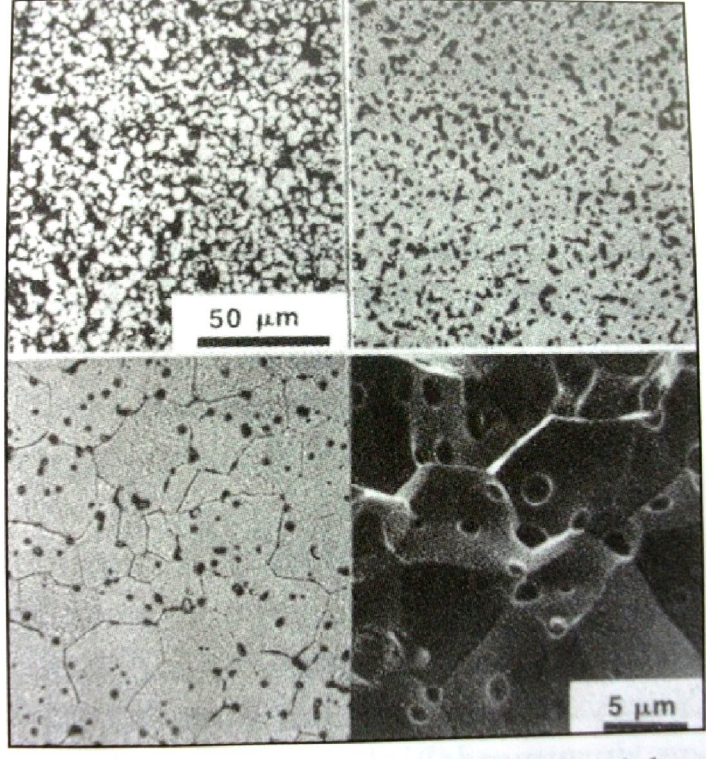
Ara aşama ile son aşama arasında, gözenek miktarı %8'e ulaştığında (%92 teorik yoğunluk) gözenek ağı geometrik olarak kararsızlaşır. Bu noktada, silindirik gözenekler, küresel gözeneklere ayrılır, bunlar ise tane büyümesini yavaşlatmada daha etkilidir. Eğer, tane boyutu hızla artarsa sinterlemenin son aşamasında izole gözeneklerin ortaya çıkması genelde yoğunlaşma hızını yavaşlatır. Buna ilaveten, içinde hapsolmuş gaz varsa gözenekler küçüldükçe gaz basıncı artacağından, gözenekler tamamen ortadan kaldırılamaz. Bu nedenle, pek çok sinterlenmiş malzemede erişilebilecek bir üst yoğunluk sınırı vardır ve bu değer %100 teorik yoğunluğun altındadır. Sinterleme vakumda yapıldığında gözeneklerde hapsolmuş gaz kalmadığından tam yoğunluğa erişilebilir.



Şekil 2.32. Gevşek toz ile başlayan ve sinterlemenin değişik aşamalarını gösteren çizimler (German, 2007).

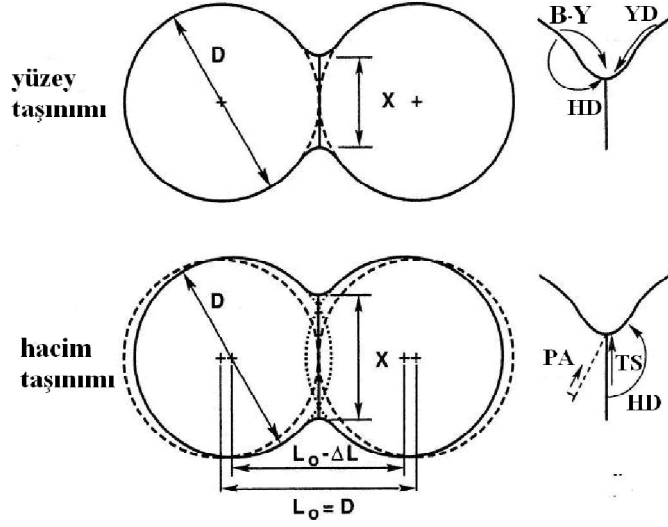
Sinterlemenin ilk aşamasına, çoğu zaman sinterleme sıcaklığına ısıtma sırasında hızla ulaşılır. İlk aşamada, boyun büyüklüğü oranı X/D 0,3 ten azdır ve sinterleme çekmesi $\Delta L/L_0$ genellikle %3 ün altındadır. Mikro yapı büyük eğrilik gradyanları içerir ve tane boyutu parçacık boyutundan fazla olamaz. Ara aşamada, gözenekler daha düzgündür ve teorik yoğunluğun %92 sine kadar ulaşabilir. Tane büyümesi ara aşamanın sonlarına doğru oluşur dolayısı ile, tane boyutu ilk parçacık boyutundan büyüktür. Sinterlemenin son aşamasında, gözenekler küresel ve kapalı olup aşırı tane büyümesi gözlenir. Başlangıçtaki parçacıklar mikro yapı da görülmez. Şekil 2.32 de verilen dört mikro fotoğrafta bu aşamalar gösterilmiştir.

Bu fotoğraflar, küçük boyutlu W tozların sinterlenmesi sırasında yoğunluk, tane boyutu ve gözenek yapısındaki değişimleri göstermektedir. Şekil 2.33' teki taramalı elektron mikroskobu görüntüsü son aşamaya kadar sinterlenmiş kırık yüzeyi göstermektedir. Tane sınırında, küresel gözenekler bulunmaktadır. Bu durum son aşama yoğunluk artışının meydana geldiğini gösterdiğinden istenir (German, 2007).



Şekil 2.33. Sinterleme sırasında yoğunluk artışı ve tane büyümesini gösteren dört mikro fotoğraf. (Siyah bölgeler gözenekler olup ilk aşamada (sol üst) malzeme yarı gözenek ve küçük parçacıklardan oluşur. Ara aşamada (Sağ üst) gözenekler daha az ve yuvarlaktır. Son aşamada (sol alt) taneler büyümüş ve gözenek oranı azalmıştır. Kırılma yüzeyi (sağ alt), tane sınırlarındaki küresel ve kapalı gözenekleri göstermektedir.) (German, 2007).

Taşıma mekanizmaları itici güçlere karşılık olarak kütle akışının nasıl olduğunu belirler. Yüzey taşıma mekanizmaları ve hacim taşıma mekanizmaları kütle akışının iki sınıfıdır. Aralarındaki fark atomların boyun bölgesini nereden doldurmaya başladıkları ile ilgilidir. Yüzey taşımasında atomlar boyun bölgesini yakınındaki gözenek yüzeylerinden başlayarak doldurur. Hacim taşıması ise tane sınırlarındaki atomları kullanarak bunları boyun bölgesinde yeniden konumlar. Şekil 2.34'de şematik olarak gösterilmiştir (German, 2007).



Şekil 2.34. Kısımli olarak sinterlenmiş bir geometriye uygulanan iki sınıf sinterlenme mekanizması (German, 2007).

Yüzey taşıyınım mekanizmalarında boyun büyümesi için kütle taşıyınımı yüzey kaynakları (buharlaşıma-yoğuşma, (B-Y) yüzey yayınıımı YY, hacim yayınıımı HY) ile gerçekleşir. Hacim taşıyınım işlemlerinde boyun büyümesi için kütle taşıyınımı iç kütle kaynakları (plastik akış PA, tane sınırı yayınıımı TSY hacim yayınıımı) ile gerçekleşir. Sadece hacim taşıyınım mekanizmaları ile çekme ve yoğunlaşma gerçekleşir. Yüzey taşıyınımı çekme veya yoğunluk artışı olmayan boyun büyümesi içerir. Yüzey yayınıımı ve buharlaşma-yoğuşma, yüzey taşıyınım kontrollü sinterlemede en önemli katkı yapan iki olaydır. Bir çok malzemenin düşük sıcaklıkta yapılan sinterlemesinde yüzey yayınıımı baskındır. Buharlaşma-yoğunlaşma, kurşun içeren düşük kararlı malzemelerin sinterlenmesi dışında pek önemli değildir (German, 2007). Buna karşılık, hacim-taşıyınım-kontrollü sinterleme çekmeye neden olur. Kütle, tane sınırından bazen de tane içinden gelir ve boyun yanındaki gözeneğin yüzeyinde toplanır. Hacim-taşıyınım mekanizmaları hacim yayınıımı, tane sınırı yayınıımı, plastik akış ve viskoz akış içerir. Özellikle preslenmiş tozlarda plastik akış ısıtma sırasında son derece önemlidir. Ancak toz tepe sıcaklığına ulaştığında plastik akış önemini kaybeder. Bunun tersine cam ve plastikler gibi amorf malzemeler viskoz akış ile sinterlenir. Bu durumda parçacıkların birleşme hızı parçacık boyutuna ve malzeme viskozitesine bağlıdır. Metallerde viskoz akış tane sınırında sıvı fazların olması durumunda mümkündür. Kristalli malzemelerin yoğunlaşmasında tane sınırı yayınıımı oldukça önemlidir ve pek çok metalin yoğunlaşmasında esas yayınıım mekanizmasıdır. Yüzey ve hacim taşıyınım işlemleri boyun büyümesine neden olurken, aralarındaki en önemli fark sinterleme esnasındaki yoğunluk veya çekmedir. Hacim taşıyınım mekanizmaları genelde yüksek sıcaklıklarda baskındır (German, 2007).

2.6.1. İlk Aşama

İlk aşama sinterlemesinde eğrilik denkleminin (denklem 2.5.) uygulanması, sinterleme mikro yapısında buhar basıncı, boşluk oranı ve gerilme farklılığının tahminini sağlar. Örneğin, boyun bölgesindeki buhar basıncı boyun iç bükey olduğundan denge basıncından daha düşüktür. Bununla birlikte, dış bükey yapıdan dolayı toz kütlesi denge basıncının üzerinde buhar üretir. Sonuç olarak, parçacık boyutundan daha kısa mesafelerde basınç farkı oluşur. Suyun aşağı doğru akması gibi, bu basınç farkı boyun bölgesine kütle taşınımına yol açar. Buhar basıncı benzer şekilde, kavisli bir yüzey altındaki boşluk yoğunluğu C , eğriliğe bağlıdır.

$$C = C_0(1-\gamma\Omega/kT)(1/R_1+1/R_2) \quad (2.8)$$

Burada C_0 denge durumundaki boşluk yoğunluğu, γ yüzey enerjisi, Ω atom hacmi, k Boltzman sabiti, T ise mutlak sıcaklıktır. Denge durumundaki boşluk yoğunluğu Arrhenius sıcaklık bağımlılığına sahiptir ve C_0 , $\exp(-Q_L/RT)$ ile değişir. Burada Q_L boşluk oluşumu için gerekli olan ve ergime sıcaklığı ile orantılı olan aktivasyon enerjisidir. Yüzey eğriliği ne kadar fazla ise, denge durumundaki boşluk yoğunluğundan sapma da o kadar fazla olur. İç bükey bir yüzey için bu değer daha küçüktür. Dolayısı ile boşluklar iç bükey yüzeyden dış bükey yüzeye akarken, atomlar ters yönde hareket eder. Gerçekte gözenekler kütleli boşluk birikme yerleridir ve balon gibi zamanla iç basıncı kaybederek çökerler (German, 2007). Sinterleme hızının tahmin edilmesi için burada ele alınmayacak olan oldukça fazla sayıda matematiksel denklem kümesine ihtiyaç duyulur. Gerçekte, iç bükey ve dış bükey yüzeylerin boşluk yoğunluğundaki farklılık, boşluk yoğunluk gradyanı oluşturur. Boşluk ile kütle akışı ilişkisi için Fick' in birinci kanunu kullanılır. Boyun hacminin bilinmesi ve bunun boyun büyüklüğüne ve yayılım olduğu alana ilişkilendirilmesi, toplam boyun büyüklüğünün zaman, sıcaklık ve parçacık boyutunun bir fonksiyonu olarak hesaplanmasını mümkün kılar. Burada sinterlenen, n ilk aşamasında sabit sıcaklık boyun büyümesi modelleri boyun-büyükölük oranını X/D aşağıdaki gibi verir:

$$(X/D)^n = Bt/D^m \quad (2.9)$$

Burada X boyun çapı, D parçacık çapı ve t ise sabit sıcaklık sinterleme süresidir. Sinterleme sıcaklığı üssel bir eşitlik içinde yer alır:

$$B = B_0\exp(-Q/RT) \quad (2.10)$$

Burada B_0 malzeme, sıcaklık ve geometrik sabitlerin toplamı, R gaz sabiti, T mutlak sıcaklık ve Q ise atom taşınım işlemi ile ilgili aktivasyon enerjisidir. Denklem (2.9) daki n , m ve B' nin değeri kütle taşınım mekanizmasına bağlıdır. Denklem (2.9), boyun büyüklük oranı 0,3'ten daha düşük olması durumunda geçerlidir. Burada kütle taşınım hızı B parametresinin içindedir ve denklem 2.2 eşitliğindeki gibi Arrhenius sıcaklık ilişkisine sahiptir. Denklem 2.9, ideal şartlarda eşit boyutlu küresel tozlar için geçerli bir modeldir. Bu nedenle, gerçek toz ve sinterleme döngülerine uygulandığında çok hassas olmamakla birlikte, önemli işlem parametrelerini verir. Parçacık boyutunun tersine aşırı duyarlılık, küçük parçacıkların daha hızlı sinterlenmesi anlamına gelmektedir. Diğer işlemlere, küçük parçacık boyutlarında yüzey yayını ve tane sınırı yayını artar. Bütün durumlarda, sıcaklık üssel bir terim olarak yer alır ve yüksek sıcaklıklarda küçük sıcaklık değişimleri önemli etki yapar. Son olarak, zamanın azalan etkisi vardır ve Şekil 2.29' da gösterildiği gibi sinterleme hızı zamana bağlı olarak azalır.

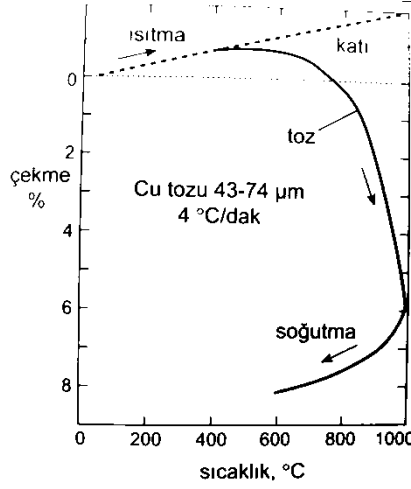
Kütle taşınım işlemleri, parçacıkların temas noktalarındaki kütlelerin uzaklaştırılması ve boyun oluşumu içim yeniden yerleştirilmesi ile ham parça yoğunluğunu değiştirir. Sonuçta toz parçada çekme oluşur. Sinterlemenin ilk aşamasında, parçacıkların birbirine yaklaşması ile boyun büyüklüğü birbirine aşağıdaki şekilde bağlantılandırılabilir :

$$\Delta L/L_0 = 1/4(X/D)^2 \quad (2.10)$$

Burada $\Delta L/L_0$ ham parça uzunluğundaki değişimin ilk uzunluğa oranıdır. Sinterlemenin ilk aşamasındaki çekme miktarı, kinetik bir kanuna uygunluk gösterir:

$$(\Delta L/L_0)^{n/2} = Bt/2^n D^m \quad (2.11)$$

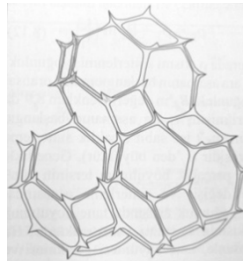
Burada $n/2$ ' nin değeri 2,5 ile 3 arasındadır, D parçacık çapı, t ise sabit sıcaklık zamanıdır. Sinterlemenin çekme miktarı ile izlenmesi sadece hacim taşınım işlemlerinde geçerlidir. Ancak, çekme ham parçanın değişik sıcaklıklara değişik sürelerde ısıtılması ile kolaylıkla ölçülebilir. Alternatif dilatometre veya doğrudan görüntüleme teknikleri ısıtma sırasında çekmenin sürekli kaydedilmesinde kullanılabilir. Dilatometre ile uygulanan yaygın bir teknik sabit hızda, 5 veya 10 °C/dak ısıtma ile belirli sıcaklık aralığında tarama yapmaktır. Şekil 2.35 de bakır tozunun 4 °C/dak ısıtma hızındaki sinterleme çekmesi örnek olarak verilmiştir. Sinterlemenin aktif olduğu bölgeyi belirlemek için numune boyu sıcaklığa bağlı olarak kaydedilir ve çekme hesaplanır. 500 °C' a kadar sadece ısıl genleşme belirgin olup bunun üzerindeki sıcaklıklar da ise sinterleme çekmesi daha baskındır. Dilatometre sinterleme sıcaklığını tek bir deney olarak belirler.



Şekil 2.35. boyutları 43-74 µm arasında olan bakır tozlarının 4°C/dak ısıtma hızında sinterleme çekmesinin sıcaklığa bağlı olarak değişiminin dilatometre ile belirlenmesi (German, 2007).

2.6.2. Ara Aşama

Özellik gelişiminin önemli bir bölümü sinterlemenin ara aşamasında gerçekleşir. Bu aşama gözenek yuvarlaklaşması, tane büyümesi ve genellikle yoğunluk artışı ile tanımlanır. Şekil 2.36' da idealize bir şekilde gösterildiği gibi sinterleme geometrisinin, tane kenarında tüp şeklinde gözeneklerden oluştuğu kabul edilmektedir. Sinterlemenin ara aşamasında, yoğunlaşma hızı boşlukların gözeneklerden uzaklara yayınımına ve tane sınırlarındaki boşlukların üzerinde yok olmasına bağlıdır. Boşlukların yok olması tane sınırlarının hacim değişimini telafi etmesini gerektirir. Bu ise tane büyümesi, tane bükülmesi ve tane dönmesi ile gerçekleşir. Tane dönmesinin yoğunlaşmaya katkısının bir kanıtı Şekil 2.37' da bakır kürelerin sinterleme esnasındaki görüntülerinde verilmiştir. Parçacıklar yoğunlaşma için zamanla dönmektedir.

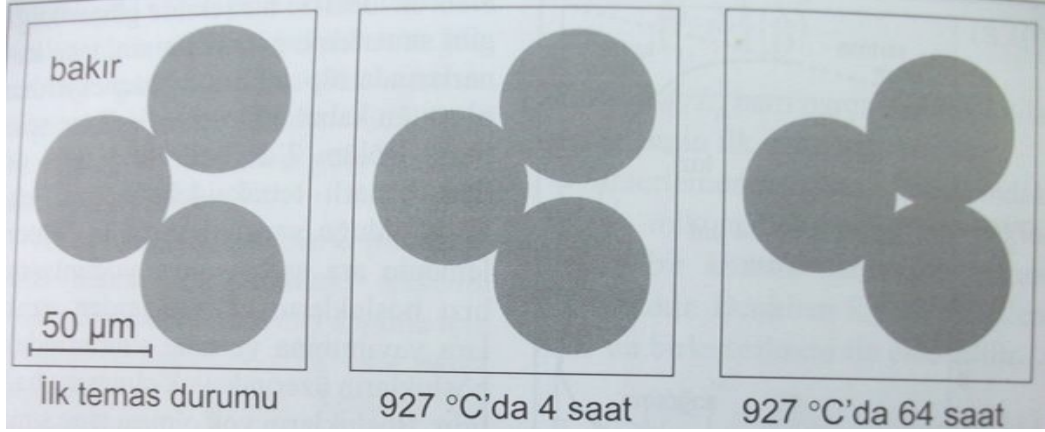


Şekil 2.36. Sinterlemenin ara aşamasındaki gözenek ağının şematik çizimi (German, 2007).

Sinterlemenin ara aşamasındaki yoğunluk artış hızı, dp/dt , boşlukların ve atomların (gözenek büyüklüğü ve sıcaklığa bağlı) akışı, yayılım mesafesi (tanecik boyutuna bağlı) ve birim hacimdeki gözenek sayısı ile belirlenir. Yoğunluk aşağıda verilen denklem ile ifade edilir:

$$\rho_s = \rho_1 + B_1 \ln(t/t_1) \quad (2.12)$$

Burada ρ_s kısmi sinterlenmiş yoğunluk, ρ_1 ara aşamanın başlangıcındaki oransal yoğunluk, B_1 'in değeri denklem 2.10 da verilmiştir, t_1 ara aşamanın başlangıç zamanı, t ise sabit sıcaklık sinterleme süresidir. Genellikle B_1 parçacık boyutunun tersinin küpü ile değişir ve sinterleme esnasındaki yoğunluk artışında tane boyutunun etkisinin önemini yansıtmaktadır. Bu nedenle tane büyümesi gecikmesi ve tane sınırı yayılımının artırılması yoğunlaşmayı önemli ölçüde iyileştirir.



Şekil 2.37. Bakır parçacıklarının 927 °C'deki sinterlenmesi. (Boyun büyümesi sırasında boşlukların tane sınırlarında yok olması nedeni ile taneler yavaşça yeni yönlerle döner ve yoğunluğu artırır. Sinterlemedeki yoğunluk artışında tane sınırlarındaki boşlukların ortadan kalkması çok önemlidir.) (German, 2007).

Tane büyümesi sinterlemeyi yavaşlattığından, sinterleme sırasındaki tane büyümesi kinetiğinin anlaşılması önemlidir. Yoğun malzemelerde ortalama tane büyüklüğü G , klasik yasaya göre zaman t ' ye bağlı olarak artar:

$$G^2 = G_0^2 + kt \quad (2.13)$$

Burada t sabit sıcaklık zamanı, G_0 başlangıç tane büyüklüğü, k , faktörü ısı aktivasyon parametresidir. Gözenekler olduğunda, k faktörü kabaca gözeneklerle kesişen tane sınırlarının oranı kadar azalır. Dolayısı ile sinterlemenin ilk aşamasında tane sınırlarının büyük bir bölümü

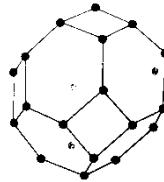
gözenekleri kestiğinden tane büyümesine oldukça fazla engel vardır. Fakat yoğunluk arttıkça, gözenekler giderildikçe K' nın artması ile daha büyük tane oluşumu sağlanır ve bunun sonucu olarak sinterleme yavaşlar. Sinterlemenin ara ve son aşamalarında, tane şeklinin tane sınırlarında silindirik şekilli gözeneklerin bulunduğu on dört kenarlı tetrakaidekheron olduğu varsayılmaktadır. Bu geometride gözenek çapı d_g , tane boyutu G , gözenek oranı ε arasındaki ilişki vardır:

$$\varepsilon = \pi (d_g/G)^2 \quad (2.14)$$

Tane sınırları gözeneklere bağlı kaldığı sürece, bu denkleme göre gözenekler bir araya geldikçe (büyüyen gözenek boyutu) veya gözenekler giderildikçe (azalan gözenek) tane boyutu büyür. Ara aşamada yoğunlaşma, hacim ve tane sınırı yayınımları ile gerçekleşir. Genelde tane sınırı yayınımları daha önemlidir. Tane sınırında bulunan gözenekler kaybolur, ancak tane sınırlarına bağlı olmayan gözenekler kararlı bir şekilde kalır. Ara aşama sinterlemesinde gözenek yuvarlaklaşması ve gözenek göçünden de anlaşılacağı üzere yüzey taşınımı etkindir. Fakat yüzey taşınımı yoğunluk atışına katkıda bulunmaz. Yayınım hızı, tane büyümesi ve gözenek hareketi ısı ile etkinleştirilmiş işlemlerdir. Pek çok malzemede bu işlemler tane boyutu, gözenek boyutu ve gözenekler arası mesafeye bağlıdır. Mikro yapı sürekli olarak değiştiğinden sıcaklığın sinterleme işlemine karmaşık bir etkisi vardır (German, 2007).

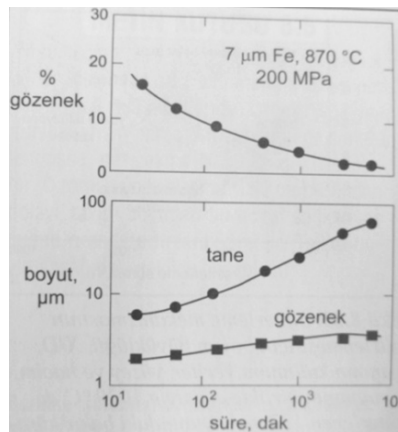
2.6.3. Son Aşama

Sinterlemenin son aşaması kapalı gözenekler ile olur ve gözenek boyutu artar. Eğer kapalı gözenekler hareketli ise tane büyümesi sırasında tane sınırları ile birlikte hareket ederek yoğunlaşmanın sürmesini sağlar. ancak başlangıçtaki yüzey enerjisinin azalması ile birlikte son aşama sinterlemesi yavaştır. Son aşama sinterlemesi sırasında gözenekler kapalıdır, izoledir ve küresel veya mercek şeklinde olma eğilimindedir. Şekil 2.38' de gösterildiği gibi gözenekler tane sınırları ile bağlantılı ise, hacim taşınım işlemleri ile çekme gösterirler.



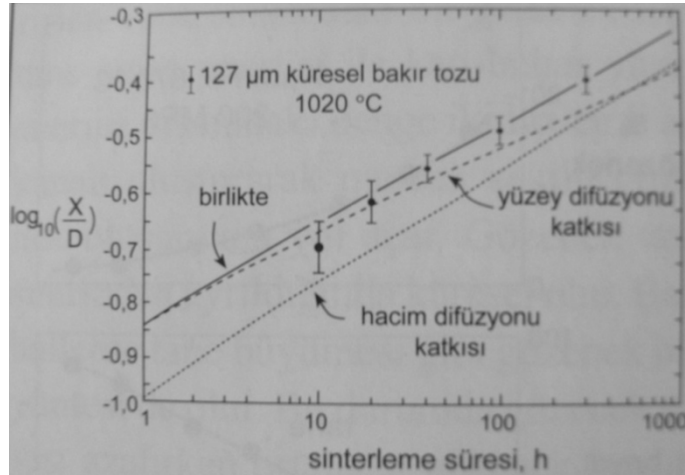
Şekil 2.38. Tane köşelerinde küresel gözenekler bulunan tetrakaidekahedron tane şekli. (Bu mikro yapı ara aşamanın karakteristiği olan açık silindirik gözeneklerin çökmesinden sonra sinterlemenin son aşamasında oluşur) (German, 2007).

Tane sınırındaki bir gözenek için, tane sınırı enerjisi ile katı-buhar yüzey enerjisi arasında denge iki düzlemlili açı kanalı oluşturarak mercek şekilli gözenek oluşumuna yol açar. Gözenek tane sınırlarından ayrıldığında küresel olur. Bu durumda gözenek sayısı azalırken ortalama gözenek boyutu artar. Gözenek eğriliğindeki ve boşluk yoğunluğundaki farklılıklar, az kararlı olan büyük gözeneklerin irileşmesine yol açar. Bu işlem "Ostwald olgunlaşması" olarak adlandırılır. Eğer gözenek içerisinde gaz varsa bu durum gözenek giderilmesini yavaşlatır veya engeller. Bu nedenle, tam yoğunluk gerekiyorsa vakumda sinterleme tercih edilir. Sinterlemenin son aşamasında, gözeneklerde hapsolmuş gaz, yoğunlaşmayı engelleyecektir. Gerçekte, belirli bir noktadan sonra parça ne kadar uzun süre sinterlenirse sinterlensin yoğunluğunda bir artış olmaz. Bu durum, kavisli gözenek yüzeyinden kaynaklanan kılcal basınç ile iç gaz basıncının dengelenmesinin sonucudur. Son aşamadaki gözenek giderme hızı yüzey enerjisi ve gözenek gaz basıncı arasındaki dengeye bağlıdır. Malzemelerin çoğunda ham parça sinterlenirken gözenek boyutları bir dağılım gösterir. Bunun sonucu olarak bazı bölgeler sinterlemenin son aşamasına komşu bölgelerden daha erken ulaşır. Bunun anlamı ara aşama ile son aşamanın arasında keskin bir geçişin olmamasıdır. Ham kütle içindeki gözenek dağılımının bir sonucu, yoğunlaşma kinetiğinde görülebilen gözenekler ve taneler arasında karmaşık etkileşimdir. Şekil 2.39' da görüldüğü gibi sinterlemenin son aşamasında gözenek büyümesi meydana gelebilir. Bu grafik küçük boyutlu demir tozunun uzun süreli sinterlenmesi sırasındaki gözeneklilik, tane boyutu ve gözenek boyutunu göstermektedir. Gözeneklilik azalmasına rağmen, gözenek boyutu artmakta ve tane boyutu büyümektedir. Bir çok faktör son gözeneklerin giderilmesini engelleyebilir ve bunun sonucu olarak sinterlemede %100 yoğunluğa ulaşmak önemli ölçüde tedbir almayı gerektirir (German, 2007).



Şekil 2.39. 200 MPa basınçta sinterlenmiş 7µm boyutundaki karbonil demir tozunun 870 °C'de farklı sürelerde sinterlenmesi sırasında gözeneklilik, gözenek boyutu ve tane boyutunun değişimi (German, 2007).

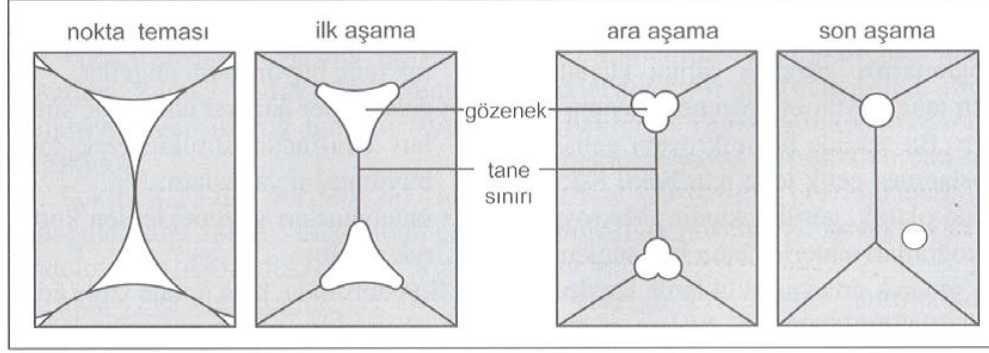
Sinterleme çalışmaları zaman, sıcaklık, parçacık boyutu, ham yoğunluk, ısıtma hızı ve atmosfer gibi diğer etkileri ayırarak incelemek için model sistemleri üzerine yapılır. Genellikle model sistemler teller, küreler, levha üzerinde-küre geometrilerinden oluşur. Ölçülen sinterleme davranışı, boyun büyüklüğü, yüzey alanı, yoğunluk, çekme, hatta elastik modül veya elektrik iletkenliği olabilir. Genelde özel olmayan bir sinterleme parametresi y , sinterleme izlemelerinden herhangi birini temsil edebilir. Sabit sıcaklık sinterlenmesinde sinterleme süresi t iken $\log(y)$ - $\log(t)$ diyagramı, zaman üssünün belirlenmesinde esas alınır. Şekil 2.40' da 1020 °C de sinterlenen 127 μm büyüklüğünde bakır küreleri için ilk aşama boyun büyüklüğü verisine uyan bir örnek verilmiştir. Logaritmik boyun büyüklüğü verisinin ($y=X/D$) eğimi, yüzey ve hacim yayınının boyunu büyütmesine karşılık gelir. Farklı sıcaklıklarda yapılan deneylerden görünür aktivasyon enerjisi de çıkarılabilir. Katı hal sinterleme verilerinin analizinde, yüzey taşınımının çekme oluşturmadığı belirlenmiştir. Sinterleme teorisinin bir sonucu, ham parçanın davranışı malzeme ve toz özelliklerinin bilinmesiyle önceden tahmin edilebilmesidir. Bu davranışın anlaşılması ile, özellikleri iyileştirmek için sinterleme döngüsünde değişiklikler yapılabilir (German, 2007).



Şekil 2.40. Sinterlenme mekanizmasının belirlenmesi için boyun büyüklüğü, X/D , oranının kullanımı (German, 2007).

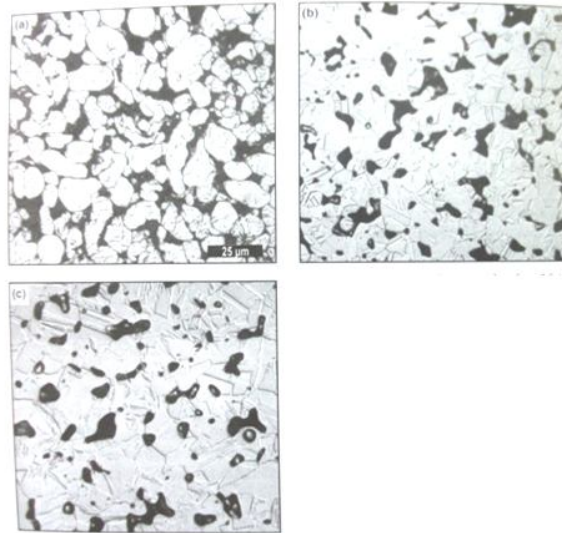
2.7. Gözenek Yapı Gelişimi

İyi sinterleme için, hızlı tane büyümesi aşamasında dahi, gözeneklerin tane sınırı ile bağlantılı olmasının sağlanması önemlidir. Sinterleme sırasında gözenek yapısındaki değişikliklerin kavramsal bir gösterimi Şekil 2.41' de verilmiştir.



Şekil 2.41 Parçacıkların nokta temasından başlayarak sinterleme sırasındaki yapı değişimlerinin şematik gösterimi (German, 2007).

Parçacıklar arasındaki temas noktaları büyüyerek boyun oluşturur. İlk aşamadan sonra, tane sınırı ve gözeneklerin düzenlenmesi sinterleme hızını kontrol eder. Ara aşamanın başlangıcında, gözenek geometrisi oldukça girintili-çıkıntılı olup gözenekler tane sınırlarının kesişme noktalarında yer alır. Sinterlemenin ara aşamasının devamında, gözenek geometrisi silindirik hale gelir ve sonra yoğunlaşma ile birlikte kapalı küre şeklinde gözeneklere dönüşür. Çünkü yoğunlaşma gözenek çapını küçültürken, tane büyümesi gözenek boyunu artırır. Bu şekilde bir mikro yapı gelişimi paslanmaz çelik tozu için Şekil 2.42' de açık olarak görülmektedir. Mikro yapı fotoğrafları sinterlemenin başlangıcında ve giderek artan sıcaklıklarda kaydedilmiştir. Görüldüğü gibi toplam gözenek miktarı azaldıkça gözenekler yuvarlaklaşmakta ve başlangıçtaki parçacık sınırları kaybolmaktadır.

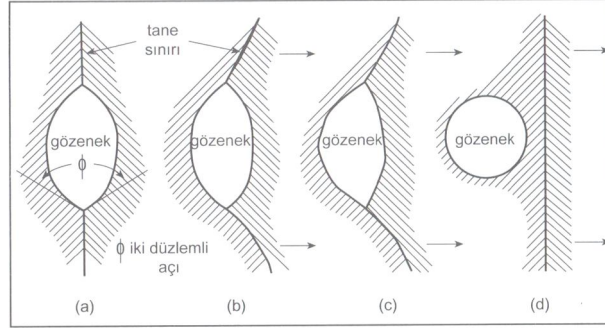


Şekil 2.42 -325 elek boyutunda olan 304L paslanmaz çelik tozunun artan sıcaklıklarda ısıtılması ile elde edilen üç optik mikro yapı fotoğrafı (German, 2007).

Sinterleme ilerledikçe, gözenek tane sınır etkileşimi üç şekil alabilir:

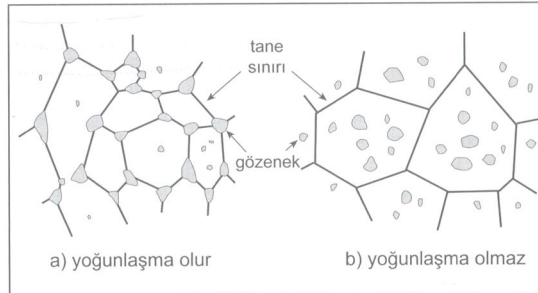
- Gözenekler tane sınırlarında kalarak tane büyümesini engeller,
- Gözenekler hareket eden tane sınırları tarafından sürüklenerek tane büyümesini yavaşlatır.
- Tane sınırları gözeneklerden koparak ayrılır (German, 2007).

Son aşamada, tane içinde izole edilmiş gözenekler oluşur ve yoğunlaşma ilerlemez. Sinterleme sıcaklığında, malzemelerin çoğu orta veya aşırı düzeyde tane büyüme hızları gösterir. Yüksek sıcaklıklarda, Şekil 2.43' te gösterildiği gibi tane sınırı hareketi gözenekten ayrılmaya yol açar. Düşük sıcaklıklarda, tane büyümesi yavaş olduğundan gözenekler tane sınırına bağlı kalır. Gözenek hareketi yüzey yayını ve buharlaşma-yoğunlaşma ile mümkündür. Sonuç olarak, sinterlemede mikro yapı gelişiminin ana belirleyicisi sıcaklıktır.



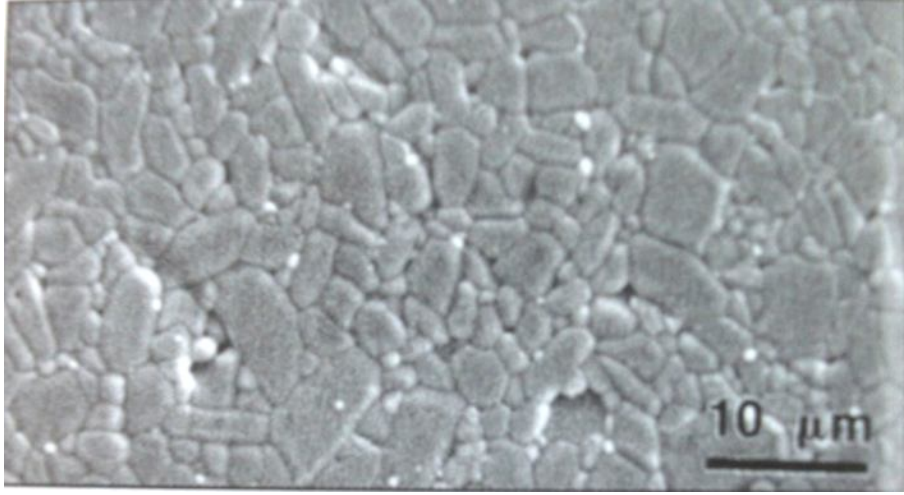
Şekil 2.43. Sinterlemenin son aşamasında gözenek izolasyonunu ve küreselleşmesi adımları: a) Tane sınırındaki gözenek, tane sınırı ve gözenek arasında iki düzlemli açı oluşur b) ve c) Gözenek sürüklenmesiyle tane büyümesi d) Tane sınırı kurtulması ile gözenek izolasyonu (German, 2007).

Şekil 2.44' deki verilen iki olası gözenek tane sınır düzenlenmesi incelenecek olursa, gözenekler tane kenarlarında veya tane içinde yer alabilirler. Gözeneklerin tane kenarlarında bulunduğu durumundaki sistem enerjisi düşüktür. Çünkü gözenekler toplam tane sınır alanını ve enerjisini azaltır.



Şekil 2.44. Sinterlemede olası iki gözenek-tane sınırı düzenlenmesi (German, 2007).

Eğer gözenek ile sınır ayrılırsa, sistemin enerjisi yeni oluşturulan tane sınırı alanına orantılı olarak artar. Sonuç olarak, gözenekğin tane sınırına bağlanma enerjisi vardır ve bu enerji gözenek miktarı ile artar. Böylece, ara aşamanın başlangıcında, gözeneklerden sınır ayrılmasının az olması beklenir. Yoğunlaşma arttıkça, gözeneklerin yavaş hareketi ve bununla birlikte kitleme kuvvetinin azalması sonucunda gözenekler tane sınırlarından kurtulur. Gözeneklerin tane sınırlarında ayrılması sinterleme ile erişilebilecek son yoğunluğu sınırlar. Bu nedenle, sıcaklığı dikkatli bir şekilde kontrol etmek önemlidir. Uygun şartlar sağlanırsa Şekil 2.45' te verilen sinterlenmiş Alümina da görüldüğü gibi, ince taneli ve yüksek yoğunluklu yapı elde edilebilir. Sinterleme işlemi 1600 °C de kontrollü bir şekilde yapılmıştır. Ayrıca, tane sınırı-gözenek temasını koruyarak yapılması yoğunluk artışı sağlanmıştır.



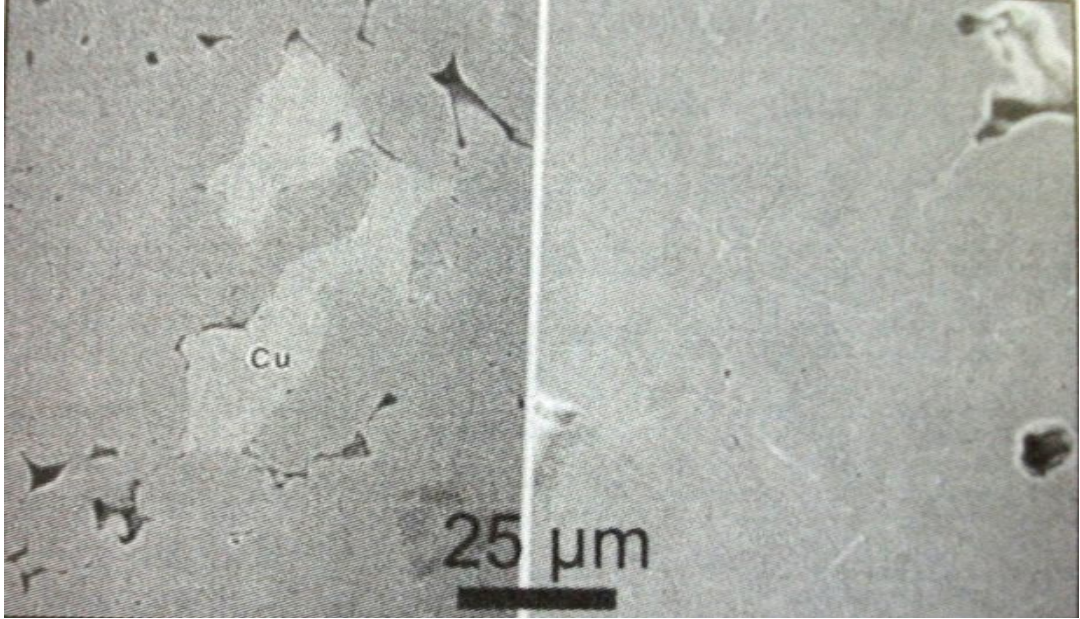
Şekil 2.45. Teorik yoğunluğa yakın sinterlenmiş ince taneli Alüminanın mikro yapısı (German, 2007).

Tane sınırı ve gözenek yapısı kontrol edilerek Alüminayı optik yarısaydam olacak şekilde sinterlemek mümkündür. Sinterlemede tam yoğunluğa ulaşmak için gözeneklerin tane sınırından ayrılmasının önlenmesi önemlidir. En kötü durum ise gözenek boyutu ve iri tane yapısının birlikte bulunmasıdır (German, 2007).

2.8. Yoğunlaşma - Bağlanma Olayları

Yoğunlaşma ve çekme toz metalurjisinde iki uç olay olarak görülür. Hassas parça üretimi yapan pek çok imalatçı sinterleme sırasında boyut değişimi olmamasını ister. Eğer çekme önlenirse preslenmiş ham parça boyutları hassas bir şekilde korunur. Sinterlenmiş parçayı kabul edilebilir sınırlara getirmek için takım boyutlarının çekmeyi dengeleyecek şekilde büyük olması zorunludur. Bu sorun oluşturur, çünkü ham parça içerisindeki yoğunluk gradyanı

sinterleme süresince farklı oranda çekmeye ve parça şeklinin bozulmasına yol açar. Yüksek sıcaklıklarda yoğunlaşma daha hızlı olduğundan bir seçenek göreceli olarak düşük sıcaklıkta yapılan kısa süreli sinterlemedir. Yüksek son yoğunluğu garanti etmek için sıkıştırma işlemi yüksek basınçlarda yapılır. Bazı malzemeler sinterleme sırasında şişme gösterdiğinden takım boyutunun küçük tutulması gerekir. Şişme genellikle karıştırılmış tozlar arasında bir tür kimyasal tepkime sonucu ortaya çıkar. Örneğin, demir-bakır tozu karışımında Şekil 2.46' da gösterildiği gibi, şişme bakırın ergiyip demir parçacıkları arasına girerek onları birbirinden ayırması sonucu ortaya çıkar. Bir dengeleme yöntemi, bu karışımı ısıtmaya devam edip şişmeye eşit miktarda sinterleme çekmesi oluşturarak boyut değişimini sıfırlamaktır. Örneğin, yaygın kullanılan Nikel-Çelik tozu karışımı 1150 °C de sinterlenirse %0,08 şişme yapar, ancak 1315 °C de sinterlenirse %0,32 oranında çekme oluşur, 1220 °C de sinterlenmede ise sıfır çekme oluşur. Sonuç olarak, malzemeye, presleme kolaylığına ve istenilen özelliklere bağlı olarak çekme istenir veya önlenir. Buna göre, sinterleme her durumda çekme veya yoğunlaşmaya göre tanımlanamaz (German, 2007).



Şekil 2.46. Demir- Bakır tozu parçalarının iki sinterlenme mikro yapısı. (Soldaki resim bakır ergimeden hemen önce numunenin 1075 °C den hızlı soğutulması sonucunda alınmıştır. Sağdaki resim ise, bakır ergidikten sonra ve numunenin hızlı soğutulduktan sonra alınmıştır. Ergimiş bakır, demir tane sınırına yayılarak parçada şişmeye neden olur.) (German, 2007).

Kalıpta sinterlenmiş parçalarda en az boyut değişimleri, iri toz boyutu, yüksek presleme basıncı, düşük sinterleme sıcaklığı, kısa sinterleme süresi, düşük parça yüksekliği ve homojen

parça geometrisiyle sağlanır. Ne yazık ki bütün bunlar parça dayanımı ve kalıp aşınması açısından olumsuzdur ve amaçlanan uygulama açısından pratik olmayabilir (German, 2007).

2.9. Karışım Toz Sinterlemesi

Karışım tozlar çoğu zaman alaşımların, kompozitlerin veya yüksek paketleme yoğunluklu yapıların üretimi için kullanılır. Örnek olarak, yüksek paketleme yoğunluklu tozlar farklı boyuttaki tozların karıştırılmasıyla elde edilmesi verilebilir. Diğer durumlarda, bir ana alaşım, tozla karıştırılır ve sinterleme sırasındaki yayılım ile karışım homojen alaşım haline getirilir. Son olarak, özellikle parçalıklı kompozitler, çözünmeyen tozların karışımı ve sinterlenmesi ile iki farklı mikro yapı elde edilir. Bileşimleri aynı olan, farklı boyuttaki toz karışımları genellikle daha yüksek ham yoğunluk verir. Ortalama parçacık boyutu arttıkça, sinterleme işlemi kötü yönde etkilenir. Düşük sinterleme sıcaklıkları ve kısa sinterleme sürelerinde, paketleme yararı baskındır ve toz karışımı en düşük boyut değişimi ile en yüksek yoğunluğu verir. Yüksek sinterleme sıcaklıkları ve uzun sinterleme süresinde, sinterleme etkisinin kötüleşmesi daha baskın olur ve en küçük ortalama toz boyutunda en yüksek yoğunluk elde edilir. Sinterleme sırasında homojenleştirme, ön alaşımlanmış tozlardan parça oluşturulmasına bir seçenektir. Bu tür alaşımlama, bileşimde değişime izin verir, daha düşük maliyetlidir ve aynı zamanda daha kolay üretim sağlar. Bazı durumlarda, karıştırılmış tozlardaki kimyasal gradyanlar, özellikle de fazlardan birbirinin tane büyümesini geciktirdiği durumlarda, sinterlemeyi artırır. Ancak, karışım toz sinterlemesi tam homojenlik sağlamak için, uzun sinterleme süresi veya yüksek sinterleme sıcaklığı veya küçük tozlar gerektirir. Eğer iki bileşenin yayılım katsayıları çok farklı ise, bileşenlerin eşit olmayan yayılma güçlerinden dolayı gözenek oluşur. Özellikle ergime noktalarının çok farklı olmaları durumunda, şişme meydana gelir. Mesela demire alüminyumun eklenmesi, alüminyumun ergimesi sonucu şişmeye neden olur. Sinterleme döngüsü iyi kontrol edilemezse, gevrek intermetalikler gibi fazlar oluşabilir (German, 2007).

2.10. Destekli Sinterleme

Yoğunlaşmayı desteklemenin bir yolu da, sıcak presleme gibi dışarıdan gerilme uygulanmasıdır. Diğer bir yol atom hareket hızının artırılmasıdır. Bir malzemenin yayılma gücü sıcaklık da dahil olmak üzere bir çok etmen tarafından belirlenir. Bununla birlikte küçük oranda katkılar yaparak sinterlemeyi hızlandırmak mümkündür. Bunun bazı örnekleri; volframa nikel, demire fosfor ve paslanmaz çeliğe bor katılmasıdır. Demir gibi bir malzemede, 910 °C' deki hacim yayılma gücü ferrit olarak bilinen hacim merkezli kübik (HMK) yapıda, östenit olarak bilinen yüzey merkezli kübik (YMK) yapıya göre yaklaşık 300 kat daha fazladır. HMK yapının

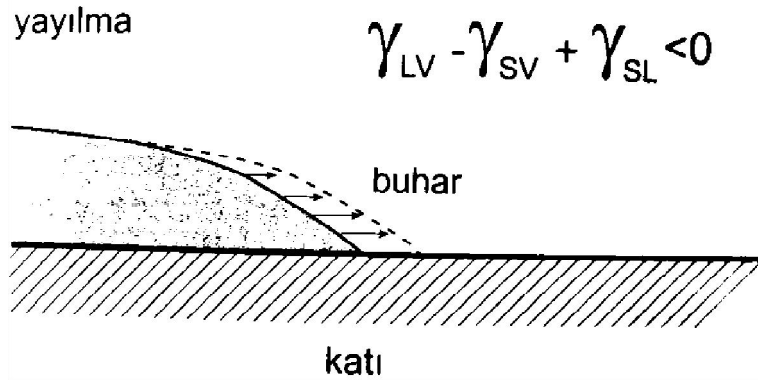
korunması sinterlemeyi destekler ve bu nedenle Mo, P ve Si katkısı sinterlemeye yardımcı olur. Bu tür karışık fazlı mikro yapılar aynı zamanda sinterleme esnasında tane büyümesine direnç göstererek sinterlenmiş yoğunluğu daha da artırır.

2.11. Sıvı Fazlı Sinterleme

Sinterleme sırasında sıvı faz oluşumu sinterleme hızını büyük ölçüde artırır. Esas olarak sıvı faz, taneleri birbirine bağlayan ve içinde hızlı yayınının olduğu lehim oluşturur. Sıvı faz sinterleme için temel gereksinim ıslatmadır. Şekil 2.47' de gösterildiği gibi sıvı katı tanelerin üzerine yayılmalıdır. Islatan bir sıvı, küçük temas açısına θ sahiptir. Temas açısı yüzey enerjilerinin dengesi ile tanımlanır.

$$\gamma_{SV} = \gamma_{SL} + \gamma_{LV} \cos(\theta) \quad (2.15)$$

Burada γ_{SV} katı-buhar yüzey enerjisi, γ_{SL} katı-sıvı yüzey enerjisi, γ_{LV} ise sıvı-buhar yüzey enerjisidir. Islatan bir sıvı filmi yoğunlaşmaya yardımcı olan kılcal kuvvet olarak tanımlanan yüzey gerilmesi sağlar.

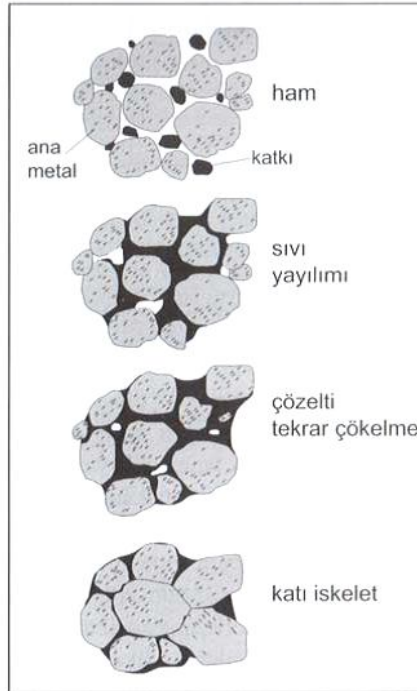


Şekil 2.47 Sıvının katı tanelerin üzerine yayılması.

Genellikle, ıslatma katının sıvı içinde çözündüğü durumlarda gerçekleşir. Bunlara ilave olarak bu çözünürlük katının sıvı içinden yayınabilmesini sağlar. Bu şartlardaki yayılım hızları olası katı hal yayınından çok fazladır. TiC-Ni ve WC-CO Sermetleri, Cu-Sn gibi metaller ve çeşitli seramik-cam bileşimleri gibi pek çok sistemler bu uygun özellikleri gösterir. Sıvı fazlı sistemlerdeki yoğunlaşma aşamaları Şekil 2.48 'de şematik olarak gösterilmiştir. Başlangıçta, ısıtma sırasında taneler katı hal sinterlemesi ile birbirine bağlanır. İlk sıvı oluştuğunda, tanelerin yeniden düzenlenmesi ile hızlı bir yoğunluk artışı olur. Oluşan sıvı katıyı ıslatarak oluşmuş olan katı bağlarını çözer ve yeniden düzenlenmeyi sağlar. Bundan sonra, çözelti tekrar çökme

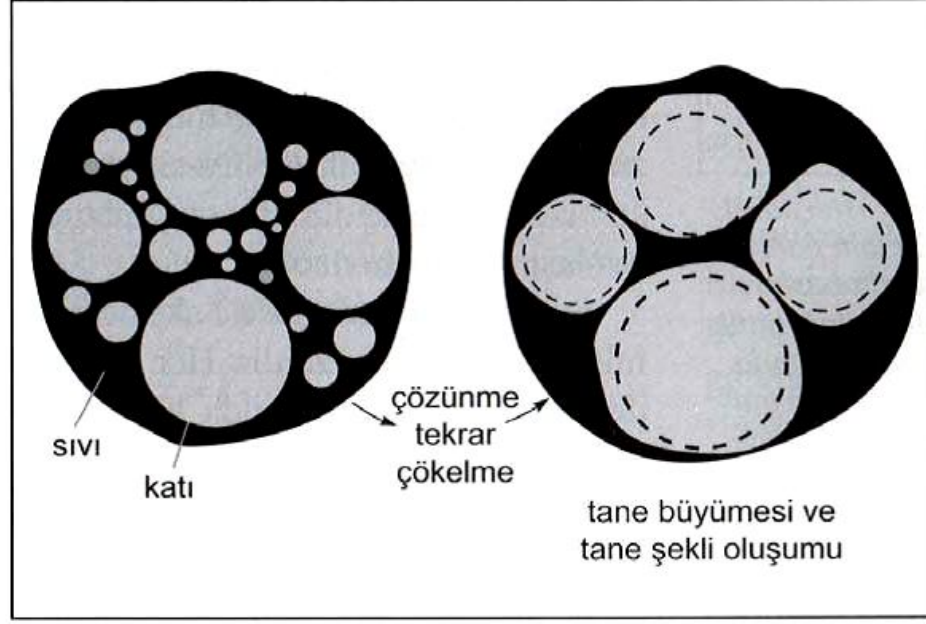
olarak bilinen işlemde, sıvı katı atomların taşıyıcısı olur. Bu aşamada daha küçük tane kütleleri sıvı içinde çözünür, sıvı içinden yayınır ve daha sonra büyük tanelerin üzerine çöker. Katı tane çözünürlüğü tane boyutu ile ters orantılıdır. Dolayısıyla, öncelikle küçük taneler sıvı faz içinde çözünür. Zamanla tane sayısı azalır ve tane boyutu artar. Çözelti tekrar çökeltme işlemi ve tane şekli yerleşimi Şekil 2.49 'da gösterilmiştir (German, 2007).

Çözelti- tekrar çökeltme işlemi, tane büyümesinin yanı sıra, işlem tane şekli yerleşimine imkan tanır, katının daha iyi paketlenmesini ve kalan boşlukların doldurulması için sıvının serbest bırakılmasını sağlar. Yayınım hızı genellikle yüksektir ve tam yoğunluğa dakikalar içerisinde ulaşılır. Ancak, düşük çözünürlüklü veya iri taneli sistemlerde yoğunlaşma yavaştır. Sıvının hacim oranı arttıkça gözenekleri dolduracak sıvı miktarı daha fazla olduğundan yoğunlaşmada kolaylaşır. Ancak yerçekiminden dolayı ham parça çökmesi sorun olur. Şekil 2.50' de yoğunlaşmanın sıvı oranı ile değişimi verilmiştir. Eğer sıvı yoksa, sinterleme katı hal işlemleri ile gerçekleşir. Fazla sıvı olması durumunda ise (yaklaşık %35 hacim oranı), sıvı oluşumu ile birlikte taneler arasındaki bütün gözenekler dolar. Ancak, bu durumda ham parça şeklini koruyamayabilir.



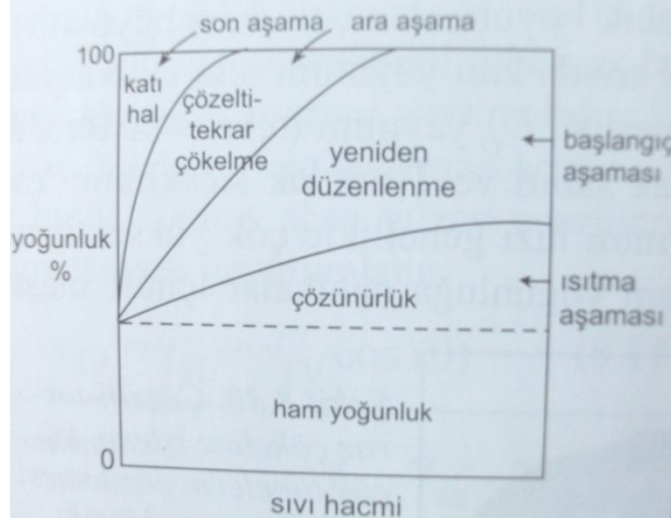
Şekil 2.48. İki toz karışımı kullanılarak sıvı faz sinterlemesinin kavramsal aşamaları.

İşlem sırasında ana metal katı durumdadır ve sıvı faz oluşumu ergime sıcaklığı düşük olan katkı metalinden kaynaklanır.



Şekil 2.49. Çözelti – tekrar çökme işlemi, küçük tanelerin çözülmesi ve daha sonra büyük tanelerin üzerine katı – faz çökmesi ile tane büyümesini sağlar (German, 2007).

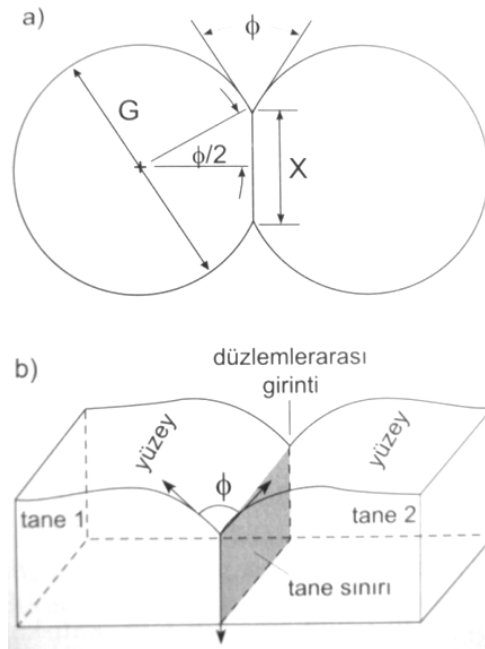
Sıvı oluştuğunda, kılcal kuvvetler taneleri yeniden düzenler, daha sonra tane şekli yerleşimi ve yoğunluğun daha da artmasına yol açan çözelti-tekrar-çökme oluşur. Sonunda, temas eden taneler arasında kararlı boyunlar oluşur ve son yoğunlaşma katı iskeletin sinterlenmesine bağlıdır.



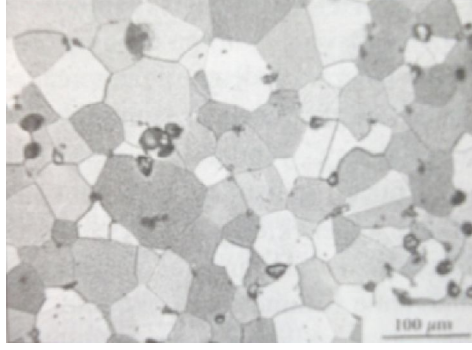
Şekil 2.50 Yoğunluk- Sıvı oranı haritası (German, 2007).

Ham parça ham yoğunluğa eşit yoğunluk ile başlar ve karışım tozların kimyasal çözünürlük gradyanlarından dolayı ısıtma sırasında yoğunlaşma başlar. Sıvı oluştuğunda

parçacıkların yeniden düzenlenmesi ile daha fazla yoğunlaşma olur. Bunu takiben çözelti-tekrar-çökeltme işlemi ve son olarak katı hal sinterlemesi ile oluşur. Her işlemin göreceli önemi sıvı miktarına bağlıdır. Küçük parçacıklar yüksek kılcal kuvvetler ve kısa yayılım mesafesi nedeni ile sıvı faz sinterlenmesine yardımcı olur. Fazla sıvı oranı ve sıvı içinde yüksek katı çözünürlükleri de yoğunlaşmaya yardımcı olur. Sıvı fazlı sinterleme ile aktifleştirilmiş sinterleme benzerdir. Her ikisinde de sinterleme sıcaklığında hızlı kütle taşınımı için kısa devre yolu olarak ikinci bir faz kullanılır. Aralarındaki en önemli fark sıvı fazlı sinterlemedeki ikinci faz oranının daha fazla olmasıdır. Bu yüksek orandaki sıvı faz özellikle sinterlemede tokluk sağladığı için çok yararlıdır. Sonuç olarak, sıvı fazlı sinterlenmiş ürünler daha üstün özelliklere sahiptir. Sıvı ile temas ettikten sonra Şekil 2.51 a' da gösterildiği gibi, iki taneli düzenleme esaslı kararlı bir katı-sıvı yapısı ortaya çıkar. Katı taneler kendilerini çevreleyen sıvı ile kararlı boyunlar oluşturduktan sonra denge durumu oluşur. Çapı G olan iki tane sıvı tarafından çevrelenir. Bu işlem, boyun tane boyutu oranı için dengeli iki düzlemli açı ϕ , değeri oluşturur. Aynı geometri (b) de gösterildiği gibi tane sınırının olduğu düz yüzeyler için de geçerlidir. Sıvı fazlı sinterlemenin, süper katıgen sıvı fazlı sinterleme, geçici sıvı fazlı sinterleme, tepkimeli sinterleme, sıvı emdirme gibi bir çok çeşidi vardır. İstenilen özellikleri elde etmek amacıyla bu sıvı fazlı sinterleme seçilebilir. Örneğin Şekil 2.52 de Ni ve Al tozlarının tepkimeli sinterleme ile $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ ' de ısıtılması ile oluşturulan Ni_3Al bileşiğinin mikro yapısı verilmiştir (German, 2007).

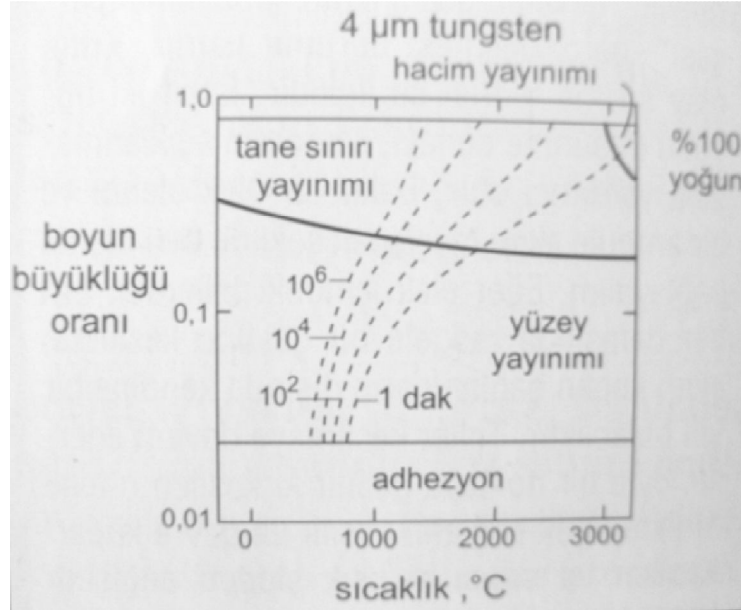


Şekil 2.51. Sıvı fazlı sinterlemede tane-tane teması dengesi için iki tane modeli (German, 2007).



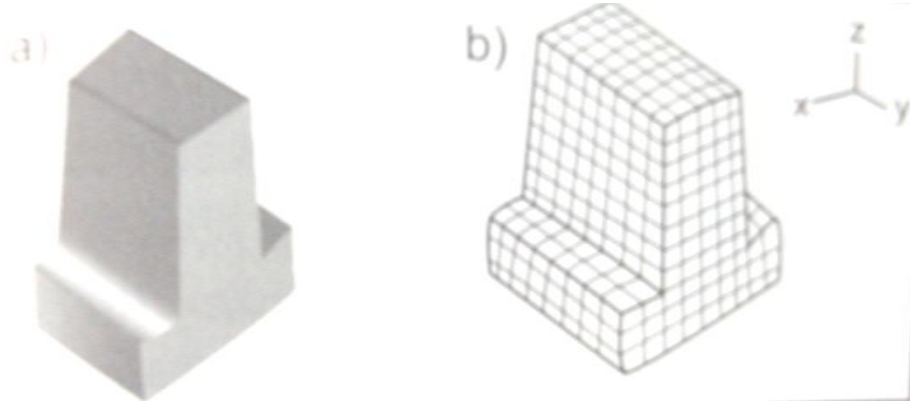
Şekil 2.52. Ni-Al toz karışımının ekzotermik tepkimeli sinterlenmesinde oluşan yapının optik görüntüsü (Ni_3Al yoğunluk %96) (German, 2007).

Bir laboratuvar deneyi için harcanan sürede, bilgisayar simülasyonu ile binlerce deney yapılabilir. Bilgisayarla işlem hızları geliştikçe simülasyon, sinterleme özelliklerinin belirlenmesinde en hızlı yol olmuştur. Programlar sinterleme fırınındaki ısı aktarımı, yoğunlaşma, özellikler, parça çarpılması, ham parça ile atmosfer etkileşimlerinin benzeşimini içerir. Sinterlemede karmaşık sorunlarının bilinmesi, bu karmaşıklığın bilgisayar simülasyonu ile etkili bir biçimde ele alınmasını sağlamıştır. Bu çalışmanın bir sonucu sinterleme diyagramlarının geliştirilmesidir. Bu diyagramlar işlem parametrelerinin seçiminde yol gösterir. Sinterleme diyagramına bir örnek $4\ \mu\text{m}$ 'luk W tozu için Şekil 2.53' de verilmiştir. Bu şekil 10^2 , 10^4 ve 10^6 dakika da dört farklı süre için boyun büyüklüğü oranının (X/D) sinterleme sıcaklığına göre değişimini göstermektedir. Yoğunlaşma esas olarak tane sınırı yayınımları ile gerçekleşir, ancak yüzey yayınımları parçacık bağlanmasında katkıda bulunmaktadır.



Şekil 2.53. $4\ \mu\text{m}$ tungsten tozu için Sinterleme haritası (German, 2007).

Son yoğunluk ve şekil tahminleri sonlu eleman hesaplamaları gerektirir. Benzeşimlerin büyük bölümü, sinterlenen parçanın sinterleme gerilmesine tepki veren bir viskoz kütle olarak kabul eder. Daha sonra, yoğunluk gradyanları, eşit olamayan ısıtma ve yerçekimi kullanılarak yoğunlaşma ile meydana gelen çarpılma tahmin edilir. Şekil 2.54' de basit bir ters T geometrisinde, şekil değişimi tahmini verilmiştir. Bu tür hesaplarda gerçeğe yakın sonuçlar elde etmek için, bir çok etkeni göz önüne almak gerekir. Bu nedenle, bilgisayar çözümlerinde bünye denklemlerini bilinen malzeme parametreleriyle oluşturmak için en zor bölümdür.



Şekil 2.54. Tungsten ağır alaşımından üretilen ters T şeklindeki bir parçanın sinterlenmesinde çekme ve çarpılmanın bilgisayarla benzeşim ile tahmininin karşılaştırılması a) Gerçek Numune b) Sonlu elemanlar şekil ve yoğunluk tahmini (German, 2007).

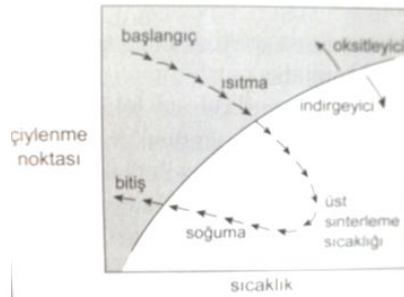
2.12. Sinterleme Atmosferleri

Sinterleme işlemi, ham toz parçayı istenilen kalite, şekil, ve boyuta sahip bir ürüne dönüştürür. Sinterleme döngüsünü tanımlarken, göz önüne alınması gereken ilk husus, sinter bağının istenilen seviyeye getirilmesidir. Parçacıklar arası bağ oluşturma yanında sinterleme döngülerinin oksit giderme gibi ikincil amaçları da vardır. Sinterleme atmosferinin en önemli görevi, yüksek sıcaklıktaki kimyasal tepkimeleri kontrol etmektir. Ayrıca atmosfer, bağlayıcı veya yağlayıcı giderme, numunelere ısı yayılımı, zararlı katkıların oluşumunun engellenmesi ile karbon ve azot seviyeleri gibi son kimyasal bileşiminin kontrol edilmesinde önemlidir. Preslenmiş ham parça, etrafındaki atmosfer ile kimyasal etkileşime girer ve bazı durumlarda atmosferden gaz emer. Karbürleme ve nitrürleme tepkimeleri son ürünün ağırlığını artıran örneklerdendir. Buna karşılık oksit indirgeme atmosfere gaz transferine sebep olur. Atmosferin bileşimi, malzeme ve istenilen kimyasal tepkimelere bağlıdır. Oksit seramikler genellikle hava ortamında sinterlenir, ancak yüksek performanslı malzemelerin çoğu için koruyucu atmosfer gereklidir. Metallerin, sinterlenme sırasında oksitlenmeden korunması ve absorbe edilen oksijen ve nemi parçadan uzaklaştırılması gereklidir. Metaller sinterlenmesi için genellikle

indirgeyici atmosfer gereklidir. Metaller için dahi ideal denilebilecek sinterleme atmosferi yoktur. Çünkü titanyum, tantalyum gibi metaller hidrojen gibi indirgeyici gazlarla tepkimeye girerken, aynı gaz paslanmaz çelik için iyi bir sinterleme atmosferidir (German, 2007). Sinterleme sırasında istenmeyen kirlilikler giderilmelidir. Metal tozları, sinterleme sırasında esas olarak oksit indirgenmesi nedeniyle %1,5'e kadar ağırlık kaybeder. Örnek olarak katı Fe_2O_3 'ün yüksek sıcaklıkta hidrojen tarafından indirgenmesini göz önüne alınırsa:



Burada (k) ve (g) sembolleri sırasıyla katı ve gazı ifade etmektedir. Hidrojen indirgenmesi neticesinde su buharı ortaya çıkar ve buhar, fırından geçen gaz tarafından kolayca uzaklaştırılır. Bazı durumlarda tepkimenin tersi de mümkündür. Demir tozu su buharı içeren ortamda ısıtıldığında, demir oksit ve hidrojen oluşur. Sıcaklığa bağlı olarak değişen oksit kararlılığı Şekil 2.55' de gösterilmiştir. Başlangıçta düşük sıcaklık ve yüksek çiylenme noktasındadır, fakat ısıtma ile oksitlenme-indirgeme sınırı aşılmaktadır. En yüksek sıcaklıkta şartlar daha indirgeyici olmakta, fakat soğuma sırasında ise oksitleyici şartlar ortaya çıkmaktadır. Sinterlenen parçanın kalitesi soğuma sırasındaki oksitlenme sıcaklığına bağlıdır. Bir toz metal parça sinterleme sıcaklığına ısıtılırken, parçacıklar nem veya oksijen absorbe ettiğinden dolayı ilk önce oksitleyici ortama maruz kalır ve gözenekler hava ile dolar. Yüksek sıcaklıkta parça ve atmosfer indirgeyici kısımda bulunur. Fakat soğuma sırasında, parça oksitlenme-indirgenme bölgesini geçerek oksitlenir. Bu durum yüksek sıcaklıkta gerçekleşirse, parça önemli ölçüde etkilenir. Bu bakımdan, soğuma sırasındaki atmosfer kalitesi çok önemlidir. Soğuma esnasında temiz atmosferin sağlanması fırın tasarımında en önemli noktadır (German, 2007).



Şekil 2.55. İndirgeyici atmosferde sinterleme sırasında oluşabilen çiylenme noktası ve sıcaklık şartları (German, 2007).

Fırın atmosferi; azot, su buharı, karbon monoksit, hidrojen, karbon dioksit ve metan karışımından oluşur. Fırın atmosferine hava ilavesi ile yanmanın özellikleri kontrol edilir. Bu hava-gaz oranı çıkan yanmış gazların özelliklerini belirler. Endotermik gaz ortamında hava-gaz oranı yaklaşık 2,4 iken ekzotermik gaz ortamında yaklaşık 9 ve üzerindedir. Ekzotermik gaz

ortamı tam yanma ile sağlanır. Sinterleme Atmosferi Gereksinimleri: Sinterlemede kullanılan atmosferler, aşağıdaki fonksiyonları sağlamalıdır.

- Havanın fırın içine girmesini engellemelidir.
- Çiğlenmeyi önleyebilmelidir.
- TM ürün üzerinde oluşabilecek oksitlenmeyi azaltmalıdır.
- Çelik parçalardaki karbon miktarını koruyabilmelidir.
- Özel uygulamalarda karbonu çıkarabilmelidir.
- Özel uygulamalarda soğutma esnasında oksidasyonu kontrol edebilmelidir.
- Isıl verimi üniform olarak taşıyabilmelidir (Nayar, 1984)

Çizelge 2.2. Demir, % 2 bakır, % 1 grafit ve % 1 yağlayıcı içeren parça için, fırın bölgeleri, sinterleme aşamaları ve atmosfer gereksinimleri (Başaran, 2007).

S/N	Fırın Bölmesi	Sıcaklık °C	Zaman dak	Sinterleme aşaması	Sinterleme alt basamakları	Sinterleme Atmosferi gereksinimleri	Oluşabilecek Atmosfer kompozisyonu (a) %			Oluşan gazların alaşı	Havalandırma ihtiyacı
							Hidrojen (b)	metan	Su		
1	Yağ alma	425-625	10-30	Ham parçadan yağlayıcının çıkarılması	Yağlayıcı buharlaşması, buhar yanması, giriş buhar püskürtme	Hızlı homojen ısı transferi; çok az oksitleme	2-7	0,0-0,1	0,5-1,5	Bıyık oranda giriş doğru	Keskinlikle olmalı
2	Ön ısıtma	650-1070	5-15	Parçacıkların yüzey oksitlerinin giderilmesi	Oksit giderme, grafit difüzyonu, bakır erimesi ve parçacık yüzeylerinin kaplanması	Yüzey oksitlerinin büyük oranda azaltma, üniform ısı transferi	5-15	0,1-0,3	0,01-0,03	Büyük oranda giriş doğru	Olmalı
3	Yüksek sıcaklık	1070-1150	10-30	Parçacık birleşmesi	Bakır difüzyonu, boyun büyümesi, gozencek küreselleşmesi	Doğal karbon azalmasını koruma	3-8	0,2-0,5	0,01-0,02	Orta düzeyde giriş doğru	Olmalı
4	Yavaş soğuma	1150-815	5-15	Karbon yeniden birikimi	Karbon transferi, homojenleşme	Üniform yavaş soğuma, çok az karbürleme	2-7	0,3-1,0	0,01-0,02	Orta düzeyde giriş doğru	Keskinlikle olmalı
5	Soğuma	815-50	30-90	Soğuma, isteğe bağlı oksitleme	Perlit oluşumu, parçanın soğuması, oksitlenmenin önlenmesi veya kontrolü	Yavaşça doğal demir dönüşümünü, üniform hızlı soğuma	0-2	0,0-0,1	0,01-0,02	Az veya orta düzeyde kısmi olarak çıkışa doğru	Keskinlikle olmalı

(a) Dengeleme esas olarak azot ile yapılmaktadır. Ancak karışımda çok az da olsa karbon monoksit ve karbon dioksit de bulunabilmektedir. (b) Hidrojen, hidrojen tankından gelebileceği gibi amonyak ayrışmasından, endotermik gazdan veya metanol ayrışmasından da ortama gönderilebilir (Başaran, 2007).

Sinterleme atmosferi olarak hava, azot, argon, oksijen, hidrojen ve çeşitli gaz karışımları kullanılır. Tüm kimyasal tepkimeleri kontrol etmek için, atmosferdeki safsızlık seviyesinin bilinmesi önemlidir. Sinterleme sırasında ne olacağını oksijen, karbon monoksit, metan, karbondioksit ve su buharı gibi gazların miktarı belirler. Sinterleme için çeşitli atmosfer koşulları mümkündür:

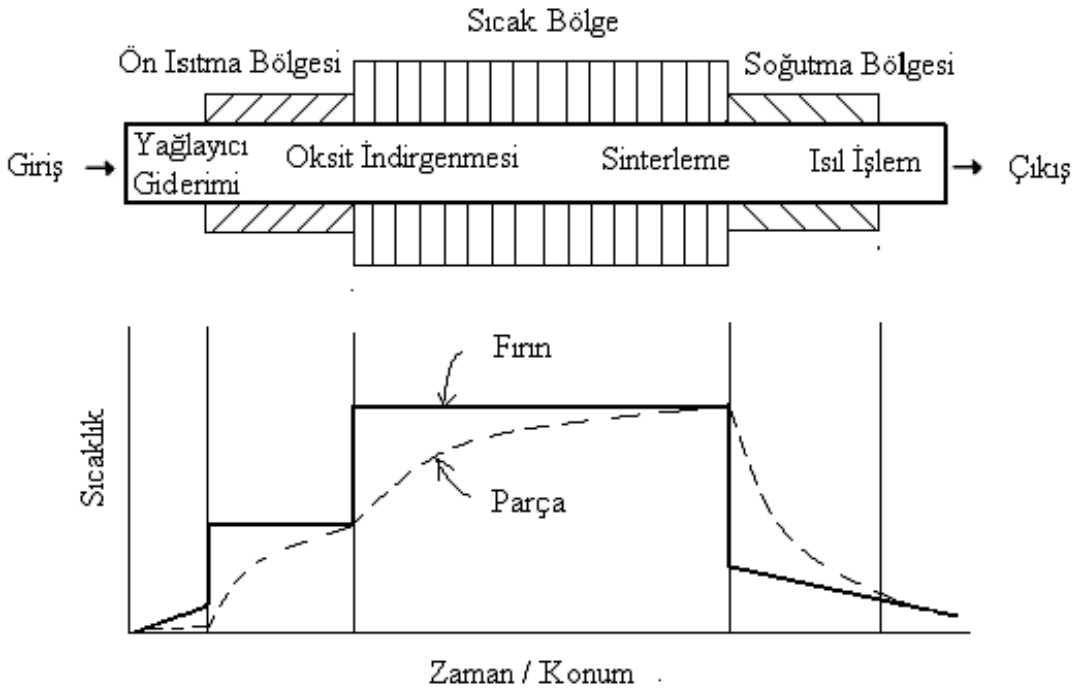
- Oksitleyici: Karbondioksit, su ve oksijen
- Nötr: argon, helyum ve vakum
- İndirgeyici: hidrojen ve karbonmonoksit
- Hidritleyici: hidrojen ve amonyak
- Hidrit giderici: vakum ve argon
- Nitrürleyici: azot veya amonyak
- Karbürleyici: metan ve propan
- Karbon giderici: karbondioksit, su ve oksijen

Bu atmosfer şartları dışında, hidrojen ve metan karışımı ile hem indirgeyici hem de karbürleyici ortam oluşturulabilir. Hava pek çok oksit seramiklerin, altın ve alüminyumun sinterlenmesinde kullanılır. Ancak hava, su içeriğindeki değişimlerden dolayı kontrol edilemeyen atmosfer olarak tanımlanır. Azot, hidrojen, su, karbon monoksit, karbon dioksit karışımı gibi endotermik atmosferlerin maliyeti düşüktür. Endotermik gaz, 6,5 kısım havanın 1 kısım doğal gaz ile katalitik tepkimesi neticesinde üretilir. Hidrojen, tepkimeye girici ve yanıcı bir atmosfer olup alümina, paslanmaz çelik, volfram alaşımları, metaller arası bileşikler, çelikler ve bazı ısıya dayanıklı metallerin sinterlenmesinde iyi sonuçlar verir. bazı malzemeler, hidrojen ile tepkimeye girerek hidrür olarak bilinen kırılgan bileşikler meydana getirirler. Bu nedenle titanyum, tantalyum, niyobyum, zirkonyum ve uranyum hidrojen ortamında sinterlenemez. Saf azot atmosferi, nitrürleme hariç, çoğunlukla nötr olarak kabul edilir. Hidrojen ve azot gaz karışımı oksit indirmek ve maliyeti düşürmek için kullanılır. Azot nötr olarak bilinmesine rağmen birçok durumda malzemede genellikle sert nitrürler oluşturur. Azot demir esaslı alaşımlarda sertliği ve mukavemeti artırır, buna karşılık manyetik tepkiyi, korozyon direnci ve sünekliği azaltır.

Vakum işlemi atmosferin yokluğunu ifade eder. Vakum sinterleme için iyi izole edilmiş fırına ve ortaya çıkan buharı sürekli olarak dışarıya atan pompa düzeneğine ihtiyaç vardır. Tepkimeye giren malzemeler (titanyum, tantalyum ve berilyum), yüksek sıcaklık malzemeleri (takım çelikleri, molibden), hidrür oluşturan elementler (zirkonyum, niyobyum, uranyum), korozyona dirençli malzemeler (paslanmaz çelikler) ve tam yoğunluğa sahip malzemeler (sementit karbürler) için vakum sinterleme uygulanır. Vakum sinterleme düşük basınçta sintelemedir. Çünkü işlem atmosferindeki tüm gaz moleküllerini gidermek, uzayda bile mümkün değildir. Bazen asal gazlar (Ar, He) sinterleme için kullanılır. Hidrojen oksit indirgeyici olarak ilave edilebilir. Eğer fırın grafit ihtiva ediyorsa asal gaz atmosferinde oluşan karbon monoksit, oksit indirgeyicidir. Bu durum, normal olarak hidrojen altında sinterlenemeyen titanyum, niyobyum ve diğer malzemelerin sinterlenmesi için temel teşkil eder (German, 2007).

2.13. Fırın Tasarımı

Sinterleme fırını, sinterleme döngüsünde sıcaklığı ve zamanı kontrol eder. İlaveten atmosferi tutar, yağlayıcı ve bağlayıcıların giderilmesini sağlayarak sinterleme sonrası ısıtım işlemi imkanı oluşturur. Şekil 2.56'da sinterleme için tipik sıcaklık-zaman döngüsü gösterilmektedir. Parti ve sürekli fırınlar arasındaki fark, fırın sıcaklığı-zaman veya parça konumu-zaman ilişkilerinin kontrolüne bağlıdır.



Sekil 2.56. Bir sinterleme fırınındaki işlemler zincirinin şematik gösterimi (Metals Handbook, 1998).

Sinterleme, toz işleminde temel bir basamaktır. Sinterleme ile ilgili bilimsel prensipler iyi anlaşılmış olmakla beraber sinterleme işlemi çok farklı şekillerde uygulanabilir. Sinterleme şartları genelde deneme yanılma ile tespit edilir. ayrıca sinterleme döngüsünü ayarlamak için bir çok endüstriyel yaklaşımlar kullanılmaktadır. Sinterleme işlemi esas itibarı ile fırınların işletimine odaklanır çok çeşitli fırınlar vardır: Parti fırın, sinterlenecek malzeme ile yüklenir ve sıcaklık döngüsü birkaç saat uygulanır. Her bir döngü farklı programlanabildiği için parti fırınların kullanımı esnektir. Ayrıca, vakum sinterleme ve basınç-takviyeli sinterleme sadece parti fırınlarda yapılabilir. Genellikle, fırın cidarları çalışma bölgelerinin etrafındaki yansıtıcı ısı kalkanları ve dıştan su soğutma ile sürekli soğutulur. Diğer bir tasarım, sinterlenen malzeme ve koruyucu atmosferi ihtiva eden kutunun ısıtıcı elemanlarla dışarıdan ısıtılmalıdır. Sıcak bölgeye

yükleme önden, üstten veya alttan çeşitli kaldırıcılar ile yapılabilir. Hazne çapı büyüdükçe sinter yükü artmakta, 500 kg.'a kadar erişmektedir. Maksimum 3000°C sıcaklığa çıkması ve bazı parti fırınlarında birkaç atmosfer basınç altında çalışılması mümkündür. Yarı-sürekli vakum sinterleme fırınlarında seri halde üç veya daha fazla oda bulunmaktadır. Yük bir odada belirli bir süre tutulduktan sonra bir sonraki odaya taşınır, böylece döngü parti fırınlarında ard arda sinterleme şeklinde oluşur (German, 2007).

Sürekli fırınlarda, malzeme konumu zamana karşı taşıyıcı bant veya itici konveyörler kullanılarak ardışık bölgelerde kontrol edilir. Genellikle, konveyörler fırın kullanım sıcaklığını sınırlamaktadır. Düşük sıcaklıklar için konveyörler tel örgüden imal edilir. Yüksek sıcaklıklar için seramik, grafit veya refrakter bant veya itici kullanımı gerekir. Refrakter malzemeler veya grafit ile 2000°C'nin üzerinde sıcaklıklara çıkmak mümkündür (İnt. Kay. 1). Sürekli bir fırında ilk bölgeler, polimer yakma ve kirletici giderme işlemi uygulanır. Atmosfer bileşimi ve akışı, her bir bölgede tepkimeleri kontrol etme ve kirleticileri yüksek sıcaklık bölgesinden uzakta tutmak için ayarlanır. Yüksek sıcaklık bölgesinde parça sinterleme sıcaklığına çıkar. Yüksek sıcaklık bölgesinin uzunluğu, sinterleme sıcaklığındaki bekleme süresini sağlayacak kadardır. Soğutma parçanın yüksek gaz akışına maruz kaldığı son bölgede olur. Gaz giriş ve çıkışlarının değişik bölgelere yerleştirilmesi ile her bir fırın bölgesi farklı atmosfere sahip olabilir. Böylece sinterleme sırasında kimyasal tepkimelerin kontrol edilmesine imkan sağlanır. Ekseriyetle, fırın ısıtıcı elemanları atmosfer ile temas halinde değildir ve ısı koruyucu ara katmandan geçerek yayılır. Yükleme kapasitesi 1 kg.'dan az olan fırınlardan, 250.000 kg.'a kadar yükleme yapılabilen fırınlara kadar sinterleme fırınları mevcuttur. Rutin üretim hızı 100 kg/saat mertebesinde. Büyük parçaların sinterlenmesinde daha yavaş ısıtma olmakta ve daha büyük fırınlara ihtiyaç duyulmaktadır (German, 2007). Sürekli fırınlar en düşük maliyette işletilebilir, fakat devamlı işe ihtiyaç vardır. Parti fırınlar esnek olmasına rağmen, birim zaman işletim maliyeti daha yüksektir. Yeni tip parti fırınlar mikrodalga ile çalışmaktadır. Sürekli mikrodalga fırınları son zamanlarda WC-Co parçalar için kullanılmaktadır. Diğer seçenekler arasında plazma ve indüksiyon fırınları sayılabilir. İndüksiyon ısıtmada ısı transferi radyan ısıtmaya oranla 3000 kat daha fazladır, fakat ısıtma sadece parça yüzeyinde meydana gelir. Plazma ısıtmada 1000 °C/dak ısıtma hızına ulaşılmaktadır. Bu teknikler bir zaman diliminde bir parça ile sınırlıdır. Hızlı teknikler olmasına rağmen verimli değildir. Ayrıca, bu teknolojiler parça boyutu homojenliği açısından henüz iyileştirilmemiştir. Bu nedenle hızlı ısıtma problemleri çözecek düzeyde geliştirilmemiştir.

Bu tez çalışmasında, indüksiyonla sinterleme işlemindeki bu sorunlara çözüm aranmıştır. Diğer fırınlara alternatif olarak konveyör sistemi ile seri üretime uygun, hızlı, düşük maliyetli ve üstün mekanik ve fiziksel özelliklere sahip parçalar üretilmiştir. Böylece, indüksiyonla sinterleme işlemi endüstriyel uygulamalarda kullanılabileceği anlaşılmıştır.

2.14. Toz Metal Malzemelerin Mekanik Özellikleri

Malzemelerin sahip olduğu mekanik özellikleri, malzeme seçiminde en önemli etkidir. Malzemeler kullanımı sırasında üzerindeki gerilmelere karşı hasara uğramadan dayanabilmelidirler. TM ile parçalarımızda mekanik özellikler presleme sonrası uygulanan sinterleme işlemi ile kazandırılmaktadır. Oda sıcaklığında sıkıştırılan TM ile üretilmiş kopmalarda öncelikler mekanik bağlar oluşmaktadır. Bu işlemin hemen sonrasında gerçekleştirilen ısıtma işlemi (sinterleme) mekanik bağlar kimyasal bağlara dönüşmekte ve üretilen TM malzemelerin mekanik özellikleri iyileştirmektedir. 1970'lere kadar toz metalurjisi denilince akla gözenekli, gevrek ve düşük mukavemetli ürünler gelirken, günümüzde ise yeni toz sıkıştırma teknikleri ve toz çeşitleri ile tam yoğunlukta, döküm ve haddelenmiş çeliklere eşit özellikte hatta daha üstün özelliklere sahip parçalar üretilmektedir (Özgün, 2007, Sarıtaş, 1985). Toz metalurjisi üretim tekniğiyle elde edilen parçaların mekanik özellikleri en çok sinterleme yoğunluğuna bağlı olarak elde edilen değiştiği bilinen bir gerçektir. Gözenekliliğin veya buna bağlı olarak yoğunlukla birlikte farklı mikro yapılara sebep olan alaşım ilavesi ve ısıtma işlemlerde toz metallerin mekanik özelliklerine etki etmektedir. Fakat mekanik özelliklere etki eden en önemli faktörün yoğunluğu olduğu bilinmektedir (Sarıtaş, 1985).

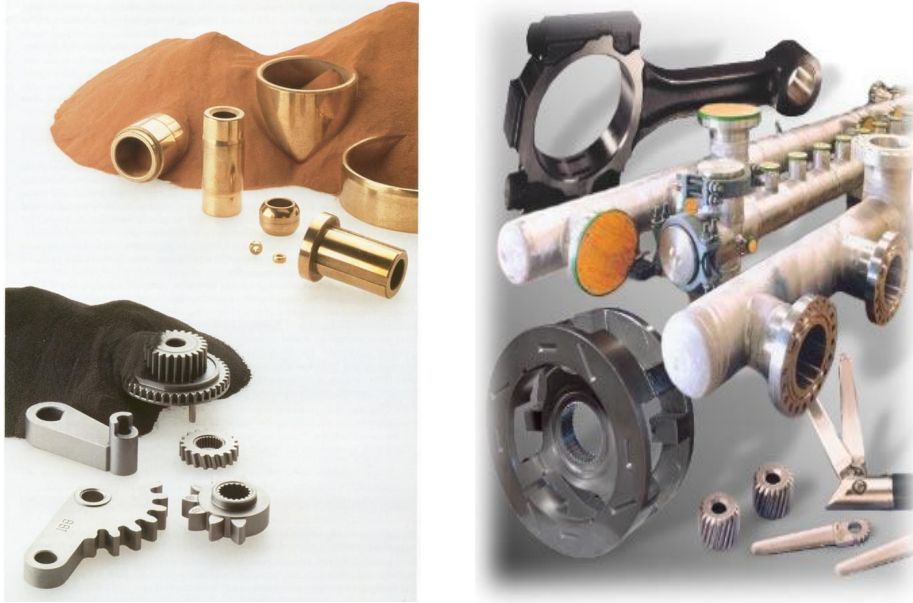
2.15. TM Uygulamaları

Modern toz metalurjisinin kendini kabul ettirerek kullanıma başlanması otomotiv sanayinde kendinden yağlamalı yatakların keşfi ile olmuştur. Boşluklu kendinden yağlamalı yatak imali ancak TM ile mümkündür. TM ile belli sayıların üzerinde üretilen yapısal parçaların maliyet etkinlik yönüyle diğer üretim yöntemlerine göre üstünlüğü de hızla kullanım alanlarının oluşmasını sağlamıştır. Sanayide üretilen parçalarda en yaygın olarak kullanılan tozlar demir, çelik ve alaşımları, bakır ve bakır esaslı alaşımlardır (pirinç, nikel gümüş ve bronz). Demir ve bakır tozları sanayide en çok kullanılan tozlar olmasına rağmen tüm kullanım alanları bunlarla sınırlı değildir. Çizelge 2.3'de metal tozlarının en yaygın uygulama alanları ve kullanıldıkları toz malzemelerinden bazıları gösterilmiştir. TM parçaların en yaygın olarak kullanıldığı alan otomotiv sanayidir. Otomatik vites parçaları, hareket dişlileri, yağlama pompa dişlileri, debriyaj baskı plakaları yıllardır TM teknolojisi ile üretilmektedir. Ayrıca, TM ile üretilen parçalar; bahçe traktörleri, otomobil motorları, fren ve direksiyon sistemleri, yıkama makineleri, elektrikli el aletleri, spor ve silah, fotokopi makineleri, off-road ekipmanları, av bıçakları, x - ray koruyucu, petrol ve gaz sondaj bileşenleri, balıkçılık ve kol saatlerinde kullanılmaktadır. Tipik bir ABD binek otomobilinde 44 kilo TM parçaları içermektedir. Şekil 2.57 sıklıkla kullanılan TM parçalara ait örnekler görülmektedir (İnt. Kay. 2, Roll, 1984).



Şekil 2.57 TM ile farklı amaçlar için üretilen çeşitli parçalar(İnt. Kay. 5)

Endüstride toz metal parçalar üstün performans, karmaşık parça üretimi, düşük maliyeti, gözenekli ve geçirgen malzemeler, talaşlı üretimi zor olan parçalar ve ağırlık tasarrufu bakımından üretilmektedir. Üstün performans malzemeleri olarak kesici takım, mini dişli çark, matkap ucu üretilmektedir. Karmaşık parça olarak, yağmur sensörü, koltuk ayar dişli halka, rotary menteşe üretilmektedir. Düşük maliyeti açısından: planya kesici için kartuş, jet koruyucu parçaları, senkromenç üretilmektedir. Düşük ağırlık bakımından ise, Alüminyum Sprocket ve Rotor, fren bandı üretilmektedir (İnt. Kay. 5). Şekil 2.58 de TM ile farklı amaçlar için üretilen çeşitli parçalar gösterilmektedir.



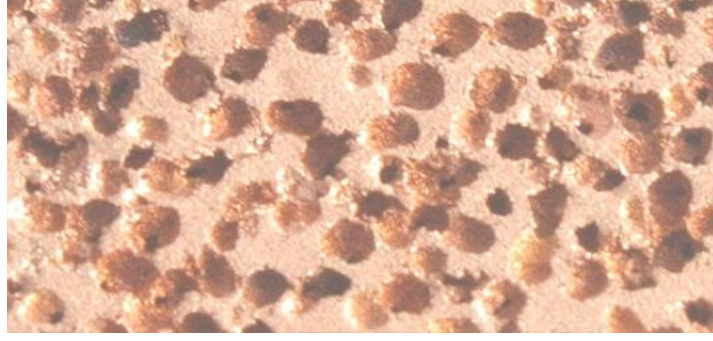
Şekil 2.58 Toz metalurjisi ile üretilmiş çeşitli parçalar (İnt. Kay. 1 ve 2)

Bunun yanı sıra, yatak, filtre, basınç veya sıvı regülatörü gibi gözenekli ve geçirgen ürünler; Toz ürünlerinin büyük bir kısmını bakır veya demir alaşımlarından yapılan yağ emdirilmiş yataklar oluşturmaktadır. Bu yataklar yağlamaya ve kullanım esnasında bakıma ihtiyaç duymadıklarından otomotiv endüstrisinde ve ev aletlerinde yaygınca kullanılmaktadır. TM filtreleri hemen her boyutta gözeneğe sahip şekilde üretilebilirler ve en küçük gözenek çapı 0,0025 mm.dir. Diğer yöntemlerle üretilmeleri halinde aşırı miktarda talaşlı işleme gereksinim duyulan karışık parçalar; Küçük boyutlu dişlilerin büyük bir kısmı toz metalurjisiyle üretilmektedir. Toz yöntemleri ile elde edilen boyutsal hassasiyet ve yüzey bitirme kalitesi çoğu zaman ilave bir işlemi gerektirmez ve bazı özel hallerde sadece çok küçük oranlarda yüzey işleme yeterlidir. Kam ve küçük manivela kolları gibi diğer girift parçalar da toz yöntemiyle oldukça ekonomik bir şekilde üretilebilmektedir.

Talaşlı işlemi zor veya yüksek ergime noktalı malzemelerden yapılan parçalar; Toz metalurjisi modern anlamda ilk kez tungsten lamba flamaları ve tungsten karbür kesici takımların üretiminde kullanılmıştır. İki veya daha fazla metalin kombine özelliklerinin istendiği parçalar; Bileşenlerin özelliklerini parçalara kazandırabilme kabiliyetinden dolayı toz metalurjisi özel kullanım alanı olan veya bazı amaçlar için dizayn edilen parçaların üretiminde yaygınca kullanılmaktadır. Motor veya jeneratör parçaları bu amaçla bakır ve grafitten üretilmektedir. Bakır elektrik iletkeni görevini görürken grafit yağlama işlevini yerine getirir. Benzer şekilde yataklar, grafitdemir, grafit-bakır veya grafit-bakır-kalay alaşımı gibi ikili malzeme gruplarından yapılmaktadır. Yumuşak metal, sert metal matrisi içerisinde dağıtılır. Elektrik anahtarı kontaklarında çoğunlukla bakır veya gümüş; tungsten, nikel veya molibden elementlerinden biriyle birleştirilir. Bakır veya gümüş yüksek iletkenlik sağlarken, yüksek ergime sıcaklıklı malzeme ark esnasında ve devrenin kapalı olduğu süre boyunca ergimeye karşı direnç sağlar.

Toz metalurjisi yönteminin diğer yöntemlere göre üstün özellik sağladığı ürünler; % 100 yoğunluğa ulaşmak amacıyla geliştirilen yöntemlerle üretilen ürünlerin özellikleri alternatif yöntemlerle üretilen ürünlerin özelliklerini aşmıştır. Uçak sanayi gibi kritik döneme sahip alanlarda ilave maliyetler özelliklerin geliştirilmesi ile haklı görülebilir. Toz metalurjisi magnetlerin üretiminde önemli bir avantaj sağlar; sinterleme öncesinde toz tanelerinin dizilmesi magnetik bir alanda yapılarak toz magnetlerde daha yüksek bir flaks yoğunluğuna ulaşabilir (Başaran, 2007).

Son zamanlarda, toz metalurjisi ile üretilmiş gözenekli metal kanallar soğutucu olarak güçlü mikro işlemcilerin soğutulmasında kullanılmaktadır. Gözenekli malzemenin ısı transfer katsayısını artırarak, soğutma işleminde çok yüksek termal performans sağlandığı görülmüştür. Ayrıca, gözenekler güç-ağırlık oranı optimizasyonu sağlamaktadır ve 10 kat daha etkili soğuma sağlayabildiği görülmüştür Şekil 2.59 da gözenekli bakır bir mikro-kanal soğutucu görülmektedir (Singh et al, 2009).



Şekil 2.59. gözenekli bakır bir mikro-kanal soğutucu (İnt. Kay. 8)

Günümüzde TM parçaların daha yüksek mekanik özellikler ve daha hafiflik gerektiren uzay ve tıbbi sanayide de kullanmaya başlamıştır. Toz metal parçaların en büyük dezavantajını gerilmelere maruz kalması durumunda gözenekli mikroyapıları ve mikro çatlaklar oluşturmalarıdır. Bunu engellemek için sinterleme parametrelerinin çok iyi tayin edilmesi önemlidir. Ayrıca sinterleme parametrelerinin doğru seçilmesi, malzeme özellikleri, enerji ve zaman tasarrufu, gereksiz sinterlemeyi önlemek için çok iyi tayin edilmelidir. Bu tez çalışmasında, indüksiyonla sinterleme parametreleri gerçek toz metal malzeme özellikleri dikkate alınarak deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir ve en uygun sinterleme parametreleri belirlenmeye çalışılmıştır.

Çizelge 2.3. Metal Tozlarının Ana Uygulama Alanları (Başaran, 2007).

Uygulama Alanı	Kullanılan Toz
Havacılık	
Frenleme yüzeyleri	Bakır, kurşun, kalay, yüksek nikel alaşımları grafit, demir
Balans ağırlıkları	Tungsten, bakır, nikel, demir
Yakıt, hidrolik ve hava fitreleri,	Bronz, paslanmaz çelik, nikel
Dış çerçeveler	Alüminyum, berilyum, titanyum, demir
Isı tutucular	Berilyum, tungsten
Isı tutucu kaplamalar	Alüminyum
Jet motor komponentleri	Süper alaşımlar
Roket yakıtları	Alüminyum
Komponent tamiri	Nikel-krom, nikel alüminyum, paslanmaz çelik
Otomobil	
Klima	Demir, çelik
Alternatör regülatörleri	Platinyum alaşımları, demir
Buşing, yataklar	Bakır, kurşun, kalay, demir alüminyum, grafit, bronz
Filtreler	Paslanmaz çelik, bronz
Yakıt pompa parçaları	Demir, bakır, takım çeliği
Şok sönümleyiciler	Demir, alüminyum
Buji gövdeleri	Demir
Aktarma parçaları	Demir, bakır, çelik
Fren balataları	Bakır, demir, kurşun, kalay, grafit, çinko
Karpitler	Tungsten, titanyum, tantalum, niobiyum
Diffüzyon kaplamaları	Alüminyum-titanyum alaşımları, krom, çinko, hafniyum
Elektrik ve elektronik	
Bataryalar	Nikel, çinko, gümüş, demir, kurşun, grafit
Fırçalar	Bakır, gümüş, grafit
Motor kutup parçaları	Demir, silikon- demir
Baskı devreler	Bakır, gümüş, paladiyum, altın, platinyum
Yarıiletkenler	Kurşun
Erozyon tezgâhları	
Elektrot	Bakır, gümüş, tungsten

2.16. TM Ürünlerin Endüstriyel Önemi

Toz metalurjisi ile şekillendirmede hassas net-şekil üretimi, maliyet-etkin bir yöntem olması, daha verimli bir şekilde tasarlanmış metal bileşenleri sağlaması, yüksek performanslı malzeme üretimi ve gelişmiş partikül malzeme çeşidi ile üretilen süper alaşımlar, takım çelikleri, PM gibi alaşımlar dövme alüminyum alaşımları, termal sprey malzemeleri, intermetalikler ve metal matris kompozitler ile endüstride yerini almıştır. TM ile geliştirilmiş ürün kalitesi ve verimlilik, geri dönüşüm yoluyla değerli hammadde tasarrufu ve pahalı ikincil işleme ortadan kaldırılması ve yakın net şekil tasarımı ile endüstriyel verimlilik sağlayan otomasyon, hassas ve özel öz-yağlama ve kontrollü filtrasyon gibi özellikleri ile vazgeçilemez bir üretim metodu olmuştur. Tungsten karbür gibi önemli metalleri oluşturma tek yolu olması göz ardı edilemez, ayrıca dağılım-güçlendirilmiş malzemeler, yüksek hız takım çelikleri ve kendini yağlayan yataklar üretilmektedir. Bununla birlikte, geri dönüşüm ve koruma yoluyla doğal kaynakların tasarrufu sağlamaktadır (İnt. Kay. 2).

Kuzey Amerika'da TM parça ve ürünlerinin 5 milyar dolarlık tahmini satış miktarı vardır. PM parça ve ürünler üretmek ve bu süper, gözenekli ürünleri, sürtünme gibi özel PM ürünler yapmak için şirketler bulunmaktadır. Bu firmalar, bakır-taban-toz malzemeler ile, elektronik uygulamalar için şerit, yüksek mukavemetli daimi mıknatıs, manyetik toz çekirdek ve ferritler, aşınma parçaları, metal enjeksiyon kesme tungsten karbür kalıp parçaları ve takım çelikleri üretmektedirler. TM kapsamında uluslararası büyüyen bir sanayi ortaya çıkmaktadır. Yıllık toplam dünya da metal tozu üretimi 700.000 ton aşmaktadır. Çizelge 2.4 de Kuzey Amerika da 2011 ve 2012 yıllarına ait yıllık toz metal üretimi verilmiştir.

Çizelge 2.4. Kuzey Amerika'da 2011 ve 2012 yıllarına ait yıllık toz metal üretimi (İnt. Kay. 2).

Kuzey Amerika Metal Tozu Üretimi		
	2011 (Ton)	2012 (Ton)
Demir & Çelik	363,831	383,984
Paslanmaz Çelik	7,000	7,350
Bakır	17,001*	16,209
Alüminyum	55,000	80,000
Molibden	2,200	2,300
Tungsten	5,300	4,800
Tungsten Karbit	7,600	7,500
Nikel	5,200	5,500
Toplam	463,132 Ton	507,643 Ton
* Sadece Toz Metal Parçalar		

2.17. Toz Metalurjisinin Avantajları ve Dezavantajları

a) Talaşlı işlem gereksiniminin azaltılması veya tamamen ortadan kaldırılması önemli bir avantajdır: Toz yöntemiyle elde edilen boyutsal hassasiyet ve yüzey bitirme kalitesi çoğu ürün veya uygulama alanı için yeterli olduğundan ilave talaşlı işleme gerek yoktur. İstisnai şekilde boyutsal hassasiyet ve yüzey kalitesinin talebi halinde ürünler basma ve boyutlandırma gibi ikinci işlemlere tabi tutulabilirler.

b) Yüksek üretim hızları ile üretilebilirler: Toz yöntemindeki bütün adımlar basittir ve otomasyona uygundur. İş gücü gereksinimi düşüktür, ürün homojenliği ve aynı kalitede tekrar üretilebilirlik oranı diğer yöntemlere göre daha yüksektir.

c) Karmaşık şekillerin üretimi yapılabilir: Talaşlı imalatla ancak üretilebilecek ürünlerin, üretilmesine mümkündür.

d) Çok geniş bir bileşim aralığı mevcuttur: Bileşim açısından oldukça yüksek saflığa sahip parçalar üretilebilir. Metal ve seramikler gibi birbiri içinde çözünmeyen ve farklı karakterdeki malzemeler de bir araya getirilebilir. Katı eriyik veya çözünürlük sınırları aşarak aşırı doymuş katı çözelti alaşımları veya yüksek alaşımlı malzemelerde elde edilebilir. Düşük ve yüksek alaşımlı veya birbiri içinde çözünmeyen toz tanelerinden meydana gelen kompozit malzemelerden üretilen parçaların Makroskopik ölçekte (bir iki toz taneleri boyutu mesafelerde) bileşim homojenitesi diğer yöntemlerle üretilenlerden daha yüksektir.

e) Özelliklerin geniş bir aralıkta değişimi, çok farklı özellikte malzeme üretimini mümkün kılar: Toz metalurjisiyle üretilen parçaların yoğunluğu ve dolayısıyla içerdikleri gözenek oranı geniş bir aralıkta değişir. Çok yüksek oranda gözenek içeren filtreler gibi fonksiyonel amaçlı parçaların üretimi yanı sıra konstrüksiyon amaçlı yüksek mukavemetli parçalarda üretilebilir. Gözenek yapılar döküm işleminde yağlayıcıların daha etkin ve istisnai bir şekilde kullanılmasını sağlamaktadır. Sürekli dökümde kalıp başlıkları içerisine yerleştirilen toz plakalar gözenekli oldukları için yağlayıcılar bu gözeneklerden sürekli olarak kalıp-ingot ara yüzeyine sevk edilebilir. Böylece yapışmaya mani olunarak hem ingotların yüzeylerin kalitesi artırılır ve hem de çalışanlar için son derece tehlikeli olan sıvı metal akıntılarının oluşumu (kanama) önlenir. Modern sıcak başlık kalıplarının üretim hattında bu plakaların kullanılmalarının diğer bir nedeni ise plakaların kalıp duvarı boyunca ısı transferini (primer soğuma) önleyerek kalıp içinde primer soğuma ile gerçekleşen katılaşmanın ortadan kaldırılmasıdır. Böylece kalıp içindeki katılaşma kalıp altı su spreyinin etkisiyle gerçekleştirilir ve ingot dökümlerdeki birbirinden farklı karakterdeki yapısal zonların oluşumu önlenir. Magnetik, aşınma ve diğer özellikler özel bir uygulama alanının gereksinimlerini karşılayacak şekilde kontrollü olarak dizayn edilebilir (kontrollü fabrikasyonla ürünlere istenilen özellikler kazandırılabilir).

f) Hurda miktarının azaltılması veya ortadan kaldırılması maliyet ve geri dönüşüm açısından önemli bir avantajdır: Toz metalurjisi bilinen üretim yöntemleri içerisinde malzeme

kaybına neden olmayan tek yöntemdir. Döküm, talaşlı işlem ve preste şekillendirmede hurda miktarı başlangıçtaki malzeme miktarının yarısına (% 50) ulaşmaktadır. Hurda oranı özellikle pahalı malzemelerin şekillendirilmelerinde daha da önem kazanmaktadır. Toz metalurjisi ile bazen toplam maliyeti arttırmadan daha pahalı malzemeler kullanarak parça üretimi gerçekleştirilebilir (Başaran, 2007, Çalışkan, 2000). Toz metalurjisinin dezavantajlarına bakılacak olursa;

a) Düşük mekanik özellikler: Çoğu kez toz metalurjisi parçalarının mekanik özellikleri döküm ve dövme ile üretilenlerin özelliklerinden daha düşük olduğu bilinmesine karşın, günümüz teknolojisi ile yüksek mukavemetli performans malzemeleri üretilebilmektedir. Bununla birlikte ilave masrafların göze alınması halinde ürünlerin mukavemet değerleri farklı malzeme, alternatif yöntem veya ikincil işlem teknikleri kullanımıyla yükseltilebilmektedir.

b) Nispeten yüksek kalıp maliyeti vardır: Toz yönteminde yüksek sıcaklık, yüksek basınç ve yüksek miktarda aşınma söz konusu olduğu için kalıplar pahalı malzemelerden ve büyük kütleler halinde yapılmaktadır. Bu nedenle toz metalurjisi ile üretilcek parça sayısı en az 10,000 adet olmalıdır.

c) Yüksek malzeme maliyeti olabilir: Birim ağırlık esasına göre toz malzemeler dövme ve döküm malzemelerden daha pahalıdır. Ancak hurda şeklinde malzeme kaybının olmayışı ve talaşlı işlemin ortadan kaldırılması yüksek malzeme maliyetini dengelemektedir. Toz metalurjisi daha çok birim parça başına malzeme maliyetinin yüksek olmadığı küçük parçaların üretiminde kullanılır.

d) Dizayn sınırlamaları vardır: Toz metalurjisi işlemi bazı şekillerdeki parçaların üretimi için uygun değildir. Parçalar kalıptan kolay çıkarılabilecek şekillerde olmalıdır. Kalınlık / çap oranı sınırlıdır. İnce kesitlerin eldesi zor olup parça boyutu pres kapasitelerinin belirlediği sınırları içinde olmalıdır.

e) Parça kesiti boyunca özelliklerin değişim gösterebilir: Yoğunluğun parça içinde bir noktadan diğer bir noktaya değişimi özelliklerin de değişimine neden olmaktadır. Bunun ana nedeni parçaların tasarımı yapılırken dizayn kriterlerine riayet edilmemesidir. Üniform olmayan şekillerin toz metalurjisi ile üretilmesi halinde bu tip problemlerle karşılaşılabilir (Başaran, 2007, Çalışkan, 2000).

3. İNDÜKSİYON HAKKINDA GENEL BİLGİLER

İndüksiyon ile ısıtma, alışlagelmiş ısıtma sistemlerine göre, işlem süresinin oldukça kısa olması, çevreye ısı dağılımının olmaması, temiz ve yüksek verimliliğe sahip olması, kontrol edilebilir ve tekrarlanabilir olması, hassas ısı kontrolü yapabilmesi ve yanma, fırınlarda kullanılan gazlar nedeni ile hava kirliliği yaratmaması, ısıtma alanında herhangi bir yanma ürünü bırakmaması, hiçbir yanma ürünü ve ısı radyasyonu olmadığı için havalandırma ve duman çıkışının minimum olması, patlama gibi olaylara izin vermeyen güvenilir bir sistem olması gibi avantajlara sahiptir. Bu avantajlar doğrultusunda, günümüzde endüstride kullanımı giderek artmaktadır. İndüksiyon endüstride bir çok amaç için kullanılmaktadır. İndüksiyon endüstri de sert lehim, yüzey sertleştirme, kaynak, dövme, tavlama, ısıl işlem, ergitme gibi işlemlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca İndüksiyonu cazip kılan bazı durumlarda vazgeçilmez olmasıdır : Torna tezgahlarında kullanılan elmas uçların mikron seviyesinde silis kaplanması ve yüzey sertleştirme işlemlerinden geçirilerek bir başka çeliği kesecek kadar sert hale getirilebiliyor olması indüksiyon ile ısıtma ve tavlamanın endüstride sağladığı bir avantajdır. Ayrıca, tıraş bıçaklarının lazerle bileylenmesi ve o kadar ince iken keskinliğinin kaybolmaması indüksiyon ile ısıtmanın bir ürünüdür, araçlardaki krank milinin içi bos olmasına rağmen tonlarca ağırlıktaki bir kamyonu ilk hareketi verirken burulması ancak kırılmıyor olması da indüksiyonla ısıtmanın bir üstünlüğüdür (Çetin, 2005, Bal, 2006).

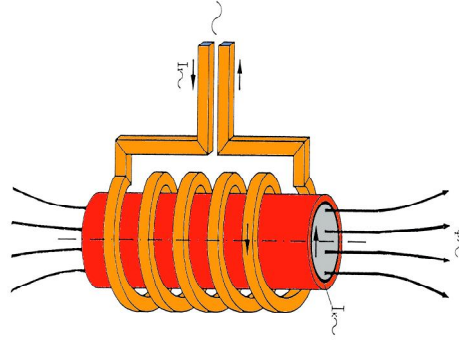
3.1. İndüksiyon

Hareketli manyetik alan içerisinde kalan bir iletkende potansiyel fark oluşmaktadır. Bu potansiyel fark, iletkenin içinden akım geçmesine neden olur. Bu olay indüksiyon olarak bilinmektedir. İndüksiyon ısıtmanın genel prensibi elektromanyetik enerjinin ısı enerjisi haline dönüştürülmesine dayanır. Klasik yolla yapılan ısıtma işlemlerinde sıcaklığın yükselmesi için gerekli olan ısı, malzemeye dış yüzeyinden verilirken, indüksiyon ile ısıtmada ise gerekli ısı malzemenin kendi içinde indüksiyon ile elde edilir.

İndüksiyon ile ısıtmada dalma derinliği özelliği göz önünde bulundurularak değişik uygulama alanları geliştirilmiştir. Çizelge 3.1 ve Şekil 3.1.'de İndüksiyon akımı ve farklı ısıtma tiplerinin güç iletimi verilmiştir (Çetin, 2005 , Bal, 2006). Çizelgeden de görülebileceği gibi elektron jet ve lazer ısıtmasan sonra en yüksek güç iletimi indüksiyon akımı ile sağlanabilmektedir. İndüksiyonla ısıtma sistemini iyi analiz edebilmek için bazı temel faktörlerin iyi bilinmesi gerekir. Bu faktörler; Elektromagnetik indüksiyon, histerezis kaybı, deri etkisi (skin effect), malzemenin elektriksel öz direnci, ısı transferi ve manyetik akıdır (Dereci, 2010).

Çizelge 3.1. Çeşitli Isıtma Tiplerinin Güç Aktarımı (İnt. Kay. 6).

Isıtma Tipi	Güç Aktarımı W/cm ²
Konveksiyon (moleküler hareketler ile ısı taşınımı)	5×10^{-1}
Radyasyon (Elektrik fırını, Kutu tipi fırın)	8
Isı iletimi, temas (sıcak levha, tuz banyosu)	20
İnfrared Nokta Yayıncı	200
Alev (brülör)	10^3
İndüksiyon Isıtma	10^4
Lazer (CO ₂)	10^8
Elektron Jet	10^{10}

**Şekil 3.1.** İndüksiyon akımı Şematik Gösterimi (İnt. Kay. 6)

3.2. Elektromanyetik İndüksiyon:

Bobine alternatif akım uygulandığında, etrafında değişken bir manyetik alan meydana gelir. Değişken manyetik alanın içinde kalan malzemede manyetik alanın yoğunluğu, frekansın etkisi ile yüzeyden merkezine doğru inildikçe azalır. Elektromanyetik indüksiyon ile cisim üzerinde oluşan eddy akımlarının meydana getirdiği ısı enerjisi, indüksiyon ile ısıtma işlemini sağlar (Çetin, 2005).

3.3. Histerezis Kayıpları

Histerezis, manyetik sürtünmenin sonucu oluşur. Manyetik alandaki moleküllerin frekansın şiddetine bağlı olarak ileri ve ters yöndeki yer değiştirmeleri sırasında birbirlerine

sürtünmeleri sonucu ısı şeklinde ortaya çıkan bir enerjidir. Genellikle ısı işlemlerde histerezis kayıplarının katkısının eddy akımları kayıplarına oranla çok düşük olması sebebi ile ihmal edilirler (Çetin, 2005).

3.4. Deri etkisi (İşleme Derinliği)

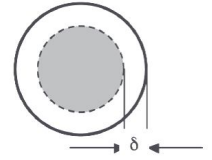
Bilindiği gibi elektronlar, iletken malzemenin yüzeyi ile taşınır. Alternatif akımda akım iletkenin yüzeyine doğru yoğunlaşmaktadır. Buna “deri olayı” denir. (Bal, 2006, Ünver, 2004). Frekans ne kadar yüksek olursa, akımın geçtiği yüzey tabakası d_0 o kadar incelik. Şekil 3.2. ve Çizelge 3.2’de malzeme kesitindeki d_0 değişimi ve farklı malzemelerdeki işleme derinliği görülmektedir. İşleme derinliği, frekansa ve maddenin elektriksel öz direncine göre değişir ve aşağıdaki eşitlikle ifade edilir (Ünver, 1997):

$$\delta = \sqrt{\rho / \mu f \pi} \quad (3.1)$$

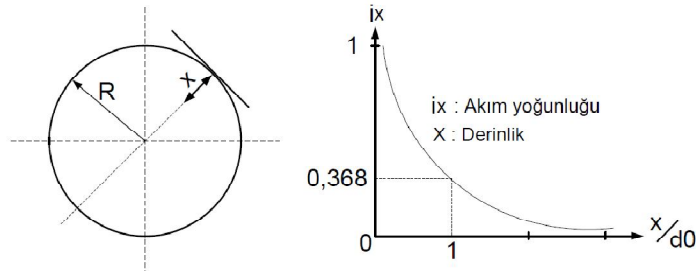
Burada; ρ : Malzemenin özgül direnci ($\Omega \cdot \text{mm}$), μ : Malzemenin manyetik geçirgenliği (Wb/At-m), δ : Dalma derinliği (mm), f : Frekanstır (Hertz).

Çizelge 3.2. Çeşitli Malzemelerin Frekans ve sıcaklığa bağlı değişen işleme derinliği (İnt. Kay.7)

δ (mm)	Çelik 20 °C	Çelik 20 °C	Bakır 20 °C	Bakır 900 °C	Grafit 20 °C
ρ ($\mu\Omega \cdot \text{m}$)	0.16	0.16	0.017	0.086	10
μ_r (-)	40	100	1	1	1
Frekans					
50 Hz	4.50	2.85	9.31	20.87	225.08
100 Hz	3.18	2.01	6.58	14.76	159.15
1 kHz	1.01	0.64	2.08	4.67	50.55
10 kHz	0.32	0.20	0.66	1.48	15.92
100 kHz	0.10	0.06	0.21	0.47	5.03
1 MHz	0.03	0.02	0.07	0.15	1.59

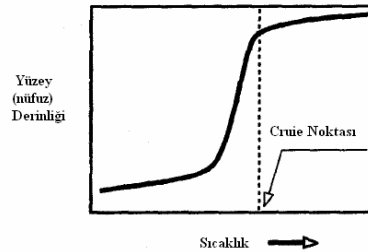


(3.1) no' lu formülden de görülebileceği gibi akım nüfuz derinliği malzemenin özgül direnci ile doğru orantılı, malzemenin manyetik geçirgenliği ve uygulanan frekansla ters orantılıdır. Yani frekansı ne kadar çok artarsa, akım nüfuz derinliği de o derece de küçülecek ve böylece akım yoğunluğu dış yüzeyde daha çok yoğunlaşacaktır. Şekil.3.2’de bir iletkenin kesit görüntüsü ve bu kesit üzerindeki akım yoğunluğunun değişimi gösterilmektedir (Dereci, 2010).



Şekil 3.2. Çeşitli Malzemelerin Frekans ve sıcaklığa bağlı değişen işleme derinliği (Dereci, 2010).

İndüksiyonla ısıtmada yüzey derinliği sert bir şekilde değişir. Isıtmanın ilk bölümünde direnç değerinin artması ve izafi geçirgenlik değerinin azalmasından dolayı nüfuz etme derinliği artar. Curie noktasına ulaşıldığında manyetik izafi geçirgenlik aniden düşer ve sonuç olarak, yüzey derinliğinde ani bir sıçrama oluşur. Şekil 3.3' de çelik çalışma parçasının indüksiyonla ısıtma esnasındaki yüzey nüfuz derinliği değişimi verilmiştir.



Şekil 3.3. Çelik çalışma parçasının indüksiyonla ısıtma esnasındaki yüzey nüfuz derinliği değişimi (Sert, 2008).

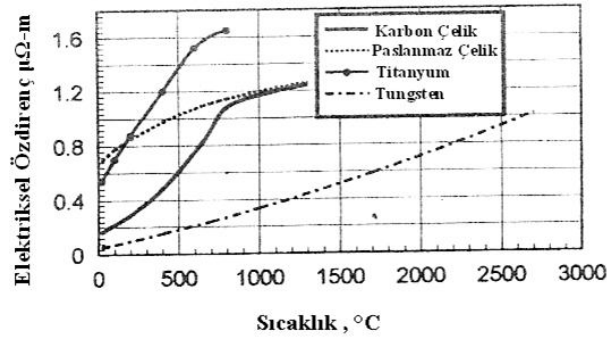
3.5. Elektriksel Özdirenç

1m uzunluğundaki ve 1 mm^2 kesitindeki bir malzemenin elektrik akımına karşı gösterdiği direnç “özgül direnç” veya “özdirenç” denir. Özgöl direnç “ ρ ” harfi ile gösterilir ve birimi “ $\Omega \cdot m$ ” dir. Her malzemenin özdirenç değeri farklıdır. Özgöl direnç malzemenin uzunluğu ve elektrik iletkenliği ile doğru, enine kesiti ile ters orantılıdır. Çizelge 3.3’de bazı malzemelerin özgöl direnç ve sıcaklık katsayı değerleri verilmektedir (Dereci, 2010, Rudnev et al, 2003).

Aşağıdaki çizelgeden de görülebileceği gibi gümüş, bakır, altın gibi metallerin özgül dirençleri çok düşüktür, yani elektriği çok iyi iletirler. Dikkat edilmesi gereken önemli bir hususta metallerin özgül dirençlerinin sıcaklıkla değişim göstermesidir. Aşağıda verilen çizelge metallerin oda sıcaklığındaki özgül direnç değerleridir. Sıcaklık değeri arttıkça birçok metalin özgül direnci artar. Şekil 3.4 'de bazı metallerin sıcaklığa bağlı olarak özgül dirençlerinin değişimi görülmektedir (Dereci, 2010, Rudnev et al, 2003).

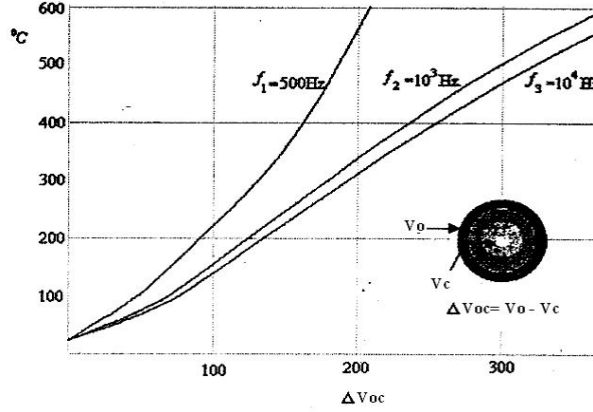
Çizelge 3.3. Bazı malzemelerin özgül direnç ve sıcaklık katsayı değerleri (Rudnev et al, 2003)

Oda Sıcaklığındaki Malzemeler	Özdirenç (Ohm.m)	Sıcaklık Katsayısı (1/°C)
Gümüş	1.59×10^{-8}	0.0061
Bakır	1.68×10^{-8}	0.0068
Altın	2.44×10^{-8}	0.0034
Alüminyum	2.65×10^{-8}	0.0043
Tungsten	5.60×10^{-8}	0.0045
Çinko	5.91×10^{-8}	0.0042
Nikel	6.80×10^{-8}	0.0069
Kobalt	9.00×10^{-8}	0.0053
Düşük Karbonlu Çelik	15.9×10^{-8}	0.0061
Paslanmaz Çelik	70.0×10^{-8}	0.0061
Kurşun	1.59×10^{-8}	0.0061

**Şekil 3.4.** Metallerin sıcaklığa bağlı olarak değişen özgül direnç değerleri (Dereci, 2010)

3.6. Isı Transferi

İndüksiyonla ısıtma sistemlerinde önemli işlemlerden birisi de ısı transferidir. İndüksiyon bobini yüksek frekanslı AC akımla beslenir. Deri etkisinden dolayı bobinden geçen akım, bobinin dış yüzeyinde maksimum dağılıma sahip olur ve merkeze doğru üstel bir şekilde azalır. Böylece ısıtılacak olan metal malzemenin dış kısmı maksimum oranda ısınmasına rağmen iç kısımları fazla ısınmaz ve malzemenin iç kısmı ile dış kısmı arasında ısı farkı meydana gelir. Uygulanan frekans ne kadar büyük olursa malzemenin dış yüzeyi ile merkezi arasındaki sıcaklık farkı o derece yüksek olur. Şekil 3.5 'de metal malzemenin çeşitli frekanslarda çalışma durumuna göre dış yüzeyi ile merkezi arasındaki ısı farklılıkları görülmektedir (Dereci, 2010).



Şekil 3.5. Metal malzemenin çeşitli frekanslarda çalışma durumuna göre dış yüzeyi ile merkezi arasındaki ısı değişimi (Dereci, 2010).

Isıtma işlemi sırasında meydana gelen malzeme içindeki ısı dağılımı Şekil 3.5 'de görüldüğü gibi malzemenin her tarafında aynı değildir. Malzeme yüzeyinden derinlere inildikçe ısı yoğunluğu azalmaktadır. İndüksiyon ile ısıtma işleminde meydana gelen ısı transferi, geçici ısı depolama aşaması, sabit sıcaklık yükselişi ve soğurma zamanı olmak üzere üç bölümde incelenmektedir. Geçici ısı depolama aşamasında, malzeme içindeki ısı dağılımı malzemenin tabakaları arasında olmaktadır. Malzeme yüzeyinden itibaren her bir tabaka kendi üzerinde ısıyı depoladıktan sonra diğer tabakaya iletmektedir. Geçici ısı depolama aşamasından sonra ısı bütün bir malzeme boyunca aynı oranda yükselmektedir. Bu sabit sıcaklık yükselişinden sonra malzemelerin uygulamalarda kullanılabilmesi için ısının malzeme tarafından soğrulma zamanına ihtiyaç vardır. Genellikle ısıtma işlemi sırasında malzemenin yüzeyi ile merkezi arasında düzgün sıcaklık dağılımı olmadığı için, çok yüksek sıcaklık farkları oluşur. Soğurma zamanı ile bu sıcaklık farkı giderilmektedir (Çetin, 2005).

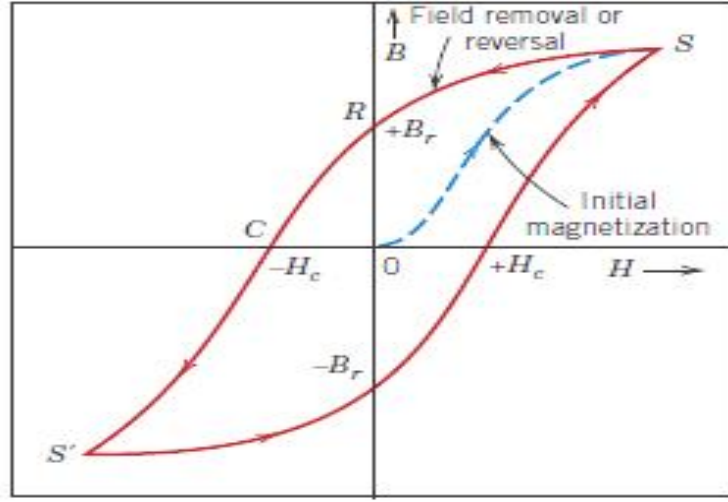
3.7. Manyetik Akı

İçinden elektrik akımı geçen bir iletkenin çevresinde manyetik alan (H) doğar. Bu manyetik alanın içine manyetiklik özelliğine sahip bir malzeme konacak olursa manyetik alan şiddeti daha da artar ve kuvvet çizgileri sıklaşır. Malzeme varlığından doğan ek manyetik alan artımına “manyetik akı (B)” denir.

$$B = \mu H \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (3.2)$$

$$\mu = \mu_0 \mu_r \text{ (H/m)} \quad (3.3)$$

Burada μ , Mutlak manyetik geçirgenlik katsayısı, μ_r bağıl manyetik geçirgenlik katsayısıdır ve μ_0 ise vakumun manyetik geçirgenliğidir değeri ise $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ dir. Manyetik malzemelerin özellikleri malzemenin B-H histerisiz eğrisinden belirlenir (Şekil 3.6). Malzemeye H alanı uygulanır ve bunun sonucu olan B ölçülür. H_c , kalıcı manyetikliği yok etmek için ters yönde uygulanması gereken manyetik alandır (Günay, 2013).



Şekil 3.6. B-H Histerisiz Eğrisi (Günay, 2013).

Malzemeler manyetiklik bakımından, diyamanyetik, paramanyetik, ferromanyetik, ferrimanyetik malzemeler olmak üzere dört gruba ayrılır. Diyamanyetik malzemelere bir manyetik alan uygulandığında çok küçük bir elektron hareketlenmesi oluşur ve $\mu_r < 1$ dir. Diyamanyetik malzemelerde manyetik moment manyetik alana ters yönde oluşur. Diyamanyetik malzemeler kalıcı olarak mıknatıslanmazlar örnek olarak demir verilebilir. Atomları daha önceden bir manyetik momente sahip olan cisimlere paramanyetik malzemeler denir. Manyetik alan uygulandığında manyetik alan ile manyetik moment aynı yönde olur. Paramanyetik malzemeler kalıcı olarak mıknatıslanmazlar. Örnek olarak krom ve alüminyumdur. Ferromanyetik malzemelerde iyonlarla serbest elektronlar bir arada bulunduğu ortamda elektronlarla komşu iyonlar arasında etkileşme olur. Ferromanyetik malzemelerde mıknatıslanma etkisi kuvvetlidir. Ferromanyetik malzemeler manyetik bir alana maruz kaldıklarında kalıcı olarak mıknatıslanabilirler. Örnek: Ni ve Co verilebilir. Ferrimanyetik malzemeler farklı manyetik momente sahip malzemelerdir, atomik mıknatısları birbirlerine paralel olmayıp, birbirlerini yok etmeyecek şekildedirler. Örnek: Manyetit (Fe_3O_4)+Ni karışımı verilebilir (Günay, 2013). Seçilen bazı malzemelerin manyetik geçirgenlik değeri Çizelge 3.4' de verilmiştir.

Çizelge 3.4. Seçilen bazı malzemelerin izafi geçirgenlik değerleri (Kraus, 1992)

Malzeme	Tip	İzafi Geçirgenlik
Bizmut	Diamanyetik	0.99983
Hava	Paramanyetik	1.0000004
Alüminyum	Paramanyetik	1.00002
Feroksküb(Mn-Zn)	Ferrimanyetik	1500
Yumuşak Çelik (0.2 C)	Ferromanyetik	2000
Demir (%99.91 saf))	Ferromanyetik	5000
Saf Demir(%99.95 saf))	Ferromanyetik	200000

3.8. İndüksiyonla Isıtmanın Matematiksel Temelleri

İndüksiyon fırınlarının frekansı ısıtılacak malzemenin cinsine, malzemenin ısıtılacak kısmına, yapılacak işe göre belirlenir. Isıtılacak malzemeye, yapılacak işe göre bobin tasarımı yapılır, sarılan bobinin endüktansı ve bobine bağlanacak kondansatörün kapasitesi sistemin rezonans frekansını belirler. Yapılacak işe uygun frekans belirlenip bu frekansa en yakın rezonans frekansını sağlamak için bobin tasarımı çok önemlidir. Rezonans frekansını hesaplamak için Formül 3.4 kullanılır:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (\text{Hz}) \quad (3.4)$$

f_0 : Rezonans frekansı (Hz), L: Bobin endüktansı (H), C: Kondansatör kapasitesidir (Alınca, 2012). İndüksiyon bobininde meydana gelen manyetik alan şiddeti akım, frekans gibi değişkenlere bağlı olduğu kadar bobin geometrisine de bağlıdır. Bobin geometrisinin etkisi endüktans değişikliği ile ortaya çıkmaktadır. Endüktans aynı zamanda formül 3.4 deki rezonans frekansının hesaplanması içinde bilinmesi gereken bir değerdir. Tur sayısı N olan bir bobinin endüktansı ise formül 3.5 ile belirlenir:

$$\ell = (\mu N^2 A)/L \quad (\text{H}) \quad (3.5)$$

Burada A: bobinin alanıdır ve $A = \pi R^2$ ile bulunur. R: bobinin yarıçapıdır (Alınca, 2012). İndüklenen eddy akımları sonucu oluşan ısı, malzeme üzerinde üniform olmadığı için, güç iletimi $P = R \cdot I^2$ formülü ile hesaplanamaz, aşağıda verilen indüksiyonla güç transfer formülü ile açıklanabilir:

$$P = \pi \cdot d \cdot h \cdot H^2 \cdot \sqrt{\pi \cdot \rho \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot f} \cdot C \cdot F \quad (3.6)$$

Burada d : silindir çapı [m], h : silindir yüksekliği [m], H : manyetik alan yoğunluğu [A/m], r : direnç [W.m], μ_0 : vakumun manyetik geçirgenliği ($4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m), μ_r : relatif geçirgenlik, f :frekans [Hz], C : bağlantı faktörü, F : güç iletim faktörüdür (İnt. Kay. 7).

3.8.1. Elektromanyetik Alanın Matematiksel Modeli

Elektromanyetik alanı hesaplama, Maxwell denklemleri ile çözülebilir. Genel olarak zamana bağlı olarak değişen elektromanyetik alanlar için, Maxwell denklemleri aşağıdaki gibi diferansiyel formda yazılabilirler (Sert, 2008)

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \text{ (Amper Kanunundan)} \quad (3.7)$$

$$\nabla \times E = - \frac{\partial B}{\partial t} \text{ (Faraday Kanunundan)} \quad (3.8)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \text{ (Gauss Kanunundan)} \quad (3.9)$$

$$\nabla \cdot D = \rho^{\text{Sarj}} \text{ (Gauss Kanunundan)} \quad (3.10)$$

Burada , E = Elektrik alan şiddeti (V/m), D = Elektriksel akış yoğunluğu (Coulomb/m²), H = Manyetik alan şiddeti (A/m), J = iletilen akım yoğunluğu (A/m²). ρ = Elektrik şarj yoğunluğudur (Coulomb). Gradyan (∇U), üç değişkenli bir vektörel büyüklük olup, türevi genelleştirmek için gerekli büyüklüktür. Türev küçük bir yer değiştirme için, fonksiyonun ne kadar hızlı değiştiğini gösteren bir bağıntıdır. Eğer fonksiyon, üç bağımsız değişkene $U(X,Y,Z)$ sahip ise, değişkenlerdeki küçük yer değiştirmelerin fonksiyonu ne kadar hızla arttıracak kısmi türevle bulunabilir (Sert, 2008).

$$\nabla U = \text{grad}U = i \frac{\partial U}{\partial x} + j \frac{\partial U}{\partial y} + k \frac{\partial U}{\partial z} \quad (3.11)$$

Diverjans U ($\nabla \cdot U$) bir noktadaki U vektör çizgilerinin ne kadar ıraksandığının bir ölçüsüdür. (Sert, 2008, Griffiths, 1996).

$$\nabla \cdot U = \text{div}U = \frac{\partial U_x}{\partial x} + \frac{\partial U_y}{\partial y} + \frac{\partial U_z}{\partial z} \quad (3.12)$$

$\nabla \times U$ rotasyoneli, U vektörünün bir nokta etrafında dolanış miktarının bir ölçüsüdür (Sert, 2008, Griffiths, 1996).

$$\nabla \times \mathbf{U} = \text{rot} \mathbf{U} = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ U_x & U_y & U_z \end{vmatrix} = \mathbf{i} \left(\frac{\partial U_z}{\partial y} - \frac{\partial U_y}{\partial z} \right) + \mathbf{j} \left(\frac{\partial U_x}{\partial z} - \frac{\partial U_z}{\partial x} \right) + \mathbf{k} \left(\frac{\partial U_y}{\partial x} - \frac{\partial U_x}{\partial y} \right) \quad (3.13)$$

Maxwell denklemleri sadece matematiksel bir anlama sahip değildir, aynı zamanda somut fiziksel anlamlara da sahiptir. Örneğin denklem 3.7 H' ın rotasyonelinin devamlı iki kaynağa sahip olduğunu ifade eder. Bunlar; iletim (J) ve yer değiştirme (Şarj ρ) akımlarıdır. Ne zaman bir manyetik alan oluşturulsa, çevrelenen maddede elektrik akımı akışı vardır. Denklem 3.8'den su sonuç çıkarılabilir; manyetik akış yoğunluğu değişiminin zamana oranı olan B, çevrelenen alanda rotasyonel E alanını indüklemeye akımlarını oluşturmaktadır. Diğer bir değişle, elektrik alanı oluşturur. Denklem 3.8' deki eksi işareti bu indüklenen elektrik alanının yönünü belirtir. Bu temel sonuçlar uzaydaki herhangi bir alanda uygulanabilir (Sert, 2008). İndüksiyon bobinine alternatif voltaj uygulanması, bobin devresinde alternatif akım meydana getirir. Denklem 3.7'e göre bir alternatif bobin akımı, çevrelediği alanda, kaynak akım (bobin akımı) ile aynı frekansa sahiptir ve alternatif (değişken) manyetik alan oluşturur. Manyetik alan kuvveti, indüksiyon bobininden geçen akıma, bobin geometrisine ve bobin mesafesine bağlıdır. Değişken manyetik alan çalışma parçasında ve bobin yanında yerleştirilmiş diğer maddelerde eddy akımları oluşturur. Denklem 3.8' e göre indüklenen akımlar, bobindeki kaynak akımla aynı frekansa sahiptir fakat bu akımların yönü bobin akımları ile karşı yönlüdür. Bu durum denklem 3.8'de eksi işareti ile tanımlanmıştır. Denklem 3.7'ye göre; çalışma parçasında indüklenen eddy akımları, bobinin ana manyetik alanının karşı yönünde kendi manyetik alanlarını oluşturur. İndüksiyon bobininin oluşturmuş olduğu toplam manyetik alan, kaynak manyetik alan ve indüklenen manyetik alanların bir sonucudur (Sert, 2008).

Denklem 3.8 'in kısa notasyonu, elektriği ileten maddelerin indüksiyonla ısıtması ve ısı işleminde gerçekten önemli bir yere sahiptir. Manyetik akış yoğunluğunun diverjansının sıfır olması demek, manyetik akış çizgilerinin (B) meydana çıktığı veya son bulduğu kaynak noktalarına sahip olmadığını söylemekle eş anlama sahiptir. Diğer bir değişle, manyetik akış çizgileri devamlı olarak sürekli döngü formundadır (Sert, 2008). Maxwell denklemleri, denklem sayısının bilinmeyen sayısından daha az olmasından dolayı belirsiz durumdadır. Bu denklemler, manyetik alanın nicelikleri arasındaki ilişkiler tanımlandığında belirli hale gelirler. Aşağıda bu yapısal ilişkiler lineer izotropik ortam için açıklanmıştır:

$$\mathbf{D} = \epsilon \epsilon_0 \mathbf{E} \quad (3.14)$$

$$\mathbf{B} = \mu_r \mu_0 \mathbf{H} \quad (3.15)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (3.16)$$

Burada, ϵ =dielektrik sabiti (F/m), μ_r = izafi manyetik geçirgenlik, σ = Elektriksel iletkenlik (Siemens) ($\sigma = 1/\rho$, ρ = elektriksel direnç), μ =Boşluğun izafi geçirgenliği ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m veya Wb/(Axm)), ϵ_0 = boşluğun dielektrik sabitidir (8.84×10^{-12} F/m). Denklem 3.14 hesaba katıldığında denklem 3.7 aşağıdaki gibi tekrar yazılabilir:

$$\nabla \times H = \sigma E + \frac{\partial(\epsilon_0 \epsilon E)}{\partial t} \quad (3.17)$$

Metallerin indüksiyonla ısıtılması pratik uygulamalarında, akımın frekansı 10 Mhz' den azdır ve indüklenen kondüktör akımı yoğunluğu, J yer değiştirme akımı yoğunluğundan ($\partial D / \partial t$) çok büyüktür. Bu nedenle denklem 3.11'in sağ tarafının son kısmı ihmal edilebilir. Sonuç olarak denklem 3.17 aşağıdaki gibi tekrar yazılabilir:

$$\nabla \times H = \sigma E \quad (3.18)$$

Bazı vektörel cebir işlemlerinden sonra, denklem 3.7, 3.8 ve 3.15 aşağıdaki gibi gösterilebilir:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\sigma} \nabla H \right) = - \mu_r \mu_0 \frac{\partial H}{\partial t} \quad (3.19)$$

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu_r} \nabla E \right) = - \sigma_r \mu_0 \frac{\partial E}{\partial t} \quad (3.20)$$

Denklem 3.15 manyetik vektör potansiyeli (A) açısından aşağıdaki gibi açıklanabilir;

$$B = \nabla \times A \quad (3.21)$$

ve daha sonra, denklem 3.8;

$$\nabla \times E = - \nabla \times \frac{\partial A}{\partial t} \quad (3.22)$$

İntegrasyondan sonra aşağıdaki denklem elde edilir;

$$E = - \frac{\partial A}{\partial t} - \nabla \phi \quad (3.23)$$

burada ϕ elektrik skaler potansiyelidir. Denklem 3.16 aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$J = -\sigma \frac{\partial A}{\partial t} + J_s \quad (3.24)$$

burada $J_s = -\sigma \nabla \phi$ indüksiyon bobinindeki kaynak (uyarma) akım yoğunluğudur. Malzeme özellikleri göz önünde tutulursa ve histerezis ve manyetik doygunluk ihmal edilirse denklem aşağıdaki gibi gösterilebilir;

$$\frac{1}{\mu_r \mu_0} (\nabla \times \nabla \times A) = J_s - \sigma \frac{\partial A}{\partial t} \quad (3.25)$$

Sertleştirme, dövme ve haddeme öncesi indüksiyonla ısıtma ve kalıba basma gibi indüksiyonla ısıtma uygulamalarına histerezis kayıplarının neden olduğu ısı etkisi, eddy akım kayıplarının neden olduğu ısı etkisinin yalnızca %7 si kadardır. Bu uygulamalarda histerezisin ihmal edilmesi yaklaşımını doğrudur (Sert, 2008). Bununla beraber, indüksiyonla tavlama, gerilim giderme, galvanizleme öncesi ısıtma gibi bazı uygulamalarda histerezis kayıplarının neden olduğu ısı etkisi, eddy akımlarının oluşturduğu ısı etkisiyle karşılaştırılabilecek değerdedir. Histerezis kayıplarının toplam ısı oluşumuna katkısı %40 civarındadır. Bu durumdan dolayı histerezis kayıpları bu uygulamalarda hesaba katılmalıdır. Bazı vektörel cebir işlemlerinden sonra denklem 3.19, 3.20, ve 3.25 sırasıyla aşağıdaki gibi yazılabilir (Sert, 2008);

$$\frac{1}{\sigma} \nabla^2 H = J_w \mu_r \mu_0 H \quad (3.26)$$

$$\frac{1}{\mu_r} \nabla^2 E = J_w \sigma_r \mu_0 E \quad (3.27)$$

$$\frac{1}{\mu_r \mu_0} \nabla^2 A = -J_s + J_w \sigma A \quad (3.28)$$

3.8.2. Isı İletiminin Matematiksel Modeli

Genel olarak, bir metal parçasında zamana bağımlı ısı transfer işlemi Fourier ısı iletim denklemi ile tanımlanabilir (Sert, 2008, Nart ve Şahin, 2005);

$$c\gamma \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q \quad (3.29)$$

Isı iletim denkleminin laplasyen açılımı yapılacak olursa, denklem diferansiyel formda aşağıdaki şekilde tekrar yazılabilir;

$$c\gamma \frac{\partial T}{\partial t} = k_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + Q \quad (3.30)$$

burada; T=sıcaklık (°C), γ =metalin yoğunluğu (Kg/m³), c=özellik ısı (J/m^3C), k=metalin ısı iletkenlik katsayısı (W/mC), Q= Eddy akımlarının oluşturduğu birim hacimdeki, birim zamandaki ısı kaynağı yoğunluğu (ısı üretimi). Isı üretimi, elektromanyetik problemler çözülerek elde edilir (W/m³).

İndüksiyonla ısıtmanın çoğu mühendislik problemleri için, sınır şartlarına konveksiyon ve radyasyondan kaynaklanan ısı kayıpları eklenir. Bu durumda sınır şartları aşağıdaki şekilde gösterilebilir,

$$k_n \frac{\partial T}{\partial n} + \alpha (T - T_0) + \sigma \varepsilon (T^4 - T_0^4) + q = 0 \quad (3.31)$$

burada ; $\partial T/\partial n$ = ele alınan noktadaki yüzeye dik yöndeki termal gradyen, k_n =yüzeye dik termal geçirgenlik, α =Konveksiyon yüzey ısı iletim katsayısı (W/m^2C), σ =Stefan-Boltzman sabiti ($W/m^2 C^4$), ε = Radyasyon ışıyım katsayısı (emissivity), $q(x, y, z,t)$ =Belirtilen yüzey kayıplarıdır (W/m²).

3.8.3. Gerilmenin Matematiksel Modeli

Gerilme birim alana etki eden kuvvet yoğunluğudur ve boyutu (kuvvet/alan) olarak verilir. Kesit düzlemine dik veya normal olan kuvvet yoğunluğuna, o noktadaki normal gerilme denir. Gerilmenin kesit düzleminde olması halinde oluşan gerilmeye ise kayma gerilmesi denmektedir. Bir kesit yüzeyinden dışa doğru etkiyen normal gerilmeleri çekme gerilmesi, içe doğru olan normal gerilmeye bası gerilmesi denir. Aşağıdaki bağıntıda, σ gerilme, N normal kuvvet (Newton), A normal kuvvetin etkilediği kesit alanıdır(m²) (Popov, 1990).

$$\sigma = \frac{N}{A} \left(\frac{N}{m^2} = Pa \right) \quad (3.32)$$

Malzemeler düşük gerilmeler altında, lineer elastik davranış gösterirler. Lineer elastik davranışta, gerilmelerle-şekil değiştirmeler orantılıdır ve şekil değiştirmeler tersinirdir. Bu davranış 'Hooke Kuralı' ile ifade edilir (Onaran, 2003).

$$\sigma = E.\varepsilon \quad (3.33)$$

Burada, E elastisite modülüdür (N/m^2). Bu değer malzemenin elastik şekil değiştirmeye karşı gösterdiği direnci veya rijitliği anlamına gelir. ϵ , şekil değiştirme oranıdır ve birimsizdir. Malzemeler üzerine yapılan deneylerde, kuvvetin etkilediği normal gerilme yönündeki deformasyonla birlikte, bu doğrultuya dik düzlem içerisinde de bazı yanal genişleme ve daralmaların olduğunu göstermektedir. Uygulanan aksenal gerilmenin doğrultusuna bağlı olarak bu yanal gerilmenin doğrultusu kolaylıkla bulunabilir. Yanal şekil değiştirmenin mutlak değerinin, aksenal şekil değiştirmeye oranına Poisson oranı denir. X-ekseni doğrultusunda uygulanan bir kuvvetin oluşturduğu aksenal şekil değiştirme ϵ_x , yanal şekil değiştirme ϵ_y , olduğuna göre, ν poisson oranı aşağıdaki bağıntı ile ifade edilebilir (Popov, 1990):

$$\nu = \frac{|\epsilon_y|}{\epsilon_x} \quad (3.34)$$

Toz metal malzemelerin, gözenekliliğine bağlı olarak elastisite modülü ve Poisson oranı değişim göstermektedir. Bu da malzemenin mukavemetini etkilemektedir. Eğer malzemeye akma dayanımı üzerinde bir gerilme uygulanacak olursa, malzemede kalıcı deformasyonlar meydana gelir. bu durumda plastik şekil değiştirmenin olduğu Ludwig kuralı geçerlidir:

$$\sigma_g = \sigma_{ak} + K \cdot \epsilon^n \quad (3.35)$$

Burada, σ_g gerçek plastik gerilme, ϵ = Gerçek plastik birim şekil değiştirme, K = mukavemet katsayısı, n = pekleşme katsayısı, σ_{ak} , malzemenin plastik deformasyona başladığı gerilme değeridir. Burada ki K , malzeme yapısına bağlı ve işlem prosesinden etkilenen bir katsayıdır, n ise 0,2 ile 0,5 arasında değişen bir malzeme özelliğidir (Ay, 2013).

Gerilmelerden başka, cisimlerdeki sıcaklık değişimleri de deformasyonlara sebep olmaktadır. Homojen ve izotropik malzemeler için, δT ($T-T_0$) miktarındaki bir sıcaklık değişimi, her doğrultuda lineer şekil değiştirmelere sebep olur. Bir denklem ile ifade edilen termal şekil değiştirmeler:

$$\epsilon_x = \epsilon_y = \epsilon_z = \alpha \cdot \delta T \quad (3.36)$$

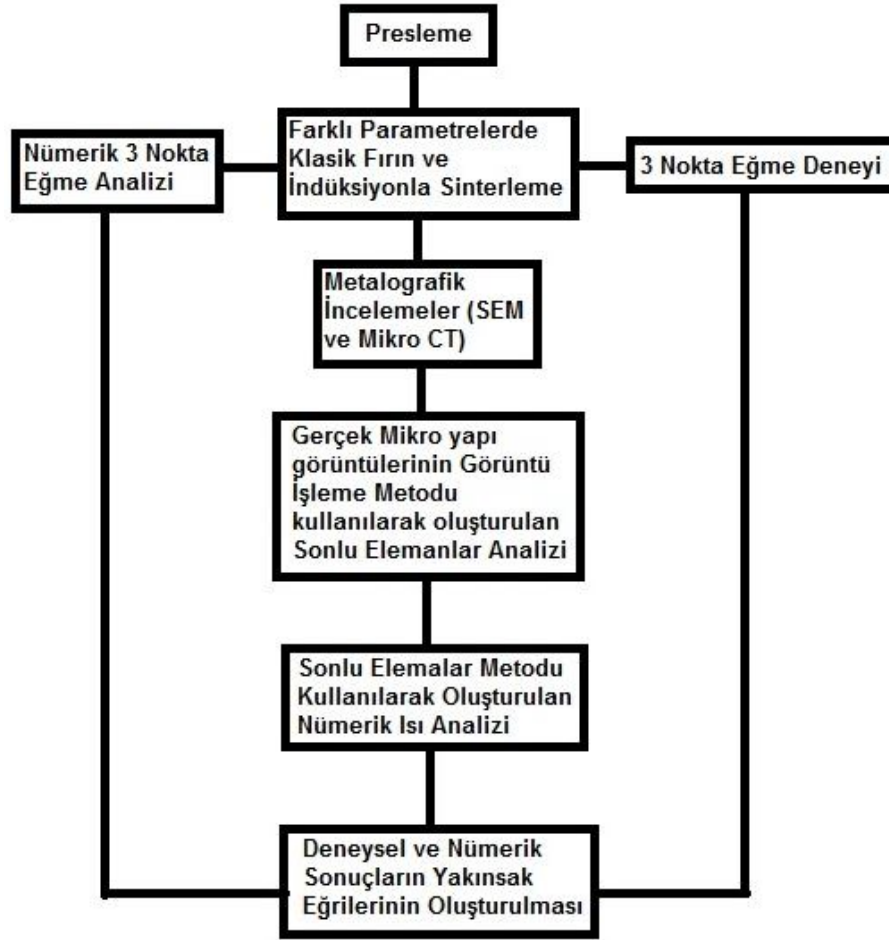
olarak verilir. Burada α ($1/^\circ\text{C}$), malzemenin termal genişleme katsayısıdır. Bu değer deneysel olarak belirlenir. Makul bir sıcaklık değişim sınırları içerisinde α sabite yakın bir değerdir (Popov, 1990). Eğer malzemenin şekil değiştirmesi kısıtlanmışsa, malzemede sıcaklık değişince gerilmeler oluşur. Bu gerilmeler denklem 3.33 'de belirtilen Hooke kuralı ile bulunabilir. Denklem 3.33'deki ϵ şekil değiştirme oranı yerine, termal şekil değiştirme bağıntısı yazılacak olursa aşağıdaki bağıntı bulunur:

$$\sigma = E . \alpha . \delta T \quad (3.37)$$

Burada E malzemenin elastisite modülü, δT ısı değişim miktarı, σ oluşan termal gerilmelerdir (Onaran, 2003).

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışmada 0,2, 0,3 ve 0,5 mm/s konveyör hızlarında indüksiyonla ve fırında sinterlenen demir esaslı toz metal numunelerin mekanik ve mikro yapısal özellikleri incelenmiştir. Ayrıca, indüksiyonla sinterlemede 2,5 kHz frekansta ön ısıtma işleminin TM numunelerin mikro yapı ve mekanik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Deneysel ve nümerik çalışmalarda yapılan işlemler Şekil 4.1' de özetlenmiştir.



Şekil 4.1. Deneysel ve Nümerik çalışma özeti şeması

Çizelge 4.1'de kimyasal, fiziksel ve elek analizi verilen Högenas ASC 100.29 demir tozundan elde edilen numuneler, farklı konveyör hızlarında indüksiyonla ve fırında sinterleme işlemine tabi tutulmuştur. Numunelere indüksiyonla, orta-düşük frekansta (2,5 kHz) ön ısıtma ve orta frekans (45 kHz) değerinde sinterleme işlemi yapılmıştır. Deney işlemi üretilen plc kontrollü konveyör ile konum ve hız kontrollü olarak yapılmıştır.

Deneysel çalışma başlangıcında, tozlar Sartorius BL 210S marka hassas terazide 37,37 gram tartılarak 10X10X55 mm boyutlarındaki kalıp boşluğuna doldurulmuştur ve numuneler kalıpta, 600 MPa basınç ta Hidrokar marka hidrolik pres ile 10 saniye boyunca soğuk preslenmiştir. Kalıp yağlayıcısı olarak grafit tozu kullanılmıştır. Numuneler daha sonra 0,2, 0,3 ve 0,5 mm/s olmak üzere üç farklı konveyör hızında indüksiyonla sinterlenmiştir. Ayrıca indüksiyonla ön ısıtma işleminin etkisini görebilmek amacıyla, bazı numunelere ön ısıtma işlemi uygulanmıştır. Archimed prensibine göre TM numunelerin yoğunlukları ölçülmüştür. Pres, kalıp ve elde edilen numune görüntüsü Şekil 4.2 ve 4.3' de verilmiştir.



Şekil 4.2. Hidrolik pres ve kalıp görüntüsü

Çizelge 4.1' de farklı parametrelerde sinterlenen numunelerin kod adları ve deney şartları verilmiştir.

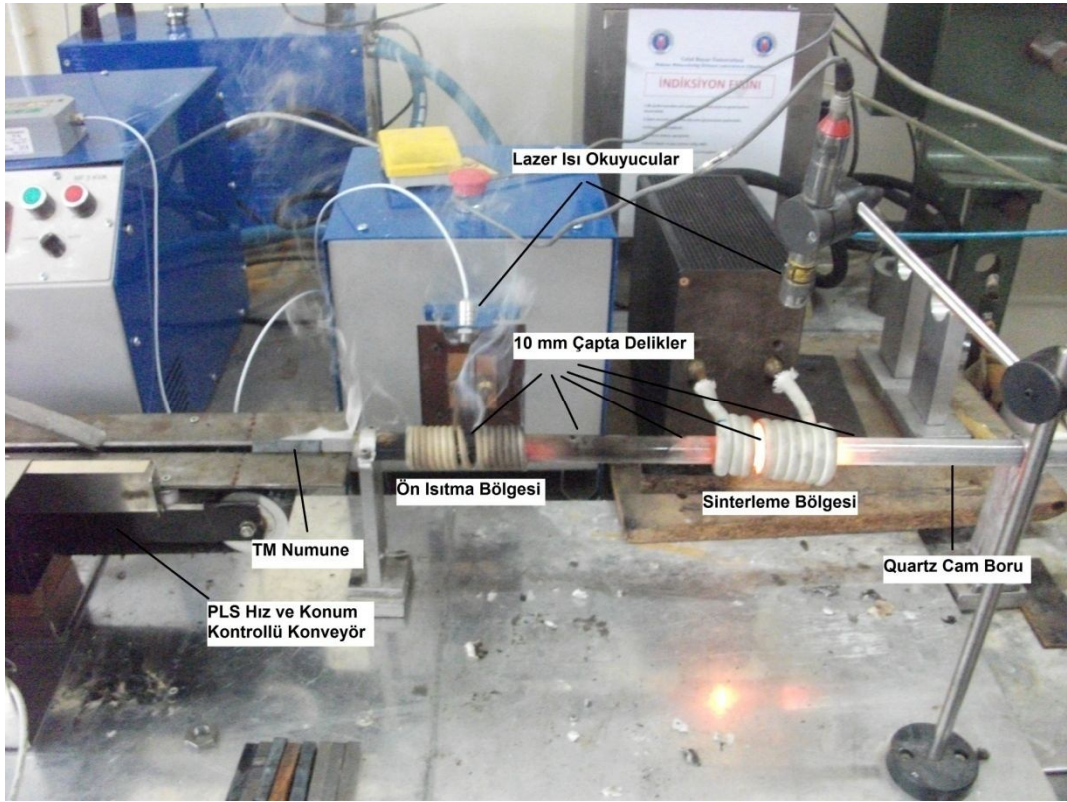


Şekil 4.3. 10x10x55 mm boyutlarında soğuk preslenmiş numune

Çizelge 4.1. TM numune kodları ve uygulanan işlemler

S.N.	Numune Kodu	Sinterleme İşlemi	Koruyucu Atmosfer	Konveyör Bant hızı(mm/s)	Ön Isıtma Süresi (dk.)	Sinterleme Süresi (dk.)	Yoğunluk (gr/cm ³)
1	K 0.2	İndüksiyon	Argon	0.2	-	17.08	7,457
2	K 0.3	İndüksiyon	Argon	0.3	-	11.38	7,197
3	K 0.5	İndüksiyon	Argon	0.5	-	6.83	7,135
4	Ö 0.3	İndüksiyon	Argon	0.3	11.27	11.38	7,485
5	Ö 0.5	İndüksiyon	Argon	0.5	6.76	6.83	7,318
6	F 1	Fırın	Argon	-	15	45	7,211
7	F 2	Fırın	Yok	-	15	45	7,184

TM numunelerin indüksiyonla sinterlenmesi esnasında ortam atmosferinin zararlı etkilerini engellemek için numuneler ısıya dayanıklı quartz cam boru içerisinden geçirilerek ortama saf argon gazı gönderilmiştir. Quartz cam boru üzerine açılan delikler vasıtasıyla yağlayıcıların buharlaşması ve lazer ısı okuyucuların numune üzerinden direkt olarak ölçüm yapabilmesi sağlanmıştır. Şekil 4.4' de quartz cam boru, ısı okuyucular ve 600 °C' de yağlayıcı giderme işlemi gösterilmiştir.

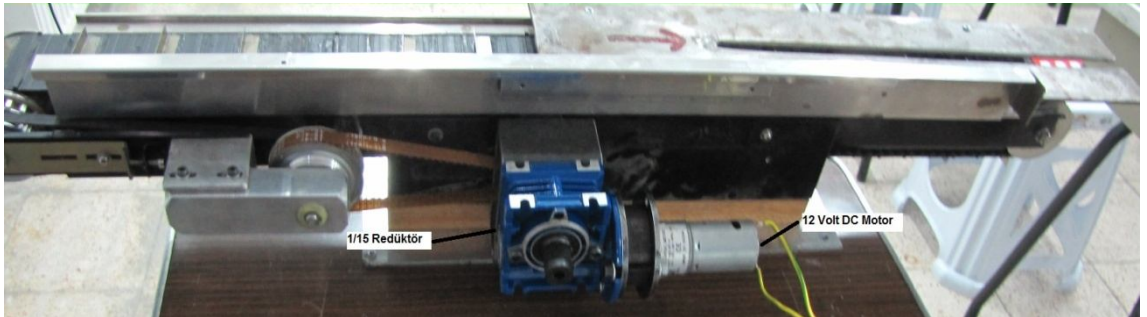
**Şekil 4.4.** İndüksiyon Deney Düzeneği

Çizelge 4.2. Högenas ASC 100.29 Demir Tozu Kimyasal, Fiziksel Özellikler ve Elek Analizi (İnt. Kayn. 10)

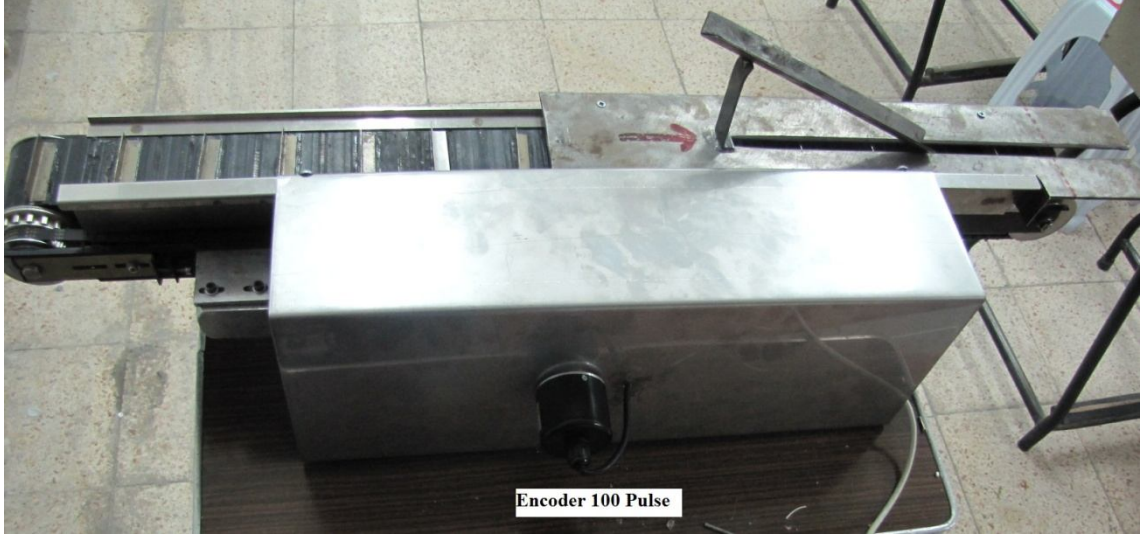
Kimyasal Özellikler % (Yüzde)		Fiziksel Özellikler		Boyut Analizi % (Yüzde)	
C	%0.01	Açık Yoğunluk	2.42 g/cm ³	< 45 µm	23
O	%0.07	Akış (Hall)	31 Sn/50g	45 ÷ 150 µm	69
Cu	% 3	Sıkıştırma Basıncı	40 tsi	150 ÷ 180 µm	8
Yağlayıcı	%0.8			> 180 µm	0
Demir	Balans element				

4.1. Deney Düzeneğinin Hazırlanması

Konveyör bandın hızı, indüksiyonla sinterleme süresini ve numuneler üzerindeki sıcaklık dağılımını doğrudan etkilediği için hassas olarak belirlenmelidir. Bu amaçla, deney düzeneğinde sürekli bir sinterleme işlemi sağlayacak şekilde, plc hız ve konum kontrollü konveyör sistemi geliştirilmiştir. Konveyör hızını kumanda edebilmek için Delta plc yazılımı kullanılmıştır. Üretilen numuneler üzerinde mekanik, fiziksel ve mikro yapı özellikleri açısından en uygun sinterleme hızları ve süreleri saptanmaya çalışılmıştır. Şekil 4.5.-4.7. de tarafımızca tasarlanan plc kontrollü konveyör bant görülmektedir. Konveyör hızını hassas bir şekilde ayarlayabilmek için bant'a 12 Voltluk DC motor ve 1/15 oranında devir düşürücü redüktör ilave edilmiştir. Ayrıca her bir devirde 100 sinyal üretebilen encoder bağlanmıştır. Encoder sinyalleri ile devir ve dolayısıyla konveyör bant hızı hesaplanmıştır ve kontrol ekranında dijital olarak gösterilmiştir. Kontrol ünitesine bağlı olan bir potansiyometre ile konveyör bant hızı 0,5mm/s ile 0,04mm/s arasında ayarlanabilmektedir.



Şekil 4.5. Plc kontrollü konveyör bant ön görünüşü



Şekil 4.6. Plc kontrollü konveyör bant encoder bağlantısı

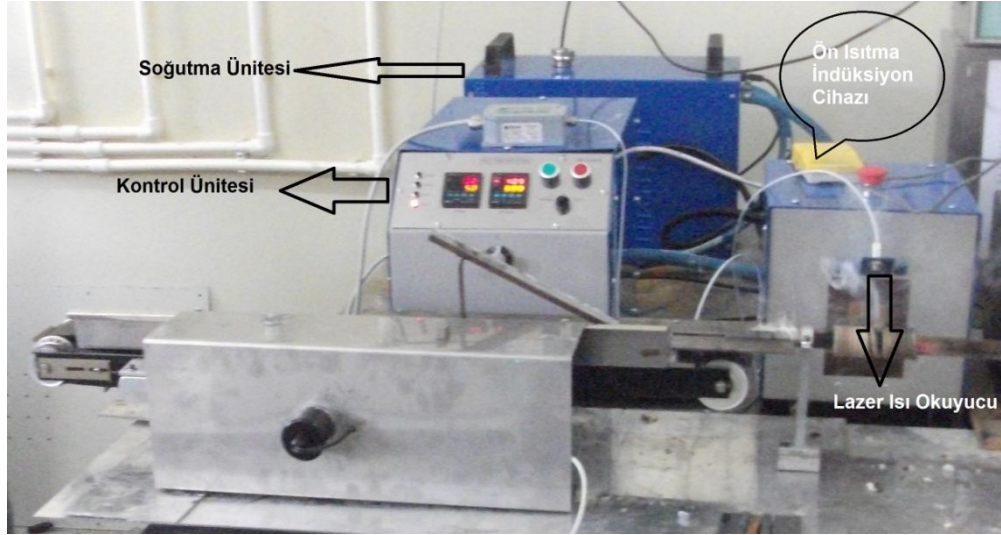


Şekil 4.7. Plc kontrol panosu

PLC hız ve konum kontrollü konveyör sistemi ile 90 mm uzunluğundaki bir bobin içerisinden geçirilen 10x10x55 mm boyutlarındaki numune için sinterleme süresi 6 ile 83 dakika arasında değiştirilebilmektedir.

Deneysel çalışma kapsamında 2013-040 no' lu Bilimsel Araştırmalar Projesi kapsamında indüksiyonla ön ısıtma işleminin sinterlenen malzemeler üzerindeki etkisini görebilmek için orta-düşük (5-2,5 kHz) frekansta ayarlanabilir 5 Kw gücünde su soğutmalı

sıcaklık ve zaman kontrollü indüksiyon cihazı tasarımı yapılmıştır. Şekil 4.8' de ön ısıtma indüksiyon cihazı resmi görülmektedir. Ön ısıtma cihazı, düşük frekans (2,5 kHz) ile daha yüksek işleme derinliği oluşturarak, toz metal numunelerin sıcaklığını kademeli bir şekilde 600 °C' ye çıkarmaktadır. Bu işlem, TM numune içerisinde bulunan yağlayıcı ve bağlayıcıların yavaş yavaş ve yüzeyi bozmadan yapıdan ayrılmasını ve termal şoku önlemektedir. Ön ısıtma işlemi için, bobin uzunluğu 93 mm, bobin çapı 4 mm, bobin sarım sayısı 15, sarım dış çapı 35 mm olarak belirlenmiştir. Lazer pirometre ile numune sıcaklığı 600 °C'de sabit tutulmuştur. Ön ısıtma esnasında da su jeti ile delinmiş quartz cam boru içerisine Argon gazı gönderilerek koruyucu atmosfer şartları sağlanmıştır. Bu boyutlardaki numune üzerinde oluşan işleme derinliği TM numunelerin deneysel sonuçlardan elde edilen elektriksel özellikleri girilerek teorik çalışmalarındaki işleme derinliği modelinde sunulmuştur.

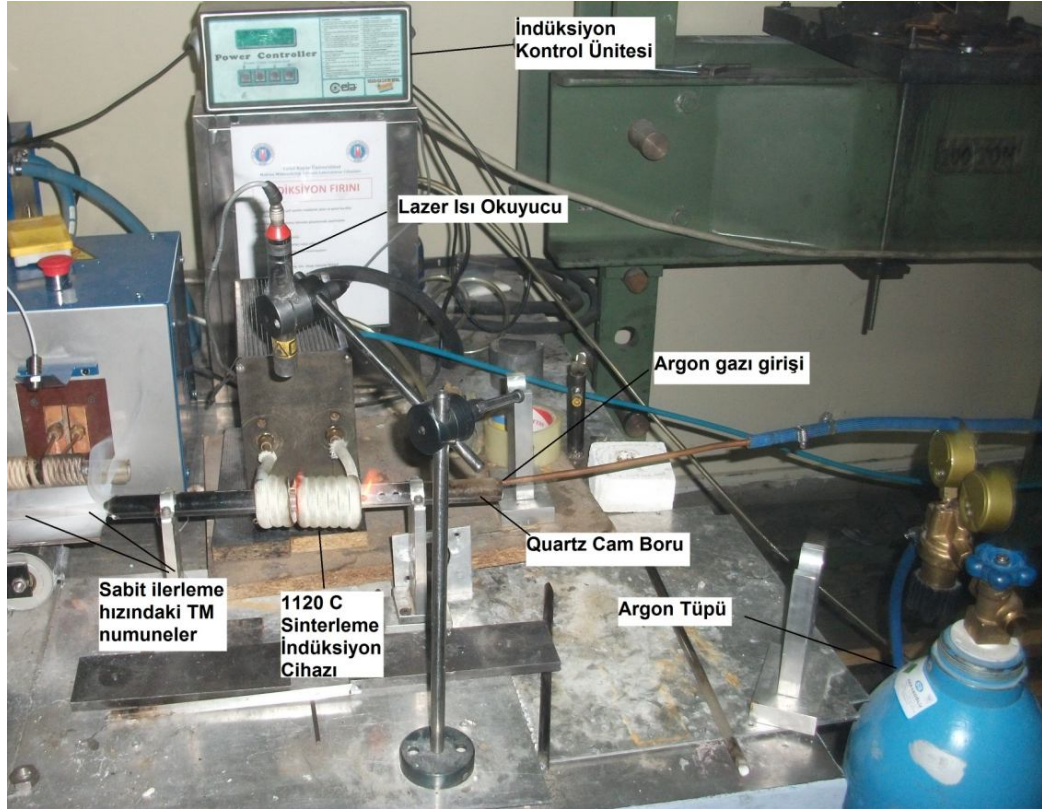


Şekil 4.8. Ön Isıtma İndüksiyon Cihazı

Klasik fırınlardaki ön ısıtma ısınma ve kademeli yavaş soğuma bölgeleri üstün malzeme özellikleri sağlamaktadır. İndüksiyonun en büyük handikabı, ani ısınma ve soğumalar karşısında malzemenin mekanik ve fiziksel özelliklerinin kötü etkilenmesidir. Bu çalışmada, indüksiyonda yavaş ısıtma sağlamak amacıyla 2,5 kHz frekanslı ön ısıtma indüksiyon cihazı ile numuneler üzerinde kademeli ısıtma sağlanmıştır. Ek olarak Plc kontrollü konveyör ile sinterleme hızı ayarlanarak bobin çıkışında malzemenin yavaş soğuması sağlanmıştır. Ayrıca fırındaki gibi fırın elemanlarının ısınması ve uzun süreli sinterleme işlemlerine gerek duyulmadan çok kısa bir zamanda TM numunelerin sinterlenmesi başarılmıştır. Böylece sürekli bir sistem üzerinde indüksiyonla ön ısıtmanın mekanik, fiziksel ve mikro yapı özelliklerine ne şekilde etki ettiği belirlenmiştir.

4.2. Toz Metal Numunelerin Sinterleme İşlemleri

Demir esaslı ASC 100.29 tozundan elde edilen numuneler 0,2, 0,3 ve 0,5 mm/s konveyör hızlarında indüksiyonla ve sabit olarak fırında sinterleme işlemine tabii tutulmuşlardır. Her numuneden 8 adet üretilmiş olup, bu numuneler gerekli mekanik, fiziksel ve mikro yapı analizleri için kullanılmıştır. Farklı konveyör hızlarında (farklı sürelerde) indüksiyonla ve fırında sinterlenen numuneler metalografik ve mekanik testlere tabii tutulmuştur. Ön ısıtma sıcaklığı 600 °C ve sinterleme sıcaklığı 1120 °C olarak belirlenmiştir. TM numunelerin 1120 °C' de sinterleme işlemi için 8 mm bobin çapında, 95 mm tünel uzunluğunda, 9 sarımlı 45 kHz frekansta, 12 Kw gücünde, 17.5 Amper akım şiddetinde indüksiyon cihazı kullanılmıştır. Şekil 4.9'da 1120 °C sıcaklıktaki sinterleme bölgesi indüksiyon cihazının resmi verilmiştir. TM numunelerin indüksiyonla sinterlenmesin de ön ısıtma işlemi uygulanmadığında ani ısınmadan dolayı yağlayıcıların numune üzerinden ani bir şekilde ayrıldığı ve yandığı görülmüştür. Buda, numunelerin mekanik ve fiziksel özelliklerini kötü etkilemiştir. Sinterleme bölgesi işleme derinliği nümerik analizle tespit edilmiştir. TM numunelerin indüksiyonla sinterleme deneylerinin tümü koruyucu argon gazı atmosferinde yapılmıştır.



Şekil 4.9. 45 KHz frekanslı indüksiyon cihazı

4.3. Mekanik Testler

4.3.1. Toz Metal Numunelerin Üç Nokta Eğme Deneyi Sonuçları

Farklı sinterleme işlemlerine tabii tutulmuş toz metal numunelerin üç nokta eğme deneyleri Shimadzu marka cihazda yapılmıştır. Üç nokta eğme cihazı Şekil 4.10' da gösterilmiştir. Her bir numune için 4 ayrı test yapılarak ortalama değerler alınmıştır.

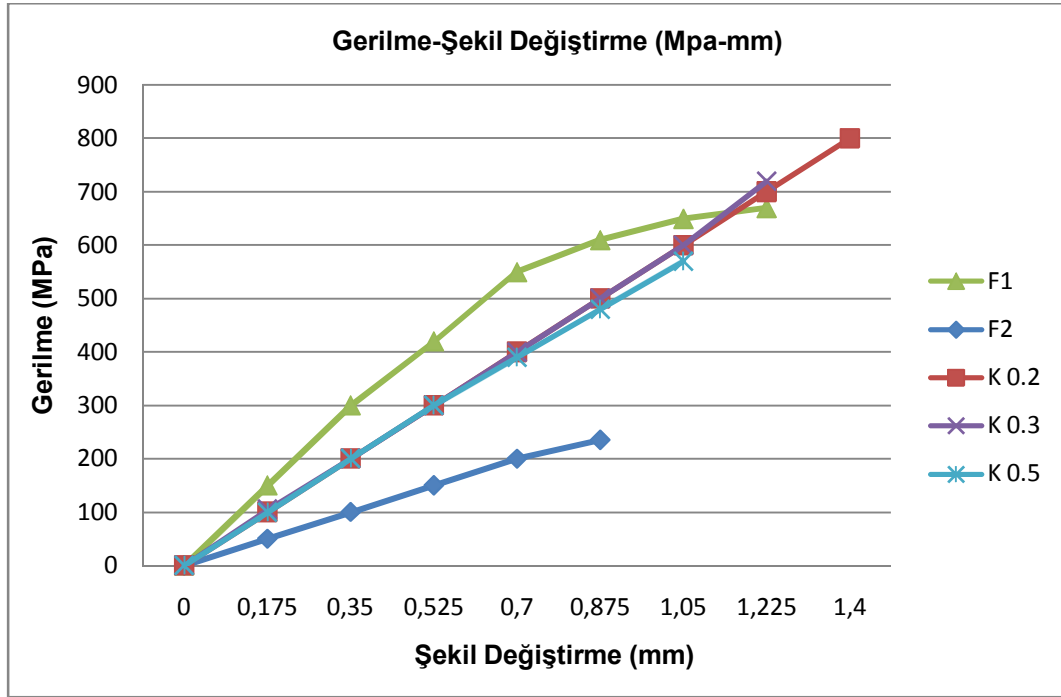


Şekil 4.10. Üç Nokta Eğme Deneyi Cihazı

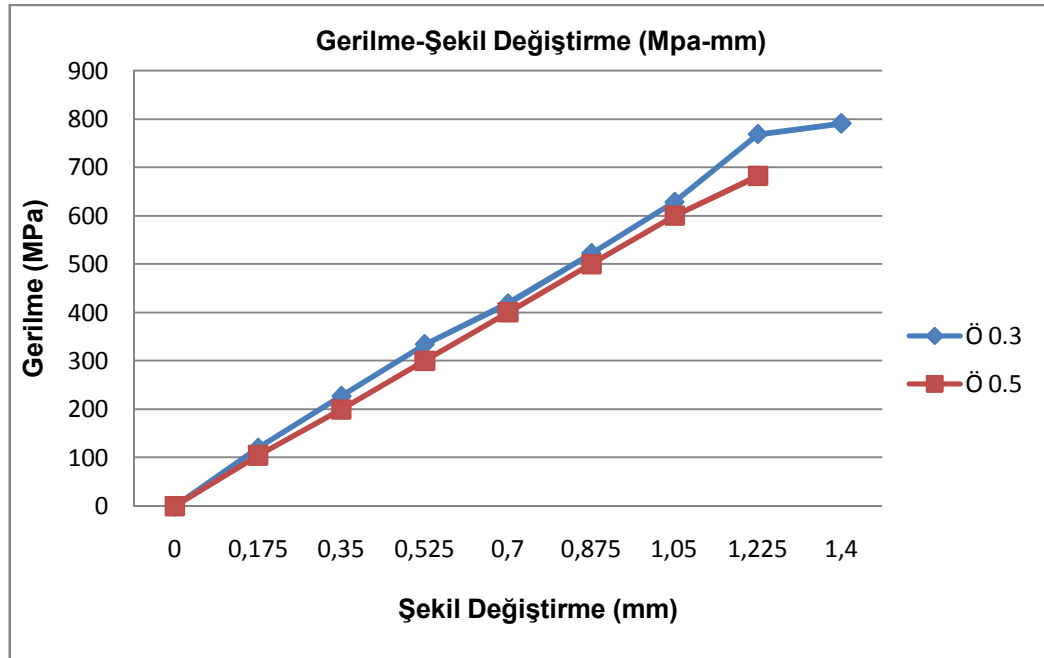
Üç nokta eğme deneyinde her bir numunenin boyutları test öncesinde bilgisayara girilmiştir. Her test başlangıcında sıfırlama ve kalibrasyon işlemleri yapılmıştır. Numuneler 44 mm mesnet mesafesinde yerleştirildikten sonra 10 mm/dakika eğme hızında ve 12 kN yük altında kırılıncaya kadar basınç uygulanmıştır. Numunelerin üç nokta eğme deneyleri ortalama değerlerinden elde edilen Gerilme-Şekil değiştirme (MPa-mm) eğrileri Şekil 4.12 ve Şekil 4.13' de verilmiştir. Şekil 4.11' de indüksiyonla ön ısıtma yapılan ve fırında ortam atmosferinde sinterlenen numunelerin görüntüleri verilmiştir.



Şekil 4.11.a) İndüksiyon ile ön ısıtma yapılarak sinterlenen numuneler **b)** Ortam atmosferinde fırında sinterlenen numune



Şekil 4.12. Fırında ve ön ısıtma yapılmamış indüksiyonla sinterlenen numunelerin üç nokta eğme deney grafikleri

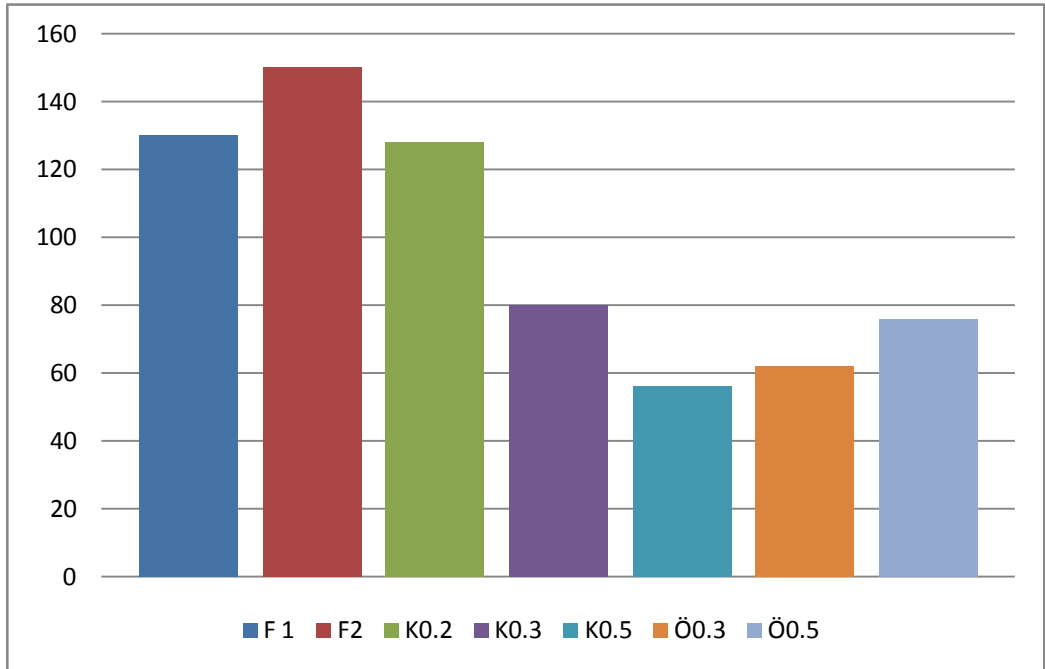


Şekil 4.13. Ön ısıtma yapılan indüksiyonla sinterlenen numunelerin üç nokta eğme deney grafikleri.

İndüksiyonla ve fırında sinterlenen numunelerin deneysel üç nokta eğme test sonuçlarının daha net görebilmek için tek bir grafikte gösterilmiştir. 600 °C' de indüksiyonla ön ısıtma işlemi uygulanan numunelerde ön ısıtma süresi, 0,3 mm/s konveyör hızındaki numune için 11,38 dakika, 0,5 mm/s konveyör hızındaki numune için 6,83 dakikadır.

4.3.2. Sertlik Testi Sonuçları

TM numunelerin yüzey sertlikleri değerleri Brinell sertlik ölçme metodu kullanılarak ölçülmüştür. Her numune zımparalama işleminden sonra 2,5 mm çapındaki bilye uç kullanılarak 10 saniye boyunca yük uygulanmıştır. Numunelere dört sertlik testi yapılarak ortalama değerleri alınmıştır. Test sonuçları Şekil 4.14'de verilmiştir.



Şekil 4.14. Numunelerin Brinell Sertlik Değerleri

4.4. Elektriksel Analizler

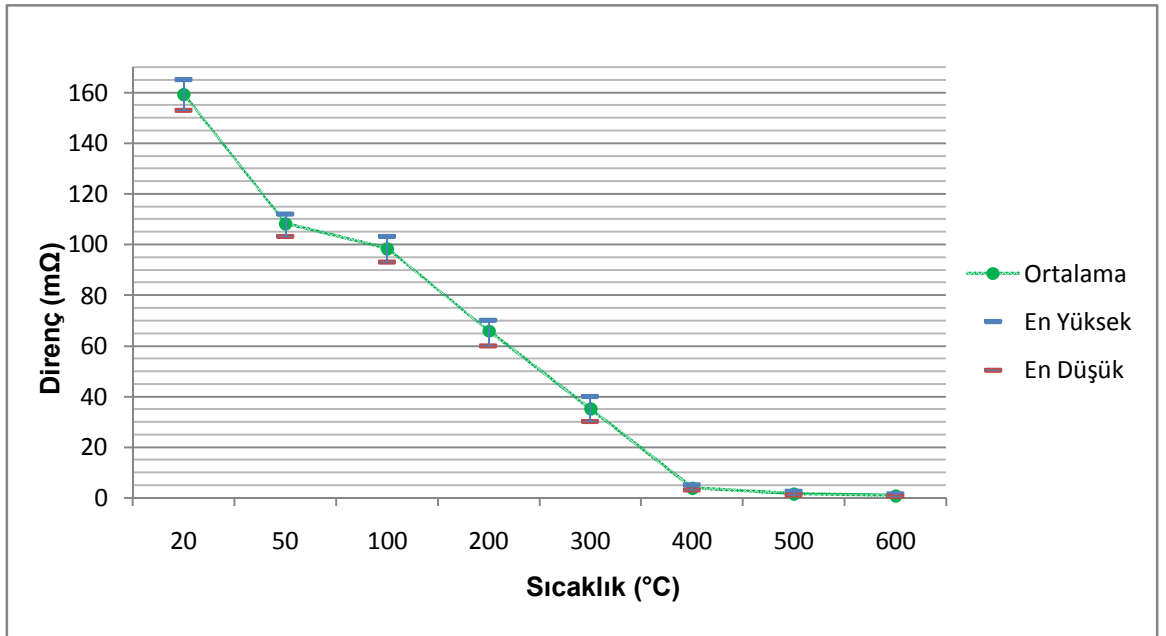
Toz metal numunelerin gözenekli iç yapısından dolayı özdirençleri bulk numunelere göre oldukça farklıdır. Toz metal malzemelerin dirençlerinin sıcaklıkla değişimlerini görebilmek ve modellemelerde gerçek özdirenç değerlerini kullanabilmek için BAP projesi kapsamında Hioki 3541 marka direnç ölçüm cihazı alınmıştır. 10x10x55 mm boyutlarındaki demir esaslı toz metal numunelerin, gerçek direnç-sıcaklık grafikleri elde edilerek ve gerçek özdirenç değerleri

hesaplanarak nümerik modellerde kullanılmıştır. Böylelikle en uygun sinterleme parametrelerine ulaşılmaya çalışılmıştır. TM numunelerin öz direnci, sinterleme parametrelerine ve malzeme içerisindeki ısı oluşumuna ve işleme derinliğine kuvvetle etki etmektedir. Şekil 4.15 de Hioki 3541 marka direnç ölçüm cihazı görülmektedir.



Şekil 4.15. Sıcaklık fonksiyonlu direnç ölçüm cihazı

10x10x55mm boyutlarındaki 316L paslanmaz çelik tozunun 1120 °C deki direnci 0,6559 mΩ olarak ölçülmüştür. Högenas ASC 100.29 demir tozunun direnç-sıcaklık grafiği ve ortalama değerleri Şekil 4.16'da ve Çizelge 4.3' de verilmiştir.



Şekil 4.16. 10x10x55mm boyutlarında ASC 100.29 Toz metal malzemenin direnç-sıcaklık grafiği

Çizelge 4.3. 10x10x55mm boyutlarında ASC 100.29 toz metal malzemenin direnç-sıcaklık ortalama değerleri

Sıcaklık (°C)	Direnç (mΩ)
20	159,4
50	108,32
100	98,507
200	65,953
300	35,14
400	3,953
500	1,72
600	0,942

Bulk metallerin öz dirençleri toz metal malzemelerin aksine sıcaklıkla doğru orantılı olarak artmaktadır. TM malzemeler indüksiyonla sinterlenirken bulk malzemelere göre iç yapılarında öz dirençlerine bağlı olarak daha farklı ısı oluşturmaktadırlar bu da indüksiyonla sinterlemeyi etkilemektedir. TM numunelerin elde edilen bu direnç değerleri ile hesaplanan öz direnç değerleri, indüksiyonla sinterleme işleminin nümerik çözümlerinde kullanılmıştır. TM numunelerin sıcaklık-konum grafikleri, ön ısıtma ve sinterleme bölgelerindeki penetrasyon derinlikleri nümerik analizler sonucunda elde edilmiştir.

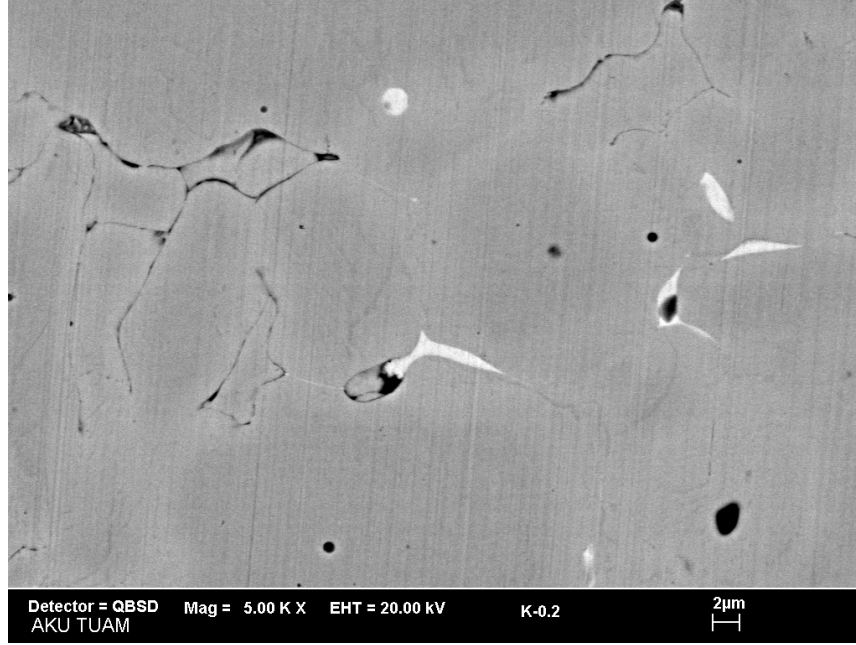
4.5. Metalografik İncelemeler

TM numunelerin SEM BEC modun da incelenebilmesi için 1x1x1 cm boyutlarında kesilmiştir. Kesilen numuneler, sırasıyla 240-400-600-800 numaralı zımparalarda zımparalanmış ve parlatılmıştır. Şekil 4.17'de yüzey parlatma cihazı ve numuneler verilmiştir.

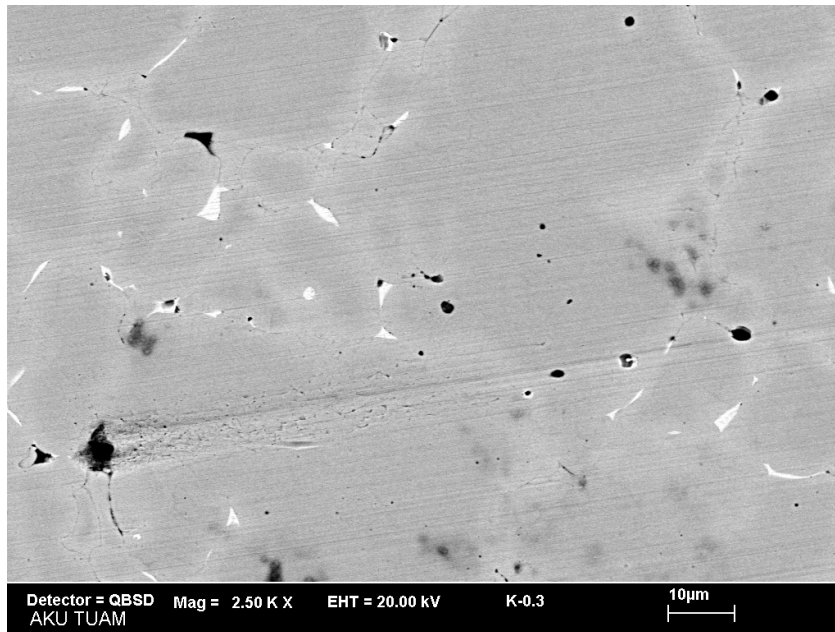


Şekil 4.17. Parlatma işlemi yapılmış 10x10x10 mm boyutlarındaki TM numuneler

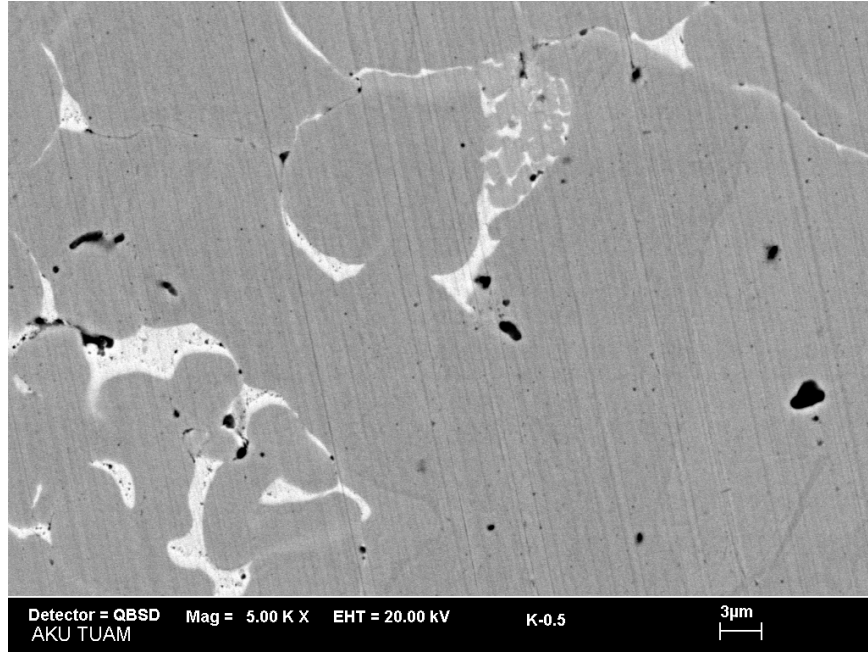
Parlatılan numuneler Afyon Kocatepe Üniversitesi laboratuvarı taramalı elektron mikroskobunda (SEM) incelenmiştir. TM numunelerin SEM sonuçları Şekil 4.18-24'de verilmiştir.



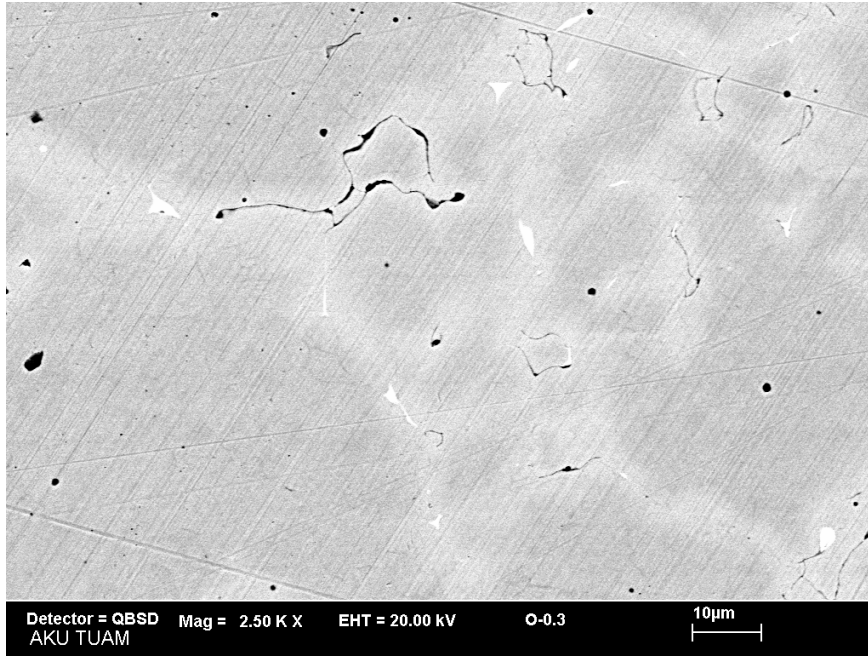
Şekil 4.18. K-0.2 Kodlu numunenin Taramalı Elektron Mikroskobu Görüntüsü 5000 Büyütme



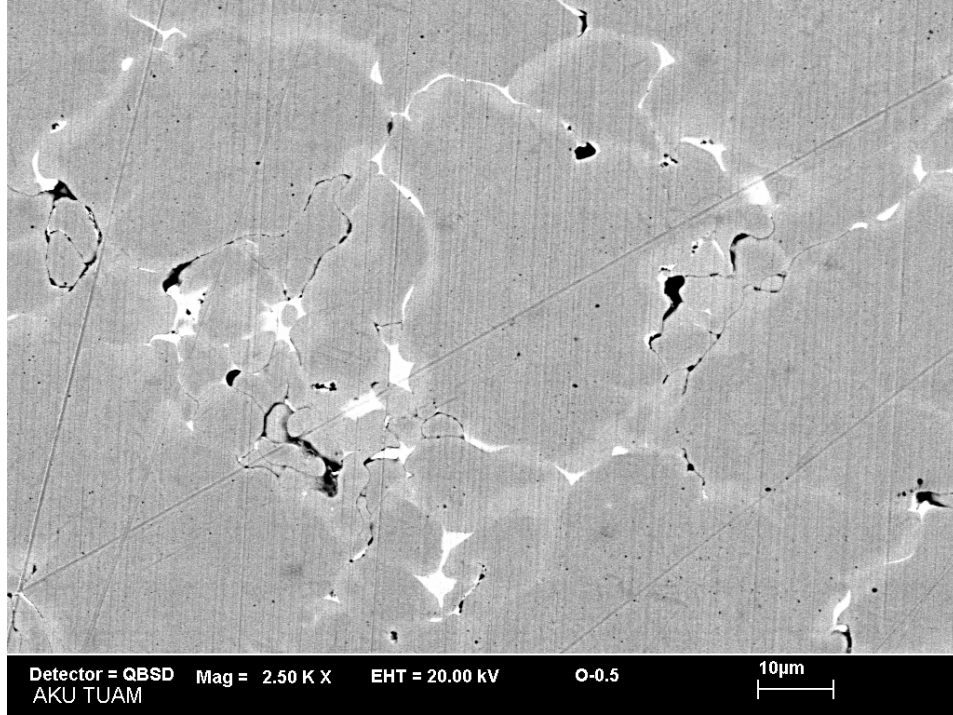
Şekil 4.19. K-0.3 Kodlu numunenin Taramalı Elektron Mikroskobu Görüntüsü 2500 Büyütme



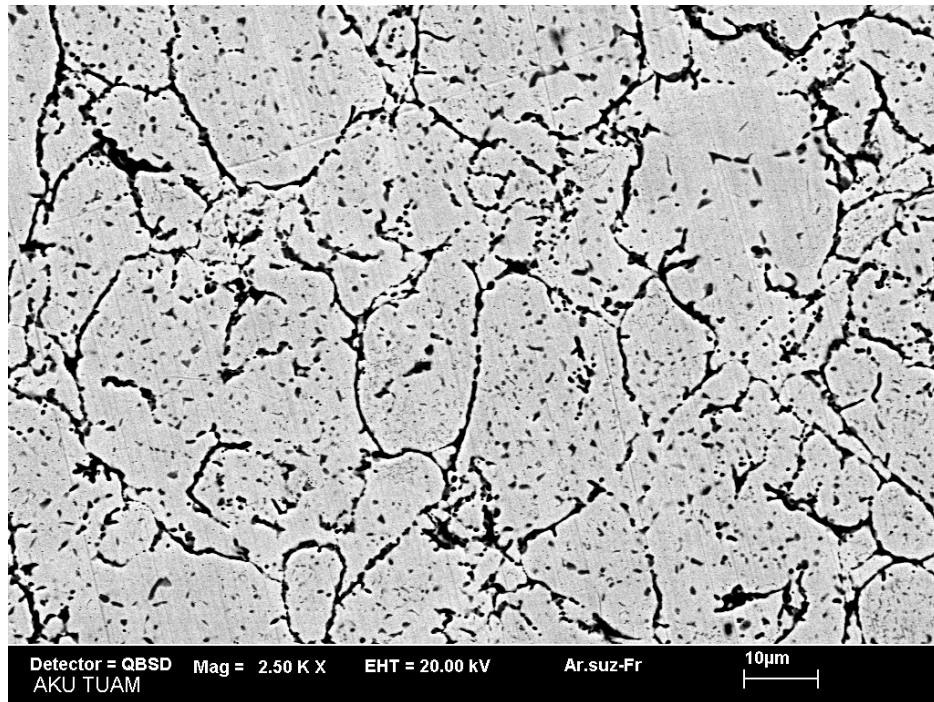
Şekil 4.20. K-0.5 Kodlu numunenin Taramalı Elektron Mikroskobu Görüntüsü 5000 Büyütme



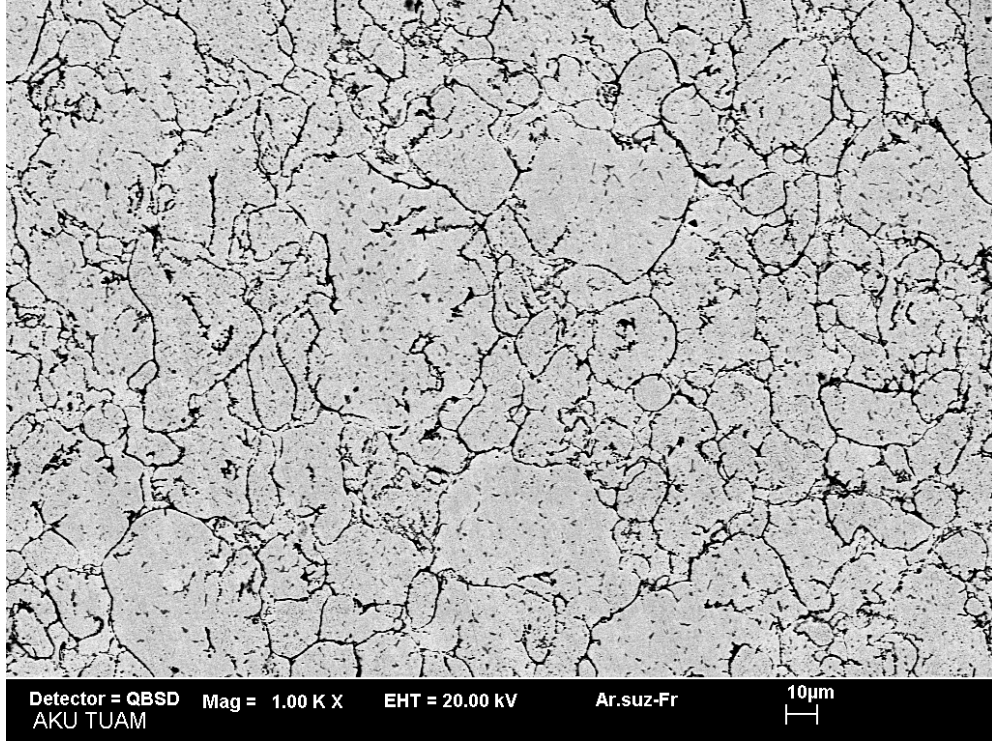
Şekil 4.21. Ö-0.3 Kodlu numunenin Taramalı Elektron Mikroskobu Görüntüsü 2500 Büyütme



Şekil 4.22. Ö-0.5 Kodlu numunenin Taramalı Elektron Mikroskobu Görüntüsü 2500 Büyütme



Şekil 4.23. F-2 Kodlu numunenin Taramalı Elektron Mikroskobu Görüntüsü 2500 Büyütme



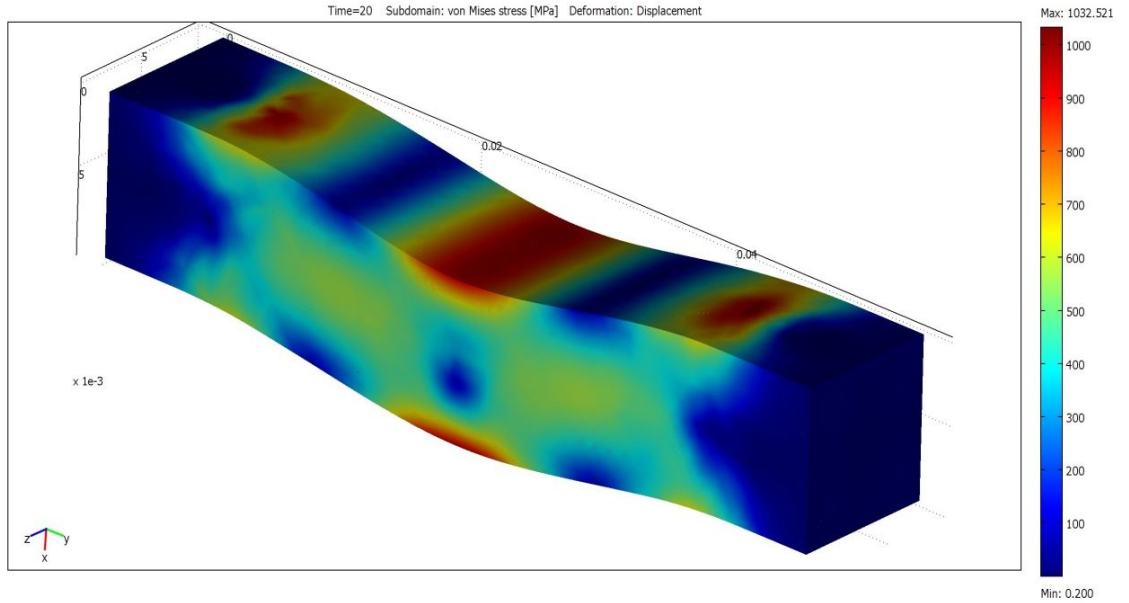
Şekil 4.24. F-2 Kodlu numunenin Taramalı Elektron Mikroskobu Görüntüsü 1000 Büyütme

5. TEORİK ÇALIŞMALAR

Teorik çalışmalarda, TM numunelerin deneysel sonuçlardan elde edilen elektriksel özellikleri kullanılarak sıcaklık-konum değerleri elde edilmiştir. Ayrıca, numuneler gerçek boyutlarında ve görüntü işleme metodu kullanılarak gerçek mikro yapılarında (SEM BEC mikro yapı fotoğrafları) modellenmiştir ve üç nokta eğme dayanımı-şekil değiştirme (displacement) analizleri yapılmıştır. Ek olarak, numuneler içerisindeki penetrasyon derinliği hesapları nümerik olarak program kullanılarak hesaplanmıştır. Nümerik çalışmalarda, Comsol Multiphysics sonlu elemanlar analiz programı kullanılmıştır. Elde edilen nümerik veriler deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

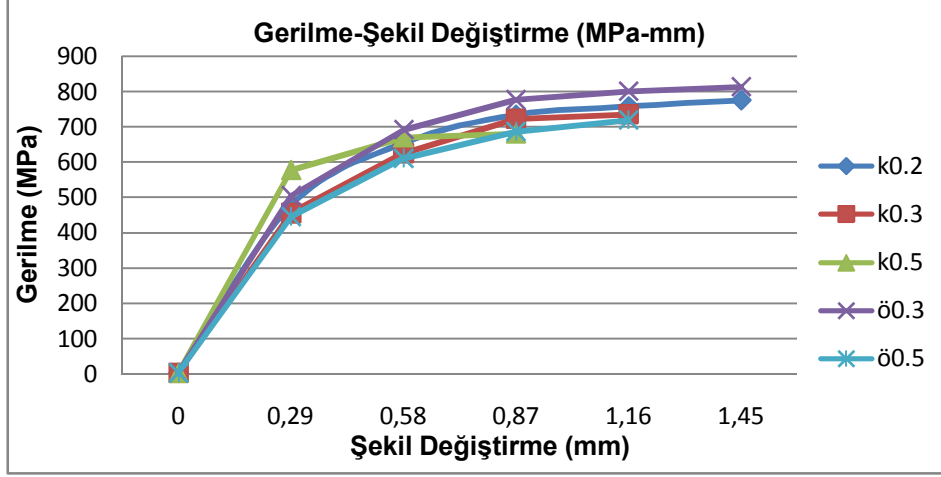
5.1. Mekanik Analizler

Numunelerin üç nokta eğme deney sonuçları, nümerik üç nokta eğme analizleri ile desteklenmiştir. Numunelerin yoğunluklarına bağlı Elastisite modülü ve Poisson oranı R-A yaklaşımı ile elde edilmiştir (Ramakrishnan and Arunachalam 1993). Diğer taraftan yoğunluk, gözeneklilik değerleri görüntü işleme analizinden elde edilmiştir. Şekil 5.1' de her bir numune için oluşturulan üç nokta eğme nümerik modellerin bir örneği verilmiştir (Bulk numune von Mises gerilme-şekil değiştirme modeli).



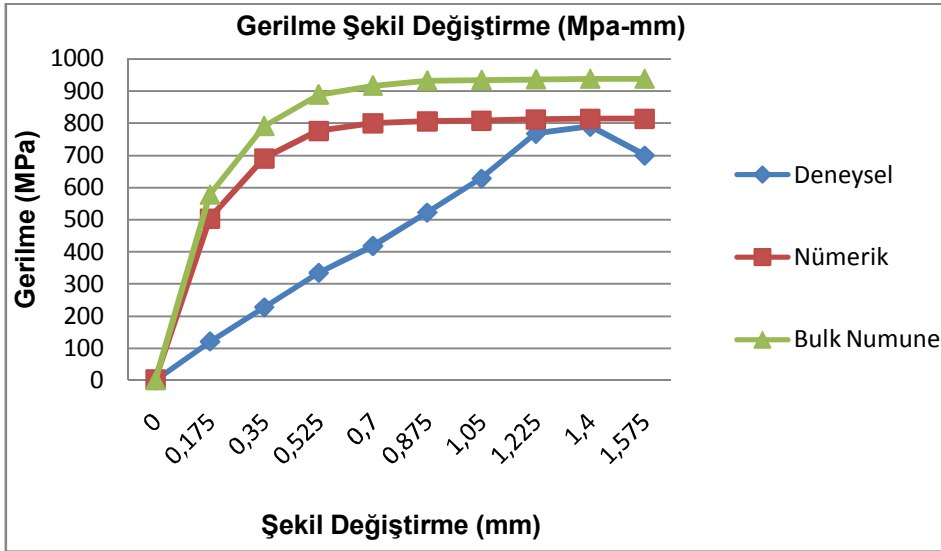
Şekil 5.1. Üç nokta eğme-şekil değiştirme nümerik analizi

Gerçek boyutlarında modellenen ve deneysel sınır şartları oluşturulan numunelerin üç nokta eğme ve şekli değiştirme grafikleri Şekil 5.2' de verilmiştir. Analizlerde, TM numunelerin Elastisite modülü ve Poisson oranı R-A yaklaşımından elde edilen değerler kullanılarak ve izotropik malzeme özellikleri kabul edilerek elde edilmiştir.



Şekil 5.2. İndüksiyonla sinterlenen numunelerin nümerik gerilme şekil değiştirme eğrileri.

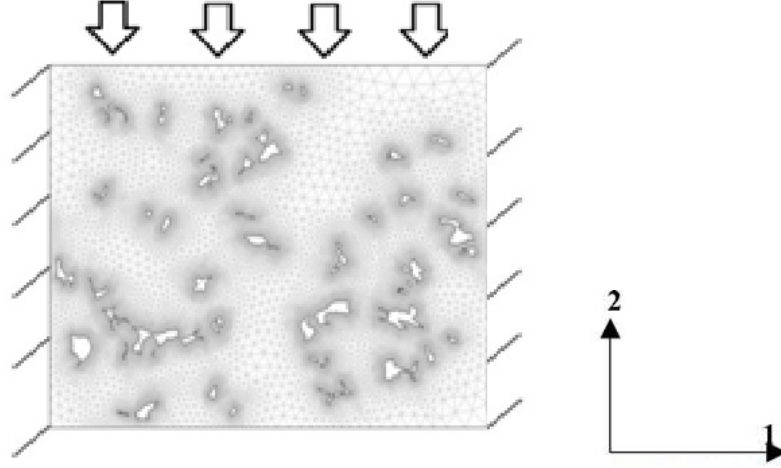
Şekil 5.3' de Ö0.3 kodlu numunenin deneysel ve nümerik üç nokta eğme dayanım sonuçları karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.3. Ö0.3 kodlu numunenin deneysel ve nümerik üç nokta eğme-şekil değiştirme dayanım sonuçları

5.2. Mikro mekanik Analizler

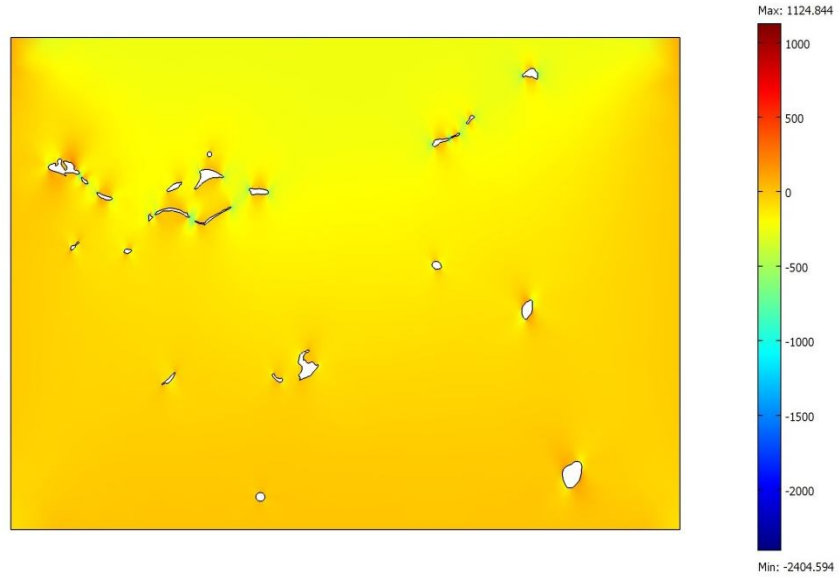
TM malzemelerin mekanik davranışı iç yapılarındaki gözenekliliğe bağlı olarak açıklanabilir. Çalışmanın bu bölümünde numunelerin SEM BEC madundaki mikro yapı görüntüleri görüntü işleme metodu kullanılarak mikro üç nokta eğme analizleri yapılmıştır. Sinterleme parametrelerinin değişimi gözenekleri nasıl etkilediği araştırılmıştır. Ayrıca yükleme durumlarında gözeneklerin nasıl bir davranış göstereceği görülmeye çalışılmıştır. Bu amaçla farklı sürelerde indüksiyonla ve fırında sinterlenen toz metal parçaların (burçların) mikro çekme analizleri yapılmıştır. Şekil 5.4'de mikro boyutta üç nokta eğme sınır şartları verilmiştir. Şekil 5.5-9 'da ise her bir numunenin gözenekler çevresi üç nokta eğme nümerik analizleri verilmiştir. Çizelge 5.1'de indüksiyonla sinterlenen numunelerin gözenek miktarı, Elastisite modülü, gözenek çevresi maksimum ve minimum gerilmeler, yoğunluk ve toplam şekil değiştirme miktarları verilmiştir.



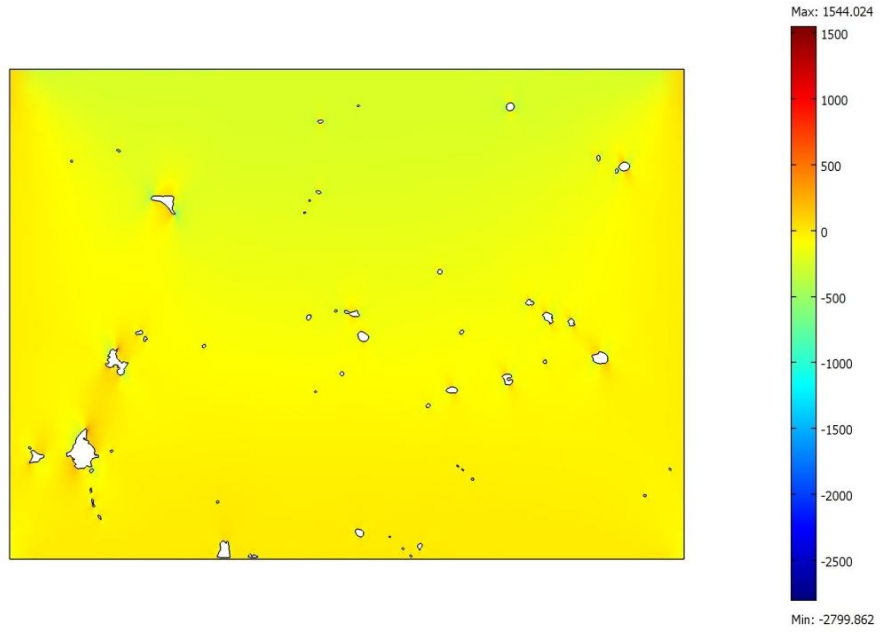
Şekil 5.4. TM Numunelerin gerçek mikro yapı sınır şartları.

Çizelge 5.1. ASC 100.29 TM numunelerin yoğunluk, gözenek miktarı, Elastisite modülü ve mikro-gerilme analiz sonuçları

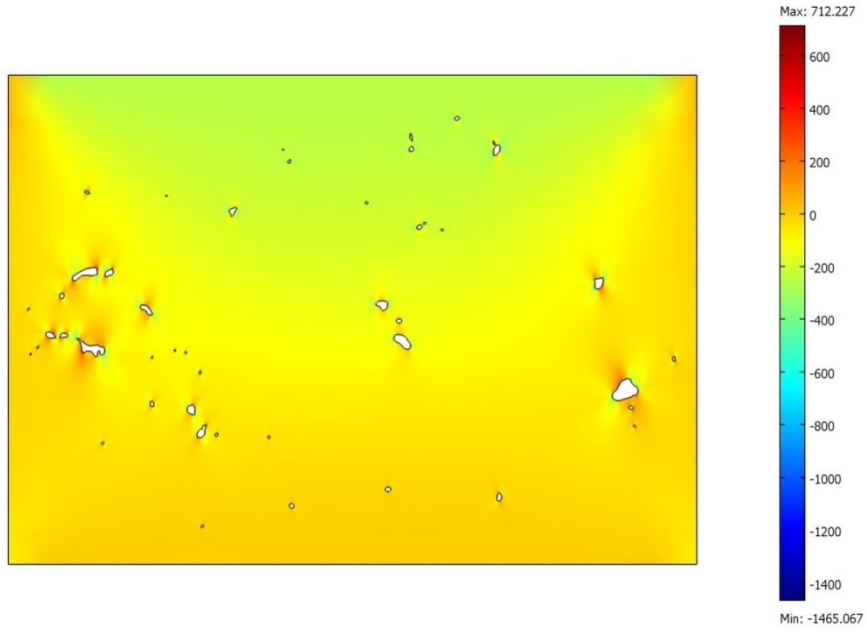
S.N.	Numune Kodu	Gözenek Miktarı (%) (İmage Analiz)	Elastisite Modülü (GPa)	Gözenek çevresi maks. Gerilme (MPa)	Gözenek çevresi Min. Gerilme (MPa)	Yoğunluk (kg/m ³) (İmage Analiz)	Toplam Şekil Değiştirme (mm)
1	K 0.2	0.620	196.68	1188.56	-3883.49	7800.54	3.45e ⁻²
2	K 0.3	0.688	195.26	2298.99	-3144.16	7795.83	3.46 e ⁻²
3	K 0.5	0.792	193.61	895.83	-2470.21	7757.98	3.71 e ⁻²
4	Ö 0.3	0.296	198.48	1376.53	-3977.47	7826.45	3.39 e ⁻²
5	Ö 0.5	0.710	194.72	2242.19	-4349.11	7763.48	3.56 e ⁻²



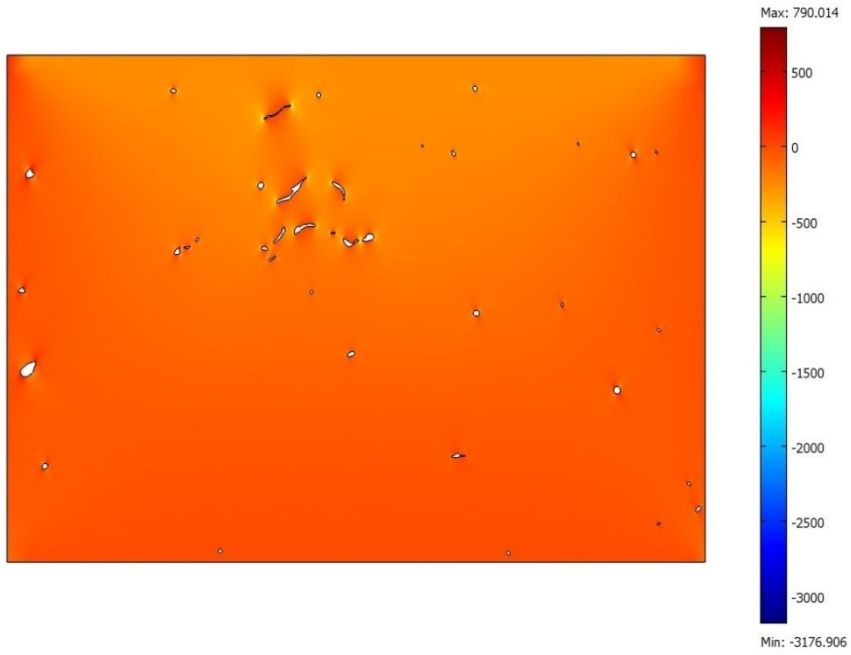
Şekil 5.5. K0.2 kodlu numune mikro üç nokta eğme nümerik analizi (MPa)



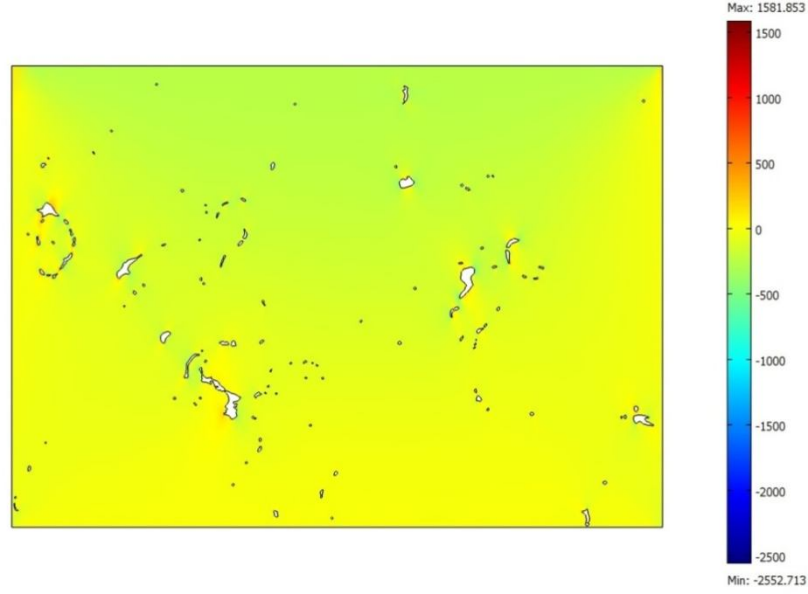
Şekil 5.6. K0.3 kodlu numune mikro üç nokta eğme nümerik analizi (MPa)



Şekil 5.7. K0.5 kodlu numune mikro üç nokta eğme nümerik analizi (MPa)



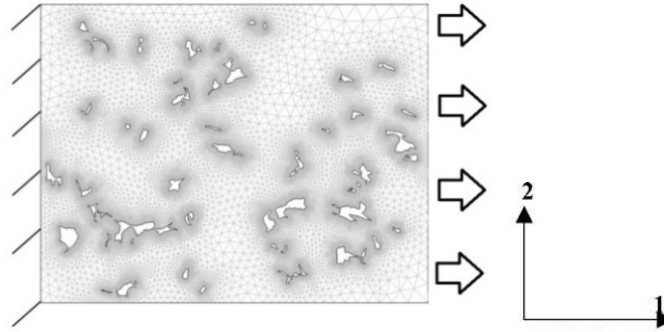
Şekil 5.8. Ö0.3 kodlu numune mikro üç nokta eğme nümerik analizi (MPa)



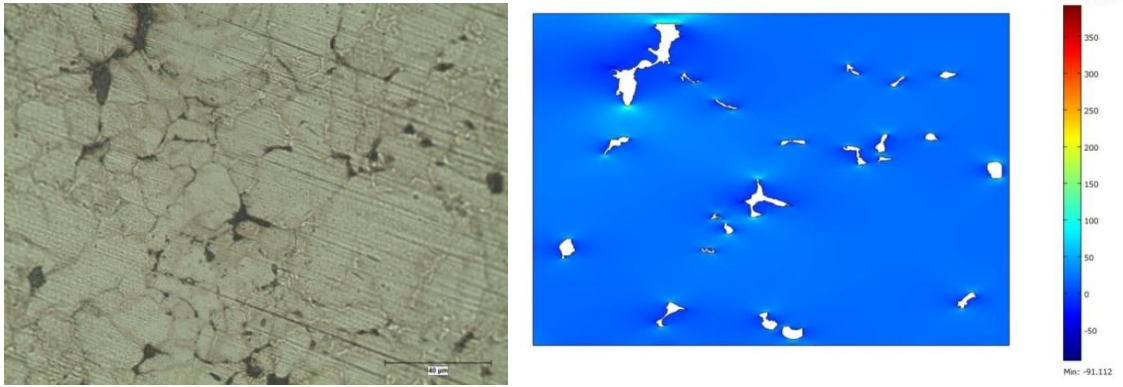
Şekil 5.9. Ö0.5 kodlu numune mikro üç nokta eğme nümerik analizi (MPa)

5.3. Toz Metal Parçaların (Burçların) İndüksiyonla Sinterlenmesinin Nümerik Analizi

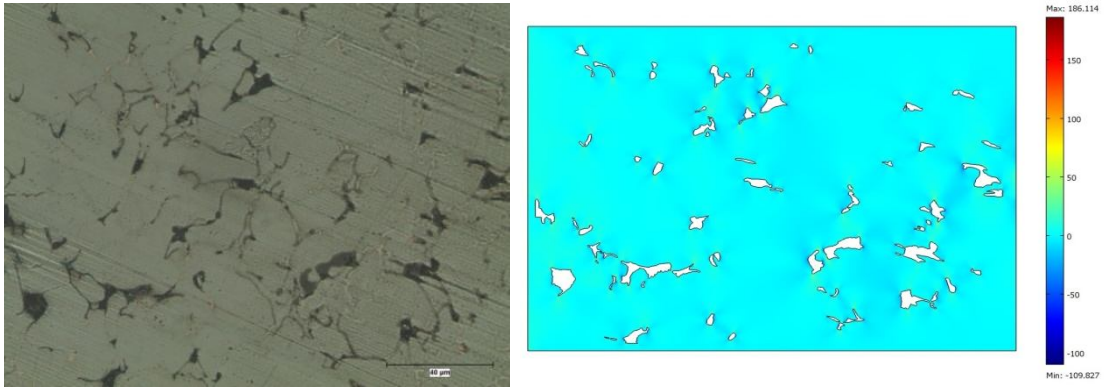
Toz metal burçlar üzerine yapılan bir diğer çalışmada farklı sürelerde indüksiyonla ve fırında sinterlenmiş toz metal burçların mikro-mekanik özellikleri nümerik olarak incelenmiştir. Numuneler gerçek mikro yapı boyutlarında modellenerek gözenekler çevresinde oluşan mikro-çekme dayanımları incelenmiştir. Çalışmada, %3 Cu % 0,5 Grafit ve yağlayıcı olarak %0,8 Kenolube içeren Högenas ASC 100.29 demir tozu kullanılmıştır. Toz Metal A.Ş. tarafından üretilen toz metal burçlar, Şekil 5.14.'de gösterilen TM burçlar 12 Kw gücünde 45 Khz frekansta indüksiyonla sinterleme düzeneğinde atmosfer ortamında 8,4; 15 dakika fırında ise 30 dakika sürelerle 1120°C' de sinterlenmiştir. Mikro yapı nümerik sınır şartları Şekil 5.10'da verilmiştir. TM burçların iç yapı optik mikroskop görüntüleri ve görüntü işleme analizleri Şekil 5.11-13' de gösterilmiştir.



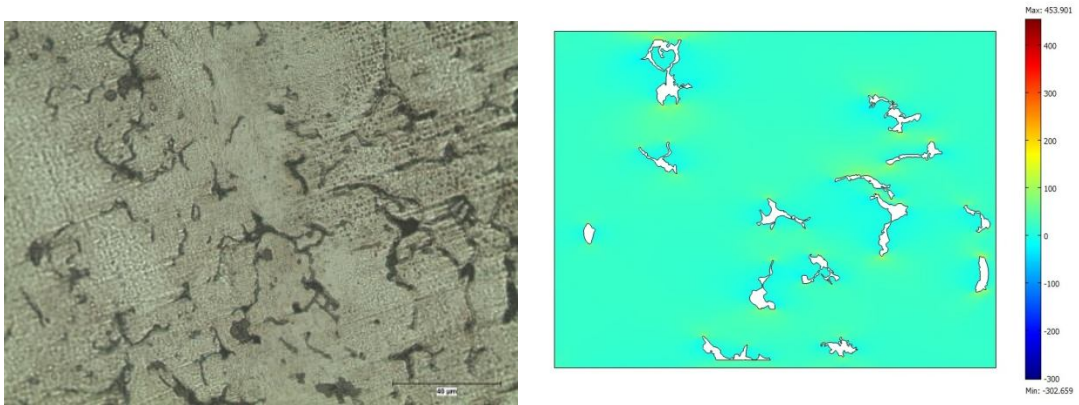
Şekil 5.10. TM Burçların gerçek mikro yapı sınır şartları.



Şekil 5.11. 30 dakika fırında sinterlenmiş TM burcun mikro yapı ve mikro gerilme görüntüleri



Şekil 5.12. 8.4 dakika İndüksiyonla sinterlenmiş TM burcun mikro yapı ve mikro gerilme görüntüleri.

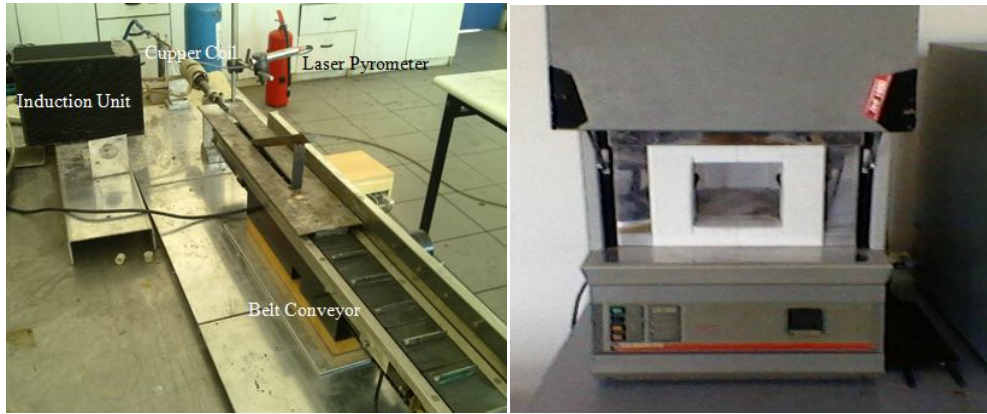


Şekil 5.13. 15 dakika İndüksiyonla sinterlenmiş TM burcun mikro yapı ve mikro gerilme görüntüleri.



Şekil 5.14. TM Burçlar

Nümerik analizlerde kullanılan, termal genişleme katsayısı ve 1-yönünde uygulanan yük Çizelge 5.2. de verilmiştir. Burçların nümerik analiz sonucu elde edilen mikro-mekanik özellikleri, gözenek çevresinde oluşan en yüksek ve en düşük gerilme değerleri, yoğunlukları, gözenek oranı ve Elastisite modülleri Çizelge 5.3'de verilmiştir.



Şekil 5.15. İndüksiyon Cihazı ve Klasik Fırın görüntüleri

Çizelge 5.2. TM Burçların termal genişleme katsayısı ve uygulanan yük.

Termal Genleşme Katsayısı (1/K)	F1 - Uygulanan Yük 1-Yönünde (N/m ²)
11.8e ⁻⁶	20e ⁶

Bir malzemenin porozitesinin Young modülünü düşürdüğü iyi bilinmektedir. Bu tez çalışmasında porozitenin Young modülüne etkisini görebilmek için Ramakrishnan-Arunachalam (R–A) yaklaşımı kullanılmıştır (Ramakrishnan and Arunachalam 1993). R-A yaklaşımı denklem 5.1 ve 5.2 de verilmiştir. Denklemde Malzemenin Young modülü E, porozitesi p, olarak verilmiştir:

$$E=E_0 \cdot [(1-p)^2 / (1+ \kappa E p)] \quad (5.1)$$

Burada E_0 tam yoğunluktaki demirin Young modülüdür (yaklaşık 200 GPa), ve κE tam yoğunluktaki malzemenin Poisson oranı sabitidir, ν_0 is Poisson oranını ifade eder:

$$\kappa E = 2 - 3\nu_0 \quad (5.2)$$

Tam yoğunluktaki bir demirin Poisson oranı yaklaşık olarak 0,3 dür. Ramakrishnan-Arunachalam yaklaşımı ile, gözenekli malzemelerin Young modüllerini sonlu elemanlar yöntemi ile karşılaştırılmasına olanak sağlamaktadır.

Çizelge 5.3. TM Burçların gözenek çevresinde oluşan en yüksek ve en düşük gerilme değerleri, yoğunlukları, gözenek oranı ve Elastisite modülleri

TM Numuneler (Burç)	Gözenek miktarı image analiz (%)	Yoğunluk (kg/m ³)	Maksimum Stress gözenek çevresi (MPa)	Minimum Stress gözenek çevresi (MPa)	Toplam Yer değiştirme(mm)	Young Modülü (GPa)
8.4 dk. İndüksiyonla Sinterlenmiş Numune	3.5411	7270	794.128	-234.780	2.31e ⁻²	185.684
15 dk. İndüksiyonla Sinterlenmiş Numune	3.1846	7352	581.068	-473.677	3.186e ⁻²	187.077
30 dk. Fırında Sinterlenmiş Numune	2.4004	7474	708.883	-228.570	2.774e ⁻²	190.177
Bulk Numune	0	7860	34.171	17.967	1.691e ⁻²	200.000

TM burç numunelerin gerçek mikro yapılarına uygulanan gerilme denklemi aşağıda verilmiştir:

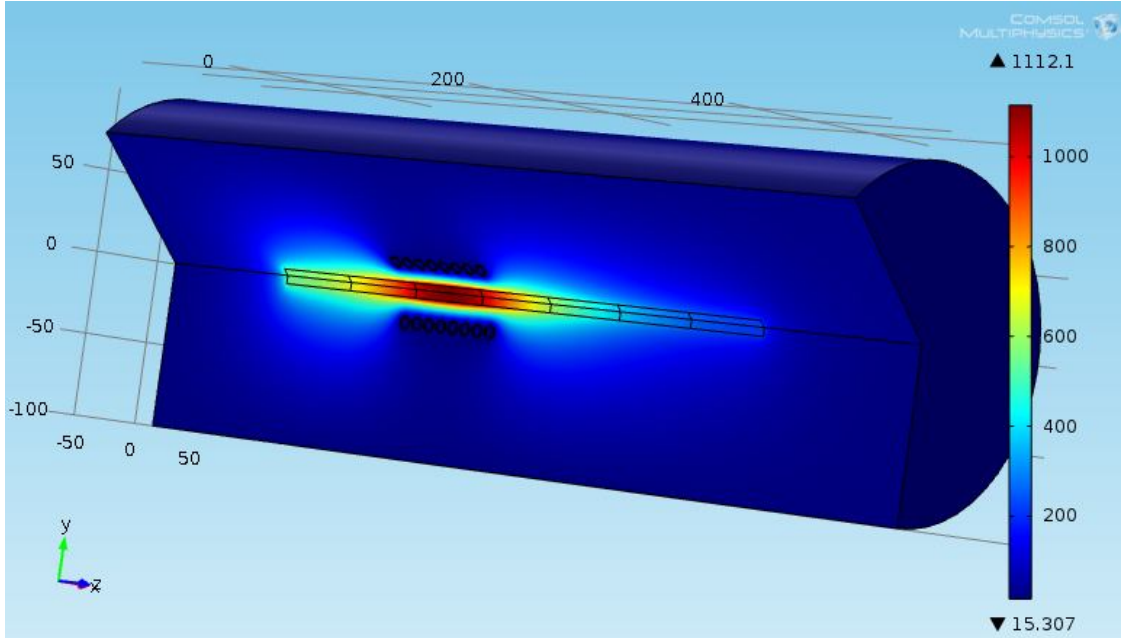
$$F(\sigma_{ij} - \xi_{ij}) - h(\lambda h) = 0 \quad (5.1)$$

Burada σ_{ij} simetrik gerilme indeksi, ξ_{ij} akma yüzeyi birinci döngüsü, λh plastik gerilmenin skaler fonksiyonu, $h(\lambda h)$ akma yüzeyinin genişleme miktarını ifade etmektedir (Suresh, 1998).

Toz metalurjisi ile üretilen burçlar, 8.4 ve 15 dk sürelerde indüksiyonla ve 30 dk klasik fırında sinterleme düzeneğinde sinterlenmiştir. Sinterlenen burçların mikro mekanik özelliklerini görebilmek için nümerik çekme analizi yapılmıştır. Numunelerin mikro yapı fotoğrafları görüntü işleme metodu kullanılarak modellenmiştir. Mikro çekme esnasında, gözenek çevresinde oluşan mikro gerilme ve deformasyonlar görülmüştür. Malzemenin mekanik davranışı mikro yapılarındaki gözenekliliğe bağlı olarak kontrol edilebileceği görülmüştür.

5.4. Nümerik Isı Oluşumu

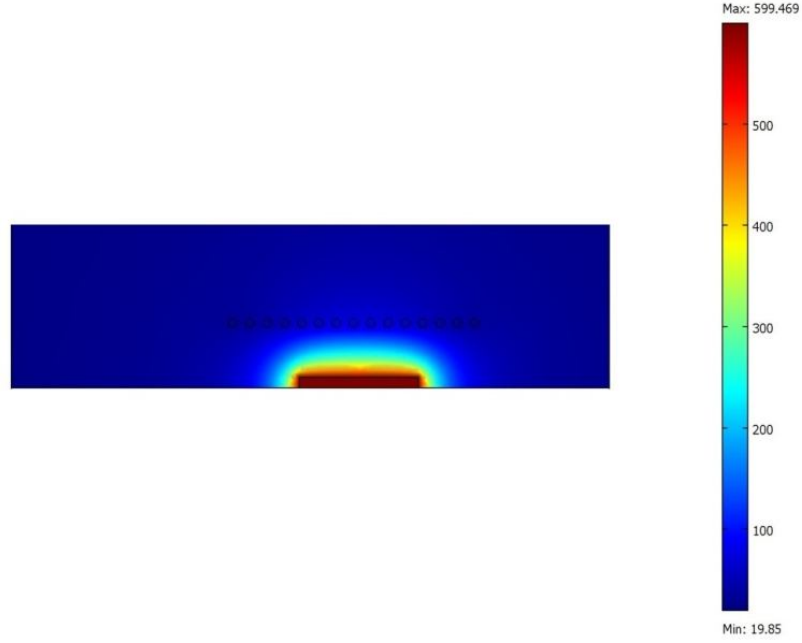
İndüksiyonla sinterlenen numuneler üzerinde oluşan ısı dağılımı ve işleme derinliği nümerik çözümlerle desteklenmiştir. TM numunelerin deneysel sonuçlardan elde edilen elektriksel özellikleri nümerik analizlerde kullanılmıştır. İndüksiyonla sinterleme bölgesi üç boyutlu ısı analizi Şekil 5.16 'da verilmiştir.



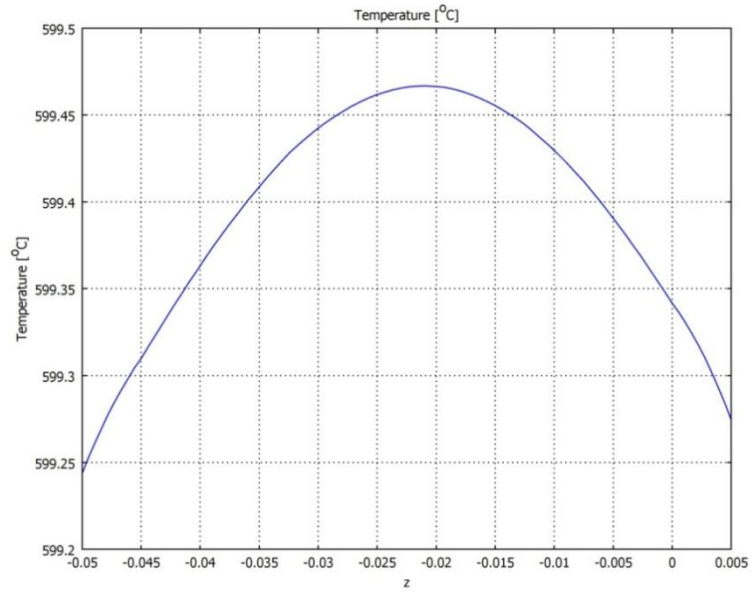
Şekil 5.16. İndüksiyonla sinterlenen TM numuneler üzerinde oluşan ısı dağılımı

5.4.1. Ön Isıtma Bölgesi

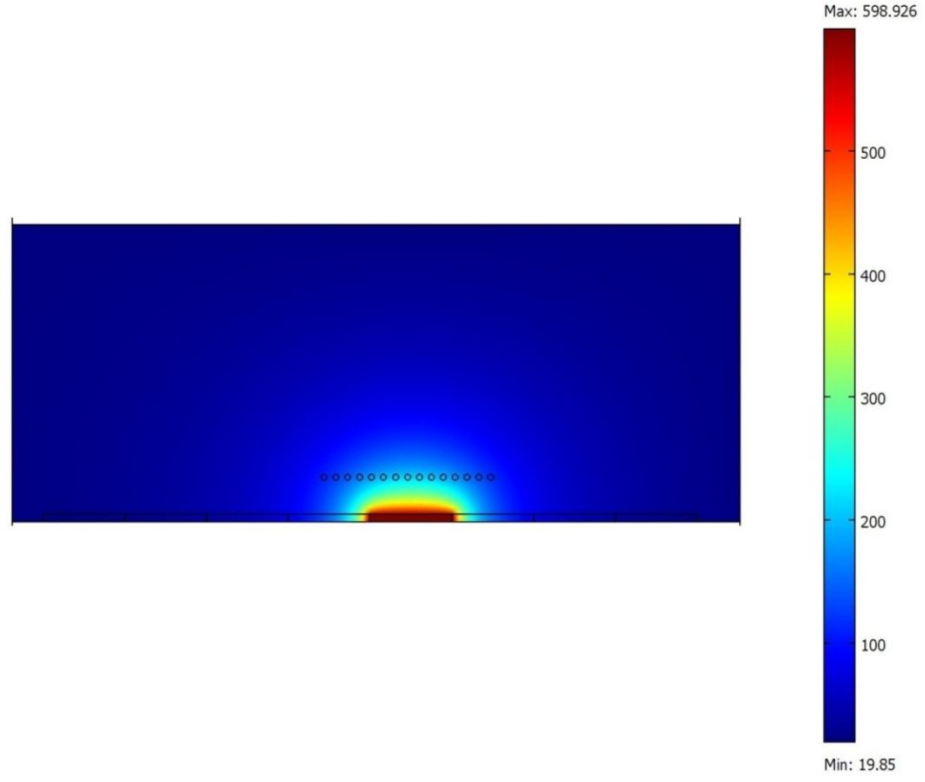
İndüksiyonla ön ısıtma yapılan tek bir TM numune üzerinde oluşan sıcaklık dağılımını ve sıcaklık konum grafiği Şekil 5.17 ve Şekil 5.18' de verilmiştir. İndüksiyonla ön ısıtma bölgesinde tüm numuneler üzerinde oluşan sıcaklık dağılımını ve sıcaklık-konum grafiği Şekil 5.19 ve Şekil 5.20' de verilmiştir.



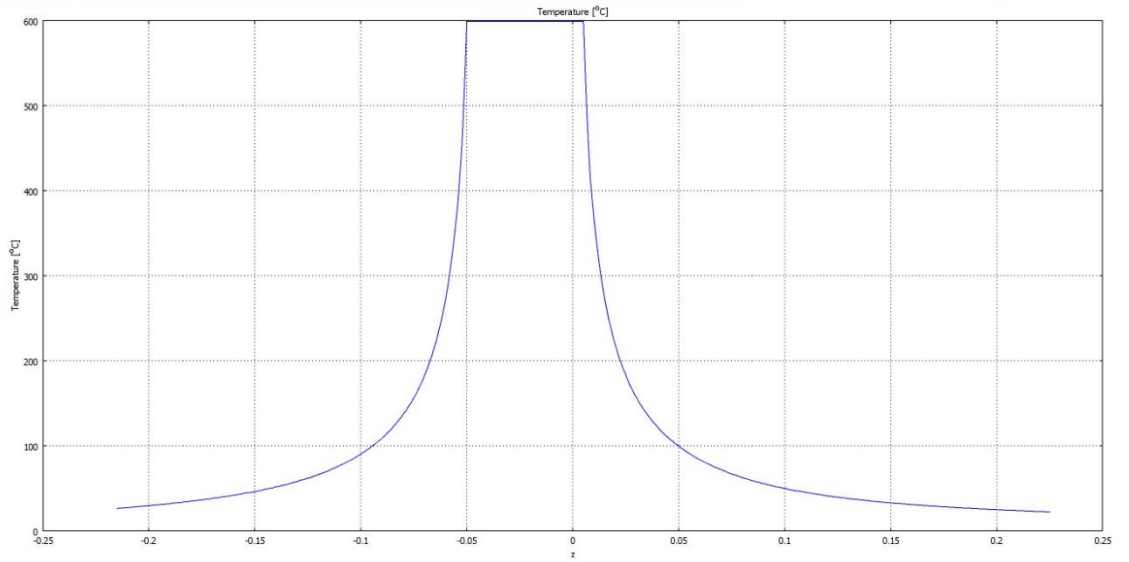
Şekil 5.17. Ön ısıtma bölgesinde tek numune için sıcaklık dağılımı (27. s)



Şekil 5.18. Ön ısıtma bölgesinde tek numune için sıcaklık-konum grafiği



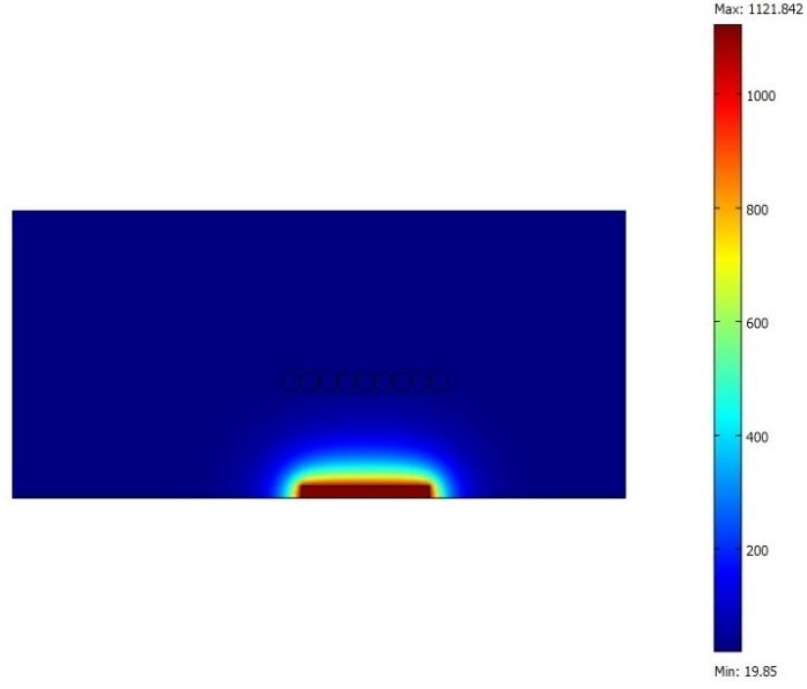
Şekil 5.19. Ön ısıtma bölgesinde tüm numuneler için sıcaklık dağılımı



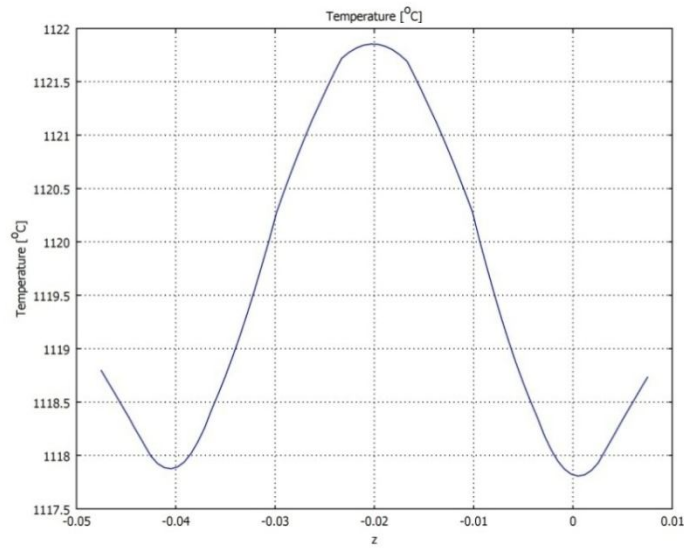
Şekil 5.20. Ön ısıtma bölgesinde tüm numuneler için sıcaklık-konum grafiği

5.4.2. Sinterleme Bölgesi

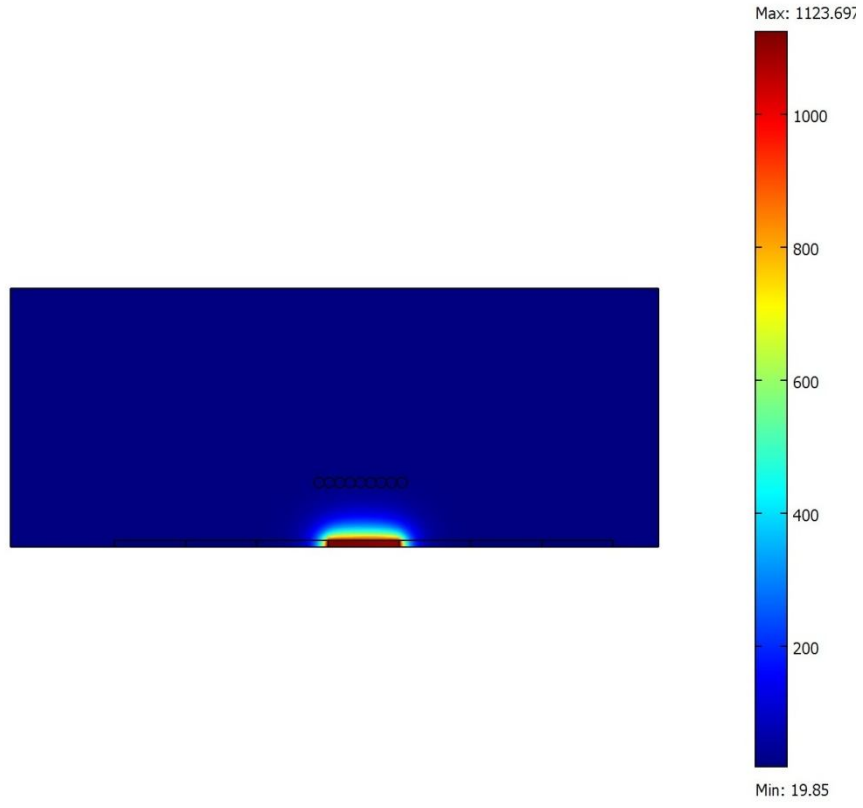
TM numuneler 1120 °C de, 8 mm bobin çapında, 45 kHz frekansta, 12 Kw indüksiyon cihazı ile 0,2, 0,3, 0,5 mm/s konveyör hızlarında sinterlenmiştir. Nümerik analizlerden elde edilen tek numune ve tüm numunelere üzerindeki sıcaklık dağılım sonuçları Şekil 5.21-24'de gösterilmiştir.



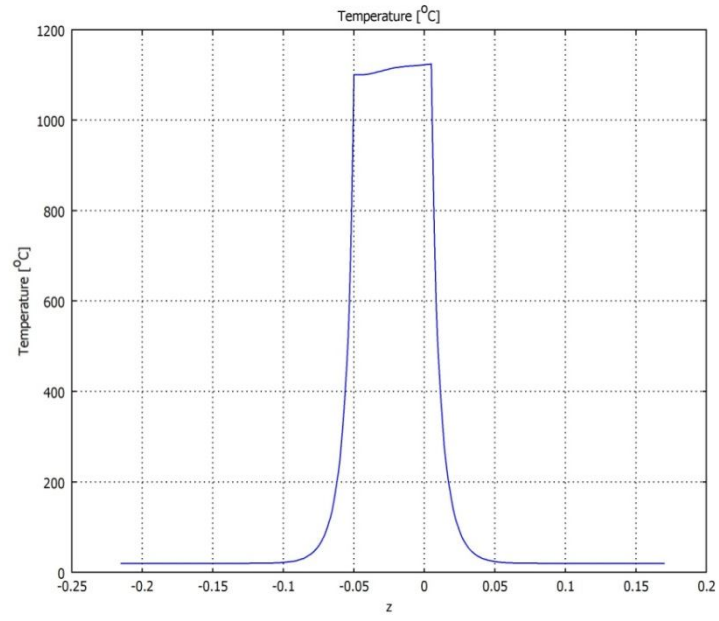
Şekil 5.21. Sinterleme bölgesinde tek numune için sıcaklık dağılımı (17.5. s)



Şekil 5.22. Sinterleme bölgesinde tek numune için sıcaklık-konum grafiği

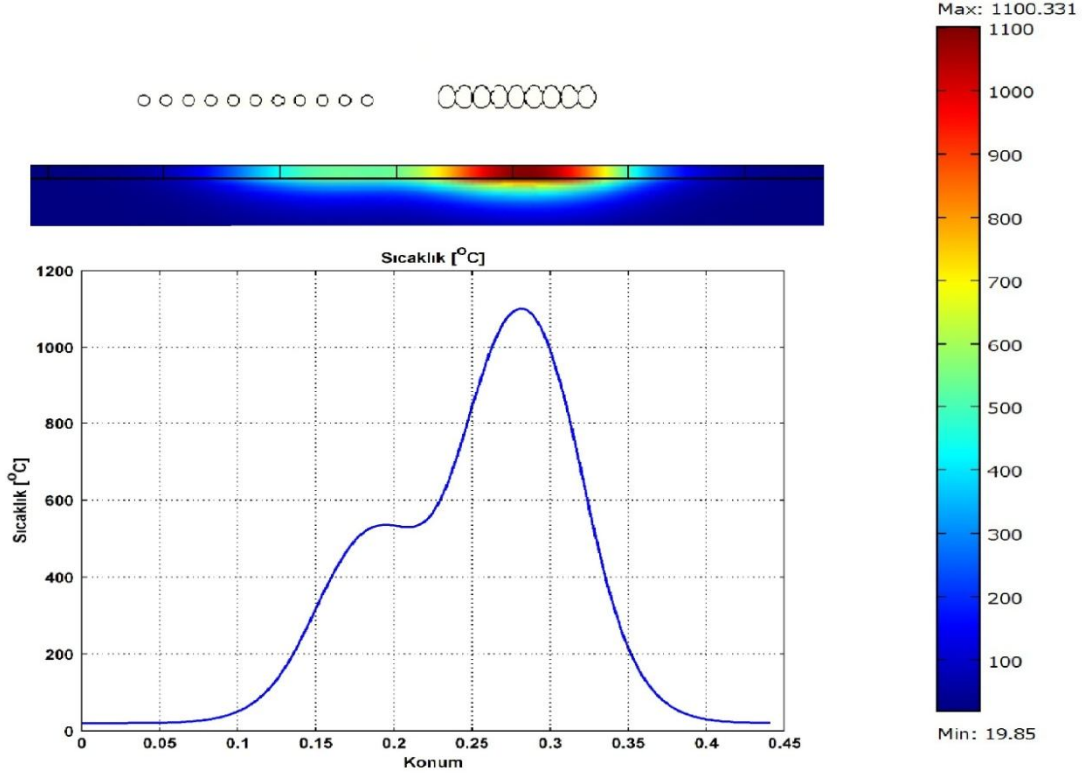


Şekil 5.23. Sinterleme bölgesinde tüm numuneler için sıcaklık dağılımı



Şekil 5.24. Sinterleme bölgesinde tüm numuneler için sıcaklık-konum grafiği

Şekil 5.25 indüksiyonla ön ısıtma ve sinterleme bölgeleri sıcaklık-konum grafiği verilmiştir.

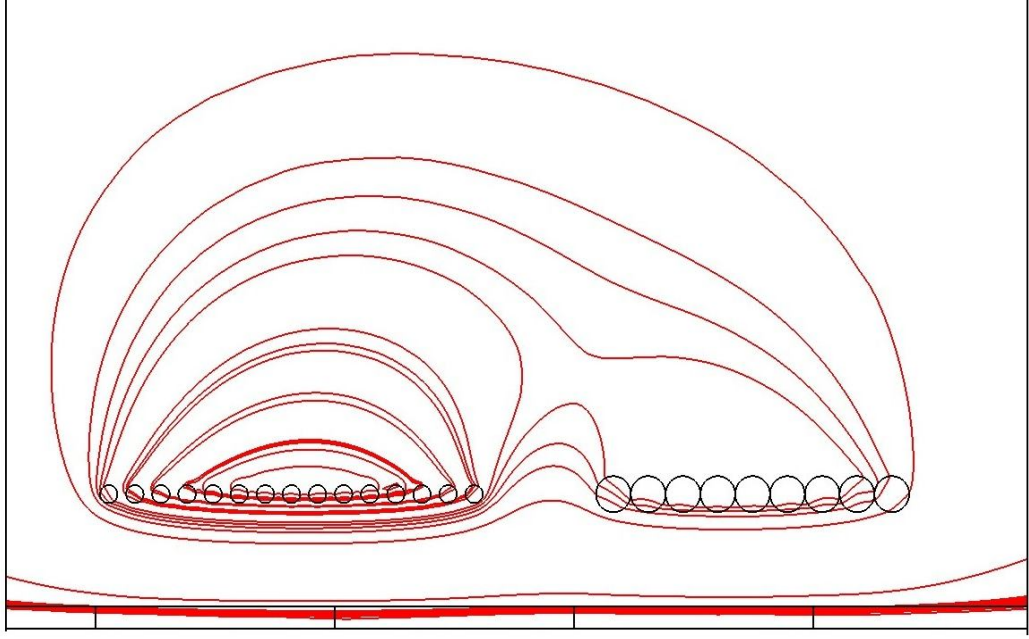


Şekil 5.25. TM numunelerin indüksiyonla ön ısıtma ve sinterleme bölgeleri sıcaklık-konum grafiği

TM numuneler, 2,5 kHz frekanslı indüksiyon cihazı ile ön ısıtma ve 45 kHz frekanslı indüksiyon cihazı ile sinterleme işlemine tabii tutulmuştur. Klasik fırındaki konum zaman eğrileri karşılaştırıldığında, kademeli ısınma ve yavaş soğuma koşulları indüksiyonla sinterleme ile çok daha kısa sürelerde başarılmıştır.

5.5. İşleme Derinliği Nümerik Analizi

Deneysel verilerden elde edilen direnç değerleri ile hesaplanan öz direnç değerleri nümerik analizlerde kullanılarak, ön ısıtma ve sinterleme bölgelerinde oluşan penetrasyon derinlikleri hesaplanmıştır. Şekil 5.26'da ön ısıtma ve sinterleme bölgeleri manyetik akı çizgileri, Çizelge 5.4 de ise ön ısıtma ve sinterleme bölgesi için programda kullanılan parametreler verilmiştir. Ön ısıtma işleminde 4mm çapında bobin ile numune üzerinde 3.751 mm işleme derinliği elde edilmiştir. Sinterleme bölgesinde ise 8 mm çapındaki bobin ile 2.56 mm penetrasyon derinliğine ulaşılmıştır.



Şekil 5.26. Ön ısıtma ve sinterleme bölgesinde oluşan manyetik alan çizgileri

Çizelge 5.4. Hesaplamalarda kullanılan parametreler

Değişkenler	Ön ısıtma Bölgesi	Sinterleme Bölgesi
Akım	10[A]	17.5[A]
Bobin Çapı	0.004[m]	0.008[m]
Sarım Sayısı	15	9
Referans Sıcaklık	20 [°C]	20 [°C]
Özdirenç $T = T_0 = 20\text{ °C}$	$289 \times 10^{-6} [\Omega \cdot m]$	$289 \times 10^{-6} [\Omega \cdot m]$
Argonun yoğunluğu	$1.784 [\text{gr}/\text{cm}^3]$	$1.784 [\text{gr}/\text{cm}^3]$
Argonun Isı Kapasitesi	$0.52 [\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$	$0.52 [\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$
Argonun termal iletkenliği	$0.01772 [\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$	$0.01772 [\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$
Demirin Ham Yoğunluğu	$6720 [\text{kg}/\text{m}^3]$	$6720 [\text{kg}/\text{m}^3]$
Demirin ısı kapasitesi	$25.1 [\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})]$	$25.1 [\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})]$
Demirin termal iletkenliği	$58 [\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$	$58 [\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$
Demirin Geçirgenliği	$8.75 \times 10^{-4} (\text{H}/\text{m})$	$8.75 \times 10^{-4} (\text{H}/\text{m})$
Frekans	2,5 kHz	45 kHz

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çalışma kapsamında, indüksiyonla ön ısıtma ve sinterleme işlemi için sürekli bir deney düzeneği tasarlanmıştır. Demir esaslı TM numunelerin 0,2, 0,3 ve 0,5 mm/s konveyör hızlarında indüksiyonla ve klasik fırında sinterleme işlemi deneysel ve teorik olarak incelenmiştir. Ayrıca, indüksiyonla orta-düşük frekansta (2,5 kHz) ön ısıtma işleminin mikro yapısal, mekanik ve fiziksel özelliklere etkisi deneysel ve nümerik olarak araştırılmıştır, aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- İndüksiyonla sinterlenen TM numunelerin üç nokta eğme sonuçlarında, konveyör hızı azalması (sinterleme süresinin artışı) ile üç nokta eğme dayanım değerlerinde artma gözlenmiştir (Şekil 4.12-13). Aynı zamanda sinterleme süresinin artışı, numunelerde gerilme altında daha fazla çökme miktarına sebep olmuştur (Çizelge 5.1, Şekil 5.2,3). En yüksek dayanım ve şekil değişimi değerleri 0,3 mm/s konveyör hızında ön ısıtma yapılan numunelerde ve 0,2 mm/s konveyör hızında ön ısıtma yapılmayan numunelerde görülmüştür (Şekil 5.2-3). Ön ısıtma uygulaması numuneler üzerindeki termal şoku engellemekle kalmamış aynı zamanda yağlayıcıların yapıdan daha kararlı bir şekilde ayrılmasını sağlamıştır. 0,5 mm/s 'den daha yavaş hızlarda indüksiyonla sinterlenen numunelerde, fırında sinterlenen numunelere göre daha fazla dayanım ve çökme miktarı değerleri elde edilmiştir. Atmosfer ortamında, fırında sinterlenen numunelerde, korozyon oluştuğu ve böylece üç nokta eğme dayanımlarının azaldığı görülmüştür (Şekil 4.11b).
- Brinell yüzey sertlik deney sonuçlarına bakıldığında, fırında sinterlenen numunelerde indüksiyonla sinterlenen numunelere göre daha fazla yüzey sertliği görülmüştür. En düşük sertlik değeri ön ısıtmalı 0,3 mm/s hızda indüksiyonla sinterlenen numunede tespit edilmiştir. Bu sonucun, fırında sinterlenen numunelerin yüzeyinde oluşan sert oksit tabakasından kaynaklandığı anlaşılmıştır (Şekil 4.11b).
- TM numunelerin dirençleri ile ilgili yapılan çalışmalarda, sinterlenmemiş numunelerin oda sıcaklıklarındaki ve yüksek sıcaklıklardaki dirençleri oldukça farklılık göstermiştir. Yapılan deneysel çalışmalarla Höpkins ASC 100.29 demir esaslı tozun direnç-sıcaklık grafiği çıkarılmıştır. Bulk metalik malzemelere zıt olarak, TM numunelerde sıcaklığın artışı öz direnci düşürmüştür. Yüksek orandaki bu düşüş, TM malzemelerin indüksiyonla ısıtılmasında penetrasyon derinliğinde düşmesine sebep olmaktadır. Literatüre 10x10x55 mm boyutlarındaki demir esaslı toz metal parçaların öz direnç değerleri kazandırılmıştır. Nümerik analizlerde TM numunelerin ölçülen gerçek öz dirençleri kullanılmıştır.
- Metalografik incelemelerde numunelerin mikro yapı (SEM) görüntülerinin oldukça farklı olduğu görülmektedir. Konveyör hızının en düşük olduğu K0.2 kodlu numunede bakırın

sıvı faz sinterleme ile mikro boşlukları doldurduğu görülmektedir (Şekil 4.18). Ayrıca konveyör hızının azalması (sinterleme süresinin artışı) ile gözeneklerin azaldığı ve yoğunluğun arttığı gözlemlenmiştir. En yüksek yoğunluk değeri ön ısıtma uygulanan 0,3 mm/s konveyör hızında indüksiyonla sinterlenen numunede % 99.704 olarak ölçülmüştür. Fırında atmosfer ortamında sinterlenen numunelerin iç yapıları indüksiyonla sinterlenen numunelerden oldukça farklıdır. Fırında sinterlenen numunelerde, ortam atmosferinin zararlı etkilerinden kaynaklanan heterojen bir iç yapı dağılımı görülmektedir (Şekil 4.23-24). İndüksiyon akımı 10X10mm kesitli numuneler üzerinde özellikle ön ısıtma bölgesinde 3.751 mm' lik bir işleme derinliği oluşturarak toz taneciklerin kademeli ve homojen ısınmasını sağlayarak daha üniform bir iç yapı oluşumu sağlamıştır.

- Nümerik üç nokta eğme sonuçlarında, her numunenin R-A yaklaşımı ile poroziteye bağlı Elastisite modülleri elde edilmiştir ve bu değerler nümerik analizlerde kullanılmıştır. TM numunenin deneysel ve nümerik üç nokta eğme dayanım grafikleri incelendiğinde sonuçların örtüştüğü görülmektedir. Ancak, arada oluşan farkın, TM numunelerin ortotropik mekanik özelliklerinden kaynaklandığı düşünülmektedir (Şekil 5.3). Deneysel sonuçlarda olduğu gibi nümerik sonuçlarda da beklenildiği gibi, indüksiyonla sinterleme süresi artışı ile numunelerin dayanım değerleri artmıştır. En yüksek üç nokta eğme dayanım değerleri K0.2 ve Ö0.3 kodlu numunelerde görülmüştür. Ö0.3 kodlu numune, K0.2 kodlu numuneden daha hızlı sinterlenmesine rağmen daha yoğun olmasının sebebi ekstra 600 °C'de 11,38 dakika süresince uygulanan ön ısıtma işlemidir. Ö0.3 kodlu numunede, ön ısıtma işlemi ve uygun konveyör hızı, mekanik özelliklere ve mikro yapıya olumlu etki yaptığı gözlenmiştir. Konveyör hızının daha da azaltılması ile yoğunluğun daha da artıracağı bilinmesine rağmen, bunun maliyeti de artıracağı göz önünde bulundurulmalıdır. Bu yüzden, indüksiyonla sintrelemede TM malzemelerin mekanik ve fiziksel özelliklerin iyileştirilmesinde, konveyör hızının azaltılması yerine, ön ısıtma yapılması enerji maliyetleri bakımından daha uygun olduğu sonucuna varılmıştır.
- Nümerik mikro analizlere bakıldığında, Şekil 5.8-9'da ön ısıtma yapılan numunelerde daha homojen bir mikro-gerilme dağılımı görülmektedir. Bunun sonuca dayanarak, ön ısıtma uygulaması numunelerde homojen bir iç yapı oluşumu sağlamıştır. Ancak, gözenek çevresi mikro-gerilmeler incelendiğinde en yüksek gerilmenin Ö0.5 kodlu ön ısıtma yapılan numunede -4349.11 MPa değerinde olduğu saptanmıştır. Bu da, gözenek çevresinde oluşan gerilmenin yoğunluk ve ön ısıtmadan bağımsız olarak gözenek şekline ve yükleme durumuna bağlı olduğunu göstermiştir. TM burçlardaki nümerik mikro gerilme sonuçlarında olduğu gibi, düzensiz gözenekler çevresinde çok daha fazla gerilme yığılmaları ve mikro deformasyonlar saptanmıştır. Beklenildiği en

yüksek mikro deformasyon miktarı, en gözenekli numune olan K0.5 kodlu numunede görülmüştür (Çizelge 5.1).

- Buna ek olarak, TM parçaların (burç) farklı bir yükleme durumunda gözenekliliğe bağlı olarak değişen mikro-çekme dayanımlarını görebilmek için farklı sürelerde indüksiyonla ve fırında sinterlenen burçların görüntü işleme tekniği kullanılarak mikro-çekme nümerik analizleri yapılmıştır. İndüksiyonla ve klasik fırında sinterleme düzeneğinde farklı sürelerde (8.4 dk., 15 dk, 30 dk) sinterlenen TM burçların nümerik mikro-çekme dayanımları incelenmiştir. Sonuç olarak, bulk ve gözenekli burç numuneler arasında oldukça farklı sonuçlar elde edilmiştir. Sinterleme süresinin artışı mikro-gözeneklerin azalmasına ve yoğunluğunun artmasına sebep olmuştur. Daha küçük ve üniform gözeneklerin çevresinde daha az gerilme yığılmaları olduğu gözlenmiştir. Ayrıca, gözenekler çevresinde oluşan gerilme yığılmalarının, gözenek şekline, büyüklüğüne ve yoğunluğuna bağlı olarak değiştiği görülmüştür. Malzemenin mekanik özelliklerini, sinterleme parametrelerine bağlı mikro yapılarındaki gözenekliliğin kontrol edilerek artırılabilceği anlaşılmıştır.
- İndüksiyonla sinterlemede nümerik ısı sonuçları Şekil 17-24'de verilmiştir. İndüksiyonda ön ısıtma ve sinterleme bölgesinde 10x10x55 mm boyutlarındaki numuneler üzerinde üniform ısı dağılımı sağlanarak üstün mekanik ve fiziksel özellikler elde edilmiştir. Mekanik test ve analiz sonuçları da bu sonuçları desteklemektedir. 10x10x55 mm boyutlarındaki TM numunelerin nümerik analize göre, ön ısıtma bölgesinde 600 °C' ye 27 saniyede ve sinterleme bölgesinde 1120 °C' ye 17.5 saniyede ulaştığı görülmüştür. Deneysel çalışmada ise ön ısıtma bölgesinde 600 °C' ye 32 saniyede ve sinterleme bölgesinde 1120 °C' ye 24 saniyede ulaştığı görülmüştür. Bu farkın nümerik çalışmalarda kullanılan kabullerden oluştuğu düşünülmektedir. Nümerik analizlerde, ön ısıtma bölgesinde numune merkezi ve köşeleri arasında yaklaşık 0,25 °C, sinterleme bölgesinde ise 3,5 °C' lik bir fark oluştuğu görülmüştür. İndüksiyonun en büyük dezavantajlarından biri olan ani sıcaklık değişimlerinin kontrol gücüdür. Bu çalışmada kullanılan uygun parametreler ve uygulanan tasarım sonucu numuneler üzerinde üniform ısı dağılımı ve kontrolü sağlanmıştır. Ön ısıtma ve sinterleme bölgelerindeki üniform ısı dağılımı sayesinde, TM numunelerde fırında sinterlenen numunelere göre daha homojen iç yapı ve daha üstün mekanik özellikler elde edilmiştir.
- Şekil 5.25'de, indüksiyonla ön ısıtma ve sinterleme bölgelerini içeren sıcaklık-konum grafiği gösterilmiştir. İndüksiyonla sinterlemede, uygun tasarım ve sıcaklık kontrolü ile fırında sinterlenen numunelere göre çok daha kısa zamanda, daha az enerji harcayarak ve daha üstün fiziksel ve mekanik özelliklerde malzeme üretilebileceği görülmüştür.
- TM numunelerin elde edilen öz direnç değerleri nümerik analizde kullanılarak ön ısıtma ve sinterleme bölgelerinde oluşan penetrasyon derinlikleri nümerik olarak

hesaplanmıştır. Simetri eksenini alınarak yapılan nümerik analizlerde, ön ısıtma bölgesinde 3,751 mm, sinterleme bölgesinde ise 2,56 mm işleme derinliği elde edilmiştir. Ön ısıtma bölgesinde numune içerisinde yaklaşık 2.49 mm lik bölge ısı transferi ile sinterlenmiştir. Ön ısıtmanın, iç yapıya ve mekanik özelliklere olumlu etkisi deneysel ve nümerik sonuçlarla desteklenmiştir. Ön ısıtma yapılan Ö0.3 kodlu numunede, en yavaş konveyör hızında sinterlenen K0.2 kodlu numunedeki mekanik özelliklere ulaştığı görülmüştür. Bu sonuca dayanarak, TM parçaların indüksiyonla sinterlemede ön ısıtma uygulaması ile sinterleme süresinin azaltılabileceği ve dolayısı ile enerji maliyetlerinin azaltılabileceği görülmüştür.

- Sonuç olarak bu çalışmada, TM parçaların indüksiyonla sinterlemede uygun parametreler kullanılarak, malzemeler üzerinde homojen ısı dağılımı ve mikro yapı oluşturarak üstün mekanik ve fiziksel özelliklere sahip malzemelerin seri üretime uygun olarak üretilebileceği anlaşılmıştır.

7. TARTIŞMA

Demir esaslı TM numunelerin indüksiyonla sinterlenmesinde, ön ısıtma ve yavaş soğuma koşulları sağlanarak üstün mikro yapılı, yoğun ve üstün mekanik ve fiziksel özelliklerde numuneler üretilenmiştir. Ayrıca İndüksiyonla sinterlemenin, fırında sinterleme işlemine göre üçte bir oranda daha az enerji sarf ettiği önceki çalışmalarımızdan bilinmektedir (Çavdar, 2009). Bu çalışmamızda kullanılan 5 Kw gücündeki indüksiyon cihazı ile ön ısıtma ısıtma işlemi, 12 Kw'lık sinterleme işlem süresini kısaltarak enerji maliyetlerini daha da düşürmüştür. Ön ısıtma uygulaması aynı zamanda yağlayıcıların yanmaksızın yapıdan daha yavaş şekilde ayrılmasını sağlamıştır.

Ayrıca, TM numunelerin sertlik deneyi güvenilirlikleriyle ilgili yapılan çalışmalarda TM malzemelerin Vickers sertlik deney sonuçlarının güvenilir olmadığı sonucuna ulaşılmıştır (Çivi ve arkadaşları, 2014). Bu sebeple TM numunelerin Brinell sertlik değerleri göz önüne alınmıştır.

TM numunelerin, mikro yapıdaki yoğunlukları ile Archimed prensibi ile ölçülen yoğunlukları numune bazında örtüşmesine rağmen, mikro yapı yoğunlukları küçük bir alanı hesaba kattığı için daha yüksek çıktığı görülmüştür.

TM numunelerin SEM mikro yapı fotoğraflarının görüntü işleme metodu kullanılarak analiz edilen gözenek çevresi mikro gerilme ve deformasyonların mikro CT gibi analizler ile daha geniş bir kesitte incelenebilir.

Gözenek çevresinde oluşan mikro gerilme ve deformasyonlar, gözenek şekline ve yükleme durumuna bağlı davranış gösterdiği için, farklı şekil ve boyutta tozlar ile üretilen TM malzemelerin farklı yükleme şartlarındaki davranışları incelenmelidir.

8. KAYNAKLAR

1. Alınca Ayhan "İndüksiyon İle Kompozit Malzemelerin Isıtılmalarının İncelenmesi" Yüksek Lisans Tezi, Maltepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı İSTANBUL, 2012.
2. Aran, A., 1987. İmal Usulleri III Ders notları. İTÜ.
3. ASM Metals Handbook, 1998. Powder metal technologies and applications volume 7. ASM International, 1145-1146s. USA.
4. AY İrfan Balıkesir Üniversitesi Makine Mühendisliği İmalat Yöntemleri 2 Ders Notları 2013.
5. Baksan, B., Gürler, R. 2003, Toz Metalurjisinin Savunma Sanayiinde Uygulanması, Osmangazi Üniversitesi, Metalurji Enstitüsü, Eskişehir.
6. Bal Hakan Yüksel "Üçüncü Harmoniğin Kullanıldığı Yüksek Frekanslı Bir İndüksiyon Fırını Tasarımı" Yüksek Lisans Tezi Elektrik Eğitimi Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Eylül, 2006 Ankara.
7. Baolong Zheng, Dustin Ashford, Yizhang Zhou, Suveen N. Mathaudhu, Jean-Pierre Delplanque, Enrique J. Lavernia, "Influence of mechanically milled powder and high pressure on spark plasma sintering of Mg–Cu–Gd metallic glasses" Acta Materialia, Volume 61, Issue 12, July 2013, Pages 4414–4428.
8. Başaran Ali, 2007, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Toz Metal Parçalara Isıl Ve Mekanik Yüzey İşlemlerin Birlikte Uygulanabilirliğinin Araştırılması, Isparta.
9. Champagne, B., Angers, R., Fiset, M., 1984, Characteristics of powders produced by rotating electrode process, MPR.
10. Chawla N., Deng X., "Microstructure and mechanical behavior of porous sintered steels" Materials Science and Engineering: A Volume 390, Issues 1–2, 15 January 2005, Pages 98–112.
11. Chawla N., Deng X., Schnell D.R.M., "Thermal expansion anisotropy in extruded SiC particle reinforced 2080 aluminum alloy matrix composites" Materials Science and Engineering: A Volume 426, Issues 1–2, 25 June 2006, Pages 314–322.
12. Conley, R.F., 1996, Practical Dispersion-A Guide to Understanding and Formulating Slurries, Wiley-VCH, New York.
13. Çalışkan, C., 2000. Toz Metalurjisi , İstanbul Teknik Üniversitesi, Bitirme Projesi.
14. Çavdar Uğur, "Demir Demir Esaslı Toz Metal Parçaların İndüksiyonla Sinterlenmesinde Parametrelerin Belirlenmesi", Doktora Tezi, Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2009.

15. Çetin Sevilay "Bir Fazlı Bir İndüksiyon Isıtma Sistemi Analizi Ve Dizaynı" Yüksek Lisans Tezi Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli 2005.
16. Çiftçi, İ., 2003, Alüminyum esaslı kompozitlerde takviye oranı ve boyutunun mekanik özellikler ve işlenebilirlik üzerine etkisinin araştırılması, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.
17. Çivi Can, Atik Enver, "Comparison of effect of induction and classical sintering to mechanical properties of powder metal components", 2nd International Advances In Applied Physics And Materials Science Congress, 26–29 April 2012, Antalya, Turkey.
18. Çivi Can, "Demir Esaslı TM Parçaların Düşük Frekanslı İndüksiyonla Sinterlenmesinde Sürenin Etkisi", Yüksek Lisans Tezi, Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2011.
19. ÇİVİ Can, Tahralı Necati, Atik Enver, "Reliability of mechanical properties of induction sintered iron based powder metal parts" Materials & Design, Volume 53, January 2014, Pages 383–397.
20. Demir, A. ve Sarıtaş, S., Toz Metal Çeliklerin Mekanik Özellikleri. Akdeniz Üniversitesi Isparta Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 1993, Sayı 7, 1-14.4.
21. Dereci Servet "İndüksiyonla ısıtma sistemlerinin incelenmesi ve bir uygulama devresinin gerçekleştirilmesi" Yıldız Teknik Üniversitesi elektrik müh. fbe, yüksek lisans tezi , 2010 İstanbul.
22. Dikicioğlu Adnan., İTÜ Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, Toz Metalurjisi Ders Notları, 2013.
23. Drobenko B. , Hachkevych O. , Kournyts'kyi T., "A mathematical simulation of high temperature induction heating of electroconductive solids", International Journal of Heat and Mass Transfer 50 (2007) 616–624.
24. Engin, A., 2011, "Otomobil Endüstrisinde Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilen Parça Kullanımı Ve Performansının Araştırılması" Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi
25. Ersümer, A., 1970, Toz metalurjisi sert metal sinterleme, İstanbul Teknik Üniversite Matbaası, İstanbul.
26. Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
27. German, R.M., 1989, Powder metallurgy science. MPIF, 203-335s, USA.
28. German, R.M., 1994, Powder metallurgy science, 2nd edition, Metal Powder Industries Federation, USA.
29. German, R.M., 2007, Toz metalurjisi ve parçacıklı malzeme işlemleri, Sarıtaş-Türker-Durlu, Türk Toz Metalurjisi Derneği, Ankara, 150-151.
30. Griffiths, D.J., Elektromagnetik Teori, Arte Güven Yayınevi, sf 13-18, 1996.
31. Günay Enis Ders Notları Erciyes Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği için Malzeme Bilgisi 2013, (<http://em.erciyes.edu.tr/egunay>).

32. Hwan-Cheol Kim, Dong-Young Oh, In-Jin Shon, "Sintering of nanophase WC–15vol.%Co hard metals by rapid sintering process", *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, Volume 22, Issues 4–5, July–September 2004, Pages 197–203.
33. Kaysser W.A., and Rzesnitzeck, K., 1990, *Principles of atomization*, Science of Sintering, Ed. D.P. Uskokovic, Plenum Press, 157 – 174.
34. Klar, E., and Fesko, J.W., 1984, Production of metal powders, *Metals Handbook*, 9th ed. Vol. 7, Powder Metallurgy, 25 – 51, Ohio.
35. Kraus, J.D., *Electromagnetics*. 4th ed. McGraw-Hill series in electrical engineering. *Electromagnetics*. 1992, New York: McGraw-Hill. xix, 847 p.
36. Lawley, A., 1977, An overview of powder atomization processes and fundamentals, *Int. J. Powder Metallurgy & Powder Technology*, 13(3), 169 – 188.
37. Lawley, A., 1992, *Atomization: The production of metal powders*, Metal Powder Industries Federation, Princeton, New Jersey, USA.
38. Mastrangelo, A.J., 1984. Screening of Metal Powder. *American Society For Metals. Metals Handbook Ninth Edition Vol.7. Powder Metallurgy*. 176-177.
39. Matej Kranjc, Anze Zupanic, Damijan Miklavcic, Tomaz Jarm, "Numerical analysis and thermographic investigation of induction heating", *International Journal of Heat and Mass Transfer* 53 (2010) 3585–3591.
40. Michael Gasik, Baosheng Zhang, " A constitutive model and FE simulation for the sintering process of powder compacts" *Computational Materials Science* Volume 18, Issue 1, July 2000, Pages 93–10.
41. Michailidis N., Stergioudi, F. Omar H., Papadopoulos D., Tsipas D.N., "Experimental and FEM analysis of the material response of porous metals imposed to mechanical loading", *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects* 382 (2011) 124–131.
42. Montasser Dewidar, "Microstructure and mechanical properties of biocompatible high density Ti–6Al–4VW produced by high frequency induction heating sintering", *Materials & Design* Volume 31, Issue 8, September 2010, Pages 3964–3970.
43. Na-Ra Park, Dong-Mok Lee, In-Yong Ko, Jin-Kook Yoon, In-Jin Shon, "Rapid consolidation of nanocrystalline Al₂O₃ reinforced Ni–Fe composite from mechanically alloyed powders by high frequency induction heated sintering" *Ceramics International*, Volume 35, Issue 8, December 2009, Pages 3147–315.
44. Nart, E., Şahin, A., *Modelling of Thermal Stresses around a Barrier in an Infinite Strip*, 4. *International Advanced Technologies Symposium*, Konya, 28-30 September 2005.
45. Nayar, H.S., 1984. Production Sintering Atmospheres. *Metals Handbook Ninth Edition Vol.7. Powder Metallurgy*, 339-350.
46. Onaran K., Malzeme Bilimi, *Bilim Teknik Yayınevi*, sf 175-177-188, Eskisehir, 2003.

47. Özgün, Ö., "Toz Metalurjisi ile Üretilen Düşük Alaşımlı Çeliklerin Mikro yapı ve Mekanik Özellikleri", Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, F.B.E., Sakarya 2007.
48. Peng ZHANG, Fu-guo LI, " Effect of particle characteristics on deformation of particle reinforced metal matrix composites" Transactions of Nonferrous Metals Society of China Volume 20, Issue 4, April 2010, Pages 655–661.
49. Popov, E.P., Mukavemet Katı Cisimlerin Mekaniğine Giriş, Çağlayan Kitabevi, sf 2-6-7, İstanbul, 1990.
50. Rai, G., Lavernia, E., and Grant, N.J., 1985, Powder size distribution in ultrasonic gas atomization, J. Metals, 22 – 26.
51. Ramakrishnan N., Arunachalam V.S., J. Am. Ceram. Soc. 76 (1993) 2745.
52. Randeep Singh, Aliakbar Akbarzadeh, Masataka Mochizuki " Sintered porous heat sink for cooling of high-powered microprocessors for server applications", International Journal of Heat and Mass Transfer 52 (2009) 2289–2299.
53. Roberto Moreno-Atanasio, Richard A. Williams, Xiaodong Jia, "Combining X-ray microtomography with computer simulation for analysis of granular and porous materials" Particuology Volume 8, Issue 2, April 2010, Pages 81–99.
54. Roberts A.P., Grayson G., Challis V.J., Zhang L.C., Grotowski J.F., Schaffer G.B., Sercombe T.B., "Elastic moduli of sintered powders with application to components fabricated using selective laser melting" Acta Materialia 59 (2011) 5257–5265.
55. Roll, K.H., 1984. Introduction. Handbook Ninth Edition Vol.7. Powder Metallurgy, 569-574.
56. Rudnev, V., Loveless D, Cook R., Black M., "Handbook of induction heating", New York, Marcel Dekker, 2003.
57. Sadeghipour K., Dopkin J.A., Li K., "A computer aided finite element/experimental analysis of induction heating process of steel", Computers in Industry Volume 28, Issue 3, June 1996, Pages 195–205.
58. Sarıtaş, S., "Çelik Toz Dövmecilik", ODTÜ Uygulamalı Araştırmalar Dergisi, 3. Sayı:11, 1-26, 1985.
59. Sarıtaş, S., 1994, Toz metalurjisi, Makine müh. el kitabı, MMO, 2.Baskı, I.Cilt.
60. Sarıtaş, S., 1999. Bilyalı Dövmenin Fe+%2Cu+%0,5C TM Çeliğin Yorulma Dayanımına Etkisinin Araştırılması. Bildiri Kitabı. 2. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı, 519-527. Ankara.
61. Sarıtaş, S., and Doğan, C., 1994, Metal powder production by centrifugal atomization, Int. J. Powder Metallurgy, 30, 419 – 427.
62. Sert Şenol "İndüksiyon Isıl Yükleme İle Bir Çatlak Etrafında Oluşan Gerilmelerin Modellenmesi" Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Eğitimi, 2008.

63. Shanefield, D.J., 1995, Organic Additives and Ceramic Processing, Kluwer Academic, Boston.
64. Suresh S., Fatigue of Materials, second ed., Cambridge University Press, Cambridge, (1998).
65. TS 3087, 1978, Toz metalurjisi – terimler, TSE, Ankara.
66. Turan, H., 1993, Gaz atomizasyonu ile metal tozu üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.
67. Ünal, R., 1995, Gaz atomizasyonu ile metal tozu üretimi değişkenlerinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.
68. Ünver, H. M., "İndüksiyon Fırınlarının Analizi", Enerji, Elektrik, Elektronik, Mart 34: 64-69, (1997).
69. Ünver, H. M., "İndüksiyonlu Çelik Tav fırınlarında Güç Ünitelerinin PLC ile Denetimi", Doktora Tezi, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale, 15-18 (2004).
70. Veljovića Dj., Jančić-Hajnemana R., Balaćb I., Jokića B., Putića S., Petrovića R., Janačkovića Dj., "The effect of the shape and size of the pores on the mechanical properties of porous HAP-based bioceramics" Ceramics International, Volume 37, Issue 2, March 2011, Pages 471–479.
71. Veyhl C., , G.E Belova. Murch, FiedlerT., "Finite element analysis of the mechanical properties of cellular aluminium based on micro-computed tomography", Materials Science and Engineering: A, Volume 528, Issues 13–14, 25 May 2011, Pages 4550–455.
72. Wanibe, Y, and Itoh, T., 1998, New Quantitative Approach to Powder Technology, John Willey and Sons, New York.
73. Wonbaek Kim, Chang-Yul Suh, Ki-Min Roh, Jae-Won Lim, Sujeong Lee, Song Lee Dub, In-Jin Shon, "High-frequency induction heated sintering of High-energy ball milled TiC0.5N0.5 powders and mechanical properties of the sintered products "Ceramics International, Volume 39, Issue 1, January 2013, Pages 585–591.
74. Xiaoqiang Li, Yongquan Ye, Yu Tang and Shengguan Qu, "Effect of Pulsed Magnetic Field on Spark Plasma Sintering of Iron-Based Powders" Materials Transactions, Vol. 51, No. 7 (2010) pp. 1308-1312.
75. Xu Wang, Zhigang Zak Fang, Hong Yong Sohn, "Grain growth during the early stage of sintering of nanosized WC–Co powder", International Journal of Refractory Metals and Hard Materials Volume 26, Issue 3, May 2008, Pages 232–241.
76. Yalçın, B., 2007, Toz Metalurjisi Yöntemi ile İmal Edilen Titanyum Alaşımı İmplantların Temel Özelliklerinin Araştırılması. (Doktora Tezi) 16-23s. Isparta.
77. Zeren Muzaffer, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Toz Metalurjisi Ders Notları 2013 (<http://metalurji.kocaeli.edu.tr/mmt423-01.php>).

İNTERNET KAYNAKLARI

1. www.turkishpm.org-22.08.2013.
2. www.mpif.org- 22.08.2013.
3. www.rahmiunal..net/toz/tozmet.html. 20.08.2013.
4. www.turktoz.gazi.edu.tr. 23.08.2013.
5. www.epma.com/2013-03-08-10-43-24/spotlight-on-pm. 12.09.2013.
6. www.eetimes.com - 05.09.2013.
7. www.inductoheat.eu (13.09.2013).
8. www.leonardo-energy.org (13.09.2013).
9. www.web.sakarya.edu.tr/~aokurt/dersler/tozuretim.htm., Ali Osman Kurt, Sakarya üniversitesi toz üretim yöntemleri ve sinterleme ders notları 2010.- 22.08.2013.
10. www.hoganas.com (13.06.2013).

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı	: Göksan AKPINAR
Doğum Tarihi	: 10.10.1983
Doğum Yeri	: İzmir
Eylül 1998 - Haziran 2002	: Fatih Anadolu Lisesi/Manisa
Eylül 2002 - Temmuz 2006	: Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Lisans Programı
Eylül 2006 - Ağustos 2008	: Afyon Kocatepe Üniversitesi ve Southern Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Konstrüksiyon ve İmalat Programı'nda Yüksek Lisans Eğitimi
Eylül 2008 - Aralık 2013	: Celal Bayar Üniversitesi - Fen Bilimler Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Konstrüksiyon ve İmalat Programı'nda Doktora Eğitimi