



T.C.
Ege Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü



TOZ METALURJİSİNDE ELEKTRİK ALAN SİNERLEME TEKNİĞİNİN BİLGİSAYAR DESTEKLİ OLARAK MODELLENMESİ VE SİMÜLASYONU

Yüksek Lisans Tezi

Semih Recep FERİK

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

İzmir
2024

T.C.
Ege Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü

**TOZ METALURJİSİNDE ELEKTRİK ALAN
SİNERLEME TEKNİĞİNİN BİLGİSAYAR DESTEKLİ
OLARAK MODELLENMESİ VE SİMÜLASYONU**

Semih Recep FERİK

Prof. Dr. Rasim İPEK

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Makine Mühendisliği Yüksek Lisans Programı

İzmir

2024

Semih Recep FERİK tarafından gerçekleştirilen ve yüksek lisans tezi olarak sunulan “Toz Metalurjisinde Elektrik Alan Sinterleme Tekniğinin Bilgisayar Destekli Olarak Modellenmesi ve Simülasyonu” başlıklı bu çalışma EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile EÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi’nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 22.02.2024 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği ile başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri:

İmza

Jüri Başkanı : Prof. Dr. Rasim İPEK

Raportör Üye : Prof. Dr. Hasan YILDIZ

Üye : Prof. Dr. Alper TAŞDEMİRCİ

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddeleri kapsamında Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum başlığı "Toz Metalurjisinde Elektrik Alan Sinterleme Tekniğinin Bilgisayar Destekli Olarak Modellenmesi ve Simülasyonu" olan ilgili tezin kendi çalışmam olduğunu, paylaştığım bilgi, sonuç, doküman ile belgeleri bizzat ve bu tez çalışması ile elde ettiğimi, bahsi geçen tez çalışmasıyla elde edilmeyen tüm bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve aynı zamanda bu atıfların kaynaklarını kaynaklar listesinde usulünce verdiğimi, tez çalışması ve yazımı süresince ve sonrasında patent ile telif haklarına karşı ihlal edici herhangi bir davranışımın olmadığını, ilgili tezimin herhangi bir bölümünü bu üniversite ve/veya herhangi bir üniversitede, başka bir tez çalışması kapsamında sunmadığımı, ilgili tezin planlanmasından yazımına kadarki tüm süreçlerde bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda da ortaya çıkacak her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

24/ 01/ 2024

Semih Recep FERİK

ÖZET**TOZ METALURJİSİNDE ELEKTRİK ALAN SİNERLEME TEKNİĞİNİN
BİLGİSAYAR DESTEKLİ OLARAK MODELLENMESİ VE
SİMÜLASYONU**

FERİK, Semih Recep

Yüksek Lisans Tezi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Rasim İPEK

Ocak 2024, 106 sayfa

Bu tezde; toz metalurjisi üretim basamaklarının bilgisayar destekli analiz programları ile modellenmesi, analiz edilmesi ile parametrelerin optimizasyonu hakkında araştırma ve geliştirme yapılmıştır. Gerçek sonuçlar ile simülasyon arasında bağlantı kurulmuş ve sonraki çalışmalarda deneme ve iterasyon sayısının azaltılması hedeflenmiştir. Toz metalurjisi üretim yönteminde en çok emek ve zaman harcanan nokta üretim parametrelerinin optimum seviyede ve doğrulukta seçilmesi sürecidir. Genellikle tecrübe ve deneme yanılmaya bağlı olan üretim parametrelerinin incelenmesi, modellenmesi ve simülasyon ile analiz edilmesiyle zaman ve emek kazanımının yanında, hurda oranının azaltımı ve enerji optimizasyonu ile ekonomik faydalar elde edilmesi üzerine çalışılmıştır.

Çalışma ticari saflıktaki magnezyum tozlarının sinterleme süreci bilgisayar desteği ile modellenmiş ve analizi yapılmıştır. Toz metalurjisi üretim basamaklarından olan FAST ile sinterleme işlemlerinde yalnızca nümerik kabullere ve bağlıdır. Bu durum işlem sırasında gerçekleşen mekanizmaları soyut kılmaktadır. Yapılan simülasyon çalışmaları ile FAST yönteminde meydana gelen mekanizmaların modellenerek daha somut hale getirilmesi hedeflenmiştir.

Anahtar sözcükler: Simülasyon, Analiz, Magnezyum, Mekanik Öğütme, FAST, Sinterleme,



ABSTRACT**COMPUTER AIDED MODELING AND SIMULATION OF ELECTRIC
FIELD SINTERING TECHNIQUE IN POWDER METALLURGY**

FERİK, Semih Recep

MSc in Mechanical Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Rasim İPEK

January 2024, 106 pages

In this thesis; Research and development has been carried out on modeling, analysis and optimization of powder metallurgy production steps with computer-aided analysis programs. A connection was established between real results and simulation, and it was aimed to reduce the number of trials and iterations in subsequent studies. The point where the most effort and time is spent in the powder metallurgy production method is the process of selecting the production parameters at the optimum level and accuracy. By examining, modeling and analyzing the production parameters, which are generally dependent on experience and trial and error, and analyzing them with simulation, efforts have been made to gain economic benefits by reducing the scrap rate and energy optimization, as well as saving time and effort.

In this study, the sintering process of commercially pure magnesium powders was modeled and analyzed with computer support. Sintering processes with FAST, which is one of the powder metallurgy production steps, depend only on numerical assumptions. This makes the mechanisms that occur during the process abstract. With the simulation studies, it was aimed to model the mechanisms occurring in the FAST method and make them more concrete.

Keywords: Simulation, Analysis, Magnesium, Mechanical Milling, FAST

ÖNSÖZ

Bu tezde; toz metalurjisi üretim basamaklarının bilgisayar destekli olarak modellenmesi ve simülasyonu analiz programları kullanılarak modellenmesi, analiz edilmesi ve optimizasyonu üzerine araştırma ve geliştirme yapılmıştır.

İZMİR

Semih Recep FERİK

22/01/2024

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	vii
ABSTRACT.....	ix
ÖNSÖZ.....	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	14
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	18
1. GİRİŞ	20
2. GENEL BİLGİLER	21
2.1. Magnezyum.....	21
2.1.1. Magnezyum Tarihi	21
2.1.2. Magnezyum özellikleri.....	22
2.1.3. Magnezyumun kristal yapısı	26
2.1.4. Magnezyumun deformasyon davranışı	27
2.1.5. Kullanım alanları	31
2.2. Mekanik Öğütme ve Mekanik Alaşımlama.....	37
2.2.1. Tarihsel perspektif.....	37
2.2.2. Mekanik alaşımlama ve mekanik öğütme işlemi	38
2.2.3. Mekanik öğütmenin etkileri	42

2.2.4. Nanokristal yapı.....	43
2.3. FAST Sinterleme (Alan destekli sinterleme tekniği).....	45
2.3.1. Tarihsel perspektif	47
2.3.2. Çalışma prensibi	47
2.3.3. Elektrik alan (FAST) mekanizmaları.....	53
2.3.4. Magnezyum ile yapılmış sinterleme çalışmaları	60
2.4. Sonlu elemanlar analizi.....	61
2.4.1. Toz metalürjisinde simülasyon üzerine çalışmalar	62
2.5. Sonlu Elemanlar Analizi Gerçekleştirilen Gerçek Sistem	69
2.5.1. Malzeme.....	69
2.5.2. Numune üretimi.....	70
2.5.3. Karakterizasyon ve analizler.....	74
3. GEREÇ VE YÖNTEM	77
3.1. Sonlu Elemanlar Çözücüsü ve Sistem Tasarımı	78
4. BULGULAR, KARAKTERİZASYON VE ANALİZLER	81
4.1. Joule Heating Etkisi İle Toz Üzerindeki Sıcaklık Dağılımı	81
4.1.1. Sistem tanımı ve simülasyon sonuçları.....	81
4.2. FAST Sinterleme İle Toz Üzerindeki Sıcaklık Dağılımı.....	85
4.2.1. Sistem tanımı ve simülasyon sonuçları.....	85

4.3. FAST Sinterleme Sonucu Artan Sıcaklığın Mekanik Etkileri	86
4.3.1. Sistem tanımı ve simülasyon sonuçları	86
5. TARTIŞMA	88
6. GENEL SONUÇLAR.....	93
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	94
TEŞEKKÜR.....	105
ÖZGEÇMİŞ	106

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil

Sayfa

Şekil 2.1 Magnezyum elementine ait Bohr diyagramı ve bilgiler.....	23
Şekil 2.2 Sıkı paket hekzagonal yapı	25
Şekil 2.3 a) Basit bir hekzagonal birim hücre b) Sıkı paket hekzagonal yapı.....	27
Şekil 2.4 Mg'de gözlenen birincil kayma ve ikiz sistemlerinin şematik gösterimi (Chang and Kochmann, 2015)	29
Şekil 2.5 İkizlenmenin kristalografik gösterimi.....	30
Şekil 2.6 İkiz bandı gösterimi ve yön tayini.....	30
Şekil 2.7 a) Rolls-Royce firmasına ait magnezyum döküm gösterge paneli b) Otomobil iç kapı çerçevesi (Blawert et al., 2004) c) Direksiyon simidi (Luo, 2002) d) Magnezyum ve alüminyumdan imal edilmiş BMW 6 silindirli benzinli motor karteri (BMW Group, 2004)	32
Şekil 2.8 a) Magnezyum kullanılarak tasarlanmış ilk uçak -Northrop XP-56 (Friedrich and Mordike, 2006), b) 1550 kg Mg içeren TU-95MS bombardıman uçağı (Ostrovsky and Henn, 2007).....	33
Şekil 2.9 Ortopedik kullanım için Mg bazlı implantların görüntüsü (Zhao et al., 2017)	35
Şekil 2.10 a) Mg alaşımından imal edilmiş stent (Erbel et al., 2017), b) Mg alaşımından imal edilmiş sıkıştırma vidası (Windhagen et al., 2013)	36
Şekil 2.11 a) Ağırlığın azaltılması için Mg alaşımları barındıran Lenovo X201 Laptop, b) Dayanımın artması amacıyla gövdesinde plastik yerine Mg alaşımı kullanılan Canon EOS- 1D Mark IV kamera, c) Sony VP 550 video kameranin Mg alaşımlarından imal edilmiş parçaları, d) LG mobil parçası.....	37
Şekil 2.12 Bilye çarpışması sırasında arada kalan toz partikülleri değişiminin şematik gösterimi	40
Şekil 2.13 Mekanik alaşımlama/ mekanik öğütme esnasında plastik deformasyon sonucu tozlar üzerinde yüzey kirleticisi tabakaların yırtılması (Benjamin and Schelleng, 1981).....	40
Şekil 2.14 MÖ ve MA'da toz bileşimlerin deformasyon özelliklerinin gösterilmesi (Suryanarayana, 2001)	41
Şekil 2.15 Öğütme işleminde kaynak ve kırılma dengesi grafiği (Soni, 2000)	42
Şekil 2.16 Nano kristal oluşumunun şematigi: a) düşük dislokasyon yoğunluğuna sahip esas tane, b) tanenin ağır plastik deformasyonu ile üretilen yüksek dislokasyon yoğunluğu oluşumu, c) dislokasyonlarının hizalanması, d) geniş açılı tane sınırı dönüşümü ile yeni alt taneler (Enayati and Mohamed, 2014).....	44
Şekil 2.17 Öğütme süresi ile Ni ve Nb' nin tane boyutu değişimleri (Enayati and Mohamed, 2014).....	45
Şekil 2.18 FAST prensibinin şematik gösterimi	48
Şekil 2.19 FAST yönteminin ısıtma teorisinin prensibi	50
Şekil 2.20 Klasik sinterme işleminde yer alan kütle taşıma mekanizmaları	52

Şekil 2.21 Küresel partiküllerin temas bölgesinde meydana gelen sinterleme sonucu boyun verme aşamasının taramalı elektron mikroskobu altındaki görüntüsü (Yavaş, 2020).....	52
Şekil 2.22 Uygulanan basıncın neden olduğu partikül yeniden düzenleme mekanizmasının şematik gösterimi.....	53
Şekil 2.23 İki farklı ticari alümina tozunun (TM-alümina ve AA-alümina) SPS yönteminde sıcaklığına ve uygulanan basınca göre tepkisi (Makino et al., 2007)	55
Şekil 2.24 Darbeli elektrik akımı sinterlemesinde (PECS) 750°C'de 20 nm partikül boyutunda nanokristal MgO için yoğunlaştırma haritası (Chaim and Margulis, 2005).....	56
Şekil 2.25 FAST sinterleme sırasında grafit kalıp içerisindeki toz numunesinden akım geçişi.....	58
Şekil 2.26 Akımın toz partikülleri üzerinden geçişinin şematik gösterimi.....	58
Şekil 2.27 Kalıp yapısının ve toz geometrisinin modellenmesi (Suk Hwan Chung vd, 2010)	63
Şekil 2.28 Simülasyon çıktısının sıcaklık dağılımı ve basınç dağılımı sonuçları (Alexander Krok vd, 2017).....	64
Şekil 2.29 Simülasyon sonucu elde edilen termal gerilme ve sıcaklık dağılım sonuçları (Hui Qiu vd, 2016).....	64
Şekil 2.30 Simülasyon sonucu elde edilen a) sıcaklık dağılımı b) gerilme dağılımı gösterilmiştir. (Garay, 2010).....	65
Şekil 2.31 Fast sinterleme sonucu sıcaklık dağılımı ve maksimum sıcaklık (Suarez et al., 2013)	66
Şekil 2.32 FAST ve sıcak pres sinterlemede sıcaklık dağılımı (Suarez et al., 2013)	66
Şekil 2.33 Ser-Mak çalkalayıcı değirmen (Kılınç, 2023)	70
Şekil 2.34 Öğütme işleminde kullanılan bilyeler (Kılınç, 2023).....	71
Şekil 2.35 Öğütme işleminde kullanılan kavanoz (Kılınç, 2023).....	71
Şekil 2.36 Mg tozunun öğütülmesinin şematik gösterimi (Kılınç, 2023).....	72
Şekil 2.37 FAST sinterleme cihazı (Kılınç, 2023).....	73
Şekil 2.38 Sinterleme işleminde kullanılan kalıp görüntüsü	74
Şekil 2.39 Precisa XB 220 A marka hassas terazi	75
Şekil 2.40 Shimadzu (AG-IS 100kN) çekme-basma cihazı (Kılınç, 2023).....	76
Şekil 3.1 Ansys Setup Kurulum Şeması	78
Şekil 3.2 Tasarımı ve simülasyonu yapılan kalıp ve toz partikülü sistemidir.	79
Şekil 3.3 Tozların modellenmesinin şematize edilmiş hali	80
Şekil 3.4 Mesh elemanı dağılımı	80
Şekil 3.5 Mesh görselleri	81
Şekil 3.6 Contact ilişkileri	81
Şekil 4.1 FAST tekniğinde numune üzerindeki elektrik yolu	82
Şekil 4.2 Kalıp ve Punch üzerinden sisteme girdi olarak verilen sıcaklık gösterilmiştir. Ara kesit görünüşüdür.	83
Şekil 4.3 Simüle edilen birinci senaryonun analiz sonuçlarıdır.....	83
Şekil 4.4 Sadece punch üzerinden sisteme girdi olarak verilen sıcaklık gösterilmiştir. Ara kesit görünüşüdür.	84
Şekil 4.5 Simüle edilen ikinci senaryonun analiz sonuçlarıdır.	84
Şekil 4.6 Analizde simüle edilen voltaj girdisidir.....	85

Şekil 4.7 Simüle edilen FAST sinterleme sonucu model üzerindeki sıcaklık dağılımıdır.	86
Şekil 4.8 Simüle edilen FAST sinterleme sonucu toz partikülleri üzerinden geçen akım ve toz partiküllerindeki akım yoğunluğudur.	86
Şekil 4.9 Zamana bağımlı sıcaklık değişimi	86
Şekil 4.10 Genleşme mekanik etkilerinin gözlemlenmesi için kurulan simülasyon girdileridir.	87
Şekil 4.11 Simülasyon sonucu toplam şekil değiştirme dağılımıdır.	88
Şekil 4.12 Simülasyon sonucu gerilme dağılımıdır.	88
Şekil 5.1 FAST ve Joule Heating Sinterleme esnasında oluşan sıcaklık farkı ve sıcaklık dağılımı. a) FAST b) Joule Heating-Geleneksel Sinterleme	89
Şekil 5.2 FAST sinterleme mekanizmasında akımın yoğun olarak izlediği yol ve tek toz partikülü üzerindeki elektrik yoğunluğu	90
Şekil 5.3 FAST sinterleme mekanizmasında akımın izlediği yolun literatürdeki şematik gösterimi	90
Şekil 5.5 FAST sinterleme termal etkilerden kaynaklı a) genleşme b) gerilme dağılımı gösterilmiştir.	91
Şekil 5.6 FAST sinterleme işlemi sonucu elde edilmiş numune üzerinden alınan mikroyapı fotoğrafı	92
Şekil 5.7 Mikroyapı fotoğrafı ile simülasyon sonuçlarının incelenmesidir. a. Akımın izlediği yol b. Akımın yarattığı şok ve sıcaklık dağılımının etkisi c. Görece daha düşük olan sıcaklığın ve akım yoğunluğunun etkisi	92
Şekil 5.8 FAST işleminde ilk ısınan puch ve sıcaklık dağılımı	93

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo

Sayfa

Tablo 2.1 Saf magnezyumun (kütlece 99,9%) bazı fiziksel ve mekanik özellikleri (Westengen and Aune, 2006).....	24
Tablo 2.2 Saf magnezyumun (kütlece 99,9%) üretim yöntemlerine göre bazı mekanik özellikleri (Westengen and Aune, 2006).....	24
Tablo 2.3 Sıcaklığın saf Mg kafes parametreleri üzerindeki etkisi (Friedrich and Mordike, 2006)	26
Tablo 2.4 Hekzagonal sıkı paket yapılı bazı metallerin oda sıcaklığındaki c/a oranları ve yoğunluk değerleri (Tromans, 2011)	26
Tablo 2.5 Magnezyumun çeşitli kayma ve ikiz sistemleri (Chang and Kochmann, 2015)	27
Tablo 2.6 Çeşitli implant materyallerinin ve doğal kemiğin mekanik özelliklerinin içeriği ve karşılaştırılması (Staiger et al., 2006; Wang et al., 2012).....	35
Tablo 2.7 Kullanılan Magnezyum tozunun element içeriği ve oranları	69
Tablo 2.8 Kullanılan Magnezyum tozunun boyutları.....	69
Tablo 2.9 Precisa XB 220 A hassas terazi teknik özellikleri.....	75
Tablo 3.1 Ansys işlemcileri ve kullanım nedenleri	78

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
Mg	Magnezyum
Na	Sodyum
O	Oksijen
µm	Mikrometre
nm	Nanometre
g	Gram
kg	Kilogram
°C	Derece Santigrat
cm ³	Santimetreküp
GPa	Gigapaskal
MPa	Megapaskal
K	Kelvin
HB	Brinell
HV	Vickers
rpm	Devir/Dakika
Ω	Ohm
Tg	Camsı Geçiş Sıcaklığı
MA	Mekanik Alaşımlama
MÖ	Mekanik Öğütme
YMK	Yüzey Merkezli Kübik

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

PKA	Proses Kontrol Ajanı
DC	Doğru Akım
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
SPH	Sıkı Paket Hegzagonal
XRD	X ışını Kırınımı
SPS	Spark Plazma Sinterleme
FAST	Alan Destekli Sinterleme
CAPAD	Akımla Aktive Edilen Basınç Yardımlı Yoğunlaştırma
PECS	Darbeli Elektrik Akım Sinterleme

1. GİRİŞ

Magnezyum (Mg), yer yüzünde bol miktarda bulunan, bilinen en hafif yapısal metaldir. Bu yanıyla magnezyum, özellikle ağırlığın kritik olduğu uygulamalar için ideal seçimdir. Ayrıca magnezyumun çeşitli uygulamalara uygun olmasını sağlayan birçok benzersiz mekanik, termal, kimyasal ve biyomedikal özelliğe sahiptir. Günümüzde savunma sanayisi, otomotiv ve havacılık uygulamaları, elektronik ürünler ve medikal endüstrilerinde kullanılmaktadır. Ancak magnezyumun endüstri ve araştırma çalışma gruplarının aktif olarak ele aldığı bazı dezavantajları vardır. Sınırlı korozyon direnci, sınırlı soğuk işlenebilirlik ve tokluk önemli dezavantajlarıdır (Mordike and Ebert, 2001). Magnezyumun önemli diğer bir dezavantajı da tüm yapısal metaller arasında en reaktif olanıdır. Bu da oksijen ile güçlü bir şekilde reaksiyona girmesi ve toz halinde bulunduğunda kolayca tutuşabilir olması anlamına gelmektedir. (Seetharaman et al., 2022). Söz konusu dezavantajlar magnezyumun kullanım alanlarının yaygınlaşmasını, farklılaşmasını ve birçok uygulama alanına yayılmasını önemli ölçüde engellemiştir. Alaşımlama ve ilave katkılar ile bu yetersiz görülen özelliklerin geliştirilmesi üzerine çalışmalar devam etmektedir.

Parçacık tarama yöntemleri ve mikro yapı kontrolü, magnezyum özelliklerinin iyileştirilmesine yönelik ana uygulamalardır. Bu tez çalışmasında magnezyum yapısı üzerinde etkili olduğu bilinen denge dışı malzeme üretimi yöntemi olan mekanik öğütme kullanılmıştır. Ancak mekanik öğütme sırasında elde edilen özellikler, mekanik öğütme sonunda veya sinterleme sırasında kaybolabilir. Bu nedenle yapılan tez çalışmasında; mekanik öğütme sırasında toz ve tozu kaplayan magnezyum oksit tabakasında gerçekleşen gerilme ile gerinim değerleri, mekanik öğütme sonrası aktif hale gelen toz tanelerinin üzerini kaplayan oksit tabakasının genleşme, ısı ve elektrik iletkenliği, bilgisayar desteği ile simüle edilmiş ve somut hale getirilmeye çalışılmıştır. Aynı zamanda Ege Üniversitesi Makine Mühendisliğinde bulunan mevcut çalışmalar ile karşılaştırması yapılarak simülasyon sonuçları yorumlanmıştır. Gelecek çalışmalar için adım niteliği taşıyan bu tezin ilk ve ana hedefi sonlu elemanlar analizi ve simülasyon çalışmalarının etkisinden toz metalürjisi alanında da faydalanmaktır.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Magnezyum

Magnezyum (Mg), 1,738 g/cm³ yoğunluğuyla bilinen en hafif metaldir. Mg, yer kabuğu içeriğinde en çok bulunan 8. elementtir ve 1 km³ deniz suyunda yaklaşık 1,3 milyon ton magnezyum bulunmaktadır. Aktif bir metal olduğu yani diğer elementlerle kolaylıkla bağlanabildiği için saf halde bulunması zordur (Pekguleryuz et al., 2013). Magnezyum elementi ve magnezyum alaşımları, yüksek özgül dayanıma, düşük yoğunluk, iyi geri dönüştürülebilirlik, iyi sönümlenme performansı, biyouyumluluk ve hidrojen depolama gibi özellikleriyle havacılık, enerji, ulaşım, elektronik ve tıp alanlarında geniş kullanım yeri bulunmaktadır. Magnezyum 21. yüzyılın en etkili doğa dostu maddesi olarak kabul edilmektedir (Xu et al., 2019; Song et al., 2020).

2.1.1. Magnezyum Tarihi

Magnezyum elementinin keşfinden bu yana yaklaşık olarak 200 yıl geçmiştir. 1755 yılında kimyager olan Joseph Black, o tarihe gelinene kadar kalsiyum olduğu düşünülen magnezyum elementini başka bir element olduğunu fark etti ve magnezyumu bir element olarak tanımlayan ilk kişi olarak tarihe adını geçirmiştir. Mg ilk olarak 1808'de Londra'da kimyager Sir Humphrey Davey tarafından saflaştırılmıştır (Bernhardt and Kasko, 2006). 1831 yılında Antoine Bussy büyük miktarlarda magnezyum izole ederek ticari üretime doğru ilk adımı atmıştır. 1864 yılında İngiltere, fotoğraf baskısında kullanılmak üzere az miktarda magnezyum üreten ilk ülke oldu. 1886 yılında dünya çapında endüstriyel ölçekte ticari magnezyum üretilmeye başlandı ve mühendislik malzemesi olarak kullanılmak üzere alaşımlar geliştirilmeye başlandı. 1926'dan 1938'e kadar magnezyum savunma sanayii uygulamalarının yanı sıra birçok inşaat mühendisliği uygulamasında da kendine yer bulmuştur (Ball, 1956; Witte, 2010).

Volkswagen markası ve ürettiği BEETLE modeli ile magnezyumun popülaritesine ve sanayide özellikle de otomotiv sanayisinde kullanılabilirliğine büyük katkı sağlamıştır. Otomobil endüstrisinden kaynaklanan emisyonları sınırlamaya yönelik mevzuatın yürürlüğe girmesinin ardından otomobil

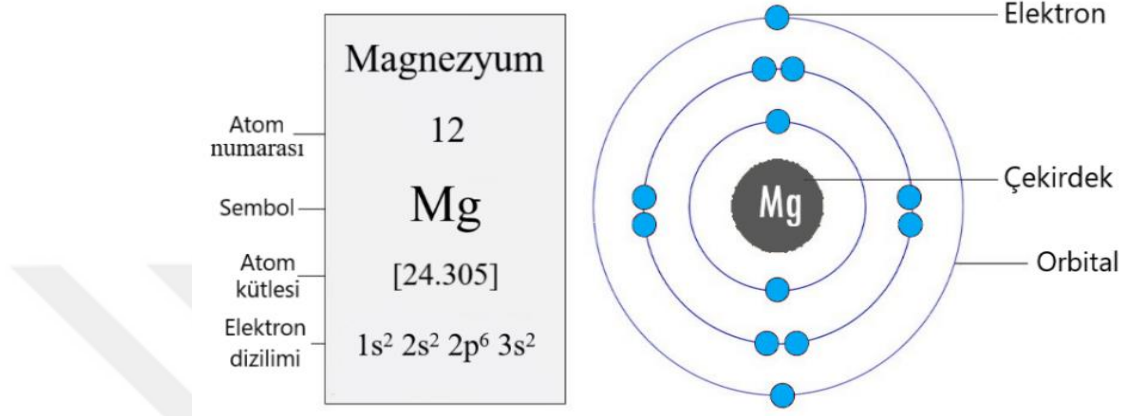
parçalarının ağırlığını azaltma ihtiyacı beraberinde hafif ama mekanik özellikleri açısından da mevcutta kullanılan malzemelerden eksik kalmayan bir malzeme ihtiyacını doğurmuştur. Bu durum Magnezyumu ön plana çıkarmıştır ve Volkswagen firması, 1940'lardan 1960'lara kadar 21.000 ton magnezyum ve alaşımlarını ürettiği otomobillerde ve çeşitli parçalarında kullanmıştır. 1972'de şirket, magnezyum tüketimini sürekli artırarak 42.000 ton magnezyuma ulaşmış ve magnezyumun popülaritesini yıllar içerisinde büyük ölçüde artırmıştır (Kainer and Buch, 2003).

1944 yılında küresel magnezyum tüketimi 228.000 tona ulaşmıştır. İkinci Dünya Savaşı'nın sonunda magnezyum tüketimi 10.000 tona düşmüş, fiyatların artmasıyla birlikte magnezyum elementi, üreticiler için elde edilmesi zor bir hammadde haline gelmiştir. Yaşanan bu olumsuzluklarla beraber magnezyum bu yıllarda popülarlığını kaybetmeye başlamıştır (Mordike and Ebert, 2001). Ancak 1990'lı yıllarda Mg hammadresi fiyatlarında yaşanan düşüş, magnezyum elementinin günümüze kadar popülarlık kazanarak gelmesini sağlamış ve çok sayıda alanda kullanımını yaygınlaşmasını sağlamıştır (Blawert and Kainer, 2004; Atalay, 2006). Küresel pazarda magnezyum elementinde şu anda yıllık %5 büyüme yaşanmaktadır. Üretimin 2024 yılında 1,2 milyon ton olması ve 2028 yılında ise 1,7 milyon tona ulaşması beklenmektedir (Tan and Ramakrishna, 2021).

2.1.2. Magnezyum özellikleri

Magnezyum elementi periyodik tabloda 2. grubun 3. periyodunda yer alan bir alkali toprak elementidir. Periyodik tablonun ikinci grubu, aktif metaller grubunun bir parçası olduğundan doğada sadece çeşitli bileşikler halinde bulunur. Magnezyum, bulunabilirlik durumuna göre dünyada en çok bulunan 8., evrende ise en çok bulunan 9. elementtir. Yeryüzünün ortalama %1,94'ü ve okyanusların %0,13'ü magnezyum içermektedir. (Gray and Luan, 2002). Yaşamsal faaliyetlere gelince, hücrede en fazla yer alan 3. element olarak yaşamsal faaliyetleri destekler. Magnezyum, 1.738 g/cm³ yoğunluğuyla dünyada bilinen en hafif yapısal metaldir. Bu, magnezyum parçalarda düşük atalet oluşturarak önemli faydalar sağlar. Ayrıca magnezyum geri dönüşüme çok uygun bir metaldir (Kelen, 2021). Ancak kimyasal reaktivitesi oldukça yüksektir (Kim et al., 2007).

Mg elementinin atom numarası 12'dir. Saf magnezyumda, tek biçimli ve yerel olmayan bir serbest elektron bulutu vardır. Elektronik konfigürasyonu s^2 ile bitmektedir ve durum da magnezyumun gerçek metalik bağlanmanın mükemmel bir örneği olduğunu ifade eder. Bohr diyagramı ve magnezyum elementine ilişkin bilgiler Şekil 2.1'de gösterilmektedir.



Şekil 2.1 Magnezyum elementine ait Bohr diyagramı ve bilgiler

Magnezyum, metalik yapı malzemeleri ile kıyaslandığında en düşük yoğunluğa sahipken, yüksek özgül mukavemeti demir elementinden %67,716, alüminyum elementinden %14,075 daha yüksektir. Yüksek sönümleme kapasitesinden dolayı (Mg bilinen en sönümleyici metaldir) gürültü ve titreşim gibi olumsuzluk yaratma potansiyeli olan durumlarda çözüm olarak kullanılabilir. Magnezyum kontrollü ortamlarda iyi kaynaklanabilirliğe sahiptir. Bu üstün özelliklerine rağmen düşük elastik modül, zayıf korozyon direnci, sınırlı soğuk işlenebilirlik, asimetrik plastik davranış, zayıf darbe performansı ve yüksek kimyasal reaktivite gibi sorunlar magnezyumun kullanımını sınırlamıştır. Bu sorunlar, magnezyumun neden rakipleri sayılabilecek alüminyum ve demir elementlerine göre daha az kullanıldığını açıklamaktadır (Li et al., 2015; Kelen, 2021).

Magnezyum günümüzde hem saf hem de alaşım halinde kullanılmaktadır. Mg alaşımının içeriğinde bulunan alaşım elementlerine ve bu elementlerin miktarına bağlı olarak fiziksel özellikleri büyük değişikliklere uğrayabilir. Tablo 2.1 ve Tablo

2.2'de saf magnezyumun fiziksel özellikleri ve üretim yöntemine göre bazı mekanik özellikleri sunulmaktadır.

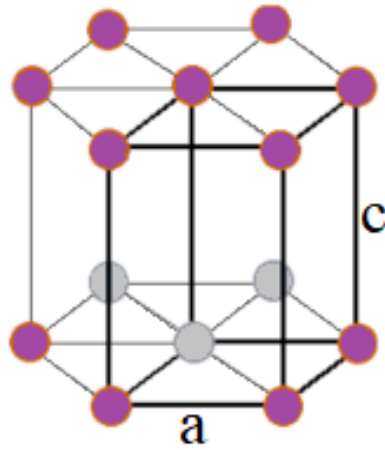
Tablo 2.1 Saf magnezyumun (kütlece 99,9%) bazı fiziksel ve mekanik özellikleri (Westengen and Aune, 2006)

Atom Numarası	12
Atom Ağırlığı	24.312 g/mol
Ergime Noktası	650 °C ± 2
Kaynama Noktası	1107 °C ± 10
20°C'de Yoğunluğu	1,738 g/cm ³ RT
Kristal Yapısı	Sıkı Paket Hegzagonal
Young Modülü	45 GPa / 4570 $\frac{\text{kgf}}{\text{mm}^2}$
Çekme Mukavemeti	80-180 MPa
Akma Mukavemeti	65-100 MPa
Sertlik (HB)	30-47
Kırılma/Kopma Uzaması	1-12%
20°C'de Elektrik İletkenliği	22,4 m/(Ωmm ²)
25°C'de Termal İletkenliği	155 W/(kg K)

Tablo 2.2 Saf magnezyumun (kütlece 99,9%) üretim yöntemlerine göre bazı mekanik özellikleri (Westengen and Aune, 2006)

ÜRETİM YÖNTEMİ	AKMA MUKAVEMETİ (BASMA) MPa	AKMA MUKAVEMETİ (ÇEKME) MPa	ÇEKME MUKAVEMETİ MPa	SÜNEKLİK (%)	SERTLİK (BRİNEL) HB
Kum Döküm	21	21	90	2 - 6	30
Ekstrüzyon	34 - 55	69 - 105	165 - 205	5 - 8	35
Levha (Haddelenmiş)	105 - 115	155 - 140	180 - 220	2 - 10	45 - 47
Levha (Tavlanmış)	69 - 83	90 - 105	160 - 195	3-15	40 - 41

Young modülü 45 GPa'dır. Magnezyum, sıkı bir şekilde paketlenmiş altıgen (SPH) kristal yapıya ve düşük kusur istifleme enerjisine sahiptir. Bu özelliklerinden dolayı magnezyum ve alaşımlarının şekillendirilebilirlik özelliği ve de sünekliği zayıftır. Magnezyumun kristal kafes yapısı Şekil 2.2'de gösterilmektedir. Oda sıcaklığında saf magnezyumun kafes yapısında c uzunluğu 0,52105 nm, a uzunluğu ise 0,32092 nm'dir. Ek olarak saf magnezyumun kafes parametreleri Tablo 2.3'te gösterildiği gibi sıcaklıkla birlikte artar. İdeal sıkı paketlenme için c/a oranı 1.633'tür. Magnezyumun c/a değeri 1,6236 olup, magnezyumun 0,32 nm atom çapıyla neredeyse mükemmel bir altıgen yapıya sahip olduğunu gösterir. c/a değeri malzemelerin mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Bir kristal kafes içinde plastik diğer bir deyişle kalıcı bir şekil değişikliğinin meydana gelebilmesi için, kafesin bir kısmının komşu atomlarla olan bağları koparması, kayma düzlemleri boyunca hareket etmesi ve yeni komşu atomlarla bağlar oluşturması gerekmektedir. Dolayısıyla söz konusu düzlemdeki bütün atomların bağlarını aynı anda kırmak için gerekli teorik kuvvet çok büyüktür. Fakat deneysel yolla bulunan değerler bahsedilen teorik kuvvetlerin çok daha altındadır. Bunun sebebi olarak dislokasyonların adım adım ilerleyerek çok daha düşük kuvvetlerle kalıcı şekil değişimini sağlaması gösterilebilir. (Westengen and Aune, 2006). Toz metalürjisi işlem basamaklarından olan mekanik öğütme sonrasında kristal kafes yapısının değiştiği düşünülmektedir. Sıkıca paketlenmiş altıgen yapılara sahip farklı metallerin oda sıcaklığında c/a oranı ve yoğunluğu Tablo 2.4'te karşılaştırılmıştır.



Şekil 2.2 Sıkı paket hekzagonal yapı

Tablo 2.3 Sıcaklığın saf Mg kafes parametreleri üzerindeki etkisi (Friedrich and Mordike, 2006)

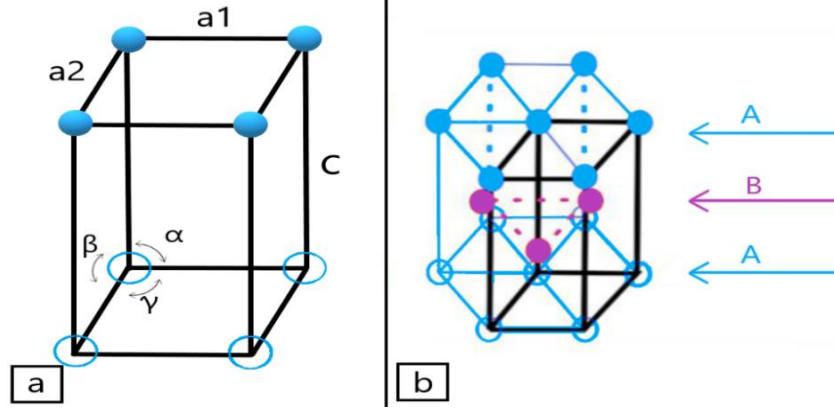
Sıcaklık [°C]	a[nm]	c[nm]
10	0.32081	0.52091
25	0.32088	0.52099
30	0.32100	0.52120
46	0.32106	0.52128
98	0.32152	0.52191
160	0.32211	0.52308
180	0.32214	0.52310

Tablo 2.4 Hekzagonal sıkı paket yapılı bazı metallerin oda sıcaklığındaki c/a oranları ve yoğunluk değerleri (Tromans, 2011)

Metal	c/a	Yoğunluk (g/cm ³)
Berilyum	1,5680	1,848
Magnezyum	1,6236	1,738
Skandiyum	1,5922	2,985
Titanyum	1,5873	4,506
Kobalt	1,6228	8,9

2.1.3. Magnezyumun kristal yapısı

Magnezyumun altıgen bir yapı olduğu düşünüldüğünde birim hücrede karşılık gelen açılar $a_1=a_2 \neq c$ ve $\alpha=\beta=90^\circ$, $\gamma=120^\circ$ 'dir (Şekil 2.3a). Şekil 2.3b basit altıgen yapıya sahip 3 hücreden oluşan altıgen kafesin simetrisini göstermektedir. Altıgen prizma ile de temsil edilebilir. Atomlar ABABABAB... şeklinde sıkı bir şekilde paketlenmiş altıgen bir yapıda üst üste dizilir.



Şekil 2.3 a) Basit bir hekzagonal birim hücre b) Sıkı paket hekzagonal yapı

2.1.4. Magnezyumun deformasyon davranışı

Von Mises'e göre, bir polikristalin düzgün bir şekilde ve tane sınırı bozulması olmadan deforme olması için beşten fazla bağımsız kayma sistemine sahip olması gerekir. Magnezyum kompakt bir altıgen yapıya sahiptir ve beş bağımsız kaydırma sistemi içermez. Yüzey merkezli kübik kristal kafes yapısına sahip metallerde 12 kayma sistemi olduğundan Von Mises kriteri karşılanmaktadır. Magnezyum elementinin bazı kayar ve paralel sistemleri Tablo 2.5'te sunulmaktadır.

Tablo 2.5 Magnezyumun çeşitli kayma ve ikiz sistemleri (Chang and Kochmann, 2015)

Tip	Kayma/ikiz düzlemi	Yönler	Toplam kayma sistem sayısı
Bazal kayma	$\{0001\}$	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	3
Prizmatik kayma	$\{1\bar{1}00\}$	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	3
Pirimal <a>	$\{1\bar{1}01\}$	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	6
Pirimal <c+a>	$\{11\bar{2}2\}$	$\langle \bar{1}123 \rangle$	6
Çekme ikizi	$\{10\bar{1}2\}$	$\langle \bar{1}011 \rangle$	6
Sıkıştırma ikizi	$\{10\bar{1}1\}$	$\langle \bar{1}012 \rangle$	6

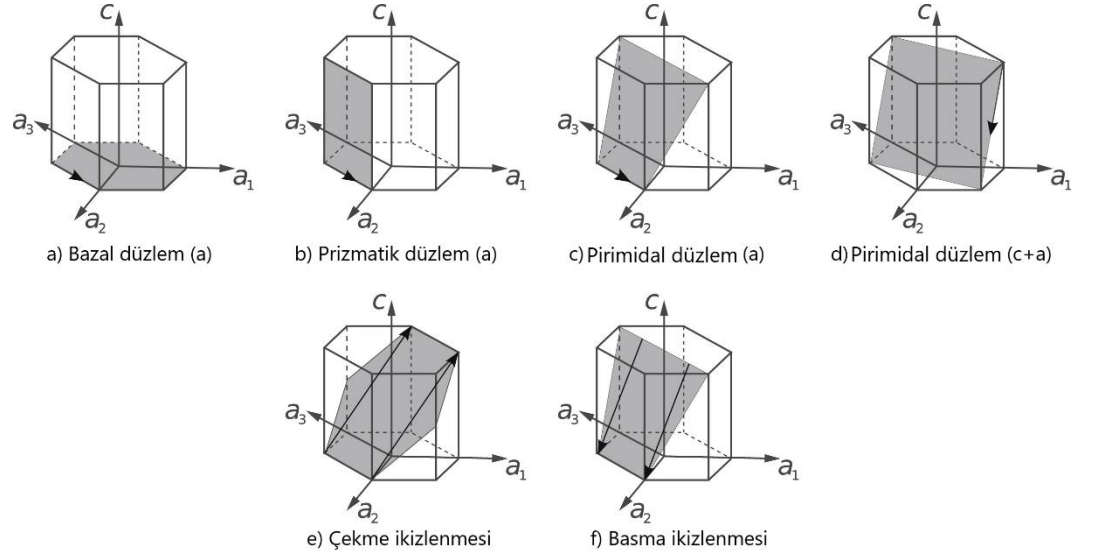
Magnezyum gibi SPH metallerinde deformasyonun oluşabilmesi için bazal olmayan diğer kayma sistemlerinin devreye girmesi ve ikizlenmenin gerçekleşmesi gerekir. Kayma ve ikizlenme sistemleri birbirlerinden farklı gerilme değerlerine

sahiptir. Bu sistemler farklı sıcaklıklara, parçacık boyutlarına, yüklere ve yönelimlere bağlı olarak çalışabilmektedir.

Magnezyum elementi 25°C'de plastik deformasyona uğrayarak yaklaşık %10 uzayabilmektedir. Kristal yapı içinde kaymayı sağlayan kayma sistemi arttıkça şekil değiştirme yeteneği de artar ve süneklik elde edilir. Magnezyum sünekliğini arttırmak için temel olmayan kayma sistemi ve ikizlenme sisteminin aktivitesinin arttırılması gerekmektedir (Barnett, 2007).

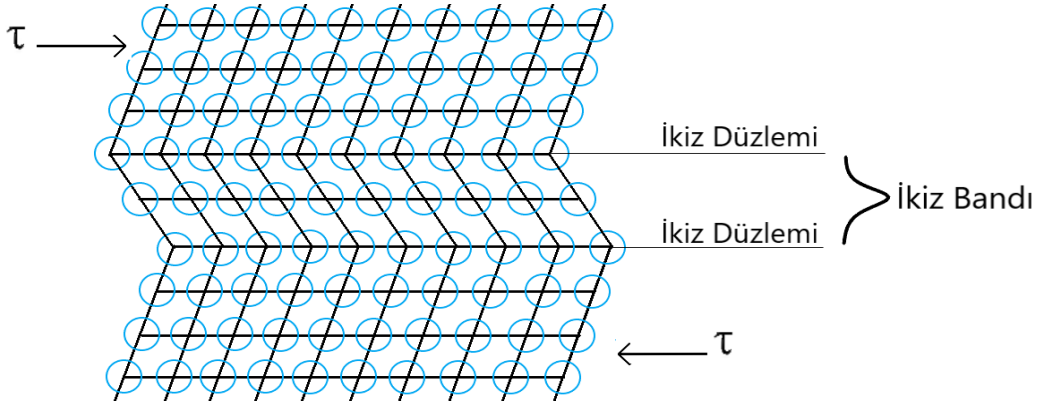
2.1.4.1. Kayma ve ikizlenme

Magnezyum için temel kayma sistemi, 25°C sıcaklıkta diğer kayma sistemleri arasında en basit ve en aktif olanıdır. 3 temel kayma sistemi varken yalnızca 2 bağımsız kayma sistemi vardır. Bu kayma sistemler Şekil 2.4'te gösterilen $\langle c \rangle$ eksenini yönünde herhangi bir gerinim yaratmamaktadır. Bu nedenle Mg kristallerinin sınırsız şekil değişimini sağlamak için temel olmayan bir kayma sistemine ihtiyacı vardır. Bazal olmayan kayma sistemlerin iki temel türü vardır. Bunlar; Prizmatik ve piramidal bir kaymadır. Prizmatik kayma sisteminde birinci dereceden ve ikinci dereceden kayma düzlemleri bulunmaktadır. Birinci derecede prizmatik düzlemlerde $\langle a \rangle$ ve $\langle c \rangle$ dislokasyonları ile kayma gerçekleşebilir. İkinci derece prizmatik düzlemde sadece $\langle c \rangle$ dislokasyonu ile kayma meydana gelebilir. Pirimidal sistemde $\langle a \rangle$ dislokasyonları birinci derece pirimidal düzlemde kayabilirken $\langle a+c \rangle$ dislokasyonları birinci ve ikinci pirimidal düzlemlerde kayabilir. Şekilde 2.4'te SPH kristal yapısındaki farklı kayma sistemleri belirtilmiştir (Partridge, 1967).

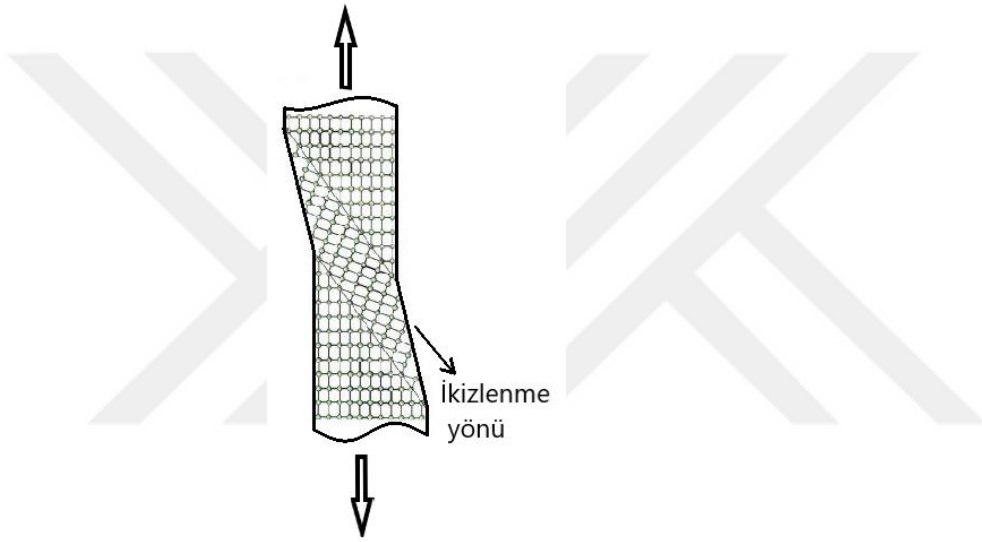


Şekil 2.4 Mg'de gözlenen birincil kayma ve ikiz sistemlerinin şematik gösterimi (Chang and Kochmann, 2015)

İkizlenme, bir kafes yapısının ikiz düzleme paralel bir atom düzleminin hareketine göre simetrik olarak yönlendirilmiş iki parçaya bölünmesi olarak tanımlanır. Plastik deformasyon mekanizması olarak ikizlenme, kaymanın zor olduğu durumlarda yüksek gerinim hızlarında ve düşük sıcaklıklarda meydana gelir. İkizlenme atomik düzlemleri hizalar ve hareketi kolaylaştırır. İkizlenmenin gerçekleştiği bölgede düzlemlerin hareket miktarı, ikiz düzlemine olan uzaklıkları ile orantılı olarak gerçekleşir (Barnett, 2013). İkizlenme bölgesi ikizlenmemiş bölgenin ayna görüntüsü şeklinde olmaktadır. Mekanizmanın kristalografik gösterimi ve ikiz bandının gösterimi sıra ile Şekil 2.5 ve Şekil 2.6'da belirtilmiştir.



Şekil 2.5 İkizlenmenin kristalografik gösterimi



Şekil 2.6 İkiz bandı gösterimi ve yön tayini

Kayma ve ikizlenme arasında bazı farklar vardır.

- Kayma mekanizmasında bir atomun hareket ettiği mesafe, atomlar arasındaki mesafenin tam katıdır; oysa ikizlenme mekanizmasında, bir atomun hareket ettiği mesafe, atomlar arasındaki mesafenin sabit bir miktarına karşılık gelir.
- Kayma mekanizmasının gerçekleşmesi için gerekli gerilme miktarı ikizlenme mekanizmasına kıyasla daha azdır.
- İkizlenmeden sonra kristal yapıda farklı yönelimler meydana gelir.
- İkizlenme sonrası oluşan izler kayma sonrası oluşan izlere kıyasla daha kalın ve bant şeklinde oluşur.
- İkizlenmede kafes ani olarak yönelir, kayma mekanizmasında dönme kademeli olarak gerçekleşmektedir (Savaşkan, 2009).

2.1.5. Kullanım alanları

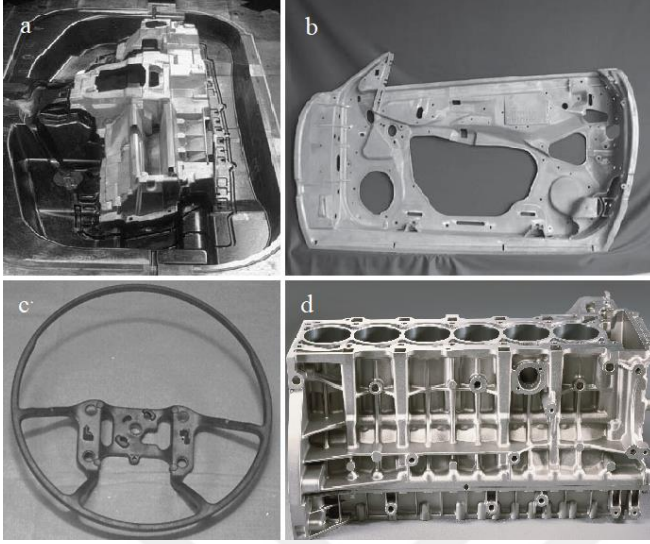
Günümüzde otomotiv, havacılık ve medikal uygulamalarda kullanılmasının yanı sıra magnezyum, organik kimya, spor malzemeleri, ev ürünleri ve ofis ekipmanları gibi çeşitli genel uygulamalarda da kullanılmaktadır. Magnezyumun özellikleri bölümünde bahsedilen bazı dezavantajları nedeniyle daha önceleri geniş çaplı uygulama alanlarında kendine yer edinememiştir. Bu, magnezyumun sınırlı araştırma ve geliştirilmesine yol açmıştır.

Magnezyumun popüler hale geldiği ilk yıllarda, alüminyum gibi diğer düşük erime noktalı alaşımlar için de geçerli olan üretim teknikleri kullanılarak üretim yapılıyordu. Magnezyum için artan talep bu durumu değiştirerek magnezyum araştırmalarını artırdı ve yeni üretim yöntemlerinin geliştirilmesine yardımcı oldu. Bu nedenle magnezyum birçok yeni uygulamada kendine yer bulmuştur. Bu aynı zamanda magnezyumun tedarikini de kolaylaştırarak ciddi bir pazar payına ulaşmasını ve en çok kullanılan 3. inşaat malzemesi olarak konumlandırılmasını sağlar (Xu et al., 2019).

2.1.5.1. Otomotiv uygulamaları

Magnezyumun otomotiv sektöründeki ilk uygulamaları, 1918 yılında tanıtılan Indy 500 yarış motorunun pistonları ve 1930'larda üretilen ve magnezyum alanında adından söz ettiren Volkswagen Beetle otomobilinin motor bloğu olmuştur. Günümüzde magnezyum çeşitli aktarma organları, şasi ve gövde yapısı uygulamalarında aktif bir rol oynamaktadır. Magnezyum, otomotiv endüstrisinde en yaygın kullanılan üçüncü metal yapı malzemesidir (Tan and Ramakrishna, 2021). Otomotiv endüstrisinde magnezyum kullanımının ana nedenlerinden biri araç ağırlığını azaltmak ve dolayısıyla yakıt tasarrufu sağlamaktır. Her ne kadar birçok otomotiv uygulamasında kendine yer bulsa da, yapısal sınırlamaları nedeniyle magnezyumun sektördeki genel payı ve katkısı çelik ve alüminyuma kıyasla çok daha düşüktür. Aynı zamanda, endüstrinin ve halkın emisyonları azaltma ve daha sürdürülebilir bir büyüme modeli izleme yönünde artan baskısıyla birlikte magnezyum, araç ağırlığını azaltma, enerji tasarrufu yapma gereksinimi ve ekosistem üzerindeki olumsuz etkileri sınırlama potansiyeli nedeniyle gittikçe daha dikkat çekici hale gelmektedir ve böylece otomotiv sektöründeki genel katkı payını

giderek arttırmaktadır (Mordike and Ebert, 2001). Şekil 2.7 magnezyum ve alaşımlarından yapılmış bazı otomotiv parçalarını göstermektedir.

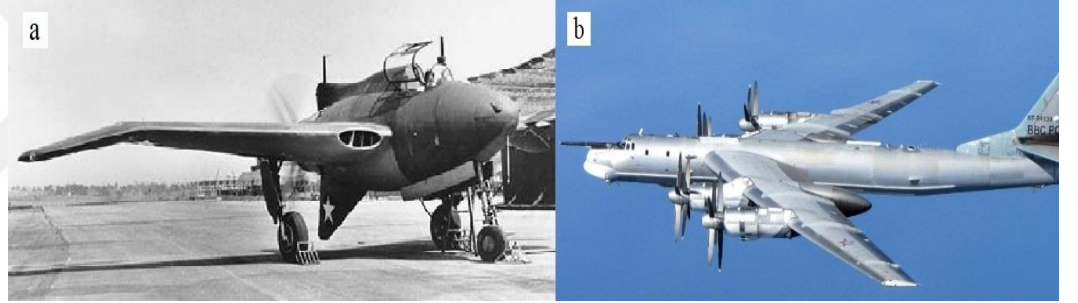


Şekil 2.7 a) Rolls-Royce firmasına ait magnezyum döküm gösterge paneli b) Otomobil iç kapı çerçevesi (Blawert et al., 2004) c) Direksiyon simidi (Luo, 2002) d) Magnezyum ve alüminyumdan imal edilmiş BMW 6 silindirli benzinli motor karteri (BMW Group, 2004)

2.1.5.2. Havacılık uygulamaları

Magnezyumun havacılıkta ilk uygulamaları I. ve II. Dünya Savaşları'nda savaş uçağı üretiminde kullanılmasıyla başlamıştır. Bu, magnezyumun sivil havacılık endüstrisinde popüler olmasını ve havacılık uygulamalarına girmesini sağlamıştır (Mordike and Ebert, 2001). Magnezyumun havacılık endüstrisindeki popüleritesinin ana nedeni, kullanımının önemli ekonomik ve çevresel faydaların yanı sıra, diğer yaygın geleneksel metal malzemelerle karşılaştırıldığında havacılık uygulamalarında ona üstünlük sağlayan mükemmel dökülebilirlik, işlenebilirlik ve süneklik sağlamasıdır. Daha da önemlisi, ağır metaller yerine magnezyum gibi daha hafif metallerin kullanılması, uçakların yakıt verimliliğini artırarak emisyonları azaltmaktadır (Tan and Ramakrishna, 2021). Ancak; Northrop XP-56, Lockheed F-80, Convair B-36 ve Convair XC 99 gibi askeri uçaklarla yapılan havacılık testleri yoluyla magnezyumun doğal sınırlamaları ve önemli yönleri belirlenmiştir. Keşfedilen yanıcılık, yüzey dayanıklılığı ve korozyon direncinin sonuçları, havacılık endüstrisinde magnezyumun sınırlandırılmasına yol açmıştır. Kısıtlamaların getirilmesinden bu yana kaydedilen önemli ilerlemelere rağmen

magnezyum, uçak yapısal uygulamaları yerine hâlâ motorlar ve dişli kutuları ile ilgili dökümlerde ve iniş takımlarında kullanılmaktadır. Bu aynı zamanda helikopterler için de geçerlidir (Gialanella and Malandrucolo, 2020). Ancak yeni malzeme ve üretim teknolojileri geliştirilmesi gibi araştırmaların yanı sıra magnezyum üzerine yapılacak araştırmalar da yakın gelecekte bu durumu değiştirebilme potansiyeli taşımaktadır. Böylece dezavantajlarının ortadan kaldırılması, magnezyumun havacılık sektörü için daha uygun hale getirilmesini sağlayacaktır. Örneğin magnezyumun yanıcılık ve tutuşma özelliklerini baskılama özelliği nedeniyle yolcu uçaklarında kullanılan koltuk çerçeveleri, gerekli standartlar karşılanıp onaylanarak 2015 yılında kullanılmaya başlanan magnezyumdan yapılabilmektedir (Czerwinski, 2014). Şekil 2.8 o dönemde yaygın olan savaş uçaklarını ve bunların üretiminde magnezyum kullanımını göstermektedir.



Şekil 2.8 a) Magnezyum kullanılarak tasarlanmış ilk uçak -Northrop XP-56 (Friedrich and Mordike, 2006), b) 1550 kg Mg içeren TU-95MS bombardıman uçağı (Ostrovsky and Henn, 2007)

2.1.5.3. Biyomalzeme uygulamaları

Bir biyomateryal olarak magnezyum, özellikle geçici implantlar alanında büyük ilgi görmektedir. Bu ilginin kökeni magnezyumun özel teknik özelliklerinde ve insan vücudu üzerindeki etkilerinde yatmaktadır. Magnezyum elementi insan vücudunda en fazla yer alan ikinci hücre içi katyondur. Proteinlerin, nükleik asitlerin ve hücre zarlarının yapılarını stabilize etmenin yanı sıra proteinlerin, enzimlerin ve ribozimlerin spesifik katalitik ve yapısal aktivitelerinin desteklenmesinin yanında insan vücudunun fizyolojik fonksiyonlarını destekler. Magnezyum elementi 300'den fazla biyokimyasal reaksiyon için gerekli elementtir. Ayrıca magnezyum elementi toksik değildir, tahriş etmez ve bununla birlikte doku

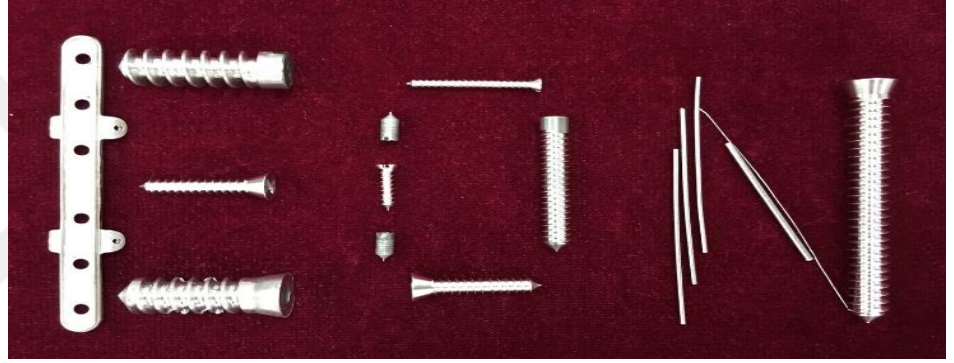
iyileşmesini de destekler. İdrar veya dışkı yoluyla insan vücudundan kolaylıkla elimine edilebilir (Zhao et al., 2017). Magnezyum biyolojik olarak parçalanabilirlik ve emilim açısından da mükemmeldir (Banerjee et al., 2019).

Çoğu durumda, vücut dokularının yenilenmesine veya bozulmuş vücut fonksiyonlarının onarılmasına yardımcı olmak için implantların veya cihazların vücuda geçici olarak yerleştirilmesi gerekir. Geçici implant olarak kullanım düşünüldüğünde biyolojik olarak parçalanabilirlik önemlidir. İdeal olarak implant biyolojik olarak parçalanabilir olmalı ve doku tamamen iyileştiğinde kaybolmalıdır. Ayrıca biyolojik bozunma sürecinin insan vücudunda herhangi olumsuz bir etki yaratmadan gerçekleşmesi de gerekmektedir (Kamrani and Fleck, 2019). Biyolojik olarak inert olan paslanmaz çelik, kobalt-krom alaşımları ve titanyum alaşımları gibi geleneksel metalik implantların aksine, magnezyum biyolojik olarak parçalanabilir ve yeniden emilebilir. Bu, iyileşme sonrasında implantın çıkarılması için ameliyat ihtiyacını ortadan kaldırır ve magnezyumun biyomateryal uygulamalarında çok değerli olmasını sağlar (Banerjee et al., 2019). Ek olarak magnezyum, insan kemiğinkine çok benzeyen bir Young modülüne sahiptir (Dvorský et al., 2021).

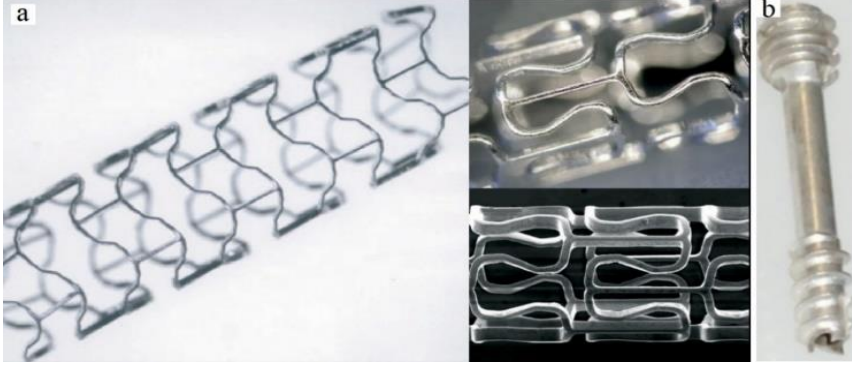
Ancak magnezyumun büyük korozyon sorunları vardır. Dejenerasyon oranı o kadar yüksektir ki, yüksek hidrojen üretimi nedeniyle hastalar tıbbi komplikasyonlar yaşayabilme ihtimalleri bulunmaktadır. Aynı zamanda implant üzerindeki eşit olmayan korozyon, implantın mekanik özelliklerinde önemli değişikliklere yol açabilmektedir. Farklı implant malzemelerinin ve doğal insan kemiğinin özelliklerinin karşılaştırılması Tablo 2.6'da sunulmaktadır. Magnezyumun bazı tıbbi uygulamaları Şekil 2.9 ve 2.10'da gösterilmektedir.

Tablo 2.6 Çeşitli implant materyallerinin ve doğal kemiğin mekanik özelliklerinin içeriği ve karşılaştırılması (Staiger et al., 2006; Wang et al., 2012)

Özellikler	İnsan Kortikal Kemiği	Magnezyum	Ti Alaşım	Co-Cr Alaşım	Paslanmaz Çelik 316L	Hidroksiapatit
Görünür Yoğunluk (g/cm^3)	1,8 - 2,1	1,74 - 1,84	4,4 - 4,5	8,3 - 9,2	7,9 - 8,1	3,1
Young Modülü (GPa)	3 - 20	41 - 45	110 - 117	230	189 - 205	73 - 117
Akma Dayanımı (MPa)	130 - 180	65 - 100	758-1117	450-1000	170 - 310	600
Kırılma Tokluğu ($\text{MPa m}^{1/2}$)	3 - 6	15 - 40	55 - 115	-	50-200	0,7



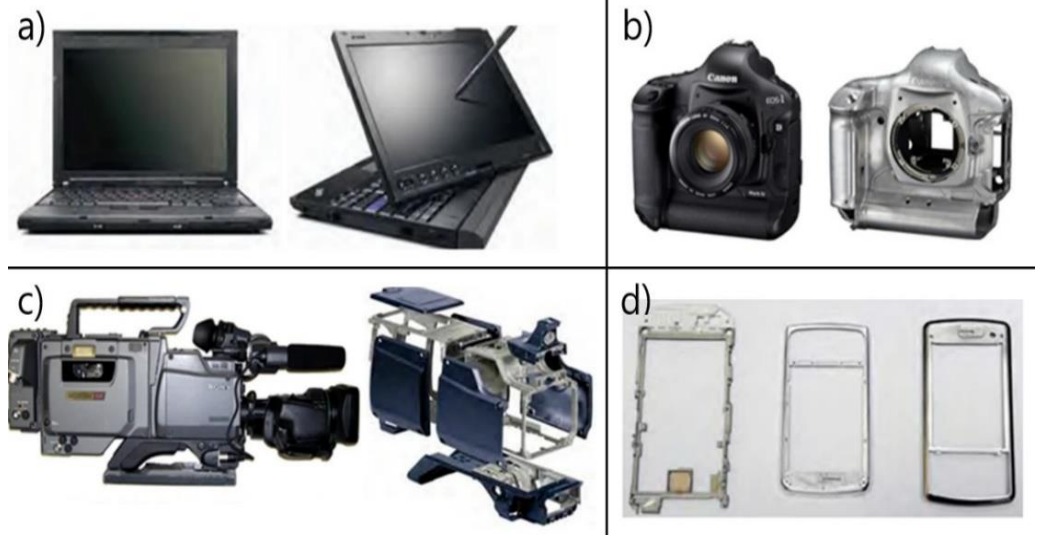
Şekil 2.9 Ortopedik kullanım için Mg bazlı implantların görüntüsü (Zhao et al., 2017)



Şekil 2.10 a) Mg alaşımdan imal edilmiş stent (Erbel et al., 2017), b) Mg alaşımdan imal edilmiş sıkıştırma vidası (Windhagen et al., 2013)

2.1.5.4. Elektronik uygulamaları

Günümüzün elektronik pazarına küçük, taşınabilir cihazlar hakimdir. Magnezyum kompakt, taşınması kolay ekipman ihtiyacını karşılayan önemli bir elementtir. Özellikle elektronik devrelerin ürettiği ısıyı dağıtmak için cihazlarda plastik yerine magnezyum alaşımları kullanılması popülerdir. Ek olarak, plastiğin yerine kullanılan birçok magnezyum alaşımı görece daha hafiftir. Bununla beraber çok daha dayanıklıdır. Magnezyum yalnızca ısının iletilmesi ve dağıtılmasında etkili olmakla kalmaz, aynı zamanda elektromanyetik girişime (EMI) ve radyo frekansı girişimine direnme etkisine de sahiptir. Birçok elektronik cihaz, magnezyumdan yapılmış karmaşık şekilli koruyucu parçalara ihtiyaç duymaktadır. Sabit diskler, kameralar, mobil telefonlar, televizyon ve bilgilendirme ekranları, dizüstü bilgisayarlar ve taşınabilir multimedya cihaz kasaları yaygın uygulama alanlarıdır (Monteiro, 2014).



Şekil 2.11 a) Ağırlığın azaltılması için Mg alaşımları barındıran Lenovo X201 Laptop, b) Dayanımın artması amacıyla gövdesinde plastik yerine Mg alaşımı kullanılan Canon EOS- 1D Mark IV kamera, c) Sony VP 550 video kameranın Mg alaşımlarından imal edilmiş parçaları, d) LG mobil parçası

2.2. Mekanik Öğütme ve Mekanik Alaşımlama

Malzeme alanında yapılan araştırmalar genellikle malzemelerin performansını ve özelliklerini iyileştirmeye odaklanır. Kimyasal, termal, mekanik ve termomekanik modifikasyonlar yoluyla malzemenin kimyasal, mekanik ve fiziksel özelliklerinde istenilen ayarlamalar yapılabilir. Tüm bu yöntemlerin ana temalarından biri de malzemelerin üretimi ve işlenmesi ile enerjinin malzemeye aktarımının dengeli olmamasıdır. Hedef malzemeye enerji aktarımı eritme, buharlaşma, basınç veya plastik deformasyon yoluyla sağlanabilmektedir. Bu uygulamalar malzemeyi kararsız hale getirebilir. Bu durumda işlenmiş ürün, geleneksel yöntemlerle üretilen malzemelere kıyasla da üstün fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklere sahiptir. Mekanik alaşımlama ve mekanik öğütme yöntemleri, malzemelerin dengeden uzak işlenmesine olanak sağlamaktadır (Murty and Ranganathan, 1998).

2.2.1. Tarihsel perspektif

1960'larda John Benjamin, International Nickel Company (INCO) araştırma laboratuvarında gaz türbini uygulamalarında kullanılmak üzere nikel bazlı süper

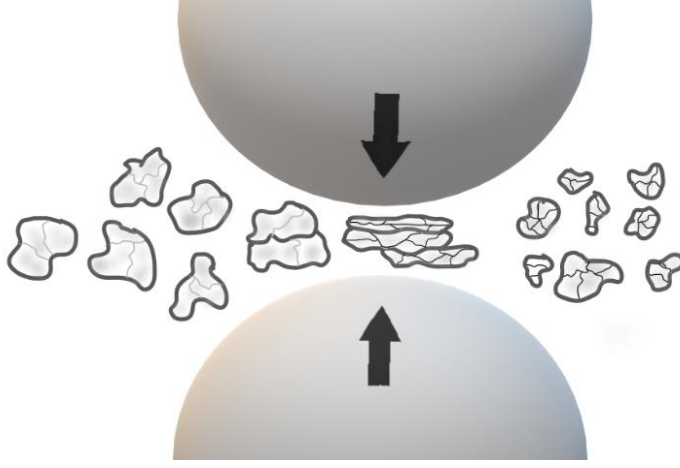
alaşımlar üretmek için oksit dispersiyon güçlendirmesini kullanan bir malzeme geliştirme programı geliştirmiştir. İşleme adımlarında mekanik alaşımlama adı verilen süreç tanıtılmıştır. Mekanik alaşım terimini kullanan ilk patent ise Amerika Birleşik Devletleri'ndeki INCO şirketine ait Ewan MacQueen'e aittir (El-Eskandarany, 2015). Bu proste oda sıcaklığına kadar düşük sıcaklıklarda stabil veya kararsız ürünlerin üretilebildiği tespit edilmiştir. Yöntemin geliştirilmesinin ardından 15-20 yıl boyunca araştırmacıların üzerinde bolca çalıştığı bir konu haline gelmiştir. 1980'li yıllarda mekanik alaşımlama yoluyla kararlı veya yarı kararlı kristal, amorf ve çok fazlı fazlar elde etmek için araştırmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmaların sonuçlarına göre hedef malzemenin gerekli sıcaklıkta mekanik olarak aktive edilebildiği anlaşılmaktadır. Mekanik alaşımlama işlemlerinin geliştirilmesi, araştırılması ve uygulanması günümüze kadar devam etmektedir (Suryanarayana, 2004a2).

2.2.2. Mekanik alaşımlama ve mekanik öğütme işlemi

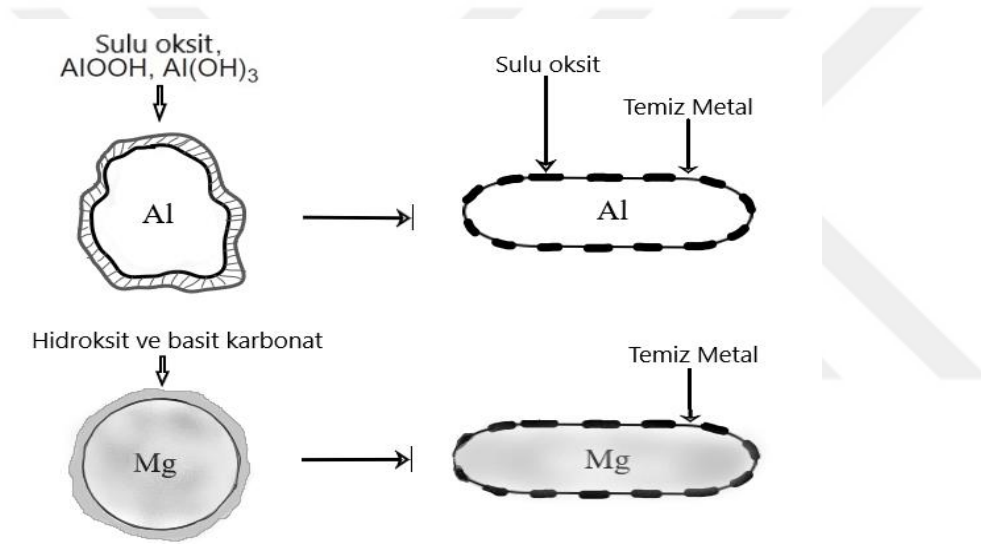
Mekanik öğütme (ME) ve mekanik alaşımlama (MA) sırasında toz partikülleri çeşitli işlem döngülerine tabi tutulur. Bunlar; bilye çarpışmaları sonucu düzleşme, soğuk kaynak, partiküllerin kırılması ve yeniden kaynak olmasıdır (Niekov, 2009). Proste kullanılan bilyalar çarpıştığında, bilyaların arasında az miktarda kırılmış/alaşımlı toz kalır ve çarpışmaya maruz kalır. Çarpışma sırasında bilye, yaklaşık 0,2 miligram ağırlığında yaklaşık 1000 toz parçacığını yakalar. Toz parçacıklarının çarpışmasıyla emilen şok, bunların plastik deformasyonuna neden olur. Bahsi geçen bu deformasyon, parçacıkların deformasyona bağlı olarak sertleşmesine ve sürekli çarpışmalar sonucu kırılmasına neden olmaktadır. İşlem sırasında tek bir çarpışmanın toz parçacıkları üzerindeki etkisi Şekil 2.12'de gösterilmektedir. Kırılma sonucunda, toz parçacıklarının boyutunu azaltır ve yüzey alanı/hacim oranını artırır. Toz parçacıklarının tahribatı ve plastik deformasyonu yeni yüzeyler oluşturur, ancak aynı zamanda mevcut oksit katmanlarını, emilen gazların ve kirliliğin oluşturduğu katmanları da yok eder. Yani yüzey filmi çatlar ve parçacıklar atomik düzeyde temiz hale gelir (Şekil 2.13). Bu, daha aktif toz parçacıklarının elde edildiği anlamına gelir (Benjamin and Schelleng, 1981; Suryanarayana, 2019). Ortaya çıkan aktifleştirilmiş toz parçacıkları kolayca yeniden birleşerek döngüyü sürdürür. Kaynak ve kırılma mekanizmalarının

tekrarlanmasıyla toz haline getirilmiş tozun iç yapısı değişir ve düzgün bir şekilde dağılır. Toz haline getirme ve kaynaklama her tekrarlandığında plastik deformasyon artar ve bu da daha ince parçacık yapısına neden olur. Bu, noktasal kusurları, boşluk kusurları, dislokasyonlar ve kafes kusurları oluşturur, kristal yapıyı tamamen ortadan kaldırır ve amorf bir malzeme sentezler. Ayrıca aktif toz parçacıkları kolaylıkla yeniden bir oksidasyon tabakası oluşturabilir veya hızla kirlenebilir. Bu nedenle proses sırasında koruyucu atmosfer olarak inert bir gazın kullanılması gerekli olabilir (Soni, 2000; Suryanarayana and Aqeeli, 2013).



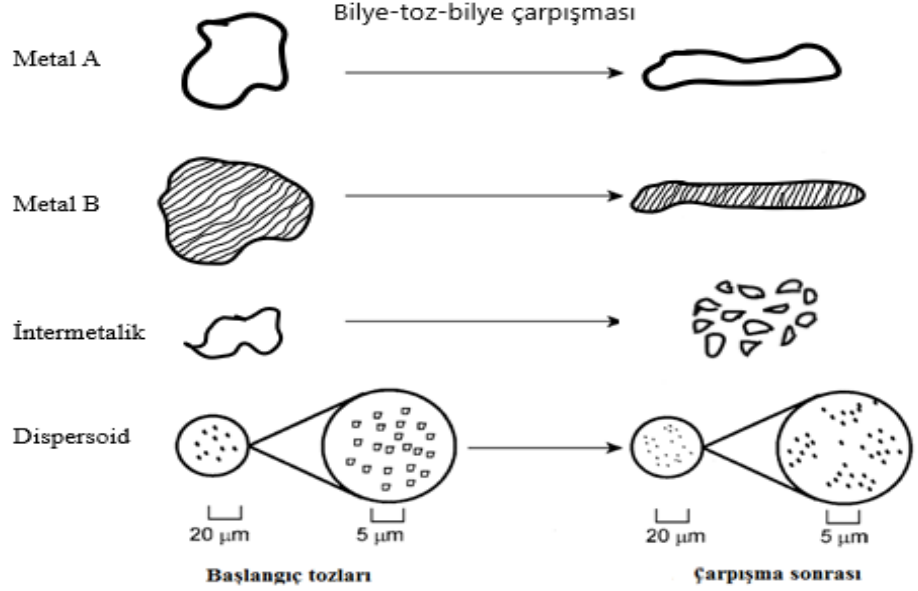


Şekil 2.12 Bilye çarpışması sırasında arada kalan toz partikülleri değişiminin şematik gösterimi



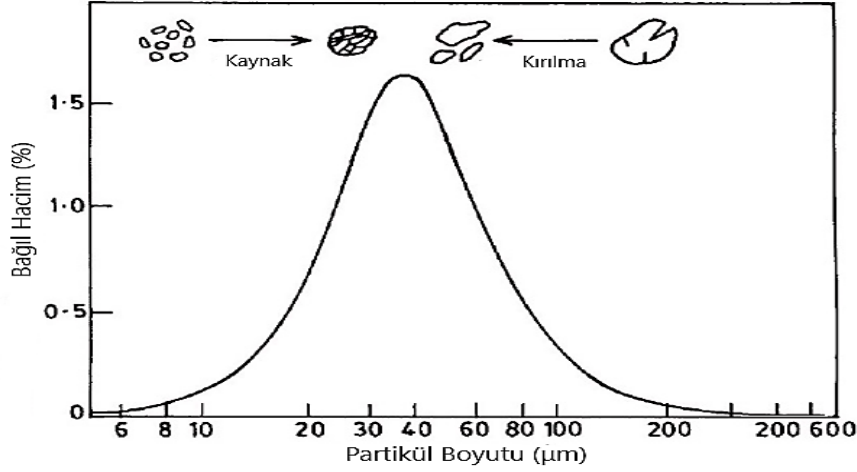
Şekil 2.13 Mekanik alaşımlama/ mekanik öğütme esnasında plastik deformasyon sonucu tozlar üzerinde yüzey kirletici tabakaların yırtılması (Benjamin and Schelleng, 1981)

MA ve MÖ işlemlerinde oluşan fiziksel etkiler ve değişiklikler Şekil 2.14'te gösterilmektedir. Sünek metal tozları bilye darbesinden sonra deforme olma ve düzleşme eğilimindeyken, metaller arası bileşikler ve dispersoidler gibi daha kırılgan fazlar çok sayıda küçük parçaya ayrılma eğilimindedir.



Şekil 2.14 MÖ ve MA'da toz bileşimlerin deformasyon özelliklerinin gösterilmesi
(Suryanarayana, 2001)

Öğütme işleminin başlangıç aşamasında metal tozları çok yumuşaktır ve birbirleriyle daha büyük parçacıklar oluşturmaya çalışırlar. İşleme sırasında farklı parçacık boyutları oluşabilir ve malzemeye bağlı olarak işlemde önceki parçacık çapından iki kat daha büyük olma ihtimali vardır. Bunun nedeni, görece daha küçük parçacıkların, daha büyük parçacıklara kaynak olma eğiliminde olmasıdır. Süreç ilerledikçe parçacıklar sertleşerek kırılmadan deformasyona direnme yeteneklerini kaybederler. Ek olarak, daha büyük parçacıkların bilye darbesiyle parçalanma olasılığı daha yüksektir. Bir süre sonra kaynaklanma ve kırılma eğilimleri sabitlenir ve parçacık boyutu dar bir ölçekte sabit kalır (Şekil 2.15). Bu sayede öğütme işleminden sonra istenilen büyüklükte toz elde edilmesi mümkün olur.



Şekil 2.15 Öğütme işleminde kaynak ve kırılma dengesi grafiği (Soni, 2000)

Bilye ve öğütme kabındaki demir içeriğinin işlem sırasında tozu kirletmesi ihtimali oldukça düşüktür. Bunun temel nedeni, kırma işlemi başladıktan hemen sonra bilye ve kabın yüzeyinin kırılmış tozla kaplanmasıdır. Ortaya çıkan kaplama sürekli olarak pul pul dökülür, parçalanır ve yeniden birleşir. Koruyucu film görevi üstlenir ve yabancı maddeleri giderir (Soni, 2000).

2.2.3. Mekanik öğütmenin etkileri

Mekanik öğütmenin/alaşımlamanın etkileri üç ana kategoriye ayrılabilir; yapısal değişiklikler, mikroyapısal değişiklikler, mekanik aktivasyondur. Mekanik öğütme sırasındaki yapısal değişiklikler tipik olarak parçacık boyutunun küçültülmesi ve toz boyunca homojen dağılımdır. Diğer yöntemleri kullanarak bunu başarmak zordur. Bu sayede kompozit malzemelerden ve geleneksel alaşımlardan önemli ölçüde farklı, mükemmel özelliklere sahip ürünler elde edilebilmektedir. Mekanik alaşımlamanın neden olduğu yapısal değişiklikler, öğütme koşullarına ve öğütülen malzemeye bağlı olarak aşırı doymuş katı çözeltilerin, intermetalik fazların (denge yarı kararlı veya yarı kristal) ve amorf fazların oluşmasıdır. Mekanik aktivasyon, fizyokimyasal bir değişime neden olan bir parçacık tarafından emilen darbe enerjisi olarak tanımlanabilir. Toz parçacıklarının maruz kaldığı çarpışma enerjisi, düzensiz ve kararsız kafes yapıları oluşturularak biriktirilir. Ayrıca kırılma ve kaynak çevrimi Gibbs serbest enerjisini arttırırken aktivasyon enerjisini azaltır. Bu, nihai ürünlerdeki düzensiz mikro yapıda

kusurlar ve yarı kararlı fazlar oluşturmaktadır (Suryanarayana., 2019; Shuai et al., 2021).

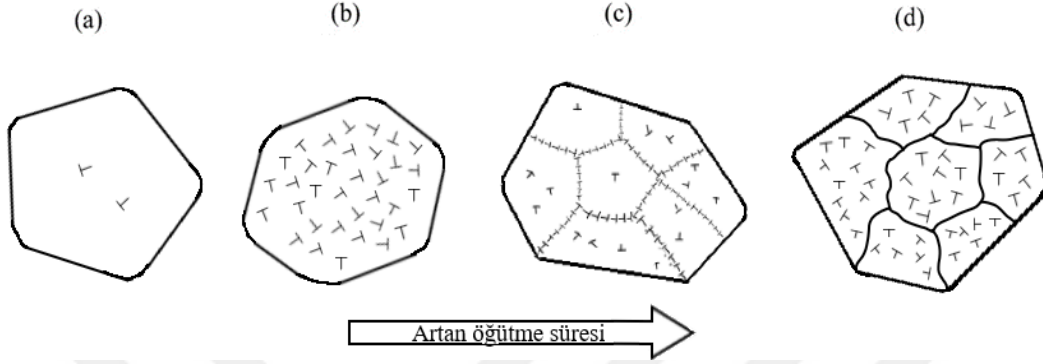
MÖ ve MA, toz partiküllerinin yüksek enerjili öğütme ortamında çarpışma sonucu tekrar tekrar deforme olduğu, kırıldığı ve kaynaklandığı işlemler olarak tanımlanmaktadır. Öğütmedeki değişiklikler genellikle proses hedeflerine, kinetik dönüşüm etkilerine ve hammaddelere bağlı olarak gerçekleştirilir (Zoz et al., 1999). Öğütme araçlarından toza kinetik enerji aktarımının ana sürecini, öğütme ortamında meydana gelen çarpışmalar oluşturmaktadır.

2.2.4. Nanokristal yapı

Nanokristal alaşımlar, partikül boyutları 1 - 100 nm arasında değişen tek veya çok fazlı malzemelerdir. Ayrıca çok küçük parçacık boyutları nedeniyle aynı zamanda yüksek oranda ara yüzey bileşenine de sahiptirler (Kalidindi and Schuh, 2017). Nanokristaller için boyut sınırı 100 nm'dir çünkü 100 nm boyut sınırının ötesinde fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri büyük ölçüde değişir. Ancak birçok çalışma bu değişikliklerin daha büyük veya daha küçük nanokristallerde de meydana gelebileceğini göstermiştir.

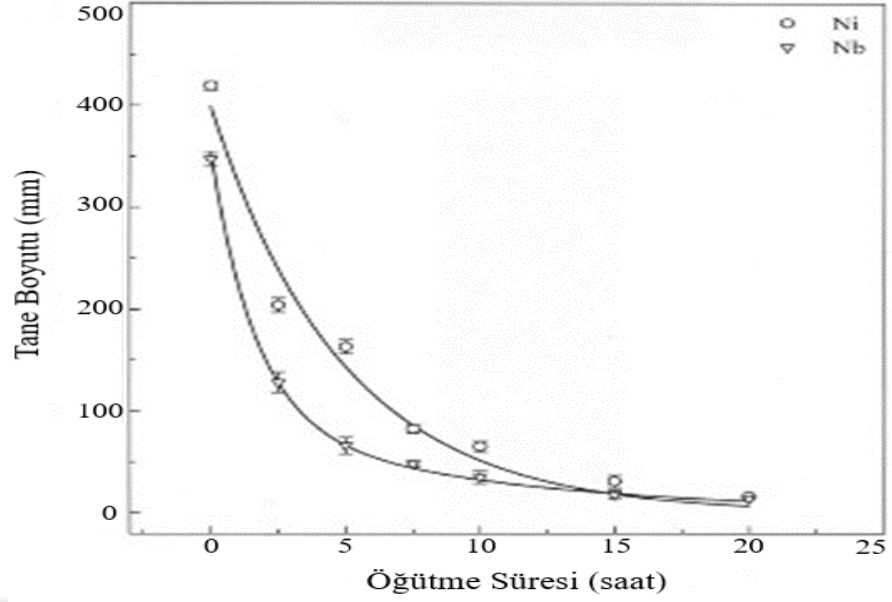
Nanokristal malzemeler, tanelerin iç kısmına kıyasla tane sınırlarında önemli miktarda atom içerir. Tane boyutu 10 μm olan geleneksel bir polikristal malzemede, tane sınırındaki atomların toplam hacme oranı yaklaşık 10^{-4} 'tür. Tane boyutu 10 nm'nin altına düştüğünde, tane sınırı yoğunluğu 10^{18} cm^{-3} ila 10^{21} cm^{-3} aralığına yükselir. Bu, tüm atomların yarısının tane sınırlarında bulunduğunu gösterir. Sonuç olarak nanokristallerin tane sınır yapısı ve özellikleri malzeme özelliklerini doğrudan etkilemektedir (Enayati ve Mohamed, 2014; Hou et al., 2014). Gerilme alanının dislokasyon yoğunluğu bir eşiği aştığında, taneler küçük açılı tane sınırlarıyla ayrılmış alt tanelere bölünür. Daha fazla öğütme, önceden gerilmemiş bölgelerdeki kayma bantlarını deforme edebilir, bu da kayma bantlarının birleşmesine ve tanenin daha da incelmesine neden olabilir. Öte yandan alt taneler arasındaki göreceli yönelim tamamen rastgeledir. Tam bir nanokristal yapı elde edildiğinde, nanokristaller nispeten az dislokasyona sahiptir ve bu nedenle tane sınırı yer değiştirmeleri daha fazla deformasyon ve enerji depolaması sağlayarak alt

tanelerin değişimine neden olur. Bu durumda, dislokasyon sayısı ve oryantasyon farkı büyür, çok yüksek arayüzey serbest enerji oranına sahip yarı kararlı bir duruma neden olur (Shuai et al., 2021). Bilyeli öğütme sırasında tek bir tanede nanokristal yapının evriminin şematik diyagramı Şekil 2.18’de gösterilmiştir.



Şekil 2.16 Nano kristal oluşumunun şematiği: a) düşük dislokasyon yoğunluğuna sahip esas tane, b) tanenin ağır plastik deformasyonu ile üretilen yüksek dislokasyon yoğunluğu oluşumu, c) dislokasyonlarının hizalanması, d) geniş açılı tane sınırı dönüşümü ile yeni alt taneler (Enayati and Mohamed, 2014)

Tozun nanometre aralığına kadar inceltilmesi, öğütme sırasındaki plastik deformasyonla kontrol edilir. Öğütülmüş malzeme mekanik öğütme işleminde yüksek gerinim oranlarına maruz kaldığında tane ve tane boyutunda incelmeye yol açar ve kayma bantlarında yüksek yoğunlukta dislokasyonlar oluşmaktadır (Khajesarvi and Akbari, 2016). Genel olarak tane boyutu, mümkün olan en küçük boyuta ulaşılan kadar öğütme süresiyle birlikte sürekli olarak azalır. Öğütme süresi ile tane büyüklüğü arasındaki ilişki Şekil 2.19’da gösterilmektedir (Enayati and Mohamed, 2014).



Şekil 2.17 Öğütme süresi ile Ni ve Nb'nin tane boyutu değişimleri (Enayati and Mohamed, 2014)

Amram ve Schuh (2018) tarafından yapılan bir çalışmada, bilyeli öğütülmüş alaşımların termal stabilitesinin niceliksel bir çalışmasını sağlamak için Fe ve Mg tozları kullanılarak mekanik alaşımlama yapılmıştır. Sonuçlar, 15 saatlik öğütme ardından parçacık boyutunun 5 ila 15 nm'ye ulaştığını göstermiştir. Çalışmada Fe-Mg nanokristalleri katı bir çözelti olarak kabul edilmiştir. 600 °C'de tavlamanın ardından 15 nm MgO nanopartikülleri tespit edilmiştir. MgO parçacıklarının daha yakından incelenmesi, parçacıkların tek kristalli ve yönlendirilmiş olduğunu ortaya koymaktadır.

2.3. FAST Sinterleme (Alan destekli sinterleme tekniği)

Elektrik alan sinterleme tekniği (FAST), esasen direkt elektrik akımını işlemlerin ana unsuru olarak kullanan bir sinterleme tekniğidir. Spark plazma sinterleme (SPS), akımla aktive edilen basınç yardımlı yoğunlaştırma (CAPAD) ve darbeli elektrik akım sinterleme (PECS) gibi birçok farklı uygulaması mevcuttur. İsimleri farklılık gösterse de sinterleme temel olarak basınç uygulanarak ve büyük bir akım geçirilerek gerçekleştirilir. Adı ne olursa olsun bu yöntemlerde plazmanın kullanılıp kullanılmadığı hala tartışılmaktadır (Garay, 2010; Munir et al., 2011).

Sinterleme işleminin temel yaklaşımı toza enerji verilerek katı bir numune elde etmektir. Hemen hemen tüm sinterleme işlemlerinde tozlar kabaca karıştırılır, şekillendirilir, sinterlenir ve bazen son ürünü oluşturmak için sinterleme sonrası işlemlere tabi tutulur. Son zamanlarda FAST yöntemi, prosesin verimliliği ve üretebildiği malzemelerin benzersizliği nedeniyle artan bir ilgi görmektedir. Elektrik akım etkisi ile basınç uygulanmadan veya sıcak presleme gibi geleneksel yöntemlerden çok daha hızlı ve düşük sıcaklıklarda tam yoğunluğa sahip malzemelerin üretimi gerçekleştirilebilir. Gubitza ve ark. (2009) çalışmasında ultra ince nikel tozu kullanılarak sıcak presleme ve SPS yöntemleri karşılaştırılmıştır. Yaklaşık %95 yoğunluğa sahip bir ürün elde etmek için sıcak pres 700°C'de 150 dakika gerektirirken, SPS işlemi 500°C'de 1 dakika gerektirdiğini tespit etmiştir. Ayrıca SPS yöntemi kullanılarak elde edilen numunelerin daha küçük tane boyutlarına ve daha yüksek akma dayanımına sahip olduğu rapor edilmiştir.

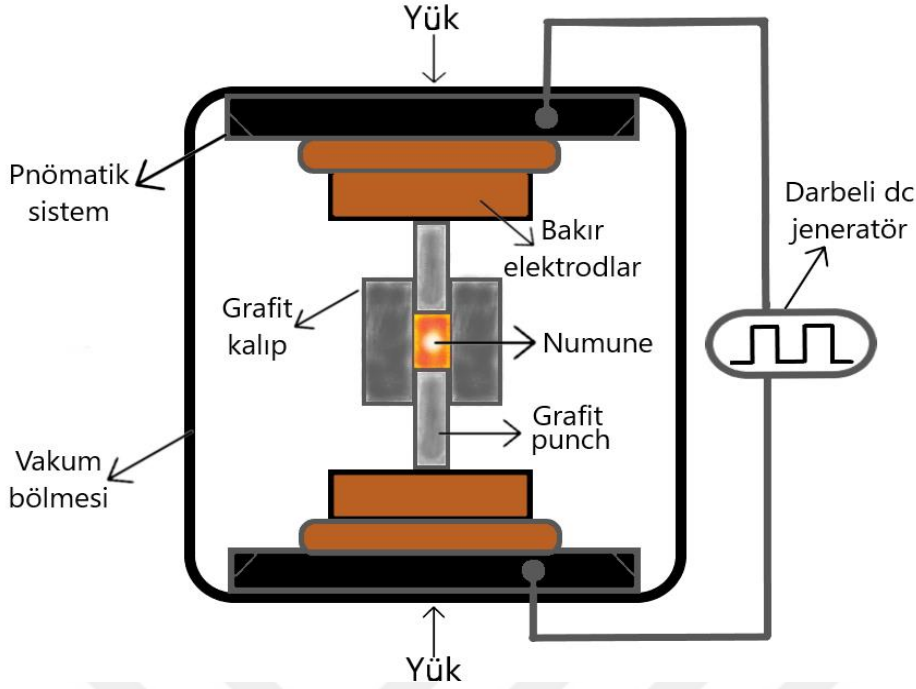
Elektrik alan destekli sinterleme (FAST), öncelikle basınç destekli düşük voltaj ve doğru akımı (DC) kullanan bir teknolojidir. Çok yüksek kısa devre akımı ve bunun yarattığı yüksek ısı sayesinde bu işlem, diğer sinterleme işlemlerine kıyasla önemli ölçüde kısa sürede ve çok daha düşük sıcaklıklarda (kalıp ısısı - Joule heating) kısa bir zamanda yüksek yoğunlukta ürün üretebilir. Mekanik öğütme gibi işlemlerle değiştirilen toz özellikleri, sinterleme işleminden sonra da korunur. Bunun temel sebebi FAST, yüksek kısa devre akımının çok yüksek hızlarda ısıtma ve soğutma yeteneğidir. Bu işlemde, toz doğrudan ısıtılır ve parçacık büyümesine neden olacak şekilde yoğunluğu artırılır. Enerji dağılımı mikroskobik olarak yalnızca toz parçacıklarının hacminde değil, aynı zamanda toz parçacıklarının enerji gerektiren temas noktalarında da meydana gelir ve böylece parçacık büyümesini azaltır ve toz bileşiminin bozulmasını önler (Kang, 2004; Suárez et al., 2013). FAST aynı zamanda geleneksel yöntemlerle üretilmesi zor olan nanoyapılı malzemeler, fonksiyonel malzemeler ve kompozitler gibi malzemelerin üretilmesinde kullanılabilecek yeni ve yenilikçi bir sinterleme teknolojisidir.

2.3.1. Tarihsel perspektif

Mezopotamya'nın eski uygarlıklarının uyguladığı kilden tuğla ve alet yapımı, sinterlemenin en eski örneği olarak kabul edilir. Bu uygulamanın tarihinin M.Ö. 6000 yıllarına kadar gittiği düşünülmektedir. M.Ö. 3000'li yıllarda metal ve seramik malzemelerin Mısırlılar tarafından sinterlendiği keşfedilmiştir (Munir et al., 2006). Sinterlemenin katı hal bilimi olarak kullanımı ilk olarak 20. yüzyılda ampuller için filament üretiminde gerçekleşmiştir. İlk sinterlemenin ardından 1910'dan 1940'lara kadar alınan patentler, dirençli sinterleme adı verilen sürecin gelişmesinde önemli adımlar olmuştur. Dirençli sinterleme, akımın darbeleri olmaması dışında birçok yönden FAST sinterlemeye benzemektedir (Munir and Ohyanagi, 2021). Dirençli sinterleme işlemi belli bir seviyeye ulaştığında, bu işlemin hakları Lockheed Missile and Space Corporation tarafından alındı ve süreç geliştirilerek "spark sintering" olarak anılmaya başlandı. Örneğin, SPS sinterlemede titanyum ve alaşımlarının kullanımı üzerine şirket tarafından yürütülen araştırma, bu yöntemin mevcut geleneksel yöntemlere göre avantajlarının yaygın olarak tanınmasına yol açmıştır (Goetzel and Marchi, 1971). Bu yöntemin geliştirilmesi ve keşfedilmesi sonucunda laboratuvarlarda ve endüstride kullanıma yönelik ekipmanların geliştirilmesi tüm dünyaya yayılmaya başlamıştır.

2.3.2. Çalışma prensibi

FAST kontrol edilebilir bir atmosfer ortamına yerleştirilmiş elektrik devresi ile birlikte hareketli bir yükleme mekanizmasından oluşur. FAST işleminde mekanik bir yükleme mekanizması sinterlenen malzemeye basınç uygular. Daha sonra numuneye suyla soğutulan bir metal elektrot aracılığıyla sabit miktarda elektrik akımı uygulanır. Sistem genel olarak vakum odası, atmosfer kontrol mekanizması, DC pulse üretici, soğutma suyu kontrol ünitesi ve sıcaklık ölçüm ünitesi gibi ünitelerden oluşur (Şekil 2.18). Uygulanan akım sinterleme için gerekli ısıyı üretir. Bu işlem ile sıcak pres sinterleme arasındaki fark, yüksek ısıtma hızı ve kütle transfer mekanizmasının yanı sıra elektrik akımının sağladığı termal olmayan etkilerde yatmaktadır. Bu etkiler "Mekanizmalar" bölümünde tartışılmaktadır.



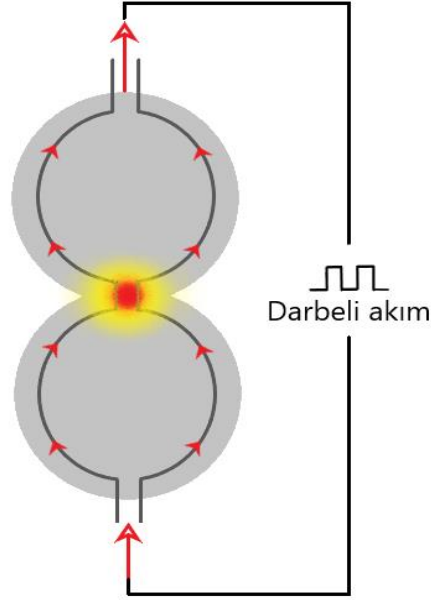
Şekil 2.18 FAST prensibinin şematik gösterimi

FAST uygulamaları genellikle düşük voltajlar (tipik olarak 10 V'tan az) ve yüksek akımlar (1000-10000 A) kullanır. Uygulanan akım darbeler halinde malzemeye aktarıldığı için sinterleme tesislerinde belirli bekleme süreleri ve özel darbe modları gerekebilmektedir. Darbeler genellikle birkaç milisaniye arayla uygulanır. İşlem, dakikada 1000 °C'ye varan yüksek ısıtma hızları sunarak kısa sürede maliyetleri düşürür ve düşük enerji tüketimi sağlar. Soğutma, elektrotlara takılan su soğutma sistemi ile sağlanır. İlave soğutma için gaz akışı kullanılarak soğutma hızları artırılabilir ve sistem soğutma hızları dakikada 400°C'ye çıkarılabilir. Proses döngüleri genellikle sıcaklığa bağlı olarak gerçekleştirilir. Yüksek soğutma hızlarına ulaşmanın yanı sıra, uygulanan tek eksenli basınç (250.000 N'a kadar ulaşabilen) yoğunlaşmayı artırır ve işlem sürelerini azaltır. Tozla doldurulan kalıplar genellikle grafiten yapılmaktadır. Grafit yüksek sıcaklıklarda mekanik özelliklerini korur. Bununla birlikte iyi elektrik ve ısı iletkenliği özellikleri bulunmaktadır. Bu sayede 2400 °C'ye kadar sıcaklıklarda sinterleme gerçekleştirilebilmektedir (Munir et al., 2011, Guillon et al., 2014; Lange, 2021).

Elektrik akımı karşılaştığı en az dirençli yolu izler. Toz, kalıp içinde rastgele bir şekilde biriktirildiğinden FAST yöntemindeki akım yolu iletken parçacıkların

yüzeyi boyunca karmaşık ve belirsiz bir ağ oluşturur (Kessel et al., 2008). Bu durum elektriksel etkiler bölümünde detaylı olarak incelenecektir. İletken tozlarda Joule etkisinden dolayı sıcaklık artar. Joule ısınması bir dirençten geçen akımdan kaynaklanır. Akım yolunun en yüksek direnci parçacıklar arasındaki temas yüzeyleri tarafından oluşturulur ve yaklaşık olarak nokta benzeri olabilir. Bu bölgelerde yoğunlaşma meydana geldiğinde gözenekler kapanır ve temas yüzeyi genişler, bu da zamanla direncin azalmasına neden olur (Chawake et al., 2014). Bu konu "Termal Etkiler" bölümünde detaylı olarak incelenecektir.

Toz partiküllerinin dizilimleri ve şekilleri, partiküllerin birbirleri ile çok küçük bir alanda temas etmeleri anlamına gelir. Bu küçük temas noktaları, Şekil 2.19'da gösterildiği gibi aşırı ısınmaya ve bölgesel erimeye neden olan yüksek direnç oluşturur. Temas noktasında üretilen yüksek sıcaklıklar, toz kompaktın ortalama sıcaklığından önemli ölçüde daha yüksek olabilir; bu, önemli sayıda farklı mikro yapısal mekanizmaların meydana gelebileceği anlamına gelir. Konsantrasyon, mevcut ağlarda ve bunların etrafındaki alanlarda çok daha hızlı gerçekleşir. Bu durum zamanla mevcut ağın iletkenliğini arttırmaktadır (Kessel et al., 2008; Garay, 2010).



Şekil 2.19 FAST yönteminin ısıtma teorisinin prensibi

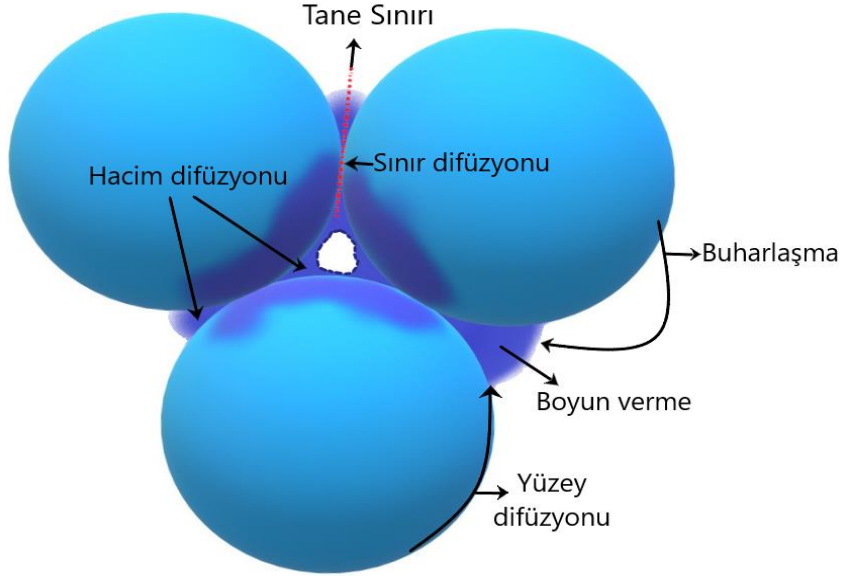
FAST sinterlemede sinterleme, kalıbın ve işlenen malzemenin iletkenliğine bağlı olarak elektrik akımının kalıptan, tozdan veya her ikisinden geçirilmesiyle gerçekleşir. Sinterleme için seçilen malzeme iletken değilse kalıp ve punchlar elektriksel dirençle ısınacak ve bu ısı numuneye aktarılacaktır. İletken malzemelerin seçilmesi ve yalıtım geometrilerinin kullanılmasıyla akım doğrudan tozun içine akar ve sinterleme verimliliği büyük ölçüde artar. Kalıp ve toz iletken ise, her iki elemandan da akım geçer ve sinterleme meydana gelir (Munir et al., 2011; Guillon et al., 2014).

2.3.2.1. Yoğunlaşma mekanizması

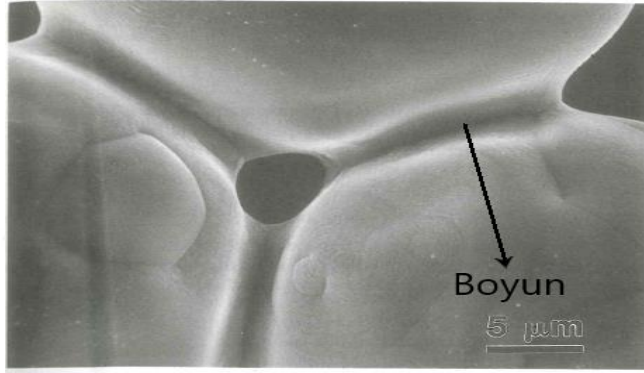
Geleneksel sinterlemede gözeneksiz malzemelerin teorik yoğunluğu %95 ila %98 arasındadır. Sinterleme sırasında gözeneksiz yapı oluşturabilmek için toz kompakttaki gözeneklerin giderilmesi gerekir. İki tür gözeneklilik vardır. Parçacık içi gözeneklilik ve parçacıklar arası gözeneklilik. Yoğunlaşma mekanizması, sinterlenen numunedeki gözenekleri ortadan kaldıran ana faktördür.

Gözenekliliğin giderilmesi ve dolayısıyla toz kompaktlarının yoğunluğunun artması üç mekanizma ile gerçekleştirilir. Bu; parçacık ve kristallerin yeniden düzenlenmesi, sinterleme, plastik deformasyondur. Sinterleme, yüzey alanının

azalması nedeniyle yoğunluğun artmasıdır ve bir malzemenin yüzey enerjisini azaltma eğilimi ile ilişkilidir. Kütle transferi, toz parçacıklarının sinterleme nedeniyle bir araya gelmesi sonucunda meydana gelir. Malzeme taşınırken parçacıklar arasında boyunlar oluşur. Şekil 2.20'de kütle aktarım mekanizması gösterilmektedir ve Şekil 2.21'de küresel parçacıkların temas noktasında oluşan boynun taramalı elektron mikroskobu görüntüsü gösterilmektedir. Şekil 2.20'de gösterilen buharlaşma ve yüzey difüzyonu, partiküller birbirine yaklaşırken hiçbir rol oynamaz ve dolayısıyla sıkışmaya tam olarak katkıda bulunmaz. Bunun yerine parçacıkların kabalaşmasına neden olur. Yüzey difüzyonunun görece daha düşük aktivasyon enerjisine sahip olması, onu düşük sıcaklıklarda tane sınırı veya toplu difüzyondan daha aktif hale getirir. Bu, toz kompaktın istenen sıcaklığa hızla ulaşmasını ve yoğunlaşmayı sağlarken, kabalaşmanın etkilerini en aza indirmesini sağlar. Özetle, toz parçacıklarının yüzey difüzyonu mikro yapının kabalaşmasına yol açarken, hacim ve sınır difüzyonu esas olarak mikro yapının yoğunlaşmasına yol açar.



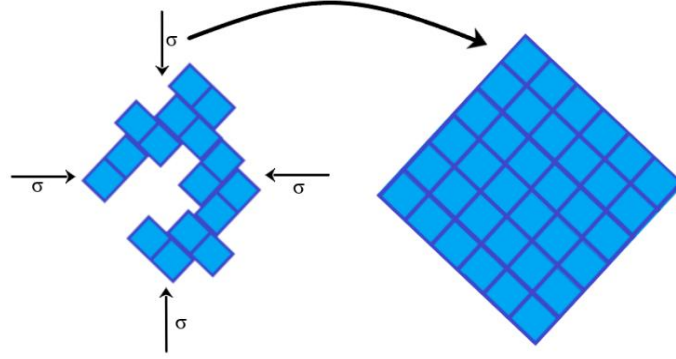
Şekil 2.20 Klasik sinterme işleminde yer alan kütle taşıma mekanizmaları



Şekil 2.21 Küresel partiküllerin temas bölgesinde meydana gelen sinterleme sonucu boyun verme aşamasının taramalı elektron mikroskobu altındaki görüntüsü (Yavaş, 2020)

Termal olarak etkinleşen parçacık difüzyonuna ek olarak, parçacık ve kristalitin yeniden düzenlenmesi, Şekil 2.22'de gösterildiği gibi, genellikle dış basınç ve kristalitlerin veya parçacıkların kaymanın neden olduğu mekanik yeniden düzenlenmesiyle kontrol edilir. Plastik deformasyon mekanizmasına uygulanan basınç akma dayanımını aştığında toz kompaktta geri dönüşü olmayan plastik deformasyon meydana gelir ve yoğunlaşma meydana gelir. Basınç sebebiyle oluşan gerilmenin akma noktasını aştığı anda plastik deformasyon oluşması beklenir (Tokita, 1993; Garay, 2010; Munir et al., 2011). Tanımlanan etki ve mekanizmalar nedeniyle FAST, uygulanan yüksek sıcaklık ve basınç etkisiyle normal bir

sinterleme işlemi gibi davranır (Anderson et al., 1999; Groza and Zavaliangos., 2000). Basınç etkileri Mekanik Etkiler bölümünde ayrıntılı olarak tartışılmaktadır.



Şekil 2.22 Uygulanan basıncın neden olduğu partikül yeniden düzenleme mekanizmasının şematik gösterimi

2.3.3. Elektrik alan (FAST) mekanizmaları

FAST sinterlemenin nihai ürünü doğrudan etkileyen çeşitli parametre ve mekanizmaları vardır. Parametrelerin ve mekaniğin değiştirilmesi, FAST sinterleme yöntemine esneklik katar ve oldukça geniş uygulamalara olanak tanır. Ayrıca parametrelerin etkileşimi sistemin karmaşıklığını arttırmakta ve parametrelerin etkilerinin incelenmesini zorlaştırmaktadır.

2.3.3.1. Darbeli akımın etkisi ve plazma mekanizması

Numuneyi ve kalıbı ısıtmanın yanı sıra akımın bir diğer etkisi de parçacıklar arasında bir plazma oluşturmaktır ancak bu bir tartışma konusudur. FAST/SPS prosesinde partikül yüzeyindeki oksit tabakası temas noktasında bir kapasitör oluşturur. Plazma bir kapasitörün boşalmasıyla üretilir (Mamedov, 2002). Oluşturulan plazma toz partikülleri ile temas ettiğinde partikülün yüzeylerindeki yabancı maddeler ve oksit tabakaları uzaklaştırılır, partikül yüzeyleri temizlenir ve yüzey enerjisi artar. Plazmanın oluşabilmesi için toz parçacıklarının birbirine temas etmeden mümkün olduğunca yakın olması gerekir. Basınç gibi etkiler nedeniyle parçacıklar arasındaki temasın artması, plazma oluşumunu azaltır. Ancak plazmanın varlığına ilişkin çalışmalar, plazmanın işin içinde olup olmadığı konusunda çelişkili görüşler ortaya çıkarmıştır (Munir et al., 2006; Trapp et al.,

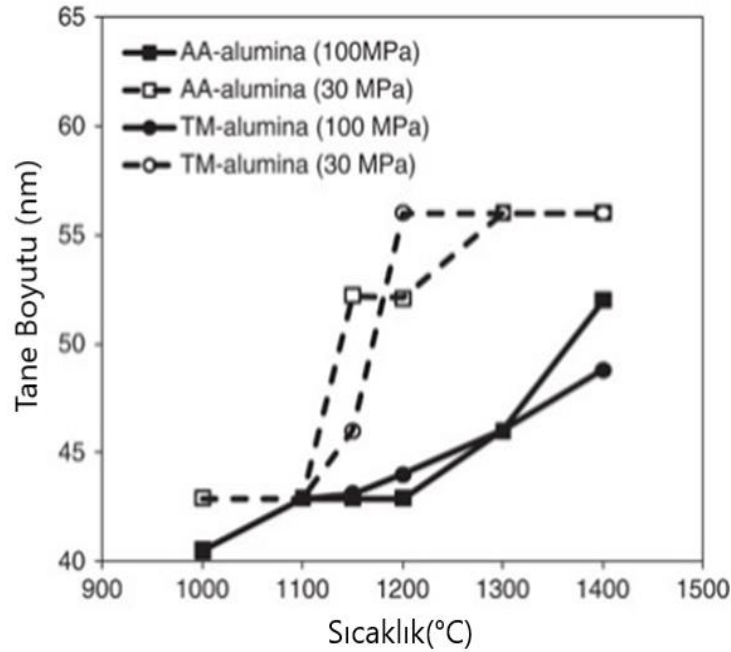
2020). Örneğin Halbert ve ark. (2008), plazmanın varlığını gözlemlemek için üç farklı deneysel yöntem kullanmıştır. Farklı tozlar ve farklı sinterleme parametreleri kullanılarak yapılan deneylerde, SPS sinterlemesi sırasında plazmanın varlığına dair hiçbir kanıt bulunmadığı bildirildi. Ancak Zhang ve diğerleri (2014), doğrudan görsel gözlem ve karakteristik mikroyapı analizine dayanarak plazmanın deşarj etkisi nedeniyle oluştuğunu bildirmiştir. Darbeli elektriğin kullanımı da tartışmalıdır ancak bazı çalışmalar bunun etkisiz olduğunu göstermiştir. Xie ve ark. (2003) farklı darbe frekanslarının alüminyumun sinterlenmesi üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. 0, 10, 40 ve 300 kHz frekanslı darbeli doğru akım kullanılmıştır. Elde edilen numunelerde elektriksel direnç, yoğunluk veya mukavemet açısından farklılık gözlemlenmemiştir. Chen ve diğerleri. (2005) yaptıkları çalışmada Si ve Mo katmanları arasındaki reaktivitenin darbeli akım üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Deneylerinde 1070 °C, 1170 °C ve 1270 °C sıcaklıklarda farklı darbe modları denenmiştir. Elde edilen örneklerin büyüme hızı, incelenen alanın etki modelinden bağımsız olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Ayrıca sonuçlar, akış yönünün katman kalınlığı üzerinde hiçbir etkisinin olmadığını bildirmiştir.

2.3.3.2. Mekanik mekanizmalar

Basınç uygulaması yoğunluğun artmasında en etkili faktörlerden biridir. Kısmi elektrostatik voltajın uygulanması toz parçacıklarının birbirleriyle daha iyi temas etmesini sağlar. Toz parçacıkları arasındaki temasın artması, yoğunlaşma mekanizmalarını, tane sınırı difüzyonunu ve kafes difüzyonunu geliştirirken, aynı anda plastik deformasyon ve tane sınırı yer değiştirmesi gibi mekanizmaların aktive edilmesinde de rol oynar (Rahaman, 2017). Önceki çalışmalar, basıncın yüzey difüzyonu üzerinde herhangi bir etkisinin olmadığını göstermiştir. Bununla birlikte bu işlemde kullanılan yüzlerce MPa'lık basınç, toz parçacıklarının çarpışmasıyla oluşan topakları yok edebilir. Aglomerlar özellikle nano ölçekli tozlarda gözlenir ve toz parçacıkları arasındaki van der Waals bağlarından kaynaklanır. Ortaya çıkan agregalar numune içinde üniform olmayan bir yapı oluşturarak düşük yoğunluğa katkıda bulunur. Aglomerlar basınçla kırıldığında malzeme yeniden düzenlenir, doldurma faktörü artar ve gözenek boyutu azalır. Yüksek sıcaklıklardaki yüksek basınçlar, akma dayanımının azalması nedeniyle malzemede plastik deformasyona neden olabilir ve sürünme gibi ek sıkıştırma mekanizmalarını etkinleştirebilir. Ek

olarak artan basınç yoğunlaşmayı artırır, bu da sinterleme sıcaklığının düşürülmesine olanak tanır (Munir et al., 2011; Guillon et al., 2014).

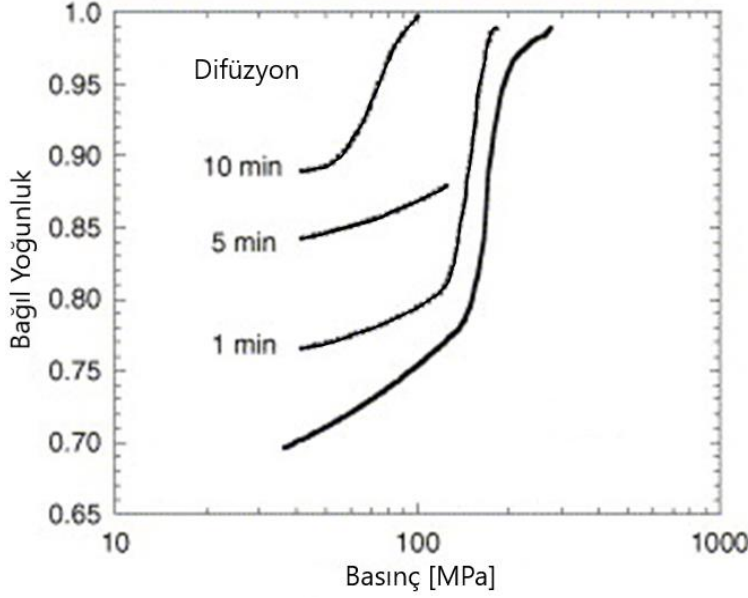
Makino ve ark. (2007), 100-230 nm boyutlarındaki alüminyum oksit tozlarını 30-100 MPa basınç altında sinterlemiştir. Sonuç olarak, düşük basınçta (30 MPa) başlangıç toz parçacık boyutunun nihai ürün üzerindeki etkisi gözlemlenebilmiştir, ancak yüksek basınçta (100 MPa) başlangıç parçacık boyutunun etkisi bastırılmıştır. Sonuçlar ayrıca basıncın kristal büyümesi üzerindeki etkisini de ortaya koymuştur ve yüksek basınç altında sinterlemenin kristal büyümesini baskıladığı bildirilmiştir. Şekil 2.23 sıcaklığın ve uygulanan basıncın bir fonksiyonu olarak alüminyum oksit tozunun reaksiyonunu göstermektedir.



Şekil 2.23 İki farklı ticari alümina tozunun (TM-alümina ve AA-alümina) SPS yönteminde sıcaklığına ve uygulanan basınca göre tepkisi (Makino et al., 2007)

Gillard ve ark. (2007) basıncın yoğunluk artışı üzerindeki etkisinin sıcaklığa bağlı olduğunu bildirmiştir. Çalışmada SiC tozu iki farklı koşulda sinterlenmiştir. İlk durumda 1800 °C'de 75 MPa basınç, ikinci durumda ise 1000 °C'de 75 MPa basınç kullanılmıştır. Çalışmadan edinilen sonuçlara göre, görece düşük sıcaklıkta basınç uygulanmasının nihai ürünün yoğunluğunun daha düşük olmasının sebebi

olarak bildirilmiştir. Chaim ve Margulis (2005) tarafından yapılan bir çalışmada nanokristal MgO tozları SPS yöntemi kullanılarak sinterlenmiş ve yoğunluk haritaları oluşturulmuştur. Şekil 2.24'te gösterilen yoğunluk haritası, basınç arttıkça yoğunluğun akış ve difüzyon gibi mekanizmalar nedeniyle arttığını göstermektedir. Ayrıca hidrostatik basınç uygulanmasının yüzey difüzyonuna göre sınır difüzyonunu arttırdığı rapor edilmiştir.



Şekil 2.24 Darbeli elektrik akımı sinterlemesinde (PECS) 750°C'de 20 nm partikül boyutunda nanokristal MgO için yoğunlaştırma haritası (Chaim and Margulis, 2005)

2.3.3.3. Termal mekanizmalar

FAST yönteminin diğer sinterleme yöntemlerine göre avantajlarından biri de yüksek sıcaklıklara kısa sürede ulaşılabilmesidir. Bu avantaj mikro yapının kabalaşmasını önlemesinin yanı sıra yoğunluk artışına da fayda sağlar. Sıcaklık, difüzyon mekanizmalarının aktivasyonu ve iç kusurların oluşması gibi önemli etkilere neden olan ana nedenlerden biridir. Termal faktör literatürde Joule ısıtması olarak ifade edilmektedir (Palatinus et al., 2013). Yüksek ısıtma hızlarına ulaşmak numunede, kalıpta ve mekanik olarak gerilmiş malzemede belirli bir özgül direnç gerektirir. Isı dağılımının çoğu grafit kalıp ve grafit punchta meydana gelir. FAST, özellikle geleneksel sinterleme yöntemleriyle karşılaştırıldığında, numune boyunca büyük sıcaklık değişimleri olmadan çok yüksek ısıtma hızlarına ulaşarak

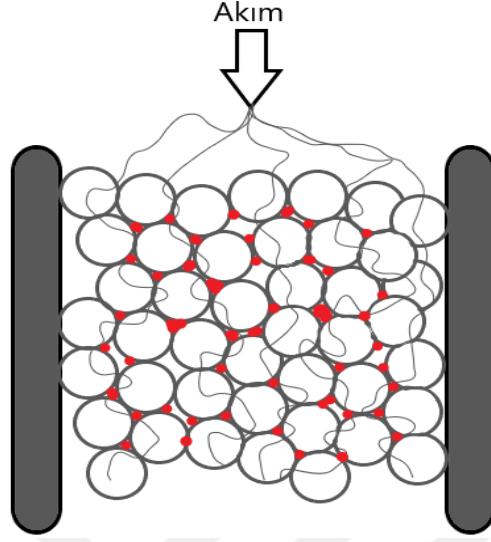
numunenin doğrudan ve eşit şekilde ısıtılmasını sağlar. Özellikle iletken numuneler için düzgün ve hızlı ısıtma garanti edilir. Numune boyunca sıcaklık gradyanı büyük olmasa da, akım küçük temas noktalarından geçtiğinde lokal olarak aşırı ısınma oluşabilir. Bu durum toz parçacıkları üzerinde erimiş bir bölge oluşturarak toz parçacıklarının birleşmesi nedeniyle boyun oluşumuna yol açmaktadır (Holland et al., 2012; Chawake et al., 2014). Tane sınır difüzyonunun yüzey difüzyonundan daha yüksek aktivasyon enerjisine sahip olduğu senaryolarda mikro yapının kabalaşmasını geciktirmek için hızlı bir şekilde hedef sinterleme sıcaklığına çıkılması gerekmektedir. FAST yöntemi bu talebi geniş bir malzeme yelpazesinde karşılayabilmektedir (Olevsky et al., 2007).

2.3.3.4. FAST bağ oluşum mekanizmaları

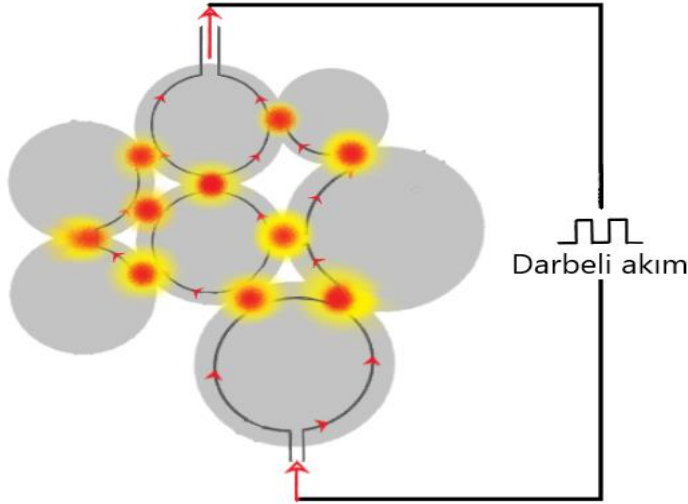
FAST sinterlemede tercih edilen akım yolu önemlidir. Çünkü numunenin mi yoksa kalıbın mı ilk önce ısıtılacağını belirler. FAST prosesinde iletken tozlar ve kalıplar kullanıldığında akım doğrudan kalıp olarak kullanılan grafit ve tozun içinden akar. İletken bir toz ve bir yalıtkan kullanılması, akımın yalnızca tozun içinden geçmesine izin vererek en iyi sonuçları verir. Bu durum sonucunda mümkün olan en yüksek akım yoğunluğunu elde eder. İletken olmayan tozlar ve iletken kalıplar kullanılarak sıcak sinterlemeye benzer bir işlem döngüsü elde edilir (Vanmeensel et al., 2005; Tamburini et al., 2005). Önemli olan sinterleme sırasında akım ve mikroyapı oluşumu arasındaki olası etkileşimdir. Bunlar; gözenekli bir toz yatağındaki akım iletim etkisi, gövde ve punch arasındaki ara yüzde Peltier etkisi ve elektrokimyasal reaksiyonlardır (McWilliams and Zavaliangos, 2008).

İşlenmekte olan toz yerleştirildiğinde tamamen homojen ve yoğun değildir. Bu nedenle akım tozun tüm kısımlarından eşit şekilde akmaz. Numunenin heterojen yapısı, Şekil 2.25'te gösterildiği üzere karmaşık bir akış ağının oluşmasına neden olur. FAST sürecinin temelini oluşturan, ortaya çıkan akım ağı boyunca joule ısı üretilir. Mevcut ağlar, ortalama proses sıcaklığının üzerinde çok yüksek sıcaklık noktaları üreten yerel akım yoğunlukları ve aşırı ısınma ile karakterize edilebilir (Şekil 2.26). Bu, kısmi ergime ve yeniden kristalleşme gibi klasik senaryolardan farklı bir mikro yapı oluşum mekanizmasına yol açar. Yoğunlaşma ilk olarak akım

ağları üzerinde ve düşük akım yoğunluklarına sahip bitişik bölgelere göre baskın olarak sıcak noktalarda meydana gelir (Schwesig, 2011).



Şekil 2.25 FAST sinterleme sırasında grafit kalıp içerisindeki toz numunesinden akım geçişi



Şekil 2.26 Akımın toz partikülleri üzerinden geçişinin şematik gösterimi

Malzemedan bir elektrik akımını geçtiğinde, elektronlar kafes atomlarına saçılır ve enerjilerinin ve momentumlarının bir kısmını kafes atomlarına aktarırlar. Bu saçılma, kafes iyonlarının difüzyonu için tercih edilen bir yol yaratır ve buna elektron transferi denir. FAST yöntemini kullanarak elektron transferinin varlığından bahsetmek zordur çünkü elektron transferi zaman alıcıdır ve tespit

edilmesi zordur. FAST yöntemi birkaç dakikalık çok kısa aralıklarla gerçekleştirildiğinden elektronların hareketinin olmadığı düşünülmektedir. Ek olarak, akım olmadığında malzemelerin bir elektrik alanı boyunca taşınmasının tane sınır difüzyonunu ve mikroyapı içerisindeki kusurları etkilediği bilinmektedir. Ancak FAST yönteminde kullanılan voltajlar, bu etkinin oluşması için gerekli olan voltajlardan çok daha düşüktür (Antolovich and Conrad, 2004; Raj et al., 2011).

Hedef malzemedan geçen akımın doğrudan neden olduğu bir diğer etki de Peltier etkisidir. Peltier etkisi, temas halindeki iki malzemenin arayüzü boyunca bir akımın akışıyla tanımlanır ve malzeme arayüzündeki Peltier katsayısındaki bir süreksizlikten kaynaklanır. Peltier etkisi nedeniyle artan akım, hareketli elektronların sayısını artırır ve ısı transferini artırır. Peltier katsayısı, belirli bir malzeme içinde taşınan sıcak elektronların miktarını karakterize eder ve iletkenlik azaldıkça önemi giderek artar. Joule ısınmasının aksine Peltier etkisi, akımın yönüne göre ısınmaya veya soğumaya neden olabilir. Sinterleme işleminde kullanılan toz metal ise toz ile grafit damga arasındaki Peltier katsayısı farkı çok küçük bir değer olacak ve Peltier etkisi göz ardı edilebilecektir (Becker et al., 2012; Tukmakova et al., 2019).

2.3.3.5. Atmosfer mekanizması

Sinterleme işlemi sırasında ortam atmosferinin bileşimi ve atmosferin kısmi basıncı, numunenin yapısı ve kusurların yayılması üzerinde önemli ve belirleyici etkiye sahiptir. Bu sebeple yoğunlaşma hızı, tane büyümesi, oksidasyon miktarı, faz stabilitesi ve stokiyometri çevredeki atmosfere bağlıdır. Yüzey enerjisi sinterleme için itici güç olduğundan, mekanizmanın, belirli su veya organik fraksiyonların adsorpsiyonu nedeniyle toz parçacıklarının yüzey enerjisindeki azalmanın hesaba katılması gerekir. Genel olarak sinterleme atmosferindeki gaz basıncının düşürülmesiyle yüzey kirliliği azaltılabilir. Sinterlenecek malzeme metal ise vakum ortamı sayesinde oksijen ve hidrojen ile reaksiyonları daha kolay önlenebilir (Schwarz et al., 2012).

2.3.4. Magnezyum ile yapılmış sinterleme çalışmaları

Brezina ve ark. (2021), spark plazma sinterleme (SPS) kullanarak gevşek ve sıkıştırılmış magnezyum tozlarının sinterlenmesini incelemişlerdir. İlk önce toz 100 MPa'dan 500 MPa'ya kadar bir dizi sıkıştırmaya tabi tutulup, daha sonra sinterleme sırasında 100 MPa basınç uygulanmıştır ve sinterleme 400 °C, 500 °C ve 600 °C'de gerçekleştirilmiştir. Soğuk basınç arttıkça gözenekliliğin azaldığı bulunmuştur. Sadece gevşek tozlu ve soğuk sıkıştırmanın az olduğu numunelerde SPS sonrası gözeneklilik ve mekanik özelliklerin olumlu yönde etkilendiği bulunmuştur. Soğuk sıkıştırma basıncının 200 MPa'nın üzerine çıkarılmasının SPS işlemi için uygun olmadığı sonucuna varılmıştır. Ek olarak sıcaklığın 400 °C'den 600 °C'ye arttırılması numunelerin bükülme mukavemetini 2,5 kat arttırmıştır.

Pozuelo ve ark. (2011), kriyojenik öğütme sonrasında elde edilen nanokristalin Mg₇₀Al₃₀ tozu SPS yöntemi kullanılarak sinterlemiştir. Sinterleme işlemi vakum ortamında 400 °C'de 6 dakika, 75 °C/dk ısıtma hızında ve 65 MPa basınçta gerçekleştirilmiştir. Ortaya çıkan numunenin Arşimet yöntemi kullanılarak %97 yoğunluğa ulaştığı bildirilmiştir.

Esamael ve Fatalla (2022) tarafından yapılan bir çalışmada ortopedik implantlarda geniş bir uygulama alanına sahip olan magnezyumun toz metalurjisi prosesi kullanılarak üretilmesi ve üretim sırasında aktif olan parametrelerin implantların mekanik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu çalışmada üç farklı parametre kullanılmıştır: Basınç, sinterleme sıcaklığı ve sinterleme süresi. Optimum parametreleri belirlemek için yoğunluk, mikro sertlik ve sıkıştırma testleri yapılmıştır. Çalışmadan elde edilen verilere göre 550 MPa sıkıştırma basıncı, 1 saat sinterleme süresi ve 450 °C sinterleme sıcaklığı magnezyum implant üretimi için en uygun parametreler olarak bulunmuştur.

Khan ve diğerleri. (2020), spark plazma sinterleme sıcaklığının (SPS), ağırlıkça %10 Al içeren mekanik olarak öğütülmüş Mg alaşımlarının mikro yapısı, sertliği ve korozyon davranışı üzerindeki etkisini araştırmıştır. Sinterleme süresi ve sinterleme basıncı sabit tutulup ve sinterleme sıcaklığı 200°C, 250°C, 300°C ve 350°C arasında değiştirilmiştir. Sonuç olarak, sinterleme sıcaklığı arttıkça alaşım

yoğunluğunun arttığı, Vickers sertliğinin ve korozyon direncinin 300°C'ye kadar arttığı, 350°C'den sonra azaldığı rapor edilmiştir.

Paraskevas ve ark. (2016), saf magnezyum ve magnezyum alaşımlı hurdalar için spark plazma sinterlemesinin (SPS) geri dönüşüm teknolojisi olarak uygulanabilirliğini araştırmışlardır. Kullanılan saf magnezyum ve AZ31 (Mg-3Al-1Zn) alaşımı yüzey frezeleme ile elde edilmiştir. SPS'nin tam yoğunlaştırmayı ve talaşlar arasında etkili metalurjik bağlanmayı başarıyla gerçekleştirebildiği bulunmuştur. Bunun sinterleme sırasındaki sıkışmadan ve akımın neden olduğu Joule ısısı nedeniyle talaş yüzeyindeki oksit filminde meydana gelen çatlaklardan kaynaklandığı düşünülmektedir. SPS ile üretilen numunelerin mikro yapısının orijinal külçeden daha ince olduğu ve SPS ile geri dönüştürülen malzemenin ham maddeden daha yüksek basınç ve kesme mukavemetlerine sahip olduğu tespit edilmiştir.

2.4. Sonlu elemanlar analizi

Yapay zekanın daimi olarak gelişiminin yanında bilgisayar ortamında simülasyon ve modelleme programlarının, işlemlerinin gelişmesi ile birlikte birçok alanda olduğu gibi toz metalurjisi alanında da simülasyon ve modelleme çalışmalarının önü açılmıştır. Gerçek hayatta deneme yanılma ve iterasyonlara gerek kalmadan, iş gücü ve maliyet kaybı olmaksızın doğru model ile yapılacak simülasyonlar sonucu optimum ve en verimli parametrelerin bulunması mümkündür.

Simülasyon ve modelleme çalışmalarının altta belirtilen avantajları bulunmaktadır.

- **Maliyet tasarrufu:** Simülasyon, tasarımcıların ve araştırmacıların fiziksel prototiplere ihtiyaç duymadan tasarımları sanal olarak test etmelerini sağlar. Bu durum, pahalı malzemelere ve üretim süreçlerine olan ihtiyacı azaltarak önemli maliyet tasarruflarına yol açabilmektedir.

- Geliştirilmiş tasarım kalitesi: Simülasyon, araştırmacılara ve bilim insanlarına bir tasarımın gerçek dünya koşullarında nasıl performans göstereceği hakkında ayrıntılı bilgi sağlar. Bu, bir ürün üretilmeden önceki potansiyel sorunlarının belirlenmesinde ve ele alınmasında yardımcı olabilmektedir. Bu durum beraberinde tasarım kalitesinin artmasına da neden olmaktadır.
- Nihai sonuca daha hızlı ulaşma: Simülasyon kullanılarak, tasarım ve optimizasyon konularında daha hızlı ve verimli bir şekilde ilerlenebilmektedir.
- Azaltılmış risk: Simülasyon, araştırmacılara bir ürünün ve deneyin gerçek şartlarda nasıl performans göstereceği hakkında ayrıntılı bilgi sağlayarak potansiyel sorunları belirlemeye yardımcı olabilmektedir. (H. Zhang vd, 2017)

Simülasyonlar ile toz metalurjisi üretim proseslerinin daha iyi anlaşılması, ürün tasarımı ve proses kontrolünde kritik öneme sahiptir. Bu nedenle, toz metalurjisinde üretim parametrelerinin araştırılması ve simülasyonlarla modellenmesi son birkaç yılda bilim camiasında artan bir ilgi çekmiştir. (Alexander Krok vd., 2017) Simülasyon, belirli bir üretim operasyonunun ilgili öğelerinin analizi için doğru süreç modellerinin kullanılmasını içerir. Toz metalürjisi alanında yapılan modellemelerin çoğu, çeşitli işleme koşulları altında malzemelerin özelliklerinin tahmin edilmesiyle ilgilidir. (Lyndon Smith, 2015)

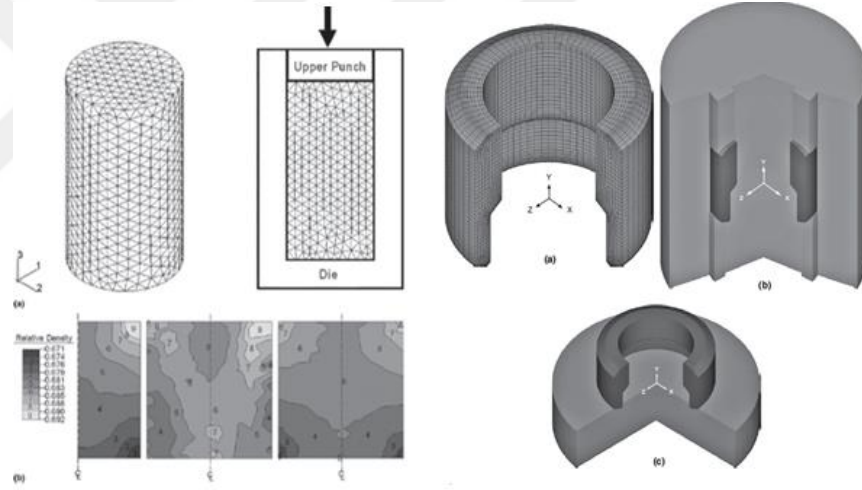
Toz metalurjisi üretim yönteminde en çok emek ve zaman harcanan nokta üretim parametrelerinin optimum seviyede ve doğrulukta seçilmesi sürecidir. Genellikle tecrübe ve deneme yanılmaya bağlı olan üretim parametrelerinin incelenmesi, modellenmesi ve simülasyon ile analiz edilmesiyle zaman ve emek kazanımının yanında, hurda oranının azaltımı ve enerji optimizasyonu ile ekonomik faydalar elde edilmesi üzerine çalışılmıştır.

2.4.1. Toz metalürjisinde simülasyon üzerine çalışmalar

Birçok alanda yaygınlaşan ve sıklıkla kullanılan bilgisayar destekli simülasyon ve modelleme ile birlikte yapay zeka kullanımı, toz metalurjisi alanında

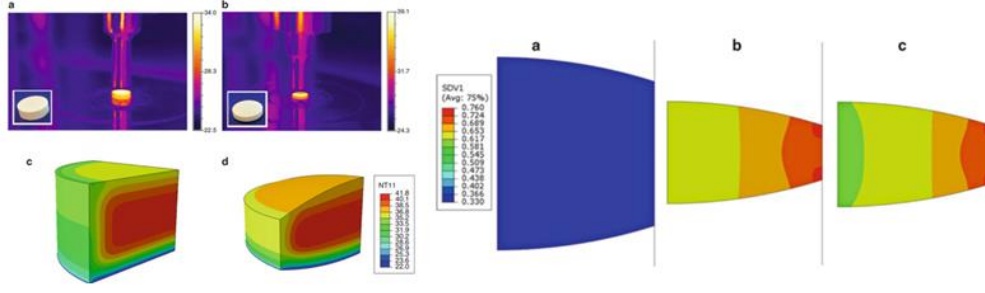
çok daha yeni ve araştırmaya açık durumdadır. Çalışmaların 21. yy ile başlayıp 2010 yılından sonra hız kazandığı literatür araştırmalarının sonuncunda ulaşılmaktadır. (Suk Hwan Chung et al, 2010)

Hyundai Steel Company ve San Diego Üniversitesi'nin katkıları ile yapılan çalışmada kalıpta toz presi ve sinter işlemleri modellenmiş, simülasyon haline getirilmiştir. Kalıpta preslenmiş tozun, kalıp geometrisi, farklı takım tasarımları, sıkıştırma presleri sonucu homojen değildir. Bu durum sinterleme ve nihai ürün eldesine direkt etkisi bulunmaktadır. Sinterleme fırınları ile hedef özellikleri sağlamak için gereken toz sıkıştırma ve sinterleme niteliklerini seçmek için iterasyonlar gereklidir. Yapılan çalışma sonucu oluşturulan Pres ve sürtünme ile sinterleme gerilimi modeli ile iterasyonlara gerek kalmadan gerekli parametreler ortaya koyulmuştur. (Suk Hwan Chung et al, 2010)



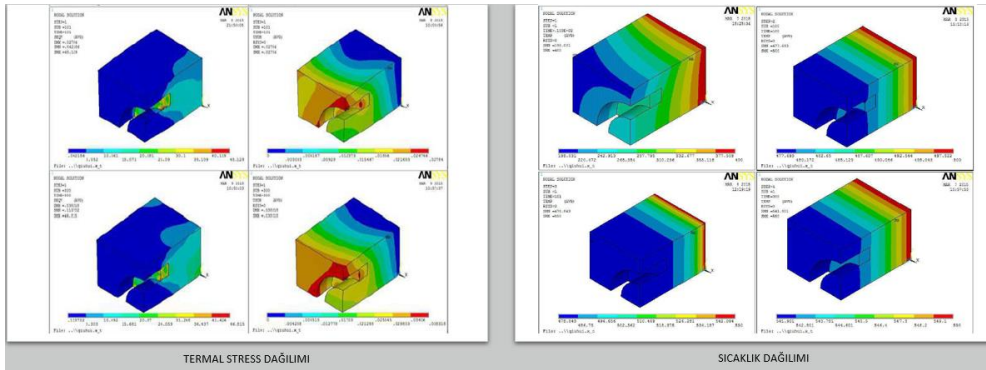
Şekil 2.27 Kalıp yapısının ve toz geometrisinin modellenmesi (Suk Hwan Chung vd, 2010)

NATO Science for Peace and Security dergisinde yayınlanan çalışmada toz sıkıştırma davranışı ve sinterleme sonucu oluşan sıcaklık ile malzeme yapısında oluşan gerilmeler modellenmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi ile tamamlanan modelleme sonucu sıkıştırma basıncı ve sinterlemede meydana gelen sıcaklığın nihai ürünün iç yapısında ortaya çıkan gerilmeler ortaya konmuş, optimum sinter sıcaklığı ve kalıpta sıkıştırma basıncı araştırılmıştır. (Alexander Krok et al, 2017)



Şekil 2.28 Simülasyon çıktısının sıcaklık dağılımı ve basınç dağılımı sonuçları (Alexander Krok vd, 2017)

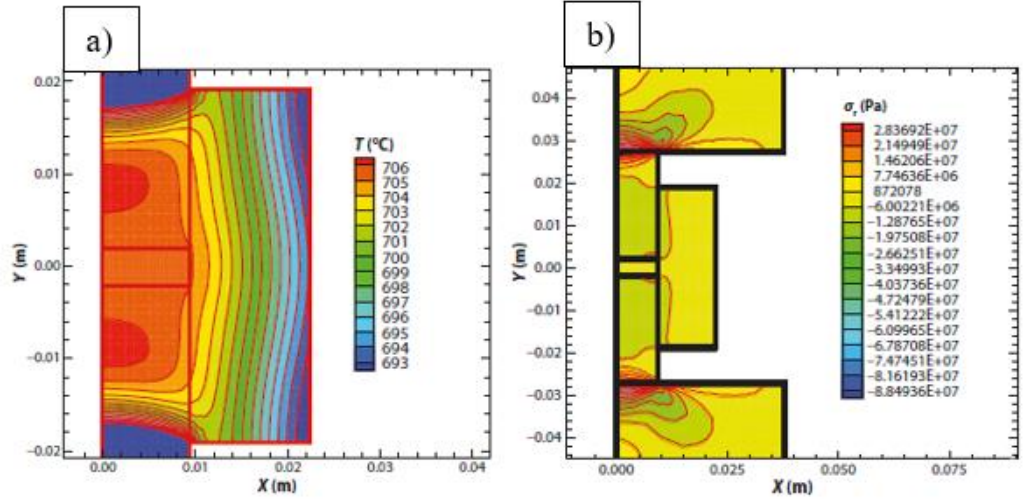
2016 yılında, Key Engineering Materials adlı dergide yayınlanan “Thermal Stress Analysis of Powder Metallurgy Sintering Process Based on ANSYS” makalesinde araştırma konusu olarak Magnezyum tozları ile birlikte Çinko, Zirkonyum ve Mangan ile alaşımlanmış ve bu yapının ANSYS isimli sonlu elemanlar analiz yazılımı ile termal analizi incelenmiştir. Kurulan modelde sinterlenmiş cismin sinter sıcaklık alanını ve termal stres alanını sistematik olarak araştırılmış ve ilgili dağılımı ortaya koymuştur. Simülasyon ve model sonucu düzensiz sıcaklık dağılımının nasıl gerçekleştiği analiz edilmiş beraberinde bu durumun yarattığı stres dağılımı ve deformasyon miktarı ortaya konmuştur. (Hui Qiu et al, 2016)



Şekil 2.29 Simülasyon sonucu elde edilen termal gerilme ve sıcaklık dağılım sonuçları (Hui Qiu vd, 2016)

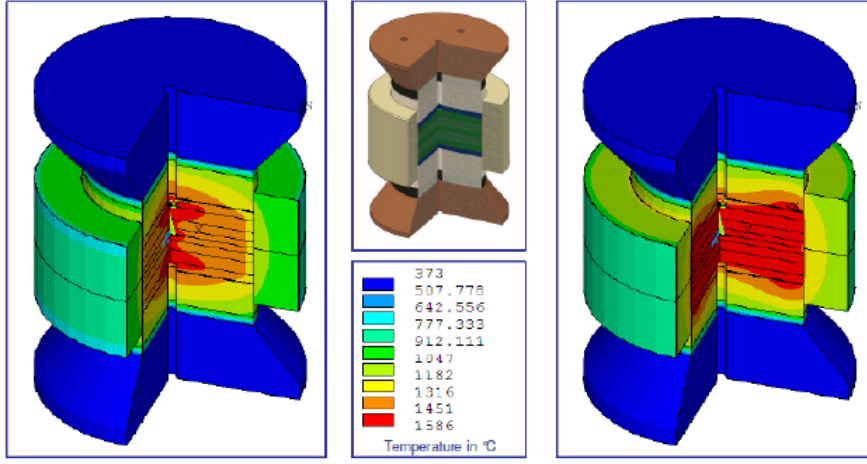
2010 yılında J.E. Garay tarafından gerçekleştirilen çalışmada FAST sistemini modelleyip simülasyonunu gerçekleştirmiştir. Simülasyonda modellemenin, sistem modelleme ve yoğunlaşma modelleme olarak ikiye alınması

gerektiğini savunmuştur. Sistem modelleme yoğunlukla sistemin makroskobik alanlarının simüle edilmesiyle ilgilidir: akım, sıcaklık ve basınç (gerilme dağılımı). Yoğunlaştırma modelleri ise FAST koşulları altında toz yoğunlaştırma sürecini simüle eder. Sistem modelleri, ölçülmesi zor olan sıcaklık ve gerilim değişimlerini incelemek için kullanılabileceğini belirtmiş ve kalıp tasarımı sürecini olumlu etkileyeceğinden bahsetmiştir. Yoğunlaşma modelleri, baskın ve ikincil yoğunlaşma mekanizmalarının rolüne ışık tutmaya yardımcı olabileceğini iddia etmiştir. Gerçek FAST girdileri verildiğinde yoğunlaştırılan malzemelerin özelliklerini (yoğunluk, tane boyutu vb.) tahmin edebilen bir model hâlâ eksiktir. Sistem modellemesi termal gerilmeleri ve sıcaklık dağılımını ortaya koymuştur. (Garay, 2010)

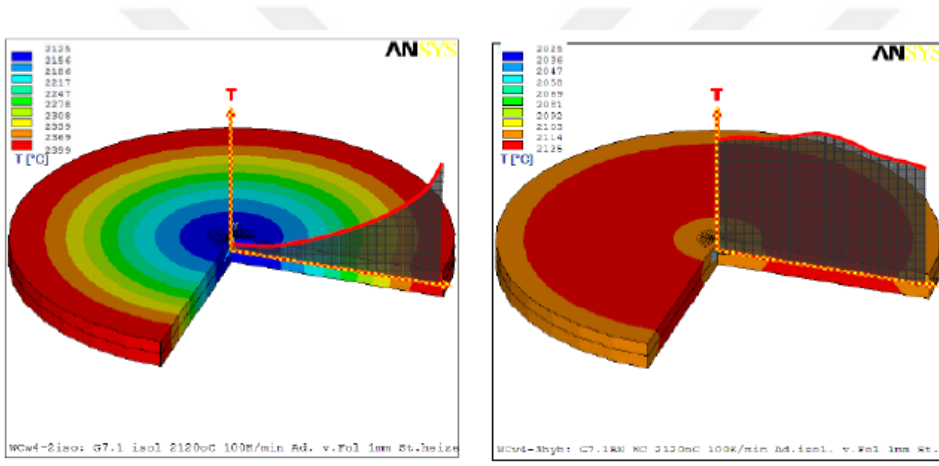


Şekil 2.30 Simülasyon sonucu elde edilen a) sıcaklık dağılımı b) gerilme dağılımı gösterilmiştir. (Garay, 2010)

2013 yılında M. Suarez ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada Standart Hot Pressing ve FAST sinterleme mekanizmaları incelenmiş ve farkları sonlu elemanlar analizi ile ortaya koyulmaya çalışılmıştır. Yapılan çalışmada toz kompakt sistemi modellenmiştir. Akım sonucu sıcaklığı 1500 derecelere çıktığı bulunmuştur. Bunun yanında FAST ve Standart Sıcak Presleme yönteminde sıcaklık dağılımını ve değişimini simüle etmiştir. (Suarez et al., 2013)



Şekil 2.31 Fast sinterleme sonucu sıcaklık dağılımı ve maksimum sıcaklık (Suarez et al., 2013)



Şekil 2.32 FAST ve sıcak pres sinterlemede sıcaklık dağılımı (Suarez et al., 2013)

Yazar	Yıl	Çalışma İçeriği
Suk Hwan Chung et al	2010	Kalıpta preslenmiş tozun, kalıp geometrisi, farklı takım tasarımları, sıkıştırma işlemleri modellenmiştir. Nihai ürün toz şeklinde mi yoksa bütün olarak modellendiği bilinmemektedir.

Alexander Krok et al.	2017	Sıkıştırma basıncı ve sinterlemede aynı anda uygulanması durumu modellenmiştir. Nihai ürün toz şeklinde değil bir bütün olarak modellenmiştir. Sıcaklık dağılımı ve presleme sonucu gerilme ortaya koyulmuştur.
Hui Qiu et al.	2016	Termal gerilme dağılımı ve sıcaklık dağılımı incelenmiştir. Nihai ürün toz şeklinde değil bir bütün olarak modellenmiştir. Kalıp tasarımında riskleri barındıran bir geometri modellenmiş ve kalıp tasarım optimizasyonu üzerine çalışılmıştır.
J.E. Garay	2010	Simülasyonda modellemenin, sistem modelleme ve yoğunlaşma modelleme olarak ikiye alınması gerektiğini savunmuştur. Sistem modellemesi makro ölçekte yapılmıştır. Sıcaklık dağılımı ve termal gerilmeler incelenmiştir.

Suarez et al.	2013	Standart Hot Pressing ve FAST sinterleme mekanizmaları simüle edilmiştir. Nihai ürün toz şeklinde değil bir bütün olarak modellenmiştir. Standart Hot Pressing ve FAST sinterleme sonucundaki sıcaklık dağılımı birbiriyle kıyaslanmıştır.
Hazırlanan Yenilikçi Yanı	Tezin	Nihai ürün toz şeklinde modellenmiştir. Mikron boyutunda yan yana gelen belli bir toz grubunun davranışı ortalama kabul edilmiş ve tek bir toz partikülü gibi davrandığı kabul edilmiştir. FAST Sinterleme mekanizmasının adımları ayrı ayrı simüle edilmiş oluşabilecek varyasyonların etkisi ayrı ayrı simüle edilmiştir. Mikroyapı görüntüleri ile simülasyon çıktıları üzerine yakınsama yapılmıştır. FAST sinterlemede akım yolu simüle edilmiştir.

2.5. Sonlu Elemanlar Analizi Gerçekleştirilen Gerçek Sistem

2.5.1. Malzeme

Referans alınan araştırma ve deneylerde kullanılan magnezyum tozu Kümaş Magnezyum Sanayi A.Ş.'den satın alınmıştır. Şirketin açıkladığı analiz sonuçlarına göre tozun saflığı %99,27. Analiz sonuçlarında raporlanan element içerikleri ve oranları Tablo 2.7'de gösterilmektedir. Aynı analize göre tozun boyutu 150 mikrometreden azdır. Tozun boyut dağılımı Tablo 2.8'de gösterilmektedir.

Tablo 2.7 Kullanılan Magnezyum tozunun element içeriği ve oranları

Bileşen	Oran(%)
Mg	99,27
SiO ₂	0,08
CaO	0
Fe ₂ O ₃	0
Al ₂ O ₃	0

Tablo 2.8 Kullanılan Magnezyum tozunun boyutları

Boyut (mm)	Dağılım(%)
0,250	0
0,180	1,4
0,150	5,66
0,125	22,92
0,100	21,79
0,075	19,37
0,065	8,9
0,063	11,05
0,032	3,96
<0,032	4,95

2.5.2. Numune üretimi

2.5.2.1. Mekanik öğütme

Referans alınan çalışmalarda metal tozunun öğütülmesi, çalkalayıcı değirmen kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.33).

Öğütme işlemi için 10 mm çapında ve 4 gram ağırlığında paslanmaz çelik bilye kullanılmıştır (Şekil 2.34). Toz/top oranı 10:1 olarak bulunmuş ve tüm öğütme işlemlerinde toplam ağırlığı 1000 gram olan 250 adet bilye kullanılmıştır. (Kılınç, 2023)



Şekil 2.33 Ser-Mak çalkalayıcı değirmen (Kılınç, 2023)

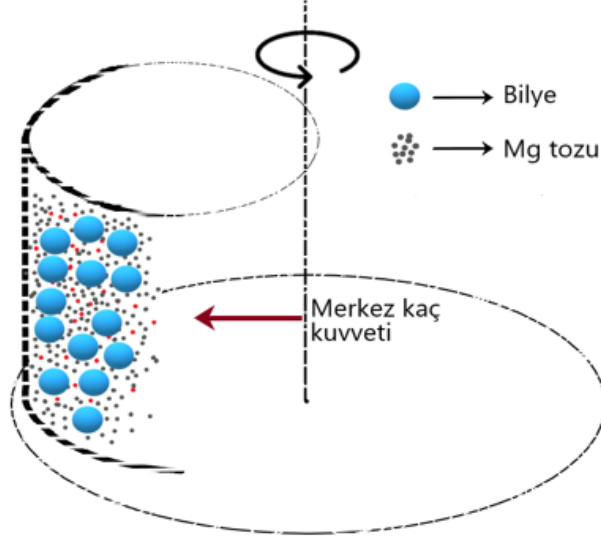


Şekil 2.34 Öğütme işleminde kullanılan bilyeler (Kılınç, 2023)

Öğütme kavanozu olarak silindirik paslanmaz çelik bir kap kullanıldı (Şekil 2.35). Kavanozun iç çapı 100 mm, yüksekliği 90 mm, ağırlığı 1804 gram olup, kavanozun kapağında birbirine bakan iki adet küresel vana bulunmaktadır. Öğütme atmosferi için inert gaz transferi bu vanalar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kapak, atmosferik koruma için sızdırmazlık sağlayan O-ring contaya sahiptir.



Şekil 2.35 Öğütme işleminde kullanılan kavanoz (Kılınç, 2023)



Şekil 2.36 Mg tozunun öğütülmesinin şematik gösterimi (Kılınç, 2023)

2.5.2.2. FAST sinterleme

Referans alınan çalışmalarda sinterleme işlemi için Şekil 2.37'te gösterilen Tugem Teknoloji'nin FAST ekipmanı kullanılmıştır. Cihaz darbeleri olarak alternatif akım kullandığı için konvansiyonel ürünlere kıyasla daha düşük güç tüketimi ile sinterlenebilmektedir. Fonksiyonları arasında, sinterleme odasına koruyucu gaz atmosferi verilmesi ve muhafaza edilmesi, sinterleme odasına vakum uygulayabilme, kalıp basıncı kontrolü ve proses boyunca sabit basıncın muhafaza edilmesi, sinterleme sırasında sıcaklık ölçümü ve kontrolü ve zaman kontrolü ve zamana dayalı süreç döngüleri yer almaktadır. FAST cihazları, elektrotların içinden akan su soğutması sayesinde uzun sinterleme işlemleri de dahil olmak üzere yüksek sıcaklıklarda çalışabilir. Sıcaklık, toza en yakın grafit kalıbın içine yerleştirilen bir termokupl kullanılarak ölçülür. Sinterleme işlemi sırasında sıcaklığın artması veya hedef değerin üzerine çıkması durumunda güç otomatik olarak kapatılır, sinterleme sıcaklığı otomatik ayarlanır ve belirlenen süre içerisinde sinterleme gerçekleştirilir.

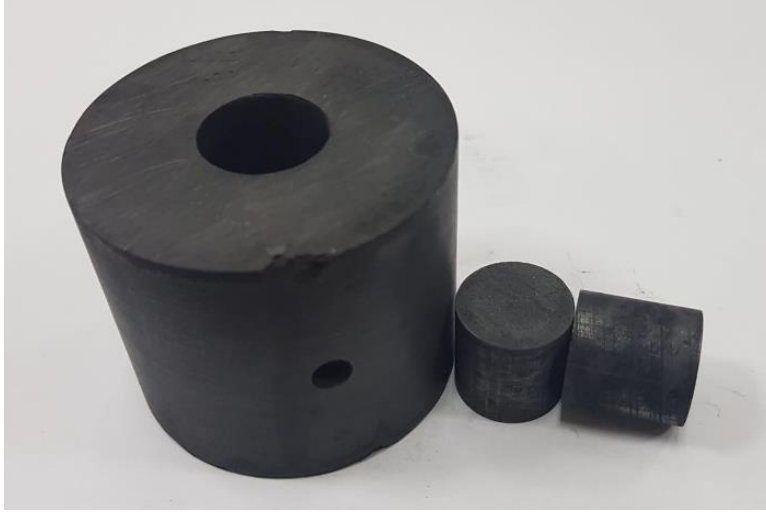


Şekil 2.37 FAST sinterleme cihazı (Kılınç, 2023)

Öğütme sonrasında elde edilen saf magnezyum tozu, 0,8 barlık vakum atmosferi altında sinterlenmiştir. Cihaz 3 bar basınca ayarlanmıştır ve punchlar üzerinden 35 MPa basınç ile tozlara sıkıştırma uygulanmıştır. Sinterleme sıcaklığı 350 °C olarak seçilmiştir ve sinterleme toplam 11 dakika sürmüştür. Sinterleme süresine ilişkin olarak 350°C hedef sıcaklığa 4 dakikada ulaşılmış, sıcaklık 350°C'de sabit tutulmuş, sinterleme işlemi 5 dakika sürdürülmüş ve daha sonra oda sıcaklığına soğuması için 2 dakika beklenmiştir. (Kılınç, 2023)

2.5.2.3. Kullanılan kalıp

Sinterleme işlemi için düzgün silindirik şekle sahip grafit malzemeden yapılmış bir kalıp (Şekil 2.38) seçilmiştir. Grafit kalıbın yüksekliği 50 mm, dış çapı 60 mm, iç çapı 20 mm'dir. Tozların kalıp içerisine yerleştirilmesi ve ardından basınç uygulanabilmesi için punchlar kullanılmıştır. Punch, 20 mm çap ve 20 mm yüksekliğe sahiptir.



Şekil 2.38 Sinterleme işleminde kullanılan kalıp görüntüsü

2.5.3. Karakterizasyon ve analizler

2.5.3.1. Yoğunluk ölçümü

2.5.3.1.1. Tozların görünür yoğunluğu

Görünür yoğunluk, malzeme içerisindeki katı kısımların ve kapalı porozitenin hacmini birlikte tanımlar ve tozun sıkıştırılmamış yoğunluğunu (g/cm^3) belirtir. Tozların sıkıştırılmadan hacmi bilinen silindir kaba transferi huni yardımı ile sağlanmıştır. Kapta bulunan tozun kütlesi kap hacmine bölünerek çalışmada elde edilen tozların görünür yoğunluğu tespit edilmiştir (Denklem 1).

$$\rho_g = \frac{m_{toz}}{V_{toz}}$$

Denklem 1 Görünür yoğunluk denklemi

ρ_g : Görünür yoğunluk(g/cm^3)

m_{toz} : Tozun kütlesi (g)

V_{toz} : Tozun hacmi (cm^3)

2.5.3.1.2. Yoğunluk ölçümü

FAST sinterleme sonucu elde edilen numune yoğunlukları, numune hacminin hesaplanarak numune kütlesi ile bölünmesi sonucu hesaplanmıştır. Numune kütle tespiti Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği laboratuvar bünyesinde bulunan Precisa XB 220A hassas terazi (Şekil 2.39) ile gerçekleştirilmiştir ve terazi özellikleri Tablo 2.9’te sunulmuştur. Numune hacim hesabı için numune yüzeyleri zımparalanarak pürüzsüz ve düzgün hale getirilmiştir. (Kılınç, 2023)



Şekil 2.39 Precisa XB 220 A marka hassas terazi

Tablo 2.9 Precisa XB 220 A hassas terazi teknik özellikleri

Kapasite: 220 g	Kefe Çapı: 80 mm
Hassasiyet: 0,0001 g/ 0,1mg	Kabin Boyutu: 170 x 170 x 230 mm
Tekrarlanabilirlik: 0,1 mg	Kefe Boyutu : Ø 80x3,1
Lineerlik +/-: 0,2 mg	Tepki Süresi : 4 sn
Kalibrasyon: Tam Otomatik	Çalışma sıcaklığı: +10° - +30°C

2.5.3.2. Basma testleri

Polimer katkısının sinterlenmiş numunelerde şekil değiştirme davranışı üzerindeki etkilerinin tespiti için basma testi uygulanmıştır. Basma testleri, 0,2 mm/dk ilerleme hızında uygulanmıştır. Numuneler test öncesinde uygun geometri sağlanması amacıyla zımparalanmıştır. Testler, Ege Üniversitesi Makine Mühendisliği bünyesinde bulunan Shimadzu marka AG-IS 100kN model (Şekil 2.40) çekme-basma cihazı ile gerçekleştirilmiştir. (Kılınç, 2023)



Şekil 2.40 Shimadzu (AG-IS 100kN) çekme-basma cihazı (Kılınç, 2023)

3. GEREÇ VE YÖNTEM

Bu çalışmada toz metalurjisi üretim basamaklarının bilgisayar destekli analiz programları ile modellenmesi, analiz edilmesi ve optimizasyonu üzerine araştırma ve geliştirme yapılmıştır. Gerçek sonuçlar ile simülasyon arasında bağlantı kurulması ve sonraki çalışmalardaki deneme ve iterasyon sayısının azaltılması hedeflenmektedir.

Çalışmada modellenecek toz metalurjisi üretim işlem basamakları, Ege Üniversitesi Makine Mühendisliği bünyesinde yapılan çalışmalar ve laboratuvarlarında bulunan ekipmanlar referans alınmıştır. İlgili çalışmada toz metalurjisi üretim basamaklarından FAST sinterleme sırasında sıcaklık dağılımı işlem basamakları üzerine yoğunlaşmıştır. Böylelikle üretim sonucuna direkt etkisi olduğu düşünülen “green compact” yoğunluğu ile toz şekli, boyutu, optimum sinterleme sıcaklığı, sıcaklık dağılımının modellenmesi ve simüle edilmesi sağlanarak toz metalurjisi üretim parametrelerine en verimli etkinin sağlanması planlanmıştır.

FAST Sinterleme mekanizmasının adımları ayrı ayrı simüle edilmiş oluşabilecek varyasyonların etkisi ayrı ayrı simüle edilmiştir ve mikroyapı görüntüleri ile simülasyon çıktıları üzerine yakınsama yapılmıştır.

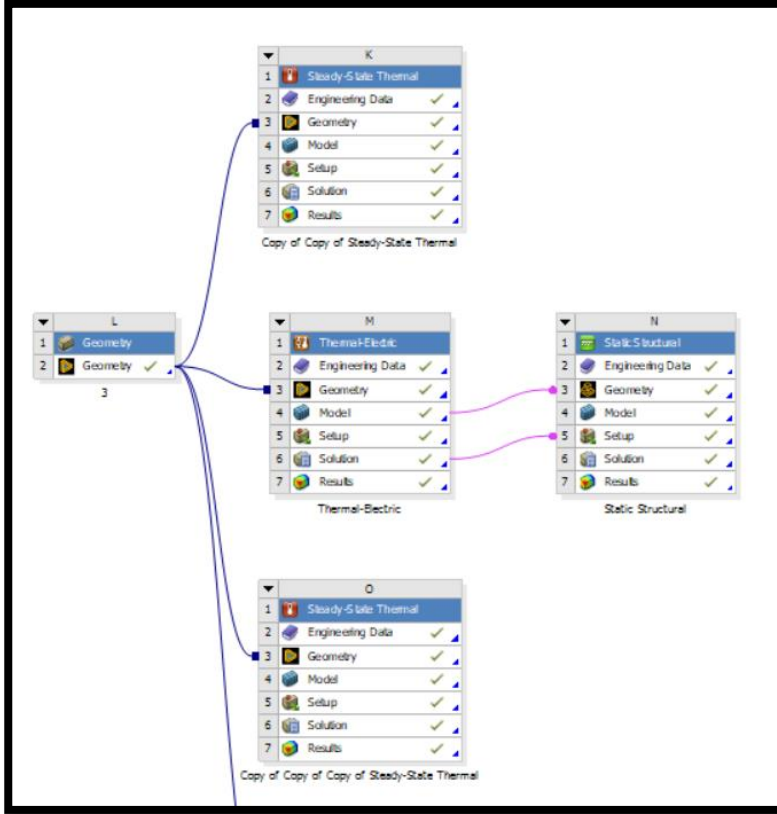
Yapılan çalışma sonlu elemanlar analizinin güçlü, verimli ve fark yaratan etkilerinin toz metalürjisi üretim basamaklarına adaptasyonu anlamında bir adım niteliğindedir. Devamında yapılacak çalışmalara yol göstermesi amaçlanarak simülasyonların detaylandırılması hedeflenmektedir.

3.1. Sonlu Elemanlar Çözücüsü ve Sistem Tasarımı

Sonlu elemanlar analizi Ansys 2023 R2 programı ile gerçekleştirilmiştir. Ansys'te kullanılan programlar ve neden bu programın seçildiği Tablo 3.1'de verilmiştir. Ansys Setup kurulumu ve akış şeması Şekil 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1 Ansys işlemcileri ve kullanım nedenleri

Ansys İşlemcisi	Kullanım Sebebi
Ansys Mechanical	Termal genleşme miktarı ve neden olduğu gerilim hesaplanmıştır.
Ansys Thermal-Electric	FAST sinterleme sonucu oluşan sıcaklık dağılımı incelenmiştir.
Ansys Steady State Thermal	Geleneksel sinterleme sonucu sıcaklık dağılımı ile Joule Heating etkisi simüle edilmiştir.

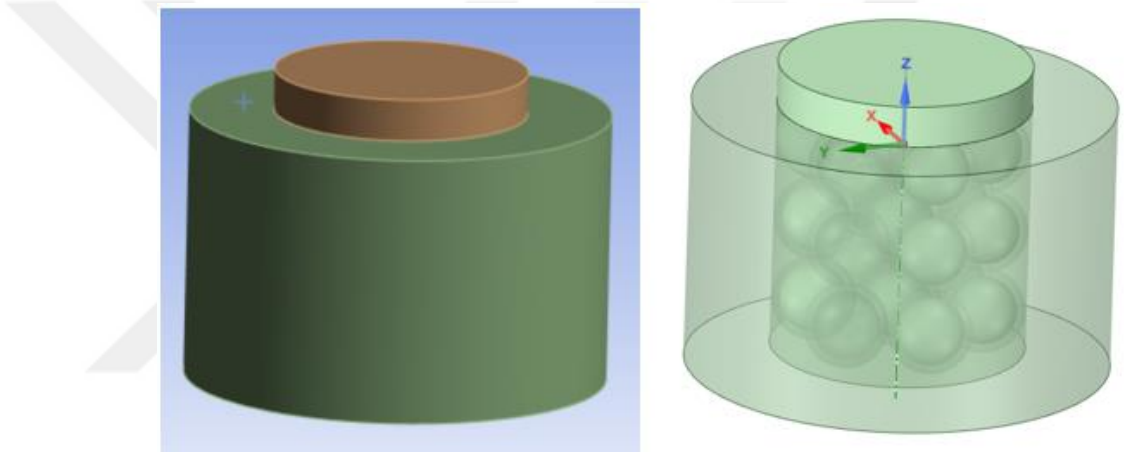


Şekil 3.1 Ansys Setup Kurulum Şeması

Ansys Setup kurulumunda alta verilen kabuller kullanılmıştır.

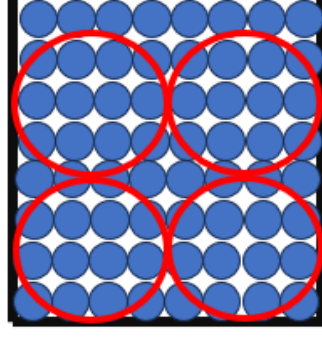
- Ortam sıcaklığı 22 °C kabul edilmiştir.
- Bilyeler rigid kabul edilmiştir.
- Kalıp ve Punch rigid kabul edilmiştir.
- Punch sıcaklık artışı ile genleşme sonucu oluşabilecek hareketi kısıtlanmıştır.

Sinterleme ve sıcak press işleminde kullanılan kalıp ve toz kümesi modellenmiştir. Modellemede Ege Üniversitesi Makine Mühendisliği Toz Metalürjisinde kullanılan kalıp referans alınmıştır. Model Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



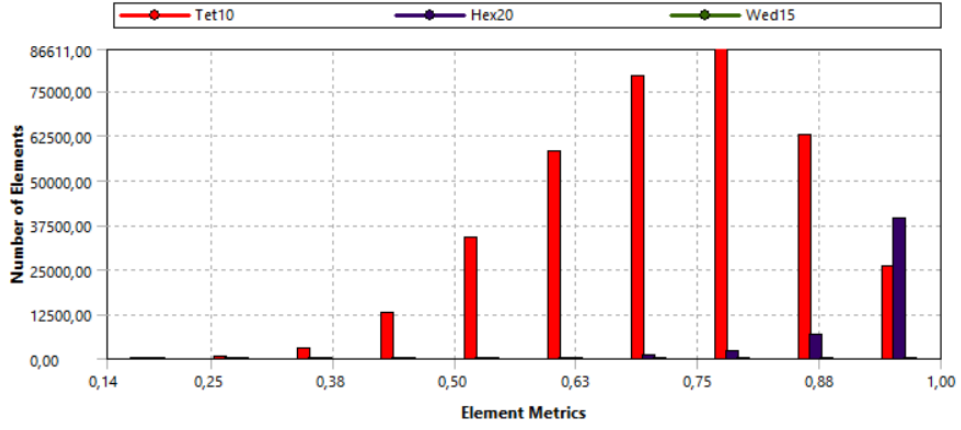
Şekil 3.2 Tasarımı ve simülasyonu yapılan kalıp ve toz partikülü sistemidir.

Her bir toz partikülün solid olarak ve orijinal boyutunda modellenip mekanik ve termal özelliklerinin incelendiği sisteme literatürde rastlanmamıştır. Tozların reel boyutunda modellendiği bir sistemin simülasyonu teknolojinin sınırlarını zorlayan bilgisayar işlemcisine ihtiyacı bulunmaktadır. Bu sebeple toz modellenmesinde mikron boyutunda yan yana gelen belli bir toz grubunun davranışı ortalama ve tek bir toz partikülü gibi davrandığı kabul edilmiştir. (Şekil 3.3)

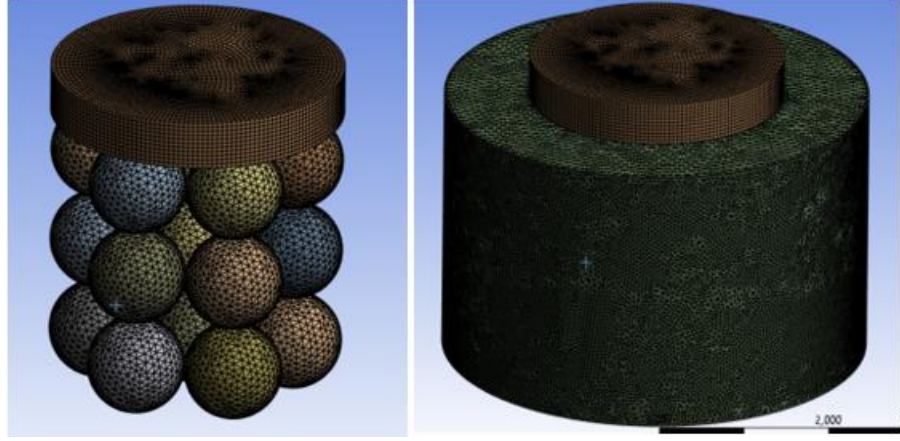


Şekil 3.3 Tozların modellenmesinin şematize edilmiş hali

Mesh çalışmasında Tet10, Hex20 ve Wed15 mesh kullanılmıştır. Toplam 837660 nodes kullanılmıştır ve ortalama element quality 0,75269'dır. Mesh dağılımı Şekil 3.4'te; mesh görselleri ise Şekil 3.5'te verilmiştir.

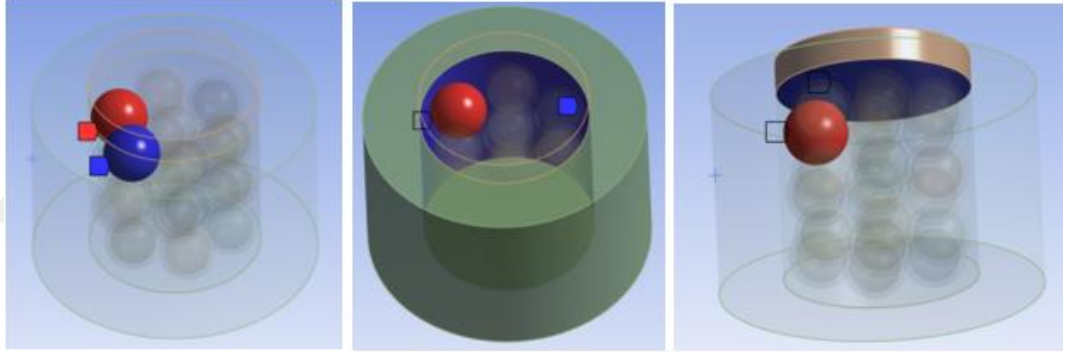


Şekil 3.4 Mesh elemanı dağılımı



Şekil 3.5 Mesh görselleri

Toz ve kalıp yüzeyleri birbirine temas ettiği noktalardan “Bonded Contact” ilişkisi verilmiştir. Stiffness factor girişim olmayacak şekilde ayarlanmıştır. (Şekil 3.6)



Şekil 3.6 Contact ilişkileri

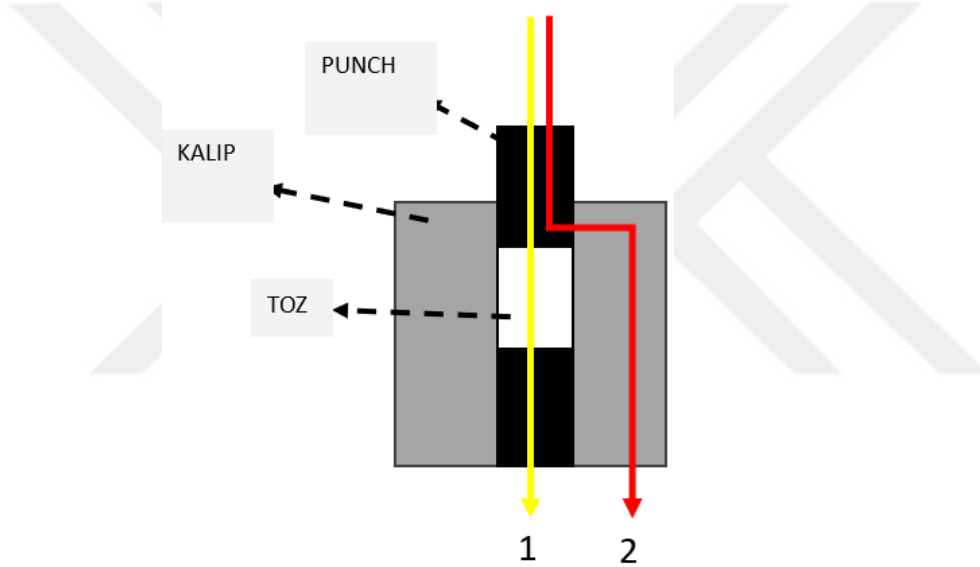
BULGULAR, KARAKTERİZASYON VE ANALİZLER

4.1. Joule Heating Etkisi İle Toz Üzerindeki Sıcaklık Dağılımı

4.1.1. Sistem tanımı ve simülasyon sonuçları

Toz metalürjisi işlem basamaklarından biri olan sinterleme operasyonunda FAST sistemi kullanıldığından Bölüm 2’de bahsedilmiştir. FAST sisteminde gerekli sıcaklığı oluşturmada ana rol elektrik enerjisine aittir. Elektrik, sistemi 3 temel şekilde tamamlamaktadır:

- Elektrotlara temas eden punch üzerinden sisteme giriş yapmakta olan akım toz içerisinde geçmekte ve kalıbın alt yüzeyinden diğer elektroda geçip sistemi tamamlamaktadır. Bu sistemde elektroda ilk temas eden punch'ın sistemin diğer bileşenlerine göre ilk ısınacak yapıdır.
- Elektrotların kalıba değdiği noktalarda ise akım direkt kalıp üzerinden tamamlanmaktadır. Bu senaryoda ise ilk olarak kalıp ısınacaktır.
- İdeal ve denge durumu olarak bahsedilen iki durum aynı anda gerçekleşecektir.

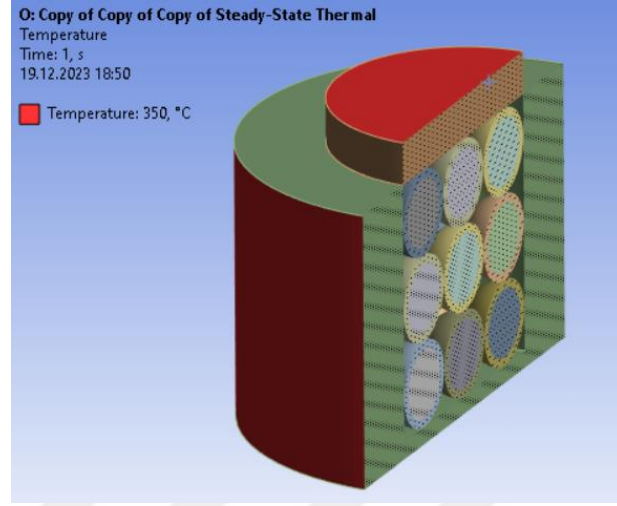


Şekil 4.1 FAST tekniğinde numune üzerindeki elektrik yolu

Termal simülasyonda sisteme ısı girdisi, akımın izleme olasılığı olan ve yukarıda bahsedilen üç senaryo üzerinden değerlendirilmiştir ve bu ısı girişinin yarattığı Joule Heating etkisi simüle edilmiştir. Toplamda 2 ayrı simülasyon yapılmıştır.

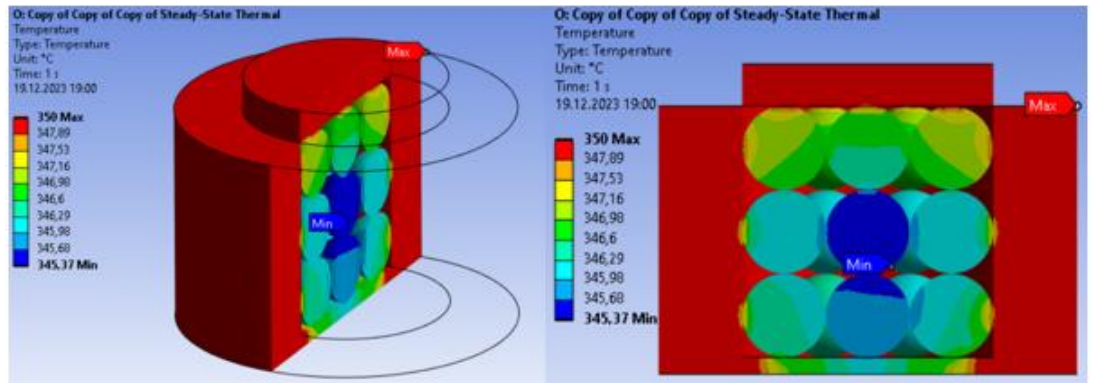
Birinci simülasyonda ideal ve denge durumu olarak belirtilen hem kalıp üzerinden hem de punch ile toz partiküllerinin üzerinden akım geçtiği senaryo simüle edilmiştir. Şekil 4.2’de modele ve aynı zamanda sisteme ısı girişi

gösterilmiştir. Sinterleme işleminin gerçekleştirildiği 350 °C sinterleme sıcaklığı olarak modellenmiştir ve sıcaklık 22 °C'den 350 °C'ye çıkartılmıştır.



Şekil 4.2 Kalıp ve Punch üzerinden sisteme girdi olarak verilen sıcaklık gösterilmiştir. Ara kesit görünüşüdür.

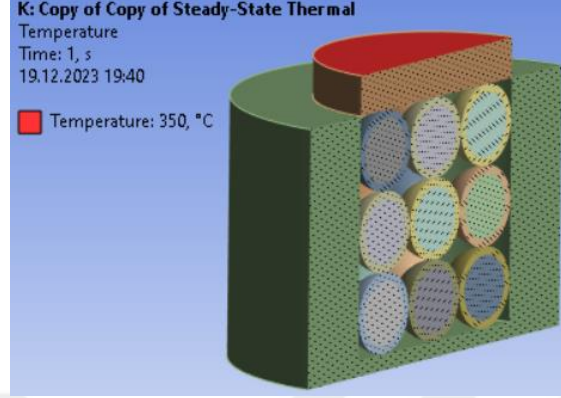
Analiz sonucunda kalıbın denge sıcaklığına geldiği ve kalıbın iç bölgelerinde kalan toz partiküllerinin görece daha düşük sıcaklıkta kaldığı tespit edilmiştir. Bu durum Şekil 4.3'te açıkça görülmektedir.



Şekil 4.3 Simüle edilen birinci senaryonun analiz sonuçlarıdır.

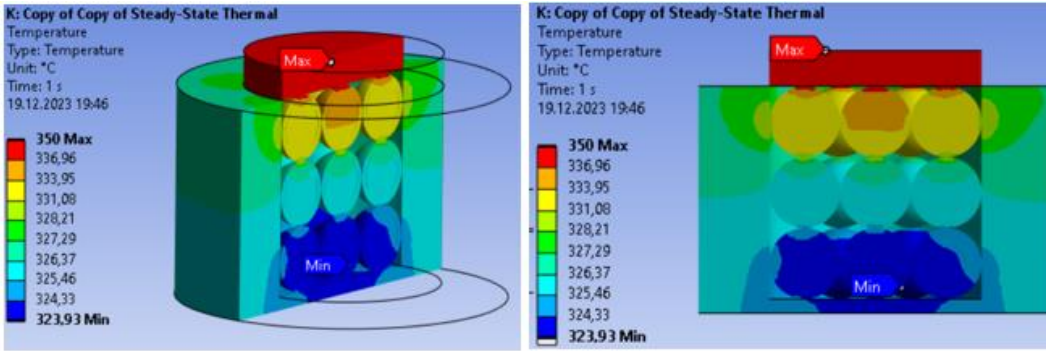
İkinci simülasyonda akımın, ilk temas ettiği punch ile punch üzerinde meydana gelen sıcaklık değişimini tamamlamak adına toz partiküllerinin üzerinden geçtiği senaryo simüle edilmiştir. Bu senaryoda ilk temasın gerçekleştiği punch'ın ilk ısınan bölge olduğu kabul edilmiş ve sinterleme işleminin ilk adımları

modellenmeye çalışılmıştır. Şekil 4.4'te modele ve aynı zamanda sisteme ısı girişi gösterilmiştir. Sinterleme işleminin gerçekleştirildiği 350 °C simülasyonda sıcaklık girdisi olarak modellenmiştir. Sıcaklık 22 °C'den 350 °C'ye çıkartılmıştır.



Şekil 4.4 Sadece punch üzerinden sisteme girdi olarak verilen sıcaklık gösterilmiştir. Ara kesit görünüşüdür.

Simülasyon sonucunda punchın ve kalıbın denge sıcaklığına geldiği görülmüştür. Sıcaklık dağılımı beklenildiği gibi gerçekleşmiş, üst bölgelerde kalan toz partiküllerinin görece daha sıcak olduğu görülmektedir. Şekil 4.5'te bu durum açıkça görülmektedir.

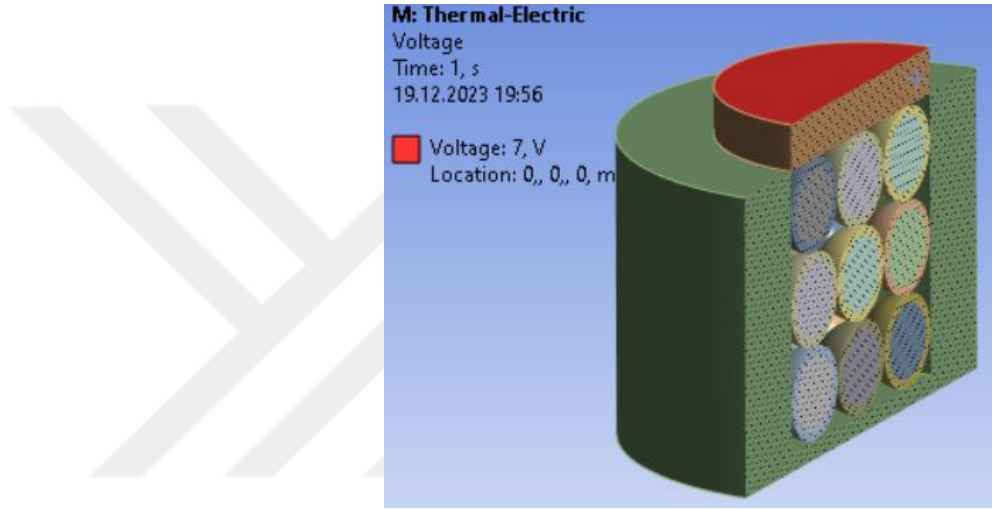


Şekil 4.5 Simüle edilen ikinci senaryonun analiz sonuçlarıdır.

4.2. FAST Sinterleme İle Toz Üzerindeki Sıcaklık Dağılımı

4.2.1. Sistem tanımı ve simülasyon sonuçları

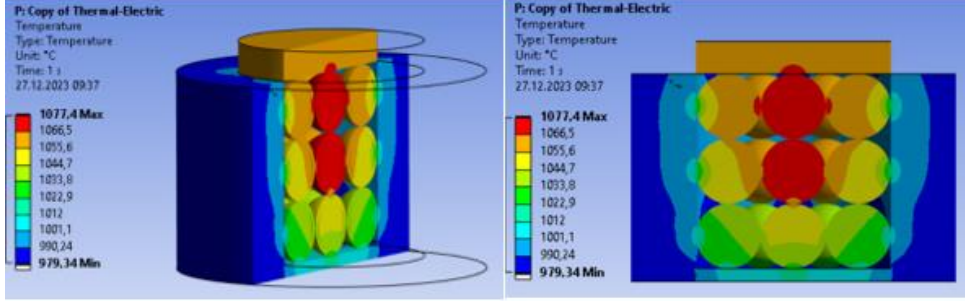
FAST tekniği kullanılarak yapılan sinterleme işleminde akımın izlediği yol ve yarattığı sıcaklık üzerine simülasyon yapılmıştır. Denge durumundaki termal-elektrik sistemi simüle edilmiştir. Simülasyona girdi olarak verilen volt değeri gerçek hayatta aynı sistem üzerine voltmetre bağlanarak bulunan değer olan 7 volt seçilmiştir (Şekil 4.6). 1 adet farklı simülasyon tasarımı yapılmıştır.



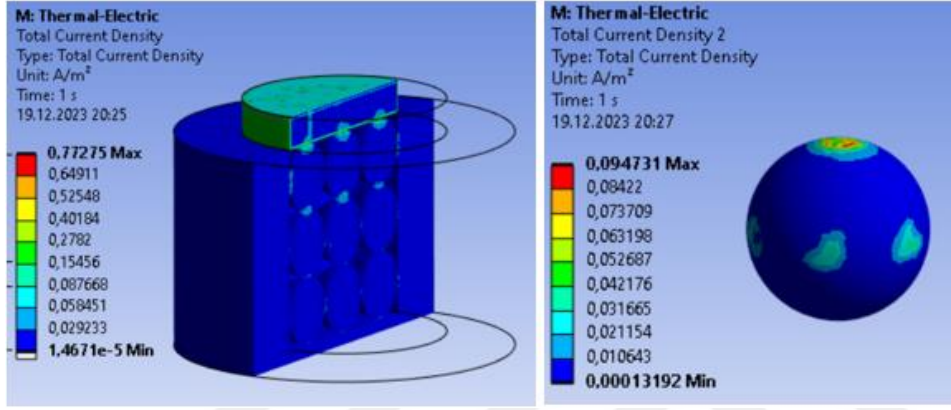
Şekil 4.6 Analizde simüle edilen voltaj girdisidir.

Simülasyonda toz çevresinde oluşma ihtimali bulunan oksit film ihmal edilmiştir.

Simülasyon sonucunda punchın ve kalıbın denge sıcaklığına geldiği görülmüştür. Şekil 4.7’de görüldüğü gibi sıcaklık, toz partiküllerinin iç kısımda kaldığı bölgede ve toz partiküllerinin birbirine temas ettiği bölgede görece daha yüksek elde edilmiştir. Akımın en kısa yoldan devreyi tamamlaması edilen sonuçları açıklamaktadır. Bu durumu akım yoğunluğunu kontrol ederek doğrulayabiliriz. Şekil 4.8’de görüldüğü gibi akım yoğunluğu tozların birbirine temas ettiği bölgelerde ve devrenin tamamlandığı en kısa yolda artmaktadır.

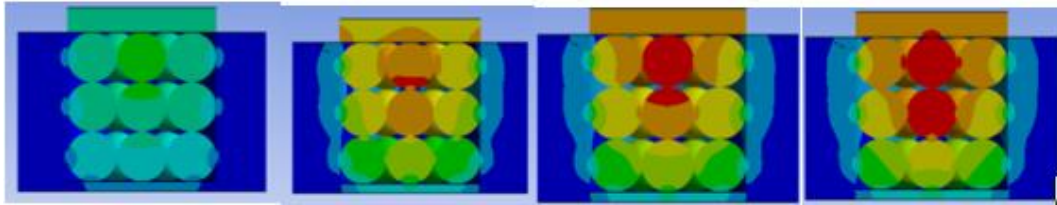


Şekil 4.7 Simüle edilen FAST sinterleme sonucu model üzerindeki sıcaklık dağılımıdır.



Şekil 4.8 Simüle edilen FAST sinterleme sonucu toz partikülleri üzerinden geçen akım ve toz partiküllerindeki akım yoğunluğudur.

Zaman bağılı olarak değişen sıcaklık şekil 4.7’de verilmiştir.



Şekil 4.9 Zamana bağımlı sıcaklık değişimi

4.3. FAST Sinterleme Sonucu Artan Sıcaklığın Mekanik Etkileri

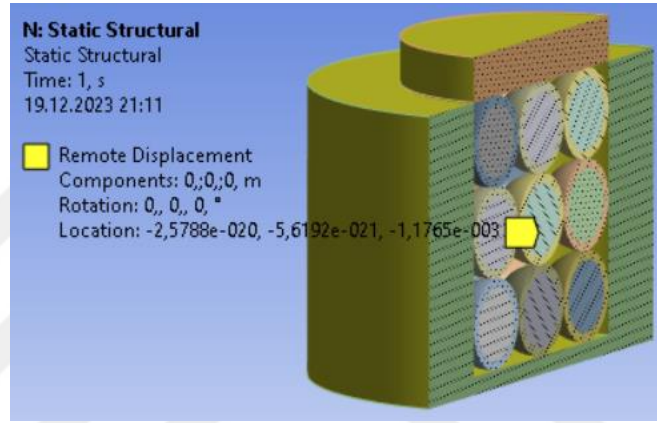
4.3.1. Sistem tanımı ve simülasyon sonuçları

Sistem tanımı 4.3.1 başlığı altında anlatılan FAST Sinterleme simülasyonu çıktısı olan sıcaklık dağılımı verileri birebir alınmış ve artan sıcaklık ile

gözlemlenen mekanik etkiyi görmek adına yeni bir analiz kurulmuş ve simülasyon elde edilmiştir.

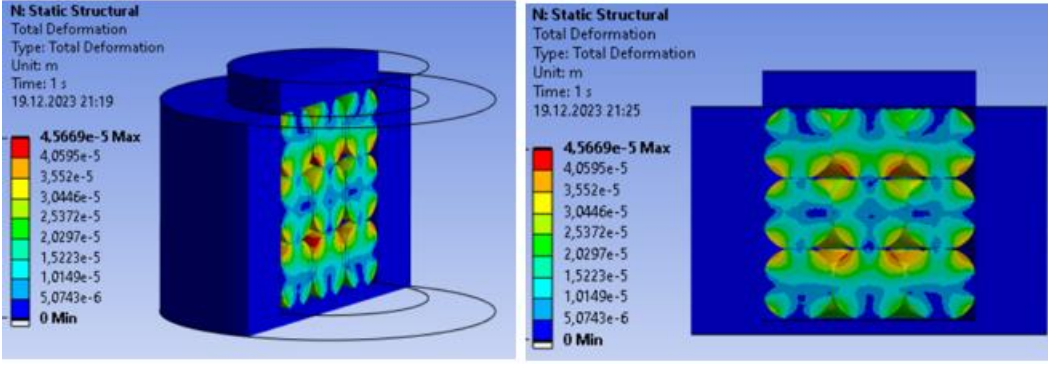
Kurulan simülasyonda toz ve kalıp sıkıştırılamaz katı kabul edilmiştir. Genleşme sonucu büyüyen toz tanelerinin punch'ı yukarı yönde hareket ettirmesi ihmal edilmiştir.

Termal genleşme sonucu oluşan mekanik etkilerin gözlemlenmesi için kurulan simülasyon girdileri Şekil 4.10'da gösterilmiştir.

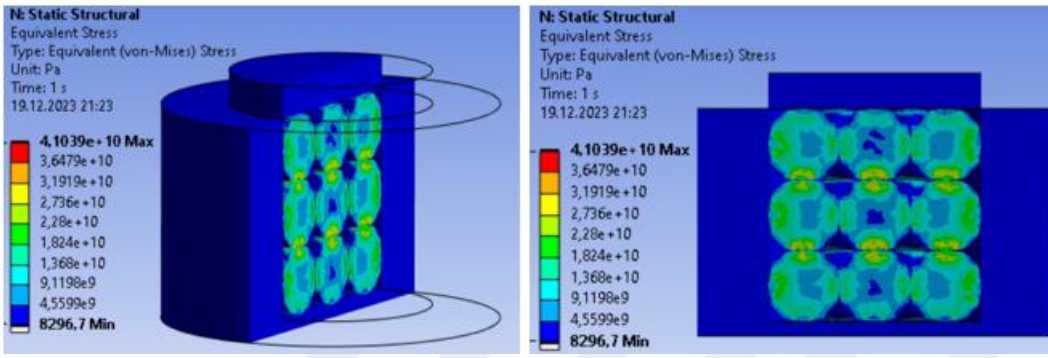


Şekil 4.10 Genleşme mekanik etkilerinin gözlemlenmesi için kurulan simülasyon girdileridir.

Simülasyon sonucunda sıcaklığın yüksek olduğu bölgelerde görece daha fazla genleşme ve gerilme gözlemlenmiştir. Toz partiküllerinin arasındaki gözenekliliğin azaldığı sonucuna ulaşılmıştır. (Şekil 4.11 ve Şekil 4.12)



Şekil 4.11 Simülasyon sonucu toplam şekil değiştirme dağılımıdır.



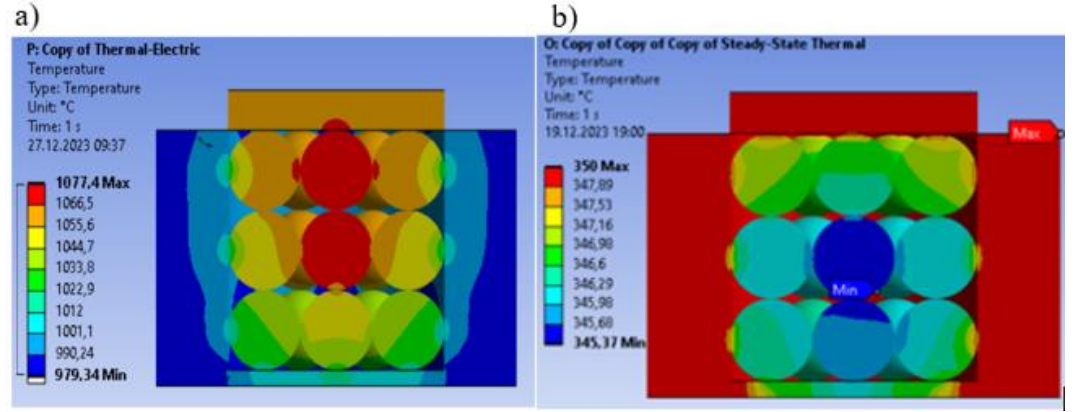
Şekil 4.12 Simülasyon sonucu gerilme dağılımıdır.

5. TARTIŞMA

Toz metalürjisi üretim basamaklarından olan FAST ile sinterleme işlemleri nümerik kabullere bağlıdır. Bu durum işlem sırasında gerçekleşen mekanizmaları soyut kılmaktadır. Yapılan simülasyon çalışmaları ile FAST yönteminde meydana gelen mekanizmaların modellenerek daha somut hale getirilmesi hedeflenmiştir.

Geleneksel -Joule heating- sinterleme ve FAST (düşük enerjili elektrik alan sinterlemesi) sinterleme mekanizmaları arasındaki fark simülasyonlarla ortaya koyulmuştur. Toz metalürjisi üretim yönteminde nihai ürün eldesinde soğuk sıkıştırılmış numune (green compact) üzerindeki sıcaklık ve sıcaklık dağılımı önemli rollere sahiptir. Sıcaklık ve sıcaklık dağılımının nihai ürünün mekanik

özelliklerine direkt etkisinin bulunduğu Bölüm 3’te detaylandırılarak anlatılmıştır. Simülasyon sonucu elde edilen sıcaklık dağılımları Şekil 5.1’de görülmektedir.



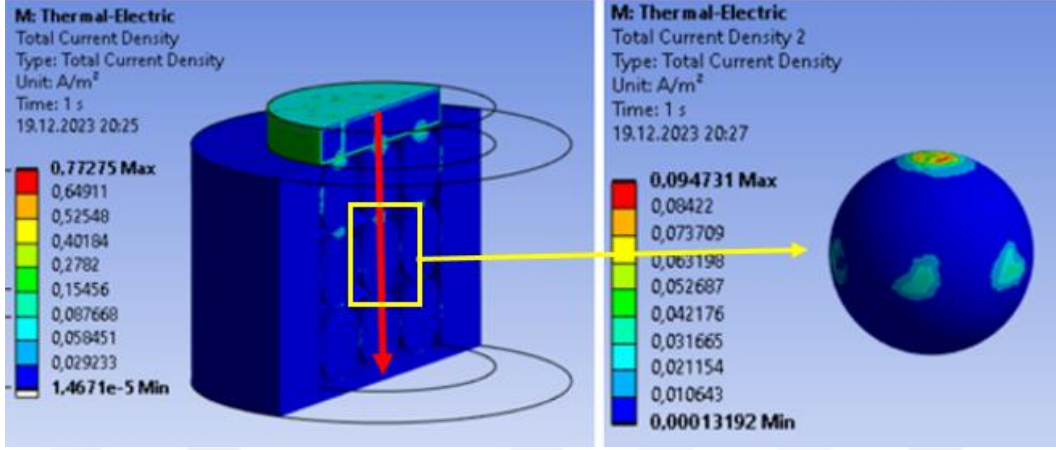
Şekil 5.1 FAST ve Joule Heating Sinterleme esnasında oluşan sıcaklık farkı ve sıcaklık dağılımı.

a) FAST b) Joule Heating-Geleneksel Sinterleme

İki durum arasındaki en bariz fark FAST yöntemi ile çok daha yüksek sıcaklık değerleri elde edilebilmektedir. Aynı zamanda toz partikülleri üzerindeki sıcaklık dağılımına göre FAST yönteminde toz partikülleri içeride kalanları daha hızlı ısınmakta ve sıcaklık içeriden dışarıya doğru dağılmaktadır. Toz partikülleri üzerinden geçen elektrik akımı ile meydana gelen FAST sinterleme sisteminin paralelinde kalıp üzerinden geçen akım ile de Joule Heating mekanizmasının devreye girdiği sonucunu çıkartabiliriz. FAST mekanizmasının yanında Joule Heating sinterleme mekanizmasının da devreye girmesi, FAST yönteminin güçlü yanlarını ortaya çıkarmakta ve mekanik özellikleri daha dayanımlı numuneler üretimini sağlamaktadır. Simülasyon sonuçları da bu yönde paralellik göstermektedir.

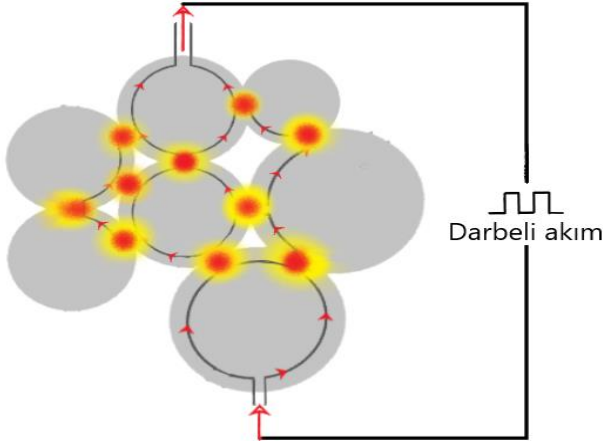
FAST sinteleme işlemini sırasında aktif rol oynayan elektrik akımı sistemi en kısa yoldan tamamlamak istemektedir. Bu durum, simülasyon sonucunda akım yoğunluğunun toz partiküllerinin ortada kalanlarının üzerinde daha yüksek değerlere çıkması sonucu ile desteklenmektedir. Tam olarak bu sebepten kaynaklı orta bölgede kalan toz partikülleri daha yüksek sıcaklıklara ulaşmaktadır. Aynı simülasyon üzerinde tek toz partikülü üzerinden geçen akım yoğunluğu da incelendiği zaman akımın toz partiküllerinin temas noktalarından geçtiği ve bu bölgelerde sıcaklığın daha yüksek değerlere çıktığı gözlemlenmiştir. Bu durum

FAST mekanizmasında spark oluşumunu destekler ve açıklar niteliktedir. (Şekil 5.2)



Şekil 5.2 FAST sinterleme mekanizmasında akımın yoğun olarak izlediği yol ve tek toz partikülü üzerindeki elektrik yoğunluğu

Şekil 5.2 ve Şekil 5.3 incelendiği zaman simülasyon sonucu elde edilen akım yoğunluğu ve dağılımının literatür bilgisi ile paralellik gösterdiği gözlemlenmektedir.

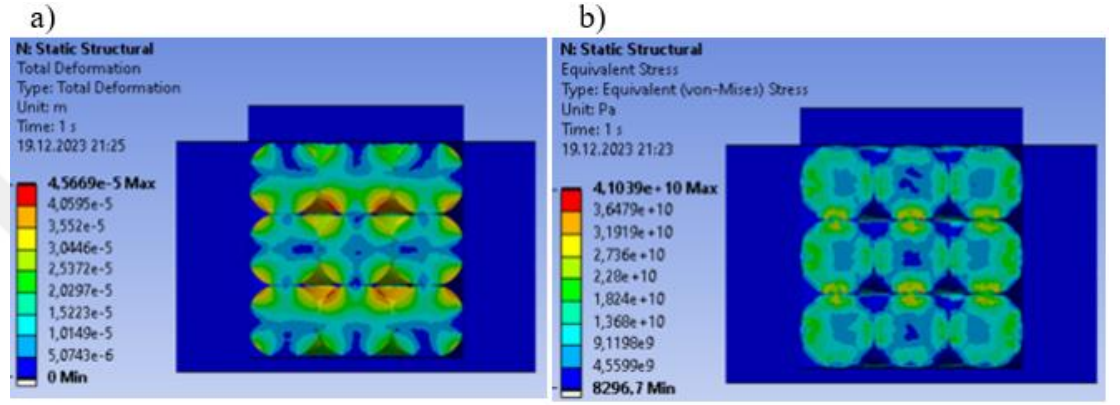


Şekil 5.3 FAST sinterleme mekanizmasında akımın izlediği yolun literatürdeki şematik gösterimi

FAST sinterleme işleminde akım ve sıcaklığının yanında genleşme (Şekil 5.4 a) ve bu sebeple toz partikülleri arasında meydana gelen gerilmelerin simülasyonu da gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.4 b'de görüldüğü gibi termal genleşme sonucu

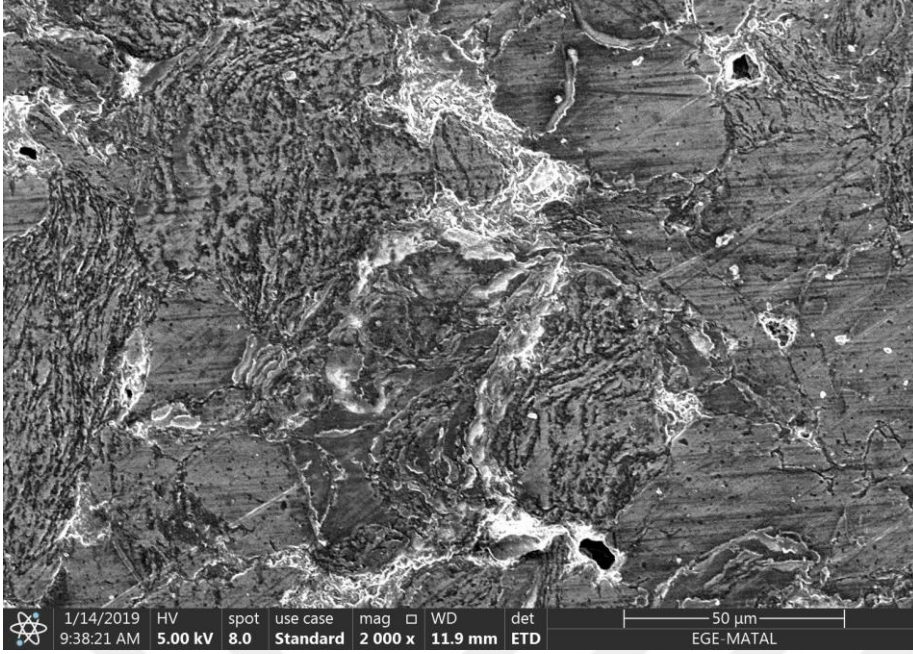
oluşan termal stres ile toz partiküllerinin çevresinde oluşan oksit tabakanın kırılmasının muhtemel olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Aynı zamanda oluşan termal genleşme ile toz partikülleri arasındaki boşluğun azaldığı ve toz partiküllerinin temas noktasında gerilmenin yükselmesi ile bu noktalarda basıncın arttığı sonucuna ulaşılmaktadır. Bu durum FAST sinterleme işleminde gözlemlenen boyun verme mekanizmasını desteklediği sonucu çıkartılabilir.

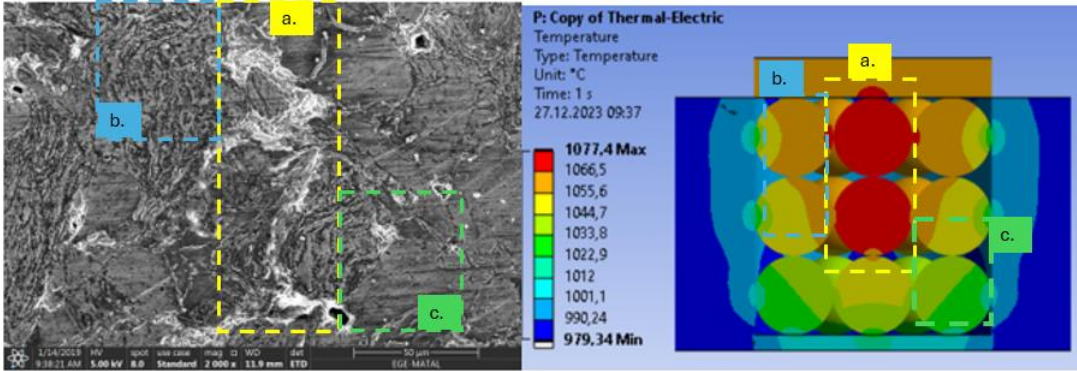


Şekil 5.4 FAST sinterleme termal etkilerden kaynaklı a) genleşme b) gerilme dağılımı gösterilmiştir.

Ege Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünde yapılan FAST sinterleme işlemi sonucu elde edilmiş numune üzerinden alınan mikro yapı fotoğrafı Şekil 5.5'te gösterilmektedir. FAST simülasyonu çıktıları ile bu mikto yapı arasındaki bağlantı Şekil 5.6'da incelenmiştir. A bölgesi akımın sistemi tamamladığı yolu göstermektedir ve sıcaklık artışının maksimum olduğu bölgedir. Mikroyapı fotoğrafında A bölgesindeki kısmı ergimeler ve ergime yönü; akımın geçişinin ve sıcaklık artışının simülasyon sonucunda elde edildiği gibi olduğunu kanıtlar niteliktedir. B bölgesi sıcaklık dağılımı sonucu oluşan termal şoku ve termal gerilmeleri göstermektedir. B bölgesinde simülasyon sonucunda da görüleceği üzere hızlı ve yüksek sıcaklık artışı beklenmektedir. Bu durum mikroyapı fotoğrafında gözlemlenen termal şok ile paralellik göstermektedir. C bölgesinde termal etki sonucu tane sınırlarının birbirini kitlediği durumlar gözlemlenmektedir. C bölgesinde simülasyonda da kanıtlandığı üzere hızlı bir sıcaklık artışı buna bağlı olarak da termal şok beklenmemektedir.



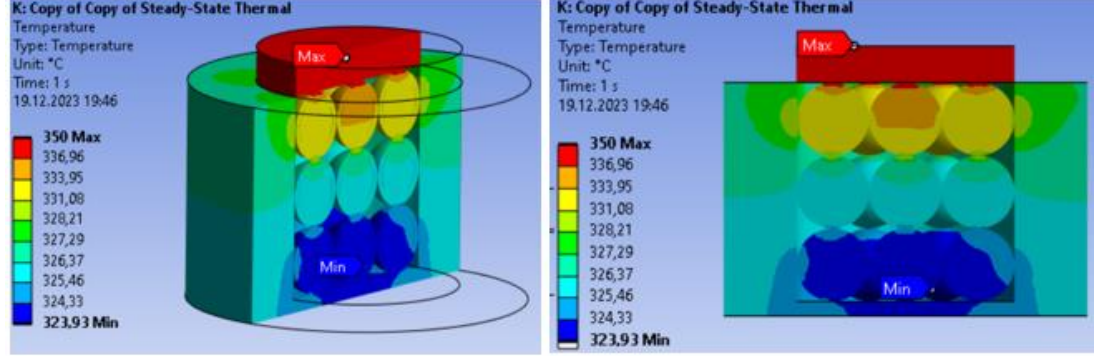
Şekil 5.5 FAST sinterleme işlemi sonucu elde edilmiş numune üzerinden alınan mikroyapı fotoğrafı



Şekil 5.6 Mikroyapı fotoğrafı ile simülasyon sonuçlarının incelenmesidir. a. Akımın izlediği yol b. Akımın yarattığı şok ve sıcaklık dağılımının etkisi c. Görece daha düşük olan sıcaklığın ve akım yoğunluğunun etkisi

Punch üzerinden akım geçişi sonucu oluşan ısının etkisinin modellendiği durumda sıcaklık değişimi Şekil 5.7’de gösterildiği gibi gerçekleşmektedir. Bu durum FAST işleminin ilk basamaklarında meydana geldiği düşünülmektedir. Bu durum laboratuvar ortamında gerçekleştirilen FAST işlemin başında gözlemlenen grafit punchın kıızıla dönmesi ile desteklenmektedir. Bu sıcaklık dağılımının sonucu olarak ilk aşamalarda reel sistemin termocupl ile sıcaklık ölçümünde sapmalar meydana gelebileceği tespit edilmiştir. Aynı zamanda sıcaklık etkisi ile üstteki

tozların ilk olarak genişlişip oksit tabakasının bu genişleme ile kırılacağı beraberinde akımın geçmesini ve devrenin toz üzerinden tamamlanmasını destekleyeceği tespit edilmiştir.



Şekil 5.7 FAST işleminde ilk ısınan puch ve sıcaklık dağılımı

6. GENEL SONUÇLAR

Toz metalürjisi üretim basamaklarının bilgisayar destekli olarak modelleme imkanının Bölüm 3'te verilen kabuller yapılarak mümkün olduğu ve literatür ile Ege Üniversitesi Makine Mühendisliğinde yapılan çalışmaların sonuçlarına paralellik gösterdiği açıkça gösterilmiştir.

Yapılan çalışma toz metalürjisinde bilgisayar destekli simülasyonların kullanılabileceği ve bunun toz metalürjisini daha yakından anlayıp fark yaratması için bulundurduğu potansiyelden bahsedilmiştir.

Literatür ve yapılan çalışmalar incelendiği zaman toz metalürjisi üretim basamaklarını tüm toz partiküllerini aynı anda değerlendirmesi ve nihai ürünün yanında toz partiküllerinin modellenmesi öncü niteliğindedir. Literatürde, toz partiküllerinin modellenip mekanik özelliklerinin incelendiği çalışmalara denk gelinmemiştir.

FAST yönteminin mekanizmaları bilgisayar destekli simülasyon ile ortaya koyulabilmiştir. FAST ile geleneksel sinterleme mekanizması arasındaki farklar simülasyon ile bilgisayar destekli olarak ortaya koyulabilmiştir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Abareshi, M., Zebarjad, S. M., & Goharshadi, E. K.,** 2010, Study of the morphology and granulometry of polyethylene–clay nanocomposite powders. *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 16(1): 90-97pp.
- Adamiak, M.,** 2008, Mechanical alloying for fabrication of aluminium matrix composite powders with Ti-Al intermetallics reinforcement. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 31(2): 191-196pp.
- Aghion, E., & Perez, Y.,** 2014, Effects of porosity on corrosion resistance of Mg alloy foam produced by powder metallurgy technology. *Materials Characterization*, 96: 78-83pp.
- Ahmed, E. M.,** 2015, Hydrogel: Preparation, characterization, and applications: A review. *Journal of advanced research*, 6(2): 105-121pp.
- Aliofkhazraei, M. (Ed.),** 2015, Handbook of Mechanical Nanostructuring, 2 Volume Set (Vol. 1). John Wiley & Sons., 272 p.
- Amini, R., Hadianfard, M. J., Salahinejad, E., Marasi, M., & Sritharan, T.,** 2009, Microstructural phase evaluation of high-nitrogen Fe–Cr–Mn alloy powders synthesized by the mechanical alloying process. *Journal of materials science*, 441: 136-148pp.
- Anonim, 2004.** “BMW 6 cylinder petrol engine with VALVETRONIC-magnesium-aluminium-compound-crankcase”,
<https://www.press.bmwgroup.com/global/photo/detail/P0015110/bmw-6-cylinder-petrol-engine-with-valvetronic-magnesium-aluminium-compound-crankcase-06/2004>
 Son erişim tarihi:26.11.2022
- Anonim, 2004,** BMW 6 cylinder petrol engine with VALVETRONIC. magnesium-aluminium-compound-crankcase”,
<https://www.press.bmwgroup.com/global/photo/detail/P0015110/bmw-6-cylinder-petrol-engine-with-valvetronic-magnesium-aluminium-compound-crankcase-06/2004>
 Son erişim tarihi:26.11.2022
- Amram, D., & Schuh, C. A.,** 2018, Interplay between thermodynamic and kinetic stabilization mechanisms in nanocrystalline Fe-Mg alloys. *Acta Materialia*, 144: 447-458pp.
- Anselmi-Tamburini, U., Gennari, S., Garay, J. E., & Munir, Z. A.,** 2005, Fundamental investigations on the spark plasma sintering/synthesis process: II. Modeling of current and temperature distributions. *Materials Science and Engineering: A*, 394(1-2): 139-148pp.
- Antolovich, S. D., & Conrad, H.,** 2004, The effects of electric currents and fields on deformation in metals, ceramics, and ionic materials: an interpretive survey. *Materials and manufacturing Processes*, 19(4): 587-610pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- ASM International.**, 2001, ASM Handbook-Vol07-Powder Metal Technologies, 194-196 pp.
- Alexander Krok, C.-Y. Wu**, 2017, Finite Element Modeling of Powder Compaction, NATO Science for Peace and Security Series A: Chemistry and Biology, s. 451-462
- Atalay, O.**, 2006, Magnezyum ve Alaşımların Konstrüksiyon Malzemesi Olarak Otomotivde Kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, 13s.
- Ates, M.**, 2016, A review on conducting polymer coatings for corrosion protection. *Journal of adhesion science and Technology*, 30(14): 1510-1536pp.
- Yavaş, B. B4c ilaveli tzm alaşımlarının spark plazma sinterleme (SPS) yöntemi ile farklı tasarımlarla üretimi ve karakterizasyonu.
- Ball, C. J.**, 1956, The history of magnesium. J. Inst. Metals, 84p.
- Barnett, M. R.**, 2007, Twinning and the ductility of magnesium alloys: Part I: "Tension" twins. *Materials Science and Engineering: A*, 464(1-2): 1-7pp.
- Barnett, M. R.**, 2013, Forming of magnesium and its alloys. *Fundamentals of magnesium alloy metallurgy*, 197-231: 201-204pp.
- Barnett, M. R., Keshavarz, Z., Beer, A. G., & Atwell, D.**, 2004, Influence of grain size on the compressive deformation of wrought Mg-3Al-1Zn. *Acta materialia*, 52(17): 5093-5103pp.
- Becker, A., Angst, S., Schmitz, A., Engenhorst, M., Stoetzel, J., Gautam, D., ... & Schmechel, R.**, 2012, The effect of Peltier heat during current activated densification. *Applied Physics Letters*, 101(1): 013113p.
- Benjamin, J. S., & Schelleng, R. D.**, 1981, Dispersion strengthened aluminum-4 pct magnesium alloy made by mechanical alloying. *Metallurgical Transactions A*, 12(10): 1827-1832pp.
- Blawert, C., Hort, N., & Kainer, K. U.**, 2004, Automotive applications of magnesium and its alloys. *Trans. Indian Inst. Met*, 57(4): 397-408pp.
- Blawert, C., Hort, N., & Kainer, K. U.**, 2004, Automotive applications of magnesium and its alloys. *Trans. Indian Inst. Met*, 57(4): 397-408pp.
- Březina, M., Hasoňová, M., Fintová, S., Doležal, P., Rednyk, A., & Wasserbauer, J.**, 2021, Mechanical and structural properties of bulk magnesium materials prepared via spark plasma sintering. *Materials Today Communications*, 28: 102569p.
- Busacker, R.G. and Saaty, T.L.**, 1965, Finite Graphs and Networks, McGraw Hill Book Com., New York, 333p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Chakraborty Banerjee, P., Al-Saadi, S., Choudhary, L., Harandi, S. E., & Singh, R.,** 2019, Magnesium implants: prospects and challenges. *Materials*, 12(1): 136p.
- Chang, Y., & Kochmann, D. M.,** 2015, A variational constitutive model for slip-twinning interactions in hcp metals: application to single-and polycrystalline magnesium. *International Journal of Plasticity*, 73: 39-61pp.
- Chawake, N., Pinto, L. D., Srivastav, A. K., Akkiraju, K., Murty, B. S., & Kottada, R. S.** (2014). On Joule heating during spark plasma sintering of metal powders. *Scripta Materialia*, 93: 52-55pp.
- Chen, W., Anselmi-Tamburini, U., Garay, J. E., Groza, J. R., & Munir, Z. A.,** 2005, Fundamental investigations on the spark plasma sintering/synthesis process: I. Effect of dc pulsing on reactivity. *Materials Science and Engineering: A*, 394(1-2): 132-138pp.
- Czerwinski, F.,** 2014, Controlling the ignition and flammability of magnesium for aerospace applications. *Corrosion Science*, 86: 1-16pp.
- Davis, R. M., McDermott, B., & Koch, C. C.,** 1988, Mechanical alloying of brittle materials. *Metallurgical Transactions A*, 19(12): 2867-2874pp.
- Dvorský, D., Kubásek, J., Roudnicka, M., Průša, F., Nečas, D., Minárik, P., ... & Vojtěch, D.,** 2021, The effect of powder size on the mechanical and corrosion properties and the ignition temperature of WE43 alloy prepared by spark plasma sintering. *Journal of Magnesium and Alloys*, 9(4): 1349-1362pp.
- El-Eskandarany, M. S.,** 2015, The history and necessity of mechanical alloying. *Mechanical Alloying*, 13-47: 2. Bölüm 32.
- El-Eskandarany, M. S.,** 2020, *Mechanical Alloying: Energy Storage, Protective Coatings, and Medical Applications*. William Andrew. 62-67pp.
- Elliott, M.,** 2004, Superabsorbent polymers. *Product development scientist for SAP. BASF Aktiengesellschaft ss*, 13.
- Enayati, M. H., & Mohamed, F. A.,** 2014, Application of mechanical alloying/milling for synthesis of nanocrystalline and amorphous materials. *International Materials Reviews*, 59(7): 394-416pp.
- Erbel, R., Di Mario, C., Bartunek, J., Bonnier, J., de Bruyne, B., Eberli, F. R., ... & Waksman, R.,** 2007, Temporary scaffolding of coronary arteries with bioabsorbable magnesium stents: a prospective, non-randomised multicentre trial. *The Lancet*, 369(9576): 1869-1875pp.
- Esamael, S. K., & Fatalla, A. A.,** 2022, Evaluation on processing parameter's effects on some mechanical properties of pure magnesium bulk prepared by powder metallurgy. *Materials Today: Proceedings*, 57, 622-629.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Famodimu, O. H.**, 2016, Additive Manufacturing of Aluminium-Metal Matrix Composite developed through Mechanical Alloying. 39-44 pp.
- Fattah-alhosseini, A., Chaharmahali, R., & Babaei, K.**, 2022, Impressive strides in amelioration of corrosion and wear behaviors of Mg alloys using applied polymer coatings on PEO porous coatings: A review. *Journal of Magnesium and Alloys*.
- Fernique, R. M. T., Savoie, S., Gariépy, M., Braidy, N., & Schulz, R.** (2020). A simple route to produce tungsten carbide powders by high-energy ball milling and annealing. *Ceramics International*, 46(2): 1736-1742pp.
- Ferreira, N. N., Ferreira, L. M. B., Cardoso, V. M. O., Boni, F. I., Souza, A. L. R., & Gremião, M. P. D.**, 2018, Recent advances in smart hydrogels for biomedical applications: From self-assembly to functional approaches. *European Polymer Journal*, 99: 117-133pp.
- Friedrich, H. E., & Mordike, B. L.**, 2006, Magnesium technology Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 214: 11-71pp.
- Gad, S. E.** (2014). Polymers. 1045-1050pp.
- Garay, J. E.**, 2010, Current-activated, pressure-assisted densification of materials. Annual review of materials research, 40. 445-468pp.
- Gerlach, G., Guenther, M., Sorber, J., Suchaneck, G., Arndt, K. F., & Richter, A.**, 2005, Chemical and pH sensors based on the swelling behavior of hydrogels. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 111: 555-561pp.
- Gialanella, S., & Malandrucolo, A.**, 2020, Alloys for aircraft structures. In *Aerospace Alloys* Springer, Cham. 41-127pp.
- Gibas, I., & Janik, H.**, 2010, Synthetic polymer hydrogels for biomedical applications. *Chem. Chem. Technol*, 4(4): 297-298pp.
- Glebov, E. M., Yuan, L., Krishtopa, L. G., Usov, O. M., & Krasnoperov, L. N.**, 2001, Coating of metal powders with polymers in supercritical carbon dioxide. *Industrial & engineering chemistry research*, 40(19): 4058-4068pp.
- Goetzel, C. G., & De Marchi, V. S.**, 1971, Electrically Activated Pressure-Sintering (Spark Sintering) Of Titanium--Aluminum--Vanadium Alloy Powders. Lockheed Palo Alto Research Lab., Calif..
- Goff, A. C.**, 2003, *Modeling and synthesis of a piezoelectric ceramic-reinforced metal matrix composite* (Doctoral dissertation, Virginia Tech), 28-37pp.
- Gray, J., & Luan, B.**, 2002, Protective coatings on magnesium and its alloys-a critical review. *Journal of alloys and compounds*, 336 (1-2): 88-113pp.
- Gubicza, J., Bui, H. Q., Fellah, F., & Dirras, G. F.**, 2009, Microstructure and mechanical behavior of ultrafine-grained Ni processed by different powder metallurgy methods. *Journal of Materials Research*, 24(1): 217-226pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Guillard, F., Allemand, A., Lulewicz, J. D., & Galy, J.**, 2007, Densification of SiC by SPS-effects of time, temperature and pressure. *Journal of the European ceramic Society*, 27(7): 2725-2728pp.
- Guillon, O., Gonzalez-Julian, J., Dargatz, B., Kessel, T., Schierring, G., Räthel, J., & Herrmann, M.**, 2014, Field-assisted sintering technology/spark plasma sintering: mechanisms, materials, and technology developments. *Advanced Engineering Materials*, 16(7): 830-849pp.
- Hahn, B. D., Park, D. S., Choi, J. J., Ryu, J., Yoon, W. H., Choi, J. H., ... & Kim, S. G.**, 2011, Aerosol deposition of hydroxyapatite–chitosan composite coatings on biodegradable magnesium alloy. *Surface and Coatings Technology*, 205(8-9), 3112-3118pp.
- He, M., Shi, L., Wang, G., Cheng, Z., Han, L., Zhang, X., ... & Wang, G.**, 2020, Biocompatible and biodegradable chitosan/sodium polyacrylate polyelectrolyte complex hydrogels with smart responsiveness. *International journal of biological macromolecules*, 155: 1245-1251pp.
- Holland, T. B., Anselmi-Tamburini, U., Quach, D. V., Tran, T. B., & Mukherjee, A. K.**, 2012, Effects of local Joule heating during the field assisted sintering of ionic ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, 32(14): 3667-3674pp.
- Hou, Z., Tian, Z., Mo, Y., & Liu, R.**, 2014, Local atomic structures in grain boundaries of bulk nanocrystalline aluminium: A molecular dynamics simulation study. *Computational materials science*, 92: 199-205pp.
- Hui Qiu, Yonggang Zhu, Li Zhang**, 2016, Thermal Stress Analysis of Powder Metallurgy Sintering Process Based on ANSYS, Key Engineering Materials Vol. 667
- Hulbert, D. M., Anders, A., Dudina, D. V., Andersson, J., Jiang, D., Unuvar, C., ... & Mukherjee, A. K.**, 2008, The absence of plasma in “spark plasma sintering”. *Journal of Applied Physics*, 104(3): 033305p.
- Hwang, S., Nishimura, C., & McCormick, P. G.**, 2001, Mechanical milling of magnesium powder. *Materials Science and Engineering: A*, 318(1-2): 22-33 pp.
- Kainer, K. U., & Von Buch, F.**, 2003, The current state of technology and potential for further development of magnesium applications. *Magnesium–alloys and technology*, 1-22pp.
- Kalidindi, A. R., & Schuh, C. A.**, 2017, Stability criteria for nanocrystalline alloys. *Acta Materialia*, 132: 128-137pp.
- Kamrani, S., & Fleck, C.**, 2019, Biodegradable magnesium alloys as temporary orthopaedic implants: a review. *Biometals*, 32(2), 185-193pp.
- Kang, S. J. L.**, 2004, *Sintering: densification, grain growth and microstructure*. Elsevier. 3-4pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Kelen, F.**, 2021, Magnezyum ve alaşımlarının otomotiv endüstrisindeki önemi ve uygulamaları. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 11(1): 548-562pp.
- Kessel, H. U., Hennicke, J., Schmidt, J., Weißgärber, T., Kieback, B. F., Herrmann, M., & Räthel, J.**, 2008, "FAST" field assisted sintering technology-a new process for the production of metallic and ceramic sintering materials. *Pulvermetallurgie in Wissenschaft und Praxis*, 22: 1-37pp.
- Khajesarvi, A., & Akbari, G.**, 2016, Properties evaluation and studying production mechanism of nanocrystalline NiAl intermetallic compound by mechanical alloying. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 47(4): 1881-1888pp.
- Khan, M. U. F., Patil, A., Christudasjustus, J., Borkar, T., & Gupta, R. K.**, 2020, Spark plasma sintering of a high-energy ball milled Mg-10 wt% Al alloy. *Journal of Magnesium and Alloys*, 8(2): 319-328pp.
- Kılınç, M. K.** 2023, Mekanik öğütülmüş magnezyum (Mg) tozların polimer kaplanması ve kaplanmış tozların sinterlenmesinin deneysel araştırılması (Master's thesis, Ege Üniversitesi).
- Kim, S. K., Lee, J. K., Yoon, Y. O., & Jo, H. H.**, 2007, Development of AZ31 Mg alloy wrought process route without protective gas. *Journal of Materials Processing Technology*, 187: 757-760pp.
- Kuziora, P., Wyszynska, M., Polanski, M., & Bystrzycki, J.**, 2014, Why the ball to powder ratio (BPR) is insufficient for describing the mechanical ball milling process. *International journal of hydrogen energy*, 39(18): 9883-9887pp.
- Lange, M. A.** *FAST solid-state synthesis on a minute scale* (Doctoral dissertation, Johannes Gutenberg-Universität Mainz), 2021.
- Lee, J. H., & Lee, S. G.**, 2016, Preparation and swelling behavior of moisture-absorbing polyurethane films impregnated with superabsorbent sodium polyacrylate particles. *Journal of Applied Polymer Science*, 133(38).
- Lemoisson, F., & Froyen, L.**, 2005, Understanding and improving powder metallurgical processes. *Fundamentals of metallurgy*, 471-502pp.
- Li, X., Qin, Y., Fu, J., & Zhao, J.**, 2015, A Gupta potential for magnesium in hcp phase. *Computational Materials Science*, 98: 328-332pp.
- Liu, M., & Guo, T.**, 2001, Preparation and swelling properties of crosslinked sodium polyacrylate. *Journal of Applied Polymer Science*, 82(6): 1515-1520pp.
- Lu, L., Lai, M. O., & Ng, C. W.**, 1998, Enhanced mechanical properties of an Al based metal matrix composite prepared using mechanical alloying. *Materials Science and Engineering: A*, 252(2): 203-211pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Luo, A. A.**, 2002, Magnesium: current and potential automotive applications. *jom*, 54(2): 42-48pp.
- Lyndon Neal Smith**, 2005, Simulation In Powder Metallurgy, Conference: Third International Conference and Exhibition on Powder Metallurgy, RoPM
- Makino, Y., Sakaguchi, M., Terada, J., & Akamatsu, K.**, 2007, Consolidation of ultrafine alumina powders with SPS method. *Journal of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy*, 54(4): 219-225pp.
- McWilliams, B., & Zavaliangos, A.**, 2008, Multi-phenomena simulation of electric field assisted sintering. *Journal of Materials Science*, 43(14): 5031-5035pp.
- Mio, H., Kano, J., Saito, F., & Kaneko, K.**, 2002, Effects of rotational direction and rotation-to-revolution speed ratio in planetary ball milling. *Materials Science and Engineering: A*, 332(1-2): 75-80pp.
- Monteiro, W. A.**, 2014, The influence of alloy element on magnesium for electronic devices applications-a review. *Light Metal Alloys Applications*, 12 (229): 229-237pp.
- Mordike, B. L., & Ebert, T.**, 2001, Magnesium: properties-applications—potential. *Materials Science and Engineering: A*, 302 (1): 37-45pp.
- Mort, P. R., & Riman, R. E.**, 1992, Reactive multicomponent powder mixtures prepared by microencapsulation: Pb (Mg₁/3Nb₂/3) O₃ synthesis. *Journal of the American Ceramic Society*, 75(6): 1581-1586pp.
- Munir, Z. A., & Ohyanagi, M.** (2021). Perspectives on the spark plasma sintering process. *Journal of Materials Science*, 56(1): 1-15pp.
- Munir, Z. A., Anselmi-Tamburini, U., & Ohyanagi, M.**, 2006, The effect of electric field and pressure on the synthesis and consolidation of materials: A review of the spark plasma sintering method. *Journal of materials science*, 41(3): 763-777pp.
- Munir, Z. A., Quach, D. V., & Ohyanagi, M.**, 2011, Electric current activation of sintering: a review of the pulsed electric current sintering process. *Journal of the American Ceramic Society*, 94(1): 1-19pp.
- Murty, B. S., & Ranganathan, S. J. M. R.**, 1998, Novel materials synthesis by mechanical alloying/milling. *International materials reviews*, 43(3): 101-141pp.
- Nam, K., Watanabe, J., & Ishihara, K.**, 2004, Modeling of swelling and drug release behavior of spontaneously forming hydrogels composed of phospholipid polymers. *International journal of pharmaceutics*, 275(1-2): 259-269pp.
- Neikov, O. D.**, 2009, Mechanical alloying. In *Handbook of Non-Ferrous Metal Powders*, 63-79pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Olevsky, E. A., Kandukuri, S., & Froyen, L.**, 2007, Consolidation enhancement in spark-plasma sintering: Impact of high heating rates. *Journal of Applied Physics*, 102(11): 114913p.
- Ostrovsky, I., & Henn, Y.**, 2007, Present state and future of magnesium application in aerospace industry. In *International Conference "New challenges in aeronautics" ASTEC*, 7: 19-22pp.
- Paraskevas, D., Dadbakhsh, S., Vleugels, J., Vanmeensel, K., Dewulf, W., & Duflou, J. R.**, 2016, Solid state recycling of pure Mg and AZ31 Mg machining chips via spark plasma sintering. *Materials & Design*, 109, 520-529pp.
- Pekguleryuz, M. O., Kainer, K., & Kaya, A.**, 2013, *Fundamentals of magnesium alloy metallurgy*. Elsevier. 1-32 pp.
- Portnoy, V. K., Fadeeva, V. I., & Zaviyalova, I. N.**, 1995, Mechanical alloying of Ni-Nb in different atmospheres. *Journal of alloys and compounds*, 224(1): 159-161pp.
- Pourmortazavi, S. M., Babaei, S., & Ashtiani, F. S.**, 2015, Statistical optimization of microencapsulation process for coating of magnesium particles with Viton polymer. *Applied Surface Science*, 349,:817-825pp.
- Pozuelo, M., Melnyk, C., Kao, W. H., & Yang, J. M.** 2011. Cryomilling and spark plasma sintering of nanocrystalline magnesium-based alloy. *Journal of Materials Research*, 26(7): 904-911pp.
- Prabhu, B., Suryanarayana, C., An, L., & Vaidyanathan, R.**, 2006, Synthesis and characterization of high volume fraction Al-Al₂O₃ nanocomposite powders by high-energy milling. *Materials Science and Engineering: A*, 425(1-2): 192-200pp.
- Rabiee, M., Mirzadeh, H., & Ataie, A.**, 2017, Processing of Cu-Fe and Cu-Fe-SiC nanocomposites by mechanical alloying. *Advanced Powder Technology*, 28(8): 1882-1887pp.
- Rahaman, M. N.**, 2017, *Ceramic processing and sintering*. CRC press. 33-34pp.
- Raj, R., Cologna, M., & Francis, J. S.**, 2011, Influence of externally imposed and internally generated electrical fields on grain growth, diffusional creep, sintering and related phenomena in ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*, 94(7): 1941-1965pp.
- Satish, C. S., Satish, K. P., & Shivakumar, H. G.**, 2006, Hydrogels as controlled drug delivery systems: Synthesis, crosslinking, water and drug transport mechanism. *Indian journal of pharmaceutical sciences*, 68(2).
- Savaşkan, T.**, 2009, Malzeme bilgisi ve muayenesi, 82s.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Schwesig, D., Schierning, G., Theissmann, R., Stein, N., Petermann, N., Wiggers, H., ... & Wolf, D. E., 2011, From nanoparticles to nanocrystalline bulk: percolation effects in field assisted sintering of silicon nanoparticles. *Nanotechnology*, 22(13): 135601pp.
- Seetharaman, S., Jayalakshmi, S., Arvind Singh, R., & Gupta, M., 2022, The Potential of Magnesium-Based Materials for Engineering and Biomedical Applications. *Journal of the Indian Institute of Science*, 1-17pp.
- Shinozaki, M., & Senna, M., 1981, Effects of number and size of milling balls on the mechanochemical activation of fine crystalline solids. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, 20(1): 59-62pp.
- Shuai, C., He, C., Peng, S., Qi, F., Wang, G., Min, A., ... & Wang, W., 2021, Mechanical alloying of immiscible metallic systems: process, microstructure, and mechanism. *Advanced Engineering Materials*, 23(4): 2001098p.
- Song, J., She, J., Chen, D., & Pan, F. (2020). Latest research advances on magnesium and magnesium alloys worldwide. *Journal of Magnesium and Alloys*, 8(1): 1-41pp.
- Soni, P. R., 2000, *Mechanical alloying: fundamentals and applications*. Cambridge Int Science Publishing. 15-23pp.
- Staiger, M. P., Pietak, A. M., Huadmai, J., & Dias, G., 2006, Magnesium and its alloys as orthopedic biomaterials: a review. *Biomaterials*, 27(9): 1728-1734pp.
- Suárez, M., Fernández, A., Menéndez, J. L., Torrecillas, R., Kessel, H. U., Hennicke, J., ... & Kessel, T., 2013, Challenges and opportunities for spark plasma sintering: a key technology for a new generation of materials. *Sintering applications*, 13: 319-342pp.
- Suk Hwan Chung, Hyundai Steel Company, Young-Sam Kwon, CetaTech, 2010, Modeling and Simulation of Press and Sinter Powder Metallurgy, ASM Handbook, Volume 22B, Metals Process Simulation
- Suryanarayana, C., 2001, Mechanical alloying and milling. *Progress in materials science*, 46(1-2): 1-184pp.
- Suryanarayana, C., 2004a1, Mechanical alloying and milling. Marcel Dekker Inc. 61-62 pp.
- Suryanarayana, C., 2019, Mechanical alloying: a novel technique to synthesize advanced materials. *Research*.
- Suryanarayana, C., & Al-Aqeeli, N., 2013, Mechanically alloyed nanocomposites. *Progress in Materials Science*, 58(4):383-502pp.
- Suryanarayana, C., 2004a2, Mechanical Alloying and Milling, Marcel Dekker, New York, 4-14 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Taha, M. A., Youness, R. A., & Zawrah, M. F.**, 2019, Review on nanocomposites fabricated by mechanical alloying. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 26(9): 1047-1058pp.
- Tan, J., & Ramakrishna, S.**, 2021, Applications of magnesium and its alloys: a review. *Applied Sciences*, 11(15): 6861p.
- Tokita, M.**, 1993, Trends in Advanced SPS Spark Plasma Sintering Systems and Technology Functionally Gradient Materials and Unique Synthetic Processing Methods from Next Generation of Powder Technology. *Journal of the Society of Powder Technology, Japan*, 30(11): 790-804pp.
- Trapp, J., Semenov, A., Eberhardt, O., Nöthe, M., Wallmersperger, T., & Kieback, B.**, 2020, Fundamental principles of spark plasma sintering of metals: part II—about the existence or non-existence of the ‘spark plasma effect’. *Powder Metallurgy*, 63(5): 312-328pp.
- Tromans, D.**, 2011, Elastic anisotropy of HCP metal crystals and polycrystals. *Int. J. Res. Rev. Appl. Sci*, 6(4): 462-483pp.
- Tukmakova, A. S., Samusevich, K. L., Asach, A. V., & Novotelnova, A. V.**, 2019, The Impact of Peltier Effect on the Temperature Field During Spark Plasma Sintering of Thermoelectric Materials. *Journal of Electronic Materials*, 48(4): 1812-1817pp.
- Vanmeensel, K., Laptev, A., Hennicke, J., Vleugels, J., & Van der Biest, O.**, 2005, Modelling of the temperature distribution during field assisted sintering. *Acta Materialia*, 53(16): 4379-4388pp.
- Wang, H., Liang, M., Gao, J., He, Z., Tian, S., Li, K., ... & Miao, Z.**, 2022, Super-hydrophobic coating prepared by mechanical milling method. *Journal of Coatings Technology and Research*, 19(2): 587-595pp.
- Wang, J., Tang, J., Zhang, P., Li, Y., Wang, J., Lai, Y., & Qin, L.**, 2012, Surface modification of magnesium alloys developed for bioabsorbable orthopedic implants: a general review. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, 100(6): 1691-1701pp.
- Westengen, H., & Aune, T. K.**, 2006, Magnesium casting alloys. In *Magnesium Technology: Metallurgy, Design Data, Applications* Berlin Heidelberg: Springer. 146-148pp.
- Windhagen, H., Radtke, K., Weizbauer, A., Diekmann, J., Noll, Y., Kreimeyer, U., ... & Waizy, H.**, 2013, Biodegradable magnesium-based screw clinically equivalent to titanium screw in hallux valgus surgery: short term results of the first prospective, randomized, controlled clinical pilot study. *Biomedical engineering online*, 12(1): 1-10pp.
- Witte, F.**, 2010, The history of biodegradable magnesium implants: a review. *Acta biomaterialia*, 6(5): 1680-1692pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Wu, Z. M., Liang, Y. X., Fan, Y., Wang, P. P., Du, J. L., Zhao, Y. B., & Fu, E. G.,** 2018, The ball to powder ratio (BPR) dependent morphology and microstructure of tungsten powder refined by ball milling. *Powder technology*, 339: 256-263pp.
- Xu, T., Yang, Y., Peng, X., Song, J., & Pan, F.,** 2019, Overview of advancement and development trend on magnesium alloy. *Journal of Magnesium and Alloys*, 7(3): 536-544pp.
- Zadorozhnyy, M. Y., Klyamkin, S. N., Strugova, D. V., Olifirov, L. K., Milovzorov, G. S., Kaloshkin, S. D., & Zadorozhnyy, V. Y.** (2016). Deposition of polymer coating on metallic powder through ball milling: application to hydrogen storage intermetallics. *International Journal of Energy Research*, 40(2): 273-279pp.
- Zadorozhnyy, V., Soprunyuk, V., Klyamkin, S., Zadorozhnyy, M., Berdonosova, E., Savvotin, I., ... & Kaloshkin, S. D.,** 2021, Mechanical spectroscopy of metal/polymer composite membranes for hydrogen separation. *Journal of Alloys and Compounds*, 866: 159014p.
- Zhang, Z. H., Liu, Z. F., Lu, J. F., Shen, X. B., Wang, F. C., & Wang, Y. D.,** 2014, The sintering mechanism in spark plasma sintering—proof of the occurrence of spark discharge. *Scripta materialia*, 81: 56-59pp.
- Zhao, D., Witte, F., Lu, F., Wang, J., Li, J., & Qin, L.,** 2017, Current status on clinical applications of magnesium-based orthopaedic implants: A review from clinical translational perspective. *Biomaterials*, 112: 287-302pp.
- Zhou, F., Ouyang, L., Zeng, M., Liu, J., Wang, H., Shao, H., & Zhu, M.,** 2019, Growth mechanism of black phosphorus synthesized by different ball milling techniques. *Journal of Alloys and Compounds*, 784: 339-346pp.
- Zhu, M., Che, X. Z., Li, Z. X., Lai, J. K. L., & Qi, M.,** 1998, Mechanical alloying of immiscible Pb-Al binary system by high energy ball milling. *Journal of materials science*, 33(24): 5873-5881pp.
- Zolriasatein, A., Shokuhfar, A., Safari, F., & Abdi, N.,** 2018, Comparative study of SPEX and planetary milling methods for the fabrication of complex metallic alloy nanoparticles. *Micro & Nano Letters*, 13(4): 448-451pp.
- Zoz, H., Ernst, D., & Reichardt, R.,** 1998, High Energy Milling/Mechanical Alloying/Reactive Milling. In *3rd International Symposium of the school of chemical engineering, University of Mexico City*.
- Partridge, P.G.,** 1967, The crystallography and deformation modes of hexagonal close-packed metals, *Metallurgical Reviews*, 12:169-194 pp.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam dahil bütün yüksek lisans eğitimim süresince değerli görüşleri, fikirleri, bilgi ve tecrübeleri ile çalışmalarımda bana yol gösteren, her alanda beni eğiterek geliştiren ve benzersiz bir dünya görüşü kazandıran çok kıymetli ve eşsiz tez danışmanım, çok değerli öğretmenim Sayın Prof. Dr. Rasim İPEK hocama teşekkür ederim. Saygı ve şükranlarımı sunarım.

Eğitim hayatımda katkısı bulunan, hayatıma giren bütün öğretmenlerime teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Bu çalışma süresince çok kıymetli Muhammed Kaan KILINÇ, Emre SİDAR'a benim için çok önemli olan destekleri için teşekkür eder, saygı, sevgi ve şükranlarımı sunarım.

Desteğini, yardımlarını ve sevgisini her zaman yanımda hissettiğim, bu günlere gelmemde çok büyük rollerinin olduğunu düşündüğüm başta annem ve babam olmak üzere çok değerli aileme teşekkürlerimi ve sevgilerimi sunarım.

Yüksek lisans eğitimimi her daim destekleyen, bilgi, birikim ve tecrübeleriyle yol gösteren, iş hayatımdaki kıymetli yöneticim Ahmet Salih ADALI'ya teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Yakın arkadaşlarım olan Uğur UYGUR, Serenat AVCI, Burak KANTAROĞLU ve Samet YEŞİL'e tez çalışmam sırasında yanımda oldukları için teşekkür ederim.

22/ 01/ 2024

Semih Recep FERİK

ÖZGEÇMİŞ

Semih Recep FERİK, ortaöğrenimini Ankara’da Çankaya Anadolu Lisesi’nde tamamladı. 2020 yılında Ege Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü’nden mezun oldu. 2020 yılında Ege Üniversitesi’nde yüksek lisans eğitimine başlamıştır.

