

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**TOZ METALURJİSİ ÜRETİM PARAMETRELERİNİN  
GÖZENEKLİLİK, MİKROSERTLİK VE ISIL GENLEŞME KATSAYISINA  
ETKİLERİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Metalurji ve Malzeme Müh. Ömer Faruk YALÇIN**

**HAZİRAN 2015**

**TRABZON**



**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**TOZ METALURJİSİ ÜRETİM PARAMETRELERİNİN  
GÖZENEKLİLİK, MİKROSERTLİK VE ISIL GENLEŞME KATSAYISINA ETKİLERİ**

**Metalurji ve Malzeme Müh. Ömer Faruk YALÇIN**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde  
" METALURJİ VE MALZEME YÜKSEK MÜHENDİSİ "   
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 26 / 05 / 2015**

**Tezin Savunma Tarihi : 11 / 06 / 2015**

**Tez Danışmanı : Doç. Dr. Bülent ÖZTÜRK**

**Trabzon 2015**

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
Ömer Faruk YALÇIN tarafından hazırlanan

TOZ METALURJİSİ ÜRETİM PARAMETRELERİNİN  
GÖZENEKLİLİK, MİKROSERTLİK VE ISIL GENLEŞME KATSAYISINA ETKİLERİ

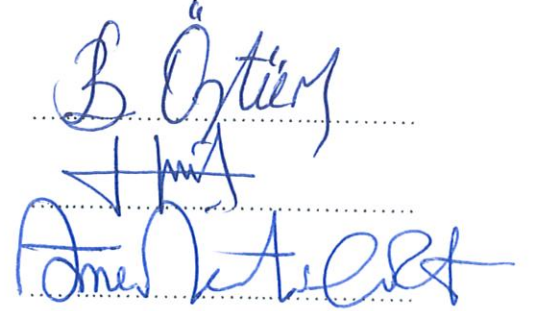
başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 26 / 05 / 2015 gün ve 1604 sayılı  
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan : Doç. Dr. Bülent ÖZTÜRK

Üye : Doç. Dr. Hakan ADATEPE

Üye : Yrd. Doç. Dr. Ömer Necati CORA



Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ

Enstitü Müdürü

## ÖNSÖZ

Gözenekli yüzeyler, değişik amaçlar için farklı uygulama alanı bulurlar. Bu yüzeylere ısı transfer uygulamaları için yüzey alanı arttırılmış alanlar, yakıt hücreleri, biyouyumlu implantlar, madde filtrasyonu vb. örnek olarak verilebilir.

Bu çalışmada, katı oksit yakıt pili (KOYP) gibi enerji dönüştürme sistemlerinde bulunan interkonnektör plakaların toz metalurji (T/M) yöntemiyle üretilmesi amaçlanmıştır. Çalışmada, toz metalurjisi üretim parametrelerinin üretilen plakaların gözeneklilik, mikrosertlik ve ısıl genleşme katsayısına etkileri incelenmiştir.

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesi sırasında değerli fikirleri ve teşvikleriyle her türlü yardımı esirgemeyen danışman hocam sayın Doç.Dr. Bülent ÖZTÜRK'e başta olmak üzere, çalışmamı izleyip bana yol gösteren değerli hocalarım sayın Prof. Dr. Sultan ÖZTÜRK, Prof. Dr. Ekrem YANMAZ, Yrd. Doç. Dr. Ömer Necati CORA ve Doç. Dr. Tayfur KÜÇÜKÖMEROĞLU'na ve ayrıca tezimin deneysel aşamasında yardımlarını esirgemeyen Arş. Gör. Hüseyin İPEK, Arş. Gör. Raşit SEZER, Arş. Gör. Kürşat İCİN, Arş. Gör. Sefa Emre SÜNBÜL, Arş. Gör. Serdar ÖZKAYA, Arş. Gör. Zafer GÖLBAŞI ile bölüm teknisyenlerimiz Mustafa ZIVALIOĞLU, Hüseyin ÖZTÜRKOĞLU ve Osman ŞAHİN'e teşekkürlerimi sunarım. Çalışmamın değişik aşamalarında katkılarını ve desteklerini esirgemeyen arkadaşlarım, Onur GÜLER, Deha Emre KANAR, Sercan AYDIN'a teşekkürü bir borç bilirim. Son olarak gösterdikleri özveri ve manevi desteklerinden dolayı sevgili aileme teşekkür ederim.

Bu çalışma 114M502 kodlu TÜBİTAK 1001 projesi tarafından desteklenmiştir.

Ömer Faruk YALÇIN

Trabzon 2015

## **TEZ ETİK BEYANNAMESİ**

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Toz Metalurjisi Üretim Parametrelerinin Gözeneklilik, Mikrosertlik ve Isıl Genleşme Katsayısına Etkileri” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Bülent ÖZTÜRK’ün sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 26/05/2015

Ömer Faruk YALÇIN

# İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ .....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ .....	IV
İÇİNDEKİLER .....	V
ÖZET .....	VII
SUMMARY .....	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XI
SEMBOLLER DİZİNİ .....	XII
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Toz Metalurjisi .....	6
1.1.1. Toz Metalurjisi Proses Adımları.....	7
1.1.1.1. Toz Üretimi .....	7
1.1.1.2. Harmanlama ve Karıştırma.....	8
1.1.1.3. Sıkıştırma veya Presleme .....	8
1.1.1.4. Sinterleme.....	9
1.1.2. Toz Metalurjisinin Avantaj ve Dezavantajları.....	10
1.1.3. Toz Metalurjisinin Uygulama Alanları.....	11
1.2. Yakıt Pili.....	13
1.3. Katı Oksit Yakıt Pili (KOYP).....	14
1.4. KOYP’larda Kullanılan İnterkonnektör Plakalar .....	16
1.5. Gözenekli Malzemeler.....	18
1.6. Isıl Genleşme Katsayısı .....	20
1.7. Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı.....	21

2.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....	22
2.1.	Kullanılan Tozlar .....	22
2.2.	Numune Üretimi .....	23
2.3.	Ölçümlerin Yapılışı .....	27
2.3.1	Gözeneklilik Ölçümü.....	27
2.3.2.	Mikrosertlik Ölçümü .....	28
2.3.3.	Isıl Genleşme Katsayısı Ölçümü .....	28
2.3.4.	SEM İncelemeleri .....	29
3.	BULGULAR .....	30
3.1.	Çalışmada Kullanılan Metal Tozları ile İlgili Bulgular .....	30
3.2.	Üretim Parametrelerinin Numune Özelliklerine Etkisi ile İlgili Bulgular .....	33
3.2.1.	Gözeneklilik Bulguları .....	35
3.2.2.	Mikrosertlik Ölçüm Sonuçları .....	43
3.2.3.	Isıl Genleşme Katsayısı Bulguları .....	47
4.	İRDELEME.....	52
4.1	Tozların Fiziksel Özellikleri.....	52
4.2	Üretim Parametrelerinin Gözenekliliğe Etkileri.....	53
4.3	Üretim Parametrelerinin Mikrosertliğe Etkileri .....	55
4.4	Üretim Parametrelerinin Isıl Genleşme Katsayısına Etkileri .....	56
5.	SONUÇLAR .....	58
6.	ÖNERİLER .....	60
7.	KAYNAKLAR.....	61

ÖZGEÇMİŞ

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

TOZ METALURJİSİ ÜRETİM PARAMETRELERİNİN  
GÖZENEKLİLİK, MİKROSERTLİK VE ISIL GENLEŞME KATSAYISINA ETKİLERİ

Ömer Faruk YALÇIN

Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Doç. Dr. Bülent ÖZTÜRK  
2015, 70 Sayfa

Gözenekli yüzeyler; katı oksit yakıt pili, ısı eşanjörleri ve biyomedikal implantlar gibi geniş uygulama alanına sahiptirler. Bu çalışmada, toz metalurjisi yöntemiyle farklı boyut ve aralıklarına sahip nikel, 316L paslanmaz çelik ve Inconel 600 metal tozları kullanılarak gözenekli yüzeyler üretilmiş ve numunelerin gözeneklilik, mikrosertlik ve ısıl genleşme katsayısına üretim parametrelerinin etkileri incelenmiştir.

Numuneler 300, 375 ve 450°C sıcaklıklarda ve 200, 300 ve 400MPa basınç değerlerinde kompakt hale getirilmiş ve azot-hidrojen atmosferinde 1 saat süreyle 1200°C’ de sinterlenmiştir. Numuneler tabakalı olarak üretilmiş olup üst ve alt tabakalar göreceli olarak daha yüksek gözenekliliğe, orta tabaka ise en az gözenekliliğe sahip olacak şekilde üretilmiştir. Üst ve alt tabakaların üretiminde 90-125µm, orta tabaka üretiminde ise 0-25µm boyutlarındaki tozlar kullanılmıştır.

Elde edilen sonuçlara göre; gözeneklilik genellikle artan üretim sıcaklığı ve basıncı ile azalmıştır. Üretim parametrelerinin mikrosertlik değerlerine belirgin bir etkisi olmadığı gözlenmiştir. Isıl genleşme katsayısı artan üretim basıncı ve sıcaklığı ile düşmüştür. En düşük ısıl genleşme katsayısı  $(17.36) \cdot 10^{-6} \cdot K^{-1}$  olarak elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Toz metalurjisi, Gözenekli yüzey, Isıl genleşme, Katı oksit yakıt pili,  
KOYP, İnterkonnektör



Master Thesis

SUMMARY

THE EFFECTS OF POWDER METALLURGY PROCESS PARAMETERS ON POROSITY,  
MICROHARDNESS AND COEFFICIENT THERMAL EXPANSION

Ömer Faruk YALÇIN

Karadeniz Technical University  
The Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Metallurgical and Materials Engineering  
Supervisor: Assoc. Professor. Bülent ÖZTÜRK  
2015, 70 Pages

Porous surfaces have wide range of applications such as solid oxide fuel cells, heat exchangers and biomedical implants. In this study, porous surfaces have been fabricated using nickel, stainless steel 316L and Inconel 600 metal powders with different size and ranges through powder metallurgy approach and the effects of the manufacturing parameters on the porosity, microhardness, coefficient thermal expansion measurements were investigated.

Samples were consolidated at 300, 375 and 450°C temperatures and under 200, 300, 400 MPa pressure and sintered in a tube furnace with controlled nitrogen-hydrogen atmosphere at 1200°C for 1 hour. Samples with top and bottom layers having relatively higher porosity, mid layer having minimum porosity are manufactured as laminated. Powders with size of 90-125µm were used to produce top and bottom layers and powders with size of 0-25µm are used to produce mid layer.

According to the obtained results, porosity and coefficient of thermal expansion have usually decreased with the increase of manufacturing pressure. It has observed that manufacturing temperature has no clear effect on porosity. Coefficient of thermal expansion of samples has diminished with the increase of manufacturing pressure and temperature. It is obtained that the lowest coefficient of thermal expansion is  $(17.36).10^{-6}.K^{-1}$

**Key Words:** Powder metallurgy, Porous surface, Thermal expansion, Solid oxide fuel cells, SOFC, Interconnector

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa No

Şekil 1.1. Katı oksit yakıt pili yığını ve elemanları .....	15
Şekil 1.2. Katı oksit yakıt pilinin şematik çalışma prensibi .....	16
Şekil 1.3. Ticari KOYP interkonnektör plakaları .....	17
Şekil 1.4. Gözenekli yüzeylerin kullanım alanları.....	19
Şekil 2.1. Üretilen numunelerin şematik resmi.....	23
Şekil 2.2. Deneysel çalışmalardaki iş akış şeması.....	24
Şekil 2.3. Numune üretim kalıp setinin şematik resmi.....	25
Şekil 2.4. Numune üretiminde kullanılan alt ve üst zımbalarının teknik resmi .....	25
Şekil 2.5. Gözeneklilik ölçümü .....	27
Şekil 2.6. Sertlik ölçüm noktaları .....	28
Şekil 2.7. Isıl genleşme ölçme sisteminin şematik resmi .....	29
Şekil 3.1. Çalışmada orta tabaka üretiminde kullanılan Nikel .....	30
Şekil 3.2. Çalışmada orta tabaka üretiminde kullanılan paslanmaz çelik 316L .....	30
Şekil 3.3. Çalışmada orta tabaka üretiminde kullanılan Inconel 600 .....	31
Şekil 3.4. Çalışmada üst/alt tabaka üretiminde kullanılan Nikel .....	31
Şekil 3.5. Çalışmada üst/alt tabaka üretiminde kullanılan paslanmaz çelik 316L .....	32
Şekil 3.6. Çalışmada üst/alt tabaka üretiminde kullanılan Inconel 600.....	32
Şekil 3.7. Çalışmada nikel tozu ile üretilen numunenin farklı görüntüleri .....	33
Şekil 3.8. Nikel tozu ile üretilen numunelerin gözeneklilik değerleri.....	35
Şekil 3.9. Nikel tozu ile üretilen numunelerin gözeneklilik değerleri.....	35
Şekil 3.10. Paslanmaz çelik 316L tozu ile üretilen numunelerin gözeneklilik.....	36
Şekil 3.11. Inconel 600 tozu ile üretilen numunelerin gözeneklilik .....	36
Şekil 3.12. Nikel tozuyla üretilen ve 900°C’de sinterlenen numuneler .....	37
Şekil 3.13. Nikel tozuyla üretilen ve 1200°C’de sinterlenen numuneler .....	38
Şekil 3.14. Paslanmaz çelik tozuyla üretilen ve 1200°C’de sinterlenen numuneler .....	39
Şekil 3.15. Inconel 600 tozlarıyla üretilen ve 1200°C’de sinterlenen numuneler.....	40
Şekil 3.16. Üretim parametrelerinin 101-109 kodlu numunelerin gözeneklilik değerlerine etkileri.....	41
Şekil 3.17. Üretim parametrelerinin 201-209 kodlu numunelerin gözeneklilik değerlerine etkileri.....	41

Şekil 3.18. Üretim parametrelerinin 301-309 kodlu numunelerin gözeneklilik değerlerine etkileri.....	42
Şekil 3.19. Üretim parametrelerinin 401-409 kodlu numunelerin gözeneklilik değerlerine etkileri.....	42
Şekil 3.20. Nikel tozundan üretilen ve 900°C sinterlenen numunelerin mikrosertlik değerleri.....	43
Şekil 3.21. Nikel tozundan üretilen ve 1200°C sinterlenen numunelerin mikrosertlik değerleri.....	43
Şekil 3.22. Paslanmaz çelik 316L tozu ile üretilen ve 1200°C sinterlenen numunelerin mikrosertlik değerleri.....	44
Şekil 3.23. Inconel 600 tozlarından üretilen ve 1200°C sinterlenen numunelerin mikrosertlik değerleri.....	44
Şekil 3.24. Nikel tozları ile üretilen numunelerin mikrosertlik grafikleri.....	45
Şekil 3.25. Nikel tozları ile üretilen numunelerin mikrosertlik grafikleri.....	45
Şekil 3.26. Paslanmaz çelik 316L tozu ile üretilen numunelerin mikrosertlikleri.....	46
Şekil 3.27. Inconel 600 tozu ile üretilen numunelerin mikrosertlik grafikleri.....	46
Şekil 3.28. Üretim sıcaklığının ve basıncının 101-109 kodlu numunelerin 800°C'deki ısı genleşme katsayılarına etkileri.....	47
Şekil 3.29. Üretim sıcaklığının ve basıncının 201-209 kodlu numunelerin 800°C'deki ısı genleşme katsayılarına etkileri.....	47
Şekil 3.30. Üretim sıcaklığının ve basıncının 301-309 kodlu numunelerin 800°C'deki ısı genleşme katsayılarına etkileri.....	48
Şekil 3.31. Üretim sıcaklığının ve basıncının 401-409 kodlu numunelerin 800°C'deki ısı genleşme katsayılarına etkileri.....	48
Şekil 3.32. Nikel tozu ile üretilen 101-109 kodlu numunelerin ısı genleşme katsayıları.....	49
Şekil 3.33. Nikel tozu ile üretilen 201-209 kodlu numunelerin ısı genleşme katsayıları.....	49
Şekil 3.34. Paslanmaz çelik 316L tozu ile üretilen 301-309 kodlu numunelerin ısı genleşme katsayıları.....	50
Şekil 3.35. Inconel 600 tozu ile üretilen 401-409 kodlu numunelerin ısı genleşme katsayısı grafikleri.....	50
Şekil 3.36. Çalışmada üretilen numuneler ile bulk numunelerin ısı genleşme katsayılarının karşılaştırılması.....	51
Şekil 3.37. Çalışmada üretilen numunelerin 800°C'deki ısı genleşme katsayılarının üretim parametrelerine bağlı olarak değişimi.....	51

## TABLolar DİZİNİ

### Sayfa No

Tablo 3.1. Metal tozlarının fiziksel ve mekanik özellikleri.....	22
Tablo 3.2. Metal tozlarının kimyasal özellikleri.....	22
Tablo 3.3. Numune üretim parametreleri .....	26
Tablo 4.1 Üretilen numunelerden elde edilen bulgular .....	34

## SEMBOLLER DİZİNİ

T/M:	Toz metalurjisi
KOYP:	Katı oksit yakıt pili
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> :	Demir oksit
MPa:	Mega paskal
Fe:	Demir
Cr:	Krom
Ni:	Nikel
Mo:	Molibden
MEG:	Membran elektrot grubu
LaCrO <sub>3</sub> :	Lantanyum kromit
d <sub>50</sub> :	Ortalama toz boyutu
µm:	Mikrometre
N <sub>2</sub> :	Azot gazı
H <sub>2</sub> :	Hidrojen gazı
TiC:	Titanyum karbür
SEM:	Taramalı elektron mikroskobu
ST:	Sinterleme sıcaklığı
α:	Boyca uzama katsayısı
L:	Cisim (numune) boyu
L <sub>0</sub> :	Cismin(numunenin) ilk boyu
T:	Sıcaklık
T <sub>0</sub> :	Ölçümden önceki sıcaklık
ΔL:	Boydaki değişim
ΔT:	Sıcaklık değişimi
C <sub>T</sub> :	Etkin ısı genleşme katsayısı
C <sub>0</sub> :	Malzemenin ısı genleşme katsayısı
ρ :	Kısmi yoğunluk

## 1. GİRİŞ

Toz metalurjisi (T/M), metal tozları veya diğer tozların kullanılması ile kütsel malzeme ve şekillendirilmiş parça üretimi teknolojisidir. T/M son şekle yakın parça imal etme ve ileri teknoloji malzemelerin imal edilmesine imkân veren farklı bir imalat yöntemidir. T/M çeşitli metal ve seramik tozların imal edilmesi, karakterizasyonu ile bu tozların değişik ısı ve mekanik deformasyon prensiplerinin uygulanarak birleştirilmesi, kullanışlı mühendislik parçalara dönüştürülmesini amaçlayan bir imalat sürecidir. Bu dönüşüm başlıca, toz üretme, istenilen tozların homojen bir şekilde karıştırılması, toz karışımın kalıp içerisinde sıkıştırılması ve toz tanelerinin birbirleriyle bağ oluşturmaları için atmosfer kontrollü ve gerekli sıcaklıkta, belirli bir sürede sinterleme işleminin yapılması basamaklarını içerir. Bu dönüşümü kapsayan genel bir ifade ile T/M; farklı boyut, tip, şekil ve sıkıştırılabilme özelliğine sahip tozların, % ağırlık oranlarının belirlenip homojen olarak karıştırılmasıdır. Karışımın uygun ortamda sıkıştırılmasıyla istenilen şekle veya forma dönüştürülerek yoğunluk kazandırılması daha sonra mukavemet ve yoğunluğun artırılması için sinterleme yapılması esası ile parça imal etme yöntemidir [1-11].

Gözenekli malzeme tasarımında en önemli faktörlerden biri gözenekliliğin kontrol edilebilir ve istenilen düzeyde elde edilebilir olmasıdır. Gözenekli yüzeyler, çok değişik amaçlar için farklı uygulama alanlarına sahiptirler. Örnek olarak gözenekli metalik yüzeyler, ısıtıcı ve soğutucu gibi termal uygulamalar, yakıt hücreleri, filtreleme işlemleri ve biyomedikal implant malzemeleri gösterilebilir. T/M yöntemiyle gözenekli metalik yüzeyler hem kolayca üretilmesi hem de istenilen oranda gözenekliliğin elde edilebilmesi nedeniyle çok önemlidir. Bu sebeplerden dolayı T/M istenilen gözeneklilik oranında ürün üretimi için en uygun yöntemdir [12-28]. Gözenekli malzemeler, düşük yoğunluk-rijitlik oranı, yüksek sıcaklıklara dayanıklılık ve yüksek ısı ve ses yalıtkanlığı gibi alışılmadık fiziksel ve mekanik özelliklere sahiptir. Bu özellikleri nedeniyle mühendislik malzemeleri içinde “çok fonksiyonlu malzemeler” olarak anılırlar. Köpük yapılarının veya yüksek oranda boşluk içeren metallerin özellikleri gerek pratik uygulamalar gerekse bu sınıftaki malzemelerin bilimsel davranışlarının incelenmesi açısından oldukça ilgi çekicidir [55-57]. Son yıllarda gözenekli malzemeler için farklı uygulama alanları bulunmuştur. Polimer ve cam köpükler düşük ısı iletkenlikleri nedeniyle ısı yalıtkanlık gerektiren uygulamalarda, yüksek enerji absorblama gösterdiklerinden dolayı da ambalajlamada kullanılırken, seramik köpükler yüksek sıcaklık dayanımlarından dolayı metal döküm sektöründe filtreleme

amacıyla kullanılmaktadır. Bu malzemelere göre yeni bir malzeme grubu olan gözenekli metalik malzemeler hafiflik, rijitlik, ısı ve ses izolasyonu özellikleriyle otomotiv, enerji ve havacılık uygulamalarında kullanım alanı bulmaktadır. Gözenekli metalik malzemelerin yapısal kullanım alanları arasında otomotiv, demiryolu ve inşaat endüstrileri, uzay araçları ve biyomedikal uygulamalar; işlevsel kullanım alanları arasında ise filtreleme, ısı değiştirici, ısıtma-soğutma sistemleri, elektrokimyasal uygulamalar (yakıt pilleri), sıvı iletimi gibi uygulamalar sayılabilir. Gözenekli olarak üretilen metaller ve alaşımlar arasında alüminyum, titanyum, çelik, nikel esaslı süperalaşımlar, kurşun ve çinko sayılabilir [53-63].

T/M yöntemiyle gözenekli metalik plaka üretimi birçok araştırmacının ilgisini çekmiştir. Öztürk, Cora ve Koç [12] yaptıkları çalışmada, gözenekli metalik yüzeylerin toz metalürjisiyle üretimini amaçlamışlar ve üretim parametrelerinin gözeneklilik ve mikrosertlik etkilerini incelemişlerdir. Sıkıştırma basıncının ve sıcaklığının artmasıyla gözeneklilik ve buna bağlı olarak mikrosertlik değerlerinin arttığını tespit etmişlerdir. Cora, Usta ve Koç [13,14,18] toz metalürjisi yöntemiyle mikro gözenekli yüzeylerin üretimini başarılı bir şekilde gerçekleştirmişler ve ürettikleri numunelerin ısı transfer hızına mikro gözeneklilerin etkisini incelemişler ve mikro gözenekler sayesinde ısı transferinde iyileşme olduğunu tespit etmişlerdir. Kurt ve Ayata [15] yaptıkları çalışmada, toz metalürjisi yöntemini kullanarak gözenekli metalik parçalar üretmişler ve ürettikleri numunelerin gözeneklilik oranlarının elektriksel iletkenliklerine etkilerini incelemişlerdir. Genellikle gözeneklilik oranının elektriksel iletkenliği kötü etkilediğini belirlemişlerdir. Öztürk ve Yalçın [16] nikel tozu kullanarak farklı sinterleme sıcaklıklarında numuneler üretmişler ve bu numunelerin gözeneklilik ve mikrosertlik değerlerini elde etmişlerdir. Elde edilen bulgulara göre sinterleme sıcaklığının hem gözeneklilik hem de mikrosertlik değerlerine önemli bir etkisi olduğunu belirtmişlerdir. Öztürk ve Yalçın [17] toz metalürjisi yöntemiyle paslanmaz 316L çelik tozunu kullanarak yakıt pillerinde kullanılan interkonnektör plaka üretimini gerçekleştirmişler ve deneylerde gözeneklilik ve ısıl genleşme katsayılarının artan üretim parametrelerine göre azaldığını tespit etmişlerdir. Cora ve arkadaşları [20-24] yaptıkları çalışmalarda, toz metalürjisi yöntemiyle gözenekli metalik yüzeyler üretmişler ve gözenekliliğin mekanik ve fiziksel özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Güner ve arkadaşları [25] yaptıkları çalışmada, gözenekli metalik yüzeyleri sayısal olarak modellemişler ve T/M'nin mekanik özelliklerine etkilerini araştırmışlardır. Usta ve arkadaşları [26,27] yaptıkları çalışmalarda, gözenekli metalik plakaların üretimini toz metalürjisiyle başarılı bir şekilde gerçekleştirmişler ve bu numunelerin ısı transferler

oranlarını üretim parametrelerine bağılı olarak belirlemişlerdir. Usta ve Köylü [28], yakıt hücrelerinde kullanılacak gözenekli metalik yüzeylerin üretim parametrelerini araştırmışlardır. Üretim için paslanmaz çelik 316L tozları kullanmışlardır. Ülkemizde yapılan çalışmaların temellerini oluşturan yüksek lisans ve doktora çalışmalarında gözenekli malzemeler ve gözenekli metalik yüzeyler ile ilgili birçok araştırma konusu bulunmaktadır [32-57]. Ayrıca T/M ile üretim parametrelerin gözenekli metalik yüzeyler üzerindeki etkisini inceleyen yayınlarda bulunmaktadır [60-72]. Çalışmalarda araştırmacılar üretim parametrelerinin üretilecek numunelerin mekanik ve fiziksel özelliklerine etkilerini incelemişler, genellikle kontrollü gözeneklilik için toz boyutu, şekli ve kimyasal kompozisyonun önemli olduğunu belirlemişlerdir.

Mühendislik uygulamalarında en çok karşılaşılan işlemlerden birisi, farklı sıcaklıklardaki iki veya daha fazla akışkan arasındaki ısı değişimidir. Bu değişimin yapıldığı cihazlar, genelde ısı değiştirici olarak adlandırılmakta olup, pratikte termik santrallerde, kimya endüstrilerinde, ısıtma, iklimlendirme, soğutma tesisatlarında, taşıtlarda, elektronik cihazlarda, yakıt pilleri, alternatif enerji kaynaklarının kullanımında, ısı depolanması vb. birçok yerde bulunabilmektedir [32]. Liter ve Kaviany [19] yaptıkları çalışmalarında, gözenekli yüzeylere sahip ısı değiştiricileri ile kılcal etkisiyle çift fazlı ısı transferi ve aynı zamanda artırılmış yüzey alanı elde etmişler ve böylece düz bir plakaya göre %300 gibi bir artışla ısı transferi kapasitesine ulaşabileceğini göstermişlerdir. Isı değiştiricilerde yüzey alanının artırılması, aktarılabilecek ısı miktarını doğrudan etkilediğinden, dar hacimler üzerinden daha büyük yüzey alanına sahip ısı değiştiricisi kullanımı zorunluluğu giderek artmaktadır. Isı değiştiricisinde gözenekli yüzeyler kullanmak veya yüzeyinde çıkıntılar oluşturmak yüzey alanını arttırmak için başlıca yöntemlerdir. Hem çıkıntılı hem de gözenekli yüzeyin aynı anda imalatı ise iki başarılı uygulamanın birleştirilmesidir. Bu yüzey alanını önemli ölçülerde artırmakla birlikte kılcal etki (capillary effect) yardımı ile iki fazlı soğutma (cooling by means of two-phase flow nucleate boiling) da mümkün olmakta ve ısı değiştiricisinin verimi %300 mertebelerinde artmaktadır [14,19,24-28,32].

Gözenekli yüzeylerin kullanım alanlarından birisi de yakıt pilleridir. Yakıt pilleri, yakıttaki kimyasal enerjiyi doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren cihazlardır. Günümüzde yüksek enerji verimliliği, güvenilirlik, taşınabilirlik ve ekolojik sınırlamalardan dolayı yeni geleneksel güç santralleri inşa etmek yerine, güç talebini karşılamak için yenilenebilir enerji kaynaklarına daha fazla önem verilmektedir. Bu kaynaklar arasında yakıt pilleri, yüksek verimli enerji üretimi ve çevreyle ilgili sınırlamaları olmadığından dolayı elektrik ve ısı



üretimi için çok büyük bir ilgi oluşturmuştur. Yakıt pilleri yanma olmaksızın, kullanılan yakıtın ve oksitleyicinin sahip olduğu kimyasal enerjiyi değişmeyen elektrot-elektrolit sistemi vasıtasıyla elektrik enerjisine dönüştüren ve yüksek verimle çalışan basit ve statik bir teknolojidir. Yakıt hücreleri kimyasal enerjinin elektrik enerjisine çevrilmesini sağlamalarıyla, elektrik enerjisinin elde edilmesinde daha ekonomik ve verimli sistemlerin üretilmesine imkân sağlamaktadır [113]. Temel olarak bir yakıt pili; elektrolit, anot ve katot elektrotlarından oluşur. Anot ve katotlar gözenekli (porous) yapıdadır. Elektrotlardan akım toplamak için interkonnektör veya akım toplayıcılar plakalar kullanılmaktadır. İnterkonnektör veya akım toplayıcılar üzerinde gaz akış kanalları işlenmiş plakalardır [129,130].

Glatz ve arkadaşları [85-89] T/M yöntemiyle net şekilli yani istenilen tolerans ölçülerinde interkonnektör plakaların üretimini araştırmışlar ve interkonnektörlerden istenilen ince kanal geometrisi ve yüzey kalitesi için toz boyutunu, toz şeklini ve üretim parametrelerini belirlemişlerdir. İnterkonnektörler için gerekli testleri ve analizleri yaparak KOYP'lara uygulanabilirliğini araştırmışlardır. Yaptıkları araştırmalarda T/M ile üretilen interkonnektör plakaların KOYP'lar için uygun ve üretimlerinin daha kolay olduğunu tespit etmişlerdir. Bu araştırmacılar Plansee (Avusturya) firması ile yaptıkları ortak projelerde T/M ile üretililecek ve KOYP için en uygun interkonnektör malzemesinin araştırmasını halen daha yapmaktadır. Molin ve arkadaşları [78] katı oksit yakıt pillerinde kullanılan interkonnektör plakaların 430L paslanmaz çelik tozları kullanarak gözenekli plakaların üretimini T/M yöntemiyle gerçekleştirmişler ve katı oksit yakıt pillerine uyumluluğunu araştırmışlardır. Panteix ve arkadaşları [71] yaptıkları çalışmada KOYP kullanılan interkonnektör plakaları için gözenekli kaplama yaparak bunların sağladığı elektriksel verimliliği araştırmışlar ve KOYP'lar için kaplama yöntemini geliştirmişlerdir. Parekh ve arkadaşları [72] T/M yöntemiyle KOYP için interkonnektör plakaların üretimini araştırmışlar ve 430L paslanmaz çelik tozu ile belirli bir kanal geometrisine uygun olarak interkonnektör numuneler üretmişlerdir. Antepara ve arkadaşları [73-75] KOYP kullanılan gözenekli metalik plakaların üretimi için T/M'den yararlanmışlar. KOYP'larda verimliliğin artırılması için yapılan bu çalışmada, anot ve katotlardan üretilen elektronların toplanmasını sağlayan interkonnektörleri gözenekli yapıda yaparak KOYP'lardan elde edilen verimliliği tespit etmeye çalışmışlar ve yaptıkları çalışmalarda elektriksel dirençlerin gözeneklilik ile ilişkili olduğunu belirlemişlerdir.

Zhu ve Deevi [129], Wu ve Liu [121], Fergus [115], Anderson [118] yaptıkları çalışmalarda KOYP'larda kullanılan gelişmiş interkonnektör malzemelerini araştırmışlardır. Metalik interkonnektör malzemelerinde istenilen özellikler genellikle yüksek sıcaklığa dayanıklı ve eş çalıştığı diğer elemanlar ile uyumlu olmasını belirtmişlerdir. En uygun interkonnektör malzemesi olarak krom oranı %22-24, ısıl genleşme katsayısının eş çalıştığı seramikler ile uyumlu olması gerektiğini ve en önemlisi kolay üretim yöntemine sahip olması gerektiğini vurgulamışlardır. Stygar ve arkadaşları [117], yaptığı çalışmada Crofer22APU metalik interkonnektör plakaların mekanik ve fiziksel özelliklerini incelemişler ve bu özelliklerin katı oksit yakıt pili interkonnektörleri için uygun olup olmadığını araştırmışlardır. Yapılan incelemeler sonucunda Crofer22APU hem seramikler ile uyumlu olduğu hem de verimliklerinin ve ohmik kayıpların az olduğunu tespit etmişlerdir. Hsiao ve arkadaşları [90] KOYP'larda interkonnektör plakası olarak paslanmaz çelik 17-4PH malzemesinin kullanılabilmesini savunmuşlar ve KOYP'lar için mekanik özelliklerini belirlemişlerdir. Yüksek sıcaklık (KOYP çalışma sıcaklıklarında) deneylerinde 17-4 PH paslanmaz çelik malzemesinin yeterli dayanıma sahip olduğunu belirlemişlerdir. 17-4 PH paslanmaz çelik malzemesinin yüksek sıcaklık özelliklerini yaşlandırma işlemi arasındaki ilişkiyi gösteren çok sayıda yayın bulunmaktadır [92-96]. Scott ve Dunand [91,112] ticari paslanmaz çelik türü olan E-Brite malzemesinin interkonnektör malzemesi olarak kullanılmasını ve toz metal ile bulk malzemeleri arasındaki farkı araştırmışlardır. Yaptıkları yüksek sıcaklık testleri ile gözenekliliğin sürünme, çekme değerlerine etkilerini belirlemişlerdir. Gözenekli yapıların yaklaşık %10 daha düşük özelliklere sahip olduğunu öne sürmüşlerdir. Ticari interkonnektör plaka üretiminde Sanyo ve Fuji Elektrik Inconel600, Siemens, Sulzer Hexis Cr<sub>5</sub>Fe<sub>1</sub>Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Ceramic Fuel Cell Ltd, Forschungszentrum ve Jülich firmaları ferritik paslanmaz çelik malzemelerini kullanmışlardır [118]. Wu ve arkadaşları [121], Church ve arkadaşları [122], Geng ve arkadaşları [122], Yang ve arkadaşları [123] yaptıkları çalışmalarda Ni-Cr alaşımlarının, Haynes, Hastelloy, Inconel, Nicrofer gibi alaşımların interkonnektör malzemesi olarak kullanılabilmesini savunmuşlardır.

Hazırlanan bu tez çalışmasında; KOYP gibi enerji dönüştürme sistemlerindeki interkonnektör plakaların toz metalurji yöntemiyle üretilebilirliği amaçlanmıştır. Çalışmada, ayrıca üretilen plakaların gözeneklilik, mikrosertlik ve ısıl genleşme katsayılarına üretim parametrelerinin etkileri incelenmiştir.

### 1.1. Toz Metalurjisi

Metal tozları ve bu tozlardan kütleli malzeme ve şekillendirilmiş parça üretme yöntemi toz metalürjisi (T/M) olarak adlandırılmaktadır. Tozların üretimi, özellikleri, şekillendirilmesi ve elde edilen parçanın kullanılabilirlik testleri gibi alt başlıkların tamamı da toz teknolojisi kapsamında incelenmektedir. TM'nin asıl amacı; metalleri toz olarak elde etmek ve elde edilen bu tozları presledikten sonra fırınlarda sinterleyerek makine parçası üretmektir. Presleme işlemi, genelde oda sıcaklığında, bazen de yüksek sıcaklıklarda yapılır. Sinterleme ile elde edilen parçalara bazen son şeklini vermek için ilave bir işlem uygulanabildiği gibi buna lüzum kalmayabilmektedir[1-2]. Sinterleme işlemi, metal tozunun ergime noktası altındaki bir sıcaklıkta yapılmaktadır. Kullanılan toz bir karışım ise, sinterleme işlemi bu tozlardan en yüksek ergime sıcaklığına sahip olan tozun ergime sıcaklığı altında yapılır. Bazı durumlarda ise sinterleme düşük ergime sıcaklığına sahip malzemenin ergime derecesinin üzerinde yapılır [3].

T/M, metalik parçaların üretiminde bilinen en eski ve en modern üretim yöntemidir. 5000 yıl öncesine dayanan, uzun ve etkileyici bir tarihçeye sahiptir. Bilinen en eski T/M yöntemi, eski Mısırlıların alet yapımında demir oksitten ( $Fe_2O_3$ ) körüklerle hava üflenmek ve taş kömürü yardımıyla ısıtmak suretiyle "sünger demir" üretimi gerçekleştirmesidir. Wollaston tarafından 1829 yılında sıvı çözeltilerde amonyak-platin klorür çökmesi ile başlayıp, platin sünger tozundan son ürün olarak kompakt platin üretimi yapması modern T/M başlangıcı olarak kabul edilmektedir. T/M ilk ticari gelişme, elektrik ampullerinde kullanılan filamentlerin üretimidir. 1910 yılında Coolidge, preslenen tungsten tozunu yüksek sıcaklıkta sinterledikten sonra tokluğunu arttırmış ve tel şekline getirilen bu materyalin daha düşük sıcaklıklarda çalışmasını sağlamıştır. T/M'si 1920'li yıllarda uygulanan tungsten-karbür kesici parça takımların üretimi ve gözenekli bronz burçların seri üretimi uygulamaları ile kullanıma başlamıştır [1,2]. Modern anlamda yeni bir parça üretim tekniği olarak teknolojide yerini ise I. ve II. Dünya Savaşı sırasında çok yüksek adetlerde demirli ve demirsiz metal üretimi ile almıştır. I. ve II. Dünya Savaşları'nın sebep olduğu daha fazla üretme gereksinimleri ve otomotiv sektöründeki olağanüstü büyüme, bu yöntemin geliştirilmesi yönündeki çalışmaları hızlandırmaktadır [29,30]. 1950 ve 1960'lı yıllarda, T/M ürünleri üzerinde yapılan yoğun çalışmalar sonucu; düşük maliyetli ve teknik yaşamını destekleyen toz birleştirme teknikleri ortaya çıkmıştır. Bunlardan başlıcaları; sıcak izostatik presleme, toz dövme, toz ekstrüzyon ve toz haddelemedir. 1970'li yıllarda,

düşük alaşım çelikler, takım çelikleri ve süper alaşımların oluşumuyla yüksek performanslı malzemeler T/M' de yerlerinin almışlardır. 1980'lerde ise hızlı katılaştırma, mekanik alaşımlandırma ve toz enjeksiyon süreçleri gibi birçok yeni ve önemli toz proses teknolojisinin geliştirilmeye başlamasıyla, günümüz T/M metal filtrelerden tam yoğunluktaki mamullere kadar çok geniş bir ürün yelpazesine sahip olmuştur [1,2,8,29,30].

T/M'nin uygulamaları oldukça geniştir. Nükleer güç yakıt elemanları, uçak fren balataları, yüksek sıcaklık filtreleri, dişli çarklar, tungsten lamba filamentleri, dişçilik, yağlamasız yataklar, elektrik kontakları, ortopedik gereçler, ofis makinaları parçaları, akü elemanları ve jet motor parçaları metal tozlarından üretilen parçalara örnek olarak verilebilir. Ayrıca, metal tozları boyalar, gözenekli betonlar, basılmış devre levhaları, zenginleştirilmiş un, patlayıcılar, kaynak elektrotları, roket yakıtları, baskı mürekkepleri, lehimleme aletleri ve katalizörlerin üretilmesinde de kullanılmaktadır [30].

### **1.1.1. Toz Metalurjisi Proses Adımları**

Toz metalurjisi üretim aşamaları genel olarak 4 safhadan oluşmaktadır [1-11];

1. Toz üretimi
2. Harmanlama ve Karıştırma
3. Sıkıştırma veya presleme
4. Sinterleme

#### **1.1.1.1. Toz Üretimi**

Günümüzde üretilen çoğu metal tozlarının boyutu 0,1-200µm arasındadır [1]. Geçmişte toz üretiminde kullanılan en yaygın yöntemler mekanik, kimyasal ve elektrolitik yöntemlerdi. Günümüzde ise endüstride kullanılan tozların % 60' dan fazlası atomizasyon yöntemi ile üretilmektedir. Örneğin; küresel toz ihtiyacı için gaz atomizasyonu, düzensiz şekilde toz ihtiyacı için su atomizasyonu ve elde edilecek tozların oksitsiz istenmesi halinde ise inert gaz veya yağ atomizasyonu tercih edilir [30].

T/M işlemlerinde gerek akışkanlık gerekse sıkıştırılabilirlik yönünden kullanılan tozun boyutu ve şekli çok önemlidir. T/M ile imal edilen parçaların özelliklerini büyük oranda bu parçaların imalinde kullanılan tozların sahip olduğu özellikler belirlemektedir. Bu nedenle tozların özelliklerinin önemi ve aldıkları rolün iyi anlaşılması ve bazı uygun niceleyici (*kantitatif*) karakterizasyon metotlarının uygulanması önemlidir.

Tozların fiziksel özelliklerinden olan toz şekli, toz boyutu dağılımı ve spesifik yüzey alanı tozların, görünür yoğunluğuna, sıkıştırma işlemi sırasında kalıba akış davranışlarına, sıkıştırılabilirliğine ve sinterleme sonrası davranışlarına etki etmektedir. Tozların saflığı da çok önemlidir. Tozları oluşturan parçacıkların şekli önemli bir özellik olup uluslararası standartlarda basit niceleyici karakterizasyonla dentritik, çubuksu, yassı-tabakamsı, lifsi, küresel, açılı, düzensiz şekilli ve granül olarak nitelendirilmiştir. Toz parçacıklarının şekli tozların akış davranışlarını, görünür yoğunluklarını ve paketlenabilirliğini etkiler [1- 11].

#### **1.1.1.2. Harmanlama ve Karıştırma**

Harmanlama, genelde tek bileşenli karışımlar için, karıştırma ise birden fazla bileşenli toz karışımları için kullanılan terimlerdir. Örneğin, katı bağlayıcıları metal tozlarıyla birleştirmek, birden çok içeriğin ifadesidir. Bu durum bazen de ek elementler ve moleküler tozların ilavesinde de kullanılır. Karıştırma sonuçları en iyi şekilde tozun hacmi, karıştırıcı hacminin %50-60' ı kadar olduğunda gerçekleşir. Genelde 5 ile 30 dakika arasında yapılan karıştırmada başarı sağlanabilir. Karıştırmanın en büyük yararı karışımda bileşimi güzel sağlayarak, tozun her kısmında sabit ve homojen yoğunluk elde etmektir [1].

#### **1.1.1.3. Sıkıştırma veya Presleme**

Toz metalürjisindeki en önemli ve üçüncü işlem basamağı sıkıştırmadır. Metal tozlar, özel olarak hazırlanmış kalıp içerisinde basınç etkisiyle kompakt hale getirilir. Sıkıştırmanın temel amacı, toz partiküllerin istenilen şekle dönüştürülmesi için, yapıya kendi ağırlığını taşıyabilecek kadar yoğunluk kazandırılmasıdır [1,2]. Sıkıştırma işlemi esnasında toz tanecikleri (partikülleri) önce uygulanan kuvvet yönünde hareket ederler. Tozlar sıvı gibi akmaz; kalıp yüzeyi ile tanecikler arasında sürtünme neticesi bir reaksiyon kuvveti gelişir. Bu kuvvet uygulanan kuvvete eşit bir değere ulaşına kadar sıkışma eksenel yönde devam eder. Presleme işlemi soğuk ve sıcak olarak iki türlü yapılmaktadır. Soğuk presleme, gözenekli bronz yatakların ve basit makine parçalarının seri imalatında elverişlidir. Sıcak presleme, sert alaşımdan, tel çekme haddelerinin, elmas alaşımlarının imali gibi sıra dışı hallerde kullanılmış olan bu yöntem, tozların özel bir şekilde ısıtılmış kömür, çelik veya grafit bir matris içine yerleştirilerek sıkıştırılarak ham mukavemet kazandırma işlemidir [4-11].

#### 1.1.1.4. Sinterleme

Sinterleme, şekillendirilmiş toz metal parçalara mukavemet kazandırmak amacıyla yüksek sıcaklıklarda pişirilip yoğunlaştırılması işlemidir. Sinterleme toz metalurjisindeki önemli işlemlerden biridir. Sinterleme işleminde belirli bir sıcaklık ve sürede toz tanelerinin birbirine bağlanması (kaynaşması) sağlanır. Sinterleme sonrasında parçaların yoğunluğu artmış olur. Sinterleme preslenmiş parçaların mukavemet kazandığı yüksek sıcaklıklar kullanılarak uygulanan ısıl işlem olarak tanımlanır. Sinterlemenin ana mekanizmaları yüzey ve hacim difüzyonudur. Sinterleme işlemi kullanılırken sinterleme esnasında, birleştirme ve sıcaklık şartları istenilen özellikleri elde edebilmek için kontrol altında tutulur. Sinterleme işlemi yağlayıcıyı alma (Ön ısıtma), sinterleme ve soğutma aşamalarından oluşur. İlk aşamada ön ısıtma bölgesinde yağlama amacıyla toza ilave edilen katkıların tamamı parçadan uzaklaştırılır. Bu aşamada birbirinden bağımsız olan toz partikülleri arasında tane sınırı oluşumu başlar. Partiküllerin merkezleri çok küçük bir miktar birbirlerine yaklaşır. İkinci aşamada, sinterleşmenin gerçekleştiği aşama olup en yüksek sıcaklığa ulaşılır. Bu aşamada gözenek miktarı azalır. Yeni bir mikro yapı oluşumuna izin veren tane büyümesi gerçekleşir. Boyutsal küçülmenin en fazla olduğu aşamadır. Sinterleme bölgesinde sıcaklık homojen olmalıdır. Son aşamada, kapalı gözenek oranı hızla azalır. Bu aşamada, özellikle 850-500°C sıcaklıklar arasındaki soğutma hızı malzeme içerisindeki faz dönüşümlerinden dolayı mekanik özellikleri etkiler. Birbirinden izole edilen gözenekler küresel şekil kazanmaya başlar [1-4].

Sinterleme işleminde sadece mukavemet artımı olmayabilir, farklı bir takım olaylar da görülebilir. Örneğin; Oksit indirgenmesi, bağlayıcı giderme veya kimyasal reaksiyonlardır. Örneğin; demirin sinterlenmesi sırasında, oksit indirgenmesi, yağlayıcıların dağılımı, karbon kaybı olması, sıcaklığa bağlı azot çözünebilirliği ile değişmektedir. Sinterleme işlemi sırasında ayrıca malzemenin yapısında da değişimler olur. Seramiklerde mukavemet, ısıl iletkenlik, yoğunluk, saydamlık ve yarı saydamlık artar. Polimerde yoğunluk ve mukavemet yükselir. Metallerde genellikle mukavemet, iletkenlik ve süneklik artar [30].

Sinterleme işlemi sırasında fırının içerisindeki atmosfer sinterleme prosesini ve malzeme yapısını doğrudan etkilediğinden hava veya oksijen bakımından zengin atmosferler tercih edilmez. Sinterleme atmosferinin asıl amacı, metal parçaları hava ile temasta gerçekleştirecek etkilerden uzak tutmaktır. Havanın açıklıklardan sızmasını engellemek amacıyla, atmosferler yeterli basınç ve akış hızında oluşturulmalıdır. Ayrıca

sinterlenen metal parçaları korumak, değişik fırın bölgelerinde ısıtma ve soğutmayı dengeli şekilde yapabilmek adına ısı iletimi veya transferini sağlamakta fırın atmosferinden beklenen özelliklerdir. Ayrıca sinterleme işleminde elde edilmek istenen bu özellikler değişik atmosferlerde gerçekleştirilir. Bu atmosferler; redükleyici atmosfer: hidrojen, karbonmonoksit, metan, nötr atmosfer: vakum, helyum, argon, azot, nitrürleyici atmosfer: amonyak [3, 35].

### **1.1.2. Toz Metalurjisinin Avantaj ve Dezavantajları**

#### Avantajları

- Diğer üretim yöntemleriyle elde edilmesi zor olan gözenekli yapılar elde edilebilir,
- Talaşlı işleme gerek yoktur, sinterleme işleminden sonra parça kullanıma hazırdır,
- Üretim sonrası elde edilen parça istenilen tolerans ve ölçüdedir,
- Üretimde malzeme kaybı çok azdır,
- Ergime kayıpları ve hataları yoktur,
- Birçok alaşım sistemleri üretilebilmektedir,
- Yüksek sertlik ve aşınma direncine sahip malzemeler üretilebilmektedir.
- Üretilen parçalar uzun süreli ve güvenilir bir performansa sahiptir,
- Karmaşık ve özel şekilli parçaların üretimi mümkündür.
- Seri üretilere uygundur,
- Düşük maliyetlidir,

#### Dezavantajları

- İlk yatırım maliyeti (takımlar, presler, ve sinterleme ekipmanı) pahalıdır.
- Büyük kütleler halinde parça üretiminde kalıp maliyeti yüksektir.
- Seri üretim yapılmazsa amortisman değerleri yüksektir.
- Metal tozların maliyeti, ingot halinde üretilen malzemelerden daha pahalıdır.
- Tozların kalıp içerisinde akışkanlığı sınırlıdır. Dolayısı ile yapılacak parçanın şekli kısıtlayıcı bir faktör olabilir [30-45].

### 1.1.3. Toz Metalurjisinin Uygulama Alanları

T/M ile birçok alanda uygulamalar mevcuttur. Bunlardan bazıları; gözenekli malzemeler, otomotiv parçaları, kendinden yağlamalı yatak burçları, metalik filtreler, metal ve metal olmayan elemanların alaşımı, sürekli mıknatıslar, röle kontakları, elektrik ampullerinin filamentleri, freze çakıları, elmas uçlar, sürtünmeyle çalışan yataklar, dişliler, pompalar ve daha pek çok alanda kullanılmaktadır [1, 2, 30-45].

T/M yönteminin en çok kullanıldığı alanlardan birisi otomotiv sektörüdür. Yaygın uygulamalarından birisi olarak kasnak zamanlama parçası örnek olarak gösterilebilir. Bu tür T/M ürünlerinin çoğu, yüksek mukavemet ve düşük maliyet nedeniyle demir esaslı alaşımlardan imal edilir. Bu nedenle demir esaslı tozların tüketimi büyük oranda otomobil üretimine bağlıdır. Günümüzde çoğu motor ve transmisyon parçalarında olmak üzere toplam demir ve çelik tozlarının yaklaşık  $\frac{3}{4}$ 'ü otomobil uygulamalarında kullanılmaktadır [1, 2]. Demir, bakır, kalay, grafit ve stearik asit belirli oranlarda karıştırılarak preslenir. Presleme basıncı düşük tutulur. Bunun nedeni tozlar arasında gözenek kalması istenir. Presleme işleminden sonra sinterlenir. Sinterleme sırasında kalay ergir ve stearik asit yanarak kaybolur. Kalayın ergimesi sonucu, ergiyen kalay ile bakır kuvvetli bağ meydana getirirken diğer yandan ergiyen kalayın yerine boşluklar oluşur. Malzeme yapısındaki bu boşluklar daha sonra vakum altında yağ emdirilerek doldurulur. Mil ile burç arasındaki sürtünme nedeniyle yağ sürtünen yüzeylere akar ve yağlama işlemi gerçekleşmiş olur. Herhangi bir sürtünme olmadığı zaman yağ akışı durduğu için, burçlar uzun süre yağ yapılarında korurlar [30]. T/M ile üretilen malzemelerde en yüksek üretim hacimleri elektronik ve elektrik sistemleri alanlarındadır. T/M sayesinde yüksek ısı iletken tozların kullanımı sayesinde günde 100 milyon civarında diyot, transistor ve elektronik devreler üretilmektedir. Ayrıca elektrik iletkenliği fazla olan bakır ile gümüş, wolfram, molibden ve nikel tozları karıştırılarak preslenir ve sinterlenir. Elde edilen malzeme elektrik kontaklarında ve elektrik direnç kaynak elektronlarında kullanılır [1, 2]. Alüminyum, nikel ve kobalt tozlarının %97 yoğunlukta karıştırıldıktan sonra preslenmesi sonucu çok ince yapılu ucuz mıknatıslar elde edilmektedir [30]. Yüksek kesme hızına sahip sert maden uçlarının, freze çakıları, kaya delme ve petrol kuyusu delme matkaplarının yapımında T/M' den faydaniılmaktadır. Sert maden uçların üretim maliyeti yüksek olduğu için küçük boyutlarda üretilip kullanılacakları takımlara sert lehimle lehimlenir. Bu uçlar wolfram karbür, titan karbür ve tantalum karbür tozlarından üretilmektedir [45-46]. Bilgisayarlarda



yarı-iletkenlerden etkin bir şekilde ısının uzaklaştırılmasına ihtiyaç duyulur. Hızlı bilgisayarlar, yarı iletken ısıyı uzaklaştırmak için yüksek ısı iletkenliğe sahip cihazlara ihtiyaç duyarlar. Bu malzemelerin üretiminde kendilerine has zorluklar vardır. Al-SiC gibi sistemde, SiC ön şekil ile başlanır ve daha sonra basınç ile gözenekler ergimiş alüminyum ile doldurulur. Böylece yüksek yoğunluk, iyi ısı iletkenliğe sahip, yüksek mukavemetli ve sızdırmaz paketler sağlanır. Her yıl milyarlarca mikroelektronik cihazlar üretildiği için, bu uygulama alanının potansiyeli etkileyicidir. Presleme basıncı kontrol edilerek, karışım içindeki toz içerisinde gözenek bırakılır. Bu gözenekler sıvı gazların süzülüp filtrelenmesini sağlamaktadırlar. İnce bakır plakalar üzerine bakır, kalay, silisyum, grafit ve kurşun tozlarının preslenmesi ile elde edilmektedir. Bu plakalar sinterlenerek 0,3 mm kalınlığında sürtünme diskleri elde edilmektedir. Bu diskler fren ve kavramada, havacılıkta uçak iniş takımlarında kullanılmaktadır. Sinterlenmiş malzemelerin biyomedikal uygulamaları; cerrahi aletler, ortodontik diş telleri gibi kısa süreli veya kalça ve diz protezleri gibi insan vücudunda sürekli kullanılan protezleri içerir. En önemli özellikleri protez malzemesinin yüzeyinde sinterlenmiş iri parçacıklar kullanmak suretiyle doku tutuculuğunu arttırmak için yüzey gözenekleri oluşturulur. Bakır ve grafit tozları, preslenerek yağlama özelliğine sahip ve elektrik iletkenliği üstün bir malzeme elde edilir. Bu malzeme jeneratörlerde kullanılır. Toz metalurjisi üretim tekniğinin temel avantajlarından birisi, birbirlerinden farklı özellikte veya karışmayan malzemeleri toz halinde birleştirmektir. Metal tozlar ve sürtünmeyi arttırıcı reçineler ve katık maddelerinin bu yöntemle sıkıştırılabilmesi, balataların ve debriyajların üretimini mümkün kılmıştır. Toz metalurjisi savunma sanayinde ısı oluşturucular tutuşturucu karışımlar, kibrit bileşimleri, ateşleyici ve geciktirici gibi birçok uygulamaları da desteklemektedir. İstenilen boyutta ve yüksek mukavemete sahip dişlilerin üretimi mümkündür. Toz metalurjisi yöntemiyle tanecik boyutunun ve bileşim kontrolünün çok iyi olması nedeniyle, akıllı metallerin üretiminde oldukça yaygındır. Toz metalurjisi mermi kovanlarının yapımı içinde oldukça elverişlidir [30-45].

T/M üretim yönteminin en önemli uygulama alanı kontrollü gözenek içeren yapıların üretimidir. Bunlara örnek olarak yataklar, filtreler, akış sınırlayıcılar, hava dağıtım yüzeyleri, ses emiciler, ısı boruları ve medikal implantlar gibi uygulamalar gösterilir. Bu tasarımların çoğu oldukça basittir. Gözenek boyut kontrolü, dar boyut aralığına sahip tozların kullanımı ve takiben kontrollü yoğunlaştırma ile gerçekleştirilmektedir. Gözeneklilik ve gözenek boyutunun bağımsız kontrolü amacıyla polimer katılarak gözenek oluşturulabilmektedir. Bir diğer seçenek ise; gözenek, mukavemet ve geçirgenlik

özelliklerinin beraberce sağlanması için tozlarla birlikte uzun parçacık, elyaf ve hatta örülü elekler kullanılmaktadır. Kontrollü gözeneklilik değişik uygulamalarda kullanılmaktadır. Yılda milyarlarca adet üretilen yağsız yataklar geniş uygulamalardan biridir. Örnek olarak soda gibi karbonatlı içeceklerde, gaz oluşumunu sağlamak için, şişelemeden önce içecek içerisinde karbon baloncukları oluşturulur. Malzeme filtrasyonu için, paslanmaz çelik, titanyum ve nikel esaslı alaşımlı metaller tercih edilir. İstenilen gözenek oranlarını elde edebilmek için presleme basıncının değerleri değiştirilir. Diğer önemli gözenekli parça üretimi olan bronz veya türevleri olan yatak malzemelerinin üretiminde de aynı proses uygulanmaktadır. Biyomedikal uygulamalarında biyo-uyumluluk, yani implantların vücut ile uyumlu olması için istenilen oranlarda gözeneklilik elde edilmesi gereklidir. Gözenekli metallerin yaygın bir uygulaması, engelleyici filtrasyon alanıdır. Burada bir akışkan içindeki kalıntı parçacıklar tutulur ve ayrıştırılır. Yüksek akış geçirgenliğine sahip bünyede küçük gözenek boyutu istenilir, ancak bu iki özellik birbirine zıttır. Filtrasyona yardımcı olmak ve filtre duvarında basınç düşüşünü en aza indirmek üzere, filtrasyonun meydana geldiği alanı arttırmak için kıvrımlı tasarımlar kullanılır. Gözenekli metalik malzemeler için bir başka önemli uygulama alanı da bakır ve kalay tozlarından üretilmiş yataklardır. Bunlara demir ve grafit katkı yapılabilir. Performansları gözenek boyutu ve gözeneklerin birbirine bağlılığına dayanır [1, 2].

## 1.2. Yakıt Pili

Fosil yakıt rezervlerinin giderek azalması ve çevreye olumsuz etkileri nedeniyle alternatif yakıtlar ve bu yakıtlara bağlı olarak alternatif araç teknolojilerinin (elektrikli, hibrid, yakıt pilli araç teknolojileri) önemi giderek artmaktadır. Bu teknolojilerden biri olan yakıt pilleri, yakıt enerjisini bir yanma işlemine başvurmadan doğrudan akıma çeviren elektrokimyasal düzeneklerdir. Yakıt pilleri; temiz, güvenilir, çevreyle uyumlu, yüksek verimle çalışan ve gelecek kuşakların çok daha yaygın olarak kullanacağı enerji dönüşüm teknolojileridir. Günümüzde verimli güç kalitesi ve çevreyle ilgili sınırlamalar göz önüne alındığında, enerji ihtiyacını karşılamak için yeni geleneksel enerji santralleri inşa etmek yerine yenilenebilir enerji kaynaklarına daha fazla önem verilmektedir. Bu kaynaklar arasında yakıt pilleri, enerji ve ısı üretiminde çok büyük bir ilgi alanı oluşturur [133]. Bununla birlikte yakıt pillerinin gelişimi sınırlı malzeme yelpazesi ve yüksek kurulum maliyeti nedeniyle hala çok yavaştır. Dolayısıyla yeni malzemelerin bulunması ve kurulum

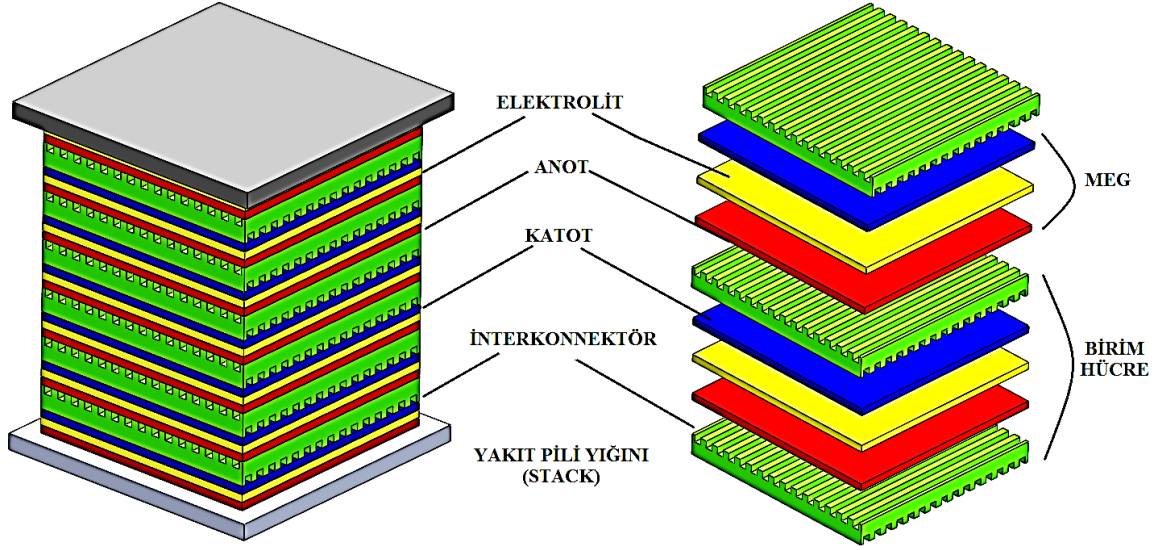
maliyetinin azaltılması için ülkemizde de dünya ile eş zamanlı araştırmaların yapılması önem kazanmaktadır. Yakıt pilleri günümüzde uzay araçları, ulaşım, taşınabilir güç kaynakları, konut, sanayi ve askeri uygulamalarda enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır [78]. Yakıt pilleri, kullanılan elektrolite göre sınıflandırılabilirler [116].

Kullanılan elektrolite göre;

1. Katı oksitli yakıt pili (KOYP)
2. Alkali yakıt pili (AYP)
3. Fosforik asit yakıt pili (FAYP)
4. Erimiş karbonat yakıt pili (EKYP)
5. Polimer elektrolit membranlı yakıt pili (PEMYP)
6. Doğrudan Metanol yakıt pili (DMYP)
7. Sodyum bor hidrüllü yakıt pili (SBHYP)

### **1.3. Katı Oksit Yakıt Pili (KOYP)**

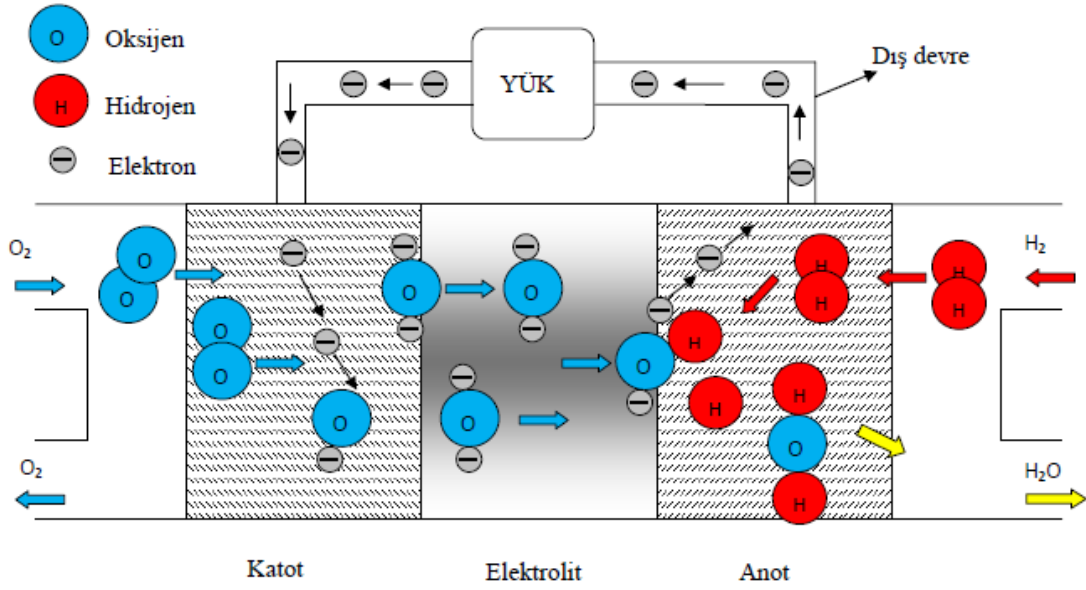
Yakıt pillerinin çeşitlerinden biri olan KOYP, yüksek sıcaklıklarda (600-1000°C) çalışmaları, hidrojenin yanı sıra fosil yakıtları ve karbonmonoksiti de bir dönüşüm ile yakıt olarak kullanabilmeleri ve kojenerasyon ile verimlerinin %80-90'lara kadar çıkabilmeleri nedeniyle diğer yakıt pillerinden daha avantajlıdır. KOYP'lar temel olarak elektrokimyasal reaksiyonun yer aldığı membran elektrot grubu (MEG) olan anot, katot ve elektrolit, hücreye mekanik destek olan ve hücrede oluşan akımın çekilmesini sağlayan interkonnektörler ve bu iki bileşen arasında hava/yakıt sızıntılarını engelleyen sızdırmazlık elemanlarından oluşmaktadır. KOYP' de, çok sayıda hücrenin bir araya getirilmesiyle "yakıt pili yığını" denilen yapılar oluşturulur. Yakıt pili yığınları ile istenilen oranda enerji üretebilecek bir sistem geliştirilebilir. KOYP yığını ve elemanlarının detaylı görünümü Şekil 1.1'de verilmiştir.



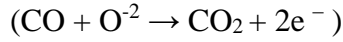
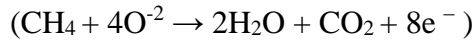
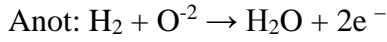
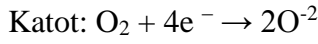
Şekil 1.1. Katı oksit yakıt pili yığını ve elemanları

KOYP'larda, anot malzemesi olarak genellikle nikel (Ni)-yttria stabilize zirkonya (YSZ), katot malzemesi olarak Perovskite tipi Lantanyum Stronsiyum Manganez filizi ( $\text{LaSrMnO}_3$  (LSM)) ve Lantan Kalsiyum Manganez filizi ( $\text{LaCaMnO}_3$  (LCM)) kullanılır. Elektrolit malzemesi iyonik olarak iletken, elektriksel olarak yalıtkan özellikte olan zirkonyum oksit ( $\text{Y}_2\text{O}_3$ ) ya da yttria stabilize zirkonya (YSZ) dir. Sızdırmazlık elemanı olarak cam-seramik esaslı yüksek sıcaklıkta viskoz olabilen malzemeler kullanılmaktadır. İnterkonnektörler, üzerinde gaz akış kanalları bulunan plakalar olup seramik veya metalik malzemelerden üretilirler [121,135].

KOYP'nin katot tarafına gönderilen oksijen veya hava katot akış kanalları sayesinde düzgün bir şekilde katot katalizör tabakaya yayılır ve burada  $\text{O}^{2-}$  iyonu haline gelir. Şekil 1.2' de katı oksit yakıt pilinin şematik çalışma prensibi görülmektedir. Seramik elektrolit sadece oksijen iyonunun anot tarafına geçmesine izin verir. Anot tarafına anot akış kanalları ile gönderilen hidrojen, katot tarafından elektrolitten geçerek anot tarafına ulaşan oksijen iyonu ile reaksiyona girerek su molekülünü oluşturur ve oksijenin iyonlaşırken katot tarafında aldığı elektronlar serbest kalır. Serbest kalan elektronlar anot akım toplayıcılarla toplanarak bir elektrik devresi sayesinde katot tarafına tekrar geri gönderilir, elektronlar katot akım toplayıcılar sayesinde yeni gönderilen oksijenin iyonlaşmasını sağlarlar ve iyonlaşma ve elektronların serbest kalması tekrarlanarak devam eder. Elektronların elektrik devresinde hareketi ile elektrik enerjisi açığa çıkmış olur [114,132].



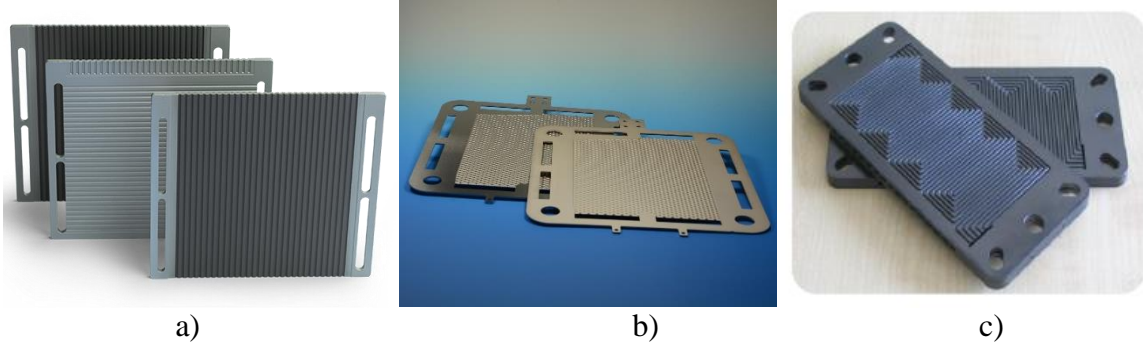
Şekil 1.2. Katı oksit yakıt pilinin şematik çalışma prensibi [114,132].



KOYP katodunda meydana gelen reaksiyon sonucunda oksijen katotta indirgenerek oksijen iyonlarına (O<sup>2-</sup>) dönüşür. KOYP anotunda meydana gelen reaksiyonda oksijen iyonları hidrojen, CH<sub>4</sub> veya CO ile tepkimeye girerek su ve elektronları oluşturur. Anot ve katottaki reaksiyonlar gerçekleşirken serbest kalan elektronlar, anottan katoda dış devre aracılığıyla geçerek elektrik akımı üretimini sağlamaktadır [121,129,131].

#### 1.4. KOYP'larda Kullanılan İnterkonnektör Plakalar

İnterkonnektörler, seri olarak birbirine eklenmiş her bir hücrenin anodu ve katodu arasındaki elektriksel iletimi ve mekanik desteği sağlamanın yanı sıra, anot ve katot reaksiyon bölgelerine hava/yakıtın homojen olarak taşınmasını da sağlamaktadırlar.



Şekil 1.3. Ticari KOYP interkonnektör plakaları; a) Plansee b) Magnex c) ZBT

İnterkonnektör plakaların sahip olması gereken özelliklerin iyi bilinmesi gereklidir.

- Üretim ve şekillendirilmesinin kolay ve ucuz olmalıdır,
- Yüksek sıcaklıklarda kullanılmaları nedeniyle kullanım süresince temas sağladığı eş parçalarla ısıl ve kimyasal olarak uyumlu olmalıdır,
- Eş çalıştığı parçalarla reaksiyona girmemelidir,
- Yakıt ve havanın birbirine karışmasının engellenmesi için gaz sızdırmaz olmalıdır,
- Elektriksel iletkenliğinin yüksek olmalıdır,
- Isıl genişleme katsayısı, eş çalıştığı parçalarla uyumlu olmalıdır [121,104,119,129].

İnterkonnektör plaka üretiminde günümüzde en yaygın kullanılan malzeme lantanyum kromit ( $\text{LaCrO}_3$ )' dir. Ancak  $\text{LaCrO}_3$ 'ün seramik esaslı olması ve bazı olumsuzlukları metalik malzemeleri ön plana çıkartmıştır.  $\text{LaCrO}_3$  p-tipi bir yarı iletkenidir ve bu malzemenin elektron iletkenliği düşüktür. Bu nedenle seramik malzemeler metalik malzemelerle kaplanır ve ayrıca yüksek yoğunluklu malzeme elde etmek için  $\text{LaCrO}_3$ 'ün sinterlenmesi oldukça zordur.  $\text{LaCrO}_3$  seramik malzemedir ve üretilebilecek interkonnektör geometrisinde sınırlamalar ortaya koyar[129]. Tüm bu olumsuzluklar dikkate alındığında interkonnektör üretiminde, seramik malzemeler yerine metal veya metal esaslı alaşım malzemelerin kullanılması ön plana çıkmıştır. Metal malzemeler daha yüksek ısıl iletkenliğe sahiptir ve bu nedenle, hem interkonnektör düzlemi boyunca hem de bileşenler arasında oluşacak termal gerilme ortadan kalkar. Metal esaslı plakaların üretimi seramik malzemelere göre nispeten daha kolay ve maliyeti biraz daha düşüktür. Talaşlı imalat veya T/M üretim yöntemleri dikkate alındığında, interkonnektör plakaları seramik yerine metalik malzemelerden üretmek daha avantajlı olmaktadır. Zira seramik malzemelerin şekillendirilmesi ve işlenmesi metalik malzemelere göre çok daha zordur [115,136-138].

### 1.5. Gözenekli Malzemeler

Gözenek, yetersiz yoğunlaştırmadan dolayı tozlar arasında oluşan boşluktur. Ham parçada gözenek boyutu toz boyutundan daha küçüktür. Gözeneklilik ise T/M ile üretilmiş bir parçadaki boşluk miktarıdır. Gözenekliliğin boyutu yoktur, ölçülen yoğunluk ve teorik yoğunluktan yüzde olarak hesaplanır [1].

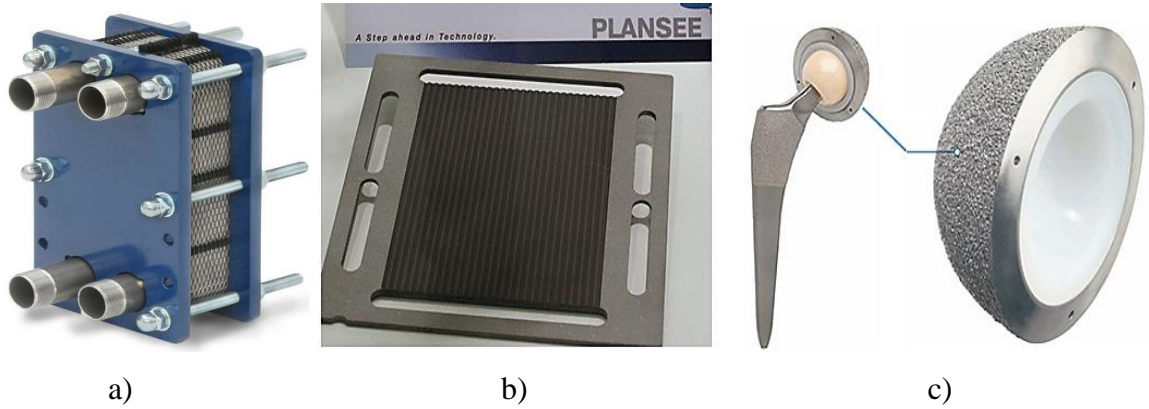
$$\varepsilon = \left[ \frac{Vb}{Vb+Vk} \right] \quad (1.2)$$

Burada;  $Vb$  toplam boşluk hacmini,  $Vk$  toplam katı hacmini ve  $\varepsilon$  gözenekliliği göstermektedir. Gözeneklilik, gözenekli ortamın yapısına bağlı olarak 0 ile 1 arasındaki değerleri alabilir. Örneğin metaller ve bazı volkanik kayalar için gözeneklilik çok düşük değerlerdedir, oysa fiber filtreler ve ısı yalıtım malzemeleri yüksek gözenekliliğe sahip malzemelerdir. Malzeme içerisindeki gözeneklerin hepsi birbiri ile bağlantılı olmayabilir. Diğer gözenekler ile bağlantısı olmayan gözeneklerin ortamdaki akışına katkısı yoktur [32,38].

Gözenekli malzemeler, düşük yoğunluk-rijitlik oranı, yüksek sıcaklıklara dayanıklılık ve yüksek ısı ve ses yalıtkanlığı gibi alışılmadık birkaç fiziksel ve mekanik özelliklere sahiptir. Bu özellikleri nedeniyle mühendislik malzemeleri içinde “çok fonksiyonlu malzemeler” olarak anılırlar. Köpük yapılarının veya yüksek oranda boşluk içeren metallerin özellikleri gerek pratik uygulamalar gerekse bu sınıftaki malzemelerin bilimsel davranışlarının incelenmesi açısından oldukça ilgi çekicidir [38,53,54,57].

Son yıllarda gözenekli malzemeler için farklı uygulama alanları bulunmuştur. Polimer ve cam köpükler düşük ısı iletkenlikleri nedeniyle ısı yalıtkanlık gerektiren uygulamalarda, yüksek enerji absorblama gösterdiklerinden dolayı da ambalajlamada kullanılırken, seramik köpükler yüksek sıcaklık dayanımlarından dolayı metal döküm sektöründe filtreleme amacıyla kullanılmaktadır. Bu malzemelere göre yeni bir malzeme grubu olan gözenekli metalik malzemeler hafiflik, rijitlik, ısı ve ses izolasyonu özellikleriyle otomotiv ve havacılık uygulamalarında kullanım alanı bulmaktadır. Gözenekli metalik malzemelerin yapısal kullanım alanları arasında otomotiv, demiryolu ve inşaat endüstrileri, uzay araçları ve biyomedikal uygulamalar; işlevsel kullanım alanları arasında ise filtreleme, ısı değiştirici, soğutma sistemleri, elektrokimyasal uygulamalar, sıvı iletimi gibi uygulamalar sayılabilir. Gözenekli olarak üretilen metaller ve alaşımlar arasında alüminyum, titanyum, çelik, nikel esaslı süperalaşımlar, kurşun ve çinko sayılabilir [53-63].

T/M üretim yönteminin en önemli uygulama alanı kontrollü gözenek içeren yapıların üretimidir. Bunlara örnek olarak yataklar, filtreler, akış sınırlayıcılar, hava dağıtım yüzeyleri, ses emiciler, ısı boruları ve medikal implantlar gibi uygulamalar gösterilir. Bu tasarımların çoğu oldukça basittir. Gözenek boyut kontrolü, dar boyut aralığına sahip tozların kullanımı ve takiben kontrollü yoğunlaştırma ile gerçekleştirilmektedir. Biyomedikal uygulamalarında biyo-uyumluluk, yani implantların vücut ile uyumlu olması için istenilen oranlarda gözeneklilik elde edilmesi gereklidir. Gözenekli metallerin yaygın bir uygulaması, engelleyici filtrasyon alanıdır. Burada bir akışkan içindeki kalıntı parçacıklar tutulur ve ayrıştırılır. Yüksek akış geçirgenliğine sahip bünyede küçük gözenek boyutu istenilir, ancak bu iki özellik birbirine zıttır. Filtrasyona yardımcı olmak ve filtre duvarında basınç düşüşünü en aza indirmek üzere, filtrasyonun meydana geldiği alanı arttırmak için kıvrımlı tasarımlar kullanılır.



Şekil 1.4 Gözenekli yüzeylerin kullanım alanları; a) ısı eşanjörü, b) interkonnektör plaka, c) biyouyumlu implant

T/M metal veya seramik tozları üretir, bunların özelliklerini kontrol eder, istenilen şekillerde sıkıştırır ve belirli bir sıcaklıkta sinterleyip parçacıklar arasında bağ oluşturarak güçlü bir ürüne dönüştürür. T/M'nin önemli olmasının nedenlerinden birisi, tekrar aynı ürünü kopyalama özellikleriyle değil, aynı zamanda uygulanabilir ürünler oluşturmak için gözeneklerin veya fazların istenilen yere konulmasına imkân sağlamasındandır. Gözenekli malzeme tasarımında en önemli faktörlerden biri gözenekliliğin istenilen düzeyde elde edilmesi ve kontrol edilebilir olmasıdır. T/M yöntemi ile gözeneklilik kontrol edilebilir ve istenilen gözeneklilik değerleri elde edilebilir [32].



### 1.6. Isıl Genleşme Katsayısı

Katı malzemeler ısıtıldığında genişir, soğutulduğunda ise büzülür. Katı malzemede, sıcaklığa bağlı olarak uzunluğundaki değişim aşağıdaki gibi ifade edilebilir [101];

$$\frac{L_s - L_0}{L_0} = \alpha_1(T_s - T_0) \quad (1.3)$$

$$\frac{\Delta L}{L_0} = \alpha_1(\Delta T) \quad (1.4)$$

Burada  $L_0$  ve  $L_s$  sırasıyla sıcaklığın  $T_0$ 'dan,  $T_s$ 'ye değişmesiyle başlangıç ve son uzunlukları göstermektedir.  $\alpha_1$  parametresi ısı doğrusal genleşme katsayısı olarak adlandırılır. Bu malzemeye özgü bir özellik olup ısıtmadan sonra malzemenin ne kadar genişeyeceğinin bir göstergesidir ve  $(^\circ\text{C}$  veya  $\text{K})^{-1}$  birimine sahiptir [58,59,103].

Isıl genleşme, sıcaklıkla artan atom titreşimlerinin genliğinden ziyade, potansiyel enerji çukuru eğrisinin asimetric şekliyle ilişkilidir. Potansiyel enerji çukuru simetric olması durumunda, atomlar arası mesafe değişmez ve sonuç olarak ısı genleşme de oluşmaz. Metal, seramik ve polimer gibi malzemelerde, atomlar arası bağ enerjisi ne kadar büyük ise potansiyel enerji çukuru da buna bağlı olarak o kadar derin ve dardır. Sonuç olarak, artan sıcaklıkla atomlar arası mesafe daha değişir ve  $\alpha_1$ 'in daha küçük değer almasına neden olur [100-109].

Metallerde ise ısı genleşme katsayısı  $(5).10^{-6}.\text{K}^{-1}$  ile  $(25).10^{-6}.\text{K}^{-1}$  arasında değişmektedir [103]. T/M yöntemiyle üretilmiş parçalarda ısı genleşme katsayısı, tam yoğun (bulk) malzeme değerleri ile daha düşük değerler arasında değişmektedir. Isıl genleşme katsayısı, atomlar arası bağlar ve titreşimlerden kaynaklanır. Gözenekler parça kütlelerini düşürür, ancak sıcaklık yükselirken atomlar arası bağın uzamasına etki etmez. Yüksek gözeneklilik seviyeleri ve düşük dayanımlar, ısı genleşme katsayısı üzerinde aşağıda verilen eşitlik ile yaklaşık olarak tespit edilebilir [1-2].

$$C_T = C_0\rho^{1/3} \quad (1.5)$$

Burada  $C_T$ , etkin ısı genleşme katsayısı;  $C_0$ , malzemenin ısı genleşme katsayısı ve  $\rho$ , kısmi yoğunluktur [1-2].

### 1.7. Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı

Gözenekli malzeme tasarımında en önemli faktörlerden biri gözenekliliğin kontrol edilebilir ve istenilen düzeyde elde edilebilir olmasıdır. Gözenekli yüzeyler, çok değişik amaçlar için farklı uygulama alanlarına sahiptirler ve son zamanlarda kullanım alanlarından biri KOYP'dur [12-14]. Temel olarak bir KOYP; elektrolit, anot, katot ve interkonnektör plakalarından oluşmaktadır. T/M yöntemiyle interkonnektör plaka üretimi yeni bir uygulama alanıdır. İnterkonnektör plakaların gün geçtikçe küçük boyutlarda ve daha kompleks yapılar haline dönüşmesi T/M yöntemini ön plana çıkarmaktadır [32]. İnterkonnektör plakaların üretimi için T/M yöntemi üretim kolaylığı ve istenilen özelliklerin elde edilmesinden dolayı cazip kılmaktadır [85-89]. Ticari olarak T/M yöntemiyle KOYP interkonnektör plaka Plansee (Avusturya) firması tarafından üretilmekte ve halen daha geliştirilmektedir [87]. Literatürde interkonnektör plakaların T/M yöntemi ile üretimini kolaylaştırmaları [85-91], verimliliğine etki eden sebepleri [115-128] ve üretimlerinde kullanılan malzemelerin geliştirilmeleri [129-130] ile ilgili çalışmalar araştırmacılar tarafından yapılmaktadır.

Katı oksit yakıt pilleri yüksek sıcaklıkta (600-1000°C) çalışırlar. İnterkonnektör plakalardan istenilen önemli özellik eş çalıştığı parçalar ile uyumluluktur. Eş çalıştığı parçalar genellikle yüksek ısıl zorlamalara dayanıklıdır [121-123]. Tüm bu sebeplerden dolayı KOYP interkonnektörleri için yapılan yüksek sıcaklık testleri yapılmaktadır. Bunlar başta ısıl genleşme katsayısı olmak üzere farklı ısıl testler yapılmaktadır [71,75,91,119-130]. Toz metalurjisi ile üretilen ve gözenekli metalik interkonnektörler de ısıl genleşme katsayısını hakkında yapılan çalışmalarda araştırmacılar ısıl genleşme katsayısının gözenekli malzemelerde tam yoğun (bulk) malzemelerden düşük olduğunu ama fiziksel özelliklerini kötü etkilemediğini belirtmişlerdir [71,78,87].

Bu çalışmada, katı oksit yakıt pili (KOYP) gibi enerji dönüştürme sistemlerinde mevcut bulunan interkonnektör plakaların toz metalurjisi yöntemiyle üretilebilirliği amaçlanmıştır. Çalışmada, ayrıca üretilen plakaların gözeneklilik, mikrosertlik ve ısıl genleşme katsayılarına üretim parametrelerinin etkileri incelenmiştir.

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

### 2.1. Kullanılan Tozlar

Bu çalışmada incelenen numunelerin üretiminde üç farklı metal tozu kullanılmıştır. Kullanılan tozlar sırasıyla yüksek saflıkta nikel, demir esaslı paslanmaz çelik 316L ve nikel esaslı Inconel 600'dür. Bu metal tozlar Alfa-Aesar A Johnson Matthey Company şirketinden temin edilmiştir. Kullanılan tozların fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri Tablo 2.1 ve tablo 2.2'de verilmiştir.

Tablo 2.1. Metal tozlarının fiziksel ve mekanik özellikleri

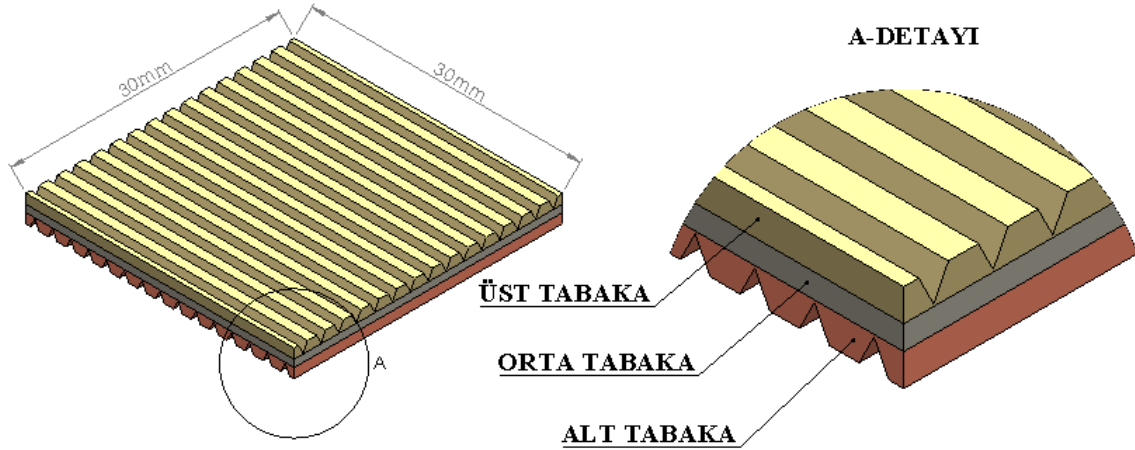
	Toz Boyutu ( $\mu\text{m}$ )	Yoğunluk $\text{g/cm}^3$	Ergime Derecesi( $^{\circ}\text{C}$ )
Nikel	90-125	8.9	1455
Paslanmaz Çelik 316L	90-125	8.0	1400
Inconel 600	90-125	8.4	1350

Tablo 2.2. Metal tozlarının kimyasal özellikleri

	% Ni	% Fe	% Cr	% Mn	% Mo	Safsızlıklar
Nikel	99,8	-	-	-	-	0,2
Paslanmaz Çelik 316L	10-13	67,5	16-18	$\leq 2$	2,5	-
Inconel 600	72	6-10	14-17	$\leq 1$	-	-

## 2.2. Numune Üretimi

Numuneler tabakalı olarak üretilmesi hedeflendiğinden, farklı boyut aralığına sahip tozlar kullanılmıştır. Numune üretiminde üst ve alt tabaka için nispeten daha büyük boyutlu (90-125  $\mu\text{m}$ ) tozlar, orta tabaka için küçük boyutlu (0-25 $\mu\text{m}$ ) tozlar kullanılmıştır. Şekil 2.1’de üretilecek numunelerin şematik resmi gösterilmiştir. Üst ve alt tabaka istenilen kanal formunda, orta tabaka ise üretim esnasında zımbalar yardımıyla ayarlanmaktadır.

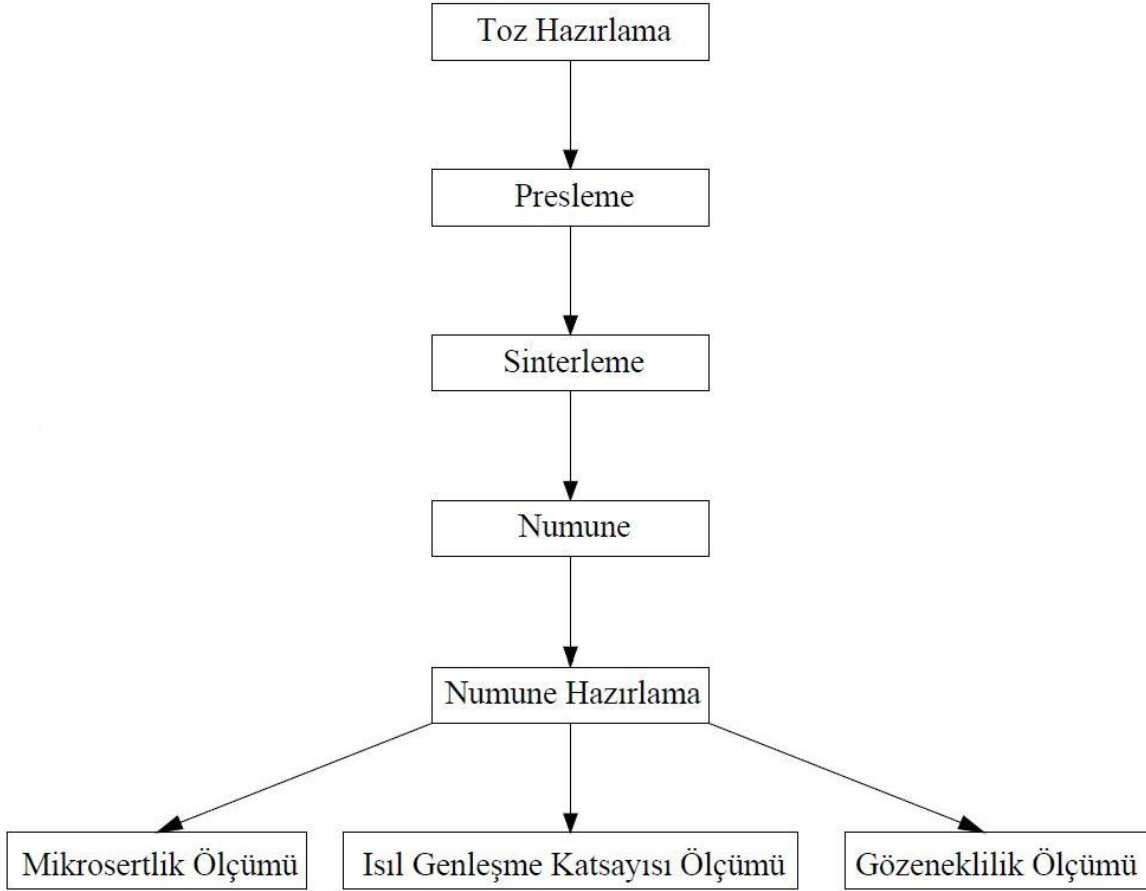


Şekil 2.1. Üretilecek numunelerin şematik resmi

Gözenekli metalik yüzeylerin üretiminde, alt ve üst tabakalar göreceli olarak daha yüksek gözenekliliğe sahip olacak şekilde, orta tabaka ise minimum gözenekliliğe sahip olacak şekilde üretilmiştir. Bunu sağlamak amacıyla üst ve alt tabaka üretiminde 90-125  $\mu\text{m}$ , orta tabaka üretiminde ise 0-25 $\mu\text{m}$  boyut aralıklarındaki tozlar kullanılmıştır. Gözenekli yüzey üretimi, metal tozlarının istenilen kanal formuna sahip bir kalıp içerisinde farklı üretim sıcaklık (300, 375 ve 450°C) ve basınç değerlerinde (200, 300 ve 400 MPa) kompakt hale getirilerek, azot-hidrojen atmosfer ortamında 1 saat süreyle 900 ve 1200°C sinterleme işlemine tabii tutulmuştur.

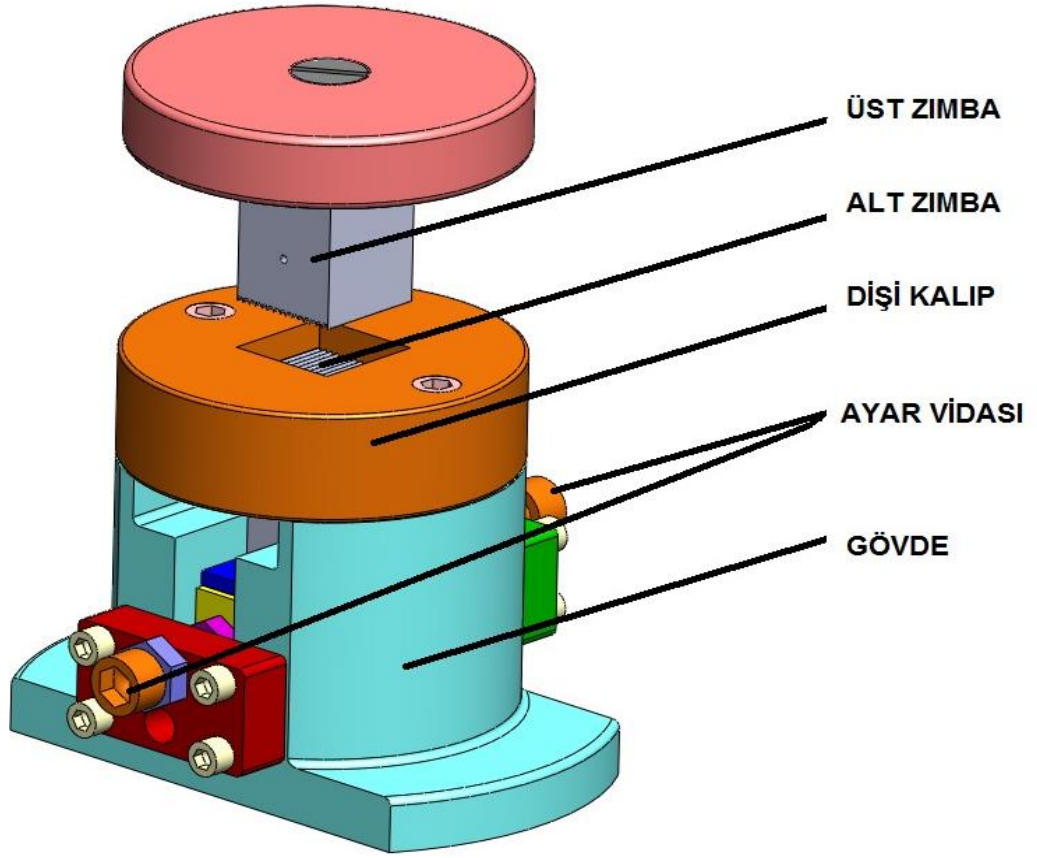
Kalıpta sıkıştırma, bir tozu istenilen şekle preslemek için alt ve üst zımbalar yardımıyla basınç uygular. Tozların en yaygın şekillendirme ve yoğunluk kazandırma yöntemi budur. Kalıpta sıkıştırmaların çoğu mekanik preslerde yapılır. Sıkıştırma işleminden sonra parça elle tutulabilir bir mukavemet kazanmış olur. Genellikle T/M yönteminde ham yoğunluğu arttırmak için ılık sıkıştırma yapılır. Ilık sıkıştırma işlemi ile tozun biraz yumuşaması sağlanır ve presleme esnasında soğuk prese göre daha fazla

yoğunluk kazanılmasına katkı sağlar. Böylece gevşek tozu taşıyabilecek mukavemeti olan bir kütleye dönüşür. Esas mukavemeti sinterleme işleminden sonra kazanır. Böylece T/M yöntemiyle nihai ürün elde edilir. Numune üretim aşamaları şekil 2.2’de gösterilmektedir.

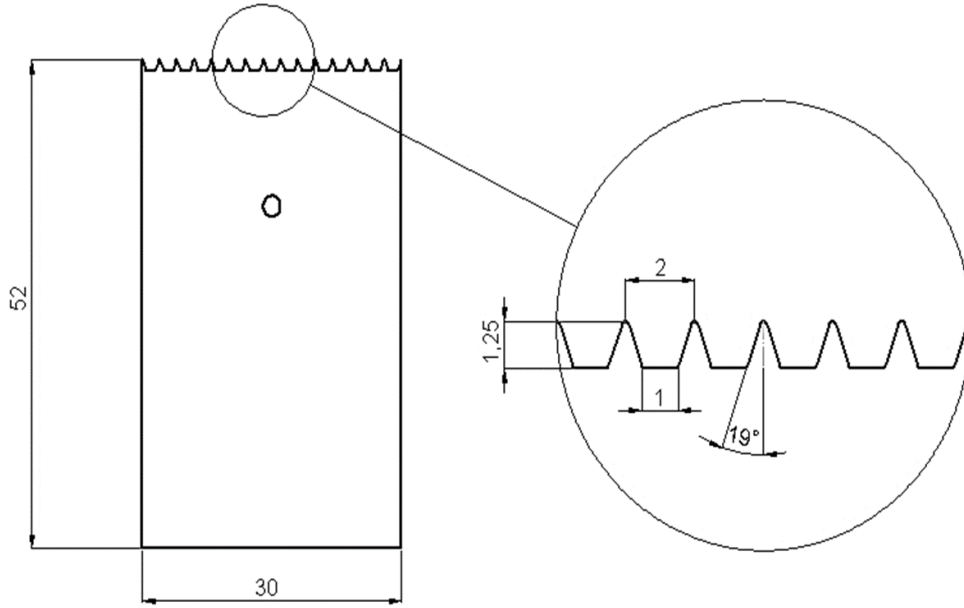


Şekil 2.2. Deneysel çalışmalardaki iş akış şeması

Numune üretiminde hidrolik pres makinesi, toz sıkıştırma kalıp seti, sinterleme fırını kullanılmıştır. Gözenekli metalik yüzeylerin üretiminde Şekil 2.3’ de şematik olarak gösterilen kalıp seti kullanılmıştır. Kalıp, sıcak iş takım çeliğinden imal edilmiştir. Sıkıştırma kalıpları, kullanılacak toz, pres cihazı ve istenilen parça şekilleri dikkate alınarak tasarlanmıştır. Numune üretimde kullanılan alt ve üst zimbalar Şekil 2.4’de ayrıntılı olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Numune üretim kalıp setinin şematik resmi



Şekil 2.4. Numune üretiminde kullanılan alt ve üst zimbalarının teknik resmi

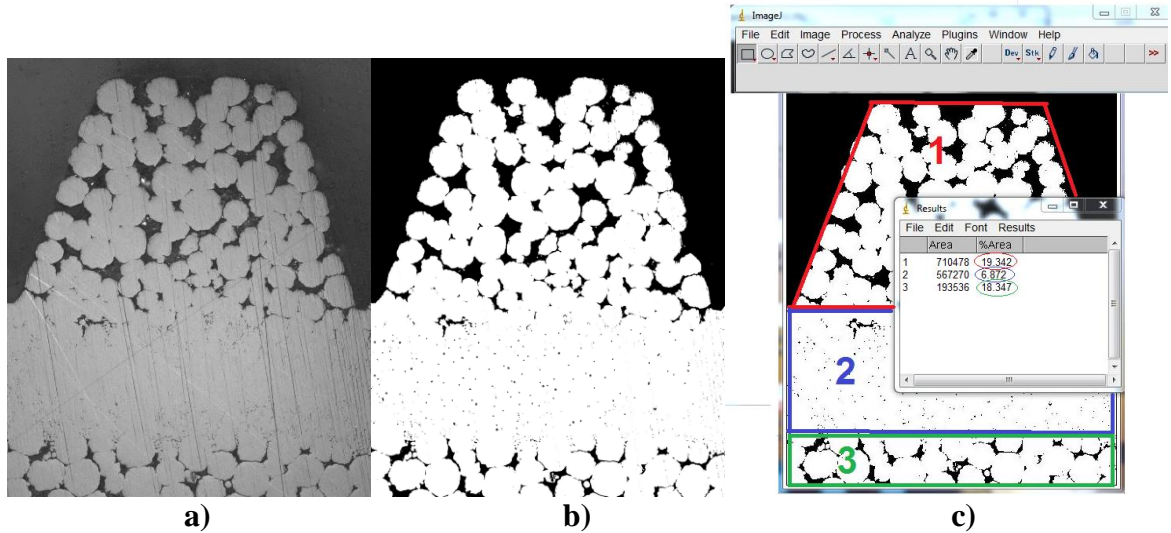
Tablo 2.3. Numune üretim parametreleri

<b>Metal Tozu</b>	<b>Numune Kodu #</b>	<b>Üretim Sıcaklığı (°C)</b>	<b>Üretim Basıncı (MPa)</b>	<b>Sinterleme Sıcaklığı (°C)</b>
Nikel	101	300	200	900
	102	300	300	900
	103	300	400	900
	104	375	200	900
	105	375	300	900
	106	375	400	900
	107	450	200	900
	108	450	300	900
	109	450	400	900
Nikel	201	300	200	1200
	202	300	300	1200
	203	300	400	1200
	204	375	200	1200
	205	375	300	1200
	206	375	400	1200
	207	450	200	1200
	208	450	300	1200
	209	450	400	1200
Paslanmaz Çelik 316L	301	300	200	1200
	302	300	300	1200
	303	300	400	1200
	304	375	200	1200
	305	375	300	1200
	306	375	400	1200
	307	450	200	1200
	308	450	300	1200
	309	450	400	1200
Inconel 600	401	300	200	1200
	402	300	300	1200
	403	300	400	1200
	404	375	200	1200
	405	375	300	1200
	406	375	400	1200
	407	450	200	1200
	408	450	300	1200
	409	450	400	1200

## 2.3. Ölçümlerin Yapılışı

### 2.3.1 Gözeneklilik Ölçümü

Numune üretiminde kullanılan tozlar farklı büyüklükte olduklarından üst tabaka, orta tabaka ve alt tabaka için farklı gözeneklilik değerleri ölçülmüştür. Gözeneklilik ölçümlerinde numuneler hassas kesme cihazı ile dört parçaya (7,5mm x 7,5mm) bölünmüştür. Metalografik incelemeler için kesilen numunelerden bir tanesi soğuk kalıplama yöntemiyle bakalit kalıp içerisine alınmıştır. Kalıplanan numune daha sonra zımparalama ve parlatma işlemine tabi tutulmuştur. Zımparalama işlemi 240, 400, 800, 1200, 1500 ve 2000 nolu zımparalar kullanılarak yapılmıştır. Daha sonra, numune yüzeyleri 10 µm' luk elmas pasta yardımıyla parlatılmıştır. Parlatılmış numunelerin yüzey görüntüleri ışık mikroskobunda incelenmiş ve fotoğrafları çekilmiştir. Bu resimler Image J programı vasıtasıyla işlenerek numunelerin gözeneklilik değerleri tespit edilmiştir. Bu amaçla gözeneklilik ölçümleri (Şekil 2.5) için alınan resimler ilk olarak siyah ve beyaz alanlara dönüştürülmüş (binarization) daha sonra üst yüzey, alt yüzey ve orta bölgeleri seçilerek, bu bölgelerdeki her bir siyah ve beyaz alanların toplamı, toplam alana oranı tespit edilmiştir. Numunelerin gözeneklilik değerleri 10 bölgedeki farklı gözeneklilik değerinin ortalaması alınarak belirlenmiştir.

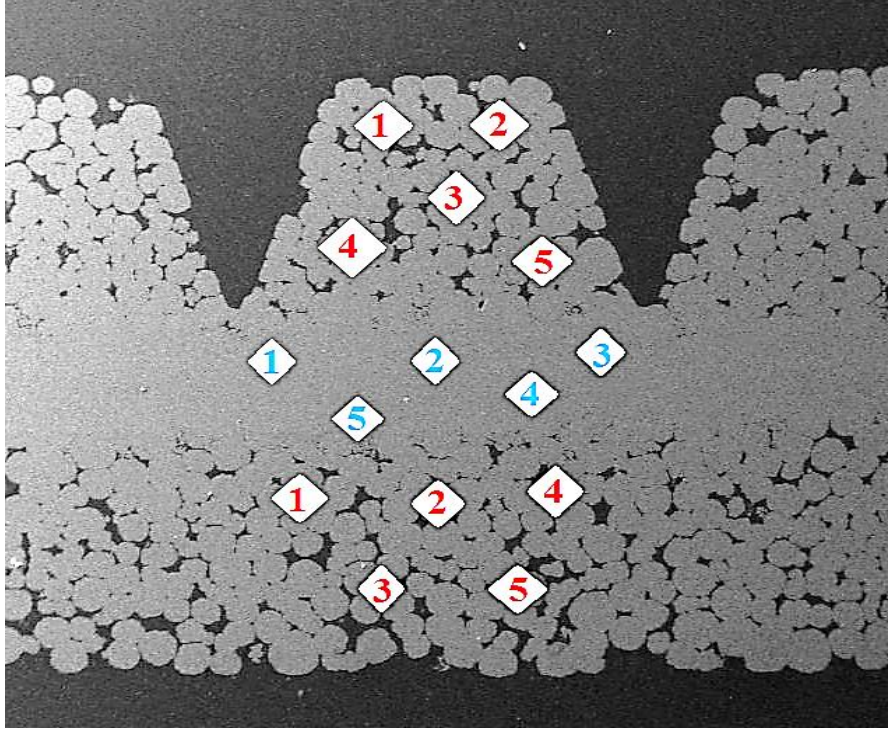


Şekil 2.5. Gözeneklilik ölçümü; a) Orjinal resim, b) Siyah-beyaz dönüştürülmüş resim, c) siyah ve beyaz alanların belirlenmesi



### 2.3.2. Mikrosertlik Ölçümü

Yüzeyi parlatılmış olan numunelerin Vickers mikrosertlikleri Innova mikrosertlik test cihazında ölçülmüştür. Numunelere uygulanan yük 50 gram olup bekleme süresi 10 saniye olarak seçilmiştir. Her tabakadan beş ölçüm noktası seçilmiş ve ortalamaları alınmıştır. Üst tabaka, alt tabaka ve orta tabakadan alınan sertlik ölçüm yerleri Şekil 2.6'da gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Sertlik ölçüm noktaları

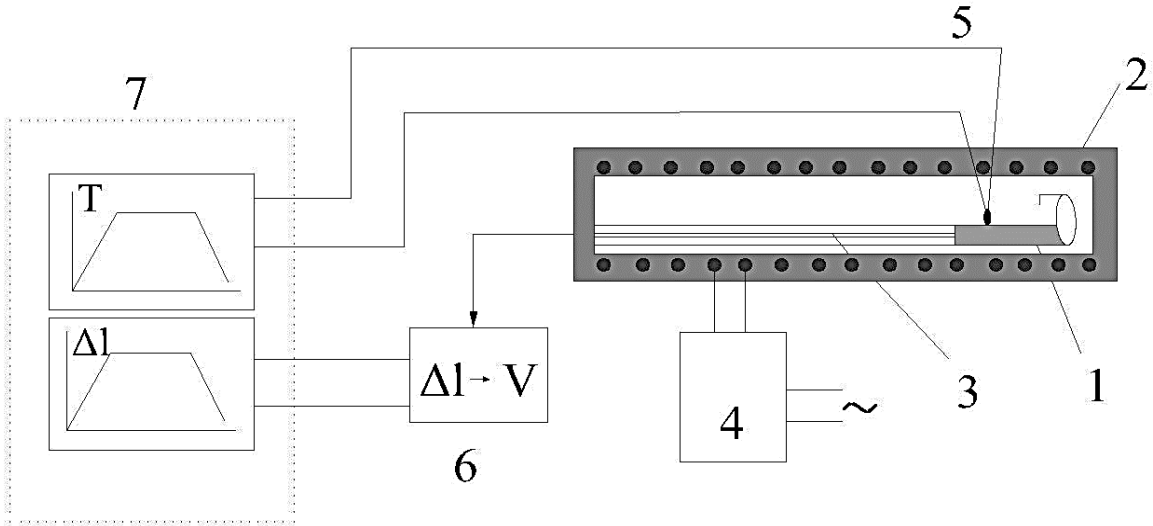
### 2.3.3. Isıl Genleşme Katsayısı Ölçümü

Isıl genleşme (dilatometre) cihazı, numunenin sıcaklık karşısındaki büyümesinde meydana gelen boyutsal değişimlerin ölçülmesinde kullanılır. Isıl genleşme katsayısı ölçümleri Linseis L75 marka dilatometre cihazda yapılmıştır. Linseis L75 dilatometresi mutlak ölçmeler için yapılmıştır; yani genleşme doğrudan sıcaklığa bağlı olarak ölçülür. Her numune için oda sıcaklığından 800°C' ye kadar yavaş ısıtmada (10°C/dk) ve hava ortamında ısıl genleşme katsayısı ölçümü yapılmıştır. Her numune için üç tekrar yapılmıştır ve ortalaması alınmıştır. Isıl genleşme katsayısı ölçümünde numuneler 20x10x3mm<sup>3</sup> boyutlarında hazırlanmıştır. Şekil 2.7'de kullanılan cihazın şematik resmi görülmektedir.

Hacimce genleşme katsayısı mühendislik uygulamalarında genellikle az kullanılır. Birçok uygulamada ısı etkisi ile hacimde meydana gelebilecek değişiklikler boyca değişikliğin yanında ihmal edilebilir. Daha sık kullanılan boyca uzama katsayısı ( $\alpha$ ) aşağıdaki formüller ile hesaplanır.

$$\alpha = \frac{1}{L_0} \frac{dL}{dT} \quad (1.4)$$

Burada; L cismin boyu, dL boydaki değişim, dT sıcaklık değişimidir.



Şekil 2.7. Isıl genleşme ölçme sisteminin şematik resmi, (1) numune, (2) fırın, (3) dokunma pistonu, (4) regülatör, (5) termo-çift, (6) çevirici ve (7) multimetre [58,59]

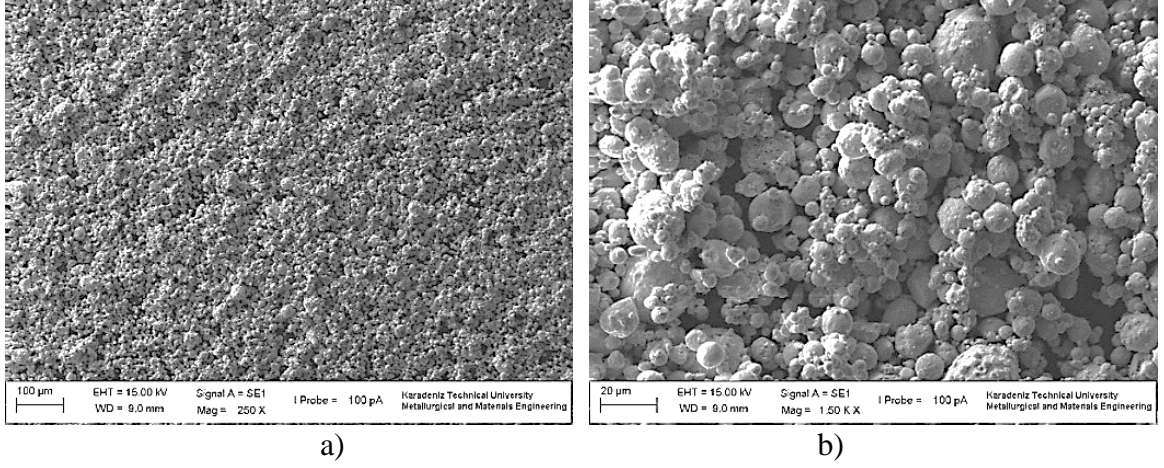
### 2.3.4. SEM İncelemeleri

Genellikle SEM incelemeleri T/M'de toz karakterizasyonu ve gözeneklilik ölçümlerinde kullanılan ve bir tozun farklı özelliklerinin gözlenmesinde kullanılan en iyi araçlardan birisidir [1]. Çalışmada kullanılan metal tozların ve üretilen numunelerin kesit alınmış yüzey incelemeleri Karadeniz Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümündeki Zeiss marka SEM cihazı ile yapılmıştır.

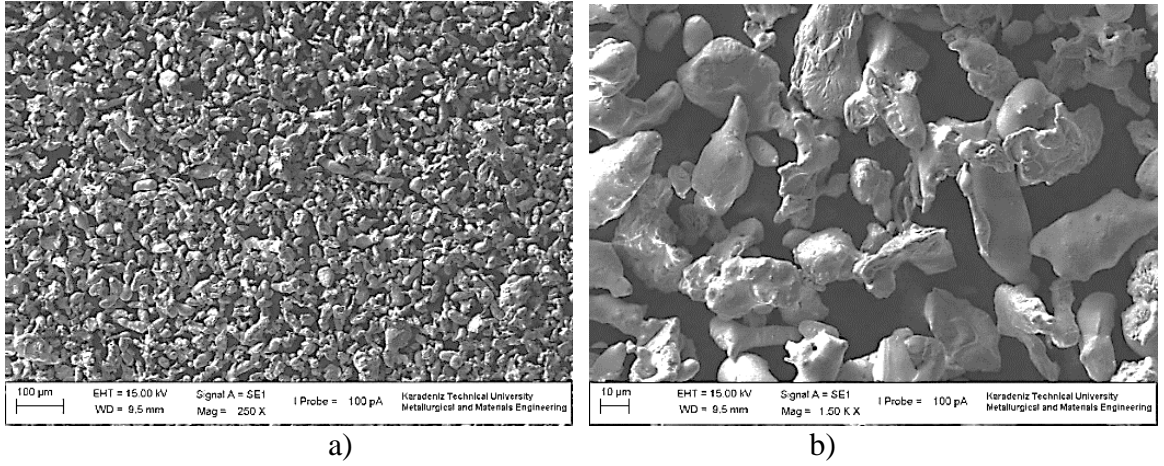
### 3. BULGULAR

#### 3.1. Çalışmada Kullanılan Metal Tozları ile İlgili Bulgular

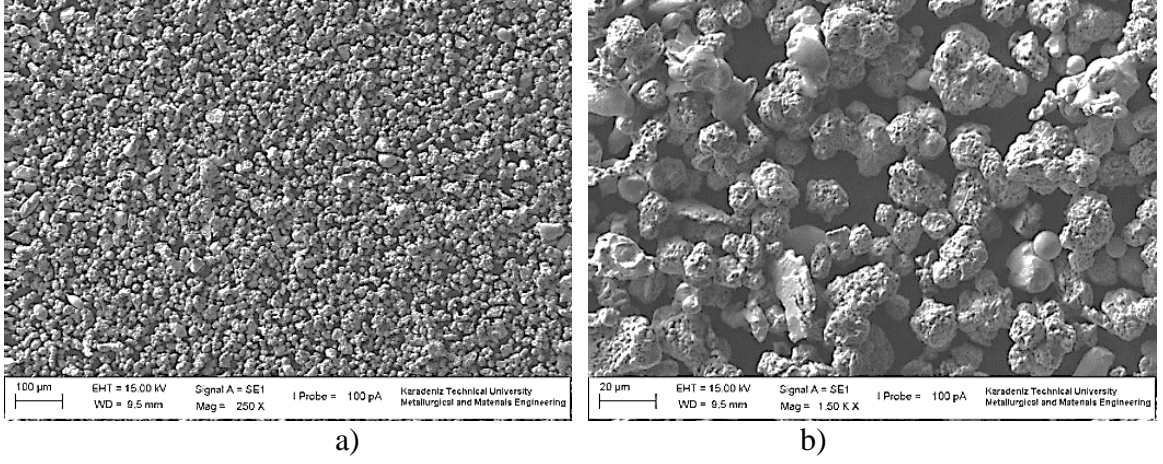
Tozların karakterizasyonunun da en etkili yöntem genellikle mikroskop görüntülerinden elde edilir [1]. Çalışmada kullanılan üç farklı metal tozlarının (nikel, paslanmaz çelik 316L ve Inconel 600) SEM görüntüleri Şekil 3.1 ile Şekil 3.6' da arasında verilmiştir.



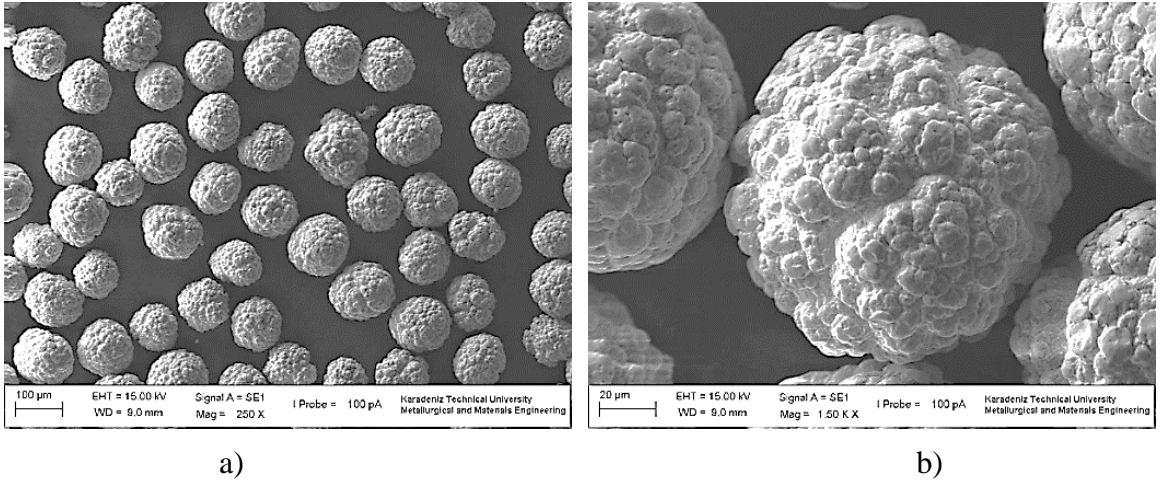
Şekil 3.1. Çalışmada orta tabaka üretiminde kullanılan Nikel (-25µm) tozunun SEM görüntüsü; a) 250X büyütme, b) 1500X büyütme



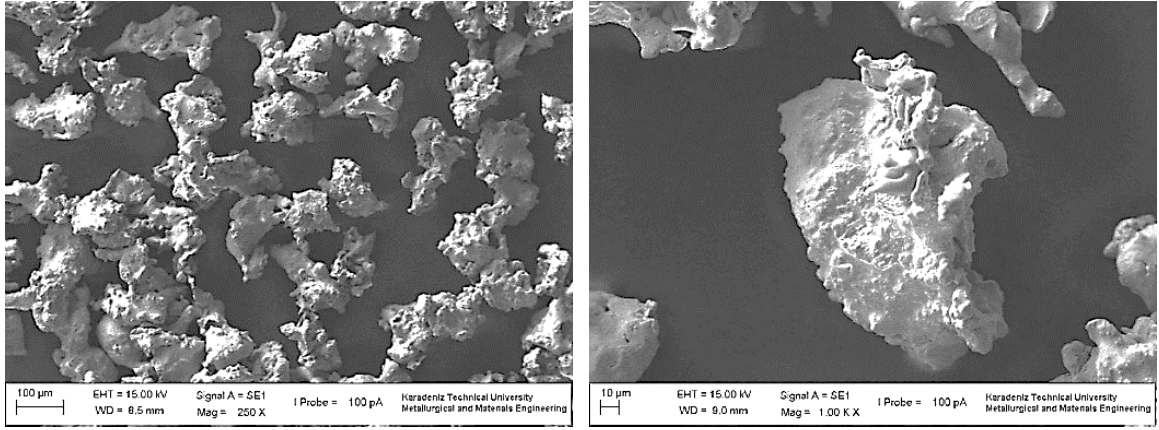
Şekil 3.2. Çalışmada orta tabaka üretiminde kullanılan paslanmaz çelik 316L (-25µm) tozunun SEM görüntüsü; a) 250X büyütme, b) 1500X büyütme



Şekil 3.3. Çalışmada orta tabaka üretiminde kullanılan Inconel 600 ( $-25\mu\text{m}$ ) tozunun SEM görüntüsü; a) 250X büyütme, b) 1500X büyütme



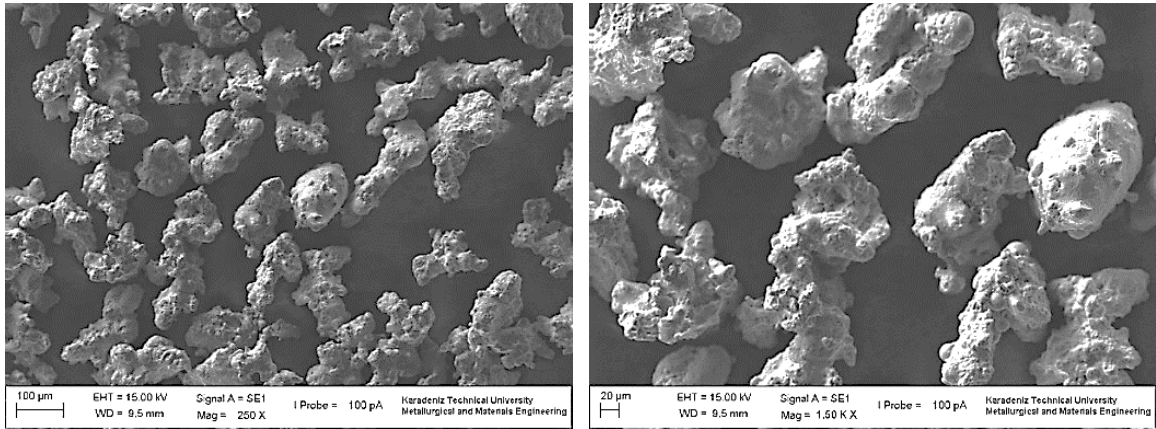
Şekil 3.4. Çalışmada üst/alt tabaka üretiminde kullanılan Nikel ( $90-125\mu\text{m}$ ) tozunun SEM görüntüsü; a) 250X büyütme, b) 1500X büyütme



a)

b)

Şekil 3.5. Çalışmada üst/alt tabaka üretiminde kullanılan paslanmaz çelik 316L (90-125µm) tozunun SEM görüntüsü; a) 250X büyütme, b) 1500X büyütme



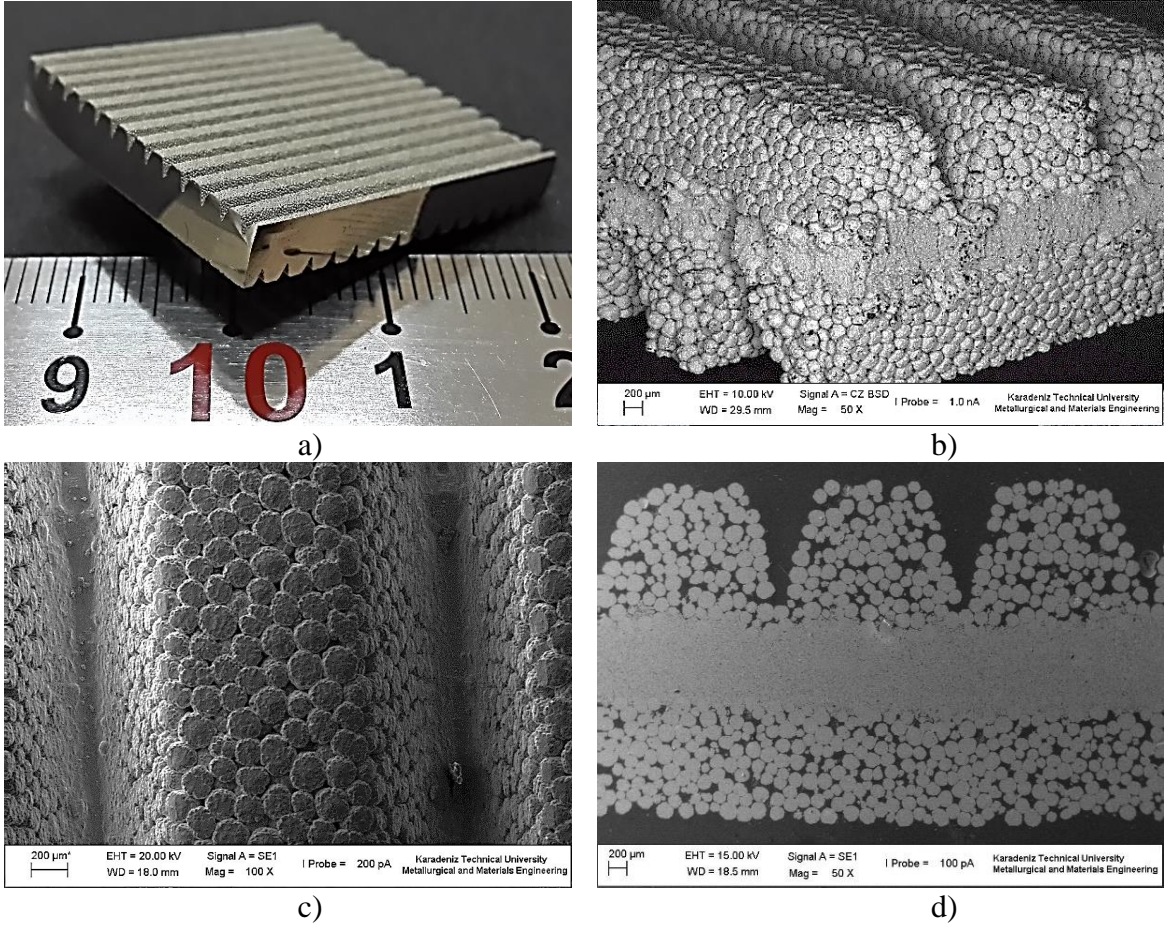
a)

b)

Şekil 3.6. Çalışmada üst/alt tabaka üretiminde kullanılan Inconel 600 (90-125µm) tozunun SEM görüntüsü; a) 250X büyütme, b) 1500X büyütme

### 3.2. Üretim Parametrelerinin Numune Özelliklerine Etkisi ile İlgili Bulgular

Üretilen numuneler 30mm x 30mm x 3mm boyutlarındadır. Şekil 3.7’de nikel tozu ile üretilen numunenin farklı görüntüleri görülmektedir. Üretilen numuneler üç tabakalı olarak başarılı bir şekilde üretilmiştir. Her bir üretim parametresi 3 kez tekrarlanmış ve toplamda 108 numune üretilmiştir. Her numunede gözeneklilik, mikrosertlik ve ısıl genleşme katsayısı ölçülmüştür.



Şekil 3.7. Çalışmada nikel tozu ile üretilen numunenin farklı görüntüleri; a) numune fotoğrafı b) kırık yüzey görüntüsü, c) üst görüntüsü, d) kesit görüntüsü

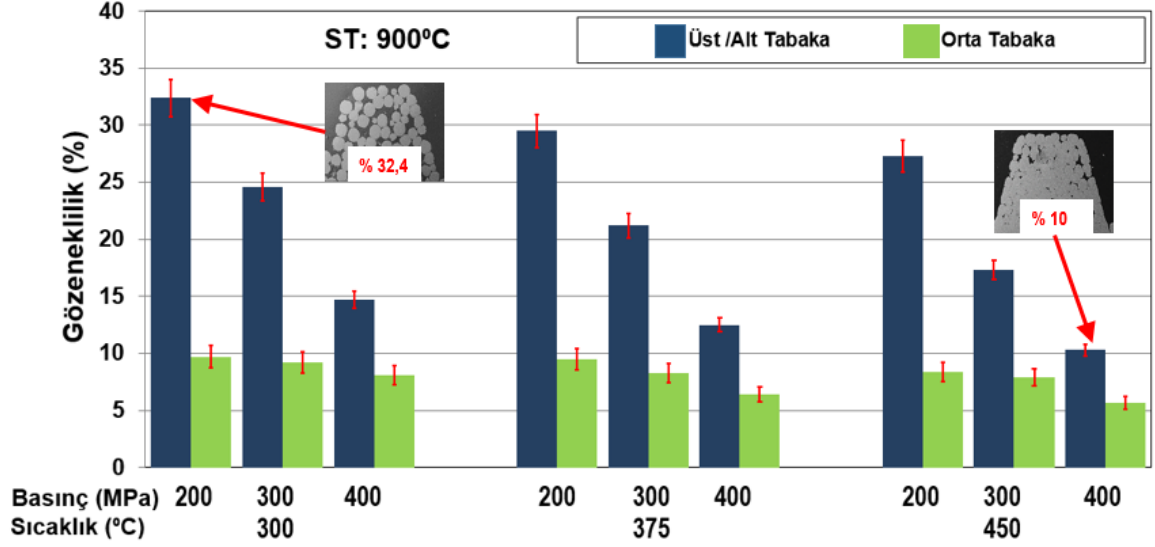
Toz metalurjisi yöntemiyle üretilen numunelerin gözeneklilik, mikrosertlik ve ısıl genleşme katsayısı değerleri ölçülmüş ve elde edilen sonuçlar Tablo 3.1 ve Şekil 3.11-3.39’ da verilen diyagramlarında gösterilmiştir. Çalışmada elde edilen bulgular ile çizilen grafiklerde genellikle artan üretim basıncının gözenekliliği azalttığı ve buna bağlı olarak ısıl genleşme katsayısının düşürdüğü tespit edilmiştir. En düşük ısıl genleşme katsayısı  $(17.36) \cdot 10^{-6} \cdot K^{-1}$  Inconel 600 ile üretilen ve en yüksek üretim parametrelerine sahip numunede elde edilmiştir (#409).

Tablo 3.1 Üretilen numunelerden elde edilen bulgular

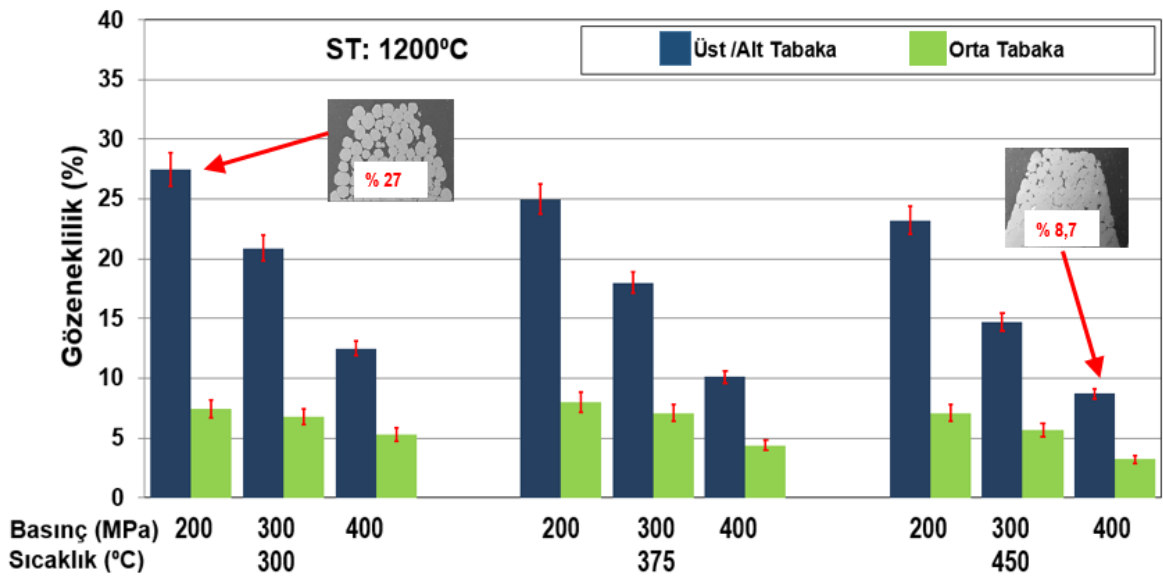
Numune Kodu	Üretim Sıcaklığı (°C)	Üretim Basıncı (MPa)	Sinterleme Sıcaklığı (°C)	Alt/Üst Tabaka Gözeneklilik (%)	Orta Tabaka Gözeneklilik (%)	Alt/Üst Tabaka Mikrosertlik (HV <sub>0,05</sub> )	Orta Tabaka Mikrosertlik (HV <sub>0,05</sub> )	Isıl Genleşme Katsayısı (10 <sup>-6</sup> .K <sup>-1</sup> )
101	300	200	900	32,4	9,7	94,7	99,3	35,40
102	300	300	900	24,6	9,2	98,5	102,4	33,70
103	300	400	900	14,7	8,1	102,8	104,1	30,00
104	375	200	900	29,5	9,5	105,8	109,6	32,20
105	375	300	900	21,2	8,3	110,5	112,9	31,30
106	375	400	900	12,5	6,4	114,2	115,6	27,80
107	450	200	900	27,3	8,4	116,7	119,3	29,80
108	450	300	900	17,3	7,9	119,4	121,8	26,70
109	450	400	900	10,3	5,7	121,3	124,6	25,80
201	300	200	1200	27,5	7,4	100,4	104,4	30,20
202	300	300	1200	20,9	6,8	110,0	113,1	28,60
203	300	400	1200	12,5	5,3	119,1	121,4	25,60
204	375	200	1200	25,0	8,0	104,0	107,0	27,30
205	375	300	1200	18,0	7,1	113,5	115,6	26,40
206	375	400	1200	10,1	4,4	121,4	123,5	23,60
207	450	200	1200	23,2	7,1	107,3	108,4	24,90
208	450	300	1200	14,7	5,7	117,0	118,2	23,10
209	450	400	1200	8,7	3,2	123,1	125,9	22,60
301	300	200	1200	36,1	11,2	135,9	134,3	33,14
302	300	300	1200	27,4	9,4	138,7	139,5	27,81
303	300	400	1200	20,3	7,2	140,5	142,8	24,75
304	375	200	1200	30,8	9,5	144,8	145,4	32,88
305	375	300	1200	23,6	8,4	148,6	151,1	25,90
306	375	400	1200	19,2	6,6	153,4	159,6	23,25
307	450	200	1200	26,3	9,1	159,6	162,3	31,11
308	450	300	1200	21,1	7,6	170,0	175,4	25,50
309	450	400	1200	16,5	5,6	175,3	178,6	21,82
401	300	200	1200	35,2	9,6	120,4	123,7	22,25
402	300	300	1200	30,9	8,7	122,0	125,2	21,24
403	300	400	1200	16,4	5,3	129,2	128,4	19,18
404	375	200	1200	24,2	8,3	124,0	127,3	21,42
405	375	300	1200	17,5	5,5	129,3	130,6	19,94
406	375	400	1200	13,8	3,9	131,6	133,8	18,93
407	450	200	1200	20,2	6,1	128,9	131,7	19,12
408	450	300	1200	16,7	3,6	130,4	134,9	18,30
409	450	400	1200	10,3	2,3	135,8	136,3	17,36

### 3.2.1. Gözeneklilik Bulguları

Gözeneklilik ölçümlerinden elde edilen bulgular Şekil 3.8 ile Şekil 3.11 arasındaki grafiklerde gösterilmektedir. Gözeneklilik sonuçları genellikle artan üretim basıncı ile azalırken, üretim sıcaklığı ile belirgin bir değişim elde edilmemiştir. Gözeneklilik ölçümleri alt ve üst tabakada benzer sonuçları verdiği için aynı kolonda gösterilmiştir.

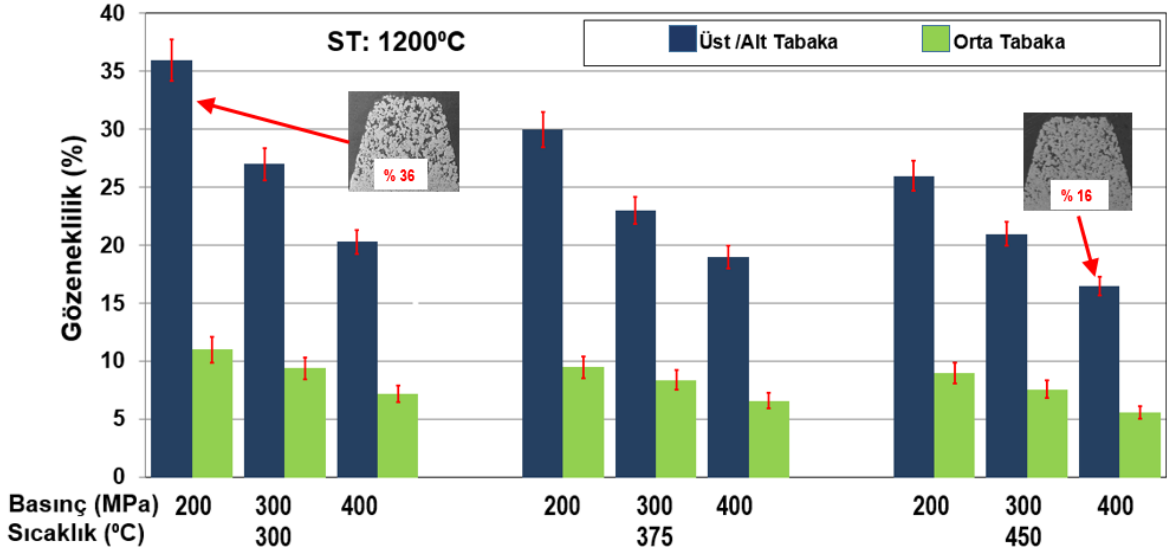


Şekil 3.8. Nikel tozu ile üretilen 101-109 kodlu numunelerin gözeneklilik değerlerinin üretim parametrelerine bağlı olarak değişimi

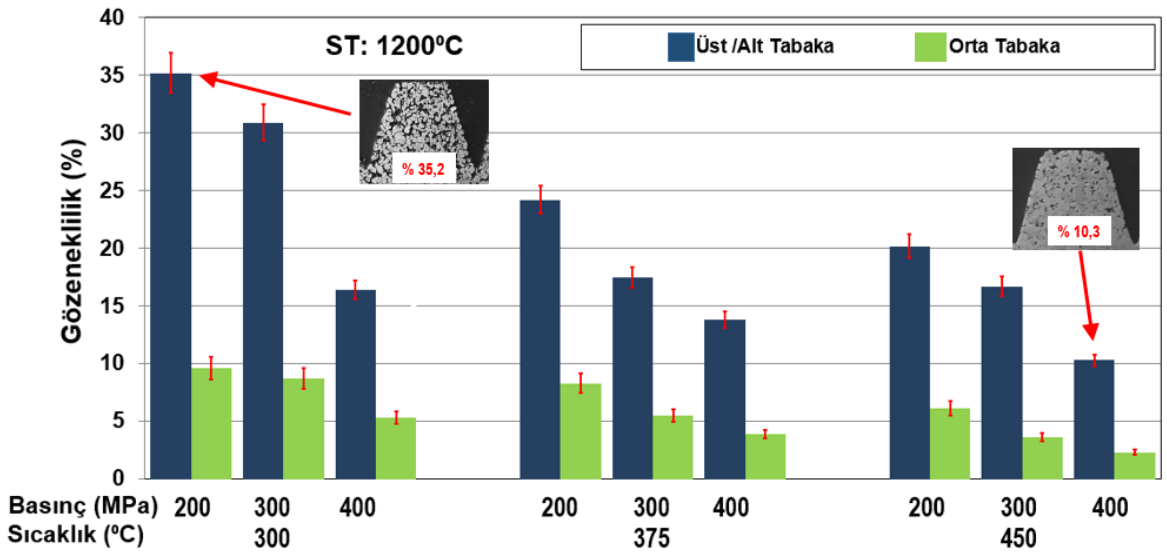


Şekil 3.9. Nikel tozu ile üretilen 201-209 kodlu numunelerin gözeneklilik değerlerinin üretim parametrelerine bağlı olarak değişimi



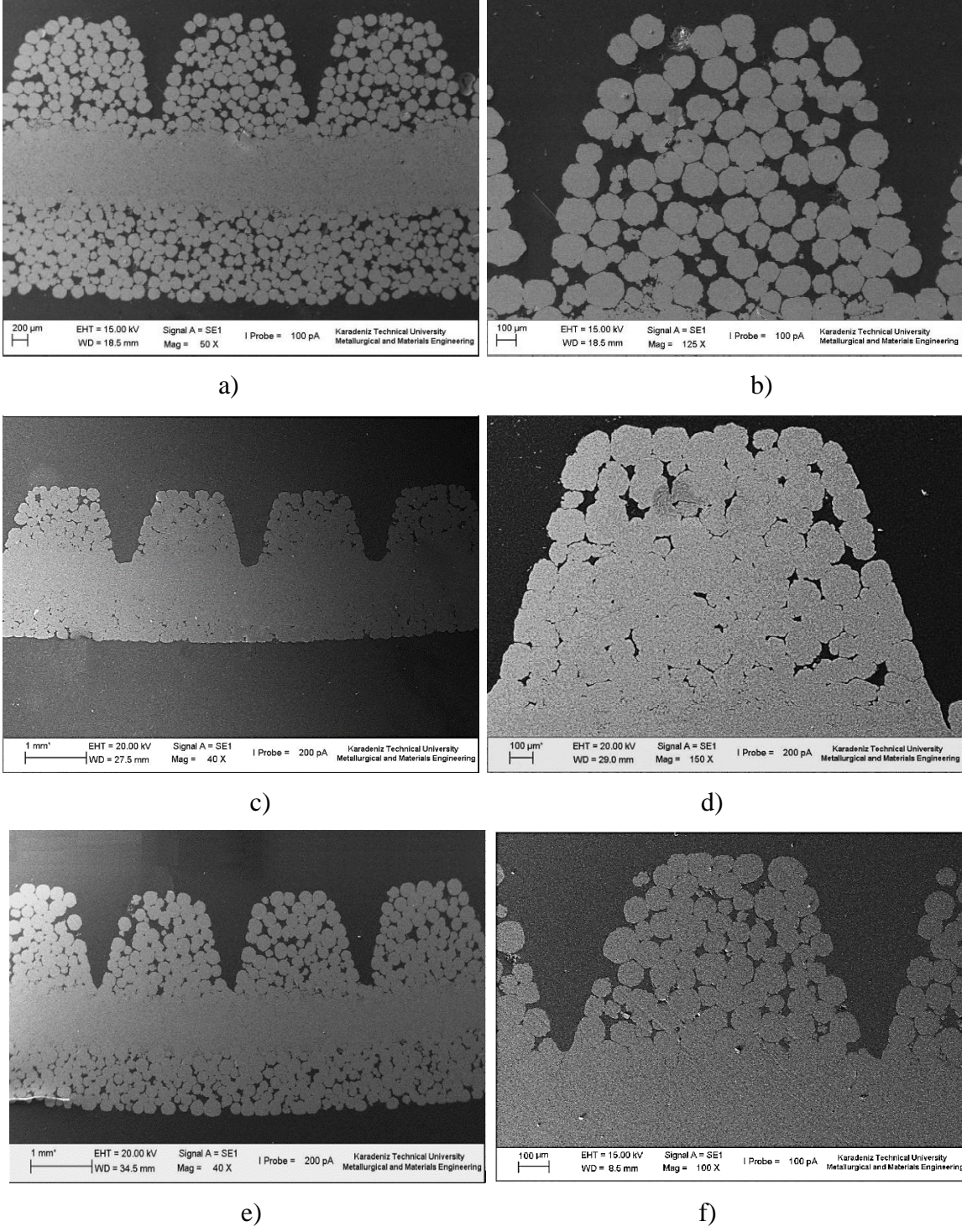


Şekil 3.10. Paslanmaz çelik 316L tozu ile üretilen 301-309 kodlu numunelerin gözeneklilik değerlerinin üretim parametrelerine bağlı olarak değişimi

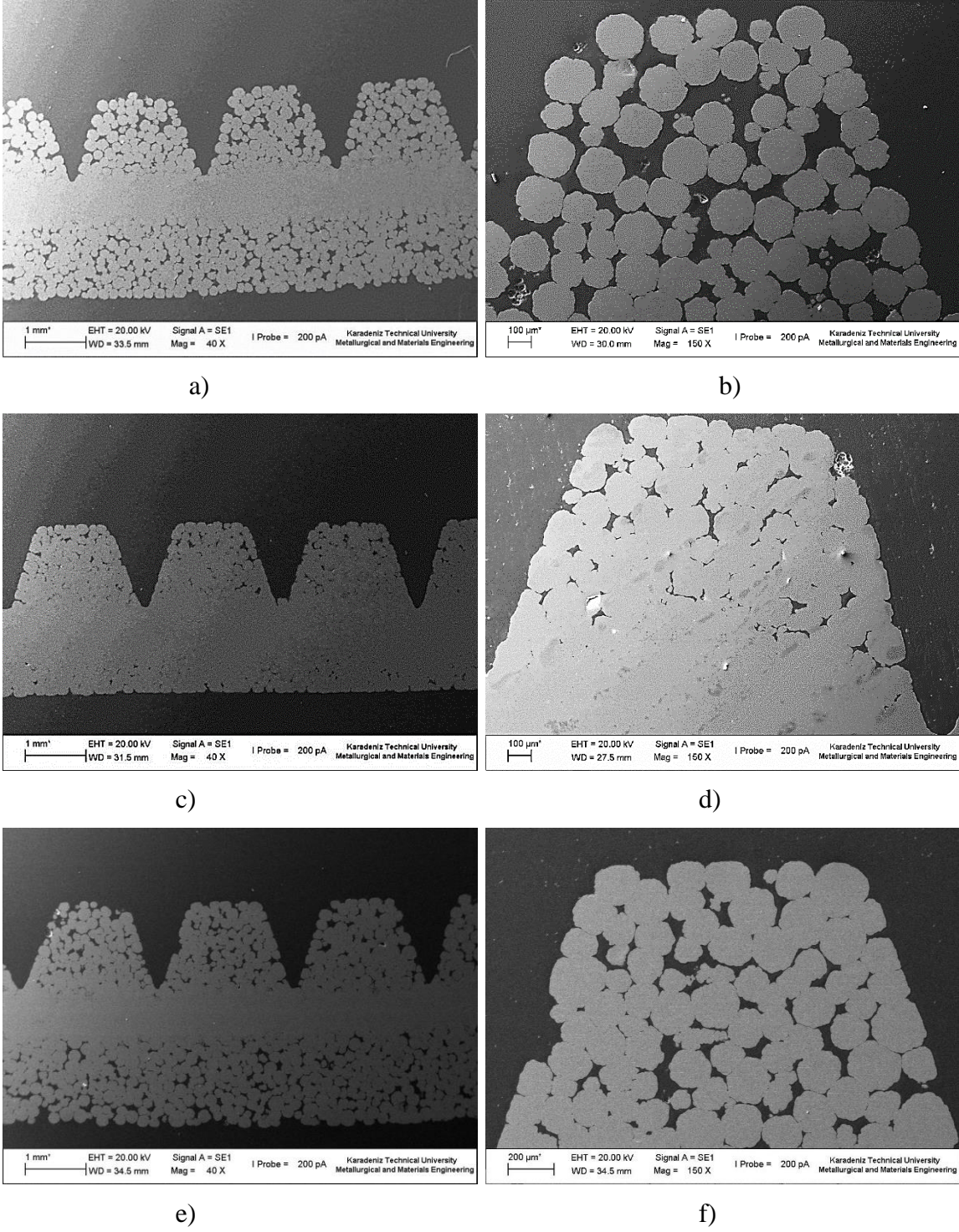


Şekil 3.11. Inconel 600 tozu ile üretilen 401-409 kodlu numunelerin gözeneklilik değerlerinin üretim parametrelerine bağlı olarak değişimi

Nikel tozları ile üretilen ve 900°C’de sinterlenen numunelerin SEM görüntüleri Şekil 3.12’de gösterilmektedir. Gözeneklilik artan üretim basıncı ile azalmaktadır. Nikel tozları ile üretilen ve 1200°C’de sinterlenen numunelerin gözeneklilik oranları 900°C’de üretilen numunelere göre düşüktür. Bu sebepten dolayı sinterleme sıcaklığının artması gözenekliliği azalttığı söylenebilir (Şekil 3.13).

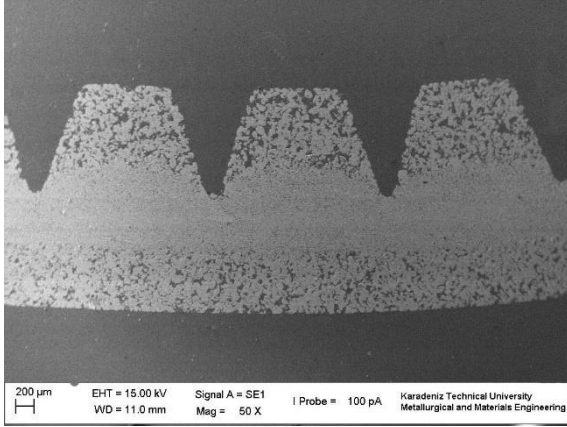


Şekil 3.12. Nikel tozuyla üretilen ve 900°C’de sinterlenen numunelerin SEM görüntüsü; a-b) 101 kodlu numune, c-d) 109 kodlu numune, e-f) 105 kodlu numune

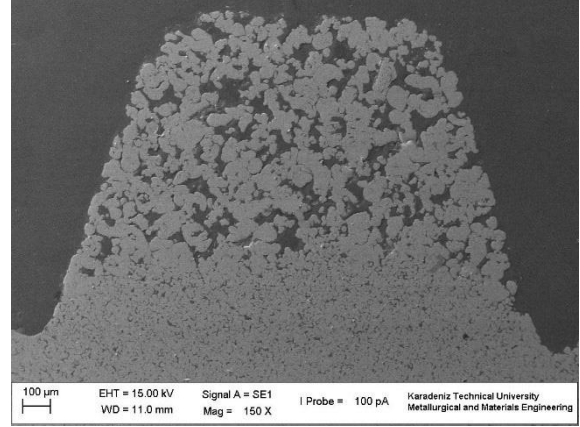


Şekil 3.13. Nikel tozuyla üretilen ve 1200°C’de sinterlenen numunelerin SEM görüntüsü; a-b) 201 kodlu numune, c-d) 209 kodlu numune, e-f) 205 kodlu numune

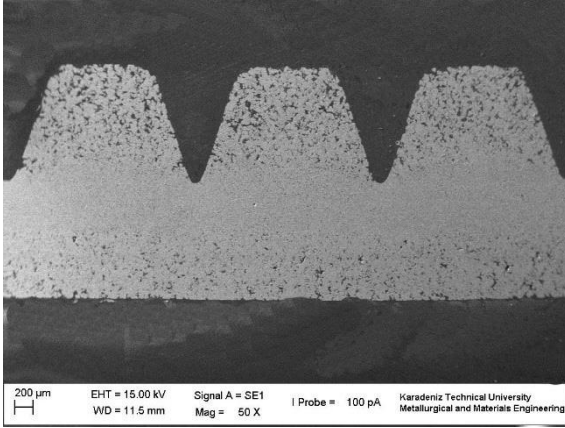
Şekil 3.14’de paslanmaz çelik 316L tozları, Şekil 3.15’de Inconel 600 ile üretilen numunelerin SEM görüntüleri görülmektedir. Her iki tozun da üretim parametrelerinin gözeneklilik üzerine etkileri aynıdır.



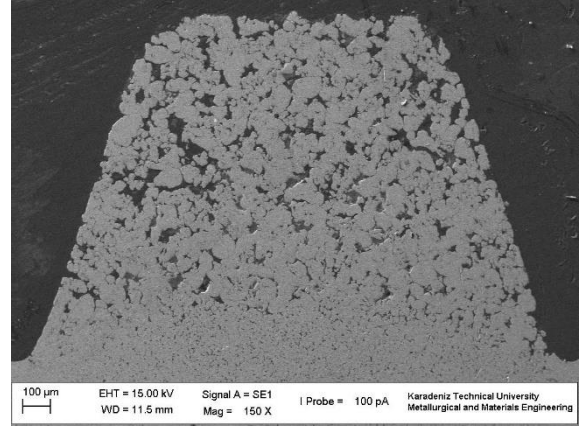
a)



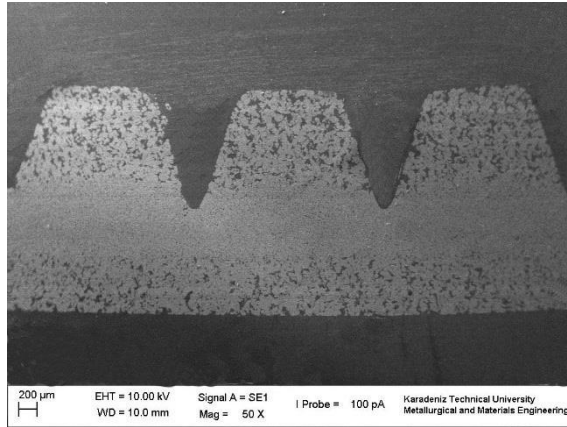
b)



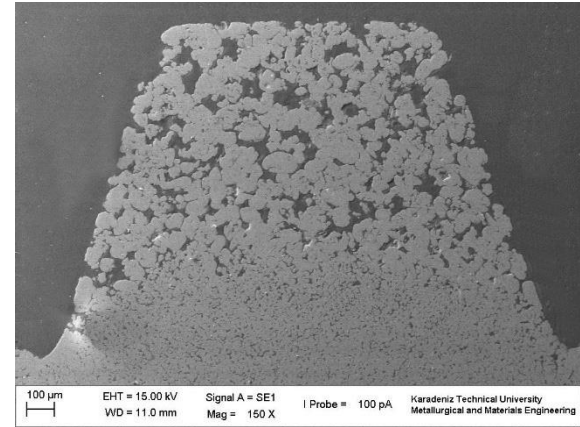
c)



d)

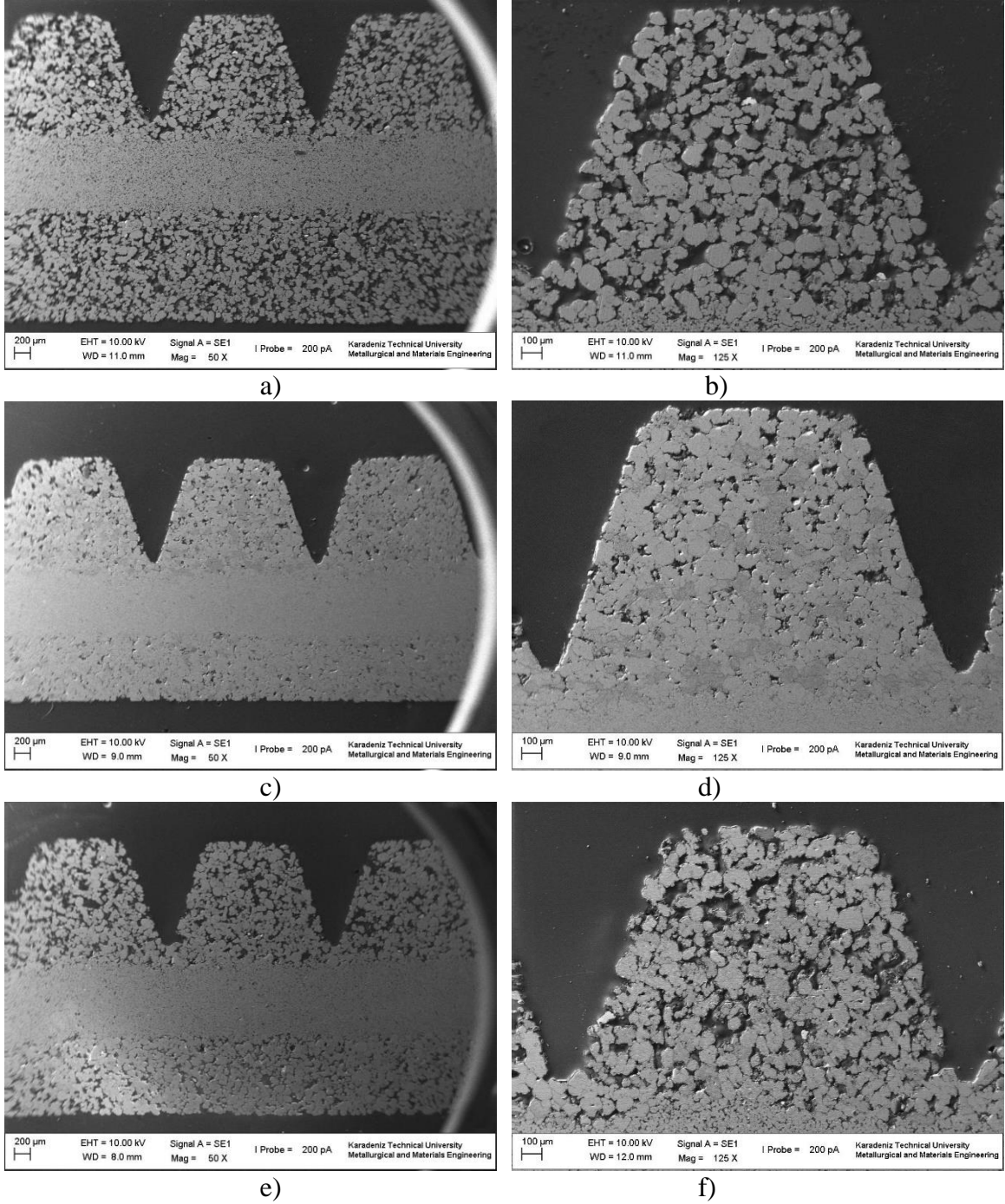


e)



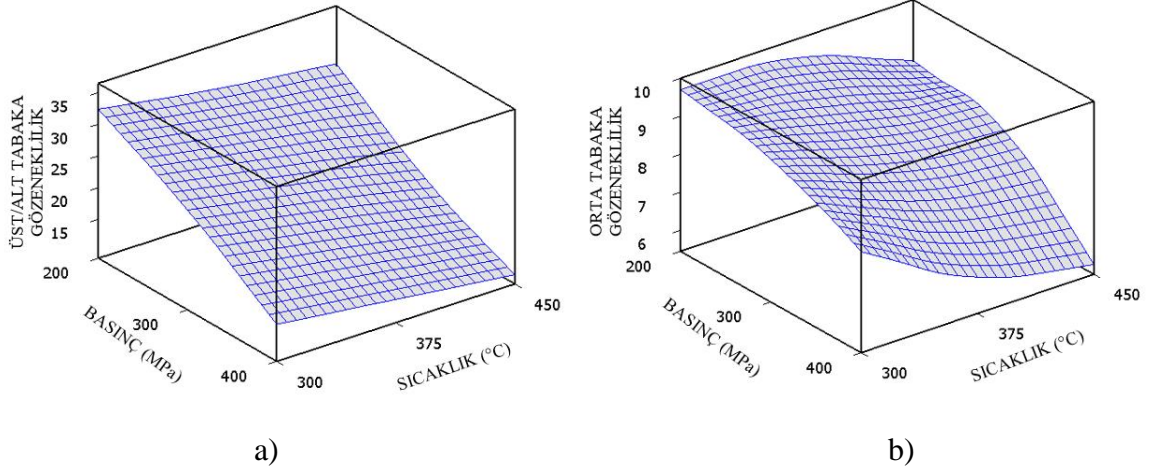
f)

Şekil 3.14. Paslanmaz çelik tozuyla üretilen ve 1200°C'de sinterlenen numunelerin SEM; a-b) 301 kodlu numune, c-d) 309 kodlu numune, e-f) 305 kodlu numune

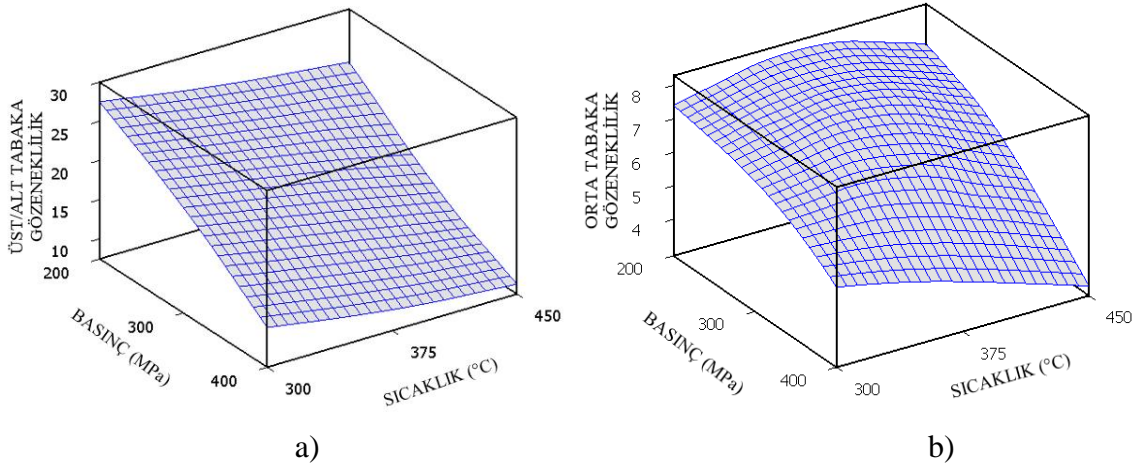


Şekil 3.15. Inconel 600 tozlarıyla üretilen ve 1200°C’de sinterlenen numunelerin SEM; a-b) 401 kodlu numune c-d) 409 kodlu numune, e-f) 405 kodlu numune

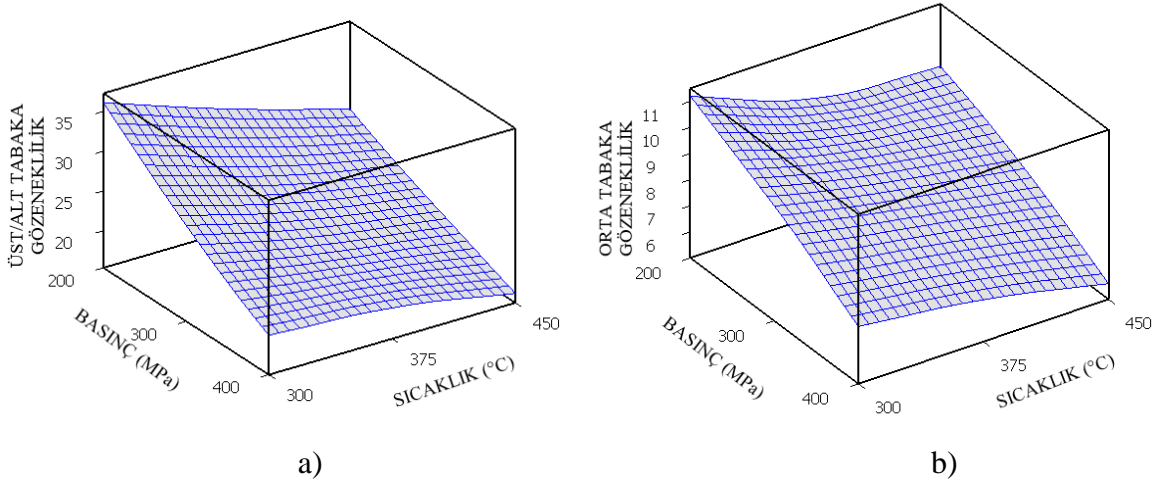
Gözeneklilik artan üretim basıncı ile azalmakta ve üretim sıcaklığına göre daha etkili bir parametredir. Üst/alt tabaka gözeneklilik bulguları, orta tabaka bulguları ile benzer özellikler sergilemektedir. Orta tabakada küçük boyutlu tozların kullanılmasından dolayı gözeneklilik çok daha az olduğu Şekil 3.16 ile Şekil 3.19 arasındaki grafiklerde görülmektedir.



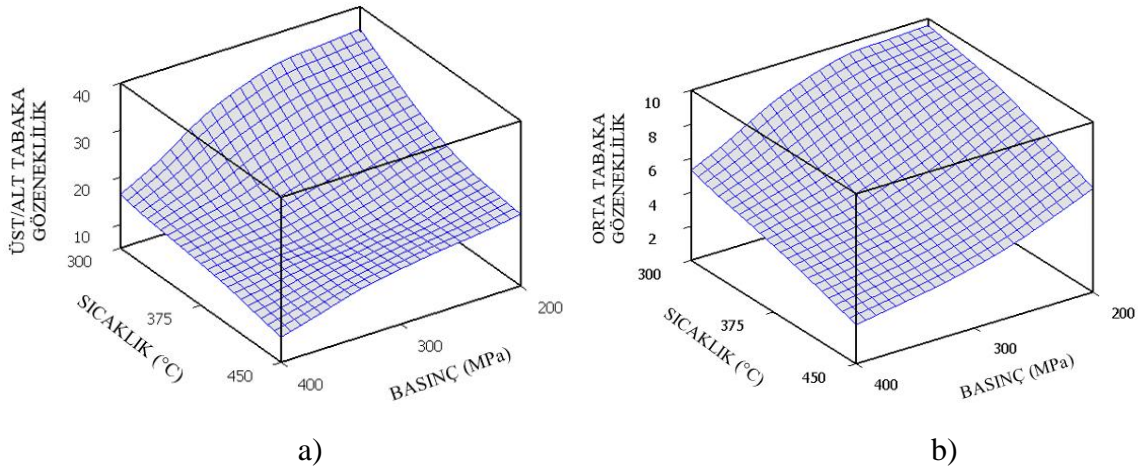
Şekil 3.16. Üretim parametrelerinin 101-109 kodlu numunelerin gözeneklilik değerlerine etkileri a) üst/alt tabaka, b) orta tabaka



Şekil 3.17. Üretim parametrelerinin 201-209 kodlu numunelerin gözeneklilik değerlerine etkileri a) üst/alt tabaka, b) orta tabaka



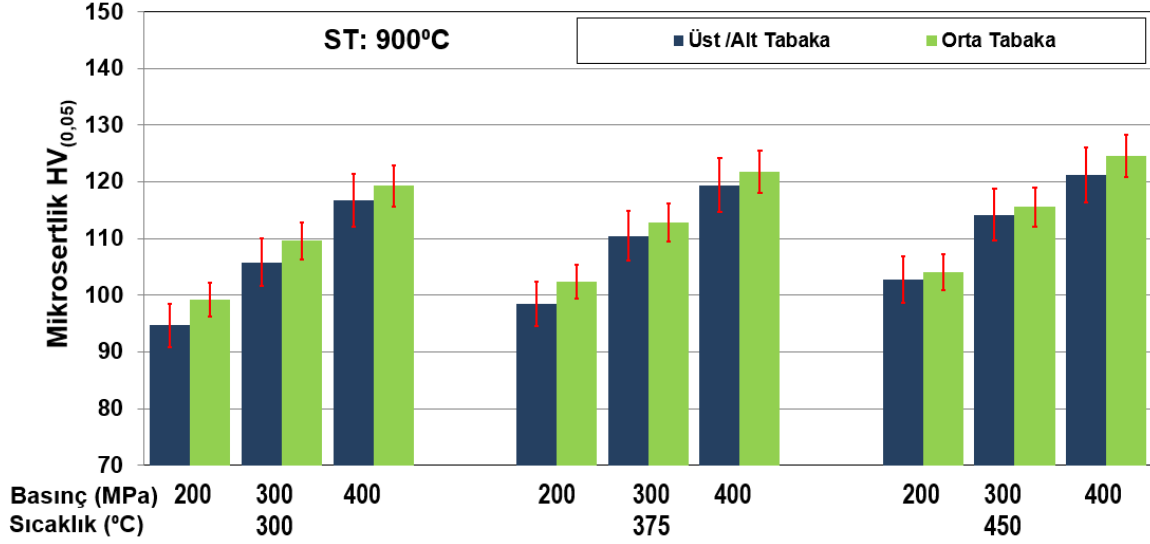
Şekil 3.18. Üretim parametrelerinin 301-309 kodlu numunelerin gözeneklilik değerlerine etkileri a) üst/alt tabaka, b) orta tabaka



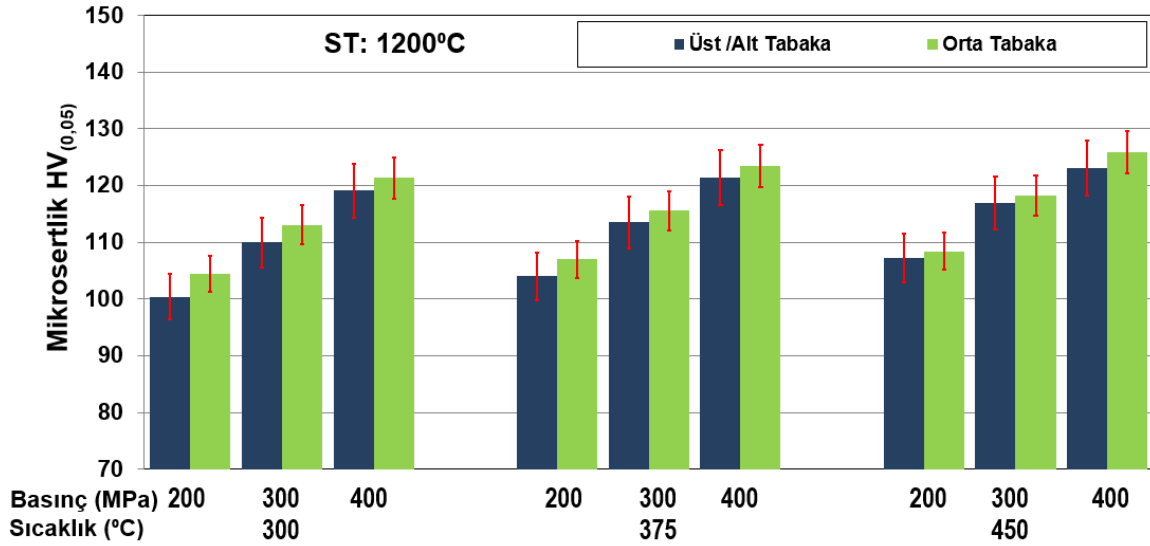
Şekil 3.19. Üretim parametrelerinin 401-409 kodlu numunelerin gözeneklilik değerlerine etkileri a) üst/alt tabaka, b) orta tabaka

### 3.2.2. Mikrosertlik Ölçüm Sonuçları

Deneylerden elde edilen numunelerin mikrosertlik değerleri Şekil 3.20 ile Şekil 3.23 arasındaki grafiklerde gösterilmektedir. Genellikle üretim basıncının mikrosertlik sonuçlarında önemli bir etki gösterirken, üretim sıcaklığının mikrosertlik değerlerine etkisi çok belirgin değildir. Artan üretim basıncı ile mikrosertlik değerleri artmaktadır.



Şekil 3.20. Nikel tozundan üretilen ve 900°C sinterlenen (101-109 kodlu) numunelerin mikrosertlik değerleri

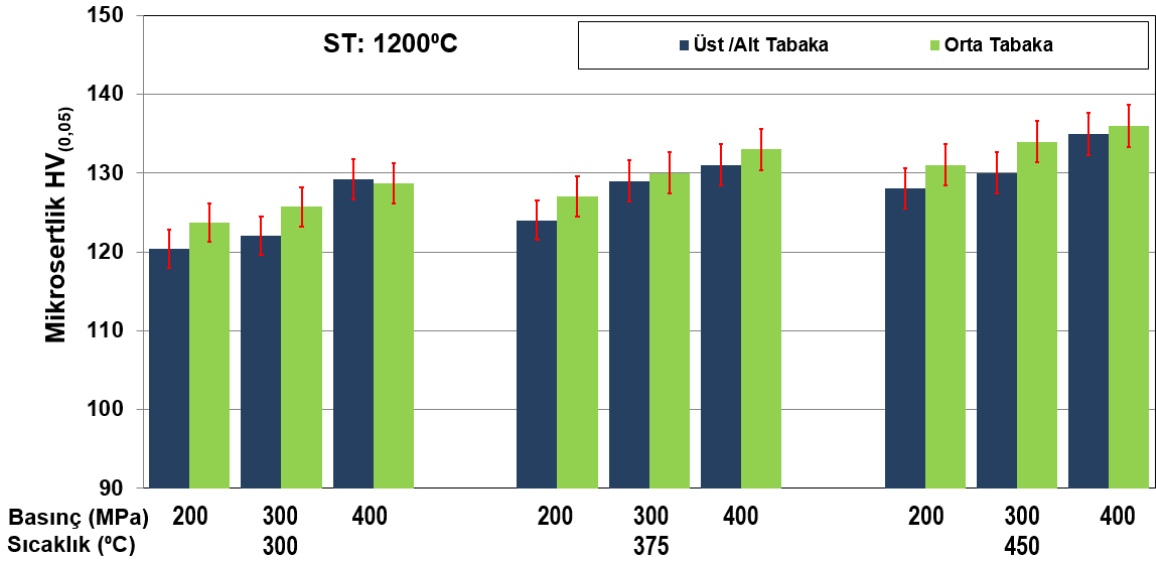


Şekil 3.21. Nikel tozundan üretilen ve 1200°C sinterlenen (201-209 kodlu) numunelerin mikrosertlik değerleri



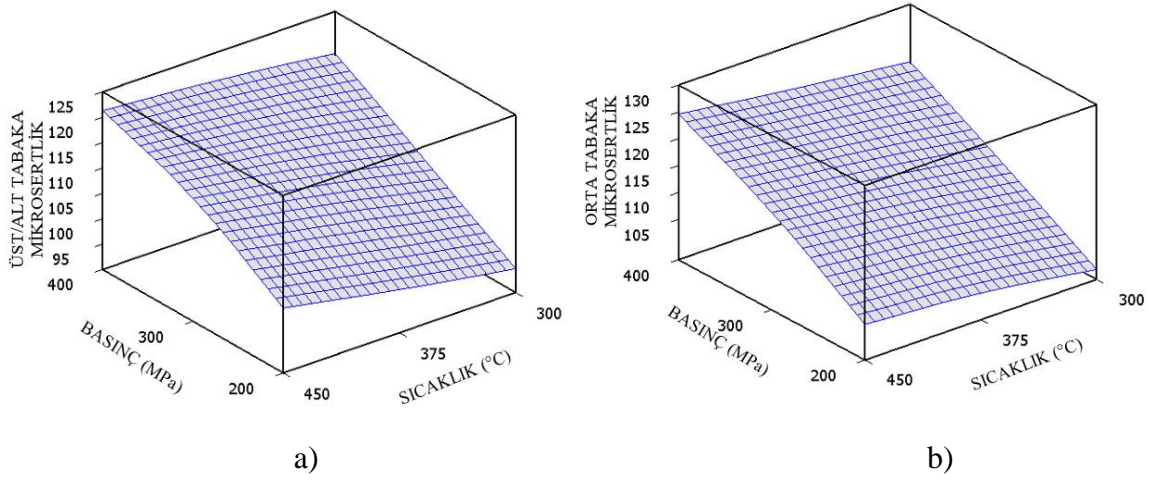


Şekil 3.22. Paslanmaz çelik 316L tozu ile üretilen ve 1200°C sinterlenen (301-309 kodlu) numunelerin mikrosertlik değerleri

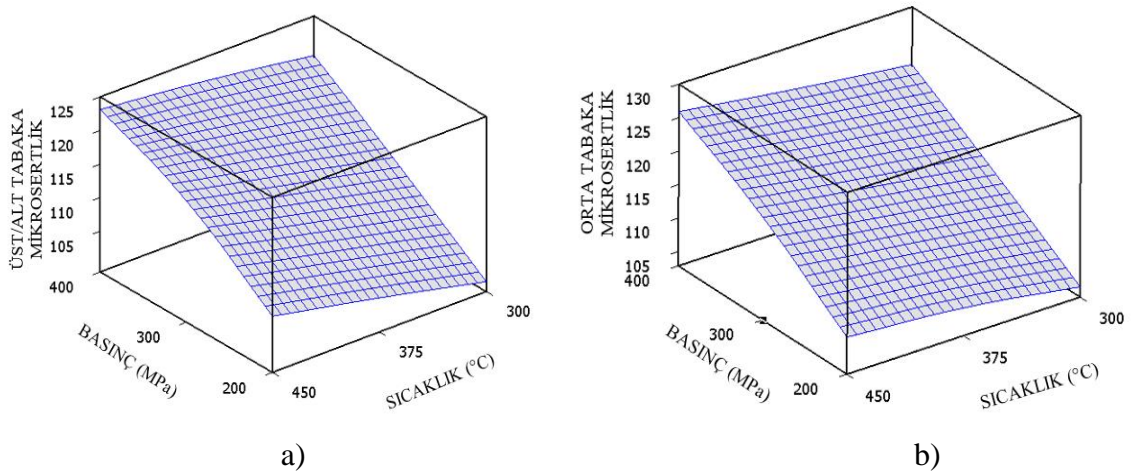


Şekil 3.23. Inconel 600 tozundan üretilen ve 1200°C sinterlenen (401-409 kodlu) numunelerin mikrosertlik değerleri

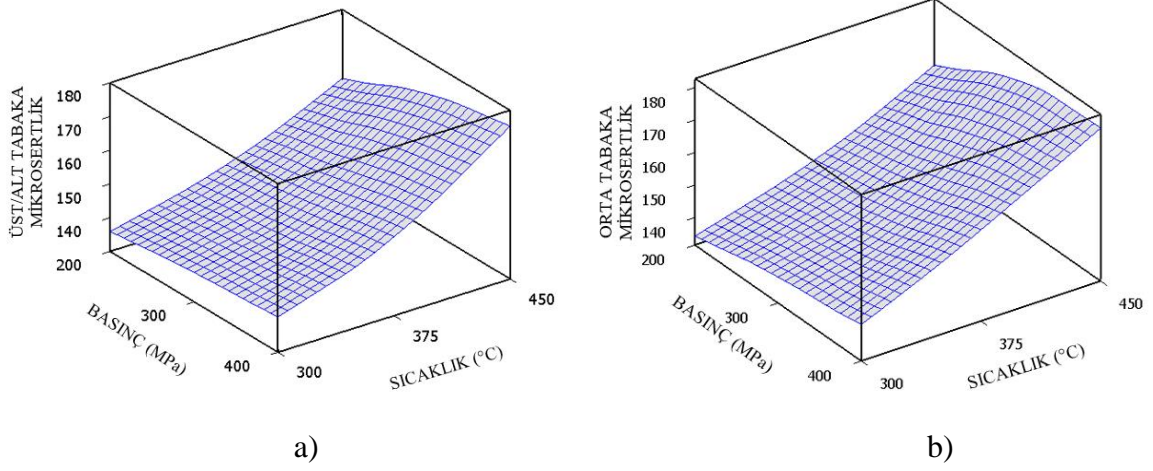
Üretim parametrelerinin mikrosertlik üzerine etkisini Şekil 3.24 ile Şekil 3.27 arasındaki grafikler ile görülmektedir. Genellikle üretim basıncının, üretim sıcaklığına göre etkisini açıkça gösteren bu grafikler ile mikrosertlik üzerine en etkili parametrenin üretim basıncı olduğu söylenebilir. Nikel tozları ile üretilen numuneler 900°C ve 1200°C de sinterleme sıcaklıklarında yapılarak mikrosertlik üzerine sinterleme sıcaklıklarının etkisi araştırılmıştır. Şekil 3.24 ve 3.25’de grafikler ile bu etki görülmektedir. Mikrosertlik değerleri sinterleme sıcaklıkları ile belirgin bir değişim göstermemiştir.



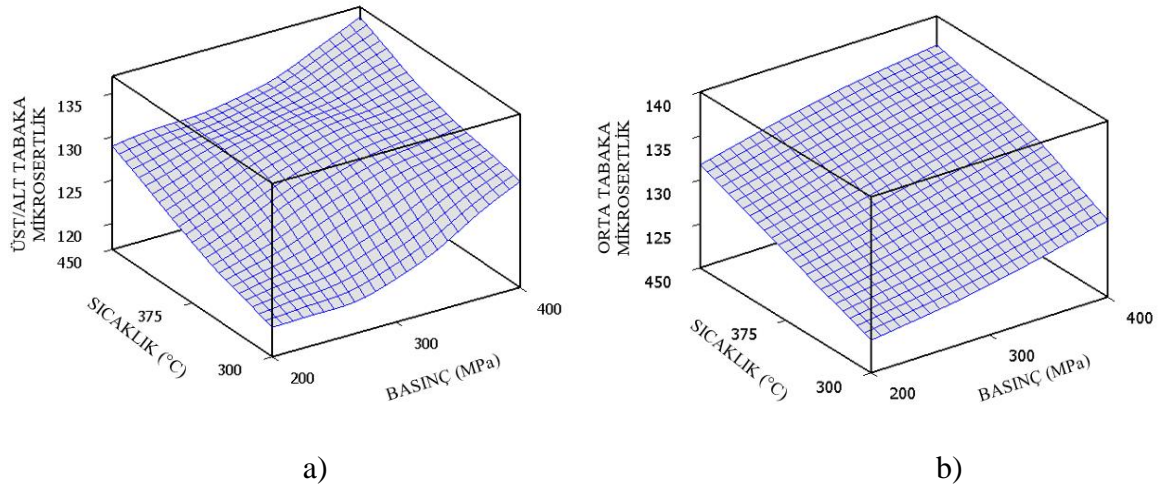
Şekil 3.24. Nikel tozu ile üretilen 101-109 kodlu numunelerin mikrosertlik grafikleri  
a) üst/alt tabaka, b) orta tabaka



Şekil 3.25. Nikel tozu ile üretilen 201-209 kodlu numunelerin mikrosertlik grafikleri  
a) üst/alt tabaka, b) orta tabaka



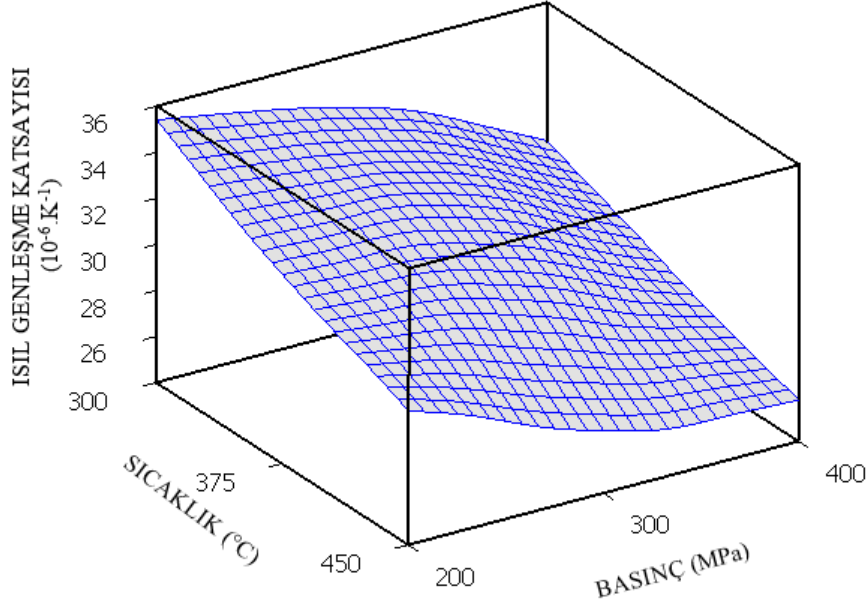
Şekil 3.26. Paslanmaz çelik 316L tozu ile üretilen numunelerin mikrosertlik grafikleri  
a) üst/alt tabaka, b) orta tabaka



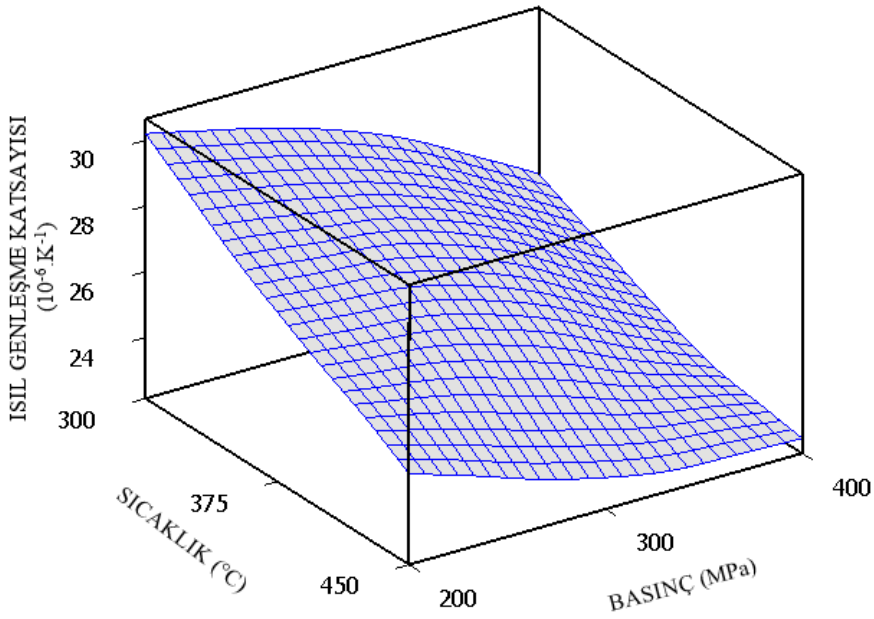
Şekil 3.27. Inconel 600 tozu ile üretilen numunelerin mikrosertlik grafikleri  
a) üst/alt tabaka, b) orta tabaka

### 3.2.3. Isıl Genleşme Katsayısı Bulguları

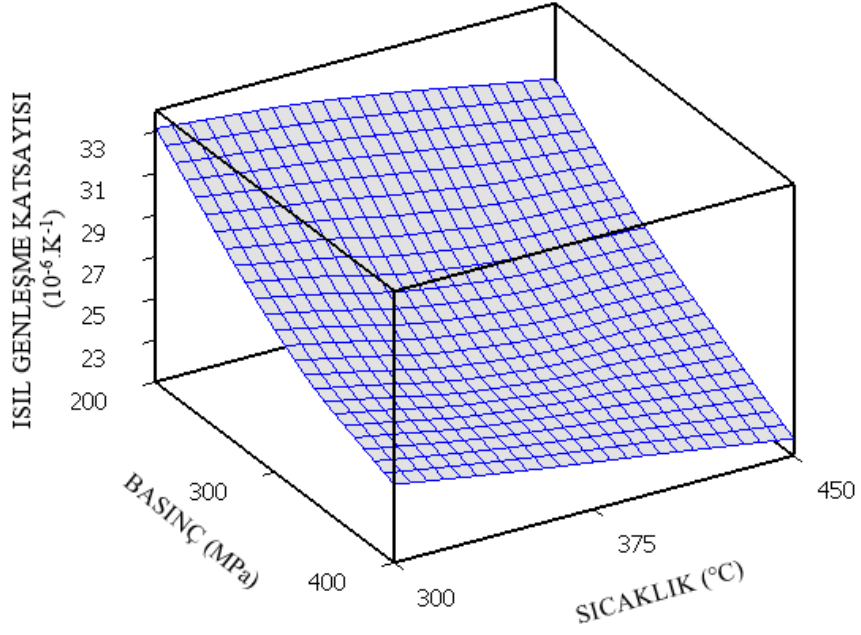
T/M yöntemiyle üretilmiş parçalarda ısıl genleşme katsayısı, tam yoğun (bulk) malzeme değerleri ile daha düşük değerler arasında değişmektedir. Isıl genleşme katsayısı, atomlar arası bağlar ve titreşimlerden kaynaklanır. Gözenekler parça kütleini düşürür, ancak sıcaklık yükselirken atomlar arası bağın uzamasına etki etmez [1-2]. Numune üretim parametrelerinin ısıl genleşme katsayısına etkileri Şekil 3.28 ile 3.31’de görülmektedir.



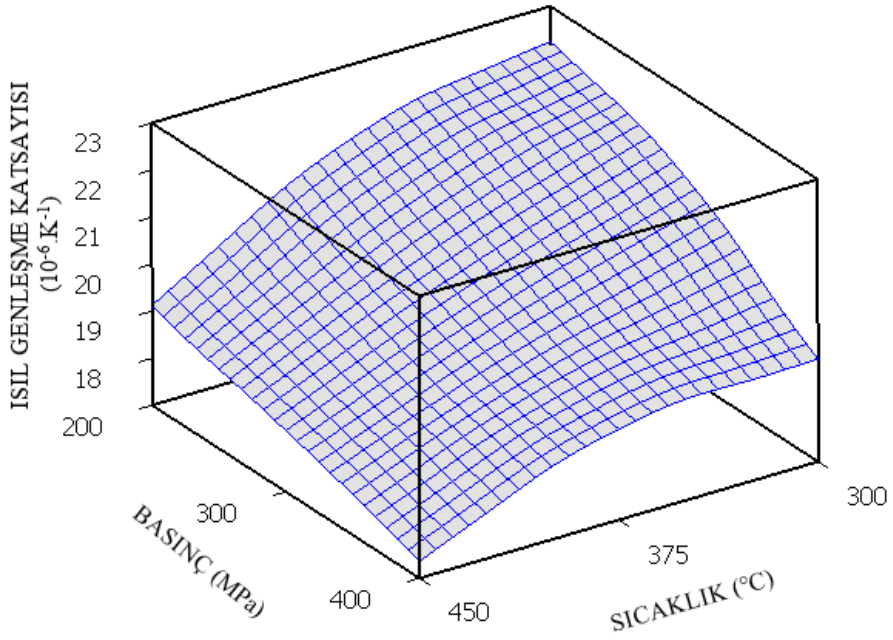
Şekil 3.28. Üretim sıcaklığının ve basıncının 101-109 kodlu numunelerin 800°C’deki ısıl genleşme katsayılarına etkileri



Şekil 3.29. Üretim sıcaklığının ve basıncının 201-209 kodlu numunelerin 800°C’deki ısıl genleşme katsayılarına etkileri

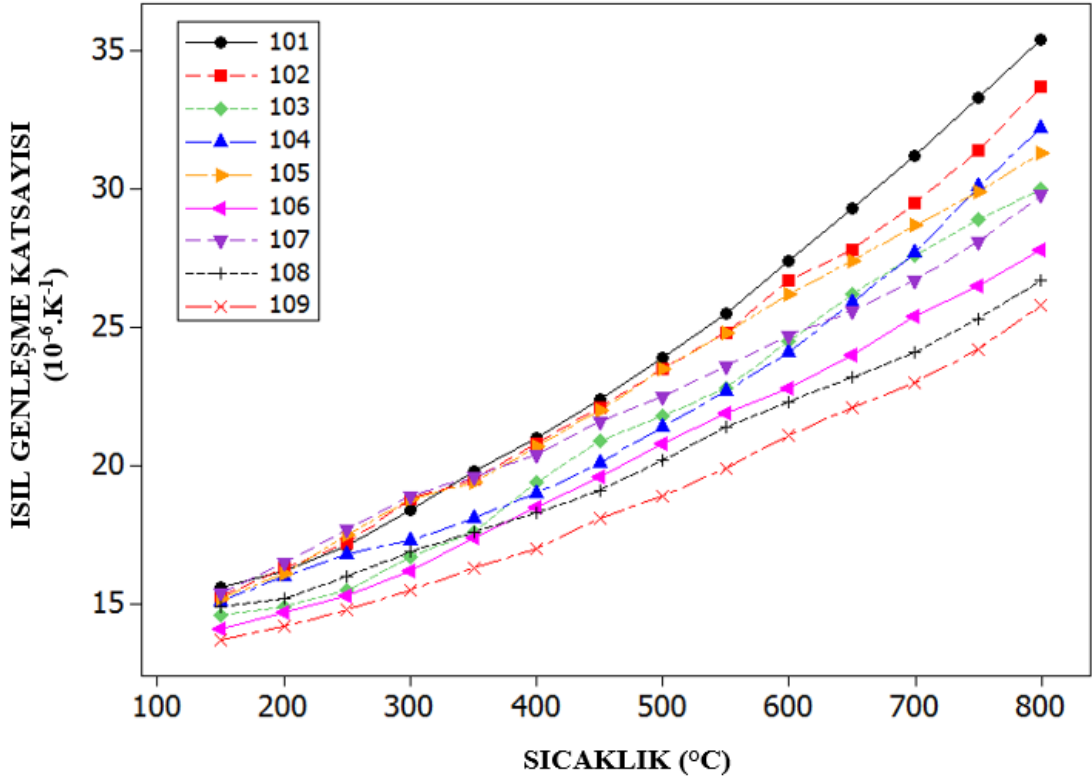


Şekil 3.30. Üretim sıcaklığının ve basıncının 301-309 kodlu numunelerin 800°C'deki ısıl genişleme katsayılarına etkileri

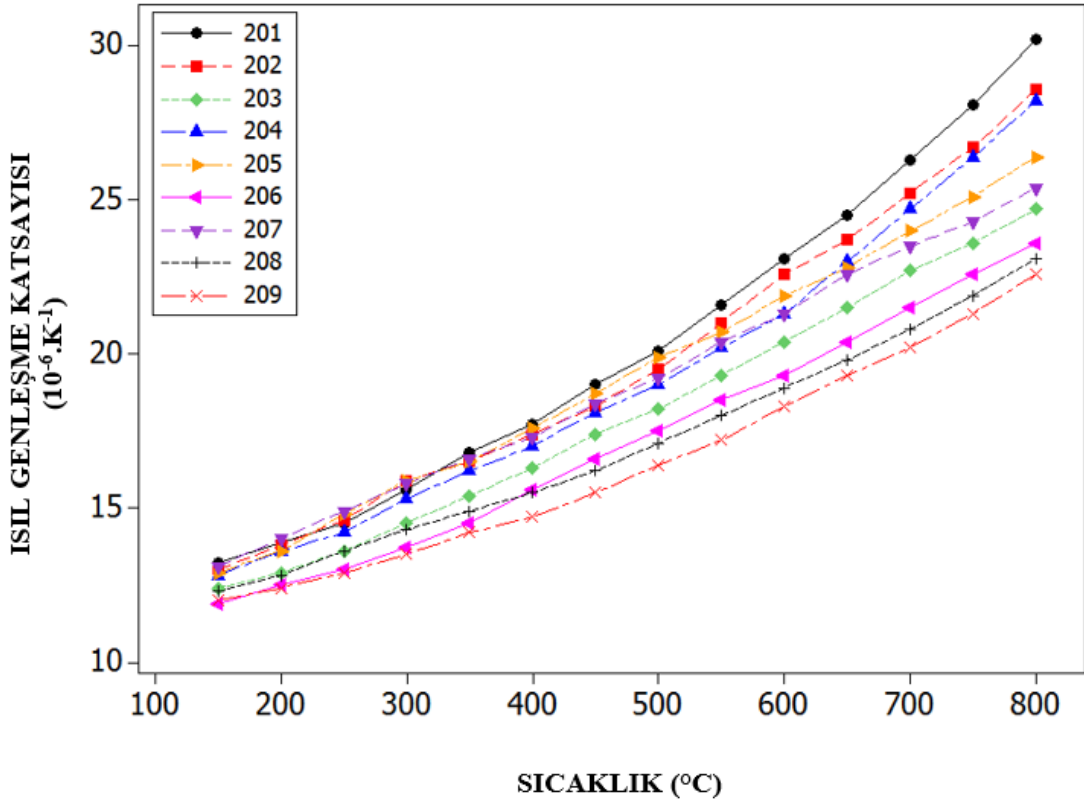


Şekil 3.31. Üretim sıcaklığının ve basıncının 401-409 kodlu numunelerin 800°C'deki ısıl genişleme katsayılarına etkileri

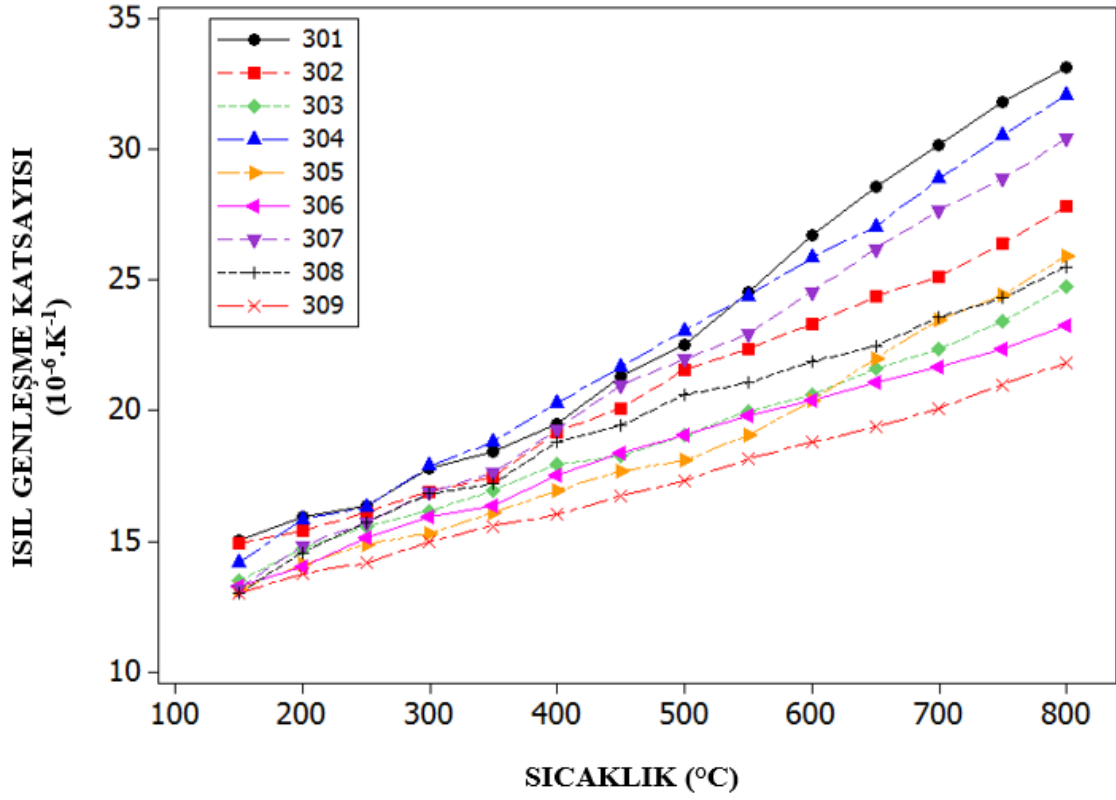
Numunelerin oda sıcaklığından 800°C'ye kadar olan sıcaklık aralığındaki ısıl genişleme katsayısı Şekil 3.32 ile Şekil 3.36 arasındaki grafiklerde üretilen her bir numune için görülmektedir. Nikel, paslanmaz çelik 316L ve Inconel 600 tozları ile üretilen numunelerin her biri için üç ayrı ısıl genişleme ölçümü yapılmış ve ortalaması alınmıştır.



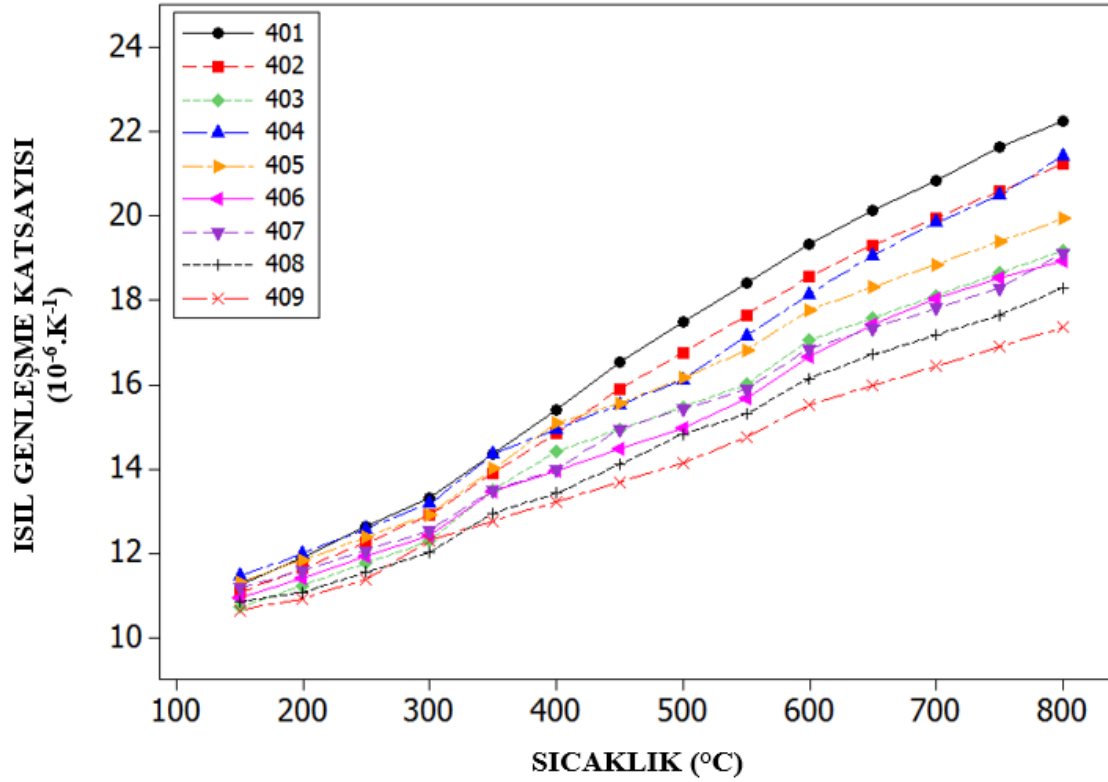
Şekil 3.32. Nikel tozu ile üretilen 101-109 kodlu numunelerin ısıl genleşme katsayıları



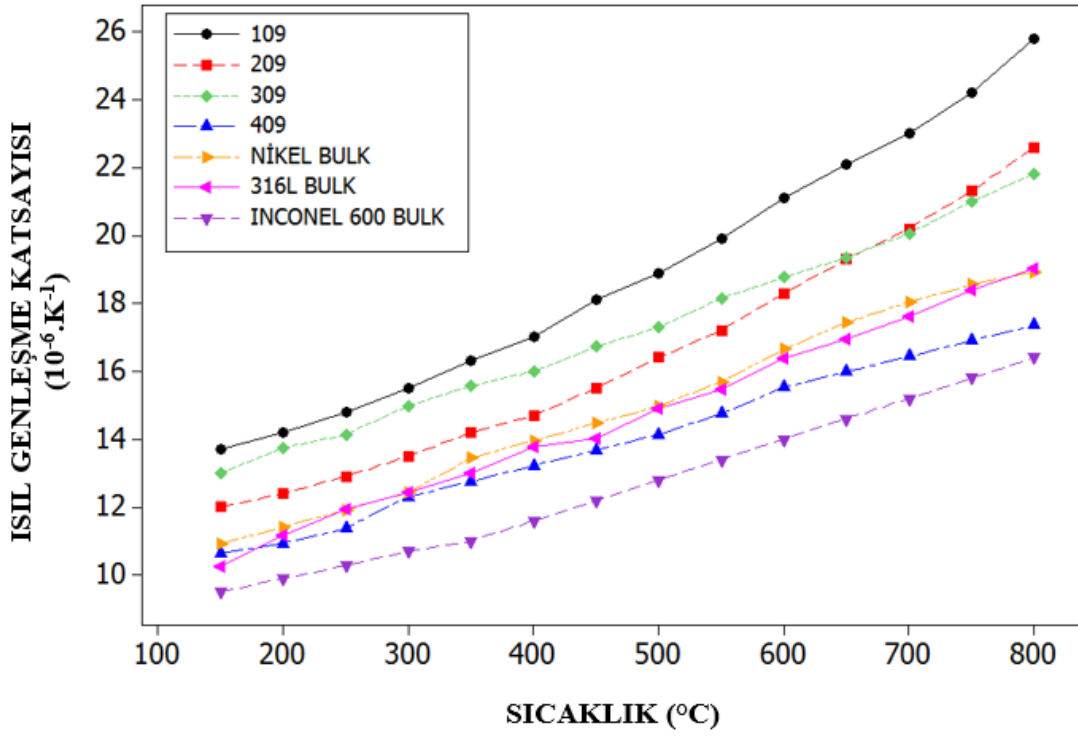
Şekil 3.33. Nikel tozu ile üretilen 201-209 kodlu numunelerin ısıl genleşme katsayıları



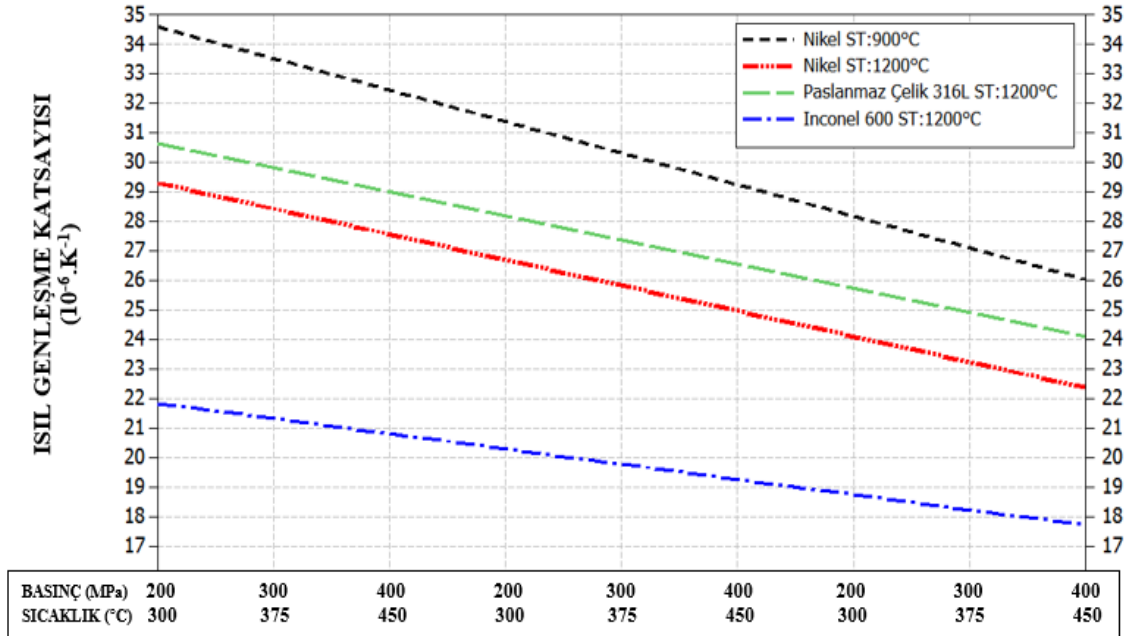
Şekil 3.34. Paslanmaz çelik 316L tozu ile üretilen 301-309 kodlu numunelerin ısı genleşme katsayıları



Şekil 3.35. Inconel 600 tozu ile üretilen 401-409 kodlu numunelerin ısı genleşme katsayıları



Şekil 3.36. Çalışmada üretilen numuneler ile bulk numunelerin ısı genleşme katsayılarının karşılaştırılması



Şekil 3.37. Çalışmada üretilen numunelerin 800°C'deki ısı genleşme katsayılarının üretim parametrelerine bağlı olarak değişimi



## 4. İRDELEME

### 4.1 Tozların Fiziksel Özellikleri

Deneysel çalışmalarda kullanılan metal tozların yüzeylerini incelemek ve diğer özelliklerini gözlemlemek için SEM görüntülerinden yararlanılmıştır. Çalışmada kullanılan tozların (nikel, paslanmaz çelik 316L ve Inconel 600) SEM görüntüleri Şekil 3.1'den 3.6'ya kadar olan resimlerde mevcuttur. Çalışmanın amacı orta tabakada gözenek oranı sifıra yakın istenirken, üst/alt tabakada gözenek oranı yüksek (%30-40) olması istenmiştir. Bu sebepten dolayı orta tabakada küçük boyutlu tozlar (0-25) kullanılmış, üst/alt tabakada büyük boyutlu tozlar (90-125) kullanılmıştır. Ortalama 0-25 µm boyut aralığına sahip orta tabakada kullanılan metal tozlar Şekil 3.1, Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'de gösterilmiştir. Ortalama 90-125µm boyut aralığına sahip üst ve alt tabakada kullanılan metal tozları Şekil 3.4, şekil 3.5, ve Şekil 3.6'da gösterilmiştir. Şekil 3.1 ve Şekil 3.4'de, nikel tozunun yüzeyinin çukurcuk olduğu ama küresel formda olduğu görülmektedir. Şekil 3.2 ve Şekil 3.5'de paslanmaz çelik 316L tozunun düzensiz yapıda olduğu ve aralarda pulsu formda olduğu görülmektedir. Şekil 3.3 ve Şekil 3.6'da Inconel 600 tozunun hem düzensiz hem de küresel formda olduğu görülmektedir.

Bu çalışmadaki amaç belirli geometriye sahip zimbalar (Şekil 3.3) yardımıyla birbirine ters geometriye sahip gözenekli metalik yüzeyler üretmektir. Deneysel çalışmada paslanmaz çelik 316L tozlarıyla kolaylıkla numune üretilirken, nikel tozlarıyla numune üretiminde zorlanılmıştır. Bunun sebebi nikel tozlarının manyetik özelliklerinin çok yüksek olması ve küresel formda olduğu için tozların birbirine sürtünmesinden kaynaklanan direnç yüzündendir. Genellikle numune üretimi esnasında nikel tozları dezavantaj yaratmıştır, akışkanlığını ve paketlenme özelliklerini kötü etkilemiştir. Inconel 600 ve paslanmaz çelik 316L tozlarının akış ve paketlenme özellikleri nikel tozlarına göre nispeten daha iyidir. Nikel tozları ile üretilen numuneler istenilen yüzey kalitesindedir. Şekil 3.8'de görüldüğü gibi istenilen yüzey kalitesi elde edilmiştir. Genellikle üretilen numunelerin orta tabakaları %5 gözenekli, üst ve alt tabakaları ise %20 gözeneklidir. Şekil 3.7'de üretilen numunelerin SEM resimlerinde tabakalı yapılar açıkça görülmektedir. Üst ve alt tabaka genellikle aynı oranda gözeneklilik ve mikrosertlik göstermiş ve bu sebepten dolayı iki tabaka tek tabaka olarak belirlenmiştir. Orta tabaka ise daha küçük boyutlu tozların kullanılmasıyla gözle

görülebilecek şekilde farklı ortaya koymuştur. Şekil 3.1’de üst/alt tabakada 90-125µm boyut aralığında toz kullanıldığını ve orta tabakada ise 0-25µm boyut aralığında toz kullanıldığını göstermektedir. Çalışmadan elde edilen bulgular Tablo 3.1’de gösterilmiştir. Gözeneklilik, mikrosertlik ve ısıl genişleme katsayıları her numune için ayrı ayrı belirlenmiştir. Üretim şartları üç tekrar yapılarak ortalaması alınmıştır.

#### 4.2 Üretim Parametrelerinin Gözenekliliğe Etkileri

Numunelerin üst/alt tabaka ve orta tabaka gözeneklilik değerleri, sıkıştırma basıncının 200 MPa’dan 400 MPa’a artmasıyla azalmıştır. Gözeneklilik bulgularında üretim basıncıyla belirgin bir değişim elde edilirken, üretim sıcaklığıyla gözeneklilik sonuçlarında belirgin bir değişim gözlemlenmemiştir. Aynı üretim sıcaklığı ve sinterleme sıcaklığında, en düşük basınç değeri olan 200MPa’dan 400MPa’a çıkartıldığında üst/alt tabaka gözeneklilik değerleri sırasıyla %32,4 ve %10,3’tür. Orta tabaka gözeneklilik değerleri sırasıyla %9,7 ve %5,7 olarak bulunmuştur. Aynı üretim basıncı ve sinterleme sıcaklığında, en düşük sıcaklık değeri olan 300°C’den 450°C’ye çıkarıldığında üst/alt tabaka gözeneklilik değeri sırasıyla %14,7 ve %10,3’tür. Orta tabaka gözeneklilik değerleri sırasıyla %8,1 ve 5,7 olarak bulunmuştur.

Şekil 3.8, Şekil 3.9, Şekil 3.10 ve Şekil 3.11’deki grafiklerde basınç ve sıcaklığın yani üretim parametrelerinin gözenekliliğe etkisi açıkça görülmektedir. Genellikle üretim basıncının, üretim sıcaklığına oranla daha etkin bir parametre olduğu görülmektedir. Üst/alt tabaka gözeneklilik oranı ise orta tabaka gözeneklilik oranına kıyasla daha çok azaldığı veya arttığı söylenebilir. Aynı üretim sıcaklığında üretilen numunelerin değişim yüzdesi üretim basıncı ile belirgin bir şekilde değişmektedir. Şekil 3.8’de en düşük üretim parametrelerinde üretilen numunenin gözeneklilik oranı % 32,4 iken en yüksek üretim parametrelerinde gözeneklilik oranı 10,3’tür. Aynı değişim diğer numunelerde de görülmektedir.

Şekil 3.12’de üretim parametrelerinin gözenekliliğine etkisini belirgin bir şekilde ortaya koymaktadır. Nikel tozları kullanılarak üretilen 900°C’de sinterlenen numunelerin SEM görüntüleri görülmektedir Şekil 3.12 a ve Şekil 3.12 b’de sinterleme sıcaklığı 900°C, üretim basıncı 200MPa ve üretim sıcaklığı 300°C üretim parametrelerindeki numunenin gözeneklilik oranı %32,4’tür. Şekil 3.12c ve Şekil 3.12 d ise sinterleme sıcaklığı 900°C, üretim basıncı 400MPa ve üretim sıcaklığı 450°C üretim parametrelerindeki numunenin gözeneklilik oranı %10,3’tür. Bu iki numunenin SEM resimleri ile üretim parametrelerinin

etkisi gözle görülmektedir. Üretim basıncı 400 MPa ve sıcaklığı 450°C’de üretilen numune %20 gözeneklidir. Bu üç numune ile gözle yapılan tespitlerde üretim basıncının gözeneklilik oranına ciddi etki ettiği görülmektedir. Şekil 3.13’de nikel tozları kullanılarak üretilen numunelerin 1200°C’de sinterlenen SEM görüntüleri görülmektedir. Şekil 3.13’ de aynı sinterleme sıcaklığında farklı üretim parametrelerinde numuneler görülmektedir. Bu numunelerin SEM görüntüleri üretim parametrelerinin gözeneklilik üzerine etkisi açıkça görülmektedir.

Düşük sıcaklıkta (900°C) sinterlenen nikel tozlarında gözeneklilik oranı yüksek iken, sinterleme sıcaklığının yükseltilmesi (1200°C) ile gözeneklilik oranında azalma gözlenmiştir. Sinterleme sıcaklığının artırılması ile tozlar arasında daha etkin metalurjik bir bağ gelişmesi nedeniyle gözeneklilik oranı azalmıştır. Şekil 3.13’de aynı üretim parametrelerindeki numunelerin farklı sinterleme şartlarında çekilen SEM görüntüleri bulunmaktadır. Numunelerin yüzeylerindeki tozların sinterleme ile farklı morfolojilere sahip olduğu görülmektedir. Sinterleme sıcaklığını arttırmak sadece mukavemet ve gözeneklilik değerlerinde farklılaşma sağlamakla kalmamış ayrıca yüzeylerde oluşan metalurjik bağ ile yüzey kalitesi ve pürüzlülüğü de iyileştirmiştir.

Şekil 3.14 ve Şekil 3.15’de üretim parametrelerinin SEM görüntüleri ile gözenekliliğe etkisi incelenmiştir. Genellikle artan üretim basıncı ile orantılı olarak gözeneklilik azalmaktadır. Üretim sıcaklığı ise gözeneklilik oranına çok belirgin bir etki etmemiştir. Artan üretim basıncı ile gözeneklilik azalmakta ve üretim sıcaklığına göre gözeneklilik üzerine daha etkili bir parametredir. Üst/alt tabaka gözeneklilik değerleri ve orta tabaka gözeneklilik değerleri üretim parametrelerine bağlı olarak benzer özellikler sergilemektedir. Orta tabakada küçük boyutlu tozların kullanılmasından dolayı gözeneklilik üst/alt tabakaya göre daha az olduğu Şekil 3.16 ile Şekil 3.19 arasındaki grafiklerde görülmektedir. Şekil 3.16’da nikel tozlarıyla üretilen ve 900°C’de sinterlenen numunelerin gözeneklilik sonuçlarının grafikleridir. Basınç ve sıcaklığa bağlı olarak çizilen grafiklerin üst/alt tabaka (a) ve orta tabaka (b) için gözeneklilik değerlerini göstermektedir. Şekil 3.17’de nikel tozu ile üretilen numunelerin 1200°C’de sinterlenmesi ile elde edilen gözeneklilik değerlerinin, üretim basıncı ve sıcaklığına bağlı olarak değişimi görülmektedir. Bu iki grafiğe bakarak gözenekliliğin artan sinterleme sıcaklığına bağlı olarak azaldığını fakat çok belirgin bir etki etmediği söylenebilir. Üst tabakada, gözeneklilik oranı basınç ve sıcaklığın etkisinde belirli oranla değiştiği ama orta tabakada bu etkinin gözlenmediği tespit edilmiştir. Şekil 3.18’de paslanmaz çelik 316L ile üretilen numunelerin gözeneklilik oranı

görülmektedir. Paslanmaz çelik 316L ile üretilen numunelerde üst/alt tabaka ile orta tabaka arasındaki değişim aynı olduğu tespit edilmiştir. Şekil 3.19'da Inconel 600 tozları ile üretilen numunelerin üretim basıncı ve sıcaklığına bağlı olarak gözeneklilik değerlerinin değişimi görülmektedir. Inconel 600 tozu ile üretilen numunelerin gözeneklilik değerlerine üretim sıcaklığı ve basıncı aynı etkiyi göstermiştir. Nikel ve paslanmaz çelik tozları ile üretilen numunelerde genellikle basınç daha etkilidir.

### 4.3 Üretim Parametrelerinin Mikrosertliğe Etkileri

Mikrosertlik değerleri nikel tozları ile üretilen numunelerde üretim parametresine bağlı olarak belirgin bir değişim gösterirken, paslanmaz çelik 316L ve Inconel 600 tozlarında belirgin bir değişim göstermemiştir. Bunun nedeni nikel tozları nispeten paslanmaz çelik 316L ve Inconel 600'e göre daha sünek ve kolaylıkla şekil değiştirebilir formda olduğu için, üretim basıncı ve sıcaklığı ile değişebilmektedir. Mikrosertlik değerlerinin değişiminde üretim basıncının etkili olduğu görülmektedir. Üretim sıcaklığı ise nispeten üretim basıncına göre daha az etkilidir. Sinterleme sıcaklığının artmasıyla mikrosertlik değerlerinde çok belirgin bir değişim görülmemiştir.

Şekil 3.20'de 900°C'de sinterlenen numunelerin mikrosertlik değerleri görülmektedir. Artan üretim basıncı ve sıcaklığı ile mikrosertlik değerlerini artmaktadır. Şekil 3.21'de 1200°C'de sinterlenen numunelerin mikrosertlik değerleri görülmektedir. Bu iki grafikten çıkarılan sonuca göre sinterleme sıcaklığı numunelerin mikrosertlik değerlerinde üretim basıncı kadar etki etmektedir. Sinterleme sıcaklığı, mikrosertlik üzerine etkisi düşük üretim basıncı ve sıcaklığındaki numunelerde daha etkili olduğu görülmüştür. Bunun nedeni gözeneklilik değerleri sinterleme sıcaklığı ile azalmakta ve böylece daha mukavemetli yapı elde edildiği için mikrosertlik değerleri de artmaktadır. Fakat sinterleme sıcaklığının artması, üretilen numunelerin mikrosertlik değerlerini çok fazla arttırmamaktadır. Şekil 3.22'deki grafikte paslanmaz çelik 316L ile üretilen numunelerin mikrosertlik değerlerine etkileri görülmektedir. Bu grafiğe göre üretim sıcaklığı, üretim basıncına göre daha etkin parametredir. Artan üretim sıcaklığı mikrosertlik değerlerini arttırmaktadır. Inconel 600 tozları ile üretilen numunelerin mikrosertlik değerleri üretim sıcaklığına bağlı olarak belirgin bir değişim göstermediği fakat artan üretim basıncı ile mikrosertlik değerlerinin de arttığı gözlemlenmiştir (Şekil 3.23). Ayrıca üretim parametrelerinin mikrosertlik üzerine etkileri çizilen üç boyutlu (Şekil 3.24 ile Şekil 3.27

arasındaki) grafikler ile gösterilmiştir. Nikel ve Inconel 600 tozlarıyla üretilen numunelerin artan üretim basıncı ile mikrosertlik değerlerinin arttığı gözlenirken, paslanmaz çelik 316L tozu ile üretilen numunelerin üretim sıcaklığı ile arttığı gözlenmiştir.

#### 4.4 Üretim Parametrelerinin Isıl Genleşme Katsayısına Etkileri

T/M yöntemiyle üretilen numunelerde ısıl genleşme katsayısı, tam yoğun (bulk) malzeme değerleri ile daha düşük değerler arasında değişmektedir. Isıl genleşme katsayısı, atomlar arası bağlar ve titreşimlerden kaynaklanır. Gözenekler parça kütlelerini düşürür, ancak sıcaklık yükselirken atomlar arası bağın uzamasına etki etmez. Üretilen numuneler çok rijit ise, o zaman ısıl genleşme katsayısı tam yoğun malzemenin ısıl genleşme katsayısı değeri ile aynı olabilir[1].

Çalışmada üretilen numunelerin oda sıcaklığından 800°C'deki sıcaklığa kadar ısıl genleşme katsayıları her numune için üç defa ölçülerek ortalamaları alınmıştır. Elde edilen ısıl genleşme katsayısı değerleri Şekil 3.28 ile Şekil 3.29 arasındaki grafiklerde üretim basıncı ve sıcaklığına bağlı olarak göstermektedir. Isıl genleşme katsayısı genellikle artan üretim basıncı ve üretim sıcaklığı ile birlikte azalmıştır. Isıl genleşme katsayısı üzerine en etkin parametre nikel ve Inconel 600 tozlarıyla üretilen numunelerde Nikel tozlarıyla üretilen numuneler hem 900°C hem de 1200°C'de sinterlenmiştir. Elde edilen sonuçlardan sinterleme sıcaklığının artırılması ile ısıl genleşme katsayısındaki düşüş çok etkili değildir. Nikel tozu ile üretilen en yüksek üretim basıncı (400MPa) ve sıcaklığındaki (450°C), #109 ve #209 kodlu numunelerin sırasıyla 800°C'deki ısıl genleşme katsayıları  $(25.8).10^{-6}.K^{-1}$ ,  $(22.6).10^{-6}.K^{-1}$ 'dir. Paslanmaz çelik 316L tozu ile üretilen #309 kodlu numune için 800°C'deki ısıl genleşme katsayısı  $(21.82).10^{-6}.K^{-1}$ , Inconel 600 tozu ile üretilen #409 kodlu numune için 800°C'deki ısıl genleşme katsayısı  $(17.36).10^{-6}.K^{-1}$ 'dir. Şekil 3.36'da en düşük ısıl genleşme katsayısı gösteren numuneler ile bu kimyasal kompozisyona sahip malzemelerin bulk plakaların ısıl genleşme katsayıları arasındaki farklılığı göstermektedir. En düşük ısıl genleşme katsayısı Inconel 600 bulk verirken buna en yakın özelliği gösteren ise Inconel 600 tozu ile üretilen üretim basıncı 400MPa ve üretim sıcaklığı 450°C olan #409 kodlu numunedir.

Isıl genleşme katsayısı genellikle üretim parametreleri ile değişkenlik gösterdiği belirlenmiştir. Üretim sıcaklığı nikel tozları ile üretilen numunelerde daha etkin parametre iken, üretim basıncı paslanmaz çelik 316L tozu ile üretilen numunelerde daha etkin

parametredir. Inconel 600 tozu ile üretilen numunelerin hem artan üretim basıncı hem de artan üretim sıcaklığı ile ısıl genleşme katsayısının azaldığı gözlemlenmiştir. Artan sinterleme sıcaklığı nikel tozuyla üretilen numunelerin ısıl genleşme katsayısını düşürmüştür. Sinterleme paramatresi sadece nikel tozunda incelendiği için paslanmaz çelik ve Inconel 600 tozundaki etkisi bilinmemektedir.

Isıl genleşme katsayısı en düşük Inconel 600 tozuyla üretilen 400MPa basınç ve 450°C sıcaklıkta üretilen #409 kodlu numunede  $(17.36) \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$  olarak bulunmuştur. Isıl genleşme katsayısına gözeneklilik oranından çok kimyasal kompozisyon etkili olduğu belirlenmiştir. Çünkü numunelerin ısıl genleşme katsayısına metal tozları arasındaki gözeneklilik oranından ziyade malzeme kompozisyonu ve atomsal titreşimler etki etmektedir. Üretim parametrelerinin ısıl genleşme katsayısına etkisi Şekil 3.37'de verilmiştir. Üretilen tüm numunelerin 20-800°C'deki ısıl genleşme katsayılarının genellikle artan üretim parametreleri ile azaldığı tespit edilmiştir. En düşük ısıl genleşme katsayısı Inconel 600 ile üretilen numunelerde gözlenmiştir. Isıl genleşme katsayısını üretim parametreleri kadar malzeme kompozisyonu da etkilemektedir. Bu nedenle nikel esaslı Inconel 600 metal tozu, paslanmaz çelik ve saf nikel tozları ile üretilen numunelere oranla daha düşüktür.

## 5. SONUÇLAR

Yapılan deneylerden elde edilen bulguların değerlendirilmesinden çıkarılan sonuçlar aşağıda verilmiştir.

1. Gözeneklilik değeri hem üst/alt tabaka hem de orta tabaka için genellikle artan üretim basıncı ile azalmaktadır.
2. Mikrosertlik değerleri artan üretim basıncı ile artmaktadır. Üst/alt tabaka mikrosertlik değerleri orta tabaka mikrosertlik değerlerinden düşüktür.
3. Isıl genleşme katsayısı değerleri üretim basıncı ile azalmaktadır. Azalan gözeneklilik değerine bağlı olarak ısıl genleşme katsayısının da düştüğü tespit edilmiştir.
4. Gözeneklilik değerlerini, üretim basıncının artırılması üretim sıcaklığının artırılmasından daha çok azaltmıştır.
5. Düşük gözeneklilik değerleri için küçük toz boyutu etkili bir parametredir. Orta tabakada üretiminde 0-25µm boyut aralığındaki metal tozlar kullanılmış, üst ve alt tabakalardan daha düşük gözeneklilik değerleri elde edilmiştir.
6. En düşük üst/alt tabaka gözeneklilik değerleri (%8,7) küresel nikel tozu ile üretilen numune de elde edilmiştir. En düşük orta tabaka gözeneklilik değeri (%2,3) ise Inconel 600 tozu ile üretilen numunede elde edilmiştir. Paslanmaz çelik 316L tozunda ise en düşük gözeneklilik değeri %16,5 olarak bulunmuştur.
7. Inconel 600 tozu ile üretilen numunelerin gözeneklilik değerlerine üretim sıcaklığı ve basıncı aynı etkiyi göstermiştir. Nikel ve paslanmaz çelik tozları ile üretilen numunelerde genellikle basınç daha etkilidir.
8. Nikel ve Inconel 600 tozlarıyla üretilen numunelerin artan üretim basıncı ile mikrosertlik değerlerinin arttığı gözlenirken, paslanmaz çelik 316L tozu ile üretilen numunelerin üretim sıcaklığı ile arttığı gözlenmiştir.
9. Nikel tozları için 2 farklı sinterleme sıcaklığı kullanılmıştır. Genel olarak sinterleme sıcaklığının artmasıyla ısıl genleşme katsayısı ve gözeneklilik değerlerinde azalma tespit edilmiştir.
10. Isıl genleşme katsayısına gözeneklilik oranının düşük olması kadar, kimyasal kompozisyon da etkili olduğu belirlenmiştir.

11. Sinterleme şartları sadece nikel tozları ile üretilen numunelerde 900°C'den 1200°C'ye çıkarılmıştır. Mikrosertlik değerlerinde sinterleme parametresi belirgin bir etki göstermemiştir. Isıl genleşme katsayısı ve gözeneklilik değerleri artan sinterleme sıcaklığı ile azalmaktadır.
12. Isıl genleşme katsayısı genellikle üretim parametreleri ile değişkenlik gösterdiği belirlenmiştir. Üretim sıcaklığı nikel tozları ile üretilen numunelerde daha etkin parametre iken, üretim basıncı paslanmaz çelik 316L tozu ile üretilen numunelerde daha etkin parametredir. Inconel 600 tozu ile üretilen numunelerin hem artan üretim basıncı hem de artan üretim sıcaklığı ile ısıl genleşme katsayısının azaldığı gözlemlenmiştir.
13. Numune üretim basıncının daha yüksek olması ve kullanılan metal tozların saflıklarının yüksek olması halinde daha az gözeneklilik elde edilebilir ve böylece daha düşük hatta bulk numunesinin ısıl genleşme katsayısına erişilebilir.
14. Üretim parametrelerinin etkilerini belirlemede metal tozların küresel formda olmalıdır. Küresel nikel tozları kullanılarak yapılan deney sonuçlarında, özellikle ısıl genleşme katsayılarında bu etki ortaya çıkmaktadır. Nikel tozu ile üretilen numunelerde, artan sıcaklıkla ısıl genleşme katsayısı daha homojen değişmiştir.
15. Kontrollü gözeneklilik için tozların yüzeyleri olabildiğince düzgün olmalı, saflıkları yüksek olmalı ve saklama koşullarının uygun olması gerekmektedir.



## 6. ÖNERİLER

1. Sinterleme parametrelerinin etkisi incelenebilir ve sinterleme vakum, argon veya hidrojen atmosferlerinde yapılabilir.
2. Üretim parametreleri olarak sıcaklık yerine toz boyutu, toz şekli veya farklı yöntemlerle üretilmiş metal tozları kullanılabilir.
3. Üretim parametrelerinin elektriksel dirençlerine veya yüksek sıcaklıktaki elektriksel iletkenlikleri etkileri incelenebilir.
4. Üretilen numunelerin orta tabaka gaz geçirgenlik testleri yapılabilir.
5. Tek eksenli pres yönteminden ziyade çift eksenli pres ile numune üretimi yapılabilir.
6. Çekme, eğme, çentik darbe, korozyon deneyleri yapılabilir.
7. Numune üretiminde presleme hızına (ilerleme hızı) bağlı olarak gözeneklilik değerlerinin araştırılması
8. İnterkonnektör plakaların toz metalurjisi ile üretilmesinde daha yüksek sıcaklıklara dayanıklı metalik tozlar (Crofer22APU) kullanılabilir ve bunların yüksek sıcaklık testleri yapılabilir.
9. Gaz akış kanallarının tasarımları COMSOL gibi programlar ile analizleri yapılabilir.
10. Üretilen numunelerin yüzey analiz teknikleri ile yüzey pürüzlülüğü, yüzeydeki korozyon tabakaları veya kirlilikler belirlenebilir.
11. Geleneksel interkonnektör plakalar ile T/M yöntemiyle üretilen interkonnektör plakaların KOYP performans test sonuçlarının karşılaştırılması yapılabilir.
12. Numunelerin gaz kanallarında dolaşan yakıt ve havanın birbirine karışıp karışmadığını incelenebilir veya gaz geçirgenlik testi yapılabilir

## 7. KAYNAKLAR

1. German, R.M., Toz Metalurjisi ve Parçacıklı Malzeme İşlemleri Çeviri Editörleri: S. Sarıtaş, M. Türker, N. Durlu, Türk Toz Metalurjisi Derneği Yayınları: Ankara, 2007.
2. German, R.M., Powder Metallurgy Science, Metal Powder Industries Federation, Princeton, New Jersey, 1994.
3. German, R.M., Sintering Theory and Practice, Chapter 3: Solid State Sintering Fundamentals, John Wiley & Sons, New York, 1996.
4. Upadhyaya, G.S., Powder Metallurgy, Cambridge International Science Publishing, England, 2002
5. ASM Handbook, Powder Metal Technologies and Applications, ASM International, Volume 7, USA, 1998.
6. Schumacher, E.E ve Souden, A.G., Some Aspects of Powder Metallurgy, Bell System Technical Journal, 23 (1944), 422-457.
7. Lawley, A., Atomization: The Production of Metal Powders, MPIF, Princeton, NJ, USA, 1992.
8. Roll, K.H., History of Powder Metallurgy, Metals Handbook 9Th Edition, ASM Metals Park, 7 (1984) 671-678.
9. Alman, D., Newkirk, J., Powder Metallurgy Alloys and Particulate Materials for Industrial Applications, The Minerals, Metals, and Materials Society, Warrendale, USA, 2000.
10. Jenkins, I ve Wood, V.J., Powder Metallurgy: An Overview, The Institute of Metals, London, UK, 1991.
11. Lenel, F.V., Powder Metallurgy: Principles and Applications, Metal Powder Industries Federation, Princeton, NJ, USA, 1980.
12. Öztürk, B., Cora, Ö. N ve Koç, M., Mikro Yapıda Üç Boyutlu Yüzeylerin Gözeneklilik ve Mikrosertliğe Üretim Parametrelerinin Etkisi, 6. Uluslararası Toz Metalurjisi Konferansı ve Sergisi, Ekim 2011, Ankara, Bildiriler Kitabı 305-313.
13. Cora, Ö.N., Usta, Y. ve Koç, M., Micro-Manufacturing of Micro-Scale Porous Surface Structures for Enhanced Heat Transfer Applications – an Experimental Process Optimization Study, Journal of Micromechanics and Microengineering, 19 (2009).
14. Cora Ö.N., Kaviani M., Koç M ve Min D., Microscale-Modulated Porous Coatings: Fabrication And Pool-Boiling Heat Transfer Performance, Journal of Micromechanics and Microengineering, 20 (2010).
15. Kurt, A., Ayata, A ve Issı, F., Toz Metal Al Malzemelerde Gözeneklilik Oranının Elektrik İletkenliğine Etkisi, 6. Uluslararası Toz Metalurjisi Konferansı ve Sergisi, Ekim 2011, Ankara, Bildiriler Kitabı, 339 - 345.

16. Öztürk,B., Yalçın,Ö.F., Cora,Ö.N., Öztürk,S. ve Göbülük,M., Nikel Tozu ile Üretilen Mikroyapılı Yüzeylerde Üretim Parametrelerinin Gözeneklilik ve Mikrosertliğe Etkisi, 7. Uluslararası Toz Metalurjisi Konferansı ve Sergisi, Ankara, Haziran 2014, Bildiriler Kitabı, 78 - 79.
17. Öztürk,B., Yalçın,Ö.F., Cora,Ö.N., Öztürk,S. ve Göbülük,M., Toz Metalurjisi yöntemi İle Üretilen İnterkonnektör Plakaların Üretim Parametrelerinin Gözeneklilik ve Isıl Genleşme Katsayılarına Etkisi, 7. Uluslararası Toz Metalurjisi Konferansı ve Sergisi, Haziran 2014, Ankara, Bildiriler Kitabı, 80-81.
18. Min, D.H., Hwang, G.S., Usta, Y., Cora, Ö.N., Koç, M. ve Kaviany, M., 2-D and 3-D Modulated Porous Coatings for Enhanced Pool Boiling, International Journal of Heat and Mass Transfer, 52 (2009), 2607-2613.
19. Liter S.G. ve Kaviany M., Pool-boiling CHF enhancement by modulated porous-layer coating: theory and experiment, International Journal of Heat and Mass Transfer, 44 (2001), 4287-4311.
20. Cora Ö.N., Turan C. ve Koç M., Investigation of The Effects Of Process Sequence On The Contact Resistance Characteristics of Coated Metallic Bipolar Plates For Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells, Journal of Power Sources, 243 (2013), 925-934.
21. Cora Ö.N., Turan C. ve Koç M., Contact Resistance Characteristics of Coated Metallic Bipolar Plates For PEM Fuel Cells - Investigations on The Effect of Manufacturing, International Journal of Hydrogen Energy, 37 (2012), 18187-18204.
22. Cora Ö.N., Turan C. ve Koç M., Effect Of Manufacturing Processes on Contact Resistance Characteristics of Metallic Bipolar Plates in PEM Fuel Cells, International Journal of Hydrogen Energy, 36 (2011), 12370-12380.
23. Güner F., Cora Ö.N. ve Sofuoğlu H., "Discrete Element Modeling Of Spherical Copper Powder Compaction Process", International Porous and Powder Materials Symposium and Exhibition, 2013, İzmir, Bildiriler Kitabı, 1-10.
24. Cora Ö.N., Öztürk B. ve Koç M., Micro-Manufacturing of 3-D Porous Surfaces- Investigation on Porosity And Microhardness, 7th International Conference on Micro Manufacturing (ICOMM), 2012, ABD, Bildiriler Kitabı, 520-525.
25. Cora Ö.N. ve Koç M., On The Manufacturing of Porous Micro-Scale Structure Arrays On Large Surface Areas, Multi-Material Micro Manufacture Conference, Vienna, 2012, Avusturya, Bildiriler Kitabı, 320-323.
26. Usta, Y., Köylü, A., Cora, O.N. ve Koç, M., Production of Micro-Scale Porous Structures by P/M For Heat Exchanger Applications, 13th International Materials Symposium, Eylül 2010, Denizli, Bildiriler Kitabı.
27. Usta, Y., Cora, O.N. ve Koç, M., Micro-Manufacturing of Porous and Modulated Surface Structures For Enhanced Heat Transfer Applications - Experimental investigations on process parameters, 3rd International Conference on Micro Manufacturing, 2008, USA, Bildiriler Kitabı.
28. Usta, Y. ve Köylü, A., Yakıt Hücrelerinde Kullanılacak Gözenekli Paslanmaz Çelik Toz Metal Parçaların Üretim Parametrelerinin Araştırılması, Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, 2012, Ankara, 265-274.

29. Öveçoğlu L.M., Toz Metalurjisi: Tarihsel Gelişim, Üretim Aşamaları ve Son Eğilimler 9.Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, İstanbul, 1997, Bildiriler Kitabı.
30. Mediha S., Toz Metalurjisi ve Uygulamaları, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze, 2007.
31. Palavar, O., Toz Metalurjisi İle Üretilen Inconel Süper Alaşımlarda Yaşlanma Parametrelerinin Aşınma Davranışlarına Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 2014.
32. Köylü, A., Yakıt Hücrelerinde Kullanılacak Gözenekli Paslanmaz Çelik Toz Metal Parçaların Üretim Parametrelerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2010.
33. Yalçın, B, Toz Metalurjisi Yöntemiyle İmal Edilen Titanyum Alaşımı İmplantların Temel Özelliklerinin Araştırılması, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 2007.
34. Engin, G., Mikro Gözenekli Titanyum Parçaların Toz Enjeksiyon Kalıplama Yöntemiyle Üretilmesi Ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2013.
35. Ak, H.D., Geleneksel Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilen AISI 304L ve AISI 316L Östenitik Paslanmaz Çeliklerin Özelliklerine Sinterleme Koşullarının Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2014.
36. Kayış, V., Kısmi ve Ön Alaşımlı Demir Tozları İçerisine Katılan B ve FeB İlavelerinin Sinterleme Davranışları ve Mekanik Özelliklere Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2005.
37. Koç V., Toz Metalurjisi Tekniğiyle Üretilen Paslanmaz Çelikte Katkı Elemanlarının Aşınma Direncine Etkisi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2006.
38. Mutlu, İ., Toz Metalurjisi Yöntemiyle Elde Edilen Gözenekli Martensitik Paslanmaz Çeliğin Mikroyapısı ve Mekanik Özellikleri, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2011.
39. Gülsoy, H.Ö., Toz Enjeksiyon Kalıplama Metodu ile Üretilmiş 17-4 PH Paslanmaz Çelik Parçalara Yapılan İki Tip Bor İlavesinin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisi, Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2003.
40. Özgün Ö, Toz Metalurjisi ile Üretilen Alaşımlı Çeliklerin Mikroyapı ve Mekanik Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya 2007.
41. Dikici B., Toz Metalurjisi Yöntemiyle Nikel Titanyum Alaşımlarının Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2010.
42. Kurt, A., Toz Metal Bronz Yatak Malzemelerin Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1992.
43. Biçer, A.,B., Toz Metalurjisi Yöntemiyle Poroz Alüminyum, Titanyum İntermetalik Kompozitlerin Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2009.

44. Topuz, A., Döküm Ve Toz Metalurjisi Yöntemleri İle Üretilen AA2014-Al4c3 Metal Matrisli Kompozitlerin Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2012.
45. Öksüz, K.,E., Toz Metalurjisi Yöntemiyle Kesici Uç (Soket) Üretilmesi ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas, 2011.
46. Çalışkan, N.,K., Powder Metallurgy of High Density W-Ni-Cu Alloys, Yüksek Lisans Tezi, O.D.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2006.
47. Günebakmaz, S., Toz Metalurjisi Yöntemi ile Inconel 718 Süper alaşımının Üretimi ve Özelliklerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2007.
48. Söyler, M., Toz Metalurjisi Ve Uygulamaları, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2007.
49. Ay, H., Toz Metalurjisi Yöntemi İle Üretilen Aa7075 Alüminyum Alaşımına Ti Ve B4c İlavesinin Aşınma Davranışı Üzerine Etkisinin İncelenmesi , Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 2014.
50. Nutku, F., Toz Metalurjisi ile Üretilen Parçaların Tahribatsız Muayenesi, Yüksek Lisans Tezi, Y.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2003.
51. Bıyık, S., Toz Metalurjisi Yöntemiyle Gümüş – Bor Oksit Esaslı Kontakt Malzemesi Üretimi Ve Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2008.
52. Kotan, G., Production and Characterization of Porous Titanium and Ti-6Al-4V, Yüksek Lisans Tezi, O.D.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2006.
53. Esen, Z., Production and Characterization of Porous Titanium Alloys, Yüksek Lisans Tezi, O.D.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2007.
54. Aydoğmuş, T., Processing and Characterization of Porous Titanium Nickel Shape Memory Alloys, Doktora Tezi, O.D.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2010.
55. Yüksel, N., Gözenekli Yapılarda Yapı Ve İşletme Parametrelerinin Isı İletim Katsayısına Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 2010.
56. İhvan,S., Metal Enjeksiyon Kalıplama ile Gözenekli Metal Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2008.
57. Tunçer, N., Metalik Köpük Malzemelerin Üretimi ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2006.
58. Kölemen, U., Gümüş Difüzyonunun YB<sub>2</sub>CuO Süperiletkenlerinin Yapısal ve Süperiletkenliklerinin Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 1996.
59. Görür, O., Gümüş Difüzyonunun Bi<sub>1,6</sub>Pb<sub>0,4</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>10</sub>(2223) Süperiletkenlerinin Yapısal ve Süperiletkenliklerinin Özellikleri Üzerindeki Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 1996.

60. B0328-96R03 Test Method for Density, Oil Content, and Interconnected Porosity of Sintered Metal Structural Parts and Oil-Impregnated Bearings, Metallic and Inorganic Coatings; Metal Powders, Sintered P/M Structural Parts, 02,05 (2005).
61. Bakan, H.I. ve A Novel Water Leaching and Sintering Process for Manufacturing Highly Porous Stainless Steel, Scripta Materialia, 55 (2006), 203 - 206.
62. Bram, M., Stiller, C., Buckramed, H.P., Stover, D. ve Bauer, H., High-Porosity Titanium, Stainless Steel and Superalloy Parts, Advanced Engineering Materials, 2 (2000), 196 - 199.
63. Wen, C.E., Mabuchi, M., Yamada, Y., Shimojima, K., Chino, Y. ve Asahina, T., Processing of Biocompatible Porous Ti and Mg, Scripta Materialia, 5(2001), 1147 - 1153.
64. Wenjuan, N., Chenguang, B., Guibao, Q. ve Qiang, W., Processing and Properties of Porous Titanium Using Space Holder Technique, Materials Science and Engineering A, 506 (2006), 148 - 151.
65. Hetsroni, G., Gurevich, M. ve Rozenblit, R., Sintered Porous Medium Heat Sink For cooling of High -Power Mini Devices, International Journal of Heat And Fluid Flow, 27 (2006), 259 - 266.
66. Sweeney, S.M. ve Martin, C.L., Pore Size Distributions Calculated From 3-D Images of DEM-simulated Power Compacts, Acta Materialia, 51 (2003), 3635 - 3649.
67. Zhang, E. ve Wang, B., On The Compressive Behavior of Sintered Porous Copper With Low To medium Porosities Part-II Preparation and Microstructure, International Journal of Mechanical Sciences, 50 (2008), 550 - 558.
68. Jiang, P.X., Li, M., Lu, T.J., Yu, L. ve Ren, Z.P., Experimental Research on Convection Heat Transfer In Sintered Porous Plate Channels, International Journal of Heat and Mass Transfer, 47 (2004), 2085 - 2096.
69. Zhang, E. ve Wang, B., On The Compressive Behavior of Sintered Porous Copper With Low To medium Porosities Part-I Experimental Study, International Journal of Mechanical Sciences, 47 (2005), 744 - 756.
70. Fredrich, J.T., 3D Imaging of Porous Media Using Laser Scanning Confocal Microscopy With Application to Microscale Transport Processes, Phys. Chem. Earth A, 24 (1999), 551 - 561.
71. Panteix, P.J., Carles, V.B.C., Tailhades, P.H., Rieu, M., Lenormand, P., Ansart, F. ve Fontaine, M.L., Elaboration of Metallic Compacts With High Porosity For Mechanical Supports of SOFC, Solid State Sciences, 11 (2009), 444 - 450.
72. Parekh G., Cora Ö.N. ve Koç M., "Investigation of Stainless Steel Powder Compaction Process For Manufacturing of Micro-Porous Surface Feature", International Conferences on Multi-Material Micro Manufacture, 4M/International Conferences on Micro Manufacturing (ICOMM), 2009, Bildiriler Kitabı, 119 - 122.
73. Antepara, I., Rivas, M., Otaegi, L., Gomez, N., Villarreal, I. ve Laresgoeti, A.L., Electrochemical Behavior of Metal-Supported SOFCs Under High Fuel Utilization and their Durability, Journal of Fuel Cell and Technology, 9 (2012), 4 - 13.

74. Antepará,I., Villarreal, L.M., Leccanda, N.R.M., Castro,U. ve Laresgoiti, A., Evaluation of Ferritic Steels For Use As Interconnects And Porous Metal Supports In IT-SOFCs, Journal of Power Sources, 151 (2005), 103-107.
75. Antepará, I., Rivas, M., Villarreal, I., Burgos, N. ve Castro, F., Influence of Different Aspects of The SOFC Anode Environment on The Oxidation Behavior of Porous Samples Made of Crofer, Journal of Fuel Cell Science and Technology, 7 (2010), 061010, 1-5.
76. Chen, P., Kim, G., Y. ve Ni, J., Fabrication of High Aspect Ratio Porous Microfeatures Using Hot Compaction Technique, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 130 (2008), 031103-1-8.
77. Ahmed, Y.M.Z., Riad, M.I., Sayed, A.S., Ahlam, M.K. ve Shalabi, M.E.H., Correlation Between Factors Controlling preparation of Porous Copper Via Sintering Technique Using Experimental Design, Powder Technology, 175 (2007), 48-54.
78. Molin,S., Kusz, B., Gazda,M. ve Jasinski,P., Evaluation of Porous 430L Stainless Steel for SOFC Operation at Intermediate Temperatures, Journal of Power Sources, 181 (2008), 31-37.
79. Rahman, M.M. ve Nor, S.S.M., An Experimental Investigation of Metal Powder Compaction at Elevated Temperature, Mechanics of Materials, 41 (2009), 553-560.
80. Gülsoy, H.O., German, R.M., Sintered Foams From Precipitation Hardened Stainless Steel Powder, Powder Metallurgy, 51 (2008), 350-353.
81. Hirohata, T., Masaki, S. ve Shima, S., Experiment on Metal Powder Compaction by differential Speed Rolling, Journal of Materials Processing Technology, 111 (2001), 113-117.
82. Chtourou,H., Guillot,M. ve Gakwaya,A., Modeling of The Metal Powder Compaction Process Using the Cap Model: Part I. Experimental Material Characterization and Validation, International Journal of Solid and Structures, 39 (2002), 1059-1075.
83. Vagnon, A., Riviere, J.P., Missiaen, J.M., Bellet, D., Michiel, D.M. ve Josserond, C., Bouvard, D., 3D Statistical analysis of a Copper Powder Sintering Observed In Situ By Synchrotron microtomography, Acta Materialia, 56 (2008), 1084-1093.
84. Mori, K., Finite Element Simulation of Powder Forming And Sintering, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 195 (2006), 6737-6749.
85. Glatz, W., Janousek, M., Batawi, E. ve Doggwiler,B., PM Net Shape Processing of Cr-Based Interconnects for Solid Oxide Fuel Cell, Proceedings of 15th int. Plansee Seminar, 1 (2001), Bildiriler Kitabı.
86. Glatz, W., Kunschert, G. ve Janousek, M., Powder Metallurgical Processing and Properties of high-performance Metallic SOFC Interconnect Materials, Proceedings of 6th European SOFC Forum, 3 (2004), Bildiriler Kitabı.
87. Venskutonis, A., Glatz ve W. Kunschert, G., P/M Processing of ODS Cr-and FeCr-Based Alloys for Solid Oxide Fuel Cell Applications, Plansee AG, Reutte, Austria, 56 (2005), 534-544.

88. Yamaguchi, K. Takakura, N. ve Imatani,S., Compaction and Sintering Characteristics of Composite Metal Powders, Journal of Materials Processing Technology, 63 (1997), 364-369.
89. Honegger,K., Plas,A. ve Glatz,W., Evaluation of Ferritic Steel Interconnects for SOFC Stacks, In Solid Oxide Fuel Cell VII, The Electrochem Society Proceedings, 16 (2001).
90. Hsiao, C.N., Chiou, C.S. ve Yang, J.R., Aging Reactions In A 17-4 PH Stainless Steel, Materials Chemistry And Physics, 74 (2002), 134-142.
91. Scott, J.A. ve Dunand, D., Oxidation and Creep Studies of Porous E-Brite for Solid Oxide Fuel Cell Interconnects, The Electrochemical Society Meeting Abstracts, 12 (2009), 1594-1594.
92. Shade, C.T., Stears, P.D., Lawley, A. ve Doherty, R.D., Precipitation Hardening PM Stainless Steels, International Journal of Powder Metallurgy, 43 (2007), 51-59.
93. Murayama, M., Katavama, Y. ve Hono, K., Microstructural Evolution in a 17-4 PH Stainless Steel After Aging at 400 °C, Metall. Mater. Trans. A, 30 (1999), 345-353.
94. Gülsoy, H.O., Salman, S., Özbek, S. ve Fındık, F., Sintering Of A Boron-Doped Injection Moulded 17-4 PH Stainless Steel, Journal of Materials Science, 40 (2005), 4101-4104.
95. Molinari, A., Kazior, J., Marchetti, F., Canteri, R., Cristofolini, I. ve Tiziani, A., Sintering Mechanisms Of Boron Alloyed AISI 316L Stainless Steel, Powder Metallurgy, 37 (1994), 115-122.
96. Karwan-Baczewska, J. ve Rosso, M., Effect Of Boron On Microstructure And Mechanical Properties of P/M Sintered And Nitrided Steels, Powder Metallurgy, 44 (2001), 221-226.
97. Klar, E. ve Samal, P., Powder Metallurgy Stainless Steels, Processing, Microstructures and Properties, ASM International, USA, 978-0-87170-848-9, 2007.
98. ASTM B 0243-05 Terminology of Powder Metallurgy, Metallic and Inorganic Coatings; Metal Powders, Sintered P/M Structural Parts, 02.05, (2005).
99. B0721 Test Method for Microhardness and Case Depth of Powder Metallurgy (P/M) Parts, Metallic and Inorganic Coatings; Metal Powders, Sintered P/M Structural Parts, 02.05, (2005).
100. B0925-03 Practices for Production and Preparation of Powder Metallurgy (P/M) Test Specimens, Metallic and Inorganic Coatings; Metal Powders, Sintered P/M Structural Parts, 02.05, (2005).
101. Raak, H., Diethelm,R. ve Riggenbach, S., The Sulzer Hexis Story: From Demonstrators to Commerical Products, Proceedings of 5th European SOFC Forum, 1 (2002), Bildiriler Kitabı.
102. Zenga, Q., Li,K., Chong,T.F. ve Dangla,P., Effect of Porosity on Thermal Expansion Coefficient of Cement Pastes and Mortars, Construction and Building Materials, 28 (2012), 468–475.
103. Callister, W.D., Materials Science and Engineering; an Introduction (3rd ed.). New York: John Wiley & Sons, Inc, 1994.



104. Zhu, J.H., Geng, S.J. ve Ballard, D.A., Evaluation of Several Low Thermal Expansion Fe-Co-Ni alloys as Interconnect For Reduced-Temperature Solid Oxide Fuel Cell, International Journal of Hydrogen Energy, 32 (2007), 3682-3688.
105. Souder, W. ve Hidnert, P., Thermal Expansion of Nickel, Monel Metal, Stellite, Stainless Steel, and Aluminum, Scientific Papers of the Bureau Standards, 17 (1921), 497 - 519.
106. Souder, W. ve Hidnert, P., Thermal Expansion of Insulating Materials, Scientific Papers of the Bureau of Standards, 15 (1919), 387 - 417.
107. Souder, W. ve Hidnert, P., Thermal Expansion of A Few Steel, Scientific Papers of the Bureau of Standards, 17 (1922), 611 - 626.
108. Hidnert, P., Thermal Expansion of Some Nickel Alloys, Journal of Research of the National Bureau of Standards, 58 (1957), 89-92.
109. Hidnert, P., Souder, W., Thermal Expansion of Solids, NBS Circular 486 (1950).
110. Touloukian, Y.S., Kirby, R.K., Taylor, R.E. ve Desai, P.D., Thermophysical Properties of Matter, Thermal Expansion, Metallic Elements and Alloys, 12 (1975), 11.
111. James, J.D., Spittle, J.A. Brown, S.G.R. ve Evans, R.W., A Review of Measurement Techniques For The Thermal Expansion Coefficient of Metals And Alloys at Elevated Temperatures, Measurement Science and Technology, 12 (2000).
112. Scott, J.A. ve Dunand, D.C., Effect of Oxidation on Creep Strength and Resistivity of Porous Fe-26Cr-1Mo, Metallurgical and Materials Transactions E, 4 (2014), 303-310.
113. Hidnert, P., Thermal Expansion of Heat-Resisting Alloys: Nickel-Chromium, Iron-Chromium and Nickel-Chromium-Iron Alloys, BS J. Research, 7 (1931), 1031.
114. Bıyıkoğlu, A., Yakıt Hücrelerinin Tarihsel Gelişimi, Çalışma Presnsipleri ve Bugünkü Durumu, Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, 36 (2003), 523-542.
115. Fergus, J.W., Materials Challenges for Solid Oxide Fuel Cell, Journal of Materials JOM, 59 (2007), 56-62.
116. Stambouli, A.B. ve Traversa, E., Solid Oxide Fuel Cell (SOFCs): A Review of An environmentally Clean and Efficient Source of Energy, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 6 (2002), 433-455.
117. Stygar, M., Kurtyka, P., Brylewski, T., Tejchman, W. ve Stasko, R., Physicochemical and Mechanical Properties of Crofer22APU Ferritic Steel Applied in SOFC Interconnects, Metallurgy and Foundry Engineering, 39 (2013), 47-58.
118. Anderson, H.U. ve Tietz, F., Chapter 7: Interconnects, High Temperature Solid Oxide Fuel Cells, S.C. Singhal, K. Kendall (eds.), Elsevier Advanced Technology, 8 (2003) 173-195.
119. Fontana, S., Amendo, R., Chevalier, S., Piccardo, P., Gaboche, G., Viviani, M., Molins, R. ve Sennour, M., Metallic Interconnects for SOFC: Characterisation of Corrosion Resistance and Conductivity Evaluation at Operating Temperature of Differently Coated Alloys, Journal of Power Sources, 171 (2007), 652-662.

120. Franco T., Lang, M., Schiller, G., Glatz, W. ve Kunschert, Powder Metallurgical High Performance Material for Substrate-Supported IT-SOFCs, Proceedings of 6th European SOFC Forum, 1 (2004), Bildiriler Kitabı.
121. Wu, J. ve Liu, X., Recent Development of SOFC Metallic Interconnect, Journal of Material Science Technology, 26 (2010), 293-305.
122. Church, B.C., Sanders, T.H., Speyer, R.F. ve Cochran, J.K., Thermal expansion matching and oxidation resistance of Fe-Ni-Cr interconnect alloys, Materials Science and Engineering A (2007), 334-340.
123. Geng, S.J., Zhu, J.H. ve, Lu, Z.G., Evaluation of Haynes 242 alloy as SOFC interconnect material, Solid State Ionics, 177 (2006), 559-568.
124. Yang, Z. ve Xia, G.G., Stevenson J.W., Evaluation of Ni-Cr-Base alloys for SOFC interconnect applications, Materials Science and Engineering A 160 (2006), 1104-1110.
125. Geng, S.J., Zhu, J.H., Brady M.P., Anderson, H.U., Zhou, X.D. ve Yang, Z., A low-Cr metallic interconnect for intermediate-temperature solid oxide fuel cell, Journal Power Sources, 172 (2007), 775-781.
126. Liu, X., Johnson, C., Li, C., Xu, J. ve Cross, C., Developing TiAlN coatings for intermediate temperature solid oxide fuel interconnect applications, Journal of Material Science Technology 33 (2008) 189-196.
127. Wen, T.L., Wang, D., Tu, H.Y., Chen, M., Lu, Z., Zhang, Z., Nie, H. ve Huang, W., Research on Planar SOFC Stack, Solid State Ionics, 152 (2002), 399-404.
128. Singhal, S.C., Solid Oxide Fuel Cells, The Electrochemical Society Interface, 2007, 42-44.
129. Zhu, W.Z. ve Deevi, S.C., Development of Interconnect Material for Solid Oxide Fuel Cells, Materials Science and Engineering A, 348 (2003), 227-243.
130. Seo, H.S., Jin, J.H., Kim, D.H. ve Kim, K.Y., Effect of Reactive Element On Oxidation Behaviour Of Fe-22Cr-0.5Mn Ferritic Stainless Steel for A Solid Oxide Fuel Cell Interconnect, Journal of Power Sources, 178 (2008), 1-8.
131. Bastidas, D.M., High Temperature Corrosion of Metallic Interconnects In Solid Oxide Fuel Cells, Revista De Metalurgia, 42 (2006), 425-443.
132. Mat, A., Katı Oksit Yakıt Pilleri için İletken Pasta Geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde, 2011.
133. Larminie, J. ve Dicks A., Fuel Cell Systems Explained, Chichester, England: John Wiley and Sons, 2000.
134. Kakac, S., Pramuanjaroenki, A. ve Zhou, X.. A Review of Numerical Modeling of Solid Oxide Fuel Cells, International Journal of Hydrogen Energy, 32 (2007), 761-786.
135. Alcaide, F., Cabot, P. ve Brillas, E., Fuel Cells For Chemicals And Energy Cogeneration, Journal of Power Sources, 153 (2006), 47-60.
136. Vielstich, W., Hubert, A., Gasteiger, M. ve Lamm, A., Chapter 74. Handbook of Fuel Cells Fundamentals Technology and Applications; Fuel Cell Technology and Applications, Wiley, New York, 2003.

137. Tietz, F., Thermal expansion of SOFC materials, Solid State Ionics, 5 (1999), 129-139.
138. Yang, Z., Weil, K., Paxton D. ve Stevenson J.. "Selection and Evaluation of Heat-Resistant Alloys for SOFC Interconnect Applications", Journal of The Electrochemical Society, 150 (2003), 1188-1201.

## ÖZGEÇMİŞ

Ömer Faruk YALÇIN, 1987 yılında İstanbul'un Kadıköy ilçesinde doğdu. 2005 yılında Pendik Rauf Denктаş Lisesinden mezun oldu. 2009 yılında Selçuk Üniversitesi Seydişehir Meslek Yüksek Okulu, Makine Bölümü ön lisans öğrenimini tamamladı. 2009 yılında Dikey Geçiş Sınavı ile Karadeniz Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliğine girmeye hak kazandı. 2012 yılında lisans öğrenimini tamamladı. Hemen ardından aynı sene Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı. Tübitak 114M502 no'lu projede yüksek lisans bursiyeri olarak çalış

### Tezden Yapılan Yayınlar

1. Öztürk,B., Yalçın,Ö.F., Cora,Ö.N., Öztürk,S. ve Göbülük,M., Nikel Tozu ile Üretilen Mikroyapılı Yüzeylerde Üretim Parametrelerinin Gözeneklilik ve Mikrosertliğe Etkisi, 7. Uluslararası Toz Metalurjisi Konferansı, Ankara, Haziran 2014, Bildiriler Kitabı, 78 - 79.
2. Öztürk,B., Yalçın,Ö.F., Cora,Ö.N., Öztürk,S. ve Göbülük,M., Toz Metalurjisi yöntemi İle Üretilen İnterkonnektör Plakaların Üretim Parametrelerinin Gözeneklilik ve Isıl Genleşme Katsayılarına Etkisi, 7. Uluslararası Toz Metalurjisi Konferansı, Haziran 2014, Ankara, Bildiriler Kitabı, 80-81.