NANO YAPILI METALİK ALAŞIMLARIN MİKRODALGA SİNTERLEME YÖNTEMİYLE ÜRETİLMESİ

PROJE NO: 109M399

PROJE YÜRÜTÜCÜSÜ: Doç. Dr. Arcan Fehmi DERİCİOĞLU

ŞUBAT 2011

ANKARA

ÖNSÖZ

“Nano Yapılı Metalik Alaşımların Mikrodalga Sinterleme Yöntemiyle Üretilmesi“ konulu bu proje Orta Doğu Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü bünyesinde Doç. Dr. Arcan Fehmi Dericioğlu tarafından yürütülmüştür.

Proje kapsamında, mikrodalga sinterleme yönteminin, konvansiyonel yönteme kıyasla yumuşak manyetik özellikler gösteren toz metalurjik nano yapılı Nikel-Demir alaşım sisteminin yoğunlaşım ve faz oluşumu ile mikroyapısal, manyetik ve mekanik özelliklerine etkisinin araştırılması hedeflenmiştir. Bu bağlamda, mikron boyutta elemental nikel ve demir tozları ile ön çalışmalar yapılmış, nano yapılı Nikel-Demir alaşım sisteminde mikrodalga sinterlemede karşılaşılan komplikasyonlar nedeni ile projenin B planı uygulamaya konarak, östenitik paslanmaz çeliklerin mikrodalga ve konvansiyonel yöntemle sinterlenerek üretilmesi gerçekleştirilmiştir. Projenin bulguları arasında, konvansiyonel yönteme kıyasla mikrodalga sinterleme yönteminin mikron boyuttaki Nikel-Demir alaşım ile Östenitik paslanmaz çeliklerin fiziksel özelliklerine etkisi yer almaktadır.

Bu proje Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu tarafından 109M399 kodlu ve 01.01.2010 başlangıç tarihli araştırma projesi kapsamında TÜBİTAK Hızlı Destek Programı ile desteklenmiştir.

İÇİNDEKİLER

Önsöz ii

İçindekiler iii

Şekil Listesi iv

Tablo Listesi vi

Öz 1

Abstract 3

1.Giriş 4

2. Deneysel Yöntem ve Gereçler 8

2.1. Toz Hazırlama Süreci: 8

2.2. Toz Sıkıştırma Süreci: 10

2.2.1. İki yönlü eksenel soğuk sıkıştırma : 10

2.2.2. Soğuk İzostatik Presleme: 10

2.3. Sinterleme Aşaması: 11

2.4. Karakterizasyon Çalışmaları: 11

2.4.1. Yoğunluk Ölçümü: 11

2.4.2. Faz Analizi: 11

2.4.3. Mikroyapı incelemesi: 12

2.4.4. Mekanik Karakterizasyon: 12

3. Bulgular ve Tartışma 13

5. Kaynakça 28

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1. Çalışmada kullanılan ön alaşımlı paslanmaz çelik tozlarının EDS analiz sonucu. 9

Şekil 2. Çalışmada kullanılan SAE 316 paslanmaz çelik tozlarının taramalı elektron mikroskobu görüntüsü. 10

Şekil 3. Mikrodalga sinterleme yöntemiyle 1275°C'de üretilen numunenin taramalı elektron mikroskobuyla elde edilen mikroyapısı.....14

Şekil 4 Konvansiyonel sinterleme yöntemiyle 1275°C'de üretilen numunenin taramalı elektron mikroskobuyla elde edilen mikroyapısı.....15

Şekil 5 Mikrodalga sinterleme yöntemiyle 1300°C'de üretilen numunenin taramalı elektron mikroskobuyla elde edilen mikroyapısı.....15

Şekil 6 Konvansiyonel sinterleme yöntemiyle 1300°C'de üretilen numunenin taramalı elektron mikroskobuyla elde edilen mikroyapısı.....16

Şekil 7. Mikrodalga (M) ve Konvansiyonel (K) sinterleme yöntemleriyle üretilmiş numunelerin histeresis eğrileri. 17

Şekil 8. İki yönlü eksenel sıkıştırma yöntemi ile 200 MPa basınç altında şekillendirilen ve mikrodalga (M) ve konvansiyonel (K) sinterleme yöntemleri ile 1150, 1200 ve 1225 °C sıcaklıklarda sinterlenen numunelerin sinterlenmiş %yoğunlaşımlarının sıcaklıkla değişimi. 19

Şekil 9. Soğuk izostatik presleme yöntemi ile 150 MPa basınç altında şekillendirilen ve mikrodalga (M) ve konvansiyonel (K) sinterleme yöntemleri ile 1150, 1200 ve 1225 °C sıcaklıklarda sinterlenen numunelerin sinterlenmiş %yoğunlaşımlarının sıcaklıkla değişimi. 20

Şekil 10. Mikrodalga ve konvansiyonel sinterleme yöntemiyle üretilen numunelerin X-ışınları diffraktogtamı.....22

Şekil 11. a-b-c. İki yönlü eksenel sıkıştırma yöntemi ile 200 MPa basınç altında şekillendirilen ve mikrodalga sinterleme yöntemi ile 1150 (Şekil 11.a) 1200 (Şekil 11.b) ve 1225 °C (Şekil 11.c) sıcaklıklarda üretilen numunelerin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri. d-e-f. İki yönlü eksenel sıkıştırma yöntemi ile 200 MPa basınç altında şekillendirilen ve konvansiyonel sinterleme yöntemi ile 1150 (Şekil 11.d), 1200 (Şekil 11.e) ve 1225 °C (Şekil 11.f) sıcaklıklarda üretilen numunelerin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri.....23

Şekil 12. a.-b. Soğuk izostatik sıkıştırma yöntemi ile 150 MPa basınç altında şekillendirilen ve mikrodalga sinterleme yöntemi ile 1150 (Şekil 12.a) ve 1200 °C (Şekil 12.b) sıcaklıklarda

üretilen numunelerin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri. c-d Soğuk izostatik sıkıştırma yöntemi ile 150 MPa basınç altında şekillendirilen ve konvansiyonel sinterleme yöntemi ile 1150 (Şekil 12.c) ve 1200 °C (Şekil 12.d) sıcaklıklarda üretilen numunelerin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri. 24

Şekil 13. İki yönlü eksenel sıkıştırma yöntemiyle 200 MPa sıkıştırma basıncı kullanılarak şekillendirilen ve mikrodalga (M) ve konvansiyonel (K) sinterleme yöntemiyle 1150, 1200, 1225 °C sıcaklıklarda üretilen numunelerin mikrosertlik değerleri.....25

Şekil 14. Soğuk izostatik sıkıştırma yöntemiyle 150 MPa sıkıştırma basıncı kullanılarak şekillendirilen ve mikrodalga (M) ve konvansiyonel (K) sinterleme yöntemiyle 1150, 1200 ve 1225 °C sıcaklıklarda üretilen numunelerin mikrosertlik değerleri.....26

TABLO LİSTESİ

Tablo 1. Çalışmada kullanılan önalaşımlı paslanmaz çelik tozlarının kompozisyonu. 9

Tablo 2. Mikrodalga (M) ve Konvansiyonel (K) sinterleme yöntemleriyle üretilen numunelerin sinterleme sıcaklığına göre yüzde yoğunlaşım değerleri. 13

Tablo 3. Mikrodalga (M) ve Konvansiyonel (K) sinterleme yöntemleriyle üretilen numunelerin sinterleme sıcaklığına göre gözenek morfolojilerindeki yuvarlaklaşma değerleri (tamamen yuvarlaklaşmış gözenek morfolojisi için ortalama yuvarlaklık değeri 1)..... 14

Tablo 4. İki yönlü eksenel sıkıştırma yöntemi ile 200 MPa basınç altında şekillendirilen ve mikrodalga (M) ve konvansiyonel (K) sinterleme yöntemleri ile 1150, 1200 ve 1225 °C sıcaklıklarda sinterlenen numunelerin sinterlenmiş %yoğunlaşımlarının sıcaklıkla değişimi . 19

Tablo 5. Soğuk izostatik presleme yöntemi ile 150 MPa basınç altında şekillendirilen ve mikrodalga (M) ve konvansiyonel (K) sinterleme yöntemleri ile 1150, 1200 ve 1225 °C sıcaklıklarda sinterlenen numunelerin sinterlenmiş yoğunluklarının sıcaklıkla değişimi. 21

ÖZ

Bu çalışmada, mikrodalga sinterleme yönteminin konvansiyonel yönteme kıyasla yumuşak manyetik özellikler gösteren toz metalurjik nano yapılı Nikel-Demir alaşım sisteminde faz oluşumu ve yoğunlaşım ile mikroyapısal, manyetik ve mekanik özelliklere etkisinin araştırılması hedeflenmiştir. Proje kapsamında, mikron yapılı Nikel-Demir alaşım sistemi ile ön çalışmalar yapılmış ve mikrodalga sinterleme yönteminin oluşan fazlar ve yoğunlaşım ile mikroyapısal ve manyetik özelliklere etkisi incelenmiştir. Bunun yanısıra, aynı koşullarda hazırlanan numuneler, konvansiyonel yöntemle de hazırlanarak, mikrodalga sinterleme yönteminin toz metalurjik numunelerin fiziksel özelliklerine etkisi konvansiyonel yönteme kıyasla araştırılmıştır. Yapılan çalışmaların sonucunda, mikrodalga sinterleme yöntemi ile, aynı koşullarda konvansiyonel yöntemle üretilen numunelere kıyasla, toz metalurjik Nikel-Demir alaşımlarının daha yüksek yoğunlaşıma sahip, azalan gözeneklilik yüzdesi ve yuvarlaklaşmış gözenek morfolojileri ile elde edilebildiği saptanmıştır. Buna paralel olarak, mikrodalga sinterleme yöntemi ile üretilen numunelerin, görece daha iyi yumuşak manyetik özellikler gösterdiği de projenin bulguları arasındadır.

Ancak, mikron boyuttaki elemental nikel ve demir tozları ile gerçekleştirilebilen deneyler, mikrodalga sinterleme atmosferinde karşılaşılan güçlükler sebebiyle nano yapılı Nikel-Demir alaşım sistemi ile gerçekleştirilemediğinden, projenin B planında yer alan östenitik paslanmaz çeliklerin mikrodalga ve konvansiyonel yöntemle üretimine geçilmiştir. Projenin B planını teşkil eden bu kapsamda, östenitik paslanmaz çeliklerle yapılan deneyler dahilinde, değişen sıkıştırma basınçları ve sinterleme sıcaklıklarında mikrodalga ve konvansiyonel sinterleme yöntemiyle toz metalurjik SAE 316 östenik paslanmaz çeliklerinin üretimi gerçekleştirilmiş ve numunelerin sinterleme sonrası yoğunluk, oluşan fazlar, mekanik ve mikroyapısal özellikler bakımından karakterizasyonu yapılmıştır. Karakterizasyon sonucunda edinilen bulgular ışığında, mikrodalga sinterleme yöntemi ile, çok daha kısa proses sürelerinde konvansiyonel sinterleme yöntemine kıyasla çok daha yüksek sinterlenmiş yoğunluğa ve mikrosertliğe sahip toz metalurjik numunelerin, azalan gözeneklilik yüzdesi ve yuvarlaklaşmış gözenek morfolojisi ile elde edildiği

saptanmıştır. Yapılan çalışmalar, mikrodalga sinterlemenin sağladığı yüksek üretim verimliliği ve gelişmiş malzeme özellikleri sebebiyle metalik toz metalurjik alaşımların üretiminde de kullanılabileceğini göstermiştir.

ABSTRACT

In the scope of this study, the main objective was to achieve microwave sintering of powder metallurgical nanostructured Nickel-Iron soft magnetic alloys to investigate the effect of microwave heating on mechanical and magnetic properties of the chosen representative metallic system, while comparing achieved properties with those of the same alloy produced by conventional sintering. In this context, preliminary microwave sintering studies were carried out with micron sized Nickel-Iron powder metallurgical compacts, and the samples were characterized in terms of phase formation, and densification as well as microstructural and magnetic properties. In a comparative manner, conventional sintering experiments were carried out under identical conditions with those of microwave sintering experiments. Results of the characterization stages revealed that compared to conventional sintering route, powder metallurgical metallic alloys with higher densification, decreasing percent porosity and rounded pore morphologies can be produced via microwave sintering. Moreover, microwave sintered Ni-Fe alloys showed improved soft magnetic behavior compared to conventionally sintered alloys, which is in good agreement with the densification response and microstructural properties.

However, microwave sintering experiments could not be realized with the nanostructured Nickel-Iron alloy system due to the complications encountered with the microwave sintering atmospheres. Therefore, microwave and conventional sintering studies were carried out using austenitic stainless steels as proposed in the plan B of the project. Austenitic stainless steel powder compacts were sintered by both microwave and conventional heating at various combinations of compaction pressures and sintering temperatures, and the sintered compacts were characterized in terms of sintered density, phases formed, microstructural characteristics and mechanical properties. It was determined that microwave sintered austenitic stainless steels reveal higher sintered densities, smoother pore mophologies and higher microhardness values when compared to the conventionally sintered samples. This demonstrates the fact that higher sintering efficiency and improved properties could be achieved using microwave sintering in the processing of metallic powder metallurgical compacts.

1.GİRİŞ

Mikrodalgalar, 50 yılı aşkın bir süredir radar sistemleri, gemicilik, havacılık, gıda/malzeme işleme süreçleri gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Mikrodalga enerjisi, proses süresini kısaltması ve enerji maliyetlerini düşürmesi sebebiyle endüstriyel işlemlerden biri olan ısıtma alanında sıklıkla tercih edilmektedir. Hacimli metalik parçaların mikrodalgaları yansıtıcı etkilerinin bilinmesi sebebiyle öncelikli olarak seramik parçaların üretiminde kullanılan mikrodalga ısıtma ve sinterleme yöntemi, toz metalurjik alaşımların hacimli karşıtlarından farklı olarak mikrodalgalar ile verimli bir şekilde etkileşebildiklerinin anlaşılmasıyla, toz metalurjik parçaların sinterlenmesinde de kullanılmaya başlanmıştır (Gavin Whittaker, Imichacl et al. 2000).

Literatürde, konu ile ilgili yapılan araştırmalar kapsamında, mikrodalga sinterleme yöntemi ile üretilen toz metalurjik alaşımların, konvansiyonel yönteme kıyasla, azalan enerji sarfiyatları ve işlem sıcaklık ve sürelerinde teorik yoğunluğa daha yakın yoğunluk değerlerinde, iyileştirilmiş mekanik özellikler, korozyon ve erozyon dayancı, azalan gözeneklilik yüzdesi ve yuvarlaklaşan gözenek morfolojileri ile elde edilebildiği tespit edilmiştir. Ancak, bu araştırmalar, mikrodalga sinterleme yönteminin toz metalurjik numunelerin mikroyapısal ve mekanik özelliklerine etkisi üzerine yoğunlaşırken, mikrodalga sinterleme yönteminin manyetik özeliklere etkisini incelememektedir. Bu nedenle, önerilen proje kapsamında, mikrodalga sinterleme yönteminin nano yapılı Nikel (Ni) ve Demir (Fe) toz metalurjik numunelerinin mikroyapısal ve manyetik özellikleri ile faz oluşumuna etkisinin, konvansiyonel yönteme kıyasla incelenmesi hedeflenmiştir. Nano boyuttaki tozların teminine kadar geçen süre zarfında, mikron boyuttaki Ni ve Fe tozları kullanılarak ön çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Ön deneylerin sonucunda, mikron yapılı yumuşak manyetik Ni-Fe alaşımlarının, mikrodalga sinterleme yöntemi ile konvansiyonel yönteme kıyasla bulgular ve tartışma bölümünde detaylandırılarak anlatıldığı üzere daha yüksek yoğunlaşım değerlerinde ve iyileştirilmiş mikroyapısal ve manyetik özelliklerle elde edilebildiği saptanmıştır.

Nano yapılı tozların temini ile, mikron yapıdaki Ni-Fe alaşımları ile yapılan ön deneylerden elde edilen bilgiler ışığında, mikrodalga ve konvansiyonel sinterleme çalışmalarına başlanmıştır. Çalışmalar dahilinde, nano boyuttaki elementel Ni ve Fe tozlarının, 80Ni-%20 Fe oranlarına izopropil alkol ortamında elde karıştırılmalarını takiben, iki yönlü eksenel sıkıştırma yöntemiyle değişen sıkıştırma basınçları (50, 100, 150, 200 MPa) altında sıkıştırılarak silindirik geometride peletler halinde elde edilmiş ve 900, 950 ve 1000 °C'de mikrodalga sinterleme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Numunelerin yüksek sıcaklıklarda oksitlenmesini engellemek amacıyla, mikrodalga sinterleme haznesinin içerisindeki hava vakumla tahliye edilmiş, arkasından 500 °C sıcaklıktaki bakır temizleme fırını içerisinden geçirilip içerisindeki oksijen yüzdesi azaltılmış argon gazı kullanılarak sinterleme atmosferi oluşturulmuştur. Ancak, mikrodalga frekanslarında sahip olduğu düşük delinme gerilimi dayanımı ile bilinen argon gazı (Gavin Whittaker, Imichacl et al. 2000), mikrodalga fırının içerisinde bulunan yüksek elektrik alan şiddetine (1000 V/m) dayanamayarak iyonize olmuş ve ark oluşumuna sebebiyet vermiştir. Koruyucu atmosfer ortamının iyonizasyonu ve ark oluşumu, numunelerde kontrol edilemeyen lokal sıcaklık artışlarına ve ergimeye yol açtıklarından, mikrodalga sinterleme deneyleri koruyucu atmosfer ortamında gerçekleştirilememiştir. Bu sebeple, koruyucu sinterleme atmosferi kullanımından vazgeçilerek, sinterleme deneylerinin argondan daha yüksek delinme gerilimine sahip hava ortamında yapılarak, arkların ve kontrolsüz ergime sorunlarının üstesinden gelinmesi hedeflenmiştir. Ancak, mikron boyutta sahip oldukları yüksek sıcaklıklarda korozyon dayanımı ile bilenen Ni-Fe alaşımları, çalışma kapsamında 50 nm'den daha küçük toz boyutlarındaki elementel Ni ve Fe tozlarından elde edildiğinden, nano yapılı peletler mikron yapılı peletlere kıyasla oldukça fazla gözenek yüzdesine ve yüzey alanına sahip olmuştur. Bu nedenle, sinterlenmiş numunelerde ciddi bir oksitlenme sorunu ile karşılaşılmış olup, ön deneyler esnasında mikron boyuttaki Ni-Fe tozları ile başarıyla gerçekleştirilen mikrodalga sinterleme deneyleri, nano yapılı toz metalurjik Ni-Fe alaşımları ile gerçekleştirilememiştir.

Nano yapılı Ni-Fe alaşımlarının, koruyucu atmosferin mikrodalga frekanstaki elektromanyetik radyasyon tarafından iyonize edilmesi ve ark oluşumlarının gözlenmesi sebebiyle koruyucu atmosfer altında ya da aşırı oksitlenme sorunu

nedeni ile hava ortamında mikrodalga sinterleme yöntemiyle üretilemeyeceği anlaşıldığından, projenin B planı uygulamaya sokulmuştur. B planı kapsamında, mikron boyuttaki paslanmaz çelik tozları ile koruyucu atmosfer kullanımına gereksinim duyulmaksızın, mikrodalga ve konvansiyonel sinterleme deneyleri gerçekleştirilmiş, üretilen toz metalurjik alaşımlar sinterlenmiş yoğunluk, oluşan fazlar, mikroyapısal özellikler ve mekanik özellikler bakımından karakterize edilerek, mikrodalga sinterleme yönteminin paslanmaz çelik sisteminin fiziksel özelliklerine etkisi konvansiyonel yönteme kıyasla incelenmiştir.

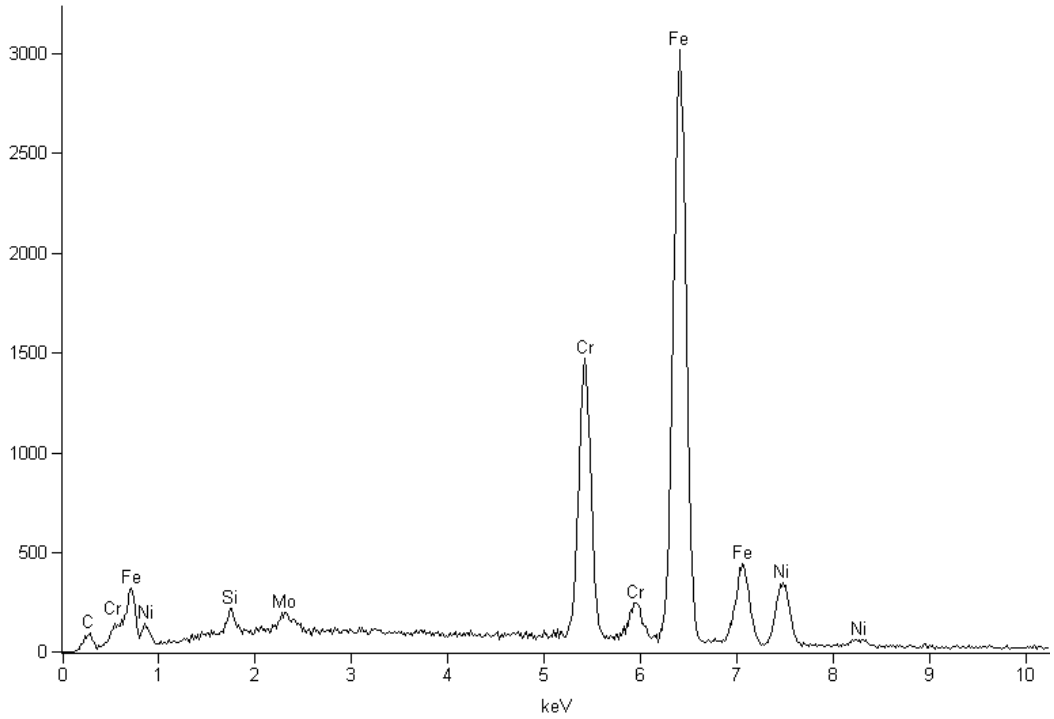
Toz metalurjik paslanmaz çelik parçalar, sahip oldukları yüksek korozyon dayanımı, yüksek sıcaklık mukavemeti ve yüksek şekillendirilebilirlikleri ile oldukça geniş bir uygulama alanına sahiptir. Paslanmaz çelikler içerisinde, östenitik paslanmaz çelikler yüksek sıcaklıklarda dahi sahip oldukları korozyon dayanımı ve mukavemeti ile en çok kullanılan çelikler arasında yer almaktadır (Saitou 2006). Ancak, toz metalurjik parçaların sinterleme işlemi sonrasında barındırdıkları gözeneklilik yüzdesi sebebiyle, mekanik özellikler ve korozyon direncinde azalma gözlenmektedir. Bu nedenle, bu metalik parçalarda sinterleme süreç parametrelerinin kontrol edilerek, minimal gözeneklilik yüzdesi ve optimum mekanik ve elektrokimyasal özellikler kombinasyonunun elde edilmesi gerekmektedir. Toz metalurjik numunelerin de mikrodalgalar ile verimli bir şekilde etkileşerek oldukça yüksek hızlarda ısıtılabildikleri ve sinterlenebildiklerinin gözlenmesinin ardından (Takayama, Link et al. 2004; Anklekar, Bauer et al. 2005; Mishra, Sethi et al. 2006; Celuch, Gwarek et al. 2008; Chhillar, Agrawal et al. 2008; Das, Mukhopadhyay et al. 2008; Leonelli, Veronesi et al. 2008; Krupka and Gwarek 2009), mikrodalga sinterleme yöntemi de toz metalurjik numunelerin üretilmesinde konvansiyonel yönteme kıyasla azalan sıcaklık ve sürelerde daha düşük gözenek yüzdeleri sağlanması sebebiyle tercih edilmeye başlanmıştır. Mikrodalga enerjisinin, ferromanyetik kayıplar, Eddy akımlarının yol açtığı ohmik kayıplar vb. mekanizmalar aracılığıyla toz metalurjik numuneler tarafından sönümlenmesi ile, mikrodalga sinterleme yöntemi ile hacimsel ısıtma sağlanabilmekte, numune içerisindeki ısıl gerilmeler ve sıcaklık farkları elimine edildiğinden, numunelerin çok daha kısa sürelerde azalan enerji sarfiyatları ve iyileştirilmiş sinterleme sonrası özellikleri ile eldesi mümkün olmaktadır (Gupta M; Wong Wai Leong 2007).

Bu çalışmada, ön alaşımlı SAE 316 kompozisyonunda östenitik paslanmaz çelik tozları, mikrodalga ve konvansiyonel sinterleme yöntemleri ile değişen şekillendirme basınçları ve sinterleme sıcaklıklarında 45 dakika süre ile sinterlenerek üretilmiş ve elde edilen numunelerin mekanik, mikroyapısal ve sinterleme sonrası yoğunluk özellikleri ile oluşan faz içerikleri bakımından karakterizasyonu sağlanarak, mikrodalga sinterleme yönteminin östenik paslanmaz çeliklerin özelliklerine etkisi konvansiyonel yönteme kıyasla incelenmiştir.

2. DENEYSEL YÖNTEM VE GEREÇLER

2.1. Toz Hazırlama Süreci:

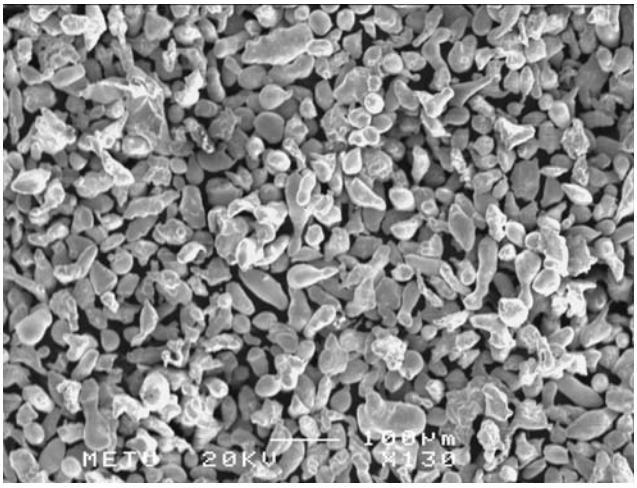
SAE 316 paslanmaz çelik kompozisyonunda ve östenitik yapıya sahip metalik tozlar, beşer gramlık numuneler elde edilebilmesi için tartılarak sıkıştırma sürecine geçilmiştir. Kullanılan tozlar ön alaşımlı olduğundan, fazladan başka bir katkılama işlemine gerek duyulmamıştır. Çalışmada kullanılan tozların EDS analizi sonuçları ve taramalı elektron mikroskobu görüntüsü sırasıyla Şekil 1 ve Şekil 2'de verilmiştir. EDS yardımıyla elde edilen kimyasal analiz sonuçları kullanılan tozun SAE 316 paslanmaz çelik kompozisyonunda olduğunu doğrulamıştır (Tablo 1). Kullanılan EDS cihazının C elementinin belirlemediki hassasiyet azlığı sebebiyle, C oranı beklenenden yüksek gözükmektedir. Dolayısıyla kimyasal kompozisyon karşılaştırmasında diğer elementlerin dağılımı referanslara göre göz önünde bulundurulmuştur. Elektron mıikroskobu incelemesi ise paslanmaz çelik tozlarının çoğunlukla çubuksu ve kısmen de küresel morfolojiye sahip olduklarını göstermiştir (Şekil 2).



Şekil 1. Çalışmada kullanılan ön alaşımlı paslanmaz çelik tozlarının EDS analiz sonucu.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan önalaşımlı paslanmaz çelik tozlarının kompozisyonu.

Element	***Weight Conc %***	***Atom Conc %***
C	4.46	17.66
Si	0.75	1.28
Cr	18.48	16.92
Fe	64.21	54.73
Ni	10.85	8.80
Mo	1.25	0.62



Şekil 2. Çalışmada kullanılan SAE 316 paslanmaz çelik tozlarının taramalı elektron mikroskobu görüntüsü.

2.2. Toz Sıkıştırma Süreci:

Karıştırılan tozlar istenilen geometride pelletler elde etmek amacıyla iki yönlü eksenel sıkıştırma ve soğuk izostatik sıkıştırma yöntemleriyle şekillendirilmiştir.

2.2.1. İki yönlü eksenel soğuk sıkıştırma :

Paslanmaz çelik numuneler, yuvarlak kesitli pelletler halinde elde etmek amacıyla 200 MPa sıkıştırma basıncında iki yönlü eksenel soğuk sıkıştırma işlemiyle şekillendirilmiştir. Eksenel sıkıştırma işlemini takiben, numunelerin sinterlenmemiş yoğunluklarını ölçmek amacıyla, preslenmiş ağırlıkları ve numune boyutları ölçülmüştür. Ölçüm sonucunda, 200 MPa basınç altında iki yönlü eksenel sıkıştırma sonucunda numunelerin ortalama olarak teorik yoğunluğa oranla %75 yaş kompakt yoğunluğuna sahip olduğu tespit edilmiştir.

2.2.2. Soğuk İzostatik Presleme:

İki yönlü eksenel sıkıştırma yöntemi esnasında kalıp ile numune duvarı arasındaki sürtünme kuvvetinden kaynaklanan sıkışma farklılıklarının sebep olabileceği sinterleme sonrası numune geometrisinde meydana gelebilecek şekil bozukluklarını engellemek amacıyla, paslanmaz çelik tozlarına

elastomerik kalıplar içerisinde yaklaşık 150 MPa basınç altında soğuk izostatik presleme işlemi uygulanarak yaş numuneler elde edilmiştir. Basınç iletiminin optimizasyonu ve maksimum yaş kompakt yoğunluğunun elde edilebilmesi amacıyla, farklı sertliklerde çeşitli elastomerik malzemelerden yapılan kalıplar denenmiş ve sonuçta 40 Shore A sertliğindeki silikon kauçuk kalıplar kullanılarak, teorik yoğunluğa oranla ortalama %67 yoğunluğa sahip yaş peletler elde edilmiştir.

2.3. Sinterleme Aşaması:

İki farklı sıkıştırma süreciyle pellet haline getirilen paslanmaz çelik numuneler, 1150, 1200 ve 1225 °C sıcaklıklarda 45 dakika süreyle hem konvansiyonel tüp fırında hem de mikrodalga fırında koruyucu atmosfer kullanılmaksızın sinterlenmiştir. Çalışmada 4,8 kW gücünde multimod kaviteye sahip mikrodalga fırın (MKH-4.8, Linn High Therm GmbH, Eschenfelden, Almanya) kullanılmış, numuneler fırına yalıtkan fiber boardlar içerisinde konulmuş ve toz metalurjik numunelerin mikrodalgalar ile verimli etkileşebildikleri sıcaklıklara kadar ısıtılmalarını sağlayacak SiC tozları kayıplı malzemeler (susceptor) olarak yerleştirilmiştir.

2.4. Karakterizasyon Çalışmaları:

Mikrodalga ve konvansiyonel tüp fırında sinterlenen numuneler, fiziksel özellikleri, oluşan faz içerikleri ve mikroyapıları bakımından incelenmiştir.

2.4.1. Yoğunluk Ölçümü:

Paslanmaz çelik alaşımlar, sinterleme sonrası 100 grit SiC kağıt kullanılarak zımparalanmış ve 2 saat süreyle vakum altında ksilen empregnasyonunu takiben, 24 saat ksilen içerisinde bekletildikten sonra Arşimet metodu ile yoğunlukları ölçülmüştür.

2.4.2. Faz Analizi:

Her iki yöntemle sinterlenen paslanmaz çelik numuneler, oluşan fazlar bakımından X-ışınları kırınımı analizi ile incelenmiştir.

2.4.3. Mikroyapı incelemesi:

Yoğunluk ölçümünü takiben, numune yüzeyleri standart metalografik hazırlama süreçleri ile parlatılmış ve taramalı elektron mikroskobu aracılığıyla incelenmiştir. Östenitik paslanmaz çelikler, görece yumuşaklıkları ile bilinen alaşımlar olduğundan, metalografik hazırlama süreçlerinden kaynaklanan plastik deformasyon nedeni ile kapanan gözenekler, inceleme öncesi numunelerin 1 dakika süre ile Marble tip dağlayıcıda bekletilmesi ile açılmış ve numunelerin gerçek mikroyapılarının incelenmesi sağlanmıştır.

2.4.4. Mekanik Karakterizasyon:

Mikroyapı inceleme aşamasının tamamlanmasını takiben, 10 gram yük altında Vickers mikrosertlik testi kullanılarak numunelerin sertlikleri incelenmiştir. Uygun yük miktarı belirlendikten sonra, test edilen alanın gözenek ve diğer hataları barındırmaması ve numuneyi temsil eden bir bölgenin test edildiğinin garantilemesi sağlanmış ve her numune için en az 5 adet sertlik değeri kaydedilmiştir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Mikron boyuttaki Ni ve Fe tozları kullanılarak gerçekleştirilen ön deneyler esnasında, mikron boyuttaki elementel Ni ve Fe tozları, %80Ni-%20 Fe oranlarına izopropil alkol ortamında elde karıştırılmalarını takiben, iki yönlü eksenel sıkıştırma yöntemiyle 100Mpa basınç altında sıkıştırılarak silindirik geometride peletler halinde elde edilmiş ve 1200, 1225 ve 1250 °C'de hem mikrodalga hem de konvansiyonel sinterleme yöntemiyle sabit süre uygulanarak üretilmiştir. Numuneler, mikrodalga ve konvansiyonel sinterleme yöntemleri ile üretildikten sonra, oluşan fazlar, yüzde yoğunlaşım, manyetik özellikler bakımından karakterize edilerek sinterleme süreçlerinin numune özelliklerine etkisi incelenmiştir. Buna göre, aynı koşullar altında mikrodalga ve konvansiyonel sinterleme süreciyle üretilen numunelerin, % teorik yoğunluk – sinterleme sıcaklığı değerleri incelendiğinde (Tablo 2), aynı sinterleme sıcaklığında mikrodalga sinterleme yöntemiyle üretilen numunelerin, konvansiyonel yöntemle üretilen numunelere kıyasla daha yüksek yoğunlaşım değerlerine tespit edilmiştir.

Tablo 2. Mikrodalga (M) ve Konvansiyonel (K) sinterleme yöntemleriyle üretilen numunelerin sinterleme sıcaklığına göre yüzde yoğunlaşım değerleri.

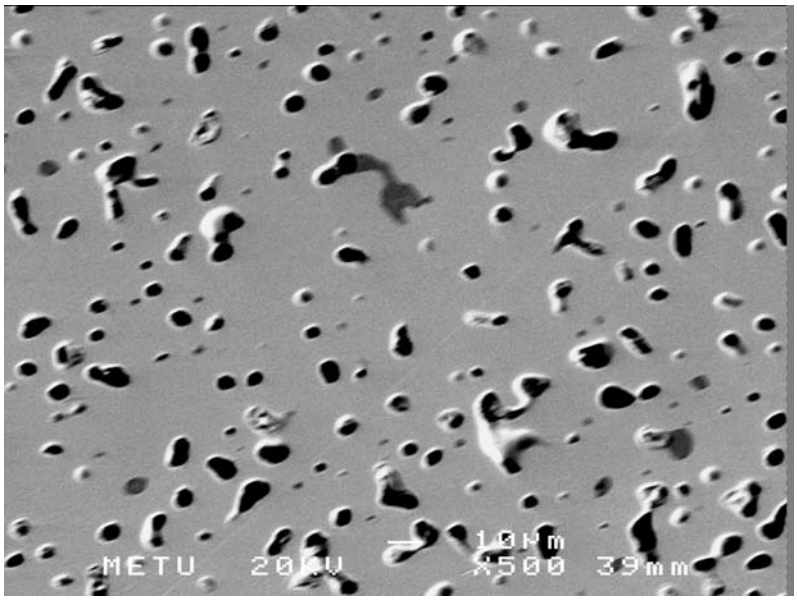
Sinterleme Sıcaklığı (°C)	Yüzde Yoğunlaşım (%)	
1200	85 (M)	83 (K)
1225	87 (M)	85 (K)
1250	89 (M)	87 (K)

Konvansiyonel ve mikrodalga sinterleme yöntemiyle üretilen numunelerin parlatılmış ancak dağlanmamış yüzeylerinden taramalı elektron mikroskobu aracılığıyla elde edilen mikroyapıları üzerinde Clemex görüntü analizi yazılımıyla gerçekleştirilen incelemeler sonucunda mikroyapısal inceleme sonucunda, mikrodalga sinterleme yöntemiyle üretilen numunelerin, konvansiyonel yönteme kıyasla daha yuvarlak gözenek morfolojileriyle elde edilebildiği anlaşılmıştır (Tablo 3).

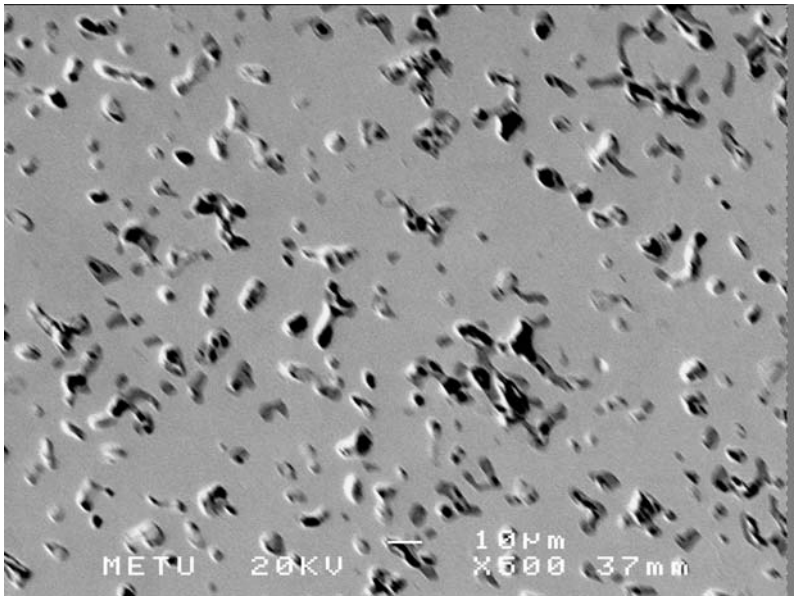
Tablo 3. Mikrodalga (M) ve Konvansiyonel (K) sinterleme yöntemleriyle üretilen numunelerin sinterleme sıcaklığına göre gözenek morfolojilerindeki yuvarlaklaşma değerleri (tamamen yuvarlaklaşmış gözenek morfolojisi için ortalama yuvarlaklık değeri 1).

Sinterleme Sıcaklığı (°C)	Ortalama Yuvarlaklık	
1200	0.615 (M)	0.592 (K)

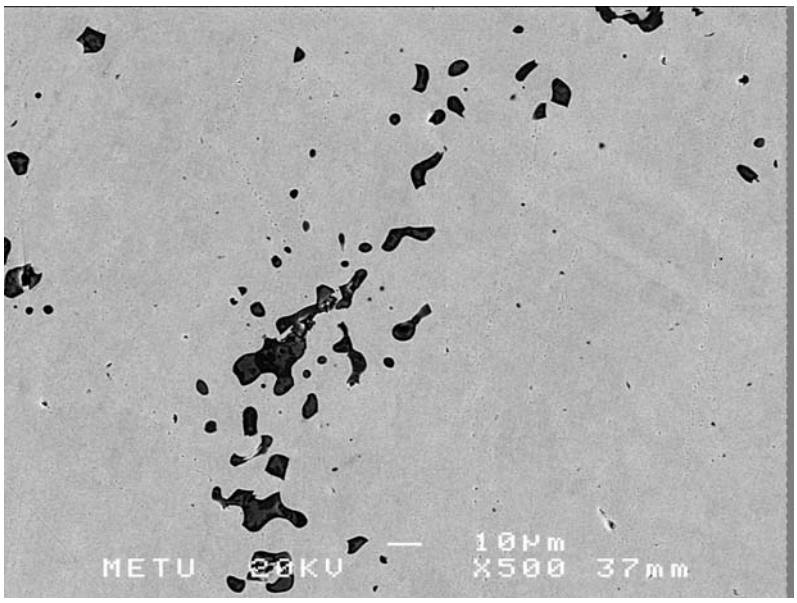
Ayrıca, her iki yöntemle üretilen numunelerde, artan sinterleme sıcaklıklarıyla beraber gözeneklilik yüzdesinde azalma görülmektedir (Şekil 3 - 6).



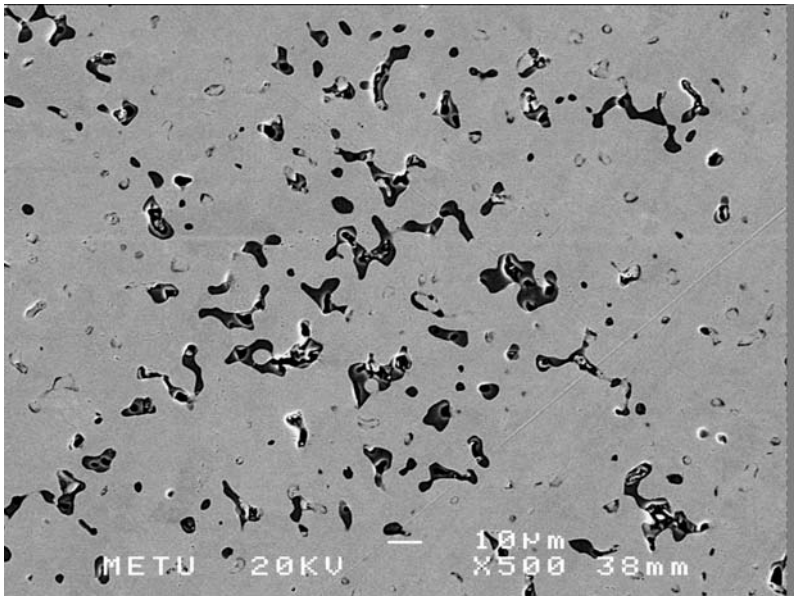
Şekil 3. Mikrodalga sinterleme yöntemiyle 1275°C'de üretilen numunenin taramalı elektron mikroskobuyla elde edilen mikroyapısı.



Şekil 4 Konvansiyonel sinterleme yöntemiyle 1275°C'de üretilen numunenin taramalı elektron mikroskobuyla elde edilen mikroyapısı.



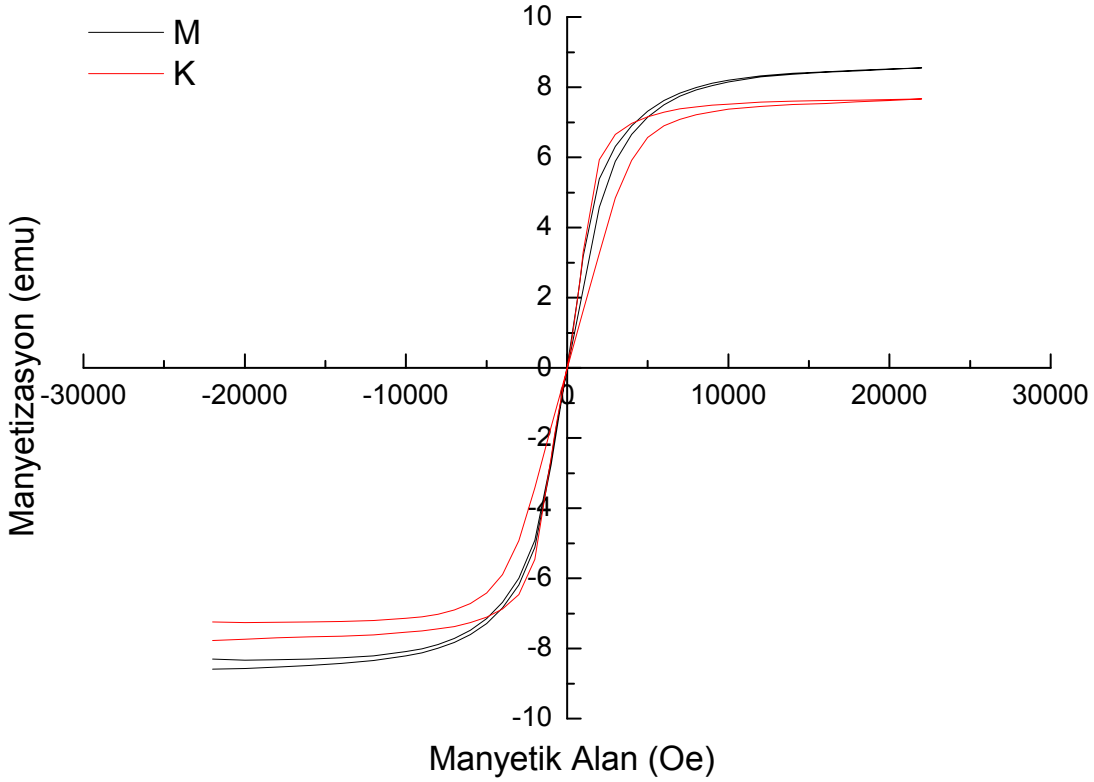
Şekil 5 Mikrodalga sinterleme yöntemiyle 1300°C'de üretilen numunenin taramalı elektron mikroskobuyla elde edilen mikroyapısı.



Şekil 6 Konvansiyonel sinterleme yöntemiyle 1300°C'de üretilen numunenin taramalı elektron mikroskobuyla elde edilen mikroyapısı.

Numuneler, oluşan fazlar bakımından X ışınları kırınımı analizi ile incelendiğinde, hem mikrodalga hem de konvansiyonel sinterleme yöntemiyle üretilen numunelerde 18-0877 numaralı ICCD referans kartına göre, yumuşak manyetik özellikler gösteren intermetalik $FeNi_3$ fazının oluştuğu gözlemlenmiştir.

Numunelerin manyetik özellikleri ise Titreşimli Örnek Manyetometresi aracılığıyla incelenmiş ve her iki yöntemle de 1200 °C'de sinterlenen alaşımların B-H eğrileri elde edilen tüm sonuçları temsilen Şekil 7'de verilmiştir. Manyetik özelliklerin incelenmesi sonucunda, aynı sinterleme sıcaklık ve sürelerinde mikrodalga sinterleme süreci ile üretilen alaşımların, konvansiyonel sinterleme süreciyle üretilen alaşımlara göre daha az histerisis davranışı ve dolayısıyla daha iyi yumuşak mıknatıs özellikleri gösterdiği görülmüştür.



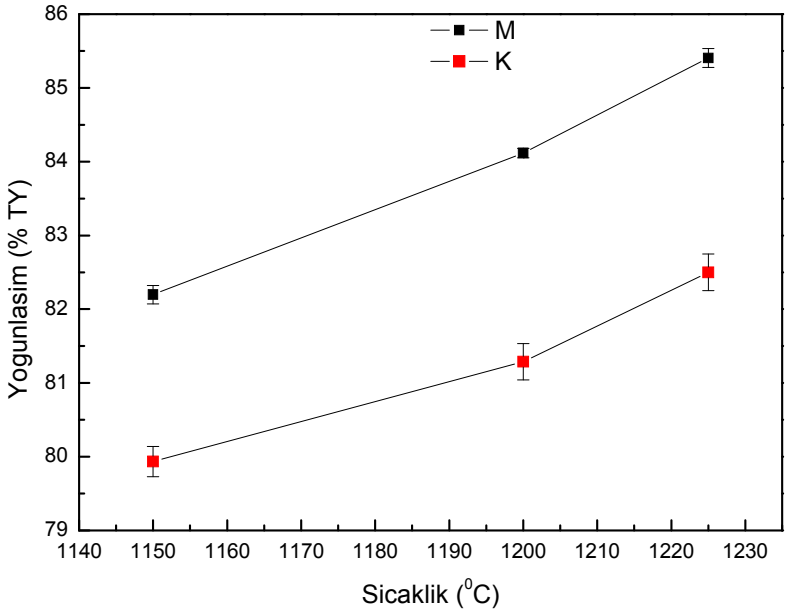
Şekil 7. Mikrodalga (M) ve Konvansiyonel (K) sinterleme yöntemleriyle üretilmiş numunelerin histeresis eğrileri.

Nanotozların teminini takiben nanoboyuttaki elementel Ni ve Fe tozlarının IPA ortamında kütlece %80Ni-%20Fe oranlarında olacak şekilde tartılarak elde karıştırılmalarını takiben, iki yönlü eksenel sıkıştırma yöntemiyle değişken sıkıştırma basınçlarında (50, 100, 150, 200 MPa) ve soğuk izostatik presleme yöntemiyle 150MPa basınç kullanılarak silindirik geometride peletler elde edilmiş ve 900, 950, 1000^{0}C sıcaklıklarda mikrodalga sinterleme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ancak, giriş bölümünde bahsedilen nanoyapılı alaşımlar ile sinterleme atmosferi arasında meydana gelen komplikasyonlar nedeniyle nanoyapılı yumuşak manyetik Ni-Fe alaşımları mikrodalga sinterleme yöntemi ile üretilemediğinden, projenin B planı uygulama konmuş ve östenitik paslanmaz çeliklerin mikrodalga ve konvansiyonel yöntemle üretilmesine başlanmıştır.

Mikrodalga ve konvansiyonel sinterleme yöntemi ile üretilen paslanmaz çelik numunelerin, ksilen empregnasyonunu takiben Arşimet metoduyla ile sinterlenmiş

yoğunlukları ölçülmüştür. İki yönlü eksenel soğuk sıkıştırma ya da soğuk izostatik presleme ile oluşturulduktan sonra mikrodalga ya da konvansiyonel yöntemle sinterlenen numunelerin % sinterlenmiş yoğunluklarının sinterleme sıcaklıkları ile değişimi, Şekil 8 ve 9'da verilmektedir. Bu iki şekilde verilen %yoğunlaşım oranlarının hesaplanmasında SAE 316 paslanmaz çelik alaşımının teorik yoğunluğu 8 g/cm^3 olarak kabul edilmiştir. Şekil 8 ve 9'da verilen %yoğunlaşım değerlerini oluşturak yoğunlaşım değerleri Tablo 4 ve 5'de verilmektedir.

İki yönlü eksenel sıkıştırma yöntemi ile 200 MPa sıkıştırma basıncı altında şekillendirilen ve 1150, 1200 ve 1225 °C sıcaklıklarda sinterlenen numunelerin %yoğunlaşımları incelendiğinde, mikrodalga ile sinterlenerek üretilen numunelerin, konvansiyonel yöntemle üretilen numunelere kıyasla daha yüksek yoğunluk değerlerine ulaştığı görülmektedir. Ayrıca, her iki yöntemle üretilen numunelerin, sinterlenmiş %yoğunlaşım – sinterleme sıcaklığı grafiklerinin birbirine yaklaşık olarak paralel bir eğilim izledikleri gözlemlenmektedir. Dolayısıyla her iki yöntemde de sinterlenmiş yoğunluğun sıcaklığa bağlılığının benzer şekilde değiştiği düşünülebilir. Mikrodalga sinterleme yöntemi ile numunelerin sinterleme sıcaklıklarına ısıtılmaları ortalama 30 dk sürerken, konvansiyonel fırında numunelerin sinterleme sıcaklıklarına ulaşmaları ortalama 2 saat sürmektedir. Mikrodalga sinterleme yöntemi ile sağlanan hızlı ısıtma, sinterleme öncesi tane büyümesini engellemekte ve dolayısıyla sinterleme esnasında atomların taneler arası difüzyon yapabileceği daha fazla yüzey alanı bulunmaktadır. Bu nedenle, mikrodalga sinterleme yöntemi ile üretilen numunelerin, konvansiyonel yöntemle üretilenlere kıyasla daha yüksek sinterlenmiş yoğunluklara sahip oldukları düşünülmektedir (Tablo 4 ve 5). Bunun yanı sıra, her iki yöntemle sinterlenerek üretilen numunelerin, sinterlenmiş %yoğunlaşım – sinterleme sıcaklığı davranışlarının benzer olması, her iki yöntemde de sinterleme süresince etkin olan difüzyon mekanizmalarının benzer olduğunu, dolayısıyla mikrodalga sinterleme yönteminin östenitik paslanmaz çelik sisteminde difüzyon mekanizması değişikliğine yol açmadığını düşündürmektedir.

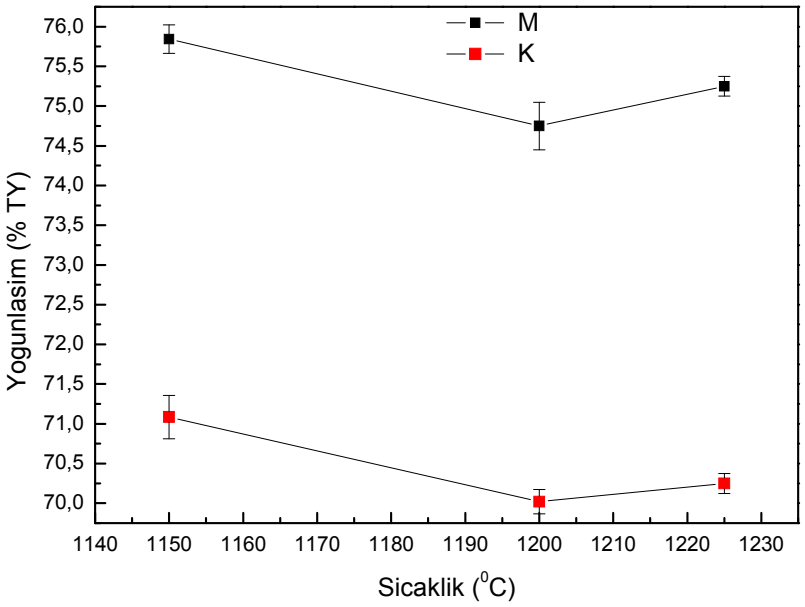


Şekil 8. İki yönlü eksenel sıkıştırma yöntemi ile 200 MPa basınç altında şekillendirilen ve mikrodalga (M) ve konvansiyonel (K) sinterleme yöntemleri ile 1150, 1200 ve 1225 °C sıcaklıklarda sinterlenen numunelerin sinterlenmiş %yoğunlaşımlarının sıcaklıkla değişimi.

Tablo 4. İki yönlü eksenel sıkıştırma yöntemi ile 200 MPa basınç altında şekillendirilen ve mikrodalga (M) ve konvansiyonel (K) sinterleme yöntemleri ile 1150, 1200 ve 1225 °C sıcaklıklarda sinterlenen numunelerin sinterlenmiş %yoğunlaşımlarının sıcaklıkla değişimi.

Sinterleme Sıcaklığı (°C)	Yoğunluk (g/cm^3)	
1150	6,58 (M)	6,39 (K)
1200	6,73 (M)	6,50 (K)
1225	6,83 (M)	6,60 (K)

Soğuk izostatik presleme yöntemi ile 150 MPa sıkıştırma basıncı kullanılarak şekillendirilen ve mikrodalga ve konvansiyonel sinterleme yöntemi ile üretilen numunelerin, sinterlenmiş yoğunluklarının sinterleme sıcaklıkları ile değişimi incelendiğinde, iki yönlü eksenel sıkıştırma yöntemi ile şekillendirilen numunelerden farklı olarak, sinterlenmiş yoğunluklarının 1150 °C sinterleme sıcaklığında optimize olduğu, her iki sinterleme yönteminde de artan sinterleme sıcaklıklarıyla sinterlenmiş yoğunlukların azaldığı saptanmıştır (Şekil 9). Bu durum, soğuk izostatik presleme yöntemiyle ulaşılan yaş yoğunlukların daha düşük olması ve dolayısıyla daha yüksek gözeneklilik yüzdesi barındıran peletlerde artan sinterleme sıcaklıklarında, gözeneklerin birleşip büyüyerek yoğunlaşımı olumsuz şekilde etkilemeleri ile açıklanabilir.

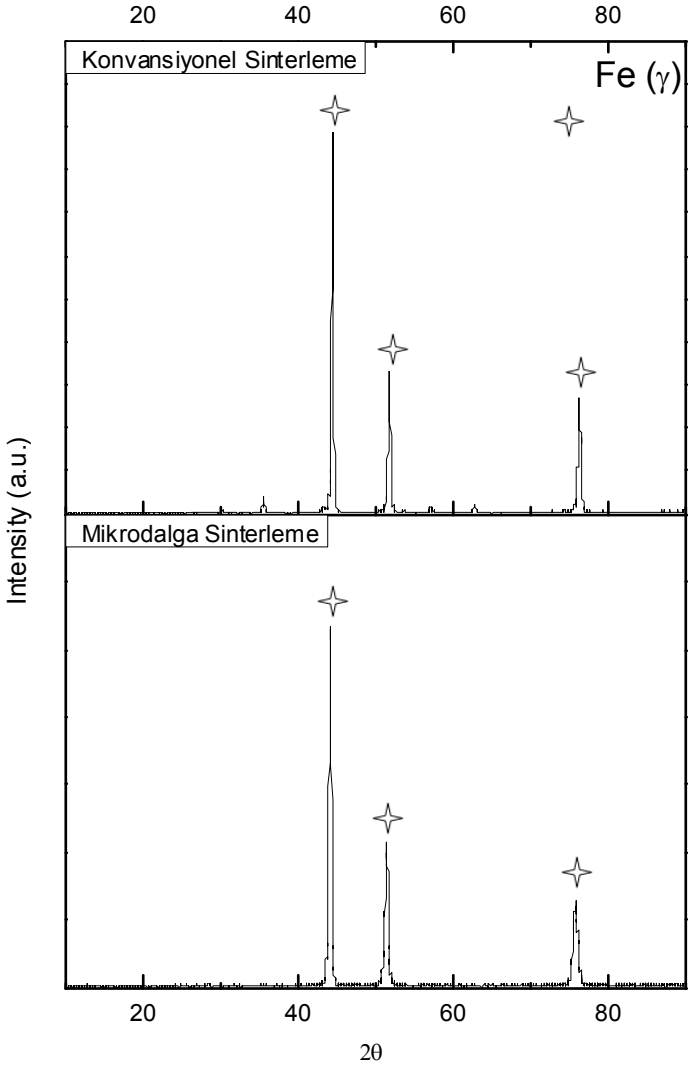


Şekil 9. Soğuk izostatik presleme yöntemi ile 150 MPa basınç altında şekillendirilen ve mikrodalga (M) ve konvansiyonel (K) sinterleme yöntemleri ile 1150, 1200 ve 1225 °C sıcaklıklarda sinterlenen numunelerin sinterlenmiş %yoğunlaşımlarının sıcaklıkla değişimi.

Tablo 5. Soğuk izostatik presleme yöntemi ile 150 MPa basınç altında şekillendirilen ve mikrodalga (M) ve konvansiyonel (K) sinterleme yöntemleri ile 1150, 1200 ve 1225 °C sıcaklıklarda sinterlenen numunelerin sinterlenmiş yoğunluklarının sıcaklıkla değişimi.

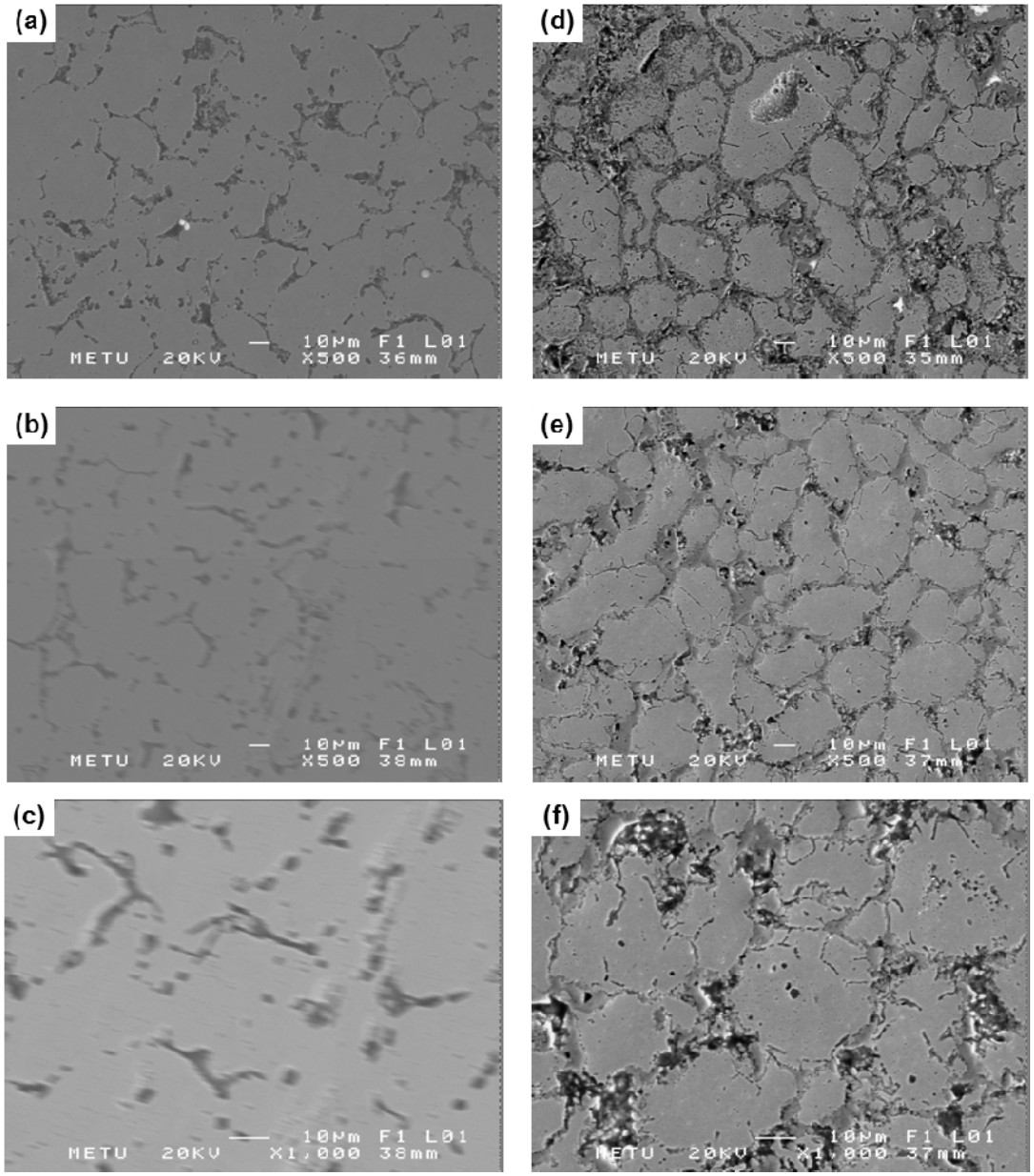
Sinterleme Sıcaklığı (°C)	Yoğunluk (g/cm^3)	
1150	6,06 (M)	5,68 (K)
1200	5,97 (M)	5,60 (K)
1225	6,02 (M)	5,62 (K)

Numunelerin X-ışınları kırınımı aracılığıyla oluşan fazlar bakımından karakterizasyonu sonucunda ise, her iki yöntemle üretilen numunede de östenit fazının elde edildiği tespit edilmiştir (Şekil 10).

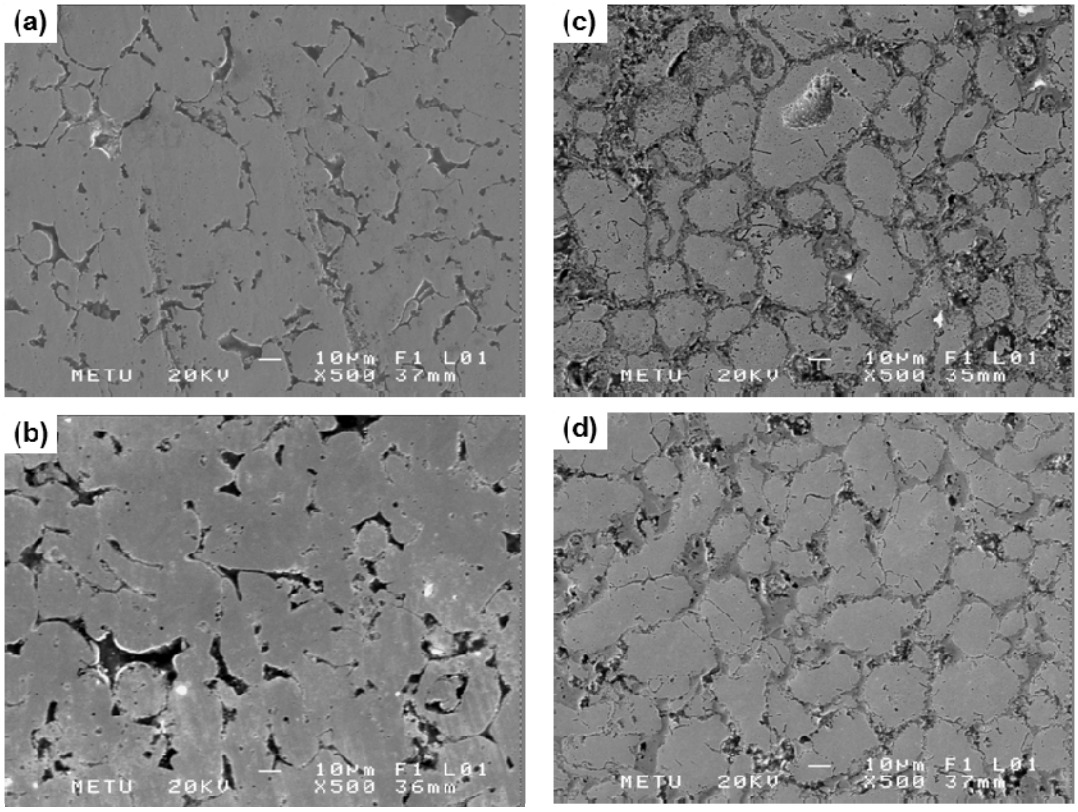


Şekil 10. Mikrodalga ve konvansiyonel sinterleme yöntemiyle üretilen numunelerin X-ışınları diffraktogtamı.

Taramalı elektron mikroskobu aracılığıyla numunelerin mikroyapısal özellikleri incelendiğinde, mikrodalga sinterleme yöntemi ile üretilen numunelerin konvansiyonel yönteme kıyasla azalan gözeneklilik yüzdesi ve yuvarlaklaşmış gözenek morfolojilerine sahip olduğu görülmüştür (Şekil 11 ve 12). Ayrıca, soğuk izostatik presleme yöntemiyle şekillendirilen numunelerin mikroyapıları incelendiğinde, 1200 °C'de sinterlenmiş numunelerin tane içlerinde dahi gözeneklilik kaldığı ve sinterlenmiş yoğunluk ölçümleri ile uyumlu olarak, yoğunlaşımın sağlanamadığı tespit edilmiştir.

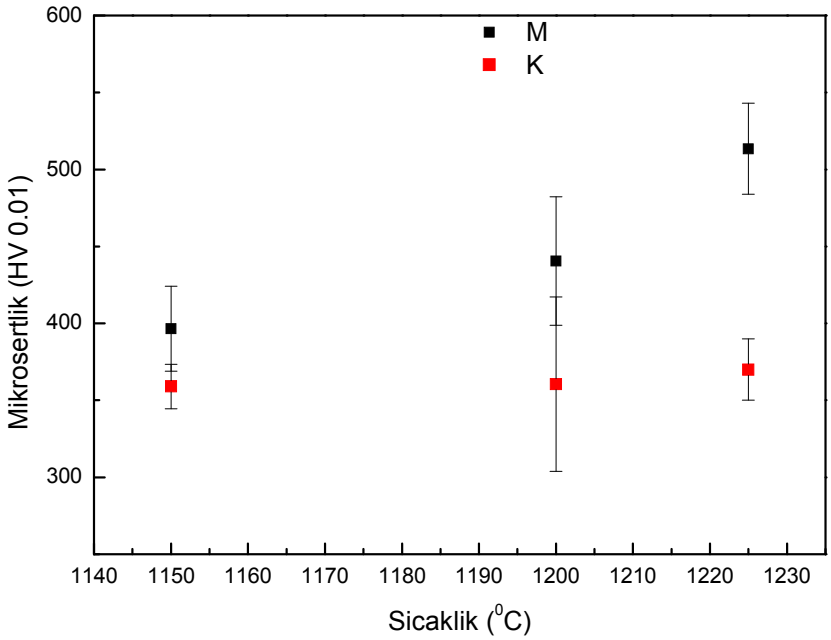


Şekil 11. a-b-c. İki yönlü eksenel sıkıştırma yöntemi ile 200 MPa basınç altında şekillendirilen ve mikrodalga sinterleme yöntemi ile 1150 (Şekil 11.a) 1200 (Şekil 11.b) ve 1225 °C (Şekil 11.c) sıcaklıklarda üretilen numunelerin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri. d-e-f. İki yönlü eksenel sıkıştırma yöntemi ile 200 MPa basınç altında şekillendirilen ve konvansiyonel sinterleme yöntemi ile 1150 (Şekil 11.d), 1200 (Şekil 11.e) ve 1225 °C (Şekil 11.f) sıcaklıklarda üretilen numunelerin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri.



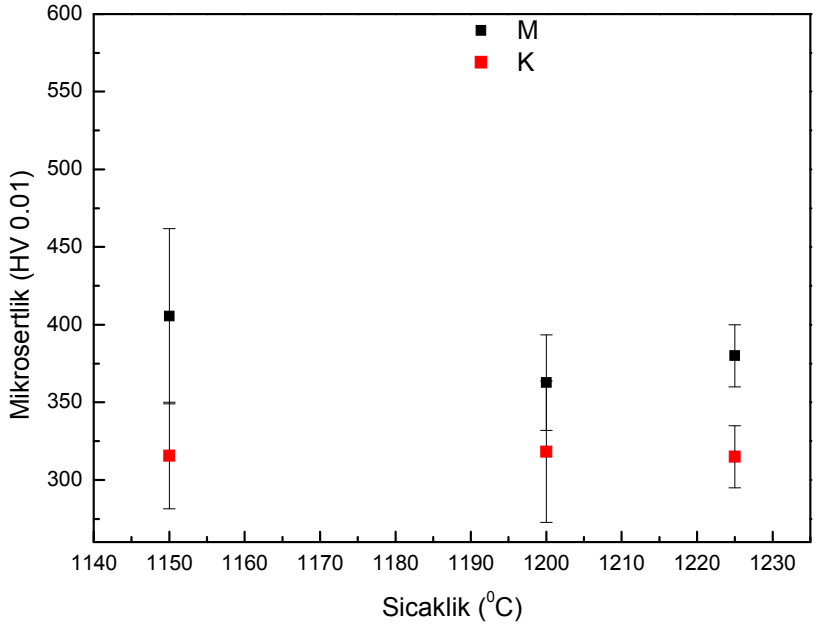
Şekil 12. a.-b. Soğuk izostatik sıkıştırma yöntemi ile 150 MPa basınç altında şekillendirilen ve mikrodalga sinterleme yöntemi ile 1150 (Şekil 12.a) ve 1200 °C (Şekil 12.b) sıcaklıklarda üretilen numunelerin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri. c-d Soğuk izostatik sıkıştırma yöntemi ile 150 MPa basınç altında şekillendirilen ve konvansiyonel sinterleme yöntemi ile 1150 (Şekil 12.c) ve 1200 °C (Şekil 12.d) sıcaklıklarda üretilen numunelerin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri.

Numunelerin mikrosertlik değerleri üzerinden mekanik özellikleri incelendiğinde ise, iki yönlü eksenel sıkıştırma yöntemi ile üretilen numunelerin, daha yüksek mikrosertlik değerlerine ulaştığı tespit edilmiştir (Şekil 13). Toz metalurjik numunelerin mühendislik özellikleri, temel olarak sinterleme sonrası yoğunluk ve kalıntı gözeneklilik tarafından kontrol edildiğinden, aynı sinterleme sıcaklıklarında mikrodalga sinterleme yöntemiyle üretilen numunelerin konvansiyonel yöntemle üretilen numunelerden daha yüksek yoğunluk değerlerine sahip olması sebebiyle daha yüksek mikrosertlik değerlerine ulaşması da beklenen bir durumdur.



Şekil 13. İki yönlü eksenel sıkıştırma yöntemiyle 200 MPa sıkıştırma basıncı kullanılarak şekillendirilen ve mikrodalga (M) ve konvansiyonel (K) sinterleme yöntemiyle 1150, 1200, 1225 °C sıcaklıklarda üretilen numunelerin mikrosertlik değerleri.

Soğuk izostatik sıkıştırma yöntemiyle şekillendirilen numunelerin mikrosertlik değerleri incelendiğinde ise, yoğunluk değerlerinde görülen azalmaya paralel olarak, her iki yöntemle de üretilen numunelerin mikrosertlik değerlerinin 1150 °C'de optimize olduğu ve artan sinterleme sıcaklıkları ile mikrosertlik değerlerinin azaldığı saptanmıştır (Şekil 14). İki yönlü eksenel sıkıştırma yöntemine kıyasla soğuk izostatik presleme ile şekillendirilen numunelerde ortaya çıkan görece düşük mikrosertlik değerleri, ikinci şekillendirme ve sonrasında sinterlemeyle daha düşük yoğunlaşım ve daha yüksek gözenek yüzdelerinin ortaya çıkması ile açıklanabilir.



Şekil 14. Soğuk izostatik sıkıştırma yöntemiyle 150 MPa sıkıştırma basıncı kullanılarak şekillendirilen ve mikrodalga (M) ve konvansiyonel (K) sinterleme yöntemiyle 1150, 1200 ve 1225 °C sıcaklıklarda üretilen numunelerin mikrosertlik değerleri.

4. SONUÇ

Mikrodalga sinterleme yöntemi ile östenitik paslanmaz çelik numunelerin, konvansiyonel sinterleme yöntemine kıyasla daha yüksek sinterlenmiş yoğunluklarda ve mikrosertlik değerlerinde elde edilebildiği saptanmıştır. Bunun yanısıra, mikroyapısal inceleme sonucunda mikrodalga sinterleme yöntemi ile üretilen numunelerin, azalan gözeneklilik yüzdesi ve görece yuvarlaklaşmış gözenek morfolojilerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Bunu yanında, soğuk izostatik preslemeye kıyasla sebep olduğu daha az basınç dağılım homojenitesine rağmen, iki yönlü eksenel sıkıştırma ile elde edilen daha yük yaş yoğunluklar sonuçta daha yüksek sinterlenmiş yoğunluklar elde edilmesi sonucunu doğurmuştur. Dolayısıyla, iki yönlü eksenel sıkıştırma ile şekillendirilen numunelerde daha az gözenek miktarı ve bununla bağlantılı olarak daha yüksek sertlik değerlerine ulaşılmıştır.

Bununla beraber, şekillendirme metodundan bağımsız olmak üzere, aynı sıcaklıklarda mikrodalga sinterleme ile konvansiyonel sinterlemeye kıyasla daha yüksek yoğunlaşım ve sertlik değerleri elde edilmiştir. Mikrodalga sinterleme yöntemiyle elde edilen bu daha etkin sinterleme karakteristiğinin, mikrodalga sinterleme yöntemi ile sağlanan görece hızlı ısıtma ile sinterleme öncesi tane büyümesinin engellenmesi ve dolayısıyla sinterleme esnasında atomların taneler arası difüzyon yapabileceği daha fazla yüzey alanı bulmalarından kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Bu nedenle, mikrodalga sinterleme yöntemi ile üretilen numunelerin, konvansiyonel yöntemle üretilenlere kıyasla daha yüksek sinterlenmiş yoğunluklara sahip oldukları düşünülmektedirÖstenitik paslanmaz çelikler, yüksek korozyon dayanımı gerektiren uygulamalarda tercih edildiklerinden, mikrodalga ve konvansiyonel sinterleme yöntemi ile üretilen numunelerin korozyon testleri aracılığıyla elektrokimyasal özelliklerinin ve korozyon dayançlarının da ölçülmesi ve mikrodalga sinterleme yönteminin numunelerin elektrokimyasal özelliklerine de etkisinin incelenmesi gerekmektedir.

5. KAYNAKÇA

Anklekar, R. M., K. Bauer, et al. (2005). "Improved mechanical properties and microstructural development of microwave sintered copper and nickel steel PM parts." Powder Metallurgy **48**(1): 39-46.

Celuch, M., W. Gwarek, et al. (2008). Effective modeling of microwave heating scenarios including susceptors. 2008 International Conference of Recent Advances in Microwave Theory and Applications, MICROWAVE 2008.

Chhillar, P., D. Agrawal, et al. (2008). "Sintering of molybdenum metal powder using microwave energy." Powder Metallurgy **51**(2): 182-187.

Das, S., A. K. Mukhopadhyay, et al. (2008). "Prospects of microwave processing: An overview." Bulletin of Materials Science **31**(7): 943-956.

Gavin Whittaker, A., D. Imichacl, et al. (2000). "Arcing and other microwave characteristics of metal powders in liquid systems." Journal of the Chemical Society, Dalton Transactions(9): 1521-1526.

Gupta M; Wong Wai Leong, E. (2007). Microwaves and Metals, John Wiley & Sons.

Krupka, J. and W. Gwarek (2009). "Measurements and modeling of planar metal film patterns deposited on dielectric substrates." IEEE Microwave and Wireless Components Letters **19**(3): 134-136.

Leonelli, C., P. Veronesi, et al. (2008). "Microwave assisted sintering of green metal parts." Journal of Materials Processing Technology **205**(1-3): 489-496.

Mishra, P., G. Sethi, et al. (2006). "Modeling of microwave heating of particulate metals." Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science **37**(5): 839-845.

Saitou, K. (2006). "Microwave sintering of iron, cobalt, nickel, copper and stainless steel powders." Scripta Materialia **54**(5): 875-879.

Takayama, S., G. Link, et al. (2004). Sintering of metal powder samples with millimeter wave technology. Conference Digest of the 2004 Joint 29th International Conference on Infrared and Millimeter Waves and 12th International Conference on Terahertz Electronics.

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje No: 109M399
Proje Başlığı: Nano Yapılı Metalik Alaşımların Mikrodalga Sinterleme Yöntemiyle Üretilmesi
Proje Yürütücüsü ve Araştırmacılar: Doç. Dr. Arcan Fehmi Dericioğlu
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi: Orta Doğu Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnönü Bulvarı 06531/Ankara
Destekleyen Kuruluş(ların) Adı ve Adresi: Orta Doğu Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnönü Bulvarı 06531/Ankara
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri: 01.01.2010 – 01.01.2011
Öz (en çok 70 kelime) Bu çalışmada, mikrodalga sinterleme yönteminin konvansiyonel yönteme kıyasla yumuşak manyetik özellikler gösteren toz metalurjik nano yapılı Nikel-Demir alaşım sisteminde faz oluşumu ve yoğunlaşım ile mikroyapısal, manyetik ve mekanik özelliklere etkisinin araştırılması hedeflenmiştir. Proje kapsamında, mikron yapılı Nikel-Demir alaşım sisteminde ön çalışmalar ile paslanmaz çelik sisteminde çalışmalar yapılmış ve mikrodalga sinterleme yönteminin oluşan fazlar ve yoğunlaşım ile mikroyapısal ve manyetik özelliklere etkisi konvansiyonel ısıtmaya kıyasla incelenmiştir.
Anahtar Kelimeler: Mikrodalga sinterleme, nikel-demir alaşımı, nano yapılı metalik alaşım, manyetik özellikler.
Projeden Yapılan Yayınlar: Erdem D. and Dericioglu A. F., “Manyetik Nikel Demir Alaşımlarının Mikrodalga Sinterleme Yöntemiyle Üretilmesi,” Proceedings of the 15th International Metallurgy & Materials Congress (IMMC 2010), Istanbul, Turkey, pp. 708-716 (2010).