

**Farklı Sıcaklıklarda Yapılan Isıl İşlemlerin Titanyum-Nikel Filmlerin Kristal Yapısına Etkisinin  
Araştırılması**

Hikmet ÇİÇEK<sup>1\*</sup>, Ozan Can AKAR<sup>1</sup>, İhsan EFEÖĞLU<sup>2</sup>

**ÖZET:** Titanyum-nikel filmler sahip oldukları şekil hafıza özelliği ve süper elastiklik özellikleri sayesinde son yıllarda giderek artan bir ilgiye ve artan bir potansiyel kullanım alanına sahiptir. Magnetron sıçratma yöntemiyle büyütülen titanyum-nikel filmler amorf iç yapıya sahiptir. Şekil hafıza ve süper elastik özelliklerinin kazandırılması için bu filmlere ısıl işlem yapılmakta ve iç yapı kristal faza dönüştürülmektedir. Bu çalışmada magnetron sıçratma yöntemi ile büyütülen titanyum-nikel filmler altı farklı sıcaklık değerinde atmosfer kontrollü tüp fırın içerisinde ısıl işleme tabi tutulmuştur. Filmlerin faz değişimleri XRD analizleri ile, iç yapıları SEM görüntüleri ile, faz dönüşüm sıcaklıkları DSC analizleri ile belirlenmiştir. Çalışma sonucu farklı ısıl işlem sıcaklıklarının iç yapıyı büyük oranda değiştirdiği belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre 550°C de yapılan ısıl işlemin oda sıcaklığındaki uygulamalar için daha uygun olduğu tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** titanyum-nikel film, şekil hafıza, faz dönüşümü, ısıl işlem

**Investigation of the Effect of Heat Treatments at Different Temperatures on the Crystal Structure of  
Titanium-Nickel Films**

**ABSTRACT:** Titanium-nickel films have an increasing interest and an increasing potential use in recent years thanks to their shape memory properties and super elasticity properties. Titanium-nickel films grown by magnetron sputtering method have amorphous internal structure. In order to give shape memory and super elastic properties, these films are heat treated and the internal structure is transformed into crystal phase. In this study, titanium-nickel films grown by magnetron sputtering method were subjected to heat treatment in an atmosphere controlled tube furnace at six different temperature values. Phase changes of the films were determined by XRD analysis, micro structures were observed by SEM images and phase transformation temperatures determined by DSC analysis. As a result of the study, it was determined that different heat treatment temperatures greatly changed the internal structure. According to the results, it was determined that the heat treatment at 550 ° C was suitable for TiNi applications at room temperature.

**Keywords:** titanium-nickel film, shape-memory, phase transformation, heat treatment.

<sup>1</sup> Hikmet ÇİÇEK (Orcid ID: 0000-0003-3038-4466), Ozan Can AKAR (Orcid ID: 0000-0001-7016-969X), Erzurum Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Erzurum, Türkiye

<sup>2</sup> İhsan EFEÖĞLU (Orcid ID: 0000-0002-9147-2104), Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Erzurum, Türkiye

\*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Hikmet ÇİÇEK, e-mail: hikmet.cicek@erzurum.edu.tr

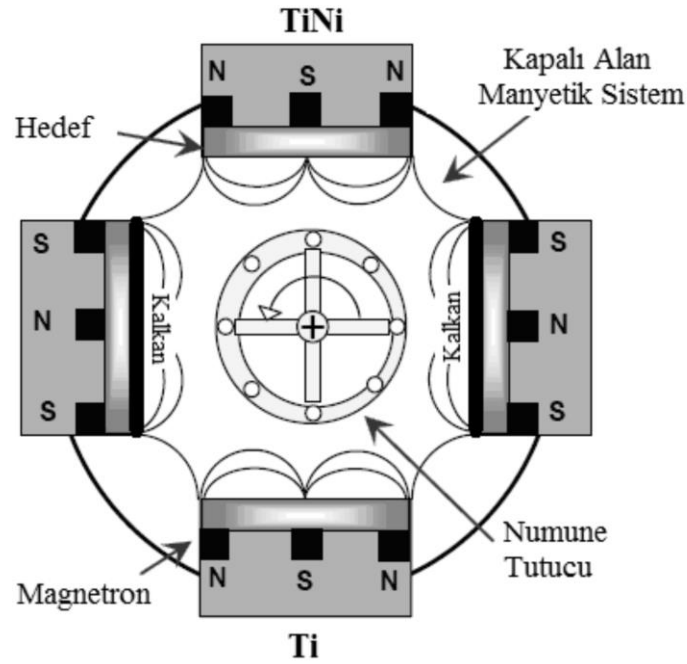
## GİRİŞ

Şekil hafızalı ince filmler şekli değiştirildikten sonra sıcaklık, yükleme veya manyetik alan gibi dış etkilere maruz kaldığında sahip oldukları ilk şekillerini hatırlayabilmekte ve ilk şekline geri dönebilmektedirler. Sahip oldukları bu eşsiz özellikten dolayı şekil hafızalı malzemeler son on yılda ilgi odağı olmuş, bu konuda yapılan çalışmaların sayısı giderek artmıştır. Şekil hafızalı alaşımlar ve filmler havacılık, biyomekanik, mikro sensörler ve dişçilik gibi birçok sektörde uygulama alanlarını giderek artırmaktadır (Kahn ve ark., 1998; Chen ve ark., 2001; Tang ve ark., 2014). Şekil hafıza, süper elastiklik, yüksek korozyon direnci, biyo-uyumluluk ve yüksek darbe direnci şekil hafızalı alaşımların genel özellikleri olarak bilinmektedir (Li, 2000; Fu ve ark., 2004). TiNi alaşımlar, özellikle ince film olarak, şekil hafızalı malzemeler arasında üstün özelliklere sahip olmasıyla öne çıkmaktadır. TiNi filmlerin faz dönüşümü sağlayarak şekil hafıza özelliği göstermesi için minimum 100 nm kalınlığa sahip olması gerekmektedir. Eğer film kalınlığı bu değerden daha düşük olursa, yapıda kalıntı gerilmeler oluşmakta, yüzeyde oksidasyon oluşabilmekte ve geri dönüşüm kuvveti azalmaktadır. TiNi alaşımının söz konusu özelliklerinin en iyi şekilde elde etmek için film kalınlığının 1 µm ve daha üzeri değerlerde olması büyük avantaj sağlamaktadır. TiNi alaşımların ve filmlerin bu eşsiz özellikleri sağlamaları için kristal yapıda olmaları gerekir. Bu kristal yapı oda sıcaklığında martenzit faz (B19 fazı) ve yüksek sıcaklıkta ise östenit faz (B2 fazı, ana faz) olarak birbirlerine dönüşmektedir (Surbled ve ark., 2001; Chen ve ark., 2001; Kim ve ark., 2013). TiNi filmler başta fiziksel buhar kaplama yöntemi (PVD) olmak üzere kimyasal buhar kaplama (CVD) ve plazma sprey gibi yöntemlerle üretilebilmektedir. Bu yöntemlerle üretilen TiNi filmler genelde amorf yapıya sahiptir ve söz konusu özellikler elde edilememektedir. Bu özelliklerin elde edilmesi için TiNi filmlere ısıl işlem uygulanarak iç yapı kristal yapıya dönüştürülmektedir (Surbled ve ark., 2001; Zhang ve ark., 2007; Miyazaki ve ark., 2009). Isıl işlem mutlaka atmosfer kontrollü bir fırında yapılmalı ve oksit oluşumundan önemli derecede sakınılmalıdır. Yüzde bir değerinde bir oksit varlığı bile filmin faz dönüşüm sıcaklıklarını değiştirmektedir. Isıl işlem sıcaklığı ve süresi TiNi filmlerin kristal yapısını önemli derece etkilemekte, bu da filmin özelliklerini değiştirmektedir. Literatür verileri değerlendirildiğinde, ısıl işlem sıcaklarının genelde 350 °C - 750 °C sıcaklıklar arasında 30 - 180 dakika sürelerde yapıldığı görülmektedir (Surbled ve ark., 2001; Fu ve Du., 2003; Zhang ve ark., 2007; Kim ve ark., 2013). Ayrıca literatürde, çok uzun sürelerde (100 saat) yapılan ısıl işlemin TiNi'in dönüşüm sıcaklığını yükselttiği ve histerezisi genişlettiği tespit edilmiştir (Dilibal, 2016)

Bu çalışmada, TiNi filmler fiziksel buhar kaplama yöntemlerinden olan kapalı alan dengesiz manyetik alanda sıçratma yöntemi ile Si taban malzemeler üzerine büyütülmüştür. Büyütülen filmler farklı sıcaklıklarda atmosfer kontrollü tüp fırın içerisinde ısıl işleme tabi tutulmuştur. Isıl işlem sıcaklığının TiNi filmlerin kristal yapısına ve faz dönüşüm sıcaklıklarına olan etkisi araştırılmıştır.

## MATERYAL VE METOT

TiNi filmler Si taban malzemeler üzerine kapalı alan DC magnetron sıçratma yöntemiyle büyütülmüştür. Bir adet eş atomlu TiNi hedef ve bir adet saf Ti hedef kullanılarak Ti ve Ni atom oranları birbirine yakın kaplamalar elde edilmiştir. %99,99 saflıkta argon gazı kullanılarak plazma ve sıçratma prosesleri gerçekleştirilmiştir. Magnetron sıçratma sisteminin ve hedef malzemelerin şematik gösterimi Şekil 1'de verilmiştir.

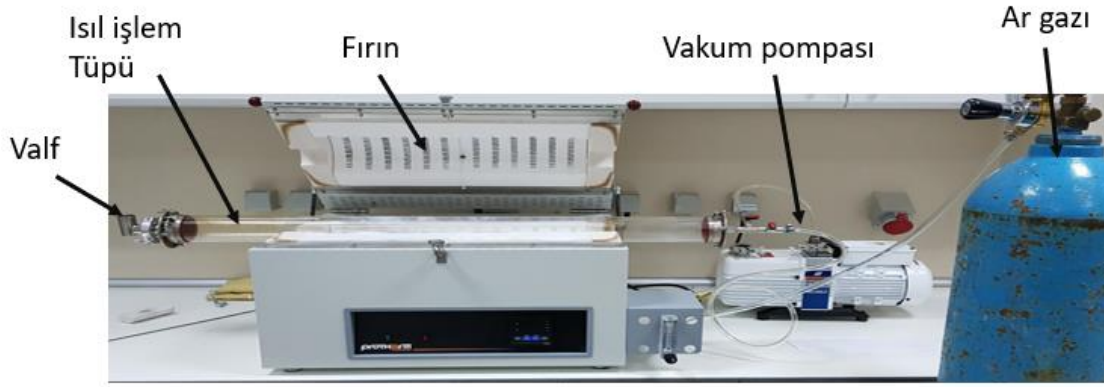


**Şekil 1.** Kaplamaların üretildiği magnetron sıçratma sisteminin şematik gösterimi

Si taban malzemeler vakum odası içerisinde 2 rpm hızla döndürülerek daha homojen bir iç yapıya sahip TiNi kaplamalar elde edilmiştir. Kaplama prosesine başlamadan önce Si taban malzemeler argon iyonlarıyla bombardımanına tabi tutularak 15dk. süreyle iyon temizleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Böylelikle taban malzemelerin yüzeyleri atomik seviyede temizlenmiş, kaplamanın daha iyi tutunması sağlanmıştır. Hedef ile taban malzeme arasındaki mesafe 90 mm olarak belirlenmiştir. TiNi hedefe 5A, Ti hedefe 1A akım uygulanarak TiNi kaplamalar üretilmiştir. Argon gaz akışı 20 sccm, taban malzemeye uygulanan bias voltajı 200 volt olarak ayarlanmıştır. Kaplama süresi toplamda 60 dk. olarak belirlenmiştir.

Üretilen TiNi kaplamalar amorf yapıdadır ve ısıl işleme tabi tutulmuştur. Büyütülen TiNi filmlerin ısıl işlem sıcaklıklarının kristal yapıya etkilerini belirlemek için altı farklı sıcaklıkta ve 60 dk. süreyle atmosfer kontrollü tüp fırın içinde ısıl işlemler yapılmıştır. Şekil 2’de ısıl işlem için kullanılan tüp fırın gösterilmiştir. Tüp önce vakum pompasıyla vakumlanarak içerisindeki atmosfer gazları boşaltılmış ve hemen ardından içeriye yüksek saflıkta argon gazı verilerek tüp içerisinde pozitif basınç oluşturulmuştur. Bu önlemler ısıl işlem sırasında kaplama yüzeyine oksijen ulaşımını engellemek için yapılmıştır. Uygulanan ısıl işlem sıcaklıkları ise Çizelge 1’de verilmektedir. Bu uygulamanın hemen öncesinde TiNi filmleri çözelti fazına almak için 1000°C de 150 dk. argon gazı atmosferinde ısıl işlem uygulanmıştır.

TiNi filmlerinin X-ışını kırınım analizleri, bir  $\text{CuK}\alpha$  ( $\lambda: 1.5405 \text{ \AA}$ ) radyasyon kaynağı ile GNR-Explorer X-Işını kırınım ölçer ile gerçekleştirildi. Ölçüm değerleri  $2\theta: 20\text{-}100^\circ$  tarama aralığında ve  $2^\circ / \text{dk.}$  tarama hızında elde edildi. XRD sonuçları JCPDS kartları ile karşılaştırılarak değerlendirildi. Kaplamaların kimyasal bileşimini elde etmek için EDS analizi yapılmıştır. TiNi filmlerinin yapısı ve kalınlığı Quanta FEG 250 tarama elektron mikroskobu ile analiz edildi. Diferansiyel tarama kalorimetre (DSC) testleri martensitten ostenite ve ostenitten martensite faz dönüşüm sıcaklıklarını belirlemek için yapılmıştır. Sıcaklık aralıkları, ısıtma işlemi için  $-50^\circ \text{C}$  ila  $500^\circ \text{C}$  ve soğutma işlemi için  $500^\circ \text{C}$  ila  $-50^\circ \text{C}$  arasında,  $5^\circ \text{C} / \text{dk.}$  ısıtma-soğutma hızlarında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2. Atmosfer kontrollü tüp ısıl işlem fırını

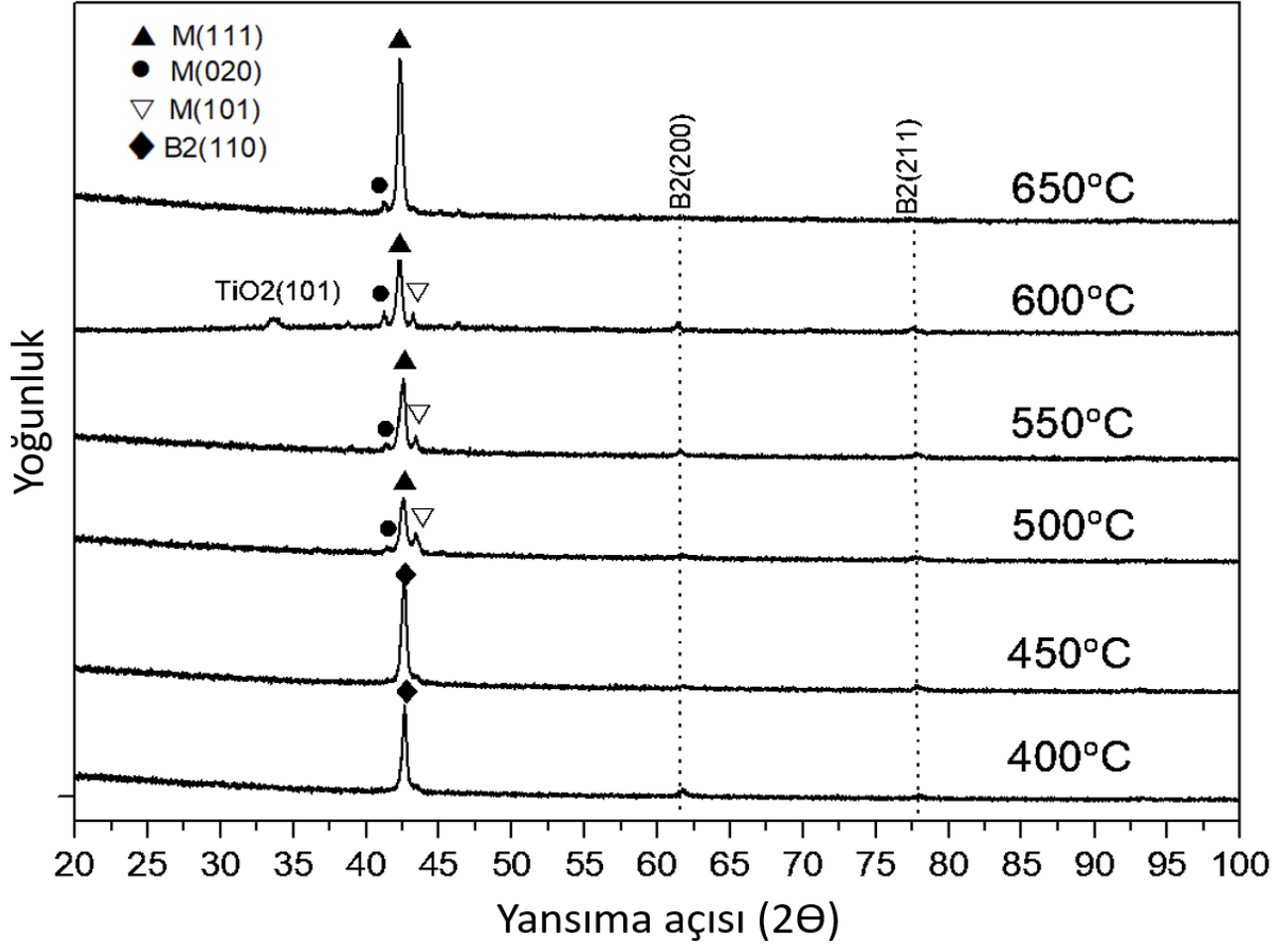
Çizelge 1. Isıl işlem deney parametreleri

Deney no	Isıl işlem sıcaklığı (°C)	Tutma Süresi (dk.)	Soğutma
1	400	60	Fırın içinde
2	450	60	Fırın içinde
3	500	60	Fırın içinde
4	550	60	Fırın içinde
5	600	60	Fırın içinde
6	650	60	Fırın içinde

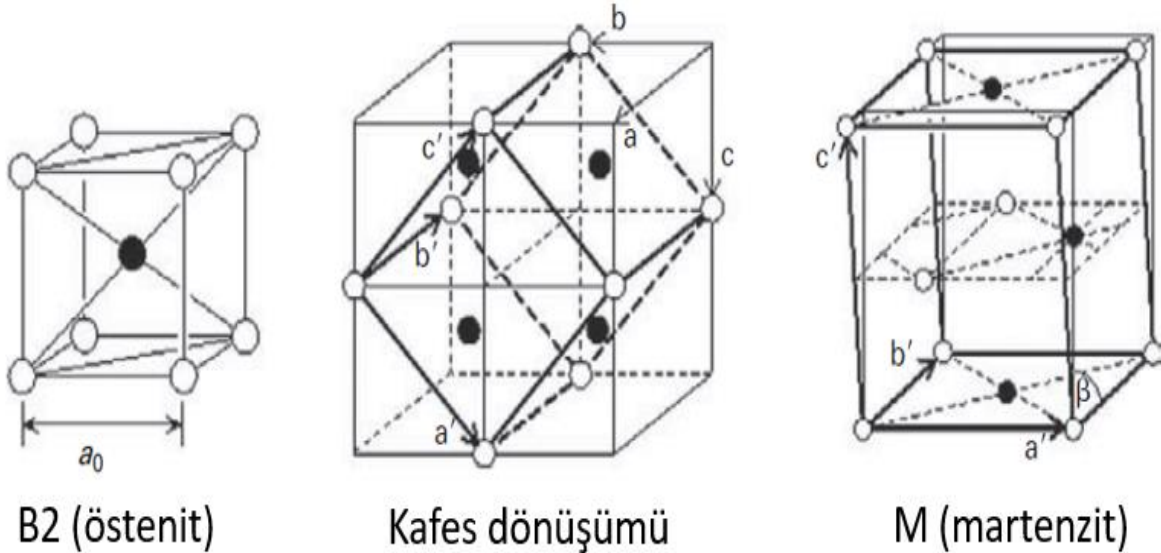
## BULGULAR VE TARTIŞMA

Altı farklı ısıl işlem uygulanan TiNi filmlerin XRD kırınım grafikleri Şekil 3'te verilmiştir. XRD pikleri incelendiğinde, B2 (110) östenit fazının 400 ° C ve 450 ° C de yapılan ısıl işlemlerden elde edildiği tespit edilmiştir. Bu iki TiNi filmler oda sıcaklığında tamamen östenit fazdadırlar. Isıl işlem sıcaklığı arttığında, kristal yapının martenzit fazlara doğru yönlendiği açıkça görülmektedir. 500°C den 650°C ye kadar yapılan ısıl işlemlerde TiNi filmlerin martenzit fazlar içermeye başladığı tespit edilmiştir. Bu filmler oda sıcaklığında martenzit fazdadırlar ve oda sıcaklığından yüksek sıcaklıklara çıkıldığında östenit faza dönüşebileceklerdir ve TiNi filmlerin karakteristik özelliklerini sergileyebileceklerdir (Fu ve Du., 2003; Li ve ark., 2005). M (111) fazı ağırlıklı olarak bu yapılarda yer almıştır. Bunlara ek olarak, M (101) ve M (020) fazları da bu 500°C ile 650°C ısıl işlemlerinde tespit edilmiştir. Öte yandan, 600 ° C ısıl işleminde çok küçük TiO<sub>2</sub> (101), B2 (200) ve B2 (211) fazları gözlenebilir (Surbled ve ark., 2001; Cicek ve ark., 2015).

B2 (ostenit) fazından Martensit (M) fazına dönüşüm şematik olarak Şekil 4'te verilmiştir (Miyazaki ve ark., 2009). Yapı, östenit fazından martenzite döndüğünde XRD piklerinin sola kaymasına neden olan TiNi'nin kafes parametreleri artmaktadır. Bu durum XRD grafiklerinde de açıkça görülmektedir. Isıl işlem sıcaklığı arttıkça, martensit pikleri sola doğru kaymaya devam eder, bu da ısıl işlem sıcaklığı arttığında TiNi filmin yapısının bozulmasının daha yüksek olduğunu gösterir.

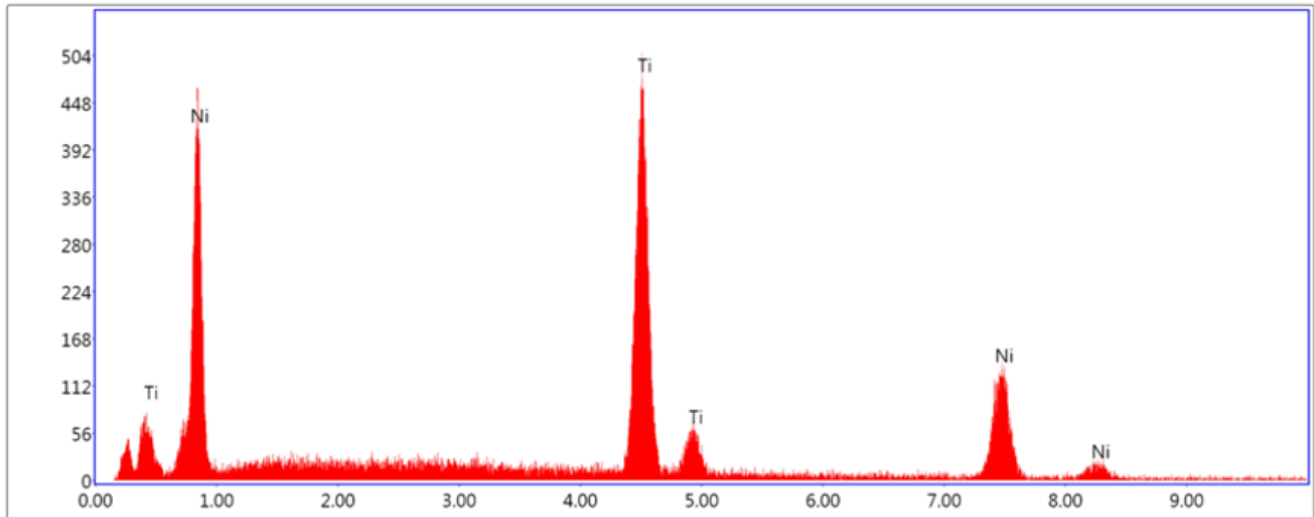


Şekil 3. Farklı sıcaklıklarda ısıl işleme tabi tutulan TiNi kaplamaların XRD grafikleri



Şekil 4. Östenit fazın (B2) martenzit faza (M) dönüşümünün şematik gösterimi

Magneton sıçratma yöntemi ile büyütülen TiNi kaplamanın yüzeyden alınan kimyasal kompozisyon analiz sonucu (EDS) Şekil 5'de verilmektedir. Analiz sonucuna göre kaplama içerisinde atomik olarak %50,59 Ti atomu ve %49,41 Ni atomu bulunmaktadır. Bu atomsal oranlar şekil hafıza için gerekli olan eş-atomlu yapıya çok uygundur (Cicek ve ark., 2015).



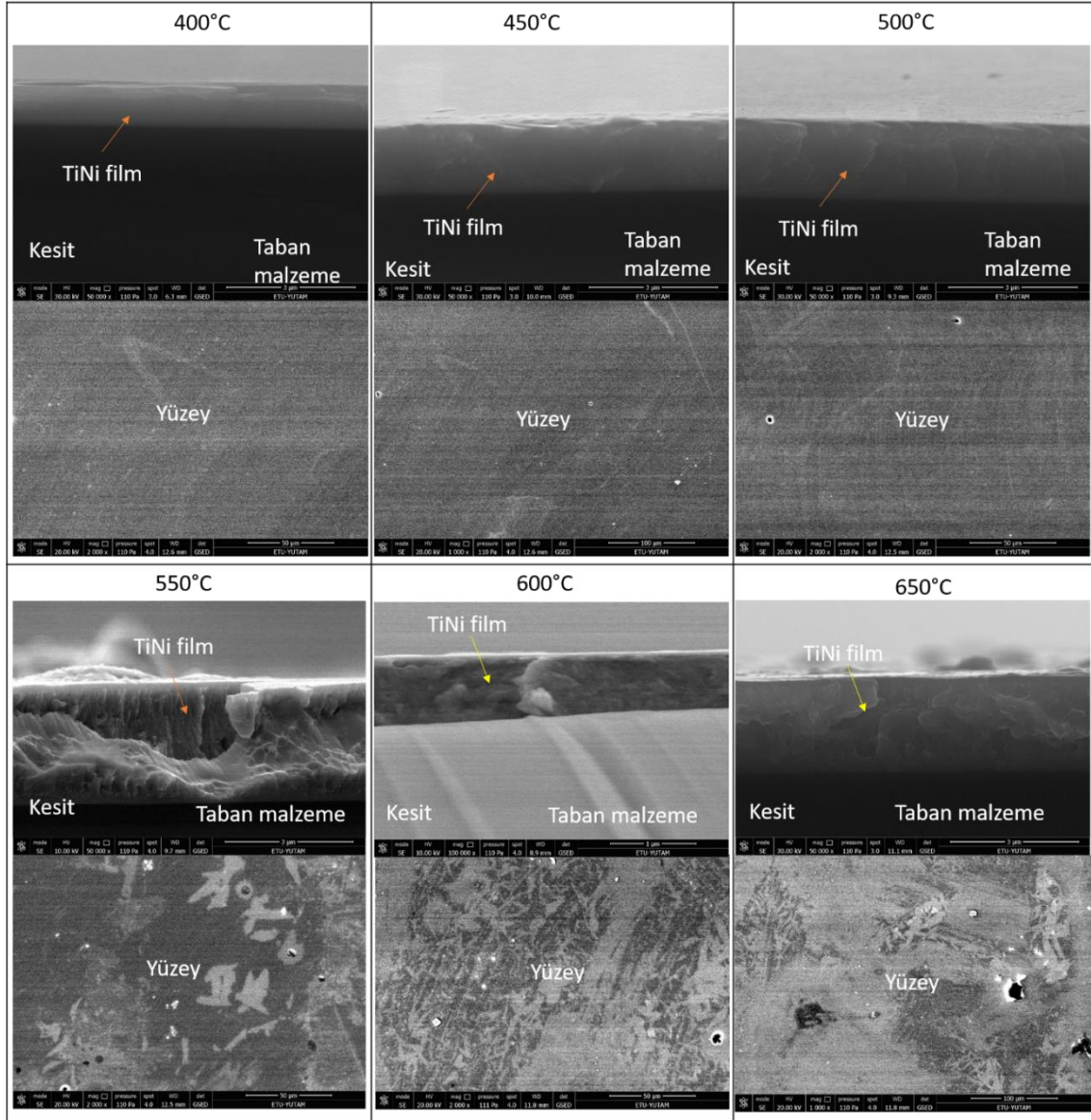
Element	Ağırlıkça %	Atomik %	Net Int.	Hata %
TiK	45.51	50.59	445.29	3.61
NiK	54.49	49.41	159.60	5.86

Şekil 5. TiNi kaplamanın kimyasal kompozisyon analizi

Isıl işleme tabi tutularak kristal yapıya dönüştürülen TiNi filmlerin kesit ve yüzey SEM görüntüleri Şekil 6'da verilmektedir. Kesit görüntülerinden faydalanarak filmin ortalama kalınlığının 1,85  $\mu\text{m}$  olduğu tespit edilmiştir. Sem görüntüleri incelendiğinde, 400°C ve 450°C derecede gerçekleştirilen ısıl işlemler sonucu elde edilen filmlerin kesitlerinde gevrek olmayan, sünek kırılmaya yakın bir kırılma kesiti görülmektedir. Bu filmlerin yüzeyleri incelendiğinde, XRD sonuçlarının da desteklediği üzere martenzit faz oluşumuna rastlanmamıştır. 500°C ısıl işlem sonucuna bakıldığında ise bir önceki filmlere göre biraz daha kırılman/gevrek bir ara yüzey görüntüsü sergilediği söylenebilir. Yüzey de ise yine çok belirgin olmayan martenzit fazlar görülebilmektedir. 550°C de yapılan ısıl işlem sonuçları incelendiğinde ise, kesit yüzeyinin artık tamamen gevrek bir kırılma gösterdiği ve yapının ise kolonlu bir görünüş sergilediği tespit edilmiştir.

Yüzey görüntülerinde ise martenzit faz oluşumları görülmektedir. Gevrek kırılmış bölgeler 600°C de ısıl işlem görmüş TiNi filmlerde de açıkça görülmektedir. Ayrıca TiNi filmlerin XRD sonucu incelendiğinde 600°C'deki yapıda martenzit ve östenit fazlara ilaveten  $\text{TiO}_2(101)$  fazı çok belirgin bir şekilde mevcuttur (Chu ve ark., 2000). Bu filmin SEM yüzey görüntüleri incelendiğinde martenzit fazlar görülmekte fakat 550°C ye göre daha küçük boyutlarda olduğu açıkça söylenebilir. En yüksek ısıl işlem sıcaklığı olan 650°C sonuçları incelendiğinde, filmin yarı-kolonel bir yapıya sahip olduğu ve yarı gevrek bir kırılma sergilediği görülmektedir. Yüzey görüntüsü incelendiğinde ise martenzit fazların görülebildiği fakat faz boyutlarının oldukça küçük olduğu, dentritik bir yapı sergilediği görülmüştür.

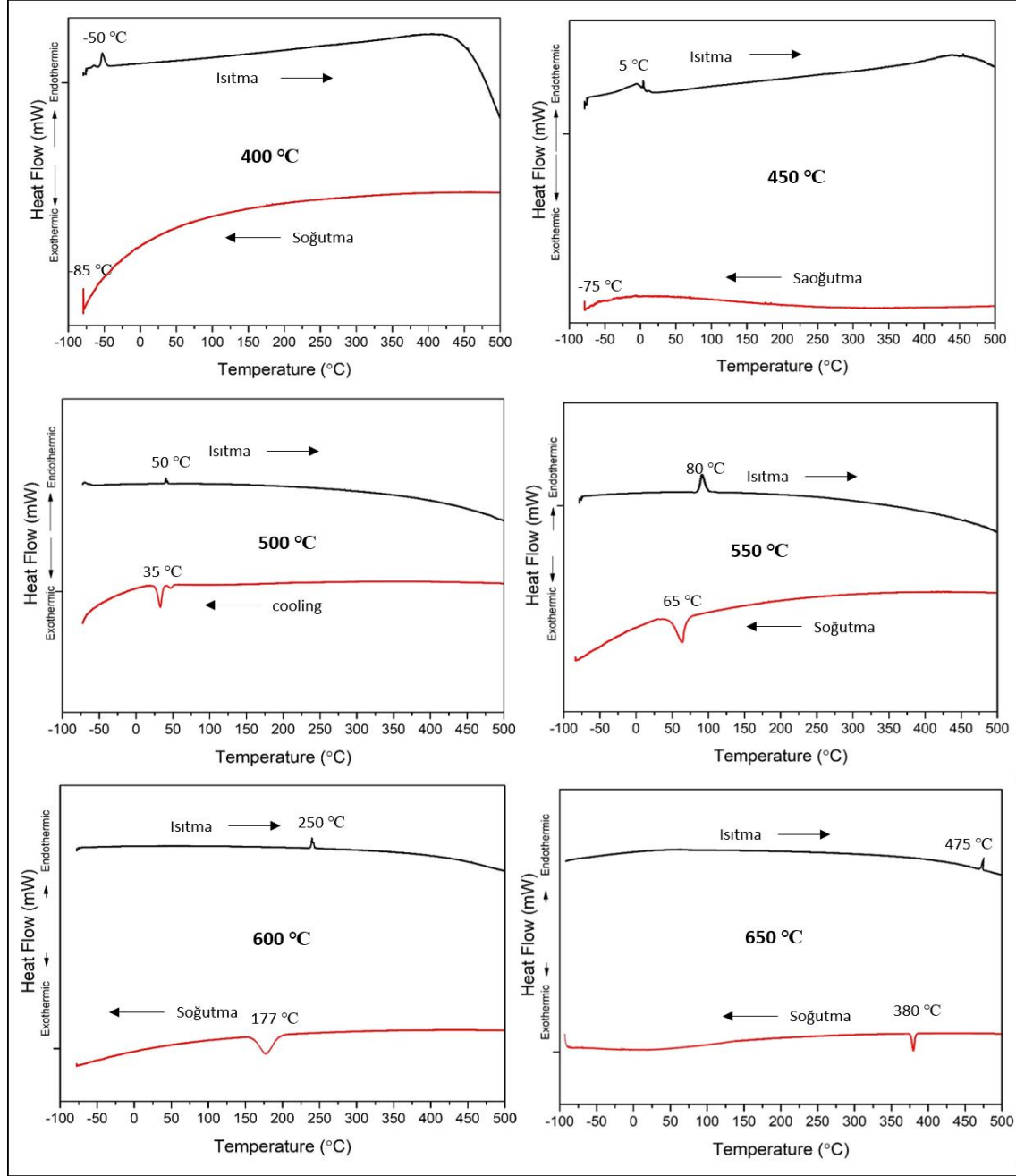
Magnetron sıçratma yöntemi ile büyütülen TiNi filmlerin sıcaklık değişimi ile faz dönüşümlerinin belirlenebilmesi için DSC (differential scanning calorimeter) analizleri yapılmıştır. Kristal yapılu TiNi filmlerde ısıtma durumunda martenzit fazdan östenit faza endotermik bir dönüşüm ile faz dönüşümü gerçekleşir. Soğutma durumunda ise östenit fazdan martenzit faza ekzotermik bir dönüşüm ile faz dönüşümü meydana gelmektedir.



**Şekil 6.** Isıl işleme tabi tutulan TiNi kaplamaların kesit ve yüzey SEM görüntüleri

Altı farklı sıcaklıkta yapılan ısıl işlemler sonucunda elde edilen TiNi filmlerin ısıtma ve soğutma durumlarında elde edilen DSC eğrileri Şekil 7’de verilmektedir. Faz dönüşümünün olduğu sıcaklık değerleri DSC eğrileri üzerinde belirtilmiştir. 400°C ve 450°C sıcaklıkta elde edilen DSC grafikleri değerlendirildiğinde, östenit faz dönüşüm sıcaklıklarının oda sıcaklığının altında sırasıyla -50°C ve 5°C olduğu görülmektedir. Bu filmlerin martenzit dönüşüm sıcaklıklarının ise sıfır derecenin altın -75°C ve -85°C olduğu görülmektedir. 500°C ve 550°C de yapılan ısıl işlemlerin DSC sonuçları incelendiğinde, östenit dönüşüm sıcaklıklarının oda sıcaklığının üzerinde, sırasıyla 50°C ve 80°C olduğu görülmektedir. Martenzit dönüşüm sıcaklıkları incelendiğinde de oda sıcaklığının üzerinde olduğu ve sırasıyla 35°C ve 65°C olarak meydana geldiği görülmektedir. Eğer oda sıcaklığında martenzit yapı isteniyorsa bu iki değer çalışma kapsamında istenen değerlere uygundur. Fakat 500°C ısıl işlem sonuçlarında martenzit dönüşüm sıcaklığı 550°C ye göre oda sıcaklığına daha yakındır dolayısıyla 500°C de ısıl işlem yapılan TiNi filmler oda sıcaklığında yüzde yüz martenzit faza dönüşümüne ihtimali vardır. Bu yüzden en ideal seçimin 550°C de ısıl işlem yapmak olduğu bu sonuçlardan da çıkarılmaktadır. Son olarak 600°C ve 650°C ısıl işlemlerin DSC grafikleri incelendiğinde, östenit faz dönüşümünün oldukça yüksek değerlerde,

sırasıyla 250°C ve 475°C olduğu görülmektedir. Martenzit faz dönüşüm sıcaklıkları ise yine oda sıcaklığının oldukça üzerinde, sırasıyla 177°C ve 380°C olduğu görülmektedir.



Şekil 1. Altı farklı sıcaklıkta ısıl işlem yapılan TiNi filmlerin DSC analiz grafikleri.

## SONUÇ

TiNi alaşımların ısıl işlemi, şekil hafızası özellikleri ve faz dönüşüm sıcaklıkları için çok kritik bir öneme sahiptir. Bu çalışmada TiNi filmler magnetron sıçratma yöntemi ile büyütülerek ısıl işlem sıcaklıklarının kristal yapıya ve faz dönüşüm sıcaklığına etkisi araştırılmış ve elde edilen sonuçlar kısaca aşağı verilmiştir.

- XRD analizlerine göre, 400 °C ve 450 °C yapılan ısıl işlemlerde kristal yapının tamamen östenit (B2) faza dönüştüğü tespit edilmiştir. Daha yüksek sıcaklıklarda ise yapının çoğunlukla martenzit fazlardan oluştuğu belirlenmiştir.



- Isıl işlem sıcaklığının artmasıyla martenzit faz piklerinin sola doğru kaydığı ve iç yapının daha da gerildiği XRD sonuçlarından çıkarılmaktadır.
- TiNi filmlerin SEM görüntüleri yapılan XRD analizleriyle örtüşmekte, düşük sıcaklıklarda yapılan ısıl işlemlerde filmlerde martenzit fazlar görülmemekte, yüksek sıcaklık işlemlerinde ise martenzit fazlar görüntülerde açıkça görülmektedir.
- DSC analizleri sonucu, düşük sıcaklıklarda yapılan ısıl işlemlerde filmler oda sıcaklığının altındaki değerlerde östenit ve martenzit dönüşüm sıcaklığına sahiptir. Diğer filmlerde ise bu dönüşüm sıcaklıkları oda sıcaklığının üzerindedir.
- Şekil hafıza ve süper elastiklik gibi TiNi filmlerin karakteristik özellikleri oda sıcaklığında uygulamalarda elde edilmek isteniyorsa, en ideal ısıl işlem sıcaklıklarının 500°C ve 550°C olduğu tespit edilmiştir.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışma, TÜBİTAK tarafından 117M149 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

## KAYNAKLAR

- Chen, Peter, and Jyh Ming Ting, 2001. Characteristics of TiNi Alloy Thin Films. *Thin Solid Film*, 398: 597–601.
- Chu, J P, Y W Lai, T N Lin, and S F Wang, 2000. Deposition and Characterization of TiNi-Base Thin Films by Sputtering. *Materials Science and Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 277: 11–17.
- Cicek, Hikmet, Ihsan Efeoglu, Yaşar Totik, Kadri Vefa Ezirmik, and Ersin Arslan, 2015. A Low Temperature In-Situ Crystalline TiNi Shape Memory Thin Film Deposited by Magnetron Sputtering. *Surface and Coatings Technology*, 284: 90–93.
- Dilibal, S, 2016. The effect of long-term heat treatment on the thermomechanical behavior of NiTi shape memory alloys in defense and aerospace applications. *Defense Science Journal*, 15(2), 1-23.
- Fu, Yongqing, and Hejun Du, 2003. Effects of Film Composition and Annealing on Residual Stress Evolution for Shape Memory TiNi Film. *Materials Science and Engineering A*, 342: 236-244.
- Fu, Yongqing, Hejun Du, Weimin Huang, Sam Zhang, and Min Hu, 2004. TiNi-Based Thin Films in MEMS Applications: A Review. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 112: 395-408.
- Kahn, H., M. A. Huff, and A. H. Heuer, 1998. The TiNi Shape-Memory Alloy and Its Applications for MEMS. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 8:1-7.
- Kim, Seong Woong, Yeong Min Jeon, Chan Hee Park, Jeoung Han Kim, Dong Ho Kim, and Jong Taek Yeom, 2013. Martensitic Phase Transformation of TiNi Thin Films Fabricated by Co-Sputtering Deposition. *Journal of Alloys and Compounds*, 580: 5–9.
- Li, D.Y, 2000. Exploration of TiNi Shape Memory Alloy for Potential Application in a New Area : Tribological Engineering. *Smart Materials and Structures*, 9: 717–726.
- Li, Zhenhua, Xianhua Cheng, and Qianqian Shangguan, 2005. Effects of Heat Treatment and ECAE Process on Transformation Behaviors of TiNi Shape Memory Alloy. *Materials Letters*, 59:705-709.
- Miyazaki, Shuichi, Yong Qing Fu, and Wei Min Huang, 2009. *Thin Film Shape Memory Alloys: Fundamentals and Device Applications*. Cambridge.
- Surbled, Patrick, Catherine Clerc, Bruno Le Pioufle, Manabu Ataka, and Hiroyuki Fujita, 2001. Effect of the Composition and Thermal Annealing on the Transformation Temperatures of Sputtered TiNi Shape Memory Alloy Thin Films. *Thin Solid Films*, 401: 52–59.
- Tang, Guanghai, Dongya Zhang, Junfeng Zhang, Ping Lin, and Guangneng Dong, 2014. Self-Recovery of Worn Surface of TiNi Shape Memory Alloy. *Applied Surface Science*, 321: 371-377.
- Zhang, L, C Y Xie, and J S Wu, 2007. Effect of Annealing Temperature on Surface Morphology and Mechanical Properties of Sputter-Deposited Ti-Ni Thin Films. *Journal of Alloys and Compounds*, 427: 238–43.