



## Mo Eklenmiş NiMnSbB Alaşımlarında Manyetik Alan Kaynaklı Martensitik Dönüşüm Özelliklerinin Belirlenmesi

Murat AYYILDIZ<sup>1</sup>, Gökhan KIRAT<sup>2</sup>, Mehmet Ali AKSAN<sup>3</sup>

(Alınış / Received: 19.12.2022, Kabul / Accepted: 27.12.2022, Online Yayınlanma / Published Online: 31.12.2022)

### Anahtar Kelimeler

Martensitik dönüşüm,  
Manyetik alan kaynaklı  
martensitik faz dönüşümü,  
Manyetik şekil hatırlama.

**Öz:** Bu çalışmada,  $Ni_{50-x}Mo_xMn_{37}Sb_{13}+B_2$  ( $x=0, 1, 3, 5$  ve  $7$ ) ferromanyetik şekil hafızalı Heusler alaşımlarının yapısal ve manyetik özellikleri incelenmiştir. Oda sıcaklığında XRD analizi, M0 ve M1 numunelerinde 40 ve 10M fazlarının bir arada bulunduğunu, M3, M5 ve M7 numunelerinin ise kübik  $L2_1$  kristal yapılarına sahip olduğunu göstermiştir. Sıcaklığa bağlı manyetizasyon analizleri (M-T) sonucunda, üretilen bütün numunelerin martensitik dönüşüm sergiledikleri belirlenmiştir. Faz geçiş sıcaklıkları artan Mo oranı ile azalmıştır. Ayrıca Mo oranının artırılması hem martensit hemde ösenit fazın manyetizasyonunda dikkate değer bir artışa yol açmıştır.  $A_s-A_f$  aralığında belirlenen sabit sıcaklıklarda numunelerin manyetik alan kaynaklı martensitik dönüşüm sergiledikleri açığa çıkarılmıştır.

## Determination of Magnetic Field Induced Martensitic Transformation Properties in Mo Added NiMnSbB Alloys

### Keywords

Martensitic transformation,  
Magnetic field induced  
martensitic phase  
transformation,  
Magnetic shape memory

**Abstract:** In this study, the structural and magnetic properties of  $Ni_{50-x}Mo_xMn_{37}Sb_{13}+B_2$  ( $x=0, 1, 3, 5$  ve  $7$ ) ferromagnetic shape memory Heusler alloys were investigated. Room temperature XRD analysis showed that 40 and 10M phases coexist in M0 and M1 samples, while M3, M5 and M7 samples have cubic  $L2_1$  crystal structures. As a result of temperature dependent magnetization analysis (M-T), it was determined that all samples produced exhibited martensitic transformation. Phase transition temperatures decreased with increasing Mo content. In addition, increasing the Mo content led to a significant increase in the magnetization of both the martensite and the austenite phase. It is revealed that the samples exhibit magnetic field-induced martensitic transformation at constant temperatures determined in the  $A_s-A_f$  range.

<sup>1</sup> İnönü Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, Malatya, Türkiye

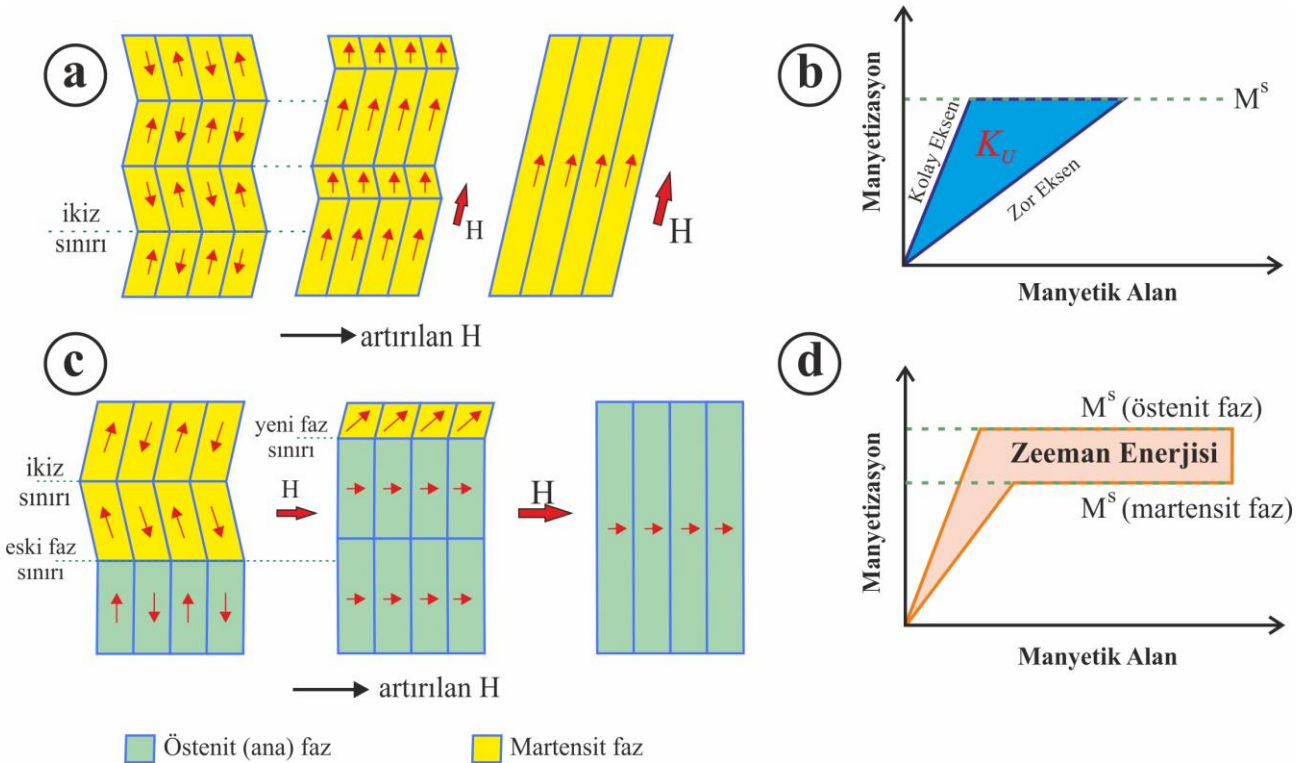
<sup>2</sup> İnönü Üniversitesi, Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Merkezi, Malatya, Türkiye

<sup>3</sup> İnönü Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, Malatya, Türkiye

## 1. Giriş

Martensitik dönüşüm (MT), katı formda herhangi bir difüzyon olmaksızın gerçekleşen birinci dereceden yapısal bir faz dönüşümüdür. MT sırasında, östenit olarak adlandırılan yüksek sıcaklık fazı, martensit olarak adlandırılan düşük sıcaklık fazına dönüşür [1]. Şekil hatırlama etkisi (SME) ise, martensitik dönüşüm sergileyen bazı alaşım gruplarının sahip olduğu önemli bir özelliktir. Şekil hafızalı alaşımların (SMA) önemli karakteristik özelliklerinden biri, martensit fazında gerilme ile deforme edildikten sonra östenit fazına dönüştüklerinde orijinal şekillerini geri kazanmalarıdır [2]. Buna ek olarak, SMA' lar mükemmel korozyon direnci ve süper elastikiyet gibi birçok kullanışlı mekanik özelliklere sahiptirler [3]. Bu nedenle, SMA' lar son yıllarda birçok bilimsel çalışmaya konu olmuş ve stentler, gözlük çerçeveleri, hassas termal sensörler, mikroaktüatörler, elektronik cihazlar, manyetik alan sensörleri, valfler ve tıbbi cihazlar gibi endüstriyel uygulamalarda da yoğun olarak kullanılmaya başlanılmışlardır [4].

Geleneksel SMA'da şekil geri kazanımı genellikle ısı ile tetiklenirken, ferromanyetik şekil hafızalı alaşımlarda (FSMA) ise şekil geri kazanımı ısının yanı sıra manyetik alan ile de kontrol edilebilir [4]. Piezoelektrik ve manyetostriktif malzemeler gibi geleneksel aktüatör malzemelerine kıyasla uygulanan manyetik alana bağlı olarak daha yüksek gerinim elde edilmesi FSMA'ya olan ilgiyi artırmaktadır. Örneğin manyetostriktif Terphenol-D malzemesinde yaklaşık 60 MPa stres ve 0,3 T manyetik alan altında <math><0,2\%</math>'lik bir gerinim elde edilebilirken, FSMA'da %10'a kadar manyetik alan kaynaklı gerinim elde edilebilmektedir [5]. FSMA'da harici bir manyetik alan uygulanması sonucunda manyetik alan kaynaklı iki farklı gerinim (MFIS) mekanizması meydana gelebilir. Bunlardan ilki manyetik alan kaynaklı martensitik ikiz varyant yeniden yönlendirme, ikincisi ise manyetik alan kaynaklı yapısal faz dönüşümüdür. İlk mekanizma olan manyetik alan kaynaklı yeniden yönlendirme (MIR), harici manyetik alan tarafından tetiklenen ikiz sınır hareketinin bir sonucu olarak kristal yapıda bir değişiklik olmaksızın mikroyapının yeniden düzenlenmesidir (Şekil 1.a.). Bir martensit varyantının manyetokristal anizotropi enerjisi (MAE) ikiz sınır hareketi için gereken enerjiden daha büyükse, MAE MIR için itici bir kuvvet görevi görür. MAE, ferromanyetik tek martensit varyantının kolay ve zor eksenleri boyunca mıknatıslanmaları arasındaki farktan belirlenir (Şekil 1.b.). MFIS'i indüklemek için bir başka olası mekanizma ise manyetik alan kaynaklı yapısal faz dönüşümüdür (MFIPT). Bu mekanizmada, her iki fazın (östenit ve martensit) bir arada bulunduğu belirli bir sıcaklıkta dış manyetik alanın artırılmasıyla kristal yapı martensitten östenite dönüşür (Şekil 1.c.) [6]. Mevcut fazların Zeeman enerjileri arasındaki fark MFIPT için itici kuvvet görevi görür ve bu fark faz sınırlarını hareket ettirmek için gereken enerjiden daha yüksek olmalıdır (Şekil 1.d.). Harici manyetik  $\mu_0 H$  ile ve dönüşüm fazları (martensit ve östenit) arasındaki manyetizasyon farkı  $\Delta M$  ile gösterildiğinde, Zeeman enerjisi  $E_{zeeman} = \mu_0 H \Delta M$  şeklinde ifade edilebilir [7].



**Şekil 1.** (a) Artan dış manyetik alanın MIR üzerindeki etkisi (b) MIR'den sorumlu MAE ( $K_u$ ) (c) Artan dış manyetik alanın MFIPT üzerindeki etkisi (d) MFIPT'den sorumlu östenit ve martensit fazları arasındaki Zeeman enerji farkı [5,6]

Mevcut çalışmada, Molibden katkısının  $Ni_{50-x}Mo_xMn_{37}Sb_{13}+B_2$  ( $x=0, 1, 3, 5$  ve  $7$ ) FSMA' rının yapısal, manyetik ve MFIPT özellikleri üzerindeki etkileri sistematik olarak incelenmiştir.

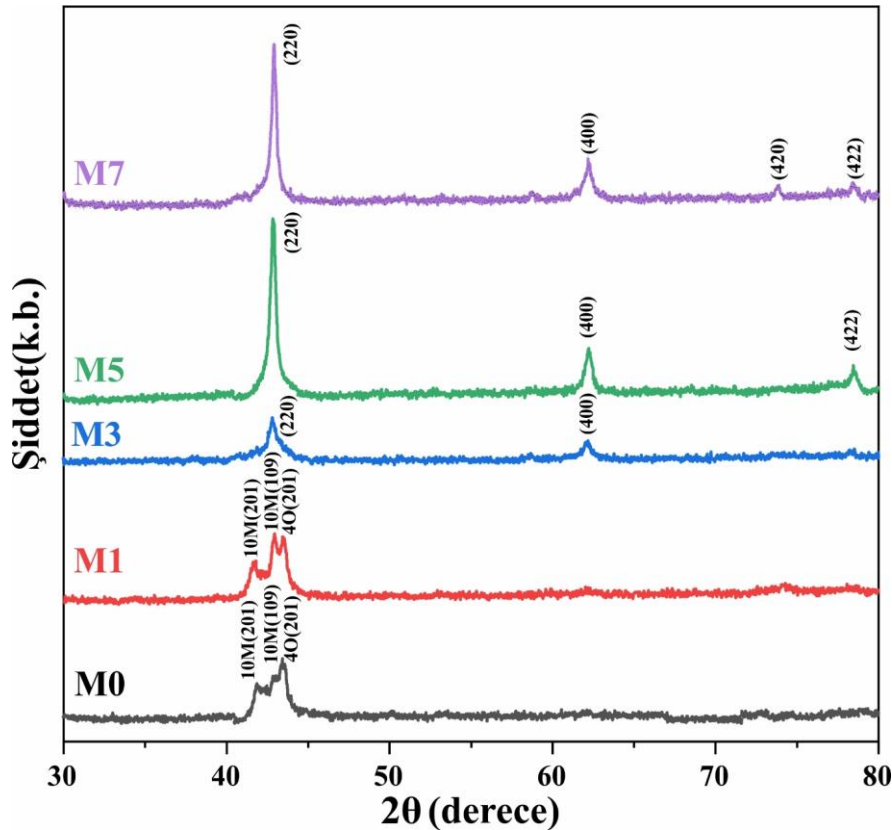
## 2. Meteryal ve Metot

$Ni_{50-x}Mo_xMn_{37}Sb_{13}+B_2$  ( $x=0, 1, 3, 5$  ve  $7$ ) ferromanyetik şekil hafızalı Heusler alaşımları, saf Ni, Mo, Mn, Sb ve B (saflikları %99,99'dan yüksek) tozları kullanılarak ark eritme fırını ile külçe formunda üretilmiştir. Eritme işlemi argon atmosferinde plazma oluşturularak ve numuneler üzerinden  $\sim 150$  A' lik bir akım geçirilerek gerçekleştirilmiştir. Homojen numuneler elde edebilmek için numuneler döndürülerek eritme işlemi birkaç kez tekrarlanmıştır. İstenilen kristal yapıyı elde edebilmek için, üretilen numuneler  $875$  °C'de 24 saat ısıl işleme tabi tutulmuş ve ardından buzlu suda soğutulmuştur. Isıl işlem sırasında numunelerin oksitlenmelerini önlemek için numuneler vakumlu kuvars tüpe yerleştirilmiştir. Örnekler sırasıyla M0 ( $x=0$ ), M1 ( $x=1$ ), M3 ( $x=3$ ), M5 ( $x=5$ ) ve M7 ( $x=7$ ) olarak etiketlenmiştir. Mn içeren Heusler alaşımlarının üretimi sırasında Mn buharlaşması hedeflenen stokiyometriye ulaşmayı zorlaştırmaktadır. Önceki deneyimlerimize dayanarak Mn buharlaşmasını engellemek için bütün numunelere %2 oranında Bor eklenmiştir [8,9].

Örneklerin oda sıcaklığındaki kristal yapıları "Rigaku Miniflex 600" bilgisayar kontrollü X-ışını difraktometresi ile  $CuK\alpha$  ( $\lambda=1.5405$  Å) radyasyonu kullanılarak belirlenmiştir. Manyetizasyon ölçümleri Quantum Dizayn PPMS cihazının titreşimli örnek magnetometresi (VSM) ataçmanıyla gerçekleştirilmiştir. Sıcaklığa bağlı manyetizasyon ölçümleriyle martensitik faz geçiş sıcaklıkları belirlenmiştir. Daha sonra her bir numunede manyetik alan kaynaklı faz dönüşümünü detaylı analiz etmek için As (östenit başlangıç) - Af (östenit bitiş) aralığında manyetik alana bağlı manyetizasyon analizleri yapılmıştır.

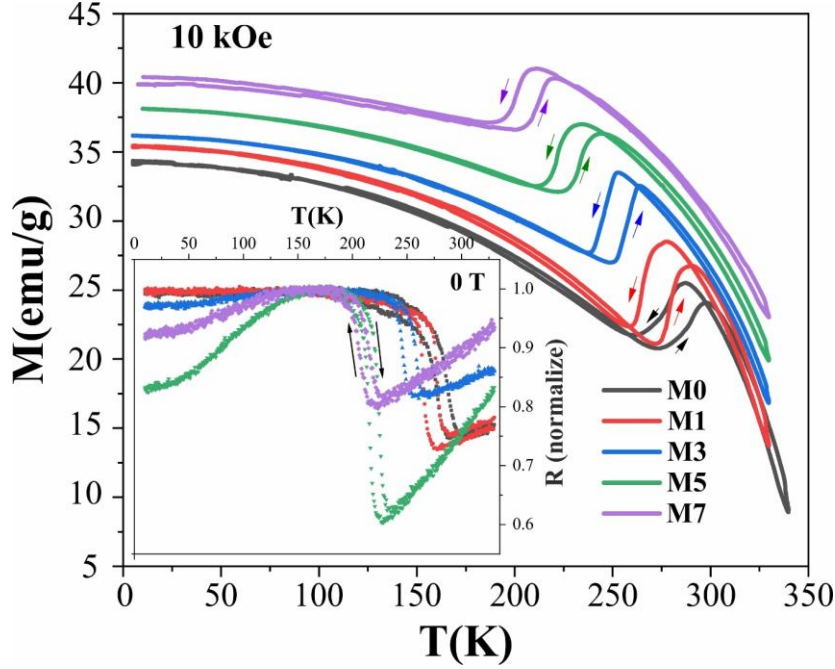
## 3. Bulgular

Yukarıda tartışıldığı gibi, MT sırasında östenit fazı martensit fazına dönüşür. Östenit fazı genellikle kübik  $L2_1$  kristal yapısına sahipken, martensit fazı bileşime ve sıcaklığa bağlı olarak monoklinik 10M ve 14M, ortorombik 4O veya modüle edilmiş tetragonal  $L1_0$  kristal yapılarına sahip olabilir [10–13].  $Ni_{50-x}Mo_xMn_{37}Sb_{13}+B_2$  ( $x=0, 1, 3, 5$  ve  $7$ ) örneklerinin XRD desenleri şekil 2'de verilmiştir. M0 ve M1 numunelerinde,  $2\theta \approx 40-45^\circ$  arasındaki pikler 4O fazının (201) piki ve 10M fazının (109) ve (201) pikleridir. M3 numunesinde martensit fazın varlığını gösteren 4O fazına ait (201) piki ve 10M fazına ait (109) ve (201) piklerinin kaybolduğu görülmüştür ve



Şekil 2. M0, M1, M3, M5 ve M7 numunelerinin XRD desenleri

bununla birlikte, Fm3m uzay grubuna sahip kübik L2<sub>1</sub> fazının (220) ve (400) pikleri oluşmuştur. Sistemdeki Mo içeriğinin daha da artmasıyla yapısal özelliklerin değiştiği gözlemlenmiştir. M5 örneğinde ise ortorombik ve monoklinik fazların pikleri elde edilememiş ve buna ek olarak L2<sub>1</sub> fazının (220), (400) ve (422) piklerinin varlığı tespit edilmiştir. En yüksek Mo oranına sahip M7 örneğinde ise M5 de elde edilen piklere ek olarak, yine kübik L2<sub>1</sub> fazına ait (420) piki gözlemlenmiştir. Elde edilen XRD analiz sonuçlarından, ölçümlerin gerçekleştirildiği oda sıcaklığında Mo içeriği düşük olan numunelerde martensit fazının varlığını gösteren 40 ve 10M fazları elde edilirken, yüksek Mo içeren numunelerde ise östenit fazın varlığına atfedilen L2<sub>1</sub> fazına ait pikler elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre düşük sıcaklık fazı olan martensit faza M0 ve M1 numunelerine oda sıcaklığında ulaşılmıştır. M3, M5 ve M7 numunelerinde ise martensit faza ulaşmak için daha düşük sıcaklıklara gitmek gerekmektedir. Böylece katkılama ile faz geçiş sıcaklıklarının azalması beklenebilir.



Şekil 3. M0, M1, M3, M5 ve M7 numunelerinin M-T eğrileri

Ferromanyetik şekil hatırlamalı alaşımlarda MT sırasında manyetizasyon değerindeki ani artış (ısıtma eğrisinde) veya azalma (soğutma eğrisinde) alaşım sisteminde meydana gelen faz dönüşümünü karakterize etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Ni<sub>50-x</sub>Mo<sub>x</sub>Mn<sub>37</sub>Sb<sub>13</sub>+B<sub>2</sub> (x=0, 1, 3, 5 ve 7) örneklerinin 10 kOe manyetik alan altında gerçekleştirilen sıcaklığa bağlı manyetizasyon ölçüm sonuçları şekil 3' de verilmiştir. Isıtma sürecinde manyetizasyon eğrilerinde elde edilen keskin artışlar ve soğutma sürecinde gözlemlenen azalmalar bütün numunelerin martensitik dönüşüm sergilediğini açıkça göstermektedir. Aşırı Mn içeren NiMnZ (Z=Sn, Sb ve In) Heusler alaşımlarında ekstra Mn atomları Z bölgelerini işgal ederler. Düzenli Mn bölgelerindeki Mn iyonları arasındaki manyetik etkileşim ferromanyetik iken kendi bölgelerinde bulunan Mn iyonları ile Z bölgesini işgal eden Mn iyonları arasındaki manyetik etkileşim antiferromanyettir. Daha düzenli östenit fazından martensit fazına dönüşüm sırasında, düzen parametresinin azalması ve yukarıda bahsedilen antiferromanyetik etkileşimlerin artması, dönüşüm sırasında (östenitten martensite) manyetizasyonda oluşan azalmanın temel nedenleridir. Isıtma ve soğutma eğrileri arasında elde edilen termal histeresiz martensit fazda oluşan ikiz sınırları arasındaki sürtünmelerden kaynaklanır [14]. Öyleki bu sürtünme faz dönüşümü için daha yüksek enerjiye ihtiyaç duyulmasına sebep olur ve sonuç olarak bir termal histeresiz bölgesi elde edilir. Ayrıca literatürde ise bu tip bir davranışın birinci dereceden faz geçişlerinin doğasında bulunduğu da değinilmiştir [15]. Ayrıca, M-T analizlerinden Mo miktarının artması ile faz geçiş sıcaklığının azaldığı ve manyetizasyonun büyüklüğünün arttığı belirlenmiştir. Heusler alaşımların martensitik dönüşüm sıcaklığının atom başına düşen valans elektronu (e/a) ile doğru orantılı olarak değiştiği rapor edilmiştir [16–20]. Ni (10) yerine daha az valans elektronuna sahip olan Mo (6) atomlarının yerleştirilmesi faz geçiş sıcaklıklarının azalmasına neden olacağı açıktır. Heusler alaşımlarının manyetizasyonu genellikle Mn atomlarından kaynaklanır. Ni atomlarının antiparalel olarak hizalanmaları toplam manyetizasyona katkılarının oldukça zayıf olmasına yol açar ve toplam manyetizasyon Mn atomlarının birbirleri ile ve diğer atomlarla olan manyetik etkileşimlerinden kaynaklanır. Bu nedenle sisteme ikame ettirilen çeşitli geçiş metalleriyle birim hücre parametreleri ve atomlar arasındaki mesafeyi modifiye ederek Heusler alaşımlarının manyetik özelliklerini geliştirmek mümkündür. Ni yerine yaptığımız Mo katkılaması birim hücrede küçülmeye neden olmuştur ve bunun sonucunda ise hem martensit fazın hem de östenit fazın manyetizasyonları artmıştır. Şekil 3' de iç şekilde numunelerin normalize edilmiş elektriksel direnç-sıcaklık eğrileri verilmiştir. Herhangi bir harici manyetik alan uygulanmadan elde edilen R-T

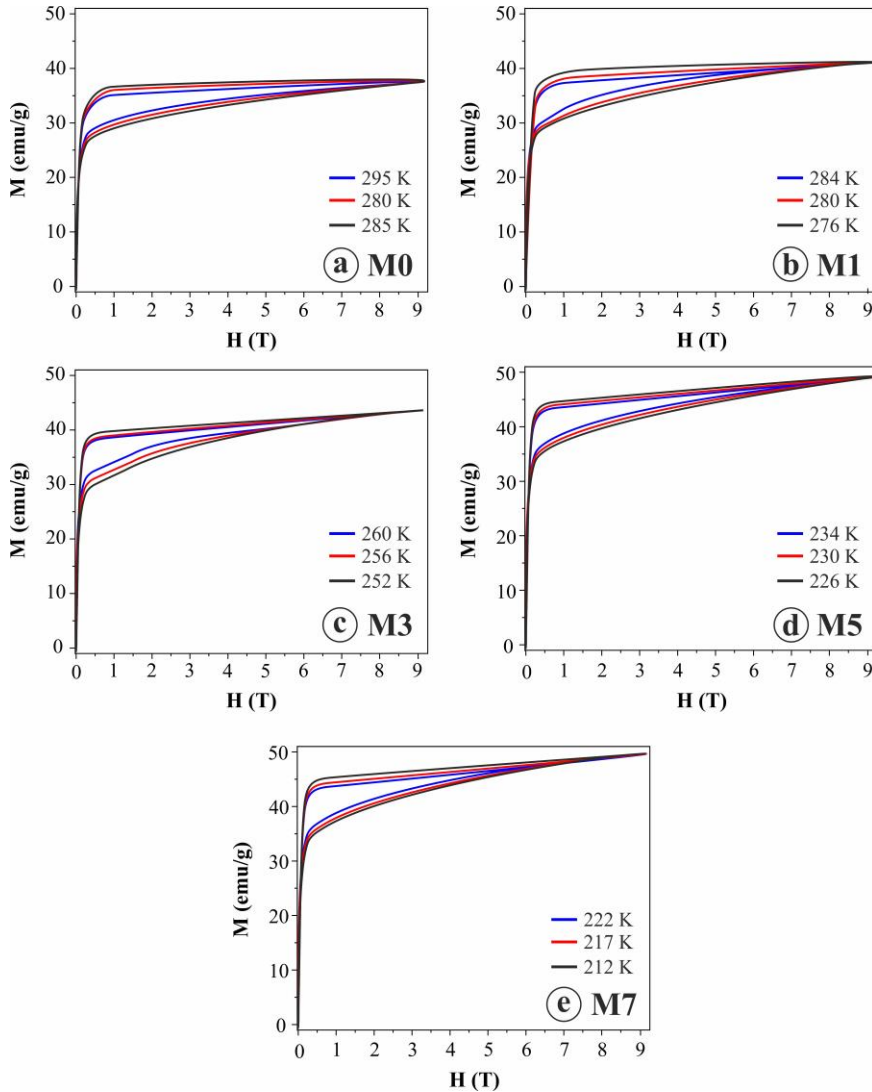
eğrilerinden belirlenen faz geçiş sıcaklıkları ile 10 kOe manyetik alan altında gerçekleştirilen M-T eğrilerinden tespit edilen faz geçiş sıcaklıkları kıyaslandığında, uygulanan harici manyetik alanın faz geçiş sıcaklıklarını azalttığı görülmektedir (tablo1). Harici manyetik alanın uygulanmasıyla faz geçiş sıcaklıklarında meydana gelen kayma Clausius-Clapeyron denklemi ile açıklanır [6,21,22];

$$\frac{dB}{dT} = \frac{\Delta S}{\Delta M} \text{ ve } \Delta T \approx \left(\frac{\Delta M}{\Delta S}\right)\Delta B \quad (1)$$

burada T sıcaklığı, B uygulanan manyetik alanı,  $\Delta M$  ve  $\Delta S$  ise sırasıyla östenit ve martensit fazları arasındaki manyetizasyon ve entropideki farkını göstermektedir.

**Tablo 1.** M0, M1, M3, M5 ve M7 numunelerinin martensitik faz geçiş sıcaklıkları ve e/a değerleri

Malzeme	Manyetik Alan	$M_s$ (K)	$M_f$ (K)	$A_s$ (K)	$A_f$ (K)	e/a
M0	0 T	286	268	277	299	8.24
	1 T	284	262	274	297	
M1	0 T	271	261	274	286	8.20
	1 T	269	260	270	282	
M3	0 T	253	240	251	263	8.12
	1 T	251	238	249	262	
M5	0 T	226	212	223	236	8.04
	1 T	224	210	221	234	
M7	0 T	215	197	206	224	7.96
	1 T	207	195	203	218	



**Şekil 4.** Her bir numune için  $A_s$ - $A_f$  aralığına denk gelen sıcaklıklarda M-H eğrileri (a)M0, (b)M1, (c)M3, (d)M5 ve (e)M7

Her bir numune için belirlenen ve  $A_s$ - $A_f$  aralığına denk gelen üç farklı sabit sıcaklıkta (bu sıcaklıklar her numuneye göre farklılık göstermektedir) numunelerin manyetik alana bağlı manyetizasyon ölçümleri yapılmıştır ve sonuçlar şekil 4' de verilmiştir. Her bir ölçümden önce numuneler tamamen martensit faza geçene kadar soğutulmuştur. Elde edilen sonuçlardan manyetizasyon ve demanyetizasyon eğrileri arasında bir fark olduğu görülmektedir. Yapılan çalışmalarda bu fark manyetik alan kaynaklı martensitik dönüşümün varlığına atfedilmiştir [23–26]. Önceki kısımda açıklandığı gibi manyetik alan kaynaklı martensitik dönüşümün oluşabilmesi için her iki fazın birlikte bulunması gerekmektedir. Martensit fazdan östenite geçişin olduğu  $A_s$ - $A_f$  aralığı yapısal faz geçişini elde edebilmek için elverişli bir sıcaklık aralığıdır. Bu aralıkta belirlenen sabit sıcaklıkta martensit ve östenit fazları birlikte bulunur ve harici manyetik alanın artırılmasıyla güçlü manyetizasyona sahip östenit fazın manyetizasyonu hızlı bir şekilde artarken daha zayıf manyetik etkileşimlere sahip olan martensit fazın manyetizasyonu nispeten daha yavaş artar. Ayrıca manyetik alanın artırılmasıyla her iki fazın Zeeman enerjileri arasındaki farktan dolayı martensit fazdan östenit faza yapısal dönüşüm başlar. Harici manyetik alan kritik bir seviyeye ulaşıncaya kadar materyal tamamen östenit faza dönüşür. Bundan sonra manyetizasyon azaltılsa bile numune daha yüksek doyum manyetizasyonuna sahip olan östenit fazda kalır. Bu fenomen manyetik alan kaynaklı martensitik faz dönüşümünün karakteristik bir davranışdır. Mevcut teorik ve literatür bilgileri ile uyum içerisinde olan elde edilen deneysel sonuçlar Mo katkılı NiMnSb+B alaşımlarının başarılı bir şekilde manyetik alan kaynaklı martensitik dönüşüm sergilediğini göstermektedir.

#### 4. Sonuç

Bu çalışmada, standart ark eritme yöntemiyle üretilen  $Ni_{50-x}Mo_xMn_{37}Sb_{13+B_2}$  ( $x=0, 1, 3, 5$  ve  $7$ ) örneklerinin yapısal ve manyetik özellikleri incelenmiştir. XRD desenleri oda sıcaklığında M0 ve M1 numunelerinde martensit fazın varlığına atfedilen 40 ve 10M fazlarının birlikte bulunduğunu göstermiştir. M3 M5 ve M7 numunelerinde ise östenit fazın var olduğunu gösteren  $L2_1$  kristal yapısına ait pikler elde edilmiştir. Sıcaklığa bağlı manyetizasyon ölçümleri bütün numunelerin martensitik dönüşüm sergilediğini açığa çıkarmıştır. Mo miktarının artırılmasıyla faz geçiş sıcaklıkları azalmıştır. Ayrıca Mo içeriğinin artırılması manyetizasyon değerinin artmasına yol açmıştır. Sıcaklığa bağlı olarak yapılan ölçümler yardımıyla  $A_s$ - $A_f$  aralığı belirlenmiş ve bu sıcaklık aralığında kalan bazı sabit sıcaklıklarda manyetik alana bağlı manyetizasyon ölçümleri yapılmıştır. Manyetizasyon ve demanyetizasyon eğrileri arasında oluşan fark numunelerin manyetik alan kaynaklı martensitik dönüşüm sergilediğini göstermektedir.

#### Teşekkür

Bu çalışma İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma projeleri birimi tarafından FDK-2022-2892 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

#### Yazar Katkı Oranları

Mevcut çalışmada Murat AYYILDIZ, numunelerin hazırlanması ve ölçümlerin gerçekleştirilmesi, Gökhan KIRAT modelin oluşturulması, literatür taraması, verilerin toparlanması ve işlenmesinde ve makalenin yazımında, Mehmet Ali AKSAN fikrin oluşturulması, elde edilen sonuçların değerlendirilmesine katkıda bulunmuştur.

#### Çıkar Çatışması

Yazarlar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar. Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur. Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

#### Kaynakça

- [1] Pérez-Landazábal, J. I., Recarte, V., Sánchez-Alarcos, V., Gómez-Polo, C., Kustov, S., & Cesari, E. (2011). Magnetic field induced martensitic transformation linked to the arrested austenite in a Ni-Mn-In-Co shape memory alloy. *Journal of Applied Physics*, 109(9).
- [2] Han, Z. D., Wang, D. H., Zhang, C. L., Xuan, H. C., Zhang, J. R., Gu, B. X., & Du, Y. W. (2008). The phase transitions, magnetocaloric effect, and magnetoresistance in Co doped Ni-Mn-Sb ferromagnetic shape memory alloys. *Journal of Applied Physics*, 104(5).
- [3] Desroches, R., & Smith, B. (2004). Shape memory alloys in seismic resistant design and retrofit: A critical review of their potential and limitations. *Journal of Earthquake Engineering*, 8(3), 415–429.

- [4] Kirat, G. (2021). Exchange Bias Effect in NiMnSbB Ferromagnetic Shape Memory Alloys Depending on Mn Content. *Adiyaman University Journal of Science*, 11, 444–455.
- [5] Karaca, H. E., Karaman, I., Basaran, B., Lagoudas, D. C., Chumlyakov, Y. I., & Maier, H. J. (2007). On the stress-assisted magnetic-field-induced phase transformation in Ni<sub>2</sub>MnGa ferromagnetic shape memory alloys. *Acta Materialia*, 55(13), 4253–4269
- [6] Karaca, H. E., Karaman, I., Basaran, B., Ren, Y., Chumlyakov, I., & Maier, H. J. (2009). *Magnetic Field-Induced Phase Transformation in NiMnCoIn Magnetic Shape-Memory Alloys — A New Actuation Mechanism with Large Work Output*. 983–998.
- [7] Zhang, H., Zhang, X., Qian, M., Yao, Z., Wei, L., & Geng, L. (2020). Increasing working temperature span in Ni-Mn-Sn-Co alloys via introducing pores. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 500(November 2019), 166359.
- [8] Kirat, G., Aksan, M. A., & Aydogdu, Y. (2019). Magnetic field induced martensitic transition in Fe doped Ni-Mn-Sn-B shape memory ribbons. *Intermetallics*, 111(October 2018), 106493.
- [9] Kirat, G., Kizilaslan, O., & Aksan, M. A. (2019). Journal of Magnetism and Magnetic Materials Magnetoresistance properties of magnetic Ni-Mn-Sn-B shape memory ribbons and magnetic field sensor aspects operating at room temperature. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 477(January), 366–371.
- [10] Zheng, H., Wang, W., Xue, S., Zhai, Q., & Frenzel, J. (2013). Composition-dependent crystal structure and martensitic transformation in Heusler Ni – Mn – Sn alloys. *Acta Materialia*, 61(12), 4648–4656.
- [11] Kirat, G., & Aksan, M. A. (2021). Influence of the Cu substitution on magnetic properties of Ni-Mn-Sn-B shape memory ribbons. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, 127(2), 1–9.
- [12] Pons, J., Chernenko, V. A., Santamarta, R., & Cesari, E. (2000). Crystal structure of martensitic phases in Ni-Mn-Ga shape memory alloys. *Acta Materialia*, 48(12), 3027–3038.
- [13] Deltell, A., Escoda, L., Saurina, J., & Suñol, J. J. (2015). *Martensitic Transformation in Ni-Mn-Sn-Co Heusler Alloys*. 695–705.
- [14] Wang, W.-H., Chen, J.-L., Liu, Z., Wu, G.-H., & Zhan, W.-S. (2001). Thermal hysteresis and friction of phase boundary motion in ferromagnetic Ni<sub>52</sub>Mn<sub>23</sub>Ga<sub>25</sub> single crystals, *Physical Review B*, 65(1), 012416.
- [15] Dos Reis, R. D., Caron, L., Singh, S., Felser, C., & Nicklas, M. (2021). Direct and indirect determination of the magnetocaloric effect in the heusler compound Ni<sub>1.7</sub>Pt<sub>0.3</sub>MnGa. *Entropy*, 23(10), 1–10.
- [16] Hernando, B., Llamazares, J. L. S., Santos, J. D., Sánchez, M. L., Escoda, L., Suñol, J. J., Varga, R., García, C., & González, J. (2009). Grain oriented NiMnSn and NiMnIn Heusler alloys ribbons produced by melt spinning: Martensitic transformation and magnetic properties. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 321(7), 763–768.
- [17] Xuan, H. C., Zheng, Y. X., Ma, S. C., Cao, Q. Q., Wang, D. H., & Du, Y. W. (2010). The martensitic transformation, magnetocaloric effect, and magnetoresistance in high-Mn content Mn<sub>47+x</sub>Ni<sub>43-x</sub>Sn<sub>10</sub> ferromagnetic shape memory alloys. *Journal of Applied Physics*, 108(10), 1–5.
- [18] Krenke, T., Acet, M., & Wassermann, E. F. (2005). *Martensitic transitions and the nature of ferromagnetism in the austenitic and martensitic states of Ni- Mn- Sn alloys*. 1–9.
- [19] Llamazares, J. L. S., Quintana-Nedelcos, A., Ríos-Jara, D., Sánchez-Valdes, C. F., García-Fernández, T., & García, C. (2016). The effect of low temperature thermal annealing on the magnetic properties of Heusler Ni-Mn-Sn melt-spun ribbons. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 401, 38–43.
- [20] Zayak, A. T., Adeagbo, W. A., Entel, P., & Rabe, K. M. (2010). *e a dependence of the lattice instability of cubic Heusler alloys from first principles e / a dependence of the lattice instability of cubic Heusler alloys*. 111903(2006), 5–8.
- [21] Zhang, B., Zhang, X. X., Yu, S. Y., Chen, J. L., Cao, Z. X., & Wu, G. H. (2007). Giant magnetothermal conductivity in the Ni-Mn-In ferromagnetic shape memory alloys. *Applied Physics Letters*, 91(1), 89–92.

- [22] Yu, S. Y., Cao, Z. X., Ma, L., Liu, G. D., Chen, J. L., Wu, G. H., Zhang, B., & Zhang, X. X. (2007). Realization of magnetic field-induced reversible martensitic transformation in NiCoMnGa alloys. *Applied Physics Letters*, 91(10).
- [23] Kainuma, R., Imano, Y., Ito, W., Sutou, Y., Morito, H., Okamoto, S., Kitakami, O., Oikawa, K., Fujita, A., Kanomata, T., & Ishida, K. (2006). Magnetic-field-induced shape recovery by reverse phase transformation. *Nature*, 439(7079), 957–960.
- [24] Liu, J., Scheerbaum, N., Hinz, D., & Gutfleisch, O. (2008). Magnetostructural transformation in Ni-Mn-In-Co ribbons. *Applied Physics Letters*, 92(16), 35–38.
- [25] Brown, P. J., Gandy, A. P., Ishida, K., Kainuma, R., Kanomata, T., Neumann, K. U., Oikawa, K., Ouladdiaf, B., & Ziebeck, K. R. A. (2006). The magnetic and structural properties of the magnetic shape memory compound  $\text{Ni}_2\text{Mn}_{1.44}\text{Sn}_{0.56}$ . *Journal of Physics Condensed Matter*, 18(7), 2249–2259.
- [26] Chen, Z., Cong, D., Li, S., Zhang, Y., Li, S., Cao, Y., Li, S., Song, C., Ren, Y., & Wang, Y. (2021). External-field-induced phase transformation and associated properties in a  $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{34}\text{Fe}_3\text{In}_{13}$  metamagnetic shape memory wire. *Metals*, 11(2), 1–14.