

Cu-Al-Zn Alaşımının Manyetik, Yapısal ve Termal Özellikleri Üzerine Mn ilavesinin Etkileri

Emine ALDIRMAZ^{1*}

Fizik Bölümü, Fen Edebiyat Fakültesi, Amasya Üniversitesi, Amasya, Türkiye

¹emine.aldirmaz@amasya.edu.tr

(Geliş/Received: 05/04/2022;

Kabul/Accepted: 07/08/2022)

Öz: Bu çalışmada, Cu-%11.42Al-%6.43Zn ve Cu-%11.31Al-%6.03Zn-%2.70Mn (% ağırlıkça) alaşımları üzerinde bazı fiziksel yöntemlerle araştırmalar yapılmıştır. Alaşımların yapısal, kristalografik, manyetik ve termal özellikleri incelenmiş ve Mn katkısının etkileri araştırılmıştır. X-ışını difraksiyon yöntemi kullanılarak alaşımların yapıları analiz edilmiştir. Elektron mikroskop incelemelerinden; Cu-Al-Zn alaşımında farklı morfolojilerde α -çökelti fazının oluştuğu gözlemlenmiştir. Fakat, Cu-Al-Zn-Mn alaşımında α -çökelti fazının gözlenmesinin yanında martensite fazına da rastlanılmıştır. Alaşımların manyetik özellikleri VSM ile belirlenmiştir. Her iki alaşımın da manyetizasyonunun manyetik alanla değişimi M-H oda sıcaklığında elde edilmiştir. Cu-Al-Zn alaşımında uygulanan dış magnetik alan ile mıknatıslanma azalırken, Cu-Al-Zn-Mn alaşımının ferromanyetik davranış sergilediği bulunmuştur. Alaşımların faz dönüşüm sıcaklıkları DSC yöntemi ile belirlenmiştir. DSC incelemelerinden Mn ilavesinin faz dönüşüm sıcaklıklarını düşürdüğü bulunmuştur.

Anahtar kelimeler: Cu-bazlı alaşımlar, Çökelti, Aktivasyon Enerjisi, Manyetizasyon, DSC.

Effects of Mn Addition on Magnetic, Structural and Thermal Properties of Cu-Al-Zn Alloy

Abstract: In this study, some physical studies were carried out on Cu-11.42Al-6.43%Zn and Cu-11.31%Al-6.03%Zn-2.70%Mn (wt. %) alloys. Structural, crystallographic, magnetic and thermal properties on alloys were investigated and the effects of Mn addition were discussed. The structure of the alloys were analyzed using the X-ray diffraction method. From electron microscope examinations; It was observed that α -precipitate phase with different morphologies was formed in Cu-Al-Zn alloy. However, in addition to the α -precipitation phase in Cu-Al-Zn-Mn alloy, martensite phase was also observed. The magnetic properties of the alloys were determined by VSM. The variation of magnetization with magnetic field M-H of both alloys was investigated at room temperature. It was found that Cu-Al-Zn alloy exhibited diamagnetic behavior, while Cu-Al-Zn-Mn alloy exhibited ferromagnetic behavior. The phase transformation temperatures of the alloys were determined by the DSC method. From the DSC investigations, it was found that the addition of Mn reduced the phase transformation temperatures.

Key words: Cu-based alloys, Precipitation, Activation Energy, Magnetization, DSC.

1. Giriş

Metal ve metal alaşımlarına duyulan ihtiyaçtan dolayı bu malzemeler üzerindeki çalışmalar geçmişten günümüze kadar devam etmektedir. Özellikle bakır bazlı alaşımlar maliyetlerinin düşük olması, yüksek elektrik ve termal iletkenlikleri sebebiyle oldukça ilgi çekicidir [1]. Son zamanlarda, bakır bazlı şekil hatırlamalı alaşımlar üzerinde çalışmalar yoğunlaştırılmıştır. Alaşımlarda, meydana gelen fazlar; yüksek sıcaklık fazı “austenite” faz ve düşük sıcaklıklarda meydana gelen “martensite” faz olarak isimlendirilir [2]. Özellikle sıcaklık, basınç, dış zor ve uygulanan manyetik alan etkisi ile metal/metal alaşımların bazı fiziksel özellikleri değiştirilebilmekte ve geliştirilebilmektedir. Bazı bakır bazlı alaşımlarda basınç, dış zor ve manyetik alan etkisi haricinde sıcaklık etkisi ile “martensite” faz gözlenebilmektedir [3]. Bu özellikleri nedeniyle bu alaşımlar; mühendislik ve medikal uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır [4, 5]. Cu-Al bakır bazlı şekil hatırlamalı alaşımlar; iyi hafıza özelliklerine sahip olmaları, yüksek dönüşüm sıcaklığı, iyi termal ve elektriksel özellik, düşük maliyet ve kolayca üretilebilirliği açısından araştırmacılar tarafından yoğun ilgi görmektedir [6]. Fakat tüm bu özelliklere rağmen, Cu bazlı şekil hatırlamalı alaşımların bazı dezavantajları vardır. Bu dezavantajlar alaşımlandırma elementlerinin eklenmesi ile geliştirilebilir. Örneğin; bu alaşımlara üçüncü bir element katkılındırmak, bu alaşımların kolay üretilmesine, iyi ısıl ve termal iletken özellik sergilemesine ve iyi şekil hatırlama etkisi göstermesini sağlar. Hatta farklı element katkıları, bu alaşımlara termal stabilite, elastiklik, tane boyutu artırma gibi özellikler de sağlar. Ayrıca Cu-Al-Zn şekil hatırlamalı alaşımlarda Al miktarının artırılması ve Zn miktarının azaltılmasının sertliğin ve elektriksel iletkenliğin azalmasına yol açtığı görülmüştür [7, 8].

Günümüzde birçok alanda kullanılan manyetik malzemelerin geliştirilmesi için pek çok çalışma yapılmaktadır. Bu malzemeler; bilgisayar teknolojisi, haberleşme, otomobil sanayisi, elektrik motorları gibi birçok alanda kullanılmaktadır [9]. Son zamanlarda şekil hatırlamalı alaşımların manyetik özellikleriyle ilgili yapılan

* Sorumlu yazar: emine.aldirmaz@amasya.edu.tr, Yazarın ORCID Numarası: 0000-0003-0456-7074

çalışmalar genellikle manyetik alan etkisiyle oluşturulan faz dönüşümlerini incelemektedir [10]. Son araştırmalarda, hem şekil hatırlama etkisi hem de ferromanyetik davranışı aynı anda gösteren “ferromanyetik şekil hatırlamalı alaşımlara yer verilmiştir [11, 12]. Hatta, Cu-Al alaşımlarına eklenen Mn; şekil hatırlama özelliğine sahip olan ferromanyetik malzemelerle yapılan çalışmalarda kompozisyona bağlı olarak alaşımların süperparamanyetik özellik gösterdiğini de ortaya çıkarmıştır [13, 14]. Şekil hatırlamalı alaşımların fiziksel, kimyasal ve elektriksel özellikleri; faz dönüşümleri, farklı alaşım elementlerinin eklenmesi, deformasyon ve uygulanan ısı işlemlerin etkisi ile geliştirilebilir [15, 16].

Şekil hatırlamalı alaşımların göstermiş olduğu üstün özelliklerinden dolayı bu konu üzerine yapılan çalışmalara ilgi giderek artmıştır. Bu malzemelerin manyetik özelliklerinin araştırılmasıyla kullanım alanları genişletilmiştir. Buna bağlı olarak da kullanılacak amaca göre uygun kompozisyonda malzeme üretimi bu konuda ilerlemelere sebep olacaktır. Bu çalışmada, Cu-Al-Zn ve Cu-Al-Zn-Mn alaşımları ergitme yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Alaşımlarda termal etki ile meydana getirilen faz dönüşümleri taramalı elektron mikroskobu (SEM), faz dönüşüm sıcaklıkları Diferansiyel Tarama Kalorimetresi (DSC), alaşımların kristal yapıları ve fazlar X Işınları Toz Difraktometresi (XRD) ve alaşımların manyetik özellikleri titreşimli örnek magnetometresi (VSM) kullanılarak incelenmiştir.

2. Materyal ve Metod

Bu çalışmada kullanılan polikristal Cu-Al-Zn (alaşım 1) ve Cu-Al-Zn-Mn (alaşım 2) alaşımları %99.9 saflık derecesinde toz halinde bulunan Cu, Al, Zn ve Mn elementleri kullanılarak hazırlanmıştır. Alaşımların ağırlıkça yüzdeleri EDX yöntemi ile Cu-%11.42Al-%6.43Zn ve Cu-%11.31Al-%6.03Zn-%2.70Mn (% ağırlıkça) olarak belirlenmiştir. Alaşımlar 800 °C’ de 30 dak. sürelerde homojenleştirme işlemine tabi tutulmuşlardır. Homojen hale getirilen örnekler, buzlu su içerisine atılarak hızlı soğutulmuşlardır. Isıl işlem uygulandıktan sonra, örneklerin yüzeyleri 10 ml HCl, 48 ml metanol ve 2.5 g (FeCl₃-6H₂O) karışımından oluşan çözelti içerisinde dağlanmıştır. Elektron mikroskobu deneyleri FEI / Quanta 450 FEG model elektron mikroskobu ile yapılmıştır. X ışınları incelemeleri Bruker D8 Advance bilgisayar kontrollü x-ışını difraktometresi ile CuK_α (λ=1.5405 Å) kullanılarak alınmıştır. Ölçümler 2θ=20-100° arasında 2°/dak. sabit tarama hızı ile yapılmıştır. DSC ölçümleri farklı ısıtma/soğutma hızlarında (5, 10, 15 ve 20 °C/dak.) azot gazı atmosferinde DSC TA Q20 model DSC ile alınmıştır. Manyetik ölçümler için Fiziksel Özellik Ölçüm Sistemi (Quantum Design PPMS-9t) kullanılmıştır. M-H ölçümleri ± 6 T aralığında oda sıcaklığında ölçülmüştür.

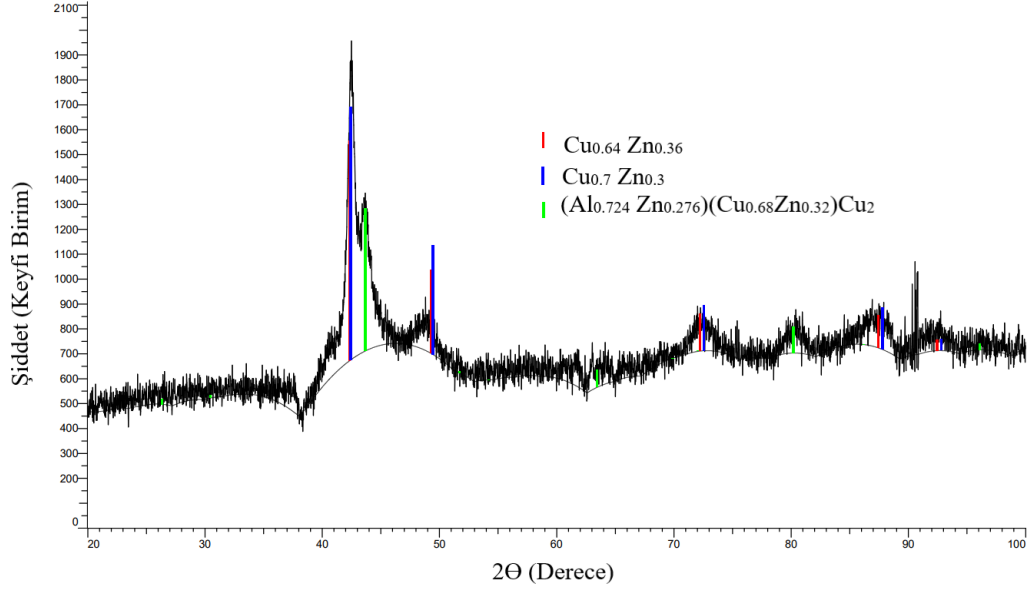
3. Bulgular ve Tartışma

Alaşım 1 ve 2’nin fazlarını ve kristal yapılarını belirlemek için x ışını kırınımı tekniği kullanılmıştır. X ışınları ölçümleri oda sıcaklığında alınmıştır. Alaşım 1 ve 2’ ye ait x-ışını kırınım desenleri Şekil 2’ de gösterilmiştir. Bu ölçümler sonucunda alaşım 1 ve 2 için elde edilen örgü parametreleri, birim hücre hacmi, boyut, dislokasyon yoğunluğu değerleri Tablo 1’de verilmiştir. Dislokasyon yoğunluğu (δ) = (1/D²) denklemi ile hesaplanır [17]. Buradaki D kristal boyutudur (nm).

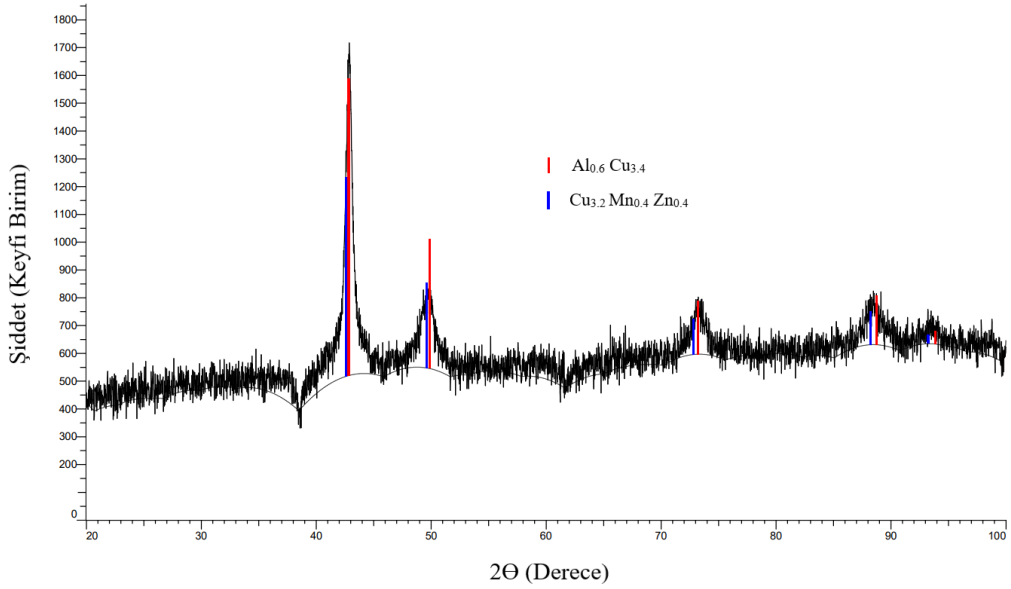
Alaşım 1’in kırınım deseni incelendiğinde; yansıma veren düzlemler (1 1 1), (2 0 0), (2 2 0), (3 1 1) ve (2 2 2) düzlemleridir ve 2θ=42.32°, 49.27°, 72.24°, 87.45° ve 92.42° dir. Faz yapısı Cu_{0.64}Zn_{0.36} dır. Alaşım 1’de gözlemlenen Cu_{0.7}Zn_{0.3} fazına ait düzlemler (1 1 1), (2 0 0), (2 2 0), (3 1 1) ve (2 2 2) şeklindedir. Bu düzlemlere ait 2θ değerleri ise 42.46°, 49.44°, 72.51°, 87.81° ve 92.82° olarak elde edilmiştir. Alaşım 1’de meydana gelen diğer 2θ faz açısı değerleri 43.66°, 63.45°, 80.19° ve 96.10° olarak belirlenmiş olup yansıma düzlemleri (2 2 0), (4 0 0), (4 2 2) ve (4 4 0) olarak bulunmuştur. Bu yansıma veren düzlemlere ait faz (Al_{0.724}Zn_{0.276})(Cu_{0.68}Zn_{0.32})Cu₂’dir. Bakır bazlı alaşımlar için kompozisyon ve soğutma hızına bağlı olarak ana faz DO₃ ve L2₁ süper örgülü yapılardan oluşması nedeniyle bu yapıları birbirinden ayırmak zordur. XRD sonuçlarına göre (2 2 0) düzlemi DO₃ yapısının temel düzlemi olduğundan bu desenin DO₃ süperörgü düzenli β₁ austenite (ana) faz yapısında olduğu tespit edilmiştir [18, 19].

Alaşım 2’nin x-ışını kırınım deseninden; 2θ=42.83°, 49.88°, 73.21°, 88.73° ve 93.83° değerlerinde difraksiyon veren düzlemler sırasıyla kübik Al_{0.6}Cu_{3.4} fazına ait (1 1 1), (2 0 0), (2 2 0), (3 1 1) ve (2 2 2) düzlemleri olarak belirlenmiştir. Yine alaşım 2’de gözlenen Cu_{3.2}Mn_{0.4}Zn_{0.4} faz için 2θ açısı 2.62°, 49.62°, 72.80°, 88.19° ve 93.24° değerleridir ve yansıma veren düzlemler (1 1 1), (2 0 0), (2 2 0), (3 1 1) ve (2 2 2) olarak belirlenmiştir. XRD çalışmaları sonucunda; alaşım 1 ve 2’de meydana gelen Cu_{0.64}Zn_{0.36}, Cu_{0.7}Zn_{0.3}, Al_{0.6}Cu_{3.4} ve Cu_{3.2}Mn_{0.4}Zn_{0.4}, fazlarının bakırca zengin kübik α-fazıdır. Elde edilen veriler önceki çalışmalar ile uyum içindedir [19-21]. Fakat, Tablo 1 incelendiğinde elde edilen dislokasyon yoğunluğu değerlerinin literatürde yer alan benzer

alaşımların değerlerinden daha büyük olduğu bulunmuştur [22]. Bu sonuç, çalışmada kullanılan alaşımların kompozisyonlarının literatürden farklı olmasına bağlanmıştır.



(a)



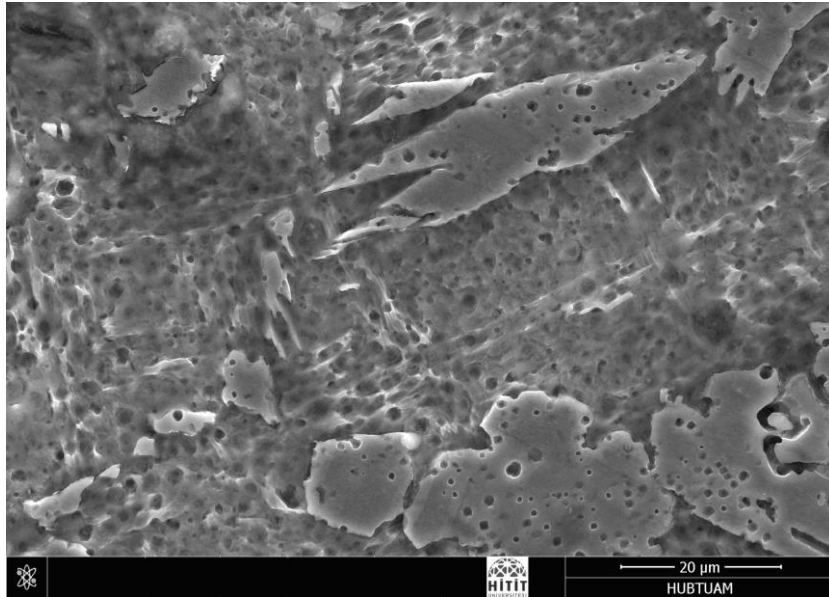
(b)

Şekil 1. Alaşımların XRD analiz sonuçları (a) alaşım 1 ve (b) alaşım 2.

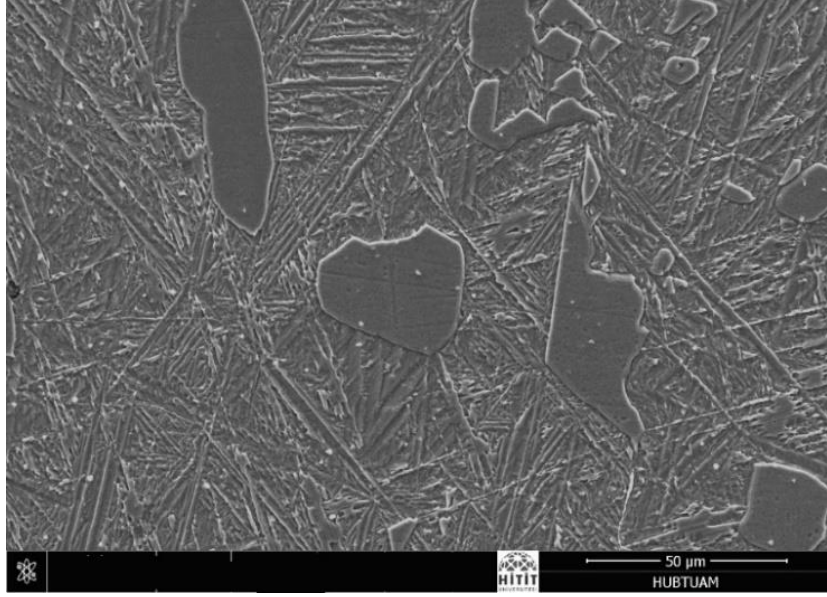
Tablo 1. Alaşımlara ait örgü parametreleri, birim hücre hacmi, boyut, dislokasyon yoğunluğu değerleri.

Yapı Parametreleri	$\text{Cu}_{0.64}\text{Zn}_{0.36}$	$\text{Cu}_{0.7}\text{Zn}_{0.3}$	$(\text{Al}_{0.724}\text{Zn}_{0.276})(\text{Cu}_{0.68}\text{Zn}_{0.32})\text{Cu}_2$	$\text{Al}_{0.6}\text{Cu}_{3.4}$	$\text{Cu}_{3.2}\text{Mn}_{0.4}\text{Zn}_{0.4}$
a (Å)	3.696	3.684	5.859	3.653	3.671
Hacim (a ³)	50.49	50.00	201.13	48.77	49.48
Kristal Boyutu (nm)	8.43	8.51	7.55	7.90	8.45
Dislokasyon Yoğunluğu	0.014	0.013	0.017	0.016	0.014
% Ağırlık	64.21	64.10	228.80	232.25	251.47
Uzay Grubu	Fm-3m (225)	Fm-3m (225)	Fm-3m (225)	Fm-3m (225)	Fm-3m (225)

Alaşım 1 ve 2'nin SEM görüntüleri Şekil 2'de verilmiştir. Şekil 2(a)'dan görülebileceği gibi alaşım 1'de taneler arasında rastgele dağılmış bakırca zengin α çökeltileri tespit edilmiştir. Ayrıca, α çökeltilerinin ana faz (β) içerisinde uzun, yuvarlak ve düzensiz morfolojide olduğu görülmüştür [23]. Alaşım 2'nin SEM görüntüsü incelendiğinde ise α çökeltileri ile birlikte iğne ve V-biçimli martensite plakaları gözlemlenmiştir. Alaşım 1'den farklı olarak Mn alaşım 2'de martensite yapının oluşmasına neden olmuştur.



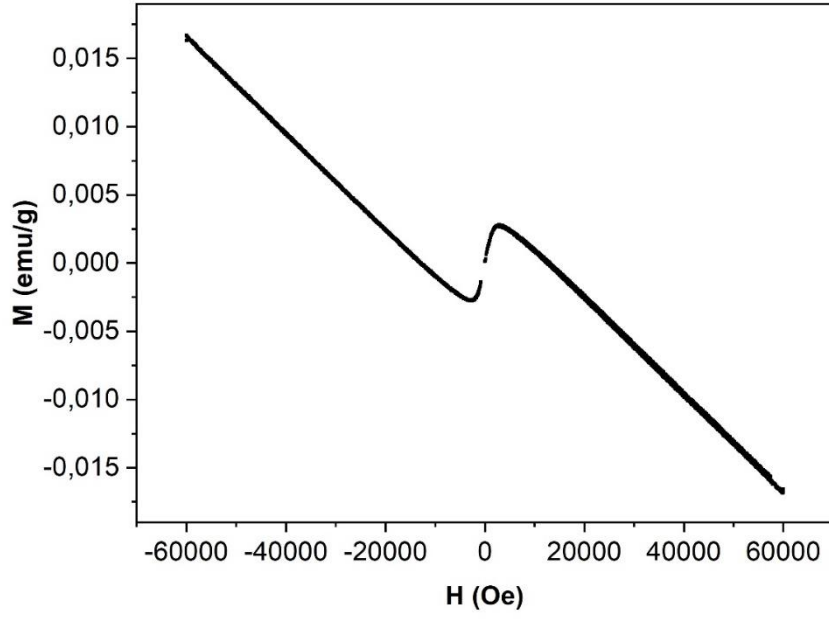
(a)



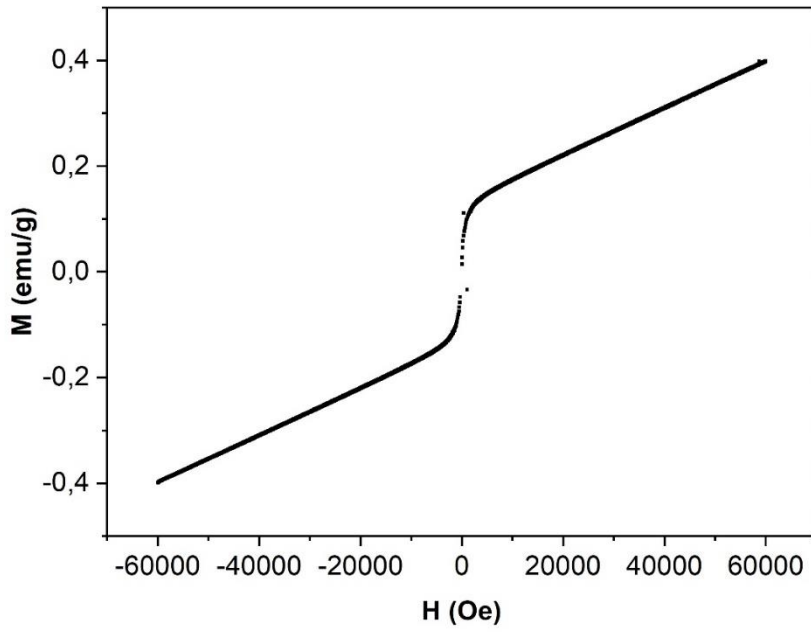
(b)

Şekil 2. Alaşımın SEM görüntüleri (a) alaşım 1 ve (b) alaşım 2.

Bu çalışmada alaşım 1 ve 2'ye ait VSM ölçümleri -6 ile 6 T aralığında alınmıştır. Alaşımlara ait M-H grafikleri Şekil 3'te verilmiştir. Şekil 3 incelendiğinde manyetik alan büyüklüğünün artması ile manyetizasyonun da değiştiği gözlemlenmiştir. Alaşım 1 ve 2 için manyetizasyon değerleri sırası ile 0.01 emu/g ve 0.39 emu/g olarak elde edilmiştir. Alaşım 1'in M-H eğrisi incelendiğinde uygulanan manyetik alanla mıknatıslanmanın azaldığı gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlar benzer alaşımların sonuçları ile uyum içerisinde [22]. Alaşım 1'e ait manyetizasyon değeri Nassar ve arkadaşlarının benzer alaşım için yapmış oldukları değerden daha yüksek bulunmuştur. Bunun nedeni alaşım kompozisyonundaki farklılıktan kaynaklanmaktadır. Alaşım 2'nin M-H eğrisi incelendiğinde ise ferromanyetik davranış gösterdiği bulunmuştur. Mn-Mn çiftlerinden dolayı alaşım 2 ferromanyetik davranış sergilemiştir. Alaşım 2'nin sonuçları literatürle uyum içerisinde [4, 11,12].



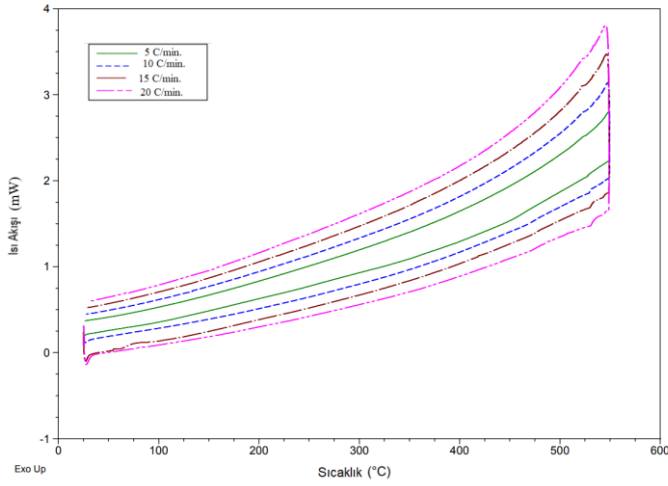
(a)



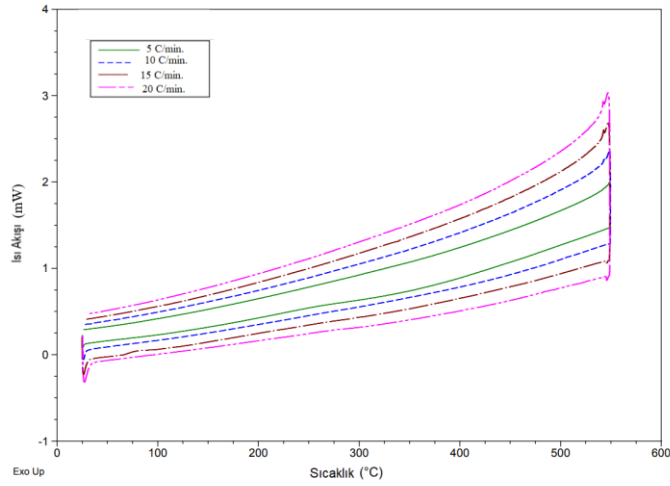
(b)

Şekil 3. Alaşımların M-H eğrileri (a) alaşım 1 ve (b) alaşım 2.

Alaşım 1 ve 2'nin dönüşüm sıcaklıkları ve entalpi değerleri DSC yöntemi ile incelenmiştir. Alaşım 1'e ait farklı ısıtma/soğutma hızlarında elde edilen DSC eğrileri sırası ile Şekil 4'te verilmiştir. Bu eğrilerden elde edilen dönüşüm sıcaklıkları ve entalpi değerleri Tablo 2 ve 3'te listelenmiştir. Tablolardan görüleceği üzere alaşımların dönüşüm sıcaklıkları genel olarak ısıtma hızının artmasıyla artmıştır. Alaşım 2'nin dönüşüm sıcaklıkları alaşım 1'e göre daha düşük elde edilmiştir. Sonuç olarak, alaşım 1'e eklenen Mn austenite dönüşüm sıcaklıklarını azaltmıştır (Tablo 2) [24]. SEM sonuçlarına göre alaşım 2' de V-biçimli martensite plakaları gözlemlenmiştir. Fakat, alaşım 2 için DSC eğrilerinde alınan sıcaklık aralığında martensite (M)→austenite (A) piklerine rastlanmamıştır. Bunun nedeni DSC cihazının düşük ısıtma hızlarına ve yavaş soğutma kabiliyetine sahip olmasındandır [25].



(a)



(b)

Şekil 4. 5, 10, 15 ve 20 °C/dak. ısıtma/soğutma oranlarında elde edilen DSC eğrileri (a) alaşım 1 ve (b) alaşım 2.

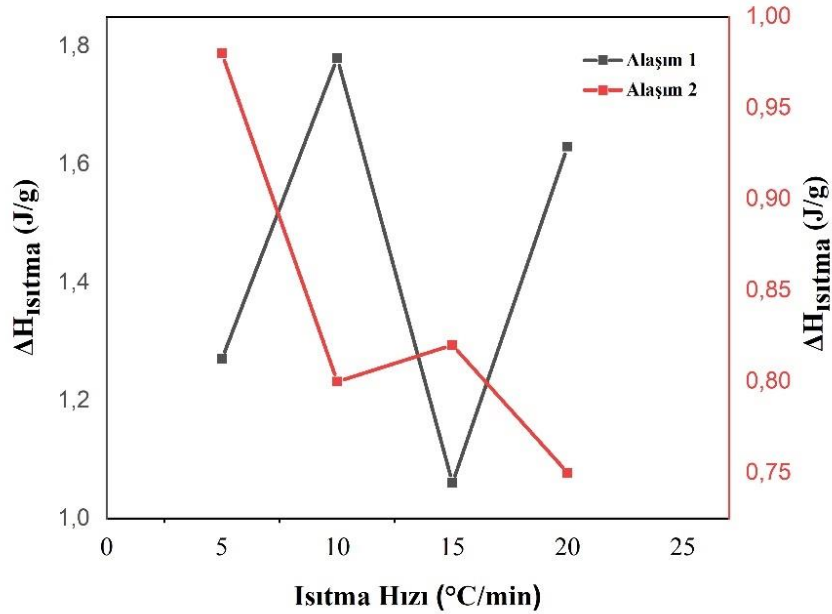
Tablo 2. Cu-Al-Zn alaşımı için entalpi değişim değerleri ve DSC pik analizleri.

Isıtma hızı (°C/dak.)	A _s (°C)	A _f (°C)	A _{max} (°C)	ΔH _{ısıtma} (J/g)
5	340.91	427.26	397.93	1.27
10	514.48	539.65	526.85	1.78
15	520.53	542.66	529.58	1.06
20	516.81	543.73	530.13	1.63

Tablo 3. Cu-Al-Zn-Mn alaşımı için entalpi değişim değerleri ve DSC pik analizleri.

Isıtma hızı (°C/dak.)	A _s (°C)	A _f (°C)	A _{max} (°C)	ΔH _{ısıtma} (J/g)
5	279.14	412.26	327.51	0.98
10	372.86	456.26	409.73	0.80
15	440.26	495.61	462.16	0.82
20	475.42	510.62	493.28	0.75

Şekil 5’ de entalpi ısıtma değerlerinin ısıtma hızına bağlı değişim grafiği verilmiştir. Grafik incelendiğinde entalpi ısıtma değerlerinin ısıtma hızına bağlı olarak değişim gösterdiği gözlemlenmiştir. Buna sebep olarak artan ısıtma hızının sıcaklıkların başlangıç ve bitiş değerlerini değiştirdiği gösterilebilir. Alaşım 1’e Mn katkılanılarak elde edilen alaşım 2’de entalpi değerleri ısıtma hızının artması ile azalma göstermiştir (Şekil 5). En yüksek entalpi değeri ise alaşım 1’de meydana gelmiştir. Bu sonuç; en zor ya da zorlanılmış dönüşümün alaşım 1’de meydana geldiğini göstermektedir [25].

**Şekil 5.** Alaşım 1 ve Alaşım 2 için entalpi ısıtma değerlerinin ısıtma hızına bağlı değişimi.

4. Sonuçlar

Bu alışmada, Cu-%11.42Al-%6.43Zn ve Cu-%11.31Al-%6.03Zn-%2.70Mn (% ağırlıkça) alaşımlarının yapısal, kristalografik, termal ve manyetik özellikleri incelenmiş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Yapılan XRD incelemeleri sonucunda Cu-Al-Zn alaşımında β_1 fazının oluştuğu ve bu faz ile birlikte $\text{Cu}_{0.64}\text{Zn}_{0.36}$ ve $\text{Cu}_{0.7}\text{Zn}_{0.3}$ fazlarının da bulunduğu tespit edilmiştir. Cu-Al-Zn-Mn alaşımında ise bakırca zengin α -fazları $\text{Al}_{0.6}\text{Cu}_{3.4}$ ve $\text{Cu}_{3.2}\text{Mn}_{0.4}\text{Zn}_{0.4}$ bulunmuştur. Elektron mikroskop çalışmaları ile Cu-Al-Zn alaşımında α -çökeltilerinin uzun, yuvarlak ve dzensiz morfolojide oluştuğu görülmüştür. Bunun yanı sıra Cu-Al-Zn-Mn alaşımında α -çökeltileri ile birlikte martensite fazın meydana geldiği belirlenmiştir. Cu-Al-Zn alaşımına Mn katkılanırmanın martensite fazın oluşmasına neden olduğu görülmüştür. Ayrıca alaşımların manyetizasyon değişimleri de incelenmiştir. Cu-Al-Zn alaşımında uygulanan manyetik alanla mıknatıslanma azalma sergilerken, Mn katkılanırılarak elde edilen Cu-Al-Zn-Mn alaşımı ferromanyetik karakter sergilemiştir. Ayrıca, Mn katkılı Cu-Al-Zn-Mn alaşımının manyetizasyon değerinin Cu-Al-Zn dan büyük olduğu bulunmuştur. Dolayısıyla Mn elementinin manyetizasyon değerini arttırdığı belirlenmiştir. DSC sonuçlarından elde edilen verilere göre, Mn katkısının austenite dönüşüm sıcaklıklarını dşrdğu tespit edilmiştir. Ayrıca DSC sonuçları alaşımların yüksek dönüşüm sıcaklıklarına sahip olduğunu göstermiştir.

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlara göre; incelenen alaşımlardan Alaşım 2 manyetik özellik, her iki alaşım da yüksek sıcaklık özelliği göstermiştir. Bu sebeple bu alanda yapılacak çalışmalara yol gösterecek ve çalışılan alaşımların manyetik davranışı ile ilgili yapılan çok az sayıda olan çalışmalara katkı sağlayacaktır.

Teşekkür

Bu makale Amasya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon birimi tarafından FMB-BAP 19-0405, FMB-BAP 19-0406 ve FMB-BAP 20-0437 nolu projeler ile desteklenmiştir. Bu sebeple Amasya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatrlğine teşekkür ederim.

Kaynaklar

- [1] Haberkorn N, Lovey F C, Condo A M, Guimpel J. Development and Characterization of Shape Memory Cu-Zn-Al Thin Films. Mater. Sci. Eng. B 2010; 170: 5-8.
- [2] Olson G B, Cohen M. Thermoelastic Behaviour in Martensitic Transformations. Scripta Metall. 1975; 9: 1247-1254.
- [3] Nishiyama Z, Martensitic Transformation. Academic Pres, New York, 1978.
- [4] Sutou Y, Omori T, Furukama A, Takahashi Y, Kainuma R, Yamauchi K, Yamashita S, Ishida K. Development of medical guide wire of Cu-Al-Mn-Base superelastic alloy with functionally graded characteristics. J. Biomed. Mater. Res. Part B Appl. Biomater. 2004; 69B: 64-69.
- [5] Silva R A G, Cuniberti A, Stipcich M, Adorno A T. Effect of Ag Addition on the Martensitic Phase of the Cu- 10 wt % Al Alloy. Mater. Sci. Eng. A. 2007; 456: 5-10.
- [6] Heil T, A phase-field computer model of microstructure evolution in a ferromagnetic shape memory alloy. Blackburg, Virginia, USA, 2005.
- [7] Dasgupta R, Jain A K, Kumar P, Hussain S, Pandey A. Role of alloying additions on the properties of Cu-Al-Mn shape memory alloys. J alloys comp. 2015; 620: 60-66.
- [8] Gomidzelovic L, Pozega E, Kostav A, Vukovic N, Krstic V, Zivkovic D, Balanovic L, Thermodynamics and characterization of shape memory Cu-Al-Zn alloys. Trans. Nonferrous Met. Soc. China 2015; 25: 2630-2636.
- [9] Alaneme K K, Eloho A O. Reconciling viability and cost-effective shape memory alloy options—a review of copper and iron based shape memory metallic systems. Eng. Sci. Tech, Int. J., 2016;19-3:1582-1592.
- [10] Akdoğan A, Nurveren K. şekil Hafızalı Alaşımlar, Mhendis ve Makine, 521 (2003) 35-45.
- [11] Aldirmaz E, Guler M, Guler E. Investigation of Magnetic Properties of Phase Transformations in Copper-Based Alloys. J. Supercond. Nov. Magn. 2017; 30: 1257-1261.
- [12] Sasmaz M, Bayri A, Aydogdu, Y. The Magnetic Behavior and Physical Characterization of Cu-Mn-Al Ferromagnetic Shape Memory Alloy. J. Supercond. Nov. Magn. 2011; 24: 757-762.
- [13] Kakeshita T, Saburi T, Shimizu K. Effects of Hydrostatic Pressure and Magnetic Field on Martensitic Transformations. Mater. Sci. Eng. 1999; A273- 275: 375-379.
- [14] Prado M O, Lovey F C, Civalo L. Magnetic Properties of CuMnAl alloys with SME. Acta Metall. 1997; 46: 137-147.
- [15] Kciuk M, Chwastek K, Kluszczyński K. Szczygłowski J. A study on hysteresis behaviour of SMA linear actuators based on unipolar sigmoid and hyperbolic tangent functions. Sensors Actuators A 2016; 243:52-58.
- [16] Canbay C A, Tataroglu A, Dere A, Al-Ghamdi A, Yakuphanoglu F. A new shape memory alloy film/p-Si solar light four quadrant detector for solar tracking applications. J. Alloys Compd. 2016; 688:762-768.
- [17] Saleem M, Fang L, Ruan H B, Wu F, Huang Q L, Xu C L, Kong C Y, Effect of zinc acetate concentration on the structural and optical properties of ZnO thin films deposited by Sol-Gel method. Int. J. Phys. Sci. 2012; 7: 2971-2979.

- [18] Gerdan Y E, Aldirmaz E, Guler M, Tanak H, Guler E. Martensitic transformation and magnetic properties of the CuAl, CuAlMn, and CuAlMnZn alloys. *J. Supercond. Nov. Magn.* 2018; 31: 3919-3923.
- [19] Aldirmaz E, Güler M, Güler E. Effect of Nickel Addition on the Magnetic and Microstructural Properties of Cu-Al-Fe Alloy. *J. Supercond. Nov. Magn.* 2020; 33: 755-759.
- [20] Cucu S C, Aldirmaz E. Effect of Heat Treatment on the Magnetic Properties of a CuMn Alloy. *J. Supercond. Nov. Magn.* 2017; 30: 197-201.
- [21] Aldirmaz E, Güler M, Güler E. Effect of Quaternary Element (Ni and Mn) Additions on Structural and Magnetic Properties of Cu-Based Alloys. *Brazilian J. Phys.* 2021; 51: 1224-1229.
- [22] Nassar A, Mahmoud D S, Mohamed Wael S, Moustafa A. M, Salwa H. El-Sabbagh. Investigation of the structure, magnetic, rheological and mechanical properties of EPDM rubber/Cu-Al-Zn alloy composites. *Egypt. J. Chem.* 2021; 64: 7377-7391.
- [23] Sampath V, Effect of Thermal Processing on Microstructure and Shape-Memory Characteristics of a Copper–Zinc–Aluminum Shape-Memory Alloy. *Mater. Manufact. Process.* 2007; 22: 9-14.
- [24] Canbay C A, Başbağ G, Karaduman O, Boyrazlı M. Thermodynamical and Microstructural SME Study on CuAlNi and CuAlNiCo Shape Memory Alloys. *J. Mater. Electr. Devices* 2021; 1: 1-5.
- [25] Canbay C A, Karaduman O, Özkul İ. Lagging temperature problem in DTA/DSC measurement on investigation of NiTi SMA. *J Mater Sci: Mater Electron* 2020; 31: 13284-13291.