



**Co-TABANLI (Co_{0,402}Fe_{0,201}Ni_{0,067}B_{0,227}Si_{0,053}Nb_{0,05})_{100-x}Cu_x (x = 0-1) CAMSI ALAŞIMLARIN
MANYETOKALORİK VE MANYETODİRENÇ
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Abdülhamit ADAM



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**Co-TABANLI ($\text{Co}_{0,402}\text{Fe}_{0,201}\text{Ni}_{0,067}\text{B}_{0,227}\text{Si}_{0,053}\text{Nb}_{0,05}$) $_{100-x}\text{Cu}_x$ ($x = 0-1$) CAMSI
ALAŞIMLARIN MANYETOKALORİK VE MANYETODİRENÇ
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Abdülhamit ADAM

Prof. Dr. İlker KÜÇÜK

(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FİZİK ANABİLİM DALI

BURSA-2019

TEZ ONAYI

Abdülhamit ADAM tarafından hazırlanan "Co-Tabanlı $(\text{Co}_{0,402}\text{Fe}_{0,201}\text{Ni}_{0,067}\text{B}_{0,227}\text{Si}_{0,053}\text{Nb}_{0,05})_{100-x}\text{Cu}_x$ ($x = 0-1$) Camsı Alaşımların Manyetokalorik ve Manyetodirenç Özelliklerinin İncelenmesi" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğuyla Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. İlker KÜÇÜK

Başkan: Prof. Dr. İlker KÜÇÜK

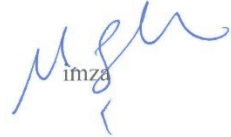
Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi,
Fizik Anabilim Dalı



imza

Üye : Doç. Dr. Mürşide HACIİSMAİLOĞLU

Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi,
Fizik Anabilim Dalı



imza

Üye : Doç. Dr. Kadir ERTÜRK

Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi,
Fizik Anabilim Dalı



imza

Yukarıdaki sonucu onaylarım


Prof. Dr. Ali BAYRAM
Enstitü Müdürü

30/01/2019

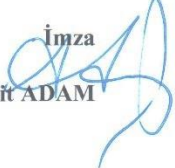
U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
 - görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
 - başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
 - atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
 - kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
 - ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı
- beyan ederim.**

30.01/2019

İmza

Abdülhamit ADAM



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Co-TABANLI ($\text{Co}_{0,402}\text{Fe}_{0,201}\text{Ni}_{0,067}\text{B}_{0,227}\text{Si}_{0,053}\text{Nb}_{0,05}$) $_{100-x}\text{Cu}_x$ ($x = 0-1$) CAMSI ALAŞIMLARIN MANYETOKALORİK VE MANYETODİRENÇ ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Abdülhamit ADAM

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. İlker KÜÇÜK

Bu çalışmada, Co tabanlı ($\text{Co}_{0,402}\text{Fe}_{0,201}\text{Ni}_{0,067}\text{B}_{0,227}\text{Si}_{0,053}\text{Nb}_{0,05}$) $_{100-x}\text{Cu}_x$ ($x = 0, 0,5, 0,75, 1$) amorf şeritlerin manyetokalorik ve manyetik direnç özellikleri araştırılmıştır. Alaşıma Cu katkısı, kristalleştirme sıcaklığı (T_x) ve Curie sıcaklığı (T_c) değerlerini değiştirmiştir.. Alaşımların doyum mıknatıslanması (M_s) ve sınırlayıcı alan (H_c) değerlerinin 65,51-38,49 emu/g ve 6,84-1,99 A/m aralığında olduğu görülmüştür. 0-2,2 T manyetik alan değişimi altında ($\text{Co}_{0,402}\text{Fe}_{0,201}\text{Ni}_{0,067}\text{B}_{0,227}\text{Si}_{0,053}\text{Nb}_{0,05}$) $_{100-x}\text{Cu}_x$ ($x=0, 0,5, 0,75, 1$) camsi şeritlerin maksimum manyetik entropi değişimi ($-\Delta S_M$)^{maks} değerleri sırasıyla 0,77, 0,71, 0,89 ve 0,67 $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ olarak hesaplanmıştır. Camsi şerit alaşımlar için soğutma kapasitesi (RC) değerleri, daha önce çalışılmış Fe tabanlı $\text{Fe}_{80}\text{B}_{10}\text{Zr}_9\text{Cu}_1$, $(\text{Fe}_{0,76}\text{B}_{0,24})_{96}\text{Nb}_4$ ve $\text{Fe}_{82}\text{Ni}_2\text{Zr}_6\text{B}_{10}$ metalik camların RC değerleriyle karşılaştırılabilir düzeydedir. 1 T manyetik alan altında maksimum manyetik direnç %MR değerleri Curie sıcaklıkları yakınında ($\text{Co}_{0,402}\text{Fe}_{0,201}\text{Ni}_{0,067}\text{B}_{0,227}\text{Si}_{0,053}\text{Nb}_{0,05}$) $_{100-x}\text{Cu}_x$ ($x=0, 0,5, 0,75,1$) camsi şeritleri için sırasıyla % 110,35, % 37,48, % 22,58 ve % 1 olarak bulunmuştur. Üretilen malzemeler uygun manyetik soğutma kapasitesi (RC) değerlerine, ihmal edilebilir histeresise, iyi termal kararlılığa ve büyük manyetik direnç değerlerine sahiptir. Elde edilen tüm bu sonuçlara göre, bu camsi alaşımların 450-600 K sıcaklık aralığında yüksek sıcaklık manyetik soğutucusu olarak kullanılabilmesi ve gösterdiği % MR değerleriyle de çok fonksiyonlu bir malzeme olduğu söylenebilir.

Anahtar Kelimeler: Amorf alaşımlar, manyetokalorik etki, manyetik entropi değişimi, camlaşma yeteneği, soğutma kapasitesi, Curie sıcaklığı, manyetik direnç

2019, x + 55 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

INVESTIGATION OF MAGNETOCALORIC AND MAGNETORESISTANCE PROPERTIES OF Co-BASED $(\text{Co}_{0,402}\text{Fe}_{0,201}\text{Ni}_{0,067}\text{B}_{0,227}\text{Si}_{0,053}\text{Nb}_{0,05})_{100-x}\text{Cu}_x$ ($x = 0-1$) GLASSY ALLOYS

Abdülhamit ADAM

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Physics

Supervisor: Prof. Dr. İlker KÜÇÜK

In this work, the magnetocaloric and magnetoresistance properties of amorphous Co-based $(\text{Co}_{0,402}\text{Fe}_{0,201}\text{Ni}_{0,067}\text{B}_{0,227}\text{Si}_{0,053}\text{Nb}_{0,05})_{100-x}\text{Cu}_x$ ($x = 0, 0,5, 0,75, 1$) ribbons were investigated. Cu additions changed the crystallisation temperature (T_x) and the Curie temperature (T_c). The saturation magnetisation (M_s) and coercivity (H_c) for alloys were in the range of 65,51–38,49 emu/g and 1,99–6,84 A/m, respectively. Under an applied magnetic field change of 2,2 T, the $(-\Delta S_M)^{\text{maks}}$ for $(\text{Co}_{0,402}\text{Fe}_{0,201}\text{Ni}_{0,067}\text{B}_{0,227}\text{Si}_{0,053}\text{Nb}_{0,05})_{100-x}\text{Cu}_x$ with $x = 0, 0,5, 0,75$ and 1 are 0,77, 0,71, 0,89 and 0,67 $\text{Jkg}^{-1} \text{K}^{-1}$, respectively. The values of refrigeration capacity (RC) for the as-spun glassy alloys are comparable with those of previously studied Fe-based metallic glasses such as $\text{Fe}_{80}\text{B}_{10}\text{Zr}_9\text{Cu}_1$, $(\text{Fe}_{0,76}\text{B}_{0,24})_{96}\text{Nb}_4$ and $\text{Fe}_{82}\text{Ni}_2\text{Zr}_6\text{B}_{10}$. In addition, the maximum magnetoresistance (MR) values for $(\text{Co}_{0,402}\text{Fe}_{0,201}\text{Ni}_{0,067}\text{B}_{0,227}\text{Si}_{0,053}\text{Nb}_{0,05})_{100-x}\text{Cu}_x$ with $x = 0, 0,5, 0,75$ and 1 are found to be 110,35 %, 37,48 %, 22,58 % and 1 % around the Curie temperatures under an applied magnetic field change of 1 T, respectively. With good RC, negligible hysteresis due to very low coercivity values and large magnetoresistance, these Co-based amorphous alloys can be used as the high temperature magnetic refrigerants and multifunctional applications working in the temperature range of 450–600 K.

Key words: Amorphous alloys, magnetocaloric effect, magnetic entropy change, glass-forming ability, refrigeration capacity, Curie temperature, magnetoresistance

2019, x + 55 pages.

TEŞEKKÜR

Tez alıŐmasını gerekleŐtirmemi sağlayan, tez sÜresi boyunca gÖstermiŐ olduğu sabır, ilgi ve yardımlarından ÖtÜrü danışman hocam Sayın Prof. Dr. İlker KÜÇÜK'e, tez çalıŐmalarım boyunca yardımlarını esirgemeyen ve destek olan Sayın AraÇ. Gör. Kağan ŞARLAR'a, beraber çalışma esnasında vermiŐ olduğu destek ve yardımlarından dolayı çalışma arkadaŐım Dr. Ersin CİVAN'a, Yüksek Lisans çalışmasında destekleyen çalışma arkadaŐım Dr. Yavuz ÖZTÜRK'e, çalıŐmalarım boyunca bana destek olan ve katlanan dostlarıma, gÖstermiŐ oldukları sabır, iyi niyetlerinden dolayı Sayın Dr. İsa KİYAT, Dr. Salih Kağan KALYONCU ve Doç. Dr. Aydın YENİAY'a, eğitimim boyunca bana her zaman destek olan, güvenen, eğitime cesaretlendiren ve bugÜnkÜ bulunduğum durumama gelmemi sağlayan aileme teŐekkürlerimi sunarım. Son olarak, trafik kazasında kaybettiğim kardeŐim Merve ADAM'a armağan ediyorum.

Abdülhamit ADAM
.../.../2019

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	5
2.1. Metalik Cam ve Amorf Kavramı	5
2.2. Metalik Camların (Amorf) Gelişimi ve Özellikleri	7
2.3. Amorf Malzemelerin Yapısı	7
2.4. Metalik Camların Camlaşma yeteneği.....	9
2.5. T-T-T (Zaman-Sıcaklık-Geçiş) Diyagramları.....	10
2.6. Manyetik Histeresis Eğrisi	12
2.7. Mke ve Termodinamik ile İlişkisi	13
2.7.1. Genel Termodinamik Yaklaşım	13
2.7.2. Entropi, Entropi Değişimi ve Manyetokalorik Etkisi.....	17
2.7.3. Manyetodirenç Etkisi	20
2.7.4. Manyetik Soğutma ve Teknolojik Geleceği	20
2.8. Manyetik Soğutma Çalışma Prensibi - Manyetokalorik Etki	25
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	28
3.1. Örnek Üretimi	28
3.1.1. Arkla Eritme İşlemi	28
3.1.2. Eriyik eğerme Metodu (Melt Spining Method)	29
3.1.3. X-ışını Kırınımı (XRD).....	31
3.1.4. Titreşimli Örnek Manyetometre (VSM).....	33
3.1.5. Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) – Termal Analiz.....	35
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	37

5. SONUÇ.....	51
KAYNAKLAR	51
ÖZGEÇMİŞ	55



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
ΔT_{ad}	Adyabatik Sıcaklık Değişimi
ΔS_M	Manyetik Entropi Değişimi
ΔT_x	Cam Geçiş Sıcaklığı İle Kristalleşme Sıcaklığı Arasındaki Sıcaklık Farkı (Aşırı Soğutulmuş Sıvı Bölgesi)
\vec{B}	Manyetik İndüksiyon
\vec{H}	Manyetik Alan Şiddeti
μ	Manyetik Geçirgenlik
μ_0	Boşluğun Manyetik Geçirgenliği
α_T	Hacimsel Isıl Genleşme Katsayısı
$C_{H,P}$	Sabit Manyetik Alan ve Basınç Altında Isı Sığası
C_P	Öz Isı
C_x	Isı sığası
F	Serbest Enerji
G	Gibbs Serbest Enerjisi
\vec{M}	Mıknatıslanma
χ_m	Manyetik Alınganlık
a_e	Elektronik Isı Sığası Katsayısı
S	Entropi
S_e	Elektronik Entropi
S_l	Örgü Entropisi
T	Mutlak Sıcaklık
S_M	Manyetik entropi
U	İç enerji
V	Hacim
P	Basınç
δQ	Sistemin Sıcaklığını ΔT Kadar Değiştirmek İçin Gerekli Isı Miktarı
Rc	Kritik Soğutma Oranı
t_n	T-T-T grafiğindenki C eğrisi zamanı
T_l	Sıvılaşma Sıcaklığı
T_x	Kristalleşme Sıcaklığı
T_g	Cam Geçiş Sıcaklığı
T_n	T-T-T grafiğindenki C eğrisi Sıcaklığı
T_{rg}	İndirgenmiş cam geçiş sıcaklığı
T_e	Erime sıcaklığı
% MR	Manyetodirenç (%)
$\rho(0)$	Manyetik Alan yokken Özdirenç
$\rho(H)$	Manyetik Alandaki Özdirenç
RC	Soğutma Kapasitesi
δT_{FWHM}	Maksimumun Yarısına Karşılık Gelen Sıcaklık Farkı

Kısaltmalar

DSC
CFC
HCFC
FOMPT
SOMPT
MKE
VSM
COP
MS
RSP
GFA
XRD
EMR
BMR

Açıklamalar

Diferansiyel Taramalı Kalorimetre
Kloroflorokarbon
Hidrokloroflorokarbon
Birinci Dereceden Manyetik Faz Geçişi
İkinci Dereceden Manyetik Faz Geçişi
Manyetokalorik Etki
Titreşimli Örnek Manyetometresi
Soğutma Performans Katsayısı
Manyetik Soğutma
Hızlı Katılaşma İşlemi
Camlaşma Yeteneği
X-Işını Kırınımı
Enine Manyetodirenç
Boyuna Manyetodirenç

ŞEKİLLER DİZİNİ

		Sayfa
Şekil 2.1.	Kristal ve cam oluşturan bir materyal için sıcaklık ile hacim değişimi grafiği.	6
Şekil 2.2.	Amorf (metalik cam) (a) ve kristal malzemelerin 3 boyutlu (3D) atom yapılarının dizimlimlerinin gösterimi	8
Şekil 2.3.	Amorf (a) ve kristal (b) yapılarının 2 boyutlu atomik dizimlimlerinin karşılaştırılması	8
Şekil 2.4.	Alaşım sistemi için şematik T-T-T diyagramı	11
Şekil 2.5.	Manyetik Histeresis Eğrisi	13
Şekil 2.6.	2014 yılına kadar üretilen prototip sayısının yıllara göre dağılımı	21
Şekil 2.7.	Manyetik Soğutma Sistemi (MRS)	22
Şekil 2.8.	İlk tıbbi-medikal soğutucu (Cooltech-Kirsch)	23
Şekil 2.9.	Manetik Soğutmalı İlk Ticari Buzdolabı (Cooltech-Carrefour)	24
Şekil 2.10.	Manyetokalorik etki (oklar manyetik momentlerin yönünü sembolize eder)	25
Şekil 2.11.	Manyetik Soğutma Çalışma Prensibi (Kaynak: Cooltech Applications)	26
Şekil 2.12.	Manyetik Soğutmayla Geleneksel soğutmanın karşılaştırılması	27
Şekil 3.1.	Saf elementlerin yerleştirildiği bakır pota	28
Şekil 3.2.	Arkla Eritme Cihazı MAM-1 (Arc Melting System)	29
Şekil 3.3.	Eriyik Eğirme metodu	30
Şekil 3.4.	Amorf şeritler	30
Şekil 3.5.	Eriyik Eğime sistemi (Melt Spining)	31
Şekil 3.6.	X-ışını kırınımı	32
Şekil 3.7.	X-ışını kırınımı cihazı (XRD)	33
Şekil 3.8.	Titreşimli Örnek Manyetometresi (VSM)	33
Şekil 3.9.	Alıcı bobinler ve bileşenlerinin şematik gösterimi	34
Şekil 3.10.	Dört Nokta Ölçüm Probu	35
Şekil 3.11.	Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) Eğrisi	36
Şekil 4.1.	$(Co_{0,402}Fe_{0,201}Ni_{0,067}B_{0,227}Si_{0,053}Nb_{0,05})_{100-x}Cu_x$ ($x=0, 0,5, 0,75, 1$) metalik cam şeritlerin XRD desenleri	37
Şekil 4.2.	$(Co_{0,402}Fe_{0,201}Ni_{0,067}B_{0,227}Si_{0,053}Nb_{0,05})_{100-x}Cu_x$ ($x=0, 0,5, 0,75, 1$) metalik cam şeritlerin DSC eğrileri	38
Şekil 4.3.	$(Co_{0,402}Fe_{0,201}Ni_{0,067}B_{0,227}Si_{0,053}Nb_{0,05})_{100-x}Cu_x$ ($x=0, 0,5, 0,75, 1$) metalik cam şeritlerin M-H ölçüm değerleri	40
Şekil 4.4.	0,01 T (Tesla) manyetik alanda mıknatıslanmanın sıcaklıkla değişimi	41
Şekil 4.5.	$(Co_{0,402}Fe_{0,201}Ni_{0,067}B_{0,227}Si_{0,053}Nb_{0,05})$ camsı şeridin izotermal mıknatıslanma eğrisi	42
Şekil 4.6.	$(Co_{0,402}Fe_{0,201}Ni_{0,067}B_{0,227}Si_{0,053}Nb_{0,05})_{99,5}Cu_{0,5}$ camsı şeridin izotermal mıknatıslanma eğrisi	42
Şekil 4.7.	$(Co_{0,402}Fe_{0,201}Ni_{0,067}B_{0,227}Si_{0,053}Nb_{0,05})_{99,25}Cu_{0,75}$ camsı şeridin izotermal mıknatıslanma eğrisi	43

Şekil 4.8.	$(\text{Co}_{0,402}\text{Fe}_{0,201}\text{Ni}_{0,067}\text{B}_{0,227}\text{Si}_{0,053}\text{Nb}_{0,05})_{99}\text{Cu}_1$ camısı şeridin izotermal mıknatıslanma eğrisi	43
Şekil 4.9.	2,2 T Manyetik alan değişimi altında $(\text{Co}_{0,402}\text{Fe}_{0,201}\text{Ni}_{0,067}\text{B}_{0,227}\text{Si}_{0,053}\text{Nb}_{0,05})_{100-x}\text{Cu}_x$ ($x=0, 0.5, 0.75, 1$) camısı şeritlerin sıcaklığa bağlı Manyetik Entropi Değişimi	44
Şekil 4.10.	$(\text{Co}_{0,402}\text{Fe}_{0,201}\text{Ni}_{0,067}\text{B}_{0,227}\text{Si}_{0,053}\text{Nb}_{0,05})_{99,5}\text{Cu}_{0,5}$ ve $\text{Co}_{40,2}\text{Fe}_{20,1}\text{Ni}_{6,7}\text{B}_{22,7}\text{Si}_{5,3}\text{Nb}_5$ camısı şeritler için $(-\Delta S_M)$ 'nin manyetik alanla değişimi	45
Şekil 4.11.	$\text{Co}_{0,402}\text{Fe}_{0,201}\text{Ni}_{0,067}\text{B}_{0,227}\text{Si}_{0,053}\text{Nb}_{0,05}$ alaşımının 0 ve 1 T'da sıcaklığa bağlı özdirenç grafiği	47
Şekil 4.12.	$(\text{Co}_{0,402}\text{Fe}_{0,201}\text{Ni}_{0,067}\text{B}_{0,227}\text{Si}_{0,053}\text{Nb}_{0,05})_{99,5}\text{Cu}_{0,5}$ alaşımının manyetik alan yokken ve 1 T manyetik alan altında sıcaklığa bağlı özdirencinin değişimi	48
Şekil 4.13.	$(\text{Co}_{0,402}\text{Fe}_{0,201}\text{Ni}_{0,067}\text{B}_{0,227}\text{Si}_{0,053}\text{Nb}_{0,05})_{99,25}\text{Cu}_{0,75}$ alaşımının 0 ve 1 T'da özdirencin sıcaklıkla değişimi	48
Şekil 4.14.	$(\text{Co}_{0,402}\text{Fe}_{0,201}\text{Ni}_{0,067}\text{B}_{0,227}\text{Si}_{0,053}\text{Nb}_{0,05})_{99}\text{Cu}_1$ alaşımı için sıcaklık-özdirenç grafiği ($\mu_0 H=0, \mu_0 H=1$ T)	49
Şekil 4.15.	Co-tabanlı alaşımlar için manyetodirencin sıcaklıkla değişimi	50

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

- Çizelge 4.1. $(\text{Co}_{0,402}\text{Fe}_{0,201}\text{Ni}_{0,067}\text{B}_{0,227}\text{Si}_{0,053}\text{Nb}_{0,05})_{100-x}\text{Cu}_x$ ($x=0, 0,5, 0,75, 1$)
şeritlerinin cam geçiş sıcaklığı, kristalleşme sıcaklığı ve aşırı soğutulmuş sıvı bölgesi değerleri 39
- Çizelge 4.2. $(\text{Co}_{0,402}\text{Fe}_{0,201}\text{Ni}_{0,067}\text{B}_{0,227}\text{Si}_{0,053}\text{Nb}_{0,05})_{100-x}\text{Cu}_x$ ($x=0, 0,5, 0,75, 1$)
amorf şeritlerin ve literatürde yayınlanmış Fe-tabanlı metalik camların 0-1,5 T ve 0-2 T manyetik alan değişimi altında T_c , RC ve $(-\Delta S_M)^{\text{maks}}$ değerleri 46

1. GİRİŞ

Manyetik malzemelerdeki manyetotermal olayların incelenmesi, katı hal fiziğinin temel konularından biri olmasının yanı sıra teknolojik uygulamalar açısından da büyük önem taşımaktadır. Bu olaylar, entropi, ısı kapasitesi ve termal iletkenlik gibi fiziksel değerler üzerinde güçlü bir etkiye sahiptir ve manyetik bir malzemenin spin yapısında meydana gelen dönüşümlerin yansımasıdır. İlk olarak 1881’de Alman bilim adamı Emil Gabriel Warburg tarafından demirde keşfedilen Manyetokalorik Etki (MKE), değişen bir manyetik alana maruz kaldığında malzemenin ısınması veya soğuması olayı olarak tanımlanır. Örneğin bu etkide demirin, manyetik alan içine konulması ile milikelvin mertebesinde ısındığı, ancak manyetik alandan çıkarıldığında ise eski sıcaklığına dönecek şekilde soğuduğu görülür. Adyabatik şartlar altında (çevreyle herhangi bir ısı değişimi olmadığında) manyetik alan, malzemenin iç enerjisini değiştirerek malzemenin soğuması veya ısınmasına neden olur. Manyetokalorik Etki (MKE) terimi, sadece malzemenin sıcaklık değişimini değil, manyetik alan etkisi altındaki manyetik alt sisteminin entropi değişimini de kapsamaktadır. Manyetik alan ısı etkisiyle düzensizleştirilmiş manyetik momentleri düzene sokar ve manyetik entropi düşürülmüş olur. Manyetik alan, adyabatik koşullar altında uygulanırsa, sistem toplam entropisini korumak için sıcaklığa bağlı entropiyi artırmalıdır. Bu entropinin artması, sistemin ısınmasına ve sıcaklığının yükselmesine neden olur. Manyetik alan adyabatik olarak ortadan kaldırıldığında ise (demanyetizasyon), soğuma gerçekleşecektir. Manyetik bir malzeme kabaca manyetik, örgü ve iletim elektron alt sistemlerinden oluşmuş olarak ele alınabilir ve bu sistemlerin her birinin malzemenin toplam entropisine katkıda bulunduğu düşünülür.

MKE sayesinde manyetik malzemelerin, gaz kullanılan soğutucuların yerini alması mümkündür. Burada klasik soğutuculardaki sıkıştırma/genleştirme yerine mıknatıslanma/mıknatıslanmayı sıfırlama kullanılır. Herhangi bir soğutma işlemini gerçekleştirmek için, entropinin sıcaklığa ve bazı dış parametrelere bağlı olduğu bir sistemin olması gerekir. Gaz için bu parametre basınç, manyetik bir malzemede ise manyetik alandır. Langevin (1905) bir paramanyetik mıknatıslanma değişiminin genel olarak geri dönüşümlü bir sıcaklık değişimine neden olduğunu göstermiştir. Debye, 1926 , Giauque ise 1927 yılında, paramanyetik bir malzemeyi manyetik alan içerisinde

kullanarak aşırı düşük sıcaklıklara ulaşabilen manyetokalorik etki çalışmaları yapmışlardır. Bu fikri gerçekleştirmek için yapılan ilk deneyler, Giauque ve MacDougall (1933), Haas ve diğerleri (1933) ve Kurti ve Simon (1934) tarafından yapılmıştır. Manyetokalorik malzemelerin araştırılması, 1970'li yılların ortalarında önem kazanmış olup; 1976 yılında Brown tarafından yapılan deneyler sonucu, ilk defa oda sıcaklığına yakın (4,7 K sıcaklık farkı elde ederek) manyetik soğutma sistemi yapılmıştır. 1982 yılında, Barclay ve Steyert, manyetik soğutucu sistemi geliştirmiş ve bu çalışma ile modern soğutma konusunda ilk kez patent almışlardır. 1998 yılında, Ames Laboratuvarı ve Havacılık-Uzay Kurumu tarafından gerçekleştirilen ortak bir çalışmayla, farklı bir manyetik soğutma sistemi ile 5 T'lık mıknatıs kullanılarak, oda sıcaklığında sıcaklık dağılımının 12 K, soğutma performans katsayısının (COP) 6,6 olduğu ve soğutma kapasitesinin 550 W'a ulaştığı sonuçlar elde edilmiştir (Zimm ve ark. 1998). 2001 yılında ise 1,5 T'lık bir mıknatıs kullanılarak 50 W'lık bir soğutma gücü ile 25 °C değerinde sıcaklık dağılımı elde edilmiş ve daha sonrasında dönen iki adet 1,5 T'lık mıknatısla 840 W değerinde bir soğutma gücü ile 10 °C değerinde sıcaklık dağılımı elde edilmiştir (Zimm ve ark. 2006) . Yapılan bu çalışmalarla, manyetik soğutmada pahalı ve kontrolü zor süperiletken elektromıknatısların kullanılmasının gerekli olmadığı kanıtlanmıştır. Bu durum, manyetik soğutmanın evsel ve ticari uygulamalar açısından uygunluğunu da ortaya koymaktadır (Tishin ve Spichkin 2003).

Günümüzün temel ihtiyaçlarından birisi olan soğutma teknolojisi gaz sıkıştırımlı cihazlarla yapılmaktadır. Gaz sıkıştırımlı teknolojilerde kullanılan temel malzemeler kloroflorokarbon (CFC) ve hidrokloroflorokarbon (HCFC) çevreye önemli zararlar vermekte ve ozon tabakasının incelmeye, dolayısıyla küresel ısınmaya ve önemli çevre sorunlarına neden olmaktadır. Dünyadaki tüm enerji kullanımının % 20'si soğutma ve iklimlendirme amacıyla kullanılmaktadır (Kitanovski ve ark. 2015). Bu nedenle son yıllarda alternatif soğutma teknolojileri ve bu teknolojilerde kullanılacak ileri malzemelerin geliştirilmesi için yoğun araştırmalar yapılmaktadır. Dünya soğutma endüstrisinin araştırma-geliştirme harcamalarının önemli bir kısmı gaz sıkıştırımlı sistemlerin yerine geçecek soğutma teknolojilerinin geliştirilmesine harcanmaktadır. Alternatif soğutma teknolojilerinden biri olan manyetik soğutma hem çevre konusundaki endişeleri gideren hem de daha az enerji tüketme özelliği sağlayan bir seçenek oluşturmaktadır. Daha az hareketli parçaya sahip olan bu soğutucular daha az bakım

masraflarına ve daha uzun kullanım ömrüne sahiptir. Örneğin MKE özellik gösteren malzemelerin düşük basınçta çalışmalarından dolayı, manyetik soğutma teknolojisi gıda koruma (275 K), dondurulmuş gıda zinciri (250-265 K), ev ve araç iklimlendirmesi (285-325 K), gaz sıvılaştırma teknolojisi (20-300 K), zirai soğutma (290-320 K), endüstriyel soğutma (300-470 K), atık ayıklama işlemleri (70-370 K) ve savunma sanayii (250-350 K), vb. gibi birçok sivil ve askeri uygulama alanına sahiptir.

Manyetik malzemelerden paramanyetik ve ferromanyetik özellik gösteren malzemeler manyetik soğutucu olarak kullanılabilir. Ferromanyetik malzemeler, manyetik alan ortadan kaldırıldıktan sonra malzemedeki mıknatıslanmanın devam edip etmemesine göre sert ve yumuşak manyetik olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadır. Yumuşak manyetik malzemelerde mıknatıslanma kalıcı değildir ve güç dönüştürücü (motorlar, jeneratörler, elektromıknatıslar), güç ayarlaması, sinyal transferi (güç transformatörleri, taşıyıcı transformatörler) ve manyetik zırlamada, mıknatıslanmanın görece daha kalıcı olduğu sert manyetik malzemeler ise kalıcı mıknatıs (hoparlör, dinamolar, motorlar, sensörler) ve analog-dijital veri saklama (hard disk, video bandı, ses bandı) uygulamalarında kullanılmaktadır. Manyetik soğutma teknolojisinde ise sert (manyetik alan kaynağı olarak) ve yumuşak manyetik malzemelerin her ikisi de kullanılabilir. Bu yeni soğutma teknolojisi bu iki sınıf manyetik malzeme grubuna yeni bir kullanım alanı açmıştır.

Amorf alaşımlar (metalik camlar), mükemmel yumuşak manyetik özelliklerinden dolayı yoğun bir araştırma konusu olmuştur. Özellikle Co/Fe bazlı alaşımların üstün yumuşak manyetik özelliği (daha düşük sınırlayıcı alan, daha yüksek manyetik geçirgenlik ve daha düşük enerji kaybı) sergiledikleri bulunmuştur. Ayrıca amorf alaşımlar sadece üstün mekanik ve manyetik özelliklerinden dolayı değil, aynı zamanda manyetokalorik etkiye (MKE) dayanan manyetik soğutma (MS) teknolojisi gibi potansiyel uygulamalar için de incelenmektedir. Amorf yapıya alaşımlar, iyi termal iletkenlik, yüksek korozyon direnci, düşük histeresis, ayarlanabilir Curie Sıcaklığı (T_c) ile geniş sıcaklık aralığında gerçekleşen manyetik entropi değişim ve yüksek soğutma kapasitesi (RC) özelliği sergilerler.

MKE'nin manyetik soğutma amacıyla kullanımının dışında başka muhtemel uygulama alanlarında kullanımı da söz konusudur. Örneğin, termo manyetik faz geçişlerinden dolayı enerji hasadı (Ujihara ve ark. 2007) ile mikro akışkan pompaların (Love ve ark. 2004) ve diğer termomanyetik jeneratörlerin geliştirilmesi (Palmy 2006) sağlanmıştır. Ayrıca yakın zamanda, diyamanyetik malzemelerin değişen MKE'sinin yüksek hassasiyetli manyetik alan sensörü yapımında kullanılması (Reis 2011) ve tıpta kanserli hücrelerin değişken manyetik alan kullanılarak ısıtılması suretiyle tedavi edilmesi de teklif edilmiştir (Tishin 2006, Tishin ve ark. 2009).

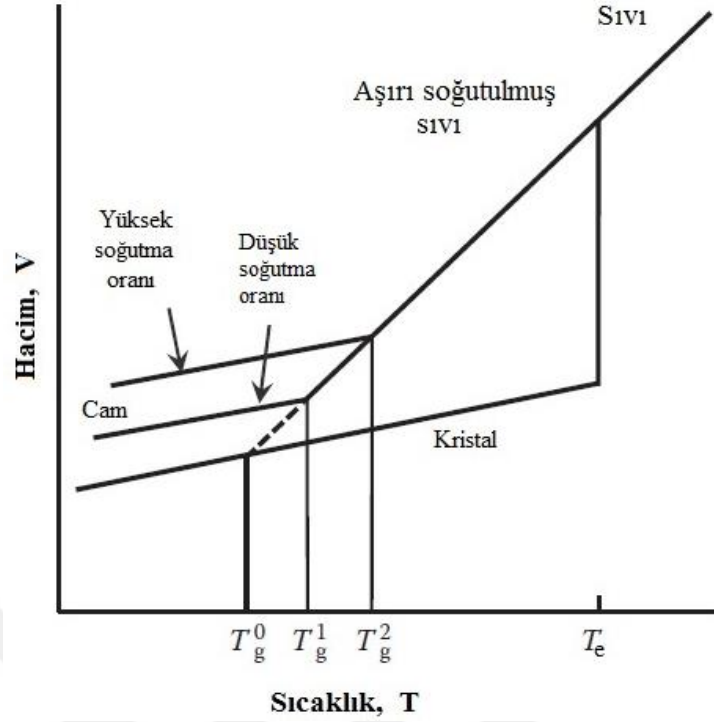


2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Metalik Cam ve Amorf Kavramı

Metalik Cam kavramı, amorf ve camsı terimleri katı malzemelerdeki kristal yapıda olmayan rastgele atomik düzenlemeleri ifade eder ve bu nedenle bu terimler, literatürde birbirinin yerine geçecek şekilde kullanılmış ve bazı karışıklıklara yol açmıştır. Ayrıca, bazı araştırmacılar tercihli olarak bu terimlerden birini veya bir kısmını kullanmaktadırlar. Buna ek olarak bazı araştırmacılar, camsı ince şerit malzemelere amorf ve hacimli camsı alaşımlar veya sadece camsı yapı olarak ifade etmişlerdir. Bu nedenle, kristal yapıda olmayan bu materyalleri tanımlamak için birkaç farklı terim kullanılmıştır. Sıvı (eriyik) halden sürekli soğutma ile oluşan kristal olmayan bir katı, bir cam olarak bilinir. Bir metal eriyiğin camsı duruma dönüşmesi, cam geçiş sıcaklığının (T_g) altında bir sıcaklıkta önemli ölçüde yeterince soğuması sonucu olur. Cam yapılar belirli bir cam geçiş sıcaklığına sahip malzemelerdir. Cam geçiş sıcaklığından daha yüksek sıcaklıkta malzeme yapı değiştirerek kristal yapıya geçiş yapar ve bu durumdaki sıcaklık kristalleşme sıcaklığı (T_x) olarak bilinir.

Bir sıvı metalin sıcaklığı düşürüldüğünde, hacimde bir azalma meydana gelir. Erime noktasında hızlı bir şekilde soğutulmayan malzemenin hacminde keskin bir düşme meydana gelir ve kristal yapı karakteristiği meydana gelene kadar bu durum devam eder. Şekil 2.1.'de cam ve kristal malzeme yapısındaki malzemenin sıcaklık hacim ilişkisi gösterilmektedir. Burada T_g^0 , kristal durumundaki cam geçiş sıcaklığı, T_g^1 düşük soğutma oranındaki cam geçiş sıcaklığı, T_g^2 yüksek soğutma oranındaki cam geçiş sıcaklığıdır. Termal genleşme katsayısına bağlı olarak daha hızlı soğutma işlemi gerçekleşmesi durumunda, hızlı soğutulmayan malzemenin hacminde meydana gelen keskin düşüş gözlenmez. Sıvı (eriyik) için, hacimde meydana gelen bu durum daha düşük sıcaklıklara gidildiğinde Şekil 2.1.'de gösterildiği gibi gerçekleşmektedir. Meydana gelen bu olay kristal yapı oluşumunu atlanarak, atomik boyutlarda düzenlemenin olabileceğini göstermektedir.



Şekil 2.1. Kristal ve cam oluşturan bir materyal için sıcaklık ile hacim değişimi grafiği.

Sıcaklık değişirken sadece hacim değeri değişmez. Buna ilave olarak viskozluk (η) ve özısı (C_p) değerleri de değişmektedir. Sıvı soğutuldukça özısı değeri artar. Fakat geçiş sıcaklığı T_g değerine kadar yavaşça artış meydana gelir ve bu sıcaklıkta durur ve ani bir düşüş meydana gelir. Cam yapı oluşumundan sonra kristal ve cam özısı değerleri arasında oldukça küçük bir fark olur. Viskozluk değeri cam geçiş sıcaklığının olduğu bölgede kristal olduğu andan daha büyük bir değere sahiptir.

Metalik camlar, isminden anlaşılacağı gibi alaşımda içermiş olduğu elementlerin çoğu metal olmasından kaynaklanmaktadır. Metalik camlar genellikle ikili metal-metal, metal-metaloit veya iki elementten daha fazla saf elementin bir araya gelmesi sonucu oluşur. Alaşım içeriğinde yüzde olarak hangi element daha fazla bulunuyorsa, o elementin adıyla belirtilir. Buna bu araştırmada üretilen $(Co_{0.402}Fe_{0.201}Ni_{0.067}B_{0.227}Si_{0.053}Nb_{0.05})_{100-x}Cu_x$ alaşım serisinin Co-tabanlı olarak isimlendirilmesi örnek olarak verilebilir.

Ayrıca, alaşımın manyetik özellikli olması isteniyorsa, ferromanyetik özellikli geçiş elementleri tercih edilmelidir ve aynı zamanda yüksek miktarda bu elementleri içermelidir. Düşük bir manyetik alanda bile, alan yönünde bir net mıknatıslanma gösteren

bu elementler Fe-Co-Ni elementleridir. Ayrıca, Fe, Co, Ni ve Cu (Inoue ve ark. 2008) elementlerini içeren alaşımların camlaşma kabiliyetleri oldukça yüksek olmaktadır.

2.2. Metalik Camların (Amorf) Gelişimi ve Özellikleri

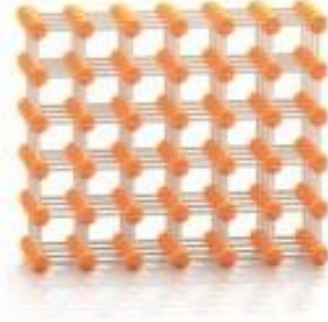
Metalik camlar, kristal fazların kümelenmesi ve büyümesinin bastırılması neticesinde eriyik metalin yüksek hızlarda (10^4 - 10^8 K/s) soğutulması (Zhong ve ark. 2015) sonucunda elde edilmektedir. Yüksek hızlarda soğutma işlemi kristal yapı olmadan, alaşımdaki atomların düzensiz yapı dağılımı ilk kez Klement ve ark. (1960) tarafından keşfedilmiştir. Amorf yapının oluşumundaki hızlı soğutma ve boyutsal kısıtlamalar sebebiyle metalik camlar sadece levha ve şerit şeklinde üretilmiştir (Hagiwara ve ark. 1982). Gelecek vadeden bu metalik camların özellikleri, düşük soğutma hızlarında yüksek camlaşma yeteğine sahip hacimli metalik camların (BMG) üretilmelerini mümkün kılmak için 1980 yılların sonuna doğru Tohoku Üniversitesinden Inoue ve ark. nadir toprak elementleriyle birlikte Fe ve Al'lu elementlerin alaşımları üzerinde araştırmalar yapmışlardır. Inoue ve Ark. daha düşük soğutma hızlarında Ln-Al-Ni ve Ln-Al-Cu alaşımlarında mükemmel camlaşma kabiliyeti keşfetmişlerdir. 1993 yılında ise Kaliforniya teknoloji (Caltech) enstitüsünden Johnson ve Peker, Vitreloy 1 adında beşli ($Zr_{41,2}Ti_{13,8}Cu_{12,5}Ni_{10}Be_{22,5}$) alaşımını birkaç cm kritik kalınlıkta üretmeyi başardılar. Aynı araştırmacılar 1997 yılında ise $Pd_{40}Ni_{40}P_{20}$ alaşımından yola çıkarak kritik kalınlığı 7,2 cm olan Pd-Cu-Ni-P alaşımını üretmeyi başarmışlardır.

2.3. Amorf Malzemelerin Yapısı

Katı malzemeler iki gruba ayrılmıştır. Bunlardan biri kristal yapı, diğeri ise amorf yapı olarak ifade edilir. Kristal yapılar atomlar arası, kısa ve uzun mesafeli, düzenli ve tekrarlanan bir yapıya sahiptir. Daha önceki bölümde ifade edildiği gibi cam yada amorf katı, literatürde aynı tür malzemeleri ifade etmekte kullanılır. Amorf (yada Cam) malzemelerde ise atomlar rastgele ve tekrarlanamayan düzensiz bir yapıya sahiptir. Şekil 2.2.'de kristal ve amorf (Cam) yapılarının atom dizilimleri gösterilmektedir.



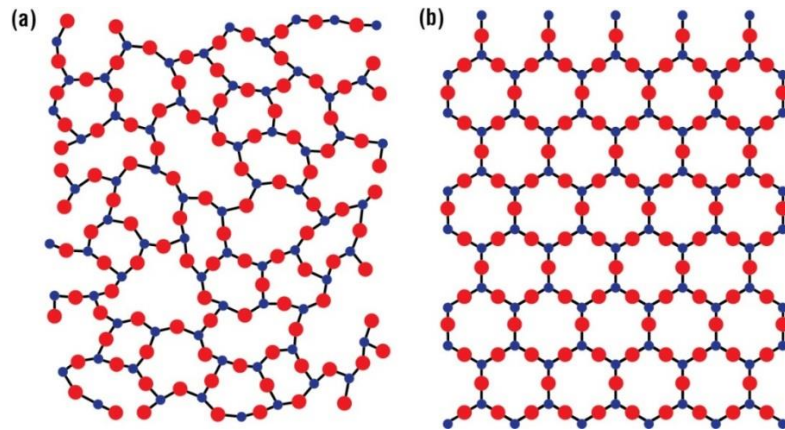
Amorf yapı
(a)



Kristal Yapı
(b)

Şekil 2.2. Amorf (metalik cam) (a) ve kristal malzemelerin 3 boyutlu (3D) atom yapılarının dizimlerinin gösterimi

Amorf malzemelerin atomik yapı boyutu incelendiğinde atomlar arasında belli bir düzene sahip olduğu görülür. Şekil 2.3.'de ise amorf ve kristal yapıdaki malzemelerin 2 boyutlu atomik yapısının karşılaştırılması gösterilmiştir. Amorf yapıda atomlar arasında belli bir düzen olmadığı ve sadece birkaç en yakın komşu atom mesafesinde kendini tekrar ederken, kristal yapıda atomlar kısa ve uzun mesafeli düzenli bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Amorf yapıdaki metalik camlar düzensiz bir yapıda olmalarına rağmen, malzeme her yönde (izotropik) aynı özelliği göstermektedir. Bu da metalik camları diğer yapılardan üstün kılar.



Şekil 2.3. Amorf (a) ve kristal (b) yapılarının 2 boyutlu atomik dizimlerinin karşılaştırılması

2.4. Metalik Camların Camlaşma yeteneği

Cam oluşum prensibi daha öncede ifade edildiği gibi bir metalik eriyiğin camsı duruma dönüşmesi için cam geçiş sıcaklığının altındaki bir sıcaklığa önemli ölçüde yeterince soğuması gerektiği ile ifade edilmektedir. Pol Duwez ve öğrencileri 1960 yılında hızlı katılaşma işlemiyle (RSP) Au-Si alaşımında bir metalik camın ilk sentezini keşfetmiştir. Metalik camları makul ve güvenilir bir şekilde üretmek ve bunları büyük miktarlarda ve tekrarlanabilir bir şekilde üretmek için, eriyiklerin cam oluşumuna ilişkin temel nedenlerin bilinmesi önemlidir. Metalik bir alaşımın camsı duruma dönüşme yeteneği, cam oluşturma yeteneği (GFA) olarak tanımlanmaktadır.

Yüksek camlaşma yeteneğine sahip alaşımları üretmek kritik parametrelere bağlıdır. Alaşımların cam oluşturma yeteneğini belirlemek için dönüşüm sıcaklıkları, erime sıcaklığı (T_e), kristalleşme sıcaklığı (T_x) ve cam geçiş sıcaklığı (T_g) kullanılarak camlaşma yeteneği hakkında bir takım öngörülere ulaşılabilmektedir. Diğer bir değişle yüksek bir T_g değeriyle ve mümkün olduğu kadar düşük T_e değerinde olan alaşım, kolay cam oluşum özelliği gösterecektir. Bu iki değerlerin oranı indirgenmiş cam geçiş sıcaklığı T_{rg} olarak ifade edilir ve matematiksel ifadesi;

$$T_{rg} = \frac{T_g}{T_e} \quad (2.1)$$

şeklinde verilir. Turnbull ve çalışma ark. çekirdeklenme (nükleasyon) teorisine dayanarak, $T_{rg} \geq 2/3$ değerinde kristal fazın, homojen çekirdeklenmede tamamen bastırıldığını ileri sürmüşlerdir. Turnbull, T_{rg} 'nin alaşımların cam oluşturma kabiliyetini belirlemek için bir kriter olarak kullanılabileceğini öne sürmüştür. Tipik olarak, bir alaşımın bir cam haline gelmesi için minimum $T_{rg} \cong 0,4$ değerinin gerekli olduğu bulunmuştur. Ancak T_{rg} değeri ne kadar yüksekse, camın oluşması o kadar kolay olur. T_{rg} değerleri camsı numunenin boyutundan bağımsızdır. Süper (Aşırı) soğutulmuş sıvı bölgenin genişliği (ΔT_x) de, metalik camlarda üretilen camsı fazın ne kadar kararlı ve kristalleşmeye karşı dirençli olduğunu göstermektedir.

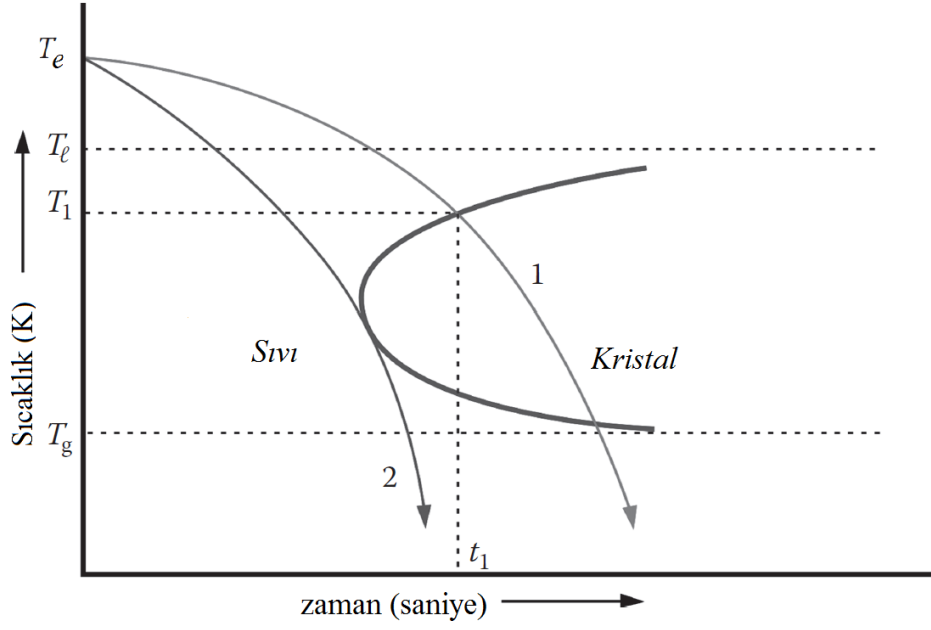
$$\Delta T_x = T_x - T_g \quad (2.2)$$

Bunu temel olarak kullanan Inoue, A. (1995, 1997 ve 2000), alaşımların GFA'sının doğrudan ΔT_x ile ilişkili olduğunu öne sürmüştür. Buna göre cam oluşumu için kritik soğutma oranının, ΔT_x değerindeki bir artış ile azaldığı kaydedilmiştir.

2.5. T-T-T (Zaman-Sıcaklık-Geçiş) Diyagramları

T-T-T diyagramı sadece kritik soğutma oranlarını tahmin etmek için kullanılmıştır. Bu diyagramlar, genel olarak aşırı soğutulmuş sıvı bölgesindeki metalik camların termal kararlılığını incelemek için kullanılabilir.

Şekil 2.4.'teki T-T-T (Temperature-Time-Transformation) diyagramında sıcaklık y-ekseninde, zaman x-ekseni üzerinde temsil edilir. Geçişin tamamlanması için geçen süre genellikle çok uzun olduğu için zaman logaritmik olarak verilir. Bir C-şekline sahip olan geçiş eğrisi, belirli bir sıcaklıkta, kararlı katı (kristal) fazın oluşumunu başlatmak için gereken süreyi temsil eder. Eğer alaşım denge koşullarında sıvı durumdan soğutulursa, yani çok yavaş bir şekilde, katılaşma çok uzun bir zaman gerektirecektir ve katılaşma ürünü her zaman kristal bir katı olacaktır. Sıvı alaşım biraz daha hızlı soğutulsa bile (Şekil 2.4.'deki "1" eğrisi ile temsil edilir), katılaşma T_1 sıcaklıkta zamanda t_1 'de meydana gelir ve dönüşümün ürünü hala kristal bir katıdır. Fakat, eğer sıvı C eğrisine teğet olan "2" eğrisiyle temsil edilen soğutma hızından daha hızlı bir oranda katılaşırsa kristal oluşumu gerçekleşmeyecektir. Bunun yerine sıvı, süper soğutulmuş (veya aşırı soğutulmuş) durumda tutulacaktır. Bu aşırı soğutulmuş sıvının sıcaklığı daha da düşürülürse (kristalleşmenin gerçekleşmesine izin vermeden), sıvının viskozitesi artmaya devam edecektir ve süper soğutulmuş sıvı bölgede T_g 'nin altındaki sıcaklıklarda camsı bir faz oluşacaktır.



Şekil 2.4. Alaşım sistemi için şematik T-T-T diyagramı

Şekil 2.4.'te "2" eğrisi ile gösterilen soğutma hızına kritik soğutma oranı denir ve genellikle R_c sembolü ile gösterilir. Kritik soğutma oranı R_c , eğer sıvı alaşım bu hızın üzerinde soğutulursa, aşırı soğutulmuş sıvının T_g 'nin altındaki bir sıcaklığa soğutulması şartıyla bir camın tamamen oluşması mümkündür. Ancak, eriyik kritik soğutma hızından daha yavaş bir oranda soğutulduğunda homojen bir camsı faz oluşmaz. Bu nedenle, cam oluşumunu tahmin etmeyi düşünebilen en basit ve en mantıklı kriter, sıvı alaşımın, R_c 'den daha hızlı bir oranda ve T_g 'nin altında bir sıcaklığa soğutulması gerektiğidir. İzotermal kristalizasyon kinetiği teorisini kullanarak farklı alaşım sistemleri için kritik soğutma hızlarını teorik olarak hesaplamak da mümkündür.

C eğrisi teğetindeki sıcaklık ve zaman sırasıyla T_n ve t_n ise ve sıvılaşıma sıcaklığı T_l ise

$$R_c \cong \frac{T_l - T_n}{t_n} \quad (2.3)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

2.6. Manyetik Histeresis Eğrisi

Ferromanyetik malzemeler içerisine konuldukları manyetik alanın etkisini arttıracak şekilde mıknatıslanırlar. Bunun yanında dış manyetik alan tamamen ortadan kalksa bile bu malzemeler üzerinde kalıcı mıknatıslanma devam eder. Mıknatıslanmanın giderilmesi ters yönde uygulanacak manyetik alanla mümkün olmaktadır (koersivite veya sıfırlayıcı alan). Manyetik malzemelerin manyetik alanla ilişkisi B (manyetik indüksiyon yada manyetik akı yoğunluğu) ile H (manyetik alan şiddeti) arasındaki değişimle ifade edilir. H dış manyetik alanı ifade ederken, B malzeme etkilerinin de göz önüne alındığı ölçülen alanı ifade etmektedir. Bu iki değişken arasındaki ilişki şu şekilde ifade edilir:

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.4)$$

Burada μ manyetik geçirgenlik olup, boşluğun geçirgenliği (μ_0) ve malzemenin alınganlığı (χ_m) cinsinden şöyle yazılabilir:

$$\mu = \mu_0 (1 + \chi_m) \quad (2.6)$$

Malzemenin mıknatıslanması ise şu şekilde tanımlanır.

$$\vec{M} = \chi \vec{H} = \chi_m \mu_0 \vec{H} \quad (2.7)$$

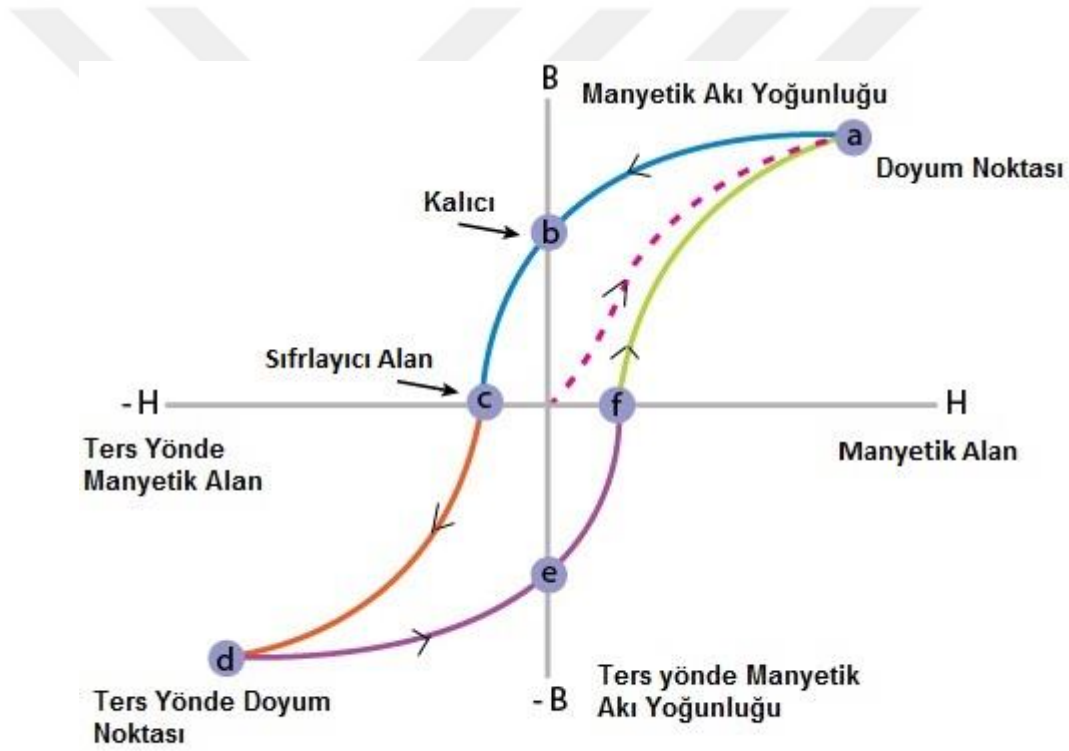
$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) \quad (2.8)$$

Yukarıda belirtilen denklem manyetik alanın düşük olduğu bölgelerde doğrusal bir ilişkinin ifadesidir. Fakat alan şiddeti arttıkça mıknatıslanma bu doğrusal ilişkiden sapar ve bir doyuma ulaşır. Sonrasında ise manyetik alan kaldırılrsa dahi malzeme üzerinde kalıcı bir mıknatıslanma olur. Bu mıknatıslanmanın giderilmesi ters yönde uygulanacak bir alanla mümkündür.

Ferromanyetik malzemede oluşan kalıcı mıknatıslanma nedeniyle $B-H$ eğrisinde belirli bir histeresis görülür (Şekil 2.5.). Bu histerisise daha iyi anlamak için aşağıdaki şekle bakılabilir. Başlangıçta dış manyetik alan olmadığını düşünelim ($H=0$). Bu durumda başlangıçta malzemenin mıknatıslanması sıfır olacağından orijinden başlamış olacağız. Buradan sonra manyetik alan arttırıldıkça mıknatıslanma değeri başlangıçta doğrusal olarak artıp sonra bir noktada doyuma ulaşır (a noktası). Manyetik doyumdan sonra manyetik alan sıfırlansa dahi malzeme üzerindeki mıknatıslanma kalır (b noktası). Bunun giderilmesi için zıt yönde manyetik alan uygulanması gerekir (c noktası).

Bu zıt yöndeki manyetik alan arttırılmaya devam ederse bu sefer malzeme mıknatıslanması ters yönde doyuma gider (d noktası). Bu manyetik alan kaldırılrsa bile malzeme üzerinde ters yönde kalıcı mıknatıslanma devam eder (e noktası). Bunun giderilmesi için doğru yönde manyetik alan uygulanmalıdır (f noktası). Bu doğru yöndeki alanın şiddeti arttırılmaya devam ederse tekrar pozitif doyuma ulaşılır (a noktası) ve böylece histeresis tamamlanmış olur.

Bu histeresis eğrileri ferromanyetik malzemelerin karakterizasyonları açısından büyük öneme sahiptir. Halen kullanılmakta olan manyetik sabit disklerdeki bilgi depolama da, yukarıda anlatılan mıknatıslanma/mıknatıslanmayı sıfırlama prensibiyle çalışmaktadır.



Şekil 2.5. Manyetik Histeresis Eğrisi

2.7. Mke ve Termodinamik ile İlişkisi

2.7.1. Genel Termodinamik Yaklaşım

Manyetik malzemelerdeki manyeto-termal etkileri tanımlamak için, iç enerji U , serbest enerji F ve Gibbs serbest enerjisi G kullanılır.

Sistemin iç enerjisi U : S (entropi), V (hacim) ve H 'nin (manyetik alan) (Denklem 2.9a) ya da S , V ve M (Mıknatıslanma)'nin (Denklem 2.9b) bir fonksiyonu olarak gösterilebilir (Swalin 1962, Bazarov 1964, Vonsovskii 1974):

$$U = U(S, V, H) \quad (2.9a)$$

$$U = U(S, V, M) \quad (2.9b)$$

Böylece sistemin iç enerjisi U 'nun toplam diferansiyali şeklinde ifade edilebilir.

$$dU = TdS - PdV - MdH \quad (2.10a)$$

$$dU = TdS - PdV - HdM \quad (2.10b)$$

Burada P basıncı, T mutlak sıcaklıktır.

Manyetik alan şiddeti H , genellikle Gibbs serbest enerjisi G ve serbest enerjisi F 'de dış bir parametre olarak kullanılır.

T , V ve H 'nin fonksiyonu olan serbest enerji F , sabit hacimli sistemler için kullanılır ve şu şekilde tanımlanmaktadır: (Swalin 1962, Bazarov 1964, Vonsovskii 1974)

$$F = U - TS \quad (2.11)$$

Böylece toplam diferansiyeli şu şekilde olur:

$$dF = -SdT - PdV - MdH \quad (2.12)$$

Gibbs serbest enerjisi, T , P ve H 'nin bir fonksiyonudur ve sabit basınç altındaki sistemler için kullanılır ve aşağıdaki denklem (2.13) şeklinde ifade edilir (Swalin 1962, Bazarov 1964, Vonsovskii 1974):

$$G = U - TS + PV - MH \quad (2.13)$$

Gibbs serbest enerjisinin G , toplam diferansiyel ifadesi

$$dG = VdP - SdT - MdH \quad (2.14)$$

şeklindedir.

F Serbest enerji için iç parametreler olan S , P , ve M ; T , V ve H dış parametre değişkenlerine bağlıdır.

Bu iç parametreler Denklem 2.12'den hareketle aşağıdaki diferansiyellerle durum denklemleri belirlenebilir (Swalin 1962, Bazarov 1964, Vonsovskii 1974):

$$S(T, H, V) = -\left(\frac{\partial F}{\partial T}\right)_{H, V} \quad (2.15a)$$

$$M(T, H, V) = -\left(\frac{\partial F}{\partial H}\right)_{V, T} \quad (2.15b)$$

$$P(T, H, V) = -\left(\frac{\partial F}{\partial V}\right)_{H, T} \quad (2.15c)$$

Benzer şekilde, Gibbs serbest enerjisi için Denklem (2.14) kullanılarak aşağıdaki denklemler yazılabilir (Swalin 1962, Bazarov 1964, Vonsovskii 1974):

$$S(T, H, P) = -\left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_{H, P} \quad (2.16a)$$

$$M(T, H, P) = -\left(\frac{\partial G}{\partial H}\right)_{T, P} \quad (2.16b)$$

$$V(T, H, P) = -\left(\frac{\partial G}{\partial P}\right)_{T, H} \quad (2.16c)$$

Şayet M Gibbs Serbest enerjisinde, manyetik alan H yerine dış bir değişken olarak seçilirse Denklem (2.10b) ve (2.12) yardımıyla,

$$H = \left(\frac{\partial G}{\partial M}\right)_{T, P} \quad (2.16d)$$

olarak yazılabilir. Ardından Maxwell denklemleri olarak isimlendirilen (2.17a), (2.17b) ve (2.17c) eşiklikleri (2.16a) (2.16b) ve (2.16c) denklemlerin yardımıyla elde edilir (Kittel 1958, Swalin 1962, Bazarov 1964, Vonsovski 1974):

$$\left(\frac{\partial S}{\partial H}\right)_{T, P} = \left(\frac{\partial M}{\partial T}\right)_{H, P} \quad (2.17a)$$

$$\left(\frac{\partial S}{\partial P}\right)_{T,H} = -\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_{H,P} \quad (2.17b)$$

$$\left(\frac{\partial S}{\partial M}\right)_{T,P} = -\left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_{M,P} \quad (2.17c)$$

Sabit x parametresine göre tanımlan C_x ısı sığası, aşağıdaki şekilde ifade edilir (Swalin 1962, Bazarov 1964)

$$C_x = \left(\frac{\delta Q}{dT}\right)_x \quad (2.18)$$

Burada δQ , sistem sıcaklığının dT kadar değişmesine karşılık sistem ısısındaki değişikliğin ifadesidir. Termodinamiğin ikinci yasasını kullanarak (Swalin 1962, Bazarov 1964):

$$dS = \frac{\delta Q}{T} \quad (2.19)$$

yazılabilir ve ısı sığası denklem (2.20)'deki gibi ifade edilebilir:

$$C_x = T \left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_x \quad (2.20)$$

Hacimsel ısı genleşme katsayısı $\alpha_T(T, H, p)$ aşağıdaki gibi tanımlanabilir

$$\alpha_T(T, H, P) = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_{H,P} \quad (2.21a)$$

yada (2.17b) denklemi kullanılarak şöyle ifade edilebilir.

$$\alpha_T(T, H, P) = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial S}{\partial P}\right)_{T,H} \quad (2.21b)$$

Böylece T , H ve p 'nin bir fonksiyonu olarak ifade edilen manyetik sistemin toplam entropisinin diferansiyel denklem (2.22)'de gösterildiği gibi yazılabilir:

$$dS = \left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_{H,P} dT + \left(\frac{\partial S}{\partial H}\right)_{T,P} dH + \left(\frac{\partial S}{\partial P}\right)_{T,H} dP \quad (2.22)$$

(2.17a), (2.20), (2.21b) ve (2.22) denklemlerini kullanarak adyabatik bir süreç için ($dS = 0$) aşağıdaki denklemi elde edebiliriz:

$$\frac{C_{H,P}}{T} dT + \left(\frac{\partial M}{\partial T}\right)_{H,P} dH - \alpha_T V dP = 0 \quad (2.23)$$

burada $C_{H,p}$ sabit manyetik alan ve basınç altındaki ısı sığasıdır.

Adyabatik-izobarik süreçte ($dP = 0$, ki bu süreç genellikle manyetokalorik deneylerde gerçekleşir.), manyetik alanın değişmesinden kaynaklanan sıcaklık değişimi denklem (2.23) yardımıyla elde edilebilir:

$$dT = \frac{T}{C_{H,P}} \left(\frac{\partial M}{\partial T} \right)_{H,P} dH \quad (2.24)$$

Eşitlik (2.22) kullanılarak, manyetik malzemede izobarik (eşbasınç) ve adyabatik mıknatıslanma koşulları altında dH kadar bir manyetik alan altında ortaya çıkan dT kadar manyetokalorik etki için genel ifadesi aşağıdaki gibidir.

$$\frac{dT}{dH} = - \frac{(\partial S / \partial H)_{T,P}}{(\partial S / \partial T)_{H,P}} \quad (2.25)$$

T , M ve P 'nin bir fonksiyonu olarak ifade edilen manyetik sistemin toplam entropisinin toplam diferansiyeli şöyle yazılabilir:

$$dS = \left(\frac{\partial S}{\partial T} \right)_{M,P} dT + \left(\frac{\partial S}{\partial M} \right)_{T,P} dM + \left(\frac{\partial S}{\partial P} \right)_{T,m} dP \quad (2.26)$$

Denklemlerden (2.17c), (2.20) ve (2.26)'den mıknatıslanmanın adyabatik-izobarik değişiminden kaynaklanan manyetokalorik etki ifadesi elde edilir:

$$dT = \frac{T}{C_{M,P}} \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_{M,P} dM \quad (2.27)$$

2.7.2. Entropi, Entropi Değişimi ve Manyetokalorik Etkisi

Manyetik bir malzemenin iki önemli özelliği, toplam entropi (S) ve manyetik alt sistemin manyetik entropisi (S_M)'dir. Manyetik alan, sıcaklık ve diğer termodinamik parametrelerin değişimiyle entropi değiştirilebilir. Manyetik entropi değişimi, manyetokalorik etki ve ısı sığasına katkısı ile yakından ilişkilidir. Ayrıca manyetik entropi değişimi, soğutma kapasitesi ve manyetik soğutucuların özelliklerini belirlemek için kullanılır. Bir manyetik malzemenin toplam entropisi, sabit basınçta genel olarak aşağıdaki gibi ifade edilir :

$$S(H, T) = S_M(H, T) + S_l(H, T) + S_e(H, T) \quad (2.28)$$

Burada S_M manyetik entropi, S_l örgü entropisi ve S_e elektronik entropidir. Genel olarak, entropiye katkıda bulunan üç etki (S_M , S_l ve S_e) sıcaklık ve manyetik alana bağlıdır ve açıkça birbirinden ayrıştırılamaz. Özellikle düşük sıcaklık bölgesinde bu durum daha da zordur, bu bölgedeki elektronik ısı sığası katsayısının değeri a_e , manyetik alanın etkisi altında veya eşzamanlı bulunan manyetik, yapısal ve elektronik faz geçişleri durumlarında değişebilir.

Manyetokalorik etki gösteren malzemeler, manyetik faz geçişlerine göre iki'ye ayrılır. Bunlar; birinci dereceden manyetik faz geçişli (FOMPT) malzeme (Ör: $\text{La}(\text{Fe}_{0,9}\text{Si}_{0,1})_{13}\text{H}_{11}$) ve ikinci dereceden manyetik faz geçişli (SOMPT) (Ör: $\text{Gd}_{0,74}\text{Tb}_{0,26}$) malzemelerdir. FOMPT özelliğine sahip malzemeler adyabatik sıcaklık (ΔT_{ad}) değişimi ile beraber manyetik entropi değişime (ΔS_M) sahip olmalarına rağmen manyetokalorik etki göstermeleri zaman almaktadır (iki basamaklı saniye düzeyinde). FOMPT malzemelerinin, manyetik entropi değişimi (ΔS_M)-sıcaklık grafiği dar ve sivri pik gösterirler, bu sonuç FOMPT malzemelerinin düşük soğutma kapasitesi (RC)'ye sahip olacağı anlamına gelmektedir.

SOMPT özelliği gösteren malzemelerin manyetokalorik etki göstermeleri çok kısa zamanda gerçekleşmektedir (mikrosaniye düzeyinde). SOMPT malzemelerinin, manyetik entropi değişimi (ΔS_M)-sıcaklık grafiği geniş bir pik gösterir ve bu malzemeler yüksek soğutma kapasitesi (RC) gösterirler. Ayrıca, SOMPT malzemelerinde manyetik histeresis kayıpları düşüktür. Son yıllarda SOMPT özellikli malzemeler üzerine çok sayıda şirket Ar-Ge çalışmaları yapmıştır. Ticari olarak Cooltech Application firması Gd tabanlı manyetik soğutma malzemeleri ve prototipleri üzerine çalışmalar yapmıştır.

Manyetik soğutma malzemelerinin karakteristik özelliklerin belirlenmesinde bir kaç büyüklüğün belirlenmesi gerekir. Bunlar, Adyabatik sıcaklık değişimi (ΔT_{ad}), manyetik entropi değişimi (ΔS_M) ve soğutma kapasitesi (RC)'dir. ΔT_{ad} , adyabatik şartlar altında manyetokalorik etki gösteren malzemelere bir manyetik alanın uygulanması ve kaldırılması neticesinde oluşan sıcaklık değişimini ifade etmektedir. Bir diğer büyüklük olan manyetik entropi değişimi (ΔS_M) manyetik soğutmada kullanılan manyetokalorik özellik gösteren malzemelerin değerlendirilmesinde kullanılır. Bu büyüklükler mıknatıslanmanın (M) sıcaklıkla değişimini veren denklemler ile aşağıdaki gibi verilir.

$$\Delta T_{ad} = -\mu_0 \int_0^{H_{maks}} \frac{T}{C_p} \left(\frac{\partial M}{\partial T} \right)_H dH \quad (2.29)$$

Denklem (2.29), adyabatik sıcaklık değişimi (ΔT_{ad})'nin matematiksel ifadesidir. Burada C_p özısı, μ_0 boşluğun manyetik geçirgenliği ve H_{maks} uygulanan maksimum manyetik alanı ifade etmektedir. Manyetik entropi değişimi (ΔS_M) ifadesi de Maxwell denklemi kullanılarak mıknatıslanmanın eş-sıcaklık ifadesinden (T. Hashimoto ve ark. 1981):

$$\Delta S_M = \mu_0 \int_0^{H_{maks}} \left(\frac{\partial M}{\partial T} \right)_H dH \quad (2.30)$$

şeklinde ifade edilir.

SOMPT malzemelerde C_p özısı manyetik alandan bağımsızdır, çünkü faz geçiş sıcaklığında süreksizdir. Manyetik geçiş sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda C_p üzerine H 'in etkisi ihmal edilebilir. Bu yüzden Denklem (2.29) yaklaşık olarak

$$\Delta T_{ad} \cong -\frac{T}{C_p} \Delta S_M \quad (2.31)$$

yazılabilir.

Soğutma sisteminin sıcak ve soğuk birimleri arasında transfer edilen enerjinin bir ölçüsü olan soğutma kapasitesi (RC) ise;

$$RC(H) = \int_{T_{soğuk}}^{T_{sıcak}} \Delta S_M(T, H) dT \quad (2.32a)$$

veya

$$RC = \Delta S_M^{tepe} \times \delta T_{FWHM} \quad (2.32b)$$

şeklinde yazılabilir (K.A. Gschneidner, Jr., ve V.K. Pecharsky 2000).

Burada $T_{soğuk}$ ve $T_{sıcak}$ manyetik entropi değişiminin maksimumunun yarısına karşılık gelen sıcaklıklardır. Maksimum (ΔS_M) değerinin yarı maksimuma karşılık gelen sıcaklık aralığı $\delta T_{FWHM} = T_{soğuk} - T_{sıcak}$ ile gösterilir. Yukarıdaki denklemler ile manyetik ölçümler yardımıyla malzemenin manyetik soğutma kapasitesi tayin edilir. Soğutma kapasitesi, bir malzemenin soğutma döngüsü sırasında ne kadar ısıyı transfer edebileceğini gösteren önemli bir parametredir.

2.7.3. Manyetodirenç Etkisi

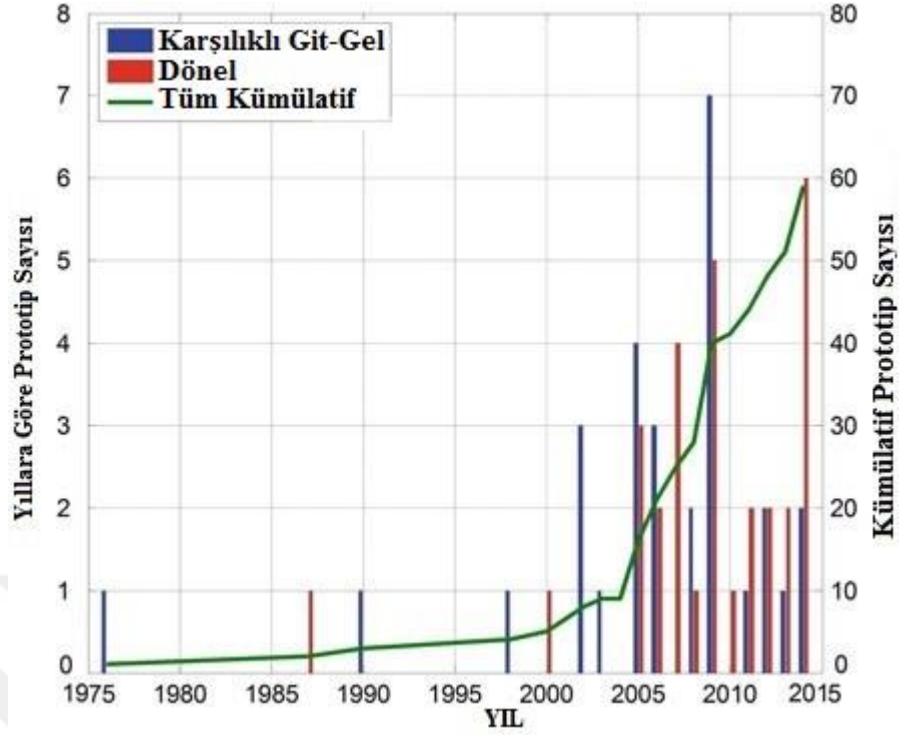
Manyetodirenç (MR) etkisi, malzemenin elektriksel direncinin manyetik alan etkisi altında değişmesidir. Manyetik alan varlığında dirençte oransal yüzde değişim olarak tanımlanır ve

$$\% \text{ MR} = \frac{\rho(H) - \rho(0)}{\rho(0)} \times 100 \quad (2.33)$$

şeklinde ifade edilir. Burada $\rho(H)$ manyetik alan altındaki öz direnç, $\rho(0)$ ise manyetik alan olmadığı durumdaki öz dirençtir. Malzemenin direnci, manyetik alan uygulandığında artıyorsa pozitif MR, azalıyorsa negatif MR elde edilir. Yukardaki denklemde görüldüğü gibi manyetik direnç, elektriksel dirençte göreceli bir değişimdir ve numunenin geometrisinden, boyutundan ve şeklinden etkilenmez. MR, manyetik alan şiddeti ve malzemeden geçen akıma göre manyetik alanın yönüne bağlıdır. Manyetik alan akıma dik bir şekilde uygulanırsa enine manyetodirenç (EMR), paralel bir şekilde uygulanması durumunda ise boyuna manyetodirenç (BMR) ölçülür.

2.7.4. Manyetik Soğutma ve Teknolojik Geleceği

Brown, 1976'da oda sıcaklığına yakın çalışan ilk manyetik buzdolabı prototipini ürettiğinden beri, son 40 yılda tasarlanan ve inşa edilen çok sayıda farklı prototip yapılmıştır. Bununla birlikte, oda sıcaklığına yakın manyetokalorik enerji dönüşümü alanında 40 yıllık bilimsel girdilere rağmen, teknoloji sadece ticarileştirmenin eşiğine gelebilmiştir. Oluşturulan her yeni prototiple, istenen hedefe doğru yavaş ama ölçülebilir iyileştirmeler görülmektedir. Şekil 2.6.'da 2014 yılına kadar üretilen prototip sayısını göstermektedir.



Şekil 2.6. 2014 yılına kadar üretilen prototip sayısının yıllara göre dağılımı

Her yeni yılda, prototip sayısının artması, manyetokalorik enerji dönüşümü araştırma topluluğunun teknoloji geliştirme ile birlikte araştırma faaliyetlerini genişletmekte olduğuna işaret etmektedir. Son yıllarda manyetik soğutucular piyasaya yavaş-yavaş sürülmeye başlanmıştır. 2015 yılında Alman soğutucu üreticisi Kirsch, Şekil 2.7.'de gösterilen Cooltec firması tarafından üretilen manyetik soğutma sistemi kullanarak ilk tıbbi-medikal soğutucuyu (Şekil 2.8.) piyasa sürmüştür.



Şekil 2.7. Manyetik Soğutma Sistemi



Şekil 2.8. İlk tıbbi-medikal soğutucu (Cooltech-Kirsch)

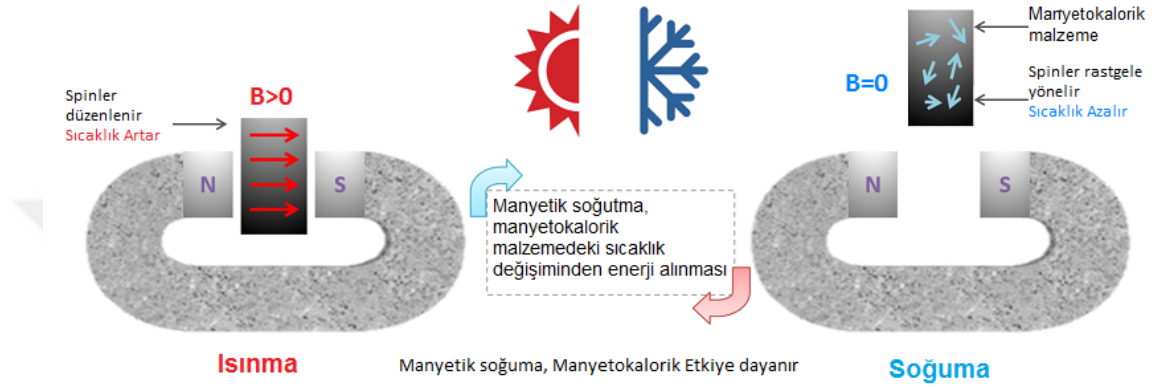
Yine Cooltech App. firması 2016 yılında Carrefour mağazalarında, Şekil 2.9.'da gösterilen manyetik soğutmalı buzdolaplarını başarıyla test etmiş ve ticari olarak pazara sunmuştur.



Şekil 2.9. Manyetik Soğutmalı İlk Ticari Buzdolabı (Cooltech-Carrefour)

2.8. Manyetik Soğutma Çalışma Prensibi - Manyetokalorik Etki

Manyetokalorik etki (MKE) manyetik malzemelerin içsel bir özelliğidir. Bir dış manyetik alanın uygulanmasıyla ısının emilmesi yada yayılmasını içerir (Tishin 1999). Bu, Şekil 2.10.'da gösterilen Manyetokalorik malzemenin ısınması ve soğutulması (terside geçerlidir) ile sonuçlanır. Manyetik döngüler genellikle, mıknatıslanma ve mıknatıslanmayı sıfırlama işleminden oluşurlar.

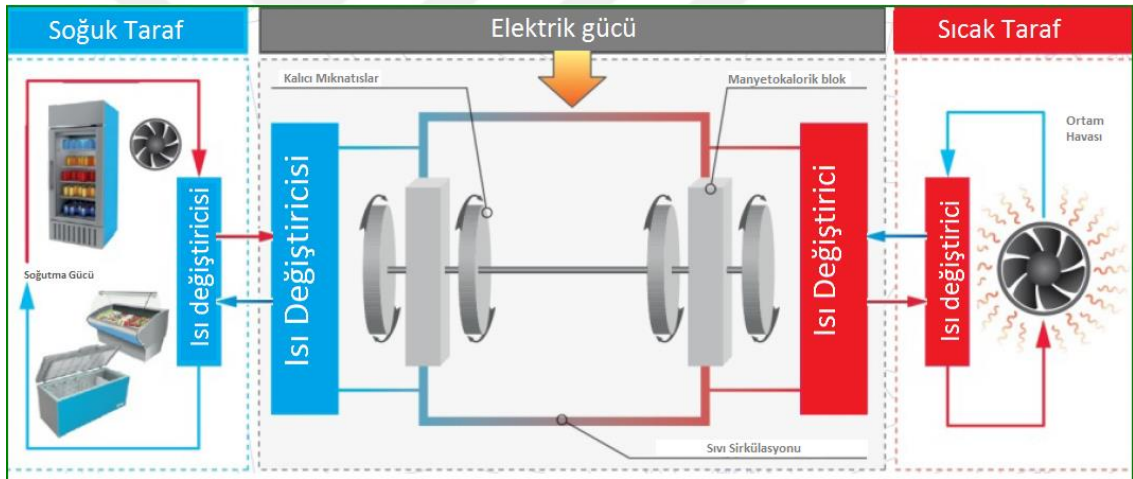


Şekil 2.10. Manyetokalorik etki (oklar manyetik momentlerin yönünü sembolize eder)

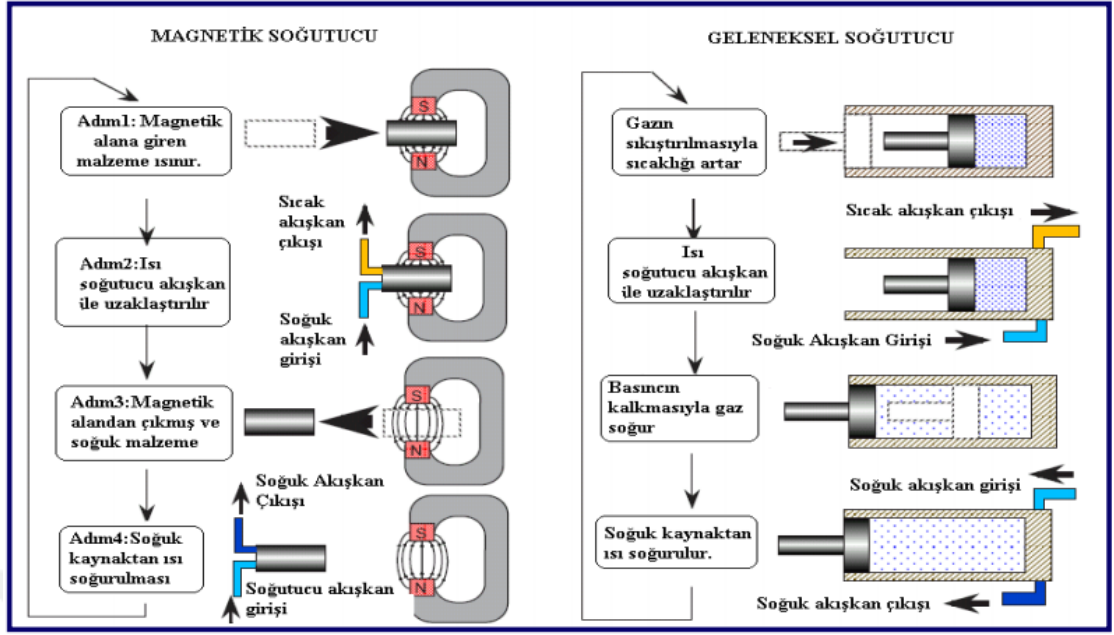
Manyetokalorik etki gösteren bir malzemeye manyetik alan uygulanması durumunda, malzeme ısınmasıyla beraber manyetik entropi değeri azalır. Tersisi durumda yani manyetik alan kaldırıldığında malzemenin soğuması ile manyetik entropi değeri artar.

Manyetik soğutucuların çalışma prensibi (Şekil 2.11.), adyabatik sıcaklık değişimi veya izotermal (eş-termal) entropi değişimi olarak algılanan manyetokalorik etkiye dayanmaktadır. Bazı malzemeler dış bir manyetik alana maruz kaldıklarında önemli bir sıcaklık değişimi gösterirler. Mıknatıslanma işlemi adyabatik olarak yapıldığı zaman manyetokalorik etki, adyabatik sıcaklık değişimi ΔT_{ad} olarak gözlemlenir. Bununla birlikte dış manyetik alanda artan sıcaklığı sabit tutmak için, malzemedeki ısının uzaklaştırılması entropi değişimi olarak görülür. Ortam ile termal dengede bir manyetokalorik malzeme için, adyabatik bir işlemde dış manyetik alandaki artış, malzemenin sıcaklığında artışa neden olur. Yüksek sıcaklık yüzünden, manyetokalorik malzeme ortamın sıcaklığına yaklaşmak için ortam ile ısı değiştirebilir.

Isı transferi işleminden sonra eğer dış manyetik alan azalır, manyetokalorik malzemenin sıcaklığı ortamın sıcaklığının altına düşecektir ve bu nedenle bu etki soğutma amacıyla kullanılabilir. Manyetik soğutma döngüsü ile geleneksel soğutma döngüsü arasında benzerlik vardır (Joule-Brayton döngüsü). Manyetik soğutma ile geleneksel soğutma döngüleri karşılaştırılması Şekil 2.12.'de gösterilmiştir. Şekil 2.12.'de geleneksel gaz sıkıştırma/genleşme soğutmanın dört temel işlemi gösterilmektedir. Bunlar bir gazın sıkıştırılması durumunda ısının enjeksiyonu ve gazın genleşmesi ise ısı çıkarılmasıdır. Ana soğutma genellikle gazın genleşmesiyle oluşur. Manyetik soğutma süreci benzer bir şekilde çalışır. Gazın sıkıştırılması yerine bir manyetokalorik malzemeye bir dış manyetik alan uygulanması ve genleşme yerine dış manyetik alanın kaldırılması olarak görülebilir.



Şekil 2.11. Manyetik Soğutma Çalışma Prensibi (Kaynak: Cooltech Applications)



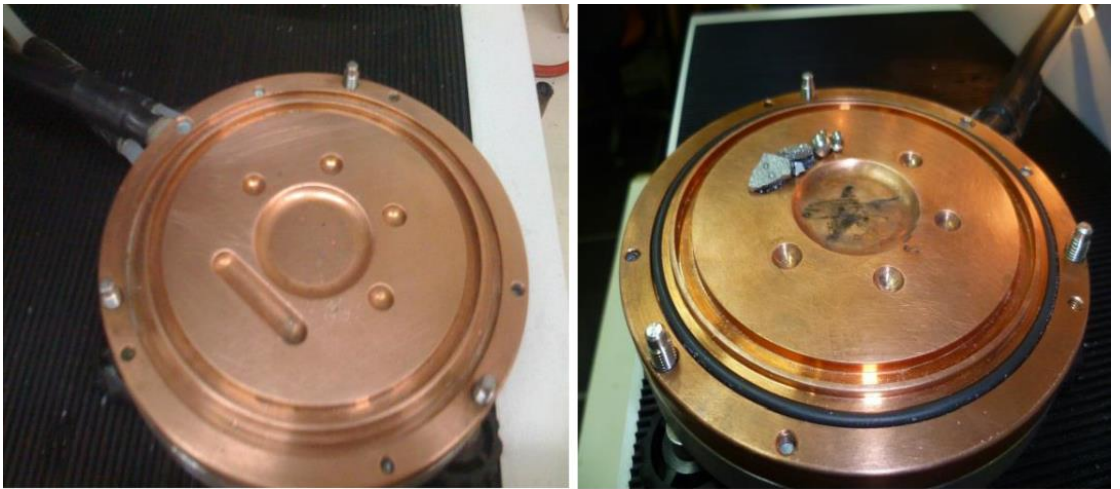
Şekil 2.12. Manyetik Soğutmayla Geleneksel soğutmanın karşılaştırılması

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Örnek Üretimi

3.1.1. Arkla Eritme İşlemi

Bu tez çalışmasında üretilen amorf alaşımı oluşturan yüksek saflıktaki (> 99.9) Co, Fe, Ni, B, Si, Nb ve Cu elementlerinin kütleleri mol oranına göre hesaplanarak dijital-elektronik hassas terazide tartılmış ve bu elementler su soğutmalı bakır pota (Şekil 4.1.) üzerine konularak, arkla eritme işlemi için hazır hale getirilmiştir. Arkla eritme işlemine başlanmadan önce elementlerin içine alındığı vakum odasında eritme sırasında ortaya çıkabilecek oksitlenmeyi engellemek için yüksek saflıkta argon gazıyla 10^{-6} mbar mertebesinde en az 5 kez vakumlama işlemi yapılmıştır. Alaşımdaki elementlerin birbirleri arasında homojen bir şekilde dağılabilmesi için düzgün bir şekilde çubuk haznesine yerleştirilerek elementlerin eriyebileceği 2500 °C gibi yüksek sıcaklıklara çıkılarak arkla pota içerisinde eritilmesi sağlanmıştır (Şekil 3.1.). Argon gazıyla vakumlama işlemi yapılmasına rağmen vakum odasında az miktarda oksijenin kalma ihtimaline karşılık, oksijen yakalama yeteneği fazla olan Zr elementi pota içerisinde farklı bir haznede eritilmiştir. Eritme sürecinde sistemde bulunan tungsten elektrottan bir akım geçirerek bakır pota ile tungsten elektrot arasında ark oluşumu gerçekleşmiş ve tungsten elektrot, pota içerisinde bulunan saf elementlerin üzerinde gezdirilerek malzemelerin homojen şekilde erimesi sağlanmıştır. Numune en az 5 kez ters çevirilerek homojen bir alaşım elde edilmiştir. Bu yolla elde edilen alaşıma 'ingot' (külçe) adı verilir.



Şekil 3.1. Saf elementlerin yerleştirildiği bakır pota

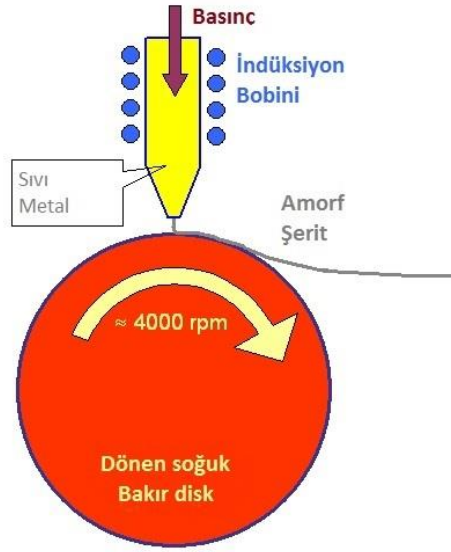
Homejen ingot elde edilmesinde Şekil 3.2.'de gösterilen Edmund Bühler MAM-1 ark eritme sistemi kullanılmıştır. Ark ile Eritme Sistemi yaklaşık 3500 °C gibi yüksek sıcaklıklarda eritme kapasitesine sahiptir.



Şekil 3.2. Arkla Eritme Cihazı MAM-1 (Arc Melting System)

3.1.2. Eriyik eğirme Metodu (Melt Spining Method)

Eriyik eğirme, eriyik haldeki alaşımların hızlı bir şekilde soğutulması için kullanılan bir tekniktir. Bir bakır disk genellikle su veya sıvı azot ile soğutulur ve döndürülür. İnce bir eriyik diske damlatılarak hızlı bir şekilde soğutulur, hızlı bir katılaşmaya neden olur. Eriyik eğirme tekniğinin çalışmasının basit gösterimi Şekil 3.3.'te gösterilmiştir. Bu teknik metalik camların oluşması için çok yüksek soğutma hızları gerektiren malzemeleri geliştirmek için kullanılır. Eriyik eğirme ile elde edilen alaşımlar için soğutma oranları 10^4 - 10^6 (K/s) mertebesindedir. Arkla eritme işlemiyle elde edilen ingot malzeme, bor nitrür (BN) bir pota içinde indüksiyon yoluyla eriyik eğirme sisteminde eritilerek potanın ucundan çok hızlı püskürtülür ve dönen bakır diske çarparak üzerinde sürekli akan bir tabaka oluşturur. Tabakanın şekli, eriyen malzemenin akış açısına ve yüzey gerilimine karşı koyan kuvvetlere bağlıdır.



Şekil 3.3. Eriyik Eğirme metodu

Eriyik ve alt tabaka ara-yüzeyinde büyük sıcaklık farkından dolayı, eriyik malzeme Şekil 3.4.'te gösterildiği gibi şerit halinde katılaşır.



Şekil 3.4. Amorf şeritler

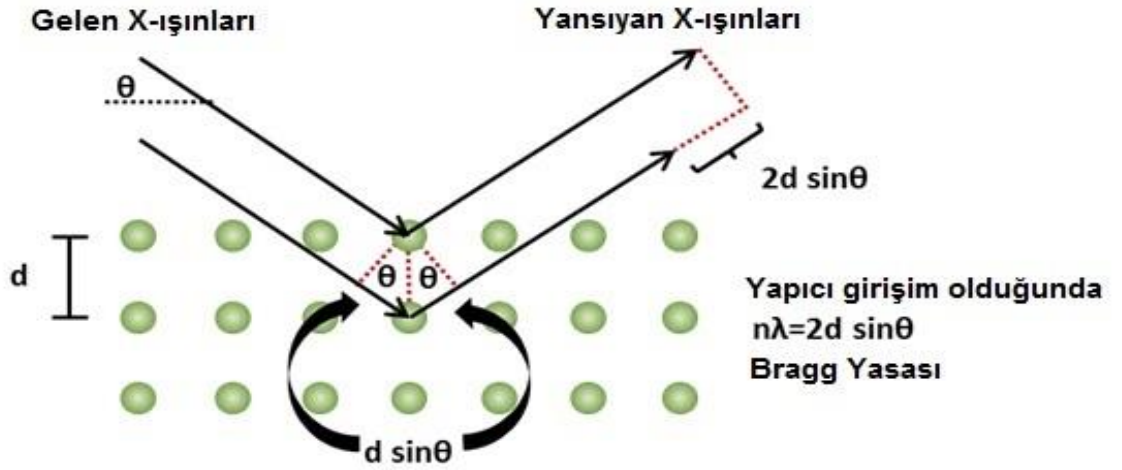
Şerit üretmek için kullanılan eriyik eğirme sistemi de (Edmund Bühler Melt Spinner SC) Şekil 3.5. te gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Eriyik Eğime sistemi (Melt Spining)

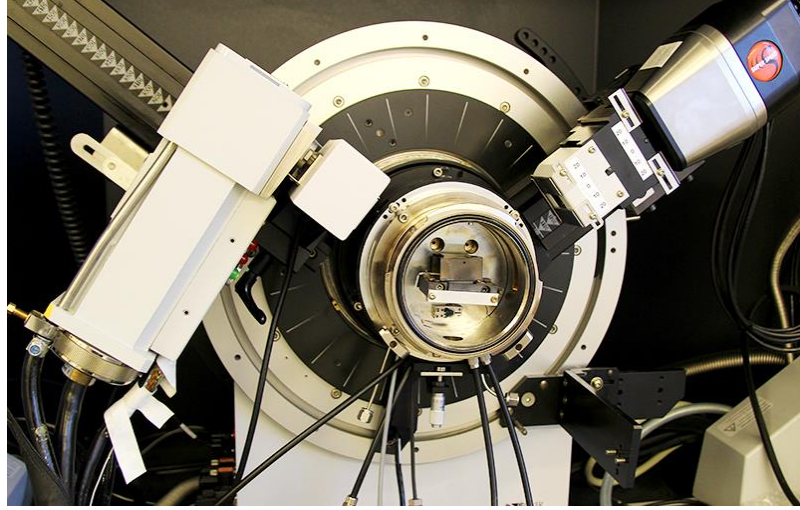
3.1.3. X-ışını Kırınımı (XRD)

Katıların kristal yapılarını incelemek için en çok kullanılan yöntem X-ışını kırınımıdır. X-ışını kırınımı [X-Ray Diffraction(XRD)], bir kristalin faz tanımlanması için kullanılan hızlı bir analitik tekniktir ve birim hücre boyutları hakkında bilgi sağlar. Üretilen bileşik yada alaşımların kristal yapılarındaki; kristalleşme, tanecik boyutu, uzaysal boyutları, örgü parametresi, birim hücre büyüklüğü, alaşım/bileşik içerisinde yer alabilen safsızlıklar ve kristal yapıya sahip olmayan amorf veya camsı malzemeler hakkında bilgi verir. X-ışını kırınımı, monokromatik X-ışınlarının ve kristalin etkileşimine dayanır. X-ışınları bir katot ışın tüpü tarafından üretilir, monokromatik radyasyon üretmek üzere filtrelenir, konsantre hale getirilir (tek noktada toplamak) ve numuneye yöneltilir. X-ışınlarının numuneye etkileşimi, Şekil 3.6.'da şematik olarak gösterildiği gibi Bragg Yasasının $n\lambda = 2d\sin\theta$ koşulunu sağlayan yapıcı girişim oluşturur.



Şekil 3.6. X-ışını kırınımı

X-ışını kırınım-ölçerler üç ana parçadan oluşur: bir X-ışını tüpü, bir numune tutucu ve bir X-ışını detektörü. X-ışını kırınımı cihazı Şekil 3.7.'de gösterilmiştir. X-ışınları bir katot ışın tüpünde bir filament elektron üretmek üzere ısıtılması, elektronların bir voltaj uygulayarak bir hedefe doğru hızlandırılması ve hedef maddenin elektronlarla bombardıman edilmesiyle üretilir. Elektronlar, hedef maddenin iç kabuk elektronlarını uzaklaştırmak için yeterli enerjiye sahip olduklarında, karakteristik X-ışını spektrumu üretilir. Bu spektrumlar birkaç bileşen içerir, en yaygın olanı K_α ve K_β 'dir. Bakır, $CuK_\alpha=1,5418\text{Å}$ radyasyonu kristal kırınımı için en yaygın hedef malzemedir. Bu X-ışınları paralelleştirilir ve numuneye yönlendirilir. Numune ve dedektör döndürülürken, yansıyan X-ışınlarının yoğunluğu kaydedilir. X-ışınlarının geometrisi Bragg Denkleminin şartlarını sağlaması durumunda yapıcı girişim oluşur ve yoğun bir pik görülür. Bir dedektör, bu X-ışını sinyalini kaydeder, işler ve sinyali daha sonra bir yazıcı veya bilgisayara gönderir.



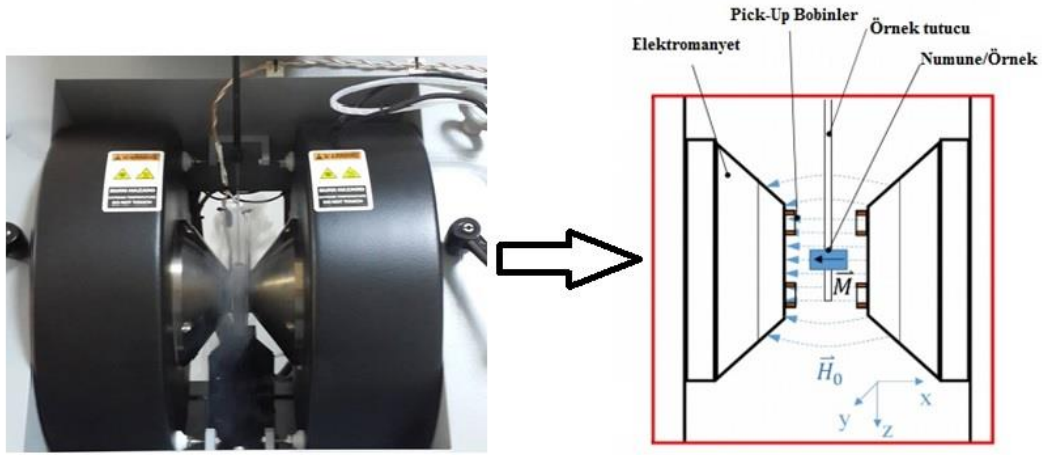
Şekil 3.7. X-Işını kırınım cihazı (XRD)

3.1.4. Titreşimli Örnek Manyetometre (VSM)

Manyetik malzemelerin manyetik davranışını karakterize etmek için Titreşimli Örnek Manyetometre (VSM) kullanılır. Titreşimli örnek Manyetometresinde kullanılan yöntemle, bir malzemenin manyetik momenti çok yüksek hassasiyetle belirlenebilir. Bu manyetometre ile ferromanyetik malzemelerin mıknatıslanma, kalıcı mıknatıslanma, sıfırlayıcı alan gibi birçok özelliği ölçülebilir. Şekil 3.8. ve Şekil 3.9. manyetik ölçümlerin alındığı titreşimli örnek manyetometresini ve bileşenlerini göstermektedir.



Şekil 3.8. Titreşimli Örnek Manyetometresi (VSM)



Şekil 3.9. Alıcı bobinler ve bileşenlerinin şematik gösteremi

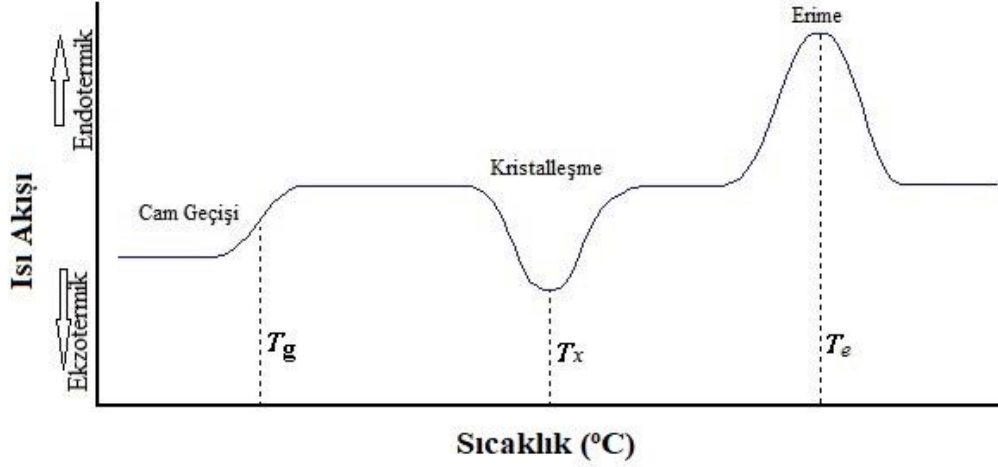
Titreşimli Örnek Manyetometresi, manyetik alanın ve/veya sıcaklığın bir fonksiyonu olarak farklı manyetik malzemelerdeki manyetik momentlerin araştırılması için duyarlı ve çok yönlü bir cihazdır. Mıknatıslanma ölçümü, Faraday elektromanyetik indüksiyon yasası ($\varepsilon = -\frac{d\phi_B}{dt}$) prensibine dayanmaktadır. Belirli bir frekansta titreşen örnek iki elektromıknatıs arasına yerleştirildiğinde, mıknatıslama miktarına göre bir emk (ε) indüklenir. İndüklenen emk, titreşen örnekteki manyetik akının değişimi sonucu ölçülür. VSM sisteminde örneğin manyetik alan boyunca titreşimi sonucunda algılayıcı bobinlerde değişken bir gerilim indüklenir. İndüklenen emk'nın büyüklüğü bobin içerisinden geçen manyetik akının zamanla değişimi ile doğru orantılıdır. VSM'de ölçüm yapılmadan önce, sadece örnek tutucunun olduğu mıknatıslanmanın ölçülmesiyle sistem kalibre edilir. Bu çalışmada kullanılan VSM sisteminde (MicroSense EZ9) açığa ve sıcaklığa (70-1000 K) bağlı olarak da ölçümler alınabilmektedir. VSM sisteminde ayrıca manyetodirenç (MR) ölçümü de yapılabilmektedir. MR ölçümü altından yapılmış iğne uçlu dört nokta probuyla yapılmaktadır. Şekil.3.10.'da gösterilen dört nokta probu örnek tutucu bölümüne yerleştirilerek 3x9 mm boyutundaki örneklerin manyetik alana bağlı olarak elektriksel dirençleri ölçülmektedir.



Şekil 3.10. Dört Nokta Ölçüm Probu

3.1.5. Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) – Termal Analiz

Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) en çok kullanılan termal analiz yöntemidir. DSC, bir numunenin ısıtılması veya soğutulması sırasında soğurulan veya salınan enerjinin miktarını, endotermik (ısı alma) ve ekzotermik (ısı verme) süreçleri üzerinde nicel ve nitel veriler sağlayarak ölçer. Deney boyunca örnek ve referans neredeyse aynı sıcaklıkta tutulup ısı akışı ölçülerek endotermik ve ekzotermik geçişler tespit edilir. DSC örnek ile referans arasındaki ısı akışındaki farkı ölçer. Kontrollü bir atmosferde sıcaklığa bağlı olarak malzemedeki geçişleri ölçmeye yarar. Bu geçişler sıcaklık ve ısı akışına bağlıdır. DSC'nin ana uygulaması; erime, cam geçişleri ve kristalleşme gibi faz geçişlerini incelemektir. Bu geçişler, DSC tarafından büyük hassasiyetle tespit edilebilen enerji değişiklikleri veya ısı kapasitesi değişikliklerini içerir. Bir DSC ölçümünün sonucu, Şekil 3.11.'de gösterildiği gibi ısı akışına karşı sıcaklık eğrisidir.



Şekil 3.11. Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) Eğrisi

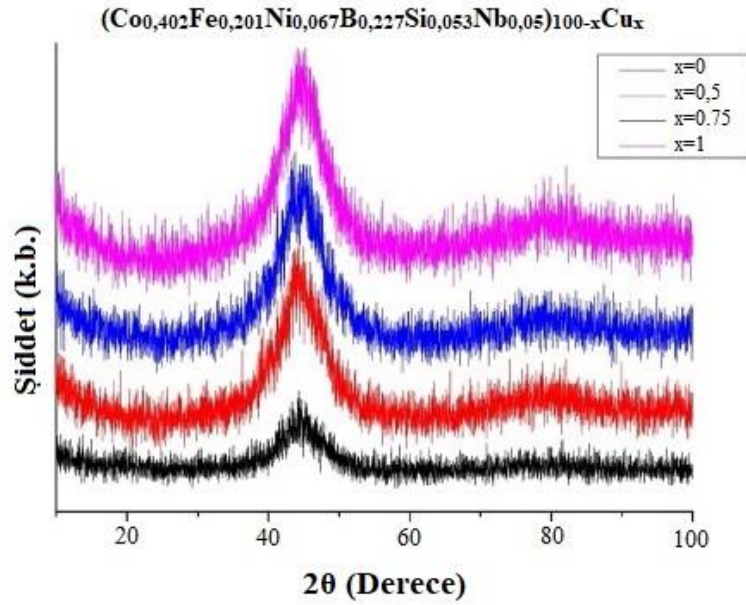
Bu eğri, geçişlerin entalpilerini hesaplamak için kullanılabilir. Geçiş entalpisi aşağıdaki denklem kullanılarak ifade edilir.

$$\Delta H = KA \quad (4.1)$$

Burada ΔH geçiş entalpisini, K kalorimetrik sabiti ve A eğri altında kalan alanı ifade etmektedir.(Pungor 1995)

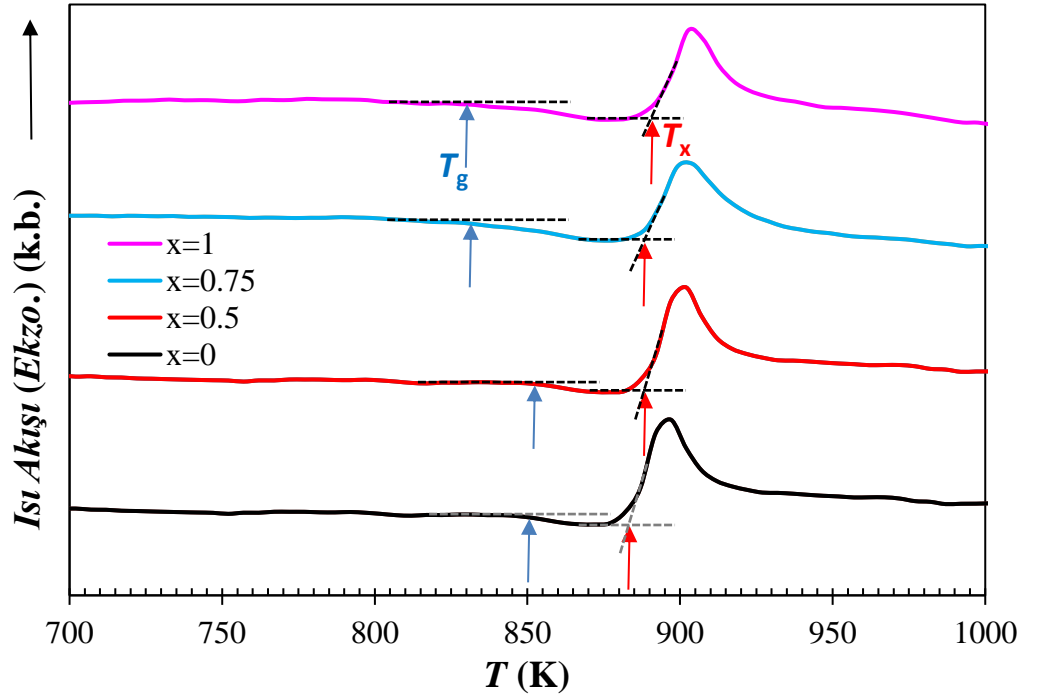
4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Co-tabanlı $(\text{Co}_{0,402}\text{Fe}_{0,201}\text{Ni}_{0,067}\text{B}_{0,227}\text{Si}_{0,053}\text{Nb}_{0,05})_{100-x}\text{Cu}_x$ ($x = 0, 0,5, 0,75, 1$) nominal kompozisyona sahip alaşımlar, Edmund Bühler MAM-1 arkla eritme cihazı (Şekil 4.1) kullanılarak yüksek saflıktaki (>% 99,9) alaşım elementleri (Co- Fe, Ni, B, Si, Nb, Cu) argon atmosferi altında eritilerek elde edilmiştir. Homojenliği sağlamak için eritme işlemleri en az beş kez tekrar edilmiştir. Daha sonra arkla homojen hale getirilen örnekler eriyik eğirme sistemi (Şekil 3.4.) ile hızla katılaştırılarak 3 m uzunluğa, 0,5 cm genişliğe ve 25 µm kalınlığa sahip amorf şeritler üretilmiştir. Üretim sırasında 1473 K sıcaklıktaki eriyik halindeki alaşım, basınçlı argon gazı yardımı ile 0,5 mm çaplı bir potadan geçirilmiştir. Hızlı katılaştırma için, eriyik haldeki alaşım 30 m/s hızla dönen bakır disk üzerine boşaltılmıştır. Üretilmiş örneklerin amorf yapıda olup olmadıklarını tespit etmek için, $\text{CuK}\alpha$ radyasyonu ile X-ışını kırınımı (XRD) yöntemi kullanılmıştır. Üretilen Co-tabanlı $(\text{Co}_{0,402}\text{Fe}_{0,201}\text{Ni}_{0,067}\text{B}_{0,227}\text{Si}_{0,053}\text{Nb}_{0,05})_{100-x}\text{Cu}_x$ ($x = 0, 0,5, 0,75, 1$) şeritlerin amorf yapı sergiledikleri Şekil 4.1.'deki XRD ölçümlerinden anlaşılmıştır. Şekil 4.1.'e bakıldığı zaman 35° ile 55° arasında amorf yapının tipik geniş kırınım deseni görülmektedir. Kristal yapı olduğunu gösteren belirgin bir pik olmamasına rağmen gözlenen bazı çok küçük şiddetteki piklerin, α -Fe'nin nanokristalleştirilmesinden kaynaklanmış olabileceği düşünülmektedir.



Şekil 4.1. $(\text{Co}_{0,402}\text{Fe}_{0,201}\text{Ni}_{0,067}\text{B}_{0,227}\text{Si}_{0,053}\text{Nb}_{0,05})_{100-x}\text{Cu}_x$ ($x=0, 0,5, 0,75, 1$) metalik cam şeritlerin XRD desenleri

Üretilen örnekler, gürültü seviyesi nedeniyle tespit edilmesi zor olan az miktarda nanokristal faza rağmen amorf bir yapının olduğunu gösteren geniş XRD kırınım deseni karakteristiği sergilemektedir. Üretilen örneklerin camlaşma (T_g) ve kristalleşme sıcaklığı (T_x) gibi ısıl özelliklerini belirlemek için, SETSYS 16/18 diferansiyel tarama kalorimetresi (DSC) kullanılmıştır. Yüksek saflıkta argon gazı geçirilen kalorimetrede 15-20 mg kütleyle sahip örnekler 0,67 K/s'lik bir ısıtma hızında taranmıştır. $(Co_{0,402}Fe_{0,201}Ni_{0,067}B_{0,227}Si_{0,053}Nb_{0,05})_{100-x}Cu_x$ ($x=0, 0,5, 0,75, 1$) metalik cam şeritler için elde edilen DSC ölçüm sonuçları Şekil 4.2.'de gösterilmiştir. Farklı Cu oranları içeren alaşımların 700K'den 1000 K'e kadar olan sıcaklık aralığında DSC eğrileri elde edilmiştir. DSC sonuçlarına göre ΔT_x (K), T_x (K) ve T_g (K) değerleri Çizelge 5.1.'de gösterilmiştir. Şekilden'de anlaşılacağı gibi metalik cam şeritler önce cam geçiş sıcaklığı T_g (K) , daha sonra ise kristalleşme sıcaklığına T_x (K) ulaşır.



Şekil 4.2. $(Co_{0,402}Fe_{0,201}Ni_{0,067}B_{0,227}Si_{0,053}Nb_{0,05})_{100-x}Cu_x$ ($x=0, 0,5, 0,75, 1$) metalik cam şeritlerin DSC eğrileri

Çizelge 4. 1. $(\text{Co}_{0,402}\text{Fe}_{0,201}\text{Ni}_{0,067}\text{B}_{0,227}\text{Si}_{0,053}\text{Nb}_{0,05})_{100-x}\text{Cu}_x$ ($x = 0, 0,5, 0,75, 1$) şeritlerinin cam geçiş sıcaklığı, kristalleşme sıcaklığı ve aşırı soğutulmuş sıvı bölgesi değerleri

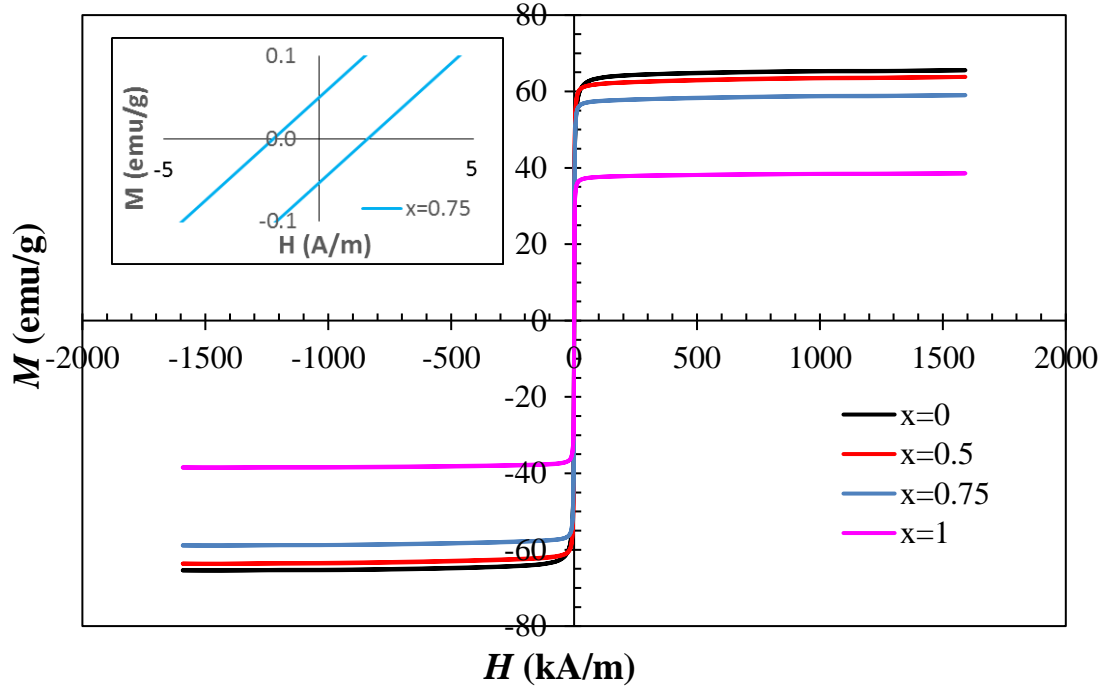
Örnekler	$T_g(\text{K})$	$T_x(\text{K})$	$\Delta T_x(\text{K})$
$\text{Co}_{40,2}\text{Fe}_{20,1}\text{Ni}_{6,7}\text{Si}_{5,3}\text{Nb}_5$	851	884	33
$(\text{Co}_{0,402}\text{Fe}_{0,201}\text{Ni}_{0,067}\text{B}_{0,227}\text{Si}_{0,053}\text{Nb}_{0,05})_{99,5}\text{Cu}_{0,5}$	852	888	36
$(\text{Co}_{0,402}\text{Fe}_{0,201}\text{Ni}_{0,067}\text{B}_{0,227}\text{Si}_{0,053}\text{Nb}_{0,05})_{99,25}\text{Cu}_{0,75}$	829	888	59
$(\text{Co}_{0,402}\text{Fe}_{0,201}\text{Ni}_{0,067}\text{B}_{0,227}\text{Si}_{0,053}\text{Nb}_{0,05})_{99}\text{Cu}_1$	829	890	61

Cu miktarı $x=0$ 'dan 1'e doğru arttıkça T_g 851 K'den 829 K'e düşmekte T_x ise 884 K'den 890 K'e artmaktadır. Bu değerler alaşımların cam oluşturma kabiliyetlerinin bakır (Cu) katkısıyla arttığını açık bir şekilde göstermektedir. Cu içeriği arttıkça aşırı soğutulmuş sıvı bölgesi ($\Delta T_x = T_x - T_g$) 33 K'den 61 K'e yükselmektedir.

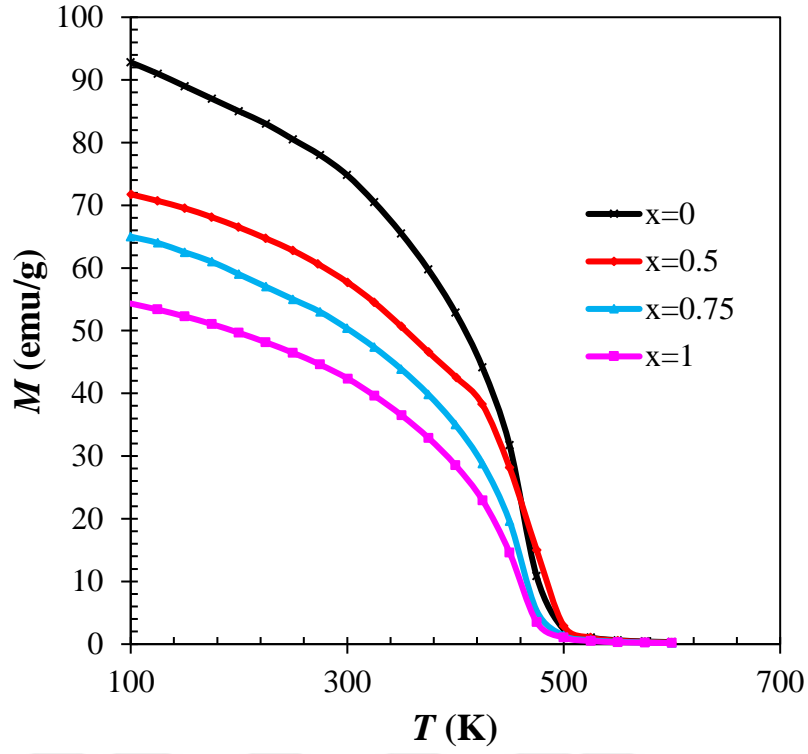
Üretilen metalik cam şeritlerin DSC ve XRD özelliklerini belirledikten sonra manyetik özellikleri incelenmiştir. Farklı Cu oranı değişiminin manyetik özelliklerine olan etkisini incelemek için maksimum 1750 kA/m manyetik alan uygulanmıştır. Örnekler için oda sıcaklığında histeresis eğrileri elde edilmiş olup sonuçlar Şekil 4.3.'te gösterilmiştir. Şekil 4.3.'deki iki yönlü mıknatıslanma eğrilerinden ($M-H$ histerezis eğrileri) ve Şekil 4.3.'nin küçük grafiğinden tüm örneklerin oda sıcaklığında mükemmel yumuşak manyetik özellikler gösterdiği anlaşılmaktadır.

$(\text{Co}_{0,402}\text{Fe}_{0,201}\text{Ni}_{0,067}\text{B}_{0,227}\text{Si}_{0,053}\text{Nb}_{0,05})_{100-x}\text{Cu}_x$ ($x=0, 0,5, 0,75, 1$) metalik cam şeritlerin oda sıcaklığındaki doyum mıknatıslanma değerleri (M_s) sırasıyla; 65,51, 64,24, 63,77 ve 38,49 emu/g olarak ölçülmüştür. Oda sıcaklığında örneklerin sıfırlayıcı alan (H_c) değerleri ise sırasıyla 6,84, 6,60, 4,14 ve 1,99 A/m olarak ölçülmüştür. Şekil 4.4.'te artan Cu katkısıyla şeritlerdeki manyetik faz geçişinin düşük sıcaklıklara doğru kaydığı görülmektedir. Şekil 4.4.'den açıkça görüldüğü gibi dM/dT 'nin minimumuna karşılık gelen sıcaklık olarak tanımlanan Curie Sıcaklığı T_C , Cu içermeyen alaşım için 462 K iken $(\text{Co}_{0,402}\text{Fe}_{0,201}\text{Ni}_{0,067}\text{B}_{0,227}\text{Si}_{0,053}\text{Nb}_{0,05})_{99}\text{Cu}_1$ alaşımında 445 K'e düşmektedir. Ayrıca $x=0,5$ ve $x=0,75$ için Curie sıcaklıkları 459 ve 456 K olarak belirlenmiştir. Sıcaklıktaki

bu düşüş, Cu atomları ve ferromanyetik atomlar arasındaki antiferromanyetik değişim etkileşimi ile açıklanabilir.



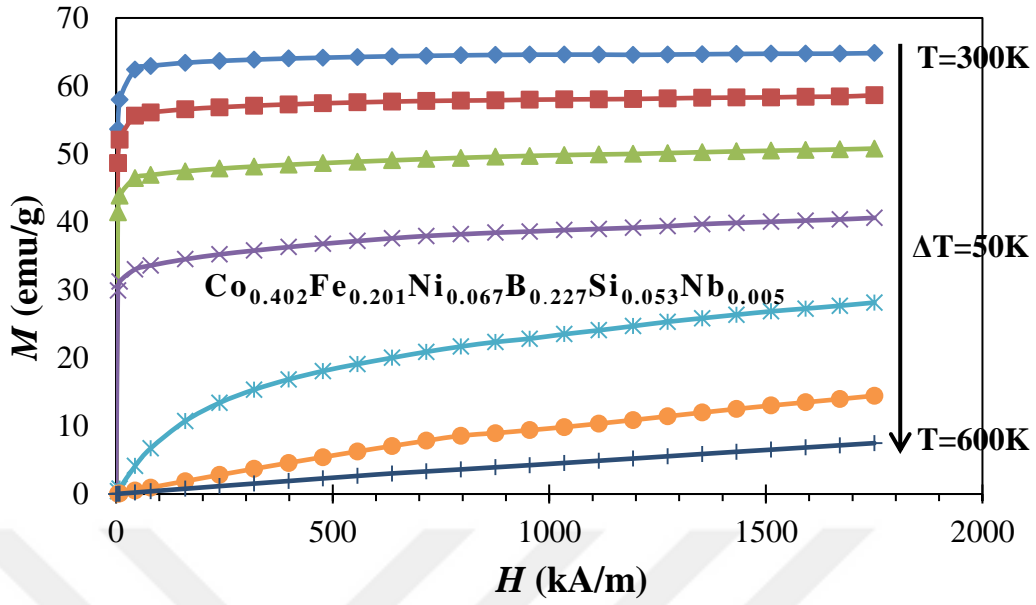
Şekil 4.3. $(\text{Co}_{0,402}\text{Fe}_{0,201}\text{Ni}_{0,067}\text{B}_{0,227}\text{Si}_{0,053}\text{Nb}_{0,05})_{100-x}\text{Cu}_x$ ($x=0, 0,5, 0,75, 1$) metalik cam şeritlerin M-H ölçüm değerleri



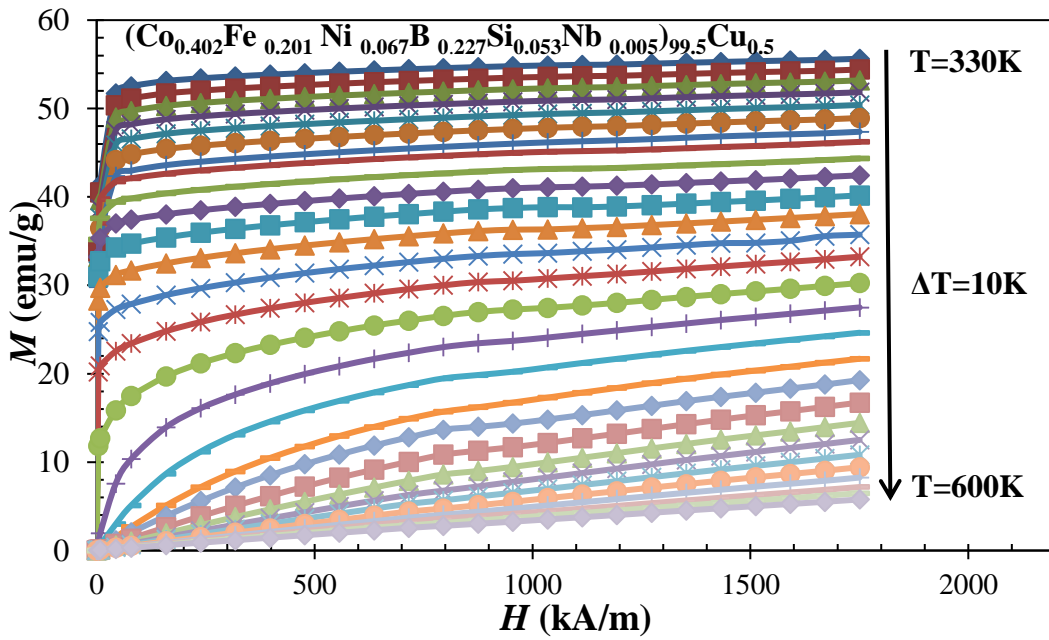
Şekil 4.4. 0.01 T manyetik alanda mıknatıslanmanın sıcaklıkla değişimi

$(\text{Co}_{0,402}\text{Fe}_{0,201}\text{Ni}_{0,067}\text{B}_{0,227}\text{Si}_{0,053}\text{Nb}_{0,05})_{100-x}\text{Cu}_x$ ($x = 0, 0,5, 0,75, 1$) camı şeritlerin manyetokalorik özelliklerini hesaplamak için geniş bir sıcaklık aralığında 10 K aralıklarla izotermal mıknatıslanma eğrileri ölçülmüştür. Kalıcı mıknatıslanmanın manyetokalorik özellikler üzerindeki etkisini yok etmek için şeritler VSM'in örnek tutucusuna yüzey vektörleri manyetik alana dik olacak şekilde yerleştirilmiştir.

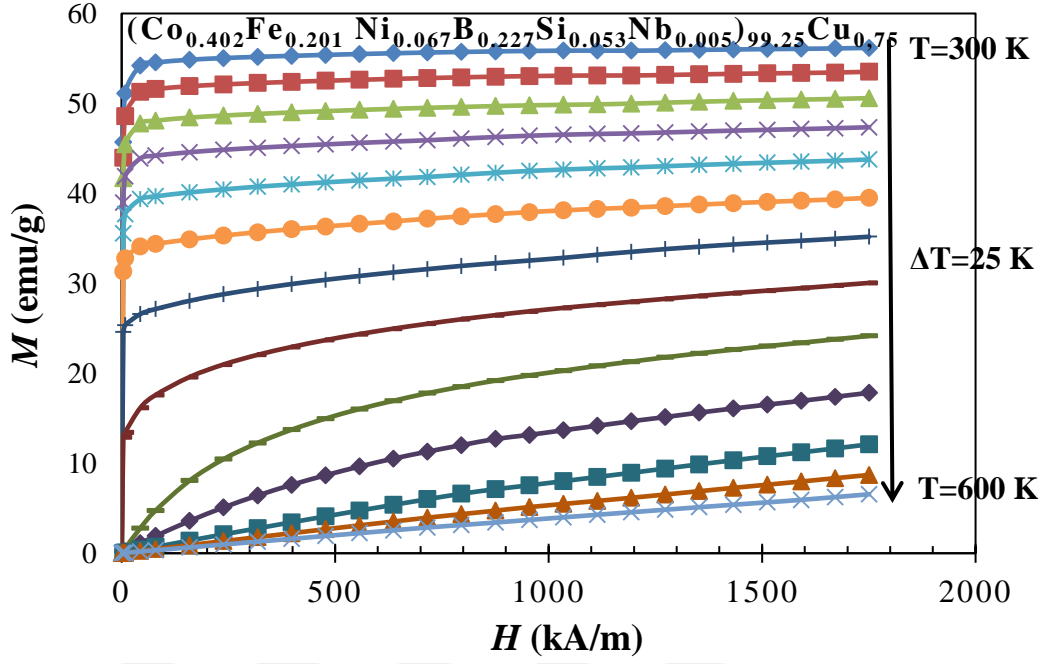
Şekil (4.5.), (4.6.), (4.7.), ve (4.8.) 2,2 T'ya kadar $(\text{Co}_{0,402}\text{Fe}_{0,201}\text{Ni}_{0,067}\text{B}_{0,227}\text{Si}_{0,053}\text{Nb}_{0,05})_{100-x}\text{Cu}_x$ ($x = 0, 0,5, 0,75, 1$) camı şeritlerin 300-600 K, 330-600 K, 300-600 K ve 310-590 K sıcaklık aralığında izotermal mıknatıslanma eğrilerini göstermektedir.



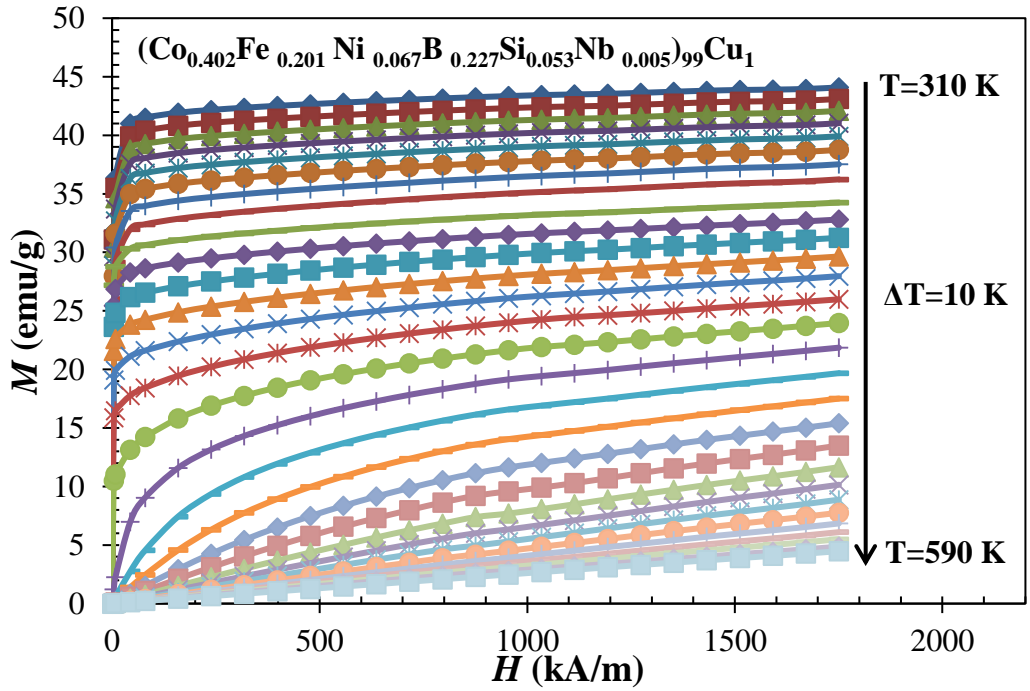
Şekil 4.5. $\text{Co}_{0.402}\text{Fe}_{0.201}\text{Ni}_{0.067}\text{B}_{0.227}\text{Si}_{0.053}\text{Nb}_{0.005}$ camsı şeridin izotermal mıknatıslanma eğrisi



Şekil 4.6. $(\text{Co}_{0.402}\text{Fe}_{0.201}\text{Ni}_{0.067}\text{B}_{0.227}\text{Si}_{0.053}\text{Nb}_{0.005})_{99.5}\text{Cu}_{0.5}$ camsı şeridin izotermal mıknatıslanma eğrisi

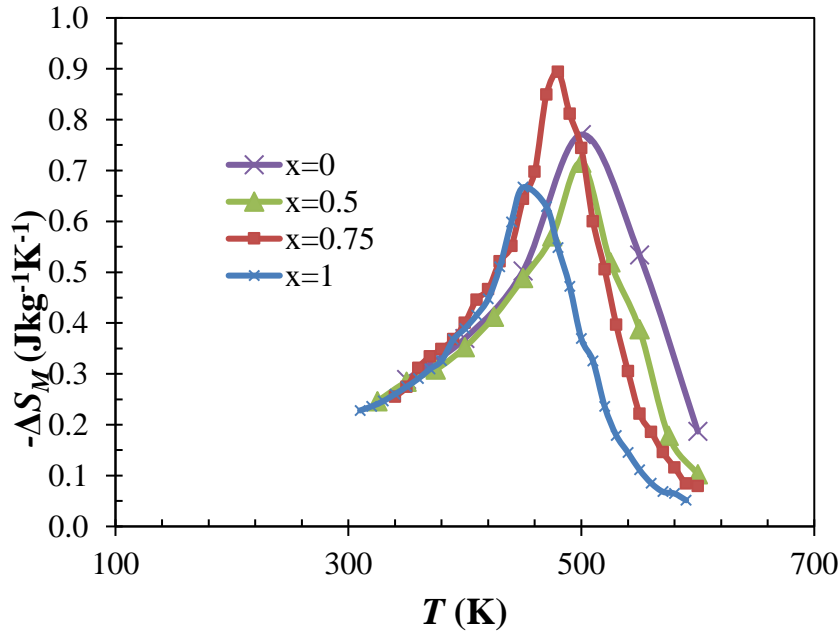


Şekil 4.7. $(\text{Co}_{0.402}\text{Fe}_{0.201}\text{Ni}_{0.067}\text{B}_{0.227}\text{Si}_{0.053}\text{Nb}_{0.005})_{99.25}\text{Cu}_{0.75}$ camsı şeridin izotermal mıknatıslanma eğrisi



Şekil 4.8. $(\text{Co}_{0.402}\text{Fe}_{0.201}\text{Ni}_{0.067}\text{B}_{0.227}\text{Si}_{0.053}\text{Nb}_{0.005})_{99}\text{Cu}_1$ camsı şeridin izotermal mıknatıslanma eğrisi

Bununla birlikte, sıcaklığın artmasıyla $M-H$ eğrileri T_C 'nin yakınında ve üstünde doğrusaldır ve bu da manyetik geçişlerin ferromanyetikten paramanyetiğe doğru olduğu anlamına gelir. Manyetik entropi değişimi ΔS_M , Maxwell denklemi (Denklem (2.30)) kullanılarak mıknatıslanma izotermelerinden hesaplanmıştır. 2,2 T manyetik alan değişimi altındaki $(\text{Co}_{0,402}\text{Fe}_{0,201}\text{Ni}_{0,067}\text{B}_{0,227}\text{Si}_{0,053}\text{Nb}_{0,05})_{100-x}\text{Cu}_x$ ($x = 0, 0,5, 0,75, 1$) şeritlerin sıcaklığa bağlı manyetik entropi değişimleri Şekil 4.9'da gösterilmiştir.



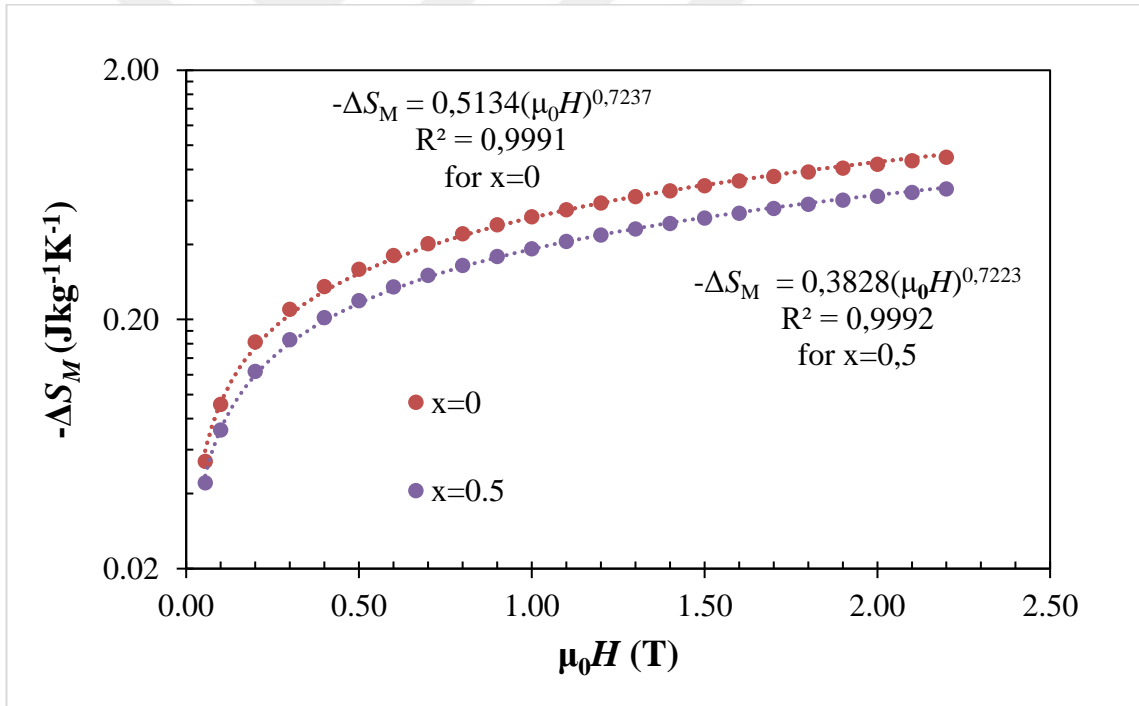
Şekil 4.9. 2,2 T manyetik alan değişimi altında $(\text{Co}_{0,402}\text{Fe}_{0,201}\text{Ni}_{0,067}\text{B}_{0,227}\text{Si}_{0,053}\text{Nb}_{0,05})_{100-x}\text{Cu}_x$ ($x=0, 0,5, 0,75, 1$) camsı şeritlerin sıcaklığa bağlı Manyetik Entropi Değişimi

Şekil 4.9'da görüldüğü gibi T_C 'ye yakın sıcaklıklarda tepe yapacak şekilde geniş pikler elde edilmiştir. Alaşımdaki Cu katkıları ($x=0, 0,5, 0,75$ ve 1) için T_{maks} sıcaklık değerleri sırasıyla 500, 510, 480 ve 450 K olarak bulunmuştur. Cu içeriğinin $x=0,5$ 'den $x=1$ 'e artmasıyla, maksimum entropi değişikliklerinin elde edildiği sıcaklığın (T)^{maks} oda sıcaklığına doğru kaydığı görülmektedir. Ayrıca farklı Cu katkılı ($x=0, 0,5, 0,75$ ve 1) camsı şeritler için maksimum manyetik entropi $(\Delta S_M)^{\text{maks}}$ değerleri sırasıyla; 0,77, 0,71, 0,89 ve 0,67 $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ olarak hesaplanmıştır. Maksimum Manyetik entropi $(\Delta S_M)^{\text{maks}}$ değeri 0,89'dan 0,67 $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ 'e değişmiştir.

Manyetokalorik malzemelerin soğutma performansının değerlendirilmesinde kullanılan diğer bir büyüklük olan "Soğutma Kapasitesi (RC)" soğuk ve sıcak hazne arasında

transfer edilebilen ısı miktarını ifade etmekte olup Denklem (2.32b)'den hesaplanır. RC_{FWHM} yada sadece RC değerleri $x=0, 0,5, 0,75, 1$ için sırasıyla 130,6, 110,6, 103,9 ve 86,6 J/kg'dır. Önceki literatür sonuçlarıyla elde edilen deneysel sonuçların daha iyi karşılaştırılması için teorik analiz yoluyla $(-\Delta S_M)^{maks}$ manyetik alan bağımlılığının anlaşılması gerekmektedir. Maksimum manyetik entropi $(-\Delta S_M)^{maks}$ 'nin manyetik alanla değişimi, bir güç yasası olarak $(-\Delta S_M)^{maks} \propto H^n$ şeklinde yazılabilir (V. Franco and A. Conde 2010). n parametresinin değerini deneysel verilere yukarıdaki eşitlik fit edilerek bulunabilir.

Örneğin $Co_{40,2}Fe_{20,1}Ni_{6,7}B_{22,7}Si_{5,3}Nb_5$ ve $(Co_{0,402}Fe_{0,201}Ni_{0,067}B_{0,227}Si_{0,053}Nb_{0,05})_{99,5}Cu_{0,5}$ camsı alaşımlar için n parametresinin değeri 0,72'dir. Şekil 4.10.'da gösterildiği gibi, deney verileri, 0-2,2 T arasındaki fit edilmiş eğriler ile iyi bir uyum içinde olduğu görülmektedir.



Şekil 4.10. $(Co_{0,402}Fe_{0,201}Ni_{0,067}B_{0,227}Si_{0,053}Nb_{0,05})_{99,5}Cu_{0,5}$ ve $Co_{40,2}Fe_{20,1}Ni_{6,7}B_{22,7}Si_{5,3}Nb_5$ camsı şeritler için $(-\Delta S_M)$ 'nin manyetik alanla değişimi

n parametresi $(Co_{0,402}Fe_{0,201}Ni_{0,067}B_{0,227}Si_{0,053}Nb_{0,05})_{99,5}Cu_{0,5}$ ve $Co_{40,2}Fe_{20,1}Ni_{6,7}B_{22,7}Si_{5,3}Nb_5$ camsı şeritlerde ortalama alan teorisi tahmini (2/3)

değerinden daha yüksektir. Sebebi ise numunede kısmen bölgesel hemojenliğin elde edilememesinden kaynaklandığı ifade edilebilir.

Çizelge 4.2’de 1,5 ve 2 T manyetik alan değişimleri altında bu çalışmada elde edilen T_C , $(-\Delta S_M)^{\text{maks}}$ ve RC değerleri, literatürde daha önce üretilen Fe-tabanlı metalik cam manyetokalorik malzemelerle karşılaştırılmıştır.

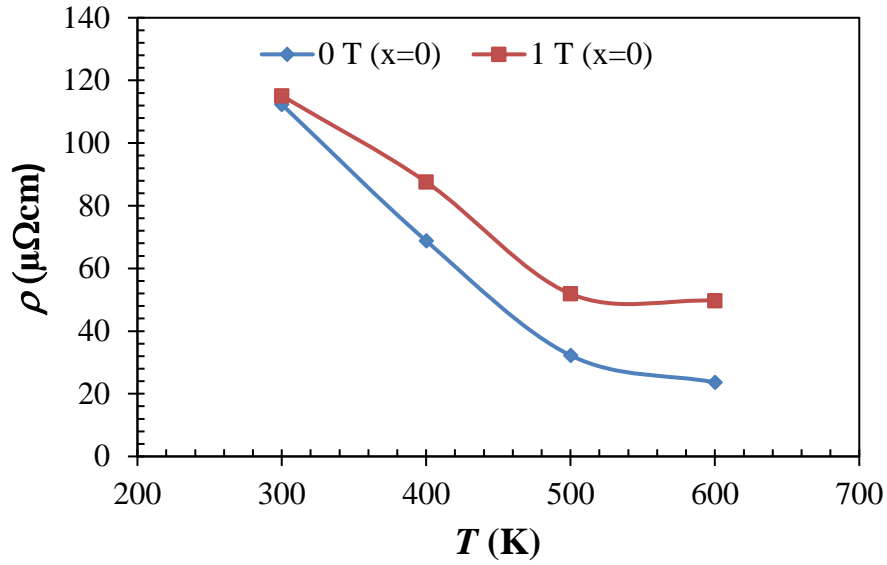
Çizelge 4.2. $(\text{Co}_{0,402}\text{Fe}_{0,201}\text{Ni}_{0,067}\text{B}_{0,227}\text{Si}_{0,053}\text{Nb}_{0,005})_{100-x}\text{Cu}_x$ ($x=0, 0,5, 0,75, 1$) amorf şeritlerin ve literatürde yayınlanmış Fe-tabanlı metalik camların 0-1,5 T ve 0-2 T manyetik alan değişimi altında T_C , RC ve $(-\Delta S_M)^{\text{maks}}$ değerleri

Nominal Kompozisyonlar	T_C (K)	$(-\Delta S_M)^{\text{maks}}$ ($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$)		RC (J/kg)		Kaynak
		0-1,5 T	0-2 T	0-1,5 T	0-2 T	
$\text{Co}_{0,402}\text{Fe}_{0,201}\text{Ni}_{0,067}\text{B}_{0,227}\text{Si}_{0,053}\text{Nb}_5$	462	0,62	0,73		124,1	Bu araştırmada
$(\text{Co}_{0,402}\text{Fe}_{0,201}\text{Ni}_{0,067}\text{B}_{0,227}\text{Si}_{0,053}\text{Nb}_{0,005})_{99,5}\text{Cu}_{0,5}$	459	0,57	0,67		103,9	Bu araştırmada
$(\text{Co}_{0,402}\text{Fe}_{0,201}\text{Ni}_{0,067}\text{B}_{0,227}\text{Si}_{0,053}\text{Nb}_{0,005})_{99,25}\text{Cu}_{0,75}$	456	0,72	0,84		96,6	Bu araştırmada
$(\text{Co}_{0,402}\text{Fe}_{0,201}\text{Ni}_{0,067}\text{B}_{0,227}\text{Si}_{0,053}\text{Nb}_{0,005})_{99}\text{Cu}_1$	445	0,51	0,62		80,6	Bu araştırmada
$\text{Fe}_{80}\text{B}_{10}\text{Zr}_9\text{Cu}_1$	356		1,72		141,4	X.C. Zhong ve
$\text{Fe}_{77}\text{Ni}_3\text{B}_{10}\text{Zr}_9\text{Cu}_1$	385		1,61		119,3	X.C. Zhong ve
$\text{Fe}_{75}\text{Ni}_5\text{B}_{10}\text{Zr}_9\text{Cu}_1$	408		1,58		123,5	X.C. Zhong ve
$\text{Fe}_{77}\text{Ta}_3\text{B}_{10}\text{Zr}_9\text{Cu}_1$	336		1,47		123,9	X.C. Zhong ve
$\text{Fe}_{75}\text{Ta}_5\text{B}_{10}\text{Zr}_9\text{Cu}_1$	313		1,04		92,2	X.C. Zhong ve
$(\text{Fe}_{0,76}\text{B}_{0,24})_{96}\text{Nb}_4$	559	1,51		121		J. Li ve ark.(2015)
$(\text{Fe}_{0,71}\text{TM}_{0,05}\text{B}_{0,24})_{96}\text{Nb}_4$	450	1,21		91		J. Li ve ark.(2015)
$(\text{Fe}_{0,58}\text{TM}_{0,18}\text{B}_{0,24})_{96}\text{Nb}_4$	325	0,87		57		J. Li ve ark.(2015)
$(\text{Fe}_{0,75}\text{Dy}_{0,01}\text{B}_{0,24})_{96}\text{Nb}_4$	528	1,34		117		J. Li ve ark.(2014)
$(\text{Fe}_{0,71}\text{Dy}_{0,05}\text{B}_{0,24})_{96}\text{Nb}_4$	455	1,11		78		J. Li ve ark.(2014)
$\text{Fe}_{82}\text{Ni}_2\text{Zr}_6\text{B}_{10}$	465	1,38		102		B. Podmiljsak

Her ne kadar, alaşımların T_C ’leri oda sıcaklığına kaydırıldığında, RC değerleri düşse de elde edilen değerler daha önceden üretilen Fe-tabanlı metalik camların RC değerleriyle kıyaslanabilir düzeydedir. Manyetik entropi değişimindeki ve soğutma kapasitesindeki bu düşüş, alaşıma Cu eklenmesiyle kompozisyondaki Co-Fe-Ni gibi ferromanyetik atomların yüzdesinin azalmasından kaynaklanmaktadır.

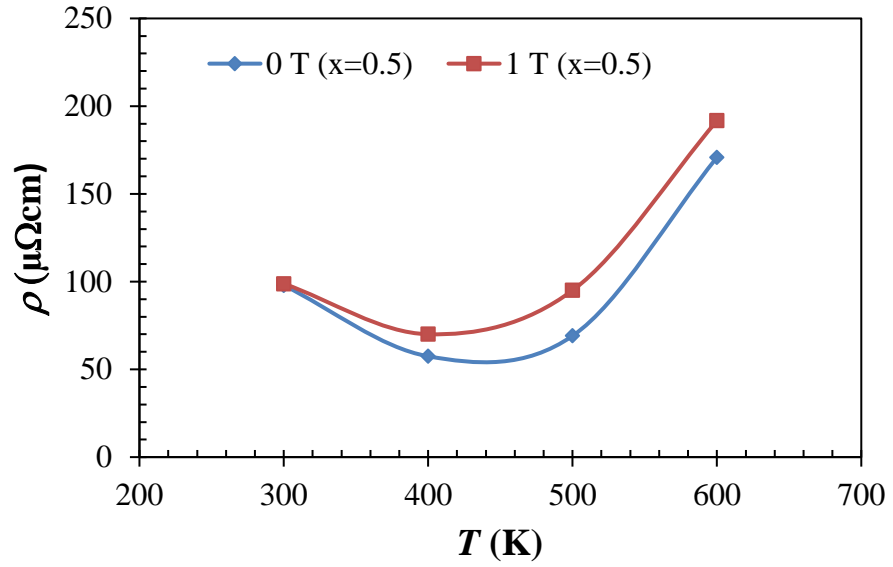
Alaşımların manyetik öz direncini belirlemek için, Şekil (4.11), (4.12), (4.13)ve (4.14)’de gösterildiği gibi elektriksel direnc 300-600 K sıcaklık aralığında 0 ve 1 T manyetik alan

altında ölçülmüştür. Manyetodirenç (% MR) değerleri, Denklem 3.25.'e göre hesaplanmıştır. Cu içermeyen alaşım için 300, 400, 500 ve 600 K'deki manyetik alan yokken öz direnç [$\rho(0)$] değerleri sırasıyla 112,3, 68,76, 32,23, ve 23,62 $\mu\Omega\text{cm}$ ve 1 T manyetik alanda [$\rho(H=1\text{ T})$] ise sırasıyla 115,08, 87,58, 51,89 ve 49,69 $\mu\Omega\text{cm}$ olarak ölçülmüştür. Cu içermeyen alaşımda sıcaklık ile manyetik öz direnç değeri azalmaktadır.



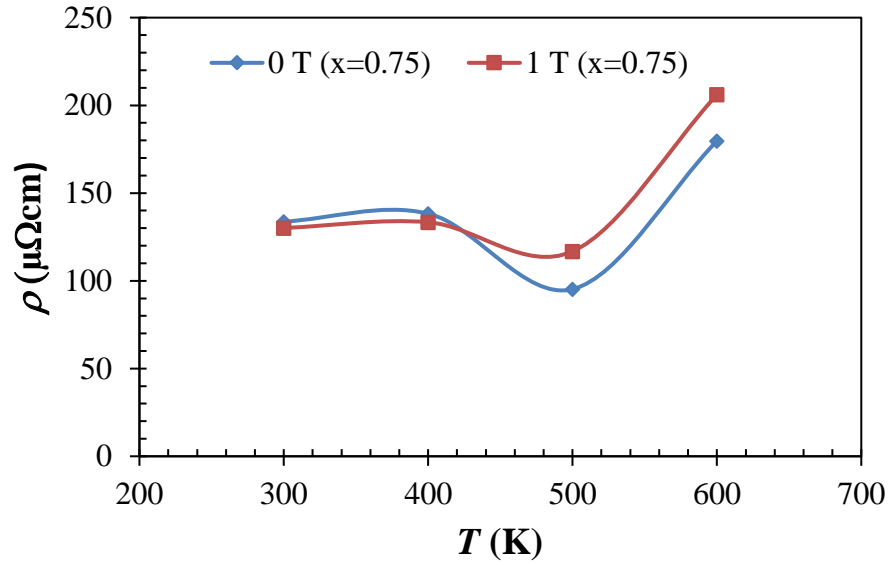
Şekil 4.11. $\text{Co}_{0,402}\text{Fe}_{0,201}\text{Ni}_{0,067}\text{B}_{0,227}\text{Si}_{0,053}\text{Nb}_{0,05}$ alaşımının 0 ve 1 T'da sıcaklığa bağlı öz direnç grafiği

Alaşımında Cu katkısı $x=0,5$ için 300, 400, 500 ve 600 K'deki $\rho(0)$ değerleri sırasıyla, 98,80, 57,45, 69,10 ve 170,77 $\mu\Omega\text{cm}$ ve $\rho(1\text{ T})$ değeri ise sırasıyla, 98,80, 70,03, 95,00 ve 191,70 $\mu\Omega\text{cm}$ olarak ölçülmüştür. $x=0,5$ değerinde 300 K'den 400 K'e kadar ρ başlangıçta düşmekte, daha sonra sıcaklığın fonksiyonu olarak artmaktadır.



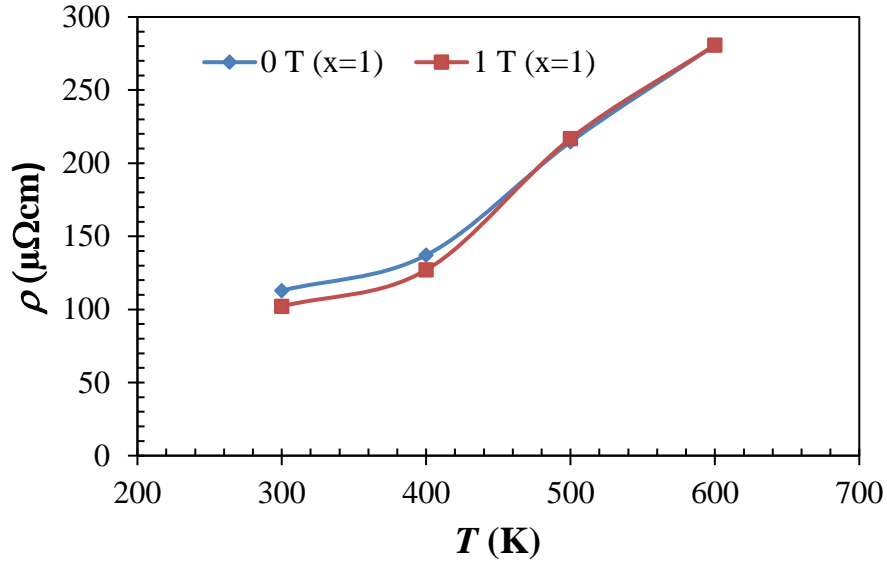
Şekil 4.12. $(\text{Co}_{0,402}\text{Fe}_{0,201}\text{Ni}_{0,067}\text{B}_{0,227}\text{Si}_{0,053}\text{Nb}_{0,05})_{99,5}\text{Cu}_{0,5}$ alaşımının manyetik alan yokken ve 1 T manyetik alan altında sıcaklığa bağlı öz direncinin değişimi

$x=0,75$ için 300, 400, 500, ve 600 K'deki $\rho(0)$ değerleri sırasıyla, 130,10, 133,39, 95,25 ve 179,71 $\mu\Omega\text{cm}$ ve $\rho(H)$ değerleri ise sırasıyla, 130,10, 133,39, 116,77 ve 206,04 $\mu\Omega\text{cm}$ olarak ölçülmüştür. Direnç değeri, Cu içeriği $x=0,75$ olan örnekte 500 K'de en düşüktür.



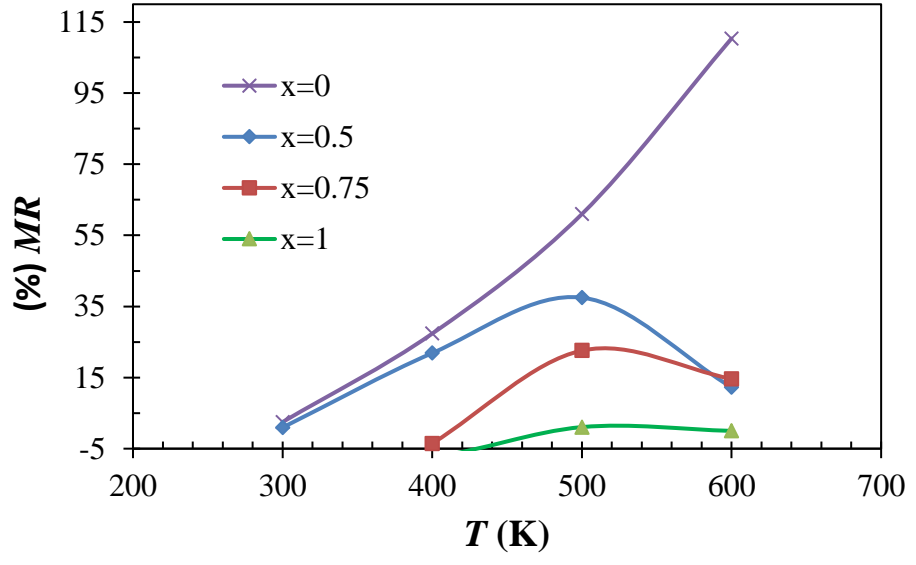
Şekil 4.13. $(\text{Co}_{0,402}\text{Fe}_{0,201}\text{Ni}_{0,067}\text{B}_{0,227}\text{Si}_{0,053}\text{Nb}_{0,05})_{99,25}\text{Cu}_{0,75}$ alaşımının 0 ve 1 T'da öz direncin sıcaklıkla değişimi

$x=1$ için ise aynı sıcaklıklarda $\rho(0)$ 112,89, 137,10, 216,84 ve 280,71 $\mu\Omega\text{cm}$ ve $\rho(H)$ değeri ise 102,09, 126,98, 216,84 ve 280,71 $\mu\Omega\text{cm}$ olarak ölçülmüştür. %1 Cu içeren alaşımlarda sıcaklıkla ρ değeri artmaktadır.



Şekil 4.14. $(\text{Co}_{0,402}\text{Fe}_{0,201}\text{Ni}_{0,067}\text{B}_{0,227}\text{Si}_{0,053}\text{Nb}_{0,05})_{99}\text{Cu}_1$ alaşımı için sıcaklık-öz direnç grafiği ($\mu_0 H=0$, $\mu_0 H=1$ T)

Denklem (2.33) ile hesaplanan % MR'nin 1 T manyetik alan altında sıcaklıkla değişimi Şekil 4.15'te gösterilmiştir. Cu içermeyen alaşım için, % MR değerleri 300, 400, 500 ve 600 K'de sırasıyla % 0,94, %27,36, % 60,99 ve % 110,35, $x=0,5$ için, %0,94, %21,87, %37,48 ve %12,25, $x=0,75$ için, 400, 500, 600 K'de % -3,53, %22,58 ve % 14,64, $x=1$ için, 500 ve 600 K'de %1 ve 0 olarak hesaplanmıştır. Cu içermeyen alaşımın ($x=0$) en büyük % MR değerleri 500 ve 600 K'de % 60,99 ve % 110,35'tir. 3d konumundaki elektronlar aracılığıyla artan spin kaynaklı saçılım yüzünden Cu içermeyen Co-bazlı camısı alaşımlarının MR değeri, Cu-katkılı alaşımlarinkinden daha yüksektir (J.Choi ve ark. 2015).



Şekil 4.15. Co-tabanlı alaşımlar için manyetodirencin sıcaklıkla değişimi

5. SONUÇ

$(\text{Co}_{0,402}\text{Fe}_{0,201}\text{Ni}_{0,067}\text{B}_{0,227}\text{Si}_{0,053}\text{Nb}_{0,05})_{100-x}\text{Cu}_x$ ($x=0, 0,5, 0,75, 1$) amorf şeritler arkla eritme ve eriyik eğirme (melt-spinning) yöntemleriyle başarıyla üretilmiştir. Amorf camsı şeritlerin manyetokalorik özellikleri incelenerek alaşıma yapılan Cu katkısının camlaşma yeteneği, manyetokalorik özellikler ve manyetik direnç üzerine etkileri araştırılmıştır. Co-tabanlı şeritlere Cu ilave edilmesi camlaşma yeteneğini artırırken alaşımdaki Cu yüzdesinin artması T_C sıcaklığını yüksek sıcaklıklardan oda sıcaklığına doğru kaydırmıştır. Cu ilavesi arttıkça doyum mıknatıslanması M_s 65,51 emu/g'dan 38,49 emu/g'a düşmüştür. $(\text{Co}_{0,402}\text{Fe}_{0,201}\text{Ni}_{0,067}\text{B}_{0,227}\text{Si}_{0,053}\text{Nb}_{0,05})_{100-x}\text{Cu}_x$ ($x=0, 0,5, 0,75,1$) şeritlerde Cu içeriği arttıkça $(-\Delta S_M)^{\text{maks}}$ azalma eğilimi göstermiştir. 2,2 T manyetik alan değişimi altında $(-\Delta S_M)^{\text{maks}}$ değerleri $(\text{Co}_{0,402}\text{Fe}_{0,201}\text{Ni}_{0,067}\text{B}_{0,227}\text{Si}_{0,053}\text{Nb}_{0,05})_{100-x}\text{Cu}_x$ alaşımında $x=0, 0,5, 0,75$ ve 1 için sırasıyla 0,77, 0,71, 0,89 ve 0,67 $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ dir. Cu miktarının artmasıyla $(\text{Co}_{0,402}\text{Fe}_{0,201}\text{Ni}_{0,067}\text{B}_{0,227}\text{Si}_{0,053}\text{Nb}_{0,05})_{100-x}\text{Cu}_x$ alaşımının RC değerleri azalmıştır ve RC $x=0, 0,5, 0,75, 1$ için 130,6, 110,6, 103,9 ve 86,6 J/kg 'dır. Üretilen örneklerin değerleri, daha önce geliştirilmiş camsı alaşımlarınki ile kıyaslanabilir olduğu gösterilmiştir. $\text{Co}_{40,2}\text{Fe}_{20,1}\text{Ni}_{6,7}\text{B}_{22,7}\text{Si}_{5,3}\text{Nb}_5$ şeridinde maksimum % MR değerleri 600 ve 500 K'de % 110,35 ve % 60,99 olarak hesaplanmıştır. Üretilen malzemeler uygun manyetik soğutma kapasitesi (RC) değerlerine, ihmal edilebilir histeresise, iyi termal kararlılığa ve büyük manyetik direnç değerlerine sahiptir. Elde edilen tüm bu sonuçlara göre, bu camsı alaşımların 450-600 K sıcaklık aralığında yüksek sıcaklık manyetik soğutucusu olarak kullanılabileceği ve gösterdiği % MR değerleriyle de çok fonksiyonlu bir malzeme olduğu söylenebilir.

KAYNAKLAR

- Akdemir, M. , Ekren, O. , Yilanci A. 2014.** Manyetokalorik Malzemeler ve Manyetik Soğutmanın Temelleri. *TTMD*, 90:15-26.
- Bazarov, I.P. 1964.** Thermodynamics. *Pergamon press*, New York, USA, 287
- Belov, 1961.** Magnetic Transformation. *Consultants Bureau*, New York, USA, 242
- Boutahar, A., Lassri, H., Hlil, E.K., and Fruchart, D., 2016.** Critical behavior and its correlation with magnetocaloric effect in amorphous $\text{Fe}_{80-x}\text{V}_x\text{B}_{12}\text{Si}_8$ ($x = 8, 10$ and 13.7) alloys. *Journal of Magnetism and Magnetic Material*. 398: 26-31.
- Dong, Y., Man, Q., Sun, H., Shen, B., Pang, S., Zhang, T., Makino, A. and Inoue, A. 2011.** Glass-forming ability and soft magnetic properties of $(\text{Co}_{0.6}\text{Fe}_{0.3}\text{Ni}_{0.1})_{67}\text{B}_{22+x}\text{Si}_{6-x}\text{Nb}_5$ bulk glassy alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. 509:206-209.
- Dong, J.D., Yan, A.R. and Liu, J. 2014.** Microstructure and magnetocaloric properties of melt-extracted La–Fe–Si microwires. *Journal of Magnetism and Magnetic Material*. 357:73-76.
- Franco, V. and Conde, A. 2010.** Scaling laws for the magnetocaloric effect in second order phase transitions: From physics to applications for the characterization of materials. *International Journal of Refrigeration*. 33:465-473.
- Franco, V., Blazquez, J.S., Ingale, B. and Conde, A. 2012.** The magnetocaloric effect and magnetic refrigeration near room temperature: Materials and models. *Annual Review of Material Science*. 42:305-342.
- Gschneidner, K.A. And Pecharsky, Jr.V.K. 2000.** Magnetocaloric materials. *Annual Review of Material Science*. 30:387-429.
- Gschneidner, K.A. And Pecharsky, Jr.V.K 2008.** Thirty years of near room temperature magnetic cooling: Where we are today and future prospects. *International Journal of Refrigeration*. 31(6): 945-961.
- Hashimoto, T., Numasawa, T., Shino, M. and Okada, T. 1981.** Magnetic refrigeration in the temperature range from 10 K to room temperature: The ferromagnetic refrigerants. *Cryogenics* 21:647-653.
- Huo, J., Huo, L. Men, H., Wang, X., Inoue, A., Wang, J., Chang, C. and Li, R.-W. 2015.** The magnetocaloric effect of Gd-Tb-Dy-Al-M ($M = \text{Fe}, \text{Co}$ and Ni) high-entropy bulk metallic glasses. *Intermetallics* 58:31-35.
- Huang, L., Cong, D.Y., Ma, L., Nie, Z.H., Wang, M.G., Wang, Suo, H.L., Ren, Y. and Wang, Y.D. 2015.** Large magnetic entropy change and magnetoresistance in a $\text{Ni}_{41}\text{Co}_9\text{Mn}_{40}\text{Sn}_{10}$ magnetic shape memory alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 647:1081-1085.
- Inoue, A. 1995.** High strength bulk amorphous alloys with low critical cooling rates. *Material Transaction, JIM* 36(7): 866-875.
- Inoue, A. 1997.** Bulk amorphous alloys with soft and hard magnetic properties. *Materials Science and Engineering*. (226-228):357-363.
- Inoue, A. 2000.** Stabilization of metallic supercooled liquid and bulk amorphous alloys. *Acta Materialia*. 48: 279.
- Kucuk, Ilker., Sarlar, Kagan., Adam, Abdulhamit. and Civan, Ersin. 2016** Magnetocaloric and magnetoresistance properties in Co-based $(\text{Co}_{0.40}\text{Fe}_{0.20}\text{Ni}_{0.067}\text{B}_{0.227}\text{Si}_{0.053}\text{Nb}_{0.05})_{100-x}\text{Cu}_x$ ($x=0-1$) glassy alloys. *Philosophical Magazine*. 96(30):3120-3130.

- Li, J., Huo, J., Law, J., Chang, C., Du, J., Man, Q., Wang, X. and Li, R.-W. 2014.** Magnetocaloric effect in heavy rare-earth elements doped Fe-based bulk metallic glasses with tunable Curie temperature. *Journal of Applied Physics*. 116(6):063902(id).
- Li, J., Law, J.Y., Ma, H., He, A., Man, Q., Mena, H., Huo, J., Chang, C., Wang, X. and Li, R.-W. 2015.** Magnetocaloric effect in Fe–Tm–B–Nb metallic glasses near room temperature. *Journal Non- Crystalline Solids* 425:114-117.
- Li, j., Law, J.Y., Huo, J., He, A., Mana, Q., Chang, C., Mena, H., Wanga, J., Wanga, X. and Li, R.-W. 2015.** Magnetocaloric effect of Fe–RE–B–Nb (RE=Tb, Ho or Tm) bulk metallic glasses with high glassforming ability. *Journal of Alloys and Compounds*. 644:346-349.
- Luo, Q., Tang, M. and Shen, J. 2016.** Tuning the magnetocaloric response of Er-based metallic glasses by varying structural order in disorder. *Journal of Magnetism and Magnetic Material* 401:406-411.
- Podmiljsak, B., Kim, J.H., McGuinness, P.J. and Kobe S. 2014.** Influence of Ni on the magnetocaloric effect in Nanoperm-type soft-magnetic amorphous alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. 591: 29-33.
- Sarlar, Kağan., Civan, Ersin., Kucuk, Ilker. 2017.** Magnetocaloric effect and temperature dependent magnetoresistance in Cu-doped FeCoNiBSiNb amorphous alloys. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 471:169-174.
- Sarlar, K. and Kucuk, I. 2015.** Glass forming ability and magnetic properties of $\text{Co}_{(40.2-x)}\text{Fe}_{(20.1+x)}\text{Ni}_{6.7}\text{B}_{22.7}\text{Si}_{5.3}\text{Nb}_5$ ($x = 0-10$). *Journal of Magnetism and Magnetic Material*. 374: 607-610.
- Stokłosa, Z., Rasek, J., Kwapuliński, P., Badura, G., Haneczok, G., Pająk, L., Lelaćko, J. and Kolano-Burian, A. 2011.** Magnetic, electrical and plastic properties of $\text{Fe}_{76}\text{Nb}_2\text{Si}_{13}\text{B}_9$, $\text{Fe}_{75}\text{Ag}_1\text{Nb}_2\text{Si}_{13}\text{B}_9$ and $\text{Fe}_{75}\text{Cu}_1\text{Nb}_2\text{Si}_{13}\text{B}_9$ amorphous alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. 509:9050-9054.
- Şarlar, K. 2014.** Co Esaslı Hacimli Metal Camın Manyetik özelliklerine etkisinin Araştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*, UU Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Bursa
- Tegus, O., Bruck, E., Buschow, K.H.J. and Boer, F.R. de 2002.** Transition-metal-based magnetic refrigerants for room-temperature applications. *Nature* 415: 150-152.
- T. Bitoh, A. Makino, and A. Inoue, 2003.** Origin of Low Coercivity of Fe-(Al, Ga)-(P, C, B, Si, Ge) Bulk Glassy Alloys. *Material Transactions*. 44(10):2020-2024.
- Wu, C., Yu, P., and Xia, L., 2015.** Glass forming ability and magnetic properties of a $\text{Gd}_{55}\text{Ni}_{25}\text{Al}_{18}\text{Zn}_2$ bulk metallic glass. *Journal. Non- Crystalline Solids* 422:23-25.
- X.C. Zhong, H.C. Tian, S.S. Wang, Z.W. Liu, Z.G. Zheng, and D.C. Zeng, 2015.** Thermal, magnetic and magnetocaloric properties of $\text{Fe}_{80-x}\text{M}_x\text{B}_{10}\text{Zr}_9\text{Cu}_1$ (M = Ni, Ta; $x = 0, 3, 5$) amorphous alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. 633:188-193.
- Xia, L., Chan, K.C., Tang, M.B. and Dong, Y.D. 2014.** Large magnetic entropy change and adiabatic temperature rise of a $\text{Gd}_{55}\text{Al}_{20}\text{Co}_{20}\text{Ni}_5$ bulk metallic glass. *Journal of Applied Physics*. 115:223904.
- Yu, P., Zhang, N.Z., Cui, Y.T., Wen, L., Zeng, Z.Y. and Xia, L. 2016.** Achieving an enhanced magnetocaloric effect by melt spinning a $\text{Gd}_{55}\text{Co}_{25}\text{Al}_{20}$ bulk metallic glass into amorphous ribbons. *Journal of Alloys and Compounds*. 655:353-356.
- Yüzüak, E., Dincer, I., Elerman, Y., Dumkowc, I., Heger, and Yuce Emre, S., 2015.** Enhancement of magnetocaloric effect in $\text{CoMn}_{0.9}\text{Fe}_{0.1}\text{Ge}$ alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 641:69-73.

Zhang, J., Shan, G., Zheng, Z. and Shek, C.H. (2016), Structure and magnetic behaviors of Gd_6FeBi_2 compound. *Intermetallics* 68:51-56.

Zhang, M., Li, J., Kong, F. and Liu, J. (2015) Magnetic properties and magnetocaloric effect of FeCrNbYB metallic glasses with high glass-forming ability. *Intermetallics* 59:18-22.



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Abdülhamit Adam

Doğum yeri ve Tarihi : Midyat/MARDİN 21/04/1987

Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu

Lise :Midyat Aziz Önen Lisesi

Lisans :Uludağ Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü

Çalıştığı Kurumlar :

Ermaksan Fiber Laser Araştırma Mühendisi (2013-2014)

Tübitak Bilgem Bursiyer (2016-2018)

Tübitak Bilgem Danışman (2018 – Halen)

İletişim (e-mail) : ahamitadam@gmail.com

: abdulhamit.adam-d@tubitak.gov.tr

Yayınlar:

Kucuk, Ilker., Sarlar, Kagan., Adam, Abdulhamit. and Civan, Ersin. 2016 Magnetocaloric and magnetoresistance properties in Co-based $(\text{Co}_{0.40}\text{Fe}_{0.201}\text{Ni}_{0.067}\text{B}_{0.227}\text{Si}_{0.053}\text{Nb}_{0.05})_{100-x}\text{Cu}_x$ ($x=0-1$) glassy alloys. *Philosophical Magazine*. 96(30):3120-3130.