

**T.C.
KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HIZLI KATILAŞTIRMA YÖNTEMİ İLE BOR KATKILI FE VE
Nİ ESASLI MANYETİK ALAŞIMLARIN AMORF YAPILI
OLARAK ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU**

Hakan KARATAŞ

**Danışman
Jüri Üyesi
Jüri Üyesi**

**Dr. Öğr. Üyesi Can Doğan VURDU
Doç. Dr. Muhammed Fatih KILIÇASLAN
Dr. Öğr. Üyesi Harun ÇUĞ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

KASTAMONU – 2019

TEZ ONAYI

Hakan KARATAŞ tarafından hazırlanan “**Hızlı Katılaştırma Yöntemi ile Bor Katkılı Fe ve Ni Esaslı Manyetik Alaşımların Amorf Yapılı Olarak Üretimi ve Karakterizasyonu** ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri üyeleri önünde savunulmuş ve **oy birliği** ile Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü **Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Ana Bilim Dalı’** nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman	Dr. Öğr. Üyesi Can Doğan VURDU
	Kastamonu Üniversitesi
Jüri Üyesi	Doç. Dr. Muhammed Fatih KILIÇASLAN
	Kastamonu Üniversitesi
Jüri Üyesi	Dr. Öğr. Üyesi Harun ÇUĞ
	Karabük Üniversitesi

01/07/2019

Enstitü Müdürü	Prof. Dr. Hasbi YAPRAK
----------------	------------------------------

TAAHHÜTNAME

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yaptığımı bildirir ve taahhüt ederim.

Hakan KARATAŞ



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

HIZLI KATILAŞTIRMA YÖNTEMİ İLE BOR KATKILI FE VE Nİ ESASLI MANYETİK ALAŞIMLARIN AMORF YAPILI OLARAK ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

Hakan KARATAŞ

Kastamonu Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Can Doğan VURDU

Bu çalışmada; Hızlı katılaştırma tekniği ile üretilen Fe-2,5Si-2,5B-0,05P-0,2C, 50Ni-42Fe-6Si-2B, 50Fe-42Ni-6Si-2B ve 46Ni-46Fe-6Si-2B (ağırlıkça %) alaşım şeritlerinin mikro yapısı ve manyetik özellikleri incelenmiştir. Alaşımın üretimi için Fe (%99,99 saflıkta); Ni (%99,99 saflıkta); Si (%99,99 saflıkta); B (%99,99 saflıkta); P (%99,99 saflıkta); C (%99,99 saflıkta) elementleri kullanılmıştır. Vakum indüksiyon eritme yöntemi ile elektrik indüksiyon ocağında üretilen döküm halindeki Fe ve Ni esaslı alaşımlar kesme makinesinde küçük parçalara ayrılmışlardır. Daha sonra bu parçalar hızlı katılaştırma için eriyik eğirme makinesinin grafit konteyneri içerisine konularak eritilmiş ve eriyik alaşım 2 mm' lik potanın çıkış ağzından argon gazı kullanılarak atmosfer basıncı altında bakır döner silindir üzerine püskürtülmüştür. Dönme hızı 20 m/s olan silindirin yüzeyine çarpan eriyik alaşımlardan 1-8 mm genişliğinde ve 20-30 µm kalınlığında şeritler elde edilmiştir.

Üretilen şerit alaşımların; X-ışını difraksiyonu (XRD) ile mikroyapısal özellikleri, VSM analizi ile MH ve MT eğrileri çizilerek manyetik özellikleri incelenmiştir. Çalışma kapsamında yapılan analiz sonuçları hızlı katılaştırma tekniği olan eriyik eğirme yöntemiyle üretilen alaşım şeritlerin kısmi kristal yapıda olduğu alaşımların genel yapısının ise amorf özellikler taşıdığı gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Fe-Ni esaslı alaşımlar, eriyik eğirme, hızlı katılaştırma, amorf malzemeler

2019, sayfa 47

Bilim Kodu: 91

ABSTRACT

MSc. Thesis

PRODUCED AND CHARACTERIZATION OF BORON CONTAINING FE AND NI BASED AMORPHOUS MAGNETIC ALLOYS BY USING RAPID SOLIDIFICATION

Hakan KARATAŞ

Kastamonu University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Material Science and Engineering

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Can Doğan VURDU

In this study, microstructure and magnetic properties of Fe-2,5Si-2,5B-0,05P-0,2C, 50Ni-42Fe-6Si-2B, 50Fe-42Ni-6Si-2B and 46Ni-46Fe-6Si-2B (wt. %) alloy ribbons produced by rapid solidification technique were investigated. For the production of alloys; Fe (99.99% purity), Ni (99.99% purity), Si (99.99% purity), B (99.99% purity), P (99.99% purity), C (99.99% purity) elements were used. Fe and Ni based casting alloys produced by vacuum induction melting method in electric induction oven are divided into small pieces in cutting machine. These pieces were then melted into the graphite container of the melt spinning machine for rapid solidification and the molten alloy was sprayed onto the copper rotary cylinder under atmospheric pressure using argon gas from the outlet of the 2 mm crucible. Ribbons of 1-8 mm wide and 20-30 μm thick were obtained from the molten alloys hitting the surface of the cylinder with rotation speed of 20 m/s.

Alloys produced; X-ray diffraction (XRD) microstructural properties, VSM analysis, MH and MT curves were drawn and magnetic properties were examined. The results of the study showed that the alloy strips produced by melt spinning, which is a fast solidification technique, have partial crystal structure and the general structure of the alloys has amorphous properties.

Key Words: Fe-Ni based alloys, melt-spinning, rapid solidification, amorphous materials

2019, pages 47

Science Code: 91

TEŞEKKÜR

Tez çalıőmamda bilgi ve tecrübesiyle bana yol gösteren, motivasyon sağlayan değerli hocam tez danıőmanım Dr. Can Doğan VURDU' ya,

Bilgi ve birikimleriyle desteğini esirgemeyen, laboratuvar çalıőmalarımnda malzeme temini ve aletlerin kullanımında her zaman yardımcı olan hocam Doç. Dr. Muhammed Fatih KILIÇASLAN' a,

Manevi desteęiyle her zaman yanımda olan sevgili eőim Ayőe Göl KARATAő' a, ocuklarım Onur KARATAő ve Zeynep Bűőra KARATAő'a

Teşekkür ediyorum.

Hakan KARATAş
Kastamonu, 07, 2019

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
TEZ ONAYI.....	ii
TAAHHÜTNAME.....	iii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
TABLolar DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL BİLGİLER	3
2.1. Amorf Alaşımlar	3
2.1.1. Amorf Malzemelerin Üretim Yöntemleri.....	4
2.1.2. Fe ve Ni Esaslı Amorf Alaşımları.....	5
2.1.3. Bor Katkılı Amorf Alaşımlar.....	6
2.2. Manyetik Malzemeler.....	6
2.2.1. Yumuşak ve Sert Manyetik Malzemeler	8
2.1.1.1. <i>Fe Esaslı Amorf Yumuşak Manyetik Malzemeler</i>	9
2.1.1.2. <i>Ni Esaslı Amorf Yumuşak Manyetik Malzemeler</i>	10
2.1.1.3. <i>Fe ve Ni Esaslı Amorf Yumuşak Manyetik Malzemeler</i>	10
2.4. Hızlı Katılaştırma Tekniği.....	10
2.3.1. Eriyik Eğirme Tekniği.....	10
2.4. X-Işını Difraksiyonu (XRD)	12
2.5. Titreşimli Numune Manyetometresi (VSM)	12
2.6. Literatür Özeti	14
3. DENEYSEL YÖNTEMLER	17
3.1. Alaşımların Hazırlanması.....	17
3.1.1. Döküm Alaşımların Hazırlanması	17
3.1.2. Eriyik Eğirme Tekniği ile numunelerin üretilmesi.....	18
3.1.3. X-Işını Kırınımı (XRD) Analizleri	22
3.1.4. Titreşimli Örnek Manyetometresi (VSM) Analizleri	22
4. DENEYSEL BULGULAR	23
4.1. XRD Analiz Sonuçları.....	23
4.2. VSM Analiz Sonuçları	32
5. SONUÇ VE TARTIŞMA	42
KAYNAKLAR	43
ÖZGEÇMİŞ	47

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

VSM	Titreşimli Örnek Magnetometresi
XRD	X-Işını Difraksiyonu
Bs	Doğunluk Akı Yoğunluğu
Fe	Demir
Ni	Nikel
Si	Silisyum
B	Bor
Co	Kobalt
H	Manyetik Alan
B	Manyetik Akı Yoğunluğu
M	Manyetik doğunluk
K	Kelvin
Tc	Curie Sıcaklığı
μ	Manyetik Geçirgenlik
Hc	Zorlayıcı Kuvvet (Koersivite)
T	Tesla

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Histerezis eğrisi oluşumu.....	7
Şekil 2.2. Sert ve yumuşak manyetik malzemelerin manyetikleşme eğrileri	9
Şekil 2.3. Eriyik eğirme aleti.....	11
Şekil 2.4. Bruker'in X-ışını Kırınımı D8-Advance cihazı.....	12
Şekil 2.5. Titreşimli Numune Manyetometresi (VSM).....	13
Şekil 3.1. MAHES elektrik indüksiyon.....	18
Şekil 3.2. Üretilen döküm numuneleri	18
Şekil 3.3. Kesme makinası (METACUT)	19
Şekil 3.4. Eriyik eğirme sisteminin şematik görünümü	19
Şekil 3.5. Eriyik eğirme makinası	20
Şekil 3.6. Eriyik-eğirme yöntemiyle üretilen şeritler.....	20
Şekil 3.7. Numune parlatma cihazı	21
Şekil 3.8. Epoksi Kalıp içerisinde şeritler.....	21
Şekil 3.9. Elmas Sprey Monokristal.....	22
Şekil 4.1. A Numunesinden alınan XRD kırınım desenleri	23
Şekil 4.2. A Numunesinden alınan 20-30 aralığında XRD kırınım desenleri.....	24
Şekil 4.3. B Numunesinden alınan XRD kırınım desenleri	25
Şekil 4.4. B Numunesinden alınan 20-30 aralığında XRD kırınım desenleri.....	26
Şekil 4.5. C Numunesinden alınan XRD kırınım desenleri	27
Şekil 4.6. C Numunesinden alınan 20-80 aralığında XRD kırınım desenleri.....	28
Şekil 4.7. D Numunesinden alınan XRD kırınım desenleri	29
Şekil 4.8. D Numunesinden alınan 20-80 aralığında XRD kırınım desenleri....	30
Şekil 4.9. Numunelerin XRD kırınım desenleri.....	31
Şekil 4.10. A Numune M-H Eğrisi	32
Şekil 4.11. A Numune M-T Eğrisi	33
Şekil 4.12. B Numune M-H Eğrisi	34
Şekil 4.13. B Numune M-T Eğrisi.....	35
Şekil 4.14. C Numune M-H Eğrisi	36
Şekil 4.15. C Numune M-T Eğrisi.....	37
Şekil 4.16. D Numunesi M-H Eğrisi	38
Şekil 4.17. D Numunesi M-T Eğrisi.....	39
Şekil 4.18. Numunelerin M-H Eğrileri	40
Şekil 4.19. Numunelerin M-T Eğrileri.....	41

TABLULAR DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 3.1. İncelenen alaşımların bileşimi (ağırlıkça yüzdeleri alınmıştır)	17
Tablo 4.1. A numune şerit alaşımlarda yoğunluk ve kırınım açısı değerleri	24
Tablo 4.2. B numune şerit alaşımlarda yoğunluk ve kırınım açısı değerleri	26
Tablo 4.3. C numune şerit alaşımlarda yoğunluk ve kırınım açısı değerleri	28
Tablo 4.4. D numune şerit alaşımlarda yoğunluk ve kırınım açısı değerleri	30



1. GİRİŞ

Teknolojide hep daha iyiye, mükemmele ulaşma isteği doğrultusunda farklı malzemelerin üretiminin ve çeşitliliğinin artırılması için sürekli çalışmalar yapılmaktadır. Bu aşamada malzeme özelliklerinin kullanıma uygun, kolay üretilen ve maliyetinin düşük olması da önem kazanmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda malzeme üretim tekniklerinin ve malzemenin yapısında bulunan bileşenlerin, malzemenin iç yapısını ve özelliklerini etkilediği ortaya çıkmıştır. Bu sebeple daha iyi ve istenen özelliklere sahip malzeme üretmek için farklı üretim teknikleri geliştirilmiş, farklı elementlerin değişik oranlarda kullanımı konusunda çalışmalar yapılmıştır (Figuroa, Betancourt, Lara, Verduzco, 2005; Giselher, 2013; Callister ve Retwisch, 2015).

1960' lardan itibaren, hızlı katılaştırma teknolojisi kullanılarak üretilen çeşitli amorf alaşımlı yumuşak manyetik malzemeler geliştirilmiştir. Yumuşak manyetik malzemelerin yüksek geçirgenlik ve düşük manyetik akımlarda kolay mıknatıslanma özellikleri sebebiyle bu durum elektromanyetik bileşenler için modern yumuşak manyetik malzemelerin araştırma ve geliştirme yönü haline gelmiştir. Araştırmalar sonucunda üretilen yüzlerce alaşım için yüksek bir uygulama beklentisi olmuş fakat daha seri üretimin başında çoğu hakkında hayal kırıklığı yaşanmıştır. Yeni alaşımlar ortaya koyma yanında, bu malzemelerin seri üretim yollarında bulunması önemlidir (Figuroa vd.; 2005; Giselher, 2013; Callister ve Retwisch, 2015).

Amorf alaşımlar cama benzeyen bir alaşım oluşturduğundan ticari ismi metalik camdır. Demir, kobalt ve demir-nikel esaslı olmak üzere üç tür amorf yumuşak manyetik alaşım türü vardır.

Kobalt esaslı amorf alaşımları (kobalt demir silikon bor), yüksek geçirgenlik, orta ve yüksek frekans ana bileşeninin düşük kaybı özellikleri yanında fiyatı pahalıdır, özellikle yüksek frekans alanında kullanılır (Warlimont, 2001).

Bu çalışmada hızlı katılaştırma tekniği ile üretilen malzemelerin amorf özellikleri taşınması sebebiyle bu üretim tekniği tercih edilmiştir. Yapılan deneylerde piyasada

satılan demir tercih edilmiş böylece maliyetin düşürülmesi amaçlanmıştır. Hızlı katılaştırma tekniği olan eriyik eğirme tekniği ile üretilen demir ve nikel esaslı, bor ve silisyum elementlerinin farklı oranlarının karışımları sonucu elde edilen alaşımların manyetik ve faz yapıları incelenmiştir.



2. KURAMSAL BİLGİLER

2.1. Amorf Alaşımalar

Atomların kararlı bir kristal yapıya sahip olmadığı katılara amorf katılar denir. Yunanca morphé (şekil) kelimesinden ortaya çıkmıştır. Amorf katılar başka bir tabirle şekilsiz katılar düzensiz bir yapı gösterirler. Amorf alaşımlar camsı metaller veya kristal olmayan alaşımlar olarak da adlandırılır. Katı maddelerin atomlarını belli bir düzende bir arada tutan yapının tersine amorf alaşımların yapısında atomların yerleri uzun mesafede periyodik bir düzende değildir. Diğer bir ifade ile amorf alaşımları diğer alaşımlardan ayıran en belirgin özellik, normal kristallerde bulunan atomik düzene ve kristal yapıya ve düzene sahip olmamalarıdır. Amorf yapı malzemelerin moleküllerinin sıvılardaki gibi rastgele yerleştiği görülmektedir. Amorf alaşımlar, ilk olarak 1960 yılında Duwez ve arkadaşları tarafından Au₇₅Si₂₅ alaşımının sıvı azot sıcaklığında hızlı soğutmasıyla üretilmiştir. Genellikle sıvı halinin ani soğutulmasıyla elde edilirler. Amorf malzemeler belirli sıcaklık aralıklarında yumuşar ve sıvı hale geçer. Yumuşamanın başladığı noktaya camsı geçiş sıcaklığı denir. Amorf malzemelerde erimenin başlangıç ve bitiş sıcaklığı arasında belirli bir fark vardır. Bundan dolayı, amorf malzemeler için erime noktasından bahsedilemez (Figuerola vd., 2005; Callister ve Retwisch, 2015).

Cam, lastik ve plastik türü maddeler amorf grubuna girerler. Cam ısıtıldığı zaman önce yumuşar, sıcaklık daha da yükselirse sıvı hale geçer. Yumuşama ile sıvı hale geçme arasındaki sıcaklıklarda çalışılarak cam, plastik ve lastik malzemelerin kalıplanması yapılır. Örneğin, cam kristal yapıda olan kuartz kumu ya da silisyum dioksitten oluşan bir yapıya sahiptir. Kum eritildiğinde, kristallenmesini önlemek amacıyla hızlı bir şekilde soğutulur ve cam adı verilen amorf bir katı şeklini alır.

Manyetik alan uygulanan malzemelerde doyum ulaşmak için küçük manyetik alanlar yeterliyse, bu tür malzemelere yumuşak manyetik malzemeler doyum değerine ulaşmak için çok yüksek manyetik alanlar gerekiyorsa bu tür malzemelere de sert manyetik malzemeler denir. Amorf alaşımlar, yüksek doyumlukta manyetik indüksiyon (Bs), yüksek başlangıç manyetik geçirgenliği ve çok düşük zorlama (Hc)

özellikleri ile mükemmel yumuşak manyetik özelliklere sahiptir. Amorf alaşımlar yüksek mukavemetli, sert ya da yumuşak manyetik ve korozyona dayanıklı olabilirler. Demir esaslı alaşımlar düşük zorlama (0,5-1 A/m) ve 1,4 T' yi aşan yüksek doygunlukta mıknatıslanma ile çok iyi manyetik özelliklere sahiptir. Genel olarak, demir, kobalt ve nikel dayalı manyetik amorf alaşımları yüksek demir içeriği ile yüksek manyetik geçirgenlik değerleri veya yüksek kobalt içeriği ile sifra yakın mıknatıslanma değerleri sağlanabilir. Manyetik özellikler, alaşım elementlerinin eklenmesiyle veya bileşimde küçük bir değişiklikle önemli ölçüde değişebilir. Katıların fiziksel özelliklerinin çoğu yapısal olarak hassastır. Örneğin, amorf alaşımların yumuşak manyetik özellikleri, manyetik bir alanda tavlama; mekanik özellikleri artık gerilmelerin varlığına, korozyon özellikleri kimyasal bileşime ve yüzey tabakasının durumuna bağlıdır (Konstantinovich, 2015; Abrasimova ve Aronin, 2016).

2.1.1. Amorf Malzemelerin Üretim Yöntemleri

Amorf alaşımları üretmek için mevcut alaşım eritilerek sıvı hale geçmesi sağlanır ve ani olarak hızla soğutulur katılaştırılır. Eriyik soğutma hızı söndürme yöntemine göre yaklaşık 10^6-10^9 K/s' dir. Alaşım eritilerek sıvı hale geçtikten sonra hızlı değil de normal soğutulursa, katılaşma için belli bir süre geçecek ve bu sürede de atomlar periyodik düzene geçip kristal yapıyı oluşturur. Katılaşma çok hızlı olursa ve yeterli alt soğuma sağlanabilirse, sıvı halde düzensiz dağılmış atomlar bu kısa zamanda kristal yapıyı oluşturamayarak katılaşır. Hızlı soğutulmuş alaşımın, katı hale geçmesine rağmen atomik dağılımı sıvılara benzer. Fiziksel bakımdan katı olan amorf alaşımlar da atomik dağılımı yönünden sıvılara benzer durumda yani düzensiz yapıda olurlar. Amorf alaşımların bazı özellikleri normal kristallerden çok daha iyidir. Normal kristallere göre daha hafif, daha sert, korozyon direnci daha fazla, daha iyi elektriksel ve manyetik özellikler göstermesi amorf alaşımların öne çıkan özellikleridir (Li ve Yi, 2014; Wang, Ma, Li ve Zhang, 2015; Chang vd., 2017).

Amorf alaşımlar yarı kararlı yapıya sahip olduğundan bu alaşımlara ısısal işlem uygulandığında enerjileri artar ve amorf alaşımlar yarı kararlı durumdan kararlı duruma (kristal) geçerler. Amorf alaşımlar kristal hale dönüşünce amorf halde iken

yapılarında taşımış oldukları özelliklerinin birçoğunu kaybedeceğinden ısısal özelliklerinin bilinmesi önemlidir. Amorf alaşımlara kristallenme sıcaklığının altındaki bir sıcaklıkta ısı işlemler uygulanırsa nanokristal yapı elde edilebilir (Maslov ve Nosenko, 2013, Callister ve Retwisch, 2015).

2.1.2. Fe ve Ni Esaslı Amorf Alaşımlar

Demir nikel alaşımları için permalloy yani manyetik geçirgenliğe sahip alaşım manasına gelen terim kullanılmaktadır. Yaklaşık %20 demir ve %80 nikel bileşenlere sahip alaşımı belirtir. Permalloy yüksek manyetik geçirgenliğe, düşük zorlayıcı kuvvete, sıfıra yakın manyetik büzülme gibi özelliklere sahiptir (Callister ve Retwisch, 2015).

Bileşimindeki nikel oranı, istenen özelliklere bağlı olarak, %35 ile %90 arasında değişebilir; düşük güçlü transformatörler için bu oran %78' dir. Yüksek güçlü transformatörlerde kullanılan ve nikel oranı %50 olan alaşıma hipernik denir. %5 molibden içeren permalloyun saf hidrojenle ısıtılmasıyla manyetik geçirgenliği daha da yüksek olan supermalloy elde edilir. Yüksek geçirgenlikli nikel esaslı yumuşak manyetik alaşımda nikel içeriği %75' in üzerindedir (Callister ve Retwisch, 2015).

Demir nikel alaşımları ayrıca zayıf manyetik alanda uygulama için uygundur. Radyo-elektronik alanında, transformatörlerde, hassas aletlerde, uzaktan kumandada ve otomatik kontrol sisteminde kullanılmaktadır. Demir nikel alaşımlarının dezavantajı ise çok sünek veya işlenebilir olmamasıdır (Yi, Ki ve Sohn; 2005).

Amorf malzemeler demir, nikel ve kobalt elementlerinin birisi veya ikisinin birden kullanımına ek olarak bor, silisyum, fosfat, karbon ve molibden ilavesinden elde edilen alaşımlar olduğundan dolayı amorf malzeme üretimi amaçlı çalışmalarda demir ve nikel esas alınarak alaşım üretimi gerçekleştirilmektedir.

2.1.3. Bor Katkılı Amorf Alaşımlar

Bor katıldığı alaşımların sertliğini, korozyona, kopmaya ve aşınmaya karşı dayanımını ve manyetik geçirgenliğini artıran bir özelliğe sahiptir.

Amorf metallerin elektrik transformatörlerinde kullanıma uygun hale getirilmesi amacıyla birçok çalışma yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda üretilen amorf alaşımların kimyasal bileşiminde temel olarak bor içeren demir bulunmaktadır (Roskil, 1995).

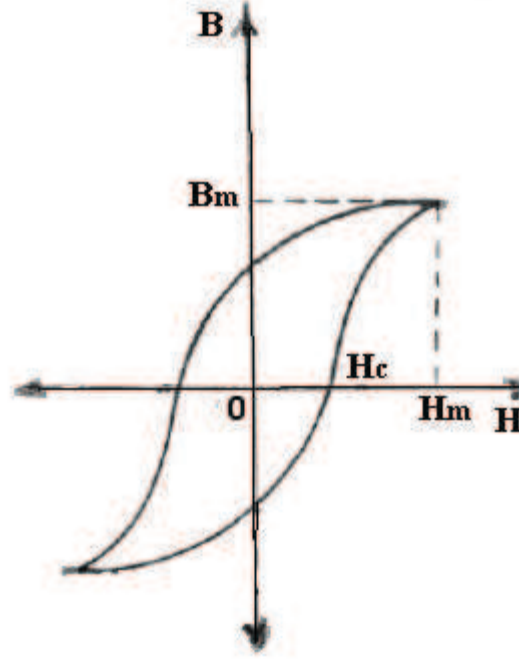
2.2. Manyetik Malzemeler

Manyetizma insanlarca çok eski dönemlerden beri bilinen bir kavramdır. Bilinen ilk manyetik malzeme magnetit yani mıknatıs taşıdır. En bilinen özelliği iki mıknatısın birbirini çekmesi veya itmesidir. Daha sonraları demir bulunduktan sonra demiri de çektiği farkedilmiştir. Basit bir tanımlama ile mıknatısın çektiği fakat itmediği ayrıca birbirini itmeyen ve çekmeyen bu tip malzemelere manyetik malzemeler denir (Jakuboviks, 2015).

Bir iletkenin telin içinden elektrik akımı geçirilirse iletken etrafında bir manyetik alan (H) oluşur. Manyetik alan içerisine manyetik özelliğe sahip mıknatıs gibi bir malzeme konulursa manyetik alan şiddeti artar. Birim alandan geçen manyetik akı miktarına manyetik akı yoğunluğu (B) denir. Manyetik alan içerisine demir konulursa manyetik alan çizgileri yakınlaşır ve manyetik akı yoğunluğu artar. Manyetik alan içerisine manyetik özelliği olmayan bakır gibi bir madde konulursa alan çizgileri birbirinden uzaklaşır ve manyetik akı yoğunluğu azalır. Bu şekilde manyetik alan çizgilerini azaltma ya da artırma özelliğine o maddenin manyetik geçirgenliği (μ) denir. Süper alaşımlar diye tabir edilen Fe, Ni ve Co çok iyi manyetik özelliklere sahiptirler ve bu metaller ferromanyetik malzemelerin en çok bilinenleridir (Jakuboviks, 2015).

H ve B arasındaki ilişki histerezis grafiği incelenerek bulunabilir. H artarken B önce yavaş sonra hızla artmaya başlar ve nihayet bu artış bir noktada (doyma noktası) biter. şekil 2.1.' de gösterilen histerezis grafiğinde 0 noktasından başlayan manyetik

alanın belirli bir artışı sonrası M noktasında manyetik akı yoğunluğu değerinin değişmediği yani malzemede doyma olduğu görülmektedir (Jakuboviks, 2015).



Şekil 2.1. Histerezis eğrisi oluşumu

Doygunluk manyetizasyonu 0 K' de en yüksek değerine ulaşır. Sıcaklık artışıyla doyma manyetizasyonu azalmaya başlar ve Curie sıcaklığında (T_c) ise sıfır olur. Örneğin; demirin 768 °C, kobaltın 1120 °C, nikelin 335 °C sıcaklıkta manyetik özellikleri sıfırlanır (Nair, Molian ve Molian, 2008; Callister ve Retwisch, 2015).

Manyetik malzemeler yumuşak ve sert manyetik malzemeler olarak ikiye ayrılırlar. Yumuşak manyetik malzemeler kolay bir şekilde manyetikleşir, manyetiklik özelliklerini kolay kaybederler. Transformator, elektrik motoru ve jeneratörlerde çekirdek malzemesi olarak kullanılırlar. Sert manyetik malzemeler ise zor manyetikleşirler, manyetik özelliklerini kolay kaybetmezler. Mikrofonlarda, telefon alıcılarında vb. kullanılırlar (Kang, Kim, Kim, Chung ve Baik, 2006; Callister ve Retwisch, 2015).

2.2.1. Yumuşak ve Sert Manyetik Malzemeler

Yumuşak manyetik malzemeler; kolay manyetikleşirler, manyetiklikleri kolay giderilir, manyetik geçirgenlikleri yüksektir, kalıcı manyetiklikleri düşüktür, yok edici manyetik alan kuvvetleri küçüktür ($H_c < 1000$ A/m) (Biol, 2015; Pang vd., 2017).

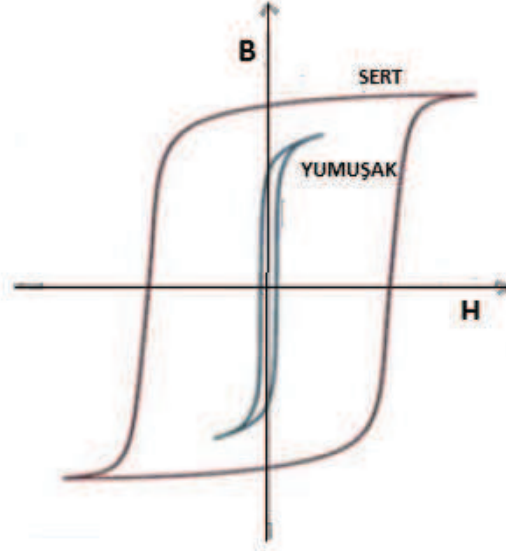
Yumuşak manyetik malzemeler alternatif manyetik alanlara maruz kalan ve bu nedenle enerji kayıpları az olması gereken cihazlarda (transformatörler ve elektrik motorları) kullanılırlar. Demir, metal türü yumuşak manyetik malzemedir (Biol, 2015).

Sert manyetik malzemeler kalıcı mıknatıslanma olduğundan, ısınma sorunu yaşanmadığından ayrıca elektrik enerjisi gerekmediğinden özellikle küçük aletlerdeki motorlarda kullanılan sert mıknatıslar elektromıknatıs kullanılan motorlardan daha üstündür. Kablosuz olarak kullanılan matkaplar ve saatlerde kullanılan sert mıknatıslar buna örnek verilebilir (Biol, 2015).

Küçük koersivite (H_c) değeri manyetik alan büyüklüğü ve yönü değiştiğinde domen sınırlarının kolaylıkla hareket etmesi demektir. Manyetik bir malzemede manyetik olmayan fazın parçacıkları veya boşluklar gibi yapısal hatalar domen sınırlarının hareketine mani olarak koersiviteyi (zorlayıcı kuvvet) artırırlar. Yumuşak manyetik malzemelerde bu gibi hatalar bulunmamalıdır (Biol, 2015; Callister ve Retwisch, 2015).

Yumuşak manyetik malzemelerde manyetikleşme ve demanyetikleşme sırasında domen sınırlarının hareketi kolay olduğundan Şekil 2.2.' de gösterildiği gibi küçük histerezis eğrisine düşük enerji kayıplarına sahiptir.

Sert manyetik malzemelerde devam sınırlarının hareketi çok zor olduğundan demanyetikleşmesi için büyük manyetik alan gerektiğinden daha kalıcıdır ve yüksek enerji kayıplarına sahiptir. Şekil 2.2.' de gösterildiği gibi histerezis eğrisi daha büyüktür (Biol, 2015).



Şekil 2.2. Sert ve yumuşak manyetik malzemelerin manyetikleşme eğrileri

Yumuşak manyetik malzemelerin diğer bir önemli özelliği elektrik direncidir. Histerezis enerji kayıpları ve manyetik alan şiddeti ve yönündeki değişiklikler enerji kaybına yol açar. Yumuşak manyetik malzemelerde enerji kayıpları elektriksel direnç artırılarak azaltılmaya çalışılır. Bu sebeple ferromanyetik malzemeler sadece demir yerine katı eriyik alaşımlardan Fe-Si ve Fe-Ni alaşımları üretilir (Callister ve Retwisch, 2015).

Piyasada en çok kullanılan sert manyetik malzemelerden Al-Ni-Co ve Fe karışımı alaşımlar, yaklaşık 850 K curie sıcaklığı sebebiyle hala tercih edilen bir mıknatıs türüdür. Cu-Ni-Fe alaşımları ve ferritler sert manyetik malzeme sınıfında tercih edilen alaşımlardır.

2.2.1.1. Fe Esaslı Amorf Yumuşak Manyetik Malzemeler

Demirin esas bileşen olduğu alaşımlar demir esaslı alaşımlar diye adlandırılır. Demirin tabiatta çok miktarda bulunması, ucuz ve kolay temin edilebilmesi, farklı alaşımlarının üretilmesinin alternatif ürünlere göre ekonomik yönden daha uygun

olması sanayide demirin kullanımını yaygınlaştırmıştır (Liang vd., 2010; Guo vd., 2016; Chang vd., 2017).

2.2.1.2. Ni Esaslı Amorf Yumuşak Manyetik Malzemeler

Bu tür alaşımlarda nikel esas element olarak alaşım yapısını oluşturur. Nikel elementinin korozyon direnci yüksek olduğundan korozyon direnci zayıf olan metallerin kaplanmasında kullanılır. Bu sebeple nikel paslanmaz çelik alaşımlarının en önemli yapısal bileşenlerinden biridir. Yüksek sıcaklıklarda da dayanımı sebebiyle tercih sebebidir. Uçak motorlarında ağırlıkça %40-50 oranında nikel esaslı malzemenin kullanılması meselenin teknik ve ekonomik açıdan önemini ortaya koymaktadır (Callister ve Retwisch, 2015).

2.2.1.3. Fe ve Ni Esaslı Amorf Yumuşak Manyetik Malzemeler

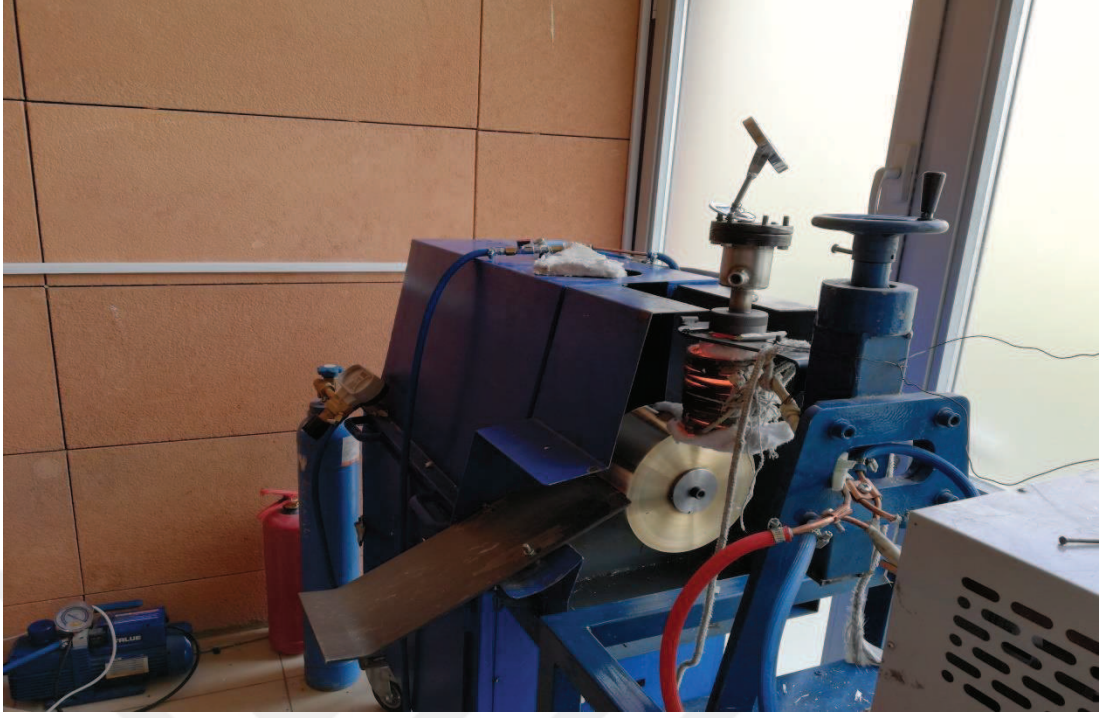
Demir-nikel esaslı alaşımlar istenilen özelliğe göre bileşenleri farklı oranlarda kullanılarak üretilmektedir. Örneğin; yüksek direnç için %36 Ni alaşımı, yüksek doygunluk mıknatıslanması için %50 Ni alaşımı ve yüksek geçirgenlik için %80 Ni alaşımı kullanılmaktadır. Yüksek duyarlıktaki haberleşme cihazlarında düşük alanlardaki geçirgenlikleri çok daha yüksek olan nikel-demir alaşımları kullanılır (Callister ve Retwisch, 2015).

2.3. Hızlı Katılaştırma Tekniği

Hızlı katılaştırma tekniği alaşım üretiminde ve özellikle de amorf, nanokristal gibi yarı kararlı alaşımların üretiminde tercih edilen bir tekniktir. Hızlı katılaştırma; alaşımdaki elementlerin eritilip sıvı hale geldikten sonra sıvı eriyiğin 10^6 - 10^9 K/s aralığında hızlı bir şekilde soğutulmasıyla elde edilen katılaştırma yöntemidir. Sıvı eriyik soğuk bir yüzeye dūřürölür, soğuk yüzeye dūřen eriyik hızlı bir şekilde ısısını kaybeder. Böylece sıvı eriyik normal soğumada olduğu gibi kristallenme fırsatı bulamadan katılaşır (Wu vd., 2014).

2.3.1. Eriyik Eğirme Tekniği

Hızlı katılaştırma tekniklerinden olan ve en çok kullanılan eriyik eğirme tekniğinde amorf ve nano-kristal şerit üretimi yapılabilmektedir. Bu teknik; eriyik haldeki maddenin gaz basıncı ile damlacık olarak döner diske dūřürölerek, ani soğutulması olayıdır. Bu sistemde üretim kısmı, rezistans ısıtmalı grafit pota ve silindirik soğutucu alt yüzeyden meydana gelmektedir. Grafit pota içinde bulunan madde, potanın etrafına sarılı indüksiyon bobiniyle eritilerek bir soy gaz basıncı ile potanın altındaki delikten hızla döner disk yüzeyine pūskürtölür. Döner disk yüzeyine temas eden eriyik aniden katılaşarak şerit haline dönuşür. Uygulanan basınç, döner diskin hızı, diskin yüzeyine eriyiğin dūřme açısı ve pota ağzının genişliği, şeritlerin kalınlık, uzunluk ve genişliğini etkilemektedir. Ticari olarak bu teknikle ilgili ilk çalışmalar şerit üretiminde olmuş fakat daha sonra hızlı katılaştırma tekniği kullanılarak bir katının diğer bir katı içerisindeki çözünürlüğünün artması, yapısal küçölmeyle homojenliğinin artması ve yarı kararlı haller keşfedilmiştir. Böylece ara malzeme üretimi için de eriyik eğirme tekniği kullanılmaya başlanmıştır (Degauque, Fagot, Bras, Bouchara ve Gannac, 1991; Viala, 1996; Warlimont, 2001; Liang vd., 2015).



Şekil 2.3. Eriyik eğirme aleti (Kastamonu Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Hızlı Katılaştırma Laboratuvarı)

2.4. X-ışını Difraksiyonu (XRD)

X-ışını difraksiyonu (XRD), kristalin atomik ve moleküler yapısını incelemek için kullanılan bir yöntemdir. X-ışınlarının kristalin yapısına göre çeşitli yönlerde kırınımı olayıdır. Bu kırınım desenleri bir çeşit parmak izi gibi o kristali tanımlar. XRD cihazına yerleştirilen numune, yavaşça döndürülürken X-ışınlarına maruz bırakılması sonucunda kırınımına uğrayan ışınlar bir kırınım deseni oluşturur. Numunelerin X-ışını kırınım deseni elde edildikten sonra nitel analizlerde, sistem hafızasında bulunan veriler ile karşılaştırılarak fazlar belirlenebilmektedir. XRD cihazı polikristallerin ve farklı kalınlıktaki ince filmlerin analizini yapar (Callister ve Retwisch, 2015).



Şekil 2.4. Bruker' in X-ışını Kırınımı D8- Advance cihazı (Kastamonu Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı)

2.5. Titreşimli Numune Manyetometresi (VSM)

VSM malzemelerin kalite kontrollerinin yapılmasında ve yeni malzemelerin özelliklerinin analizinde kullanılır. M-H ve M-T eğrilerinin elde edilmesinde de VSM cihazından faydalanılır. Yapılan ölçümlerle malzemelerin; ısıtma-soğutma

eğrisi, doyum manyetizasyonu, zamana bağlı sıcaklık eğrisi, zorlayıcı kuvveti, curie sıcaklığı ve manyetik iletkenlik gibi verileri elde edilir.

Titreşimli numune manyetometresinde, numuneyi istenen açıda tutmak için bir cihaz, bir titreşimli eleman, bir kontrol ünitesi ve bir metre içerir. Veri toplamak ve analiz etmek için de bir bilgisayar bulunmaktadır (Callister ve Retwisch, 2015).

Sıcaklık malzemelerin atomlarının ısı titreşimlerinde artış olmasından dolayı manyetik özelliklerini değiştirmektedir. Artan sıcaklık iki komşu dipol arasındaki momentleri etkisiz hale getirir ve dipol düzensizliğine neden olur malzemenin manyetikleşmesi azalır, doyum manyetizasyonu 0 K' de en yüksek değere ulaşır. Sıcaklıkla doyum manyetizasyonu azalır ve curie sıcaklığında sıfıra düşer. Bazı elementler için curie sıcaklığı ise; Fe: 768 K, Ni: 335 K' dir (Callister ve Retwisch, 2015).



Şekil 2.5. Titreşimli Numune Manyetometresi (VSM) (Lake Shore - 7407) (Kastamonu Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı)

2.4. Literatür Özeti

Figuroa ve ark. (2005) B ve Si' nin Fe-esaslı amorf metalik şeritlerin mekanik özellikleri üzerine etkisi hakkında çalışma yapmışlardır. Bor ve silisyum elementlerinin eriyik eğirme yöntemi ile farklı oranları ile alaşım üretilerek Fe esaslı amorf şeritlerin üzerinde mekanik etkileri XRD, SEM ve Vickers micro sertlik analizleri incelenmiştir. Yapılan deneylerde değişken Si ve B içeriğinin FeBSi amorf şeritlerinin mekanik özellikleri üzerindeki etkisi belirlenmiştir. Vickers mikro sertliği, kırılma dayanımı B içeriğinin oranının artmasıyla artmış, % 8 Si olan alaşımlı serilerin mikro sertliği ve kuvvetinin % 10 Si olan serilere kıyasla üstün olduğu bulunmuştur.

Warlimont Hans (2001) tarafından yapılan araştırmada, amorf alaşımlar ve yenilikçi üretim yöntemleri incelenmiştir. Araştırmada şerit, tel döküm yöntemleri gibi amorf malzemelerin geliştirilmesiyle birlikte geliştirilmesi gereken yenilikçi üretim yöntemleri aynı zamanda uygulanabilir işleme yolları olarak belirtilmiş, daha sonra geniş çeşitlilikteki teknik malzemeler ve ürünlerin evriminin yarattığı etkiyi belirtmek üzere listelenmekte ve karakterize edilmektedir. Çalışmada amorf metallerin elektrik enerjisi dağıtımındaki enerji korunumundan dijital iletişim sistemlerinde gerekli bileşenlere kadar çok sayıda ve çeşitte uygulama fırsatını sağlaması ortaya konmuştur.

Kim ve ark. (2007) tarafından yapılan çalışmada, Fe-Si-B esaslı amorf toz çekirdeklerin soğuk presleme ile imalatı ve manyetik özellikleri incelenmiştir. Araştırmada Fe esaslı amorf toz çekirdekler, organik ve inorganik bağlayıcılarla gaz atomizasyonu ve soğuk presleme yoluyla Fe-Si-B amorf tozundan hazırlanmıştır. Burada gaz atomize edilmiş Fe-Si-B amorf tozunun özellikleri ve çekirdeklerin yüksek frekanslı manyetik özellikleri incelenmiştir. Fenol reçinesiyle düzgün yalıtım ve gaz atomlu Fe-Si-B amorf tozunun yumuşak manyetik özellikleri çekirdeklerin mükemmel yüksek frekans karakteristiğine yol açtığı belirlenmiştir. Permalloy tozun, çekirdeklerin manyetik geçirgenliğini artırdığı fakat manyetik geçirgenliğin yüksek içeriğe olan yüksek frekanslı bağımlılığını bozduğu görülmüştür.

Li ve ark. (2017) tarafından yapılan çalışmada, farklı deneysel yöntemler kullanılarak Fe₈₀Nb₆B₁₄ amorf alaşımının elektromanyetik ekranlamaya uygulanması incelenmiştir. Bu çalışma da Fe₇₈Si₉B₁₃ amorf tozlarının faz yapısı XRD ile analiz edildi. Toz çekirdeklerin geçirgenliği, Empedans Analiz Cihazı ile ölçülen çekirdek endüktansından hesaplandı. Boyutları farklı olan amorf tozların morfolojisi SEM ile incelenmiştir. Çekirdek kaybı, Geniş Bantlı Toz Analiz Cihazı ile ölçüldü ve histerezis kaybı, DC B-H döngü analiz cihazı ile ölçüldü. DC kutup alanı performansı, bir LCR metre ile ölçülmüştür. Çalışmadaki sonuçlara göre, boylamsal manyetik alan tavlama işleminin amorf toz çekirdeklerin yumuşak manyetik özelliklerini iyileştirmede etkili bir yaklaşım olduğu sonucuna varılmıştır.

Herzer Giselher (2013) tarafından yapılan araştırmada, modern yumuşak mıknatıslar olan amorf ve nanokristal malzemeler incelenmiştir. Araştırmaya göre nanokristal Fe esaslı alaşımlar gibi amorf Co esaslı alaşımlarda da üstün yumuşak manyetik özellikler sağlayabilir. Ayrıca nanokristal alaşımlar 1,2-1,3 T' da daha yüksek doygunluk indüksiyonuna ve yumuşak manyetik özelliklerin termal kararlılığına sahiptir. Çalışmaya göre yüksek doygunlukta mıknatıslanma ve yüksek geçirgenlik, düşük kayıplar ve termal kararlılığı hakkında yeni gelişmeler değerlendirilmiştir. Anahtarlama güç kaynakları veya telekomünikasyonda kullanılan manyetik bileşenlerin boyutunda ve ağırlığında azalma sağlanması yeni gelişmelere örnek verilebilir. Çalışmada yeni gelişmelere rağmen kullanılan malzemelerin ucuz hammaddeler olan demir ve silikona dayandığı belirtilmektedir.

Liang ve ark. (2015) tarafından yapılan çalışmaya göre, eriyik eğirme yöntemi sanayide Fe esaslı amorf ve nanokristal şeritlerin üretiminde yaygın bir şekilde kullanılmıştır. Fe-6,5Si (ağırlıkça %) yüksek silikon çeliği düşük maliyetlidir ve iyi yumuşak manyetik özelliklere sahiptir. Yüksek erime noktasından dolayı, şeritlerinin imalatı çok zordur ve sadece laboratuvar ölçeğinde üretimi yapılabilir. Bu makalede, Fe-6,5Si şeritlerinin imalatı yapılarak mikroyapıları, mekanik ve yumuşak manyetik özellikleri araştırılmıştır. Hızlı katılaşma nedeniyle, şeritler çok ince tanecikler ve düşük dereceli düzende olmuş bir dereceye kadar bükülme ve gerilme sünekliği sergilemiştir. Isıl işleminden sonra mükemmel yumuşak manyetik özellikler elde edilmiştir. Bu çalışma sonucunda sifıra yakın manyetostriksiyon (manyetik büzülme)

nedeniyle, şeritlerin düşük gürültülere ihtiyaç duyulan yüksek frekanslı elektrikli cihazlarda kullanımı için uygun olduğu görülmüştür.

Wu ve ark. (2014) tarafından yapılan çalışmaya göre; Fe esaslı amorf şeritler, mükemmel yumuşak manyetik özellikler sergiler ve enerji şebekelerinde tasarruf için anahtar bileşen olan transformatörlerde kullanılırlar. Çalışmada üretilen şerit kalitesi bir optik mikroskopla değerlendirilmiş ve tekerlek yüzeyi pürüzlülüğü ve döküm basıncı karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Şerit manyetik özellikleri bir VSM ile ölçülmüştür. Yapılan çalışmada, tavlama işlemi sırasında histerezis kaybındaki ve gevreklikteki iyileşmeler ele alınmış ve uygun tavlama sıcaklıkları üzerine çalışılmıştır.

Nosenko Viktor Konstantinovich (2015) çalışmasında, eriyiğin süper hızlı soğutulmasıyla demire dayanan manyetik amorf ve nanokristal bant alaşımlarının üretimi için teknolojinin geliştirilmesinin sonuçları ve ayrıca manyetik özelliklerin yüksek ısıl kararlılığına sahip manyeto iletkenlerin üretimi açıklanmaktadır. Yapılan çalışmada, geliştirilen nanokristal manyetik devrelerin, transformatörlerin uygulama örnekleri, elektrik mühendisliği, güç elektroniği uygulamaları ve büyük ölçekli uygulamalar hakkındaki beklentiler analiz edilmiştir.

Abrosimova Galina ve Alexandr Aronin (2016) tarafından yapılan çalışmada, amorf alaşımların yapı ve özelliklerinin gelişimi ele alınmıştır. Kristalleşme öncesinde amorf yapı değişimi analiz edilmiştir. Bu çalışmada; kristalleşme altındaki sıcaklıkların, amorf Fe-B alaşımının tavlama neticesinde, amorf fazın mikro sertliğini ve stabilitesini ve kristalleşme sonrası kristal boyutunu on kat değiştirdiği bulunmuştur. Farklı sıcaklıklarda uygulanan ısıl işlemin sadece faz bileşiminin değişmesine değil ayrıca müteakip ısıtmanın ardından daha küçük kristallerle yapının oluşumuna yol açtığı bulunmuştur. Çalışmada çok küçük kristallerin oluşumu da gözlenmiştir yani heterojen amorf yapının kristalleşmesi söz konusudur. Bu durum amorf faz içinde ayrışmaya ve ayrılmaya dayanarak yapı tasarımı olasılığını gösterir. Yapılan çalışma sonucunda; Amorf fazın ayrılması, Fe-B-P alaşımlarında kristalin yüzeyli amorf numunelerin ve amorf yüzeyli kristalin numunelerin üretilmesini mümkün kıldığı belirlenmiştir.

3. DENEYSEL YÖNTEMLER

3.1. Alaşımın Hazırlanması

3.1.1. Döküm Alaşımın Hazırlanması

Fe-Si-B-P-C, Ni-Fe-Si-B, Fe-Ni-Si-B, Ni-Fe-Si-B alaşımları, Tablo 3.1.' de gösterilen ağırlıkça yüzde oranlarında hazırlanmış ve alaşım bileşenlerinin yüksek saflığından (Fe %99,99; Ni %99,99; Si %99,99; B %99,99; P %99,99; C %99,99) faydalanılarak tüm Fe esaslı alaşımların ağırlığının tespiti sağlanmıştır.

Tablo 3.1. *İncelenen alaşımlarının kimyasal bileşimi (ağırlıkça %)*

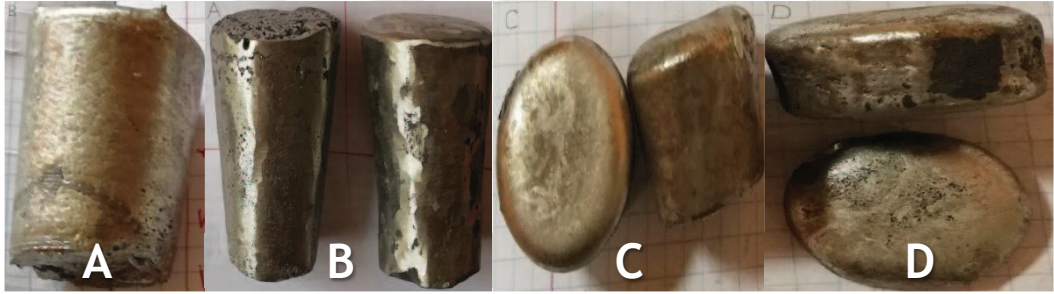
Alaşım	Fe	Ni	Si	B	C	P
Fe-2,5Si-2,5B-0,05P-0,2C	94,75	-	2,5	2,5	0.05	0,2
42Fe-50Ni-6Si-2B	42	50	6	2	-	-
50Fe-42Ni-6Si-2B	50	42	6	2	-	-
46Fe-46Ni-6Si-2B	46	46	6	2	-	-

Numune alaşımlar oksijenli tepkimeyi engellemek için vakum indüksiyon eritme yöntemi ile Şekil 3.1.' de gösterilen elektrik indüksiyon ocağı grafit potada toplandı. Elementlerin homojen bir dağılımda olması için numuneler asgari üç kez tekrar eritildi.



Şekil 3.1. MAHES elektrik indüksiyon ocağı

Fe esaslı alaşımlar, eriyik metallerin kalıba dökülmesi ile hazırlanıp üretildi. Alaşımların üretilen son şekilleri, Şekil 3.2.' de gösterilmiştir.



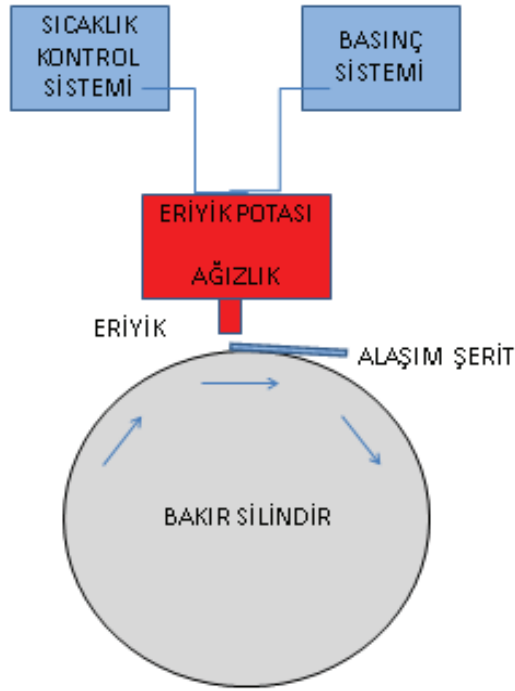
Şekil 3.2. Üretilen döküm numuneleri; (A) Fe-2,5Si-2,5B-0,05P-0,2C, (B) 42Fe-50Ni-6Si-2B, (C) 50Fe-42Ni-6Si-2B, (D) 46Fe-46Ni-6Si-2B

3.1.2. Eriyik Eğirme Tekniğiyle Numunelerin Üretilmesi

Üretilen döküm halindeki Fe esaslı alaşımlar, Şekil 3.3.' te gösterilen kesme makinesi (METACUT) ile parçalar halinde kesildi. Bu işlemin amacı hızlı katılmış Fe esaslı alaşım şerit üretmek için küçük parçalar elde etmektir. Elde edilen parçalar (Şekil 3.2.) argon gazı altında indüksiyon eritme yoluyla eriyik eğirme tekniği kullanılarak şerit haline getirilmiştir. Hazırlanan şeritlerde amorf ve kristalize yapılar, Cu K α radyasyonu ile X ışını kırınımı (XRD) ile belirlenmiştir. Şekil 3.4.' te eriyik eğirme makinesinin basit şematik görünümü gösterilmektedir.



Şekil 3.3. Kesme makinası (METACUT)



Şekil 3.4. Eriyik eğirme sisteminin şematik görünümü

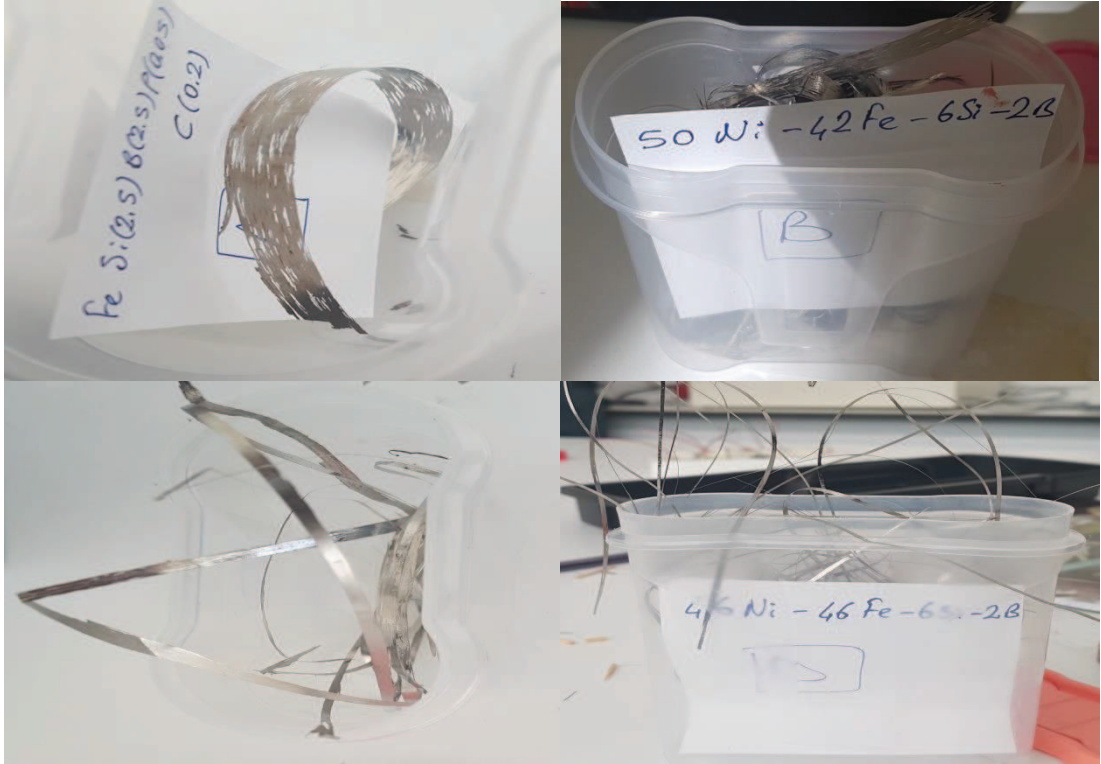
Şeritler, Şekil 3.5.' te gösterilen eriyik eğirme makinesi (Kastamonu Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Hızlı Katılaştırma Laboratuvarı) kullanılarak üretilmiştir. Makinede eritme işleminde grafit konteyner ve bakır döner diskten oluşan bir sistem vardır. Alaşım bileşenleri

eritilerek ve 2 mm' lik potanın çıkış ağzından argon gazı kullanılarak atmosfer basıncı altında dönen silindir üzerine basınçlandırılmıştır.



Şekil 3.5. Eriyik eğirme makinası (Kastamonu Üniversitesi)

Silindir hareket ettikçe (2,5 cm çapında ve dönme hızı 20 m/s), eriyik alaşım katılaşmış şerit şeklinde yayılmış olarak, cilalı pirinç silindir yüzeyine çarparak ve Şekil 3.6.' da gösterilen ortalama 1-8 mm genişliğinde ve 20-30 µm kalınlığında şeritler elde edilmiştir.



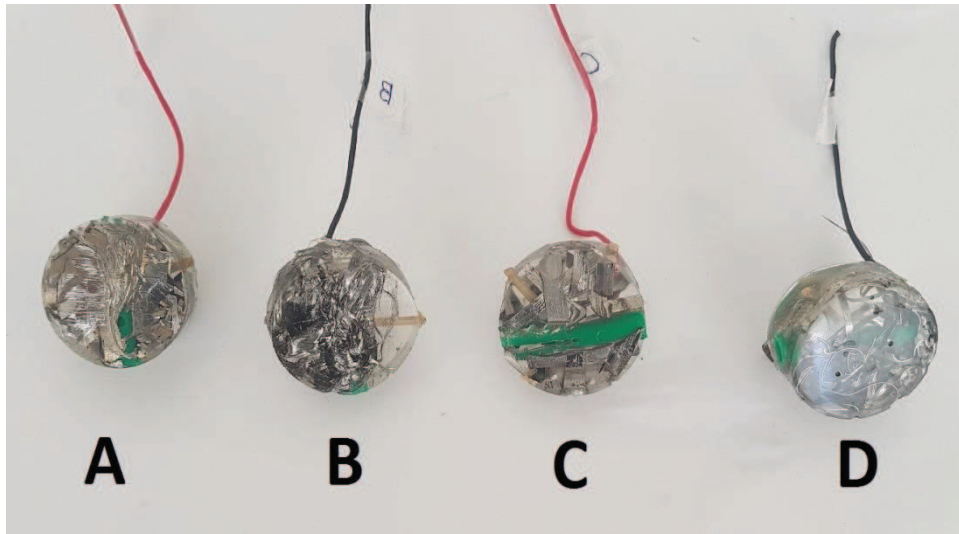
Şekil 3.6. Eriyik-egirme yöntemiyle üretilen şeritler (a) Fe-2,5Si-2,5B-0,05P-0,2C, (b) 42Fe-50Ni-6Si-2B, (c) 50Fe-42Ni-6Si-2B, (d) 46Fe-46Ni-6Si-2B

Kesme makinesinde (METACUT) (Şekil 3.3.) döküm numuneleri küçük bıçaklarla bölümlerde dilimlenirken ve aynı zamanda su ile soğutuldu. Elde edilen epoksi reçine içinde kalıplanmış şerit numuneleri, Şekil 3.8.' de gösterilmektedir. Epoksi reçine içine kalıplama işlemi ile, cilalama ve dağlama öncesinde numunelerin korunması sağlandı.



Şekil 3.7. Numune parlatma cihazı

Daha sonra numuneler epoksi içinden alınıp epoksinin etkilerini arındırmak için zımparalama ve dağlama işlemleri yapıldı.



Şekil 3.8. Epoksi Kalıp içerisinde şeritler (A) Fe-2,5Si-2,5B-0,05P-0,2C, (B) 42Fe-50Ni-6Si-2B, (C) 50Fe-42Ni-6Si-2B, (D) 46Fe-46Ni-6Si-2B (ağırlıkça %)

Zımparalama için 5' er dakika 180 µm, 320 µm, 600 µm, 800 µm, 1000 µm ve 1200 µm silisyum karbür aşındırıcı zımparalar kullanılmıştır. Her yapılan zımparalama sonrası Şekil 3.7.' de gösterilen numune parlatma cihazı ile her bir numune için 15 dakika kadar parlatma işlemi yapılmış arkasından saç kurutma makinesi ile kurutma işlemi gerçekleştirilmiştir. İnce zımparalar ile kaba zımparalama yapılmış, 1200 µm kalınlıktaki zımpara ile de düzeltme işlemi tamamlanmıştır. Optik mikroskopi ile bakılarak numunelerin düz ve çiziksiz olması için işlem tekrar edilmiştir. Numuneler ayrıca 20 saniye ve 40 saniye aralıklarla asidik solüsyonda tutulup sonra suya batırılmış daha sonra kurutma işlemi gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.9.' da gösterilen parlatici sprej kullanılarak numuneler son defa temizlendi.



Şekil 3.9. Elmas Sprey Monokristal

3.2. X Işını Kırınımı (XRD) Analizi

Çalışma yapılan numunelerin amorf ve kristal yapılarını ortaya çıkarmak için X-ışını kırınımı (XRD) analizlerinde yüksek enerjili CuK α radyasyonu ($\lambda=1,5406 \text{ \AA}$) kullanıldı. Ölçümler için 2θ açısı 3° ile 90° aralığında tutuldu.

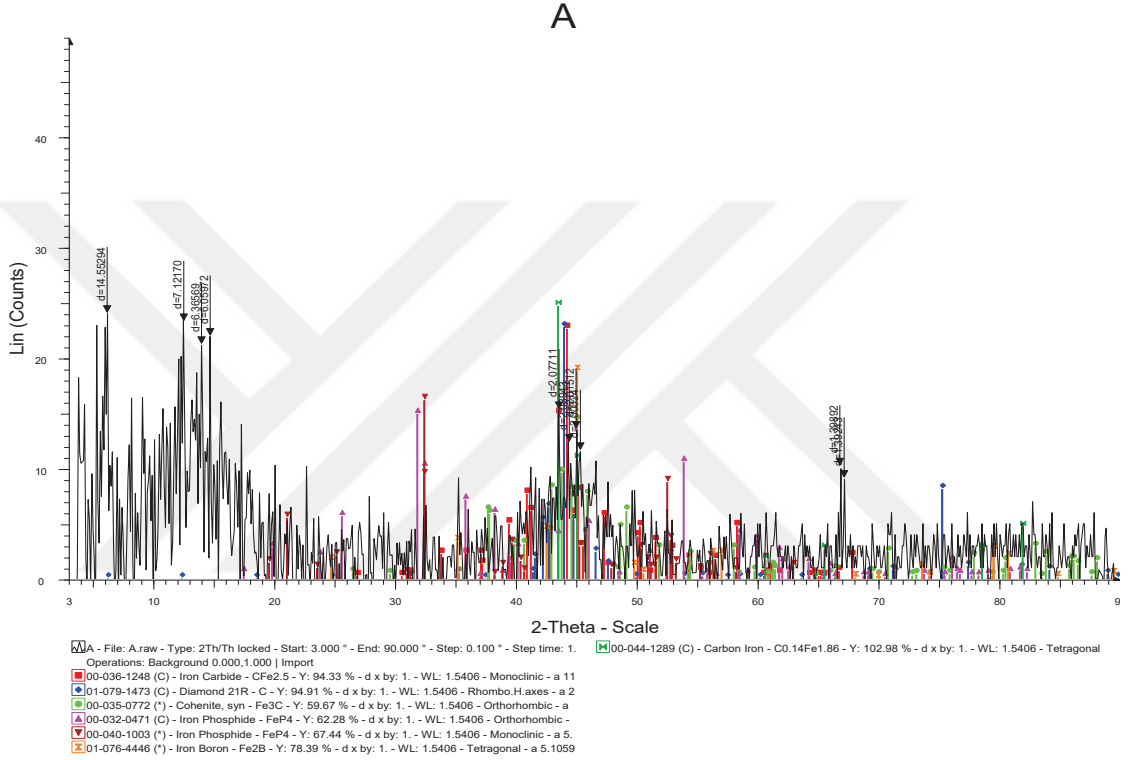
3.3. Titreşimli Numune Manyetometresi (VSM) Analizleri

Şeritlerin 0,5 Tesla aralığında VSM analizlerine bakıldı. M-H ve M-T ölçümleri alınarak manyetik yapı analizleri yapıldı.

4. DENEYSEL BULGULAR

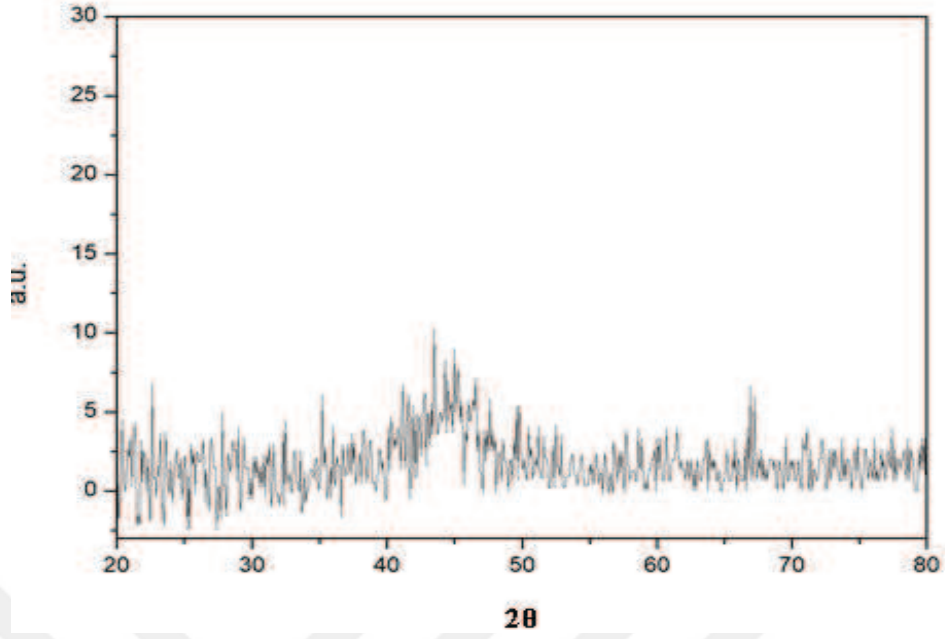
4.1. XRD Analiz Sonuçları

X-ışını kırınımı verileri 3° - 90° ' lik kırınım açısı aralığında ölçülmüştür.



Şekil 4.1. A numunesi Fe-2,5Si-2,5B-0,05P-0,2C 'den alınan XRD kırınım desenleri

Şekil 4.1.' de gösterildiği gibi XRD analizi sonucu CFe25 monoklinik, Fe3C ortorombik, Fe2B tetragonal, FeP4 ortorombik ve monoklinik kristal yapılar tespit edilmiştir.

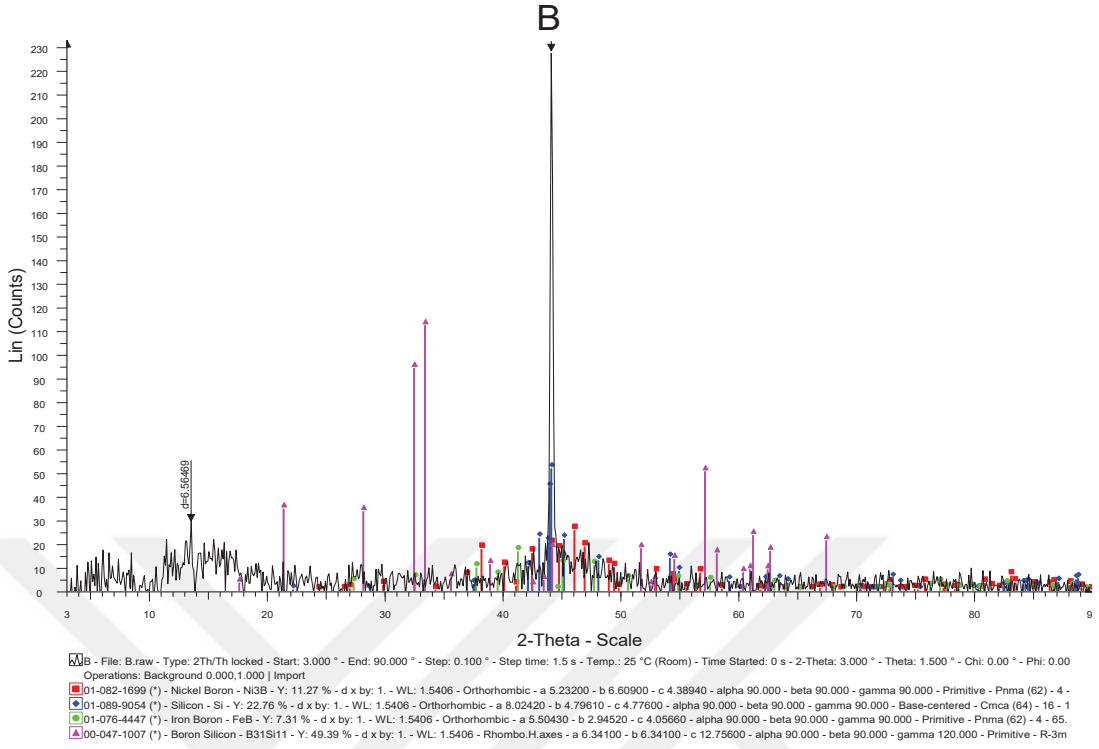


Şekil 4.2. A numunesi Fe-2,5Si-2,5B-0,05P-0,2C 20-80 aralığında XRD kırınım desenleri

Şekil 4.2. Fe-2,5Si-2,5B-0,05P-0,2C numunesi kesitlerinden alınan XRD desenlerini göstermektedir. Söz konusu numuneye ait XRD kırınım deseninde $2\theta = 67^\circ$ civarında FeP₄ (demir fosfid) bileşenine ait kristalimsi bir pik ve $2\theta = 45^\circ$ civarında dağınık zirvenin var olduğunu gözlemliyoruz. Bu durum numunenin amorf faz ve bir miktar kristal fazdan oluştuğunu gösterir. Kırınım deseni Fe ve Ni esaslı amorf yapının oluşumunu doğrular niteliktedir. XRD kırınım desenlerinden alınan veriler Tablo 4.1.' de gösterilmiştir.

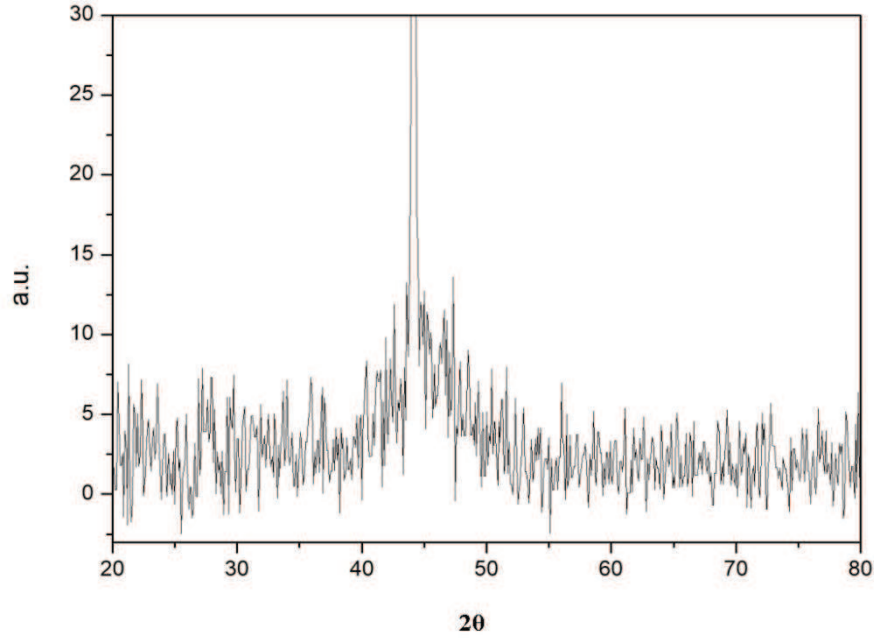
Tablo 4.1. A numune şerit alaşımlarda yoğunluk ve kırınım açısı değerleri

Açı 2θ	d değeri (Angstrom)	Yoğunluk sayısı %	Yoğunluk %
6,068	14,55294	24,2	100,0
12,419	7,12170	23,5	96,9
13,901	6,36569	21,4	88,4
14,606	6,05972	22,1	91,4
43,536	2,07711	15,5	63,9
44,383	2,03943	12,5	51,7
44,948	2,01512	13,7	56,6
45,300	2,00024	11,8	48,6
66,822	1,39892	10,4	42,8
67,174	1,39243	9,26	38,2



Şekil 4.3. B numunesi 42Fe-50Ni-6Si-2B 'den alınan XRD kırınım desenleri

Şekil 4.3.' de gösterildiği gibi XRD analizi sonucunda N3B ortorombik, FeB ortorombik, Si ortorombik kristal yapılar tespit edilmiştir.

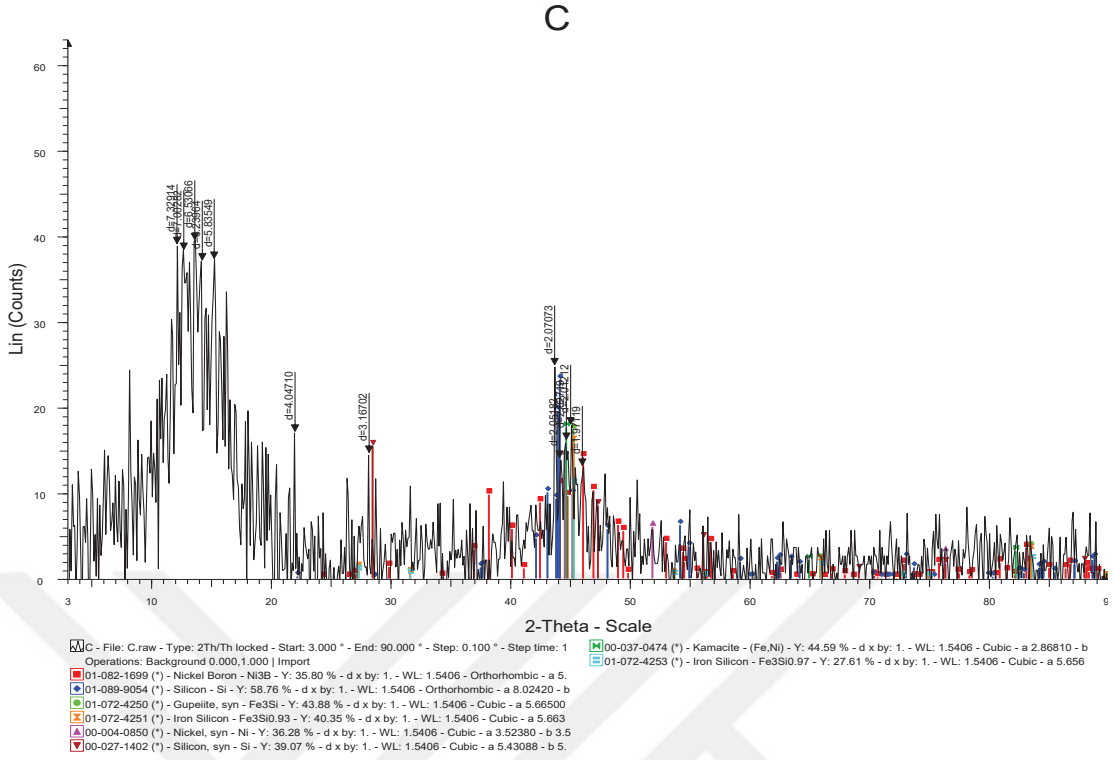


Şekil 4.4. B numunesi 42Fe-50Ni-6Si-2B 20-80 aralığında alınan XRD kırınım desenleri

Şekil 4.4. de 42Fe-50Ni-6Si-2B numunesi kesitlerinden alınan XRD desenlerini gösterir. Söz konusu numuneye ait XRD kırınım deseninde $2\theta = 44^\circ$ civarında yüksek bir kristal bir pik ve $2\theta = 45^\circ$ civarında dağınık zirvenin var olduğunu gözlemliyoruz. Bu durum numunenin amorf faz ve bir miktar kristal fazdan oluştuğunu gösterir. Kırınım deseni Fe ve Ni esaslı amorf yapının oluşumunu doğrular niteliktedir. XRD kırınım desenlerinden alınan veriler Tablo 4.2.' de gösterilmiştir.

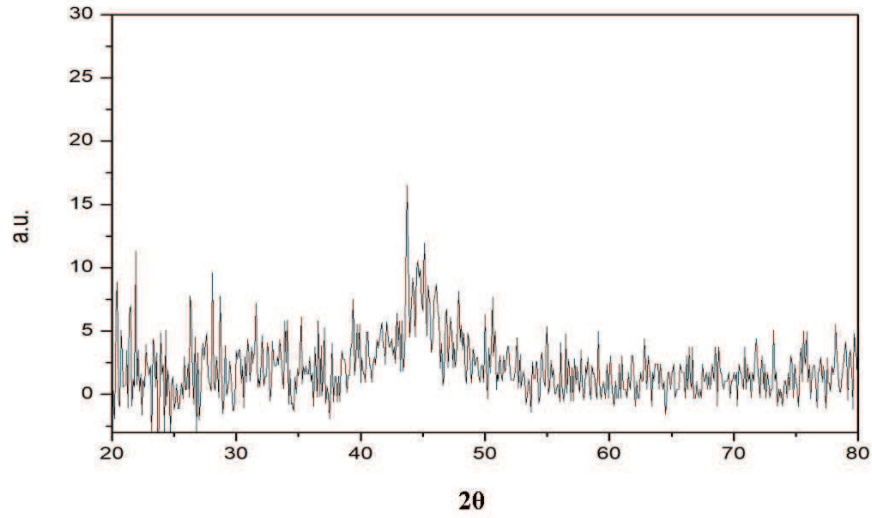
Tablo 4.2. B numune şerit alaşımlarda yoğunluk ve kırınım açısı değerleri

Açı 2θ	d değeri (Angstrom)	Yoğunluk sayısı %	Yoğunluk %
13,477	6,56469	29,6	12,9
44,101	2,05182	229	100.0



Şekil 4.5. C numunesi 50Fe-42Ni-6Si-2B' den alınan XRD kırınım desenleri

Şekil 4.5.' de gösterildiği gibi N3B ortorombik, Si ortorombik, Fe3Si kübik, Si kübik kristal yapılar tespit edilmiştir.

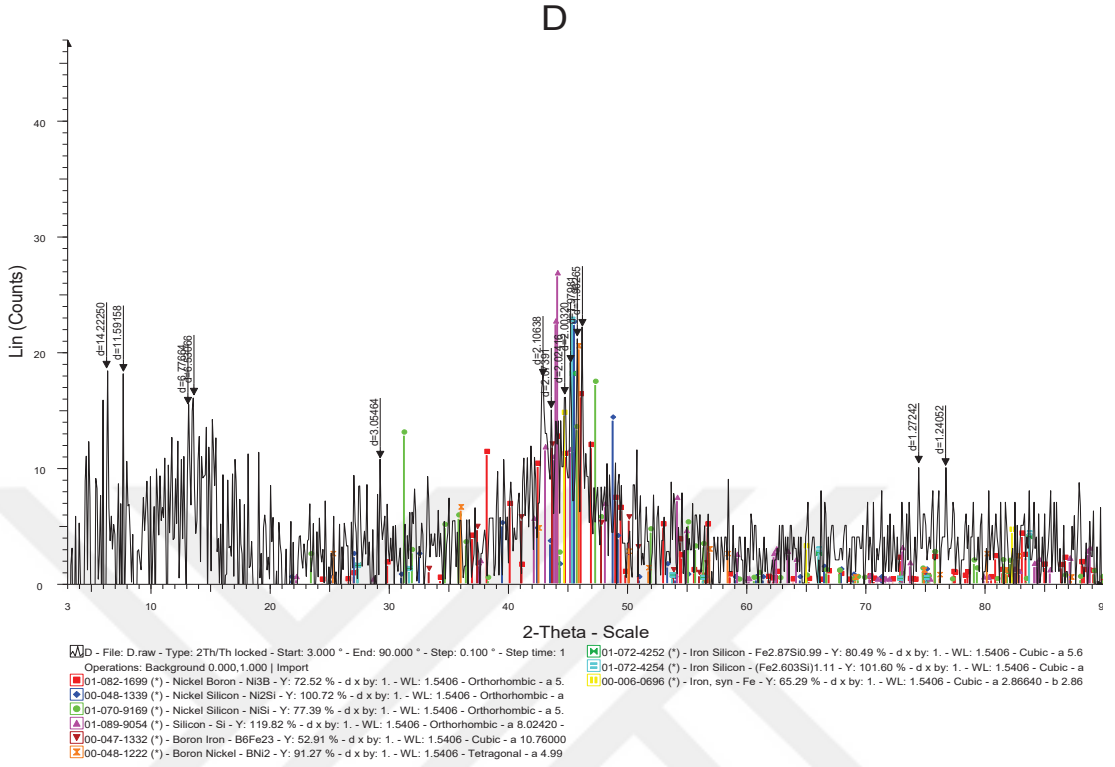


Şekil 4.6. C numunesi 50Fe-42Ni-6Si-2B 20-80 aralığında alınan XRD kırınım desenleri

Şekil 4.6.' da 50Fe-42Ni-6Si-2B numunesi kesitlerinden alınan XRD desenlerini gösterir. Söz konusu numuneye ait XRD kırınım deseninde $2\theta = 44^\circ$ civarında Fe_3Si , $2\theta = 45^\circ$ civarında (Fe, Ni) elementlerine ait kristal zirvelerin ve $2\theta = 45^\circ$ civarında dağınık zirvenin var olduğunu gözlemliyoruz. Bu durum numunenin amorf faz ve bir miktar kristal fazdan oluştuğunu gösterir. Kırınım deseni Fe ve Ni esaslı amorf yapının oluşumunu doğrular niteliktedir. XRD kırınım desenlerinden alınan veriler Tablo 4.3.' te gösterilmiştir.

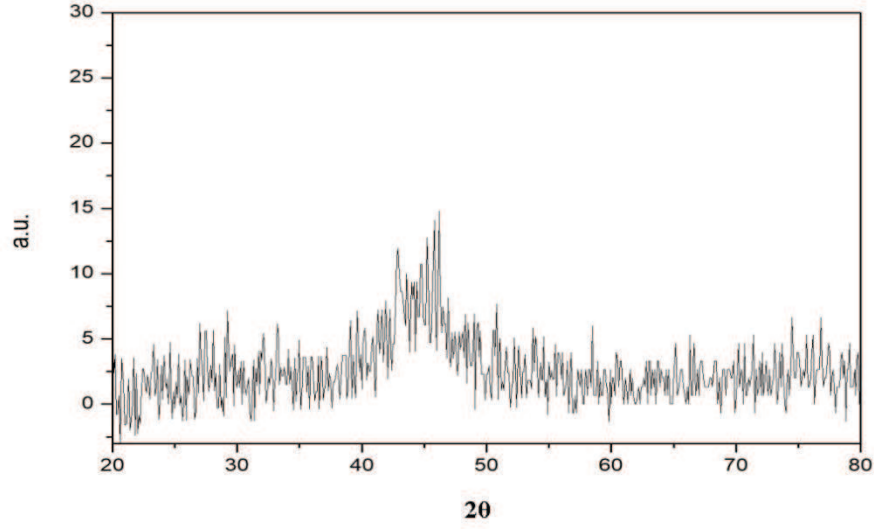
Tablo 4.3. C numune şerit alaşımlarda yoğunluk ve kırınım açısı değerleri

Açı 2θ	d değeri (Angstrom)	Yoğunluk sayısı %	Yoğunluk %
12,066	7,32914	39,2	98,8
12,630	7,00282	38,6	97,1
13,548	6,53066	39,7	100,0
14,183	6,23964	37,3	94,0
15,171	5,83549	37,5	94,5
21,945	4,04710	17,2	43,4
28,154	3,16702	14,8	37,2
43,677	2,07073	25,0	63,1
44,101	2,05182	14,2	35,7
44,665	2,02719	16,3	41,0
45,018	2,01212	18,1	45,6
46,006	1,97119	13,2	33,3



Şekil 4.7. D numunesi 46Fe-46Ni-6Si-2B 'den alınan XRD kırınım desenleri

Şekil 4.7.' de gösterildiği gibi N2Si ortorombik, N3B ortorombik, BNi2 tetragonal, NSi ortorombik, Si ortorombik kristal yapılar tespit edilmiştir.

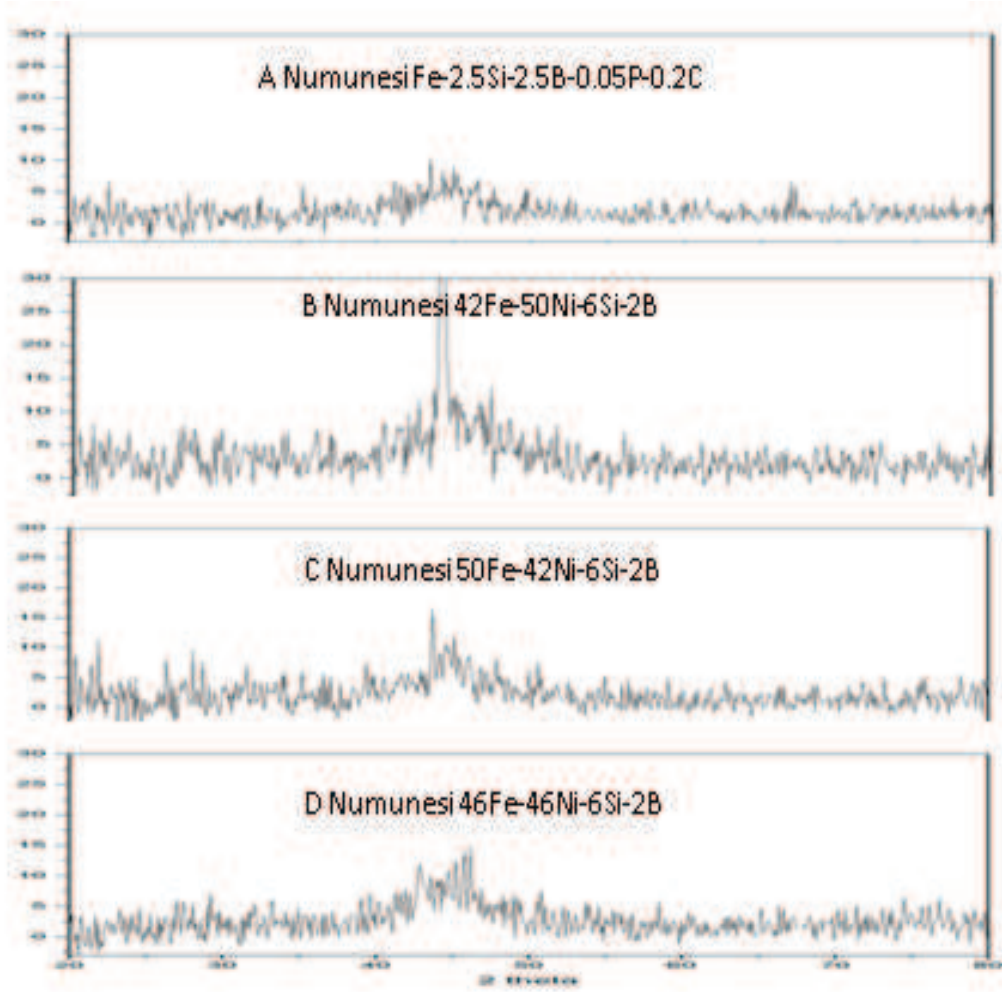


Şekil 4.8. D numunesi 46Fe-46Ni-6Si-2B 20-80 aralığında alınan XRD kırınım desenleri

Şekil 4.8.' de 46Fe-46Ni-6Si-2B numunesi kesitlerinden alınan XRD desenlerini gösterir. Söz konusu numuneye ait XRD kırınım deseninde $2\theta = 53^\circ$ civarında boron demir, $2\theta = 77^\circ$ civarında (Ni, Si) elementlerine ait kristal zirvelerin ve $2\theta = 45^\circ$ civarında dağınık zirvenin var olduğunu gözlemliyoruz. Bu durum numunenin amorf faz ve bir miktar kristal fazdan oluştuğunu gösterir. Kırınım deseni Fe ve Ni esaslı amorf yapının oluşumunu doğrular niteliktedir. XRD kırınım desenlerinden alınan veriler Tablo 4.4.' te gösterilmiştir.

Tablo 4.4. D numune şerit alaşımlarda yoğunluk ve kırınım açısı değerleri

Açı 2θ	d değeri (Angstrom)	Yoğunluk sayısı %	Yoğunluk %
7,621	11,59158	18,4	82,5
6,209	14,22250	18,7	83,8
13,054	6,77664	15,6	69,7
13,548	6,53066	16,3	73,2
29,212	3,05464	10,9	48,7
42,901	2,10638	18,0	80,6
43,607	2,07391	15,2	68,2
44,736	2,02416	16,4	73,6
45,230	2,00320	19,2	86,0
45,794	1,97981	21,5	96,2
46,218	1,96265	22,3	100,0
74,513	1,27242	10,4	46,8
76,771	1,24052	10,2	45,9



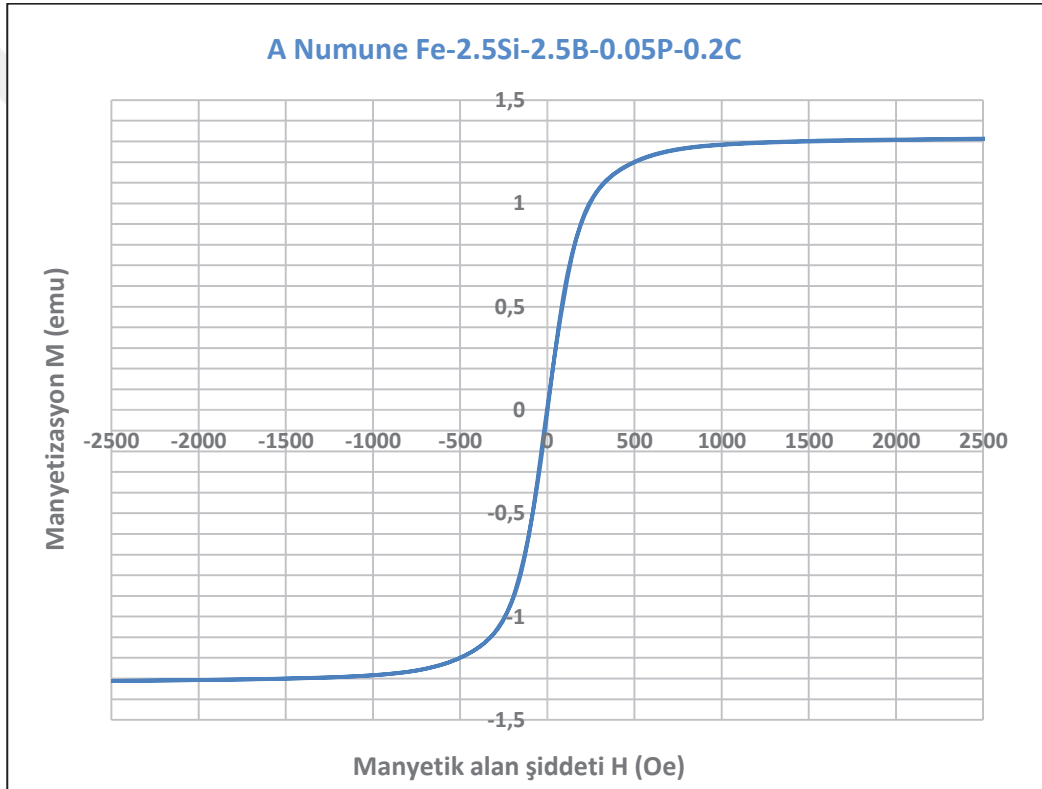
Şekil 4.9. Numunelerin XRD kırınım desenleri

Şekil 4.9.' da Tüm numunelerin XRD kırınım desenleri birlikte gösterilmiştir. Desenler incelendiğinde az sayıda kristal piklerin mevcut olduğu fakat amorf bir yapının tüm numunelerde ortaya çıktığı görülmektedir.

4.2. VSM Analiz Sonuçları

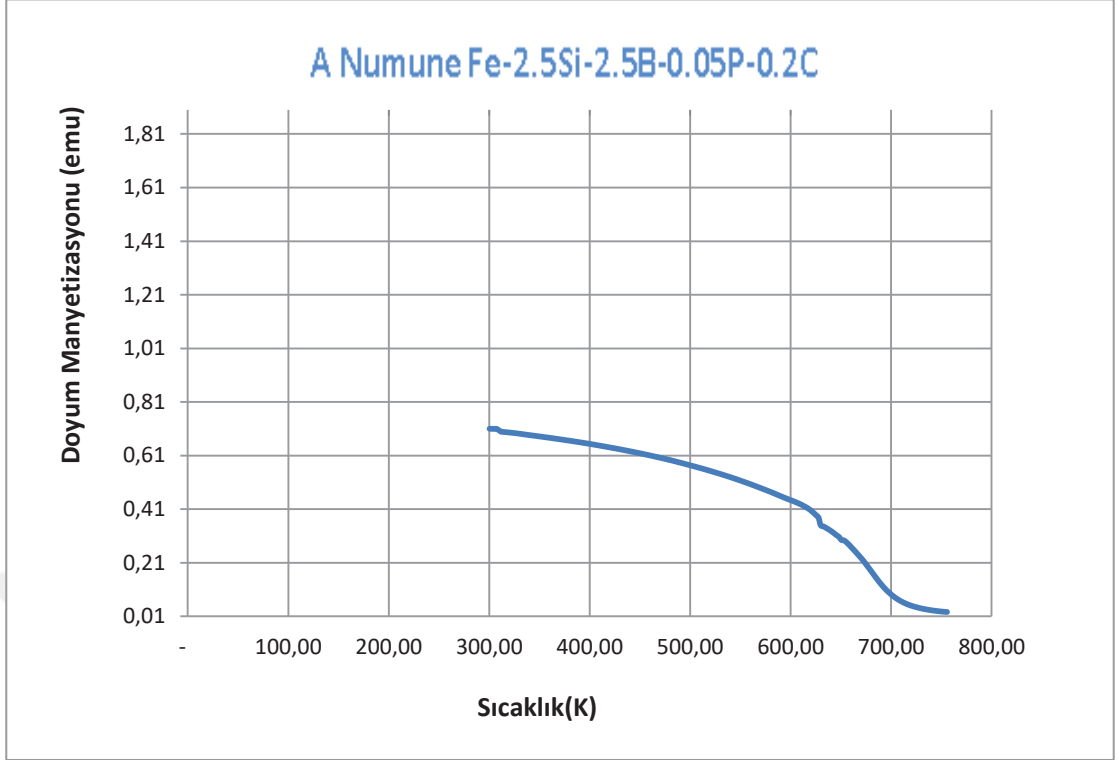
2 tesla bu numuneler için çok olduğundan 0,5 tesla aralığında alındı. Numunelerin M-H ölçümleri için alınan miktarlar; A numunesi $m= 0,0089$ gram, B numunesi $m= 0,0049$ gram, C numunesi $m= 0,0072$ gram, D numunesi $m= 0,0037$ gram.

Numunelerin 1 tesla alan altında M-T ölçümleri alınmıştır. A numunesi $m= 0,0046$ gram B numunesi $m= 0,00498$ gram, C numunesi $m= 0,0040$ gram, D numunesi $m= 0,0039$ gram olarak alındı.



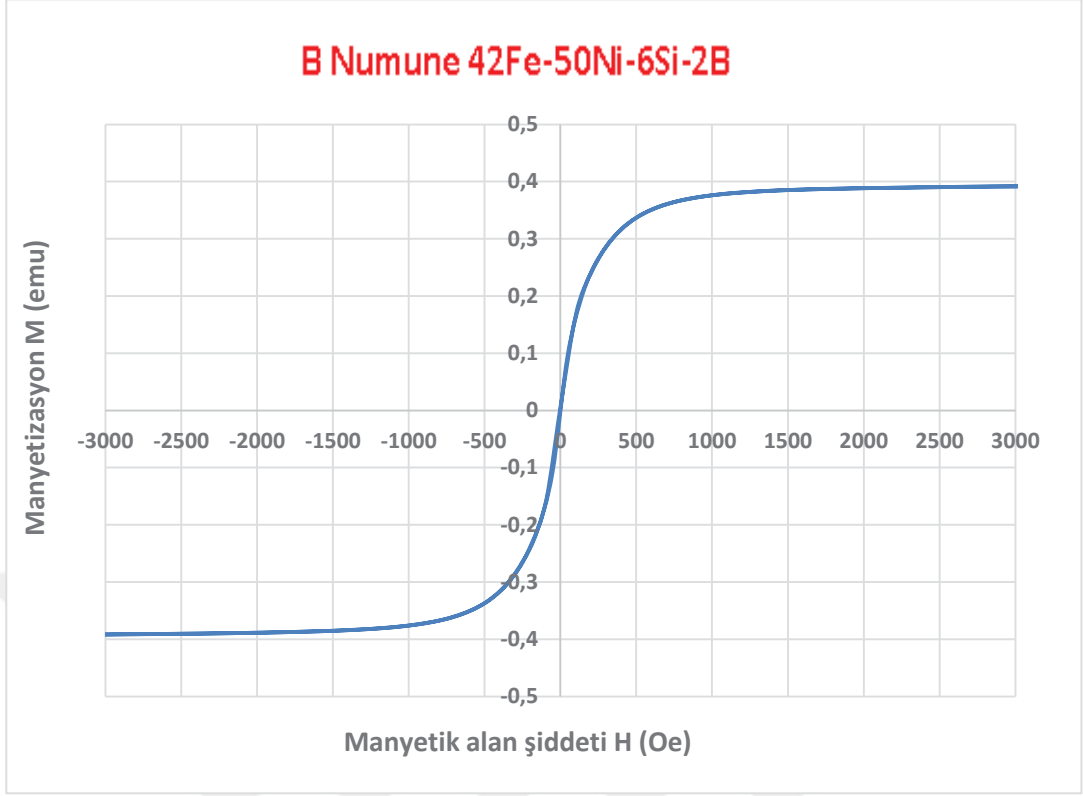
Şekil 4.10. A numunesi Fe-2,5Si-2,5B-0,05P-0,2C' nin M-H grafiği

Şekil 4.10.' da gösterildiği gibi A numunesinin M-H analizlerinden doyma olayı (doyum manyetizasyonu) yaklaşık 1,3 değerinde gerçekleşmektedir. Elde edilen bu değer Fe elementine (100) doğrultusunda manyetik alan uygulanması durumunda ortaya çıkan yaklaşık 1,7 değerinden daha düşük bir doyum manyetizasyonu noktasına sahiptir (Callister 2015).



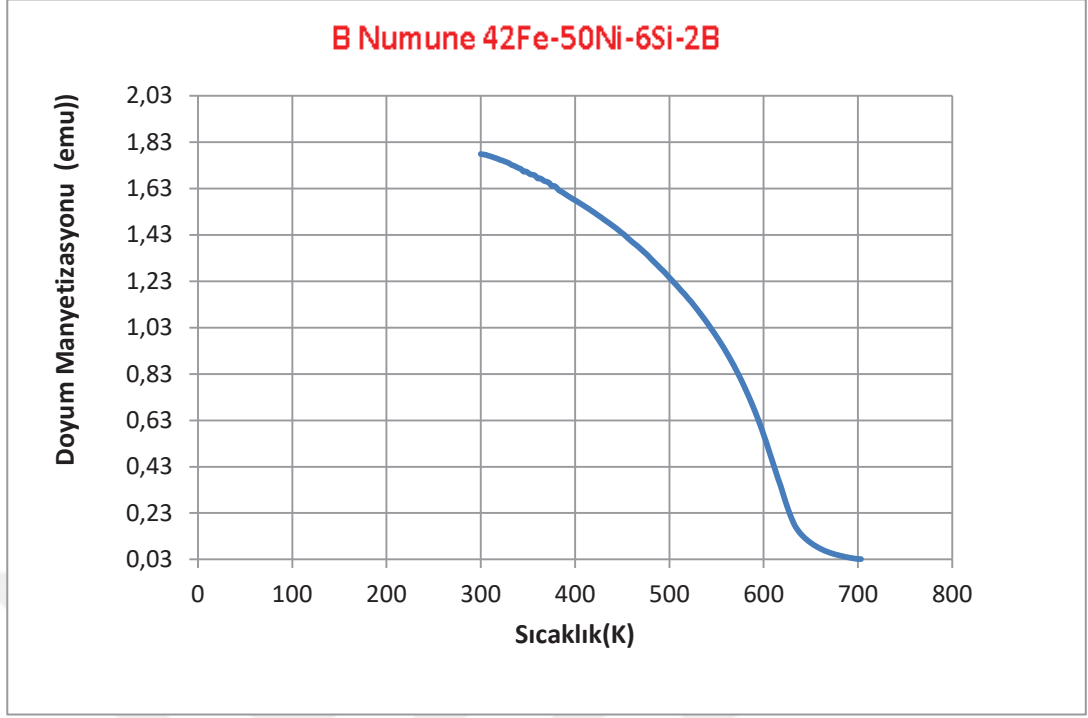
Şekil 4.11. A numunesi Fe-2,5Si-2,5B-0,05P-0,2C' nin M-T grafiği

Şekil 4.11.' de A numunesinin manyetikleşmesinin sıcaklıkla değişimi gösterilmektedir. Artan sıcaklıkla doyum manyetizasyonu düşmekte ve 768 K civarında T_c (curie) sıcaklığına ulaştığı M-T ölçümlerinden ortaya çıkmaktadır.



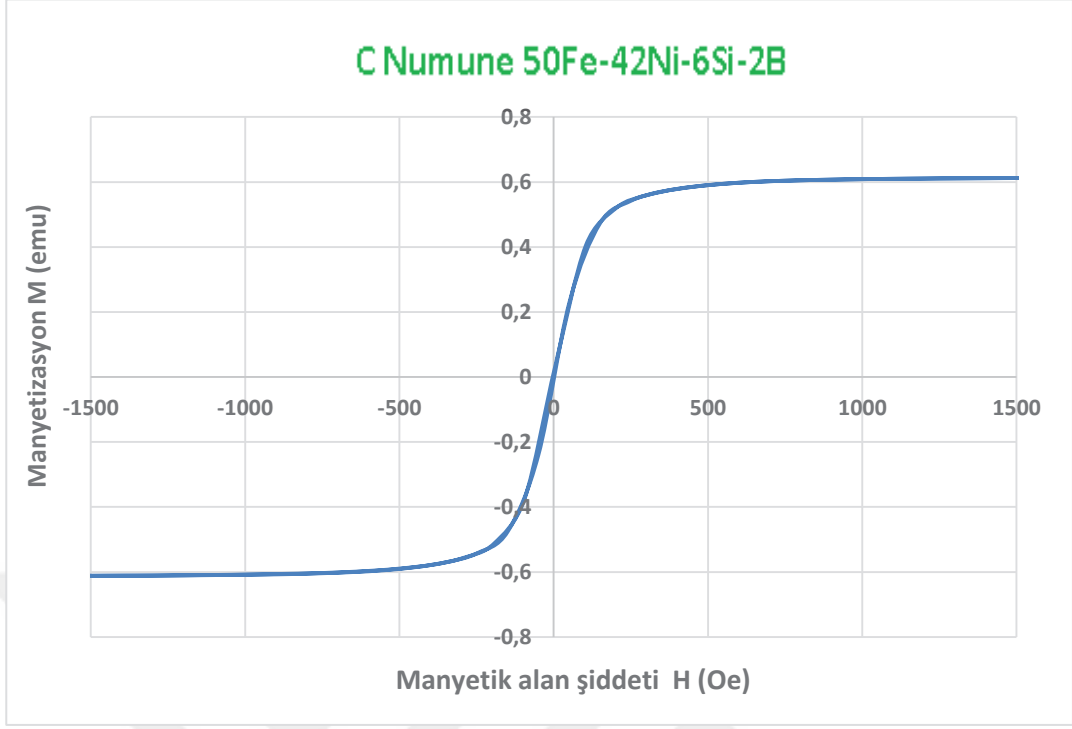
Şekil 4.12. B numunesi 42Fe-50Ni-6Si-2B' nin M-H grafiği

Şekil 4.12.' de gösterildiği gibi B numunesinin M-H analizlerinden doyma olayı (doyum manyetizasyonu) yaklaşık 0,4 değerinde gerçekleşmektedir. Elde edilen bu değer demir oranı yüksek olan A numunesinden daha düşük bir doyum manyetizasyonuna aittir. Nikel oranı artışıyla doyum manyetizasyonunda düşüş meydana gelmiştir.



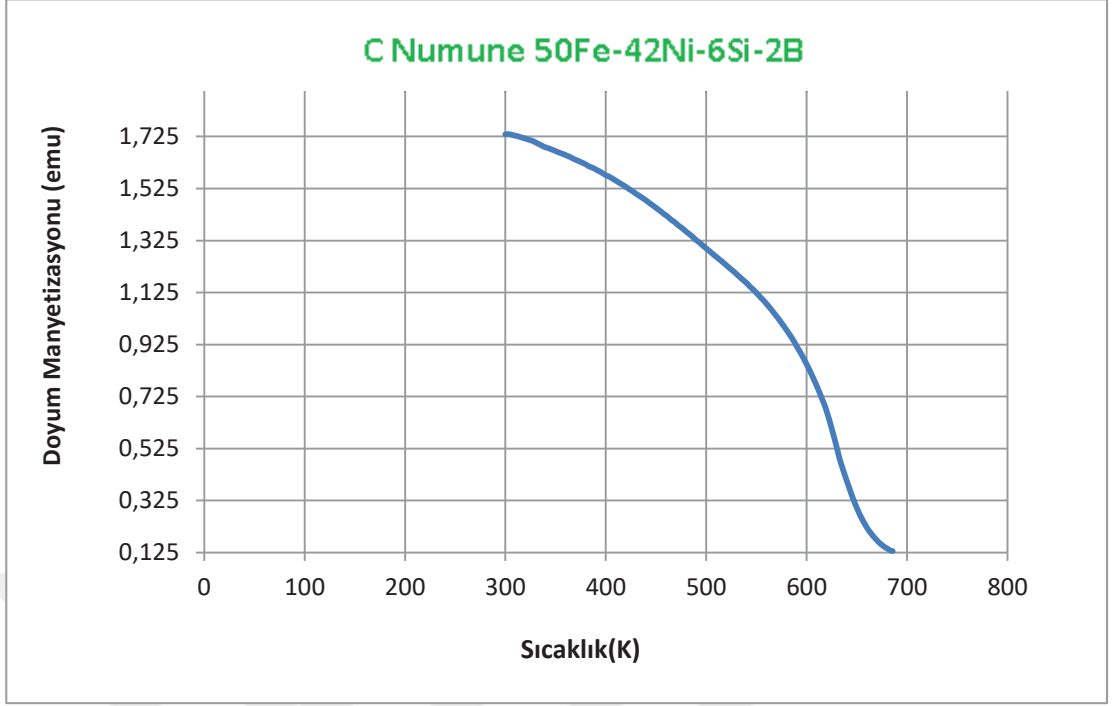
Şekil 4.13. B numunesi 42Fe-50Ni-6Si-2B' nin M-T grafiği

Şekil 4.13.' te B numunesinin manyetikleşmesinin sıcaklıkla değişimi gösterilmektedir. Artan sıcaklıkla doyum manyetizasyonu düşmekte ve 703 K civarında T_c (curie) sıcaklığına ulaştığı M-T ölçümlerinden ortaya çıkmaktadır.



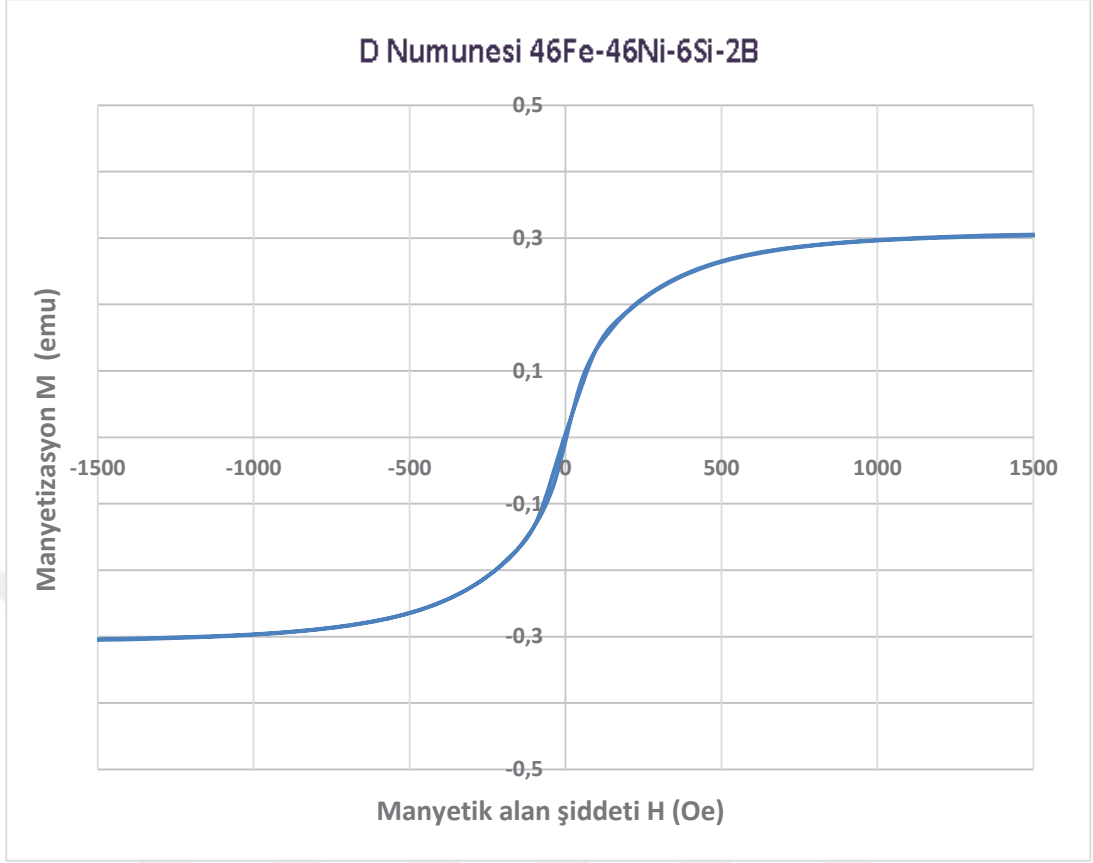
Şekil 4.14. C numunesi 50Fe-42Ni-6Si-2B' nin M-H grafiği

Şekil 4.14.' te gösterildiği gibi C numunesinin M-H analizlerinden doyma olayı (doyum manyetizasyonu) yaklaşık 0,6 değerinde gerçekleşmektedir. Elde edilen bu değer demir oranı yüksek olan B numunesinden biraz daha yüksek bir manyetik alana aittir. Burada doyum manyetizasyonu yükselmiş fakat doygunluk daha küçük H alanında elde edilmiştir. Manyetik geçirgenlik B numunesinden daha yüksek bir değerdedir.



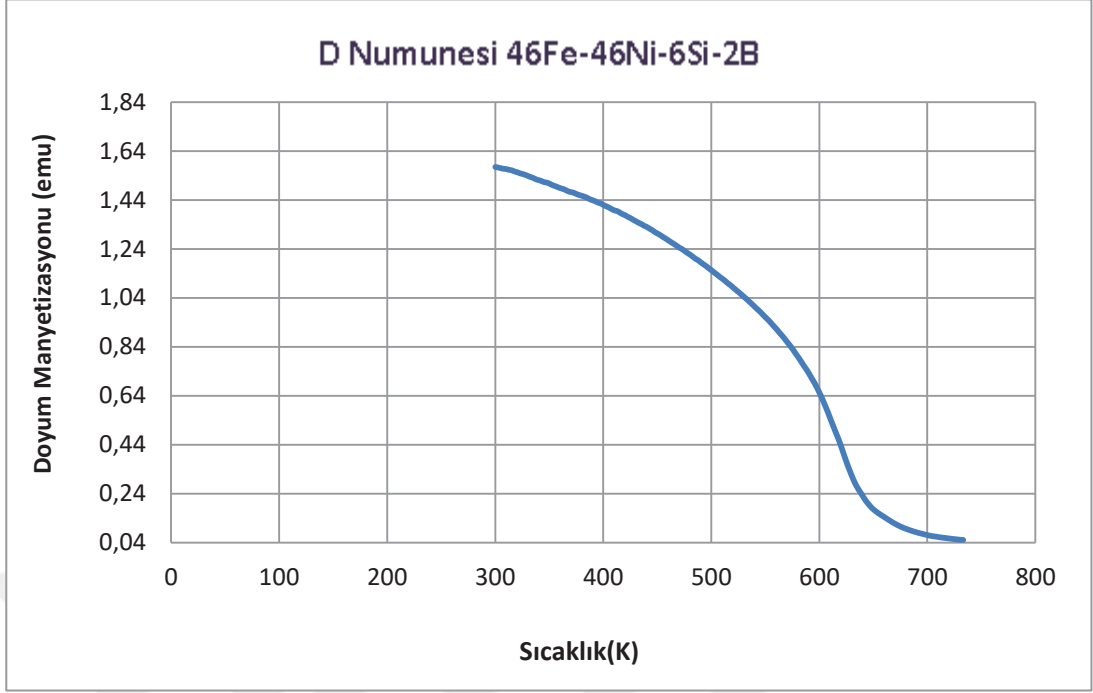
Şekil 4.15. C numunesi 50Fe-42Ni-6Si-2B' nin M-T grafiği

Şekil 4.15.' te C numunesinin manyetikleşmesinin sıcaklıkla değişimi gösterilmektedir. Artan sıcaklıkla doyum manyetizasyonu düşmekte ve 685 K civarında T_c (curie) sıcaklığına ulaştığı M-T ölçümlerinden ortaya çıkmaktadır.



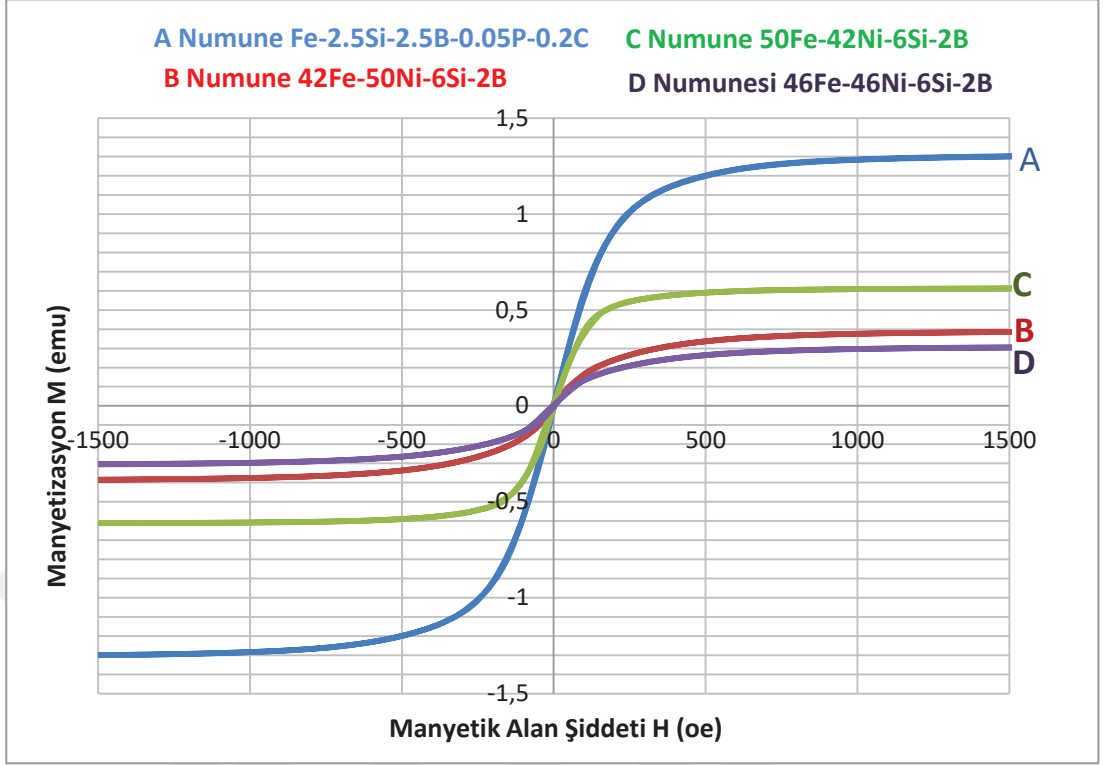
Şekil 4.16. D numunesi 46Fe-46Ni-6Si-2B' nin M-H grafiği

Şekil 4.16.' da gösterildiği gibi D numunesinin M-H analizlerinden doyma olayı (doyum manyetizasyonu) yaklaşık 0,3' ten biraz fazla gerçekleşmektedir. Elde edilen bu değer demir oranı yüksek olan C numunesinden daha düşük bir manyetik geçirgenliğe sahiptir. Nikel oranı artışıyla düşük doyum manyetizasyonu meydana gelmiştir. Burada doyum manyetizasyonu düşmüş fakat doygunluk daha büyük H alanında elde edilmiştir.



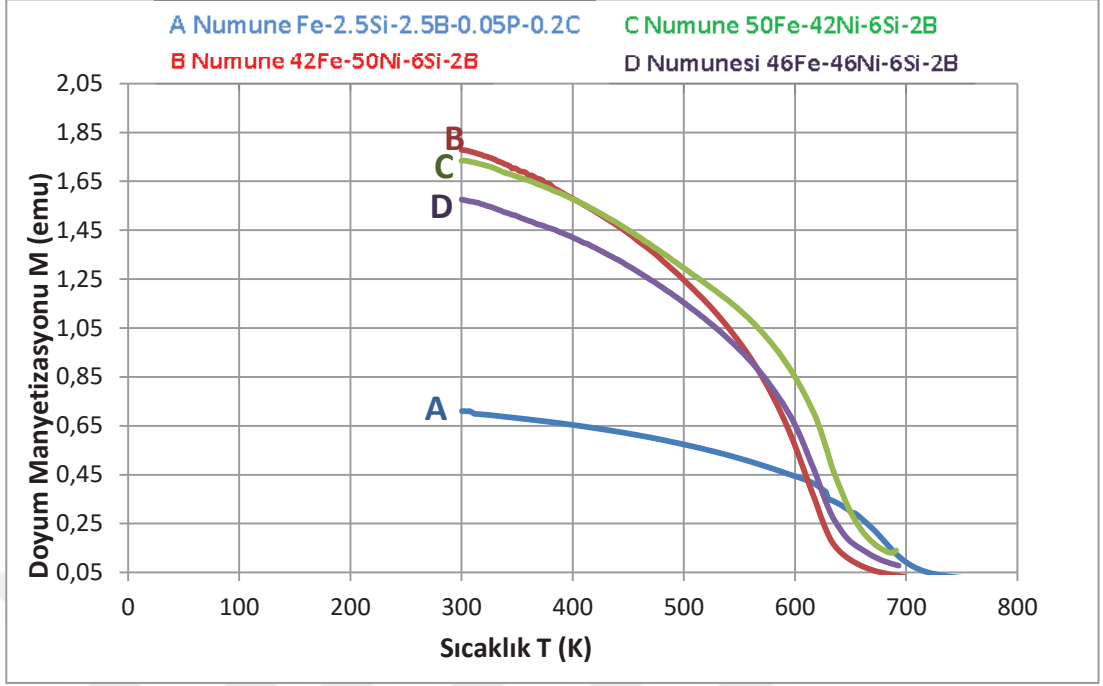
Şekil 4.17. D numunesi 46Fe-46Ni-6Si-2B' nin M-T grafiği

Şekil 4.17.' de D numunesinin manyetikleşmesinin sıcaklıkla değişimi gösterilmektedir. Artan sıcaklıkla doymuş manyetizasyonu düşmekte ve 733 K civarında Tc (curie) sıcaklığına ulaştığı M-T ölçümlerinden ortaya çıkmaktadır.



Şekil 4.18. Numunelerin M-H eğrileri

Şekil 4.18.' de numunelere ait M-H eğrileri gösterilmektedir. Alaşımında ağırlıkça demir bileşeni en fazla olan A numunesine ait M-H eğrisinde doyum manyetizasyonunun en yüksek olduğu, en düşük doymanın ise alaşımında demir ve nikel elementi oranının eşit olduğu D numunesi ile gerçekleştiği görülmüştür. Doyum manyetizasyonuna en küçük H alanında ulaşan ise (yaklaşık 500) C numunesi olduğu görülmüştür. C numunesinin manyetik geçirgenliği ise A numunesine göre düşük kalmıştır.



Şekil 4.19. Numunelerin M-T eğrileri

Şekil 4.19.' de numunelere ait M-T eğrileri gösterilmektedir. Alaşımda ağırlıkça demir bileşeni fazla olan A ve C bileşenlerinde doyum manyetizasyonu yavaş bir şekilde azalmış nikel oranı arttıkça daha hızlı düşüş göstermiştir. Bileşiminde en yüksek demir oranına sahip A numunesin en yüksek T_c sıcaklığına sahip olduğu görülmüştür.

4. SONUÇ VE TARTIŞMA

XRD analiz sonuçlarına bakıldığında, Fe ve Ni esaslı olmak üzere çalışmamızdaki diğer bileşenlerinde eklenmesiyle elde edilen alaşımlarımızda kısmi kristal fazlarında bulunduğu amorf yapılı malzemenin oluşumu doğrulanmaktadır.

VSM analiz sonuçlarına bakıldığında ise, alaşıma Fe katkısı arttığı oranda doyum manyetizasyonu noktasının yükselmekte, nikel katkısı arttıkça doyum manyetizasyon noktasının düşmekte olduğu görülmüştür.

Hazırladığımız şerit numunelerin üretiminde piyasada satılan demir kullanılarak Fe esaslı amorf alaşımların sanayi ürünü olarak kullanımını konusunda maliyet ve ürün temininde yaşanacak sorunların azaltılması amaçlanmıştır.

Sonuç olarak, Hızlı katılaştırma yöntemlerinden eriyik eğirme tekniğiyle üretilen Fe ve Ni esaslı amorf yumuşak manyetik alaşımlarda Fe ve Ni bileşen oranları değiştirildiğinde manyetik ve yapısal özelliklerin de değiştiği görülmüştür. Bu çalışmada üretilen alaşımların taramalı elektron mikroskobu (SEM) vb. farklı analiz cihazlarıyla mikroyapılarının daha ayrıntılı incelenmesi, dirençlerinin ve enerji kayıplarının ölçülmesi önemli bir çalışma alanı teşkil edecektir. Çalışmada kullanılan elementlerin hammadde açısından ucuz ve bol bulunması, özellikle piyasada kolayca temin edilebilecek malzemelerin kullanılması ayrıca hızlı katılaştırma tekniği ile üretilen alaşımların XRD ve VSM analizleri sonucu amorf yumuşak manyetik malzeme olduklarının görülmesi sanayi için üretimini teşvik edici mahiyettedir.

KAYNAKLAR

- Abrosimova, G., & Aronin, A. (2016). Amorphous and Nanocrystalline Metallic Alloys. In: Vadim Glebovsky (ed). Progress in Metallic Alloys. Institute of Solid State Physics, Russian Academy of Science. Chapter 3.
- Biol, Y. (2015). Manyetik Özellikler. Dokuz Eylül Üniversitesi. http://web.deu.edu.tr/metalurjimalzeme/pdf/mmm2002Malzeme2/DER_S9.pdf Erişim Tarihi; 15.02.2019.
- Bozorth, R. M. (1993). Ferromagnetism, Wiley-IEEE Press (1993 reissue), ISBN 0-7803-1032-2.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2015). Materials Science and Engineering. (Ankara, Nobel Akademik Yayıncılık).
- Chang, C., Li Z., Dong Y., Pauly S., Wei R., Li F., Wang X.-M. (2017). Enhanced soft magnetic properties of Fe-based amorphous powder cores by longitude magnetic field annealing. Journal of Alloys and Compounds 706-1-6.
- Ciureanu, P., & Middelhoek, S. (Eds). (1992). Thin Film Resistive Sensors, Institute of Physics Publishing, ISBN 0-7503-0173-2.
- Degauque, J., Fagot, M., Bras, J., Bouchara, D. and Gannac, Y. (1991). Purity influence on the magnetic properties of Fe-6.5 wt% Si melt-spun ribbons. Journal of Magnetism and Magnetic Materials 101, 114-116.
- Figueroa, A., I., Betancourt, G., Lara, Verduzco, J.A. (2005) Effect of B, Si and Cr on the mechanical properties of Fe-based amorphous metallic ribbons. Journal of Non-Crystalline Solids 351, 3075–3080.
- Giselher, H. (2019). Modern soft magnets: Amorphous and nanocrystalline materials. Acta Materialia 61, 718–734.
- Guo, J., Dong, Y., Man, Q., Li, Q., Chang, C., Wang X. M., Li, R. W. (2016). Fabrication of FeSiBPNb amorphous powder cores with high DC-bias and excellent soft magnetic properties. Journal of Magnetism and Magnetic Materials 401, 432–435.
- Haneczok. G., Wroczynskib, R., Kwapulinski, P., Chrobak, A., Stokłosa, Z., Rasek, J. (2009) Electro/magnetic shielding effectiveness of soft magnetic Fe80Nb6B14 amorphous alloy. Journal of materials processing technology 209, 2356–2360.

- Hennayaka, H.M.M.N., Lee, H. S., Yi, S. (2015). Surface oxidation of the Fe based amorphous ribbon annealed at temperatures below the glass transition temperature. *Journal of Alloys and Compounds* 618, 269–279.
- Jakuboviks, J. P. (2015). *Magnetism and magnetic Materials*. Ankara, Nobel Akademik Yayıncılık.
- Kang, E. Y., Kim, Y. B., Kim, K. Y., Chung, Y. H., Baik, H. K. (2006). Preparation of Fe–Si–B–Nb amorphous powder cores with excellent high-frequency magnetic properties. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 304 e182–e185.
- Konstantinovich, N. V. (2015). *Amorphous And Nanocrystal Alloys For Equipment And Energy-Efficient Technologies*. ISSN 1027-3239. *Visn. National Academy of Sciences of Ukraine*, No. 4.
- Li, F., Li, Z., Yaqiang, D., Chang, C., Wang, X. M., Li R. W. (2017) Fe₇₈Si₉B₁₃ amorphous powder core with improved magnetic properties. *J Mater Sci: Mater Electron*, 28:1180–1185.
- Li, Q., & Yi, S. (2014). Improvement of Glass Forming Ability and Soft Magnetic Properties of Fe-C-Si-P Amorphous Alloys Through a Flux Treatment Technique. *Met. Mater. Int.*, Vol. 20, No. 1, pp. 7-11.
- Li, X., Lu, G., Zhang, Z., Ju, D., Makino, A. (2015). Bulk amorphous powder cores with low core loss by spark-plasma sintering Fe₇₆Si_{9.6}B_{8.4}P₆ amorphous powder with small amounts of SiO₂. *Journal of Alloys and Compounds* 647, 917-920.
- Li, Z., Dong, Y., Li F., Chang, C., Wang, Li, R. W. (2017) Fe₇₈Si₉B₁₃ amorphous powder core with improved magnetic Li properties. *J Mater Sci: Mater Electron*, 28:1180–1185.
- Liang, Y. F., S. W., H. Li, Y. M. J., F. Y., & J., P. L. (2015). Fabrication of Fe-6.5wt%Si Ribbons by Melt Spinning Method on Large Scale. *Hindawi Publishing Corporation Advances in Materials Science and Engineering*, Article ID 296197, 5 pages.
- Liang, Z., Li, D., Lu, Z., Lu, C., Liu, T., Guo, F., Liu, K., Wang, J. & Zhou, S. (2010). Novel Fe-based amorphous magnetic powder cores with ultra-low core losses. *SCIENCE CHINA Technological Sciences*, Vol.53 No.5: 1290–1293.
- Long, W., Lu, A. & Li, J. (2013). Preparation of Zr₅₀Al₁₅–xNi₁₀Cu₂₅Y_x amorphous powders by mechanical alloying and thermodynamic calculation. *Bull. Mater. Sci.*, Vol. 36, No. 7, pp. 1275–1280. *Indian Academy of Sciences*.

- Maslov, V. & Konstantinovich, N. V. (2013). Soft magnetic amorphous and nanocrystalline alloys. http://www.stcu.int/documents/reports/distribution/tpf/MATERIALS/METALL_RESEARCH/hannover%2013.pdf. Erişim tarihi: 15/02/2019.
- Nair, R., Molian, R., Molian, P. (2008). Effect of nanoscale thin films of Dy₂Fe₁₄B on the magnetic hysteresis characteristics of melt-spun ribbons of Nd₂Fe₁₄B. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 320, 957–965.
- Pang, W. A., Yu, S., Kong, F., Qiu, K., Chang, C., Wang, X., & Liu, C.T. (2017). Fluxing purification and its effect on magnetic properties of high-Bs FeBPSiC amorphous alloy. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 433, 35–41.
- Petro, J. (2016). Advanced Materials for Motor Laminations: Past, Present and Future. <https://metglas.com/wp-content/uploads/2016/12/Advanced-Materials-for-Motor-Laminations.pdf>. Erişim Tarihi: 14/02/2019.
- Roskil, (1995). "Bor Ekonomisi", Raskill Information Services LTD. 2 Clampham Road London SW9 Oja- England, (pp. 145).
- Roy, R., Panda, K., Ashis, K. & Mitra, A. (2015). Alloy Development through Rapid Solidification for Soft Magnetic Application, in: Zaki Ahmad (ed.) *New Trends in Alloy Development, Characterization and Application*. Chapter 2.
- Viala, B., Degauque, J., Fagot, M., Baricco, M., Ferrara, E., Fiorillo, F. (1996). Study of the brittle behaviour of annealed Fe-6.5 wt%Si ribbons produced by planar flow casting. *Materials Science and Engineering A212*, 62-68.
- W.,J. Yuan, R. Li, Q. Shen, L.M. Zhang. (2007). Characterization of the evaluation of the solid solubility of Si in sintered Fe–Si alloys using DSC technique. *Materials Characterization* 58, 376–379.
- Wang, H.B., Ma, L.X., Li, L., Zhang, B. (2015). Fabrication of Fe-based bulk metallic glasses from low-purity industrial raw materials. *Journal of Alloys and Compounds* 629, 1–4.
- Warlimont, H. (2001). Amorphous metals driving materials and process innovations. *Materials Science and Engineering A304–306*, 61–67.
- Wu, C. Y., Lin K. J., Cheng Y. T., Huang C. K., Pan, C. N., Li, W. C., Chiang, L. K., Y, C. N. & Fong, S. C. (2014). Development of Amorphous Ribbon Manufacturing Technology. *China Steel Technical Report*. No.27. (pp. 28-42).

- Yaqiang, D., Lia Z., Min L., Chuntao C., Fushan L., Xin-Min W. (2017). The effects of field annealing on the magnetic properties of FeSiB amorphous powder cores. *Materials Research Bulletin*. MRB 9291 pp.4.
- Yi, S., Ki, K. Buem & Sang, S. H. (2005). Fabrication of Fe-Based Bulk Amorphous Alloys Using Hot Metal and Commercial Ferro-Alloys. *Materials Transactions*, Vol. 46, No. 10 (pp. 2237-2240).
- Yoon, B. K., Jang, H. K. Seok, K.Y. K. (2007). Fabrication of Fe–Si–B based amorphous powder cores by cold pressing and their magnetic properties. *Materials Science and Engineering A* 449–451, 389–393.
- Zheng, Y. Y., Y.G. Wang, G.T. X. (2015). Amorphous soft magnetic composite-cores with various orientations of the powder-flakes. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 396, 97–101.

