

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FARKLI UYGULAMA ALANLARI İÇİN FLUXGATE SENSÖR
TASARIMI VE OPTİMİZASYONU

HAVA CAN
DOKTORA TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

GEBZE
2018

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FARKLI UYGULAMA ALANLARI İÇİN
FLUXGATE SENSÖR TASARIMI
VE OPTİMİZASYONU

HAVA CAN
DOKTORA TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
PROF. DR. FEVZİ NECATİ ECEVİT
II. DANIŞMANI
DOÇ. DR. UĞUR TOPAL

GEBZE
2018

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

**FLUXGATE SENSOR DESIGN AND
OPTIMIZATION FOR DIFFERENT
APPLICATION AREAS**

HAVA CAN

**A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF PHILOSOPHY OF PHYSICS**

THESIS SUPERVISOR
PROF. DR. FEVZİ NECATİ ECEVİT
II. THESIS SUPERVISOR
ASSOC. PROF. DR. UĞUR TOPAL

GEBZE
2018

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 20/06/2018 tarih ve 2018/32 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 04/07/2018 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Hava CAN'ın tez çalışması Fizik Anabilim Dalında DOKTORA tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI)

: Prof. Dr. Fevzi Necati ECEVİT

ÜYE

: Prof. Dr. Fedai İNANIR

ÜYE

: Dr. Öğretim Üyesi Sinan KAZAN

ÜYE

: Prof. Dr. Savaş BERBER

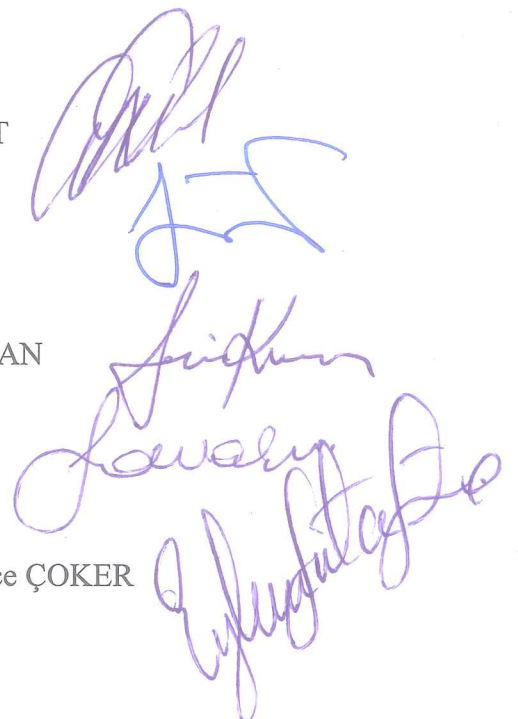
ÜYE

: Dr. Öğretim Üyesi Eylem Gülce ÇOKER

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun

...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.



ÖZET

Bu tez çalışmasında soft manyetik amorf yapıda ferromanyetik nüvelerin kullanıldığı, dünya manyetik alanı (0.6×10^{-4} T) ile 1×10^{-12} T arası bölgedeki DC manyetik alan büyüklüklerini doğrudan ölçebilme yeteneğine sahip Fluxgate sensörlerin geliştirilmesine yönelik araştırmalar yapıldı ve sensör performansına etki eden faktörler belirlendi. Tez çalışmasının bir parçası olduğu TÜBİTAK 113F192 nolu projenin ortağı olan SAS (Slovakya Bilimler Akademisi) grubu laboratuvarlarında üretilen bir dizi sensör algılama nüvesi üzerinde yapılan çalışmalar neticesinde manyetik geçirgenlik, doyum mıknatıslanması, manyetik büzülme katsayısı gibi manyetik parametrelerin sensör performansı üzerindeki olası etkileri ayrıntılı bir şekilde incelendi. Çubuk tipi ve halka tipi fluxgate sensör geometrileri üzerinde çalışmalar yapıldı. Geliştirilen çubuk tipi sensörler ile kredi kartı üzerindeki manyetik kayıt bilgisi LabVIEW programlama diliyle geliştirilen bir yazılımla ölçülüp görüntülendi. Ayrıca halka tipi sensörlerde önemli tasarımlar yapıldı ve ~ 1 pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ @1Hz gibi oldukça düşük gürültü seviyelerine ve ~ 3 MV/T'ya varan oldukça yüksek hassasiyet (ya da ölçek faktörü) değerlerine ulaşıldı. Halka tipi sensörlerin uzun dönem kararlılığının ve sıcaklık bağımsızlığının sağlanması için tasarımlar yapıldı ve -50°C ile $+85^\circ\text{C}$ arasında ölçümler yapıldı. Bu ölçümler ile sensörlerin karakteristik parametrelerinin sadece $\sim 6\%$ değişim gösterdiği gözlemlendi.

Anahtar Kelimeler: Fluxgate sensör, 2. harmonik sinyal, Manyetik alan sensörü, tahribatsız muayene.

SUMMARY

In this study, studies were made to develop Fluxgate sensors capable of measuring the DC magnetic fields in the region between the magnetic field of the earth (0.6×10^{-4} T) and 1×10^{-12} T using the soft magnetic amorphous ferromagnetic cores and the factors affecting the sensor performance were determined. As a result of studies on a series of magnetic cores produced in the laboratories of SAS group, which is partner of the TÜBİTAK 113F192 project, the possible effects of magnetic parameters such as magnetic permeability, saturation magnetization and magnetostriction coefficient on sensor performance have been examined in detail. Rod and ring core type fluxgate sensor geometries have been investigated. With the developed rod-type sensors, the magnetic recording data on the credit card could be measured and imaged (with homemade software) successfully. On the other hand, ring-shaped sensors have also been designed with considerable noise levels as low as ~ 1 pT / $\sqrt{\text{Hz}}$ @ 1Hz. Besides, the sensitivity (or scale factor) has reached very high values up to ~ 3 MV/T. Our designs to ensure the long-term stability and temperature independence of the ring-type sensors has also shown that the characteristic parameters of the sensor (like the sensitivity) between -50°C and $+85^\circ\text{C}$ changed only $\sim 6\%$.

Key Words: Fluxgate sensor, the 2nd harmonic signal, Magnetic field sensor, non-destructive inspection.

TEŞEKKÜR

Doktora tezi olarak sunduğum bu çalışma; TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME) Manyetik Ölçümler Laboratuvarında 113F192 numaralı proje kapsamında gerçekleştirilmiştir. Bu vesileyle projeyi destekleyen TÜBİTAK'a,

Tezimi hazırlamamda gerekli bilgi, destek ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen, doktora çalışmam boyunca bilimsel tutum ve davranışlarıyla rol model olan eş-danışmanım çok değerli hocam Sayın Doç. Dr. Uğur TOPAL'a ve doktora çalışma sürecimde göstermiş olduğu ilgi, emek ve yardımlarından dolayı saygıdeğer danışman hocam Sayın Prof. Dr. Fevzi Necati ECEVİT'e,

ve hayatımın her anında yanımda olup tüm imkânlarını seferber eden ve çalışmalarım boyunca desteklerini esirgemeyen sevgili aileme, annem Mariye POLAT'a, babam Mustafa POLAT'a, hayat arkadaşım Samet CAN'a ve varlığıyla hayatıma anlam katan dünya tatlısı kızım Tuana CAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
TABLolar DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	5
2. KURAMSAL TEMELLER	6
2.1. Manyetizmanın Temelleri	6
2.1.1. Manyetik Alan Şiddeti ve Manyetik Akı Yoğunluğu	6
2.1.2. Mıknatıslanma	7
2.1.3. Demanyetizasyon Faktörü	9
2.1.4. Manyetik Malzemelerin Sınıflandırılması	10
2.1.4.1. Diyamanyetizma	11
2.1.4.2. Paramanyetizma	12
2.1.4.3. Ferromanyetizma	13
2.1.5. B-H Eğrisi	14
2.1.6. Soft ve Hard Manyetik Malzemeler	16
2.1.7. Eddy (Girdap) Akımları	17
2.1.8. Curie Sıcaklığı	17
2.2. Manyetik Sensörler	18
2.2.1. Fluxgate Sensörler	20
2.2.1.1. Fluxgate Sensör Çalışma Prensibi	25
3. DENEYSEL METOD	30
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	35
4.1. Alçak ve Yüksek Yörünge Uyduları İçin Halka Tipi Fluxgate Sensör Tasarımı ve Karakterizasyonu	35

4.2. İnce Manyetik Teller Kullanarak Tekli Çubuk Tipi Fluxgate Manyetometrenin Algılama Performansının Optimizasyonu	38
4.2.1. Kredi Kartı Manyetik Bit Analizi	47
4.3. Halka Tipi Düzlemsel Sensör Nüvesinin Devre Kazıyıcı ile Üretimi ve Isıl İşlemin Sensör Performansı Üzerine Etkileri	48
4.4. Şerit Sargılı Halka Tipi Fluxgate Sensörlerin Optimizasyon Çalışmaları: Nüve, Çap ve Isıl İşlem Etkisi	54
4.4.1. PEEK Kasnaklı Halka Tipi Fluxgate Sensörler	58
4.4.2. MACOR Kasnaklı Halka Tipi Fluxgate sensörler	65
4.5. -50°C - + 85°C Sıcaklık Aralığında Halka Tipi Fluxgate Sensörlerin Algılama Özellikleri	71
5. SONUÇ	78
KAYNAKLAR	81
ÖZGEÇMİŞ	88
EKLER	89

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler ve Açıklamalar

Kısaltmalar

V_{2f}	: 2. Harmonik sinyal
Hz	: Hertz
M	: Manyetizasyon
D	: Demanyetizasyon faktörü
μ	: Manyetik geçirgenlik
μ_r	: Göreceli manyetik geçirgenlik
ε	: Dielektrik sabiti
χ_m	: Manyetik Duygunluk
AC	: Alternatif akım
DC	: Doğru akım
H	: Manyetik alan şiddeti
B	: Manyetik akı yoğunluğu (Manyetik İndüksiyon)
H_{DC}	: DC Manyetik alan
H_{sat}	: Doyum manyetik alan değeri
λ_s	: Doyum manyetik büzülme katsayısı
B_s	: Doyum manyetik indüksiyon değeri
FGM	: Fluxgate manyetometre
SQUID	: Süperiletken Kuantum Girişim Cihazı
SAS	: Slovakya Bilimler Akademisi
GTÜ	: Gebze Teknik Üniversitesi
UME	: Ulusal Metroloji Enstitüsü
NDT	: Tahribatsız muayene

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Solenoidin çalışma prensibi.	6
2.2: Manyetik momentler.	8
2.3: Manyetik alanın farklı tür malzemeler üzerindeki etkisi.	10
2.4: Elementlerin manyetik davranış tipleri.	11
2.5: Diyamanyetik bir malzemenin atomik dipol gösterimi a) uygulanan dış manyetik alan yokken, b) uygulanan dış manyetik alan varken .	12
2.6: Paramanyetik bir malzemenin atomik dipol gösterimi a) uygulanan dış manyetik alan yokken, b) uygulanan dış manyetik alan varken.	12
2.7: Ferromanyetik bir malzemenin atomik dipol gösterimi.	13
2.8: Diyamanyetik ve paramanyetik malzemenin B-H davranışı.	14
2.9: Ferromanyetik bir malzemede B-H davranışı ve domain yönelimi.	15
2.10: Ferromanyetik bir malzemede B-H değişimi.	16
2.11: Soft ve hard manyetik malzemelerin mıknatıslanma eğrisinin şematik gösterimi.	17
2.12: Manyetik alan sensör çeşitleri.	18
2.13: Temel Fluxgate sensör yapısı.	21
2.14: Ortogonal Fluxgate sensör çeşitleri.	22
2.15: Fluxgate sensör çeşitleri a) çubuk tipi, b) halka tipi, c) yarış-pisti tipi Fluxgate sensör.	23
2.16: Fluxgate manyetometrelerde kullanılan Metglas2714A nüve ve ona ait B-H eğrisi.	25
2.17: Fluxgate sensör temel çalışma prensibi a) dış manyetik alan yokken, b) dış manyetik alan varken.	27
3.1: Ölçüm sistemi genel görünümü.	29
3.2: VSM manyetometreye ait görüntü.	30
3.3: Termal kabin ve ölçüm düzeneğine ait görüntü.	31
4.1: Halka tipi fluxgate sensör hazırlık aşamaları.	34
4.2: 2f sinyalinin uygulanan DC alana karşı göstermiş olduğu değişim grafikleri. a) geniş DC alan aralığı b) dar DC alan aralığı.	36
4.3: Çalışılan fluxgate sensörlere ait alan gürültü spektrumları. a) 0-12,5 Hz b) 0-	37

50 kHz.

4.4:	Çubuk tipi fluxgate sensör ve algılama nüvesine ait görüntü.	39
4.5:	Farklı koşullarda tavlanan sensör nüvelerine ait B-H eğrileri. İçindekiler: ortalama manyetik geçirgenliğin tavlama sıcaklığına bağlı değişimi.	40
4.6:	Sensörde kullanılan nüvelerin tavlama sıcaklığı ve manyetik alana bağımlı hassasiyet ölçümleri.	43
4.7:	Çalışılan nüvelere ait 0-12.5 Hz arası gürültü ölçümleri.	44
4.8:	Çubuk tipi fluxgate sensör ile manyetik kart analizi.	47
4.9:	Sensörlerin hazırlık aşamaları.	48
4.10:	Uyarma sinyali frekansına bağlı olarak 2. harmonik sinyal şiddetinin değişimi.	49
4.11:	2. harmonik sinyalinin DC alan bağımlılık grafikleri. İçindeki: üst limit belirleme ölçüm grafikleri.	50
4.12:	Farklı koşullarda işlem gören nüvelere ait gürültü spektrumu.	51
4.13:	Farklı koşullarda işlem gören nüvelere ait M-H eğrileri.	52
4.14:	Demir içeriğine bağlı olarak değişen manyetik büzülme değerleri.	55
4.15:	6 mm (sol) ve 20 mm (sağ) çapındaki halka fluxgate sensörlere ait uyarma ve algılama bobinleri.	56
4.16:	6.5 mm uzunluğundaki şeritlere ait B-H eğrileri.	57
4.17:	Farklı demir içeriğine sahip olan 10, 15 ve 20 mm çapındaki halka nüveli sensörlerin uyarma frekansına bağlı olarak 2. harmonik sinyalinin değişimi.	57
4.18:	a) 6 mm, b) 6 mm, c) 10 mm, d) 15 mm ve e) 20 mm halka çapındaki sensörlere ait DC alan hassasiyet grafikleri. Grafiklerde yer alan S parametresi ilgili sensörlerin hassasiyet (ölçek faktörü) değerleridir.	59
4.19:	a) 6 mm, b) 6 mm, c) 10 mm, d) 15 mm ve e) 20 mm halka çapındaki sensörlere ait gürültü spektrumları. Grafiklerde yer alan N parametresi ilgili sensörlerin gürültü seviyelerini vermektedir.	61
4.20:	6, 10, 15 ve 20 mm çaplı sensörler için Fe ₂ nüvesine ait üst limit belirleme ölçüm grafikleri.	63
4.21:	Gerilme altında ısıtılma işleminin histeresis eğrisine etkisi (s harfi gerilme altında ısıtılma işlem gören nüveleri temsil etmektedir.)	65
4.22:	Farklı ısıtılma işlem altında tavlanan farklı demir içeriğine sahip sensörlerin uyarma frekansına bağlı olarak 2. harmonik sinyalinin değişimi. İçindekiler	66

görüntü kalitesini düşürmemek için ayrı çizilmiştir.

- | | |
|---|----|
| 4.23: Farklı ısıtım işlem altında tavlanan farklı demir içeriğine sahip sensörlerin uygulanan DC alan hassasiyet grafikleri. Grafiklerde yer alan S parametresi ilgili sensörlerin hassasiyet (ölçek faktörü) değerleridir. | 67 |
| 4.24: Farklı ısıtım işlem altında tavlanan farklı demir içeriğine sahip sensörlerin gürültü spektrumları. Grafiklerde yer alan N parametresi ilgili sensörlerin gürültü seviyeleridir. | 69 |
| 4.25: Fe6-kodlu sensörün oda sıcaklığında a) $f-V_{2f}$, b) hassasiyet ve c) gürültü grafikleri. | 72 |
| 4.26: Farklı nüve, sensör çapı ve seri direnç kullanılan sensörlerin sıcaklık uç noktalarındaki $V_{2f}-H_{DC}$ grafikleri. | 74 |
| 4.27: Farklı nüve, sensör çapı ve seri direnç kullanılan sensörlerin hassasiyetlerinin sıcaklık ile değişim grafikleri. | 75 |
| 4.28: Farklı nüve, sensör çapı ve seri direnç kullanılan sensörlerin uç sıcaklık noktalarındaki gürültü spektrumları. | 76 |

TABLÖLAR DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
3.1: Nüve parametresinin sensör performansına etkisi.	33
4.1: Nüvelere ait manyetik parametreler.	41
4.2: Çalışılan nüvelere ait hassasiyet, gürültü seviyesi ve 1/f köşe dönüm değerleri.	45
4.3: Nüvelere ait manyetik parametreler.	52
4.4: 15 mm ve 20 mm çaplı halka sensörler için sıfır ofset değerler.	62

1. GİRİŞ

Bilim ve teknolojiadaki ilerlemeler yeni, daha hassas ve daha doğru ölçüm yapan aygıtların geliştirilmesine doğrudan katkı sağlamaktadır. Bu aygıtlar içerisinde manyetik alan ölçümü yapan sensörler önemli bir yer teşkil etmektedir. Manyetometreler manyetik alanın yönünün ve şiddetinin ölçümü ve manyetik malzemelerin mıknatıslanma karakteristiklerinin belirlenmesinde kullanılmaktadırlar [1]–[5]. Manyetik sensör endüstrisinde 4 ana sensör tipi ön plana çıkmaktadır. Bunlardan; SQUID(Superconducting Quantum Interference Device) sensörler çok küçük manyetik alanların (1 fT-1 nT), Fluxgate sensörler küçük manyetik alanların (0.1 nT-100 μ T), Manyetik Rezonans (NMR) sensörler orta seviye manyetik alanların (100 nT- 1 mT) ve Hall sensörler daha büyük şiddetteki manyetik alanların (10 μ T-3 T) tespitinde tercih edilen temel manyetik alan sensörleri olarak bilinmektedirler [5]. SQUID sensörlerin sıvı helyum ihtiyacından kaynaklanan pahalı ve pratik olmama durumu ve hedef nesnenin manyetik alan büyüklüğünü ölçmek yerine nesne üzerindeki manyetik alan değişimlerini algılayabilmesi nedeniyle Fluxgate sensörler düşük manyetik alan ölçen sensörler içerisinde en çok tercih edilenler arasında gelmektedirler [6], [7]. Fluxgate sensörler yüksek hassasiyet ve ölçüm doğruluğunun yanı sıra geniş sıcaklık aralığında ölçüm yapabilmektedirler. Yüksek güvenilirlik, uzun dönem kararlılığı, düşük güç tüketimi ve düşük maliyeti bu sensörleri cazip kılan diğer önemli unsurlardır.

Fluxgate sensörlerin uydularda konum ve yönelim belirlemenin yanı sıra metallerde tahribatsız muayene (NDT), trafik yoğunluğu kontrolü, mayın arama detektörü, denizaltı ve deniz mayını tespiti gibi stratejik ve geniş uygulama alanı mevcuttur. Metaller içerisinde bulunan mikro (ya da daha büyük) çatlaklar malzeme üzerindeki manyetik alan dağılımını değiştirmektedir. Çok hassas bir sensör olan Fluxgate sensörler ile bu dağılım belirlenip çatlak büyüklüğü ve derinliği konusunda bilgi sahibi olunabilir. Yerkabuğu hareket halindedir. Çok büyük kayaçların parçalanması dünya manyetik alanının yerel büyüklüğünü etkilediğine dair bilimsel raporlar mevcuttur. Dünya üzerindeki birçok teknolojik uygulama yeryüzündeki manyetik alan profiline bağlı olarak çalışabilmektedir. Dünya manyetik anomalileri Fluxgate sensörlerle incelenebilmektedir. İnsan vücuduna enjekte edilen manyetik ve lüminesans nanoparçacıklar ile hastalıklı olma olasılığı yüksek organdan (ya da

organlardan) daha net görüntü alınabilmektedir. Nanoparçacıkların hastalıklı bölgeye kümelenmesi sürecinde manyetik sensörlerden faydalanılmaktadır. Fluxgate sensörler bu alanda da alternatif bir teknik olarak öne çıkmaktadır. Nanoteknoloji alanındaki güncel gelişmeler manyetik alan yaratan kaynakların da boyutlarının küçülmesine neden olmakta ve bunun bir sonucu olarak manyetik alan büyüklükleri de küçülmektedir. Çok düşük manyetik alan büyüklüklerinin ölçümüne yönelik mevcut teknik sayısı oldukça azdır. Bu tekniklerden birisi Fluxgate Manyetometre (FGM)'dir ve FGM Metroloji bilimi açısından büyük önem arz etmektedir. Manyetik mürekkep kullanılarak basılan paralar üzerinde manyetik dağılımın çıkarılması ve görüntülenmesi sayesinde sahte para kaçakçılığının da önüne geçilebilir. Bu kadar yaygın kullanım alanına sahip olmasına rağmen ülkemizde manyetik alan sensörü üzerine bilimsel çalışmalar oldukça az olmakla birlikte son ürüne yönelik çalışma neredeyse yoktur. Amacımız bu teknolojiyi ülkemize kazandırmak ve bahsi geçen uygulama alanlarındaki eksiklikleri gidermektir.

Ucuz maliyet, çevresel faktörlere karşı dayanım, yüksek hassasiyet (≤ 10 mV/nT), 10 pT'ya varan çözünürlük, kontrol edilebilir sıfır ofset ve dik alan etkisi gibi karakteristikleri fluxgate sensörleri avantajlı kılan diğer hususlardır [8]. Fluxgate sensörler manyetik akıyı yoğunlaştırmak ve yönlendirmek amaçlı kullanılan, yüksek manyetik geçirgenliğe sahip ferromanyetik bir nüve ve etrafına sarılan uyarma ve algılama bobininden oluşmaktadır [9]. Fluxgate sensörler DC ile 500 Hz arası manyetik alan şiddetinin büyüklüğünü ölçebilme yeteneğine sahiptir [10]. Keşfinin üzerinden 80 yıl geçmesine rağmen, malzeme bilimindeki güncel teknolojik gelişmeler Fluxgate sensörlerin popülerliğini sürdürmesine katkıda bulunmaktadır. Bu sensörlerin bir parçası olan ferromanyetik nüvelerin mıknatıslanma karakteristiği cihaz performansını belirleyici temel unsur olarak karşımıza çıkmaktadır. Örneğin, ferromanyetik malzemelerin trafo, elektromıknatıs ve manyetik anahtar gibi kullanılan birçok uygulamanın aksine sensör olarak kullanılması durumunda sinyal şiddetinin yüksek olması için doğrusal olmayan mıknatıslanma eğrilerine ihtiyaç duyulmaktadır [11]. Literatürdeki fluxgate sensörlerin çoğunda sensör sinyali olarak algılama bobininde AC ve DC alanın birlikte uygulanması sonucunda indüklenen ve uygulanan AC sinyal frekansının çift katı frekansa sahip sinyaller kullanılmaktadır. Uygulanan AC sinyal tamamen elektronik amaçlı olup ölçüm prensibi ile alakalıdır. Buna modülasyon sinyali de denmektedir. Temel amaç uygulanan DC alanı ölçebilmektir. Algılama bobininde indüklenen ve çift harmonikler olarak bilinen bu

sinyallerin içinde ise gerek sinyal şiddetinin yüksek olması gerekse DC alanla mükemmel doğrusal değişimi nedeniyle 2. harmonik sinyali sensörün sinyali olarak değerlendirilir [12], [13]. Daha yuvarlak mıknatıslanma eğrileri (M-H ya da B-H) 2f sinyal şiddetinin daha yüksek olmasını sağlamaktadır. Diğer taraftan yüksek elektriksel dirence ve düşük manyetik histeresis eğrilerine sahip ferromanyetik nüvelerin kullanılması sensörün ısınmasını engellemektedir. Bu sayede aynı zamanda yaşlanma etkisi de minimize edilmektedir. Nüvelerin yapısal homojenliği de sensörün performansını etkileyen önemli bir parametre olarak karşımıza çıkmaktadır. Kullanılan nüvenin tamamındaki üretim kaynaklı safsızlık atomları, mikro gerilmeler ve yerinden çıkma (atomik dislokasyon) gibi yerel yapısal kusurlar nüvelerin mıknatıslanma karakteristiğini belirleyen koordineli domein duvarı hareketini olumsuz yönde etkilemekte ve sensör gürültü seviyesini artırmaktadır [14]–[17]. Ferromanyetik malzemelerin mıknatıslanma sürecinde şekil ve boyut değişiminin bir göstergesi olarak bilinen doyum manyetik büzülme katsayısı λ_s fluxgate sensörlerin gürültü seviyesine etki eden bir parametredir. Sonuç olarak literatür bilgisine dayanarak sıcaklık bağımsızlığı, yüksek hassasiyet (ya da ölçek faktörü) ve düşük gürültü gibi en iyi sensör performansına ulaşabilmek için kullanılan manyetik nüveden beklenen manyetik, elektriksel ve yapısal faktörleri şu şekilde özetleyebiliriz. Bu faktörler başlıca sıfıra yaklaşan doyum manyetik büzülme katsayısı λ_s ($\ll 1$), yüksek Curie sıcaklığı (> 200 °C), 0.2 T-0.6 T arası bir değerdeki doyum manyetik indüksiyon değeri B_s , 0.1 Oe'den küçük koersif alan değeri H_c , mümkün mertebe en yüksek ilk manyetik geçirgenlik değeri μ_i (> 100000), 1.0 $\mu\Omega\text{m}$ 'den büyük öz elektriksel direnç, 25 μm 'den daha az kalınlık olarak gösterilebilir [18]. Bu sınırlamalar içinde muhtemel manyetik malzemeler nikel zengini alaşımlar (permalloy) ve amorf yapıdaki kobalt zengini alaşımlar olarak görülmektedir.

Fluxgate sensörler üzerine yapılan çalışmalara bakıldığında çubuk tipi, yarış-pisti tipi ve halka tipi geometriye sahip üç farklı sensör tipinin yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir [19], [20]. Bu geometriler içinde çubuk tipi olanlar açık uçlu manyetik akı döngüsünden dolayı en kötü gürültü seviyesine sahip olmalarıyla bilinmektedirler [21]. Çubuk nüvenin uç noktalarında manyetik akı çizgilerinin bükülmesi gürültü seviyesini artırmaktadır. Fakat bu geometrinin diğer geometrilere nazaran avantajlı olduğu durum söz konusudur. Çubuk tipi sensörler algılama yönü

dışından gelen manyetik alan bileşenlerine daha az hassasiyet göstermektedirler. Cross-field etkisi olarak adlandırılan bu özelliğin minimum olmasının nedeni algılama yönü dışındaki yönler için çubuk tipi sensörlerin sahip olduğu çok yüksek demanyetizasyon katsayısıdır. Çubuk tipi sensör geometrisi yerel manyetik alan bilgisi gerektiren uygulama alanları için en uygundur. Yarış pisti şeklindeki sensör geometrisi kapalı döngü manyetik akı özelliğine sahip olduğundan mıknatıslanmadan kaynaklanan gürültü katkısı minimum seviyede kalmaktadır. Fakat algılama yönü dışındaki manyetik alan yönünde demanyetizasyon katsayısı çubuk tipine nazaran daha düşük olduğundan cross-field etkisi daha hissedilebilir seviyededir. Dolayısıyla dik yönden gelen manyetik alan bileşenlerine çubuk tipine nazaran daha fazla hassasiyet göstermektedir [22], [23]. Yarış pisti geometride pist 2-3 mm genişliğinde şeritlerden oluşturularak cross-field etkisi azaltılabilir fakat pistin dönüm noktalarında nüve üzerinde meydana gelecek mekanik stres gürültü seviyesini artırmaktadır [23]. Halka tipi geometri diğer geometrilere nazaran daha iyi özelliklere sahiptir. Nüve üzerindeki mekanik stres düzgün bir şekilde dağılmaktadır. Bu şekilde düşük gürültülü sensörler elde edilebilmektedir fakat bu geometrideki sensörlerin çözünürlük seviyesi demanyetizasyon faktörü tarafından sınırlandırıldığından nüvenin uyarılmasında gerçek alandan daha büyük alanlar gerekebilmektedir. Çünkü nüve tarafından hissedilen çevresel alan büyüklüğü gerçek alan değerinin çok altındadır. Bu yüzden sensörün gerçek hassasiyet değerine ulaşılması zorlaşmaktadır. Farklı çaplarda halka tipi sensörler için demanyetizasyon faktörünün etkisi ayrıntılı bir şekilde [24] çalışmasında incelenmiştir. Halka tipi geometri çubuk tipi geometriyle kıyaslandığında nispeten daha yüksek demanyetizasyon katsayısına sahiptir ki bu da sensör hassasiyetinin düşük olmasına sebep olmaktadır. Demanyetizasyon katsayısını azaltmak için yarış-pisti şeklinde nüve kullanılsa da daha önce bahsedildiği gibi yarış-pisti geometrinin dönüm noktalarında meydana gelen yüksek mekanik stres kolay bir şekilde denge sağlanamamasına sebep olmaktadır [25].

1.1. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Fluxgate sensörlerin ölçüm hassasiyeti malzeme teknolojisindeki gelişmelerle paralel olarak artmaktadır. Son on yılda 800'e yakın bilimsel makalenin araştırma konusu olması ve gün geçtikçe artan uygulama alanlarının varlığı günümüz teknolojisindeki yerinin önemini fazlasıyla göstermektedir. 1950lerden bu yana uzay görevlerinde aktif olarak kullanılması ve ülkemizin son yıllarda artan uydu çalışmalarında %100 milli olma politikası üzerine bu yönde gerçekleştirilecek çalışmaların Türk bilim insanları tarafından yapılması büyük önem arz etmektedir. Tüm durumlar göz önüne alınarak, tez çalışmasında farklı geometrilerde fluxgate sensör tasarımları gerçekleştirilerek birçok alanda ülkemiz için oldukça faydalı olacak bir alt yapı hazırlığı yapıldı. Farklı geometrilerde fluxgate sensörlerin avantajlı ve dezavantajlı olduğu durumlar göz önünde bulundurularak kullanım amacına uygun olacak şekilde sensörler geliştirildi. Ayrıca bu süreçte geliştirilen sensörlerin hassasiyeti, gürültüsü, boyutu ve maliyeti gibi oldukça önem arz eden özellikleri de dikkate alındı. Üretilen sensörlerin çevresel şartların azami değişim gösterdiği ortamlarda kullanılabilmesi ve bu nedenle kararlılığının sağlanmasına yönelik önemli çalışmalar yapıldı. Sensör yapımında kullanılan manyetik nüve, ölçüm hassasiyetini ve dinamik ölçüm aralığını belirleyen önemli bir unsur olduğundan farklı özellikte ferromanyetik nüveler denenerek sensör performansı için baskın parametreler belirlendi. Nüvelerin üretimi sürecinde oluşabilecek yapısal bozuklukların giderilmesine yönelik farklı yöntemlerle nüve ısıtım işlemleri gerçekleştirildi ve ısıtım işlemin sensör performansına etkileri incelendi. Sensör performansının optimizasyonunun (hassasiyet, dinamik ölçüm aralığı, vs.) yanı sıra sensör ebatları da optimize edilerek nüve çapının sensör performansı üzerindeki etkisi incelendi. Fluxgate sensörlerin özellikle dış mekân uygulamaları için sıcaklık değişimlerine karşı kararlılığı gerekmektedir. Bu sebeple, bu çalışmada termal kabin içerisinde -50°C ile $+85^{\circ}\text{C}$ aralığında farklı özellikteki nüvelerden yapılan sensörlerin sıcaklık bağımlılıkları analiz edildi. Deneysel sonuçlar, hem sıcaklık bağımlılığı hem de gürültü seviyeleri açısından değerlendirildi.

2. KURAMSAL TEMELLER

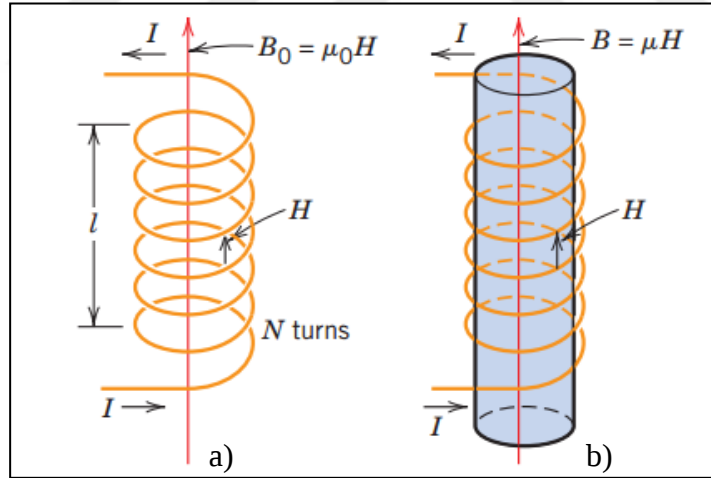
2.1. Manyetizmanın Temelleri

2.1.1. Manyetik Alan Şiddeti ve Manyetik Akı Yoğunluğu

Şekil 2.1’de yer alan solenoid örneği dikkate alındığında manyetik alan şiddeti

$$H = \frac{NI}{l} \quad (2.1)$$

şeklinde olur [26]. Burada N tur sayısını, I telden geçen akımı ve l solenoidin uzunluğunu temsil etmektedir. H manyetik alan şiddetinin birimi Amper/metre (A/m)’dir. Manyetik indüksiyon veya diğer adıyla manyetik akı yoğunluğu B manyetik alana dik birim alandan geçen akı miktarıdır. Birimi Weber/metre-kare (Wb/m²) veya Tesla (T)’dir.



Şekil 2.1: Solenoidin çalışma prensibi.

Manyetik alan şiddeti ve manyetik akı yoğunluğu arasındaki ilişki

$$B = \mu H \quad (2.2)$$

şeklindedir (Şekil 2.1.b). Burada μ ile temsil edilen manyetik geçirgenlik, manyetik alanın malzeme içerisinden geçişini tanımlayan bir parametredir. Vakum ortamında

nüvesiz bir solenoid için manyetik akı yoğunluğu ve manyetik alan şiddeti arasındaki ilişki

$$B_0 = \mu_0 H \quad (2.3)$$

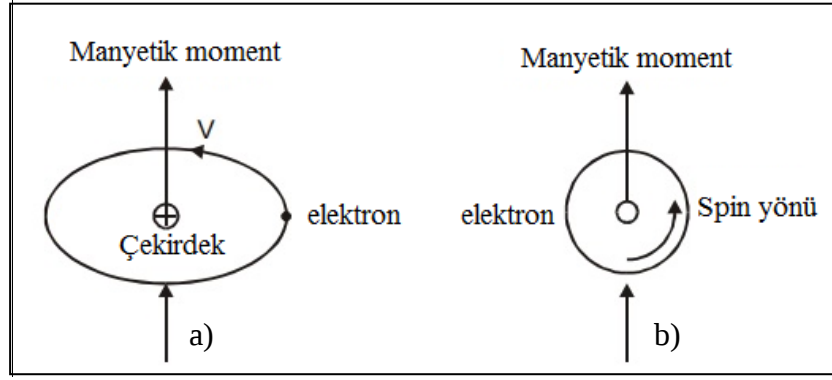
ile verilir (Şekil 2.1.a). Boşluğun manyetik geçirgenliği μ_0 ile temsil edilir. Evrensel bir sabit olup, değeri $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ (1.257×10^{-6}) Henry/metre (H/m) veya Wb/A-m'dir. Solenoid içerisine nüve yerleştirilmesi durumunda ortamın geçirgenliği büyük ölçüde değişir ve dış manyetik alan etkisi altında kalan malzemenin manyetik akı yoğunluğu değişerek

$$B = \mu_0 H + \mu_0 M \quad (2.4)$$

şeklini alır. M mıknatıslanma olarak adlandırılır. Manyetik alana maruz bırakılan nüvenin varlığı manyetik akı yoğunluğunu güçlendirir. Burada $\mu_0 M$ mıknatıslanmadan kaynaklanır ve nüvenin katkısının bir ölçüsüdür [27].

2.1.2. Mıknatıslanma

Mıknatıslanma, malzemedeki manyetik dipol momentlerin yoğunluğunu ifade eden vektör alanı olarak görülebilir. Atomik seviyedeki manyetik dipol momentlere iki tür katkı vardır. Birincisi çekirdek etrafında dolaşan yörünge elektronları (Şekil 2.2.a), ikincisi aşağı veya yukarı yönlü olabilen elektron spinleridir (Şekil 2.2.b). Temelde manyetik dipol momentlere çekirdeğin spininden de katkı söz konusudur fakat etkisi oldukça az olduğundan göz ardı edilir. Yüklü parçacıkların kapalı bir halka boyunca dönmesi şeklinde olan bu hareketleri birer manyetik moment oluşturur (Şekil 2.2) [28]. Atomların net manyetik momenti bu momentlerin vektörel toplamı olarak alınabilir.



Şekil 2.2: Manyetik momentler.

Uygulanan dış manyetik alana bağlı olarak her malzemenin verdiği tepki farklıdır. Bu farklılık malzemenin manyetik karakteristiğini belirler. Bütün malzemeler manyetik özellik gösterir. Yalnız bazı malzemeler diğerlerinden daha çok manyetik özellik gösterir. Bu malzemeler arasındaki temel ayrım bazı malzemelerde atomik manyetik momentlerin ortak etkileşimi olmadığı halde, diğerlerinde çok güçlü bir etkileşim olmasıdır [29], [30]. Malzemelerin manyetik davranışları diyamanyetik, paramanyetik ve ferromanyetik olarak sınıflandırılmaktadır. İleriki bölümlerde bu malzemelerle ilgili ayrıntılı bilgi verilecektir.

Mıknatıslanma

$$M = \frac{N}{V} m = nm \quad (2.5)$$

formülü ile basit bir biçimde tanımlanabilir. m manyetik momenti tanımlayan vektör, V hacim ve N manyetik moment sayısını temsil etmektedir. n manyetik malzemenin birim hacimdeki dipol momentlerinin sayısıdır. Mıknatıslanmanın birimi Amper/metre (A/m)'dir [31].

Mıknatıslanma ve manyetik alan şiddeti arasındaki ilişki

$$M = \chi_m H \quad (2.6)$$

şeklindedir. χ_m birimsiz oran sabiti olup, manyetik duygunluk olarak ifade edilir. Malzemenin manyetik özelliğini tanımlarken kullanılan parametrelerden biridir. Uygulanan manyetik alana cevap olarak malzemede oluşan mıknatıslanma derecesini

belirtir. (2.2) eşitliğinden yola çıkarak aşağıda verilen denklem ilişkileri elde edilir [31]–[34],

$$B = \mu_0 H + \mu_0 M \quad (2.7)$$

$$B = \mu_0 (1 + \chi_m) H \quad (2.8)$$

$$\mu_0 (1 + \chi_m) = \mu \quad (2.9)$$

$$(1 + \chi_m) = \frac{\mu}{\mu_0} = \mu_r \quad (2.10)$$

Burada μ_r malzemenin göreceli geçirgenliğidir. Herhangi bir malzemenin manyetik geçirgenliğinin boşluğun manyetik geçirgenliğine oranıdır.

2.1.3. Demanyetizasyon Faktörü

Malzemelerin manyetik davranışları sadece içsel özelliklerine değil aynı zamanda malzemenin şekline ve boyutuna da bağlıdır. Sonlu boyuta sahip bir malzeme manyetik alan ile mıknatıslandığı zaman malzemenin kutupları mıknatıslanmayı azaltma eğilimi gösteren bir H_d demanyetizasyon alanı oluşturur. Dış bir manyetik alan olan H_a uygulandığı zaman toplam manyetik alan aşağıdaki gibi olur.

$$H = H_a + H_d \quad (2.11)$$

H alanı mıknatıslanma ile ilişkili olan nüvenin varlığında azalmaktadır. Demanyetizasyon faktörü ferromanyetik nüvenin şekline ve boyutuna bağlı bir parametredir. Demanyetizasyon alanının şiddeti manyetik kutup yoğunluğuyla, dolayısıyla mıknatıslanma ile orantılıdır.

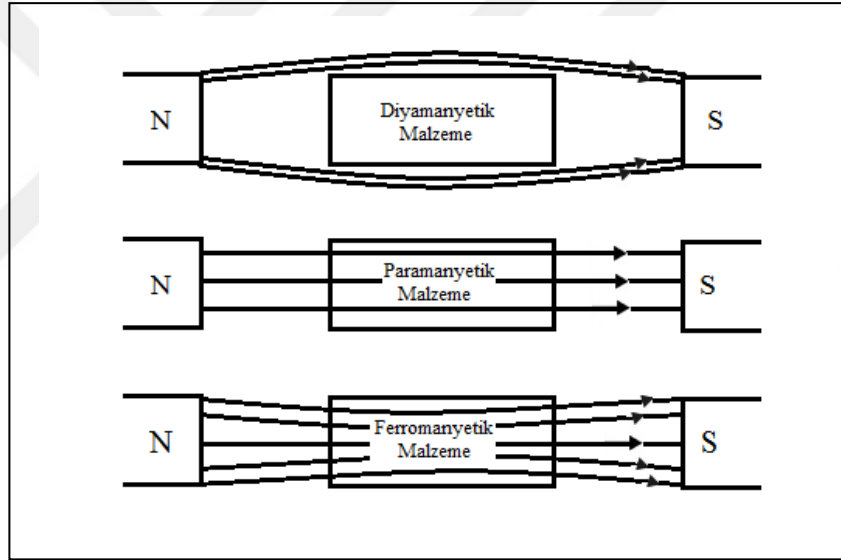
$$H_d = -N_d M \quad (2.12)$$

Bu ifadede yer alan N_d demanyetizasyon faktörü olarak isimlendirilir.

2.1.4. Manyetik Malzemelerin Sınıflandırılması

Malzemeler dış bir manyetik alanın varlığına farklı tepkiler verebilir. Bu tepkiler, maddenin atomik ve moleküler yapısı ve atomlarla ilişkili net manyetik alan gibi faktörlere bağlıdır. Atomlarla ilişkili manyetik momentler üç kökene sahiptir. Bunlar, elektron hareketi, dış manyetik alanın yol açtığı hareket değişikliği ve elektronların spinidir.

Malzemelerin manyetik davranışları diyamanyetizma, paramanyetizma ve ferromanyetizma olmak üzere üç ana başlık altında incelenebilir. Manyetik alanın farklı tür malzemeler üzerindeki etkisinin şematik gösterimi Şekil 2.3'te ve elementlerin oda sıcaklığında manyetik davranış tiplerini gösteren periyodik cetvel Şekil 2.4'te verilmektedir.



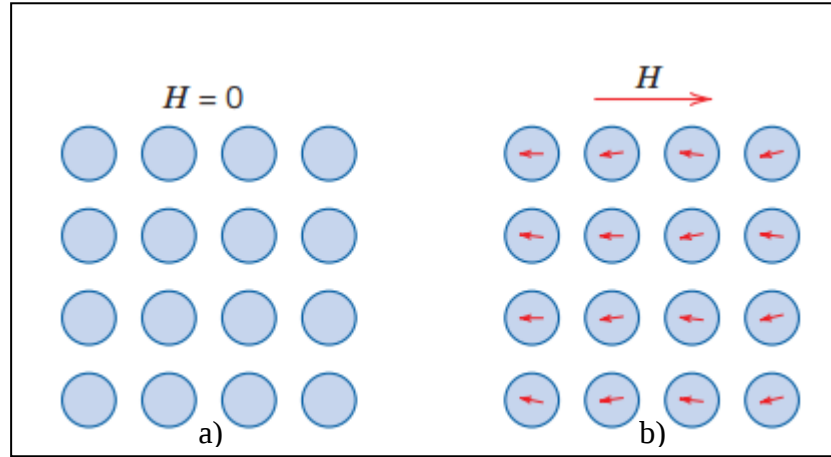
Şekil 2. 3: Manyetik alanın farklı tür malzemeler üzerindeki etkisi.

1 H																	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	89 Ac															
			58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	

Şekil 2.4: Elementlerin manyetik davranış tipleri.

2.1.4.1. Diyamanyetizma

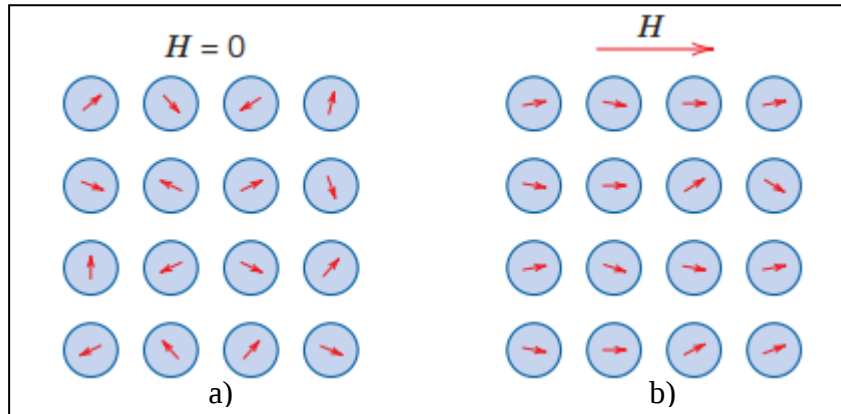
Diyamanyetizma, uygulanan dış manyetik alana zıt yönde manyetik moment oluşturan zayıf bir mıknatıslanma türüdür. İlk olarak, 1778 yılında S.J. Brugmans tarafından yapılan çalışmalarda Bizmut (Bi) ve Antimon (Sb) elementlerinde görülmüştür. 1845 yılında M. Faraday tarafından isimlendirilmiştir. Daha sonra Faraday ve farklı bilim adamları tarafından bazı elementlerin ve bileşiklerin de negatif manyetizma sergilediği görülmüştür [35]. Diyamanyetik malzemelerin net manyetik momentleri yoktur dolayısıyla uygulanan alan kaldırıldığında mıknatıslanma ortadan kalkar (Şekil 2.5) [26]. Bütün maddelerin temel özelliğidir, zayıf da olsa tüm maddelerde diyamanyetik özellik bulunur. Diyamanyetik malzemeler sıcaklık değişimlerinden etkilenmezler. Göreceli geçirgenliği 1'den biraz küçük ($\mu_r < 1$) ve manyetik duygunluğu $\chi_m < 0$ 'dır.



Şekil 2.5: Diyamanyetik bir malzemenin atomik dipol gösterimi a) uygulanan dış manyetik alan yokken, b) uygulanan dış manyetik alan varken.

2.1.4.2. Paramanyetizma

Dış manyetik alan olmadığı durumda manyetik moment yönelimleri rastgele (Şekil 2.6.a) olan malzemelerin karakteristiğidir [26]. Alan uygulandığında manyetik momentlerin yönü uygulanan alanla aynı olma eğilimindedir (Şekil 2.6.b). 1845 yılında M. Faraday tarafından isimlendirilmiştir [36]. Manyetik dipoller uygulanan alandan bireysel olarak etkilenirler ve komşu dipollerle karşılıklı etkileşime girmeden yönelirler.



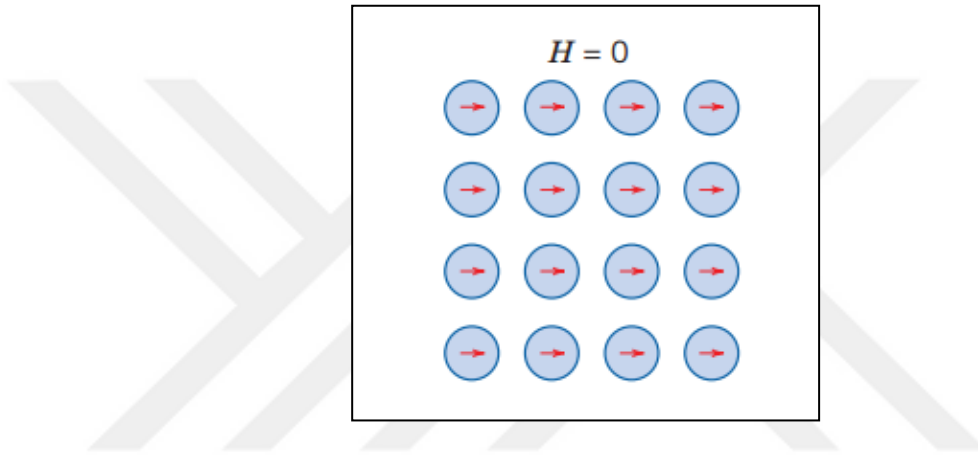
Şekil 2.6: Paramanyetik bir malzemenin atomik dipol gösterimi a) uygulanan dış manyetik alan yokken, b) uygulanan dış manyetik alan varken.

Paramanyetik malzemelerin manyetik duygunluğu sıcaklıkla ters orantılıdır. Curie sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda paramanyetik malzemeler diyamanyetik malzemelere dönüşür. Manyetik duygunluk $\chi_m > 0$ 'dır fakat oldukça küçük

değerlidir. Göreceli geçirgenliği 1'den biraz büyük ($\mu_r > 1$; $\mu_r = 1.001$) olan maddelerdir.

2.1.4.3. Ferromanyetizma

Dış manyetik alan olmadığı durumda bile ferromanyetik malzemelerin manyetik momentleri paralel olarak hizalanırlar (Şekil 2.7) [26]. Paramanyetik malzemelere göre daha güçlü mıknatıslanma gösterirler ve dış manyetik alan kaldırılrsa bile mıknatıslanmaları devam eder.



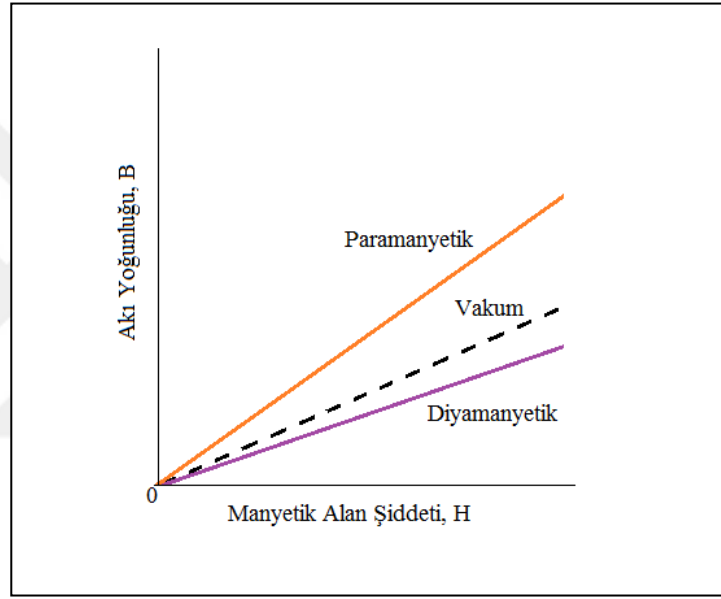
Şekil 2.7: Ferromanyetik bir malzemenin atomik dipol gösterimi.

Ferromanyetik malzemelerde aynı yönde yönelmiş pek çok manyetik dipol bölgesi vardır. Bu bölgeler domain olarak adlandırılır. Her bir domaindeki manyetik momentlerin yönelimleri farklıdır. Manyetik alan uygulandığında her bir domaindeki manyetik dipoller uygulanan alan yönünde hizalanır ve domain duvarları diğer domainleri küçülterek genişler. Alan uygulamaya devam edildikçe domainler genişlemeye devam eder ve bütün manyetik momentler uygulanan alanla aynı yönlü hizalana kadar sürüp gider.

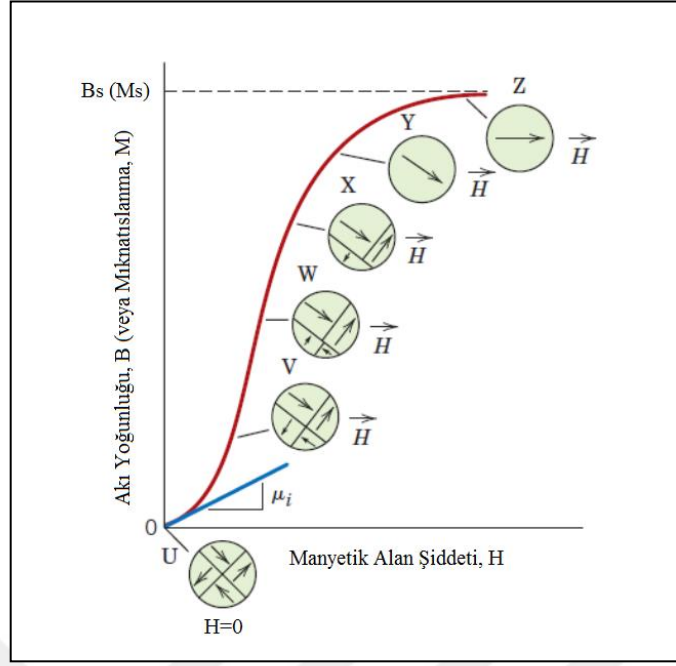
Curie sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda ferromanyetik malzemeler paramanyetik malzemelere dönüşür. Manyetik duyguluk $\chi_m > 0$ 'dır ve oldukça büyük değerlidir. Göreceli geçirgenliği 1'den çok yüksek ($\mu_r > > 1$)'dir.

2.1.5. B-H Eğrisi

Diyamanyetik ve paramanyetik malzemelerde uygulanan H alanıyla akı yoğunluğu B lineer olarak değişirken (Şekil 2.8) ferromanyetik malzemede bu durum daha farklıdır (Şekil 2.9) [26]. Ferromanyetik malzeme H manyetik alanı uygulandığında mıknatıslanmaya başlar. H alanı artırıldığında malzemedeki manyetik akı yoğunluğu B önce yavaş sonra hızlı bir biçimde artar. Uygulanan alanın belli bir seviyesinde doyum mıknatıslanması (M_s) gerçekleşir ve manyetik akı yoğunluğu H alanından bağımsız hale gelir.



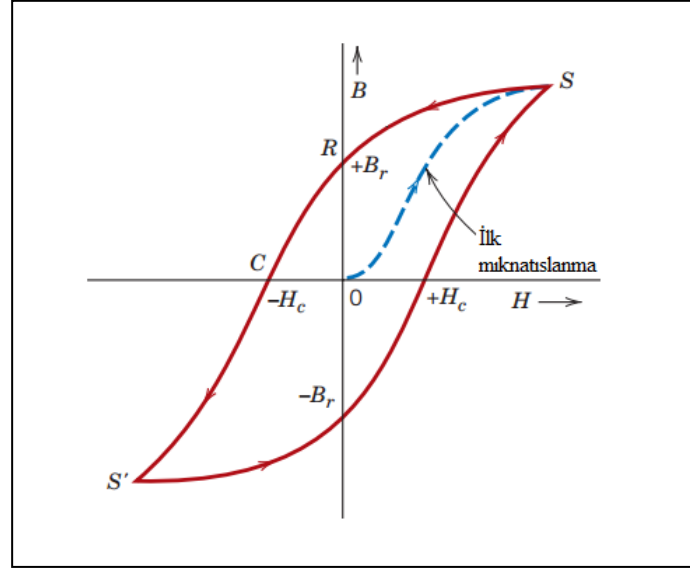
Şekil 2.8: Diyamanyetik ve paramanyetik malzemenin B-H davranışı.



Şekil 2.9: Ferromanyetik bir malzemede B-H davranışı ve domain yönelimi.

B ve H alanı arasındaki ilişki doğrusal olmadığından, bu ilişkiyi paramanyetik malzemelerde olduğu gibi sabit bir katsayı ile tanımlamak mümkün değildir. Normalde, $H=0$ için ilk manyetik geçirgenlik μ_i tanımlanır.

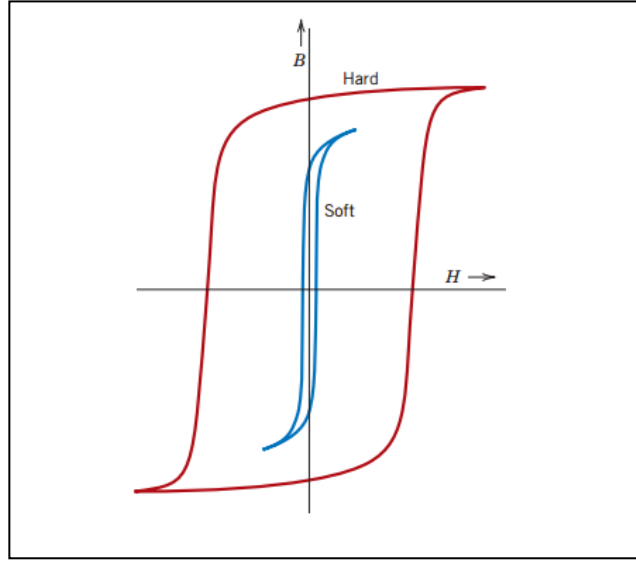
Doyum gerçekleştiğinde H alanına göre yönlendirilmiş tek bir domain oluşur. H alanı azaltılmaya başlandıktan sonra B alanı, aynı eğriyi takip edemeyerek geride kalır ve bir histerisiz döngüsü başlatır (Şekil 2.10) [26]. H, sıfıra geri döndüğünde malzemede hala bir miktar B alanı vardır. Bu kalıcı akı yoğunluğudur. Şekil 2.10'da B_r ile temsil edilmiştir. H alanının yokluğunda bile malzeme mıknatıslanmış olarak kalır. Mıknatıslanmayı ortadan kaldırmak için koersif (zorlayıcı) kuvvet (H_c) olarak adlandırılan ters yönde H alanı uygulanır. Alan uygulanmaya devam ettirilirse ters yönde doyum gerçekleşir. Alanın ikinci kez yön değiştirmesiyle tekrar ilk doyum noktasına ulaşır ve B-H çevrimi bir histerisiz döngüsü oluşturur.



Şekil 2.10: Ferromanyetik bir malzemede B-H değişimi.

2.1.6. Soft ve Hard Manyetik Malzemeler

B-H eğrilerinde malzemenin bileşimine bağlı olarak farklı şekillerde histerisiz eğrilerini gözlemlemek mümkündür. Ferromanyetik malzemeler genel olarak soft (yumuşak) ve hard (sert) ferromanyetik malzemeler olarak ikiye ayrılmaktadır. İkisi arasındaki farklılık Şekil 2.11’de açık bir şekilde görülmektedir [26]. Soft ferromanyetik malzemelerin histerisiz eğrisi ince ve dar, hard ferromanyetik malzemeler ise kalın ve geniştir. Bu sebeple soft malzemelerde doyuma ulaşmak için küçük manyetik alanlar yeterliyken, hard malzemeler için çok yüksek manyetik alanlar gerekir. Soft malzemeler yüksek manyetik geçirgenlik ve düşük koersif alana, hard malzemeler ise düşük manyetik geçirgenliğe ve yüksek koersif alana sahiptir.



Şekil 2.11: Soft ve hard manyetik malzemelerin mıknatıslanma eğrisinin şematik gösterimi.

2.1.7. Eddy (Girdap) Akımları

Manyetik kayıp mekanizmaları [32], [37] tarafından özetlenmiştir. Bu mekanizmalar içerisinde Eddy (Girdap) akım kayıpları önemli bir yer teşkil eder. Alternatif akım ya da zamanla değişen alanların söz konusu olduğu durumlarda ortaya çıkan ısı kayıplarıdır. Bu akımlar kendisini oluşturan alana ters yöndedir. Sadece malzemenin ısınmasına sebep olmazlar, aynı zamanda manyetik alanı da zayıflatırlar [37].

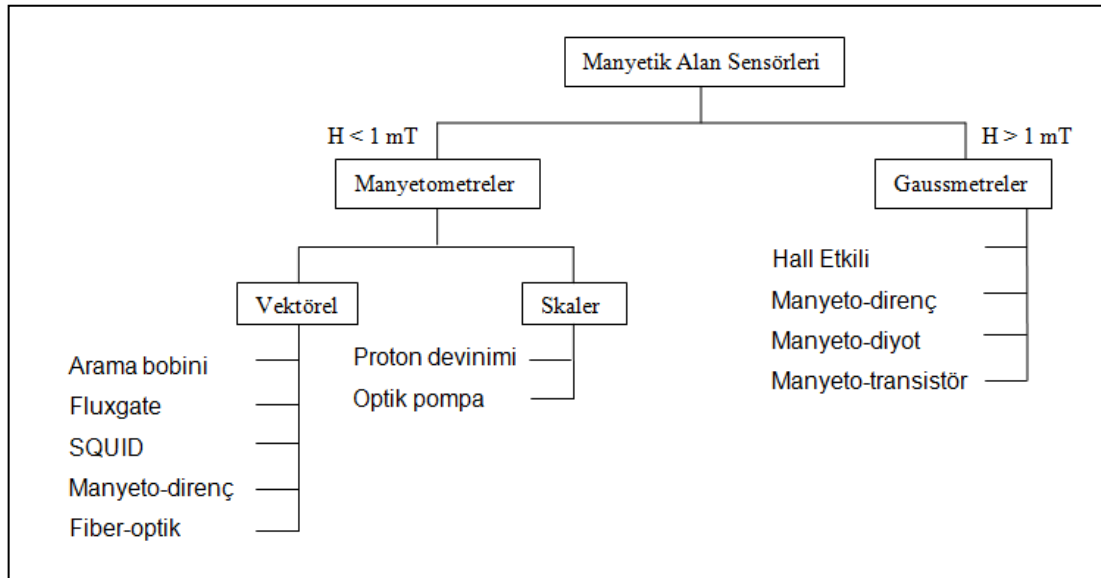
2.1.8. Curie Sıcaklığı

Sıcaklık malzemelerin manyetik karakteristiklerini etkileyen önemli faktörlerdendir. Sıcaklık artışı ile atomların termal titreşimleri artar ve manyetik moment dizilimleri değişir. Ferromanyetik malzemelerde 0 K'de mıknatıslanma maksimumken, termal titreşimler minimum seviyededir. Sıcaklık artışıyla Curie sıcaklığı olarak adlandırılan sıcaklığın belirli bir noktasında mıknatıslanma aniden sıfıra düşer ve malzemenin mıknatıslanma özelliği kaybolur. Bu sıcaklığın üzerinde Ferromanyetik malzemeler paramanyetik olur. Malzemenin soğutulması durumunda yeniden ferromanyetik malzeme özelliğini kazanır. Her malzeme için Curie sıcaklığı farklılık gösterir.

2.2. Manyetik Sensörler

Manyetik sensörler herhangi bir ortamdaki manyetik alanları ölçmede kullanılan cihazlardır. Her ortamın alan şiddetinin ve büyüklüğünün farklı olması farklı tiplerde sensör kullanma gereksinimini ortaya çıkarmıştır. İlk olarak manyetik sensörler dünyanın manyetik kutuplarını algılayan pusulalar şeklinde karşımıza çıkmışken, sonraları uzay araştırmaları, biyomedikal, askeri uygulamalar, güvenlik, manyetik kayıt, navigasyon, otomobil endüstrisi ve cep telefonu gibi sürekli gelişen birçok yeni teknolojiye yerini almıştır. Şöyle ki her geçen gün artan talep ve ortaya çıkan bağımlılık manyetik sensörler üzerine yapılan çalışmaların artmasına ve sürekliliğine vesile olmuştur [38]–[43].

Yaygın olarak bilinen manyetik sensörler Şekil 2.12’de yer alan şemada verilmektedir [44]. 1mT’nin altındaki manyetik alanları ölçen sensörler manyetometre olarak isimlendirilirken, 1mT’nin üstündeki alanları ölçen sensörler gaussmetre olarak isimlendirilmektedir [44]. Manyetik alan sensörlerini vektörel ve skaler olmak üzere iki gruba ayırmak mümkündür. Skaler manyetik sensörler toplam alan şiddetini verirken, vektörel manyetik sensörler istenilen yöndeki alan şiddetini vermektedir [45]. Ayrıca vektörel manyetik alan sensörleri kendi aralarında DC ve AC manyetometreler olmak üzere iki gruba ayrılır. DC ölçüm yapan manyetometreler arasında Fluxgate manyetometreler en yaygın olanlarıdır [46].



Şekil 2.12: Manyetik alan sensör çeşitleri.

Literatürde sıklıkla karşılaşılan bu sensörler kısaca şu şekilde özetlenebilir:

Proton (nükleer) devinimi manyetometre skaler manyetik alan şiddetini ölçmek için kullanılmaktadır. Özellikle jeolojik keşiflerde geniş bir uygulama alanına sahiptir. Fakat düşük örnekleme hızına sahip olduğundan manyetik alandaki hızlı değişimleri ölçmede yetersiz kalmaktadır. Çalışma prensibi temel atomik sabitlere dayanmaktadır. Manyetometre kalibrasyonlarında birincil standart olarak kullanılmaktadır. Optik pompa manyetometre yüksek örnekleme hızına ve oldukça hassas ölçüm yeteneğine sahiptir. Biyomanyetik sinyalleri ölçebilir [47] fakat ölçümler sadece laboratuvar ortamında yapılabilir [48], [49]. Proton devinimi manyetometrelere nazaran pahalıdır ve laboratuvar ortamıyla sınırlı kalması sebebiyle çok fazla tercih edilmemektedir. Arama bobini diğer bir adıyla indüksiyon bobini Faraday yasasını esas alarak düşük manyetik alanları ölçen sağlam, güvenilir ve diğer düşük alan ölçen manyetometrelere göre nispeten ucuz manyetometrelerdir [44]. Değişen manyetik alanlarda ya da manyetik alan boyunca hareket halindeki nesnelerin tespitinde etkilidir. Bu durum arama bobinlerinin durağan ya da yavaşça değişen alanların algılanmasında kullanılmasını engellemektedir [50]–[52]. SQUID manyetometre manyetik alan ölçen cihazlar arasında en hassas olanlarıdır fakat bu sensörlerin sıvı helyum ihtiyacı sebebiyle sadece çok özel olan Elektrokardiyografi (EKG) ile tespit edilemeyen kalp rahatsızlıkları, akciğer rahatsızlıkları ve beynin elektriksel aktivitelerini ve manyetik değişimlerini incelemek için kullanıldığı görülmektedir [53]–[58]. Aynı zamanda manyetik alanın büyüklüğü yerine manyetik alandaki değişim miktarını belirleyebilmektedir. Manyeto-direnç sensörler yaygın bir şekilde AMR (anizotropik manyeto-direnç) ve GMR (dev manyeto-direnç) çeşitleri ile karşımıza çıkmaktadır. Orta seviye manyetik alanların ölçümünde tercih edilmektedirler. Malzemenin elektriksel direncinin manyetik alan ile değişmesi prensibiyle çalışmaktadır. Fiber optik manyetometreler düşük manyetik alan ölçen aygıtlardandır. Hall etkili manyetik sensörler en eski yüksek manyetik alan sensörleridir. Hall olayı prensibine dayalı çalışmaktadırlar. Uygulanan manyetik alanla orantılı olarak gerilim üretirler. Durgun alanları vektörel olarak ölçebilirler. Fluxgate sensörler ise düşük gürültü ve yüksek hassasiyet gibi özelliklerinden dolayı düşük manyetik alanları ölçmek için kullanılmaktadırlar [9], [59]–[61]. Yüksek hassasiyetle çok düşük manyetik alanları ölçebilen SQUID sensörlerle kıyaslanabilecek düzeydedirler [62].

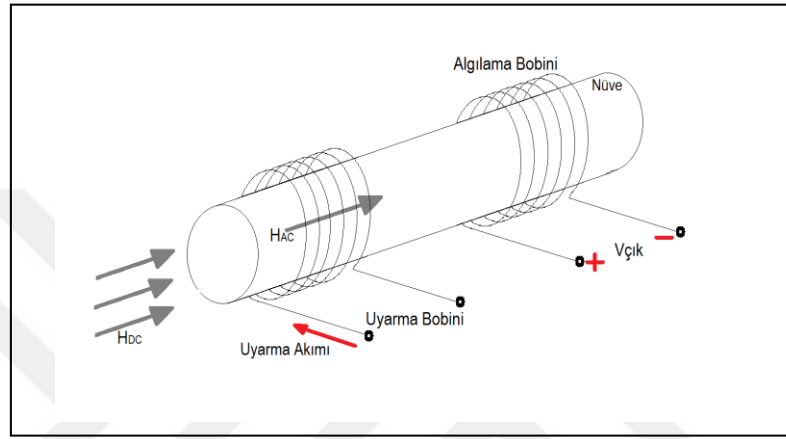
Günümüzde vektörel manyetik sensörler içerisinde Hall etkili sensörler, manyeto-direnç sensörler ve fluxgate sensörler yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Uygulama alanlarına bağlı olarak birbirlerine göre üstünlükleri değişmektedir. Fluxgate sensörlerin askeri ve uzay araştırmaları gibi kritik öneme sahip alanlarda kullanılmasının yanı sıra ucuz maliyet, dış faktörlere karşı dayanım (sıcaklık gibi), yüksek hassasiyet (≤ 10 mV/nT), 10 pT'ya varan çözünürlük, kontrol edilebilir ofset ve dik alan etkisi gibi karakteristikleri sahip olduğu avantajlı durumlara örnek verilebilir. Kontaklı akım ölçümleri gibi yüksek manyetik alanların ölçümünü gerektiren uygulamalar için çoğunlukla tercih edilen Hall etkili sensörlerdir. Hall etkili sensörlerin ana dezavantajı bazen 10 mT'ya kadar çıkabilen cihaz çıkışındaki ofset değerine gelen gürültü katkısıdır. Ofset sebebiyle sensörün uzun dönem kararlılığı düşebilmektedir. Ayrıca Hall etkili sensörler Fluxgate sensörlerin hassasiyet ve kararlılığına ulaşamamaktadır. Manyeto-direnç sensörler çoğunlukla manyetik kayıt ve açısal ve çizgisel konum algılama sistemleri gibi orta seviye manyetik alanların tespitinde kullanılan sensörlerdir. Hall etkili sensörlere benzer şekilde AMR ve GMR gibi manyeto-direnç sensörlerin en büyük dezavantajı güçlü manyetik alana maruz kalınması durumunda ofset değerine 10 μ T civarında bir katkının gelmesidir [63]. Bu sensörlere ait ayrıntılı bilgi referans [64] ve [65]'de yer almaktadır.

2.2.1. Fluxgate Sensörler

Fluxgate sensörler manyetometrelerin kalbi olarak görülür. DC veya düşük frekans manyetik alan vektörlerini ölçmek için kullanılan hassas sensörler sınıfındadır. Keşfinin üzerinden 80 yıl geçmiş olmasına rağmen popülerliği devam etmektedir. Temel özellikleri düşük gürültü, yüksek hassasiyet ve mükemmel doğrusallıktır [61]. Yüksek hassasiyetle çok düşük manyetik alanları ölçebilen SQUID sensörlerle kıyaslanabilecek düzeydedir [62]. İkinci Dünya Savaşı sırasında denizaltı tespitinde kullanılmaya başlanmış ve uzay çağıının başlamasıyla 1950'li yıllardan bu yana uzay görevlerinde oldukça önemli bir yer edinmiştir [6]. Günümüzde stratejik öneme sahip alanların yanı sıra medikalden metal endüstrisine kadar birçok alanda kullanılmaktadır [9], [59], [61], [66], [67]. Güvenilir, istikrarlı, düşük enerji tüketimli, sağlam, ekonomik ve nispeten basit olma gibi özellikleriyle

birlikte nüve malzemesinin sürekli geliştirilerek değiştirilmesi popülerliğini devam ettirmiştir. Literatürde farklı geometrilerde Fluxgate sensörler yer almasına rağmen hepsinin çalışma prensibi temel olarak aynı ve oldukça basittir.

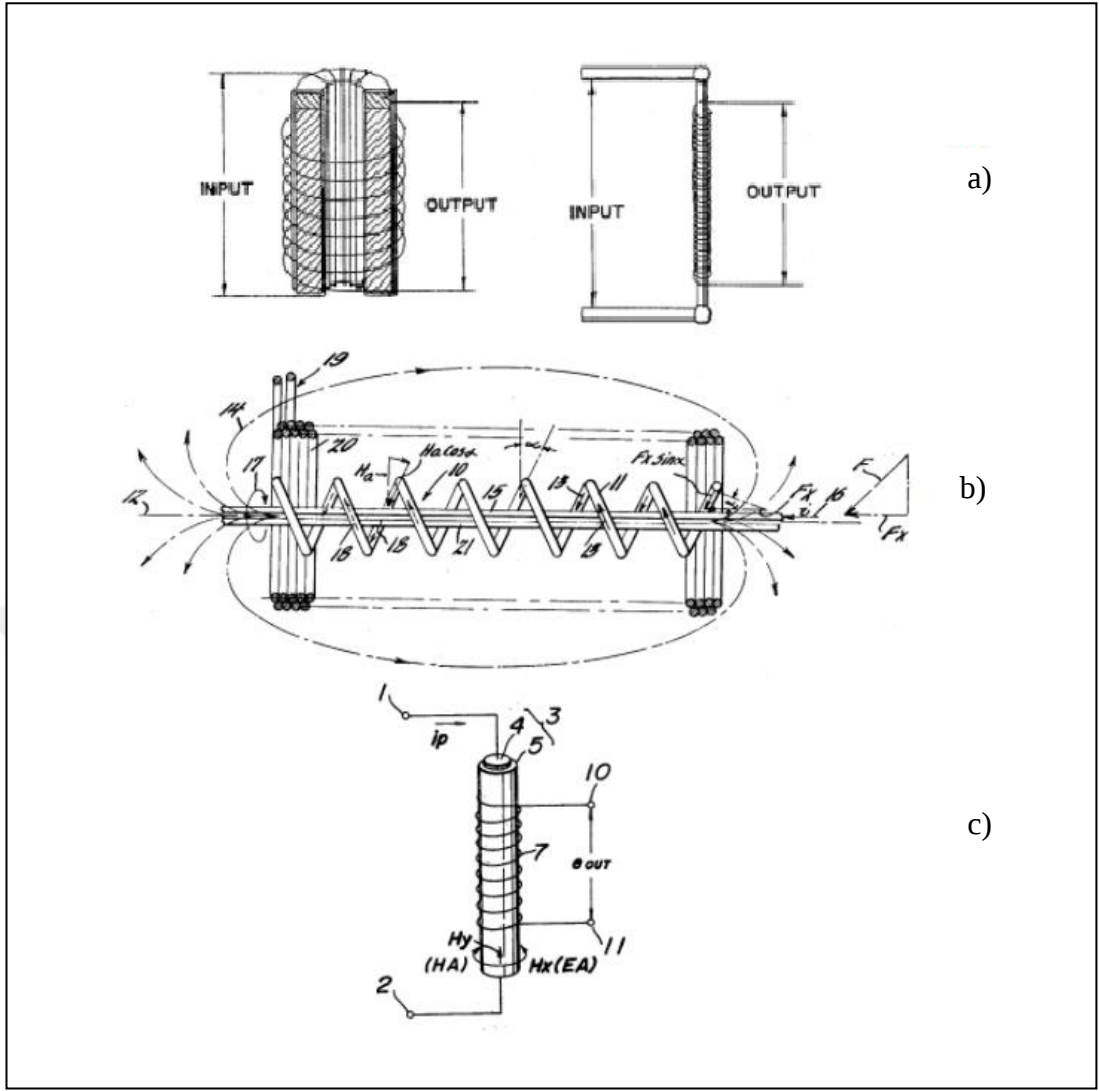
Fluxgate sensörler, Şekil 2.13'te görüldüğü üzere, manyetik akıyı yoğunlaştırmak ve yönlendirmek amaçlı kullanılan yüksek manyetik geçirgenliğe sahip ferromanyetik bir nüve ve etrafına sarılan uyarma ve algılama bobininden oluşmaktadır [9].



Şekil 2.13: Temel Fluxgate sensör yapısı.

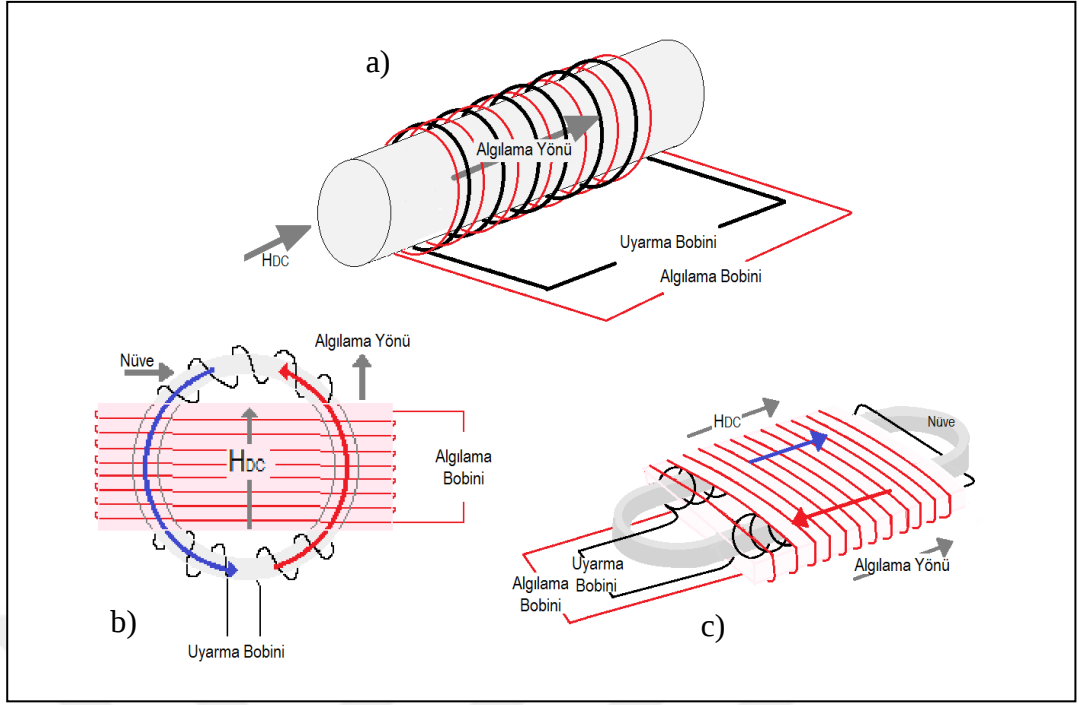
Fluxgate sensörler genel olarak ortogonal ve paralel Fluxgate sensörler olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Her iki durumda da çalışma prensibi aynıdır. Farklılık uygulanan alan ile ölçülmek istenen alanın birbirlerine göre konumuyla ilişkilidir. Uygulanan alan ile ölçülmek istenen alan birbirine dik olduğu durumda ortogonal, paralel olduğunda ise paralel Fluxgate sensörler olarak isimlendirilmektedirler.

Ortogonal Fluxgate sensörlerin ilki Şekil 2.14.a'da görüldüğü üzere silindirik ve tel nüveli olarak önerilmişken [68], daha sonra Şekil 2.14.b'de yer alan, uyarma akımı taşıyan iletken bir telin etrafına manyetik bir telle sarmal (helezoni) şeklinde önerilmiştir [69]. Tam unutulmaya yüz tutarken yıllar sonra Şekil 2.14.c'de gösterilen, kompozit tel tabanlı üretilen ortogonal sensörler ortaya çıkmıştır [70]–[72]. Şöyle ki yıllar geçse de paralel Fluxgate sensörlerin popülerliğini yakalayamamıştır.



Şekil 2.14: Ortogonal Fluxgate sensör çeşitleri.

Paralel Fluxgate sensörlerin sahip olduğu özellikle düşük gürültülü yüksek performans bu alanda yapılan çalışmaların kendi üzerinde yoğunlaşıp ilerlemesini sağlamıştır. Uygulama ve kullanım amacına bağlı olarak farklı geometrileri mevcuttur. Yaygın olarak tercih edilen geometriler Şekil 2.15'te yer almaktadır.



Şekil 2.15: Fluxgate sensör çeşitleri a) çubuk tipi, b) halka tipi, c) yarış-pisti tipi Fluxgate sensör.

Bu geometriler içinde çubuk tipi olanlar en kötü gürültü seviyesine sahip olmalarıyla bilinirler. Nedeni ise açık uçlu manyetik akı döngüsünden kaynaklanmaktadır. Çubuk nüvenin uç noktalarında manyetik akı çizgileri büküldüğünden manyetik bileşenden kaynaklı gürültü seviyesine ek gürültü gelmektedir. Gürültü seviyesi bakımından dezavantajlı olsa da bu geometrinin diğerlerine nazaran avantajlı olduğu durumda söz konusudur. Örneğin bu tip sensörler algılama yönü dışından gelen manyetik alan bileşenlerine diğer geometrilere nazaran daha az hassasiyet gösterirler. Cross-field etkisi denen bu özellik minimumdur. Nedeni ise algılama yönü dışındaki yönler için çubuk tipi sensörlerin sahip olduğu çok yüksek demanyetizasyon katsayısıdır. Çubuk tipi geometri lokal manyetik alan bilgisi gerektiren uygulama alanları için en uygun geometridir.

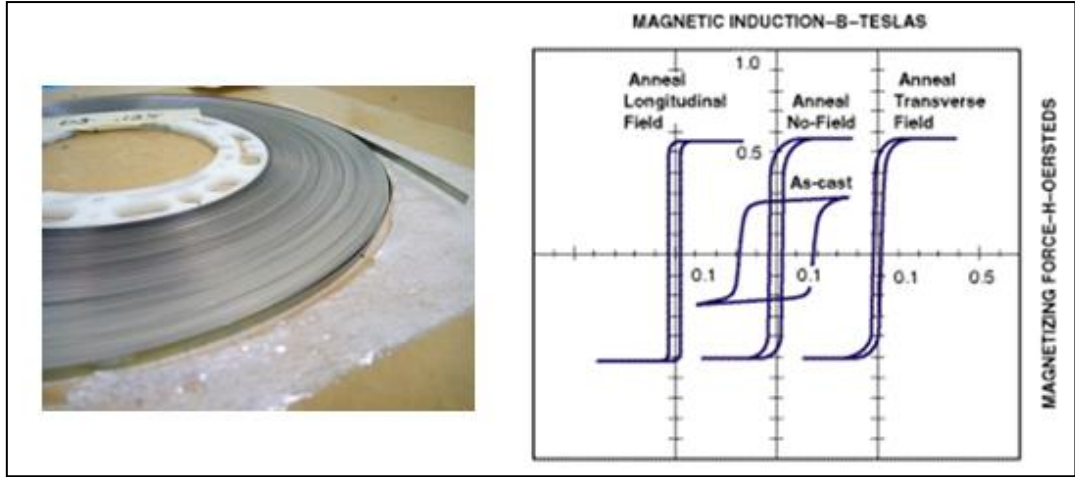
Yarış pisti şeklindeki sensör geometrisi kapalı döngü manyetik akı özelliğine sahiptir. Mıknatıslanmadan kaynaklanan gürültü katkısı minimum seviyededir. Algılama yönü dışındaki manyetik alan yönünde demanyetizasyon katsayısı çubuk tipine nazaran daha düşüktür. Bu sebeple cross-field etkisi daha hissedilebilir seviyededir.

Fluxgate sensörlerin birçok uygulama alanı için gerekli ana şartlar şu şekilde özetlenebilir [73]:

- Sıfır dik-alan etkisi
- Sıfır ofset değeri
- Geniş dinamik ölçüm aralığı
- Kararlılık
- Yüksek hassasiyet
- Çevresel dış şartlara dayanım (robustness).

Literatüre bakıldığında bu özelliklerin sağlanabileceği sensör geometrisi olarak halka tipi karşımıza çıkmaktadır. Halka tipi Fluxgate sensör mantıksal olarak iki adet çubuk tipi nüvenin alt ve üst kısımlarının birleştirilmesiyle sürekli bir manyetik çevrim oluşturmaya benzetilebilir. Bu geometri diğer geometrilere nazaran algılama yönü için daha büyük demanyetizasyon katsayısına sahiptir fakat yukarıdaki özelliklerin neredeyse tamamını sağlamaktadır. Bu özelliklere sahip olmasının yanısıra daha güvenilir ölçüm sonuçları verdiği için daha çok tercih edilmektedir.

Halka tipi Fluxgate sensörün uyarma bobini, doyum mıknatıslanma alanı ve koersif alanı çok düşük ferromanyetik malzemelerden seçilen nüve (Şekil 2.16) etrafına toroidal olarak sarılmaktadır. Uyarma bobinine uygulanan alternatif akımın oluşturduğu manyetik alanın genliğinin ferromanyetik malzemeyi periyodik olarak her iki yönde manyetik açıdan doyuma ulaştıracak büyüklükte olması gerekli şarttır [74].



Şekil 2.16: Fluxgate manyetometrelerde kullanılan Metglas2714A nüve ve ona ait B-H eğrisi.

Algılama bobini nüve yüzeyine dik olacak şekilde sarılmaktadır. Fluxgate sensörde kullanılan algılama bobininin ölçüm hassasiyeti ve sistem gürültüsü üzerinde etkisi büyüktür. Nüve malzemesinin seçimi hedef odaklıdır. Yani uygulama alanına uygun olarak malzemenin çeşidi, geometrisi, çıkış sinyalinin değerlendirme yöntemi, uyarma parametreleri ve ölçüm aralığı gibi etkin faktörler dikkate alınarak tasarım gerçekleştirilmelidir.

2.2.1.1. Fluxgate Sensör Çalışma Prensibi

Çalışma prensibi nüve yapımında kullanılan soft ferromanyetik malzemenin doğrusal olmayan mıknatıslanma özelliğine dayanmaktadır. Nüve, uyarma bobininden geçen AC akımın oluşturduğu manyetik alanla periyodik olarak doyurulmaktadır. Burada bobine uygulanan AC sinyal, tamamen elektronik amaçlı olup ölçüm prensibiyle alakalıdır. Buna modülasyon sinyali de denmektedir. Doyum sırasında nüvenin manyetik geçirgenliğinde periyodik olarak bir değişim meydana gelmektedir. Bu değişim işaret sinyalinin 2. harmoniğinde gerilim indüklenmesine sebep olmaktadır. Uygulanan DC alan (ölçülmek istenen) ile birlikte 2. harmonik sinyalinin mükemmel doğrusallıkta göstermiş olduğu değişim Fluxgate sensörlerin temelini oluşturmaktadır [9], [59], [61].

Değişen manyetik alan içine yerleştirilmiş ferromanyetik nüveli algılama bobini üzerinde oluşan gerilim şu şekildedir:

$$V_i = -\frac{d\phi}{dt} = -\frac{d}{dt}(NA\mu_0\mu_r H) \quad (3.1)$$

Burada N algılama bobini sarım sayısı, ϕ hava akısı ihmal edilecek olursa bobindeki manyetik akı, A bobin kesit alanı, H uyarma bobini tarafından oluşturulan alternatif alan, μ_0 serbest uzayın geçirgenliği ve μ_r ise sensör nüvesinin göreceli manyetik geçirgenliğidir. Bobin manyetik alan içerisinde dönüyorsa A zamana bağlı olarak değişir. Aynı zamanda μ_r ve H terimleri de zamana bağlıdır. (3.1) denklemi düzenlendiğinde algılama bobininde oluşacak gerilim:

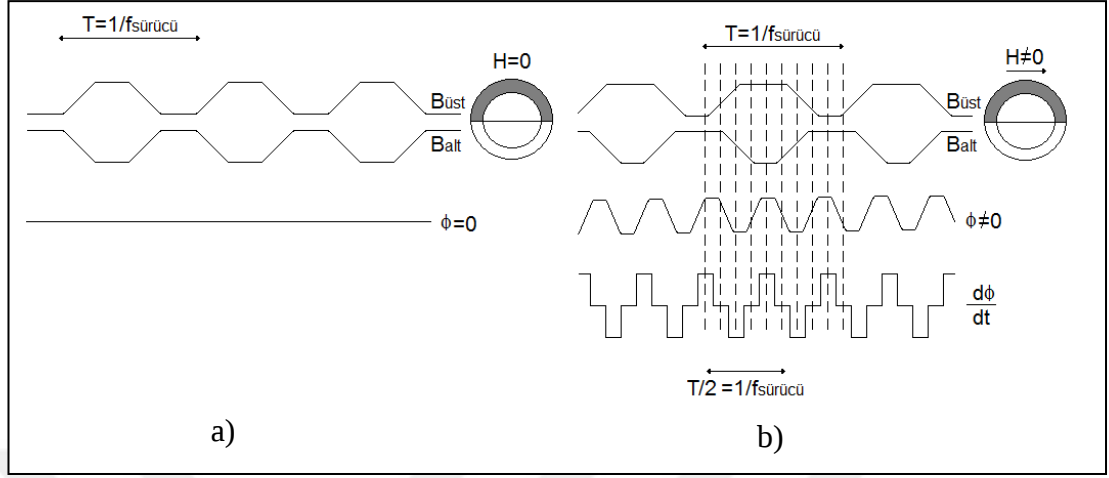
$$V_i = -\frac{d}{dt}(NA(t)\mu_0\mu_r(t)H(t)) \quad (3.2)$$

$$V_i = -NA\mu_0\mu_r \frac{dH(t)}{dt} - N\mu_0\mu_r H \frac{dA(t)}{dt} - NA\mu_0 H \frac{d\mu_r(t)}{dt} \quad (3.3)$$

şeklindedir. Bu denklemde birinci terim değişen manyetik alana karşılık gerilim üretir. İndüksiyon bobini (arama bobini) manyetometrenin çalışma prensibini oluşturur ve manyetik alanın sabit olduğu durumda kullanılamaz. İkinci terim algılama bobininin kesit alanındaki değişime cevaben gerilim üretir. Teorik olarak, bobinin döndürülerek, ölçülen düzlemdeki etkin alanın değiştirilmesi sonucu manyetik alanın ölçülmesinde kullanılır. Bu yöntem pratik olmamakla birlikte nadiren kullanılır. Son terim kullanılan malzemenin zamana bağlı manyetik geçirgenliğinden üretilen gerilime karşılık gelir ve Fluxgate sensörlerin temel denklem formudur [59]. 1. ve 2. terim Fluxgate sensörler için hata kaynağıdır. Bunlardan gelen gerilim etkisi elektronik olarak temizlenir ve çoğunlukla hesaba katılmaz. Sadece son terim dikkate alınmaktadır.

Uyarma bobiniyle oluşturulan alternatif alan sonucunda ve ferromanyetik nüve manyetik geçirgenliğindeki homojen olmayan durum nedeniyle algılama bobininde işaret sinyalinin tek harmonikleri oluşmaktadır. Daha önce bahsedildiği gibi DC alan ile sinyalin doğrusal değişimi sadece 2. harmonik sinyalinde gözlenebilmektedir. Uyarma bobini üzerinde dolaşan AC akımın yaratmış olduğu manyetik akı halka nüvenin (halka tipi Fluxgate sensörlerde) her iki tarafında birbirine zıt yönlüdür. Yani nüvedeki net akı sıfırdır ve algılama bobini üzerinde herhangi bir gerilim indüklenemez ($\phi_2 - \phi_1 = 0$) (Şekil 17.a). Gerilim ancak ölçülmek istenen dış DC

manyetik alanın sensör üzerine düşmesi sonucu oluşacak $\Delta\phi$ farkından dolayı ve ancak işaret sinyalin 2. harmoniğinde gözlenmektedir (Şekil 17.b).



Şekil 2.17: Fluxgate sensör temel çalışma prensibi a) dış manyetik alan yokken, b) dış manyetik alan varken.

Fluxgate sensörlerde demanyetizasyon etkisi ihmal edilemez. Bu etkinin büyüklüğü nüveyi uyarmak için gerekli olan modülasyon sinyal genliğinin de büyük olmasını gerektirir. Bu fazladan enerji kaybı demektir ve sensörün gerçek hassasiyet değerine ulaşılmasını zorlaştırır. Düşük seviye manyetik alan büyüklükleri ölçülmek istendiğinde demanyetizasyon faktörünün mümkün mertebe asgari tutulması ya da bazı uygulama alanları için optimize edilmesi gerekmektedir. Böyle bir durumda dış manyetik alan ile nüvenin manyetik indüksiyonu arasında

$$B = \frac{\mu_0 \mu_r H}{(1+D(\mu-1))} \quad (3.4)$$

ilişkisi söz konusudur. Burada D nüveye ait demanyetizasyon faktörüdür. Demanyetizasyon ile ilgili ayrıntılı bilgiye [75] numaralı referanstan ulaşılabilir. Demanyetizasyon etkisi dikkate alındığında algılama bobini üzerinde oluşacak çıkış gerilimi aşağıdaki eşitlikte verilen daha karmaşık bir yapıya dönüşmektedir [19]:

$$V_i(t) = NA\mu_0 H \frac{(1-D)}{(1+D(\mu-1))^2} \frac{d\mu_r(t)}{dt} \quad (3.5)$$

Fluxgate sensörlerin çıkış sinyaline ait ilk analitik yaklaşım 1936 yılında yapılmıştır ve o zamandan beri model üzerinde birçok iyileştirme yapılmıştır. Fakat fluxgate çıkış sinyalinde 2. harmoniğin kaynağını en basit haliyle Aschenbrenner'in ileri sürdüğü analitik yaklaşım açıklamaktadır [76]. B-H mıknatıslanma eğrisini 3. dereceden normalleştirilmiş bir polinom yaklaşımı ile $a>0$ ve $b>0$ olmak üzere şu şekilde yazabiliriz:

$$B(t) = aH(t) - bH^3(t) \quad (3.6)$$

Bu yaklaşım mıknatıslanma eğrisinin her iki bölgesi (1. ve 3. bölgeleri) için kullanılabilir. Uygulanan DC alan $H_{dış}$ ile uyarma bobini üzerinde dolaşan AC akımın yaratmış olduğu uyarma alan yoğunluğu $Asin\omega t$ toplamı:

$$H_{1,2}(t) = H_{dış} \pm Asin\omega t \quad (3.7)$$

şeklindedir ve (3.7) eşitliği (3.6) eşitliğinde yazılıp gerekli düzenlemeler yapıldığında her iki bölge için normalleştirilmiş akı yoğunluğu aşağıdaki gibi olur.

$$\begin{aligned} B_{1,2}(t) &= a(H_{dış} \pm Asin\omega t) - b(H_{dış} \pm Asin\omega t)^3 \\ &= a.H_{dış} - b.H_{dış}^3 - \frac{3}{2}b.A^2.H_{dış} \\ &\quad \pm \left(a.A - 3b.A.H_{dış}^2 - \frac{3}{4}b.A^3\right)sin\omega t + \frac{3}{2}b.A^2H_{dış}cos2\omega t \pm \frac{1}{4}b.A^3sin3\omega t \\ &= a.H_{dış} - b.H_{dış}^3 - \frac{3}{2}b.A^2.H_{dış} + \frac{3}{2}b.A^2H_{dış}cos2\omega t \\ &\quad \pm \left(a.A - 3b.A.H_{dış}^2 - \frac{3}{4}b.A^3\right)sin\omega t \pm \frac{1}{4}b.A^3sin3\omega t \end{aligned} \quad (3.8)$$

Elde edilen (3.8) eşitliğinden çıkış sinyali şu şekilde düzenlenebilir.

$$V_t \sim \frac{dB_{1,2}}{dt} = 3b.A^2H_{dış}\omega sin2\omega t \quad (3.9)$$

Sonuç olarak (3.9) eşitliğinden, daha önce bahsi geçen uygulanan DC alan (ölçölmek istenen) ile 2. harmonik sinyalinin doğrusal değışimi açık bir biçimde görölmektedir.



3. DENEYSEL METOD

Hassasiyet (ya da ölçek faktörü) ölçümlerinde (V_{2f}/H_{DC}) DC alan yaratmak için DC alan izlenebilirliği BIPM (The International Bureau of Weights and Measures) üzerinden sağlanan Referans Solenoid kullanılarak hazırlanan bobin sabiti 15.861 Oe/A olan bobin ve Keithley 220 akım kaynağı kullanıldı. Algılama bobininde oluşan harmonik sinyalin ölçümünde Stanford SR810 ve SR830 Lock-in yükselteçler kullanıldı. Gürültü analizi ölçümlerinde sensörler dış manyetik alanın yalıtılmış olduğu çok katmanlı mu-metal çember içine yerleştirildi. Bağlantı kabloları olarak çevresel gürültüleri minimize edebilecek olanaklara sahip kablolar tercih edildi. Ölçümlerde Agilent 35670A Dinamik Sinyal Analizörüyle birlikte Lock-in yükselteç kullanıldı. Şekil 3.1’de TÜBİTAK-UME Manyetik Ölçümler Laboratuvarına ait tez çalışmasının yapıldığı ölçüm düzeneğinin görüntüsü verilmektedir.



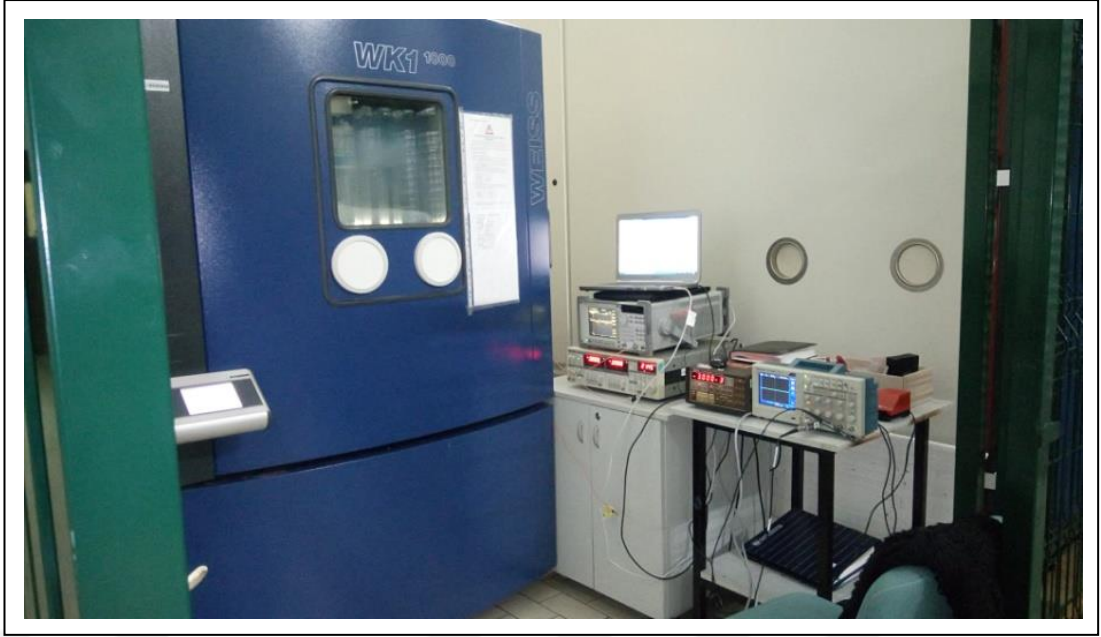
Şekil 3.1: Ölçüm sistemi genel görünümü.

Kullanılan nüvelerin manyetik parametrelerinin sensör performansına etkisini incelemek için TÜBİTAK-UME Manyetik Ölçümler Laboratuvarı bünyesinde faaliyet gösteren Lakeshore marka VSM manyetometre kullanılarak B-H ve M-H ölçümleri yapıldı. Şekil 3.2’de VSM manyetometreye ait görsel yer almaktadır.



Şekil 3.2: VSM manyetometreye ait görüntü.

Sensörlerin uzun süre kararlılığını koruması için hangi çevresel faktörlerden ne kadar etkilendiğinin önceden belirlenmesi gerekir. Özellikle fluxgate sensörlerin uydularda konum ve yönelim belirleme sensörü olarak kullanılması durumunda uzay ortamında günlük sıcaklık değişimi (-50°C - $+85^{\circ}\text{C}$) dikkate alınarak çalışılan sensörlerden bazılarının sıcaklık bağımlılıkları incelendi. TÜBİTAK-UME Sıcaklık Laboratuvarı bünyesinde faaliyet gösteren Weiss marka WK1 model -180°C - $+200^{\circ}\text{C}$ arası sıcaklık ve 5-100% göreceli nem değerleri arasında test imkânı sunan termal kabine ait görüntü Şekil 3.3'te yer almaktadır.



Şekil 3.3: Termal kabin ve ölçüm düzeneğine ait görüntü.

Fluxgate sensörlerin yapımında kullanılan nüvelerin tarihine bakıldığında ilk kullanılan nüve malzemelerinin demir [76] ve ferritlerden [42] oluştuğu görülmektedir. Sonraları kristalize Ni-Fe şerit ve çubuk nüveler kullanılmaya başlanmış fakat halen uzay araştırmalarında kullanılmakta olan özel olarak tavllanmış permaloy şeritlerin [74] kullanılması ile son bulmuştur [77]. Permaloyun temel avantajı yüksek sıcaklıklarda çalışma imkânı sağlayan Curie sıcaklığıdır fakat sıfıra yakın manyetik büzülme katsayısı elde edebilmek için malzeme bileşimini hazırlarken özel dikkat gerekmektedir. Kristalli malzemelerle nüvenin son şeklini alması için tavlama işlemi gerekirken, 1980lerden bu yana ince şerit veya tel formunda üretilen ve son şeklini alması için tavlama işlemi gerektirmeyen amorf malzemelerin yaygın bir şekilde kullanıldığı görülmektedir.

Sensör yapımında kullanılan nüvelerin yapısal homojenliği sensörün performansını etkileyen önemli bir parametredir. Kullanılan nüvenin tamamındaki üretim kaynaklı safsızlık atomları, mikro gerilmeler ve yerinden çıkma gibi yerel yapısal bozukluklar nüvelerin mıknatıslanma karakteristiğini belirleyen koordineli domain duvarı hareketini olumsuz yönde etkilemekte ve sensör gürültü seviyesini artırmaktadır [15], [16], [78], [79]. Ferromanyetik malzemelerin mıknatıslanma sürecinde şekil ve boyut değişiminin bir göstergesi olarak bilinen doyum manyetik büzülme katsayısı λ_s fluxgate sensörlerin gürültü seviyesine etki eden bir parametredir. Sıcaklık bağımsızlığı, yüksek hassasiyet (ya da ölçek faktörü) ve düşük

gürültü gibi en iyi sensör performansına ulaşabilmek için kullanılan manyetik nüveden beklenen manyetik, elektriksel ve yapısal faktörler şu şekilde özetlenebilir. Bu faktörler başlıca sıfıra yaklaşan doyum manyetik büzülme katsayısı λ_s , yüksek Curie sıcaklığı ($> 200^\circ\text{C}$), 0.2T-0.6T arası bir değerdeki doyum manyetik indüksiyon değeri B_s , 1 Oe'den küçük koersif alan değeri H_c , mümkün mertebe en yüksek ilk manyetik geçirgenlik değeri μ_i (>100000), $1.0 \mu\Omega\text{m}$ 'den büyük öz elektriksel direnç, $25 \mu\text{m}$ 'den daha az kalınlık olarak gösterilebilir [18]. Bu sınırlamalar içinde muhtemel manyetik malzemelere bakıldığında nikel zengini alaşımlar (permalloy) ile amorf yapıdaki kobalt zengini alaşımlar öne çıkmaktadır [78], [80]. Tez çalışmasında sensör yapımı için bu ölçütler göz önünde bulundurularak uygun nüve malzemeleri seçilmeye çalışıldı. Bu malzemelerin genel özelliklerine kısa bir şekilde aşağıda yer verilmektedir.

Metglas 2714A: CoFeSiNiB içeren alaşım amorf metal şerit üretiminde dünyanın önde gelen firmalarından biri olan Metglas® Inc.'ten temin edildi. Kobalt tabanlı bu alaşım sensör nüvesi olarak kullanılabilecek manyetik ve elektriksel özelliklere sahiptir. Herhangi bir ısıtma işlemi görmeksizin döküm sonrası halinde bile manyetik geçirgenliği 80000'in üzerindedir ki sensör sinyal şiddetinin yüksek olmasını sağlayabilir. Curie sıcaklığı 225°C olup oda sıcaklığı bölgesinde rahatlıkla çalışma olanağı sunar. Doyum manyetik büzülme katsayısı 0.5 ppm 'den küçük olduğu için gürültü seviyesinin düşük olması beklenir. Elektriksel direnci $1.4 \mu\Omega\text{m}$ olduğu için malzemede ısınma olmaksızın yüksek uyarma frekansında çalışabilme olanağı sunulabilir.

Vitrovac6025X: Kobalt tabanlı bu alaşım (%80 Co) sensör nüvesi olarak kullanılabilecek manyetik ve elektriksel özelliklere sahip olması sebebiyle Vacuumschmelze GmbH & Co. KG firmasından temin edildi. Bu alaşımların ısıtma işlemi sonrası 20000 civarında manyetik geçirgenliği bulunmaktadır. Curie sıcaklığı 200°C olup oda sıcaklığı bölgesinde rahatlıkla çalışma olanağı sağlamaktadır. Elektriksel direnci $1.4 \mu\Omega\text{m}$ olduğu için malzemede ısınma olmaksızın yüksek uyarma frekansında çalışabilme olanağı sunulmaktadır.

Unitika Tel: FeCoSiB içeren amorf metalik tel $100 \mu\text{m}$ çapında UNITIKA Ltd. şirketi tarafından suda soğutarak çekme yöntemiyle (water quenched spinning method) özel olarak üretildi. Manyetik büzülme katsayısı λ_s neredeyse 0.0, doyum

manyetik indüksiyon değeri B_s 0.81 T ve göreceli manyetik geçirgenlik değeri μ_r 20000 civarındadır.

Fe Serisi: Proje ortağı olan Slovakya Bilimler Akademisi bilim insanları tarafından farklı oranlarda demir içeren $Co_{71-x}Fe_xCr_7Si_8B_{14}$ ($x=0, 2.0, 3.2, 4.0, 6.0$ ve 8.0) şerit nüveler hızlı söndürmeli alaşım tekniği ile üretildi. Yüksek Curie sıcaklığının yanı sıra doyum manyetik indüksiyon değeri B_s 0.4 T-0.8 T arasında, koersif alan değeri $H_c \ll 1.0$ Oe, göreceli manyetik geçirgenlik değeri μ_r çalışılan frekans bölgesinde en az 10000 civarında, manyetik büzülme katsayısı $\lambda_s < 1$ ve elektriksel direnci 1.0-1.2 $\mu\Omega.m$ mertebelerindedir.

Sensör performansı üzerinde nüve malzemesinin seçiminin ne kadar önemli olduğu ve hangi parametreleri etkilediği, yüksek hassasiyet ve düşük gürültü için anahtar rolünde olduğu fluxgate sensörün gelişim sürecinde açık bir şekilde ortaya çıkmıştır. Nüve seçiminin Fluxgate sensör performansı üzerinde ne derece etkili olduğu aşağıda yer verilen Tablo 3.1’de görülmektedir [25].

Tablo 3.1: Nüve parametresinin sensör performansına etkisi.

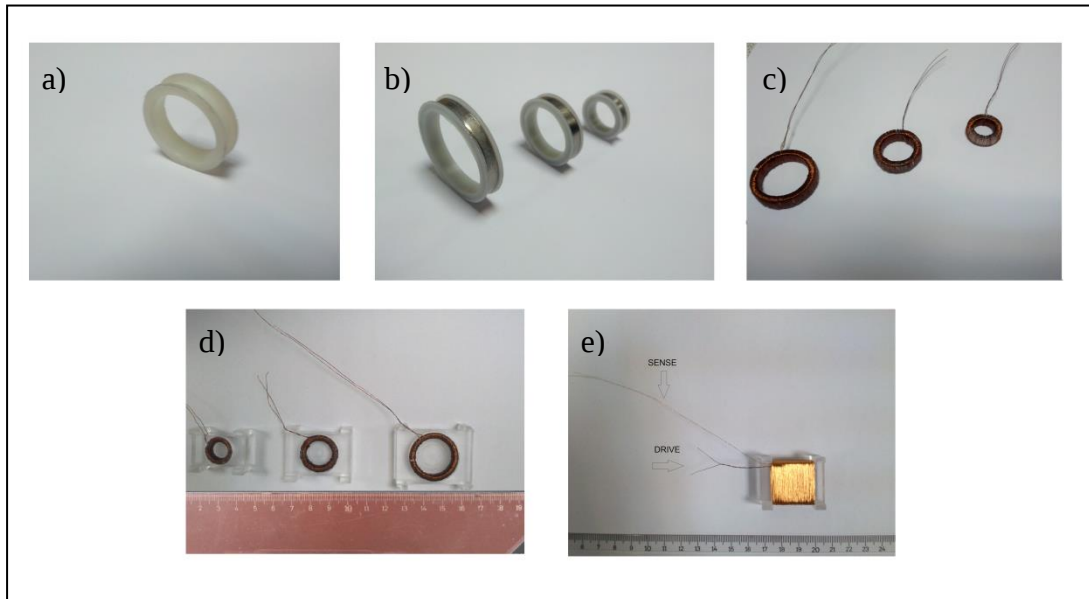
Nüve Parametresi	Birincil Etki	İkincil Etki
Düşük demanyetizasyon etkisi	Hassasiyet	Gürültü
Düşük Barkhausen gürültüsü	Gürültü	-
Düşük manyetik büzülme	Offset	Gürültü
Yüksek geçirgenlik	Hassasiyet	Güç tüketimi
Doyuma yaklaşma	Gürültü	-
Kalınlık	Eddy akımları	Yüksek frekans
Curie sıcaklığı	Çalışma aralığı	Gürültü

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

4.1. Alçak ve Yüksek Yörünge Uyduları İçin Halka Tipi Fluxgate Sensör Tasarımı ve Karakterizasyonu

Önceki bölümlerde bahsettiğimiz üzere Fluxgate sensörler zayıf manyetik alanların ölçümünde oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Yaygın olarak kullanılmasının ve popülerliğini kaybetmemesinin altında yatan en önemli etkenin manyetik malzemelerdeki gelişmeler olduğu görülmektedir. Manyetik malzemelerdeki son gelişmeler, bu sensörlerin karakteristik özelliklerini (hassasiyet, dinamik aralık ve gürültü v.s.) oldukça iyi bir hale getirmiş olsa da sensör hassasiyet ve gürültü seviyesinin sensör nüve çapıyla olan güçlü ilişkisini ortadan kaldırmamaktadır. Literatürde yapılan bazı çalışmalarla [24], [59] bu ilişkinin varlığı çok açık bir biçimde ortaya çıkmış olsa da en uygun nüve çapının belirlenmesi üzerine yapılan bir çalışma olmadığı görülmektedir.

Uydu uygulamaları gibi birçok uygulama alanı için sensör boyutu ve ağırlığı gibi fiziksel özelliklerin önem arz etmesinden dolayı bu bölümde 3 nT'ya varan, çok düşük DC alanların algılanmasını sağlayan ve oldukça geniş dinamik ölçüm aralığına sahip farklı çaplarda halka tipi fluxgate sensörler tasarlandı. Şekil 4.1'de sensörlerin hazırlık aşamaları özetlenmiş olup, aşağıda ayrıntılarıyla açıklanmaktadır:

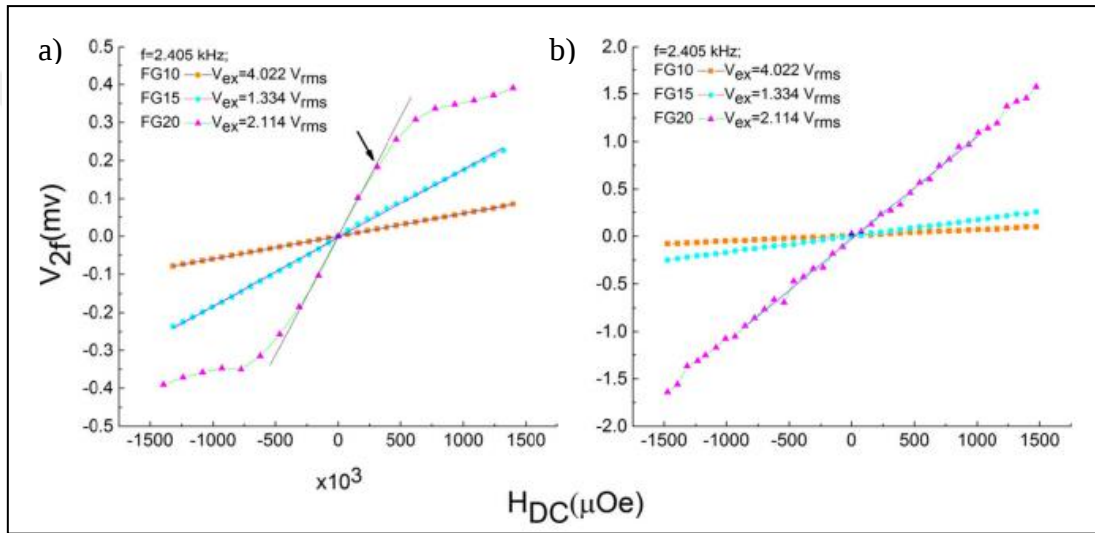


Şekil 4.1: Halka tipi fluxgate sensör hazırlık aşamaları.

Şekil 4.1.a'da nüvelerin yerleştirileceği Teflon malzemesinden hazırlanan kasnak görülmektedir. Metglas 2714A şerit nüve kullanılarak üç farklı çapta (10,15 ve 20 mm) halka tipi fluxgate sensör hazırlandı. Şerit nüvelerin kalınlığı 15 μm ve genişliği 3.175 mmdir. Burada vurgulamak gerekir ki 15 μm gibi çok küçük bir kalınlığın seçilmesinin amacı Eddy akımlarından kaynaklanacak güç kayıplarını önlemek ve gürültü seviyesini minimize etmektir. Şekil 4.1.a'da yer alan kasnak üzerine şerit nüveden altı kat sarıldı (Şekil 4.1.b). Ayrıca şunu vurgulamak gerekir ki nüvenin doyum indüksiyonu ~ 0.57 T ve DC geçirgenliği 10^5 civarındadır. Bir sonraki aşamada 200 μm çaplı bakır tel kullanılarak uyarma bobinleri toroidal olarak sarıldı (Şekil 4.1.c). Tur sayıları FG10, FG15 ve FG20 olarak halka çapına göre isimlendirilen nüveler için sırasıyla 90, 155 ve 350'dir. Toroidal sargılı nüvenin algılama bobini merkezine doğru uygun konumda ve rotasyonda yerleştirilmesi sıfır ofset değerinin belirlenmesi açısından ve herhangi bir sarsıntıya ya da darbe durumunda etkilenmemesi açısından önem arz etmektedir. Bu nedenle doğru tasarımın yapılması gerekmektedir. Bu süreçte uyarma bobinlerinin yerleştirileceği ve algılama bobininin sarılacağı farklı çaplarda kasnaklar tasarlandı. Şekil 4.1.d'de özel olarak tasarlanan algılama bobin kasnaklarının içerisine uyarma bobinlerinin yerleştirildiği görülmektedir. Farklı boyutlardaki algılama bobinleri mikroskop altında 100 μm çaplı bakır tel kullanılarak sarıldı. Tur sayıları sırasıyla 1020,1410 ve 1900'dür. Şekil 4.1.e'de FG15 adlı sensöre ait görüntü yer almaktadır.

Yukarıda bahsedildiği üzere, nüve çapı değiştirilerek üç farklı boyutta halka tipi sensör tasarlandı. Uygun manyetometre yapısını bulmak için uyarma sinyalinin genlik ve frekansı gibi hassasiyet ve gürültü seviyesini etkileyen bazı önemli faktörleri incelendi. Şekil 4.2'de bu üç sensör için iki farklı DC alan ölçeğinde (Şekil 4.2.a: üst limit belirlemek için ± 1.5 Oe aralığında ve Şekil 4.2.b: hassasiyet belirlemek için ± 1.5 mOe aralığında) ikinci harmonik sinyalin dış manyetik alanla değişim grafikleri verilmektedir. Uzun denemeler sonucunda uygulanan DC alana en şiddetli 2f cevabının 2.405 kHz uyarma frekansında olduğu gözlemlendi. Diğer taraftan en uygun uyarma sinyal genliği, 2f sinyalinin şiddetinin genlikle değişmesi sebebiyle her bir sensör için farklı olarak belirlendi. Elde edilen verilerin doğrusal davranış gösterdikleri bölgelerin eğiminden sensörlerin hassasiyetleri (transfer fonksiyonu, ölçek faktörü) belirlendi ve doğrusallıktan sapmanın başladığı noktalar sensörlerin üst limitleri olarak kabul edildi. Üç sensörün küçükten büyüğe doğru sıralamasında hassasiyetleri ya da ölçek faktörleri 597, 1798 ve 11400 V/T olarak belirlendi.

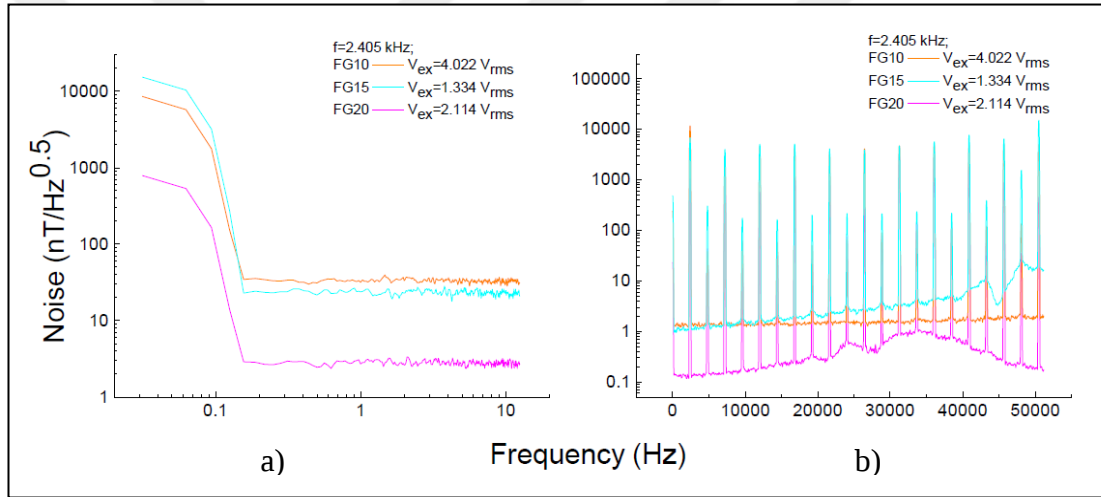
Görüldüğü üzere, FG20'nin hassasiyeti en yakın rakibi olan FG15'in 6 kat üstündedir. Fakat üst limiti dikkate değer bir biçimde diğer iki sensörden küçüktür. Bu değer FG20 (Şekil 4.2.a'da ok işareti ile gösterilen) için 0.31 Oe iken diğerleri için akım kaynağımızın ürettiği manyetik alandan daha büyük değerlere sahiptir. Bu da FG10 ve FG15 için üst limitin 1.5 Oe (dünyanın alanının neredeyse üç katı) değerini geçtiği görülmektedir. Yapılan bu ölçümler ışığında FG20 sensörü daha hassas görünmesine rağmen üst limiti 0.6 Oe'den (dünya alanı üst limiti) küçük olduğu için uydu uygulaması mümkün görünmemektedir. Diğer taraftan FG10 ve FG15 sensörleri mevcut durumda uydu için gerekli isterleri karşılayacak özelliktedir.



Şekil 4.2: 2f sinyalinin uygulanan DC alana karşı göstermiş olduğu değişim grafikleri a) geniş DC alan aralığı b) dar DC alan aralığı.

Sensörlerin gürültü yoğunluğu değerleri 35670A FFT analizörden okunan gerilim gürültü yoğunluğu değerlerinin ölçek faktörü değerlerine bölümü sonucu elde edildi. Şekil 4.3'te incelenen sensörlere ait frekansa bağlı gürültü seviyelerini gösteren grafikler verilmektedir. Çalışılan sensörlerin 1 Hz'deki gürültü seviyeleri FG10, FG15 ve FG20 için sırası ile 31.7, 23.8 ve 2.72 nT/√Hz olarak belirlendi. Literatürdeki diğer çalışmalar ile kıyaslandığında elde edilen gürültü seviyelerinin yüksek olduğu görüldü [2], [9], [16]. Örneğin ticari ürün olan STL DM 050 fluxgate manyetometrenin gürültü seviyesi 50 pT/√Hz@1Hz olarak, STL DM 005 fluxgate manyetometrenin ise 6 pT/√Hz@1Hz olarak beyan edilmektedir. Lakin bu manyetometrelerin sensör çapı 30 mm'den daha yüksek olması sebebi ile bu derece küçük gürültü seviyesi elde edilmesi beklenen bir sonuçtur. Diğer taraftan,

tasarladığımız sensörlerin gürültü karakterleri sıra dışı bir davranış göstermektedir. $1/f$ frekansı keskin bir şekilde frekansla düşmektedir. Tasarlanan sensörlerin köşe frekansı 0.1 Hz kadar küçüktür. Gürültü spektrumunun düz kısmı ve 1 Hz'de yüksek gürültüye neden olan yüksek beyaz gürültünün nedeni esas olarak elektroniklerin basitliği ve ölçüm alanından kaynaklanmaktadır. Burada şunu vurgulamak gerekir ki, bizim gürültü ölçümlerimiz ticari manyetometrelerin kullandığı bant geçiren (bandpass) filtre gibi ek elektronikler kullanılmadan algılama bobininde indüklenen $2f$ sinyalinin analog çıkışı üzerinden yapılmaktadır. Bu sebeple ikinci harmonik ölçümlerinde yüksek kalite bant geçiren filtre kullanılması gürültü seviyesini büyük ölçüde azaltabilir. Bunun yanı sıra kullanılan mu-metalin kat sayısı da artırılarak başarı sağlanabilir.



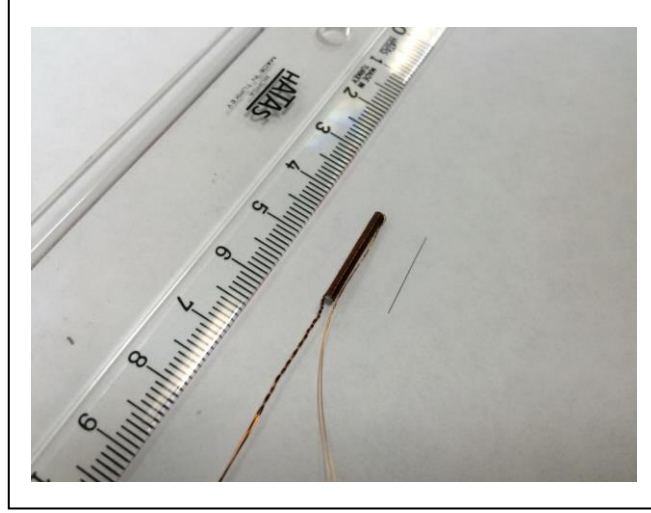
Şekil 4.3: Çalışılan fluxgate sensörlere ait alan gürültü spektrumları a) 0-12,5 Hz b) 0-50 kHz.

4.2. İnce Manyetik Teller Kullanarak Tekli Çubuk Tipi Fluxgate Manyetometrenin Algılama Performansının Optimizasyonu

Yıllık Pazar payı 2 milyar doları bulan manyetik alan sensörlerinin uygulama alanlarından biri de tahribatsız muayene yöntemi (NDT) olarak kullanılmasıdır. Sensör algılama kesit alanı ebatlarının yeterince küçük olması durumunda mikron altı malzeme çatlaklarının tespit edilebileceği ön görülmüştür [81]. Referans [81]'de gerçekleştirilen kapsamlı araştırma sonuçlarına göre sensör hassasiyetinin ve gürültü seviyesinin de tespit edilecek çatlak (ya da yapısal bozukluk) büyüklüğüne doğrudan

katkısı olmaktadır. Mevcut teknolojide bu amaç doğrultusunda Hall etkili manyetometreler kullanılmasına rağmen sensör kesit alanı yeterince küçük olamamakla beraber (minimum $0,018 \text{ mm}^2$) ve bu sensörlerin üretim teknolojisi ve çalışma doğası gereği (sensör yüzey pürüzlülüğü ve taşıyıcı yoğunluğundaki kaçınılmaz farklılıklar, vs) hassasiyeti ve gürültü seviyesi fluxgate manyetometrelere nazaran yüksek kalmaktadır. Fluxgate manyetometre ile yürütülen NDT literatür çalışmalarına baktığımızda ise sensör algılama kesit alanının Hall etkili sensörlerinden dahi daha fazla olduğunu ve çalışılan sensör tipi olarak ortogonal tipi fluxgate manyetometreler kullanıldığını görmekteyiz. Ortogonal fluxgate manyetometreler ise uç noktalardan akım sürülebilmesi için gerekli bağlantı lehimleri nedeni ile inceleme yapılacak numuneye yaklaşım mesafesini olumsuz yönde etkilemektedir. Aynı zamanda bu tip manyetometrelerin doğrusal olmayan sinyal - H_{DC} bağımlılıkları dolayısı ile yüzey üzerindeki manyetik alan dağılımını verebilmesine rağmen doğru değeri yansıtmaması güç görünmektedir.

Bu bölümde noktasal manyetik alan kaynaklarının tespiti ve tahribatsız muayene ölçüm bölgesinin küçültülmesine yönelik bir tasarım gerçekleştirildi. Bu tasarımda Unitika Ltd. firmasından temin edilen ve çapı $100 \text{ }\mu\text{m}$ olan (ki sensör algılama kesit alanı olarak $0,00785 \text{ mm}^2$ ye tekabül eder) daha önce bahsedildiği üzere kobalt, demir, silikon ve boron içeriğine sahip Şekil 4.4'te sensörün sağ tarafında yer alan ferromanyetik tel nüve kullanıldı. Sensör için iç çapı $200 \text{ }\mu\text{m}$ ve boyu 20 mm olan seramik gövde kullanıldı. 15 mm boyunda algılama bobini $100 \text{ }\mu\text{m}$ çaplı bakır tel kullanılarak seramik gövdenin üzerine üç kat sarıldı. Uyarma bobini algılama bobininin üzerine $200 \text{ }\mu\text{m}$ çaplı bakır tel ile tek kat sarıldı. 20 mm boyunda olan uyarma bobini sıfır ofset değerini minimize etmek için boyunun yarısında yön değiştirilerek sarıldı. Sonrasında bu bobin sisteminin içine boyu 19.6 mm olan incelenecek ferromanyetik nüve yerleştirildi. Bu tasarımda nüve uç noktalarındaki manyetik alan çizgisi dağılımları gürültüye neden olacağından algılama bobini nüve boyundan kısa ve nüvenin homojen bir şekilde mıknatıslanmasını sağlamak için uyarma bobini nüve boyundan uzun tutuldu. Bu tasarımdan görüleceği üzere sensör inceleme yapılacak numune üzerine istenildiği kadar yaklaştırılabilir ki tespit edilebilecek minimum ebattaki çatlak tayini için önemli bir husustur.



Şekil 4.4: Çubuk tipi fluxgate sensör ve algılama nüvesine ait görüntü.

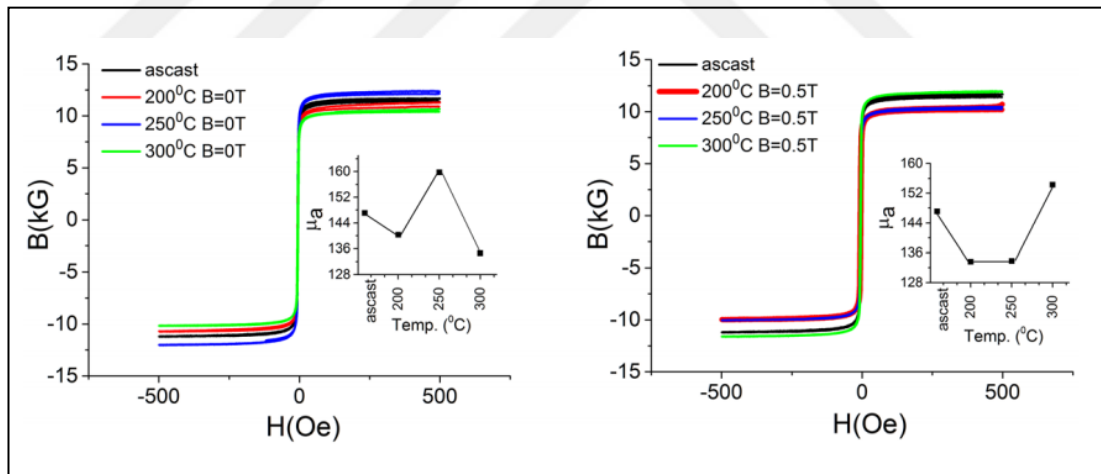
Mikron altı manyetik alan kaynaklarının tayini için sensör hassasiyetinin ve gürültü seviyesinin önemi büyüktür. Bu nedenle yüksek hassasiyet ve minimum gürültüye ulaşmak için nüveler farklı koşullarda ısıtılma işlemine tabi tutuldu. Bu işlemin amacı ferromanyetik nüvelerin kristal yapısındaki yapısal bozuklukların giderilmesi ve bu sayede benzer manyetik parametrelere sahip olan homojen bir domain yapısının elde edilmesi ve nihayetinde sensör gürültü seviyesini azaltmaktır. Bu doğrultuda sensör optimizasyonu üzerine yapılan çalışmalar kısaca şu şekilde özetlenebilir:

Bobin sisteminin gözüne farklı sıcaklıklarda ısıtılma işlemi görmüş (ascast, 200, 250 ve 300°C) ve bazılarında boyuna 0.5 T manyetik alan uygulanan 19.6 mm uzunluğunda ve 100 µm çapında soft ferromanyetik nüveler yerleştirildi. Yerleştirilen her nüve için hassasiyet ve gürültü analizleri yapıldı. İkinci harmonik ölçümleri için SR830 Lock-in yükselteç, DC alan kaynağı olarak bobin sabiti 15. 861 Oe/A olan kalibreli bobin ve Keithley 220 sabit akım kaynağı kullanıldı. Gürültü analizleri için 7 katlı mu-metal çember ve Agilent marka 35670A dinamik spektrum analizörü kullanıldı. B-H eğrileri için VSM manyetometre kullanıldı. Elde edilen veriler, aynı nüve setlerinin üç parçası üzerinden yapılan ölçümlerin ortalamasının sonuçlarıdır. B-H eğrilerinden çıkarılan manyetik parametrelerin belirsizliklerinin maksimum değeri % 2.0 iken, sensör performans analiz ölçümleri (hassasiyet, gürültü ve 1/f köşe) için % 1.0 olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle, ölçümlerin tekrarlanabilir ve tekrar edilebilir olduğunu belirtmek doğru olacaktır.

Fluxgate sensörler için algılama bobininde indüklenen gerilim

$$V_i = NA\mu_0 H \frac{d\mu_r(t)}{dt} \quad (4.1)$$

şeklindeydi. Göreceli manyetik geçirgenliğin zamana karşı değişimi fluxgate sinyalin şiddeti hakkında bilgi vermektedir. Zamanla değişim ne kadar büyükse algılanan sinyal o kadar büyüktür. Bunun yanı sıra, doyum manyetik alanının değeri (H_{sat}) sürülen AC alanın gerekli tepe alan değeri hakkında bilgi vermektedir. H_{sat} değerinin küçük olması düşük güç tüketimi ve elektriksel gürültü sağlar. Daha az gürültülü fluxgate sensör elde etmek için AC alan ile modüle edilen manyetik nüvenin tüm domainlerinin doyurulması gerekir. Bilindiği üzere B-H eğrilerinden bazı manyetik parametrelere ulaşmak mümkündür. Bu sebeple farklı sıcaklık (200, 250 ve 300°C) ve manyetik alanlarda (0 ve 0.5 T) tavlanan nüvelerin VSM manyetometre kullanılarak Şekil 4.5'te yer alan B-H eğrileri çıkarıldı. Bu eğrilerden ilk ve ortalama manyetik geçirgenlik değerleri hesaplanarak Tablo 4.1'de verildi.



Şekil 4.5: Farklı koşullarda tavlanan sensör nüvelerine ait B-H eğrileri. İçindekiler: ortalama manyetik geçirgenliğin tavlama sıcaklığına bağlı değişimi.

Tablo 4. 1: Nüvelere ait manyetik parametreler.

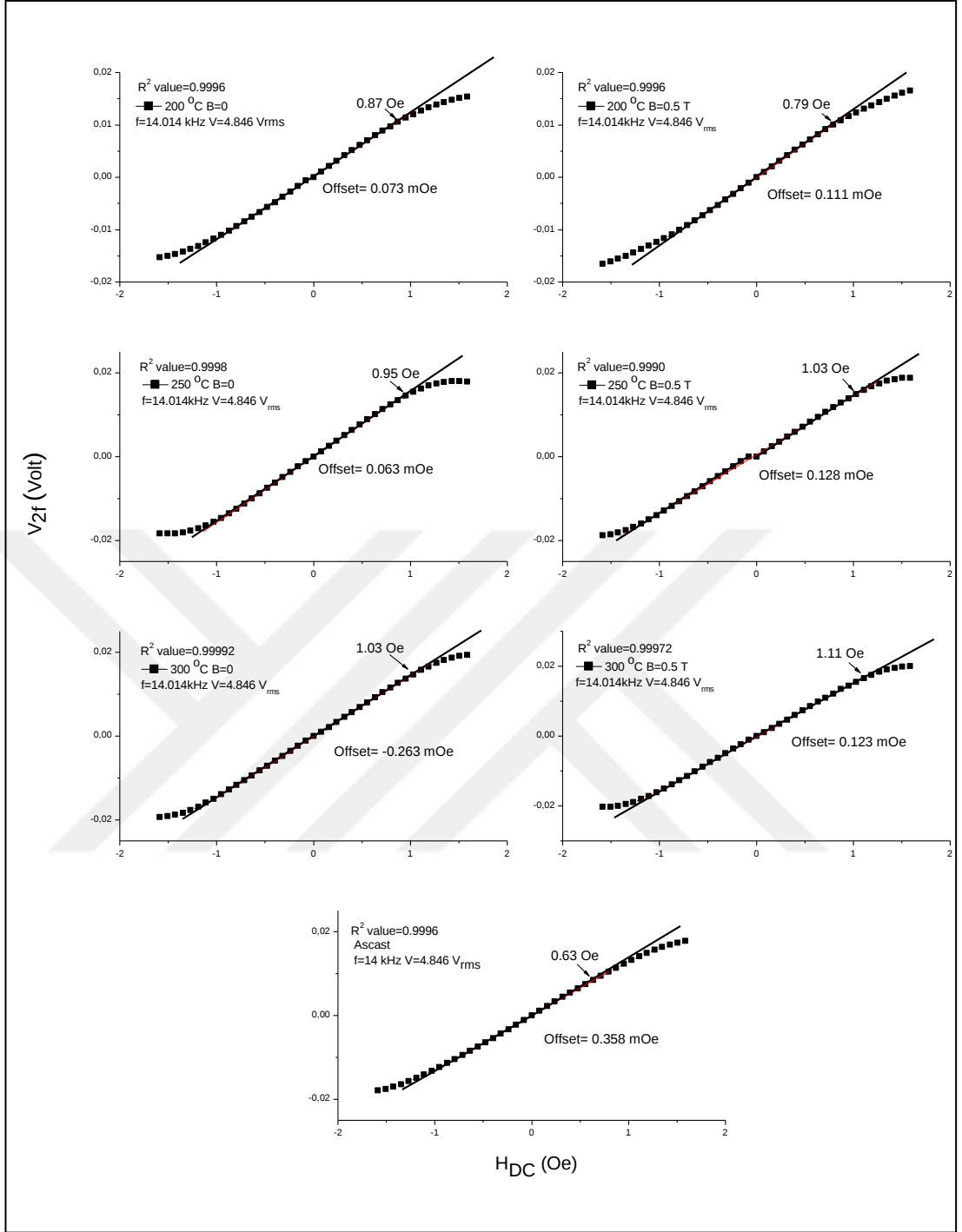
	As-cast	200°C B=0 T	200°C B=0.5 T	250°C B=0 T	250°C B=0.5 T	300°C B=0 T	300°C B=0.5 T
μ_a	147±3	140±3	134±3	160±3	134±3	135±3	154±3
μ_i	4304±43	3966±40	3757±38	4717±48	3796±38	3502±35	3865±39
B_s (T)	1.12±0.01	1.07±0.01	1.03±0.01	1.19±0.01	1.02±0.01	1.04±0.01	1.17±0.01
H_{sat} (Oe)	70±4	57±3	60±3	55±3	70±4	75±4	65±3

Burada μ_a , sürülen AC alanın tepe değerleri olan -70 Oe ile +70 Oe arası göreceli geçirgenliğin ortalaması olarak düşünülmelidir. Tablo 4.1’de yer alan μ_i ve μ_a değerlerinin tavlama koşullarına göre nasıl değiştiği görülmektedir. Örneğin ortalama geçirgenlik değeri nüvenin 250°C’de tavllanmasıyla 147’den 160’a çıkarken, 250°C’nin dışındaki sıcaklıklarda daha düşük değerlerde çıkmış ve 135-140 seviyesinde kalmıştır. Diğer taraftan nüve 0.5 T manyetik alan altında tavlendiğinde maksimum geçirgenlik 300°C’de elde edilmiş ve μ_a 154 olmuştur. İlk manyetik geçirgenlik değerleri de aynı şekilde değişim göstermiştir. İlk manyetik geçirgenlik değeri μ_i yine manyetik alan olmadan 250°C’de tavlanan nüve için maksimum olarak elde edilmiştir. Doyum manyetik indüksiyon (B_s) değerleri geçirgenlik değerleri ile uyum içindedir. Maksimum B_s değerleri 250°C ($B = 0$ T) ve 300°C ($B = 0.5$ T) için sırasıyla 1.19 T ve 1.17 T olarak belirlenmiştir. Barkhausen etkisinin bir sonucu olarak sensörün gürültü seviyesi için etkili olan H_{sat} değeri tavlama koşullarına bağlı olarak 55 Oe ile 75 Oe arasında değişmektedir. Örneğin as-cast nüve için 70 Oe iken 250°C ($B = 0$ T) de tavlandıktan sonra 55 Oe değerine düşmüştür ve 300°C ($B = 0$ T) de tavlanan nüve için maksimum elde edilmiştir.

Aslında bu sonuçlar ısıtıl işleminden beklentilerimizi karşılamaktadır. Çünkü ısıtıl işlem ile amacımız nüvelerin içindeki atomların rahatlamasını sağlayıp atomik örgüdeki gerçek yerlerini bulması ve daha düzenli bir yapının elde edilmesidir. Dahası manyetik ısıtıl işlem ile nüvelerin kolay mıknatıslanma eksenlerinin yeniden organize (atomik orbitaller ile elektron spinleri arası ya da spin-orbit (SO) etkileşimlerinden ya da spin-alan etkileşimlerinden dolayı örgünün yeniden organize edilmesi sonucunda kolay mıknatıslanma ekseninin kontrolü) edilmesi beklenmektedir. Sonuç olarak manyetik ısıtıl işlem sonrası uniform bir manyetik yapının ve bunun sonucu herhangi bir alan altında daha yüksek bir mıknatıslanma seviyesinin elde edilmesi beklenen bir etkidir. Uygun bir ısıtıl işlem ile manyetik domainlerin manyetik özellikleri arasındaki farklılıkların minimize edilmesi (Barkhausen etkisi), manyetik geçirgenliğin artması, koersif alan değerinin azalması

mümkündür. Bizim deneylerimiz neticesinde manyetik parametreler açısından bakıldığında en uygun ısıtılmanın 250°C ($B=0\text{ T}$) olduğu anlaşılmaktadır. Bu nüve en yüksek geçirgenliğe ve B_s değerine sahip olmakla birlikte en küçük doyum manyetik alan H_{sat} değerine sahiptir.

Nüvelere ait 2. Harmonik sinyaline karşılık dış manyetik alan grafikleri Şekil 4.6'da verilmiştir. Bu ölçümlerden tavlamanın ve tavlama esnasında uygulanan manyetik alanın sensör DC alan hassasiyeti üzerinde önemli etkileri olduğunu görmekteyiz. Örneğin as-cast olarak adlandırılan ve üretildiği gibi kullanılan nüvenin DC alan V_{2f} (2. Harmonik) grafiğini incelediğimizde sensörün dinamik ölçüm aralığının -0.63 Oe ile 0.63 Oe arası olduğunu görmekteyiz. Bu değer üstünde doğrusallıktan sapma başlamıştır. Dinamik ölçüm aralığında çizilen doğrunun deneysel veriler ile oldukça örtüştüğü açıkça görülmektedir. (R^2 değeri= 0.9996, %99.96 örtüşme). Diğer taraftan bu nüve kullanılması durumunda DC sıfır ofset değeri 0.358 mOe 'dir. Yani hiçbir manyetik alan uygulanmaksızın bu sensör bu değeri göstermektedir. Aynı zamanda literatürde hassasiyet ya da transfer fonksiyonu olarak bilinen ve aslında bu doğrusal denklemin eğimi olan değer 133 V/T olarak hesaplanmıştır.

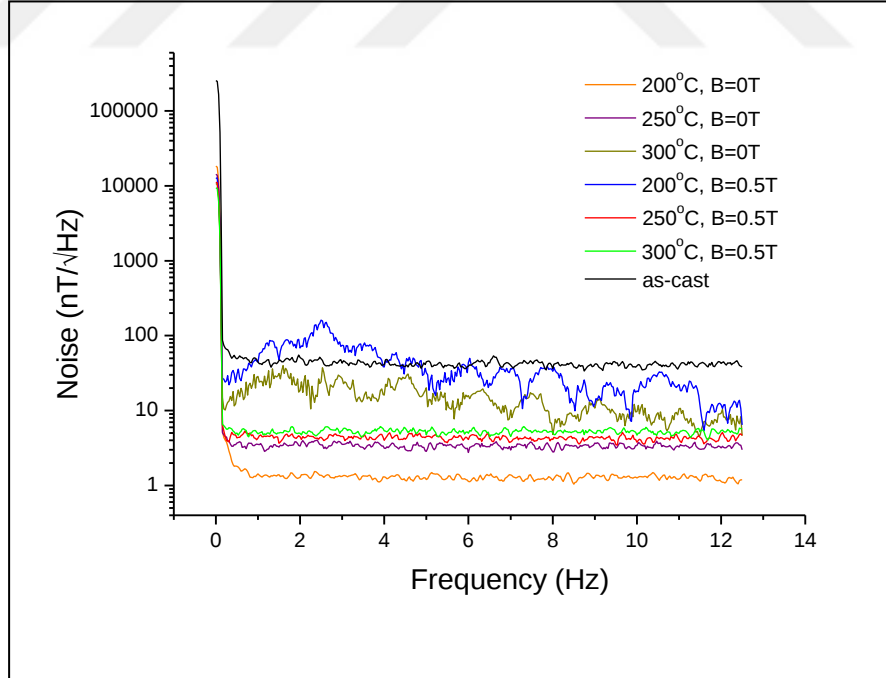


Şekil 4.6: Sensörde kullanılan nüvelerin tavlama sıcaklığı ve manyetik alana bağımlı hassasiyet ölçümleri.

Bu ölçümlerde tavlama koşullarının hassasiyet değerlerine önemli katkıda bulunduğu görülmektedir. 250 $^{\circ}C$ ($B=0T$) ve 300 $^{\circ}C$ ($B=0.5T$) de tavlanan nüvelerin hassasiyetleri sırasıyla 152 V/T ve 155 V/T'dır. Bu nüvelerin aynı zamanda en yüksek ortalama geçirgenliğe sahip olması elde edilen sonuçların teori ile uyumlu olduğunu göstermektedir. 300 $^{\circ}C$ ($B=0.5T$) tavlanan sensörün dinamik ölçüm aralığı

as-cast nüvenin hemen hemen iki katı olan ± 1.11 Oe aralığında çıkmıştır. Ayrıca as-cast nüveye göre DC offset değerinde iyileşme sağlanmış ve değeri 0.123 mOe olarak belirlenmiştir. En iyi DC offset değeri 0.063 mOe ile 250°C (B=0T) de tavlanan nüveye aittir ve dinamik ölçüm aralığı 0.95 Oe'tir. Sensör performansını etkileyen önemli bir parametre olan ve yüksek alan uygulandıktan sonra offset değerinde değişime sebep olan “perming effect” olarak bilinen etki incelenmiştir. 100 Oe gibi yüksek bir alan uygulanmış fakat sıfır ofset değerinde bir değişim gözlenmemiştir. Sadece as-cast nüvede 0.1 mOe kayma gözlenmiştir. Dik alan etkisi de incelenmiş ve bütün sensörlerde sıfır olarak belirlenmiştir. Çubuk tipi fluxgate sensörlerde dik alan etkisinin minimum olması gerektiği (oldukça yüksek demanyetizasyon katsayısından dolayı) zaten beklenmekle birlikte bu çalışmada doğrulanmış olmaktadır.

Gürültü performanslarını değerlendirmek için sensörler 7 katlı mu-metal içine yerleştirilmiştir. Veriler FFT analizör kullanılarak voltaj olarak elde edilmiş ve Tablo 4.2’de verilen hassasiyet değerleri kullanılarak manyetik akı yoğunluğuna çevrilmiştir. Şekil 4.7’de nüvelere ait gürültü analiz grafikleri yer almaktadır.



Şekil 4.7: Çalışılan nüvelere ait 0-12.5 Hz arası gürültü ölçümleri.

As-cast nüvenin en yüksek gürültü seviyesine sahip olduğu görülmektedir. 1 Hz’deki gürültü seviyesi 44.4 nT/√Hz olarak belirlenmiştir. 200°C (B=0T)’de

tavlandıktan sonra $1.4 \text{ nT}/\sqrt{\text{Hz}}$ seviyesine düşmüştür. Bunu 250°C ($B=0\text{T}$)’de tavlanan nüve $3.5 \text{ nT}/\sqrt{\text{Hz}}$ ile takip etmiştir. NDT (tahribatsız muayene) gibi hızlı veri toplama uygulaması gerektiren alanlar için gürültü spektrumunun $1/f$ köşe dönümü önem arz etmektedir. Şekil 4.7’deki gürültü spektrumlarından elde edilen $1/f$ değerleri 200°C ($B=0\text{T}$) ısıtıl işlem sonrası 0.8 Hz , 250°C ($B=0\text{T}$) ısıtıl işlem sonrası 0.1 Hz olarak belirlenmiştir. Yani bu nüve ile $1/10$ saniyede veri toplama gerçekleştirilebilir. Bu çalışmanın deneysel sonuçları göz önüne alındığında 250°C ($B=0\text{T}$)’de tavllanmış nüvenin diğerlerinden daha iyi performans sergilediği görülmektedir. Nüveyi doyurmak için gerekli alan olan H_{sat} ’ın sensörlerin gürültü seviyelerinin belirlenmesinde önemli bir role sahip olduğu daha iyi anlaşılmaktadır. Tablo 4.2’ye bakıldığında en düşük gürültü seviyesinin en düşük H_{sat} değerine sahip nüvelerde olduğu görülmektedir. Gürültü seviyesi ve hassasiyet gibi sensör performanslarına bakıldığında bu çalışmanın ticari aygıtlar ve literatürdeki bilimsel çalışmalardan kötü olduğu görülmektedir. Fakat nüvenin boyutu (tek bir nüve $100 \mu\text{m}$ çapında) ve sarım sayısı dikkate alındığında NDT teknolojisinde çatlak boyutlarının tespit edilebilirlik sınırını azaltmak için yaptığımız kısıtlamalardan kaynaklandığını unutmamak gerekir. Çünkü bu denli küçük sensör algılama kesit alanı ile tahribatsız muayene kusur tespit iş hacmi yükseltilebilir. Bir başka deyişle literatürdeki tekniklere alternatif ve ilerleme olarak malzeme içindeki çok daha küçük yapı kusurları mevcut sensörler ile tespit edilebilir. Bu sebeple bu sonuçlar yerel alan bilgisi gerektiren NDT tipi uygulamalar için tatmin edici ve uygulanabiliridir.

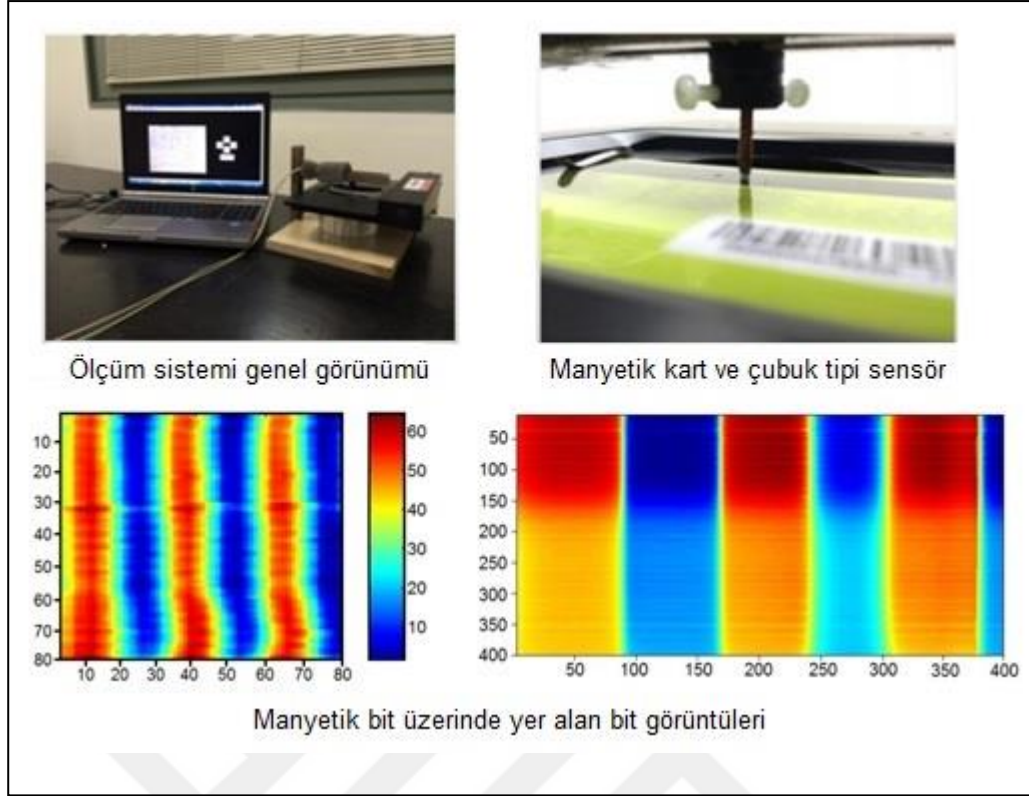
Tablo 4.2: Çalışılan nüvelere ait hassasiyet, gürültü seviyesi ve $1/f$ köşe dönüm değerleri.

	Hassasiyet (V/T)	Gürültü ($\text{nT}/\sqrt{\text{Hz}}$) @1 Hz	$1/f$ köşe (Hz)
As-cast	133.0 ± 1.2	44.40 ± 0.50	$0.7 \pm \leq 1.0\%$
200°C $B=0$	120.1 ± 1.2	1.40 ± 0.01	$0.8 \pm \leq 1.0\%$
250°C $B=0$	152.3 ± 1.4	3.50 ± 0.04	$0.1 \pm \leq 1.0\%$
300°C $B=0$	145.5 ± 1.4	28.50 ± 0.03	$0.3 \pm \leq 1.0\%$
200°C $B=0.5 \text{ T}$	131.1 ± 1.3	44.07 ± 0.05	$0.2 \pm \leq 1.0\%$
250°C $B=0.5 \text{ T}$	148.0 ± 1.5	4.31 ± 0.04	$0.2 \pm \leq 1.0\%$
300°C $B=0.5 \text{ T}$	155.3 ± 1.5	4.92 ± 0.05	$0.1 \pm \leq 1.0\%$

4.2.1. Kredi Kartı Manyetik Bit Analizi

Yukarıda bahsettiğimiz üzere çubuk tipi fluxgate sensörlerin NDT ve yerel manyetik alan dağılımlarını tespit etmek amacı ile kullanılabileceğini vurgulamıştık. Bu sebeple üzerinde manyetik bant olan herhangi bir kart üzerinde testler yapıldı. Şekil 4.8’de ölçüm düzeneği ve sonuçları görülmektedir. Ölçüm sistemi bilgisayar kontrollü olup hassas x-y tablası, Lock-in yükselteç ve sensörden oluşmaktadır. Sistemin otomasyonu için LabVIEW programlama dili kullanıldı. Ölçümde kullanılan x-y tablası 0.01 μm adımlarla ilerleme yeteneğine sahiptir ve başlangıç noktasına geri dönebilmektedir. Ölçüm, belirlenen herhangi bir bölgede önce x-ekseninde tarama, sonra y ekseninde 1 adım ilerleyip x-ekseninde yeniden tarama döngüsü olacak şekilde yapıldı. 4x4 mm^2 ’lik bir alanda her bir noktada Lock-in yükselteç yardımıyla gerilim değerleri okundu. Elde edilen sayısal değerlere MATLAB programlama dili yardımıyla renk kodları atanarak görüntüleme işlemi gerçekleştirildi.

Şekil 4.8’de aynı kart üzerinde yapılan ölçüm neticesinde elde edilen iki adet görüntü yer almaktadır. Ölçüme ait sol taraftaki görüntü 50 μm kaba adımlarla 2 saat gibi bir sürede tamamlanırken, sağ tarafta yer alan görüntü 10 μm adımlarla yaklaşık olarak 12 saatte tamamlanmıştır. Görüntüde yer alan eksenler ölçümde mm^2 başına düşen adım sayılarını göstermektedir. Kısa sürede kaba adımlarla yapılan ölçümde görüntü oldukça net değilken daha uzun sürede küçük adımlarla yapılan ölçümde kart üzerinde yer alan bitlerin kenarları daha keskin ve elde edilen görüntünün gayet net olduğu görülmektedir. Burada açık şekilde görülmektedir ki görüntü kalitesi kullanıcının isteğine bağlı olarak belirlenebilmektedir.



Şekil 4.8: Çubuk tipi fluxgate sensör ile manyetik kart analizi.

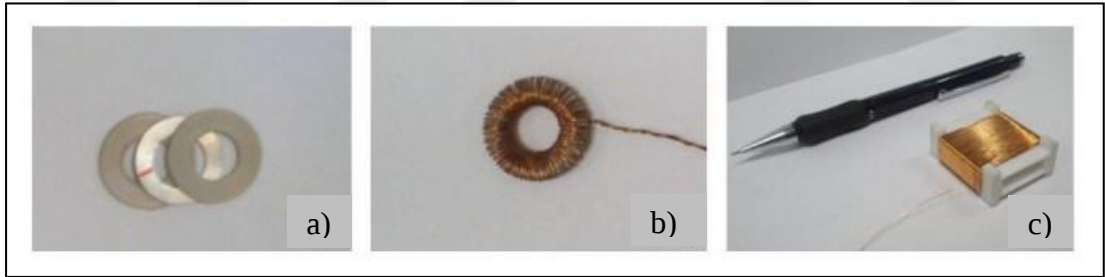
4.3. Halka Tipi Düzlemsel Sensör Nüvesinin Devre Kazıyıcı ile Üretimi ve Isıl İşlemin Sensör Performansı Üzerine Etkileri

Bu çalışmada sensör çözünürlüğünün çok daha iyi olabilir düşüncesiyle, halka tipi nüve 25 μm kalınlığındaki levhadan devre kazıyıcı kullanılarak elde edildi. (Şu ana kadar yapılan çalışmalarda nüve hazırlanırken böyle bir yöntemin kullanılmadığı görülmektedir.) Hazırlanan nüveler hem malzeme üretiminde hem de kazıma işlemi sırasında meydana gelebilecek yapısal deformasyonların giderilmesi için farklı koşullarda ısıtılma tabi tutuldu ve tavlama koşullarının sensör karakteristikleri üzerindeki etkisi incelendi.

Çalışmada nüve malzemesi olarak CoFeCrSiB atomik bileşene sahip Metglas 2714A levhalar kullanıldı. Bu malzemenin DC geçirgenliği 80000'den büyük, Curie sıcaklığı $\sim 225^\circ\text{C}$, doyum manyetik büzülme katsayısı 10^{-6} 'den küçük ve elektriksel direnci $140 \mu\Omega.\text{cm}$ 'dir.

25 μm kalınlığındaki levhalardan önce 16 mm çapında daire kesildi, sonra bu dairenin merkezinden 10 mm çapında bir daire daha çıkarılarak halka şeklinde

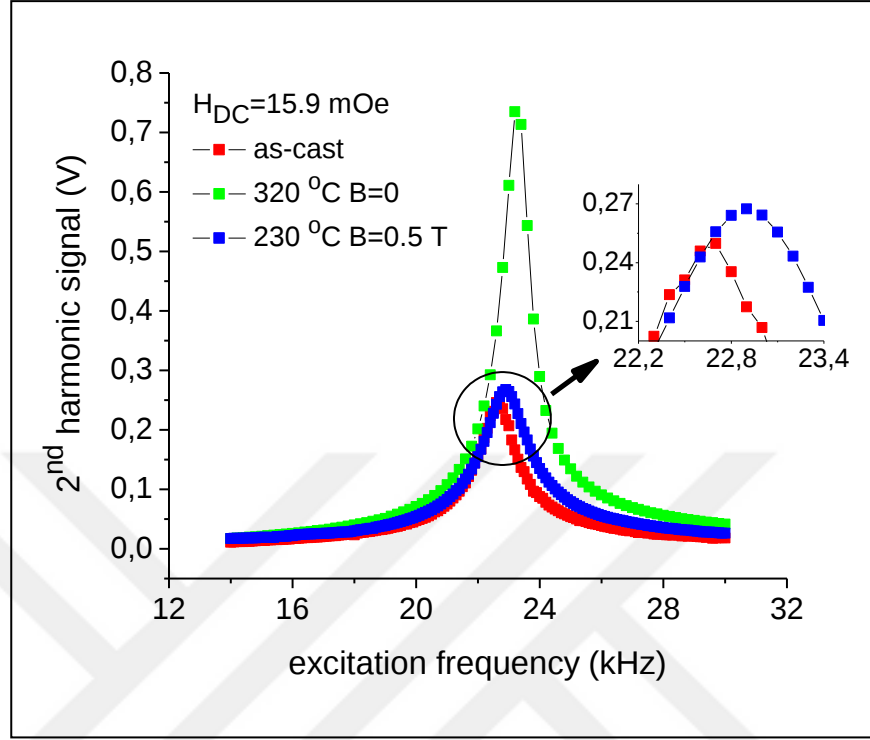
nüveler hazırlandı. Kesme sırasında meydana gelebilecek kusurları ortadan kaldırmak için nüveler farklı koşullarda ısıtılma işlemine tabi tutuldu. Nüveler hazırlanırken üç farklı yol izlendi. İlk nüvede herhangi bir iyileştirme işlemi yapılmadı. İkinci nüve 230°C’de (Curie sıcaklığı çevresi) 1 saat boyunca 0.5 T manyetik alan altında argon atmosferinde tavlandıktan sonra yavaşça (2 °C/dk) soğutuldu. Son nüve ise manyetik alan olmaksızın 320°C’de argon atmosferi altında 1 saat boyunca tavlandı. Uyarma bobini sarımı sırasında nüveye herhangi bir zarar gelmemesi için PEEK (Poly Ether Ether Ketone) malzemeden üretilen nüveler ile aynı ebatlarda halkalar arasına sandviç formunda yerleştirildi (Şekil 4.9.a). Uyarma bobini 300 µm çaplı bakır tel kullanılarak 70 tur toroidal olarak sarıldı (Şekil 4.9.b). Algılama bobini 100 µm çaplı bakır tel kullanılarak içine kolayca uyarma bobini yerleştirilecek şekilde hazırlanan kasnak üzerine sıkı bir şekilde 1840 tur sarıldı (Şekil 4.9.c). İkinci harmonik ölçümleri için SR830 Lock-in yükselteç, DC alan kaynağı olarak 15.9 Oe/A kalibreli bobin ve Keithley 220 akım kaynağı kullanıldı. Gürültü analizleri için 4 katlı mu-metal çember ve Agilent marka 35670A dinamik spektrum analizörü kullanıldı. M-H ölçümleri için Lakeshore VSM manyetometre kullanıldı.



Şekil 4.9: Sensörlerin hazırlık aşamaları.

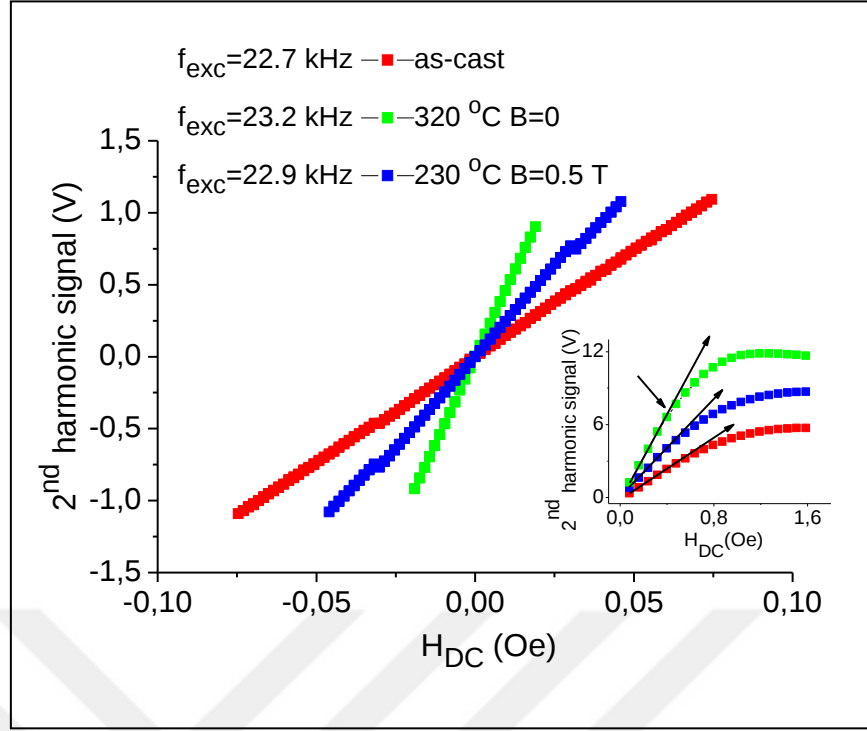
En uygun uyarma sinyal frekansını belirlemek için frekans 100 Hz’lik adımlarla 14 kHz ile 30 kHz arasında taranarak her bir noktadaki ikinci harmonik sinyali LabVIEW programı yardımıyla kayıt edildi. Ölçüm esnasında uyarma sinyali akım genliği optimize edilerek 60 mA (pp) değerine sabitlendi. (~5.0 Oe (pp)). Bu genlik değeri manyetik nüveyi doyuma ulaştırmak için yeterli büyüklüktedir. Şekil 4.10’da bütün sensörlerin uyarma sinyali frekansına bağlı olarak 2. harmonik sinyalinin değişimi yer almaktadır. 2. harmonik sinyalinin maksimuma ulaştığı

frekans değerleri as-cast nüve için 22.7 kHz, 230°C’de tavlanan nüve için 22.9 kHz ve 320°C’de tavlanan nüve için 23.2 kHz olarak belirlendi.



Şekil 4.10: Uyarma sinyali frekansına bağlı olarak 2. harmonik sinyal şiddetinin değişimi.

Belirlenen uyarma frekanslarında DC alan hassasiyet ölçümleri yapıldı. Şekil 4.11’de 2. harmonik sinyalinin DC alanla değişimini gösteren grafik yer almaktadır.



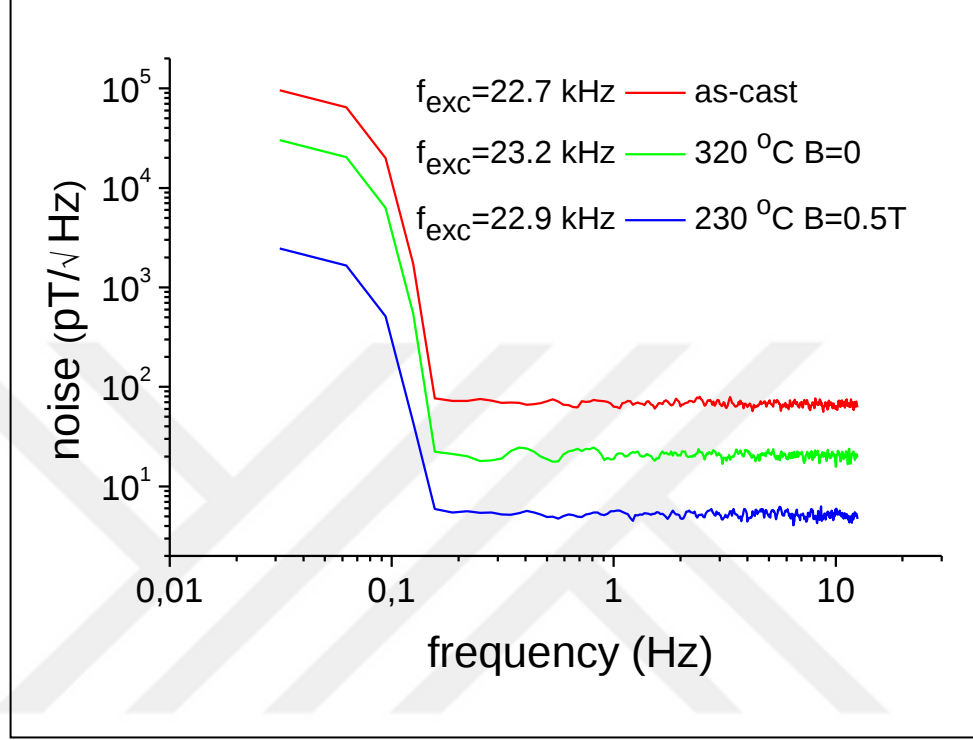
Şekil 4.11: 2. harmonik sinyalinin DC alan bağımlılık grafikleri. İçindeki: üst limit belirleme ölçüm grafikleri.

Uyarma sinyali akım genliği 60 mA (pp) olarak ayarlandı. Sensörlerin DC alan hassasiyeti diğer bir adıyla ölçek faktörleri eğrilerin doğrusal bölgelerinin eğimlerinden belirlendi. En düşük ölçek faktörü 147.3 kV/T ile as-cast nüveye aitken, en yüksek ölçek faktörü 481.9 kV/T ile 320°C’de tavlanan nüveye aittir. 230°C’de 0.5 T manyetik alan altında tavlanan nüvenin ölçek faktörü ise 241.3 kV/T’dır.

Sensörlerin üst ölçüm limitlerini belirlemek için Lock-in yükselteç yerine ölçüm limiti 1 Volttan büyük olan dijital bir voltmetre kullanıldı. Elde edilen veriler Şekil 4.11’in içinde gösterildi. Grafikte ok işaretiyle gösterilen ve doğrusallıktan sapmanın başladığı noktalar sensörlerin üst limiti olarak kabul edildi. Her bir sensörün üst limiti 0.53 Oe olarak ölçüldü. Bu sonuçlarla sensörlerin açık alan uygulamalarında kullanılabileceği anlaşılmaktadır.

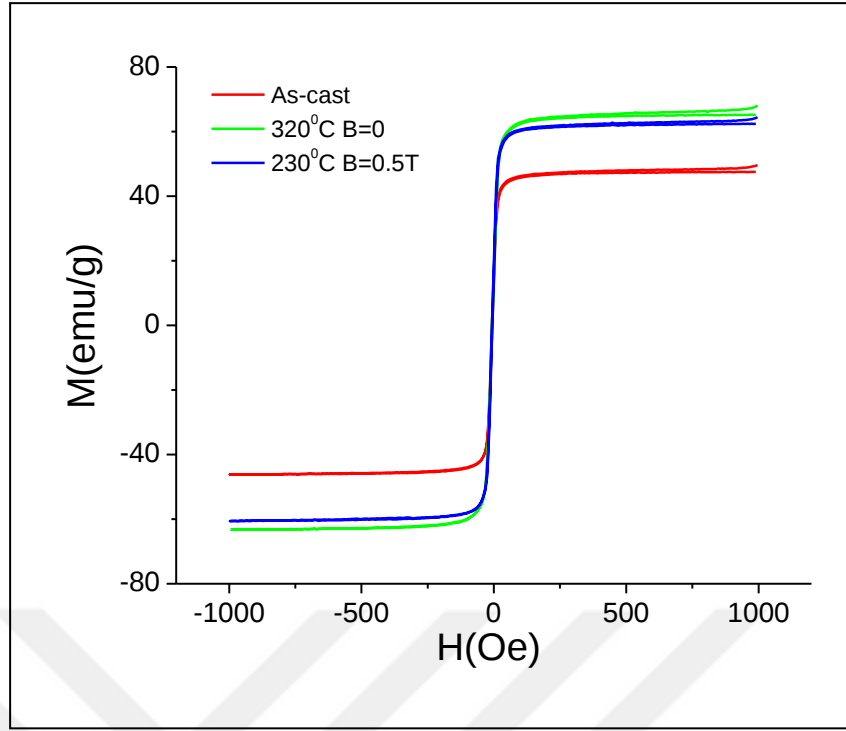
Sensörlerin gürültü seviyelerini gösteren grafik Şekil 4.12’de verilmektedir. Ölçümler aynı sürücü frekans ve genlik değeri kullanılarak yapıldı. 230°C’de 0.5 T manyetik alan altında tavlanan nüve 5 pT/√Hz@1Hz ile en düşük gürültü seviyesine sahiptir. Referans [3]’te yer alan değerlerle aynı mertebededir. 320°C’de tavlanan nüvenin gürültü seviyesi 18 pT/√Hz@1Hz ve as-cast nüvenin gürültü seviyesi 63

$\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}@1\text{Hz}$ olarak belirlendi. Bu tür sensörlerin ölçüm hızını belirlemek için kullanılan $1/f$ faktörü bütün nüveler için aynı ve $0.15 \text{ Hz}'\text{dir}$. Köşe frekansının oldukça küçük olması ve beyaz gürültü bölgesinde gürültü tekdüzeliği bu sensörlerin hızlı veri toplama gerektiren uygulamalarda kullanılmasını sağlayabilir.



Şekil 4.12: Farklı koşullarda işlem gören nüvelere ait gürültü spektrumu.

Sensörlerin performanslarını etkileyen faktörler hakkında fikir edinmek için, sensörlerin M-H eğrileri VSM manyetometre kullanılarak belirlendi. Şekil 4.13'te farklı koşullarda işlem gören nüvelerin M-H eğrileri verilmektedir. Tablo 4.3'te M-H eğrilerinden belirlenen koersif alan (H_c), doyum mıknatıslanması (M_s), kalıcı mıknatıslanma (M_r) gibi manyetik parametreler verilmektedir. Halka nüvelerin hacimlerini hesaplamak zor olduğundan manyetik parametreler emu/gr olarak verilse de çalışılan nüveler arasında karşılaştırma yapmak için yeterli olmaktadır.



Şekil 4.13: Farklı koşullarda işlem gören nüvelere ait M-H eğrileri.

Tablo 4. 3: Nüvelere ait manyetik parametreler.

	H _c (Oe)	M _s (emu/g)	M _r (emu/g)	μ _a (emu/g/Oe)	μ _i (emu/g/Oe)
As-cast	0.8	46.9	1.9	1.7	2.4
230 °C (B=0.5 T)	0.9	61.3	2.6	2.1	2.8
320 °C (B=0 T)	0.7	64.2	1.7	2.1	2.5

M-H ölçümlerinden manyetik parametrelerin doyum mıknatıslanma değeri M_s hariç diğerleri hemen hemen aynı değerdedir. M_s değerleri ısıtılma işleminden sonra artış göstermiştir. Bu sonuç ısıtılma işlemle yapısal kusurların giderildiği anlamına gelmektedir ve ısıtılma işlem gören nüvelerin gürültü seviyelerinde meydana gelen düşüşü de açıklamaktadır.

Sonuç olarak asitle dağlama gibi geleneksel yöntemlerle elde edilen bu tip fluxgate sensörlerin kazıma usulü bir yöntemle elde edilmesi bu sensörlerin seri üretimlerini daha kolay kılmakta, bunun yanı sıra hassasiyet ve gürültü seviyesinin de literatür ile yarışır büyüklükte olması çalışmanın bilimsel ve ticari önemini artırmaktadır.

4.4. Şerit Sargılı Halka Tipi Fluxgate Sensörlerin Optimizasyon Çalışmaları: Nüve, Çap ve Isıl İşlem Etkisi

Fluxgate sensörlerle ilgili yapılan çalışmalarda nüvenin manyetik özelliklerinin sensör performansını belirleyici ana unsurlardan olduğu görülmektedir [13], [82]. Örneğin, doğrusal olmayan mıknatıslanma eğrileri, transformatörlerde, manyetik anahtarlar ve elektromıknatıslarda olduğunun aksine sensörlerin sinyal gücünü artırmak için tercih edilmektedir [11]. Fluxgate sensörlerin birçoğunda çift harmonik sinyaller (çoğunlukla en yüksek şiddete sahip olan 2. harmonik sinyali) kullanılmaktadır. Çünkü çift harmonik sinyaller DC alan ile mükemmel bir doğrusallık göstermektedir. Bu yüzden, B-H eğrilerinin yuvarlaklığı daha fazla 2f sinyal şiddeti sağlamaktadır. Yüksek elektriksel direnç ve düşük manyetik histeresis gösteren malzemeler eddy akım oluşumlarını önleyerek sensörün ısınmasını engellemektedir. Bu sensörlerin performansını belirleyen başka bir etken yapısal homojenliktir. Malzemenin bütünündeki yapısal bozukluklar manyetik domainlerin koordineli hareketini bozarak ek gürültüye neden olabilmektedir [15], [17], [78]. Mıknatıslanma sırasında ferromanyetik malzemelerin boyut veya şekil değişimini yansıtan doyum manyetik büzülme katsayısı λ_s fluxgate sensörlerin gürültü seviyesinin belirlenmesine etki etmektedir. Sonuç olarak en iyi sensör performansı beklenen nüvenin manyetik, elektriksel ve yapısal özellikleri şu şekilde özetlenebilir:

- Çok küçük doyum manyetik büzülme katsayısı ($\lambda_s \rightarrow 0$)
- Yüksek Curie sıcaklığı ($> 200^\circ\text{C}$)
- 0,2 T ile 0,6 T arasında doyum manyetik indüksiyon değeri (B_s)
- Histeresis kare oranı $B_r/B_s = \sim 0.5$ (B_r manyetik kalıntı)
- 0.1 Oe'den daha küçük koersif alan değeri
- Başlangıç geçirgenlik değeri $\mu_i (> 100000)$
- Öz elektriksel direnç ($> 1.0 \mu\Omega\text{m}$)
- Nüve şerit kalınlığı ($< 25 \mu\text{m}$) [18].

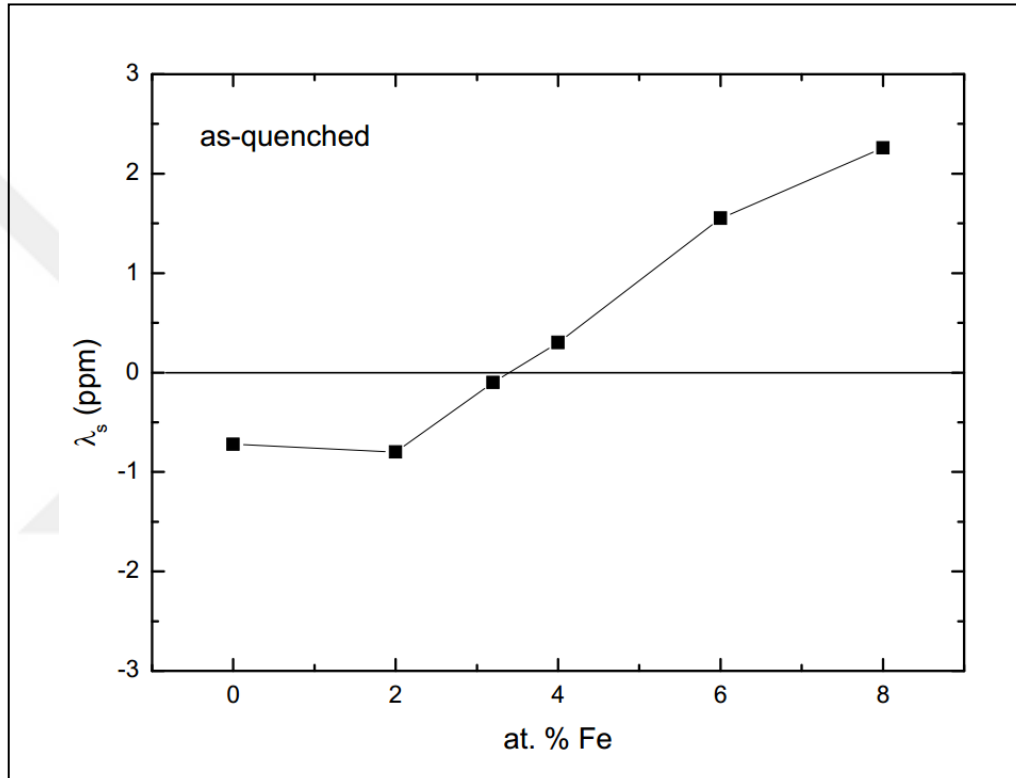
Bu sınırlar içinde uygun nüve malzemesi olarak nikel zengini alaşımlar (permalloy) ve kobalt zengini amorf alaşımlar olası manyetik malzemeler olarak görülmektedir. Bu çalışmada kobalt zengini şerit alaşımların fluxgate sensör

uygunluğu araştırılarak en iyi performansa sahip sensöre ulaşılmaya çalışıldı. Tez çalışmasının bir parçası olduğu TÜBİTAK 113F192 nolu proje kapsamında proje ortağı olan Slovakya Bilimler Akademisi bilim insanları tarafından farklı oranlarda demir içeren $\text{Co}_{71-x}\text{Fe}_x\text{Cr}_7\text{Si}_8\text{B}_{14}$ ($x=0, 2.0, 3.2, 4.0, 6.0$ ve 8.0) şerit alaşımlar hızlı söndürmeli alaşım tekniği ile üretildi. Manyetik ve elektriksel parametreler kontrollü bir şekilde değiştirilerek sensör performansına etki eden ana unsurlar belirlenmeye çalışıldı. Yapısal kusur etkisini incelemek için üretilen şerit nüveler farklı koşullarda ısıtılma işlemine tabi tutuldu.

Birçok uygulama alanı için manyetik alan sensörlerinin bazı şartları sağlaması gerekmektedir. Bunlar başlıca; sıfır dik alan etkisi, sıfır ofset değeri, geniş dinamik ölçek, kararlılık, yüksek hassasiyet ve dayanım olarak gösterilebilir. Literatür bilgisine göre bu şartlar halka tipi geometri ile sağlanabilmektedir. Bu geometriye sahip sensörlerin diğerlerine nazaran avantajlı olduğu durumlar söz konusudur. Diğer taraftan, hassasiyetin önemli olduğu uygulama alanlarında bu geometri yüksek demanyetizasyon faktöründen dolayı tercih edilmezken aynı nedenden dolayı üst limit açısından avantajlı duruma gelmektedir. Uydularda konum ve yönelim belirleme sensörü olarak kullanılması gibi bazı uygulama alanlarında ağırlık ve boyutta kısıtlamalar olabilmektedir [83]. Dolayısıyla sensörden beklenen performansın yanı sıra uygun ağırlık ve boyutla üretilmesi de önem arz etmektedir. Bu nedenle halka çapının sensör performansına etkisi de incelenen araştırma konularından biridir. Aşağıda elde edilen sonuçlar sistematik bir şekilde sunulmaktadır.

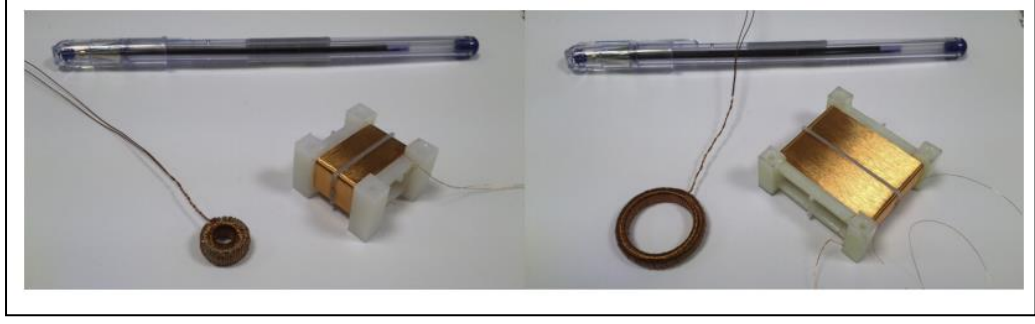
Farklı demir konsantrasyonlarına sahip $\text{Co}_{71-x}\text{Fe}_x\text{Cr}_7\text{Si}_8\text{B}_{14}$ ($x = 0, 2.0, 3.2, 4.0, 6.0$ and 8.0) kobalt temelli alaşımlar 3 mm genişliğinde ve 20 μm kalınlığında düzlem akışlı döküm metodu (Planar Flow Casting Method) ile üretildi [84]. Çalışmada kolaylık olması bakımından Fe oranını temsil eden ve x ile tasvir edilen değerlere göre nüve isimleri adlandırıldı. Örneğin, $\text{Co}_{69}\text{Fe}_2\text{Cr}_7\text{Si}_8\text{B}_{14}$ kompozisyonu için nüve ismi Fe2 olarak tanımlandı. Isıl işlemin sensör performansları üzerindeki etkisini incelemek için üç farklı yol izlendi. İlk yaklaşımda hazırlanan nüveler 1 saat boyunca argon atmosferi altında 320°C’de ısıtılma işlemine tabi tutuldu. Bu nüveler çapları 6, 10, 15 ve 20 mm olan PEEK kasnaklar üzerine 6 kat olarak sarıldı. İkinci yaklaşımda ilk yaklaşımdan elde edilen bilgiler neticesinde sensör performansı, boyutu ve ağırlığından dolayı en uygun halka çapının 15 mm olduğuna karar verildi ve nüveler işlenebilir seramik olan MACOR kasnaklar üzerine 6 kat sarıldı. Sarım

sonrasında 1 saat boyunca argon atmosferi altında 320°C’de ısıtılma tabi tutuldu (MACOR servis sıcaklığı ~1000°C). Son yaklaşımda ise sadece 4 farklı kompozisyona sahip nüve aynı ısıtılma işlemi altında gerdirilerek tavlandı ve 15 mm çaplı MACOR kasnaklar üzerine 6 kat sarıldı. Burada, işlem zorluğundan dolayı nüvelerin seçimi manyetik büzülme değerlerine göre yapıldı. Şekil 4.14’te farklı demir içeriğine sahip alaşımların manyetik büzülme değerlerinin değişimini gösteren grafik verilmektedir [85].



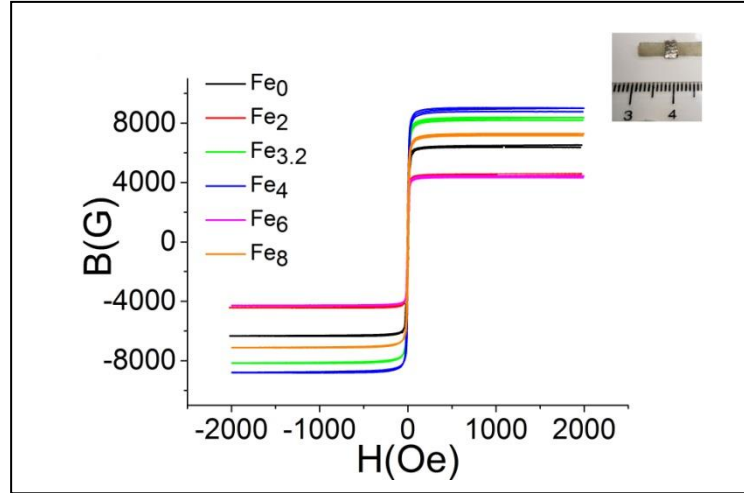
Şekil 4.14: Demir içeriğine bağlı olarak değişen manyetik büzülme değerleri.

Uyarma bobinleri 6, 10, 15 ve 20 mm çapındaki halka nüveler üzerine 200 μ m çaplı bakır tel kullanılarak sırasıyla 85, 84, 130 ve 180 tur sarıldı. Algılama bobinleri 100 μ m çaplı bakır tel kullanılarak aynı çap sırası için 1040, 1050, 1920 ve 2160 tur sarıldı. Uyarma bobinleri indüklenen sinyalin şiddetini artırmak için toroidle yakın temas sağlayacak biçimde tasarlanan algılama bobinlerinin merkezine yerleştirildi. Şekil 4.15’te 6 mm (sol) ve 20 mm (sağ) çapındaki halkalara ait uyarma ve algılama bobin fotoğrafları yer almaktadır.



Şekil 4. 15: 6 mm (sol) ve 20 mm (sağ) çapındaki halka fluxgate sensörlere ait uyarma ve algılama bobinleri.

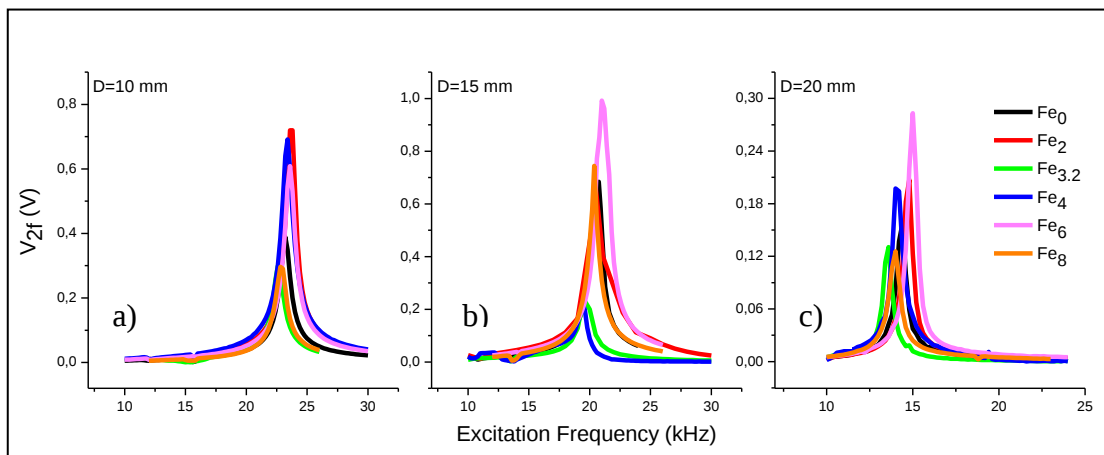
Manyetik parametrelerin sensör performansına etkisini incelemek için VSM manyetometre kullanılarak B-H ölçümleri yapıldı. Şekil 4.16'da nüvelere ait B-H eğrileri verilmektedir. Her bir nüve malzemesinden 6.5 mm uzunluğunda şeritler kesilerek ölçümler yapıldı. Şeritlerin genişliği 3 mm ve kalınlığı 20 μ m olduğundan demanyetizasyon etkisinin hemen hemen sıfır olduğu söylenebilir. Ölçüm sonuçlarından demir oranının doyum manyetik indüksiyon B_s değerini etkilediği fakat manyetik geçirgenlik μ ve koersif alan H_c değerleri üzerinde çok fazla etkili olmadığı görülmektedir. Fe4 nüvesi en yüksek B_s değeri olan 0.8 T'ye sahipken en düşük B_s değerleri 0.4-0.5 T arasında değerlere sahip olan Fe2 ve Fe6 nüvelerinde gözlemlendi. Bu ölçümlerden görüldüğü üzere birkaç Oe gibi çok küçük manyetik alanla nüvelerin doyurulması mümkün olmaktadır. Ortalama göreceli manyetik geçirgenlik değeri olan μ_a (sürücü sinyalin tepe değerleri olan ± 6 Oe arasındaki göreceli manyetik geçirgenlik değerlerinin ortalaması) B-H eğrilerinin eğimlerinden hesaplandı ve tüm nüvelerde yaklaşık aynı büyüklükte olduğu görüldü. Örneğin, Fe3.2, Fe4 ve Fe6 nüveleri için μ_a değerleri sırası ile 550, 540 ve 330 olarak belirlendi.



Şekil 4.16: 6.5 mm uzunluğundaki şeritlere ait B-H eğrileri.

4.4.1. PEEK Kasnaklı Halka Tipi Fluxgate Sensörler

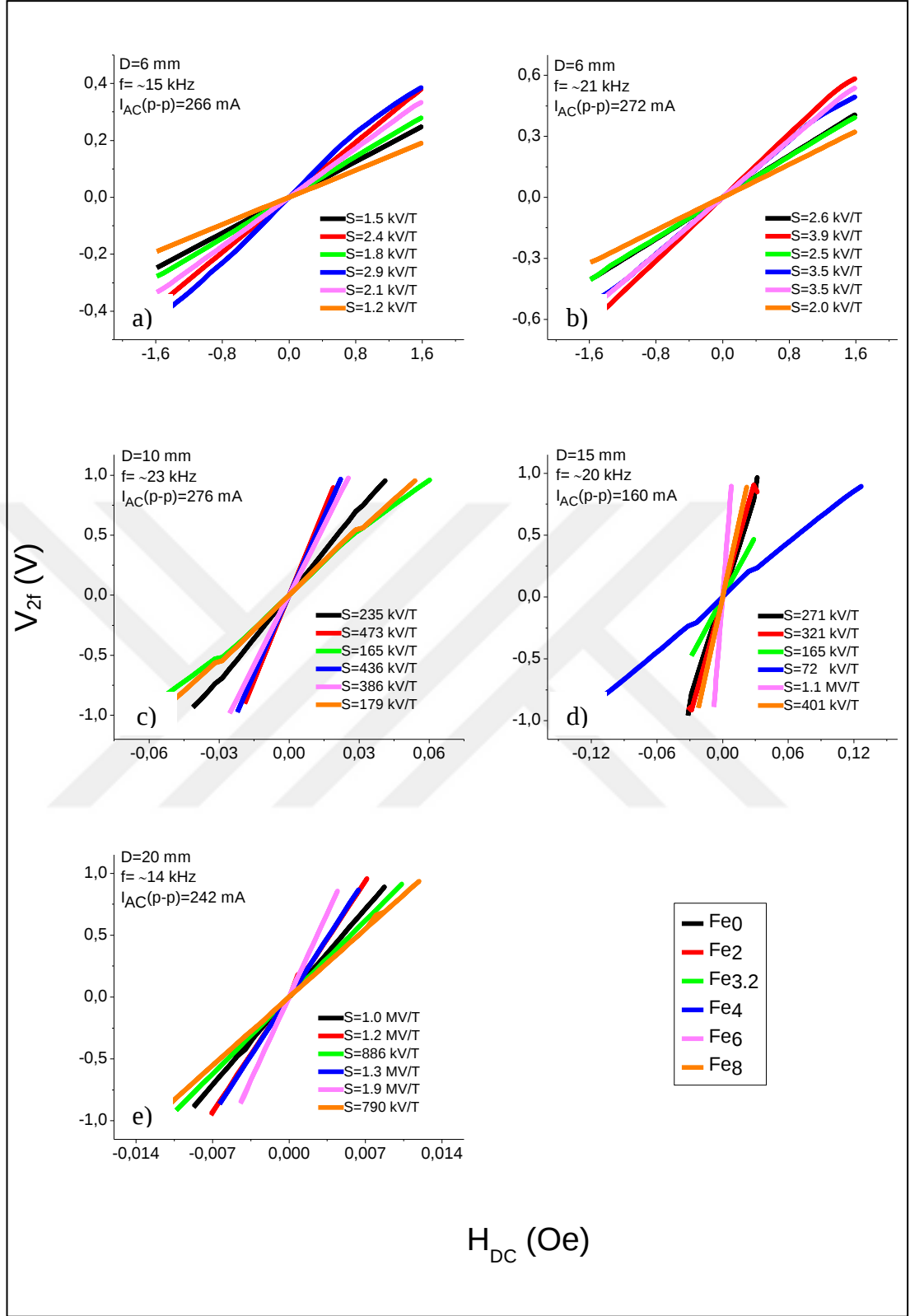
Çalışmanın bu kısmında, nüveler 320°C’de argon atmosferinde 1 saat tavlandı ve 6, 10, 15 ve 20 mm çaplı PEEK kasnaklar üzerine 6 kat sarıldı. En uygun uyarma(sürücü) frekansı ve genliğini bulmak için sensörler sabit bir DC alan içine yerleştirildi. AC alan genliği nüveleri doyuracak büyüklükte olacak şekilde uyarma frekansı 8 kHz ile 30 kHz arasında değiştirilerek 2. harmonik sinyal verileri toplandı. Şekil 4.17 farklı çaplardaki halka nüveli sensörlere ait 2. harmonik sinyalinin uyarma frekansına bağlı değişim grafikleri yer almaktadır.



Şekil 4.17: Farklı demir içeriğine sahip olan 10, 15 ve 20 mm çapındaki halka nüveli sensörlerin uyarma frekansına bağlı olarak 2. harmonik sinyalinin değişimi.

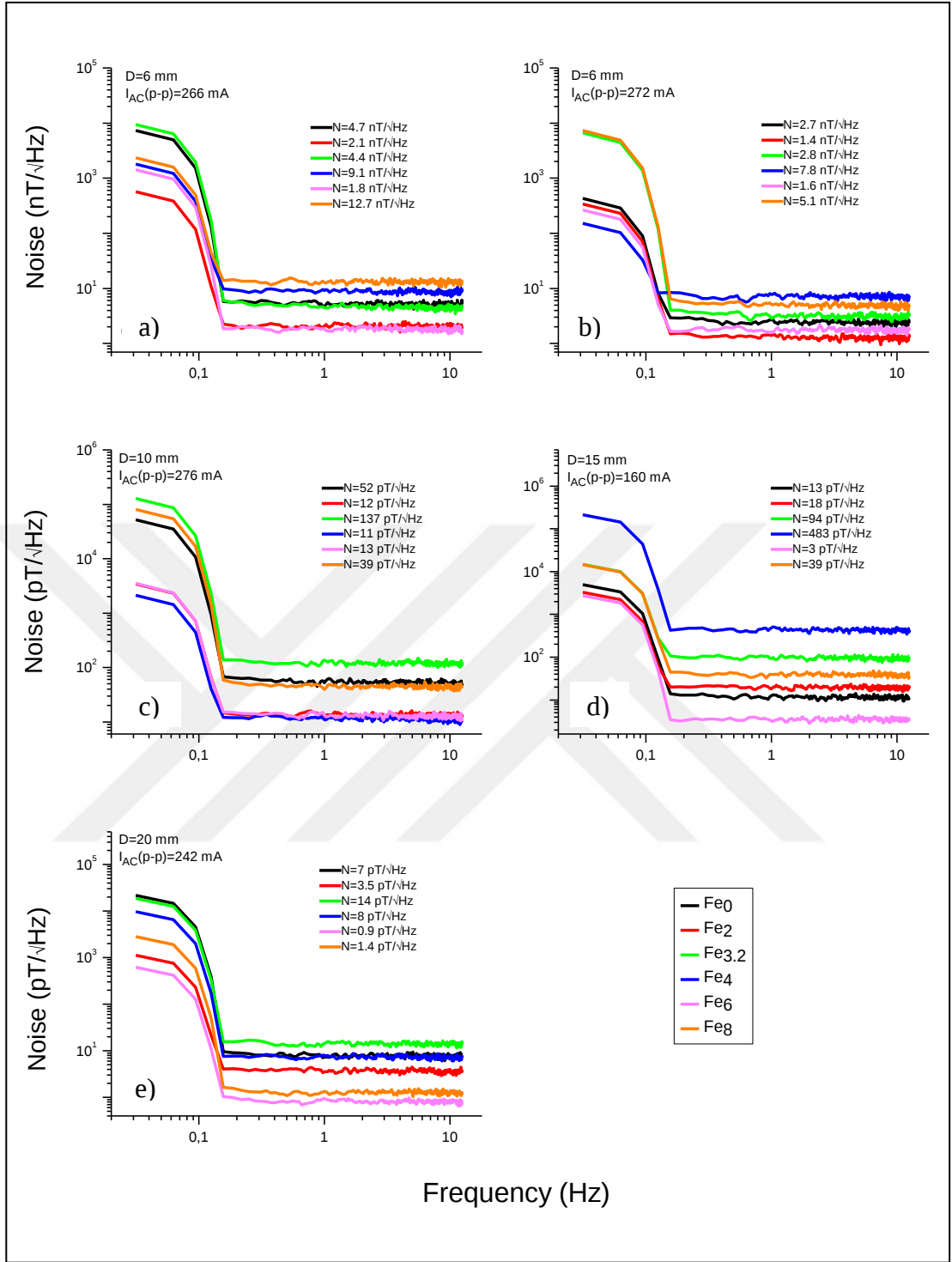
Grafiklerden görüldüğü üzere, 2. harmonik sinyali frekansın belirli değerlerinde maksimum değere sahiptir. Frekansın büyük olduğu değerlerde eddy akımlarından kaynaklanan kayıpların artması ve manyetik geçirgenliğin azalması sebebiyle en uygun frekansın 10-25 kHz aralığında olması istenen özellikler arasındaydı. Öyle ki yapılan ölçümlerden elde edilen sonuçlar hedeflenen değerlere ulaşıldığını göstermektedir. 10, 15 ve 20 mm çapındaki halka nüveli sensörler için elde edilen değerler sırasıyla ~23, ~20 ve ~14 kHz civarındadır. Demir içeriğine bağlı olarak en uygun sürücü frekansında küçük sapmalar gözlemlendi. Sapmaların sebebi nüvelerin manyetik geçirgenliklerindeki küçükmte olsa var olan değişim olabilir. Çünkü manyetik geçirgenlik rezonanstan sorumlu olan toroidal sargılı uyarma bobinlerinin indüktansını belirleyen temel fiziksel parametredir.

Uygulanan DC manyetik alanla 2. harmonik sinyalinin değişim grafiği Şekil 4.18'de verilmektedir. 6 mm çapında halka nüveli sensörün sinyal şiddeti 30 kHz civarında olmasına rağmen sensör kararlılığını etkileyecek olan eddy akımlarından kaçınmak için daha düşük frekanslarda çalışılmasının uygun olacağı düşüncesiyle ~15 ve ~21 kHz'de ölçümler yapıldı (Şekil 4.18.a ve Şekil 4.18.b). Şekil 4.18.a ve Şekil 4.18.b'den sensörün dinamik üst ölçüm limitinin 1.6 Oe'ten büyük olduğu görülmektedir. Diğer sensörlerin üst ölçüm limitlerinin ise kullanılan lock-in yükseltecin 1 Volt kısıtından dolayı kesin olarak belirlenemediği görülmektedir. Şekil 10'da tüm sensörlerin uygulanan DC manyetik alanla 2. harmonik sinyal değişiminin mükemmel doğrusallıkta olduğu görülmektedir. 6 mm çapındaki halka nüveli sensör grubunda DC alan hassasiyetinin (ölçek faktörü) Fe2, Fe4 ve Fe6 da iyi olduğu görülmektedir. Nüve çapı 10 mm'ye çıkarıldığında DC alan hassasiyetinin 10 kat arttığı görülmektedir (Şekil 4.18.c). Bu sensör grubunda en yüksek ölçek faktörü 473 kV/T ile Fe2 nüvesine aittir. Halka çapının daha da artırılmasıyla ölçek faktörünün büyüklüğü bakımından Fe6 nüvesinin ön plana çıktığı görülmektedir. Ölçek faktörü 15 mm çaplı halka nüve için 1.1 MV/T iken 20 mm çaplı halka nüve için 1.9 MV/T elde edilmiştir.



Şekil 4.18: a) 6 mm, b) 6 mm, c) 10 mm, d) 15 mm ve e) 20 mm halka çapındaki sensörlere ait DC alan hassasiyet grafikleri. Grafiklerde yer alan S parametresi ilgili sensörlerin hassasiyet (ölçek faktörü) değerleridir.

Gürültü ölçümleri için uyarma sinyal frekansı ve genliği hassasiyet ölçümlerinde kullanılan değerler ile aynıdır. Tüm sensörlere ait gürültü spektrumları Şekil 4.19'da verilmektedir. Gürültü seviyesi bakımından Fe2 ve Fe6 nüveleri ön plana çıkmaktadır. 6 mm çaplı halka nüveli sensörde iki nüve için gürültü seviyesi 1-2 nT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ @ 1 Hz'dir. 10 mm çaplı halka nüveli sensörde bu iki nüve için 11-13 pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ @ 1 Hz değerine düşmektedir. 15 mm çaplı halka nüveli sensörler arasında Fe6 nüvesi 3 pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ @ 1 Hz ile en düşük gürültü seviyesine sahiptir. Bu gürültü seviyesi literatürde [86]–[88] yer alan bu boyuttaki sensörlerle yarışabilir düzeydedir. Halka çapının 20 mm'ye çıkarılması ile gürültü seviyesi ~ 1 pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ @ 1 Hz gibi oldukça düşük bir değere ulaşmaktadır. Elde edilen ölçüm sonuçlarından halka çapının artmasıyla gürültü seviyesinin düştüğü görülmektedir. Bu davranışın sebebinin çapın azalmasıyla nüve üzerinde oluşan stresin artması gösterilebilir.



Şekil 4.19: a) 6 mm, b) 6 mm, c) 10 mm, d) 15 mm ve e) 20 mm halka çapındaki sensörlere ait gürültü spektrumları. Grafiklerde yer alan N parametresi ilgili sensörlerin gürültü seviyelerini vermektedir.

Algılama bobininde indüklenen sinyal ile ölçülmek istenen dış DC alan arasında bir dönüşüm yapabilmek için sensörlerin sıfır ofset değerlerinin bilinmesi gerekir. Bu amaç doğrultusunda bazı sensörler mu-metal çember içerisine

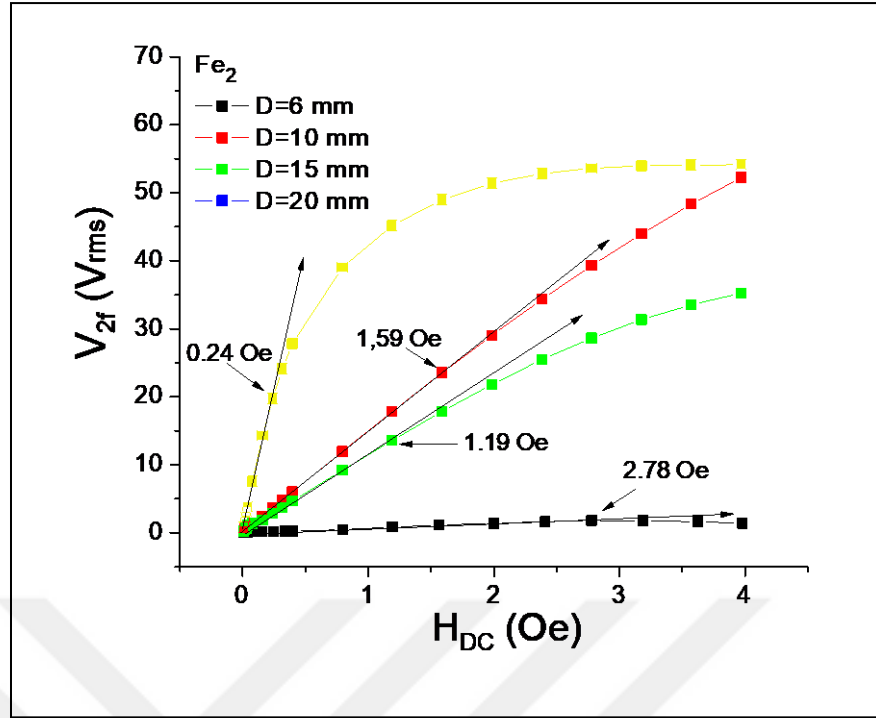
yerleştirilerek Lock-in yükselteçten gerilim değerleri okundu. Bu değerler, ölçek faktörleri (hassasiyet) kullanılarak manyetik alan değerlerine dönüştürüldü. Tablo 4.4'te 15 ve 20 mm çaplı halka nüveli sensörlerin sıfır ofset değerleri verilmektedir. Bu durumda sıcaklıktaki değişimler gibi diğer etkenleri ihmal edersek dış DC alan aşağıdaki formülle belirlenebilir.

$$H_{DC} = \frac{1}{\text{hassasiyet}} \times V_{2f} + H_{offset} \quad (4.2)$$

Tablo 4.4: 15 mm ve 20 mm çaplı halka sensörler için sıfır ofset değerler.

D15	H _{offset} (nT)	D20	H _{offset} (nT)
Fe0	43.2	Fe0	114
Fe2	42.7	Fe2	93.5
Fe3.2	166.8	Fe3.2	142.1
Fe4	9298	Fe4	444.8
Fe6	22	Fe6	36.8
Fe8	19.7	Fe8	21.5

Uygulamalar açısından tasarlanan sensörlerin üst ölçüm limit kabiliyeti hassasiyet sınırı kadar büyük önem taşımaktadır. Örneğin, üst ölçüm limiti 0.6 Oe'ten küçük olan bir sensör dünyanın manyetik aktivitelerini izlemek için kullanılamaz. Daha önce belirttiğimiz gibi, Lock-in yükseltecin 1 Volt kısıtından dolayı halka nüve çapları 10, 15 ve 20 mm olan sensörlerin üst limitleri belirlenemedi. Bu amaç doğrultusunda üst limit ölçümleri Fe2 nüvesi seçilerek Agilent marka 34401A dijital multimetre kullanılarak yapıldı. Şekil 4.20'de geniş DC alan aralığında 2. harmonik sinyalinin değişimi verilmektedir. Bu eğrilerde doğrusallıktan sapmanın başladığı noktalar sensörün üst limiti olarak kabul edildi. Bu bilgiler ışığında 6, 10, 15 ve 20 mm çaplı halka nüveli sensörlerin üst limitleri sırasıyla ~2.8, ~1.6, ~1.2 ve ~0.2 Oe olarak belirlendi.



Şekil 4.20: 6, 10, 15 ve 20 mm çaplı sensörler için Fe2 nüvesine ait üst limit belirleme ölçüm grafikleri.

Demanyetizasyon faktörünün (D) halka çapının artmasıyla azalması ($D \sim 1/d^2$) elde edilen sonuçların beklentileri karşıladığını göstermektedir. $H_{gerçek} = H_{uygulan} - DM$ (M =manyetizasyon) denklemi ışığında, nüve boyunca toplam manyetik alan demanyetizasyon faktöründen dolayı azalacak ve yüksek demanyetizasyon faktörüne sahip olan nüvenin mıknatıslanma sürecini erteleyecektir. Sonuç olarak, büyük demagnetizasyon faktörüne sahip nüvelerde minimum algılanabilecek alanlar ve üst limitler yüksek alanlara doğru kaymaktadır. Bu ölçümün en önemli sonucu çalışılan sensör grubunda en iyi hassasiyet ve gürültü seviyesine sahip 20 mm çaplı halka nüveli sensörün üst limitinin ~ 0.2 Oe olmasıdır. Dünya alanından bu derece küçük üst limit değeri açık alan uygulama potansiyelini kısıtlamaktadır. Dolayısıyla açık alan uygulamalarıyla ilgili ağırlık ve hacim gibi kısıtlamalar da göz önünde bulundurularak kalan üç sensör grubundan uygun sensör çapı seçilebilir.

$V_{2f} - H_{DC}$ eğrilerinden anlaşıldığı üzere doğrusal bölge sensörün dinamik ölçüm aralığını vermektedir. Bu bölgede çizilen en uygun eğri tüm ölçüm noktalarının tam merkezinden geçmez fakat tüm ölçüm noktalarına oldukça yakın noktadan geçer. Yakınlığın derecesi sensör terminolojisinde ölçek hatası olarak adlandırılır ve ölçümün doğruluğu hakkında bilgi verir. Dolayısıyla sensörün bu özelliğinin de

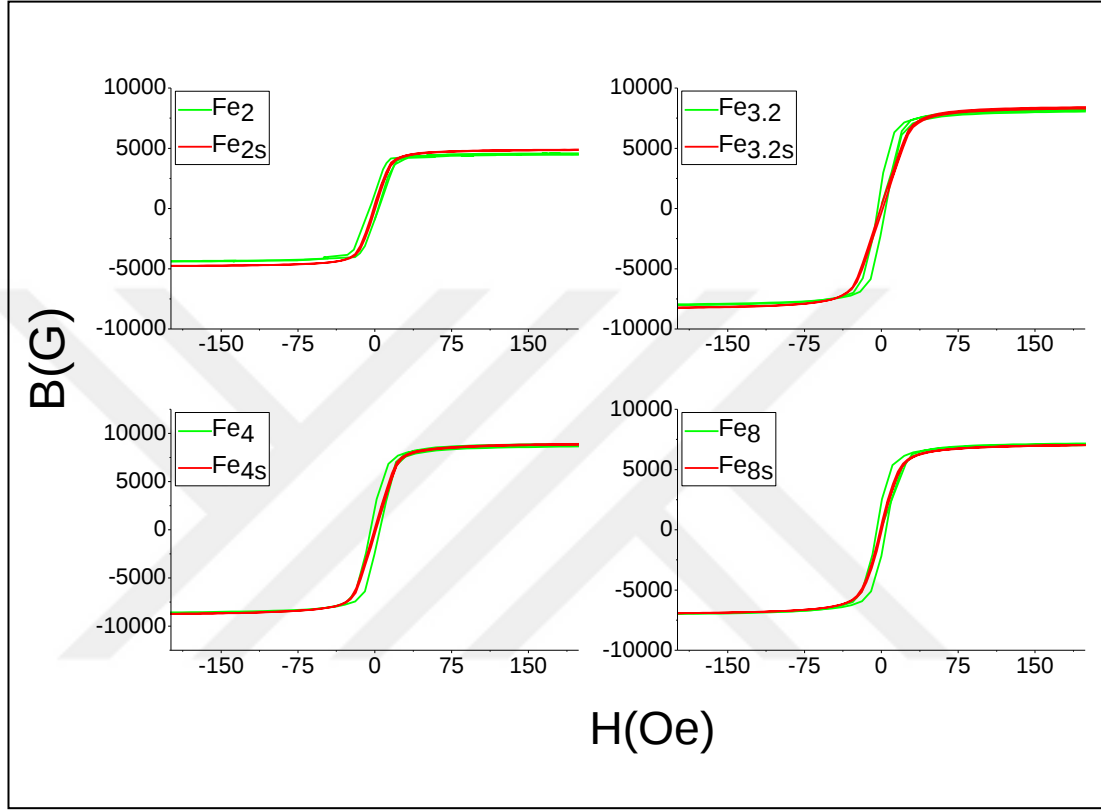
belirlenmesi gerekmektedir. 6, 10, 15 ve 20 mm çaplı halka nüveli sensörlerin ölçek hataları sırası ile ± 0.10 %, ± 0.10 %, ± 0.01 % and ± 0.30 % olarak bulundu. Birçok ticari cihazda ölçek hatası ± 0.06 - 0.1 % arasında değer almaktadır [89], [90]. Dolayısıyla 15 mm çaplı halka nüveli sensörün ölçek hatası kayda değer büyüklüktedir.

Literatürdeki bazı çalışmalarda fluxgate sensörlerde ana gürültü kaynağı olarak nüve malzemesinin manyetik büzülme katsayısı gösterilse de bu bölümde verilen deneysel sonuçlardan başka bir faktör olduğu görülüyor. Fe2 ve Fe6 nüvelerinde en düşük gürültü seviyesinin gözlenmesi bu fikri doğrulamaktadır. Bu nüvelerin manyetik büzülme katsayıları sırasıyla -0.78 ve 1.42 ppm'dir. Normalde Fe3.2 nüvesinin hemen hemen sıfır olan manyetik büzülme katsayısından dolayı en düşük gürültü değerine sahip olması gerekirken yüksek bir değer elde edildi. Şekil 4.16'da yer alan B-H eğrileri dikkatli bir şekilde incelendiğinde, Fe2 ve Fe6 nüvelerinin ortak karakteristik özelliği ~ 0.4 T olan düşük manyetik doyum indüksiyon B_s değeridir. Çalışılan sensör grubunda en düşük B_s değeri bu iki nüveye aittir. Ayrıca göreceli geçirgenlik ve koersivite gibi diğer manyetik özellikleri de hemen hemen aynıdır.

4.4.2. MACOR Kasnaklı Halka Tipi Fluxgate Sensörler

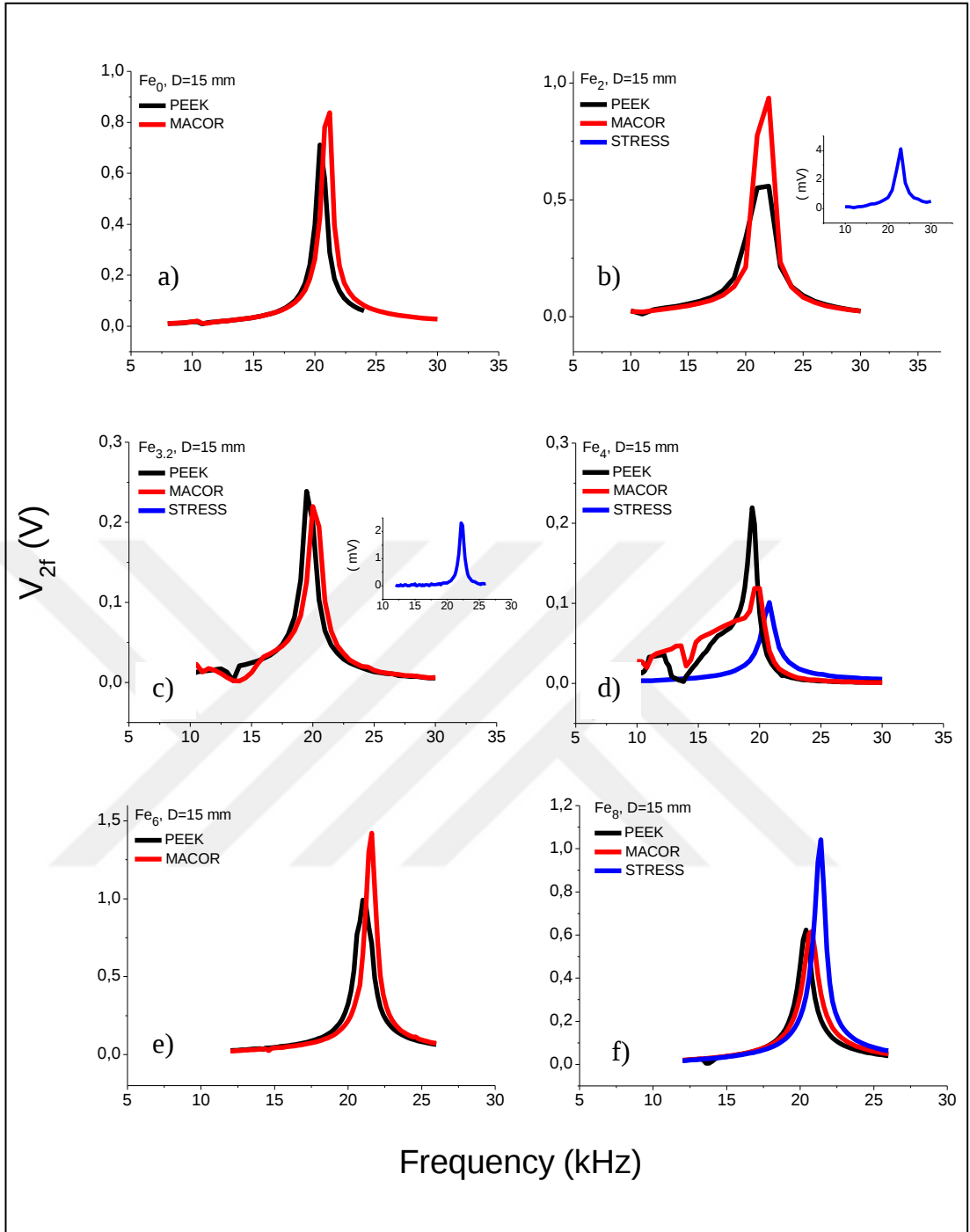
Önceki bölümde hassasiyet, gürültü ve dinamik ölçüm aralığı açısından bakıldığında en uygun nüve çapının 15 mm olduğu ve daha geniş bir uygulama alanı bulacağı belirlenmişti. Bu sebeple sensör iyileştirme çalışmaları bu geometri üzerinden yapıldı. Sensör nüvesi olarak Fe içerikli nüveler kullanıldı. Önceki bölümde tanımlanandan farklı ısıtım işlem rotası uygulandı. İlk çalışmada, önce Macor kasnak etrafına as-cast nüveler sarıldı, sonra halka nüveler 320°C 'de 1 saat argon atmosferinde ısıtım işlem gördü. Bu sayede sarım esnasında meydana gelebilecek olası gerilmelerin önüne geçilmesi amaçlandı. İkinci çalışmada, sensör grubu içerisinden doyum manyetik büzülme değerleri dikkate alınarak dört farklı Fe içeriğine sahip nüve seçildi. Gerilme altında ve gerilme olmadan ısıtım işlem uygulandı. Şekil 4.21'de gerilme altında ve gerilme olmadan ısıtım işlem uygulanan dört nüve (Fe2, Fe3.2, Fe4 ve Fe8) için histeresis döngüleri verilmektedir. Gerilme altında ısıtım işlem uygulanan tüm nüvelerde koersivite değerleri dikkate değer bir şekilde azaldı. Diğer taraftan manyetik geçirgenlik değerleri Fe içeriğine bağlı olarak farklı değişim gösterdi. Fe2

nüvesinin aksine, gerilme altında ısıtıl işleminden sonra Fe_{3.2}, Fe₄ ve Fe₈ nüvelerinin manyetik geçirgenlik değeri azaldı. İlginç bir şekilde gerilme altında ısıtıl işlem uygulanan nüvelerden manyetik büzölme değeri pozitif ya da sıfıra yakın olan nüvelerin manyetik geçirgenlikleri azalırken, negatif olanların manyetik büzölme katsayıları artmaktadır.

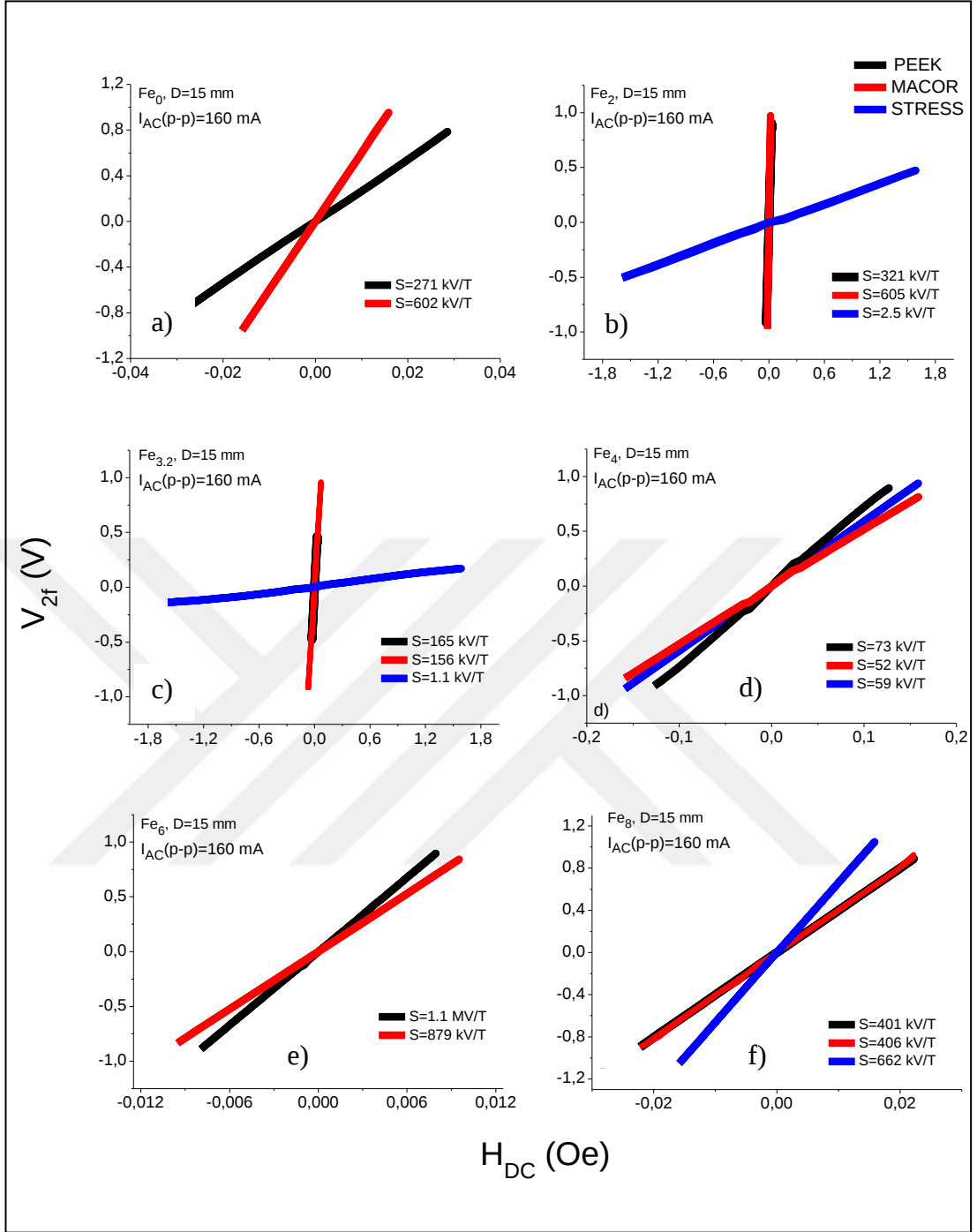


Şekil 4.21: Gerilme altında ısıtıl işlemin histeresis eğrisine etkisi (s harfi gerilme altında ısıtıl işlem gören nüveleri temsil etmektedir.)

Şekil 4.22’de farklı koşullarda tavlanan nüvelerin uyarma frekansına bağlı olarak 2. harmonik sinyalinin değişimi verilmektedir. PEEK kullanılarak hazırlanan nüveler sadece karşılaştırma yapmak için verilmektedir. Şekil 4.22’de görüldüğü üzere en uygun frekans değeri 19 ve 24 kHz arasında yer almaktadır. Ayrıca ısıtıl işlemin nüvelerin DC alan hassasiyetine etkisi incelendi (Şekil 4.23). MACOR üzerine sarıldıktan sonra ısıtıl işlem gören nüvelerde beklenildiği gibi hassasiyet değeri bir etki gözlenmedi. Diğer taraftan, literatürde [91], [92] referanslarında verilen bilgilerin aksine gerilme altında ısıtıl işlem uygulanması sensör hassasiyetinin kötüleşmesine neden olmaktadır. Gerilme altında ısıtıl işlemin sadece Fe₈ nüvesinde etkili olduğu ve hassasiyetinin %50 civarında iyileştiği gözlemlendi.

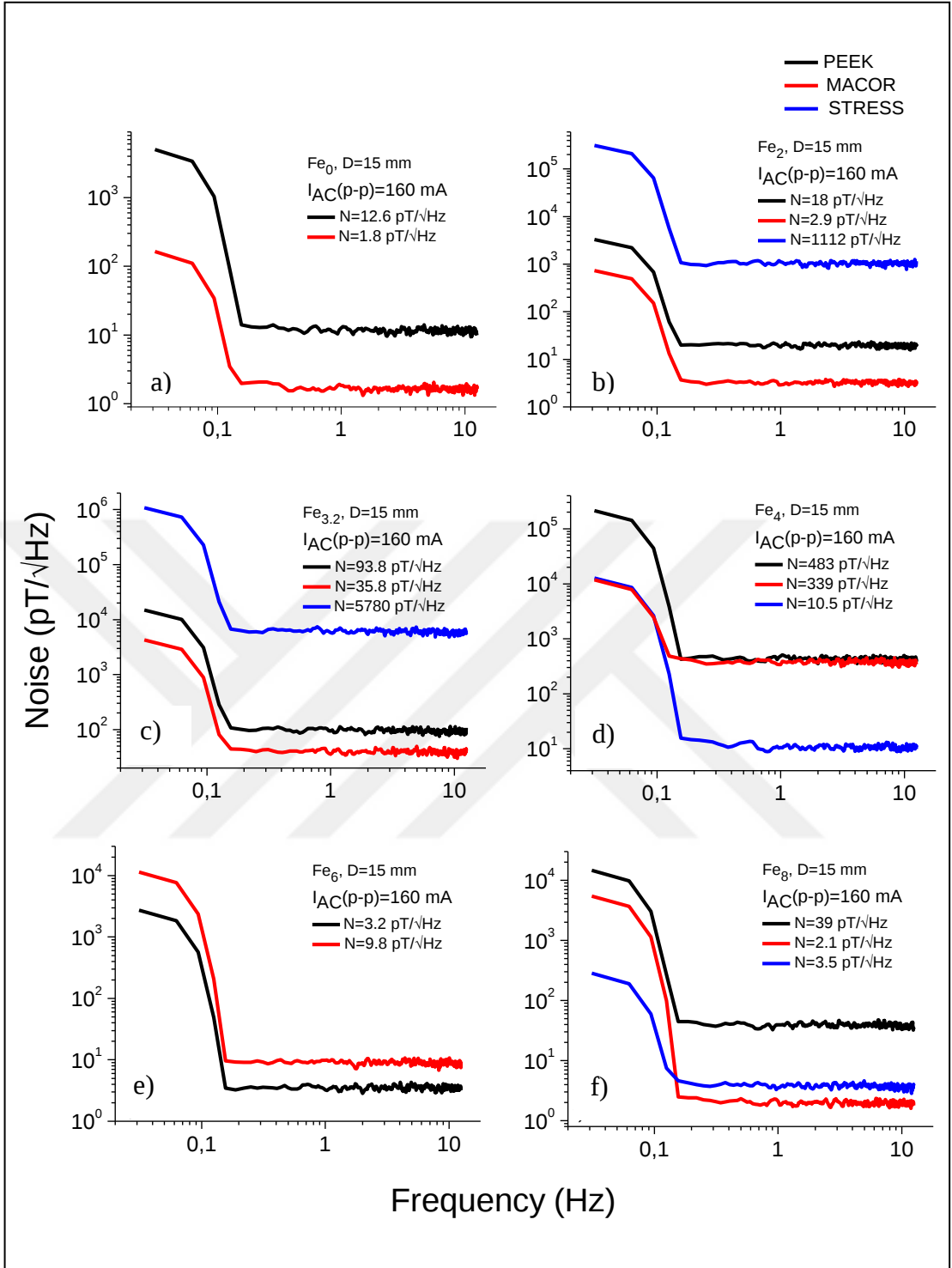


Şekil 4.22: Farklı ısıtım altında tavlanan farklı demir içeriğine sahip sensörlerin uyarma frekansına bağlı olarak 2. harmonik sinyalinin değişimi. İçindekiler görüntü kalitesini düşürmemek için ayrı çizilmiştir.



Şekil 4.23: Farklı ısıtım altında tavlanan farklı demir içeriğine sahip sensörlerin uygulanan DC alan hassasiyet grafikleri. Grafiklerde yer alan S parametresi ilgili sensörlerin hassasiyet (ölçek faktörü) değerleridir.

Hassasiyet değerlerinde görülen beklenmedik sonuçlara rağmen, sensörlerin gürültü analizi sonuçları hemen hemen beklentileri karşılamaktadır. 0-12.5 Hz frekans aralığında yapılan gürültü analizlerinde hem gerilme altında hem de MACOR etrafına sarıldıktan sonra uygulanan ısıl işlemin etkisi memnuniyet vericidir. Fakat ısıl işlemin etkisi demir içeriğine bağlı olarak değişim göstermektedir. Örneğin Fe8 nüvesinde gerilme altında uygulanan ısıl işlem gürültü seviyesini $3.5 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ @1Hz seviyesine düşürmektedir. Diğer taraftan Fe2 nüvesi için aynı ısıl işlem gürültü seviyesini $1.1 \text{ nT}/\sqrt{\text{Hz}}$ @1Hz seviyesine çıkarmaktadır. En iyi gürültü seviyelerine MACOR etrafına sarıldıktan sonra ısıl işlem gören sensörlerde ulaşıldı. Fe0, Fe2 ve Fe8 nüveleri için elde edilen gürültü seviyeleri sırasıyla ~ 1.8 , 2.9 and $2.1 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ @1Hz'dir. şekil 4.24'te sensörlere ait gürültü spektrumları verilmektedir.



Şekil 4. 24: Farklı ısıtım işlem altında tavlanan farklı demir içeriğine sahip sensörlerin gürültü spektrumları. Grafiklerde yer alan N parametresi ilgili sensörlerin gürültü seviyeleridir.

4.5. -50°C - + 85°C Sıcaklık Aralığında Halka Tipi Fluxgate Sensörlerin Algılama Özellikleri

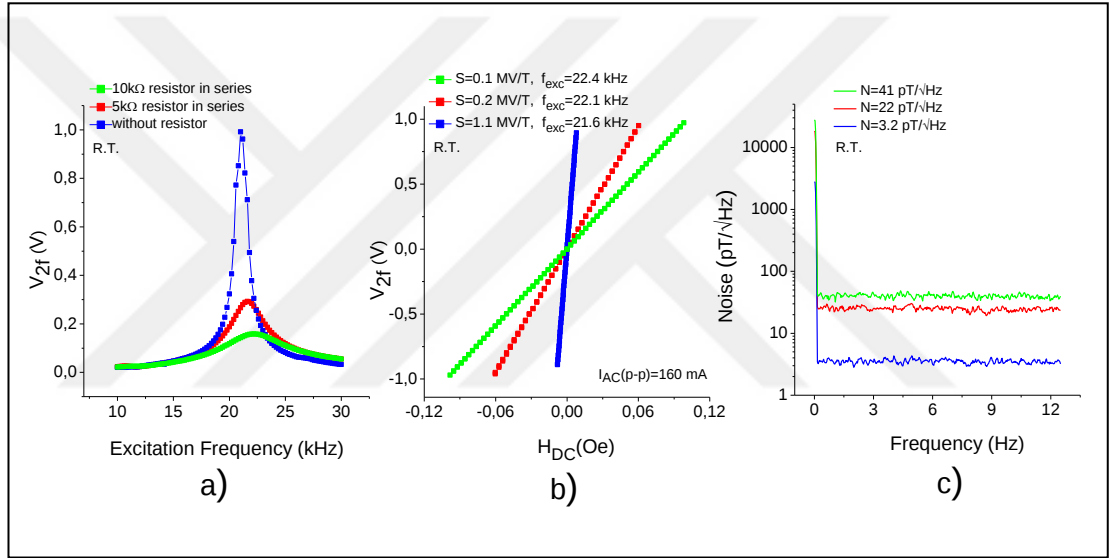
Sensörlerin uzun süre kararlılığını koruması için hangi çevresel faktörlerden ne kadar etkilendiğinin önceden belirlenmesi gerekir. Sıcaklık bunlardan bir tanesidir ve Fluxgate sensörler farklı sebeplerden dolayı sıcaklıktan etkilenmektedir. Bu sebepleri kısaca özetlemek gerekirse; ferromanyetik nüveyle taşıyıcı gövde arasındaki termal uyumsuzluktan dolayı nüve üzerinde oluşacak mekanik gerilme, uyarma bobini sarım geometrisinin değişimi ve dolayısıyla sarımların direncindeki değişiklikler, ferromanyetik nüveyi doyuma ulaştırmak için sürülen akımdaki değişiklikler ve nüvenin manyetik ve yapısal özelliklerinin değişimidir [93]. Bunlar arasında baskın olan mekanizma nüvenin manyetik ve yapısal özelliklerinin sıcaklıkla değişimidir ki bu da istenmeyen en önemli şartlar arasındadır, çünkü sıcaklık ve uygulanan alanın manyetik nüveye uyguladığı gerilim (stres) sensörün gürültü ve ölçek faktörünü kötü şekilde etkilemektedir. Çalışmanın bu kısmında geniş sıcaklık aralığında (-50°C-+85°C) araştırma yapmak için Metglas2714A, Vitrovac6025X ve farklı Fe içeriğine sahip Co tabanlı $\text{Co}_{71-x}\text{Fe}_x\text{Cr}_7\text{Si}_8\text{B}_{14}$ ($x = 0, 2.0, 3.2, 4.0, 6.0$ ve 8.0) serisinden seçilen üst düzey performansın elde edildiği $\text{Co}_{69}\text{Fe}_2\text{Cr}_7\text{Si}_8\text{B}_{14}$ ve $\text{Co}_{65}\text{Fe}_6\text{Cr}_7\text{Si}_8\text{B}_{14}$ nüveleri seçildi [94]. Halka geometride dört nüveden hazırlanan sensörler nüvelerin sensörlerin sıcaklık bağımlılığı üzerindeki etkisini anlamak için aynı uyarma ve algılama bobin sisteminde karakterize edildi. Nüveler farklı uygulama alanları için oldukça uygun görünen ağırlığı, boyutu ve algılama performansı da göz önünde bulundurularak 15 mm çaplı MACOR halka kasnaklar üzerine sarıldı. Kasnakla nüve arasında termal genleşmeden kaynaklanacak uyumsuzlukları ortadan kaldırmak için kasnak materyali olarak MACOR seçildi. Nüveler kasnak etrafına sarılı halde 320°C sıcaklıkta 1 saat boyunca Argon atmosferinde tavlandı. Uyarma bobinleri 200µm çaplı bakır tel ile halkaların etrafına 130 tur toroidal olarak sarıldı. Uyarma bobinleri tamamlanan halkalar indüklenen sinyal şiddetini artırmak için toroidle yakın temas sağlayacak şekilde özel olarak hazırlanan algılama bobin merkezine yerleştirildi. Algılama bobini 100µm çaplı bakır telle 1920 tur sarıldı.

Termal kabin içine referans bobin yerleştirilerek hassasiyet ölçümleri, üçlü mu-metal çember yerleştirilerek gürültü analizleri yapıldı. Hassasiyet ölçümleri -50°C - +85°C arasında 10°C'lik aralıklarla yapıldı. Gürültü analizleri ise sadece -50°C ve +85°C'de yapıldı.

Sensör performansını geliştirmek için yaptığımız bir önceki çalışmada $\sim 1\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ @1 Hz gürültü seviyesi ve 1-2 MV/T hassasiyet elde etmiştik [94]. Bu çalışma ile literatüre önemli bir katkı sağlamıştık. Öte yandan, bu sensörlerin laboratuvar ortamında ve sıcaklığın kontrol altında olduğu ortamlarda doğru ölçümler yapabildiğini söylemekteyiz. Fakat ortam şartlarının zorlu olduğu ve kontrolümüz dışında olan sıcaklık değişimlerinde (örneğin günlük sıcaklık değişimi 135°C 'yi bulan uydu platformunda) sensörlerin tasarımlarında ciddi değişiklikler gerekebilir.

Karakterizasyon çalışmalarında öncelikle uygun çalışma frekansını belirlemek gerekir. Bunun için 4.3. ve 4.4. başlıkları altında yer alan çalışmalardaki uyarma sinyali ile V_{2f} değişim grafiklerine bakıldığında $2f$ sinyalinin maksimum noktasının elektronikte yüksek kalite bant geçiren filtreye benzer oldukça dar bir frekans bandında olduğu görülmektedir. Bu, uyarma sinyalinde meydana gelecek 5-10 Hz'lik bir kaymada bile algılama bobininin elektriksel direnç ve indüktansında değişime sebep olacağından sensörün çıkış sinyalinde ciddi değişikliklere yol açacağı anlamına gelir. Bu yüzden, sensörlerin hassasiyetinde oldukça iyi sonuçlar elde edilse bile, f - V_{2f} grafiklerinde görülen dar frekans aralığının genişletilmesi gerekir. Bu durumda çevresel faktörlere karşı sensör kararlılığı sağlanabilir. Bu amaç doğrultusunda, Fe6 kodlu sensörün algılama bobinine $5\text{k}\Omega$ ve $10\text{k}\Omega$ 'luk iki farklı değerde direnç seri bağlandı. Uyarma bobinine 10 kHz ile 30 kHz arasında nüveyi doyuma ulaştıracak büyüklükte sabit AC akım sürüldü. NMR manyetometre aracılığıyla kalibre edilmiş solenoid tarafından oluşturulan sabit bir DC alanı, ikinci harmonik sinyalin üretilmesi için sensörün algılama yönüne paralel olarak uygulandı. SR830 Lock-in yükselteç ile $2f$ sinyal verileri okundu. Şekil 4.25.a'da uyarma frekansına bağlı olarak $2f$ sinyalinin dirençsiz ve direnç bağlıyken nasıl değiştiğini gösteren eğri verilmektedir. Şekil 4.25.a'dan direnç yokken belirli bir uyarma frekansında keskin bir pik olduğu görülmektedir. Şöyle ki 10 Hz'lik bir kaymada $2f$ sinyalinin pik değerinde %10'luk bir azalma meydana gelmektedir. $5\text{k}\Omega$ bağlıyken frekans bağımlılığının önemli ölçüde azaldığı görülmektedir ve $2f$ sinyalinin şiddetinde %10'luk bir azalmanın olabilmesi için en az 100 Hz'lik bir kayma olması gerekmektedir. Bu durumda, en uygun frekans değeri dirençsiz olana göre 500 Hz daha büyüktür. $10\text{k}\Omega$ bağlı durumda ise frekans bağımlılığı minimize edilse de $2f$ sinyalinin şiddeti de oldukça azalmaktadır. Burada dikkate alınması gereken nokta ölçek faktörü ve frekans bağımlılığının hedeflenen uygulama alanı için dengelendiği kritik noktayı bulmaktır. Diğer bir deyişle, hassasiyet ya da ölçek faktörü olarak

bilinen parametrenin frekans bağımsızlığını da sağlayacak şekilde optimize edilmesi gerekir. Örneğin, düşük yörünge uydularında konum ve yönelim belirlemek için kullanılacak sensör için 30-60kV/T'lık ölçek faktörü yeterli olacaktır. Bu nedenle direnç değeri teknik gereksinimlere göre belirlenmelidir. Şekil 4.25.b'de direncin ölçek faktörü üzerindeki etkisi görülmektedir. Uygulanan alanla 2. harmonik sinyal değişiminin dirençli ve dirençsiz sensör üzerindeki etkisi görülmektedir. Bu eğrilerin eğimlerinden ölçek faktörleri hesaplandı ve Şekil 4.25.b'den de görüldüğü üzere direnç büyüklüğünün artması ölçek faktörünü önemli ölçüde azaltmaktadır. Aynı durum sensörlerin gürültü seviyeleri içinde geçerlidir (Şekil 4.25.c). Direnç büyüklüğü arttıkça sensörün gürültü seviyesi artmaktadır.



Şekil 4.25: Fe6-kodlu sensörün oda sıcaklığında a) f - V_{2f} , b) hassasiyet ve c) gürültü grafikleri.

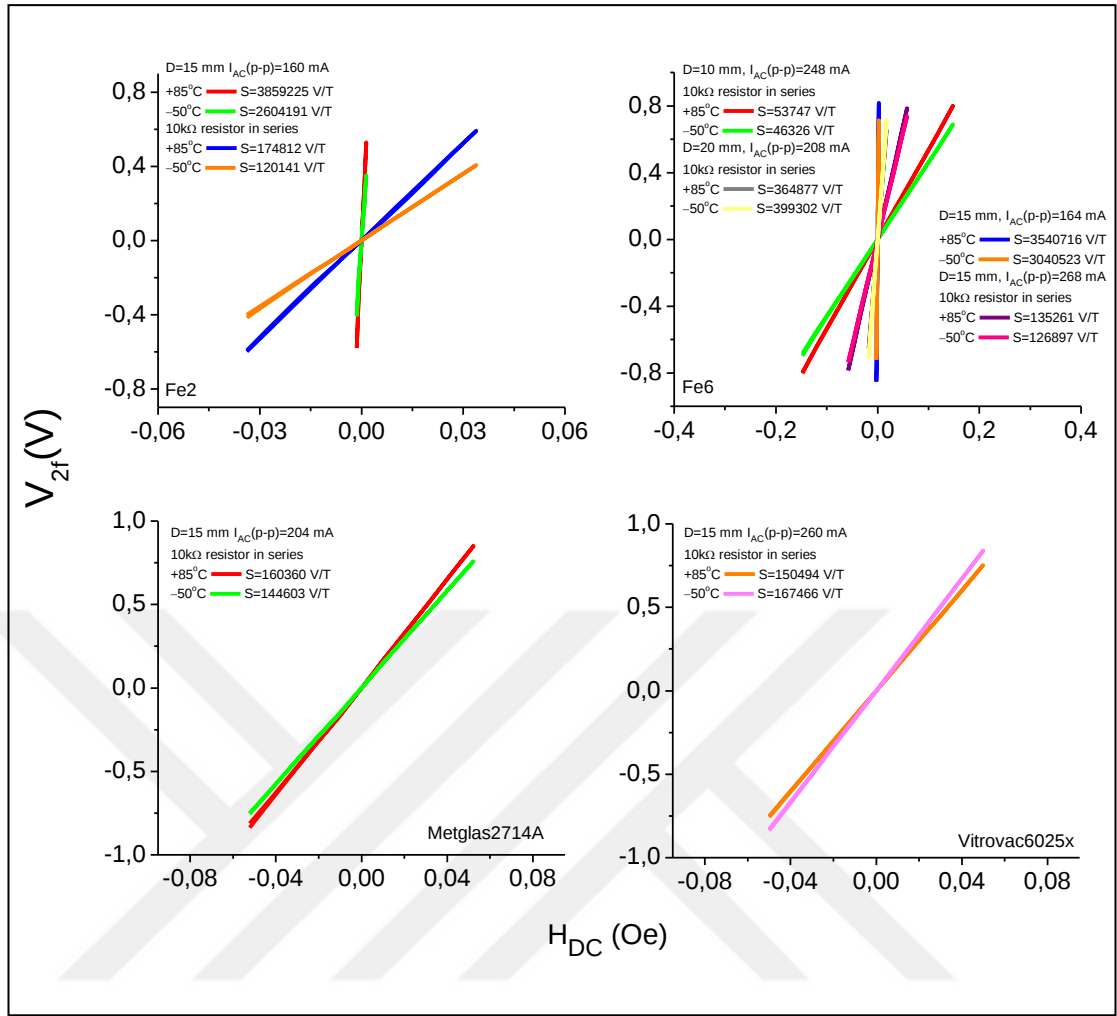
Bu ölçümler sonucunda 10 kΩ seri direnç, ölçek faktörü ve gürültü seviyesi bakımından değerlendirildiğinde kötü gibi görünse de aşağıda yer alan ölçüm sonuçlarından görüleceği üzere sıcaklığa karşı kararlılığı sağlayacaktır.

Çalışmanın bu bölümünde sensör çapına, kullanılan manyetik nüveye ve kararlılığı sağlamak için bağlanan seri dirence bağlı olarak ölçek faktörü ve gürültü ölçümleri -50°C ile $+85^{\circ}\text{C}$ arasında yapıldı. Şekil 4.27'da sıcaklıkla hassasiyetin değişimini gösteren grafik yer almaktadır. Kullanılan nüveye bağlı olarak sıcaklık altında gözlenen davranış değişmektedir. Örneğin, Metglas 2714A nüve kullanılan sensörde sıcaklığın artmasıyla hassasiyet değeri artarken Vitrovac6025 kullanılması durumunda sıcaklık artarken hassasiyet değeri azalmaktadır. Yapılan sensör

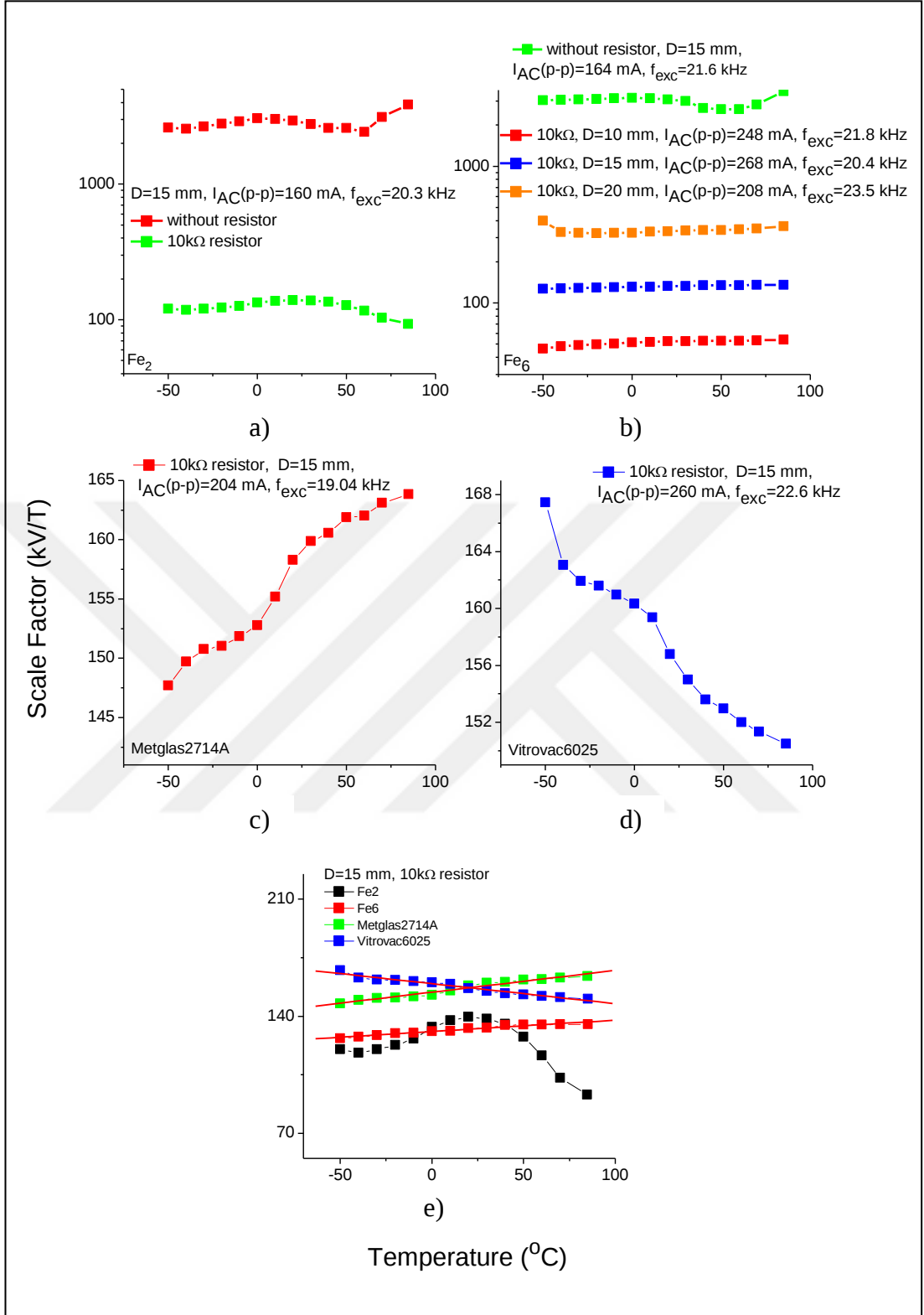
alışmalarından kararlılığın sağlanması için seri direnç bağlamanın uygun olduğu fakat hassasiyetin azaldığı bilinmektedir. Bu çalışmada sıcaklığa bağlı kararlılığın değişimini gözlemlemek için sensörlere 10 k Ω direnç seri bağlanarak sıcaklıkla hassasiyetteki değişim incelendi. Fe2 nüveli sensörde direnç yokken ve direnç bağlı iken alınan ölçümlerde elde edilen sıcaklıkla hassasiyetin değişim grafiğinde %5 kadar iyileşme olduğu gözlendi. Örneğin direnç bağlı olmayan sensörde çalışılan sıcaklık aralığında maksimum hassasiyet değişimi %50'leri bulurken, direnç bağlı olanda %45 olarak belirlendi (şekil 4.27.a) Aynı şekilde Fe6 nüveli sensörde dirençli ve dirençsiz olarak incelendi. Dirençsiz olanında sıcaklıkla gözlenen hassasiyet değişimi %17 iken, dirençli olanda bu değer %6 olarak belirlendi (şekil 4.27.b). Metglas2714A nüve kullanılan sensörde bu değer %10 iken Vitrovac6025 nüve kullanılan sensörde %11 olarak belirlendi (şekil 4.27.c ve şekil 4.27.d). Grldğu üzere, seri direnç sensörün sıcaklığa karşı kararlılığını artırmıştır ve en iyi sonuç Fe6 nüveli sensörde elde edilmiştir.

Literatüre faydalı olabilir düşüncesiyle Fe6 nüvesi ile 10 mm ve 20 mm çapında uyarma bobinleri hazırlanarak [94] kararlılık analizleri yapıldı (şekil 4.27.b). 10 mm çaplı halka nüveli sensördeki maksimum hassasiyet değişimi %16, 20 mm çaplı halka nüveli sensördeki maksimum hassasiyet değişimi %21 olarak hesaplandı.

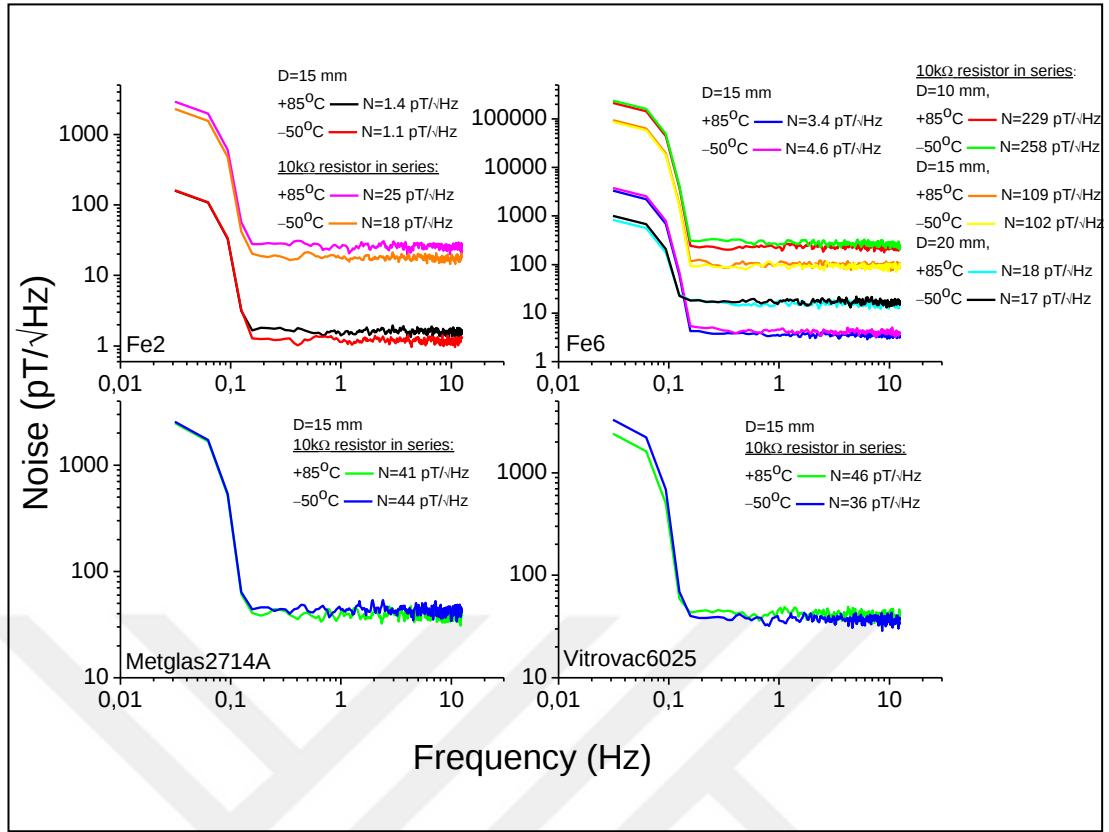
Hassasiyetin sıcaklıkla değişimini veren grafikler herhangi bir fonksiyon ile tanımlanabilirse sıcaklıktan kaynaklanan hata azaltılabilir. Çalışılan sensör grubunda, tüm sıcaklık aralığında 15 mm çaplı seri dirençli Fe6 nüveli sensörde doğrusal değişim söz konusudur ki bu da sıcaklıktan gelen ölçek faktörünün hata oranını %2'den daha düşük tutmamıza izin verir.



Şekil 4.26: Farklı nüve, sensör çapı ve seri direnç kullanılan sensörlerin sıcaklık uç noktalarındaki V_{2f} - H_{DC} grafikleri.



Şekil 4.27: Farklı nüve, sensör çapı ve seri direnç kullanılan sensörlerin hassasiyetlerinin sıcaklık ile değişim grafikleri.



Şekil 4.28: Farklı nüve, sensör çapı ve seri direnç kullanılan sensörlerin uç sıcaklık noktalarındaki gürültü spektrumları

Şekil 4.28’de yer alan gürültü spektrumları incelendiğinde çalışılan bütün nüve grubunda bağlanan seri dirençle gürültü seviyesi büyük oranda artmaktadır. Bağlanan seri direnç yüksek kalite seramik direnç olmasına rağmen radyasyon ve sıcaklık bağımlılığı daha iyi olan bir direnç bulunursa gürültü seviyesinin azaltılması mümkün olabilir. Elde edilen sonuçlarda, uç sıcaklık değerlerinde gürültü seviyesi dirençsiz olan sensörlerde birkaç $\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}@1\text{Hz}$ seviyesinde iken dirençli olanlarda 30 kata kadar çıkmaktadır. Örneğin Fe6 nüvesi kullanılması durumunda gürültü seviyesi $+85^\circ\text{C}$ ’de $3.4 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}@1\text{Hz}$ ’den $109 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}@1\text{Hz}$ ’e artmıştır. Yine de uydu uygulamaları gibi alanlarda sıcaklık bağımlılığını minimize etmek daha önemli bir parametre olduğu için bu gürültü seviyesi de kabul edilebilir bir büyüklüktür. Lakin Fe6’nın yanı sıra Vitrovac6025 ve Metglass2714A nüveleri de gerek sıcaklık bağımlılığı gerekse gürültü seviyeleri açısından değerlendirildiğinde tercih edilebilir nüveler olarak öne çıkmaktadır.

5. SONUÇ

Tez çalışmasının ilk bölümünde fluxgate manyetometrelerin halka nüve çapının sensör hassasiyeti ve gürültüsü üzerine etkisi araştırıldı. Yaptığımız çalışmada 20 mm çaplı sensörün DC alanları 3 nT'ya kadar algılayabildiği görüldü. Ancak bu durumda maksimum ölçülen alan dünya manyetik alanından düşük olan 0.3 Oe ile sınırlandırılmış oldu. Küçük çaplı olan sensörlerin ise 20-30 nT arası DC alanları algılayabildiği görüldü. Bu durumda, bu sensörlerin üst limitleri dünyanın manyetik alanının çok üstünde çıktı. Bu da nüve çapının sensörlerin uygulama alanlarının sınırlarını belirlediğini göstermektedir. Örneğin, 10 mm çaplı halka nüve seçiminin uydularda konum ve yönelim belirleme sensörü olarak kullanımının uygun olacağını, 20 mm çaplı halka nüve seçiminin ise yer altındaki gömülü nesnelerin tespitinde kullanılabileceğini göstermektedir.

Son yıllarda fluxgate manyetometrelerin performansları dikkate değer bir şekilde geliştirilse de, çubuk tipi fluxgate manyetometrelerde algılama alanının boyutunu azaltmak için yeterli deneysel çalışma bulunmamaktadır. Öte yandan, nanoteknolojideki hızlı gelişmeler ile malzemenin boyutları atomik boyutların altına kadar inmiştir ki yeni ölçüm tekniklerinin gelişimi gün geçtikçe zorunlu hale gelmektedir. Bu sebeple, tez çalışmasının ikinci bölümünde tek nüveli çubuk tipi fluxgate manyetometrenin algılama alanı küçültülerek herhangi bir nokta kaynaktan üretilen manyetik alanların değerlendirilmesi için uygulanabilir olması amaçlanmıştır. Bu amaçla 100 μm çaplı kobalt tabanlı camsı metal tel nüve kullanılarak hazırlanan sensörün algılama alanı 0.00785 mm^2 'ye düşürüldü. En iyi sensör performansını elde etmek için sıcaklık ve manyetik alanın fonksiyonu olarak farklı tavlama koşulları uygulandı. Nüve için en uygun tavlama koşulunun 250 °C ($B = 0 \text{ T}$)'de 1 saat boyunca olduğu bulundu. Bu gibi gelişmiş özelliklere sahip sensörlerin, düşük maliyet, güvenilirlik, hassasiyet, dinamik aralık ve sıfır ofset nedeniyle Hall etkisi ve MFL(Magnetic Flux Leakage) gibi rakiplerine meydan okuyabildiklerini ve NDT teknolojisinde uygulanabileceğini kolayca söyleyebiliriz.

Tez çalışmasının üçüncü bölümünde amorf yapıda kobalt tabanlı manyetik alaşımların ince levhalarından devre kazıyıcı yardımıyla yeni bir tip halka tipi fluxgate sensör tasarlandı. Sensör performansının geliştirilmesi için farklı tavlama koşulları uygulandı. 230 °C ($B = 0.5 \text{ T}$)'de tavlanan nüve için 5 $\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ @1 Hz gibi

iyi bir gürültü seviyesi elde edildi. Bu değer literatürde yer alan diğer sensörlerle rekabet edecek düzeydedir. Bu sensörlerle elde edilen doğrusal bölge, geniş dinamik aralık gerektiren uygulama alanları için oldukça uygun görünmektedir. Bu sensörlerin üst limiti 0.53 Oe'e kadar çıkabilmektedir.

Tez çalışmasının dördüncü bölümünde, kobalt zengini bir grup şerit alaşım üzerinde yapılan incelemeler sonucunda halka tipi fluxgate sensörler farklı çaplarda incelendi ve en uygun nüve malzemesi ve halka çapı mercek altına alındı. Özellikle manyetik büzülme ve manyetik parametrelerin sensör performansına etkileri anlaşılmaya çalışıldı. Bu çalışma sonucunda doyum manyetik indüksiyon B_s değerinin sensör hassasiyeti üzerine kritik bir rolünün olduğu tespit edildi. En iyi sensör performansı $Co_{69}Fe_2Cr_7Si_8B_{14}$ ve $Co_{65}Fe_6Cr_7Si_8B_{14}$ şeritlerinin kullanılması durumunda elde edildi ve bu iki nüvenin B_s değeri 0.4 T civarında belirlendi. Bu iki nüvenin manyetik büzülme katsayısının sıfırdan uzak olduğu düşünüldüğünde manyetik büzülmenin etkisinin B_s tarafından gölgelendiği yargısına varılmaktadır. Uygun ısıtım işlemi ile gürültü seviyesi bir kaç $pT/\sqrt{Hz}@1$ Hz seviyesine indirilebilmektedir. En iyi gürültü seviyesi 20 mm halka çapı ile $\sim 1pT/\sqrt{Hz}@1$ Hz olarak elde edildi. Lakin bu sensörün üst limiti 0.24 Oe olup açık alan uygulamaları için sıkıntı yaratmaktadır. İkinci öne çıkan aday sensör olarak 15 mm çaplı sensör çıkmaktadır. Bu sensör geometrisiyle gürültü seviyesi ve üst limit optimize edildi ve sırası ile $\sim 2 pT/\sqrt{Hz}@1$ Hz ve 1.2 Oe olarak bulundu. Ağırlık ve hacimsel bir kısıtın olması durumunda 10 mm halka çaplı sensör de önerilebilir. Bu sensöre ait gürültü ve hassasiyet değerleri sırası ile $\sim 10 pT/\sqrt{Hz}@1$ Hz ve 1.6 Oe'dir. Bu aşamada ideal bir fluxgate sensör için; şeritlerin kasnak etrafına sarıldıktan sonra ısıtım işlemi görmesi, halka çapının 15 mm olması ve kullanılacak şeritlerin manyetik büzülme katsayısının ve B_s değerlerinin düşük olması önerilmektedir.

Tez çalışmasının son bölümünde Co tabanlı amorf yapıda manyetik şeritler kullanılarak hazırlanan halka geometrili fluxgate sensörlerin sıcaklık bağımlılıkları incelendi. Nüve malzemesine bağlı olarak sıcaklık bağımlılığının değiştiği görüldü. Örneğin, sıcaklık artışıyla Fe6 ve Metglas2714A nüveli sensörlerin ölçek faktörü artarken, Vitrovac6025x nüveli sensörün ölçek faktörü azalmakta, Fe2 nüveli sensör için ise polinomiyal bağımlılık göstermektedir. Diğer taraftan geniş sıcaklık aralığında yapılan ölçek faktörü çalışmalarında algılama bobinine bağlanan $10k\Omega$ seri direncin sıcaklıktan gelecek hatayı % 1.4'ten daha aşağı indirilebileceğini

göstermektedir. Ayrıca fluxgate sensörlerin sıcaklık bağımlılığının diğer algılama özelliklerinin optimum seviyede tutulmasıyla daha da azaltılabileceğine inanıyoruz. Bunun için, Curie sıcaklığı çalışma sıcaklığından büyük olan diğer manyetik özellikleri Co tabanlı nüvelerle aynı olan şerit nüveler kullanılmalıdır. Bizim önerimiz Curie sıcaklığının en az 400°C olması gerektiğidir. Sebebi ise manyetik geçirgenlikle ilişkilidir, çünkü manyetik geçirgenliğinin zaman türevi ölçek faktörünün büyüklüğünü belirler. Çalışma sıcaklığı Curie sıcaklığının altındaysa büyüklüğü ve zaman türevi sabit kalır.



KAYNAKLAR

- [1] Lenz J., Edelstein S., (2006), “Magnetic sensors and their applications”, IEEE Sensors Journal, 6 (3), 631–649.
- [2] Lenz J. E., (1990), “A Review of Magnetic Sensors”, Proceedings of the IEEE, 78 (6), 973–989.
- [3] Ripka P., (2000), “New directions in fluxgate sensors”, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 215, 735–739.
- [4] Bellini N., (2014), “Magnetic Actuators for Nanosatellite Attitude Control”, Yüksek Lisans Tezi, California Polytechnic State University.
- [5] Tumanski S., (2013), “Modern Magnetic Field Sensors – A Review”, Przegląd Elektrotechniczny, (10), 1–12.
- [6] Gordon D. I., Brown R. E., (1972), “Recent Advances in Fluxgate Magnetometry”, IEEE Transactions on Magnetics, 8 (1), 76–82.
- [7] Geyger W. A., (1962), “New type of flux-gate magnetometer”, Journal of Applied Physics, 33 (3), 1280–1281.
- [8] Heathcote C., Aspinall A., (1981), “Some aspects of the use of fluxgate magnetometers (gradiometers) in geophysical prospection in archaeology”, Revue d’archéométrie, 5, 61–70.
- [9] Primdahl F., (1979), “The fluxgate magnetometer”, Journal of Physics E: Scientific Instruments, 12, 241–253.
- [10] He D., Shiwa M., (2014), “A magnetic sensor with amorphous wire”, Sensors (Switzerland), 14 (6), 10644–10649.
- [11] Wallis D. D., Miles D. M., Narod B. B., Bennest J. R., Murphy K. R., Mann I. R., Yau A. W., (2015), “The CASSIOPE/e-POP Magnetic Field Instrument (MGF)”, Space Science Reviews, 1 (4), 27–39.
- [12] Primdahl F., Burger J. R., (1973), “The Theoretical Output of a Ring Core Flux-Gate Sensor”, IEEE Transactions on Magnetics, 9 (4), 708.
- [13] Lu C. C., Huang J., (2015), “A 3-axis miniature magnetic sensor based on a planar fluxgate magnetometer with an orthogonal fluxguide”, Sensors (Switzerland), 15 (6), 14727–14744.
- [14] Yang X., Guo W., Li C., Zhu B., Chen T., Ge W., (2016), “Design Optimization of a Fluxgate Current Sensor with Low Interference”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 26 (4), 1.

- [15] Butta M., Sasada I., Janosek M., (2012), “Temperature dependence of offset and sensitivity in orthogonal fluxgate operated in fundamental mode”, IEEE Transactions on Magnetics, 48 (11), 4103–4106.
- [16] Ripka P., (2000), “New directions in fluxgate sensors”, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 215, 735–739.
- [17] Can H., Svec P., Tanriseven S., Bydzovsky J., Birlikseven C., Sözeri H., Topal U., (2015a), “Optimizing the sensing performance of a single-rod fluxgate magnetometer using thin magnetic wires”, Measurement Science and Technology, 26 (11), 115102.
- [18] Musmann G., (2010), “Fluxgate magnetometers for space research”, 2th Edition, Books on Demand.
- [19] Forslund Å., (2006), “Designing a Miniaturized Fluxgate Magnetometer”, Master Thesis, School of Electrical Engineering Royal Institute of Technology Stockholm.
- [20] Janošek M., Ripka P., (2009), “PCB sensors in fluxgate magnetometer with controlled excitation”, Sensors and Actuators, A: Physical, 151 (2), 141–144.
- [21] Moldovanu C., Brauer P., Nielsen O. V., Petersen J. R., (2000), “The noise of the Vacquier type sensors referred to changes of the sensor geometrical dimensions”, Sensors and Actuators A: Physical, 81 (1–3), 197–199.
- [22] Butvin P., Janošek M., Ripka P., Butvinová B., Kuzminski M., Švec P., Vlasák G., (2012), “Field annealed closed-path fluxgate sensors made of metallic-glass ribbons”, Sensors and Actuators, A: Physical, 184, 72–77.
- [23] Ripka P., Janošek M., Butta M., Billingsley W. S., Wakefield E. M., (2013), “Crossfield effect in commercial fluxgate and AMR sensors”, Journal of Electrical Engineering, 61 (7), 13–16.
- [24] Gordon D., Lundsten R., Chiarodo R., Helms H. . J., (1968), “A fluxgate sensor of high stability for low field magnetometry”, IEEE Transactions on Magnetics, 4 (3).
- [25] Janosek M., (2017), “Parallel fluxgate magnetometers”, Smart Sensors, Measurement and Instrumentation, 19, 41–61.
- [26] Callister W., Rethwisch D., (2007), “Materials science and engineering: an introduction”, Materials Science and Engineering, (94), 5.
- [27] Robert P., (1988), “Electrical and Magnetic Properties of Materials”, Materials Science Library. Artech House.
- [28] Web 1, (2018), http://www.brainkart.com/article/Magnetic-Materials_6823/, (Erişim Tarihi: 03/04/2018).

- [29] Stacey F., (2012), “The Physical Principles of Rock Magnetism”, Developments in solid earth geophysics, Featured Edition, Elsevier Science.
- [30] Néel L., (1955), “Some theoretical aspects of rock-magnetism”, *Advances in Physics*, 4 (14), 191–243.
- [31] Cardarelli F., (2008), “Materials Handbook: A Concise Desktop Reference”, 3rd Edition, Springer London.
- [32] Chikazumi S., (1964), “Physics of magnetism”, Wiley series on the science and technology of materials, 1st Edition, Wiley & Sons Inc.
- [33] Cullity B. D., Graham C. D. (2011), “Introduction to Magnetic Materials”, 2nd Edition, Wiley & Sons Inc.
- [34] Telford W. M., Geldart L. P., Sheriff R. E., (1990), “Applied Geophysics”, 1st Edition, Cambridge University Press.
- [35] Web 2, (2018), <https://www.britannica.com/science/diamagnetism>, (Erişim Tarihi: 04/04/2018).
- [36] Web 3, (2018), <https://www.britannica.com/science/paramagnetism>, (Erişim Tarihi: 03/04/2018).
- [37] Bozorth R. M., (1951), “Ferromagnetism”, The Bell Telephone Laboratories series, 1st Edition, Van Nostrand.
- [38] Daughton J. M., Pohm A. V., Fayfield R. T., Smith C. H., (1999), “Applications of spin dependent transport materials”, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 32 (22).
- [39] Dolabdjian C., Saez S., Reyes Toledo A., Robbes D., (1998), “Signal-to-noise improvement of bio-magnetic signals using a flux-gate probe and real time signal processing”, *Review of Scientific Instruments*, 69 (10), 3678–3680.
- [40] Mahdi A. E., Panina L., Mapps D., (2003), “Some new horizons in magnetic sensing: High-TcSQUIDs, GMR and GMI materials”, *Sensors and Actuators, A: Physical*, 105 (3), 271–285.
- [41] Matsuoka A., Shinohara M., Tanaka Y., Fujimoto A., Iguchi K., (2013), “Development of fluxgate magnetometers and applications Magnet Fields in the Space”, *An Introduction to Space Instrumentation*, (5), 217–225.
- [42] Primdahl F., (1970), “The Fluxgate Mechanism, Part I: The Gating Curves of Parallel and Orthogonal Fluxgates”, *IEEE Transactions on Magnetics*, 6 (2), 376–383.
- [43] Su X., Tong H., Ji P., (2014), “Activity recognition with smartphone sensors”, *Tsinghua Science and Technology*, 19 (3), 235–249.

- [44] Macintyre S. A., (1999), "Magnetic field measurement", CRC Press LLC, 16–18.
- [45] Calangiu D. I., (2014), "Implementation of a Digital Fluxgate Magnetometer for Nanosatellites Implementation of a Digital Fluxgate Magnetometer for Nanosatellites", Yüksek Lisans Tezi, Luleå University of Technology.
- [46] Ness N. F., (1970), "Magnetometers for space research", Space Science Reviews, 11 (4), 459–554.
- [47] Livanov M. N., Koslov A. N., Sinelnikova S. E., Kholodov J. A., Markin V. P., Gorbach A. M., Korinewsky A. V., (2014), "Record of the Human Magnetocardiogram by the Quantum Gradiometer with Optical Pumping", (May), 78–80.
- [48] Johnson C., Schwindt P. D. D., Weisend M., (2010), "Magnetoencephalography with a two-color pump-probe, fiber-coupled atomic magnetometer", Applied Physics Letters, 97 (24).
- [49] Xia H., Ben-Amar Baranga A., Hoffman D., Romalis M. V., (2006), "Magnetoencephalography with an atomic magnetometer", Applied Physics Letters, 89 (21).
- [50] Kasper H. J., Hess B. J. M., Dieringer N., (1987), "A precise and inexpensive magnetic field search coil system for measuring eye and head movements in small laboratory animals", Journal of Neuroscience Methods, 19 (2), 115–124.
- [51] Ogorodnikov D., Tarasenko S., Yakushin S., Cohen B., Raphan T., (2006), "Head fixed field coil system for measuring eye movements in freely moving monkeys", Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology - Proceedings, 5567–5570.
- [52] Payne H. L., Raymond J. L., (2017), "Magnetic eye tracking in mice", eLife, 6.
- [53] Martinická F., Šimáček I., Jurdák P., Cigán A., Maňka J., (2006), "SQUID method of lung contamination testing", Physica C: Superconductivity and its Applications, 435, 128–131
- [54] Koch H., (2008), "Squid Sensors", Sensors Set, (Adelerhof 1994), 381–445.
- [55] Tumanski S., (2013) "Modern Magnetic Field Sensors – A Review", Przegląd Elektrotechniczny, 10, 1–12.
- [56] Bick M., Sternickel K., Panaitov G., Effern A., Zhang Y., Krause H. J. (2001), "SQUID gradiometry for magnetocardiography using different noise cancellation techniques", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 11, 673–676.

- [57] Bick M., Panaitov G., Schiek M., Zhang Y., Krause H. J., (2003), “Adaptive frequency dependent gradiometry applied to SQUID magnetocardiography”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 13, 364–367.
- [58] Drung D., (1995), “The PTB 83-SQUID System for Biomagnetic Applications in a Clinic”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 5 (2), 2112–2117.
- [59] Ripka P., (1992), “Review of fluxgate sensors”, *Sensors and Actuators: A. Physical*, 33, 129–141.
- [60] Ripka P., Kawahito S., Choi S. O., Tipek A., Ishida M., (2001), “Micro-fluxgate sensor with closed core”, *Sensors and Actuators, A: Physical*, 91 (1–2), 65–69.
- [61] Ripka P., (2003), “Advances in fluxgate sensors”, *Sensors and Actuators, A: Physical*, 106, 8–14.
- [62] Lei J., Lei C., Zhou Y., (2012), “Fabrication and characterization of a new MEMS fluxgate sensor with nanocrystalline magnetic core”, *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 45 (3), 535–540.
- [63] Zorlu Ö., (2008), “Orthogonal Fluxgate Type Magnetic Microsensors With Wide Linear Operation Range”, Doctor of Philosophy Thesis, Institute of Microelectronics and Microsystems.
- [64] Ripka P., Janosek M., (2010), “Advances in Magnetic Field Sensors”, *IEEE Sensors Journal*, 10 (6), 1108–1116.
- [65] Li W., Wang J., (2014), “Magnetic sensors for navigation applications: An overview”, *Journal of Navigation*, 67 (2), 263–275.
- [66] Can H., Svec P., Tanriseven S., Bydzovsky J., Birlikseven C., Sözeri H., Topal, U., (2015b), “Optimizing the sensing performance of a single-rod fluxgate magnetometer using thin magnetic wires”, *Measurement Science and Technology*, 26 (11).
- [67] Xue Q., Wang R., Sun F., Huang Z., (2014), “Chaotic vibration analysis of the bottom rotating drill string”, *Shock and Vibration*.
- [68] Alldredge L., (1958), “Magnetometer”, U.S. Patent 2,856,581.
- [69] Schonstedt E. O., (1959), “Saturable measuring device and magnetic core”, U. S. Patent 2,916,696.
- [70] Gise P., Yarbrough R., (1975), “An electrodeposited cylindrical magnetometer sensor”, *IEEE Transactions on Magnetics*, 11 (5), 1403–1404.
- [71] Gise P. E., Yarbrough R. B., (1977), “An improved cylindrical magnetometer sensor”, *IEEE Transactions on Magnetics*, 13 (5), 1104–1106.

- [72] Inoue S. T. I. S., (1972), “Thin film magnetometer using an orthogonal flux gate”, U.S. Patent 4,007,417.
- [73] Korepanov V., Bondaruk B., Rakhlin L., Best A., Linthe H. J., Marianiuk J., Pajunpaa K., (1998), “Experience of observatory practice with Lemi-004 magnetometers”, *Revista Geofisica*, (48), 15–40.
- [74] Acuña M. H., (2002), “Space-based magnetometers”, *Review of Scientific Instruments*, 73 (11), 3717.
- [75] Primdahl F., Hernando B., Nielsen O. V., Petersen J. R., (1989), “Demagnetising factor and noise in the fluxgate ring-core sensor”, *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 22 (12), 1004–1008.
- [76] Aschenbrenner H., Goubau G., (1936), “Eine Anordnung zur Registrierung rascher magnetischer Störungen”, *Hochfrequenz und Elektroakustik*, 47 (6), 177–181.
- [77] Auster H. U., Glassmeier K. H., Magnes W., Aydogar O., Baumjohann W., Constantinescu D., Wiedemann M., (2008), “The THEMIS fluxgate magnetometer”, *Space Science Reviews*, 141 (1–4), 235–264.
- [78] Zhukova V., Ipatov M. ve Zhukov A., (2009), “Thin magnetically soft wires for magnetic microsensors”, *Sensors*, 9 (11), 9216–9240.
- [79] Can H., Topal U., (2015), “Design of ring core fluxgate magnetometer as attitude control sensor for low and high orbit satellites”, *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 28 (3), 1093–1096.
- [80] Humphrey F. B., (1994), “Applications of amorphous wire”, *Materials Science and Engineering A*, 179–180, 66–71.
- [81] Uetake I., Ito H., Saito T., (1992), “The relation between measured value of magnetic flux leakage and sensor size”, *Nondestructive Testing and Evaluation*, 7 (1–6), 347–359.
- [82] Korepanov V., Marusenkov A., (2012), “Flux-Gate Magnetometers Design Peculiarities”, *Surveys in Geophysics*. 33 (5), 1059–1079.
- [83] Herčík D., Auster H. U., Blum J., Fornaçon K. H., Fujimoto M., Gebauer K., Glassmeier K. H., (2017), “The MASCOT Magnetometer”, *Space Science Reviews*, 208, 433–449.
- [84] Duhaj P., Švec P., Majková E., Boháč V., Mat'ko I., (1991), “The study of phase transitions in amorphous bilayers prepared by rapid quenching”, *Materials Science and Engineering A*, 133 (C), 662–666.

- [85] Kraus L., Fendrych F., Švec P., Bydžovský J., Kollár M., (2002), “Cobalt-rich amorphous ribbons for strain sensing in civil engineering”, *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 4 (2), 237–243.
- [86] Sarkar P., Vcelak J., Roy R. K., Panda A. K., Mitra A. ve Ripka P., (2015), “Co-based amorphous material for giant magneto-impedance and fluxgate sensing cores”, 2015 IEEE Magnetics Conference (INTERMAG), 1.
- [87] Lei C., Liu Y., Sun X. C., Wang T., Yang Z., Zhou Y., (2015), “Improved Performance of Integrated Solenoid Fluxgate Sensor Chip Using a Bilayer Co-Based Ribbon Core”, *IEEE Sensors Journal*, 15 (9), 5010–5014.
- [88] Yin F., Lühr H., Park J., Rauberg J., Michaelis I., (2015), “Noise features of the CHAMP vector magnetometer in the 1-25 Hz frequency range”, *Sensors and Actuators, A: Physical*, 222, 272–283.
- [89] Marusenkov A., (2014), “The simple procedure for the fluxgate magnetometers calibration” EGU General Assembly Conference Abstracts, 16.
- [90] Liu Y. X., Li X. S., Zhang X. J., Feng Y. B., (2014), “Novel calibration algorithm for a three-axis strapdown magnetometer”, *Sensors (Switzerland)*, 14 (5), 8485–8504.
- [91] Moldovanu A., Chiriac H., Moldovanu C., Macoviciuc M., Ioan C., (2000), “Performances of the fluxgate sensor with tensile stress annealed ribbons”, *Sensors and Actuators, A: Physical*, 81 (1), 189–192.
- [92] Diaconu D., Chiriac E., Hoffmann H., Ioan H., Moldovanu C., Macoviciuc M., (1998), “Effect of Tensile Stress-Annealing on the Magnetical Behaviour of Some Thin Amorphous Ribbons for Fluxgate Sensors”, *Materials Science Forum*, 287–288.
- [93] Miles D. M., Mann, I. R., Kal A., Millin D. K., Narod B. B., Bennes J. R., Unsworth M. J. (2017), “The effect of winding and core support material on the thermal gain dependence of a fluxgate magnetometer sensor”, *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 6 (2), 377–396.
- [94] Can H., Svec P., Bydzovsky J., Svec P., Sözeri H., Topal U., (2017), “Systematic optimization of the sensing properties of ring-core fluxgate sensors with different core diameters and materials”, *Sensors and Actuators, A: Physical*, 255, 94–103.

ÖZGEÇMİŞ

1988 yılında Erzurum'da doğdu. İlköğretimini 19 Mayıs İlköğretim okulunda tamamladı. Orta öğretimini Erzurum Lisesi'nde yabancı dil ağırlıklı olarak okudu. 2011 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümünü bitirdi. 2013 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Nanobilim ve Nano mühendislik Anabilim Dalı Nanofotonik bilim dalında yüksek lisansını tamamladı. Yüksek lisans eğitimi esnasında 111T217 numaralı ‘Metal Oksit Tabanlı Memristör Yapıların Sıralı Reaktif Sputter Tekniği ile Fabrikasyonu ve Karakterizasyonu’ adlı TÜBİTAK projesinde Bursiyer olarak görev aldı. Yüksek lisans eğitiminden sonra 2013 yılında Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında doktora eğitimine başladı. 2013-2017 yılları arasında TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME) Manyetik Ölçümler Laboratuvarında 113F192 numaralı ‘Düşük Manyetik Alan Algılama İçin Hızlı Söndürmeli Manyetik Alaşım Geliştirme’ projesinde Bursiyer olarak görev aldı. Bursiyerlik görevinin bitmesinin ardından aynı laboratuvarında araştırmacı olarak çalışmaya başladı.

EKLER

Ek A: Tez Çalışması Kapsamında Yapılan Yayınlar

Can H., Topal U., (2015), “Design of Ring Core Fluxgate Magnetometer as Attitude Control Sensor for Low and High Orbit Satellites”, J. Supercond. Novel Magnetism, 28, 1093-1096.

Can H., Svec P., Tanrıseven S., Bydzovsky J., Birlikseven C., Sözeri H., Topal U., (2015), “Optimizing the sensing performance of a single-rod fluxgate magnetometer using thin magnetic wires”, Measurement Science and Technology, 26, 115102.

Tanrıseven S., Can H., Birlikseven C., Topal U., Vural R., (2015), “A low cost and simple fluxgate magnetometer implementation”, 2015 International Conference on Synthesis, Modeling, Analysis and Simulation Methods and Applications to Circuit Design, SMACD 2015, Istanbul, Turkey.
doi: 10.1109/SMACD.2015.7301685

Can H., Svec P., Bydzovsky J., Jn. Svec P., Sözeri H., Topal U., (2017), “Systematic optimization of the sensing properties of ring-core fluxgate sensors with different core diameters and materials”, Sensors and Actuators, A: Physical, 255, 94-103.

Can H., Svec P., Bydzovsky J., Jn. Svec P., Aktaş B., Sözeri H., Topal U., (2017), “Fabrication of Fluxgate Sensor Heads by Milling with a Circuit Board Plotter and Influence of Core Annealing Conditions on Sensor Performance”. J. Supercond. Novel Magnetism, 30, 3257-3261.

Can H., Ecevit F. N., Svec P., Jn. Svec P., Topal U., (2018), “The Sensing Characteristics of Ring-Core Fluxgate Sensors at Temperature Interval of -50°C to +85°C”. IEEE Transactions on Magnetics.
doi: 10.1109/TMAG.2018.2835771

Ek B: Tez Çalışması Kapsamında Yapılan Bildiriler

Can H., Topal U., “Design of Ring Core Fluxgate Magnetometer for Used as Attitude Control Sensor for Low and High Orbit Satellites”, 4th International Conference on Superconductivity and Magnetism-ICSM2014, 27 Nisan-2 Mayıs 2014, Antalya, Turkey.

Can H., Svec P., Tanrıseven S., Bydzovsky J., Birlikseven C., Sözeri H., Topal U., “Optimizing the sensing performance of a single-rod fluxgate magnetometer using thin magnetic wires”, 20th Conference on Magnetism, 5-10 Temmuz 2015, Barcelona, İspanya.

Tanrıseven S., Can H., Birlikseven C., Topal U., Vural R., “A low cost and simple fluxgate magnetometer implementation”, International Conference on Synthesis, Modeling, Analysis and Simulation Methods and Applications to Circuit Design-SMACD 2015, 7-9 Eylül 2015, Istanbul, Turkey.

Can H., Svec P., Bydzovsky J., Jn. Svec P., Aktaş B., Sözeri H., Topal U., “Fabrication of Fluxgate Sensor Heads by Milling with a Circuit Board Plotter and Influence of Core Annealing Conditions on Sensor Performance”, 5th International Conference on Superconductivity and Magnetism-ICSM2016, 24-30 Nisan 2016, Muğla, Turkey.

