

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FLUXGATE MANYETOMETRE
TASARIMINDA SENSÖR VE DEVRE
OPTİMİZASYONU

FATMA NUR ÇELİK
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE
2021

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FLUXGATE MANYETOMETRE
TASARIMINDA SENSÖR VE DEVRE
OPTİMİZASYONU

FATMA NUR ÇELİK
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
DR. ÖĞR. ÜYESİ ATILLA UYGUR
II. DANIŞMANI
DOÇ. DR. UĞUR TOPAL

GEBZE
2021

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

**OPTIMIZATION OF SENSOR AND
CIRCUIT DESIGN FOR FLUXGATE
MAGNETOMETER**

FATMA NUR ÇELİK
A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE
DEPARTMENT OF ELECTRONIC ENGINEERING

THESIS SUPERVISOR
ASSIST. PROF. DR. ATILLA UYGUR
II. THESIS SUPERVISOR
ASSOC. PROF. DR. UĞUR TOPAL

GEBZE

2021



YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 25/12/2020 tarih ve 2020/60 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 30/12/2020 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Fatma Nur Çelik'in tez çalışması Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : DR. ÖĞR. ÜYESİ ATILLA UYGUR

ÜYE

: DOÇ DR. HÜSEYİN ARDA ÜLKÜ

ÜYE

: DR. ÖĞR. ÜYESİ EYLEM GÜLCE ÇOKER

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
... / ... / tarih ve /... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

Bu tez çalışmasında, yüksek hassasiyet ve düşük çözünürlüğe sahip Fluxgate Manyetometreler araştırıldı ve uzay uygulamalarında kullanılmak üzere geliştirildi. Fluxgate sensörlerin yüksek hassasiyet, iyi çözünürlük, düşük gürültü ve düşük güç tüketiminden sorumlu olan manyetik nüveler kobalt ve demir tabanlı manyetik alaşımların atomik bileşenleri değiştirilerek incelendi. Nüvelerin manyetik özelliğinin ölçüm performansı üzerindeki etkisini belirlemek için elektronik devre tasarımı yapıldı. Analog yapıdaki bu devre her bir nüvenin optimum algılama özelliği için optimize edildi. Sonuçta 30278 V/T ölçek faktörü ile $\sim 1 \text{ nT}/\sqrt{\text{Hz}}@1\text{Hz}$ gürültü seviyesine ve 5 nT çözünürlüğe ulaşıldı. Geliştirilen manyetometrenin en dikkat çeken özelliği ise sıcaklık gibi çevresel koşullara karşı dayanımıdır. Sensör çıkış sinyali $\sim 90 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklık aralığında neredeyse hiç değişiklik göstermez. Ayrıca güç tüketimi $\sim 0.4 \text{ W}$ gibi düşük bir değer olarak belirlendi.

Anahtar Kelimeler: Fluxgate manyetometre, Fluxgate sensör, Manyetik alan ölçümü, İkinci harmonik algılama, Manyetik sensör.

SUMMARY

In the present work, the fluxgate magnetometer having properties of high sensitivity and low resolution was investigated and developed to be used in space applications. The magnetic cores responsible for high sensitivity, good resolution, low noise and low power consumption of the fluxgates were examined by changing the atomic compositions of cobalt and iron based magnetic alloys. An electronic circuit was designed in order to determine the influence of the magnetic properties of the cores on the measurement performance. The circuit having analogue structure was optimized for optimal sensing characteristics of each cores. Finally, we could achieve to get a noise value of $\sim 1 \text{ nT}/\sqrt{\text{Hz}}$ @1Hz and a resolution of 5 nT with a scale factor of 30278 V/T. The most challenging property of the developed magnetometer was its robustness against environmental conditions, like temperature. The sensor output signal shows almost no change at temperature interval of $\sim 90 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Besides, the power consumption was determined to be as low as $\sim 0.4 \text{ W}$.

Key Words: Fluxgate magnetometer, Fluxgate sensor, Magnetic field measurement, Second harmonic detection, Magnetic sensors.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezi olarak hazırladığım bu çalışma TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME) Manyetik Ölçümler Laboratuvarında 118F012 numaralı proje kapsamında gerçekleştirilmiştir. Bu vesileyle projeyi destekleyen TÜBİTAK'a,

Tezimi hazırlamamda gerekli bilgi, destek ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen, yüksek lisans çalışmam boyunca bilimsel tutum ve davranışlarıyla bana rol model olan eş-danışmanım çok değerli hocam Sayın Doç. Dr. Uğur TOPAL'a ve yüksek lisans çalışma sürecimde göstermiş olduğu ilgi, emek ve yardımlarından dolayı saygıdeğer danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Atilla UYGUR'a, tezimin deneysel aşamaları esnasında örneklerin hazırlanmasında, cihazların kullanılmasında ve bütün ölçümlerin alınmasında yardımlarını esirgemeyip sabır ve anlayışla bana yol gösteren Sayın Dr. Hava CAN'a

ve son olarak hayatımın her anında yanımda olup tüm imkanlarını seferber eden ve benden desteklerini esirgemeyen sevgili aileme, babam Hayri ÇELİK'e, ve annem Zübeyde ÇELİK'e sonsuz sevgi ve 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. Literatür Özeti	2
1.2. Çalışmanın Amacı	5
2. KAVRAMSAL TEMELLER	7
2.1. Manyetizma	7
2.1.1. Mıknatıslanma	7
2.1.2. Manyetik Alan Vektörleri	8
2.1.3. Demanyetizasyon Etkisi	9
2.1.4. Manyetik Malzemelerin Sınıflandırılması	10
2.1.4.1. Diyamanyetizma	11
2.1.4.2. Paramanyetizma	11
2.1.4.3. Ferromanyetizma	12
2.1.5. Mıknatıslanma Eğrisi ve Histerisiz	13
2.1.6. Yumuşak ve Sert Manyetik Malzemeler	15
2.1.7. Girdap (Eddy) Akımları	16
2.1.8. Curie Noktası	16
2.2. Manyetik Alan Ölçüm Teknolojisi	17
2.2.1. Fluxgate Sensörler	20
2.2.2. Fluxgate Sensörlerin Çalışma Prensibi	23
2.2.3. Fluxgate Sensörlerde Nüve Seçimi	26
2.2.4. Fluxgate Sensörlerde İşaret İşleme Elektronikleri	27
2.2.5. Fluxgate Sensör Gürültüsü	30

2.2.5.1. Titreşim Gürültüsü (Flicker veya Pembe Gürültü)	31
2.2.5.2. Barkhausen Gürültüsü	31
2.2.5.3. Termal Gürültü (Johnson-Nyquist Gürültü)	31
2.2.5.4. Beyaz Gürültü (White Gürültü)	32
2.2.6. Fluxgate Sensörleri için Performans Parametreleri	32
2.3. Fluxgate Manyetometre	34
2.3.1. Fluxgate Manyetometre Uydu Uygulamaları	36
3. FLUXGATE MANYETOMETRE TASARIMI	41
3.1. Fluxgate Manyetometre Sensör Tasarımı	42
3.2. Fluxgate Manyetometre Elektronik Tasarımı	44
3.2.1. Uyarma Elektroniği	45
3.2.2. Algılama Elektroniği	47
3.2.3. Sensör Çıkış Sinyalinin Analogtan Dijitale Dönüştürülmesi	55
4. ÖLÇÜMLER	57
4.1. Hassasiyet, Çözünürlük ve Ölçüm Aralığı Belirleme	57
4.2. Gürültü Ölçümü	62
4.3. Bantgenişliği Ölçümü	63
4.4. Güç Tüketimi	66
4.5. Manyetometre Çalışma Gerilim Aralığı	67
5. SONUÇ ve TARTIŞMA	72
KAYNAKLAR	76
ÖZGEÇMİŞ	82

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler ve</u> <u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklamalar</u>
μ	: Manyetik geçirgenlik
μ_a	: Görünür geçirgenlik
μ_r	: Göreceli manyetik geçirgenlik
Φ	: Manyetik akı
χ_m	: Manyetik Alınganlık
λ_s	: Doyum manyetik büzülme katsayısı
AC	: Alternatif akım
ADC	: Analog-dijital dönüştürücü
B	: Manyetik akı yoğunluğu (Manyetik İndüksiyon)
B_R	: Kalıcı mıknatıslanma
B_s	: Doyum manyetik indüksiyon değeri
CMOS	: Bütünleyici Metal Oksit Yarı İletken
D	: Demanyetizasyon faktörü
DC	: Doğru akım
FPGA	: Alanda programlanabilir kapı dizisi
H	: Manyetik alan şiddeti
H_{DC}	: DC Manyetik alan
H_{sat}	: Doyum manyetik alan değeri
H_c	: Koersif alan şiddeti
M	: Mıknatıslanma
M_s	: Doyum mıknatıslanması
Oe	: Oersted
PCB	: Baskı devre kartı
PSD	: Faza duyarlı senkron detektör
SQUID	: Süperiletken Kuantum Girişim Cihazı
UME	: Ulusal Metroloji Enstitüsü
V_{2f}	: İkinci harmonik sinyali

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Manyetik momentler.	7
2.2: Solenoid çalışma prensibi.	8
2.3: Manyetik alanın farklı malzeme türleri üzerindeki etkisi.	10
2.4: Diamanyetik malzemenin a) dış manyetik alan olmaması, b) dış manyetik alan olması durumları için atomik dipol gösterimi.	11
2.5: Paramanyetik malzemenin a) dış manyetik alan olmaması, b) dış manyetik alan olması durumları için atomik dipol gösterimi.	12
2.6: Ferromanyetik malzemenin atomik dipol gösterimi.	13
2.7: Ferromanyetik malzemenin B-H davranışı ve domain yönelimi.	14
2.8: Ferromanyetik bir malzemede B-H eğrisi ve histerisiz.	15
2.9: Yumuşak ve sert manyetik malzemelerin B-H eğrisi.	16
2.10: Manyetik alan sensörleri.	17
2.11: Manyetik alan sensörlerinin ölçüm aralıkları.	18
2.12: Temel Fluxgate sensör yapısı.	20
2.13: Ortogonal Fluxgate sensör çeşitleri.	21
2.14: Fluxgate sensör türleri a) yarış-pisti tipi, b) çubuk tipi, c) halka tipi Fluxgate sensör.	21
2.15: Fluxgate sensör dalga formları, a) uyarım sinyali, b) uyarma akımı, c) algılama bobininde indüklenen gerilim.	24
2.16: Açık çevrim analog fluxgate manyetometre blok şeması.	29
2.17: Kapalı çevrim analog fluxgate manyetometre blok şeması.	30
2.18: Gürültü spektral güç yoğunluğu.	31
2.19: MAGSAT fluxgate manyetometre blok şeması.	37
2.20: Ørsted kompakt küresel fluxgate manyetometre.	38
2.21: Ørsted fluxgate manyetometre elektroniği blok şeması.	38
2.22: Ørsted uyarma elektroniği.	39
2.23: Ørsted algılama elektroniği.	39
2.24: THEMIS fluxgate manyetometre elektronik şeması.	40
3.1: Manyetometre fonksiyonel yapısı.	41

3.2:	Fluxgate manyetometre sistemi blok diyagramı.	41
3.3:	Halka tipi fluxgate sensör hazırlık aşamaları.	43
3.4:	Fluxgate manyetometre elektronik devre şeması.	45
3.5:	Uyarma devresi.	45
3.6:	Uyarım sinyali.	47
3.7:	Algılama devresi.	47
3.8:	Algılama bobininin akort edilen çıkış sinyali.	48
3.9:	Senkron detektör yapısı.	49
3.10:	Senkron detektör çalışma prensibi.	49
3.11:	Dış alan bilgisi ile orantılı DC gerilim sinyali.	50
3.12:	Referans sinyali.	50
3.13:	Giriş sinyali ile referans sinyalinin fazda olması durumunda senkron demodülatör aşamaları.	52
3.14:	DC gerilim sinyal büyüklüğünün faz açısına göre değişimi.	53
3.15:	Giriş sinyali ile referans sinyalinin faz dışı olması durumunda senkron demodülatör aşamaları.	53
3.16:	Kapalı çevrim fluxgate manyetometre blok şeması.	54
3.17:	Referans gerilim sinyali üreteç devresi.	55
3.18:	Fluxgate manyetometre.	56
4.1:	Hassasiyet, ölçüm aralığı ve çözünürlük ölçüm düzeneği.	57
4.2:	FGS1, FGS2 ve FGS3 sensörlerine ait 2. harmonik sinyalinin DC alan bağımlılık grafikleri.	59
4.3:	FGS1 sensörüne ait çözünürlük ölçüm grafikleri.	60
4.4:	FGS2 sensörüne ait çözünürlük ölçüm grafikleri.	61
4.5:	FGS3 sensörüne ait çözünürlük ölçüm grafikleri.	61
4.6:	Gürültü analizi ölçüm düzeneği.	62
4.7:	FGS1, FGS2 ve FGS3 sensörlerine ait gürültü spektrumu.	63
4.8:	Bantgenişliği ölçüm düzeneği.	64
4.9:	FGS1'e ait manyetometre çıkışının a) alt ve üst gerilim değeri, b) yükselme süresi.	65
4.10:	Manyetometre güç tüketimi ölçüm düzeneği.	66
4.11:	Manyetometre çalışma gerilim aralığı ölçüm düzeneği.	67
4.12:	FGS1 sensörüne ait farklı besleme gerilim değerlerindeki a) sıfır alan	69

	altında çıkış gerilim değeri, b) ölçek faktör grafiği.	
4.13:	FGS2 sensörüne ait farklı besleme gerilim değerlerindeki a) sıfır alan altında çıkış gerilim değeri, b) ölçek faktör grafiği.	70
4.14:	FGS3 sensörüne ait farklı besleme gerilim değerlerindeki a) sıfır alan altında çıkış gerilim değeri, b) ölçek faktör grafiği.	71

TABLÖLAR DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Manyetik sınıfların fiziksel özellikleri.	13
2.2: Farklı geometriye sahip sensörlerin karşılaştırması.	22
2.3: Nüve parametrelerinin sensör performansına etkisi.	27
4.1: FGS1, FGS2 ve FGS3 sensörlerinin ölçüm aralığı.	60
4.2: FGS1, FGS2 ve FGS3 sensörlerinin ölçek faktörü ve çözünürlükleri.	62
4.3: FGS1, FGS2 ve FGS3 sensörlerinin kullanılması durumunda manyetometre gürültü değeri.	63
4.4: FGS1, FGS2 ve FGS3 sensörleri kullanılarak alınan manyetometre bant genişliği.	65
4.5: FGS1, FGS2 ve FGS3 sensörlerine ait güç tüketim değerleri.	67
5.1: FGS1, FGS2 ve FGS3 sensörlerine ait özellikler ve ölçüm sonuçları.	73
5.2: Literatürde yer alan farklı türdeki fluxgate sensörleri ile FGS1 ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması.	75

1. GİRİŞ

Manyetik alan ölçümü uzay araştırmaları, güvenlik kontrol sistemleri, astrofizik gibi çeşitli alanlarda oldukça önemli bir rol oynamaktadır. Manyetik alan ölçüm sonuçları doğrudan ölçülmesi kolay olmayan değişkenleri (doğal kaynak, patlamamış mühimmat tespiti gibi) hesaplamak için de kullanılmaktadır. Manyetik alan algılama teknolojisi yüksek hassasiyet, daha küçük boyut ve elektronik sistemlerle uyumluluğa duyulan ihtiyaç nedeniyle gelişmiş ve gelişmeye de devam etmektedir [1]. Çeşitli uygulamalara sahip çok yönlü sensör grubu olan manyetometreler manyetik alanı skaler veya vektörel olarak ölçmek için kullanılan cihazlardır. Ölçüm hassasiyetlerine göre değerlendirildiklerinde temelde 4 manyetometre türü ön plana çıkmaktadır. Bunlardan SQUID (Süperiletken Kuantum Girişim Cihazı) manyetometreler 1 fT-1 nT aralığındaki çok küçük manyetik alanların, Fluxgate manyetometreler 0.1 nT-100 μ T aralığındaki küçük manyetik alanların, Manyetik Rezonans sensörler 100 nT-1 mT aralığındaki orta ölçekli manyetik alanların, Hall-Etkili manyetometreler ise 10 μ T-3 T aralığındaki daha büyük manyetik alanların ölçülmesinde tercih edilmektedir [2]. Düşük manyetik alan ölçümlerinde SQUID ve Fluxgate manyetometreleri öne çıkmaktadır. SQUID manyetometresinin sıvı helyum ile soğutulma gerekliliği güç tüketiminin artmasına, pahalı ve hantal bir yapıda olmasına neden olmaktadır. Bu nedenle düşük manyetik alanların ölçümünde sağlam, güvenilir, fiziksel olarak küçük ve güç tüketimi düşük olması Fluxgate manyetometreleri tercih edilir hale getirmiştir. Fluxgate manyetometrelerin kullanıldığı bazı önemli uygulama alanları aşağıda verilmektedir.

- Elektronik Pusulalar ve Navigasyon Sistemleri

Manyetik pusula antik çağlardan bu yana önemli navigasyon aracı olmuştur. Dünya'nın manyetik alanının vektörel toplamına ve örnek olarak bir geminin manyetik alanına hizalayarak navigasyona yardımcı olmaktadır. Geminin metal kütlesi (gövde ve içerik), Dünya'nın manyetik alanına eşit veya daha büyük bir manyetik alan oluşturarak seyir analizinde hatalara neden olabilmektedir. Bu problem manyetik alan kaynağı olan gövdenin uzağına hassas ve sağlam bir manyetik sensör yerleştirilmesiyle çözülebilir hale gelmektedir. Yapılan çalışmalar neticesinde fluxgate sensörün bu uygulama için en uygunu olduğu görülmüştür.

Fluxgate manyetometresi sapmanın minimum ve kararlı olduğu, manyetik alan kaynaklarından uzak bir yerde manyetik alanın ölçölmesni sağlamakta ve bu da fluxgate teknolojisinin kullanılmasıyla çok verimli navigasyon sistemleri elde edilebileceğini göstermektedir.

- Uzak Aracı ve Uydular İçin Durum Cayrosu

Fluxgate manyetometreleri bir uzak aracının veya uydunun Dünya'ya göre oryantasyonu hakkında bilgi vermek için Dünya'nın manyetik alan vektörünün ölçölmesinde kullanılmaktadır. Bu uygulamalarda manyetometrenin özellikle küçük boyut, düşük güç tüketimi, yüksek hassasiyet ve daha az gürültüye sahip olması gerekmektedir. Fluxgate manyetometreleri bu gereksinimleri karşıladığı için uydu uygulamalarında kullanımı en uygun manyetik alan sensörü olmaktadır.

- Uzak Manyetik Alan Ölçömleri/Uyulamaları

Güneş-yeryüzü ortamını yöneten süreçlerin iyi anlaşılmasıyla yeryüzündeki yaşamımızı büyük ölçüde etkileyebilecek olayları daha iyi tahmin ederek bunlara uyum sağlayabilmek ve Güneş ile Dünya'nın manyetosferde nasıl etkileşime girdiğini tam olarak öğrenilebilmek mümkündür. Manyetosferin izlenmesi için de Fluxgate sensörleri de sağlamlıkları, hassasiyetleri ve düşük güç tüketimleriyle en uygun sensör grubudur.

Bunların yanısıra denizaltı algılama, jeofizik uygulamaları, paleomanyetik araştırmalar gibi çeşitli uygulama alanları da mevcuttur. Tüm bunlar göz önünde bulundurulduğunda fluxgate sensörlerinin çok yönlü manyetik alan sensörü olduğu açıkça görölmektedir.

1.1. Literatür Özeti

Fluxgate manyetometrelerin boyutunu, güç tüketimini ve ağırlığını azaltmak mikro elektronik endüstrisinde, kara ve uzak teknolojilerinde oldukça önem arz etmektedir. Bu nedenle çeşitli araştırmacılar tarafından fluxgate sensörleri geliştirilerek sinyal işleme ve sistem geliştirme çalışmaları yapılmıştır.

Fluxgate manyetometre optimizasyonu sensör yapımında kullanılan ferromanyetik malzeme, uyarma-algılama bobinleri ve sinyal işleme devresi olmak üzere üç alanda yapılmaktadır. Bobinlerin optimizasyonunda kullanılan üç yöntem vardır; ilki birkaç katmandan oluşan ve aralarına nüve malzemesi yerleştirilen düzlemsel bobinlerin kullanıldığı Baskı Devre Kartı (PCB) teknolojisi, ikincisi ferromanyetik ince filmi çevreleyen ve birkaç üretim aşamasıyla gerçekleştirilen spiral algılama bobinin üretildiği Mikro-Elektromekanik Sistemler (MEMS) teknolojisi ve sonuncusu ferromanyetik nüvenin etrafına sarılmış üç boyutlu (3D) bobin üretiminin yapıldığı tel sargı teknolojisidir.

2006 yılında yapılan bir çalışmada Fluxgate sensör gürültüsünün azaltılması ve hassasiyetinin artırılması hedeflenmiştir [3]. Bu çalışmada sinyal üretimi için 400 kHz'lik osilatör tercih edilmiş ve osilatörden elde edilen 100 kHz frekanslı üçgen dalga formu uyarım sinyali olarak kullanılırken, 200 kHz frekanslı sinyal sensör çıkışının demodülasyonunda referans sinyali olarak kullanılmıştır. Uyarma devresi sırasıyla entegratörden, geçiş iletkenliği kuvvetlendiricisinden ve AB sınıfı güç kuvvetlendiricisinden, ikinci harmonik algılama prensibine dayanan algılama devresi ise senkron demodülasyon bloğundan ve ikinci dereceden Sallen-Key alçak geçirgen filtreden oluşturulmuştur. Çalışmadaki arayüz devresinin oldukça karmaşık bir yapıda oluşu fluxgate sistemiyle uyum sağlamasını zorlaştırmıştır.

2009 yılında analog arayüz devresine sahip olan ve üretiminde 0.5 μm CMOS teknolojisi kullanılan iki eksenli mikro-fluxgate sensörü üzerine bir çalışma yapılmıştır [4]. Sensör uyarımında 100 kHz frekanslı genliği özelleştirilebilen üçgen dalga formu kullanılmıştır. Uyarım sinyalinin genliğinin ayarlanabilmesi için uyarma devresinde 3.3 V ve 26 V besleme gerilimine sahip iki ayrı blok kullanılmıştır. 3.3 V besleme gerilimine sahip blokta yalnızca uyarım sinyalinin üretimi yapılırken, 26 V besleme gerilimine sahip ikinci blokta tüm sisteminin çalışması için gerekli güç sağlanmıştır. Algılama devresinde sırasıyla kazanç, demodülatör ve ikinci dereceden Sallen-Key düşük geçirgen filtre katmanları kullanılmış ve DC çıkış 13-bitlik bir ADC kullanılarak sayısallaştırılmıştır. Sistemin güç tüketimi 76.3 mW seviyelerindedir. Kullanılan analog arayüz devresinin oldukça karmaşık olması ve buna ek dekaplaj katmanı kullanılarak devre maliyetinin artırılması dezavantaj oluşturmuştur.

2010 yılında yapılan bir çalışmada yüksek sıcaklığa sahip Vitroperm VP800R nüvesiyle hazırlanan çubuk geometrili fluxgate sensörünün optimizasyonu için

analitik yaklaşım kullanılmıştır [5]. Sensör hassasiyetinin optimizasyonu için algılama bobini tur sayısı, nüve uzunluğu ve çapı hesaplanmıştır. Bu yaklaşım fluxgate manyetometresinin kapalı döngü hassasiyetini sıcaklığın bir fonksiyonu olarak çözümlenmesine olanak sağlamış ve arayüz devresinin optimum performansının sadece nüve boyutuna ve geometrisine değil aynı zamanda bobinlerin tur sayısına da bağlı olduğunu göstermiştir. Üretilen sensör maksimum $130 \text{ mV}/\mu\text{T}$ hassasiyetle $50 \mu\text{T}$ 'ye kadar doğrusallık göstermiş ve 100 Hz 'deki gürültüsü $15 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ olarak ölçülse de algılama bobininin termal direnci sensörün artan bir gürültü profili sergilemesine neden olmuştur.

2012 yılında düzlemsel fluxgate sensörleri için basit ve hassas bir okuma elektroniği üzerine bir çalışma yapılmıştır [6]. Çalışmada Vitrovac 6025 (%73 oranında Co, Fe, Mo ve %27 oranında Si, B) nüvesi ile hazırlanan sensör kullanılmıştır. Sensör hassasiyetini, gürültüsünü ve doğrusal çalışma aralığını optimize etmek için Jiles-Atherton modeline göre Vitrovac histerisiz döngü modeli geliştirilerek elektronik tasarımında PSPICE simülasyon aracı kullanılmıştır. Üretilen sensörün 10 kHz uyarım frekansında ve 600 mA uyarım akımında maksimum hassasiyeti $13.3 \text{ mV}/\mu\text{T}$, $12.2 \text{ nT}/\sqrt{\text{Hz}}$ @ 1.5 Hz olarak ölçülmüş ve $38 \mu\text{T}$ 'ya kadar doğrusal davranış göstermiştir. Harici ferromanyetik kümelenmelerin veya kaçak alanların etkisinden dolayı üretilen sensörün hassasiyetinin ticari ürüne kıyasla daha düşük olduğu görülmüştür.

2013 yılında 3D tel sargı yöntemiyle hazırlanan halka geometrili fluxgate sensörü kullanılarak fluxgate manyetometresi analiz edilmiştir [7]. Çalışmada sensörün karmaşıklığının, parça sayısının ve fiziksel boyutunun azaltılması hedeflenmiştir. Manyetometre ölçüm hassasiyetini, gürültüsünü ve doğrusal çalışma aralığını optimize etmek içinse dijital geri besleme yöntemi kullanılmıştır. Üretilen manyetometrenin 28.8 kHz uyarım frekansında doğrusal çalışma aralığı $\pm 65 \mu\text{T}$, güç tüketimi 1.5 W ve gürültüsü $10 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ @ 1 Hz olarak ölçülmüştür. Manyetometre tasarımında dijital geri beslemeden yararlanılması önemli ölçüde güç tüketimine neden olmuştur.

2013 yılında yapılan bir diğer manyetometre çalışmasında 3D tel sargı yöntemi ve 20 mm çaplı nikel-molibden permaloy nüvesiyle hazırlanan halka geometrili fluxgate sensörleri kullanılmıştır [8]. Manyetometre hassasiyetini ve ölçüm aralığını artırmak amacıyla delta-sigma ADC yapısı kullanılmıştır. 11 kHz uyarım frekansında sensörün doğrusal çalışma aralığı $60 \mu\text{T}$, güç tüketimi 2.17 W ve gürültüsü $7.7\text{-}8.9$

$\text{nT}/\sqrt{\text{Hz}}@1\text{Hz}$ olarak ölçülmüştür. Nüve kesit alanının geniş olması doyuma ulaşması için daha yüksek uyarım akımı gerektirmiş bu durum manyetometre güç tüketiminin artmasına neden olmuştur. Devre kartı ağırlığının 414 g, sensör ağırlığının 118 g ve güç tüketiminin 2.17 W olması geliştirilen manyetometreyi önemli ölçüde dezavantaj oluşturmıştır.

2014 yılında yapılan bir çalışmada Metglas 2714A nüvesiyle hazırlanan düzlemsel fluxgate sensörü kullanılmıştır [9]. İki adet 3D uyarım bobini ve dört adet düzlemsel algılama bobininden oluşan sensörün hassasiyet ve gürültü optimizasyonunu sağlamak için uyarım bobinlerinin optimum geometrik boyutları hesaplanmıştır. Nüvelerdeki manyetik akı yoğunluğu dağılımını analiz etmek için sonlu eleman analizi (FEA) elektromanyetik modellemesi ve simülasyonu yapılmıştır. 50 kHz uyarım frekansında ve 600 mA uyarım akımında maksimum sensör hassasiyeti 593 V/T ve gürültüsü $50 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}@1\text{Hz}$ olarak ölçülmüştür. Bu çalışmada MEMS üretim teknolojisi sınırlamaları sensör hassasiyetinin oldukça düşük olmasına neden olmuştur.

2015 yılında 3D tel sargı yöntemiyle Metglas 2714A şeritleri kullanılarak hazırlanan halka geometrili fluxgate sensörleri üzerinde bir çalışma yapılmıştır [10]. Çalışma kapsamında farklı çap ve tur sayısına sahip 3 adet sensör hazırlanmıştır. 10 mm, 15 mm ve 20 mm çapındaki sensörler FG10, FG15 ve FG20 olarak adlandırılarak sırasıyla uyarım bobini tur sayıları 90, 155, 350; algılama bobin tur sayıları 1020, 1410, 1900 olarak belirlenmiştir. FG10, FG15, FG20 sensörlerinin hassasiyeti sırasıyla 597 V/T, 1798 V/T ve 11400 V/T, gürültüleri ise $31.7 \text{ nT}/\sqrt{\text{Hz}}@1\text{Hz}$, $23.8 \text{ nT}/\sqrt{\text{Hz}}@1\text{Hz}$ ve $2.72 \text{ nT}/\sqrt{\text{Hz}}@1\text{Hz}$ olarak ölçülmüştür. Elektronik ölçüm sınırlandırmaları (manyetik alan kaynaklarınca temiz olmayan ortam) sensör gürültü seviyelerinin önceki yıllarda yapılan çalışmalara kıyasla daha kötü olmasına neden olmuştur.

1.2. Çalışmanın Amacı

1950'lerden bu yana birçok kullanım alanı olmasına karşın Fluxgate manyetometreleri üzerine ülke çapında yapılan çalışmaların nicelik olarak yetersizliği bu konuda yapılacak olan tüm katkıları önemli kılmaktadır [11]. Ülkemizde manyetik alan sensörleri üzerine bilimsel çalışmalar az olmakla birlikte

son ürüne yönelik çalışma yoktur. Amacımız bu teknolojiyi ülkemize kazandırarak, uydu konum ve yönelim belirleme sensörü olan manyetometrelerin de milli olanaklar ile üretimini sağlamaktır. Bu tez çalışmasında bu alandaki geçmiş çalışmalar büyük bir titizlikle incelenerek boyut, hassasiyet, gürültü ve güç tüketimi açısından daha iyi özelliklere sahip özellikle uzay araştırmalarında kullanılmak üzere dünyanın manyetik alanının büyüklüğünü vektörel olarak ölçebilen optimize bir Fluxgate manyetometre tasarlanması hedeflendi. Fluxgate sensöründen ve sinyal koşullandırma elektroniğinden oluşan manyetometrede öncelikle sensör optimizasyonunu sağlamak için farklı oranlarda atomik kompozisyona sahip kobalt ve demir tabanlı soft ferromanyetik malzeme (nüve) ile üç adet sensör hazırlanarak nüvelerin manyetik özelliklerinin sensör performansına olan etkisi incelendi. Sinyal koşullandırma elektroniği için gerekli literatür taramasının yapılarak optimum tasarım belirlenerek elektronik devre elemanları üzerinde iyileştirmeler yapıldı. Örnek oluşturma açısından tasarlanan sinyal işleme elektroniği ile birlikte üretilen sensörler kullanılarak alınan ölçüm sonuçları önceki yıllarda yapılan çalışmalar ile karşılaştırıldı. Tasarlanan manyetometre çözünürlüğünün 5 nT, dinamik ölçüm aralığının $\pm 70 \mu\text{T}$ ve ölçüm hızının 100 Hz olması sayısal olarak başarı kriterlerimiz olmuştur. Böylelikle son yıllarda ülkemizin artan uzay araştırmalarında kullanılmak üzere Fluxgate manyetometresinin milli imkanlarla tasarımı ve üretimi için gerekli teorik altyapının hazırlanması hedeflenmiştir.

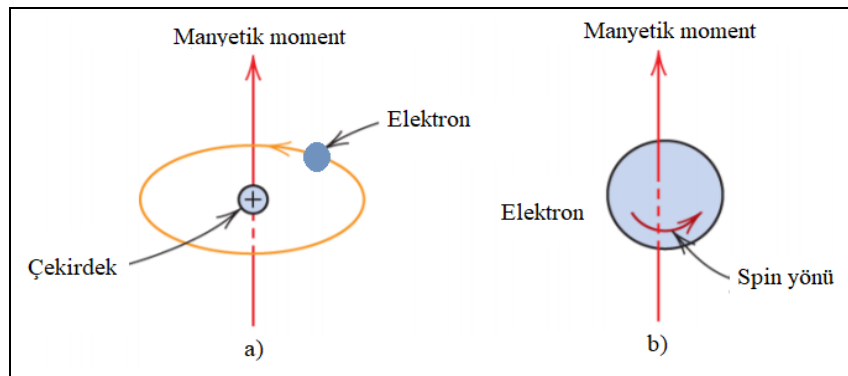
2. KAVRAMSAL TEMELLER

2.1. Manyetizma

Manyetizma bir malzemenin manyetik alana olan tepkisi olup manyetik malzemeler üzerinde oluşturduğu çekici veya itici kuvveti ifade etmektedir. Manyetik alanı oluşturan belirli bir hacimdeki manyetik enerjinin değişimidir. Manyetizmanın kökeni elektronların yörünge ve spin hareketlerine ve birbirleriyle nasıl etkileştiklerine dayanmaktadır. Yörünge hareketi elektronun çekirdeği etrafında, spin hareketi ise kendi eksenini etrafında dönmesidir. Bu hareketlerin her ikisi de manyetik malzemelerde manyetik davranışa katkıda bulunmaktadır.

2.1.1. Mıknatıslanma

Maddenin manyetiklik durumunu belirten bir nicelik olan mıknatıslanma, malzemenin birim hacmindeki manyetik moment yoğunluğunu ifade eden vektör alanıdır. Atomik seviyedeki manyetik momentlere yörünge elektronları ve elektron spinleri olmak üzere iki türde katkı vardır. Şekil 2.1’de gösterildiği gibi yüklü parçacıkların kapalı çevrimdeki bu hareketleri birer manyetik moment oluşturmaktadır [12]. Bu manyetik momentlerin birbiriyle nasıl etkileşime girdikleri malzemelerin manyetik karakteristiğini belirlemektedir.



Şekil 2.1: Manyetik momentler.

Manyetik moment ve mıknatıslanma arasındaki ilişki

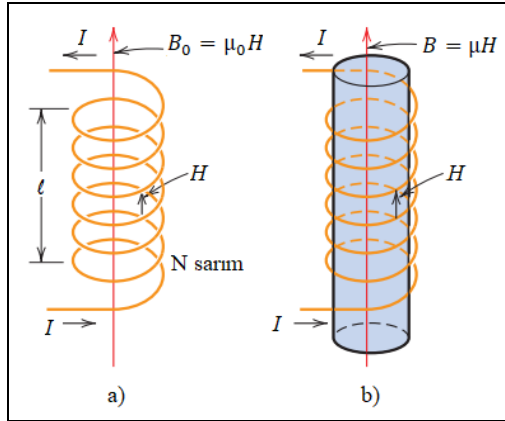
$$M = \frac{N}{V} m \quad (2.1)$$

denklemleriyle ifade edilir. Burada M mıknatıslanma, m manyetik moment vektörü, V malzemenin hacmi, N ise V hacmindeki malzemenin manyetik moment sayısıdır. Malzemedeki toplam mıknatıslanmanın birimi Amper/metre (A/m)'dir.

2.1.2. Manyetik Alan Vektörleri

Manyetik alan şiddeti harici olarak uygulanan bir akımdan kaynaklanan ve malzemenin kendisine özgü olmayan manyetik alanı ifade etmektedir. Metre başına amper olarak ölçülen bu nicelik H ile gösterilmektedir. Şekil 2.2'de gösterildiği gibi akım taşıyan silindirik bir bobin (veya solenoid) örneğini ele alacak olursak manyetik alan şiddeti Denklem 2.2 ile ifade edilir. Burada N tur sayısı, I telden geçen akım ve l solenoidin uzunluğudur.

$$H = \frac{NI}{l} \quad (\text{A/m}) \quad (2.2)$$



Şekil 2.2: Solenoid çalışma prensibi.

Manyetik akı yoğunluğu (B) ise manyetik alana dik birim alandan geçen akı miktarıdır ve birimi Tesla (T) veya Weber/metrekare (Wb/m^2)'dir. Solenoid içerisinde manyetik bir malzeme bulunmaması durumunda (Şekil 2.2.a) manyetik alan şiddeti ile manyetik indüksiyon arasındaki ilişki

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

olacaktır. Burada boşluğun manyetik geçirgenliği olan μ_0 evrensel bir sabit olup değeri $4\pi \times 10^{-7}$ Henry/metre (H/m)'dir.

Solenoid içerisine manyetik malzeme yerleştirilmesi durumunda (Şekil 2.2.b) ortam geçirgenliği büyük ölçüde değişerek malzemenin manyetik alan ile etkileşimi

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

olacaktır. Burada μ manyetik geçirgenlik olup

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (2.5)$$

ile ifade edilmektedir. Burada μ_r malzemenin boşluğa göre göreceli geçirgenliği olup malzemenin manyetizasyon kapasitesini belirtmektedir.

Mıknatıslanma ve manyetik alan şiddeti arasındaki ilişki ise Denklem 2.6'da verilmektedir.

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

Burada manyetik alınganlık olan χ_m birimsiz olup malzemenin uygulanan manyetik alana karşı mıknatıslanma ölçüsünü ifade etmektedir.

Dış manyetik alan altındaki malzemenin toplam manyetik alanı mıknatıslanmasının ve manyetik alan şiddetinin vektörel toplamına eşit olmaktadır. B, H ve M arasındaki bu ilişki Denklem 2.7 ile ifade edilmektedir.

$$B = \mu_0 (H + M) = \mu_0 (H + \chi_m H) = \mu_0 (1 + \chi_m) H = \mu_0 \mu_r H \quad (2.7)$$

2.1.3. Demanyetizasyon Etkisi

Bir ferromanyetik malzeme harici manyetik alan ile manyetize edildiğinde mıknatıslanma alanına karşı bir H_d demanyetizasyon alanı oluşturarak tepki vermektedir [13]. Bu durumda toplam alan

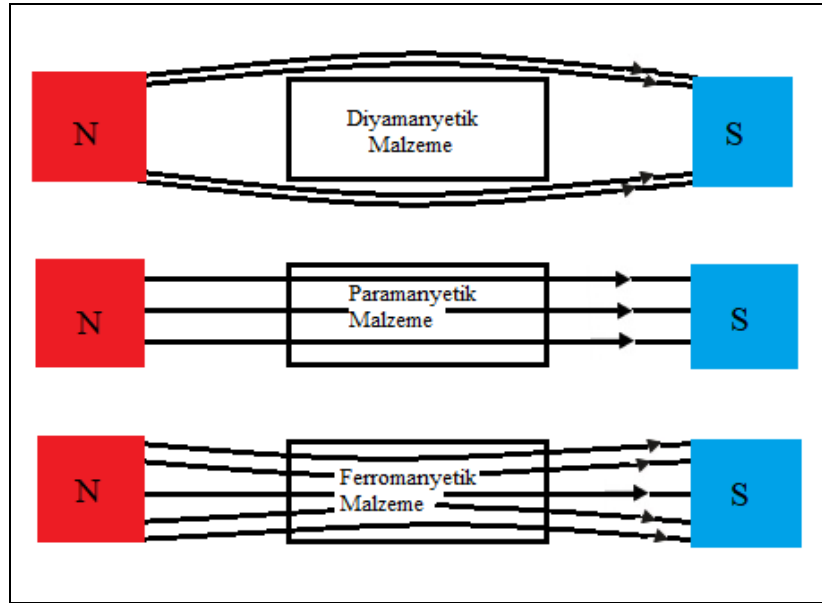
$$H = H_a + H_d \quad (2.8)$$

olacaktır. Demanyetizasyon alanı H_d Denklem 2.9’da ifade edildiği gibi demanyetizasyon faktörü N_d ile manyetizasyon arasındaki zıt bir orantılılık sabitidir. Bu nedenle de ferromanyetik malzemenin şekline ve boyutuna bağlı olarak toplam alan gücünü azaltma eğilimindedir.

$$H_d = -N_d M \quad (2.9)$$

2.1.4. Manyetik Malzemelerin Sınıflandırılması

Tüm manyetik malzemeler uygulanan manyetik alana karşı farklı tepki göstermektedir. Malzemelerin sınıflandırılmasındaki ilk ayrım atomların kalıcı manyetik dipol taşıyıp taşımadığıdır. Kalıcı dipol içermeyen malzemeler diyamanyetik malzeme olarak isimlendirilirken, malzemelerin atomları kalıcı dipoller taşıyorsa bunlar ayrı ayrı dipoller arasındaki etkileşime bağlı olarak paramanyetik, ferromanyetik ve ferrimanyetik olarak isimlendirilmektedir. Manyetik alanın malzeme sınıfları üzerindeki etkisi Şekil 2.3’te gösterilmektedir.

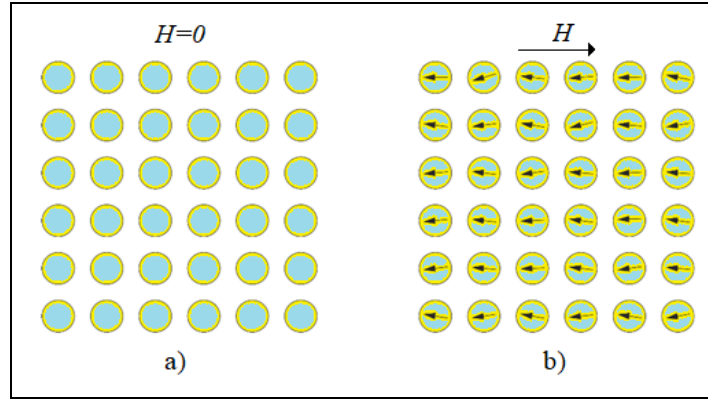


Şekil 2.3: Manyetik alanın farklı malzeme türleri üzerindeki etkisi.

2.1.4.1. Diyamanyetizma

Diyamanyetizma sadece harici bir manyetik alanın varlığında devam eden çok zayıf bir manyetizma türüdür. Diyamanyetik malzemelerin net manyetik momentleri olmadığı için sadece dışarıdan manyetik alan uygulandığında manyetiklik davranışını korumaktadırlar. Bu durum manyetik alan nedeniyle elektron yörünge hareketinin değişmesinden kaynaklanmaktadır. Diyamanyetik malzemeler kalıcı dipollere sahip değildir ve dipoller sadece Şekil 2.4.b’de gösterildiği gibi harici bir manyetik alanın varlığında uygulanan alana zıt yönde indüklenir. Bu gruptaki malzemeler manyetik alana maruz kaldığında mıknatıslanmaları çok zayıf ve uygulanan alana zıt yöndedir.

Diyamanyetik malzemeler manyetik alanlara zayıf ve olumsuz bir duyarlılığa sahiptir. Bu malzemelerin manyetik alınganlıkları oldukça küçük ve negatifken ($\chi \approx -10^{-5}$) göreceli geçirgenlikleri 1’den biraz küçüktür ($\mu_r < 1$).



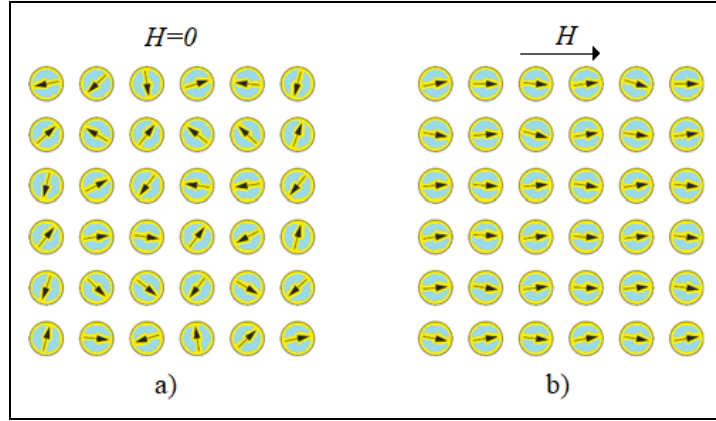
Şekil 2.4: Diyamanyetik malzemenin a) dış manyetik alan olmaması, b) dış manyetik alan olması durumları için atomik dipol gösterimi.

2.1.4.2. Paramanyetizma

Paramanyetik malzemeler harici bir manyetik alan uygulandığında zayıf bir mıknatıslanma özelliği göstermektedirler. Harici bir manyetik alanın olmadığı durumda manyetik moment yönelimleri rastgeleyken alan uygulanması durumunda manyetik momentler uygulanan alana doğru yönelerek malzemeye net bir mıknatıslanma kazandırmaktadır. Bu malzemeler kalıcı bir mıknatısa zayıf bir şekilde çekilme eğilimindedir. Manyetik momentler birbiriyle manyetik olarak etkileşmez ve dış alandan bireysel olarak etkilenirler [14]. Bu gruptaki malzemeler

de diyamanyetizma grubundakiler gibi dış manyetik kaldırıldığında mıknatıslanmaları sıfır olmaktadır.

Paramanyetik malzemelerin manyetik alınganlıkları oldukça küçük ve pozitif ($\chi \approx 10^{-5}$) göreceli geçirgenlikleri ise 1'den biraz büyüktür ($\mu_r \geq 1$).

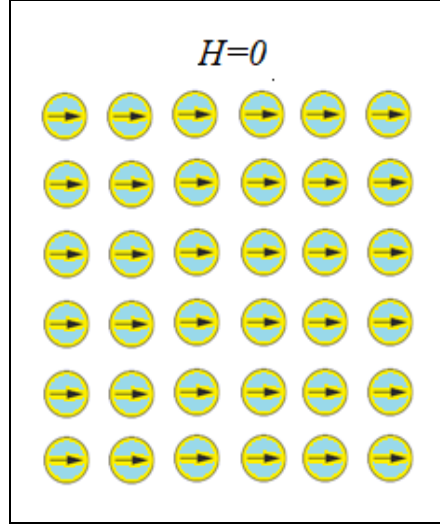


Şekil 2.5: Paramanyetik malzemenin a) dış manyetik alan olmaması, b) dış manyetik alan olması durumları için atomik dipol gösterimi.

2.1.4.3. Ferromanyetizma

Ferromanyetik malzemeler paramanyetik malzemelere benzer şekilde davranırsa da farklı olarak harici manyetik alanın yokluğunda bile manyetik momentleri Şekil 2.6'da gösterildiği gibi paralel olarak hizalanmaktadır. Paramanyetizma sınıfındaki malzemelere kıyasla bunların manyetik momentleri çok daha güçlü etkileşimler gösterir. Ayrıca ferromanyetik malzemelerde diğer manyetizma türlerinin aksine uygulanan dış manyetik alan şiddetine göre malzemenin geçirgenliği değişirerek B-H eğrisinde bir histerisize neden olur. Bu durum sabit olmayan geçirgenliğin kesin bir göstergesidir [15].

Manyetik alınganlık değeri pozitif ($\chi > 0$) ve oldukça büyük değerli, manyetik geçirgenliği ise 1'den oldukça yüksektir ($\mu_r \gg 1$).



Şekil 2.6: Ferromanyetik malzemenin atomik dipol gösterimi.

Tablo 2.1 ile açıklaması verilen manyetizma türlerinin özellikleri özetlenmiştir [16].

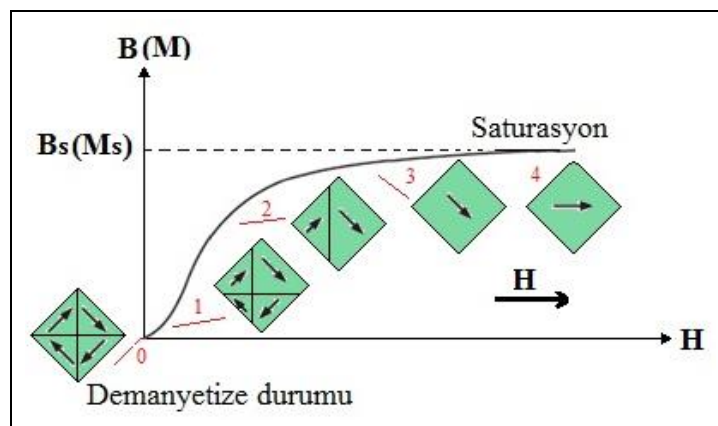
Tablo 2.1: Manyetik sınıfların fiziksel özellikleri.

Sınıf	Sıcaklığa bağlı χ_m	Manyetik alana bağlı χ_m	Histerisiz	Örnek	χ_m
Diyamanyetizma	hayır	hayır	yok	Cıva, azot, hidrojen, helyum, bakır, amonyak, gümüş vb.	$\sim -10^{-5}$
Paramanyetizma	hayır	evet	yok	Alüminyum, magnezyum, sodyum, oksijen vb.	$\sim 10^{-5}$
Ferromanyetizma	evet	evet	var	Süpermalloy Demir Nikel Kobalt	10^6 $5 \cdot 10^3$ $6 \cdot 10^3$ $2.44 \cdot 10^2$

2.1.5. Mıknatıslanma Eğrisi ve Histerisiz

Paramanyetik ve diyamanyetik malzemelerin mıknatıslanma eğrisi uygulanan manyetik alan ile doğrusal bir değişim gösterirken ferromanyetik malzemelerde mıknatıslanma eğrisi karakteristiği farklıdır. Ferromanyetik malzemeler artan bir

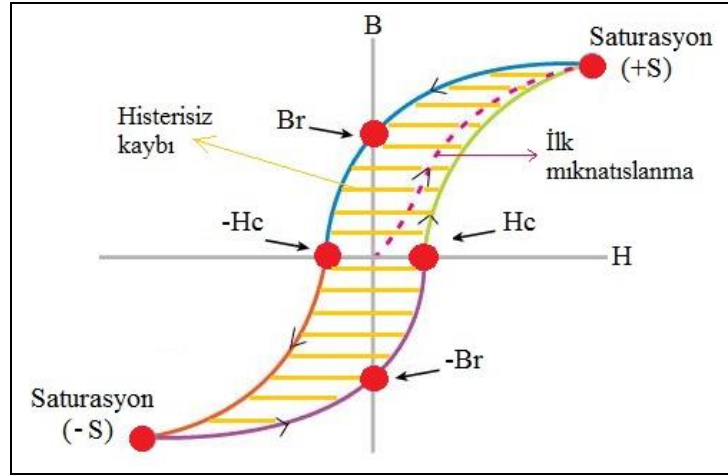
Ferromanyetik bir malzemenin mıknatıslanma eğrisi Şekil 2.7’de gösterilmektedir. Malzeme 0 noktasında demanyetizasyon manyetik alan uygulanması durumunda doyuma ulaşınca kadar sırasıyla 0-1-2-3-4 yolunu izleyecektir.



Histerisiz eğrisi, manyetik akı yoğunluğu (B) ile uygulanan manyetik alan ($H_{dış}$) arasında doğrusal olmayan bir ilişkiyi ifade etmektedir. Bu nedenle ferromanyetik malzemelerde B ve H alanı arasındaki ilişki sabit bir sayıyla ifade edilememektedir. Ferromanyetik malzeme doyuma ulaştıktan sonra manyetik alanın azaltılmasıyla manyetik akı yoğunluğu aynı eğriyi takip edemeyerek geride kalacak ve histerisiz çevrimini başlatacaktır [17]. Ferromanyetik malzeme için tipik bir histerisiz eğrisi Şekil 2.8’de gösterilmektedir. Burada manyetik alan şiddeti sıfır noktasına geri geldiğinde malzeme üzerinde kalıcı mıknatıslanmanın (B_R) bir ölçüsü olan manyetik akı yoğunluğu kaldığı görülmektedir. Manyetik alan yokluğunda malzeme üzerinde kalan bu mıknatıslanmanın giderilmesi için koersivite veya koersif alan şiddeti (H_C) olarak adlandırılan zıt yönde bir manyetik alan uygulanır. Koersif alan uygulanmaya devam edildiğinde ise bu defa da ters yönde doyum gerçekleşecektir. Böylece alan ikinci defa yön değiştirmiş olacak ve yeniden ilk

doymum noktasına ulaşacaktır. Sonuç olarak B-H çevrimi bir histerisiz döngüsü oluşturacaktır.

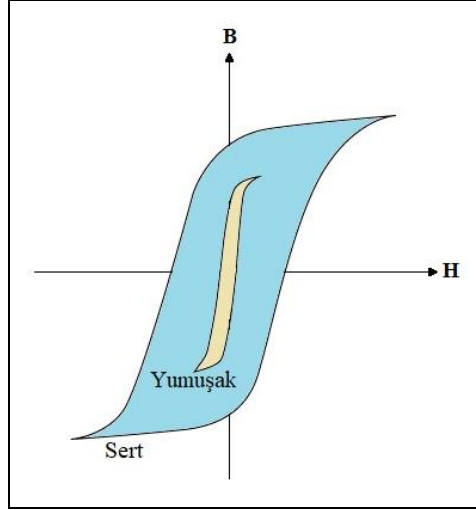
Bir malzemedeki histerisiz güç kaybını ise B-H eğrisindeki alanın genişliği belirlemektedir. B-H eğrisindeki alanın genişliği ile malzeme üzerindeki güç kaybı doğru orantılıdır.



Şekil 2.8: Ferromanyetik bir malzemedeki B-H eğrisi ve histerisiz.

2.1.6. Yumuşak ve Sert Manyetik Malzemeler

Ferromanyetik malzemeler uygulanması gereken koersif alan şiddetine göre yumuşak (soft) ve sert (hard) malzemeler olarak sınıflandırılmaktadır. Histerisiz eğrisine bakılarak malzemenin yumuşak veya sert olduğu anlaşılmaktadır (bkz. Şekil 2.9). Yumuşak ferromanyetik malzemeler ince ve dar bir histerisiz eğrisine sahipken sert ferromanyetik malzemelerin histerisiz eğrisi kalın ve geniştir. Bunun yanı sıra yumuşak ferromanyetik malzemeler düşük koersiviteye ve yüksek manyetik geçirgenliğe sahipken sert ferromanyetik malzemeler yüksek koersiviteye ve düşük manyetik geçirgenliğe sahiptir.



Şekil 2.9: Yumuşak ve sert manyetik malzemelerin B-H eğrisi.

2.1.7. Girdap (Eddy) Akımları

Girdap akımları, Faraday indüksiyon yasasına göre değişen manyetik alana karşı iletkende oluşan çembersel elektrik akımlarıdır. Bu akımlar manyetik alana dik bir düzlemde ve kendisini oluşturan alana ters yönde kapalı bir çevrimde akmaktadır. Manyetik kayıp mekanizmaları içinde önemli bir yere sahip olan Girdap akım kayıpları manyetik alanın zamanla değişmesinden dolayı ısı şeklinde ortaya çıkmaktadır. Bu kayıplar malzemenin ısınmasına neden olurken manyetik alanı da zayıflatmaktadır.

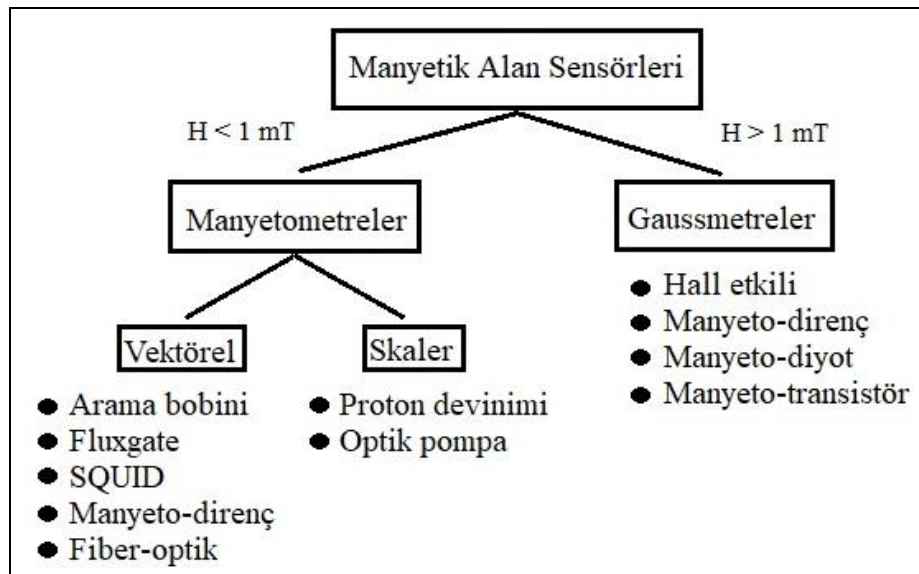
2.1.8. Curie Noktası

Malzemelerin manyetikliğini etkileyen en önemli etkenlerden birisi sıcaklıktır. Sıcaklık artışı atomların termal titreşimini artırarak manyetik moment dizilimlerini değiştirir. Malzemelerin manyetik karakteristiğinin değiştiği bu sıcaklık değerine Curie noktası denir. Ferromanyetik malzemelerde sıcaklığın Curie noktasına yükseltilmesi malzemenin mıknatıslığını yitirerek paramanyetik davranış sergilemesine neden olur. Bu malzemeler Curie noktasının altında soğutulduklarında ise yeniden ferromanyetik özelliklerini kazanmaktadır.

2.2. Manyetik Alan Ölçüm Teknolojisi

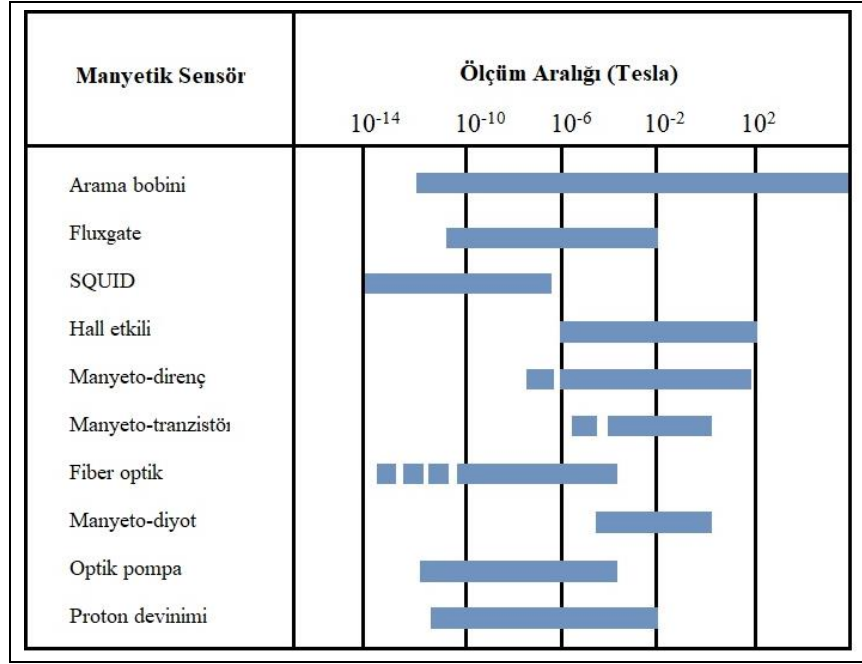
Manyetik alan sensörleri çeşitli ortamlarda mevcut manyetik alanı elektrik sinyaline dönüştüren cihazlardır. Bir mıknatıs tarafından üretilen manyetik alan birçok bilgi türü için taşıyıcı olarak kullanılmaktadır. Manyetik alanla taşınan bu bilgileri algılama, toplama, depolama, dönüştürme, çoğaltma ve izleme görevi manyetik alan sensörleri tarafından yerine getirilir. Bu nedenle de bilgi teknolojisi ve endüstrisinde vazgeçilmez bir temel unsur haline gelmişlerdir. Günümüzde manyetik alan sensörleri fiziksel, kimyasal ve biyolojik ekiler temelinde geliştirilerek, bilimsel araştırmalarda ve günlük hayatta yaygın olarak kullanılmaktadır. Sensör seçimi yapılırken uygulama alanına uygun olması ve ölçülecek alanın büyüklüğü, bant genişliği, çözünürlüğü, çalışma sıcaklığı, menzil gibi birçok parametre göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

Şekil 2.10'da sıklıkla karşılaşılan manyetik alan sensörleri verilmiştir. Manyetik alan sensörleri ölçülecek alanın büyüklüğüne göre manyetometre ve gaussmetre olarak isimlendirilmektedir. 1 mT'nin altındaki manyetik alanlar manyetometreler ile ölçülürken 1 mT'nin üzerindeki manyetik alanlar gaussmetreler ile ölçülür. Manyetometreler de kendi aralarında vektörel ve skaler olmak üzere ikiye ayrılır. Skaler manyetometreler ile manyetik alanın genliği ölçülürken vektörel manyetometreler ile belirli bir yöndeki manyetik alan ölçülmektedir.



Şekil 2.10: Manyetik alan sensörleri.

Sensör üretiminde kullanılan farklı teknolojiler hassasiyet, kararlılık, dayanıklılık gibi sensör parametrelerini etkilemektedir. Bu nedenle sensör seçimini uygulama alanına yönelik yapmak oldukça önemlidir. Öncelik olarak ölçülecek alanın büyüklüğü göz önünde bulundurulmalı sonrasında uygulamaya yönelik diğer parametreler dikkate alınmalıdır. Manyetik alan sensörlerinin ölçüm aralıkları Şekil 2.11’de verilmiştir.



Şekil 2.11: Manyetik alan sensörlerinin ölçüm aralıkları.

İndüksiyon bobini veya arama bobini (search-coil) manyetometresi Faraday indüksiyon yasasına dayanan düşük manyetik alan algılama cihazıdır. İndüksiyon yasasına göre zamanla değişen bir manyetik alan spiral tel boyunca manyetik akı değişimine neden olarak spiral içindeki akının değişim hızıyla orantılı bir gerilim indükleyecektir. Buna göre İndüksiyon bobini manyetometresi ile ölçüm yapılabilmesi için bobinin değişen bir manyetik alanda olması veya sabit bir manyetik alanda hareket etmesi gerekmektedir. Bu nedenle statik veya değişimi yavaş olan alanların tespitinde kullanmak için uygun değildir.

SQUID (Süperiletken Kuantum Girişim Cihazı) manyetometre en hassas düşük manyetik alan ölçüm cihazıdır. Çok düşük manyetik alanları yüksek bir hassasiyet ile ölçebilme avantajına karşın sıvı helyum ile soğutulma gereklilikleri uygulama alanlarını sınırlandırmakta ve çok fazla güç tüketimine neden olmaktadır.

Bu nedenle sadece çok özel olan beyin aktivitelerin incelenmesi, kalp rahatsızlıklarının belirlenmesi gibi sağlık alanlarında kullanılmaktadır.

Manyeto-direnç sensörleri orta seviye manyetik alan ölçümünde kullanılan ve manyetik alanın genliği ile birlikte yönünü de ölçebilen vektör sensörleridir. Manyeto-direnç bir malzemenin manyetik alana maruz kaldığında elektriksel direncini değiştirmesidir. Manyeto-direnç sensör yapımında manyetik alan uygulandığında elektrik direnci değişen özel malzemeler kullanılır. Böylelikle manyetik alana maruz kalan malzemenin direnç değişimi doğru bir şekilde ölçüldüğünde manyetik alan hakkında bilgi elde edilir. Bu sensörler manyeto-direnç etkilerine göre AMR (anizotropi manyeto-direnç) ve GMR (dev manyeto-direnç) olarak sınıflandırılmaktadır.

Hall etkili manyetik sensörler Hall olayı prensibine dayanan ve yüksek manyetik alan ölçümünde kullanılan en eski vektör sensörleridir. Manyetik alandaki yüklü parçacıkların sapmasına bağlı bir gerilim üreterek manyetik alan değeri sensörün ürettiği Hall gerilimi ile ölçülmektedir. Bu sensörlerle vektörel olarak statik alanları ölçmek mümkün olsa da zayıf alanların ölçümü için uygun değildir [15].

Fluxgate sensörler Faraday indüksiyon yasasına dayanan ve düşük manyetik alan ölçümleri için yaygın olarak kullanılan cihazlardır. Yumuşak ferromanyetik malzemenin periyodik olarak doyuma ulaştırılması ilkesi ile çalışmaktadır [15]. Fluxgate sensörleri ile DC'den birkaç kHz'e kadar düşük genlikli manyetik alanları yüksek hassasiyet, güvenilirlik ve sağlamlıkla ölçmek mümkündür. nT ve μ T büyüklüğündeki manyetik alanları yüksek hassasiyetle ölçebilme yeteneği ile SQUID sensörlerle kıyaslanabilecek düzeydedir.

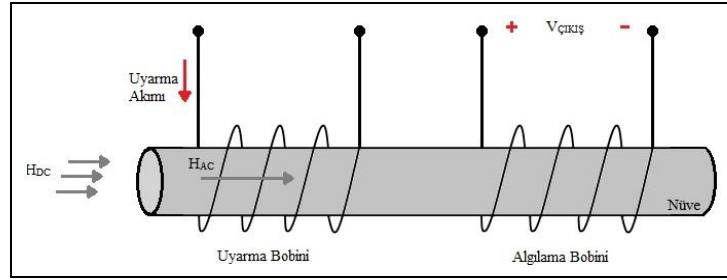
Bir manyetik alan sensörünün başarısı şu kavramlar çerçevesinde değerlendirilmektedir [15];

- ölçüm aralığı,
- çözünürlük (duyarlılık),
- doğrusallık,
- gürültü,
- bantgenişliği,
- güç tüketimi,
- çalışma gerilim aralığı,

- ofset,
- uzun dönem kararlılık,
- çevre koşullarına dayanım,
- maliyet.

2.2.1. Fluxgate Sensörler

Fluxgate sensörler yüksek hassasiyetli vektör sensörleridir ve DC veya düşük frekanslı AC manyetik alanların ölçümünde kullanılmaktadırlar. Sensör yapımında kullanılan yumuşak ferromanyetik malzemenin uyarma ve algılama olarak adlandırılan iki sarım sistemi tarafından çevrenmesi ile oluşturulur. Nüvenin periyodik olarak doyurulması prensibiyle çalışan fluxgate sensörlerinin temel yapısı Şekil 2.12’de gösterilmektedir.

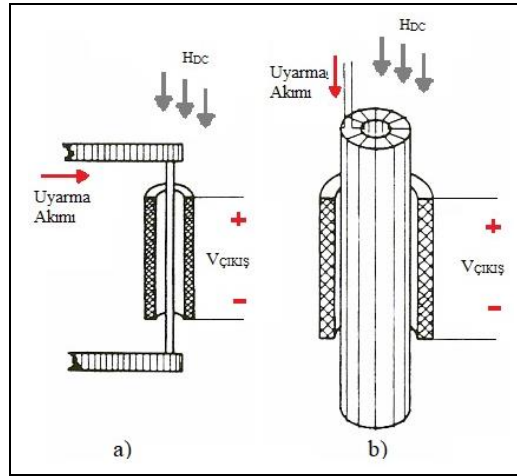


Şekil 2.12: Temel Fluxgate sensör yapısı.

Fluxgate sensörler farklı konfigürasyonlarda karşımıza çıksa da hepsi aynı çalışma prensibine dayanmaktadır. Uygulanan alan ile ölçülecek alanın birbirine göre konumuna bağlı olarak ortogonal ve paralel olmak üzere ikiye ayrılır. Paralel fluxgate sensör tipinde uygulanan alan ile ölçülmek istenen alan aynı yöndeysen ortogonal fluxgate sensöründe bu iki alan birbirine diktir.

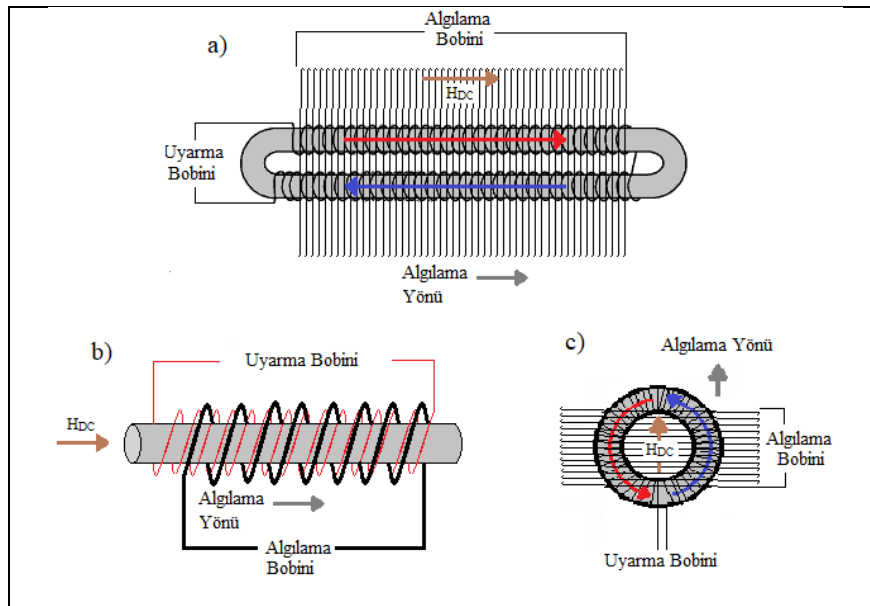
Ortogonal fluxgate sensör konfigürasyonları Şekil 2.13’te gösterilmektedir. Şekil 2.13.a’da ferromanyetik bir telden geçen akımın ürettiği dairesel manyetik alanla uyarım sağlanırken, Şekil 2.13.b’de silindirik nüvedeki tek bir tel veya toroidal bir bobin tarafından uyarım sağlanmaktadır. Her iki konfigürasyonda da kullanılan nüve, uzunluğu boyunca manyetik alana duyarlıdır ve algılama bobinleri sinyal tespiti için kullanılmaktadır. Ortogonal Fluxgate sensör konfigürasyonlarında

uyarma alanının nüvenin ortasında sıfır olması sensör remanansı (kalıcı mıknatıslanması) ile ilgili sorunlara neden olmaktadır [18].



Şekil 2.13: Ortogonal Fluxgate sensör çeşitleri.

Paralel fluxgate sensörleri düşük gürültü seviyesine ve yüksek performansa sahip olmalarından dolayı mevcut çalışmaları kendi üzerine yoğunlaştırmıştır. Literatürdeki sensör tasarımlarının çoğunda kullanım amacına göre farklı geometrilere üretilen paralel fluxgate sensör özellikleri görülmektedir. Şekil 2.14'te yer alan yarış-pisti, çubuk tipi ve halka tipi yaygın olarak kullanılan sensör geometrileridir.



Şekil 2.14: Fluxgate sensör türleri a) yarış-pisti tipi, b) çubuk tipi, c) halka tipi Fluxgate sensör.

Çubuk tipi geometrisi açık uçlu manyetik akı özelliğine sahiptir. Bu durum gürültü bakımından çubuk tipi sensörü dezavantajlı hale getirirse de dik alanlara karşı bağışıklığı yüksektir. Çubuk tipi sensörlerin temel sorunu yüksek uyarma akımlarıdır. Yüksek uyarma akımları sensörün transformatör gibi davranmasına neden olduğu için yüksek doğruluklu ölçümlerde tercih edilmemektedir. Bu geometrideki sensörlere daha çok bölgesel manyetik alan bilgisinin gerekli olduğu uygulamalarda karşılaşılmaktadır.

Halka tipi geometrisine sahip sensörlerin çalışma prensibi iki tane çubuk geometrili sensörün alt ve üst kısımlarının birleştirilerek kapalı çevrim oluşturmaya benzetilebilir. Bu durumda dengeli çift çubuk sensörler olarak düşünmek mümkündür; manyetik olarak kapalı bir yolun parçaları olan iki yarım halka [15]. Halka geometrili sensörler diğer sensör geometrilerine kıyasla daha yüksek demanyetizasyon katsayısına sahip olsa da sağladığı avantajlardan ve kapalı bir manyetik yol üzerine kurulduklarından dolayı gürültüye karşı bağışık olmaları, özellikle modern uzay araştırmalarında ilk tercih olmalarını sağlamıştır.

Yarış pisti geometrili sensörler de halka geometrisinde olduğu gibi kapalı döngü manyetik akı özelliğine sahiptir ve halka nüveli sensörün eliptik bir nüve ile yapılmış halidir. Halka tipi geometrisine sahip sensörlere kıyasla daha düşük demanyetizasyon faktörüne sahip olduğu için yarış pisti geometrisinin sensör hassasiyeti daha yüksek ve dik alanlara daha az duyarlıdır. Halka geometrisine göre dik alan etkisi düşük olsa da çubuk geometrili sensörlere kıyasla bu etki daha hissedilebilir seviyededir. Yarış pisti sensörlerinin temel sorunu büyük parazit sinyallerdir; halka nüveli sensörler kadar kolay dengelenemezler. Tablo 2.2’de yukarıda bahsedilen sensör geometrilerinin karşılaştırılması verilmektedir [19].

Tablo 2.2: Farklı geometriye sahip sensörlerin karşılaştırması.

Sensör Parametresi	Çubuk Nüve	Halka Nüve	Yarış-pisti Nüve
Gürültü	46 pT rms	15 pT rms	~15 pT rms
Kararlılık	***	**	
Doğrusallık	10 ppm	10 ppm	10 ppm
Kolay üretim	***	**	*
Güç tüketimi	yüksek	düşük	Orta
Dik-alan	***	*	***
Perming	*	***	**

Fluxgate sensörlerin birçok uygulama alanı için temel gereksinimleri şu şekildedir [20].

- geniş ölçüm aralığı,
- düşük gürültü seviyesi,
- yüksek hassasiyet,
- doğrusallık,
- çevresel koşullara dayanım,
- uzun dönem kararlılık,
- sıfır ofset değeri,
- sıfır dik alan etkisi.

2.2.2. Fluxgate Sensörlerin Çalışma Prensibi

Fluxgate sensörlerin çalışması sensör yapımında kullanılan nüvenin periyodik doygunluğuna dayanmaktadır [21], [22]. Uyarma bobinine uygulanan akımın oluşturduğu alanla nüvenin her iki yönde doyuma ulaşması sağlanmaktadır. Doyum esnasında malzemenin mıknatıslanma eğrisine göre manyetik geçirgenliği periyodik olarak değişmektedir. Manyetik geçirgenlikteki homojen olmayan değişim algılama bobininde uyarım sinyalinin tek harmoniklerini oluşturmaktadır [11]. Ölçülecek olan DC alan mıknatıslanma eğrisinde bir simetri kırınımına neden olarak algılama bobininde çift harmonikleri de oluşturmaktadır. DC alanın uyarım sinyalinin özellikle 2. Harmoniğinin çok iyi doğrusallıkta değişim göstermesi Fluxgate sensörlerinin temelini oluşturmaktadır [23]–[25].

Halka nüveli sensörlerde nüvenin sağlı sollu iki adet yarım halkadan oluştuğu göz önünde bulundurulursa uyarma bobinine uygulanan akımın oluşturduğu manyetik akı her iki yarım halkada birbirine zıt yönlü olacaktır. Dış manyetik alanın yokluğunda nüvedeki net akı sıfır olacak ($\Phi_2 - \Phi_1 = 0$) ve dolayısıyla algılama bobininde bir gerilim indüklenmeyecektir. Eğer sensör bir manyetik alana yerleştirilirse yarım halkalardan bir tanesi dış alan ile aynı yönde olacak ve onu güçlendirecektir. Diğer yarım halka ise dış manyetik alana zıt yönde olacak ve onu zayıflatacaktır. Aradaki $\Delta\Phi$ farkından dolayı algılama bobininde uyarım sinyalinin ikinci harmoniğinde bir gerilim indüklenenecektir. Şekil 2.15'te fluxgate sensörünün

Figure 1 consists of three vertically stacked plots labeled a), b), and c). Plot a) shows a square wave representing flow rate, alternating between a high level and a low level. Plot b) shows a sawtooth wave representing oxygen saturation. The peaks of the wave are labeled 'saturasyon' (saturation) and the troughs are labeled 'akı çökmesi' (flow drop). Plot c) shows a sawtooth wave representing flow rate. The peaks of the wave are labeled 'akı toplanması' (flow accumulation) and the troughs are labeled 'akı çökmesi' (flow drop).

Değişen manyetik alana yerleştirilen sensörün algılama bobininde indüklenen gerilim

olacaktır. Burada N algılama bobinindeki sarım sayısı, Φ bobinden geçen manyetik akı, A algılama bobininin kesit alanı, H uyarma bobini tarafından oluşturulan manyetik alan, μ_0 boşluğun manyetik geçirgenliği ve μ_r nüvenin bağıl geçirgenliğidir. Denklem 2.10 düzenlendiğinde algılama bobininde indüklenecek gerilim için genel denklem

olacaktır. Bu denklemde birinci terim algılama bobininin kesit alanındaki değişime karşılık gerilim üretir. Teorik olarak, bobininin ölçüm düzlemindeki etkin kesit alanın değiştirilmesi sonucu manyetik alanın ölçülmesinde kullanılır. İkinci terim ise manyetik alanın değişimine cevaben gerilim üretir. Bu gerilim indüksiyon bobini manyetometrenin çalışma prensibini oluşturur ve statik manyetik alan ölçümünde kullanılamaz. Son terim malzemenin bağlı geçirgenliğinin zamanla değişiminden

dolayı üretilen gerilimdir. Statik alan ölçümlerinde yararlanılan bu terim Fluxgate sensörlerin de temel denklemini oluşturmaktadır. 1. Ve 2. Terimlerden gelen katkılar Fluxgate sensörler için hata kaynağı olarak kabul edilmekte ve elektronik olarak temizlenmektedir.

Halka ve yarış-pisti nüveli sensörler için demanyetizasyon etkisi de dikkate alınması gereken bir parametredir. Bu geometrilerde sensör içinden geçecek alan sensör dışındaki alana kıyasla daha az olacaktır [15]. Bu nedenle de algılama bobininde indüklenecek gerilimin sensör içinden geçen manyetik alana göre hesaplanması gerekmektedir [15]. Bu durumda sensör içinden geçen manyetik alan

$$B = \frac{\mu_0 \mu_r H_0}{(1 + D(\mu - 1))} = \mu_0 \mu_a H_0 \quad (2.12)$$

olacaktır. Burada D nüveye ait demanyetizasyon faktörünü ve μ_a görünür geçirgenliği ifade etmektedir. Denklem 2.12’de nüve tarafından görülen alanın demanyetizasyon etkisi nedeniyle azaldığı görülmektedir. Söz konusu demanyetizasyon etkisi de dikkate alındığında algılama bobininde indüklenecek gerilim denklemi daha karmaşık hale gelecektir [26].

$$V_i(t) = -NA \frac{dB}{dt} = -NA \mu_0 H \frac{1 - D}{(1 + D(\mu - 1))^2} \frac{d\mu_r(t)}{dt} \quad (2.13)$$

Ölçülecek DC alan bilgisi Fluxgate sensör uyarım sinyalinin 2. Harmoniği ile taşınmakta ve bu nedenle de sinyal demodülasyonunda yaygın olarak ikinci harmonik algılama tekniği kullanılmaktadır. Aschenbrenner’in analitik yaklaşımı ile Fluxgate sensörün çıkış sinyalindeki bu 2. Harmonik kaynağı anlaşılır bir şekilde açıklanmıştır [27]. Z karakteristiğindeki mıknatıslanma eğrisi ve 2. Harmonik prensibi için üçüncü dereceden polinom yaklaşımı kullanılmaktadır [28]. Mıknatıslanma eğrisi normalleştirilmiş üçüncü dereceden bir polinom olarak $a > 0$ ve $b > 0$ olmak üzere

$$B(t) = aH(t) - bH^3(t) \quad (2.14)$$

şeklinde ifade edilir. Ölçülmek istenen DC alan ($H_{dış}$) ile uyarım sinyalinin uyarma bobininde oluşturduğu alan yoğunluğunun toplamı

$$H_{1,2}(t) = H_{dış} \pm A \sin \omega t \quad (2.15)$$

şeklinde dir. Denklem 2.15 yeniden düzenlendiğinde mıknatıslanma eğrisinin birinci ve üçüncü bölgeleri için normalleştirilmiş akı yoğunluğu

$$\begin{aligned} B_{1,2}(t) &= a(H_{dış} \pm A \sin \omega t) - b(H_{dış} \pm A \sin \omega t)^3 \\ &= aH_{dış} - bH_{dış}^3 - \frac{3}{2}bA^2H_{dış} \pm \left(aA - 3bAH_{dış}^2 - \frac{3}{4}bA^3\right) \sin \omega t \\ &\quad + \frac{3}{2}bA^2H_{dış} \cos 2\omega t \pm \frac{1}{4}bA^3 \sin 3\omega t \\ &= aH_{dış} - bH_{dış}^3 - \frac{3}{2}bA^2H_{dış} + \frac{3}{2}bA^2H_{dış} \cos 2\omega t \end{aligned} \quad (2.16)$$

olacaktır. Denklem 2.16 çıkış sinyali için düzenlendiğinde ise

$$V_i \sim \frac{dB_{1,2}}{dt} = 3bA^2H_{dış}\omega \sin 2\omega t \quad (2.17)$$

elde edilir. Böylece 2. Harmonik sinyali ile ölçülmek istenen DC alanın doğrusal değişimi Denklem 2.17 ile de açıkça gösterilmiştir.

2.2.3. Fluxgate Sensörlerde Nüve Seçimi

Fluxgate sensör yapımında kullanılan ferromanyetik malzemenin manyetik özellikleri ölçüm performansı açısından oldukça önem arz etmektedir. Sensörün uyarma frekansı, duyarlılığı, güç tüketimi gibi birçok parametresi seçilen malzemeye ilişkilidir. Ayrıca sensör performansının sıcaklık ve zamana bağımlılığı da seçilen malzemeye bağlıdır [15]. Fluxgate sensör yapımında kullanılacak ferromanyetik malzemenin seçimi hedef odaklı olsa da genel gereksinimler şu şekildedir:

- Yüksek ilk manyetik geçirgenlik μ_i (>100000),
- 0.2 T – 0.6 T arasındaki doyum manyetik akı yoğunluğu B_s ,
- Düşük koersif alan H_c (< 1 Oe),

- Dikdörtgen karakterde olmayan mıknatıslanma eğrisi,
- Sıfıra yaklaşan doyum manyetik büzülme katsayısı λ_S ,
- Yüksek Curie sıcaklığı ($> 200^\circ\text{C}$),
- Yüksek öz elektriksel direnç ($> 1.0 \mu\Omega$),
- Pürüzsüz yüzey, düzgün kesit ve parametrelerin homojenliği,
- Düşük Barkhausen gürültüsü.

Manyetik büzülme katsayısı λ_S , ferromanyetik malzemelerin mıknatıslanma esnasında şekil ve boyut değişimlerinin bir göstergesidir ve fluxgate sensörlerinin gürültü seviyesine etki etmektedir. Bu nedenle düşük gürültülü bir sensör için “sıfır” manyetik büzülme katsayısına sahip malzemelerin seçilmesi oldukça önemlidir. Nüve parametrelerinin sensör performansı üzerindeki etkileri Tablo 2.3’te verilmiştir [29]. Manyetik malzemeler gereksinimler çerçevesinde incelendiğinde nikel zengini alaşımlar (permalloy) ile amorf yapıdaki kobalt zengini alaşımların öne çıktığı görülmektedir [30], [31].

Tablo 2.3: Nüve parametrelerinin sensör performansına etkisi.

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

2.2.4. Fluxgate Sensörlerde İşaret İşleme Elektronikleri

Fluxgate sensör çıkışında oluşan sinyali işlemek için farklı işaret işleme teknikleri geliştirilmiş olsa da en çok tercih edilen ikinci harmonik algılama yöntemidir. Dış DC manyetik alan bilgisinin büyük bir kısmının uyarım sinyalinin ikinci harmoniğinde taşınması bu yöntemi oldukça avantajlı hale getirmektedir. Ayrıca ikinci harmonik algılama prensibiyle çalışan fluxgate manyetometrelerin

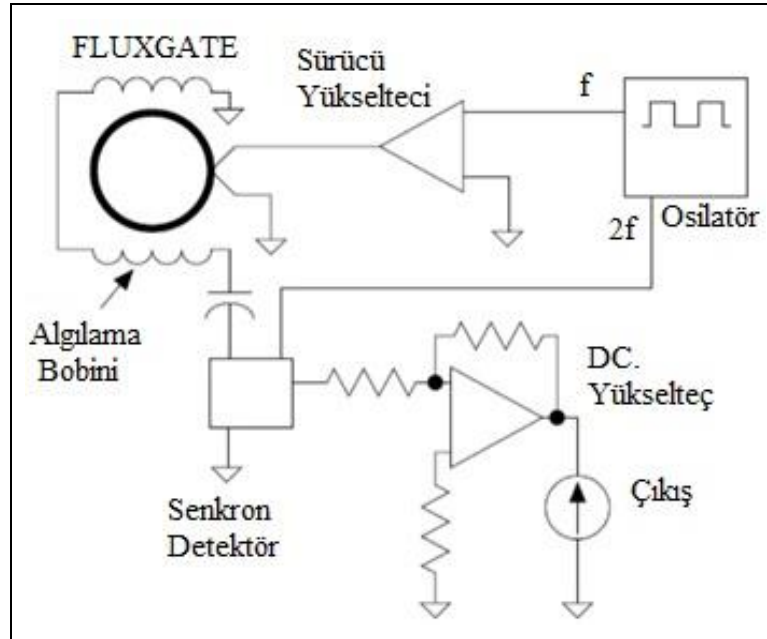
hassasiyet ve gürültü bakımından da diğer işaret işleme tekniğini kullanan manyetometrelere kıyasla daha iyi sonuçlar verdiği belirtilmiştir [32].

Temelde Fluxgate sensörlerinin çalışabilmesi için bir uyarım sinyaline ihtiyaç vardır. Uyarma elektroniği tasarımı yapılmadan önce uyarım sinyalinin dalga formunun belirlenmesi gerekmektedir. Literatürde yer alan Fluxgate sensör çalışmaları sinüzoidal [33], üçgen [34] veya kare dalga [35] formundaki uyarıma dayanmaktadır. Kare dalga formundaki uyarım sinyalinin üretilmesi nispeten daha kolayken düşük hassasiyet pahasına güç tüketimini azaltmaktadır [34], [36]. Yapılan çalışmalar kare dalga formundaki uyarımın düşük güç tüketimi ve uygulamadaki basitliği nedeniyle fluxgate sensörleri için en uygun uyarım formu olduğunu göstermiştir [37].

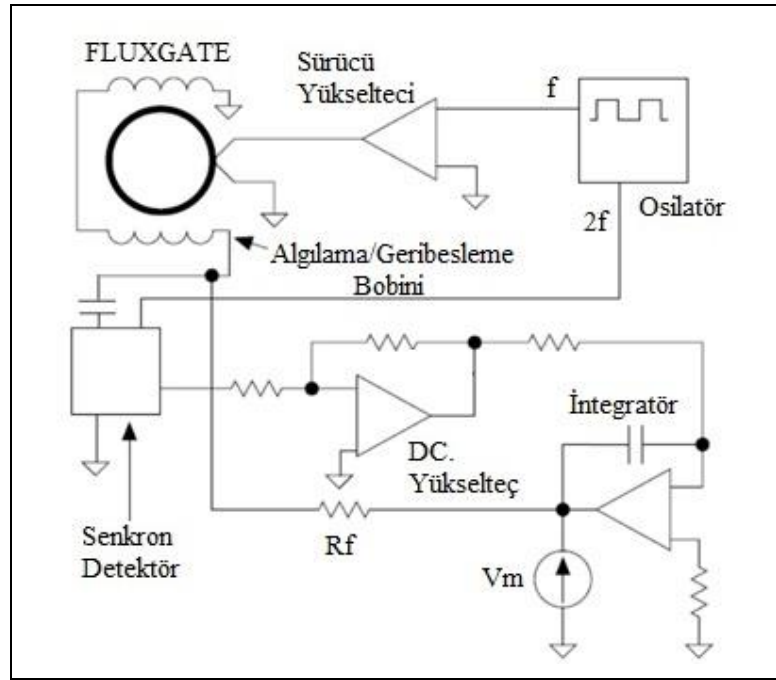
Fluxgate sensör çıkış sinyali işlenirken analog veya dijital sinyal işleme birimleri kullanılmaktadır ve buna göre de fluxgate manyetometreler analog veya dijital olarak isimlendirilmektedir. Dijital manyetometrelerde öncelikli olarak analog sensör çıkış sinyali bir ön-yükselteç ile kuvvetlendirilmekte ve bant geçiren filtreden geçirilmektedir. Sonrasında bu sinyal ADC'ler ile sayısallaştırılarak FPGA gibi dijital sinyal işleme birimleriyle işlenmektedir [15]. Dijital sinyal işleme yöntemi kullanılırken ADC'lerin harmonik distorsiyona neden olması, dijital sinyal işleme birimlerinin yüksek güç tüketimi ve gürültüleri dijital manyetometrelerin göz önünde bulundurulması gereken önemli dezavantajlardır.

Analog manyetometreler ise sinyal işlemede herhangi bir dijital birim kullanılmadığı için güç tüketimi ve gürültü bakımından dijital manyetometrelere kıyasla daha avantajlı konumdadır. İkinci harmonik algılama yöntemine dayanan açık ve kapalı çevrim analog fluxgate manyetometre yapısını sırasıyla Şekil 2.16 ve Şekil 2.17 göstermektedir. Kapalı çevrim prensibinde sensör çıkış gerilim büyüklüğüyle orantılı akımın algılama bobinine geribeslemesi sağlanarak sensör çıkışı kompanze edilmektedir [15]. Bu şekilde manyetometre DC gerilim çıkışı ek bir kompanzasyon sargısı veya bir direnç üzerinden sensöre geribeslemesi yapılarak algılama bobininde dış alana zıt yönde bir manyetik alan oluşturulması sağlanmaktadır. Böylece sensör çıkışı sürekli olarak sıfırlanarak ferromanyetik malzeme mıknatıslanma eğrisinin doğrusal olduğu bölgede tutulmaktadır. Açık çevrim prensibinde ise böyle bir geribesleme mekanizması bulunmamaktadır. Literatürdeki Fluxgate manyetometrelerin çoğunda sensör hassasiyetini ve doğrusallığını artırdığı için geribesleme mekanizması kullanılmaktadır.

Manyetometre ile sensör çıkış gerilimi ölçülecek DC alan ile modüle edilen bir sinyal olduğu için faza duyarlı senkron detektör ile bu gerilim demodüle edilmektedir. Osilatör bloğu ile sensör uyarımı için gereken f frekanslı ve senkron demodülatörün çalışması için gereken $2f$ frekanslı kare dalga formundaki sinyaller üretilmekte ve $2f$ frekanslı işarete faz kaydırma işlemi uygulanmaktadır [15]. Üretilen f frekanslı uyarım sinyalinin de akım seviyesi nüveyi doyurmada yetersiz olacağından bir güç kuvvetlendiricisi ile yükseltilmektedir. Algılama bobin çıkış gerilim sinyali bant geçiren filtre yardımı ile uyarma frekansının ikinci harmoniğine ($2f$) ayarlanarak bir ön yükseltece gönderilir ve sonuç olarak algılama bobininde indüklenen gerilimi senkronize bir demodülasyon yöntemiyle çıkarmak mümkün hale gelir [7]. Genellikle demodülasyon tekniği faza duyarlı bir detektör, tipik olarak ön-yükselteci takip eden bir CMOS analog anahtarı ile gerçekleştirilmektedir [2]. Kuvvetlendirilen sensör çıkış sinyali $2f$ referans sinyali (osilatör bloğunda üretilen $2f$ sinyali) kullanılarak senkron demodülatörü tarafından demodüle edilir. Son olarak bu sinyal bir kazanç bloğuna gönderilerek çıkışta dış manyetik alan bilgisi ile orantılı bir DC gerilim sinyali elde edilir. Ek olarak algılama bobininden DC akımların akmasını önlemek ve ofseti azaltmak için sensör çıkışı ile ön-yükselteç arasına seri bir kapasitör eklenerek birbirinden izole edilmektedir.



Şekil 2.16: Açık çevrim analog fluxgate manyetometre blok şeması.

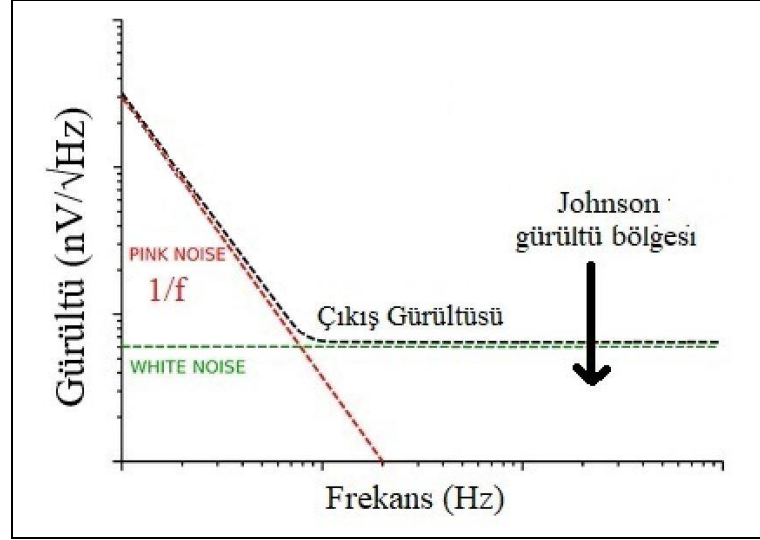


Şekil 2.17: Kapalı çevrim analog fluxgate manyetometre blok şeması.

2.2.5. Fluxgate Sensör Gürültüsü

Fluxgate manyetometrelerde gürültü seviyesi sensör çözünürlüğünü belirlediği için önemli bir hata kaynağı olarak kabul edilmektedir [38]. [39] numaralı referansta gürültünün ferromanyetik nüvenin doyması zor olan bazı bölgelerinden kaynaklandığı açıklanmaktadır. Bu bölgelerde nüvenin doyuma ulaştığı zamanki davranışını sergilemeyip gürültüye neden olduğu belirtilmiştir. Ayrıca sensör uyarım sinyalinin varyasyonları da gürültüye neden olduğu için gürültü yalnızca sensörden kaynaklanmamaktadır. Fluxgate sensörün uyarım sinyali olmadan çalışamayacağı göz önünde bulundurulduğunda sensör gürültüsü çalışan ölçüm sisteminin toplam gürültüsü olarak kabul edilmektedir [40]. Bunların yanı sıra manyetize nesneler, cihazlardaki yüksek akımın indüklediği alan, Dünya manyetik alanının varyasyonları, güneş rüzgârları (manyetik fırtına) gibi dış kaynaklardan gelen gürültüler de cihazın yetersiz çalışmasına neden olmaktadır [38].

Tüm elektronik cihazlarda Şekil 2.18’de gösterildiği gibi termal gürültü, titreşim gürültüsü gibi çeşitli gürültü türleri bulunmaktadır [41]. Düşük frekanslarda titreşim gürültüsü (Pink noise) baskınken, yüksek frekanslarda Johnson (termal) gürültüsü baskındır. Bunlara ek Fluxgate sensör yapımında kullanılan ferromanyetik malzemenin manyetik Barkhausen gürültüsü de dikkate alınması gerekmektedir.



Şekil 2.18: Gürültü spektral güç yoğunluğu.

2.2.5.1. Titreşim Gürültüsü (Flicker veya Pembe Gürültü)

Titreşim gürültüsü veya temas gürültüsü DC akım ile ilgili olan ve neredeyse tüm elektronik cihazlarda oluşan düşük frekanslı bir gürültüdür. Spektral yoğunluğu kabaca $1/f$ ile orantılı olan bu gürültü DC alan ölçümünde kullanılacak sensör sisteminin çalıştığı 100 Hz'in altındaki frekanslarda her zaman belirgin olduğu için sistemin performansını ciddi bir şekilde zayıflatmaktadır [38].

2.2.5.2. Barkhausen Gürültüsü

Barkhausen gürültüsü nüve mıknatıslanmasının, uyarım sinyali dalgalanmalarından dolayı değişiminden kaynaklanmaktadır. Barkhausen gürültüsünün kullanılan nüve malzemesinin kompozisyonuyla sıkı bir şekilde ilişkili olduğu [42] numaralı referansta belirtilmiştir. Yapılan çalışmalarda nüve malzemesi olarak CoFeSiB amorf tellerinin kullanılması NiFeSiB alaşımının kullanılmasına kıyasla oldukça düşük gürültüye sahip olduğu ortaya çıkmıştır.

2.2.5.3. Termal Gürültü (Johnson-Nyquist Gürültü)

Her direnç serbest elektronlar arasındaki termal etkileşim nedeniyle sıcaklığa bağlı bir gürültü gerilimi üretmektedir [43]. Ölçüm sargılarının termal gürültüsü

Fluxgate sensörlerin sınırlayıcı gürültüsü olmaktadır [44]. Üretilen bu gürültü gerilimi Denklem 2.18 ile ifade edilmektedir.

$$V_{noise} = \sqrt{4k_B T R} \text{ (nV}/\sqrt{\text{Hz}}) \quad (2.18)$$

Burada k_B Boltzmann sabiti ($1.38 \times 10^{-23} \text{ J / } ^\circ\text{K}$), R gürültüye neden olan bobin direnci, T ise oda sıcaklığıdır. Gürültünün eşdeğer alanı ise Denklem 2.19 ile hesaplanmaktadır.

$$B_{noise} = \frac{V_{noise}}{\text{Hassasiyet}} \quad (2.19)$$

2.2.5.4. Beyaz Gürültü (White Gürültü)

Frekanstan bağımsız olan beyaz gürültüyü tek tip bir spektral yoğunluk karakterize etmektedir [45]. Beyaz ışık tüm görünür frekansları eşit miktarda içerdiğinden beyaz gürültü analogi olarak beyaz ışıqla adlandırılmaktadır. Tüm dirençlerde ve yarı-iletken devre elemanlarında beyaz gürültü mevcuttur. Bir dirençte görülen beyaz gürültü termal gürültü olarak adlandırılırken yarıiletkenlerde görülen beyaz gürültü atış (Shot) gürültüsü olarak adlandırılmaktadır [43].

2.2.6. Fluxgate Sensörleri için Performans Parametreleri

Sensör performansı üzerindeki tüm değerlendirmelerin yapıldığı kavramlar ve açıklamaları şu şekildedir.

- Hassasiyet

Sensörün 2f gerilim cevabının doğrusallığını ifade etmektedir. Yüksek hassasiyetli ölçüm yapabilmek için sensör yapımında kullanılan ferromanyetik malzemenin yüksek manyetik geçirgenliğe sahip olması oldukça önemlidir. Bunun yanı sıra modülasyon frekansı, uyarım sinyalinin genliği, nüve kesit alanı ve algılama bobini sarım sayısı da ölçüm hassasiyetini etkileyen diğer parametrelerdir. Bu parametrelerin her birinin artırılması hassasiyeti belli bir değere kadar artırsa da sonrasında yüzey etkisi (skin effect), girdap akım kayıpları, termal gürültü gibi

sınırlayıcı etkiler ortaya çıkmaktadır. Bunların yanısıra bobin yerleşimi de hassasiyet üzerinde etkili olmaktadır. Bu nedenle yüksek hassasiyet için uyarma bobini algılama bobininin tam merkezinde olacak şekilde yerleştirilmesi oldukça önemlidir.

- Perming

“Hafıza etkisi” olarak da adlandırılan perming etkisi, sensör hassasiyetini sınırlayan en önemli faktörlerden biridir [25]. Bir sensörün çok yüksek bir manyetik alana maruz kaldıktan sonra çıkışında meydana gelen değişim olarak açıklanmaktadır. Bu değişim sensör çıkışında farklı bir sinyal okunmasına neden olmakta ve alan etkisi kaldırılrsa bile sensör çıkışı önceki değerine dönmesini engellemektedir. Perming etkisiyle sensör çıkışında onlarca μT değişiklik olabilmektedir. Bu etkinin minimize olması için sensör nüvesinin tam doyuma ulaştırılması gerekmektedir [46].

- Doğrusal Çalışma Aralığı

Uygulanan DC alan ile sensör 2f çıkış sinyalinin doğrusal değişim gösterdiği çalışma aralığıdır [11]. Sensör, doğrusallığın olduğu aralıkta normal bir şekilde çalışırken bu aralığın dışında hatalı ölçüm sonuçlarına neden olmaktadır. Hatalı sonuçların alındığı bu bölgelerde maksimum aşım seviyesi geçilmediği müddetçe sensörde kalıcı hasar olmamaktadır. Doğrusal çalışma aralığını belirleyen en önemli etken sensör yapımında kullanılan ferromanyetik malzeme ve algılama elektroniğidir.

- Çözünürlük

Sensörün ölçebildiği minimum manyetik alan değerini ifade etmektedir. Algılama bobininin termal gürültüsü ve nüvenin Barkhausen gürültüsü sensör çözünürlüğünü etkileyen iki önemli faktördür. Bu iki faktörün de etkisi sensör boyutlarının küçültülmesiyle artmaktadır [47]. Termal gürültüyü artıran etken algılama bobin sarım sayısının ve dolayısıyla bobin direncinin artmasıdır. Bu durum büyük boyutlu sensörlerde sorun oluşturmamaktadır.

- Bant Genişliği

Sensörün ölçüm aralığındaki alanların frekans aralığıdır [11]. Fluxgate sensörleri DC veya düşük frekanslı manyetik alan ölçümünde kullanıldıkları için yüksek frekanslı alanlardaki sınırlayıcı faktör yüzey etkisi (skin effect) veya girdap akım kayıplarıdır. Bu nedenle yüksek frekanslardaki alanların ölçümü için sensör uyarım sinyalinin frekansı ölçülecek alanın frekansından çok daha yüksek olması ve yüksek dirençli ferromanyetik malzemeler tercih edilmesi gerekmektedir.

- Güç Tüketimi

Güç tüketimi açısından kullanılacak ferromanyetik malzemenin manyetik özellikleri oldukça önemlidir. Güç kaybını minimize etmek için yüksek bağlı geçirgenliğe, düşük kalıcı mıknatıslanmaya (B_R) ve düşük koersif alana (H_c) sahip yumuşak ferromanyetik malzemeler tercih edilmesi gerekmektedir.

- Kararlılık

Zamana, sıcaklığa ve nüvenin stres faktörüne bağlı olarak sensör hassasiyetindeki ve ofsetindeki değişimi ifade etmektedir [11]. Manyetik alanca yalıtılmış bir ortamda sensör ofseti işaret işleme elektroniğindeki ofset ile belirlenmektedir. Ayrıca nüve malzemesinin manyetik büzülme katsayısı da alan kaynaklı strese neden olduğu için sensör doğrusallığını ve uzun dönem kararlılığını bozabilmektedir.

2.3. Fluxgate Manyetometre

Fluxgate manyetometreler dünyada ve uzayda manyetik alan şiddeti ölçen cihazların öncüsü olmuş ve halen olmaktadır. Sağlamlığı, güvenilirliği, küçük fiziksel boyutu ve düşük güç tüketimi fluxgate manyetometreleri ön plana çıkarmaktadır. Bu özelliklerinin yanı sıra 0.1 nT ile 1 mT arası geniş dinamik ölçüm aralığına sahip olması ve DC'den birkaç kHz'e uzanan aralıktaki manyetik alan büyüklüklerinin vektör bileşenlerini ölçebilme yeteneği Fluxgate manyetometreleri çok yönlü bir cihaz haline getirmektedir. Fluxgate sensörleri, hareketli parçası olmayan katı hal cihazlarıdır ve geniş bir sıcaklık aralığında çalışabilmektedir. Uzun dönem kararlılığı ticari ürünlerde 10 nT olarak verilse de 1 nT uzun dönem kararlılığa

ulaşabilmektedir. Bunlara ek sıcaklık kararlılıkları da yüksektir; ofsetin sıcaklıkla değişimi $0.1 \text{ nT}/^{\circ}\text{C}$ iken hassasiyetin sıcaklık katsayısı $30 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ 'dir [15]. Daha önce de belirtildiği gibi kapalı döngü manyetometrelerde geri bildirim yöntemiyle ölçüm doğrusallığı artırılarak geniş dinamik ölçüm aralığı elde edilmektedir. Açık döngü manyetometrelerde ise daha az g tüketimi sağlasa da doğrusallık açısından fluxgate sensörlerinin çoğu geri bildirim modunda çalıştırılmaktadır. Fluxgate manyetometrelerin kararlı, düşük güç tüketimli, sağlam, ekonomik ve nispeten basit olmasıyla birlikte nüve malzemesinin sürekli geliştirilerek değiştirilmesi popülerliğini devam ettirmektedir [14]. Bu nedenle yüksek çözünürlük gerekli olduğunda fluxgate manyetometreler hala en iyi tercih olmaktadır [48]. Fluxgate manyetometrelerin rakipleri SQUID (Süper İletken Kuantum Girişim Cihazı) ve AMR (anizotropik manyeto-direnç) manyetometreleridir. SQUID manyetometreler fluxgate manyetometrelerinden daha iyi çözünürlük sunmalarına karşın kW seviyelerindeki g tüketimlerinden ve kriyojenik soğutma sistemi gerekliliklerinden dolayı uygulama alanları sınırlıdır. SQUID manyetometreler ağır, geniş hacimli, pahalı, g tüketimi yüksek ve son derece karmaşık sistemler olarak karakterize edilebilirler. Diğer taraftan AMR manyetometrelerinin fluxgate manyetometrelerine kıyasla daha düşük maliyet, daha düşük güç tüketimi ve daha küçük boyutlu olma avantajlarına sahiptir. Fakat AMR manyetometrelerin çözünürlükleri fluxgate manyetometrelerinden çok daha kötüdür.

Fluxgate manyetometrelerin bazı uygulamaları şu şekildedir:

- uzay araştırmaları,
- manyetik gradiyometre,
- Dünya manyetik alan lm,
- Jeolojik araştırmalar ve petrol arama,
- arkeolojik araştırmalar,
- navigasyon sistemleri ve hassas elektronik pusulalar,
- hassas AC ve DC elektrik akım sensörleri,
- silah sistemlerinin konumlandırılması vs.

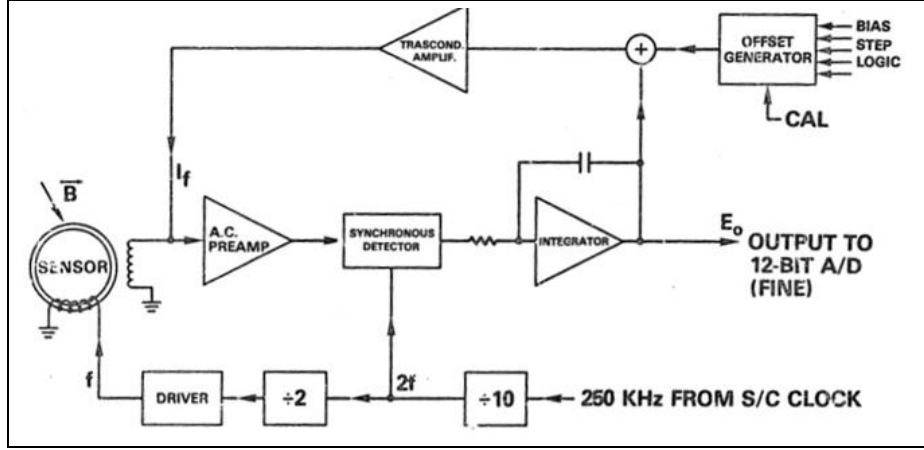
Fluxgate manyetometrelerin diğer manyetometrelere kıyasla sundukları benzersiz avantajlar özellikle uzay uygulamalarında [49]–[52] yaygın olarak kullanılmalarına

neden olmuş ve olmaktadır. Manyetik alanın gradyanını ölçmek için Fluxgate gradiyometre olarakta kullanılmaktadır [53], [54]. Daha az bilinen diğer uygulamalar arasında, bunlarla sınırlı olmamak üzere, Fluxgate akım sensörleri, temassız piston konum transdüseri [55] ve kalıcı mıknatıslı senkron motor arıza izleme de yer almaktadır [56].

2.3.1. Fluxgate Manyetometre Uydu Uygulamaları

1928 yılında Aschenbrenner ve Goubau'nun ilk fluxgate manyetometreyi yapmaya başlaması ve çalışmalarını [27] 1936 yılında yayınlamasından bu yana fluxgate sensörleri uzun bir yol kat etmiştir. Hassas fluxgate sensörleri İkinci Dünya Savaşı sırasında gemi ve denizaltı tespiti için tasarlanmıştır [57]. Savaştan sonra roket ve füze sistemlerinde olduğu gibi denizcilik ve havacılıkta da pusula olarak yaygın bir şekilde kullanılmıştır [58]. Fluxgate sensörlerin ilk uzay uygulaması jeofizik bilimine katkı sağlamak amacıyla 1958 yılında fırlatılan Sovyet araştırma uydusu Sputnik-3 olmuştur [42]. Sputnik-3 uydusunda halka nüveli fluxgate sensörleri kullanılmıştır.

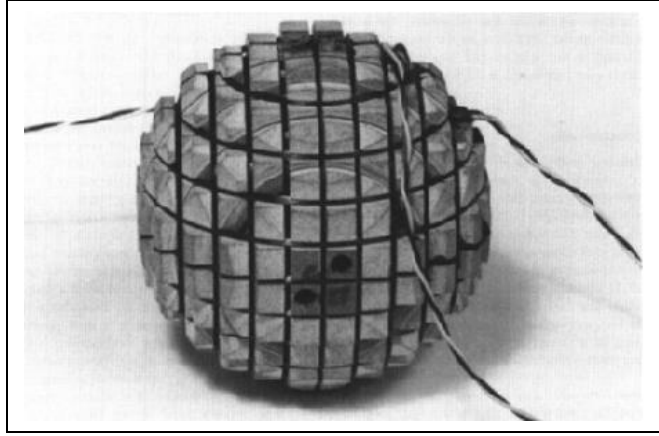
1980'lerden bu yana fluxgate sensörler Dünya'nın manyetik alanındaki değişimleri gözlemlemek için de kullanılmıştır [59]. MAGSAT uydusu 1979 yılında Dünya'nın manyetik alanını haritalamak için fırlatılan ilk uydu olmuştur. Uydu tarafından toplanan veriler ilk defa Dünya'nın 3D manyetik haritalandırılmasına olanak sağlaması nedeniyle fırlatılan en önemli uydulardan biri olarak kabul edilmektedir. MAGSAT uzay aracının biriktirdiği veriler özellikle yeni uydu verilerini geçmiş gözlemlerle ilişkilendirmede hala kullanılmaktadır. Uyduda sezyum skaler manyetometresi ve vektörel fluxgate manyetometresi kullanılmıştır. Kullanılan fluxgate manyetometre blok şeması Şekil 2.19'da gösterilmektedir [60].



Şekil 2.19: MAGSAT fluxgate manyetometre blok şeması.

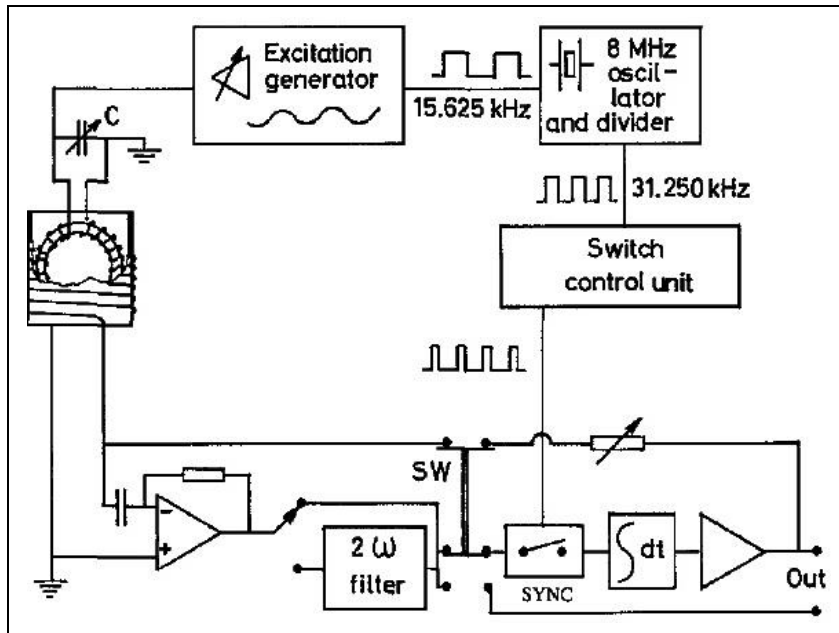
MAGSAT fluxgate manyetometresi uyarma elektronğinde 250 kHz’lik uyarım sinyali uzay aracı saatinden üretilmiş ve fluxgate sensörlerinin uyarımı için 12.5 kHz’e dönüştürülmüştür. Sinyal işleme elektronğı sürücü sinyalinin ikinci harmoniğine ayarlanmış bir AC ön yükseltecinden, senkron demodülatörden, entegratörden ve geleneksel tasarımlardaki geribesleme direncinin yerini alan bir toplama amplifikatöründen oluşmaktadır. Analog sinyal işleme devresinin gerektirdiğı yüksek doğruluk ultra hassas elektronik komponentlerin kullanımını zorunlu kılmıştır. Manyetometre çıkışı ± 0.5 nT’lık genel bir cihaz çözünürlüğü veren 12-bit ADC’ler ile dijitalleştirilmiştir. MAGSAT fluxgate manyetometresinin bildirilen ölçüm aralığı ± 64 nT, çözünürlüğü ise ± 0.5 nT’dır [60].

1999 yılında ise Danimarka’nın ilk uydusu olan Ørsted uzay aracı fırlatılmıştır. Ørsted uydusunun ana görevi MAGSAT uzay aracı ile başlatılan çalışmaları devam ettirerek Dünya’nın manyetik alanının hassas haritalandırmasını yapmak ve meydana gelen değişiklikleri belirlemek olmuştur [52]. Bu açıdan Ørsted uydusundan elde edilen veriler Dünya’nın manyetik kutuplarının kaydığı sonucunu ortaya koymuştur [61]. Ørsted uydusunda skaler Overhauser manyetometresi ve vektörel fluxgate manyetometresi kullanılmıştır. Vektör manyetometresi olarak Danimarka Teknik Üniversitesi’nde geliştirilen kompakt küresel bobin (CSC) tipi fluxgate manyetometre tasarımı kullanılmıştır [52]. Şekil 2.20’de gösterilen manyetometre küresel üç eksenli sensörleriyle birlikte sensör uyarma sürücüsünü, sigma-delta ADC’leri ve elektronik arayüzü içermektedir.

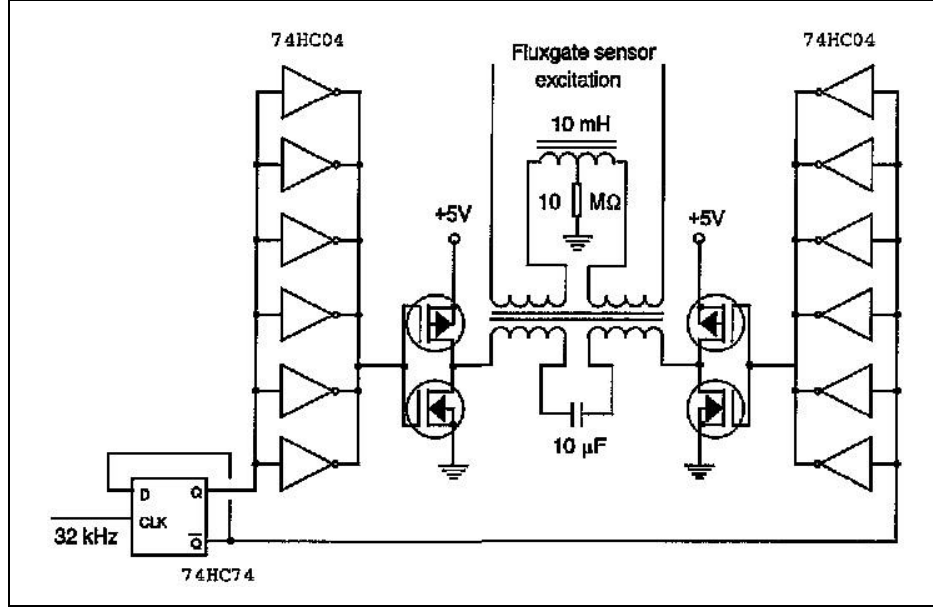


Şekil 2.20: Ørsted kompakt küresel fluxgate manyetometre.

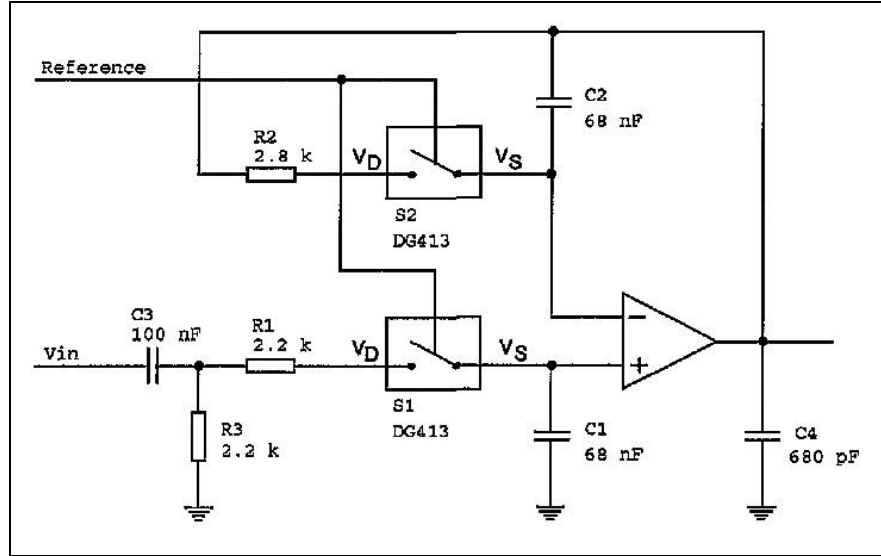
Fluxgate vektör manyetometresinin skaler kalibrasyonu Overhauser skaler manyetometresi ile yapılmıştır. Kapalı çevrim prensibine dayanan üç eksenli fluxgate manyetometre elektronığının ve uyarma elektronığının blok şeması sırasıyla Şekil 2.21 ve Şekil 2.22’de gösterilmiştir [52]. Uyarma elektronığında MOSFET H-köprüsü kullanılmış ve tek beslemeden faydalanılmıştır. Şekil 2.23’te verilen algılama elektronığında ise analog anahtarlamalı entegratör yapısı kullanılmıştır [52]. Manyetometre çıkışı çözünürlüğü 0.5 nT ile sınırlayan 16-bit ADC’lerle örneklenmiştir. Ørsted fluxgate manyetometresinin bildirilen ölçüm aralığı $\pm 65 \mu\text{T}$, güç tüketimi ise yaklaşık 1 W’tır [62].



Şekil 2.21: Ørsted fluxgate manyetometre elektronığı blok şeması.

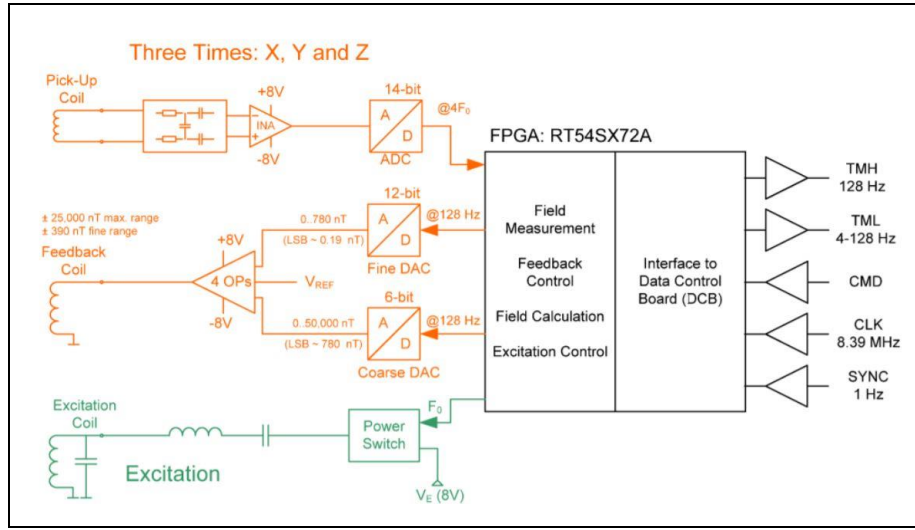


Şekil 2.22: Ørsted uyarma elektronığı.



Şekil 2.23: Ørsted algılama elektronığı.

2007 yılında NASA Dünya'nın manyetosferinden yayılan enerji üzerine çalışmalarını yürütmek için THEMIS uzay görevini başlatmıştır. NASA'nın tek bir roketle başlatılmış ilk beş uydu görevi olmuştur. Her uydu fluxgate ve arama bobini manyetometrelerinden, elektrik alan ölçüm cihazlarından, elektrostatik analizörlerden ve katı hal teleskoplarından oluşturulmuştur [63]. THEMIS fluxgate manyetometrelerinde önceki görevlerden farklı olarak sensör sinyallerini doğrudan dijitalleştiren ve analog donanımı yazılımla değiştiren dijital fluxgate teknolojisi kullanılmıştır. Şekil 2.24'te sistemin blok şeması verilmiştir [50].



Şekil 2.24: THEMIS fluxgate manyetometre elektronik şeması.

Kullanılan dijital fluxgate teknolojisinde geleneksel fluxgate manyetometrelerin analog elemanları olan filtreler ve faza duyarlı entegratörler FPGA ile değiştirilmiştir. THEMIS fluxgate manyetometresinin ölçüm aralığı ± 65 nT, çözünürlüğü 1 nT, gürültüsü $10 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ ve güç tüketimi 0.85 W olarak bildirilmiştir [64].

2015’li yıllarda NASA manyetik yeniden bağlanma mikrofiziğini incelemek için Dünya’nın manyetosferini laboratuvar olarak kullanacak olan ve dört özdeş uzay aracından oluşan MMS (Magnetospheric Multiscale) çalışmasını başlatmıştır [49]. Her bir uzay aracında ortak bir hatayı önlemek amacıyla birbirinden bağımsız olarak tasarlanan iki adet fluxgate manyetometre kullanılmıştır. Bunlar minyatürize Uygulamaya Özel Entegre Devre (ASIC) tabanlı sensör elektroniği kullanan dijital ve daha geleneksel devre tasarımına sahip analog fluxgate manyetometrelerdir. Farklı tasarım ve çalışma prensibine dayanan manyetometreleri kullanmak sürekli verilerin elde edilmesini sağlamak için önemli olmuş ve iki farklı manyetometre türü ile manyetik alanın yedek ölçümleri sağlanmıştır [65].

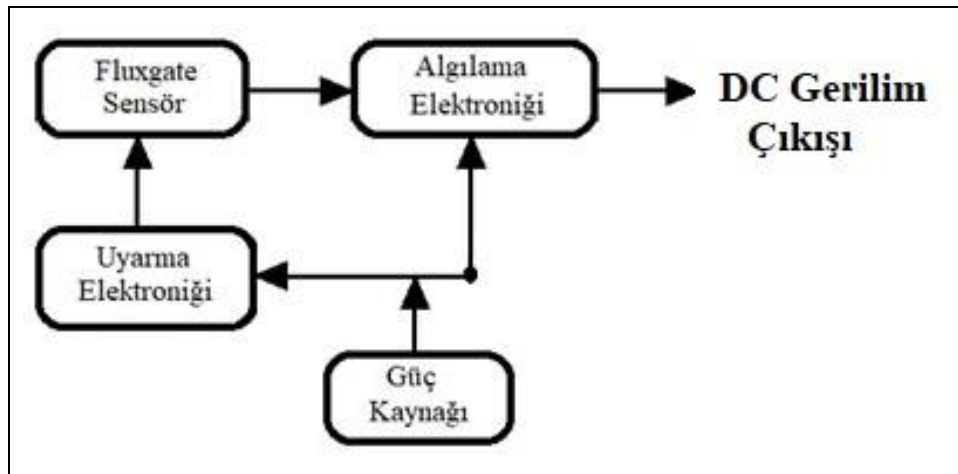
3. FLUXGATE MANYETOMETRE TASARIMI

Manyetometreler çıkış gerilimi ile ölçülmek istenilen manyetik alan arasında bir ilişki kurarak manyetik alan ölçümünü gerçekleştirmektedir (bkz. Şekil 3.1).



Şekil 3.1: Manyetometre fonksiyonel yapısı.

Açık çevrim prensibine dayanan manyetometrelerin ölçüm hassasiyeti nüvenin mıknatıslanma eğrisinin doğrusallığı ile sınırlı ve Dünya manyetik alan ($60 \mu\text{T}$) ölçüm uygulamaları için yaklaşık %5'tir [66]. Bu nedenle bu çalışmada daha hassas ve kararlı bir manyetometre tasarımı hedeflenerek kapalı çevrim prensibi kullanılmıştır. Böylece algılama bobininindeki manyetik alanın sıfıra doğru yönlendirilmesiyle ölçüm aralığı artırılabilecektir. 3 farklı yapıdan oluşan fluxgate manyetometre sisteminin blok diyagramı Şekil 3.2'de verilmektedir. Fluxgate Manyetometre ve Sensör tasarımının kolayca anlaşılabilmesi için bu bölüm 3 altbaşlık altında açıklanmaktadır.



Şekil 3.2: Fluxgate manyetometre sistemi blok diyagramı.

3.1. Fluxgate Manyetometre Sensör Tasarımı

Tez çalışmasında öncelikli hedefimizin keşif ve araştırma uydularında konum ve yönelim belirleme sensörü olarak kullanılacak manyetometre geliştirmek olması ve bu amaca yönelik en uygun tasarımın halka tipi fluxgate sensörlerin olduğunun bilinmesinden dolayı çalışmalara halka tipi fluxgate sensör tasarımı ile başlandı. Bu tip sensörlerin diğerlerine nazaran en avantajlı yönü titreşim, radyasyon, sıcaklık ve vakum gibi çevresel parametrelere olan asgari duyarlılığıdır. Fluxgate sensörlerin uygulanan DC alana 2f gerilim cevabının sensör yapımında kullanılan nüvenin manyetik özelliklerine bağlı olduğu ve bunun da ölçüm performansını etkilediği bilinmektedir [67]. Mesela bağlı geçirgenliğin zamana bağlı türevi ve mıknatıslanma eğrisinin yuvarlaklığı sensör çıkış sinyalinin genliğine etki ederken benzer şekilde koersif alan, kalıcı mıknatıslanma ve doyum mıknatıslanması da sinyalin gürültü seviyesinde belirleyici olmaktadır. [14] numaralı çalışmada nüvenin doyum mıknatıslanmasının güç tüketimi ve ölçüm hassasiyetinde, Curie sıcaklığının ise manyetik geçirgenliği üzerinde etkili olduğu belirtilmiştir. Bu tez çalışmasında ise Fluxgate manyetometre sensör (FMS) optimizasyonunun sağlanabilmesi için farklı manyetik özelliklere sahip kobalt ve demir tabanlı nüveler üzerinde çalışmalar yapıldı. İki kobalt biri demir tabanlı olmak üzere üç adet özdeş halka tipi sensör hazırlandı. Çalışma boyunca anlatım kolaylığı sağlaması için sırasıyla FGS1, FGS2 ve FGS3 olarak isimlendirilen sensörlerin genel özellikleri şu şekildedir.

- FGS1

Kobalt tabanlı CoFeSiNiB içeren alaşım ticari olarak temin edilmiştir. Herhangi bir ısıtma işlemi tabii tutulmaksızın üretim sonrasındaki manyetik geçirgenliği 80000'in üzerindedir. Bu değerdeki manyetik geçirgenliğin sensör sinyalinin şiddetli olmasını sağlayacağı düşünülmektedir. Curie sıcaklık değerinin yaklaşık olarak 225 °C olması oda sıcaklığında rahat çalışma imkanı sunmaktadır. Doyum manyetik büzülme katsayısı (λ_s) 0.5 ppm'den küçük olması sensör gürültüsünün düşük olması gerektiği anlamına gelmektedir. Elektriksel direnç değeri ise 1.4 $\mu\Omega.m$ 'dir ve bu da malzemede ısınma olmadan geniş bir uyarım frekans aralığında çalışma olanağı sunmaktadır. Ayrıca koersif alan değeri 0.02 Oe, doyum manyetik indüksiyon değeri ise 0.5 T'dir.

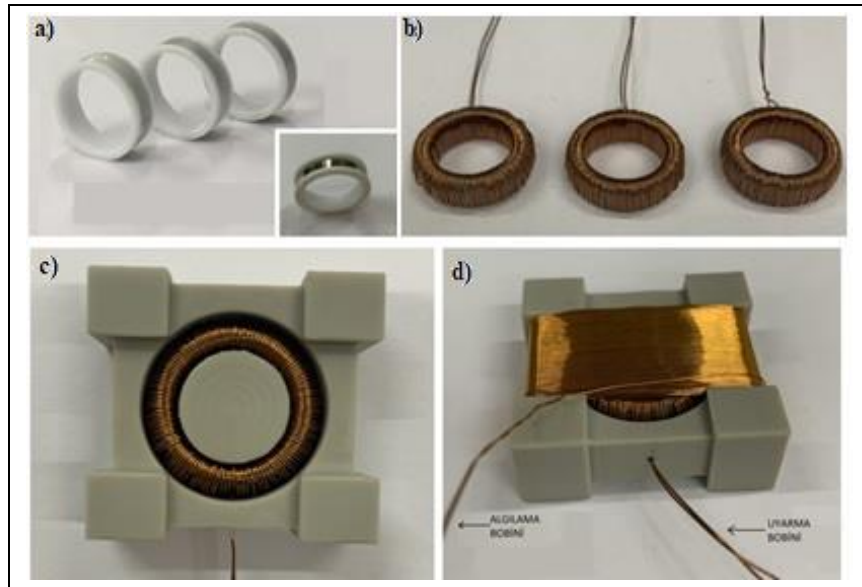
- FGS2

$\text{Co}_{69}\text{Fe}_2\text{Cr}_7\text{Si}_8\text{B}_{14}$ kompozisyonuna sahip kobalt zengini şerit nüveler proje ortağı olan Slovakya Bilimler Akademisi bilim insanları tarafından üretilmiştir. Yüksek Curie sıcaklığına sahip malzemenin göreceli manyetik geçirgenliği 10000'in üzerindedir. Ayrıca manyetik büzülme katsayısı 1'den küçük, doyum manyetik indüksiyon değeri 0.4 T - 0.5 T aralığında, elektriksel direnci 1.0 - 1.2 $\mu\Omega\cdot\text{m}$ seviyelerinde ve koersif alan değeri 1.0 Oe'den oldukça küçüktür.

- FGS3

FINEMET tipi $\text{Fe}_{71.5}\text{Si}_{15.5}\text{B}_9\text{NbCu}_3$ demir tabanlı alaşım yine proje ortağı olan Slovakya Bilimler Akademisi bilim insanları tarafından üretilmiştir. Curie sıcaklığı oldukça yüksek ve 395 °C olan malzemenin elektriksel direnci 1.2 $\mu\Omega\cdot\text{m}$, doyum manyetik indüksiyon değeri 0.5 T - 0.6 T aralığında, koersif alan değeri ise 0.025 Oe'dir.

Sensörlerin hazırlık aşamaları ise Şekil 3.3 ile gösterilerek ayrıntıları aşağıda verilmiştir.



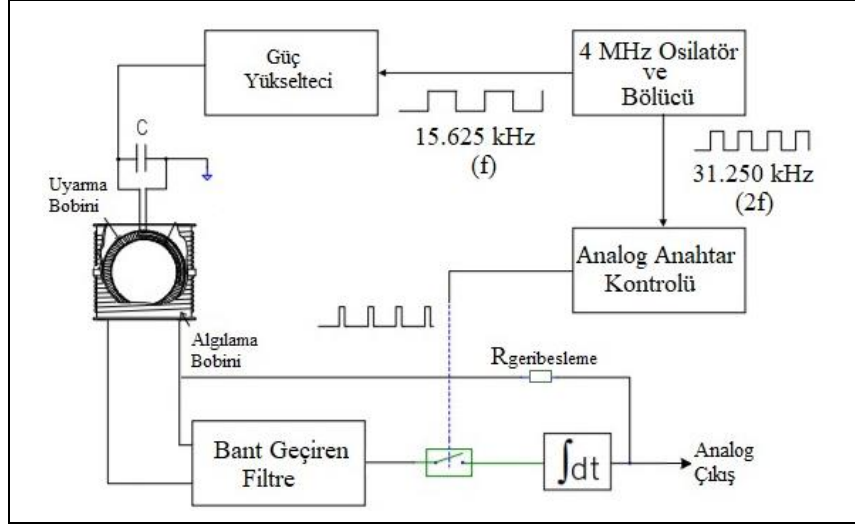
Şekil 3.3: Halka tipi fluxgate sensör hazırlık aşamaları.

Öncelikle kalınlığı 15 μm (FGS1, FGS2) ve 18 μm (FGS3), genişliği 3.175 mm olan şerit nüveler çapı 15 mm olan uyarma kasnağı üzerine 6 kat sarıldı (Şekil 3.3.a). Uyarma bobini sarımı yapılmadan önce sargıların nüve ile kısa devre olma riskini

ortadan kaldırmak için nüve sarılı kasnaklar termal iletkenliği iyi olan bir yapıştırıcı ile kaplandı. Daha sonra uyarma bobini için 300 μm çaplı bakır tel kullanılarak uyarma kasnağı üzerine [10] numaralı çalışmada iyi sonuçlara ulaşıldığı için ~130 tur sarım yapıldı (Şekil 3.3.b). Böylece sensörlerin uyarma bobin üretimleri tamamlandı ve Şekil 3.3.c’de gösterilen algılama bobin kasnağındaki oyuk içerisine yerleştirildi. Uyarma bobininin algılama bobininin tam merkezinde olması sensör sıfır ofseti açısından oldukça önemli olduğu daha önceki bölümlerde belirtilmişti. Bu nedenle kullanılacak algılama bobin kasnağı uyarma bobini merkezde kalacak şekilde özel olarak üretilmiştir. Son olarak sensör üretiminin tamamlanması için kasnak üzerine çapı 100 μm olan bakır tel ile ~500 tur algılama bobin sarımı yapıldı. Önceki yıllarda yapılan çalışmalar algılama bobin tur sayısının sensör hassasiyeti ile doğru orantılı olduğunu belirtse de sarım sayısının artırılması bobin direncini ve beraberinde de termal gürültüyü artırmaktadır. Şekil 3.3.d’de FGS1’e ait üretimi tamamlanan sensör görülmektedir. Üretimi tamamlanan üç sensörün de ölçümleri manyetometre elektronik devre tasarımı yapıldıktan sonra gerçekleştirilecek ve optimum sonuca sahip sensör nihai ürün olarak kullanılacaktır.

3.2. Fluxgate Manyetometre Elektronik Tasarımı

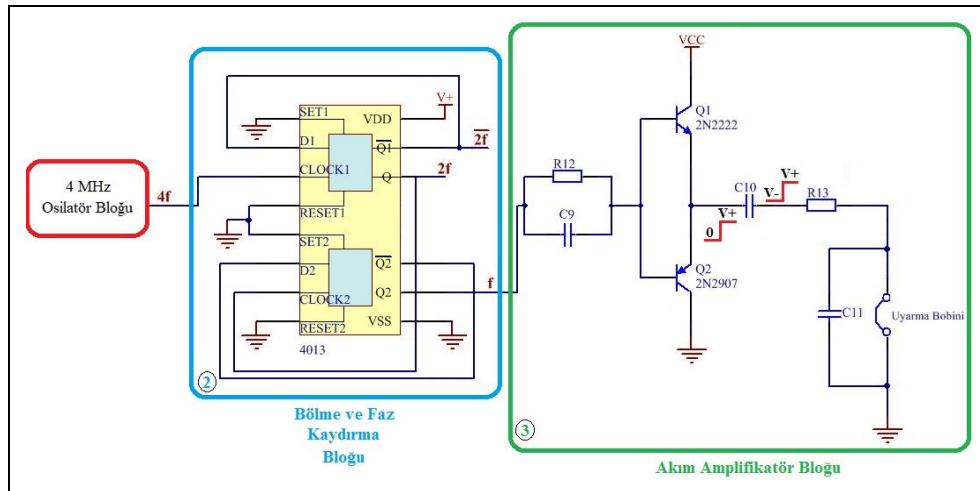
Fluxgate manyetometre elektroniğinde temelde uyarma ve algılama olmak üzere iki elektronik devre söz konusudur. Uyarma devresi sensörlerin aktif hale getirilmesi ve DC manyetik alanın ölçülebilmesi için gerekli modülasyon sinyali üreticidir. Bu devrede sabit frekans ve genlikte kare dalga formunda uyarım sinyali (f) üretilerek uyarma bobinine sürülmektedir. Algılama devresi ise sensör çıkışında oluşan ve uyarım sinyalinin harmoniklerini içeren gerilim sinyalinden ikinci harmonik ($2f$) sinyalini süzüp yükselten yüksek kalite faktörlü lock-in yükselteç preniyle çalışan devredir. Bu kapsamda yapılan çalışmalar uyarma ve algılama elektronik devre tasarımı olarak iki ana başlıkta toplanmıştır. Daha önce Ørsted uzay aracında kullanılan Fluxgate manyetometre elektroniği baz alınarak tasarımı gerçekleştirilen kapalı çevrim manyetometrenin elektronik devre şeması Şekil 3.4 ile gösterilmektedir. Uyarma elektroniği osilatörden, frekans bölücünden ve akım kuvvetlendiriciden, algılama elektroniği ise bant geçiren filtreden, senkron dedektörden ve integratör bloğundan oluşmaktadır.



Şekil 3.4: Fluxgate manyetometre elektronik devre şeması.

3.2.1. Uyarma Elektronığı

Çalışmanın ikinci bölümünde de belirtildiği gibi uygulamadaki basitliği ve düşük güç tüketimi nedeniyle kare dalga uyarım formu fluxgate sensörleri için en uygundur. Bu nedenle uyarma elektronığı tasarımı kare dalga formundaki uyarıma yönelik yapıldı. Sensörün uyarma bobinini Şekil 3.5 ile gösterilen uyarma devre yapısı ile sürülmektedir.



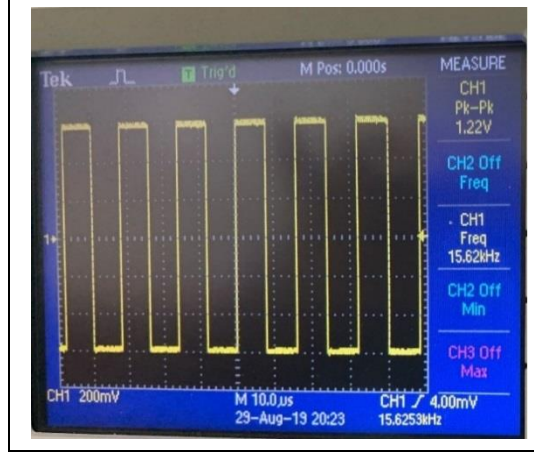
Şekil 3.5: Uyarma devresi.

Uyarma devre tasarımı yapılmadan önce sensör uyarım sinyali genliğinin ve frekansının belirlenmesi oldukça önem arz etmektedir. Halka tipi Fluxgate sensörlerinin optimum uyarım frekansı üzerine yapılan bir çalışmada farklı DC

alanlarda sensör çıkış sinyalinin ikinci harmonik değişimi incelenerek yinelenen ölçümler sonucunda uygulanan DC alana en iyi $2f$ cevabın 15 kHz ile 20 kHz frekans aralığındaki uyarımda olduğu görülmüştür [68]. Bu nedenle sinyal üretim aşamasında piyasadaki mevcut kristal değerleri göz önünde bulundurulduğunda uyarım sinyali olarak 12 V genlikli ve 15.625 kHz (f) frekanslı kare dalga kullanıldı.

Sinyal üreteç devreleri için opamp, transistör, hex invertör ve benzeri yapılar kullanılsa da bu tez çalışmasında uygulamadaki basitliği nedeniyle kristal osilatör yapısı kullanıldı. Kırmızı çerçeveli ilk blokta osilatör entegresi kullanılarak 4 MHz kristal ile $4f$ (62.5 kHz) frekanslı saat sinyali üretildi. Daha sonra mavi çerçeveli blokta yer alan D-flip-flop entegresi, saat sinyalinden $2f$ (31.250 kHz) frekanslı referans sinyalini (senkron detektör devresini sürmek ve ikinci harmonik demodülasyonunu gerçekleştirmek için) ve f (15.625 kHz) frekanslı uyarım sinyalini (uyarma bobinini sürmek için) oluşturmak için kullanıldı. Birbirinden bağımsız olarak kullanılabilen iki adet flip-floptan oluşan 4013 entegresini frekans bölücü olarak kullanmak için tamamlayıcı ve veri giriş pimleri birbirine bağlandı. Aynı zamanda sinyal demodülasyonunun yapılabilmesi için gerekli olan $2f$ referans sinyaline faz kaydırma işlemi de bu blokta uygulandı. Sonuç olarak ikinci blokta yalnızca bir adet flip-flop kullanılarak kare dalga formunda $2f$, $\overline{2f}$ ve f frekanslı sinyaller üretildi. Unipolar analog gerilim çıkışı üreten flip-flop entegresinin çıkış akımı oldukça düşük olduğu için sensör nüvesini sürmede bu entegre ile üretilen sinyal doğrudan kullanılamamaktadır. Bu nedenle nüveyi doyuma ulaştırabilecek büyüklükte akım elde etmek için bir kuvvetlendiriciye ihtiyaç vardır. Uyarım sinyalinin akım kazancı için mavi çerçeveli üçüncü blokta yer alan push-pull B sınıfı güç yükselteci kullanıldı. Bu yapının tercih edilmesinin başlıca nedeni verimliliğinin yüksek olması ve herhangi bir kayıp olmadan sadece pozitif besleme gerilimi ile devrede güç tüketiminin azaltılabilmesidir. Bu durumda Q2 tranzistörünün açılması için gereken negatif besleme gerilim C10 kapasitesinin doldur-boşalt özelliği ile sağlandı. Böylelikle kuvvetlendirilen unipolar sinyalden kapasite aracılığıyla bipolar uyarım sinyali elde edilerek sensör nüvesinin her iki yönde de doyuma ulaşması sağlandı. Mevcut uyarma devresi tasarımında sensörün sürücü kısmına 40-50 mARMS değerinde akım sürülerek tank kısmında 100 mARMS akım oluşturuldu. Böylelikle gürültü minimizasyonu için nüvenin doyum mıknatıslanmasının en az 3 katı doyurulması sağlandı. Şekil 3.5'te yer alan C11 kapasitesi 15.625 kHz'deki bobin reaktansına uygun olacak şekilde seçilerek tank bölgesinde rezonansı sağlandı.

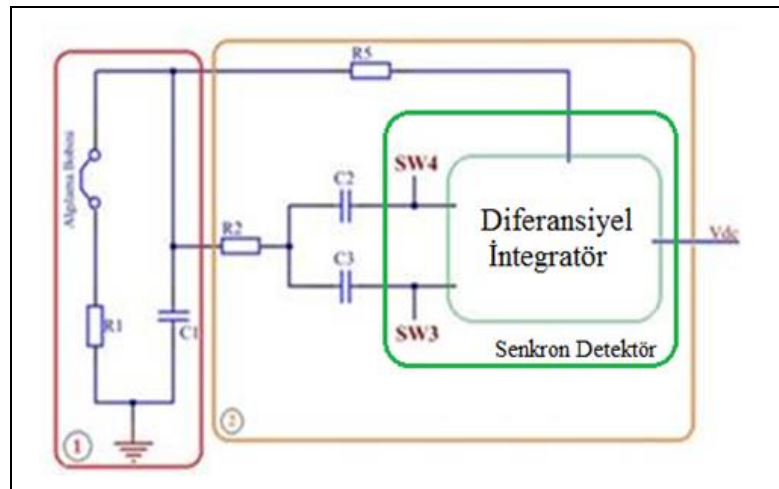
Uyarma bobinine seri bağılı R13 sönümlleme direnci ise uyarım sinyalinin f frekansında daha kararlı bir hale gelmesi için kullanıldı. Sonuçta üretilen uyarım sinyali Şekil 3.6’da verilmiştir.



Şekil 3.6: Uyarım sinyali.

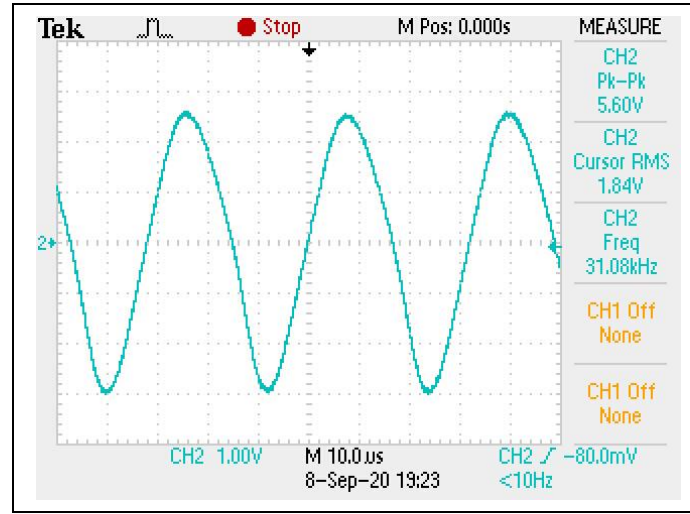
3.2.2. Algılama Elektronikği

Uyarma bobinine enerji verildikten sonra faraday indüksiyon yasasına göre algılama bobini üzerinde dış manyetik alan bilgisini de içeren bir gerilim indüklenir. İndüklenen bu gerilim sinyalinden dış alan bilgisini çıkarmak için kullanılan alan geri beslemeli algılama devre yapısı Şekil 3.7’de verilmiştir.



Şekil 3.7: Algılama devresi.

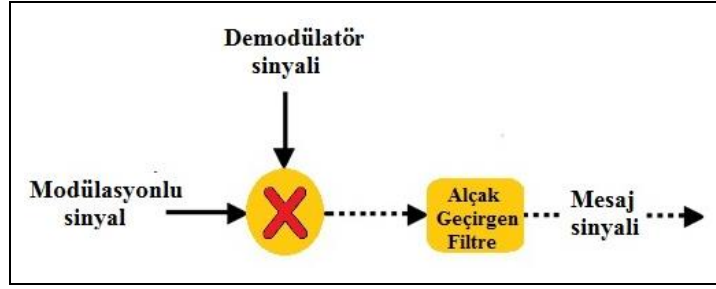
Kırmızı çerçeve ile belirtilen ilk blokta sensör çıkışı ikinci harmonik bileşeni çıkarmak için paralel bir kapasite ile akort edildi. Algılama bobinine paralel bir kapasitör ile yapılan rezonans devresi çok basit olmasına rağmen analitik olarak açıklamak oldukça karmaşık ve etkisi doğrusal değildir [24]. İç direnci düşük olan bobinin akort edilmesi sıfır manyetik alanda bile sensör çıkışında bir salınım yaratarak kararsızlık tehlikesi taşımaktadır. Bu olası problemin önüne geçerek sensör çıkışının sıcaklık stabilizesini sağlamak ve rezonans bölgesini genişletmek için akort kapasitesine paralel bir direnç eklendi [37]. Bu direnç değerinin artırılması rezonans bölgesini genişletirken kalite faktörünü düşürse de kritik tasarımlarda uygulama alanının dikkate alınması gerektiği unutulmamalıdır. Özellikle uzay uygulamalarında olduğu gibi kontrol edilemeyen alanlarda çevre şartlarına karşı sağlamlık sağlamak için performans parametreleri arasındaki dengeyi sağlamak oldukça önem arz etmektedir [67]. Sonuçta kırmızı blok çıkışında elde edilen dilen sinyal dış manyetik alanın genliği ve fazıyla orantılı bir sinüs dalgasıdır (bkz. Şekil 3.8).



Şekil 3.8: Algılama bobininin akort edilen çıkış sinyali.

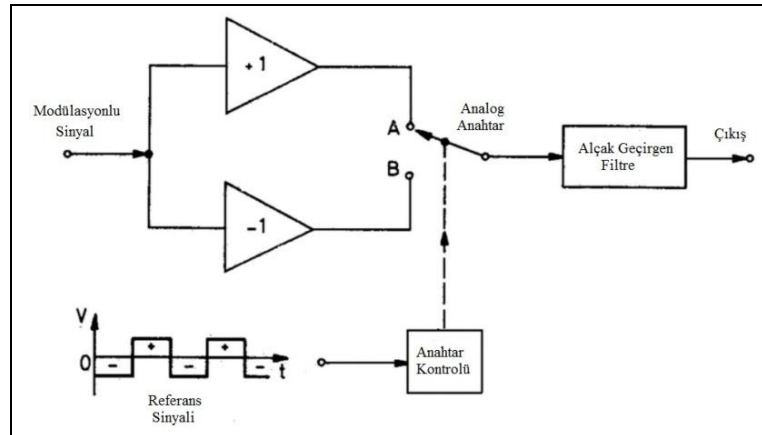
Şekil 3.7’de turuncu çerçeve ile belirtilen ikinci blok girişinde bulunan kapasiteler akort edilmiş sensör gerilim çıkışının DC ofsetini gidermek için kullanıldı. Böylelikle sensör çıkış sinyali ve referans sinyali arasındaki faz ilişkisine bağlı olarak modüle edilen ve dış alan bilgisini içeren sinyal tamamen ayırt edilebilir hale getirildi. Bu aşamadan sonra Şekil 3.7’de yeşil çerçeve ile belirtilen senkton detektör yapısında manyetometrenin en kritik elemanı olan ve modülatör/demodülatör işlemini yapan bir çarpım devresi elemanı kullanılmaktadır.

Bu iki sinyali birbirinden ayırma işlemi olan sinyal demodülasyonu genellikle operasyonel amplifikatörü takip eden bir analog anahtar ve senkron (faza duyarlı) dedektör ile gerçekleştirilmektedir [15]. Sinyal demodülasyonunun kilitleme amplifikatörü kullanmak gibi başka yöntemleri olsa da devrenin karmaşıklığı ve maliyeti dezavantajlara neden olmaktadır. Bu nedenle sinyal demodülasyonu için Şekil 3.9’da verilen senkron detektör yapısı kullanıldı.



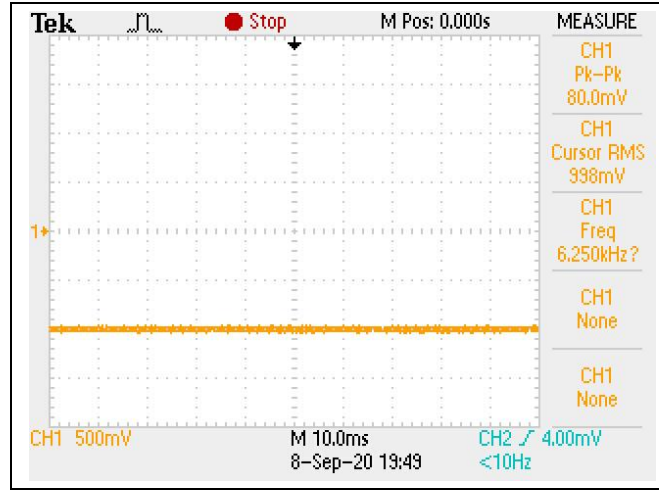
Şekil 3.9: Senkron detektör yapısı.

Senkron detektörün çalışma prensibi Şekil 3.10’da verilmiştir. Demodülasyonun ilk aşaması CMOS analog anahtarı ile oluşturulan ve referans sinyali tarafından kontrol edilen çarpım devresidir. Anahtarın $2f$ ve $\overline{2f}$ frekanslı referans sinyalinin pozitif yarı döngüleri ile fazda olan iki çıkışı vardır (SW3, SW4) ve referans sinyali polaritesini değiştirdikçe anahtar A ve B noktaları arasında konumunu değiştirir. Bu durum sinyal yolunda +1 ve -1 arasında bir kazanç değişikliği sağlar. Referans sinyalinin simetrik bir şekilde polaritesinin değiştirmesi anahtar çıkışında sinyalin tam dalga doğrultusuna neden olur [69].



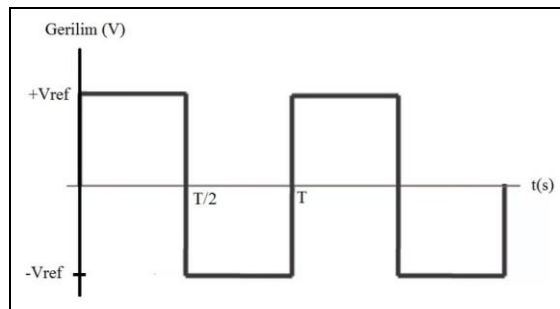
Şekil 3.10: Senkron detektör çalışma prensibi.

Modülasyonlu sensör çıkış sinyali ile referans sinyalinin çarpımı sonucu oluşan tam doğrultulmuş sinyal sonrasında DC bileşeni çıkarmak için diferansiyel integratör ile oluşturulan alçak geçiren filtreden geçirilir. Sonuç olarak diferansiyel integratör bloğu çıkışında demodüle edilmiş ve dış alan bilgisiyle orantılı olan DC gerilim elde edilir (bkz. Şekil 3.11).



Şekil 3.11: Dış alan bilgisi ile orantılı DC gerilim sinyali.

Senkron detektör yapısı matematiksel olarak ifade edilecek olursa ayrıntılı bir açıklama için kare dalga formundaki referans sinyalinin (demodülasyon sinyali) Fourier ifadesinin kullanılmaktadır [41]. Şekil 3.12 ile gösterilen kare dalga sinyalinin Fourier açılımı Deklem 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.12: Referans sinyali.

$$V_{ref}(t) = V_{ref} \quad 0 < t < T/2 \quad (3.1)$$

$$V_{ref}(t) = -V_{ref} \quad T/2 < t < T \quad (3.2)$$

$$F(t) = \frac{4V_{ref}}{\pi} \left(\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \dots \right) \quad (3.3)$$

$V_{in}(t)$ sinüzoidal giriş sinyali (modülasyonlu sinyal) ve $V_{ref}(t)$ kare dalga referans sinyali olmak üzere bu iki sinyalin aynı fazda olması durumunda senkron demodülatör aşamaları Şekil 3.13 ile gösterilmektedir. Demodülasyon süreci matematiksel olarak

$$V_{in}(t) = V_s \sin \omega t \quad (3.4)$$

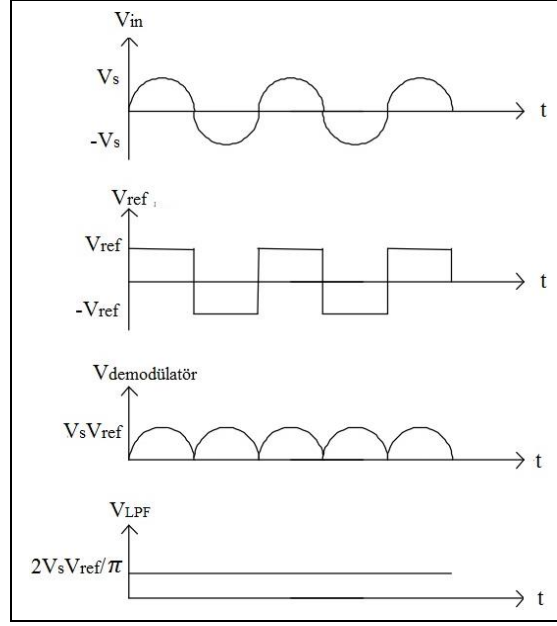
$$V_{ref}(t) = \frac{4V_{ref}}{\pi} \left(\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \dots \right) \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned} V_{demod\ddot{u}lat\ddot{o}r}(t) &= V_s(t) * V_{ref}(t) \\ &= \frac{4V_{ref}V_s}{\pi} [\sin \omega t] \left(\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \dots \right) \\ &= \frac{2V_sV_{ref}}{\pi} \left[1 - \frac{2}{3} \cos 2\omega t - \frac{2}{15} \cos 4\omega t - \frac{2}{35} \cos 6\omega t - \dots \right] \end{aligned} \quad (3.6)$$

$$V_{LPF}(t) = \frac{2V_sV_{ref}}{\pi} \quad (3.7)$$

denklemleri ile ifade edilmektedir.

Şekil 3.13'te de görüldüğü gibi aslında bu çalışmada senkron detektör tam dalga doğrultucu olarak kullanılmaktadır. Bu şekildeyken demodülatör çıkışı giriş sinyalinin tam dalga doğrultulmuş halinden başka bir şey değildir.



Şekil 3.13: Giriş sinyali ile referans sinyalinin fazda olması durumunda senkron demodülatör aşamaları.

Eğer giriş sinyali ile referans sinyali arasında bir faz farkı varsa, giriş sinyalinin

$$V_{in}(t) = V_s \sin \omega t + \theta \quad (3.8)$$

olması durumunda demodülatör çıkış sinyalinin Fourier ifadesinin DC terimi

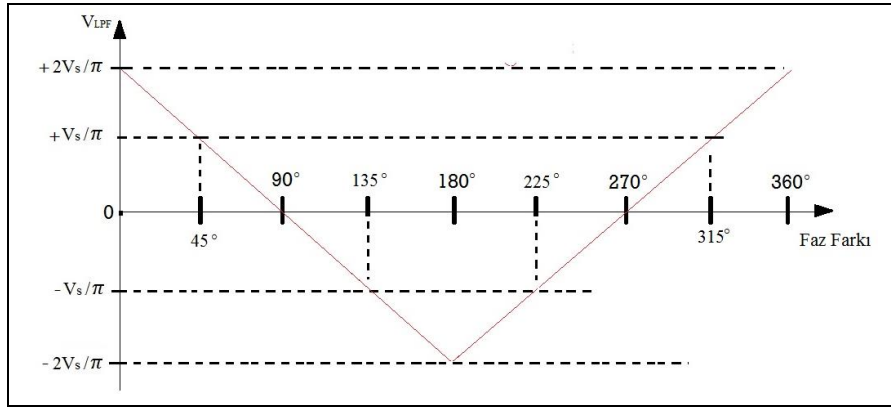
$$V_{demodulator}(t) = \frac{2V_s V_{ref}}{\pi} \cos \theta \quad (3.9)$$

olmaktadır. Dolayısıyla da alçak geçiren filtre çıkışının DC seviyesi, giriş sinyali ile referans sinyali arasındaki faz farkının kosinüsü ile orantılı olacaktır. Bu durumda Şekil 3.14 ve Şekil 3.15'te gösterildiği gibi alçak geçiren filtre çıkışının DC bileşeni faz farkına göre değişecektir.

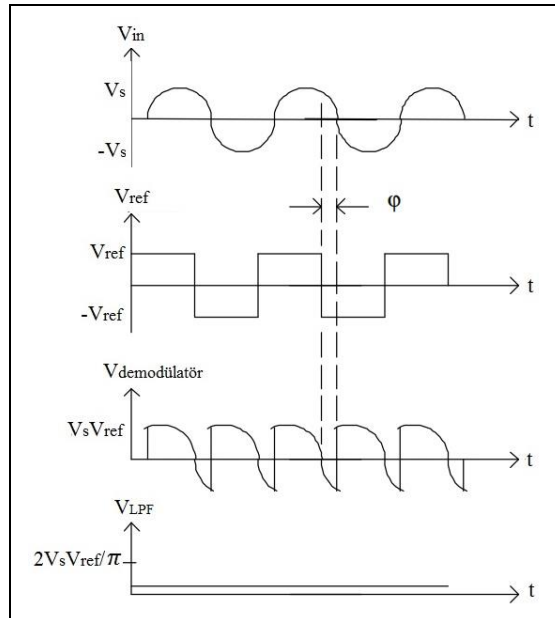
$$V_{LPF} = \frac{2V_s V_{ref}}{\pi} \quad \theta = 0^\circ \text{ ve } 360^\circ \quad (3.10)$$

$$V_{LPF} = 0 \quad \theta = 90^\circ \text{ ve } 270^\circ \quad (3.11)$$

$$V_{LPF} = -\frac{2V_s V_{ref}}{\pi} \quad \theta = 180^\circ \quad (3.12)$$



Şekil 3.14: DC gerilim sinyal büyüklüğünün faz açısına göre değişimi.



Şekil 3.15: Giriş sinyali ile referans sinyalinin faz dışı olması durumunda senkron demodülatör aşamaları.

Anahtar $0 < t < T/2$ zamanında açık pozisyonda ve kazancı $+V_{ref}$ iken $T/2 < t < T$ aralığında kapalı pozisyonda ve kazancı $-V_{ref}$ 'tir. Giriş sinyalinin frekansı referans sinyal frekansından Δf kadar farklılık gösterirse giriş sinyali ve referans sinyali demodülatöre tam olarak aynı fazda ulaşmayacaktır. Giriş sinyali ile referans sinyali arasındaki bu ilişkiler

$$f_{in} = f_{ref} + \Delta f \quad (3.13)$$

$$\omega_{in} = \omega_{ref} + \Delta\omega \quad (3.14)$$

$$\omega_{ref} = 2\pi f_{ref} \quad (3.15)$$

$$\Delta\omega = 2\omega\Delta f \quad (3.16)$$

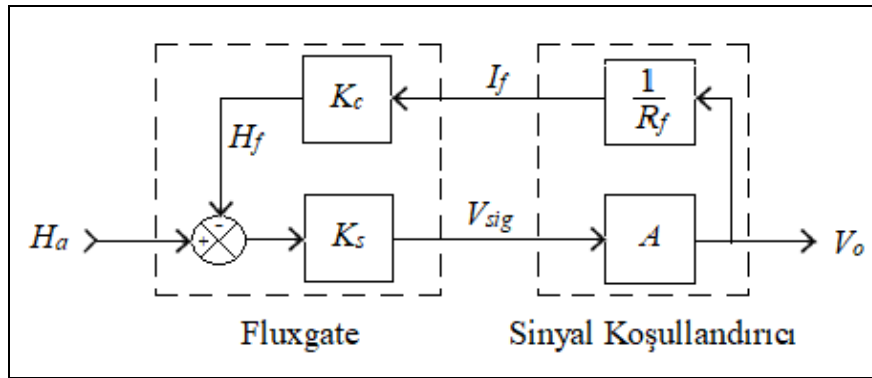
$$V_{in} = V_s \sin(\omega_{ref} + \Delta\omega)t \quad (3.17)$$

denklemleri ile ifade edilmesi durumunda alçak geçiren filtre çıkışı

$$V_{LPF} = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} V_s V_{ref} \sin(\omega_{ref}t + \Delta\omega t) dt = \frac{2V_s V_{ref}}{\pi} \cos \Delta\omega t \quad (3.18)$$

olacaktır.

Yukarıda anlatılanlar Şekil 3.16'daki yapı kullanılarak basite indirgenebilir ve manyetometre transfer fonksiyonu üzerinden anlaşılması kolaylaştırılabilir.



Şekil 3.16: Kapalı çevrim fluxgate manyetometre blok şeması.

Burada H_a dış manyetik alanı, H_f geribesleme alanını, K_s sensör için manyetik alanı gerilime çeviren sabiti ve K_c bobin için akımı manyetik alana çeviren sabiti ifade etmektedir. Bu yapıda dış manyetik alandan geribesleme alanı çıkartılarak fark manyetik alanı, alanı gerilime çeviren transfer fonksiyonunun kullanılmasıyla gerilim sinyaline çevrilir. Bu gerilim sinyali bir amplifikatör tarafından yükseltilir ve yükselttilen sinyal geribesleme akımına dönüştürülür. Daha sonra geribesleme akımı, akımı manyetik alana çeviren transfer fonksiyonu kullanılarak geribesleme alanına dönüştürülür. Bu durumda manyetometre için genel transfer fonksiyon

$$\frac{V_o}{H_a} = \frac{AK_s}{1 + \frac{K_c AK_s}{R_f}} \quad (3.19)$$

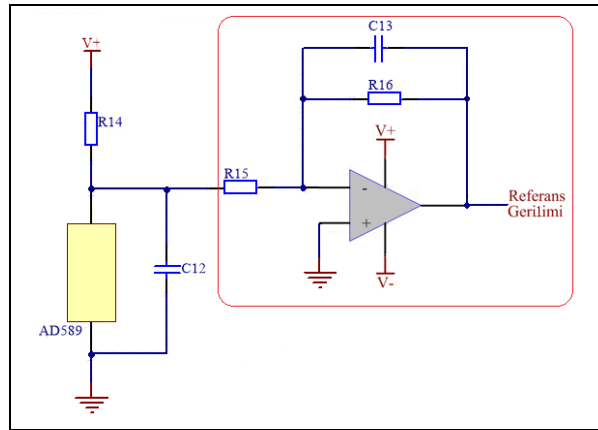
olur. Amplifikatör kazancı çok yüksek olduğundan paydadaki ikinci terim 1'den çok daha büyük olacak ve Denklem 3.19 yeniden düzenlenirse

$$\frac{V_o}{H_a} = \frac{R_f}{K_c} \quad (3.20)$$

elde edilecektir. Denklem 3.20'de görüldüğü gibi manyetometre transfer fonksiyonu neredeyse sadece geribesleme direnci (R_f) ve sensörün akım-alan bobin sabiti (K_c) oranına göre belirlenmektedir. Bu sabitlerin her ikisi de iyi bir şekilde kontrol edilebilmektedir.

3.2.3. Sensör Çıkış Sinyalinin Analogtan Dijitale Dönüştürülmesi

Manyetometre uyarma ve algılama devresinin besleme gerilim değeri ± 12 V olduğu için DC gerilim çıkışı ± 12 V aralığında olmaktadır. Bu DC gerilim çıkışının dijital olarak kontrol edilebilmesini sağlamak için ölçeklendirilmesi gerekmektedir. Bu nedenle uygulanabilirlik açısından ve çoğu mikrodenetleyicinin analog giriş gerilim değeri 0-5 V olduğundan manyetometre DC çıkış gerilim sinyali bu değerler arasında ölçeklendirilerek sıfır gerilim değeri 2.5 V olarak ayarlandı.

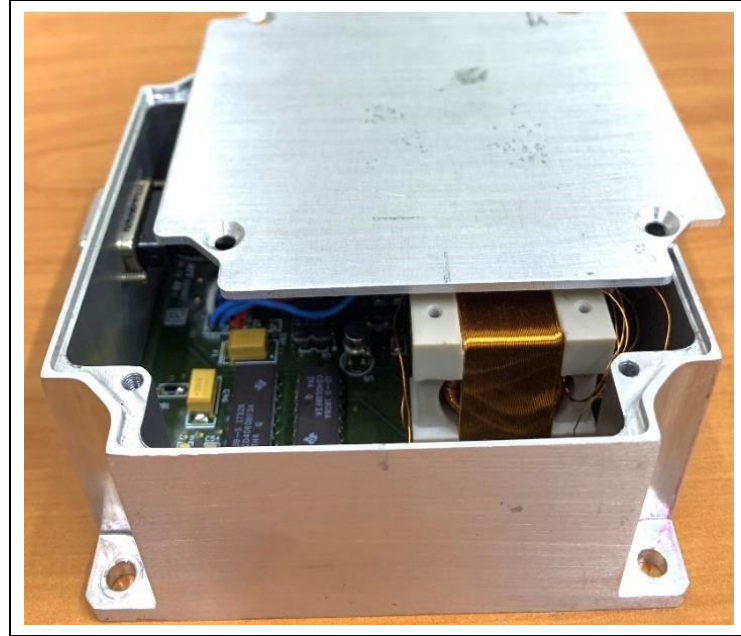


Şekil 3.17: Referans gerilim sinyali üreteç devresi.

Bunun için öncelikle Şekil 3.17'de gösterilen voltaj referans entegresi ile referans gerilimi üretildi. Literatürdeki çoğu çalışmada referans gerilimi üretmek için zener diyot kullanılsa da zener diyotun salınımının fazla olması ölçüm doğruluğunu etkilediği için bu çalışmada 1.2 V voltaj referans entegresi kullanıldı. Şekil 3.17'de

kırmızı çerçeve içerisindeki integratör yapısı ise 1.2 V voltaj referansına $\frac{R_{16}}{R_{15}}$ oranında kazanç sağlayan bir eviren yükselteç olarak kullanıldı ve bu direnç değerleri 1.25 V referans gerilimini 10 V yapacak şekilde ayarlanarak çıkışında -10 V elde edildi. Sonrasında ise toplayıcı yükselteç yapısı kullanılarak sensör çıkışındaki DC gerilim sinyali ile referans gerilimi toplandı. Böylece maximum ± 12 V besleme gerilim değerine ulaşabilecek olan manyetometre DC gerilim çıkışı -10 V referans gerilimi kullanılarak 0 ile 5 V arasında ölçeklendirildi.

Sonuç olarak ikinci harmonik algılama prensibine göre tasarımı gerçekleştirilen ve DC çıkış gerilimi 0-5 V arasında ölçeklendirilen analog Fluxgate manyetometresi Şekil 3.18’de gösterilmektedir.



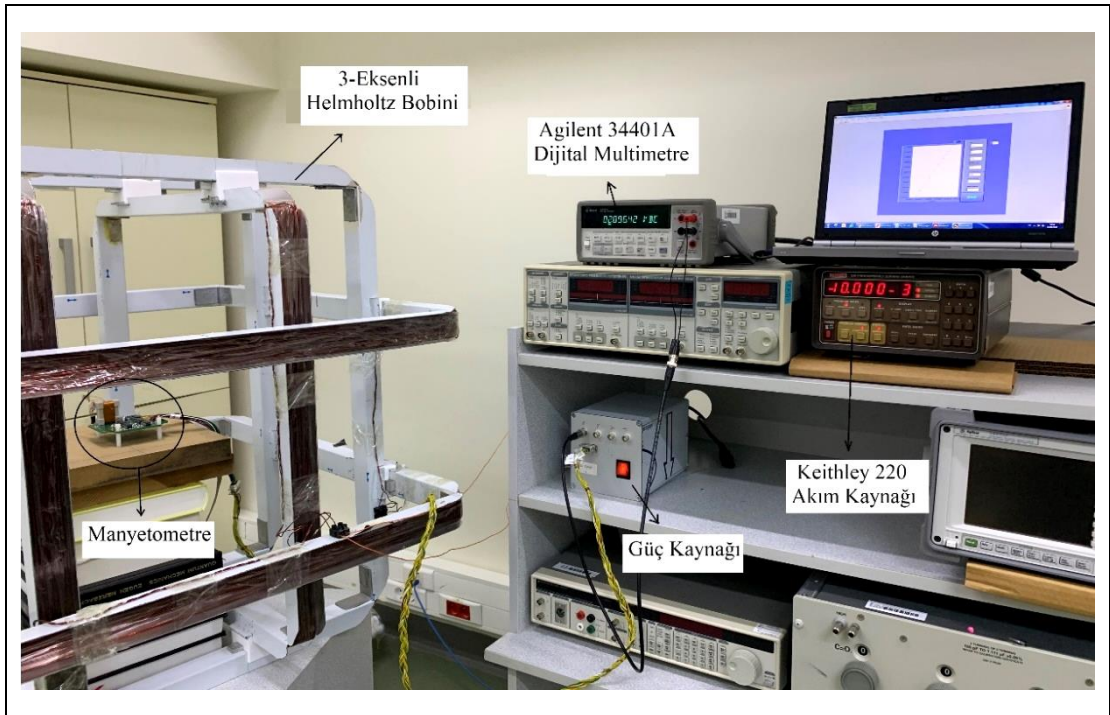
Şekil 3.18: Fluxgate manyetometre.

4. ÖLÇÜMLER

Çalışmanın ikinci bölümünde manyetik alan ölçüm sistemi, üçüncü bölümünde de fluxgate manyetometre tasarımı ayrıntılı olarak verilmiştir. Bu bölümde ise FGS1, FGS2 ve FGS3 sensörleri ile yapılan manyetometre performans ölçümlerine ait yöntem ve sonuçlar verilmektedir.

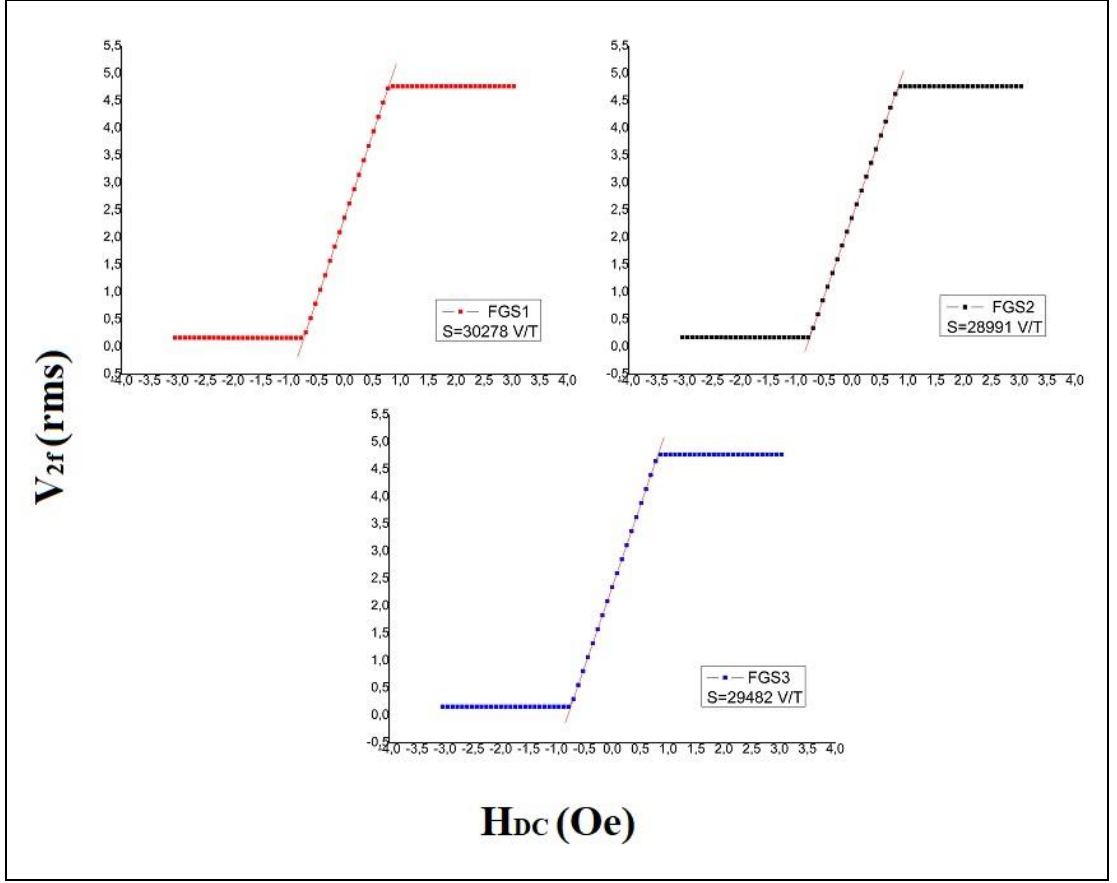
4.1. Hassasiyet, Çözünürlük ve Ölçüm Aralığı Belirleme

Fluxgate manyetometre hassasiyeti (ya da ölçek faktörü), dışarıdan uygulanan veya ölçülmek istenen DC alana karşı sensörün 2f gerilim cevabının doğrusal olduğu aralığı ifade etmektedir. V/T ile ifade edilen ölçek faktörü, manyetometre gerilim çıkışını manyetik alana çevirmek için transfer fonksiyon olarak kullanılmaktadır. Çalışmada hazırlanan üç sensörün hassasiyet ölçümleri için Şekil 4.1 ile gösterilen düzenek kullanılmıştır. Ölçüm sisteminin kontrolü bilgisayar ile sağlanarak otomasyonu için LabVIEW programlama dili kullanılmıştır.



Şekil 4.1: Hassasiyet, ölçüm aralığı ve çözünürlük ölçüm düzeneği.

Şekil 4.1’de gösterildiği gibi hassasiyet (ya da ölçek faktörü) ölçümlerinde DC alan yaratmak için bobin sabiti 4.34 Oe/A olarak belirlenen kalibreli Helmholtz bobini, Keithley 220 akım kaynağı ve Agilent 34401A dijital multimetre kullanıldı. Öncelikle manyetometre ölçüm eksenini Helmholtz bobininde oluşturulan DC manyetik alana paralel olacak şekilde merkezi bir konumda yerleştirildi. Labview programında hazırlanan bir yazılım aracılığı ile Helmholtz bobinine farklı değerlerde DC akım sürülerek manyetometre çıkış sinyali kaydedildi. Ölçümde herhangi bir histeri olup olmadığını anlamak için – ve + maksimum akım değerleri arasında döngü sağlandı. Sürülen akım değerleri Helmholtz bobini model fonksiyonu ile çarpılarak manyetik alan birimine çevrildi. Sonrasında manyetometre çıkış sinyalinin çevresel DC alan grafikleri ($V_{2f} - H_{DC}$) çizildi. Şekil 4.2 hazırlanan sensörlere ait 2. harmonik sinyal şiddetinin uygulanan DC alana bağlı değişimini göstermektedir. Bu ölçümlerin sonucunda $V_{2f}-H_{DC}$ grafiklerinin doğrusal davranış gösterdikleri bölgelerin eğiminden sensörlerin hassasiyetleri sırasıyla FGS1, FGS2 ve FGS3 için 30278 V/T, 28991 V/T ve 29482 V/T olarak belirlendi. Hassasiyet ölçümlerinden manyetometreler için önemli bir parametre olan alt ve üst manyetik alan sınırı da (V_{2f} sinyalinde doğrusallıktan sapmanın gözlemlendiği DC manyetik alan değerleri) belirlendi. Bu değerlendirmeye göre FGS1, FGS2 ve FGS3 sensörleri için alt limitin 0.60 Oe üst limitin ise 0.78 Oe olduğu saptandı. FGS1, FGS2 ve FGS3 sensörlerinin minimumda ~0.16 V’ta, maksimumda ise ~4.76 V’ta doyuma ulaştığı ve ara bölgede dış DC alana karşı 2f cevabının mükemmel bir doğrusallıkta olduğu Şekil 4.2’de görülmektedir. Minimum ve maksimum doyum noktaları manyetometrenin ölçüm aralığını ifade etmektedir.



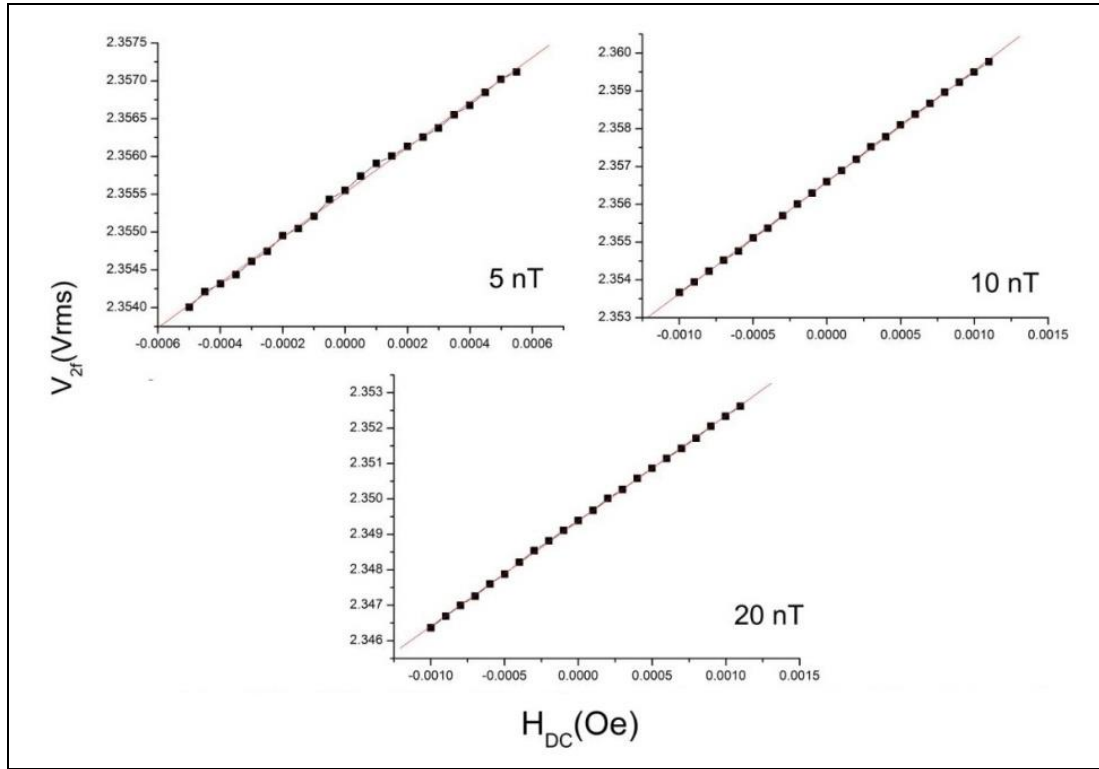
Şekil 4.2: FGS1, FGS2 ve FGS3 sensörlerine ait 2. harmonik sinyalinin DC alan bağımlılık grafikleri.

Manyetometrenin dinamik ölçüm aralığını belirlemek için öncelikle manyetometre mu-metal olarak adlandırılan ve çevresel manyetik alanın yalıtımını sağlayan manyetik kalkan içerisine yerleştirildi ve dijital multimetre kullanılarak okunan manyetometre çıkış sinyali (V_0) kaydedildi. Daha sonra hassasiyet ölçüm grafiklerinden elde edilen doyum gerilim değerlerinden (V_+ ve V_-) mu-metal içerisinde alınan gerilim değeri çıkartıldı. Bu ölçüm üç sensör için de tekrarlandı ve her bir sensör için elde edilen fark ölçek faktörü kullanılarak manyetik alan birimine çevirildi. Bu sayede negatif ve pozitif DC alan yönlerindeki manyetometrenin ölçüm sınırları belirlendi. Sensörlere ait ölçüm sonuçları Tablo 4.1’de verilmektedir.

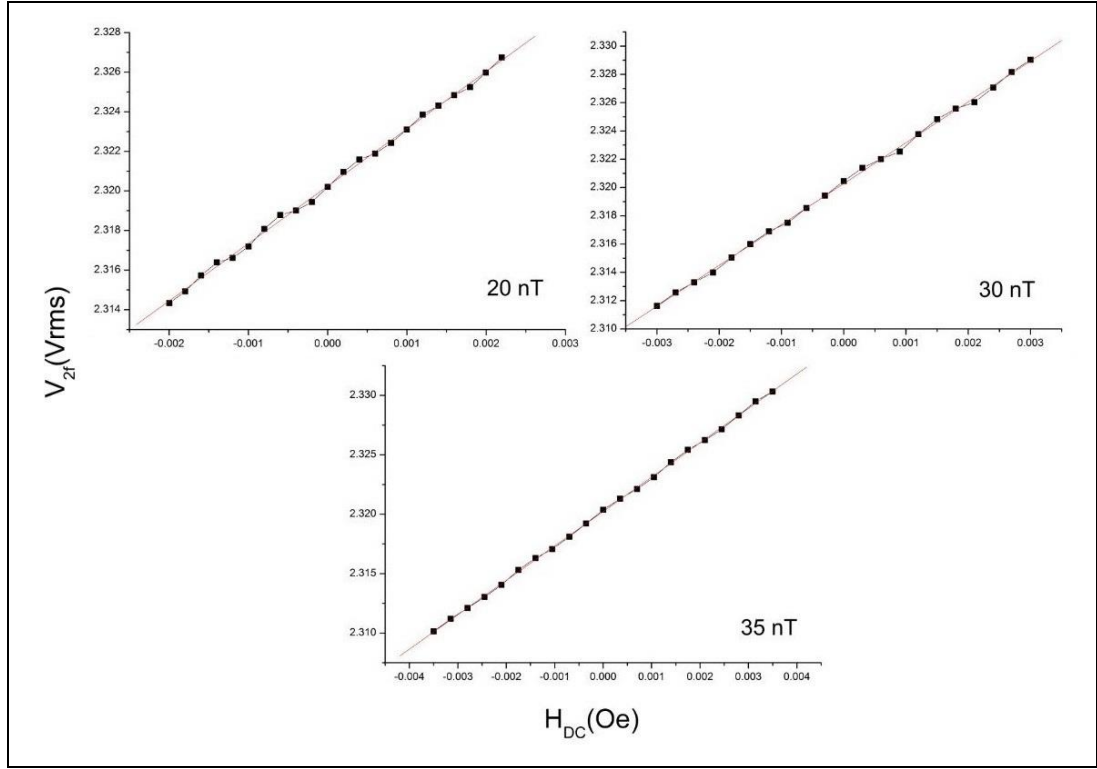
Tablo 4.1: FGS1, FGS2 ve FGS3 sensörlerinin ölçüm aralığı.

	$V_0(V)$	$V+(V)$	$V-(V)$	Ölçüm aralığı
FGS1	2.3685	4.7691	0.1687	+79.29 μT , -72.65 μT
FGS2	2.3327	4.7689	0.1777	+84.03 μT , -74.33 μT
FGS3	2.3137	4.7724	0.1624	+83.40 μT , -72.97 μT

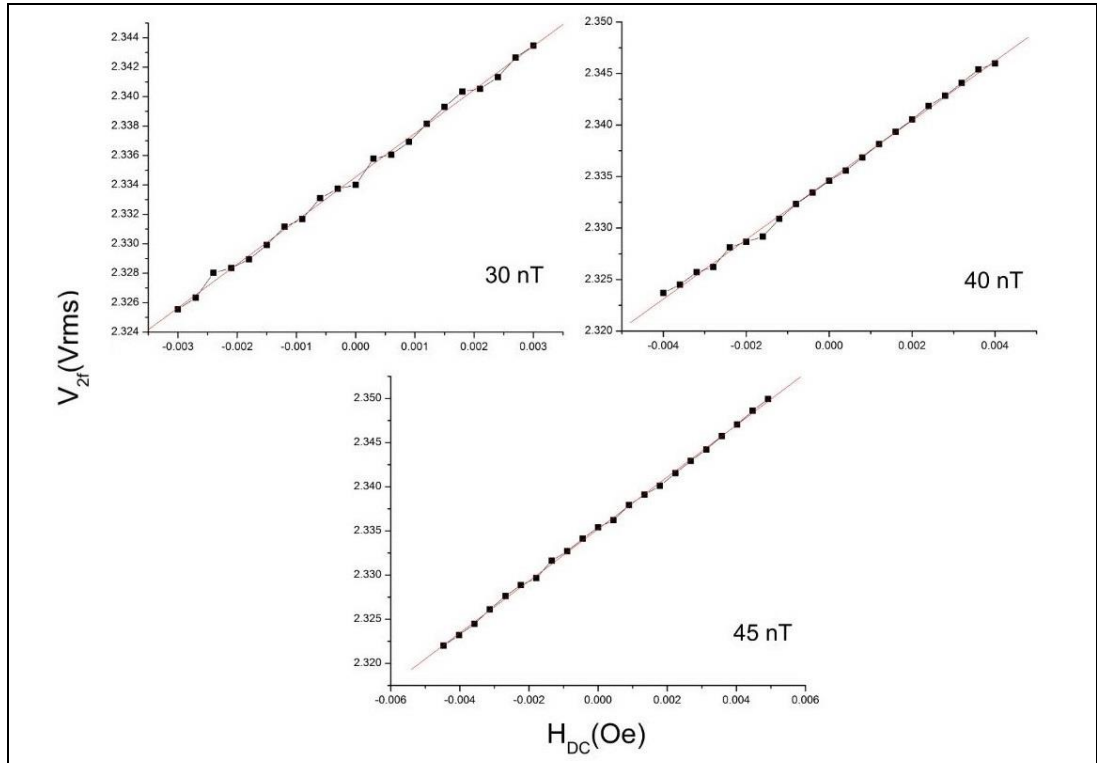
Fluxgate manyetometresi için bir diğer önemli parametre sensör çözünürlüğüdür. Hazırlanan sensörlerin ölçebildiği en düşük manyetik alan büyüklüğünü belirlemek için çevresel manyetik alan dar aralıkta küçük adımlar ile değiştirilerek manyetometre çıkış sinyali kaydedildi. Şekil 4.3, Şekil 4.4 ve Şekil 4.5 FGS1, FGS2 ve FGS3'e ait ölçüm grafiklerini göstermektedir. Buna göre FGS1 sensörü 5 nT DC alan büyüklüğü rahat bir şekilde ölçülebilirken FGS2 ile minimum 20 nT, FGS3 ile 30 nT büyüklüğündeki alanların çözülebildiği görülmektedir.



Şekil 4.3: FGS1 sensörüne ait çözünürlük ölçüm grafikleri.



Şekil 4.4: FGS2 sensörüne ait çözünürlük ölçüm grafikleri.



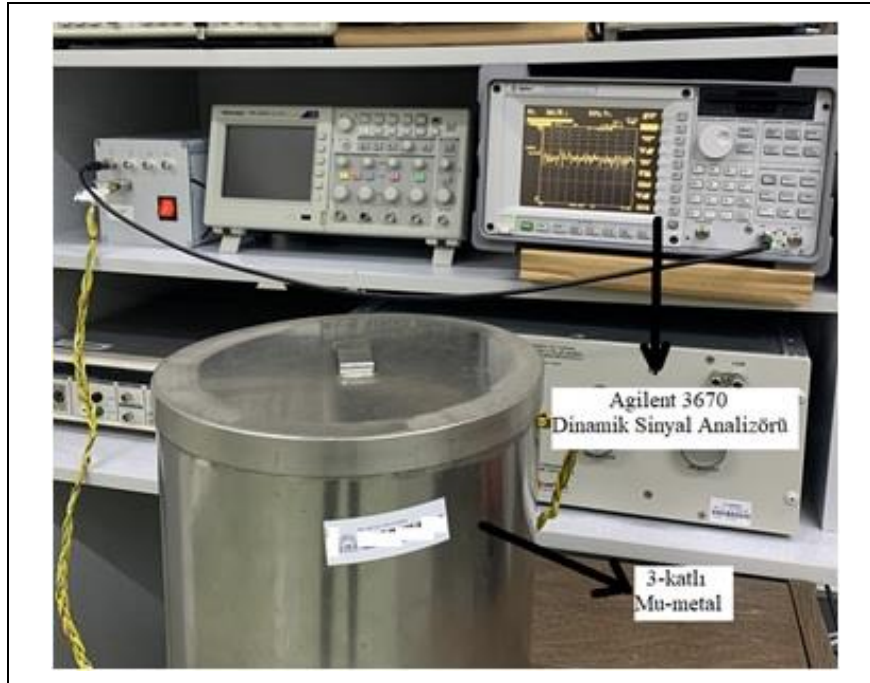
Şekil 4.5: FGS3 sensörüne ait çözünürlük ölçüm grafikleri.

Tablo 4.2: FGS1, FGS2 ve FGS3 sensörlerinin ölçek faktörü ve çözünürlükleri.

	Ölçek Faktörü (V/T)	Çözünürlük (nT)
FGS1	30278	5
FGS2	28991	20
FGS3	29482	30

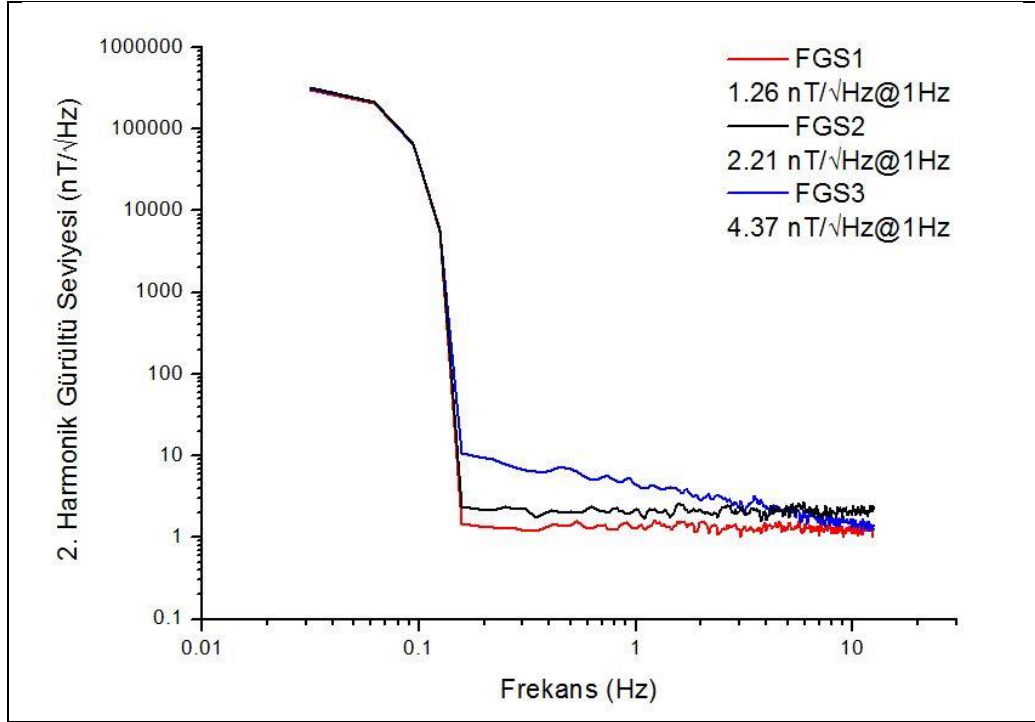
4.2. Gürültü Ölçümü

Manyetik alan ölçümlerinde kullanılan sistemlerin gürültü seviyesi ölçüm hasasiyetini sınırlayıcı bir etken olduğu için oldukça önemlidir. Sensörlerin manyetometre elektroniği tarafından sağlanan uyarım sinyali olmadan çalışmasının mümkün olmadığı düşünüldüğünde sensör gürültüsü, çalışan ölçüm sisteminin toplam gürültüsü olarak kabul edilmektedir. Gürültü analizi ölçümlerinde manyetometre dış manyetik alanın yalıtılmış olduğu 3 katlı mu-metal çember içine yerleştirildi ve sinyal çıkışı dinamik sinyal analizör girişine bağlandı. Ölçümler Agilent 35670A dinamik sinyal analizörü ile yapıldı (bkz. Şekil 4.6).



Şekil 4.6: Gürültü analizi ölçüm düzeneği.

Şekil 4.7 incelenen sensörlere ait frekansa bağlı gürültü grafiklerini göstermektedir. Çalışılan sensörlerin 1 Hz'deki gürültü seviyeleri FGS1, FGS2 ve FGS3 için sırası ile 1.26, 2.21 ve 4.37 nT/√Hz@1Hz olarak belirlenmiştir. Manyetik alan gürültü yoğunluğu değerleri (nT/√Hz) 35670A FFT analizörden okunan gerilim gürültü yoğunluğu değerlerinin (V/√Hz) ölçek faktörü değerlerine bölümü sonucu elde edilmiştir.



Şekil 4.7: FGS1, FGS2 ve FGS3 sensörlerine ait gürültü spektrumu.

Tablo 4.3: FGS1, FGS2 ve FGS3 sensörlerinin kullanılması durumunda manyetometre gürültü değeri.

	Gürültü (nT/√Hz@1Hz)
FGS1	1.26
FGS2	2.21
FGS3	4.37

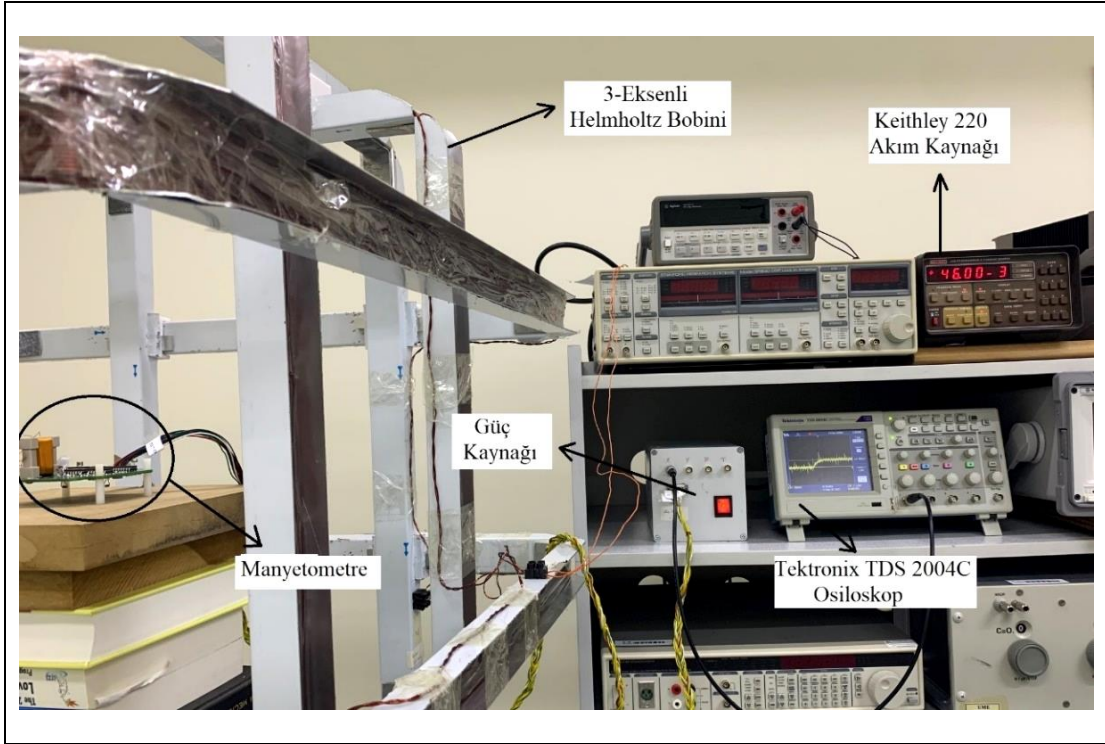
4.3. Bantgenişliği Ölçümü

Bantgenişliği manyetometrenin manyetik alandaki hızlı değişiklikleri ne kadar iyi takip ettiğinin bir göstergesidir. Diğer bir deyişle bantgenişliği sensörün

algılayabilceği alanlardaki frekans aralığını ifade etmektedir. Manyetometre bantgenişliği ölçümünde [6] numaralı referanstan yararlanılarak Denklem 4.1’de verilen çıkış sinyalinin yükselme süresi (τ) ile bantgenişliği (BW) arasındaki ilişki kullanıldı.

$$BW = \frac{0.35}{\tau} \quad (4.1)$$

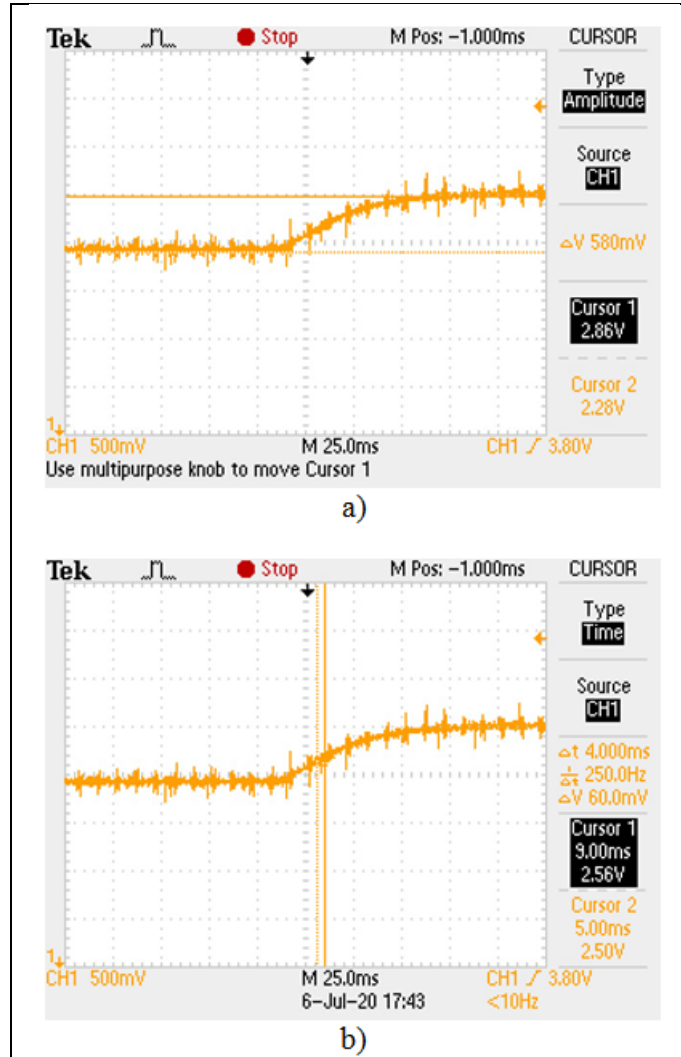
Ölçüm için Şekil 4.8’de gösterilen Helmholtz bobini, Keithley 220 akım kaynağı ve Tektronix TDS 2004C osiloskopu kullanıldı. Öncelikle manyetometre ölçüm eksenini Helmholtz bobininde oluşturulan alana paralel olacak şekilde merkezi bir konumda yerleştirildi. Daha sonra akım kaynağı ile bobinde 20 μ T’lık bir DC manyetik alan oluşturuldu. Bu esnada osiloskopa bağlanan manyetometre sinyal çıkışı bobine akım uygulandığı anda kaydedildi.



Şekil 4.8: Bantgenişliği ölçüm düzeneği.

FGS1 sensörüne ait ölçümün osiloskop görüntüsünün verildiği Şekil 4.9.a’da sinyalin üst ve alt gerilim değeri belirlenirken, Şekil 4.9.b’de bu gerilim değerlerinin %10’u ve %90’ı arasında geçen yükselme süresi hesaplandı. Buna göre Denklem 4.1

kullanılarak manyetometre bant genişliği belirlendi. Her bir sensör için tekrarlanan ölçüm sonuçları Tablo 4.4’te verilmektedir.



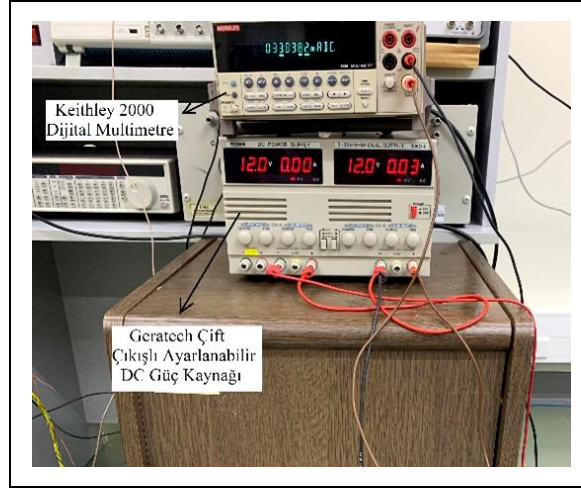
Şekil 4.9: FGS1’e ait manyetometre çıkışının a) alt ve üst gerilim değeri, b) yükselme süresi.

Tablo 4.4: FGS1, FGS2 ve FGS3 sensörleri kullanılarak alınan manyetometre bant genişliği.

	Yükselme Süresi (t_r)	Bant Genişliği
FGS1	4 ms	87.5 Hz
FGS2	6 ms	58.3 Hz
FGS3	4 ms	87.5 Hz

4.4. Güç Tüketimi

Özellikle uzay araştırmalarında sınırlı enerji kaynağı olmasından dolayı manyetometre güç tüketimi önemli ölçüde minimize edilmesi gereken bir parametredir.



Şekil 4.10: Manyetometre güç tüketimi ölçüm düzeneği.

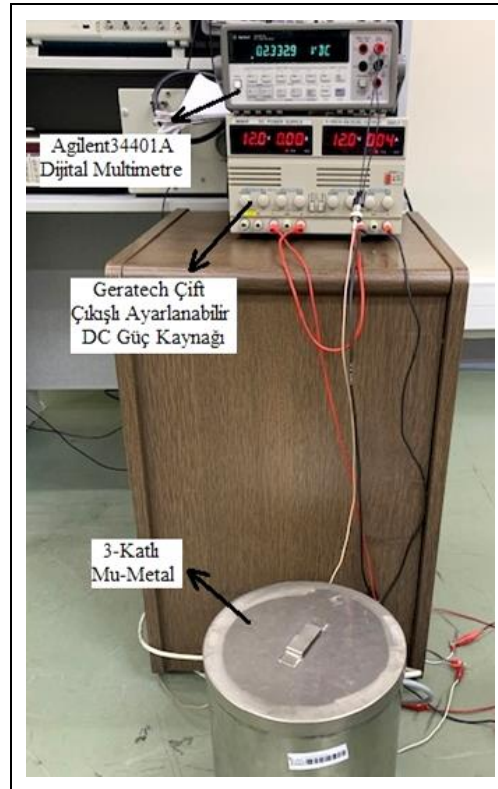
Kullanılan sensörün manyetometre güç tüketimi üzerindeki etkisini belirlemek için Şekil 4.10'da verilen ölçüm düzeneği kullanıldı. Öncelikle manyetometrenin data ve güç hattı birbirinden ayrılarak devre beslemesi çift çıkışlı ayarlanabilir güç kaynağı ile sağlandı. Güç hattının negatif beslemesi doğrudan güç kaynağına bağlanırken manyetometrenin çektiği akımın okunabilmesi için pozitif beslemesi dijital multimetre üzerinden seri olarak güç kaynağına bağlandı. Güç kaynağından ± 12 V verilerek multimetrede okunan akım değeri kaydedildi ve $P=V.I$ eşitliğinden manyetometre güç tüketimi hesaplandı. ± 12 V besleme geriliminde üç sensöre ait ölçüm sonuçları Tablo 4.5'te verilmektedir. Burada FGS3 sensörünün güç tüketiminin düşük olması endüktif direncinin yüksek olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Tablo 4.5: FGS1, FGS2 ve FGS3 sensörlerine ait güç tüketim değerleri.

	Akım (mA)	Güç (mW)
FGS1	33.83	405.96
FGS2	37.28	447.36
FGS3	31.46	377.61

4.5. Manyetometre Çalışma Gerilim Aralığı

Manyetometre besleme geriliminde meydana gelebilecek olası dalgalanmalar sonucunda manyetometre çıkış sinyalinin ne derece etkilendiğinin belirlenmesi güvenlik açısından önem arz etmektedir. Bu nedenle çalışma geriliminin ölçüm sonuçlarına olan etkisini belirlemek için Şekil 4.11’de verilen ölçüm düzeneği kullanıldı.



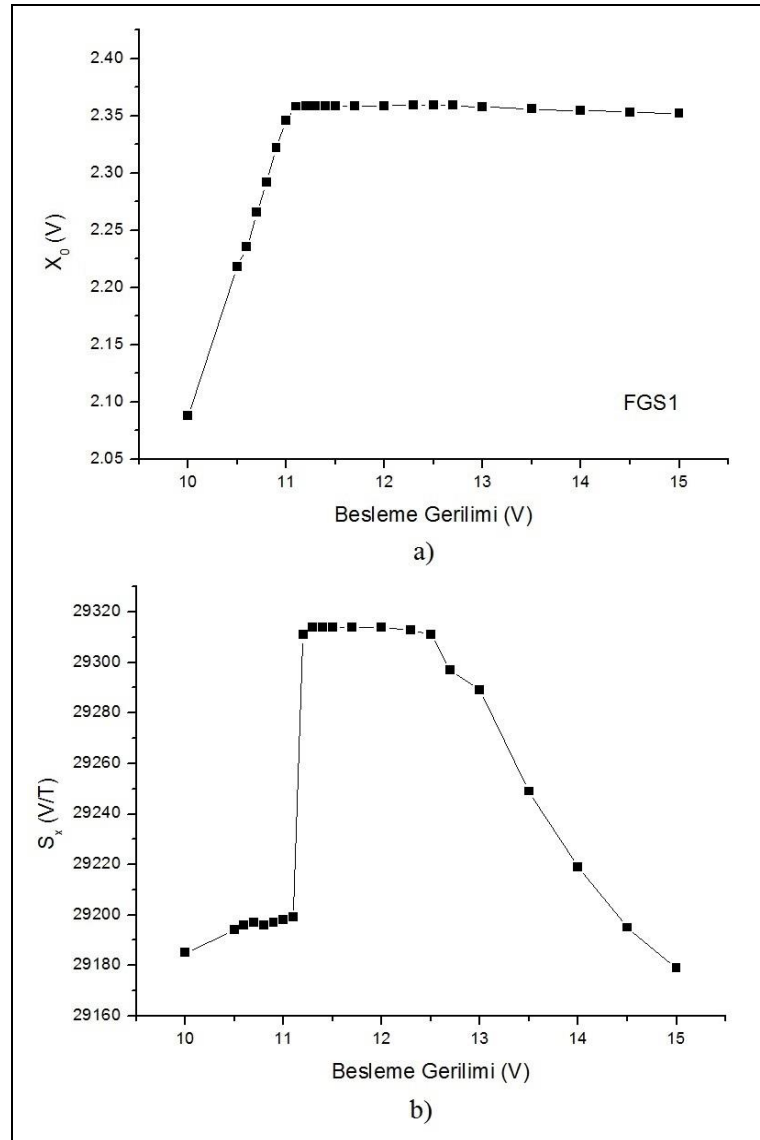
Şekil 4.11: Manyetometre çalışma gerilim aralığı ölçüm düzeneği.

Güç ölçümünde olduğu gibi manyetometrenin data ve güç hattı birbirinden ayrıldı. Güç hattının negatif ve pozitif beslemeleri çift çıkışlı ayarlanabilir güç kaynağına, data hattı ise dijital multimetreye bağlandı. Daha sonra manyetometre

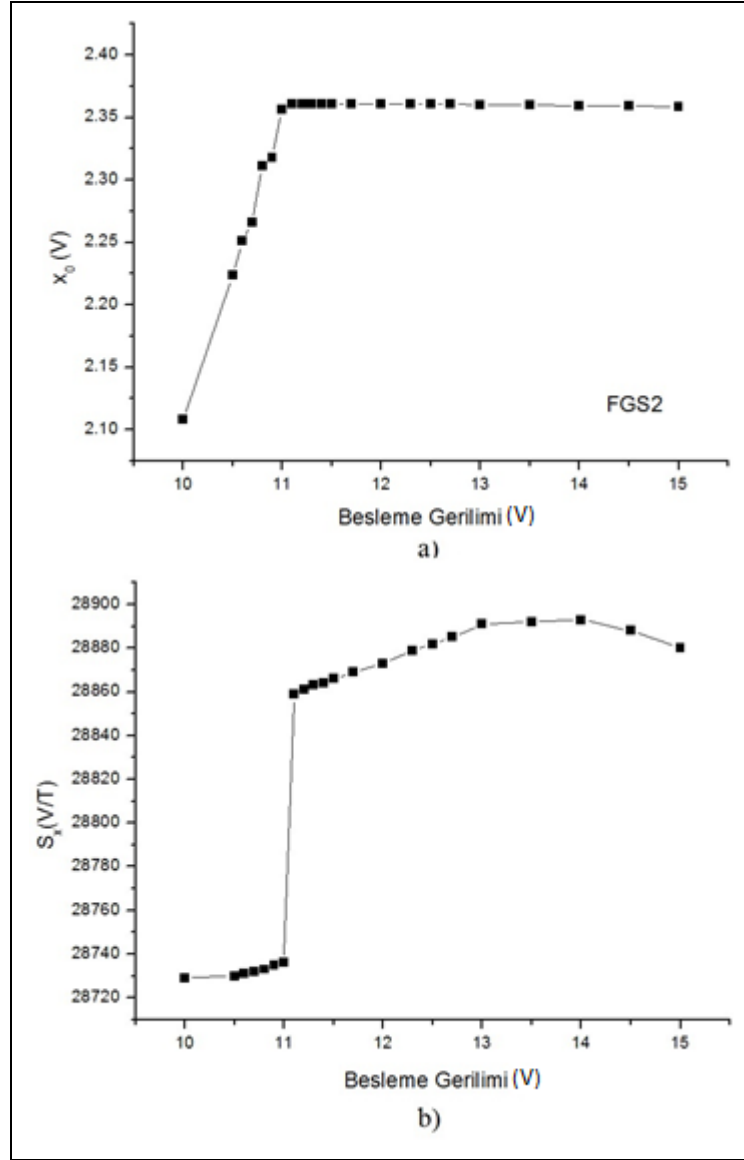
mu-metal içerisine yerleştirilerek sinyal çıkışı multimetreden okunarak kaydedildi. Sonrasında farklı besleme gerilim değerlerinde de aynı işlem tekrarlandı. Ek olarak manyetometrenin besleme gerilimine karşı ölçüm performansının nasıl değiştiğini inceleyebilmek için bu gerilim değerlerinde hassasiyet (ya da ölçek faktör) lm yapıldı. Bylelece besleme gerilim değerinin manyetometre ölçüm performansı üzerindeki etkisi incelendi. FGS1, FGS2 ve FGS3 sensörlerine ait ölçüm sonuç grafikleri sırasıyla şekil 4.12, şekil 4.13 ve şekil 4.14'te verilmektedir

Buna göre manyetometre besleme gerilim değeri 12 V'un üstüne çıkarıldığında  sensörün de sıfır manyetik alanda benzer bir davranış sergilediği görüldü. Fakat besleme gerilim değeri 12 V'un altına düşürüldüğünde FGS1 ve FGS2 sensörlerinin çıkış gerilim değerlerinde yaklaşık %10'luk bir kaybın olduğu, FGS3 sensörünün ise 11.1 V'ta ölçümü tamamen keştiği grlmektedir. FGS3 sensörünün belli bir besleme gerilim değerlerinde ölçümü tamamen kesmesi kontrol edilemeyen bir ortamda büyük bir risk oluşurmaktadır.

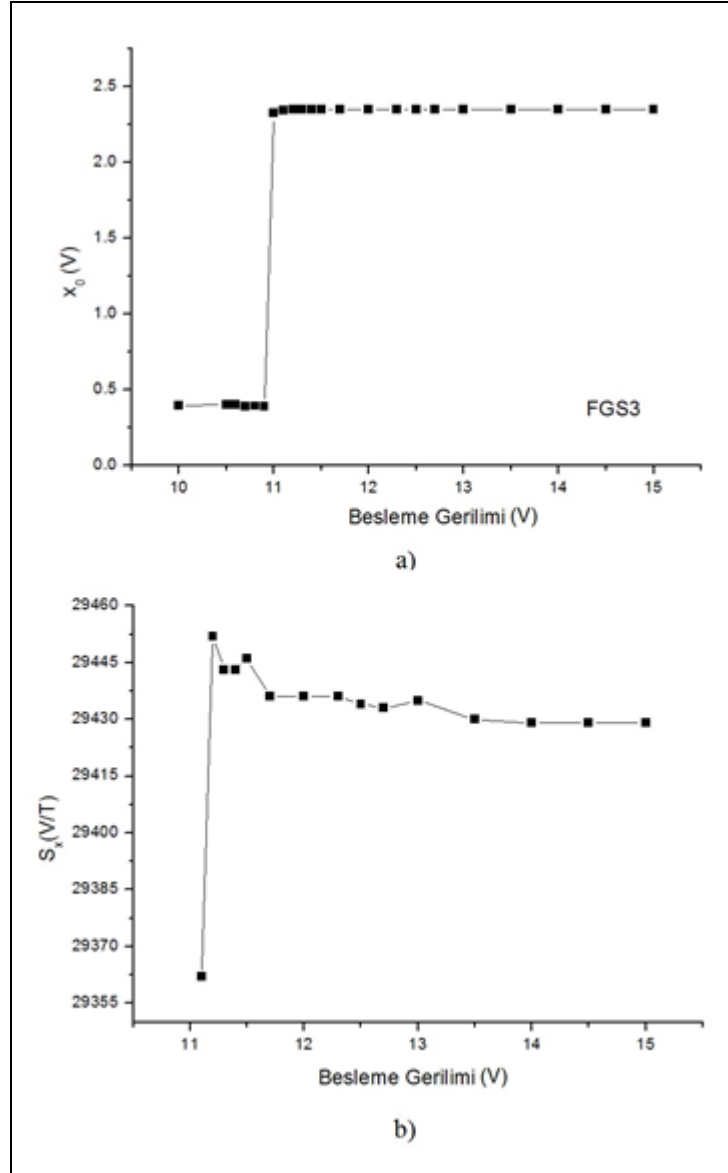
Ölçek faktör değeri sensör gerilim çıkışını manyetik alana çevirmede transfer fonksiyonu olarak kullanıldığđ için besleme gerilim değerine bağlı olmaması beklenmektedir. Buna göre sensörlerin farklı besleme gerilim değerlerindeki ölçek faktör grafiklerine bakıldığında FGS1 sensörünün 11.3 V ile 12.7 V aralığında sabit bir ölçek faktörüne sahip olduğu, FGS2 ve FGS3 sensörlerinin ise ölçek faktör değerinde tutarsızlık olduğu grlmektedir. Buna göre bu ölçüm sonuçları değerlendirildiğinde en iyi besleme gerilim toleransının FGS1 sensörüne ait olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.12: FGS1 sensörüne ait farklı besleme gerilim değerlerindeki a) sıfır alan altında çıkış gerilim değeri, b) ölçek faktör grafiği.



Şekil 4.13: FGS2 sensörüne ait farklı besleme gerilim değerlerindeki a) sıfır alan altında çıkış gerilim değeri, b) ölçek faktör grafiği.



Şekil 4.14: FGS3 sensörüne ait farklı besleme gerilim değerlerindeki a) sıfır alan altında çıkış gerilim değeri, b) ölçek faktör grafiği.

5. SONUÇ ve TARTIŞMA

Bu çalışmada soft ferromanyetik malzemelerin kullanıldığı, dünya manyetik alanı (0.6×10^{-4} T) ile 1×10^{-9} T arası bölgedeki DC manyetik alan büyüklüklerini doğrudan ölçebilme yeteneğine sahip Fluxgate manyetometrelerin geliştirilmesine yönelik araştırmalar yapılarak uzay araştırmalarında kullanılması için milli imkânlarla üretimi gerçekleştirildi. Yüksek hassasiyet, gelişmiş çözünürlük, düşük gürültü seviyesi ve düşük güç tüketimine sahip Fluxgate manyetometre elde edebilmek için farklı atomik bileşenlere sahip kobalt ve demir tabanlı nüveler kullanılarak üç adet özdeş halka geometrili fluxgate sensörü hazırlandı. Sensörlerde kullanılan nüvelerin manyetik özelliklerinin ölçüm performansına olan etkisini incelemek için elektronik devre tasarımı yapıldı. Bu tasarım için uzay araştırmalarında kullanılan devre yapıları incelendi. Ørsted uzay aracında kullanılan Fluxgate manyetometre elektroniği baz alınarak sinyal işleme elektroniğinde farklı devre yapıları kullanıldı ve manyetometre optimizasyonu sağlandı. Geliştirilen manyetometre ve Ørsted manyetometresi karşılaştırıldığında tasarlanan manyetometre ile daha geniş ölçüm aralığı ve düşük güç tüketim değerleri elde edildi. Manyetometre elektroniğinde kullanılan malzemeden kaynaklanacak hataları en aza indirmek için komponent seçiminde oldukça hassas davranıldı. Buna göre

- i) tüm komponentlerin manyetik olmayan malzemelerden üretilmiş olmasına,
 - ii) üzerinde sıcaklık, nem gibi testlerin uygulandığı MIL-PRF-55342 askeri standartına uygun kalitedeki dirençlerin seçilmesine,
 - iii) özellikle geribesleme direncinin ultra hassas ve yüksek kararlılıkta olmasına,
 - iv) seramik kapasitör seçimlerinde kapasitör değerinin sıcaklıkla minimum değişim gösterdiği birinci sınıf C0G(NP0) ürünler tercih edilmesine,
 - v) tüm radyasyon, dayanıklılık testlerinin uygulandığı askeri standartlara uygun ve daha önceki uydu uygulamalarında kullanılan tarihçeli entegrelerin seçilmesine
- dikkat edildi.

Buna göre kobalt zengini alaşımların demir tabanlı alaşımlara kıyasla oldukça düşük gürültü seviyesine sahip olduğu ve bunun da nüvenin doyum manyetik indüksiyon değeri ile ilişkili olduğu sonucuna ulaşıldı. Bunun yanı sıra sensör

hassasiyetini artırabilmek için manyetik geçirgenlik değerin oldukça yüksek olması gerektiği belirlendi.

Çalışmada hazırlanan sensörlerin özellikleri ve ölçüm sonuçları Tablo 5.1’de verilmiştir.

Tablo 5.1: FGS1, FGS2 ve FGS3 sensörlerine ait özellikler ve ölçüm sonuçları.

Parametre	birim	FGS1	FGS2	FGS3
Nüve -kompozisyon -kalınlık -genişlik	- μm mm	CoFeSiNiB 15 3.175	CoFeCrSiB 15 3.175	FeSiBNbCu 18 3.175
Uyarma sargısı -sarım sayısı -tel kalınlığı	- μm	~ 130 300	~ 130 300	~ 130 300
Algıma sargısı -sarım sayısı -tel kalınlığı	- μm	~ 500 100	~ 500 100	~ 500 100
Uyarma bobini -frekans -genlik -akort kapasitesi - uyarma akımı	kHz V nF mA _{RMS}	15.625 12 100 86.1	15.625 12 100 77.7	15.625 12 220 96
Algılama bobini -akort kapasitesi	nF	3.9	3.9	3.9
Ölçek faktörü	V/T	30278	28991	29482
Çözünürlük	nT	5	20	30
Gürültü	nT/ $\sqrt{\text{Hz}}@1\text{Hz}$	1.26	2.21	4.37
Ölçüm aralığı	μT	± 72.65	± 74.33	± 72.97
Bant genişliği	Hz	87.5 Hz	58.3	87.5
Güç tüketimi	mW	405.96	447.36	377.60
Çalışma gerilimi -max. -min.	V V	15 10.5	15 10.5	14 11.1

Yukarıda verilen ölçüm sonuçları değerlendirildiğinde FGS1 sensörünün hassasiyet, gürültü ve çözünürlük açısından diğer iki sensöre kıyasla daha iyi sonuçlar verdiği ve bu nedenle de daha geniş bir uygulama alanı bulabileceği görülmektedir. Geliştirilen manyetometrede son ürün olarak kobalt tabanlı FGS1 sensörü kullanılmasıyla hassasiyet, doğrusal çalışma aralığı ve güç tüketimi açısından literatürdeki mevcut tasarımlara kıyasla iyi sonuçlara ulaşıldığı Tablo 5.2’de gösterilmiştir. Böylece bu çalışmada üretilen Fluxgate manyetometre ile sensör ve analog sinyal işleme elektronığının senkronize çalışması için optimum sonuçlara ulaşılarak özellikle uzay araştırmalarında kullanılmak üzere ülkemiz adına önemli kazanımlar sağlandığı düşünülmektedir.

Tablo 5.2: Literatürde yer alan farklı türdeki fluxgate sensörleri ile FGS1 ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması.

	[70]	[71]	[72]	[6]	[7]	[8]	FGS1
Çalışma şekli	İkinci harmonik	İkinci harmonik	İkinci harmonik	İkinci harmonik	İkinci harmonik	İkinci harmonik	İkinci harmonik
Tasarım	Cu/Permalloy tel	16 adet cam kaplı amorf tel	Düzlemsel Cu/Permalloy yapı	Düzlemsel Vitrovac 6025	3D tel sargı (halka)	Nikel-molibden Permalloy 3D tel sargı (halka)	CoFeSiNiB 3D tel sargı (halka)
Nüve uzunluğu	9 mm	18 mm	1 mm	-	-	20 mm	~30 cm
Algılama bobin tur sayısı	1000	1000	2x60 Düzlemsel	2x21 Düzlemsel	-	-	~500
Çap	20 μm	16 μm	16 μm x 10 μm (Kare)	-	-	-	-
Uyarım akımı	10 mA_{RMS}	6 mA_{RMS} sinüs	100 mA	600 mA sinüs	-	-	86.1 mA_{RMS} kare
Uyarım frekansı	500 kHz	188 kHz	100 kHz	10 kHz	28.8 kHz	11 kHz	15.625 kHz
Hassasiyet	20000 V/T	850 V/T	0.51 V/T	13300 V/T	-	-	30278 V/T
Doğrusal aralık	-	-	$\pm 100 \mu\text{T}$	38 μT	$\pm 65 \mu\text{T}$	$\pm 60 \mu\text{T}$	$\pm 72.65 \mu\text{T}$
Çözünürlük	-	-	215 nT	-	8 pT	-	5 nT
Güç tüketimi	100 mW	-	8.1 mW	-	1.5 W	2.17 W	405.96 mW
Gürültü	-	-	-	12.2 nT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ @1Hz	10 pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ @1Hz	8.9 nT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ @1Hz	1.26 nT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ @1Hz

KAYNAKLAR

- [1] Lenz J., Edelstein A. S., (2006), “Magnetic sensors and their applications”, IEEE Sensors Journal, 6 (3), 631–649.
- [2] Tumanski S., (2013), “Modern Magnetic Field Sensors - A Review”, Przegląd Elektrotechniczny, 89 (10), 1–12.
- [3] Baschiroto A., Borghetti F., Dallago E., Malcovati P., Marchesi M., Venchi G., (2006), “A CMOS Front-End Circuit for Integrated Fluxgate Magnetic Sensors”, IEEE International Symposium on Circuits and Systems, 4-4406.
- [4] Baschiroto A., Dallago E., Malcovati P., Marchesi M., Melissano E., Morelli M., Siciliano P., Venchi G., (2009), “An Integrated Micro-Fluxgate Magnetic Sensor with Front-End Circuitry”, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 58 (9), 3269-3275.
- [5] Sebbes P., Ludwig F., Schilling M., (2010), “Fluxgate Magnetometer for Temperatures up to 180°C”, Journal of Electrical Engineering, 61 (7), 21-23.
- [6] Rovati L., Cattini S., (2012), “Zero-Field Readout Electronics for Planar Fluxgate Sensors Without Compensation Coil”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 59 (1), 571-578.
- [7] Miles D. M., Bennest J. R., Mann I. R., Millling D. K., (2013), “A Radiation Hardened Digital Fluxgate Magnetometer for Space Applications”, Geoscientific Instrumentation Methods and Data Systems, 2, 213-224.
- [8] Matsuoka A., Shinohara, M., Tanaka Y., Fujimoto, A., Iguchi K., (2013), “Development of Fluxgate Magnetometers and Applications to the Space Science Missions”, An Introduction to Space Instrumentation, (5), 217–225.
- [9] Lu C. C., Huang J., Chiu P. K., Chiu S. L., Jeng J. T., (2014), “High-Sensitivity Low-Noise Miniature Fluxgate Magnetometers Using a Flip Chip Conceptual Design”, Sensors (İsviçre), 14 (8), 13815–13829.
- [10] 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.
- [11] Özkök E., (2017), “Düşük Manyetik Alan Algılama İçin Fluxgate Sensör Geliştirme ve Optimizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi.
- [12] Web 1, (2020), http://www.brainkart.com/article/Magnetic-Materials_6823/, (Erişim Tarihi: 07/04/2020).
- [13] Koga S., Yamasawa A., Kawahito S., Tadokoro Y., Mizuno K., Tabata O.,

- (1997), “Micro Fluxgate Magnetic Sensor Interface Circuits Using $\delta\sigma$ Modulation”, IEEJ Transactions on Sensors and Micromachines, 117 (2), 84-88.
- [14] Can H., (2018), “Farklı Uygulama Alanları İçin Fluxgate Sensör Tasarımı ve Optimizasyonu”, Doktora Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi.
- [15] Yağlıdere İ., (2010), “Fluxgate Tipi Hassas Magnetik Sensör Tasarımı”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [16] Web 2, (2020), <http://info.ee.surrey.ac.uk/Workshop/advice/coils/mu/>, (Erişim Tarihi: 09/04/2020).
- [17] William D., David G., (2007), “Materials Science and Engineering: An Introduction”, 8th Edition, Materials Science and Engineering Book, Wiley & Sons Inc.
- [18] Ripka P., (2002), “Magnetic Sensors and Magnetometers”, Measurement Science and Technology, 13 (4), 645–645.
- [19] Web 3, (2020), <http://www.invasens.co.uk/FluxgateExplained.PDF>, (Erişim Tarihi: 05/02/2020).
- [20] Korepanov V., A. Best, B. Bondaruk, H. J. Linthe, J. Marianiuk, K. Pajunpää, L. Rakhlin, J. Reda, (1998), “Experience of Observatory Practice with Lemi-004 Magnetometers”, Reviews of Geophysics, 48, 31-40.
- [21] Zhang Y., Steiger M., Hibbs A. D., Grimm R. E., Sprott T. A., (2010), “Dual-mode, Fluxgate-Induction Sensor for UXO Detection and Discrimination”, Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 15 (2), 51-64.
- [22] Solorzano E. F., (2013), “A Fluxgate Magnetometer and An EMIS Algorithm to Study Europa’s Subsurface”, Objective Europa.
- [23] Primdahl F., (1979), “The Fluxgate Magnetometer”, Journal of Physics E: Scientific Instruments, 12 (4), 241-253.
- [24] Ripka P., (1992), “Review of Fluxgate Sensors”, Sensors and Actuators A: Physical, 33 (3), 129-141.
- [25] P. Ripka, (2003), “Advances in Fluxgate Sensors”, Sensors and Actuators A: Physical, 106 (1-3), 8-14.
- [26] Forslund Å., (2006), “Designing a Miniaturized Fluxgate Magnetometer”, Yüksek Lisans Tezi, KTH Royal Institute of Technology.
- [27] Aschenbrenner H., Goubau G., (1936), “Eine Anordnung Zur Registrierung Rascher Magnetischer Störungen”, Hochfrequenztechnik und Elektroakustik, 47 (6), 177–181.

- [28] Djamal M., (2006), “Design and Development Fluxgate Magnetometer and Its Applications”, Indonesian Physics Journal, 17 (1), 7-14.
- [29] Janosek M., (2017), “Parallel Fluxgate Magnetometers”, Smart Sensors Measurement and Instrumentation, 19, 41-61.
- [30] Zhukova V., Ipatov M., Zhukov A., (2009), “Thin Magnetically Soft Wires for Magnetic Microsensors”, Sensors (İsviçre), 9 (11), 9616-9240.
- [31] Humphrey F. B., (1994), “Applications of Amorphous Wire”, Materials Science and Engineering A, 179, 66-71.
- [32] Lu C. C. , Huang J., (2015), “A 3-Axis Miniature Magnetic Sensor Based on A Planar Fluxgate Magnetometer with an Orthogonal Fluxguide”, Sensors, 15 (6), 14727–14744.
- [33] Zorlu O., Kejik P., Teppan W., (2010), “A Closed Core Microfluxgate Sensor with Cascaded Planar FeNi Rings”, Sensors and Actuators A: Physical, 162 (2), 241–247.
- [34] Baschiroto A., Dallago E., Ferri M., Malcovati P., Rossini A., Venchi G., (2010), “A 2D Micro-Fluxgate Earth Magnetic Field Measurement Systems with Fully Automated Acquisition Setup”, Measurement: Journal of the International Measurement Confederation, 43 (1), 46–53.
- [35] Waheed, O.T., Rehman A., (2011), “Design and Development of a Fluxgate Magnetometer for Small Satellites in Low Earth Orbit”, Journal of Space Technology, 1 (1), 78–82.
- [36] Cui Z. J., (2013), “Design of a Novel Excitation Circuit for Low Perming Error Fluxgate”, Advanced Materials Research, 478, 859–863.
- [37] Pavel R., (2002), “Magnetic Sensors and Magnetometers”, Measurement Science and Technology, 13 (4), 645–645.
- [38] Jie F., (2010), “Study of Orthogonal Fluxgate Sensor in Terms of Sensitivity and Noise”, Doktora Tezi, University of Science and Technology of China.
- [39] Scouten D. C., (1972), “Sensor Noise in Low-Level Flux-Gate Magnetometers”, IEEE Transactions on Magnetics, 8 (2), 223–231.
- [40] Butta M., Ripka P., Kubik J., (2007), “Algorithm for Noise Reduction in Output Signal of Racetrack Core Fluxgate”, PIERS Online, 3 (8), 1307-1310.
- [41] Oğuz O., (2002), “A Lock-In Amplifier for Fluorescent Light Detection”, Yüksek Lisans Tezi, University of Tennessee.
- [42] Shirae K., (1984), “Noise in Amorphous Magnetic Materials”, IEEE Transactions on Magnetics, 20 (5), 1299–1301.

- [43] Carusone T. C., Johns D. A., Martin K. W., (2011), "Analog Integrated Circuits Design", 2nd Edition, Wiley & Sons Inc.
- [44] Koch R. H., Deak J. G., Grinstein G., (1999), "Fundamental Limits to Magnetic-Field Sensitivity of Flux-gate Magnetic-Field Aensors", *Applied Physics Letters*, 75, 3862-3864.
- [45] Gray P. R., Meyer R. G., (1993), "Analysis and Design of Analog Integrated Circuits", 3rd Edition, Wiley & Sons Inc.
- [46] Ripka P., Janošek M., (2010), "Advances in Magnetic Field Sensors", *IEEE Sensors Journal*, 10 (6), 1108–1116.
- [47] Zorlu Ö., (2008) "Orthogonal Fluxgate Type Magnetic Microsensors With Wide Linear Operation Range", *Doktora Tezi*, École Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- [48] Yağlıdere İ., Güneş E. O., (2018), "A Novel Method for Calculating the Ring-Core Fluxgate Demagnetization Factor", *IEEE Transactions on Magnetics*, 54 (2), 1-11.
- [49] Russell C. T., Anderson B. J., Baumjohann W., Bromund K. R., Dearborn D., Fischer D., Le G., Leinweber H. K., Leneman D., Magnes W., Means J. D., Moldwin M. B., Nakamura R., Pierce D., Plaschke F., Rowe K. M., Slavin J. A., Strangeway R. J., Torbert R., Hagen C., Jernej I., Valavanoglou A., Richter I., (2016), "The Magnetospheric Multiscale Magnetometers", *Space Science Reviews*, 199 (1-4), 189-256.
- [50] Auster H. U., Glassmeier K. H., Magnes W., Aydogar O., Baumjohann W., Constantinescu D., Fischer D., Fornacon K. H., Georgescu E., Harvey P., Hillenmaier O., Kroth R., Ludlam M., Narita Y., Nakamura R., Okrafka K., Plaschke F., Richter I., Schwarzl H., Stoll B., Valavanoglou A., Wiedemann M., (2008), "The THEMIS fluxgate magnetometer", *Space Science Reviews*, 141 (1-4), 235-264.
- [51] Pedersen E. B., Primdahl F., Petersen J. R., Merayo J. M. G., Brauer P., Nielsen O. V., (1999), "Digital Fluxgate Magnetometer for the Astrid-2 Satellite", *Measurement Science and Technology*, 10 (11), 124-129.
- [52] Nielsen O. V., Petersen J. R., Primdahl F., Brauer P., Hernando B., Fernandez A., Merayo J. M. G., Ripka P., (1995), "Development, Construction and Analysis of the 'Oersted' Fluxgate Magnetometer", *Measurement Science and Technology*, 6 (8), 1099-1115.
- [53] Elrefai A. L., Sasada, I., Harada S., (2015), "Gradiometer and Magnetometer Integration Using a Pair of Fundamental Mode Orthogonal Fluxgate Sensor Heads", *IEEE Transactions on Magnetics*, 51 (11), 1-4.
- [54] Janosek M., Platil A., Vyhnánek J., (2015), "The Effect of Sensor Size On Axial Gradiometer Performance", *IEEE Transactions on Magnetics*, 51 (1), 1-

4.

- [55] Ripka P., Chirtsov A., Grim V., (2017), “Contactless Piston Position Transducer with Axial Excitation”, IEEE Transactions on Magnetics, 53 (11), 1-4.
- [56] Goktas T., Zafarani M., Lee K. W., Akin B., Sculley T., (2017), “Comprehensive Analysis of Magnet Defect Fault Monitoring Through Leakage Flux”, IEEE Transactions on Magnetics, 53 (4), 1-10.
- [57] How H., Vittoria C., (2001), “Generation of High-Order Harmonics in Insulator Magnetic Fluxgate Sensor Cores”, IEEE Transactions on Magnetics, 37 (4), 2448-2450.
- [58] Grosz A., Haji-Sheikh M. J., Mukhopadhyay S. C., (2017), “High Sensitivity Magnetometers”, 1st Edition, Springer.
- [59] Langel R., Ousley G., Berbert J., Murphy J., Settle M., (1982), “The MAGSAT mission”, Geophysical Research Letters, 9 (4), 243-245.
- [60] Acuna M. H., Searce C. S., Seek J., Scheifele J., (1978), “The MAGSAT Vector Magnetometer: A Precision Fluxgate Magnetometer for the Measurement of the Geomagnetic Field”, Technical Memorandum No: NASA-TM-79656, NASA's Goddard Space Flight Center, USA.
- [61] Web 4, (2020), <https://nationalmaglab.org/education/magnet-academy/history-of-electricity-magnetism/museum/orsted-satellite>, (Erişim Tarihi: 27/04/2020).
- [62] Pavelka R., (2011), “Design and Construction of Fluxgate Magnetometer for Space Research”, Lisans Tezi, Czech Technical University in Prague.
- [63] Bester M., Lewis M., Roberts B., McDonald J., Pease D., Thorsness J., Frey S., Cosgrove D., Rummel D., (2008), “THEMIS operations”, Space Science Reviews, 141 (1-4), 91-115.
- [64] Web 5, <https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/649>, (Erişim Tarihi: 03/05/2020).
- [65] Web 6, <https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/m/mms-observatory>, (Erişim Tarihi: 05/05/2020).
- [66] Macintyre S. A., (2014), “Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook”, 2nd Edition, CRC Press.
- [67] Topal U. , şvec P. Sr., Can H., çelik F., Birlikseven C., şkorvnek I., Andrejka F., Kunca B., Marcin J., şvec P. Jr., Janotov I., Uygur A., (2021), “Optimization of the Temperature Stability of Fluxgate Sensors for Space Applications”, IEEE Sensors Journal, 21 (3), 2749-2756.
- [68] Can H., Svec P. Sr., Bydzovsky J., Svec P. Jr., Szeri 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*, 225, 94–103.

- [69] Meade M., (1983), “Lock-in amplifiers: Principles and Applications”, 1st Edition, Peter Peregrinus Ltd.
- [70] Fan J., Li X. P., Ripka P., (2006), “Low Power Orthogonal Fluxgate Sensor with Electroplated Ni₈₀Fe₂₀/Cu Wire”, *Journal of Applied Physics*, 99 (8), 08B311.
- [71] Li X. P., Fan J., Ding J., Chiriac H., Qian X. B., Yi J. B., (2006), “A Design of Orthogonal Fluxgate Sensor”, *Journal of Applied Physics*, 99 (8), 08B313.
- [72] Zorlu O., Kejik P., Popovic R. S., (2007), “An Orthogonal Fluxgate-Type Magnetic Microsensor with Electroplated Permalloy Core”, *Sensors and Actuators A: Physical*, 135 (1), 43-49.

ÖZGEÇMİŞ

Fatma Nur ÇELİK 1995 yılında Malatya'da doğdu. 2018 yılında başladığı Gaziantep Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümünü 2018 yılında başarıyla tamamlayarak aynı yıl yüksek lisans eğitimine Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında başladı. Yüksek lisans eğitimi boyunca TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME) Manyetik Ölçümler Laboratuvarında 118F012 numaralı ‘Uzay Kalifiye Manyetometre ve Uydu Cihazlarında Kullanılmak Üzere Soft Manyetik Nüve Geliştirilmesi’ projesinde Bursiyer olarak görev aldı.