

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DÜŞÜK MANYETİK ALAN ALGILAMA İÇİN FLUXGATE SENSÖR
GELİŞTİRME VE OPTİMİZASYONU**

EMEL ÖZKÖK

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI
FİZİK PROGRAMI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. FEDAİ İNANIR**

İSTANBUL, 2017

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DÜŞÜK MANYETİK ALAN ALGILAMA İÇİN FLUXGATE SENSÖR
GELİŞTİRME VE OPTİMİZASYONU**

Emel ÖZKÖK tarafından hazırlanan tez çalışması 09.06.2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Fedai İNANIR
Yıldız Teknik Üniversitesi

Eş Danışman

Doç. Dr. Uğur TOPAL
Tübitak UME

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Fedai İNANIR
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Orhan İÇELLİ
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Tuğrul Hakioğlu
İstanbul Teknik Üniversitesi

Bu çalışma, TÜBİTAK' ın 113F192 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Bu çalışmayı hazırlamamda çok büyük emeği olan, bana TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi Ulusal Metroloji Enstitüsü'nde çalışma fırsatı veren, geniş bakış açısı, tecrübesi ve sonsuz anlayışı ile yol gösteren eş danışman hocam Doç.Dr. Uğur TOPAL'a,

Aktardığı değerli bilgiler ile çalışmaya yön veren, görüş ve önerilerini paylaşan, danışman hocam Prof.Dr. Fedai İNANIR'a,

Tezimin deneysel aşamaları esnasında örneklerin hazırlanması, cihazların kullanılması, bütün ölçümlerin alınmasında yardımlarını hiç bir zaman esirgemeyen değerli arkadaşım Araştırma Görevlisi Hava Can'a,

Tanıdığım andan itibaren en zor zamanlarımda bile hep yanımda hissettiğim, moral desteği veren, tecrübeleriyle katkılar sunan, hem dostlarım hem de ailem olan Öğr.Gör. Dr.Esma Özerol ve Doç.Dr.Beyza Özkök'e,

Hayatımda bu süreç gelene kadar her daim maddi ve manevi destekte bulunan sevgili babam Faruk KÜÇÜK, sevgili annem Nesrin KÜÇÜK ve özellikle biricik kardeşim Aziz Emre KÜÇÜK'e,

Tüm süreç boyunca ilgi ve sabırla desteklerini sürdüren sevgili eşim Salih ÖZKÖK, annemiz Birsen ÖZKÖK ve hayatımıza uğur getiren oğlumuz Yusuf ÖZKÖK'e sonsuz teşekkürler ederim.

Nisan, 2017

Emel ÖZKÖK

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ	xi
ÖZET	xii
ABSTRACT	xiv
BÖLÜM 1	
GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	4
1.3 Hipotez	5
BÖLÜM 2	
SENSÖR SİSTEMİNDE TEMEL MANYETİK ÖZELLİKLER	7
2.1 Manyetizmanın Temel Kavramları	7
2.2 Sensör Sistemlerine Kavramsal Yaklaşım.....	13
2.3 Manyetik Sensör Çeşitleri ve Kullanım Alanları	17
2.3.1 Arama Bobini	22
2.3.2 SQUID (Superconducting Quantum Interference Device).....	23
2.3.3 Vektör/Helyum	25
2.3.4 Proton Devinimi	25
2.3.5 Hall Etkisi	25
2.3.6 Anizotropik Manyeto-Direnç (AMR)	28
2.3.7 Fluxgate	30

BÖLÜM 3

DENEYSEL ÇALIŞMA	39
3.1 Kullanılan Malzemeler	39
3.2 Örnek Hazırlama Metotları	40
3.3 Sinyal Analizinde Kullanılan Cihazlar.....	41
3.3.1 Akım Kaynağı	41
3.3.2 FFT Dinamik Sinyal Analizörü.....	42
3.3.3 Lock-in Yükselteç	42
3.3.4 Dört Katlı Mu-Metal.....	42
3.4 Sensör Ölçek Faktörü Analizi	43
3.4.1 Frekansa Bağlı Ölçek Faktörü Analizi	45
3.4.2 Nüve Kat Sayısına Bağlı Ölçek Faktörü Analizi	46
3.5 Gürültü Analizi	47
3.5.1 Frekansa Bağlı Gürültü Analizi	48
3.5.2 Nüve Kat Sayısına Bağlı Gürültü Analizi	49
3.6 Sonuç Geliştirme Çalışmaları	50

BÖLÜM 4

SONUÇ VE ÖNERİLER	56
KAYNAKLAR.....	58
ÖZGEÇMİŞ.....	61

SİMGE LİSTESİ

B	Manyetizasyon
F_B	Manyetik Kuvvet
H	Manyetik Alan
H_C	Koersif Kuvvet
H_{AC}	AC Manyetik Alan
H_{DC}	DC Manyetik Alan
I_{ext}	Uyarma Akımı
M	Manyetizasyon
M_r	Kalıcı Manyetizasyon
M_s	Doyum Manyetizasyonu
μ	Permeabilite
V_{2f}	İkinci Harmonik Sinyal

KISALTMA LİSTESİ

AC	Alternative Current
AMR	Anizotropik Manyeto-direnç
CMR	Collosal Magnetoresistance
DC	Direct Current
GMI	Giant Magneto Impedance
GMR	Giant Magneto Resistance
RF	Radio Frequency
RT	Race-track
SQUID	The Superconducting Quantum Interference Device
TMR	Tunnel Magneto Resistance

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Üç tür için manyetik momentler	10
Şekil 2.2 Bir metalin atomunda domen duvarları.....	11
Şekil 2.3 Histerisiz eğrisi.....	12
Şekil 2.4 Manyetik algılama sensörleri ile diğer türde sensörlerin farkı.....	18
Şekil 2.5 Bilinen manyetik alan sensörleri	20
Şekil 2.6 Manyetik sensör türleri ve hassasiyet seviyeleri.....	21
Şekil 2.7 dc ve rf SQUID halkalarının temel elemanları	24
Şekil 2.8 Akı-kilitli (flux-locked) dc SQUID manyetometrenin basit bir devresi.....	25
Şekil 2.9 Hall etkili sensörlerin genel çalışma prensibi	26
Şekil 2.10 AMR devre simgesi	28
Şekil 2.11 AMR sensörün temel konfigürasyonu	29
Şekil 2.12 AMR sensörde barber pole (çubuk şeker) konfigürasyonu.....	29
Şekil 2.13 AMR Sensör devresi ve çıkış sinyali	30
Şekil 2.14 Fluxgate devre şeması	32
Şekil 2.15 Paralel(a) ve ortogonal(b) fluxgate sensör konfigürasyonu	34
Şekil 2.16 Tek çubuklu geometri.....	35
Şekil 2.17 Çift çubuklu geometri	35
Şekil 2.18 Ring core fluxgate	37
Şekil 2.19 Race-track (Yarış-pisti) Fluxgate	38
Şekil 3.1 Sensör yapımında kullanılan manyetik algılama nüveleri	40
Şekil 3.2 Tek kat nüveli yarış-pisti sensörün (RT-1) uyarma bobini hazırlık evreleri	41
Şekil 3.3 RT-1 in algılama bobini hazırlık evreleri	41
Şekil 3.4 Fluxgate sensör analiz ve karakterizasyon çalışmaları için gerekli deneysel düzenek.....	42
Şekil 3.5 f-V analiz sonuçları	44
Şekil 3.6 Frekansa göre çizilen RT-1, RT-2, RT-3 ve RT-5 sensörlerine ait 2. harmonik sinyal şiddeti-uygulanan DC alan grafiği	45
Şekil 3.7 Nüve kat sayısına göre çizilen RT-1, RT-2, RT-3 ve RT-5 sensörlerine ait 2. harmonik sinyal şiddeti-uygulanan DC alan grafiği	46
Şekil 3.8 Frekansa bağlı değişen RT-1, RT-2, RT-3 ve RT-5 sensörlerine ait gürültü seviyeleri.....	48
Şekil 3.9 Nüve kat sayısına bağlı değişen RT-1, RT-2, RT-3 ve RT-5 sensörlerine ait gürültü seviyeleri	49

Şekil 3.10 (a) RT-5 in uyarma bobinine bağlanan kapasitör ile (b) algılama bobinine bağlanan kapasitör ve dirençler	51
Şekil 3.11 Farklı dirençlere bağlı RT-5 sensörlerin f-V analiz sonuçları	52
Şekil 3.12 RT-5 ile farklı büyüklükteki dirençlerin oluşturduğu sensörlere ait ölçek faktörü değerleri.....	52
Şekil 3.13 RT-5 ile farklı dirençlerin birlikte oluşturduğu sensör sistemlerine ait gürültü seviyeleri.....	53

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Bazı manyetik alan kaynakları ve alan şiddetleri.....	8
Çizelge 2.2 Manyetik malzemelerin koersif kuvvet (H_c) özelliklerine göre sınıflandırılması.....	13
Çizelge 2.3 Manyetik sensör çeşitlerinin uygulama alanları.....	22
Çizelge 2.4 Çubuk, halka tipi ya da yarış-pisti şeklindeki geometrilerin avantajları ve dezavantajları	38
Çizelge 3.1 Sensör ölçek faktörü sonuçları	47
Çizelge 3.2 Sensör gürültü sonuçları.....	50
Çizelge 3.3 Geliştirme çalışmalarının sonuçlar üzerindeki katkısı	54

DÜŞÜK MANYETİK ALAN ALGILAMA İÇİN FLUXGATE SENSÖR GELİŞTİRME VE OPTİMİZASYONU

Emel ÖZKÖK

Fizik Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Fedai İNANIR

Eş Danışman: Doç. Dr. Uğur TOPAL

Manyetik sensörlere artan talep, sensör yapıları hakkındaki çalışmaları ivmelendirmiştir. Diğer tür sensörlerle karşılaştırıldığında fluxgate sensörlerin geniş kullanım alanına sahip olmaları, yüksek hassasiyetleri, düşük gürültü seviyeleri ve yüksek sıcaklık kararlılıkları gibi daha fazla avantajları vardır. Sayılan özellikler bu sensörlerin 1930 yılından bu yana süren popülerliğini garantilemektedir.

Farklı ürünlerin geniş çapta pazarını araştıran uluslar arası bir kuruluş olan, Markets&Markets'in araştırma raporuna göre 2010 yılı içinde manyetik alan sensörlerine olan talep 3,67 milyar parça (parasal karşılığı 1,1 milyar dolar) olmuş ve bunun 2016 yılında 7,16 milyar parça'ya (parasal karşılığı 2,0 milyar dolar) ulaşması beklenmektedir. Bu büyüklükte bir pazardan ülkemizin faydalanamadığını görmek çok üzücüdür.

Manyetik alan sensörü üretimine yönelik hiçbir ticari kuruluş olmadığı gibi bu alanda son ürüne yönelik bilimsel çalışmalarda bulunan bilim insanı sayısı da yok denecek kadar azdır. Piyasadaki manyetik alan sensörleri içinde ise en çok rağbet gören sensörlerin fluxgate manyetometre olduğunu biliyoruz. Fluxgate manyetometrelerin

uydulara konum ve yönelim belirleme uygulamalarının yanı sıra metallerde tahribatsız muayene (NDT), trafik yoğunluğu kontrolü, mayın arama detektörü, denizaltı ve deniz mayını tespiti gibi stratejik ve geniş bir spektrumda uygulama alanı mevcuttur. Avrupa Uzay Ajansı verilerine göre fluxgate manyetometreler uzay geçmişi olan ve birçok görevde başarılı sonuçlar vermiş tek manyetometre tipidir. Fluxgate sensörlerin sahip olduğu tüm bu stratejik konumlardan ötürü ülkemizin milli imkanlar ile sensör tasarlaması zorunluluk haline gelmiştir.

Bütün bu nedenlerden ötürü bu çalışmada özellikle uzay koşullarında fonksiyonunu yitirmeyecek şekilde çevresel parametrelerden etkilenmeyen, yarış-pisti fluxgate manyetometre tasarımı gerçekleştirdik. Sensör nüvesinin kat sayısının sensör performansı üzerindeki etkilerini araştırdık.

Anahtar Kelimeler: Manyetometre, manyetik sensörler, 2.harmonik sinyal, fluxgate, yarış-pisti sensör.

**FABRICATION AND OPTIMIZATION OF FLUXGATE SENSOR FOR
DETECTION OF LOW MAGNETIC FIELDS**

Emel ÖZKÖK

Department of Physics

MSc. Thesis

Adviser: Prof. Fedai İNANIR

Co-Adviser: Assoc. Prof. Uğur TOPAL

An increasing demand of magnetic sensors gives rise to many studies in the improvement of sensor structures. Comparing other types of sensors, fluxgate sensors have much more advantages such as applications on large areas, having high sensitivity, low noise, and high temperature stability. These features ensure their continuous popularity since the 1930s.

Based on the reports of Markets&Markets, which is an international organization searching the markets of different products in a wide spectrum, the demand on magnetic sensors in 2010 was 3.67 billion units (corresponding to 1.1 billion \$) and it is expected to reach 7.16 billion units (corresponding to 2.0 billion \$) in 2016. Unfortunately, it is very sad to see that our country does not benefit from such a huge market.

In addition to the absence of commercial companies dealing the fabrication magnetic sensors there is almost no scientist making researchs towards final product. We know that fluxgate magnetometer is one of the most popular one in the market.

In addition to its usage in satellites as an attitude and orientation determination equipment it has also applications in metal industry as a nondestructive texturing method (NDT) and the traffic control systems. Besides, the fluxgates can also be used for detection of earth and sea mines and the submarines.

According to European Space Agency (ESA) the fluxgates has a good history in satellite applications comparing with other magnetometers. Because of the critical position they have, designing of the fluxgate sensors by national sources is in case of emergency.

Due to the above stated reasons, in this study we have suggested a fluxgate magnetometer at race-track geometry which will be robust against external factors like temperature, radiation and vacuum. We have investigated the influence of the number of core layers on the sensor performance.

Keywords: Magnetometer, magnetic sensors, 2nd harmonic signal, fluxgate, race-track sensor.

1.1 Literatür Özeti

İngilizce “sense” kelimesinden türetilen ve dilimizdeki karşılığı “algılayıcı” olan sensörler, fiziksel ortam ile elektronik aygıtları birbirine bağlayan köprü işlevine sahiptir. Manyetik sensörler, manyetik değişimleri algılayıp bununla çıkış sinyali üreten cihazlardır.

Bu cihazlar binlerce sistemin analiz ve kontrolünü yapmaya yardımcı olmuşlardır. Bilgisayarlar harddisk, CD/DVD ve flaşdisk sürücülerinde bulunan manyetik sensörler sayesinde neredeyse sınırsız hafızaya sahiptir. Uçaklar manyetik sensörle çalışan, temassız elektrik düğmeleri ile yüksek güvenliqli uçuş sağlayabilmektedir. Otomobiller park esnasında mesafe belirlemek için sensörleri kullanır. Fabrikalar dayanıklı ve düşük maliyetli sensörlerin etkisiyle daha yüksek verime sahiptirler [1].

Manyetik sensörler iki bin yılı aşkın süre boyunca kullanımda olup, ilk olarak Dünya’nın manyetik kutuplarını algılayan pusulalar olarak karşımıza çıkmıştır. Sadece Dünya’dan değil sabit mıknatıslar, yumuşak manyetik malzemeler, cihaz arızaları, kalp atışları, beyin dalgaları ve elektrik akımı gibi kaynaklardan oluşan manyetik alanların da varlığını saptamış, bu alanların şiddet ve yönünü belirleyebilmesi ile birlikte endüstrideki uygulama alanlarını hızlı biçimde genişletmiştir. Manyetik alan algılama sistemleri daha yüksek hassasiyet, küçük boyutlar, elektronik sistemlere uyumluluk gibi gereksinimlerin ortaya çıkması sonucunda da evrim geçirmeye devam etmiştir.

Günümüzde yine bir çeşit pusula olarak algılandsalar bile, manyetik sensörler artık uydular için olmazsa olmaz ekipmanlardan biridir. Endüstriyel ve navigasyon kontrol

sistemlerinin adeta gözü haline gelmişlerdir. Bu durum, manyetik alanın yanısıra sürat, manyetik mürekkep varlığı, araçların aranması, ve maden tarama gibi işlevleri de sunması ile gerçekleşmiştir. Bu parametreler doğrudan ölçülemez ancak, manyetik alan değişimi ya da bu alanın bozulması ile ölçülebilirler [2].

İlk manyetometre Carl Friedrich Gauss tarafından 1833'te icat edilmiş ve 19. yüzyılda Hall etkisi gibi önemli gelişmeler ile uygulama alanını genişletmiştir.

Fluxgate manyetometrelere ait ilk patenti alan kişi ise 1931 yılında Henry P. Thomas olmuştur. Fluxgate, İkinci Dünya Savaşı sırasında ABD de Aschenbrenner ve Goubau tarafından Alman denizaltılarının yerini tesbit etmek amacıyla geliştirilmiştir.

Uzun yıllar boyunca fluxgate manyetometreler oda termometresi olarak kullanılmış olup sonraki dönemlerde jeofiziğe uyarlanmış ve günümüzde uydu platformlarında en çok kullanılan manyetometre olmuştur. 2000 yılının Ağustos ayında fırlatılan CLUSTER II 'ın yanı sıra Voyager, MGS, ACE, WIND ve LP misyonlu uydularda fluxgate manyetometre kullanılmıştır. 2003 yılında fırlatılan Double Star, 2004 yılında Rosetta, 2005 yılında Venus Express, 2007 yılında THEMIS misyonlarında ve 2011 yılında Çin tarafından Mars gezegenini keşif amacıyla gönderilen YH-1 uydusunda kullanılmıştır. Çevresel faktörlere karşı robust (dayanıklı ve değişmez) olması ve sahip olduğu geniş ölçüm aralığı fluxgate manyetometreleri uzay uygulamaları için cazip hale getirmiştir [3].

Allredge 1952 yılında ilk ortogonal fluxgate tasarımını gerçekleştirmiş ancak paralel konfigürasyona göre gürültü düzeyi yüksek olduğundan yaygınlaşmamıştır.

Fluxgate sensörlerin performansını gösteren iki unsur; gürültü düzeyi ve hassasiyeti etkileyen oldukça fazla parametre vardır ki, bunlar cihazların dizaynı aşamasında değerlendirilerek geliştirilebilir. Bu parametrelerden birisi sensör geometrisidir. Bu nedenle literatürde fluxgate sensörlerin farklı bir çok konfigürasyon ve dizayn metotlarına rastlanmaktadır. Çalışmalarda en eskiden gelişmişe doğru çubuk nüveli, halka nüveli ve yarış-pisti nüveli sensörler tasarlandığı görülür. Yarış-pisti nüveli fluxgate sensörler bunlar arasında en iyi performansa sahip tasarımdır. Bu sebeple son dönemde yapılan araştırmalar yarış-pisti fluxgate sensör üzerinde yoğunlaşmıştır.

Ripka (1993) laboratuvar uygulamaları için uygun yüksek hassasiyetli yarış-pisti sensörler tasarlamıştır. Ayrıca sandviç tekniği ile düşük güç gereksinimi sağlamaya çalışmıştır [4].

S. Kawahito ve grubu, 1996 yılında Toyohashi Üniversitesi'nde yürüttükleri deneysel çalışmalarda dikdörtgen düzleme sahip uyarma bobinlerinin her iki yanına nüve yerleştirilerek, çift permaloylu simetrik nüveli Micro-fluxgate sensor geliştirmişlerdir. Uyarma bobininde kapalı devre kurulması, nüvenin aynı akımla sürekli doyurulmasını sağlamış ve böylece daha derin saturasyon sağlanabilmiştir. Bu farklı kapalı devre dizaynı ile elde edilen sonuçlarda histerisiz, perming ve crossfield gibi etkiler azaltılmış, böylece geleneksel düzlemsel tek taraflı açık nüveli micro-fluxgate sensörlere kıyasla performansta gelişme sağlanabilmiştir [5].

C. Hinnrichs, C. Pels ve M. Schilling 2000'de yarış-pisti fluxgate sensörlerin lineerliğini ve gürültü karakterizasyonlarını incelemişlerdir [6]. 2001 yılında C. Hinnrichs, bu çalışmayı bir adım daha ileri götürerek yarış-pisti sensördeki boyut değişiminin sensör sonuçlarına etkilerini incelemiştir [7].

2000'de P.Ripka, yarış-pisti sensör için geliştirme çalışmaları yaptı. Önerdiği bu çalışmada çok iyi bir simetrizasyon sağlayarak daha kesin sonuçlar veren, daha düşük seviyeli sürekli beslemeli sinyal oluşturdu. Sistemin kararlılığını garantilemek adına devre çıkışına seri direnç bağladı [8].

2008 yılında J.Kubik ve, P. Ripka demagnetizasyon faktörünü düşürmesi sebebiyle halka nüvenin karşısındaki en iyi yüksek hassasiyete sahip alternatifin uzun ve ince (yani şerit halindeki) yarış-tipi nüveler olduğunu belirtmişlerdir. Demagnetizasyon faktörü sensörün hassasiyet ve gürültüsü üzerinde çok etkili olduğu için söz konusu çalışmada yarış-pisti nüvenin seçilmesi gereken optimum boyutlar detaylı verilmiştir [9].

Yarış-tipi fluxgateler her ne kadar popülerliğini sürdürse de bazı özel alanlarda (uydu sistemi ve uzay araştırmaları gibi) halka nüveli sensörler sisteme entegre edildiğinde daha işlevseldir. Bu bakımdan bu geometri üzerinde de çalışmalar eş zamanlı olarak devam etmektedir. R.H. Koch ve J.R.Rozen, 2001 yılında çubuk ve halka geometrili fluxgate sensörler kullanarak düşük gürültü düzeyi hedeflemişlerdir [10]. Kubík, J. Ve Ripka, P. halka nüveli sensörlerde etkin demagnetizasyon faktörünü FEM modeli (Finite

Element Modelling) kullanarak incelemişler ve model ile ölçümler arasında büyük yakınlık ortaya koymuşlardır. Model, 2008 yılında bu çalışma ile doğrulanmıştır [11]. Can,H. Ve Topal, U. TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü'nde düşük ve yüksek yörüngeli uydular için halka nüveli, düşük gürültülü sensörler tasarlayarak nüve boyutlarının sensörün kullanım alanını belirleyen en önemli parametre olduğunu göstermişlerdir(2015) [12].

Fluxgate temelli manyetometrenin ölçüm hassasiyeti malzeme teknolojisindeki gelişmeler ile birlikte paralel iyileştirme göstermektedir. Bu nedenle son on yıl içinde 700'e yakın bilimsel makalenin araştırma konusu olmakla birlikte bu sayı teknolojik uygulama alanlarındaki genişleme ile birlikte ivmelenerek artış eğilimindedir. Literatür verisine göre yenilikçi araştırmaların özellikle algılama nüvesi ve sistem elektroniği üzerinde odaklandığı görülmektedir [3].

Fluxgate sensörler SQUID lere göre daha gürültülü olmalarına rağmen, lineer çalışma aralığının geniş olması sebebiyle daha tercih edilir konumdalar. Yapılan çalışmalar fluxgate sensörlerin SQUID yerine kullanılabildiği gösterilmiştir. Ripka, P. (2004) bir çok biyomedikal uygulamada, örneğin insan akciğerinde mevcut olan ferromanyetik toz ve dumanın dağılım haritasının çizilmesinde fluxgate sensörlerin SQUID'lere iyi bir alternatif olabileceğini ortaya koymuştur [13]. Akciğerlerde bulunan, güçlü bir DC alan tarafından manyetize edilmiş ferromanyetik parçacıkların dağılım haritasının çıkarılmasında fluxgate sensörler kullanılabildiği çalışmalarla ortaya konulmuştur [14].

1.2 Tezin Amacı

Manyetik sensörler; malzeme ve teknolojiye gelişmeler ile paralel olarak yakın gelecekte günümüze üzerinde çok fazla çalışma yapılan ve hala da yapılmakta olan cihazlardır. Hareketli ya da durağan nesnelerin algılanması, takibi, yerlerinin belirlenmesi, sınıflandırılması konularında; optik (kızılötesi, radar) ve akustik sensörlere nazaran daha avantajlı olduğu durumlar vardır. Algılanması istenen manyetik nesnelerin ortama yaydığı sinyallerin dış ortam tarafından zayıflatılamaması örnek gösterilebilir. Düşük frekans AC-manyetik alan kaynağı ile birlikte kullanıldığında toprak mayınları gibi metalik hedeflerin, aktif ordu donanım malzemeleri ve kimyasal, biyolojik ve nükleer atıkların yerleri manyetik sensörler aracılığıyla tespit edilebilmektedir. Deniz

mayınları ve denizaltı tespiti, jeofizik anomallerin incelenmesi, toprak altı su ve petrol kaynaklarının tespiti, hırsız alarmları gibi bir çok alanda manyetik sensörlerden faydaniılmaktadır [3].

Yapılan literatür taramasında, farklı sensör geometrileri üzerinde çok sayıda çalışmaya ulaşılmış, çalışmalarının çoğunun nüve malzemesi ve bu malzemelerin sensör performansı üzerindeki etkileri etrafında yoğunlaştığı anlaşılmıştır. Ancak sensörde kullanılan ferromanyetik nüvenin kat sayısının sensör performansına etkileri araştırma konusu olmamıştır. Sensör malzeme üretimi ve sistemlerinin geliştirilmesi ile ilgili bu çalışmaların çoğunun Çekoslovakya olmak üzere Avrupa'daki araştırmacılar tarafından yapıldığı belirlenmiştir. Çok geniş kullanım alanına sahip olmasının yanı sıra haberleşme ve uydu sistemlerine entegre edilerek askeri amaçlara da hizmet etmeleri sebebiyle milli imkanlar ile üretimi yüksek öneme sahiptir.

Manyetik sensörler ile ilgili ülke çapında yapılan çalışmaların nicelik bakımından yetersiz olmasından dolayı, bu alana sunulan tüm katkılar stratejik bir öneme sahiptir. Bu çalışmada öncelikli amacımız, sensör sistemlerinin üretiminin yerel imkanlar kullanarak sağlanabileceğini göstermek ve bu pazarın oluşmasında öncü olmaktır. Kullanım alanları her geçen gün genişlemekte olan manyetik sensörlerin performansını belirleyen en önemli parametrelerden birisi sensör hassasiyetidir. Bu çalışma ile yüksek hassasiyetli yarış-pisti fluxgate tipi sensör tasarımı ve üretimi hedeflenmiştir. Başarı kriteri olarak ortaya koyduğumuz sayısal değerler $\pm 65 \mu T$ ölçüm aralığı, 1 nT ölçek faktörü ve 50pT rms/VHz@1Hz gürültü seviyesi şeklindedir. Tasarlanan sensörlerin ülkemizde ticari olarak üretimi gerçekleşen ilk manyetometre olması beklenmektedir. Yapımı hedeflenen sensörlerde kullanılan ferromanyetik nüvenin sahip olduğu kat sayısının sensör performansına etkileri incelenerek çalışmanın, literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

1.3 Hipotez

Fluxgate sensörlerin temel çalışma prensibi, tıpkı bir pusula gibi ortamdaki manyetik alan değişimine dayanır. İçerdikleri ferromanyetik nüvenin özelliği, şekli ve/veya boyutlarının değişmesi sonucunda performanslarının etkilenmesi ve kullanım alanlarının değişmesi onları daha da ilgi çekici hale getirmektedir. Sensörün uyarma

sarımı içerisinde yer alan nüvenin sahip olduğu kat sayısının sensör sistemi üzerinde iyileştirme sağlayacağını öngörüyoruz. Ayrıca mevcut çalışma bulgularından yola çıkarak bu tez çalışmasında özellikle, optimum geometriye sahip, dayanıklı, yüksek ölçek faktörlü ve düşük gürültülü sensör hedefleyerek, iş bu yeni hipotezinde endüstride kullanılabilir olmasını beklemekteyiz.

SENSÖR SİSTEMİNDE TEMEL MANYETİK ÖZELLİKLER

Sensör ya da algılayıcı fiziksel ya da kimyasal bir büyüklüğü elektrik sinyaline çeviren düzeneklerin genel adıdır. Manyetik alan ölçümleri için kullanılan sensörler ile ilgili çalışmalarda manyetik alanın doğasını anlamak ön koşuldur. Bu bölümde manyetik alan ile ilgili temel bilgiler, kavramlar, çeşitli manyetik büyüklükler ve bu büyüklüklerin birimlerine yer verilmiştir. Ayrıca bu bilgiler ışığında çeşitli maddelerin manyetik özelliklerine göre sınıflandırılması, manyetik alan kaynakları ve ürettiği alan büyüklüklerine değinilerek bir manyetik sensör çalışmaları için ihtiyaç duyulabilecek kavramsal bilgiler özet halinde sunulmuştur.

2.1 Manyetizmanın Temel Kavramları

Maddelerin manyetik özellikleri onların elektronlarından kaynaklanır. Serbest atomların manyetik özellikleri o atomlara ait yörünge elektronlarının düzenlenme biçimine bağlıdır. Bir elektronun net manyetik moment; o elektronun, bağlı olduğu atomun yörüngesindeki hareketi ile spin hareketinin vektörel toplamı şeklinde ifade edilir. Elektronlar yörünge hareketi ile birlikte kendi eksenleri etrafında da dönerler [15].

Herhangi bir hareketli elektrik yükünün çevresindeki uzay bölgesi elektrik alana ek olarak bir de manyetik alan içerir. Tarihsel olarak, bir manyetik alanı temsil etmek için B harfi kullanılır. Herhangi bir yerdeki manyetik alanın yönü, oraya konulan pusulanın gösterdiği yöndür. Uzayın bir noktasındaki B manyetik alanını, orada bulunan bir

deneme cisminin alanın uyguladığı F_B manyetik kuvvet cinsinden tanımlayabiliriz. Manyetik kuvvetin büyüklüğü

$$F_B = |q| v B \sin\theta \quad (2.1)$$

bağıntısıyla verilir. Eşitlik 2.1 den manyetik alanın SI biriminin coulomb-metre/saniye başına Newton olduğu görülür, ki buna tesla (T) denir. Tesla çok büyük bir birim olduğundan pratikte, manyetik alan birimi olarak cgs sisteminde gauss (G) da kullanılmaktadır. Alan büyüklüğünü ifade eden tüm birimler şu şekildedir:

$$1 \text{ T} = 10^4 \text{ Oe} = 10^4 \text{ G} = 10^9 \text{ nT} = 10^9 \text{ gamma} = 10^{12} \text{ pT} = 10^{15} \text{ fT} = \frac{1}{4\pi} \times 10^7 \text{ amper-sarım/metre}$$

Manyetik alanın bazı tipik değerleri Çizelge 2.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.1 Bazı manyetik alan kaynakları ve alan şiddetleri [16].

Alan Kaynağı	Alan Büyüklüğü (T)
Kuvvetli süperiletken laboratuvar mıknatısı	30
Kuvvetli sıradan laboratuvar mıknatısı	2
Tıpta kullanılan MRI birimi	1,5
Çubuk mıknatıs	10^{-2}
Güneş’in yüzeyi	10^{-2}
Dünya’nın yüzeyi	$0,5 \times 10^{-4}$
İnsan beyninin içi (sinir atımlarından kaynaklanan)	10^{-13}

Bir maddenin magnetik alan ile etkileşimi eşitlik (2.2) ile ifade edilir:

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

Burada H manyetik alan şiddetini, μ manyetik geçirgenliği, B ise manyetik indüksiyonu temsil etmektedir. Manyetik geçirgenlik ya da diğer adı permeabilite bir maddenin uygulanan magnetik alan ile ne kadar mıknatıslandığının ölçüsüdür.

Eşitlik (2.3) de ise, μ_0 boşluğun permeabilitesini temsil ederken μ_r ise maddenin boşluğa (vakum ortamına) göre bağıl permeabilitesini temsil etmektedir.

$$\mu = \mu_r \cdot \mu_0 \quad (2.3)$$

Permeabilityi etkileyen başlıca madde özellikleri anizotropi, homojen olmayan madde yapısı ve histerisizdir.

Manyetik indüksiyon B, uygulanan alana (H) ve maddenin M mıknatıslanmasına bağlıdır Eşitlik (2.4).

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

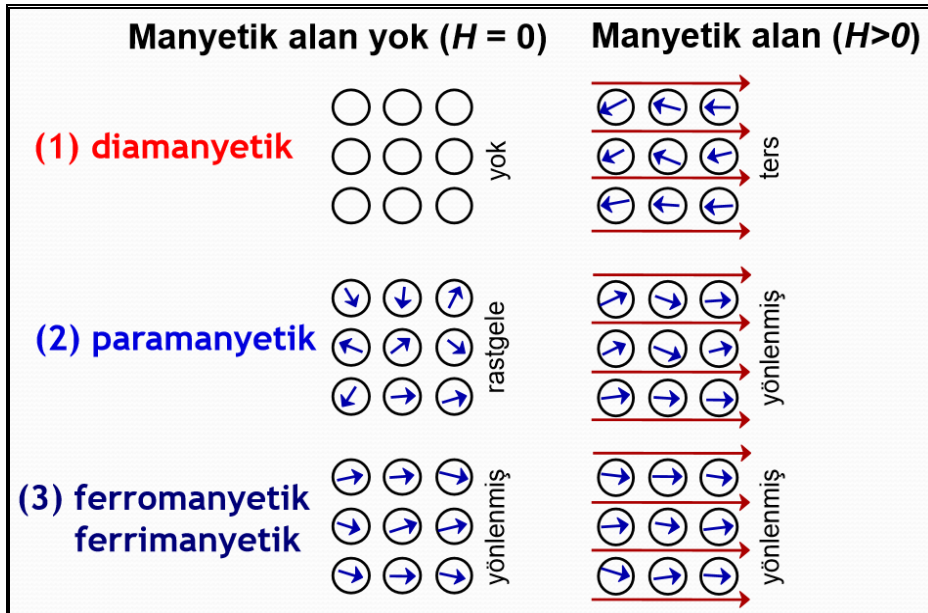
Atomları elektronlara sahip oldukları için bütün malzemelerin manyetik olması gerektiği düşünülebilir. Ancak malzemelerin manyetik özellikleri arasında çok belirgin farklar vardır. Bazı atomlardaki elektronlar birbirlerinin manyetik etkilerini yok edecek şekilde yönlendirirler. Bütün malzemeler bir manyetik etki gösterebilirler de, bir çok malzemedeki mıknatıslanma ancak çok hassas cihazlarla ölçülebilecek kadar zayıftır.

Maddeler manyetik özelliklerine göre üç gruba ayrılabilir. Genellikle manyetik alandan kaçan, dış manyetik alan tarafından itilen maddelere diyamanyetik, manyetik alana doğru çekilen maddelere de paramanyetik maddeler denir. Ayrıca demir, kobalt, nikel ve bunların alaşımları, gibi maddeler paramanyetik maddelerden en az bin kez daha fazla bir kuvvetle manyetik alana çekilirler. Bu tür maddelere de ferromanyetik maddeler denir.

Manyetik maddeler manyetik alınganlıklarına göre sınıflandırılır. Diamanyetik maddelerin manyetik alınganlıkları (χ) 10^{-5} civarındadır ve uygulanan alana zıt yönde bir manyetizasyona sahiptirler. Paramanyetik maddelerin manyetik alınganlıkları 10^{-3} - 10^{-5} civarındadır ve uygulanan manyetik alanla aynı yönde bir manyetizasyona sahiptirler. Ferromanyetik maddelerin manyetik alınganlıkları 50-10000 civarındadır ve manyetizasyonları uygulanan manyetik alanla aynı yönlüdür [15].

Sadece yörüngesel hareketteki değişiklik diyamanyetik alınganlığa sebep olur. Diyamanyetizma uygulanan alana zıt olan çok zayıf bir manyetizasyona yol açar. Bu nedenle diyamanyetik alınganlık negatiftir. Bir diyamanyetik maddedeki atomların

sürekli (daimi) dipol momentleri yoktur. Bir dış manyetik alan uygulandığı zaman elektronların yörüngesel hareketinde bir değişiklik olur. Böylece dipol momentteki değişiklik dış alana zıt yönelir.



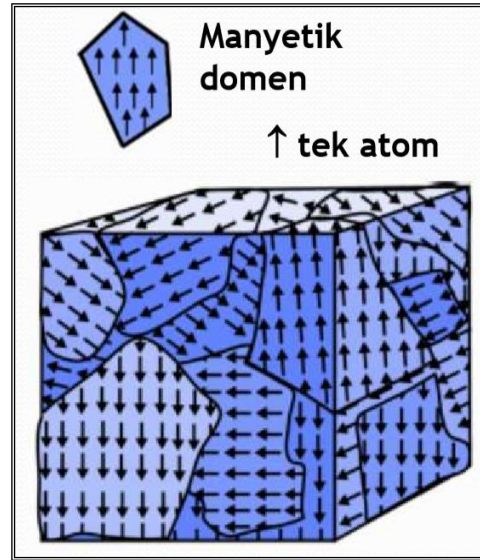
Şekil 2.1 Üç tür için manyetik momentler [17].

Sonuç olarak, net alan dış alandan daha küçüktür. Bu davranış Lenz kanunu ile anlaşılabilir. Akıdaki değişim indüklenen alana zıttır. Enerjiyi dağıtacak (harcayacak) bir mekanizmanın yokluğunda, dış alan sabit bir değere eriştikten sonra bile elektron akımlarındaki değişim devam eder. Aynı zamanda diyamanyetik alınganlık (χ) sıcaklıktan bağımsızdır ve manyetik geçirgenliği (μ) manyetik alanın fonksiyonu olarak sabittir. Periyodik tablodaki birçok element diyamanyetiktir (Cu, Au, Af, Bi vb.). Ancak diyamanyetik etki çok zayıf olduğundan, genellikle paramanyetik ve ferromanyetik etkiler tarafından bastırılır.

Paramanyetizmayı incelemek ferromanyetizmayı araştırmamıza ve anlamamıza yardımcı olur. Çünkü paramanyetizma kollektif bir olay değildir. Bu nedenle fizikçiler paramanyetik alınganlığın sıcaklığa bağımlılığı gibi paramanyetizmanın temelini teşkil eden teorilerle daha içli dışlıdır. Paramanyetik özellik gösteren maddeler daha çok tek sayıda elektronu olan atomlar ve moleküllerdir. Yani çiftlenmemiş bir elektron spinleri vardır. Dış manyetik alan arttıkça, alanla aynı yönde net bir manyetik moment oluşur ve alan kaldırıldığında eski hallerine geri dönerler. Bunlara geçiş elementleri gibi

kısmen dolu iç yörüngelere sahip atomlar ve iyonlar da dahildir. Çift sayıda elektronları olan bazı elementlerde paramanyetiktir. Paramanyetik maddelere örnekler; Platin (Pt), Alüminyum (Al), Oksijen (O), geçiş metallerinin tuzları, nadir toprak elementlerinin (lantanidler) tuzları ve oksidleri kuvvetli paramanyetiklerdir. 3d, 4d ve 5d geçiş metallerinin hepsi paramanyetiktir. Aynı zamanda H₂O da paramanyetiktir. Bütün ferromanyetik metaller (Co, Ni ve Fe) Currie sıcaklıklarının üstünde paramanyetik olurlar. Paramanyetik maddelerin manyetik geçirgenliği (μ_r) manyetik alanın fonksiyonu olarak sabittir [15].

Fe, Ni ve Co gibi metaller çok kuvvetli manyetik özellik sergiler. Bu metaller ferromanyetik malzemelerin en iyi bilinen örnekleridir. Ferromanyetik malzemelerde, manyetik dipol momentlerinin paralel yönlendiği mikro bölgeler bulunur. Bu bölgelere domen denir. Her biri kendi doygunluk mıknatıslanmasına sahiptir. Bu bölgeler domen sınırları veya duvarları ile birbirinden ayrılır. Mıknatıslanmanın yönü bu sınırlardan geçerken değişir. Özetle benzer manyetik yönlenmelere sahip atomlar komşu atomlarla birlikte bu gruplarda toplanırlar (Şekil 2.2).



Şekil 2.2 Bir metalin atomunda domen duvarları [17].

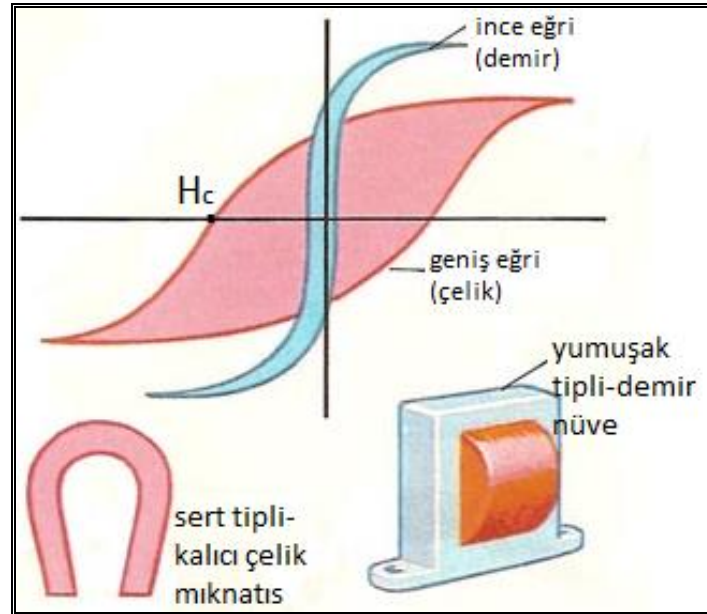
Ferromanyetik bir malzeme komşu atomların manyetik momentleri arasındaki kuvvetli etkileşim nedeniyle gelişigüzel yönlenmiş manyetik domenlere sahiptir. Bir manyetik alan uygulandığında bu alana paralel yönlenmiş domenler büyürken diğerleri küçülür

ve sonunda alana paralel domen tüm yapıya hakim olur. Bu aşamada doygunluk mıknatıslanmasına ulaşılmış olur.

Bir manyetik malzeme için en önemli makroskopik özellik M-H eğrisi olarak da adlandırılan histeris eğrisidir (Şekil 2.3). Malzemeye H alanı uygulanır ve bunun sonucu olan B ölçülür. Bu eğriden manyetik malzemenin ferromanyetik (antiferromanyetizma ve ferrimanyetizma), diamanyetik veya paramanyetik bir malzeme olduğu anlaşılabilir. Bütün malzemeler bu manyetizma türlerinden en az birini sergilerler. Gerçekleşen manyetizma elektron ve atomik manyetik dipollerin dışardan uygulanan manyetik alanda nasıl davrandıklarına bağlıdır.

Daha geniş histerisiz eğrisine sahip olan madde, daha düşük geçirgenliğe, daha yüksek kalıcı mıknatıslanmaya, daha yüksek koersif kuvvete sahiptir.

Daha dar histerisiz eğrisine sahip olan madde, daha yüksek geçirgenliğe, daha düşük kalıcı mıknatıslanmaya ve daha düşük koersif kuvvete sahiptir.



Şekil 2.3 Histerisiz eğrisi [18].

Şekil 2.3’de örnek olarak gösterilen çelik, geniş bir eğriye sahiptir. Demanyetizasyon olması zordur ve bu nedenle kalıcı mıknatıs olarak kullanılmaktadır. Demir gibi yumuşak malzemeler ise dar eğriye sahiptir ve transformatör nüvesi olarak kullanılırlar.

Ferromanyetik malzemeler için söz konusu B-H histerisiz eğrisinden malzemenin soft veya hard manyetik malzeme olduğu da anlaşılır. Malzemeye uygulanan H dış alanının

sonucunda oluşan B manyetizasyonunu yok etmek için uygulanması gereken ters yönlü alan büyüklüğüne (H_c) koersif kuvvet denir. Manyetik malzemeler Çizelge 2.2’de gösterildiği gibi koersif kuvvetlerine (H_c) göre sınıflandırılabilir.

Çizelge 2.2 Manyetik malzemelerin koersif kuvvet (H_c) özelliklerine göre sınıflandırılması

Malzeme Tipi	$H_c(A/m)$	Uygulama Yeri
Yumuşak	$H_c < 1000$	Elektromıknatıs, trafo, motor ve jeneratör
Sert	$H_c > 50000$	Hoparlör, video kayıt cihazı, TV ve saat

2.2 Sensör Sistemlerine Kavramsal Yaklaşım

Tüm manyetik alan sensörlerini Faraday Kanunları ile tanıtmaya başlamak bir gelenektir. Faraday’a göre manyetik akı çizgilerini kesen bir iletkende oluşan potansiyel farkı, akının değişme hızıyla yani zamana göre türeviyle orantılıdır. Lenz Yasası’na göre bu potansiyel fark, kendisini yaratan değişime karşı koymak üzere onunla zıt yönlü olmalıdır. Bu iki yasanın birleştirilmesiyle, indüksiyon potansiyel farkının, manyetik akının türevinin eksi işaretlisine eşit olduğu söylenir. Bir iletken sarım ve içerisinde nüve olan basit bir alan sensörümüz olduğunu düşünürsek, iletken üzerinde Eşitlik 2.5’deki gibi bir potansiyel fark indüklenir.

$$V_i = -\frac{d\phi}{dt} = -N \frac{d(\vec{B} \cdot \vec{S})}{dt} = -\frac{d(N\mu_0\mu_r \vec{H} \cdot \vec{S})}{dt} \quad (2.5)$$

Burada;

N: sarım sayısı

μ_0 : boşluğun permeabilitesi

μ_r : nüvenin bağlı permeabilitesi

$\vec{H}$: nüve içindeki manyetik alan

$\vec{S}$: nüvenin kesit alanı

$\vec{S}$ ve μ_r değerleri birer sabit olduğundan eşitlik şu şekle gelir:

$$V_i = -N\mu_0\mu_r\vec{S}\frac{d\vec{H}(t)}{dt} \quad (2.6)$$

Alan sensörlerinden manyetometrelerin çalışma prensibi soft manyetik ferromanyetik malzemelerin doğrusal olmayan mıknatıslanma özelliğine dayanmaktadır. Bu malzemeler algılama elemanı (nüve) olarak kullanılmaktadır. Manyetik nüve, manyetometrenin ölçüm hassasiyetini ve dinamik ölçüm aralığını belirleyen en önemli parametredir. Bu iki sonuç manyetometrenin performansı hakkında bilgi verir. Sensörlerin çalışma ilkeleri ferromanyetik nüvenin manyetik geçirgenliğine dayandığından, bir manyetometrenin en önemli hassasiyet parametresi Eşitlik 2.5'deki $\frac{d\mu_r}{dt}$ dir. Nüvenin sahip olacağı yüksek geçirgenlik değerleri, yüksek hassasiyetli sensör için tercih edilir. Ancak; dar histerisiz eğrileri daha fazla gürültü demektir ki, bu durumda doğru tercih için düşünmek gerekir.

Kolayca mıknatıslanabilme özelliğine sahip ferromanyetik nüvelerin, belirli bir genlikte AC alan uygulanarak doyuma ulaşması sağlanır. Nüvenin doyuma (saturasyona) ulaşması, üzerinden sarılan iletken tel ile uyarma bobini hazırlayarak sağlanır. Bu uygulama sonucunda işaret sinyalinin tek harmonikleri (1.,3.,5. harmonikler gibi) oluşur. AC alan ile birlikte DC alan uygulanması durumunda çift harmonikler de (2.,4.,6. harmonikler gibi) oluşur. Uygulanan DC alanın 2.Harmonik sinyali ile doğrusal bir değişim göstermesi özelliği manyetometrenin temelini oluşturmaktadır [3].

Periyodik fonksiyonun uyarma frekansındaki artış ($dH(t)/dt$), hassasiyeti belli bir değere kadar yükseltir. Bu noktadan sonra eddy akımı veya yüzey etkisi (skin effect) baskın olur ve nüve geçirgenliği azalır. Uyarma frekansının genliği de aynı şekilde cihazların hassasiyetini artırır [19].

$$H(t) = A\sin(\omega t) \Rightarrow \frac{dH(t)}{dt} = A\omega\cos(\omega t) \quad (2.7)$$

Nüvenin kesit alanı da cihazların hassasiyeti ile doğru orantılıdır, ancak burada da yüzey etkisi değerlendirilmelidir, çünkü bu faktörün de belirli bir sınır değeri olacaktır.

Uyarma bobini ile birlikte, sinyal almak için sistemde eğer bir algılama bobini de kullanılıyorsa, bu bobinin sarım sayısı (N) da hassasiyet üzerinde etkili olacaktır. Diğer taraftan ise, bobindeki sarımların direnci artacağından sensörün ısı gürültü düzeyi üzerinde olumsuz etki yaratacaktır. Hassasiyeti etkileyen bir diğer faktör ise bobinin yerleşimidir. Nüveyi çevreleyen sarım merkezde olmalı ve algılama bobini nüvenin kenarlarına yerleştirilmelidir [19].

Bir sensör üzerinde yapılabilecek tüm değerlendirmeler şu kavramlar çerçevesinde gerçekleşir:

Tanım 2.1 Lineer Çalışma Aralığı

Bir sensörün temelinin, uygulanan DC alanın 2.Harmonik sinyal ile doğrusal bir değişim göstermesi özelliği olduğunu belirtmiştik. Doğrusallığın bulunduğu bölgeler sensörün normal çalışma aralığıdır. Bu aralığın aşılması sensörün hatalı sonuç vermesine sebep olur ancak maksimum overload seviyesi aşılmadıkça sensörde kalıcı hasara yol açmaz.

Tanım 2.2 Bant Genişliği

Sensörün algılayabileceği frekanslardaki alan aralığıdır. Fluxgate tip bir manyetometre genel olarak DC alan ile düşük frekans alanları ölçer. Yüksek frekanslı alandaki sınırlama ise yüzey etkisi veya eddy akımından kaynaklanır. Bu nedenle sensör ölçülen alandan daha büyük bir sinyalle uyarılmalıdır. Belli bir değerin üzerindeki frekanslar söz konusu iken, nüve içerisinde eddy akımı etkisini gösterir ve nüvenin manyetizasyonunu düşürür. Ferromanyetik malzemenin boyutlarındaki azalma-ki bu kesit alanında azalma demektir-bu akım etkisini azaltır. Sensörün yüksek frekansları algılaması, başka bir deyişle çalışma frekans aralığını maksimuma getirebilmesi için yüksek dirençli ferromanyetik malzemeler tercih edilir.

Tanım 2.3 Maksimum overload

Elektronik cihazların üst sınırdan maruz kalma yoğunluğudur. Bu değerin aşılması hatalı sonuçlar alınmasına ve sensörde kalıcı hasara yol açar.

Tanım 2.4 Güç Kaybı

Sensörlerde bu etkiyi minimize edebilmek için dar histerisiz eğrili ferromanyetik malzeme kullanılır. Bu sebeple yüksek bağlı geçirgenliğe, daha düşük kalıcı mıknatıslanmaya (B_{sat}) ve daha düşük zorlayıcı (H_c) alana sahip malzemeler nüveyi doyuma ulaştırmak için gereklidir. Öte yandan nüveyi doyuma ulaştıracak alan sensörde perming e yol açar. Bu etkiyi azaltabilmek için manyetik domenler kontrol edilebilir olmalıdır. Bu sebepten ötürü sensör nüveyi saturasyona (doyuma) getiren alandan (H_K) daha büyük bir alan ile uyarılmalıdır. Genel olarak sensörün düzgün çalışabilmesi için (H_K) alanından birkaç kat büyük değer gereklidir. Fluxgate sensörler ileriki bölümde detaylı bahsedilecek farklı konfigürasyonlarda karşımıza çıkar. Güç kaybı ve lineer çalışma aralığı genellikle paralel tipte fluxgate sensörler için bir bütün olarak değerlendirilir, tıpkı demanyetizasyon faktörünün her iki durumu da etkilemesi gibi. Halka tipi ve yarış-pisti fluxgateler kapalı çevrimlerinden ötürü daha kolay saturasyon ve az güç kaybı sağlar.

Tanım 2.5 Kararlılık

Bir sensörün kararlılığı zaman, sıcaklık ve ferromanyetik malzemenin stres faktörüne bağlı olarak hassasiyet ve offsetteki değişim ile belirlenir. Fluxgate sensörler düşük offset ve düşük sıcaklık katsayıları sebebiyle diğer sensörlere nazaran avantajlı durumdadır. İdeal durumda fluxgate sensörün uyarılması tek harmoniklerden oluşan sinyal ile gerçekleşir. Bu nedenle elektronikten kaynaklanan offset haricinde, sıfır dış alanda ikinci harmonik bileşen yoktur. Böylece sensör sisteminin offseti elektronik koşulların sinyalinin offsetinden bulunur. Manyetik büzülme uygulanan alan ile şekilde bozulma olması durumudur. Bu olay da kararlılık ve lineriteyi sağlamaya engel durumlardan birisidir. Fluxgate sensörlerde hedeflenen sıfır manyetik büzülme sağlayan ferromanyetik malzeme kullanılmasıdır.

Tanım 2.6 Çözünürlük

Bu önemli faktör, iki kritik değişken (algılama nüvelerinin ısı gürültüsü ve ferromanyetik nüvenin Barkhausen gürültüsü) tarafından etkilenir. Sensör boyutları küçüldükçe bu faktörlerin etkileri artar. Algılama bobinindeki sarım sayısının ve bobin

direncinin artması termal gürültüyü de artırmaktadır. Büyük boyutlu fluxgate sensörlerde bu önemli bir sorun oluşturmaz.

Birkaç yüz sarımlık bakırın direnci $10-100\Omega$ aralığındadır. Barkhausen gürültüsü, ferromanyetik malzemenin manyetizasyonundaki sürekli dalgalanmadan kaynaklanan dış alandaki ayrı bir değişimdir. Bu durum madde içerisindeki domenlerin varlığı ve domenlerdeki manyetizasyonun ayrı kararlı durumları ile açıklanabilir.

Tanım 2.7 Perming

Perming etkisi sensörün kesin veriler vermesini sınırlayan en önemli etkilere birisidir. Buna histerisiz gibi “hafıza etkisi” de denilebilir. Genellikle bu duruma şu şekilde açıklama getirilir; çok yüksek alana maruz kaldığında sensörün çıkışında meydana gelen değişimdir. Değişim, alanın etkisi ortadan kaldırıldığı zaman çıkıştaki değerin önceki değere dönememesi durumudur. Böyle bir alan uygulanıp, etkisi kaldırıldıktan sonra sensör çıkışında farklı bir sinyale yol açar. Bazı sensörler kalıcı hasara uğrar.

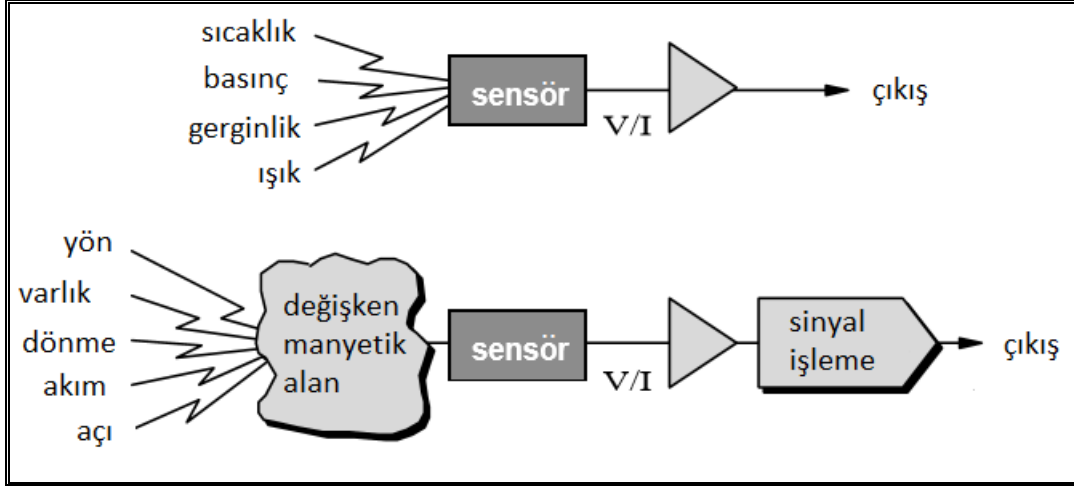
Perming etkinin minimize olması için uyarma bobininin sensör nüvesini tam doyuma ulaştırması gerekir [20].

Tanım 2.8 Demanyetizasyon Etkisi

Fluxgate tipi ferromanyetik nüveli sensör tasarımında demanyetizasyon etkisi ihmal edilemez. Demanyetizasyon etkisinden dolayı nüvenin hissettiği ölçülecek manyetik alan büyüklüğü dışarıdan gelen çevresel manyetik alan büyüklüğünden küçük olmaktadır. Düşük manyetik alan büyüklüklerinin ölçülmesi isteniyorsa demanyetizasyon faktörünün mümkün mertebe asgari tutulması gerekmektedir [3].

2.3 Manyetik Sensör Çeşitleri ve Kullanım Alanları

Genel anlamda tüm sensörler fiziksel ortam değişikliklerini algılayan cihazlar olarak çalışma prensiplerine göre aktif ve pasif sensörler şeklinde ikiye ayrılırlar. Sıcaklık, basınç ya da ışık gibi büyüklükleri algılayan pasif sensörler ile; aktif olan manyetik algılama sistemlerinin temel çalışma prensipleri Şekil 2.4’de karşılaştırmaktadır. İlkinde sistem direkt olarak istenen parametreyi verirken, ikincisinde sadece çıkış sinyali görülür.



Şekil 2.4 Manyetik algılama sensörleri ile diğer türde sensörlerin farkı [2].

Şekilde 2.4'te görüldüğü gibi, alan sensörlerinin kullanılması için öncelikle bir manyetik alan oluşmalı ya da alanda değişme olmalıdır. Bu alanı telden geçen bir akım, kalıcı bir mıknatıs ya da Dünya'nın manyetik alanı oluşturabilir. Sensör bu alanı ya da alandaki değişimi algıladığı an, çıkış sinyali-sensör çıkışını istenen parametre değerine dönüştürmek için-bazı sinyal işleme gerektirir. Bu durum manyetik algılamayı bir çok uygulama için gerçekleştirmeyi zorlaştırır fakat; parametrelerin güvenilir ve kesin bir algılama sağlar.

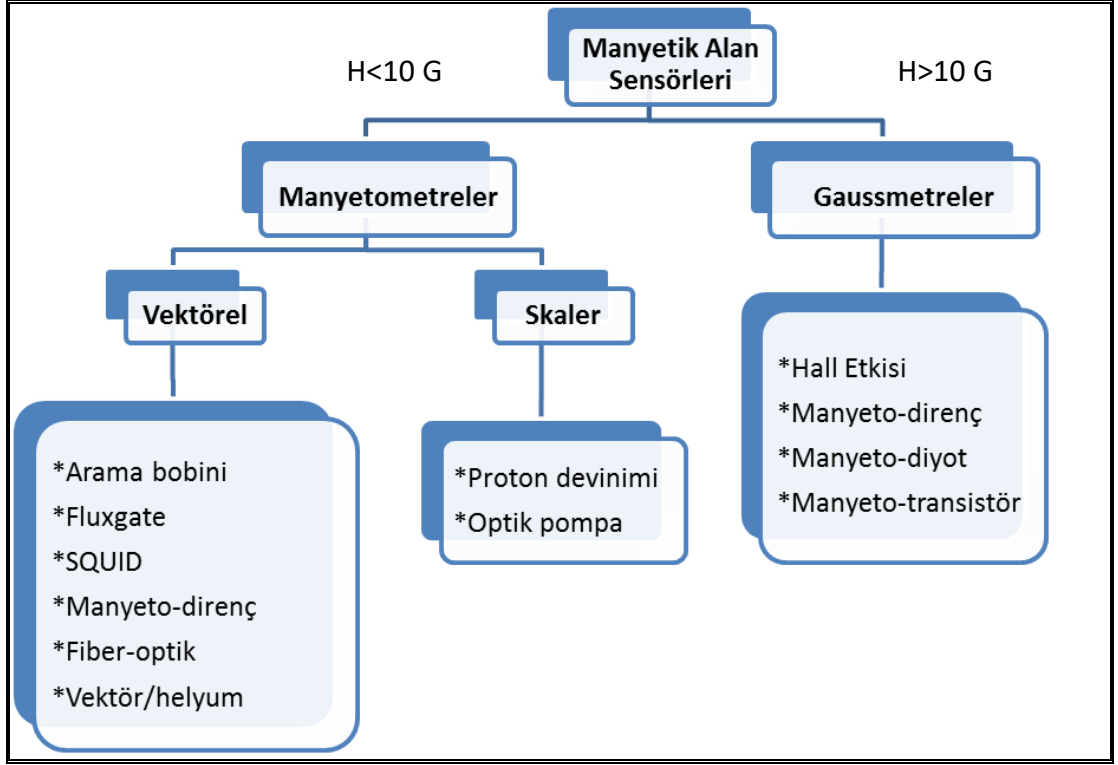
Manyetik sensörlerin sınıflandırma şeklinden ilki, toplam manyetik alan şiddetini ya da manyetik alanın vektörel bileşenlerini ölçüp ölçmemesine bağlı olarak sırasıyla skaler ve vektörel manyetik sensörler şeklindedir. Her iki tip sensörün üretilmesi için gerekli teknikler fizik ve elektronik alanlarının ortaklığıyla geliştirilmiştir.

Buradaki husus, sensörün ölçüm yaparken sadece alanın büyüklüğünü ya da her bir vektörel bileşenini ölçüp ölçmediğidir. Bu noktada karşılaştırmaya gidilirse vektörel manyetik sensörlerin ekstra bilgi sağladığı için, sadece alan büyüklüğünü veren skaler manyetik sensörlerden daha iyi olduğu düşünülebilir. Ancak; toplam alan sensörleri de denilen skaler manyetik sensörler, bazı uygulamalar için vektörel olan sensörlerden daha iyidir. Örneğin hareket halinde bulunan bir taşıt üzerindeki sensörü düşünürsek, ferromanyetik malzemedan kaynaklanan küçük değişimlerin algılanması gereği doğar. Aracın dönme titreşimi, vektörel sensör tarafından algılanan Dünya'nın alan bileşenlerinde değişim yaratacaktır ki çıkış sinyalinden bu etkiyi ayırmak zordur.

Bileşenlerdeki bu değişimler ferromanyetik nesneler kaynaklı değişimlerden genelde daha büyüktür. Vektörel bileşenlerden toplam alanın doğru hesabı çok güçtür, çünkü üç vektör sensörlerin hassasiyeti özdeş ve eksenleri dikeydir. Böyle bir uygulama durumunda toplam alan sensörleri, vektörel sensörlerden daha kullanışlı olur [1].

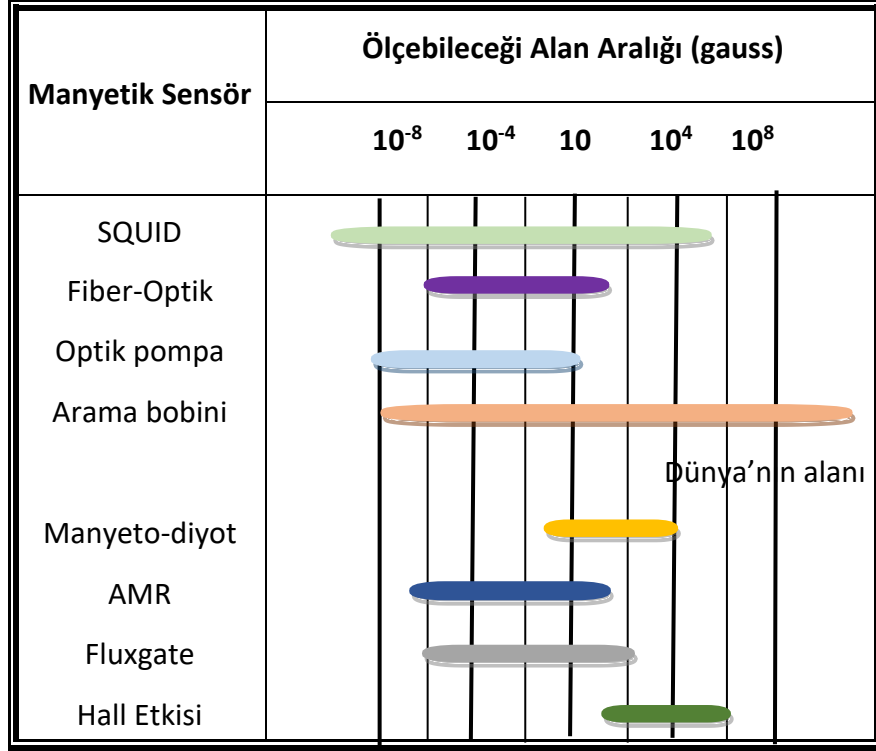
Diğer taraftan ise, vektörel sensörler uydunun ilk fırlatıldığı andan itibaren yörüngeye yerleşmesine kadar geçen süreçte faaliyet gösteren tek konum belirleme sensörüdür. Diğer konumlama sensörleri (ufuk, yıldız algılayıcı, güneş, vs.) bu süreçte kördür ve aktif değildir. Aynı şekilde yörüngeye yerleşen uydunun gelişigüzel zamanlarda takla atması kaçınılmazdır. Bu durumda uydu görevini yerine getiremez. Taklanın durdurulması ve tekrar Dünya yöneliminin sağlanması gerekmektedir [3]. Manyetik sensörlerin sınıflandırılma yollarından ikincisi ise sensörün sahip olduğu alan algılama aralığıdır. Burada manyetik alan (H) ile manyetik akı yoğunluğu (B) ayrımı yapmıyoruz. Bu sınıflandırmaya göre sensörler düşük, orta ve yüksek alan sensörleri olarak üçe ayrılabilirler. 1 mikrogauß'tan düşük alanları saptayan sensörlere düşük alan sensörleri, 1 mikrogauß-10 gauss aralığında çalışabilen, Dünya'nın oluşturduğu alanı ölçen sensörler orta alan sensörleri, 10 gauss'tan büyük alanları ölçen sensörler yüksek alan sensörleri olarak adlandırılırlar.

Manyetik sensör çeşitlerinin sınıflandırılması Şekil 2.5'de gösterilmektedir. Burada iki ana başlıktan biri olarak görülen vektörel sensörler de kendi içinde düşük alan ölçen ($H < 10G$) ve yüksek alan ölçen ($H > 10G$) şeklinde ikiye ayrılırlar. Düşük alan ölçen sensörlere manyetometre, yüksek alan ölçen sensörlere ise gaussmetre denilmektedir.



Şekil 2.5 Bilinen manyetik alan sensörleri [21].

Kullanacağımız sensörden doğru veri alabilmek için bilmemiz gereken en önemli hususlardan birisi, sensörün nerede kullanılacağıdır. Sensörler üretilirken çok değişik şekillerde imal edilebilmektedirler. Bu durum sensörlerin yapısını, kararlılığını, hassasiyetini, dayanıklılığını ve maliyetini gibi pek çok faktörü etkileyebilmektedir. Sensörler imal edilirken belirli bir ölçüm aralığını ölçebilecek şekilde tasarlanırlar. Bundan dolayı bir sensör seçimi için, onu nerede ve ne şartlarda kullanacağımızı çok iyi bilmemiz gerekir. Şekil 2.6'da manyetik sensör türleri ve hassasiyet değerleri verilmiştir.



Şekil 2.6 Manyetik sensör türleri ve hassasiyet seviyeleri [2].

Alan büyüklüğü manyetik alan kaynağına olan uzaklık ile ters orantılı olarak azalma göstermektedir. Dünya, merkezinde dev bir mıknatıs olan büyük bir alan kaynağıdır. Dünya'nın yüzeyindeki bu manyetik alanın büyüklüğü ortalama olarak 0.3-0.6 Gauss aralığında bölgeden bölgeye çeşitlenmektedir ve yeryüzünden 50000 km mesafe uzak mesafeler için 1/100 oranında azalma olur. Uydular kullanım amacına göre farklı yörüngelerde konuşlandırılır. Bu bazen yeryüzünden 700 km bazen de 50000 km uzaklıkta olabilir. Özelliklerine göre dört temel yörüngeye yerleşen uydular tasarlanırken, havadaki (uzay) konumunu doğru olarak belirleyebilmek için farklı sensörlerin kullanımına ve doğru yörüngede tutabilmek için birtakım iticilere ihtiyaç duyulur. Manyetik alanın belirtilen mesafeler için azalması, uzay çalışmaları için gaussmetre yerine manyetometre denilen 10 Gauss'tan küçük değerleri ölçebilen cihazların kullanım gerekliliğini gösterir. Manyetik sensör uygulamalarının sınıflandırılması Çizelge 2.3'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.3 Manyetik sensör çeşitlerinin uygulama alanları [22].

1.Kategori Düşük hassasiyet	2.Kategori Orta hassasiyet	3.Kategori Yüksek hassasiyet
<i>Tanım</i>		
Dünya'nın alanından daha güçlü alanları ölçer.	Dünya'nın alan yönü ve/veya büyüklüğündeki değişimleri ölçer.	Kalıcı dipol moment veya indüklenme ile alan değişim hızını ölçer.
<i>Genel uygulamalar</i>		
Temassız anahtar, akım ölçümü, manyetik hafıza okuma	Pusula, fûnye, maden arama	Beyin haritası, manyetik anomali taraması
<i>Yaygın kullanılan cihazlar</i>		
Arama bobini, Hall etkisi	Arama bobini, fluxgate, manyeto-direnç	SQUID, optik pompa

Çalışmamızda tüm manyetik alan sensörlerinin ismi yer almasına rağmen, piyasada en yaygın olan sensörlere değinilecektir.

2.3.1 Arama Bobini

Fluxgate sensörler gibi en yaygın kullanılan vektörel ölçüm sağlayan dayanıklı, güvenilir ve diğer düşük alan vektörel sensörlere göre daha ucuz cihazlardır [21]. Arama bobini manyetometreleri manyetik alanın değerini ve yönünü birkaç Hz'den birkaç kHz'e kadar olan manyetik alan kaynakları için ölçebilmesine rağmen bilinen bir Uzay Mekiği kullanımı literatürde mevcut değildir [3].

Eşitlik 2.5 temel indüksiyon bobin için düzenlenirse

$$\int_{t_1}^{t_2} V_i dt = -(N\mu_0\mu_r \vec{H}_{t_2} \cdot \vec{S} - N\mu_0\mu_r \vec{H}_{t_1} \cdot \vec{S}) \quad (2.8)$$

Arama bobinleri ile DC alan ölçümü yapılamaz, sadece yüksek frekanslı alan değişimleri için kullanılırlar. Sabit alanların ölçümü veya yavaş değişimler gösteren alanları algılayamazlar. Ayrıca düşük hassasiyete sahip olduklarından yüksek kesinlikte sonuç

beklediğimiz durumlarda da işe yaramayacaktır. Hassasiyet nüvenin geçirgenliğine ve bobindeki sarım sayısına bağlıdır. Ancak düşük sıcaklık istememeleri, karmaşık elektroniğe sahip olmamaları, ucuz olması nedeniyle çalışması kolay cihazlardır. Son dönemlerde, trafik lambaları, göz tarama (eye-tracking) ve auroral substorm ölçümlerinde kullanılmaktadır [23].

2.3.2 SQUID (Superconducting Quantum Interference Device)

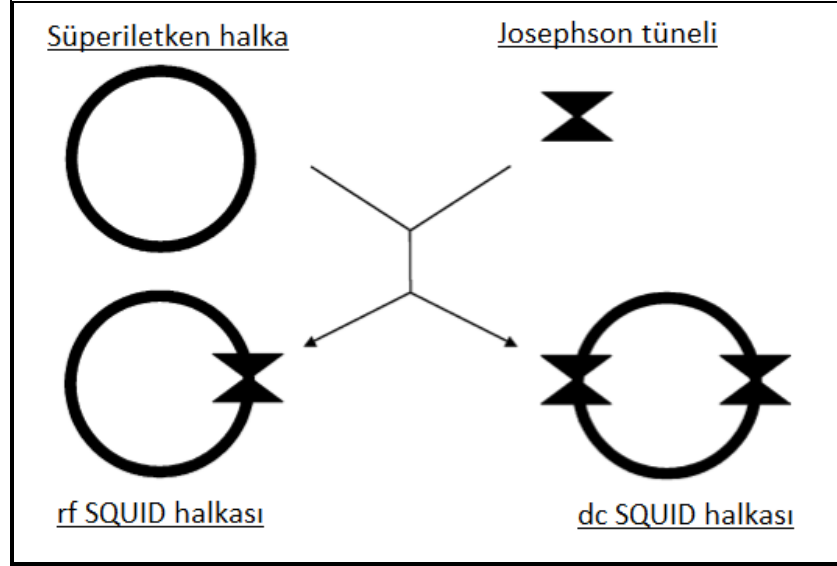
SQUID diğer adı ile süperiletken kuantum girişim aygıtları, çok küçük alanları ölçmek için kullanılan en hassas ölçüm yapan oldukça karmaşık ölçüm sistemleridir. Pikoteslalardan militeslalara kadar ölçüm yapabilen SQUID sensörler, sıvı helyum ile soğutulmaları gerektiğinden büyük ve çok enerji harcayan sensörlerdir. Algılama bobini, sinyal bobini, SQUID, geri besleme bobini ve geri besleme direnci bileşenlerinin dondurucu sıcaklıkta tutulması gerekir. Algılama bobini dışında bütün bileşenler manyetik olarak zırhlanmıştır. Diğer bileşenler ise oda sıcaklığında çalıştırılabilirler [21].

Gürültüleri 3/fT Hz kadar küçüktür. Birçok sıvı helyum soğutmalı SQUID 1 Hz ile bir kaç 10 kHz arasında düz bir gürültü eğrisine sahiptir ve biyomagnetik işaretlerin ölçümü için idealdir [24]. Ancak mutlak sıfır sıcaklıkta çalışması ve özel termal kontrol sistemlerini gerektirmesi gibi sebepler bu sensörleri daha pahalı, az dayanıklı ve az güvenilir hale getirmektedir.

SQUID ve fluxgate sensörler hassasiyeti en yüksek sensörler olarak bilinirler. Bu nedenle bir karşılaştırma yapılırsa, ilk olarak fluxgate sensörlerin alan büyüklüğünü ölçerken, SQUID tipi sensörlerin alandaki değişimleri de algıladığını söyleyebiliriz. Öte yandan fluxgate sensörler 10^{-8} - 10^{-9} T aralığındaki alan sinyallerini algılarken, SQUID sensörler 10^{-10} - 10^{-14} T aralığında çalışır. SQUID sensörler daha yüksek hassasiyete sahip olmaları sebebiyle avantajlı görünebilir ancak; fluxgate sensörler oda sıcaklığında çalışabilen en hassas ölçüm cihazlarıdır. Ayrıca SQUID sensörler sıvı helyum kullanımı gerektirdikleri için uygulamadaki alanları çok sınırlıdır ve sadece özel ölçümler için kullanılırlar. Kalp, akciğer ve beyin elektriksel aktivitelerini ve manyetik değişimlerini incelemek için ve çok nadir olarak jeofizik alanında kullanılırlar.

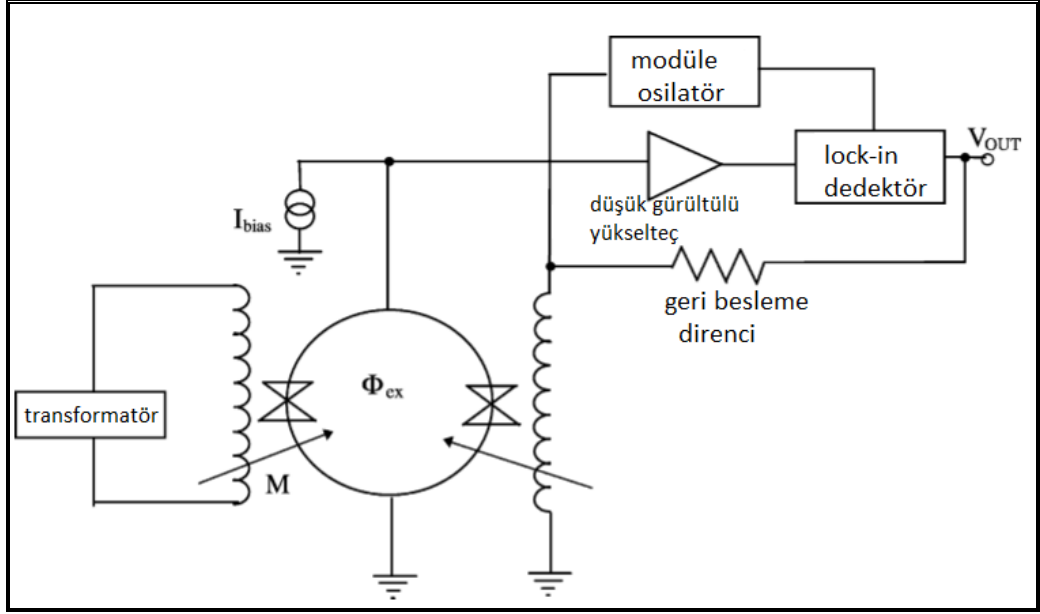
Çalışma prensibi süperiletkenlik, Meissner etkisi, akı kuantizasyonu ve Josephson etkisine dayanır. Josephson etkisi, yarı iletkenler ile süper iletkenleri tünelleme olayları ile ilgili, Brian D. Josephson'a ait 1962 yılında gerçekleşen deneysel bir keşiftir.

İki tipte SQUID sensör vardır: rf ve dc. Her iki türde de cihaz, şekilde gösterildiği gibi bir ya da iki adet Josephson tüneli ile kesilen süperiletken bir halkadan oluşur.



Şekil 2.7 dc ve rf SQUID halkalarının temel elemanları [22]

Şekildeki iki sistem arasındaki fark rf ya da dc olmasına bağlı olarak bias akımının doğasındadır. İki türde de Josephson tünelinin özel yapısı, SQUID empedansının halkayı saran manyetik akıya ait periyodik bir fonksiyon olmasına sebep olur. Böylece bias akıma uygulanan düzenlenmiş bir sinyal şeklindeki gibi lock-in dedektör ile birlikte empedans ölçmek ve voltaj-akı ilişkisini doğrusallaştırmak için kullanılır. Bu da SQUID sensörü şu ana kadar bilinen en hassas akı-voltaj dönüştürücüsü yapar. Ayrıca SQUID halka zayıf alanları algılamak için o kadar küçüktür ki bir algılama bobiniyle süperiletken bir dönüştürücü genellikle sisteme eklenerek gradiyometre oluşturur [22].



Şekil 2.8 Akı-kilitli (flux-locked) dc SQUID manyetometrenin basit bir devresi [22].

2.3.3 Vektör/Helyum

Vector Helyum Magnetometre 1978-1979 arası NASA tarafından finanse edilen MAGSAT uydusunda kullanılmış olmasına rağmen Fluxgate Manyetometre'ye nazaran daha ağır olması (2-3 kg) ve daha fazla enerjiye ihtiyaç duyması nedeni ile ilerleyen dönemlerde cazibesini yitirmiştir.

2.3.4 Proton Devinimi

Skaler manyetik alan ölçümünde kullanılan en popüler cihazdır. Başlıca uygulama alanları jeolojik araştırmalar ve jeomanyetik alanın hava haritacılığıdır. Çalışma prensibi temel atomik sabitlere dayandığı için manyetometre kalibrasyonunda birincil standart olarak kullanılır. Proton devinimi yaklaşık saniyede 1 ile 3 gibi çok düşük örnekleme hızına sahiptir, bu nedenle alandaki hızlı değişiklikleri ölçemez [21].

2.3.5 Hall Etkisi

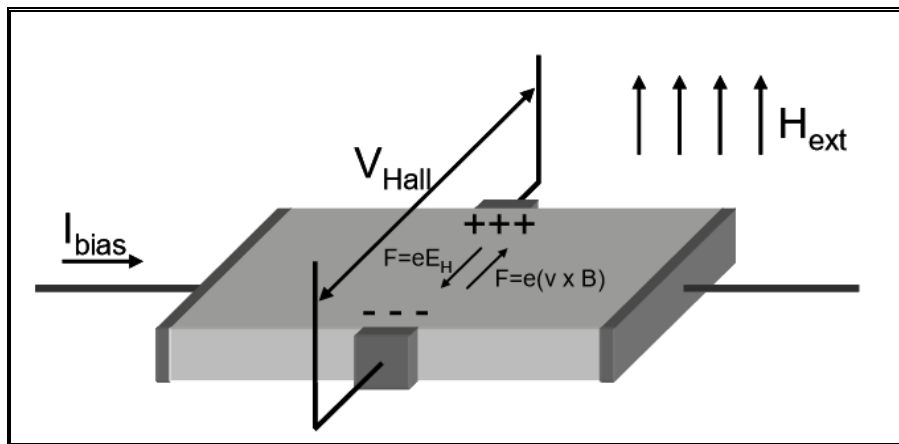
Gaussmetreler arasında en çok kullanılan ve en eski yüksek alan vektör sensörleridir. Özellikle çok yüksek alanları (1T dan büyük) ölçmek için elverişlidirler [21]. Bu nedenle nT boyutundaki alanlar için yine vektörel ölçüm yapabilen fluxgate sensörleri tercih

etmek gerekir. Genel olarak otomotiv sanayide kullanılan Hall etkili sensörler geniş aralıkta ve yüksek doğrulukta ölçüm yapabilirler.

E. Hall tarafından 1897’de keşfedilen Hall etkisi hareketli yük ile oluşur ve bu etki Lorentz kuvveti kanununun bir sonucudur. Buna göre V hızıyla manyetik alana giren bir yük (q) manyetik alan içerisinde alana dik bir F Lorentz kuvvetine maruz kalır. Eşitlik 2.9 ile F kuvvetinin büyüklüğü verilmiştir.

$$F = -q (E + V \times B) \quad (2.9)$$

Hall Etkili sensörler, şekilde gösterildiği gibi düz ve ince iletken ya da yarı iletken malzemelerden yapılan dikdörtgen prizma ile birbirine dik olan iki çift elektrottan oluşmuştur.



Şekil 2.9 Hall etkili sensörlerin genel çalışma prensibi [19].

Sol el kuralına göre elektronlar aşağı yöne doğru hareket ederek uçlarda yük birikimi oluştururlar. Bu yüklerin oluşturacağı elektrik alan manyetik etkiyi dengelemeye çalışır. Yani iletkenler üzerinde serbestçe hareket edebilen elektronlar üzerindeki elektriksel kuvvet Lorentz kuvveti sıfır olana dek artar. Bu denge durumu F_m kuvveti ile F_e kuvveti eşit oluncaya kadar devam eder.

$$eE_H + eVB = 0 \quad (2.10)$$

Burada $E_H = \text{Plaka üstünde iki yandaki elektrik alan olup, denklem ile ifade edilir.}$

$$E_H = -vB \quad (2.11)$$

Şekil 2.9’da görülen pozitif yük taşıyıcılarına etki eden F_m manyetik kuvveti $F_m = eVB$

Akımın sürüklenme hızı cinsinden ifadesi ise Eşitlik 2.12'deki gibidir.

$$I = nq_0AV \quad (2.12)$$

Denklem 2.11 daki eşitlikten yararlanılarak elde edilen v 'nin değeri denklemde yerine konulduğunda ise manyetik kuvvet Eşitlik 2.13'deki gibi olur.

$$F_m = \frac{q_0IB}{nq_0A} \quad (2.13)$$

Denge durumunda elektrik alandan dolayı oluşan kuvvet(F_e) ile manyetik kuvvetin(F_m) birbirine eşit olmasından yararlanarak hesaplanan Hall gerilimi Eşitlik 2.15'deki gibidir.

$$F_m = F_e = \frac{V_h q_0}{\omega} \quad (2.14)$$

$$V_h = \frac{IB}{nq_0d} \quad (2.15)$$

Burada;

I =Akım

n =Yük taşıyıcıları yoğunluğu

d =iletken kalınlığı

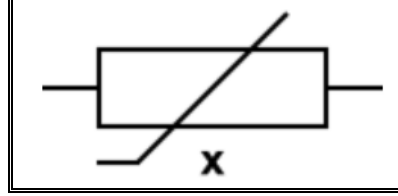
olarak tanımlanmıştır [25].

Eşitlik 2.15'den anlaşılacağı gibi iletkenin sabit bir I akımı aktığında iletkenin uçlarından ölçülen Hall gerilimi manyetik alanla doğru orantılı olarak değişir. Sensörün çalışma prensibi, akımın sabit tutulduğunda gerilimin manyetik alana göre lineer değişmesidir. Manyetik alan değişiminde sensörün ürettiği gerilim de değişecektir. Sensörün ürettiği gerilimden faydalanarak manyetik alanın değeri ölçülebilmektedir. Hall voltajı mV seviyelerinde olduğundan bir yükselteç ile birlikte ölçüm sistemi kurulur.

Hall etkili sensörlerin genel dezavantajı cihaz çıkışındaki yüksek offset voltajıdır. Bu offset nedenleri sensörün uzun dönem kararlılığını düşürür. Diğer dezavantajı ise 0.1-10 Hz çalışma aralığındaki yaklaşık $1\mu T$ değerinde olan $1/f$ gürültüdür.

2.3.6 Anizotropik Manyeto-Direnç (AMR)

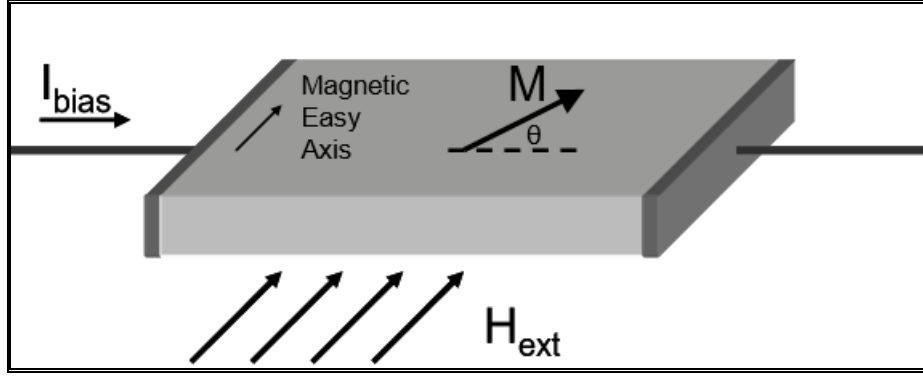
Manyeto-direnç bir dış manyetik alan uygulandığında, elektriksel direnci değişen direnç demektir [26]. Bu tanımı tarif eden sembol Şekil 2.10'daki gibidir. Değişken direnç sembolünün altındaki x bu değişimin manyetik akıdan kaynaklandığını işaret eder.



Şekil 2.10 AMR devre simgesi [26].

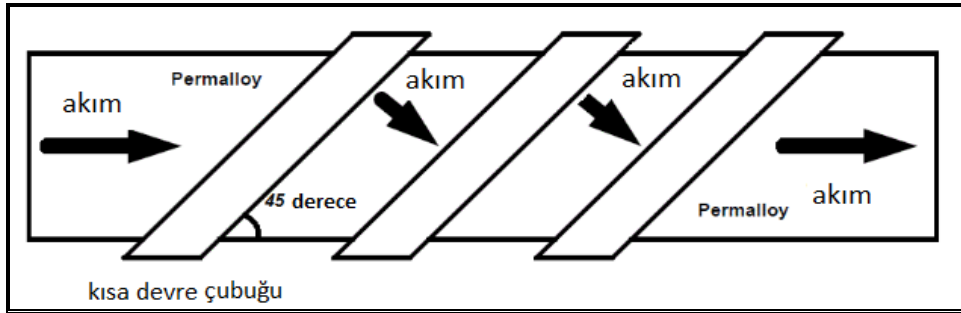
Manyeto-dirençler manyetik alan şiddetine bağlı olarak farklı direnç değerlerine sahip devre elemanlarıdır. Alanın varlığını, şiddetini ve yönünü ölçmek için kullanılabilirler. Manyeto-dirençler manyetik direnç etkisinden faydalanırlar. Bu etki 1856 yılında William Thomson tarafından ferromanyetik metallerde keşfedilmiştir. Ancak bu keşfin bir sensör uygulamasına dönüşmesi 100 yıldan fazla zaman almıştır. Manyeto-dirençlerin yapımında uzun ince film alaşımları kullanılır. Manyeto-direnç yapımı için favori malzeme %81 nikel ve %19 demirden oluşan alaşımdır.

İnce film teknolojisinin gelişmesiyle yüksek hassasiyetli manyeto-direnç sensörler tasarlanmıştır. Bunlar arasında giant magnetoresistance effect (GMR), colossal magnetoresistance effect (CMR) and tunnel magnetoresistance effect (TMR) bulunsa da; en geleneksel ve yaygın olan manyeto-dirençler anizotropik etkiyi (AMR) kullanmaktadırlar. Bu nedenle yalnızca AMR sensörlerden bahsedilecektir. AMR etki manyetik anizotropiye sahip ferromanyetik ince filmin anizotropik direnç değerine dayanır. Şekil 2.11 AMR sensörün temel konfigürasyonunu göstermektedir.



Şekil 2.11 AMR sensörün temel konfigürasyonu [19].

Sensörün M vektöründeki dönmeye verdiği cevap tek kutupludur, bu nedenle uygulanan alanın yönünü ters çevirmek film katlarının direncini değiştirmez. Bu sorunu bertaraf etmek için barber pole (çubuk şeker) konfigürasyonu kullanılır. Burada alüminyum veya altın ince filmin üzerine 45 derecelik açıyla yerleştirilir. Bu da akımın film boyunca 45 derecelik açıyla akmasını sağlar [19].

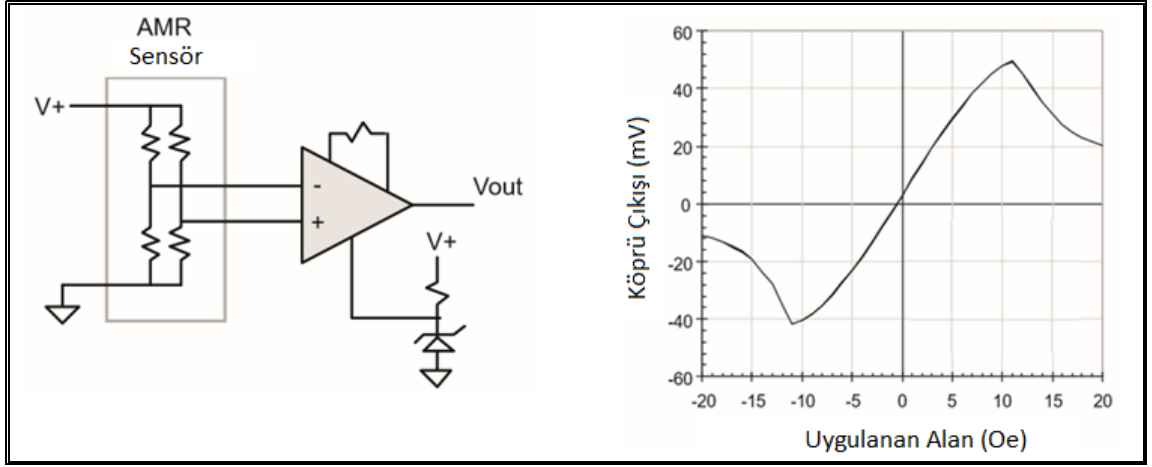


Şekil 2.12 AMR sensörde barber pole (çubuk şeker) konfigürasyonu [19].

AMR sensörler çoğunlukla manyetik depolama cihazlarının okuma başlığında, açısal ve çizgisel konum algılama sistemlerinde, araç aramaları ve pusula uygulamalarında kullanılır. AMR ince filmlerin direnci, manyetik alan varlığında %2-3 değişime uğrar. Sensörün direnci film katlarının kalınlığı azaldıkça büyür. Bu durum sensörde offset sorununa yol açar. Bu nedenle AMR sensörler Wheatstone köprüsü konfigürasyonu ile kurulur.

Wheatstone köprüsü ile hassasiyet değerleri ve sensör kararlılığı artar. AMR sensörlerin dezavantajı ise lineer olmayan sinyal çıkışı ve manyetik alan yönünü değil, sadece büyüklüğünü verebilmesidir [27].

Sensör, dört adet direnç Wheatson köprüsü ile bağlanması sonucu DC alanların şiddetini ve yönünü ölçebilmektedir.



Şekil 2.13 AMR Sensör devresi ve çıkış sinyali [28].

İnce alaşım filmin özelliği olarak, uygulanan alan değişiminde direnç farkı (ΔR) oluşmaktadır. Bu durumun çıkış sinyaline etkisi Şekil 2.13'de gösterilmektedir. Devre tipik olarak 1 k Ω dirence ve 1-5 MHz aralığında bant genişliğine sahiptir. Üretilen çıkış sinyali uygulanan alan ile doğru orantılıdır.

2.3.7 Fluxgate

Fluxgate manyetometre, manyetik alanı elektrik voltajına dönüştüren bir çeşit transistördür. DC alan ile düşük frekanslı (birkaç yüz Hz frekans bandında) AC alan büyüklüklerini yönü ile beraber ölçebilen, 1 mT şiddetindeki alan yönelimlerine duyarlı, düşük enerji ile çalışabilen (birkaç Watt), güvenilir katı hal cihazlardır. Çözünürlüğün nT seviyelerinde olması gereken durumlarda en iyi seçim fluxgate sensörler olacaktır zira; bu sensörler 0.1-10 nT aralığında ölçüm verir. Küçük boyutlarda, dayanıklı, ucuz ve geniş çalışma sıcaklığına sahip olmaları da tercih sebepleri arasındadır.

SQUID manyetometre veya Hall manyetometresi fluxgate sensörler için rakip görülse de, SQUID çalışmak için sıvı helyuma ihtiyaç duyar, dolayısıyla yüksek kararlılık ve hassasiyete rağmen sadece özel ölçümler için kullanılabilir. Hall manyetometresi ise fluxgate manyetometrenin hassasiyet ve kararlılığına ulaşamamaktadır. Ayrıca Hall sensörler oldukça gürültülü ve sıcaklığa bağlı offsete sahiptir. Manyetodiotlar ve manyetotransistörler de aynı boyutta Hall sensöründen

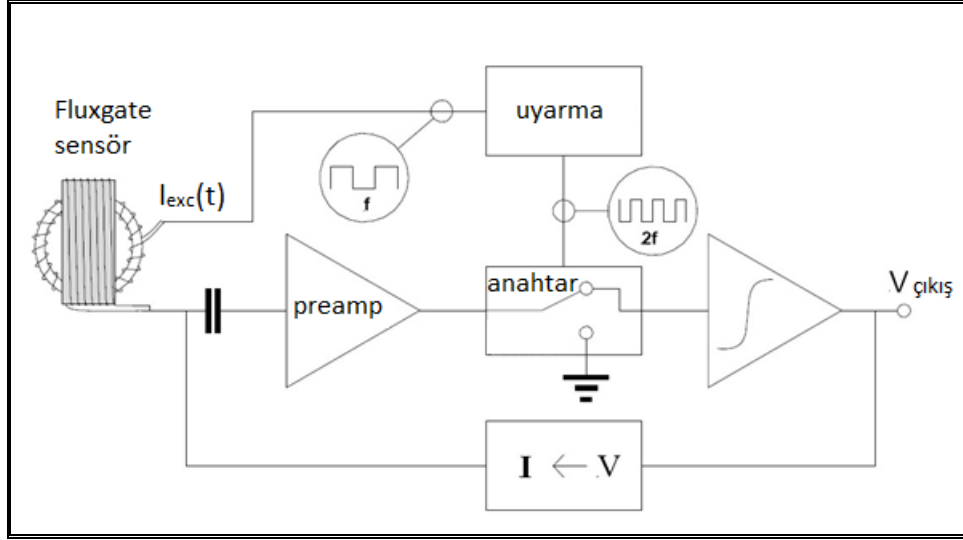
daha iyi değildirler. Büyük manyetoempedans (GMI) sensörlerin zayıf duyarlılığa sahip olduğu söylenebilir. Anizotropik manyeto-direnç sensörlerde ise 1 nT'dan daha büyük gürültü olduğu belirtilmektedir.

İlk fluxgate sensör 1930'ların başında görülmeye başlasa da günümüzde bir çok uygulamada hala kullanılmaktadır. Üç eksenli olanları Dünya'nın alan değişimlerini gözlemlemede (sıklıkla proton manyetometre ile birlikte) kullanılır. Taşınabilir cihazlar olarak, havacılık alanında kalkış ölçümleri için bölgesel alan anormalliklerini gösterirler. Tüm kara ve hava taşıtlarında pusula olarak kullanılırken; uzay araştırmaları, uydu sistemleri, arkeoloji, denizaltı ve diğer taşıtların aranması gibi çalışmalarda da karşımıza çıkarlar.

Standart olarak 100 pT ve 10 nT hassasiyete sahip olarak ticari üretimi yapılmaktadır. Ancak çalışmalarda 10 pT çözünürlüğe ulaşılabilmiş ve 1 nT lık uzun dönem kararlılığa sahiptir [29].

Farklı konfigürasyonlarla karşımıza çıkan fluxgate sensörler ferromanyetik bir nüvenin iki sarım sistemi ile çevrelenmesi ile oluşur; uyarma ve algılama bobini. Uyarma bobini içerisine yerleştirilen nüve, manyetik alanın ölçülebilecek düzeyde yoğunlaştırılması görevine sahiptir. İçerisinden AC akım geçen, uyarma bobini denilen sarım sistemine birincil bobin de denilmektedir. Böylece algılama bobini, ikincil bobin olarak da literatürde karşımıza çıkar.

Şekil 2.14 fluxgate temelli en basit sensörün çalışma prensibini göstermektedir. Soft manyetik özellikteki nüve şekilde $I_{exc}(t)$ ile gösterilen AC akım ile periyodik olarak uyarılır ve ortaya çıkan uyarma alanı ile nüve doyuma ulaşır. Genelde uyarma frekansı 1 kHz ile 10 kHz arası bölgeye sınırlı olmaktadır. 5 kHz üzeri frekanslar olası Eddy akımlarını önlemek (sensör gürültüsünü azaltmak) amacı ile çok fazla tercih edilmez.



Şekil 2.14 Fluxgate devre şeması [30].

Nüve saturasyonu (doyum) sağlanmasıyla nüvenin manyetik geçirgenliği değişime uğrar ve ölçülen DC alandan (B_0) meydana gelen DC akı modüle edilir. Bunun sonucunda algılama bobini üzerinde V_{ind} ile gösterilen, oluşan DC alanla orantılı, bir voltaj indüklenir. DC alan uygulaması, uyarma frekansına ait ikinci (ve daha büyük) harmonik sinyali ortaya çıkarır. Aynı çalışma prensibi manyetik modülatör/düzenleyiciler, DC transformatörler ve manyetik yükselticilerde de kullanılmıştır [29]. Tek harmonikler alternatif alandan dolayı (H_{AC}), çift harmonikler de DC alandan dolayı (H_{DC}) oluşmaktadır.

Denklem 2.5'te basit bir sarımda geçerli olan Faraday indüksiyon yasasını, Fluxgate devre şeması için türetecek olursak;

Değişen manyetik alan içine yerleştirilmiş ferromanyetik nüveli algılama bobini üzerinde oluşan elektrik sinyali Eşitlik 2.16 ile gösterilir.

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{d[N\mu_0\mu(t)S(t)H(t)]}{dt} \quad (2.16)$$

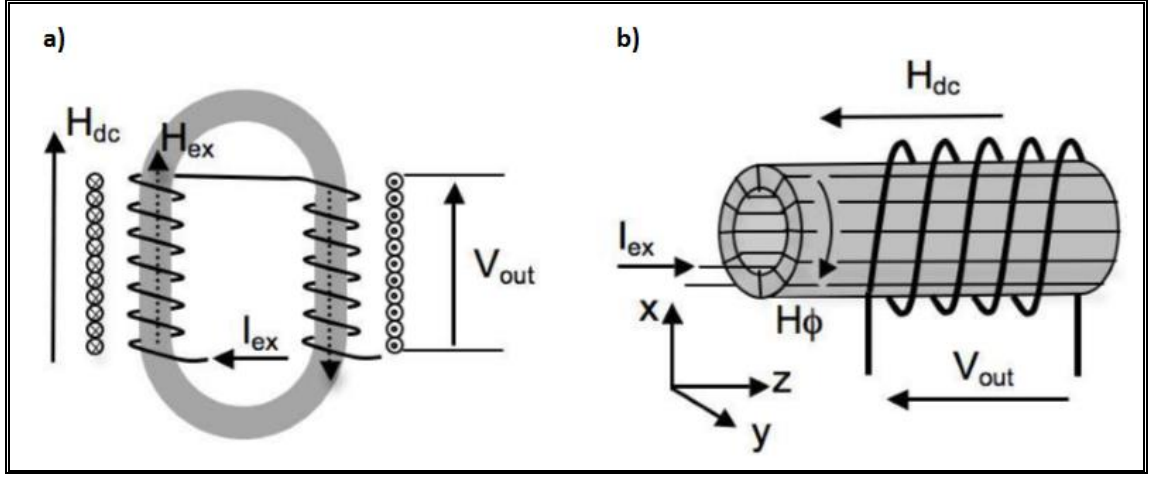
Burada N algılama bobini sarım sayısı, hava akısı ihmal edilecek olursa bu bobindeki manyetik akı $\phi=BS$, $S(t)$ ölçülen alana dik düzlemdeki etkin bobin kesit alanıdır, H uyarma bobini tarafından oluşturulan alternatif alan ve $\mu(t)$ sensor nüvesinin göreceli manyetik geçirgenliğidir. Böylece, algılama sensöründe oluşacak gerilim için genel denklem Eşitlik 2.17 ile gösterilir.

$$V_i = NS\mu_0\mu \frac{dH(t)}{dt} + N\mu_0\mu H \frac{dS(t)}{dt} + NS\mu_0H \frac{d\mu(t)}{dt} \quad (2.17)$$

Temel indüksiyon ya da arama bobini bu denklemde birinci terime, ikinci terim döner bobin sensorlerine ve son terim de temel fluxgate terimine karşılık gelmektedir. Hedeflenen uzay mekiği uygulamasında 1. ve 2. terimlerden gelen katkılar istenmemektedir. Kısacası sensör sinyali olarak sonuncu terim değerlendirmeye alınacaktır. Uyarma bobini ile oluşturulan alternatif alan sonucunda ve ferromanyetik nüve manyetik geçirgenliğindeki homojen olmayan durum nedeni ile algılama bobininde işaret sinyalinin tek harmonikleri oluşmaktadır. Ölçülecek DC alan (ya da düşük frekanslı alan) ile birlikte görünen B-H eğrisinde simetri kırılımı oluşmakta bu da çift harmoniklerin oluşmasına neden olmaktadır. Daha önce bahsedildiği gibi DC alan ile sinyal doğrusal değişimi ancak 2. harmonik sinyalinde gözlenebilmektedir. Yukarıdaki indüksiyon denkleminde (2.17) bobin herhangi bir dönel hareket yapmayacağı için 2. terimden gelen katkı sıfır olmaktadır. En baskın sinyal birinci terimden gelmekte ve bunun temizlenmesi gerekmektedir [3].

Uyarma bobini üzerinde dolaşan AC akımın yaratmış olduğu manyetik akı halkanın her iki tarafında birbirine zıt yönlüdür. Yani nüvedeki net akı sıfırdır. Bu durumda algılama bobini üzerinde (mevcut sarım geometrisinde) herhangi bir gerilim indüklenemez ($\phi_2 - \phi_1 = 0$). Gerilim ancak ölçülmek istenen dış manyetik alanın sensör üzerine düşmesi sonucu oluşacak $\Delta\phi$ farkından dolayı ve ancak işaret sinyalin 2. harmoniğinde gözlenir. Kısacası bandpass filtre kullanılmaksızın Eşitlik 2.17'deki indüksiyon denklemindeki 1. terimden gelen istenmeyen sinyal büyük oranda temizlenmiş olacaktır.

Fluxgate sensörler ortogonal ve paralel olarak iki sınıfta karşımıza çıkarlar. Bu sınıflandırma Şekilde gösterildiği gibi, oluşan DC manyetik alan H_{dc} ile uyarma bobini üzerindeki H_{ex} alanlarının yönelimlerine bağlı olarak yapılır.



Şekil 2.15 Paralel(a) ve ortogonal(b) fluxgate sensör konfigürasyonu [31].

a) H_{dc} ile H_{ex} alanlarının aynı yönlü olduğu paralel fluxgate

b) H_{dc} ile H_{ex} alanlarının farklı yönlü olduğu ortogonal fluxgate

Sensör performansı için (özellikle gürültü düzeylerinde) paralel fluxgate tasarımının olumlu sonuçlar vermesiyle, ortogonal tasarım neredeyse unutulmuş diyebiliriz. Yapılan tasarım ve çalışmaların çoğunda paralel fluxgate özelliği görülmektedir. Çünkü eğer yüksek hassasiyet isteniyorsa gürültü en önemli parametredir. Geriye kalan doğrusallık, hassasiyet gibi özelliklerin uygun elektronik sistemler ile telafisi mümkündür.

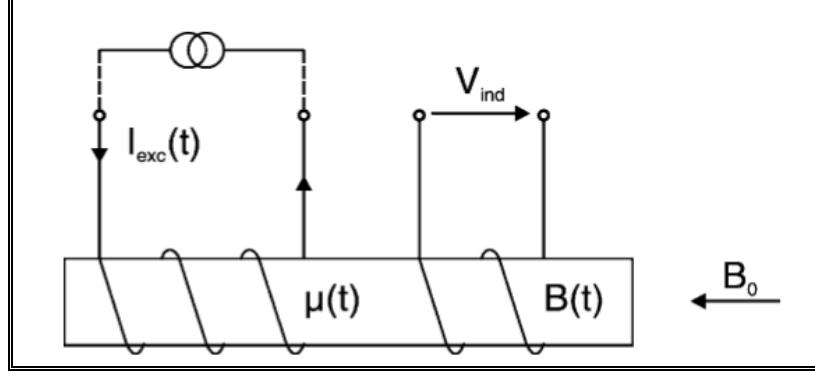
Fluxgate sensör sınıflandırmasında, iki ana başlık olan paralel ve ortogonallık, nüve malzemenin şekli ve çalışma anında dış manyetik alana karşı konumlanmasıyla çeşitlenir. Nüve şekline göre popüler üç çeşit fluxgate-çubuk, halka ve yarış pisti nüveli sensör bulunmaktadır. Nüve malzemesinin manyetik özelliği ve sahip olduğu geometri sensör performansı üzerinde çok etkilidir.

Rod Core (Çubuk Nüveli) Fluxgate

İlk geliştirilen fluxgate manyetometredir. Fluxgate sensörler ile en çok haşır neşir olan grup olan jeomanyetik uzmanlarına göre bu tip sensörler daha yüksek kararlılığa sahipler. Diğer iki türdeki sensörlere göre, daha düşük performans göstermelerine rağmen, daha kolay üretilirler.

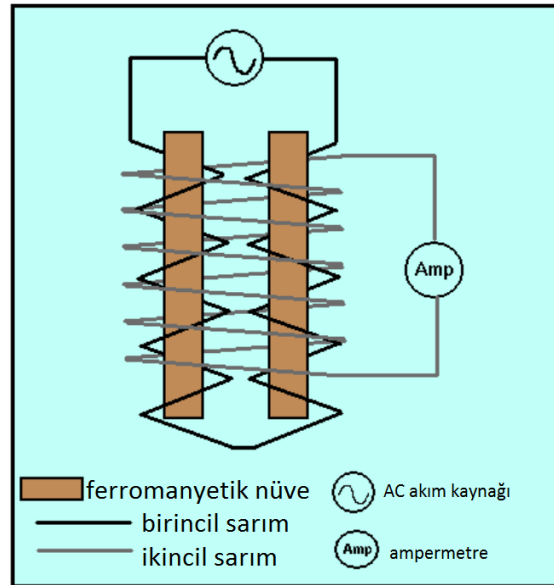
Ferromanyetik çubuk üzerine sarım sistemlerinin entegre edilmesiyle oluşturulup, yine ikincil sarım üzerinden ölçümler alınır.

Çubuk sensörler tek çubuklu ve çift çubuklu olarak iki farklı şekilde tasarlanmaktadır. Tek çubuklu sensörlerde genel sorun yüksek uyarma akımlarıdır. Yüksek uyarma akımları sistemin transformatör gibi davranmasına neden olur. Bu yüzden yüksek doğruluklu ölçümler için çift çubuklu ya da toroid nüveli sensörler tercih edilmelidir.



Şekil 2.16 Tek çubuklu geometri [29].

Çift çubuklu sensörler ile daha doğru ölçümler yapmak mümkündür. Fluxgate sensörler genel olarak ikinci harmoniği algılama yöntemi ile çalışır. Bu yöntemde, sensör çıkışında transformatör etkisinden kaynaklanan, uyarma frekansında ve bunun tek harmoniklerinde oluşan istenmeyen işaret sorun yaratmaktadır. Çift çubuklu sensörde istenmeyen tek harmonikler daha azdır, çünkü iki adet çubuk zıt yönlerde doyuma sokulur. Neticede yapılmaya çalışılan, uyarma ve sensör sargıları arasındaki ortak endüktansı sıfır yapabilmektir [24].



Şekil 2.17 Çift çubuklu geometri [32].

Çubuk tipi sensörlerin genel avantajları şunlardır:

- 1.Yüksek çözünürlük,
- 2.Dik alanlara karşı bağışıklık.

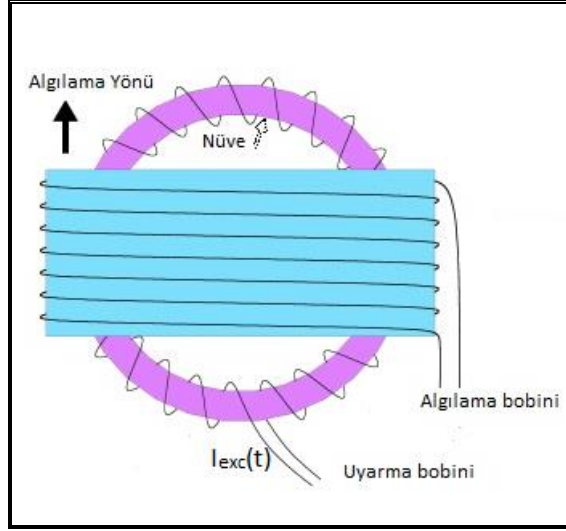
Dezavantajları ise şunlardır:

- 1.Gürültü bağışıklıkları açık uçlardan ötürü kötüdür,
- 2.Magnetik yayınımları fazladır,
- 3.Doyurması zor olduğundan güç tüketimleri fazladır,
- 4.Sensör ofsetinin sıcaklık kararlılığı kötüdür,
- 5.Sensör ofsetinin uzun dönem kararlılığı kötüdür,
- 6.Yüksek genlikli bir alana maruz kaldıklarında parametreleri kalıcı olarak (offset gibi) değişir [24].

Ring Core (Halka Nüveli) Fluxgate

1930'larda görülmeye başlasa da 1962'ye kadar geliştirilmemiştir. Düşük güçte çalışmaları ve yüksek performansı sebebiyle modern uzay araştırmalarında istisnasız ring core tip fluxgate kullanılmaktadır. Uzay uygulamaları için farklı geometrilere sahip fluxgate manyetometreler denenmiş lakin düşük gürültü nedeni ile halka nüveli geometri en çok tercih edilen fluxgate manyetometre tipi olarak literatüre geçmiştir.

Şekildeki gibi algılama bobini merkezinde halka nüveli düz bir solenoid olsa da, uyarma bobini etrafında toroidal sarım bulunmaktadır. Nüve genellikle demir-nikel alaşımı gibi soft manyetik özellikte ince film şeklindedir. Yüksek demagnetizasyon etki sebebiyle düşük hassasiyetli olsalar da düşük gürültü seviyeleri ile çalışmalarda avantaj kazandırırılar [29].



Şekil 2.18 Ring core fluxgate [30].

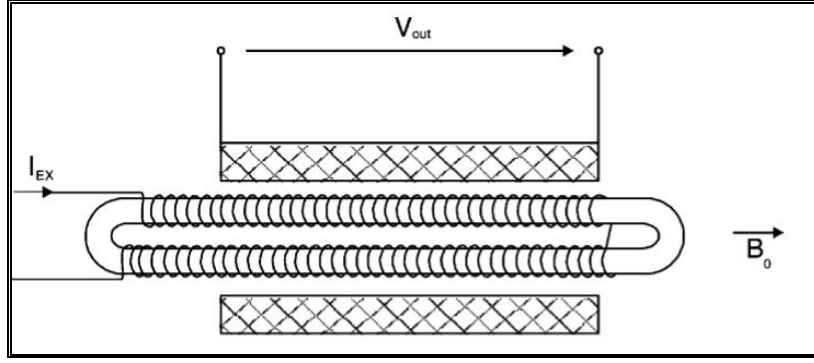
Genel avantajları şunlardır:

- 1.Toroid nüve ölçüm sargısına göre döndürülerek ince ayar yapılabilir.
- 2.Nüve üzerindeki mekanik stres düzgün olarak dağılır.
- 3.Kapalı bir magnetik yol üzerine kurulduğundan gürültüye karşı bağıstıktır.
- 4.Kapalı bir magnetik yol üzerine kurulduğundan magnetik yayınıımı azdır.

Temel dezavantajı ise, demagnetizasyon etkisinden dolayı sensör duyarlılığının daha düşük olmasıdır [24].

Race-Track Core (Yarış Pisti Nüveli) Fluxgate

Teorik olarak race-track fluxgateeler, sahip oldukları tüm özellikleriyle diğer iki türe göre en iyi sonuçları gösteren, geliştirilmiş son dizayn fluxgate sensörlerdir. Ancak yine de bu teoriyi kanıtlayacak daha fazla yayınlanmış veriye ihtiyaç duyulmaktadır. Hassasiyetleri yüksektir ve düşük demagnetizasyon etki sebebiyle düşey alanlara karşı daha az duyarlıdır.



Şekil 2.19 Race-track (Yarış-pisti) Fluxgate [29].

Farklı geometrilere sahip fluxgate sensörlerin özelliklerini karşılaştırdığımızda, her birinin avantaj sağladığı ve dezavantaj yarattığı durumlar olduğunu görebiliriz (Çizelge 2.4). Halka tipi geometri düşük hassasiyetli olmasına rağmen, gürültü düzeyinin düşük oluşu ile tercih sebebidir. Çubuk geometrili fluxgate sensörler hassas alan ölçümü sağlarlar ancak, çubuk uçlarının gürültü üzerinde olumsuz etkileri vardır. Yarış-pisti sensörler, yüksek hassasiyet ve düşük gürültü düzeyine sahiptir. Bir özelliği de dik alan etkisi olarak bilinen ve ferromenyetik nüveye sahip tüm sensörlerde mevcut olan crossfield etkisini minimize edebilmesidir.

Çizelge 2.4 Çubuk, halka tipi ya da yarış-pisti şeklindeki geometrilerin avantajları ve dezavantajları [30].

	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 gereksinimi	yüksek	düşük	orta
Kesintisiz besleme	***	**	*
Perming	*	***	**
Crossfield	***	*	***

BÖLÜM 3

DENEYSEL ÇALIŞMA

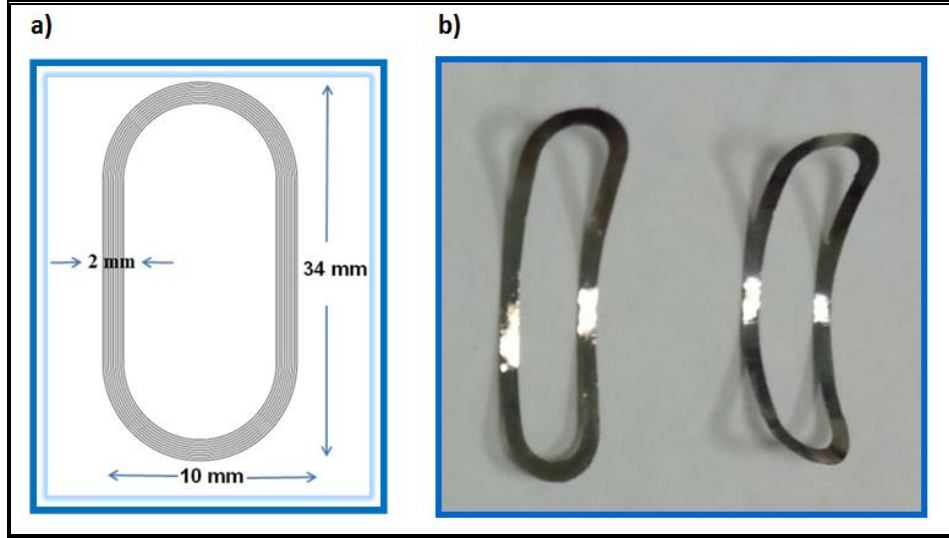
3.1 Kullanılan Malzemeler

Algılama nüvesi olarak kullanılan Vitrovac 6025X, sensör tasarımında sıkça seçilen soft ferromanyetik malzemelerden birisidir. Bu malzeme yarış pisti şeklinde kesilerek, aynı boyutta hazırlanan iki plaka arasına yerleştirilmiştir. Uyarma bobini sarımında 300 μm bakır tel, algılama bobininde ise 200 μm bakır tel ile kullanılmıştır.

Ölçülmek istenilen DC alanı yaratmak için güvenilir bir DC alan büyüklüğüne ihtiyaç vardır. Bu alan Helmholtz bobini ya da Referans Solenoid aracılığı ile oluşturulabilir. Helmholtz bobini laboratuvar koşullarında mevcut malzemeler ile üretilebilir. Lakin bu noktada dikkat edilmesi gereken husus bobin boyunca manyetik alan dağılımının homojen olmasıdır. En azından karakterize edilecek manyetik alan sensörünün yerleştirileceği bölgede homojenliği sağlamak gerekmektedir. Bu nedenle bobinin sarımına başlamadan önce teorik hesaplamaların ve tasarımın yapılması önem arz etmektedir. MATLAB programlama dili kullanılarak solenoidin çapına ve boyuna bağlı olarak gerçekleşen teorik hesaplamalar sonucunda 10 cm çap ve 50 cm boy ile bizim için yeterli manyetik homojenite sağlanmıştır. Bu bobinin kalibrasyonu 1. seviye manyetik alan referans standardı olan NMR teslametre ile gerçekleşmiş ve 15.861 Oe/A olarak belirlenmiştir [3].

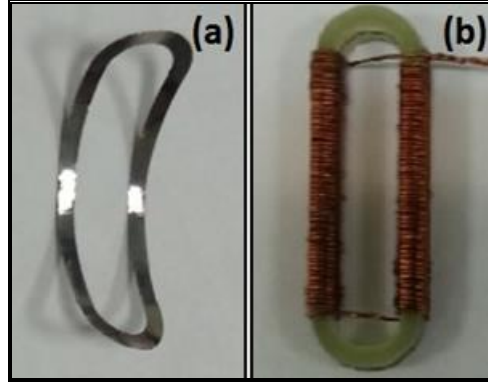
3.2 Örnek Hazırlama Metotları

Daha önceki bölümlerde bahsedildiği üzere fluxgate sensörler üzerinde yapılan çalışmalar uygulama alanına bağlı olarak farklı geometrik sensör konfigürasyonlarında gerçekleştirilmektedir. Yoğun çalışılan sensör geometrilerinden bir tanesi de yarış-pisti konfigürasyonudur. Algılama nüvesi Vitrovac 6025X yarış-pisti şeklinde çıkartılmış ve aynı ölçülerde iki plaka arasına yerleştirilerek 130 sarımlık uyarma bobini hazırlanmıştır. Burada sensör hassasiyeti ve gürültüyü önemli ölçüde etkileyen demagnetizasyon faktörünü mümkün olduğunca bertaraf etmeyi hedeflediğimiz için Şekil 3.1 (a)'daki boyutlar literatürdeki tüm çalışmalar değerlendirilerek özel olarak seçilmiştir ve mevcut veriler [9], örnek hazırlığı aşamasında bize referans sağlamışlardır.



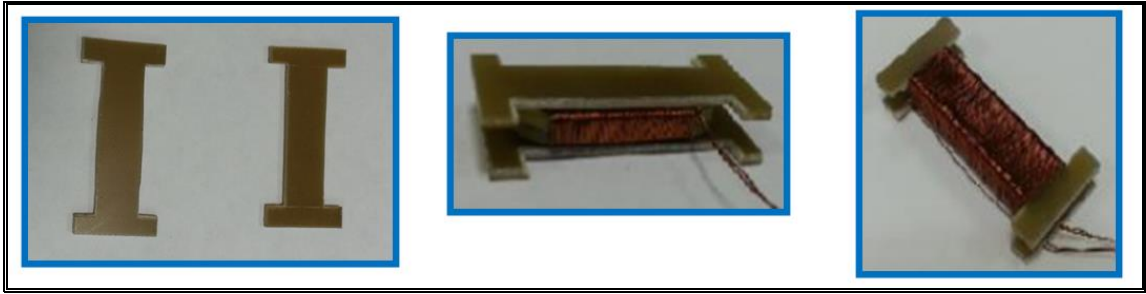
Şekil 3.1 Sensör yapımında kullanılan manyetik algılama nüveleri

Aynı şekilde nüve katman sayısının sensör performansı üzerinde önemli mertebede etkili olduğu saptanmıştır. Bu etkiyi incelemek adına plakalar arasına tek katlı, iki katlı, üç katlı ve beş katlı nüve yerleştirilerek dört adet yarış-pisti tipi sensör hazırlanmıştır. Bu sensörler sahip oldukları algılama nüvelerinin katman sayısını göstermek üzere RT-1, RT-2, RT-3 ve RT-5 şeklinde isimlendirilmiştir.



Şekil 3.2 Tek kat nüveli yarış-pisti sensörün (RT-1) uyarma bobini hazırlık evreleri

Algılama bobini tasarımında iki plaka kullanılmıştır. Plakaların arasına uyarma bobini yerleştirilmiş ve bobin üzerinden 132 sarım yapılmıştır. Böylece tek kat nüveli yarış-pisti sensör (RT-1) hazırlık aşaması tamamlanmıştır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3 RT-1 in algılama bobini hazırlık evreleri

Aynı işlemler iki, üç ve beş kat nüve ile tekrar edilerek RT-2, RT-3 ve RT-5 sensörleri de tamamlanmış ve tüm sensörler ölçümlere hazır hale getirilmiştir. Hazırlanan her sensör için belirlenen frekans ve genlik değerlerinde ölçümler yapılmıştır. Cihazlardan alınan ölçüm sonuçları Lab View programıyla analiz edilerek sensör hassasiyet ve gürültü değerleri hesaplanmıştır.

3.3 Sinyal Analizinde Kullanılan Cihazlar

3.3.1 Akım Kaynağı

Akım kaynağı olarak Keithley 220 gibi 1nA ile 100 mA (ya da daha yüksek) arası DC akım üreten cihaz kullanılmıştır. Hassasiyet (ya da ölçek faktörü) ölçümlerinde (V_{2f}/H_{DC}) DC alan yaratmak için hazırladığımız bobin sabiti 15.861 Oe/A olarak belirlenen kalibreli bobin ve Keithley 220 akım kaynağı kullanıldı.

3.3.2 FFT Dinamik Sinyal Analizörü

Gürültü ölçümleri için sistemin en pahalı cihazı olan Agilent marka 35670A model FFT Dinamik Sinyal Analizör kullanıldı.

3.3.3 Lock-in Yükselteç

Ölçümlerde AC alan kaynağı olarak ve işaret sinyalinin 2 katı olan $2f$ sinyalini algılamak için SR830 tipi Lock-in yükseltece ihtiyaç vardır. Algılama bobininde oluşan harmonik sinyalin ölçümünde Stanford SR830 Lock-in Amplifier kullanıldı.

3.3.4 Dört Katlı Mu-Metal

Gürültü ölçümleri manyetikçe yalıtılmış ortamda yapılması gerektiğinden özel mu-metal yalıtılmış alana ihtiyaç vardır. En az 4-5 kat ve aralarında spacer'ların bulunduğu bu sistemde her bir kova kalınlığı en az 1 mm olmalıdır. Deneyisel süreçlerde dört katlı mu-metal kullanıldı.



Şekil 3.4 Fluxgate sensör analiz ve karakterizasyon çalışmaları için gerekli deneysel düzenek

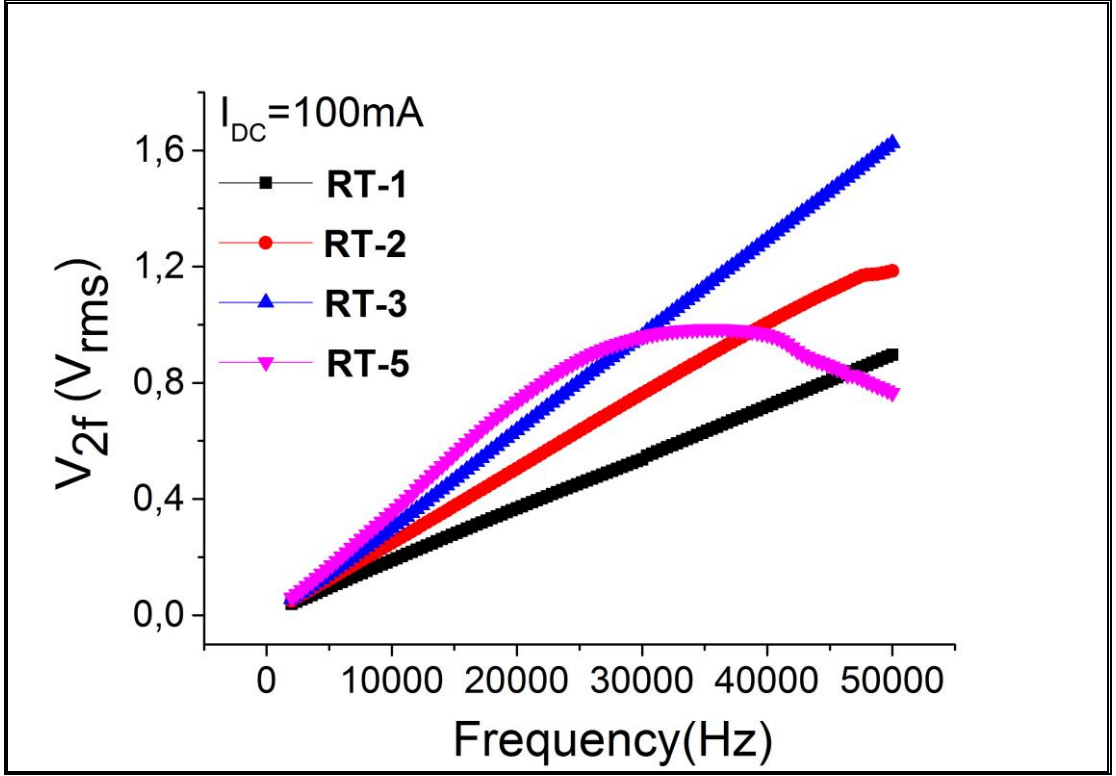
3.4 Sensör Ölçek Faktörü Analizi

Bir sensörün hassasiyetini o sensör için hesaplanabilecek ölçek faktörü (transfer fonksiyonu) üzerinden belirleyebiliriz. V/T cinsinden hesaplanan bu değer ne kadar yüksekse sensör o kadar hassastır diyebiliriz. Ölçek faktörünü belirlemek için öncelikle sensörün uyarma frekansına verdiği cevabı yani sinyal şiddetini gösteren $f-V$ ölçümü yapmak ve sonuçlarını değerlendirmemiz gerekir. Çünkü tasarladığımız sensörlerin hangi aralıkta çalışacağını belirleyen parametre $f-V$ ölçümüdür.

Şekil 3.5 RT-1, RT-2, RT-3 ve RT-5 sensörlerine ait $f-V$ sonuçlarını bir arada göstermektedir. Bu dört ölçüm esnasında nüvenin 100 mA'lık DC akım ile doyuma ulaşması beklenmiştir. Burada yalnızca RT-5 sensörüne ait eğrinin pik noktası için net bir değer ($f_{max}=35,6$ kHz) görülse de, diğer üç sensör için ancak 50 kHz üzerinde bir değer olduğu görülüyor. RT-5'e ait eğrinin tepe kısmı yaklaşık 20 kHz genişlikte olup, geniş bir plato gibi düz biçimde uzanmıştır. Buna göre bu sensör, ortam sıcaklığı gibi koşullardan etkilenmeyen (veya en az etkilenen) ve diğerlerine göre daha kararlı olan sensördür.

Tüm sensörler için çıkarabileceğimiz ortak sonuç ise bize geniş bir çalışma aralığı avantajı sunmasıdır.

$f-V$ sonuçlarından elde ettiğimiz değerlere bağlı olarak tüm sensörler için ölçümlerde 2,508 V_{rms} genlik ve sırasıyla 10 kHz, 15 kHz, 20 kHz ve 25 kHz frekans değerleri kullanılmıştır. Sonuçlarda tüm bu frekans değerlerine karşılık gelen ölçek faktörü elde edilmiştir. Zira, $f-V$ grafikleri bize hangi frekansta çalışmamız gerektiği bilgisini vermediği için frekans aralığını taramamız gerekmiştir. Bu değerlere ek olarak sadece RT-5 35 kHz frekansta incelenmiştir.



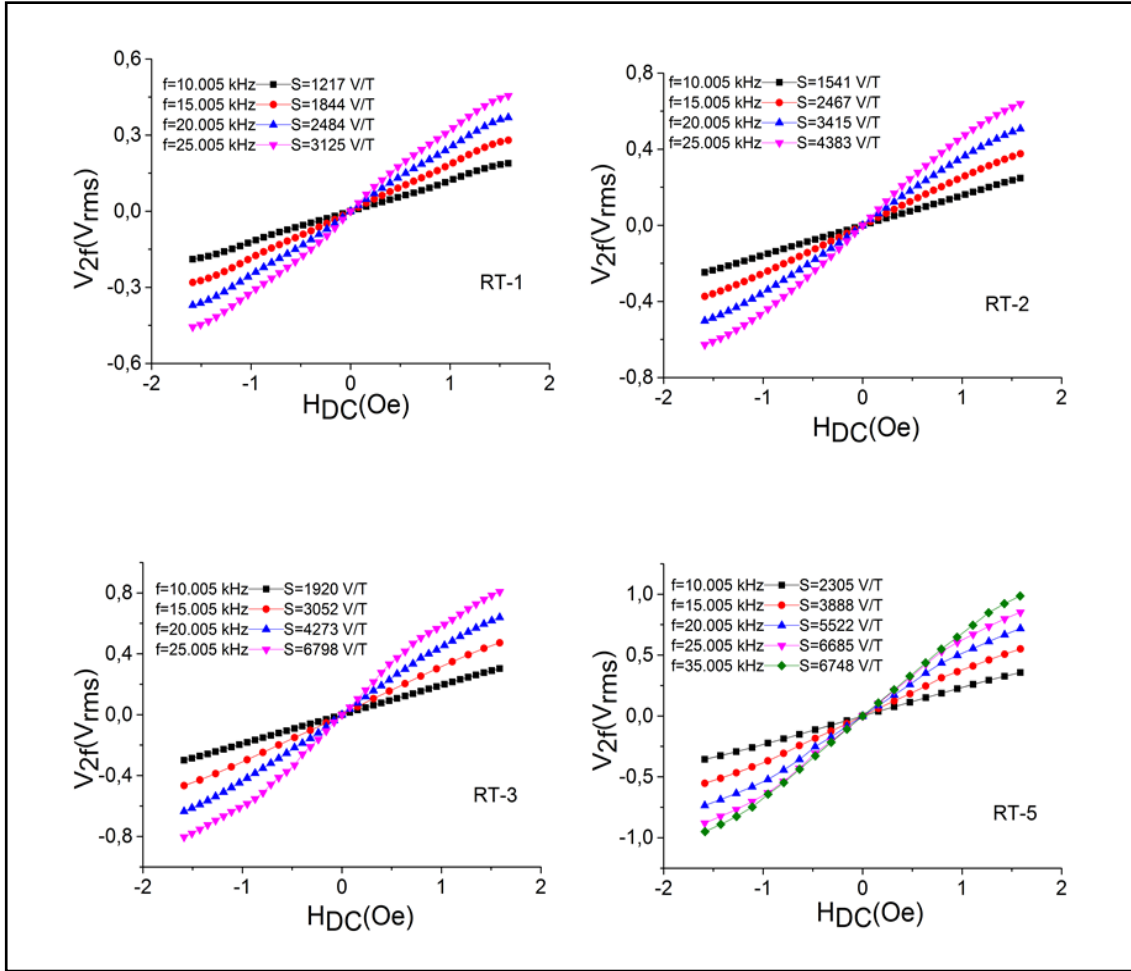
Şekil 3.5 f-V analiz sonuçları

Fluxgate manyetometre teorisinde bahsedildiği gibi sensör içerisindeki nüvelerin, belirli bir genlikte AC alan uygulanarak doyuma ulaşması sağlanır. Bu uygulama sonucunda işaret sinyalinin tek harmonikleri (1., 3., 5. harmonikler gibi) oluşur. AC alan ile birlikte DC alan uygulanması durumunda çift harmonikler de (2., 4., 6. harmonikler gibi) oluşur. Uygulanan DC alanın 2. Harmonik sinyali ile doğrusal bir değişim göstermesi özelliği işin temelini yansıtmaktadır.

Ölçek faktörü sonuçları Şekil 3.6 ve Şekil 3.7’de frekansa ve nüve kat sayısına bağlı olarak iki şekilde sunulmuştur. Zira burada amacımız uyarma frekansının ve nüve kat sayısının sensör performansını nasıl etkilediğini görmektir.

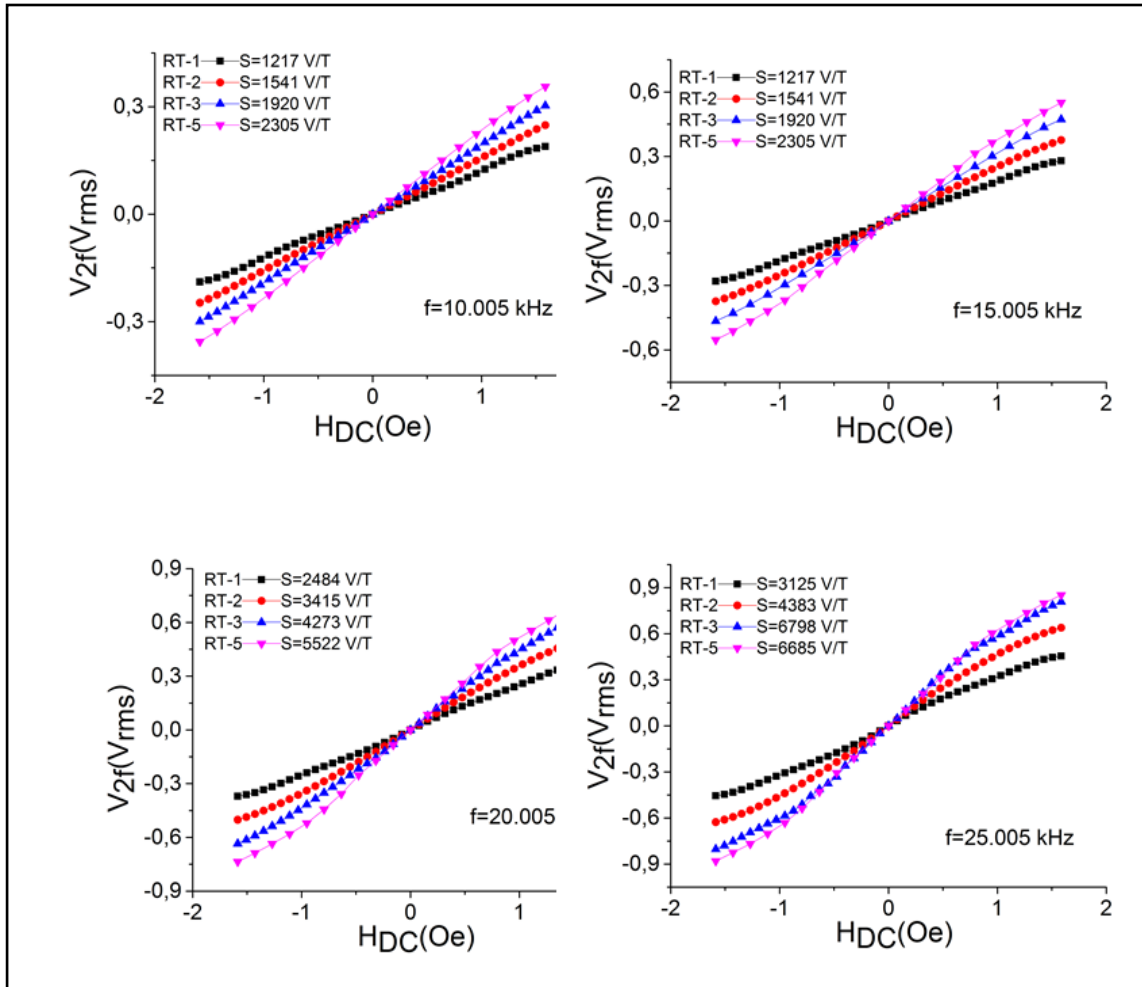
$V_{2f-H_{DC}}$ grafiklerinin doğrusal davranış gösterdikleri bölgelerin eğimi sensörlerin hassasiyetlerini yani ölçek faktörünü V/T cinsinden göstermektedir. Doğrusallıktan sapmanın başladığı nokta ise sensörün üst limiti olarak kabul edilir.

3.4.1 Frekansa Bağlı Ölçek Faktörü Analizi



Şekil 3.6 Frekansa göre çizilen RT-1, RT-2, RT-3 ve RT-5 sensörlerine ait 2. harmonik sinyal şiddeti-uygulanan DC alan grafiği

3.4.2 Nüve Kat Sayısına Bağlı Ölçek Faktörü Analizi



Şekil 3.7 Nüve kat sayısına göre çizilen RT-1, RT-2, RT-3 ve RT-5 sensörlerine ait 2. harmonik sinyal şiddeti-uygulanan DC alan grafiği

Grafiklerden elde edilen eğimlerden ölçek faktörü hesaplanarak, Çizelge 3.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1 Sensör ölçek faktörü sonuçları (V/T)

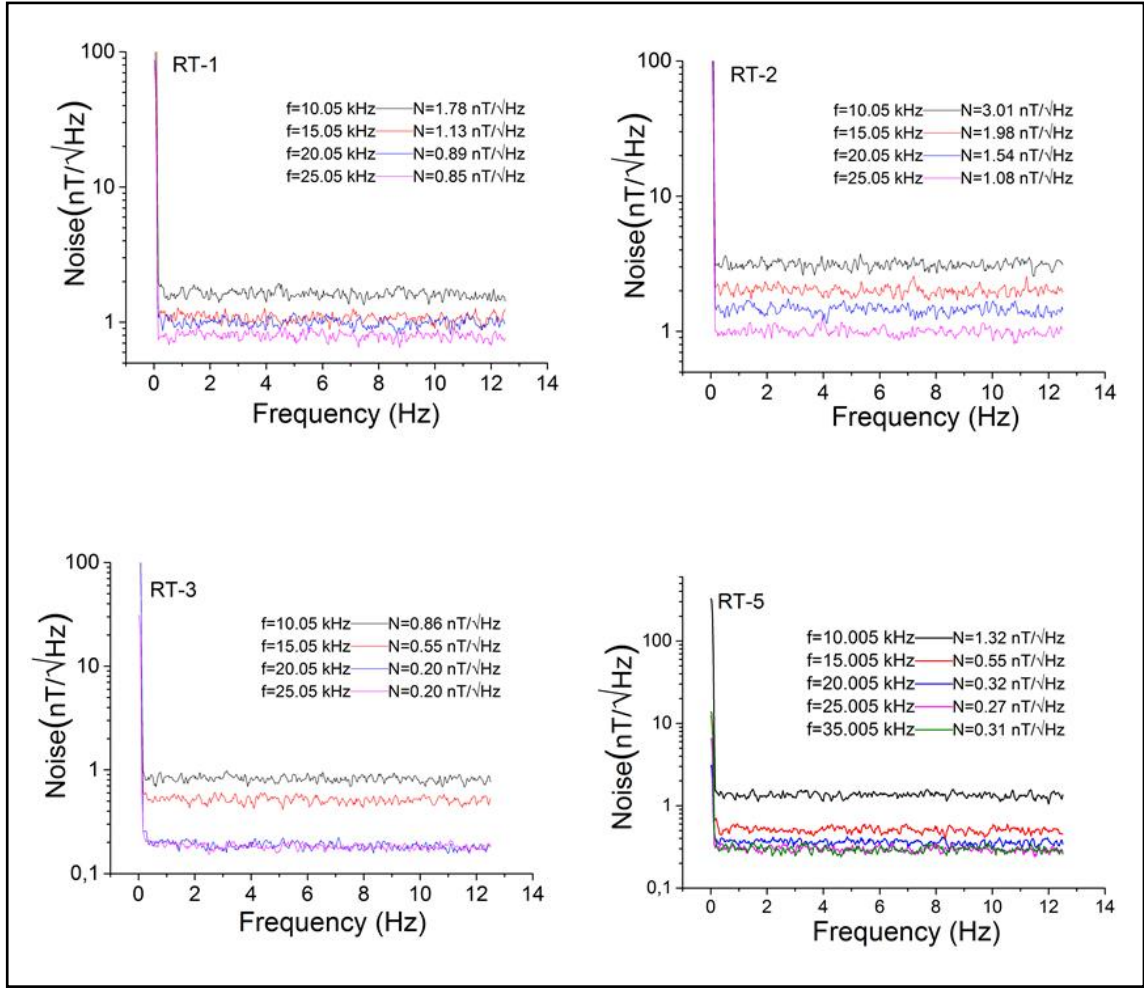
	f=10 kHz	f=15 kHz	f=20 kHz	f=25 kHz	f=35 kHz
RT-1	1217	1844	2484	3125	-
RT-2	1541	2467	3415	4383	-
RT-3	1920	3052	4273	6798	-
RT-5	2305	3888	5522	6685	6748

Tablodan görüleceği gibi, en iyi sonuç üç katlı nüveye sahip sensör RT-3 'ün 6798 V/T olarak belirlenen hassasiyet değerindedir. İlk üç sensörün verdiği sonuçlar, nüve kat sayısı ve frekansın artmasıyla hassasiyetin arttığını gösterirken, beş katlı nüveden alınan sonuçlarda 25 kHz üzerine çıkıldığında bozulmalar meydana gelmiştir.

3.5 Gürültü Analizi

Gürültü analizi ölçümlerinde sensörler dış manyetik alanın yalıtılmış olduğu mu-metal çember içine yerleştirildi. Bağlantı kabloları olarak çevresel gürültüleri minimize edebilecek kablolar tercih edildi. Ölçümlerde Agilent 35670A Dynamic Signal Analyzer ve Lock-in yükselteç kullanıldı. Manyetik alan gürültü yoğunluğu değerleri analizörden okunan gerilim gürültü yoğunluğu değerlerinin ölçek faktörü değerlerine bölümü sonucu elde edildi. Şekil 3.8, çalışılan sensörlere ait frekansa bağlı gürültü seviyelerini göstermektedir. Sensörlerin gürültü seviyeleri grafiklerde 1Hz frekans üzerinden okunmuştur.

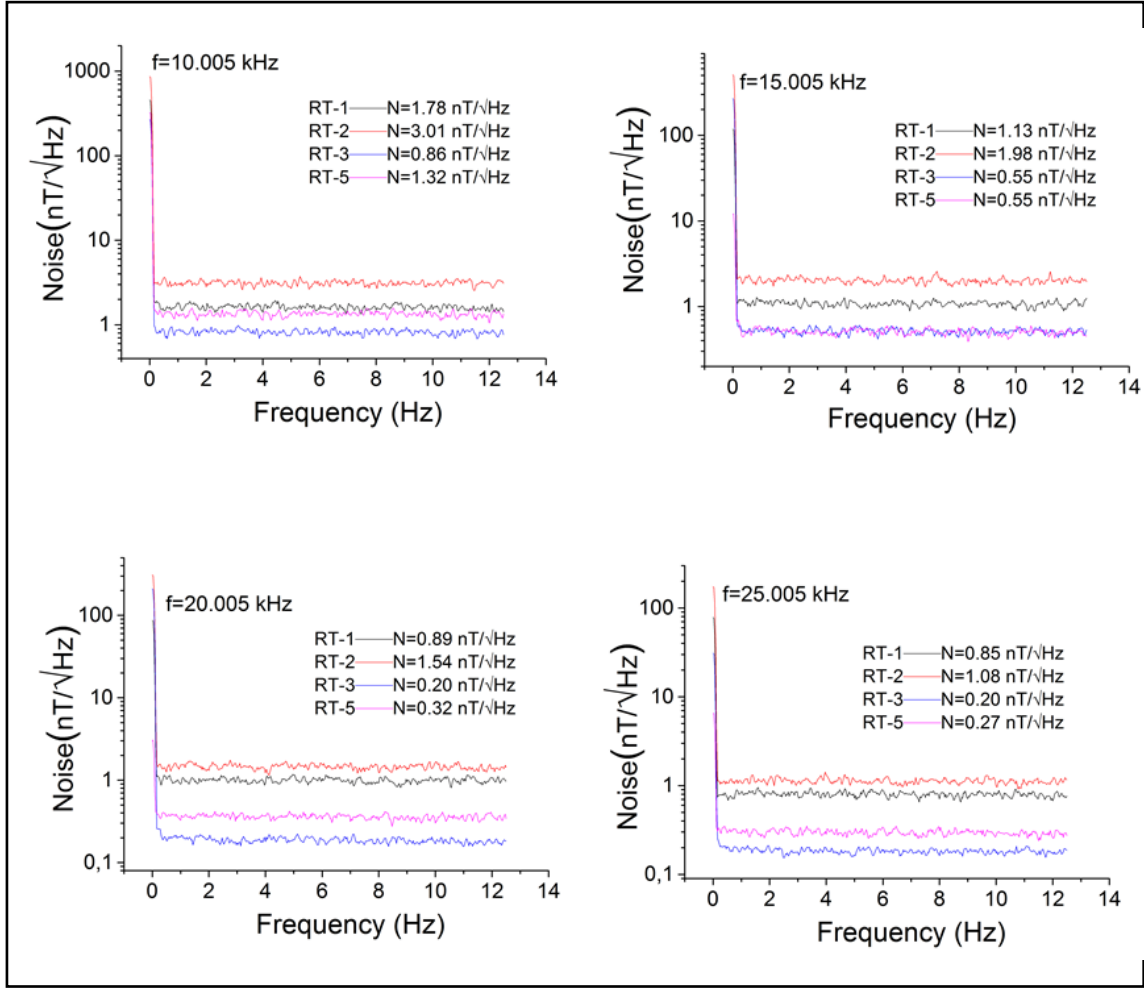
3.5.1 Frekansa Bağlı Gürültü Analizi



Şekil 3.8 Frekansa bağlı değişen RT-1, RT-2, RT-3 ve RT-5 sensörlerine ait gürültü seviyeleri

Şekil 3.8’de görüleceği gibi uyarma frekansındaki artış ölçek faktörünü artırmış, dolayısıyla sensör hassasiyetini iyileştirmiştir.

3.5.2 Nüve Kat Sayısına Bağlı Gürültü Analizi



Şekil 3.9 Nüve kat sayısına bağlı değişen RT-1, RT-2, RT-3 ve RT-5 sensörlerine ait gürültü seviyeleri

Şekil 3.9’da görüleceği gibi nüve kat sayısındaki artış ile gürültü seviyesi arasında tek yönlü bir eğilim bulunmamaktadır.

Çizelge 3.2’de verilen tabloya göre en düşük gürültü sonucu, RT-3 sensörüne ait değer olan 200 pT/√Hz@1Hz’dir.

Çizelge 3.2 Sensör gürültü sonuçları (pT/VHz@1Hz)

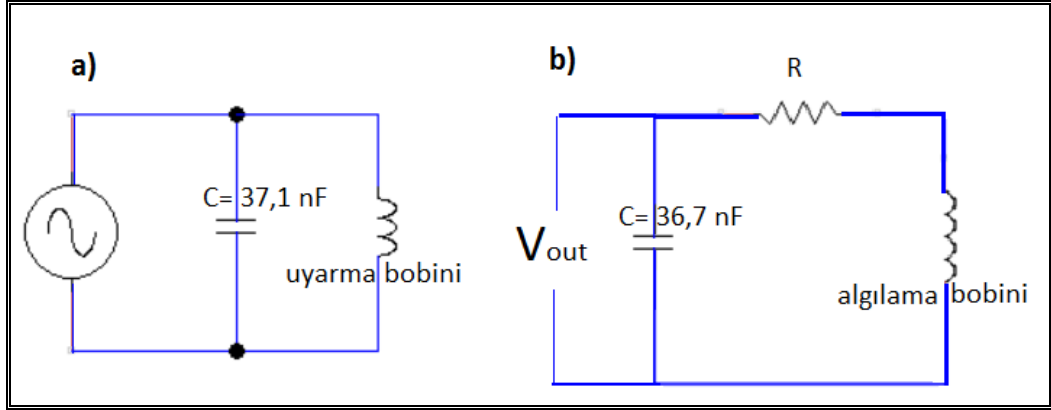
	f=10 kHz	f=15 kHz	f=20 kHz	f=25 kHz	f=35 kHz
RT-1	1780	1130	890	850	-
RT-2	3010	1980	1540	1080	-
RT-3	860	550	200	200	-
RT-5	1320	550	320	270	310

3.6 Sonuç Geliştirme Çalışmaları

Sensör analiz sonuçlarından elde edilen önemli bulgulardan birisi, uygulanan DC alana sensörlerimizin verdiği mükemmel lineerlikte sinyaldir. $2f$ sinyali ile alanın doğrusal değişimini Şekil 3.6 ve 3.7'deki grafikleri üzerinde inceledik. Bilindiği üzere regresyon analizi iki değişken arasındaki uyumun ne düzeyde olduğunu gösteren bir parametredir ve R^2 maksimum değeri olan 1'e ulaştığında tüm değerlerin eğri üzerinde olduğu sonucu çıkar [33]. Grafik üzerinden hesaplanan 0.9998 gibi oldukça yüksek regresyon (R^2) ve ikincil bulgu olarak karşılaştığımız ± 1.5 Oe gibi geniş dinamik ölçüm aralığı, fluxgate sensörlerde çok rastlanan değerler değildir. Bu nedenle alınan bu iki sonuç da çarpıcıdır.

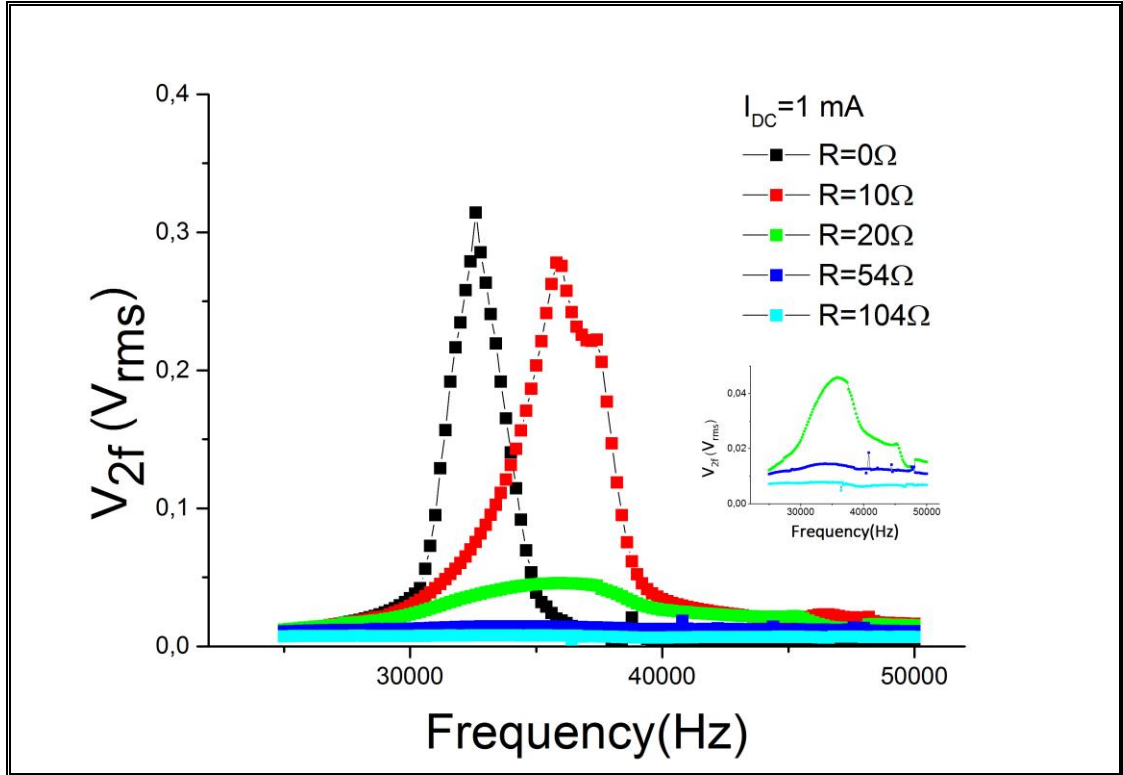
Diğer taraftan sensör performansı ele alındığında, tasarladığımız sensörlerin hassasiyet ve gürültü değerlerinin iyileştirilmesi gerektiğini görüyoruz. Çizelge 3.1 ve 3.2'deki sonuçlar literatürdeki verilerle kıyaslandığında geliştirme çalışmaları aşamasını zorunlu kılar. Zira ölçümlerimizde en iyi sonuçlar olarak elde edilen 6798 V/T ve 200 pT/VHz@1Hz gibi sonuçlar fluxgate sensörler için beklenen hassasiyet ve gürültü seviyesinden oldukça uzaktır. Bu nedenle tasarladığımız sensörlerden birisi üzerinde (RT-5) çalışmayı sürdürerek, sonuçlarda gelişme görmeyi amaçladık. RT-5 sensörünün sarım sistemine direnç ve kapasitör ekleyerek devreyi rezonans durumuna getirmeye

çalıştık. Burada hedeflenen uyarma akımının artışa geçerek nüvenin doyuma ulaşmasıdır. Şekil 3.10'da gösterilen devreler üzerinden önceki ölçümleri tekrarladık.

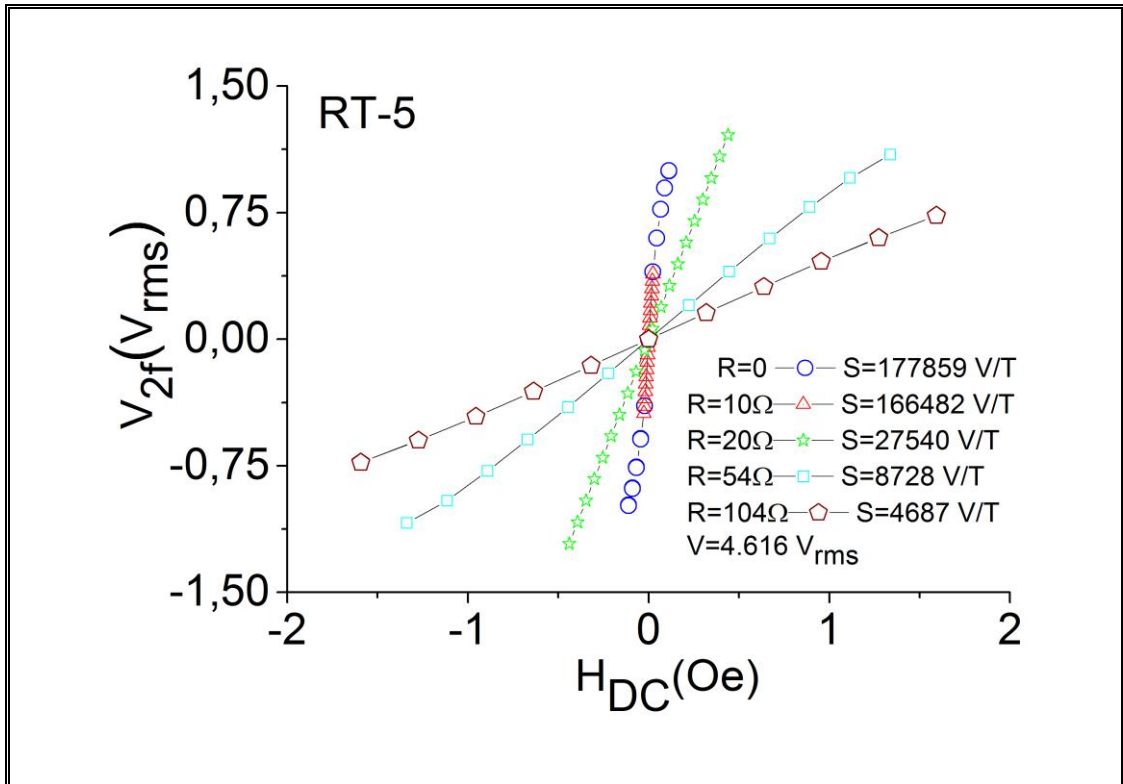


Şekil 3.10 (a) RT-5 in uyarma bobinine bağlanan kapasitör ile (b) algılama bobinine bağlanan kapasitör ve dirençler.

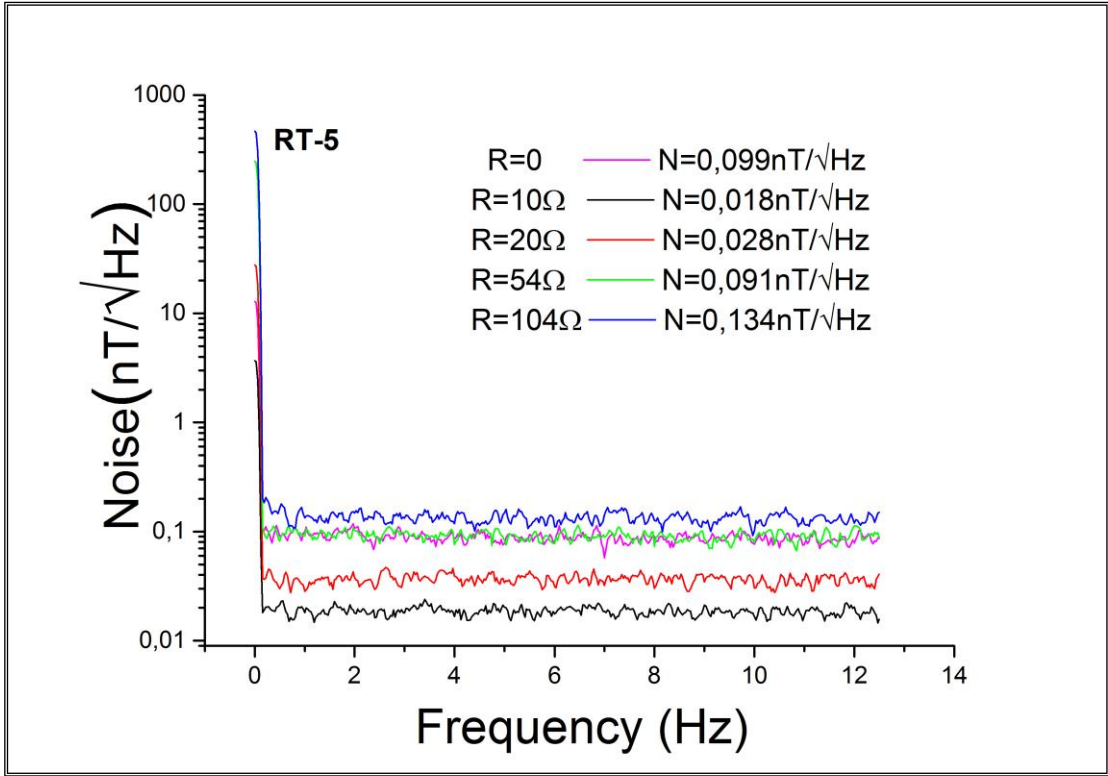
RT-5 sensörünün uyarma bobinine Şekil 3.10(a)'da gösterilen devre şemasındaki gibi $37,1 \text{ nF}$ lık kapasitör eklenmiş ve bobini uyaran akım (I_{ext}) olarak 1mA lık akım seçilmiştir. Algılama bobinine ise $36,7 \text{ nF}$ lık kapasitör ile birlikte Şekil 3.10(b)'da gibi sırasıyla 10Ω , 20Ω , 54Ω ve 104Ω luk dirençler seri olarak bağlanmıştır. Dirençsiz devrelerin verileri çizelgelerimizde mevcut olduğundan karşılaştırma yapılabilir. Böylelikle direnç değerlerinin sensör performansına etkisi incelenebilecektir.



Şekil 3.11 Farklı dirençlere bağlı RT-5 sensörlerin f-V analiz sonuçları



Şekil 3.12 RT-5 ile farklı büyüklükteki dirençlerin oluşturduğu sensörlere ait ölçer faktörü değerleri



Şekil 3.13 RT-5 ile farklı dirençlerin birlikte oluşturduğu sensör sistemlerine ait gürültü seviyeleri

Şekil 3.12 ve Şekil 3.13'teki grafiklerden alınan sonuçlara göre, sensör algılama bobinine eklenen dirençlerin büyüklüğünün artmasıyla sensör ölçek faktöründe azalma ve gürültü seviyesinde artış görülmüştür.

Deneyisel çalışmalarımızın tümü değerlendirilecek olursa aynı nüve malzemesi (Vitrovac 6025X) ile hazırlanan tüm sensörlerimizin performanslarına olumlu katkı sağlayan iki durum mevcuttur:

- Nüve kat sayısının belirli bir limite kadar artırılması
- Sarım sisteminin rezonansa getirilmesi

Nüve kat sayısının etkisi beklentilerimizi yeterince karşılamadığından, sonraki aşamada rezonans faktörü ile gelişme sağladık (Çizelge 3.3).

Çizelge 3.3 Geliştirme çalışmalarının sonuçlar üzerindeki katkısı

	Sensör	Ölçek Faktörü (V/T)	Gürültü (pT/√Hz@1Hz)
ÖNCE	RT-1 (R=0)	3125	850
	RT-2 (R=0)	4383	1080
	RT-3 (R=0)	6798	200
	RT-5 (R=0)	6685	270
SONRA	RT-5 (R=0)	177859	99
	RT-5 (R=10Ω)	166482	18
	RT-5 (R=20Ω)	27540	28
	RT-5 (R=54Ω)	8728	91
	RT-5 (R=104Ω)	4687	134

Çizelge 3.3'deki veriler bize iki farklı açıdan bakış sağladığı için oldukça ilgi çekicidir. İlk olarak sonuç geliştirme çalışmaları yapmadan önce-direnç ve kapasitörlerin bulunmadığı sensör devrelerinde- bir, iki, üç ve beş kat nüveli sensörler arasında en iyi sonucu veren sensörün üç katlı nüveye sahip sensör (RT-3) olduğu görülmektedir. Bu durumda nüve kat sayısının artırılması belirli bir limite kadar performansa katkı sağlayabiliyor diyebiliriz. İlk üç sensörün sonuçları bir öncekine göre iyileşme gösteriyordu. Bu nedenle tasarladığımız sensörlerin sahip olduğu tüm karakteristik özellikler kat sayısını üç olarak sınırlamaktadır.

İkinci çıkarım ise sarımlara eklenen kapasitör ve direncin sensör performansı üzerinde çok büyük gelişme sağlamasıdır. Çizelge 3.3'den görüleceği gibi önceki duruma kıyasla sensör hassasiyetini gösteren ölçek faktörü 27 kat, sensör gürültü değerleri yaklaşık olarak 10 kat iyileşme göstermiştir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Günümüzde teknoloji geliştikçe talep ve ihtiyaçlar yeniden şekillenmiş olup, hayatımıza yeni bir çok sistem girmiştir. Bu sistemler günlük yaşantımız ile o derece iç içe bulunurlar ki kullanım esnasında çoğu zaman varlıklarının farkında bile olmayız. Her ne kadar uzun bir geçmişe sahip olsa da yaşamımızın adeta bir parçası olması yeni sayılan manyetik sensörlerden, etkinliği ve yaygınlığı göz önüne alındığında ilk sırada yer alması gereken alan sensörü fluxgate sensörlerdir. Bu çalışmada soft manyetik amorf yapıda ferromanyetik nüveli, 10^{-4} - 10^{-12} T aralığındaki DC manyetik alan büyüklüklerini ölçebilen, kararlı fluxgate sensörlerin tasarımına yönelik araştırmalar yaptık. Tasarlanan sensörlerin hedefimize ne kadar yakın olduğunu görebilmek için hassasiyet ve gürültü değerlerini test ettik. Sensör performansını düşüren parametreleri bertaraf edecek nüve, sarım şekli, sensör boyutlarını titizlikle seçtik ve bu özellikleri sabit tutacak şekilde toplam dokuz adet fluxgate sensör üretimi gerçekleştirdik. Üretilen ilk dört sensörde sadece nüvenin kat sayısını değiştirerek, bu sayısının performans ölçümlerinde nasıl bir etki yapacağını araştırdık. Deneysel çalışmalarımız sonucunda elde edilen verilerin literatür ile kıyaslamasını yaparak iyileştirme çalışmalarına ihtiyaç olduğunu belirledik. İlk etapta üretimi sağlanan dört sensörden birisini seçtik ve bu sensör üzerinde ne şekilde gelişme sağlanabilir diye çalışmalar yaptık. Sensör sarım sistemlerine farklı devre elemanları entegre ettik ve sonuçlarda kayda değer ilerlemeler sağladık.

Gelinen son noktada kararlı, hassas, düşük gürültü düzeyine sahip fluxgate manyetometre üretimini başardık. En iyi değerler olarak yaklaşık 178 kV/T ölçek

faktörü ve 18 pT/VHz@1Hz gürültü değerlerine ulaşabildik. Sensörlerimizin boyutları ve sahip oldukları ölçüm aralığı göz önünde bulundurulduğunda hepsinin farklı sistemlere entegre edilebilir ve bir çok uygulama alanında yer alabilir olduklarını gördük.

Çalışmamız alan sensörleri konusunda mevcut bulunan araştırma eksikliğini gidermeye katkıda bulunabilir ve ticari ürün geliştirilmesine yönelik olan çalışmalara da öncülük edebilir. Bunun yanında sensörlerin sahip olduğu en kritik eleman olan manyetik nüveler için günbegün gelişen malzeme teknikleri sorgulanarak sensör sistemleri için takip edilmeli ve böylelikle Dünya ile rekabet edebilecek düzeye ulaşmalıyız.

KAYNAKLAR

- [1] Lenz, J., ve Edelstein, S. (2006). "Magnetic sensors and their applications" IEEE Sensors journal, 6(3):631-649.
- [2] Caruso, M. J., Bratland, T., Smith, C. H., ve Schneider, R. (1998). "A new perspective on magnetic field sensing" SENSORS-PETERBOROUGH-, 15:34-47.
- [3] Topal, U. (2013) Tübitak Proje Özeti- Proje 113F19.
- [4] Ripka, P. (1993). "Race-track fluxgate sensors". Sensors and Actuators A: Physical, 37:417-421.
- [5] S. Kawahito, H. Satoh, M. Sutoh, ve Y. Tadokoro, (1996). "High-resolution micro-fluxgate sensing elements using closely coupled coil structures," Sensors and Actuators A, 54:612-617.
- [6] C. Hinnrichs, C. Pels ve M. Schilling, (2000). "Noise and Linearity of a Fluxgate Magnetometer in Race-track Geometry" Journal of Applied Physics, 87(9):7085-7087.
- [7] C. Hinnrichs, J. Stahl, Kai Kuchen Brandt ve M. Schilling, (2001). "Dependence of Sensitivity and Noise of Fluxgate Sensors on Race-track Geometry" IEEE transactions on magnetics, 37(4):1983-1985.
- [8] Ripka, P. (2000). "Race-track fluxgate with adjustable feedthrough" Sensors and Actuators A: Physical, 85(1):227-231.
- [9] Kubik, J. ve Ripka, P. (2008) "Racetrack fluxgate sensor core demagnetization factor" Sensors and Actuators A: Physical, 143(2):237-244.
- [10] R. H. Koch ve J. R. Rozen (2001) "Low-noise flux-gate magnetic-field sensors using ring- and rodcore geometries," Applied Physics Letters, 78(13):1897-1899.
- [11] Kubík, J., ve Ripka, P. (2008). "Racetrack fluxgate sensor core demagnetization factor" Sensors and Actuators A: Physical, 143(2):237-244.
- [12] Can, H., ve 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.
- [13] Ripka, P. (2004). "Biomedical Applications of Fluxgate Sensors" In Progress in Electromagnetic Research Symposium 28-31.

- [14] Ripka, P., ve Navratil, P. (1997). "Fluxgate sensor for magnetopneumometry", *Sensors and Actuators A: Physical*, 60(1-3):76-79.
- [15] Özerin, E., (2008). Elektrodepozisyon Tekniğı ile Büyütölen CoFeCu Filmlerin Yapısal, Manyetik ve Manyetodirenç Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, BÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
- [16] Serway ve Beichner(2000). Fen ve Mühendislik İçin Fizik, 2.Cilt, Beşinci Baskı, Palme Yayıncılık, Ankara.
- [17] Dokuz Eylül Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliğı Ders Notları 9, Manyetik Özellikler, http://web.deu.edu.tr/metalurjimalzeme/pdf/mmm2002_Malzeme2/DERS9.pdf, 23 Ekim 2016.
- [18] The Worlds of David Darling, Encyclopedia of Science, Hysteresis and Hysteresis Loops, http://www.daviddarling.info/encyclopedia/H/hysteresis_loop.html, 11 Mart 2016.
- [19] Zorlu, Ö., (2008). Orthogonal Fluxgate Type Magnetic Microsensors With Wide Linear Operation Range,Doktora Tezi, Bilim ve Teknoloji Mühendislik Faköltesi Lozan.
- [20] Ripka, P., ve Janosek, M. (2010). "Advances in magnetic field sensors" *IEEE Sensors Journal*, 10(6):1108-1116.
- [21] Macintyre, S. A. (2003). Electrical Measurement, "Signal Processing and Displays, Magnetic Field Measurement", 12-1:228-258 CRC Press LLC, Virginia.
- [22] Mahdi, A. E., Panina, L., ve Mapps, D. (2003). "Some new horizons in magnetic sensing: high-T c SQUIDS, GMR and GMI materials" *Sensors and Actuators A: Physical*, 105(3), 271-285.
- [23] Coroli, I. (2016). Excitation Unit for Orthogonal Fluxgate with DC Bias Flipping, Lisans Bitirme Tezi, Elektrik Mühendisliğı Bölümü, Prague.
- [24] Yağılıdere, İ. (2010). Fluxgate Tipi Hassas Manyetik Sensör Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Elektronik ve Haberleşme Müh.,İstanbul
- [25] Akkaya Oy, S., Demirtaş, M., ve Aydın, O. (2015). Manyetik Alan Ölçümleri için Hall Effect Sensörlü Gaussmetre Tasarımı ve Uygulaması. *Afyon Kocatepe University Journal of Science and Engineering*, 15(3).
- [26] Resistor Guide, Magneto resistor, <http://www.resistorguide.com/magneto-resistor/> , 3 Eylül 2016.
- [27] Zhou, L. Magnetic Sensors and Logic Gates, <http://slideplayer.com/slide/5070113/> , 31 Ekim 2016.
- [28] Caruso, M. J. ve Withanawasam, L. S. (1999). "Vehicle detection and compass applications using AMR magnetic sensors", In *Sensors Expo Proceedings (Vol. 477, p. 39)*.

- [29] Ripka, P. (2003). "Advances in fluxgate sensors", Sensors and Actuators A:Physical, 106(1):8-14.
- [30] Evans, K., (2006), Fluxgate Magnetometer Explained, <http://www.invasens.co.uk/FluxgateExplained.PDF>, 23 Ekim 2016.
- [31] Butta, M., (2012).Magnetic Sensors–Principles and Applications Dr Kevin Kuang (Ed.),ISBN:978-953-51-0232-8, <http://cdn.intechopen.com/pdfs/30942/InTech-Orthogonalfluxgates.pdf>, 16 Nisan 2016.
- [32] Erickson, L., Terrestrial Planet Exploration Spacecraft, http://pages.erau.edu/~ericksol/courses/sp200/terrestrial_planet_exploration.html, 25Nisan 2016.
- [33] The Minitab Blog, How High Should R-squared Be in Regression Analysis? <http://blog.minitab.com/blog/adventures-in-statistics-2/how-high-should-r-squared-be-in-regression-analysis>, 5 Temmuz 2016.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Emel ÖZKÖK
Doğum Tarihi ve Yeri : 31.10.1983, İstanbul
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : emelkucuk2008@hotmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Fizik Öğretmenliği	İstanbul Üniversitesi	2010
Lisans	Fizik	İstanbul Üniversitesi	2008
Lise	Fen	Kemal Hasoğlu Lisesi	2001

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2015- ...	Çevre Koleji	Fen Bilimleri Öğretmenliği
2014-2015	Okan Koleji	Fizik Öğretmenliği
2012-2014	Gökkuşığı Koleji	Fizik Öğretmenliği

YAYINLARI

Makale

1. Özkök, E., Can, H., İnanır, F. ve Topal, U. (2016). "A Comparative Study for Optimization of Sensitivity and Noise Levels in Race-Track Sensors", Journal of Superconductivity and Novel Magnetism.

Bildiri

1. Özkök, E., Can, H., İnanır, F., ve Topal, U., A Comparative Study for Optimization of Sensitivity and Noise Levels in Race-Track Sensors. 5th International Conference on Superconductivity and Magnetism, 24 - 30 Nisan 2016, Fethiye, Turkey.

Proje

1. 113F192 nolu TÜBİTAK Projesi, Düşük Manyetik Alan Algılama İçin Hızlı Söndürmeli Manyetik Alaşım Geliştirme, 2015.