

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DEPREM HABERCİSİ OLARAK BİLİNER ULTRA
DÜŞÜK FREKANSLARDAKİ MANYETİK
ANOMALİLERİN TESPİTİ İÇİN ARAMA BOBİNLİ
MANYETOMETRE GELİŞTİRİLMESİ

Ahmet Enes YILDIRIM

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektronik ve Haberleşme Anabilim Dalı

Haberleşme Programı

Danışman

Prof. Dr. Nurhan TÜRKER TOKAN

Temmuz, 2025

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DEPREM HABERCİSİ OLARAK BİLİLEN ULTRA DÜŞÜK
FREKANSLARDAKİ MANYETİK ANOMALİLERİN TESPİTİ
İÇİN ARAMA BOBİNLİ MANYETOMETERE
GELİŞTİRİLMESİ**

Ahmet Enes YILDIRIM tarafından hazırlanan tez çalışması 02.07.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik ve Haberleşme Anabilim Dalı, Haberleşme Programı YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Nurhan TÜRKER TOKAN
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Nurhan TÜRKER TOKAN, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Ahmet Serdar TÜRK, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Sena Esen BAYER KESKİN, Üye
Kırklareli Üniversitesi

Danışmanım Prof. Dr. Nurhan TÜRKER TOKAN sorumluluğunda tarafımda hazırlanan Deprem Habercisi Olarak Bilinen Ultra Düşük Frekanslardaki Manyetik Anomalilerin Tespiti için Arama Bobinli Manyetometre Geliştirilmesi başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Ahmet Enes YILDIRIM

İmza



Bu çalışma, “1001 Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projelerini Destekleme Programı 123F249 numaralı” ve “Yeni Tasarım Arama Bobinli Manyetometre ile Deprem Habercisi Olarak Bilinen ULF Manyetik Anomalilerin Tespiti” başlıklı proje ile desteklenmiştir.



AILEME

TEŐEKKÖR

Yüksek lisans tezi olarak hazırladığım bu çalışma, TUBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME) Manyetik Laboratuvarında 123F249 numaralı proje kapsamında gerçekleştirilmiştir. Projeyi destekleyen TUBİTAK'a,

Yüksek lisans çalışmam sürecinde göstermiş olduğu emek ve yardımlarından dolayı değerli hocam Prof. Dr. Nurhan TÖRKER TOKAN'a,

Tez süreci boyunca, bilgi, destek ve yardımlarından dolayı laboratuvar hocalarım; Dr. Lev DOROSINSKY, Doç. Dr. Hüseyin SÖZERİ ve Doç. Dr. Uğur TOPAL'a, tez boyunca gerçekleştirilen elektronik ürünlerin iyileştirmeleri konusunda destek veren Yücel DENİZ'e,

Son olarak hayatımın her anında destek olan sevgili ailem, annem Fatma YILDIRIM'a, babam Mustafa YILDIRIM'a, ve ablam Güleyfe Beyza YILDIRIM'a sevgi ve teşekkürlerimi sunuyorum.

Ahmet Enes YILDIRIM

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	viii
KISALTMA LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ	x
ÖZET	xii
ABSTRACT	xiv
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	7
1.3 Hipotez	8
2 MANYETOMETRE İLE ULF MANYETİK ANOMALİLERİN TESPİTİ İÇİN CİHAZ TASARIMI	9
2.1 Giriş	9
2.2 Sensör Çalışma Prensibi	10
2.3 Kullanılacak Olan Çekirdeklerin Hazırlanması	11
2.4 Kasnakların Tasarımı	13
2.5 Arama Bobini Manyetometresi için Teknik Detaylar	15
2.5.1 Arama Bobini Manyetometre Sensörü	15
2.5.2 Ön Yükselteç Devre Tasarımı	16
2.5.3 Analog Devre Tasarımı	18
2.5.4 Elektronik Bileşenler için PCB Tasarımı	22
2.5.5 Analog Dijital Dönüştürücü – ADC	24
2.5.6 Kontrol Merkezi	25
3 MANYETOMETRE İLE ULF MANYETİK ANOMALİLERİN TESPİTİ İÇİN PROTOTİP ÜRETİM VE BİLEŞENLERİN TESTLERİ	26
3.1 Üretimi Gerçekleştirilen Sensörler	26
3.1.1 Nüvesiz (Plastik) Sensör Üretimi	26
3.1.2 Silindir Nüveli Sensör Üretimi	27
3.1.3 Katmanlı Nüveli Sensör Üretimi	27
3.2 Nüveler için Yapılan Test Ortamı	28
3.3 Nüveler için Yapılan Testler	29

3.3.1	Test 1: Sabit Gerilim – Sabit Frekans Altında İndüklenen Voltaj Ölçümleri.....	30
3.3.2	Test 2: Sabit Gerilim Altında Değişken Frekanslarda İndüklenen Voltaj Ölçümleri.....	32
3.3.3	Test 3: Sabit Frekans Altında Değişken Gerilimlerde İndüklenen Voltaj Ölçümleri.....	34
3.3.4	Test 4: Gürültü Analizi için Ölçümler.....	35
3.3.5	Test 5: Hassasiyet Analizi için Ölçümler.....	39
3.4	Yapılan Testler Neticesinde Nüve Seçimi	42
3.5	Elektronik Bileşenlerin Prototip Üretimi	43
4	ELEKTRONİK BİLEŞENLER VE SENSÖRLERİN ENTEGRASYONU	49
4.1	Test Düzenegi	49
4.2	Test Sonuçları	52
5	SONUÇ	53
	KAYNAKÇA	55
	TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	59

SİMGE LİSTESİ

G	Amfinin Kazancı
N	Çekirdek Sarım Sayısı
R	Direnç
E	Elektrik Alan Vektörü
k	Filtre Frekans Tepkisinin Katsayısı
H	Filtre Kazancı
ω_c	Filtre Kesim Frekansı
f_0	Filtre Merkez Frekans
μ_r	Göreceli Manyetik Geçirgenlik
μ_0	Havanın Geçirgenlik Sabiti
Q	Kalite Faktörü
C	Kapasite
ϕ_B	Manyetik Akı
B	Manyetik Alan Yoğunluk Vektörü
μ	Manyetik Geçirgenlik
V	Voltaj

KISALTMA LİSTESİ

AC	Alternatif Akım
ADC	Analog Dijital Dönüştürücü
SCM	Arama Bobin Manyetometre
PCB	Baskı Devre Kartı
DC	Doğru Akım
EMK	Elektromanyetik Kuvvet
Hz	Hertz
mHz	Mili Hertz
cm	Santimetre
ULF	Ultra düşük Frekans

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Deprem tespiti için kayıt altına alınan verinin zamanla değişimi (a) anomali olmayan durum; (b) anomalilerin başladığı durum; (c) deprem günü.....	6
Şekil 2.1 Arama bobini manyetometresi temel diyagramı	10
Şekil 2.2 Çekirdek üzerine bobin sarımı ve voltaj oluşumunun diyagramı.....	10
Şekil 2.3 Arama bobini için silindir manyetik nüve; (a) silindir nüveye üstten bakış, (b) silindir nüveye yanda bakış	11
Şekil 2.4 Arama bobini için nüvesiz tasarım üstten bakış.....	12
Şekil 2.5 Katmanlı nüveli arama bobini için levhalar; (a) üstten bakış, (b) yandan bakış	12
Şekil 2.6 Birleştirilen levhaların tamamlanması ile nüvenin tamamlanması; (a) nüveye yandan bakış, (b) nüveye üstten bakış.....	13
Şekil 2.7 Arama bobini için kasnak tasarımları; (a) kasnak üstten bakış, (b) kasnak yandan bakış.....	14
Şekil 2.8 Üretimi tamamlanan silindir ve katmanlı nüveli tasarımlar için kasnaklar; (a) silindir kasnak üstten bakış, (b) katmanlı tasarım için genel bakış	14
Şekil 2.9 Sistem tasarım diyagramı	15
Şekil 2.10 Ön yükselteç devre şeması	16
Şekil 2.11 Ön yükselteç devresinin şematik ve simülasyon sonuçları; (a) şematik tasarım, (b) zaman uzayındaki simülasyon sonucu.....	17
Şekil 2.12 Analog devrenin sistem akış diyagramı	18
Şekil 2.13 Sallen-Key filtre topolojisi	19
Şekil 2.14 0.75- 2 Hz için bant geçiren filtre tasarımı.....	21
Şekil 2.15 Bant geçiren filtre simülasyon sonuçları; (a) zaman uzayındaki filtre çıkış sonucu, (b) frekans uzayındaki filtre çıkış sonucu	22
Şekil 2.16 Ön yükselteç devresi PCB tasarımı	23
Şekil 2.17 Analog elektronik devresi PCB tasarımı	24
Şekil 2.18 NI-9205 ADC modülü.....	25
Şekil 3.1 Üretimi tamamlanan nüvesiz arama bobini; (a) nüvesiz arama bobini, (b) arama bobini için sarılmış kasnak.....	26
Şekil 3.2 Kasnakları bağlanmış silindir nüveli arama bobini.....	27
Şekil 3.3 Kasnaklı nüve tasarımı için arama bobini; (a) manyetik levhalar ve boş kasnaklar, (b) kasnakların katmanlı nüveye geçirilmiş hali.....	28
Şekil 3.4 Test ortamı için akış diyagramı	28
Şekil 3.5 Manyetik arama bobini için test ortamı.....	29

- Şekil 3.6** Sabit gerilim ve sabit frekans altında indüklenen voltaj değerleri; (a) 10mHz frekansında değişimler, (b) 100mHz frekansında değişimler, (c) 1Hz frekansında değişimler, (d) 5Hz frekansında değişimler**31**
- Şekil 3.7** Sabit gerilim ve değişken frekanslar altında indüklenen voltajlar; (a) 1mHz-100mHz frekans aralığındaki değişimler, (b) 100mHz-1Hz frekans aralığındaki değişimler, (c) 1Hz-10Hz frekans aralığındaki değişimler, (c) 1mHz-30Hz frekans aralığındaki değişimler.....**33**
- Şekil 3.8** Sabit frekans – değişken gerilimler altında indüklenen voltajlar; (a) 10mHz frekansında değişimler, (b) 100mHz frekansında değişimler, (c) 1Hz frekansında değişimler, (d) 5Hz frekansında değişimler**35**
- Şekil 3.9** Gürültü analizi için farklı frekanslarda ölçümler; (a) 43mHz frekansındaki değişimler, (b) 110mHz frekansındaki değişimler, (c) 750mHz frekansındaki değişimler, (d) 2Hz frekansındaki değişimler.....**37**
- Şekil 3.10** Manyetik alanının zamanla değişimi; (a) 43mHz frekansındaki değişimler, (b) 110mHz frekansındaki değişimler, (c) 750mHz frekansındaki değişimler, (d) 2Hz frekansındaki değişimler**39**
- Şekil 3.11** Hassasiyet ölçümleri için farklı gerilimlerin verilmesi; (a) 43mHz frekansındaki değişimler, (b) 110mHz frekansındaki değişimler, (c) 270mHz frekansındaki değişimler, (d) 1Hz frekansındaki değişimler**41**
- Şekil 3.12** Hassasiyet ölçümlerinin dış manyetik alan ile değişimi; (a) 43mHz frekansındaki değişimler, (b) 110mHz frekansındaki değişimler, (c) 270mHz frekansındaki değişimler, (d) 1Hz frekansındaki değişimler**42**
- Şekil 3.13** Prototip üretimi gerçekleştirilen baskı devre kartlarının dizgisiz hali; (a) analog elektronik devresi, (b) ön yükselteç devresi.....**44**
- Şekil 3.14** Prototip üretimlerin dizgisi yapılmış hali; (a) analog elektronik devresi, (b) ön yükselteç devresi**45**
- Şekil 3.15** Baskı devre kartlarının test düzeneği**476**
- Şekil 3.16** 3Hz frekansı için simülasyon ve test sonuçları; (a) simülasyon sonucu, (b) üretimden gelen PCB test sonucu.....**47**
- Şekil 3.17** 1.1Hz frekansı için simülasyon ve test sonuçları; (a) simülasyon sonucu, (b) üretimden gelen PCB test sonucu.....**47**
- Şekil 4.1** Elektronik bileşenler ile sensörlerin entegrasyonu ve test ortamı**49**
- Şekil 4.2** Sistem entegrasyon sonuçları; (a) birinci filtre çıkışı, (b) ikinci filtre çıkışı, (c) üçüncü filtre çıkışı, (d) dördüncü filtre çıkışı.....**51**

Deprem Habercisi Olarak Bilinen Ultra Düşük Frekanslardaki Manyetik Anomalilerin Tespiti için Arama Bobinli Manyetometre Geliştirilmesi

Ahmet Enes YILDIRIM

Elektronik ve Haberleşme Anabilim Dalı

Haberleşme Programı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Nurhan TÜRKER TOKAN

Bu tez çalışmasında depremlerin önceden tahmin edilmesine yönelik olarak, Dünya'nın manyetik alanının ölçümüne dayalı yeni bir yöntem geliştirilmesi hedeflenmiştir. Dünya'nın manyetik alanı, DC bileşeninin yanı sıra düşük frekanslı AC bileşenler de içerir. Özellikle 1 mHz ile birkaç Hz arasında değişen ultra düşük frekans (ULF) aralığındaki manyetik alan büyüklüğünün, güçlü depremlerden önce önemli ölçüde artabileceği gözlemlenmiştir. Ancak, depremlerin değişken doğası ve yeterli gözlemsel istatistiklerin bulunmaması nedeniyle, ULF manyetik alanındaki değişimler ile yaklaşan depremler arasında kesin bir ilişki kurulamamıştır.

ULF manyetik alanı, Arama Bobinli Manyetometresi (SCM) adı verilen bir cihazla ölçülmektedir. SCM, değişken manyetik alanların bir sargı bobininde indüklediği voltajı tespit eder. Hassasiyetin artırılması amacıyla, bobin genellikle yüksek manyetik geçirgenliğe sahip bir manyetik nüve üzerine sarılmaktadır. Bu tez çalışmasında farklı nüve tasarımlarıyla bir SCM geliştirilmesine yönelik alternatif yaklaşımlar incelenmiştir. Geliştirilen farklı tasarımlar neticesinde yapılan testler

ile en verimli olan SCM seçilmiştir. Bununla beraber ölçülen analog sinyallerin toplanması için ön yükselteç devresine ve bant geçiren filtrelere ihtiyaç vardır. Önce simülasyon ortamında ardından da uygun çizim programlarında baskı devre kartlarının tasarımı yapılmış ardından da üretilmiştir.

Üretimi tamamlanan sensörler ile devre kartlarının birlikte testleri yapılmıştır. Laboratuvar ortamında yapılan testler sonucu elde edilen veriler incelenmiş ardından saha çalışmalarının yapılması için çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Sahaya sensörlerin gömülmesi, ortamın hazırlanması ve diğer işler için planlamalar yapılmıştır. Gelecekte olası depremlerin önceden tespitine yönelik düzenli ölçümler yapılması ve sinyallerin detaylı analizlerinin gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Deprem, arama bobinli manyetometre, analog elektronik, sensör tasarımı, PCB tasarımı

Development of Search Coil Magnetometer for Detection of Ultra Low Frequency Magnetic Anomalies Known as Earthquake Precursors

Ahmet Enes YILDIRIM

Department of Electronic and Communication Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Nurhan TURKER TOKAN

In this thesis study, a new method based on measuring the Earth's magnetic field has been targeted for the early prediction of earthquakes. The Earth's magnetic field contains not only a DC component but also low-frequency AC components. In particular, it has been observed that the magnitude of the ultra-low frequency (ULF) magnetic field, ranging between 1 mHz and a few Hz, may increase significantly before strong earthquakes. However, due to the variable nature of earthquakes and the lack of sufficient observational statistics, a definitive relationship between ULF magnetic field variations and impending earthquakes has not yet been established.

The ULF magnetic field is measured using a device called a Search Coil Magnetometer (SCM), which detects the voltage induced in a coil by changing magnetic fields. To enhance sensitivity, the coil is typically wound around a magnetic core with high permeability. In this thesis study, alternative approaches for developing an SCM with different core designs have been investigated. The most efficient SCM has been selected based on tests conducted on various designs. Additionally, preamplifier circuits and band-pass filters are required to collect the measured analog signals. Initially, simulations were performed, followed by the design of printed circuit boards using appropriate software, which were subsequently produced.

The completed sensors and circuit boards were tested together, and the data obtained from laboratory tests were analyzed. Subsequently, preparations were made for field studies, including the burying of sensors, the preparation of the environment, and other related tasks. In the future, it is aimed to conduct regular measurements and perform detailed analyses of signals for the early detection of potential earthquakes.

Keywords: Earthquake, search coil magnetometer, analog electronics, sensor design, PCB design



1.1 Literatür Özeti

Doğal afetler, doğa güçlerinin beklenmedik ve şiddetli bir şekilde açığa çıkmasıyla meydana gelir. Sel, fırtına, volkanik patlama ve deprem gibi olaylar, yerleşim bölgelerinde enkazlara, can ve mal kayıplarına yol açar. Bunlar arasında özellikle depremler, yıkıcı etkileri ve belirsizlikleri nedeniyle ciddi sorunlara neden olur. Deprem tahmini, bilimsel açıdan en karmaşık ve zorlu problemlerden biri olarak kabul edilir [1].

Depremler; tektonik hareketler ya da yer kabuğunun kayması sonucunda enerji boşalmaları ve sismik dalgalanmalarla ortaya çıkar. Tanınmayan faylar üzerinde gerçekleşen bu olaylar, ilgili bölgelerin nüfusunu derinden etkileyebilir. Her ne kadar depremlerin önceden tahmin edilmesi imkânsız gibi görünse de stres transferine dayalı çalışmalar depremler hakkında önemli bilgiler sunmaktadır [2]. Ayrıca depremler birbiriyle etkileşim içindedir; araştırmalar, büyük aktif faylar veya fay sistemlerinde bir depremin stres değişiklikleri yoluyla ikinci bir sismik şokun olasılığını artırabileceğini ya da azaltabileceğini ortaya koymuştur [3]. Bu dinamikler, depremlerin oluşumunda temel bir rol oynar.

Türkiye, genç jeolojik yapısı ve tektonik özellikleri nedeniyle yüksek sismik riske sahip bir ülkedir. Bu durum, ülkede sık sık depremlerin yaşanmasına neden olur ve can kayıplarına yol açar. Yaşanan afetler, oluşum sıklığı, yıkıcı etkileri ve sonuçlarıyla adeta değişmez bir gerçeklik haline gelmiştir [4]. Bu bağlamda, bilinen bir afete karşı önceden alınan tedbirler, kaçınılmaz sonuçların önüne geçmeyi hedeflemektedir.

Literatür incelendiğinde, depremlerin önceden tahminine yönelik çok sayıda çalışma yapıldığı görülmektedir. Geçmişten günümüze uzanan bu araştırmalarda, teknolojik gelişmelerin deprem tahmini üzerinde önemli bir etkisi olduğu belgelenmiştir. Bunun yanı sıra, daha ilkel sayılabilecek yöntemler de dikkat çekmiştir; özellikle hayvan davranışlarının analizi, depremlerin habercisi olarak değerlendirilmiştir.

Farklı hayvan türlerinde gözlemlenen değişik tepkiler bilimsel çalışmalara konu olmuştur. Örneğin, bir araştırmada, kurbağaların deprem öncesi ve sonrası davranışlarında belirgin değişiklikler olduğu ve bu durumdan etkilendikleri tespit edilmiştir [5]. Bu tür bulgular, deprem tahmini için geleneksel ve modern yaklaşımların bir arada kullanılabilceğini göstermektedir.

Teknolojinin ilerlemesiyle birlikte, depremlerin önceden tespitine yönelik çeşitli yöntemler geliştirilerek kapsamlı çalışmalar yürütülmüştür. Bazı araştırmalarda, depremler öncesinde yer kabuğu hareketleri, eğim değişiklikleri, sıvı basıncı, elektrik ve manyetik alan anomalileri, radon gazı emisyonu, jeokimyasal değişimler ve sismik aktivitenin izlenmesi gibi unsurlar detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Ayrıca uydu teknolojileri ve uzaktan algılama sistemleri de bu süreçte önemli bir yer edinmiştir. Bu yöntemlerin, depremlerin tahmin edilmesinde etkili bir rol oynadığı gözlemlenmiştir [6].

Jeokimyasal anomalilerin incelenmesi üzerine gerçekleştirilen bir çalışma, toprak ve kaynak gazlarının tektonik aktiviteler ile sismik davranışlar açısından analizine odaklanmıştır. Bu araştırmada, kaynak gazlarının derin kökenli gazlarla zenginleştiği, fakat atmosferik gazların etkisinden daha az kirlendiği belirlenmiştir. Bu özellik, gazların depremlerin habercisi olarak tanımlanmasında önemli bulgular sağlamıştır [7]. Ayrıca basınç, sıcaklık ve toprak nemi gibi çevresel parametrelerin gaz çıkış süreçlerini etkilediği, dolayısıyla bu faktörlerin depremlerin önceden fark edilmesinde doğrudan rol oynadığı gözlemlenmiştir.

Sismik dalga hızlarındaki değişiklikleri inceleyen bir başka çalışma ise yer kabuğundaki stres birikiminin bu hızları etkilediğini ortaya koymuştur. Bu değişimlerin ayrıntılı analizi, depremlerin önceden belirlenmesinde değerli ipuçları sunabileceği sonucuna ulaşmıştır [6].

Bunun yanı sıra, başka bir araştırma volkanik aktivitelerin depremlerin habercisi olabileceğini göstermiştir. Bu çalışmada, volkanik faaliyetlerin başlangıcı ile depremler arasındaki zamansal ilişki incelenmiş ve bu iki olgunun birbiriyle bağlantılı olduğu ortaya konmuştur [8].

Depremlerin önceden tahminine yönelik bir diğer çalışma ise radar yöntemlerinin kullanımına odaklanmıştır. Bu araştırmalarda, radar teknolojisiyle yer kabuğundaki

milimetrik düzeydeki değişimlerin izlenmesi, depremlerden önceki döneme dair sinyaller verebileceği sonucunu ortaya koymuştur [9], [10].

Yeryüzü sıcaklığının izlenmesi de depremlerin öngörülmesinde dikkate değer bir yöntem olarak öne çıkmıştır. Yapılan çalışmalar, büyük depremler öncesinde termal anomalilerin ortaya çıktığını ve bu anomalilerin deprem habercisi olarak önemli bilgiler sunduğunu göstermiştir [11], [12]. Kızılötesi verilerinden elde edilen bu termal değişimler, bulutlu veya sisli hava gibi zorlu koşullarda bile izleme imkânı sağladığı için depremlerin önceden tespitinde kullanılan bir yöntemdir [13].

Deprem öncesinde önemli ipuçları sunan bir başka araştırma konusu ise elektrik ve manyetik alan değişimlerinin analizidir. Bu yönetime odaklanan çalışmalar, literatürde daha önce de ele alınmış olup, yer kabuğundaki elektromanyetik anomalilerin depremlerle ilişkisini incelemeyi amaçlamıştır. Ancak bu yaklaşımın uygulanması, çok büyük miktarda verinin toplanmasını ve istatistiksel olarak analiz edilmesini gerektirmektedir.

Bu bağlamda, yer kabuğunun elektrik alan sinyalleri deprem tahmini açısından önemli bir potansiyel taşımaktadır. Tektonik hareketler ve yer kabuğunun kayması sonucu açığa çıkan enerjiden kaynaklanan bu sinyallerin, depremden önceki dönemdeki gerilimlerinde gözlemlenen değişiklikler, depremlerin öngörülmesinde kayda değer bir bilgi kaynağı sunmaktadır [14].

Benzer şekilde bir başka çalışmada ise Dünya'nın elektrik alan değerinin deprem öncesi dönemde sinyal yoğunluğunda artış gösterdiği tespit edilmiştir. Verilerin işlenmesi ve anlamlı hale getirilmesi amacıyla analizler yapılmış, bu analizler sonucunda enerjinin büyüklüğü hesaplanarak depremin şiddeti hakkında yeni bilgiler elde edilmiştir [15].

Yine elektrik alan değişimlerinin incelendiği bir başka çalışmada, deprem öncesi anormal elektrik alan modellerinin belirlenmesi ve toplanan verilerin anlamlandırılmasına yönelik araştırmalara odaklanılmıştır. Bu kapsamda, geliştirilen elektrik alan problemleriyle sürekli ölçümler yapılmış ve bu sinyallerin sismik dalgalarla olan ilişkisi detaylı bir şekilde incelenmiştir [16], [17].

Literatürde yine bu alanda yapılan bir araştırmada, büyük bir depremin ardından uydu verileriyle ultra düşük frekans bandında belirgin anomaliler tespit edilmiştir.

Merkez üssü çevresindeki frekans aralığında sinyal-gürültü oranlarının, deprem öncesi ve sonrası dönemde farklı değişimler sergilediği gözlemlenmiştir [18].

Manyetik alanın analizi, deprem tahmini için bir başka yöntem olarak literatürde geçmişten günümüze uzanan çeşitli çalışmalarla ele alınmıştır. Bazı araştırmalar yalnızca yazılımsal analizlere odaklanırken, diğerleri sistemi baştan sona tasarlamayı içermektedir. Bu kapsamda, sensör tasarımı, elektronik devreler ve yer istasyonu gibi unsurları bir araya getiren bütüncül çalışmalar da bulunmaktadır [19]. Manyetik alanın ölçümü için ise arama bobini manyetometre, fluxgate, optik pompalı, nükleer devrim, manyetostriktif, magnetodiode ve manyetotransistör gibi çok sayıda teknoloji alternatifi geliştirilmiştir [20].

Bu sensör tasarımlarından biri olan “search coil magnetometer” (SCM) ya da Türkçe adıyla arama bobinli manyetometre, sistemin oluşturulmasında önemli bir rol üstlenmektedir. Bu tasarım, manyetik alanın hassas bir şekilde ölçülmesini hedeflemektedir. Tarihsel açıdan bakıldığında, manyetik alan ölçümünde kullanılan ilk sensör, navigasyon pusulası olarak bilinen manyetik iğne olmuştur [21].

Arama bobinli manyetometrelerin çalışma prensibi, Faraday’ın indüksiyon yasasına dayanır. Bu yasaya göre, manyetik alanın zamanla değişmesi durumunda iletken bir bobin içerisinde elektromotor kuvvet (EMK) indüklenir. EMK, manyetik akı değişim hızıyla orantılı olarak ortaya çıkar.

Arama bobinli manyetometrelerin bobin yapıları, genellikle bir manyetik nüve (çekirdek) etrafına ince bir telin çok sayıda sarım oluşturacak şekilde sarılmasıyla tasarlanır. Cihazın hassasiyetini artırmak amacıyla nüve, yüksek geçirgenliğe sahip malzemelerden seçilir. Ancak nüve tasarımları, uygulamaya bağlı olarak farklılık gösterebilir. Tasarımlarda hassasiyet, gürültü oranı ve maliyet gibi parametreler, cihazın geliştirilmesinde belirleyici rol oynar. Örneğin, katmanlı veya silindirik mu-metal nüveler farklı hassasiyet seviyeleri sunarken, nüvesiz tasarımlar düşük maliyet ve azaltılmış gürültü seviyeleri sağlayabilir. Bu faktörler değerlendirildiğinde, projenin ihtiyaçlarına göre uygun tasarımın seçilmesi önem kazanır.

Arama bobinli manyetometreler, düşük frekanslı değişken manyetik alan değişimlerini ölçmek için tasarlanmış önemli araçlardır. Bu cihazlar, genellikle 1 mHz ile birkaç Hz arasındaki frekans aralığında çalışır ve bu aralık ultra düşük

frekans (ULF) olarak tanımlanır [22]. Deprem habercisi sinyaller ve tektonik hareketlerle ilişkili frekanslar da bu bölgede yer alır. Söz konusu aralıkta tespit edilen anomaliler, büyük depremlerin öncü göstergeleri olarak kabul edilmektedir [23], [24].

Arama bobinli manyetometreler, endüstride jeomanyetik araştırmalar, maden aramacılığı gibi yer bilimleri uygulamalarının yanı sıra depremlerin önceden tahminine yönelik çalışmalarda tektonik hareketlerin analizi ve uzay ortamındaki manyetik alanların incelenmesi gibi alanlarda kullanılarak önemli bir rol üstlenmektedir [25], [26].

Uzay deneylerinde, düşük manyetik alanları ölçme yeteneği ve dayanıklılığı nedeniyle arama bobinli manyetometreler sıklıkla tercih edilmektedir [27]. Özellikle güneş altı bölgelerde düşük frekanslı manyetik alan ölçümleri için kullanılan bu cihazlar, Dünya'nın manyetik alanının yerel veya küresel dönüşümlerini tespit etme kapasitesiyle öne çıkar [28].

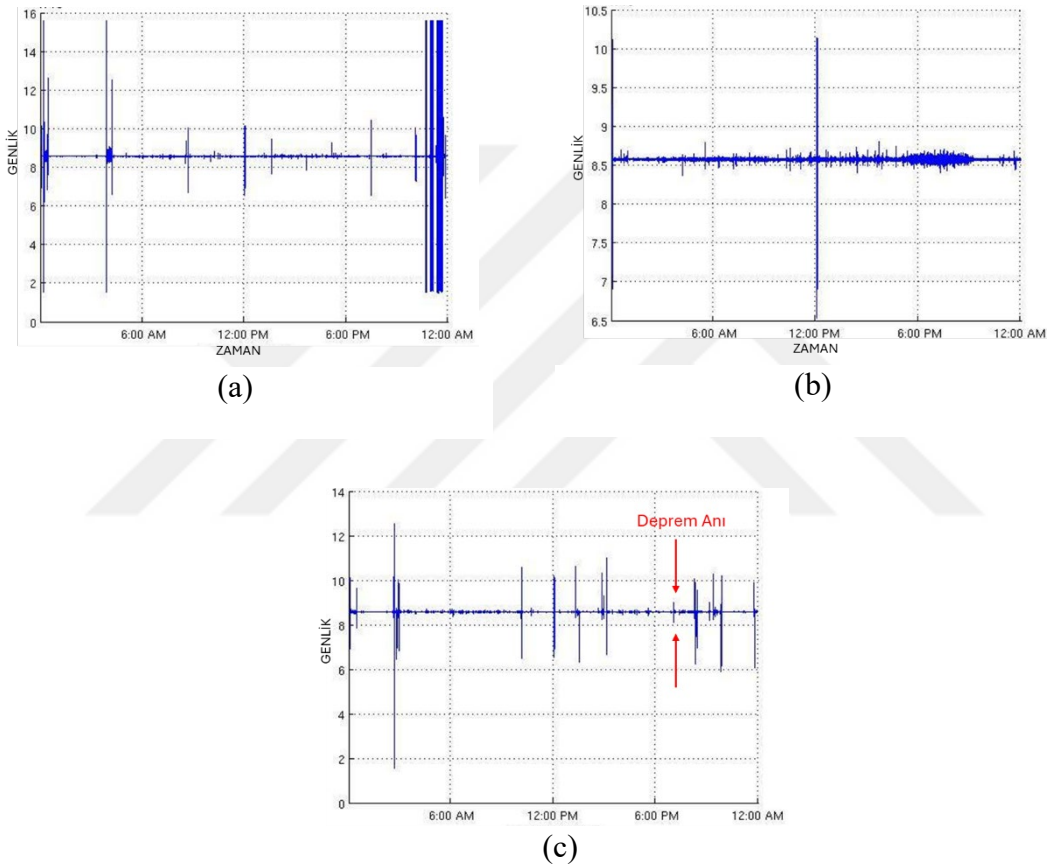
Dünya'nın manyetik alanı genellikle sabit gibi kabul edilse de yalnızca DC bileşeninden ibaret olmayıp aynı zamanda düşük frekanslı bir AC bileşene de sahiptir. Bu bileşen, ultra düşük frekans (ULF) aralığındaki değişimleri yansıtır ve bu değişimlerin tektonik kaynaklı olduğu düşünölmektedir. Ancak, frekans spektrumunda yer alan düşük frekansların büyük ölçüde zayıflaması nedeniyle, yalnızca ULF dalgaları belirgin bir şekilde gözlemlenmektedir [29].

Tektonik hareketler sırasında stres altındaki kayaların, laboratuvar ölçümleriyle çeşitli frekanslarda dalgalar yaydığı gözlemlenmiştir. Kırılan kayalar yüksek düzeyde elektrik akımı üretir ve bu akımlar yüzeye ile havaya yayılır. Kaya deformasyonunun atomların dengesini bozduğu, negatif elektronların serbest kalmasıyla pozitif yük eksiklikleri veya delikler oluşturduğu düşünölmektedir. Bu değişimler sonucunda manyetik alan ortaya çıkar; frekansların çok düşük olması nedeniyle dalga boyları oldukça yüksek olduğundan, bu sinyaller yüzeyde tespit edilebilir [30].

Literatürdeki ilk çalışmalardan biri olarak, 1989 yılında San Francisco'da 7.1 büyüklüğünde gerçekleşen deprem sırasında sinyaller kaydedilmiş, ancak o dönemde bu bulgular yeterince dikkate alınmamıştır. Daha sonra aynı bölgede kurulan yeni bir sistemle düzenli ölçümler yapılmıştır. Bu sistem, yeni bir

depremden iki hafta önce 10 mHz ULF sinyalinin arka plan gürültüsünün 20 katına, depremden üç saat önce ise 60 katına yükseldiğini tespit etmiştir. Deprem sonrasında ise artçı şoklarla birlikte sinyal bir süre daha yüksek kalmış, ardından kaybolmuştur [30].

Literatüre giren bir başka çalışma, Amerika’da bir deprem öncesinde sinyallerin kaydedilmesi ve bu verilerin diğer parametrelerle karşılaştırılmasını kapsamaktadır. Araştırmada, “normal gün” ile aktivitenin gözlemlendiği “aktif gün” arasındaki farklar analiz edilmiştir [31].



Şekil 1.1 Deprem tespiti için kayıt altına alınan verinin zamanla değişimi [31] (a) anomali olmayan durum; (b) anomalilerin başladığı durum; (c) deprem günü

Şekil 1.1.(a)'da normal günde anomalilerin olmadığı zamanda kaydedilmiş verileri göstermektedir. Şekil 1.1.(b)'de depremden 2 hafta önce kaydedilen ve anomalilerin başlangıcı olan günü göstermektedir. Şekil 1.1.(c)'de ise deprem zamanındaki kayıt altına alınana sinyalleri göstermektedir. “Ok” ile gösterilen sinyal deprem olduğu anı göstermektedir [31].

2009 yılında yayımlanan bir başka çalışmada, Hindistan'ın Agra bölgesinde kırsal bir alanda, üç bileşenli arama manyetometresi kullanılarak 10 mHz ile 30Hz frekans aralığındaki ultra düşük frekanslı (ULF) sinyaller, 7 ay boyunca gece saatlerinde ölçülmüş ve analiz edilmiştir. 15Hz'e kadar olan veriler incelendiğinde, 7 farklı ULF anomali sinyali belirlenmiştir. Bu anomalilerin istatistiksel analizi sonucunda, 5'inin yer altı kaynaklı, diğer 2'sinin ise iyonosfer ve manyetosfer kökenli olduğu saptanmıştır. İlk anomaliler değerlendirildiğinde, bölgeden uzak mesafelerde gerçekleşen ve büyüklükleri 4.5'in üzerinde olan bazı depremlerle ilişkileri ortaya konmuştur [32].

Bir başka çalışmada ise Hindistan'ın Agra bölgesine yerleştirilen bir sistemle, 2010-2017 yılları arasını kapsayan ve istatistiksel analizler sunan bir inceleme gerçekleştirilmiştir. Bu dönemde, Endonezya ve Pakistan'da sırasıyla 8.5 ve 7.4 büyüklüğündeki depremlerden yaklaşık 9-16 gün önce anomaliler tespit edilmiştir. Bu anomaliler veya patlamalar, 60mHz ile 100mHz frekans aralığında gözlemlenmiş ve depremlerle ilişkilendirilmiştir [33].

1.2 Tezin Amacı

Tezin amacı, depremlerden önce oluşan manyetik habercileri tespit etmek ve ULF sinyallerini kullanarak deprem tahmini olasılığını analiz etmek için Arama Bobini Manyetometreleri (SCM) ile manyetik alanları gözlemlemektir. Farklı nüve tasarımlarıyla yeni arama bobini manyetometreler kullanılarak analizlerinin yapılması hedeflenmiştir.

Tez boyunca farklı nüve tasarımlarının performansları analiz edilmiş ve en iyi sonuç veren sensör ile manyetik etkilerden etkilenmeyecek şekilde uzak bir konumda cihaz kurulumunun yapılması planlanmıştır. Üretimi gerçekleştirilen sensör ve elektronik bileşenler ile ölçümler alınması ve elektronik bileşenler üzerinde yer alan filtre devreleri ile anlamlı sinyallerin elde edilmesi ve analizlerinin yapılması planlanmıştır.

Bu çalışmalar neticesinde üretilen arama bobini manyetometresi ile ULF manyetik alan verilerinin depremlerden önce tahmini konusundaki potansiyeli araştırılarak önemli bir konuda ortaya ürün çıkarılması hedeflenmiştir.

1.3 Hipotez

Depremlerin önceden tahmin edilmesi, can ve mal kayıplarının önlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Öncesinde alınabilecek tedbirler ile oluşabilecek olumsuz durumları en aza indirmek mümkündür. Teknolojinin ilerlemesiyle depremlerin önceden tahminine yönelik birçok çalışma yapılmaktadır. Manyetik alan değişimlerinin izlenmesi, uydu ile kızılötesi izleme ya da kimyasal olarak yer kabuğunun incelenmesi gibi yöntemler ile depremin önceden tespitine yönelik projeler gerçekleştirilmiştir [6].

Bu tez çalışmasında manyetik alan değişimlerinin incelenmesi ve depremin önceden tahminine yönelik çalışmalar yapılmıştır. ULF manyetik alan ölçümleri ile yaklaşık olarak 1mHz ile 5Hz arasında bu çalışma boyunca izlenmiştir. İzlenen frekans aralıklarında meydana gelebilecek anomalilerin tespiti deprem ile ilgili bilgi verebilecektir. Bu tez çalışmasında farklı nüve tasarımlarıyla karşılaştırma yapılarak hassasiyeti en iyi olan arama bobini manyetometresinin kurulumu yapıp manyetik alandan uzak bir bölgede ölçümler alınması planlanmıştır. Ardından toplanan verilerin analizi ile doğru sinyalin elde edilmesi için çalışmalar yapılacaktır. Bu hipotez doğrultusunda, ULF manyetik alan anomalileri, deprem tahmininde kullanılabilir güvenilir göstergeler olması düşünülmektedir.

2

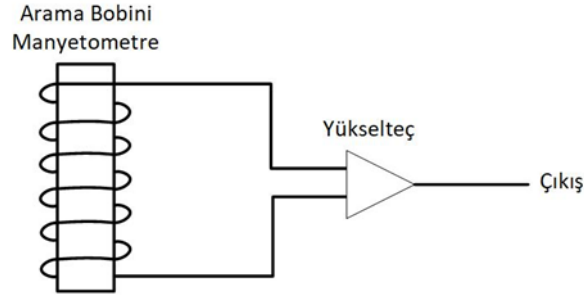
MANYETOMETRE İLE ULF MANYETİK ANOMALİLERİN TESPİTİ İÇİN CİHAZ TASARIMI

2.1 Giriş

Arama bobini manyetometresi, uzay ve yer bilimi araştırmalarında düşük frekanslı manyetik alan dalgalarını ölçmek için yaygın olarak kullanılır. Uzay fiziğinde ilgilenilen manyetik alan frekansları genellikle ultra düşük frekans (ULF) aralığında birkaç mHz'den birkaç Hz'ye yer alır ve bu frekanslar arama bobini manyetometresi ile tespit edilebilir. Bu tür manyetometre ile uzay plazmasındaki dalgaları ULF aralığında bulunması nedeniyle uzay bilimi araştırmalarında kullanılır.

Düşük frekanslı manyetik dalgaların incelenmesinde kullanılan arama bobini manyetometresi, küçük boyutlu olması, güç tüketiminde nispeten düşük seviyelerde olması ve bunun yanında frekans aralıklarının da iyi olması uzay çalışmalarında ve yer bilimlerinde kullanılmasında ön plana çıkarmaktadır [34].

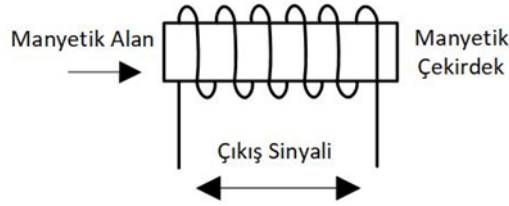
Sensör tasarımının yapısı incelendiğinde arama bobini, manyetik alanın zamanla değiştiği bobin üzerinde voltaj oluşturması için yüksek geçirgenliğe sahip bir çekirdeğin etrafına sarılan bakır telden oluşmaktadır. Çekirdek etrafına sarılan telin çıkışında indüklenen voltajı yükseltmek için amplifikatör devrelerine ihtiyaç duyulmaktadır [34]. Benzer şekilde manyetik alan yoğunluğundaki (B) ölçümlerinde kullanılan fluxgate manyetometresine göre arama bobini manyetometresi daha yüksek sinyal çözünürlüğüne ve hassasiyetle zamanla değişen manyetik alanı (db/dt) algılar. Çözünürlüğün iyileştirilmesinde; bobin sarım sayısı, çekirdek boyutu, sinyal yükseltilmesinde kullanılacak olan amplifikatör devrelerinin kazancı artırılarak arama bobinin çözünürlüğü artırılması ile düşük frekanslı manyetik alan dalgalanmalarının tespitinde önemlidir. Şekil 2.1'de yüksek geçirgenliğe sahip çekirdek üzerine sarılmış arama bobini manyetometresinin temel tasarım diyagramı ile indüklenen voltajın yükseltilmesi ve çıkışa aktarılmasının şematik tasarımları paylaşılmıştır.



Şekil 2.1 Arama bobini manyetometresi temel diyagramı

2.2 Sensör Çalışma Prensibi

Arama bobini manyetometresi, manyetik alan yoğunluğunu ve yönünü ölçen en basit manyetik alan sensörü türüdür. Çalışma prensibi Faraday Yasası'na dayanır [21], [34], [35]. Şekil 2.2'de manyetik çekirdek üzerinde akım ile manyetik alan algılanır. Bobin boyunca akı yoğunluğu değiştiğinde voltaj indüklenir.



Şekil 2.2 Çekirdek üzerine bobin sarımı ve voltaj oluşumunun diyagramı

Bu yasaya göre indüklenen gerilim, tel boyunca elektrik alanının çarpımına, yüzeydeki manyetik alanın zamanla değişimine ya da manyetik akının zamanla değişmesi ve buna bağlı olarak sarım sayısı ile çarpılması indüklenen gerilimi vermektedir [35]. Denklem (2.1)'de B manyetik alanı, ϕ_B manyetik akıyı, E elektrik alanı, N çekirdek üzerindeki sarım sayısını ifade etmektedir. İndüklenen gerilimi arttırmak ve buna bağlı manyetik akı yoğunluğunu arttırmak için genellikle yüksek geçirgenliğe sahip çekirdekler kullanılmaktadır. Yüksek geçirgenlikle elde edilen avantaj, hassasiyetin ve indüklenen voltajı arttırmasını sağlamaktadır.

$$V_0 = \oint E dl = -\frac{d\phi_B}{dt} = -N \frac{d\phi_B}{dt} \quad (2.1)$$

2.3 Kullanılacak Olan Çekirdeklerin Hazırlanması

Bu tez çalışmasında, arama bobini manyetometresinin tasarımı için farklı türde nüveler ile farklı tasarımların incelemesi ve sonuçlarının karşılaştırılması bunun neticesinde en iyi performans sağlayan nüvenin seçilmesi hedeflenmiştir. Üç farklı nüve çeşidi ile karşılaştırma yapabilmek için aynı testler yapılmıştır. Bunlar; yapay nüve ya da nüvesiz tasarım, silindir manyetik nüve ve katmanlı nüve olmak üzere 3 farklı tasarımların testleri gerçekleştirilmiştir. Her çekirdek yapısının hassasiyeti, sinyal çözünürlüğü ve gürültü performansının karşılaştırılmaları yapılarak en uygun olan yapının seçilmesi planlanmıştır. Bunun sonucu olarak optimum performansa sahip arama bobini manyetometre tasarımı seçilmiştir.

Geliştirilmiş olan sensörlerin tasarımları her biri 80 cm uzunluğunda ve yaklaşık olarak 25.4 mm çapında olacak şekilde planlanmıştır. Silindir olan nüveli ve nüvesiz tasarımlar Şekil 2.3 ve Şekil 2.4'te gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 2.3 Arama bobini için silindir manyetik nüve; (a) silindir nüveye üstten bakış, (b) silindir nüveye yanda bakış

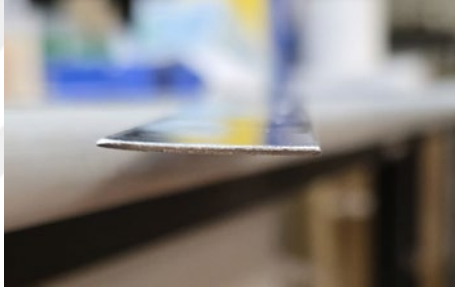


Şekil 2.4 Arama bobini için nüvesiz tasarım üstten bakış

Son tasarım olan katmanlı nüve için, Şekil 2.5’te kullanılacak ürünler gösterilmiştir. Burada yaklaşık 20 tane levhanın üst üste getirilmesiyle ve aralarında yalıtkan malzeme olacak şekilde izolasyon sağlandıktan sonra birleşmesiyle çekirdek oluşumu tamamlanmıştır.



(a)



(b)

Şekil 2.5 Katmanlı nüveli arama bobini için levhalar; (a) üstten bakış, (b) yandan bakış

Manyetik levhaların birleştirilmesinin ardından Şekil 2.6’da nüvenin oluşumu tamamlanmıştır.



(a)



(b)

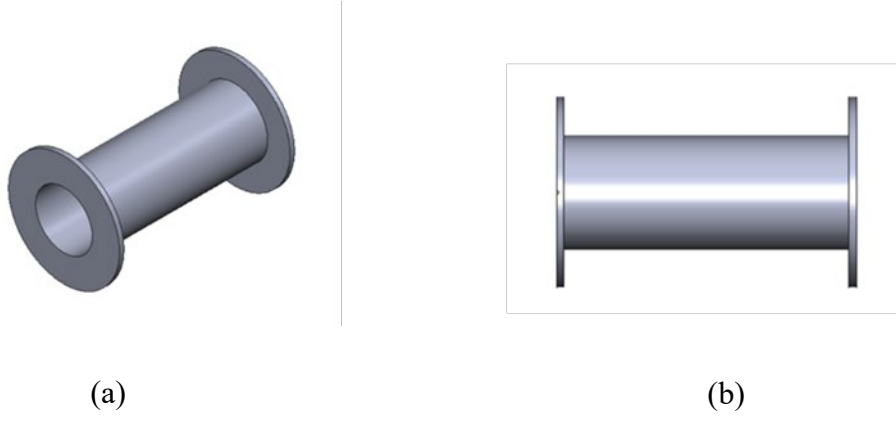
Şekil 2.6 Birleştirilen levhaların tamamlanması ile nüvenin tamamlanması; (a) nüveye yandan bakış, (b) nüveye üstten bakış

3 farklı çekirdeğin hazırlanmasının ardından kasnakların tasarımı yapılmıştır. Kasnakların çekirdeklere entegre edilmesi sonrasında arama bobini manyetometresi tamamlanmıştır.

2.4 Kasnakların Tasarımı

Elde edilen çekirdekler üzerinde manyetik alan oluşturmak için tele ihtiyaç vardır. Bu nedenle elde edilen çekirdekler üzerine sarımlar yapılmalıdır. Ancak çekirdeklere sarım yapılabilmesi zor olduğundan dolayı bunu kasnaklar üzerinde gerçekleştirerek üretim kolaylığı elde edilir.

Elde edilen çekirdeklerin uzunluğu 80 cm olması nedeniyle kasnak üretmek ve üretilen kasnaklara sarım yapılması gerekmektedir. Bunun için tasarımlar oluşturulmuştur. Silindir nüve ve katmanlı nüve için kasnak tasarımları oluşturulmuş olup üretimleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.7’de silindir kasnak tasarımları gösterilmiştir. Kasnakların uzunluğu 8 cm olacak şekilde toplam 10 adet kasnak üretimi gerçekleştirilmiştir.

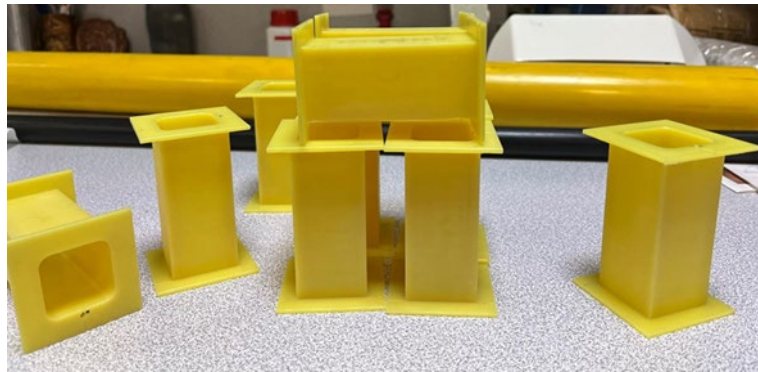


Şekil 2.7 Arama bobini için kasnak tasarımları; (a) kasnak üstten bakış, (b) kasnak yandan bakış

Şekil 2.8’de üretimi tamamlanan silindir nüveli ve katmanlı nüveli tasarımlar için kasnaklar gösterilmiştir.



(a)



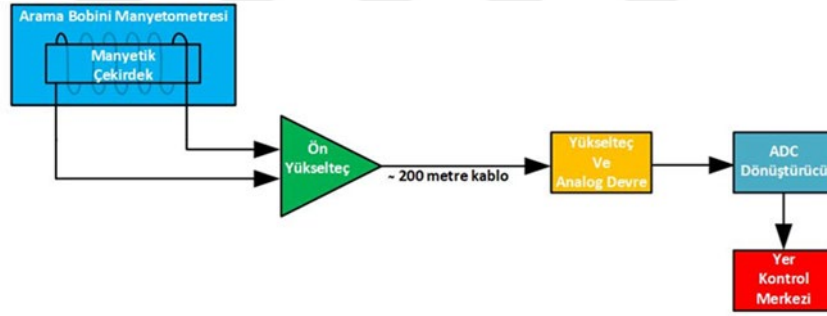
(b)

Şekil 2.8 Üretimi tamamlanan silindir ve katmanlı nüveli tasarımlar için kasnaklar; (a) silindir kasnak üstten bakış, (b) katmanlı tasarım için genel bakış

2.5 Arama Bobini Manyetometresi için Teknik Detaylar

Sistemin tamamı incelendiğinde hem süreci görmek için hem de daha kolay anlaşılması için diyagram, Şekil 2.9'da verilmiştir. Manyetik alan ölçümü için arama bobini manyetometresi, yükselteç, analog devreler ve veri toplama ve okuma bileşenlerinden oluşmaktadır. Manyetik alandan etkilenmeyecek şekilde uzak bir konumda yer alan arama bobini sensörlerden algıladığı manyetik alanı önce kendi üzerinde bulunan harici olarak tasarlanan yükselteç devresi ile alınan sinyallerin seviyesini artırır, ardından yaklaşık 200 metre kablo ile sinyalin taşınması sağlanır.

Sinyalin taşındığı nokta geçici veya sabit yer istasyonu olabilir. Burada gelen sinyaller önce kablo ve mesafe kayıplarının da önüne geçmek için harici olarak tasarlanan yükselteç ve analog devrelerden geçer. Yükseltelen sinyaller, istenilen frekans aralıklardaki çıkışları verebilmesi için filtre devrelerinden geçer. Çıkışlardan alınan analog sinyaller ekstra ürün olan analog-dijital dönüştürücüden (ADC) geçerek analizlerinin yapılması sağlanır.



Şekil 2.9 Sistem tasarım diyagramı

2.5.1 Arama Bobini Manyetometre Sensörü

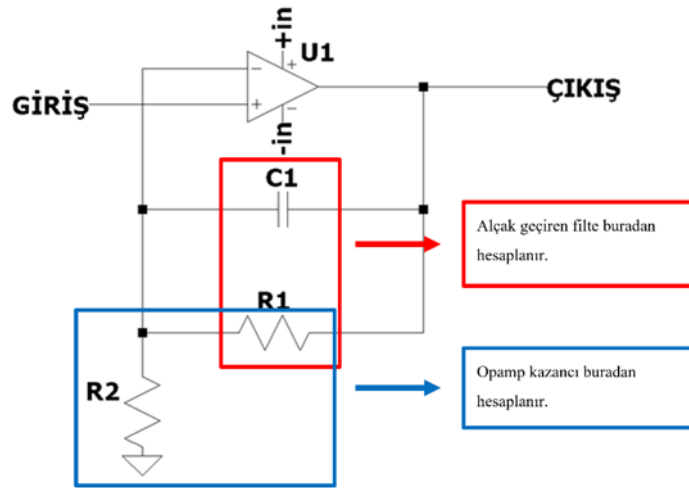
Tez kapsamında gerçekleştirilen arama bobinli manyetometre için önceki yapılan çalışmalar incelenmiş olup kullanılacak malzemelerin de üretim maliyetleri ve kullanılabilirliği incelendiğinde buna uygun olarak tasarım kriterleri belirlenmiştir.

Projede kullanılan manyetik çekirdeğin boyu 80 cm olacak şekilde ve 10 adet kasnak üzerine her biri için sarılmış yaklaşık 16 bin sarım sayısı ile toplam 160 binden fazla sarım çekirdek üzerine sarılmıştır. Sarılan 100 mikron kalınlığındaki bakır tel ile arama bobini manyetometresi tasarlanarak manyetik alan ölçümleri yapılması deprem öncesindeki sinyallerin toplanması hedeflenmiştir.

2.5.2 Ön Yükselteç Devre Tasarımı

Ön yükselteç devresi, arama bobini manyetometresi üzerinde yer alır. Ön yükselteç kullanılmasının sebebi sensörden indüklenen voltajın değerini yükseltmektir. Depremlerden önce yer kabuğundaki stresten dolayı elektronların serbest kalması nedeniyle sensör üzerinde yer alan bobinler aracılığıyla voltaj indüklenir. Faraday yasasına göre oluşan bu elektrik akımı bir manyetik alan oluşturur. Yapılan bu çalışmada indüklenen gerilim seviyesine göre analiz yapılması ön görülmektedir.

Sensörde indüklenen gerilim seviyesinin çok düşük olması nedeniyle bunun yükseltilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun için OpAmp ile yükseltme işlemi yapılmıştır. Bunun için önce LTspice programı ile benzetim yapılmıştır. Şekil 2.10'da devrede kullanılan ön yükselteç için şematik tasarımını gösterilmiştir. Burada hem aktif alçak geçiren filtre yapısı hem de yükseltme işlemi gerçekleştirilmektedir.



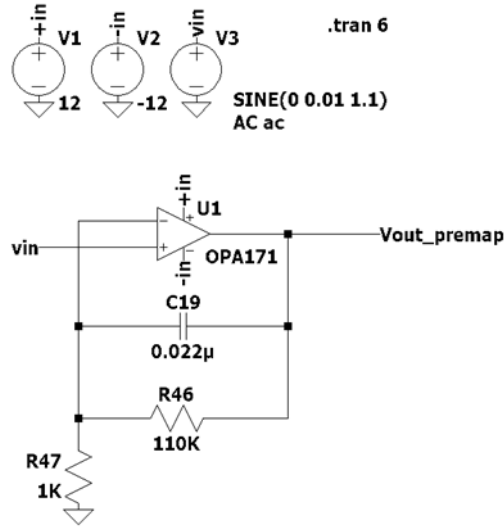
Şekil 2.10 Ön yükselteç devre şeması

Aşağıda yer alan formüller ile hem devredeki alçak geçiren filtrenin kesim frekansını hem de OpAmp kazanç değerinin hesaplanması denklemler yardımıyla bulunur. Denklem (2.2) filtrenin kesim frekansını verirken Denklem (2.3) ile amfi kazancı hesaplanmaktadır.

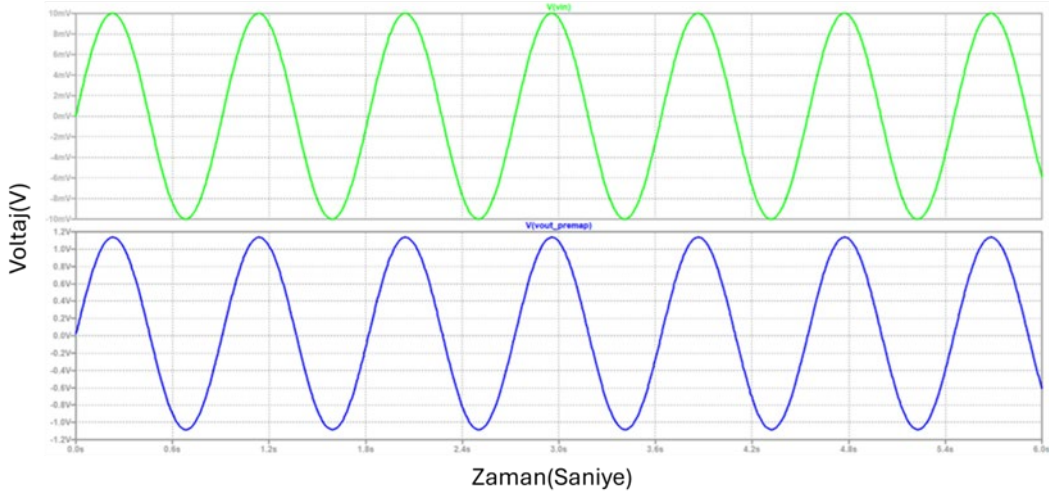
$$W_c = (2\pi f_c) = \frac{1}{RC} = f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (2.2)$$

$$G = 1 + \frac{R_1}{R_2} \quad (2.3)$$

Tez kapsamında gerçekleştirilen ön yükselteç devresi Şekil 2.11.(a)'da gösterilmiştir. Simülasyon sonuçları ise Şekil 2.11.(b)'de gösterilmiştir. Burada da görüldüğü gibi zaman uzayında incelenen grafiklerin giriş ve çıkışlarının incelenmesi sonucu girişte verilen 10mV sinyalin çıkışta yaklaşık 1.1V olduğu görülmektedir.



(a)

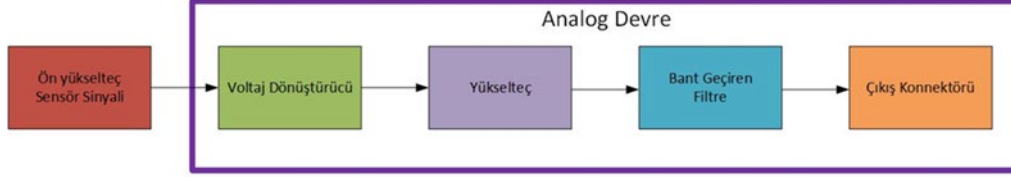


(b)

Şekil 2.11 Ön yükselteç devresinin şematik ve simülasyon sonuçları; (a) şematik tasarım, (b) zaman uzayındaki simülasyon sonucu

2.5.3 Analog Devre Tasarımı

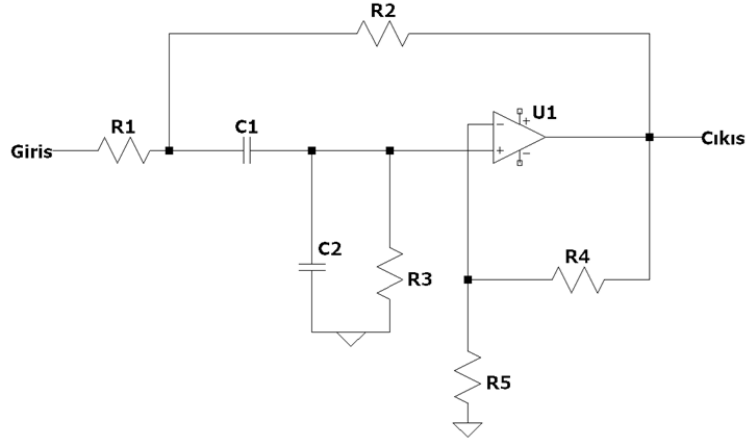
Tez kapsamında gerçekleştirilen ve üretilen analog devre içerisinde güç bağlantıları, yükselteçler sinyal konnektörleri, filtreler bulunmaktadır. Şekil 2.12’de analog devreye ait akış diyagramı bulunmaktadır.



Şekil 2.12 Analog devrenin sistem akış diyagramı

Manyetik alandan uzak bir noktada yer alan arama bobini manyetometresi yaklaşık olarak 200 metre uzaklıkta yer almaktadır. Arama bobininden yer kontrol merkezine gelecek olan sinyalin gürültülerden arındırılması ve voltaj değerinin yükseltilmesi için yükselteç devresine ihtiyaç vardır. Uygun filtrelerden geçen sinyal analog-dijital dönüştürücüye (ADC) aktarılmak üzere konnektör ile bağlantısı yapılır ve kontrol merkezine gönderilir.

Deprem sinyalinin önceden tespitinde istenilen frekans aralıklarının çok düşük olması nedeniyle bu tez çalışmasında yaklaşık olarak 1 mHz ile 5 Hz arasını ölçmek gerektiğinden dolayı analog sinyalin belli kesimlerinin incelenmesi gerekmektedir. Bu nedenle 9 adet frekans aralığının incelenmesi gerçekleştirilmiştir. İncelenmesi istenilen frekans aralıklarını elde etmek için bant geçiren filtrelere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle yapılan araştırmalar sonucu voltaj kontrollü voltaj kaynağı filtrelerinden olan, yüksek geçiş bandı kazancı sağlayan ve aktif filtrelerde kullanılan 2.dereceden Sallen-Key bant geçiren yöntemi kullanılmıştır [36], [37]. Şekil 2.13’te 2.dereceden Sallen-Key bant geçiren filtre tasarımı gösterilmektedir [38]. Sinyal girişi ve çıkışı arasındaki komponentlerin değerleri belirlenirken bazı dikkat edilmesi gereken hususlar vardır. Bunların hesaplanması birbirleriyle bağlantılı oldukları için dikkat edilmeli ve bu komponent değerlerinin piyasa bulunmaları gerektiği için başlangıç için önem arz etmektedir.



Şekil 2.13 Sallen-Key filtre topolojisi

Şekil 2.13'te verilen bant geçiren filtre topolojisi için istenilen frekans aralıklarında filtre yapılabilmesi için doğru değerlerde komponent seçimi yapılmalıdır. Bu nedenle değer hesaplamaları şu şekildedir;

F_H ve F_L bant geçiren filtrenin düşük ve yüksek kesim frekanslarını ifade etmektedir.

$$Q = \frac{\sqrt{F_H F_L}}{F_H - F_L} \quad (2.4)$$

$$H = \frac{1}{3} \left(6.5 - \frac{1}{Q} \right) \quad (2.5)$$

$$f_0 = \sqrt{F_H F_L} \quad (2.6)$$

$$k = 2\pi f_0 C_1 \quad (2.7)$$

$$C_2 = \frac{1}{2} C_1 \quad (2.8)$$

$$R_1 = \frac{2}{k} \quad (2.9)$$

$$R_2 = \frac{2}{3k} \quad (2.10)$$

$$R_3 = \frac{4}{k} \quad (2.11)$$

$$R_5 = \frac{R_4}{H - 1} \quad (2.12)$$

Denklem (2.4)'te verilen Q filtre devresinin kalite faktörünü verir ve keskinliği belirler. Geçiş bandının keskin ya da yayvan bir şekilde geçişini belirlemek için hesaplanır. Ayrıca H ile filtre kazanç bağlantısı hesaplanırken k ile ise direnç değerleri ile frekans tepkisi görülmektedir.

Bu verilen denklemler neticesinde Sallen-Key topolojisine göre C_1 ve R_4 değerlerinin kendimiz tarafından verilmesi gerekmektedir. Bunun için piyasada bulunan ve proje kapsamında belirlenen frekans aralıkları değerlerine göre karar verilmesi gerekmektedir. Bunun için 2-5 Hz frekans aralık değerleri için örnek hesaplama değerleri aşağıda verilmiştir.

$$C_1 = 10\mu F$$

$R_4 = 10K$ ohm için diğer komponentlerin hesaplanması;

$$Q = \frac{\sqrt{F_H F_L}}{F_H - F_L} = \frac{\sqrt{5 * 2}}{5 - 2} = 1.05 \quad (2.13)$$

$$H = \frac{1}{3} \left(6.5 - \frac{1}{Q} \right) = \frac{1}{3} \left(6.5 - \frac{1}{1.05} \right) = 1.84 \quad (2.14)$$

$$f_0 = \sqrt{F_H F_L} = \sqrt{5 * 2} = 3.16 \quad (2.15)$$

$$k = 2\pi f_0 C_1 = 2 * \pi * 10 * 10^{-6} = 198.54 * 10^{-6} \quad (2.16)$$

$$C_2 = \frac{1}{2} C_1 = \frac{1}{2} * 10 * 10^{-6} = 5\mu F \quad (2.17)$$

$$R_1 = \frac{2}{k} = \frac{2}{198.54 * 10^{-6}} = 10.7Kohm \quad (2.18)$$

$$R_2 = \frac{2}{3k} = \frac{2}{3 * 198.54 * 10^{-6}} = 3.35Kohm \quad (2.19)$$

$$R_3 = \frac{4}{k} = \frac{4}{198.54 * 10^{-6}} = 20.1Kohm \quad (2.20)$$

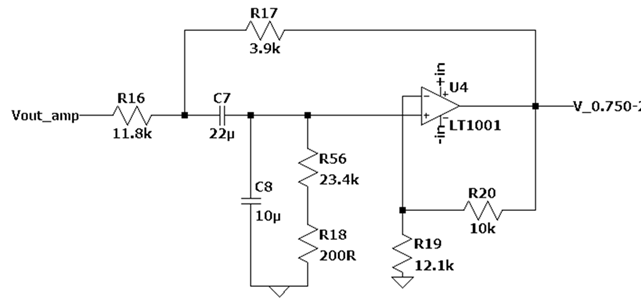
$$R_5 = \frac{R_4}{H - 1} = \frac{10^3}{1.84 - 1} = 11.9Kohm \quad (2.21)$$

Yukarıda hesaplanan komponent değerlerinin piyasada bulunabilirliğine göre güncellemeleri yapılmaktadır. Örneğin R_3 değerinin 201.4K ohm olması piyasada bu şekilde olmaması nedeniyle ya en yakın değeri seçilebilir ya da istenilen değere ulaşmak için seri dirençler ile eklemelerin yapılmasıyla 201.4K ohm değerine ulaşılması gerekmektedir. Bu çalışmada da istenilen değerlere ulaşmak için bu şekilde yöntemler kullanılmıştır. Şekil 2.13'te bulunan şematik diyagrama benzer devre yapısı kullanılarak istenilen bant geçiren filtreler elde edilmiştir.

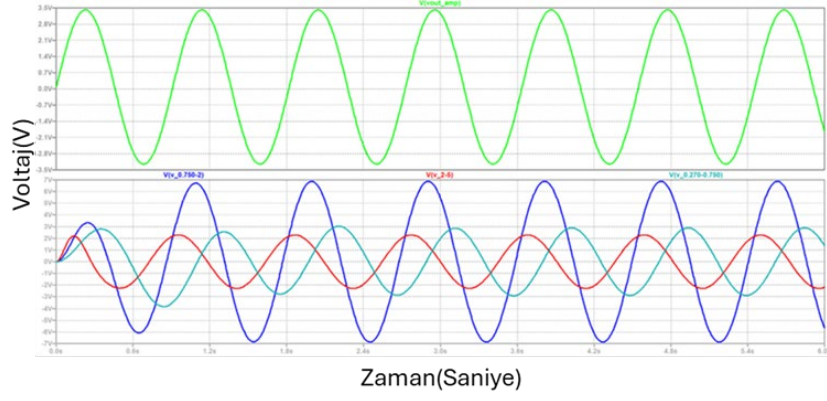
Analog devre oluşturulurken daha önce bu alanda yapılan çalışmalar incelenmiş ve uygun komponent ve topoloji araştırılması yapılmıştır. Özellikle filtre devresinin devre elemanları seçilirken belirli isterlere dikkat edilmiştir. Sıcaklık değişimi, çalışma süreleri gibi parametreler ile belirli standartları korumak ve oluşturmak amaçlanmıştır. Oluşturulan şematik tasarım baskı devre yapılmadan önce simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bunun için piyasada da sıklıkla kullanılan "LTspice" simülasyon programı kullanılmıştır.

Tez kapsamında 9 farklı frekans aralığının bant geçiren filtre ile incelenmesi istenmektedir. Bu nedenle bu aralıklardan olan 0.75-2 Hz aralığının simülasyon çalışmasını Şekil 2.14'te gösterilmiştir. Simülasyon sonuçları ise zaman ve frekans uzayındaki karşılıkları Şekil 2.15'te verilmiştir.

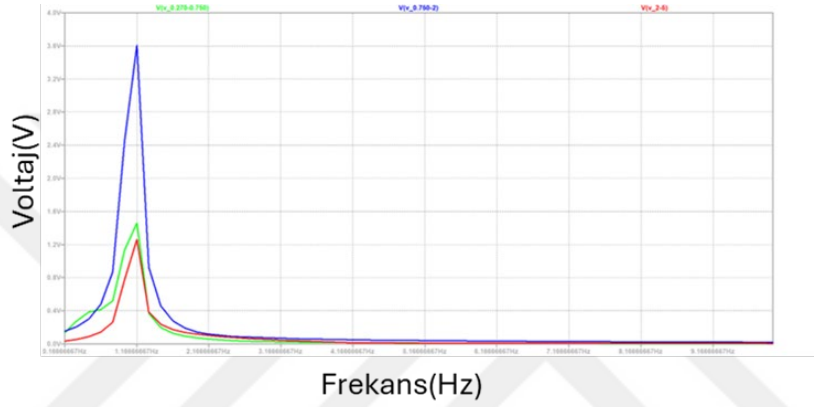
Şekil 2.14'te de görüldüğü gibi 2.dereceden Sallen-Key topolojisi kullanılarak bant geçiren filtre tasarımı yapılmıştır. Daha önce de bahsedildiği gibi hesaplanan değerlerin piyasa incelenmesi yapıldıktan sonra yakın değerler ile seri bağlantı kurularak teorik hesaplanan değere yaklaşmıştır.



Şekil 2.14 0.75- 2 Hz için bant geçiren filtre tasarımı



(a)



(b)

Şekil 2.15 Bant geçiren filtre simülasyon sonuçları; (a) zaman uzayındaki filtre çıkış sonucu, (b) frekans uzayındaki filtre çıkış sonucu

2.5.4 Elektronik Bileşenler için PCB Tasarımı

Bölüm 2.5.2’de anlatılan ön yükselteç devresi ve Bölüm 2.5.3’te yer alan analog elektronik devresinin simülasyon çalışmaları yapılmış olup akabinde baskı devre oluşturma kısmına geçilmiştir.

Bunun için KICAD adlı açık kaynak kodlu ücretsiz olan yazılım programı kullanılarak PCB tasarımı oluşturulmuştur.

Devre tasarımları yapılırken komponentlerin hesaplanan teorik değerlerinin piyasada bulunup bulunamayacağına göre yakın değerler seçilerek devrenin tasarımı tamamlanmıştır. Devreler 4 katlı olacak şekilde sinyal ve güç hatlarına dikkat edilerek tasarım yapılmıştır.

2.5.4.1 Ön Yükselteç Devresi PCB Tasarımı

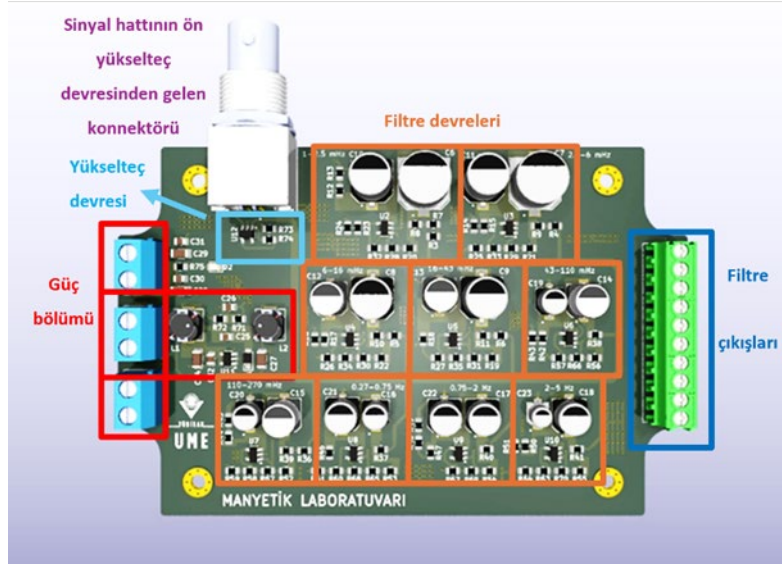
Öncelikle sensör ile kullanılacak olan ön yükselteç devresinin tasarımı yapılmıştır. Bu devre yapısında daha önce de bahsedildiği gibi OpAmp, alçak geçiren filtre ve kazanç için tasarım oluşturulmuştur. Şekil 2.16’da ön yükselteç yapısına ait PCB tasarım gösterilmiştir.



Şekil 2.16 Ön yükselteç devresi PCB tasarımı

2.5.4.2 Analog Elektronik Devresi PCB Tasarımı

Ön yükselteç devresinin tamamlanmasından ardından filtre devrelerinin içinde bulunduğu analog elektronik devresinin tasarımına geçildi. Bu elektronik devrede, 9 adet filtre çıkışı olacak şekilde farklı frekans aralıklarında çalışması planlanan tasarım yapıldı. Şekil 2.17’de analog elektronik yapısına ait tasarım gösterilmiştir. Buradaki tüm bileşenler açıkça gösterilmiştir. Bu filtre çıkışları analog sinyal olacağından, sayısal sinyale çevirmek için sonrasında dönüştürücü modüle aktarılacak şekilde planlanmıştır.



Şekil 2.17 Analog elektronik devresi PCB tasarımı

Şekil 2.12’de gösterilen sistem diyagramının çıkarılmasının sonra ilk önce simülasyon programlarında hazırlanan testler ile devrelerin sonuçları analiz edilmiştir. Simülasyon sonuçlarının değerlendirilmesinden sonra PCB tasarımı yapılmıştır. Yapılan PCB tasarımının ardından üretilmesi için sipariş verilmiştir. Aynı zamanda uygun komponentlerin bulunması için araştırmalar yapılmış olup onların da siparişi verilmiştir.

2.5.5 Analog Dijital Dönüştürücü – ADC

Önemli noktalarından olan analog sinyalin dijital sinyale dönüştürülmesi ve işlenmesi sonuçların anlamlandırılması için kritiktir. ADC, analog sinyali dijital sinyale dönüştürerek verilerin işlenmesini sağlayan cihazlardır. Proje kapsamında bunun için Şekil 2.18’de gösterilen “National Instruments” ürünü olan “NI-9205” kullanılacaktır. Arama bobininden elde edilecek olan analog sinyal daha önce de bahsedildiği gibi gerekli işlemlerden geçtikten sonra ve en son bant geçiren filtrelerden alınan sinyallerin konnektörler aracılığıyla bu cihaza gelecek olup, buradan analog sinyalin dijitalle çevrilmesi ve ardından sinyalin işlenmesi hedeflenmektedir.



Şekil 2.18 NI-9205 ADC modülü

2.5.6 Kontrol Merkezi

Edilen verilerin gerçek zamanlı kaydedilmesi gerekli olduğunda müdahale edilmesi ve kontrolü gibi işlerin gerçekleştirilmesi ve sensörü güç ile beslemesi nedeniyle enerji odası olarak kullanılabilmesi için kontrol istasyonuna ihtiyaç duyulmaktadır. Yaklaşık olarak 200 metre uzaklıkta bulunan sensörden gelen analog sinyalin burada analog elektronik devresine gelip sinyalleri filtreledikten sonra dijitale çevrilip analizlerinin yapılması için kontrol odasına ihtiyaç vardır. Ayrıca kartlarda herhangi bir problem olması halinde müdahale burada gerçekleştirilecektir.

3

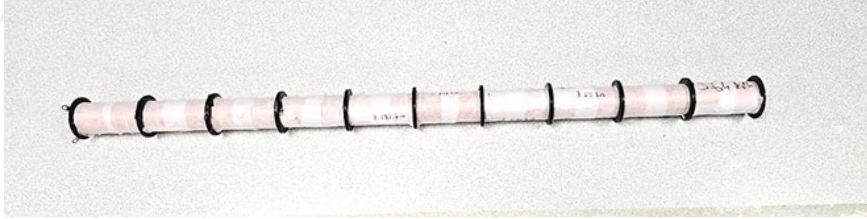
MANYETOMETRE İLE ULF MANYETİK ANOMALİLERİN TESPİTİ İÇİN PROTOTİP ÜRETİM VE BİLEŞENLERİN TESTLERİ

3.1 Üretimi Gerçekleştirilen Sensörler

Bölüm 2’de anlatılan ve tasarımları yapılan nüvesiz, silindir nüveli ve katmanlı nüveli arama bobinlerinin üretimleri tamamlanmıştır. Kasnaklara 100 mikron kalınlığında teller sarılarak sensörler test için hazırlanmıştır.

3.1.1 Nüvesiz (Plastik) Sensör Üretimi

Nüvesiz tasarım ile, maliyet, hafiflik ve manyetik kayıplarının olmaması avantaj olarak söylenebilmektedir. Bunun yanında manyetik geçirgenliğinin düşük olması oluşan manyetik alanı zayıf şekilde iletir ve manyetik akıyı az miktarda yoğunlaştırır ve ölçüm hassasiyetlerinin azalmasına neden olabilir. Şekil 3.1’de nüvesiz arama bobini gösterilmektedir.



(a)



(b)

Şekil 3.1 Üretimi tamamlanan nüvesiz arama bobini; (a) nüvesiz arama bobini, (b) arama bobini için sarılmış kasnak

3.1.2 Silindir Nüveli Sensör Üretimi

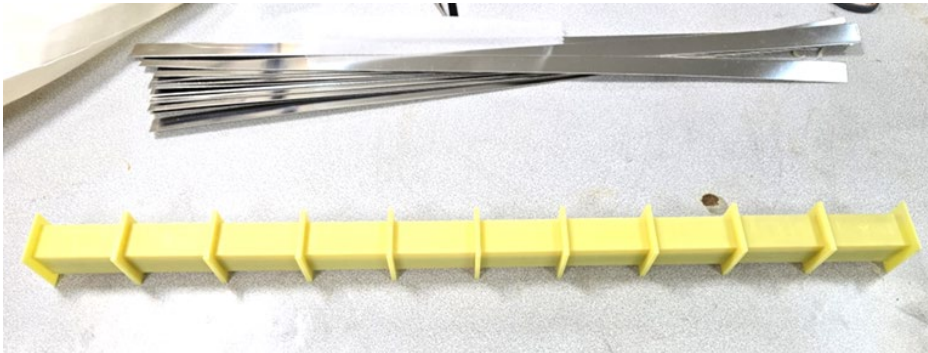
Nüveli çekirdekli yapılan çalışmalarda, yüksek geçirgenliğe sahip olması, akım ile üretilen manyetik akıyı yükseltmesi bunun sonucunda ise ölçüm hassasiyetinin artırılması beklenmektedir [39]. Manyetik nüveli tasarım, manyetik alan çizgilerini toplayarak sinyalin şiddetini artırır. Ayrıca dışardan gelen gürültüyü bastırarak daha iyi sinyal gürültü oranı elde edilir. Bunun yanında manyetik nüve kullanmanın bazı dezavantajları mevcuttur. Mu-metal gibi özel malzemelerin maliyeti yüksektir. Ayrıca kütlesi de fazladır. Manyetik alana bağlı olarak doyum noktasına ulaşabilir ve hassasiyeti azalabilir. Şekil 3.2’de silindir nüveli arama bobini gösterilmiştir.



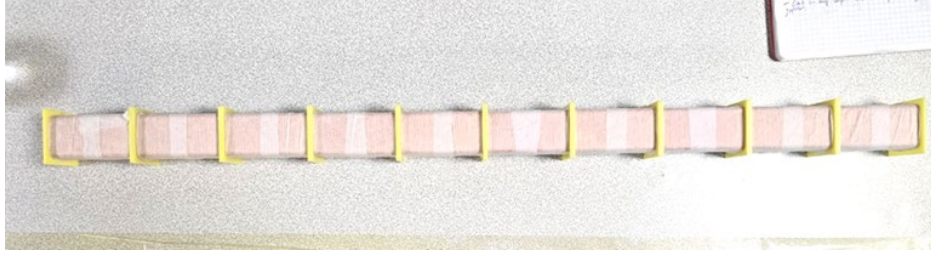
Şekil 3.2 Kasnakları bağlanmış silindir nüveli arama bobini

3.1.3 Katmanlı Nüveli Sensör Üretimi

Katmanlı nüve, ince manyetik malzemelerin bir araya gelmesiyle oluşan yapıdır. Bu yapı oluşturularak manyetik kayıpları azaltmak ve manyetik verimliliğin artırılması için tasarlanmaktadır. Katmanlar arasında yaklaşık yarım milim boşluk oluşturulmuştur. Katmanlı nüve, istenildiği taktirde farklı manyetik özelliklere sahip malzemelerin bir araya getirilmesiyle de oluşturulabilir. Bu kullanıma bağlı olarak daha hafif, daha iyi hassasiyet sağlayabilir. Ancak farklı özelliklere sahip malzemelerin birleştirilmesi, üretim zorluğunu da beraberinde getirebilir. Şekil 3.3’te katmanlı nüveye ait arama bobini gösterilmiştir.



(a)



(b)

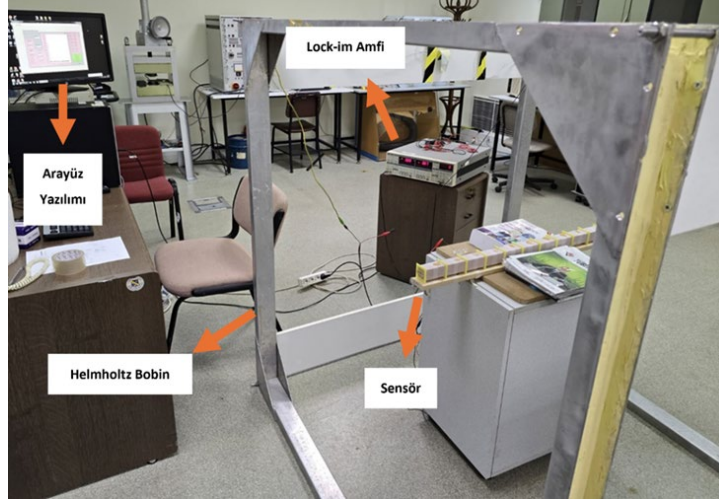
Şekil 3.3 Kasnaklı nüve tasarımı için arama bobini; (a) manyetik levhalar ve boş kasnaklar, (b) kasnakların katmanlı nüveye geçirilmiş hali

3.2 Nüveler için Yapılan Test Ortamı

Şekil 3.4'te test düzeneğinin akış diyagramı Şekil 3.5'te ise üretimi yapılan nüvelerin test ortamı gösterilmiştir. Burada akış diyagramında anlatılmak istenen; kilitleme amfi cihazından helmholtz bobinine sinyal gitmektedir. Örneğin amfi cihazından çıkan 1 Hz frekansında ve 100 mV genliğindeki sinyal, helmholtz bobinine verilerek manyetik alan oluşturulması sağlanmaktadır. Ardından oluşan manyetik alan sayesinde arama bobininde bir gerilim indüklemektedir. İndüklenen gerilim yine amfi cihazından okunmaktadır. Okunan gerilim değeri bilgisayar ortamında kaydedilmektedir.



Şekil 3.4 Test ortamı için akış diyagramı



Şekil 3.5 Manyetik arama bobini için test ortamı

Şekil 3.5'te gösterildiği gibi arayüz ekranında LabVIEW yazılımı kullanılarak ölçümlerin bilgisayar arayüzünde kontrol etmek ve verinin kaydedilmesi sağlanmaktadır.

3.3 Nüveler için Yapılan Testler

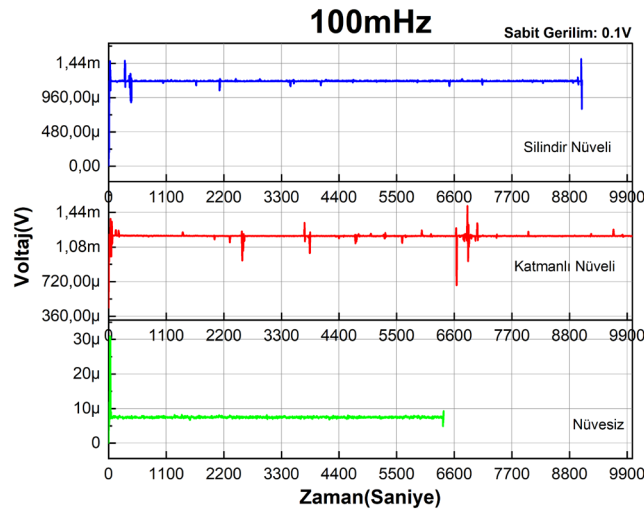
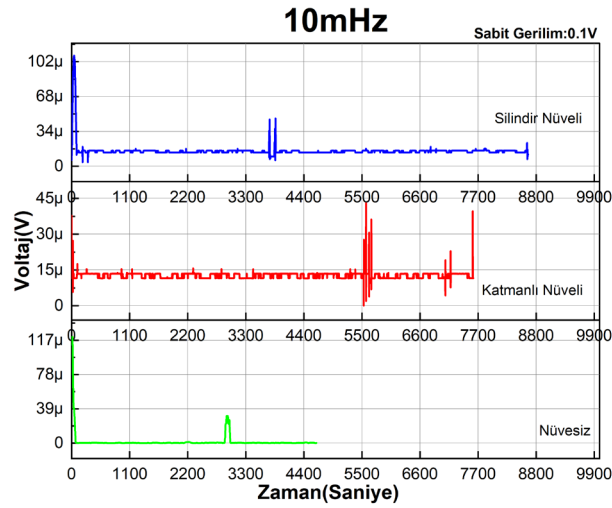
Tez kapsamında en iyi sonucu verecek olan nüveyi seçmek için testler gerçekleştirilmiştir. En iyi hassasiyeti elde etmek için oluşturulan testler için farklı frekans ve farklı genliklerde analizleri yapılarak en verimli olanın tercih edilmesi planlanmıştır. Bunun için 5 farklı test gerçekleştirilmiştir. İlk testte sabit frekans ve sabit gerilim verilerek sensörün indüklediği gerilim ölçülmüştür. İkinci testte yine sabit gerilim verilerek farklı frekanslardaki sensörün indüklediği gerilim ölçülmüştür. Üçüncü testte ise sabit frekans altında değişken gerilim verilerek sensörün indüklediği gerilim ölçülmüştür. Dördüncü testte nüvelerin gürültü analizlerinin tespiti için ölçümler yapılmıştır. Son testte ise manyetometrelerin hassasiyeti için ölçümler yapılmıştır.

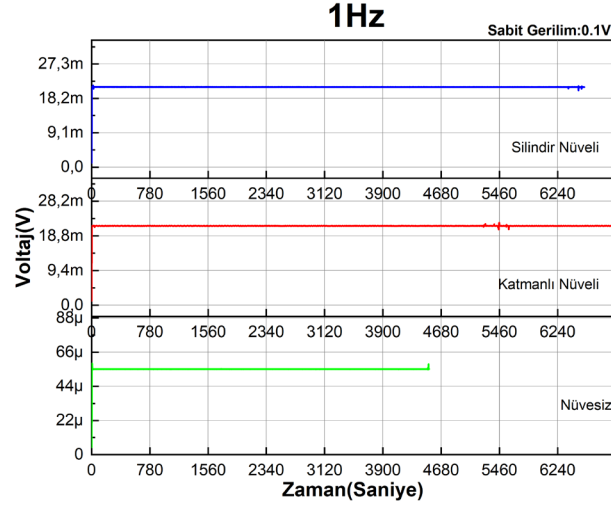
Şekil 3.5'te ölçüm için hazırlanan test ortamı görülmektedir. Kilitleme amfi cihazı ile sensörün bulunduğu helmholtz bobinine gerilim ve frekans verilmektedir. Böylece manyetik alan oluşturularak sensör üzerinde indüklenen gerilim ölçülmektedir. Ölçülen gerilim değeri LabVIEW ile oluşturulmuş olan arayüz ekranında verilerin toplanması sağlanmaktadır.

3.3.1 Test 1: Sabit Gerilim – Sabit Frekans Altında İndüklenen Voltaj Ölçümleri

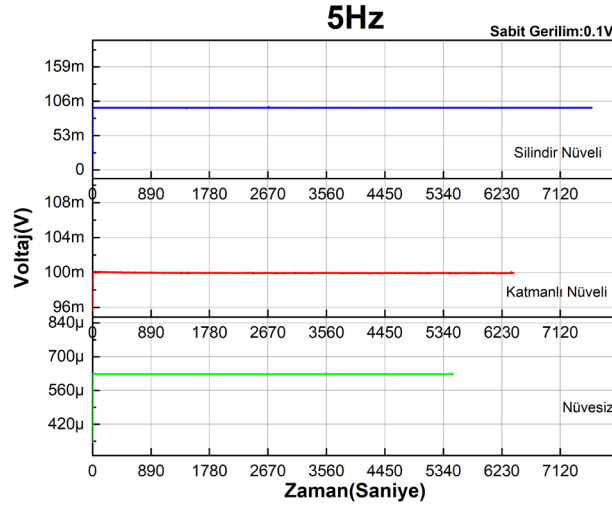
Gerçekleştirilen bu testte anlık ölçümler alınmıştır. Sabit frekans ve sabit gerilim altında sensör üzerinde indüklenen voltaj değerleri kaydedilmiştir. Burada sensörün anlık ölçtüğü gerilim değerlerinin nasıl değişebileceği, sensörün yakınından mıknatıs ile geçilince ya da kapı açılmasının indüklediği gerilimi nasıl değiştirdiği gözlemlenmiştir.

Bunun için gerçekleştirilen testlerde her 3 sensör için de 0.1V sabit gerilim altında; 10mHz, 100mHz, 1Hz ve 5Hz frekans değerleri için testler gerçekleştirilmiştir. Bu testlerde anlık okumalar yapılmıştır.





(c)



(d)

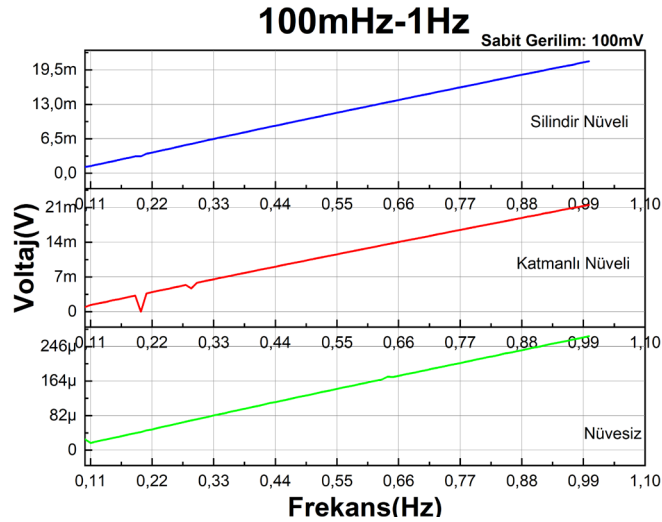
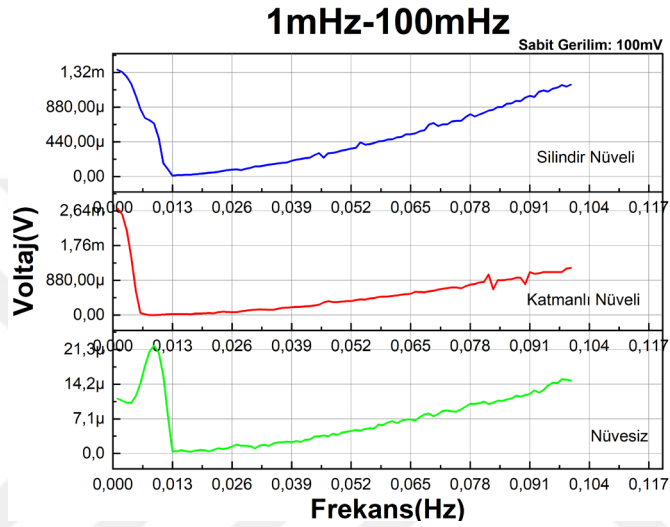
Şekil 3.6 Sabit gerilim ve sabit frekans altında indüklenen voltaj değerleri; (a) 10mHz frekansında değişimler, (b) 100mHz frekansında değişimler, (c) 1Hz frekansında değişimler, (d) 5Hz frekansında değişimler

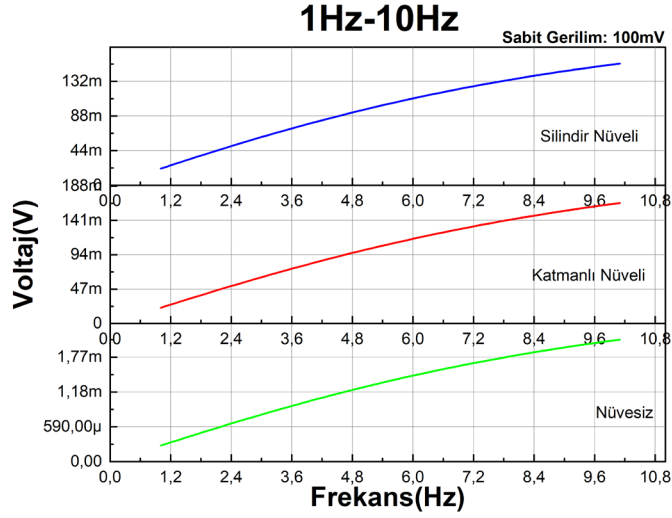
Şekil 3.6'daki grafiklerde sabit gerilim ve sabit frekans altında anlık ölçülen arama bobinli manyetometrelerin indüklenen gerilimlerin davranışları gösterilmiştir. Grafiklerdeki değişimler ortamdaki gürültülerden etkilendiğini göstermektedir. Bu test sonucu için silindir nüveli tasarımın, katmanlı nüveli ve nüvesiz tasarıma göre daha fazla gerilim indüklediği söylenmektedir.

3.3.2 Test 2: Sabit Gerilim Altında Değişken Frekanslarda İndüklenen Voltaj Ölçümleri

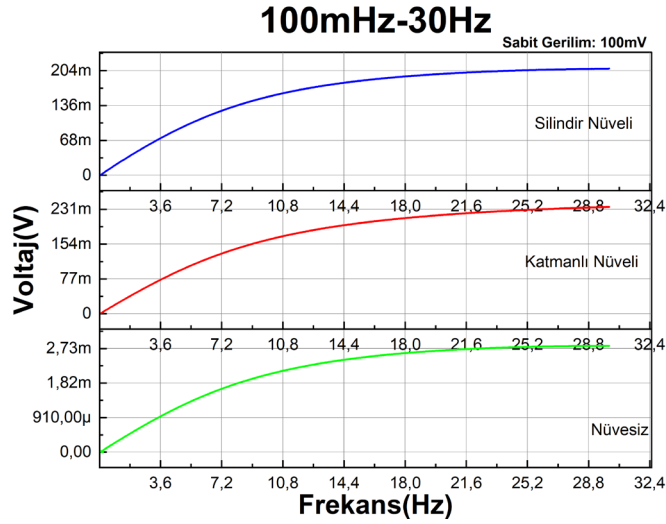
Yapılan bu testte sabit gerilim altında farklı frekanslar taranarak her bir sensörün indüklediği gerilimin ölçülmesi hedeflenmiştir. Nüvesiz, nüveli ve katmanlı nüveli tasarımların indüklediği gerilim ile sensörlerin karakteristiği çıkarılmıştır.

Gerçekleştirilen test için sensörlere; 0.1 V gerilim altında 1mHz-100mHz, 100mHz-1Hz, 1Hz-10Hz, 100mHz-30Hz frekans aralıkları incelenmiştir.





(c)



(d)

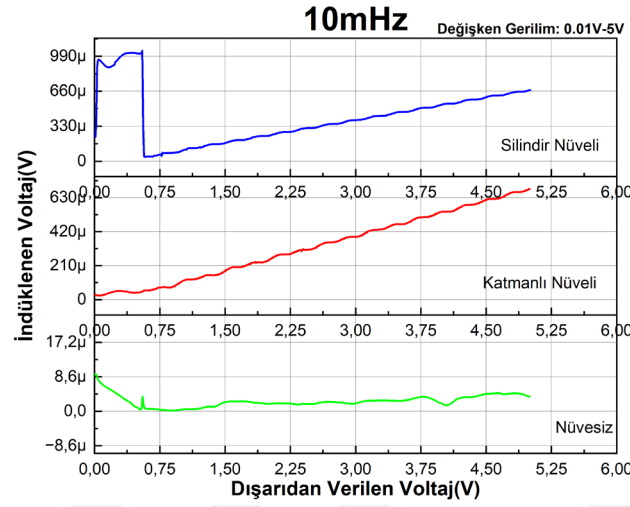
Şekil 3.7 Sabit gerilim ve değişken frekanslar altında indüklenen voltajlar; (a) 1mHz-100mHz frekans aralığındaki değişimler, (b) 100mHz-1Hz frekans aralığındaki değişimler, (c) 1Hz-10Hz frekans aralığındaki değişimler, (d) 1mHz-30Hz frekans aralığındaki değişimler

Şekil 3.7'deki grafiklerde, sabit gerilim altında farklı frekanslarda arama bobinli manyetometrelerin indüklediği gerilimlerin nasıl değiştiği gözlemlenmiştir. Bu ölçümlerde silindir nüveli ve katmanlı nüveli tasarımlarında indüklenen voltaj değerleri birbirine yakın çıkarken nüvesiz tasarımın indüklediği voltaj çok düşük seviyelerde kalmıştır. Ayrıca sonuçların doğrusal olarak artış göstermesi, frekans arttıkça manyetik akının zamana bağlı değişiminin ve buna bağlı ($d\Phi/dt$) artması ile açıklanmaktadır.

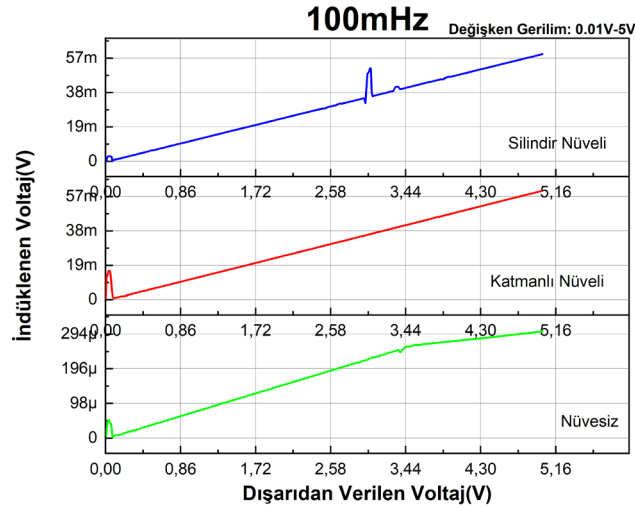
3.3.3 Test 3: Sabit Frekans Altında Değişken Gerilimlerde İndüklenen Voltaj Ölçümleri

Yapılan bu testte sabit frekans altında farklı gerilimler taranarak her bir sensörün indüklediği gerilimin ölçülmesi hedeflenmiştir. Nüvesiz, nüveli ve katmanlı nüveli tasarımların indüklediği gerilim ile sensörlerin ilişkisi incelenmiştir.

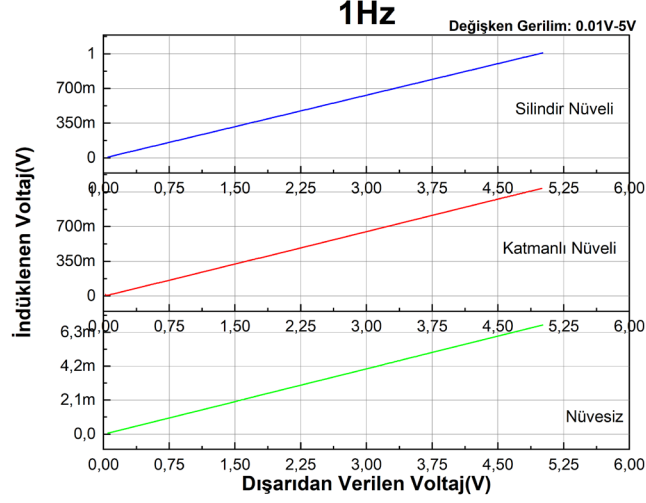
Gerçekleştirilen test için sensörlere; 10 mV-5 V değişken gerilimler verilirken, 10mHz, 100mHz, 1Hz ve 5Hz frekansları incelenmiştir.



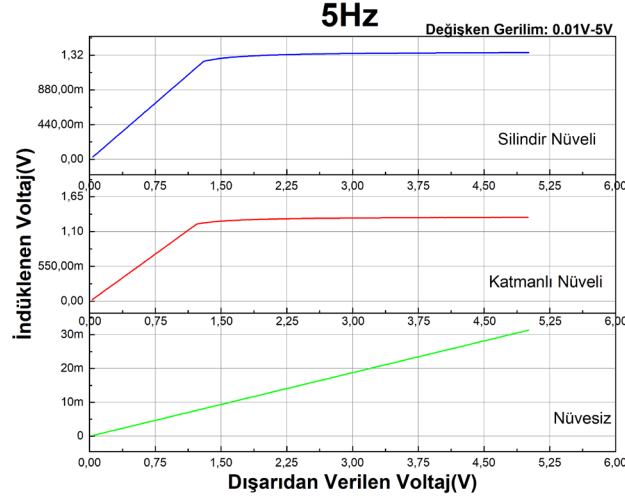
(a)



(b)



(c)



(d)

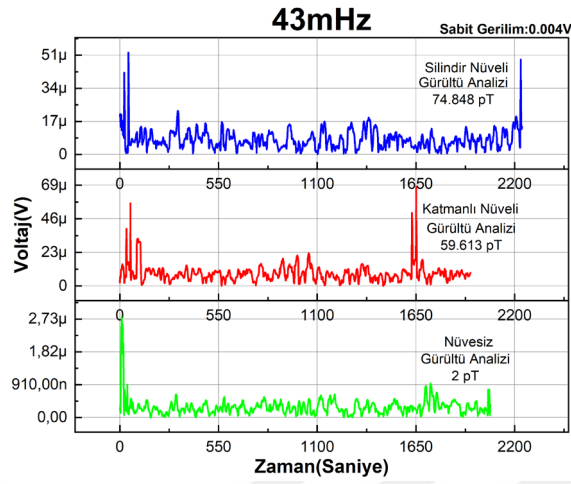
Şekil 3.8 Sabit frekans – değişken gerilimler altında indüklenen voltajlar; (a) 10mHz frekansında değişimler, (b) 100mHz frekansında değişimler, (c) 1Hz frekansında değişimler, (d) 5Hz frekansında değişimler

Şekil 3.8'deki grafiklerde, sabit frekans altında değişken gerilimlerin uygulanması sonucu arama bobinli manyetometrelerin değişimleri gözlemlenmiştir. Gerilim arttığında manyetik akının büyüklüğü artacağı için doğrusal olarak grafiklerde de ortaya çıkmıştır.

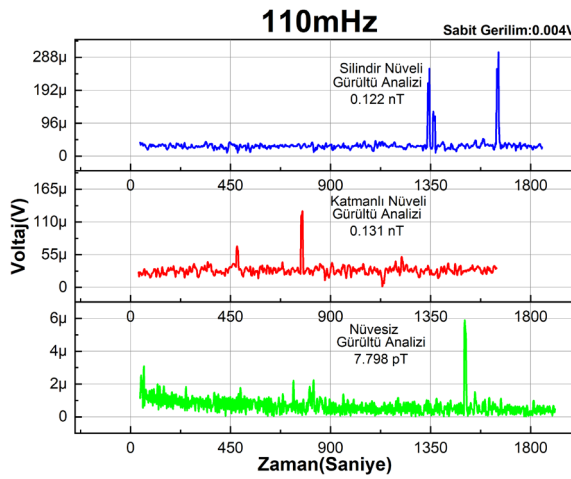
3.3.4 Test 4: Gürültü Analizi için Ölçümler

Bu testte manyetometrelerin gürültü analizleri yapılmıştır. Burada anlık ölçümlerde indüklenen gerilimler incelenmiştir. Yapılan ölçümlerde farklı frekanslarda, ölçü aletinden verilebilecek en düşük gerilim verilerek testleri yapılmıştır.

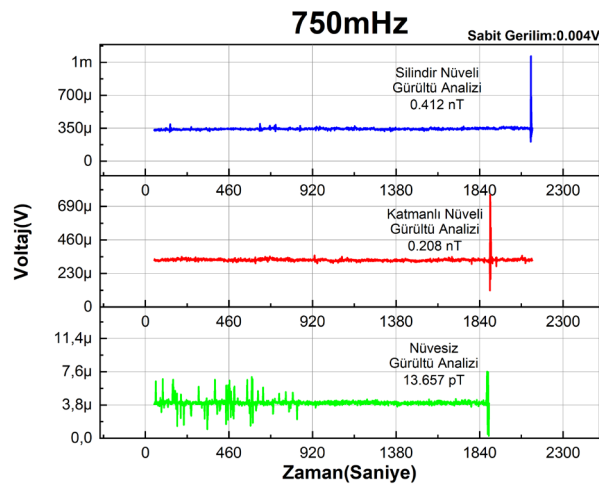
Bunun için 0.004 V sabit gerilim verilerek, 43mHz, 110mHz, 750mHz ve 2Hz frekansları için sensörler üzerinde indüklenen gerilimler incelenmiştir.



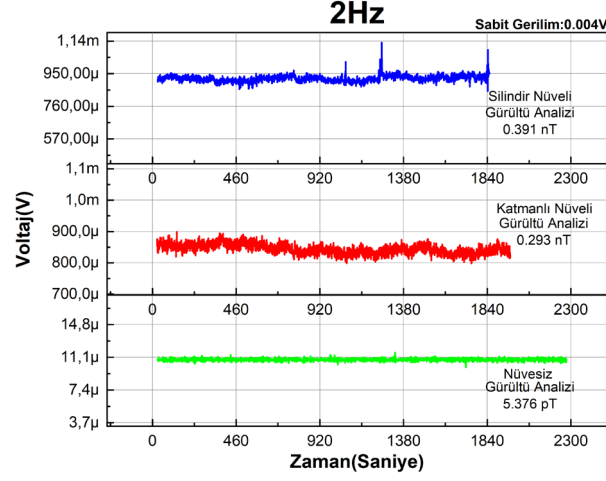
(a)



(b)



(c)

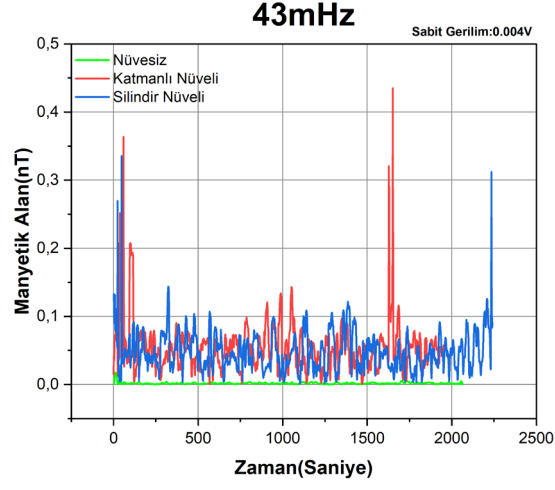


(d)

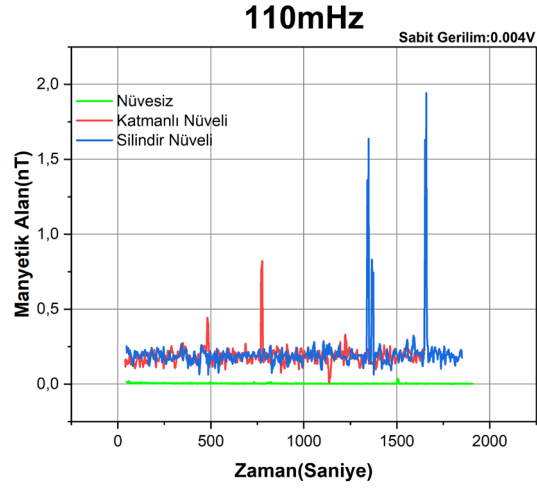
Şekil 3.9 Gürültü analizi için farklı frekanslarda ölçümler; (a) 43mHz frekansındaki değişimler, (b) 110mHz frekansındaki değişimler, (c) 750mHz frekansındaki değişimler, (d) 2Hz frekansındaki değişimler

Şekil 3.9'daki grafiklerde gürültü analizi için ortalama değerler bulunmuştur. Testler sonucu gürültü analizi incelendiğinde, silindir nüveli tasarımın 74 pT - 412 pT, katmanlı nüveli tasarımın 59 pT - 293 pT, nüvesiz tasarımın ise 2 pT - 13 pT arasında gürültü ürettiğini göstermiştir. Ölçümlerin belirtilen gürültü analiz kısmı o değerlerin altında sensörün okuma yapamadığını göstermektedir.

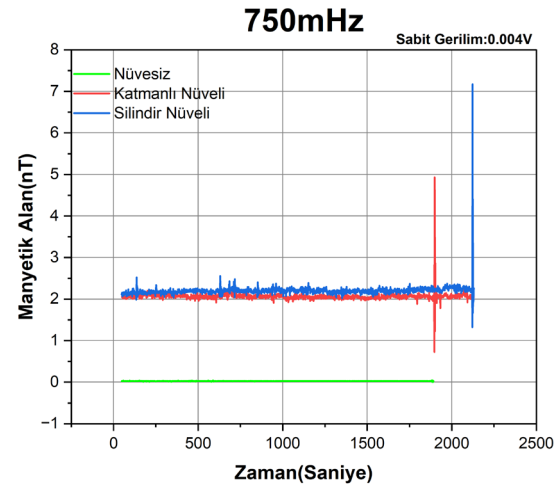
Ayrıca gürültü analizi kısmı için zaman ile manyetik alan değişimlerinin sonuçlarını da elde edilebilmektedir. Şekil 3.10'da bu sonuçlara ait grafikler gösterilmiştir.



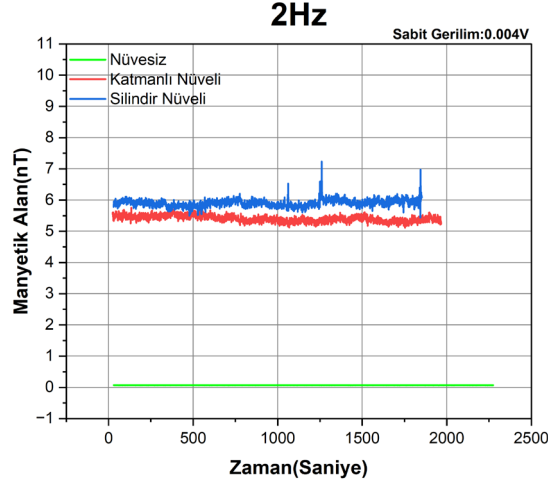
(a)



(b)



(c)



(d)

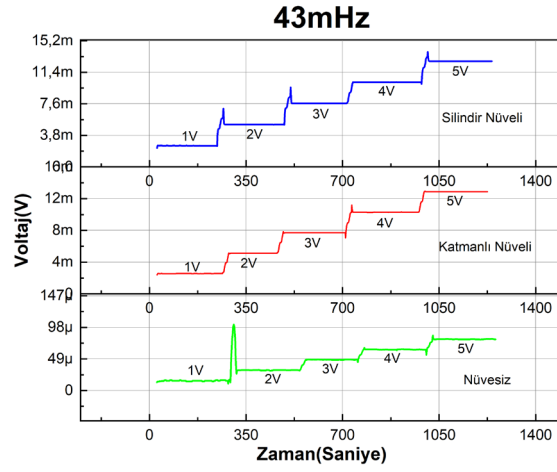
Şekil 3.10 Manyetik alanının zamanla değişimi; (a) 43mHz frekansındaki değişimler, (b) 110mHz frekansındaki değişimler, (c) 750mHz frekansındaki değişimler, (d) 2Hz frekansındaki değişimler

Şekil 3.10'da belirtilen frekanslardaki manyetik alanın değişimi gösterilmiştir. Nüvesiz tasarımın çok düşük bir manyetik alanda değiştiği gözlemlenmektedir. Bunun yanında silindir nüveli ve katmanlı nüveli tasarımların manyetik alan değişimleri daha fazladır.

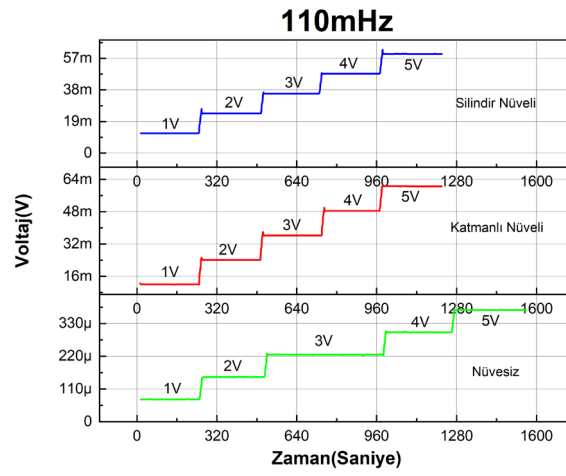
3.3.5 Test 5: Hassasiyet Analizi için Ölçümler

Üretilen arama bobinlerinin hassasiyetlerinin tespiti için yapılan bu testlerde ilk önce test edilecek frekansa farklı gerilimler verilerek indüklenen voltaj değerleri ölçülür ardından da buna bağlı hassasiyetleri elde edilir.

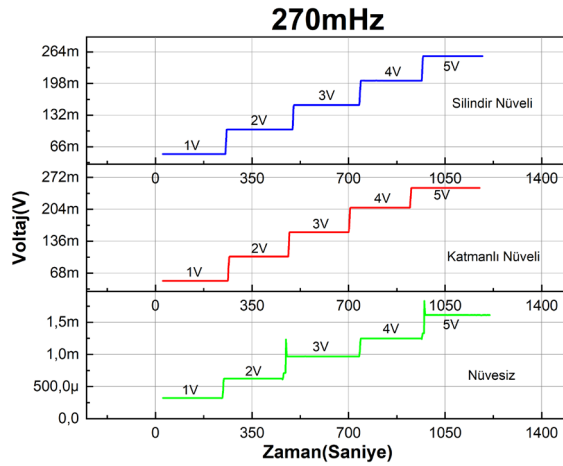
Bunun için farklı gerilimler altında; 43mHz, 110mHz, 270mHz ve 1Hz frekanslarındaki hassasiyetleri elde edilmiştir.



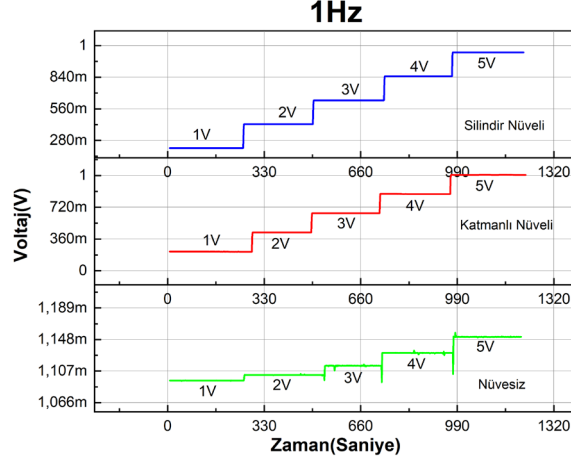
(a)



(b)



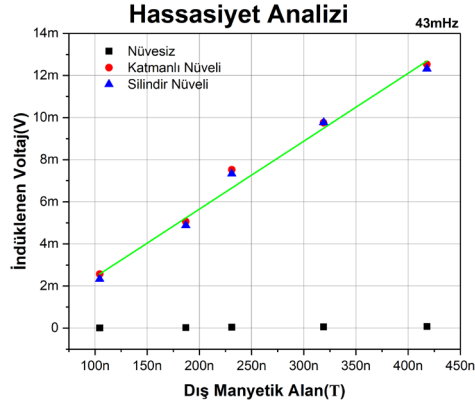
(c)



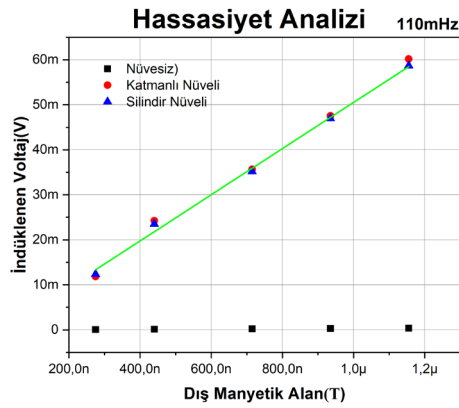
(d)

Şekil 3.61 Hassasiyet ölçümleri için farklı gerilimlerin verilmesi; (a) 43mHz frekansındaki değişimler, (b) 110mHz frekansındaki değişimler, (c) 270mHz frekansındaki değişimler, (d) 1Hz frekansındaki değişimler

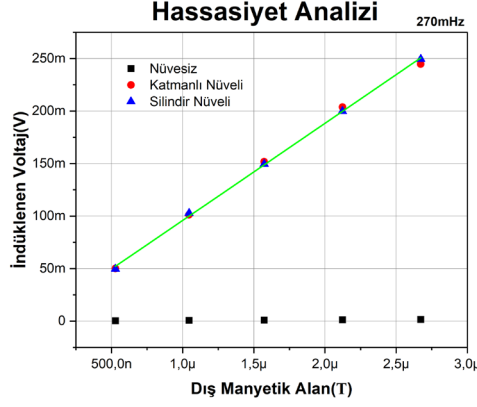
Şekil 3.11'deki grafiklerde elde edilen ölçümler neticesinde voltaj değerlerinden hassasiyet için grafikler elde edilmiştir.



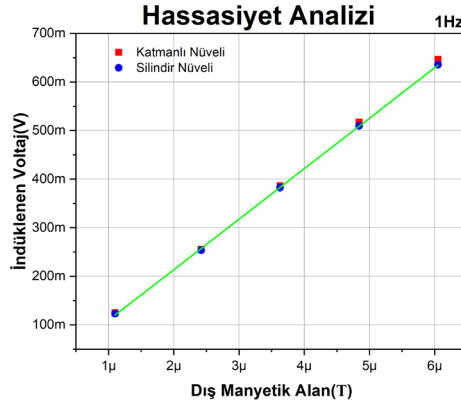
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 3.12 Hassasiyet ölçümlerinin dış manyetik alan ile değişimi; (a) 43mHz frekansındaki değişimler, (b) 110mHz frekansındaki değişimler, (c) 270mHz frekansındaki değişimler, (d) 1Hz frekansındaki değişimler

Şekil 3.12'deki grafiklerde silindir nüveli ve katmanlı nüveli arama bobini manyetometrelerin benzer hassasiyetlerinin olduğu, nüvesiz tasarımın ise hassasiyetinin oldukça düşük olduğu sonucu ortaya çıkmıştır.

3.4 Yapılan Testler Neticesinde Nüve Seçimi

Doğru ve hassas sensörlerin seçilebilmesi için gerçekleştirilen testlerde, en iyi sonuçları veren silindir nüveli ve katmanlı nüveli arama bobini manyetometresi tasarımları olmuştur. Yapılan 5 farklı testte çıkan sonuçlar bu ikilinin daha hassas bir şekilde gerilimleri indüklediğini göstermiştir. Çalışmada X, Y ve Z eksenlerine yerleştirilecek olan sensörler için 2 tanesinin silindir nüveli 1 tanesinin ise katmanlı nüveli olmasına karar verilmiştir.

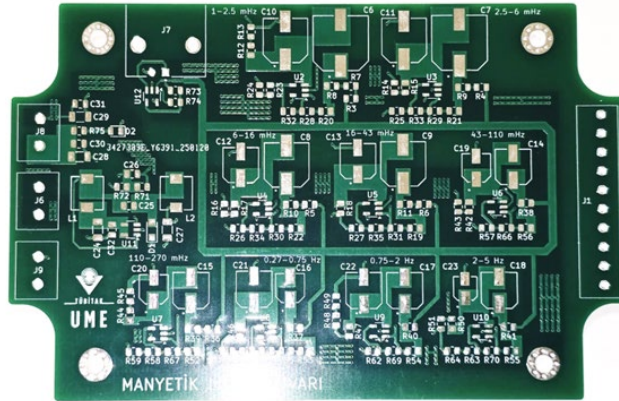
Nüvesiz sensör tasarımının sonuçları incelendiğinde indüklediği gerilim diğerlerine nazaran çok düşük kaldığı için yetersiz olarak görülmüştür. Bunun yanında gürültü seviyesinin çok düşük olması bir avantaj olsa da çok az gerilim indüklemesi istenilen sinyallerin yakalanması konusunda problem çıkaracağı için uygun görülmemiştir.

Silindir nüveli ve katmanlı nüveli tasarımlarının sonuçlarında ise indüklenen gerilim seviyeleri çok yakın olması nedeniyle ve nüvesiz tasarıma göre çok yüksek olması sebebiyle kullanıma uygun olmuştur. 3 eksene yerleştirilecek olan sensörler 2 silindir nüveli ve 1 katmanlı nüveli olacak şekilde çalışmalara devam edilmiştir.

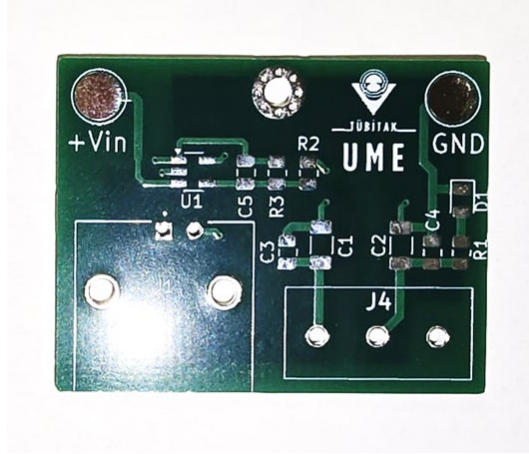
3.5 Elektronik Bileşenlerin Prototip Üretimi

Bölüm 2.4.1'den başlayan ve Bölüm 2.4.5'e kadar anlatılan elektronik sistemlerin önce simülasyon ortamında sonrasında ise PCB tasarımlarının gerçekleştirilmesinin ardından prototip için üretimi gerçekleştirilmiştir.

Hem ön yükselteç hem de filtre devrelerinin yer aldığı analog elektronik kartın üretimi ardından da bu kartların dizgileri gerçekleştirilmiştir.



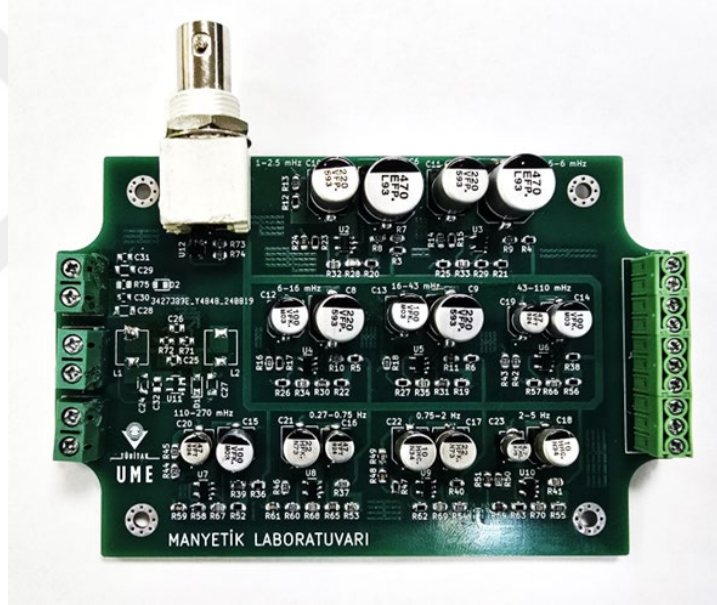
(a)



(b)

Şekil 3.13 Prototip üretimi gerçekleştirilen baskı devre kartlarının dizgisiz hali;

(a) analog elektronik devresi, (b) ön yükselteç devresi



(a)



(b)

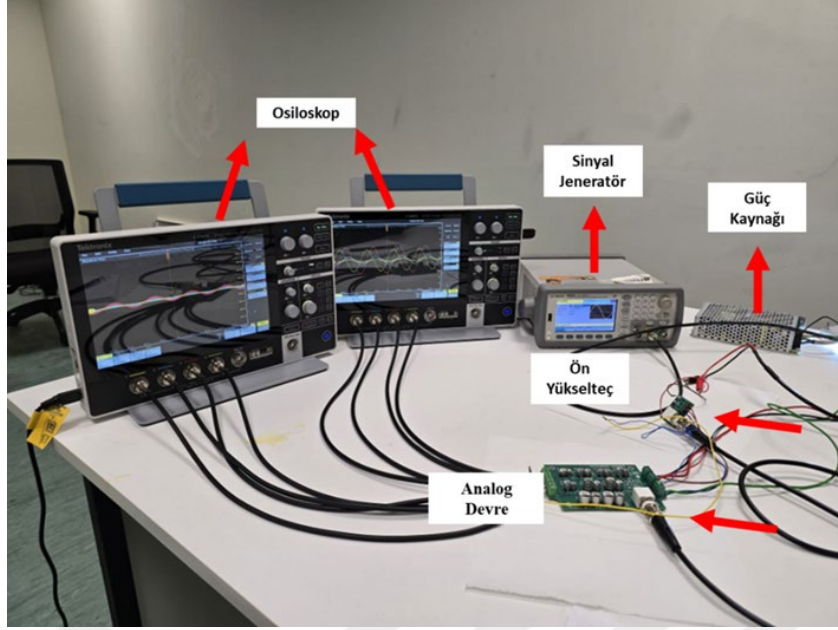
Şekil 3.14 Prototip üretimlerin dizgisi yapılmış hali; (a) analog elektronik devresi, (b) ön yükselteç devresi

Şekil 3.13'teki üretimi yapılan baskı devre kartları gösterilmiştir. Ardından Şekil 3.14'te komponentlerin dizgi işlemlerinin yapılmasının ardından donanım testlerine başlanmıştır. Devrede öncelikle kısa devre olup olmadığı, ardından güç verilerek komponentlerin bacaklarından ölçülen voltaj değerlerinin kontrolü sağlanmıştır.

Donanım testlerinin yapılmasının ardından filtre devrelerinin ve yükselteç devrelerinin kontrolleri yapılmıştır. Burada kurulan sistem için sinyal jeneratörü ve osiloskop kullanılmıştır.

Test için sinyal jeneratöründen, 10mVpp gerilim verilmiş olup farklı frekanslarda filtrelerin çıkışları osiloskop ekranından takip edilmiştir. Şekil 3.15'te kart için kurulan test ortamı gösterilmiştir.

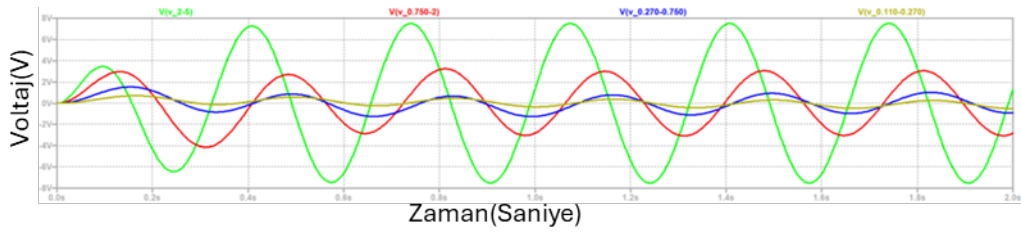
Şekil 3.15'te gerçekleştirilen testlerde analog elektronik devresinde bulunan 9 farklı çıkış 2 osiloskop ile 8 kanal kullanılarak her bir sinyalin izlenmesi sağlanmıştır.



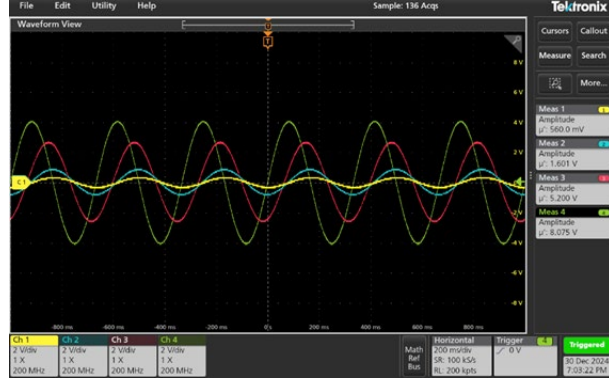
Şekil 3.15 Baskı devre kartlarının test düzeneği

Yapılan filtre testlerinde Bölüm 2.4.3 ve Bölüm 2.4.4'te gerçekleştirilen simülasyonlar ile benzer sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Şekil 3.16 (a) ve Şekil 3.16.(b)'de gösterilen grafiklerde örnek bir çıktı incelenmiştir. Örnek olarak verilen çıktı için sinyal kaynağından 3Hz frekansında 10mV gerilim verilmiştir. Şekil 3.16.(a)'da tasarım aşamasında gerçekleştirilen simülasyon çalışmasının çıktısını verirken, Şekil 3.16.(b)'de ise gösterilen osiloskop görüntüsü ise üretimi gerçekleştirilen PCB tasarımının çıktısını göstermektedir. Bu iki grafikte incelendiğinde filtre çıkışlarının benzer sonuçlar verdiği gözlemlenmektedir.



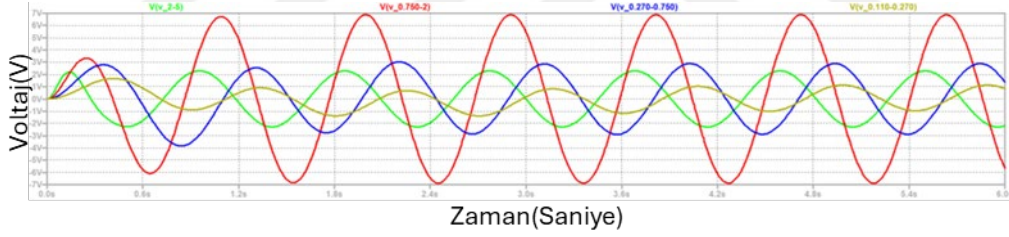
(a)



(b)

Şekil 3.16 3Hz frekansı için simülasyon ve test sonuçları; (a) simülasyon sonucu, (b) üretimden gelen PCB test sonucu

Bir başka yapılan testte, 1.1Hz frekans değeri incelendiğinde çıkan sonuçlar yine benzerlik göstermektedir. Şekil 3.17.(a)'da simülasyon sonucu gösterilirken, Şekil 3.17.(b)'de verilen üretimi gerçekleştiren PCB tasarım test sonucu gösterilmektedir. Sonuçlar karşılaştırıldığında benzer değerler okunmaktadır.



(a)



(b)

Şekil 3.177 1.1Hz frekansı için simülasyon ve test sonuçları; (a) simülasyon sonucu, (b) üretimden gelen PCB test sonucu

Şekil 3.16 ve Şekil 3.17’de gösterilen önce simülasyon ardından da üretilen PCB ile gerçekleştirilen test sonuçlarının benzer değerler gösterdiği gözlemlenmiştir.

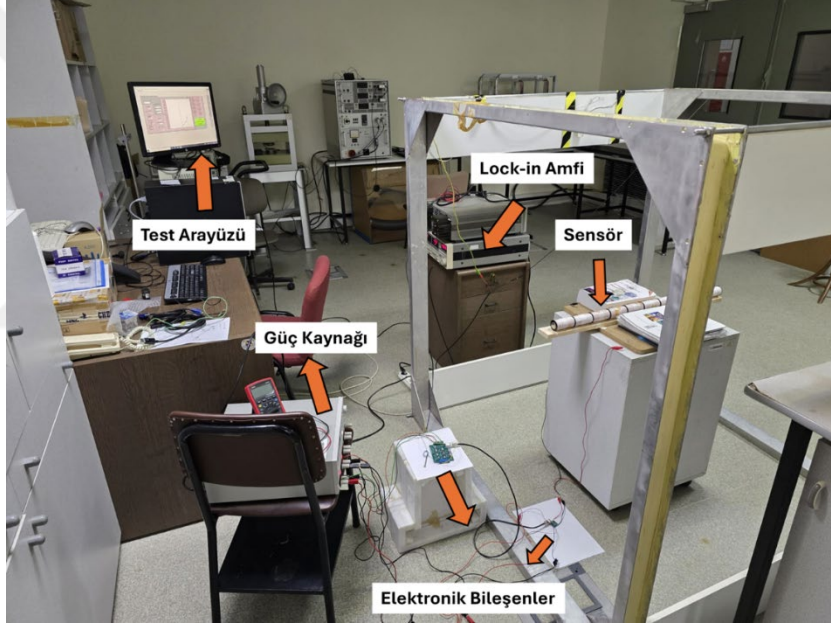


4

ELEKTRONİK BİLEŞENLER VE SENSÖRLERİN ENTEGRASYONU

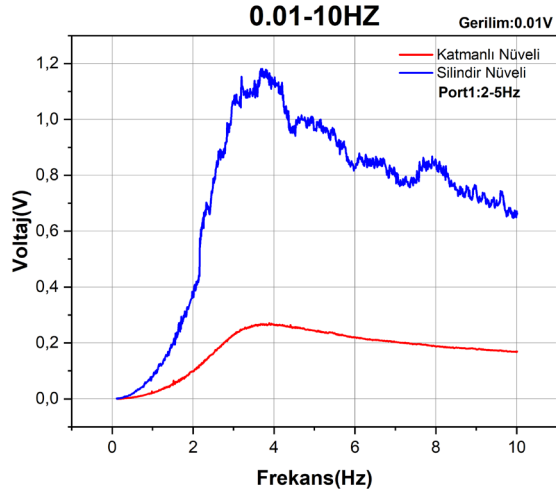
4.1 Test Düzeneği

Üretimi gerçekleştirilen arama bobinleri ile elektronik bileşenlerin beraber çalışmalarının ve sensörlerin nasıl davrandıklarının tespiti için ölçümler yapılmıştır. Bu testler kapsamında seçilen arama bobinlerinden silindir nüveli ve katmanlı nüveli tasarımların nüvesiz tasarıma göre daha fazla gerilim üretmesinden dolayı bu iki sensörün seçimi yapılmıştır.

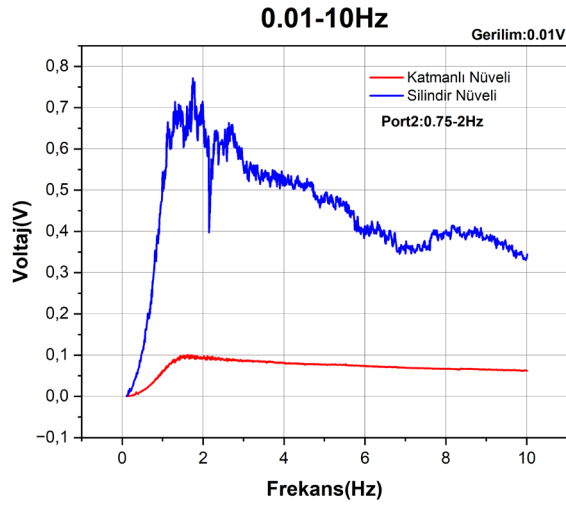


Şekil 4.1 Elektronik bileşenler ile sensörlerin entegrasyonu ve test ortamı

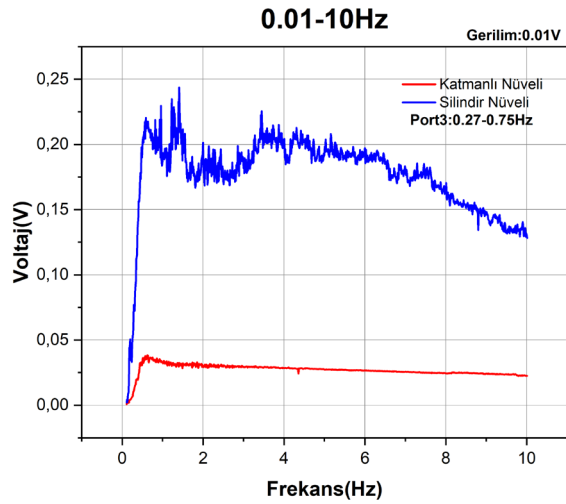
Şekil 4.1’de, sensörler ile elektronik bileşenlerin testleri için ortam gösterilmiştir. Burada kilitleme amfi cihazı ile helmholtz bobini üzerinden manyetik alan oluşturularak sensörün gerilim indüklemesi sağlanmaktadır. Ardından sensörde çıkan iki uç ön yükselteç devresine gelmektedir. Buradan sinyal kablosu analog devreye bağlanır ve uygun filtre çıkışından ölçü aleti aracılığı ile arayüz ekranında veriler toplanır. Bu bağlamda yapılan testlerde birinci filtre çıkışı, ikinci filtre çıkışı üçüncü filtre çıkışı ve dördüncü filtre çıkışlarından veriler toplanmıştır.



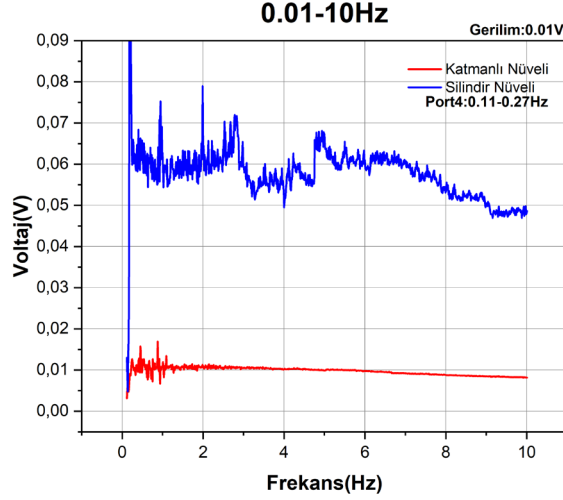
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 4.2 Sistem entegrasyon sonuçları; (a) birinci filtre çıkışı, (b) ikinci filtre çıkışı, (c) üçüncü filtre çıkışı, (d) dördüncü filtre çıkışı

Şekil 4.2’de çıkan sonuçlar incelendiğinde filtre bölgelerinde elde edilen gerilimlerin diğer gölgelere nazaran daha yüksek olduğu ortaya çıkmıştır. Bunun yanında silindir nüveli ve katmanlı nüveli tasarımlarında malzemelerin ve buna bağlı manyetik geçirgenliklerin farklı olması nedeniyle arama bobinleri üzerinde indüklenen gerilimlerin değişkenlik gösterdiği ortaya çıkmıştır.

Bu indüklenen gerilimlerdeki değişiklik manyetik geçirgenlik (μ) ile açıklanır. Faraday yasasına göre bobinlerde indüklenen elektromanyetik kuvvet (EMK) şu şekilde ifade edilir;

$$EMK = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (4.1)$$

Burada N sarım sayısını, Φ manyetik akıyı temsil eder. Burada Φ ise şu şekilde ifade edilir;

$$\Phi = B \cdot A \quad (4.2)$$

B , manyetik akı yoğunluğunu A ise kesit alanını ifade eder. Bunun yanında B manyetik akı yoğunluğu ise uygulanan manyetik alan şiddeti (H) ve nüvenin manyetik geçirgenliği (μ) ile ifade edilir.

$$B = \mu \cdot H \quad (4.3)$$

Bununla birlikte μ , aynı zamanda μ_0 ve μ_r bileşenlerini de içerir. Burada μ_0 boşluktaki geçirgenliği ifade eder ve sabit olarak kabul edilir, μ_r ise malzemenin geçirgenliğini ifade eder.

Bu teorik ifadelerden yola çıkıldığında Şekil 4.2’de elde edilen sonuçlar incelendiğinde, silindir nüveli ve katmanlı nüveli tasarımların indüklediği gerilimlerin teorik bilgiyi desteklediği sonucu elde edilmiştir.

4.2 Test Sonuçları

Bölüm 4.1’de gerçekleştirilen testler sonucunda, silindir nüveli ve katmanlı nüveli arama bobinli manyetometrelerin, ön yükselteç ve analog elektronik devreleri ile entegrasyonu gerçekleştirilmiş ve sistem performansı test edilmiştir. Elektronik bileşenlerin entegrasyonu sonrasında testler için başlangıç olarak 0.1-10Hz frekans aralıkları içerisinde ilk dört filtrenin çıkışlarından testler gerçekleştirilmiştir. Test için Şekil 4.1’de yer verilen, amfi cihazı ile helmholtz bobini üzerinden ile manyetik alan oluşturulmuş ve arama bobinli manyetometrelerin gerilim indüklenmesi sonucu sistem testleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar neticesinde, silindir nüveli ve katmanlı nüveli arama bobinli manyetometrelerin manyetik geçirgenliklerinin (μ) farklı olmasından dolayı sensörler üzerinde indüklenen gerilimler de farklılık göstermiştir. Ortaya çıkan bu sonuç ile Faraday Yasası’na göre teorik olarak (Denklem 4.1, Denklem 4.2 ve Denklem 4.3) desteklendiği ortaya çıkmıştır. Bu nedenle silindir nüveli tasarımın katmanlı nüveli tasarıma göre daha fazla gerilim indüklediği gözlemlenmiştir. Filtre çıkışlarının hedef frekans bölgesinde sinyal seviyesinin diğer bölgelere göre daha yüksek çıktığı sonucuna ulaşılmıştır. Entegrasyon testleri ile arama bobinli manyetometreler ile elektronik bileşenlerin başlangıç testleri için uyumlu çalıştığı ancak sistemin uzun süreli saha testleri ile değerlendirilmesine ve veri toplanmasına ihtiyaç duyulmaktadır.

Yapılan tez çalışması kapsamında depremlerin önceden tahminine yönelik ultra düşük frekans manyetik alan anomalilerin tespit edilmesi amacıyla arama bobinli manyetometre tasarımı ve geliştirilmesi üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu tez çalışması kapsamında 1mHz ile 5Hz frekans aralığındaki değişimlerin deprem habercisi olarak araştırmayı ve bu hedefle hassas bir ölçüm sistemi geliştirmeyi hedeflemiştir.

Öncelikli olarak hassasiyet ve maliyet etkeninin değerlendirilmesinin yapılması için farklı türde nüve tasarımları hazırlanarak bunların analizleri yapılmıştır. Ayrıca arama bobinlerini oluşturacak olan kasnakların üretimi ve sarımlarının yapılmasının ardından sensörler testler için hazırlanmıştır. Tez kapsamında nüvesiz, silindir nüveli ve katmanlı nüveli olmak üzere 3 farklı tasarım ile arama bobinli manyetometrelerin performansları karşılaştırılmıştır. Bunun için 5 farklı test senaryosu ile ölçümler alınmıştır. Birinci test; sabit gerilim-sabit frekans altındaki ölçümler, ikinci test; sabit gerilim-değişken frekans altındaki ölçümler, üçüncü test; sabit frekans-değişken gerilimler altındaki ölçümlerin alınması sonucu arama bobinlerinin analizleri sağlanmıştır. Ayrıca bu testler ışığında gürültü analizleri ve arama bobinli manyetometrelerin hassasiyetleri incelenmiştir. Gerçekleştirilen testler sonucunda, arama bobinli manyetometrelerin gürültüleri karşılaştırıldığında; nüvesiz tasarımın, 2-13pT değerleri arasında, katmanlı nüveli tasarımın, 59-293pT değerleri arasında ve silindir nüveli tasarımın 74-412pT değerli arasında gürültü ürettiği sonucu elde edilmiştir. Bununla birlikte arama bobinli manyetometrelerin hassasiyetleri karşılaştırıldığında silindir nüveli ve katmanlı nüveli tasarımlarının hassasiyetlerinin birbirleriyle yakın olduğu fakat nüvesiz tasarımın hassasiyetinin çok düşük olduğu ortaya çıkmıştır. Yapılan bu testler sonucunda, hassasiyetlerinin ve sensör üzerinde indüklenen gerilimler incelendiğinde silindir nüveli ve katmanlı nüveli tasarımlar ile çalışmalara devam edileceği nüvesiz tasarımın kullanılmayacağı ortaya çıkmıştır. Sistem tasarımında hassas ölçümlerin alınmak istenmesinden dolayı ve üç eksenli bir yapı planlandığı

için (X, Y, Z) iki silindir nüveli ve bir katmanlı nüveli arama bobinli manyetometreleri tasarımlar seçilmiştir.

Testleri tamamlanan arama bobinli manyetometrelerin indüklediği gerilimleri toplayabilmek ve anlamlandırabilmek için elektronik bileşenlere ihtiyaç duyulmaktadır. Arama bobinli manyetometreleri toprağa gömdükten sonra indüklenen gerilimlerin sinyal seviyeleri çok düşük olacağından ötürü ilk başta ön yükselteç ile gerilimin genliği arttırılacaktır. Ardından kontrol merkezinde yer alan analog elektronik devresi ile içinde yer alan filtreler ile sinyal bant bölgelerine ayrılıp gelen analog sinyal analog-dijital dönüştürücü ile sayısallaştırılıp bilgisayar arayüzünde görselleştirilecektir. Ön yükselteç devresi ve analog devre içinde yer alan dokuz farklı filtre devreleri için LTspice ile simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Ardında KICAD yazılımı kullanılarak PCB tasarımı yapılmıştır. PCB tasarımından sonra dizgisi yapılan kartlarda gerçekleşen testler sonucunda simülasyon ile benzer sonuçlar elde edilmiştir.

Üretimi yapılan elektronik bileşenler ile arama bobinli manyetometrelerin birlikte entegrasyonunun gerçekleştirilmesinden sonra yapılan testlerde ilgili filtre bantlarında ana sinyalin baskın diğerlerinin zayıfladığı sonucuna ulaşılmıştır. Bununla beraber silindir nüveli ve katmanlı nüveli arama bobinli manyetometrelerinin farklı seviyelerde gerilim indüklemesinin malzemelerin manyetik geçirgenliklerinden olduğu ortaya çıkmıştır.

Yapılan çalışmalar sonucunda, geliştirilen farklı arama bobinli manyetometre sisteminin, ULF manyetik alan anomalilerin tespiti konusunda hassasiyet sağlayabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Bununla birlikte, sistemin saha uygulamalarında uzun süreli verilerin toplanması ve istatistiksel olarak analizlerinin yapılması gerektiği, böyle yapılarak anlamlandırılması sonucu depremin önceden bilinmesine yönelik önemli bir sonuç elde edilmesi için kritik bir adımdır.

Bu tez kapsamında, deprem tahmini için yeni bir ölçüm cihazı geliştirerek katkı sağlamış ve manyetik alan değişimlerinin deprem habercisi olabilmesi konusunda altyapı oluşturmuştur. Gelecek çalışmalarda, daha geniş frekans aralıklarının incelenmesi, farklı bölgelerde bir ağ oluşturularak daha fazla veri toplanması ve analiz edilmesi deprem tahmini doğruluğunu arttırabilir.

- [1] Y. Zhang and X. Cheng, “Satellite observation based thermal anomalies detection for 2016 Menyuan MS6.4 earthquake,” *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, vol. 2017-July, pp. 1930–1933, Dec. 2017, doi: 10.1109/IGARSS.2017.8127356.
- [2] M. Picchiani, M. Chini, F. Del Frate, S. Stramondo, and G. Schiavon, “Retrieval of fault parameters of October 23, 2011 Eastern Turkey earthquake obtained by Neural Network,” *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, pp. 2998–3001, 2012, doi: 10.1109/IGARSS.2012.6350795.
- [3] S. Stramondo *et al.*, “Did the September 2010 (Darfield) earthquake trigger the February 2011 (Christchurch) event?,” *Scientific Reports 2011 1:1*, vol. 1, no. 1, pp. 1–7, Sep. 2011, doi: 10.1038/srep00098.
- [4] Uzun Alper and Oğlakçı Burak, “(PDF) Turkey’s Earthquake History and Institution Based Earthquake Reduction Policies and Strategies.” Accessed: Jul. 30, 2024. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/345497616_Turkey’s_Earthquake_History_and_Institution_Based_Earthquake_Reduction_Policies_and_Strategies
- [5] R. A. Grant, T. Halliday, C. A. Rachel Grant, and N. Bennett, “Predicting the unpredictable; evidence of pre-seismic anticipatory behaviour in the common toad,” *J Zool*, vol. 281, no. 4, pp. 263–271, Aug. 2010, doi: 10.1111/J.1469-7998.2010.00700.X.
- [6] C. H. Scholz, L. R. Sykes, and Y. P. Aggarwal, “Earthquake Prediction: A Physical Basis,” *Science (1979)*, vol. 181, no. 4102, pp. 803–810, Aug. 1973, doi: 10.1126/science.181.4102.803.
- [7] J. P. Toutain and J. C. Baubron, “Gas geochemistry and seismotectonics: a review,” *Tectonophysics*, vol. 304, no. 1–2, pp. 1–27, Mar. 1999, doi: 10.1016/S0040-1951(98)00295-9.
- [8] H. Acharya, “Volcanic activity and large earthquakes,” *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 13, no. 3–4, pp. 373–378, Aug. 1982, doi: 10.1016/0377-0273(82)90057-9.
- [9] R. Klees and D. Massonnet, “Deformation measurements using SAR interferometry: Potential and limitations,” *Geologie en Mijnbouw/Netherlands Journal of Geosciences*, vol. 77, no. 2, pp. 161–176, 1998, doi: 10.1023/A:1003594502801/METRICS.
- [10] B. Gündoğdu, H. Erdoğan, and O. Oktar, “Investigation of Disasters with Different InSAR Methods,” *Turkish Journal of Geosciences*, vol. 2, no. 1, pp. 33–45, Jun. 2021, doi: 10.48053/TURKGEO.945892.
- [11] Y. Zhang, Z. Jiang, H. Huang, Y. Fang, X. Mu, and X. Cheng, “Thermal anomalies detection before 2013 Songyuan earthquake using MODIS LST

- data,” *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, pp. 3009–3012, Nov. 2014, doi: 10.1109/IGARSS.2014.6947110.
- [12] Y. Zhang, Z. Jiang, Y. Fang, H. Huang, and X. Cheng, “Thermal anomaly detection for 2014 Jinggu earthquake using remote sensing data,” *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, vol. 2015-November, pp. 3587–3590, Nov. 2015, doi: 10.1109/IGARSS.2015.7326597.
- [13] F. Jing, M. Jiang, L. Zhang, and R. P. Singh, “Detection and Identification of Preseismic Thermal Anomalies in Cloudy Conditions Associated with the 2022 Luding (China) Mw 6.6 Earthquake,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 61, 2023, doi: 10.1109/TGRS.2023.3304975.
- [14] W. Astuti, F. Ari, R. Akmeliawati, and W. Sediono, “Graphical based monitoring of the Earth’s electric field signal prior to the earthquake,” *2014 the 5th International Conference on Information and Communication Technology for the Muslim World, ICT4M 2014*, Jan. 2014, doi: 10.1109/ICT4M.2014.7020680.
- [15] J. Hu *et al.*, “Time Domain Feature Extraction Technique for earth’s electric field signal prior to the Earthquake,” *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 53, no. 1, p. 012006, Dec. 2013, doi: 10.1088/1757-899X/53/1/012006.
- [16] M. S. Ozerdem, B. Ustundag, and R. M. Demirer, “Self-organized maps based neural networks for detection of possible earthquake precursory electric field patterns,” *Advances in Engineering Software*, vol. 37, no. 4, pp. 207–217, Apr. 2006, doi: 10.1016/j.advengsoft.2005.07.004.
- [17] Y. Fujinawa, K. Takahashi, Y. Noda, H. Iitaka, and S. Yazaki, “Remote Detection of the Electric Field Change Induced at the Seismic Wave Front from the Start of Fault Rupturing,” *International Journal of Geophysics*, vol. 2011, no. 1, p. 752193, Jan. 2011, doi: 10.1155/2011/752193.
- [18] Z. ; Li *et al.*, “Analysis of Pre-Earthquake Space Electric Field Disturbance Observed by CSES,” *Atmosphere 2022, Vol. 13, Page 934*, vol. 13, no. 6, p. 934, Jun. 2022, doi: 10.3390/ATMOS13060934.
- [19] N. Tal, Y. Morag, and Y. Levron, “Increasing the Sensitivity of Search Coil Magnetometer by Capacitive Compensation,” *IEEE Sens J*, vol. 16, no. 12, pp. 4671–4672, Jun. 2016, doi: 10.1109/JSEN.2016.2550604.
- [20] T. Qin, S. Zhang, S. Chen, and J. Lin, “Frequency response of search coil magnetometer with magnetic feedback,” *ICCASM 2010 - 2010 International Conference on Computer Application and System Modeling, Proceedings*, vol. 5, 2010, doi: 10.1109/ICCASM.2010.5619077.
- [21] M. Bucur, G. Roşu, A. Bordianu, L. Petrescu, V. Ionita, and O. Baltag, “Simplified Design of a Low Frequency Search Coil Magnetometer,” *2019 11th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering, ATEE 2019*, Mar. 2019, doi: 10.1109/ATEE.2019.8724978.
- [22] A. Nourmohammadi, M. H. Asteraki, S. M. H. Feiz, and M. Habibi, “A Generalized Study of Coil-Core-Aspect Ratio Optimization for Noise Reduction and SNR Enhancement in Search Coil Magnetometers at Low

- Frequencies,” *IEEE Sens J*, vol. 15, no. 11, pp. 6454–6459, Nov. 2015, doi: 10.1109/JSEN.2015.2461432.
- [23] P. Xiong, C. Long, H. Zhou, X. Zhang, and X. Shen, “GNSS TEC-Based Earthquake Ionospheric Perturbation Detection Using a Novel Deep Learning Framework,” *IEEE J Sel Top Appl Earth Obs Remote Sens*, vol. 15, pp. 4248–4263, 2022, doi: 10.1109/JSTARS.2022.3175961.
- [24] M. B. Gokhberg, V. A. Morgounov, T. Yoshino, and I. Tomizawa, “Experimental measurement of electromagnetic emissions possibly related to earthquakes in Japan,” *J Geophys Res Solid Earth*, vol. 87, no. B9, pp. 7824–7828, Sep. 1982, doi: 10.1029/JB087IB09P07824.
- [25] A. Grosz, E. Paperno, S. Amrusi, and B. Zadov, “A three-axial search coil magnetometer optimized for small size, low power, and low frequencies,” *IEEE Sens J*, vol. 11, no. 4, pp. 1088–1094, 2011, doi: 10.1109/JSEN.2010.2079929.
- [26] A. Kiyak, E. Pamuk, S. Köksal, M. L. Bakar, and S. Tosuner, “New high resolution aeromagnetic anomaly map of Türkiye and its various derivative-based maps,” *Turkish Journal of Earth Sciences*, vol. 32, no. 2, pp. 231–247, 2023, doi: 10.55730/1300-0985.1840.
- [27] C. Coillot, J. Moutoussamy, P. Leroy, G. Chanteur, and A. Roux, “Improvements on the Design of Search Coil Magnetometer for Space Experiments,” *Sens Lett*, vol. 5, no. 1, pp. 167–170, Mar. 2007, doi: 10.1166/sl.2007.050.
- [28] O. Le Contel *et al.*, “The Search-Coil Magnetometer for MMS,” *Space Sci Rev*, vol. 199, no. 1–4, pp. 257–282, Mar. 2016, doi: 10.1007/s11214-014-0096-9.
- [29] M. Parrot *et al.*, “The magnetic field experiment IMSC and its data processing onboard DEMETER: Scientific objectives, description and first results,” *Planet Space Sci*, vol. 54, no. 5, pp. 441–455, Apr. 2006, doi: 10.1016/J.PSS.2005.10.015.
- [30] T. Bleier and F. Freund, “Earthquake [earthquake warning systems],” *IEEE Spectr*, vol. 42, no. 12, pp. 22–27, Dec. 2005, doi: 10.1109/MSPEC.2005.1549778.
- [31] T. Bleier, C. Dunson, M. Maniscalco, N. Bryant, R. Bambery, and F. Freund, “Investigation of ULF magnetic pulsations, air conductivity changes, and infra red signatures associated with the 30 October Alum Rock M5.4 earthquake,” *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 9, no. 2, pp. 585–603, Apr. 2009, doi: 10.5194/NHESS-9-585-2009.
- [32] V. Kushwah, V. Singh, and B. Singh, “Ultra low frequency (ULF) amplitude anomalies observed at Agra (India) and their association with regional earthquakes,” *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, vol. 34, no. 6–7, pp. 367–372, Jan. 2009, doi: 10.1016/J.PCE.2008.07.011.
- [33] Swati *et al.*, “Ultra-low frequency (ULF) magnetic field emissions associated with some major earthquakes occurred in Indian Subcontinent,” *J Atmos Sol Terr Phys*, vol. 211, p. 105469, Dec. 2020, doi: 10.1016/J.JASTP.2020.105469.

- [34] G. B. Hospodarsky, "Spaced-based search coil magnetometers," *J Geophys Res Space Phys*, vol. 121, no. 12, pp. 12,068-12,079, Dec. 2016, doi: 10.1002/2016JA022565.
- [35] J. E. Lenz, "A Review of Magnetic Sensors," *Proceedings of the IEEE*, vol. 78, no. 6, pp. 973–989, 1990, doi: 10.1109/5.56910.
- [36] M. Remy, T. Hélie, and R. Müller, "A minimal passive model of the operational amplifier: application to Sallen--Key analog filters," Aug. 2019, Accessed: Sep. 06, 2024. [Online]. Available: <https://hal.science/hal-02275503>
- [37] O. B. Olalekan and O. V. Toluwani, "Sallen-Key Topology, MFB and Butterworthy in Bandpass Design for Audio Circuit Design," *Asian Journal of Electrical Sciences*, vol. 6, no. 1, pp. 23–28, Apr. 2017, doi: 10.51983/AJES-2017.6.1.1992.
- [38] TI Documentation, "Single-supply, 2nd-order, Sallen-Key band-pass filter circuit Gain Low Cutoff Frequency (f_l) High Cutoff Frequency (f_h) V_{ref}," 2021, Accessed: Sep. 06, 2024. [Online]. Available: www.ti.com
- [39] J. Y. C. Chan, N. C. F. Tse, and L. L. Lai, "A coreless electric current sensor with circular conductor positioning calibration," *IEEE Trans Instrum Meas*, vol. 62, no. 11, pp. 2922–2928, 2013, doi: 10.1109/TIM.2013.2266051.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. A. E. Yıldırım, N. Tokan Türker, ve H. Sözeri, “Ultra Düşük Frekans (ULF) Sinyal Tespiti için Arama Bobinli Manyetometre Tasarımı: Nüve Yapısının Performans Üzerindeki Etkisi,” İstanbul: 10.Bilim Günleri Kongresi, 2025.

