T.C
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAVAİ GÜÇ HATLARININ ETRAFINDAKİ ELEKTROMANYETİK ALANLARDAN ENERJİ HASADI

Mahmut KABAKULAK

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ŞANLIURFA
2020

Dr. Öğr. Üyesi Serdal ARSLAN danışmanlığında, Mahmut KABAKULAK'ın hazırladığı "**Havai Güç Hatlarının Etrafındaki Elektromanyetik Alanlardan Enerji Hasadı**" konulu bu çalışma 13/01/2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

İmza

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Serdal ARSLAN …….

Üye : Prof. Dr. Erol KURT …….

Üye : Doç. Dr. M. Tahir GÜLLÜOĞLU …….

Bu Tezin Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Yapıldığını ve Enstitümüz Kurallarına Göre Düzenlendiğini Onaylarım.

Doç. Dr. İsmail HİLALİ
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖZET…… i
ABSTRACT…….... ii
TEŞEKKÜR…….... iii
ŞEKİLLER DİZİNİ……..…... iv
ÇİZELGELER DİZİNİ……. v
SİMGELER DİZİNİ……..... vi
1. GİRİŞ..... 1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR..... 4
3. MATERYAL ve YÖNTEM..... 12
3.1. Elektromanyetik Alanlardan Enerji Hasatlayıcı……..... 12
3.1.1. Hasatlayıcı tasarım modelleri……... 14
3.1.2. Toroidal tip modeller……... 20
3.1.3. Çekirdek tip modeller……... 22
3.1.4. Sonlu elemanlar yöntemi ve Ansys Maxwell yazılımı…… 23
3.2. RF Alıcı-Verici, Güç Kontrol ve Sensörler Kartı……..… 25
3.3. Bilgisayar Ara Yüz Programı……..... 28
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA…… 31
4.1. Sayısal Analizler ve Deney Verileri……... 31
4.1.1. Toroidal tip modellerin sayısal analizleri ve deney verileri……..…….... 31
4.1.2. Çekirdek tip modellerin sayısal analizleri ve deney verileri……..... 40
4.2. Endüstriyel Test Sonuçları…….....……..... 50
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER…… 57
KAYNAKLAR……... 59
ÖZGEÇMİŞ…….. 62
EKLER…….. 63
Ek 1. Hasatlayıcı Sistem İçin Kullanılan Devre Şematikleri……... 63
Ek 2. Yazılım Kodları…….. 69
Ek 3. Veri Kartı Özetleri……..... 74
Ek 4. Firma Cihaz Bilgileri……..…… 83

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

HAVAİ GÜÇ HATLARININ ETRAFINDAKİ ELEKTROMANYETİK ALANLARDAN ENERJİ HASADI

Mahmut KABAKULAK

Harran Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Serdal ARSLAN
Yıl: 2020, Sayfa: 93

Gelişen teknoloji ile çok düşük güçlerde (miliwatt) çalışabilen sensörler gün geçtikçe artmaktadır. Sensörler yardımıyla iletim hatlarında ölçme, takip ve uyarı işlemleri kolaylıkla yapılabilmektedir. Günümüzde bu küçük güçlü sensörlerin çalışabilmesi için gerekli olan enerji güneş, rüzgâr enerjisi gibi sistemlerle sağlanabilmektedir. Bu sistemler olumsuz çevresel koşullardan çok fazla etkilenip ek bakım masraflarına yol açmaktadır. İletim hatları etrafındaki manyetik alanlardan enerji hasatlaması yöntemi ile olumsuz çevresel koşullarının etkileri en aza indirilebilir. Elektromanyetik alan enerji hasatlayıcıları, iletim hattının pirmer sargı ve hasatlayıcı üzerindeki sargıların ise sekonder sargıları olduğu iki parçalı transformatör gibi düşünülebilir. Verimin oldukça düşük olduğu bu sistemlerde iletim hattı üzerine yerleştirilebilecek boyutlardaki hasatlayıcılardan miliwatt seviyelerinde enerji elde edilebilmektedir. Bu seviyedeki enerji ile birçok sensörü çalıştırmak mümkündür. Böylece iletim hatlarından veri eldesine imkân sağlanır.

Bu tez çalışmasında iletim hatlarından veri elde etmeye yönelik hasatlayıcılar, sensör ve veri toplama kartı tasarlanmış ve testleri gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda; üç farklı nüve geometrisine sahip hasatlayıcıların sayısal analizleri Ansys Maxwell yazılımı ile yapılmıştır. Daha sonra laboratuvarda yapılan ön testlerle hasatlayıcıların farklı hat akımlarında hasatladığı gerilim ve güç ölçülmüştür. Analiz sonuçları ve ön test sonuçları incelenerek yüksek akımın olduğu havai iletim hatlarında kullanılması uygun geometrik yapının (çift C) modeli olabileceği tespit edilmiştir.

Endüstriyel testinde kullanılmak üzere; hava sıcaklığı, nem, basınç, yükseklik, hava kalitesi ve trafo sıcaklığı ölçümü yapabilen ve bu verileri RF verici ile uzak mesafeye iletebilecek bir devre tasarlanmıştır. Veri toplama kartına gelen veriler; bilgisayar ara yüz programı ile belirli periyotlarda kaydedilebilmekte ve verilerin zamana göre grafikleri elde edilebilmektedir. Bu devrenin enerjisi elektromanyetik alandan hasatlanan enerji ile karşılamaktır. Endüstriyel testi bir dağıtım transformatörü üzerinde yapılmıştır. Endüstriyel testinde transformatör besleme hattına monte edilen hasatlayıcı, sensör devresini besleyen bataryayı yeteri bir güçte şarj edip sistemin normal bir şekilde çalışması sağlamıştır.

ANAHTAR KELİMELER: Elektromanyetik indüksiyon, Enerji hasatlayıcı, İletim hattı, Sensör

ABSTRACT

MSc Thesis

ENERGY HARVESTİNG FROM ELECTROMAGNETİC FİELDS AROUND OVERHEAD POWER LİNES

Mahmut KABAKULAK

Harran University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electrical Electronic Engineering

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Serdal ARSLAN
Year: 2020, Page: 93

With the developing technology, sensörs that can operate at very low powers (milliwatts) are increasing day by day. With the help of sensörs, measurement, monitoring and warning operations can be performed easily on the transmission lines. Today, the energy required for the operation of these small powerful sensörs can be supplied by solar, wind energy systems. These systems are greatly affected by adverse environmental conditions, leading to additional maintenance costs. The effects of adverse environmental conditions can be minimized by energy harvesting from magnetic fields around the transmission lines. Electromagnetic field energy harvesters can be thought of as two-part transformers where the transmission line is the pirmer winding and the windings on the harvester are secondary windings. In these systems where the efficiency is very low, the millwatt levels of energy can be obtained from the harvesters of sizes that can be placed on the transmission line. With this level of energy it is possible to operate many sensörs. Thus, it is possible to obtain data from transmission lines.

In this thesis, harvesters, sensörs and data acquisition cards were designed and tested to obtain data from transmission lines. In this context; Numerical analyzes of harvesters with three different core geometries were performed with Ansys Maxwell software. Then the voltage and power harvested by the harvesters at different line currents were measured with pre-tests in the laboratory. Analysis results and pre-test results were examined and it was determined that the geometric structure (double C) model suitable for use in overhead transmission lines with high current could be used.

To be used in field testing; A circuit is designed to measure air temperature, humidity, pressure, altitude, air quality and transformer temperature and to transmit this data to the remote distance with RF transmitter. Data received on the data collection card; computer interface program can be recorded at certain periods and time-based graphs of the data can be obtained. The energy of this circuit is to meet the energy harvested from the electromagnetic field. The field test was carried out on a distribution transformer. In the field test, the harvester mounted on the transformer supply line has charged the battery supplying the sensör circuit with sufficient power to ensure normal operation of the system.

KEY WORDS: Electromagnetic induction, Energy harvester, Transmission line, Sensor

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın yürütülmesi esnasında bilgisini ve tecrübesini benden esirgemeyen değerli danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Serdal ARSLAN'a, çalışmalarımın yürütülmesi süresince verdikleri teknik destekten dolayı Meksan Trafo Ltd. Şti.'ne, Tanel CANDEMİR'e ve çalışmam sürecinde maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen aileme ve de gelişiyle hayatıma renk katan canım oğlum Vahab Aliyar'a sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 3.1. Hasatlayıcı sistemi..... 12
Şekil 3.2. Hasatlayıcı modelleri..... 13
Şekil 3.3. Hasatlayıcı modellerin genel yapısı..... 15
Şekil 3.4. Hasatlayıcı deney seti..... 20
Şekil 3.5. Toroidal modellerin deney setindeki görüntüleri..... 21
Şekil 3.6. Çekirdek tip modellerin deney setindeki görüntüleri..... 23
Şekil 3.7. Yazılım çözüm akış diyagramı..... 25
Şekil 3.8. Hazırlanan güç kontrol, sensörler ve RF verici devresi görünümü..... 26
Şekil 3.9. Alıcı devre..... 27
Şekil 3.10. Bilgisayar ara yüz programı..... 28
Şekil 4.1. Model 1 manyetik akı yoğunluğu değişimi ve akı çizgileri..... 31
Şekil 4.2. Model 1 hasatlanan güç değişim grafiği..... 31
Şekil 4.3. Model 1 hasatlanan gerilim değişim grafiği..... 33
Şekil 4.4. Model 2 hasatlanan güç değişim grafiği..... 34
Şekil 4.5. Model 2 hasatlanan gerilim değişim grafiği..... 35
Şekil 4.6. Model 3 hasatlanan güç değişim grafiği..... 36
Şekil 4.7. Model 3 hasatlanan gerilim değişim grafiği..... 37
Şekil 4.8. Toroidal modellerde hasatlanan güç değişim grafiği..... 38
Şekil 4.9. Model C1 manyetik akı yoğunluğu değişimi ve akı çizgileri..... 40
Şekil 4.10. Model C1 demir kayıpları değişimi..... 41
Şekil 4.11. Model C1 hasatlayıcıda indüklenen gerilim değişimi (Ansys Maxwell)..... 42
Şekil 4.12. Model C1 hasatlayıcıda indüklenen gerilim değişimi (deney)..... 42
Şekil 4.13. Model C1 hasatlanan güç değişim grafiği..... 43
Şekil 4.14. Model C1 hasatlanan gerilim değişim grafiği..... 44
Şekil 4.15. Model C2 manyetik akı yoğunluğu değişimi ve akı..... 45
Şekil 4.16. Model C2 demir kayıpları değişimi..... 46
Şekil 4.17. Model C2 hasatlayıcıda indüklenen gerilim değişimi (Ansys Maxwell)..... 47
Şekil 4.18. Model C2 hasatlayıcıda indüklenen gerilim değişimi (deney)..... 47
Şekil 4.19. Model C2 hasatlanan güç değişim grafiği..... 48
Şekil 4.20. Model C2 hasatlanan gerilim değişim grafiği..... 49
Şekil 4.21. Çekirdek tip modellerde hasatlanan güç değişim grafiği..... 50
Şekil 4.22. Endüstriyel test öncesi..... 51
Şekil 4.23. Endüstriyel test..... 52
Şekil 4.24. Hava sıcaklığı değişim grafiği 53
Şekil 4.25. Basınç değişim grafiği..... 53
Şekil 4.26. Yükseklik değişim grafiği..... 54
Şekil 4.27. Nem değişim grafiği..... 54
Şekil 4.28. Trafo sıcaklık değişim grafiği..... 55
Şekil 4.29. Hava kirliliği değişim grafiği..... 55

.

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa No

Çizelge 3.1. Ferromanyetik malzemelerin özellikleri…….. 14
Çizelge 3.2. Toroidal tip hasatlayıcı modellerin teknik özellikleri.....15
Çizelge 3.3. Çekirdek tip hasatlayıcı modellerin teknik özellikleri…….. 16
Çizelge 3.4. *H*'nin bir fonksiyonu olarak *B* için anhisteritik eğri katsayıları…… 17
Çizelge 3.5. *B*'nin bir fonksiyonu olarak *H* için anhisteritik eğri katsayıları…… 18
Çizelge 3.6. Steinmetz katsayıları……. 19
Çizelge 3.7. Sensör teknik verileri…… 27
Çizelge 4.1. Güç yoğunlukları karşılaştırması..... 39
Çizelge 4.2. Endüstriyel testi verileri..…… 52
Çizelge 4.3. Sensör verilerinin karşılaştırılması.....…… 47

SİMGELER DİZİNİ

A	: Amper
B	: Manyetik akı yoğunluğu
H	: Henry
H(t)	: Manyetik alan şiddeti
Hz	: Hertz
J	: Akım yoğunluğu
m	: Metre
N	: Sipir sayısı
V	: Volt
W	: Watt
T	: Tesla
ρ	: İletken öz direnci
E	: Elektrik alan şiddeti
S	: Kesit alanı
μ	: Manyetik geçirgenlik
φ	: Manyetik akı
L	: Uzunluk
I	: Akım
P	: Aktif güç
f	: Frekans
m_k	: Anhisteritik eğri katsayısı
h_k	: Anhisteritik eğri katsayısı
n_k	: Anhisteritik eğri katsayısı
α_k	: Anhisteritik eğri katsayısı
β_k	: Anhisteritik eğri katsayısı
γ_k	: Anhisteritik eğri katsayısı
ε_k	: Anhisteritik eğri katsayısı
ζ_k	: Anhisteritik eğri katsayısı
k_w	: Steinmetz katsayısı
α	: Steinmetz katsayısı
β	: Steinmetz katsayısı
Ω	: Ohm
AC	: Alternatif Akım
DC	: Doğru akım
RF	: Radyo frekans
GPS	: Küresel konumlama sistemi
GSM	: Cep telefonu iletişim protokolü
SPI	: Seri haberleşme protokolü
PCB	: Baskı devre kartı
Li-Po	: Lityum polimer batarya
IEC	: Uluslararası elektroteknik komisyonu

1. GİRİŞ

Hans Christian Orsted 1819 yılında bir deney esnasında, elektrik devresinin açılıp kapanması ile devrenin yanındaki bir pusula ibresinin hareket ettiğini görmüştür. Orsted bu gözlemi üzerine giderek yaptığı deneyler sonucunda 1820 yılında akım geçen telin etrafında bir manyetik alan oluştuğunu söyleyerek bilim tarihinde (bilinen) ilk defa elektrik akımı ve manyetizma arasındaki ilişkiyi ortaya koyan kişi olmuştur.

William Sturgeon 1825 yılında at nalı şeklindeki bir demir parçasına üzerine birkaç sarım kablo sarıp kablodan akım geçirdiğinde demirin mıknatıslandığını görmüş ve Manyetizmanın elektrik akımı ile oluşturulmasıyla elektromıknatısı keşfetmiştir. Sturgeon'un keşfettiği elektromıknatıs ile 30 gramlık bir demir parçası ile yaklaşık 4 kilogramlık bir demir parçasını kaldırması, elektrik enerjisinin makine kontrolünde de kullanılması fikrine mihmandarlık etmiştir. Michael Faraday'ında elektromanyetizma üzerine çalışması bilim tarihinde büyük bir ehemmiyete sahiptir. Faraday demir bir nüve üzerine birbirinden izoleli iki sargı sarıp birinci sargıdan akım geçirdiğinde ikinci sargıda anlık bir akımın oluştuğunu görmesi, 1831 yılında elektromanyetik indüksiyon kavramını ortaya çıkarmıştır. Faraday deneylerine devam ederek; bir doğal mıknatısı sargı içinde hareket ettirdiğinde sargıda elektrik akımının oluştuğunu gözlemlemesi ve sabit bir doğal mıknatısın etrafındaki sargıyı hareket ettirdiğinde sargıda akım oluştuğunu gözlemlemesi günümüz elektrik makinelerinin temelini oluşturmuştur. Faraday'ın bu çalışmalarının en önemli sonucu değişen manyetik alanın bir elektrik alan ürettiğidir. Daha sonra James Clark Maxwell manyetik alan ile elektrik alan arasındaki bu ilişkiyi Faraday kanunu adıyla matematiksel olarak modellemiştir. Nicholas Joseph Callan 1836 yılında Strgueon ve Faraday'ın çalışmalarını birleştirerek bir demir nüvenin karşılıklı kenarlarına birbirinde yalıtılmış iki ayrı sargıdan oluşan bir tasarım yapmıştır. Birinci sargıda yük oluşturan akım kaynağının açma kapama hızının artmasıyla ikinci sargıda daha yüksek bir gerilim oluştuğunu gözlemlemesi aslında hem ilk indüksiyon transformatörünün hem de kablosuz enerji iletiminin temelini atmıştır (Uzun, 2012). Kablosuz enerji iletimi uygulaması 19. yüzyılın sonlarında Nikola Tesla ile ortaya

çıkan genel bir fikirdir. Tesla'nın bu fikrinin temelinde elektrik akımı elektromanyetizma olduğu aşikardır ve bu önceki çalışmalar ışığında kablosuz enerji transferi fikrini hızla geliştirmiştir.

Kablosuz enerji transferi çeşitlerinden; elektromanyetik radyasyon, lazer ışını ve mikrodalga ışınımsal iletim yöntemlerini oluştururken transformatörler, hava aralıklı sistemler, indüktif enerji transferi ve manyetik rezonans ışınımsal olmayan iletim yöntemleri olarak adlandırılmaktadır. Bu iki yöntem arasındaki en büyük fark ışınımsal olmayan yöntemlerin ışınımsal yöntemlere göre daha kısa mesafeli ve daha yüksek güçlü olmasıdır (Özsoy, 2018). Işınımsal olmayan kablosuz enerji iletimi yöntemlerinde enerji aktarımı birbirinden izoleli en az iki sargıdan oluşur. Bu sargılardan birine zamana göre yönü ve şiddeti değişen bir gerilim uygulayıp sargıdan akım akmasını sağlanırsa Ampere yasasına göre bu sargı etrafında zamanla yönü ve şiddeti değişen bir manyetik alan oluşur. Zamanla yönü ve şiddeti değişen bir manyetik alan içerisinde bulunan diğer sargılarda manyetik indüksiyon yasasına göre gerilim indüklenir. Bu gerilim kaynağına bir yük bağlanması durumunda yük üzerinden akım geçer ve enerji bir taraftan diğer tarafa kablosuz olarak aktarmış olur.

Yarı iletken teknolojisinin ilerlemesiyle çok çeşitli sensörler mili watt gibi çok düşük seviyelerde çalışabilir duruma gelmiştir. Böylece sensörlerin; ev uygulamaları, akıllı şebeke uygulamaları, iletim-dağıtım hatlarının izlenmesi, meteorolojik verilerin elde edilmesinin ve günlük yaşantımız gibi birçok yerde kullanılmalarına olanak sağlamıştır. Bazı özel kullanım alanlarına yönelik kullanılacak sensörlerin enerji ihtiyaçlarının sağlanması önemli sorundur. Örneğin; dış mekân durum izleme sensörlerinin çalışabilmesi için gerekli olan elektrik enerjisi bataryalı sistemler ile sağlanmaya çalışılmıştır. Ancak bataryalı sistemlerin batarya ömrü batarya değişimi gibi işletme masrafları bu sensörler için farklı bir enerji kaynağı arayışına sebep olmuştur. Daha sonraları bu sensörlere küçük güçlü güneş panelleri veya rüzgâr tribünleri ile enerji sağlanması fikri dikkat çekici olmuştur. Düşük maliyetli bu sistemlerin olumsuz hava koşullarından çok fazla etkilenmesi önemli dezavantajlarıdır. Son zamanlarda popüler olmaya başlayan bir yöntemde bu sensörlere bağlı bulundukları hattın etrafındaki elektromanyetik alandan enerji

hasatlanması yöntemiyle enerji sağlanması olmuştur. Elektromanyetik enerji hasatlayıcılar; ışınımsal olmayan kablosuz enerji iletim yöntemlerinden indüktif enerji transferi çeşitlerine girer. İki parçalı transformatör gibi düşünülen indüktif enerji iletiminin temeli iki devre arasındaki indüktif kuplajı kullanarak enerji transferi gerçekleştirmektir. Endüktif enerji iletimiyle enerji elde eden elektromanyetik hasatlayıcılarda birincil bobini hattın kendisi, ikincil bobini ise hattan bağımsız bir nüve üzerine sarılan sargılar oluşturmaktadır. Bu sistemlerden çok düşük enerji elde edilebildiğinden dolayı literatürde daha çok kablosuz enerji iletimi yerine enerji hasatlayıcı ismiyle anılmaktadır. Bu sistemlerin diğer sistemlere kıyasen avantajları şöyle sıralanabilir (Zhuang ve ark., 2017);

- Olumsuz hava koşullarından etkilenmemeleri,
- Hareketli parçalarının olmamasıyla bakım gerektirmemeleri,
- Yüksek kapasiteli batarya ihtiyaçlarının olmaması,
- Hatta akım olduğu sürece sistemin çalışması,

Bu avantajların yanı sıra literatürde ve ticari olarak bu sistemlerin tercih edilmesi nedeniyle bu tez çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu tez çalışmasının katkıları şu şekilde özetlenebilir:

- Literatüre yer alan toroidal nüveli çalışmalardan farklı olarak tek ve karşılıklı C tipi geometri incelenmiştir. Ayrıca toroidal, tek C ve karşılıklı C modellerin sayısal ve deneysel çalışmaları gerçekleştirilmiştir.
- Hasatlayıcı model, güç kontrol devresi, RF haberleşme, sensör ve ara yüz içeren deney seti hazırlanmış ve tasarlanan sistemin endüstriyel testleri gerçekleştirilmiştir.
- Bu alanda ülkemizde gerçekleştirilen ilk çalışmadır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Enerji tüketiminin artmasıyla enerjiye ihtiyaç gün geçtikçe artmaktadır. Özellikle büyük tüketicilerin enerji talepleri ve enerji santrallerinin şebekeye girip çıkması gibi durumlar iletim hatlarında büyük dalgalanmalara sebep olmaktadır. Bu dalgalanmalar iletim hattının güvenirliğini ve kalitesini olumsuz etkilemektedir. İletim hatlarına kurulacak sensör düğümleri ağı ile iletim hatlarının mevcut yüklerinin çevrim içi izlenerek alınacak önlemlerle hattın güvenirliği ve enerji kalitesi artırabilir (Zhao ve ark., 2012). Özellikle yüksek gerilim iletim hatlarının çevrim içi izlenmesi, hatta oluşabilecek problemleri ön görüp müdahale edebilmek için büyük önem arz etmektedir. Bilindiği üzere yüksek gerilim hatlarında hattın toprağa mesafesini etkileyen yaşlanma ve buz yükü gibi olaylar ciddi problemlere sebep olabilmektedir. Örneğin; havai iletim hatlarında buz yükünün artması, buz yükünden 1998'de Kanada'da 150 iletim direğinin çökmesi gibi çok tehlikeli sonuçlar doğurabileceği görülmüştür (Moser ve ark., 2010). Bu yüzden iletim hatlarının buz yükünün çevrim içi takip edilmesi önemli bir konudur. İletim hattına kolayca monte edilebilecek bir ivme sensörü ve haberleşme modülü ile hattın buzlanması, toprağa ve diğer kısımlara olan mesafesi çevrim içi olarak takip edilebilir (Moser ve ark., 2010). Düşük seviyede enerji ihtiyacı olan bu sensör sistemlerinin enerjilerini güneş ve rüzgâr modülleri ile karşılamak mümkün olmuştur. Fakat bu modüllerin hava koşullarına aşırı duyarlılığı, akü ömürlerinin kısalığı, hareketli parçalarının bulunmasından bakım ihtiyaçlarının olması ve yine kullanım ömrünün kısalığı birer dezavantaj olmuştur (Yang ve ark., 2018).

İletim hat etrafındaki bazı bilgileri merkeze ileteceği düşünülen bu sensör düğümlerinin enerji ihtiyacını, hat üzerindeki elektrik alan hasatlayıcıları ile karşılamak yöntemi, güneş ve rüzgâr enerjisi hasatlayıcıları gibi bilinen yöntemler dışında farklı bir çığır açmıştır. Zangl ve ark. (2008), bu yöntem ile 150 kV'luk hattaki ivme sensörü düğümüne 350 mW enerji hasatlayarak bu düğümden başarı ile veri alabilmişlerdir. Zhao ve ark. (2012), çalışmalarında 110 kV'luk iletim hattındaki elektrik alandan enerji hasatlama ile 17.3 mW'lık enerji elde etmişlerdir. Bu enerji

süper kapasitör ve batarya kullanılarak depo edilip sensör düğümlerinin çalışabilmesi için yeterli enerjiyi sağlamıştır. Moser ve ark. (2010), 220 kV'luk iletim hattı üzerinden elektrik alan enerji hasatlama yöntemi ile 0.5 mW civarında güç elde edilmiştir. Bu güç; kapasitör ve lityum-iyon bataryalarda depo edildiğinde sensör ve haberleşme modülü sisteminin enerji ihtiyacını karşılamak için yeterli olmuştur.

İletim hattı yakınlarından, elektrik alandan enerji hasatlama yöntemi yanı sıra iletim hattı etrafındaki manyetik alandan enerji hasatlama yöntemi de oldukça dikkat çekici olmuştur. Bu iki yöntem basitçe karşılaştırıldığında elektrik alandan enerji hasatlamada; hasatlayıcının montaj kolaylığı ve enerji eldesindeki lineerliğin avantajlı olduğu görülmüştür. Buna karşılık basit bir sıcaklık sensörü ve haberleşme modülünden oluşan sistemden sıcaklık verisi almak için yapılan deneyde; 22 kV potansiyel farklık elektrik alandan enerji hasatlama yöntemi ile elde edilen enerji ile bu sistemden 45 dakikada bir veri alına bilinirken 75 A'lik iletim hattındaki manyetik alandan enerji hasatlama yöntemi ile elde edilen enerji ile sensör haberleşme modülü sisteminden 4 dakikada bir veri alınmış olup elektromanyetik alandan enerji hasatlama yöntemi ile nispeten daha fazla enerji elde edilebildiği görülmüştür (Judd ve ark., 2012).

İletim hatlarındaki elektromanyetik alandan hasatlanan enerji kablosuz güç aktarım sistemleri ile iletim direklerindeki izleme ekipmanlarına enerji sağlama (Wang ve ark., 2016) fikri oldukça dikkat çekici olmuştur. Elektromanyetik alandan enerji hasatlama yöntemi aslında akım trafosu mantığına dayanan bir uygulamadır. Bu tip bir hasatlayıcı ile hem hattın akımını hem de eklenecek sensörlerle farklı veriler elde edilebilir. Akım trafosu gibi tasarlanmış bir hasatlayıcının kapasitesini ve indüktansını ölçüp gerekli hesaplamalarla bu hasatlayıcıya bir rezonans kondansatörü ekleyerek hasatlayıcıdan daha yüksek bir güç elde edilmesi mümkündür. Wang ve ark. (2014), rezonansa girmiş bir hasatlayıcıdan 68 A'lik bir hat akımında yaklaşık 20 W enerji hasatlamıştır. Daha yüksek enerji elde edilmesi daha fazla sensörün çalıştırılabilmesi anlamına gelir. Ayrıca bu çalışmada; hat akımının aşırı artması sonucu hasatlayıcıda indüklenen gerilimin yük için tehlikeli seviyelere çıkmasını engellemek için köprü doğrultucunun alt iki diyotlarına paralel kontrollü anahtarlar

bağlanmıştır. Bu kontrollü anahtarlar tehlikeli gerilim seviyelerinde bir kontrol devresi ile açılıp sekonder sargıları kısa devre ederek yüke giden akım beslemesini kesip yükü koruyabilmektedir.

Elektromanyetik indüksiyon ile enerji elde edilmesinde en önemli parametreler; nüve malzemesinin manyetik geçirgenliği, boyut ve sarım sayısının olduğu bilinmektedir. Hat akımının sabit 15 A olduğu bir iletken üzerinde, farklı boyutlarda ve farklı sarımlarla sarılmış nüve malzemesi olarak ferrit, nanokristalin ve demir tozu kullanılarak üç farklı toroidal elektromanyetik hasatlayıcının hasatladığı enerji karşılaştırıldığında ferrit nüveden 315.6 mW, nanokristal nüveli hasatlayıcıdan 54 mW ve demir tozu nüveli hasatlayıcıdan 0.77 mW enerji hasatlanmıştır (Junior ve ark. 2013; Santos ve ark. 2014). Nanokristal materyalinin manyetik geçirgenliğinin ferrit materyalinden yaklaşık 4 kat daha fazla olmasına rağmen ferrit nüveden hasatlanan enerji daha yüksek olmuştur bunun sebebi ferrit nüveli hasatlayıcının kütlesini daha fazla olmasıdır. Ferrit nüveli hasatlayıcıdan elde edilen enerjinin sıcaklık, nem, rüzgâr hızı algılayıcı gibi birçok sensörün çalışması için yeterli olduğu görülmüştür.

Elektromanyetik alandan enerji hasatlamada hasatlayıcının nüve geometrisinin ve sarım özelliğinin hasatlanan enerji üzerinde büyük etkisi olduğu görülen ilgi çekici bir çalışmada (Yuan ve ark., 2015) aynı manyetik alanda, nüve malzemesinin (ferrit), uzunluğunun ve üzerindeki sarım sayısının aynı olduğu, eşit dış çaplarda seçilen selenoid ve papyon şeklinde tasarlanmış hasatlayıcıların hasatladığı enerjiler karşılaştırılmıştır. Yapılan deneyde; papyon şeklindeki nüvenin iki ucu bir papyon gibi genişletilmesiyle havadan nüveye daha fazla manyetik akı yönlendirilmesine vesile olup nüvenin ortasındaki manyetizasyon yoğunlaştırılmıştır. Ayrıca tasarlanan nüve ile kutup yüzeylerinin artmasıyla kutuplar arasındaki ayrılmayı iyice belirginleştirdiğinden nüve ortasındaki demanyetizasyon iyice azalmıştır. Böylece bu yeni tasarımda 15 kat daha fazla enerjinin hasatlandığı belirtilmiştir. Bunlara ek olarak hasatlayıcının sarım özelliğinin hasatlanan enerji üzerindeki etkisi incelenerek aynı sarımda farklı kalınlıkta tel kullanıldığında çıkış gücünde çok bir değişiklik

olmadığı fakat küçük çaplı tel seçip sarım sayısını artırmakla daha yüksek güç elde edilebileceği tavsiye edilmiştir.

Elektromanyetik enerji hasatlayıcı ile hasatlanacak maksimum enerji nüve malzemesinin maksimum doyma akı yoğunluğuna bağlı olması hasatlanacak enerji miktarının belli bir sekonder sarım sayısından sonra değişmeyeceğini ve ayrıca doyma akı yoğunluğu daha büyük olan bir materyalden yapılacak nüvenin hacminin dolayısıyla ağırlığının daha küçük olacağından iletim hatlarında kullanılmasının daha avantajlı olacağı belirtilmiştir (Liu ve ark., 2016). Bu çalışmada aynı hacimde fakat daha küçük iç çaplı nüve tasarımıyla hat ile hasatlayıcı arasındaki hava boşluğunun azaltılması hasatlanan enerjiyi artırmış ve maksimum güç transferi için önemli olan toplam sekonder direnci hesabında bobin sargı direncinin büyüklüğü çekirdek kayıplarının oluşturduğu direncin yanında ihmal edilebilecek kadar küçük olduğu görülüp daha doğru bir hesap yapılarak 10 A hat akımından birçok sensörün çalışması için yeterli olan için 350 mW enerji hasatlanmıştır.

Paul ve ark. (2018), nüve malzemesi, tek veya çift nüveli yapı ve çift nüveli yapının arasındaki hava boşluğu şeklinin hasatlanan enerji üzerine etkisini araştırmıştır. Nüve malzemesi olarak silikon çeliği, nikel ve nanokristalin malzemeli nüveler karşılaştırıldığında hasatlanan en yüksek enerjinin çift nanokristalin nüveli hasatlayıcı olduğu görülmüştür. 100 A'lik hat akımından lineer hava boşluklu tasarımdan 25 V, V-şekilli hava boşluklu tasarımdan 37.7 V ve kademeli hava boşluklu tasarımdan 43 V gerilim indüklenmesiyle hava boşluğunun V-şekilli veya kademeli olması durumunda manyetik akının akabileceği yüzey alanın artmasından dolayı indüklenen geriliminde artırdığı görülmüştür. Wang ve ark. (2016), çalışmasında soğuk haddelenmiş silikon çelik sac nüve kullanılmış ve yapılan deneyler sonucunda diğer parametreler sabit kalma şartıyla; nüve hava aralığının azaltılması, radyal kalınlığın arttırılması, iç yarı çapın arttırılması, nüve yüksekliğinin arttırılması, hasatlayıcının verimini artırmıştır. Gerçekleştirdikleri optimizasyon çalışmalarıyla 102.5 A'lik hat akımından maksimum 17.64 W enerji hasatlanmıştır.

Toroidal nüveli enerji hasatlayıcıların hatta montaj zorluğu ve hava aralıklı hasatlayıcıların verim probleminden dolayı montaj kolaylığını sağlamak için geleneksel akım trafosu yönteminden farklı bir yöntem düşünülmüştür. Bu yöntemde (Hosseinimehr ve Tabesh, 2016) hattın yakınına monte edilmiş hasatlayıcının ucuna yerleştirilen sabit mıknatısla hat etrafındaki elektromanyetik alandan önce mekanik titreşimler elde edilmiş ve daha sonra bu mekanik titreşimler cihaz içindeki zıt kutuplu küçük sabit mıknatısların arasına yerleştirilen bobinlerde gerilim indükleyerek 50 A'lik hat akımından 0,16 mW enerji hasatlanmıştır. Boles ve ark. (2016), çalışmalarında; farklı bobin sarım şekillerinin hasatlanan enerji üzerindeki etkisi araştırılmış ve hava nüveli yarım daire bobin tasarımının; tam daire, kare ve üçgen tasarımdan daha iyi sonuç vermiştir. Fakat 2000 sarımlı hava nüveli bobinden 700 A lik hat akımında 2,28 W enerji hasatlanması hava nüveli hasatlayıcıların kullanım için uygun olmadığı sonucunu vermiştir. Aynı sarımda sarılmış bobin ve aynı ferrit malzeme kullanılarak toroidal tasarlanmış farklı boyutlarda 4 hasatlayıcı üzerinde yapılan analizlerde (Gaikwad ve Kulkarni, 2018) iç yarıçapı daha düşük ve enine kesiti daha fazla olan hasatlayıcıda indüklenen gerilimin daha fazla olduğu görülmüştür. Nüve tasarımının hasatlanan enerji üzerindeki etkisi araştırıldığı sarmal şekildeki nüve (Yuan ve ark., 2017) ile manyetik akı yolu uzatılmış olup demanyetizasyon faktörünün azalmıştır. Böylece manyetik akı yoğunluğunun artması ile hasatlanan enerji papyon nüveye nazaran 2 kat artmıştır. Yapılan optimizasyonlarda aynı boyda sarmal sayısının artırılması, sarmal adım açısının artırılması ve nüve materyali olarak yüksek geçirgenliğe sahip ferrit nüve kullanılması ile daha fazla enerji hasatlanabileceği görülmüştür.

Elektromanyetik indüksiyonda istenmeyen bir durum olan nüvenin doyuma ulaşması sargılarda indüklenen gerilimi sınırlamaktadır. Elektromanyetik hasatlayıcılarda da hat akımının nüvenin manyetik akı yoğunluğunu doyuracak şekilde artması hasatlayıcıdan elde edilecek enerjiyi iyice azaltır. Hasatlayıcı bobinine paralel bağlanacak bir anahtar ile hat akımının nüveyi doyuracak kadar yükselmesi durumunda anahtarın kısa bir süre bobin uçlarını kısa devre etmesi ve sonra tekrar açılması ile nüve doyum süresinin azaltılması (Zhuang ve ark., 2017)

fikri, anahtarsız devreye göre aynı hasatlayıcıdan %27 verim ile 10 A'lik hat akımından 317 mW enerji hasatlanmasına vesile olmuştur.

Hattı çevrelemeyip hattın bitişiğine konulan hasatlayıcı hatta kolaylıkla monte edilebilir. Ancak hat üzerinde oluşan manyetik alanın çok az bir kısmı bobin üzerinden geçeceğinden hasatlanacak enerjide çok az olacaktır. Hattın bitişiğine konulan böyle bir hasatlayıcıda, güçlü bir ferromanyetik malzeme olan elektrik çeliğinden yapılmış ve hat iletkeniyle hasatlayıcı nüvesini örten "akı kılavuzu" (White ve ark., 2018) kullanılarak hat üzerindeki manyetik alanın daha büyük bir kısmı nüve üzerine yönlendirilmiştir. Bu şekilde "akı kılavuzlu" tasarlanan dikdörtgen hasatlayıcıda verim %833 artarak 100 A'lik hat akımından 1.5 W enerji hasatlanmıştır.

Elektromanyetik alan hasatlayıcıların akıllı ev sistemlerindeki sensörlerin beslemesi için de kullanılabileceği fikri ile (Maharjan ve ark., 2018) hasatlayıcılar alışılmış dış mekân uygulamaları yanında iç mekânda da kullanılabilir olmuştur. Bu çalışmada ferrit malzemeden yapılmış iki adet C nüve tasarımı, montaj kolaylığı sağlanmıştır. İç mekân hat akımlarının çok düşük olmasından dolayı taşınabilir bir uzatma kablosu ve prizden oluşmuş kutu içerisine birden fazla sarım eklenerek hat akımı suni olarak yükseltilerek 65.3 A'lik hat akımı oluşturulmuş ve 105.24 mW enerji hasatlanmıştır.

Boles ve ark. (2016), çalışmalarında; bağıl geçirgenliği 1040 olan nüve malzemesi kullanılarak yarım daire bobinli 7.1 kg ağırlığında tasarlanan hasatlayıcıdan 150 A'lik hat akımında 100 W civarında enerji hasatlanması hatlarda çalışan İHA'ların şarjları için umut verici olduğu görülmüştür. Yıldırım akımları ölçme sistemleri, yıldırımın şebekeye geçmesi durumunu önlemek için genellikle; güneş panelleri, optoelektrik güç iletimi ve akım trafo gibi şebekeden bağımsız besleme kaynaklarına ile beslenir (Yang ve ark., 2018). Güneş panellerinin hava koşullarına aşırı duyarlılığı ve akü ömürlerinin kısalığı, optoelektrik güç iletimi yönteminin ise pahalı lazer devre elemanı ve yine kullanım ömrünün kısalığı birer dezavantajtır. Yang ve ark., (2018) akım trafosu ilkesine dayalı üzerinde hem sinyal

alma bobini hem de güç bobini bulunan tasarımla ihtiyacı olan enerjiyi yıldırım akımlarından alan bir yıldırım akımları ölçüm sistemi ile 25.6 kA'lik yıldırım darbe akımından güç devresi için 4.88 V gerilim indüklenmiş ve %3.1 hata ile yıldırım akımını ölçerek bu sistemlerin beslemesi için büyük avantaj elde etmiştir.

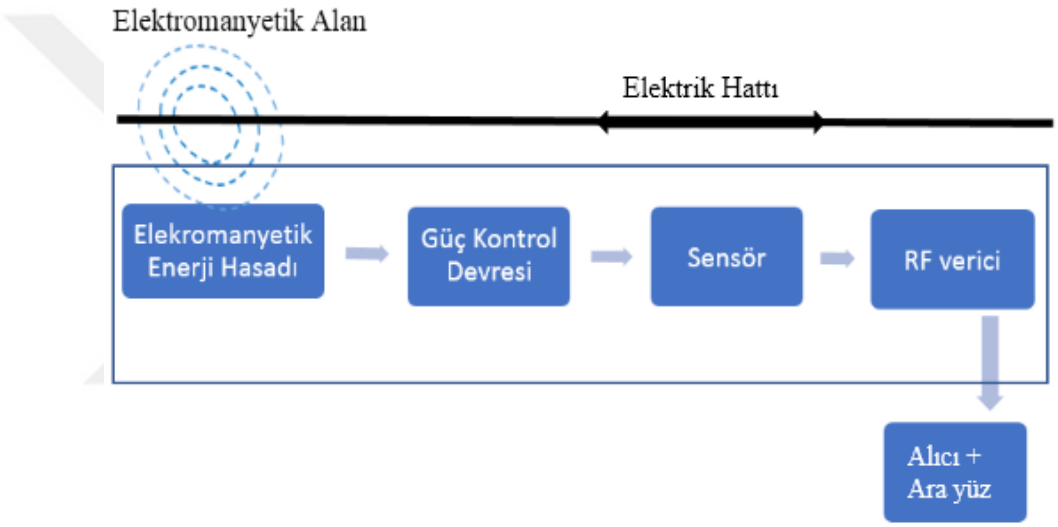
İletken üzerinden akan akımın frekansı arttıkça deri etkisinden dolayı iletkenin dışına doğru akım yoğunluğu artar. Düşük frekanslarda güç frekansın karesi ile artar ve bobin büyüklüğüne bağlı olarak frekansın artmasıyla güç artar. Belli bir seviyeden sonra bobin parametrelerinden bağımsız olarak deri etkisi ve yakınlık etkisinden dolayı güç düşmeye başlar (Morag ve Levron 2019). Şebeke frekansında yüksek akımlarda kablo yerine bara tip iletkenler kullanılır ayrıca uçak gibi bazı araçlarda değişken frekanslı elektrik akımı taşıyan baralar üzerinden elektrik iletimi sağlanır. Bu baralar üzerine yerleştirilecek elektromanyetik alan enerji hasatlayıcılarla bazı sensörler için enerji hasatlanması fikri ile Wright ve ark. (2019), bara iletkenlerinin üzerinde 10 Hz ile 300 Hz arasında değişen hat akımlarında hasatlama yapılacak en uygun yerin deri etkisinden dolayı bara kenarları olduğunu söylemiştir. Ayrıca bu çalışmada dikdörtgen nüve şekli ve huni nüve şekilli hasatlayıcıların simülasyonu karşılaştırılmış olup huni şekilli nüvede hem kullanılacak tel ağırlığının azalması hem de nüve ortasındaki akı yoğunluğunun artmasından dolayı hasatlanan enerji 4.5 kat artarak 300 Hz, 30 A hat akımında 106 $\mu W/cm^3$ olmuştur.

Radyo frekanslarından 300 KHz ile 300 GHz aralığındaki radyo dalgarında da çok az miktarda enerji hasatlanabilir. Friis denklemine göre radyo dalgasından hasatlanan enerji sinyalin dalga boyunun karesi ile doğru, alıcı-veirici arasındaki mesafenin karesi ile ters orantılıdır (Guo ve ark., 2018). Genel olarak çok düşük yoğunluğa sahip olan radyo frekansından enerji hasatlamada yaklaşık 100 µW vericiden en fazla 0.3 $\mu W/cm^2$ kadar güç elde edilebilir bu da sensörlerin çalışabilmesi için yetersizdir (Rodriguez, 2017). Küçük kablosuz sensör ağlarına ve hızlı gelişen IP bağlantılı cihazların sistemlerine güç sağlamak için mikro ölçeklerden nano ölçeklere kadar belirli enerjiye ihtiyaç vardır.

Yukarda elektromanyetik hasatlayıcıların farklı geometrilerde, farklı yapılarda ve farklı uygulamalar için kullanılmaya başladığı görülmüştür. Her geometri ve yapıda farklı güçler elde edilerek bazı sensörlere enerji sağlanmıştır. Bu tez çalışmasında literatürde olan toroidal geometrili hasatlayıcı nüveleri incelenmiştir. Ayrıca literatürden olmayan farklı pencere genişliğine sahip C tipi geometride nüve modeli üzerinde durularak elektromanyetik hasatlama ile elde edilen enerji önceki çalışmalardaki benzer sensörlerin çalıştırılmasında kullanılmıştır. Sonraki bölümlerde izlenen yöntemlerle ilgili detaylı bilgiler sunulacaktır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Elektrik hattından enerji eldesi için yaygın olarak kullanılan sistem Şekil 3.1'de görülmektedir. Bu sistem; bir veya birden fazla elektromanyetik hasatlayıcı, bir güç kontrol devresi, sensör/sensör grubu, RF vericiden oluşmaktadır. Elektromanyetik hasatlayıcı; güç kartının (güç kontrol devresi, sensör, RF verici) ihtiyacı olan elektrik enerjisini sağlamaktadır. Sensör veya sensörlerden alınan veriler RF verici vasıtasıyla alıcı devreye aktarılmaktadır.



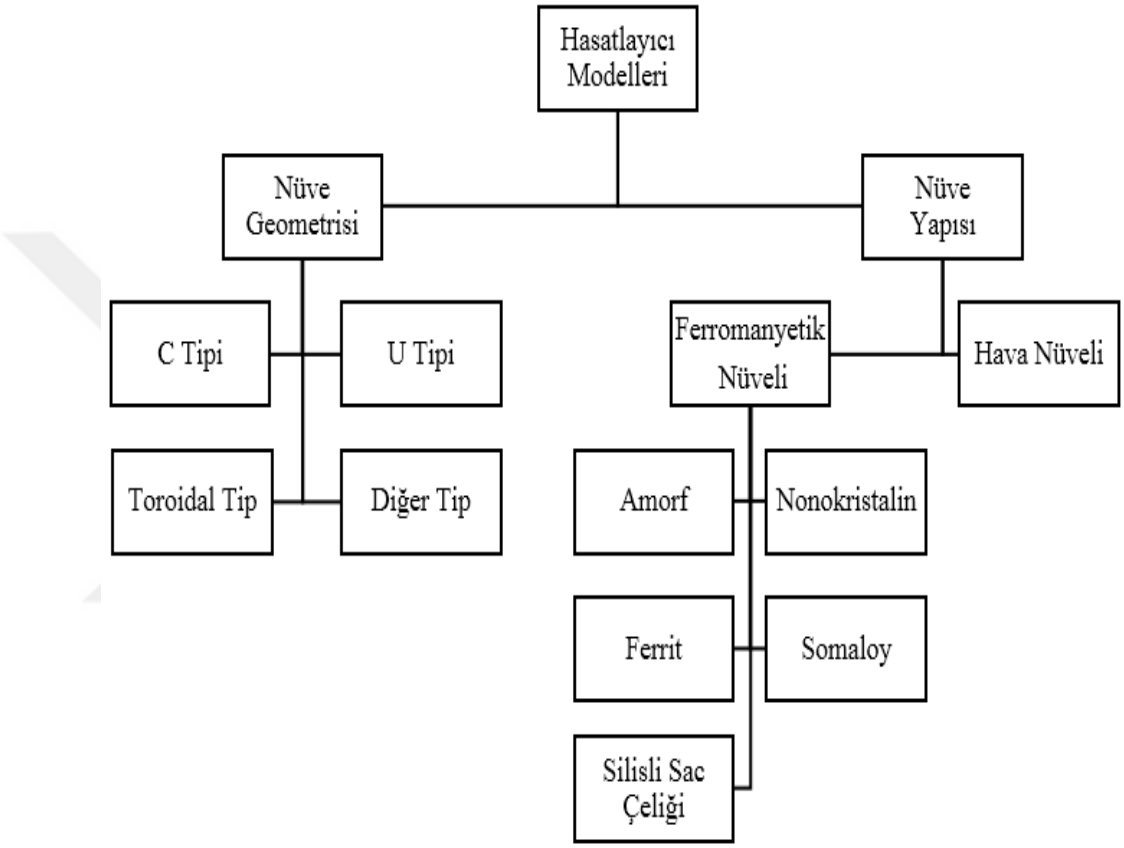
Şekil 3.1. Hasatlayıcı sistemi

Şekil 3.1'de verilen sistemin oluşturulması için gerçekleştirilen çalışmalar Bölüm 3.1, 3.2, 3.3'te detaylı olarak verilmiştir.

3.1. Elektromanyetik Alanlardan Enerji Hasatlayıcı

Literatürde yer alan hasatlayıcı modelleri Şekil 3.2'de gösterildiği gibi genel olarak; nüve geometrisi ve nüve yapısına göre iki (2) ana başlıkta incelenmiştir. Geometriye göre bakıldığında C tipi, U tipi, toroidal ve diğer tip olmak üzere dört (4) grupta incelenebilir. C tipi ve U tipi nüvelerin hatta montaj kolaylığı sağlamakta fakat indüktansları toroidallara göre daha düşüktür. Geleneksel nüve modellerinin dışında selenoid, papyon (Yuan ve ark., 2015) ve sarmal (Yuan ve ark., 2017) gibi

'Diğer Tip' olarak tanımlanan nüveler de hasatlayıcı uygulamaları için tasarlanmaktadır. Yapısına göre ise hava ve ferromanyetik malzemeli olarak iki grupta incelenebilir. Burada hava nüveli hasatlayıcılarda hat akımı yüksek olmasına rağmen elde edilecek güç oldukça azdır. Bu nedenle hava nüveli yapının (Boles ve ark., 2016) hasatlayıcılar için uygun olmadığı belirtilmiştir.



Şekil 3.2. Hasatlayıcı modelleri

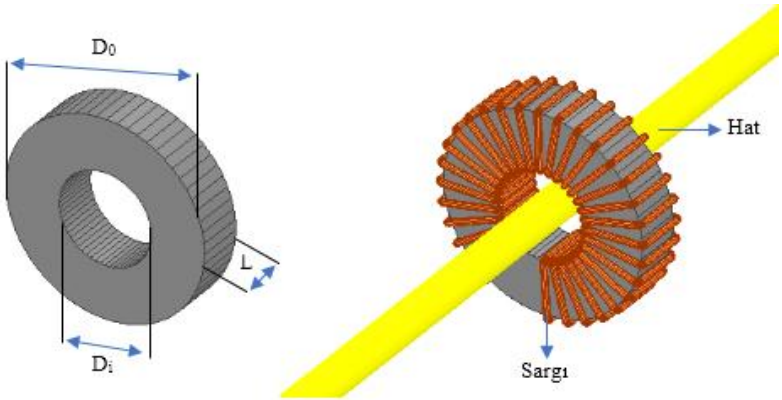
Çizelge 3.1'de özellikleri verilen bazı ferromanyetik malzemelerin genel özellikleri verilmiştir. Bu malzemelerden hasatlayıcı uygulamalarında en fazla nanokristalin, amorf ve ferrit nüveler tercih edilmiştir.

Çizelge 3.1. Ferromanyetik malzemelerin özellikleri

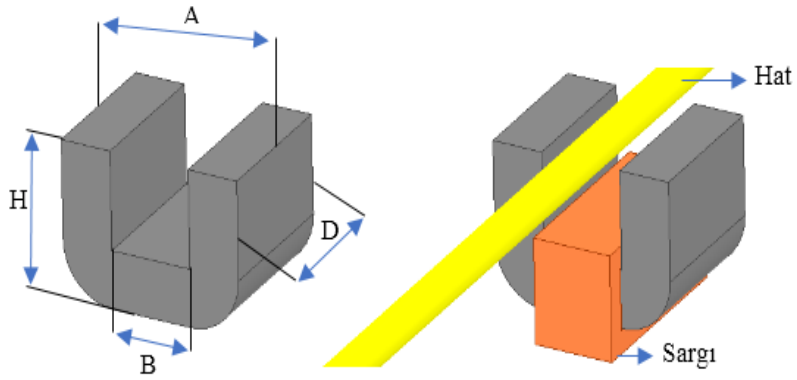
Elektrik Çeliği	Saturasyon J s(T)	Direnç (Ωm x10^8)	Yoğunluk (kg/m^3)	Kürleme Sıcaklığı (°C)
%3 Si tanecikleri yönlendirilmiş (Işık, 2014)	2	48	7650	-
Ferit(MnZn) (Işık, 2014)	0.45-0.50	110-220	4900	>250
Amorf (Arslan, 2011)	1.56	130	7180	392
Somaloy (10003P) (Somaloy Material Data)	1.57	55	7420	-

3.1.1. Hasatlayıcı tasarım modelleri

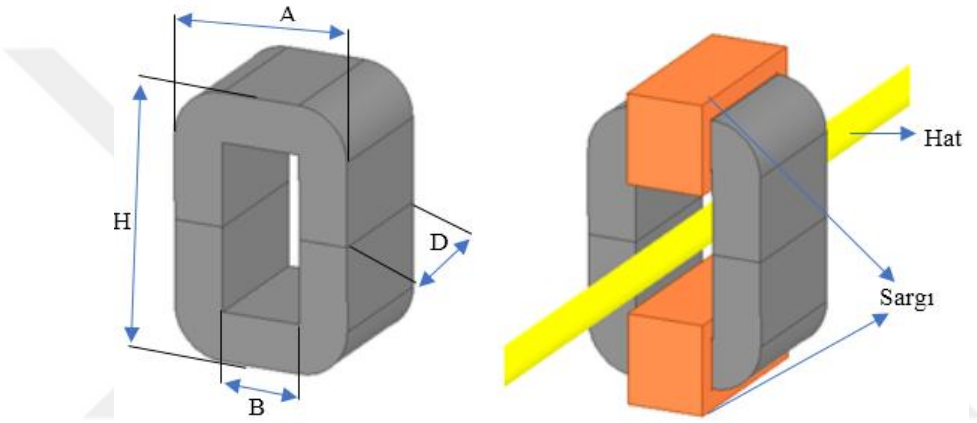
Şekil 3.3(a)'da toroidal modelin çizimleri verilmiştir burada "D_0" dış çapı, "D_i" iç çapı ve "L" nüve kalınlığını ifade etmektedir. Şekil 3.3 (b) ve Şekil 3.3 (c)'de çekirdek tip modellerin çizimleri verilmiştir burada "H" nüve yüksekliğini, "A" nüve dış genişliği, "B" pencere genişliği ve "D" kalınlığı ifade etmektedir. Çizelge 3.2'de teknik özellikleri verilen toroidal ve C tipi geometriler için Amorf malzemeli hasatlayıcılar üzerine çalışılmıştır. Sayısal analizleri Ansys Maxwell yazılımı ile yapılan bu modeller için Şekil 3.4'te gösterilen deney seti kurularak deneyler yapılmıştır. Daha sonra deney verileri ile sayısal analizler karşılaştırılmıştır.



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.3. Hasatlayıcı modellerin genel yapısı; (a) Toroidal nüveli modeller, (b) C1 nüve modeli, (c) C2 nüve modeli

Çizelge 3.2. Toroidal tip hasatlayıcı modellerin teknik özellikleri

Modeller	**Do (mm)**	**Di (mm)**	**L (mm)**	**N (sarım)**	**Tel Çapı (mm)**	**Hesaplanan Rdc (Ω)**	**Ölçülen Rdc (Ω)**	**L (H)**
Model 1	54	37	30	91	0.95	0.19	0.23	0.745
Model 2	50	32	20	91	0.50	0.51	0.60	0.505
Model 3	40	25	15	91	0.50	0.43	0.49	1.232

Çizelge 3.3. Çekirdek tip hasatlayıcı modellerin teknik özellikleri

Modeller	A (mm)	B (mm)	D (mm)	H (mm)	N (sarım)	Tel Çapı (mm)	Hesap. Rdc (Ω)	Ölçülen Rdc (Ω)	L (H)
C1	31	11	20	25	800	0.25	17.11	21.2	0.063
C2	31	11	20	50	1600	0.25	34.21	42.4	0.126

Manyetik alan şiddeti denklem (3.1)'deki Ampere kanuna göre hesaplanır.

$$H(t) = \frac{N_p i(t)}{l_m} \tag{3.1}$$

burada N_p sarım sayısı, $i(t)$ birim zamandaki akım ve l_m nüvenin ortalama yol uzunluğudur.

Nüvedeki akı yoğunluğu denklem (3.2) ile hesaplanır.

$$B(t) = \frac{1}{N_s A_e} \int_0^T v(\tau) d\tau \tag{3.2}$$

burada N_s sarım sayısı ve A_e nüve kesit alanıdır.

B-H eğrileri, denklem (3.3) kullanılarak alan yoğunluğu H'nin bir fonksiyonu olarak denklem (3.4)' teki gibi hesaplanabilir (Metglass 2605-SA1):

$$B = \mu_H(H) H \tag{3.3}$$

$$\mu_H(H) = \mu_0 + \sum_{k=1}^{K} \frac{m_k}{h_k} \frac{1}{1 + \left| H / h_k \right|^{n_k}} \tag{3.4}$$

Benzer şekilde B-H eğrileri, denklem (3.5) kullanılarak akı yoğunluğu B'nin bir fonksiyonu olarak denklem (3.6)'daki gibi hesaplanabilir (Metglass 2605-SA1):

$$B = \mu_B(B) H \tag{3.5}$$

$$\mu_B(B) = \mu_0 \frac{r(B)}{r(B)-1} \tag{3.6}$$

Burada *r(B)* 'nin hesabı için denklem (3.7) kullanılır (Metglass 2605-SA1):

$$r(B) = \frac{\mu_r}{\mu_r - 1} + \sum_{k=1}^{K} \alpha_k |B| + \delta_k \ln\left(\varepsilon_k + \zeta_k e^{-\beta_k |B|}\right) \tag{3.7}$$

Burada eğri katsayıları denklem (3.8)'deki eşitliklerden hesaplanır (Metglass 2605-SA1):

$$\delta_k = \frac{\alpha_k}{\beta_k}, \quad \varepsilon_k = \frac{e^{-\beta_k \gamma_k}}{1+e^{-\beta_k \gamma_k}}, \quad \zeta_k = \frac{1}{1+e^{-\beta_k \gamma_k}} \tag{3.8}$$

H'nin bir fonksiyonu olarak *B* için anhisteritik eğri katsayıları Çizelge 3.4. ve *B*'nin bir fonksiyonu olarak *H* için anhisteritik eğri katsayıları Çizelge 3.5'te verilmiştir (Metglass 2605-SA1):

Çizelge 3.4. *H*'nin bir fonksiyonu olarak *B* için anhisteritik eğri katsayıları (Metglass 2605-SA1)

k	**1**	**2**	**3**	**4**
m_k	1.42349197109713	0.150315028083879	-0.19397207699694	-0.26992286269725
h_k	131.748299040353	25.3776161728309	220.646170969346	533.629141542570
n_k	1	2.24802664153633	2.86432068393265	3.24722527305998

Çizelge 3.5. *B*'nin bir fonksiyonu olarak *H* için anhisteritik eğri katsayıları (Metglass 2605-SA1)

k	1	2	3	4
μ_r	16083.8541186965	0.15031502808387	-0.19397207699694	-0.2699228626972
α_k	0.62315074543457	0.07496397895185	0.00131337189057	0.00131337046133
β_k	65.8063408906339	17.8022351180829	2.02022687832383	4.54498137661652
γ_k	1.42423166533048	1.41022908458104	9.99999986009086	0.49660038386335
δ_k	0.00946946353498	0.00421093073170	0.00065011108636	0.00028897158261
ε_k	$1.978846970169e^{-41}$	$1.2500784243816e^{-11}$	$1.6837060310089e^{-09}$	0.09474397966694
ζ_k	1	0.999999999987499	0.999999998316294	0.90525602033 305

Çeşitli frekans ve indüksiyon seviyelerindeki çekirdek kayıpları, çeşitli uyarma dalga formları kullanılarak ölçülür. Ölçümlere dayanarak (Metglass 2605-SA1), Steinmetz denkleminin (3.9) katsayıları tahmin edilmektedir:

$$P_w = k_w (f / f_0)^{\alpha} (B / B_0)^{\beta} \tag{3.9}$$

Burada; P_w, birim ağırlık başına çekirdek kaybı; f_0, temel frekans (1 Hz), B_0, temel akı yoğunluğudur (1 T). Ayrıca k_w, α ve β, deneysel verilerden elde edilen Steinmetz katsayılarıdır. Çizelge 3.6'da farklı uyarma koşullarında Steinmetz katsayılarını listelemektedir.

Çizelge 3.6. Steinmetz katsayıları (Metglass 2605-SA1)

Dalga Şekli	k_w	α	β
Sinüs	0.00336922369454695	1.30103359460677	2.13595976775746
Testere dişi / Trapez%50 görev	0.00355181904635424	1.28521618008723	2.17280378011837
Testere dişi %30 görev	0.00286605711571677	1.31608598357857	2.19190780960191
Testere dişi %10 görev	0.00196862009744675	1.39295811175637	2.18756372359758
Trapez %30 görev	0.00151692484796744	1.41158141023495	2.18960351245929
Trapez %10 görev	0.000947882242820038	1.51736678718175	2.18178968493193

Çekirdeğin bağıl geçirgenliği, denklem (3.10)'daki gibi akı yoğunluğu ve frekansının işlevleri olarak ölçülür.

$$\mu_r = \frac{B_{peak}}{\mu_0 H_{peak}} \tag{3.10}$$

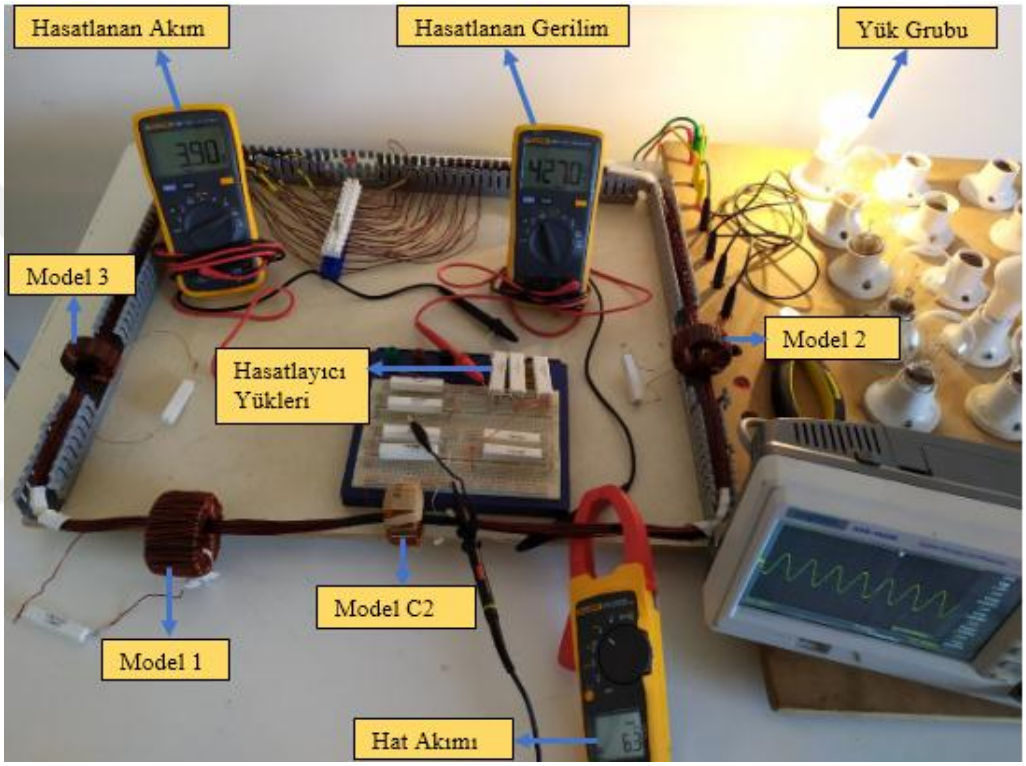
Burada B_{peak} ve H_{peak} her bir ölçüm noktasındaki maksimum akı yoğunluğu ve alan şiddetidir. Bir bobin için genel sargı direnci hesaplama formülü denklem (3.11)'de verilmiştir.

$$R = \rho \frac{L_B}{S} N \tag{3.11}$$

Burada ρ sargı iletkenin öz direncini (bakır için $1{,}72 \times 10^{-8}$ Ω.m), L_B sargı uzunluğunu, N sargı sarım sayısı ve S sargı iletkenin kesit alanını ifade etmektedir.

Enerji hasatlama sistemi için kurulan deney seti Şekil 3.4'te verilmiştir. Bu deney setinde yer alan malzemeler; yük gurubu, enerji hattı, hasatlayıcı nüveler olarak sıralanmaktadır. Hattan akım geçirilmesi için akkor lambalardan oluşan yük grubu kendi arasında seri paralel farklı şekillerde bağlanarak hat akımı oluşturulmuş

ve bu akım pens multimetre ile ölçülerek kaydedilmiştir. Hat akımını ve hat etrafındaki manyetik alan yoğunluğunu artırmak için hattaki iletken sayısı arttırılmıştır. Hat iletkeni; dikdörtgen tahta zemin üzerine kablo kanalı kullanılarak birden fazla sarımla sarılmıştır. Enerji hasadı için kullanılan C ve toroidal geometrisindeki nüveler hat üzerine sırasıyla yerleştirilmiştir. Oluşturulan bu deney setinde; hasatlayıcılardan farklı yüklerde hasatlanan gerilim ve akımlar multimetreler ile ölçülerek kaydedilmiştir.



Şekil 3.4. Hasatlayıcı deney seti

3.1.2. Toroidal tip modeller

Toroidal nüveler için ortalama manyetik akı yolu (L_{mT}), denklem (3.12) kullanılarak hesaplanır (Metglass 2605-SA1):

$$L_{mT} = \frac{\pi(D_0 - D_i)}{\ln\left(\frac{D_0}{D_i}\right)} \tag{3.12}$$

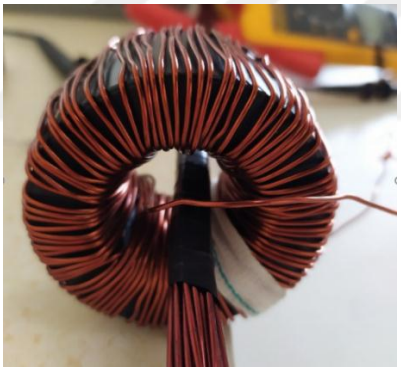
Toroidal nüveler için sargı uzunluğu L_{TB} olarak yazılırsa denklem (3.13) elde edilmiş olur.

$$L_{TB} = (D_0 - D_i) + 4r + 2L \tag{3.13}$$

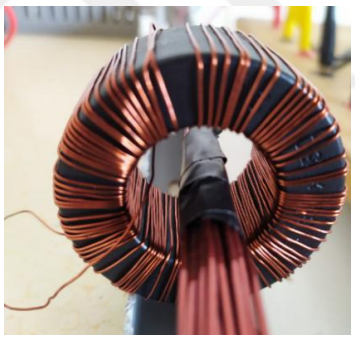
Burada r iletken çapını, L nüve kalınlığını ifade etmektedir. Denklem (3.13), denklem (3.11)'de yerine yazılırsa toroidal nüveler için -katların dikkate alınmadığı- sargı direnci hesabı olan denklem (3.14) elde edilir.

$$R = \rho \frac{(D_0 - D_i) + 4r + 2L}{S} N \tag{3.14}$$

Toroidal model hasatlayıcıların deney setindeki görüntüleri Şekil 3.5'te verilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.5. Toroidal modellerin deney setindeki görüntüleri;(a) Model 1,(b) Model 2,(c) Model 3

3.1.3. Çekirdek tip modeller

Çekirdek tip nüvelerden C1 (tekli) modeli için ortalama manyetik akı yolu (L_{mC1}), denklem (3.15)'te verilmiştir.

$$L_{mC1} = 2H + (\frac{\pi}{2} + 1)(A - B) \tag{3.15}$$

Burada H nüve yüksekliğini, A nüve dış genişliği ve B pencere genişliği ifade etmektedir.

Denklem (3.16)'da verilen çekirdek tip nüvelerden C2 (çiftli) modeli için ortalama manyetik akı yolu (L_{mC2}), tekli modelin 2 katı kadar olacaktır. Ancak burada g hava aralığına dikkat edilmesi gerekir.

$$L_{mC2} = 2L_{mC1} + 2g \tag{3.16}$$

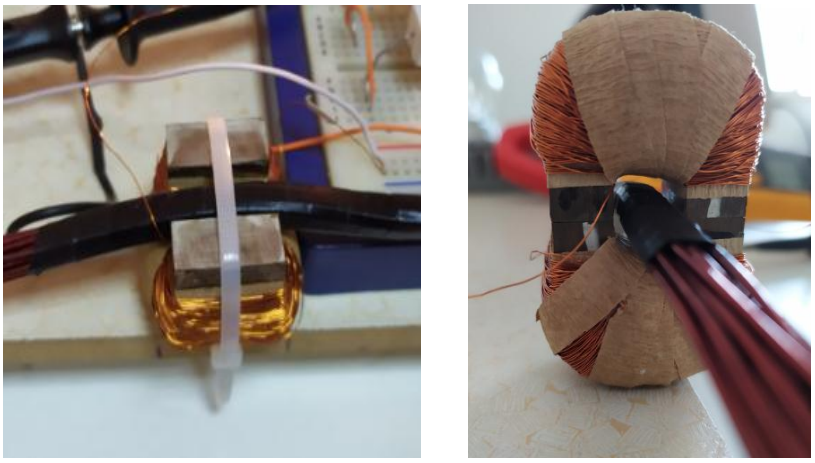
Çekirdek tip nüveler için minimum sargı uzunluğu L_{CB} olarak yazılırsa denklem (3.17) elde edilir:

$$L_{CB} = A - B + 2D + 4r \tag{3.17}$$

Burada D nüve derinliği olmak üzere denklem (3.17), denklem (3.11)'de yerine yazılırsa çekirdek tip nüveler için -minimum- sargı direnci denklem (3.18)'de elde edilir:

$$R = \rho \frac{A - B + 2D + 4r}{S} N \tag{3.18}$$

Çekirdek tip hasatlayıcıların deney setindeki görüntüleri Şekil 3.6'da verilmiştir.



(a) (b)

Şekil 3.6. Çekirdek tip modellerin deney setindeki görüntüleri; (a) C1, (b) C2

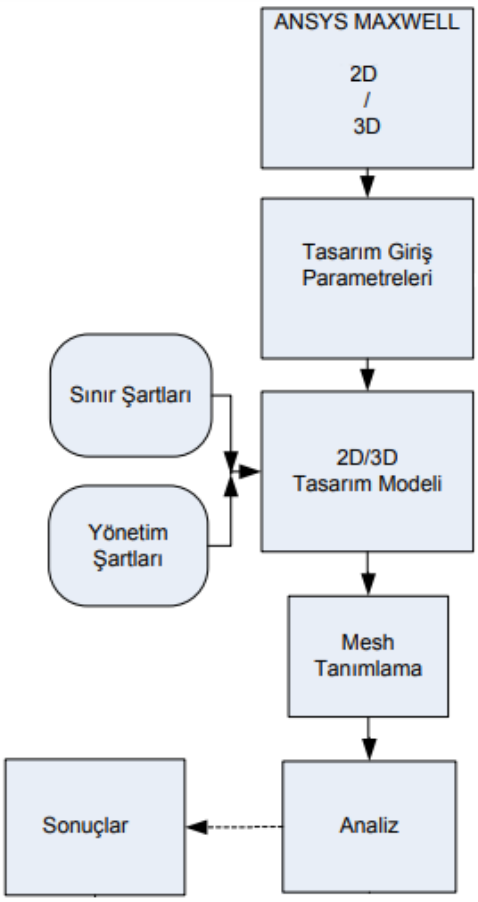
3.1.4. Sonlu elemanlar metodu ve Ansys Maxwell yazılımı

Karmaşık yapıları bilhassa homojen olmayan yapıları sonlu elemanlar yöntemi ile çözmek kolaydır. Bu metot, karmaşık olan problemlerin basit bilinen alt yapılara bölünerek her birinin çözümünün ayrı ayrı yapılarak ana çözüme varılması mantığına dayanmaktadır. Tahmin edilebileceği gibi alt yapıların sayısının artırılması ile daha hassas çözümler yapılabilir. Sonlu elemanlar analizinde karmaşık fiziksel bir sistem alt modellere ayrılabilen bir matematiksel modele dönüştürülüp çözülür. Günümüzde bu mantıkta çalışan ANSYS, NASTRAN, ABAQUS, COSMOS vb. bilgisayar destekli ticari yazılımlar endüstriyel uygulamaların analizlerinde ve tasarımlarında vazgeçilmez olmuştur.

Bu çalışmada sayısal analizler için; geniş bir çizim altyapısına sahip olması, Geçici hal, Kalıcı hal, Eddy akımları gibi çözüm seçeneklerinin çok olması gibi özelliklerinde dolayı literatürde en çok kullanılan ANSYS Maxwell 3D ticari yazılımı kullanılmıştır. Bu program homojen olmayan yapılarda manyetik alanı belirlemek için yapıyı birden fazla dörtyüzlü parçalara bölerek yapıda alt bölgeler oluşturur. Her alt bölge için ayrı ayrı polinomlarla her bölgenin alanını belirler (Fenercioğlu, 2007). Alt bölgelere ayırma işlemine (mesh) ağlara bölme, her bir alt bölgelere sonlu eleman ve bu elemanların toplamına da sonlu eleman ağı

denmektedir. Bir analizde sonlu eleman sayısı ne kadar çok olursa elde edilecek sonuçlarda o kadar gerçekçi olur.

Yazılım tanımlanan tüm sonlu elemanların orta noktalarındaki manyetik alan şiddetini, akım yoğunluğunu kullanarak hesaplar. Nüve malzemesinin doğrusal olmaması durumunda Newton-Raphson yöntemi ile doğrusal bir yaklaşımla B-H eğrisi kullanılarak çözümleme yapılır. Çözümleme tamamlandıktan sonra hata analizlerine geçilir ve çözücü sürekli olarak en hatalı sonlu elemanı tekrar tekrar parçalara ayırarak belirlenen kriterler yerine getirilene kadar çözümlemeye devam eder. Sonuç olarak bu yazılım ile belirlenen malzemeler için indüktans değeri, akım yoğunluğu, manyetik alan şiddeti, manyetik akı yoğunluğu ve kuvvetler elde edilebilir (Arslan, 2011). Sayısal analizlerin gerçekleştirildiği yazılımın akış diyagramı Şekil 3.7'de verilmiştir.



Şekil 3.7. Yazılım çözüm akış diyagramı

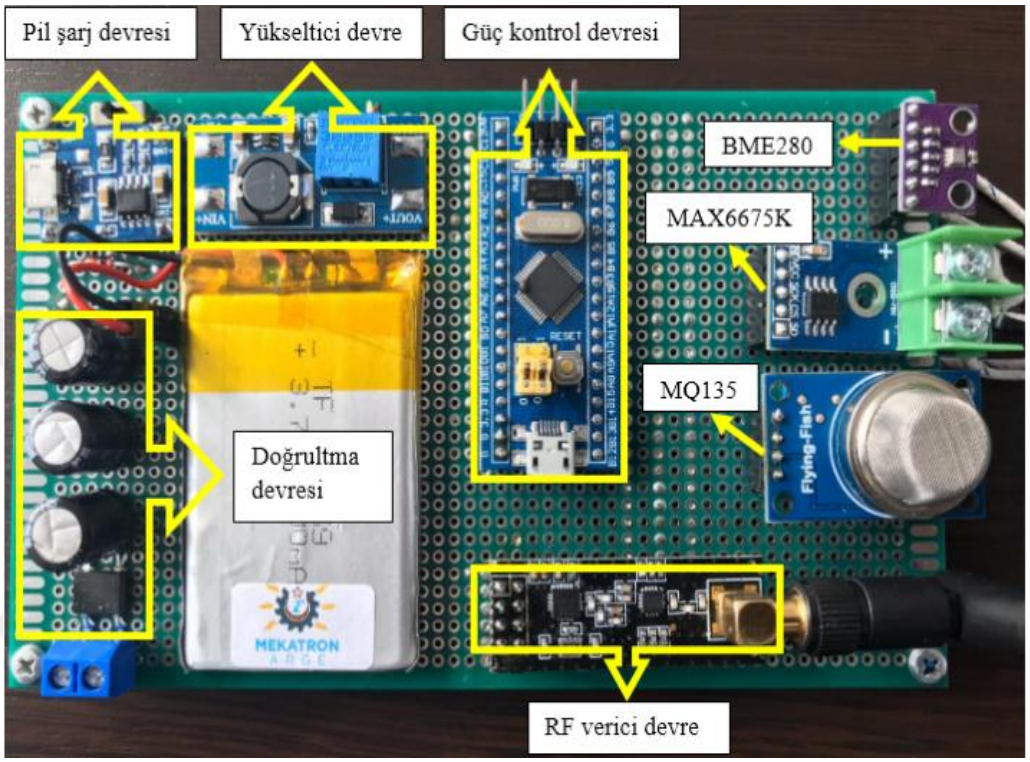
Hasatlayıcı modellerin sürekli hal analizi: Şekil 3.7'de verilen akış diyagramı doğrultusunda öncelikle çözülecek modelin koordinat düzlemi belirlenmiştir. Çözüm yöntemi sürekli hal (manyetostatic) olarak seçilip ele alınan hasatlayıcı modeli çizilmiştir. Hat akımı, Ampere kanunu dikkate alınarak dikdörtgen biçiminde hasatlayıcı modelinden çok büyük olacak şekilde seçilmiştir. Çünkü dikdörtgen hat modelinin kenar akımlarında manyetik alan şiddetinin hasatlayıcı modeline etki etmemesi istenmiştir. Hat akımı, deneyde uygulanacak hat akım değerleri olarak hat akımı terminalinde tanımlanmıştır. Hasatlayıcı modelin çekirdeğine mesh atanarak çözümler gerçekleştirilmiştir. Hattan akım geçtiğinde çekirdekte meydana gelen akı yoğunluğu değişimleri incelenmiştir.

Hasatlayıcı modellerin geçici hal analizi: Sürekli hal analizine benzer şekilde verilen akış diyagramı doğrultusunda öncelikle çözülecek modelin koordinat düzlemi belirlenmiştir. Çözüm yöntemi geçici hal (transient) olarak seçilip ele alınan hasatlayıcı modeli çizilmiştir. Hat akımı, Ampere kanunu dikkate dikdörtgen biçiminde hasatlayıcı modelinden çok büyük olacak şekilde seçilmiştir. Çünkü dikdörtgen hat modelinin kenar akımlarında manyetik alan şiddetinin hasatlayıcı modelini etki etmemesi isteniştir. Hat akımı deneyde uygulanacak hat akım değerleri olarak hat akımı terminalinde tanımlanmıştır. Bu tanımlama hattan geçen akım sinüzoidal dalga olarak değiştiğinden işaret $I=im\ sin(wt)$ olarak tanımlanmıştır. Sargı tanımlamaları indüklenen gerilimi verebilecek şekilde tanımlanmıştır. Ayrıca hasatlayıcının yüklenmesi ile ilgili analizler harici devre modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Hasatlayıcı modeli çekirdeğine ve sargılara mesh atanmıştır. Hat akımlarında çekirdekte meydana gelen kayıplar ve sargılarda indüklenen gerilim değişimleri incelenmiştir.

3.2. RF Alıcı-Verici, Güç Kontrol ve Sensörler Kartı

Devrede kullanılan nRF24L01 alıcı-verici modülü 2.4 GHz bandını kullanır ve 250 kbps'den 2 Mbps'ye kadar baud hızlarıyla çalışabilir. Açık alanda ve düşük baud hızında kullanılırsa, menzili 100 metreye kadar çıkabilir (Datasheet, nRF24L01). Tasarlanan devrede modül sinyal güçlendirici (LNA- Low Noise Amplifer) ile bu

mesafe 1000 metreye kadar çıkartıldı. Bu modülün güç tüketimi, iletim sırasında sadece bir LED'den bile düşük olan 12 mA civarındadır. Modülün çalışma voltajı 1.9 V ile 3.6 V arasındadır, ancak iyi olan şey diğer pinlerin 5 V gerilime tolerans göstermesidir, böylece herhangi bir mantık seviyesi dönüştürücü kullanmadan kolayca bir mikro denetleyiciye bağlayabiliriz.



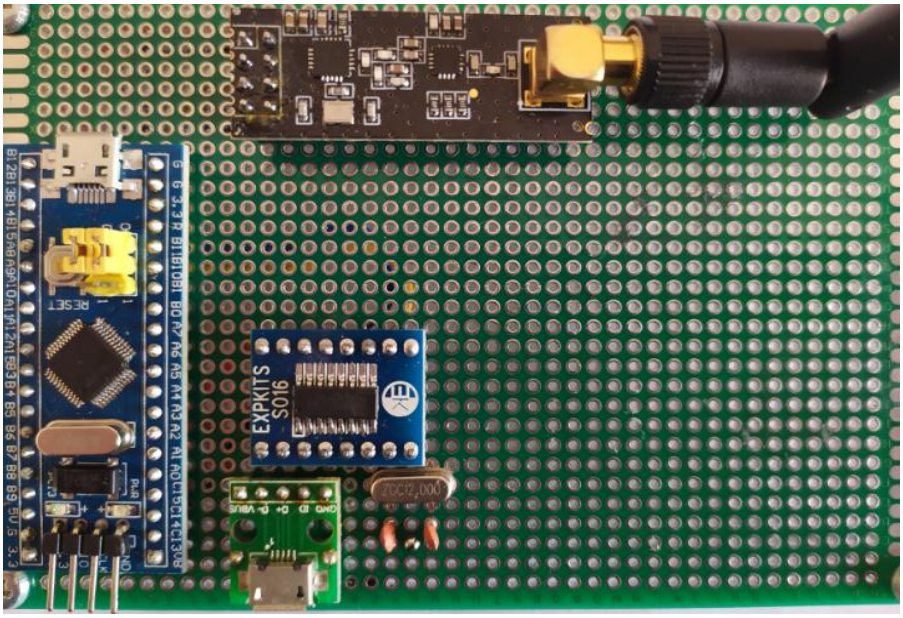
Şekil 3.8. Hazırlanan güç kontrol, sensörler ve RF verici devresi görünümü

Hazırlanan devre Şekil 3.8'de verilmiştir. Devrenin çalışma prensibi ise hasatlanan AC gerilimi DB207S köprü diyotlu doğrultucu devre üzerinden DC gerilime dönüştürmektedir. 12 V zener diyot yardımıyla gerilim belirli bir voltaja sabitlenmektedir. Pil şarj devresi TP4056 çipi ile kurulmuş olup sistem üzerine bağlı 1300 mAh kapasiteye sahip Li-Po bataryayı şarj etmektedir. Şarj edilen gerilim MT3608 çipli DC-DC yükseltici (boost) devre yardımıyla yükseltilerek sistemin çalışması için gerekli olan gerilim seviyesini üretmektedir.

Çizelge 3.7. Sensör teknik verileri (Kabakulak ve ark., 2018)

Nitelik	Kod	Çalışma Gerilimi (+V)	Çalışma Akımı (mA)	Gücü (mW)	Üretici Firma
Nem	BME280	3.3	0.340	1.2	Bosch
Sıcaklık			0.350	1.3	
Yükseklik			-	-	
Basınç			0.714	2.6	
Isıl çift (Termokupl)	MAX6675	3.3	0.7	3.5	Maxim
Amonyak	MQ135	5	160	800	Olimex
Duman					
Sülfür					

Şekil 3.8'de gösterilen ve Çizelge 3.7'de bazı teknik özellikleri verilen; BME280 sensörü ile sıcaklık-nem-basınç-yükseklik, MAX6675 ısıl çifti ile trafo yağ sıcaklığı ve MQ135 sensörü ile hava kalitesi verileri mikro denetleyici tarafından yorumlanarak ve işlenerek RF modül verici devre üzerinden alıcı devresine gönderilmektedir. Şekil 3.9'da gösterilen alıcı devre RF üzerinden gelen verileri yorumlayarak CH340G çipi yardımıyla bilgisayarın seri portuna 115200 baud hızıyla transfer etmektedir.



Şekil 3.9. Alıcı devre

3.3. Bilgisayar Ara Yüz Programı

Tasarlanan ara yüz programının ana sayfası Şekil 3.10'da gösterilmiştir. GUI (Graphical User Interface) olarak hazırlanan PC ara yüz programı seri porttan gelen verileri zaman ve data koordinatlarına yerleştirerek liste ve grafiksel olarak zamana bağlı olarak sıralamaktadır. Ara yüz programının ana ekranda COM port bağlantı ayarları ve kayıt periyodu seçenekleri mevcuttur. Program kaydedilen sensör verilerinin zaman bilgisiyle birlikte dışarı istenildiğinde *.xlsx (excel) formatında veya her bir sensör için grafiklerde *.png (vektör imaj) formatında kaydetmeye imkân vermektedir.



Şekil 3.10. Bilgisayar ara yüz programı

Bilgisayar ara yüzü sekiz (8) sekmeden oluşmaktadır. Bunları kısaca şöyle özetleyebiliriz;

Ayarlar: Bu ana sekmeden; port seçenekleri, alıcıya bağlanma, bağlantıyı kesme, kayıt frekansı (saniye, dakika, saat, gün) ve verilerin kaydedilip dışarıya aktarılması işlemleri yapılabilmektedir.

Tablo: Bu sekmede tüm sensör verileri zamana göre tablo şeklinde ayarlanan süre aralığında görülebilmektedir.

Sıcaklık: Bu sekmede BME280 sensöründen ayarlanan süre aralığında gelen sıcaklık verisinin grafiği görülebilmektedir. Sensör (ekler kısmında BME280 veri kartı incelenebilir) -40 °C ile +85 °C aralığında ölçüm yapabilmektedir.

Basınç: Bu sekmede BME280 sensöründen ayarlanan süre aralığında gelen hava basınç verisinin grafiği görülebilmektedir. Sensör (ekler kısmında BME280 veri kartı incelenebilir) 300 hPA ile 1100 hPA aralığındaki hava basıncı ölçümü yapabilmektedir.

Yükseklik: Bu sekmede BME280 sensöründen ayarlanan süre aralığında gelen deniz seviyesinden yükseklik verisinin grafiği görülebilmektedir. Sensör (ekler kısmında BME280 veri kartı incelenebilir) 0 ile 1000 m aralığındaki yükseklik bilgisini verebilmektedir.

Nem: Bu sekmede BME280 sensöründen ayarlanan süre aralığında gelen havadaki bağıl nem verisinin grafiği görülebilmektedir. Sensör (ekler kısmında BME280 veri kartı incelenebilir) %10 ile %90 aralığındaki bağıl nem ölçümünü yapabilmektedir.

Trafo Sıcaklığı: Bu sekmede MAX6675K ısıl çift sensöründen ayarlanan süre aralığında Trafo yağ cebinden alınan sıcaklık bilgisinin grafiği görülebilmektedir. Sensör (ekler kısmında MAX6675K veri kartı incelenebilir) 0 °C ile +700 °C aralığında sıcaklık ölçümü yapabilmektedir.

Hava kirliliği: Bu sekmede MQ135 hava kalitesi ölçüm sensöründen havadaki zararlı partikül grafiği ayarlanan süre aralığında ppm (particule per million) olarak alınabilmektedir. Sensör (ekler kısmında MQ135 veri kartı incelenebilir) havanın 10 ppm ile 300 ppm aralığında NH_3(amonyak), 10 ppm ile 1000 ppm aralığında Benzene ve 10 ppm ile 300 ppm aralığında Alkol miktarının ölçümü yapabilmektedir.

Bilgisayar ara yüz programından alınan ölçüm verilerinin kalibrasyonları yapılmamıştır fakat endüstriyel testleri sırasında ara yüzdeki hava sıcaklığı, nem ve trafo sıcaklığı ölçüm verileri, firmanın kalibrasyonlu ölçü aletleri ile karşılaştırılmış olup aradaki sapma miktarı Bölüm 4'te verilmiştir.

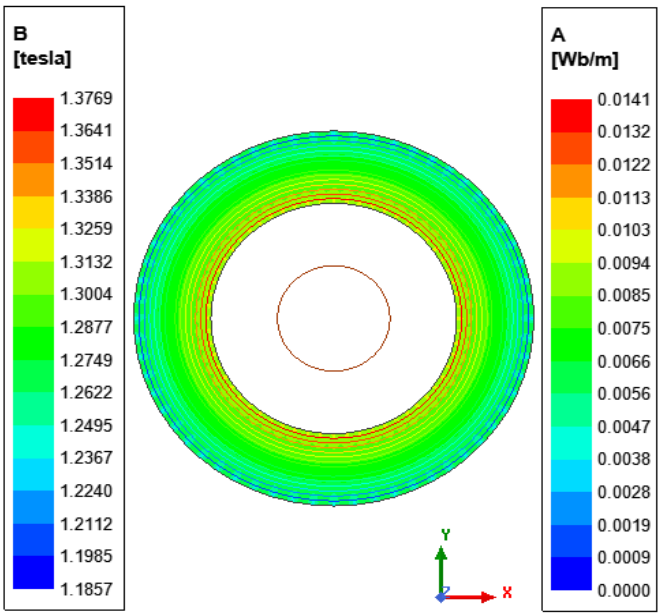
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1. Sayısal Analizler ve Deney Verileri

Amorf yapılı toroidal ve çekirdek tip modellerin deneyleri elektrik hattının modellendiği Şekil 3.4'te verilen deney setinde gerçekleştirilmiştir. Hattan sırasıyla 3 A, 6.2 A ve 9.2 A geçirilmiş olup hasatlayıcı yükü de 11 Ω ile 330 Ω arasında değiştirilerek farklı hat akımlarında ve farklı yüklerde hasatlanan akım ve gerilim (rms olarak) ölçülerek kayıt altına alınmıştır. Hasatlanan güç, hasatlanan akım ve gerilimin çarpılması ile hesaplanmıştır. Excel dosyasına kaydedilen verilerin yüke göre hasatlanan akım, gerilim ve güç grafikleri elde edilmiştir.

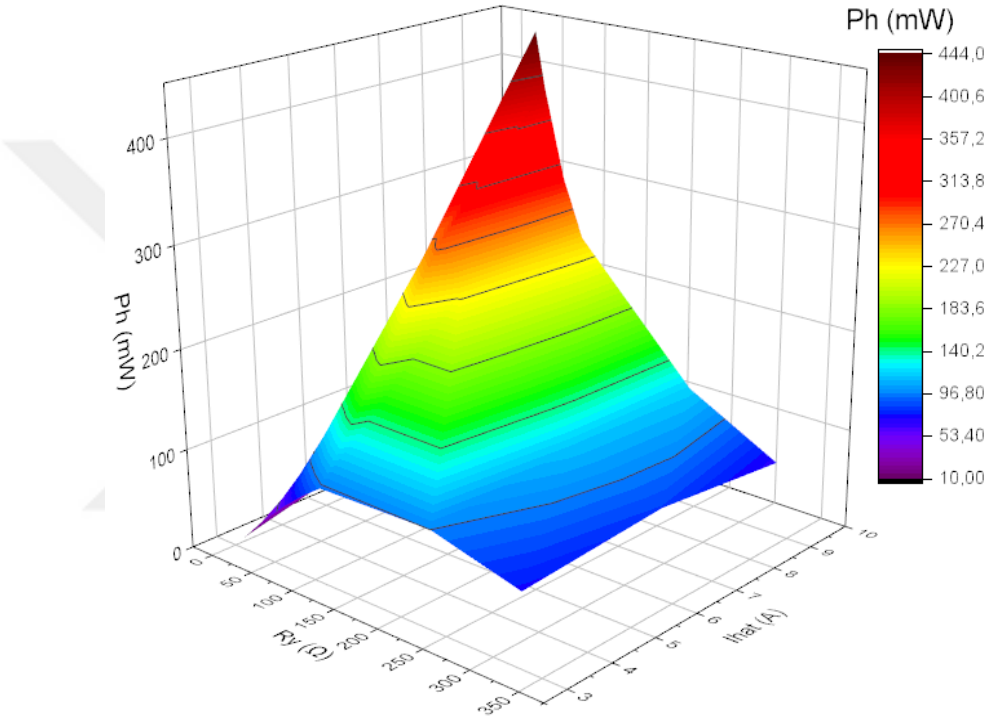
4.1.1. Toroidal tip modellerin sayısal analizleri ve deney verileri

Çizelge 3.2'de teknik özellikleri verilen Model 1'in hat akımı 6.2 A tanımlanarak Ansys Maxwell ile statik manyetik analizi gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.1'de nüvenin manyetik akı yoğunluğu değişimi ve akı çizgileri analiz sonucu verilmiştir.



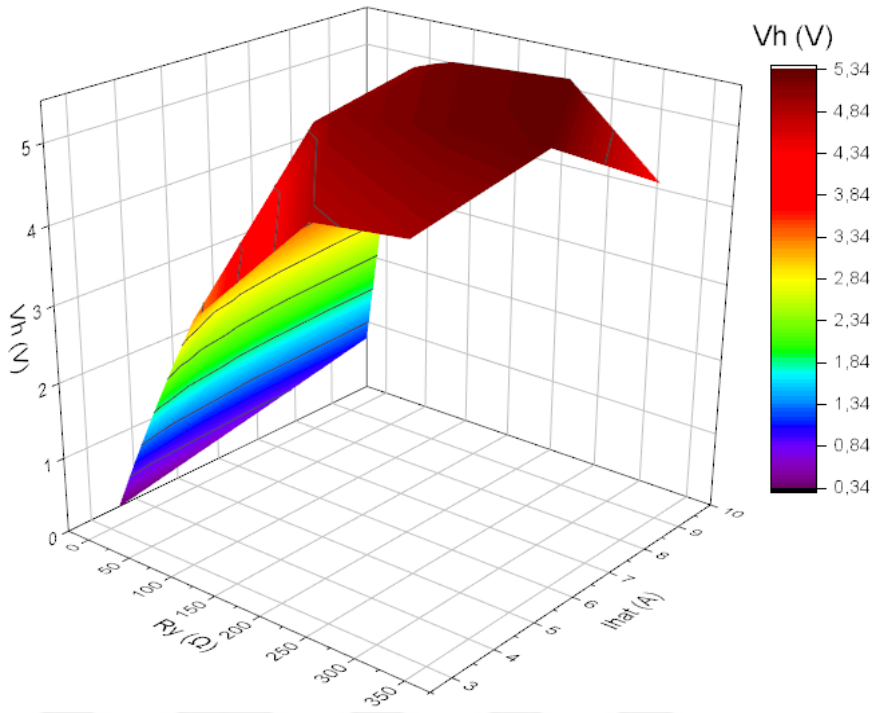
Şekil 4.1. Model 1 manyetik akı yoğunluğu değişimi ve akı çizgileri

Manyetik akı yoğunluğu değeri, 6.2 A hat akımında bu model için en fazla 1.35 T değerlerindedir. Bu akı yoğunluğu toroidal dışına doğru azalmaktadır. Ayrıca toroidal model yekpare parçadan meydana geldiğinden dolayı manyetik akı çizgileri bozulmamakta ve kaçak akılar meydana gelmemektedir. Model 1 için Çizelge 3.6'da verilen sinüzoidal dalga kayıp katsayıları ile Denklem 3.9'da verilen Steinmetz formülü kullanılarak demir kaybı hesaplanmıştır. Bu kayıp ortalama olarak 0.89 Watt'tır.



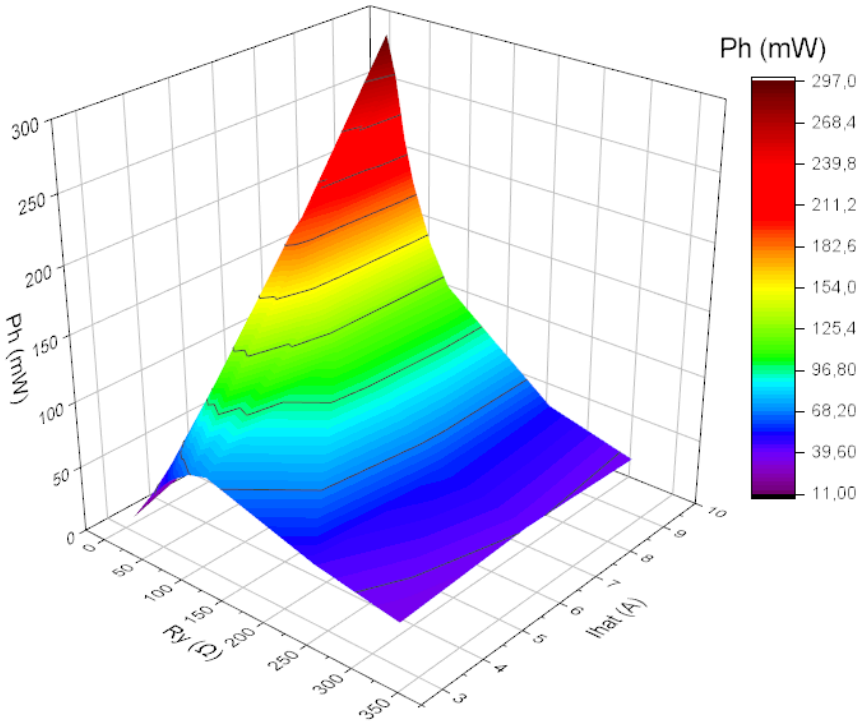
Şekil 4.2. Model 1 hasatlanan güç değişim grafiği

Model 1 için yapılan deneylerde hat akımının (I_{hat}) ve yük direncinin (R_y) değişimine göre hasatlanan gücün (P_h) değişim grafiği Şekil 4.2'de verilmiştir. 3 A hat akımında en fazla hasatlanan güç, 235 Ω yük direncinde 96.77 mW olarak ölçülmüştür. 6.2 A hat akımında en fazla güç, 88 Ω yük direncinde 277.98 mW olarak ölçülmüştür. 9.2 A hat akımında en fazla güç, 55 Ω yük direncinde 443.78 mW olarak ölçülmüştür. Deney verilerinden görüldüğü gibi hat akımı artıkça, hasatlanan maksimum gücün meydana geldiği yük direnci düşmektedir.



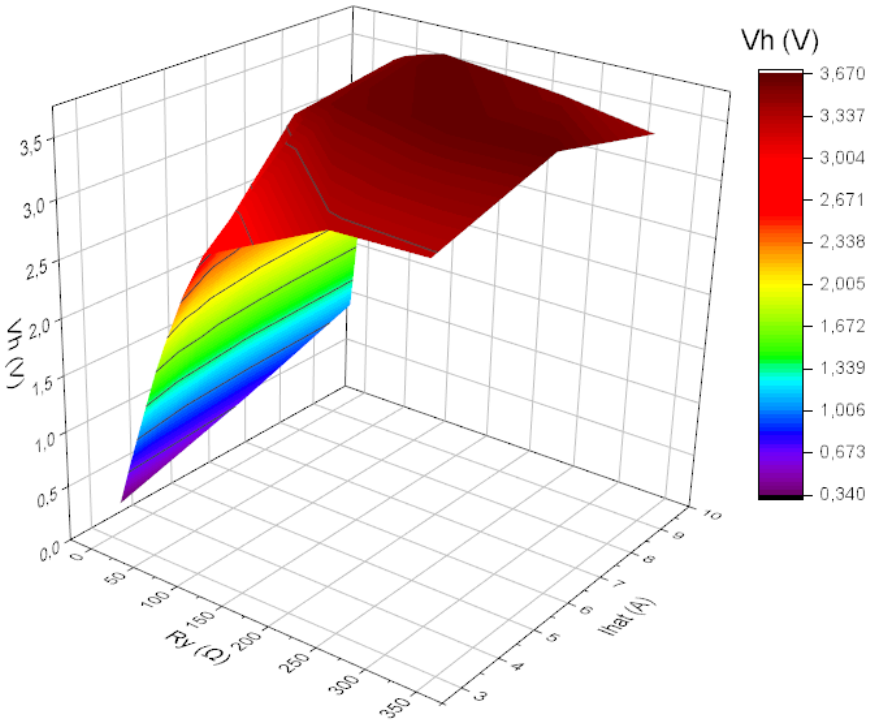
Şekil 4.3. Model 1 hasatlanan gerilim değişim grafiği

Model 1 için yapılan deneylerde hat akımının (I_{hat}) ve yük direncinin (R_y) değişimine göre hasatlanan gerilimin (V_h) değişim grafiği Şekil 4.3'te verilmiştir. Hat akımının 3 A ve 6.2 A olduğu durumlarda hasatlayıcı yükü arttıkça hasatlanan gerilim de artmıştır. 9.2 A hat akımında 235 Ω yük direncine kadar hasatlanan gerilim artmış daha sonra yük artıkça hasatlanan gerilimde düşmeye başlamıştır.



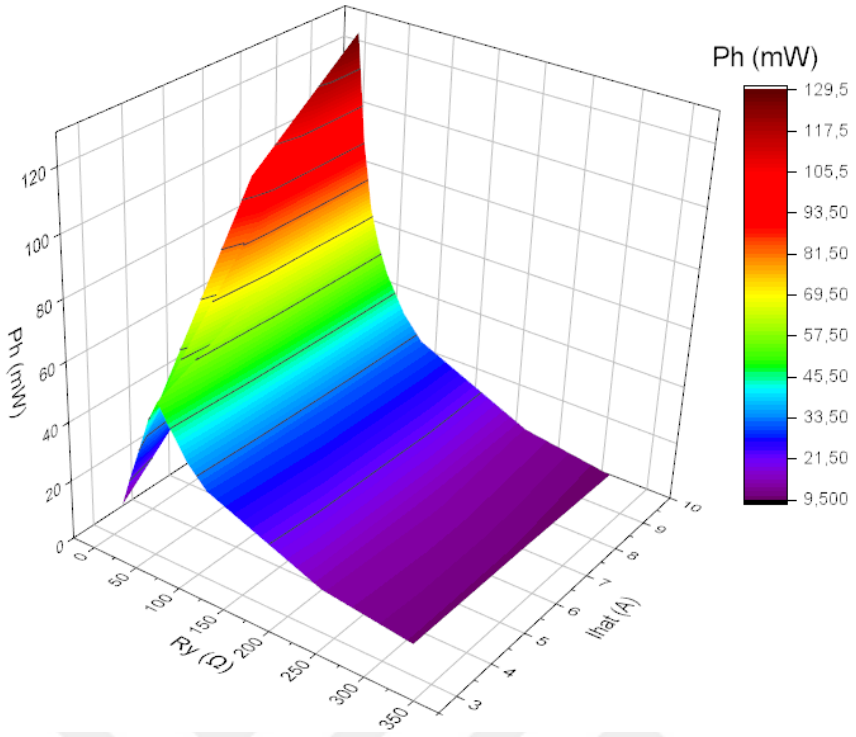
Şekil 4.4. Model 2 hasatlanan güç değişim grafiği

Model 2 için yapılan deneylerde hat akımının (I_{hat}) ve yük direncinin (R_y) değişimine göre hasatlanan gücün (P_h) değişim grafiği Şekil 4.4'te verilmiştir. 3 A hat akımında en fazla hasatlanan güç, 110 Ω yük direncinde 71.69 mW olarak ölçülmüştür. 6.2 A hat akımında en fazla güç, 55 Ω yük direncinde 188.80 mW olarak ölçülmüştür. 9.2 A hat akımında en fazla güç, 33 Ω yük direncinde 296.36 mW olarak ölçülmüştür. Deney verilerinden görüldüğü gibi hat akımı artıkça, hasatlanan maksimum gücün meydana geldiği yük direnci düşmektedir.



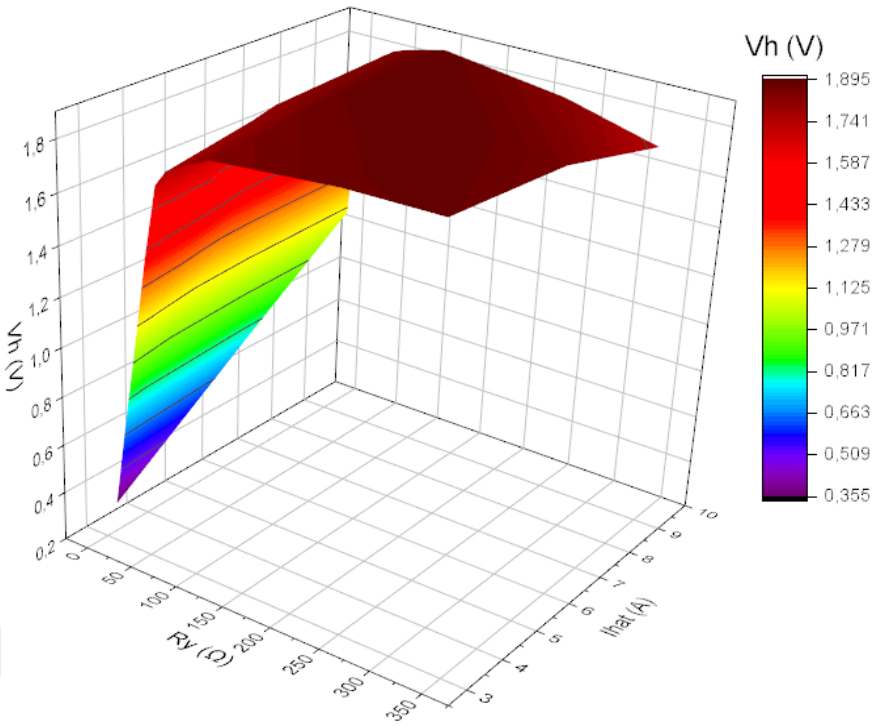
Şekil 4.5. Model 2 hasatlanan gerilim değişim grafiği

Model 2 için yapılan deneylerde hat akımının (I_{hat}) ve yük direncinin (R_y) değişimine göre hasatlanan gerilimin (V_h) değişim grafiği Şekil 4.5'te verilmiştir. Hat akımının 3 A ve 6.2 A olduğu durumlarda hasatlayıcı yükü arttıkça hasatlanan gerilim de artmıştır. 9.2 A hat akımında 150 Ω civarlarındaki yük direncine kadar hasatlanan gerilim artmış daha sonra yük artıkça hasatlanan gerilimde düşmeye başlamıştır.



Şekil 4.6. Model 3 hasatlanan güç değişim grafiği

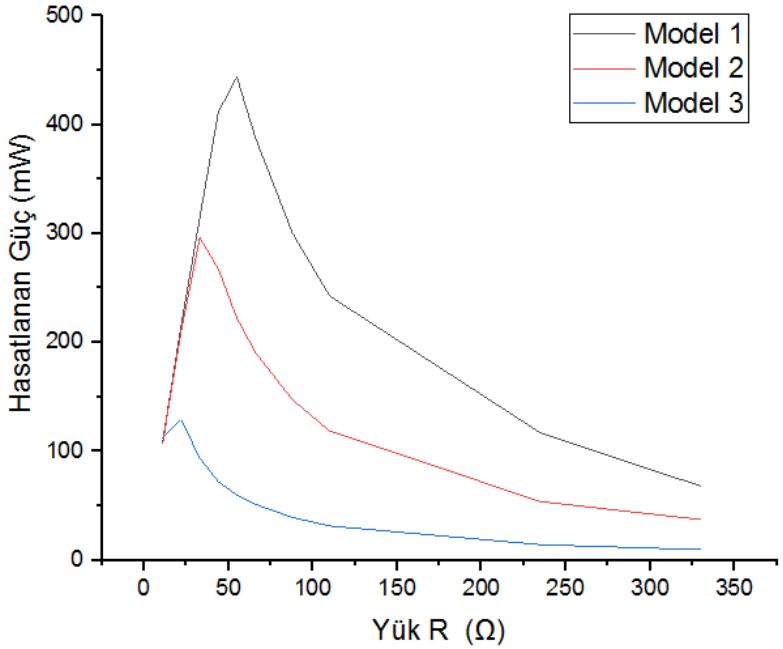
Model 3 için yapılan deneylerde hat akımının (I_{hat}) ve yük direncinin (R_y) değişimine göre hasatlanan gücün (P_h) değişim grafiği Şekil 4.6'da verilmiştir. 3 A hat akımında en fazla hasatlanan güç, 55 Ω yük direncinde 52.56 mW olarak ölçülmüştür. 6.2 A hat akımında en fazla güç, 22 Ω yük direncinde 99.26 mW olarak ölçülmüştür. 9.2 A hat akımında en fazla güç, 15 Ω yük direncinde 132.04 mW olarak ölçülmüştür. Deney verilerinden görüldüğü gibi hat akımı artıkça, hasatlanan maksimum gücün meydana geldiği yük direnci düşmektedir.



Şekil 4.7. Model 3 hasatlanan gerilim değişim grafiği

Model 3 için yapılan deneylerde hat akımının (I_{hat}) ve yük direncinin (R_y) değişimine göre hasatlanan gerilimin (V_h) değişim grafiği Şekil 4.7'de verilmiştir. Hat akımının 3 A olduğu durumlarda hasatlayıcı yükü arttıkça hasatlanan gerilim de artmıştır. 6.2 A hat akımında hasatlanan gerilim 235 Ω yük direncine kadar artmış daha sonraki yük değerlerinde ise düşmeye başlamıştır. 9.2 A hat akımında 110 Ω yük direncine kadar hasatlanan gerilim artmış daha sonra yük artıkça hasatlanan gerilimde düşmeye başlamıştır.

Deney verilerinden görüldüğü gibi hat akımı artıkça, hasatlanan maksimum gücün meydana geldiği yük direnci düşmektedir. Bu durumun nedeni maksimum güç transferi teoremine dayandırılabilir. Maksimum güç teoremine göre yük empedansı ile güç kaynağının empedansının eşit olduğu durumda yüke maksimum güç aktarılır. Hasatlayıcının toplam empedans hesabında bobin sargı direncinin büyüklüğü çekirdek kayıplarının oluşturduğu direncin yanında çok küçük olmasından dolayı asıl empedansı oluşturan çekirdek kayıplarıdır. Bu yüzden hat akımı artıkça hasatlayıcıda maksimum gücün oluştuğu yükte düşmektedir (Liu ve ark., 2016).



Şekil 4.8. Toroidal modellerde hasatlanan güç değişim grafiği

Toroidal modellerin 9.2 A hat akımında yapılan deneylerinde yük değişimine göre birleştirilmiş hasatlanan güç değişim grafiği Şekil 4.20'de verilmiştir. Toroidal tip modellerin grafikleri incelendiğinde hasatlayıcı yükü arttıkça; hasatlanan akımın düştüğü buna karşılık olarak hasatlanan gerilimin belli bir yüke kadar daha fazla arttığı ve dolayısıyla hasatlanan gücünde bu yüke kadar arttığı görülmektedir. Toroidal nüvelerin yapılarında hava boşluğu olmamasından dolayı üzerlerinden daha fazla manyetik akı geçer ve C tipi nüvelere göre daha küçük yüklerde maksimum güç elde edilir. Grafiklerden de görüldüğü gibi hat akımı artıkça daha fazla güç hasatlanmakta fakat nüve daha küçük yüklerde doyuma ulaşmaktadır. Önceki çalışmaları (Santos ve ark. 2014; Liu ve ark., 2016) destekleyecek şekilde Model 1'in hacminin büyüklüğü ve Model 2'ye göre iç çapının daha küçük olmasından dolayı daha fazla güç hasatladığı görülmüştür. Model 3'ün hacminin çok küçük olması daha küçük yüklerde doyuma gitmesine ve daha az gücün hasatlanabilmesine sebep olmuştur.

Çizelge 4.1. Güç yoğunlukları karşılaştırması

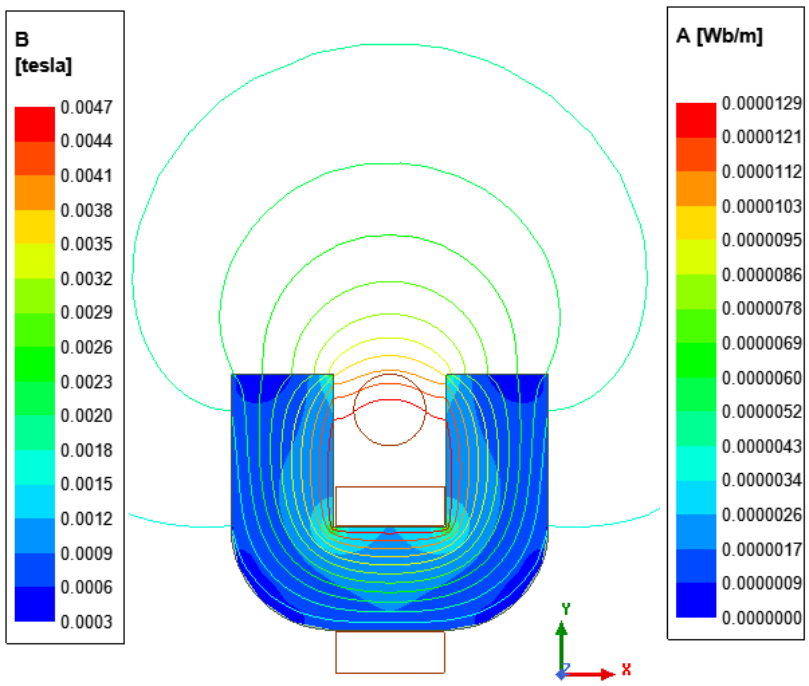
Çalışma	Nüve Malzemesi	Güç Yoğunluğu (mW/cm^3)	Hat Akımı (A)	Ry (Ω)	Sarım Sayısı	D_0 (mm)	D_i (mm)	L (mm)
Santos ve ark., (2014)	Ferrit	7.83	5	-	156	36	23	15
Santos ve ark., (2014)	Nanokristalin	1.98	5	-	96	33.5	27.5	4
Santos ve ark., (2014)	Demir tozu	0	5	-	111	38.4	21.5	11.1
Liu ve ark., (2016)	Silikon çelik	2.38	5	900	200	75	55	30
Model 1	Amorf	7.63	6.2	88	92	54	37	30
Model 2	Amorf	8.14	6.2	55	92	50	32	20
Model 3	Amorf	8.64	6.2	22	92	40	25	15
Liu ve ark., (2016)	Silikon çelik	9.54	10	770	200	75	55	30
Model 1	Amorf	12.18	9.2	55	92	54	37	30

Çizelge 4.1 ‘de toroidal geometrideki hasatlayıcılar için önceki çalışmalar ile bu tez çalışmasındaki güç yoğunlukları karşılaştırılmaları verilmiştir. Çizelge incelendiğinde yaklaşık aynı hat akımlı ve yaklaşık aynı iç çaplardaki amorf nüveli model 3 hasatlayıcıdan, ferrit nüveli hasatlayıcıya göre %10.34 daha fazla güç yoğunluğu elde edilmiştir. Yine model 3 hasatlayıcı ile yaklaşık aynı hat akımlı ve yaklaşık aynı iç çaplardaki nanokristalin hasatlayıcının güç yoğunlukları karşılaştırıldığında amorf nüveli model 3 hasatlayıcıdan yaklaşık 4.3 kat daha fazla güç yoğunluğu elde edilmiştir. 10 A hat akımlı silikon çelik malzemeli hasatlayıcı ile 9.2 A hat akımlı amorf malzemeli model 1 hasatlayıcının güç yoğunlukları karşılaştırıldığında model 1 hasatlayıcıdan %27.67 daha fazla güç yoğunluğu elde edilmiştir. Bu tez çalışmasındaki toroidal modeller kendi içinde karşılaştırıldığında aynı nüve malzemeli ve aynı hat akımındaki hasatlayıcılardan, iç çapı daha düşük modelde daha fazla güç yoğunluğu elde edildiği görülmüştür. Bu bağlamda iç çapın dolayısıyla hat ile hasatlayıcı arasındaki hava boşluğunun en düşük olduğu model 3 hasatlayıcıdan daha fazla güç yoğunluğu elde edildiği görülmüştür. Çizelge

incelendiğinde demir tozu nüve malzemesinin çok düşük manyetik geçirgenliğinden dolayı hasatlayıcılarda kullanılması pek uygun görülmemektedir.

4.1.2. Çekirdek tip modellerin sayısal analizleri ve deney verileri

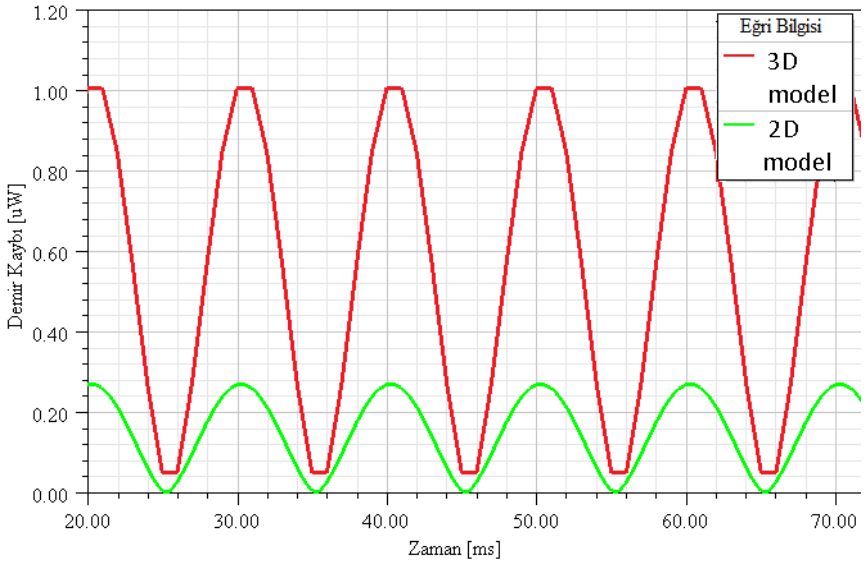
Çizelge 3.3'te teknik özellikleri verilen Model C1'in hat akımı 6.2 A tanımlanarak Ansys Maxwell ile statik manyetik analizi gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.5'te nüvenin manyetik akı yoğunluğu değişimi ve akı çizgileri analiz sonucu verilmiştir.



Şekil 4.9. Model C1 manyetik akı yoğunluğu değişimi ve akı çizgileri

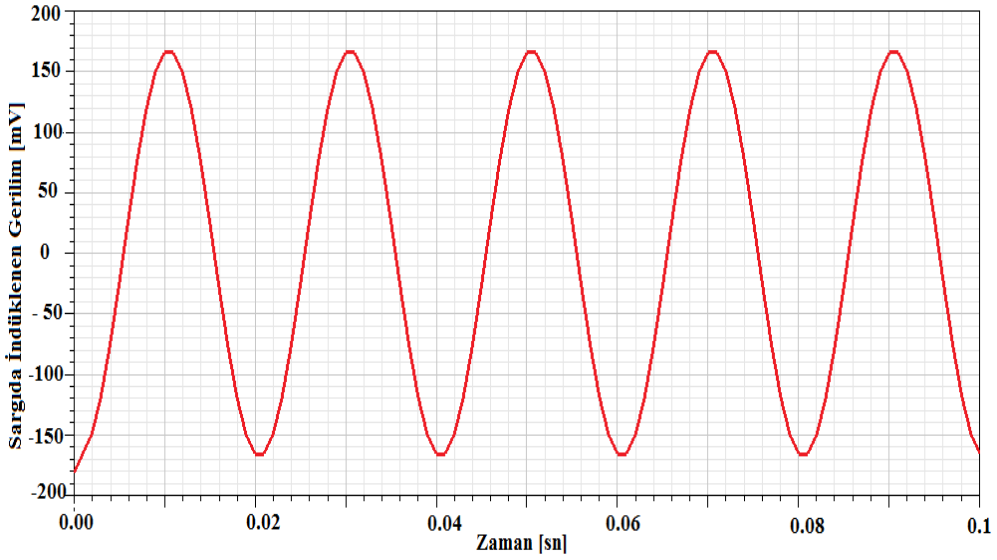
Şekil 4.9'da görüldüğü üzere, hava aralığının yüksek olması nedeniyle manyetik akı yoğunluğunda büyük miktarda azalma meydana gelmiştir. 6.2 A hat akımında ortalama manyetik akı yoğunluğu 1.2 mT'dır. Nüvenin doyum manyetik akı yoğunluğu düşünüldüğünde bu değer çok küçük kalmaktadır. Bu durum da diğer nüve modellerine nazaran yüksek hat akımlarında doyum etkilerinin oluşmayacağı düşünülebilir. Manyetik akı nüve malzemesinin iç bölgelerinden devresini tamamlamakta ve nüvenin dış bölgelerine doğru manyetik akı yoğunluğu azalmaktadır. Ayrıca hat akımını taşıyan iletkenin hasatlayıcı nüveye yakın

bölgelerinde akı kısa yoldan devresini tamamlamaktadır. Yine Ansys Maxwell ile geçici zaman analizleri gerçekleştirildiğinde nüve malzemesinin demir kayıpları değişimi Şekil 4.10'daki gibi olmuştur.

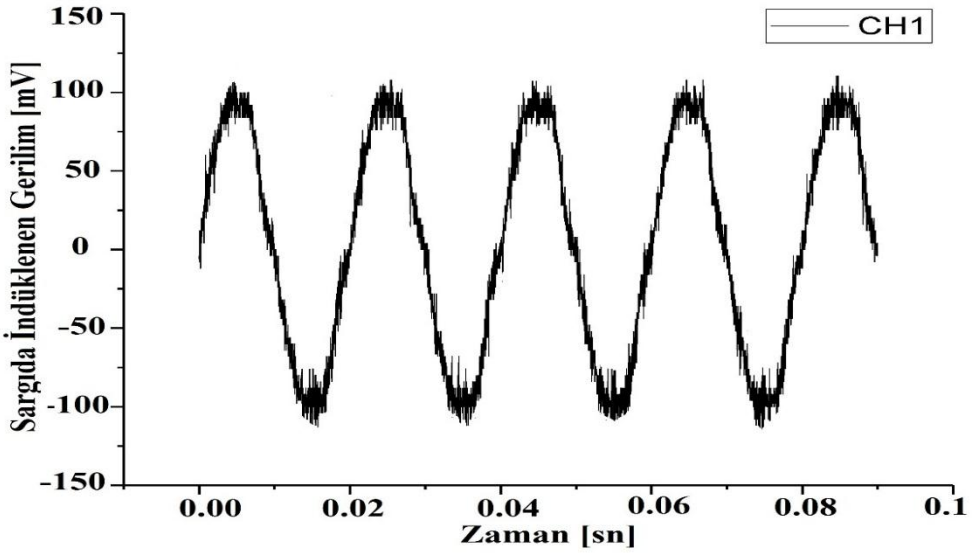


Şekil 4.10. Model C1 demir kayıpları değişimi

Ansys Maxwell ile gerçekleştirilen analizler neticesinde iki boyutlu analizde demir kaybı yaklaşık 0.25 µW ve üç boyutlu analizde ise 1 µW olarak bulunmuştur. Model C1 için Çizelge 3.6'da verilen sinüsoidal dalga kayıp katsayıları ile Denklem 3.9'da verilen Steinmetz formülü kullanılarak demir kaybı hesaplanmıştır. Bu kayıp ortalama olarak 0.62 µW bulunmuştur. Model C1'in hat akımı 6.2 A iken boşta çalışma durumunda indüklenen gerilim değişimi Şekil 4.11'de Ansys Maxwell yazılımı ve Şekil 4.12'de deney sonuçları ile incelenmiştir.

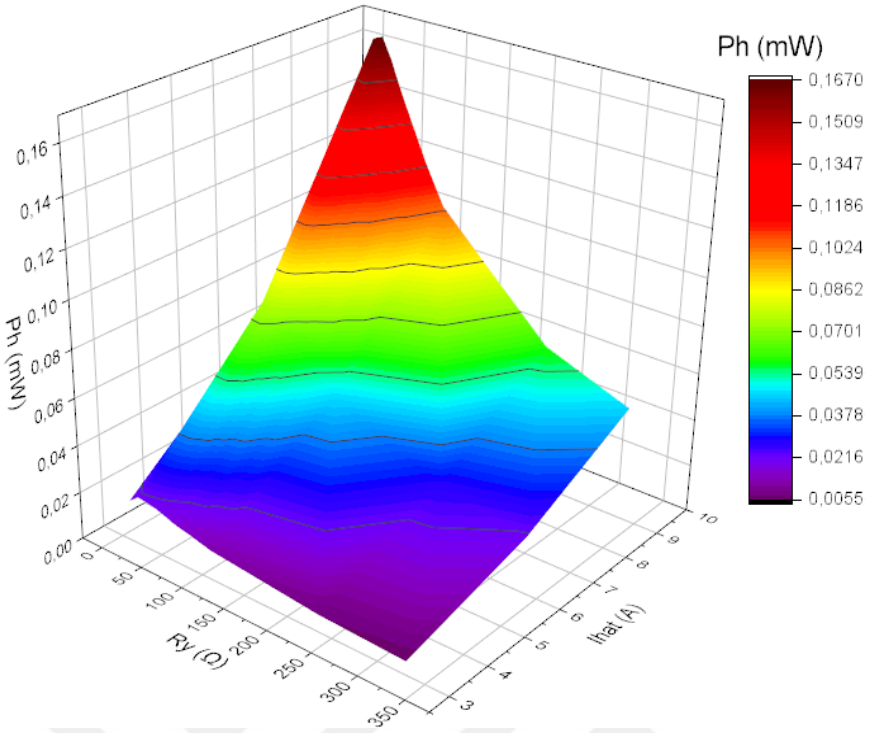


Şekil 4.11. Model C1 hasatlayıcıda indüklenen gerilim değişimi (Ansys Maxwell)



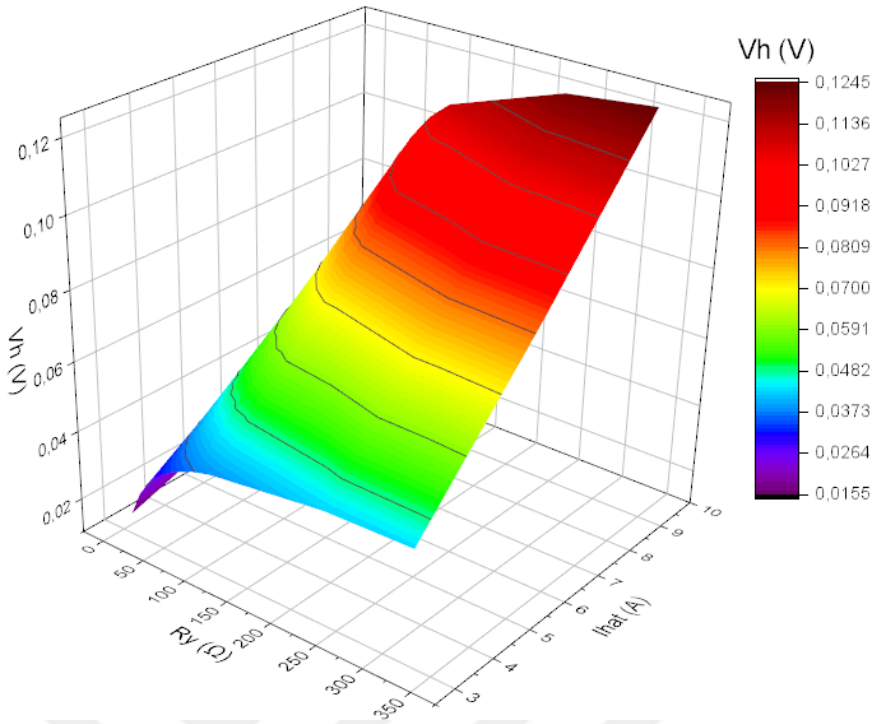
Şekil 4.12. Model C1 hasatlayıcıda indüklenen gerilim değişimi (deney)

Uygulama ve benzetim sonuçlarına göre dalga formu hat akımının dalga formu ile aynı özelliklere sahiptir. Benzetim çalışmasında indüklenen gerilimin tepe değeri 70 mV bulunmuştur. Uygulamada çalışmasında indüklenen gerilimin tepe değeri 80 mV olarak ölçülmüştür. Benzetim ve uygulama sonuçları birbiriyle uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 4.13. Model C1 hasatlanan güç değişim grafiği

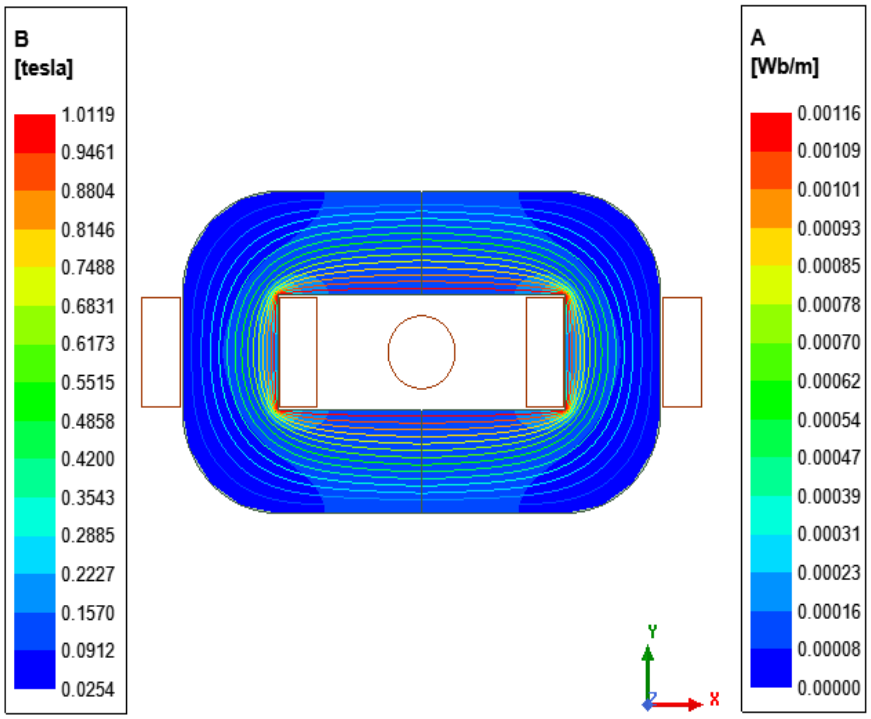
Model C1 için yapılan deneylerde hat akımının (I_{hat}) ve yük direncinin (R_y) değişimine göre hasatlanan gücün (P_h) değişim grafiği Şekil 4.13'te verilmiştir. 3 A hat akımında en fazla hasatlanan güç, 22 Ω yük direncinde 0.02 mW olarak ölçülmüştür. 6.2 A hat akımında en fazla güç, 33 Ω yük direncinde 0.07 mW olarak ölçülmüştür. 9.2 A hat akımında en fazla güç, 33 Ω yük direncinde 0.16 mW olarak ölçülmüştür. Deney verilerinden görüldüğü gibi hat akımı artıkça, hasatlanan maksimum gücün meydana geldiği yük direnci artmaktadır. C1 Modelin hasatladığı güç çok büyük hava boşluğundan dolayı toroidal modellerle kıyaslanamayacak derecede küçüktür. Fakat çok yüksek hat akımlarında bile doyuma ulaşmayacağının görülmesi çok yüksek hat akımlarında kullanılmaları açısından bir avantaj olarak görülebilir.



Şekil 4.14. Model C1 hasatlanan gerilim değişim grafiği

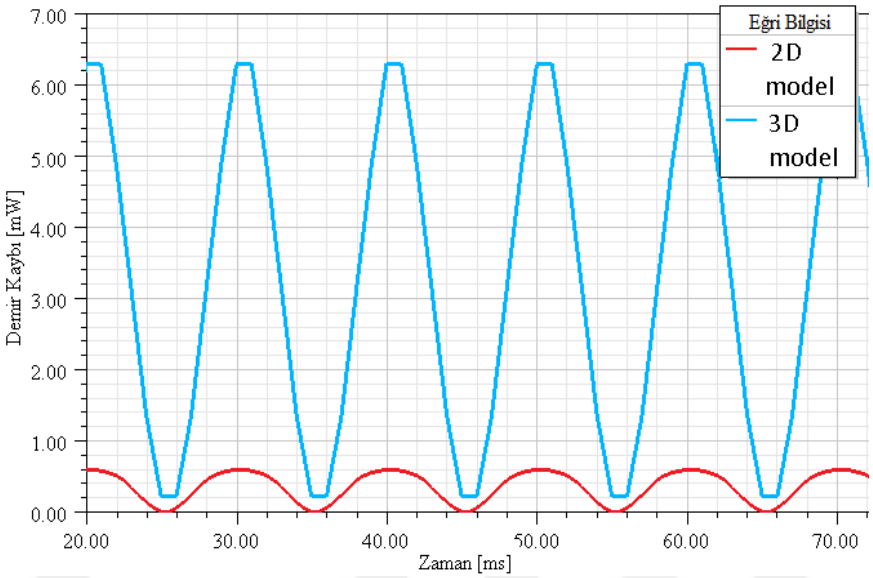
Model C1 için yapılan deneylerde hat akımının (I_{hat}) ve yük direncinin (R_y) değişimine göre hasatlanan gerilimin (V_h) değişim grafiği Şekil 4.14'te verilmiştir. Tüm hat akımlarında yük artıkça hasatlanan gerilimin arttığı görülmüştür. 9.2 A hat akımında 330 Ω yükte 0.12 V gerilim hasatlanmıştır.

Şekil 3.3(c)'de görüldüğü üzere C2 modeli; C1 modelin karşılıklı olarak yerleştirilmesinden meydana gelmiştir. Bu modelde sargılar birbirine seri olarak bağlanmıştır. Çizelge 3.3'te teknik özellikleri verilen Model C2'nin hat akımı 6.2 A tanımlanarak Ansys Maxwell ile statik manyetik analizi gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.15'te nüvenin manyetik akı yoğunluğu değişimi ve akı çizgileri verilmiştir.



Şekil 4.15. Model C2 manyetik akı yoğunluğu değişimi ve akı çizgileri

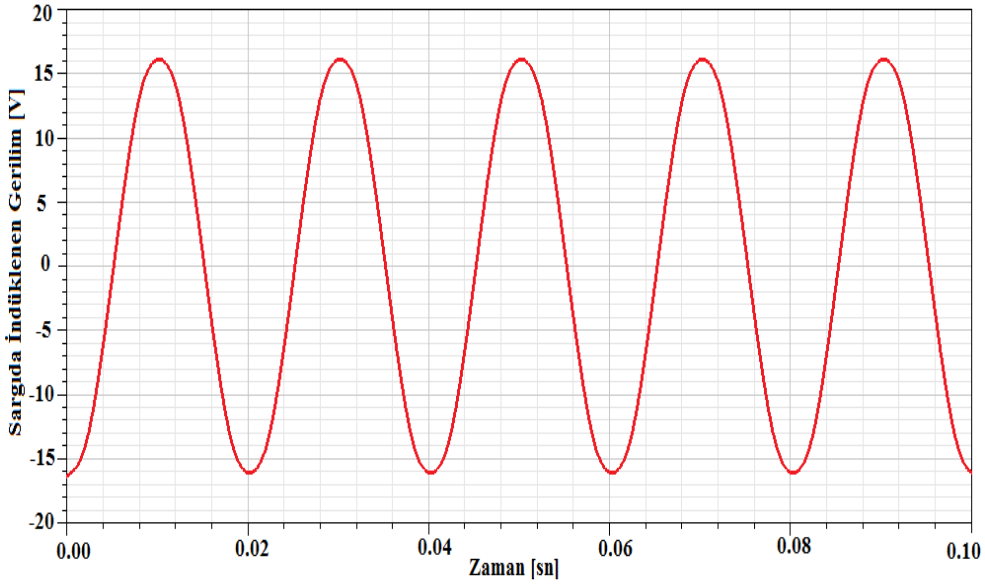
Hava aralığının artması manyetik devrede relüktansı arttıracak dolayısıyla etkin manyetik akı azalacaktır. Hava aralığını azaltmak için deney sırasında model, kablo bağı ile sıkıca bağlanmıştır. Şekil 4.15'te görüldüğü üzere akı yoğunluğu nüve iç bölgelerinde yoğunlaşmıştır. Amorf C tipi nüvelerin köşe noktaları manyetik doyma etkilerini azaltmaya yönelik kavisli olarak üretilmektedir. Bu durum benzetim modelinde de dikkate alınmıştır. Benzerim çalışmasında maksimum akı yoğunluğunun 1.01 T olduğu görülmüştür. Akı çizgileri dikkate alındığında nüve köşelerinde çok az miktarda kaçak akıların oluştuğu görülmektedir. Benzetim çalışmasında demir kaybı, kaçak akıların etkileri ihmal edilerek hesaplanmıştır. Yüksek hat akımlarında manyetik doyum etkileri toroidal modelde olduğu gibi bu modelde de dikkate alınmalıdır.



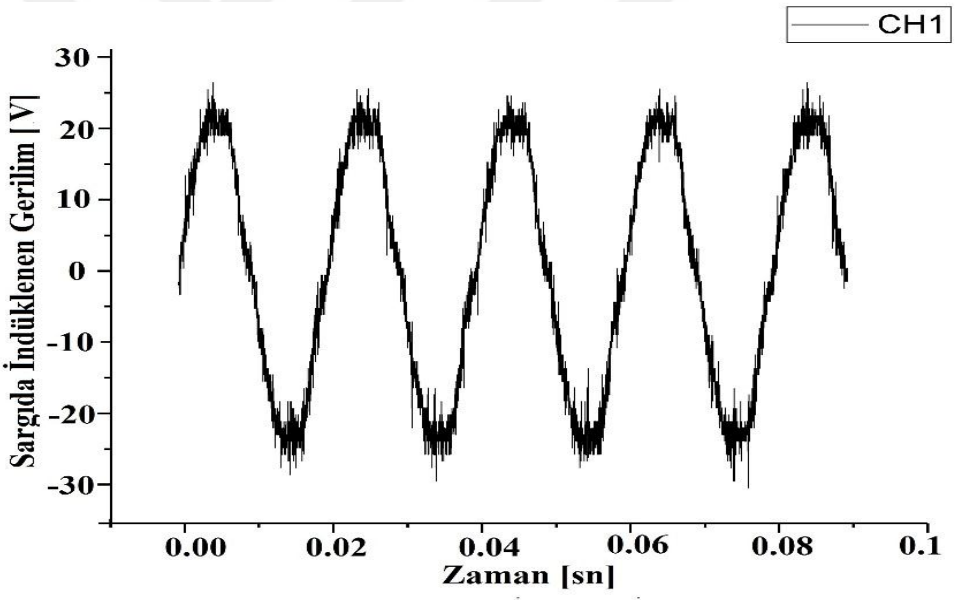
Şekil 4.16. Model C2 demir kayıpları değişimi

Ansys Maxwell ile gerçekleştirilen Model C2'nin demir kayıpları değişimi Şekil 4.16'da verilmiştir. İki boyutlu analizde demir kaybı yaklaşık 0.8 mW ve üç boyutlu analizde ise 6.3 mW olarak bulunmuştur. Model C2 için Çizelge 3.6'da verilen sinüsoidal dalga kayıp katsayıları ile Denklem 3.9'da verilen Steinmetz formülü kullanılarak demir kaybı hesaplanmıştır. Bu kayıp ortalama olarak 8.6 mW bulunmuştur.

Model C2'nin hat akımı 6.2 A iken boşta çalışma durumunda indüklenen gerilim değişimi Şekil 4.17'de Ansys Maxwell yazılımı ve Şekil 4.18'de deney sonuçları ile incelenmiştir.

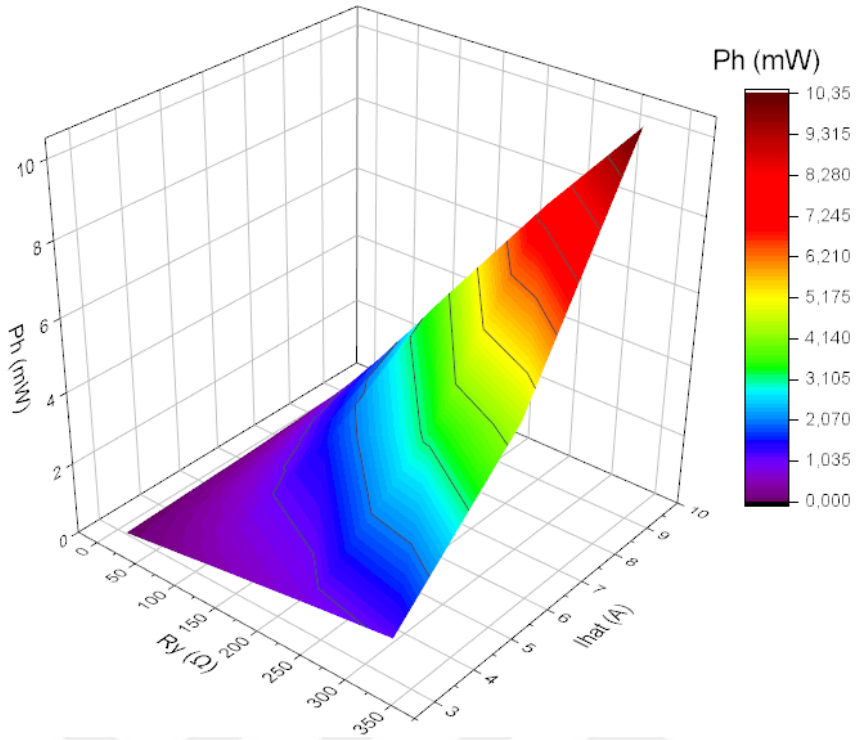


Şekil 4.17. Model C2 hasatlayıcıda indüklenen gerilim değişimi (Ansys Maxwell)



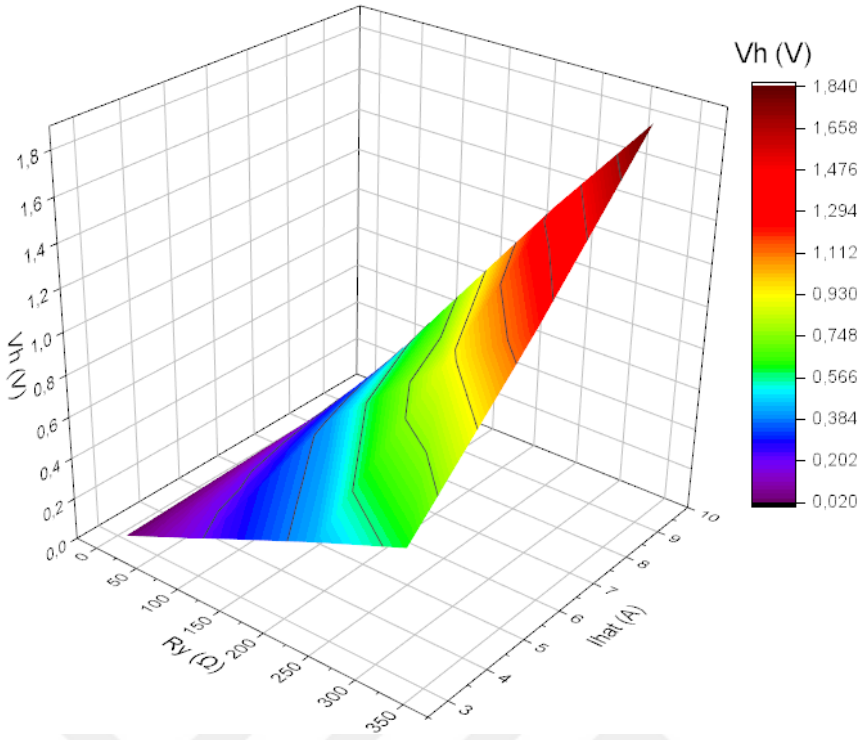
Şekil 4.18. Model C2 hasatlayıcıda indüklenen gerilim değişimi (deney)

Uygulama ve benzetim sonuçlarına göre dalga formu hat akımının dalga formu ile aynı özelliklere sahiptir. Benzetim çalışmasında indüklenen gerilimin tepe değeri 16 V bulunmuştur. Uygulamada çalışmasında indüklenen gerilimin tepe değeri 20 V olarak ölçülmüştür. Benzetim ve uygulama sonuçları birbiri ile uyumlu olduğu görülmektedir.



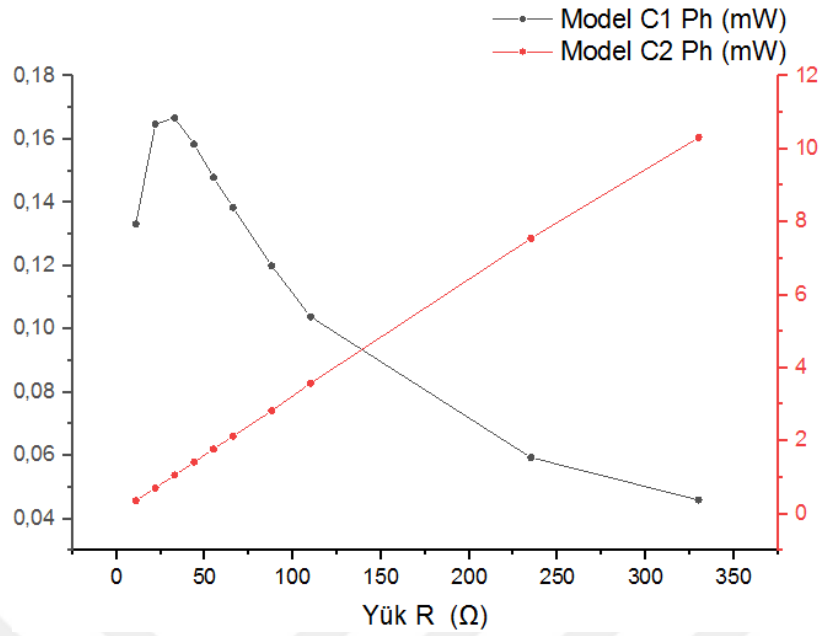
Şekil 4.19. Model C2 hasatlanan güç değişim grafiği

Model C2 için yapılan deneylerde hat akımının (I_{hat}) ve yük direncinin (R_y) değişimine göre hasatlanan gücün (P_h) değişim grafiği Şekil 4.19'da verilmiştir. Model C2'nin deney verileri diğer (Model 1, Model 2, Model 3, Model C1) deney verilerine nazaran çok ilgi çekici olmuştur. Diğer modellerde hasatlayıcıdan elde edilen güç belli bir yüke kadar artıp daha sonra düşmeye başlamıştı. Bu modelde ise hasatlayıcı yükünün artmasına rağmen güç sürekli artmıştır. Deneyde hasatlayıcı yükü artmasına rağmen hasatlanan akımın neredeyse sabit kalması ve hasatlanan gerilimin sürekli artması sonucu hasatlanan güçte yük artıkça sürekli artmıştır. Tüm hat akımlarında en fazla hasatlanan güç, deney setindeki en yüksek değerlikli direnç olan 330 Ω yük direncinde ölçülmüştür. 3 A hat akımında 1.12 mW, 6.2 A hat akımında 4.5 mW, 9.2 A hat akımında 10.31 mW olarak ölçülmüştür. Model C2'nin hacmi model C1'e göre 2 kat artmasına rağmen aynı hat akımında C1 modele göre yaklaşık 200 kat daha fazla enerji hasatlanmıştır. Bu sonucun doğmasındaki en büyük sebep C2 modelde hava aralığının azalması ile (manyetik relüktansın oldukça azalması) etkin manyetik akının artarak nüve üzerinden devresini tamamlamasından ileri gelmektedir.



Şekil 4.20. Model C2 hasatlanan gerilim değişim grafiği

Model C2 için yapılan deneylerde hat akımının (I_{hat}) ve yük direncinin (R_y) değişimine göre hasatlanan gerilimin (V_h) değişim grafiği Şekil 4.20'de verilmiştir. Deneyde hasatlayıcı yükü artmasına rağmen hasatlanan gerilimin sürekli artması sonucu hasatlanan güçte sürekli artmıştır. Tüm hat akımlarında en fazla hasatlanan gerilim, deney setindeki en yüksek değerlikli direnç olan 330 Ω yük direncinde ölçülmüştür. 3 A hat akımında 0.61 V, 6.2 A hat akımında 1.21 V, 9.2 A hat akımında 1.84 V olarak ölçülmüştür.

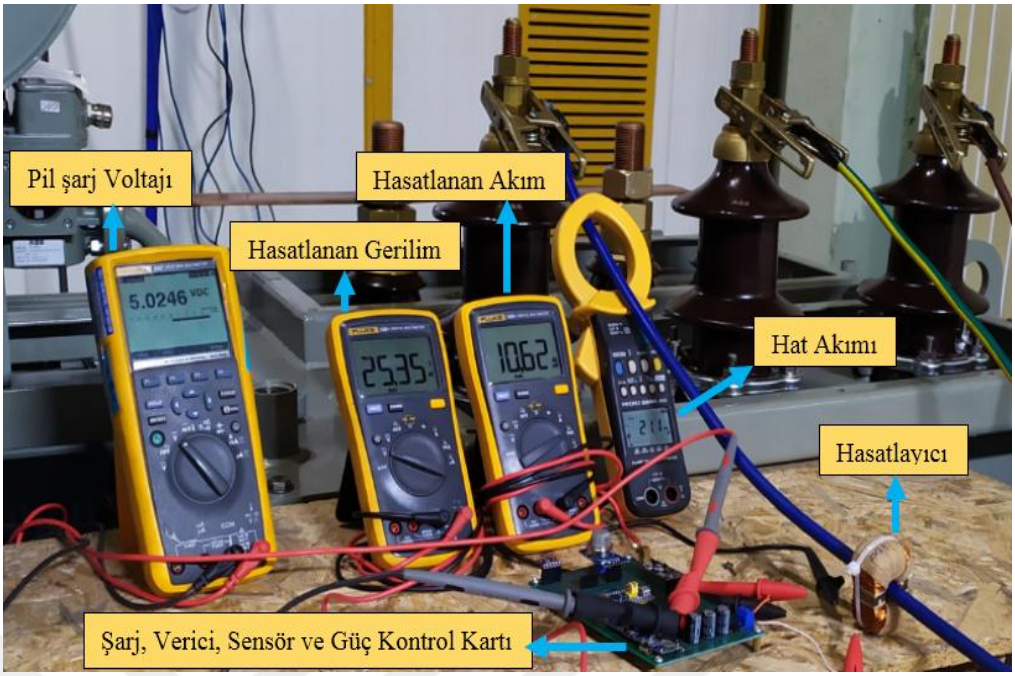


Şekil 4.21. Çekirdek tip modellerde hasatlanan güç değişim grafiği

Çekirdek tip modellerin 9.2 A hat akımında yapılan deneylerinde yük değişimine göre birleştirilmiş hasatlanan güç değişim grafiği Şekil 4.21'de verilmiştir. Diğer modellerde olduğu gibi model C1'de hasatlayıcı yükü arttıkça belli bir yüke kadar hasatlanan gücünde arttığı görülmektedir. Model C2'de ise deney setindeki en yüksek değerlikli (330 Ω) yüke kadar hasatlayıcı yükü arttırıldıkça hasatlanan güçte sürekli artmıştır.

4.2. Endüstriyel Test Sonuçları

Firmada yapılan teste; teknik detayları Ek 4'te verilen Meksan Trafo markalı Üç (3) fazlı yağlı tip dağıtım transformatörü kullanılmıştır. Transformatör, uygun hat akımının sağlanabilmesi için "kısa devre empedansı ve yük kayıplarının bulunması (TS EN ISO/IEC 60076-1)" deneyindeki gibi çalıştırılmıştır. Bu deneyde transformatör alçak gerilim tarafı kısa devre edilerek yüksek gerilim tarafından anma akımına kadar akım çekmesi sağlanabilmektedir. Firmanın teknik altyapısı ile anma akımı kademeli olarak artırılabilmektedir. Şekil 4.22'de endüstriyel test için yapılan hazırlık aşaması görülmektedir.



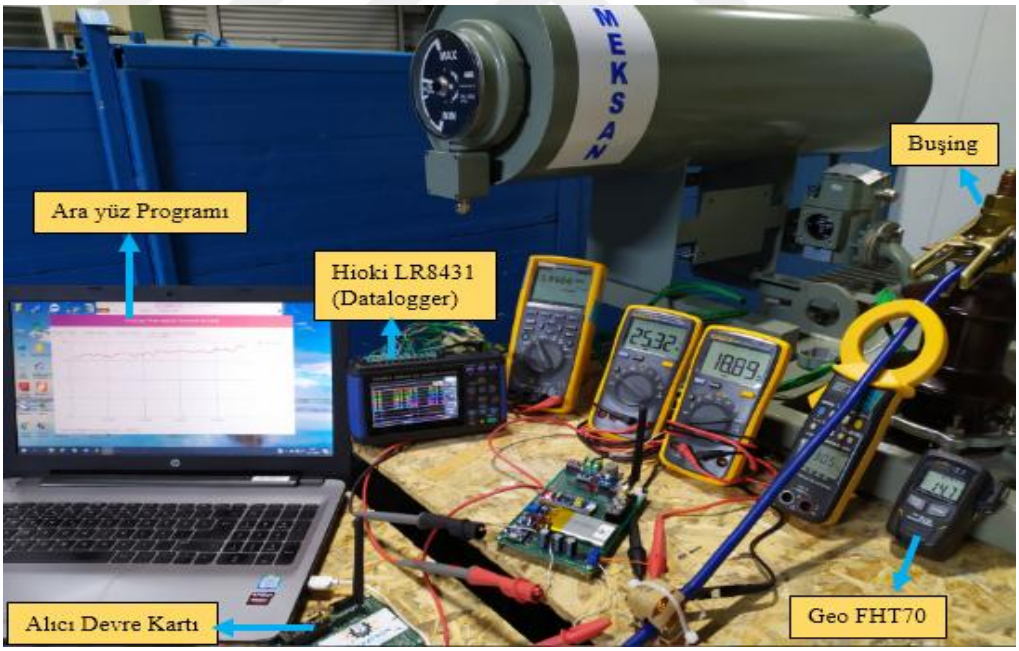
Şekil 4.22. Endüstriyel test öncesi

Endüstriyel test öncesinde hasatlayıcı transformatörün ‘A’ fazına kablo bağı ile sıkıca tutturulmuştur. Farklı hat akımları için batarya şarj devresinden alınan gerilim, hat akımı, hasatlayıcıdan hasatlanan gerilim ve akım RMS olarak ölçülmüştür. Hasatlanan güç ise hasatlanan akım ve gerilimin çarpılması ile hesaplanmıştır. Elde edilen veriler Çizelge 4.2’de verilmiştir. Burada yüksüz çalışma durumu, Li-Po bataryanın şarj devresi soketlerinden çıkartılmış durumunu, yüklü durum ise şarj devresinin soketlerine Li-Po bataryanın bağlandığı ve tüm sistemin çalışır durumu olarak düşünülmüştür. Doğrultma devresinin çalışma giriş gerilimi 20 V ile 50 V arası AC olduğundan dolayı devre için ideal hat akımı 30 A civarı olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 4.2. Endüstriyel test verileri

Yükleme durumu	Hat akımı (A)	Pil Şarj Gerilimi (V)	Hasatlanan Gerilim (V)	Hasatlanan Akım (mA)	Hasatlanan Güç (mW)
Yüksüz	10.60	3.71	11.84	5.32	62.99
Yüksüz	17.30	5.07	21.84	8.24	179.96
Yüksüz	21.10	5.02	25.35	10.62	269.22
Yüksüz	25.10	5.20	27.04	12.32	333.13
Yüksüz	30.50	5.10	31.54	14.45	455.75
Yüklü	30.50	3.66	25.32	18.89	478.29

Endüstriyel test için gerekli kontroller yapıldıktan sonra test düzeneği Şekil 4.23'teki gibi kurulmuştur. Hat akımı 30.5 A'ya ayarlanarak sistem tüm bileşenleri ile çalıştırılmıştır.

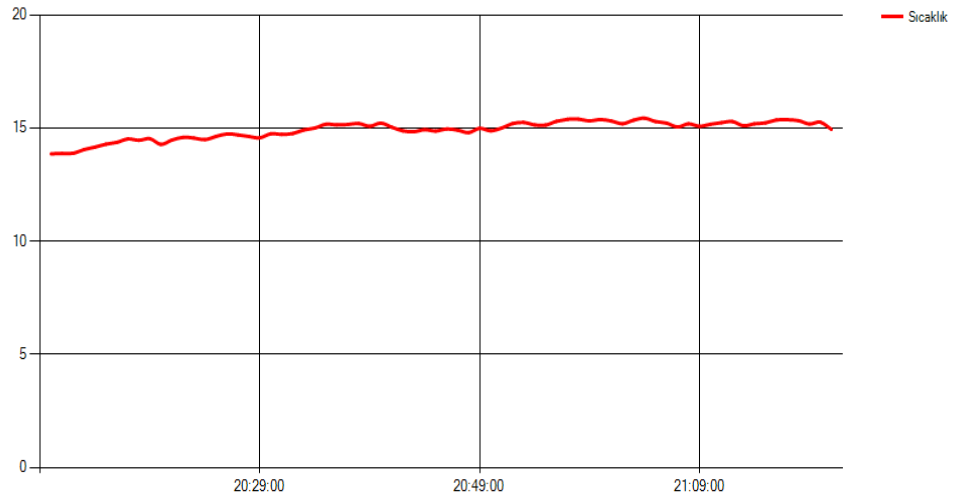


Şekil 4.23. Endüstriyel test

Çizelge 4.2'de görüldüğü gibi devreye batarya bağlanınca hasatlanan akım ve hasatlanan güç artırmıştır. Sistem hasatlayıcıdan 30.5 A hat akımında, 478.29 mW güç hasatlayarak bataryayı şarj etmeye başlamıştır. Endüstriyel test çalışmasında

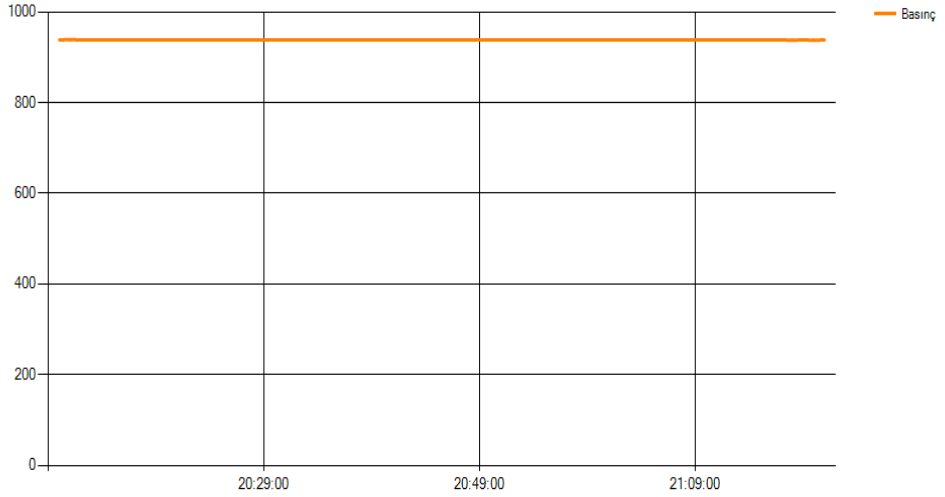
sistem bir (1) saatten fazla çalıştırılmıştır. Birer dakikalık periyotlarda sensörlerden; hava sıcaklığı, basınç, yükseklik, nem, trafo sıcaklığı, hava kirliliği değişim verileri grafiksel olarak alınmıştır.

Endüstriyel testte alınan hava sıcaklığı değişim grafiği Şekil 4.24'te verilmiştir. Deney süresince ortam sıcaklığında çok fazla bir değişiklik olmamıştır.



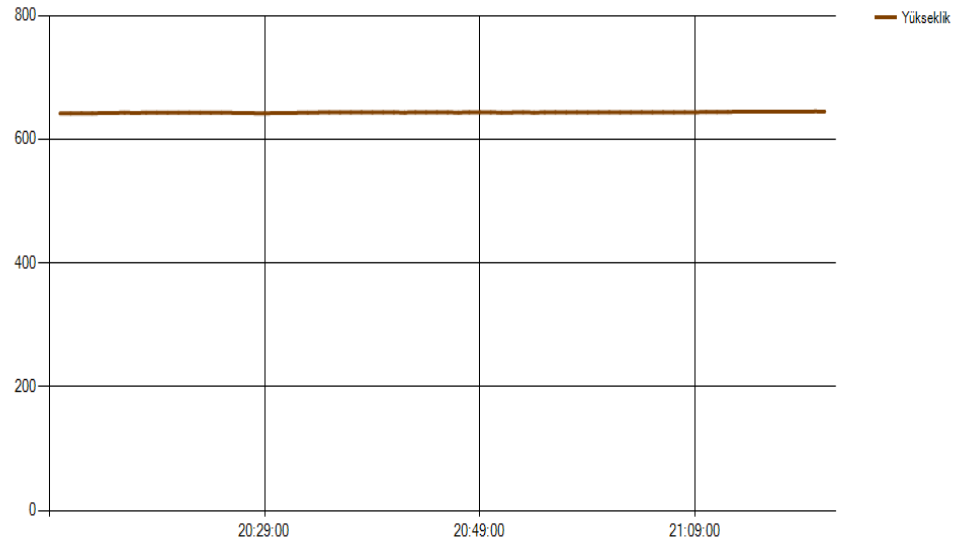
Şekil 4.24. Hava sıcaklığı değişim grafiği

Endüstriyel testte alınan basınç değişim grafiği Şekil 4.25'te verilmiştir. Deney süresince hava basıncında bir değişiklik olmamıştır.



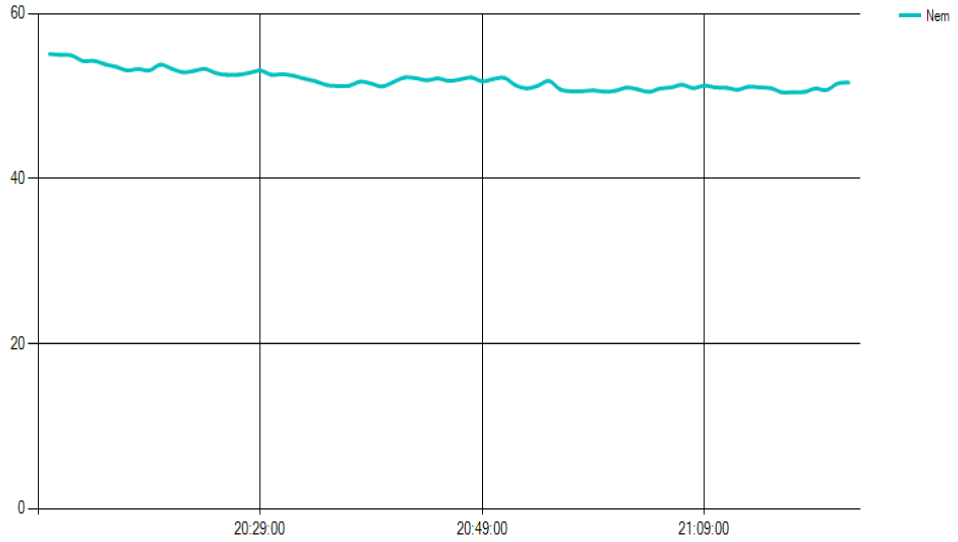
Şekil 4.25. Basınç değişim grafiği

Endüstriyel testte alınan yükseklik değişim grafiği Şekil 4.26'de verilmiştir. Deney süresince basıncın değişmemesi nedeniyle yükseklik verisinde de bir değişiklik olmamıştır.



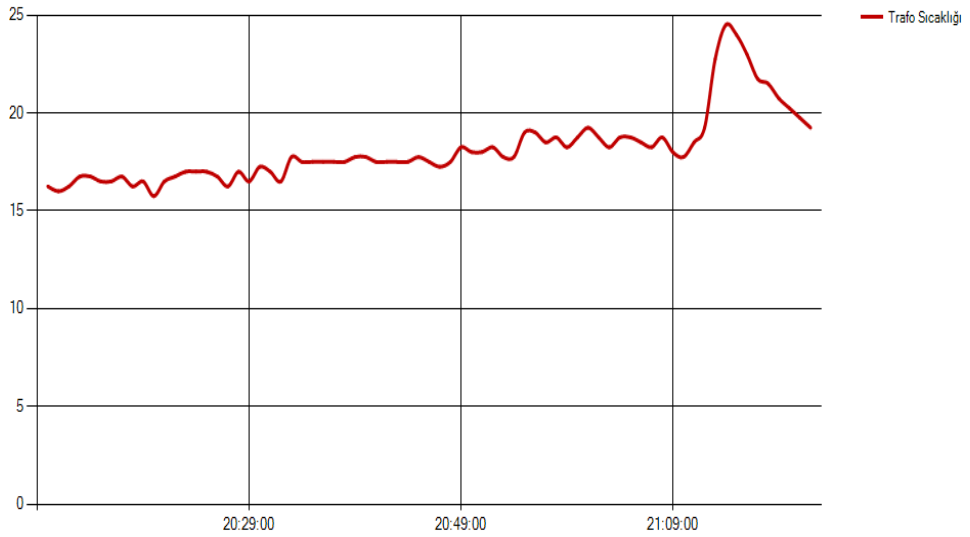
Şekil 4.26. Yükseklik değişim grafiği

Endüstriyel testte alınan nem değişim grafiği Şekil 4.27'te verilmiştir. Deney süresince nem verisinde çok fazla bir değişiklik olmamıştır.



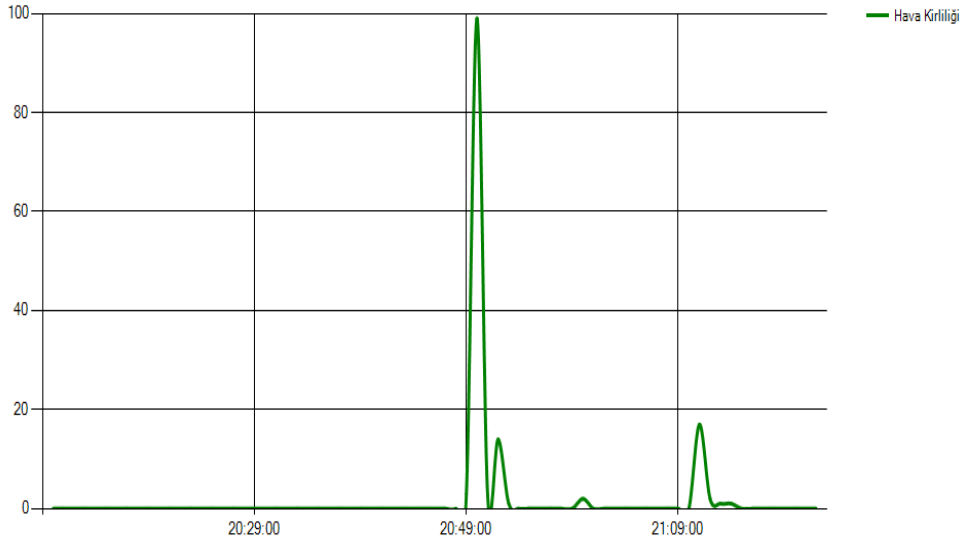
Şekil 4.27. Nem değişim grafiği

Endüstriyel testte alınan trafo sıcaklık değişim grafiği Şekil 4.28'de gösterilmiştir. Sensörün sağlıklı çalıştığını gösterebilmek için ısıl çift ucu dışardan ısıtılması ile grafikte ani yükselmeler elde edilmiştir.



Şekil 4.28. Trafo sıcaklık değişim grafiği

Endüstriyel testte alınan hava kirliliği değişim grafiği Şekil 4.29'de gösterilmiştir. Sensörün sağlıklı çalıştığını gösterebilmek için sensör alıcısına çakmak gazı verilerek grafikte ani yükselmeler elde edilmiştir.



Şekil 4.29. Hava kirliliği değişim grafiği

Çizelge 4.3. Sensör verilerinin karşılaştırılması

Trafo Sıcaklığı (°C)			Hava Sıcaklığı (°C)			Nem (%)		
Firma-Hioki LR8431	**Ara yüz**	**Fark%**	**Firma-Geo FHT 70**	**Ara yüz**	**Fark%**	**Firma-Geo FHT 70**	**Ara yüz**	**Fark%**
15.50	16.25	4.84	14.30	13.86	-3.08	60.80	55.10	-9.37
15.30	16.00	4.58	14.60	14.29	-2.12	58.80	53.85	-8.42
15.10	15.75	4.30	14.80	14.63	-1.15	58.80	53.81	-8.49
15.20	15.75	3.62	14.70	14.28	-2.86	57.90	52.57	-9.21
16.40	17.00	3.66	14.80	14.63	-1.15	58.80	52.77	-10.26
16.60	17.25	3.92	14.80	14.75	-0.34	58.80	52.57	-10.60
16.80	17.50	4.17	14.80	15.17	2.50	57.10	51.32	-10.12
17.00	17.75	4.41	14.90	15.22	2.15	58.80	51.17	-12.98
17.00	17.75	4.41	14.90	15.17	1.81	58.70	51.07	-13.00
22.70	24.00	5.73	14.90	15.23	2.21	58.70	50.95	-13.20
19.20	20.25	5.47	14.80	15.26	3.11	58.40	50.72	-13.15

Hasatlayıcı sistem ile firmanın trafo sıcaklığı ölçümü için kullandığı Hioki LR8431, ayrıca firmanın ortam sıcaklığı ve nem ölçtüğü Geo FHT70 veri kaydedicileri (datalogger) cihazlarından alınan sonuçlar Çizelge 4.3'te karşılaştırılmıştır. Hava sıcaklığı ölçümünde en fazla %3.11 ve trafo sıcaklığı ölçümünde en fazla %5.73 fark olduğu görülmüştür. Trafo sıcaklığı ölçümündeki bu farkın kullanılan ısıl çift hassasiyetlerinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, iki farklı geometrik yapıda, amorf materyalli nüveler ile elektromanyetik alandan enerji hasatlanmasında;

- Ansys Maxwell yazılımı ile sayısal analizler,
- Deney düzeneği ile farklı hat akımlarında, farklı yüklerde ve farklı boyutlarda hasatlayıcı performans testleri,
- Tasarlana sensör sisteminin hat üzerinde çalışma performansını değerlendirmek için endüstriyel test,
- Bu sistemden alınan veriler ile piyasada ticari olarak satılan veri kaydediciler(dataloggerlar)'in karşılaştırılması gerçekleştirilmiştir.

Yapılan deneylerde, 9.2 A hat akımında toroidal modellerden en fazla 500 mW civarında güç hasatlandığı, çekirdek tip modellerden ise 10 mW civarında güç hasatlandığı görülmüştür. Endüstriyel testte çekirdek tip (C2) modelde 30.5 A hat akımında ve tam yükte 478.29 mW güç hasatlanmıştır. Toroidal geometrili nüveler ile yapılan elektromanyetik alandan enerji hasatlama ön deneylerinde bu nüvelerin manyetik akı yolunda hava boşluğunun olmamasından hat akımının artması ile çabuk doyuma ulaştıkları görülmüştür. İletim hatlarında ya da transformatör alçak gerilim buşinglerinde toroidal geometrili hasatlayıcılar için doyum etkisi dikkate alınmalıdır. Bu durum için önlemler alınmalıdır. Toroidal nüveli hasatlayıcıların daha düşük hat akımlı uygulamalar (ev uygulamaları, vb.) için uygun olduğu görülmüştür.

Literatüre kazandırılan çekirdek tip nüve modeli ile yapılan elektromanyetik alandan enerji hasatlama deneylerinde bu nüvelerin yapılarındaki hava boşluğundan dolayı yaklaşık aynı hacimdeki toroidal modellere göre daha az enerji hasatladığı görülmüştür. Bu dezavantaj sayılabilecek özelliklerine rağmen yüksek akımlarda doyuma ulaşmaları ve montaj kolaylıkları sağlamaktadır. Özellikle yüksek akımın olduğu iletim hatlarında kullanılabilmeleri açısından çekirdek tip modeller büyük bir avantaj sunmaktadır.

Endüstriyel testi yapılan prototip enerji hasatlayıcı sisteminde elektromanyetik alandan enerji hasatlanmıştır. Bu enerji ile batarya şarj edilmiştir. Güç kontrol kartı vasıtasıyla hava sıcaklığı, hava kirliliği ve ısıl çiftten başarılı bir şekilde veri alınmıştır. Bu veriler; tasarlanan ara yüz üzerinden gerçek zamanlı olarak alınabilmekte ve kaydedilebilmektedir. Hava sıcaklığı ölçümünde en fazla %3.11 trafo sıcaklığı ölçümünde en fazla %5.73 fark olduğu görülmüştür. Bu farkın kullanılan sensörlerin hassasiyetlerinin artması ile azalacağı beklenmektedir. Performans/maliyet düşünüldüğünde tasarlanan sistemin iletim hatlarından veri elde edilebilmesi için kullanılabileceği görülmüştür. Tasarlanan prototipten elde edilen sonuçlar ve öneriler aşağıda sıralanmıştır:

- Hâlihazırdaki güç hatlarında kullanılan ve olumsuz çevre şartlarından etkilenen sensör sistemleri yerine hatta enerji olduğu sürece veri alabilme özelliğindedir.
- Bilindiği gibi transformatörün ömür tayini için trafo sıcaklık değişiminin izlenmesi önemlidir. Bu sistem, transformatörlerin sıcaklık/çalışma verilerini kayıt altına alabilme özelliğindedir.
- Transformatör sıcaklık artış testinde (IEC ISO/EN 60076-2) kullanılan bir veri kaydediciye (datalogger) göre daha uygun maliyettedir.
- Piyasa araştırmasına göre sadece Avrupa'da üretilen benzeri ticari ürünlere, yerli ve milli bir alternatif üründür. Bu bakımdan yurt dışına aktarılacak dövizin ülkemizde kalması sağlanabilir.
- Bu sistemin kullanıldığı her bir hat etrafındaki meteorolojik veriler ve hava kirliliği gibi çevresel veriler hatta enerji olduğu sürece ilgili yerlerle paylaşılabilir. Özellikle meteorolojik verilerin elde edilmesi için harcanan bütçe düşünüldüğünde hasatlama sistemleriyle bu veriler daha az maliyetlerle elde edilebilir.

KAYNAKLAR

ARSLAN S., 2011. Orta Frekanslı Punta Kaynak Transformatörü ve Makinası Tasarımı. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 55.

BOLES, J. D., OZPINECI, B., TOLBERT, L. M., BURRESS, T. A., AYERS, C. W., and BAXTER, J. A., 2016. Inductive Power Harvesting For a Touchless Transmission Line Inspection System. IEEE, Power and Energy Society General Meeting, (2016): 1-5.

DOS SANTOS, M. P., VIEIRA, D. A., RODRIGUEZ, Y. P., DE SOUZA, C. P., DE MORAES, T. O., and FREIRE, R. C., 2014. Energy Harvesting Using Magnetic Induction Considering Different Core Materials. IEEE International, Instrumentation And Measurement Technology Conference Proceedings, (I2MTC): 942-944.

FENERCİOĞLU, A., ve TARIMER, İ., 2007. Bir Manyetik Sistemin Maxwell 3D Alan Simülatörü ile Statik Manyetik Analizinin Çözüm Süreçleri. Selçuk Teknik Dergisi, 6(3): 221-240.

GAIKWAD, A. A., and KULKARNI, S. B., 2018. Evaluation Of Dimensional Effect On Electromagnetic Energy Harvesting. Procedia Computer Science, 143: 58-65.

GUO, F., HAYAT, H., and WANG, J., 2011. Energy Harvesting Devices For High Voltage Transmission Line Monitoring. IEEE, Powerand Energy Society General Meeting, (2011): 1-8.

HOSSEINIMEHR, T., and TABESH, A., 2016. Magnetic Field Energy Harvesting From AC Lines For Powering Wireless Sensor Nodes İn Smart Grids. IEEE, Transactions On Industrial Electronics, 63(8): 4947-4954.

IŞIK F., 2014. Amorf Çekirdekli 33/0.4 kV 1 MVA Dağıtım Transformatörü Tasarımı ve Performans Analizi. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Sakarya, 49.

JUDD, M., ZHU, M., and ROSCOE, N., 2012. Powering Sensors through Energy Harvesting. Presented at Euro Tech Conference, November 2012, Glasgow,1-9.

KABAKULAK, M., ARSLAN, S., ve GÜLLÜOĞLU, T., 2018. Ortak Simülasyon Platformunda Enerji Hasatlayıcı Analizi. GAP Matematik, Mühendislik, Fen ve Sağlık Bilimleri Kongresi, Şanlıurfa, 26-32.

LIU, Y., XIE, X., HU, Y., QIAN, Y., SHENG, G., JIANG, X., and LIU, Y., 2016. A Novel High-Density Power Energy Harvesting Methodology For Transmission Line Online Monitoring Devices. Review Of Scientific Instruments, 87(7): 075119.

MAHARJAN, P., SALAUDDİN, M., CHO, H., and PARK, J. Y., 2018. An Indoor Power Line Based Magnetic Field Energy Harvester For Self-Powered Wireless Sensors In Smart Home Applications. Applied Energy, 232: 398-408.

MORAG, Y., and LEVRON, Y., 2019. Output Power Limit in Energy Harvesting Systems Based on Magnetic Induction Incorporating High-Frequency Effects. Instruments, 3(2): 26.

MOSER, M. J., BRETTERKLİEBER, T., ZANGL, H., and BRASSEUR, G., 2010. Strong And Weak Electric Field Interfering: Capacitive Icing Detection and Capacitive Energy Harvesting an a 220-kV High-Voltage Overhead Power Line. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 58(7): 2597-2604.

OLIVEIRA DE MORAES JÚNİOR, T., PERCY MOLINA RODRIGUEZ, Y., PROTÁSIO DE SOUZA, C., and CLEUDSON SOUSA MELO, E., 2013. Experimental Results On Magnetic Cores For Magnetic Induction-Based Energy Harvesting. Instrumentation Viewpoint, (14): 625-630.

ÖZSOY, M., 2018. Kablosuz Enerji Transferi Sisteminin Modellenmesi. Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Tokat, 4-9.

PAUL, S., BASHIR, S., and CHANG, J., 2018. Design of a Novel Electromagnetic Energy Harvester With Dual Core for Deicing Device of Transmission Lines. IEEE Transactions on Magnetics, 55(2), 1-4.

RODRIGUEZ, J. 2017. Electric Field Energy Harvesting from Medium Voltage Power Lines. RMIT University, School of Engineering College of Science, Engineering and Health, Doctor of Philosophy, Australia,14.

URL-1,https://www.netl.doe.gov/sites/default/files/netl-file/METGLAS-2605-SA1-Core-Datasheet_approved%5B1%5D.pdf (Erişim Tarihi:14.11.2019)

URL-2,https://www.sparkfun.com/veri kartıs/Components/nRF24L01_ prelim_ prod spec1_2.pdf (Erişim Tarihi:04.11.2019)

UZUN, G., 2012. Kablosuz Enerji İletimi. Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Samsun, 5-8.

YUAN, S., HUANG, Y., ZHOU, J., XU, Q., SONG, C., and THOMPSON, P., 2015. Magnetic Field Energy Harvesting Under Overhead Power Lines. IEEE Transactions On Power Electronics, 30(11): 6191-6202.

WANG, W., HUANG, X., TAN, L., GUO, J., and LIU, H., 2016. Optimization Design Of An İnductive Energy Harvesting Device For Wireless Power Supply System Overhead High-Voltage Power Lines. Energies, 9(4): 242.

WANG, Z., DU, J., WANG, R., HUANG, W., HU, W., WU, J., and HE, X., 2014. An Enhanced Energy Harvesting Method Based On Resonant Current Transformer For High Voltage AC Cable Monitoring Equipment. In 2014 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, (APEC 2014): 3455-3459.

WHITE, R. M., NGUYEN, D. S., WU, Z., and WRIGHT, P. K., 2018. Atmospheric Sensors and Energy Harvesters on Overhead Power Lines. Sensors, 18(1): 114-114.

WRIGHT, S., KIZIROGLOU, M., SPASIC, S., RADOSEVIC, N., and YEATMAN, E., 2019. Inductive Energy Harvesting From Current-Carrying Structures. IEEE Sensors Letters, 3(6): 6001104.

YANG, F., DU, L., WANG, D., WANG, C., and WANG, Y., 2018. A Novel Self-Powered Lightning Current Measurement System. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 65(3): 2745-2754.

YUAN, S., HUANG, Y., ZHOU, J., XU, Q., SONG, C., and YUAN, G. 2017. A High-Efficiency Helical Core For Magnetic Field Energy Harvesting. IEEE Transactions on Power Electronics, 32(7): 5365-5376.

ZANGL, H., BRETTERKLIEBER, T., and BRASSEUR, G., 2008. Energy Harvesting For Online Condition Monitoring Of High Voltage Overhead

Power Lines. IEEE Instrumentation And Measurement Technology Conference Proceedings, (IMTC2008): 1364-1369.

ZHAO, X., KEUTEL, T., BALDAUF, M., and KANOUN, O., 2012. Energy Harvesting For Overhead Power Line Monitoring. Systems, Signals And Devices (SSD), International Multi-Conference, (9): 1-5.

ZHUANG, Y., XU, C., YUAN, S., HE, C., CHEN, A., LEE, W. W., and HUANG, Y., 2017. An İmproved Energy Harvesting System On Power Transmission Lines. IEEE Wireless Power Transfer Conference, s.1-3.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Mahmut KABAKULAK
Uyruğu : T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi : Şanlıurfa-1986
Telefon : 05344096334
e-mail : m.kabakulak@harran.edu.tr

EĞİTİM

Derece	Adı, Yeri	Bitirme Yılı
Lise	: Şanlıurfa Lisesi	2003
Üniversite	: İnönü Üniversitesi	2012

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2014	Meksan Trafo Ltd. Şti.	Test Mühendisi
2016	Meksan Trafo Ltd. Şti.	Laboratuvar Müdürü
2018	Harran Üniversitesi	Öğretim Görevlisi

UZMANLIK ALANI

Transformatör Testleri
TÜRKAK Laboratuvar Akreditasyonu

YABANCI DİLLER

İngilizce

YAYINLAR

KABAKULAK M., GÜLLÜOĞLU M. T., ve ARSLAN S., 2018. Bir kablosuz Enerji Hasatlama Sistemi Tasarımı ve Sayısal Analizi, 3. Uluslararası Mesleki ve Teknik Bilimler Kongresi-UMTEB, Gaziantep, 418-425

KABAKULAK, M., ARSLAN, S., ve GÜLLÜOĞLU, T., 2018. Ortak Simülasyon Platformunda Enerji Hasatlayıcı Analizi. GAP Matematik, Mühendislik, Fen ve Sağlık Bilimleri Kongresi, Şanlıurfa, 26-32

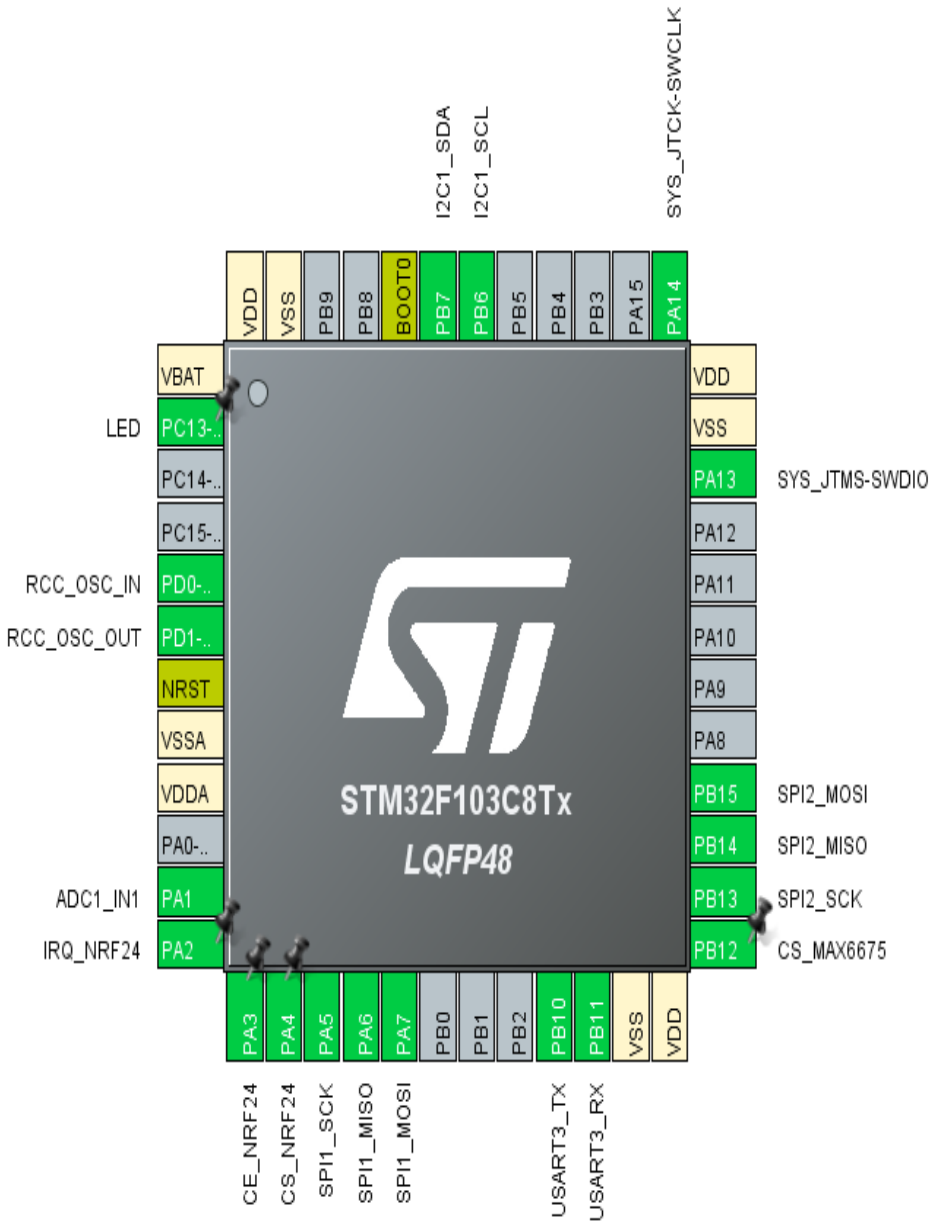
KABAKULAK, M., GÜLLÜOĞLU M. T., ve ARSLAN, S., 2018. İletken Şeklinin Değişimine Göre Enerji Hasatlayıcıların Karşılaştırılması I. Uluslararası Akdeniz Sempozyumu, Mersin, 16-26.

KABAKULAK, M., GÜLLÜOĞLU M. T., ve ARSLAN, S., 2018. Bara Üzerinden Enerji Hasatlama. I. Uluslararası Akdeniz Sempozyumu, Mersin, 27-36.

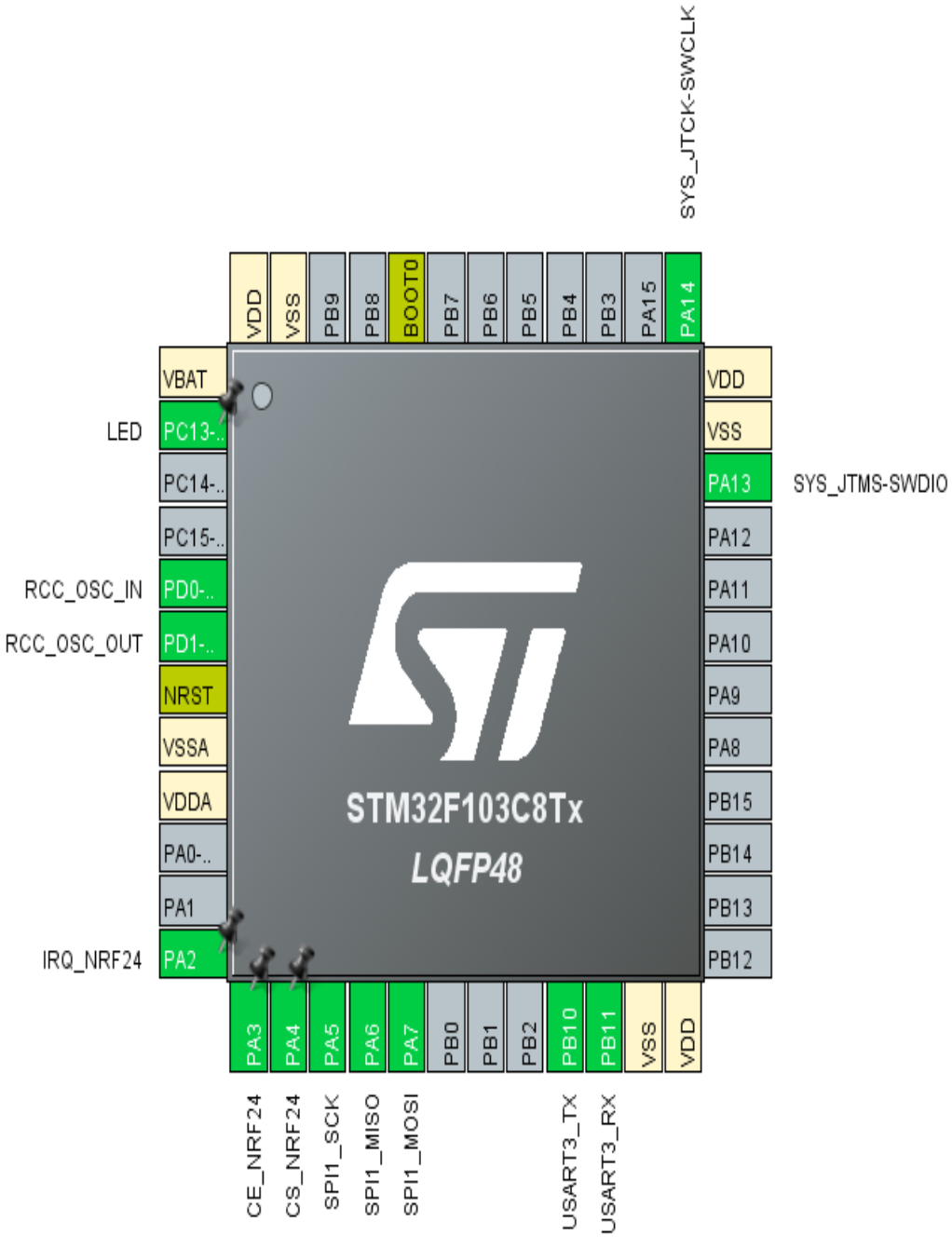
EKLER

Ek 1. Hasatlayıcı Sistem İçin Kullanılan Devre Şematikleri

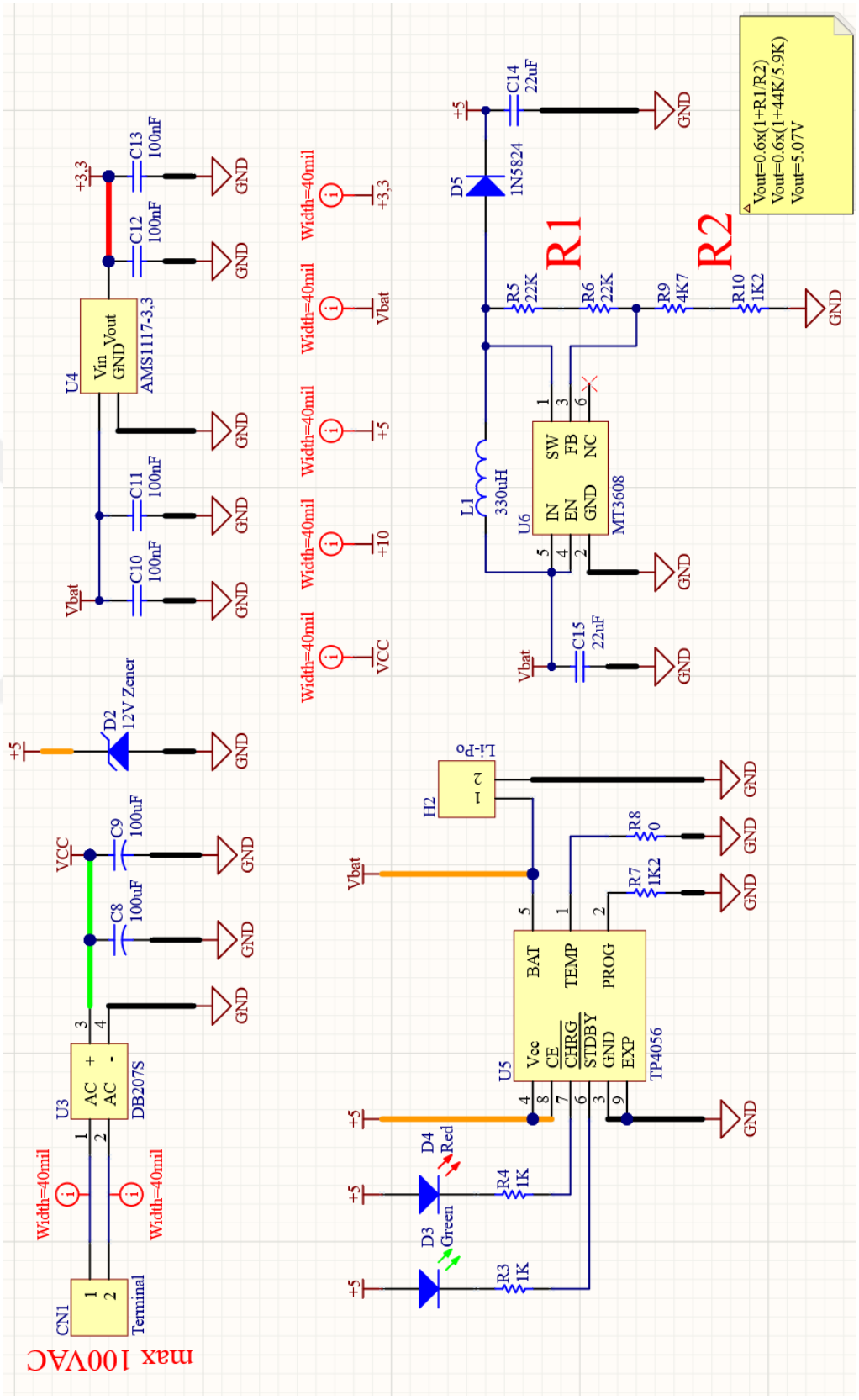
Verici devresine ait mikro denetleyici bağlantı şekli (pinout) aşağıda gösterildiği şekildedir. Sensör bağlantıları, RF modül bağlantısı ve senkron LED bağlantısı gösterilmektedir.



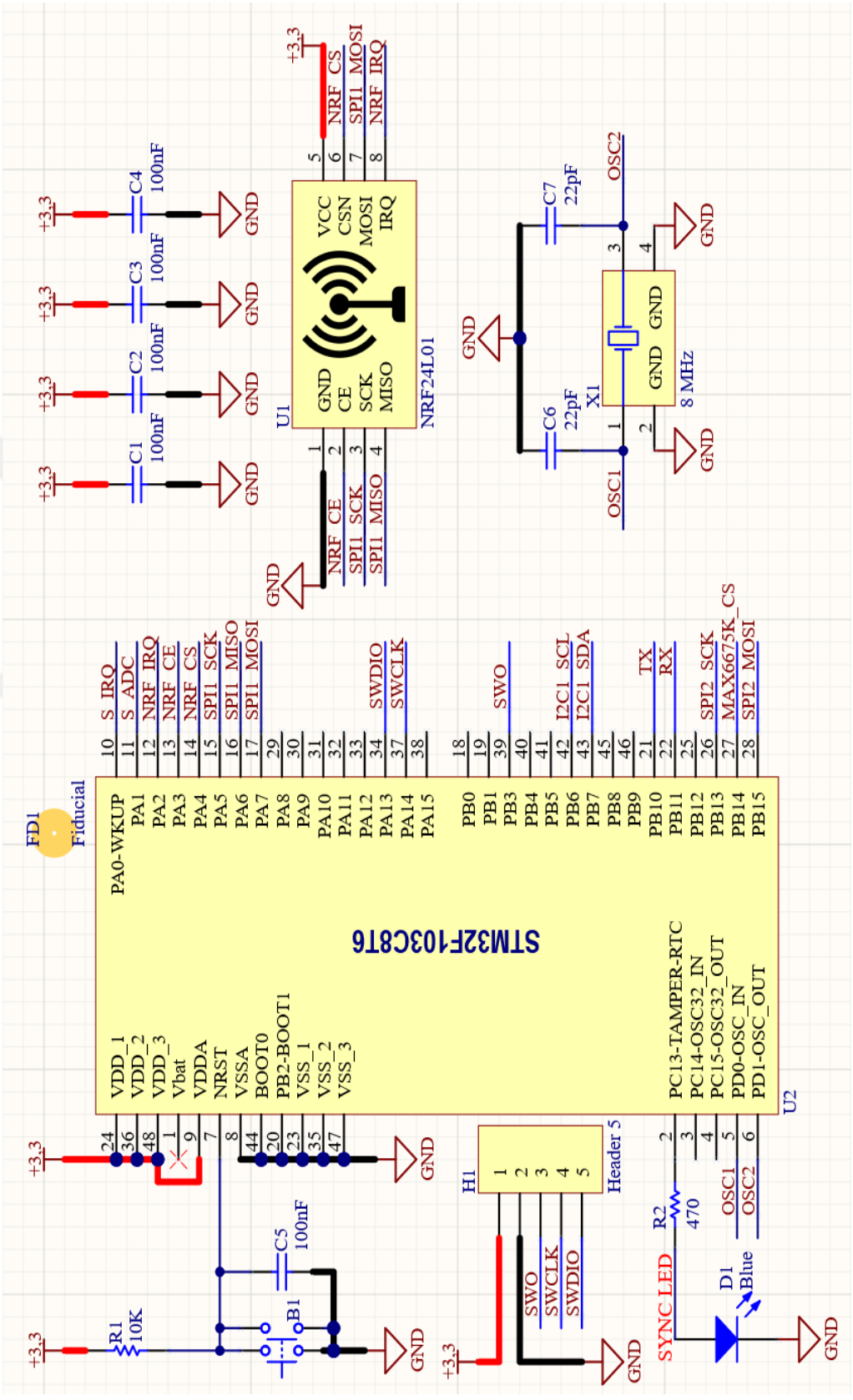
Alıcı devresine ait mikro denetleyici bağlantı şekli (pinout) aşağıda gösterildiği şekildedir.



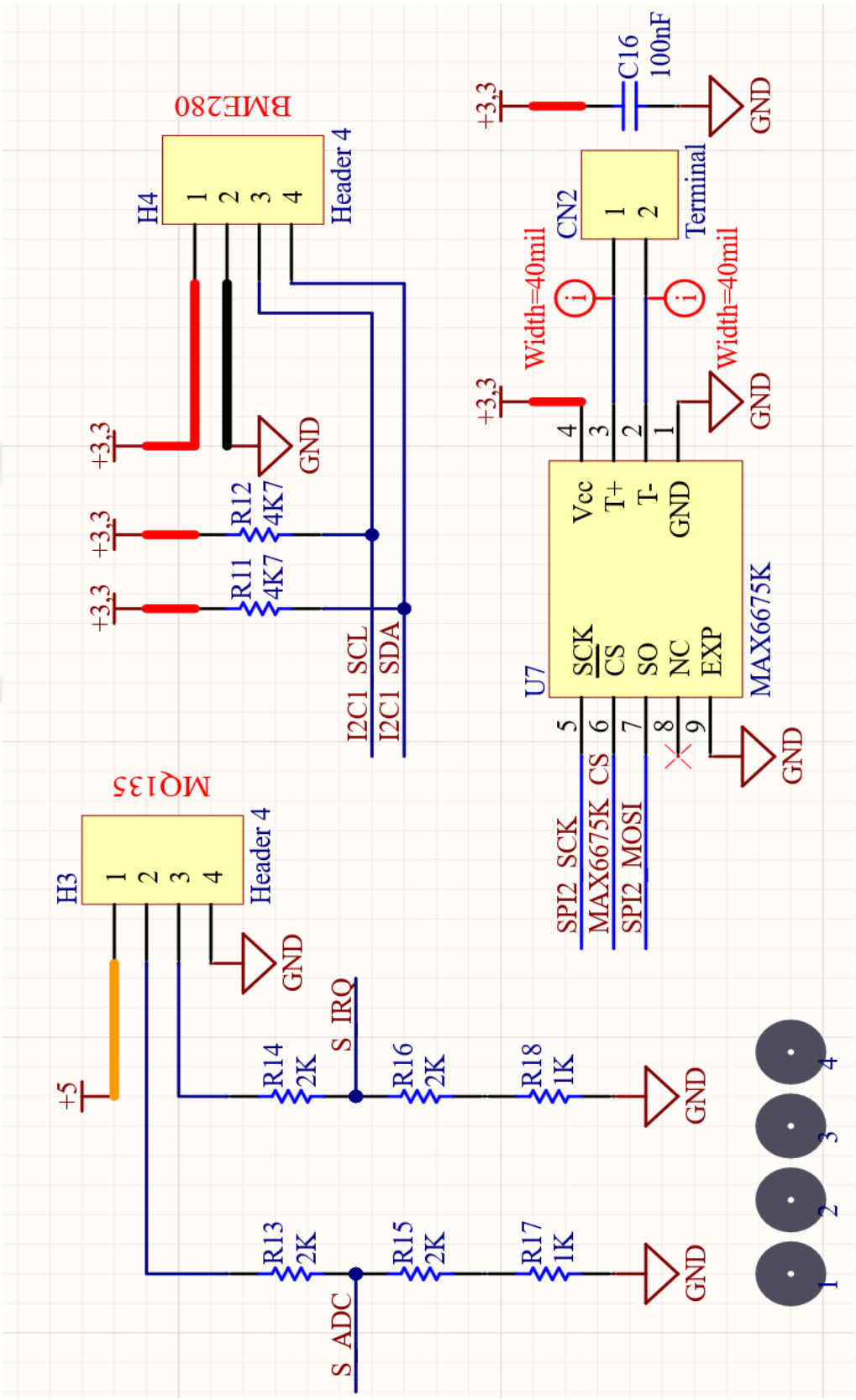
Tasarlanan devrenin güç ve şarj devre şematiği aşağıdaki gibidir.



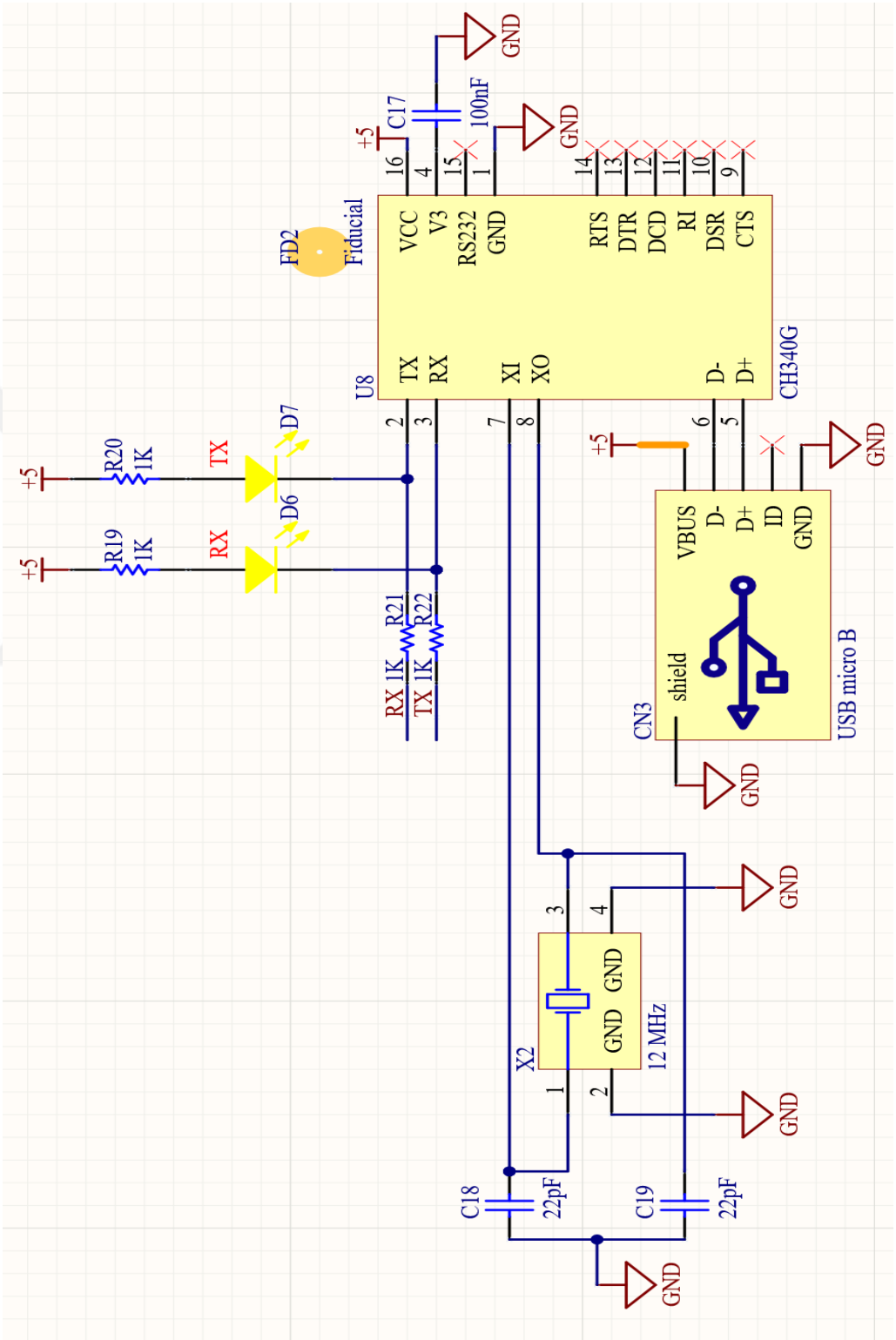
Tasarlanan devrenin mikroişlemci devre şematiği aşağıdaki gibidir.



Tasarlanan devrenin Sensör devreleri şematikleri aşağıdaki gibidir.



Tasarlanan alıcı devresi için seri port dönüştürücü devre şematiği aşağıdaki gibidir.



Ek 2. Yazılım Kodları

Gömülü Yazılım için kullanılan kodlar aşağıda belirtilmiştir.

```
/* USER CODE BEGIN Header */
/**
  ******************************************************************************
  * @file           : main.c
  * @brief          : Main program body
  ******************************************************************************
  * @attention
  *
  * <h2><center>&copy; Copyright (c) 2019 STMicroelectronics.
  * All rights reserved.</center></h2>
  *
  * This software component is licensed by ST under BSD 3-Clause license,
  * the "License"; You may not use this file except in compliance with the
  * License. You may obtain a copy of the License at:
  *                        opensource.org/licenses/BSD-3-Clause
  *
  ******************************************************************************
  */
/* USER CODE END Header */

/* Includes ------------------------------------------------------------------*/
#include "main.h"
#include "adc.h"
#include "i2c.h"
#include "spi.h"
#include "usart.h"
#include "gpio.h"

/* Private includes ----------------------------------------------------------*/
/* USER CODE BEGIN Includes */
#include "BME280.h"
#include "max6675.h"
#include "NRF24.h"
/* USER CODE END Includes */
/* Private typedef -----------------------------------------------------------*/
/* USER CODE BEGIN PTD */
/* USER CODE END PTD */
/* Private define ------------------------------------------------------------*/
/* USER CODE BEGIN PD */
/* USER CODE END PD */
/* Private macro -------------------------------------------------------------*/
/* USER CODE BEGIN PM */
/* USER CODE END PM */
/* Private variables ---------------------------------------------------------*/
/* USER CODE BEGIN PV */
char str1[100];
char data_s[8];
char data1[32];
char data2[32];
char data3[32];
char data4[32];
```

```
char data5[32];
char data6[32];
char data7[32];
char data8[32];
char data9[32];
float tf = 0.0f, pf = 0.0f, af = 0.0f, hf = 0.0f;
uint32_t tf_tx,pf_tx,af_tx,hf_tx,temper_tx,percent_tx;
uint8_t answer = 0;
uint16_t reg = 0;
float temper = 0;

uint32_t mq135;
float percent_mq135;
uint8_t buf1[20]={0};
/* USER CODE END PV */
/* Private function prototypes -----------------------------------------------*/
void SystemClock_Config(void);
/* USER CODE BEGIN PFP */
/* USER CODE END PFP */
/* Private user code ---------------------------------------------------------*/
/* USER CODE BEGIN 0 */
/* USER CODE END 0 */
/**
  * @brief  The application entry point.
  * @retval int
  */
int main(void)
{
  /* USER CODE BEGIN 1 */
  /* USER CODE END 1 */
  /* MCU Configuration--------------------------------------------------------*/
  /* Reset of all peripherals, Initializes the Flash interface and the Systick. */
  HAL_Init();
  /* USER CODE BEGIN Init */
  /* USER CODE END Init */
  /* Configure the system clock */
  SystemClock_Config();
  /* USER CODE BEGIN SysInit */
  /* USER CODE END SysInit */
  /* Initialize all configured peripherals */
  MX_GPIO_Init();
  MX_I2C1_Init();
  MX_USART3_UART_Init();
  MX_SPI2_Init();
  MX_ADC1_Init();
  MX_SPI1_Init();
  /* USER CODE BEGIN 2 */
  /* USER CODE END 2 */
  /* Infinite loop */
  /* USER CODE BEGIN WHILE */
HAL_ADC_Start(&hadc1);
  while (1)
  {
    /* USER CODE END WHILE */
    /* USER CODE BEGIN 3 */
                        //-----------------------------------------------
                        // BME280 SENSOR
                        //-----------------------------------------------
```

```
                tf = BME280_ReadTemperature();
                pf = BME280_ReadPressure();
                af = BME280_ReadAltitude(SEALEVELPRESSURE_PA);
                hf = BME280_ReadHumidity();
                //---------------------------------------------
                //---------------------------------------------
                //          MAX6675
                //---------------------------------------------
                answer = max6675ReadReg(&reg);
if(answer == MAX6675_OK)
{
  temper = max6675Temp(reg);
                sprintf(data5, "Termocouple = %0.2f\n", temper);
                }
else
{
                sprintf(data5, "T = error\n");
}
                //---------------------------------------------
                //---------------------------------------------
                //          MQ135 SENSOR
                //---------------------------------------------
                HAL_ADC_PollForConversion(&hadc1,100);
                mq135=HAL_ADC_GetValue(&hadc1);
                percent_mq135=mapfloat((float)mq135,0.0,3850.0,0.0,100.0);
                //---------------------------------------------
                //---------------------------------------------
                //          Degisken atamalari
                //---------------------------------------------
                sprintf(data1, "Temperature: %.2f *C\n", tf);
                sprintf(data2, "Pressure: %.2f hPa\n", pf/1000.0f);
                sprintf(data3, "Altitude: %.2f m\n", af);
                sprintf(data4, "Humidity: %.2f %%\n", hf);
                //                              data5 üst tarafta kullanilmistir
                sprintf(data6, "Air Pollution : %%%.0f\n", percent_mq135);
                sprintf(data_s, "\n");
                //---------------------------------------------
                //---------------------------------------------
                //          Seri Porttan veri gönderme
                //---------------------------------------------
                HAL_UART_Transmit(&huart3,(uint8_t*)data1,strlen(data1),0x1000);
                HAL_UART_Transmit(&huart3,(uint8_t*)data2,strlen(data2),0x1000);
                HAL_UART_Transmit(&huart3,(uint8_t*)data3,strlen(data3),0x1000);
                HAL_UART_Transmit(&huart3,(uint8_t*)data4,strlen(data4),0x1000);
                HAL_UART_Transmit(&huart3,(uint8_t*)data5,strlen(data5),0x1000);
                HAL_UART_Transmit(&huart3,(uint8_t*)data6,strlen(data6),0x1000);
                HAL_UART_Transmit(&huart3,(uint8_t*)data_s,strlen(data_s),0x1000);
                //---------------------------------------------
                //---------------------------------------------
                //          RF için veri hazirlama
                //---------------------------------------------
                tf_tx=tf*100.0f;
                pf_tx=pf;
                af_tx=af*100.0f;
                hf_tx=hf*100.0f;
                temper_tx=temper*100.0f;
                percent_tx=percent_mq135;
                //---------------------------------------------
```

```
                    //-----------------------------------------------
                    //          RF buffer verisinin girilmesi
                    //-----------------------------------------------
                    buf1[0]=(tf_tx&0xFF);
                    buf1[1]=(tf_tx>>8);
                    buf1[2]=(pf_tx&0xFF);
                    buf1[3]=(pf_tx>>8);
                    buf1[4]=((pf_tx>>16)&0xFF);
                    buf1[5]=((pf_tx>>16)>>8);
                    buf1[6]=(af_tx&0xFF);
                    buf1[7]=(af_tx>>8);
                    buf1[8]=((af_tx>>16)&0xFF);
                    buf1[9]=((af_tx>>16)>>8);
                    buf1[10]=(hf_tx&0xFF);
                    buf1[11]=(hf_tx>>8);
                    buf1[12]=(temper_tx&0xFF);
                    buf1[13]=(temper_tx>>8);

                    buf1[14]=percent_tx;
                    //-----------------------------------------------
                    NRF24L01_Send(buf1);
                    HAL_Delay(1000);
  }
  /* USER CODE END 3 */
}

/**
  * @brief System Clock Configuration
  * @retval None
  */
void SystemClock_Config(void)
{
  RCC_OscInitTypeDef RCC_OscInitStruct = {0};
  RCC_ClkInitTypeDef RCC_ClkInitStruct = {0};
  RCC_PeriphCLKInitTypeDef PeriphClkInit = {0};

  /** Initializes the CPU, AHB and APB busses clocks
  */
  RCC_OscInitStruct.OscillatorType = RCC_OSCILLATORTYPE_HSE;
  RCC_OscInitStruct.HSEState = RCC_HSE_ON;
  RCC_OscInitStruct.HSEPredivValue = RCC_HSE_PREDIV_DIV1;
  RCC_OscInitStruct.HSIState = RCC_HSI_ON;
  RCC_OscInitStruct.PLL.PLLState = RCC_PLL_ON;
  RCC_OscInitStruct.PLL.PLLSource = RCC_PLLSOURCE_HSE;
  RCC_OscInitStruct.PLL.PLLMUL = RCC_PLL_MUL9;
  if (HAL_RCC_OscConfig(&RCC_OscInitStruct) != HAL_OK)
  {
    Error_Handler();
  }
  /** Initializes the CPU, AHB and APB busses clocks
  */
  RCC_ClkInitStruct.ClockType = RCC_CLOCKTYPE_HCLK|RCC_CLOCKTYPE_SYSCLK
                              |RCC_CLOCKTYPE_PCLK1|RCC_CLOCKTYPE_PCLK2;
  RCC_ClkInitStruct.SYSCLKSource = RCC_SYSCLKSOURCE_PLLCLK;
  RCC_ClkInitStruct.AHBCLKDivider = RCC_SYSCLK_DIV1;
  RCC_ClkInitStruct.APB1CLKDivider = RCC_HCLK_DIV2;
  RCC_ClkInitStruct.APB2CLKDivider = RCC_HCLK_DIV1;
```

```
  if (HAL_RCC_ClockConfig(&RCC_ClkInitStruct, FLASH_LATENCY_2) != HAL_OK)
  {
    Error_Handler();
  }
  PeriphClkInit.PeriphClockSelection = RCC_PERIPHCLK_ADC;
  PeriphClkInit.AdcClockSelection = RCC_ADCPCLK2_DIV6;
  if (HAL_RCCEx_PeriphCLKConfig(&PeriphClkInit) != HAL_OK)
  {
    Error_Handler();
  }
}

/* USER CODE BEGIN 4 */
/* USER CODE END 4 */
/**
  * @brief  This function is executed in case of error occurrence.
  * @retval None
  */
void Error_Handler(void)
{
  /* USER CODE BEGIN Error_Handler_Debug */
  /* User can add his own implementation to report the HAL error return state */

  /* USER CODE END Error_Handler_Debug */
}

#ifdef  USE_FULL_ASSERT
/**
  * @brief  Reports the name of the source file and the source line number
  *         where the assert_param error has occurred.
  * @param  file: pointer to the source file name
  * @param  line: assert_param error line source number
  * @retval None
  */
void assert_failed(uint8_t *file, uint32_t line)
{
  /* USER CODE BEGIN 6 */
  /* User can add his own implementation to report the file name and line number,
     tex: printf("Wrong parameters value: file %s on line %d\r\n", file, line) */
  /* USER CODE END 6 */
}
#endif /* USE_FULL_ASSERT */
/************************ (C) COPYRIGHT STMicroelectronics *****END OF FILE****/
```

Ek 3. Veri Kartı Özetleri

Max6675K Veri Kartı Özeti

Soğuk Bağlantı Dengelemeli K- ısıl çift Dijital Dönüştürücü (0 ° C ila + 1024 ° C)

Genel açıklama

MAX6675, soğuk bağlantı telafisi gerçekleştirir ve bir K tipi ısıl çiftin sinyalini sayısallaştırır. Veriler 12 bit çözünürlükte, SPI ™ uyumlu, salt okunur biçimde çıkar.

Bu dönüştürücü, sıcaklıkları 0,25 ° C'ye kadar çözer, + 1024 ° C'ye kadar okumalara izin verir ve 0 ° C ila + 700 ° C arasındaki sıcaklıklar için 8LSB'lerin ısıl çift doğruluğunu gösterir. MAX6675, küçük, 8 pimli SO paketinde mevcuttur.

MAX6675 — **Cold-Junction-Compensated K-Thermocouple-to-Digital Converter (0°C to +1024°C)**

General Description

The MAX6675 performs cold-junction compensation and digitizes the signal from a type-K thermocouple. The data is output in a 12-bit resolution, SPI™-compatible, read-only format.

This converter resolves temperatures to 0.25°C, allows readings as high as +1024°C, and exhibits thermocouple accuracy of 8LSBs for temperatures ranging from 0°C to +700°C.

The MAX6675 is available in a small, 8-pin SO package.

Applications

- Industrial
- Appliances
- HVAC

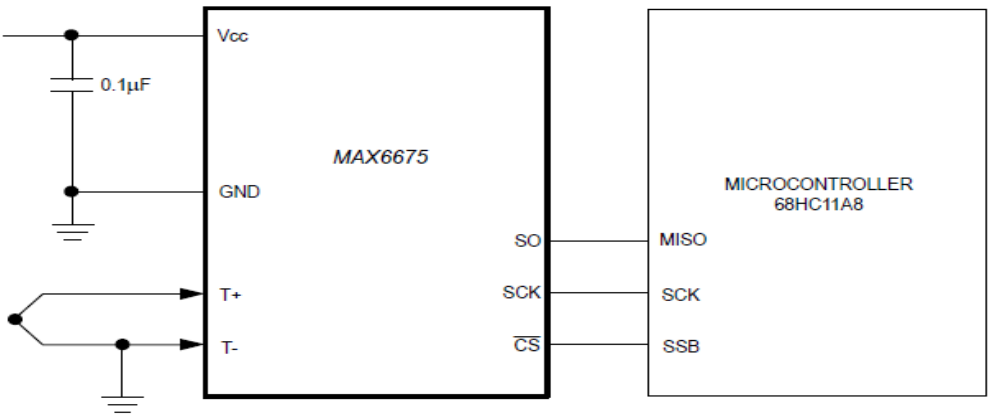
Features

- Direct Digital Conversion of Type -K Thermocouple Output
- Cold-Junction Compensation
- Simple SPI-Compatible Serial Interface
- 12-Bit, 0.25°C Resolution
- Open Thermocouple Detection

Ordering Information

PART	TEMP RANGE	PIN-PACKAGE
MAX6675ISA	-20°C to +85°C	8 SO

MAX6675K entegresi ve K tipi ısıl çift bağlantısı aşağıda gösterildiği gibi SPI protokolü ile mikro denetleyici haberleşmesi sağlanmıştır ve verilerin 0.25°C hassasiyetle aktarılması sağlanmıştır.



SPI protokolü ve zamanlama grafiği veri kartı'te aşağıdaki gibi gösterilmiştir.

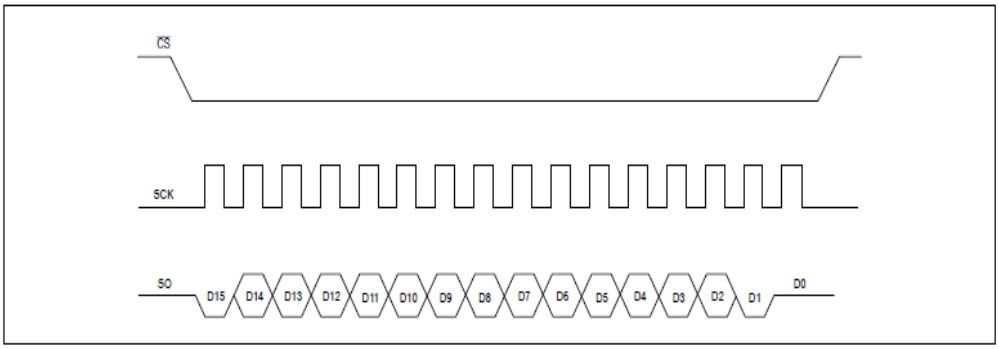


Figure 1a. Serial Interface Protocol

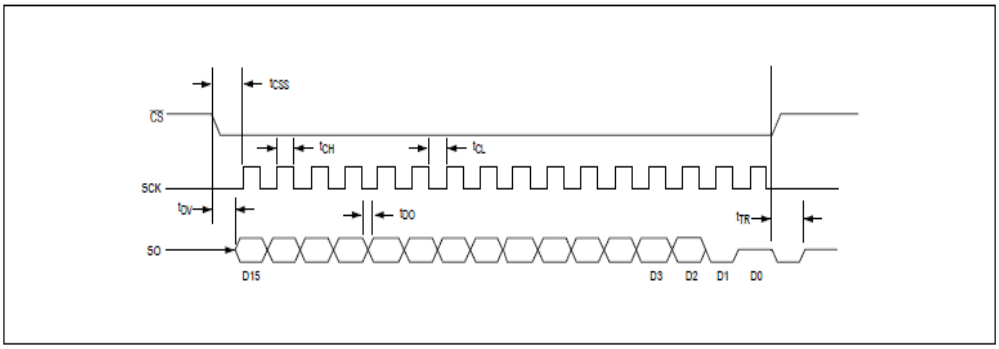


Figure 1b. Serial Interface Timing

Veri kartı özerleri aşağıdaki linkten alınmıştır.

https://veri kartıs.maximintegrated.com/en/ds/MAX6675.pdf

MQ135 Veri Kartı Özeti

Özellikleri

Geniş tespit kapsamı hızlı tepki ve yüksek hassasiyet kararlı ve uzun ömürlü, basit tahrik devrelidir.

Uygulama

Binalar / ofisler için hava kalitesi kontrol ekipmanlarında kullanılırlar, NH3, NOx, alkol, Benzen, duman, CO2, vb.

TECHNICAL DATA MQ-135 GAS SENSOR

FEATURES

Wide detecting scope Fast response and High sensitivity
Stable and long life Simple drive circuit

APPLICATION

They are used in air quality control equipments for buildings/offices, are suitable for detecting of NH3,NOx, alcohol, Benzene, smoke,CO_2 ,etc.

SPECIFICATIONS

A. Standard work condition

Symbol	Parameter name	Technical condition	Remarks
Vc	Circuit voltage	5V±0.1	AC OR DC
V_H	Heating voltage	5V±0.1	ACOR DC
R_L	Load resistance	can adjust	
R_H	Heater resistance	33Ω±5%	Room Tem
P_H	Heating consumption	less than 800mw	

B. Environment condition

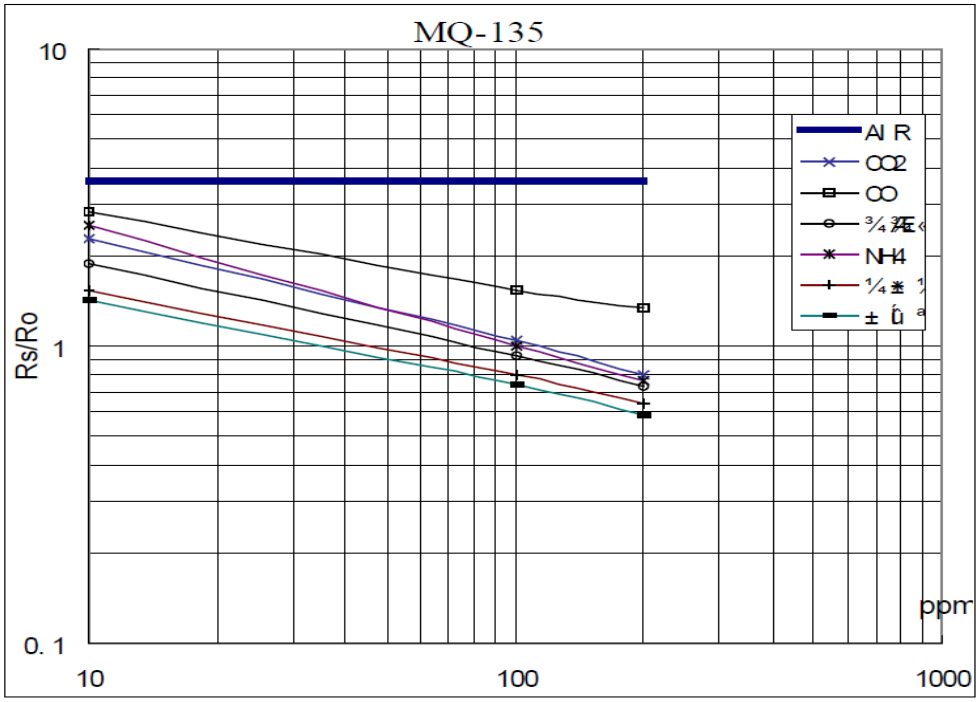
Symbol	Parameter name	Technical condition	Remarks
Tao	Using Tem	-10□-45□	
Tas	Storage Tem	-20□-70□	
R_H	Related humidity	less than 95%Rh	
O_2	Oxygen concentration	21%(standard condition)Oxygen concentration can affect sensitivity	minimum value is over 2%

C. Sensitivity characteristic

Symbol	Parameter name	Technical parameter	Ramark 2
Rs	Sensing Resistance	30KΩ-200KΩ (100ppm NH_3)	Detecting concentration scopeⅡ 10ppm-300ppm NH_3 10ppm-1000ppm Benzene 10ppm-300ppm Alcohol
α (200/50) NH_3	Concentration Slope rate	≤0.65	
Standard Detecting Condition	Temp: 20□±2□ Vc:5V±0.1 Humidity: 65%±5% Vh: 5V±0.1		
Preheat time	Over 24 hour		

D. Structure and configuration, basic measuring circuit

Grafik sensörün hava içerisinde bulunan çeşitli gazların ppm (particules per million) cinsinden ölçüm hassasiyeti gösterilmiştir.



Veri kartı özerleri aşağıdaki linkten alınmıştır.

https://www.olimex.com/Products/Components/Sensors/Gas/SNS-MQ135/resources/SNS-MQ135.pdf

BME280 Veri Kartı Özeti

BOSCH	Final Datasheet BME280 Environmental sensor	Page 2

BME280

Dijital Nem, Basınç ve Sıcaklık Sensörü

Ana Özellikler

2.5 Ambalaj 2,5 mm x 2,5 mm x 0,93 mm metal kapak LGA
İnterface Dijital arayüz I²C (3,4 MHz'e kadar) ve SPI (3 ve 4 kablo, 10 MHz'e kadar)
 Besleme gerilimi VDD ana besleme gerilimi aralığı: 1,71 V - 3,6 V
VDDIO arabirim voltaj aralığı: 1,2 V - 3,6 V

Consumption Akım tüketimi 1 Hz nem ve sıcaklıkta 1.8 µA
1 Hz basınçta ve sıcaklıkta 2,8 µA
3.6 µA @ 1 Hz nem, basınç ve sıcaklık
Uyku modunda 0,1 µA
 Çalışma aralığı -40… + 85 ° C,% 0… 100 rel. nem, 300… 1100 hPa
Sensor Nem sensörü ve basınç sensörü bağımsız olarak etkinleştirilebilir / devre dışı bırakılabilir
Sens Bosch Sensortec BMP280 dijital basınç sensörü ile uyumlu kayıt ve performans
HS RoHS uyumlu, halojensiz, MSL1
Nem sensörü için anahtar parametreler
 Tepki süresi 1 s
 Doğruluk toleransı ±% 3 bağıl nem
 Histerezis ±% 1 bağıl nem
Basınç sensörü için anahtar parametreler
 RMS Gürültü 0,2 Pa, eşdeğ. 1.7 cm'ye kadar
 Ofset sıcaklık katsayısı ± 1,5 Pa / K, eşdeğ. 1 ° C sıcaklık değişiminde ± 12,6 cm'ye
Tipik uygulama
Awareness Bağlam farkındalığı, ör. cilt tespiti, oda değişim tespiti
Monitoring Sağlık izleme / refah
De Dehidrasyon veya sıcak çarpması ile ilgili uyarı
 Spirometri (akciğer hacminin ve hava akışının ölçülmesi)
 Ev otomasyonu kontrolü
Heating ısıtma, havalandırma, klima (HVAC) kontrolü
 Nesnelerin İnterneti
Enhan GPS geliştirme (örn. İlk onarım süresi iyileştirmesi, ölü hesaplaşma, eğim algılama)
 İç mekan navigasyonu (zemin algılama, asansör algılama)
 Açık hava navigasyonu, eğlence ve spor uygulamaları
 Hava Durumu
 Dikey hız göstergesi (yükselme / çökme hızı)

BME280 çipinin iç yapısı aşağıda gösterildiği şekildedir. Bosch firması tarafından üretilen bu seri BMXX80 ailesi içerisinde yer almaktadır. Aynı sensör için BMP280 mevcuttur. Bizim kullandığımız sensör ise BME280 (P: Pressure; E: Environment) ifade etmektedir. 280 sayısı 2. Nesil sensör olduğunu göstermektedir.

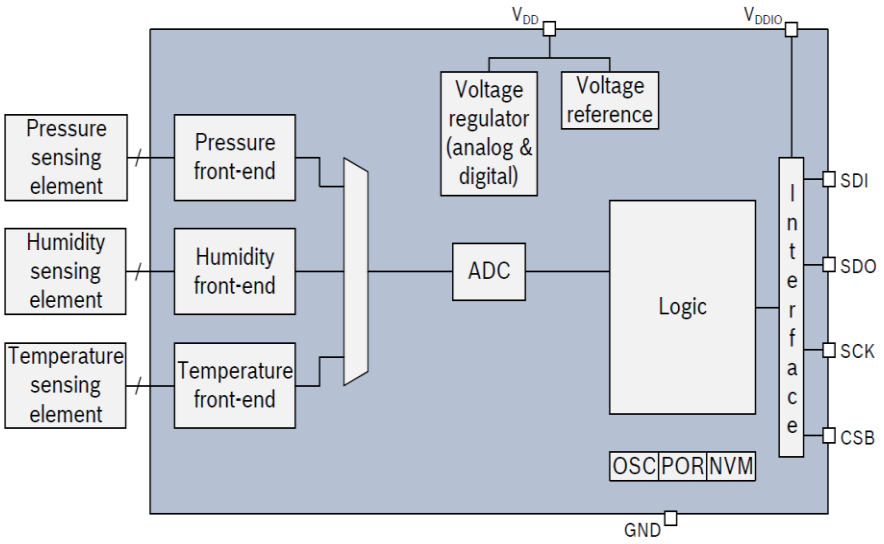


Figure 2: Block diagram of BME280

BME280 için kod algoritması aşağıda gösterildiği şekilde oluşturulmuştur.

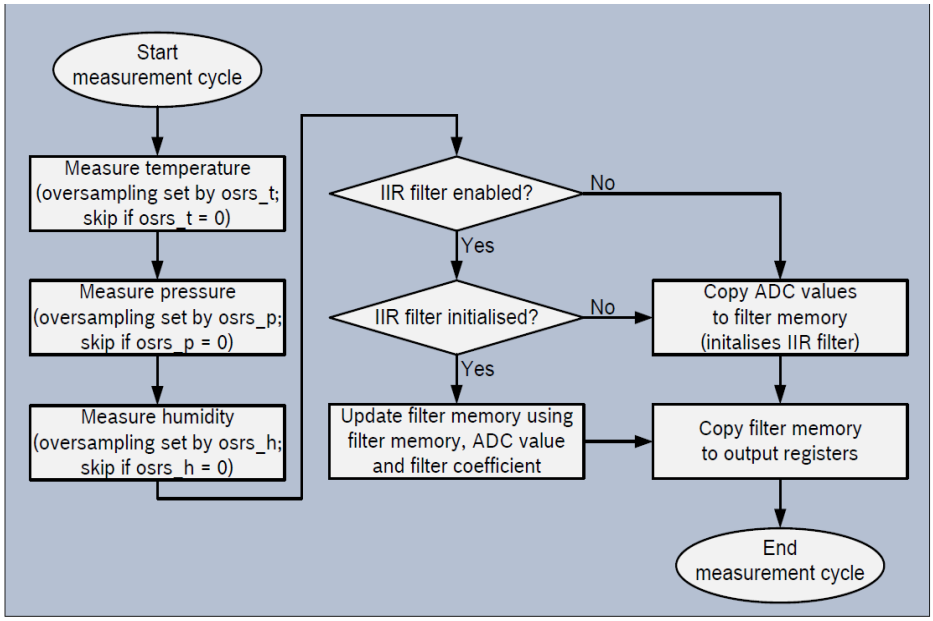


Figure 6: BME280 measurement cycle

Veri kartı özerleri aşağıdaki linkten alınmıştır.

http://www.embeddedadventures.com/datasheet/BME280.pdf

nRF24L01 Veri Kartı Özeti

nRF24L01+

Single Chip 2.4GHz Transceiver

Preliminary Product Specification v1.0

Key Features

- Worldwide 2.4GHz ISM band operation
- 250kbps, 1Mbps and 2Mbps on air data rates
- Ultra low power operation
- 11.3mA TX at 0dBm output power
- 13.5mA RX at 2Mbps air data rate
- 900nA in power down
- 26µA in standby-I
- On chip voltage regulator
- 1.9 to 3.6V supply range
- Enhanced ShockBurst™
- Automatic packet handling
- Auto packet transaction handling
- 6 data pipe MultiCeiver™
- Drop-in compatibility with nRF24L01
- On-air compatible in 250kbps and 1Mbps with nRF2401A, nRF2402, nRF24E1 and nRF24E2
- Low cost BOM
- ±60ppm 16MHz crystal
- 5V tolerant inputs
- Compact 20-pin 4x4mm QFN package

Applications

- Wireless PC Peripherals
- Mouse, keyboards and remotes
- 3-in-1 desktop bundles
- Advanced Media center remote controls
- VoIP headsets
- Game controllers
- Sports watches and sensors
- RF remote controls for consumer electronics
- Home and commercial automation
- Ultra low power sensor networks
- Active RFID
- Asset tracking systems
- Toys

nRF24L01+ modülüne ait blok diyagram aşağıda gösterildiği şekildedir.

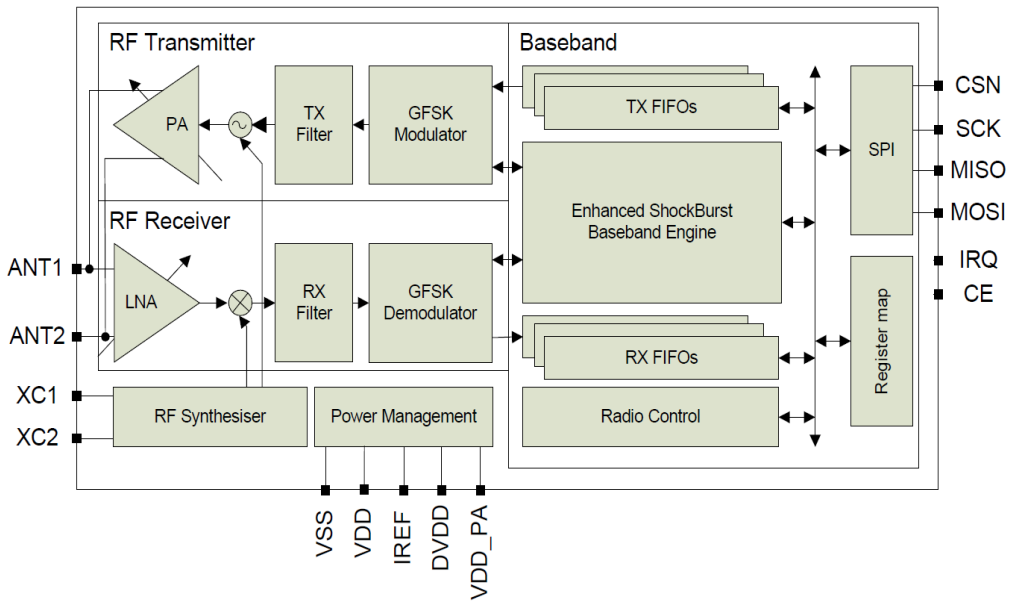


Figure 1. nRF24L01+ block diagram

Aşağıda gösterilen şekil cihazın aynı anda haberleşme (Hand-shaking) yapabileceği ağ topolojisi gösterilmektedir.

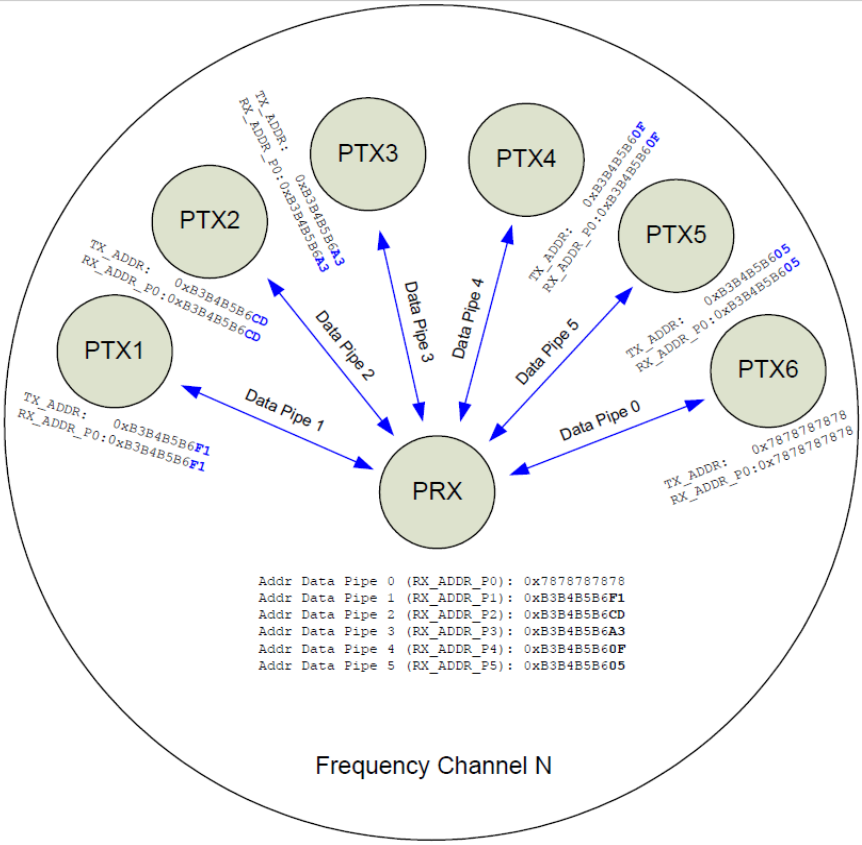


Figure 12. Example of data pipe addressing in MultiCeiver™

SPI protokolü okuma-yazma işlemi ve zamanlama diyagramı

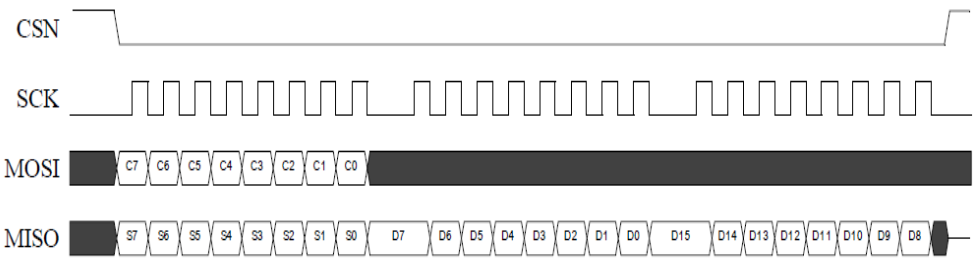


Figure 23. SPI read operation

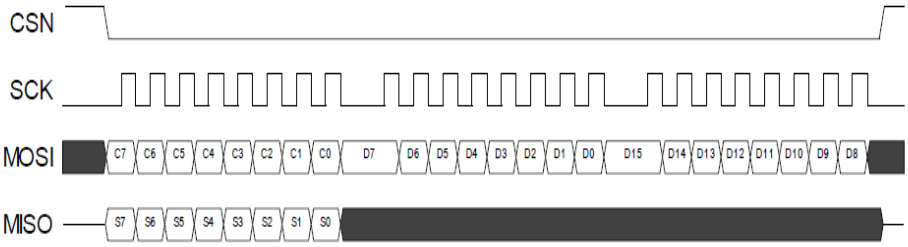


Figure 24. SPI write operation

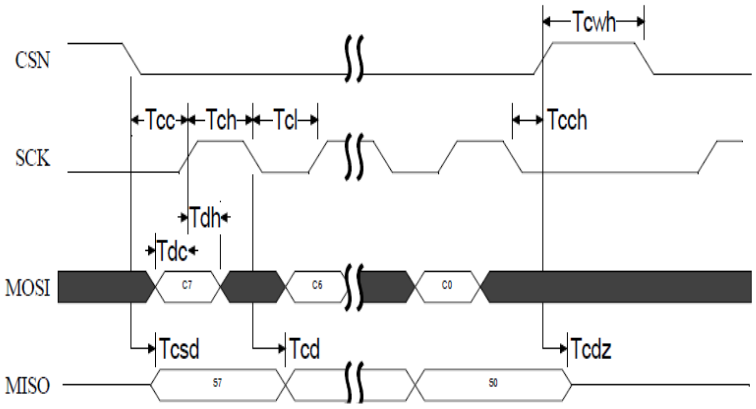


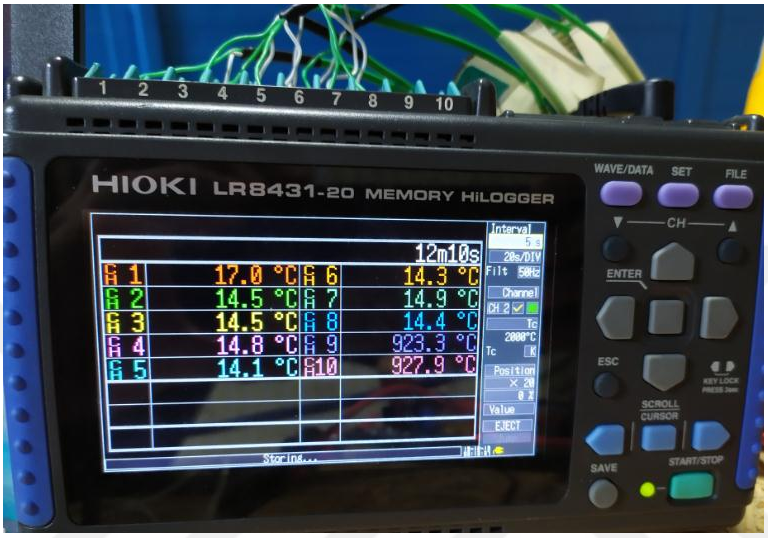
Figure 25. SPI NOP timing diagram

Veri kartı özerleri aşağıdaki linkten alınmıştır.

https://www.sparkfun.com/datasheet/Components/SMD/nRF24L01Pluss_Preliminary_Product_Specification_v1_0.pdf

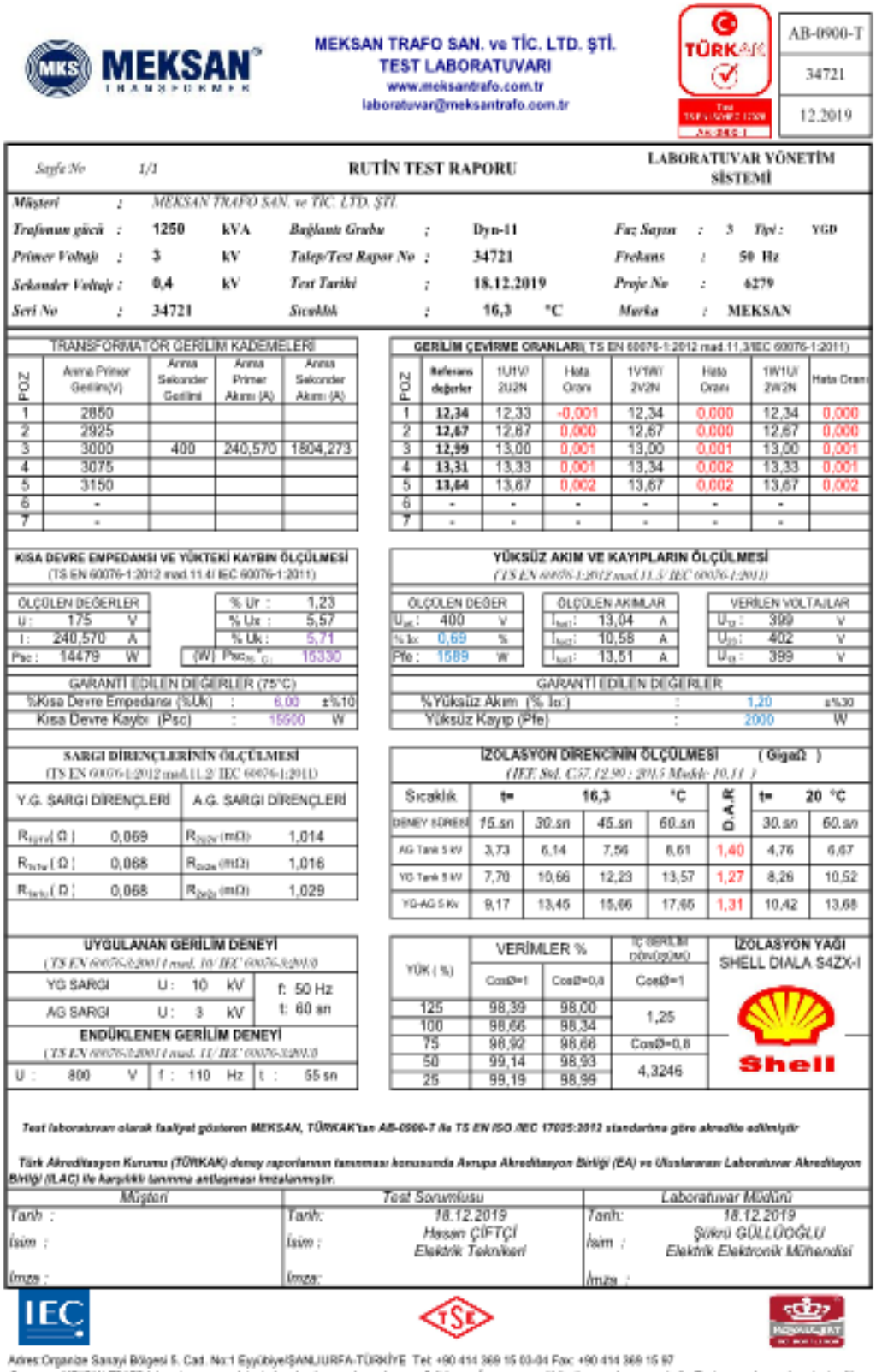
Ek 4. Firma Cihaz Bilgileri

Firmanın sıcaklık artış testi için kullanmış olduğu Hioki LR8431 10 kanallı veri kaydedicisi (Datalogger) ve firmanın ortam sıcaklığı ve nem ölçümü için kullandığı Geo FHT-70 veri kaydedicisi (Datalogger) cihazı.





Endüstriyel teste kullanılan transformatörün etiket bilgileri aşağıdaki gibidir.



MEKSAN TRAFO SAN. ve TİC. LTD. ŞTİ.
TEST LABORATUVARI
www.meksantrafo.com.tr
laboratuvar@meksantrafo.com.tr

AB-0900-T | 34721 | 12.2019

Sayfa No 1/1 — RUTİN TEST RAPORU — LABORATUVAR YÖNETİM SİSTEMİ

Müşteri	:	MEKSAN TRAFO SAN. ve TİC. LTD. ŞTİ.							
Trafonun gücü	:	1250	kVA	Bağlantı Grubu	:	Dyn-11	Faz Sayısı	: 3	Tipi : YGD
Primer Voltajı	:	3	kV	Talep/Test Rapor No	:	34721	Frekans	: 50 Hz	
Sekonder Voltajı	:	0,4	kV	Test Tarihi	:	18.12.2019	Proje No	: 6279	
Seri No	:	34721		Sıcaklık	:	16,3 °C	Marka	: MEKSAN	

TRANSFORMATÖR GERİLİM KADEMELERİ

POZ	Anma Primer Gerilimi(V)	Anma Sekonder Gerilimi	Anma Primer Akımı (A)	Anma Sekonder Akımı (A)
1	2850			
2	2925			
3	3000	400	240,570	1804,273
4	3075			
5	3150			
6	-			
7	-			

GERİLİM ÇEVİRME ORANLARI (TS EN 60076-1:2012 mad.11.3/IEC 60076-1:2011)

POZ	Referans değerler	1U1V/ 2U2N	Hata Oranı	1V1W/ 2V2N	Hata Oranı	1W1U/ 2W2N	Hata Oranı
1	12,34	12,33	-0,001	12,34	0,000	12,34	0,000
2	12,67	12,67	0,000	12,67	0,000	12,67	0,000
3	12,99	13,00	0,001	13,00	0,001	13,00	0,001
4	13,31	13,33	0,001	13,34	0,002	13,33	0,001
5	13,64	13,67	0,002	13,67	0,002	13,67	0,002
6	-	-	-	-	-	-	
7	-	-	-	-	-	-	

KISA DEVRE EMPEDANSI VE YÜKTEKİ KAYBIN ÖLÇÜLMESİ
(TS EN 60076-1:2012 mad.11.4/ IEC 60076-1:2011)

ÖLÇÜLEN DEĞERLER		
U :	175	V
I :	240,570	A
Psc :	14479	W

% Ur :	1,23	
% Ux :	5,57	
% Uk :	5,71	
(W) $P_{sc_{75\,°C}}$:	15330	

YÜKSÜZ AKIM VE KAYIPLARIN ÖLÇÜLMESİ
(TS EN 60076-1:2012 mad.11.5/ IEC 60076-1:2011)

ÖLÇÜLEN DEĞER		
U_{ort} :	400	V
% Io :	0,69	%
Pfe :	1589	W

ÖLÇÜLEN AKIMLAR		
I_{fazU} :	13,04	A
I_{fazV} :	10,58	A
I_{fazW} :	13,51	A

VERİLEN VOLTAJLAR		
U_{12} :	399	V
U_{23} :	402	V
U_{31} :	399	V

GARANTİ EDİLEN DEĞERLER (75°C)

%Kısa Devre Empedansı (%Uk)	:	6,00	±%10
Kısa Devre Kaybı (Psc)	:	15500	W

GARANTİ EDİLEN DEĞERLER

%Yüksüz Akım (% Io)	:	1,20	±%30
Yüksüz Kayıp (Pfe)	:	2000	W

SARGI DİRENÇLERİNİN ÖLÇÜLMESİ
(TS EN 60076-1:2012 mad.11.2/ IEC 60076-1:2011)

Y.G. SARGI DİRENÇLERİ		A.G. SARGI DİRENÇLERİ	
R_{1U1V} (Ω)	0,069	R_{2U2N} (mΩ)	1,014
R_{1V1W} (Ω)	0,068	R_{2V2N} (mΩ)	1,016
R_{1W1U} (Ω)	0,068	R_{2W2N} (mΩ)	1,029

İZOLASYON DİRENCİNİN ÖLÇÜLMESİ (GigaΩ)
(IEE Std. C57.12.90 : 2015 Madde- 10.11)

Sıcaklık	t=	16,3	°C		D.A.R	t=	20 °C	
DEMEY SÜRESİ	15 sn	30 sn	45 sn	60 sn		30 sn	60 sn	
AG Tank 5 kV	3,73	6,14	7,56	8,61	1,40	4,76	6,67	
YG Tank 5 kV	7,70	10,66	12,23	13,57	1,27	8,26	10,52	
YG-AG 5 Kv	9,17	13,45	15,66	17,65	1,31	10,42	13,68	

UYGULANAN GERİLİM DENEYİ
(TS EN 60076-3:2013 mad. 10/ IEC 60076-3:2013)

YG SARGI	U :	10	kV	f: 50 Hz
AG SARGI	U :	3	kV	t: 60 sn

ENDÜKLENEN GERİLİM DENEYİ
(TS EN 60076-3:2013 mad. 11/ IEC 60076-3:2013)

U :	800	V	f :	110	Hz	t : 55 sn

YÜK (%)	VERİMLER %		İÇ GERİLİM DÜŞÜŞÜ(%)
	Cosϕ=1	Cosϕ=0,8	Cosϕ=1
125	98,39	98,00	1,25
100	98,66	98,34	
75	98,92	98,66	Cosϕ=0,8
50	99,14	98,93	4,3246
25	99,19	98,99	

İZOLASYON YAĞI
SHELL DIALA S4ZX-I

Shell

Test laboratuvarı olarak faaliyet gösteren MEKSAN, TÜRKAK'tan AB-0900-T ile TS EN ISO /IEC 17025:2012 standartına göre akredite edilmiştir

Türk Akreditasyon Kurumu (TÜRKAK) deney raporlarının tanınması konusunda Avrupa Akreditasyon Birliği (EA) ve Uluslararası Laboratuvar Akreditasyon Birliği (ILAC) ile karşılıklı tanınma anlaşması imzalanmıştır.

Müşteri	Test Sorumlusu	Laboratuvar Müdürü
Tarih :	Tarih: 18.12.2019	Tarih: 18.12.2019
İsim :	İsim : Hasan ÇİFTÇİ, Elektrik Teknikeri	İsim : Şükrü GÜLLÜOĞLU, Elektrik Elektronik Mühendisi
İmza :	İmza:	İmza :

Adres:Organize Sanayi Bölgesi 5. Cad. No:1 Eyyübiye/ŞANLIURFA-TÜRKİYE Tel: +90 414 358 15 03-04 Fax: +90 414 358 15 97

*Bu rapor, MEKSAN TRAFO laboratuvarın yazılı izni olmadan kısmen kopyalanıp çoğaltılamaz. İmzasız ve mührüsüz raporlar geçersizdir. Test sonuçları sadece test edilen numuneye aittir. * * * İşaretli testler akreditasyon kapsamında değildir.*

LPR02 FR01 F.Y.T.:28/08/2014 F.R.No:04 F.R.T.:10/04/2017