

T.C.
BANDIRMA ONYEDİ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI İÇİN ELEKTROMANYETİK ENERJİ HASATLAYICI
TASARIMI, OPTİMİZASYONU VE UYGULAMASI**

Muhammed Şamil BALCI

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Elektronik Mühendisliği Programı

TEMMUZ 2023

T.C.
BANDIRMA ONYEDİ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI İÇİN ELEKTROMANYETİK ENERJİ HASATLAYICI
TASARIMI, OPTİMİZASYONU VE UYGULAMASI**

Muhammed Şamil BALCI

DANIŞMAN
Doç. Dr. Adem DALCALI

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Elektronik Mühendisliği Programı

TEMMUZ 2023

ONAY

Muhammed Şamil BALCI tarafından hazırlanan “İnsansız Hava Araçları İçin Elektromanyetik Enerji Hasatlayıcı Tasarımı, Optimizasyonu ve Uygulaması” adlı tez çalışması 20/07/2023 tarihinde yapılan sınavla aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile Bandırma Onyedİ Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Adem DALCALI

(Danışman)

Doç. Dr. Harun ÖZBAY

(Üye)

Doç. Dr. Emre ÇELİK

(Üye)

İmza

Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun .../.../...gün ve .../... sayılı kararı ile onaylanmıştır.

Doç. Dr. Abdullah YEŞİL

Enstitü Müdürü

BANDIRMA ONYEDİ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI
ETİK BEYANI

Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre hazırlamış olduğum “İnsansız Hava Araçları İçin Elektromanyetik Enerji Hasatlayıcı Tasarımı, Optimizasyonu ve Uygulaması” adlı tezimin özgün bir çalışma olduğunu, tez hazırlanırken tüm aşamalarda bilimsel etik ilkelerine uygun davrandığımı, tez kapsamında sunulan tüm verileri bilimsel etik ilkelerine uygun elde ettiğimi, tezde faydalandığım tüm eserlere atıf yaptığımı ve kaynaklar kısmında bu eserleri gösterdiğimi beyan ederim.

20/07/2023

Muhammed Şamil BALCI

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim boyunca ve tez sürecimde değerli bilgilerini ve yardımlarını benden esirgemeyen kıymetli hocam Sayın Doç. Dr. Adem DALCALI'ya, değerli katkılarından dolayı Sayın Dr. Selçuk SAKAR hocama, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen aileme ve bilhassa bu süreçte her türlü özveriyle yanımda olan sevgili eşime teşekkürlerimi sunuyorum.

Ayrıca bu tez çalışması kapsamında BAP-23-1010-001 numaralı proje ile verdikleri desteklerden dolayı Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne teşekkür ederim.



ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI İÇİN ELEKTROMANYETİK ENERJİ HASATLAYICI TASARIMI, OPTİMİZASYONU VE UYGULAMASI

Muhammed Şamil BALCI

**Bandırma Onyedli Eylül Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Doç. Dr. Adem DALCALI

Temmuz 2023, 61 sayfa

Enerji ihtiyacının artmasına paralel olarak enerji nakil hatlarının önemi de giderek artmaktadır. Enerji iletiminin sağlıklı bir şekilde yapılabilmesi için nakil hatlarının kesintisiz bir şekilde çalışabilmesi gerekmektedir. Bundan dolayı hatların denetlenmesi, izlenmesi ve herhangi bir arızada anında müdahale edilmesi önem arz etmektedir. Bu hatların denetlenmesi ve izlenmesi için İnsansız Hava Araçları'nın (İHA) kullanılması gerek güvenlik gerekse de maliyet açısından avantaj sağlamaktadır. Çalışma kapsamında İHA'lara enerji sağlayabilmek için elektromanyetik enerji hasatlayıcılarının tasarımı, analizleri ve deneyleri yapılmıştır. Öncelikle hasatlayıcıların matematiksel modellemesi yapılmıştır. Bu modelden hareketle tasarlanan elektromanyetik enerji hasatlayıcılar Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) kullanılarak analiz edilmiştir. Daha sonra deney düzeneği kurulmuş ve hasatlayıcıların performansı deneysel ortamda da incelenmiştir. SEY analizleri ve deneylerden elde edilen sonuçlar ile çeşitli yapı ve malzemelerden oluşan elektromanyetik enerji hasatlayıcıların boyut, malzeme özellikleri, hava aralığı ve hat akımı değişkenlerine göre performansları incelenmiş ve en iyi ağırlık/enerji yoğunluğuna sahip hasatlayıcı ortaya konulmaya çalışılmıştır.

Anahtar kelimeler: Elektromanyetik enerji hasatlayıcı, nakil hattı, İHA, SEY

ABSTRACT

M.Sc. THESIS

ELECTROMAGNETIC ENERGY HARVESTER DESIGN, OPTIMIZATION AND APPLICATION FOR UNMANNED AERIAL VEHICLES

Muhammed Şamil BALCI

Bandırma Onyedi Eylül University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Adem DALCALI

July 2023, 61 pages

Parallel to the increase in energy demand, the importance of energy transmission lines is also increasing. In order for energy transmission to be carried out correctly, transmission lines must operate uninterruptedly. Therefore, it is important to inspect and monitor the lines and to intervene immediately in case of any fault. The use of Unmanned Aerial Vehicles (UAV) for the inspection and monitoring of these lines provides advantages in terms of both safety and cost. In the study, the design and analysis of electromagnetic energy harvesters have been made in order to provide energy to UAVs. Firstly, the mathematical modeling of the core has been presented. Electromagnetic energy harvesters designed based on this model have been analyzed using the Finite Element Method (FEM). Then, the experimental setup was set up and the performance of the harvesters was also examined in the experimental environment. With the results obtained from SEM analyzes and experiments, the performances of electromagnetic energy harvesters consisting of various structures and materials according to size, material properties, air gap and line current variables were examined and the harvester with the best weight / energy density was tried to be revealed.

Keywords: Electromagnetic energy harvesters, transmission line, UAV, FEM

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	I
ABSTRACT	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ŞEKİL LİSTESİ	V
TABLO LİSTESİ.....	VI
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ.....	VII
1. GİRİŞ.....	1
1.1 TEZİN LİTERATÜRE KATKISI	3
1.2 LİTERATÜR ÖZETİ.....	4
2. ENERJİ HASATLAMA.....	9
2.1 ENERJİ HASATLAMA YÖNTEMLERİ	9
2.1.1 Güneş Enerjisinden Enerji Hasadı	10
2.1.2 Isı Enerjisinden Enerji Hasadı	11
2.1.3 Rüzgâr Enerjisinden Enerji Hasadı.....	12
2.1.4 Titreşimden Enerji Hasadı	13
2.1.5 Elektrik Alandan Enerji Hasadı	14
2.1.6 Manyetik Alandan Enerji Hasadı	15
3. TEORİK ANALİZ.....	16
3.1 MATEMATİKSEL MODEL	16
3.2 MAKSİMUM GÜÇ AKTARIMI	21
3.3 ELEKTROMANYETİK ENERJİ HASATLAYICILARDA KULLANILAN NÜVE GEOMETRİLERİ.....	22
3.3.1 Hava Nüvesi	22
3.3.2 U Nüve	22
3.3.3 Toroid Nüve	22

3.3.4	E Nüve.....	23
3.4	ELEKTROMANYETİK ENERJİ HASATLAYICILARDA KULLANILAN NÜVE MALZEMELERİ	23
4.	TASARIM VE ELEKTROMANYETİK ANALİZLER.....	25
4.1	SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ	25
4.2	NÜVE YAPISININ VE MALZEMESİNİN ENDÜKTANS ÜZERİNE ETKİSİ ...	26
4.3	HAT AKIMININ NÜVE ÜZERİNDEKİ MANYETİK AKI YOĞUNLUĞUNA ETKİSİ.....	28
4.4	PARÇALI NÜVEDE HAVA ARALIĞININ MANYETİK AKI YOĞUNLUĞUNA ETKİSİ.....	30
5.	DENEYSEL ÇALIŞMA.....	33
5.1	DENEY DÜZENEĞİ	33
5.2	NÜVELERİN AL DEĞERLERİ	34
5.3	NÜVELER VASITASIYLA ENDÜKLENEN GERİLİMLER.....	35
5.4	NÜVE AĞIRLIKLARI VE MALİYETLERİ	41
5.5	HASATLAYICILARIN GÜÇ ANALİZLERİ	43
6.	BULGULAR VE SONUÇ	51
7.	KAYNAKLAR	54
	ÖZGEÇMİŞ	61

ŞEKİL LİSTESİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 1-1: İş akış şeması.....	3
Şekil 2-1: Enerji hasatlama sistemi.....	10
Şekil 3-1: Toroid şekilli manyetik enerji hasatlayıcı	16
Şekil 3-2. Elektromanyetik enerji hasatlayıcının eşdeğer devresi.....	17
Şekil 3-3. Toroid nüve değişkenleri.....	17
Şekil 3-4. Maksimum güç aktarımı	21
Şekil 3-5. Kullanılan doğrusal olmayan malzemelerin B-H eğrileri.....	24
Şekil 4-1. SEY ile modellenen hasatlayıcının ağ yapısı	25
Şekil 4-2. 60x30x20 silisli çelik nüvenin SEY ile ve teorik olarak elde edilmiş hat akımına göre öz endüktans değerlerinin değişimi	28
Şekil 4-3. 60x30x20 silisli çelik ve nanokristal nüvelerin Hat Akımı / Manyetik Akı Yoğunluğu grafikleri	29
Şekil 4-4. Sabit manyetik geçirgenliğe sahip feritlerin Hat Akımı / Manyetik Akı Yoğunluğu grafikleri	30
Şekil 4-5. Hava aralığındaki değişim ve manyetik akı yoğunluğu grafikleri	31
Şekil 4-6. Hava aralıksız ve hava aralıklı nüvelerdeki manyetik akı yoğunluğu dağılımları	32
Şekil 5-1. Çalışmada kullanılan nüveler	33
Şekil 5-2. Deney düzeneği.....	34
Şekil 5-3. 40x30x20 Silisli Çelik nüve tarafından endüklenen gerilim değerleri	37
Şekil 5-4. 50x30x20 Nanokristal nüve tarafından endüklenen gerilim değerleri	39
Şekil 5-5. 60x30x20 Ferit nüve tarafından endüklenen gerilim değerleri	41
Şekil 5-6. 40x30x20 Silisli Çelik nüve tarafından hasatlanan güçlerin hat akımı ve yük direncine göre değişimi	48
Şekil 5-7. 50x30x20 Nanokristal nüve tarafından hasatlanan güçlerin hat akımı ve yük direncine göre değişimi	49
Şekil 5-8. 60x30x20 Ferit nüve tarafından hasatlanan güçlerin hat akımı ve yük direncine göre değişimi	50

TABLO LİSTESİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
Tablo 2-1: Enerji hasatlama sistemlerinin karşılaştırılması	15
Tablo 4-1. 30 Amper hat akımında SEY ile elde edilen ortak ve öz indüktans değerleri.....	27
Tablo 4-2. 30 Amper hat akımında teorik olarak hesaplanan ortak ve öz indüktans değerleri.....	27
Tablo 5-1. Nüvelerin AL değerleri ve sarım sayıları ve ağırlıkları.....	35
Tablo 5-2. Silisli Çelik nüveler vasıtasıyla endüklenen gerilimler.....	36
Tablo 5-3. Nanokristal nüveler vasıtasıyla endüklenen gerilimler	38
Tablo 5-4. Ferit nüveler vasıtasıyla endüklenen gerilimler.....	40
Tablo 5-5. Nüve ağırlıkları.....	42
Tablo 5-6. Nüve maliyetleri.....	43
Tablo 5-7. Silisli Çelik nüveler tarafından hasatlanan en büyük güçler	44
Tablo 5-8. Nanokristal nüveler tarafından hasatlanan en büyük güçler	45
Tablo 5-9. Ferit nüveler tarafından hasatlanan en büyük güçler	46
Tablo 5-10. En büyük güçlerin elde edildiği nüvelerin endüklediği gerilimler ve akımlar ..	47

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
V	: Gerilim, V
V ₂	: Endüklenen gerilim
Ω	: Ohm
RMS	: Ortalama karekök
B	: Manyetik akı yoğunluğu, T
H	: Manyetik alan şiddeti,
°C	: Santigrad derece
L	: Endüktans, H
L ₂₂	: Öz endüktans, H
M	: Ortak endüktans, H
N ₁	: Birincil sargılar
N ₂	: İkincil sargılar
i	: Akım, A
R	: Direnç, Ω
b	: Nüve dış çapı, mm
a	: Nüve iç çapı, mm
h	: Nüve yüksekliği, mm
μ	: Manyetik geçirgenlik
μ_r	: Bağlı geçirgenlik
μ_0	: Boşluğun manyetik geçirgenliği
r	: Yarıçap
ϕ	: Manyetik akı
w	: Açısal hız, Rad/s
f	: Frekans, Hz
W	: Enerji, Joule

Kısaltmalar**Açıklama**

İHA	: İnsansız Hava Aracı
SEY	: Sonlu Elemanlar Yöntemi
SEA	: Sonlu Elemanlar Analizi
DC	: Doğru Akım
AC	: Alternatif Akım
Ni-Zn	: Nikel-Çinko
Mn-Zn	: Manganez-Çinko



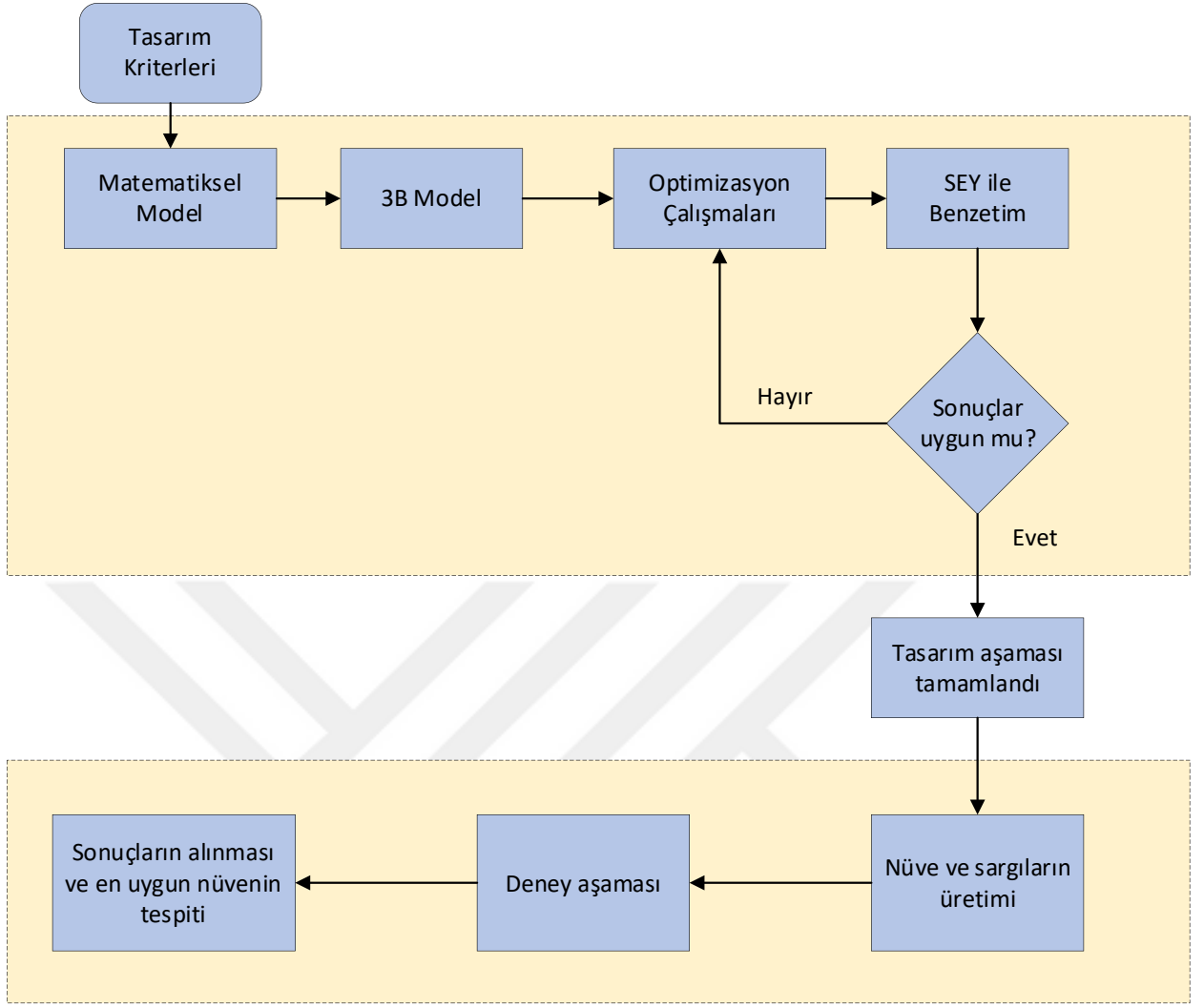
1. GİRİŞ

Teknolojiye bağılı olarak sanayinin gelişmesi, dünya nüfusunun hızla artması gibi etkenlerden dolayı enerji ihtiyacı gün geçtikçe artmaktadır. Artan tüketim, enerji arz güvenliği ve enerji kalitesi sorunlarını beraberinde getirmektedir. Enerji arz güvenliğinin sağlanması için enerji tüketiminin çeşitlendirilmesi ve üretim miktarının artırılması gibi çeşitli önlemler alınabilir. Kurulan hatların sürekli takip edilmesi, bakım ve onarımının yapılması arz güvenliğinin sağlanmasındaki diğer önemli unsurlar olarak karşımıza çıkmaktadır. Artan enerji ihtiyacı ile birlikte enerji nakil hatlarının önemi de artmaktadır. Enerji nakil hatlarının izlenmesi ve denetlenmesi enerjinin sürdürülebilirliği ve kalitesi açısından önemli bir husustur. Enerji nakil hatlarının önemli bir bölümü ulaşımın ve erişimin zor olduğu kırsal bölgelerde yer almaktadır. Mevsimsel etkiler de göz önünde bulundurulduğunda hatları izlemek için bazı çevresel şartlarla başa çıkmak gerekmektedir. Enerji nakil hatlarında hattın sehimini etkileyen ve hatları tutan direklerin ve iletkenin üzerine ciddi bir yük binmesine neden olan kar ve buz birikmesi gibi durumlar önemli sorunlara sebebiyet vermektedir [1]. Bu durum hatların takibi ve herhangi bir arıza anında müdahale edilmesinin hatların sağlıklı ve kesintisiz bir şekilde çalışabilmesi için ne kadar mühim olduğunu göstermektedir. Nakil hatlarının izlenmesi insan gücü, birtakım sensörler, helikopterler veya uçaklar ile sağlanabilmektedir. Bu işlemlerin güvenli ve maliyet açısından en uygun şekilde yapılması gerekmektedir. Hem maliyet hem de zorlu çevre şartları nedeniyle bu görevlerde İnsansız Hava Araçlarının (İHA) kullanımı söz konusudur. İHA'ların en büyük dezavantajı bataryalarının yetersiz olmasıdır. Bu yüzden İHA'ların görev yerlerinden şarj için geri çekilmeleri veya periyodik olarak batarya değişikliği yapılması yerine şarjları bitmek üzereyken yakındaki uygun bir hattan manyetik enerji hasadı ile şarj işlemi yapılabilir. Böylece görevi icra edecek olan İHA görev bölgesini terk etmeden şarj işleminden sonra kaldığı yerden çalışmaya devam edebilir [2].

Enerji hasadı ısı, rüzgâr, güneş, elektromanyetik yöntemler ile mevcut olan küçük miktarlardaki enerjinin yakalanması ve elektrik enerjisine dönüştürülmesi olarak tanımlanabilir [3]. Elektromanyetik enerji hasatlayıcılar, iletim hattının birincil ve nüve üzerindeki sargıların ise ikincil sargıların olduğu bir transformatöre benzetilebilir. Bu hasatlayıcılar vasıtasıyla, hattın etrafındaki manyetik alandan yararlanarak gerilim indüklenip iletim hatlarından enerji elde edilmektedir. Elektromanyetik alanlardan enerji hasat yönteminin diğer enerji hasat yöntemlerine göre bazı avantajları vardır. Bu avantajlar; hava koşullarına bağımlı olmaması, bakım

maliyetlerinin olmaması, basit yapıda olması ve iletim hattından akım geçtiği sürece çalışabilmesi olarak sıralanabilir [4], [5].

Bu çalışmada enerji nakil hatlarının denetlenmesi ve incelenmesinde kullanılmak üzere İnsansız Hava Araçları için kablosuz şarj imkânı sağlayan elektromanyetik enerji hasatlayıcılarının tasarımı gerçekleştirilmiştir. Enerji nakil hatlarından bir İHA'nın şarj edilebilmesi için tasarlanacak yapıda sistemin boyut, ağırlık ve yüksek güç yoğunluğu açısından optimize edilmesi gerekmektedir. Çalışmada, hasatlayıcılar tasarlanırken nüve malzemesi, nüve boyutu, nüvenin doyuma ulaşması ve İHA'ların ağırlık kısıtından dolayı hasatlayıcının ağırlığı gibi etkenler üzerinde durularak optimum tasarım sağlanmaya çalışılmıştır. Şekil 1-1'deki iş akış şemasında da görüldüğü üzere öncelikle hasatlayıcılar için matematiksel model oluşturulmuş ve tasarımlar bu model esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan hasatlayıcılar Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) ile benzetimleri yapılmak suretiyle analiz edilmiştir. SEY analizlerinde belirli akım değerlerinde hasatlayıcıların ortak ve öz indüktans değerleri ile manyetik akı yoğunluğu değerleri hesaplanmıştır. Mukayese edebilmek için endüktans değerleri teorik olarak da hesaplanmıştır. Daha sonra tasarlanan hasatlayıcıları denemek üzere deney düzeneği kurulmuştur. Nüve sargıları sarıldıktan sonra hasatlayıcılar tarafından indüklenen gerilim ve yüke aktarılan güç değerleri ölçülmüştür. Yüke aktarılan en büyük gücü bulabilmek için farklı yük dirençleri kullanılarak alınan ölçümler sonrasında eğri uydurma yapılmıştır. Eğri uydurma ile her akım değerinde elde edilen azami güç ve bu gücün hangi yük direncinde hasatlandığı tespit edilmiştir. Ağırlık ve boyut sorunu da göz önünde bulundurularak hasatlayıcıların performansı ortaya konulmuş ve çalışmada kullanılan nüveler arasında hangisinin İHA'lar için en uygun olduğu belirlenmiştir.



Şekil 1-1: İş akış şeması

1.1 TEZİN LİTERATÜRE KATKISI

Bu tez çalışmasında İnsansız Hava Araçlarının bir enerji nakil hattından kablosuz şarj edilebilmesini sağlamak üzere elektromanyetik enerji hasatlayıcılar tasarlanmıştır. Çalışma kapsamında özellikle İHA'ların en büyük sorunu olan ağırlık meselesi üzerinde durulmuştur. Çalışmada birçok farklı boyutta nanokristal, silisli çelik ve üç farklı ferit nüveden oluşan enerji hasatlayıcıların öncelikle Sonlu Elemanlar Yöntemi ile benzetimi yapılmış daha sonra deneysel ortamda denenmiştir. Çalışmanın sonucunda gerek ağırlık gerek güç yoğunluğu açısından en uygun nüve tespit edilmeye çalışılmıştır.

1.2 LİTERATÜR ÖZETİ

Elektromanyetik enerji hasatlayıcılarda nüve malzemesi, nüve geometrisi, sarım sayısı, hat akımı ve nüvenin doyuma ulaşması gibi etkenler hasatlayıcının verimi açısından oldukça önemlidir. Literatürde bu etkilerin incelendiği, hasatlayıcıları optimum hale getirmek ve çeşitli sorunların üstesinden gelebilmek için birçok çalışma yapılmıştır. Nüve malzemesinin etkisinin incelendiği bir çalışmada ferit, nanokristal ve demir tozu olmak üzere çeşitli malzemeler kullanılarak tasarlanan elektromanyetik enerji hasatlayıcılar 5 A hat akımında test edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre nanokristal nüveye sahip hasatlayıcı en yüksek güç yoğunluğuna sahip olmuştur [6]. Tek bir akım değerinde yapılan çalışmada elde edilen veriler kısıtlı kalmıştır. Nitekim benzer bir çalışmada yine ferit, nanokristal ve demir tozundan olmak üzere bazı elektromanyetik enerji hasatlayıcılar denenmiş ve 15 A hat akımında en yüksek güç elde edilen hasatlayıcı ferit nüveye sahip hasatlayıcı olmuştur [7]. İki çalışmayı birlikte değerlendirdiğimizde birinde ferit, diğerinde ise nanokristal nüve ile tasarlanan hasatlayıcıdan daha yüksek güç elde edilmiştir. Çelişki gibi görünen bu durumun sebebi ikinci çalışmada kullanılan ferit nüvenin nanokristal nüveye nazaran daha düşük bağıl geçirgenliği olmasına karşın doyuma ulaşma konusunda nanokristal nüveden daha iyi olmasıdır. Buradan çıkarılacak sonuca göre hasatlayıcı tasarlanırken seçilecek olan manyetik malzeme doyum sorunu göz önünde bulundurularak hat koşullarına göre seçilmelidir.

Hasatlayıcıda kullanılan nüve malzemesinin doyuma ulaşması elde edilen çıkış gücünü önemli ölçüde etkilemektedir. Nüve doyuma ulaşmamışken yani doğrusal bölgede çalışırken etkin bir şekilde hasatlama yapılabilmektedir. Nüve doyuma ulaştığında ise indüktans değerlerinin azalmasına bağlı olarak endüklenen gerilim azalmakta, bununla birlikte çıkış gücü de büyük ölçüde düşmektedir. Nüve geometrisinin etkisinin incelendiği kapsamlı bir çalışmada; nüve iç yarıçapının azalması, nüve yüksekliğinin artması ve hava boşluğunun mümkün olduğunca küçük olması dolayısıyla kaçak manyetik akının azalmasının çıkış gücünü arttırdığı tespit edilmiştir. Ayrıca hat akımının değerine göre sargıların optimize edilmesi gerektiği belirlenmiştir. Bunlarla birlikte düşük hat akımlarında daha yüksek güç elde edebilmek için ve yüksek hat akımlarında fazla enerjinin tahliye edilebilmesi için bir güç dengeleme stratejisi ortaya atılmıştır [8]. Farklı bağıl geçirgenliğe sahip ferit nüvelerin kullanıldığı hasatlayıcıların incelendiği bir çalışmada 1000 ve 2500 sarım sayılı sargıların ve nüve malzemesinin etkisi incelenmiştir. Çalışmada bağıl geçirgenliği yüksek olan nüveye sahip hasatlayıcının en yüksek sarım sayısı ile en yüksek enerjiyi

elde ettiği belirlenmiştir [9]. Buradan nüve malzemesinin bağıl geçirgenliği ve sarım sayısı arttıkça elde edilen gücün de arttığı sonucu çıkarılabilir.

Hasatlayıcılarda nüvenin doyuma ulaşmaması için literatürde farklı çözümler önerilmiştir. Manyetik nüvenin doyuma ulaşmasını engellemek için nüveye eklenen hava aralığından kaynaklı oluşan manyetik direncin önüne geçmek üzere çift nüveli bir hasatlayıcı tasarlanmıştır. Tasarlanan bu iki parçalı nüve ile aynı boyutta, aynı malzemeden oluşan ve aynı sarım sayısına sahip tek parçalı nüve karşılaştırılmıştır. Çift nüveli hasatlayıcıda tek nveliye kıyasla kaçak manyetik akı önemli ölçüde azalmış ve %53'e kadar daha fazla çıkış gücü elde edilmiştir [10]. Yapılan diğer bir çalışmada doygunsuzlaştırma kontrolörlü bir enerji hasatlayıcı tasarlanıp denenmiştir. Tasarlanan bu modelde, manyetik nüvenin doyum etkisini gidermek için nüve üzerindeki sargılara ek olarak ikincil bir sargı eklenip nüve doyuma girecekken ikincil sargının devreye girmesiyle doyum etkisi giderilmeye çalışılmıştır. Çalışmada ikincil sargıya sahip olmayan hasatlayıcıya kıyasla %13,8 daha fazla gücü elde edilmiştir [11].

Hattın yanına hatta paralel bir şekilde konuşlandırılarak hasatlama yapan hava nüveli yarım daire şekilli bir hasatlayıcı ve hattı çevreleyen dikdörtgen şekilli nüveye sahip başka bir hasatlayıcının kıyaslandığı bir diğer çalışmada hava nüveli yarım daire şekilli hasatlayıcıdan elde edilen gücün az olduğuna vurgu yapılarak hattı çevreleyen nüveye sahip hasatlayıcının hasatlanan gücü açısından daha uygun olduğu belirtilmiştir [12]. Nakil hatlarında kullanılan evrimii izleme cihazları için enerji hasatlamak üzere yapılan başka bir çalışmada 10 A hat akımında 0,7 mW gücü hasatlanmıştır. Çalışmaya göre geleneksel hasatlayıcılara nazaran 2 kat daha fazla gücü elde edilmiş dolayısıyla önerilen hasatlayıcının ağırlığının geleneksel hasatlayıcıların ağırlığının yarısı kadar olduğu belirtilmiştir [13]. Enerji nakil hatlarında biriken kar ve buzu eritmek için kullanılan cihazlara enerji sağlamak için manyetik enerji hasatlayıcıların tasarlandığı bir diğer çalışmada nüve malzemesi olarak silikon elik, nikel elik ve nanokristal HTX-012 kullanılmıştır. Bu kapsamda tek ve ikili nüveli modeller üç farklı hava aralığı ile denenmiştir. Çalışma sonucunda en yüksek gerilim silikon elik ve HTX-012 malzemelerinden oluşan ikili nüveli ve kademeli hava aralığına sahip model tarafından indüklenmiştir. Tekli nüveler kullanılarak yapılan analizlerde en yüksek manyetik geçirgenliğe sahip olmasına rağmen doyuma gittiği için HTX-012 avantajını kaybetmiştir. Nüve kayıpları daha yüksek olmasına rağmen silikon elik doyuma ulaşmadığı için yüksek akım değerlerinde daha etkili olduğu grlmştir [14]. İHA'lara enerji sağlamak için yapılan bir çalışmada U şekilli bir nüve ile 100 A ila 1000 A arasında 100'er amperlik adımlarla arttırılarak elektromanyetik enerji hasatlama yapılmıştır. Bir mekanizma yardımıyla U şekilli nüvenin İHA ile birlikte hatta tutunması sağlanmıştır. Hattan başarılı bir şekilde enerji elde

edilmesine rağmen U şekilli nüveye sahip hasatlayıcının hattın tamamını çevreleyememesinden ve hasatlama esnasında tutucunun üstünde kalan manyetik alandan faydalanamamasından dolayı hasatlanan enerjinin kısıtlı kaldığı belirtilmiştir [15]. Bir başka çalışmada nüve geçirgenliği karmaşık bir değişken olarak ele alınmış, nüve boyutunu ve kayıplarını, yük empedansı optimizasyonunu, manyetik akı seviyesini, güç faktörü performansını ve bu değişkenler arasındaki ilişkiye odaklanılmıştır. Çalışmada ferit, nanokristal ve çok katlı silikon katkılı çelik nüveden oluşan elektromanyetik enerji hasatlayıcılar tasarlanmış ve kıyaslanmıştır. Çalışmada ferit ve nanokristal nüvelerin çeşitli avantajlarına rağmen zayıf mekanik bütünlük ve zor işlenebilirliklerinden dolayı 50-60 Hz aralığında çok katlı silikon katkılı çelik nüveli hasatlayıcının daha iyi bir seçenek olduğu öne sürülmüştür [16]. Diğer bir çalışmada 10 kV'luk bir nakil hattı üzerine kurulan çevrimiçi izleme cihazına güç sağlamak için bir manyetik enerji hasatlayıcı sistem nüve malzemesi, boyutu ve sargıları göz önünde bulundurularak kurulmuştur. Çalışmada ayrıca çıkış gerilimini dengede tutmak için güç yönetim devresi tasarlanmıştır. Çalışma sonucunda 3,3 V'luk sabit bir DC gerilim elde edilmiştir [17]. Başka bir çalışmada iletim hatlarında dalgalanan akımdan dolayı oluşan manyetik alanlardan kararlı bir şekilde enerji hasatlamak için manyetik olarak kontrol edilen bir akım trafosu önerilmiştir. Geleneksel akım trafoları ile karşılaştırıldığında, bu sistem karşılık gelen dirençli kapasitif empedansa eşdeğer olacak şekilde ayarlanmış elektronik bir yük kullanarak sabit manyetik akı kontrolü ve kararlı gerilim çıkışı sağlayabilmiştir. Çalışma sonucuna göre 50-500 A aralığındaki akım dalgalanmalarında ve yük empedansı 30Ω 'a ayarlandığında 20 V çıkış gerilimi ve 13 W'lık kararlı bir güç elde edilebilmiştir [18]. Bir diğer çalışmada değişken hat akımı ve yük koşullarında hasatlanan enerjiyi iyileştirmeye yönelik olarak, etkin bir doğrultucu ile elde edilen azami gücü izleyebilen empedans eşleştirmeye dayanan bir manyetik alan enerji hasat kontrol sistemi sunulmuştur. Önerilen yöntem ile hasatlayıcı 50 Hz ve 80 Arms'lık güç hattından 800Ω 'luk bir yükte ortalama 2,51 W güç elde edebilmiştir. Çalışmaya göre önerilen yöntem vasıtasıyla etkin olmayan doğrultucuya sahip geleneksel manyetik enerji hasatlayıcılara nazaran %136,8 daha fazla güç elde edildiği bildirilmiştir [19]. Manyetik enerji hasatlayıcıların nüve doyum bölgesinde iken indüklediği gerilimi ve hasatladığı gücü hesaplayabilmek ve hasatlayıcıların doyum bölgesinde çalışabilmesini konu alan bir çalışmada mıknatıslanma endüktansının sebep olduğu faz farkını hesaplayabilmek için bir uyarım akım modeli kurulmuştur. Teorik değerle mukayese edildiğinde önerilen hasatlayıcı ile indüklenen gerilimdeki sapma %0,4 ve çıkış gücündeki sapma yalnızca %0,8 olmuştur ve nüve doyum bölgesinde iken hasatlayıcının performansı ölçülebilmıştır. Ayrıca tasarlanan nüvenin istenilen güce ulaşılabilceği gösterilmiştir [20]. Diğer bir çalışmada çok

kristalli Ni-Zn feritten oluşan toroid şekilli iki nüvenin arasına aynı şekilde ve aynı boyutta piezoelektrik malzeme konarak ve etrafına iletken sarılarak tasarlanan üç katmanlı, çift çıkışlı bir manyetik enerji hasatlayıcı incelenmiştir. Hasatlayıcı üzerinden birisi iletken uçlarında port I olarak adlandırılan, diğeri piezoelektrik malzemede port II olarak adlandırılan çıkışlarda indüklenen gerilim ve bu vasıtayla elde edilen güç ölçölmüştür. Deneysel sonuçlara göre indüklenen azami gerilim 50 Hz, 70mA'lık hat akımında port I üzerinde 15 mV ve port II üzerinde 1,2 mV olarak ölçölmüştür. Üretilen azami çıkış gücü ise port I ve port II'de sırasıyla 250 Ω ve 140 Ω 'luk yük dirençleri üzerinde 0,4285 μ W ve 30,1476 nW olmuştur [21]. Hat akımı düşük değerlerde iken yetersiz güç elde edilip yüksek akım değerlerinde manyetik nüvenin doyuma gitmesi sonucu hasatlayıcının performansının düşmesi elektromanyetik enerji hasatlayıcılar için önemli bir sorun teşkil etmektedir. Bu sorunun üstesinden gelebilmek için yeni bir yöntemin önerildiği bir çalışmada yüke seri bir kapasitör ve iki anahtar kullanılmıştır. Bu yöntem ile kapasitör ile enerji depolamak, nüvenin doyumunu modöle etmek ve anahtarların dönüşümlü olarak açılıp kapanması sağlanarak yük geriliminin azaltılması ve yüksek hat akımlarında hasatlayıcının korunabilmesi amaçlanmıştır. Yapılan bu çalışmaya göre 50 Hz, 2 Arms hat akımında hasatlanan gücün %206 arttığı belirtilmiştir [22]. Manyetik nüvenin yüksek akım koşullarında doyması sorununu ele alan başka bir çalışmada doyum durumu dikkate alınarak çeşitli analizler yapılmıştır. Değişen birincil akıma göre mıknatıslanma endüktansı B-H eğrisi kullanılarak analiz edilmiştir. Çalışmanın geçerliliğini doğrulamak için manyetik nüve malzemeleri üretilmiş ve deneyler yapılmıştır. Benzetim sonuçları ve 5 A ila 250 A hat akımlarında deneysel olarak ölçölen sonuçlara dayanarak geleneksel modele kıyasla önerilen model vasıtasıyla doyum bölgesinde çalışan hasatlayıcının elde ettiği güç doğru bir şekilde tahmin edilebilmiştir [23]. Yüksek gerilim hatlarındaki çevrimiçi izleme algılayıcılarına güç sağlamak için enerji hasatlama üzerine yapılan çalışmada nüve malzemesi olarak silisli çelik kullanılmıştır. Çalışmada yüksek akım değerlerinde doyum sorununu çözmek için bir tahliye devresi tasarlanmıştır. Çalışma sonucuna göre 18,6 A ile 500 A arasındaki hat akımı değerlerinde kararlı bir şekilde 0,5 W güç elde edilebilmiştir. Ayrıca normalde nüve 200 A değerinde doyuma ulaşırken hava tahliye devresi kullanıldığında 500 A'lık akım değerinde dahi doymamıştır [24]. Bir başka çalışmada nüvenin doyumunu, yükteki gerilimdeki dalgalanmalar, sarım sayısı, sargı direnci ve doğrultucu diyodun gerilim düşüşü gibi değişkenler dikkate alınarak teorik bir model oluşturulmuş ve model deney ve benzetim sonuçları ile doğrulanmıştır. Çalışmada hasatlanan enerjiyi en yüksek seviyeye çıkarmak ve doyum sorununun üstesinden gelmek için kapasitans dengeleme devresi kullanılmıştır [25]. Nüve doyum koşullarında iken hasatlanan enerjiyi iyileştirmek üzere yeni bir yöntemin sunulduğu

diğer bir çalışmada iletim hatlarındaki manyetik alanı manipüle etmek için ek bir kontrol sargısı ile yapay bir manyetik alan oluşturulmak istenmiştir. Kontrol sargıları tarafından toplanan enerjiyi depolamak ve karşı manyetik alan oluşturmak ve hasatlayıcıya geri besleme sağlamak için bir güç yönetim devresi kullanılmıştır. Bu vasıta ile nüvenin kolayca doyuma ulaşmaması ve daha fazla enerji hasatlanması düşünülmüştür. Deneysel sonuçlara göre 50 Hz 10 Arms iletim hattında ortalama 283 mW güç hasatlanabilmiştir. Bu sonuca göre kontrol sargıları kullanılarak elde edilen gücün %45 arttığı belirtilmiştir [26]. Geleneksel teorik modele göre tasarlanan manyetik enerji hasatlayıcıların bazen gereksinimleri karşılayamayacağını ifade eden ve bundan dolayı yapılan bir çalışmada uydurma yöntemi adı verilen bir yöntem geliştirilmiştir. Çalışmada teorik değer ve benzetim sonuçlarının oranı ile yeni bir fonksiyonel ifade elde edilmiştir. Nüve boyutu, sarım sayısı gibi değişkenler bu fonksiyonel ifadeye göre yeniden hesaplanmış ve teorik değer ile deney sonuçları arasındaki azami gerilim farkının 0,26 V, azami güç farkının ise 0,016 W olduğunu gösterilmiştir. Çalışmaya göre çıkış geriliminin ve çıkış gücünün doğrudan nüve boyutu ve sarım sayısına göre hesaplanabileceği veya nüve boyutunun ve sarım sayılarının hedeflenen çıkış gerilimi ve gücüne göre tasarlanabileceği belirtilmiştir [27]. Başka bir çalışmada biri kelepçelenebilir, diğeri yüksek geçirgenliğe sahip ve hava aralıksız olan iki ayrı nüveden oluşan bir elektromanyetik enerji hasatlayıcı modeli önerilmiştir. Kelepçelenebilir nüvenin sistemlere entegre olma kolaylığı sağlaması, yüksek geçirgenliğe sahip diğer nüvenin ise hasatlanan enerjiyi en üst düzeye çıkarması amaçlanmıştır. Çalışmada matematiksel model önerilmiş ve bu modelin benzetim ve deney sonuçları ile doğrulandığı belirtilmiştir. Çalışma sonucuna göre hava aralıksız yüksek geçirgenliğe sahip olan nüve hafif doyuma ulaştığında elde edilen enerjinin azami değerine ulaştığı ifade edilmiştir [28].

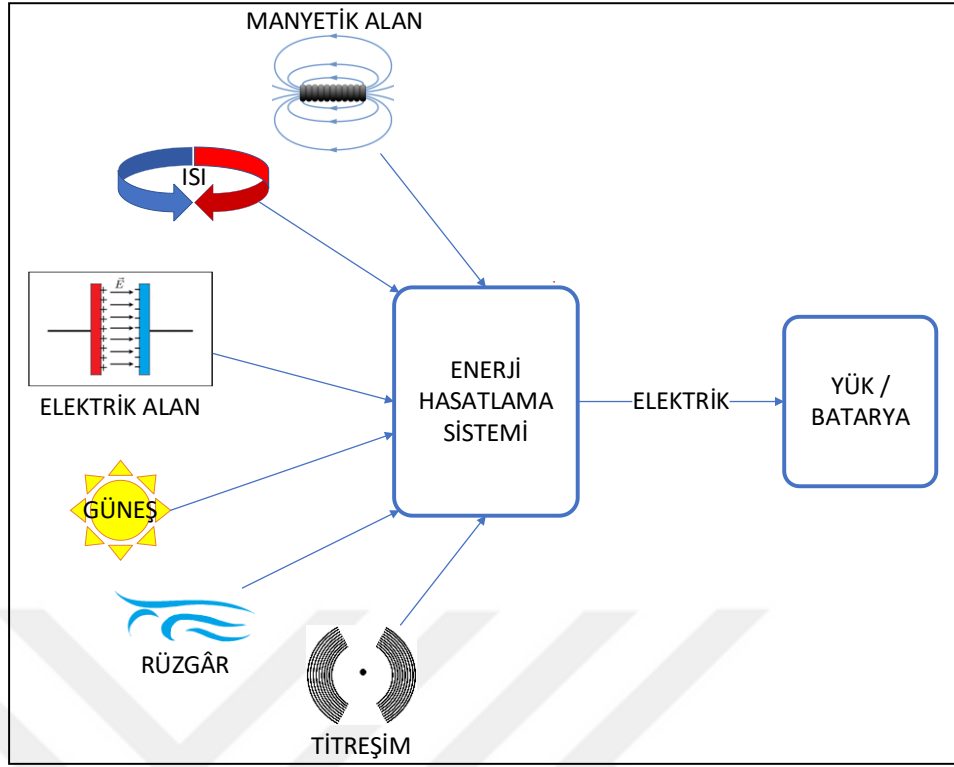
2. ENERJİ HASATLAMA

Enerji hasatlama, çevrede bulunan kaynaklardan enerji toplama ve elektrik enerjisine dönüştürerek kullanma sürecidir. Elde edilen enerji miktarı düşük olduğu için enerji hasatlama terimi kullanılmaktadır. Enerji dönüşümü açısından bakıldığında, insanlar halihazırda yel değirmeni, su değirmeni, jeotermal ve güneş enerjisi şeklinde enerji hasat teknolojilerini uzun yıllardır kullanmışlardır ve kullanmaya devam etmektedirler [29].

Enerji hasatlama teknikleri, düşük güç tüketen elektronik cihazların ve algılayıcıların enerji ihtiyaçlarını karşılamak için kullanılmaktadır. Özellikle son yıllarda enerji ihtiyacının artmasına paralel olarak alternatif enerji kaynaklarına olan ilginin artmasının sonucunda enerji hasatlama yöntemleri yoğun olarak araştırılmaya başlanmıştır. Geleneksel güç kaynaklarının sınırlı olmaları, kablosuz sensör ağları gibi sistemlere yönelik artan talepler ve teknolojinin gelişmesiyle oldukça düşük güç ile çalışan elektrikli cihazların artması, ayrıca çevre dostu olmaları sebebiyle enerji hasatlama teknikleri oldukça önem kazanmıştır. Kablosuz ve mikro elektro-mekanik sistemlerdeki son gelişmelerle birlikte, enerji hasadı geleneksel bataryalara önemli bir alternatif olarak öne çıkmaktadır [28]. Düşük güç ihtiyacı duyan taşınabilir elektronik cihazlar ve kablosuz sensörler için güç kaynağı olarak geleneksel bataryalar kullanılmaktadır. Ancak batarya ömrü cihazların çalışma ömrüne kıyasla oldukça sınırlıdır ve periyodik olarak değiştirilmesi veya yeniden şarj edilmesi gerekmektedir. Bu durum özellikle erişilemeyen konumlardaki sensörler için oldukça maliyetlidir [30]. Bu nedenle, enerji hasatlama teknolojileri, kablosuz algılayıcıları ve daha başka birçok cihazın enerji açısından kendi kendine yetebilmesi için umut verici bir çözümdür.

2.1 ENERJİ HASATLAMA YÖNTEMLERİ

Enerji hasatlama işlemi Şekil 2-1’de görüldüğü gibi titreşim, rüzgâr, güneş, ısı, manyetik alan, elektrik alan gibi farklı kaynaklar ile yapılabilmektedir. Enerji hasatlama işleminde kullanılan bu kaynakların her birinin kullanım alanlarına göre artı ve eksileri söz konusudur [31].



Şekil 2-1: Enerji hasatlama sistemi

Enerji hasatlama teknikleri, çevredeki kullanılabilir bir kaynağı genellikle düşük güce ihtiyaç duyan sistemlere, çeşitli algılayıcılara güç sağlamak için ve bataryaları şarj edebilecek kadar yeterli elektrik enerjisine dönüştürmenin bir yolu olarak araştırılmaktadır. Aşağıda altı ana enerji hasatlama yönteminin kavramları, uygulamaları, avantajları ve dezavantajları üzerine kapsamlı bir inceleme yapılmaktadır. Günümüze kadar, özellikle uzun süredir kullanılan geleneksel enerji dönüşüm yöntemlerinden olan güneş ve rüzgâr enerjisi gibi doğal kaynaklardan veya titreşim, ısı, iletim hatlarındaki manyetik alan ve elektrik alanlar gibi atık diyebileceğimiz kaynaklardan enerji hasatlama üzerine birçok çalışma yapılmış ve bu konularda ciddi bir literatür oluşmuştur [32] [33].

2.1.1 Güneş Enerjisinden Enerji Hasadı

Günümüzde en çok kullanılan yenilenebilir enerji kaynaklarından olan güneş enerjisi vasıtasıyla enerji hasatlama yapılabilmektedir. Güneş enerjisi çevre dostu, bakım maliyetinin çok az olması ve dayanıklılık gibi çeşitli avantajlara sahip bir kaynaktır [34]. Güneş enerjisinden enerji elde etmek için kullanılan fotovoltaik hücrelerin geliştirilmesi uzun yıllardır devam etmektedir.

Lâkin bu hücrelerin dönüşüm verimlilikleri halen istenilen düzeyde değildir ve malzemenin tipine bağlı olarak %8 ila %20 arasında değişmektedir [35].

Gün ışığı altında nispeten verimli olan güneş enerjisinin en olumsuz tarafları hava şartlarına olan bağıllık ve fotovoltaik hücrelerin verimlerinin oldukça düşük olmasıdır. Güneş enerjisinden enerji hasadı sadece gün ışığı altında yapılabilmektedir. Bundan dolayı gece kullanımları için bataryalara ihtiyaç duyulmaktadır ve bu da maliyet açısından bir dezavantaj olarak görülebilir. Ayrıca gündüz vakti olmasına rağmen havanın kapalı olması durumunda hasatlayıcının verimi ciddi oranda düşmektedir. Bu gibi çeşitli sebeplerden dolayı güneş enerjisinden enerji hasatlama işlemi nakil hatları için çok uygun olmamakla beraber farklı alanlarda ve sistemlerde daha verimli şekilde kullanılabilir.

2.1.2 Isı Enerjisinden Enerji Hasadı

Enerji hasatlamada kullanılan yöntemlerden bir diğeri olan ısı vasıtasıyla enerji hasatlama yöntemi, sanayide ve endüstride kullanılan cihazlar başta olmak üzere ısı üreten veya ısı değişimi olan herhangi bir sistem veya cihaz üzerinde kullanılabilir. Özellikle son zamanlarda hem doğal hem de endüstriyel ortamlarda sıcaklık değişimlerinin önemli ölçüde artması sebebiyle ısı enerjisi ile enerji hasadı önem kazanmıştır [36].

Bir tür termoelektrik etki olan Seebeck etkisi, sıcaklık farklarının oluşturduğu potansiyel farkın elektrik enerjisine dönüşümü olarak ifade edilebilir. Isı enerji hasatlayıcıları için temel teşkil eden bu etki 1821 yılında Thomas Johann Seebeck tarafından bulunmuştur. Seebeck etkisi farklı sıcaklıktaki iki bölge arasındaki enerji farklarını doğrudan elektrik enerjisine dönüştürmek için kullanılabilir. Seebeck etkisi prensibiyle çalışan termoelektrik jeneratörler ısı enerji hasatlayıcılarına örnek olarak gösterilebilir.

Biri üstte, diğeri altta birbirine seri bağlanmış n-tipi ve p-tipi iki termoelektrik yarı iletkenlerden oluşan yapıya sahip olan bu jeneratörler, oluşan sıcaklık farklarının herhangi bir hareketli parça olmadan doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülmesini sağlar [37]. Ayrıca soğuktan sığa ve sıcaktan soğuğa olmak üzere her iki şekilde de çalışabilir. Bu yüzden termoelektrik jeneratörler, gün boyunca oluşan sıcaklık değişikliklerinden faydalanarak enerji üretiminde kullanılabilirler. Termoelektrik jeneratörlerin avantajlarından birkaçı; hareketli parçalara sahip olmadıkları için bakıma ihtiyaç duymamaları ve uzun ömürlü olmaları, doğrudan enerji dönüşümüne sahip olmaları ve gürültüsüz çalışmaları olarak ön plana çıkmaktadır.

Termoelektrik enerji hasatlayıcılar hakkında oldukça kapsamlı araştırma yapılan bir çalışmada herhangi bir güçlendirici devre olmaksızın düşük güçlü bir hasatlayıcı denenmiş ve 105 °C'lık sıcaklık değişiminde azami olarak 64,59 mW güç elde edilmiştir. Çalışma sonucu elde edilen bu gücün düşük güçlere ihtiyaç duyan algılayıcılar için yeterli olduğu belirtilmiştir. Daha iyi soğutucu tasarımları ile ısıdaki değişim miktarı artırılarak ve güçlendirici devreler kullanılarak elde edilen gücün önemli ölçüde artırılabilceği ifade edilmiştir [38]. Termoelektrik jeneratörlerin çok ilginç bir uygulaması, orman yangını izleme, hassas tarım, ağaç ömrü izleme ve diğerlerinde potansiyel olarak kullanılabilen Akıllı Ağaç uygulamasıdır. Bu çalışmada ormanların izlenmesi için kullanılan algılayıcılara güç sağlamak amacıyla ağaç gövdelerindeki ısı değişiminden enerji hasatlayan bir hasatlayıcı tasarlanmış ve denenmiştir. Çalışmadaki deneysel sonuçlara göre ağaç gövdelerinden enerji hasatlamak için yeterli bir ısı değişimi elde etmek mümkün olmuştur [39].

Isı enerjisi ile enerji hasatlayıcıların geliştirilmesinde ve kullanımındaki en büyük dezavantaj termoelektrik malzemelerin verimlerinin çok düşük olması ve maliyetlerinin fazlalığıdır. Nitekim bu malzemelerin ortalama verimlilikleri %10'un altındadır. Bu yüzden termoelektrik malzemelerin geliştirilmesi ısı ile enerji hasatlamadaki en önemli husustur ve bu konuya yoğunlaşılması gerekmektedir [38]. Ayrıca ısı enerjisinden hasat yönteminin sürekli bir ısı kaynağının her zaman mevcut olmamasından dolayı nakil hatları için uygun olmadığı söylenebilir.

2.1.3 Rüzgâr Enerjisinden Enerji Hasadı

En önemli yenilenebilir enerji kaynaklarından olan rüzgâr enerjisi son yıllarda dünyada enerji üretiminde oldukça önemli bir yer kaplamaktadır. Rüzgâr enerjisi ile büyük çaplı enerji üretimi için rüzgâr türbinleri geliştirilmiştir. Bununla birlikte enerji hasatlama olarak tabir ettiğimiz işlem küçük miktarda enerji eldesi olduğu için daha küçük çapta hasatlayıcılara ihtiyaç duyulmaktadır. Rüzgârdan enerji hasatlayıcılar döner elemanlı hasatlayıcılar ve rüzgâr kaynaklı titreşim hasatlayıcıları olmak üzere iki başlık altında incelenebilir. Döner elemanlı hasatlayıcılar bir nevi küçük boyutlu rüzgâr türbini gibi düşünülebilir. Rüzgârdan dolayı oluşan kinetik enerji türbin vasıtasıyla mekanik enerjiye dönüştürülür ve daha sonra çeşitli elemanlar ile elektrik enerjisine dönüştürülür. Bu çeşit döner rüzgâr enerji hasatlayıcılarının maliyetleri hasatlama işleminde döner elemanların olması ve sistemin karmaşık olmasından dolayı yüksek olmaktadır. Ayrıca türbin kanatlarının yeterince küçük ölçekte olamamalarından dolayı boyut konusunda soruna yol açmaktadırlar.

Rüzgâr kaynaklı titreşim hasatlayıcıları ise mekanik titreşime neden olmak için özel olarak tasarlanmış bir yapı üzerinde rüzgâr esmesine izin verecek şekilde tasarlanmıştır. Rüzgârın oluşturduğu kinetik enerji önce titreşim enerjisine dönüştürülür. Titreşim enerjisi daha sonra elektromekanik bir dönüşüm mekanizması ile elektrik enerjisine dönüştürülür. Diğer rüzgâr enerji hasatlayıcılarına kıyasla basitliği, daha verimli olması ve daha küçük boyutlarda imal edilebilme potansiyeli nedeniyle, rüzgâr kaynaklı titreşim hasatlayıcıları, son yıllarda yoğun olarak çalışılmaktadır [40]–[42].

Rüzgâr enerji hasatlayıcıların en olumsuz tarafı güneş enerji hasatlayıcılarda olduğu gibi hava şartlarına bağlı olmasıdır. Rüzgârlı havalarda verimli olan bu hasatlayıcıların verimi rüzgâr olmadığı zaman ciddi oranda düşmektedir. Bu gibi sebeplerden dolayı rüzgârdan enerji hasatlama işlemi nakil hatları için çok uygun olmadığı söylenebilir.

2.1.4 Titreşimden Enerji Hasadı

Titreşimle çalışan enerji hasatlayıcılar köprüler, taşıtlar, elektriksel cihazlar gibi titreşim kaynakları tarafından oluşturulan titreşimi elektrik enerjisine dönüştürürler. Titreşim çevrede kolaylıkla bulunması ve erişilebilmesi nedeniyle enerji hasadı için en uygun kaynaklardan biridir. Özellikle güneş ve rüzgâr enerjileri hava şartlarından dolayı ve kapalı ortamlar gibi bazı durumlarda mevcut olmadığı için titreşim enerjisi bu kaynaklara alternatif olarak ön plana çıkmaktadır. Titreşim enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmek için piezoelektrik, elektrostatik ve elektromanyetik olmak üzere üç farklı dönüşüm mekanizması vardır. Bahsi geçen yöntemler arasında en verimli, en basit ve yüksek güç yoğunluğuna sahip olması gibi çeşitli avantajlarından dolayı en yaygın olan yöntem piezoelektrik dönüşüm mekanizmasıdır [43]. Piezoelektrik malzemeler kullanılarak mekanik enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülmesinin kolaylığı nedeniyle piezoelektrik enerji hasadı özellikle düşük güç ihtiyacı olan elektronik uygulamalar için oldukça popüler hale gelmiştir ve son dönemde oldukça yoğun bir şekilde çalışılmaktadırlar.

Piezoelektrik etki, uygulanan bir gerinme sonucunda malzeme içindeki yükün ayrılmasıdır. Bu yük ayrımı, malzeme içinde etkili bir şekilde bir elektrik alanı oluşturur ve bu durum piezoelektrik etki olarak bilinir. Ters piezoelektrik etki ise uygulanan bir elektrik alanının bir sonucu olarak bir malzemede gerilim ve gerinim oluşması olarak tanımlanabilir. Titreşimli endüstriyel makinelere monte edilen çeşitli sensörler, piezoelektrik elemanın enerji kaynağı olarak kullanılmasından yararlanabilir. Piezoelektrik enerji hasatlayıcılar rezonans frekansında çalıştırıldığında, azami güç hasat edilebilmektedir [44].

Piezoelektrik bir enerji hasatlayıcının tasarlandığı, teorik ve deneysel olarak test edildiği bir çalışmada 35 Hz'de teorik olarak 5,99 V deneysel olarak ise 3,65 V çıkış gerilimi elde edilmiştir. Teorik ve deneysel sonuçlar arasındaki bu farkın frekans, malzeme özellikleri gibi değişkenlerin benzetim ortamında gerçekteki değerlerinden farklı olabilmesinden kaynaklı olduğu belirtilmiştir [44]. Dikkat çekici bir başka çalışmada ise düşük frekanstaki köprü titreşimlerinden elektrik enerjisi elde edilmesine imkân sağlayan bir piezoelektrik enerji hasatlayıcı tasarlanmıştır. Çalışmada şehirde kullanılan bir üst geçitten ölçümler alınmış ve laboratuvar ortamında ölçülen titreşimi üretmek suretiyle hasatlayıcı denenmiştir. Deney sonuçlarına göre 4 Hz. frekans ve 4 V genlikte 0,20 mW güç elde edilmiştir. Elde edilen gücün düşük olması yapısal titreşimlerin düzensiz olmasına bağlanmıştır [45]. Yani bu tip enerji hasatlayıcıların verimli olabilmesi için sürekli ve düzenli titreşimlerin gerekli olduğu söylenebilir.

Titreşim enerjisi uygun şartlarda, basit yapısı ve yüksek enerji dönüşüm verimliliğine sahip olduğundan hasatlama için makul bir kaynak olduğu söylenebilir. Enerji nakil hatlarının incelenmesi için kullanılan algılayıcılara enerji sağlanması açısından bakıldığında ise titreşim enerjisinden enerji hasatlamak çok uygun bir yöntem değildir. Nitekim nakil hatlarının üzerinde her zaman uygun bir titreşim oluşması mümkün değildir. Bu tip enerji hasatlayıcıları titreşimin sürekli olduğu sistemler üzerinde değerlendirmek uygun bir tercih olacaktır.

2.1.5 Elektrik Alandan Enerji Hasadı

Özellikle nakil hatlarının izlenmesi için kullanılan algılayıcılara enerji sağlamak için üzerinde çalışılan enerji hasat yöntemlerinden birisi elektrik alandan enerji hasat yöntemidir. Elektrik alanlardan enerji hasatlama tekniği, bir iletkene belirli bir gerilim uygulandığında dairesel bir elektrik alan yayılması prensibine dayanır. Yayılan bu enerji, iletkenin toprağa doğru akan kapasitif yer değiştirme akımı ile hasatlanabilir. Bunun için akımın bir yükten akmak üzere saptırılması gerekmektedir [46]. Elektrik alandan enerji hasatlamamanın en önemli avantajı hat üzerinde akım akmasına ihtiyaç duyulmaması ve montaj kolaylığıdır. Bu hasatlayıcıların dezavantajı ise boyut olarak büyük olmaları ve bazı durumlarda kısa devre edilmeleri gerektiğidir [47].

Enerji nakil hatlarının etrafındaki elektrik alanların açık devre koşullarında mevcut olması, hat akımından bağımsız olması ve nispeten zengin ve sürekli olmasından dolayı, elektrik alandan enerji hasat yöntemi nakil hatları için en uygun tekniklerinden birisidir.

2.1.6 Manyetik Alandan Enerji Hasadı

Elektromanyetik enerji hasatlayıcılar enerji nakil hatlarının üzerindeki atık denilebilecek elektromanyetik alanlardan enerji elde edilmesini sağlamaktadır. Bu atık diye tabir ettiğimiz elektromanyetik alan sürdürülebilir bir enerji kaynağı olarak değerlendirilebilir. Elektromanyetik enerji hasatlayıcılar başta toroid olmak üzere, hava nüveli, E şekilli ve U şekilli gibi çeşitli geometrik şekillerde tasarlanabilmektedir. Elektromanyetik enerji hasatlayıcılar transformatörün temel prensibine dayanırlar. Bu hasatlayıcılar iletim hattının birincil, nüve üzerindeki sargıların ise ikincil sargılar olduğu bir transformatör gibi çalışırlar. Bu suretle hattın etrafındaki manyetik alandan gerilim indüklenip iletim hatlarından enerji elde edilebilir. Diğer enerji hasat yöntemlerine kıyasla elektromanyetik alanlardan enerji hasat yönteminin bazı avantajları vardır. Bu avantajlar; olumsuz hava koşullarından etkilenmemesi, bakım maliyetlerinin olmaması ve iletim hattında akım olduğu sürece çalışabilmesi olarak sıralanabilir. Elektromanyetik enerji hasatlayıcılardaki en önemli dezavantaj ise nüvenin doyuma ulaşması sorunudur. Hava aralığı ekleme, çift halkalı nüve gibi bazı önlemlerle doyuma ulaşma sorunu ile başa çıkılmaya çalışılmıştır. Bunun haricinde nüvede oluşan kayıplar ve hasatlamının yapıldığı hat üzerinde hasatlamaya elverişli manyetik alan oluşması için yeterli akımın olması gerektiği de diğer dezavantajlar arasında gösterilebilir. Elektromanyetik alanlardan enerji hasatlama tekniği nakil hatlarında kullanılan algılayıcılar ve hatların denetiminde kullanılan İHA'lara şarj sağlamak için en uygun yöntemlerden birisidir.

Yukarıda bahsedilen enerji hasatlama yöntemlerinin avantajları ve dezavantajları Tablo 2-1'de özetlenmiştir.

Tablo 2-1: Enerji hasatlama sistemlerinin karşılaştırılması

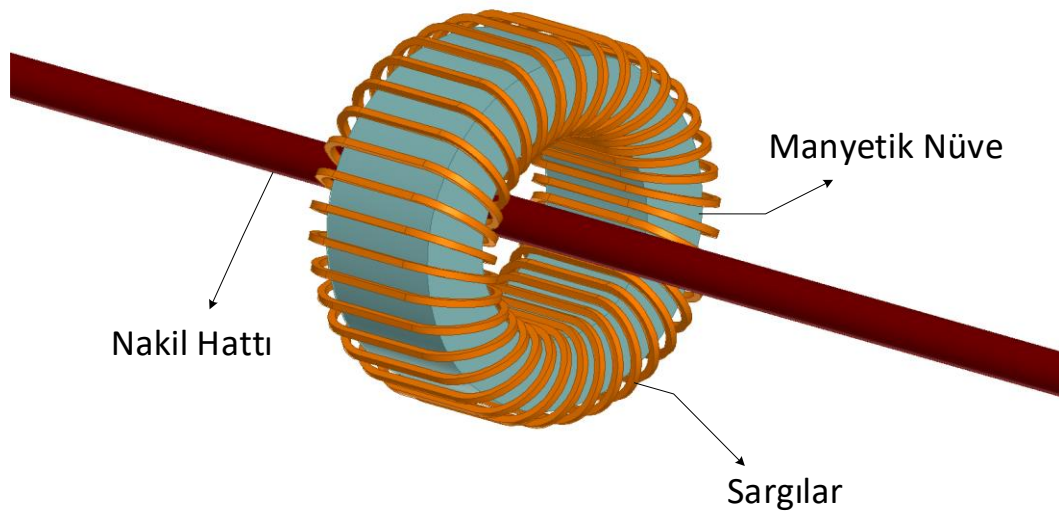
Enerji Hasat Yöntemi	Avantajı	Dezavantajı
Güneş Enerjisi [35], [48], [49]	Yüksek potansiyele sahiptir. Bakım maliyeti azdır.	Hava şartlarına bağımlılık söz konusudur. Depolama ihtiyacı vardır. Kapalı ortamlarda kullanılamaz. Fotovoltaik hücrelerin verimlilikleri düşüktür.
Isı Enerjisi [36], [50], [51]	Doğada ve endüstride ısı üreten herhangi bir sistem veya cihazdan faydalanılabilir. Uzun ömürlüdürler.	Termoelektrik malzemelerin verimleri düşüktür.
Titreşim [45]	Çevrede kolaylıkla bulunabilir.	Çevredeki titreşimler genellikle sürekli ve sabit değildir. Bu da verimi düşürmektedir.
Rüzgâr Enerjisi [42], [49]	Yüksek potansiyele sahiptir	Hava şartlarına bağımlılık söz konusudur. Bakım maliyeti yüksektir. Montajı zordur. Kapalı ortamlarda kullanılamaz.
Elektrik Alan [52]	Yüksek gerilim hatlarında veya ekipmanların yakınında sürekli mevcuttur.	Yüksek reaktanstan dolayı düşük enerji dönüşümüne sahiptir.
Manyetik Alan [4], [5], [53]	Akım akan her iletkeninde sürekli mevcuttur. Verimlilikleri yüksektir, bakım maliyeti hiç yoktur ve yapısı oldukça basittir.	İletkeninde akan akımın yeterli olması gerekmektedir. Yüksek akım değerlerinde nüve doyuma ulaşabilir. Nüve kayıpları olabilmektedir.

3. TEORİK ANALİZ

Çalışmanın bu kısmında toroid nüveli elektromanyetik enerji hasatlayıcılarının analitik modeli ortaya konulmuştur. Analitik model oluşturulduktan sonra çalışma kapsamında kullanılan her bir nüvenin ortak ve öz endüktans değerleri bu model üzerinden teorik olarak hesaplanmış ve sonuçlar kıyaslanmıştır.

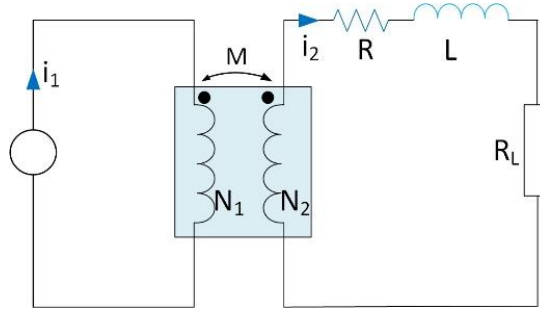
3.1 MATEMATİKSEL MODEL

Bu çalışmada İHA'lara şarj sağlamak için enerji hasat yöntemlerinden biri olan manyetik alandan enerji hasatlama yöntemi seçilmiştir. Nüve geometrisi olarak hattı tamamen kaplayabilmesinden dolayı diğer geometrik şekillere nazaran daha yüksek güç elde edilmesine olanak sağladığı için toroid model tercih edilmiştir [54]. Elektromanyetik enerji hasatlayıcıların tasarımında nüvenin doyuma ulaşması, nüve geometrisi, montaj kolaylığı gibi bazı sorunların dikkate alınarak istenilen özellikleri karşılayan bir tasarıma ulaşılması için bazı analizlerin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu bölümde hasatlayıcı teorik olarak incelenecek ve analitik modeli çıkarılacaktır. Elektromanyetik enerji hasatlayıcıların yapılarında kısaca Şekil 3-1'de görüldüğü üzere yumuşak manyetik malzemeden oluşan bir nüve ve nüvenin üzerine sarılı iletken bulunmaktadır. Nüve üzerindeki sargılar ikincil ve toroidin bağlanacağı hat birincil sargılardır.



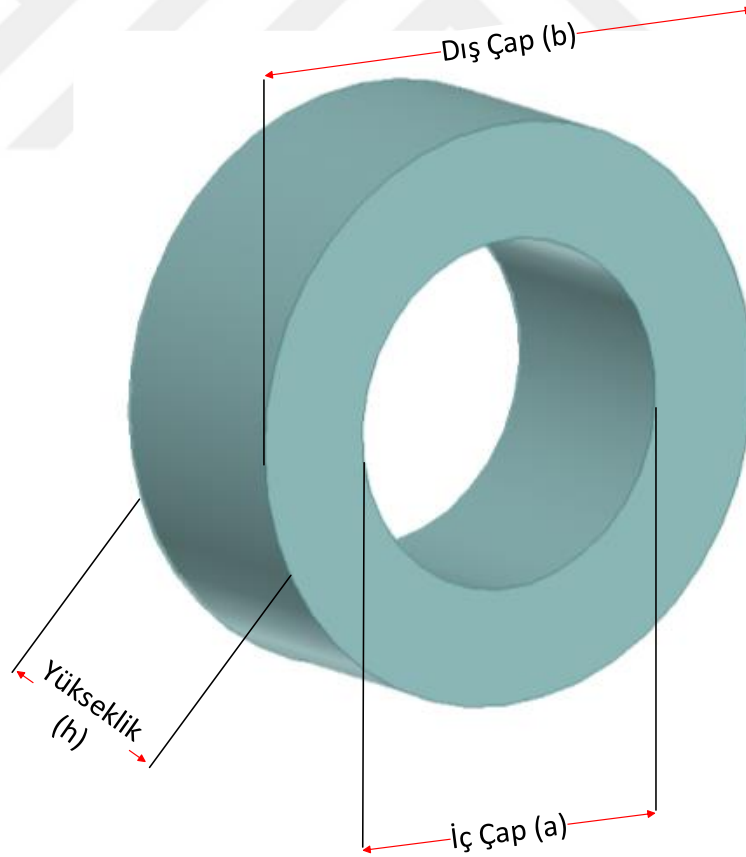
Şekil 3-1: Toroid şekilli manyetik enerji hasatlayıcı

Akım trafosu mantığında çalışan bu hasatlayıcıların eşdeğer devresi basitçe Şekil 3-2'deki gibi gösterilebilir.



Şekil 3-2. Elektromanyetik enerji hasatlayıcının eşdeğer devresi

Toroid nüveler boyutsal olarak Şekil 3-3'te görüldüğü gibi iç çap, dış çap ve yükseklik değişkenlerine sahiptir. Bu değişkenlerin hasatlayıcı tarafından elde edilen enerji üzerinde önemi çok büyüktür. Nitekim hasatlanan enerji miktarı bu değişkenlere bağlı olarak değişmektedir.



Şekil 3-3. Toroid nüve değişkenleri

Elektromanyetik alan enerji hasatlayıcılar, Faraday, Ampere ve Lenz Kanunları ilkelerine göre çalışır. Bir nakil hattından geçen akım vasıtasıyla iletkenin etrafında bir manyetik alan oluşturur. Bu manyetik alandan gerilim indüklenmesi ile İHA'ların bataryalarını şarj etmeye yetecek kadar güç elde edilebilir.

Manyetik alan şiddeti (H) uygulanan akıma bağlı olup akım değeri arttıkça manyetik alan şiddeti de artar. Toroid nüve için manyetik alan şiddeti Denklem 3.1'deki gibidir.

$$\vec{H} = \frac{i}{2\pi r} \quad (3.1)$$

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (3.2)$$

Manyetik alan şiddeti, manyetik geçirgenlik ile birlikte nüvedeki manyetik akı yoğunluğunu belirler. Nitekim manyetik akı yoğunluğu manyetik geçirgenlik ile manyetik alan şiddetinin çarpımı ile elde edilmektedir. Manyetik geçirgenlik ise Denklem 3.2'de görüldüğü üzere havanın manyetik geçirgenliği ile malzemenin manyetik bağıl geçirgenliğinin çarpımıdır. Toroid nüvedeki herhangi bir r yarıçapındaki manyetik akı yoğunluğu Denklem 3.4'teki gibi ifade edilir. Toroid model için Ampere Kanunu uygulandığında toroid içerisinde herhangi bir r yarıçapındaki manyetik akı yoğunluğu Denklem 3.4'teki gibidir [3].

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (3.3)$$

$$\vec{B} = \mu \frac{icos(wt)}{2\pi r} \quad (3.4)$$

Burada B manyetik akı yoğunluğunu, i hattan geçen akımı, μ havanın manyetik geçirgenliği olan $4\pi \times 10^{-7}$ H/m (μ_0) ile nüve malzemesinin bağıl geçirgenliğinin (μ_r) çarpımını temsil etmektedir. Manyetik akı yoğunluğu değerinden toroiddeki akı (Φ_{21}) ve buradan toroid ile hattın ortak endüktansı (L_{21} veya M) ve toroidin öz endüktansı (L_{22}) hesaplanabilir. Ortak ve öz endüktanslar vasıtasıyla, toroid tarafından endüklenen gerilime (V_2) ve hasatlayıcıdaki manyetik akı yoğunluğunda depolanan manyetik enerjiye ulaşılabilir.

Endüktans bir endüktörün enerjii manyetik akı yoğunluğu olarak depolayabilme kapasitesi olarak ifade edilebilir. Endüktans değerleri ile endüklenen gerilim, güç yoğunluğu ve

elde edilen enerji arasında önemli bir ilişki olduğu söylenebilir. Toroiddeki manyetik akı, manyetik akı yoğunluğunun alan integrali ile ifade edilip Denklem 3.6'daki gibi gösterilmektedir;

$$\Phi_{21} = \int \vec{B}_1 \cdot d\vec{s}_2 \quad (3.5)$$

$$\Phi_{21} = \frac{\mu \cos(wt)}{2\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right) h \quad (3.6)$$

Nüvedeki ortak endüktans ise toplam akının akıma göre türevi ile sarım sayısının çarpımı ile elde edilir ve Denklem 3.8'deki gibi ifade edilir.

$$L_{21} = L_{12} = M = N_2 \frac{d\Phi_{21}}{di} \quad (3.7)$$

$$M = \frac{\mu}{2\pi} h N_2 \ln\left(\frac{b}{a}\right) \quad (3.8)$$

Öz indüktans ise Denklem 3.9'daki gibi gösterilir.

$$L_{22} = \frac{\mu}{2\pi} h N_2^2 \ln\left(\frac{b}{a}\right) \quad (3.9)$$

Faraday Yasası'na göre toroidde endüklenen gerilim nüvedeki manyetik akının zamana bağlı türevi ile nüve üzerindeki sarım sayısının çarpımı ile elde edilmektedir ve Faraday Yasası'na göre toroidde endüklenen gerilim;

$$V_2 = -N_2 \frac{d\Phi_{21}(t)}{dt} \quad (3.10)$$

$$V_2 = N_2 \mu i(t) f \sin(wt) \ln\left(\frac{b}{a}\right) h \quad (3.11)$$

Endüklenen en büyük gerilim ise Denklem 3.12'deki gibidir.

$$V_2 = N_2 \mu i f \ln\left(\frac{b}{a}\right) h \quad (3.12)$$

Denklem 3.11’da da görüldüğü üzere toroid yapılı bir elektromanyetik enerji hasatlayıcı tarafından endüklenen gerilim;

- Toroidin etrafındaki sarım sayısı N_2 ,
 - Nüvenin manyetik geçirgenliği μ ,
 - Frekans f ,
 - İletim hattından geçen akım miktarı i ,
 - Nüvenin iç ve dış çapları a ve b
 - Nüvenin yüksekliği h ,
- değişkenlerinden etkilenmektedir [55].

Ayrıca endüklenen gerilim ortak endüktans ile beraber Denklem 3.13’teki gibi elde edilebilir.

$$V_2 = M i f \sin(\omega t) 2\pi \quad (3.13)$$

Denklem 3.13’te açıkça görüldüğü gibi hasatlayıcı tarafından endüklenen gerilim ortak endüktans değerinden doğrudan etkilenmektedir. Buradan açıkça ortak endüktansın endüklenen gerilim üzerindeki etkisinin önemi görülmektedir. Ayrıca daha önce de bahsedildiği ve Denklem 3.11 ve Denklem 3.12’de görüldüğü gibi nüve boyut değişkenlerinin endüklenen gerilim, dolayısıyla hasatlanan enerji üzerinde büyük bir etkisi vardır. Endüklenen gerilimin değeri nüve iç çapının azalması, dış çapının ve yüksekliğinin artması ile artmaktadır.

Manyetik akı yoğunluğunda depolanan manyetik enerji ise aşağıdaki eşitlikle ifade edilir;

$$W = \frac{1}{2} L i^2 \quad (3.14)$$

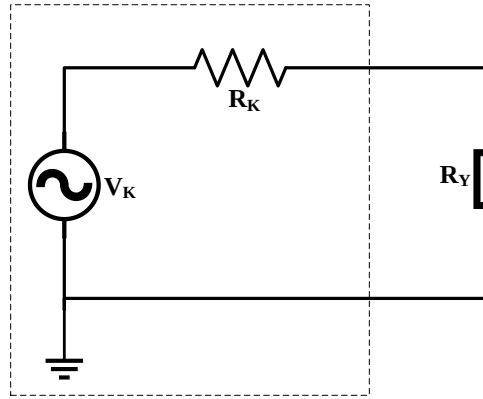
Daha önce de bahsedildiği ve Şekil 3-2’de görüldüğü üzere toroid yapılı elektromanyetik enerji hasatlayıcılar iletim hattının birincil, toroid üzerindeki sargıların ise ikincil sargı olarak kabul edildiği bir trafo mantığında çalışır. Bu durumda hasatlayıcıdaki manyetik akı yoğunluğunda depolanan manyetik enerji Denklem 3.15’teki gibi ifade edilebilir.

$$W = \frac{1}{2}(L_{11}i_1^2 + L_{22}i_2^2 + 2Mi_1i_2) \quad (3.15)$$

Bu bağıntıya göre hasatlayıcı vasıtasıyla elde edilen enerji hattın üzerindeki akım (i_1), sargılardan geçen akım (i_2), ortak indüktans (M) ve öz indüktans (L_{22}) değerlerinden etkilenmektedir. Bu yüzden indüktans değerlerinin hasatlanan enerji ve güç yoğunluğu üzerinde oldukça önemli olduğu söylenebilir. Dolayısıyla enerji hasatlayıcıyı güç yoğunluğu ve elde edilen enerji açısından en uygun şekilde tasarlayabilmek için ortak ve öz endüktans değerlerini hesaplayabilmek gerekir.

3.2 MAKSİMUM GÜÇ AKTARIMI

Maksimum güç aktarımı bir yüke maksimum gücün aktarılabilmesi için gereken koşulları ifade etmektedir. Güç aktarılmak istenen cihaza elde edilen gücü en iyi şekilde aktarabilmek için yükün değeri önemlidir. Bu yüzden maksimum güç aktarımı uygulanması çok temel bir kavramdır. Hasatlayıcıda endüklenen gerilim vasıtasıyla en yüksek güce ulaşabilmek için maksimum güç aktarımı yapılmalıdır. Maksimum güç aktarımı için kaynak empedansı ile yük empedansının birbirine eşit olması gerekmektedir.



Şekil 3-4. Maksimum güç aktarımı

Elektromanyetik hasatlayıcılar özelinde maksimum güç aktarımı yapılması için nüve kayıpları ve nüvenin sargı direnci ile güç aktarımı yapılacak olan yük dirençleri arasında Şekil 3-4'teki gibi uygun bir eşleşme olması gerekmektedir. Bu durum nüve kayıpları ile sargı direncinin yük direncine eşit olduğunda gerçekleşir. Bu durumda, yüke aktarılan güç en yüksek değerine ulaşır ve maksimum güç aktarımı sağlanmış olur.

3.3 ELEKTROMANYETİK ENERJİ HASATLAYICILARDA KULLANILAN NÜVE GEOMETRİLERİ

Elektromanyetik enerji hasatlayıcılarda kullanılan nüveler farklı geometrilere sahip olabilirler. Farklı geometrilere sahip her nüvenin kendine göre artıları ve eksileri söz konusudur. Nüve geometrisi, manyetik performansın yanı sıra üretim maliyeti, montaj kolaylığı gibi bazı faktörlere bağlı olarak seçilir. Elektromanyetik enerji hasatlayıcılar tasarlanırken yaygın olarak kullanılan bazı nüve geometrileri:

3.3.1 Hava Nüvesi

Hava nüvesi enerji hasatlayıcılar için en basit ve temel geometridir. Hava nüveleri manyetik malzeme yerine bir hava boşluğundan oluşan bir nüve çeşididir ve sadece sargılardan oluşur. Herhangi bir manyetik nüveye sahip olmadığı için demir kayıpları yoktur. Maliyeti çok düşük ve üretimi oldukça basittir. Bununla birlikte hava nüvelerinin yapısında herhangi bir manyetik malzeme olmadığı için düşük manyetik geçirgenlik sebebiyle manyetik akı yoğunluğu ve endüktans değerleri açısından sınırlanmaktadır. Dolayısıyla hasatlanan enerjinin miktarı da manyetik malzeme kullanılan hasatlayıcılara nazaran oldukça düşük olacaktır [56], [57].

3.3.2 U Nüve

U tipi nüveler, elektromanyetik enerji hasatlamada yaygın olarak kullanılan bir nüve geometrisidir. Nüve şekli bir halkanın yarısı gibi U şeklinde olduğu için bu isimle adlandırılmışlardır. U nüveler, açık yapıları sebebiyle sargıların kolayca sarılabildikleri için üretim süreçleri hızlı ve kolaydır. Ayrıca yine açık yapıları sebebiyle hat üzerine montajları da kolay olmaktadır. Bu avantajlara rağmen yapıları toroid modelin yarısı nispetinde olduğu için endüktans değerleri ve dolayısıyla endüklenen gerilim ve elde edilen güç açısından kısıtlanmaktadır [15].

3.3.3 Toroid Nüve

Toroid nüveler manyetik akı yoğunluğunun halka etrafında bir daire içinde hareket etmesine izin verdikleri için çok az kaçak manyetik akıya sahiptirler. Ayrıca toroid nüveler hasatlama esnasında hattı tam olarak çevreleyebildikleri için yüksek endüktans değerleri elde

edilmesini sağlarlar. Bundan dolayı endüklenen gerilim ve dolayısıyla hasatlanan güç diğer nüve şekillerine göre oldukça fazla olmaktadır. Tüm bu nedenlerden dolayı elektromanyetik enerji hasatlamada kullanılabilecek en kusursuz nüve yapısı oldukları söylenebilir. Toroid nüveleri elle sarmak oldukça zordur. Özellikle tur sayısı arttığında sarım işlemi oldukça zorlaşır ve özel makine kullanımını gerektirebilir. Kapalı yapılarından dolayı montajları zor olmaktadır [58].

3.3.4 E Nüve

Elektromanyetik enerji hasatlamada kullanılabilen E şekilli nüvelerin hatta montajları ve sarımları kolaydır fakat kaçak manyetik akının fazla olması en büyük dezavantajdır [59].

Bu nüvelerin haricinde hattan uzakta iken gerilim indüklemek üzerine kullanılan papyon, sarmal ve selenoid vb. şekilli başka nüveler de mevcuttur.

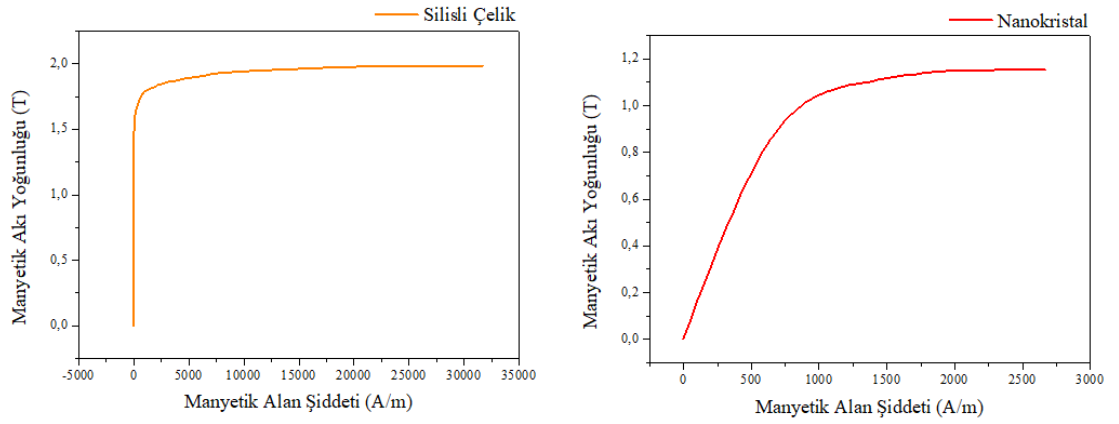
Çalışmada analizler ve deneyler için nüve geometrisi olarak yüksek güç yoğunluğu ve düşük kaçak manyetik akıya sahip olmaları gibi avantajlarından dolayı toroid şekilli nüveler belirlenmiştir. Belirlenen bu nüveler farklı manyetik malzemeler ile farklı boyutlarda ayrı ayrı analiz edilmiştir.

3.4 ELEKTROMANYETİK ENERJİ HASATLAYICILARDA KULLANILAN NÜVE MALZEMELERİ

Elektromanyetik enerji hasatlayıcılarda hat akımı, sarım sayısı, ağırlık, frekans, maliyet gibi bazı değişkenlere ve durumlara bağlı olarak çeşitli malzemeler kullanılabilmektedir. Ferromanyetik malzemeler, manyetik akıyı daha yoğun bir şekilde geçirdiği için en sık kullanılan malzemelerdir. Malzeme seçimi, uygulama gereksinimlerine göre yapılmalıdır. Nüveler elektromanyetik hasatlayıcıların manyetik devresini oluşturdukları için tasarlanırken seçilecek nüve malzemelerinde aranılan bazı değişkenler vardır. Bunlar yüksek bağl geçirgenlik μ_r , yüksek doyum akı yoğunluğu B_s ve düşük nüve kaybı olarak sıralanabilir. Elektromanyetik enerji hasatlayıcıların nüve kısımlarında genel olarak silikon katkılı çelik, nikel katkılı çelik, çelik 1010 gibi farklı çelikler, Mn-Zn ve Ni-Zn gibi farklı feritler, amorf, nanokristal ve demir tozu gibi farklı malzemeler kullanılmaktadır.

Çalışma kapsamında mukayese açısından farklı boyutlarda farklı malzemeler kullanılmıştır. Kullanılan malzemeler silisli çelik, nanokristal ve farklı manyetik geçirgenliğe sahip üç çeşit ferit olarak seçilmiştir. Silisli çelik çok yüksek μ_r 'ye sahip olmamakla beraber çok

yüksek B_s 'ye sahiptir. Bu yüzden yüksek akım değerlerinde doyum sorununa karşı oldukça iyi sonuç vermesi beklenmektedir. Nanokristal malzemeler ise oldukça yüksek μ_r 'ye sahiptirler. B_s 'leri silisli çelikler kadar yüksek olmasa da feritlere göre nispeten daha yüksektir. Feritler ise nanokristal ve silisli çeliğe nazaran hem düşük μ_r 'ye hem de düşük B_s 'ye sahip olmakla birlikte bu malzemelere göre çok daha düşük nüve kayıplarına sahiptirler. Ayrıca Şekil 3-6'da bu çalışmada kullanılan nanokristal ve silisli çelik malzemelerinin B-H eğrileri verilmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan doğrusal B-H eğrisine sahip ferit malzemelerin manyetik geçirgenlikleri ise sırasıyla; Ferit CF139 için 2100, Ferit N30 Mn-Zn için 4300 Ferit 4W620 için 620'dir.



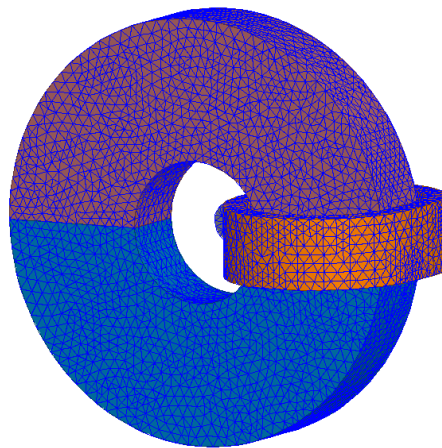
Şekil 3-5. Kullanılan doğrusal olmayan malzemelerin B-H eğrileri

4. TASARIM VE ELEKTROMANYETİK ANALİZLER

Çalışmanın bu kısmında belirlenen boyutlarda ve malzemelerde tasarlanan hasatlayıcıların Sonlu Elemanlar Yöntemi ile birtakım analizleri yapılmıştır. Analizler kapsamında her bir nüvenin hat akımı karşısında manyetik akı yoğunluğu değişimleri ile ortak ve öz endüktans değerleri incelenmiştir. Ayrıca hava aralığının farklı hat akımı koşullarında hasatlayıcılara olan etkisinin üzerinde durulmuştur.

4.1 SONLU ELEMENLAR YÖNTEMİ

Sonlu elemanlar yöntemi (SEY) belirli bir bölgedeki değişimleri kısmi diferansiyel denklemlerle gösterilebilen problemleri çözmek amacıyla ortaya atılmıştır. SEY elektrik – elektronik, makine, inşaat, biyomedikal gibi birçok mühendislik alanındaki problemlerin bilgisayar yardımıyla çözülmesinde yoğun olarak kullanılmaktadır. SEY yardımıyla çözümü yapılmak istenen bölge sonlu sayıda küçük bölgelere ayrılır. Şekil 4-1’de görülen ve ağ adı verilen bu bölgelerin ayrı ayrı matematiksel olarak modellenmesi ve etkilerinin çözülmesi sonucu yaklaşık çözüme ulaşılabilmektedir. Ağ sayısı ne kadar fazla olursa problemlerin çözümü de o kadar doğru olmaktadır. Karmaşık yapıların davranışlarının matematiksel olarak modellenmesine ve benzetimlerinin yapılmasına izin veren bu yöntem ile karmaşık ve çözümü uzun zaman alan problemlerin analizleri yüksek doğrulukla ve kısa sürede çözümlenmektedir [60].



Şekil 4-1. SEY ile modellenen hasatlayıcının ağ yapısı

Elektrik – elektronik mühendisliğinde manyetik alan, elektrik alan gibi belirli bir bölgede daima olan büyüklüklerin sayısal çözümleri SEY ile yaklaşık olarak bulunabilir. Elektrik makinelerinin modellenenbilmesine olanak tanıyan SEY manyetik akı yoğunluğu, endüktans değerleri, endüklenen gerilim, kayıplar, girdap akımları gibi önemli değişkenlerin yüksek doğrulukta hesaplanmasını sağlayabilmektedir [61]. Transformatör mantığında çalışan elektromanyetik enerji hasatlayıcılarının tasarlanması için de bahsi geçen değişkenler büyük önem arz ettiği için SEY yardımıyla tasarlanıp modellenmeleri büyük avantaj ve kolaylık sağlamaktadır. Bu sayede çok sayıda prototip oluşturmaya gerek kalmaksızın SEY yardımıyla hasatlayıcıların optimizasyonu yapıp en optimum boyut, malzeme ve şekil ortaya konup sadece o modelin prototipi oluşturulup deneysel aşamaya kolaylıkla geçilebilir. Bundan dolayı tasarlama ve modelleme aşamasında SEY kullanılması gerek maliyet gerekse de zamansal açıdan büyük kolaylık sağlamaktadır.

4.2 NÜVE YAPISININ VE MALZEMESİNİN ENDÜKTANS ÜZERİNE ETKİSİ

Endüktans değerleri hasatlayıcı tarafından endüklenen gerilim için önemli olmakla beraber endüktans değeri ne kadar yüksekse hasatlayıcı tarafından endüklenen gerilim ve hasatlayıcıdaki güç yoğunluğu da o kadar yüksek olmaktadır. Bu bağlamda güç yoğunluğu ile endüktans arasında önemli bir ilişki söz konusu olup hasatlayıcıdaki güç yoğunluğu ve elde edilen enerji endüktans değerlerine bağlıdır.

İnsansız hava araçlarının en büyük dezavantajı sayılabilecek ağırlık sorunundan dolayı hasatlayıcılar tasarım esnasında boyut ve ağırlık açısından kısıtlanmaktadır. Daha büyük boyutlu nüve daha yüksek indüktans değeri ve güç yoğunluğu sağlamaktadır lâkin bu durum nüvenin daha ağır olmasını beraberinde getirir. Bu yüzden tasarımlar yapılırken ağırlık ya da endüktans değerlerinin birinden ödün vermek gerekmektedir. Bu yüzden hasatlayıcı ağırlığı ve performansı yönünden en optimum şekilde tasarlanmalıdır.

Toroid nüvelerin boyutları piyasa koşulları ve ağırlık ile boyut kıstasları göz önünde bulundurularak 63x38x20, 61x35,5x20, 60x50x20, 60x40x20, 60x30x20, 50x40x20, 50x30x20, 50x28,5x20, 40x30x20, 34x20,5x10, 31,7x19x8 olarak seçilmiş olup değişkenler sırasıyla toroidin dış çap (mm), iç çap (mm) ve yüksekliğini (mm) temsil etmektedir.

Çalışmada tasarlanan hasatlayıcılar teorik olarak ve SEY ile ortak endüktans (M), öz endüktans (L_{22}) ve manyetik akı yoğunluğu (B) açısından hat akımı 0 ila 100 A aralığında 5 A'lık adımlarla arttırılmak suretiyle sarım sayıları 100 tur alınarak analiz edilmiştir. Tablo 4-1'de SEY

analizleri sonucu 30 Amper hat akımında her bir nüve için elde edilen M ve L₂₂ değerleri görülmektedir.

Tablo 4-1. 30 Amper hat akımında SEY ile elde edilen ortak ve öz indüktans değerleri

Nüve Boyutları (mm) Dış Çap x İç Çap x Yükseklik		63x38x20	61x35,5x20	60x50x20	60x40x20	60x30x20	50x40x20	50x30x20	50x28,5x20	40x30x20	34x20,5x10	31,7x19x8
Nano- kristal	L ₂₂ (mH)	25,60481	27,31779	9,693379	20,64133	34,51365	11,51202	25,48151	28,0171	14,4319	12,3692	9,961792
	M (mH)	0,24863	0,265826	0,090467	0,19949	0,339824	0,109547	0,25015	0,27436	0,139663	0,120096	0,09662
Ferit CF139	L ₂₂ (mH)	43,2047	46,18076	15,96192	34,71888	58,94637	19,29066	43,44228	47,82114	24,6476	21,66008	17,51518
	M (mH)	0,42466	0,45434	0,152312	0,34076	0,58292	0,18767	0,42954	0,4729	0,24198	0,21271	0,17222
Ferit N30 Mn-Zn	L ₂₂ (mH)	87,65491	93,78235	31,98107	70,38015	119,8656	38,86416	88,37015	97,31548	49,96094	43,92801	35,53204
	M (mH)	0,86926	0,9312358	0,312644	0,69767	1,1917	0,38276	0,87812	0,96775	0,4952	0,435384	0,35244
Ferit 4W620	L ₂₂ (mH)	13,25307	14,1218	5,14791	10,69864	17,85218	6,056972	13,18801	14,50845	7,600172	6,64523	5,380665
	M (mH)	0,124967	0,13401	0,044495	0,100705	0,171335	0,05481	0,1271	0,140166	0,071262	0,06286	0,05099
Silisli Çelik	L ₂₂ (mH)	136,4498	139,4026	54,60816	109,284	164,4343	54,99343	110,3911	118,9455	55,71066	38,18982	28,8252
	M (mH)	1,356421	1,38738	0,538724	1,086444	1,637694	0,544025	1,098376	1,184597	0,55242	0,37834	0,28532

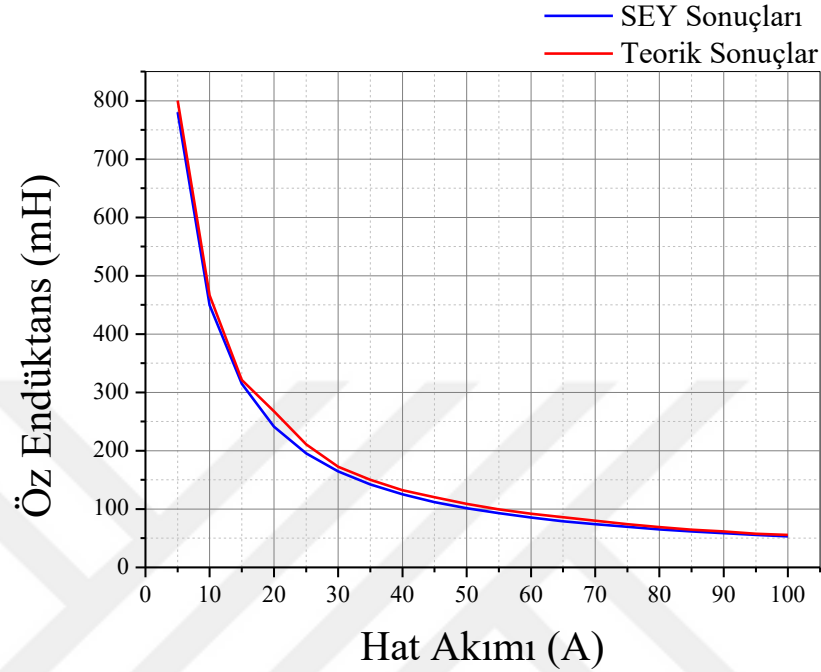
Denklem 3.8 ve 3.9'a göre M ve L₂₂ değerleri nüvenin yüksekliği, iç ve dış çapları, sarım sayısı ve malzemenin bağlı geçirgenliğine bağlıdır. Farklı boyutlardaki ve malzemelerdeki nüvelerle yapılan analizlerden çıkan sonuçlara göre Tablo 4-1'de görüldüğü gibi her nüve malzemesi için en yüksek endüktans değerlerine sahip olan hasatlayıcılar küçük iç çap, büyük dış çap ve büyük yüksekliğe sahip olan 60x30x20 boyutlarındaki hasatlayıcılar olmuştur. Bundan dolayı 30 A hat akımında endüklenen gerilim ve dolayısıyla hasatlanan enerji açısından da en uygun boyutlara sahip modelin bu olduğu söylenebilir.

Tablo 4-2. 30 Amper hat akımında teorik olarak hesaplanan ortak ve öz indüktans değerleri

Nüve Boyutları (mm) Dış Çap x İç Çap x Yükseklik		63x38x20	61x35,5x20	60x50x20	60x40x20	60x30x20	50x40x20	50x30x20	50x28,5x20	40x30x20	34x20,5x10	31,7x19x8
Nano- kristal	L ₂₂ (mH)	24,93	26,6353	9,0049	19,986	34,3226	10,9664	24,96	28,647	13,96425	12,054	9,6681
	M (mH)	0,2493	0,266353	0,090049	0,19986	0,343226	0,109664	0,2496	0,28647	0,139643	0,12054	0,096681
Ferit CF139	L ₂₂ (mH)	42,46608	45,47266	15,31501	34,05907	58,22436	18,74406	42,90935	47,21799	24,16529	21,2493	17,19909
	M (mH)	0,424661	0,454727	0,15315	0,340591	0,582244	0,187441	0,429094	0,47218	0,241653	0,212493	0,171991
Ferit N30 Mn- Zn	L ₂₂ (mH)	86,95435	93,11068	31,35931	69,74	119,2213	38,38069	87,86201	96,68445	49,48132	43,51046	35,21719
	M (mH)	0,869544	0,931107	0,313593	0,6974	1,192213	0,383807	0,87862	0,966845	0,494813	0,435105	0,352172
Ferit 4W620	L ₂₂ (mH)	12,5376	13,42526	4,521575	10,05553	17,19005	5,53396	12,66848	13,94055	7,134515	6,2736	5,07783
	M (mH)	0,125376	0,134253	0,045216	0,100555	0,171901	0,05534	0,126685	0,139405	0,071345	0,062736	0,050778
Silisli Çelik	L ₂₂ (mH)	136,241	144,42	52,505	108,05	172,42	60,93	119,06	124,167	57,2	35,311	28,22
	M (mH)	1,36241	1,4442	0,52505	1,0805	1,7247	0,6093	1,1906	1,24167	0,572	0,35311	0,2822

Tablo 4-2'de teorik olarak hesaplanmış ortak ve öz endüktans değerleri görülmektedir. Teorik analizlerden çıkan sonuçlara göre en yüksek endüktans değerlerine sahip olan hasatlayıcılar SEY sonuçlarında olduğu gibi küçük iç çap, büyük dış çap ve büyük yüksekliğe sahip olan

60x30x20 boyutlarındaki hasatlayıcılar olmuştur. Bu sonuçlara göre de 30 A hat akımında endüklenen gerilim ve dolayısıyla hasatlanan enerji açısından en uygun modelin bu olduğu söylenebilir.



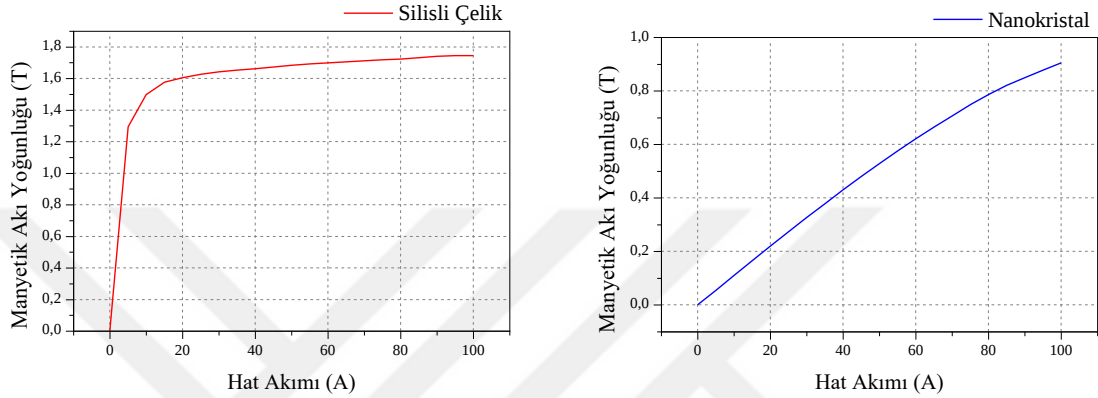
Şekil 4-2. 60x30x20 silisli çelik nüvenin SEY ile ve teorik olarak elde edilmiş hat akımına göre öz endüktans değerlerinin değişimi

Her iki tablodan da görüldüğü üzere teorik olarak elde edilen sonuçların SEY analizleri sonucu ulaşılan değerlere oldukça yakın olduğu görülmektedir. Ayrıca Şekil 4-2'deki grafikte teorik olarak ve SEY analizleri sonucu hat akımına göre öz endüktansların değişimleri verilmiştir. Grafikte görülen sonuçlara göre SEY ve teorik olarak elde edilen değerlerin her hat akımında birbirine çok yakın olduğu açıktır. Teorik ve SEY analizlerinin her ikisinde de hava aralığı kullanılmamıştır.

4.3 HAT AKIMININ NÜVE ÜZERİNDEKİ MANYETİK AKI YOĞUNLUĞUNA ETKİSİ

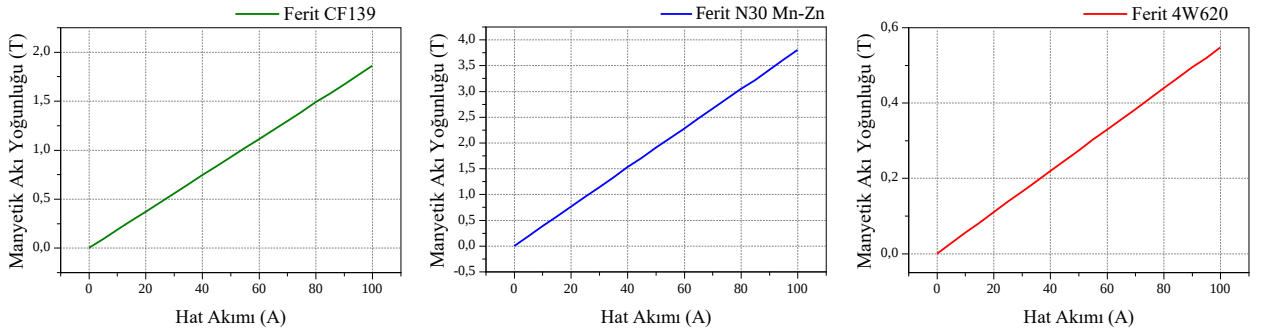
Çalışmanın devamında hat akımı değerinin hasatlayıcının performansına etkisi incelenmiştir. Akım değerleri 0-100 A aralığında olmak üzere her adımda 5 A arttırılarak analiz edilmiştir. Her hat akımı koşulunda manyetik akı yoğunluğu değerleri hesaplanarak hat akımının,

hasatlayıcılar üzerindeki etkisi görülmeye çalışılmıştır. Analizler kapsamında manyetik akı yoğunluğu değerleri için her nüvenin gövdesinin orta kısmında bir nokta belirlenmiştir. Bu nokta üzerindeki manyetik akı yoğunluğu değerlerine göre analizler yapılmıştır. Bu analizlerde tasarımlar arasında en yüksek endüktans değerine sahip olan 60x30x20 boyutlu nüve tasarımı referans alınmıştır.



Şekil 4-3. 60x30x20 silisli çelik ve nanokristal nüvelerin Hat Akımı / Manyetik Akı Yoğunluğu grafikleri

Analizlerde uygulanan akım değerlerinde en yüksek manyetik akı yoğunluğu değerine ulaşan malzeme yaklaşık 1,8 T ile Şekil 4-3'teki grafiklerde görüldüğü gibi Silisli Çelik olmuştur. Silisli Çelikli nüvenin 1,6 T'dan sonra doyum bölgesinde çalışmaya başladığı görülmektedir. Nanokristal nüve doyuma ulaşma konusunda Silisli Çelikten daha iyi bir performans ortaya koymuştur. Fakat hat akımı 100 A iken yaklaşık 0,9 T gibi bir manyetik akı yoğunluğu değerine ulaşarak doyum bölgesine yaklaşmıştır. Silisli Çelik malzemeli nüve ise henüz 20 A hat akımında 1,6 T manyetik akı yoğunluğuna ulaşmıştır. Malzemelerin hat akımı karşısındaki manyetik akı yoğunluğu değerleri beklendiği gibi Şekil 3.6'daki B-H eğrilerine benzer şekilde olmuştur. B-H eğrilerinden de görüleceği üzere iki malzeme arasında daha yüksek bağıl geçirgenliğe sahip olan Silisli Çelik hat akımı 20 A'ı geçtiğinde doyuma ulaşmaya başlamıştır. Fakat nanokristal 100 A akım değerinde doğrusal bölgenin dışına çıkmaya başlamıştır.

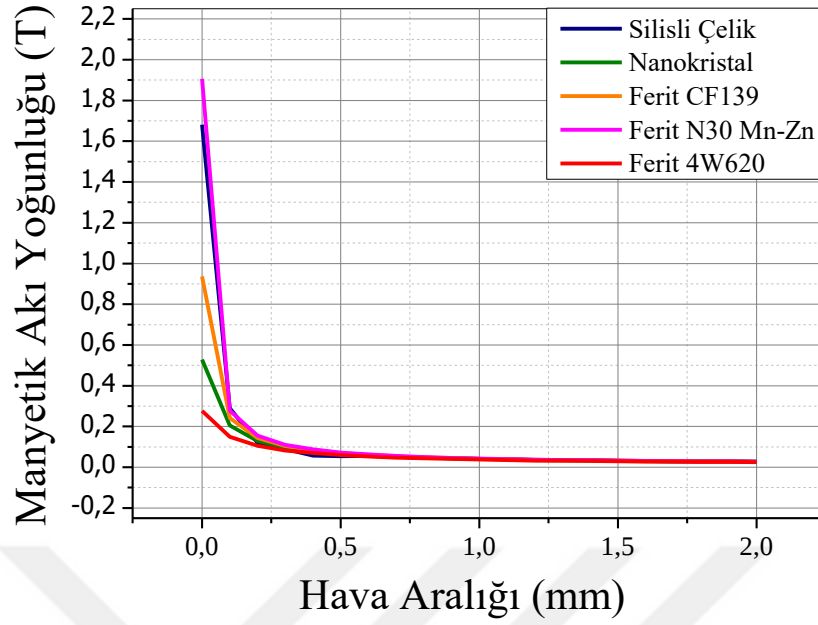


Şekil 4-4. Sabit manyetik geçirgenliğe sahip feritlerin Hat Akımı / Manyetik Akı Yoğunluğu grafikleri

Doğrusal B-H eğrisine sahip ferit malzemelerin Hat Akımı / Manyetik Akı Yoğunluğu grafikleri ise Şekil 4-4'te görülmektedir. Bu malzemelerden en büyük manyetik geçirgenliğe dolayısıyla en büyük manyetik akı yoğunluğuna sahip olan malzeme Ferit N30 Mn-Zn olmuştur. Onu sırasıyla Ferit CF139 ve Ferit 4W620 takip etmiştir.

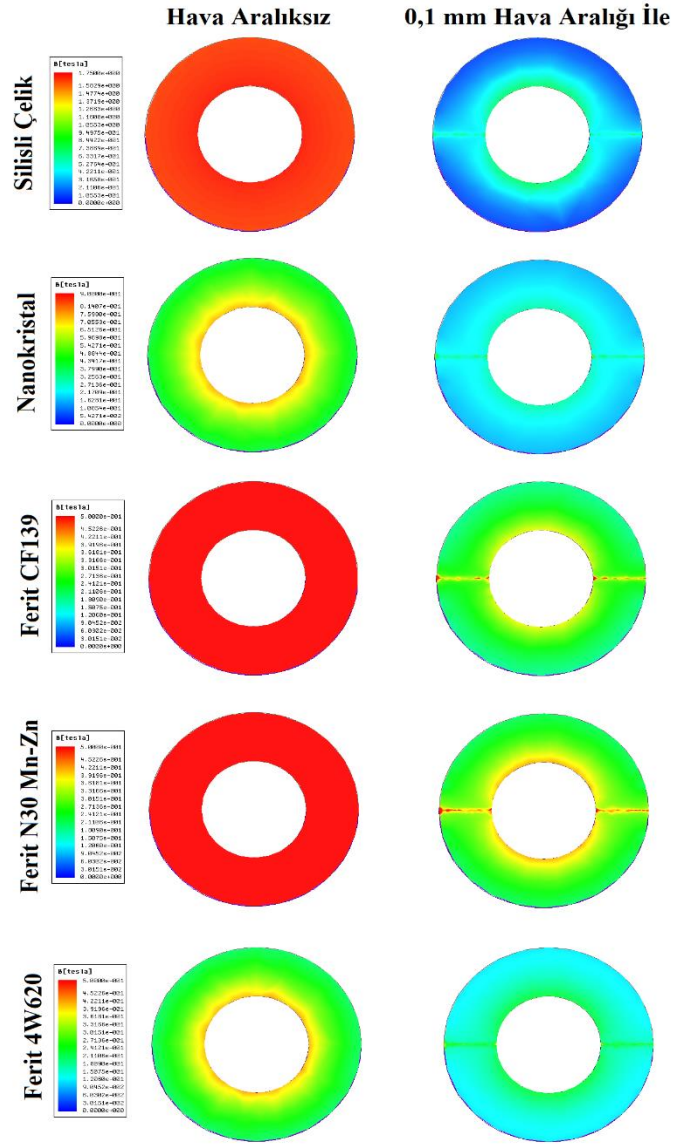
4.4 PARÇALI NÜVEDE HAVA ARALIĞININ MANYETİK AKI YOĞUNLUĞUNA ETKİSİ

Çalışmanın bu kısmında hava aralığının hasatlayıcı performansına ve doyum sorununa nasıl etki ettiğini görmek üzere analizler yapılmıştır. Elektromanyetik enerji hasatlayıcıların en büyük sorunlarından biri olan manyetik malzemenin doyuma gitmesi sorunu ile başa çıkmak için kullanılan en yaygın yöntemlerden birisi nüveye bir hava aralığı eklemektir. Çeşitlerine göre nüve malzemeleri hat akımına karşı farklı davranışlar göstermektedirler. B-H eğrisine göre hat akımı belirli bir sınırı aştıktan sonra nüveler doyuma gitmektedir ve bunun sonucunda nüvenin endüktans değerleri azalmaktadır. Bu durum doğrudan hasatlayıcı tarafından endüklenen gerilimi ve dolayısıyla hasatlanan gücü etkilemektedir. Bunun önüne geçmek ve nüvenin tekrar doğrusal bölgede çalışmasını sağlamak için hava aralığı eklenebilmektedir. Hava aralığı manyetik devrenin relüktans değerini arttıracığı için dikkatli seçilmelidir. Bu yüzden çalışmada nüvelere eklenen hava aralıkları 0-2 mm aralığında her adımda 0,1 mm arttırılarak sırasıyla denenmiştir ve her bir uzunluktaki hava aralığında nüvelerin nasıl davrandığı incelenmiştir. Bu analizler için yine 60x30x20 boyutlu tasarım referans alınmıştır.



Şekil 4-5. Hava aralığındaki değişim ve manyetik akı yoğunluğu grafikleri

Nüvedeki hava aralığının 0,1 mm'lik adımlarla arttırılması ile yapılan analizlere göre Şekil 4-5'teki grafikte görüldüğü gibi hava aralığı arttıkça relüktansın artmasından dolayı manyetik akı yoğunluğu hızlı bir şekilde azalmaktadır ve belirli bir noktadan sonra sıfıra yakın sabit bir değer almaktadır. Bu durumda hasatlayıcıların endüktans değerleri ile endüklenen gerilim değerleri, dolayısıyla elde edilen güçler de hava aralığının uzunluğu arttıkça azalacak ve sıfıra yaklaşacaktır. Bu yüzden nüvenin doyuma gitmesinin önüne geçmek için kullanılan hava aralığının iyi seçilmesi ve gereğinden fazla olmamasına dikkat edilmelidir. Şekil 4-6'da 50 A hat akımında nüvelerin hava aralıksız ve hava aralığı 0,1 mm iken manyetik akı yoğunluğu dağılımları verilmiştir.



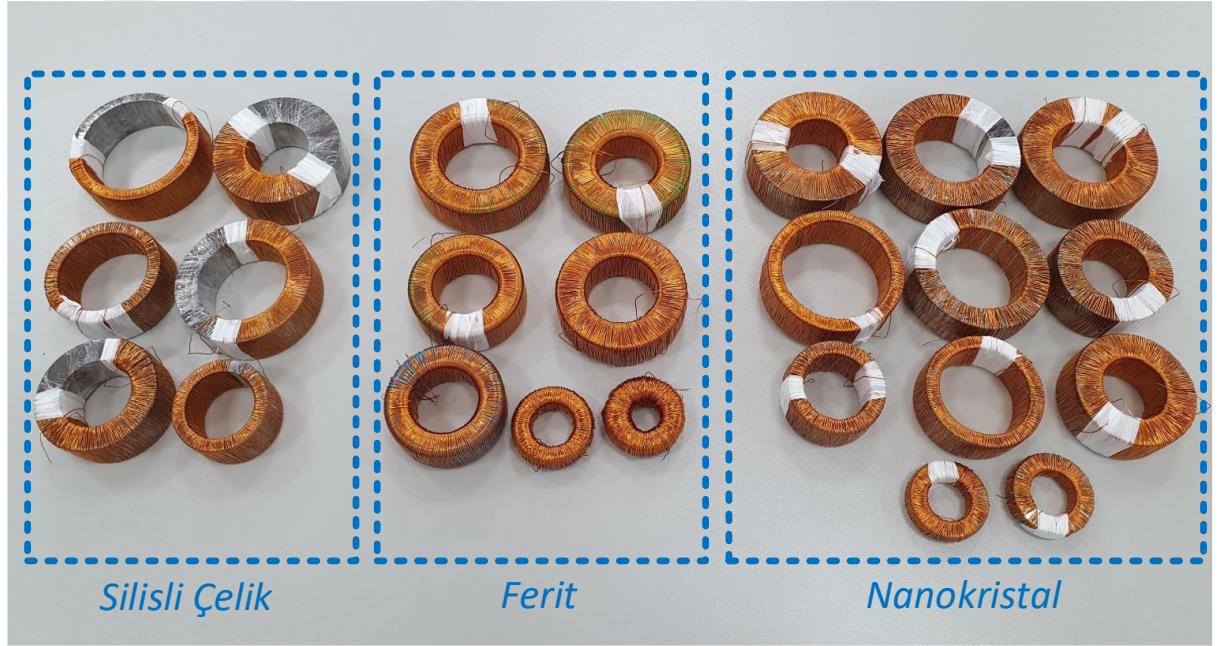
Şekil 4-6. Hava aralıksız ve hava aralıklı nüvelerdeki manyetik akı yoğunluğu dağılımları

Hava aralıksız durumda Silisli Çelik doyum noktasında iken hava aralığı eklendiğinde doğrusal bölgede çalıştığı görülmektedir. Benzer şekilde hava aralıksız iken Nanokristal doyum bölgesinde olmasa da bu bölgeye yakın olarak çalışmaktadır, hava aralığı eklendiğinde ise doğrusal bölgede çalışsa da bu nüve için analizin yapıldığı 50 A hat akımı değerinde hava aralığına gerek duymadığı söylenebilir. Fakat daha yüksek hat akımı değerlerinde bu nüve de doyuma gideceği için hava aralığı eklenmesi göz önünde bulundurulmalıdır. Ferit N30 Mn-Zn ile CF139 ise hava aralığı olmadığından tamamen doyum bölgesindedir. Hava aralığı eklendiğinde ise doğrusal bölgede çalışmaya başlamaktadırlar. Ferit 4W620 malzemeli nüvenin ise nanokristal nüveye benzer şekilde çalıştığı görülmektedir.

5. DENEYSEL ÇALIŞMA

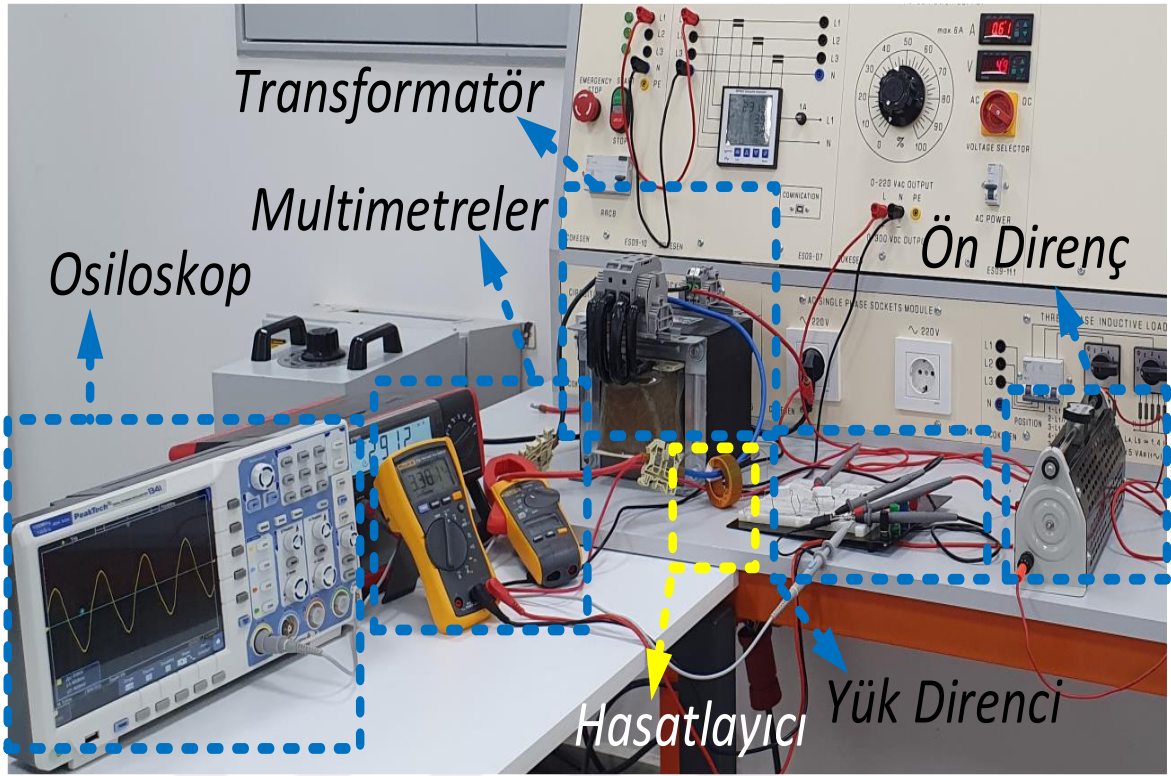
5.1 DENEY DÜZENEGİ

Çalışmada kullanılan sargıları sarılmış nüveler Şekil 5-1’de görülmektedir. Hasatlayıcı nüvelerin sarım sayıları Tablo 5-1’deki sarım değerleri esas alınarak yapılmıştır. İletken olarak 0,35 mm² kesitli bakır iletken seçilmiştir. Çalışmada Silisli Çelik nüveler 60x50x20, 60x40x20, 60x30x20, 50x30x20, 50x40x20, 40x30x20 mm boyutlarda kullanılmıştır. Ferit CF139 malzemeli nüveler 63x38x20, 50x30x20 ve 60x30x20 mm, Ferit 4W620 malzemeli nüveler 61x35,5x20 ve 31,7x19x8 mm, Ferit N30 Mn-Zn malzemeli nüveler ise 50x28,5x20 ve 34x20,5x10 mm boyutlarındadır. Nanokristal nüveler ise tüm boyutlarda kullanılmıştır.



Şekil 5-1. Çalışmada kullanılan nüveler

Deneyde hat akımını istenilen seviyelere çıkarabilmek için 220V:12V çevirme oranına sahip, 50/60 Hz, 1.5 kVA’lık bir transformatör ve hat akımını hassas bir şekilde ayarlayabilmek için 10 Ohm, 5 A’lık bir reosta ön direnç olarak kullanılmıştır. Hat akımını takip etmek üzere bir pens ampermetre, endüklenen gerilimi ve yük tarafından çekilen akımı ölçmek için multimetreler ve osiloskop kullanılmıştır. Kurulan deney düzeneği Şekil 5-2’de görülmektedir.



Şekil 5-2. Deney düzeneği

5.2 NÜVELERİN AL DEĞERLERİ

Tasarlanan nüveleri test etmek için her bir nüvenin endüktans değeri farklı frekanslarda, farklı iletkenlerle ve farklı sarım sayılarında LRC metre vasıtası ile ölçüldükten sonra ortalama AL değerleri hesaplanmıştır. AL değeri bir nüvenin manyetik geçirgenliği ile orantılı olduğu için bu değerlerin hesaplanması hasatlanan güç açısından önemlidir.

AL değeri, bir nüvenin endüktansını ifade eden ve manyetik akı yoğunluğunun birim akım başına olan oranını temsil eden bir değişkendir. Nüvelerin sarım sayıları da ölçülen bu AL değerlerine göre hesaplanmıştır. Deneyler hesaplanan sarım sayıları kullanılarak yapılmıştır. Tablo 5-1’de hasatlayıcıların hesaplanan ağırlıkları, AL değerleri ve sarım sayıları görülmektedir.

Tablo 5-1. Nüvelerin AL değerleri ve sarım sayıları ve ağırlıkları

	Nüve Boyutları (mm)	Ağırlık (g)	Ölçülen Ortalama AL (nH)	Sarım Sayısı (Tur)
Silisli Çelik	60x50x20	126,703	9860	225,1886746
	60x40x20	237,163	23884	144,6876527
	60x30x20	312,733	47091	103,042419
	50x30x20	183,103	32375	124,2739532
	50x40x20	103,97	13700	191,04018
	40x30x20	79,37	21485	152,5517954
Ferit CF139	63x38x20	189,753	4185,5	345,6299186
	50x30x20	118,937	6103,166667	286,2248835
	60x30x20	202,487	8364,5	244,4922005
Ferit 4W620	31,7x19x8	20,02	574,025	933,296417
	61x35,5x20	169,275	1596,75	559,5856124
Ferit N30 MnZn	34x20,5x10	16,605	4797,5	322,8326941
	50x28,5x20	117,74	9329,75	231,4994688
Nanokristal	63x38x20	232,05	15434,58333	179,9855117
	61x35,5x20	255,38	7576,25	256,8963026
	60x50x20	109,745	2042,5	494,770696
	60x40x20	186,205	19034,75	162,0732771
	60x30x20	270,39	6348,333333	280,6435989
	50x40x20	92,845	7115,416667	265,0848048
	50x30x20	153,75	23441	146,0484441
	50x28,5x20	155,545	5370,75	305,1177925
	40x30x20	73,88	14251,33333	187,3083996
	34x20,5x10	29,565	26411	137,5918087
	31,7x19x8	26,19	12867,08333	197,1264702

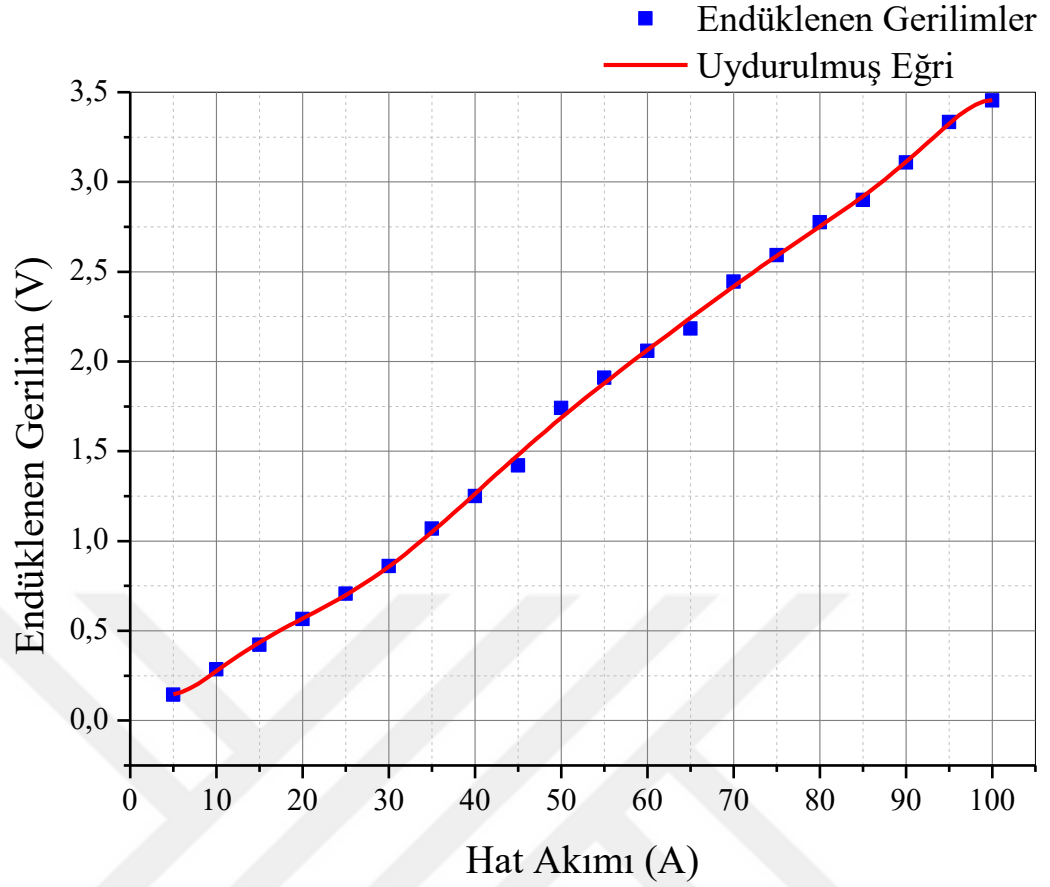
5.3 NÜVELER VASITASIYLA ENDÜKLENEN GERİLİMLER

Bu bölümde hasatlayıcılar vasıtasıyla endüklenen gerilim ölçümleri gösterilmiştir. Deneylerde hat akımı 0-100 A aralığında 5 A'lık adımlarla arttırılarak her bir nüve tarafından endüklenen gerilim değerleri ölçülmüştür. Her malzeme kendi içerisinde değerlendirilmiştir. Tablo 5-2'de Silisli Çelik nüveli hasatlayıcılar tarafından endüklenen gerilimlerin 0-100 A aralığındaki hat akımlarındaki değerleri görülmektedir.

Tablo 5-2. Silisli Çelik nüveler vasıtasıyla endüklenen gerilimler

	Endüklenen Gerilimler (V)					
Nüve Boyutları (mm) →	60x50x20	60x40x20	60x30x20	50x30x20	50x40x20	40x30x20
Hat Akımı (A)						
5	0,013	0,039	0,0256	0,079	0,041	0,143
10	0,0257	0,076	0,0516	0,157	0,079	0,286
15	0,0383	0,115	0,0761	0,233	0,117	0,423
20	0,0505	0,153	0,103	0,309	0,157	0,566
25	0,0635	0,192	0,127	0,383	0,194	0,706
30	0,0762	0,23	0,154	0,457	0,233	0,86
35	0,0893	0,268	0,182	0,535	0,27	1,069
40	0,102	0,307	0,208	0,605	0,308	1,251
45	0,12	0,346	0,237	0,675	0,347	1,42
50	0,129	0,387	0,266	0,743	0,385	1,741
55	0,141	0,425	0,293	0,812	0,422	1,909
60	0,154	0,465	0,325	0,878	0,461	2,06
65	0,168	0,506	0,353	0,952	0,499	2,183
70	0,181	0,542	0,384	1,007	0,538	2,445
75	0,193	0,583	0,419	1,079	0,577	2,592
80	0,207	0,623	0,451	1,148	0,614	2,776
85	0,22	0,662	0,497	1,208	0,652	2,899
90	0,234	0,701	0,53	1,272	0,69	3,108
95	0,247	0,734	0,566	1,324	0,728	3,334
100	0,261	0,757	0,58	1,367	0,768	3,4526

Tablo 5-2’de görüldüğü üzere en yüksek endüklenen gerilimler 40x30x20 boyutlu nüve vasıtasıyla elde edilmiştir. Dolayısıyla silisli çelik nüveler arasında en yüksek güçlerin de bu nüve vasıtasıyla elde edileceği düşünülebilir. Şekil 5-3’te bu nüve tarafından endüklenen gerilimlerin hat akımı karşısında değişimi görülmektedir. Hat akımı 100 A iken 3,4526 V’luk gerilim endüklenmiştir.



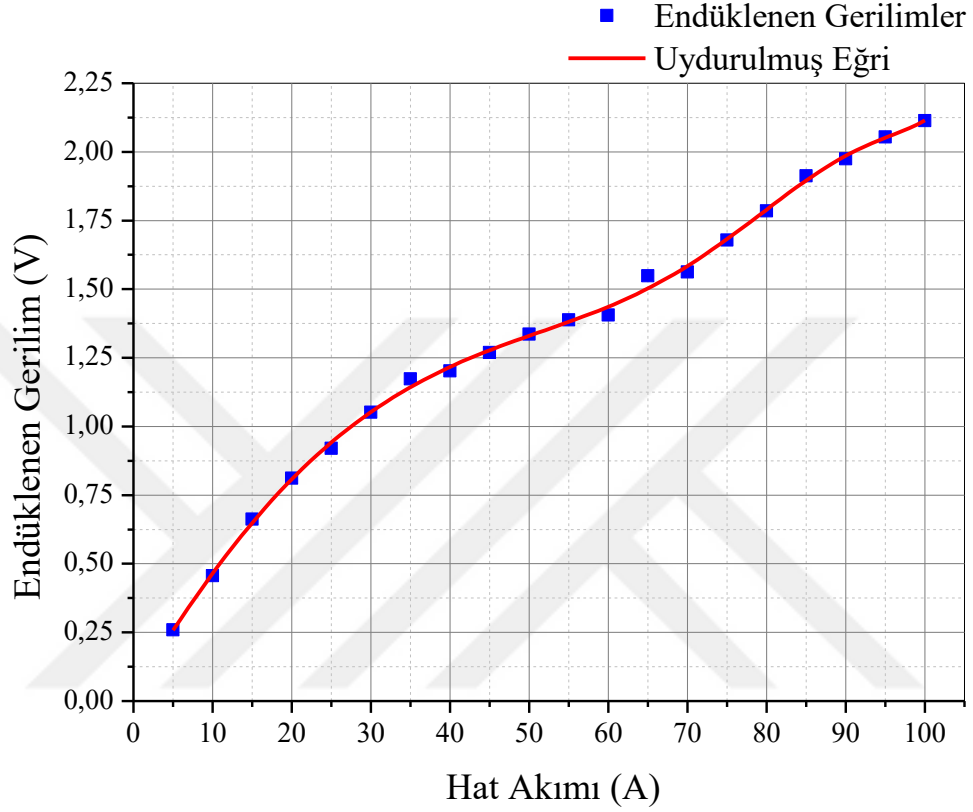
Şekil 5-3. 40x30x20 Silisli Çelik nüve tarafından endüklenen gerilim değerleri

Tablo 5-3'te ise nanokristal nüvelerin endüklediği gerilimlerin hat akımına göre değişimleri görülmektedir.

Tablo 5-3. Nanokristal nüveler vasıtayla endüklenen gerilimler

	Endüklenen Gerilimler (V)										
Nüve Boyutları (mm) →	63x38x20	61x35,5x20	60x50x20	60x40x20	60x30x20	50x40x20	50x30x20	50x28,5x20	40x30x20	34x20,5x10	31,7x19x8
Hat Akımı (A)											
5	0,089	0,0142	0,0103	0,025	0,057	0,0241	0,259	0,024	0,065	0,017	0,082
10	0,176	0,0276	0,0205	0,051	0,111	0,0475	0,456	0,047	0,13	0,033	0,159
15	0,262	0,041	0,0309	0,077	0,168	0,0706	0,662	0,072	0,195	0,048	0,244
20	0,334	0,055	0,0408	0,103	0,223	0,0948	0,812	0,096	0,258	0,064	0,325
25	0,405	0,0691	0,0511	0,129	0,279	0,118	0,92	0,12	0,323	0,081	0,411
30	0,468	0,0827	0,0614	0,155	0,335	0,142	1,052	0,145	0,384	0,096	0,499
35	0,521	0,0962	0,0715	0,182	0,391	0,165	1,173	0,168	0,438	0,114	0,581
40	0,575	0,11	0,0822	0,208	0,448	0,188	1,202	0,192	0,487	0,129	0,662
45	0,623	0,125	0,0921	0,235	0,502	0,213	1,269	0,214	0,544	0,145	0,746
50	0,675	0,137	0,102	0,262	0,563	0,237	1,336	0,238	0,591	0,161	0,834
55	0,723	0,151	0,113	0,287	0,641	0,26	1,388	0,263	0,636	0,178	0,928
60	0,772	0,165	0,123	0,314	0,705	0,285	1,405	0,286	0,683	0,195	1,011
65	0,819	0,179	0,133	0,341	0,759	0,309	1,549	0,307	0,741	0,211	1,094
70	0,871	0,193	0,143	0,369	0,821	0,332	1,562	0,327	0,88	0,227	1,114
75	0,923	0,206	0,153	0,394	0,879	0,357	1,679	0,35	0,913	0,245	1,216
80	0,974	0,221	0,163	0,421	1,006	0,381	1,785	0,374	0,92	0,261	1,299
85	1,043	0,235	0,174	0,447	1,078	0,406	1,912	0,393	0,987	0,278	1,361
90	1,097	0,248	0,184	0,479	1,123	0,431	1,975	0,416	1,062	0,293	1,425
95	1,128	0,263	0,195	0,511	1,181	0,454	2,054	0,442	1,184	0,309	1,455
100	1,186	0,276	0,205	0,542	1,236	0,478	2,114	0,466	1,215	0,326	1,53

Tabloda görüldüğü üzere nanokristal nüveler arasında en yüksek endüklenen gerilimler 50x30x20 boyutlu nüve tarafından elde edilmiştir. Şekil 5-4'te bu nüve tarafından endüklenen gerilimlerin hat akımına göre değişimi görülmektedir. Bu nüveli hasatlayıcı vasıtasıyla 100 A'lık hat akımı koşulunda 2,114 V'luk bir gerilim endüklenmiştir.



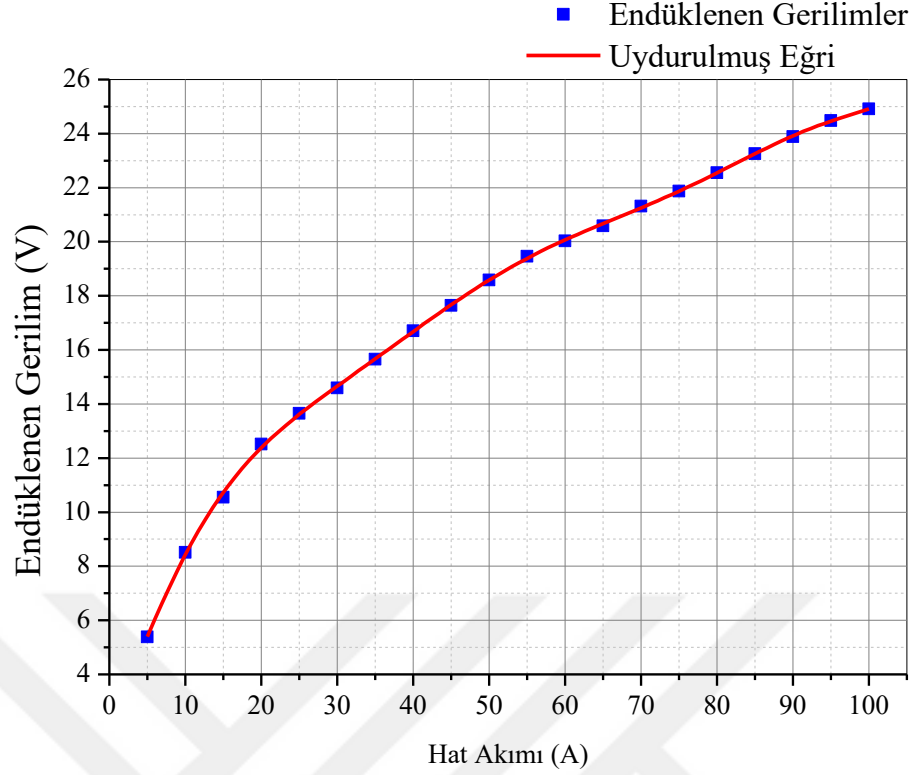
Şekil 5-4. 50x30x20 Nanokristal nüve tarafından endüklenen gerilim değerleri

Tablo 5-4'te ferit nüveler tarafından endüklenen gerilim değerleri görülmektedir. Ferit nüvelerin diğer nüvelere nazaran çok daha yüksek gerilimler endüklediği açık bir şekilde görülmektedir.

Tablo 5-4. Ferit nüveler vasıtasıyla endüklenen gerilimler

	Endüklenen Gerilimler (V)						
	Ferit CF139			Ferit N30 Mn-Zn		Ferit 4W620	
Nüve Boyutları (mm) →	63x38x20	60x30x20	50x30x20	50x28,5x20	34x20,5x10	61x35,5x20	31,7x19x8
Hat Akımı (A)							
5	4,745	5,385	4,381	4,245	2,191	6,85	2,355
10	8,44	8,51	6,61	5,8	3,024	10,34	3,353
15	10,52	10,55	8,12	6,91	3,657	12,2	4,005
20	12,05	12,52	9,24	7,74	4,163	13,55	4,314
25	13,31	13,65	10,18	8,45	4,485	14,76	4,349
30	14,42	14,59	11,03	8,66	4,589	15,83	4,352
35	15,43	15,65	11,76	9,15	4,547	16,62	4,321
40	16,29	16,71	12,42	9,64	4,452	17,54	4,275
45	17,21	17,65	13,05	10,12	4,371	18,19	4,214
50	17,89	18,58	13,67	10,51	4,283	18,75	4,156
55	18,59	19,46	14,19	10,87	4,172	19,22	4,092
60	19,22	20,03	14,68	11,28	4,052	19,62	4,085
65	19,88	20,59	15,16	11,63	3,953	20,01	4,011
70	20,51	21,32	15,57	12,02	3,844	20,28	3,988
75	21,09	21,87	15,99	12,25	3,756	20,67	3,918
80	21,66	22,55	16,34	12,55	3,641	20,86	3,864
85	22,21	23,26	16,62	12,8	3,517	21,23	3,763
90	22,59	23,89	16,91	13,04	3,424	21,45	3,718
95	23,02	24,48	17,19	13,22	3,326	21,65	3,625
100	23,41	24,91	17,71	13,41	3,203	21,99	3,518

Ferit nüvelerin kendi içlerinde ise en yüksek gerilim endükleyen nüve 60x30x20 boyutlu Ferit CF139 malzemeli nüve olmuştur. Hasatlanan güç açısından da bu nüvenin tüm diğer nüvelerden daha iyi bir performans göstermesi beklenmektedir.



Şekil 5-5. 60x30x20 Ferit nüve tarafından endüklenen gerilim değerleri

Şekil 5-5'te 60x30x20 boyutlu Ferit nüvenin hat akımına göre endüklediği gerilim değerleri görülmektedir. Bu nüveli hasatlayıcı ile 100 A hat akımında 24,91 V gerilim endüklenmiştir.

5.4 NÜVE AĞIRLIKLARI VE MALİYETLERİ

Elektromanyetik enerji hasatlayıcılarının İHA'lara şarj sağlamak için kullanımında boyut ve ağırlık konuları önemli bir sorun olarak ortaya çıkmaktadır. Günümüzde kullanılan İHA'ların taşıma kapasitelerinin kendi ağırlıklarının yaklaşık %10'u kadar olduğu bilinmektedir. Ayrıca İHA'nın ağırlığı arttığında güç tüketiminin de arttığı göz önünde bulundurulduğunda bu konunun önemi ortaya çıkmaktadır. Bundan dolayı hasatlayıcılarda kullanılan nüvelerin ağırlık ve boyutları da sağladıkları güç kadar önem arz etmektedir. Bu yüzden İHA'lar için elektromanyetik enerji hasatlayıcılar tasarlanırken bu konu üzerinde durulmalıdır. Tüm bu sebeplerden dolayı çalışmada kullanılan nüveler ağırlık yönünden de incelenmiştir. Kullanılan her bir nüvenin ve sargıların üretiminde kullanılan bakırların toplam ağırlıkları ölçülmüştür. Ölçülen ağırlık değerleri Tablo 5-5'te görülmektedir. Tabloya göre Silisli Çelik malzemeli nüvelerin aynı boyutlardaki diğer

nüvelere nazaran çok daha ağır oldukları görülmektedir. Silisli çelik malzemeli nüveleri nanokristal nüveler takip etmektedir. Ferit nüvelerin ise en hafif nüveler olduğu açık bir şekilde görülmektedir.

Tablo 5-5. Nüve ağırlıkları

Malzeme	Nüve Boyutları	Ağırlık (g)		
		Nüve	Bakır	Toplam
Silisli Çelik	60x50x20	126,703	9,567	136,27
	60x40x20	237,163	8,497	245,66
	60x30x20	312,733	5,717	318,45
	50x30x20	183,103	6,397	189,5
	50x40x20	103,97	9,38	113,35
	40x30x20	79,37	8,63	88
Ferit CF139	63x38x20	189,753	20,377	210,13
	50x30x20	118,937	14,603	133,54
	60x30x20	202,487	14,843	217,33
Ferit 4W620	31,7x19x8	20,02	24,67	44,69
	61x35,5x20	169,275	36,325	205,6
Ferit N30 MnZn	34x20,5x10	16,605	19,185	35,79
	50x28,5x20	117,74	11,83	129,57
Nanokristal	63x38x20	232,05	15,46	247,51
	61x35,5x20	255,38	16,91	272,29
	60x50x20	109,745	21,005	130,75
	60x40x20	186,205	7,795	194
	60x30x20	270,39	18,85	289,24
	50x40x20	92,845	13,015	105,86
	50x30x20	153,75	5,18	158,93
	50x28,5x20	155,545	15,62	171,165
	40x30x20	73,88	11,15	85,03
	34x20,5x10	29,565	2,695	32,26
	31,7x19x8	26,19	5,4	31,59

Tablo 5-6’da ise tüm nüvelerin ve sargılarda kullanılan bakırların dolar bazında maliyetleri görülmektedir. Silisli çelik malzemeli nüvelerin en düşük maliyetli oldukları görülmektedir. Silisli çelik malzemeli nüvelerden sonra ise Ferit CF139 malzemeli nüveler gelmektedir. En maliyetli nüveler ise Ferit N30 Mn-Zn ve Nanokristal nüvelerdir.

Tablo 5-6. Nüve maliyetleri

Malzeme	Nüve Boyutları	Maliyet (\$)		
		Nüve	Bakır	Toplam
Silisli Çelik	60x50x20	1,932	0,128198	2,060198
	60x40x20	2,5668	0,11386	2,68066
	60x30x20	1,17	0,076608	1,246608
	50x30x20	1,647	0,08572	1,73272
	50x40x20	0,9828	0,125692	1,108492
	40x30x20	0,7872	0,115642	0,902842
Ferit CF139	63x38x20	5,66	0,273052	5,933052
	50x30x20	4,116	0,19568	4,31168
	60x30x20	3,62	0,198896	3,818896
Ferit 4W620	31,7x19x8	2,17	0,330578	2,500578
	61x35,5x20	10,13	0,486755	10,61676
Ferit N30 MnZn	34x20,5x10	4,86	0,257079	5,117079
	50x28,5x20	17,98	0,158522	18,13852
Nanokristal	63x38x20	10,61474	0,207164	10,8219
	61x35,5x20	11,1815	0,226594	11,40809
	60x50x20	5,020102	0,281467	5,301569
	60x40x20	8,517637	0,104453	8,62209
	60x30x20	12,36854	0,25259	12,62113
	50x40x20	4,247039	0,174401	4,42144
	50x30x20	7,033037	0,069412	7,102449
	50x28,5x20	7,115146	0,209308	7,324454
	40x30x20	3,379517	0,14941	3,528927
	34x20,5x10	1,352402	0,036113	1,388515
	31,7x19x8	1,198018	0,07236	1,270378

5.5 HASATLAYICILARIN GÜÇ ANALİZLERİ

Çalışmanın devamında hasatlayıcıların elde ettiği güçler ele alınmıştır. Yük tarafında maksimum güç aktarımı için muhtelif direnç değerleri kullanılmıştır. Ölçümler hat akımı 0-100 A aralığında her 5 A’de bir hat akımı arttırılarak alınmış, her bir hasatlayıcı tarafından elde edilen güç değerleri ölçülmüştür. Daha ayrıntılı sonuçlar elde edebilmek için ölçülen değerler kullanılarak eğri uydurma işlemi yapılmıştır. Eğri uydurma sonucu en büyük güç değerlerinin hangi yük dirençlerinde elde edildiği tespit edilmiştir.

Tablo 5-7’de silisli çelik nüveli hasatlayıcılar tarafından belirlenen her bir akım değerinde eğri uydurma işlemleriyle birlikte hasatlanan en büyük güçler görülmektedir.

Tablo 5-7. Silisli Çelik nüveler tarafından hasatlanan en büyük güçler

Hat Akımı (A)	Nüve Boyutları						
	60x50x20	60x40x20	60x30x20	50x30x20	50x40x20	40x30x20	
5	0,0219	0,31875	0,07385	0,74528	0,21828	1,11364	Hasatlanan En Büyük Güçler (mW)
10	0,08741	1,20672	0,30848	3,0429	0,87837	4,71925	
15	0,19057	2,75472	0,62132	6,741	1,90249	9,98306	
20	0,33559	4,7405	1,13402	11,6724	3,42296	17,60722	
25	0,54769	7,383	1,73479	18,357	5,39241	26,18853	
30	0,7889	10,6596	2,52415	26,5788	7,82465	38,22572	
35	1,03471	14,4648	3,48881	35,8849	10,40093	51,20099	
40	1,38758	18,8564	4,61185	45,7275	13,76449	66,2283	
45	1,73857	23,8852	5,72474	58,8101	17,39011	88,72268	
50	2,16379	29,5395	7,16894	72,0336	21,56034	109,2462	
55	2,61907	35,5431	8,75492	86,8644	26,27056	134,6071	
60	3,08813	42,3467	10,66267	100,0813	31,5068	173,5717	
65	3,64468	49,704	12,46774	119,3045	36,72214	196,5198	
70	4,23807	57,7724	14,86054	136,9948	43,05179	229,622	
75	4,86475	65,8827	17,3345	156,2598	49,87109	253,9059	
80	5,54328	74,6878	20,11532	176,8494	58,17952	282,2497	
85	7,21335	83,3704	22,58845	198,9276	66,92779	318,8515	
90	7,97499	93,4789	26,59898	221,3543	77,29053	357,3379	
95	8,54736	108,9012	29,88494	245,8512	87,86646	415,0669	
100	9,6572	120,3175	32,78502	267,3354	101,7308	458,205	

En yüksek endüklenen gerilimlerde olduğu gibi güç açısından da en iyi sonuç veren nüve tüm hat akımlarında 40x30x20 boyutlu nüve olmuştur. Bu nüveli hasatlayıcı tarafından hasatlanan en büyük güç 100 A hat akımında 458,205 mW olmuştur.

Nanokristal nüveli hasatlayıcılar ile yapılan deneyler ve eğri uydurma işlemleri sonucunda bu hasatlayıcılar tarafından hasatlanan en büyük güç değerleri Tablo 5-8’de görülmektedir. Bu nüveler arasında en yüksek güç beklendiği gibi her hat akımı değerinde en yüksek gerilimin endüklendiği 50x30x20 boyutlu hasatlayıcı ile elde edilmiştir. Bu hasatlayıcı tarafından 100 A hat akımında elde edilen en büyük güç 295,80757 mW olmuştur.

Tablo 5-8. Nanokristal nüveler tarafından hasatlanan en büyük güçler

Hat Akımı (A)	Nüve Boyutları										
	63x38x20	61x35,5x20	60x50x20	60x40x20	60x30x20	50x40x20	50x30x20	50x28,5x20	40x30x20	34x20,5x10	31,7x19x8
5	0,66483	0,049128	0,023104	0,095352	0,10934	0,02568	0,75896	0,05145	0,61731	0,060314	0,31096
10	2,46458	0,194895	0,093952	0,36288	0,408126	0,10339	2,84751	0,204387	2,51089	0,231633	1,22958
15	5,5403	0,423302	0,20596	0,8012	0,92742	0,23495	6,33439	0,453024	5,45004	0,542115	2,74652
20	9,89355	0,758028	0,36771	1,41881	1,694	0,404838	11,33014	0,798876	10,13701	0,93292	4,8594
25	16,25325	1,32294	0,57952	2,17035	2,65374	0,63257	18,05591	1,238458	15,4093	1,47316	7,5597
30	23,16478	1,686838	0,817626	3,21003	3,79665	0,894483	25,94604	1,7871	22,19518	2,118823	11,0285
35	31,35844	2,309762	1,125376	4,3338	5,15503	1,183829	35,56804	2,41449	30,79909	2,944074	15,1179
40	42,65727	2,999532	1,478466	5,6924	6,54689	1,545908	46,65312	3,16263	38,8929	3,77728	19,9985
45	51,25185	3,78737	1,83898	7,1638	8,34225	1,9656	58,78077	4,00214	49,20733	4,71932	25,4384
50	63,45942	4,51856	2,279952	8,911	10,35216	2,59161	72,78754	4,91925	60,6465	5,7886	31,5482
55	79,08287	5,5651	2,7482	10,9964	12,7022	2,91852	88,47552	5,98879	74,21051	7,0399	38,5536
60	98,08714	6,567	3,31008	12,9444	14,9766	3,48912	106,03273	7,1001	88,55144	8,2838	46,6101
65	108,40708	7,6874	3,88077	15,3472	17,5441	4,08876	125,43664	8,38356	103,82	9,8892	54,7932
70	126,10578	8,9344	4,47894	17,7284	20,3454	4,75272	147,28941	9,72438	119,87	11,2398	63,8104
75	149,40832	10,1928	5,13372	20,4828	23,1826	5,49516	170,5779	11,23584	140,1848	12,8652	73,4428
80	180,60556	11,6362	5,8344	23,5658	26,3264	6,37093	195,79691	12,85103	161,4808	13,9356	84,056
85	196,26778	13,113	6,5772	26,7496	29,6055	7,47344	222,73738	14,409	179,3049	14,6124	95,6352
90	219,83819	14,7015	7,4175	30,135	32,8923	8,6868	247,21836	16,17649	204,882	15,6576	107,6754
95	249,36082	16,4256	8,2038	33,8256	36,4236	10,53918	271,17092	18,05646	235,2861	17,336	120,4082
100	277,81578	18,1719	9,1904	38,0277	40,3925	12,08019	295,80757	20,1498	260,7028	18,9244	132,2608

Hasatlanan En Büyük Güçler (mW)

Deneyler sonucu alınan ölçümler ve eğri uydurma sonuçlarına göre ferit nüveli hasatlayıcılar vasıtasıyla elde edilen en büyük güç değerleri Tablo 5-9’da görülmektedir. Ferit nüvelerin kendi içinde en büyük güç en yüksek gerilimin endüklendiği 60x30x20 boyutlu Ferit CF139 malzemeli nüve tarafından elde edilmiştir. Bu nüve tarafından elde edilen en büyük güç 100 A hat akımında 2484,841 mW olmuştur. Tablo 5-7, 5-8 ve 5-9’da görülen sonuçlara göre endüklenen gerilimlerde olduğu gibi en yüksek güçler ferit nüveli hasatlayıcılar tarafından elde edilmiştir.

Tablo 5-9. Ferit nüveler tarafından hasatlanan en büyük güçler

Hat Akımı (A)	Nüve Boyutları						
	Ferit CF139			Ferit 4W620		Ferit N30 Mn-Zn	
	63x38x20	50x30x20	60x30x20	31,7x19x8	61x35,5x20	34x20,5x10	50x28,5x20
5	27,66037	38,83305	23,59375	5,96736	20,75	17,50114	102,3901
10	106,9392	105,9377	88,54601	17,00562	73,632	44,07659	146,7049
15	210,4595	185,6071	196,6135	29,86354	135,2224	72,25866	185,7986
20	324,731	292,8918	340,592	43,13865	193,6442	99,78623	280,9312
25	437,3366	367,9001	515,4233	56,54979	258,588	123,61377	350,5157
30	550,3423	451,5193	689,6923	68,74838	319,725	150,47237	408,8511
35	669,5485	545,9419	850,1641	83,61015	386,384	176,68272	477,6666
40	784,8025	624,3454	997,2714	97,53744	455,04	200,37447	541,2288
45	901,6854	701,2289	1134,724	110,0845	519,67	224,29388	564,8214
50	1019,457	782,5028	1266,104	122,2511	591,628	241,90416	668,8656
55	1129,422	860,7269	1390,739	135,793	656,208	264,58069	769,4796
60	1248,446	1008,179	1533,541	150,2096	714,696	283,99764	854,2534
65	1350,613	1073,28	1657,063	164,5481	774,064	302,60673	928,998
70	1461,844	1134,255	1775,404	176,2236	840,834	320,29382	998,0425
75	1573,92	1191,481	1903,06	188,4681	914,385	336,7647	1065,572
80	1689,242	1259,726	2025,249	200,136	979,888	352,59042	1126,692
85	1814,932	1340,323	2140,317	211,0634	1048,288	368,35109	1188,452
90	1911,837	1433,748	2252,974	222,8436	1105,504	384,57674	1243,13
95	2017,142	1520,775	2369,879	234,9464	1169,562	399,44619	1293,207
100	2119,707	1598,637	2484,841	246,7035	1219,86	413,17783	1342,973

Hasatlanan En Büyük Güçler (mW)

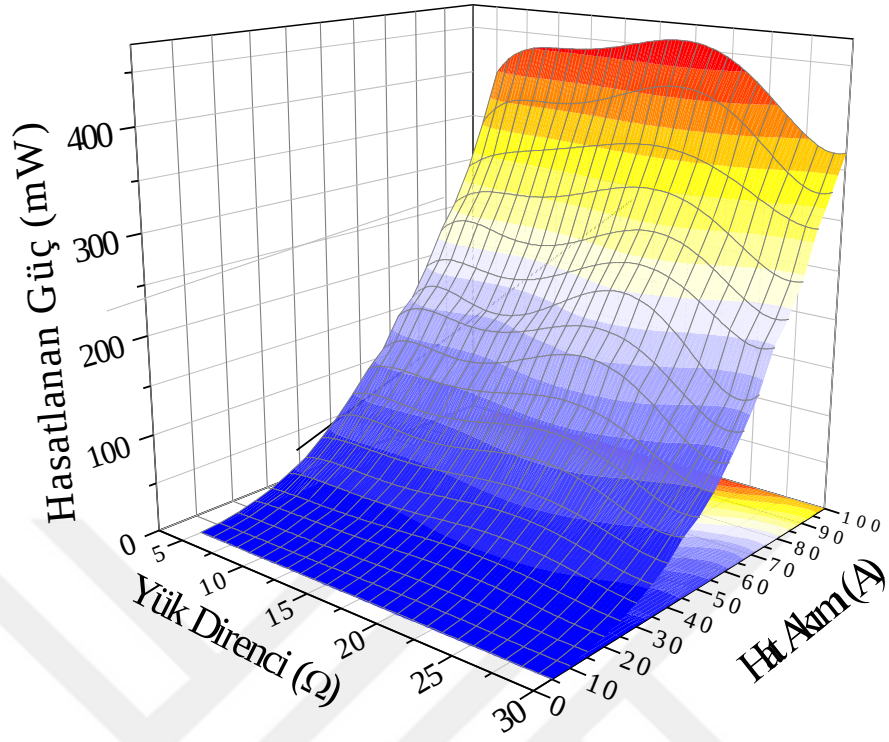
Tablo 5-10’da her malzemenin içinden en yüksek güçlerin hasatlandığı nüvelerin endükledikleri gerilimler, akımlar ve hasatlanan güç değerleri görülmektedir. 40x30x20 boyutlu Silisli Çelik malzemeli nüve ile 100 A hat akımında 458,205 mW güç değeri ile 1,870749 V’luk gerilim, 244,9314 mA’lik akım değerleri elde edilmiştir. 50x30x20 boyutlu Nanokristal nüve ile hat akımı 100 A iken 295,8076 mW güç 0,909543 V gerilim ve 325,2265 mA sargı akımı ile

hasatlanmıştır. En yüksek gücün hasatlandığı Ferit CF139 60x30x20 boyutlu nüveye sahip hasatlayıcı 8,114 V'luk gerilim endüklerken sargı akımı 306,2365 mA olmuştur ve 2484,841 mW'lık bir güç hasatlanmıştır.

Tablo 5-10. En büyük güçlerin elde edildiği nüvelerin endüklediği gerilimler ve akımlar

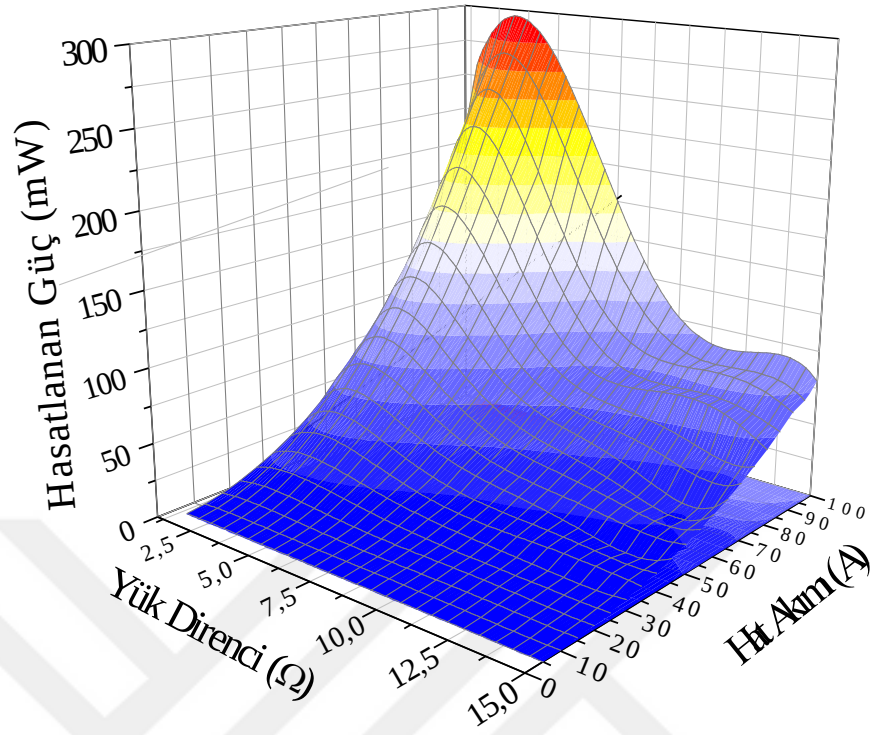
Hat Akımı (A)	40x30x20 Silisli Çelik			50x30x20 Nanokristal			60x30x20 Ferit CF139		
	Vyük (V)	Isargı (mA)	Güç (mW)	Vyük (V)	Isargı (mA)	Güç (mW)	Vyük (V)	Isargı (mA)	Güç (mW)
5	0,132352	8,4142	1,11364	0,045576	16,65263	0,75896	1,185893	19,89534	23,59375
10	0,287395	16,42079	4,71925	0,089383	31,85756	2,84751	2,298799	38,51838	88,54601
15	0,400569	24,92219	9,98306	0,132323	47,8706	6,33439	3,416924	57,54109	196,6135
20	0,523985	33,60252	17,60722	0,176765	64,09718	11,33014	4,484399	75,95042	340,592
25	0,619867	42,24864	26,18853	0,222389	81,19049	18,05591	5,523178	93,32006	515,4233
30	0,730677	52,3155	38,22572	0,266583	97,32832	25,94604	6,35868	108,4647	689,6923
35	0,832131	61,52998	51,20099	0,313514	113,4497	35,56804	6,950669	122,314	850,1641
40	0,916678	72,24817	66,2283	0,358267	130,219	46,65312	7,131655	139,8373	997,2714
45	1,075002	82,53256	88,72268	0,403305	145,7477	58,78077	7,40894	153,1561	1134,724
50	1,160685	94,12221	109,2462	0,446296	163,0924	72,78754	7,490038	169,0384	1266,104
55	1,261198	106,7295	134,6071	0,493524	179,2731	88,47552	7,469275	186,1947	1390,739
60	1,464972	118,4813	173,5717	0,543468	195,1038	106,0327	7,459994	205,5686	1533,541
65	1,48728	132,1337	196,5198	0,592228	211,8046	125,4366	7,614956	217,6064	1657,063
70	1,58855	144,5482	229,622	0,646901	227,6847	147,2894	7,730926	229,6496	1775,404
75	1,565151	162,2245	253,9059	0,695968	245,0943	170,5779	7,844082	242,611	1903,06
80	1,607969	175,5318	282,2497	0,747331	261,995	195,7969	8,008775	252,8787	2025,249
85	1,679682	189,8285	318,8515	0,799599	278,5613	222,7374	8,029872	266,5444	2140,317
90	1,727145	206,8952	357,3379	0,847016	291,8696	247,2184	8,035387	280,3815	2252,974
95	1,840995	225,4579	415,0669	0,881557	307,6047	271,1709	8,158556	290,4778	2369,879
100	1,870749	244,9314	458,205	0,909543	325,2265	295,8076	8,114124	306,2365	2484,841

Silisli çelik nüveler arasında en yüksek gücün elde edildiği 40x30x20 boyutlu nüvenin hasatlanan güç, yük direnci ve hat akımı grafiği Şekil 5-6'da görülmektedir.



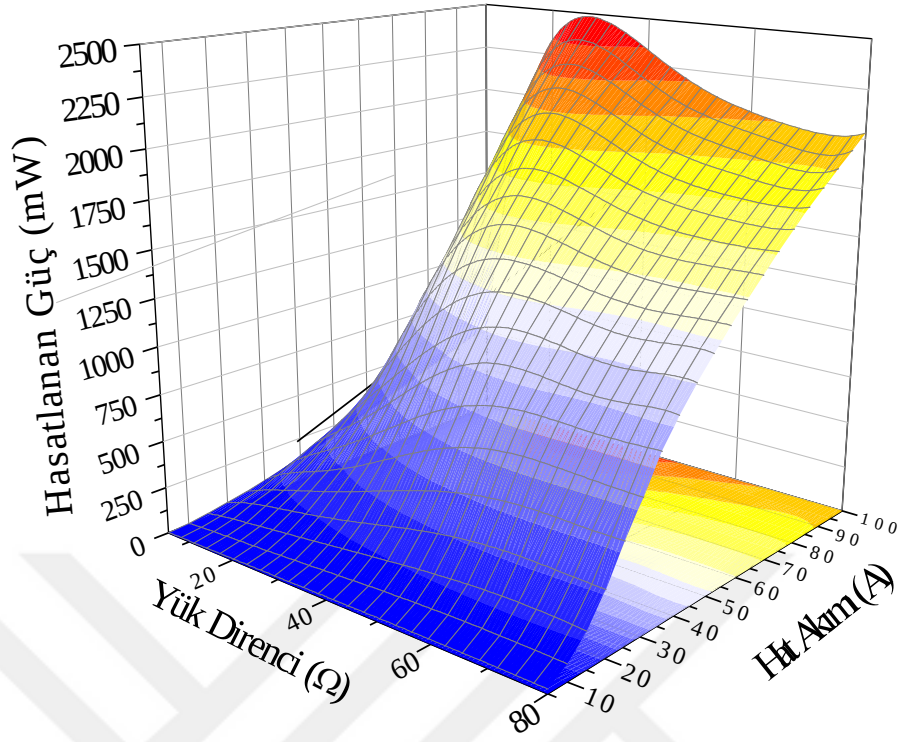
Şekil 5-6. 40x30x20 Silisli Çelik nüve tarafından hasatlanan güçlerin hat akımı ve yük direncine göre değişimi

40x30x20 boyutlu silisli çelik nüve tarafından hasatlanan en yüksek güç 100 A hat akımında 19,14141 Ω 'luk yük direnci ile 458,205 mW olmuştur. Bu direnç değerine kadar artan güç değeri en büyük değerine ulaştıktan sonra düşmeye başlamıştır. Maksimum güç aktarımı bu direnç değerinde sağlanmıştır.



Şekil 5-7. 50x30x20 Nanokristal nüve tarafından hasatlanan güçlerin hat akımı ve yük direncine göre değişimi

Nanokristal nüveler arasında en yüksek gerilim 50x30x20 boyutlu nüve tarafından endüklendiği için bu nüve vasıtasıyla en büyük güce ulaşılmıştır. Bu nüve vasıtasıyla elde edilen güçler ve bu güce hangi yük direncinde ulaşılabileceğini belirlemek için ölçümler sonrası eğri uydurma yapılmıştır. 0-100 A aralığında 5'er A'lık her akım değerinde yapılan eğri uydurmalar neticesinde Şekil 5-7'deki Hasatlanan Güç / Yük Direnci / Hat Akımı grafiği elde edilmiştir. Grafikte görüldüğü üzere bu nüve ile elde edilen güç 100 A hat akımında 3,27273 Ω 'luk yük direncine kadar artmaya devam etmiş ve en büyük değerine 295,80757 mW olarak ulaşmıştır. Daha sonra kullanılan direnç değeri arttıkça güç değeri azalmaya başlamıştır.



Şekil 5-8. 60x30x20 Ferit nüve tarafından hasatlanan güçlerin hat akımı ve yük direncine göre değişimi

Ferit nüveler içinde ise en yüksek gerilim 60x30x20 boyutlu nüve tarafından endüklendi. Bu nüve tarafından hasatlanan güçler ve bu güce hangi yük direncinde ulaşılacağını belirlemek için diğer nüvelerde olduğu gibi 0-100 A aralığında her 5 A’de alınan ölçümler sonrası her akım değerinde elde edilen en yüksek güç hangi yük direncinde elde edildiği bulunmak için eğri uydurma yapılarak Şekil 5-8’deki grafik elde edilmiştir. Grafikte görüldüğü gibi bu nüve ile hasatlanan en büyük güç değeri 100 A hat akımında yük direnci 27,72727 Ω olana kadar artmaya devam etmiştir. Bu direnç değerine ulaşıncaya en büyük güç değeri 2484,84076 mW olarak elde edilmiştir. Daha sonra direnç değeri arttıkça azalmaya başlamıştır. Bu hasatlayıcı ile elde edilen güç değeri çalışmada kullanılan bütün nüveler arasındaki en yüksek değer olarak ön plana çıkmaktadır.

6. BULGULAR VE SONUÇ

Bu çalışmada enerji nakil hatlarından enerji hasatlamak üzere toroid şekilli manyetik enerji hasatlayıcıların tasarımı gerçekleştirilmiştir. Hasatlayıcılar Ferit, Nanokristal ve Silisli Çelik malzemeleri ile değişkenler sırasıyla dış çap (mm), iç çap (mm) ve yükseklik (mm) olacak şekilde 63x38x20, 61x35,5x20, 60x50x20, 60x40x20, 60x30x20, 50x40x20, 50x30x20, 50x28,5x20, 40x30x20, 34x20,5x10, 31,7x19x8 mm olmak üzere 11 farklı boyutta tasarlanmıştır. Tasarımı yapılan hasatlayıcıların 0-100 A aralığında 5'er A'lık adımlarla arttırılmak suretiyle farklı akım değerlerinde teorik analizleri ve SEY ile analizleri yapılmıştır. Bu analizler ile hasatlayıcılar ortak ve öz endüktans, manyetik akı yoğunluğu ve hava aralığı açısından incelenmiştir. Sonrasında deney aşamasına geçmek için her nüvenin AL değeri LCR metre ile ölçülerek bu değerlerden yola çıkılarak sarım sayıları belirlenmiştir. Sargıları sarılan hasatlayıcıları test etmek için deney düzeneği kurulmuş ve her bir nüvenin endüklediği gerilimler ölçülmüştür ve hasatlayıcıların güç analizleri yapılmıştır. Deney kapsamında hat akımı koşulları frekans 50 Hz, hat akımı ise 0-100 A aralığında her 5 A'de bir arttırılmak suretiyle seçilmiştir.

Silisli Çelik nüveli hasatlayıcılar arasında 100 A hat akımında endüklenen en yüksek gerilim değeri 3,4526 V olmuştur. Bu gerilim değeri 40x30x20 boyutlu hasatlayıcı ile elde edilmiştir. Nanokristal nüveli hasatlayıcılar arasında ise en yüksek gerilimi endükleyen hasatlayıcı 50x30x20 boyutlu hasatlayıcı olmuştur. Bu hasatlayıcı tarafından endüklenen gerilim değeri 100 A hat akımında 1,549 V olmuştur. Son olarak ferit nüveli hasatlayıcılar arasında 60x30x20 boyutlu nüve vasıtasıyla hat akımı 100 A iken 24,91 V ile en yüksek gerilim elde edilmiştir.

Daha sonra güç analizine geçilerek her hat akımı değerinde hasatlayıcılar tarafından hasatlanan güçlerin ölçümleri yapılmıştır. Bu kapsamda belirlenen akım değerlerinde her bir hasatlayıcı vasıtasıyla hasatlanan en büyük güce erişebilmek için yani maksimum güç aktarımı yapabilmek için farklı yük dirençleri kullanılarak ölçümler alınmıştır. Daha kapsamlı sonuçlar elde edebilmek adına ölçümlerde elde edilen veriler kullanılarak eğri uydurma işlemi yapılarak her nüvenin her hat akımında elde ettiği en büyük güç ve bu gücü hangi yük direncinde elde ettiği tespit edilmiştir. Beklendiği üzere en büyük gerilim değerlerini endükleyen hasatlayıcılar tarafından aynı zamanda en yüksek güçler hasatlanmıştır. 40x30x20 boyutlu Silisli Çelik nüveli hasatlayıcı tarafından 100 A hat akımı koşulunda yük direnci 19,14 Ω iken 1,871 V gerilim ve 244,9314 mA sargı akımı ile 458,205 mW güç hasatlanmıştır. 50x30x20 boyutlu nanokristal nüveye sahip hasatlayıcı vasıtasıyla hat akımı 100 A iken 3,273 Ω 'luk yük direncinde 0,909 V gerilim ve 325,2265 mA sargı akımı ile 295,8076 mW güç hasatlanmıştır. Son olarak 60x30x20

boyutlu ferit nüveli hasatlayıcı ile yük direnci $27,73 \Omega$ olduğunda 8,114 V gerilim, 306,2365 mA'lık sargı akımı ile 2484,841 mW güç hasat edilmiştir.

Çalışmada tasarlanan nüvelerin İHA'lara şarj sağlamak üzere kullanılması düşünüldüğü ve İHA'ların uçuşunda ağırlık önemli bir husus olduğu için her nüvenin hem sargısız hem de sarımları yapıldıktan sonra ağırlıkları ölçülmüştür. Ayrıca kullanılan her nüvenin maliyetleri de çıkarılmıştır. Ağırlık açısından malzemeler arasında en hafif olan nüveler ferit nüveler olmuştur. Silisli çelik nüveler en ağır nüveler olup daha sonra nanokristal nüveler gelmektedir. Maliyet açısından bakıldığında ise en düşük maliyetli malzemenin Silisli Çelik olduğu görülmektedir.

Günümüzde kullanılan döner kanatlı İHA'ların bataryaları yaklaşık 77 Watt'tır. Çalışma kapsamında 100 A'lık hat akımı koşullarında hasatlanan güçler değerlendirildiğinde 40x30x20 Silisli Çelik nüveli hasatlayıcının hasatladığı 458,205 mW'lık güç ile bu bataryanın yaklaşık 168 saatte şarj edilmesi beklenmektedir. Nanokristal nüveli hasatlayıcılar içinde en yüksek gücün hasatlandığı 50x30x20 boyutlu nüve tarafından hasatlanan 295,8076 mW'lık güç ile aynı bataryanın 260 saatte şarj olması beklenmektedir. Çalışma kapsamında en yüksek güç değerinin elde edildiği 60x30x20 Ferit nüveli hasatlayıcı vasıtası ile hasatlanan 2484,841 mW'lık güç ile bu bataryanın yaklaşık 30 saatte şarj edilebileceği öngörülmektedir. Yapılacak olan şarj devresi, boost dönüştürücü gibi bazı eklemeler ile bu sürenin daha da azalması mümkündür. Ferit nüve tarafından hasatlanan bu gücün ortalama bir İHA bataryasını şarj etmeye yeterli olduğu görülmektedir. Ayrıca gerek ağırlık gerek maliyet gerekse de hasatlanan güç açısından enerji nakil hatlarından enerji hasatlamaya en elverişli nüvelerin Ferit nüveler olduğu açıkça görülmektedir. 60x30x20 boyutlu ferit nüveli hasatlayıcı en yüksek gücü hasatlamış olmasına rağmen 217 gramlık ağırlığı ile İHA'larda kullanılması sorun teşkil edebilir. Bu açıdan bakıldığında hasatladığı 413,18 mW'lık güç ile 34x20,5x10 boyutlu Ferit Mn-Zn nüveli hasatlayıcı hem boyut açısından hem de ağırlık açısından ön plana çıkmaktadır. Nitekim bu hasatlayıcının toplam ağırlığı yalnızca 35,79 gramdır. Bu hasatlayıcı ile bahsi geçen bataryanın şarj edilmesi yaklaşık 186 saat sürecektir. Süre oldukça yüksek olsa da hasatlayıcının düşük ağırlığından dolayı İHA'nın uçuş süresinin artacağı muhakkaktır. Ayrıca boyutunun küçük olması da diğer bir avantaj olarak görülebilir. Son olarak 40x30x20 Silisli Çelik nüveli hasatlayıcının ağırlığı 88 gram olup bu açıdan İHA'lar için uygun olduğu söylenebilir. Ayrıca tüm hasatlayıcılar arasında en düşük maliyete sahip hasatlayıcı olarak ön plana çıkmaktadır.

Çalışmadan yola çıkarak konu ile alakalı gelecekte yapılabilecek çalışmalar için öneriler şunlardır:

- Toroid nüvelerin yapılarından dolayı hatlara tutunmaları için parçalı olmaları gerekmektedir. Bu yüzden İHA'lara şarj sağlamak üzere hatlara tutunabilmeleri için mekanizmalar gereklidir. Bu sorun için gerekli çözümlerin üretilmesi önemlidir.
- İHA'ların ağırlık sorunundan dolayı ağırlığı azaltmaya yönelik önlemler alınmalıdır. Bunun için sargı malzemesi olarak bakır yerine alüminyum kullanılması önerilmektedir.
- Hasatlayıcılar vasıtasıyla hasatlanan güçlerin her koşulda yükseltilmesi için literatürde olmayan farklı şarj devresi tasarımlarının yapılması gerekmektedir.
- Hasatlayıcıları en optimum hale getirmek için farklı nüve malzemeleri ile farklı boyutlarda ve farklı geometrik şekillerde denenmesi önerilmektedir.

7. KAYNAKLAR

- [1] M. J. Moser, T. Bretterklieber, H. Zangl, ve G. Brasseur, “Strong and weak electric field interfering: Capacitive icing detection and capacitive energy harvesting on a 220-kV high-voltage overhead power line”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, c. 58, sy 7, ss. 2597-2604, Tem. 2011, doi: 10.1109/TIE.2010.2098362.
- [2] İ. Özer, S. B. Efe, ve H. Özbay, “CNN/Bi-LSTM-based deep learning algorithm for classification of power quality disturbances by using spectrogram images”, *International Transactions on Electrical Energy Systems*, c. 31(12), 2021, doi: <https://doi.org/10.1002/2050-7038.13204>.
- [3] T. O. de M. Júnior, Y. P. M. Rodriguez, E. C. de S. Melo, M. P. dos Santos, ve C. P. de Souza, “Energy Harvesting Based on Magnetic Dispersion for Three-Phase Power System”, *Energy Power Eng*, c. 05, sy 03, ss. 20-23, 2013, doi: 10.4236/epe.2013.53b005.
- [4] Y. Zhuang vd., “An Improved Energy Harvesting System on Power Transmission Lines”, *WPTC 2017 - Wireless Power Transfer Conference*, 2017, doi: 10.1109/WPT.2017.7953847.
- [5] M. Kabakulak, “Havai Güç Hatlarının Etrafındaki Elektromanyetik Alanlardan Enerji Hasadı”, Harran Üniversitesi, 2020.
- [6] M. P. Dos Santos, D. Vieria, Y. P. M. Rodriguez, T. O. de M. Júnior, ve R. Freire, “Energy harvesting using magnetic induction considering different core materials”, içinde *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, 2014, ss. 942-944. doi: 10.1109/I2MTC.2014.6860881.
- [7] T. O. De Moraes, Y. P. M. Rodriguez, E. C. D. S. Melo, ve C. P. De Souza, “Experimental results on magnetic cores for magnetic induction-based energy harvesting”, *19th IMEKO TC4 Symposium - Measurements of Electrical Quantities 2013 and 17th International Workshop on ADC and DAC Modelling and Testing*, ss. 625-630, 2013.
- [8] W. Wang, X. Huang, L. Tan, J. Guo, ve H. Liu, “Optimization Design of an Inductive Energy Harvesting Device for Wireless Power Supply System Overhead High-Voltage Power Lines”, *Energies (Basel)*, c. 9, sy 4, 2016, doi: 10.3390/en9040242.
- [9] A. A. Gaikwad ve S. B. Kulkarni, “Energy Harvesting Based on Magnetic Induction”, *Smart Innovation, Systems and Technologies*, c. 106, ss. 363-370, 2019, doi: 10.1007/978-981-13-1742-2_35.

- [10] J. Zhang, X. Tian, J. Li, ve D. Yan, “A Novel Electromagnetic Energy Harvester Based on Double-Ring Core for Power Line Energy Harvesting”, *Journal of Circuits, Systems and Computers*, c. 29, sy 16, ss. 1-17, 2020, doi: 10.1142/S0218126620502655.
- [11] J. Wang, J. Kim, ve D. S. Ha, “Powerline Energy Harvesting Circuit with a Desaturation Controller for a Magnetic Core”, ss. 220-223, 2021, doi: 10.1109/MWSCAS47672.2021.9531890.
- [12] J. D. Boles, B. Ozpineci, L. M. Tolbert, T. A. Burrell, C. W. Ayers, ve J. A. Baxter, “Inductive Power Harvesting for a Touchless Transmission Line Inspection System”, içinde *2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM)*, 2016, ss. 1-5.
- [13] Y. Liu vd., “A novel high-density power energy harvesting methodology for transmission line online monitoring devices”, *Review of Scientific Instruments*, c. 87, sy 7, Tem. 2016, doi: 10.1063/1.4959556.
- [14] S. Paul, S. Bashir, ve J. Chang, “Design of a Novel Electromagnetic Energy Harvester with Dual Core for Deicing Device of Transmission Lines”, *IEEE Trans Magn*, c. 55, sy 2, Şub. 2019, doi: 10.1109/TMAG.2018.2873012.
- [15] R. Kitchen vd., *Design and Evaluation of a Perching Hexacopter Drone for Energy Harvesting from Power Lines*. 2020. doi: 10.0/Linux-x86_64.
- [16] M. J. Vos, “A Magnetic Core Permeance Model for Inductive Power Harvesting”, *IEEE Trans Power Electron*, c. 35, sy 4, ss. 3627-3635, Nis. 2020, doi: 10.1109/TPEL.2019.2933133.
- [17] K. Tang, J. Tao, Y. Yan, X. Yue, ve J. Chen, “Design of Induction Power Collection Device for Overhead Lines Based on Magnetic Field”, içinde *IEEE 6th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference, ITOEC 2022*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022, ss. 999-1003. doi: 10.1109/ITOEC53115.2022.9734576.
- [18] F. Chen, C. Yang, Z. Guo, Y. Wang, ve X. Ma, “A Magnetically Controlled Current Transformer for Stable Energy Harvesting”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, c. 38, sy 1, ss. 212-221, Şub. 2023, doi: 10.1109/TPWRD.2022.3184327.
- [19] Y. Li, N. Duan, Z. Liu, J. Hu, ve Z. He, “Impedance-Matching Based Maximum Power Tracking for Magnetic Field Energy Harvesters Using Active Rectifiers”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Eki. 2022, doi: 10.1109/TIE.2022.3219064.
- [20] Z. Liu, Y. Li, H. Yang, N. Duan, ve Z. He, “An Accurate Model of Magnetic Energy Harvester in the Saturated Region for Harvesting Maximum Power: Analysis, Design, and

- Experimental Verification”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, c. 70, sy 1, ss. 276-285, Oca. 2023, doi: 10.1109/TIE.2022.3156033.
- [21] J. Zhang vd., “A Dual-Output Magnetoelectric Energy Harvester in Ferrite/Piezoelectric Toroidal Magnetoelectric Composites”, *IEEE Trans Magn*, c. 58, sy 2, Şub. 2022, doi: 10.1109/TMAG.2021.3085737.
- [22] Z. Liu vd., “A Novel Method for Magnetic Energy Harvesting Based on Capacitive Energy Storage and Core Saturation Modulation”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, c. 70, sy 3, ss. 2586-2595, Mar. 2023, doi: 10.1109/TIE.2022.3172777.
- [23] B. Park vd., “Analysis of Magnetic Energy Harvester for Inspection Robot of Power Line Using Saturable Inductor”, içinde *2020 IEEE Wireless Power Transfer Conference, WPTC 2020*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Kas. 2020, ss. 435-438. doi: 10.1109/WPTC48563.2020.9295637.
- [24] C. Tan, Y. Zhao, ve Z. Tang, “Study on Energy Harvesting of Open-close Current Transformer”, içinde *International Conference on Sensing, Measurement and Data Analytics in the Era of Artificial Intelligence, ICSMD 2020 - Proceedings*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Eki. 2020, ss. 567-571. doi: 10.1109/ICSMD50554.2020.9261672.
- [25] J. Wang ve W. Chen, “Output Characteristics Analysis of Energy Harvesting Current Transformer”, *IEEE Sens J*, c. 21, sy 20, ss. 22595-22602, Eki. 2021, doi: 10.1109/JSEN.2021.3107864.
- [26] Y. Zhuang vd., “Improving Current Transformer-Based Energy Extraction from AC Power Lines by Manipulating Magnetic Field”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, c. 67, sy 11, ss. 9471-9479, Kas. 2020, doi: 10.1109/TIE.2019.2952795.
- [27] H. Huang, C. Li, K. Ye, H. Liu, H. Yang, ve X. Du, “An Accurate Model of Magnetic Energy Harvester for Harvesting Maximum Power Based on Fitting Method”, içinde *2021 IEEE 2nd China International Youth Conference on Electrical Engineering, CIYCEE 2021*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021. doi: 10.1109/CIYCEE53554.2021.9676856.
- [28] M. Gao, L. Yi, ve J. Moon, “Analysis, Modeling, and Validation of Cascaded Magnetics for Magnetic Energy Harvesting”, içinde *2022 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2022*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022. doi: 10.1109/ECCE50734.2022.9947560.

- [29] H. S. Kim, J. H. Kim, ve J. Kim, “A Review of Piezoelectric Energy Harvesting Based on Vibration”, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, c. 12, sy 6, ss. 1129-1141, 2011, doi: 10.1007/s12541-011-0151-3.
- [30] S. Li, Z. Peng, A. Zhang, D. Luo, ve F. Wang, “Dual Resonant Structure for Energy Harvesting from Random Vibration Sources”, *2016 IEEE 11th Annual International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, NEMS 2016*, c. 1, ss. 255-259, 2016, doi: 10.1109/NEMS.2016.7758245.
- [31] M. Ş. Balcı, S. Sakar, ve A. Dalcı, “Electromagnetic energy harvester design for power transmission line”, *Transdiscipl J Eng Sci*, c. 13, ss. 111-123, 2022, doi: 10.22545/2022/00211.
- [32] M. C. Hamilton, “Recent Advances in Energy Harvesting Technology and Techniques”, *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, ss. 6297-6304, 2012, doi: 10.1109/IECON.2012.6389019.
- [33] F. Yang, L. Du, H. Yu, ve P. Huang, “Magnetic and Electric Energy Harvesting Technologies in Power Grids: A Review”, *Sensors (Switzerland)*, c. 20, sy 5, ss. 1-12, 2020, doi: 10.3390/s20051496.
- [34] T. V. Quyen, C. V. Nguyen, A. M. Le, ve M. T. Nguyen, “Optimizing Hybrid Energy Harvesting Mechanisms for UAVs”, *EAI Endorsed Transactions on Energy Web*, c. 7, sy 30, ss. 1-8, 2020, doi: 10.4108/eai.13-7-2018.164629.
- [35] S. A. A. Najafi, A. A. Ali, Y. Sozer, ve A. De Abreu-Garcia, “Energy Harvesting from Overhead Transmission Line Magnetic fields”, *2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2018*, ss. 7075-7082, 2018, doi: 10.1109/ECCE.2018.8558356.
- [36] M. M. Camboin, O. Baiocchi, A. W. R. Villarim, S. Y. C. Catunda, C. P. De Souza, ve C. D. S. Moreira, “An Automatic Emulation System for Environmental Thermal Energy Harvesting”, *I2MTC 2019 - 2019 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference, Proceedings*, c. 2019-May, 2019, doi: 10.1109/I2MTC.2019.8827004.
- [37] A. Ghosh, M. Meenakshi, S. Khalid, ve V. P. Harigovindan, “Performance Analysis of Wireless Body Area Network with Thermal Energy Harvesting”, içinde *Global Conference on Communication Technologies, GCCT 2015*, IEEE, 2015, ss. 916-920. doi: 10.1109/GCCT.2015.7342795.
- [38] N. Nadaf ve A. Preethi, “Review on Waste Heat Energy Harvesting using TEG: Applications and Enhancements”, içinde *2021 8th International Conference on Smart*

Computing and Communications: Artificial Intelligence, AI Driven Applications for a Smart World, ICSCC 2021, IEEE, 2021, ss. 334-339. doi: 10.1109/ICSCC51209.2021.9528196.

- [39] C. P. Souza vd., “On Harvesting Energy from Tree Trunks for Environmental Monitoring”, *Int J Distrib Sens Netw*, c. 2016, 2016, doi: 10.1155/2016/9383765.
- [40] Y. Yang vd., “Triboelectric Nanogenerator for Harvesting Wind Energy and as Self-Powered Wind Vector Sensor System”, *ACS Nano*, c. 7, sy 10, ss. 9461-9468, Eki. 2013, doi: 10.1021/nn4043157.
- [41] Y. Wu, X. Zhong, X. Wang, Y. Yang, ve Z. L. Wang, “Hybrid Energy Cell for Simultaneously Harvesting Wind, Solar, and Chemical Energies”, *Nano Res*, c. 7, sy 11, ss. 1631-1639, Kas. 2014, doi: 10.1007/s12274-014-0523-y.
- [42] Q. Wen, X. He, Z. Lu, R. Streiter, ve T. Otto, “A Comprehensive Review of Miniatured Wind Energy Harvesters”, *Nano Materials Science*, c. 3, sy 2. KeAi Communications Co., ss. 170-185, 01 Haziran 2021. doi: 10.1016/j.nanoms.2021.04.001.
- [43] Md. N. Uddin, Md. S. Islam, J. Sampe, S. H. M. Ali, ve M. S. Bhuyan, “Design and simulation of piezoelectric cantilever beam based on mechanical vibration for energy harvesting application”, içinde *2016 International Conference on Innovations in Science, Engineering and Technology (ICISSET)*, IEEE, Eki. 2016, ss. 1-4. doi: 10.1109/ICISSET.2016.7856532.
- [44] W. M. Jayarathne, W. A. T. Nimansala, ve S. U. Adikary, “Development of a Vibration Energy Harvesting Device Using Piezoelectric Sensors”, içinde *2018 Moratuwa Engineering Research Conference (MERCon)*, IEEE, May. 2018, ss. 197-202. doi: 10.1109/MERCon.2018.8421913.
- [45] S. Balguyhar ve S. Bhalla, “Green Energy Harvesting Using Piezoelectric Materials from Bridge Vibrations”, içinde *2018 2nd International Conference on Green Energy and Applications (ICGEA)*, IEEE, Mar. 2018, ss. 134-137. doi: 10.1109/ICGEA.2018.8356282.
- [46] J. C. Rodriguez, D. G. Holmes, B. P. McGrath, ve R. H. Wilkinson, “Maximum Energy Harvesting from Medium Voltage Electric-Field Energy Using Power Line Insulators”, içinde *2014 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, IEEE, Eyl. 2014, ss. 1-6. doi: 10.1109/AUPEC.2014.6966633.
- [47] R. Moghe, Yi Yang, F. Lambert, ve D. Divan, “A Scoping Study of Electric and Magnetic Field Energy Harvesting for Wireless Sensor Networks in Power System Applications”,

- içinde *2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, IEEE, Eyl. 2009, ss. 3550-3557. doi: 10.1109/ECCE.2009.5316052.
- [48] S. Yuan, Y. Huang, J. Zhou, Q. Xu, C. Song, ve P. Thompson, “Magnetic Field Energy Harvesting under Overhead Power Lines”, *IEEE Trans Power Electron*, c. 30, sy 11, ss. 6191-6202, Kas. 2015, doi: 10.1109/TPEL.2015.2436702.
- [49] N. M. Roscoe ve M. D. Judd, “Harvesting energy from magnetic fields to power condition monitoring sensors”, *IEEE Sens J*, c. 13, sy 6, ss. 2263-2270, 2013.
- [50] J. Zhou, L. He, L. Liu, G. Yu, X. Gu, ve G. Cheng, “Design and research of hybrid piezoelectric-electromagnetic energy harvester based on magnetic couple suction-repulsion motion and centrifugal action”, *Energy Convers Manag*, c. 258, Nis. 2022, doi: 10.1016/j.enconman.2022.115504.
- [51] S. Yeasparan, M. Zafri Bin Baharuddin, N. Bt, M. Din, ve M. H. Haron, “A Review of Energy Harvesting Methods for Power Transmission Line Monitoring Sensors”, 2018. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: www.sciencepubco.com/index.php/IJET
- [52] S. Yuan, “Magnetic Field Energy Harvesting for Smart Grid Applications”, 2016.
- [53] S. Ahmed ve A. Najafi, “ENERGY HARVESTING FROM OVERHEAD TRANSMISSION LINE MAGNETIC FIELDS”, 2019.
- [54] Y. Zhang, Z. Wang, Y. Li, B. Tian, X. Huang, ve P. Zhang, “Optimized Design and Simulation Study of Helical Core Suitable for Non-invasive Energy Harvesting”, içinde *2021 IEEE 16th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, IEEE, Ağu. 2021, ss. 1016-1019. doi: 10.1109/ICIEA51954.2021.9516123.
- [55] B. Park vd., “Optimization design of toroidal core for magnetic energy harvesting near power line by considering saturation effect”, *AIP Adv*, c. 8, sy 5, 2018, doi: 10.1063/1.5007772.
- [56] S. Sun, X. Dai, K. Wang, X. Xiang, G. Ding, ve X. Zhao, “Nonlinear Electromagnetic Vibration Energy Harvester with Closed Magnetic Circuit”, *IEEE Magn Lett*, c. 9, Mar. 2018, doi: 10.1109/LMAG.2018.2822625.
- [57] K. Tashiro, H. Wakiwaka, S. Inoue, ve Y. Uchiyama, “Energy Harvesting of Magnetic Power-Line Noise”, *IEEE Trans Magn*, c. 47, sy 10, ss. 4441-4444, Eki. 2011, doi: 10.1109/TMAG.2011.2158190.
- [58] C. N. Johnson, “The Three-Dimensional Electromagnetic Simulation Analysis of Amorphous Ferromagnetic Microwires”, Northeastern University, Boston, Massachusetts, 2020.

- [59] A. DA Emanuel Silva Bento, D. Ricardo Jorge Ferreira Luís Júri, D. João Hermínio Ninitas Lagarto Vogais, ve D. Ricardo Jorge Ferreira Luís Doutor Miguel Cabral Ferreira Chaves, “Toroid Inductor Development for a SiC DC-DC Converter up to 150kW, based on Finite Element Method Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Eletrotécnica-ramo de Energia Orientador: INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA”.
- [60] A. DALCALI, “KÜRESEL EYLEYİCİNİN ROTOR MIKNATIS MALZEMESİ VE STATOR SARGI GEOMETRİSİNİN EYLEYİCİ TORKUNA ETKİSİ”, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, c. 7, sy 1, ss. 145-151, Mar. 2019, doi: 10.21923/jesd.437980.
- [61] S. Balcı, “Evirici Çıkış Transformatörlerinin Modellenmesi ve Analizi”, GAZİ ÜNİVERSİTESİ, 2010.

ÖZGEÇMİŞ

