

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

EV TİPİ İNDÜKSİYONLU OCAK BOBİNLERİNİN
TASARIMI VE HOMOJEN PİŞİRME PARAMETRELERİNİN
İNCELENMESİ

Ali Buğra BUĞDAY

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı
Elektrik Makinaları ve Güç Elektronik Programı

Danışman
Doç. Dr. Selin ÖZÇİRA ÖZKILIÇ

Şubat, 2023

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

EV TİPİ İNDÜKSİYONLU OCAK BOBİNLERİNİN TASARIMI VE
HOMOJEN PİŞİRME PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ

Ali Buğra BUĞDAY tarafından hazırlanan tez çalışması 22.02.2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı Elektrik Makinaları ve Güç Elektroniği Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Selin ÖZÇİRA ÖZKILIÇ
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Selin ÖZÇİRA ÖZKILIÇ, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Atiye Hülya OBDAN, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üye. Ali AĞÇAL, Üye
Süleyman Demirel Üniversitesi

Danışmanım Doç. Dr. Selin ÖZÇİRA ÖZKILIÇ sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Ev Tipi İndüksiyonlu Ocak Bobinlerinin Tasarımı ve Homojen Pişirme Parametrelerinin İncelenmesi başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Ali Buğra BUĞDAY

İmza

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmam sürecinde her zaman yapıcı ve olumlu fikirleri ile benim yanımda olan, çalışmayı tamamlamam için bana desteği ve güveni sonsuz olan ve bana yol gösteren değerli hocam Doç. Dr. Selin ÖZÇİRA ÖZKILIÇ'a sonsuz teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım. Sizin sayesinde bu zorlu süreçte adım adım ilerleyebildim ve tezimin kalitesini artırabildim.

Ayrıca, tezimi tamamlamam için her zaman yanımda olan eşim Yağmur BUĞDAY'a da teşekkür etmek istiyorum. Sevgili eşimin motive edici sözleri ve teşvikleri sayesinde, benim bu tez için harcadığım zaman ve çaba anlamlı hale geldi. Onun çalışkanlığını her zaman kendime örnek aldım.

Annem, Selma BUĞDAY ve babam, Yücel BUĞDAY'ya da, hayatım boyunca bana verdikleri destek ve cesaretlendirme için teşekkür etmek istiyorum. Sizlerin sayesinde, hayallerim için çalışmaya devam ediyorum.

Son olarak, sevgili kardeşim Emre BUĞDAY'ya da teşekkürlerimi sunmak istiyorum. Onun bana olan sıcak tebessümü her zaman beni motive etti,

Sizlerin her birininizin desteği, tezimi tamamlama sürecinde bana güç verdi ve benim başarılı olmamı sağladı. Sizlerin yardımlarını asla unutmayacağım, sizi çok seviyorum. Tekrar teşekkür ederim.

Ali Buğra BUĞDAY

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	vi
KISALTMA LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	viii
TABLO LİSTESİ	x
ÖZET	xi
ABSTRACT	xiii
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	5
1.3 Hipotez	6
2 MAXWELL DENKLEMLERİ	7
2.1 Elektrik Alan için Gauss Yasası	7
2.1.1 İntegral biçimi	7
2.1.2 Diferansiyel biçimi	8
2.2 Manyetik Alanlar İçin Gauss Yasası	8
2.2.1 İntegral biçimi	8
2.2.2 Diferansiyel biçimi	9
2.3 Faraday Yasası	9
2.3.1 İntegral biçimi	9
2.3.2 Diferansiyel biçimi	10
2.4 Ampere - Maxwell Yasası	10
2.4.1 İntegral biçimi	10
2.4.2 Diferansiyel biçimi	11
3 İNDÜKSİYONLU ISITMANIN TEORİSİ	12
3.1 İndüksiyonlu ısıtmanın avantajları	12
3.2 Bobin-Tencere Grubunun Manyetik Eşdeğer Devresi	13

3.3	Bobin-Tencere Grubunun Elektriksel Eşdeğer Devresi	14
3.4	Bobin ve Tencere Üzerinde Oluşan Kayıplar	15
3.4.1	Bakır Kayıpları	16
3.4.2	Demir Kayıpları	16
3.5	Deri ve Yakınlık Etkisi	16
3.5.1	Deri Etkisi	17
3.5.2	Yakınlık Etkisi	18
3.6	Rezonans Frekansı	18
4	EV TİPİ İNDÜKSİYONLU OCAK BOBİNİNİN TASARIMI	19
4.1	Ev tipi İndüksiyonlu Ocak Bobininin Yapısı	19
4.1.1	Alüminyum plaka	21
4.1.2	Ferrit nüveler	21
4.1.3	Bobin Sargıları	22
4.1.4	Temperli Cam	22
4.1.5	Tencere	22
4.2	İndüksiyonlu Ocak Bobini Tasarımı	24
4.3	Bobin Tasarımında Kullanılan Parametreler	27
5	SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ KULLANILARAK EV TİPİ İNDÜKSİYONLU OCAK BOBİNİNİN ANALİZİ	28
5.1	Sargı Sayısının Etkisi	32
5.2	Sargı Kalınlığının Etkisi	33
5.3	Ferrit Nüve Sayısının Etkisi	35
5.4	Ferrit Nüve Kalınlığının Etkisi	37
5.5	Parçalı Bobin Tasarımının Etkisi	40
5.6	Yuvarlak Köşeli Dikdörtgen Bobin Tasarımları	44
5.7	Bobin Parametrelerinin Etkileri	49
5.8	İndüksiyonlu Ocak Bobini Tasarım ve Analiz Adımları	50
6	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	54
	KAYNAKÇA	56
A	TENCERE TABANI MANYETİK AKI DAĞILIMLARI	60
B	FERRİT NÜVE MANYETİK AKI DAĞILIMLARI	62
	TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	64

SİMGE LİSTESİ

I	Akım
J	Akım yoğunluğu
μ_r	Bağıl manyetik geçirgenlik
ϵ_0	Boşluğun yalıtkanlık sabiti
Ω	Elektrik akımına karşı iletkenin gösterdiği direncin birimi
σ	Elektriksel iletkenlik
L	Endüktans
Hz	Hertz
η	Isıtma verimi
Φ	Manyetik akı
B	Manyetik akı yoğunluğu
B_S	Manyetik doygunluk
μ	Manyetik geçirgenlik
\mathfrak{R}	Relüktans
N	Sarım sayısı

KISALTMA LİSTESİ

AA	Alternatif Akım
AWG	Amerikan Tel Ölçüleri
NTC	Direnci Sıcaklıkla Azalan Termistör
PCB	Baskı Devre
RMS	Etkin Değer
3B	3 Boyut

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 3.1	İndüksiyon ocak Manyetik devre modeli	14
Şekil 3.2	İndüksiyon ocak elektriksel devre modeli	15
Şekil 3.3	Eşdeğer devre modeli	15
Şekil 4.1	ANSYS Maxwell programında çizilen indüksiyon bobini	20
Şekil 4.2	Manyetik malzemenin B-H eğrisi [39]	22
Şekil 5.1	3D bobin - tencere modeli üstten görünüm	31
Şekil 5.2	3D bobin - tencere modeli yandan görünüm	31
Şekil 5.3	3D bobin modeli üstten görünüm	32
Şekil 5.4	Sargı kalınlığının, tencere üzerindeki manyetik akı yoğunluğunun dağılımına etkisi	33
Şekil 5.5	Sargı kalınlığının, ferrit nüveler üzerindeki manyetik akı yoğunluğunun dağılımına etkisi	34
Şekil 5.6	Tencere üzerindeki manyetik akı yoğunluğunun dağılımı	34
Şekil 5.7	Ferrit nüveler üzerindeki manyetik akı yoğunluğunun dağılımı	35
Şekil 5.8	Ferrit nüvelerin dağılımı	36
Şekil 5.9	Ferrit nüveler üzerindeki manyetik akı yoğunluğu dağılımı	36
Şekil 5.10	Tencere tabanındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımı	37
Şekil 5.11	Ferit kalınlığının, ferritler üzerindeki manyetik akı yoğunluğunun dağılımına etkisi	38
Şekil 5.12	Ferrit kalınlığının, ferrit nüveler üzerindeki manyetik akı yoğunluğu dağılımına etkisi	38
Şekil 5.13	Ferrit kalınlığının, tencere tabanındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımına etkisi	39
Şekil 5.14	Ferrit kalınlığının, tencere tabanındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımına etkisi	39
Şekil 5.15	Tencere üzerindeki manyetik akı yoğunluğunun dağılımı	40
Şekil 5.16	Tencere üzerindeki manyetik akı yoğunluğunun dağılımı	41
Şekil 5.17	Bobin1 ve Bobin3 tencere tabanındaki akı dağılımları	41
Şekil 5.18	Bobin1 ve Bobin5 tencere tabanındaki akı dağılımları	42
Şekil 5.19	Farklı bobin tasarımlarının üstten görünümleri	42
Şekil 5.20	Farklı bobin tasarımlarının alttan görünümleri	42

Şekil 5.21 Farklı bobin tasarımlarının tencere tabanı görünüşleri	42
Şekil 5.22 Farklı bobin tasarımlarının ferrit nüve görünüşleri	43
Şekil 5.23 Tencerelerin tabanındaki manyetik akı dağılımı	43
Şekil 5.24 Bobin6 ve Bobin7 üstten görünüm	45
Şekil 5.25 Bobin6 ve Bobin7 alttan görünüm	46
Şekil 5.26 Bobin6 ve Bobin7 üstten tencereli görünüm	46
Şekil 5.27 Bobin6 ve Bobin7 tencere tabanındaki manyetik alan dağılımı	48
Şekil 5.28 Bobin6 ve Bobin7 ferrit nüve yüzeyindeki manyetik alan dağılımı . .	48
Şekil 5.29 Ana diyagram	50
Şekil 5.30 Bobin tasarım diyagramı	51
Şekil 5.31 Bobin analiz diyagramı	52
Şekil 5.32 Prototip bobin test diyagramı	53
Şekil A.1 Bobin1 - Tencere üzerindeki manyetik akı yoğunluğunun dağılımı . .	60
Şekil A.2 Bobin2 - Tencere üzerindeki manyetik akı yoğunluğunun dağılımı . .	60
Şekil A.3 Bobin3 - Tencere üzerindeki manyetik akı yoğunluğunun dağılımı . .	61
Şekil A.4 Bobin4 - Tencere üzerindeki manyetik akı yoğunluğunun dağılımı . .	61
Şekil A.5 Bobin5 - Tencere üzerindeki manyetik akı yoğunluğunun dağılımı . .	61
Şekil B.1 Bobin1 - Ferrit nüve üzerindeki manyetik akı yoğunluğunun dağılımı	62
Şekil B.2 Bobin2 - Ferrit nüve üzerindeki manyetik akı yoğunluğunun dağılımı	62
Şekil B.3 Bobin3 - Ferrit nüve üzerindeki manyetik akı yoğunluğunun dağılımı	63
Şekil B.4 Bobin4 - Ferrit nüve üzerindeki manyetik akı yoğunluğunun dağılımı	63
Şekil B.5 Bobin5 - Ferrit nüve üzerindeki manyetik akı yoğunluğunun dağılımı	63

TABLO LİSTESİ

Tablo 4.1	Tasarımı önerilen bobin parametreleri	24
Tablo 4.2	AWG - Tel çapları	25
Tablo 4.3	İndüksiyonlu ocak bobininde kullanılan malzemelerin yükseklikleri	26
Tablo 5.1	Bobin özellikleri	29
Tablo 5.2	Bobinlerin direnç ve endüktans sonuçları	29
Tablo 5.3	Bobin ve tenceredeki kayıplar	29
Tablo 5.4	Direnç değerleri ile verimin hesaplanması	30
Tablo 5.5	Bobin özellikleri	35
Tablo 5.6	Ferrit nüve ölçüleri	37
Tablo 5.7	Bobin 6 ve 7 tasarım parametreleri	45
Tablo 5.8	Bobinlerin direnç ve endüktans sonuçları	45
Tablo 5.9	Direnç değerleri ile verimin hesaplanması	47
Tablo 5.10	Bobin ve tenceredeki kayıplar	47
Tablo 5.11	Bobin ve tenceredeki kayıplar	49

Ev Tipi İndüksiyonlu Ocak Bobinlerinin Tasarımı ve Homojen Pişirme Parametrelerinin İncelenmesi

Ali Buğra BUĞDAY

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Selin ÖZÇİRA ÖZKILIÇ

İndüksiyonlu ısıtma, iletken malzemelerin temassız, hızlı ve verimli ısıtılmasını sağlar. İndüksiyon ısıtma teknolojisinin günümüzde birçok uygulama alanı vardır. Endüstride, ev eşyalarında, medikal uygulamalar da kullanılırlar. Verimli ve hızlı ısıtma, güvenlik, hassas kontrol ve temizlik gibi avantajları vardır. Ev tipi indüksiyonlu ocaklar, değişken manyetik alan oluşturarak tencerenin direkt olarak ısıtılmasını sağlar. Yüksek frekanslı evirici kullanılarak düz spiral bobinde değişken manyetik alan oluşturulur. Tencerede oluşan ısı, zaman içinde değişen manyetik alanın tencere tabanında oluşturduğu girdap akımlarının sonucudur. İndüksiyonlu ısıtma 3 ana bölüme ayrılabilir; Güç elektroniği, Kontrol teknikleri, manyetik eleman tasarımı. İndüksiyon ocaklardaki bobin ve yük grubu; ferromanyetik tencere, düz spiral bobin, ferrit nüveler ve alüminyum plakadan oluşur. Ev tipi indüksiyon ocaklarda elektronik devre yapısı olarak, yarım köprü seri rezonans eviriciler ve tek anahtarları paralel rezonans eviriciler yaygın olarak kullanılmaktadır. Bobin tasarımı da kullanılacak evirici tipine göre yapılmalıdır. Bu çalışmada ev tipi indüksiyonlu ocaklarda kullanılan indüksiyon bobinlerinin tasarımı yani manyetik eleman tasarımı konusu ele alınmıştır. İndüksiyonlu ocak bobini 3 boyutlu olarak modellenmiş ve ANSYS/Maxwell programı kullanılarak manyetik analizler yapılmıştır. ANSYS/Maxwell içerisinde bulunan “Eddy Current” analiz yöntemi kullanılmıştır. Yapılan analizlerde yarım köprü seri rezonans evirici devre yapısı kullanıldığı kabul edilmiştir. Bu devre yapısında kullanılacak anahtarlama frekansı, rezonans kapasitörünün değeri, bobin akımının maksimum değeri, bobin sargısının yüksekliği, disk – bobin arasındaki hava aralığı belirlenmiştir. Anahtarlama frekansı, rezonans kapasitörünün değerlerinden yola

çıkarak yük altındaki endüktans değeri bulunmuştur. Anahtarlama frekansını kullanarak girme derinliği hesaplanıp, uygun tel kesiti bulunmuş ve malzeme seçimi yapılmıştır. Tasarlanacak bobinin mekanik ölçüleri belirlenmiştir; iç çap, dış çap, yükseklik. Bir sarımın kesit alanı belirlenip, akım yoğunluğu ve bir sarımda bulunan tel sayısı hesaplanmıştır. Kullanılan ferrit sayısının ve pozisyonunun endüktansa, ferrite akı yoğunluğuna ve tencere tabanındaki akı yoğunluğuna etkisi incelenmiştir. Sargı yüksekliğindeki değişikliklerin sistemdeki etkileri incelenmiştir. Çalışma kapsamında ev tipi indüksiyonlu ocaklarda yaygın olarak kullanılan yuvarlak bobinlerin yerine kullanılabilir yuvarlak köşeli dikdörtgen bobin tasarımı yapılmıştır. Çalışma sonucunda indüksiyon ocak bobin tasarımı yapılmış ve uygun tasarım yapabilmek için akış diyagramı çıkartılmıştır . İndüksiyon bobin tasarımının akış diyagramı ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılması prototip sürecini oldukça hızlandırır ve maliyet avantajı sağlar.

Anahtar Kelimeler: Elektromanyetik analiz, indüksiyonlu ısıtma, indüksiyon bobini tasarımı, sonlu elemanlar yöntemi, indüksiyonlu pişirme

Design of Household Induction Cooker Coils and Examination of Homogeneous Cooking Parameters

Ali Buğra BUĞDAY

Department of Computer Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Selin ÖZÇİRA ÖZKILIÇ

Induction heating provides contactless heating of conductive materials. Nowadays, induction heating technology has many application areas. It is becoming preferred technology in industry, household appliances, medical applications. It has advantages such as efficient and heating quickly, safety, precise control and cleaning. Domestic induction cookers create an alternating magnetic field which allows the pot to be heated directly. An alternating magnetic field is created in the flat spiral coil using a high frequency inverter. The heat generated in the pan is the result of eddy currents created by the magnetic field changing over time at the bottom of the pan. Induction heating can be divided into three main parts: power electronics, control techniques, magnetic element design. Coil and load group in induction cookers; ferromagnetic pot consists of flat spiral coil, ferrite cores and aluminum plate. Half-bridge series resonant inverters and single-switch parallel resonance inverters are widely used as electronic circuit topology in the domestic induction cookers. Coil should be designed according to the circuit topology. In this study, the designing of induction coils which are used in household induction cookers, that is, magnetic element design, is discussed. The induction cooker coil is modeled in 3D and electromagnetic analysis were made by using ANSYS/Maxwell. The "Eddy Current" analysis was used in ANSYS/Maxwell. Series resonance half-bridge inverter circuit topology is assumed to be used in the analysis. The coil is design to be used with series resonance half-bridge inverter circuit topology. The switching frequency that can be used in this circuit structure, the value of the resonant capacitor, the maximum value of the coil current, the height of the coil winding, the air gap between the disc and the coil have been determined. Inductance

and capacitance were calculated based on the switching frequency. Penetration depth was calculated by using the switching frequency and the proper wire cross-section was calculated, and the materials was selected. The mechanical dimensions of the coil which includes inner diameter, outer diameter, height is determined. The cross-sectional area of a winding was obtained, the current density and the number of wires in a winding were calculated. The effects of the number and positions of ferrite is investigated. Ferrite flux density and flux density in the bottom of the pan were obtained from simulations The effects of changes in winding height on the system were analyzed. In addition, two different rounded rectangle coils are designed, which can be an alternative of the circular coils which are used in domestic induction cookers. As a result of the study, seven different induction cooker coils are designed and flow diagrams are created in order to explain method of designing induction coils. Flow diagrams and finite element simulations accelerate the prototype process and provide cost advantage.

Keywords: Electromagnetic simulation, induction heating, induction coil design, finite element analysis, induction cooking

1.1 Literatür Özeti

İndüksiyonlu ısıtma teknolojisinin endüstride, ev eşyalarında ve medikal uygulamalarda oldukça yaygın uygulamaları alanları vardır. Ev tipi indüksiyonlu ocakların, yüksek verim, hızlı ısıtma, hassas güç kontrolü ve güvenlik gibi özelliklerinden dolayı gündün güne popülerliği artmaktadır [1].

Güvenlik, kullanılabilirlik ve tasarım gibi başlıca konulardan dolayı son yıllarda hızla artmaya devam etmektedir. İndüksiyonlu pişirmede ateş olmadığı için, deprem riskinin olduğu ülkelerdeki yüksek katlı binalarda kullanımları oldukça makuldür. Kullanımın artmasından dolayı kullanıcı davranışları ve beklentilerine yönelik teknolojiler geliştirilmeye devam etmektedir.

Ev tipi indüksiyon ocaklarda kullanıcılar doğrudan pişirme performansını tecrübe etmiş olurlar. Pişirme performansı birçok etmene bağlıdır. Homojen pişirmeme problemi de doğrudan bobin ile ilgili bir konudur.

İndüksiyon ısıtma teknolojisi oldukça geniş bir teknoloji yelpazesi sunar; Yüksek frekanslı eviriciler, elektriksel koruma devreleri, yabancı obje tespiti, indüksiyon bobini ve yarı iletken soğutma teknikleri, pişirme algoritmalarının geliştirilmesi, indüksiyon bobini manyetik analizleri ve tasarımları [2]. Geleneksel indüksiyonlu ocaklar, AC-DC doğrultucu, rezonans evirici ve indüksiyon bobininden oluşur.

İndüksiyonlu ısıtmanın geçmişteki gelişmeleri, günümüzde kullanılan teknolojileri ve gelecek çalışmaları, Lucia ve arkadaşları özetlemişlerdir [3].

2020 yılında Huang ve arkadaşları, ferromanyetik olmayan tencereleri ısıtmak için kullanılabilir bir çalışma yapmışlardır. 3 boyutlu sonlu elemanlar yöntemini kullanarak bobinin analizini gerçekleştirmişlerdir. Daha sonra uygun topolojinin seçimini ve diğer hesaplamalar paylaşılmıştır. Bobin analizleri ile elde edilen endüktans ve direnç değeri ile gerçek ölçümler karşılaştırılmış ve %6'dan daha az bir

sapma bulunmuştur [1].

2019 yılında Topuz ve arkadaşları, homojen pişirme performansının doğrulanması için sonlu elemanlar yönteminin kullanıldığı çalışma yapmışlardır. Bu çalışma kapsamında, indüksiyon bobini üç boyutlu olarak modellenmiş ve tencere tabanındaki manyetik akı dağılımları hesaplanmıştır. Sonrasında termal kamera yardımıyla yapılan analiz çalışması doğrulanmıştır [4].

2011 yılında Hakan'ın tez çalışmasında, iki boyutlu sonlu elemanlar yöntemi kullanarak bobin tasarımına etki eden faktörler incelenmiştir. Endüktans ve direnç değerlerine etki eden parametrelerden, sarım sayısı, bobinin sarılacağı tel yapısı, tencere ile bobin arası mesafe, kullanılan malzemeler incelenmiştir. Bu parametreler değiştirilerek, elde edilen sonuçlar açıklanmıştır. Daha verimli bir bobin tasarımı için nelerin gerekli olduğu belirlenmiştir. [5]

Yeni bobin tasarımları daha çok birden fazla bobinin bir araya getirilmesiyle daha esnek bir pişirme yüzeyi elde etmek ve bobinin çalışması sırasında manyetik alandan dolayı ortaya çıkan kayıpları azaltarak verimi maksimum düzeye çıkar üzerine yapılmaktadır [6].

2005 yılında Acero ve arkadaşları litz teli ile sarılan indüksiyonlu ocak bobinin sargı direncini hesaplamak için sade bir metod geliştirmişlerdir. Bu çalışmalarında girdap akımı kayıplarını, iletim kayıplarını ve yakınlık etkisi ile oluşan kayıpları da dikkate almışlardır. Bu metod ile manyetik alanın nümerik hesabı yapılmakta ve uygun litz teli sayısı belirlenebilmektedir. Ayrıca sıcaklığın bobin direncine olan etkisi de hesaplamaların içerisine dahil edilmiştir [7].

2017 yılında Villuendas ve arkadaşları, ev tipi indüksiyonlu ocaklardaki kayıpların kaynağını açıklayan ve sonlu elemanlar yönteminin kullanıldığı bir çalışma yapmışlardır. Çalışmanın sonucunda ferrit nüveler üzerinde oluşan kayıplar ile toplam güç tüketimi arasındaki bağlantı incelenmiş ve ferrit nüveler üzerinde oluşan kayıpların sistem üzerindeki etkisi tartışılmıştır [8].

Farklı kaynaklardan beslenen bobin tasarımları literatürde araştırılmıştır. Bu tasarımda merkezde bir bobin yer almakta, bu bobinin dışına bir bobin daha eklenmektedir. Bobinler farklı elektronik devreler ile kontrol edildiğinde farklı kontrol algoritmaları uygulanabilir ve sistem üzerine koyulan yüke göre kendini ayarlayabilir [9] [10].

2011 yılında Carretero ve arkadaşları, iç içe geçmiş ve iki ayrı kaynaktan beslenen indüksiyonlu ocak sisteminin hesaplamalı modelini geliştirmişlerdir. Çalışmanın ilk

adımında her bir bobinin eşdeğer öz empedansları ve bobinler arasındaki eşdeğer kuplaj empedansı sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Daha sonra bobinin karakteristik özelliklerinin frekansa bağlı değişimi incelenmiştir. [11]. Bu tipte iç içe geçen ve farklı kaynaklardan beslenen bobin tasarımları homojen pişirmenin iyileştirilmesi ve daha hızlı ısıtma işleminin sağlanabilmesi için yüksek güç tüketimine olanak sağlar.

2016 yılında Hataya ve arkadaşları, 2 adet bobinin yüksek frekanslı eviriciler ile birbirinden bağımsız olarak kontrol edildiği çalışmayı yapmışlardır. Bu çalışmada pişirme sırasındaki homojenlik arttırılmaya çalışılmıştır [12].

2017 yılında Han ve arkadaşları, tek bir kaynaktan beslenen birden fazla bobini kullanarak homojen ısıtma performansını iyileştiren yöntem önermişlerdir. Geleneksel tasarımlarda manyetik akı yoğunluğu tencere tabanında bir halka şeklinde oluşur ve tencere merkezinde ve dış bölgelerinde manyetik akı yoğunluğu düşüktür. Önerilen tasarımda iki farklı bobin ayrı ayrı kontrol edilmiş ve homojenliğin en uygun şekilde elde edildiği kontrol yöntemi bulunmuştur. [13].

2014 yılında Acero ve arkadaşları, üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemini kullanarak burgulu yapıda yapılan bobin sargısının etkisini incelemişlerdir. Kayıplar açısından bakıldığında, yüksek burulma derecinden kaçınmanın ve teller arasındaki izolasyonu arttırmanın uygun olduğu sonuca varılmıştır [14].

2008 yılında Acero ve arkadaşları, ev tipi indüksiyonlu ocaklar için burgulu yapıda sarılan bobinin verimini hesaplamışlardır. Bu verim değerini, tencerede oluşan girdap akımı kayıpları ve bobinde oluşan kayıplardan yola çıkarak bulmuşlardır. Burgulu yapıda sarılan bobindeki akım dağılımı eşit değildir ve bobinin direncinde artışa sebep olur. Ferromanyetik malzemeler için burgulu yapıdaki tellerle sarılan bobinin veriminin %95'ten daha yüksek olduğu bulunmuştur. Ancak manyetik olmayan malzemeler için verimlilik çok daha düşüktür (bakır %50, alüminyum %60). Ayrıca 100 kHz'den daha yüksek frekanslarda indüksiyon verimliliği bozulur ve manyetik olmayan malzemeler için düşme daha kötüdür; bu, bu metalleri ticari bir cihazda ısıtmak için yalnızca frekansın arttırılmasının uygun bir strateji olmadığı anlamına gelir. [15].

2002 yılında Llorente ve arkadaşları, ev tipi indüksiyonlu ocaklarda kullanılan devre topolojilerini incelemişlerdir. Tam köprü evirici topolojisi, anahtarlama elemanlarından geçen düşük akım nedeniyle en verimli olanıdır, ancak uygulanması karmaşıktır. Yarım köprü evirici topolojisi, karmaşıklık ve performans arasında uygun bir denge sunar. Tek anahtarlı evirici topolojileri, komponent sayısının az olması nedeniyle basittir, ancak anahtarlama elemanlarının yüksek voltajlara dayanması

gerekir, bu nedenle verimleri düşüktür. Ayrıca, kontrolleri karmaşıktır [16].

2018 yılında Serrano ve arkadaşları, daha esnek bir pişirme yüzeyi elde etmek için birbirlerinin üstüne konumlandırılan bobin tasarımı yapmışlardır. Küçük bobinler ile tasarlanan sistemlere göre bu sistemin verimi daha yüksek çıkmıştır. Bu sistemin kullanılması bobin maliyetlerini azaltır ve elektronik devredeki komponent sayısını azaltır. Önemli ölçüde maliyet avantajı sağlanır. Diğer yönden bobinlerin tencereye olan mesafesinin fazla olması ve empedanslarının farklılığı dezavantajdır. En alttaki bobine daha fazla akım uygulanması veya sarım sayısının arttırılmasıyla manyetik alan arttırılır [17].

1994 yılında Garcia ve arkadaşları, histerezis kayıplarını hesaplamak için girme derinliğini de göz önüne alarak yeni bir yöntem geliştirmişlerdir. [18].

2007 yılında Acero ve arkadaşları, indüksiyonlu ocak bobininin eşdeğer empedansının analitik modelini türetmişlerdir. Frekansa bağlı olarak bobin direncinin değişimi ve deri etkisi, yakınlık etkisi de modele eklenmiştir. Çalışma sonucunda manyetik olmayan malzemelerin ısıtılmasının, düşük eşdeğer empedans, düşük verimlilik ve yüksek kalite faktörü gibi dezavantajları vardır. [19].

2012 yılında Acero ve arkadaşları, frekans-mesafe değişkenlerinin kullanıldığı bir kontrol metodu geliştirmişlerdir. Bu çalışma ile verimde iyileştirme sağlanmış ve sabit frekansın kullanılabilirdiği bir güç aralığı elde edilmiştir [20].

2002 yılında Hernandez ve arkadaşları, iki boyutlu sonlu elemanlar yöntemi kullanarak, girdap akımı analizi yapmışlardır. Bu analiz ile bobin direncini, en uygun tel sayısını, tel çapını ve frekansı elde edilmiştir. Ayrıca sargı direncinin, sıcaklığa bağlı olarak iletkenliğin ve manyetik geçirgenliğin değişmesi sonucu nasıl etkilendiği incelenmiştir [21].

2010 yılında Acero ve arkadaşları, ev tipi indüksiyonlu ısıtmanın verimini ölçtükleri deneysel bir çalışma yapmışlardır [22].

2013 yılında Carretero ve arkadaşları, üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemini kullanarak eliptik bobin tasarımı yapmışlardır. [23]. Bu çalışmada eliptik bobin tasarımı ile maliyet odaklı bir tasarım yapıldığı söylenmiştir fakat ev tipi indüksiyonlu ocak pazarı incelendiğinde bu tipteki ürün tasarımları oldukça maliyetlidir.

2015 yılında Lope ve arkadaşları, litz teli ile sarılan indüksiyonlu ocak bobininin verimini, frekans ve geometri değişkenleri doğrultusunda hesaplamışlardır. Bu çalışmada bobindeki bakır sargı yoğunluğunun en uygun değerine getirilerek verimin iyileştirilmesi sağlanmıştır [24].

1998 yılında Hernandez ve arkadaşları, bobin sıcaklığının yüksek derecelere ulaşmasına çözüm bulmak için bakır folyo kullanarak bobin tasarımı yapmışlardır. Bobin üzerindeki akım dağılımı, bobin kayıplarının azaltılması ve maliyet konuları ele alınmıştır. Folyo kalınlığının tasarımdaki etkisi, ferrit nüvelerin etkisi ve sargıların arasındaki yakınlık etkisi incelenmiştir. [25]

2016 yılında Kılıç ve arkadaşları, geleneksel olarak daire biçiminde olan bobinlere alternatif olarak dış sargıları kare şeklinde ve iç sargıları dairesel olan iki bobin tasarımı yapmışlardır. Bu bobinler ayrı ayrı enerjilendirilebilmektedirler. Ayrıca bobin çifti oluşturulmuş ve bobinler 180 derece faz farklı ile sürüldüğünde maksimum verim elde edilmiştir. [26].

2013 yılında Lope ve arkadaşları, çok katmanlı PCB ile üretilen ve geleneksel olarak kullanılan litz teli ile sarılmış bobine benzer performans sağlayan bobin tasarımı yapmışlardır. PCB üzerinde tasarlanan litz teli yapısı bobin kayıplarını azaltmış ve çok katmanlı birden fazla PCB'nin üst üste yerleştirilmesi ile istenen güç değerlerine ulaşılmıştır. Ayrıca yapılan tasarım sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilmiştir [27].

2016 yılında Serrano ve arkadaşları, PCB ile tasarlanmış küçük boyuttaki bobinlerin tasarımı ve iyileştirilmesi üzerine çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada analitik yöntemler ve sonlu elemanlar yöntemleri kullanılmıştır. Bu yöntemlerin kullanılmasındaki amaç iletim ve yakınlık kayıplarını azaltabilmektir. Bu bobin tasarımı kullanılarak esnek pişirme yüzeyine sahip bir indüksiyonlu ocak yapısı oluşturulmuştur [28]. PCB ile tasarlanan, bobin tasarım çalışmalarının popülerliği artmaktadır [29] [30] [31].

İndüksiyon ocaklarda yapılan yeni tasarımlarının çoğu maliyet problemi ile karşılaşmaktadır. Bu çalışmada indüksiyon bobinin maliyet yönü de düşünülerek mevcutta kullanılan bobinlerin nasıl iyileştirilebileceği ve yeni bir tasarımda nelere dikkat edileceği üzerinde durulmuştur.

1.2 Tezin Amacı

Bu çalışmada, ev tipi indüksiyonlu ocaklarda önemli bir performans kriteri olan homojen pişirmeyi elde etmek için yeni bir bobin tasarımı yapılmıştır. Bu bobin tasarımı ile indüksiyon ocak bobini tasarımı nasıl yapılmalıdır tartışılmış ve tasarımı simülasyon ortamında test edilmiştir. Prototip aşamasında harcanan sürenin azaltılması, bobinin homojenliğinin fiziksel teste ihtiyaç olmadan simülasyon ortamında görülebilmesi ve homojenlik konusunda iyi performans gösteren bir bobin tasarımı yapılması amaçlanmıştır.

1.3 Hipotez

Ev tipi indüksiyon ocaklarda kullanılan indüksiyon bobinlerindeki sargı yerleşimi ve ferrit nüvelerin konumları, tencere tabanındaki ve ferrit nüveler üzerindeki manyetik akı yoğunluğu dağılımını etkileyen faktörlerdir.



2 MAXWELL DENKLEMLERİ

Maxwell denklemleri, elektromanyetizmayı açıklayan 4 adet karmaşık denklem grubudur. Bu denklemler, elektrik ve manyetik alanların nasıl yayıldığını, etkileşime girdiğini ve bunların nesnelere nasıl etkilendiğini açıklar. Maxwell denklemleri elektrik, optik ve radyo teknolojilerine matematiksel model sağlar.

Bu bölümün devamında maxwell denklemleri incelenmiş ve indüksiyon ısıtma ile olan bağlantısı anlatılmıştır.

2.1 Elektrik Alan için Gauss Yasası

Maxwell denklemlerinde, elektrik alanın iki tipi mevcuttur: elektrik yükünden dolayı oluşan elektrik alan ve değişen manyetik alandan dolayı oluşan indüklenmiş elektrik alan. Elektrostatik alanın uzaysal davranışını ve elektrostatik alanı üreten yük dağılımının ilişkili olduğu bu yasa ile açıklanır [32].

Elektrik alan için gauss yasasının iki farklı denklem biçimi incelenmiştir. İntegral biçimindeki gösterim yüzey üzerindeki elektrik alanın normal bileşeninin toplamını içerir. Diferansiyel biçimindeki gösterim, elektrik alanın diverjansı ve boşluktaki tekil noktadaki yük yoğunluğunu ile ilgilidir [32].

2.1.1 İntegral biçimi

Elektrik alan için gauss yasasının integral biçimi denklem 2.1'de verilmiştir.

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{q_{net}}{\epsilon_0} \quad (2.1)$$

Eşitliğin sol tarafında, kapalı bir S yüzeyinden geçen elektrik akısının matematiksel açıklamasıdır. Denklemin sağ tarafında ise yüzeyin içinde bulunan toplam yük miktarının, ϵ_0 boşluğun yalıtkanlık sabitine bölünmesini açıklar. Elektrik yükü elektrik

alan oluşturur. Elektrik alanın herhangi bir kapalı yüzeyden geçen akısı, o yüzeyin içinde bulunan elektrik yükü ile doğru orantılıdır [32].

2.1.2 Diferansiyel biçimi

Elektrik alan için gauss yasasının diferansiyel biçimi denklem 2.2'de verilmiştir.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (2.2)$$

Eşitliğin sol tarafında, elektrik alanın diverjansının matematiksel gösterimidir. Diverjans, elektrik alanın belirli bir noktadan uzaklaşma eğilimidir. Denklemin sağ tarafı, elektrik yük yoğunluğunun boşluğun yalıtkanlık sabiti ile bölünmesidir. Elektrik yükünün pozitif yüklerin uzaklaşması ve negatif yüke yakınsamasıyla elektrik alan oluşur [32].

2.2 Manyetik Alanlar İçin Gauss Yasası

Gauss yasasının elektrik alan ve manyetik alan versiyonlarının sebebi, pozitif ve negatif yükler birbirlerinden ayrıştırılabilirken, manyetik kutuplar (kuzey ve güney) her zaman çiftler halinde bulunurlar. İzole edilmiş manyetik kutup doğada bulunamaz. Bu durum manyetik alanın davranışını açıklar yani manyetik alanın başlangıç noktasına döneceğini bize gösterir.

2.2.1 İntegral biçimi

Manyetik alanlar için gauss yasasının integral biçimindeki denklemi 2.3'de verilmiştir.

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (2.3)$$

Denklemin sol tarafındaki eşitlik, kapalı bir yüzeyden geçen vektör alanının akısının matematiksel açıklamasıdır. Manyetik akı, Kapalı bir S yüzeyinden geçen manyetik alan çizgilerinin toplamıdır. Denklemin sağ tarafı sıfırdır [32].

Manyetik alan için gauss yasası özetle, herhangi bir kapalı yüzeyden geçen toplam manyetik akı sifıra eşittir. Fakat bu yüzeyden hiç manyetik alan çizgisi geçmediğini söyleyemeyiz. Bu yüzeyin çevrelediği hacimden geçen her bir manyetik alan çizgisi için, bir manyetik alan çizgisi hacimden ayrılmalıdır. Böylece içe doğru giren manyetik akı, dışa doğru giden manyetik akıyı kesinlikle dengeler.

2.2.2 Diferansiyel biçimi

Manyetik alan için gauss yasasının diferansiyel biçimi denklem 2.4'de verilmiştir.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.4)$$

Eşitliğin sol tarafında, manyetik alanın diverjansının matematiksel gösterimi vardır. Manyetik alanın diverjansı, manyetik alanın bir noktadan uzağa doğru olduğundan daha güçlü akma eğilimidir. Denklemin sağ tarafındaki eşitlik sıfırdır [32].

Manyetik alanın diverjansı herhangi bir noktada sifıra eşittir. Manyetik kutupları izole edemeyiz yani kuzey kutbu olmadan güney kutbu olamaz ve manyetik yük yoğunluğu her yerde sıfır olmalıdır. Bu da manyetik alanın diverjansının sıfır olduğu anlamına gelir.

2.3 Faraday Yasası

1831 yılında Michael Faraday yaptığı bir dizi deney ile, kapalı bir devrenin kapsadığı manyetik akıyı değiştirerek, devrede elektrik akımının indüklenebileceğini bulmuştur. Bu açıklamayı sadeleştirirsek, değişen manyetik alan elektrik alan üretir. Bu elektrik alanlar, elektrik yükünün oluşturduğu elektrik alanlardan oldukça farklıdır ve Faraday'ın indüksiyon yasası elektrik alanlarının davranışını anlamının anahtarıdır.

2.3.1 İntegral biçimi

Faraday yasasının integral biçimindeki denklemini 2.5'de verilmiştir.

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad (2.5)$$

Bir yüzeyden geçen değişken manyetik alan, o yüzeyin herhangi bir sınır yolu üzerinde elektromotor kuvveti (emf) meydana getirir ve manyetik alanın değişmesi dolaşan elektrik alan oluşturur. Eğer emf meydana gelen sınır üzerinde iletken malzeme bulunursa, indüklenen elektrik alan, malzeme boyunca akımı yönlendiren bir emk sağlar [32]. Benzetim yapacak olursak, sabit bir tel halkanın içine bir mıknatıs çok hızlı bir şekilde sokmak tel içerisinde elektrik alan oluşturur fakat mıknatıs sabit tutulursa elektrik alan oluşmaz. Denklemdaki negatiflik, indüklenen emf'in akı değişimine karşı çıktığını açıklamaktadır.

2.3.2 Diferansiyel biçimi

Faraday yasasının diferansiyel biçimindeki denklemi 2.6'de verilmiştir.

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.6)$$

Eşitliğin sol tarafında, elektrik alanın burulmasının matematiksel gösterimidir. Elektrik alanın burulması, elektrik alan çizgilerinin bir nokta etrafında dolaşma eğilimidir. Eşitliğin sağ tarafında manyetik alanın zamana göre değişim oranını temsil eder [32]. Özetle, dolaşan manyetik alan, elektrik alanın zaman ile değişmesi sonucu oluşur.

2.4 Ampere - Maxwell Yasası

Ampere yasası sabit bir akımın dolaşan bir manyetik alan üretmesini açıklar. Ampere yasası sadece sabit durumlarda geçerlidir. Ampere yasasının uygulanabilirliğini zamana bağlı koşullara genişleten, Maxwell'in değişen bir elektrik akımını denkleme eklemesiydi. Ampere yasası denklem 2.7'de verilmiştir.

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_{net} \quad (2.7)$$

2.4.1 İntegral biçimi

Ampere - Maxwell yasasının integral biçimi denklem 2.8'de verilmiştir.

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \left(I_{net} + \epsilon_0 \frac{d}{dt} \int_S \vec{E} \cdot d\vec{A} \right) \quad (2.8)$$

Denklemin sol tarafı, manyetik alanın kapalı bir C yolu etrafındaki dolaşımının matematiksel gösterimidir. Denklemin sağ tarafı manyetik alan için iki kaynak içerir; C yolu ile sınırlanmış herhangi bir S yüzeyi boyunca sabit bir iletim akımı ve değişen bir elektrik akısı [32].

Bir yüzeyden geçen bir elektrik akımı veya değişen bir elektrik akısı, o yüzeyi sınırlayan herhangi bir yol etrafında dönen bir manyetik alan üretir.

2.4.2 Diferansiyel biçimi

Ampere - Maxwell yasasının diferansiyel biçimi denklem 2.9'de verilmiştir.

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \left(\vec{J} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) \quad (2.9)$$

Eşitliğin sol tarafında, manyetik alanın burulmasının matematiksel gösterimi vardır. Manyetik alanın burulması, manyetik alan çizgilerinin bir nokta etrafında dönme eğilimidir. Eşitliğin sağ tarafında ise elektrik akım yoğunluğu ve elektrik alan değişiminin matematiksel ifadeleri yer almaktadır. Kısaca, dolaşan bir manyetik alan, bir elektrik akımı ve zamanla değişen bir elektrik alanı tarafından üretilir. Buradaki ana düşünce, değişen bir elektrik alanının, hiçbir yük olmadığı ve akım akmadığı zaman bile değişen bir manyetik alan oluşturmasıdır.

İndüksiyonlu ısıtma, temassız olarak iletken malzemelerin ısıtılması işlemidir. İndüksiyonlu ısıtmanın temelinde yüksek frekanslı alternatif akımın indüktör üzerinden akması sonucu oluşan manyetik alanlar vardır. Yüksek frekanslı alternatif akımı üretmek için farklı devre yapıları kullanılabilir. Bunlar temel olarak yarım köprü ve tam köprü rezonans evirici, tek anahtarlı rezonans eviricidir. Alternatif akım ile aynı frekansta oluşan ve zamanla değişen manyetik alan, iletken malzemeden yapılmış olan tencerenin tabanında akım indükler. Bu indüklenen akım faraday yasası ile açıklanır [17]. Özetle, bobinden akan alternatif akımın oluşturduğu zamanla değişen manyetik alan, tencerenin tabanında girdap akımları ve manyetik histeresiz oluşturur [33]. Girdap akımları, ısıtılmak istenen malzemeye uygulanan manyetik alana zıttır ve ısıyı joule etkisi (3.1) ile üretirler. Bu indüksiyonlu ısıtma işleminin ana ısı kaynağıdır. Bunun yanında, manyetik histerezis, ferromanyetik materyallerin içinde ek ısı oluşturur. Bunlar tencerede ısıyı oluşturur.

$$Q = I^2 \times R \times t \quad (3.1)$$

Q: Isı enerjisi (Joule) I: Akım (Amper) R: Direnç (ohm) t: Zaman (saniye)

Formül 3.1'de Q, direnci R olan bir iletken üzerinden t sürede geçen akım I tarafından yaratılan ısıdır. Akım (amper), direnç (ohm), zaman da (saniye) olduğunda Q'nun birimi joule olacaktır.

Bu bölümde sistemin manyetik ve elektriksel eşdeğer devre modelleri incelenerek sistemin nasıl çalıştığı açıklanmış, sistemde oluşan kayıplardan bahsedilmiştir.

3.1 İndüksiyonlu ısıtmanın avantajları

Yerleşim alanlarında enerjinin verimli kullanımı gittikçe önem kazanmaktadır. Klasik pişirme yöntemlerine alternatif olarak indüksiyonlu pişirme kullanımı giderek

yaygınlaşmaktadır. [34]

Ev tipi indüksiyonlu ocakların avantajları aşağıdaki gibi 4 ana başlık altında sınıflandırılabilir: Hızlı ısıtma: İndüksiyonlu ısıtma teknolojisinde, ısıtılacak malzeme doğrudan ısıtılır, yüksek güç yoğunlukları ve herhangi bir maddesel ısı transferi olmadığı için boşa harcanan ısı azdır ve bu yüzden ısıtma sürelerini önemli ölçüde kısalır. İndüksiyon ısıtmanın temassız olmasından dolayı ısıtılacak elemanın, ısıtma elemanı ile bağlantı yoktur [3]. Günümüzde indüksiyonlu pişiricilerdeki gözler, şebekeden 3.6kW'a kadar güç çekebilecek şekilde tasarlanmaktadır.

Verimlilik: Modern gelişmiş ve verimli bobin tasarımı ve güç devrelerinin tasarlanması ile %90'ın üzerinde verimler elde edilebilmektedir. İndüksiyonlu ısıtmada sadece ısıtmak istenilen malzeme ısıtıldığı için ortam ve çevresel elementler aracılığı ile ısı kaybı oldukça azdır böylece yüksek ısıya çıkılabilir.

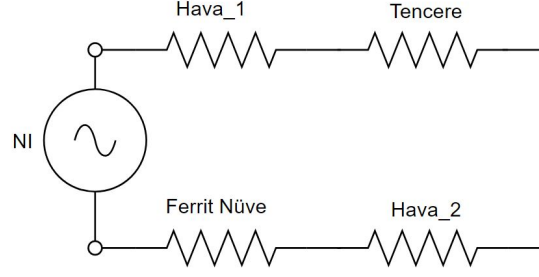
Isı kontrolü: Isıtılacak tencerenin ne kadar ısıtılacağı bobin tasarımı ve güç devresi ile hassas bir şekilde kontrol edilebilmektedir. Hassas sıcaklık kontrolü, önceden tanımlanan sıcaklık profilleri, çalışma ve pişirme modları, ocağın açık unutulmasının önlenmesi ve boş tencere algılama algoritmaları ev tipi indüksiyon ocaklara eklenebilmektedir.

Temizlik ve güvenlik: Ev tipi indüksiyonlu ocaklarda sadece tencere ısıtıldığı için tencere çevresindeki sıcaklık düşük olur. Böylece tencere çevresine dökülen yemeklerin yanmasından kaçınılmış olunur. Ayrıca sıcaklık kontrolü devamlı yapıldığı için yüksek sıcaklıklara çıkıldığında, güvenlik algoritmaları devreye girer ve güvenli pişirme ortamı sağlanır.

3.2 Bobin-Tencere Grubunun Manyetik Eşdeğer Devresi

İndüksiyonlu pişirme uygulamalarında indüktör, çekirdeğinin çoğunun ve sekonderinin, ısıtılacak ferromanyetik tencere olduğu kayıplı bir transformatör gibi davranır. Transformatörde manyetik akının büyük bir bölümü çekirdek üzerinden akarken, bobinde manyetik akı yolu çoğunlukla bobinin içinden geçer. Bu yüzden bobin sargılarındaki iletkenlerde girdap akımları oluşur. İletkenlerdeki girdap akımları sargı kayıplarını artırır [21].

Ev tipi indüksiyonlu ocaklarda ise bobinde oluşan manyetik alanın izlediği yol en basit şekilde, hava boşluğundan geçerek tencereye ulaşır, tenceden tekrar hava boşluğuna geçer ve ferrit nüveler üzerinden geçerek devresini tamamlamış olur. 3.1'de eşdeğer devre modeli verilmiştir. Eşdeğer devrede akan manyetik akı (Φ) iki hava aralığı, ferrit



Şekil 3.1 İndüksiyon ocak Manyetik devre modeli

nüve ve tencereden geçer. Ampere yasasını bu durum için sadeleştirecek olursak,

$$N \times I = \Phi \times \mathfrak{R} \quad (3.2)$$

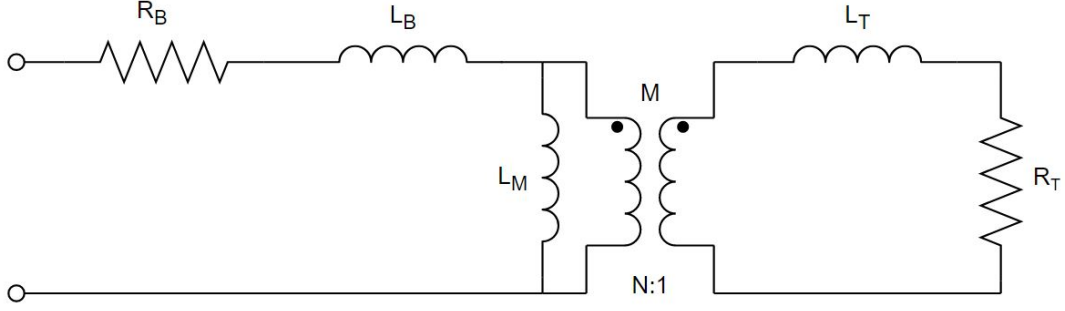
3.2'deki formüle göre, akım değeri sabit tutulur ve bobinin sarım sayısı arttırılsa manyetik akı artacaktır. Manyetik akının artması sonucu, manyetik akı yoğunluğu artacağından, kayıplar artar.

$$L = \frac{N^2}{\mathfrak{R}} \quad (3.3)$$

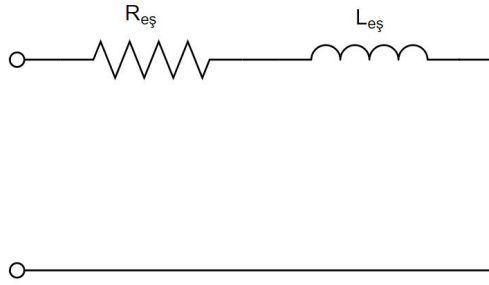
3.3 Bobin-Tencere Grubunun Elektriksel Eşdeğer Devresi

İndüksiyonlu ısıtmanın fiziği maxwell denklemleri ile oldukça kapsamlı şekilde açıklanabilirken, elektriksel özellikleri eşdeğer devre modeli kullanılarak daha kolay anlaşılacaktır.

Bobin ve tencereden oluşan sistem, sekonderi bir sarımlı , primeri çok sarımlı olan bir transformatör gibi çalışır. Primerde görülen direnç değeri, dönüştürme oranının karesi ile artmaktadır.



Şekil 3.2 İndüksiyon ocak elektriksel devre modeli



Şekil 3.3 Eşdeğer devre modeli

3.4 Bobin ve Tencere Üzerinde Oluşan Kayıplar

Bobin sargılarında iletim kayıpları ve girdap akımı yapıları oluşur. iletim kayıpları sargı direnci ile ilgilidir, tel sayısı ve sıcaklığa bağlı olarak değişir. Girdap akımı kayıpları manyetik akı yoğunluğu ile ilgilidir. Bobinin iç sargılarında manyetik akı yoğunluğu, bobinin içindeki minimum noktadan 3 kat daha fazladır [21].

Bobinin iç sargılarında güç kaybı yoğunluğu daha fazladır. Yüksek sıcaklıklarda iletken telin direncinin artmasından dolayı, litz telindeki girdap akımı kayıpları azalır. Ayrıca bobinin sıcaklığı arttıkça manyetik akı yoğunluğu artmaktadır [21].

İndüksiyonlu ocak bobininin sargılarında oluşan güç kayıplarının üç farklı kaynağı vardır. Birincisi, akım taşıyan iletken üzerinde oluşan güç kayıplarıdır. İkincisi, sargıdaki her bir telin birbirleriyle olan etkileşimi sonucu oluşan yakınlık etkisinden kaynaklanan güç kayıplarıdır. Üçüncüsü, manyetik alanın diğer sargılar üzerinden indüklediği akımlardan dolayı oluşan güç kayıplarıdır. Bu üç farklı kaybı topladığımızda sargıdaki toplam güç kaybını buluruz [35].

3.4.1 Bakır Kayıpları

Bakır kayıpları, indüksiyon ocaklarda bobini oluşturan iletkenlerden akım geçmesi sonucu oluşan kayıplardır. Bakır kayıpları, iletkenlerin omik direncinden dolayı ısı şeklinde ortaya çıkar. Transformatörlerin bakır kayıpları kısa devre deneyi yapılarak bulunur. Kısa devre deneyinde transformatörün sekonder sargısı kısa devre edilir ve primer sargısına varyak yardımı ile düşük gerilim uygulanır. Transformatörün sargısından geçen akım nominale ulaştığında güç değeri hesaplanır. Bakır kayıpları sargıda kullanılan iletkenin direnci ve iletkenin geçen akımın karesi ile doğru orantılıdır. Düşük frekanslı uygulamalarda girme derinliği yüksek olduğu için kalın kesitli ve düşük dirençli iletkenler kullanılır. Böylece bakır kaybı azaltılmış olur [21].

İndüksiyon ocaklarda bobin tencere grubunun elektriksel eşdeğer devresi incelendiğinde sekonder sargının tek sarım olduğu yani kısa devre olduğu görülür. Tencerenin elektriksel karşılık yüküdür. Bu yüzden tencerede oluşan kayıplar bakır kayıpları olarak kabul edilmemelidir.

3.4.2 Demir Kayıpları

Ev tipi indüksiyon ocaklarda en verimli çalışma ferromanyetik tencereler ile elde edilir. Isıtılacak malzemenin diğer bir deyişle tencerenin, manyetik geçirgenliğinin ve elektriksel direncinin büyük olması gerekir. Alüminyum ve bakır gibi malzemelerin iletkenliği yüksek ve manyetik geçirgenliği yüksektir. Bu tip malzemeleri ısıtılmak için girme derinliği mümkün olduğunca azaltılmalı (frekans arttırılmalı) ve akım değeri arttırılmalıdır [36]. Ev tipi indüksiyon ocaklarda, ocağın üzerine koyulan tencere ve sargıların altına bulunan ferrit nüveler arasında bir akı yolu oluşur ve bu akı yolunda kayıplar meydana gelir. İndüksiyonlu ısıtmanın doğası gereği alternatif akım kullanılır. Alternatif akımdan dolayı, tencere ve ferrit nüveler üzerinde manyetik ve elektriksel kayıplar oluşur. Manyetik kayıplar, histerezis kaybı olarak, elektriksel kayıplar ise girdap akımı kaybı isimlendirilir.

3.5 Deri ve Yakınlık Etkisi

Deri ve yakınlık etkisi, yüksek frekanslı elektrik akımının iletkenlerin dış yüzeyinden akma eğiliminin sonucu olan etkilerdir. Bu etkilerden dolayı iletkenlerin etkin direnci, yüksek frekanslarda kayda değer biçimde artmakta ve frekansa bağlı olarak değişmektedir.

3.5.1 Deri Etkisi

Elektrik akımının iletken içerisinde eşit olmayan bir dağılım göstermesine deri etkisi denir. Tek bir iletkenin geçen doğru akım düşünüldüğünde, o iletkenin içindeki elektrik akımı dağılımının iletkenin kesiti alınıp bakıldığında eşit olduğu görülür. Bu durum alternatif akım için geçerli değildir. Aynı iletkenin alternatif akım geçirildiğinde elektrik akımının iletken içerisinde eşit dağılmadığı görülür. En fazla elektrik akım yoğunluğu her zaman iletkenin yüzeyindedir ve iletkenin merkezine doğru elektrik akımının yoğunluğu azalır [37].

Frekans yükseldikçe girme derinliği azalır. Bu yüzden indüksiyonlu ocaklarda yüksek frekanslara çıkıldığında iletkenin etkin yüzeyini arttırmak için ince teller kullanılır. Deri etkisi, iletkenin akım taşıyan etkin kesitini azalttığı için iletkenin direnci artar. Deri etkisini ortadan kaldırmak için indüksiyonlu ocaklarda birbirinden izole yapıda burgulu teller kullanılarak bir tel demeti oluşturulur. Bu tel demeti litz teli olarak isimlendirilir. İndüksiyonlu ocaklarda kullanılan bobinlerin içerisinde alternatif akım geçtiği için deri etkisi oluşur ve dikkat edilmesi gereken bir noktadır.

İndüksiyon bobininde oluşturulan ve zamana göre değişen manyetik alan çizgileri, tencere üzerinden geçtiğinde tencere tabanında girdap akımları oluşur. Manyetik alan zamana bağlı olarak değiştiği için tencerede de deri etkisi görülür. Tencerenin tabanında oluşan girdap akımının dolaştığı alan ne kadar küçük olursa, tencerenin yüzey direnci o kadar yüksek olur.

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho_c}{\mu\omega}} \quad (3.4)$$

$\omega = 2\pi f$: manyetik alanın açısal hızı

μ : malzemenin geçirgenliği (bakır için bu değer $\mu \cong \mu_0$)

ρ_c : iletken malzemenin (bakır) elektriksel direnci

$$\rho_c = 23 \times 10^{-9} \Omega\text{m} (100^\circ\text{C})$$

$$\rho_c = 17.24 \times 10^{-9} \Omega\text{m} (25^\circ\text{C})$$

Denklem 3.4'de frekans 20500Hz olarak kabul edildiğinde, bakırın girme derinliği 0.53mm bulunmuştur. Bu değer altındaki çapa sahip iletkenlerin kullanılması deri etkisini minimize eder.

3.5.2 Yakınlık Etkisi

Deri etkisini açıklarken iletkenin tek başına olduğunu ve çevresinde akım taşıyan başka iletken olmadığını kabul edilmişti. Çoğu pratik uygulamada bu mümkün değildir. Çoğunlukla birçok iletken biriyle yakınlık içerisinde. Bu iletkenlerin ayrı ayrı oluşturdukları kendi manyetik alanları vardır ve çevrelerindeki manyetik alanlar ile etkileşimdedirler. Güç yoğunluğunun dağılımında ve elektrik akımının akışında yakınlık etkisinin etkisi görülür [37].

3.6 Rezonans Frekansı

Rezonans frekansının ideal değeri, ısıtma performansını en üst seviyeye çıkartabilmek için hesaplanmalıdır. Anahtarlama frekansının artırılması ile bobinin gördüğü direnç değeri artar. Isıtma verimi eşdeğer direncin artmasından dolayı artar. Eşdeğer direnç, tencerenin yüzey direncinin frekans yükseldikçe artmasından kaynaklanır.

Yarım köprü rezonans eviricilerde anahtarlama kayıplarını azaltmak için anahtarlama frekansı, rezonans frekansından yüksek seçilmelidir [1]. Frekans aralığının belirlenmesi gerekmektedir. Ses frekansının genel olarak kabul görmüş aralığı 20 ila 20.000 Hz'dir. Bu yüzden tencerede oluşan titreşimlerden kaynaklı seslerin ortadan kaldırmak için sabit 20500Hz frekans seçilmiştir.

$$f_{rez} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.5)$$

İletkenliği yüksek malzemelerin indüksiyonla ısıtılması en basit yolu, bobinde dolaşan uyarım akımının frekansı arttırmaktır. Fakat frekansın yükselmesiyle sargılardaki AA kayıpları artacaktır. Özetle, indüksiyonla ısıtma verimliliği, kritik bir frekansın üzerinde önemli ölçüde artmaz [38].

EV TİPİ İNDÜKSİYONLU OCAK BOBİNİNİN TASARIMI

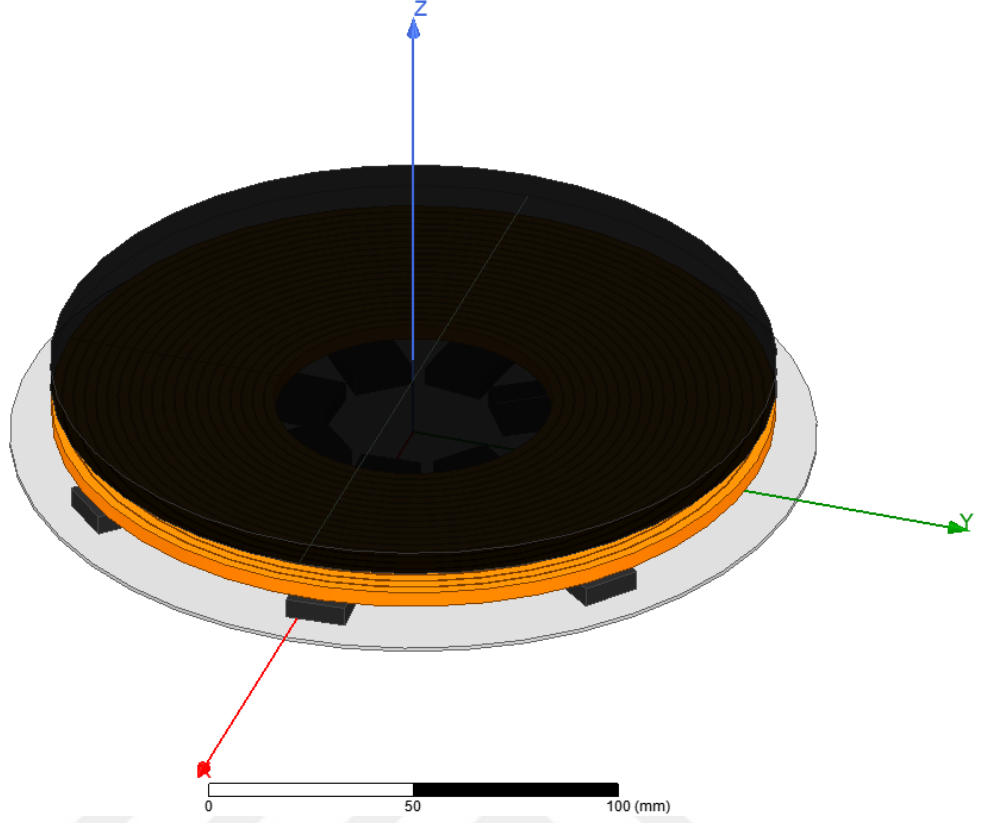
İndüksiyon ocaklarda kullanılan bobinin üç fonksiyonu vardır:

- Şebekeden aldığı enerjiyi manyetik alan ile tencereye aktarmak.
- Manyetik alanı tencere tabanına eşit bir şekilde dağıtmak
- Evirici devresindeki rezonans grubunun bir parçası olmak.

Ev tipi indüksiyon ocaklarda yüksek verime ulaşmak için bobin tasarımının optimum yapılması gereklidir. Tasarım süresinin ve prototip sayısının azaltılabilmesi için bobin analiz araçlarının kullanılabilir. Bu çalışma kapsamında farklı bobin yapıları tasarlanmış ve analizleri gerçekleştirilmiştir. Bobin tasarım ve analiz çalışmalarında analitik hesaplamalar yapılmış ve sonlu elemanlar yöntemi (FEM) yazılımları kullanılmıştır. Bu tez çalışması kapsamında yapılan analizlerde ANSYS/Maxwell yazılımı kullanılmıştır. Bobin gereksinimleri belirlenmiş, bobin ve ferit boyutları belirlenmiş ve analiz sonuçları değerlendirilmiştir. Bu tasarım ve analiz süreci tarif edilmiştir.

4.1 Ev tipi İndüksiyonlu Ocak Bobininin Yapısı

Şekil 5.3'te indüksiyonlu ocak bobinin üç boyutlu modeli gösterilmiştir. Bu model ANSYS/Maxwell programı kullanılarak çizilmiştir. Temperli camın manyetik bir etkisi olmadığı için gizlenmiştir. Bu sayede üç boyutlu model daha sade hale gelmiştir.



Şekil 4.1 ANSYS Maxwell programında çizilen indüksiyon bobini

Ev tipi indüksiyonlu ocaktaki bobin grubu temel olarak:

- Alüminyum Plaka
- Ferrit Nüveler
- Bobin sargıları
- Temperli Cam
- Tencere 'den oluşur.

3 boyutlu modelin en altında gri renkli alüminyum plaka yerleştirilmiştir. Alüminyum plakanın üzerinde siyah renkli ferrit nüveler bulunmaktadır. Ferrit nüvelerin üzerinde turuncu renkli bobin sargıları ve bobin sargılarının üzerinde de siyah renkli disk modeli bulunmaktadır.

4.1.1 Alüminyum plaka

Şekil 5.3'te gri renkte olan alüminyum plaka bobininin en altında yer alır, ferritleri ve sargılar alüminyum plaka üzerinde bulunur. Bobinin altına konumlandırılan elektronik kartların manyetik alandan etkilenmemesini sağlar [21]. Ayrıca bobinde oluşan ısıyı daha geniş bir yüzeye yayarak bobinin soğutulmasında da etkilidir. Alüminyum plaka kalınlığı 1.2mm olarak belirlenmiş ve bu tezde kapsamında yapılan analizlerde bu değer kullanılmıştır. Plakanın kalınlığının azaltılması soğutma performansını düşürebilir, tasarıma göre değişmekle beraber belirli bir inceliğe kadar ekranlama açısından olumsuz bir etki yaratabilir. Bobinin altına yerleştirildiği içinde boyutunun bobini kapsaması gerekmektedir.

4.1.2 Ferrit nüveler

Ev tipi induksiyon ocaklarda bobin sargılarının altına ferrit nüveler yerleştirilir. Bu ferrit nüvelerin koyulmasının iki sebebi vardır:

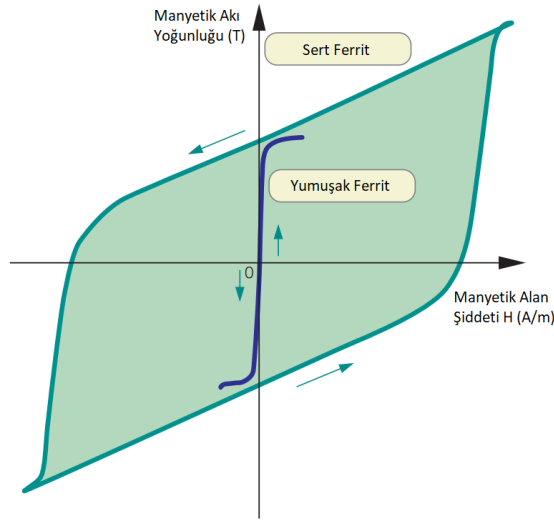
- Manyetik akının yolunu kısaltmak
- Manyetik akı kayıplarını azaltmak

Ferrit nüveler yüksek frekansta kullanılırlar. Bunun sebebi yüksek frekansta yüksek geçirgenlik ve düşük elektriksel iletim gösterirler. Düşük iletkenlik göstermelerinin avantajı eddy akımlarının azalmasıdır.

İki farklı ferrit türü vardır; Yumuşak ve sert ferritler. Sert ferritlerin manyetik akı yönü kolay kolay değişmez, bu yüzden mıknatıs yapımında kullanılırlar. Mıknatıs özelliklerini uzun süre korurlar fakat darbe ve ısı yoluyla mıknatıs özellikleri azalır.

Yumuşak ferritler ise nüve yapımında kullanılırlar. Çünkü manyetik akı yön değişimlerine karşı düşük kayıp gösterirler. Bu da daha düşük histeresiz kaybı demektir. Yumuşak ferritler Mn-Zn (Mangenez - çinko) ve Ni-Zn (Nikel - Çinko) olarak ikiye ayrılırlar. Mn-Zn ferritler, harika magneto-elektriksel karakteristiğe sahiptirler çünkü yüksek geçirgenliğe, yüksek B_s değerine sahiptir ve çekirdek kayıpları düşüktür. Yüksek geçirgenliklerinden dolayı kullanılabilecekleri frekans 1Mhz'in altındadır.

Ni-Zn ferritler, Mn-Zn ferritlere göre, daha düşük geçirgenlik ve B_s değerlerine sahiptir. Çekirdek kayıpları ve elektriksel direnci yüksektir [39]. Ev tipi induksiyonlu ocaklarda Mn-Zn tipi ferritler, yüksek geçirgenliğe, yüksek sıcaklık dayanımına sahip oldukları için tercih edilirler. Doyum noktaları da yüksek olduğu için yüksek güçlere çıkılmak istenilen tasarımlarda tercih edilirler.



Şekil 4.2 Manyetik malzemenin B-H eğrisi [39]

4.1.3 Bobin Sargıları

Ev tipi indüksiyonlu ocaklarda bobin sargılarını sararken litz teli kullanılır. Litz teli birden fazla yalıtılmış iletken telin, birbiri etrafında bükülerek veya örülerek ya da kısmi olarak birbiri üzerine örülmüş tel öbeklerinin tekrar birbirleri üzerine örülmesi ile oluşturulan tel grubunu olarak tanımlanabilir. Litz telinin boşluk faktörü düşüktür, tel çok damarlı olarak sarılırken, teller arasında boşluklar kalır [12]. Burgulu yapıda tasarlanan sargıların doğru bir şekilde modellenmesi deri etkisi ve yakınlık etkisinden dolayı kolay değildir.

4.1.4 Temperli Cam

Bobin grubu ve tencere arasındaki hava boşluğunu oluşturur. Temperli cam kalınlığı standart 4mm'dir. Cam temperleme işlemiyle ısıya dayanıklı hale gelir ve tencerenin tabanı çok yüksek sıcaklıklara ulaşsa bile cam sağlamlığını korur.

4.1.5 Tencere

Ev tipi indüksiyon ocaklarda ferromanyetik malzemeden yapılan tencereler yüzey dirençlerinin yüksek olması sebebiyle verimli şekilde kullanılabilirler. Avantajlarının yanında ferromanyetik tencere kullanmanın iki dezavantajı bulunmaktadır. Bunların birincisi, tencereye uygulanan manyetik alan kuvvetinin yüksek olması durumunda, ferromanyetik malzeme doyuma ulaşır. Doyuma ulaşıldığı, bobin akımında oluşan ani yükselişten anlaşılabilir. İkinci dezavantajı ise indüksiyon yüklerinin çeşitliliğidir. Birbirlerinden çok farklı malzemelerden yapılmış farklı büyüklüklerde pişirme elemanları insanlar tarafından kullanılmaktadır. Bu da tasarlanan indüksiyon

bobini tasarımını etkilemekte ve kontrol sistemini karmaşıktırılmaktadır.

Isıtma elemanlarının malzemelerindeki çeşitlilik, malzemelerin farklı bağıl manyetik geçirgenlik (μ_r) ve elektriksel iletkenlik (σ) değerlerine sahip olmasından kaynaklanır [40].

Tencerelerin karakteristiğini anlamak için yapılmış çalışmalar mevcuttur [36] . Tencerenin iletkenliği malzemesinin türüne ve sıcaklığa göre değişir ve tencerelerin karakteristik olarak sınıflandırılabilmesi için iletkenliklerine bakılabilir.

Ev tipi indüksiyonlu ocaklarda tencerenin ocak ile maksimum uyum içerisinde olması için yüksek direnç değeri şartının sağlanması gerekir. Fakat burada dikkat edilmesi gereken nokta, tenceredeki kayıpları hesaplarken en basit şekilde $W = I^2 \times R$ formülünü kullanabiliriz. Bu formüle göre toplam kayıp akımın karesi ile orantılı iken direnç ile sabit orantılıdır. Bu durumda direncin çok artmasının, akımın azalmasına ve bir noktadan sonra direnç artışının tenceredeki kayıpların azalmasına sebep olacağını çıkartabiliriz. IGBT anahtarlama kayıplarının en düşük olması için de yüksek endüktans değerinin olması gerekir. Endüktans değerinin düşmesi rezonans frekansının da düşmesine sebep olur. Anahtarlama frekansı ile rezonans frekansı arasındaki farkın büyümesi aktarılan gücü azaltır. Ev tipi indüksiyonlu ocaklarda kullanılacak en uygun tipteki tencere, dökme demir tencedir.

AISI 430 çelik-alüminyum tencerelerin kullanımı yaygınlaşmaktadır. Alüminyum içeriğinden dolayı düşük direnç ve endüktans değerlerine sahiptirler. Düşük çapı olan tencerelerde, tencerenin bobini yapsayamaz bu yüzden endüktans değeri düşer ve kullanılan anahtarlama elemanlarının anahtarlama kayıpları artar [36]. AISI 304 çelik tencere ferromanyetik tipte bir tencere değildir fakat bobini kapsayacak kadar bir tencere kullanıldığında ısıtılabilirler. AISI 304 çelik tip tencereler düşük endüktans ve düşük direnç değerlerine sahip oldukları için kullanılan anahtarlama elemanlarının anahtarlama kayıpları yüksektir [36].

4.2 İndüksiyonlu Ocak Bobini Tasarımı

Bobin tasarımına başlarken bobinin iç ve dış çapının belirlenmesi gerekmektedir. Bu değişkenler bobinin yüksekliğine etki etmektedir. Ev tipi indüksiyon ocaklarda bobinlerin ortasına NTC konumlandırılmaktadır. Bu yüzden bobinin orta noktasında boşluk bırakılmalıdır. Bobinin iç sargılardaki kayıp yoğunluğu daha fazladır [41]. Bu yüzden, iç sargıların NTC'ye yakın olması, okunan sıcaklık değerinin gürültüden etkilenmesine yol açabilmektedir. Bu çalışmada 50mm ve 69mm iç çaptaki bobin tasarımları yapılmıştır. Tablo 5.5'de detaylar bulunabilir.

Tablo 4.1 Tasarımı önerilen bobin parametreleri

Parametre	Değer	Tolerans
Tencere materyali	Döküm demir	
Tencerenin çapı	180mm	±%1
Bobin Dış Çapı	180mm	±%3
Bobin İç Çapı	50mm - 69mm	±%3
Sargı Yüksekliği	4mm	±%5
Hava Aralığı	5.8mm	±%2
I_{RMS}	35A	±%10
Güç	3000W	±%10
Anahtarlama frekansı	20500Hz	
Tencersiz Endüktans Değeri	63 uH	±%3
Tencereli Endüktans Değeri	45 uH	±%3
Rezonans Kapasitans Değeri	1.36 μF	
R_{es}	2 Ω	±%10

Formül 3.5'de, Tablo 5.5'deki tencereli endüktans değeri ve rezonans durumu için gerekli kapasite değeri kullanılarak, rezonans frekansı 20334 Hz bulunmuştur.

Yarım köprü seri rezonans evirici ile tasarlanan bir sistemin güç devresi, tam rezonans frekansında anahtarlama elemanı sıfır gerilim veya sıfır akımda anahtarlama yapacaktır. Ancak indüksiyonlu ocaklarda yük sabit olmadığı için devre rezonans frekansının altında veya üzerinde çalışacaktır. İndüksiyon ocak uygulamalarında rezonans frekansı üzerinde çalışma kayıpların minimuma indirilebilmesini sağladığı için daha mantıklı olmaktadır. Endüktans değeri arttıkça rezonans frekansının değeri düşmekte, endüktans değeri azaldıkça rezonans frekansının değeri artmaktadır. Tasarım yapılırken, rezonans frekans değerinden yüksek bir frekans değeri tablo 5.5'de seçilmiştir.

Belirlenen anahtarlama frekansı değerinden yola çıkarak girme derinliği 0.53mm olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan girme derinliği için kullanılacak tel ölçüleri Tablo 4.3'de verilmiştir.

İndüksiyon ocak bobinleri, kayıpları minimize etmek için Litz telleri ile sarılan bir bobindir. Kullanılan teller birbirlerin izoledir ve örgü biçiminde birbirleri üzerine sarılırlar. Uç noktaları birleştirilir ve her izole tel yaklaşık olarak aynı akımı taşımış olur.

Tablo 4.2 AWG - Tel çapları

AWG	Çap (mm)
AWG 24	0.511
AWG 25	0.455
AWG 26	0.405
AWG 27	0.361
AWG 28	0.321
AWG 29	0.287
AWG 30	0.254

Tasarımda 30AWG çapında litz teli kullanıldığı düşünülmüştür. 120 telli bir bobin sargısının kesit alanı 4.1 formülü kullanılarak hesaplanabilir.

$$A = D^2 \times N \quad (4.1)$$

D:Kullanılan telin çapı

N: Bir sarımı oluşturan tel sayısı

A: Bir sarımın yaklaşık kesit alanı

Bir sarımdaki kesit alanı $7,74192 \text{ mm}^2$ olarak bulunmuştur. Simülasyon ortamında gerçek hayattaki toleranslar da dahil edilerek 2,5mm sargı genişliği ve 4mm sargı yüksekliği kullanılmıştır. Simülasyon ortamındaki kesit alanı 10 mm^2 'dir.

Bobinin toplam yüksekliği ürünün yerlesiminde kritik bir değerdir. Değerler yaklaşık olarak tablo 4.3'te paylaşılmıştır.

Tablo 4.3 İndüksiyonlu ocak bobininde kullanılan malzemelerin yükseklikleri

Malzeme	Yükseklik (mm)
Al plaka	1
Silikon yapıştırıcı	0.2
Ferit	5
Silikon yapıştırıcı	0.1
Mika	0.5
Silikon yapıştırıcı	0.1
Bobin	4
Silikon yapıştırıcı	0.1
Spacer	1.3
Silikon yapıştırıcı	0.1
Mika	0.3
Temperli cam	4

4.3 Bobin Tasarımında Kullanılan Parametreler

Tasarımı önerilen bobin parametrelerine (tablo 5.5) göre bobin tasarımına başlanır. Bu parametrelerde tencereli ve tenceresiz hedeflenen endüktans değeri, bobinin dış ve iç çapları, bobine uygulanacak olan akımın RMS değeri ve bobinin hangi frekansta çalışacağı belirlenmelidir.

Bobinin dış ve iç çapları geometriyle ilgilidir ve endüktans değeri geometriye göre değişiklik gösterir. Belirlenen dış ve iç çap ölçülerini değiştirmeden sargı yüksekliği değiştirilerek farklı endüktans değerleri elde edilebilir. Bu yüzden sargı yüksekliğini mekanik yerleşime ve kısıtlara göre belirlemek faydalı olacaktır. Daha sonra belirlenen dış ve iç çaplarda istenen bobin geometrisinin yerleşip yerleşemeyeceğine bakılır.

Güç devresinde limitlenecek maksimum RMS akım değeri belirlendikten sonra bobin sargılarındaki akım yoğunluğu hesaplanmalıdır.

$$J = \frac{I_{RMS}}{\pi n_s (d_b/2)^2} \quad (4.2)$$

- Girme derinliği (δ) [mm]
- Litz teli çapı (d_s) [mm]
- Tel sayısı (n_s) [mm]
- Sarım çapı (d_b) [mm]
- Akım yoğunluğu (J) [A/mm^2]
- Sarım sayısı (N)

RMS akım değerinin 35A olarak kabul edilmesi sonucunda akım yoğunluğu 5.756A olarak hesaplanmıştır. Bobinin soğutulmadığı sistemlerde, bobinin akım yoğunluğu 4-7A/ mm^2 , bobinin soğutulduğu sistemlerde ise akım yoğunluğu maksimum 10A/ mm^2 olacak şekilde tasarım yapılması önerilir.

Tasarımda kullanılan bazı kabuller aşağıda sıralanmıştır.

- Bobin ve tencere arasındaki mesafe 5.8mm'dir.
- Tencerenin merkezi ile bobinin merkezindedir.
- Litz tellerinin simülasyonu oldukça karmaşık olduğundan dolayı [42], [43], simülasyonda çok telli yapı seçilmiştir, litz telleri ayrıca modellenmemiştir.

5

SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ KULLANILARAK EV TİPİ İNDÜKSİYONLU OCAK BOBİNİNİN ANALİZİ

Simülasyon modelleri ANSYS/Maxwell programı kullanılarak 3 boyutlu olarak çizilmiştir. Simülasyonda kullanılan model, alüminyum plaka, ferrit nüveler, bobin sargıları ve metal diskten oluşmaktadır. Malzemeler arasındaki boşluklar gerçek ölçüm sonuçları temel alınarak bırakılmıştır. Manyetik akı dağılımını hesaplamak için Maxwell programında girdap akımı modu seçilmiştir.

Metal diskin malzemesi döküm demirdir. Gerçekte bobin sargıları çok telli yapıda sarılır, fakat bu analizlerde yakınlık kayıpları incelenmediği için litz teli yapısı (burgulu yapı) ihmal edilmiştir. Diğer parametreler ve durumlar, indüksiyon ocak bobini üzerinden ölçülerek bulunmuştur. Uyarım akımı sinüs dalga formundadır, tepe değeri 60A, frekans değeri 20500Hz olarak belirlenmiştir.

Örnek bobin üzerinde, bir tur bobin sarımının yüksekliği 4mm ve eni 2.5mm olarak ölçülüp simülasyonda kullanılmıştır. Temel bobinin (Bobin1) yarı çapı 89.75mm, sargılar arasındaki mesafe 0.275mm olarak çizilmiştir.

Bobin tasarımında kullanılacak ferrit sayısını ve boyutlarını belirlemek için ferrit nüvelerin etkisinin incelenmesi gerekmektedir. Ferrit nüveler üzerindeki akı yoğunluğu, nüvenin doyuma girip girmediği anlamak için önemli bir parametredir. Maksimum manyetik akı yoğunluğu değerinin ferrit nüvenin doyuma ulaştığı (B_{sat}) değerden küçük olması gerekmektedir. B_{sat} değeri ferrit nüvenin teknik çiziminde üretici tarafından paylaşılmalıdır. Metal disk, çapı 180mm ve kalınlığı 6mm olan bir silindir olarak çizilmiş ve bobin sargılarının 5.8mm üzerinde konumlandırılmıştır.

Tablo 5.1'te tasarlanan bobinlerin iç çapı, dış çapı, sarım sayısı, ferrit sayısı ve ölçüleri verilmiştir. Bu verilen değerler kullanılarak, farklı bobinler arasında kıyaslama yapılabilir.

Tablo 5.2’te bobinlerin tencereli, tencerelisiz durumlardaki endüktans ve direnç değerleri verilmiştir. Tenceresiz değerler bobin üretimi sonrasında yapılacak kontrollerde bu değerler referans olarak kullanılabilirler. LCR metre ile bu değerlerin ölçümü oldukça basittir. İndüksiyonlu ocak çalışırken elektronik devrenin gördüğü yük tencereli durumdur. Tenceresiz durumda rezonans evirici devresine yük olarak bağlanan bobinin direnç değeri çok düşük olduğu için, yüksek akımlar devreden geçebilir. Bu yüzden tenceresiz durumda elektronik kontrol sistemi tencere tanıma algoritmalarını kullanarak tencerenin olup olmadığı kontrol eder. Analizler sonucunda tencereli durumda elde edilen veriler daha anlamlıdır ve yorumlanabilirler. İlerleyen bölümlerde bu sonuçlar etraflıca tartışılacaktır.

Tablo 5.3’da bobin sargılarında ve tencere üzerinde oluşan kayıplar verilmiştir. Bu sonuçlar kullanılarak bobin prototipi gerçekte test edildiğinde, şebekeden ne kadar güç çekilebileceği, sargılar üzerinde ne kadar kayıp olacağı tahmin edilebilir.

Tablo 5.1 Bobin özellikleri

Bobin no	İç çap (mm)	Dış çap (mm)	Sarım	Ferit sayısı
Bobin1	69	180	20	7x[70x15x5]
Bobin2	69	180	20	7x[60x15x5]
Bobin3	69	180	20	7x[60x15x5]+6x[40x15x5]
Bobin4	50	180	10+11	7x[70x15x5]+7x[40x15x5]
Bobin5	50	180	10+11	8x[66x15x5]

Tablo 5.2 Bobinlerin direnç ve endüktans sonuçları

Bobin No	R [mΩ]	L [μH]	R(Tencere) [Ω]	L (Tencere) [μH]
Bobin1	53.131	59.500	1.986	44.726
Bobin2	56.184	56.020	1.723	44.815
Bobin3	52.365	62.744	1.985	48.253
Bobin4	45.287	59.446	1.885	44.425
Bobin5	49.201	53.321	1.757	39.998

Tablo 5.3 Bobin ve tenceredeki kayıplar

Bobin No	Tencere Kayıpları [W]	Sargı Kayıpları [W]
Bobin1	3550.1	24.325
Bobin2	3077.5	23.941
Bobin3	3547.9	24.348
Bobin4	3369.8	23.715
Bobin5	3137.9	23.729

Hesaplanan tencereli ve tenceresiz direnç değerleri ile bobinin ısıtma verimi:

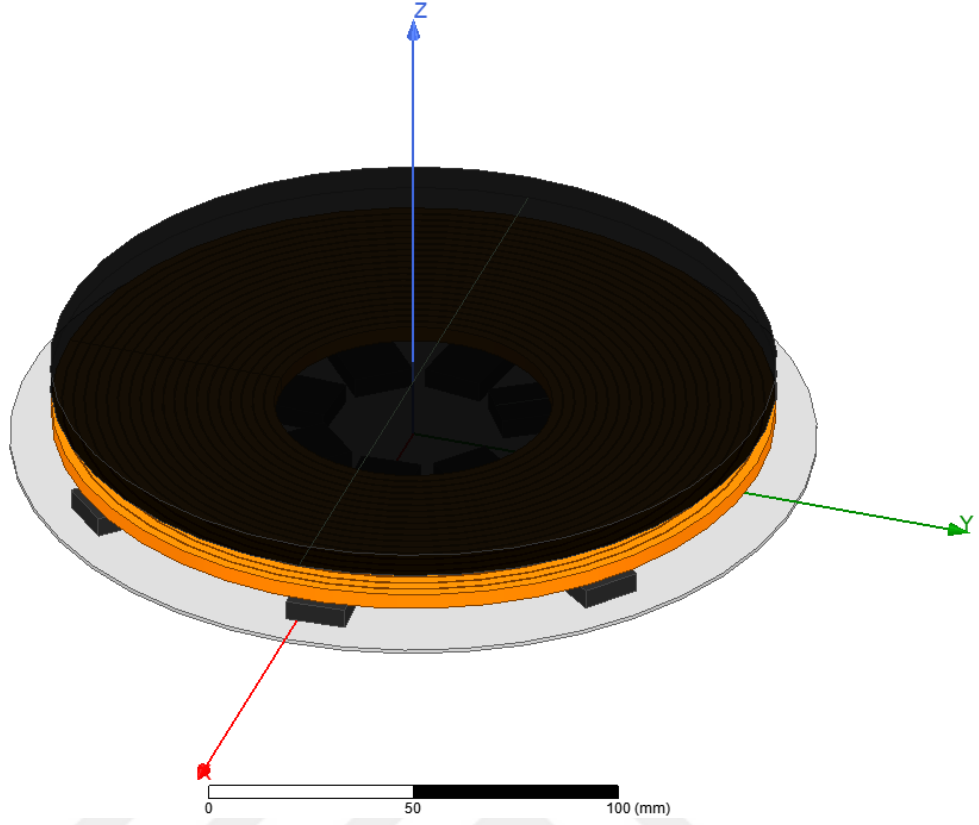
$$\eta = \frac{P_{tencere}}{P_{tencere} + P_{kayip}} = \frac{R_{tencere}}{R_{esdeger} + R_{devre}} \approx \frac{R_{tencere}}{P_{esdeger}} \quad (5.1)$$

- $R_{tencere}$: Tencerenin direnci
- R_{bobin} : Bobin direnci
- $P_{kayip}(= P_{devre} + P_{bobin})$: Rezonans devresinin kaybı
- $R_{esdeger} = R_{tencere} + R_{bobin}$: Tencereli bobinin direnç değeri
- $R_{devre} \ll R_{esdeger}$: Rezonans devresinin direnci

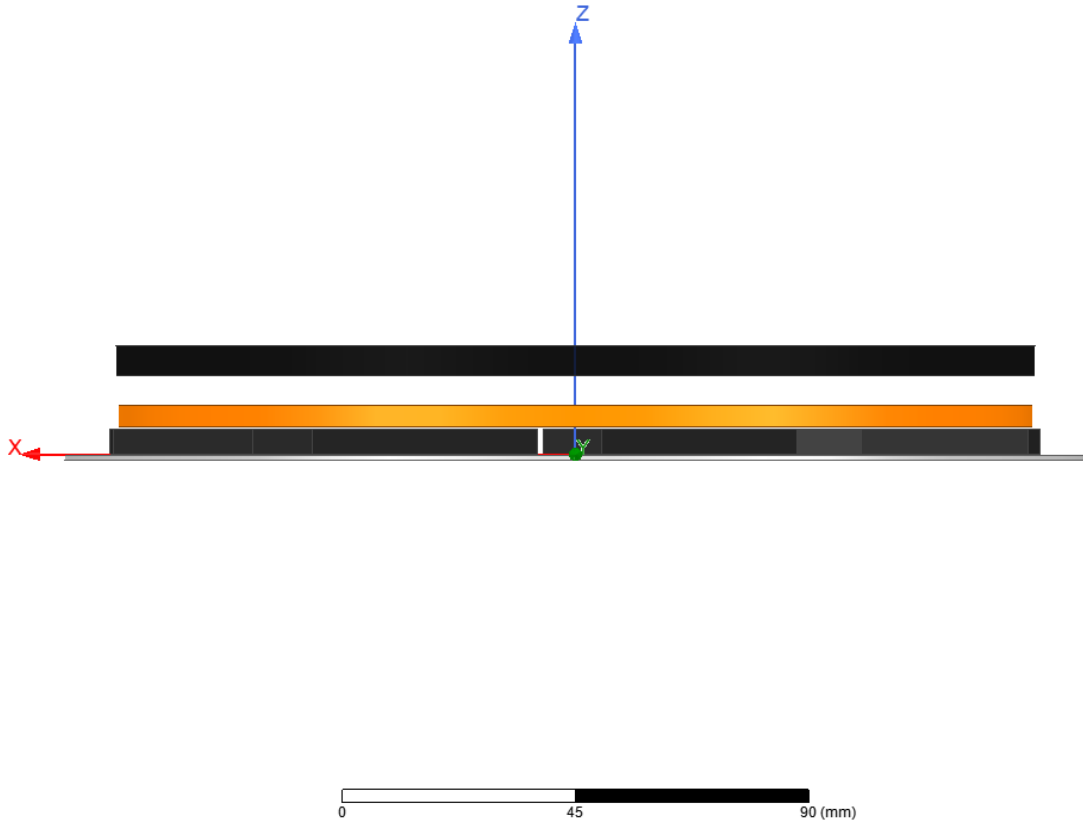
$R_{tencere}$, deri etkisinden dolayı frekansın karesi ile orantılıdır, fakat R_{bobin} , litz telindeki yakınlık etkisinden dolayı frekansın doğrusal olmayan bir fonksiyonudur [44]. Tablo 5.4'de tenceresiz ve tencereli durumda yapılan analiz sonuçları paylaşılmıştır. Direnç değerlerine göre hesaplanan verim değeri en yüksek bobin4 tasarımında elde edilmiştir. Bu verim değeri, bobin sargıları ve tencere üzerinde oluşan kayıpların birbirine olan oranıdır.

Tablo 5.4 Direnç değerleri ile verimin hesaplanması

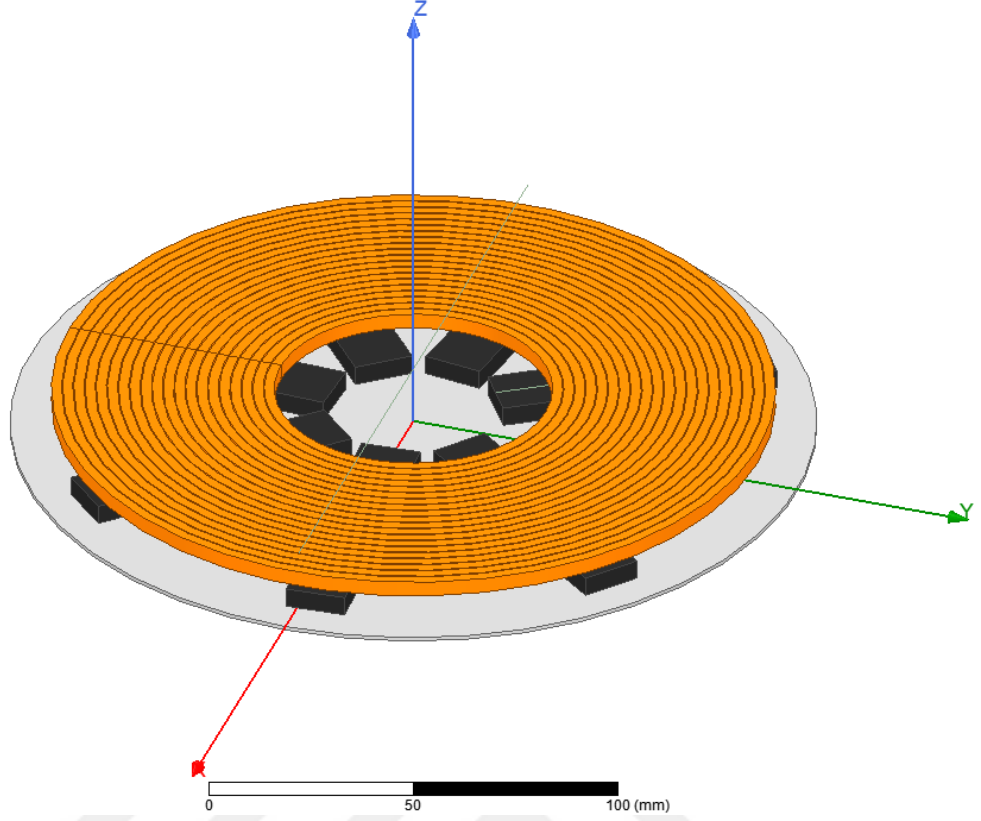
Bobin No	R [mΩ]	R(Tencere) [Ω]	Verim η]
Bobin1	53.131	1.986	%97.40
Bobin2	56.184	1.723	%96.85
Bobin3	52.365	1.985	%97.45
Bobin4	45.287	1.885	%97.66
Bobin5	49.201	1.757	%97.28



Şekil 5.1 3D bobin - tencere modeli üstten görünüm



Şekil 5.2 3D bobin - tencere modeli yandan görünüm



Şekil 5.3 3D bobin modeli üstten görünüm

5.1 Sargı Sayısının Etkisi

Sarım sayısının artırılması, eşdeğer direnci arttırmanın bir yoludur. Bu durumda manyetik akı yoğunluğu artacaktır. Manyetik akı yoğunluğunun artması ile de histerezis kayıpları ve girdap akımı artacaktır.

Eşdeğer direncin formüsel gösterimi 5.2'de verilmiştir.

$$R_{es} = N^2 \times \sqrt{4\pi^2 \times 10^{-7} \times \sqrt{f \times \mu_t \times \rho_t}} \quad (5.2)$$

3.2'de gösterildiği gibi elektriksel devre modelinde primer N sarımlı, sekonder ise 1 sarımlı olarak modellenir. Bu durumda primerin sarım sayısını arttırmak, primerde görünen değeri dönüştürme oranının karesi kadar arttırır.

Sarım sayısının artması ile sargılardan geçen yüksek frekanslı alternatif akımın yol açtığı yakınlık kayıpları artar. Sarım sayısını arttırmak endüktansın artmasına sebep olur. Q kalite faktörünün frekansa göre olan grafiği sivrileşir ve sistemin frekansa olan hassasiyeti artar [45].

Mekanik yerleşim açısından, sarım sayısı arttırıldığında bobinin kapladığı alan ve

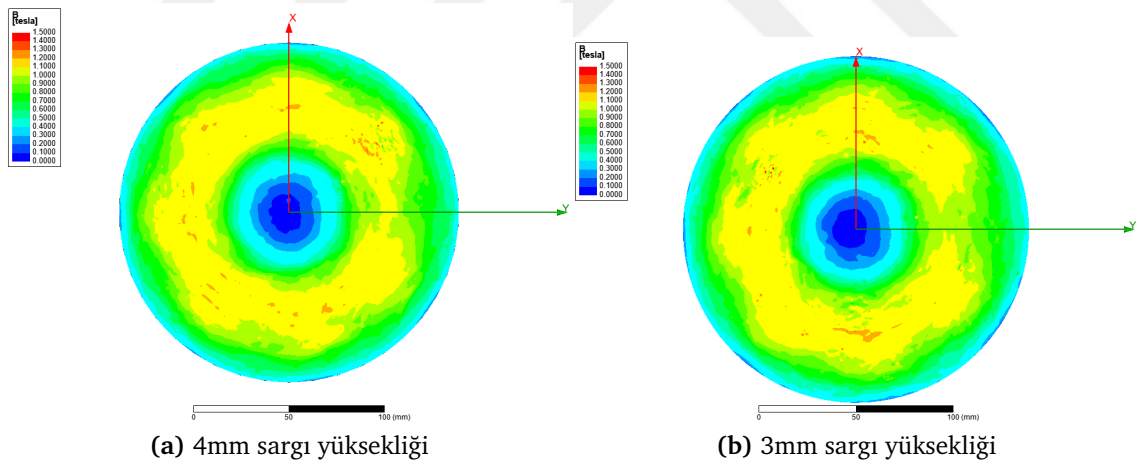
bobinin ağırlığı artar.

Maliyet açısından, bobin sarımında kullanılan litz telinin miktarı arttığı için bobinin maliyeti artar.

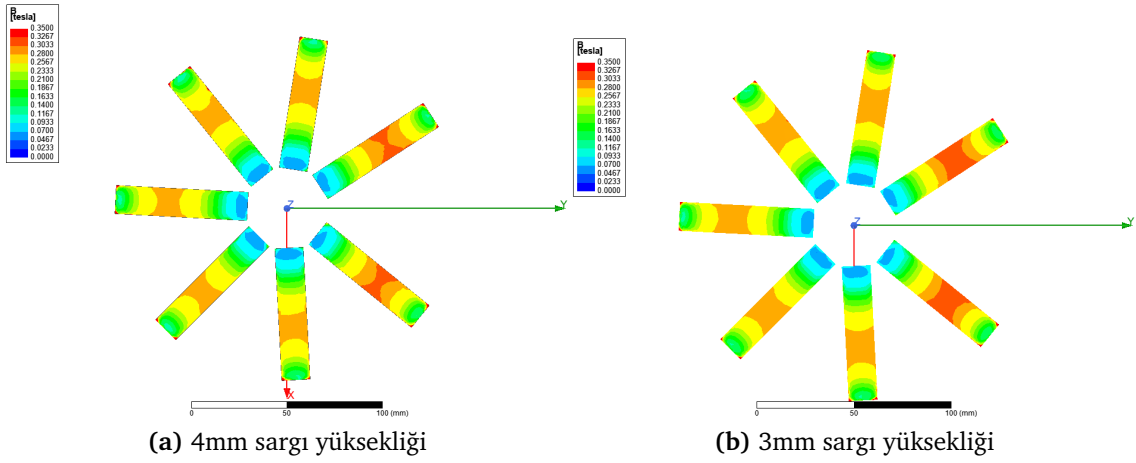
5.2 Sargı Kalınlığının Etkisi

İndüksiyonlu ocak bobini, litz teli adı verilen ve burgulu yapıda sarılan çok telli bir yapıdan oluşmaktadır. Bobinin üretimi sırasındaki toleransları ve tellerin arasında kalacak boşluğu düşünürsek bir sarımın kesitini 4.1 formülünden yola çıkarak hesaplayabiliriz.

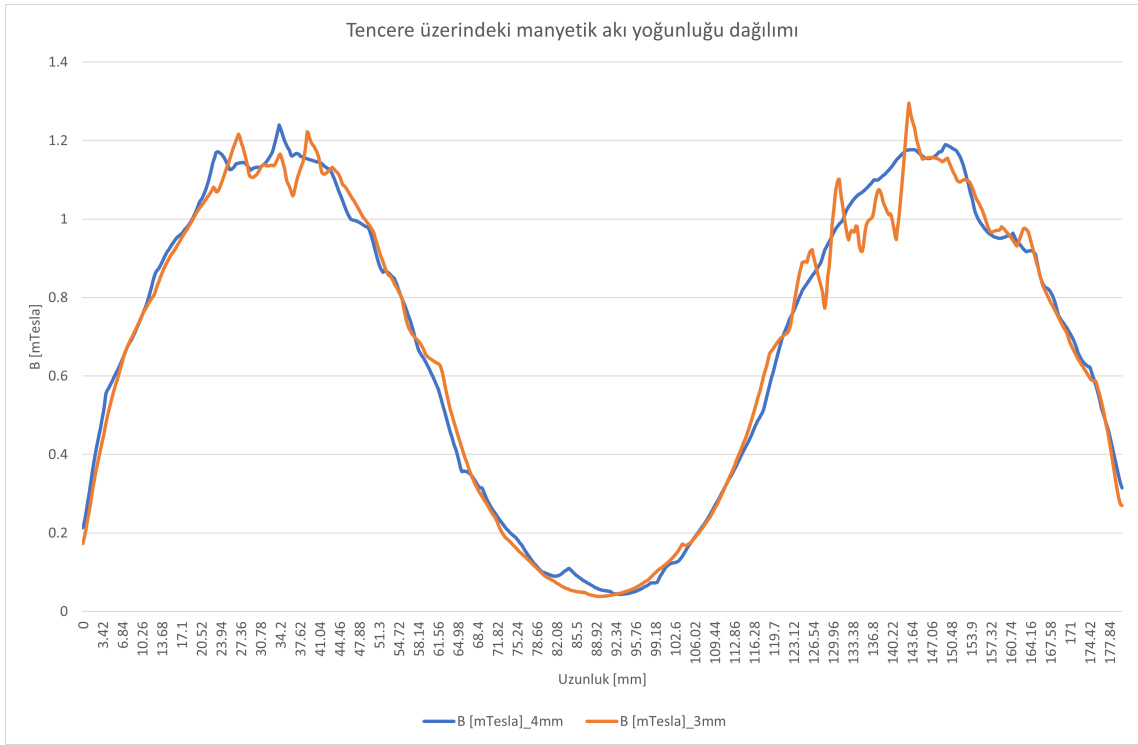
Bobin1 tasarımı üzerinde ferrit – disk mesafesi sabit tutulup analiz yapılmıştır. Sargı kalınlığı 4mm'den 3 mm'ye düşürülmüştür. Bu analiz sonucunda disksiz durumda sargı direnci artmış ve endüktans düşmüştür. Tencereli durumda analiz yapıldığında eşdeğer direncin azaldığı ve eşdeğer endüktansın yükseldiği görülmüştür. Bu durum kuplajın azaldığı anlamına gelmektedir. Katı kayıplarında da bir düşüş olmuştur. Sargı kayıpları ise artmıştır. Bunun sebebi aynı akım değerinin daha düşük bir kesit alanından geçmesidir.



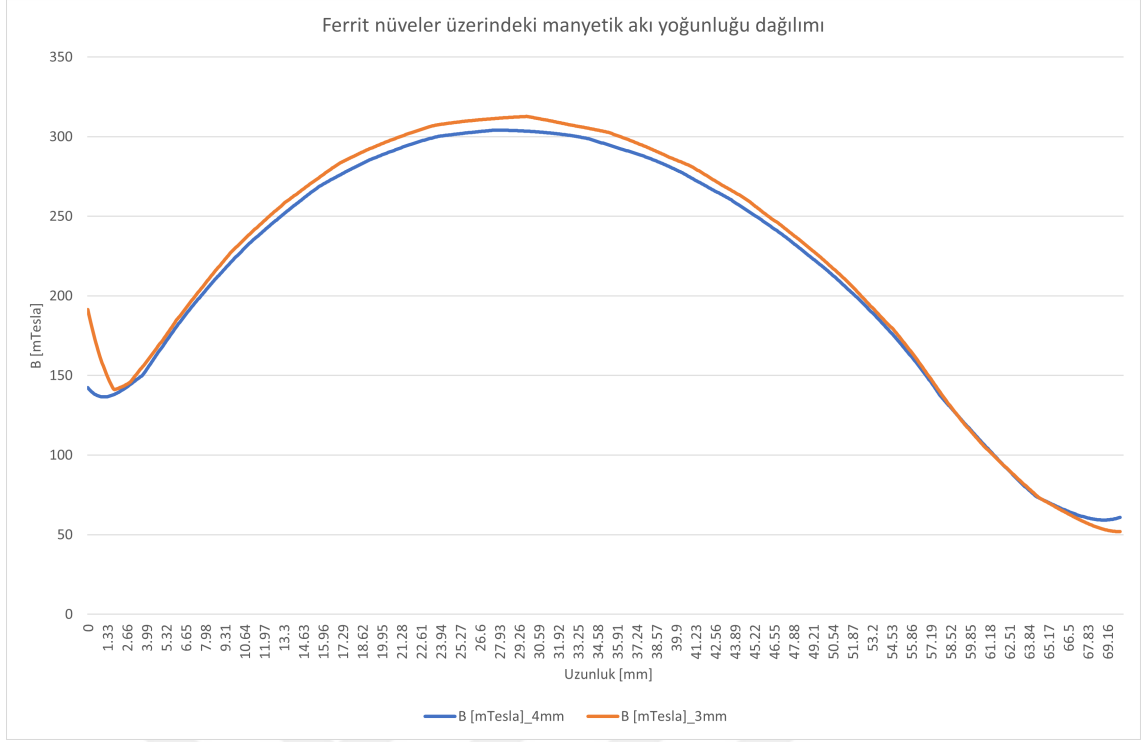
Şekil 5.4 Sargı kalınlığının, tencere üzerindeki manyetik akı yoğunluğunun dağılımına etkisi



Şekil 5.5 Sargı kalınlığının, ferrit nüveler üzerindeki manyetik akı yoğunluğunun dağılımına etkisi



Şekil 5.6 Tencere üzerindeki manyetik akı yoğunluğunun dağılımı



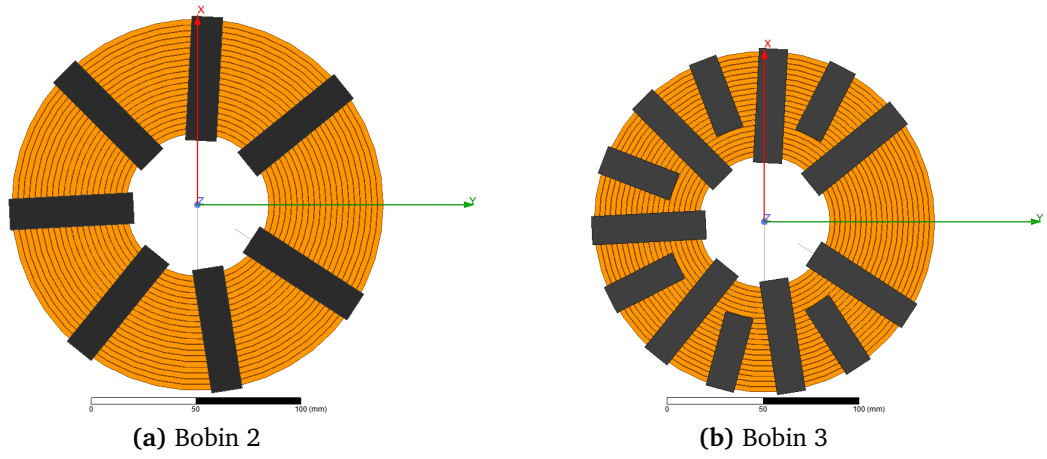
Şekil 5.7 Ferrit nüveler üzerindeki manyetik akı yoğunluğunun dağılımı

5.3 Ferrit Nüve Sayısının Etkisi

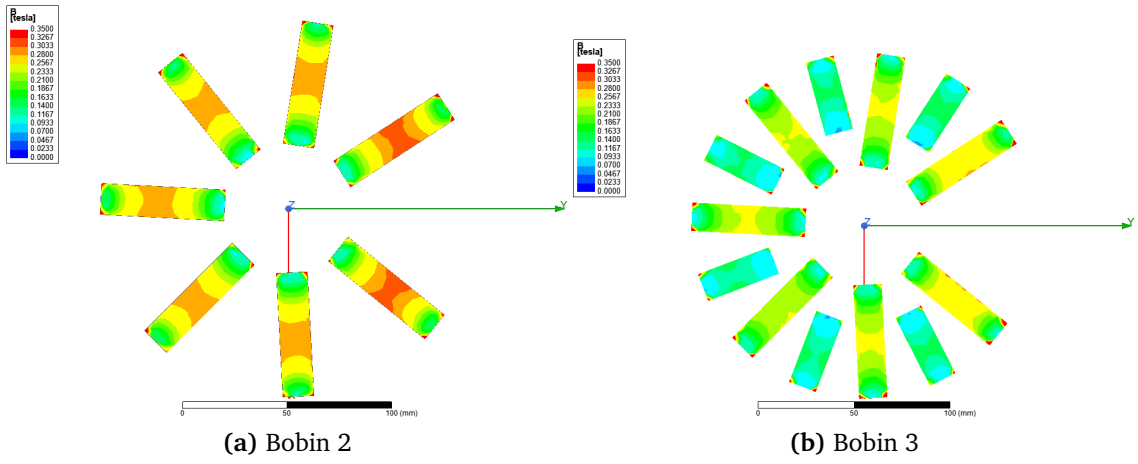
Yapılan analizler sonucunda, ferrit nüveler üzerindeki en yüksek manyetik akı yoğunlukları 5.5'te sayısal değerleri ile paylaşılmıştır. Ferrit sayısının arttırılmasının doyuma olan etkisini incelemek için Bobin2 tasarımına ferritler eklenerek Bobin3 tasarımı oluşturulmuştur. Bobin2 tasarımında, manyetik akı yoğunluğu maksimum 307.8426 mT iken, ferritlerin eklenmesi ile Bobin3 tasarımında 270.9347mT seviyesine düşmüştür. Ferrit miktarının artması endüktans değerini arttırmıştır. Katı kayıplarında artış olmuş ve disk tabanındaki manyetik akı yoğunluğunun dağılımı iyileşmiştir.

Tablo 5.5 Bobin özellikleri

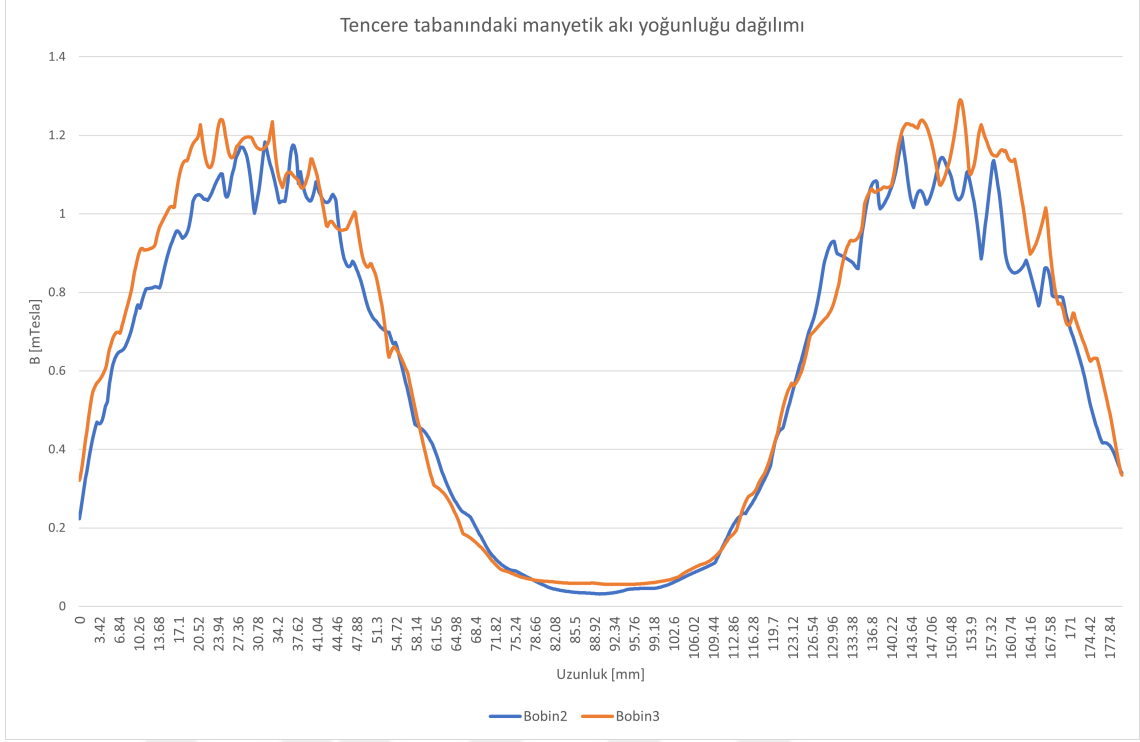
Bobin No	Ferrit Nüve (B_{max}) [mT]
Bobin1	304.071
Bobin2	307.8426
Bobin3	270.9347
	145.8095
Bobin4	235.9861
	130.7131
Bobin5	246.2717



Şekil 5.8 Ferrit nüvelerin dağılımı



Şekil 5.9 Ferrit nüveler üzerindeki manyetik akı yoğunluğu dağılımı



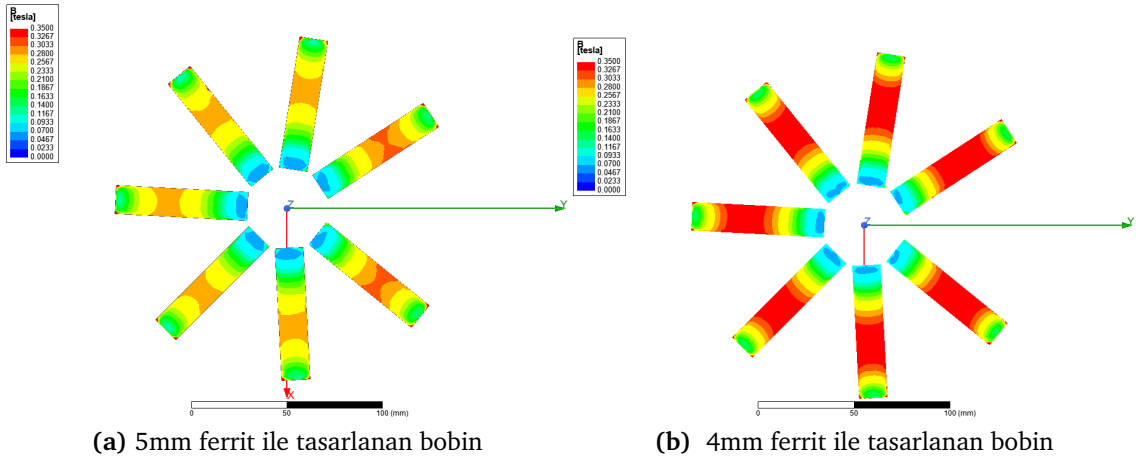
Şekil 5.10 Tencere tabanındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımı

5.4 Ferrit Nüve Kalınlığının Etkisi

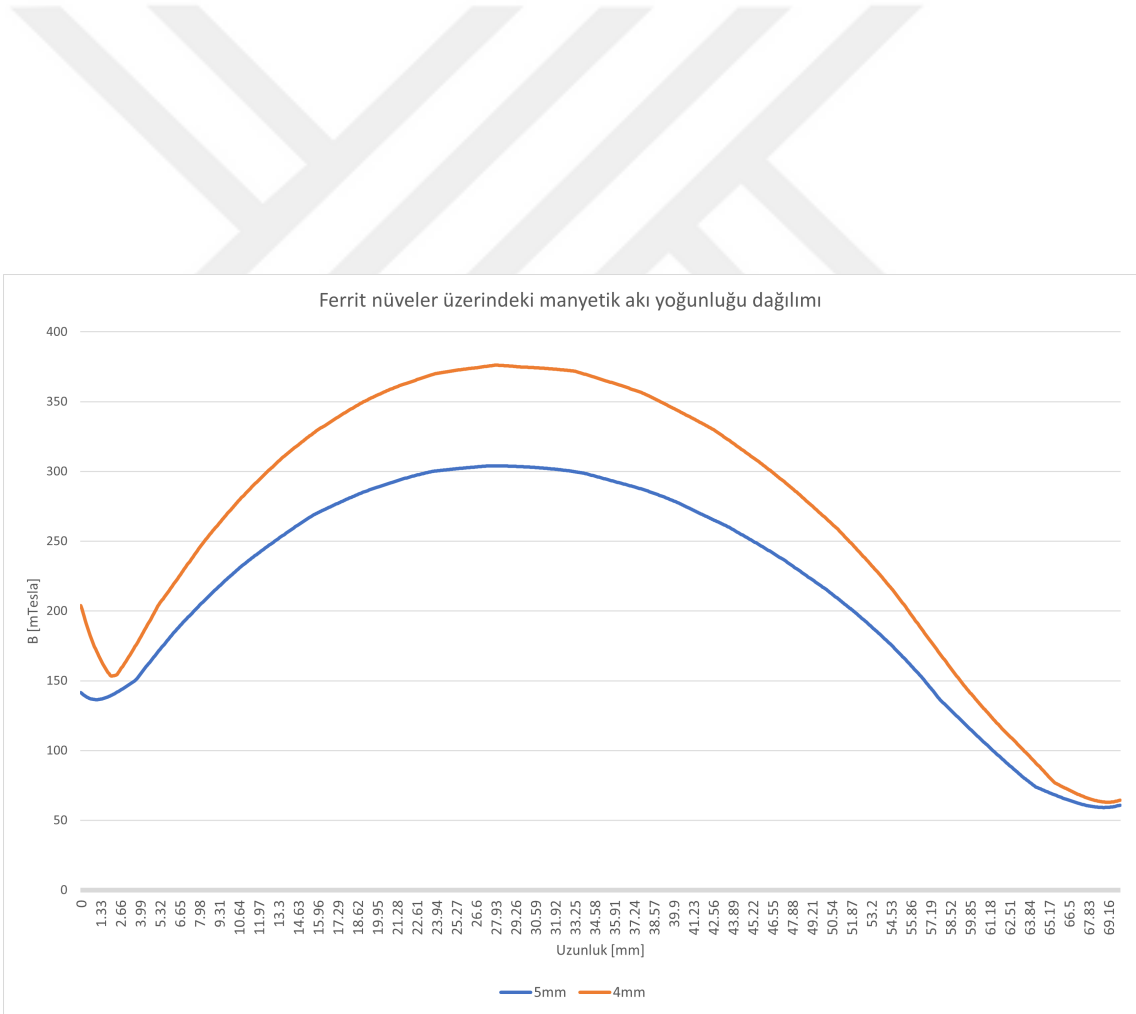
Ferrit nüve kalınlığının bobinin elektriksel özelliklerinde sebep olduğu değişimi incelemek için Bobin1 5mm ve 4mm kalınlığa sahip feritler ile iki farklı tasarımın analizleri yapılmıştır. Analiz sonucunda ferrit nüve kalınlığı azaldıkça, ferrit nüveler üzerindeki manyetik akı yoğunluğu artmış, endüktans değeri ve direnç değeri azalmıştır. 4mm kalınlığındaki ferrit nüvelerin maksimum manyetik akı yoğunluğu 376.22 mTesla, 5mm kalınlığındaki ferrit nüvelerin ise maksimum manyetik akı yoğunluğu 304.07 mTesla bulunmuştur. Ferrit nüveler üzerindeki manyetik akı yoğunluğu arttığı için, ferrit nüvelerin yüksek sıcaklık altındayken doyuma ulaşma problemi ortaya çıkacaktır.

Tablo 5.6 Ferrit nüve ölçüleri

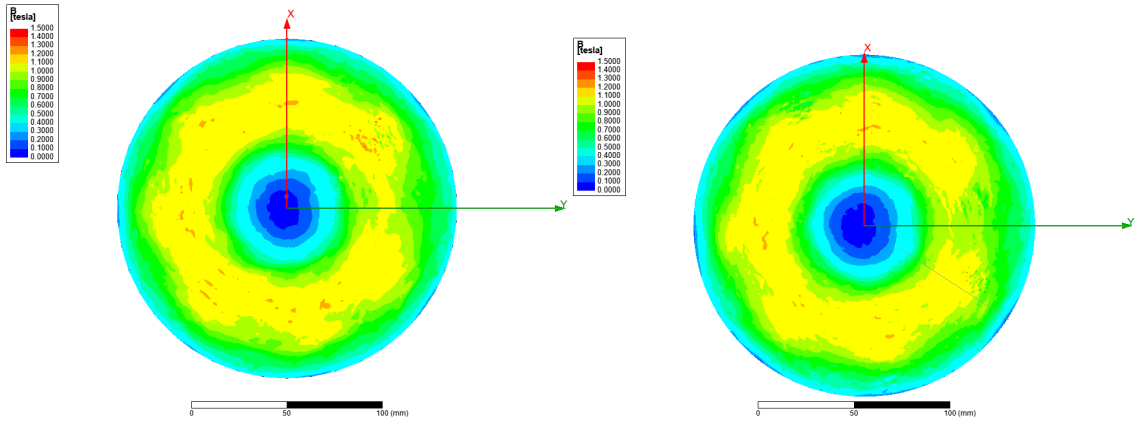
Ferrit nüve tipi	Ölçü (mm)	Sayı
Ferrit 1	[70x15x5]	7
Ferrit 2	[70x15x4]	7



Şekil 5.11 Ferrit kalınlığının, ferritler üzerindeki manyetik akı yoğunluğunun dağılımına etkisi



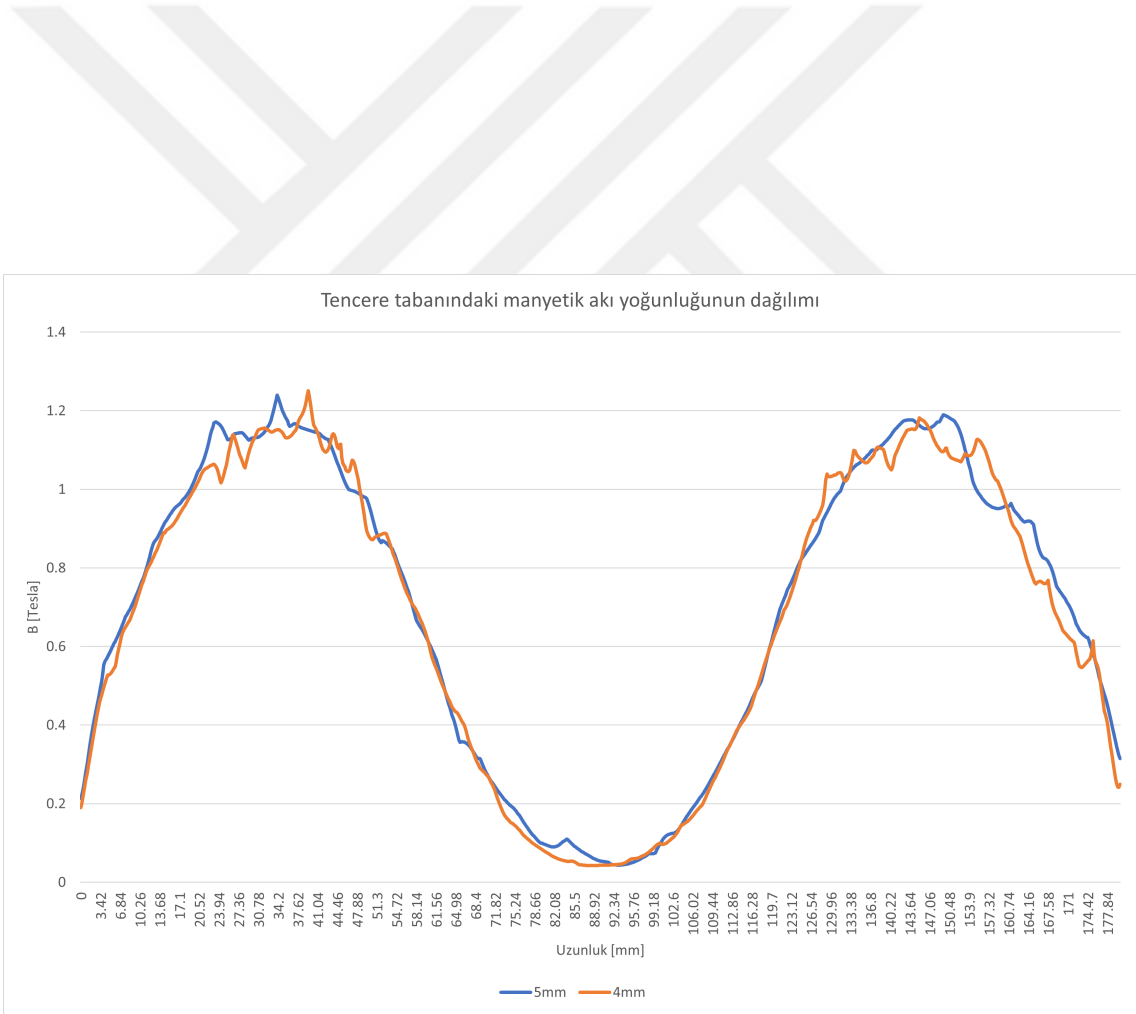
Şekil 5.12 Ferrit kalınlığının, ferrit nüveler üzerindeki manyetik akı yoğunluğunun dağılımına etkisi



(a) 5mm ferrit ile tasarlanan bobin

(b) 4mm ferrit ile tasarlanan bobin

Şekil 5.13 Ferrit kalınlığının, tencere tabanındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımına etkisi



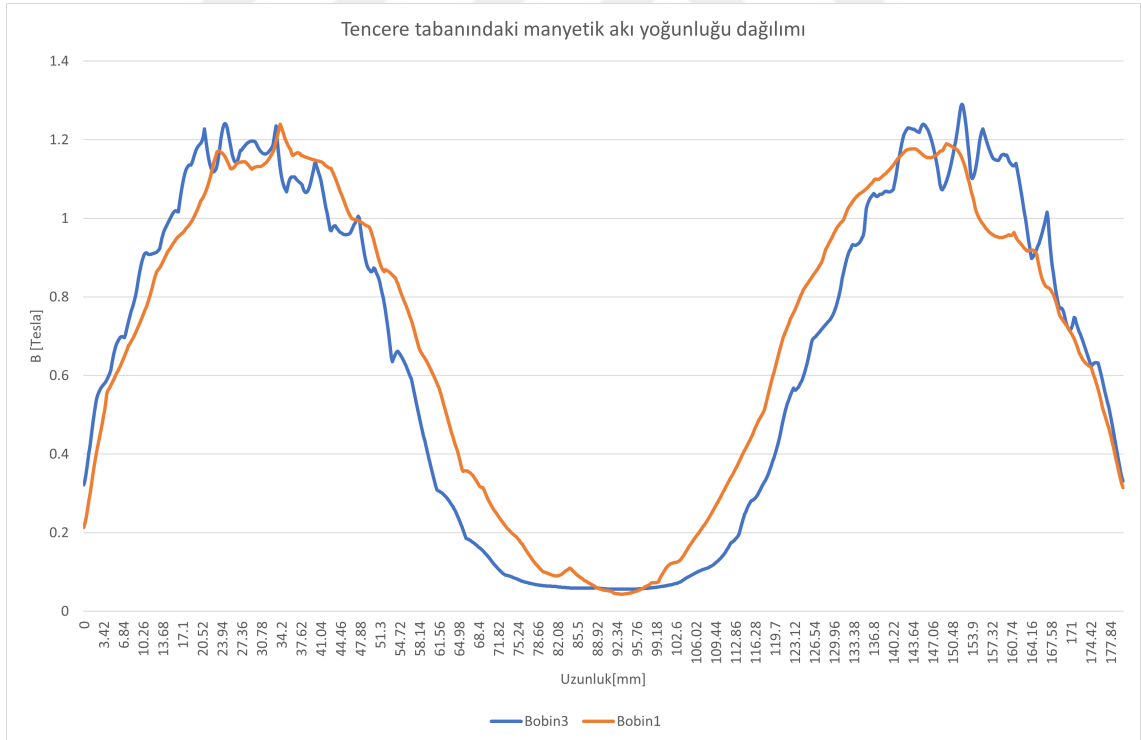
Şekil 5.14 Ferrit kalınlığının, tencere tabanındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımına etkisi

5.5 Parçalı Bobin Tasarımının Etkisi

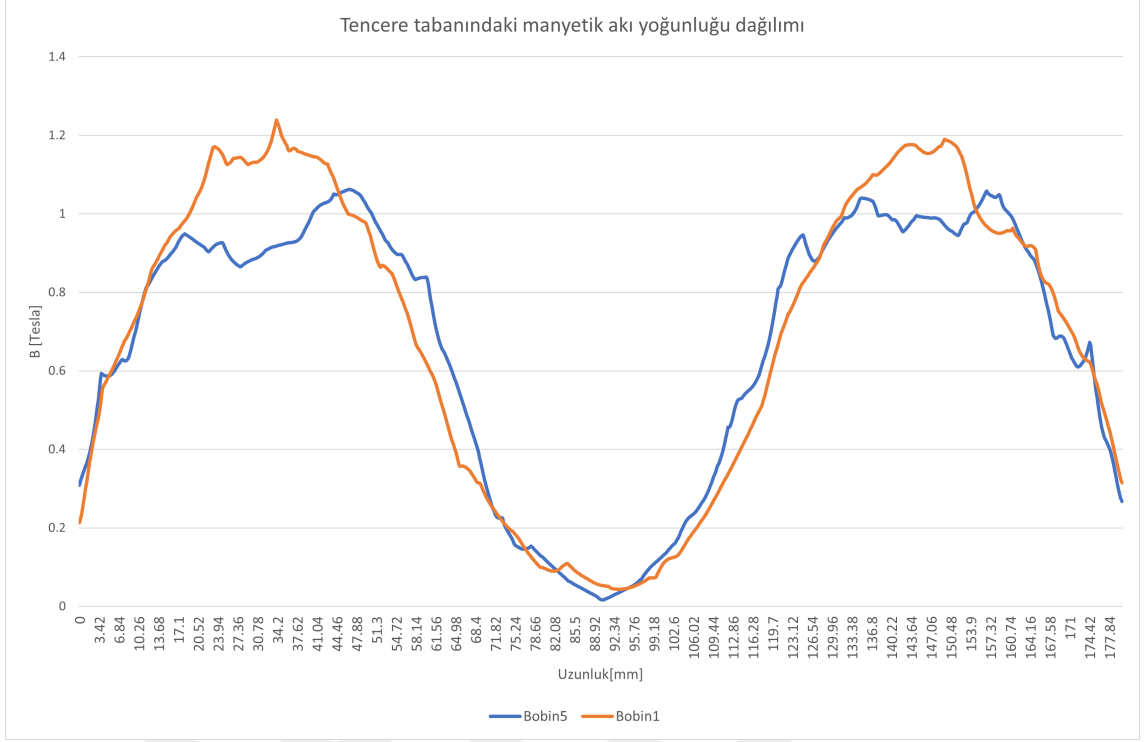
Bobin1 ve bobin3 tasarımları incelendiğinde ferrit nüve eklemenin tencere tabanındaki manyetik akı yoğunluğu dağılımını iyileştirdiği ve arttırdığı görülmüştür. Fakat bu tasarımların eksik yönü bobinin iç çapının fazla olmasıdır. Bobin iç çapı düşürülerek, tencerenin merkez noktasının çevresindeki bölgelerdeki manyetik akı yoğunluğu artırılabilir.

Bobin1 ve Bobin5 tasarımları incelendiğinde, parçalı bobin tasarımında ferrit nüveler üzerindeki manyetik akı yoğunluğunun azaldığı görülmüştür. Bobin5 tasarımı homojenlik açısından yeterli bulunmamıştır. Bu yüzden Bobin4 tasarımı yapılmıştır.

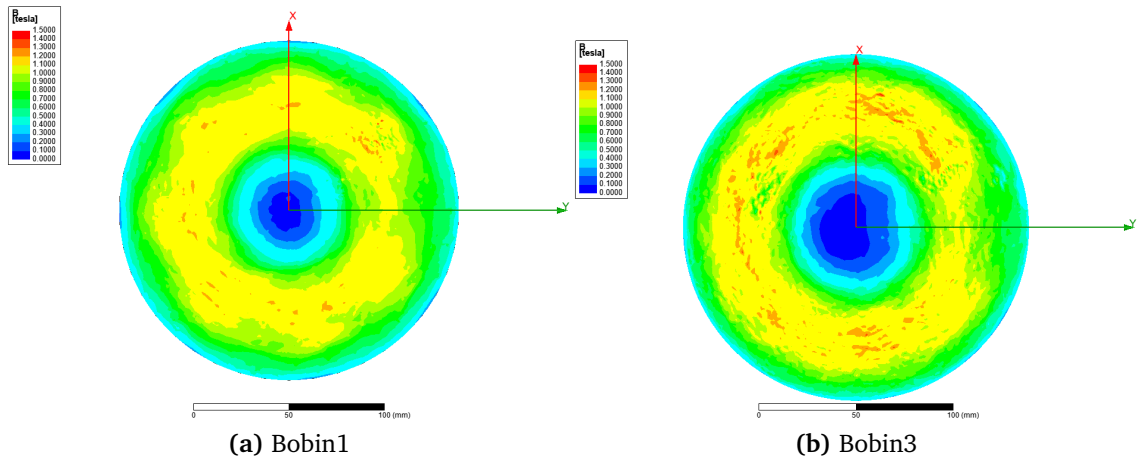
Parçalı bobin tasarımının kullanılması, bobinin yüzey alanının arttırılarak tencere üzerinden geçen manyetik alanların daha geniş bir yüzeyden geçmesini sağlar. Bobin1 tasarımı ele alınacak olursa, manyetik alan çizgileri tencere üzerinden dolaşırken, tencere tabanındaki en fazla manyetik akı yoğunluğu bobinin orta sargılarına denk gelmektedir. Parçalı bobin tasarımı yapılarak orta noktada boşluk bırakılır ve manyetik alan çizgilerinin tencere tabanında oluşturdukları manyetik akı yoğunluğu dağılımı geniş bir yüzeye yayılır.



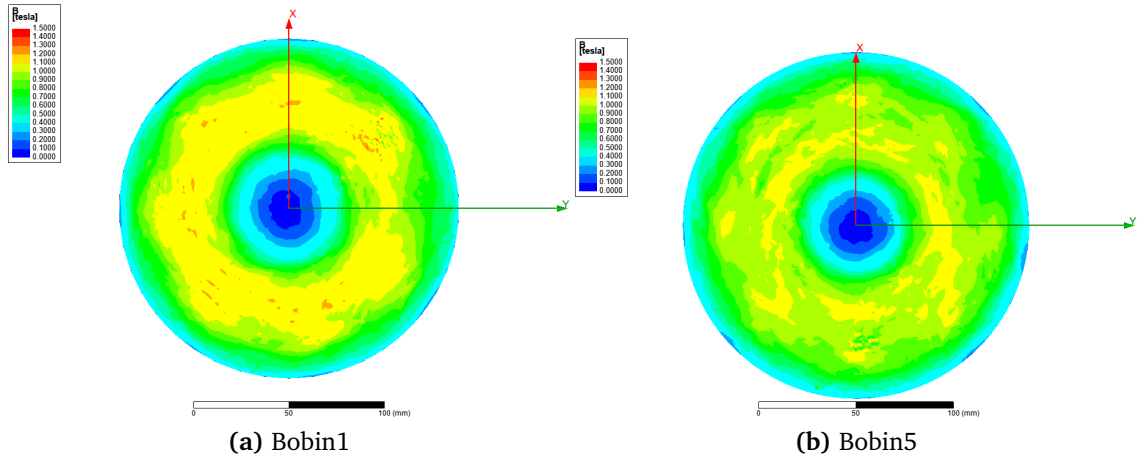
Şekil 5.15 Tencere üzerindeki manyetik akı yoğunluğunun dağılımı



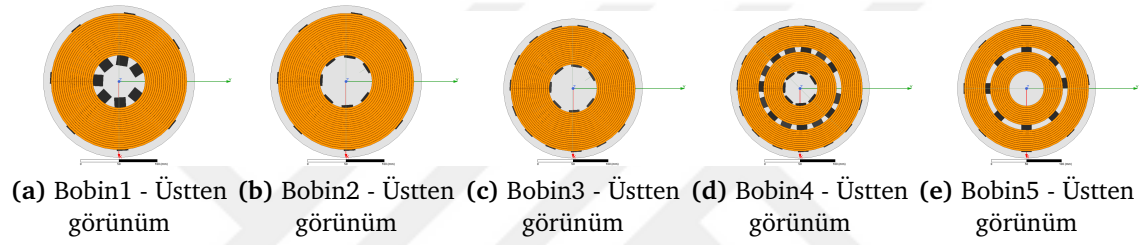
Şekil 5.16 Tencere üzerindeki manyetik akı yoğunluğunun dağılımı



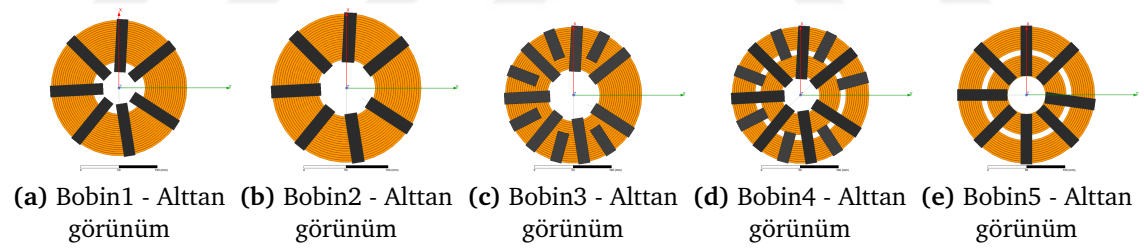
Şekil 5.17 Bobin1 ve Bobin3 tencere tabanındaki akı dağılımları



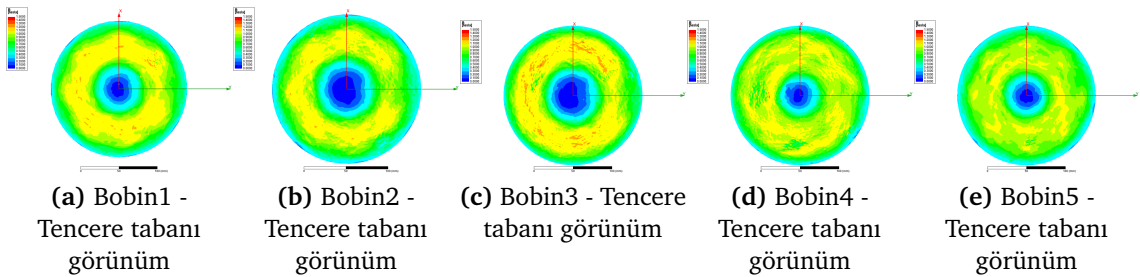
Şekil 5.18 Bobin1 ve Bobin5 tencere tabanındaki akı dağılımları



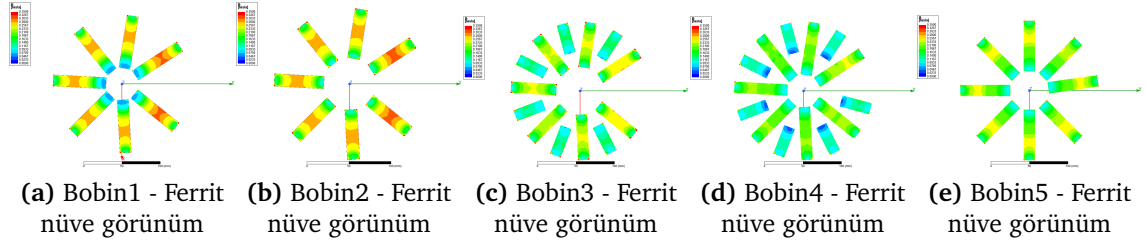
Şekil 5.19 Farklı bobin tasarımlarının üstten görünüşleri



Şekil 5.20 Farklı bobin tasarımlarının alttan görünüşleri

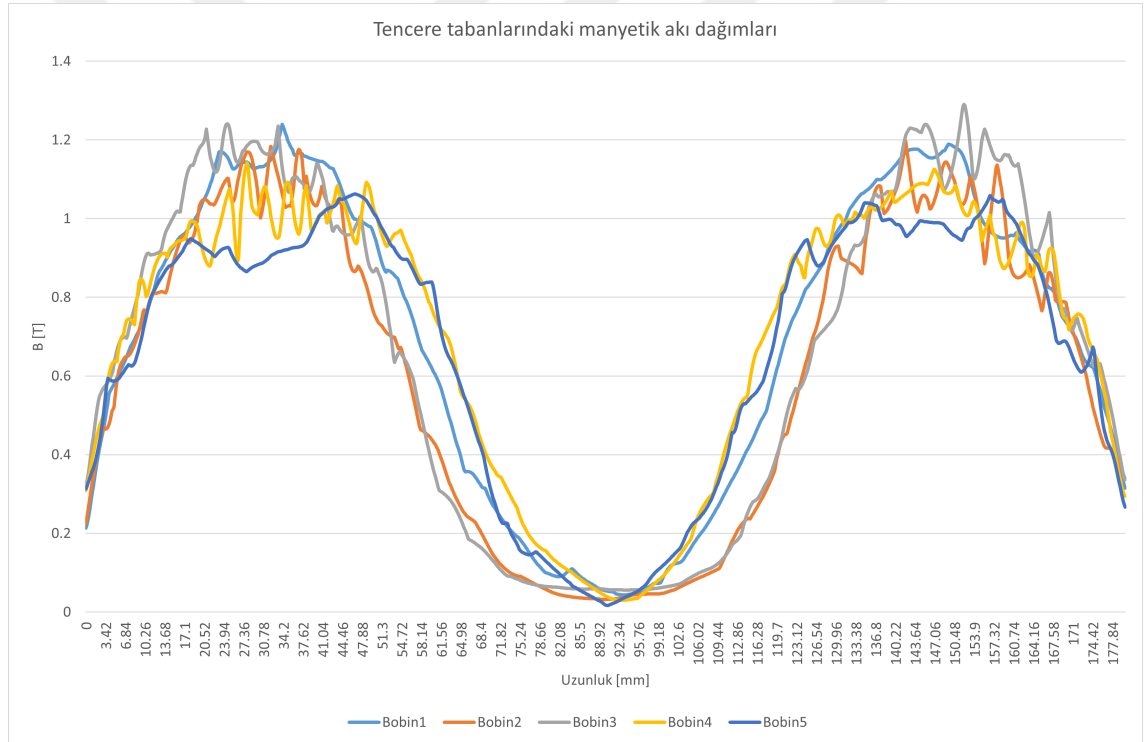


Şekil 5.21 Farklı bobin tasarımlarının tencere tabanı görünüşleri



Şekil 5.22 Farklı bobin tasarımlarının ferrit nüve görünümleri

5.23’de tencere tencere tabanlarındaki manyetik akı dağılımı verilmiştir. Bobin1, bobin4 ve bobin5 tasarımlarında bobin merkezindeki manyetik akı yoğunluğu daha fazladır. Bobin1 tasarımındaki ferrit nüveler uzun olduğundan dolayı bobin merkezinin çevresindeki manyetik akı yoğunluğu artmıştır. Bobin4 ve bobin5 tasarımlarında sargının iç çapı merkeze daha yakındır.



Şekil 5.23 Tencerelerin tabanındaki manyetik akı dağılımı

5.6 Yuvarlak Köşeli Dikdörtgen Bobin Tasarımları

Yuvarlak bobinler ile elde edilen sonuçlar önceki bölümlerde incelenmiştir. Ev tipi induksiyonlu ocaklarda tencerelerin yuvarlak olmasından dolayı yuvarlak bobinler kullanılmaktadır. Pişirme alanını esnek hale getirmek için yapılmış çalışmalar literatürde mevcuttur [17], [28], [26]. Çalışmalar incelendiğinde yuvarlak köşeli dikdörtgen bobin tasarımına rastlanmamıştır. İki farklı yuvarlak köşeli dikdörtgen bobin tasarımı yapılmış, üç boyutlu modeli oluşturulup sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilmiştir. Yuvarlak köşeli dikdörtgen bobinler üretim yöntemi değiştirilmeden üretilmektedir. Bu bobinlerden 2 adet kullanılarak esnek pişirme alanı elde edilebilir. Tasarlanan bobinler Bobin6 ve Bobin7 olarak isimlendirilmiştir.

Bobin6 tasarımında iç sargılar yuvarlak dış sargılar yuvarlak köşeli dikdörtgen olarak tercih edilmiştir. Bobin 7 tasarımında ise iç ve dış sargıların her ikisi de yuvarlak köşeli dikdörtgen olarak tercih edilmiştir. Bobin7 tasarımında iç sargılardaki sarım sayısı fazla iken dış sargılardaki sarım sayısı Bobin6'ya göre azdır. Tencerenin sağ veya sola koyulması durumunda bobin ve tencere arasındaki kuplaj azalacak ve kaçak manyetik alanlar artacaktır.

Bobin6 tasarımdaki ferrit nüve diziliminde yatay ekseninde simetriklik var iken, dikey ekseninde simetriklik yoktur. Bobin sağ ve sol bölümlerindeki ferrit nüve uzunlukları farklı olduğu için sağ taraftaki ferrit nüve yoğunluğu daha fazladır. Bu farklılık 5.27'de görülmektedir. Bobin6 tasarımı ile yapılan analizde tencere tabanındaki manyetik alan yoğunluğunun sağ tarafta sol tarafa göre daha fazla olduğu görülmektedir.

Bobin7 tasarımda ferrit diziliminde yatay ve dikey ekseninde simetriklik vardır. Ferrit nüve yoğunluğu bobinin her bir çeyreğinde eşittir.5.27'de tencere tabanlarındaki manyetik alan yoğunluğu dağılımı görülmektedir. Bobin7 tasarımının manyetik akı yoğunluğu dağılımları incelendiğinde, dağılımın her bir çeyrek bölgede simetriğe yakın olduğu görülür. Buradan yola çıkarak Bobin7 tasarımının, Bobin6 tasarımına göre daha homojen pişirme performansı sunabileceğinin yorumu yapılabilir.

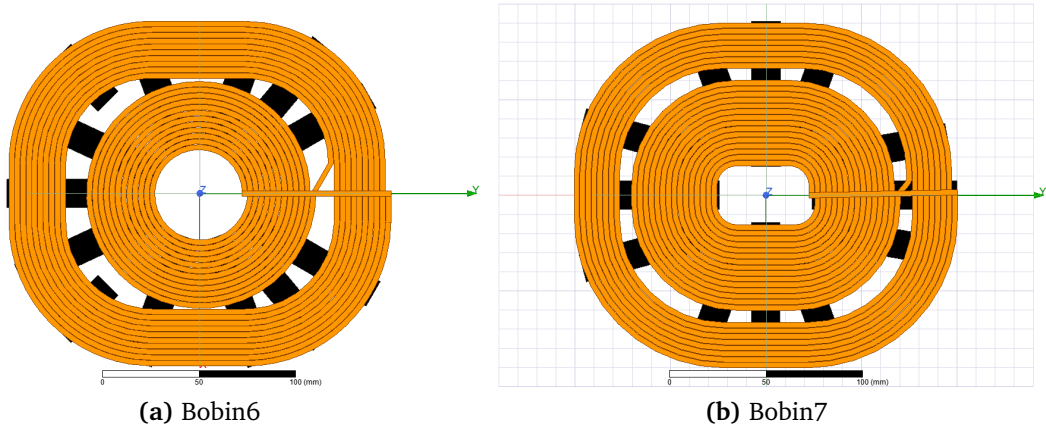
Bobin6 tasarımı için yapılan manyetik analiz sonuçları incelendiğinde, tencere tabanındaki manyetik alanın sağ ve sol bölgelerde az olduğu görülmüştür. Bunun sebebi tencerenin alt yüzeyini gören bobin sargılarının az olmasından kaynaklanabilir. 5.26'de bobin ve tencerenin üstten görünümü paylaşılmıştır. Bakıldığında kapsama alanı açısından bir farklılık göze çarpmamaktadır. Fakat tencere tabanındaki manyetik akı yoğunluğunun farklılığı, Bobin7 tasarımındaki iç sargıların sayısının fazlalığından ve iç dış sargı arasındaki mesafe farkından kaynaklanmaktadır.

Bobin7 tasarımında iç sargıların merkeze yakın olmasından dolayı, manyetik akı

yoğunluğu merkez çevresine, Bobin6 tasarımına göre daha yaklaşmıştır.

Tablo 5.7 Bobin 6 ve 7 tasarım parametreleri

Parametre	Bobin6	Bobin7
Ferrit Sayısı ve Ölçüsü	4x[80x15x5] 4x[70x15x5] 3x[56x15x5] 2x[35x15x5]	4x[76x15x5] 4x[70x15x5] 4x[55x15x5]
Maksimum Rezonans Akımı	60A	60A
Anahtarlama Frekansı	20500Hz	20500Hz
Sarım Sayısı	12 iç sarım 10 dış sarım	15 iç sarım 8 dış sarım
İç Çap	44mm	32-48.5mm
Dış Çap	180-200mm	180-200mm
Sargı Yüksekliği	3.5mm	3.5mm
Tencere Tabanı ve Bobin Sargısı Arası Mesafe	6mm	6mm
Ferrit Nüve Tabanı ve Tencere Tabanı Arası Mesafe	15mm	15.5mm
Tencere Çapı	180mm	180mm
Bobin sargısı ve Ferrit Nüve Arasındaki Mesafe	0.5mm	1mm

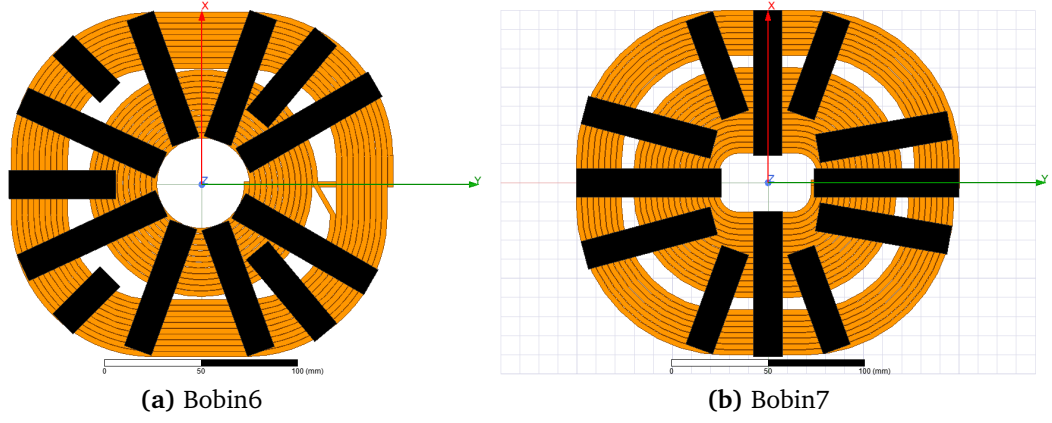


Şekil 5.24 Bobin6 ve Bobin7 üstten görünüm

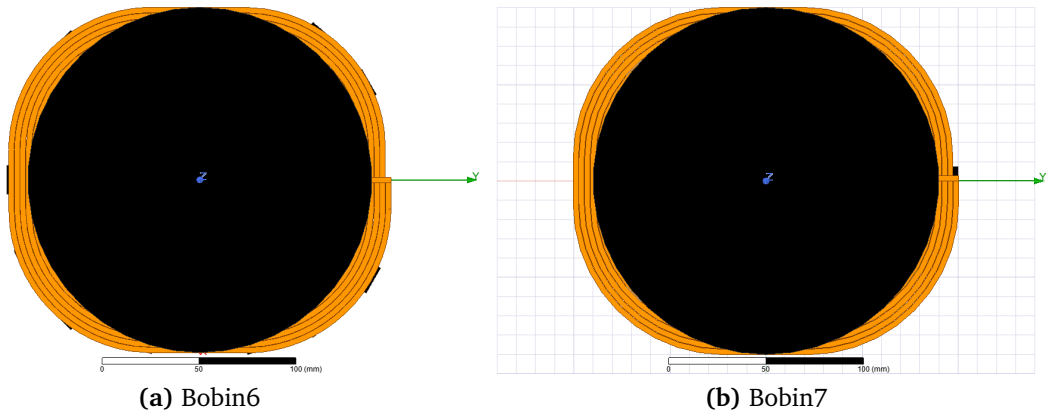
Tablo 5.8 Bobinlerin direnç ve endüktans sonuçları

Bobin No	R [mΩ]	L [μH]	R(Tencere) [Ω]	L (Tencere) [μH]
Bobin6	43	61.647	1.9109	43.917
Bobin7	42	63.644	2.0293	44.998

Tablo 5.8’de direnç ve endüktans değerleri paylaşılmıştır. Bobin7 tasarımının tencereli durumdaki endüktans ve direnç değeri, Bobin6 tasarımına göre daha fazladır. Yani



Şekil 5.25 Bobin6 ve Bobin7 alttan görünüm



Şekil 5.26 Bobin6 ve Bobin7 üstten tencereli görünüm

tencere ve bobin arasındaki kuplaj daha fazladır. Bunun sebebi, bobin7 tasarımındaki sarım sayısının, Bobin6'dan daha fazla olması olabilir.

Tablo 5.9 Direnç değerleri ile verimin hesaplanması

Bobin No	R [mΩ]	R(Tencere) [Ω]	Verim η
Bobin6	43	1.9109	%97.80
Bobin7	42	2.0293	%97.97

Tablo 5.9'de tencereli ve tenceresiz direnç değerlerinden yola çıkarak bobinlerin verimi hesaplanmıştır. Bobin7'nin veriminin az da olsa Bobin6'dan fazla olduğu bulunmuştur.

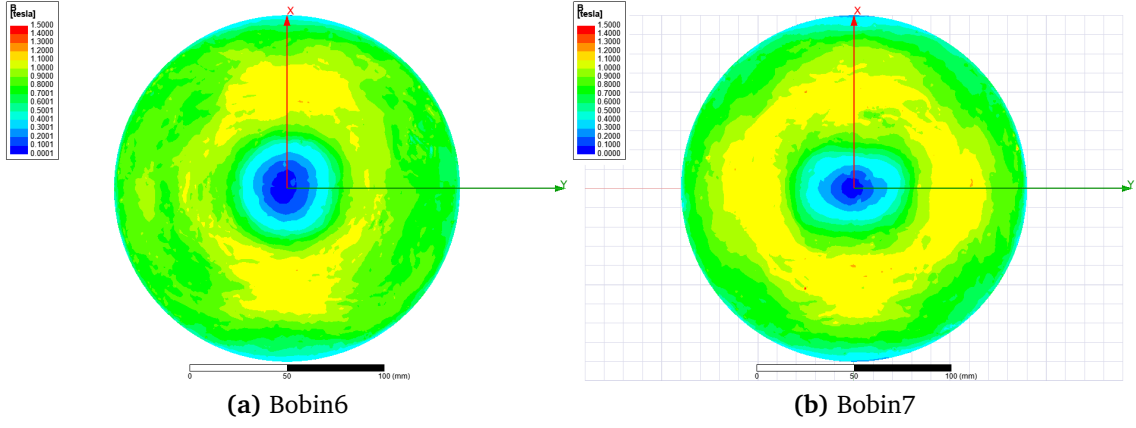
Tablo 5.10 Bobin ve tenceredeki kayıplar

Bobin No	Tencere Kayıpları [W]	Sargı Kayıpları [W]
Bobin6	3412.0	27.615
Bobin7	3623.9	27.871

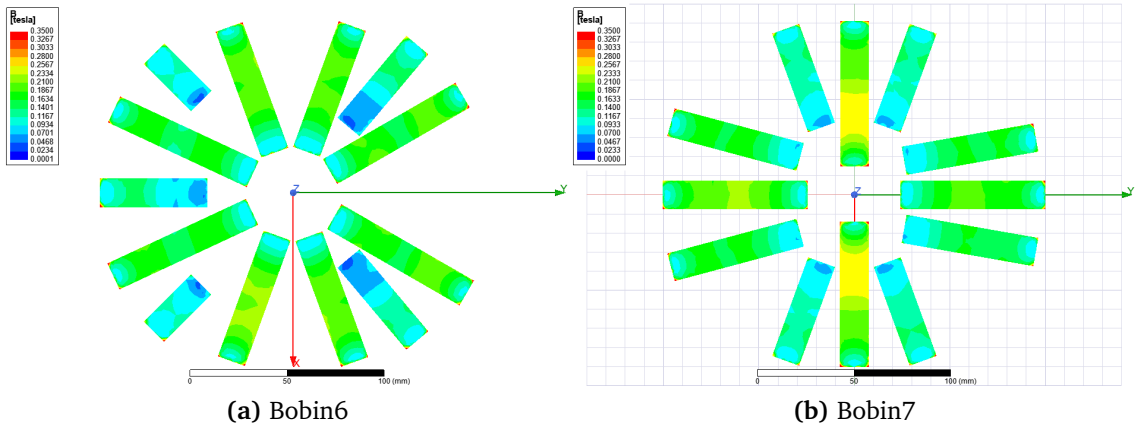
Tablo 5.11'de bobin sargılarında ve tencerede oluşan kayıplar paylaşılmıştır. Bobin sargılarındaki kayıplar arasında fark yaklaşık %1'dir. Bobin7'nin tencerede harcanan güç değeri ise Bobin6'ya göre yaklaşık %8 - %9 daha fazladır.

Bobin7 ve Bobin6 tasarımlarındaki ferrit nüveler üzerindeki manyetik akı yoğunluğu dağılımları incelendiğinde, Bobin6 tasarımında manyetik akı yoğunluğunun daha düşük olduğu gözlenmektedir. Bobin7 tasarımda dikey eksen üzerine konumlandırılan ferrit nüvelerin üzerindeki manyetik akı yoğunluğu, Bobin6'ya göre fazla olmasına rağmen kullanılabilir sınırlar içerisindedir. Ferrit nüveler üzerindeki manyetik alan yoğunluğunun maksimum değeri 300-350mTesla olarak kabul edilebilir. Bu değerlerden fazla manyetik akı yoğunluğu ferrit nüveler üzerinde oluşursa, ferrit nüveler yüksek sıcaklık ile beraber doyuma ulaşacaktır.

Yukarıda yorumlanan analizler sonucunda, Bobin7 tasarımının daha verimli, daha hızlı ısıtma yapabildiği ve daha homojen ısı dağılımına sahip olduğu sonucuna varılabilir.



Şekil 5.27 Bobin6 ve Bobin7 tencere tabanındaki manyetik alan dağılımı



Şekil 5.28 Bobin6 ve Bobin7 ferrit nüve yüzeyindeki manyetik alan dağılımı

5.7 Bobin Parametrelerinin Etkileri

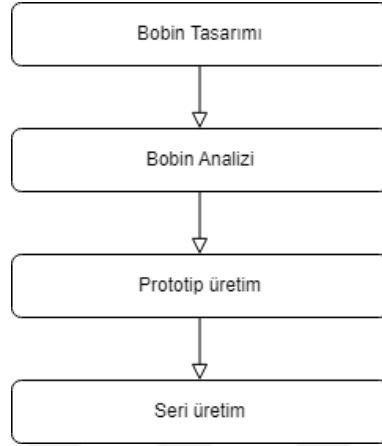
Yapılan analizler sonucunda elde edilen verilerin daha anlaşılabilir olması için tablo şeklinde gösterim yapılmıştır. Bu sayede bobin tasarımında yapılan değişikliğin nelere yol açtığı kolayca görülebilecek ve yorum yapılabilir olacaktır.

Tablo 5.11 Bobin ve tenceredeki kayıplar

Değişken parametreler	Eşdeğer direnç	Eşdeğer endüktans	Sargı direnci (tenceresiz)	Bakır kayıpları	Demir kayıpları
Sarım sayısını arttırmak	Artar	Artar	Artar	Artar	Azalır
Sarım kalınlığını arttırmak	Artar	Artar	Artar	Artar	Azalır
Frekansı arttırmak	Artar	Azalır	Artar	Artar	Azalır
Ferrit nüve sayısını arttırmak	Artar	Artar	Azalır	-	Artar
Ferrit nüve kalınlığını arttırmak	Azalır	Azalır	-	-	Azalır

5.8 İndüksiyonlu Ocak Bobini Tasarım ve Analiz Adımları

İndüksiyonlu ocak bobininin tasarımından seri üretime hazır hale gelene kadar süreci 4 adımda açıklayabiliriz. 5.29'te görüldüğü üzere bu adımlar bobin tasarımı, tasarlanan bobinin analiz edilmesi, prototip üretim aşaması ve seri üretilmektedir.

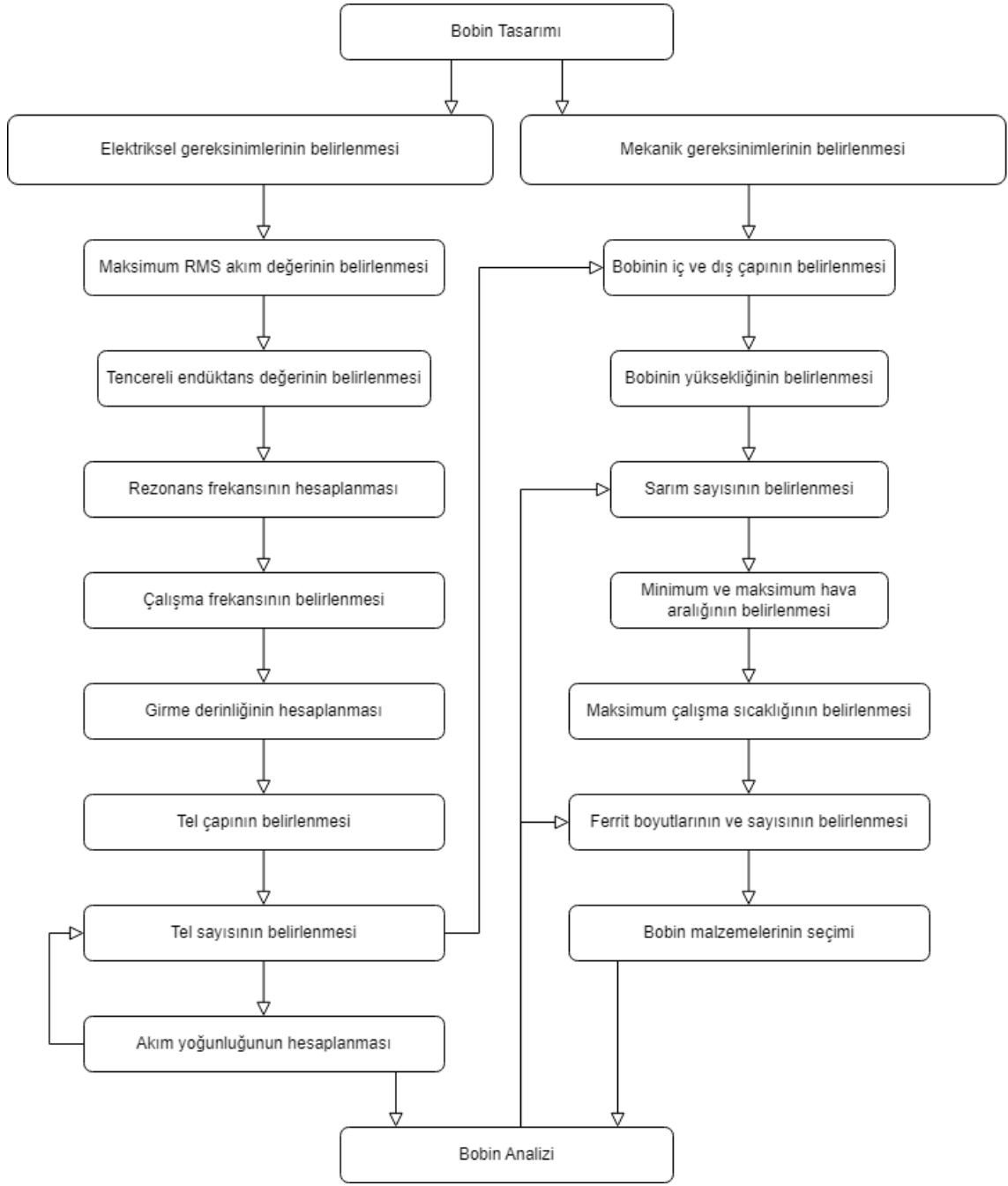


Şekil 5.29 Ana diyagram

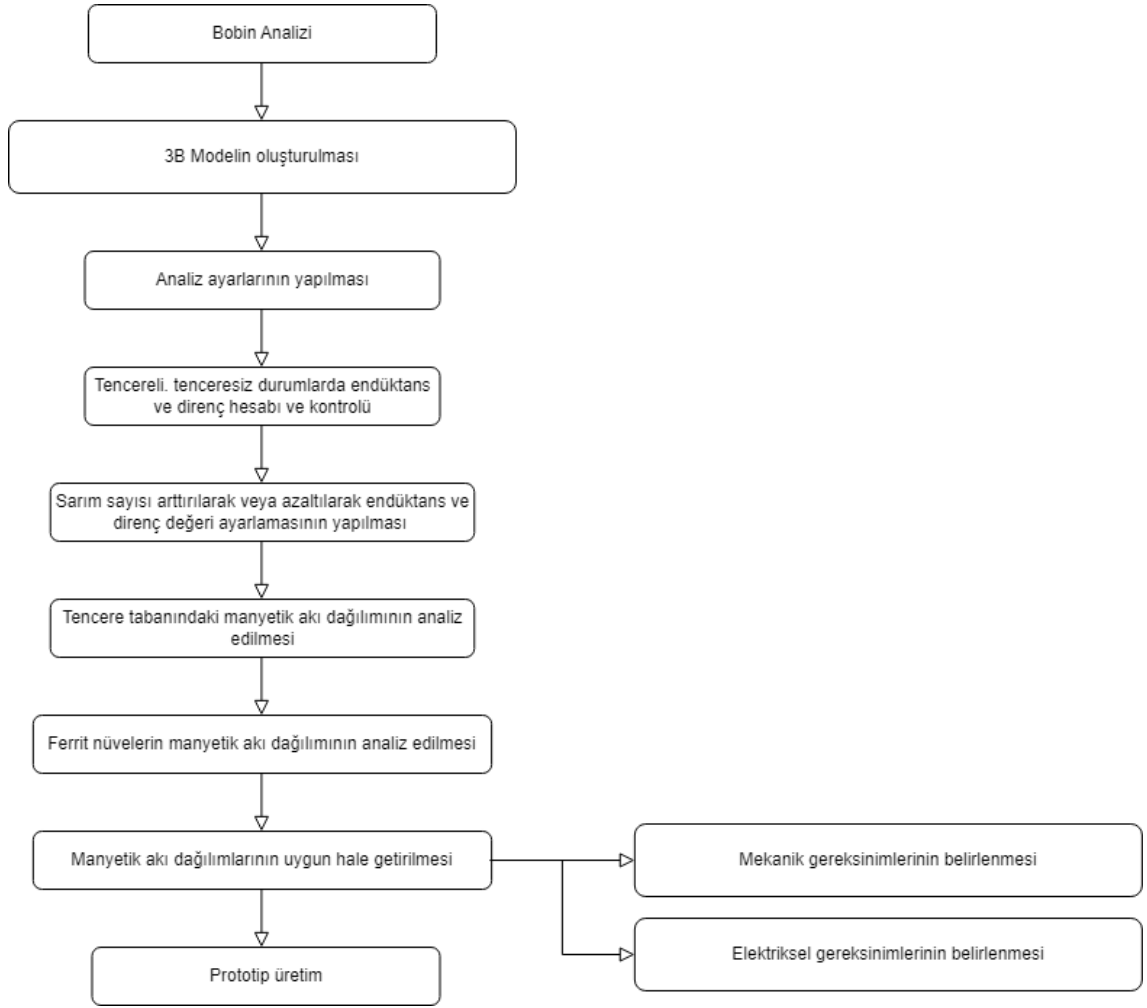
Bobin tasarımına elektriksel ve mekanik gereksinimlerin belirlenmesiyle başlanır. 5.30'de tasarım adımları paylaşılmıştır. Bu aşamada birden fazla bobin tasarımı yapmak, tasarımlar arasındaki farkı görmemizi sağlar. Bu sayede bobin isteklerimizi sağlayan farklı bobin tasarımlarının analizini yapabiliriz.

Bobin analizinde izlenecek adımlar 5.31'de verilmiştir. Burada yapılan analizler ile hangi bobinler ile prototip çalışması yapılacağına karar verilir. Gerekli olduğunda tasarımlarda iyileştirmeler yapılır.

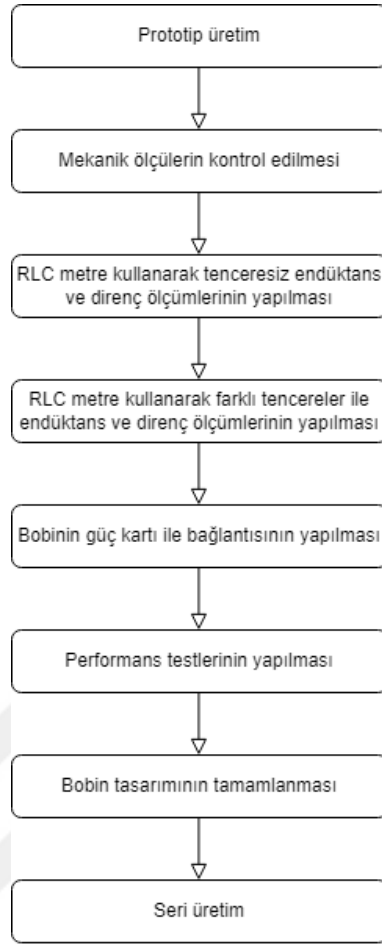
Prototip üretim sonrasında bobin fiziksel olarak elimize ulaşmıştır. Bu aşamada takip edilmesi gereken adımlar 5.32'de verilmiştir. Bu adımlar takip edilerek bobinin doğrulaması yapılır.



Şekil 5.30 Bobin tasarım diyagramı



Şekil 5.31 Bobin analiz diyagramı



Şekil 5.32 Prototip bobin test diyagramı

6 SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında, indüksiyonlu ısıtma sisteminin en önemli parçalarından biri olan indüksiyon bobinlerinin tasarımı ve elektromanyetik analizi yapılmıştır. Bobinlerin, endüktans ve direnç değerleri analizler sonucunda elde edilmiştir.

Tasarıma başlamadan önce maxwell denklemleri açıklanmış ve indüksiyonlu ocağın çalışma prensibinin maxwell denklemleri ile olan ilişkileri açıklanmıştır.

İndüksiyonlu ısıtmanın teorisi incelemek için, indüksiyonlu ısıtma sisteminin manyetik ve elektriksel(transformatör) eşdeğer devre modelleri paylaşılmış ve sistemin çalışma prensibi anlatılmıştır.

Daha sonra indüksiyonlu ısıtma sisteminde ısıyı oluşturan oluşan kayıplar ve zamana göre değişen manyetik alan sonucunda sistemde oluşan manyetik etkiler incelenmiştir.

İndüksiyonlu ocak bobinini oluşturan alüminyum plaka, ferrit nüveler, bobin sargıları, temperli cam ve tencere elemanları açıklanmıştır.

İndüksiyonlu ocak sisteminde verimini ve performansını etkileyebilecek dört ana tasarım başlığı vardır. Elektronik devre tasarımı, kontrol yazılımı tasarımı, indüksiyon bobini tasarımı ve soğutma sistemi tasarımıdır.

İndüksiyon bobin tasarımlarının üç boyutlu sonlu eleman modelleri oluşturulmuştur. ANSYS/Maxwell programı kullanılarak, üç boyutlu bobin ve tencere modellerinin ANSYS/Maxwell programı içerisindeki "eddy current" çözücüsü kullanılarak analizleri yapılmıştır.

Bu çalışmada sargı sayısının, sargı kalınlığının, ferrit nüve sayısının, ferrit nüve kalınlığının, parçalı bobin tasarımının sisteme olan etkileri incelenmiştir. Yapılan analizler sonucunda, tasarımı yapılan bobinlerin tencere tabanında oluşan manyetik akı yoğunluğu dağılımına olan etkisi incelenmiştir.

Tencereli olarak yapılan analizler sonucunda elde edilen endüktans ve direnç değerleri

indüksiyonlu ocaklardaki en önemli parametrelerdir. İndüksiyonlu ocaklarda bulunan elektronik devre yapısı ile bu parametrelerin uyumlu olması gerekmektedir. Bu parametreler bobinden geçen akım, bobin akımının yükselme hızı, tencere tabanında, endüklenen akımlar ve tencerede harcanan güce etki eder.

Tencereli olarak yapılan analizlerde ferrit nüve eklemenin hem direnç hem de endüktans üzerinde etkisinin olduğu görülmüştür. Ferrit nüve eklemek tencereli durumda direnci ve endüktansı arttırmaktadır. Kayıplara bakacak olursak, tencereli durumdaki direnç değerinin tenceredeki kayıplar üzerindeki etkisi, endüktans değerinin artışının etkisinden daha fazladır.

Bir bobin tasarımı yapılırken, ferrit nüveler üzerindeki manyetik akı yoğunluğu (B) değeri doyum bölgesine yaklaşmamalıdır. Yüksek manyetik akı yoğunluğu değerlerinde yani doyum bölgesinde bobinlerin aşırı yüklenmesi nedeniyle ciddi ısınma problemleri ortaya çıkar. Ortaya çıkan ısı enerjisi ise bakır kayıplarını arttırarak verimin düşmesine neden olur.

Bobin üretiminin ve tedarikinin uzun sürmesinden dolayı indüksiyon bobininin modelleme çalışmaları, bobin tasarımını kısa sürede tamamlamak için oldukça önemlidir. Prototip aşamaya geçilen süreçte hem zaman hem de maliyet avantajı elde edilebilir ve prototip sayısı oldukça azalır.

Tasarım değişikliklerin bobin performansına ve homojen pişirme performansına olan etkisi daha hızlı bir şekilde analiz yardımıyla görülebilmektedir. Sonuç olarak indüksiyonlu ocaklarda kullanılan bobinlerin üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analiz edilebilmektedir.

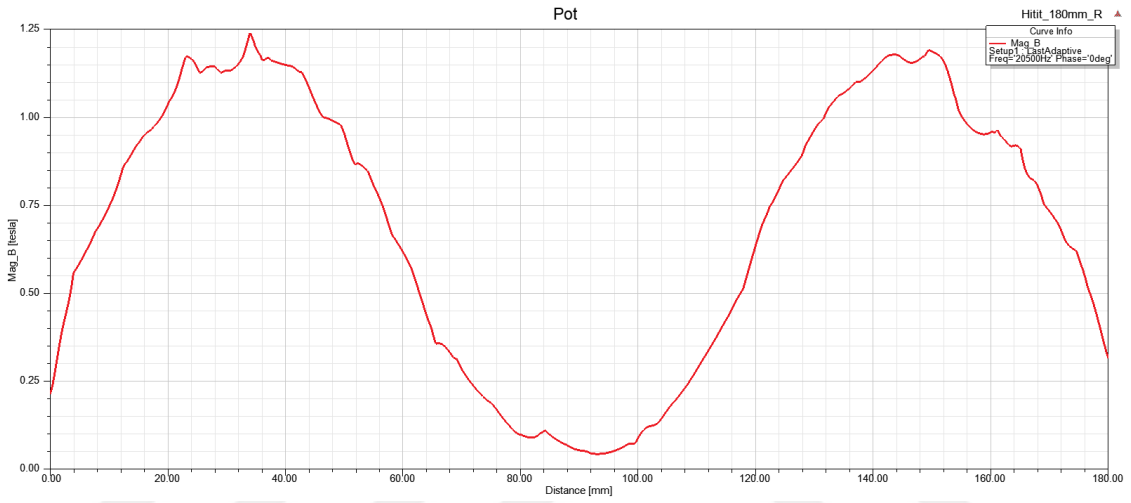
- [1] M.-S. Huang, C.-C. Liao, Z.-F. Li, Z.-R. Shih, H.-W. Hsueh, “Quantitative design and implementation of an induction cooker for a copper pan,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 5105–5118, 2020.
- [2] O. Lucia, J. Acero, C. Carretero, J. M. Burdio, “Induction heating appliances: Toward more flexible cooking surfaces,” *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 7, no. 3, pp. 35–47, 2013.
- [3] O. Lucia, P. Maussion, E. J. Dede, J. M. Burdio, “Induction heating technology and its applications: Past developments, current technology, and future challenges,” *IEEE Transactions on industrial electronics*, vol. 61, no. 5, pp. 2509–2520, 2013.
- [4] N. E. TOPUZ, K. DAWOOD, K. Ünsal, G. ODABAŞ, G. KÖMÜRGÖZ, “Electromagnetic and thermal analysis of a domestic induction cooker coil,” in *2019 4th International Conference on Power Electronics and their Applications (ICPEA)*, IEEE, 2019, pp. 1–5.
- [5] H. S. Yardibi, “Sonlu elemanlar yöntemi ile ev tipi endüksiyon ocak bobininin analizi,” Ph.D. dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2011.
- [6] M. Aoyama, W. Thimm, M. Knoch, L. Ose, “Proposal and challenge of halbach array type induction coil for cooktop applications,” *IEEE Open Journal of Industry Applications*, vol. 2, pp. 168–177, 2021.
- [7] J. Acero, P. J. Hernández, J. M. Burdio, R. Alonso, L. Barragdan, “Simple resistance calculation in litz-wire planar windings for induction cooking appliances,” *IEEE Transactions on magnetics*, vol. 41, no. 4, pp. 1280–1288, 2005.
- [8] F. Villuendas, C. Carretero, J. Acero, J. M. Burdio, “Power losses in flux concentrators of inductor systems for induction cooktops,” in *IECON 2017-43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, IEEE, 2017, pp. 3791–3796.
- [9] F. Forest, S. Faucher, J.-Y. Gaspard, D. Montloup, J.-J. Huselstein, C. Joubert, “Frequency-synchronized resonant converters for the supply of multiwinding coils in induction cooking appliances,” *IEEE transactions on industrial electronics*, vol. 54, no. 1, pp. 441–452, 2007.
- [10] J. Acero, C. Carretero, I. Millán, Ó. Lucia, R. Alonso, J. M. Burdio, “Analysis and modeling of planar concentric windings forming adaptable-diameter burners for induction heating appliances,” *IEEE transactions on power electronics*, vol. 26, no. 5, pp. 1546–1558, 2010.

- [11] C. Carretero, O. Lucia, J. Acero, J. Burdio, “Fea tool based model of partly coupled coils used in domestic induction cookers,” in *IECON 2011-37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, IEEE, 2011, pp. 2533–2538.
- [12] M. Hataya, Y. Oka, K. Umetani, E. Hiraki, T. Hirokawa, M. Imai, “Novel thin heating coil structure with reduced copper loss for high frequency induction cookers,” in *2016 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, IEEE, 2016, pp. 1–6.
- [13] W. Han, K. Chau, Z. Zhang, C. Jiang, “Single-source multiple-coil homogeneous induction heating,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 53, no. 11, pp. 1–6, 2017.
- [14] J. Acero, I. Lope, J. Burdio, C. Carretero, R. Alonso, “Loss analysis of multistranded twisted wires by using 3d-fea simulation,” in *2014 IEEE 15th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL)*, IEEE, 2014, pp. 1–6.
- [15] J. Acero, R. Alonso, L. Barragan, J. Burdio, C. Carretero, “Efficiency model of planar loaded twisted-wire windings in a magnetic substrate for domestic induction heating appliances,” in *2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference*, IEEE, 2008, pp. 3482–3488.
- [16] S. Llorente, F. Monterde, J. Burdio, J. Acero, “A comparative study of resonant inverter topologies used in induction cookers,” in *APEC. Seventeenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (Cat. No. 02CH37335)*, IEEE, vol. 2, 2002, pp. 1168–1174.
- [17] J. Serrano, J. Acero, I. Lope, C. Carretero, J. M. Burdio, “A flexible cooking zone composed of partially overlapped inductors,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, no. 10, pp. 7762–7771, 2018.
- [18] J. Garcia, J. Burdio, A. Martinez, J. Sancho, “A method for calculating the workpiece power dissipation in induction heating processes,” in *Proceedings of 1994 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition-ASPEC’94*, IEEE, 1994, pp. 302–307.
- [19] J. Acero, J. Burdio, L. Barragan, R. Alonso, “A model of the equivalent impedance of the coupled winding-load system for a domestic induction heating application,” in *2007 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, IEEE, 2007, pp. 491–496.
- [20] J. Acero, O. Lucia, C. Carretero, I. Lope, C. Diez, “Efficiency improvement of domestic induction appliances using variable inductor-load distance,” in *2012 Twenty-Seventh Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, IEEE, 2012, pp. 2153–2158.
- [21] P. Hernandez, F. Monterde, J. Burdio, J. Garcia, S. Llorente, “Power losses distribution in the litz-wire winding of an inductor for an induction cooking appliance,” in *IEEE 2002 28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society. IECON 02*, IEEE, vol. 2, 2002, pp. 1134–1137.
- [22] J. Acero, C. Carretero, I. Millán, R. Alonso, O. Lucia, J. Burdio, “Experimental setup for inductive efficiency measurements of domestic induction systems based on energy balance,” in *IECON 2010-36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, IEEE, 2010, pp. 114–119.

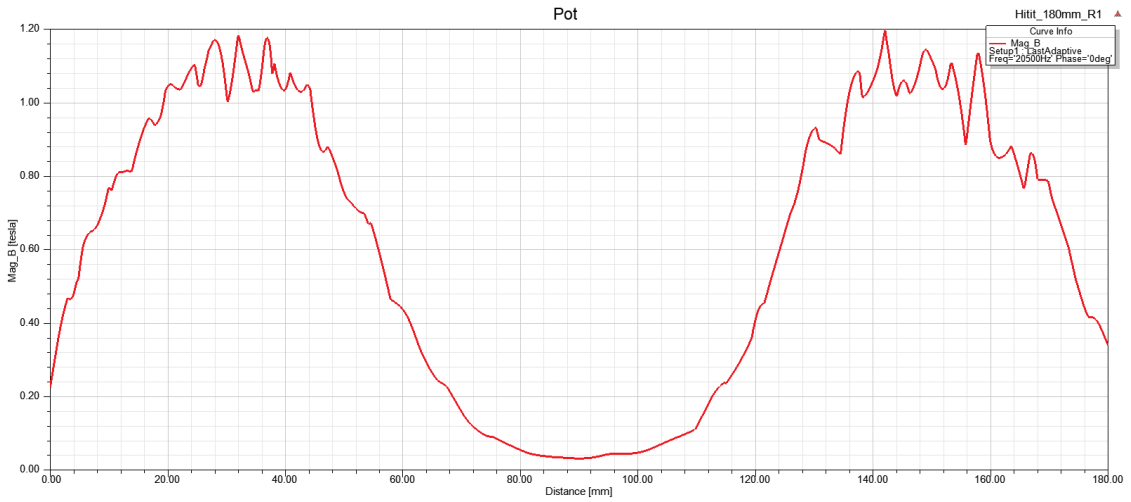
- [23] C. Carretero, J. Acero, R. Alonso, I. Lope, J. Burdio, "Elliptic flat-type inductor for low-cost flexible active surface implementations of domestic induction heating appliances," in *2013 Twenty-Eighth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, IEEE, 2013, pp. 2380–2385.
- [24] I. Lope, J. Acero, C. Carretero, "Analysis and optimization of the efficiency of induction heating applications with litz-wire planar and solenoidal coils," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, no. 7, pp. 5089–5101, 2015.
- [25] P. Hernandez, F. Monterde, J. Burdio, J. Garcia, "Power loss optimisation of foil coils for induction cooking," in *IECON'98. Proceedings of the 24th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (Cat. No. 98CH36200)*, IEEE, vol. 1, 1998, pp. 371–374.
- [26] V. T. Kilic, E. Unal, E. Gonendik, N. Yilmaz, H. V. Demir, "Strongly coupled outer squircle–inner circular coil architecture for enhanced induction over large areas," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, no. 12, pp. 7478–7487, 2016.
- [27] I. Lope, C. Carretero, J. Acero, J. Burdio, R. Alonso, "Printed circuit board implementation of small inductors for domestic induction heating applications using a planar litz wire structure," in *2013 Twenty-Eighth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, IEEE, 2013, pp. 2402–2407.
- [28] J. Serrano, I. Lope, J. Acero, C. Carretero, J. M. Burdio, R. Alonso, "Design and optimization of small inductors on extra-thin pcb for flexible cooking surfaces," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53, no. 1, pp. 371–379, 2016.
- [29] I. Lope, C. Carretero, J. Acero, R. Alonso, J. M. Burdio, "Ac power losses model for planar windings with rectangular cross-sectional conductors," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 1, pp. 23–28, 2013.
- [30] I. Lope, C. Carretero, J. Acero, J. M. Burdio, R. Alonso, "Pcb multi-track coils for domestic induction heating applications," in *IECON 2012-38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, IEEE, 2012, pp. 3287–3292.
- [31] I. Lope, J. Acero, J. M. Burdio, C. Carretero, R. Alonso, "Design and implementation of pcb inductors with litz-wire structure for conventional-size large-signal domestic induction heating applications," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 51, no. 3, pp. 2434–2442, 2014.
- [32] D. Fleisch, *A student's guide to Maxwell's equations*. Cambridge University Press, 2008.
- [33] J. Acero, P. Hernandez, J. Burdio, R. Alonso, L. Barragdan, "Simple resistance calculation in litz-wire planar windings for induction cooking appliances," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 41, no. 4, pp. 1280–1288, 2005. DOI: 10.1109/TMAG.2005.844844.
- [34] J. Acero *et al.*, "Domestic induction appliances," *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 16, no. 2, pp. 39–47, 2010.
- [35] C. Carretero, J. Acero, R. Alonso, J. Burdio, F. Monterde, "Temperature influence on equivalent impedance and efficiency of inductor systems for domestic induction heating appliances," in *APEC 07-Twenty-Second Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, IEEE, 2007, pp. 1233–1239.

- [36] U. Oktay, “Ev tipi endüksiyon ocaklarda yük karakteristiğinin belirlenmesi,” Ph.D. dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [37] V. Rudnev, D. Loveless, R. Cook, M. Black, *Handbook of Induction Heating (Manufacturing Engineering and Materials Processing)*. CRC Press, 2002, ISBN: 9781420028904. [Online]. Available: <https://books.google.nl/books?id=FRmqNkwTvGAC>.
- [38] J. Acero, J. Burdio, L. Barragan, D. Puyal, R. Alonso, “Frequency-dependent resistance in litz-wire planar windings for all-metal domestic induction heating appliances,” in *Twentieth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2005. APEC 2005.*, IEEE, vol. 2, 2005, pp. 1294–1300.
- [39] S. Ito, “Basics of ferrite and noise countermeasures,” *TDK EMC Technology; TDK Corporation Magnetics Business Group: Tokyo, Japan*, 2011.
- [40] J. Acero, I. Lope, J. M. Burdio, C. Carretero, R. Alonso, “Performance evaluation of graphite thin slabs for induction heating domestic applications,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 51, no. 3, pp. 2398–2404, 2014.
- [41] P. Hernandez, F. Monterde, J. Burdio, J. Garcia, S. Llorente, “Power losses distribution in the litz-wire winding of an inductor for an induction cooking appliance,” in *IEEE 2002 28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society. IECON 02*, vol. 2, 2002, 1134–1137 vol.2. DOI: 10.1109/IECON.2002.1185432.
- [42] A. Roßkopf, E. Bär, C. Joffe, C. Bonse, “Calculation of power losses in litz wire systems by coupling fem and peec method,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, no. 9, pp. 6442–6449, 2015.
- [43] S. Hiruma, Y. Otomo, H. Igarashi, “Eddy current analysis of litz wire using homogenization-based fem in conjunction with integral equation,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 54, no. 3, pp. 1–4, 2017.
- [44] J. Acero, R. Alonso, J. M. Burdio, L. A. Barragán, D. Puyal, “Frequency-dependent resistance in litz-wire planar windings for domestic induction heating appliances,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 21, no. 4, pp. 856–866, 2006.
- [45] J. G. Kassakian, M. F. Schlecht, G. C. Verghese, *Principles of power electronics-adison*, 1991.

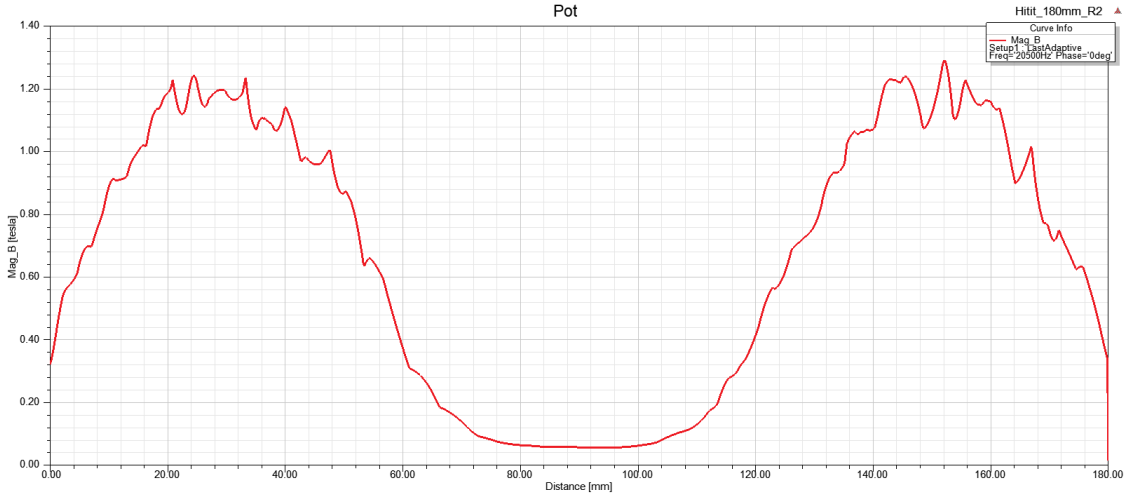
TENCERE TABANI MANYETİK AKI DAĞILIMLARI



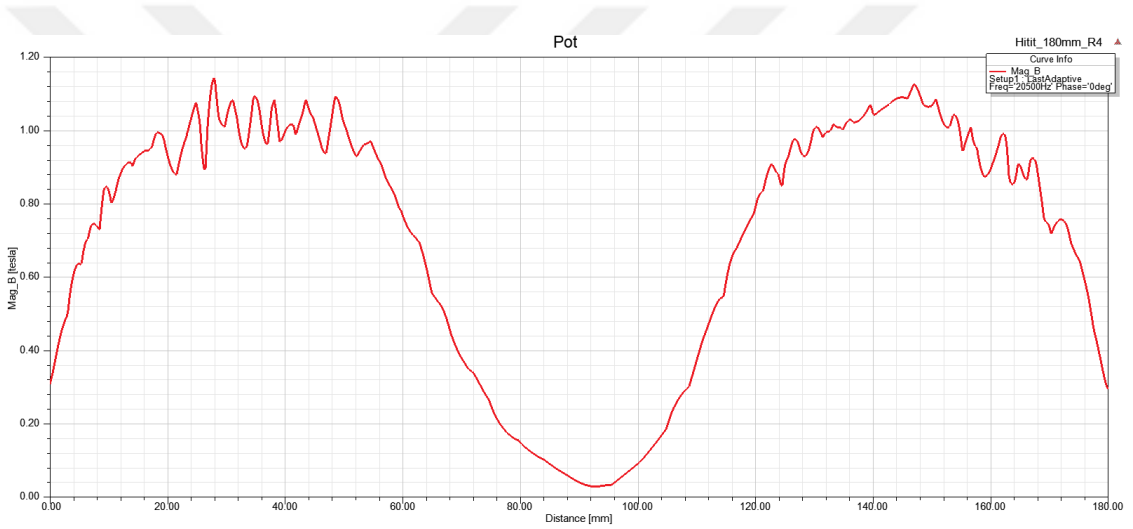
Şekil A.1 Bobin1 - Tencere üzerindeki manyetik akı yoğunluğunun dağılımı



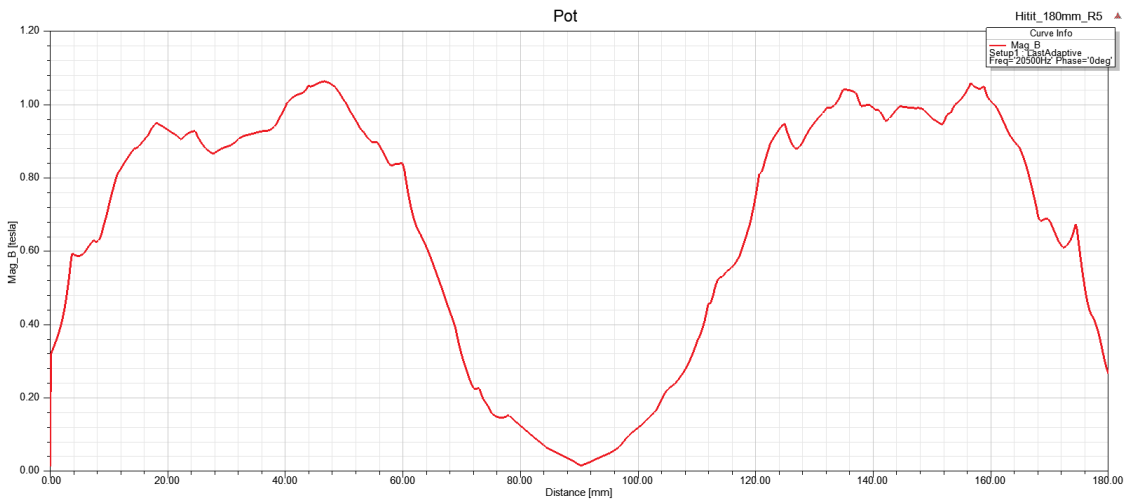
Şekil A.2 Bobin2 - Tencere üzerindeki manyetik akı yoğunluğunun dağılımı



Şekil A.3 Bobin3 - Tencere üzerindeki manyetik akı yoğunluğunun dağılımı

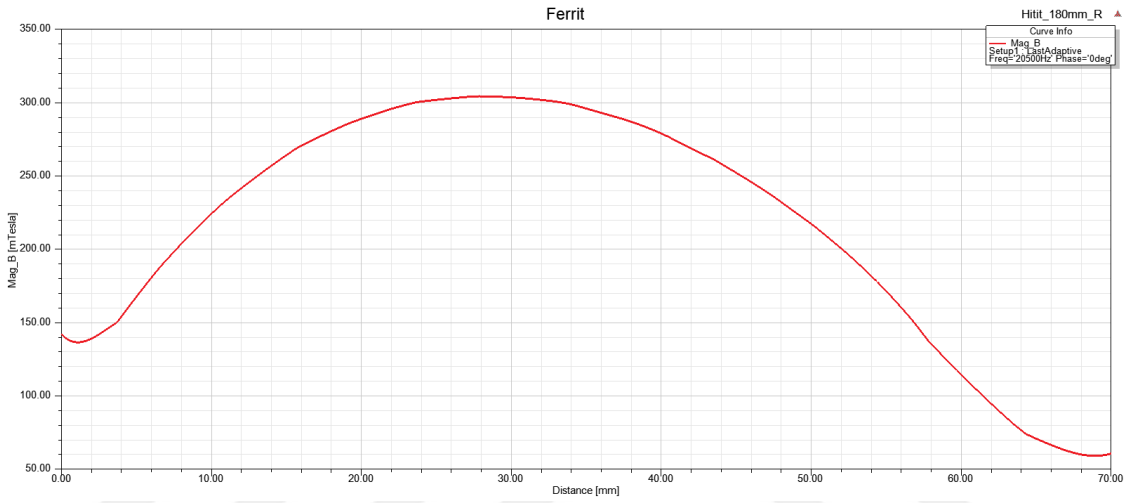


Şekil A.4 Bobin4 - Tencere üzerindeki manyetik akı yoğunluğunun dağılımı

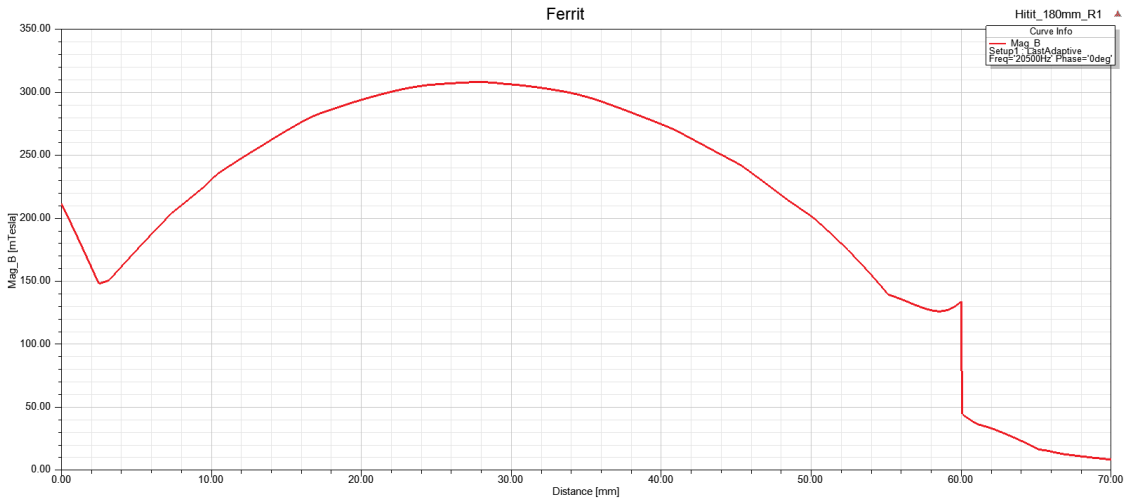


Şekil A.5 Bobin5 - Tencere üzerindeki manyetik akı yoğunluğunun dağılımı

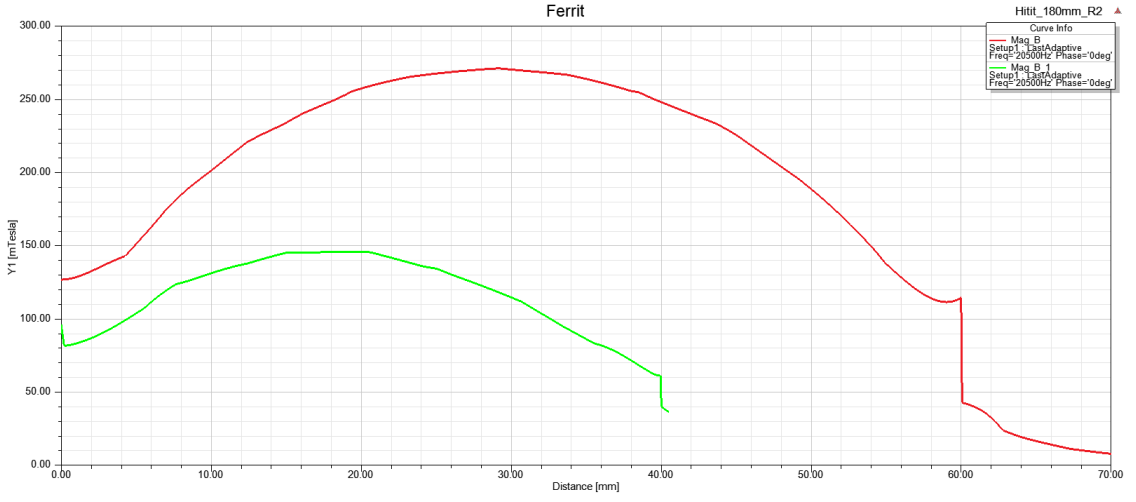
FERRİT NÜVE MANYETİK AKI DAĞILIMLARI



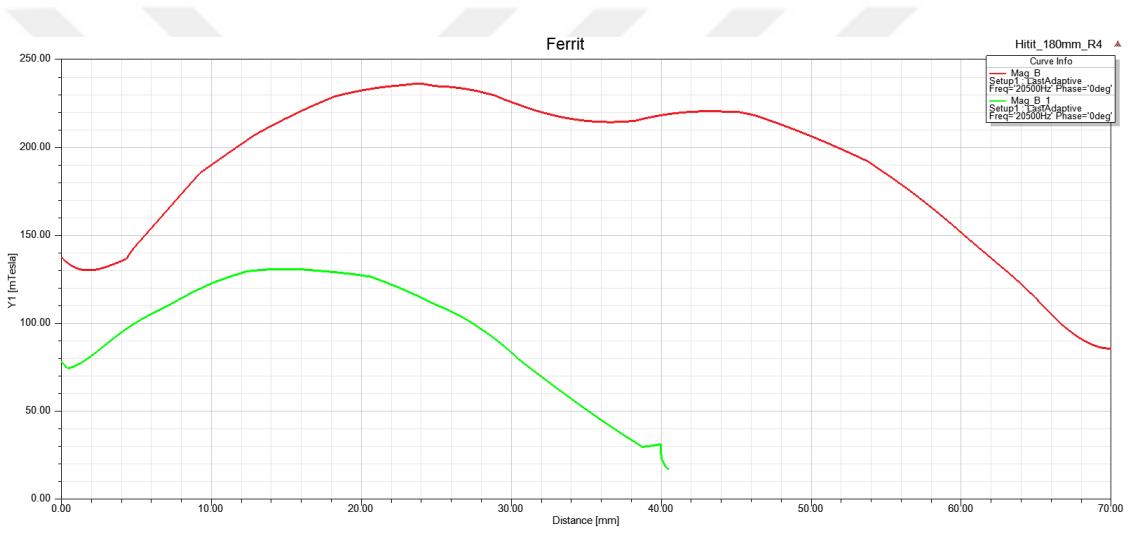
Şekil B.1 Bobin1 - Ferrit nüve üzerindeki manyetik akı yoğunluğunun dağılımı



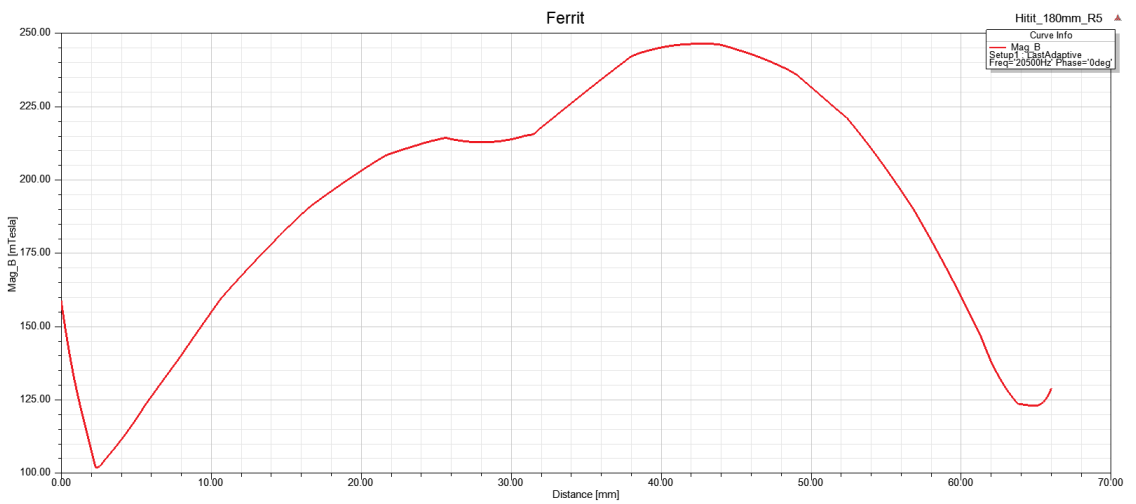
Şekil B.2 Bobin2 - Ferrit nüve üzerindeki manyetik akı yoğunluğunun dağılımı



Şekil B.3 Bobin3 - Ferrit nüve üzerindeki manyetik akı yoğunluğunun dağılımı



Şekil B.4 Bobin4 - Ferrit nüve üzerindeki manyetik akı yoğunluğunun dağılımı



Şekil B.5 Bobin5 - Ferrit nüve üzerindeki manyetik akı yoğunluğunun dağılımı

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirisi

1. Buğday A.B., Özçira Özkılıç S. (2022). “Ev Tipi İndüksiyon Ocaklarda Homojen Isıtma Performansının İncelenmesi ve İyileştirilmesi”, 9. Uluslararası Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Kongresi, 14-15-16 Mayıs 2022

