İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE EV TİPİ ENDÜKSİYON OCAK BOBİNİNİN ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Hakan Süleyman YARDİBİ

Anabilim Dalı : Elektrik Mühendisliği

Programı : Elektrik Mühendisliği

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Özgür ÜSTÜN

HAZİRAN 2011

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE EV TİPİ ENDÜKSİYON OCAK BOBİNİNİN ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Hakan Süleyman YARDİBİ
504081016

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 06 Mayıs 2011
Tezin Savunulduğu Tarih : 20 Haziran 2011

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Özgür ÜSTÜN (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Hacı BODUR (YTÜ)
Yrd. Doç. Dr. Güven KÖMÜRGÖZ (İTÜ)

HAZİRAN 2011

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmama olumlu eleştiri ve önerileri ile katkıda bulunan değerli hocam Sn. Yrd. Doç. Dr. Özgür ÜSTÜN'e çok teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimi konusunda beni teşvik eden ve "Endüstride Uygulama Destekli Tez Programı" kapsamında tez çalışmamı yapmamda büyük katkıları olan Öğr. Gör. Dr. Azmi DEMİREL'e sonsuz teşekkür ederim.

Bu çalışmanın gerçekleşmesini sağlayan ve çalışmaya destek olan Arçelik Araştırma ve Geliştirme Merkezi'ne, başta Sn. Cemil İNAN, Sn. Dr. Latif TEZDUYAR ve Sn. Günsu ALBAŞ'ın şahsına teşekkür ederim.

Tez çalışmamın başlangıcından sonuna kadar her zaman desteğini esirgemeyen, değerli fikirleri ve eleştirileriyle çalışmama sonsuz katkı sağlayan Sn. Sefa HAZIR'a, ayrıca olumlu katkıları ve görüşleriyle destek veren Sn. Serdar Gökhan DOĞANAY, Sn. Namık YILMAZ ve Arçelik ARGE Güç Elektroniği Ailesi'ne çok teşekkür ederim.

Son olarak, her zaman yanımda olan, desteğini bir an olsun esirgemeyen babam Yaşar YARDİBİ, annem Nurcan YARDİBİ ve kardeşim Esra YARDİBİ'ye sonsuz teşekkürler.

Haziran 2011

Hakan Süleyman YARDİBİ

(Elektrik Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ... **iii**
İÇİNDEKİLER ... **v**
KISALTMALAR ... **vii**
ÇİZELGE LİSTESİ ... **ix**
ŞEKİL LİSTESİ ... **xi**
SEMBOL LİSTESİ ... **xv**
ÖZET ... **xvii**
SUMMARY ... **xix**
1 GİRİŞ ... **1**
2 ENDÜKSİYON OCAK İLE İLGİLİ GENEL BİLGİLER ... **5**
2.1 Olumlu Özellikleri ... 6
2.2 Olumsuz Özellikleri ... 7
3 MAXWELL DENKLEMLERİ ... **9**
3.1 Gauss Yasası ... 9
3.1.1 İntegral biçim ... 9
3.1.2 Diferansiyel biçim ... 9
3.2 Manyetizma İçin Gauss Yasası ... 10
3.2.1 İntegral biçim ... 10
3.2.2 Diferansiyel biçim ... 10
3.3 Faraday Yasası ... 10
3.3.1 İntegral biçim ... 10
3.3.2 Diferansiyel biçim ... 11
3.4 Ampere Yasası ... 11
3.4.1 İntegral biçim ... 11
3.4.2 Diferansiyel biçim ... 11
4 ENDÜKSİYON OCAĞIN ÇALIŞMA PRENSİBİ ... **13**
4.1 Endüksiyon Ocağın Güç Elektroniği Devresi ... 15
4.2 Bobin ve Tencere Üzerinde Oluşan Kayıplar ... 21
4.2.1 Bobin – tencere sisteminin elektromanyetik devresi ... 21
4.2.2 Bakır kayıpları ... 22
4.2.3 Demir kayıpları ... 25
4.2.3.1 Histerezis kayıpları ... 25
4.2.3.2 Girdap akımı kayıpları ... 26
4.2.4 Bobin - Tencere sisteminin elektriksel eşdeğer devresi ... 28
5 ENDÜKSİYON OCAĞI BOBİNİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZİ VE İNCELENMESİ ... **31**
5.1 Bobin Kayıplarının İncelenmesi ... 33
5.1.1 Deri etkisi ... 34
5.1.2 Yakınlık etkisi ... 38

5.2 Endüksiyon Bobini Modelinin İncelenmesi 45
5.3 SEA ile Endüktans ve Direnç Hesaplanması 49
5.4 Sargıların Yerleşiminin Bobin Tasarımındaki Etkileri 71
5.5 Ferit Malzemesinin Etkisi 76
5.6 Hava Aralığının Etkisi 78
5.7 Tencerenin Kayıp Karakteristiği ve Kaybın Tencereye Düzgün Yayılması 81
6 SONUÇLAR VE ÖNERİLER 89
KAYNAKLAR 93
EKLER 97
ÖZGEÇMİŞ 125

KISALTMALAR

IGBT : Insulated Gate Bipolar Transistor
Maglev : Magnetic Levitation (Manyetik Yatak-Yüzme)
SEA : Sonlu Elemanlar Analizi

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 5.1 : Farklı Litz tellerinin 5kHz frekansta karşılaştırması 44
Çizelge 5.2 : Tencere malzemelerinin özellikleri [28] 52
Çizelge 5.3 : Analiz yapılan 3 tencere malzemelerinin özellikleri 61
Çizelge 5.4 : JR2KBF ferit teknik özellikleri 61
Çizelge B.1.1 : Tek tel ile sarılan bobinin direnç ölçümler [28] 100
Çizelge B.1.2 : Tek tel ile sarılan bobinin endüktans ölçümleri [28] 100
Çizelge B.2.1 : Tek telli bobinin bakır tencere ile analizi 101
Çizelge B.2.2 : Tek telli bobinin alüminyum tencere ile analizi 101
Çizelge B.2.3 : Tek telli bobinin f115 tencere ile analizi 101
Çizelge C.1 : 20×0.5mm Litz teli ile sarılan bobinin direnç ölçümleri [28] 102
Çizelge C.2 : 20×0.5mm Litz telli sistemin analiz sonuçları 102
Çizelge D.1 : 31×0.4mm Litz teli ile sarılan bobinin direnç ölçümleri [28] 103
Çizelge D.2 : 31×0.4mm Litz telli sistemin analiz sonuçları 103
Çizelge E.1 : 160mm bobinin ferromanyetik tencere ile yüklüyken deneysel ölçümleri 104
Çizelge E.2 : 160mm bobinin ferromanyetik tencere ile yüklüyken analiz sonuçları 105
Çizelge F.1 : 160mm bobinin alüminyum tencere ile deneysel ölçümleri 106
Çizelge F.2 : 160mm bobin alüminyum tencere ile yüklüyken analiz sonuçları 107
Çizelge G.1 : 160mm bobin ferromanyetik olmayan çelik tencere ile yüklüyken deneysel sonuçlar 108
Çizelge G.2 : 160mm bobinin ferromanyetik olmayan çelik tencere ile yüklüyken analiz sonuçları..... 109
Çizelge H.1 : 180mm bobinin ferromanyetik tencere ile yüklü iken deneysel endüktans ve direnç ölçümleri 110
Çizelge H.2 : 180mm bobinin ferromanyetik tencere ile yüklüyken analiz sonucu endüktans ve direnç değerleri 111
Çizelge I.1 : Aralıklı sarım ölçümleri 114
Çizelge I.2 : Bitişik sarılan bobin ölçümleri 114
Çizelge J.1 : Normal iki katlı 52 sarımlı bobin ölçümleri 117
Çizelge J.2 : Özel iki katlı 52 sarımlı bobin ölçümleri 118
Çizelge K.1 : Farklı bağıl manyetik geçirgenliğe sahip feritler ile analiz sonuçları 119
Çizelge K.2 : Farklı iletkenliğe sahip feritler ile analiz sonuçları 120
Çizelge L.1 : 2mm hava aralığı ile analiz sonuçları 121
Çizelge L.2 : 3mm hava aralığı ile analiz sonuçları 122
Çizelge L.3 : 4mm hava aralığı ile analiz sonuçları 122
Çizelge L.4 : 5mm hava aralığı ile analiz sonuçları 122
Çizelge L.5 : 6mm hava aralığı ile analiz sonuçları 123

Çizelge L.6 : 7mm hava aralığı ile analiz sonuçları 123

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Endüksiyon ocağında ısı doğrudan tencere üzerinde oluşturulur..... 5
Şekil 2.2 : Isıtma yöntemlerinin ısıtma hızı açısından karşılaştırılması [3] 6
Şekil 2.3 : Isıtma yöntemlerinin verim açısından karşılaştırılması [3]..... 7
Şekil 2.4 : Isıtma yüzeyinin soğuma süresi açısından ısıtma yöntemlerinin karşılaştırılması [3]..... 7
Şekil 2.5 : Endüksiyon ocaklarında tencerelerin ısıtılabilirliği 8
Şekil 4.1 : Endüksiyon bobini..... 13
Şekil 4.2 : Endüksiyon ocağı transformatör benzetimi [6]..... 14
Şekil 4.3 : Rezonans eğrisi [8]..... 15
Şekil 4.4 : Yarım köprü rezonans çevirici [10] 16
Şekil 4.5 : Rezonans çevirici adım 0 [6]..... 18
Şekil 4.6 : Rezonans çevirici adım 1 [6]..... 18
Şekil 4.7 : Rezonans çevirici adım 2 [6]..... 19
Şekil 4.8 : Rezonans çevirici adım 3 [6]..... 19
Şekil 4.9 : Rezonans çevirici adım 4 [6]..... 19
Şekil 4.10 : Anahtarlama anı ve kayıplar [2]..... 20
Şekil 4.11 : Bobin-tencere sistemi [14] 21
Şekil 4.12 : Bobin-tencere sistemi manyetik eşdeğer devresi 22
Şekil 4.13 : Girme derinliği 23
Şekil 4.14 : Farklı Litz teli yapıları..... 24
Şekil 4.15 : Histerezis eğrisi..... 25
Şekil 4.16 : 3 boyutlu bobin akımı ve girdap akımı yönleri 27
Şekil 4.17 : Endüksiyon bobini ile tencere direncinin oluşturduğu yapının eşdeğer devresi [8] 28
Şekil 5.1 : Pratik mühendislik problemlerinde SEA gösterimi [24]..... 32
Şekil 5.2 : Endüksiyon bobini direnç modeli [7]..... 34
Şekil 5.3 : Deri etkisi [25]..... 35
Şekil 5.4 : 50A 50Hz uyarma durumunda manyetik alan şiddeti ve akım yoğunluğu..... 36
Şekil 5.5 : 50A 50kHz uyarma durumunda manyetik alan şiddeti ve akım yoğunluğu..... 37
Şekil 5.6 : 50A 1.9kHz uyarma durumunda eş potansiyel çizgileri ve akım yoğunluğu..... 38
Şekil 5.7 : Yakınlık etkisinin gösterimi [25] 39
Şekil 5.8 : İki iletkenden teki 50Hz'de uyarılmış yakınlık etkisi..... 39
Şekil 5.9 : İki iletkenden teki 50kHz'de uyarılmış yakınlık etkisi..... 40
Şekil 5.10 : 50kHz’de iki iletken de akım taşırken yakınlık etkisi..... 41
Şekil 5.11 : 1.9kHz'de iki iletken akım taşırken akım yoğunlukları..... 42
Şekil 5.12 : Bir bobinde akım yoğunluğu değişimi [25] 42
Şekil 5.13 : Örnek bir bobinin akı ve akım yoğunluğu 43

Şekil 5.14 : Tek iletkenden sarılmış endüksiyon bobini 46
Şekil 5.15 : 31×0.4mm tel ile sarılmış bobin 47
Şekil 5.16 : 31×0.4mm ve 14×0.6mm iletkenlerden oluşan litz tellerinde akım dağılımlarının karşılaştırılması 48
Şekil 5.17 : Endüksiyon bobininde halkalanan akılar 50
Şekil 5.18 : Tek tel ile sarılmış bobin [28] 52
Şekil 5.19 : Tek tel ile sarılmış bobin modeli ve oluşturulan üçgen sonlu elemanlar 53
Şekil 5.20 : Bakır tencere, SEA ile deney sonuçlarının karşılaştırılması 54
Şekil 5.21 : Alüminyum tencere, SEA ile deney sonuçlarının karşılaştırılması 55
Şekil 5.22 : F114 tencere, SEA ile deney sonuçlarının karşılaştırılması 56
Şekil 5.23 : 20×0.5mm Litz telli model 57
Şekil 5.24 : 20×0.5mm Litz telli sistemin analiz sonuçlarıyla deneysel verilerin karşılaştırılması 57
Şekil 5.25 : 31×0.4mm Litz telli sistemin modeli 58
Şekil 5.26 : 31×0.4mm Litz telli sistemin analiz sonuçlarıyla deneysel verilerin karşılaştırılması 59
Şekil 5.27 : Analizi yapılan 14×0.4mm telden oluşan 160mm'lik bobin 60
Şekil 5.28 : Analizlerde kullanılan tencereler 60
Şekil 5.29 : Bobinlerin yerleştirildiği düzenek 62
Şekil 5.30 : 160mm çapındaki bobinin ferromanyetik tencere ile yüklüyken analizi (20kHz) 63
Şekil 5.31 : 160mm bobinin deneysel ve analiz sonuçlarının karşılaştırması 64
Şekil 5.32 : 160mm bobin alüminyum tencere ile yüklüyken analiz sonuçlarının deneysel sonuçlarla karşılaştırılması 65
Şekil 5.33 : 160mm bobin ferromanyetik olmayan çelik tencere ile yüklüyken analiz sonuçlarının deneysel sonuçlarla karşılaştırılması 67
Şekil 5.34 : Analizi yapılan 180mm bobin 68
Şekil 5.35 : 180mm bobin ferromanyetik tencere ile yüklüyken analiz sonuçlarının deneysel sonuçlarla karşılaştırılması 69
Şekil 5.36 : Bitişik ve aralıklı sarılan bobin örnekleri 72
Şekil 5.37 : Aralıklı sarımın bitişi sarım ile verim açısından karşılaştırması 73
Şekil 5.38 : Üst üste koyularak oluşturulan iki katlı bobin 74
Şekil 5.39 : Özel sarım tekniği ile oluşturulan çok katlı bobin 74
Şekil 5.40 : Tek kat (aralıklı), özel ve normal çok katlı bobinlerin verim karşılaştırması 75
Şekil 5.41 : Tek kat(aralıklı), özel ve normal çift katlı bobinlerin direnç ve endüktans karşılaştırması 76
Şekil 5.42 : Aralıklı sarım akı yoğunluğu 77
Şekil 5.43 : Hava aralığının endüktans ve dirence olan etkisi 79
Şekil 5.44 : Hava aralığı değişimi ile endüktans, direnç ve verim değişimleri 80
Şekil 5.45 : 1 ve 10kHz'de alüminyum tencere ile manyetik alan çizgileri 81
Şekil 5.46 : Tencere üzerinde akı çizgileri ve akım yoğunluğu 82
Şekil 5.47 : Akım yoğunluğuna göre düzgün ısı dağılımı çalışması 83
Şekil 5.48 : Eşit manyetik alan dağılımının sağlaması beklenen fayda [21] 83
Şekil 5.49 : Akı dağılımına göre eşit ısı dağılımı çalışması 84
Şekil 5.50 : Çoklu bobin ile eşit ısı dağılımı [31] 85
Şekil 5.51 : Yanlış yönde uyarmalı parçalı bobinde akı şiddeti vektörleri 85
Şekil 5.52 : Yanlış uyarma yönü ile parçalı bobin yapısı 86
Şekil 5.53 : Doğru yönde uyarmalı parçalı bobinde akı şiddeti vektörleri 86

Şekil 5.54 : Çoklu bobin yapısı ve düzgün ısı dağılımı 87
Şekil 5.55 : Örnek 2 ve 4 parçalı bobinler, dört parçalı bobinde tek parçalı bobine göre ısıl dağılım iyileşmesi [32] 88
Şekil A.1 : Yaklaşık bakır alanına sahip 1, 3, 7 damarlı tellerden oluşan 4 sarımlı bobinde akım dağılımı 98
Şekil A.2 : Yaklaşık bakır alanına sahip 14 ve 45 damarlı tellerden oluşan 4 sarımlı bobinde akım dağılımı 99
Şekil F.1 : 160mm bobinin alüminyum tencere ile yüklüyken analizi (100kHz) ... 106
Şekil G.1 : 160mm bobinin ferromanyetik olmayan çelik tencere ile yüklüyken analizi 108
Şekil H.1 : 180mm bobinin SEA modeli 110
Şekil I.1 : Aralıklı sarılan bobinin analizi (100kHz) 112
Şekil I.2 : Bitişik sarılan bobinin analizi (100kHz) 113
Şekil I.3 : Aralıklı ve bitişik sarımların direnç ve endüktans karşılaştırması 115
Şekil J.1 : Normal iki katlı 52 sarımlı bobin analizi 116
Şekil J.2 : Özel iki katlı 52 sarımlı bobin analizi 117
Şekil L.1 : Ferromanyetik tencere ile hava aralığı 4mm iken analiz (20kHz) 121

SEMBOL LİSTESİ

E : Elektrik Alan
q : Elektriksel Yük
ε_0 : Boşluğun Elektrik Alan Geçirgenliği
∇ : Diverjans (Nabla) Operatörü
p : Elektriksel Yük Yoğunluğu
J : Akım Yoğunluğu
B : Manyetik Alan Yoğunluğu
Q : Rezonans Çevirici Kalite Faktörü
Φ : Akı
$\Re$: Relüktans
N : Sarım Sayısı
Ψ : Halkalanma Akı
δ : Girme Derinliği
ρ : Özgül Direnç
f : Frekans
μ_r : Bağıl Manyetik Geçirgenlik
R_s : Tencere Yüzey Direnci
R_{in} : Bobin Giriş Direnci
n : Litz Telindeki İletken Sayısı
E : Enerji
Q_{su} : Suya Aktarılan Enerji
μ : Verim

SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE EV TİPİ ENDÜKSİYON OCAK BOBİNİNİN ANALİZİ

ÖZET

Endüksiyonla ısıtma tekniği, endüstriyel uygulamalarda ısıtma, eritme ve kaplama gibi alanlarda uzun yıllardır yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak ev içi uygulamalarına, özellikle endüksiyon ocaklarla son on beş yılda girebilmiştir. Bu ısıtma tekniğinin evde kullanılmasının nedeni klasik ocaklara göre bazı avantajlara sahip olmasıdır. Örneğin, daha verimli olması, daha hızlı ısıtması ve düzgün bir yüzeye sahip olması açısından daha kullanışlı olması endüksiyon ocakların diğer ocaklara olan en büyük avantajlarıdır.

Bu tez çalışmasında endüksiyon ocaklarının en temel malzemelerinden birisi olan endüksiyon ocak bobini detaylı bir şekilde incelenmiştir. İncelemede sonlu elemanlar yöntemi kullanan bir yazılımdan faydalanılmıştır.

Endüksiyon ocağı bobininin endüktans ve direnç değerleri güç elektroniği devresi açısından oldukça büyük önem taşımaktadır. Bir benzetim modeli kurularak bu değerler tez çalışmasında hesaplanmıştır. Endüktans ve direnç değerlerine etki eden parametrelerden, sarım sayısı, bobinin sarılacağı tel yapısı, tencere ile bobin arası mesafe, kullanılan malzemeler incelenmiştir. Bu parametreler değiştirilerek bobinin elektriksel karakteristiğindeki değişimler gözlenmiş, böylelikle bobin tasarımı sırasında yapılan değişikliklerin sonuçları anlaşılmaya çalışılmıştır. Bu çalışma sonuçlarından daha verimli bir bobin tasarımı için bazı fikirler de çıkartılmaya çalışılmıştır. Ayrıca endüksiyon ocağın çalışması sırasında üretilen ısının tencere yüzeyine daha eşit bir şekilde dağılması için yapılabilecekler yine sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir.

FINITE ELEMENT ANALYSE OF A DOMESTIC INDUCTION COOKER BOBBIN

SUMMARY

Induction heating has been used in industrial applications, such as melting, sheathing and heating, for long times. However, induction heating could have been used in home appliances for last fifteen years (induction cookers). Induction cookers have some advantages over conventional cookers, such as efficiency, heating speed and having a reliable, easy clean surface.

Induction bobbin or inductance is one of the main components in induction cookers. In this study, induction bobbin is investigated in a detailed way. This investigation or study is made by a software which uses finite elements method.

Inductance and resistance values of induction bobbin are very important for power electronic circuit. These values are calculated in this study using a simulation model of induction bobbin. In addition, the parameters which affect these values are investigated too. For example, number of turns, the conductor type, distance between bobbin and pan and the materials which are used in whole induction bobbin. By means of these parameters, some conclusions about efficiency are given too. Active surface heating over the pan is another investigation subject in this study.

1 GİRİŞ

Endüksiyon ocakları endüstriyel uygulamalarda uzun sürelerdir kullanılsa da ev uygulamalarında son 10 ila 20 yıldır yerini almıştır. Genel olarak tercih sebepleri; verimli çalışmaları, hızlı ısıtma sağlayabilmeleri ve güvenilir olmalarıdır. Bu ocakların çalışma prensibi Faraday'ın endüksiyon yasasına dayanmaktadır. Faraday yasasına göre değişken manyetik alan içerisinde bir iletken bulunursa ya da sabit manyetik alan içerisinde bir iletken hareket ettirilirse bu iletken üzerinden akım akar. Bu yasa ile bugünkü motor ve transformatör tasarımları gerçekleştirilmiştir. Ancak yine Faraday yasası gereği değişken manyetik alanın oluşturduğu akımlar transformatörlerde ya da bazı makinelerde kayıplara da neden olabilirler. Çünkü değişken manyetik alan aynı zamanda akı yolu iletken ise bu yolun üzerinde girdap akımı oluşmasına neden olur. Girdap akımlarının akması ise girdap akımı kayıplarını (Foucault kayıpları) oluşturmaktadır. Bu kayıplarla birlikte histerezis kayıpları demir kayıplarının tamamını oluştururlar [1].

Girdap akımlarının büyüklüğü, akının dik olarak gördüğü iletken yüzeyi ya da akı yolunun kalınlığı ile doğru orantılıdır. Bu yüzden transformatörlerde ve elektrik makinelerinin bir kısmında lamine sac ya da ferit malzeme kullanılmaktadır. Böylelikle akı yolunun kalınlığı azaltılmış ve girdap akımlarının genliği küçültülmüş olmaktadır [1].

Girdap akımları ve histerezis kayıpları endüksiyon ocaklarının temelini oluşturmaktadırlar. Transformatörler ve elektrik makinelerinde dezavantaj olan bu akımlar endüksiyon ocaklarında bir avantaja dönüşmektedir. Çünkü bu uygulamalarda oluşturulan akı tencere üzerinden geçirilerek histerezis ve özellikle girdap akımı kayıpları bilinçli olarak oluşturulmaktadır. Bu kayıplar ısı olarak ortaya çıkacağı için tencere ısınacaktır, yani amaca ulaşılmış olacaktır [2].

Girdap akımlarının etkisi başta olmak üzere demir kayıplarından yeterince faydalanabilmek için tencere malzemesinin ferromanyetik ve kötü bir iletken olması tercih edilmektedir. Bu şekilde akılar tencere üzerinde yoğunlaştırılabilir, yeterince

büyük girdap akımları ile kayıplar oluşturulabilir. Tencere malzemesinin direncini artırmak, dolayısıyla tenceredeki kayıpları artırarak daha fazla ısıtmak için yüksek frekanslara çıkılarak deri etkisinden faydalanılmaktadır. Bilindiği gibi deri etkisi ile akımın akacağı alan azalmakta ve direnç artmaktadır, bu şekilde kayıplar da artacaktır [2].

Tüm bu etkiler göz önüne alınırken ve verimi yüksek bir endüksiyon ocağı tasarlanmaya çalışılırken manyetik kuplajı sağlayan endüksiyon bobininin optimum tasarıma sahip olması oldukça önemli bir hale gelmektedir. Bu nedenle bu tez çalışmasında sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak bir takım analizler yapılmış ve en verimli, en uygun bobin tasarımının nasıl yapılacağına dair bazı çıkarımlar edinilmiştir. Ancak ilk olarak endüksiyon ocağının ve endüksiyon bobininin çalışma prensibine hâkim olmak amacıyla Maxwell denklemleri olmak üzere bazı denklemler incelenmiştir. Daha sonra hem tencere üzerinde oluşan faydalı kayıpların hem de bobin üzerinde oluşan zararlı kayıpların nedenlerinden olan yakınlık (proksimity) ve deri etkileri ayrıntılı olarak incelenmiştir. Daha sonra bir endüksiyon bobini modeli kurularak ana olarak incelenmiş daha sonra bu bobinin nasıl tellerden oluşması gerektiği üzerinde durulmuştur.

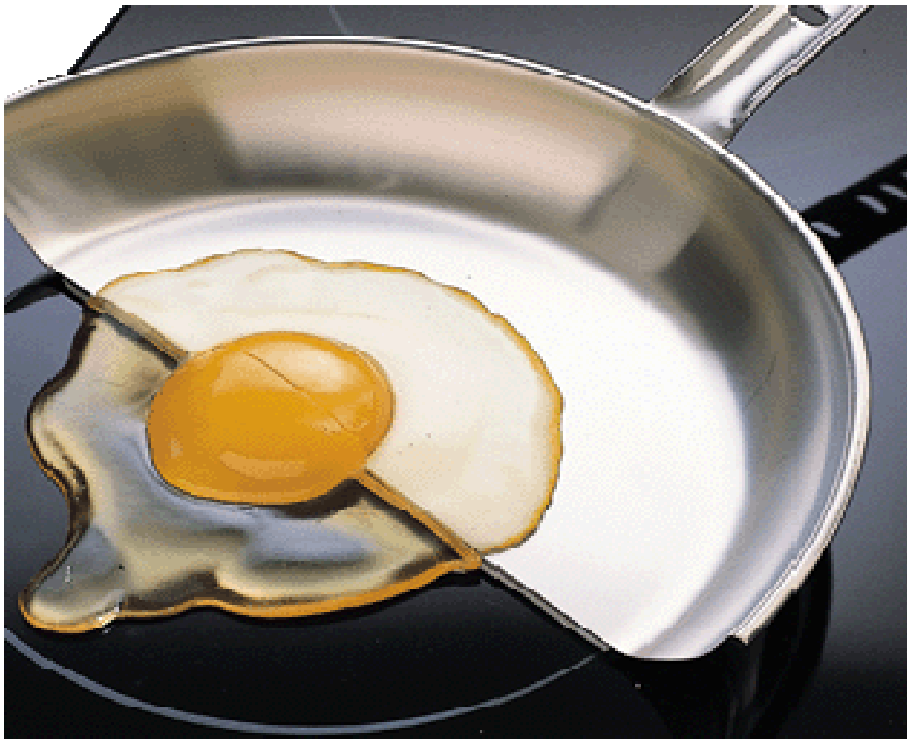
Bobinin direnç ve endüktans karakteristiği de güç elektroniği devresi açısından hayati öneme sahiptir. Bu değerlerin de teorik olarak nasıl hesaplanabileceği üzerinde durulmuştur. Analizler sonucu elde edilen bilgiler üzerinde bazı formülasyonlar kullanılarak endüktans ve direnç değerleri hesaplanmış, gerçekte bir RLC metre ile ölçülen değerler doğrulanmıştır. Endüktans ve direncin yanında verime de etki eden bazı parametreler mevcuttur, bunlar; tencerenin bobine olan mesafesi, ferit malzemesi, sarım sayısı ve sarımların yerleşimidir. Tüm bu parametreler de değiştirilerek bobin üzerindeki etkileri anlaşılmaya çalışılmıştır. Özellikle endüktans ve direnç değerlerine etkileri başta olmak üzere, verime olan etkileri en kritik noktalardır.

Tüm bu çalışmalar sırasında da görüleceği üzere girdap akımları tencere üzerinde belirli bir bölgede yoğunlaşmaktadır ve bu nedenle tencere tabanının belirli bir kısmı daha fazla ısınmaktadır. Bunu önlemek için daha önce uygulanmış bazı yöntemler incelenmiştir. Bu yöntemlerden ilki akım yoğunluğunun ya da akı yoğunluğunun az olduğu bölgelere fazladan sarım sayısı eklemektir. Yapılan çalışmada akı yoğunluğu ve akım yoğunluğunun az olduğu bölgeler belirlenerek buralara sargılar eklenmiş ve

sonuçlar incelenmiştir. Daha sonra endüksiyon bobini iki parçaya bölünmüş ve tencere üzerinde iki girdap akımı oluşturulmaya çalışılmıştır. Bu çalışmanın sonucunun daha başarılı olduğu sonucuna varılmıştır. Bobinin iki parçaya, 4 parçaya ya da daha fazla parçaya bölünmesinin, tencere üzerinde daha eşit bir ısı dağılımı sağladığı sonucuna varılmıştır.

2 ENDÜKSİYON OCAK İLE İLGİLİ GENEL BİLGİLER

Isıtma, bir kaynakta oluşturulan ısıl enerjinin, belirli bir ısınma yolu üzerinden, ısıtılmak istenen malzemeye aktarılması işidir. Genel olarak ısı kaynağı, kimyasal (odun, kömür, vb) ve elektriksel olmak üzere ikiye ayrılır. Endüksiyon ile ısıtmada ısı kaynağı elektriktir yalnız tam olarak ısıtma tanımına uymaz. Çünkü endüksiyon ile ısıtmada ısının belirli bir ortam üzerinden taşınması mevzu bahis değildir. Maxwell denklemleri (özellikle Faraday yasası) gereğince bir manyetik kuplaj vardır ve ısı direkt olarak hedef malzeme olan tencere üzerinde oluşturulur. Algı olarak mikrodalgaya benzetilse de çalışma prensipleri arasında çok büyük farklılıklar vardır. Mirodalga yönteminde tencere de mevcut değildir, direkt yiyecek ısıtılır.

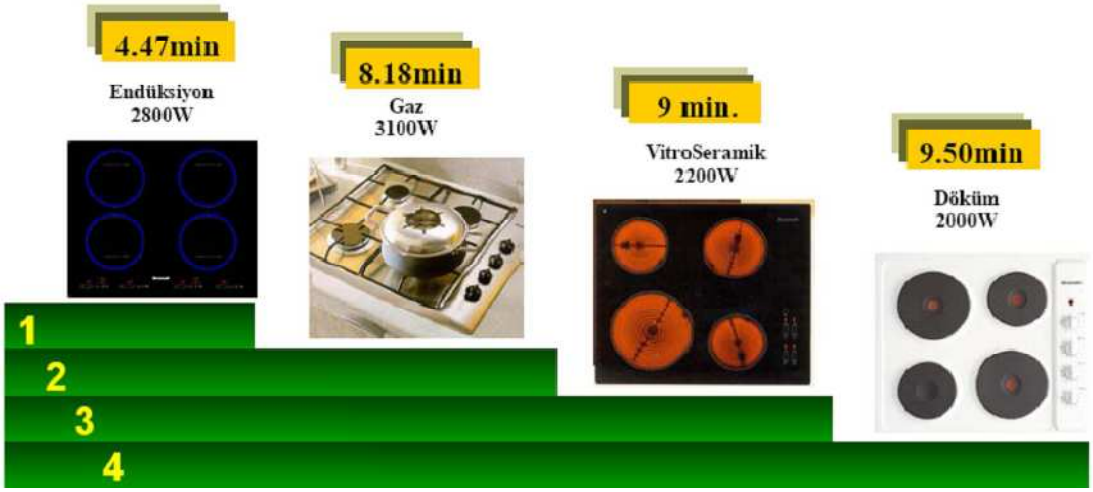


Şekil 2.1 : Endüksiyon ocağında ısı doğrudan tencere üzerinde oluşturulur

Bu tez çalışmasında ev tipi endüksiyon ocağı incelenmiştir. Ev tipi ocaklarda yeni bir teknoloji sayılabilecek olan endüksiyonla ısıtma teknolojisi birçok yönden diğer ısıtma yöntemlerinden ve ocaklardan farklılıklar gösterir. Bu farklılıklar olumlu ve olumsuz yönler olarak iki alt başlıkta incelenebilir.

2.1 Olumlu Özellikleri

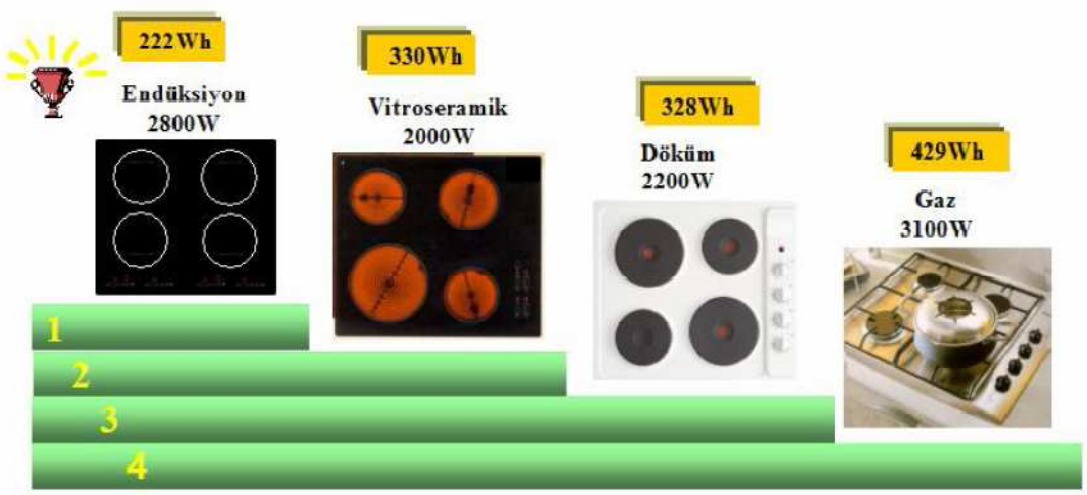
Hızlı Isıtma: Endüksiyon ocaklarında tencere aktarılacak güç miktarı oldukça hassas bir şekilde ayarlanabilmektedir. Bu miktar doğrudan tencere üzerinde harcandığı içinse yüksek güçlerde tencerenin ve yemeğin ısınma hızları diğer yöntemlere göre daha fazladır. Şekil 2.2'de ev tipi ocaklarda ısıtma hızı açısından bir karşılaştırma verilmiştir. Bu çalışmada 2 litre suyun sıcaklığının 20^{o}C'den 95^{o}C'ye çıkma süreleri karşılaştırılmıştır [3].



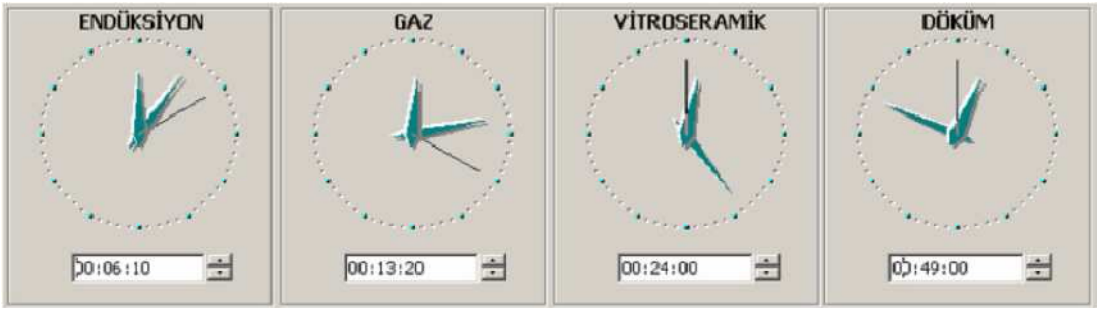
Şekil 2.2 : Isıtma yöntemlerinin ısıtma hızı açısından karşılaştırılması [3]

Verimli Isıtma: Endüksiyonla ısıtmada, enerjinin büyük kısmı doğrudan ısıtılacak cisme yani tencereye aktarılır. Gaz ve diğer geleneksel ısıtma yöntemlerinde ise kaynak enerji ilk olarak ısı enerjisine çevrilir, daha sonra ısıtılacak cisim olan tencereye bu ısı enerjisi aktarılır. Isı enerjisi tencereye aktarılırken hava ile teması yüzünden enerjinin bir kısmı havaya aktarılarak kayıp oluşturulur. Şekil 2.3'te 2lt suyun sıcaklığının 20^{o}C'den 95^{o}C'ye çıkarılması için harcanması gereken enerji miktarları bakımından ısıtma yöntemleri karşılaştırılmıştır [3].

Güvenilirlik: Endüksiyonla ısıtma yöntemi ağır bir elektronik aksam içermektedir ve oldukça kontrollü olarak enerjiyi ısıtılacak cisme aktarır. Ayrıca ısı kaynağı ocak yüzeyi değil tencere yüzeyi olduğu için ocak yüzeyinin soğuması daha kolaydır. Şekil 2.4'te ocak yüzeyinin sıcaklığının tenceredeki 2lt su kaynadıktan sonra 60^{o}C'ye düşme süreleri verilmiştir [3].



Şekil 2.3 : Isıtma yöntemlerinin verim açısından karşılaştırılması [3]



Şekil 2.4 : Isıtma yüzeyinin soğuma süresi açısından ısıtma yöntemlerinin karşılaştırılması [3]

Estetik ve Kullanım Kolaylığı: Diğer ocak türlerinde olduğu gibi ocak üzerinde ateş olacak veya ısınması gerekecek bir yüzey olmadığı için dümdüz bir cam kullanılabilir. Bu nedenle hem göze hoş görünen bir yapıya sahip olan endüksiyon ocağı hem de temizlenmesi açısından da büyük kolaylık sağlar.

2.2 Olumsuz Özellikleri

Tencere veya Tava Uygunluğu: Endüksiyon ocak ile ısıtılabilecek tencereler ferromanyetik malzemeden yapılmalıdır ve bunun yanında iletken olmalı ancak üzerinde yeterince kayıp oluşturulabilecek kadar dirence sahip olmalıdır [3].

Bu tanıma ferromanyetiklik ve iletkenlik açısından uymayan alüminyum, bakır gibi tencerelerin ısıtılması için karmaşık güç elektroniği ve kontrol devreleri kurulmalıdır. Bu elektronik yapılar yenilikçi birçok yaklaşım gerektirmekte, ayrıca hızlı ve standart endüksiyon ocaklarda kullanılandan fazla sayıda sıcaklık sensörleri kullanılmaktadır (kızılötesi sensörler). Bunların yanında özel ve daha etkin soğutma

teknikleri de kullanılmaktadır [4]. Bu ocaklar ile tencere kullanım aralığı genişlemektedir (Bkz. Şekil 2.5). Kullanım alanı genişletilmiş bu ocaklar genelde all-metal ocak olarak bilinmektedir.

	 FerroManyetik ÇELİK	 DökmeDemir ve Emaye	 NonFerro ÇELİK	 Teflon Kaplı Alüminyum	 Alüminyum	 Çok Katmanlı	 BAKIR
Standart OCAK	✓	**Sınırlı**	✗	✗	✗	✗	✗
All Metal OCAK	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Şekil 2.5 : Endüksiyon ocaklarında tencerelerin ısıtılabilirliği

Yüksek Güç İsteği: Endüksiyon ocakları diğer ocak türlerine göre daha etkin ısıtma sağlamaktadır ve daha yüksek güçlere de çıkılabilir. Bunun önündeki engel ise çekilen elektrik enerjisinin evlerde anlık olarak belirli bir seviyenin üzerine çıkamamasıdır. Ev tipi endüksiyon ocaklarında en fazla 3500W güç çekilmektedir ve bu güç için şebekeden yaklaşık 16A çekilmelidir. Daha fazla güçlerde bazı evlerdeki sigortalarının atacağı düşünülürse, bir seri üretim ürünü olan endüksiyon ocaklarında bunun sağlanması pek de anlamlı olmaz. Ancak endüksiyon ocak kullanıcıları genel olarak yüksek güçlere çıkmak istemektedir [3].

3 MAXWELL DENKLEMLERİ

Maxwell denklemleri elektriksel ve manyetik sistemleri ya da olayları açıklamakta kullanılan en temel ve gerekli denklemlerdir. Temel denklemler olması nedeniyle, elektriksel ve manyetik sistemlerinin açıklayıcısı en basit denklemler olarak düşünülebilirler ancak oldukça karmaşık sistemlerin de temelinde her zaman Maxwell denklemleri yatmaktadır.

Endüksiyon ocaklar hem elektriksel hem de manyetik sistemlerdir. Her elektriksel ve manyetik sistemi anlamakta olduğu gibi, Maxwell denklemleri endüksiyon ocakları da anlamakta kullanılan ana eşitliklerdir. Bu yüzden tez çalışmasında da Maxwell denklemleri ayrıntısına girilmeden, temel hatlarıyla açıklanacaktır.

3.1 Gauss Yasası

Tüm Maxwell denklemleri gibi Gauss Yasası da integral ve diferansiyel biçimleriyle açıklanmaktadırlar. Aşağıda bu biçimlerin denklemleri ve açıklamaları yapılmıştır.

3.1.1 İntegral biçim

Gauss yasasının integral ifadesi aşağıdadır.

$$\oint_S \vec{E} \cdot \overrightarrow{dA} = \frac{q_{enc}}{\varepsilon_0} \qquad \textbf{(3.1)}$$

İfadenin sol tarafı S alanından geçen elektrik alan çizgilerinin toplamını ifade etmektedir. Sağ taraf ise bu alandaki toplam yükün, boşluğun elektrik alan geçirgenliğe oranıdır [5].

Yani şöyle açıklanabilir; elektrik yükü bir elektrik alan oluşturur ve bu alanın da oluşturduğu bir akı vardır. Bu akı, içinden geçtiği alanın barındırdığı yükler ile doğru orantılı olarak değişmektedir [5].

3.1.2 Diferansiyel biçim

Gauss yasasının diferansiyel ifadesi aşağıdadır.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{p}{\varepsilon_0} \quad \textbf{(3.2)}$$

İfadenin sol tarafı elektrik alanın diverjansı, yani alanın belirlenen bölgeden dışarıya akma meylidir. Sağ taraf ise elektrik yük yoğunluğunun, boşluğun elektrik alan geçirgenliğine oranıdır [5].

Başka bir ifade ile; elektrik yükü tarafından oluşturulan elektrik alan pozitif yükten uzaklaşır, negatif yüke yakınlaşır [5].

3.2 Manyetizma İçin Gauss Yasası

3.2.1 İntegral biçim

$$\oint_S \ \vec{B} \cdot \overrightarrow{dA} = 0 \quad \textbf{(3.3)}$$

Eşitliğin sol tarafı, belirli bir alandan geçen manyetik alan çizgilerinin toplam sayısını verir ki bu değer 0'dır. Yani kapalı bir alandan geçen toplam manyetik akı 0'dır [5].

3.2.2 Diferansiyel biçim

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad \textbf{(3.4)}$$

Herhangi bir noktada manyetik alanın diverjansı 0'dır. Manyetik alanın diverjansı, manyetik alanın bir noktadan uzaklaşma meylinin, o noktaya akma meylinden fazla oluşu olarak tanımlanabilir. Başka bir ifade ile akı çıktığı bir noktaya geri döner, yani sürekli halkalanmaktadır. Bu yüzden bir noktadan çıkan akı ile o noktaya giren akı miktarı birbirine eşittir [5].

3.3 Faraday Yasası

3.3.1 İntegral biçim

$$\oint_C \ \vec{E} \cdot \overrightarrow{dl} = -\frac{d}{dt} \int_S \ \vec{B} \cdot dA \quad \textbf{(3.5)}$$

Bu eşitliğe göre kapalı bir döngüdeki elektrik alanın integrali, bu döngü içerisindeki manyetik akı değişiminin negatifini verir [5].

Ya da başka bir deyişle; bir yüzeyden geçen manyetik akının değişimi, o alan üzerinde elektromotor kuvveti (emf) oluşturur ve manyetik alandaki değişim döner bir elektrik alan oluşturur [5].

3.3.2 Diferansiyel biçim

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \textbf{(3.6)}$$

İfadenin sol tarafı elektrik alanın rotasyoneli yani alan çizgilerinin bir nokta etrafında dönme eğilimlerini ifade eder. Sağ taraf ise manyetik alanın zamana göre değişiminin negatifidir [5].

Yani ifade şunu söylemektedir; dönen bir elektrik alan, zamana göre değişen bir manyetik alan tarafından üretilmektedir [5].

3.4 Ampere Yasası

3.4.1 İntegral biçim

$$\oint_C \ B \cdot dl = \mu_0 \left(I_i + \varepsilon_0 \frac{d}{dt} \int_S \ \vec{E} \cdot dA \right) \quad \textbf{(3.7)}$$

Eşitliğin sol tarafı, manyetik alanın C kapalı yolunda (döngüsünde) dönüşünü ifade eder. Sağ tarafta ise manyetik alanın iki kaynağı mevcuttur; sabit akım ve C ile belirlenmiş A alanından geçen elektrik alan [5].

Amper yasasının integral gösterimi sözel olarak da şöyle açıklanabilir; bir akım veya bir yüzeyden geçen değişken elektrik alan, bu yüzeyi kapsayan herhangi bir kapalı yolda dönen manyetik alan oluşturur [5].

3.4.2 Diferansiyel biçim

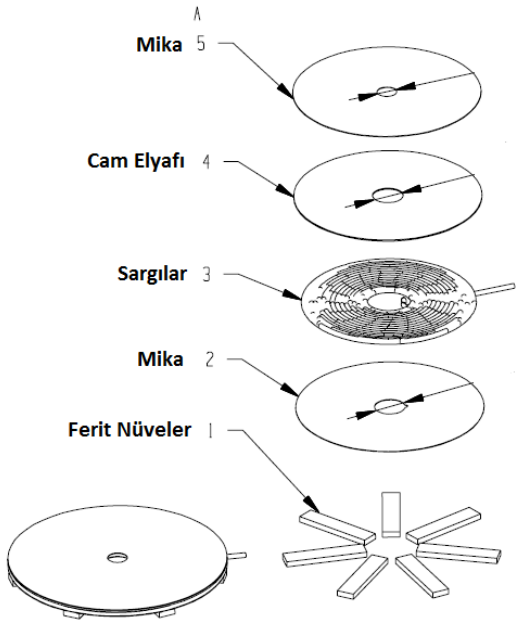
$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \left(\vec{J} + \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) \quad \textbf{(3.8)}$$

İfadenin sol tarafı manyetik alanın rotasyoneli, yani alan çizgilerinin bir nokta etrafında dönme eğilimidir. Sağ tarafta ise akım yoğunluğu ve elektrik alanın zamana göre değişimi vardır. Yani bu ifade dönen bir manyetik alanın, bir elektrik akımı ve zamana göre değişen elektrik alan tarafından üretildiğini açıklamaktadır [5].

4 ENDÜKSİYON OCAĞIN ÇALIŞMA PRENSİBİ

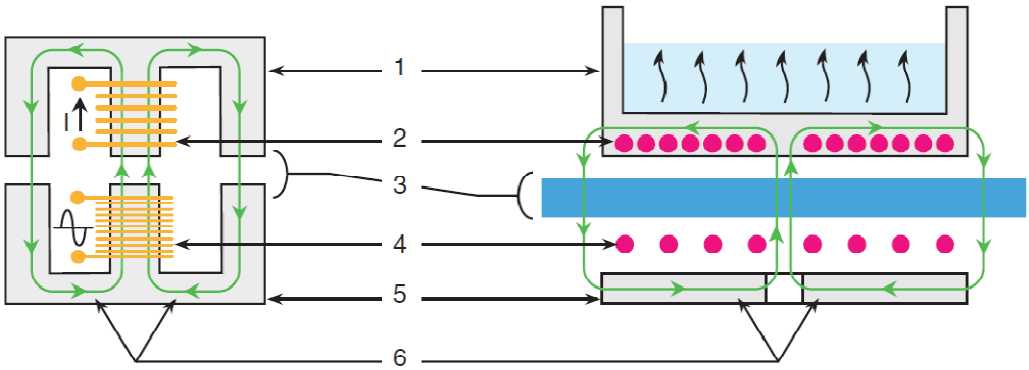
Endüksiyon ocağının temelindeki kavramlardan bir tanesi Michael Faraday'ın 1831 yılında bulduğu Faraday yasasıdır. Bu yasaya göre, içinden değişken bir akım geçen iletkenin yanındaki iletkende de belirli bir miktarda akım akmakta veya sabit akım taşıyan bir iletkenin yanındaki bir iletken hareket ettirildiğinde hareket ettirilen iletkende akım akmaktadır. Bu yasaya ek olarak, Faraday yasasından faydalanarak açıklanabilen girdap akımları ile birlikte histerezis kayıpları endüksiyon ocaklarının çalışma prensibini açıklayan temel kavramlardır [2].

Kısaca açıklamak gerekirse; endüksiyon ocakları değişken, hatta sinüsoidal değişen, manyetik alanın ısıtılmak istenen cismin üzerinde yoğunlaştırılmasıyla çalışırlar. Bu manyetik alanın ya da akının oluşturulması için yatay bir bobin hazırlanır ve belirli bir mesafe ile tencere ya da kayıp oluşturulacak akı yolu bu bobinin üzerine konulur. Bu noktada bir endüksiyon bobinini tanımlamak ve hangi parçalardan oluştuğunu göstermek gerekmektedir. Şekil 4.1'da görüldüğü gibi bir endüksiyon bobini kabaca 5 parçadan oluşur. En önemli kısım 3 numaralı kısımdır ve burada sarımlar bulunmaktadır.



Şekil 4.1 : Endüksiyon bobini

Son noktadan devam edilirse, endüksiyon bobini üzerinden sinüsoidal bir akım akıtılarak yine sinüsoidal değişen bir manyetik alan yaratılır ve bu manyetik alan geçebileceği en kolay yol olan tencere üzerinden geçer. Tencere tercihen ferromanyetik, iletken ama direnci yüksek olmalıdır. Transformatörlerde ya da birçok makinedeki gibi akı yolu lamine saclardan oluşmaz, çünkü tencereler geniş ve tek parça yüzeylere sahiptirler. Bu durum tencerede oluşacak histerezis kayıplarına ek olarak oldukça büyük girdap akımlarına neden olacaktır. Bahsi geçen kayıplar büyüdükçe tencere daha fazla ısınacak, amaca daha fazla yaklaşılacaktır. Endüksiyon ocağı Şekil 4.2'de gösterildiği gibi özel bir transformatöre benzetilebilir [2]. Bu sistemde tencere transformatörün nüvesinin bir kısmı, akı yolunu tamamlaması ve ekranlama görevi için konulan ferit nüveler transformatör nüvelerinin diğer kısmını oluşturmaktadır. Transformatördeki hava aralığı endüksiyon ocağında da tencere ile bobin arasındaki mesafe olarak algılanabilir ki bu hava aralığı genelde camdır. Transformatörün birincil sargısı bobinin kendisi iken ikincil sargısı tencere üzerinde endüklenecek olan akımlar dolayısıyla tencere yüzeyidir.



Şekil 4.2 : Endüksiyon ocağı transformatör benzetimi [6]

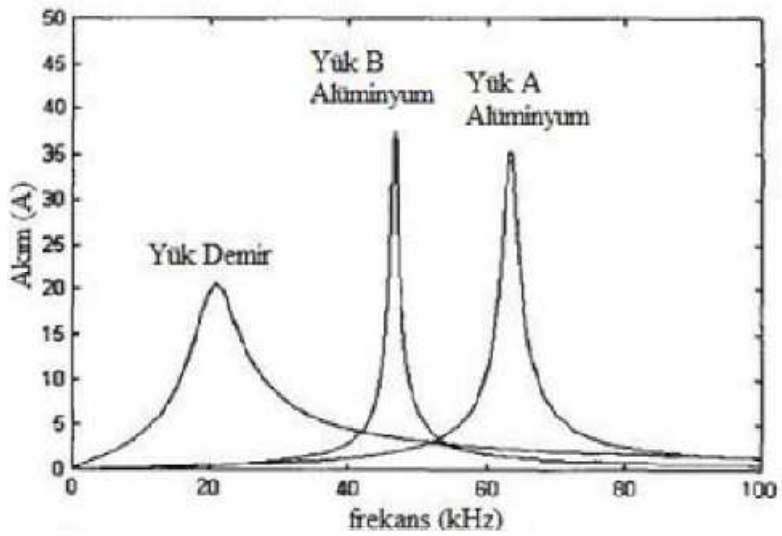
Yine daha sonra ayrıntılı olarak açıklanacak kavramlardan birisi olan deri etkisi de tencere üzerinde oluşturulacak akımlar açısından oldukça önemlidir. Bobin üzerinden akan akımın frekansı arttıkça tencere üzerinden akacak olan akımın da frekansı artacaktır. Frekans arttıkça deri etkisi yüzünden tencere üzerinden akan akımların kullandığı alan azalacaktır. Alanın azalması da tencerenin direncinin artışına neden olarak girdap akımlarının oluşturacağı kayıpları çoğaltacak, böylelikle tencere daha çok ve çabuk ısınacaktır [2].

Bobin endüktans demektir ve endüktans üzerinden yüksek frekansta sinüsoidal akım akıtılmak istendiğinde rezonans olayından faydalanmak oldukça mantıklıdır. Bu

durum, rezonans çeviricileri endüksiyon ocakta kullanılacak topolojiler içerisinde öne çıkartmaktadır.

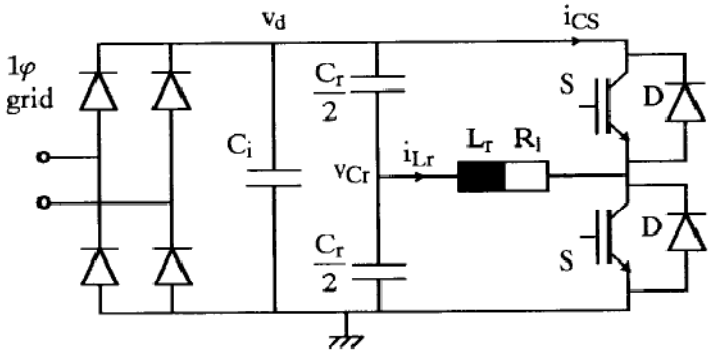
4.1 Endüksiyon Ocağın Güç Elektroniği Devresi

Rezonans devrelerinin temel elemanları birbirine seri veya paralel bağlı endüktans ve kapasitelerdir. Endüksiyon ocaklarında bobin ve tencereden oluşan sistem seri bağlı direnç ve endüktans şeklinde modellenmektedir [7,8] ve bu endüktans bir kapasite ile rezonansa sokulmaktadır. Rezonans frekansı endüktans ve kapasite değerleri ile belirlenir. Rezonans çeviricilerin çalışma prensibi gereği en fazla güç rezonans frekansında anahtarlama yapıldığında (akım akıtıldığında) elde edilir. Endüksiyon ocaklarında genelde rezonans frekansı 20kHz'de veya biraz daha yukarıda belirlenir çünkü insan kulağının duyma sınırı 20kHz'dir. Daha düşük frekanslarda anahtarlama sesi duyulmaya başlanır [2]. 20kHz üzerine çıkıldıkça güç azalmakta bu frekansa yaklaştıkça güç artmaktadır, böylece tencereye istenilen miktarda güç frekans ayarlanarak aktarılabilmektedir. Değişik tencere malzemelerinde rezonans eğrileri Şekil 4.3'de verilmiştir.



Şekil 4.3 : Rezonans eğrisi [8]

Endüksiyon ocaklarında kullanılan rezonans çeviricilerde genellikle yarım köprü, tam köprü ve tek anahtarlı yapılar kullanılır. Bunlar da kendi içlerinde paralel ve seri rezonans, hatta kapasite bobin yerleşimlerine göre de gruplara ayrılmaktadır. Burada en çok kullanılan yapı olan yarım köprü rezonans yapısı çalışma evreleri ile açıklanacaktır [9].



Şekil 4.4 : Yarım köprü rezonans çevirici [10]

Bu topolojide şebeke girişi tam dalga doğrultularak C_i bara kapasitesi doğrultulur, böylelikle v_d bara gerilimi oluşturulur. İki adet $C_r/2$ rezonans kapasitesi ile L_r-R bobin-tencere ana rezonans elemanlarıdır. Anahtarlama için IGBT kullanılır ve bu IGBT'lere paralel ters diyotlar bulunmak zorundadır.

Şekil 4.3'de verilen rezonans eğrilerinde akımın en fazla olduğu frekans rezonans frekansıdır. Bu frekansın üzerinde çalışma anahtarlama durumuna endüktif, altında çalışma durumuna kapasitif çalışma denir [2]. Rezonans frekansında çalışma durumunda endüktans ve kapasitenin empedansları birbirini götürür ve akımı sadece direnç değeri sınırlar. Rezonans frekansının üstündeki frekanslarda endüktansın empedansı daha baskın olurken, düşük frekanslarda kapasitenin empedansı baskın olmaktadır. Çalışma evrelerine verilen isimler de buradan gelmektedir. Rezonans frekansının 20kHz civarında ayarlandığı daha önce söylenmişti. Duyma sınırının üzerinde yer almak için frekans artırılarak güç azaltılır, yan endüksiyon ocakları genelde endüktif bölgede çalışmaktadırlar. Bu durum da endüktans üzerindeki kayıpların önemini göstermektedir. Empedans formülleri ve rezonans frekansı hesabı aşağıda verilmiştir [2].

$$\underline{X_L} = j.\omega.L = j.2.\pi.f.L \quad \textbf{(4.1)}$$

$$\underline{X_C} = \frac{1}{j.\omega.C} = \frac{1}{j.2.\pi.f.C} \quad \textbf{(4.2)}$$

$$|Z| = \sqrt{R^2 + \left(\omega.L - \frac{1}{\omega.C}\right)^2} \quad \textbf{(4.3)}$$

$$2.\pi.f.L = \frac{1}{2.\pi.f.C} \Rightarrow f_0 = \frac{1}{2.\pi.\sqrt{L.C}} \quad \textbf{(4.4)}$$

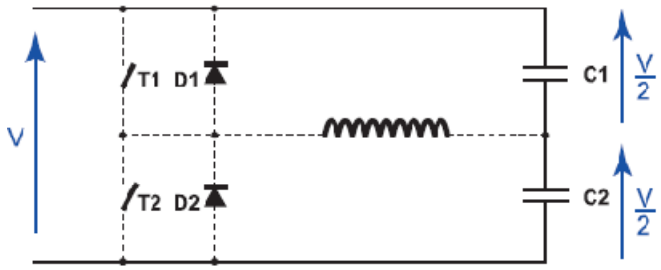
Rezonans çeviricinin seçiciliğini belirleyen bir Q faktörü vardır. Aşağıda formülü verilen bu faktör ne kadar büyük olursa rezonans eğrisi o kadar dik ve maksimum akım o kadar fazla olmaktadır [2,11]. Başka bir deyişle Q'nun büyük değerlerinde empedans karakteristiğinin frekans değişimine olan duyarlılığının arttığı görülür [11,12]. Bu durum az frekans değişimi ile daha fazla güç değişimi sağlamaktadır ve ilk bakışta istenen bir durum olarak görünebilir. Ancak asıl amacın R direncinde güç harcamak olduğu endüksiyon ocağı uygulamalarında bu durum pek de istenen bir durum değildir. Örneğin ferromanyetik olmayan tencerelerin ısıtıldığı sistemlerde düşük direnç ve küçük kapasite değerlerinin kullanılması nedeniyle Q faktörü değeri daha büyüktür (Bkz. Denklem (4.5)). Ferromanyetik malzemelerin ısıtıldığı bir endüksiyon ocağında 30kHz aralıkta 3000W güç kontrol edilebilirken, düşük dirençli ve ferromanyetik olmayan tencerelerin ısıtıldığı uygulamalarda 1kHz aralıkta 1500W değişim görülmektedir. Aynı şekilde rezonans frekansındaki en yüksek güç de 3500W'a 36kW'tır [13]. Frekansa karşı çok hassas olunması endüksiyon ocaklarında güvenlik sorununa da yol açabilmekte ya da seri üretim ürünlerinde istenmeyecek hassasiyette kontrol algoritmalarının kullanılmasını gerektirmektedir.

$$Q = \frac{\omega_0.L}{R} = \frac{1}{\omega_0.C.R} = \frac{1}{2.\pi.f_0.C.R} = \frac{1}{R}.\sqrt{\frac{L}{C}} \qquad \textbf{(4.5)}$$

Endüksiyon ocaklarında kullanılan yarım köprü evirici yapısı Şekil 4.4'te verilmişti. Endüksiyon ocaklarında tencereyi ısıtan unsur bobinle oluşturulan manyetik alandır ve bu alan da bobinden (L_r) akan akımla mümkün olmaktadır. Yani tenceredeki kayıpları belirleyen ana etken bobin akımıdır. Şimdi bu yapının çalışma prensibi bobin akımı ve anahtarların iletim ve kesim durumlarıyla 4 bölüme ayrılarak incelenecektir [6].

Adım 0:

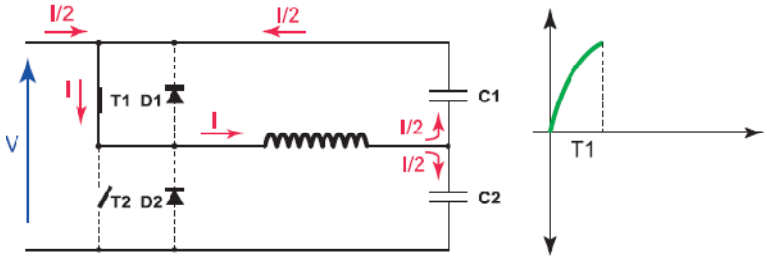
Adım 0 bekleme durumu yani rezonans çeviricinin çalışmaya başlamadığı durumu ifade etmektedir. Bu adımda tüm anahtarlar kesimdedir ve doğru gerilimle beslenen evirici sayesinde rezonans kapasiteleri olan C1 ve C2, V/2 gerilime kadar dolmuştur.



Şekil 4.5 : Rezonans çevirici adım 0 [6]

Adım 1:

İlk olarak T1 ismi verilen IGBT iletime sokulmuştur (bkz. Şekil 4.6). T1 iletime sokulduktan sonra kendi üzerinden ve bobin üzerinden I akımı akar. Bu I akımı ile C2 kapasitesi +V gerilimine kadar şarj olurken C1 kapasitesi deşarj olur, toplam akımı iki kapasite paylaşır.



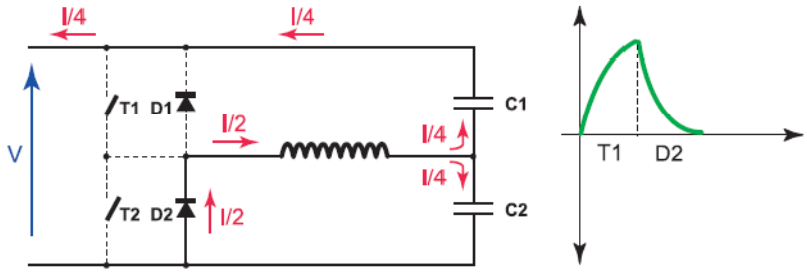
Şekil 4.6 : Rezonans çevirici adım 1 [6]

Adım 2:

İkinci adımda T1 tekrar kesime sokulur ve T2 zaten kesimdedir. T1'in kesime sokulması ile endüktans akımı kesilmez çünkü ani akım değişimlerine endüktans ters gerilim oluşturarak engel olacaktır (bkz. Denklem (4.6)). Endüktansın ters gerilimi nedeniyle D2 diyotu iletime girer ve endüktans akımı aynı yönde fakat azalarak devam eder. Çünkü daha önce depoladığı enerjiyi harcamaktadır.

$$V_L = L.\frac{dI_L}{dt} \qquad \textbf{(4.6)}$$

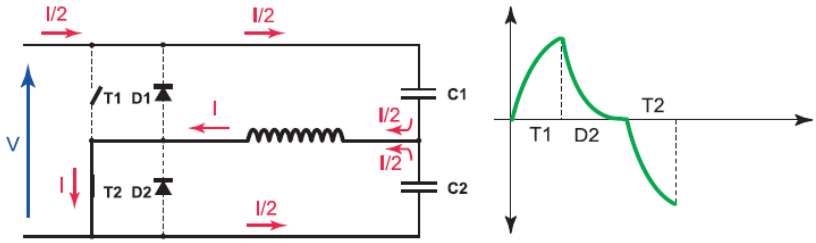
C_1 kapasitesi bu adımda tekrar +V/2 potansiyeline kadar şarj olur ve C2 potansiyeli ise +V'den +V/2'ye geriler. Tüm bu işlemler sonunda bobin akımı 0 olur.



Şekil 4.7 : Rezonans çevirici adım 2 [6]

Adım 3:

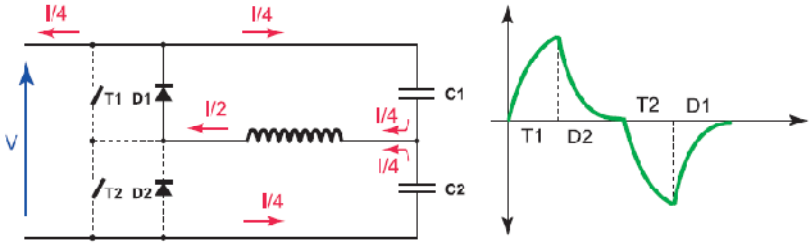
Adım 3'te T2 iletime sokulur. T2'nin iletime sokulmasıyla 0'a düşen akım negatif alternansa geçer. Akım negatif yönde artış eğilimindedir, C1 kapasitesi +V potansiyeline kadar şarj olur, C2 ise deşarj olmaktadır ve bobini besler.



Şekil 4.8 : Rezonans çevirici adım 3 [6]

Adım 4:

Adım 4'te T2 tekrar kesime sokulur ve iki anahtarın kapalı olduğu bu durumda yine endüktans akım değişikliğine karşı koyarak ters gerilim oluşturur ve D1 diyotu iletime geçer. Akım yine sıfıra düşer ve C1 ile C2 potansiyelleri V/2 olur. Bu adım bittiğinde tekrar adım 1'e dönülür ve bu işlem döngü halinde tekrar edilir.



Şekil 4.9 : Rezonans çevirici adım 4 [6]

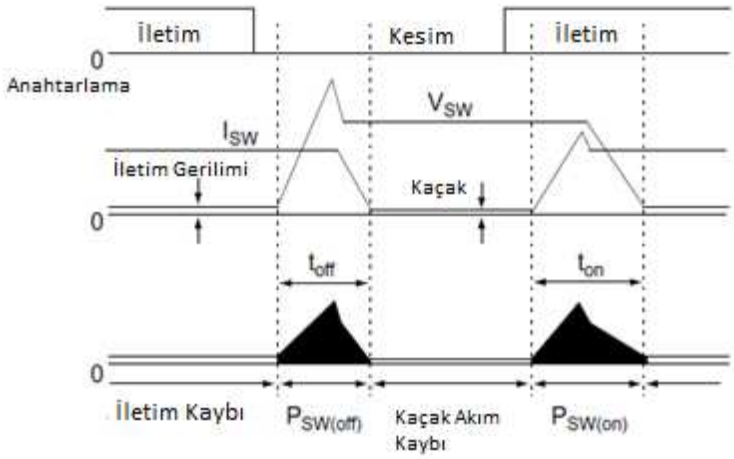
Anahtarlama sırasında dikkat edilen ve sistemin çalışmasına etkide bulunacak bazı bilgiler aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

IGBT anahtarlama işaretleri bir mikroişlemci vasıtasıyla üretilir ve bu işaretler kullanılarak IGBT'ler sürülür. Anahtarlama frekansları akım frekansı ile aynıdır ve bu frekans rezonans frekansına eşit olduğunda en yüksek akım değerine dolayısıyla en yüksek güce ulaşılır. Başka bir deyişle endüktans ve kapasite empedansları birbirini sönümleyerek en küçük empedans değerine rezonans frekansında ulaşılır [2].

Bir IGBT kesime geçtikten sonra diğer IGBT'ye paralel diyot hemen iletime girmektedir. Bu durumda ters diyotu iletime geçen IGBT'nin kolektör – emiter gerilimi sadece diyot iletim gerilimi kadar olur. Bu da 0V'a çok yakın bir değerdir. Tam bu anda, yani anahtar uçlarında gerilim sıfırken anahtara gate işareti uygulanırsa iletime geçme anında anahtarlama kaybı sıfır olur. Bilindiği gibi yarıiletkenlerde iletime ve kesime geçme kayıpları iletim kayıplarına nazaran daha büyüktür ve bu işlemle anahtarlama kayıpları bir miktar azaltılmış olur.

Yukarıda anlatılan işlemin adı sıfır gerilim anahtarlamadır ve iletime geçiş anında gerilimi sıfıra indirir. Benzer şekilde kesime geçme anındaki anahtarlama kaybını yok etmek için sıfır akım anahtarlama tekniği de bazı uygulamalarda kullanılmaktadır. Genel olarak bu işlemlerin tümüne yumuşak anahtarlama da denmektedir.

İletime geçme kayıpları genelde daha fazladır ve EMI olarak da sıfır gerilim anahtarlama daha avantajlıdır [2].



Şekil 4.10 : Anahtarlama anı ve kayıplar [2]

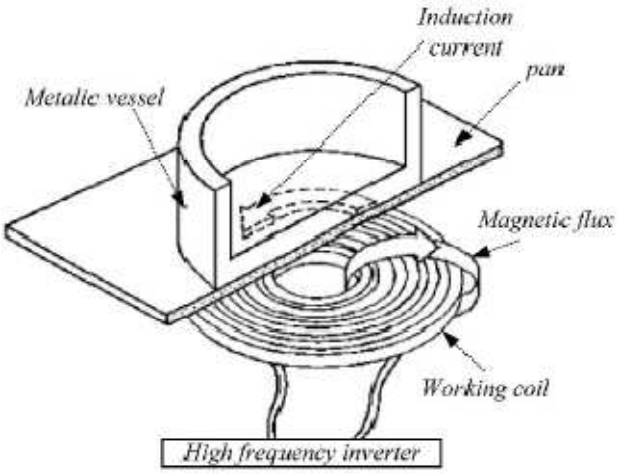
Şekil 4.10'te de görülebileceği gibi anahtarlama anlarında akım ya da gerilim aniden 0'a düşmez ya da istenen değere çıkmaz. Bu durum yarım köprü yapısında sırayla

açılan anahtarlarda bara kısa devresine neden olmamak için dikkat edilmesi gereken bir husustur. Yani, örnek olarak T1 kesime sokulduktan sonra T2'nin iletime sokulması için bir süre beklenmesi gerekmektedir. T1 kesime geçirildiği anda T2 iletime geçirilirse, iki IGBT'nin iletimde olduğu bir an yakalanır ve +V potansiyelindeki bara gerilimi yaklaşık 0Ω (IGBT iletim direnci) dirençle karşılaşır ve yüksek bir akım akar. Bu durum IGBT'ler başta olmak üzere köprü diyotlar ve birçok devre elamanının arızalanmasına neden olur. Bahsedilen bekleme süresine ölü zaman denir. Ölü zamanın ne kadar olacağı IGBT karakteristikleri, sürme devresi ve direnci ile belirlenebilir.

4.2 Bobin ve Tencere Üzerinde Oluşan Kayıplar

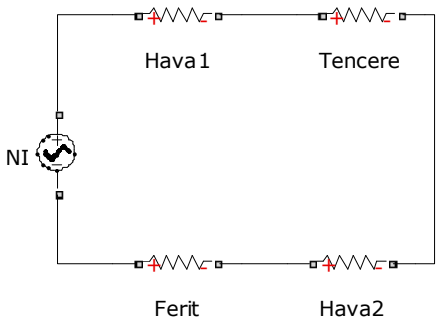
Endüksiyon ocaklarında asıl istenen olayın tencere üzerindeki kayıpları artırmak olduğu daha önce de söylenmişti. Bu durumu daha iyi anlatmak amacıyla ilk olarak bobin tencere sisteminin elektromanyetik devresi verilecek daha sonra tencere üzerinde oluşturulacak başlıca kayıplar, demir kayıpları histerezis ve girdap akımı kayıpları olarak incelenecektir.

4.2.1 Bobin – tencere sisteminin elektromanyetik devresi



Şekil 4.11 : Bobin-tencere sistemi [14]

Şekil 4.11'da verilen tencere sisteminde görüldüğü gibi bir bobinle manyetik akı oluşturulur. Bu akı hava aralığını geçerek tencereye yönelir. Tencere içinden geçen akı daha sonra yine bir hava aralığı mesafe kat eder ve bobin altında resimde görünmeyen feritlerle yolunu tamamlayarak her akı gibi bir halka oluşturur. Bu durumda sistemin manyetik devresi Şekil 4.12'deki gibidir.



Şekil 4.12 : Bobin-tencere sistemi manyetik eşdeğer devresi

Şekil 4.12'de görülen eşdeğer devrede akan akı (ϕ) relüktans değerleri olan iki hava aralığı, ferit ve tencere üzerinden geçmektedir. Ampere yasası gereği aşağıdaki denklem yazılabilmektedir.

$$N.I = \emptyset.\Re \quad \textbf{(4.7)}$$

Bu durumda sabit akım değeri fazla sarım sayılı bobinden akıtılırsa daha fazla akı oluşturulacaktır. Bu da halkalanan akıyı artıracak ve aşağıda verilen eşitlikler gereği endüktans değerini artıracaktır. Ayrıca akı artışı akı yoğunluğunu da artıracağından oluşacak kayıp değerleri de artacaktır. Bununla ilgili ayrıntılı bilgi ilerleyen bölümlerde verilecektir.

$$N.\emptyset = \Psi \quad \textbf{(4.8)}$$

$$L = \frac{N^2}{\Re} \quad \textbf{(4.9)}$$

(4.8) ve (4.9) denklemleri (4.7)'de yerine yazılırsa (4.10) denklemi bulunur.

$$\Psi = L.I \quad \textbf{(4.10)}$$

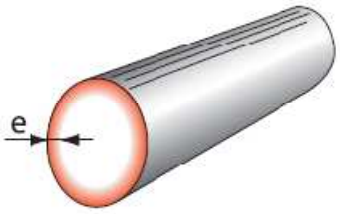
4.2.2 Bakır kayıpları

Bakır kayıpları, endüksiyon ocağında bobini meydana getiren iletkenlerin ve tencerenin dirençleri dolayısıyla meydana gelen iletim kayıplarıdır. Transformatördeki bakır kaybı ile benzerdir. Bilindiği gibi bir transformatörün bakır kaybının bulunması için ikincil sargı kısa devre edilir ve girişten çekilen güç ölçülür. Endüksiyon ocaktaki bobin – tencere sisteminde daha önce de söylendiği gibi ikincil sargı tek sarım ya da kısa devredir. Tencere direnci de transformatör

benzetmesindeki yüktür. Bu nedenle tenceredeki kayıplar bakır kaybı olarak sayılmazlar.

Bobinde iletkenlerinde oluşan kayıplarda etkin rol oynayan üç unsur vardır. Bunlar; deri etkisi, yakınlık etkisi ve bobin yerleşimi (geometri) nedeniyle sargıların birbiri üzerindeki etkileridir [15, 16]. Bunlardan deri ve yakınlık etkileri sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak bobinin analiz edildiği bölümde ayrıntılı olarak incelenecek ve gözlenecektir. Bu bölümlerde tel veya iletken üzerinde durulacaktır ancak tencere üzerinde de tüm tencere yüzeyinin kullanılamamasını bu etkiler açıklamaktadır. Geometrik etki ise diğer iki etkinin teller arasında değil sarımlar arasında oluşan halidir. Bu yüzden deri ve yakınlık etkileri doğru bir şekilde analiz edilebiliyorsa geometrik etki de görülebiliyor demektir. İki etki hakkında kabaca verilebilecek bilgiler şöyledir; deri etkisi bir iletkenden geçen zamanla değişen akım nedeniyle görünür. Bu etkiyle akım iletkenin tüm yüzeyini kullanamaz ve dış yüzeyini kullanarak akar [17]. Frekans değerine göre iletkenin ne kadar yüzeyini kullanacağı aşağıdaki formülle hesaplanabilir ve bu değere girme derinliği denir. Bilindiği gibi akımın aktığı alan azaldıkça direnç değeri artacaktır, bu da kayıpları artırır.

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{4.\pi^2.10^{-7}}} . \sqrt{\frac{\rho}{f.\mu_r}} \qquad \textbf{(4.11)}$$



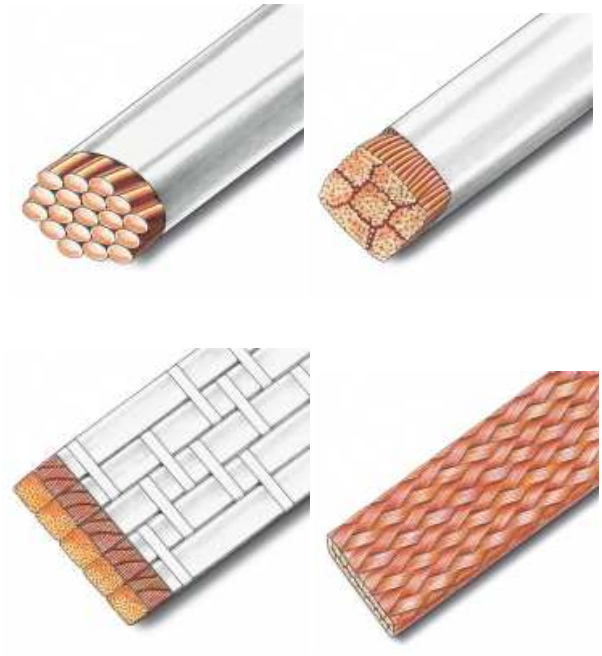
Şekil 4.13 : Girme derinliği

Denklem (4.11)'de girme derinliği bulunur ve birimi m'dir. Genelde *f* frekansında bir akım taşıyacak olan iletken veya iletkenlerin çapları en fazla girme derinliği yarıçapında olmalıdır ki iletkenin tüm yüzeyi kullanılabilsin. Akım tek iletkenle taşınmak istendiğinde akım yoğunluğu fazla çıkabilir. Bu durumdan kaçınmak için en fazla girme derinliği yarıçapında iletkenlerden oluşan birçok iletken paralel kullanılmaktadır (örneğin Litz teli). Ancak paralel iletken kullanımı ile bir başka etken olan yakınlık etkisi görülmeye başlanır. Yakınlık etkisi akım taşıyan birden fazla iletkenin birbirine yakın geçmesi durumunda, yarattıkları manyetik etki

dolayısıyla iletkenlerin tüm yüzeyinden akım akamaması olayıdır [15]. Bu etkiyle de kesit alan azaldığı için direnç artmaktadır.

Endüksiyon bobininde her sarım yan yana olacağı için geometrik etki de görülecektir. Bu bir anlamda her sarımın diğerinde oluşturduğu yakınlık etkisi olarak da düşünülebilir. Bazı araştırmalarda dış etkilerden ve iç etkilerde oluşan yakınlık etkisi olarak da sınıflandırılmışlardır [18,19] Sarımların birbirine etkisini azaltmak için bazı endüksiyon bobinlerinde sargılar arasında boşluk bırakılır ve böylelikle mesafe artırılarak yakınlık etkisi küçültülür. Bu sarım şekline bazı örnekler gösterilerek analizleri daha sonra yapılacaktır.

Yakınlık etkisini yok etmek için de bazı yöntemler mevcuttur. Litz teli adı verilen çok iletkenden oluşan yapılar burularak yakınlık etkisi azaltılmaya çalışılır. Burma işlemi, iletkenin kat ettiği yolun düz olmamasını sağladığı için etkili olmaktadır. Yani bir iletken teli ele alırsak, bu iletken sürekli aynı iletkenler ile yan yana gittiğinde kesit alanının belirli bir kısmını hiç kullanamaz. Fakat burulduğunda iletkenin yeri ve komşu olduğu iletkenler sürekli değişeceği için iletkenin daha fazla alanının eşit şekilde kullanılması sağlanabilir ve böylelikle direnç azalarak kayıplar da azaltılır [19, 20]. Hatta Litz telini oluşturan iletkenler alt gruplara ayrılarak başka yönlere burulduğunda yakınlık etkisi daha da azalır [20]. Bunun nedeni de iletkenlerin Litz teli kesit alanında düz (üniform) bir yol kat etmemesidir.



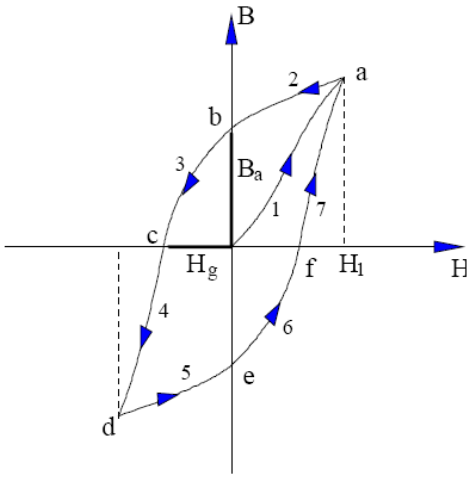
Şekil 4.14 : Farklı Litz teli yapıları

4.2.3 Demir kayıpları

Endüksiyon ocaklarında tencerenin ısıtılabilmesi için çok özel uygulamalar hariç tencere malzemesinin ferromanyetik olması gerekir. Alternatif akım ile beslenen bir bobinin, ferromanyetik malzemeden yapılan akı yolunda (endüksiyon ocağında tencere, transformatörde nüve) demir kayıpları oluşur. Alternatif akımın bir periyot içerisinde iki defa yön değiştirmesi, aslında iletken bir malzeme olan tencere üzerinde manyetik ve elektrik olarak iki türlü etki meydana getirir. Manyetik etki ya da kayıp histerezis kaybı olarak, elektriksel kayıp da girdap akımı kaybı olarak bilinir [1].

4.2.3.1 Histerezis kayıpları

Yukarıda manyetik etki olarak da geçen histerezis kayıpları, akımın ani değerinin değişmesine bağlı olarak, amper-sarımın ani değerinin ve dolayısıyla B manyetik alan yoğunluğunun değişmesiyle kendisini gösterir.



Şekil 4.15 : Histerezis eğrisi

Şekil 4.15'de bir histerezis döngüsü görülmektedir. Manyetik akı şiddeti aynı zamanda akım ile orantılı olduğu için akım olarak düşünülebilir, aynı şekilde manyetik akı yoğunluğu ekseni olan y ekseni de akı olarak düşünülebilir. Bu durumda bu eğri aynı zamanda bir akım-akı grafiğidir.

Henüz üzerinden hiç akı geçmemiş bir ferromanyetik malzeme üzerinden (artık mıknatıslanma yok) bir akım ile oluşturulan akı geçirilirse ilk olarak 1 yolunu izler. Bu akım sinüsoidal ise ki endüksiyon ocağında öyledir, akım tekrar azalmaya başlar ancak akı aynı şekilde azalmaz (2). Akının başlangıç noktasına geri dönmesi için

akımın belirli bir miktarda negatife düşmesi, ya da negatif alternansta bir sürenin geçmesi gerekir (3). Daha sonra akım negatif tepe noktasına ulaşıp (4) tekrar sıfıra düşürüldüğünde ise yine başlangıç noktasına dönülmez (5), akının ya da akı yoğunluğunun başlangıç anına dönmesi için pozitif yönde bir miktar akım akıtılması gerekir (6). Bu durum bir periyot boyunca histerezis eğrisi içindeki alan kadar enerjinin kayıp olmasına neden olmaktadır. Bu kayıplara ise histerezis kayıpları denir [1]. Histerezis kayıplarının parametrelerinden olan Şekil 4.15'teki H_g "koersif etki", B_a ise 'kalıcı akı yoğunluğu' olarak bilinir. Ayrıca akımın frekansı ne kadar yüksek ise aynı süre içerisinde bu döngü o kadar fazla tekrarlanır, dolayısıyla histerezis kayıpları frekansla doğru orantılıdır. Histerezis kayıpları denklem (4.12) ile ifade edilebilir.

$$P_h = \sigma_h.G.B^x.f \qquad \textbf{(4.12)}$$

σ_h malzeme histerezis kayıp katsayısı (W/kg), G malzeme ağırlığı, ks ise malzeme özelliklerine göre değişen ve 0.5 ile 2.3 arası değişen bir katsayıdır [1]. Histerezis kayıplarının artırılması için akının artırılması ve frekansın artırılması ocağın kontrolüyle ilgili olduğu için en pratik çözümlerdir. Akı yoğunluğu denklem (4.12) gereğince sarım sayısı artırılarak artırılabilir. Frekans ise rezonans çevirici ile değiştirilebilmektedir.

Histerezis kayıpları, endüksiyon ocaklarında girdap akımlarından daha küçüktür ancak yine de tencereyi ısıtan bir etkidir [19, 21]. Ayrıca ferromanyetik olmayan ve iyi bir iletken olan malzemelerde (bu iki özellik de endüksiyon ocak için dezavantajdır) histerezis kayıp katsayısı 0'dır. Ferromanyetik olmayan tencerelerin ısıtılamaması ya da ısıtılması için özel uygulamalar gerekmesini bu durumda bir miktar açıklamaktadır ancak söylendiği gibi tencere üzerinde oluşan ana kayıplar histerezis kayıpları değildir.

4.2.3.2 Girdap akımı kayıpları

Demir kayıplarından ikincisi, tencerenin elektrik akımına gösterdiği elektriksel dirençten kaynaklanan girdap akımı kayıplarıdır.

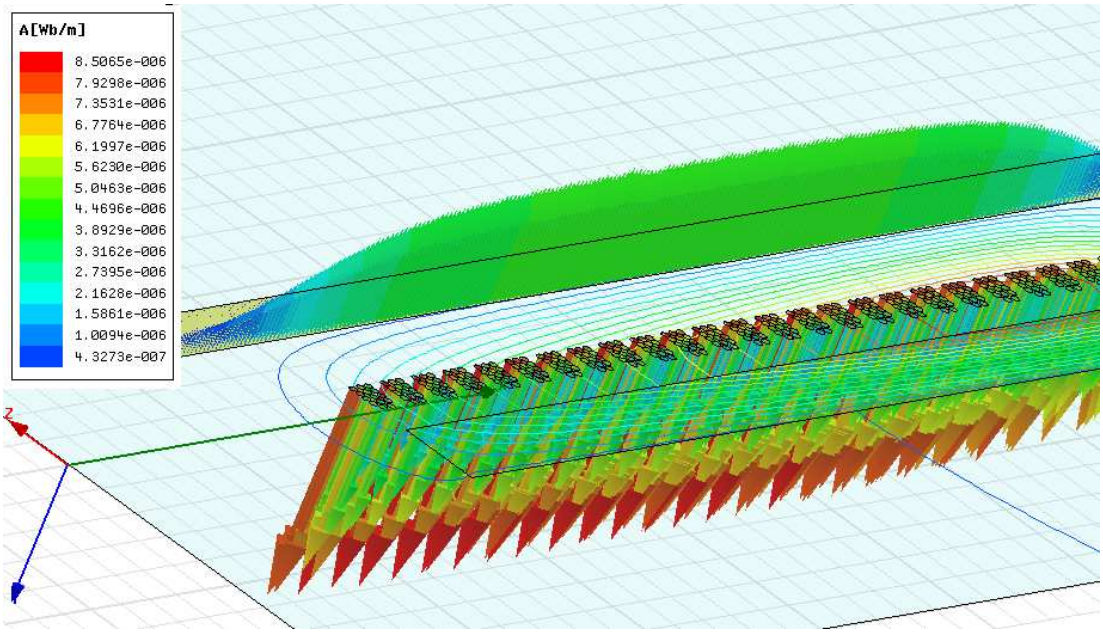
Tencere iletken bir malzemeden yapıldığı için değişen akının etkisi ile üzerinde gerilim endüklenir. Bu gerilim de tencere üzerinde akımın akmasına neden olur. Bu

akımlara girdap akımları, bu akımın oluşturduğu kayıplara da girdap akımı kayıpları denir [1]. Matematiksel ifadesi aşağıda verilmiştir.

$$P_f = \sigma_f.G.B^2.f^2 \qquad \textbf{(4.13)}$$

(4.13)'ten de anlaşılacağı gibi en etkili faktörler akı yoğunluğu ve frekanstır. Bu parametrelerin değişimi ile girdap kayıpları etkili bir şekilde çoğaltılabilir. Ayrıca deri etkisi burada da etkin bir şekilde görülebilir. Aynı girdap akımı ne kadar yüksek dirençli iletkenden akarsa girdap akımı kayıpları o kadar artar. Bu nedenle frekansın artışı ile tencere üzerinde görülecek olan deri etkisi direnci artırır ve dolayısıyla tencere üzerindeki istenen kayıplar da artmış olur.

Girdap akımlarının değişken akı nedeniyle oluştuğundan bahsedilmişti. Bu durum Faraday ve Lenz yasalarıyla açıklanabilmektedir. Bir bobinde ya da mıknatısta oluşturulan akının genliği ya da akı yolundaki iletkeni dik kesen akı miktarı sürekli değişirse, akı yolundaki iletkende oluşacak girdap akımları daima kendine sebep olan akıyı bastıracak yönde olurlar. Bu durum bobin akımı ve tencerede endüklenen girdap akımı yönlerinin de gösterildiği Şekil 4.11'den anlaşılmaktadır. Girdap akımının yönü daima bobindeki akımın oluşturduğu akıya ters yönde akı oluşturacak şekilde akar (Bkz. Şekil 4.16).



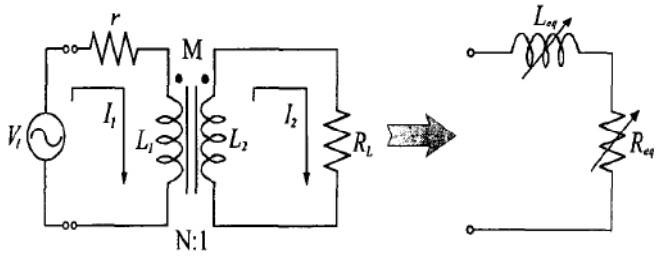
Şekil 4.16 : 3 boyutlu bobin akımı ve girdap akımı yönleri

Tencere malzemesinin iletkenliği ne kadar kötü ise -aynı akı için- girdap akımlarının şiddeti o kadar küçük olur, bu da bobinin oluşturduğu akıyı bastırmasını bir miktar engeller, tencere üzerinde enerji kaybolur. Tencere ya da bobin üzerindeki malzeme ne kadar iyi iletken olursa, tencere ve bobin arasında oluşturulan ters akıların şiddeti o kadar büyür ve birbirlerini itmeye başlarlar. Bu durumun bazı uygulamalarda tencerelerin endüksiyon bobini üzerinde havalanmasına ya da kaymasına neden olduğu görülmüştür [22]. Örneğin direnci 2.8×10^{-8} Ω.m olan alüminyum bir tencerede yapılan ölçümlerde 1200W giriş gücünde, kütlesi 530 g olan bir tencereyi kaldırabilecek itme kuvveti oluşmaktadır [22].

Bu durum manyetik levitasyonun kullanıldığı yerlerde oldukça sık bir şekilde kullanılır. Akı genelde mıknatıslar ile üretilir, akı değişimi ise maglev trenlerinde hareket ile sağlanır. Kullanılan iletken yüzeyler ise mutlak sıfır sıcaklığında (0 K) tutularak süper iletkenlikten faydalanılır, böylelikle hem girdap akımlarının genliği artırılır, hem de kayıplar azaltılır. Endüksiyon ocağı sistemlerinde ise tencere üzerindeki kayıpların tam tersine artırılması istenir. İyi iletken olan tencereleri de ısıtabilmek ve hatta kötü iletkenliği olan tencereleri daha hızlı bir şekilde ısıtabilmek için deri etkisinden faydalanılır veya sarım sayısı artırılır [13, 22, 23]. Bu etkilerden önce endüksiyon ocağının transformatör benzerliği kullanılarak elektriksel eşdeğer devresi çıkartılmıştır. Bu şekilde deri etkisi ve sarım sayısının etkisi matematiksel eşitliklerle anlatılmaya çalışılmıştır.

4.2.4 Bobin - Tencere sisteminin elektriksel eşdeğer devresi

Endüksiyon bobini, birincil tarafı N sarımlı bir bobinden, ikincil sargısı ise tek sarımdan oluşan bir transformatöre benzerdir. Bu durum, tencere üzerinden akan girdap akımlarının karşılaştığı direncin çevirme oranının karesiyle giriş direnci olarak görünmesine neden olur.



Şekil 4.17 : Endüksiyon bobini ile tencere direncinin oluşturduğu yapının eşdeğer devresi [8]

Tencere üzerinden alternatif bir akı geçtiği için girdap akımları da alternatiftir ve frekansı akım frekansı ile aynıdır. Akan akımın alternatif olması dolayısıyla tencere üzerinde deri etkisi görülür. Deri etkisi zamanla değişen akımın bu değişim yüzünden iletken kesitinin tamamı yerine sadece dış yüzeyini kullanabilmesi olayıdır. Kullanılan iletken alanı azaldığı için direnç ve kayıp artmaktadır. Bu durum bakır kayıplarının anlatıldığı bölümdekine çok benzerdir ancak daha önce bobin üzerindeki etki incelenmişti. Burada girdap akımlarının karşılaştığı deri etkisi ve tencere üzerindeki deri etkisi incelenmiştir. Akımın f frekansında akabileceği en büyük derinlik ya da kullanabileceği maksimum kesit derinliği girme derinliği olarak bilinir ve daha önce de verilen denklem (4.11) ile girme derinliği hesaplanabilir [17].

Normalde yuvarlak kesitli bir iletkende akım iletkenin dış yüzeyinden akar ancak girdap akımları tencereden akmaktadır ve deri etkisi burada biraz daha farklı olur. Şekil 4.16'te görüldüğü gibi deri etkisi nedeniyle girdap akımları sadece tencerenin alt yüzeyinden akabilmektedir. Bu durum yeni bir terim olan yüzey direncini doğurur. Yüzey direnci, tencere üzerinde girdap akımlarının akarak kayıpları oluşturduğu kısmın elektriksel direncidir [22]. R_s ile gösterilen yüzey direncinin formülü (4.14) ile verilmiştir.

$$R_s = \frac{\rho}{\delta} = \sqrt{4.\pi^2.10^{-7}}.\sqrt{f.\mu_r.\rho} \qquad \textbf{(4.14)}$$

Şekil 4.17'da gösterilen yük direnci R_L yüzey direnci olmaktadır. Transformatör benzerliğinde sarım sayısı da N olarak alınırsa bobin uçlarından görünen direnç (4.15) ile hesaplanabilir [22].

$$R_{in} \approx N^2.R_s \approx N^2.\sqrt{4.\pi^2.10^{-7}}.\sqrt{f.\mu_r.\rho} \qquad \textbf{(4.15)}$$

Endüksiyon ocağında asıl amacın tencere üzerinde kayıplar oluşturmak olduğu daha önce de vurgulanmıştı. Denklem (4.15) ile bulunan R_{in} bobin uçlarından görünen ya da rezonans çeviricinin gördüğü tencere direncidir. Bu direnç değeri artırılırsa tencere üzerinde daha fazla kayıp oluşturulabilir ve böylelikle tencerede istenen ısı elde edilebilir. Ya da bu direncin oranı diğer kayıplara göre daha fazla artırılabilirse tencereye daha verimli bir şekilde enerji aktarılabilecektir. Bu tarz bilgiler daha verimli ısıtma yapmak veya küçük dirençli tencereleri ısıtabilmek açısından büyük öneme sahiptir. Böylelikle tencere kayıplarını artırmak için hangi parametrelerin değiştirilmesi gerektiği ve etkisinin ne kadar olacağı tahmin edilebilmektedir.

Tencere kayıplarını artırmanın ya da tencere eşdeğer direncinin artırılmasının sağlanması için yapılabilecekler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

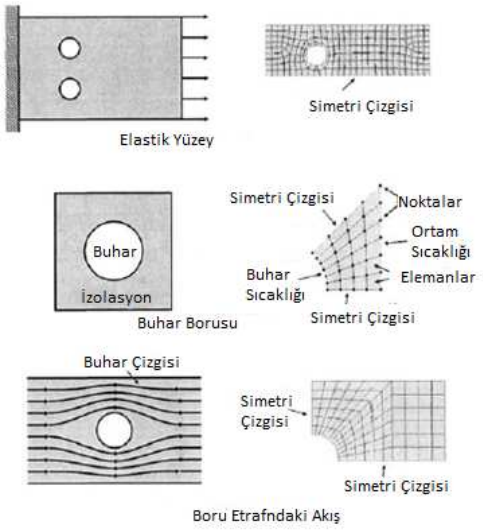
- Frekans artırılarak girme derinliği azaltılabilir. Az girme derinliği daha yüksek direnç demektir ve bu da tencere kayıplarını artıracaktır [13, 23]. Görünen tencere direnci frekansın karekökü ile artmaktadır. Dezavantajı ise frekans artırıldığında güç elektroniği devresinde kayıplar artacak ve daha karmaşıklaşacaktır. Ayrıca deri etkisi yüzünden bobinde kullanılan Litz teli daha ince ve çok sayıda iletkenden oluşmak zorunda kalacaktır.
- Bobin akımı artırılarak oluşturulan akı artırılabilir. Böylelikle histerezis ve girdap akımları artacaktır ancak kontrolü daha zor ve güvenilirlik açısından daha kötü bir durum elde edilebilir. Ek olarak yüksek frekansta anahtarlama yapılmaktadır ve çıkılabilecek akım seviyesi sınırlıdır. Ayrıca bobin üzerindeki ve güç elektroniği devresi üzerindeki kayıplar da artacaktır. Toplam iletken yüzeyi daha kalın tel kullanılarak artırılma çalışılabilir.
- Sarım sayısı artırılarak oluşturulan akı artırılabilir. Böylelikle histerezis kayıpları ve girdap akımı genliği büyütülebilir.
- Sarım sayısı artırılarak girişten görülen tencere direnci artırılabilir. Girişten görülen direnç sarım sayısının karesi ile orantılıdır ve oldukça etkili bir yöntemdir. Bu durumdaki dezavantajlardan birisi yakınlık kayıplarının artmasıdır fakat bunun önüne daha özel Litz telleri kullanılarak geçilebilir. Diğer bir dezavantaj ise sarım sayısının artışı ile endüktansın artması ve bu nedenle de Q faktörünün büyüyerek rezonans çeviricinin frekans duyarlılığının artmasıdır [11]. Ayrıca fazla sarım sayısı daha fazla yer kaplayacaktır.

5 ENDÜKSİYON OCAĞI BOBİNİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZİ VE İNCELENMESİ

Sonlu elemanlar analizi (SEA) yöntemi ilk olarak 1956 yılında Turner tarafından gerçek dünyadaki karmaşık mühendislik sorunlarını sınır koşullarından faydalanarak çözmede kullanılmıştır. SEA kullanımına başlanması fiziksel yapıların modellenmesi ve tasarlanması için hayati öneme sahip bir adımdır. Bu fiziksel yapıların süreklilik arz eden ve değişken bazı bölümleri mevcuttur. Değişkenlik arz eden alanların tam çözümü için sosuz çözüm gerekmektedir [24].

SEA'nin temeli, süreklilik arz eden bölümlerin çözümüne ulaşmak için, bu bölümleri sonlu sayıda parçalara ayırmaya dayanır. Bu parçalara eleman denir ve değişimleri belirlidir. Yani sonlu elemanlar yöntemi ile bilinmeyen bir sistem bilinen sonlu sayıda parçaya bölünerek matematiksel denklemlerle (interpolasyon denklemleri) ifade edilir, daha sonra çözülmüş olur. Sonlu eleman içerisindeki değişim o elemanın matematiksel ifadesi ile ifade edilerek başka bir değişiklik ihmal edilir yani bir varsayım ya da yakınsama yapılmış olur. Bu nedenle değişkenlerin ya da sistemin tamamının çözümü için sonsuz adet eleman ve çözüme ihtiyaç vardır ve sonlu elemanlar yöntemi bir miktar varsayım içermektedir. Ne kadar fazla sonlu eleman ile çözüm yapılırsa o kadar az hata yapılmış olur. Bir elemanı sonlu elemanlara ve matematiksel ifadeye bölmek için noktalara ihtiyaç duyulur. Noktalar genelde sınır noktalarda yoğunlaşır ve tüm sisteme yayılır. Daha sonra noktalar birleştirilerek sistem sonlu elemanlara bölünmüş olmaktadır [24].

Düzgün olmayan sistemlerin düzgünleştirilerek ve sınır koşullarını başlangıç noktası alarak çözüme ulaşan sonlu elemanlar yöntemi daha sonra birçok mühendislik uygulamasında kullanılmış buna ilave olarak birçok kitap da yazılmıştır. Sonlu elemanlara bölünmüş bazı pratik sistemler aşağıdaki resimde örnek olarak verilmiştir.



Şekil 5.1 : Pratik mühendislik problemlerinde SEA gösterimi [24]

Sonlu elemanlar analizi ana olarak aşağıdaki adımları gerektirmektedir [24] :

- Çözülecek alanın sonlu sayıda alt bölümlere (eleman) bölünmesi.
- İnterpolasyon denklemlerinin seçimi.
- Oluşturulan alt bölümler için eleman matrisinin oluşturulması.
- Her eleman için oluşturulan matrislerin birleştirilerek ana bir matris oluşturulması.
- Sınır koşullarının belirlenmesi.
- Denklemlerin çözülmesi.
- Eğer isteniyorsa ek hesaplamaların yapılması.

Yaklaşık bir çözüme ulaşmak için üç ana yaklaşım mevcuttur; direkt yaklaşım artımsal yaklaşım ve değişken yaklaşım. Bu çözüm metotları kolaydan zora doğru sıralanmıştır ve karmaşık sistemler için daha zor yöntemlerin kullanılması gerekmektedir [24].

Büyük sistemlerin ya da çok küçük ayrıntılar barındıran sistemlerin sonlu eleman analizlerinin yapılması daha zor olmasının ana nedenlerinden birisi sonlu eleman sayısının, bu sistemlerde oldukça artmasıdır. Daha fazla sonlu eleman demek daha fazla matematiksel işlem demektir. Örneğin düşük iletken sayılı Litzlerin kullanıldığı bir endüksiyon bobininin analizinde kurulan model için sonlu elemanlar oluşturulursa ortalama 20000 adet sonlu eleman oluşturulur. Daha karışık (100 telli Litzler) modeller için ise 80000 civarında sonlu eleman sayısına çıkılabilmektedir ve bunların el ile çözümünün imkânı bulunmamaktadır. Bu durumu açıklamak için şu

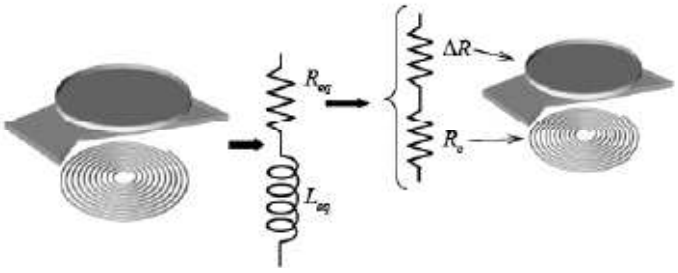
örnek verilebilir, 100 iletkenli 0.1~0.2mm çapında tellerden oluşan ve yaklaşık 20 sarım sayılı bir bobin Maxwell yazılımı ile analiz edilmeye başlandığında, en az 10 saatlik sonlu elemanlara ayırma işleminden sonra çözüme başlanır. Bazı durumlarda program çözüme ulaşamayarak hata vermektedir.

Bu tez içerisinde yapılan çalışmalarda Maxwell yazılımı kullanılmıştır. Sistemdeki kayıplar; tencere, bobin, ferit gibi bölümlere ayrılarak incelenmiş ve esas olan da sistemdeki enerji miktarı ve kayıp olmuştur. Bu nedenle yazılım içerisindeki çözüm türlerinden 'eddy current' çözüm yöntemi seçilerek analizler yapılmıştır. Ayrıca sistem bobinin tam orta noktasından simetrik olduğu için 2 boyutlu ve Z eksenine göre simetrik çözüm yapılmıştır. Litz telinin burgulu yapısı, iki boyutlu çözüm yapıldığı için yazılıma girilememiştir ve bu bir miktar ihmale neden olmuştur. Analiz sonuçlarından yapılan ihmalin neden olduğu hatanın kabul edilebilir aralıklarda olduğu görülmüştür.

Yapılan analizlerde ilk olarak bobin üzerindeki kayıpların daha iyi anlaşılabilmesi ve kullanılan yazılımda bu kayıpların görülebilirliğini anlamak amacıyla deri etkisi ve yakınlık etkisi çeşitli iletkenler kullanılarak anlaşılmaya çalışılmıştır. Daha sonra basit bir modelden yola çıkılarak endüksiyon ocaklarında kullanılan bobinlerden bazı örneklerin modelleri kurulmuş, bunların endüktans ve direnç değerleri yazılım yardımıyla hesaplanarak gerçek ölçümlerle karşılaştırılmıştır. Bu çalışmalara ilave olarak tencere üzerindeki ısı dağılımı incelenerek çeşitli sarım teknikleri karşılaştırılmış, ferit malzemesi, tencere ile bobin arasındaki mesafe gibi kavramların etkileri incelenmiştir. Yani bir bobin tasarımında dikkat edilmesi gereken tüm detaylar sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmeye çalışılmıştır.

5.1 Bobin Kayıplarının İncelenmesi

Endüksiyon bobini sisteminin ölçülen direncinin bir kısmı bobinin kendi direnci ve bir kısmı da tencerenin bobin uçlarından görünen direncidir (Şekil 5.2) [7]. Bu tez çalışmasını da içine alan tüm bobin ile ilgili çalışmalarda Şekil 5.2'deki R_0 mümkün olduğunca azaltılarak ΔR artırılmaya çalışılır. Böylelikle daha verimli bir bobin tasarımı elde edilebilir.



Şekil 5.2 : Endüksiyon bobini direnç modeli [7]

R_0 ya da bobin direncini etkileyen faktörler, tahmin edilebileceği gibi bobin malzemesinin (genellikle bakır) özgül direnci ile birlikte uzunluğu ve kalınlığıdır. Bu etkiler denklem (5.1)'de verilen direnç formülünden gelmektedir. Bu duruma çok fazla etki edilememekle birlikte en fazla iletkenin kesit alanı artırılmaya çalışılabilir, ancak bu durum da aynı alana daha az sarım sayısı sığdırmaya neden olmaktadır. Çünkü iletken çapı arttıkça ya da Litz telini oluşturan iletkenlerin sayısı arttıkça her sarımın kapladığı alan artacaktır.

$$R = \rho.\frac{l_b}{A_w} \quad \textbf{(5.1)}$$

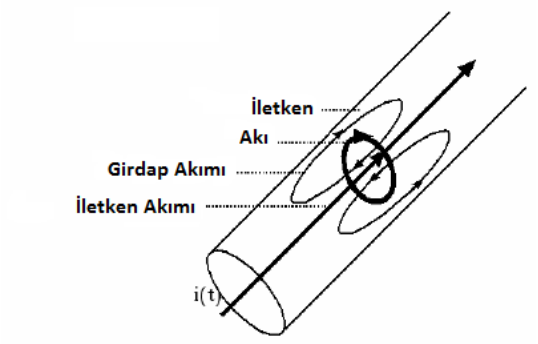
l_b iletken uzunluğu, A_w iletken kesit alanı ve ρ iletken malzeme özgül direncidir. Bu eşitlikler bobinden doğru akım geçtiğinde rahatlıkla kullanılabilir ancak daha önceki bölümlerde birçok kez belirtildiği gibi endüksiyon ocaklarında yüksek frekanslı alternatif akımlar kullanılmaktadır. Bu alternatif akımlar sadece tencere üzerinde girdap akımları oluşturmazlar, aynı zamanda bir Litz içerisindeki her iletken yanındakilere, ayrıca bobindeki her sarım diğer sarımlara da etki ederek onlar içerisinde girdap akımları oluşturur [15, 16]. Bu durumun da açıklayıcısı Faraday'ın endüksiyon yasasıdır. İletkenler içerisinde oluşturulan girdap akımları iki ana isim ile incelenebilir. Bunlar; deri etkisi ve yakınlık etkisidir. Bu etkiler ile direnç hesaplanırken kullanılan iletken kesit alanı değişmekte, ya da değişmemesi için kullanılacak Litz teli yapıları ile uzunluk değişmektedir.

Alt bölümlerde deri ve yakınlık etkileri sonlu elemanlar yöntemi ile oluşturulan modelde, farklı iletken durumlarında incelenecek ve açıklanacaktır.

5.1.1 Deri etkisi

Bir iletken sinüsoidal bir akımla uyarılırsa iletken eksenine dik olacak şekilde, sinüsoidal bir akı oluşturur. Faraday yasasına göre bu akı iletken içerisinde bir akım

oluşturur (girdap akımı) ve oluşan bu akımın üreteceği akının yönü de ana manyetik akıya ters olacak şekildedir. Sonuç olarak ise iletkenin ortasındaki akım yoğunluğu düşerken, kenar kısımları daha fazla akım taşır [25].

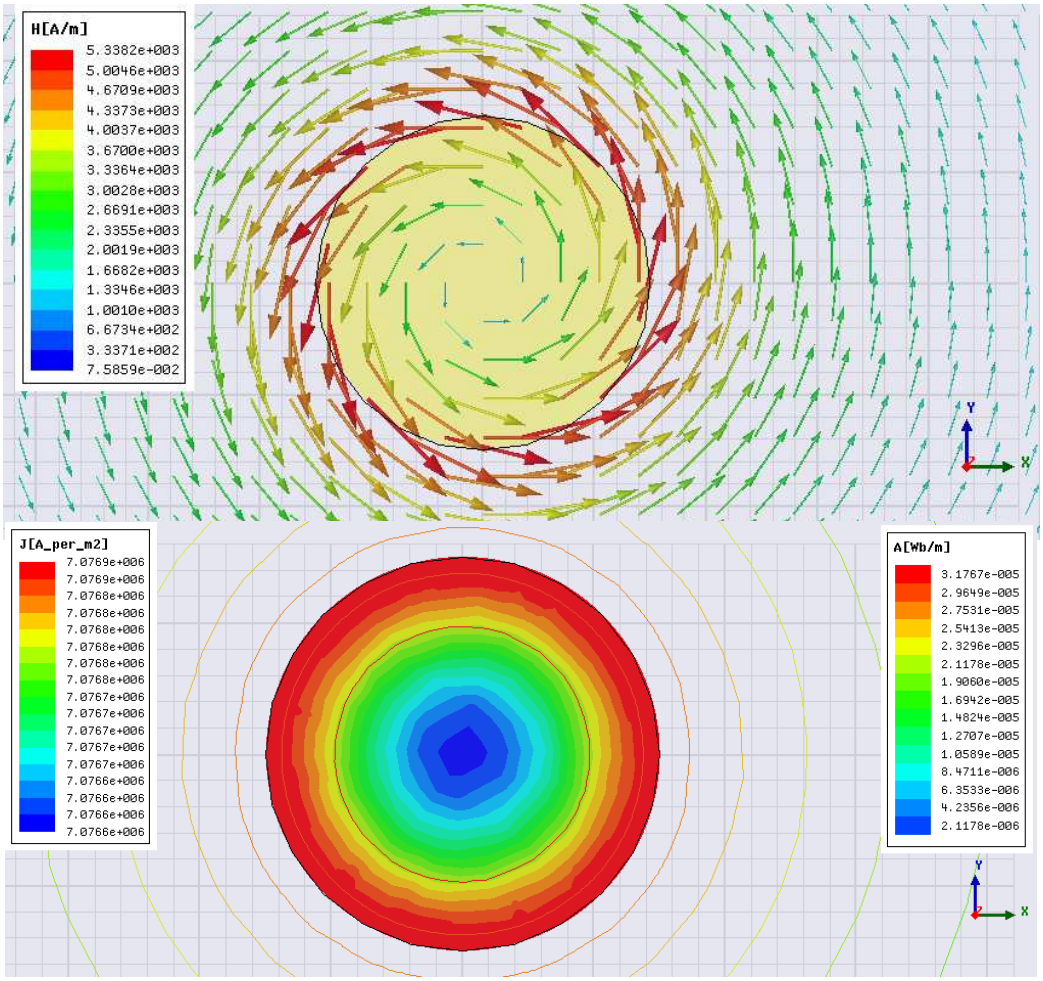


Şekil 5.3 : Deri etkisi [25]

Maksimum akım yoğunluğunun ya da deri etkisinin şiddetinin hesaplanması için girme derinliği denen akımın aktif olarak kullanabildiği yüzeyi ifade eden terim kullanılır. Daha önce denklem (4.11) ile verilen deneysel formül ile girme derinliği hesaplanabilir.

Deri etkisinin sonlu elemanlar analizi yazılımları ile etkisini görmek için tek iletken üzerinde bir model oluşturularak incelenmiştir. Modelde kullanılan iletken 3mm çapındadır ve bakırdır. Üzerinden 50A tepe değerinde sinüsoidal bir akım akar. Bu parametreler sabit tutulurken akım frekansı 50Hz ve 50kHz'de analizler yapılmış, manyetik alan şiddeti vektörleri ile birlikte akım yoğunlukları incelenmiştir. Akım yoğunluğunun gösterildiği resimlerde eş potansiyel çizgileri de görülmektedir.

Şekil 5.4'ten görüldüğü gibi akım neredeyse tüm yüzeyi kullanmaktadır. Denklem (4.11) kullanılarak yapılan hesaplamada bakır için girme derinliği 9,28mm çıkmaktadır ki bu 3mm'lik iletken için fazlasıyla yeterlidir. Ayrıca eş potansiyel çizgileri ve manyetik alan şiddeti vektörleri iletken içlerine kadar girmektedir, bu durum iletken üzerindeki girdap akımlarının ana manyetik alanı bastıracak seviyeye ulaşamadığını gösterir. İletken merkezi ile en dışı arasındaki akım yoğunlukları 7.0766A/mm^2'ye 7.0769A/mm^2'dir. Yani toplamda 0,3mA/mm^2 değişim olmuştur ki bu ihmal edilebilecek bir değişimdir.

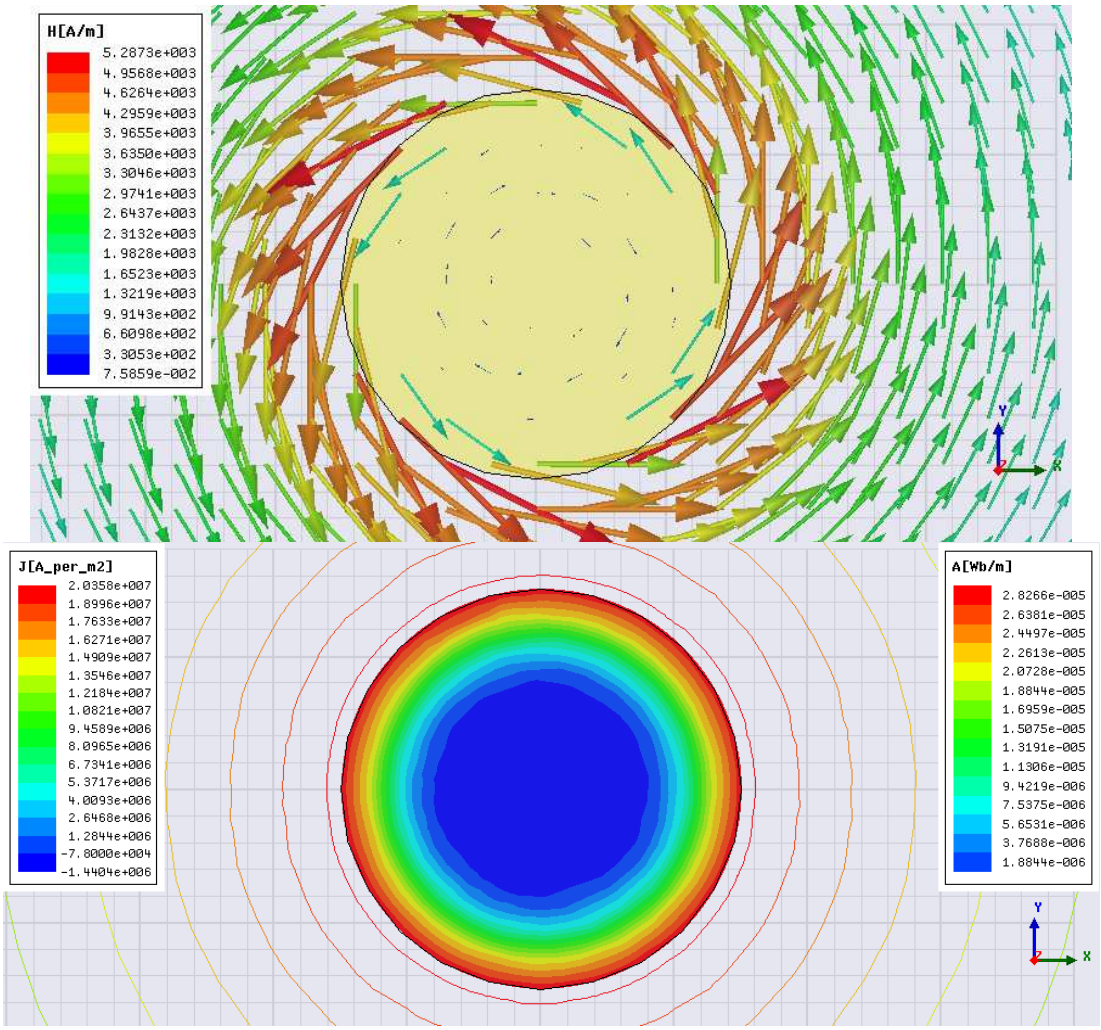


Şekil 5.4 : 50A 50Hz uyarma durumunda manyetik alan şiddeti ve akım yoğunluğu

Şekil 5.5'te ise frekans 50kHz yani 1000 katına çıkartılmıştır. Bu frekansta bakırın girme derinliği 0.2mm'dir yani 0.4mm çapındaki bir iletken ancak yeterli olacakken 3mm çapında bir iletken kullanılmıştır. Şekil 5.5'te görülen analiz sonuçlarında da eş potansiyel çizgilerinin ve manyetik alan şiddeti (H) vektörlerinin iletken içerisine giremedikleri görünmektedir. Yani büyük girdap akımları oluşmuş ve deri etkisi gözlenmiştir. Asıl deri etkisini net gösteren ise akım yoğunluğu şeklidir. Şekilden net bir şekilde görüleceği gibi akım artık iletkenin tüm yüzeyini kullanmamakta, sadece kenarlardan akmaktadır. Akımın kullandığı alan azalmışken akım uyarması yazılıma bir girdi olarak verildiği için akım sabit kalacaktır. Bu durumda aynı akımın akması için maksimum akım yoğunluğu değerinin oldukça artması beklenir. 50Hz frekansta maksimum akım yoğunluğu yaklaşık 7 A/mm^2 iken frekans 50kHz'e çıktığında maksimum akım yoğunluğu değeri yaklaşık 20 A/mm^2 olmuştur.

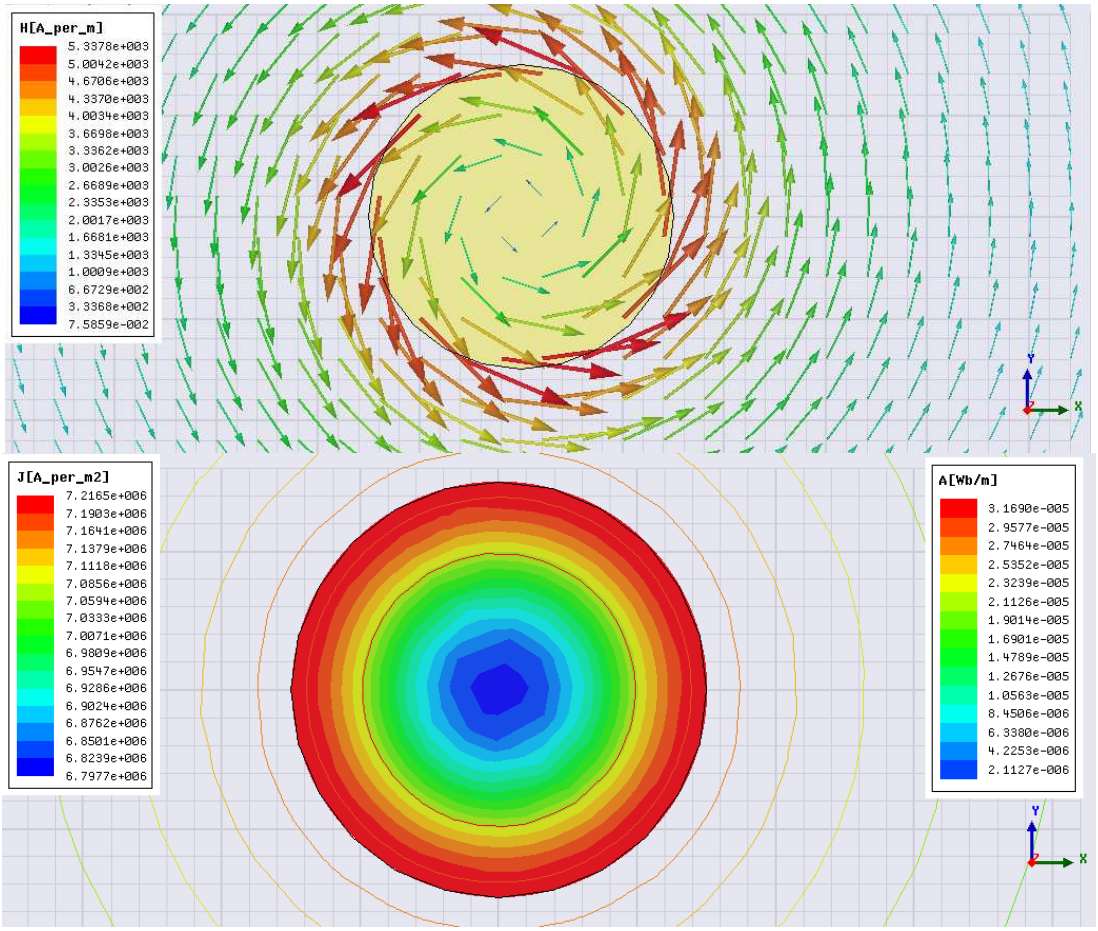
İletkenin merkezi ile en dışı arasındaki akım yoğunlukları da oldukça farklıdır. Hatta iletken merkezinde negatif akım akmaktadır. Bu negatif akımlar iletken dış

yüzeyinden 0.5mm içeride başlamaktadırlar. Akım değerleri hakkında sayısal veriler ile konuşmak gerekirse; iletken merkezinde -1.4404 A/mm^2 akım yoğunluğu varken en dışta ise akım yoğunluğu 20.358 A/mm^2 olmuştur.



Şekil 5.5 : 50A 50kHz uyarma durumunda manyetik alan şiddeti ve akım yoğunluğu

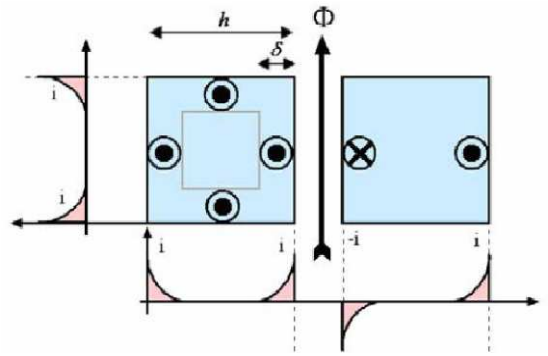
Deri etkisi hesabının doğruluğundan emin olmak için bir analiz daha yapılmıştır. Bu analizde akımın frekansı girme derinliği 1.5mm olacak şekilde ayarlanmış ve tüm yüzeyin etkin olarak kullanıldığı görülmek istenmiştir. Şekil 5.6'dan görüleceği gibi iletken dışı ve içindeki akım yoğunluğu farkı yaklaşık 0.4 A/mm^2 olacak şekilde akım taşınmıştır. Yani tüm iletken yüzeyi etkin bir şekilde kullanılabilmektedir.



Şekil 5.6 : 50A 1.9kHz uyarma durumunda eş potansiyel çizgileri ve akım yoğunluğu

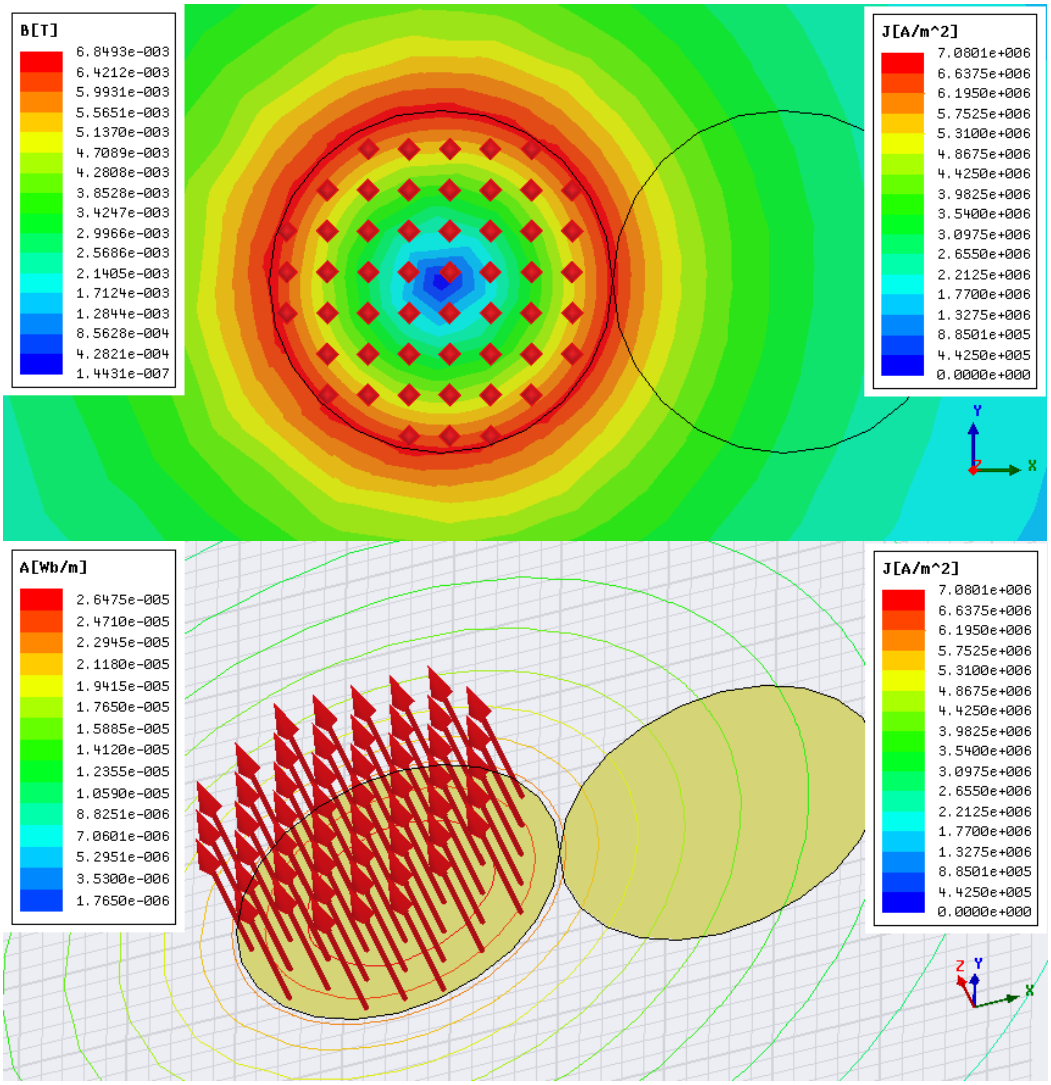
5.1.2 Yakınlık etkisi

Yakınlık etkisi yine Faraday yasası ile açıklanabilecek olaylardan birisidir. İki iletken yan yana ya da yakın durduklarında birisinin üzerinden akan akım sinüsoidal olursa değişken bir manyetik alan oluşturur. Bu alan da yanındaki iletkende girdap akımları oluşturur. Daha önce de açıklandığı gibi bu akımların oluşturacağı akı ana akıya ters yönde olacaktır, yani komşu iki iletkenden akım geçirildiğinde sadece deri etkisini göz önünde bulundurmak yetmez, birbirlerini de etkileyecekleri için deri etkisi ile hesaplanan iletken çapından daha düşük iletken çapları gerekebilir. Özel Litz yapıları yardımıyla yakınlık etkilerinin bir miktar önüne geçilebilir ancak yok edilemez. Bu nedenle sadece girme derinliği kullanılarak iletken çapı belirlenemez.

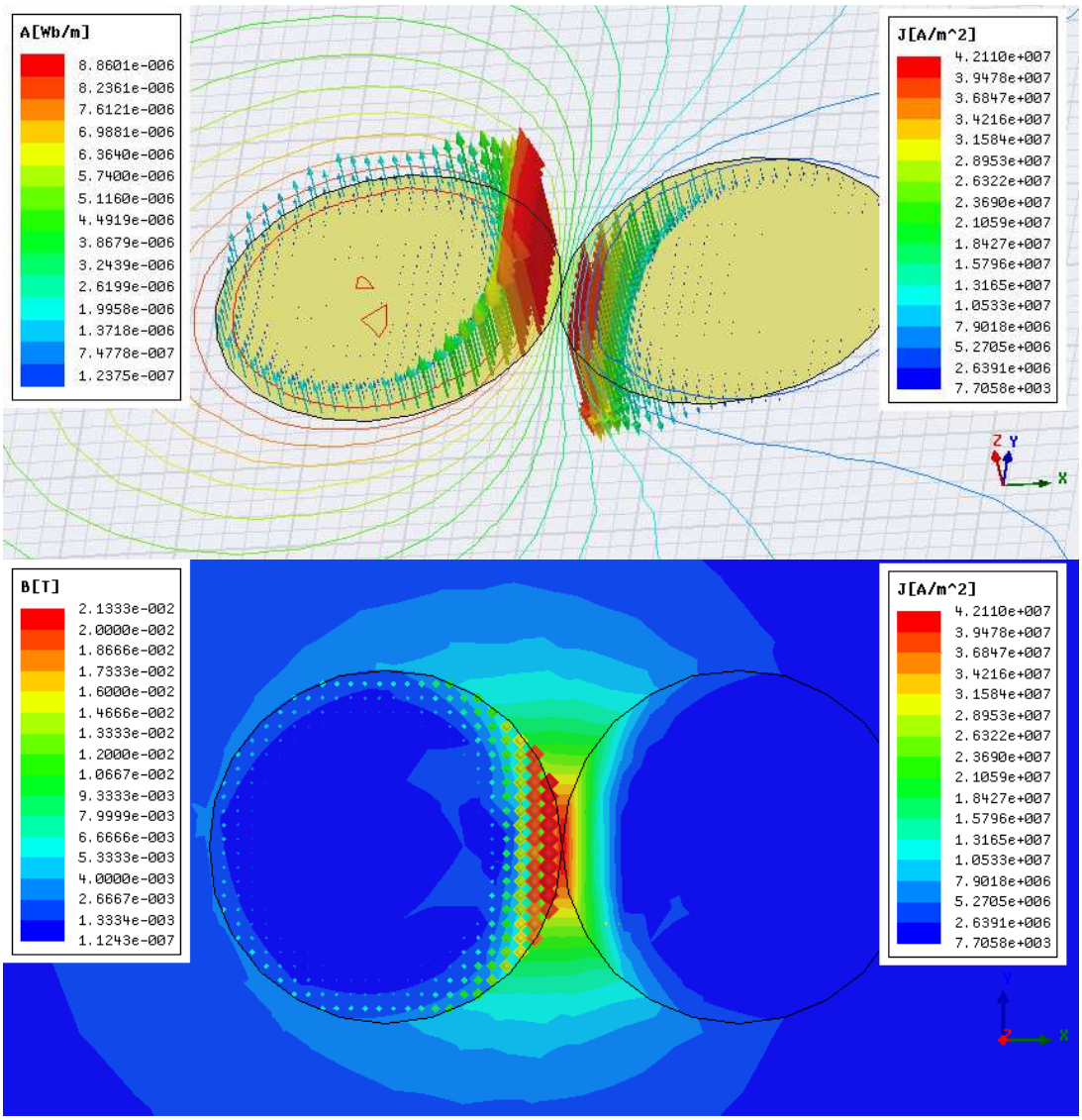


Şekil 5.7 : Yakınlık etkisinin gösterimi [25]

Bu etkiyi daha iyi anlamak için iki iletken yan yana konularak ilk önce teki 50A tepe değeri olan sinüsoidal bir akımla uyarılmıştır. 50Hz ve 50kHz'de akı ve akım yoğunlukları karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.8 : İki iletkenden teki 50Hz'de uyarılmış yakınlık etkisi

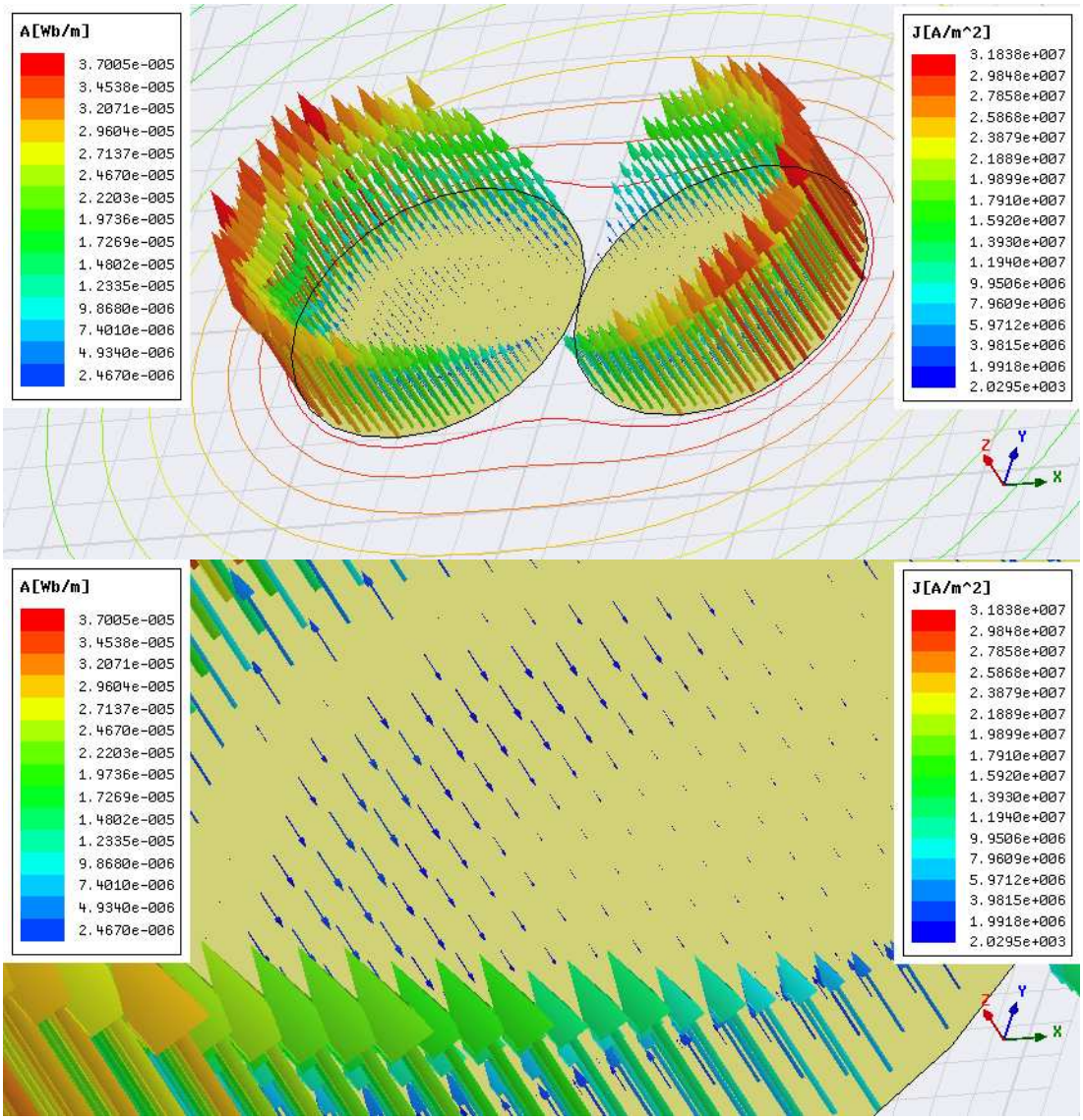


Şekil 5.9 : İki iletkenden teki 50kHz'de uyarılmış yakınlık etkisi

Şekil 5.8'de soldaki iletken 50Hz frekansında akım taşımaktadır ve oluşturduğu akılar yanındaki iletkenin içinden geçmekte, iletken üzerinde herhangi bir etkiye neden olmamaktadır. Daha sonra frekans 50kHz'e çıkartılınca, akım taşıyan iletkende deri etkisi nedeniyle akımlar kenarlara yığılmanın yanı sıra kendisine yakın iletkenle komşu oldukları noktada daha fazla yoğunlaşmışlardır. İşte bu etkiye yakınlık etkisi denir. Faraday yasası gereğince oluşturulan akıya ters yönde komşu iletkende akı oluşturulmuş, bu nedenle eş potansiyel çizgileri ve akı yoğunluğu iletken içinde oldukça azalmıştır.

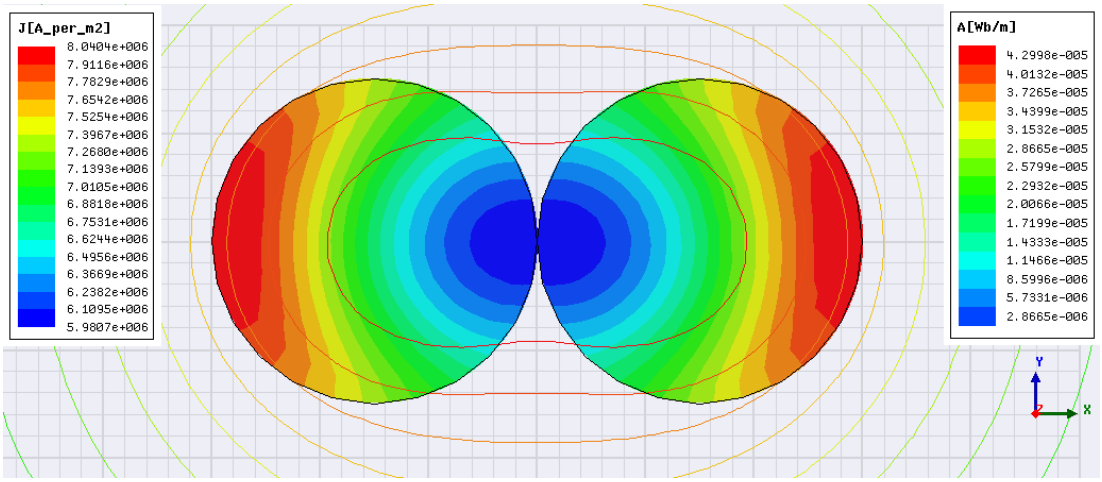
Endüksiyon bobininde yan yana birçok sarım bulunmaktadır ve bu sarımlar birbirine seri bağlı oldukları için aynı akımı taşırlar. Bu durumu görmek için yavaş yavaş ilerlenmiş, ilk olarak iki iletken aynı akımı taşıdıklarında ne olduğu incelenmiştir.

50Hz’de iki iletkenin kesiştiği yerde çok küçük bir farkla da olsa akım azalmıştır ancak bu değişim ihmal edilebilecek düzeydedir. Bu çalışmayı ilgilendiren durum ise 50kHz civarındaki frekanslarda akımların nasıl dağıldığıdır.



Şekil 5.10 : 50kHz’de iki iletken de akım taşırken yakınlık etkisi

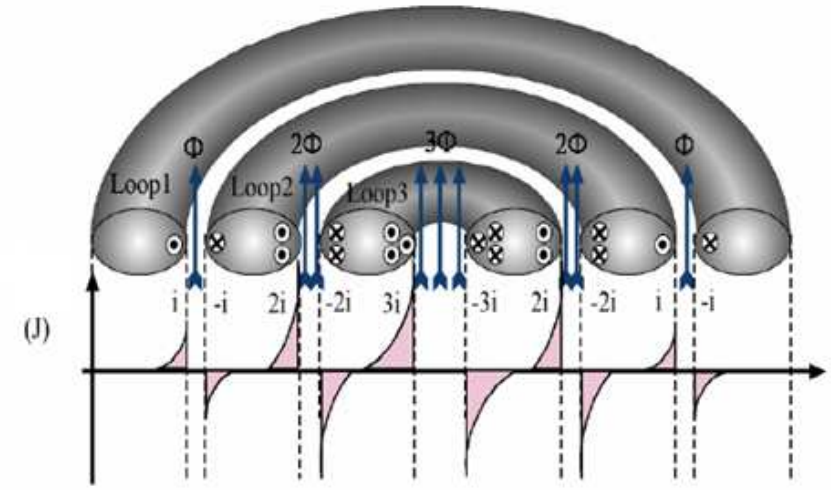
Skin ve yakınlık etkilerinin beraber anlaşılması için kıyaslama yapmak istenmiştir. İki iletken yan yana akım taşırlarken ters akımların görünmeye başladığı iletken derinliği tek iletkende önceki bölümde açıklandığı gibi 0.5mm iken, şimdi iletkenlerin yaklaştıkları noktalarda 0mm, uzak noktalarda ise 0.6mm’dir. Bu konuyu netleştirmek için 3mm’lik iletkenin sınır koşulu olan 1.9kHz’de bir analiz daha yapılmıştır.



Şekil 5.11 : 1.9kHz'de iki iletken akım taşırken akım yoğunlukları

Önceki bölümde bu sınır koşulunda iletken dışı ve içindeki akım yoğunlukları farkı yaklaşık 0.4 A/mm^2 bulunmuştu. Burada ise fark yaklaşık 2 A/mm^2 olmuştur. Bu durum iki iletken yan yana akım taşırken girme derinliğinin gerektirdiğinden daha ince tellere neden ihtiyaç duyulduğunu net bir şekilde göstermektedir.

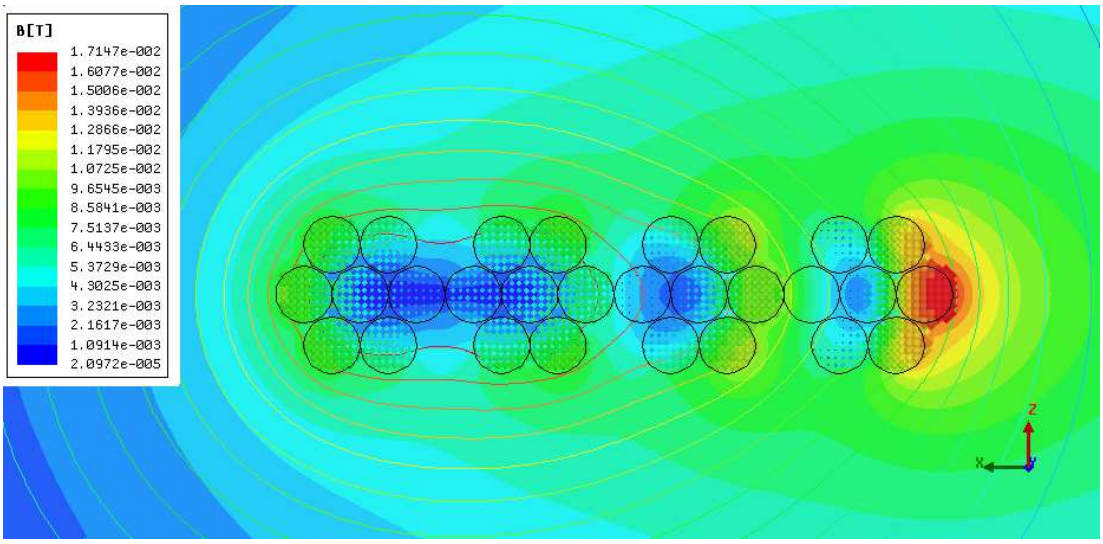
Şekil 5.9'de akım taşıyan iletkenin yanındaki iletkene komşu olduğu noktada ters akıma neden olduğu görülmüştü. İki iletken uyarıldığında ise ikisi de diğerine aynı etkide bulunduğu için komşu oldukları noktada akım yoğunluğu daha da azalmıştır (Bkz. Şekil 5.10). Ayrıca 100kHz çalışma ile 50kHz çalışma arasındaki farklar da incelenmiş ve beklendiği gibi deri ve yakınlık etkileri daha şiddetli olmuştur. Bu iki iletkenden iki sarımlı bir bobin oluşturulduğunda akı yoğunluğunun daha fazla olduğu orta noktada akım yoğunluğunun daha fazla olması beklenir.



Şekil 5.12 : Bir bobinde akım yoğunluğu değişimi [25]

Şekil 5.12'deki etkiyi sonlu elemanlar analizi ile doğrulamak için 4 iletken yan yana koyularak bir bobin oluşturulmuş ve bobin akımı olarak sinüsoidal 50A girilmiştir. Sistem, Şekil 5.12'den da görüldüğü gibi orta noktadan simetriktir. Bu nedenle çizimin sadece yarısı yapılarak Z eksenine göre simetrik olacağı Maxwell programına tanımlanabilir. Böylelikle çözümün yapılacağı 3 boyutlu analizde her iletken bir sarımı temsil etmiş olacaktır.

Her biri 4 sarım sayılı olmak üzere sırasıyla; 1×3mm, 3×1.7mm, 5×1.35mm, 14×0.9mm ve 45×0.5mm iletkenli Litz telleri ile analizler yapılmış, böylelikle iletkenleri bölmenin etkisi görülmeye çalışılarak, her frekans için uygun iletken çapı bulunmaya çalışılmıştır. Ayrıca girme derinliğinin 0.9mm olduğu yani 3 iletkene bölme işleminin yeterli olduğu frekans olan 5kHz frekansta benzetim koşturularak sonuçlar irdelenmiştir. Daha önceki analizlerde 50kHz'e kadar çıkıldığı için akım dağılımı bu analizlerden daha fazla iletken kenarlarına sıkışmış olacaktır.



Şekil 5.13 : Örnek bir bobinin akı ve akım yoğunluğu

EK A'da yukarıda sayılan Litz telleri ile 4 sarımlık bobinlerin analiz resimleri verilmiştir. Beklenildiği gibi bobin oluşturulduğunda en ortada akı yoğunluğu daha fazla olduğu için akım yoğunluğu da ortadaki sarımda ya da birinci turda daha fazla olmuştur. Ayrıca akı çizgilerinin yoğunlaştığı bölgelerde akım yoğunluğu da artmıştır. Kullanılan toplam kesit alanı aynı kalacak şekilde tel sayısı artırıldıkça maksimum akım yoğunluğu düşmüş ve daha fazla alandan akımlar akmaya başlamıştır. Tel sayısına ve çapına ilişkin yapılan çalışmalardan hesaplanan girme derinliği kadar bir iletken çapı seçilmesi gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. İlk olarak

0.9mm çapında 14 iletkenli ve 0.5mm çapında 45 iletkenli Litz telleri analiz edilmiş, 0.9mm iletkende akım yoğunluğu ve kayıp düşerken 0.5mm çaplı iletkende kayıplar yakınlık etkisi nedeniyle artmıştır.

Çizelge 5.1 : Farklı Litz tellerinin 5kHz frekansta karşılaştırması

Kullanılan Litz Teli [Adet×mm]	**Toplam Bakır Alanı [mm^2]**	**Toplam Bakır Kaybı [W]**	**En Yüksek Akım Yoğunluğu [A/mm^2]**
1×3	7.07	2.39	20.04
3×1.7	6.08	2.5	20.41
7×1.35	10.02	2.25	18.71
14×0.9	8.9	2.2	17.6
45×0.5	8.8	2.36	17.46

Analiz sonuçlarından endüksiyon bobinlerinin ortasında koyulan boşluğun nedeni anlaşılabilir. Tüm yüzeyin sargılarla doldurulması durumlarında orta kısımlardaki sargılar çok fazla kayıplara neden olacak ve daha sonraki bölümlerde açıklanacak nedenlerle endüktans olarak çok fazla katkıda bulunamayacaktır. Ayrıca yakınlık etkisinin bir iletkenin yakınındaki iletkenleri etkilemesi ile meydana geldiği söylenmişti. Bu durumda son olarak gösterilen 4 iletkenli bobinde iç çap aynı kalacak şekilde sarımlar arasına mesafe koyulursa yakınlık etkisi daha da azalacaktır. Bu durum da daha sonraki bölümlerde sarım yöntemleri karşılaştırılırken daha detaylı olarak ele alınacaktır.

Sırf deri ve yakınlık etkilerini inceleyerek endüksiyon bobininde kullanılacak iletkenler hakkında tahminde bulunmak pek doğru bir yaklaşım olmayacaktır çünkü bu sistemde değişken olan bir parça olan tencere de önemli bir etkendir. Ancak bu bölümde yapılan analizlerden oldukça önemli sonuçlar çıkmıştır. Her şeyden önce yakınlık ve deri etkilerinin sonlu elemanlar yöntemi kullanan bir yazılım ile görülebiliyor olması ve bir tasarım yapılırken bu durumların da göz önünde bulundurulacak olması oldukça önemlidir. Bu şekilde yapılan ilk çalışmalardan hesaplanan girme derinliği çapında iletkenler seçilmesi gerektiği görülmüştür. Ancak bu durum tam bir endüksiyon ocak modelinde incelenmeli, tel sayısı ve çapı bu şekilde belirlenmelidir.

Bu bölümden çıkartabileceğimiz diğer önemli sonuçlara örnek verecek olursak; bobin sarılırken orta kısımda boşluk bırakılması gerektiği, deri ve yakınlık etkilerinin azaltılması için fazla sayıda küçük çaplı tellerin kullanılabileceği ve hatta sarımlar arasına koyulacak aralığın oldukça önemli katkılar sağlayabileceği söylenmiştir. Daha net bilgiler edinebilmek ve tüm bu parametreler hakkında kesin yargılara varabilmek için endüksiyon bobininin tam bir modeli kurulmalıdır.

5.2 Endüksiyon Bobini Modelinin İncelenmesi

Bu bölümde iki endüksiyon ocağı modeli incelenecektir. İlk olarak 3mm çapında tek telden oluşan bir bobin daha sonra ise 31 adet 0.4mm çapında iletkenlerden oluşan bir model analiz edilecektir. Daha önce de söylendiği gibi genelde endüksiyon ocaklar en yüksek güçlerine 20kHz frekanslarda çıkarlar ve bu durumlarda taşıdıkları sinüsoidal akımın tepe değeri de 50A civarında olur. İşte bu iki model de bu koşullarda karşılaştırılacaktır.

20kHz frekansta bakırın girme derinliği yaklaşık olarak 0.45mm'dir. Yani 0.45mm yarıçapında bir iletken yakınlık etkisinin olmadığı bir ortamda girme derinliğinden etkilenmez. Ancak hem yakınlık etkisi nedeniyle hem de ocağın güç ayarı yapılırken frekansın 50kHz'lere kadar ulaşması nedeniyle bu yarıçaptan daha küçük teller kullanılır. Pratikteki denemeler ve bazı uygulamalarda kullanılan tel çapları incelendiğinde 0.45mm yarıçap değil en büyük iletken olarak 0.45mm çap kullanılması uygun olmaktadır. Sonuç olarak gerekenden iki kat daha ince bir iletken kullanılarak analiz yapılmış ve bu iletken çapının yeterli olup olmadığı incelenmek istenmiştir.

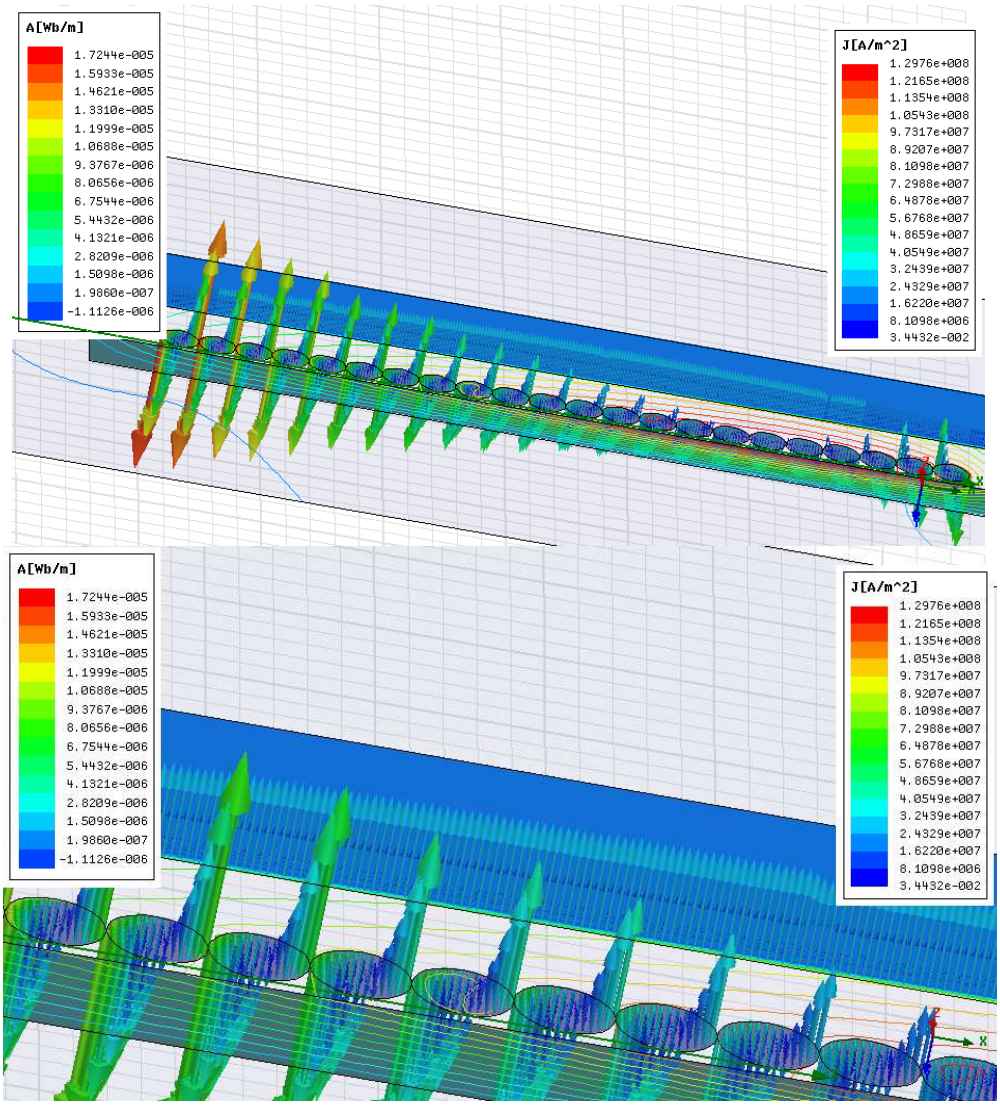
İlk olarak söylendiği gibi 3mm çapında iletkenden oluşan 22 sarımlı bobin incelenecektir. Daha sonra 31×0.4mm ile sarılan 23 sarımlı bobinler. Bunların toplam bakır alanları aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$A_1 = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot 1.5^2 = 7.07mm^2 \quad \textbf{(5.2)}$$

$$A_2 = 31 \cdot \pi \cdot r^2 = 31 \cdot \pi \cdot 0.2^2 = 3.9mm^2 \quad \textbf{(5.3)}$$

Aşağıda hem endüksiyon bobinin çalışmasını daha iyi anlatacak hem de seçilecek Litz telinin nasıl olması gerektiği ile ilgili fikir edinilmesine yardımcı olacak analiz sonuçları verilmiştir. Bu analizlerde tencerenin bağıl manyetik geçirgenliği 100,

iletkenliği ise 10^7 $(\Omega.m)^{-1}$ olarak sisteme girilmiştir. Tencerenin çapı 250mm, kalınlığı ise 10mm alınmıştır. Bu hayali bir tencere olup, kalınlığın da girme derinliğinden sonra bir etkisi bulunmadığı için tencerenin tüm boyutlarıyla doğru bir şekilde sisteme girilmesi gerekmemektedir.

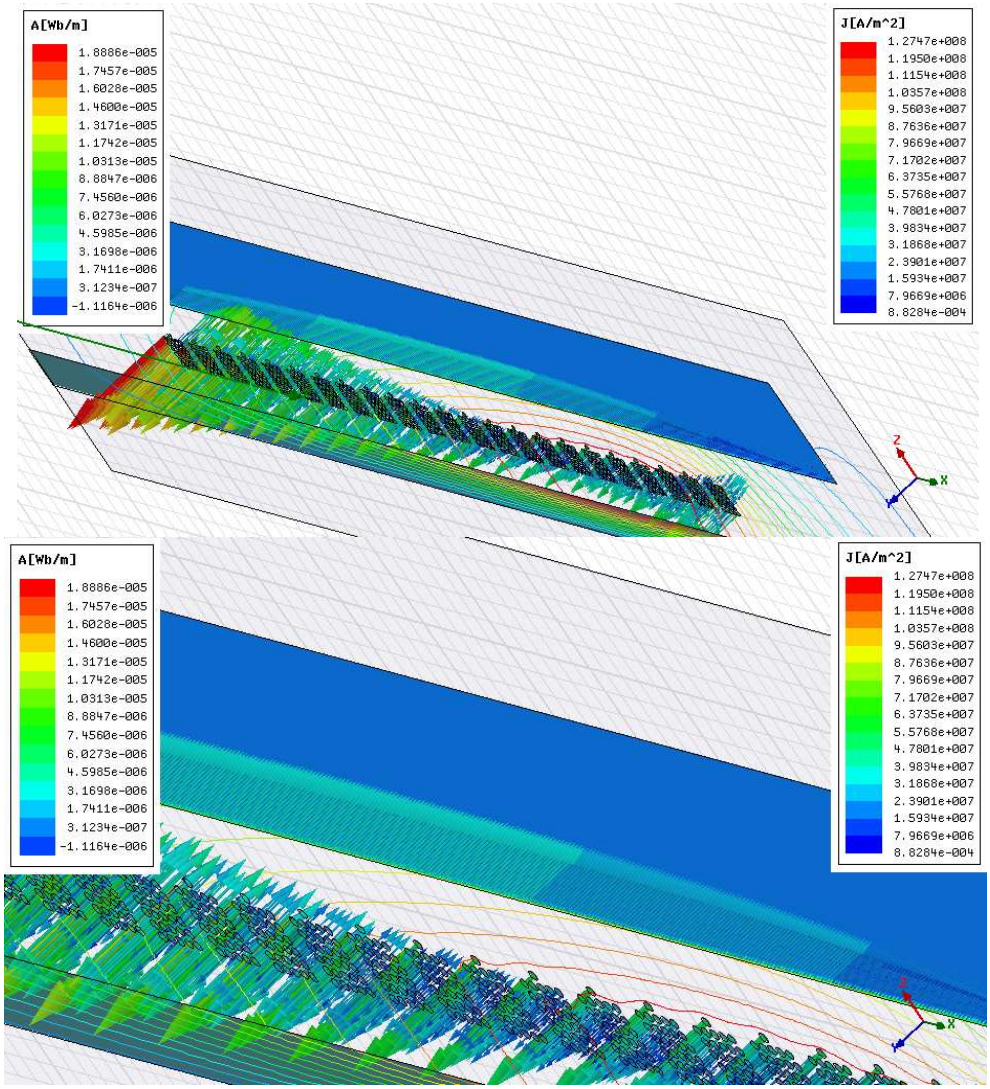


Şekil 5.14 : Tek iletkenden sarılmış endüksiyon bobini

Şekil 5.14'te tek telden sarılmış 22 sarımlı bir endüksiyon bobini yukarıda özellikleri verilen ferromanyetik bir tencere ile yüklü iken görünmektedir. Tek tel kullanılması nedeniyle yakınlık ve deri etkisi kendini oldukça etkili bir şekilde göstermiştir. Hatta iletkenlerin diğer iletkenlerle komşu olduğu yerlerde oldukça büyük ters akımlar dahi akmaktadır. Eğer kayıp oranını rakamlara dökmek gerekirse sistemde toplam 3100W güç vardır. Bu gücün 450W kadarı bobinde omik kayıplar olarak görünmektedir. Aslında böyle bir durum gerçekte test edilemez, çünkü 50A tepe değerli olan bir

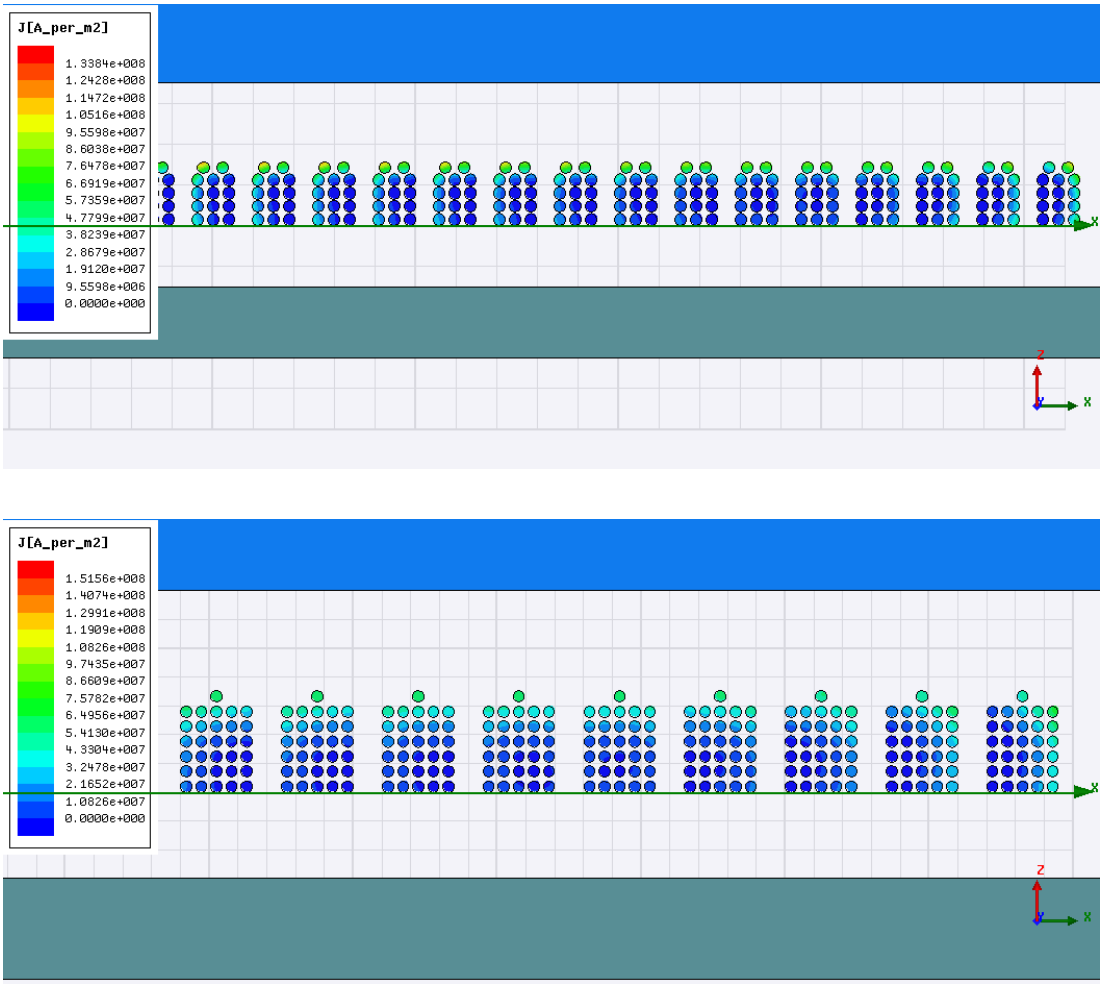
akımla bu sistemi beslemek oldukça güç bir iştir. Ancak Litz telinin nasıl seçilmesi gerektiği ve etkilerinin neler olduğunu anlamak için faydalı bir analizdir.

Girme derinliğinin 0.45 mm olduğunun ancak gerekenin yaklaşık iki katı incelikte (0.4mm çapında) bir tel kullanıldığının altı daha önce çizilmiştir. Bu sistemde sarım sayısı 1 fazla olduğu için toplam güç daha fazladır. Toplamda 4100W'lara kadar çıkılmıştır. Bu artışın tamamı sarım sayısından gelmemektedir, tencereye yakın iletkenlerden daha fazla akım taşınmaya başlanması da böyle bir sonuca katkıda bulunmuştur. Toplam gücün bobinde harcanan kısmı sadece 300W kadarıdır. Toplam bakır alanı ya da iletken alanının dahi daha küçük olduğu bu durumda kayıplar oldukça düşmüştür. Ayrıca Şekil 5.15'dan görüldüğü gibi yakınlık ve deri etkileri oldukça azalmıştır. Bu şekilde, 0.4mm çapında tellerin kullanıldığı bir bobinin yeterli olabileceği sonucuna varılmıştır.



Şekil 5.15 : 31×0.4mm tel ile sarılmış bobin

0.4mm’den daha yüksek çaplı tellerin kullanıldığı fakat toplam bakır alanı aynı olan bobinlerde ise kayıplar artmakta ve tüm iletkenler etkin olarak kullanılamamaktadır. Örneğin iletkenlerin birbirine daha uzak olduğu için daha avantajlı bir bobin olan 14×0.6mm Litz telinin analizi yapılmıştır. Kayıplar 350W çıkmıştır ve tüm iletkenlerin 31×0.4mm Litz teli gibi kullanılamadığı görülmüştür.



Şekil 5.16 : 31×0.4mm ve 14×0.6mm iletkenlerden oluşan litz tellerinde akım dağılımlarının karşılaştırılması

Bobinler daha da ince ve çok tellerden oluşan iletkenlerden sarılabilir. Ancak daha ince ve çok tel kullanılan durumlarda maliyet ve işçilik daha güçleşmektedir. Çok fazla inceltmeden bitişik sarılan bir bobinde 0.3mm ya da 0.2mm’lik tellerden kullanılabilir. Ancak dikkat edilmelidir ki toplam bakır alanı 3.5mm’nin altına inmemelidir. Çünkü en yüksek akım değeri 35A etkin değeridir ve bu akım değerinde mm^2 başına 3.5mm’lik tel için 10A düşecektir. Bundan daha fazla olan durumlarda ne kadar deri ve yakınlık etkilerini yok edilse de omik kayıplar yok

edilemez. Örneğin 0.2mm'lik tellerden oluşan bir Litz teli kullanılacak ise aşağıdaki hesaba başvurulur;

$$3.5 = n \cdot \pi \cdot r^2 = n \cdot \pi \cdot 0.1^2 \Rightarrow n = 111.4 \quad \textbf{(5.4)}$$

Sonuç olarak, en az 112 tel kullanılmalıdır. Daha düşük akımlarda çalışacak bobinler için daha az tel kullanılabilir. Daha önce 31×0.4mm'lik Litz teli analiz edilmişti. Bu telden bir miktar çıkartılarak 20×0.4mm Litz teli kullanılmıştır. Yani toplam bakır alanı 3.9mm^2'den 2.5mm^2'ye düşürülmüştür. Litz telindeki toplam omik kayıp 300W'tan 350W'a yükselmiştir. Akım yoğunluğu olarak da görülen en yüksek değer 124A/mm^2'den 198 A/mm^2'ye yükselmiştir.

Genel bir formülizasyon ile kullanılacak tel seçiminde şöyle bir metodoloji geliştirilmiştir; ilk olarak en yüksek gücün aktarıldığı frekansta girme derinliği hesaplanarak bu çapta iletken kullanılır (yakınlık etkisi nedeniyle), ikinci olarak da toplam akımın toplam bakır alanına oranı (akım yoğunluğu) 10A/mm^2'yi aşmamalıdır. Bu sonuçlara ek olarak Şekil 5.14 ve özellikle Şekil 5.15'dan bobin akım yönü ile tencere üzerinde oluşan girdap akımlarının yönü görülebilmektedir. Ferromanyetik bir tencere olduğu için akı çizgileri de tencere üzerinde yoğunlaşmaktadır ve bu durum da şekillerden rahatça görülebilir. Ayrıca sistemdeki güçten ve bobin üzerinde kaybolan güçten de bahsedilmiştir. Mesela 31×0.4mm'lik Litz teli ile yapılan analizde toplam güç 4100W, bobindeki güç ise 300W olarak verilmiştir. Bu gücün geri kalanı yani 3800W tencere üzerinde harcanmaktadır. Bu oldukça yüksek bir verim oranıdır (%92), çünkü bu verime güç elektroniği devresi dâhil değildir.

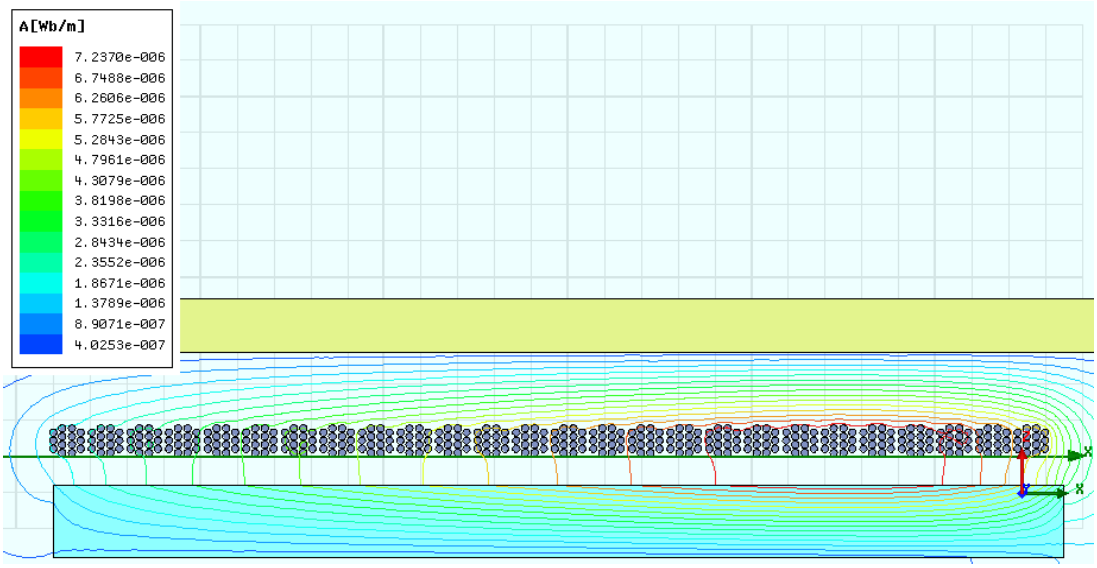
5.3 SEA ile Endüktans ve Direnç Hesaplanması

Bu bölümde sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilen endüksiyon bobininin endüktans ve direnç değerleri hesaplanmıştır. Böylelikle bir bobin yapısının gerçekten yapılarak denenmesi yerine çok daha pratik bir yolla endüktans ve direnç değerlerinin bilinmesi sağlanmış olacaktır. Çalışmada kullanılacak formüller temel elektriksel ve elektromanyetik eşitliklerdir. Direnç değerinin hesaplanması için analiz sonrasında tüm sistemdeki omik kayıplar yazılım sayesinde bulunur. Daha sonra denklem 5.2.'de de gösterildiği gibi kayıplar bobin üzerindeki akımın etkin değerinin karesine bölünerek bobin uçlarındaki direnç hesaplanmış olacaktır.

$$R = \frac{P_{loss}}{(I_{rms})^2} \qquad (5.5)$$

Burada dikkat çeken hususlardan birisi bu kayıplara tencere kayıplarının da dâhil olmasıdır. Tencere kayıplarını bu hesaba dâhil etmenin açıklaması aslında daha önce Şekil 5.2'de yapılmıştır. Tencere direnci de bobin uçlarından ölçülen dirence yansımaktadır.

Endüktans değerini hesaplamak için iki yöntem vardır. Bunlardan birisi sistemdeki toplam halkalanan akıdan faydalanarak endüktansın bulunmasıdır. Gereken formül denklem (4.10) ile daha önce verilmiştir. Yalnız bu formülle endüktans hesaplanırken halkalanan akıların iki defa hesaplanmasından kaçınılmalıdır. Akılar bir kez oluşturularak tencereye doğru yönelirler fakat daha sonra yolunu tamamlamak amacıyla yeniden aşağı iner ve bir halka oluştururlar. Yani X ekseni boyunca alınacak bir integral ile halkalanan akılar hesaplanırsa bulunması gereken değerin iki katı bulunur.



Şekil 5.17 : Endüksiyon bobininde halkalanan akılar

Diğer yöntem ise endüktansın enerji depolama özelliğinden faydalanarak endüktans değerinin hesaplanmasıdır [26, 27]. İlk yönteme göre hata yapılma riski daha az ve hesaplama açısından daha pratiktir. Yazılımın hesaplama ara yüzü kullanılarak tüm sistemdeki depolanan enerji miktarı hesaplanır. Daha sonra denklem (5.6) ile endüktans değeri bulunabilir.

$$E = \frac{1}{2}.L.(I_{rms})^2 \quad \textbf{(5.6)}$$

Verilen eşitlikler yardımıyla ve sonlu elemanlar analizi yazılımıyla bir endüksiyon ocağı sisteminin endüktans ve direnç değerleri bulunabilir ancak bu işlemlerin doğru sonuç vermesi için sistemdeki malzemelerin özellikler tam olarak bilinmelidir. Elektriksel ve manyetik özellikler başta olmak üzere malzemeleri tam boyutları bilinmeli ve tam doğru bir model çizilebilmelidir. Bu nedenlerle endüktans ve direnç değerleri doğrulanırken, ilk olarak malzeme özelliklerinin ve geometrilerinin tam olarak bilindiği çalışmalardan yola çıkılmıştır.

'Domestic Induction Heating Impedance Modeling Including Windings, Load, and Ferrite Substrate' ile 'Simple Resistance Calculation in Litz-Wire Planar Windings for Induction Cooking Appliances' (J. Acero et al.) makalelerinde ev tipi endüksiyon ocaklarının bobin yapılarının analitik modeli çıkartılmaya çalışılmıştır [28, 29]. Bu model yardımıyla bobin sistemlerinin endüktans ve direnç değerleri hesaplanarak gerçekte alınan ölçümlerle karşılaştırılmış, kabul edilebilir bir doğrulukta sonuçlar bulunmuştur. Bu makalede de tez çalışmasına benzer bir amaç güdülmüş olup aynı şekilde kullanılan malzemelerin ayrıntılı geometrik özelliklerinin yanı sıra elektriksel ve manyetik özellikleri de verilmiştir. Ayrıca bu sistemlerden alınan deneysel sonuçlar da grafikler halinde makalelerde mevcuttur. İlk olarak yazılımın özelliklerini anlayabilmek ve hata riskini en aza indirgemek amacıyla basit bir model kurulmuş ve sonuçlar alınmıştır. Bu sistemde bobin Litz teli yerine tek bir iletken ile sarılır. Ölçüm alınan bobinlerde kullanılan tel bakır ve 2mm çapındadır ve bobin 23 sarımdan oluşur. Her sarım arasında ferromanyetik veya iletken olmayan plastiğe benzer 1.5mm kalınlığında bir malzeme bulunmaktadır. Bu malzeme bobinin altında da vardır ve genelde sarım işlemini kolaylaştırmak ve sarımları birbirinden uzaklaştırarak yakınlık etkisini azaltmak amacıyla kullanılır. Ölçümler alınırken bobinin üstüne de altına da 4mm kalınlığında cam koyulmuştur. Yani modelde tencere ve ferit bobinin 4mm üstünde ve altında yer alacaktır. Kullanılan feritler daire şeklindedir ve 125mm çapında 3.5mm kalınlığındadır ve malzemesi Ferroxcube firmasının 3C90 kodlu ferit malzemesidir. Bu malzemenin datasheet'i ekte verilecek olmakla birlikte genel özelliklerini verecek olursak; lineer bölgede manyetik geçirgenliği 2300, özgül direnci de 5 Ω.m'dir. Ölçümler bakır, alüminyum

ve F114 ferromanyetik çelik malzemelerden yapılmış olmak üzere üç çeşit tencere ile alınmıştır. Bu malzemelerin özellikleri ise Çizelge 5.2'de verilmiştir.

Çizelge 5.2 : Tencere malzemelerinin özellikleri [28]

Malzeme	İletkenlik $(\Omega.m)^{-1}$	Bağıl Manyetik Geçirgenlik (μ_r)	1kHz'de Girme Der. [mm]
Alüminyum	1×10^7	1	5.03
Bakır	5.8×10^7	1	2.08
F114	8×10^6	130	0.493



Şekil 5.18 : Tek tel ile sarılmış bobin [28]

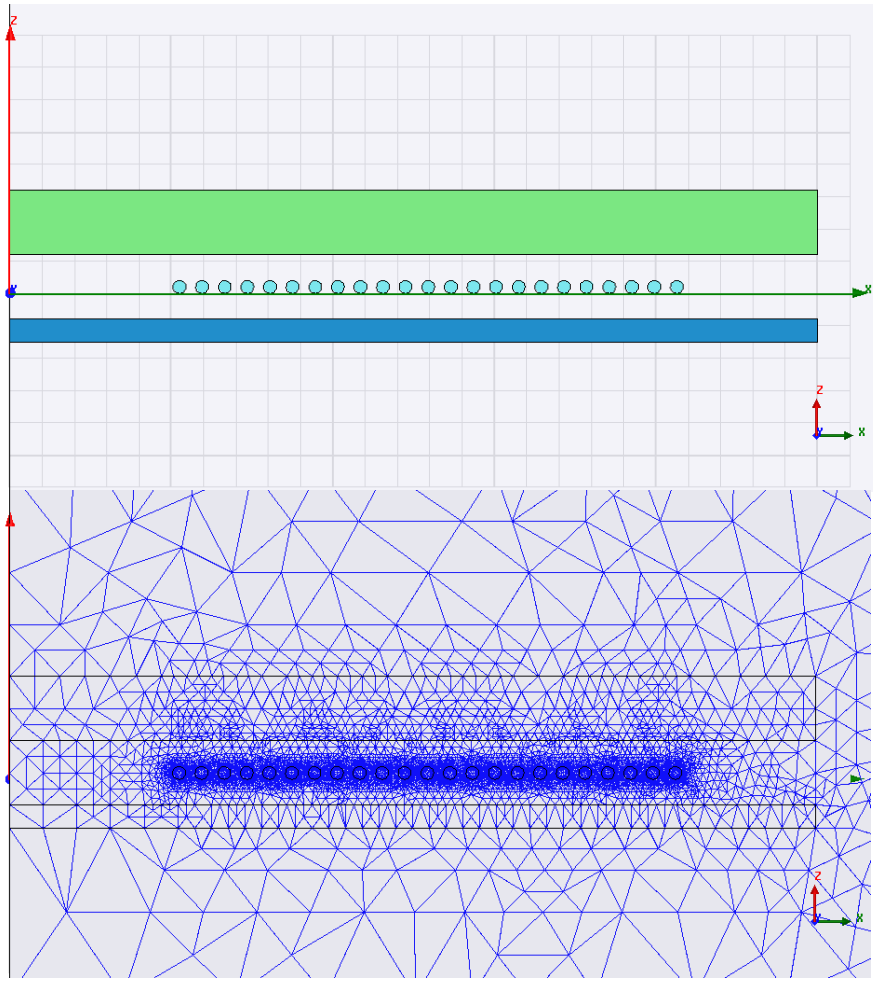
Bahsedilen bobinin çeşitli yükler (tencere) ile endüktans ve direnç ölçümleri RLC metre yardımıyla alınmıştır. RLC metre belirlenen bir frekansta istenen gerilimi ölçümü alınacak bobine uygular. Gerilim ve akımın faz farkından endüktans, oranından da direnç değerlerini bulur. Alınan deneysel ölçümler EK B.1'de verilmiştir. Analiz sonuçlarının bu ölçümlerle kabul edilebilir yakınlıkta olması beklenmektedir.

Analizlerde bobin akımı tepe değeri 30A olarak girilmiştir. Endüktans ve direnç değerlerinin akım ile değişmediği analiz sonuçlarından görülmüştür. Bu durum (4.10) denkleminde (5.7) denklemini yerine yazarak teorik olarak da görülebilir. Bu durumda eşitliğin iki tarafındaki akım ifadeleri birbirini sadeleştirecektir (Denklem (5.8)).

$$\boldsymbol{\Psi = N.\emptyset = N.\frac{N.I}{\Re}} \qquad \textbf{(5.7)}$$

$$\boldsymbol{L.I = \frac{N^2 I}{\Re} \Rightarrow L = \frac{N^2}{\Re}} \qquad \textbf{(5.8)}$$

Kurulan model oluşturulan sonlu elemanlarla birlikte Şekil 5.19'te, analiz sonuçları ise sayısal olarak EK B.2'de verilmiştir.

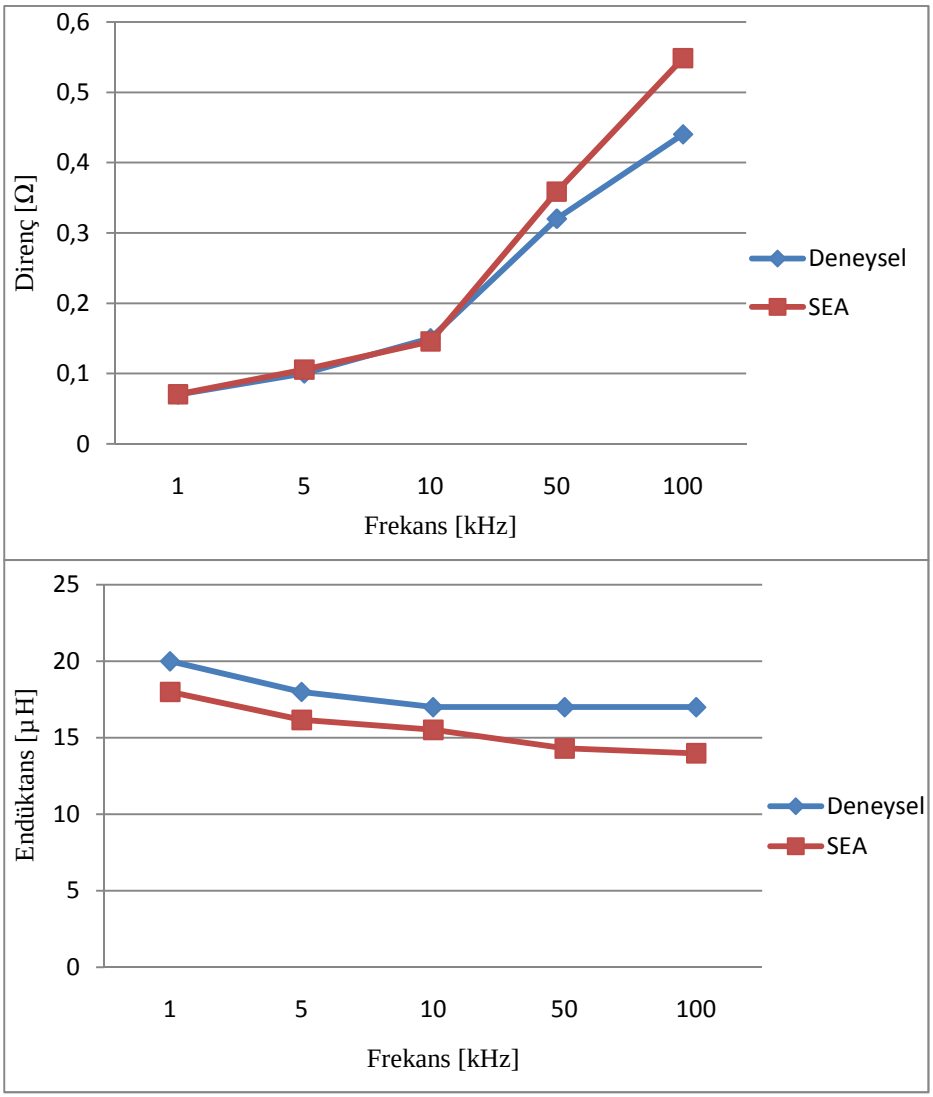


Şekil 5.19 : Tek tel ile sarılmış bobin modeli ve oluşturulan üçgen sonlu elemanlar

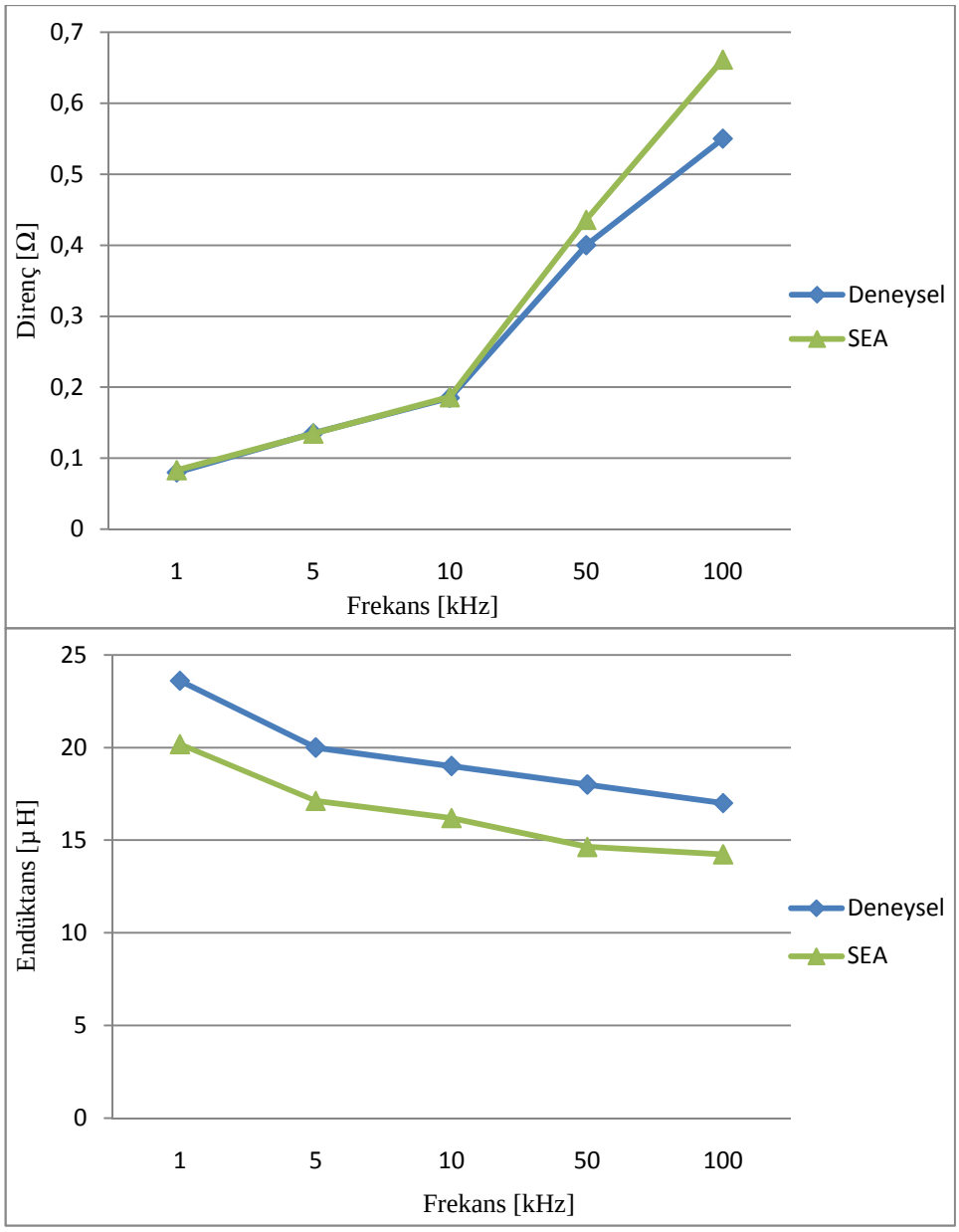
Bu sayısal sonuçlar bir grafikte deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır ve sonuçlar aşağıda verilmiştir. Şekillerden de görüldüğü gibi sonuçlar oldukça yakındır. Frekans değişimi ile endüktans ve direnç değerlerinin yakın olması yerine aynı şekilde değişmesi bile büyük bir kazançtır çünkü bu şekilde sistemin gerçekte değişimi görülebilir. Ancak analiz sonuçları gösteriyor ki analiz edilebilecek boyutlarda bir bobinin, malzeme özellikleri ve geometrisi tam olarak bilindiğinde, oldukça iyi bir şekilde endüktans ve direnç değerleri hesaplanabilmektedir. Ortalama olarak hata oranı %10-20 civarındadır.

Ek olarak tüm sistemdeki kayıplar ile tencere üzerindeki kayıplar Maxwell yazılımında oldukça kolay bir şekilde ayrıştırılabilmektedir. Bu ayrıştırma analizciye bobin tasarımında görülen direncin ne kadarının tencere direnci ne kadarının bobinin

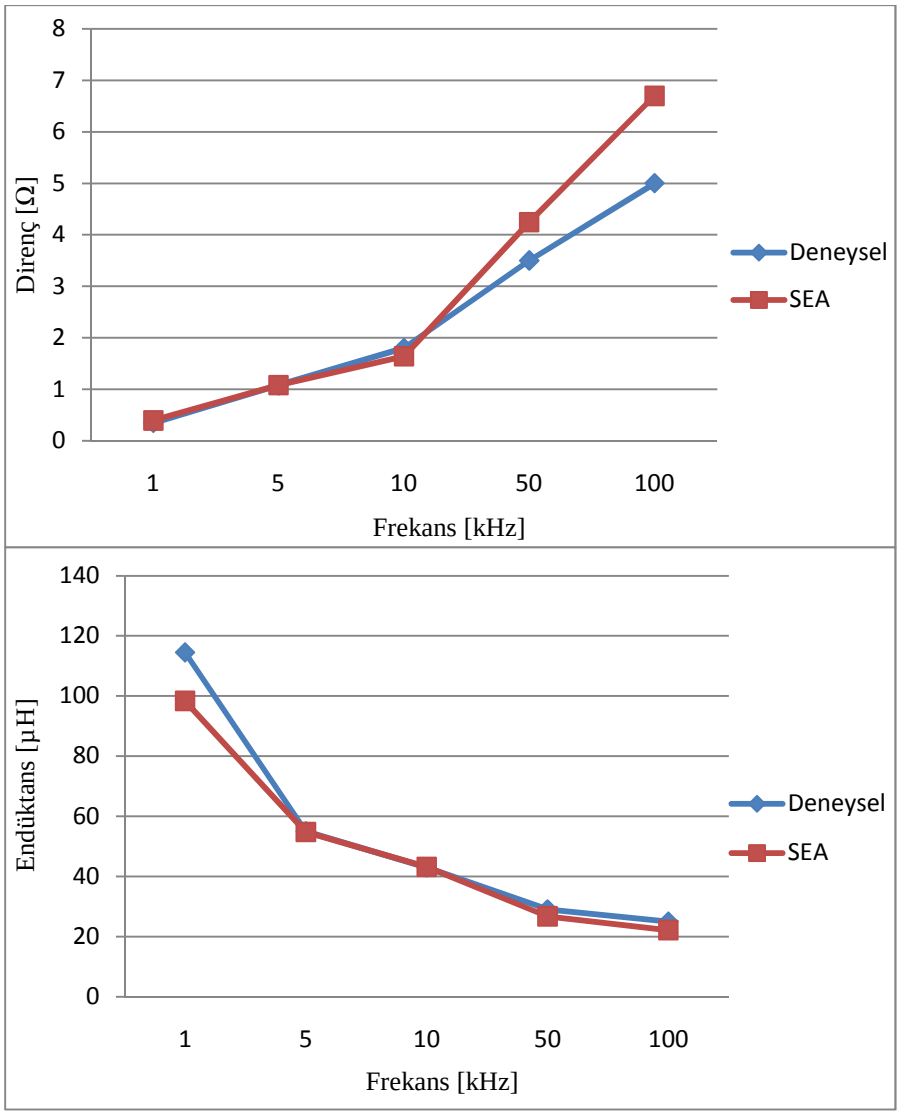
bakır direnci olduğu konusunda da fikir vermektedir. Bu ayrıştırmanın doğru bir sonuç verdiği düşüncesi, F114 tencere ile yapılan analizde tencere üzerindeki kayıpların oranının daha fazla olmasıyla desteklenebilir.



Şekil 5.20 : Bakır tencere, SEA ile deney sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 5.21 : Alüminyum tencere, SEA ile deney sonuçlarının karşılaştırılması



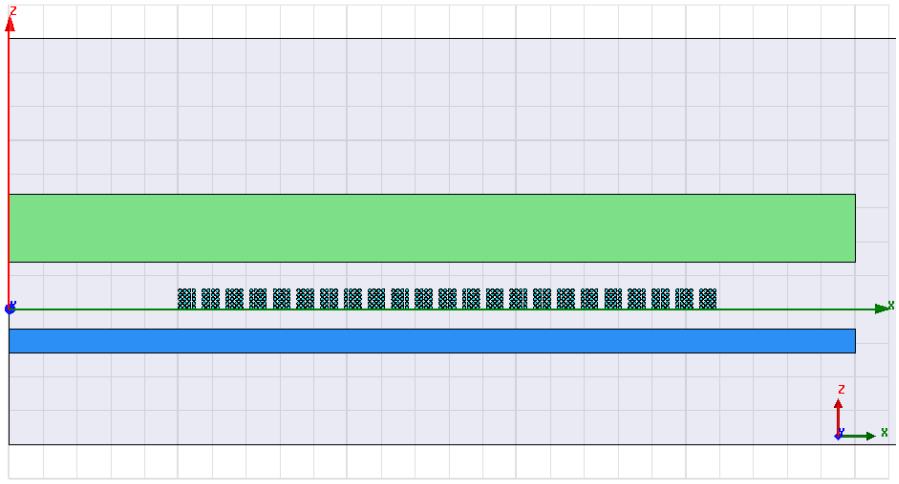
Şekil 5.22 : F114 tencere, SEA ile deney sonuçlarının karşılaştırılması

Bu analizlerden endüktans ve direnç bilgisine ulaşılabileceği görülmüştür. Hata payları ise sırasıyla direnç ve endüktans olmak üzere: ferromanyetik tencerede %28'e %17, alüminyumda %18'e %16 ve bakırda %22'ye %12 çıkmıştır. Bu sonuçlardan sonra Litz teli ile sarılan bobinler incelenmiştir.

Modellemede sadece bir açıdan bakış sağlandığı için Litz telindeki burma etkisi modele girilemez ve dolayısıyla fazladan bir hata payı eklenmiştir. Yine malzeme özellikleri ve sistemin geometrik bilgileri söz edilen makalelerden alınmıştır. Önceki analizde bobin sarmak için kullanılan karkas burada da kullanılmıştır. Feritlerin boyutları aynı olmakla birlikte bobine olan mesafesi 3mm'dir. Ferit malzemesinin manyetik geçirgenliği ise bu sefer 2000, elektriksel iletkenliği de 0.1 $(\Omega.m)^{-1}$ olarak verilmiştir. Tencerenin bobine uzaklığı aynı (4mm), ana malzemesi alüminyum olan

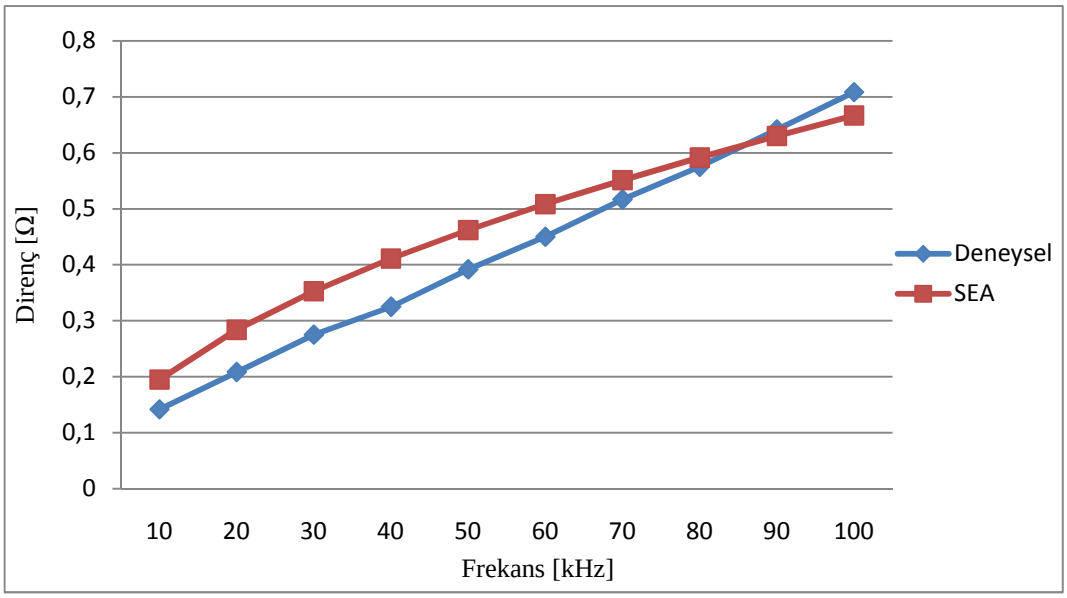
tencerenin iletkenliği ise 3×10^{7} $(\Omega.m)^{-1}$'dir. İlk analizde kullanılan Litz teli 20 adet 0.5mm çapındaki iletkenlerden oluşmaktadır [28]. Analizde bobin yine tepe değeri 30A olan sinüsoidal bir akımla uyarılmıştır. Modelin çizimi Şekil 5.23'da gösterilmiştir.

RLC metre yardımı ile alınan deneysel ölçümler makalede sadece direnç değerlerini içermektedir. Bu sonuçlar EK C'de çizelge şeklinde verilmiştir.



Şekil 5.23 : 20×0.5mm Litz telli model

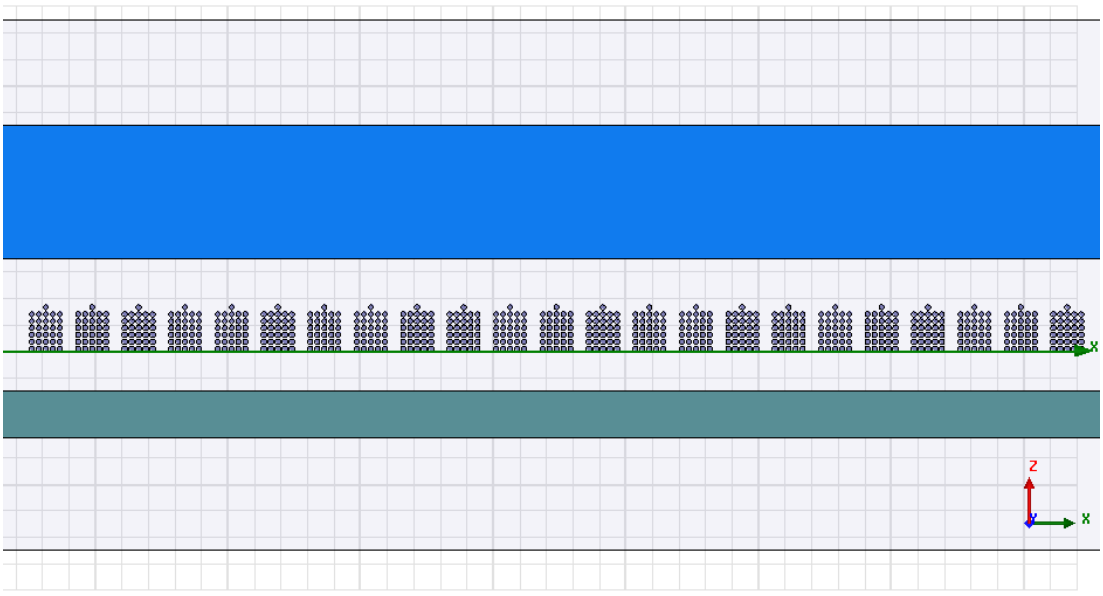
Sonlu elemanlar analizi sonucunda alınan ölçümler EK C'de çizelge şeklinde gösterilmiş, daha sonra da grafikler yardımı ile deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.24 : 20×0.5mm Litz telli sistemin analiz sonuçlarıyla deneysel verilerin karşılaştırılması

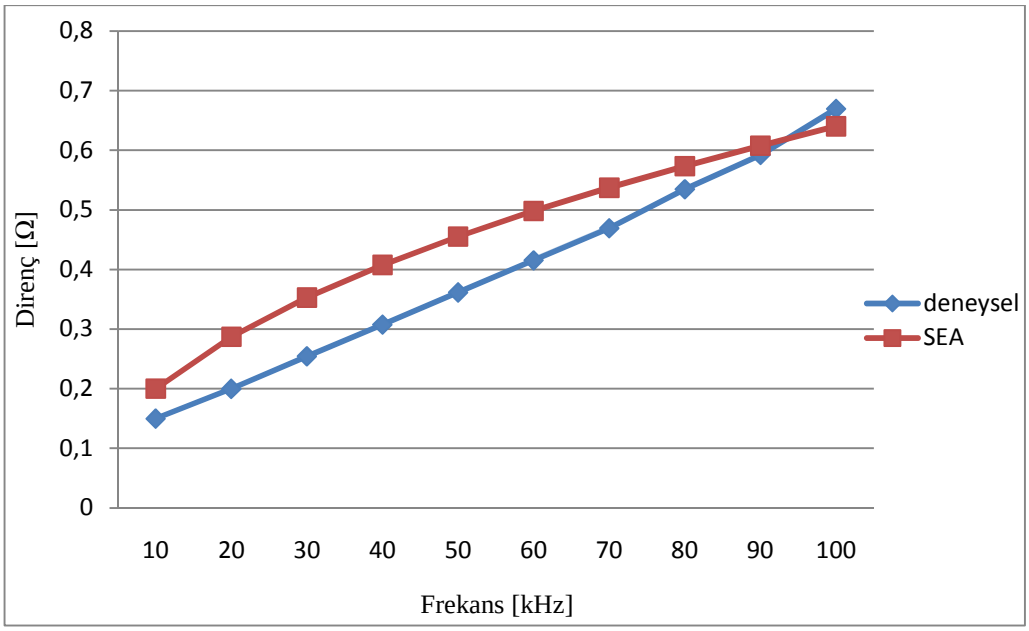
Sonuçlar oldukça yakın çıkmıştır. 20kHz frekansında en büyük hata oranı (%35) gerçekleşmiştir. Direnç değerleri çok küçük olduğu için, deneysel ölçüm ile analiz sonuçları arasında küçük bir fark da büyük oranda bir hataymış gibi görülebilmektedir.

20 iletkenli Litz telinin kullanıldığı sistem analiz edildiğinde analizin sonuçlanması yaklaşık 5 saat gibi bir süre almıştır. Bahsedilen makalede daha karışık bir modelin ölçümleri de mevcuttur. Yine bir önceki çalışmada kurulan sistem kurulmuştur, yani tencere, ferit, sarım sayısı ve sarımların yerleşimi gibi özellikler aynıdır ancak bobinin sarıldığı Litz teli farklı özelliklere sahiptir. Bu Litz teli 31 adet 0.4mm kalınlığında iletkenlerden oluşmaktadır (Şekil 5.25). Bu durumda tüm analizin sonuçlanması 10 saat gibi bir süreyi bulmuştur. Bundan daha çok sayıda tele sahip sistemlerin modellenmesi artık pratik olmamaktadır. Çünkü veriler çok uzun sürede ele geçmekte ve herhangi bir yanlışta sistemin yeniden modellenip çalışması oldukça güç bir sürece dönüşmektedir. Ayrıca bu 10 saatlik süre sadece analizin tamamlanmasıdır. Endüktans, direnç gibi değerlerin elde edilmesi için analiz sonuçlarından sayısal veriler çıkartılmalı ve bu veriler daha önce belirtilen formüllerde kullanılmalıdır.



Şekil 5.25 : 31×0.4mm Litz telli sistemin modeli

Son sistemin deneysel ölçümleri ile analiz sonuçlarında elde edilen veriler ise EK D'de verilmiş, daha sonra da Şekil 5.26'dekarşılaştırılmıştır.

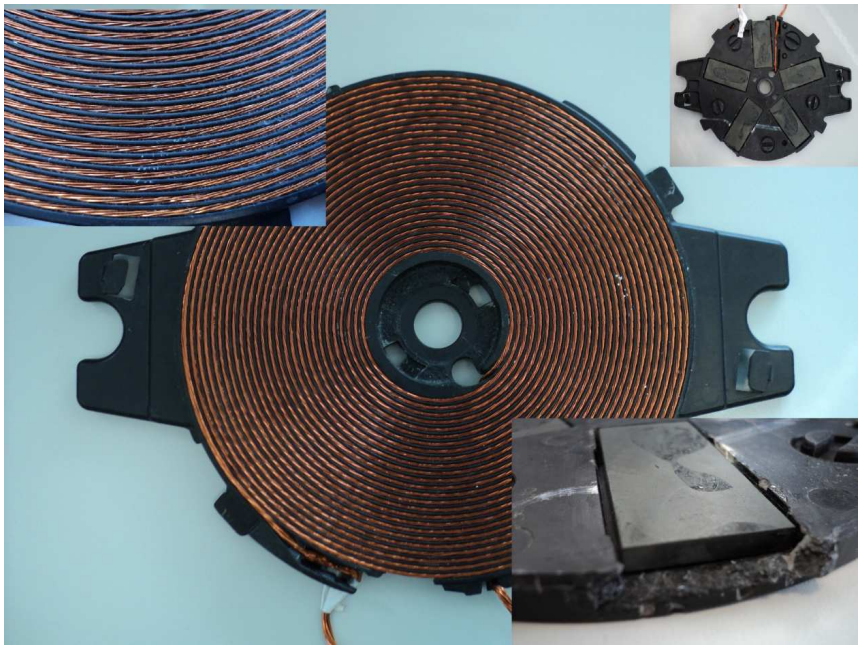


Şekil 5.26 : 31×0.4mm Litz telli sistemin analiz sonuçlarıyla deneysel verilerin karşılaştırılması

Sonuçlarda hata oranı yaklaşık olarak %40 çıkmıştır. Son iki analizde direnç değerleri çok küçük olduğu için hata oranları büyük görünmektedir ancak bu durum yanıltıcı olabilir ki sonuçlar gerçek sistemle ilgili doğru fikirler vermektedir. Daha büyük direnç ve endüktans değerlerine sahip olan ferromanyetik malzeme ile yüklenmiş bobin sistemlerinde gerçeğe oldukça yaklaşılabilmektedir. Ancak asıl önemli olan bu malzemenin elektriksel ve manyetik özelliklerinin tam olarak bilinmesidir. Bu karakteristiklerin çıkartılması kolay bir süreç değildir ancak analiz amacıyla belirli bir malzeme seti oluşturularak analizler gerçekle özdeşleştirilebilir.

Maxwell programının ve sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan analizin verdiği sonuçların endüktans ve direnç hesaplamaları için yeterli olduğu sonucuna varılmıştır. Bu durumda gerçekte elde bulunan ve tüm ölçümlerin bizzat alındığı bir sistem doğrulanmaya çalışılmıştır. Bu bobin de öncekiler gibi bir karkas yardımı ile sarılmıştır. Her sarımın yerleşeceği dikdörtgen bir alan vardır ve buranın genişliği 1.45mm iken derinliği 2mm'dir. Her sarım arasında ise 0.75mm mesafe bulunmaktadır. Bobinin iç çapı yani sarım bulunmayan boş kısmın çapı 44mm, bobinin dış çapı yani son sarımın çapı ise 160mm'dir. Bobin, 14 adet 0.4mm iletkenden oluşan Litz teli ile sarılmıştır. Bobinin üstü ile tencerenin altı arasında 4mm mesafe bulunaktadır ki bu yine aradaki camdan kaynaklanır. Ölçümler alınırken üç çeşit tencere kullanılmıştır. Bu tencerelerden birisi 3mm kalınlığında alüminyumdan yapılmış olup, diğer ikisi de farklı katmanlardan oluşmaktadır.

Paslanmaz çelik malzeme kaplı olan tencere ferromanyetik değildir. En altta 0.77mm kalınlığında ferromanyetik olmayan malzeme, onun üstünde 4.1mm alüminyum ve en üstte yine 0.69mm kalınlığında 304 sınıf paslanmaz çelikten yapılan tabana sahip bir tencere ferromanyetik olmayan çelik tencere olarak isimlendirilmiştir. Diğer tencere ise 432 sınıfından ferromanyetik çelik malzemeden yapılmıştır ve kalınlığı 3mm'dir. Bu malzemelerin özellikleri aşağıda tablo olarak verilmiştir.



Şekil 5.27 : Analizi yapılan 14×0.4mm telden oluşan 160mm'lik bobin



Şekil 5.28 : Analizlerde kullanılan tencereler

Çizelge 5.3 : Analiz yapılan 3 tencere malzemelerinin özellikleri

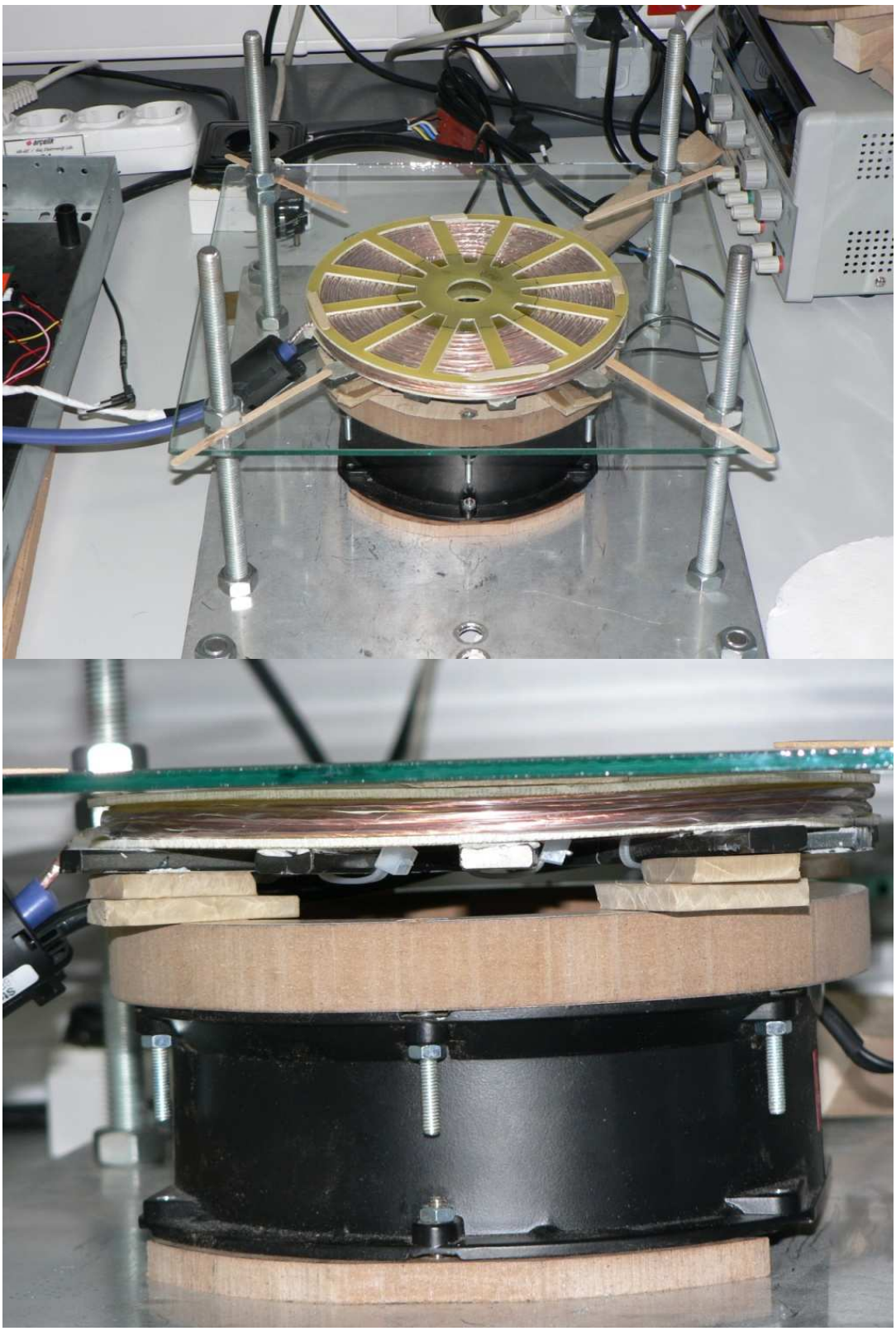
Malzeme	**Bağıl Manyetik Geçirgenlik [μ_r]**	**İletkenlik $(\Omega.m)^{-1}$**
Alüminyum Tencere (Teflon)	1	3×10^7
Ferromanyetik Olmayan Çelik Tencere (304 alaşım)	1	10^6
Ferromanyetik Tencere (432 alaşım)	60	1.67×10^6

Bobinin 1.6mm altında ise ferit malzemesi bulunur. Feritlerin kalınlığı da 4mm'dir ve ilk sarımın izdüşümünden başlar, uzunluğu 55mm'dir. Ferit malzemesi Sef Tech firmasından JR2KBF malzemesidir ve teknik özellikleri aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Çizelge 5.4 : JR2KBF ferit teknik özellikleri

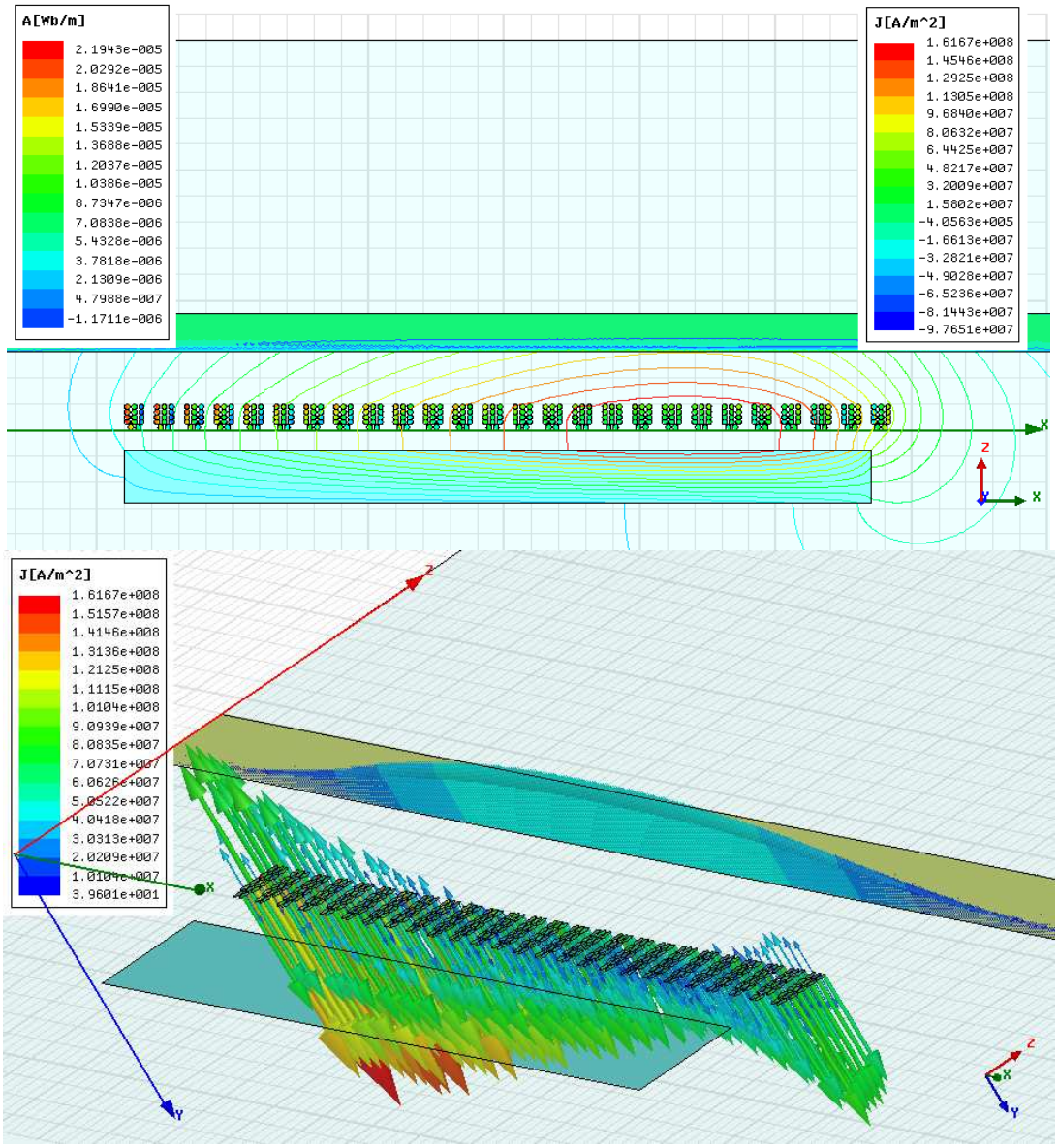
Description	Symbol	Unit	Test Condition	JR2KBF
Initial Permeability	μi		25C	2300±25%
Flux Density	Bs	mT	25C 100C	510 390
			(1194 A/m)	
Coercive Force	Hc	A/m	25C	14
Curie Temperature	Tc	C	1kHz	215 Min
Remanance	Br	mT	25C	95
Power Losses	PL	kW/cm3	f=25kHz B=200mT	25C≤130 60C≤90 80C≤90 100C≤110
Resistivity	ρ	Ω.m		6,5
Density	D	g/cm3		4,75±0,05

İlk olarak bahsedilen model ferromanyetik tencere ile yüklüyken analiz edilmiştir. Şekil 5.29'da RLC metre ile deneysel ölçümlerin alındığı düzenek verilmiştir. Ayrıca bobinlerin yerleştirildiği, hava aralığının nasıl ayarlandığı da bu resimde gösterilmiştir. Resim çekilme anında içinde bulunan bobin, hava aralığı olarak kullanılan cam ve bunların yanında bobini soğutmak amacıyla koyulan altındaki fan da görülmektedir.



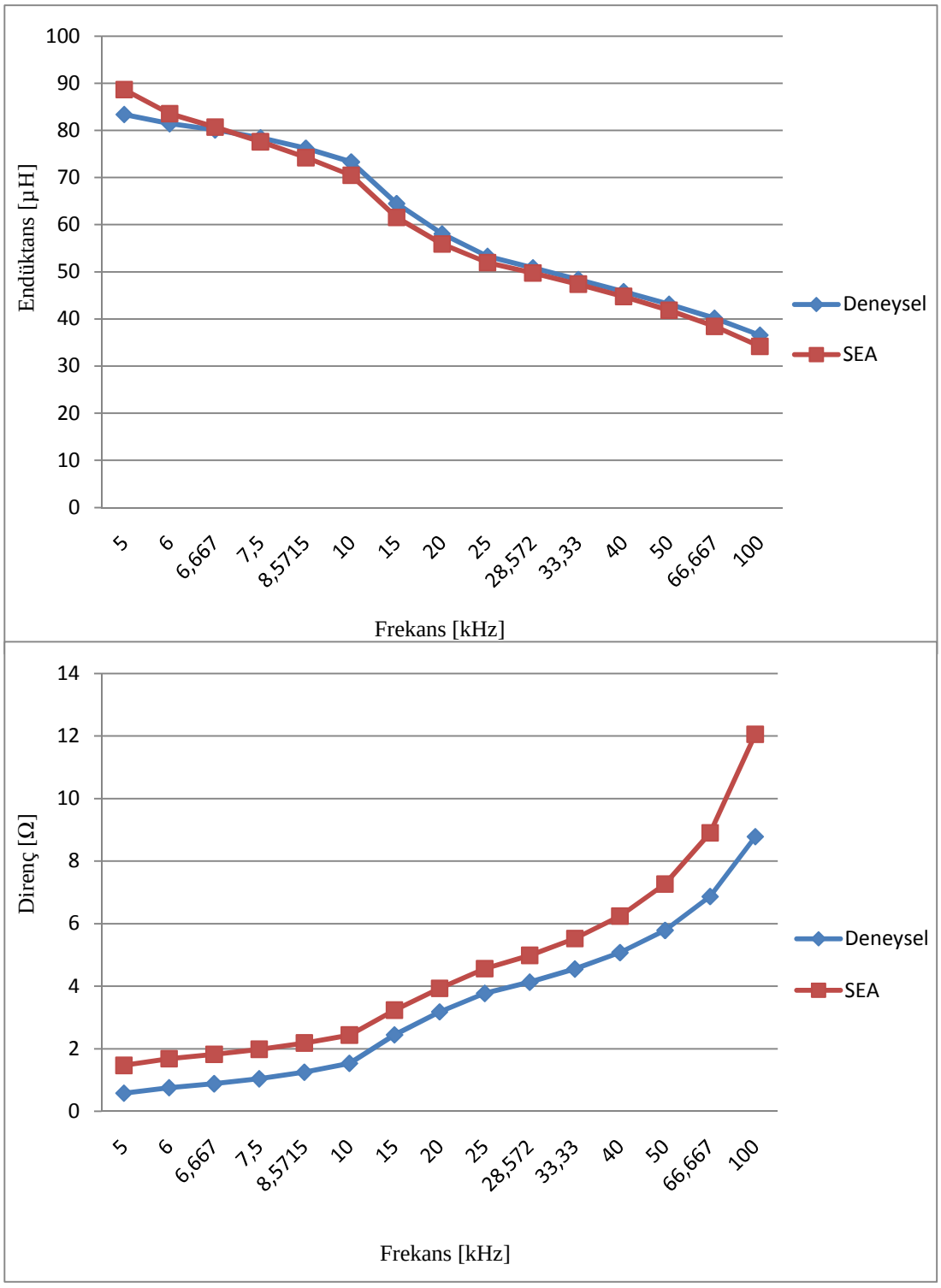
Şekil 5.29 : Bobinlerin yerleştirildiği düzenek

Bobin ferromanyetik tencere ile yüklüyken kurulan SEA modeli ve bu analiz sonucu alan çizgileri, akımlar Şekil 5.30'de verilmiştir.



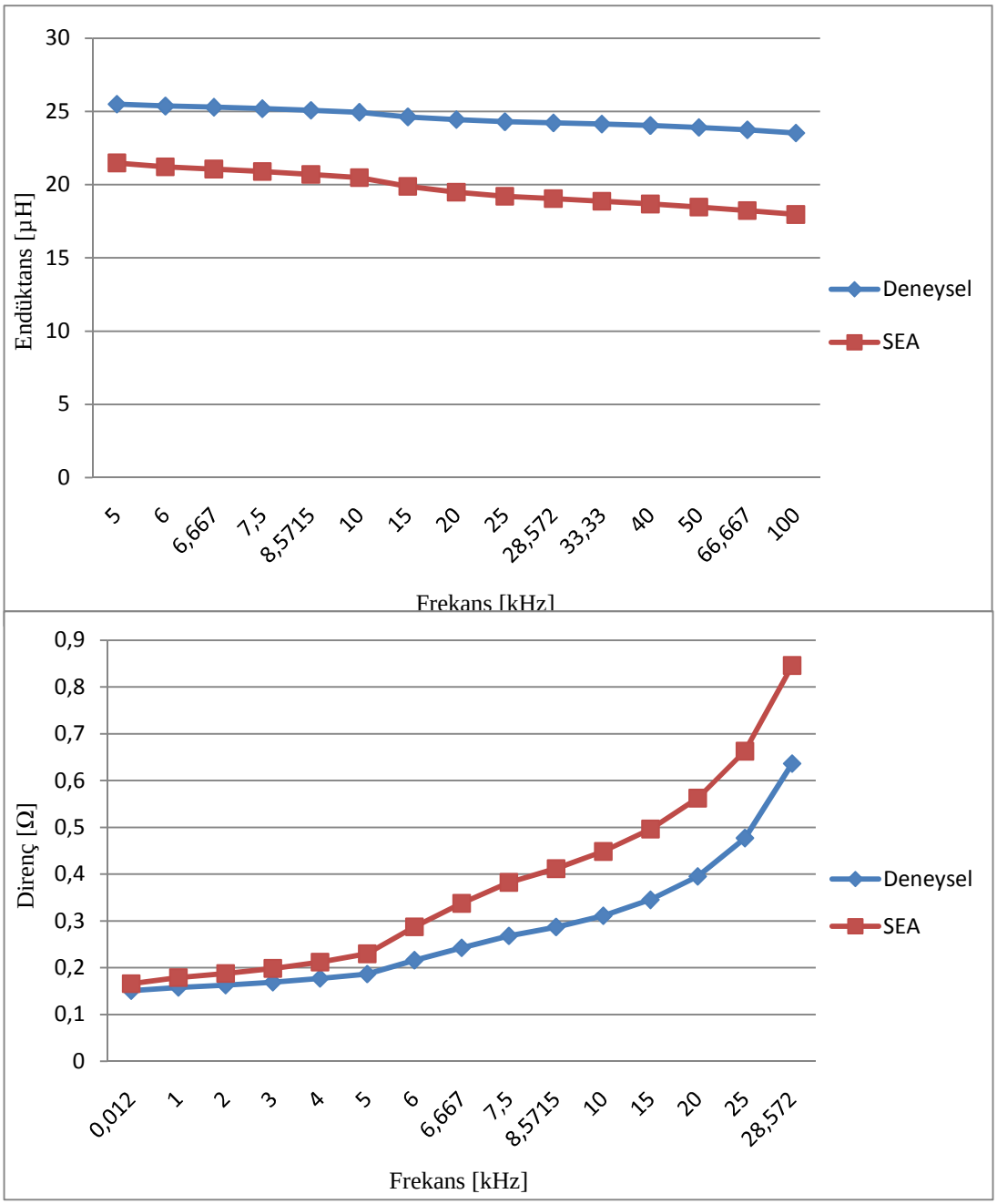
Şekil 5.30 : 160mm çapındaki bobinin ferromanyetik tencere ile yüklüyken analizi (20kHz)

Kurulan model sonucu elde edilen veriler deneysel ölçümlerle birlikte EK E'de verilmiştir. Bu sayısal verilerin karşılaştırılması ise Şekil 5.31'de verilmiştir. Görüldüğü gibi analiz sonucu ile deneysel ölçümler birbirine oldukça yakın çıkmaktadır.



Şekil 5.31 : 160mm bobinin deneysel ve analiz sonuçlarının karşılaştırması

İkinci olarak alüminyum malzemeden yapılmış tencere ile ölçümler alınmış ve analiz yapılmıştır. Kurulan model ve sayısal veriler EK F'de verilirken karşılaştırma sonucu Şekil 5.32'te verilmiştir.



Şekil 5.32 : 160mm bobin alüminyum tencere ile yüklüyken analiz sonuçlarının deneysel sonuçlarla karşılaştırılması

Sonuçlar görüldüğü gibi alüminyum tencere ile sonuçlar ferromanyetik tencereye göre daha hatalı çıkmıştır. Ancak direncin ve endüktansın frekans ile değişimi deneysel sonuçlarla örtüşmektedir. Ayrıca analiz sonuçlarından görüleceği üzere alüminyum tencere ile yapılan analizde toplam güç içerisinde tencerede harcanan gücün oranı küçük ferromanetik tencereye göre düşüktür. Bu durum ferromanyetik tencerenin üzerinde toplam güce göre daha fazla güç aktarılabileceği, yani daha verimli ısıtma sağlanabileceğini göstermektedir. Analiz sonuçlarından ferromanyetik

tencere ile bobin sisteminin verimi %90 civarında iken alüminyum tencere kullanıldığında bu değer %50 civarında kalmaktadır. Aşağıda ve EK G'de verilecek olan ferromanyetik olmayan çelik tencere ile yapılan analiz sonuçlarından ise verim değeri %60 civarında çıkmıştır. Bu durum yapılan çalışmalarda deneysel olarak da görülmüştür. Bir rezonans çevirici çıkışına bağlanan bobinler beslenerek yapılan bu verim çalışmalarında giriş gücü ile tencere içerisindeki 1lt suya aktarılan güç karşılaştırılmaktadır.

Verim ölçümü yapılırken giriş gücü Yokogava firmasının PZ4000 model güç analizörü ile Watt cinsinden ölçülmektedir. Isıtılan suyun 1lt olmasına dikkat edilir ve başlangıç sıcaklığı not edilir. Daha sonra su kaynayasıya kadar yani 100^{o}C oluncaya kadar ısıtılır ve suyun kaynamasına kadar geçen süre kaydedilir. Suya aktarılan güç joule cinsinden aşağıdaki gibi bulunabilir:

$$Q_{su} = m \cdot c \cdot \Delta T \quad \textbf{(5.9)}$$

Burada Q suya aktarılan enerki, m kütle ve c ise malzemenin özgül ısısıdır ve su için 4180J/kg.^{o}C'dir. Verimin bulunabilmesi için giriş gücü Watt cinsinden ölçülüyorsa suya aktarılan güç de Watt olarak hesaplanmalıdır. Bu dönüşüm ise aşağıdaki gibi yapılmaktadır:

$$W_{su} = \frac{Q}{t} \quad \textbf{(5.10)}$$

En son da giriş gücü ile suya aktarılan güç ya da çıkış gücü oranlanarak verim aşağıdaki gibi bulunur:

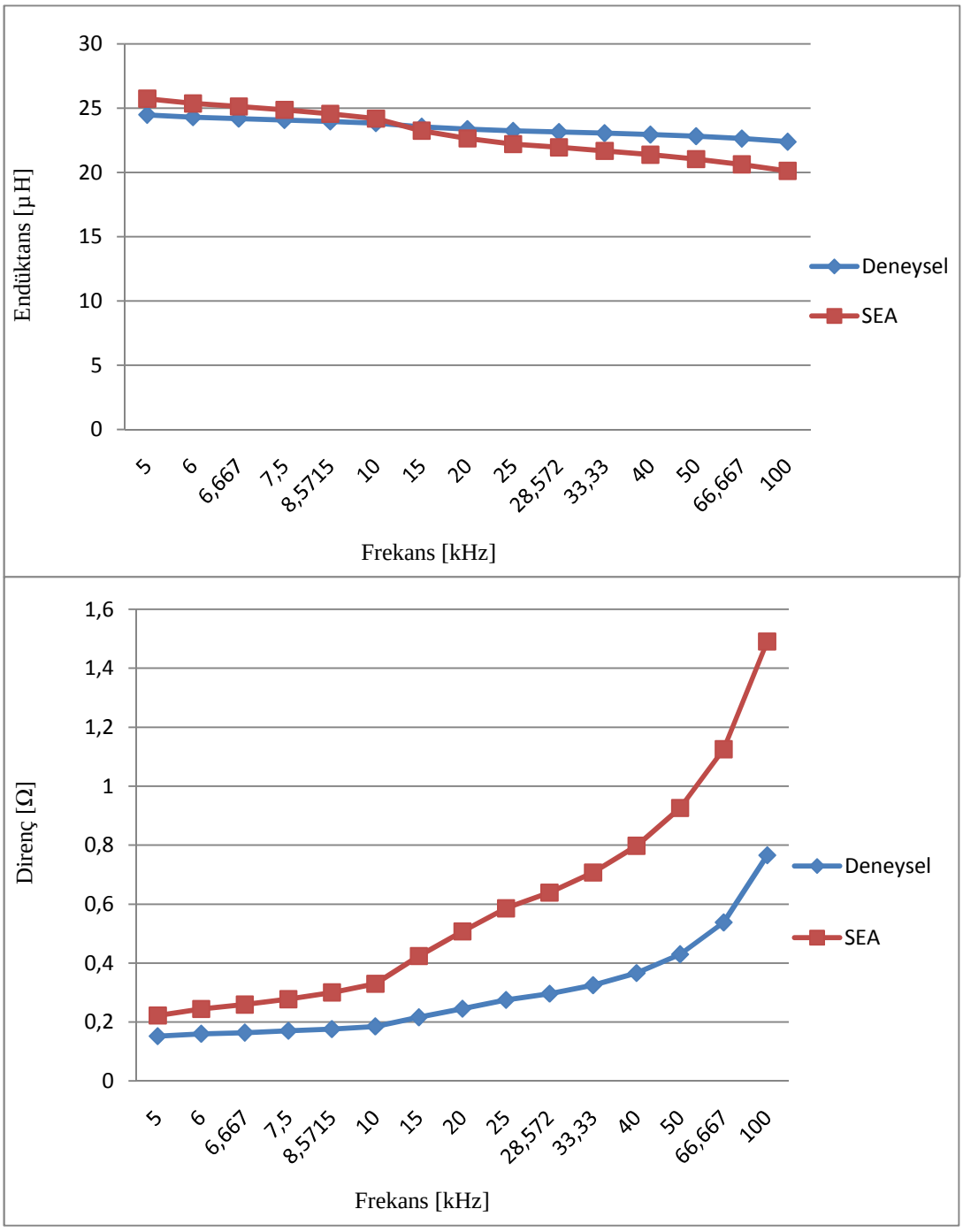
$$\mu = \frac{W_{su}}{W_{giriş}} \cdot 100 \quad \textbf{(5.11)}$$

Son olarak ferromanyetik olmayan çelik malzemeden yapılmış bir tencere ile alınan ölçümler analiz edilerek doğrulanmaya çalışılmıştır.

Burada dikkat edilmesi gereken husus ferromanyetik olmayan tencerelerin ısıtıldığı bobinlerin analizi yapılan bobinlerden farklı olmasıdır. Bu bobinlerde Litz telini oluşturan iletkenlerin çapları 70µm'ye kadar düşmeli ve sayıları da 1000 veya daha fazla olmalıdır [30]. Aksi halde ferromanyetik tencerelerin ısıtılması mümkün olmamaktadır. Bu nedenle analizi yapılandan farklı bir bobinde verim ölçümleri alınarak analiz sonuçlarının doğruluğu görülmüştür. Ölçümler çok kez tekrarlanmış

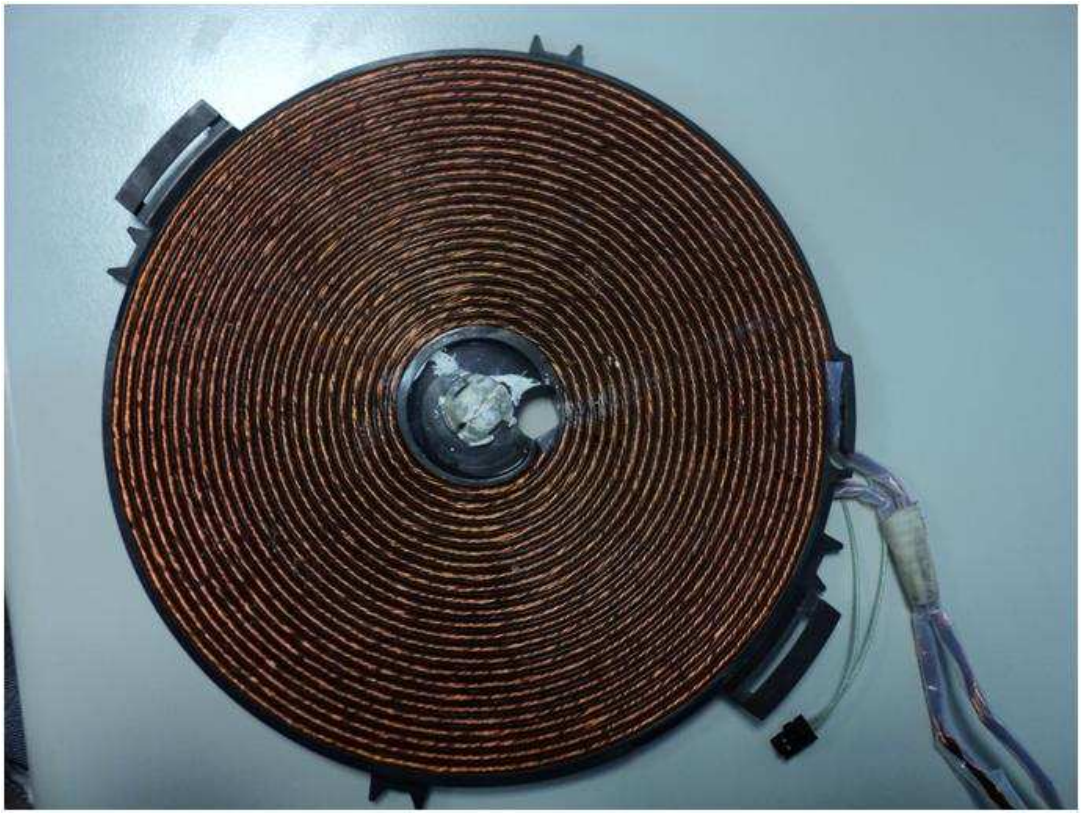
ve ortalamalar alınmıştır. Giriş gücü 1400W iken verimler; ferromanyetik tencerede %83 iken alüminyum tencerede %52, ferromanyetik olmayan çelik tencerede ise %55 ölçülmüştür. Bu değerler analiz sonuçları ile uyum göstermektedir.

Ferromanyetik olmayan çelik tencere ile alınan deneysel ölçümler ve analiz sonuçları EK G'de verilirken karşılaştırmalı veriler Şekil 5.33'de görülebilir.



Şekil 5.33 : 160mm bobin ferromanyetik olmayan çelik tencere ile yüklüyken analiz sonuçlarının deneysel sonuçlarla karşılaştırılması

Sonuçlardan da görüleceği üzere ferromanyetik tencere ile analiz sonuçlarında hata oranı daha az çıkmaktadır. Endüktans ve direnç değerlerinin doğru bir şekilde hesaplanabileceğinin gösterilmesi için aynı ferromanyetik tencere ile başka bir bobinin analizi daha yapılmıştır. Bu bobinin çapı 180mm olup kullanılan Litz teli 22 adet 0.4mm çapında iletkenlerden oluşmaktadır. Arım sayısı 24 olan bobinde her sarım 2.5mm derinliğinde 2.2mm genişliğinde oluklara sarılmış olup sarımlar arasında 0.8mm boşluk bulunmaktadır. Bobin ortasındaki boşluğun çapı ise 40mm'dir. Kullanılan ferit malzeme 3C90 malzemesidir ve bobinin 3mm altındadır. Feritin kalınlığı 3.8mm ve uzunluğu 61.5mm'dir. Tencere ile bobin üstü arasındaki mesafe ise 4mm'dir.

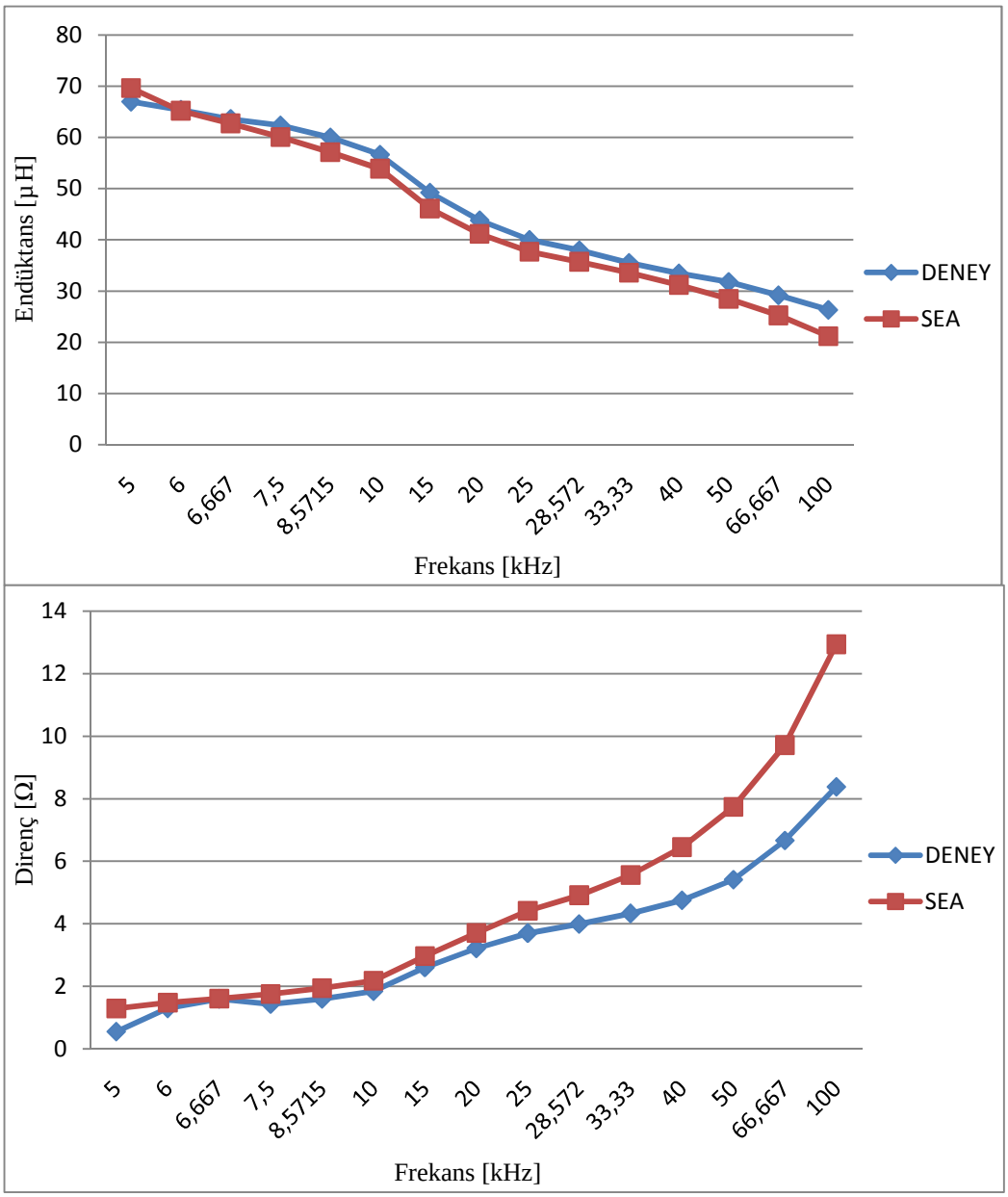


Şekil 5.34 : Analizi yapılan 180mm bobin

Bu bobinin kurulan SEA modeli ve analiz sonuçlarıyla birlikte deneysel ölçümleri EK H' de verilmiştir. Karşılaştırma grafiği ise Şekil 5.35'dedir.

Sonuçlar göstermiştir ki analiz sonuçlarında gerçek değerlere en fazla ferromanyetik tencere yaklaşmaktadır. Tencere ferromanyetik olduğunda akı çizgileri daha fazla tencere üzerinde yoğunlaşmaktadır fakat ferromanyetik olmayan tencerelerde böyle

bir durum yoktur. Hatta ferromanyetik olmayan tencerelerde saçaklanan akıların da daha fazla olması analiz sonuçlarını olumsuz etkilemiş olabilir.



Şekil 5.35 : 180mm bobin ferromanyetik tencere ile yüklüyken analiz sonuçlarının deneysel sonuçlarla karşılaştırılması

Endüksiyon ocaklarını oluşturan iki ana kısmın endüksiyon bobini ve güç elektroniği devresi olduğu daha önce söylenmişti. Bobin tasarımının en uygun noktaya ulaşması için bobin sarılmadan önce birçok özelliğinin bilinmesi istenir. Bu nedenle de modelleme ve analiz etme oldukça önemlidir. Endüksiyon ocağının çalışma şeklini göz önüne alırsak farklı durumlarda, bobinin direncini ve endüktansını önceden hesaplayarak tahmin edebilmek hayati öneme sahip bir konudur. Tasarımcının işini

de oldukça kolaylaştıracak olan bu çalışma ile endüktans ve direnç değerlerinin oldukça iyi bir şekilde hesaplanabildiği yukarıda verilen çalışmalarla gösterilmiştir. Çalışmalardan elde edilen bazı çıkarımlar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

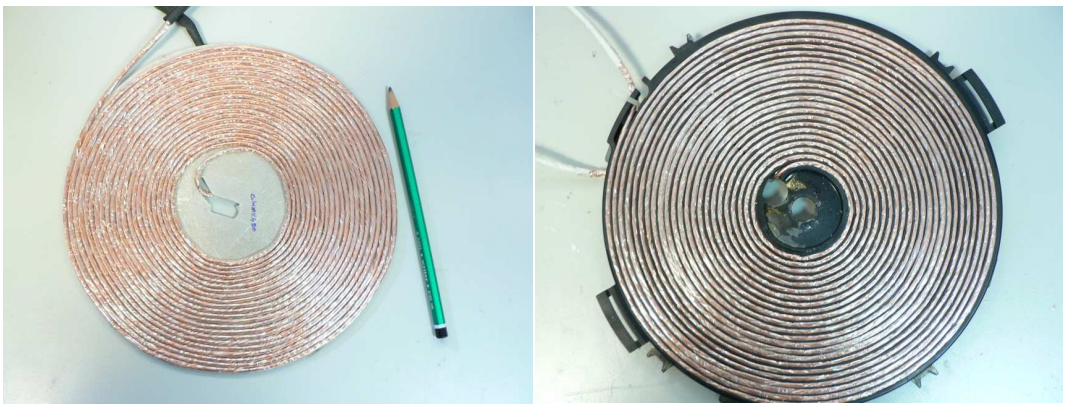
- Ferromanyetik tencerelerin kullanıldığı modeller diğerlerine göre daha doğru sonuçlar vermiştir.
- Ferromanyetik tencere ile yapılan analizlerde endüktans %5, direnç ise %25en yüksek hata ile hesaplanmıştır.
- Modelleme ve analiz ile endüktans ve direncin doğru hesaplanabilmesi için sistem içerisindeki malzemelerin elektriksel ve manyetik özelliklerinin yanında sistem geometrisinin de oldukça iyi bir şekilde bilinmesi gerekmektedir. Çok küçük yanlış girdiler dahi büyük hatalara neden olabilmektedir.
- Kullanılabilecek tüm Litz telleri analiz edilememektedir. Bu tez çalışmasında 31×0.4mm teller analiz edilebilmiş fakat yaklaşık olarak 10 saatlik bir süre almıştır. Daha karmaşık bobin modellerinin (0.2mm iletkenlerden oluşan Litz telleri gibi) analizi ya mümkün olmamakta ya da kullanışsız derecede uzun sürmektedir. Ancak analizlerden de görüldüğü gibi standart bir endüksiyon ocak için yeterli çap ve sayıda bobin analiz edilebilmiştir. 50 A tepe akımı ile 3000-3600W aralığında güçler elde etmek mümkündür ve bu değer 16A sigorta olan bir faz için sınır değerdir.
- Direnç değerini tüm sistemdeki omik kayıplar belirlemektedir ancak tencere üzerindeki kayıplar da ayrı bir şekilde hesaplanabilir. Ferromanyetik olmayan ve yüksek iletkenliğe sahip tencerelerin kullanıldığı durumlarda tenceredeki kayıpların oranı çok düşük olurken, endüksiyonla ısıtmaya uygun tencere malzemelerinin kullanıldığı durumlarda bu oran oldukça yüksektir. Bu durum deneysel olarak alınan verim çalışmalarında da görünmektedir.
- 160mm'lik bobinin deneysel olarak alınan ölçümlerinde ferit malzeme sadece çubuk şeklinde 6 tanedir ancak analizlerde bobinin altına tamamen ferit yerleştirilmiştir. Bu durum analiz sonuçlarında olası bir hataya neden olmuştur, çünkü bir ihmal söz konusudur.
- Ferit geometrisi ve malzemesi, tencere ile bobin arasındaki hava aralığı mesafesi, sargıların yerleşimi gibi etkenler de sistemde bazı değişikliklerin de sistemde değişikliklere yol açması beklenmektedir. Daha sonraki bölümlerde bunlar incelenecektir.

- Deneysel sonuçlara paralel olarak, en verimli olarak ısıtılan ferromanyetik tencere, daha sonra ferromanyetik olmayan çelik tencere, daha sonra da alüminyum tencere gelmektedir. Örnek olarak 20kHz'de verimler sırasıyla %92, %60 ve %58 çıkmıştır. 66 kHz çalışma frekansında ise verimler %94, %66 ve %59 olmaktadır. Verimlerin deneysel ölçümlerden fazla çıkmasının nedeni güç elektroniği devresindeki kayıpların burada hesaba katılamamasıdır. Bu da düşünüldüğünde deneysel sonuçlar analizde doğrulanabilmiştir.

5.4 Sargıların Yerleşiminin Bobin Tasarımındaki Etkileri

Daha önce 160mm bobin olarak verilen bobinin ayrıntılı güç ve enerji ölçümleri verilmiştir. Bu ölçümlerden endüktans ve direnç değerleri de hesaplanmıştır. Ayrıca bobinin verimi yani tencerede harcanan gücün toplam sistemdeki güce oranı da hesaplanmıştır.

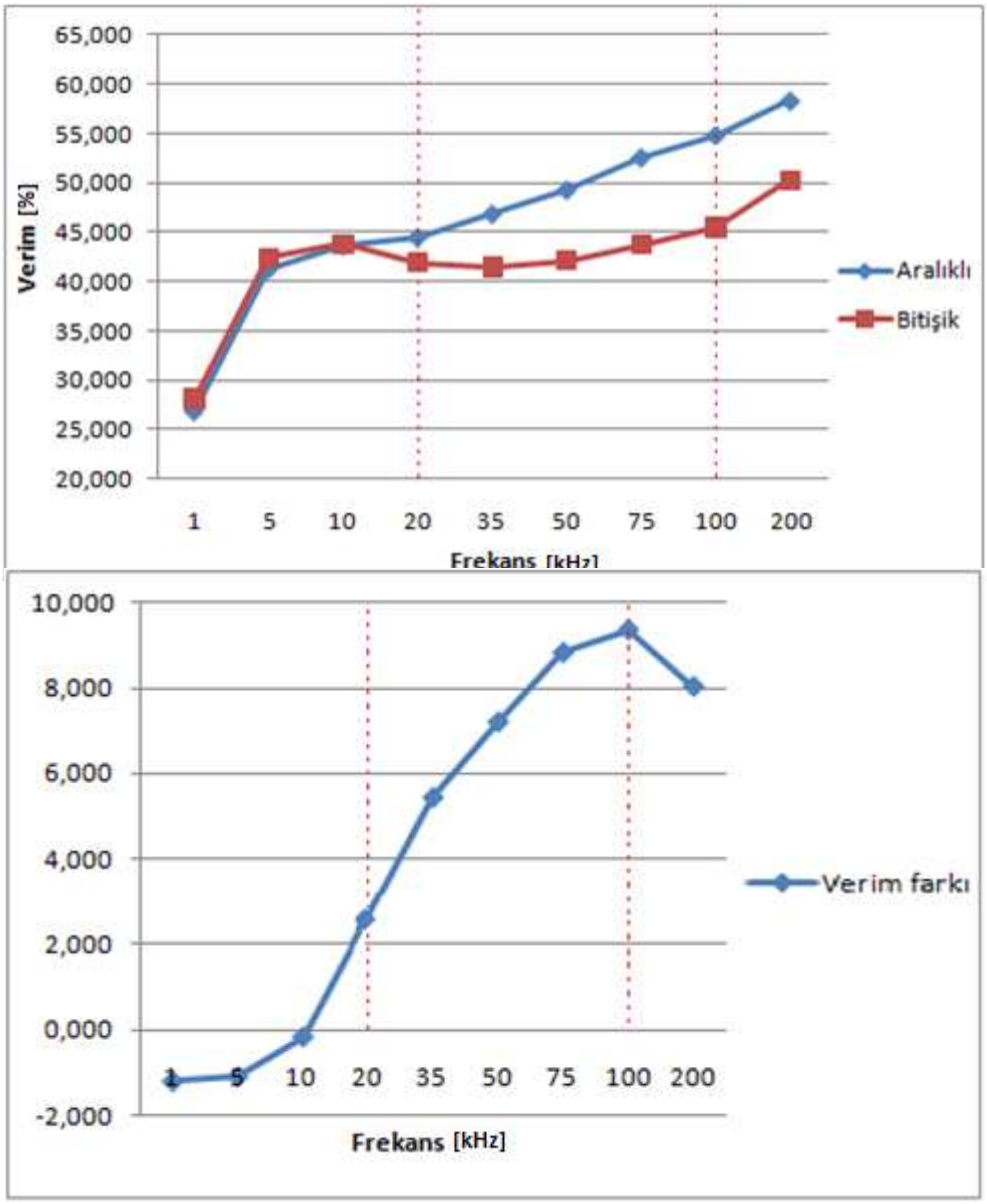
Daha önce de yakınlık etkisinin endüksiyon bobinlerinde bazı kayıplara neden olduğundan bahsedilmişti. Bunun önüne geçmek için bazı farklı burma işlemlerinden geçen Litz tellerinin kullanılmasının yanında bobinler aralıklı da sarılmaktadır. İlk olarak aynı tel yapısıyla aynı sistemin aralıklı ve aralıksız sarıldığı durumlar incelenerek, aradaki farklar ve nedenleri anlaşılmaya çalışılmıştır. Bu iki bobine örnek olarak Şekil 5.36 gösterilebilir. Daha sonra sarım sayısını artırmanın etkilerini gözlemlemek amacıyla bobine ikinci bir kat çıkılmış ve neyin değiştiği gözlemlenmiştir. Sarım sayısının artırılmasının aynı akımda gücü artırması ya da tencere direncinin girişe yansımasını artırması beklenmektedir ve sonuçlardan da görüleceği üzere beklenen durumlar gözlemlenmiştir. En son olarak, çok katlı sarımlarda yeni bir sarım yöntemi kullanılarak aynı sarım sayısının daha küçük bir alana sığdırılması denenmiştir. Aslında resimlerden de görüleceği gibi bobinin orta kısımlarında, yani 15 ile 26. sarımlar üzerinde akı çizgilerinin arttığı bilinmektedir. Sarımların bu civarda çıkartılmasının ya da bu bölgeye yoğunlaşmasının bobin endüktansını normalden fazla azaltması veya artırması beklenmektedir. Ayrıca iç çapın daha büyük olduğu bir tasarım olduğu için daha verimin daha yüksek olabileceği tahmin edilmiştir.



Şekil 5.36 : Bitişik ve aralıklı sarılan bobin örnekleri

Analizlerde tencere olarak verim karşılaştırmasının daha kolay yapılabilmesi için alüminyum kullanılmış, bobin akımının tepe değeri ise 50A alınmıştır. Kullanılan malzemelerin geometrileri ve özellikleri daha önce 160mm bobin olarak verilen bobinle aynıdır. Kurulan SEA modellerinin resimleri ve analiz sonuçları çizelge şeklinde EK I'da verilmiştir.

Sarım sayıları aynı olması nedeniyle endüktans ve direnç değerleri arasında neredeyse fark yoktur. İki sarım şeklinin direnç ve endüktans bakımından karşılaştırması yine EK I'da verilmiştir. Bobinler arasındaki temel farklılık verimdedir. Görüldüğü gibi aralıklı sarım şeklinde iletkenler arası mesafe arttığı için yakınlık etkisinde azalma oluşmuş, sonuç olarak da verimde bir artış görülmüştür. Frekans arttıkça her iletken etrafında daha faza girdap akımı oluşturur ve birbirine yakın sargılarda daha fazla kayıp oluşur. Bu nedenle aralıklı sarımın verim avantajı yüksek frekanslarda daha fazla görülmüştür. Ev tipi endüksiyon ocaklarında kullanılan frekans aralığı Şekil 5.37'de kırmızı kesikli çizgi ile gösterilmiştir. Bu aralık anahtarlama elemanlarının sınırları nedeniyle 100kHz ve insan kulağının duyma sınırı olması nedeniyle 20kHz olarak belirlenmiştir. Şekilden net bir şekilde görüldüğü gibi ev tipi endüksiyon ocaklarda bobinlerin bir karkas üzerine aralıklı olarak sarılması verim bakımından bir avantaj sağlamaktadır. Bu durum deney düzeneği ile alınan verim ölçümlerinde de görülmüştür. Aralıklı sarım bitişik sarıma göre %5 ila %10 arasında daha verimli çıkmıştır.

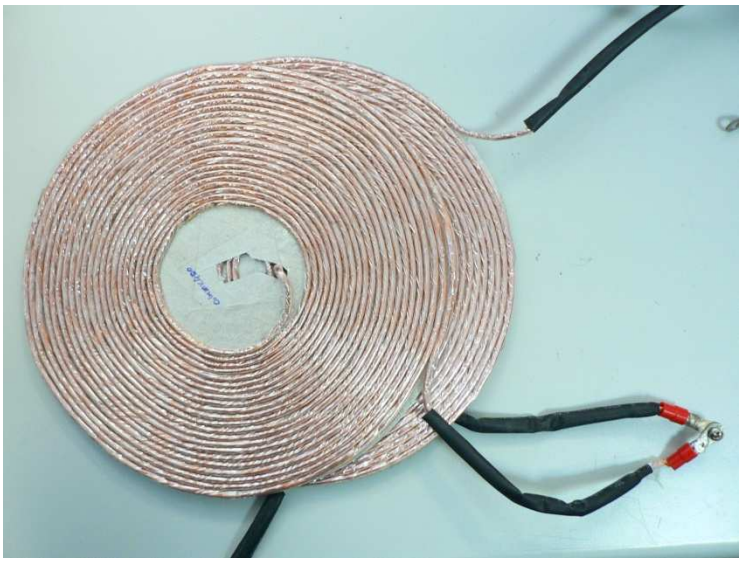


Şekil 5.37 : Aralıklı sarımın bitişi sarım ile verim açısından karşılaştırması

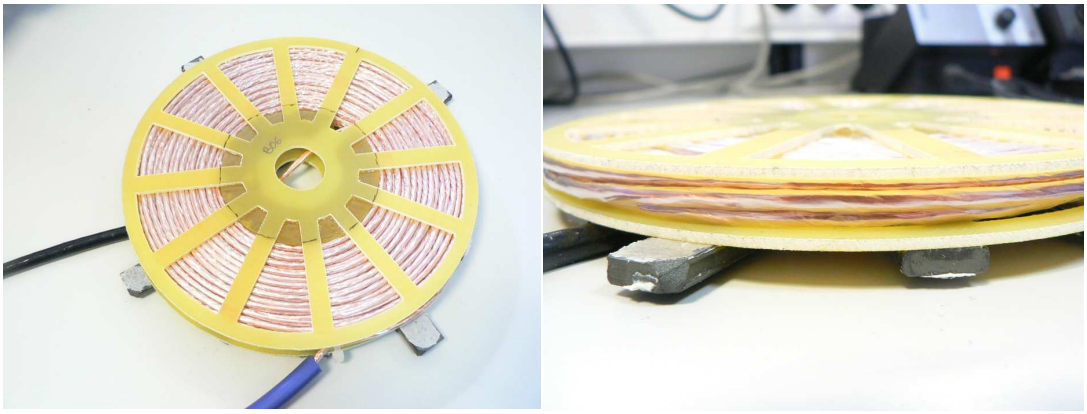
Bazı uygulamalar için bobin tasarımında önemli olan verim değil endüktans ve direnç değerleri olmaktadır. Bu nedenle verimde düşüş olsa bile endüktans ve direnç değerlerini etkin şekilde artıracak bobin tasarımı aranmaktadır. Bu değerdeki en büyük etkiye sarım sayısı sahiptir. Sarım sayısı artırıldığında ise belirli bir çapa sığmak güçleşebilmektedir. Çok katlı sarımlar aynı çapa daha fazla sarım sayısı sığdırmayı mümkün hale getirmektedirler.

Çok katlı bobin sarma şekilleri iki sınıfa ayrılmıştır; normal ve özel çok katlı bobinler. Bu iki bobin modeli deneysel olarak denenmiş ve normal sarım şeklinde %50 verim elde edilmişken özel sarım şeklinde %70 verimler ölçülmüştür. Ayrıca

direnç ve endüktans değerleri de doğal olarak normal sarım şekline göre çok katlılarda artış göstermiştir. Verim bakımından kıyaslandıklarında ise tek katlı bobinler çok katlılardan daha verimli çıkmıştır. Bunun nedeni ise da alt katta kalan bobinlerin tencereye daha uzak olmalarıdır.



Şekil 5.38 : Üst üste koyularak oluşturulan iki katlı bobin



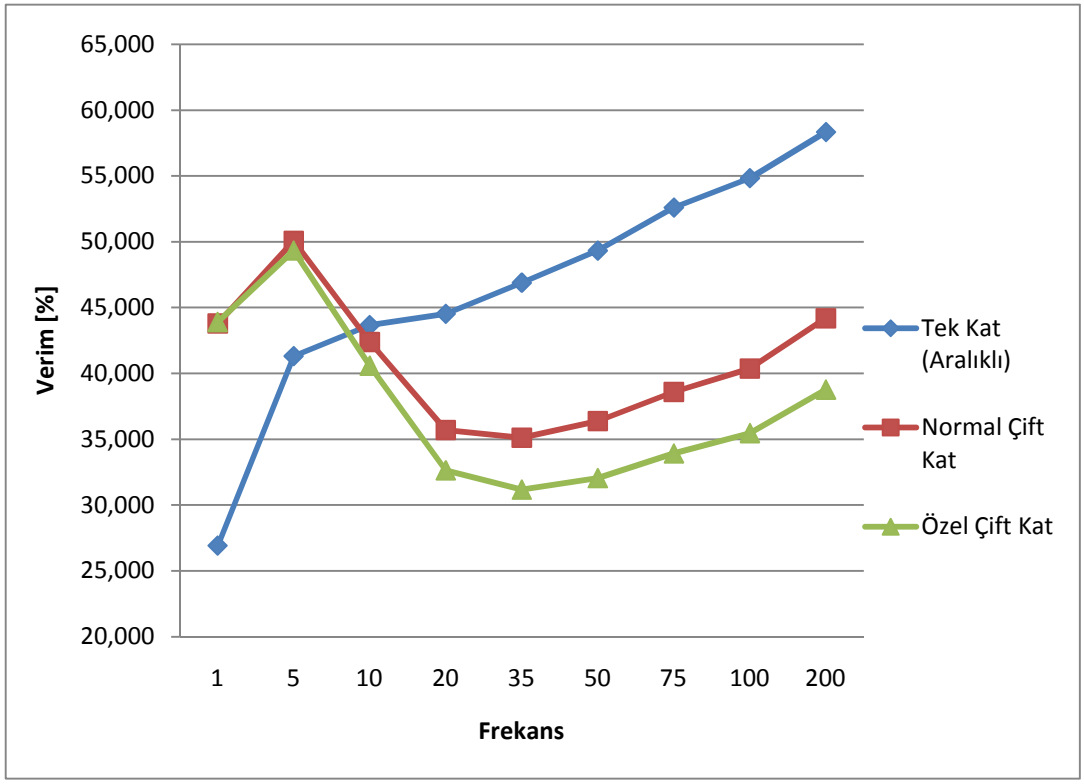
Şekil 5.39 : Özel sarım tekniği ile oluşturulan çok katlı bobin

Oluşturulan modeller ve çizelge şeklinde analiz sonuçları EK J'de verilmiştir. Bobin sarımları ikinci kata çıktığında ve sarım sayısı iki katına çıkartıldığında sistemin taşıdığı güç yaklaşık olarak 4 katına çıkmıştır. Daha önce transformatör benzetmesinde de gösterildiği gibi girişten görülen tencere direnci sarım sayısının karesi ile orantılıdır.

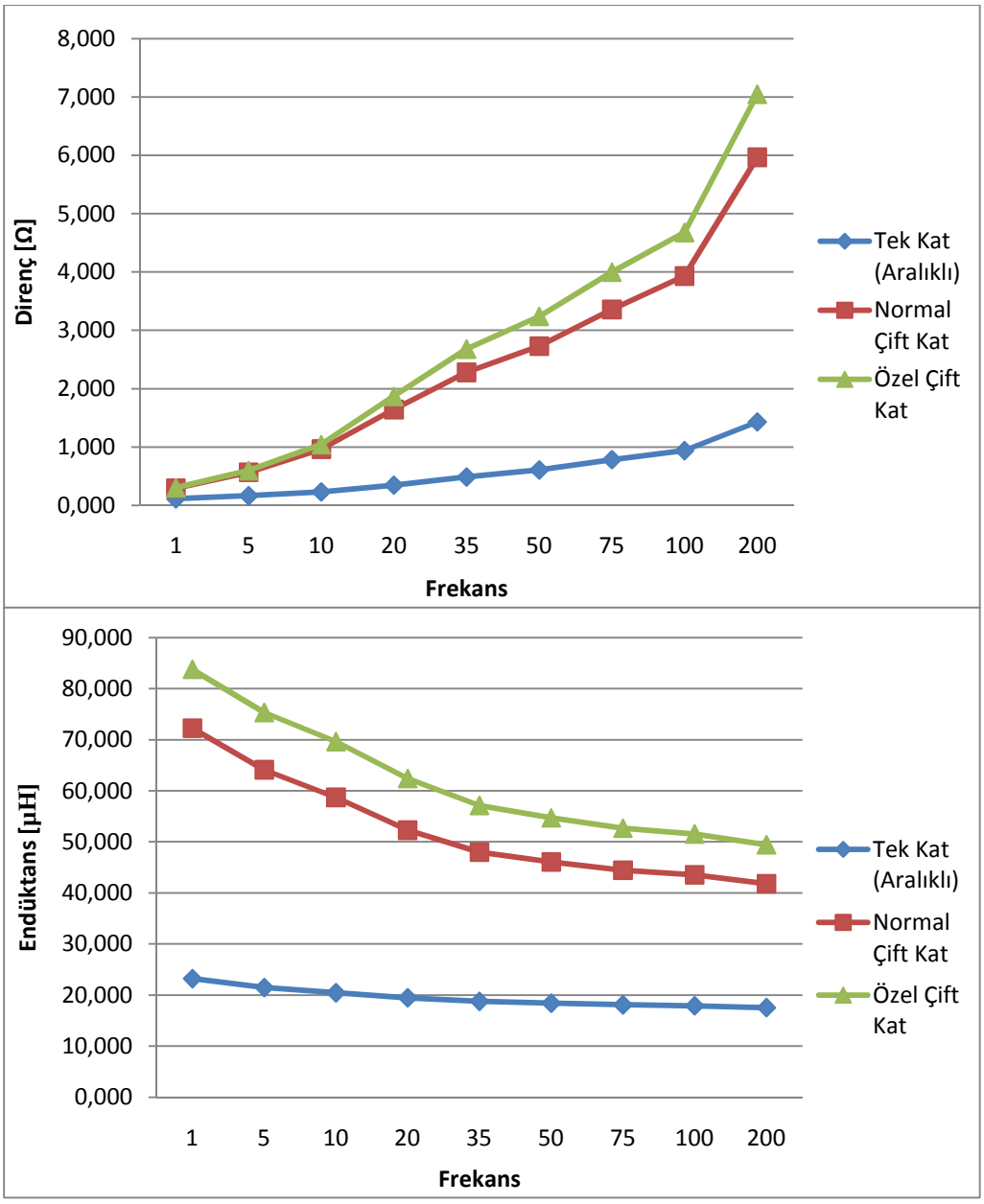
Ayrıca sarımlar ikinci kata çıktıklarında endüktans ve direnç değerlerinde de artışlar görülmüştür. Çevirme oranı (sarım sayısı) arttığı için direnç artışının büyük çoğunluğu tencere direncinin girişe yansımasından gelmektedir. Tenceredeki gücün

tüm sistemdeki güce oranı incelendiğinde ise daha verimsiz bir bobin olduğu görülmektedir. Bu durum deneysel ölçümlerde de görülmüştür, nedeni ise hava aralığı ile ilgilidir. Bunun net bir şekilde anlaşılması için hava aralığı analizleri yapılacaktır ancak deneysel ölçümlerden hava aralığının verimi düşürdüğü görülmüştür.

Analiz sonuçları da deneysel ölçümlerle paralellik göstermiştir. Aşağıda karşılaştırmalar grafik şeklinde verilmiştir. Buradan çıkan sonuca göre bobin tasarımı sırasında amaca göre bir karar verilmelidir. Yüksek direnç veya endüktans isteniyorsa çok katlı bobin kullanılmalıdır. Daha sonraki bölümlerde endüktans artışı için farklı yöntemler de incelenecektir (nüve özellikleri ve hava aralığı) ancak bu etkenler farklı yan etkilere neden olmaktadır ayrıca sarım sayısı en etkili faktördür. Verimin birincil etken olduğu bir endüksiyon ocağı tasarlanırken ise çok katlı bobinler tercih edilmemelidir. Tek katlı bobinler ile daha etkin bir ısıtma sağlanabilir, ayrıca boyut olarak da daha küçük ve kullanılan bakır miktarı da daha azdır. Ancak endüktans ve direnç değerleri çok katlılara göre düşük olacaktır. Ayrıca kullanılacak tek katlı bobin de bir karkasa aralıklı sarılmalıdır.



Şekil 5.40 : Tek kat (aralıklı), özel ve normal çok katlı bobinlerin verim karşılaştırması



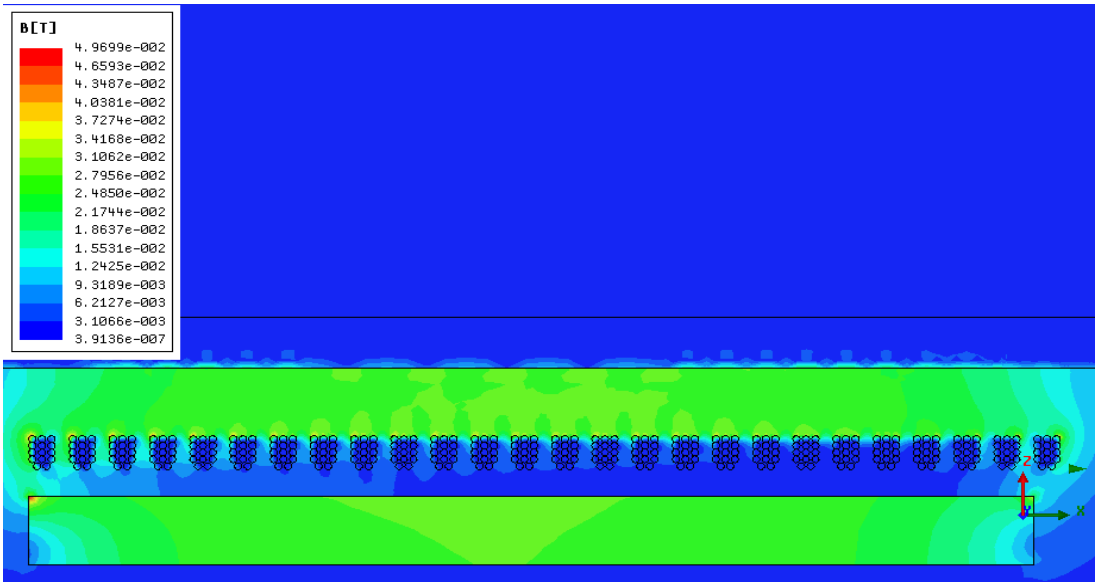
Şekil 5.41 : Tek kat(aralıklı), özel ve normal çift katlı bobinlerin direnç ve endüktans karşılaştırması

5.5 Ferit Malzemesinin Etkisi

İlk olarak ölçümleri alınan, 160mm veya aralıklı bobin olarak geçen bobinin altında kullanılan feritlerin özellikleri Çizelge 5.4'te verilmiştir.

Ferit malzemesinin en temel özelliklerinden birisi doyma akı yoğunluğudur. Bu değerin kritik bir değerde olmadığı Şekil 5.42'ten görülebilmektedir. Analizde akımın tepe değeri 50A'dir ki bu çoğu endüksiyon ocağında görülen en yüksek değerdir. Bu yüzden seçilen feritlerin doyma akı yoğunluğunun daha düşük seçilmesi

fiyat açısından bir avantaj oluşturabilir ancak bu şekilde özelliklere sahip standart bir ürün bulunmamaktadır.



Şekil 5.42 : Aralıklı sarım akı yoğunluğu

Koersif kuvvet ve artık mıknatıslanım değerleriyle birlikte kayıplarla ilgili bazı bilgiler verilmiştir. Bu değerler ferit kayıpları açısından öneme sahiptir ancak deney düzeneklerinin çalıştırıldığı durumlarda ferit sayısının ya da özelliklerinin değiştirilmesinin bobin verimine pek fazla etkisinin olmadığı gözlenmiştir. Ayrıca ferit kayıpları yapılan çalışmada Maxwell programı ile hesaplanamamıştır. Malzemelerin özelliklerine doyma etkisini içeren bir BH eğrisi girilebilmektedir ancak bu eğri histerezis döngüsü şeklinde olmadığı için yazılım aracılığı ile bu kayıplar hesaplanamamıştır. Bu durumda manyetik geçirgenlik ve elektriksel iletkenlik değerlerinin yanı sıra ferit malzemenin kalınlığının da değiştirilmesi ile sistemin nasıl etkilendiği incelenmiştir. Gerçekte üretilen endüksiyon ocaklarında feritlerin bobin alt yüzeyinin tamamını kaplamadığı unutulmamalıdır. Bu durum analizlere bir hata payı eklemektedir.

Bu bölümde incelenmek istenen bir konu da direnç ve endüktans değerinin sarım sayısı artırılmadan ferit ile oynanarak ne kadar artırılabileceğini görmektir.

Kullanılan feritlerin manyetik geçirgenlik, iletkenlik ve kalınlıkları aşağıda sıralandığı gibi değiştirilmiş ve analizler yapılmıştır. Daha sonra analiz sonuçları çizelgeler halinde EK K'de verilmiştir.

- Relative Permeability = 2300, Conductivity = 0.154 $(\Omega.m)^{-1}$, Kalınlık =4mm,

- Relative Permeability = 1000, Conductivity = 0.154 $(\Omega.m)^{-1}$/m, Kalınlık =4mm,
- Relative Permeability = 5000, Conductivity = 0.154 $(\Omega.m)^{-1}$/m, Kalınlık =4mm,
- Relative Permeability = 2300, Conductivity = 0.05 $(\Omega.m)^{-1}$/m, Kalınlık =4mm,
- Relative Permeability = 2300, Conductivity = 0.3 $(\Omega.m)^{-1}$/m, Kalınlık =4mm,
- Relative Permeability = 2300, Conductivity = 0.3 $(\Omega.m)^{-1}$/m, Kalınlık =6mm.

Ferit ile ilgili yapılan analizlerden çıkartılan, bobin tasarımını etkileyici sonuçlar şöyledir:

- Kullanılan yazılımda ferit malzemesinin özelliklerine doyma özelliği girilebilmekte, histerezis kayıpları ise girilememektedir.
- Tüm analiz sonuçlarında ferit üzerindeki en yüksek akı yoğunluğu değeri 50mT çıkmıştır. Ferit malzemesi bu akı yoğunluğunda doyuma ulaşmayacak bir malzemeden seçilmelidir.
- Ferit malzemesinin manyetik geçirgenliği artırılırsa direnç ve endüktans değerlerinde çok küçük artış görülür. Bilindiği gibi bu değerler sistemdeki halkalanan akının artışıyla artmaktadır. Bu bilgilere paralel olarak sonraki maddeler sıralanabilir.
- Ferit malzemesinin kalınlığı artırılırsa direnç ve endüktans değerlerinde çok küçük artış görülür.
- Ferit malzemesinin elektriksel direnci artırılırsa direnç ve endüktans değerlerinde çok küçük artış görülür.
- Verim değerleri birbirine çok yakın olduğu için bir sonuca ulaşmak zordur. En azından ferit malzemesinin sistem verimine etkisinin çok düşük olduğu söylenebilir ki bunun deneylerle doğrulandığı daha önce de söylenmişti.

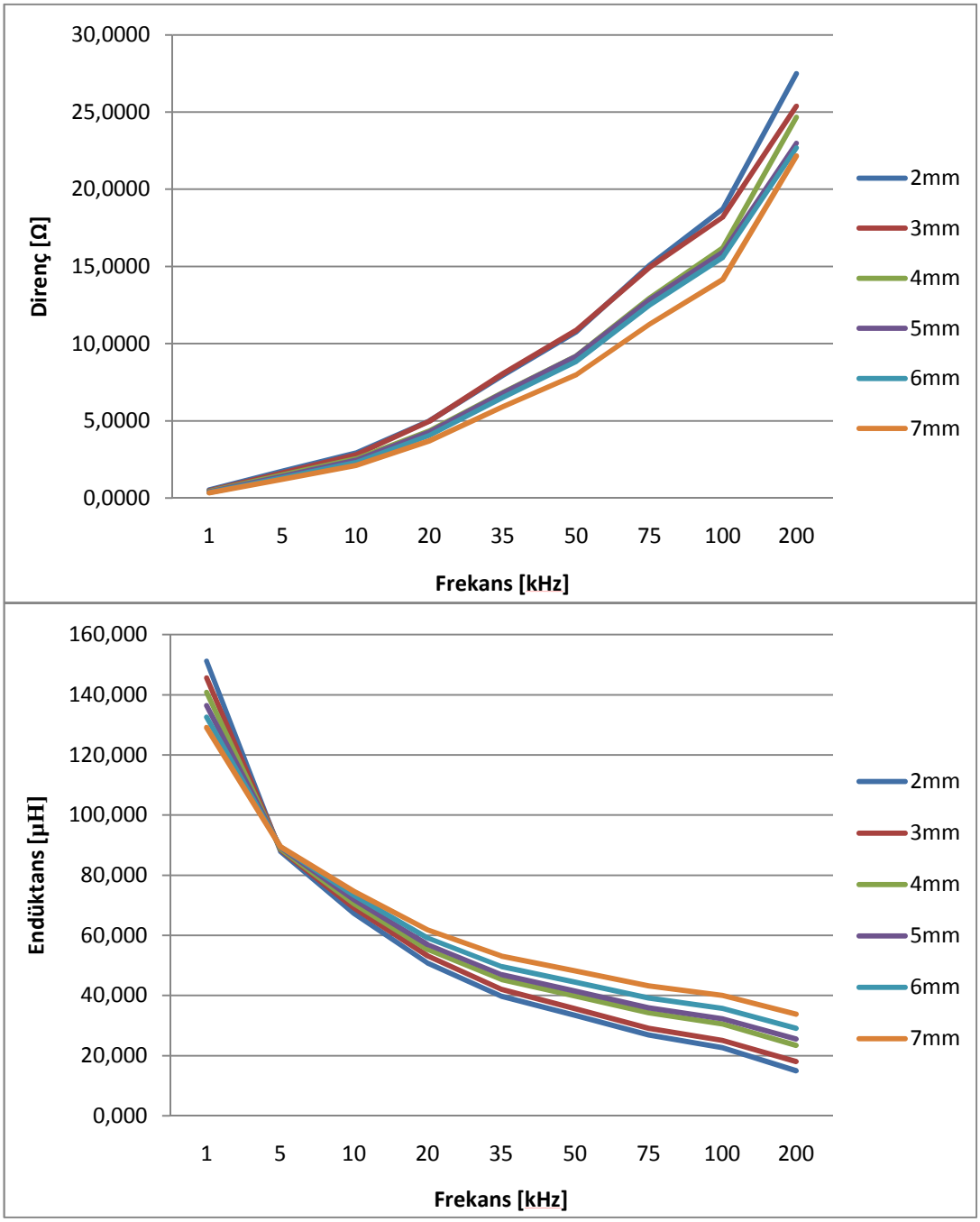
5.6 Hava Aralığının Etkisi

Tencere ile bobin arasındaki mesafe endüksiyon ocak tasarımlarındaki kritik konulardan birisidir. Bu mesafe bobinin üst yüzeyi ile tencerenin alt yüzeyi arasındaki mesafedir. Daha önce 160mm'lik bobin olarak analizi yapılan bobin, tencere sabit tutularak hava aralığı mesafesi 2mm, 3mm, 4mm, 5mm, 6mm ve 7mm iken analiz edilmiştir. Çıkan sonuçlar incelenerek yorumlar yapılacaktır.

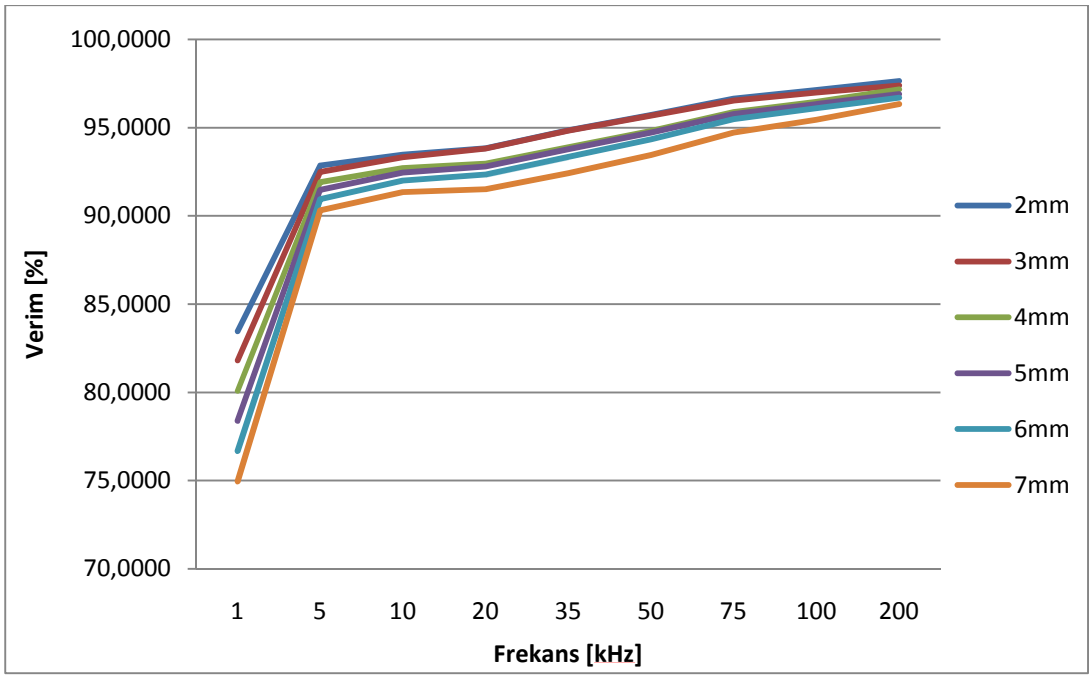
Öncelikle deneysel sonuçlardan bahsetmek gerekirse, birçok bobin çeşidinde yapılan çalışmalar sonucunda hava aralığı arttıkça direncin azaldığı ve endüktansın arttığı

görülmüştür. Sarım sayısı ve ferit malzeme analizlerinin aksine burada direnç ve endüktansın değişimleri ters orantılıdır. Ayrıca verim de hava aralığı ile ters orantılı olmaktadır. Yani tencere bobine ne kadar yakınsa verim o kadar fazla çıkmaktadır. Bu verim farkları çok yüksek olmayıp, çok kez yapılan testlerde 2mm'lik hava aralığı azalmalarının en fazla %5-6 oranında verimi artırdığı görülmüştür.

Kurulan modellerin 4mm hava aralıklı örneği ve analiz sonuçları EK L'da verilmiştir. Karşılaştırma grafikleri ve yorumlar aşağıdadır:



Şekil 5.43 : Hava aralığının endüktans ve dirence olan etkisi

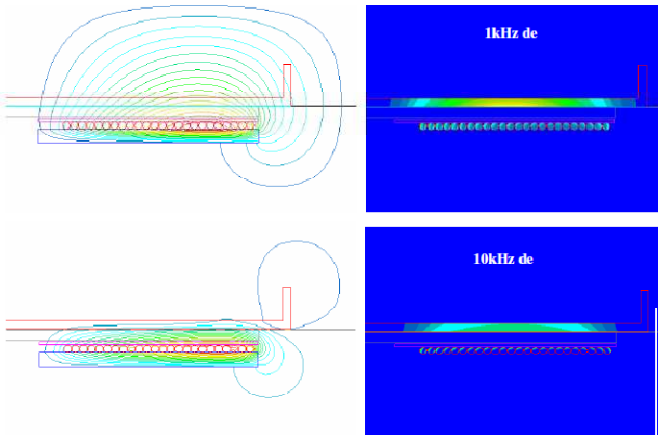


Şekil 5.44 : Hava aralığı değişimi ile endüktans, direnç ve verim değişimleri

- Hava aralığının artışı ile endüktans artarken direnç azalmıştır. Bu sonuç deneysel sonuçlarla paralel çıkmaktadır. Tüm bobinler ve yüklerle hava aralığı artırıldığında endüktans artmaktayken direnç azalma eğilimindedir.
- Hava aralığının artışı ile sistemin verimi azalmaktadır. Kuplajın, ya da etkileşimin daha azalması nedeniyle hava aralığındaki artış verimi kötüleştirir. Bu durum daha önce de açıklandığı gibi deneysel ölçümlerde de paralel çıkmıştır.
- Frekans arttıkça verimler arası farkın kapanması beklenmekteydi ve bu durum da analizlerde gözlenmiştir. Bunun sebebi 5.4 bölümünde aralıklı ve bitişik sargıların kıyaslanması bölümünde açıklanmıştır. Hatırlanacak olursa o bölümde de yüksek frekanslarda aynı mesafede endüklenecek gerilimin ya da akımın frekansla arttığı açıklanmıştır. Burada da aynı şekilde frekans arttıkça tencere üzerinde oluşturulan girdap akımları arttırılır. Bu yüzden frekans arttıkça aradaki fark kapanmaktadır.

Frekans arttıkça verimlerin yakınlaşması durumunu daha net açıklayabilmek için şu örnek verilebilir: ferromanyetik olmayan tencerelerde bilindiği gibi manyetik alan çizgileri tencere üzerinde toplanmaz, girdap akımları etkisiyle tencere altına bastırılır ve orada yoğunlaşır. Ancak düşük frekanslarda bu durum gözlenmez ve tencere hava aralığıymış gibi davranır. Bunun nedeni de düşük frekanslarda tencere üzerinde

yeterince girdap akımının oluşamamış olmasıdır. Bu durum alüminyum tencere ile 1 kHz ve 10 kHz frekanslarda yapılmış iki analiz ile gösterilmiştir. Resimler aşağıda verilmiştir. Bu duruma benzer şekilde hava aralığının verime etkisinin frekans ile azalması da açıklanabilmektedir.

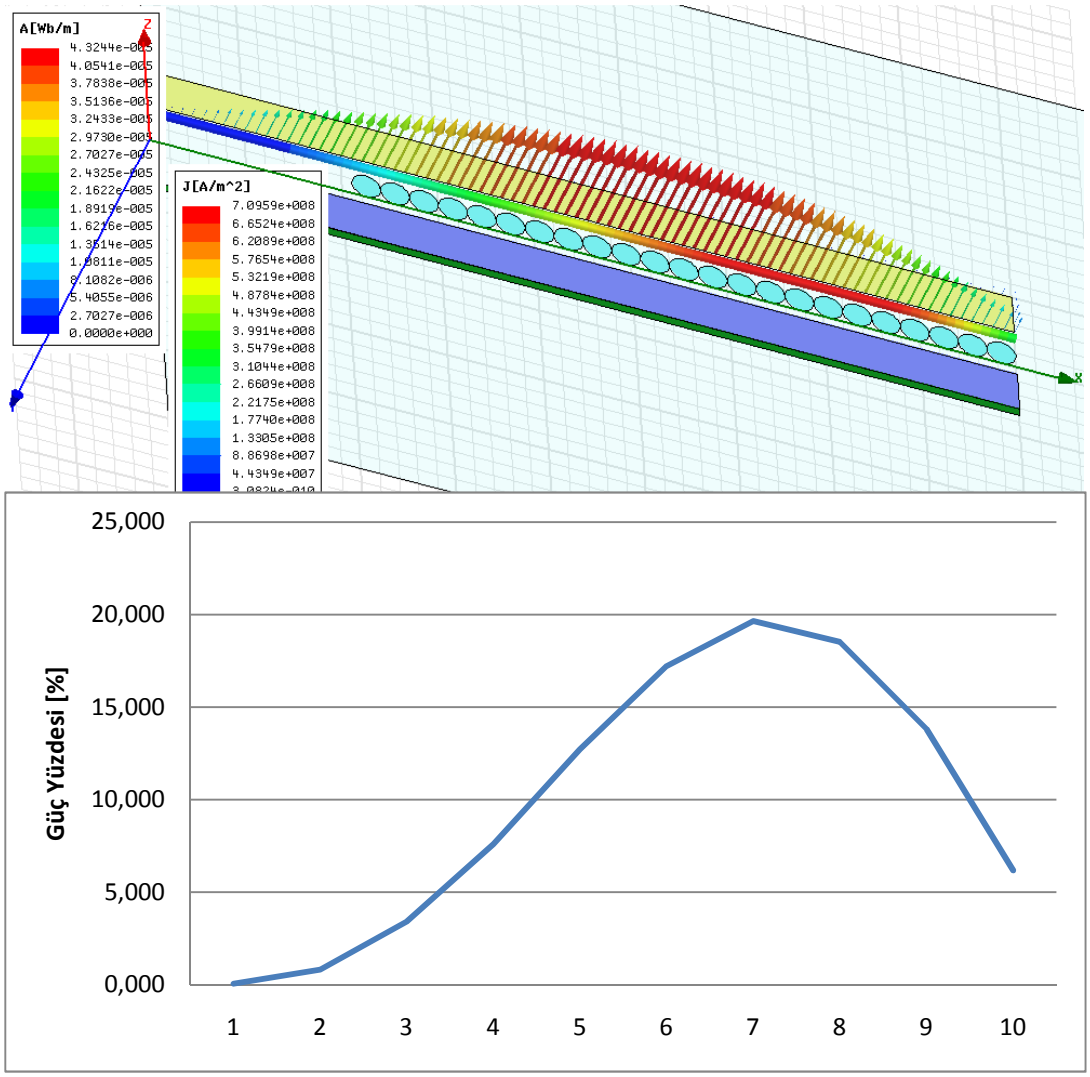


Şekil 5.45 : 1 ve 10kHz'de alüminyum tencere ile manyetik alan çizgileri

Ev tipi endüksiyon ocaklarda kullanılan hava aralığı en az 4mm olmak zorundadır. Çünkü ısıl ve mekanik dayanım açısından kullanılabilen Ceran camların kalınlıkları en az 4mm'dir. Bu durumda tasarımın amacına göre yine seçim yapılabilir. Verimin önceliğinin daha fazla olduğu tasarımlarda hava aralığı sadece Ceran cam yani 4mm olmalıdır (ya da mümkün olduğunca az), endüktansın yüksek olması istenen bir tasarım yapılmak istendiğinde de hava aralığı artırılabilir. Bu artış daha önce verilen sarım sayısının artırılması kadar etkin olmamaktadır ve ek olarak sarım sayısı artırmanın tersine burada hava aralığı arttıkça direnç azalmaktadır.

5.7 Tencerenin Kayıp Karakteristiği ve Kaybın Tencereye Düzgün Yayılması

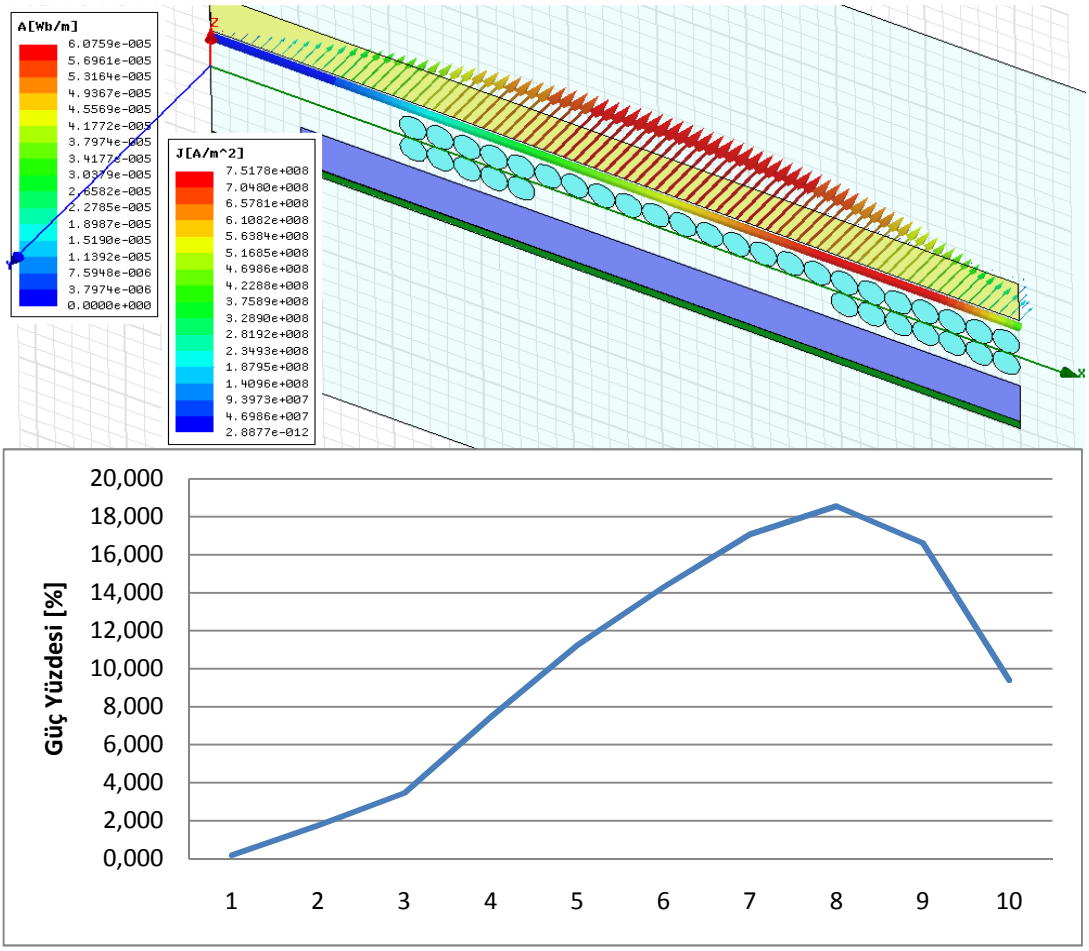
Tencere altında bulunan endüksiyon bobininde akan akımın tencere üzerinde kendine ters bir akım oluşturacağından ve bunun da üretilen ısının ana kaynağı olduğundan daha önce bahsedilmişti. Oluşan akımın ve akı çizgilerinin tencerenin hangi bölgesinde yoğunlaştığı, ısının tencerenin hangi bölgesinde daha etkin bir şekilde oluşturulduğunu göstermektedir. Deri etkisinin ve yakınlık etkisinin ihmal edildiği bir analiz ile girdap akımlarının tencerenin hangi bölgesinde yoğunlaştığı ve akı çizgilerinin en çok hangi bölgeden aktığı incelenmiş, tencere 10 eşit parçaya bölünerek her parçadaki kayıplar hesaplanarak tencere üzerindeki kayıp dağılımı çıkartılmıştır (Bkz. Şekil 5.46).



Şekil 5.46 : Tencere üzerinde akı çizgileri ve akım yoğunluğu

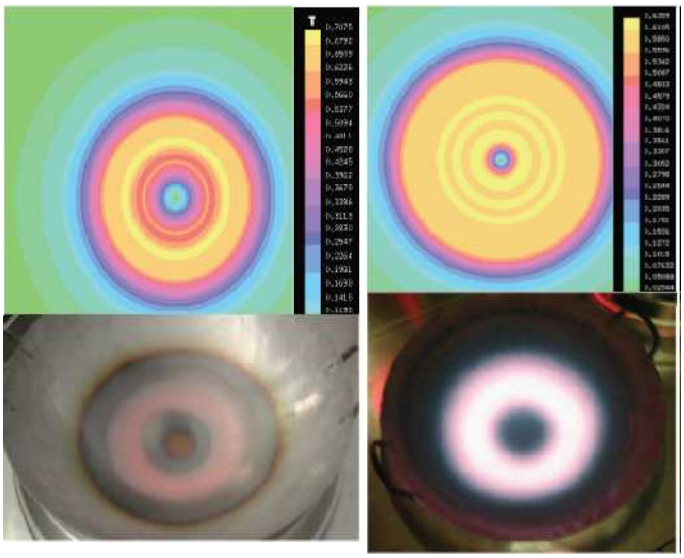
Bu analiz sonuçlarına göre akım yoğunluğunun kırmızı ile gösterildiği yerler diğer bölgelerden daha fazla ısınacaktır. Şeklin üç boyutlu olduğu ve yarısının gösterildiği düşünülürse aynı akımlar tencerenin diğer kısmından devam etmektedir. Yani tencere yüzeyinin bir bölgesinde halka şeklinde nispeten yüksek sıcaklık oluşacaktır. Bunu düzeltmek için ilk olarak akım yoğunluğunun az olduğu bölgelere ikinci kat sargılar eklenmiş ve diğer bölgelerde de akımın yoğunlaşması istenmiştir. Analiz sonuçları Şekil 5.47'de verilmiştir.

Şekil 5.47'den görüldüğü gibi girdap akımlarının daha geniş bir yüzeye yayılması sağlanamamıştır. Akı çizgileri daha dış bölgelerde daha da fazla yoğunlaşmıştır. Bu durum deri etkisi ve yakınlık etkisinin ihmal edilmediği gerçek uygulamalarda daha fazla kayıplara yol açacaktır.



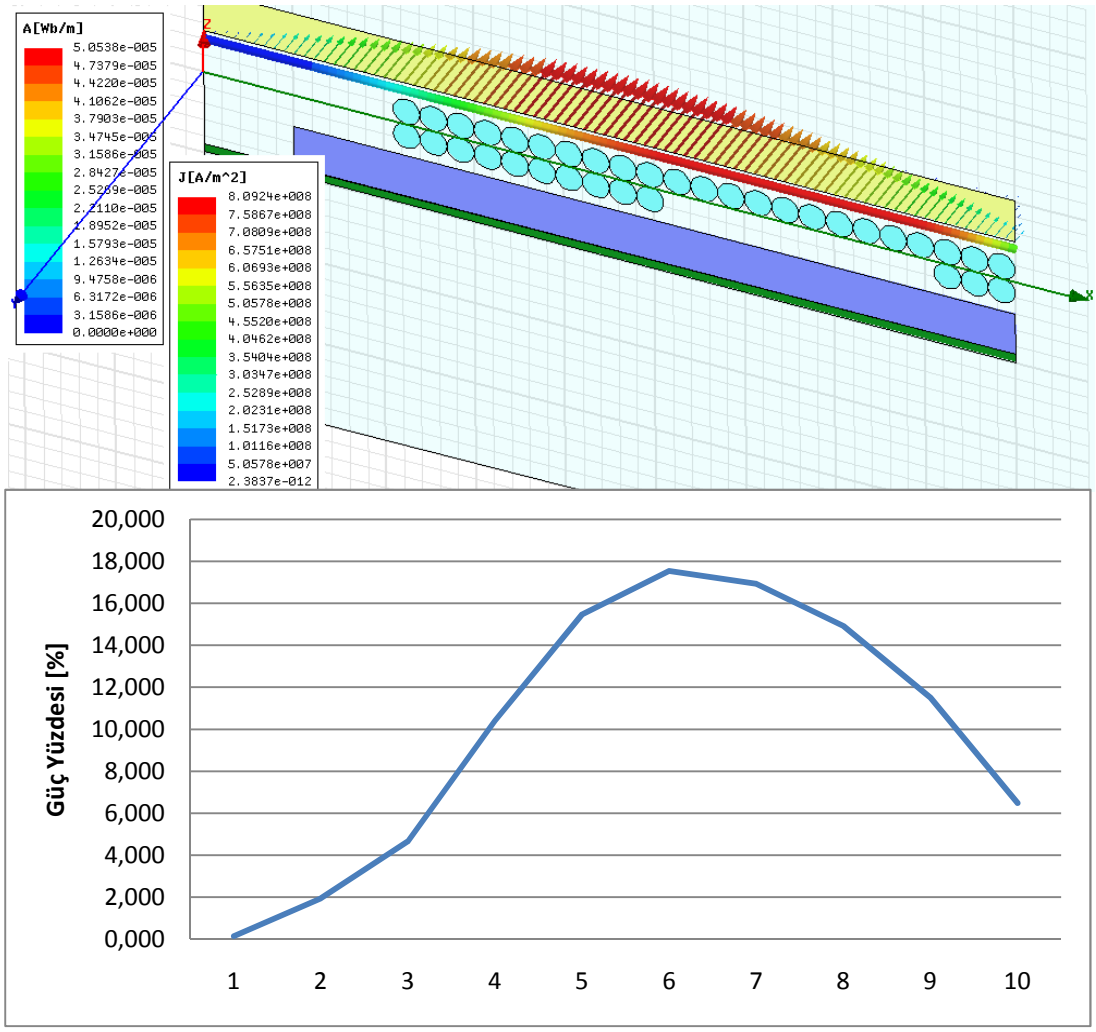
Şekil 5.47 : Akım yoğunluğuna göre düzgün ısı dağılımı çalışması

Daha önce yapılan bazı çalışmalarda manyetik alan dağılımının düzgünleştirilerek eşit ısı dağılımının sağlanabildiği öne sürülmüştür, ancak yapılan çalışma standart düz yüzeye sahip tencereler için değildir [21].



Şekil 5.48 : Eşit manyetik alan dağılımının sağlaması beklenen fayda [21]

Bu çalışma da Şekil 5.47'deki çalışmaya benzer şekilde akı yoğunluğunun daha düşük olduğu bölgelere ek sarımlar yerleştirilerek sağlanmaya çalışılmıştır. Şekil 5.49'da bu çalışma yapılmış ve analiz sonuçları verilmiştir.

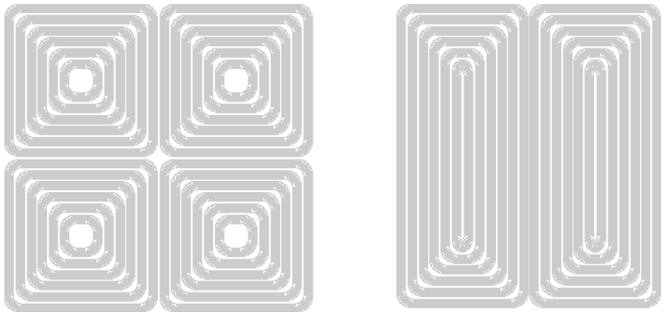


Şekil 5.49 : Akı dağılımına göre eşit ısı dağılımı çalışması

Şekil 5.49'de görüldüğü gibi akı çizgileri daha fazla alana yayılmışlardır. Ancak akım yoğunluğu hala tencere üzerinde aynı bölgede daha yoğundur. Bu durumda eşit ısı dağılımının sağlanıp sağlanmadığı ancak deneysel verilerle doğrulanabilir.

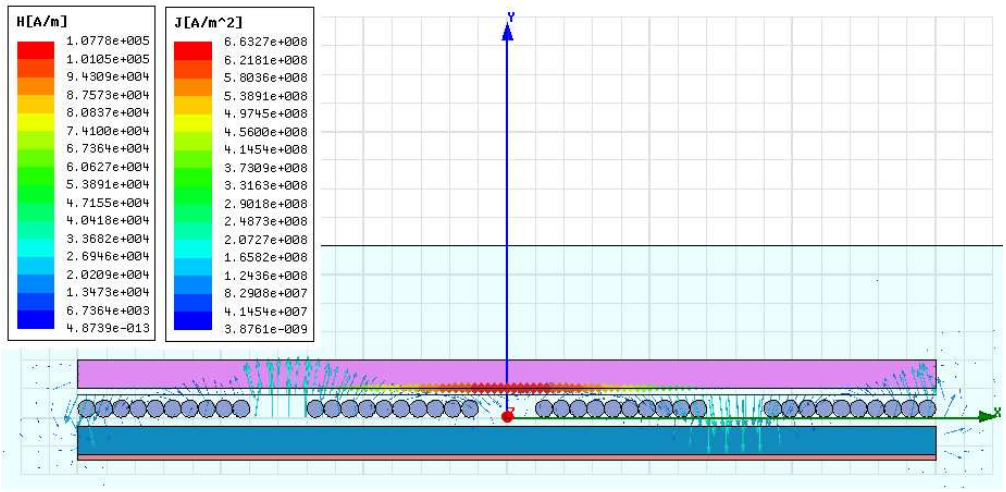
Tüm bu çalışmalara ek olarak daha kesin bir yöntem vardır. Oluşan bu akımları ısı kaynağı olarak düşünüyorsak, bu ısı kaynakları tencere üzerinde birkaç gruba bölünebilir. Belki tamamen eşit bir ısı dağılımı sağlanmaz ama bu şekilde eskisine göre daha iyi bir dağılım sağlanacaktır. Bu ise ancak Şekil 5.50'da gösterildiği gibi bobini birden fazla parçaya bölerek sağlanabilir. Ayrıca buna benzer şekilde birçok küçük bobin yan yana getirilerek tüm endüksiyon ocağı yüzeyi kaplanabilir.

Böylelikle ocak yüzeyinin herhangi bir yerine konan tencereler ısıtılabilmektedir [31].

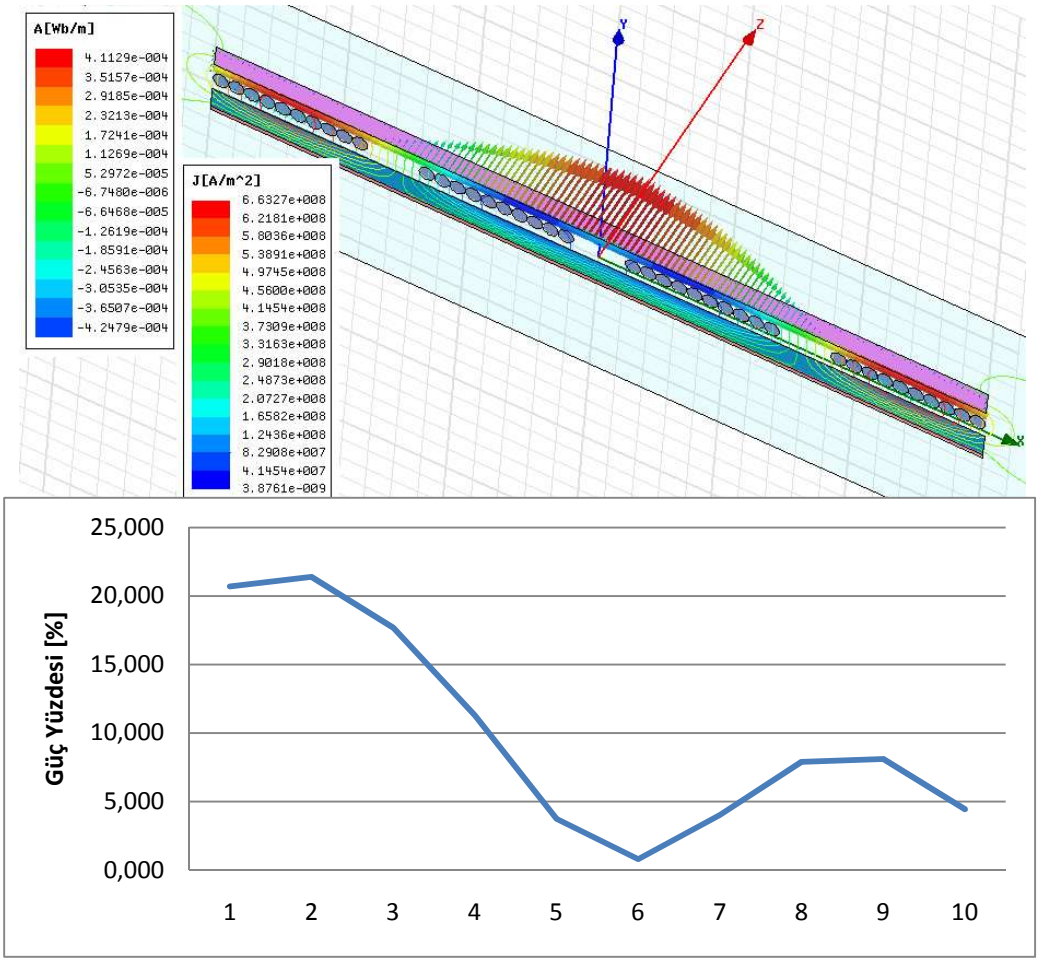


Şekil 5.50 : Çoklu bobin ile eşit ısı dağılımı [31]

Şekil 5.50'de gösterilen sistemler de Maxwell programı ile modellenmiş ve incelenmiştir. Ancak bu modeller daha öncekiler gibi iki boyutlu olarak Z eksenine göre simetrik bir şekilde oluşturulamaz. Ya bir simetri oluşturmadan tüm sistem iki boyutlu bir şekilde modellenecek ya da üç boyutlu bir model oluşturulacaktır. Daha çabuk bir şekilde sonuca ulaştıracak olan iki boyutlu model kullanılmıştır. İlk olarak bobinin iki parçaya bölünmesi incelenecektir. Bu durumun olumlu bir sonuç vermesi ki bu beklenmektedir, daha çok parçaya bölünmüş bir bobinin daha etkili sonuçlar doğuracağını göstermiş olacaktır. Bu sistemlerde kritik bir nokta daha vardır, o da bobinlerden akacak olan akımların yönleridir. Bir bobinde üretilen akı diğer bobinin akılarıyla birleşerek tek bir yol izlerse etkin bir ısıtma sağlanamamaktadır. Bu durum aşağıdaki şekilde, manyetik alan şiddeti vektörleri ve girdap alkımları ile gayet net bir şekilde gösterilmiştir. Bu sistemde bobin gruplarından akan akımlar sırası ile sayfa düzleminden dışarı, içeri, içeri ve dışarıya doğrudur.

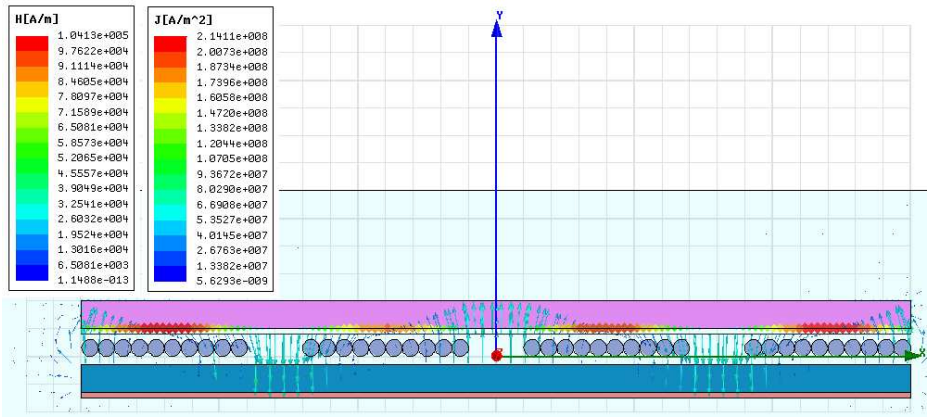


Şekil 5.51 : Yanlış yönde uyarmalı parçalı bobinde akı şiddeti vektörleri

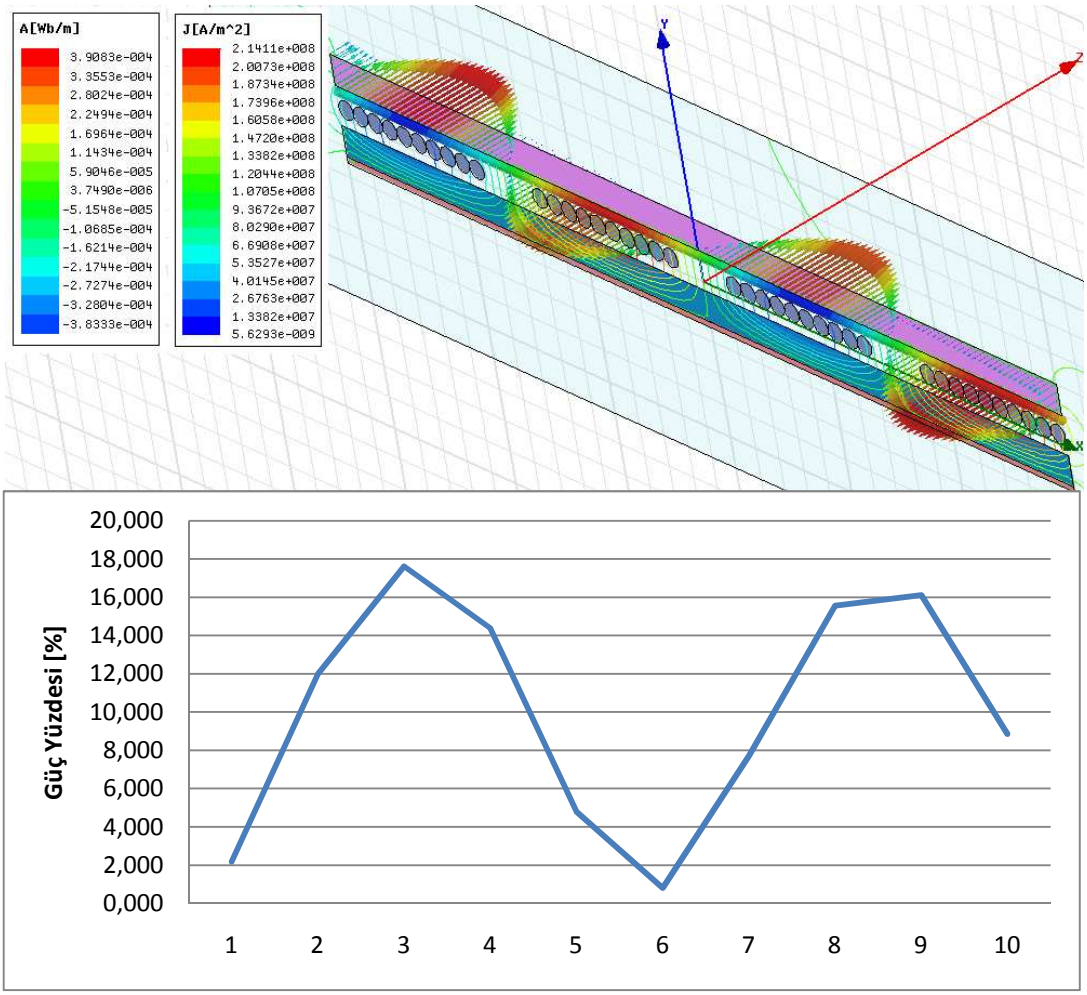


Şekil 5.52 : Yanlış uyarma yönü ile parçalı bobin yapısı

Görüldüğü gibi akımlar sadece tencerenin göbeğinde anlamsız bir şekilde oluşmaktadır. Bu durumda eşit bir ısı dağılımı beklenemez. Aşağıda her bobinin oluşturduğu akıları kendi yollarından halkalandığı sistem görünmektedir. Bu durumda tencere üzerinde iki ayrı bölgede girdap akımları oluşacak, yani tencere üzerinde iki ayrı halka şeklinde ısı kaynağı olacaktır.



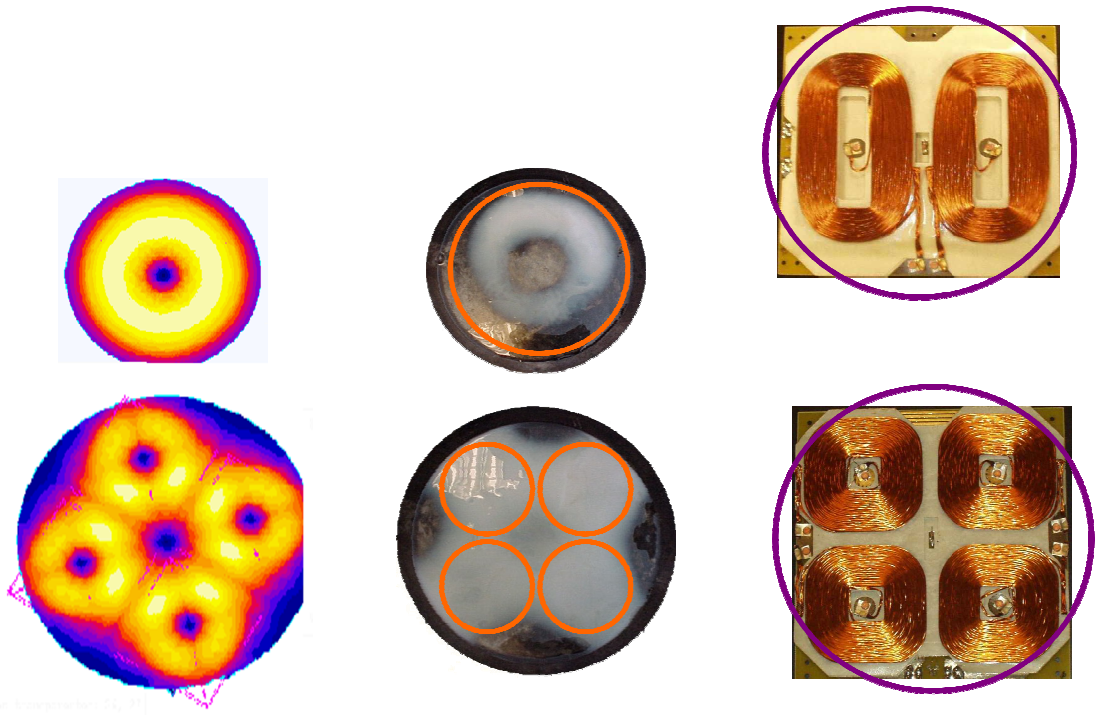
Şekil 5.53 : Doğru yönde uyarmalı parçalı bobinde akı şiddeti vektörleri



Şekil 5.54 : Çoklu bobin yapısı ve düzgün ısı dağılımı

Şekil 5.54'te dört ayrı bölgede akımların yoğunlaştığı net bir şekilde görülmektedir. Bu akımlardan ikili gruplar döngü şeklinde birbirini tamamlamaktadır. Yani tencere üzerinde iki girdap akımı dolayısıyla iki ısı kaynağı oluşmakta, böylede nispeten daha düzgün bir ısıl dağılım oluşmaktadır. Bu sonuçtan yola çıkarak bobinin ne kadar fazla parçaya bölünürse tencereyi o kadar eşit bir şekilde ısıtacağı sonucuna ulaşılabilir. Ancak üretim zorluklarından ve güç elektroniği devresinin karmaşıklaşacağından dolayı çok sayıda parçalı bir bobin kullanılmamaktadır. Bazı uygulamalarda 6 ya da 8 parçaya kadar çıkılmıştır ancak örnekleri oldukça kısıtlıdır.

Bu çalışmalar ile tencere üzerindeki kayıp dağılımı iyileştirilmiştir ve aşağıdaki resimde parçalı bobin çalışmasının sonuçları gösterilmiştir. Bu iyileştirmenin analiz sonuçlarından daha iyi ve doğru bir şekilde görülebilmesi için üç boyutlu girdap akımı analizi ve ısıl analizler yapılmalıdır.



Şekil 5.55 : Örnek 2 ve 4 parçalı bobinler, dört parçalı bobinde tek parçalı bobine göre ısıl dağılım iyileşmesi [32]

6 SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tez çalışmasında, yeni yaygınlaşmakta olan ve son zamanlarda hızla gelişen ev tipi endüksiyon ocak sistemleri incelenmiştir. İlk olarak genel çalışma prensibi açıklanmış ve diğer ocaklara göre avantajları ve dezavantajları sıralanmıştır. Daha sonra güç elektroniği ve kontrol sistemi açıklanarak ocakta kullanılan bobin ve tencereden oluşan endüktans sisteminin önemi açıklanmıştır. Kontrol sistemi için olduğu kadar bobin tasarımının endüksiyon ocağı verimi için de büyük önemi vardır. Bu yüzden tez çalışmasında bobinin bir modelinin oluşturulması amaçlanarak; verim, endüktans ve direnç değerlerine hangi parametrelerin ne kadar etkisi olduğu incelenmiştir.

Modelleme çalışmaları endüksiyon ocak tasarımının önemli bir kısmıdır. Modelleme çalışması ile bobinin kayıplarının önüne geçmek, istenen endüktans ve direnç değerlerini -model üzerinden- bobin gerçekte sarılmadan hesaplayabilmek mümkün olmaktadır. Bu çalışma hem vakit hem de ekonomik kazançlar getirmektedir. Ayrıca sistemin daha güvenli bir şekilde tasarlanması sağlanmış olmaktadır, çünkü zayıf noktalar da model üzerinden görülebilmektedir.

Endüksiyon ocak bobininin 2 boyutlu sonlu eleman modeli oluşturulmuş ve Maxwell programı ile analizler yapılmıştır. Analizler program içerisinde ‘eddy current analysis’ olarak geçen bölümde yapılmıştır. Oluşturulan 2 boyutlu model Z eksenine göre simetrik olduğu için bobinin sadece yarısı çizilmiştir. Analiz programına şunlar girdi olarak verilmiştir; sistemin fiziksel yerleşimi, tencere malzemesinin boyutları, elektriksel ve manyetik özellikleri, Litz telinin boyutları ve kaç iletkenden oluştuğu, ferit malzemenin boyutları, elektriksel ve manyetik özellikleri. Bunların yanında iletkenlerden geçen akım, bu akımın frekansı da programa girilmektedir. Analiz sonucunda manyetik alan çizgileri, eş potansiyel çizgileri ve akım yoğunlukları şekilsel olarak görülebilmekte, ayrıca hesaplanabilmektedir. Bunun yanında toplam omik kayıp ve enerji gibi veriler kullanılarak direnç, endüktans ve verim hesapları da sonlu elemanlar yöntemi ile yapılabilmektedir.

Yapılan analizler sonucunda deri etkisi ve yakınlık etkisinin sonuçlarda hesaba katılacağı ve bu yüzden analiz sonuçlarının gerçekçiliğinin yüksek olacağı görülmüştür. Bu etkiler, kullanılacak Litz telinin iletken sayısı ve çapının seçilmesindeki ana etkenlerdir. Litz telinde gereğinden ince tel kullanılması işçiliği, gereğinden fazla tel kullanılması da maliyeti artıran etkenlerdir. Bu nedenle uygun tel seçimini deneme yapmadan modelleme ile yapabilmek büyük öneme sahiptir. Analiz çalışmaları sonucunda yaklaşık 40 iletkenli tellere kadar sonlu elemanlar analizinin yapılmasının mümkün ve makul olduğu görülmüş, daha fazla iletkenli Litz teli analizleri yapılamamıştır. Kullanılan iletkenlerin çapları da 0.3mm'den daha ince tutulduğunda yine aynı şekilde analiz süreleri çok artmakta veya mümkün olmamaktadır. Ancak daha fazla iletkenli Litz telleri yalnızca özel amaçlar için kullanılmakta standart ev tipi endüksiyon ocaklarında daha fazla iletkenli teller pek tercih edilmemektedir. Bu tarz özel bobinlerin incelenmesi için sonlu elemanlar yöntemi tek başına yeterli olmamakta, bununla birlikte matematiksel modellemeler ve hesaplamalar da ayrıntılı şekilde yapılmalıdır. Tez içerisinde çeşitli tel sayılarında ve tel çaplarında analizler yapılarak karşılaştırılmış ve uygun tel sayısının ve çapının belirlenmesi için bazı yöntemlerden bahsedilmiştir. Yapılan ilk çalışmalar sonucunda endüksiyon bobini tasarımında kullanılacak Litz telinin belirlenmesi için bir metod geliştirilmiştir. Buna göre ocağın en yüksek gücü aktardığı frekansta girme derinliği hesaplanacak ve bu girme derinliği çapında bir iletken kullanılacaktır. Ayrıca Litz telindeki iletken sayısı da toplam akım yoğunluğu en fazla 10 A/mm^2 olacak şekilde belirlenecektir.

Kullanılacak bobinin endüktans ve direnç değerleri endüksiyon ocaklardaki en kritik parametrelerdir. Çünkü ocağın çalışması tamamen bu bobinin akımı, tencere üzerinde endüklenecek akımlar ve gücün kontrolü üzerinedir. Hatta verim hesabı da direnç hesabından çıkabilir çünkü bobin ucundan görülen direncin bir kısmı tencere direnci diğer bir kısmı da kayıpların oluştuğu bobin iletkenlerinin direncidir. Bu değerlerin doğru bir şekilde hesaplanabilmesi kontrol sisteminin erken tasarlanarak optimize edilmesini sağlayabilir. Ya da kontrol sistemi tasarlandıktan sonra en uygun endüktans ve direnç değerleri belirlenebilir, buna göre de bobin tasarımı değişebilir. Ek olarak belirtilmelidir ki bobin endüktans ve direncinde en etkili parametrelerden birisi tenceredir. Tencereler ise kullanıcı tarafından ocağa konulurlar ve her birisi farklı karakteristiklere sahiptirler. Bu yüzden farklı tencereler ile endüktans ve direnç

değişimleri analiz yöntemi ile gayet kolay ve çabuk bir şekilde görülebilmektedir. Bu durumda sistemin her türlü tencerede nasıl davranacaklarının öngörülmesi de kolaylaşmış olmaktadır. Analiz sonuçlarından, endüktans ve direncin ferromanyetik tencerelerde daha yüksek doğrulukla hesaplanabildiği görülmüştür. Bu doğrulama çalışmalarında da yaklaşık olarak; direnç hesabında %25, endüktans hesabında %5 hata ile sonuçlara ulaşılmıştır.

Bobin sarılırken sarımların birbirine yakınlıkları ve yerleşimleri de kayıplar açısından önemlidir. Hatta bazı uygulamalarda bobinler iki veya daha fazla katlı olarak sarılmaktadırlar. Bu durumda verimlerin nasıl değiştiği de sonlu eleman modeli ile analiz yapılarak görülebilmektedir. Öngörülebileceği gibi analiz sonuçlarından sarımlar arası mesafenin artmasının verimi artıracağı görülmüştür. Daha sonra bu durum gerçek bobinlerde verim ölçümleri alınarak doğrulanmıştır. Ayrıca sarım sayısını artırmak için kullanılacak farklı bobin yapıları karşılaştırılmış ve etkileri de analiz ile görülmüştür. Kullanılan özel çok katlı bobinlerde daha yüksek endüktans ve direnç değerlerine ulaşılabilmiştir. Bu analiz sonuçları deneysel olarak da doğrulanmıştır.

Bobin ile tencereden oluşan sistemin verim, endüktans ve direnç olarak etkileneceği diğer parametreler; tencereye olan uzaklığı (hava aralığı) ve ferit nüve karakteristiğidir. Bunlardan hava aralığı ile ilgili analiz sonuçları gerçek ölçümlerle paralellik göstermiş; hava aralığının endüktansı artırarak, direnci düşürdüğü görülmüştür. Bu durum tencere direncinin girişe daha az yansıması olarak açıklanmaktadır. Yani dolaylı olarak bu durum bize hava aralığı arttıkça verimin düşeceğini göstermiştir ki analiz sonuçlarından kayıplar incelendiğinde hava aralığı ne kadar az ise verimin o kadar yüksek olduğu da görülmüştür. Bu durum gerçekte alınan verim ölçümlerinde de aynı şekildedir. Ferit nüvelerle ilgili olarak analizlerden en yüksek akı yoğunluğu değeri görülebilmekte ve bu değere göre gerçekte kullanılacak nüveler seçilebilmektedir. Ancak bu konu ile ilgili dikkat edilmesi gereken nokta nüvelerin bobin altını tamamen kaplamasıdır. Bu durum gerçekte farklıdır, buna göre nüve kesit alanlarından oranlanarak gerçek akı yoğunluğu değerine ulaşılabilir. Ayrıca nüve kalınlığının, bağıl manyetik geçirgenliğinin, direncinin de endüktansa etkileri olmaktadır. Mesela gerçek bobinlerde alınan ölçümlerde görülmüştür ki nüve kalınlığı arttıkça endüktans ve direnç değerleri artış göstermektedir. Analizlerde de benzer sonuçlar çıkmış ancak

değişimler çok küçük olmuştur. Nüve üzerinde oluşacak kayıplar analizlerden görülememiştir çünkü idealize edilmiş kayıp karakteristikleri vardır. Bu etkileri görmek için daha detaylı ferit özellikleri girilerek analizler de yapılabilir. Ancak yapılan deneysel ölçümlerde de ferit kalınlıklarındaki değişimler verim üzerinde etkili olmamıştır. Bunun nedeni nüve üzerindeki kayıpların sistemdeki toplam gücün yanında oldukça az olmasıdır.

Son olarak bir başka konu olan tencere üzerindeki ısı dağılımının iyileştirilmesi çalışması yapılmıştır. Tenceredeki kayıpların daha iyi dağılımını sağlamak ısıl dağılımı iyileştirecektir ancak yine de gerçek ısıl dağılım için ısıl analiz yapılması gerekmektedir. Manyetik alan çizgileri ve tencere üzerindeki girdap akımları incelendiğinde tencere üzerinde kayıpların belirli bölgelerde yoğunlaştığı görülmüştür. Bunu iyileştirmek için analizlerde bazı değişiklikler yapılarak sonuçlar hızlı bir şekilde görülebilmiş ve sonuçlar tezde paylaşılmıştır. Buna göre en uygun yöntem bobini birden fazla parçadan oluşturmak olmuştur. Böylelikle tencere üzerinde halkalanan girdap akımları birden fazla parçaya bölünmüş ve daha eşit bir ısı dağılımı oluşmuştur. Sonuçların daha iyi görülmesi için 3 boyutlu bir ısıl analiz yapmak daha uygun olabilir. Hatta çok parçalı bobinlerin bir diğer uygulamalı şekli olan tüm endüksiyon ocak yüzeyinin kullanılabilmesi çalışmaları için de endüksiyon ocak yüzeyi üç boyutlu olarak modellenebilir ve tencerenin tam konumuna göre ısıtma işleminin nasıl gerçekleştiği görülebilir. Sonuçlara göre bobin tasarımları şekillendirilebilir.

Sonuç olarak tezde yapıldığı gibi endüksiyon ocak bobinleri başarılı bir şekilde sonlu elemanlar ile analiz edilebilmekte, analiz sonuçları deneysel sonuçlarla paralellik göstermektedir. Ancak 3 boyutlu modeller kurularak veya ısıl modeller kurularak daha farklı çalışmalar da yapılabilir. Ayrıca özel uygulamalar veya daha karmaşık sistemlerin analizi için analitik(matematiksel) modellerden de faydalanılması gerekmektedir. Çünkü SEA, iletken sayısı arttıkça veya çap küçüldükçe daha fazla vakit almakta ve kullanılamaz hale gelmektedir. İki yöntem birleştirilerek de analizlerin yapılması bir başka yöntem olabilir.

KAYNAKLAR

[1] Mergen, F. ve Zorlu, S. 2005, *Elektrik Makineleri 1 Transformatörler*, Birsen Yayınevi, İstanbul., 22-43.

[2] AN9012, 2000, *Induction Heating System Topology Review*. Fairchild Semiconductor.

[3] Aytekin, B., 2008, Endüksiyon Ocak Elektronik Kontrol Sistem Tasarımı, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[4] Url-1 <http://www.hitachi.com/rev/archive/2009/__icsFiles/afieldfile/2009/08/20/r2009_technology_dc.pdf>, alındığı tarih 20.06.2011.

[5] Fleisch, D., 2008, *A Student's Guide to Maxwell's Equations*, Cambridge University Press, Wittenberg University.

[6] Url-2 <http://aussiewhitegoodsrescue.com.au/Agents/TSPM/CT/Kleenmaid/ ICK 60KS_80ks_IVK60_Service.pdf>, alındığı tarih 20.06.2011.

[7] Acero, J., Burdio, J.M., Barragan, L.A., Artigas, J.I. and Alonso, R., 2006, An electromanyetic-based model for calculating the efficiency in domestic induction heating appliances, *Power Electronics Specialists Conference*, Jeju, June 18-22, 1-6.

[8] Kwon, Y., Yoo, S. and Hyun, D., 1999, Half-Bridge Series Resonant Inverter for Induction Heating Applications with Load-Adaptive PFM Control Strategy, *Applied Power Electronics Conference and Eksposition, 1999, Fourteenth Annual*, Vol. **1**, 575 – 581, Dallas, TKS, USA, Mar. 14-18.

[9] Llorente, S., Monterde, F., Burdio, J.M. and Acero, J, 2002, A comparative Study of Resonant Inverter Topologies Used in Induction Cookers, *Applied Power Electronics Conference and Eksposition*, Vol. **2**, 1168 – 1174, Dallas, TKS, USA, March 10-14.

[10] Koertzen, H.W., van Wyk, J.D. and Ferreira, J.A., 1995, Design of the half bridge, series resonant converter for induction cooking, *Power Electronics Specialists Conference*, Vol. **2**, 729-735, Atlanta, GA, USA, Jun 18-22.

[11] Kassakian, John G., Schlecht, Martin E., Verghese and George C., 1991, *Principles of Power Electronics*, Addison-Wesley, 197-208.

[12] Mohan, N., Underland, T.M. and Robbins, W.P., 1989, *Güç Elektroniği. Çeviriciler, Uygulamalar ve Tasarım*, Literatür Yayıncılık, İstanbul Teknik Üniversitesi, 273-277, Çevirenler; Nejat Tuncay, Metin Gökaşan, Seta Boğosyan.

[13] Millan, I., Puyal, D., Burdio, J.M., Acero, J and Llorente, S., 2007, Resonant Inverter Topology for All-Metal Domestic Induction Heating, *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 913-918, Vigo, Spain, Jun 4-7.

[14] Hosseini, S.H. and Goharrizi, A.Y., 2006, Harmonic Optimization of Asymmetrical Voltage-Cancellation Control for Full-Bridge Series Resonant Inverters. *SICE-ICASE, 2006, International Joint Conference*, 4350-4353, Beksco, Busan, Korea, Oct 18-21.

[15] Podoltsev, A.D., Kucheryavaya, I.N. and Lebedev, B.B., 2003, Analysis of Effective Resistance and Eddy-Current Losses in Multiturn Winding of High-Frequency Magnetic Components, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. **39**, Issue 1, 539-548.

[16] Ferreira, J.A., 1992. Analytical computation of AC resistance of round and rectangular Litz wire windings. *Electric Power Applications, IEE Proceedings B.* Vol. **139**, Issue 1, 21-25.

[17] Demirel, **A.,** 2007, *Industrial Applications of Power Electronics Ders Notları*, İ.T.Ü., İstanbul.

[18] Bartoli, M., Noferi, N., Reatti, A. and Kazimierczuk, M.K., 1996. Modeling Litz-Wire Winding Losses in High-Frequency Power Inductors. *Power Electronics Specialists Conference*, Vol. **2**, 1690-1696, Baveno, Italy, Haziran 23-27.

[19] Acero, J., Alonso, R., Burdio, J.M., Barragan, L.A. and Puyal, D., 2006, Frequency-Dependent Resistance in Litz-Wire Planar Windings for Domestic Induction Heating Appliances. *IEEE Transactıons On Power Electronıcs*, Vol. **21**, No. 4, 856-866.

[20] Keishima, T., Kataoka, A., Aihira, K., Makio, N., Gotou, K., 2005, Induction Heating Coil, *European Patent Office*, No: EP1545159A1 dated 22.06.2005.

[21] Meng, L.C., Cheng, K.W.E. and Chan, K.W., 2009, Heating Performance Improvement and Field Study of the Induction Cooker, *3rd International Conference on Power Electronics Systems and Applications*, 1-5, Hong Kong, May 20-22.

[22] Tanaka, T., 1989, A New Induction Cooking Range For Heating Any Kind Of Metal Vessels, *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 635-641.

[23] Yonemori, H. and Kobayashi, M., 2006, On the Heating Characteristic and Magnetic Flux of a Double-Coil Drive Type Induction Heating Cooker, *IEEE Industrial Electronics, IECON 2006 - 32nd Annual Conference.* 2488-2493, Paris, France, Nov 6-10.

[24] Madenci, E. and Guven, İ., 2006, *The finite element method and applications in engineering using ANSYS*, Springer Science+Business Media, New York, USA.

[25] Hediehloo and M. and Akhbari, M., 2009, New approach in design of planar coil of induction cooker based on skin and proximity effects analysis, *IEEE International Conference on Industrial Technology*, 1-6, Gippsland, VIC, Australia, Feb 10-13.

[26] Imai, T., Sakiyama, K., Hirota, I. and Omori, H., 1997, A Study of Impedance Analysis for an Induction Heating Device by Applying a New Interpolation Method, *IEEE Transactions on Manyetics*, Vol. **33**, No 2, 2143-2146.

[27] Koertzen, H.W.E., van Wyk, J.D. and Ferreira, J.A., 1992, An investigation of the analytical computation of inductance and AC resistance of the heat-coil for induction cookers, *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, Vol. **1**, 1113-1119, Houston, TKS, USA, Oct. 4-9.

[28] Acero, J., Alonso, R., Barragán, L.A., Carretero, C., Lucía, O., Millán, I. and Burdío, J.M., 2009, Domestic Induction Heating Impedance Modeling Including Windings, Load, and Ferrite Substrate, *13th European Conference on Power Electronics and Applications*, Barcelona, Page 1, Spain, Sept. 8-10.

[29] Acero, J., Hernandes, P.J., Burdío, J.M., Alonso, R. and Barragán, L.A., 2005, Simple Resistance Calculation in Litz-Wire Planar Windings for Induction Cooking Appliances, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. **41**, Issue 4, 1280-1288.

[30] Acero, J., Alonso, R., Burdio, J.M., Barragain, L.A. and Carretero, C., 2007, A model of losses in twisted-multistranded wires for planar windings used in domestic induction heating appliances, *Applied Power Electronics Conference, APEC 2007 - Twenty Second Annual IEEE*, 1048-2334, Anaheim, CA, USA, Feb 25 – March 1.

[31] Forest, F., Faucher, S., Gaspard, J., Montloup, D., Huselstein, J. and Joubert, C., 2007, Frequency-Synchronized Resonant Converters for the Supply of Multiwinding Coils in Induction Cooking Appliances, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. **54**, Issue 1, 441-452.

[32] Url-3 <http://www.jaegerindustry.com/wp-content/uploads/2010/11/JAEGER-gamme-JIC2.pdf>, alındığı tarih 20.06.2011.

EKLER

EK A: 4 Sarımlı Bobin Örnekleri ve Kullanılacak Tel Çapının Belirlenmesi

EK B.1: Tek Tel İle Sarılan Bobinin Deneysel Direnç ve Endüktans Ölçümleri

EK B.2: Tek Tel İle Sarılan Bobinin Analiz Sonucu Direnç ve Endüktans Değerleri

EK C: 20×0.5mm Litz Teli İle Sarılan Bobinin Deneysel Direnç Ölçümleri ve Analiz Sonucu Endükans - Direnç Değerleri

EK D: 31×0.4mm Litz Teli İle Sarılan Bobinin Deneysel Direnç Ölçümleri ve Analiz Sonucu Endükans ve Direnç Değerleri

EK E: 160mm Bobinin Ferromanyetik Tencere İle Yüklüyken Deneysel Ölçümleri ve Analiz Sonucu Verileri

EK F: 160mm Bobinin Alüminyum Tencere İle Yüklüyken Deneysel Ölçümleri ve Analizi

EK G: 160mm Bobinin Ferromanyetik Olmayan Çelik Tencere İle Yüklüyken Deneysel Ölçümleri ve Analizi

EK H: 180mm Bobinin Ferromanyetik Tencere ile Yüklüyken Deneysel Ölçümleri ve Analizi

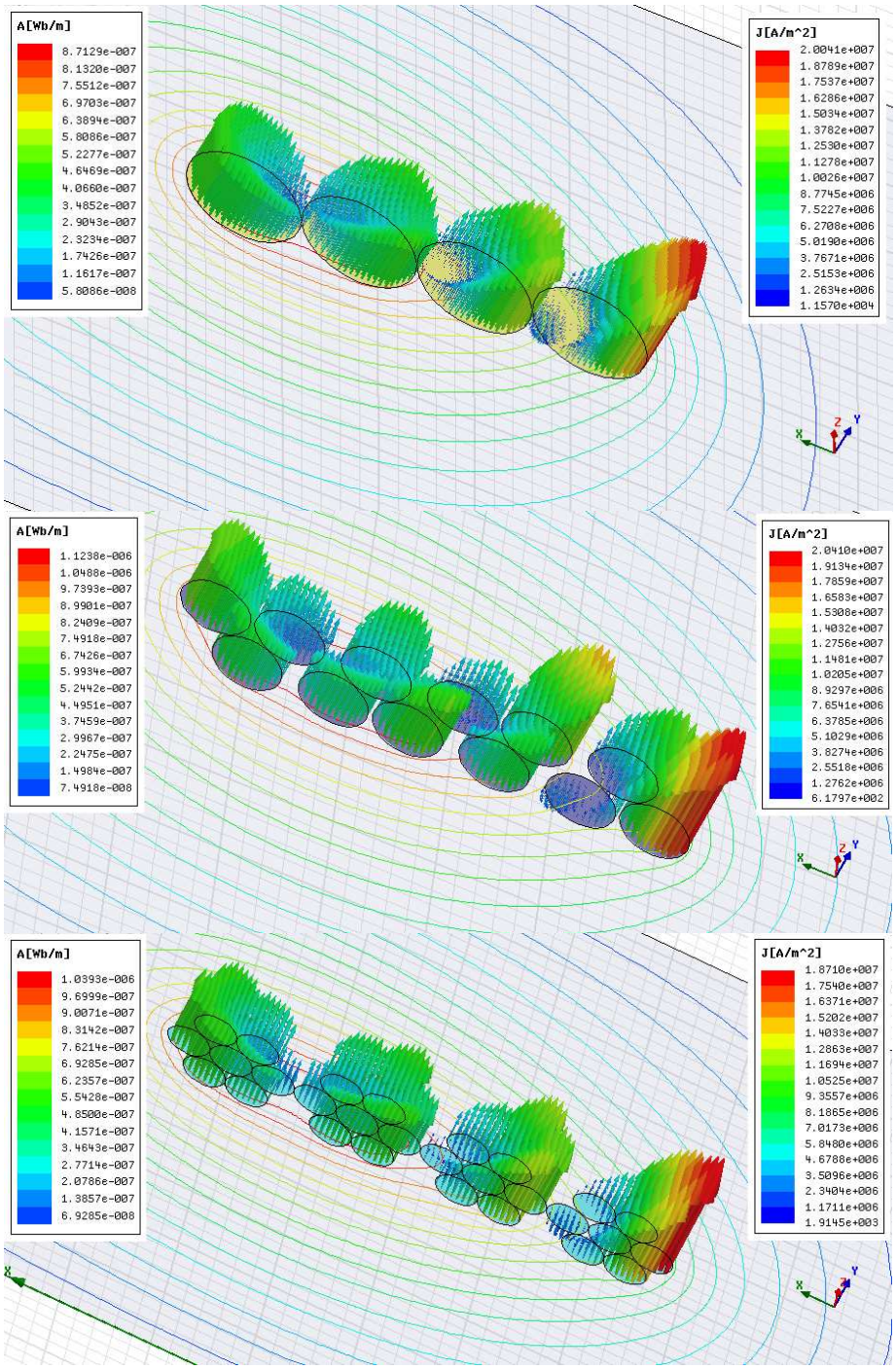
EK I: Aralıklı ve Bitişik Sargıların SEA Modelleri

EK J: Çok Katlı Sarılmış Bobinlerin SEA Modelleri

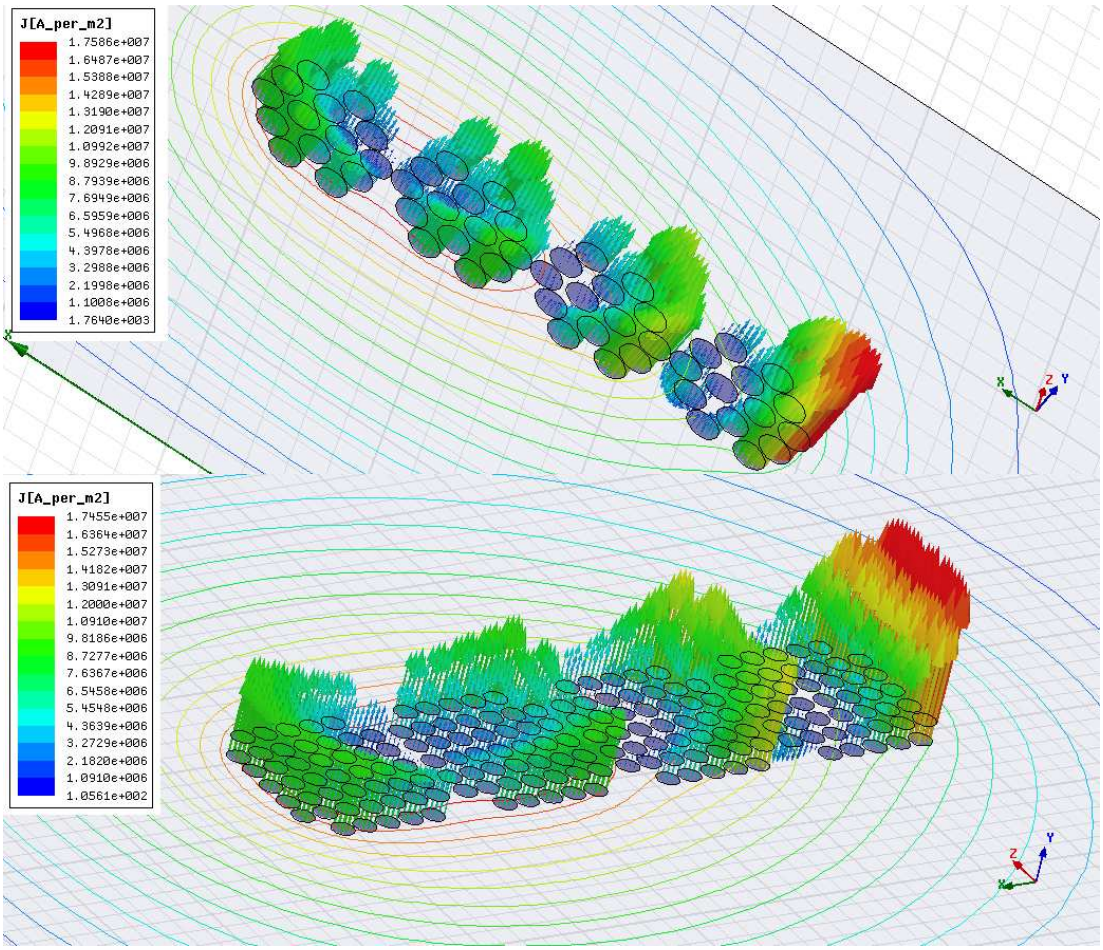
EK K: Ferit Etkisinin İncelendiği Analizlerin Sonuçları

EK L: Hava Aralığı Ekisinin İncelendiği Analizlerin Sonuçları

EK A



Şekil A.1 : Yaklaşık bakır alanına sahip 1, 3, 7 damarlı tellerden oluşan 4 sarımlı bobinde akım dağılımı



Şekil A.2 : Yaklaşık bakır alanına sahip 14 ve 45 damarlı tellerden oluşan 4 sarımlı bobinde akım dağılımı

EK B.1

Çizelge B.1.1 : Tek tel ile sarılan bobinin direnç ölçümler [28]

Frekans [kHz]	**Direnç** [Ω]		
	Cu	**Al**	**F114**
1	0.07	0.08	0.35
5	0.1	0.135	1.08
10	0.15	0.185	1.8
50	0.32	0.4	3.5
100	0.44	0.55	5

Çizelge B.1.2 : Tek tel ile sarılan bobinin endüktans ölçümleri [28]

Frekans [kHz]	**Endüktans [µH]**		
	Cu	**Al**	**F114**
1	20	23.6	114.5
5	18	20	55
10	17	19	43
50	17	18	29
100	17	17	25

EK B.2

Çizelge B.2.1 : Tek telli bobinin bakır tencere ile analizi

Frekans [kHz]	Omik Kayıp [W]				
	Tüm Model	Tencere	Enerji [J]	Direnç [Ω]	Endüktans [µH]
1	31.7760355	8.4157441	0.0040471	0.0706134	17.9869646
5	47.5155081	19.2474491	0.0036363	0.1055900	16.1611728
10	65.5991851	27.9561001	0.0034905	0.1457760	15.5131325
50	161.4093208	77.7217110	0.0032176	0.3586874	14.3003603
100	246.8109546	126.7868227	0.0031464	0.5484688	13.9838645

Çizelge B.2.2 : Tek telli bobinin alüminyum tencere ile analizi

Frekans [kHz]	Omik Kayıp [W]				
	Tüm Model	Tencere	Enerji [J]	Direnç [Ω]	Endüktans [µH]
1	37.4206489	14.0581839	0.0045403	0.0831570	20.1788937
5	60.5515414	32.2703172	0.0038517	0.1345590	17.1184726
10	83.7388346	46.0645386	0.0036429	0.1860863	16.1905617
50	196.0774550	112.2645027	0.0032938	0.4357277	14.6390438
100	297.6263112	177.2277580	0.0032039	0.6613918	14.2394800

Çizelge B.2.3 : Tek telli bobinin f115 tencere ile analizi

Frekans [kHz]	Omik Kayıp [W]				
	Tüm Model	Tencere	Enerji [J]	Direnç [Ω]	Endüktans [µH]
1	177.494454	153.657333	0.0221346	0.3944321	98.3757797
5	485.907790	454.520826	0.0123288	1.0797951	54.7946139
10	739.102186	695.789022	0.0097188	1.6424493	43.1945125
50	1910.039392	1822.26443	0.0060178	4.2445320	26.7457011
100	3013.666350	2945.11238	0.0049869	6.6970363	22.1642176

EK C

Çizelge C.1 : 20×0.5mm Litz teli ile sarılan bobinin direnç ölçümleri [28]

Frekans [kHz]	Direnç [Ω]
10	0.1417
20	0.2083
30	0.275
40	0.325
50	0.3917
60	0.45
70	0.5167
80	0.575
90	0.6417
100	0.7083

Çizelge C.2 : 20×0.5mm Litz telli sistemin analiz sonuçları

Frekans [kHz]	Omik Kayıplar [W]		Enerji [J]	Direnç [Ω]	Endüktans [µH]
	Tüm Sistem	Tencere			
10	87.796794	39.999168	0.003455	0.195104	15.357152
20	127.766077	61.279206	0.003248	0.283925	14.435168
30	158.804474	79.620986	0.003157	0.352899	14.029941
40	184.936019	95.925984	0.003104	0.410969	13.79337
50	207.909259	110.676418	0.003068	0.462021	13.636328
60	228.741405	124.245748	0.003043	0.508314	13.52354
70	248.051489	136.895309	0.003024	0.551226	13.437918
80	266.220431	148.797818	0.003008	0.591601	13.370143
90	283.484612	160.067206	0.002996	0.629966	13.314722
100	299.992031	170.780338	0.002985	0.666649	13.268224

EK D

Çizelge D.1 : 31×0.4mm Litz teli ile sarılan bobinin direnç ölçümleri [28]

Frekans [kHz]	Direnç [Ω]
10	0.15
20	0.2
30	0.2546
40	0.3077
50	0.3615
60	0.4154
70	0.4692
80	0.5346
90	0.5923
100	0.6692

Çizelge D.2 : 31×0.4mm Litz telli sistemin analiz sonuçları

Frekans [kHz]	Omik Kayıplar [W]		Enerji [J]	Direnç [Ω]	Endüktans [J]
	Tüm Sistem	Tencere			
10	250.274067	104.002826	0.009404	0.200219	15.046147
20	359.003188	147.589622	0.008799	0.287203	14.078017
30	441.151313	181.691264	0.008529	0.352921	13.646913
40	509.531201	211.391568	0.008369	0.407625	13.390749
50	569.122958	238.572089	0.008261	0.455298	13.217318
60	622.547671	264.167539	0.008182	0.498038	13.090647
70	671.416883	288.706050	0.008121	0.537134	12.993425
80	716.827489	312.504920	0.008073	0.573462	12.91612
90	759.568304	335.761095	0.008033	0.607655	12.852975
100	800.223130	358.599614	0.008000	0.640179	12.800271

EK E

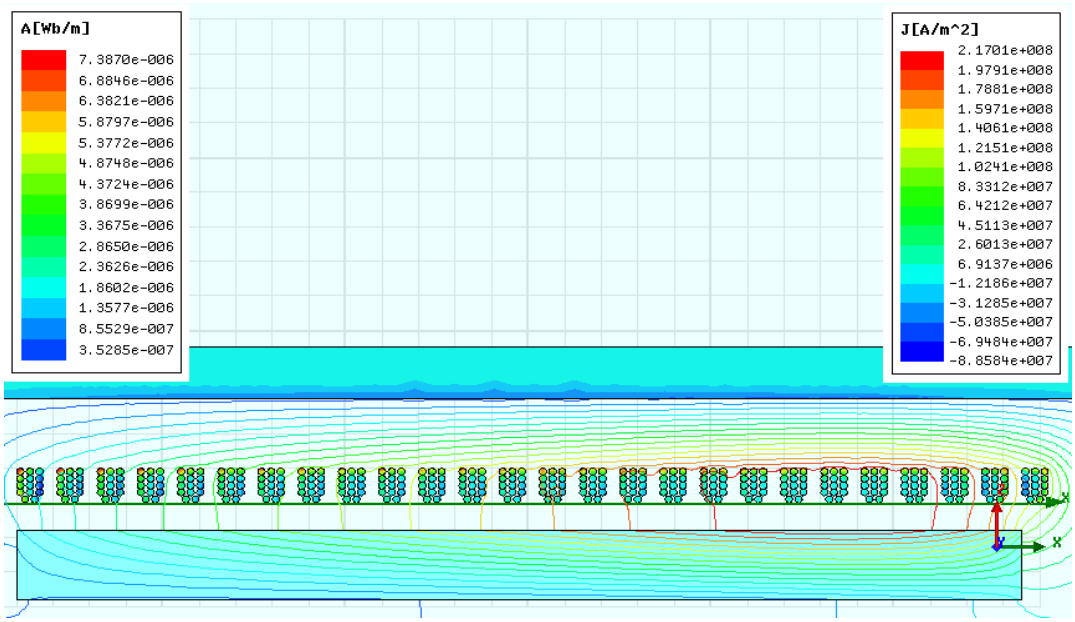
Çizelge E.1 : 160mm bobinin ferromanyetik tencere ile yüklüyken deneysel ölçümleri

Bobin Çapı [mm]	Hava Aralığı [mm]	Tencere Malzemesi	Tencere Çapı [mm]	Frekans [kHz]	Endüktans [µH]	Direnç [Ohm]
160	4	Ferromanyetik	210	5.00	83.39	0.5828
160	4	Ferromanyetik	210	6.00	81.44	0.7579
160	4	Ferromanyetik	210	6.67	80.13	0.8822
160	4	Ferromanyetik	210	7.50	78.42	1.042
160	4	Ferromanyetik	210	8.57	76.21	1.253
160	4	Ferromanyetik	210	10.00	73.32	1.534
160	4	Ferromanyetik	210	15.00	64.49	2.445
160	4	Ferromanyetik	210	20.00	58.05	3.181
160	4	Ferromanyetik	210	25.00	53.28	3.772
160	4	Ferromanyetik	210	28.57	50.86	4.129
160	4	Ferromanyetik	210	33.33	48.36	4.55
160	4	Ferromanyetik	210	40.00	45.79	5.076
160	4	Ferromanyetik	210	50.00	43.1	5.787
160	4	Ferromanyetik	210	66.667	40.15	6.868
160	4	Ferromanyetik	210	100.00	36.58	8.781

Çizelge E.2 : 160mm bobinin ferromanyetik tencere ile yüklüyken analiz sonuçları

Frekans [kHz]	Omik Kayıplar [W]		Enerji [Joule]	Direnç [Ω]	Endüktans [μH]
	Tüm Sistem	Tencere			
5.00	1836.363189	1686.168009	0.055406	1.469091	88.64891191
6.00	2104.657979	1939.475617	0.052209	1.683726	83.53440560
6.67	2275.000624	2099.332055	0.050430	1.820000	80.68812378
7.50	2479.519600	2290.359900	0.048504	1.983616	77.60572494
8.57	2730.933779	2524.005605	0.046395	2.184747	74.23273971
10.00	3048.704430	2817.802442	0.044064	2.438964	70.50220635
15.00	4043.798028	3732.195105	0.038454	3.235038	61.52627627
20.00	4913.528221	4532.335541	0.034937	3.930823	55.89844205
25.00	5702.320825	5264.041387	0.032472	4.561857	51.95483007
28.57	6231.284930	5759.039162	0.031104	4.985028	49.76596109
33.33	6904.065517	6393.845330	0.029620	5.523252	47.39201105
40.00	7801.914163	7249.388848	0.027988	6.241531	44.78024058
50.00	9085.870313	8485.966679	0.026153	7.268696	41.84517756
66.67	11131.897982	10476.213813	0.024016	8.905518	38.42634461
100.00	15069.276240	14333.820268	0.021368	12.055421	34.18858705

EK F



Şekil F.1 : 160mm bobinin alüminyum tencere ile yüklüyken analizi (100kHz)

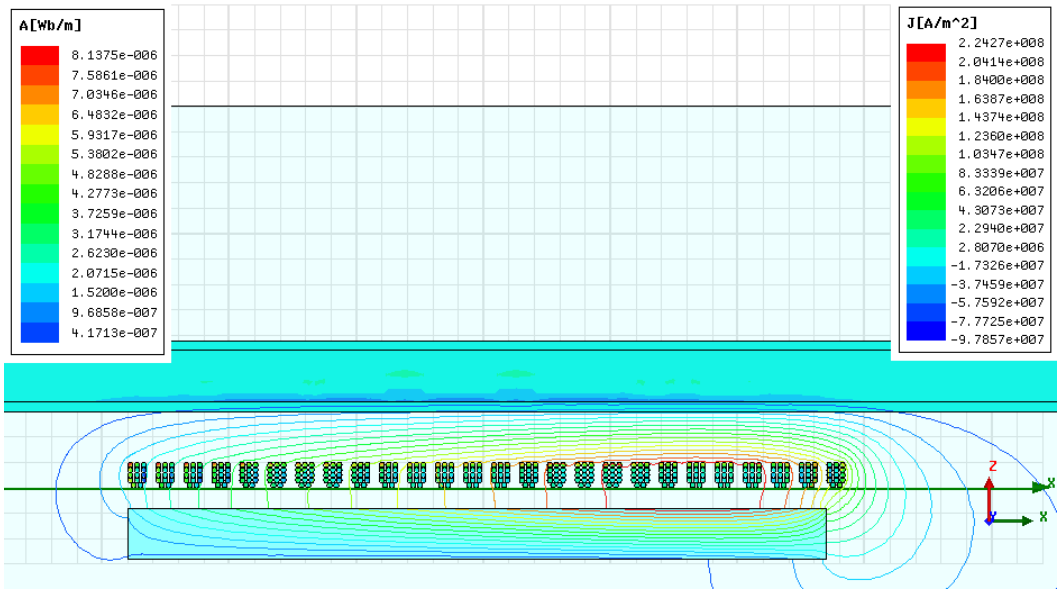
Çizelge F.1 : 160mm bobinin alüminyum tencere ile deneysel ölçümleri

Bobin Çapı [mm]	Hava Aralığı [mm]	Tencere Malzemesi	Tencere Çapı [mm]	Frekans [kHz]	Endüktans [uH]	Direnç [Ohm]
160	4	Alüminyum	210	5.00	25.5	0.151
160	4	Alüminyum	210	6.00	25.37	0.158
160	4	Alüminyum	210	6.67	25.29	0.163
160	4	Alüminyum	210	7.50	25.19	0.169
160	4	Alüminyum	210	8.57	25.08	0.177
160	4	Alüminyum	210	10.00	24.95	0.1864
160	4	Alüminyum	210	15.00	24.63	0.216
160	4	Alüminyum	210	20.00	24.44	0.2424
160	4	Alüminyum	210	25.00	24.3	0.268
160	4	Alüminyum	210	28.57	24.22	0.287
160	4	Alüminyum	210	33.33	24.14	0.311
160	4	Alüminyum	210	40.00	24.04	0.345
160	4	Alüminyum	210	50.00	23.91	0.395
160	4	Alüminyum	210	66.667	23.75	0.477
160	4	Alüminyum	210	100.00	23.53	0.636

Çizelge F.2 : 160mm bobin alüminyum tencere ile yüklüyken analiz sonuçları

Frekans [kHz]	Omik Kayıplar [W]		Enerji [J]	Direnç [Ω]	Endüktans [µH]
	Tüm Sistem	Tencere			
5.00	207.152731	84.972367	0.013429	0.165722	21.48562288
6.00	223.808892	94.069318	0.013262	0.179047	21.21948730
6.67	234.703277	99.572157	0.013166	0.187763	21.06589280
7.50	248.116845	105.980610	0.013059	0.198493	20.89473779
8.57	265.088735	113.672858	0.012938	0.212071	20.70075183
10.00	287.206450	123.266309	0.012798	0.229765	20.47643808
15.00	359.062944	153.468570	0.012430	0.287250	19.88785139
20.00	421.967236	180.475049	0.012180	0.337574	19.48879645
25.00	477.836086	205.475041	0.012002	0.382269	19.20244349
28.57	514.595898	222.514899	0.011902	0.411677	19.04278136
33.33	560.524973	244.493536	0.011794	0.448420	18.86978611
40.00	620.342925	274.288656	0.011675	0.496274	18.68050920
50.00	702.951507	317.610711	0.011544	0.562361	18.47096021
66.67	828.447015	387.962679	0.011397	0.662758	18.23538726
100.00	1057.275541	527.431085	0.011227	0.845820	17.96355548

EK G



Şekil G.1 : 160mm bobinin ferromanyetik olmayan çelik tencere ile yüklüyken analizi

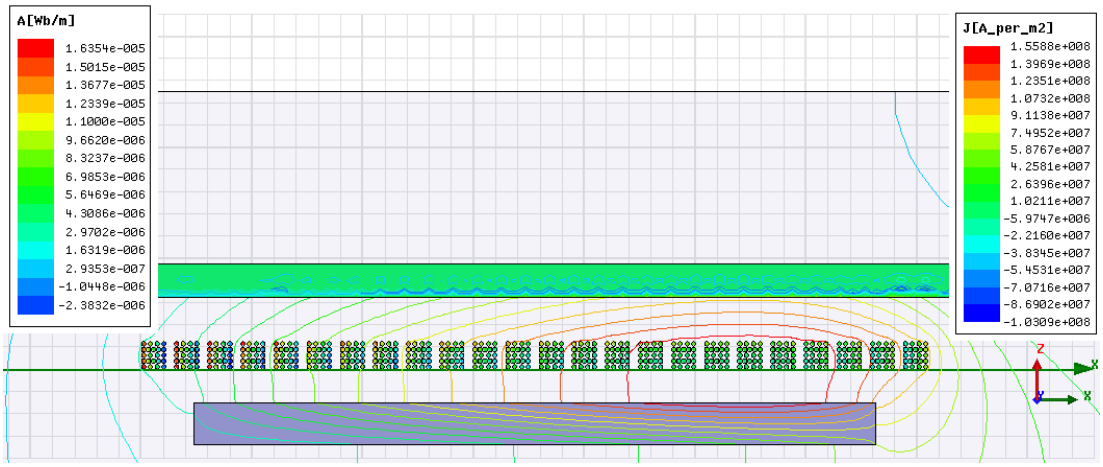
Çizelge G.1 : 160mm bobin ferromanyetik olmayan çelik tencere ile yüklüyken deneysel sonuçlar

Bobin Çapı [mm]	Hava Aralığı [mm]	Tencere Malzemesi	Tencere Çapı [mm]	Frekans [kHz]	Endüktans [uH]	Direnç [Ohm]
160	4	NonFerromanyetik	210	5.00	24.49	0.152
160	4	NonFerromanyetik	210	6.00	24.3	0.16
160	4	NonFerromanyetik	210	6.67	24.2	0.164
160	4	NonFerromanyetik	210	7.50	24.09	0.17
160	4	NonFerromanyetik	210	8.57	23.98	0.176
160	4	NonFerromanyetik	210	10.00	23.85	0.185
160	4	NonFerromanyetik	210	15.00	23.56	0.216
160	4	NonFerromanyetik	210	20.00	23.37	0.245
160	4	NonFerromanyetik	210	25.00	23.24	0.275
160	4	NonFerromanyetik	210	28.57	23.16	0.296
160	4	NonFerromanyetik	210	33.33	23.07	0.325
160	4	NonFerromanyetik	210	40.00	22.96	0.366
160	4	NonFerromanyetik	210	50.00	22.83	0.43
160	4	NonFerromanyetik	210	66.667	22.65	0.538
160	4	NonFerromanyetik	210	100.00	22.4	0.766

Çizelge G. 2 : 160mm bobinin ferromanyetik olmayan çelik tencere ile yüklüyken analiz sonuçları

Frekans [kHz]	Omik Kayıplar [W]		Enerji [J]	Direnç [Ω]	Endüktans [μH]
	Tüm Sistem	Tencere			
5.00	251.166659	134.475124	0.016090	0.222387	25.74404492
6.00	277.983831	153.962491	0.015859	0.244496	25.37458792
6.67	305.620375	173.473969	0.015716	0.259257	25.14500232
7.50	324.071754	186.185764	0.015548	0.277483	24.87751259
8.57	346.854188	201.548661	0.015353	0.300386	24.56429251
10.00	375.482580	220.373965	0.015123	0.329796	24.19693877
15.00	412.245203	243.888616	0.014535	0.423567	23.25566805
20.00	529.459009	316.368524	0.014152	0.507638	22.64352971
25.00	634.547893	381.859704	0.013879	0.585779	22.20668547
28.57	732.223505	445.005265	0.013725	0.638954	21.95965624
33.33	798.692002	489.314616	0.013555	0.707002	21.68765134
40.00	883.751945	547.497157	0.013365	0.797756	21.38364020
50.00	997.195019	627.431497	0.013148	0.926098	21.03751928
66.67	1157.622833	744.467095	0.012895	1.125397	20.63141775
100.00	1406.746017	933.863553	0.012578	1.490688	20.12408525

EK H



Şekil H.1 : 180mm bobinin SEA modeli

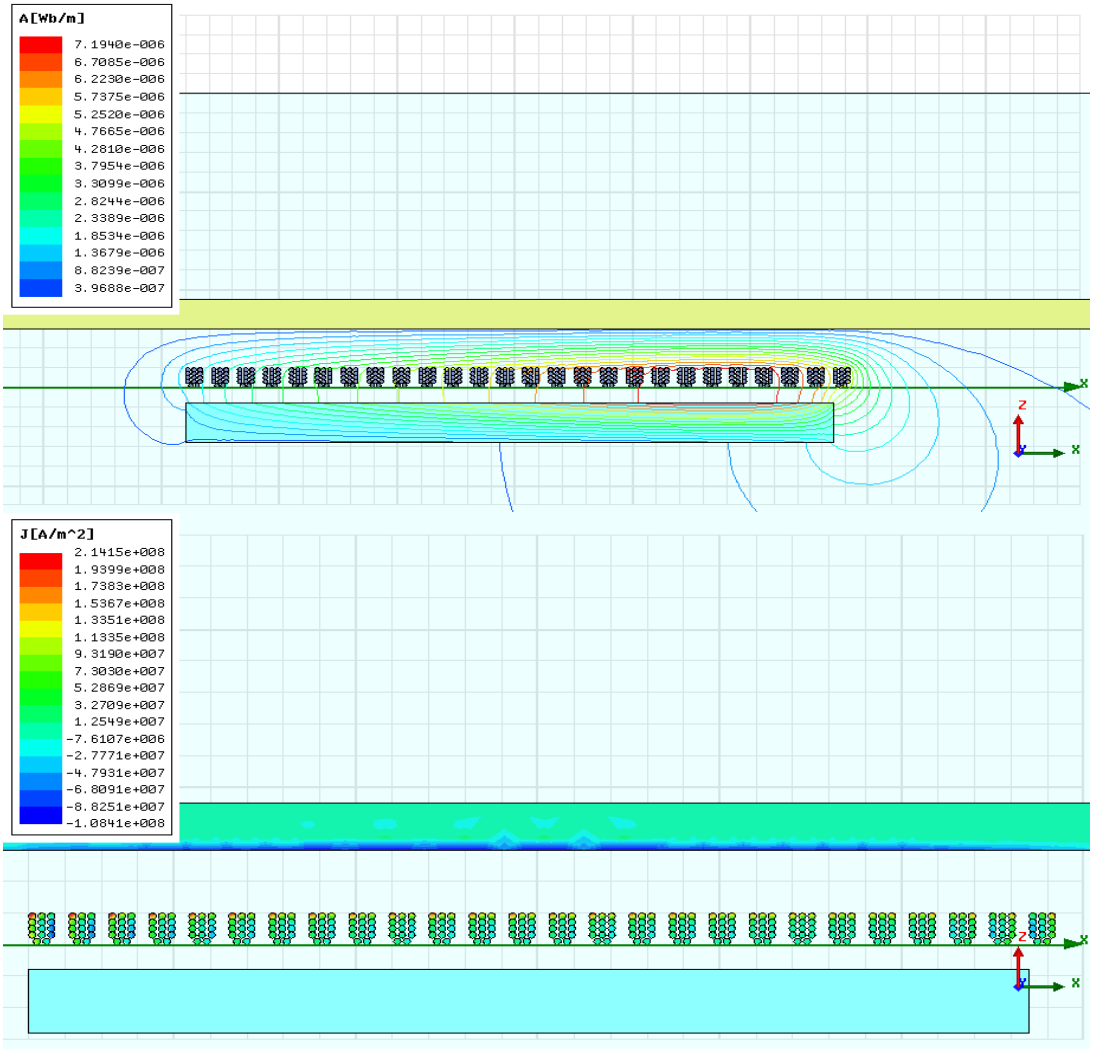
Çizelge H.1 : 180mm bobinin ferromanyetik tencere ile yüklü iken deneysel endüktans ve direnç ölçümleri

Bobin Çapı [mm]	Hava Aralığı [mm]	Tencere Malzemesi	Tencere Çapı [mm]	Frekans [kHz]	Endüktans [uH]	Direnç [Ω]
180	4	Ferromanyetik Çelik	210	5.00	71.8	0.169
180	4	Ferromanyetik Çelik	210	6.00	70.85	0.225
180	4	Ferromanyetik Çelik	210	6.67	69.74	0.31
180	4	Ferromanyetik Çelik	210	7.50	68.45	0.42
180	4	Ferromanyetik Çelik	210	8.57	66.96	0.55
180	4	Ferromanyetik Çelik	210	10.00	65.37	1.295
180	4	Ferromanyetik Çelik	210	15.00	63.57	1.598
180	4	Ferromanyetik Çelik	210	20.00	62.35	1.4312
180	4	Ferromanyetik Çelik	210	25.00	60	1.6
180	4	Ferromanyetik Çelik	210	28.57	56.64	1.84
180	4	Ferromanyetik Çelik	210	33.33	49.25	2.6
180	4	Ferromanyetik Çelik	210	40.00	43.82	3.216
180	4	Ferromanyetik Çelik	210	50.00	40	3.7
180	4	Ferromanyetik Çelik	210	66.667	38	3.99
180	4	Ferromanyetik Çelik	210	100.00	35.5	4.33

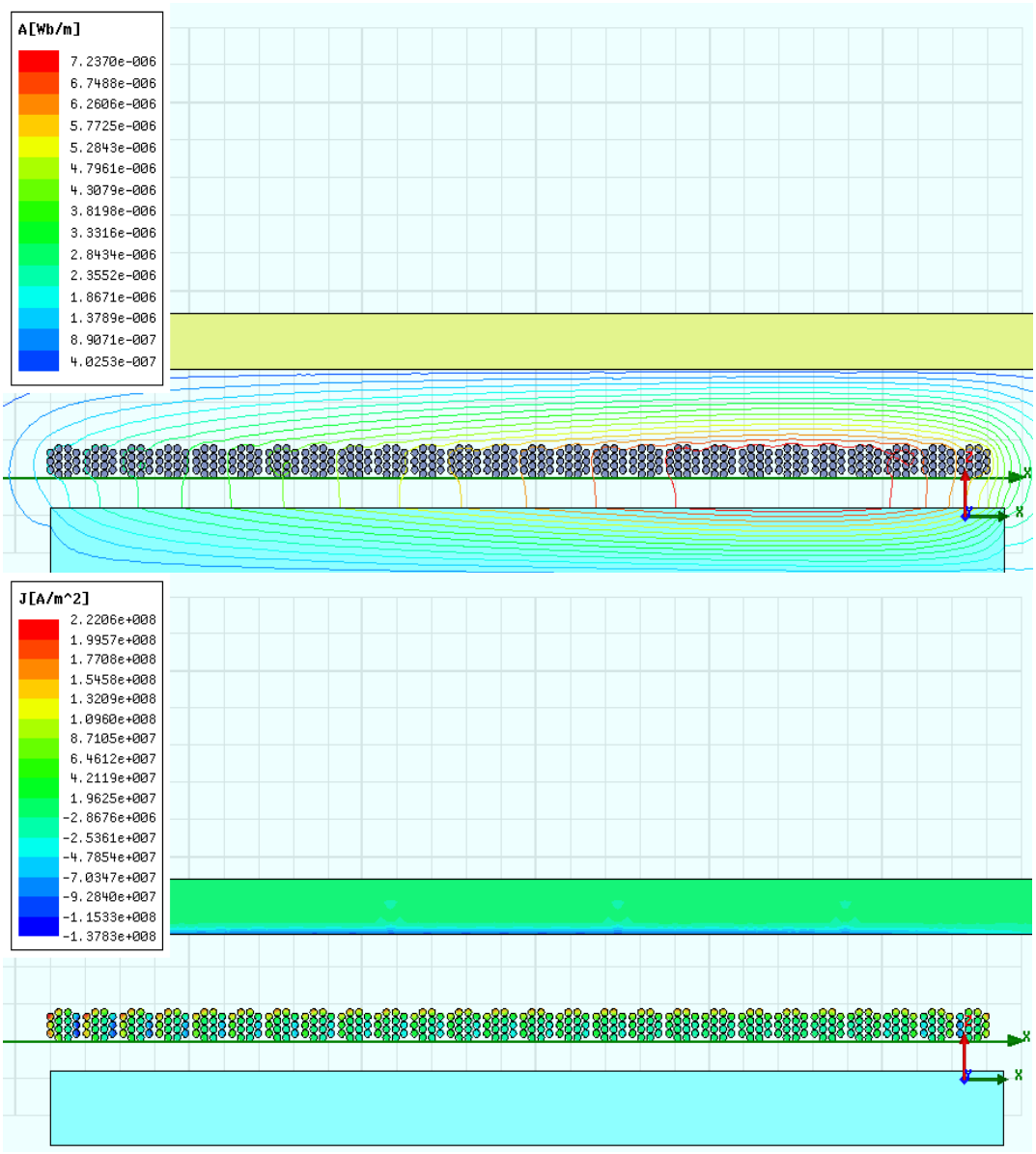
Çizelge H.2 : 180mm bobinin ferromanyetik tencere ile yüklüyken analiz sonucu endüktans ve direnç değerleri

Frekans [kHz]	Omik Kayıplar [W]		Enerji [J]	Direnç [Ω]	Endüktans [µH]
	Tüm Sistem	Tencere			
5.00	1610.790806	1475.420445	0.043520	1.288633	69.63226292
6.00	1849.752542	1695.852425	0.040754	1.479802	65.20590506
6.67	2003.292567	1836.881003	0.039211	1.602634	62.73688638
7.50	2189.560048	2007.568202	0.037538	1.751648	60.06010298
8.57	2421.624426	2219.941737	0.035706	1.937300	57.13007688
10.00	2720.407810	2493.528041	0.033682	2.176326	53.89112688
15.00	3703.821099	3401.984233	0.028809	2.963057	46.09419982
20.00	4629.151151	4272.791902	0.025729	3.703321	41.16599974
25.00	5519.611789	5123.953166	0.023547	4.415689	37.67456979
28.57	6140.705125	5723.337874	0.022325	4.912564	35.71952064
33.33	6953.139980	6512.396939	0.020989	5.562512	33.58258574
40.00	8064.384719	7597.980143	0.019504	6.451508	31.20680022
50.00	9670.623533	9175.105204	0.017810	7.736499	28.49526684
66.67	12147.684705	11617.760009	0.015790	9.718148	25.26474601
100.00	16177.546725	15604.858341	0.013252	12.942037	21.20291171

EK I



Şekil I.1 : Aralıklı sarılan bobinin analizi (100kHz)



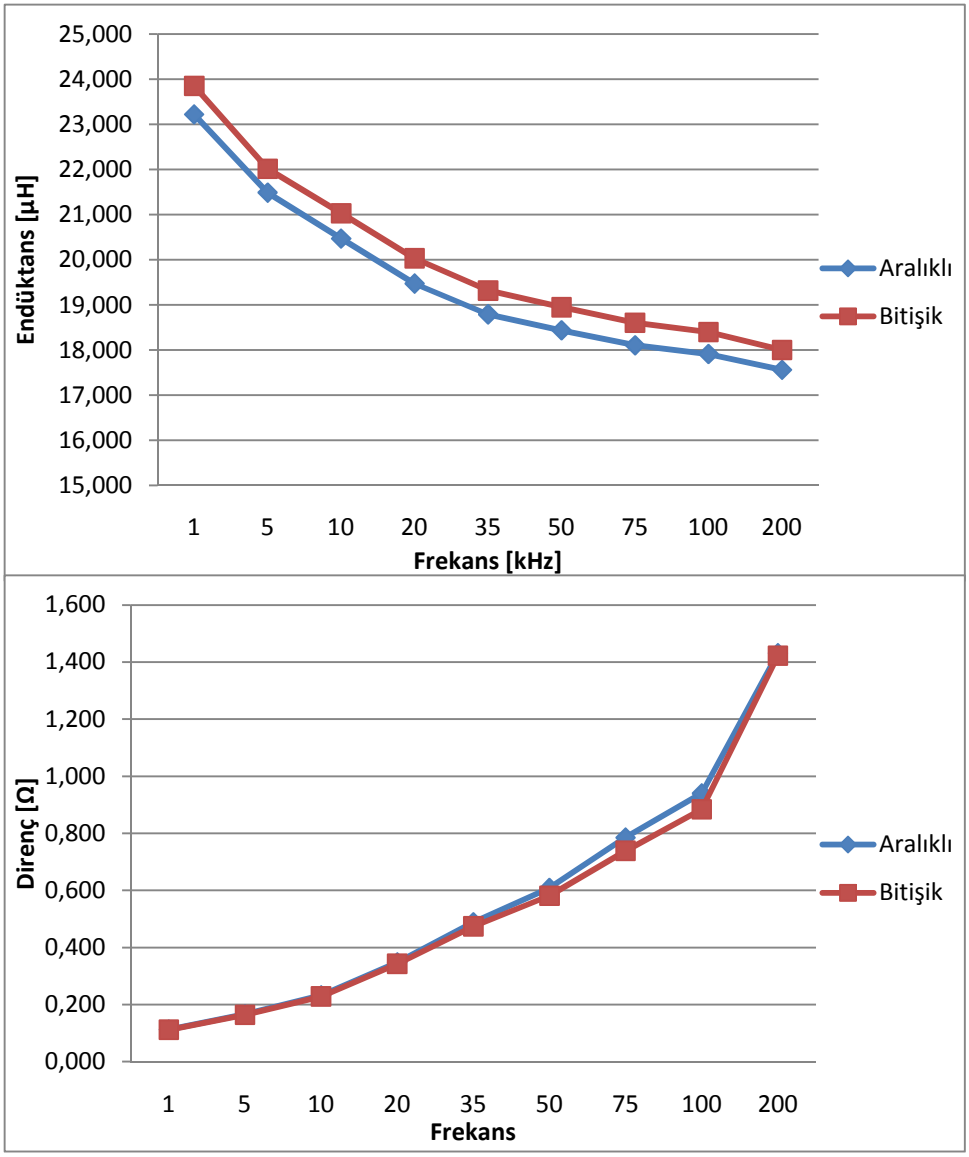
Şekil I.2 : Bitişik sarılan bobinin analizi (100kHz)

Çizelge I.1 : Aralıklı sarım ölçümleri

Frekans [kHz]	**Omik Kayıplar [W]**			**Enerji [J]**	***Direnç [Ω]***	***Endüktans [μH]***	***Tencere/Top [%]***
	Toplam	**Tencere**	**Bobin**				
1	141.050	37.980	103.070	0.01451	*0.113*	*23.213*	26.927
5	208.197	86.019	122.179	0.01343	*0.167*	*21.483*	41.316
10	290.995	127.058	163.936	0.01279	*0.233*	*20.465*	43.663
20	435.308	193.817	241.490	0.01217	*0.348*	*19.468*	44.524
35	609.922	286.011	323.911	0.01174	*0.488*	*18.787*	46.893
50	760.692	375.263	385.429	0.01152	*0.609*	*18.433*	49.332
75	981.268	516.206	465.062	0.01131	*0.785*	*18.101*	52.606
100	1174.391	644.004	530.387	0.01119	*0.940*	*17.908*	54.837
200	1788.976	1043.631	745.346	0.01097	*1.431*	*17.559*	58.337

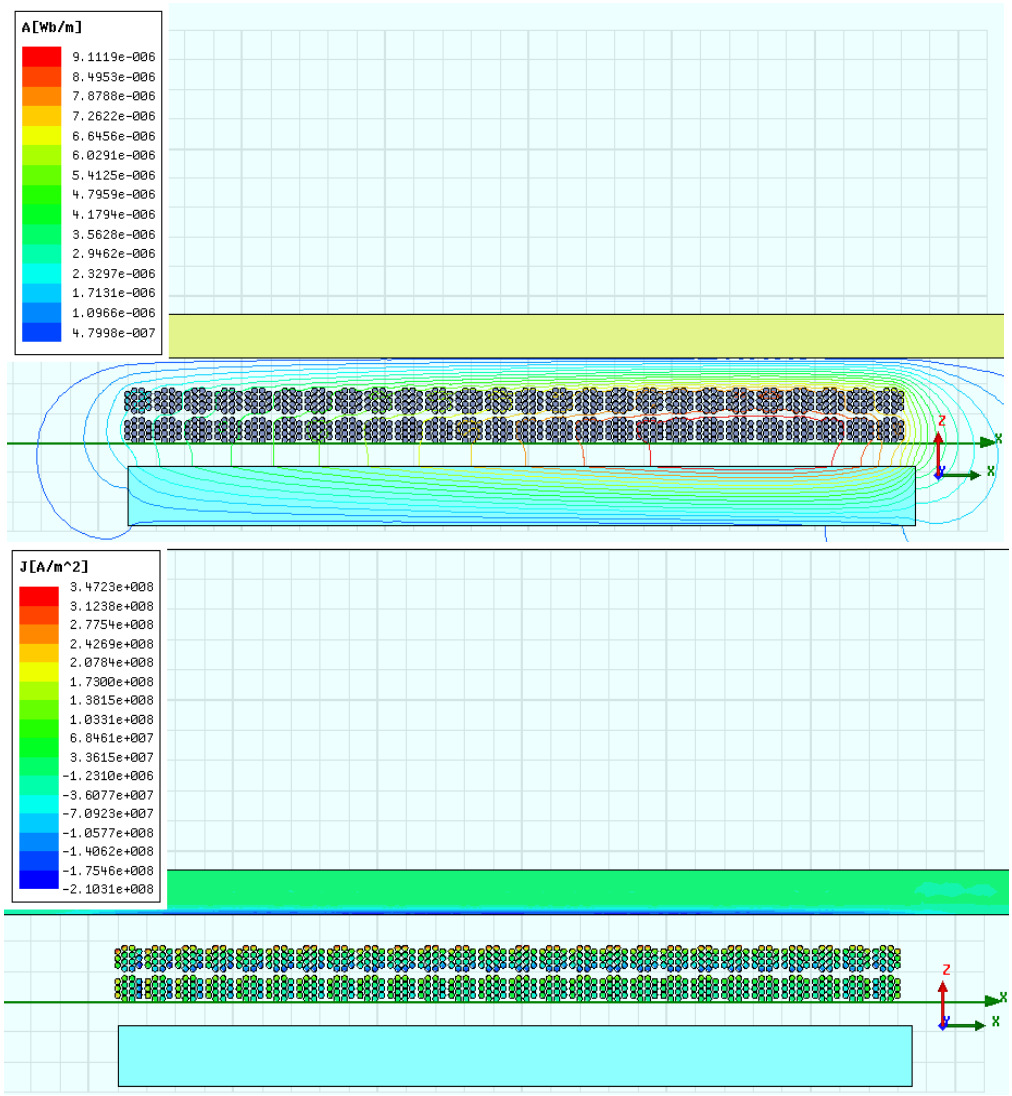
Çizelge I.2 : Bitişik sarılan bobin ölçümleri

Frekans [kHz]	**Omik Kayıplar [W]**			**Enerji [J]**	***Direnç [Ω]***	***Endüktans [μH]***	***Tencere/Top [%]***
	Toplam	**Tencere**	**Bobin**				
1	139.765	39.317	100.448	0.01490	*0.112*	*23.847*	28.131
5	205.222	87.032	118.190	0.01376	*0.164*	*22.009*	42.408
10	285.508	125.119	160.389	0.01314	*0.228*	*21.027*	43.823
20	428.471	179.521	248.949	0.01252	*0.343*	*20.028*	41.898
35	592.624	245.625	346.999	0.01207	*0.474*	*19.314*	41.447
50	726.885	306.137	420.747	0.01184	*0.582*	*18.944*	42.116
75	923.435	404.136	519.298	0.01162	*0.739*	*18.599*	43.764
100	1104.655	502.211	602.444	0.01150	*0.884*	*18.394*	45.463
200	1777.827	894.064	883.763	0.01125	*1.422*	*17.998*	50.290



Şekil I.3 : Aralıklı ve bitişik sarımların direnç ve endüktans karşılaştırması

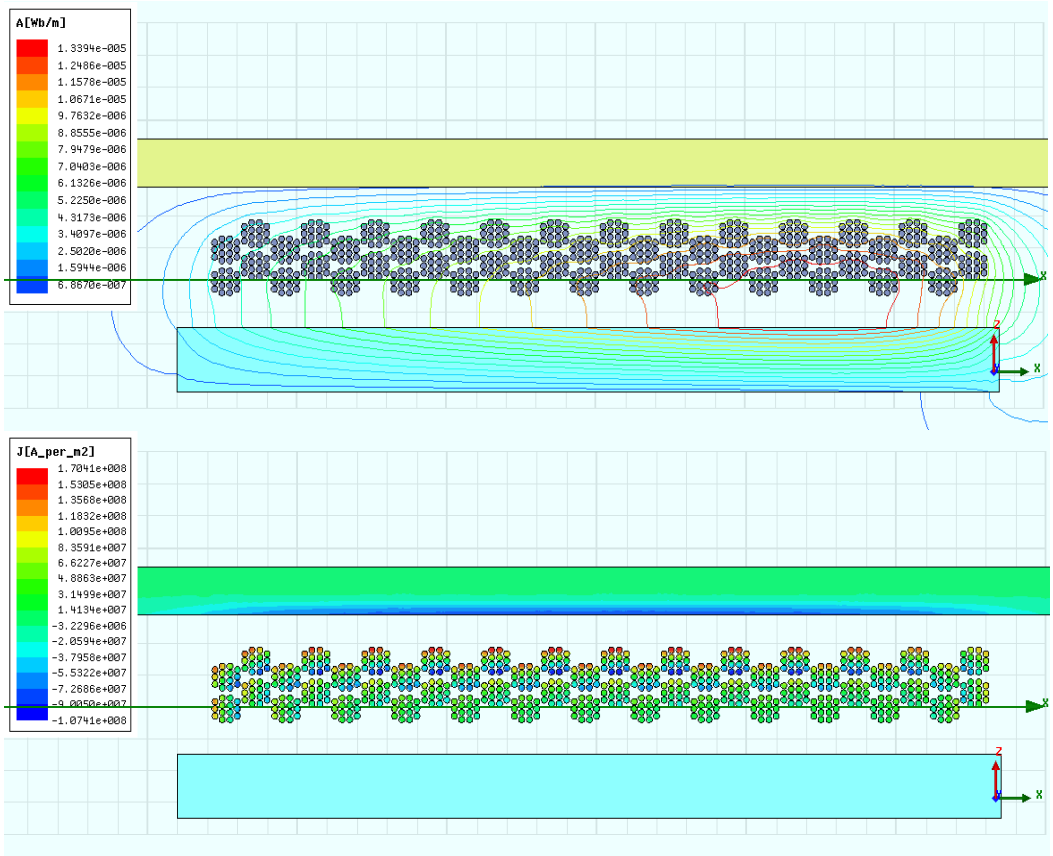
EK J



Şekil J.1 : Normal iki katlı 52 sarımlı bobin analizi

Çizelge J.1 : Normal iki katlı 52 sarımlı bobin ölçümleri

Frekans [kHz]	Omik Kayıplar [W]			Enerji [J]	*Direnç [Ω]*	*Endüktans [µH]*	*Tencere/Top [%]*
	Toplam	Tencere	Bobin				
1	366.696	160.590	206.107	0.04517	*0.293*	*72.267*	43.794
5	709.938	355.465	354.473	0.04007	*0.568*	*64.114*	50.070
10	1205.781	511.025	694.756	0.03669	*0.965*	*58.700*	42.381
20	2054.236	733.435	1320.800	0.03268	*1.643*	*52.283*	35.704
35	2849.181	1000.253	1848.928	0.02998	*2.279*	*47.973*	35.107
50	3410.619	1240.632	2169.988	0.02878	*2.728*	*46.052*	36.376
75	4197.289	1620.117	2577.172	0.02778	*3.358*	*44.441*	38.599
100	4913.497	1983.746	2929.751	0.02721	*3.931*	*43.531*	40.373
200	7457.072	3294.610	4162.462	0.02612	*5.966*	*41.796*	44.181



Şekil J.2 : Özel iki katlı 52 sarımlı bobin analizi

Çizelge J.2 : Özel iki katlı 52 sarımlı bobin ölçümleri

Frekans	Ohmik Kayıplar [W]			Enerji	*Direnç*	*Endüktans*	*Tencere/Top*
[kHz]	Toplam	Tencere	Bobin	[Joule]	*[Ω]*	*[µH]*	*[%]*
1	377.702	165.834	211.869	0.05235	*0.302*	*83.759*	43.906
5	745.284	367.731	377.553	0.04708	*0.596*	*75.320*	49.341
10	1304.505	529.498	775.007	0.04353	*1.044*	*69.641*	40.590
20	2336.616	762.566	1574.049	0.03901	*1.869*	*62.421*	32.636
35	3350.602	1044.488	2306.114	0.03572	*2.680*	*57.145*	31.173
50	4051.898	1298.355	2753.543	0.03420	*3.242*	*54.714*	32.043
75	5002.032	1696.262	3305.770	0.03293	*4.002*	*52.687*	33.911
100	5848.522	2073.911	3774.611	0.03222	*4.679*	*51.560*	35.460
200	8809.966	3415.887	5394.079	0.03091	*7.048*	*49.458*	38.773

EK K

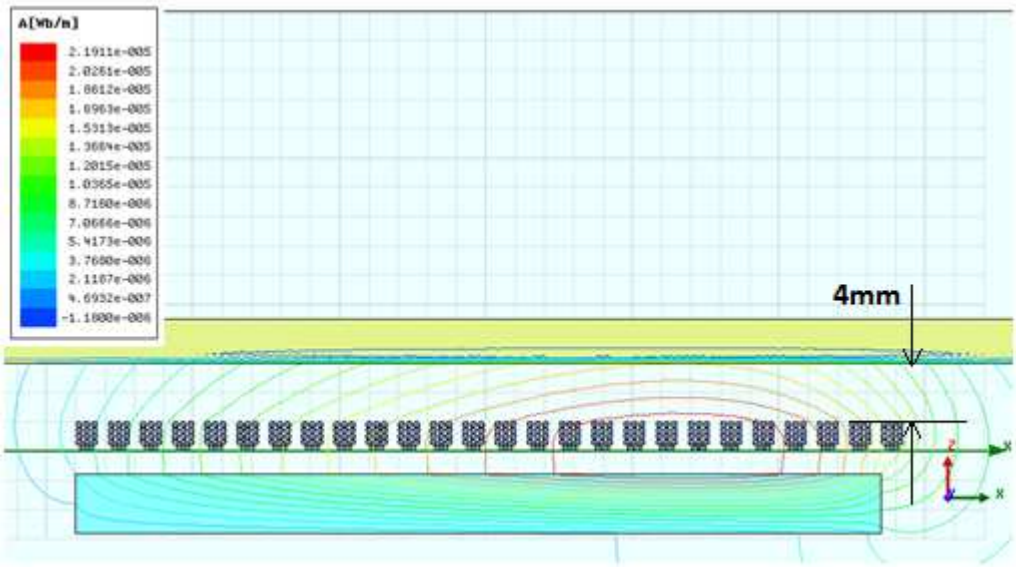
Çizelge K.1 : Farklı bağıl manyetik geçirgenliğe sahip feritler ile analiz sonuçları

	Frekans	Omik Kayıplar [W]			Enerji	*Direnç*	*Endüktans*	*Tencere/*
	[kHz]	Toplam	Tencere	Bobin	[J]	*[Ω]*	*[µH]*	*Top*
µ = 2300 ρ=0,154 Siemens/m	**1**	141,050425	37,980186	103,070238	0,014508	*0,11284*	*23,213243*	26,92667
	5	208,197437	86,018592	122,178845	0,013427	*0,166558*	*21,482616*	41,31587
	10	290,994662	127,058404	163,936258	0,012791	*0,232796*	*20,465044*	43,66348
	20	435,307817	193,817481	241,490336	0,012168	*0,348246*	*19,468214*	44,52424
	35	609,921972	286,010800	323,911172	0,011742	*0,487938*	*18,78685*	46,89301
	50	760,691781	375,262616	385,429164	0,011521	*0,608553*	*18,432917*	49,33176
	75	981,268097	516,205612	465,062485	0,011313	*0,785014*	*18,101364*	52,60597
	100	1174,391188	644,004023	530,387164	0,011193	*0,939513*	*17,908176*	54,83727
	200	1788,976458	1043,630629	745,345829	0,010974	*1,431181*	*17,558657*	58,33674
	Frekans	**Omik Kayıplar [W]**			**Enerji**	***Direnç***	***Endüktans***	***Tencere/***
	[kHz]	**Toplam**	**Tencere**	**Bobin**	**[J]**	***[Ω]***	***[µH]***	***Top***
µ = 1000 h=4mm ρ=0,154 Siemens/m	**1**	141,001567	37,933621	103,067945	0,014499	*0,112801*	*23,197699*	26,90298
	5	208,053252	85,921128	122,132125	0,013418	*0,166443*	*21,469194*	41,29766
	10	290,727551	126,922798	163,804753	0,012783	*0,232582*	*20,45325*	43,65696
	20	434,860227	193,624339	241,235888	0,012161	*0,347888*	*19,458028*	44,52565
	35	609,298933	285,737536	323,561397	0,011736	*0,487439*	*18,777557*	46,89612
	50	759,922596	374,911063	385,011533	0,011515	*0,607938*	*18,424007*	49,33543
	75	980,264137	515,729135	464,535002	0,011308	*0,784211*	*18,092769*	52,61124
	100	1173,153016	643,416349	529,736667	0,011187	*0,938522*	*17,899763*	54,84505
	200	1786,721096	1042,711874	744,009223	0,010969	*1,429377*	*17,550547*	58,35896
	Frekans	**Omik Kayıplar [W]**			**Enerji**	***Direnç***	***Endüktans***	***Tencere/***
	[kHz]	**Toplam**	**Tencere**	**Bobin**	**[J]**	***[Ω]***	***[µH]***	***Top***
µ = 5000 h=4mm ρ=0,154 Siemens/m	**1**	141,070836	37,999650	103,071186	0,014512	*0,112857*	*23,219728*	26,93657
	5	208,257415	86,059330	122,198085	0,013430	*0,166606*	*21,488215*	41,32354
	10	291,105021	127,115053	163,989968	0,012794	*0,232884*	*20,469967*	43,66639
	20	435,489418	193,898250	241,591168	0,012170	*0,348392*	*19,472461*	44,52422
	35	610,163665	286,124643	324,039022	0,011744	*0,488131*	*18,790719*	46,8931
	50	760,972685	375,409698	385,562987	0,011523	*0,608778*	*18,436627*	49,33287
	75	981,583453	516,404202	465,179251	0,011316	*0,785267*	*18,104936*	52,6093
	100	1174,706798	644,249125	530,457673	0,011195	*0,939765*	*17,911665*	54,8434
	200	1788,975439	1044,013210	744,962229	0,010976	*1,43118*	*17,561996*	58,35816

Çizelge K.2 : Farklı iletkenliğe sahip feritler ile analiz sonuçları

	Frekans	Omik Kayıplar [W]			Enerji	*Direnç*	*Endüktans*	*Tencere/*
	[kHz]	Toplam	Tencere	Bobin	[J]	*[Ω]*	*[µH]*	*Top*
µ = 2300 h=4mm ρ=0,05 Siemens/m	**1**	141,050419	37,980183	103,070237	0,014508	*0,11284*	*23,213242*	26,92667
	5	208,197398	86,018582	122,178816	0,013427	*0,166558*	*21,482615*	41,31588
	10	290,994531	127,058392	163,936138	0,012791	*0,232796*	*20,465043*	43,6635
	20	435,307349	193,817455	241,489894	0,012168	*0,348246*	*19,468213*	44,52428
	35	609,920968	286,010796	323,910172	0,011742	*0,487937*	*18,786849*	46,89309
	50	760,690312	375,262574	385,427738	0,011521	*0,608552*	*18,432916*	49,33185
	75	981,266520	516,205598	465,060922	0,011313	*0,785013*	*18,101363*	52,60605
	100	1174,390406	644,004012	530,386394	0,011193	*0,939512*	*17,908175*	54,8373
	200	1788,987123	1043,630526	745,356597	0,010974	*1,43119*	*17,558659*	58,33639
	Frekans	**Omik Kayıplar [W]**			**Enerji**	***Direnç***	***Endüktans***	***Tencere/***
	[kHz]	**Toplam**	**Tencere**	**Bobin**	**[J]**	***[Ω]***	***[µH]***	***Top***
µ = 2300 h=4mm ρ=0,3Siemens/m	**1**	141,050413	37,980183	103,070230	0,014508	*0,11284*	*23,213242*	26,92667
	5	208,197214	86,018581	122,178634	0,013427	*0,166558*	*21,482615*	41,31591
	10	290,993753	127,058392	163,935361	0,012791	*0,232795*	*20,465043*	43,66361
	20	435,303877	193,817443	241,486434	0,012168	*0,348243*	*19,468212*	44,52463
	35	609,909245	286,010761	323,898483	0,011742	*0,487927*	*18,786846*	46,89399
	50	760,663895	375,262477	385,401417	0,011521	*0,608531*	*18,43291*	49,33355
	75	981,197998	516,205045	464,992953	0,011313	*0,784958*	*18,101354*	52,60967
	100	1174,256815	644,003574	530,253240	0,011193	*0,939405*	*17,90816*	54,8435
	200	1788,355488	1043,629447	744,726041	0,010974	*1,430684*	*17,55863*	58,35693
	Frekans	**Omik Kayıplar [W]**			**Enerji**	***Direnç***	***Endüktans***	***Tencere/***
	[kHz]	**Toplam**	**Tencere**	**Bobin**	**[J]**	***[Ω]***	***[µH]***	***Top***
µ = 2300 h=6mm ρ=0,154 Siemens/m	**1**	141,085935	38,012962	103,072973	0,014567	*0,112869*	*23,306808*	26,94313
	5	208,570985	86,326614	122,244370	0,013483	*0,166857*	*21,573351*	41,38956
	10	291,130488	127,024935	164,105553	0,012844	*0,232904*	*20,551125*	43,63162
	20	434,187116	192,493926	241,693190	0,012219	*0,34735*	*19,550719*	44,33432
	35	605,255536	281,291489	323,964047	0,011792	*0,484204*	*18,867521*	46,47483
	50	751,234059	365,884387	385,349672	0,011570	*0,600987*	*18,512697*	48,70445
	75	963,488879	498,652331	464,836548	0,011363	*0,770791*	*18,180744*	51,75486
	100	1150,260509	620,226606	530,033903	0,011242	*0,920208*	*17,987611*	53,92053
	200	1762,251809	1018,020593	744,231216	0,011023	*1,409801*	*17,63674*	57,76817

EK L



Şekil L.1 : Ferromanyetik tencere ile hava aralığı 4mm iken analiz (20kHz)

Çizelge L.1 : 2mm hava aralığı ile analiz sonuçları

Frekans [kHz]	Ohmik Kayıplar [W]			Enerji [Joule]	*Direnç [Ω]*	*Endüktans [µH]*	*Tencere/Top [%]*
	Toplam	Tencere	Bobin				
1	647.897	540.774	107.124	0.09450	*0.5183*	*151.208*	83.4659
5	2168.557	2013.483	155.074	0.05493	*1.7348*	*87.895*	92.8490
10	3642.733	3405.285	237.449	0.04206	*2.9142*	*67.303*	93.4816
20	6241.133	5856.792	384.341	0.03174	*4.9929*	*50.776*	93.8418
35	9928.019	9416.192	511.826	0.02480	*7.9424*	*39.685*	94.8446
50	13459.062	12883.860	575.203	0.02086	*10.7672*	*33.383*	95.7263
75	18830.157	18198.460	631.698	0.01678	*15.0641*	*26.845*	96.6453
100	23386.060	22715.370	670.689	0.01417	*18.7088*	*22.671*	97.1321
200	34363.341	33555.280	808.061	0.00936	*27.4907*	*14.974*	97.6485

Çizelge L.2 : 3mm hava aralığı ile analiz sonuçları

Frekans [kHz]	Ohmik Kayıplar [W]			Enerji [Joule]	*Direnç [Ω]*	*Endüktans [μH]*	*Tencere/Top [%]*
	Toplam	Tencere	Bobin				
1	585.315	478.809	106.506	0.09104	*0.4683*	*145.672*	81.8037
5	2031.841	1879.441	152.400	0.05529	*1.6255*	*88.471*	92.4994
10	3511.217	3276.988	234.229	0.04320	*2.8090*	*69.118*	93.3291
20	6214.030	5829.845	384.185	0.03322	*4.9712*	*53.148*	93.8175
35	10048.012	9529.658	518.354	0.02628	*8.0384*	*42.048*	94.8412
50	13583.411	12997.461	585.950	0.02228	*10.8667*	*35.651*	95.6863
75	18668.965	18023.871	645.095	0.01819	*14.9352*	*29.098*	96.5446
100	22731.680	22047.043	684.637	0.01565	*18.1853*	*25.046*	96.9882
200	31715.574	30891.302	824.272	0.01128	*25.3725*	*18.040*	97.4011

Çizelge L.3 : 4mm hava aralığı ile analiz sonuçları

Frekans [kHz]	Ohmik Kayıplar [W]			Enerji [Joule]	*Direnç [Ω]*	*Endüktans [μH]*	*Tencere/Top [%]*
	Toplam	Tencere	Bobin				
1	532.585	426.536	106.049	0.08800	*0.4261*	*140.805*	80.0878
5	1861.321	1710.956	150.365	0.05545	*1.4891*	*88.718*	91.9216
10	3177.783	2945.916	231.867	0.04405	*2.5422*	*70.473*	92.7035
20	5445.133	5061.678	383.455	0.03456	*4.3561*	*55.298*	92.9578
35	8535.303	8013.229	522.074	0.02829	*6.8282*	*45.261*	93.8834
50	11503.547	10907.216	596.331	0.02489	*9.2028*	*39.820*	94.8161
75	16170.089	15503.640	666.449	0.02139	*12.9361*	*34.229*	95.8785
100	20266.692	19552.427	714.265	0.01910	*16.2134*	*30.558*	96.4757
200	30821.187	29949.726	871.461	0.01463	*24.6569*	*23.411*	97.1725

Çizelge L.4 : 5mm hava aralığı ile analiz sonuçları

Frekans [kHz]	Ohmik Kayıplar [W]			Enerji [Joule]	*Direnç [Ω]*	*Endüktans [μH]*	*Tencere/Top [%]*
	Toplam	Tencere	Bobin				
1	489.107	383.408	105.699	0.08527	*0.3913*	*136.432*	78.3893
5	1748.760	1599.880	148.879	0.05573	*1.3990*	*89.174*	91.4866
10	3057.799	2827.208	230.592	0.04489	*2.4462*	*71.819*	92.4589
20	5353.054	4968.106	384.948	0.03556	*4.2824*	*56.904*	92.8088
35	8493.898	7965.299	528.599	0.02931	*6.7951*	*46.889*	93.7767
50	11474.351	10868.365	605.986	0.02590	*9.1795*	*41.433*	94.7188
75	16041.536	15363.155	678.381	0.02242	*12.8332*	*35.865*	95.7711
100	19894.866	19167.736	727.130	0.02016	*15.9159*	*32.261*	96.3451
200	28725.351	27833.844	891.506	0.01597	*22.9803*	*25.546*	96.8964

Çizelge L.5 : 6mm hava aralığı ile analiz sonuçları

Frekans [kHz]	Ohmik Kayıplar [W]			Enerji [Joule]	*Direnç [Ω]*	*Endüktans [µH]*	*Tencere/Top [%]*
	Toplam	Tencere	Bobin				
1	451.941	346.515	105.426	0.08286	*0.3616*	*132.581*	76.6727
5	1628.980	1481.461	147.519	0.05584	*1.3032*	*89.351*	90.9441
10	2865.968	2636.651	229.317	0.04575	*2.2928*	*73.193*	91.9986
20	5073.730	4685.618	388.112	0.03697	*4.0590*	*59.151*	92.3506
35	8123.787	7583.014	540.773	0.03101	*6.4990*	*49.618*	93.3433
50	11052.462	10426.897	625.565	0.02778	*8.8420*	*44.449*	94.3400
75	15611.059	14905.259	705.800	0.02446	*12.4888*	*39.142*	95.4788
100	19494.315	18735.239	759.076	0.02228	*15.5955*	*35.651*	96.1062
200	28342.194	27407.941	934.254	0.01815	*22.6738*	*29.044*	96.7037

Çizelge L.6 : 7mm hava aralığı ile analiz sonuçları

Frekans [kHz]	Ohmik Kayıplar [W]			Enerji [Joule]	*Direnç [Ω]*	*Endüktans [µH]*	*Tencere/Top [%]*
	Toplam	Tencere	Bobin				
1	419.966	314.761	105.205	0.08068	*0.3360*	*129.085*	74.9491
5	1510.029	1363.692	146.337	0.05591	*1.2080*	*89.458*	90.3090
10	2639.275	2411.068	228.207	0.04659	*2.1114*	*74.551*	91.3534
20	4630.300	4237.370	392.930	0.03865	*3.7042*	*61.836*	91.5139
35	7379.251	6820.140	559.112	0.03319	*5.9034*	*53.109*	92.4232
50	9993.232	9340.102	653.130	0.03014	*7.9946*	*48.224*	93.4643
75	14065.198	13322.102	743.097	0.02701	*11.2522*	*43.214*	94.7168
100	17688.342	16883.157	805.184	0.02500	*14.1507*	*39.995*	95.4479
200	27695.012	26683.671	1011.341	0.02110	*22.1560*	*33.753*	96.3483

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Hakan Süleyman YARDİBİ

Doğum Yeri ve Tarihi: Karabük, 11.08.1985

Adres: Doğu Mah. Kum Sok. Erinal Apt. No:11 Kat 4.

Lisans Üniversite: İstanbul Teknük Üniversitesi