



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



PLL KONTROLLÜ İKİ FAZLI YÜRÜYEN
DALGA İNDÜKSİYON ISITICI TASARIMI

Abdullah ALACA

YÜKSEK LİSANS

Elektrik-Elektronik Mühendisliği
Anabilim Dalı

Ocak-2025
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Abdullah ALACA tarafından hazırlanan “PLL Kontrollü İki Fazlı Yürüyen Dalga İndüksiyon Isıtıcı Tasarımı” adlı tez çalışması 20/01/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Doç.Dr. M. Fahri ÜNLERŞEN
(Necmettin Erbakan Üniversitesi)

.....

Danışman

Prof. Dr. Ercan YALDIZ
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Üye

Doç.Dr. Mümtaz MUTLUER
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlüt UYAN
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Abdullah ALACA

Tarih: 20/01/2025

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

PLL KONTROLLÜ İKİ FAZLI YÜRÜYEN DALGA İNDÜKSİYON ISITICI TASARIMI

Abdullah ALACA

**Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Prof. Dr. Ercan YALDIZ

2025, 94 Sayfa

Jüri

**Prof. Dr. Ercan YALDIZ
Doç. Dr. M. Fahri ÜNLERŞEN
Doç. Dr. Mümtaz MUTLUER**

İndüksiyon ısıtma hızlı, temassız, temiz, verimli, kolay ve hassas kontrol edilebilir bir ısıtma teknolojisidir. Bu özellikleri nedeniyle yüzey sertleştirme, temperleme, tavlama, kürleme gibi endüstriyel uygulamalarda; medikal uygulamalarda ve indüksiyon ocakları gibi evsel uygulamalarda sıklıkla tercih edilmektedir. İndüksiyon ısıtma sistemlerinde iş parçasının sıcaklığa bağlı olarak değişen parametreleri nedeniyle sistemin rezonans frekansı değişmekte ve verim düşmektedir. Bu tezde, indüksiyon ısıtma sisteminin sürekli rezonansta tutulması faz kilitli döngü (PLL) kullanılarak sağlanmıştır. Deri etkisinin azaltılması için indüksiyon bobini litz telinden yapılmıştır. Enine akı indüksiyon ısıtma sistemlerinde karşılaşılan iş parçasının orta kısımlarında yeterli ısı artışı oluşmama sorunu, iki fazlı yürüyen dalga indüksiyon ısıtıcı tasarımı ile çözülmüştür. Kaçak manyetik alanların azaltılması ve manyetik akının doğrudan iş parçasına yönlendirilmesi amacıyla ferrit manyetik akı yoğunlaştırıcı kullanılmıştır. Sayısal analizler 3 boyutlu modeller üzerinden sonlu elemanlar yöntemi kullanan COMSOL Multiphysics programı ile yapılmıştır. İlgili programda yoğunlaştırıcı ve yoğunlaştırıcısız, tek ve çift bobinli enine akı indüksiyon ısıtma modellerinin karşılaştırması yapılmıştır. Sayısal analiz sonuçlarından enine akı indüksiyon ısıtma sistemlerinde iş parçası yüzeyinde homojen ısıtma için yürüyen dalga indüksiyon ısıtma ve manyetik akı yoğunlaştırıcı kullanılmasının sistemin performansını arttırdığı görülmüştür. Gerçekleştirilen indüksiyon ısıtma sistemi tarafından iş parçası üzerinde oluşturan sıcaklık değerleri termal kamera ile ölçülerek sistem performansı değerlendirilmiştir. Termal analizler Fluke Smartview programı kullanılarak yapılmıştır. İş parçası yüzeyinde oluşan sıcaklık değerlerinin minimum, maksimum, ortalama değerleri, standart sapmaları ve yataydaki iki eksen boyunca sıcaklık değişimleri incelenmiştir. Ayrıca seçilen bir noktanın belirli bir sıcaklığa ulaşma süresi değerlendirilmiştir. İki fazlı yürüyen dalga indüksiyon ısıtıcı modelinde bobin akımları arasındaki faz farkı değiştirilerek parametrik tarama yapılmış, farklı durumlar için en uygun faz farkı değerleri belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: İndüksiyon ısıtma, Manyetik akı yoğunlaştırıcı, Faz kilitli döngü, Yürüyen dalga.

ABSTRACT

MS THESIS

PLL CONTROLLED TWO-PHASE TRAVELLING WAVE INDUCTION HEATER DESIGN

Abdullah ALACA

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Electrical and Electronics Engineering**

Advisor: Prof. Dr. Ercan YALDIZ

2025, 94 Pages

Jury

**Advisor Prof. Dr. Ercan YALDIZ
Assoc. Prof. Dr. M. Fahri ÜNLERŞEN
Assoc. Prof. Dr. Mümtaz MUTLUER**

Induction heating is a fast, non-contact, clean, efficient, easy and precisely controllable heating technology. Due to these features, it is frequently preferred in industrial applications such as surface hardening, tempering, annealing, curing; in some medical applications and in domestic applications such as induction furnaces. In induction heating systems, the resonance frequency of the system changes and efficiency decreases due to the changing parameters of the workpiece depending on the temperature. In this thesis, keeping the induction heating system constantly at resonance has been achieved by using phase locked loop (PLL). Induction coil has been made of litz wire to reduce the skin effect. The problem of insufficient heat increase in the middle parts of the workpiece encountered in transverse flux induction heating systems has been solved by the two-phase traveling wave induction heater design. Ferrite magnetic flux concentrator has been used to reduce stray magnetic fields and direct the magnetic flux directly to the workpiece. Numerical analyses have been performed using the COMSOL Multiphysics program using the finite element method on 3D models. In the relevant program, a comparison of single and double coil transverse flux induction heating models with and without concentrators have been made. From the numerical analysis results, it has been observed that using traveling wave induction heating and magnetic flux concentrator for homogeneous heating on the workpiece surface in transverse flux induction heating systems increased the performance of the system. The system performance has been evaluated by measuring the temperature created on the workpiece by the induction heating system with a thermal camera. Thermal analyses have been performed using the Fluke Smartview program. The minimum, maximum, average values and standard deviations of the temperature values occurring on the workpiece surface, and temperature changes along the two horizontal axes have been examined. In addition, the time it took for a selected point to reach a certain temperature has been evaluated. Parametric scanning has been performed by changing the phase difference between the coil currents in the two-phase traveling wave induction heater model, and the most appropriate phase difference values have been determined for different situations.

Keywords: Induction heating, Magnetic flux concentrator, Phase locked loop, Travelling wave.

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında bilgi ve tecrübeleri ile bilimsel gelişimime katkı sağlayan, beni yönlendiren değerli danışman hocam Prof. Dr. Ercan YALDIZ'a, bugünlere gelmemde emeği geçen tüm hocalarıma ve aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca beni çalışmaya cesaretlendiren değerli büyüğüm mesai arkadaşım Makina Müh. Selim SARIGÜL'e ve mesai saatleri dışında uzun çalışma zamanlarımda sabrıyla yanımda olan hayat arkadaşım eşim Raziye ALACA ile hayat kaynaklarım çocuklarım Ahmet ve Mehmet Selim'e çok teşekkür ederim.

Abdullah ALACA
Konya-2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR	vi
1. GİRİŞ	1
1.1. İndüksiyon Isıtma	3
1.2. Geçmişten Günümüze İndüksiyon Isıtma	4
1.3. İndüksiyon Isıtıcının Çalışma Prensibi.....	5
1.3.1. İndüksiyon ısıtmada kullanılan inverter topolojileri.....	8
1.3.2. Yürüyen dalga indüksiyon ısıtma	10
1.4. İndüksiyon Isıtma Performansına Etki Eden Faktörler	11
1.4.1. Deri olayı	11
1.4.2. Özgül direnç.....	13
1.4.3. Manyetik geçirgenlik	14
1.4.4. Elektromanyetik yakınlık etkisi	16
1.4.5. Elektromanyetik yarıklık etkisi	18
1.4.6. Elektromanyetik halka etkisi	18
1.4.7. Elektromanyetik kuvvet.....	19
1.4.8. Elektromanyetik uç ve kenar etkisi.....	20
1.4.9. Isıl işlem görececek malzemenin termal özellikleri	21
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	23
2.1. İnverter Çalışmaları	23
2.2. Modülasyon ve Kontrol Algoritmaları	26
2.3. Manyetik Akı Yoğunlaştırıcı	33
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	42
3.1. Analiz ve Simülasyon.....	42

3.2. Devre Tasarımı	45
3.2.1. Faz kilitli döngü (PLL) tasarımı	45
3.2.2. İnverter tasarımı	50
3.2.3. İndüksiyon bobini devre tasarımı.....	51
3.3. Termal Kamera Ölçümleri.....	53
3.4. İş parçası.....	54
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	55
4.1. Analiz Sonuçları	55
4.2. PLL Devresi Ölçüm Sonuçları.....	68
4.3. Termal Kamera Ölçüm Sonuçları	71
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	78
5.1. Sonuçlar	78
5.2. Öneriler	82
KAYNAKLAR	85

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

B	: Manyetik akı yoğunluğu
B_p	: Manyetik akı yoğunluğunun tepe değeri
C_r	: Rezonans kondansatörü
d	: Levha veya tel kalınlığı
E	: Elektrik alan şiddeti
f	: Frekans
F	: Kuvvet
H	: Manyetik alan şiddeti
H_c	: Koersif manyetik alan şiddeti
I	: Akım
J_s	: Yüzey akım yoğunluğu
$L_{eş}$	: Eşdeğer endüktans
P	: Birim kütle başına ısı kayıp
q	: Yük
$R_{eş}$	: Eşdeğer direnç
T	: Sıcaklık (Kelvin)
T_c	: Cruie sıcaklığı
T_0	: İlk sıcaklık değeri
v	: Yükün hızı
α	: Sıcaklık katsayısı
ε	: Elektromotor kuvvet
λ	: Isıl iletkenlik
μ	: Manyetik geçirgenlik
μ_0	: Boşluğun manyetik geçirgenliği
ρ	: Özgül direnç
σ	: Özgül iletkenlik
τ	: Şarj ve deşarj zaman sabiti
ω	: Açısal frekans
δ	: Deri kalınlığı

Kısaltmalar

AC	: Alternative Current (Alternatif Akım)
ADC	: Asymmetrical Duty Cycle Control (Asimetrik Görev Döngüsü Kontrolü)
APWM	: Asymmetrical Pulse Width Modulation (Asimetrik Darbe Genlik Modülasyonu)
BJT	: Bipolar Junction Transistor (Bipolar Jonksiyon Transistör)
CAT6	: Category 6 Cable (Kategori 6 Kablo)
CMOS	: Complementary Metal Oxide Semiconductor (Bütünleyici Metal Oksit Yarı İletken)
DC	: Direct Current (Doğru Akım)
DSP	: Digital Signal Processor (Dijital Sinyal İşlemcisi)
EPDM	: Enhanced Pulse Density Modulation (Geliştirilmiş Darbe Yoğunluk Modülasyonu)
EM	: Electromagnetic (Elektromanyetik)
EMC	: Electromagnetic Compatability (Elektromanyetik Uyumluluk)
FPGA	: Field Programmable Gate Arrays (Alanda Programlanabilir Kapı Dizisi)
GHz	: Gigahertz
IGBT	: Insulated-Gate Bipolar Transistor (İzole Kapılı Bipolar Transistör)
IPA	: Instrument For Pre-Accession Assistance (Katılım Öncesi Yardım Aracı)
K	: Kelvin
kWh	: Kilowatt Hour (Kilowatt Saat)
LPF	: Low Pass Filter (Alçak Geçiren Filtre)
MMReO	: Multiple - Model Reset Observer (Çoklu Model Sıfırlama Gözlemcisi)
MOSFET	: Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (Metal Oksit Yarıiletken Alan Etkili Transistör)
OPAMP	: Operational Amplifier (İşlemsel Kuvvetlendirici)
PDM	: Pulse Density Modulation (Darbe Yoğunluk Modülasyonu)
PI	: Proportional Integral (Oransal İntegral)
PLL	: Phase Locked Loop (Faz Kilitli Döngü)
PSC	: Phase Shift Control (Faz Öteleme Kontrolü)
PWM	: Pulse Width Modulation (Darbe Genişlik Modülasyonu)
RB-IGBT	: Reverse Blocking Insulated Gate Bipolar Transistor (Ters Blokeli İzole Kapılı Bipolar Transistör)

ReO	: Reset Observer (Sıfırlama Gözlemcisi)
RMS	: Root Mean Square (Karekök Ortalama)
RTC	: Rapid Temperature Cycling (Hızlı Sıcaklık Döngüsü)
SM ² C	: Soft Magnetic Moldable Composite (Yumuşak Şekillendirilebilir Manyetik Kompozit)
SMC	: Soft Magnetic Composite (Yumuşak Manyetik Kompozit)
SMC-PLL	: Sliding Mode Controlled Phase Locked Loop (Kayan Kip Kontrollü Faz Kilitli Döngü)
SPCC	: Steel Plate Cold Rolled Commercial (Ticari Kalite Soğuk Haddelenmiş Çelik Sac)
TWh	: Terawatt Hour (Terawatt Saat)
VCO	: Voltage Controlled Oscillator (Voltaj Kontrollü Osilatör)
VF	: Variable Frequency (Değişken Frekans)
XOR	: Exclusive Or (Özel Veya Kapısı)
ZVS	: Zero Voltage Switching (Sıfır Gerilimde Anahtarlama)

1. GİRİŞ

Dünyada artan nüfusa göre her geçen gün enerji ihtiyacı artmaktadır. Sınırlı kaynaklara sahip dünyamızda artan enerji talebini karşılayabilmek için bir yandan yeni enerji kaynakları bulunmaya çalışılmakta diğer yandan mevcut enerji tüketen cihazların daha az enerji ile çalışabilmesinin yolları araştırılmaktadır.

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığınca hazırlanan 2020-2040 dönemini kapsayan Türkiye Elektrik Enerjisi Talep Projeksiyonu Raporu'nda "Uzun Dönemli Enerji Planlama ve Senaryolar" adlı 2018 yılında başlayan IPA projesi kapsamında Türkiye Enerji Modeli geliştirilerek 2020 yılında yaklaşık 305 TWh olarak gerçekleşen elektrik talebinin 20 yıllık dönemde yıllık bazda %2,9 – % 3,7 oranında değişerek 545-636 TWh bandına çıkacağı tahmin edilmektedir. Bu durumda nüfus artış oranı da dikkate alındığında kişi başı enerji tüketiminin yaklaşık 5.430-6.336 kWh seviyelerine çıkacağı öngörülmektedir. Dünya genelinde 2018 yılında toplam enerji tüketimi 161250 TWh olarak gerçekleşmiştir. Tüm dünyada 2040 yılına kadar enerji tüketiminin 641 – 675 Ekzajoule seviyesine çıkacağı düşünülmektedir. Tüm dünya genelinde sınırlı enerji kaynaklarının tüketilmesinin azaltılması amacıyla enerji performansı yüksek ürünler kullanılmaya başlanmıştır. 2016 – 2040 yılları arasındaki enerji yatırım projeksiyonunda 66,5 trilyon dolar enerji yatırım yapılması planlanmakta bunun %35'ini ise enerji verimliliğine ilişkin çalışmalar oluşturmaktadır (Topcan, 2019). Ülkemizde enerjinin etkin kullanılması, israfının önlenmesi, enerji maliyetlerinin ekonomi üzerindeki yükünün hafifletilmesi ve çevrenin korunması için enerji kaynaklarının ve enerjinin kullanımında verimliliğin artırılması amacıyla 2007 yılında 5627 sayılı kanun yayımlanmıştır.

Enerji israfının azaltılmasında, bir prosese giren enerji ile çıkan enerji veya faydalanılan enerji arasındaki farkı azaltmak yani sistemin verimini artırmak esastır. Üretimde enerji verimliliğinin artırılması tek başına yeterli değildir. Aynı zamanda üretilen ürünün yeterli kaliteye sahip olması ve aynı ürünü üreten üretici sayısı arttıkça kalitenin de artırılarak rekabet koşullarının sağlanması gereklidir. Bunun yanında ürünün hızlı bir şekilde üretilmesi ve son kullanıcıya tedariki büyük önem taşımaktadır. Endüstriyel ürünler ve proseslerle alakalı bilimsel çalışmalarda genellikle enerji verimliliği, ürün kalitesinin ve üretim süresinin kısaltılmasına ilişkin olmakta ve bu çalışmalar endüstriyel uygulamalara yön vermektedir.

Bu tez çalışmasında indüksiyon ısıtıcı performansının etkileyen faktörler göz önünde bulundurularak indüksiyon ısıtıcılarda verim ile ürün kalitesinin artırılması üzerine odaklanılmıştır.

Klasik indüksiyon ısıtma sistemlerinde verim, indüksiyon ısıtmanın başlangıç anında yüksekken işlem gören malzemenin sıcaklığa bağlı olarak değişen elektriksel parametreleri nedeniyle zamanla düşer. Bu durum, indüksiyon bobini üzerinden geçen akım ile bobin üzerindeki gerilim arasında oluşan faz farkı oluşmasına dolayısıyla aktif gücün azalmasına reaktif gücün ise artmasına sebep olur ve güç faktörü düşer. Güç faktörünün düşmesi bir yandan indüksiyon ısıtma performansını olumsuz etkilemekte iş parçasının daha uzun sürede istenilen sıcaklık değerine ulaşmasına sebep olmaktadır. Bu durum üretim maliyetini artırmakla kalmayıp son kullanıcı ürün tedarikinin gecikmesine sebep olmaktadır. Güç faktörünün yükseltilerek 1'e çıkarılması amacıyla frekansın değiştirilmesi veya indüksiyon ısıtma sisteminde kullanılan kondansatörlerin güç faktörüne bağlı olarak değiştirilmesi reaktif güç kompanzasyonunun yapılması gereklidir.

Farklı uygulama alanlarına göre indüksiyon ısıtma sistemlerinde farklı frekanslar kullanılmaktadır. Kullanılan frekans insan kulağının duyabileceği maksimum sınır olan 20 kHz'den başlamaktadır. Frekansın yükselmesiyle birlikte iletken içerisinde akım dağılımı bozulmaktadır. Deri olayı olarak adlandırılan bu durum sebebiyle iletkenin direnci artmakta ve geçen akıma bağlı olarak kayıp da artmaktadır. Bu kaybın önlenmesi için sabit akım koşullarını sağlamak amacıyla gerilim artırılrsa bile, akım dağılımı bozulmasının neden olduğu elektromanyetik (EM) etkiler önlenemez ve verim düşer. Bu tez çalışmasında performansı etkileyen deri etkisinin neden olduğu olumsuzlukların giderilmesi için tel kalınlığı deri kalınlığından daha küçük olan çoklu izoleli tellerden oluşan litz telinden indüksiyon bobini yapılmıştır. Bu sayede indüksiyon bobini içinde akımın homojen olarak dağılması sağlanarak yakınlık etkisi, halka etkisi gibi indüksiyon bobininin zarar görmesine sebep olan etkiler azaltılmıştır.

Tasarımı doğru yapılmamış bir indüksiyon ısıtma sisteminde proses sırasında iş parçası üzerinde farklı noktalardaki sıcaklık farklılıklarından dolayı termal etkilere maruz kalır. Bu etkiler malzeme üzerinde bir termal stres oluşturur. Termal stresin en aza indirgenmesi için malzeme üzerinde farklı noktalarda sıcaklık farklarının azaltılması gerekmektedir. Bu durumun sağlanması proses sonrası ürünün daha kaliteli olmasını sağlayacaktır. Bu tez çalışmasında homojen sıcaklık dağılımı konusu üzerinde de durulmuştur. Çalışmada tercih edilen enine akı indüksiyon ısıtma sisteminde indüksiyon bobininin orta kısmı üzerinde kalan iş parçası bölgesinde yeterince sıcaklık artışı

sağlanamaması sorununun önüne geçebilmek için yürüyen dalga indüksiyon ısıtma sistemi kullanılmıştır. Böylece iş parçası üzerinde homojen sıcaklık artışı sağlanarak termal stres azaltılmıştır. Ayrıca tasarımda kullanılan manyetik akı yoğunlaştırıcı ile kaçak manyetik alanların önüne geçilerek doğrudan manyetik akının olabildiğince eşit bir şekilde malzeme üzerine yoğunlaştırılması sağlanmıştır. Bütün bunların yanında sistemin düşük maliyetli olması amaçlanmıştır.

Bu bölümde manyetik ısıtma teknolojilerinin tarihsel gelişimi hakkında bilgiler verilmiş, indüksiyon ısıtma performansına etki eden etkenler üzerinde durulmuştur.

1.1. İndüksiyon Isıtma

Endüstriyel ısıtmada, açık alevli ocaklar, doğalgaz, elektrik, kızılötesi, mikrodalga ve indüksiyon ısıtma olmak üzere birçok ısıtma teknolojisi kullanılmaktadır. İndüksiyon ısıtma bu ısıtma teknolojileri arasında düşük maliyetli, yüksek verimli, ısı uygulama alanının kolay kontrol edilebilir olması ve daha az çevre kirliliğine sebep olması yönüyle modern endüstride son yıllarda tercih sebebi haline gelmiştir. İndüksiyon ısıtma ile diğer ısıtmaların enerji verimliliği kıyaslaması Çizelge 1.1’de verilmiştir (Frogner ve diğ. 2011).

Çizelge 1.1. Farklı ısıtma sistemlerinin kıyaslanması (Frogner ve diğ. 2011).

Isıtma teknolojisi	Verimlilik
Yanma fırını	20-30 %
Elektrikli fırın	25-35 %
Geleneksel İndüksiyon	40-60 %
Greenheat İndüksiyon	50-90 %

İndüksiyon ısıtma teknolojisi temassız, hızlı ve verimli olması sebebiyle endüstriyel uygulamalar (Lozinski, 1969), evsel kullanım (Moreland, 1973) ve medikal (Stauffer ve diğ., 1984) uygulamalarda tercih edilir hale gelmiştir. Güç elektroniği, kontrol teknikleri ve manyetik malzeme tasarımındaki ilerlemeler sayesinde indüksiyon ısıtma sistemleri oldukça hassas bir şekilde kontrol edilebilmek ve sistemleri daha ucuz ve kolay ulaşılabilir hale getirmektedir (Lucia ve diğ., 2013).

İndüksiyon ısıtma eritme, kütleme, yüzey sertleştirme, sızdırmazlık uygulamaları, malzeme şekillendirme, tavlama gibi ısı işlem gerektiren işlerde doğrudan

kullanılabildiği gibi elektriksel olarak iletken olmayan malzemelerin de dolaylı olarak işlenmesi ile kimyasal reaksiyonların gerçekleştirilmesinde yardımcı olarak kullanılmaktadır. İndüksiyon ısıtmada değişken manyetik alanının ısı işleme maruz bırakılacak malzeme üzerinde oluşturmuş olduğu eddy akımları sebebiyle malzemenin direncine bağlı olarak omik güç kayıpları oluşur. Joule etkisi de denilen söz konusu güç kayıpları nedeniyle malzeme ısınır. Bunun yanında ferromanyetik malzemelerde histerezis olayı da malzemenin ısınmasına sebep olur. Ancak histerezis nedeniyle oluşan ısı, omik etki sebebiyle oluşan ısıya göre çok daha düşük seviyededir. Değişken manyetik alan sebebiyle malzeme ısı işleme tabi tutulacak malzeme üzerinde oluşan eddy akımlarının dağılımı, deri olayı, yakınlık etkisi, halka etkisi (*ring effect*), slot etkisi (*slot effect*), uç ve kenar etkisi (*end and edge effect*) ve benzeri diğer etkiler sebebiyle homojen olmaz. Bu etkiler indüksiyon ısıtıcı sistemi performansı üzerinde etkiye sahiptir.

1.2. Geçmişten Günümüze İndüksiyon Isıtma

İndüksiyon ısıtmada Michael Faraday tarafından 1831 yılında keşfedilen EM indüksiyon prensibini kullanılır (Semiconductor, 2000).

Sebastian Ziani de Ferranti tarafından 1887 yılında indüksiyon ısıtmanın metal ergitmede kullanılması fikri ortaya atılmış ve indüksiyon ısıtıcı ile ilgili ilk patent alınmıştır (Nwosu ve diğ., 2021). 1891 yılında Fredrik Adolf Kjellin tarafından ilk endüstriyel indüksiyon fırını yapılmıştır. İlk yüksek frekanslı (20 kHz) pota tipi (*crucible*) indüksiyon fırını Edwin Fitch Northrup tarafından 1916 yılında Princeton'da geliştirilmiştir (Mühlbauer, 2008; Lucia ve diğ., 2013; Vishnuram ve diğ., 2021). Aynı yıllarda Marcel Gustave Ribaud tarafından kıvılcım aralığı jeneratörü (*spark – gap generator*) kullanılarak yüksek frekanslı indüksiyon ısıtıcı geliştirmiştir. Daha sonraları Valentin Petrovich Vologdin jeneratör ve vakum tüpleri kullanarak 1922 yılında yüksek frekanslı indüksiyon ısıtıcı tasarlamıştır (Vishnuram ve diğ., 2021).

Yüzey sertleştirilmesi yapılan askeri araç bileşenlerinde ve silahlarda dayanımının daha fazla olması sebebiyle 2. dünya savaşı ve sonrasında uçak, otomotiv ve silah endüstrisinde yüksek frekanslı indüksiyon ısıtma sistemlerinin kullanımı hız kazanmıştır.

İndüksiyon ısıtmada ikinci önemli ilerleme yarı iletken teknolojiyle birlikte yaşanmıştır. Genellikle tristör kullanılarak tasarımlar yapılmış daha sonraları yüksek frekansta çalışabilen bipolar jonksiyon transistör (BJT) ve metal oksit yarıiletken alan

etkili transistörler (MOSFET) kullanılmaya başlanmıştır. Bu sayede indüksiyon ısıtma teknolojisi endüstri için tercih edilen ısıtma teknolojisi haline gelmiştir.

Kısa adı IGBT olan izole kapılı bipolar transistörler gibi yarıiletken iletken teknolojisindeki gelişmeler teknolojinin sunmuş olduğu yüksek voltaj, yüksek akım, kontrol edilebilir anahtarlama kapasitesi (Salih, 2012) sayesinde indüksiyon ısıtma sadece endüstriyel alanda değil diğer alanlarda da kullanılmaya başlanmıştır. 1980’li yılların sonlarından itibaren pek çok evsel uygulamalarda indüksiyon ısıtma kullanılmaya başlanmıştır. 2000’li yıllardan sonra indüksiyon ısıtma teknolojisi yüksek ısıtma hassasiyeti ve lokal alana ısı uygulanabilmesini mümkün kılması nedeniyle özellikle hipertermi gibi medikal uygulamalarda kullanılmaya başlanmıştır (Lucia ve diğ., 2013).

Günümüzde gelişen teknoloji sayesinde indüksiyon ısıtma sistemleri geçmiştekine nazaran daha yüksek hassasiyet ve verime sahiptir.

1.3. İndüksiyon Isıtıcının Çalışma Prensibi

İndüksiyon ısıtmanın anlaşılabilmesi için öncelikle EM indüksiyonun bilinmesi gerekmektedir. EM indüksiyon, değişken bir manyetik alanda bulunan bir iletken üzerinde gerilim indüklenmesidir. EM indüksiyon genellikle Faraday – Neumann yasası olarak da bilinen akı yasası ile tanımlanır (Giuliani, 2008). Akı yasası için genel formül Denklem (1.1)’de verilmiştir.

$$\varepsilon = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot \hat{n} dS \quad (1.1)$$

burada ε iletken bir devrede döngü boyunca yük üzerinde toplam birikmiş kuvvet şeklinde tanımlanan elektromotor kuvveti, bir başka deyişle birim yük başına düşen kuvvetin (Lorentz kuvveti) teğetinin devre boyunca integralini (Feynman ve diğ., 1964), S kapalı döngü yüzeyini, $\vec{B}$ manyetik akı yoğunluğunu ifade etmektedir. Kapalı bir devrede elektromotor kuvvet devre üzerinde hareket eden yüklerin bir döngü boyunca bir kez yapmış olduğu toplam işe eşittir. İlgili denklemdeki d/dt ifadesinden anlaşılacağı üzere elektromotor kuvvet aynı zamanda iletken bir devre boyunca manyetik akının zamana bağlı değişim oranının negatifine eşittir.

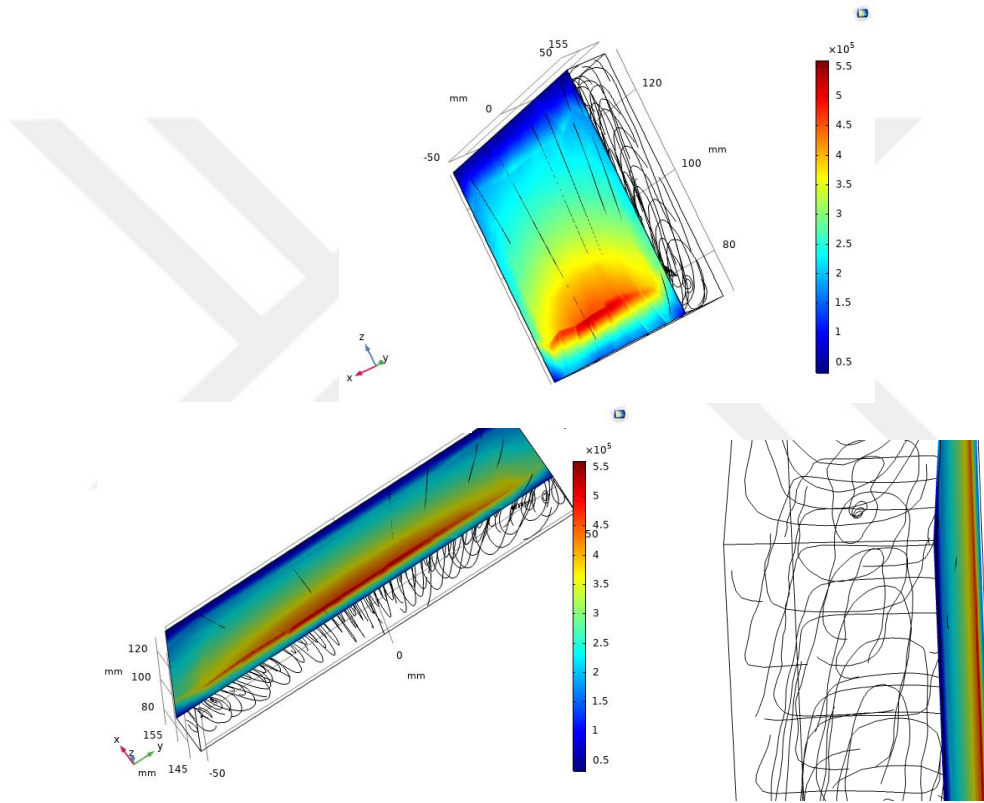
EM alanın noktasal yük üzerine uyguladığı kuvvet

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (1.2)$$

Lorentz kuvveti olarak tanımlanır. Elektromotor kuvvet (emk) birim yük başına düşen kuvvetin kapalı devre boyunca integralinin alınmasıyla bulunduğundan emk,

$$\varepsilon = \oint_l (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l} \quad (1.3)$$

şeklinde de yazılabilir. Bu formülde $\vec{v}$ yükün hızını göstermektedir. Değişken bir manyetik alanda bulunan bir iletken üzerinde gerilim indüklenir. İndüklenen bu gerilime bağlı olarak malzeme içinden manyetik alan düzlemine dik kapalı döngüler oluşturacak şekilde akımlar oluşur, bu akımlara eddy akımları denilmektedir (Şekil 1.1).



Şekil 1.1. Eddy akımları

Fukolt akımları olarak da bilinen eddy akımları, değişken bir manyetik alan yakınında bir iletkende indüklenemediği gibi, sabit bir manyetik alan içinde göreceli olarak hareket eden bir iletkende de indüklenmektedir. Belli bir döngü boyunca indüklenen akımın büyüklüğü manyetik alan şiddeti, döngü alanı, zamana bağlı akı değişimi oranı ile doğru orantılı iken; malzemenin direnci ile ters orantılıdır. Lenz yasasına göre, eddy akımları kendisini meydana getiren manyetik alana zıt yönlü bir manyetik alan oluşturur. Bu zıt etki manyetik alan içindeki hareketli bir iletkeni durdurmaya zorlar buna eddy akım

freni denilmektedir. Eddy akım freni ağır yük taşıtlarında (Bae ve diğ., 2015), demiryolu taşıtlarında (Lu ve diğ., 2014; Cho ve diğ., 2017), motosiklet gibi hafif araçlarda (Luo ve diğ., 2017) yardımcı frenleme sisteminde kullanılmaktadır. Frenleme sırasında oluşan enerji, manyetik alana maruz kalan iletkenin iç direncinden kaynaklı olarak ısıya dönüşmektedir. Eddy akımlarının iletkenin direncine bağlı olarak oluşturduğu ısı etki indüksiyon ısıtmada kullanılmaktadır. Değişken bir manyetik alana maruz bırakılan homojen bir malzemede deri olayının olmadığı kabulü yapılırsa eddy akımları sebebiyle birim kütle başına oluşacak ısı kayıp Denklem (1.4)'de verilmiştir.

$$P = \frac{\pi^2 B_p^2 d^2 f^2}{6k\rho D} \quad (1.4)$$

Bu denklemde,

P : kg/m cinsinden ısı kaybı

B_p : Tesla biriminde manyetik akı yoğunluğunun tepe değerini

d : Metre cinsinden eddy akımlarının oluştuğu levha veya telin kalınlığını

f : Hertz cinsinden frekansı

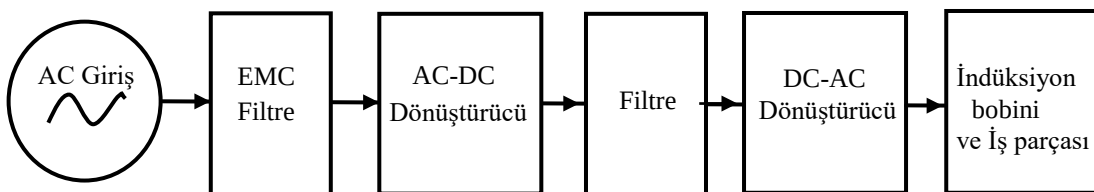
k : Levha için 1, ince tel için 2 olmak üzere sabit katsayıyı

ρ : Ωm cinsinden eddy akımlarının oluştuğu levha veya telin özgül direncini

D : Malzemenin yoğunluğunu

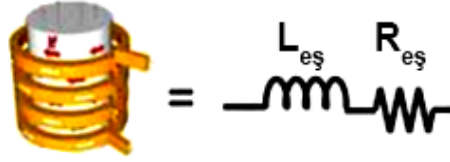
göstermektedir.

Tipik bir indüksiyon ısıtıcının güç dönüşüm şeması Şekil 1.2'de verilmiştir. Öncelikli olarak EM standartların sağlanması amacıyla şebeke gerilimi EMC filtresine uygulanır. Sonraki katta kullanılan inverter bloğuna (DC-AC dönüştürücü) doğru akım sağlamak amacıyla, AC sinyali doğru akıma çevrilir ve parazitlerden arındırılması amacıyla filtrelenir. İnverter bloğunda DC sinyal istenen frekansta alternatif akıma dönüştürülerek indüksiyon bobinine uygulanır. Sistem tasarımına bağlı olarak indüksiyon ısıtmada çıkış gerilim seviyesini artırmak ve sinüzoidal çıkış elde etmek amacıyla güç faktörü düzeltme blokları kullanılabilir (Kawaguchi ve diğ., 2010).



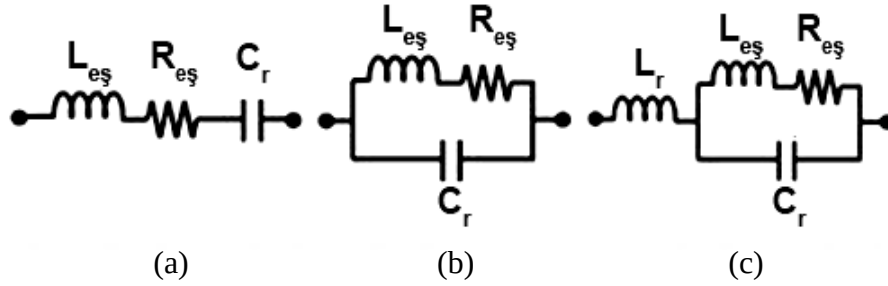
Şekil 1.2. İndüksiyon ısıtma sistemi blok şeması

İndüksiyon ısıtma sistemlerinde gerilim veya akım kaynağı rezonans inverterleri kullanılmaktadır (Kazimierczuk ve Czarkowski, 1995). İndüksiyon ısıtmada yük genellikle eşdeğer direnç ve eşdeğer endüktans olmak üzere Şekil 1.3'deki gibi modellenmektedir (Dawson ve Jain, 1991).



Şekil 1.3. İndüksiyon ısıtma sistemi yük eşdeğer modeli

Burada $R_{eş}$ ısıtılacak malzemeyi, $L_{eş}$ ise indüksiyon bobinini temsil etmektedir. Tank devresinin oluşturulabilmesi için harici endüktör ve/veya kondansatör sisteme Şekil 1.4'de gösterildiği gibi farklı şekillerde eklenmektedir.



Şekil 1.4. Rezonans devre konfigürasyonları. a) Seri, b) Paralel, c) Hibrit.

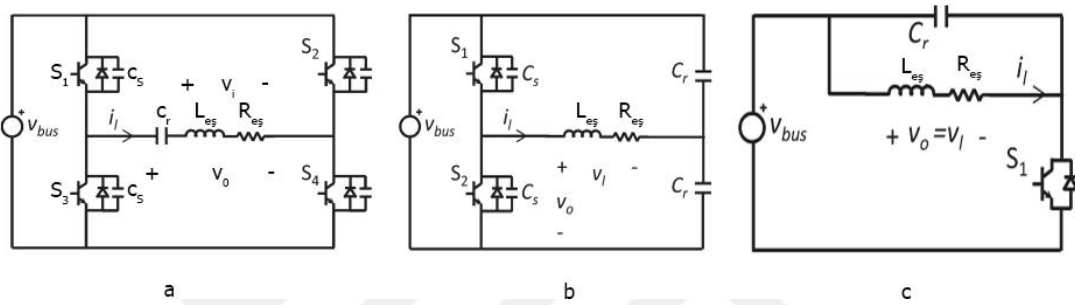
Şekil 1.4a'da gösterilen seri RLC devresi genellikle gerilim kaynağı inverterlerinde (Lucia ve diğ., 2010; Esteve ve diğ., 2011) kullanılırken; Şekil 1.4b'de gösterilen paralel RLC devresi akım kaynağı inverterlerinde kullanılmaktadır (Sarnago ve diğ., 2013). Şekil 1.4c'deki RLC devresi ise Şekil 1.4a ve b'de gösterilen devrelerin avantajlarına ve kısa devre korumasına sahiptir (Espino-Huerta ve diğ., 2007; Chudjuarjeen ve diğ., 2010).

1.3.1. İndüksiyon ısıtmada kullanılan inverter topolojileri

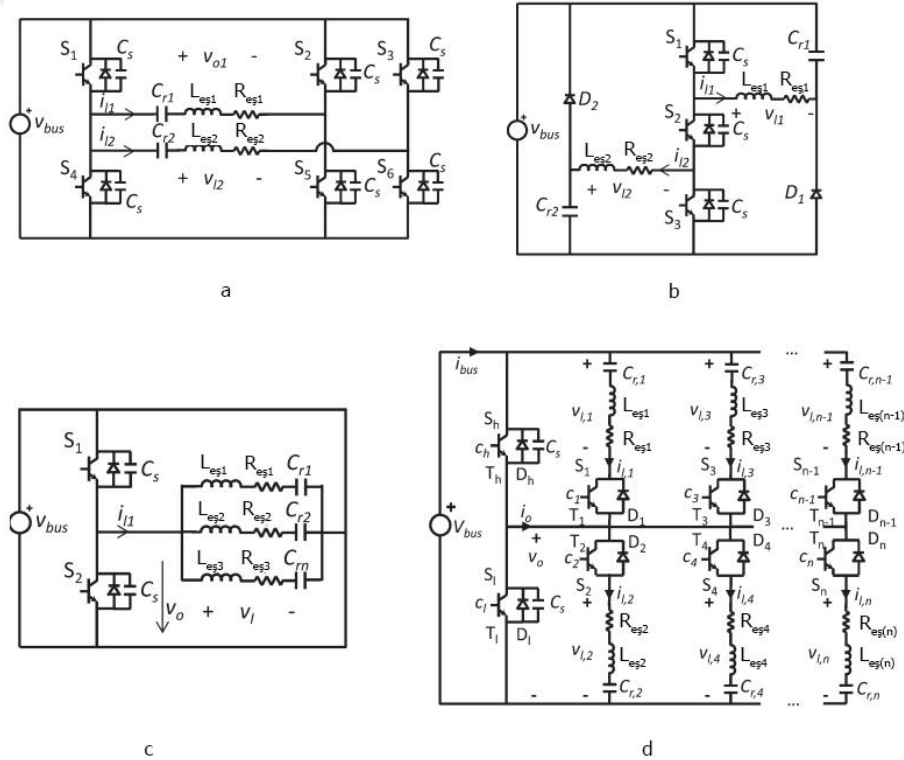
İndüksiyon ısıtmada tam köprü (Dede ve diğ., 1991), yarım köprü (Koertzen ve diğ., 1995; Kamli ve diğ., 1996) ve tek anahtarlı rezonans inverter devreleri kullanılmaktadır (Şekil 1.5).

Tam dalga köprü topolojisi genellikle 5 kW'tan yüksek güce sahip endüstriyel indüksiyon ısıtma sistemleri için kullanılırken; yarım dalga köprü topolojisi 5 kW'a kadar evsel (*domestic*) uygulamalar için tercih edilmektedir. Tek anahtarlı ZVS yarı rezonans inverter topolojisi ise 2 kW'a kadar düşük güçlü evsel uygulamalarda tercih edilmektedir.

Genellikle uygulamalarda homojen ısı dağılımını sağlamak amacıyla birden fazla indüksiyon bobini kullanılmaktadır (Rodriguez ve Leeb, 2009). Söz konusu çok bobinli sistemler (*Multi coil system*) endüstriyel (Ngoc ve diğ., 2011; Pham ve diğ., 2012) ve evsel uygulamalarda (Forest ve diğ., 2007; Lucia ve diğ., 2010) kullanılmaktadır. Şekil 1.6'da çok bobinli indüksiyon ısıtma inverter topolojileri verilmiştir.



Şekil 1.5. İndüksiyon ısıtmada kullanılan inverter topolojileri. a) Tam dalga köprü seri rezonans inverter, b) yarım dalga köprü seri rezonans inverter, c) tek anahtarlı sıfır gerilim anahtarlamalı (ZVS) yarı rezonans inverteri (Lucia ve diğ., 2013).

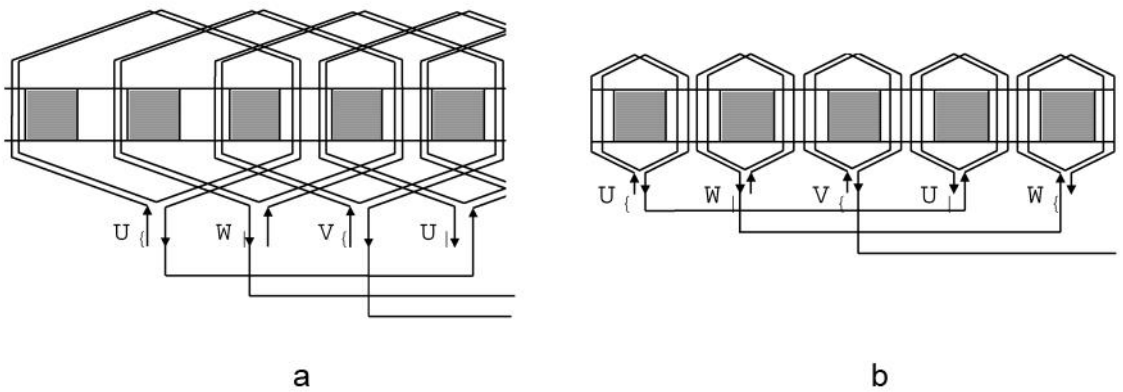


Şekil 1.6. Çok bobinli indüksiyon ısıtma sistemleri için çok çıkışlı inverterler (Lucia ve diğ., 2013). a) Çift tam dalga köprü, b) Çift yarım dalga köprü, c) Frekans çoklamalı yarım dalga köprü, d) Seri rezonans çoklu inverter.

1.3.2. Yürüyen dalga indüksiyon ısıtma

İndüksiyon ısıtma sistemlerinde kolay üretilmeleri, bobin ile iş parçası arasındaki mesafenin kolaylıkla ayarlanabilmesi ve verimliliğin yüksek olması gibi nedenlerle enine akı (*transverse flux*) konfigürasyonları kullanılmaktadır. Ancak bu sistemlerin dezavantajı bobin merkezinde yeteri sıcaklık artışının sağlanamamasıdır (Fireteanu ve diğ., 2003). Bu durumun önüne geçebilmek amacıyla iki veya daha fazla indüksiyon bobini, aralarında belirli bir faz farkı olacak şekilde enine akı indüksiyon ısıtıcı sisteminde bir araya getirilir. Lineer motorlardaki EM alanın hareketine benzer bir şekilde bobinler üzerinde EM alanın hareket etmesi sağlanır. Böylece iş parçası üzerinde sıcaklık farkları azaltılarak iş parçası yüzeyinin olabildiğince homojen ısıtılması sağlanır. Yürüyen dalga indüksiyon ısıtma sistemleri, bobinlerinin birbirlerine göre durumlarına göre tam adım (*full pitch*) ve kısa adım (*short pitch*) olmak üzere iki çeşittir (Tomita ve diğ., 2005). Tam adım yürüyen dalga indüksiyon sisteminde bobinler iç içe geçerken kısa adım yürüyen dalga indüksiyon ısıtma sisteminde bobinler birbirinden ayrıdır. Ancak oluşturdukları manyetik alanların birleştirilmesi için manyetik akı yoğunlaştırıcıları kullanılır (Frogner ve diğ., 2014) (Şekil 1.7).

Kısa adım yürüyen dalga indüksiyon ısıtma sistemleri büyük hava aralıklarının olduğu yerlerde daha verimli olmalarının yanında iş parçası üzerinde homojen sıcaklık artışı sağlamaktadır (Tomita ve diğ., 2005; Sekine ve diğ., 2007; Sekine ve diğ., 2009).



Şekil 1.7. Yürüyen dalga indüksiyon ısıtma bobin geometrileri (Tomita ve diğ., 2005).
a) tam adım, b) kısa adım.

İş parçası üzerinde termal stresin azaltılması, sıcaklık dağılımının homojen olması amacıyla yürüyen dalga indüksiyon ısıtma sistemlerinde bobin sayısının artırılması gerekmektedir. Bobin sayısı arttıkça ısıtma daha homojen olabilmektedir. Bobin sayının

artması sıcaklık dağılımı yönüyle bir avantaj sağlarken; sistemin karmaşıklığını ve maliyetini artırmaktadır.

1.4. İndüksiyon Isıtma Performansına Etki Eden Faktörler

1.4.1. Deri olayı

Deri olayı yüksek frekanstaki akımın iletkenin yüzeyine doğru itilmesi frekansla orantılı olarak iletken yüzeyinde sınırlı bir derinlikte kalma durumudur. Bir iletken içinden akan akım sebebiyle iletken çevresinde manyetik alan oluşur oluşan bu manyetik alan iletken içindeki akım dağılımını değiştirerek akımın iletken yüzeyine yakın taşınmasına neden olur. Akımın sınırlı bir alanda akması sebebiyle iletkenin kesit alanından bağımsız olarak iletkenin direnci değişir. Deri olayı önemi, çözümünde yaşanan güçlükler sebebiyle bilim insanlarınca 19. Yüzyılın sonlarında çalışılan bir konu haline gelmiştir (Raicevic ve diğ., 2020).

Maxwell tarafından 1873 yılında alternatif akımının iletken içinde akım yoğunluk dağılımına etkisi matematiksel olarak tartışılmış, Heaviside ve John Henry Poynting tarafından 1884-1887 yılları arasında konuya ilişkin matematiksel hesaplamalar literatüre eklenmiştir. Lord Rayleigh tarafından 1886 yılında sonsuz genişlikte bir şerit üzerindeki deri olayına ilişkin ilk formül ortaya konulmuştur. 1891 yılında “deri olayı” terimi Mr. James Swinburne tarafından kullanılmıştır (Kennelly ve diğ., 1915).

Deri olayı frekansın yanında iletken malzemenin manyetik özellikleri ile özgül direncine de bağlı olup

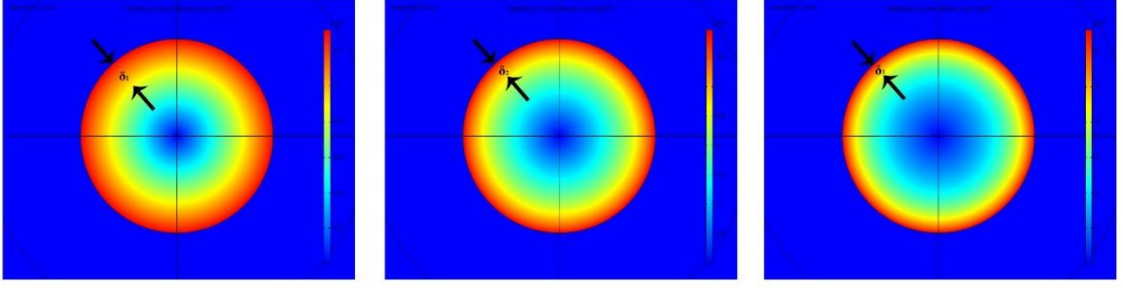
$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} \quad (1.5)$$

şeklinde formülize edilir. Burada δ deri kalınlığını, ρ özgül direnç, ω açısal frekansı ve μ manyetik geçirgenliği ifade etmektedir.

İletken yüzeyinde J_s olan akım yoğunluğu yüzeyden uzaklaştıkça eksponansiyel olarak azalır. İletken yüzeyinden merkeze doğru d kadar uzaklıkla akım yoğunluğu Denklem (1.6) kullanılarak hesaplanır.

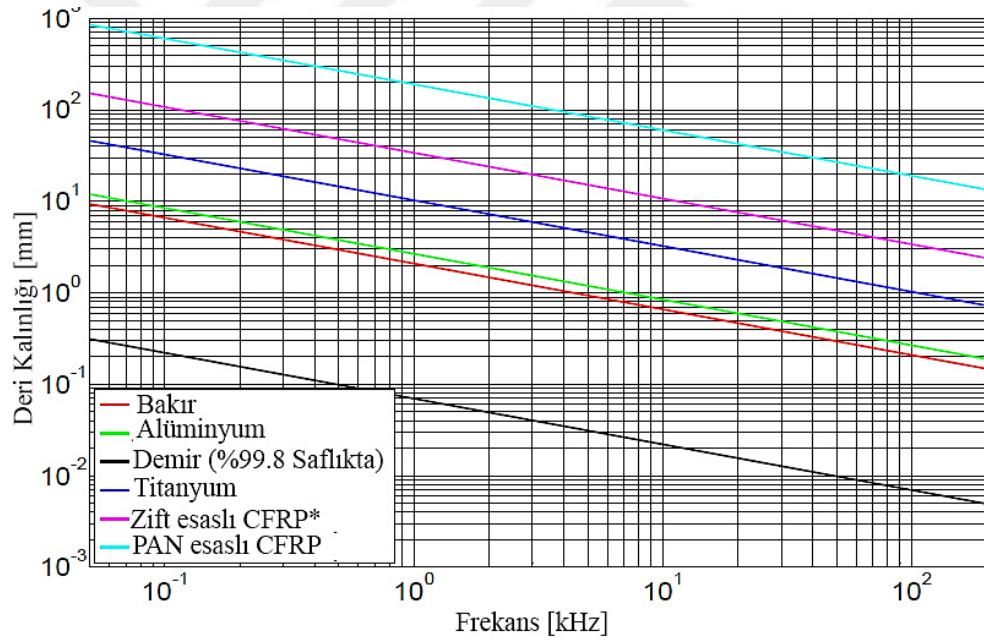
$$J(d) = J_s e^{-d/\delta} \quad (1.6)$$

Şekil 1.8, farklı frekanslarda akım yoğunluğunun iletken içinde değişimini göstermektedir.



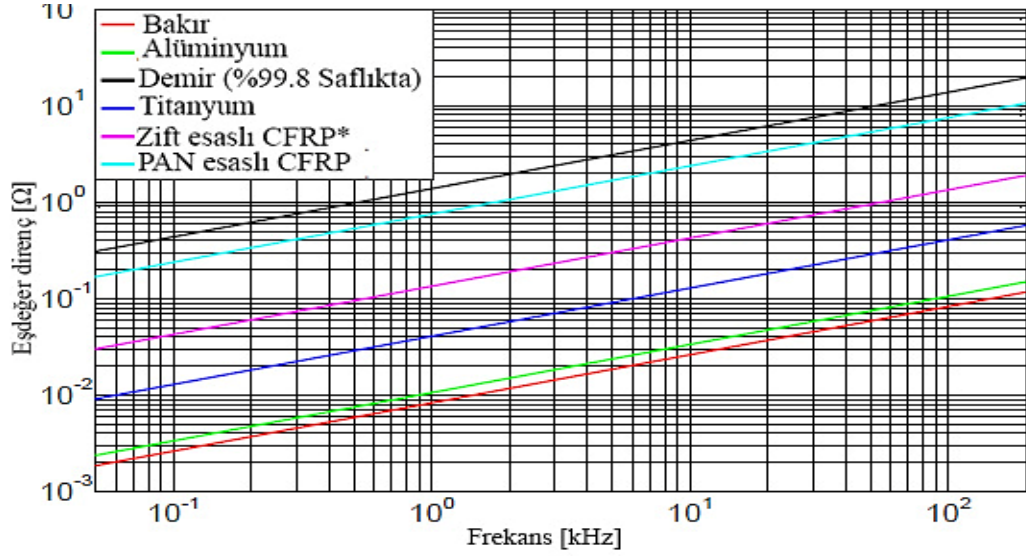
Şekil 1.8. Farklı frekanslarda akım yoğunluğunun iletken içinde değişimi

Farklı frekanslarda farklı malzemelerin deri kalınlığı, eşdeğer direncinin değişimini gösteren şekiller aşağıda gösterilmiştir.



* CFRP: karbon elyaf güçlendirilmiş plastik

Şekil 1.9. Farklı malzemelerin frekansa bağlı deri kalınlıklarının değişimi (Frogner, 2014)



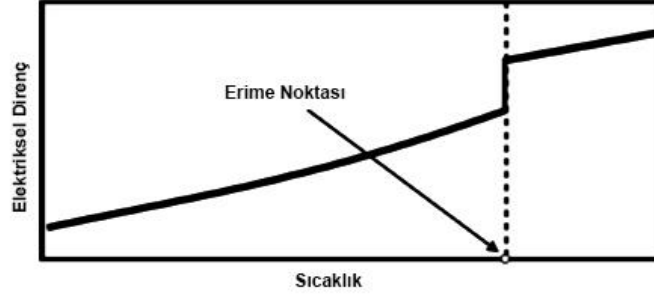
Şekil 1.10. Farklı malzemelerin frekansa bağlı eşdeğer dirençlerinin değişimi (Frogner, 2014)

1.4.2. Özgül direnç

Özgül direnç, bir malzemenin akım geçişine izin vermeme ölçüsü olarak tanımlanabilir (Borup ve diğ., 2012). ρ simgesi ile gösterilir. Özgül direncin tersi özgül iletkenlik olup σ simgesi ile ifade edilmektedir. Özgül direncin birimi Ωm iken özgül iletkenliğin birimi S/m 'dir. T_0 ortam sıcaklığındaki özgül direnç ρ_0 ve α malzemeye özgü sıcaklık katsayısı olmak üzere sıcaklığın fonksiyonu olarak

$$\rho(T) = \rho_0[1 + \alpha(T - T_0)] \quad (1.7)$$

şeklinde ifade edilir. α genellikle sabit değerli olmasına karşın sinterlenmiş metal oksit gibi malzemelerde negatif olabilmektedir. Ayrıca karbon çelik, alaşımlı çelik ve grafit gibi malzemelerde α sıcaklığın doğrusal olmayan bir fonksiyonu da olabilmektedir. Metallerde erime noktasında özgül direnç dikkate değer ölçüde hızlı bir şekilde artar. Bazı metal alaşımlarında eğri alaşım oranına bağlı olarak özgül direnç eğrisi çan eğrisi şeklini alabilir. İndüksiyon ısıtma yapılacak hesaplamalarda malzemenin sıcaklığa bağlı olarak değişen (Şekil 1.11) özelliklerinin iyi bilinmesi gerekmektedir (Rudnev ve diğ., 2017). Toz metalürjisine sahip malzemeler için özgül direnç yoğunlukla azalırken (Montes ve diğ., 2017) tane çapının azalmasıyla artar (Zhou ve diğ., 2004).



Şekil 1.11. Elektriksel direncin sıcaklığa bağlı olarak değişimi (Rudnev ve diğ., 2017)

1.4.3. Manyetik geçirgenlik

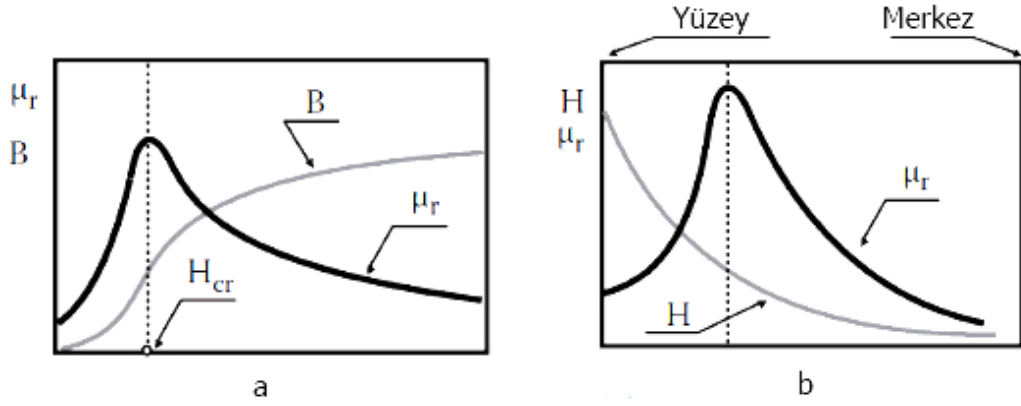
Manyetik geçirgenlik manyetik akı iletiminin ölçüsü olarak tanımlanabilir. μ simgesi ile gösterilir. Birimi Henry/metre'dir. Serbest uzayın manyetik geçirgenliği $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m'dir. Bir malzemenin vakum ortamına oranla manyetik akı iletimi ise bağlı manyetik geçirgenlik olarak adlandırılır ve μ_r ile gösterilir, birimsizdir. Diğer bir değişle bağlı manyetik geçirgenlik vakum ortamına göre malzemenin ne kadar iyi akı ilettiğinin bir ölçüsüdür. Manyetik geçirgenlik,

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (1.8)$$

şeklinde ifade edilir. Manyetik alan şiddeti (H), manyetik akı yoğunluğu (B) ve sıcaklığa bağlı olarak değişkenlik gösterir. Sabit sıcaklıkta,

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (1.9)$$

şeklinde ifade edilir. Malzemelerin bağlı manyetik geçirgenliklerini etkileyen diğer faktörler frekans, malzemenin kimyasal bileşimi, malzeme içindeki tanecik boyutu olarak sıralanabilir. Ferromanyetik bir malzemenin manyetik özelliklerini kaybettiği ($\mu_r = 1$) sıcaklık değerine Curie sıcaklığı denilmektedir. Bağlı manyetik geçirgenlik, ferromanyetik malzemeler için manyetik alan şiddeti ve manyetik akı yoğunluğu arasındaki doğrusal olmayan ilişki sebebiyle değişkenlik gösterir. Manyetik alan şiddetinin belli bir değerinde maksimuma ulaşan bağlı manyetik geçirgenlik, manyetik alan şiddetinin artmasıyla düşer teorik olarak manyetik alan şiddetinin limiti sonsuza giderken bağlı manyetik geçirgenlik vakumun manyetik geçirgenliği olan 1 değerine yakınsar.



Şekil 1.12. a) Manyetik akı yoğunluğu (B) ve bağıl manyetik geçirgenliğin (μ_r) manyetik alan şiddetine (H) göre değişimi, **b)** Homojen silindirik karbon çeliğinin yarıçapı üzerinde manyetik alan şiddeti (H) ve bağıl manyetik geçirgenliğin (μ_r) dağılımı (Rudnev ve diğ., 2017).

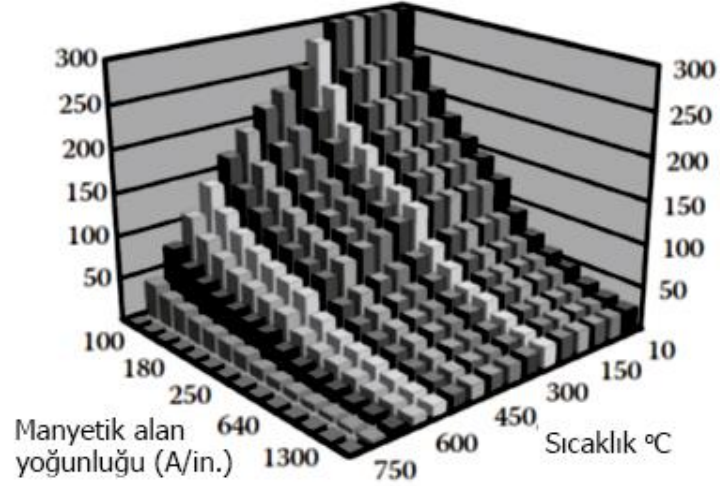
μ değeri Denklem 1.6'dan da görüleceği üzere δ deri kalınlığını değiştirmektedir. μ değerinin sıcaklığa bağlı olarak değişimi sonucu deri kalınlığı 15 kat veya daha fazla oranda değişebilmektedir (Rudnev, 2014). Bu durumun dikkate alınmaması yüzey sertleştirme işlemlerinde istenen kalitenin elde edilememesine sebebiyet vermektedir. Ayrıca indüksiyon ısıtmada kullanılan bobinin performansını da etkilemektedir. İndüksiyon ısıtmada performansı etkileyen bir diğer faktör ısıtılacak malzemenin yüzey manyetik alan şiddeti ile orta noktası arasındaki manyetik alan şiddetinin akım dağılımına benzer bir şekilde birbirinden farklı olmasıdır. Yüzey manyetik alan şiddeti merkeze doğru eksponansiyel olarak azalır.

Sıcaklık ve manyetik alan yoğunluğuna bağlı olarak bağıl manyetik geçirgenliğin değişimi Şekil 1.13'de verilmiştir.

Bir malzemenin manyetik geçirgenliği oda sıcaklığındaki malzemenin sertlik ve yumuşaklığına bağlıdır. Saturasyon manyetik akı yoğunluğunun sıcaklığa bağlı olarak değişimi T_c curie sıcaklığı, T sıcaklık olmak üzere

$$B_s = B_0(1 - [T/T_c])^6 \quad (1.10)$$

şeklinde ifade edilebilir (Miodownik, 1977). İlgili denklemde B_0 mutlak sıfır noktasındaki saturasyon manyetik akı yoğunluğudur. Görüleceği üzere T değeri arttıkça saturasyon manyetik akı yoğunluğu düşecektir.



Şekil 1.13. Bağlı manyetik geçirgenliğin manyetik alan yoğunluğu ve sıcaklığa bağlı olarak değişimi (Rudnev ve diğ., 2017)

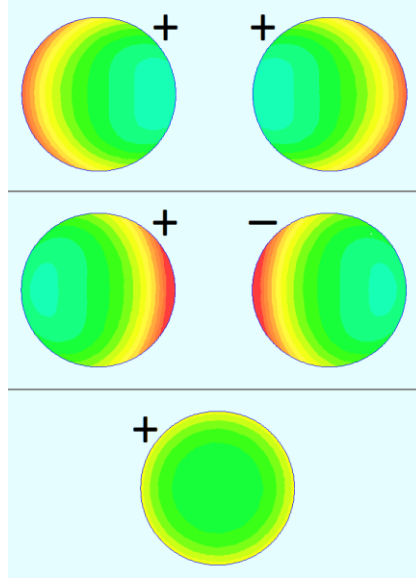
Benzer şekilde koersitif manyetik alan şiddeti H_c , sıcaklığa bağlı olarak

$$H_c = H_0(1 - [T/T_c]^3) \quad (1.11)$$

şeklinde değişir (Schwerer ve diğ., 1978).

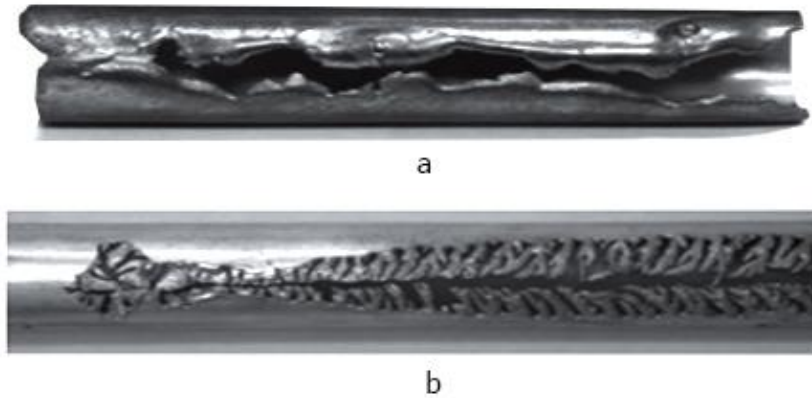
1.4.4. Elektromanyetik yakınlık etkisi

Birbirine yakın iletkenlerden geçen akım nedeniyle oluşan manyetik alanların karşılıklı etkileşimleri sonucunda iletken içinde akım dağılımının değişmesi olayına EM yakınlık etkisi denilmektedir. Bu durum deri etkisinin yanında akımın dağılımının belli bir bölgede yoğunluğuna sebebiyet verdiğinden iletken direncinin artmasına sebep olmaktadır. Buna bağlı olarak omik kayıplar artmaktadır. Akım taşıyan iki iletkenin akım yönlerine bağlı olarak akım dağılımını değişimi Şekil 1.14’de gösterilmiştir.



Şekil 1.14. Birbirine komşu iletkenlerden geçen akımların neden olduğu akım dağılımı bozulmaları.

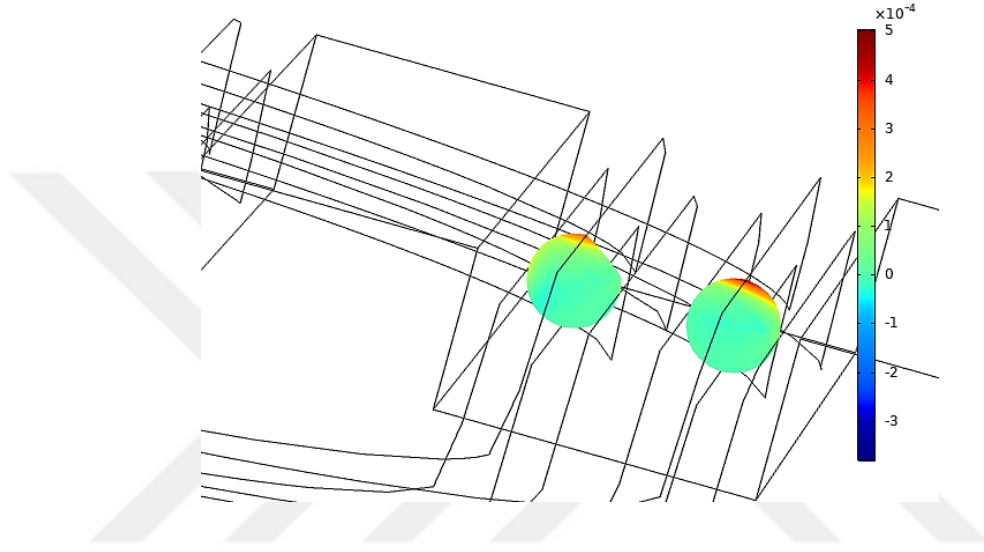
Yakınlık etkisi EM ısıtma için çok önemlidir. Çünkü indüksiyon ısıtmada en az iki iletken birbirleriyle etkileşim halindedir. Faraday yasayı gereğince ısıtılacak malzeme üzerinde meydana gelen eddy akımları kendisini meydana getiren akıma kıyasla zıt yönlü olacağından indüksiyon bobini ile ısıtılacak malzemenin birbirine yakın olan kısımlarında akım yoğunlaşması meydana getirecektir. Bu durum birbirine komşu iletkenlerin neden olduğu akım dağılımının bozulmasına ilave bir bozulma meydana getirecektir. Yüksek akım indüksiyon ısıtma uygulamalarında yakınlık etkisine bağlı akım yoğunlaşmasının olduğu bölgelerde aşırı ısınmaya bağlı olarak erimeler oluşmaktadır (Şekil 1.15).



Şekil 1.15. Yakınlık etkisine bağlı oluşan aşırı ısı nedeniyle indüksiyon bobininin tahrip olması **a)** bakır, **b)** alüminyum (Rudnev ve diğ., 2017)

1.4.5. Elektromanyetik yarık etkisi

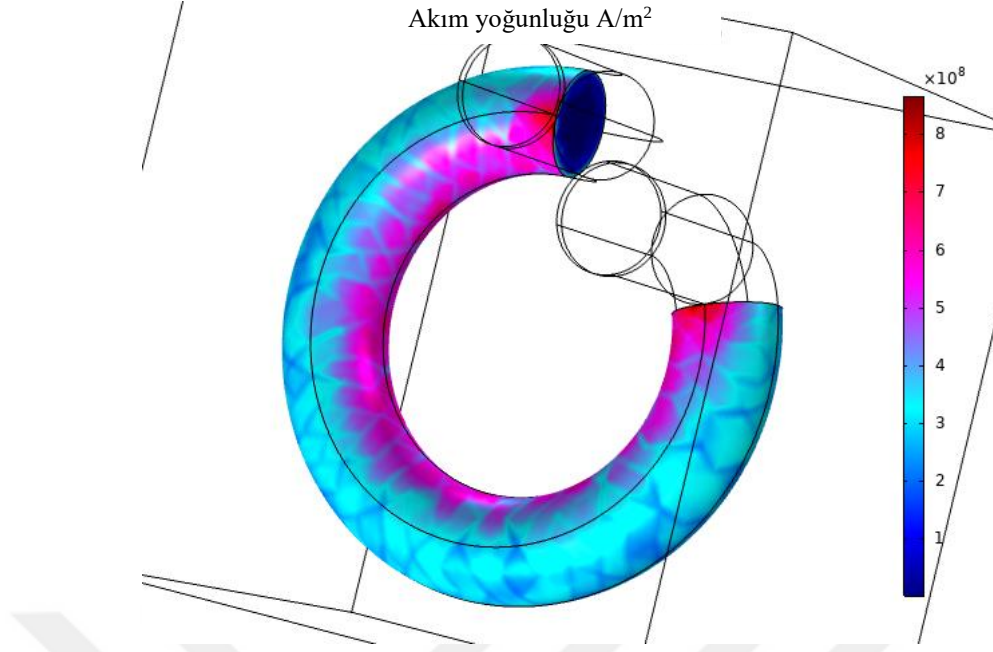
İndüksiyon ısıtmada manyetik akı yoğunlaştırıcılar kullanılmaktadır. Bu yoğunlaştırıcıların içine yerleştirilen bobinden geçen akım, yoğunlaştırıcı tarafından yarığın (*slot*) dış kısmına doğru itilmekte ve bu bölgede yoğunluğu artırmaktadır (Şekil 1.16). Böylece ısıtılacak malzeme üzerinde daha fazla ısı oluşmaktadır.



Şekil 1.16. Bobin akımının manyetik yoğunlaştırıcı yarığının dışına doğru yoğunlaşması

1.4.6. Elektromanyetik halka etkisi

Bir iletken halka (*ring*) haline getirilirse manyetik akı çizgileri iç kısımlarda artacaktır. Bu nedenle halkanın iç kısmında akım yoğunluğu artacak ve akım en kısa ve en düşük empedanslı yerden akacaktır. EM halka etkisine bağlı olarak akım yoğunluğunun iç kısımda artması Şekil 1.17’de görülmektedir.



Şekil 1.17. EM halka etkisine bağlı olarak akım yoğunluğunun iç kısımda artması

1.4.7. Elektromanyetik kuvvet

İçinden akım geçen birbirine yakın iletkenlerden geçen akımın büyüklüğüne bağlı olarak iletkenlerin birbirlerine uyguladıkları itme veya çekme kuvveti oldukça büyük olabilmektedir. Bu kuvvet EM fırlatıcılar, EM şekillendiriciler gibi uygulamalarda olumlu etkiye sahipken, indüksiyon ısıtma sistemlerinde malzemenin şeklinin bozulmasına, indüksiyon bobininin eğilmesine, bağlantı noktasının zarar görmesine, manyetik yoğunlaştırıcının zarar görmesine varan etkilere sebep olmaktadır. Ampere ve Biot-Savart tarafından yapılan deneysel çalışmalar sayesinde dl uzunluğunda I akımı taşıyan ve B manyetik alanına yerleştirilen bir iletkeni etki edecek dF kuvveti, φ ; B alanı ile I akımı yönü arasındaki açı olmak üzere

$$d\vec{F} = I \cdot d\vec{l} \times \vec{B} = a_n IB dl \sin\varphi \quad (1.12)$$

şeklinde hesaplanabilmektedir. Kuvvetin yönü a_n , akım yönü ile manyetik alan çizgisinin bulunduğu düzleme dik yöndedir. Genelde sol el kuralı ile ifade edilmektedir. İndüksiyon ısıtma uygulamalarında bobinden geçen akım aynı yönde veya farklı yönde olabilmektedir. Birbirine paralel olarak duran iki iletkenin aynı yönde akım geçmesi durumunda iki iletken birbirini çekmekte zıt yönde akım geçmesi durumunda ise birbirlerini itmektedir. l uzunluğunda, birbirlerinden R kadar uzaklıkta bulunan yan yana

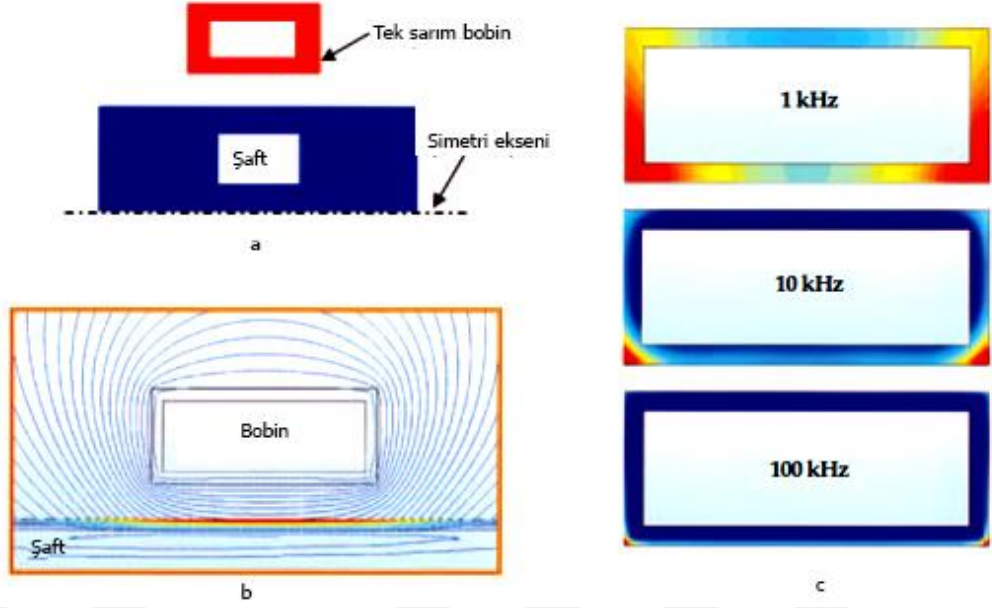
iletkenlerden geçen akımlar I_1 ve I_2 olmak üzere söz konusu iki iletkenin birbirini itme veya çekme kuvveti

$$F = I_2 \frac{\mu_0 I_1}{2\pi R} l \quad (1.13)$$

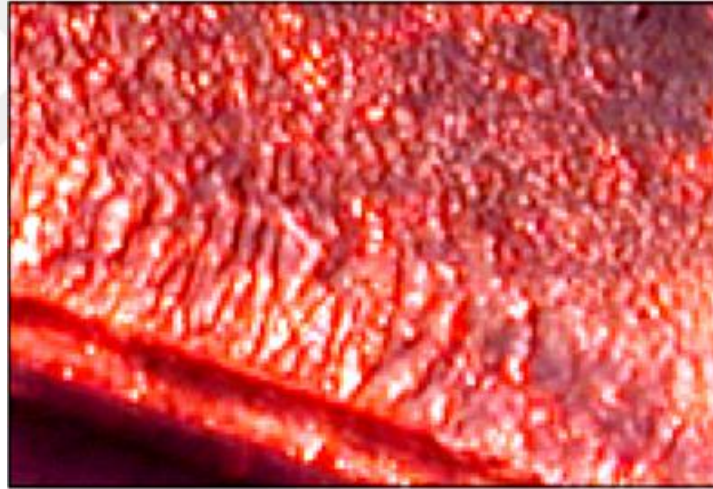
şeklinde hesaplanır. Benzer şekilde selonoid indüksiyon bobininde de uç kısımlardan içe doğru yan taraflardan ise dışa doğru bir kuvvet oluşur. Şaft ve dişli üretimi gibi yüksek akım ihtiyacı olan indüksiyon ısıtma sistemlerinde gerek indüksiyon ısıtma sisteminin gerekse işlem ısıtma işlem gören malzemenin zarar görmemesi için bu tür sistemlerde EM kuvvetin hesaplanması gerekmektedir. Kuvvetin fazla olması EM fırlatıcılarda olduğu gibi malzemenin yüksek hızla itilmesine sebep olabilir. EM kuvvet etkisi bakır, magnezyum ve alüminyum alaşımları gibi düşük özgül dirence sahip malzemelerde daha fazla olmaktadır. Her ne kadar yüksek manyetik kuvvetlerin indüksiyon oluşturdukları titreşim etkisiyle sistemlerinin rijitliğine olumsuz etkisi olsa da ergitme fırınlarında karışımın sağlanması gibi olumlu etkileri de mevcuttur. Denklem 1.13 sadece basit hesaplamalar için geçerlidir. Pek çok indüksiyon ısıtma sistemi karmaşık geometrilere sahip olduğundan bilgisayar modellemeleri yapılarak gerekli hesaplamalar yapılmalıdır.

1.4.8. Elektromanyetik uç ve kenar etkisi

İndüksiyon bobininin uç ve kenarlar bölgelerinde EM akı dağılımının farklılaşmasına bağlı olarak ısıtılacak malzeme ve bobin üzerinde farklı noktalarda farklı ısı dağılımları olmaktadır. Bu etki özellikle indüksiyon bobini uç ve kenarlarda çok fazla olmaktadır. Şekil 1.18’de farklı frekanslarda tek sarımlı indüksiyon bobininin uçlarında oluşan akım yoğunlukları gösterilmiştir. Görüleceği üzere indüksiyon bobininin uç noktalarında akım yoğunluğu artmaktadır. Buna bağlı olarak indüksiyon bobini uç noktalarında sıcak noktalar (*hot-spot*) oluşmakta ve gerilmeye bağlı olarak bobin yüzeyinde çatlaklar oluşmaktadır (Şekil 1.19).



Şekil 1.18. a) Tek sarımlı bobin ve şaft, b) manyetik alan dağılımı, c) bobin akım dağılımı (Rudnev, 2006)



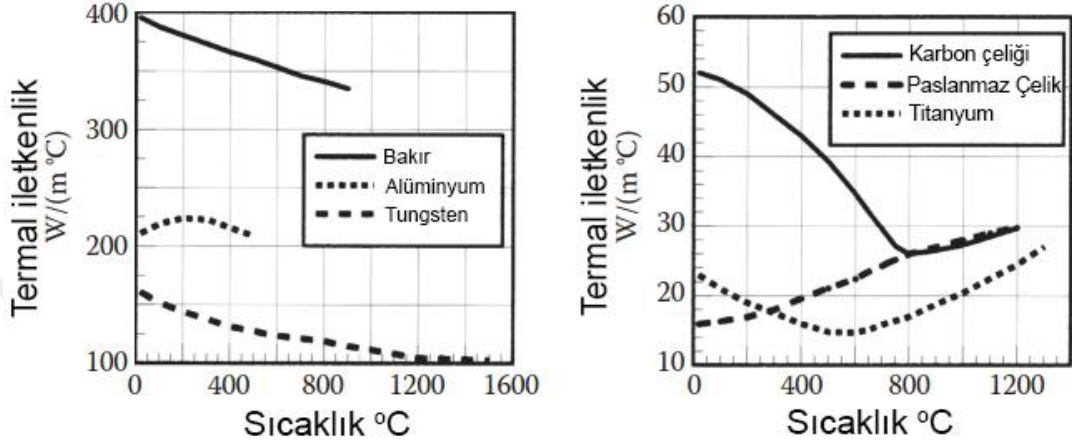
Şekil 1.19. Bakır bir indüksiyon bobininin kenarlarında çatlamların oluşması (Rudnev ve diğ., 2017).

1.4.9. Isıl işlem görececek malzemenin termal özellikleri

1.4.9.1. Termal iletkenlik

Bir malzemenin ısı iletebilme kabiliyeti termal iletkenlik olarak tanımlanır ve λ simgesi ile gösterilir. λ değeri yüksek olan malzeme düşük olan malzemeye göre ısıyı daha iyi iletir. İndüksiyon ısıtmada λ değeri önemlidir. Özellikle yüzey sertleştirme uygulamalarında yüksek λ değerine sahip malzemelerin kullanımı ısınının sadece

sertleştirilmesi düşünülen yüzeyde değil aynı zamanda daha derinlere de ilerlemesine neden olacaktır. Bu durum indüksiyon ısıtma sisteminin güç tüketimini artıracak ve sistem verimsiz hale gelecektir. Ayrıca aşırı ısı transferi nedeniyle malzemede mikro boyutlarda yapısal değişiklikler meydana gelecektir. Sıcaklığa bağlı olarak termal iletkenlik (k) değerinin değişimi farklı malzemeler için Şekil 1.20’de verilmiştir.



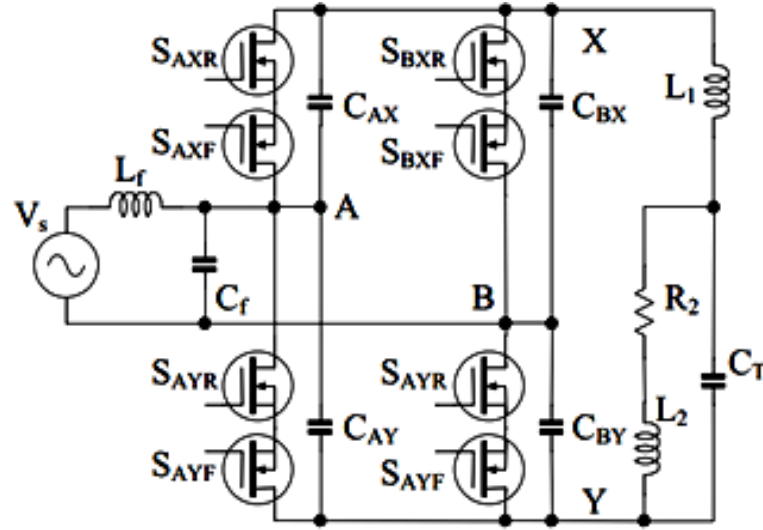
Şekil 1.20. Farklı malzemelerin sıcaklığa bağlı termal iletkenlik değişimi (Rudnev ve diğ., 2017)

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

İndüksiyon ısıtma geleneksel ısıtma teknolojilerine kıyasla pek çok avantaja sahip olduğundan araştırmacılar tarafından verimliliğinin artırılması ve ısıtmaya etki eden faktörlerin belirlenmesi ısı performansının iyileştirilmesi için birçok çalışma yapılmıştır. Söz konusu çalışmalar inverter çalışmaları, modülasyon ve kontrol algoritmaları, manyetik akı yoğunlaştırıcı başlıkları altında toplanacaktır.

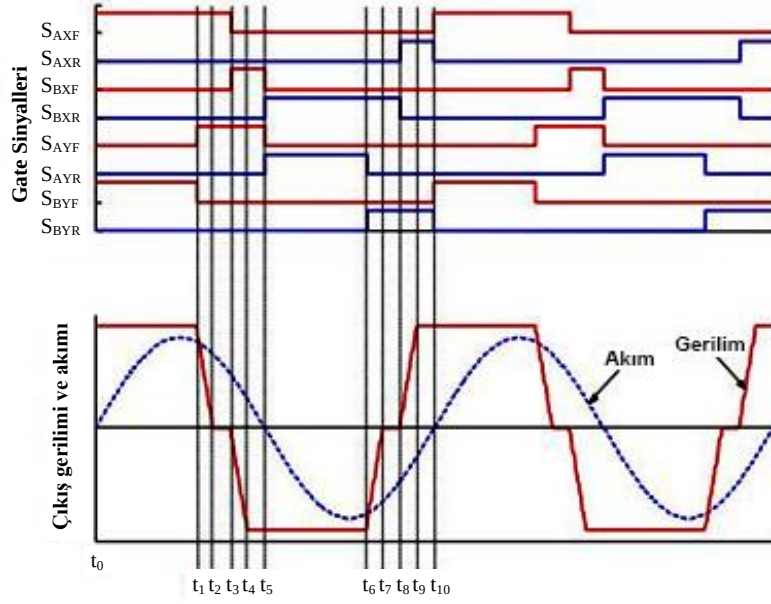
2.1. İnverter Çalışmaları

Bazı araştırmacılar tarafından indüksiyon ısıtma sistemlerinde verimliliğin artırılması, kullanılan malzeme sayısında azalma sağlanabilmesi ve EM emisyonların azaltılması amacıyla doğrudan AC-AC dönüştürücüler önerilmiştir. Nguyen ve diğerleri (2006) tarafından AC-DC-AC dönüştürücülerin güç faktörlerinin kötü olması ve şebekede büyük genlikli harmonik akımlara sebep olmaları sebebiyle AC-AC dönüştürücülerin gerekliliğine vurgu yapılmış ve Şekil 2.1.'de verilen matris dönüştürücü sistem önerilmiştir (Nguyen-Quang ve diğ., 2006).



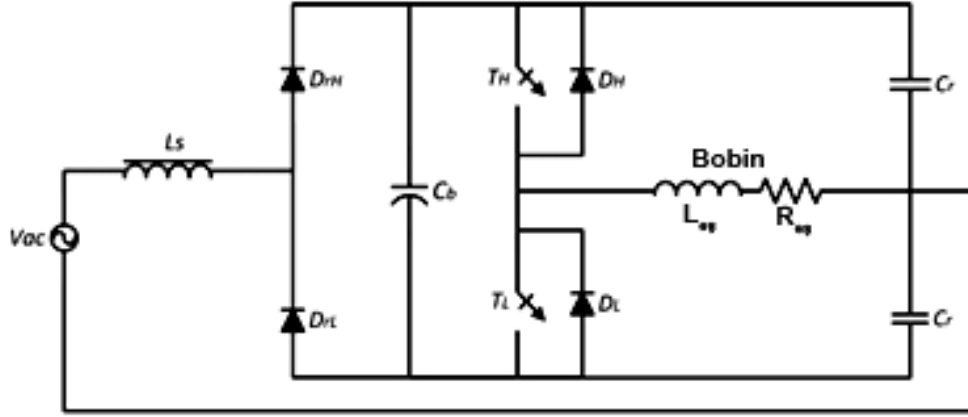
Şekil 2.1. Tek fazlı matris inverter (Nguyen-Quang ve diğ., 2006).

Şekil 2.2'de gösterildiği gibi, dönüştürücü devresinde AC çıkış elde edebilmek için MOSFET'lerin gate uçlarına uygun sinyaller uygulanmıştır.



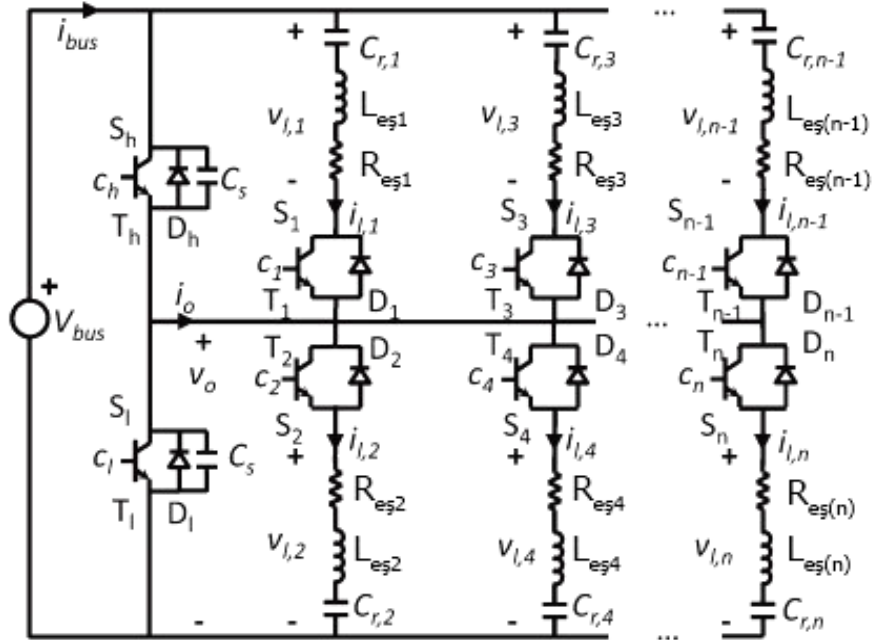
Şekil 2.2. MOSFET’lerin gate uçlarına uygulanan sinyaller ve buna bağlı oluşan çıkış gerilim ve akımı (Nguyen-Quang ve diğ., 2006).

Nguyen ve diğerleri (2007) tarafından tasarlanan bu sistemin geleneksel H köprüsü sistemleriyle kıyaslaması yapılmış ve güç faktörü, toplam harmonik distorsiyon ve yumuşak anahtarlama durumlarında geniş güç aralıklarında daha iyi kontrol imkânının sağladığı görülmüştür. Ancak geleneksel H köprülerine göre daha düşük verimliliği sahiptir (Nguyen-Quang ve diğ., 2007). Bazı araştırmacılar IGBT (Lucia ve diğ., 2011) veya ters blokeli IGBT’ler (RB-IGBT) (Li ve diğ., 2005; Sugimura ve diğ., 2008) ile AC-AC dönüştürücüler de önermişlerdir. Ancak ilgili çalışmalarda kullanılan sistemlerde anahtarlama elemanlarının fazlalığı sebebiyle verimlilik düşerken maliyet ise artmaktadır. Dönüştürücü performansını artırıp maliyeti azaltmak amacıyla genellikle elektronik balastlarda yarım köprü boost doğrultucular kullanılmaktadır (Aguilar ve diğ., 2001). Benzer şekilde Sarnago ve diğerleri (2012) tarafından seri rezonans yarım dalga köprü topolojisi kullanılarak güç elektroniği elemanlarının sayısı azaltılarak yeni bir topoloji önerilmiştir. Söz konusu topolojide 2 adet doğrultucu diyot kullanılmıştır. Efektif çıkış gerilimi 2 katına çıkarılmış ve bu sayede anahtarlama elemanlarında akım azaltılmıştır. Sonuç olarak verimlilik artırılmıştır (Sarnago ve diğ., 2012). Sarnago ve diğerleri (2012) tarafından önerilen topoloji Şekil 2.3.’de verilmiştir.



Şekil 2.3. Sarnago ve diğerleri tarafından önerilen inverter topolojisi (Sarnago ve diğ., 2012).

AC-AC dönüştürücüler ile ilgili olarak literatürde birçok çalışma bulunmasına rağmen genellikle çalışmaların çoğu tek çıkış üzerine yapılmıştır. Ancak uygulamalarda homojen ısı dağılımını sağlamak, farklı frekanslarda indüksiyon ısıtmaları ve indüksiyon ısıtma bobini üzerindeki güç yoğunluğunu azaltmak için birden çok çıkışa ihtiyaç duyulmaktadır. Lucía ve diğerleri (2010) çok çıkışlı bir matris dönüştürücülü indüksiyon ısıtma sistemi tasarlanmış ve uygulanmıştır (Lucía ve diğ., 2010) (Şekil 2.4)

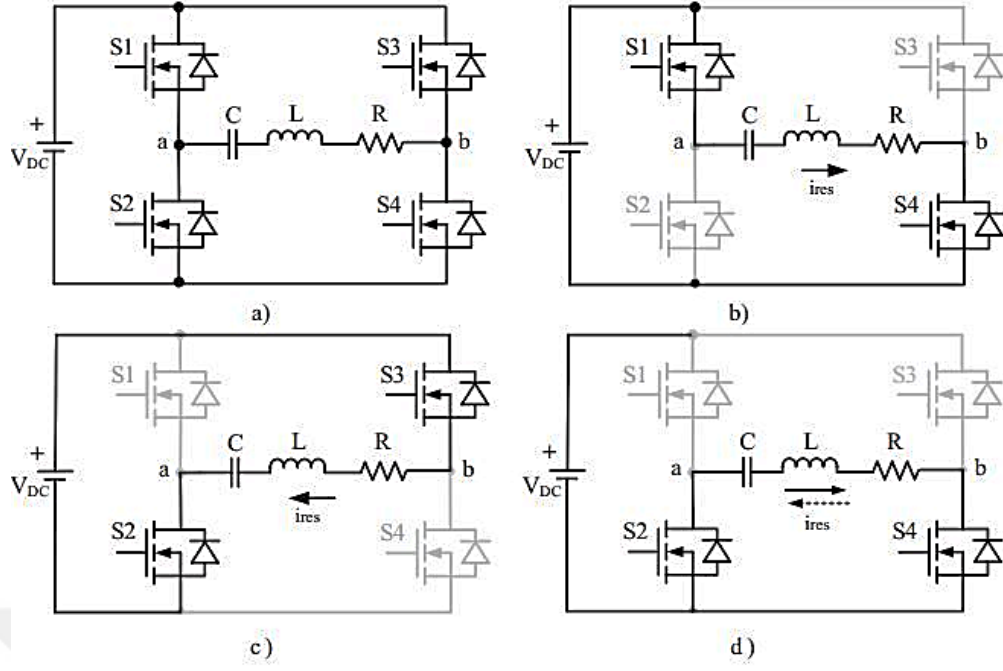


Şekil 2.4. Lucía ve diğerleri (2010) tarafından önerilen matris inverter topolojisi (Lucía ve diğ., 2010).

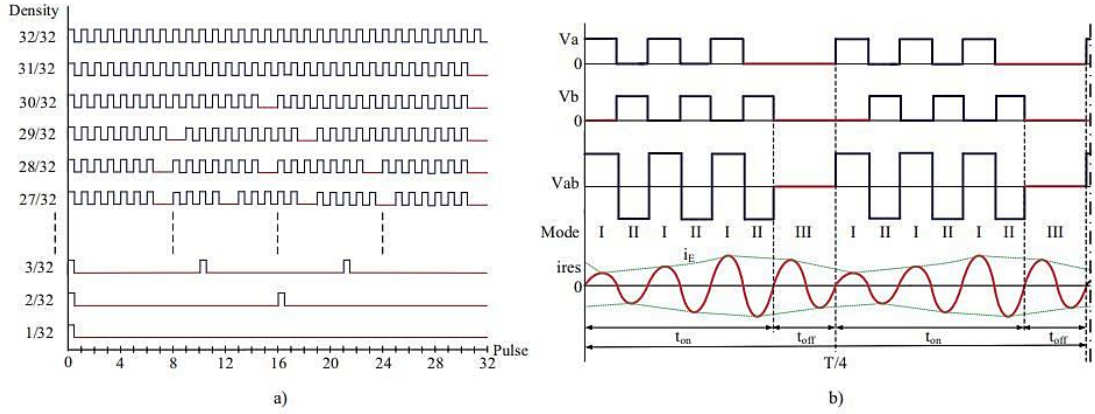
2.2. Modülasyon ve Kontrol Algoritmaları

Modülasyon ve kontrol algoritmaları indüksiyon ısıtma sistemlerinde istenilen düzeyde ısıtmanın performansının sağlanabilmesi, verimliliğin artırılması için gereklidir. İndüksiyon ısıtma sistemlerinde ısı sonucu değişen elektriksel parametreler ile termal parametreler ve malzeme üretiminden kaynaklanan özellikler nedeniyle indüksiyon ısıtma sistemlerinden beklenen performansın alınabilmesi için çıkış gücünün kontrol edilmesi gerekmektedir.

Modülasyon tekniklerinden en kolayı kare dalga modülasyonudur. Kare dalga modülasyonunda çıkış gücü anahtarlama frekansının değiştirilmesi ile değiştirilmektedir. Asimetrik görev döngüsü kontrolü (ADC) ise kare dalganın frekansının yanında görev döngüsü süresinin de değiştirilmesi bu sayede çıkış gücünün değiştirilmesini amaçlar. Bu modülasyon teknikleri orta/yüksek çıkış gücü aralığında kullanılır. En yüksek güç rezonans frekansında alınır. Ancak düşük güç aralığında yüksek anahtarlama frekansı gerektiğinden anahtarlama kayıpları yükseleceğinden verim de düşecektir. Geniş aralıklı güç kapasitelerin gerektiği durumlarda kare dalga ve asimetrik görev döngüsü modülasyon tekniklerinin kullanımı yetersiz olacaktır (Lucia ve diğ., 2009). Düşük güç aralıklarında verimliliği artırmak amacıyla Darbe yoğunluk modülasyonu (PDM) kullanılır. Küme modu (*burst mode*) olarak da adlandırılan bu modülasyon tekniği dönüştürücünün (inverter) açık kalma süresinin değiştirmesi sayesinde sabit frekansta dönüştürücünün kullanmasına imkân sağlar (Esteve ve diğ., 2011). PDM kontrol tekniği bir komut kümesidir. Komut kümesindeki kontrol darbelerinin (*pulse*) silinmesi suretiyle güç kontrolü gerçekleştirilir. Silinen kontrol darbesi sayısı arttıkça çıkış gücü azalmaktadır (Karafil ve diğ., 2017). Şekil 2.5’de tam köprü inverter devresinin mod 1, mod 2 ve mod 3 kontrolleri gösterilmiş; Şekil 2.6 (a)’da 32 adet PDM modeli; Şekil 2.6 (b)’de ise PDM akım dalga şekli gösterilmiştir.



Şekil 2.5. a) Tam dalga köprü inverter, b) mod 1 kontrolü, c) mod 2 kontrolü, d) mod 3 kontrollü



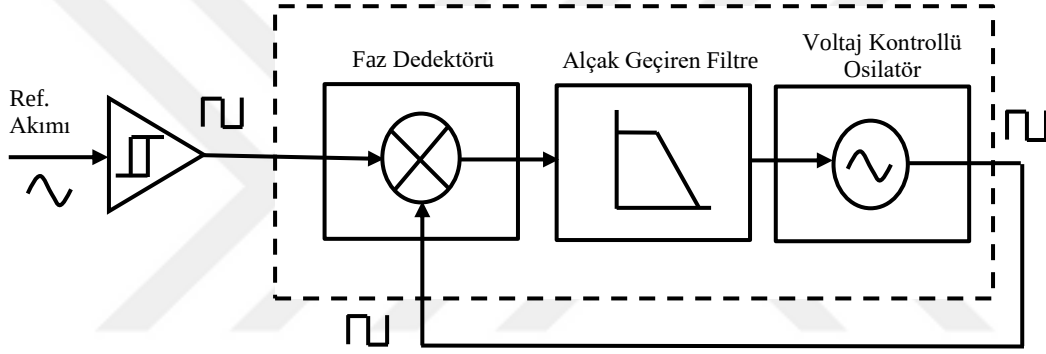
Şekil 2.6. a) PDM sinyalleri b) PDM akım dalga şekli (Özbay ve diğ., 2021).

Şekil 2.5’de görüldüğü üzere inverter girişine V_{DC} gerilimi uygulanır. Şekil 2.5(b)’de gösterilen mod 1 ile c’de gösterilen mod 2 anahtarlama durumlarında 3 darbe (pulse) uygulanarak Şekil 2.6(b)’de gösterilen V_a ve V_b gerilimleri oluşur. 4. çevrimde mod 3 anahtarlama ile kontrol darbesi sıfırlanır. Bu dalga formunda ortalama çıkış gücü, tam çıkış gücünün $\frac{3}{4}$ ’üne tekabül etmektedir. Bu şekilde darbe sayıları Şekil 2.6(a)’da gösterilen şekilde artırılarak çıkış gücü artırılmaktadır (Özbay ve diğ., 2021). PDM’de düşük bobin kalite faktörü, düşük çıkış akımı ve düşük yük koşullarında çıkış akımı süreksiz modda (*discontinous mode*) olabilir. Çıkış akım dalgalanması yüksek akımlara sebep olabilir bu nedenle güç kayıpları artarak frekans takip hassasiyeti azalabilir. Bu durumun önüne geçmek için Esteve ve diğerleri (2015) tarafından geliştirilmiş bir darbe

yoğunluk modülasyonu (EPDM) önermişlerdir. Gerek simülasyon çalışmaları gerekse deneysel çalışmalar ile kare dalga modülasyonu, faz öteleme modülasyonu ve PDM ile karşılaştırmalar yapılmış EPDM kontrol yönteminin diğer yöntemlere nazaran verimliliği arttırdığı görülmüştür. EPDM ile PDM çıkış akım dalgalanması yönüyle karşılaştırılmış ve EPDM kontrol yönteminde çıkış dalgalanmasının daha az olduğu görülmüştür (Esteve ve diğ., 2015).

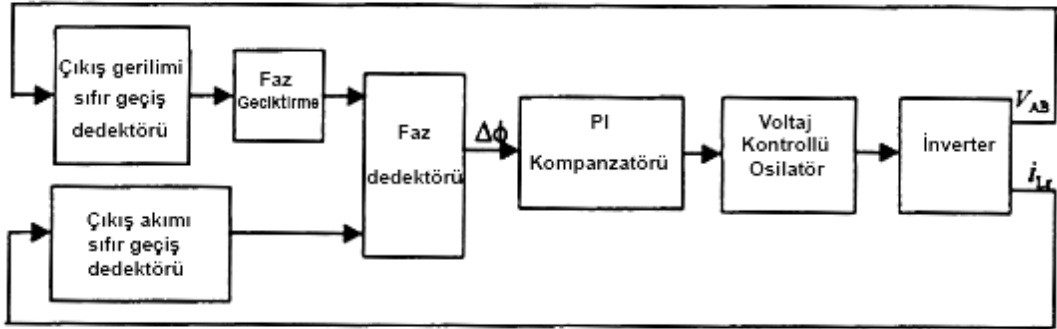
Modülasyon çeşitlerinin birbirilerine göre avantaj ve dezavantajları mevcuttur. Birçok araştırmacı tarafından modülasyon teknikleri geliştirilerek indüksiyon ısıtıcı performansının artırılması amaçlanmıştır. Örneğin Lucia ve diğerleri tarafından sıfır gerilim anahtarlama yarı köprü seri rezonans dönüştürücülerdeki verimliliğin yüksek frekansa bağlı olarak düşmesinin önlenmesi amacıyla kare dalga ve klasik asimetrik görev döngüsü (Imbertson ve Mohan, 1993; Lucia ve diğ., 2009) kontrollerinin birleşimi olan değişken frekans görev döngüsü önerisi yapılmış bu sayede anahtarlama frekansı düşürülerek düşük ve orta frekanslarda verimliliğin artırılması hedeflenmiştir (Lucia ve diğ., 2010). Pek çok indüksiyon ısıtma sisteminde değişken frekans kontrolü kullanılmaktadır. Genellikle evlerde kullanılan indüksiyon ocaklarında yarı köprü seri rezonans dönüştürücüler kullanılmaktadır. Bu dönüştürücülerde anahtarlama frekansının artması verimin düşmesine ve daha düşük bir çıkış gücü elde edilmektedir. Bu sorunun üstesinden gelmek amacıyla bazı araştırmalarda (Jain ve diğ., 1996) asimetrik kontrol yöntemi kullanılmış bu sayede frekans sabit tutularak ZVS (*Zero Voltage Switching*) ile anahtarlama kayıpları azaltılarak verim artırılmıştır. Ancak ZVS koşullarının düşük yük koşullarında ortadan kalkması nedeniyle yüksek açma (*turn-on*) kayıpları meydana gelmektedir. Bu nedenle faz ötelemeli adaptif yük kontrollü darbe genlik modülasyonu çıkış gücünün ayarlanması ve tüm yük aralıklarında ZVS koşullarının sağlanabilmesi için kullanılmaktadır (Nagai ve diğ., 1992; Grajales ve Lee, 1995). Ancak bu modülasyonun yarı köprü inverterlerde kullanılamaması nedeniyle Tian ve diğerleri (2005) tarafından frekans takip kontrollü asimetrik darbe genlik modülasyonu (APWM) önerilmiş ve ZVS koşullarının geniş bir yük aralığında sabit frekans metoduna göre daha iyi korunabildiği görülmüştür. Söz konusu APWM modülasyonu alanda programlanabilir kapı dizisi (FPGA) tabanlı dijital bir kontrolör ile gerçekleştirilmiştir (Tian ve diğ., 2005). İndüksiyon ısıtma sistemlerinde bir diğer kontrol yöntemi ise faz kilitli döngüdür (PLL). Bu yöntemde ısıya bağlı malzemede meydana gelen direnç değişimleri, bağlı manyetik geçirgenlik gibi elektriksel parametre değişiklikleri, indüksiyon ısıtma sistemi üzerinde değişen ortam şartlarının sebep olduğu etkiler, ısı işleme tabi tutulacak malzeme

değişiklikleri gibi nedenlerle bozulan rezonans durumunun korunması amaçlanmaktadır. Bu kontrol yönteminde rezonans şartlarının korunması yarı iletken anahtarlama frekansının değiştirilmesi ile sağlanmaktadır. Bu sayede verim yükseltilmekte ısı işleme tabi tutulan malzemenin istenilen sıcaklığa en kısa sürede çıkarılması hedeflenmektedir. PLL kontrolünde akım ile gerilimin aynı fazda olması sağlanır (Okuno ve diğ., 1995). Bunu sağlamak için akım ve gerilim sinyalleri XOR kapısından geçirilir ve kapı çıkışı alçak geçiren filtre ile filtrelenir. Daha sonra çıkış sinyali gerilim kontrollü osilatöre (VCO) uygulanır ve osilatör çıkışından üretilen sinyal ile anahtarlama elemanları kontrol edilir. Uygulamada genellikle 4046 ailesinden entegre devreler kullanılmaktadır (Fridman ve Levant, 2002; Zeng, 2012; Zhang ve Pu, 2014; Li ve Deng, 2016). Tipik bir PLL kontrol blok diyagramı Şekil 2.7’de gösterilmiştir.



Şekil 2.7. PLL kontrolü blok şeması

Geleneksel PLL kontrolünde ZVS koşulları oluşturulamayabilir bunun sonucunda artan anahtarlama kayıpları nedeniyle verim düşer. Bu nedenle Chen ve diğerleri (2001) tarafından geleneksel PLL kontrolü bir faz geciktirme aşaması eklenmek suretiyle yeniden tasarlanarak sistemde kullanılacak olan tam köprü inverterin ZVS koşullarında kalması amaçlanmıştır (Şekil 2.8).



Şekil 2.8. Chen ve diğerleri (2001) tarafından önerilen PLL kontrol şeması

Chen ve diğerleri (2001) tarafından yapılan çalışmanın bir benzeri Bayındır ve diğerleri (2003) tarafından yapılmış, önceki çalışmada PLL için 4046 CMOS entegresi tercih edilirken; sonraki çalışmada TMS320F240 dijital sinyal işlemcisi (DSP) tercih edilmiştir. Çalışma sonunda DSP temelli PLL'in analog PLL kontrolöre göre daha esnek ve hassas olduğu sonucuna varılmıştır (Bayındır ve diğ., 2003).

Özbay ve diğerleri (2021) tarafından yapılan bir çalışmada geleneksel PLL kontrolünün yavaş ve güvenilir olmadığı, mekanik vibrasyon gibi harici etkenlerden etkilenebildiği ve VCO'nun parametre belirsizliklerinin performansın düşmesine sebep olduğu vurgulanarak kayan kip kontrollü PLL (SMC-PLL) (*Sliding mode controlled PLL*) önerisi yapılmıştır (Özbay ve diğ., 2021). SMC-PLL algoritmasının geleneksel PLL kontrolünden daha iyi olduğuna yönelik başka çalışmalar da mevcuttur (Komurcugil ve diğ., 2017; Yaylacı, 2018). Yakın yıllarda Bouadi ve diğerleri (2022) tarafından yapılan bir çalışmada PLL'de kullanılan alçak geçiren filtre (LPF) yerine kontrol hassasiyetini artırmak ve sistemin cevap süresini kısaltmak amacıyla yapay sinir ağları kullanılmış ve sinirsel kontrollü PLL devresi analiz edilmiştir. Çalışmanın sonunda geleneksel PLL kontrolüne nazaran simülasyon sonuçları, önerilen bu sinirsel PLL kontrol sisteminin etkinliğini ve üstünlüğünü göstermiştir (Bouadi ve diğ., 2022). Bir diğer kontrol yöntemi ise RMS genlik kontrolüdür. Bu yöntemde değişen malzeme parametrelerine bağlı olarak düşen akımın artırılması amacıyla inverter öncesindeki buck dönüştürücünün çıkış gerilimi artırılır. Bu sayede sisteme sabit bir akım sağlanır. Bu kontrol yöntemi, PLL ile birleştirilerek sistemin rezonansta kalması sağlanır. Isıya bağlı olarak artan elektriksel direnç nedeniyle meydana gelen akım düşüşü ise buck dönüştürücü çıkış gerilimin artırılması ile kompanze edilir. Sisteme ait blok şeması Şekil 2.9'da gösterilmiştir (Ngoc ve diğ., 2011). Önerilen kontrol yönteminin dezavantajı buck dönüştürücü kontrolü için yapılan hesaplamaların dinamik cevabını yavaşlatmasıdır (Lucia ve diğ., 2013).

Observer: ReO) potansiyellerini araştırmak amacıyla Paesa ve diğeri (2011) tarafından indüksiyon ocakları için kaynatma kontrollü bir sistem tasarlanmıştır. Bu amaçla, parametreleri çoklu model ReO (MMReO) tarafından sağlanan tahminlere bağlı olarak çevrimiçi olarak güncellenen indüksiyon ocakları için uyarlanabilir bir kaynatma kontrolü önerilmiştir. Çalışma sonunda araştırmacılarca MMReO'nun nicel geri bildirim teorisi (*Quantitative Feedback Theory*) temelli bir kontrole göre daha performanslı olduğu ve tencere içindeki su miktarına bağlı olarak %30'a kadar suyun daha erken kaynadığı görölmüştür (Paesa ve diğ., 2011). Araştırmacılar tarafından tek fazlı sistemlerin yanında çok fazlı ve/veya çok bobinli sistemler de önerilmiştir. Long ve diğeri (2012) tarafından sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak basitleştirilmiş çok fazlı indüksiyon ısıtma sisteminin eşdeğer modellemesi yapılmıştır. İlgili çalışmada referans akım takibi yapılan rezonans kontrolü yapılan sistem, enine akı konfigürasyonunda yüz yüze düzenlenmiş üç endüktör bobininden ve ısıtılacak yük olan bir disk plakasından oluşmaktadır. Tüm sistemin beslemesi akım kaynağı üzerinden yapılmıştır. Sistemin kontrolü RMS akım üzerinden oransal integral (PI) kontrol ile yapılmıştır (Nguyen ve diğ., 2012).

Modölasyon ve kontrol algoritmaları geçmişte çoğunlukla analog olarak yapılırken günümüzde çoğunlukla dijital olarak yapılmaktadır. Dijital uygulamaların kolay kontrol edilebilirliği ve performans avantajları nedeniyle mikroişlemciler, dijital sinyal işlemcileri (DSP'ler) veya alanda programlanabilir kapı dizileri (FPGA'lar) kullanılmaktadır (Lucia ve diğ., 2013).

Mikroişlemciler ve DSP'ler tamamen yazılımsal çözümler sunarken FPGA'lar mikroişlemci veya DSP'ler tarafından gerçekleştirilmeye uygun olmayan belirli görevleri gerçekleştiren özel dijital donanımları uygulamak için kullanılır (Navarro ve diğ., 2013).

Özetlemek gerekirse indüksiyon ısıtma için darbe genişlik modölasyonu (PWM), değişken frekans (VF), asimetrik görev döngüsü kontrolü (ADC), faz öteleme kontrolü (PSC) ve darbe yoğunluk modölasyonu (PDM) kullanılmaktadır. Bu modölasyon tekniklerinin tek yüke sahip tek kademeli güç dönüştürücülerde ısıtma / pişirme uygulamaları için karşılaştırılması Vishnuram ve diğeri (2020) tarafından yapılmış Çizelge 2.1'de verilmiştir (Vishnuram ve diğ., 2020).

Çizelge 2.1. İndüksiyon ısıtma tekniklerinin kıyaslanması

Kaynak	Modülasyon tekniği						Maksimum çıkış gücü	Yumuşak anahtarlama	Kontrol zorluğu	Gerilim stresi	Maksimum verim
	PWM	VF	ADC	PSC	PDM	Fliker					
(Shenkman ve diğ., 2001)		✓				Yok	5 kW	Kısmi	Orta	V_{in}	-
(Mishima ve diğ., 2015)	✓					Var	3 kW	Kısmi	Orta	$V_{in}-V_{L2}-V_{Lb}$	95
(Mishima ve diğ., 2016)				✓		Var	3 kW	Var	İyi	$V_{in}-V_{L2}-V_{Lb}-V_{dx}$	95
(Komeda ve Fujita, 2017)				✓		Yok	1,3 kW	Var	Kötü	$(V_{in}-V_{Lf})/2$	97,7
(Ahmed, 2010)	✓				✓	Var	1,3 kW	Kısmi	İyi	$V_{in}-V_{LX}-V_{dx}$	93
(Sarnago ve diğ., 2013)	✓					Yok	800 W	Kısmi	Orta	$V_{in}-V_o$	96,2
(Sarnago ve diğ., 2012)			✓			Yok	3,6 Kw	Kısmi	Orta	$V_{in}-V_{LX}-V_{dx}$	96
(Sarnago ve diğ., 2016)	✓					Var	5 kW	Kısmi	Orta	$V_{in}-V_{LX}$	99
(Okuma ve diğ., 1983)		✓				Var	-	Yok	Kötü	V_{in}	-
(Kumar ve diğ., 2018)	✓					Var	1,1 kW	Kısmi	Orta	V_{in}	-
(Mishima ve diğ., 2017)	✓					Var	2,6 kW	Kısmi	Orta	$V_{in}-V_{L2}-V_{Lb}-V_{dx}$	97,7

V_{in} : Giriş gerilimi; V_{L2} , V_{Lb} , V_{Lf} , V_{LX} : Bobin gerilimi; V_o : Çıkış gerilimi; V_{dx} : Diyot gerilimi

2.3. Manyetik Akı Yoğunlaştırıcı

İndüksiyon ısıtma sistemlerinde manyetik akı yoğunlaştırıcıların kullanımı performans artırmada en etkili yollardan bir tanesidir. Manyetik akı yoğunlaştırıcıların doğru kullanımı indüksiyon bobininin veriminde artış, enerjinin daha iyi transferi, inverter ile indüksiyon bobininin empedans uyumunun artırılması, homojen ısıtma ve verimin düşmesine sebep olan kaçak manyetik alanların ısıtılacak malzeme üzerinde yoğunlaşması sağlanarak daha hızlı bir sıcaklık artışı sağlar. Hızlı ve homojen ısıtma sayesinde yüksek termal farklılıklara bağlı malzeme üzerindeki stres azalacağından yüksek kaliteli ürünlerin daha kısa sürede üretilmesi mümkün olmaktadır. Manyetik akı

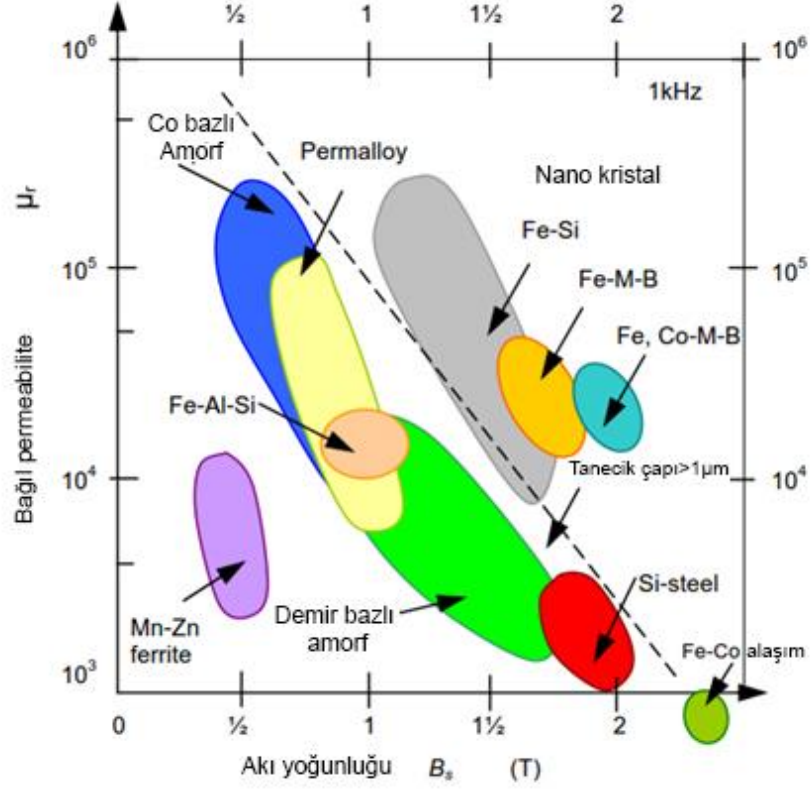
yoğunlaştırıcıları yumuşak manyetik toz (*soft magnetic powder*) ve bağlayıcıdan (*binder*) üretilen, özel bir teknolojiye göre preslenmiş ve ısıtma işlemine tabi tutulmuş kompozitlerdir.

Manyetik akı yoğunlaştırıcıları ilk başlarda lamine çelikler halinde trafolarla kullanılmıştır. Enerji verimliliğini artırdığından daha sonraları birçok alanda kullanılmaya başlamıştır. İndüksiyon ısıtmada da manyetik akı yoğunlaştırıcılar kullanılmaktadır. Manyetik akının istenilen doğrultuda akması sağlanarak indüksiyon ısıtmada ısıtma işlemi görecektir malzeme üzerinde istenilen alanda ısıtma sağlanabilirken verim de artmaktadır. Lamine çelikler düşük frekanslarda kullanılırken anahtarlamalı güç kaynakları, yüksek frekans trafolar ve ateşleme bobinleri gibi yüksek frekans uygulamalarda ferrit nüveler kullanılmaktadır. Akı yoğunlaştırmada kullanılan malzemelerin sahip oldukları farklı özellikler bu malzemelerin farklı uygulamalarda kullanılmasına imkân sağlamaktadır. Kullanılan malzemeler mıknatıslardan farklı olarak daimî olarak mıknatıslanmayan ancak bağlı manyetik geçirgenliği 1'den büyük olan ve akı yönüne dik olarak yüksek elektriksel direnç gösteren malzemelerdir. Histerezis kayıplarının az olması için kullanılacak akı yoğunlaştırıcılarının düşük histerezis aralığına sahip olması gerekmektedir. Bu sayede indüksiyon ısıtma sisteminde verim artırılabilir ve ısı kayıplarının önüne geçilebilmektedir.

Akı yoğunlaştırıcıların en önemli özellikleri manyetik geçirgenlik, anizotropi ve kayıplardır. Saturasyon nedeniyle manyetik geçirgenlik manyetik alan şiddetine bağlıdır. Anizotropi ise manyetik yoğunlaştırıcı tasarımında önemli bir faktördür. Çünkü anizotropi nedeniyle akı yoğunluğu yöne bağlı olarak değişmektedir. Kayıplar ise manyetik akı yoğunluğu (B) ve frekansa (f) bağlı olarak değişmektedir.

İndüksiyon ısıtmadaki manyetik akı yoğunlaştırıcı sekonder ucu kısa devre edilmiş bir trafonun nüvesine benzetilebilir. Primer sargı indüksiyon bobini sekonder sargı ise iş parçasıdır. İndüksiyon ısıtmada kullanılan manyetik yoğunlaştırıcının trafo manyetik yoğunlaştırıcı veya nüvesinden farklı manyetik akının izlediği yoldur. Trafoda manyetik akı kapalı bir döngü içinde dolaşırken, indüksiyon ısıtmada manyetik akı çizgileri yoğunlaştırıcı, hava ve iş parçasından oluşan kapalı yolu takip eder.

Manyetik akı yoğunlaştırıcı seçiminde manyetik akı yoğunluğu ve bağlı manyetik geçirgenlik gibi faktörler göz önünde bulundurulmalıdır. Şekil 2.10'da farklı türden alaşımlara ait $B - \mu_r$ grafiği verilmiştir (Williams, 2013).



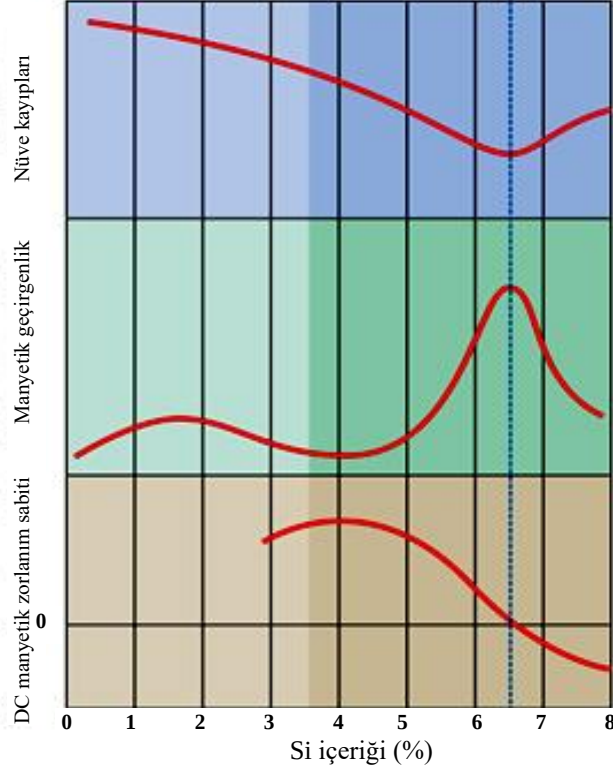
Şekil 2.10. Farklı türden manyetik akı yoğunlaştırıcılara ait seçim grafiği (Williams, 2013).

Manyetik yoğunlaştırıcı olarak,

- Lamine çelik
- Amorf ve nanokristal alaşımlar
- Yumuşak ferritler
- Manyetodielektrik malzemeler (*Soft Magnetic Composite*)
- Şekillendirilebilir manyetik kompozitler (*Soft Magnetic Moldable Composite*)

kullanılmaktadır. Bu malzemelerden lamine çelikler, demir ve silikon alaşımlarından oluşur. Bazen içerisine az miktarda alüminyum manganez gibi malzemelerde kullanılır (Anonymous, 2009). Silikon, titreşim ve sese sebep olan manyetik zorlanımın (Magnetostriction) azaltılması ve manyetik geçirgenliğin artırılması amacıyla kullanılır. Lamine çelikler 10 kHz frekansa kadar kullanılabilir ancak daha yüksek frekanslarda malzemenin değiştirilmesi gerekmektedir. Frekans yükseldikçe lamine kalınlıklarının inceltmesi gereklidir. 50–200 μm kalınlıklarda kayıplar yeterince düşük tutulabilir ve 50 kHz'e kadar frekanslar için kullanılabilir. Ayrıca lamineler arasında organik olmayan malzemeler ve oksitler de kullanılabilir. Lamineler arasında izolasyon malzemesi olarak reçine veya vernik kullanılır. Kayıpların en az olduğu, maksimum manyetik

geçirgenliğin elde edildiği ve DC manyetik zorlanım sabitinin sıfıra indiği optimum nokta silikon içeriğinin %6.5 olduğu noktadır. Bu durum aşağıda gösterilmiştir (Core, 2014).



Şekil 2.11. Lamine çelik manyetik akı yoğunlaştırıcılarda silikon içeriğine bağlı olarak kayıp, manyetik geçirgenlik ve DC manyetik zorlanım sabitinin değişimi (Core, 2014).

Frekansın yükselmesi lamine çeliklerde kayıpları artıracığından yüksek frekanslar için uygun malzeme seçilmesi gerekmektedir. Bu malzemelerden birisi amorf ve nano-kristal alaşımlardır. Bu malzemeler eriyik haldeki malzemelerin 10^6 °C/s mertebesinde son derece hızlı bir şekilde ince yapılara veya şeritlere katılaştırılması yoluyla elde edilebilir (Frogner, 2014). Bu malzemelerin avantajları düşük histerezis kayıpları, yüksek manyetik geçirgenlik ve yüksek doyum değerine sahip olmasıdır. Üretim aşamasında çok hızlı bir soğutma gerektiğinden katman kalınlığı 5–30 μm ile sınırlıdır. Katmanlar arası iletkenliği azaltmak için katmanlar ince bir oksit veya diğer yalıtım malzemesi tabakasıyla kaplanır (Hilzinger ve Rodewald, 2013). Nano-kristal yapının oda sıcaklığında kırılmadan bükülebilir olması lamine çelik manyetik yoğunlaştırıcılara göre bir avantajdır (Nikolov ve Valchev, 2009). Frogner (2014) tarafından hazırlanan doktora tezinde manyetik yoğunlaştırıcılar arasında kıyaslama

yapılmıştır (Çizelge 2.2). Bu kıyaslamaya göre nano-kristalin yapılar ile lamine çelik yapılar izotropi yönüyle oldukça kötüdür. İzotropi yönüyle en iyi manyetik yoğunlaştırıcı ferrit ve şekillendirilebilir manyetik kompozitlerdir (Frogner, 2014).

Çizelge 2.2. Manyetik akı yoğunlaştırıcıların karşılaştırılması* (Frogner, 2014).

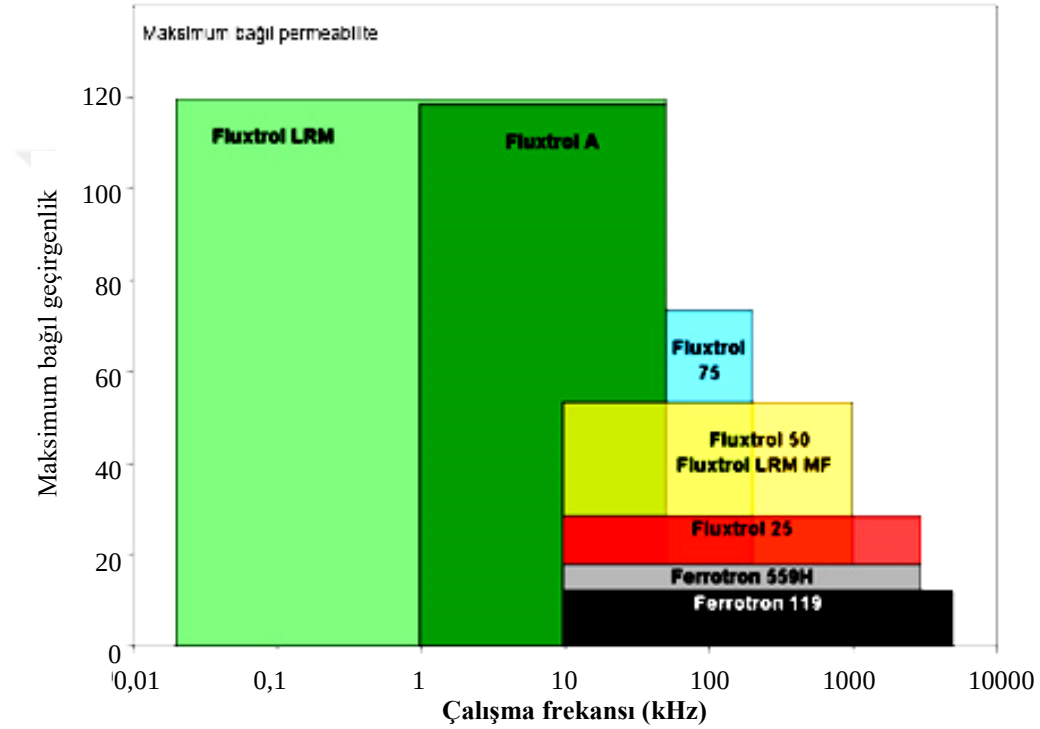
Yoğunlaştırıcı Cinsi	M. geçirgenlik	Saturasyon	İzotropi	Kayıplar	Termal iletkenlik	Isıl direnç	Boyut sınırlaması	Üretim Zorluğu
Lamine Çelik	5	5	1	3	5	5	4	2
Nanokristal alaşım	5	4	1	5	4	4	4	1
Ferrit	4	1	5	4	2	2	2	2
Yumuşak manyetik kompozit	3	5	4	4	4	3	2	4
Yumuşak şekillendirilebilir kompozit	2	4	5	4	2	3	5	5

* 1 en kötü – 5 en iyi.

Ferritler (*soft ferrite*) bir ferromanyetik malzeme olan ferrik oksitten ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) oluşur (Sugimoto, 1999). Ferromanyetik malzemelerin genel olarak elektrik iletkenlikleri de iyi olduğundan eddy akımları nedeniyle malzemenin ısınmasını önlemek amacıyla mikro ölçekte parçacıklar arasında laminasyon yapılması gerekmektedir. Fe_3O_4 gibi bileşiklerin sahip oldukları yüksek özgül direnç ve yarı iletken özellikler sayesinde ferrit manyetik yoğunlaştırıcılarda kullanılmaktadır. Bu malzemelere mikro ölçekte laminasyon sağlamak amacıyla manganez ve çinko oksitler eklenerek yüksek frekansta çok düşük kayba sahip malzemeler üretilmektedir (Hilzinger ve Rodewald, 2013). Ferritler genellikle indüksiyon ocaklarında manyetik akıyı yoğunlaştırmakta kullanılmaktadır. İçerisinde kullanılan malzemelere bağlı olarak 25 GHz'e kadar frekanslarda çalışabilmektedir. Yüksek bağlı manyetik geçirgenliğe sahip olmaları (>1000) bir avantajken düşük saturasyona sahip olmaları dezavantajdır (Hilzinger ve Rodewald, 2013).

Saturasyon yönüyle yumuşak manyetik kompozitler (SMC) ön plana çıkmaktadır. Bu malzemeler ince elektriksel izolasyon sağlayan bir tabaka ile kaplanmış inorganik veya organik bağlayıcı ile birbirine bağlanan ve yüksek basınç altında üretilen malzemelerdir (Ruffini ve diğ., 2013). Şekil ve boyut olarak birbirinden farklı atomize

toz veya pulların birbirine yüksek basınç altında birbirine bağlanması ile oluşan SMC’lerde diğer manyetik yoğunlaştırıcılarda olduğu gibi, tozun özel alaşımı SMC’nin nihai özelliklerini büyük ölçüde belirler. Parçacık boyutunun küçük olması eddy akımlarını azaltacağından kayıplarda azalacaktır. Yüksek frekanslara çıkıldıkça parçacıklar arasındaki izolasyonun kalınlaşması gerekmektedir. İzolasyonun kalınlaştırılması kayıpları azaltıcı yönde etki ederken malzemenin manyetik geçirgenliğini ise azaltmaktadır. (Frogner, 2014)



Şekil 2.12. Farklı türden SMC’lerin çalışma frekansı ve bağıl manyetik geçirgenlikleri (Frogner, 2014)

SMC’ler belli boyutlara kadar üretilabilmektedir. Ayrıca yüksek basınç altında üretilmeleri sebebiyle geometrik sınırlamalar mevcuttur. Bu nedenle Lund Üniversitesi ve sanayii işbirliği ile gaz atomizasyonu yöntemiyle %6.5 silikon demir tozu karışımı üretilerek düşük viskoziteli epoksi bağlayıcı ile silindirik toz parçacıklarının birbirine bağlanmış ve yumuşak şekillendirilebilir manyetik kompozit (SM²C) üretimi gerçekleştirilmiştir. Frogner ve diğerleri (2011) tarafından indüksiyon ısıtma sistemlerinde verimliliği artırmak ve kaçak manyetik alanları azaltmak amacıyla SM²C ile litz teli arasında termal bir kuplaj gerçekleştirilmiş (Şekil 2.13), böylece hem indüksiyon bobininin soğutması sağlanmış hem de verimlilik artırılmış; litz teli ve

SM²C'den oluşan indüksiyon ısıtma sisteminde bobin kayıplarının %50 seviyelerinden %1 veya daha az seviyelere düşürülmesi çoğu uygulama için mümkün olduğu beyan edilmiştir (Frogner ve diğ., 2011).



Şekil 2.13. SM²C ile litz teli arasında oluşturulan termal kuplaj (Frogner, 2014).

Manyetik akı yoğunlaştırıcıların indüksiyon ısıtma uygulamalarındaki etkisine ilişkin detaylı bir çalışma Ruffini ve diğerleri (1998) tarafından yapılmıştır (Ruffini ve diğ., 1998). Rüzgâr türbini kararlılığının iyileştirilmesi için türbin dişlilerinin indüksiyon ısıtma ile yapılan sertleştirme işleminde homojen dağılımlı bir yüzey oluşturmak amacıyla Wen ve diğerleri (2021) tarafından rüzgâr türbinlerinde kullanılan dişlilerinin aralıkları arasında manyetik akı yoğunlaştırıcının etkisini araştırmıştır. İlgili çalışmada EM alan modellemesi ve nümerik modelleme yapılmıştır. Çalışma sonunda ısıtma verimliliğinin manyetik yoğunlaştırıcı içindeki manyetik alan şiddetine ve manyetik alan çizgilerinin dağılıma bağlı olduğu görülmüştür (Wen ve diğ., 2021). İndüksiyon ısıtma teknolojisinin en verimli ısıtma teknolojisi olması dolayısıyla bazı araştırmacılar tarafından kaldırım ısıtmada kullanılması düşünülmüştür. Bu çalışmalarda kaldırım üstüne atılacak asfalt içerisinde çeşitli endüktif ajanlardan (genellikle metaller) oluşan bir konulması düşünülmüş ve asfalt dökülmeden önce alt tabakaya indüksiyon bobini yerleştirilmesi de düşünülmüştür (Dai ve diğ., 2013; González ve diğ., 2018). Kaldırım

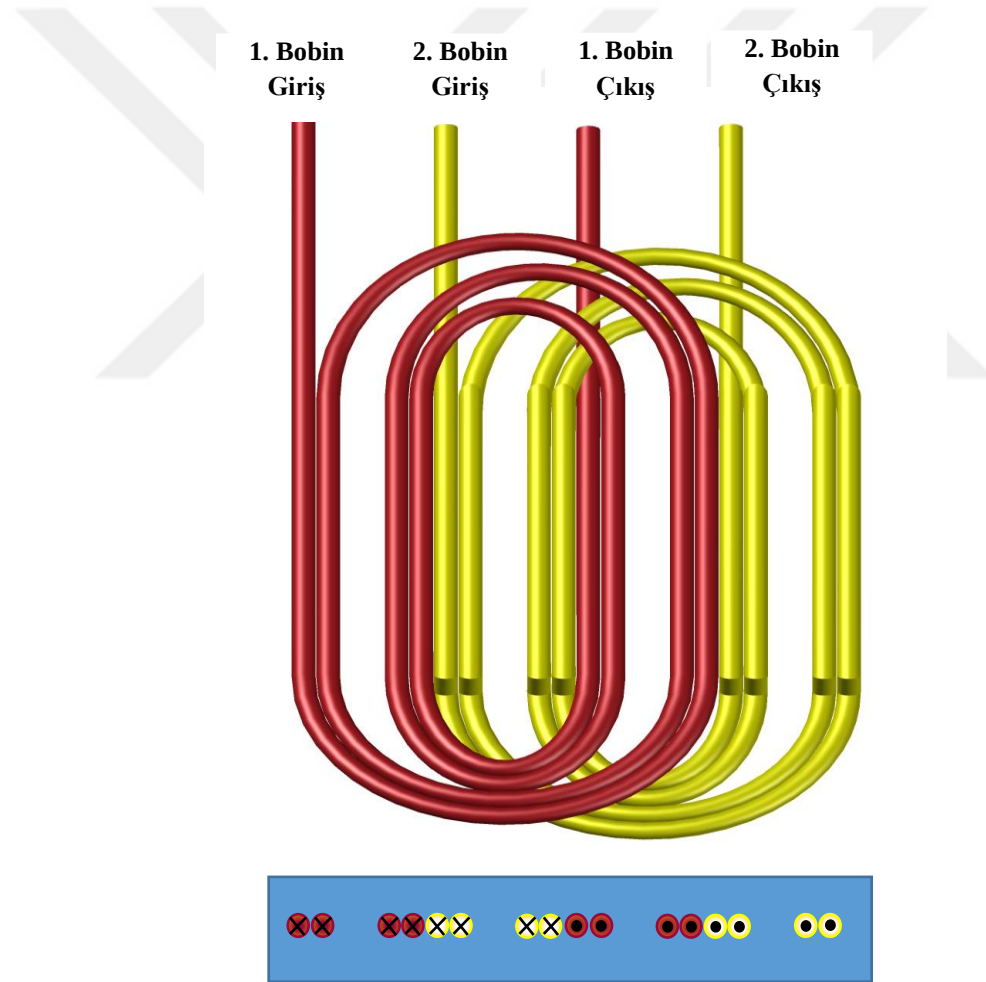
ısıtma için bu teknoloji temiz, verimli ve temassız olması nedeniyle her geçen gün artmaktadır. Bu ısıtma yönteminde verimin artırılması amacıyla Liu ve diğerleri (2020) tarafından indüksiyon bobini alt katmanında içerisinde atık ferrit malzemeler bulunan bir başka katman oluşturulması düşünülmüştür. Yapılan çalışmalar sonucunda kaçak manyetik alanların doğru bir şekilde içerisinde endüktif ajanlar bulunan asfalt tabakasına yoğunlaştırılmasının gerek buz eritmede gerekse asfalttaki çatlakların kendi kendine onarımında daha iyi sonuçlar verdiği ve enerji verimliliğinin arttığı gözlenmiştir (Liu ve diğ., 2020). Li ve diğerleri (2018) tarafından ferromanyetik metal toz bağlı manyetik akı yoğunlaştırıcı kullanarak akı yoğunlaştırıcının indüksiyon ısıtma performansına etkisi incelenmiştir. Çalışmada ısıtma işlemi gören malzeme yüzeyindeki manyetik akı yoğunluğu, güç yoğunluğu yönüyle karşılaştırma yapılmış ve akı yoğunlaştırıcısının manyetik akı yoğunluğunu 2.5 kat artırdığı, manyetik yoğunlaştırıcının olmadığı alana göre güç yoğunluğunun ise yaklaşık 7 kat fazla olduğu tespit edilmiştir (Li ve diğ., 2018). Heidari ve diğerleri (2018) farklı geometriye sahip manyetik akı yoğunlaştırıcıların Czochralski kristal büyüme sisteminde EM alan dağılıma ve ısı dağılımına etkisini 2 boyutlu sonlu elemanlar metodu kullanarak analiz etmişlerdir. Manyetik akı yoğunlaştırıcısının kullanılması durumunda manyetik vektör potansiyel değerinin arttığı görülmüştür (Heidari ve diğ., 2018). Manyetik akı yoğunlaştırıcılarının kullanıldığı sistemler için nümerik hesaplamaların yapılması büyük önem taşımaktadır. Normalde sabit bir manyetik geçirgenliğe sahip olduğu kabulü yapılmasına karşılık sıcaklığa bağlı olarak manyetik geçirgenlikleri değişmektedir. Bu durumun indüksiyon ısıtma sistemi tasarımında dikkate alınması gerekmektedir. Ancak sıcaklık artışının akı yoğunlaştırıcısına etkisi üzerine çalışmaların sayısı azdır (Nemkov ve Goldstein, 2007; Nemkov, 2013; Goldstein, 2014). Bu çalışmaların birinde Nemkov diğ.'i (2007) bir dikiş tavlama işleminde indüksiyon bobininde ve akı yoğunlaştırıcıda bütünsel bir nümerik modelin geliştirilebilmesi amacıyla sabit durum sıcaklık dağılımını incelemişlerdir. Termal analiz, iş parçasında ve akı yoğunlaştırıcı ve bobinde gerçekleştirilmiştir (Nemkov ve Goldstein, 2007). Baldan ve diğerleri (2019) tarafından manyetik akı yoğunlaştırıcı geometrisinin EM verimliliği ve sıcaklık dağılımını nasıl etkilediği araştırılmış ve Nemkov diğ. (2007) tarafından yapılan çalışmaya benzer olarak tüm sistem üzerinde ısı dağılımları tespit edilmiştir. Yapılan optimizasyon sonuçlarından akı yoğunlaştırıcıların 0.5-1.7 mm kalınlığında ince tabakalar halinde olması ve yatay düzlem ile akı yoğunlaştırıcısı arasında 20° ve 40° arasında açı olması gerektiği sonucuna varılmıştır. Böylece akı yoğunlaştırıcısı üzerinde oluşan ısının düşürülerek

yoğunlaştırıcının ömrünün uzatılabileceği vurgulanmıştır (Baldan ve diğ., 2019). Özellikle polimerik malzemelerin yaygın olarak kullanılan işleme yöntemi olan enjeksiyon kalıplama işleminde son yıllarda hızlı sıcaklık döngü teknolojileri (Rapid Temperature Cycling: RTC) kullanılmaktadır. Bu teknolojiye indüksiyon ısıtma kullanılmaktadır. Mrozek ve diğerleri (2020) tarafından enjeksiyon kalıplamada bobin sayısının, bobinler ile kalıp boşluğu yüzeyi arasındaki mesafenin ve kalıp malzemesinin etkisi manyetik yoğunlaştırıcının varlığında ve yokluğunda incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda akı yoğunlaştırıcının kullanıldığı durumda enjeksiyon malzemesinin 200 °C sıcaklığa çıkma süresi 3-4 s olarak ölçülürken; akı yoğunlaştırıcının olmadığı durumda bu süre 9 s olarak ölçülmüştür (Mrozek ve diğ., 2020). İndüksiyon ısıtma sisteminin performansının artırılması için yapılan bir diğer çalışmada indüksiyon kalıp fırınının tasarımında bobin tasarımı düzgün bir ısı dağılımının oluşturulabilmesi amacıyla ANSOFT Maxwell yazılımı kullanılarak iş parçası üzerindeki eddy akımları ve manyetik alanlar simule edilmiştir. Sistemde manyetik akı yoğunlaştırıcısı kullanılmış ve %7.5 oranında verim artışı sağlanmıştır (Tharmapalan ve diğ., 2020).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

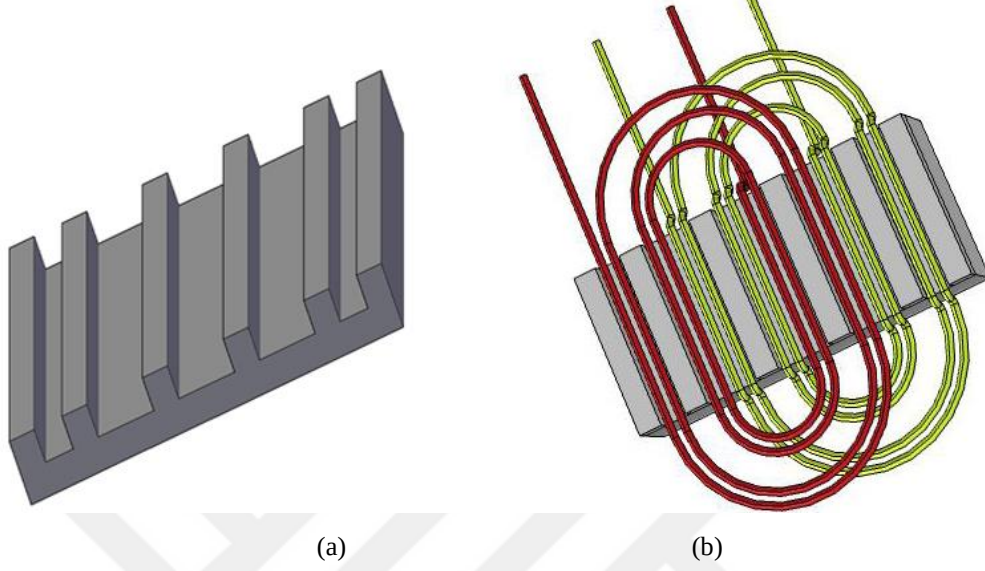
3.1. Analiz ve Simülasyon

Bu çalışmada 3 boyutlu modellemesi yapılan bir indüksiyon ısıtma sisteminin EM ve termal analizleri COMSOL[®] Multiphysics 5.4 yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tasarım aşamasında modelin basitleştirilmesi adına güç kaynağı ve indüksiyon bobininin empedans uyumlu olduğu kabulü yapılmış ve sistemin sabit akım kaynağı üzerinden beslendiği varsayımı yapılmıştır. Yürüyen dalga (*travelling wave*) indüksiyon ısıtma için Frogner (2014) tarafından önerilen özdeş iki indüksiyon bobini tasarlanmış ve bu bobinler Şekil 3.1’de gösterildiği şekilde yerleştirilmiştir.



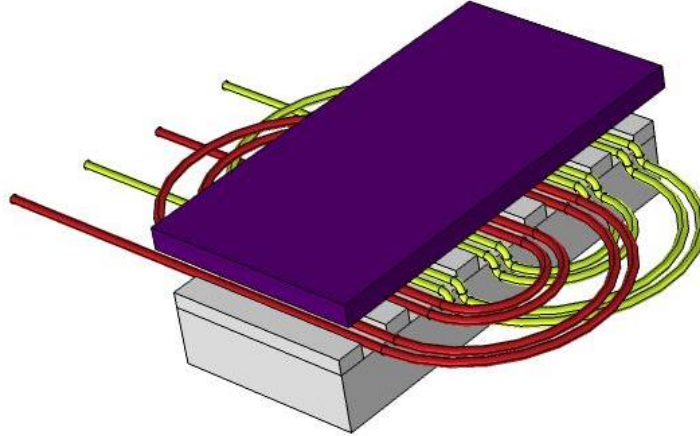
Şekil 3.1. Yürüyen dalga indüksiyon ısıtma için oluşturulan bobin sargı düzeni ve akım akış yönleri

EM alanının düzenli bir şekilde dağılımının sağlanabilmesi amacıyla ferrit nüve kullanılmış ve ferrit nüve üzerine indüksiyon bobinlerinin yerleşimi için kanallar açılmıştır (Şekil 3.2.a). Bobinler kanallara Şekil 3.2.b’deki gibi yerleştirilmiştir.



Şekil 3.2. Tasarlanan ferrit nüve ve üzerine yerleştirilen bobinler.

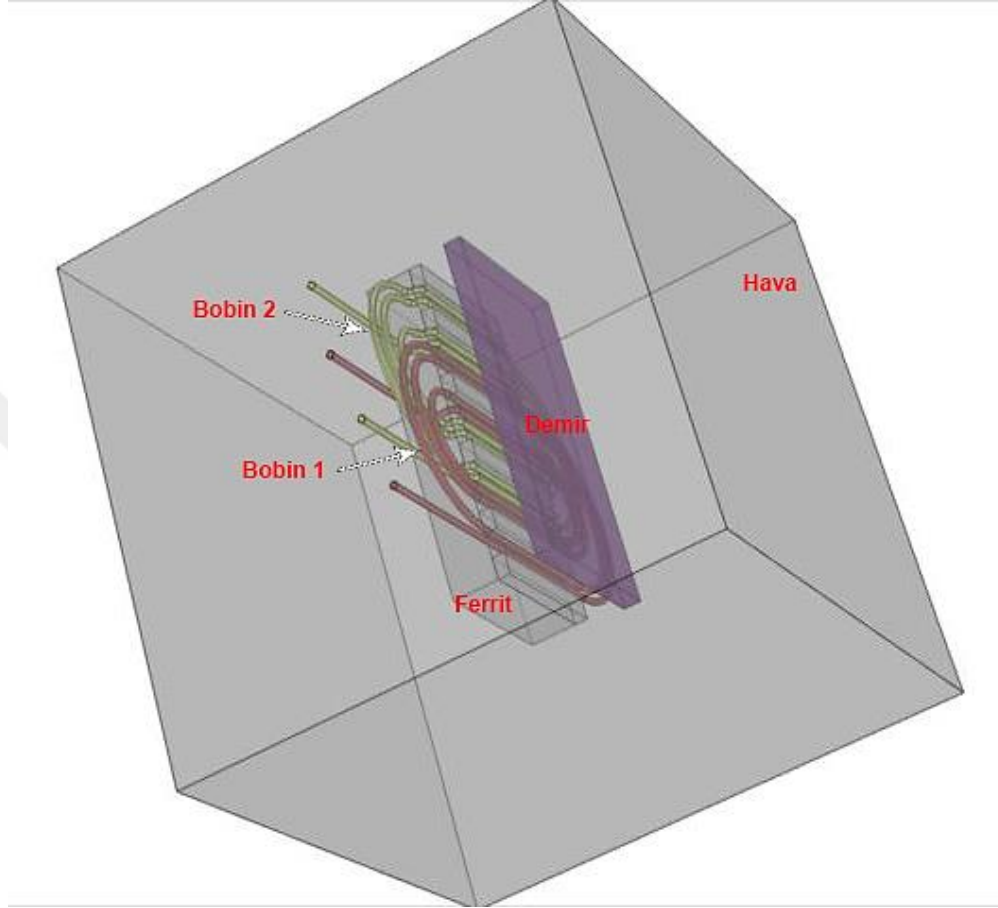
Manyetik akı yoğunlaştırıcı olarak kullanılan ferrit nüvenin üzerine simülasyon amacıyla iş parçası yerleştirilmiştir. (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Tasarlanan indüksiyon ısıtma sistemi.

COMSOL programında katmanlar arasındaki boşluğun hava katmanı olarak tanımlanabilmesi için Şekil 3.4’de gösterildiği gibi indüksiyon ısıtma sistemini içine alan

bir katman oluşturulmuş ve bu katman hava katmanı olarak tanımlanmıştır. Simülasyonda indüksiyon bobinleri bakır, manyetik akı yoğunlaştırıcı ferrit nüve ve iş parçası ise demir olarak tanımlanmıştır.

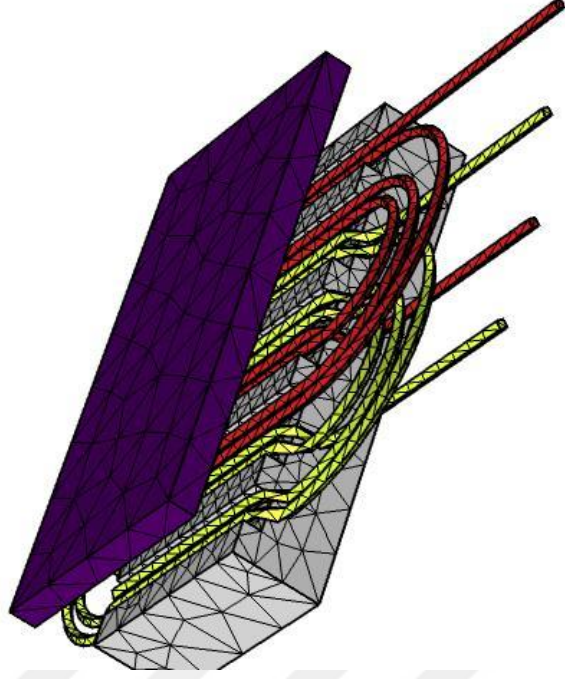


Şekil 3.4. COMSOL programında analiz için oluşturulan tasarım.

Program üzerinden bobin tanımlamaları yapılmış bobin giriş ve çıkış noktaları tanımlanmıştır. 1. bobin ve 2. bobin arasında 110° faz farkı olacak şekilde akım kaynağı üzerinden 100 kHz frekanslı akım her iki bobine de uygulanmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ile analizin yapılabilmesi amacıyla mesh oluşturulmuştur (Şekil 3.5).

Programda öncelikli olarak bobin geometri analizleri yaptırılmış, daha sonra nümerik hesaplatmalar yaptırılmıştır. Bobinler arasındaki faz farkının indüksiyon ısıtma performansına etkisinin belirlenebilmesi amacıyla bobinler arasındaki faz farkı 30° 'lık adımlarla 180° 'ye kadar ayarlanmıştır.

Sistemin performansının belirlenebilmesi amacıyla tek bobin, çift bobin, manyetik akı yoğunlaştırıcısız ve yoğunlaştırıcılı durumlar için hesaplama işlemleri yeniden yapılmıştır.

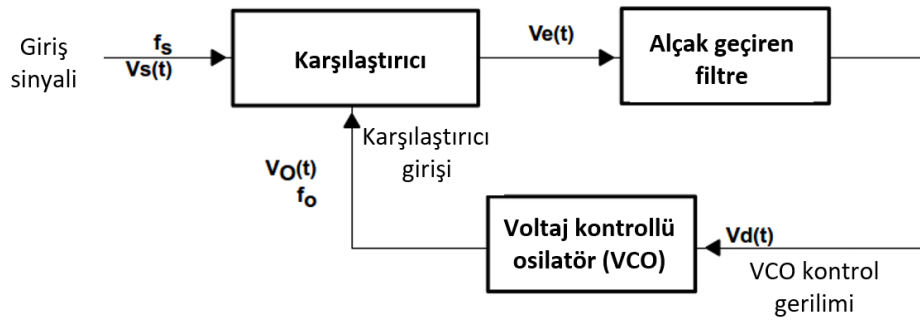


Şekil 3.5. Sonlu elemanlar yöntemi hesaplaması için oluşturulan mesh.

3.2. Devre Tasarımı

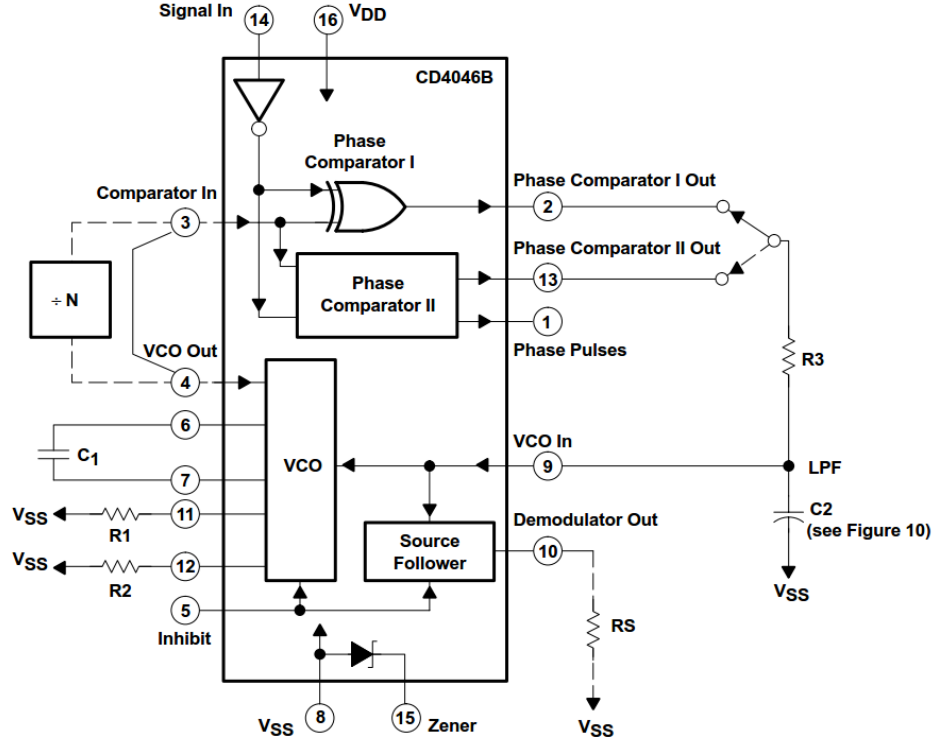
3.2.1. Faz kilitli döngü (PLL) tasarımı

Tasarlanan indüksiyon ısıtma sisteminde ısıya bağlı olarak değişen malzeme parametreleri nedeniyle bozulan rezonans durumunun yeniden sağlanması amacıyla indüksiyon bobini üzerindeki akım ve gerilim arasındaki faz açısına bağlı olarak seçilen frekansın değiştirilmesi planlanmıştır. Bu amaçla aşağıda blok şeması verilen PLL sistemi kullanılmıştır (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. İndüksiyon ısıtma için kullanılan PLL blok şeması.

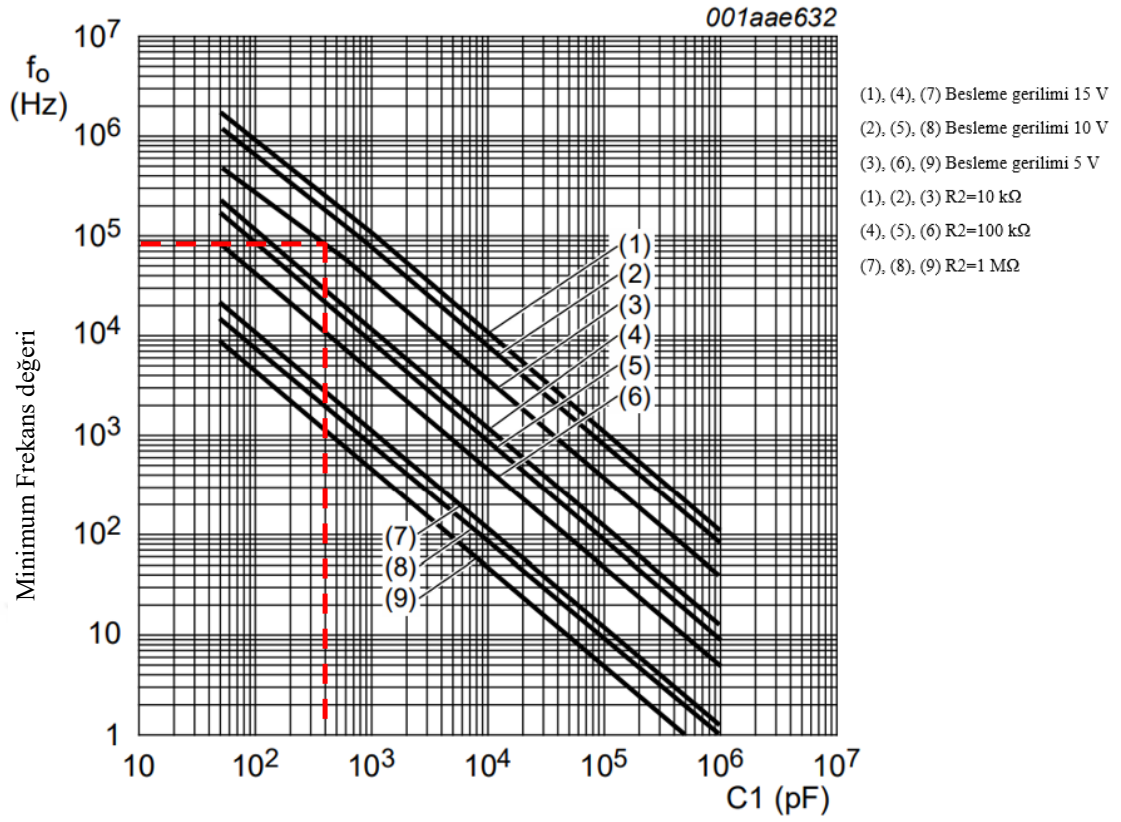
Uygulamanın kolaylığı açısından yukarıda blok şeması verilen sistem için dahili bir voltaj kontrollü osilatör ve karşılaştırıcı içeren 4046 PLL entegresi kullanılmıştır (Şekil 3.7).



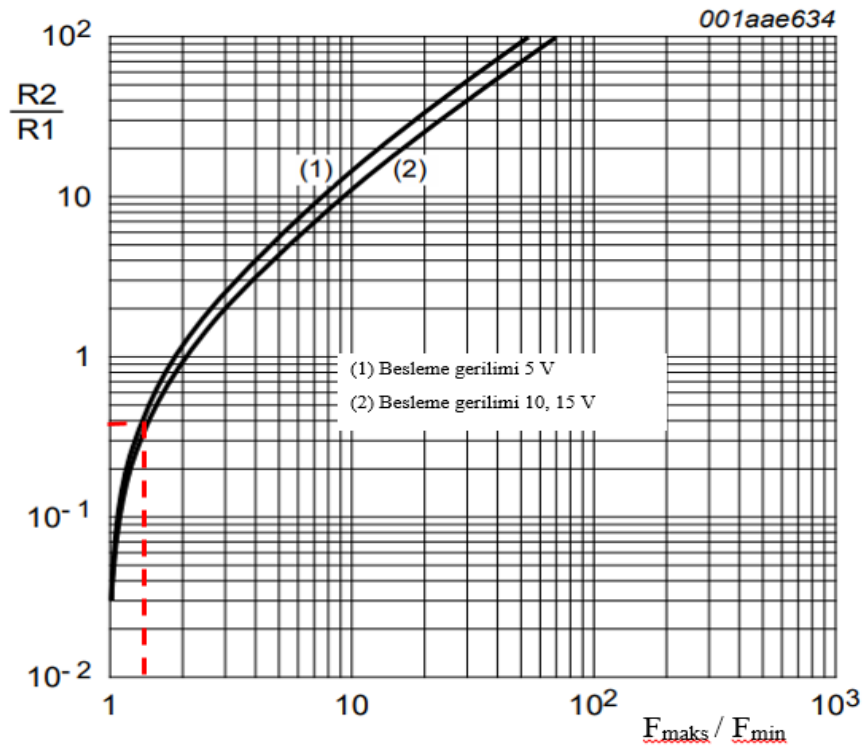
Şekil 3.7. 4046 CMOS PLL blok diyagramı.

PLL merkez frekansı 100 kHz olarak belirlenmiştir. Entegre devre besleme gerilimi 5 V ve R_2 direnci ise 10 k Ω olarak seçilmiştir. Tasarlanan indüksiyon ısıtma sisteminin $\pm 20\%$ frekans sınırları içinde çalışması planlanmıştır. Entegrenin söz konusu aralıkla işlevini gerçekleştirebilmesi için PLL'nin çalışacağı en düşük frekans f_{min} ve PLL'nin çalışacağı en yüksek frekans f_{max} olmak üzere $\pm 20\%$ frekans aralığını için $f_{min} = 80$ kHz ve $f_{max} = 120$ kHz bulunmuştur. 4046 entegre kataloğundan $R_2 = 10$ k Ω olmak üzere C_1 voltaj kontrollü osilatör (VCO) zamanlama kondansatörünün değeri 400 pF olarak belirlenmiştir (Şekil 3.8).

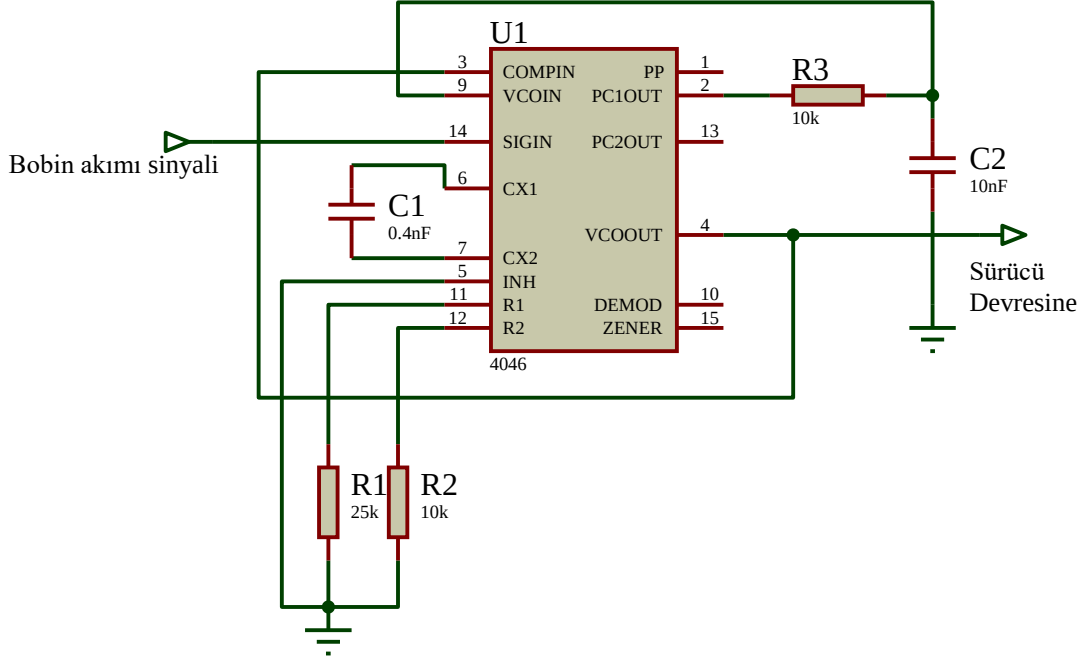
Tasarlanan sistemde $f_{max}/f_{min} = 1,5$ olmak üzere R_1 değerini belirlemek için katalogta verilen grafik (Şekil 3.9) üzerinden R_2/R_1 oranı yaklaşık olarak 0,4 bulunmuştur. R_2 değeri 10 k Ω olarak belirlendiğinden R_1 değeri 25 k Ω olarak bulunmuştur. Tasarlanan PLL devresi ve komponentleri Şekil 3.10'da verilmiştir.



Şekil 3.8. 4046 entegresi VCO için zamanlama kondansatörü seçim cetveli

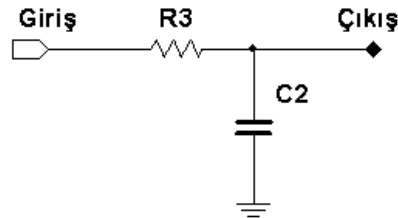


Şekil 3.9. 4046 entegresi R_2/R_1 oranının belirleme grafiği



Şekil 3.10. Tasarlanan PLL devresi ve komponentleri.

Bulunan bu değerler entegre katalogunda belirtilen $R_1 \geq 5 \text{ k}\Omega$, $R_2 \leq 1 \text{ M}\Omega$, $C_1 \geq 50 \text{ pF}$ değerleri sağlandığından uygundur. Tasarlanan sistemde PLL entegresinin “comparator 1” çıkışı kullanılmıştır. PLL entegresinin “comparator I” çıkışında “Signal In” ve “Comparator In” girişlerine uygulanan sinyallerin XOR’u alınmaktadır. Yani her iki sinyalde aynı olduğu zaman çıkış sinyali lojik 0 seviyesinde; farklı olduğu zaman ise lojik 1 seviyesinde çıkış alınmaktadır. Sinyaller arasındaki faz farkı arttıkça “comparator I” çıkışında ortama gerilim seviyesi artacaktır. PLL entegresi, voltaj kontrollü osilatör girişine uygulanan gerilim seviyesine göre çıkış sinyali ürettiğinden “comparator I” çıkış sinyalinin alçak geçiren filtre ile filtrelenmesi gerekmektedir. Tipik bir alçak geçiren filtre devresi Şekil 3.11’de verilmiştir.

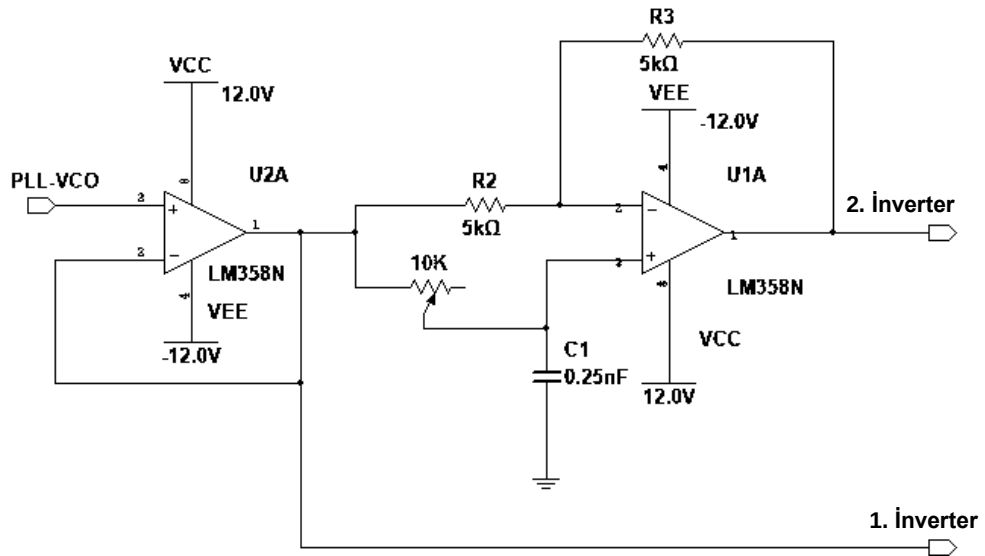


Şekil 3.11. Pasif alçak geçiren filtre.

Burada kondansatörün şarj ve deşarj zaman sabiti $\tau=R_3 \cdot C_2$ 'dir. Bu değeri giriş sinyali lojik 0 seviyesinden lojik 1 seviyesine yükselirken kondansatör geriliminin lojik 1 gerilim seviyesinin yaklaşık %63'sine ulaşmaya kadar geçen süre veya giriş sinyali lojik 1 seviyesinden lojik 0 seviyesine düşerken kondansatör geriliminin lojik 1 gerilim seviyesinin yaklaşık %36 seviyesine ulaştığı nokta olarak kabul edilir. Teorik olarak 3τ süre içinde kondansatörün giriş gerilimine şarj olduğu ve yine aynı süre içinde geriliminin sıfıra düştüğü kabul edilir. τ değerinin periyoda göre görece büyük olması sinyalin ortalama değerinin daha iyi alınmasını ve dolayısıyla VCO çıkışındaki sinyalin daha stabil kalmasını sağlayacaktır. Kondansatör ve direnç seçiminde bir diğer önemli kriter alçak geçiren filtrenin üst kesim frekansıdır. Bu frekans ne kadar küçük olursa sinyaldeki dalgalanma o kadar az olur.

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_3 \cdot C_2} \quad (3.1)$$

Tasarlanan alçak geçiren filtrede $R_3=10 \text{ k}\Omega$ ve $C_2=10 \text{ nF}$ olarak alınmış; tasarımın uygunluğu Proteus Design Suite 8 kullanılarak test edilmiştir. Sistemde kullanılacak olan 2 adet invertere sinyal girişinin sağlanması amacıyla VCO'nun bir ucu doğrudan 1. İnvertere sinyal girişi olarak uygulanırken, 2. İnverter girişine 1. İnvertere uygulanan sinyalin fazı kaydırılarak verilmiştir. Bunu gerçekleştirmek için Şekil 3.12'deki faz kaydırıcı devresi kullanılmıştır. Devrenin ilk kısmında gerilim takipçisi kullanılmıştır. Gerilim takipçisinin çıkışı faz farkını oluşturmak amacıyla 2. İşlemsel kuvvetlendiriciye (Opamp) uygulanmıştır. Faz farkı ayarı kullanılan potansiyometre ile sağlanmıştır.

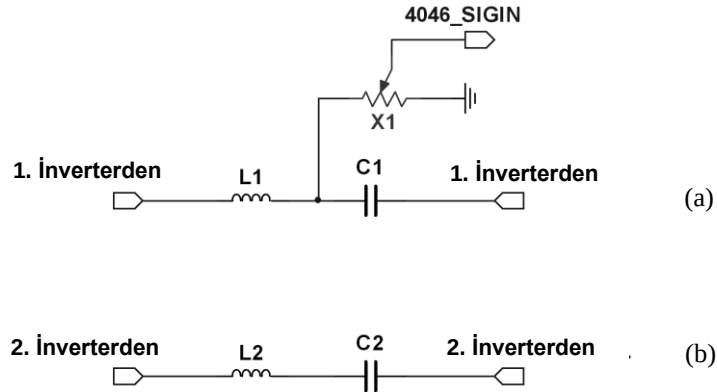


Şekil 3.12. Faz kaydırma devresi.

Şekil 3.14'deki devrede Q3 ve Q4 MOSFET'leri iletim durumunda iken C3 ve C6 kondansatörleri sırasıyla D3 ve D6 diyotları üzerinden şarj olmaktadır. Q3 ve Q4 kapalı duruma geçtiğinde ise besleme gerilimine şarj olan kondansatörler Q1 ve Q2 MOSFET'lerini iletim durumuna sokmaktadır. Devrede kullanılan R7, R8, R13 ve R14 dirençleri, gate ile source arasındaki uygulanan kare dalgaya bağlı olarak oluşan çınlamanın sınırlandırılması böylece MOSFET katalogunda belirlenen gate source gerilim limitinin aşılmasından korunması için kullanılmıştır. D1, D2, D4 ve D5 diyotları MOSFET'lerin daha hızlı kesim durumuna ulaşması; D7, D8, D9 ve D10 diyotları ise MOSFET'lerin korunması amacıyla kullanılmıştır. Her bir bobin-kondansatör grubunu sürmek için birer adet inverter kullanılmıştır. Şekil 3.12'de verilen devrenin çıkışından gelen sinyalin geriliminin 12V'a sabitlenmesi ve IR2101 sürücü entegrelerinin HIN ve HLIN uçlarına uygulanacak 180° faz farkının elde edilebilmesi amacıyla TC4426 ve TC4427 sürücü entegreleri kullanılmıştır. MOSFET'lerin soğutulması için ise 2 adet $57 \times 40 \times 190$ mm ölçülerinde alüminyum soğutucu kullanılmıştır.

3.2.3. İndüksiyon bobini devre tasarımı

Tasarlanan indüksiyon ısıtma sisteminde manyetik alanın ısı işlem görecekt olan malzemenin yüzeyi boyunca homojen ısıtma sağlayabilmesi amacıyla yürüyen dalga tekniği uygulanmıştır. Isıtmanın homojen olabilmesi ve maksimum verimin elde edilebilmesi amacıyla COMSOL kullanılarak bobinler arasındaki ideal faz farkı parametrik tarama yöntemi ile elde edilmiş ve bu açı $11\pi/18$ radyan olarak bulunmuştur. Sistemde her iki bobin farklı inverterler üzerinden sürülmüştür (Şekil 3.15).



Şekil 3.15. a) 1. LC tank devresi, b) 2. LC tank devresi.

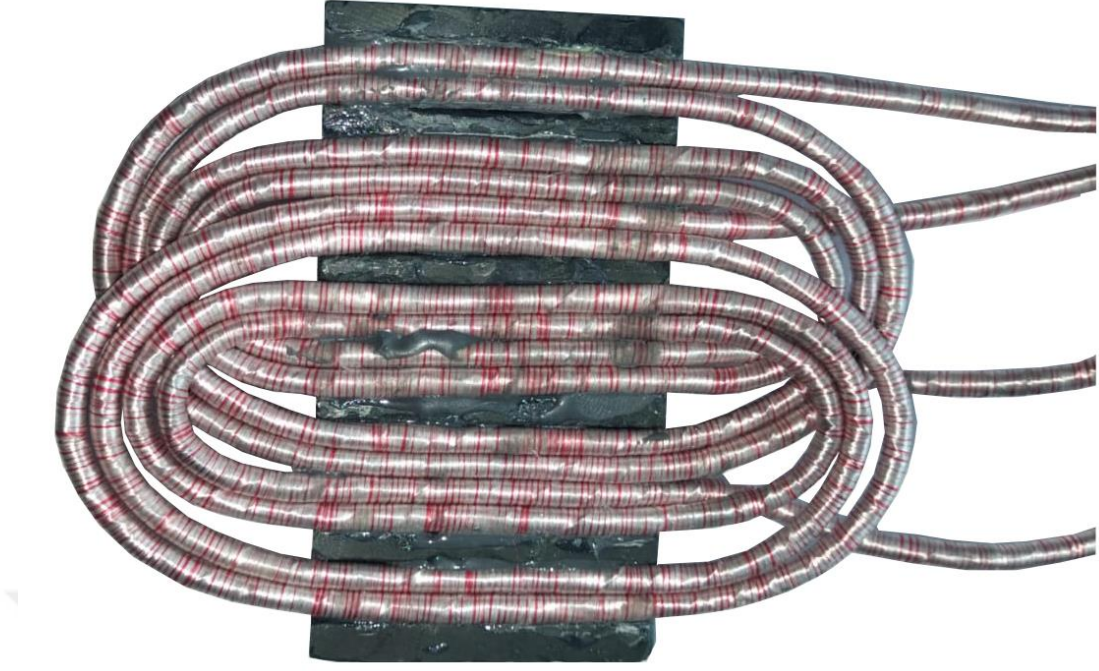
Bobin 1 ve Bobin 2 özdeş olup, endüktansları LCR metre kullanılarak 2,63 μH olarak ölçülmüştür. Tasarlanan indüksiyon ısıtma seri rezonans devre konfigürasyonu kullanılmıştır. 100 kHz merkez frekansında rezonansın oluşabilmesi için,

$$C_1 = C_2 = \frac{1}{\omega^2 L} \text{ bağıntısından } C_1 = C_2 = 0,963 \mu\text{F} \text{ olması gerekmektedir.}$$

Bobin gerilimi, PLL entegresi VCO çıkış gerilimiyle aynı fazda olduğundan VCO çıkışı “*Comparator In*” girişine uygulanırken; C1 kondansatörü üzerine düşen gerilim potansiyometre ile PLL entegresi besleme gerilimine küçültülerek “*Signal In*” girişine uygulanmıştır. Böylece sürekli rezonans durumunun sağlanması için VCO çıkışının “*Comparator In*” ve “*Signal In*” girişlerinin aynı fazda olmasını sağlayacak şekilde frekansı değiştirmesi yani sistemin sürekli olarak rezonans frekansında tutulması sağlanarak maksimum akı transferi sağlanmıştır. Deri olayının azaltılması amacıyla bobin olarak 700 adet 0,01 mm² kesitinde dışı izoleli telden oluşan litz teli kullanılmıştır (Şekil 3.16). Yürüyen dalga litz teli sarımı, ferrit nüve üzerinde oluklar açılarak Şekil 3.17’de gösterildiği şekilde yerleştirilmiştir.



Şekil 3.16. Tasarımda kullanılan litz teli.



Şekil 3.17. Tasarımı gerçekleştirilen 2 faz yürüyen dalga indüksiyon ısıtıcı.

3.3. Termal Kamera Ölçümleri

Tasarlanan PLL kontrollü 2 fazlı yürüyen dalga indüksiyon sisteminin ısıtma performansının tespiti amacıyla bobinler arasındaki faz farkı 30° 'lik aralıklarla değiştirilmiştir. Termal kamera, tripod kullanılarak iş parçası üzerinde 37 cm uzaklıkta olacak şekilde konumlandırılmıştır (Şekil 3.18). Termal kameranın lazer ışığıyla iş parçası üzerinde merkez noktası belirlenerek işaretlenmiştir. Her bir faz açısı değeri için iş parçası merkez noktası sıcaklığı 30°C 'den 75°C olana kadar ısıtılmıştır. Kayıtlar video formatında tutulmuştur. Her ölçüm arasında indüksiyon ısıtma sistemi kapatılarak faz açısı değiştirilmiş ve iş parçasının bir önceki ölçümdeki başlangıç sıcaklık değerine ulaşması beklenmiştir. Bu değerin kontrolü, termal kamera üzerinden yapılmıştır. $30 - 60 - 90 - 110 - 120$ ve 150 derece faz açılarında ölçümler yapılarak işlem tamamlanmıştır. Termal kamera üreticisinin görüntü işleme yazılımı (Fluke SmartView 4.4.423.0) kullanılarak veriler analiz edilmiştir.



Şekil 3.18. Termal kamera ölçüm düzeneği.

3.4. İş parçası

İş parçası olarak otomotiv, elektronik, beyaz eşya ve metal imalat sektörlerinde kullanılan JIS (*Japan industrial standards*) G 3141'ye uygun ticari kalite soğuk haddelenmiş çelik sac (SPCC) kullanılmıştır. SPCC düşük maliyetli bir malzeme olup sahip olduğu düşük karbon içeriği sayesinde kolay kaynak yapılabilir ve şekillendirilebilir. Bu özellikleri sebebiyle endüstriyel alanlarda yangın olarak kullanılmaktadır. Söz konusu malzemenin JIS G3141 standardında tanımlanan kimyasal bileşimi Çizelge 3.1'de verilmiştir.

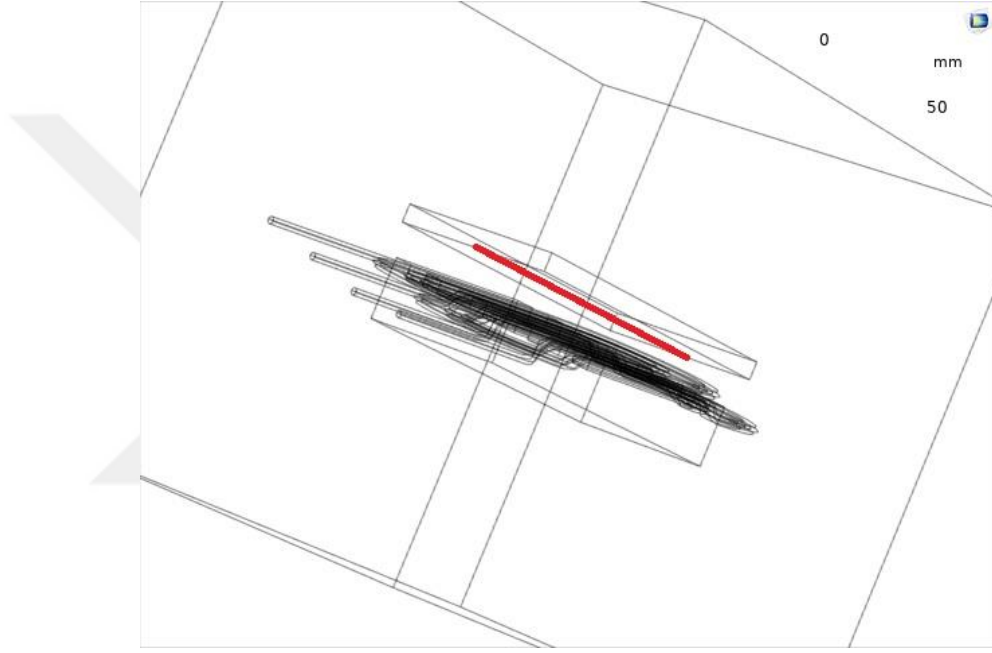
Çizelge 3.1. SPCC malzemenin kimyasal özellikleri

Element	Oranı %
Karbon (C)	$\leq 0,12$
Mangan (Mn)	$\leq 0,50$
Fosfor (P)	$\leq 0,035$
Kükürt (S)	$\leq 0,025$
Demir (Fe)	>99

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

4.1. Analiz Sonuçları

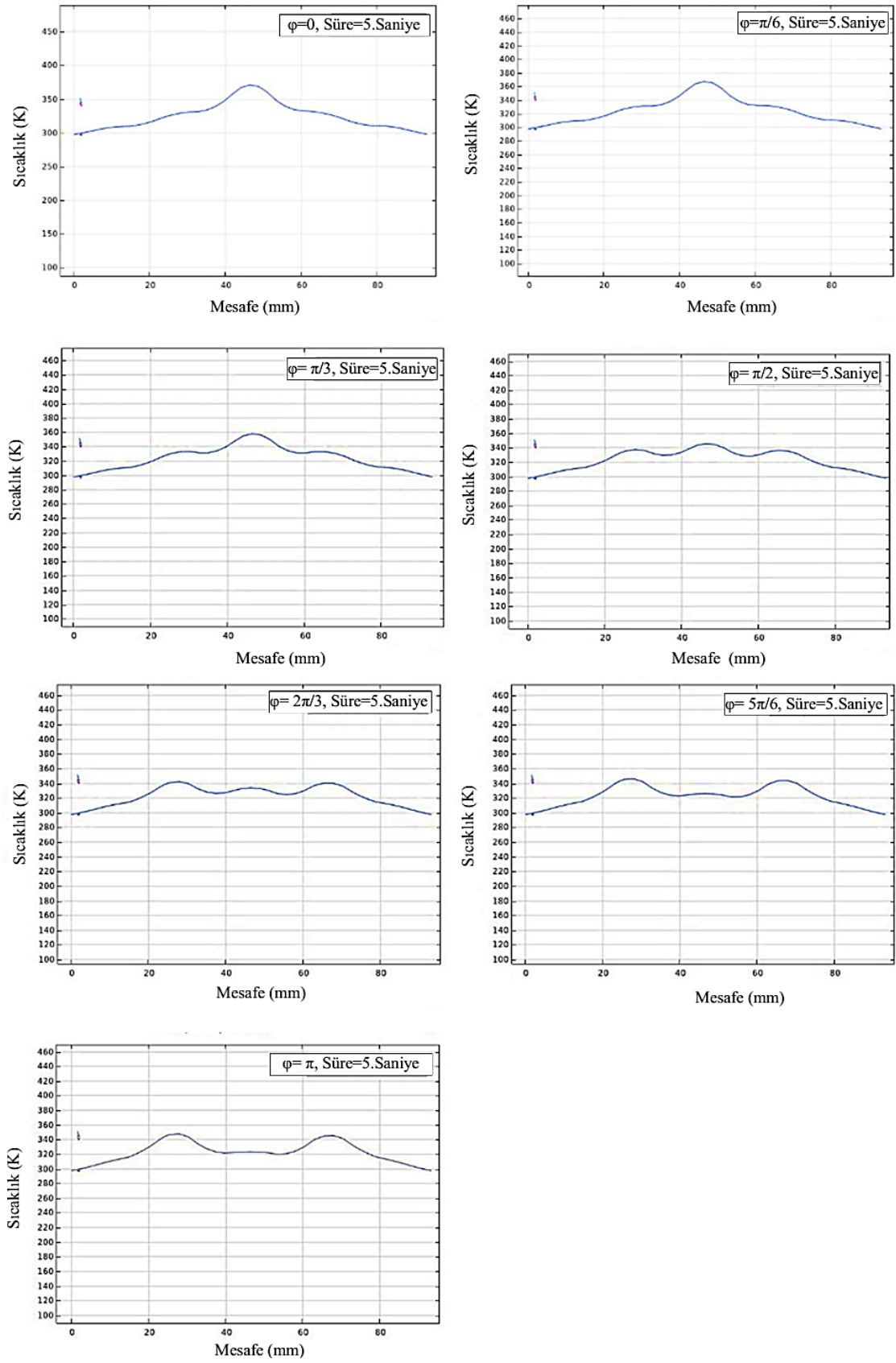
Tasarlanan indüksiyon ısıtıcı sistemine ilişkin analizler COMSOL® Multiphysics 5.4 yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Öncelikli olarak iş parçasının indüksiyon bobinine bakan yüzü tarafında boyuna bir kesme çizgisi alınmış ve bu çizgi üzerinde oluşan sıcaklık değerleri simüle edilmiştir. Kesme çizgisi Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. COMSOL programında analiz için oluşturulan kesme çizgisi.

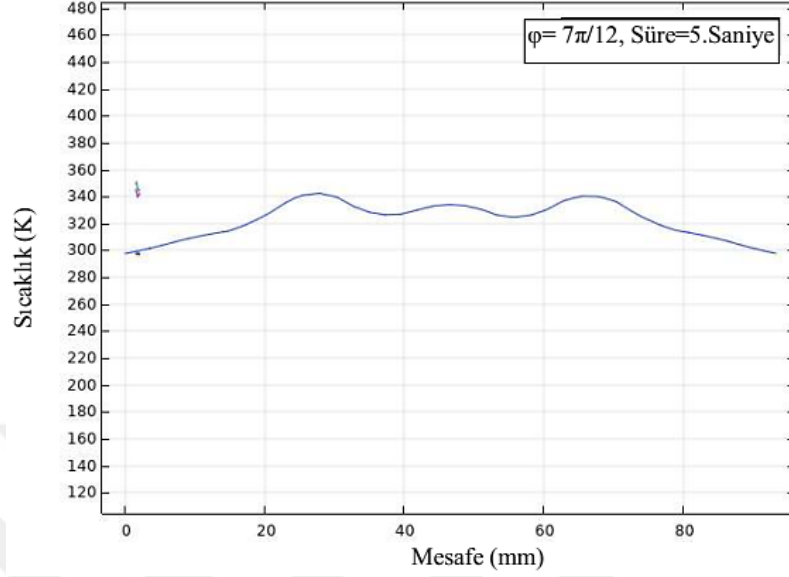
Tasarlanan çoklu bobin sisteminde indüksiyon ısıtmanın 5. saniyesi baz alınarak parametrik tarama yapılmış ve bobinler arasındaki faz farkı 30°’lik aralıklarla 180°’ye kadar değiştirilmiş ve en uygun faz farkı bulunmuştur. Tasarlanan modelde bobinler arasındaki faz farkına bağlı olarak kesme çizgisi boyunca oluşan sıcaklık değerleri Şekil 4.2’te verilmiştir.

Grafiklerden görüleceği üzere malzeme yüzeyinde $\phi = \pi/2$ ve $\phi = 2\pi/3$ aralığında indüksiyon ısıtıcının malzeme yüzeyini daha homojen ısıttığı görülmektedir. Bu nedenle bu aralıkta faz farkı aralığı adım boyutu küçültülerek tekrar parametrik tarama işlemi yapılmıştır.



Şekil 4.2. Bobinler arasındaki faz farkına bağlı 5. saniyede kesme çizgisi boyunca oluşan sıcaklık değerleri.

Adım aralıkları $\pi/36$ 'ya düşürülerek yapılan parametrik taramada kesme çizgisi boyunca en iyi homojen ısıtma işleminin iki bobin arasında $7\pi/12$ derece faz farkı olduğu durumda olduğu görülmüştür (Şekil 4.3).



Şekil 4.3. Bobinler arasındaki faz farkı $7\pi/12$ olduğunda 5. saniyede kesme çizgisi boyunca oluşan sıcaklık değerleri

Kesme çizgisi, ısıtılan yüzey ve ısıtılan hacim boyunca 5. saniyede oluşan ortalama sıcaklık değerlerinin faz farkına göre değişimi Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Bobinler arasındaki faz farkına bağlı olarak kesme çizgisi, ısıtılan yüzey ve hacimde ortaya çıkan ortalama sıcaklık değerleri.

Faz Farkı (ϕ)	Zaman	Kesme çizgisi boyunca oluşan ortalama sıcaklık (K)	Yüzey üzerinde oluşan ortalama sıcaklık (K)	Hacim'de oluşan ortalama sıcaklık (K)
0	5. s	325,38	326,77	317,66
$\pi/6$	5. s	325,06	326,41	317,39
$\pi/3$	5. s	324,29	325,54	316,73
$\pi/2$	5. s	323,55	324,63	316,04
$19\pi/6$	5. s	323,46	324,50	315,95
$5\pi/9$	5. s	323,38	324,38	315,86
$7\pi/12$	5. s	323,31	324,28	315,78
$11\pi/18$	5. s	323,25	324,18	315,71
$23\pi/36$	5. s	323,21	324,10	315,65
$2\pi/3$	5. s	323,17	324,03	315,60
$5\pi/6$	5. s	323,10	323,77	315,39
π	5. s	323,13	323,73	315,36

Yine 5. saniyede iş parçası üzerinde oluşan maksimum ve minimum sıcaklık değerlerinin faz farkına göre değişimi Çizelge 4.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. Bobinler arasındaki faz farkına bağlı olarak kesme çizgisi, ısıtılan yüzey ve hacimde ortaya çıkan maksimum ve minimum sıcaklık değerleri.

Faz Farkı (φ)	Zaman	Maksimum Sıcaklık			Minimum Sıcaklık		
		Hacim (K)	Yüzey (K)	Kesme çizgisi (K)	Hacim (K)	Yüzey (K)	Kesme çizgisi (K)
0	5. s	375,67	375,67	370,95	295,98	297,46	297,73
$\pi/6$	5. s	372,06	372,06	367,37	295,98	297,44	297,72
$\pi/3$	5. s	362,46	362,46	357,85	295,99	297,42	297,69
$\pi/2$	5. s	351,24	351,24	345,47	296,00	297,39	297,65
$19\pi/6$	5. s	349,43	349,43	343,40	296,00	297,39	297,64
$5\pi/9$	5. s	347,65	347,65	341,37	296,00	297,38	297,64
$7\pi/12$	5. s	345,92	345,92	339,75	296,01	297,38	297,63
$11\pi/18$	5. s	344,24	344,24	340,63	296,01	297,38	297,63
$23\pi/36$	5. s	344,28	344,28	341,50	296,01	297,37	297,63
$2\pi/3$	5. s	345,02	345,02	342,35	296,01	297,37	297,62
$5\pi/6$	5. s	348,60	348,60	346,50	296,01	297,35	297,59
π	5. s	349,98	349,98	348,10	296,02	297,34	297,59

Verilen çizelgelerin daha iyi yorumlanması ve uygun faz açısının belirlenmesi amacıyla hacim, yüzey ve kesme çizgisi boyunca 5. saniyede ortaya çıkan maksimum, minimum ve ortalama sıcaklık değerleri farklarının karşılaştırması Çizelge 4.3’te verilmiştir.

Çizelge 4.3. Bobinler arasındaki faz farkına bağlı olarak kesme çizgisi, ısıtılan yüzey ve hacimde ortaya çıkan maksimum, minimum ve ortalama sıcaklık değerleri arasındaki farklar.

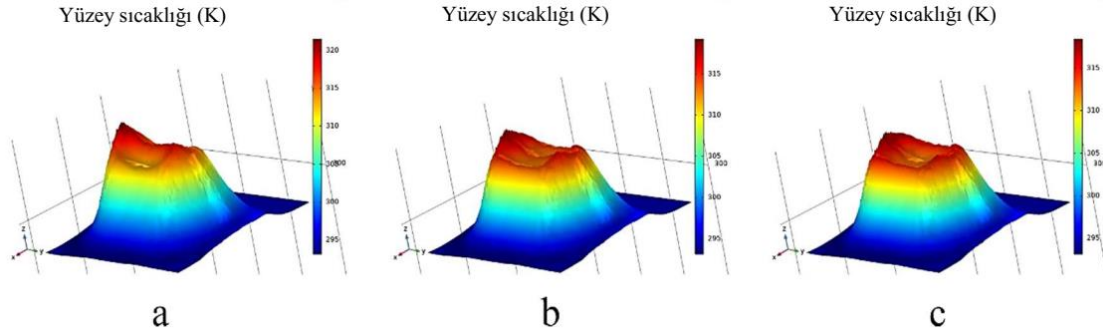
Faz Farkı (φ)	Hacim		Yüzey		Kesme Çizgisi	
	Maks-Min arasındaki fark (%)*	Maks-Ort. arasındaki fark (%)**	Maks-Min arasındaki fark (%)	Maks-Ort. arasındaki fark (%)	Maks-Min arasındaki fark (%)	Maks-Ort. arasındaki fark (%)
0	21,21	15,44	20,82	13,02	19,74	12,28
$\pi/6$	20,45	14,69	20,06	12,27	18,96	11,52
$\pi/3$	18,34	12,62	17,94	10,19	16,81	9,38
$\pi/2$	15,73	10,02	15,33	7,58	13,84	6,34
$19\pi/6$	15,29	9,58	14,89	7,13	13,33	5,81
$5\pi/9$	14,86	9,14	14,46	6,69	12,81	5,27
$7\pi/12$	14,43	8,71	14,03	6,26	12,40	4,84
$11\pi/18$	14,01	8,29	13,61	5,83	12,62	5,10
$23\pi/36$	14,02	8,32	13,63	5,86	12,85	5,36
$2\pi/3$	14,20	8,53	13,81	6,08	13,07	5,60
$5\pi/6$	15,09	9,53	14,70	7,12	14,12	6,75
π	15,42	9,89	15,04	7,50	14,51	7,17

* Fark (%) = (Maks – Min)•100 / Maks

** Fark (%) = (Maks – Ort)•100 / Maks

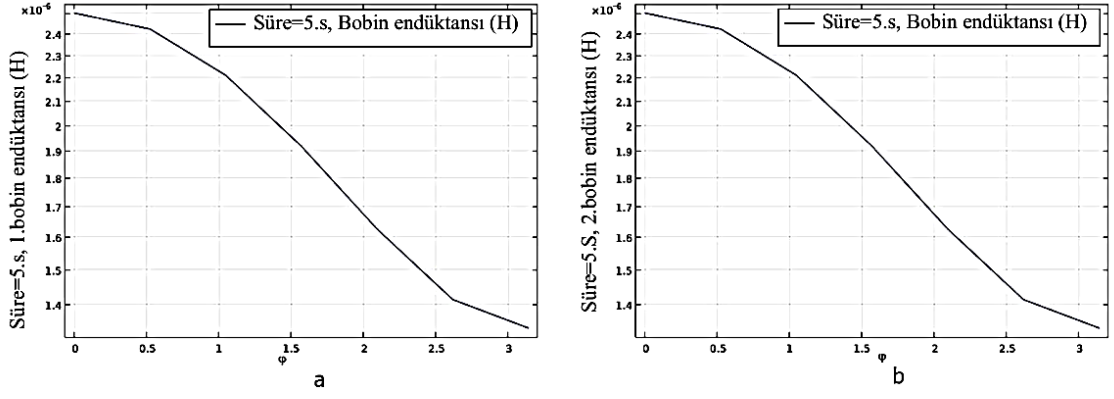
Çizelge 4.3'e bakıldığında iş parçası yüzeyi ile iş parçasının tamamının homojen bir şekilde ısıtılabilmesi için bobinler arasındaki faz farkının $11\pi/18$ rad olması gerektiği görülmektedir. Ancak kesme çizgisi boyunca homojen ısıtma için faz farkının $7\pi/12$ rad olması gerekmektedir. Özel uygulama alanları dışında indüksiyon ısıtmada yüzey ısıtması ile hacim ısıtması önemli olduğundan, endüstriyel ve evsel uygulamalarda bobinler arasındaki faz farkının $11\pi/18$ rad olarak alınması uygun olacaktır. Şekil 4.4'te değişik faz farklarına ait yüzey sıcaklığı grafikleri verilmiştir.

Benzer bobin tasarımı için Frogner (2014) tarafından hazırlanan doktora çalışmasında bobinler arasındaki en ideal faz farkı değeri 90° olarak bulunmuştur. 2 fazlı sistemlerde en ideal faz farkının yaklaşık 90° derece olduğunu söyleyen başka çalışmalar da mevcuttur (Dughiero ve diğ., 1995). 3 fazlı sistemler için en ideal faz açısı 60° veya 120° 'dir. Bobin geometrilerine göre ideal faz farkı değişmektedir. Bu tez çalışmasında kullanılan bobin tasarımı için maksimum – minimum ve ortalama sıcaklık değerleri arasındaki fark baz alınarak ideal faz farkı $11\pi/18$ rad (veya 110°) olarak bulunmuştur. Faz sayısı arttıkça iş parçası üzerinde sıcaklık dağılımı daha homojen olmaktadır (Dughiero ve diğ., 1994).



Şekil 4.4. Değişik faz farkları için iş parçası yüzeyinde oluşan sıcaklıklar
a) $\varphi = \pi/2$, b) $\varphi = 11\pi/18$, c) $\varphi = 2\pi/3$.

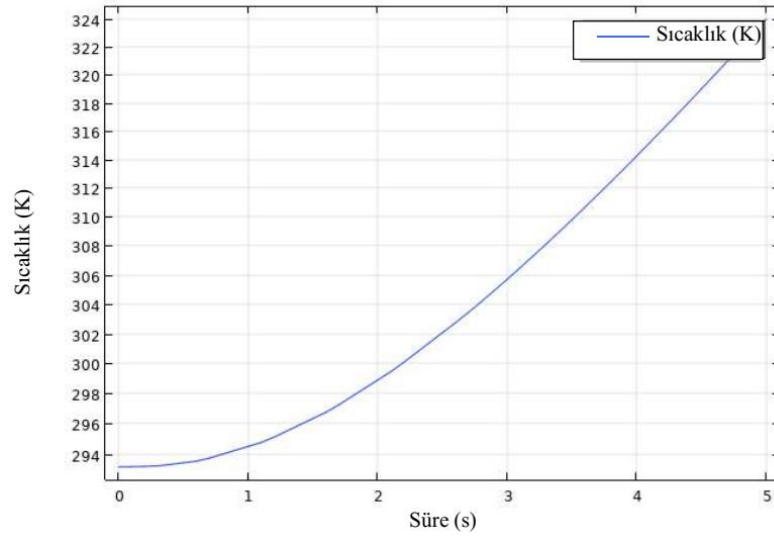
Bobinler arasındaki faz farkına bağlı olarak bobinlerin endüktansı değişmektedir. $0 - \pi$ aralığında $\pi/6$ 'şar adımlarda değişen faz farkı için bobin 1 ve bobin 2'nin endüktans değişimi sırasıyla Şekil 4.5a ve b'de gösterilmiştir. Bobinler özdeş olduklarından her iki grafik birbirinin aynısıdır.



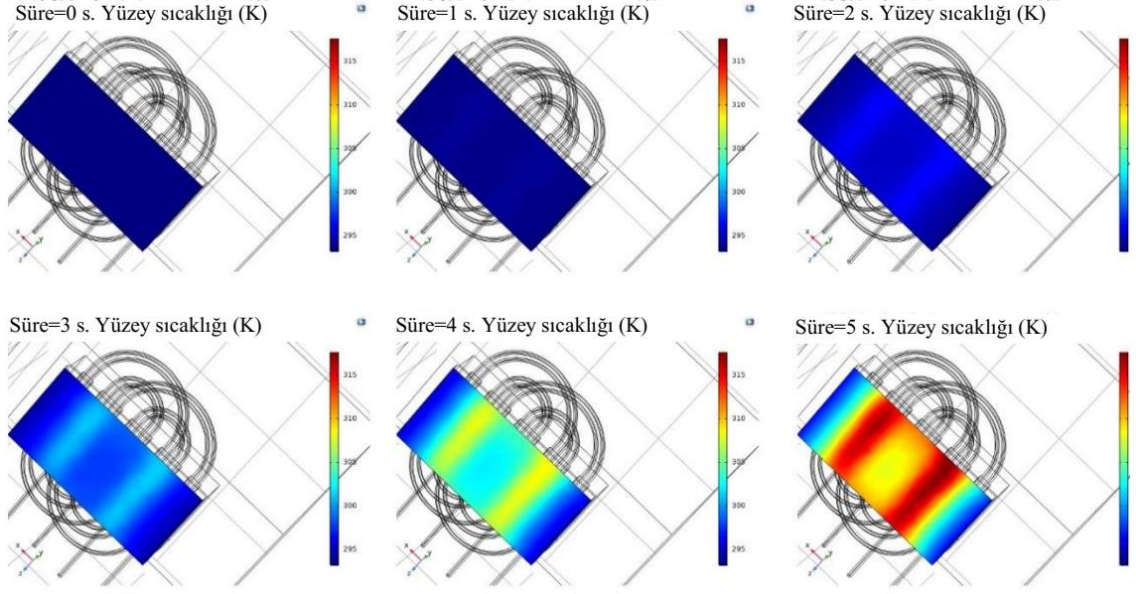
Şekil 4.5. Bobinler arasındaki faz farkına bağlı olarak bobin endüktanslarının değişimi.

Tasarlanan indüksiyon ısıtma sisteminde $\phi = 11\pi/18$ rad faz farkı için ortalama yüzey sıcaklığının zamana bağlı olarak değişimi Şekil 4.6’da ve ortaya çıkan simülasyon görüntüleri Şekil 4.7’de verilmiştir.

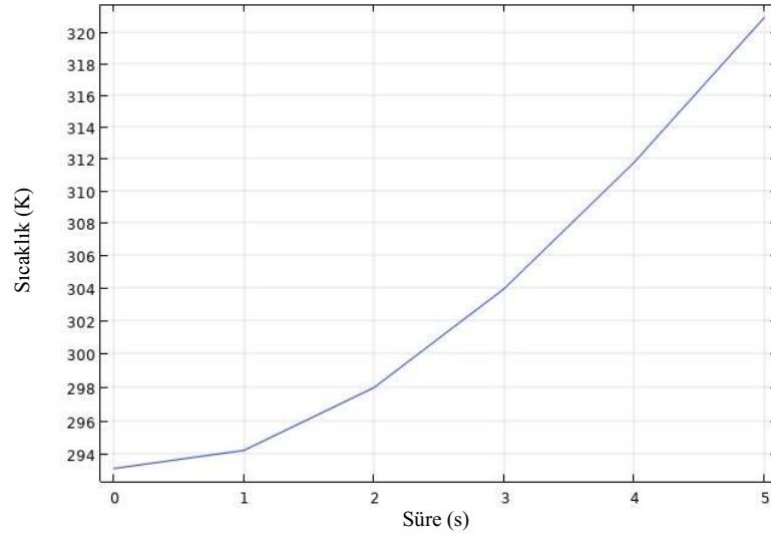
Tasarlanan indüksiyon ısıtma sisteminde manyetik akı yoğunlaştırıcı kullanılmaması durumunda ortalama yüzey sıcaklığının zamana bağlı olarak değişimi Şekil 4.8’de gösterildiği gibi olmuştur.



Şekil 4.6. Manyetik akı yoğunlaştırıcılı çift bobin indüksiyon ısıtıcı tasarımında iş parçası ortalama yüzey sıcaklığının zamana bağlı değişimi.



Şekil 4.7. $\varphi = 11\pi/18$ faz farkı için iş parçası yüzeyinde zamana bağlı sıcaklık değişimi



Şekil 4.8. Manyetik akı yoğunlaştırıcısız çift bobin indüksiyon ısıtıcı tasarımında iş parçası ortalama yüzey sıcaklığının zamana bağlı değişimi

Şekil 4.8 ve Şekil 4.6 grafiklerindeki değerlerin karşılaştırması yapılmış sayısal değerler Çizelge 4.4'te verilmiştir. Çizelge incelendiğinde aynı süre içinde ortalama yüzey sıcaklığının manyetik akı yoğunlaştırıcı kullanılan indüksiyon ısıtma sisteminde daha hızlı yükseldiği görülmektedir.

Çizelge 4.4. Çift bobinli indüksiyon ısıtıcıda manyetik akı yoğunlaştırıcı kullanımının iş parçasının yüzey ortalama sıcaklığına etkisi

Süre (s)	Sıcaklık (K) (Yoğunlaştırıcı yok)	Sıcaklık (K) (Yoğunlaştırıcı var)	Fark (%)
0	293,15	293,15	0
1	294,22	294,49	0,09
2	297,96	298,89	0,31
3	303,94	305,70	0,58
4	311,77	314,25	0,79
5	320,98	324,03	0,95

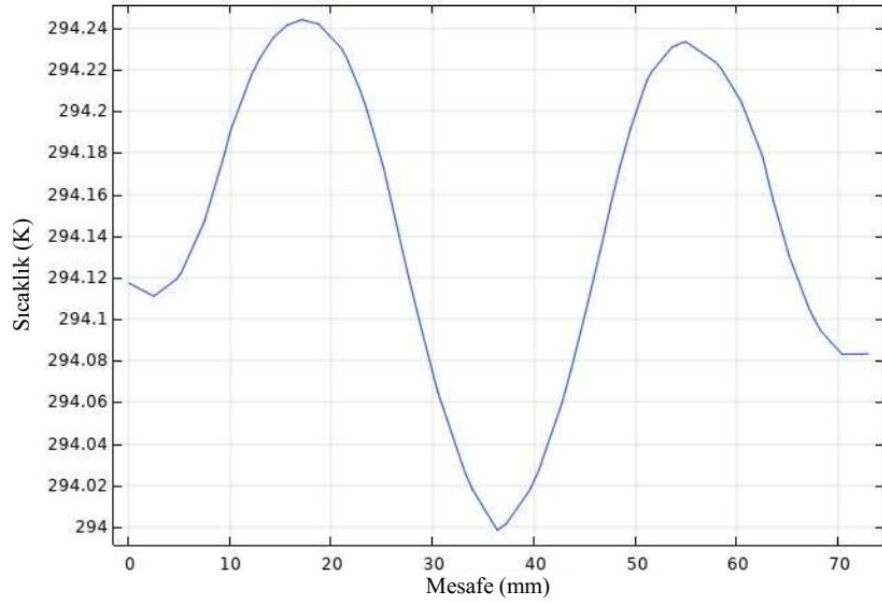
Manyetik akı yoğunlaştırıcı kullanılıp kullanılmama durumuna göre indüksiyon ısıtmada iş parçası yüzeyi üzerinde ortaya çıkan maksimum ve minimum sıcaklık durumları ise Çizelge 4.5’te verilmiştir.

Çizelge 4.5. Çift bobinli indüksiyon ısıtıcıda manyetik akı yoğunlaştırıcı kullanımının iş parçasının yüzeyinde ortaya çıkan maksimum ve minimum sıcaklığına etkisi

Süre (s)	Maksimum Sıcaklık (T)		Minimum Sıcaklık (T)	
	Yoğunlaştırıcı yok	Yoğunlaştırıcı var	Yoğunlaştırıcı yok	Yoğunlaştırıcı var
0	293,15	293,15	293,15	293,15
1	294,90	296,11	293,29	293,26
2	300,47	304,39	293,91	293,75
3	309,16	316,07	295,07	294,63
4	320,27	329,87	296,83	295,85
5	333,04	345,02	299,18	297,37

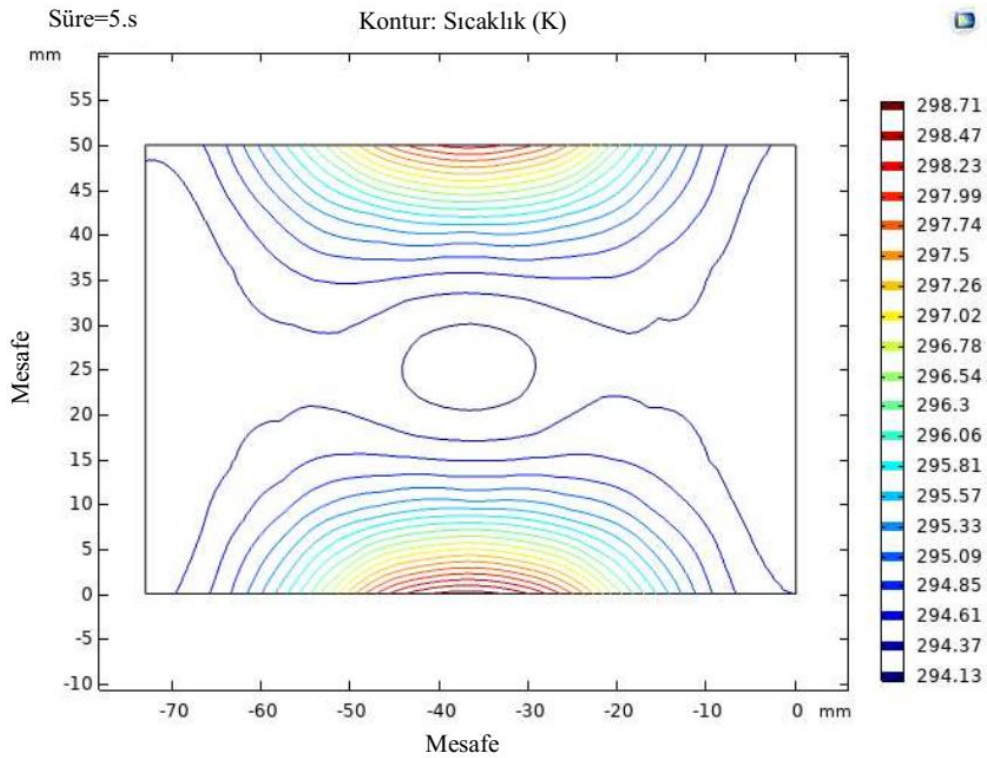
Çizelgelerden de anlaşılacağı üzere manyetik akı yoğunlaştırıcı kullanımı iş parçası yüzeyinde daha hızlı sıcaklık artışı sağlamaktadır.

Tasarlanan sistemin tek bobinli olması durumunda ise kesme çizgisi üzerindeki sıcaklık dağılımı Şekil 4.9’da verilmiştir.



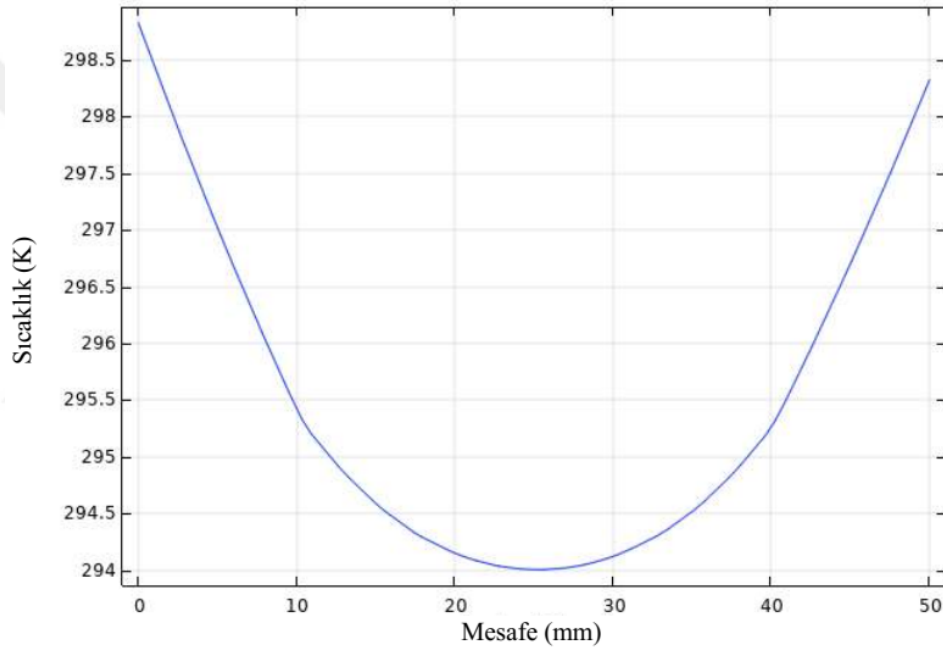
Şekil 4.9. Manyetik akı yoğunlaştırıcısız tek bobin indüksiyon ısıtıcı tasarımında iş parçası üzerinde kesme çizgisi boyunca oluşan sıcaklıklar.

Şekil 4.9'dan görüleceği üzere manyetik akı yoğunlaştırıcısız tek bobin tasarımının çift bobin tasarımına göre sıcaklık dağılımı homojenliği azalmaktadır. İş parçası yüzeyinde 5. saniyede gerçekleşen sıcaklık dağılımı Şekil 4.10'da gösterilmiştir.



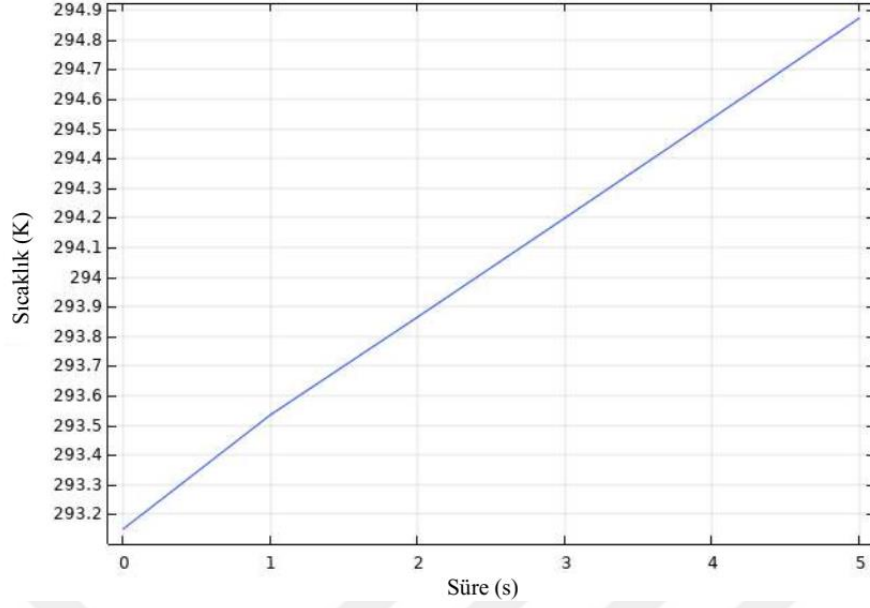
Şekil 4.10. Manyetik akı yoğunlaştırıcısız tek bobin indüksiyon ısıtıcı tasarımında iş parçası yüzeyinde 5. saniyede oluşan sıcaklık dağılımı.

Şekil 4.10'daki grafikten görüleceği üzere en yüksek sıcaklıklar uzun kenarların orta noktalarında oluşmaktadır. Uzun kenarların dış kısımlarına doğru sıcaklıklar düşmektedir. En düşük sıcaklıklar ise iş parçasının orta noktasında ortaya çıkmaktadır. İş parçası üzerinde uzun kenar orta noktalarını birleştirecek şekilde bir kesme çizgisi çekilmesi durumunda sıcaklık dağılımının dengesizliği görülecektir (Şekil 4.11). Fireteanu ve diğerleri (2003) tarafından yapılan çalışmada enine akı indüksiyon ısıtıcı konfigürasyonlarında iş parçasının orta noktasında ısıtmanın yetersiz olduğu belirtilmiştir.



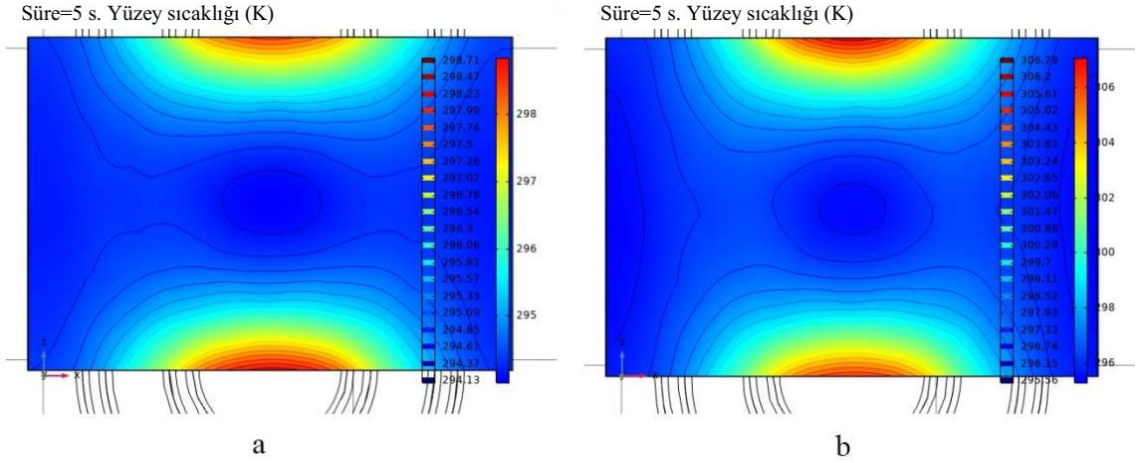
Şekil 4.11. Manyetik akı yoğunlaştırıcısız tek bobin indüksiyon ısıtıcı tasarımında iş parçası uzun kenar orta noktaları boyunca oluşan sıcaklık dağılımı

Malzeme üzerinde sıcaklık farklarının fazla olması termal stresi artıracığından malzemenin bozulmasına sebep olacaktır. Bu durum istenmeyen bir durumdur. Manyetik akı yoğunlaştırıcısız tek bobin indüksiyon ısıtıcı tasarımında iş parçası yüzeyinde zamana bağlı ortalama sıcak artışı ise Şekil 4.12'de verilmiştir.



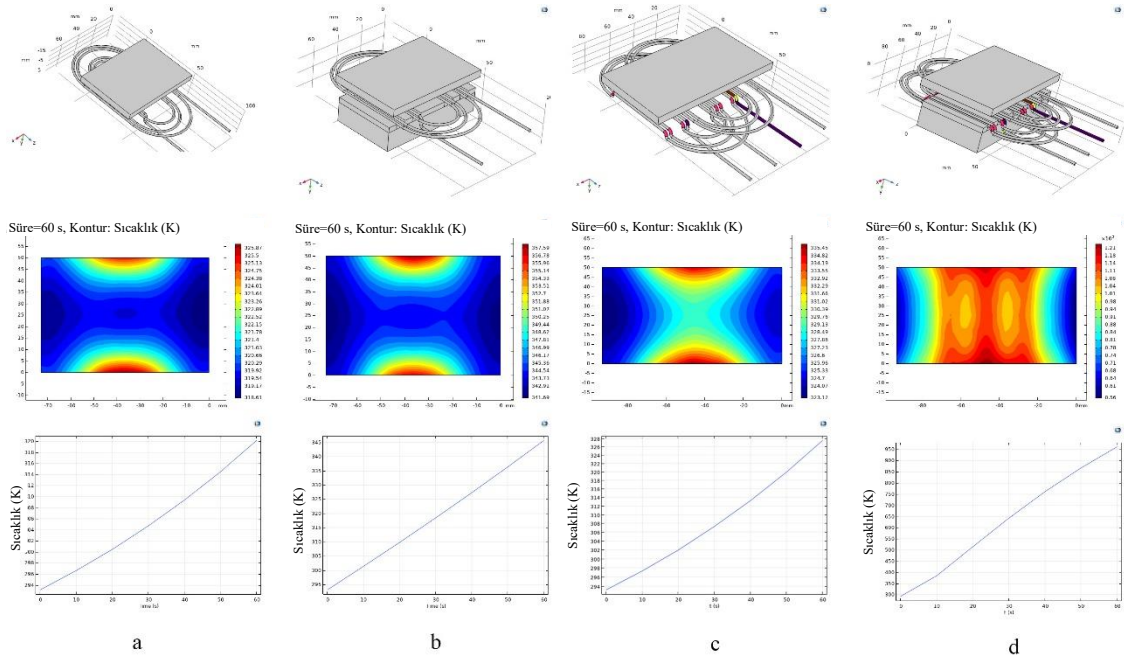
Şekil 4.12. Manyetik akı yoğunlaştırıcısız tek bobin indüksiyon ısıtıcı tasarımında iş parçası yüzey sıcaklığının zamana bağlı değişimi

Tek bobinli sisteme manyetik akı yoğunlaştırıcı eklenmesi durumunda ise sistemin biraz daha performansı artmakta ancak çift bobinli sisteme göre performansı oldukça düşük kalmaktadır. İndüksiyon ısıtmanın 5. saniyesi için eşdeğer sıcaklık eğrileri üzerinden her iki sistemin kıyaslanması Şekil 4.13’de verilmiştir.



Şekil 4.13. a) Tek bobinli manyetik akı yoğunlaştırıcısız indüksiyon ısıtma sistemi, b) Tek bobinli manyetik akı yoğunlaştırıcılı indüksiyon ısıtma sistemi.

Analizi yapılan manyetik akı yoğunlaştırıcısız ve manyetik akı yoğunlaştırıcılı tek bobinli ve çift bobinli sistemler için iş parçasının yüzeyi üzerinde 1. dakikada ortaya çıkan ortalama sıcaklık değerleri karşılaştırmalı olarak Şekil 4.14’de verilmiştir.



Şekil 4.14. a) Tek bobinli manyetik akı yoğunlaştırıcısız induksiyon ısıtma sistemi, b) tek bobinli manyetik akı yoğunlaştırıcılı induksiyon ısıtma sistemi c) çift bobinli manyetik akı yoğunlaştırıcısız induksiyon ısıtma sistemi, d) çift bobinli manyetik akı yoğunlaştırıcılı induksiyon ısıtma sistemi.

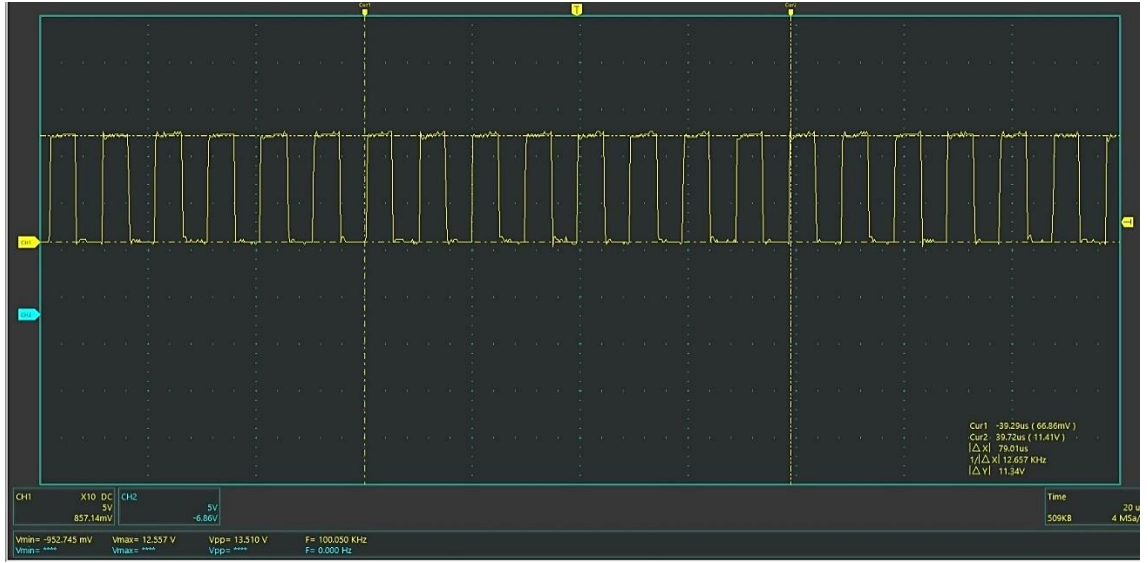
0 - 60 s aralığında ısıtılan yüzey ve hacim üzerinde ortaya çıkan minimum ve maksimum sıcaklık değerleri ilişkin veriler Çizelge 4.6’da verilmiştir.

Çizelge 4.6. Farklı indüksiyon ısıtma sistemlerinin karşılaştırılması

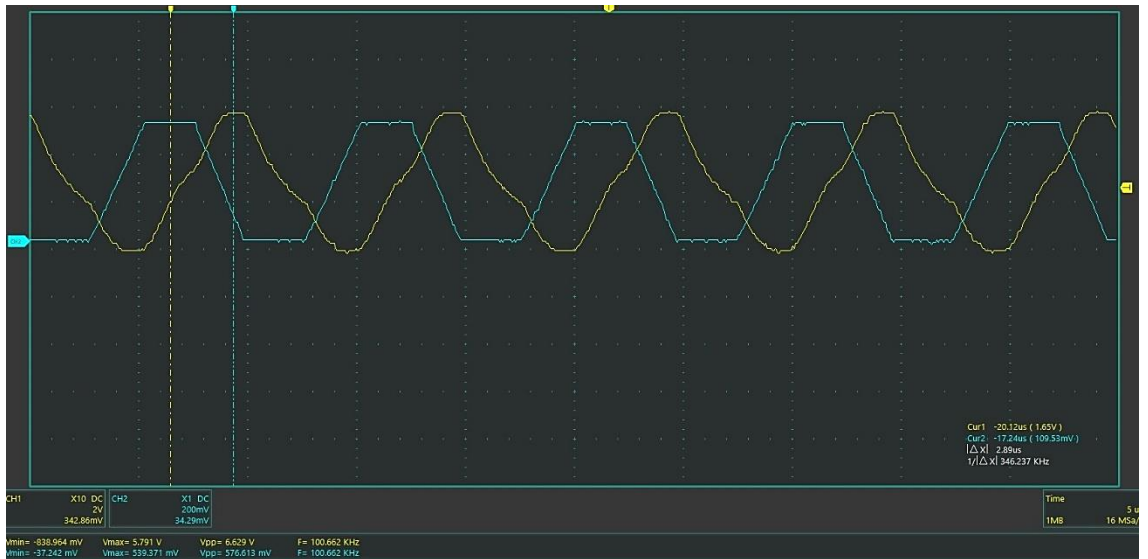
Süre (s)	Tek Bobin				Tek Bobin + Yoğunlaştırıcı				Çift Bobin				Çift Bobin + Yoğunlaştırıcı			
	Yüzey		Hacim		Yüzey		Hacim		Yüzey		Hacim		Yüzey		Hacim	
	Minimum Sıcaklık (K)	Maksimum Sıcaklık (K)	Minimum Sıcaklık (K)	Maksimum Sıcaklık (K)	Minimum Sıcaklık (K)	Maksimum Sıcaklık (K)	Minimum Sıcaklık (K)	Maksimum Sıcaklık (K)	Minimum Sıcaklık (K)	Maksimum Sıcaklık (K)	Minimum Sıcaklık (K)	Maksimum Sıcaklık (K)	Minimum Sıcaklık (K)	Maksimum Sıcaklık (K)	Minimum Sıcaklık (K)	Maksimum Sıcaklık (K)
0	293,15	293,15	293,15	293,15	293,15	293,16	293,15	293,16	293,15	293,15	293,15	293,15	293,15	293,15	293,15	293,15
10	295,61	301,09	295,54	301,09	298,69	312,16	298,65	312,16	295,34	302,44	295,3	302,44	310,47	440,71	308,54	440,71
20	299,16	305,35	299,08	305,35	306,38	321,44	306,33	321,44	299,05	308,09	299	308,09	348,05	634,28	347,68	634,28
30	303,28	309,84	303,18	309,84	314,74	330,38	314,66	330,38	303,82	314,05	303,74	314,05	396,43	813,76	396,43	813,76
40	307,8	314,68	307,7	314,68	323,47	339,38	323,35	339,38	309,35	320,52	309,24	320,52	450,78	972,46	450,78	972,46
50	312,8	319,97	312,68	319,97	332,46	348,57	332,31	348,57	315,74	327,7	315,6	327,7	506,38	1109,7	506,38	1109,7
60	318,34	325,79	318,2	325,79	341,72	357,98	341,54	357,98	323,12	335,77	322,95	335,77	561,15	1226,7	561,15	1226,7

4.2. PLL Devresi Ölçüm Sonuçları

Tasarlanan PLL devresinde merkez frekansı 100 kHz olmak üzere bağlantısı Şekil 3.10'da verilen 4046 PLL entegresinin VCO çıkışında osiloskop ekranında Şekil 4.15'deki dalga formu elde edilmiştir. Şekil 3.12'de verilen devrenin çıkışında ise bobinler arasındaki faz farkı 110° yapılmış 1. inverter ile 2. inverter kontrol sinyalleri dalga formu Şekil 4.16'daki gibi ölçülmüştür.



Şekil 4.15. 4046 entegresinin VCO çıkış sinyali.



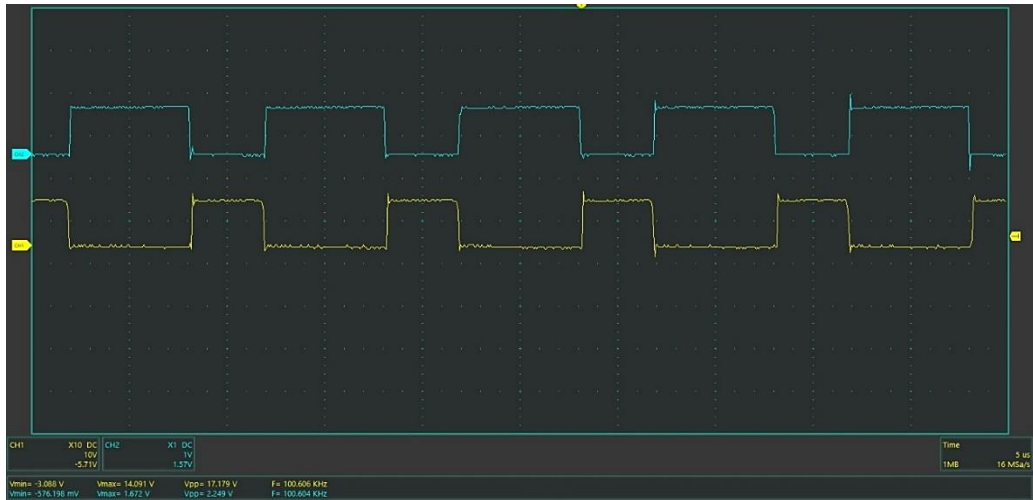
Şekil 4.16. Bobin 1 ve bobin 2 kontrol sinyalleri.

PLL entegresinin VCO çıkışında sinyalin 0-5 V yükselme süresi 0,13 μ s'de gerçekleşirken, opamp çıkışında sinyalin 0 – 12 V seviyesine yükselme süresi 2,56 μ s olarak gerçekleşmiştir. Çıkış sinyali genliğinin sabitlenmesi ve IR2101 entegresinin HIN ve LIN girişlerine aralarında 180° faz farkı bulunan sinyalin uygulanabilmesi için TC4426 ve TC4427 entegreleri kullanılmıştır. Bu entegrelere Şekil 4.16'da verilen sinyaller uygulanmıştır ve Şekil 4.17'deki dalga formu oluşmuştur.



Şekil 4.17. Bobin 1 ve bobin 2 kontrol sinyallerinin TC4046 ve TC4047 entegrelerine uygulanmasıyla oluşan çıkış sinyali.

Ancak sistemde gürültünün çok fazla olduğu görülmüş ve TC4426 ve TC4427 entegre beslemeleri için 10 μ F kutuplu kondansatör kullanılmıştır. Böylece gürültü büyük oranda azaltılmıştır (Şekil 4.18).

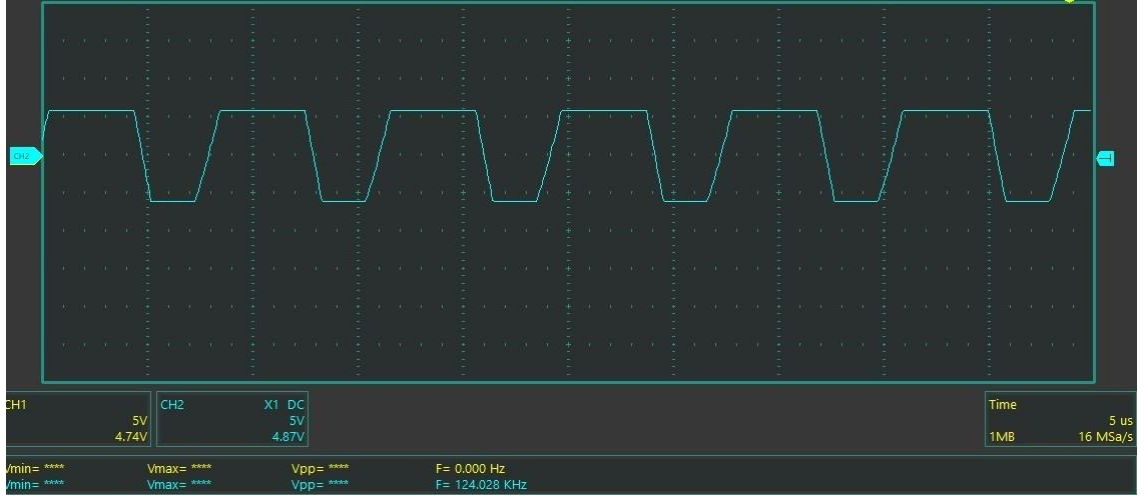


Şekil 4.18. Sinyaldeki gürültülerin azaltılması

TC4426 ve TC4427 entegrelerinin çıkışları IR2101 entegresinin HIN ve LIN girişlerine 1 k Ω 'luk dirençler üzerinden uygulanmış bootstrap tekniği ile tam dalga köprünün üst ve alt kısımlarında bulunan MOSFET'ler sürülmüştür. Her iki inverterde Q1 MOSFET'lerine uygulanan V_{gs} sinyalleri ile tam köprü inverterin çıkış sinyali aşağıdaki gibi elde edilmiştir.



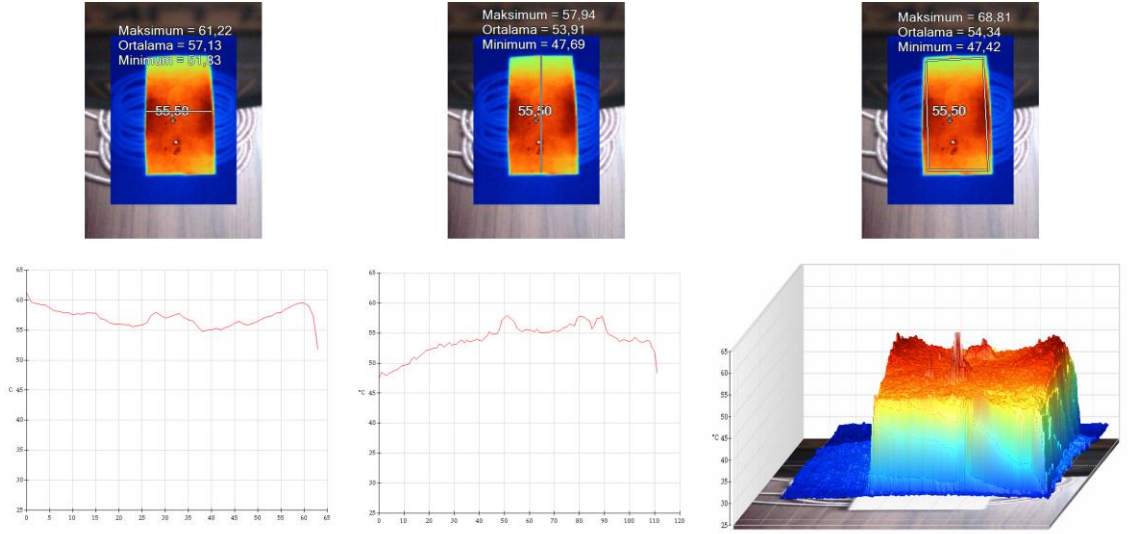
Şekil 4.19. Q1 MOSFET V_{gs} gerilimleri



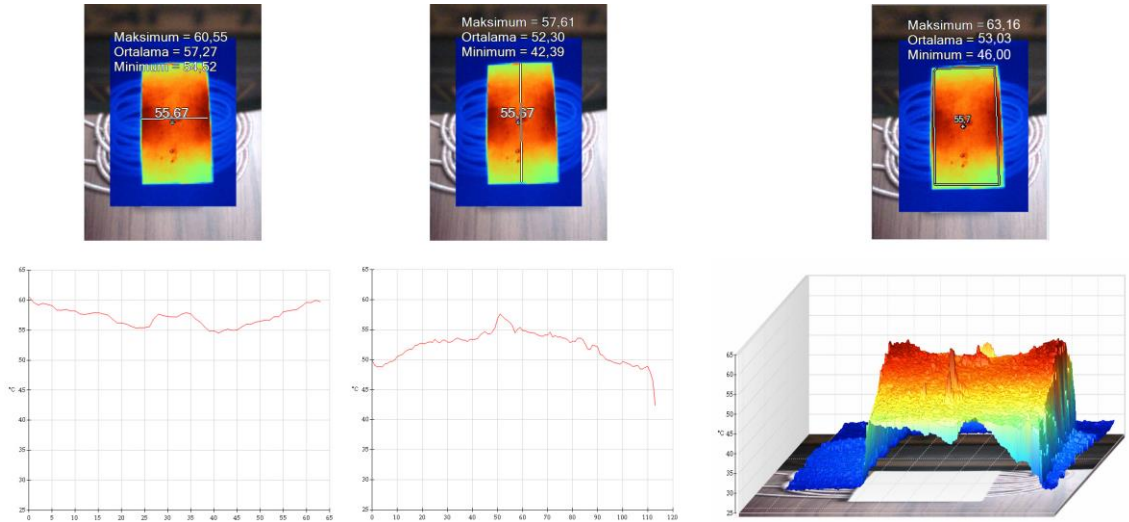
Şekil 4.20. Tam köprü inverter çıkış sinyali

4.3. Termal Kamera Ölçüm Sonuçları

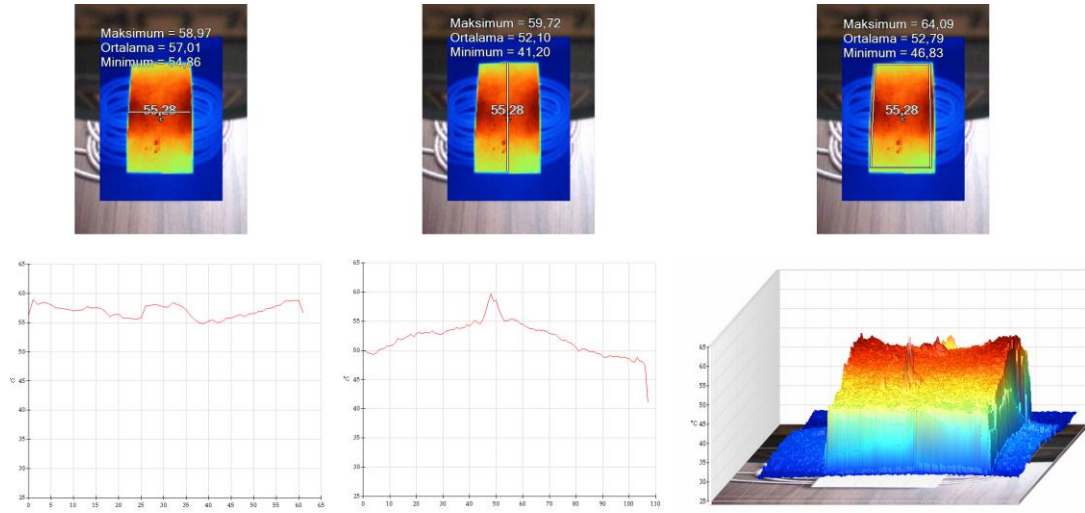
Termal kamera ile yapılan ölçümler bobinler arasındaki faz farkı 30, 60, 90, 110, 120, 150, 171 derece olacak şekilde tekrarlanarak yapılmış ve kamera görüntüleri analizleri Fluke Smartview programı kullanılarak yapılmıştır. İş parçasının orta noktasından x eksenini ve y eksenini doğrultusunda kesme çizgileri çekilmiş ve bu çizgiler boyunca ortaya çıkan sıcaklık değerleri grafiksel olarak gösterilmiştir. Ayrıca iş parçası yüzey alanında ortaya çıkan sıcaklık değerleri ise 3 B grafik kullanılarak gösterilmiştir.



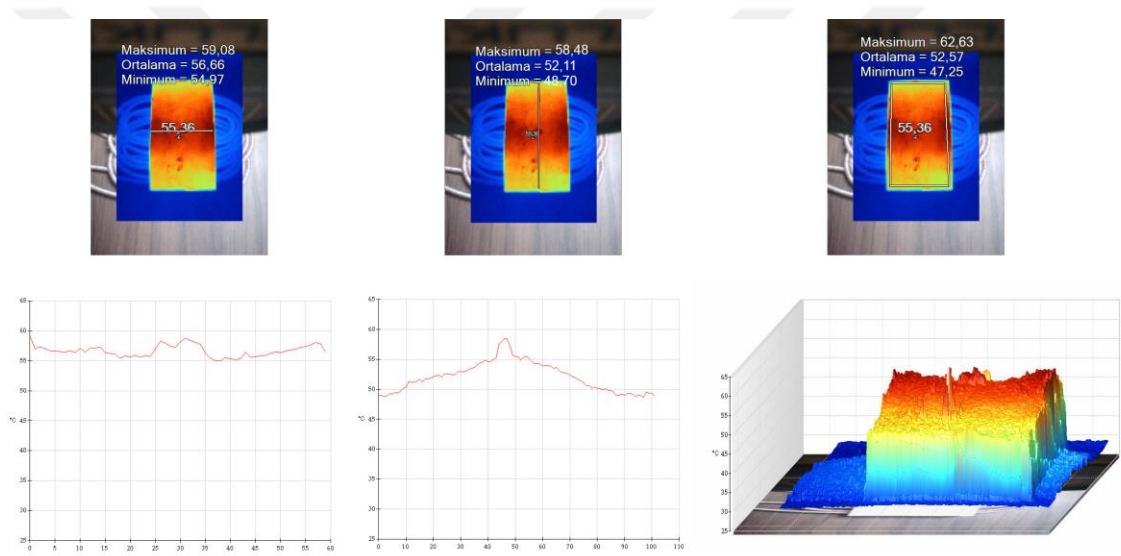
Şekil 4.21. 30° faz farkı için iş parçasında x eksenini, y eksenini ve yüzeyde ortaya çıkan sıcaklıklar.



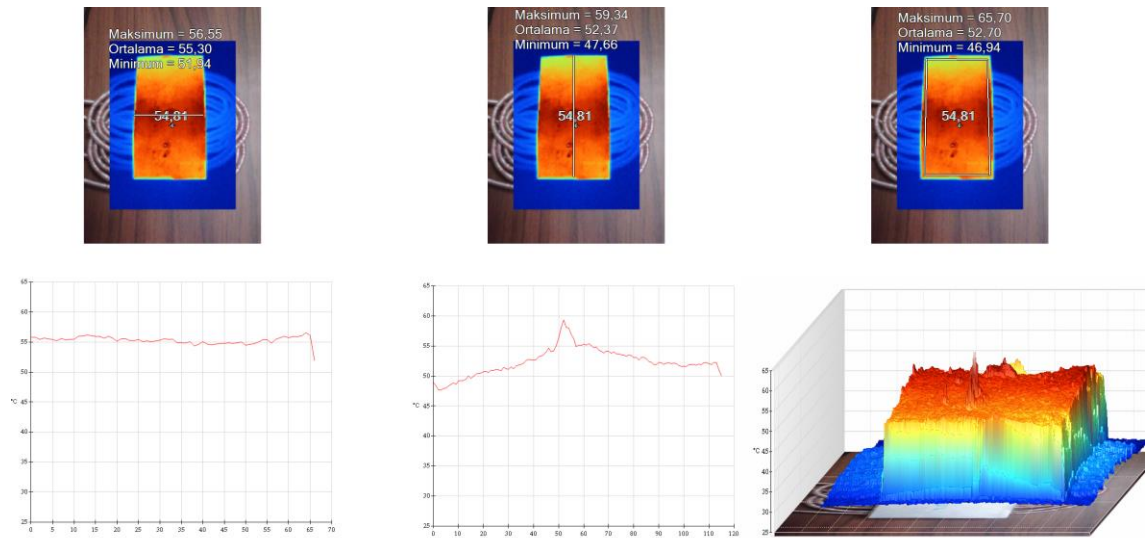
Şekil 4.22. 60° faz farkı için iş parçasında x eksenini, y eksenini ve yüzeyde ortaya çıkan sıcaklıklar.



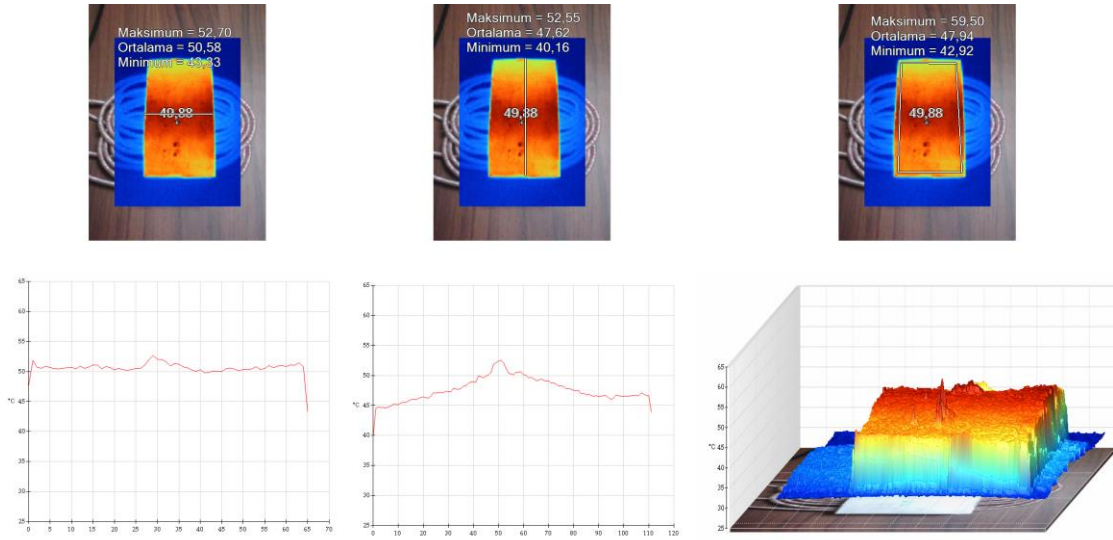
Şekil 4.23. 90° faz farkı için iş parçasında x eksen, y eksen ve yüzeyde ortaya çıkan sıcaklıklar.



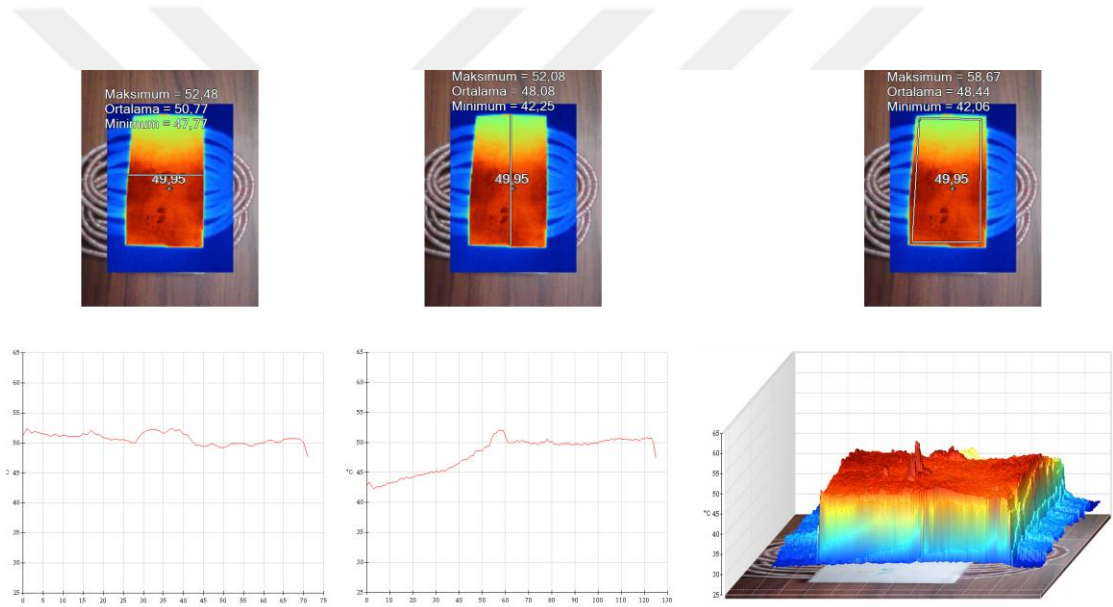
Şekil 4.24. 110° faz farkı için iş parçasında x eksen, y eksen ve yüzeyde ortaya çıkan sıcaklıklar.



Şekil 4.25. 120° faz farkı için iş parçasında x eksen, y eksen ve yüzeyde ortaya çıkan sıcaklıklar.

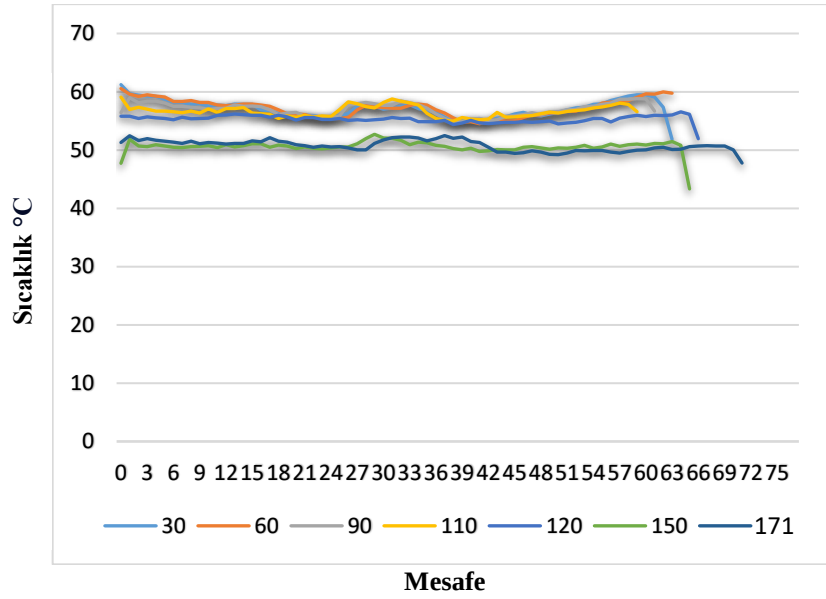


Şekil 4.26. 150° faz farkı için iş parçasında x eksen, y eksen ve yüzeyde ortaya çıkan sıcaklıklar.

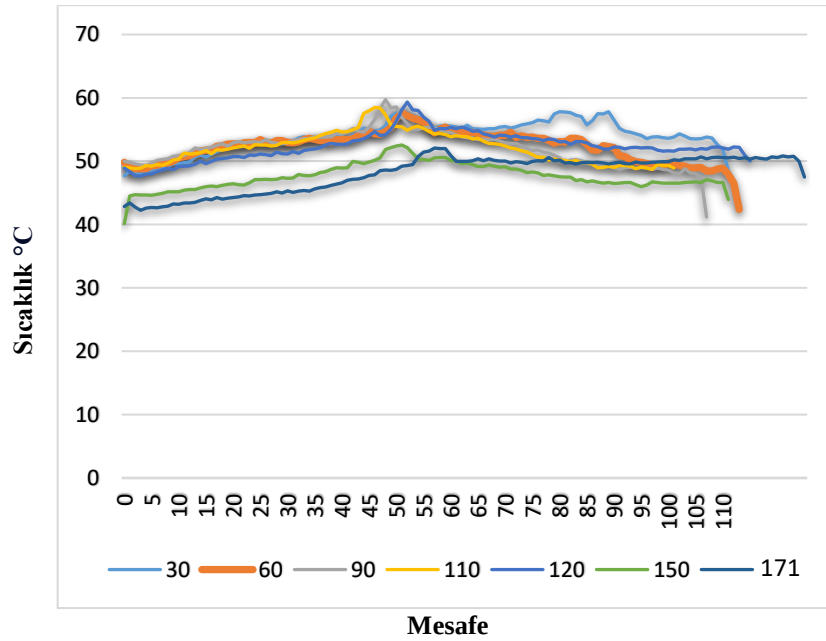


Şekil 4.27. 171° faz farkı için iş parçasında x eksen, y eksen ve yüzeyde ortaya çıkan sıcaklıklar.

x ekseninde oluşturulan kesme çizgisi boyunca oluşan sıcaklık değerlerinin kıyaslaması yapıldığında 120° faz farkı için en iyi sıcaklık dağılımının olduğu görülmektedir. Bu faz açısında x eksen boyunca uzanan kesme çizgisi üzerinde çok az bir sıcaklık dalgalanması oluşmaktadır (Şekil 4.28).



Aynı kıyaslama y eksenini boyunca uzanan kesme çizgisi üzerinde oluşan sıcaklıklar için yapıldığında ise 110°'de sıcaklık dağılımının en iyi durumda olduğu görülür. Sayısal yöntemler kullanılarak yapılan hesaplamalarda ise en iyi faz açısı 105° olarak bulunmuştur.



İş parçasının yüzeyinde farklı faz açılarındaki ortaya çıkan maksimum, minimum ve ortalama sıcaklıklar Çizelge 4.7’de verilmiştir. İlgili çizelgeden minimum sıcaklık ile ortalama sıcaklık ve minimum sıcaklık ile maksimum sıcaklık oranları baz alınarak yapılan kıyaslamada en ideal faz açısının 110°’de ortaya çıktığı görülmektedir.

Çizelge 4.7. Bobinler arasındaki faz farkına bağlı olarak iş parçası yüzeyinde ortaya çıkan sıcaklık değerleri.

Faz Farkı	Maksimum Sıcaklık (T_{max})	Ortalama Sıcaklık (T_{ort})	Minimum Sıcaklık (T_{min})	T_{min}/T_{ort}	T_{min}/T_{max}
30	68,81	54,34	47,82	0,88	0,69
60	63,16	53,03	46,00	0,87	0,73
90	64,09	52,79	46,83	0,89	0,73
110	62,63	52,57	47,25	0,90	0,75
120	65,7	52,7	46,94	0,89	0,71
150	59,5	47,94	42,92	0,90	0,72
171	58,67	48,44	42,06	0,87	0,72

Yüzeyde ortaya çıkan sıcaklık değerlerinin standart sapması alındığında en düşük standart sapma değerinin 30° faz farkında ortaya çıktığı görülmektedir. Standart sapma değeri, iş parçası üzerinde oluşan ortalama yüzey sıcaklığı ile noktasal sıcaklıkların birbirinden ne kadar farklı olduğunu göstermesi yönüyle önemlidir (Çizelge 4.8).

Çizelge 4.8. Faz farkına bağlı iş parçası yüzeyinde oluşan sıcaklık standart sapmaları

Faz Açısı	İş parçası merkez noktası sıcaklığı			
	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C
30	3,29	4,80	6,21	7,44
60	4,12	6,48	8,52	10,46
90	3,93	6,34	8,41	10,30
105	3,73	6,28	8,50	10,52
110	3,53	5,83	7,92	9,50
120	3,53	5,97	8,08	10,06
150	3,24	5,46	7,29	8,95

İlgili tablodan görüleceği üzere iş parçası yüzeyinde sıcaklık değeri arttıkça standart sapma da artmaktadır. Bu durum noktasal sıcaklıklar ile ortalama yüzey sıcaklığı arasındaki farkın arttığını göstermektedir. İş parçası üzerinde yapılan termal kamera ölçümlerinde farklı faz açılarındaki merkez noktasının 35 °C’den 75 °C sıcaklık değerine

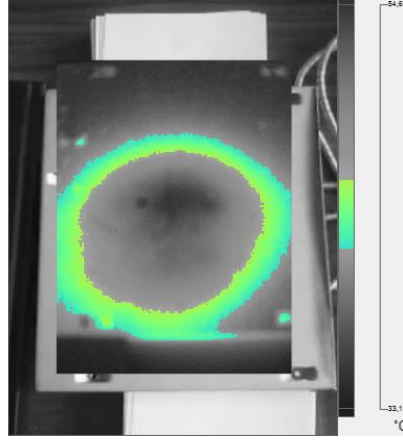
kadar gelmesi sağlanmış ve süre kaydedilmiştir. Ayrıca bu süre zarfında çekilen akım değerinin ortalaması hesap edilmiştir. Ölçüm sonuçları Çizelge 4.9’da verilmiştir.

Çizelge 4.9. Faz farkına bağlı yapılan ölçüm sonuçları

Faz açısı	Merkez noktası 35 °C–75 °C çıkma süresi (s)	Ölçüm süresince çekilen ortalama akım (A)	Ortalama yüzey sıcaklığı değişimi (°C)	Tüketilen enerji (Joule)
30	35,809	11,04	33,90	4743,98
60	21,054	15,29	32,59	3862,99
90	20,048	15,31	33,00	3683,22
105	22,318	15,11	32,92	4046,70
110	24,258	14,7	32,24	4279,11
120	24,076	14,85	31,86	4290,34
150	25,607	16,44	33,22	5051,75

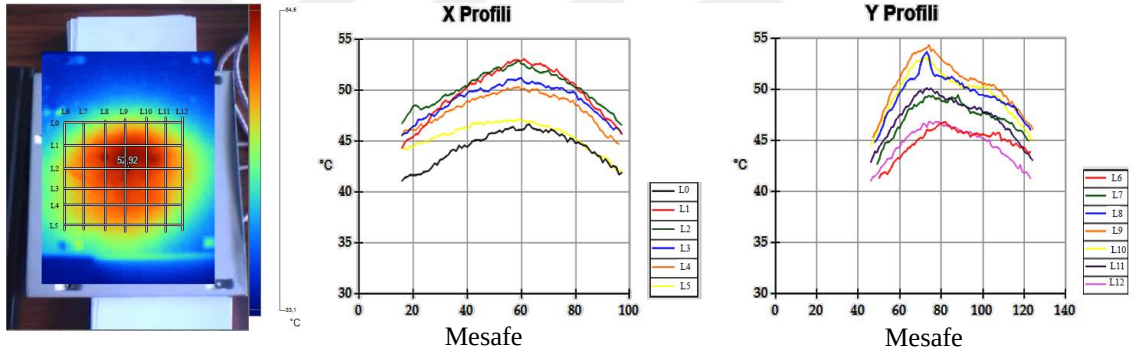
Çizelge 4.9 incelendiğinde 90° faz açısında ısınma süresi ile tüketilen enerji miktarının minimuma indiği görülmektedir. Bu faz açısı dışındaki faz açılarında bobinlerce üretilen EM akıda bozulmalar meydana gelmektedir. 2. Bobine uygulanan 90°’lik faz farkı 1. Bobin tarafından oluşturulan EM akıyı destekleyen yönde 2. Bobinin akı üretmesine neden olur. Ancak diğer faz açılarında EM akı değişimi sabit olmayıp her iki bobin tarafından üretilen akılar birbirini yok etme veya artırma eğilimindedir.

İş parçasının indüksiyon bobinlerini de içine alacak kadar büyük olması durumunda ferrit nüve dışında kalan iş parçası alanlarının nispi olarak sıcaklık seviyelerinin düşük olduğu görülmektedir. Ferrit nüve ve indüksiyon bobini dışında kalan iş parçası alanlarının çoğunlukla kondüksiyon yoluyla ısı transferine bağlı olarak zamanla sıcaklıkları artmaktadır. İş parçasının alt kısmında bulunan manyetik akı yoğunlaştırıcı olarak kullanılan ferrit nüve yüksek bağl manyetik geçirgenlik sebebiyle manyetik akının iş parçasının orta noktasına doğru yönelmesine sebep olmakta, indüksiyon bobini ve ferrit dışında kalan alanlarda indüksiyon ısıtmanın etkisi azalmaktadır (Şekil 4.32).



Şekil 4.32. İş parçası üzerinde kondüksiyonla sıcaklık artışı gerçekleşen bölgeler.

110° faz farkı için termal görüntü üzerinde x ve y eksenleri doğrultusunda ızgaralama yapılarak ölçülen sıcaklık değerlerine ilişkin grafik, Şekil 4.33’de gösterilmiştir.



Şekil 4.33. 110° faz farkı için x ve y ekseninde çizilen kesme çizgileri eksen boyunca oluşan sıcaklıklar.

İlgili grafiklerden de görüleceği üzere geniş yüzeye sahip iş parçası kullanımı yüzey alanında sıcaklık dağılımı homojenliğini büyük ölçüde bozmaktadır. Bu durumun sebebi EM alanın iş parçası yüzeyi üzerinde homojen dağılmaması ve kondüksiyon yoluyla ısı transferleridir. İlgili grafikler, manyetik akı yoğunlaştırıcı kullanılan indüksiyon ısıtma sistemlerinde iş parçasına uygun geometride tasarım yapılması gerekliliğini ortaya koymaktadır. İş parçası geometrisine uygun tasarımı yapılmayan indüksiyon ısıtıcı tasarımlarında verim düşmektedir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

İndüksiyon ısıtma sistemlerinin performansına etki eden birçok parametre bulunmaktadır. Tüm bu parametrelerin sayısal analiz programları kullanılmadan hesaplanması çok zordur. Tasarlanan indüksiyon ısıtma sisteminde sayısal analizleri gerçekleştirmek üzere COMSOL Multiphysics programı kullanılmıştır. Programın tercih edilme nedeni, indüksiyon ısıtmada kullanılan ve özellikleri doğrusal olmayan malzemelere ait tüm bilgileri içermesidir. Örneğin manyetik alan şiddetine bağlı olarak malzemenin manyetik geçirgenlik değişimleri, erime noktasında malzemenin elektriksel direncinin değişimi veya alaşım veya grafit gibi malzemelerin doğrusal olmayan elektriksel direnç değişimleri programda kayıtlıdır. Diğer taraftan indüksiyon ısıtmada malzemenin homojen olarak ısıtılması genellikle mümkün olmadığından farklı sıcaklığa sahip noktaların elektriksel direnç, manyetik geçirgenlik gibi değerleri de birbirinden farklı olmaktadır. Bu durum analizi daha da zorlaştırmaktadır. Özellikle yüzey sertleştirme uygulamaları gibi sıcaklığın belli bir derinlikte sınırlandırılması gereken uygulamalarda ısıya bağlı artan termal iletkenlik katsayısı nedeniyle istenilen sonuçların alınabilmesi için sayısal analizlerin yapılması zorunludur. Termal iletkenlik katsayı bazı malzemeler için doğrusal hesaplama yöntemleri ile belirlenebilirken, bazı malzemelerde belirli bir sıcaklığa kadar artma daha sonra azalma eğilimine girmektedir. Dolayısıyla indüksiyon ısıtma sisteminde kullanılacak her bir malzemeye ilişkin tüm bilgiler alınarak sayısal hesaplamalar yapılmalıdır.

Bu nedenlerden dolayı tez çalışmasında sayısal analizlerin gerçekleştirilebilmesi ve daha doğru sonuçlar alabilmek için sayısal analiz programı kullanılmıştır. Kullanılan sayısal analiz programında sonlu elemanlar metodu kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır. Tasarımın zorluğu ve malzeme çeşitliliğine göre programın hesaplama süresi değişmektedir.

Bu tez çalışmasında indüksiyon ısıtmada iki fazlı yürüyen dalga modeli incelemesinde 0,1 saniye aralıklarla 5. saniyeye kadar bobinler arasında faz farkı $\pi/6$ 'şar aralıklarla 0'dan π 'ye kadar değiştirilmek suretiyle parametrik tarama işlemi yapılmıştır. Programın bu hesaplamayı yapma süresi 3 GHz i7 işlemcili 16 GB RAM'e sahip bir bilgisayarda yaklaşık olarak 3 saat sürmüştür. Söz konusu programda yapılan parametrik taramada yaklaşık olarak 300 farklı durum için 3 boyutlu bir modelleme üzerinde

hesaplama yapıldığından bu süre normaldir. Tarama parametrelerinin sayısının artması hesaplama süresinin artmasına sebep olacaktır. Örneğin parametrik taramaya iş parçasının indüksiyon ısıtma sistemine göre iki farklı açı girilmesi durumunda yukarıdaki hesaplama yaklaşık olarak 6 saat sürecektir.

Sayısal analiz programında yapılan hesaplamalar sonucunda tüm malzeme parametreleri dikkate alınarak iki fazlı yürüyen dalga indüksiyon ısıtma sisteminde fazlar arasında ideal faz farkı diğer çalışmalardan farklı olarak $11\pi/18$ rad olarak bulunmuştur. Tasarımı yapılan indüksiyon ısıtma sisteminde termal kamera ile farklı faz açıları için ölçümler yapılarak bu değer doğruluğu test edilmiştir. Burada malzeme üzerindeki maksimum ve minimum sıcaklık farkları göz önüne alınmıştır. Bunu yapmaktaki amaç sıcaklığa bağlı olarak malzeme üzerinde oluşacak stresin azaltılması ve ürün kalitesinin artırılmasıdır. Çünkü malzeme ne kadar homojen ısıtılırsa termal etkiye bağlı iş parçası üzerinde oluşacak kuvvetler o kadar dengeli olacaktır. Ayrıca konveksiyonel ısı transferinin indüksiyon bobinleri üzerindeki etkisi de daha dengeli olacaktır.

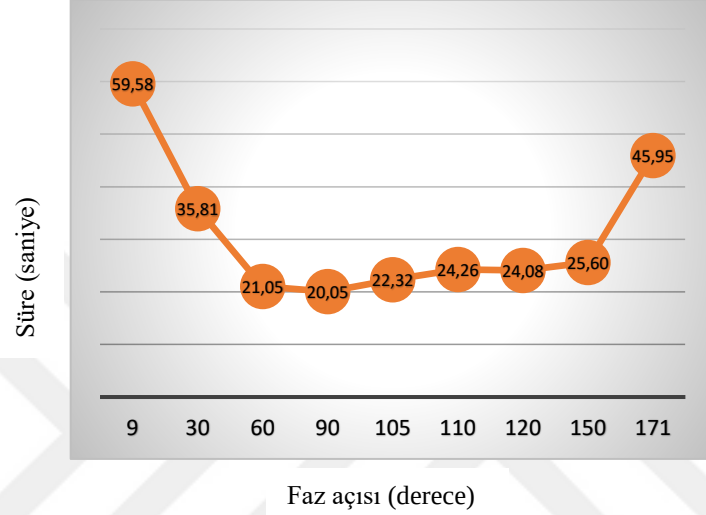
Tasarlanan indüksiyon ısıtma sisteminde değişen malzeme parametresinin oluşturmuş olduğu olumsuz etkiyi kompanze etmek amacıyla sistemin sürekli rezonans durumunda tutulması amaçlanmıştır. İndüksiyon ısıtmada işlem görecektir olan iş parçası ve manyetik akı yoğunlaştırıcı başlangıçta belirli bir manyetik geçirgenliğe sahiptir. Bu manyetik geçirgenlik ısının etkisiyle azalacaktır. Azalan manyetik geçirgenlik sistemin rezonans frekansının değişmesine sebep olacaktır. Sistemin istenilen sıcaklığa en kısa sürede ulaşabilmesi amacıyla sistemin çıkış akımının artırılması gerekmektedir. Çıkış akımının artması için iki yöntem kullanılabilir. Bunlardan birisi sabit akım kaynağı üzerinden sistemi sürmektir.

İnverterde kullanılan MOSFET'lerin gate ile source terminalleri arasındaki gerilimi artırmak suretiyle MOSFET çıkış akımları yükseltilebilir. Ancak bu yöntemde sistem rezonans dışında olduğundan güç faktörü bozulacak ve kayıplar artacaktır. Diğer yöntem ise frekansın değiştirilmesidir. Frekans değiştirilerek indüksiyon ısıtma sistemi rezonansa tutularak sistemin maksimum akım çekmesi sağlanır. Bu tez çalışmasında frekans değiştirilerek sistemin rezonans durumunda kalması sağlanmıştır. Yürüyen dalga indüksiyon ısıtma için 100 kHz merkez frekansı olarak belirlenmiştir. Bobinler arasındaki faz farkının sağlanması amacıyla opamp'ın + ve - girişine faz farklı sinyaller uygulanmıştır. Opamp girişlerine uygulanan sinyaller arasındaki faz farkı pasif alçak geçiren filtre düzeneği ile sağlanmıştır. Ancak kare dalganın Fourier açılımı yapıldığında sonsuz sayıda sinüs dalgadan oluştuğu görülür.

Pasif filtre dolayısıyla sinyalin belirli bir frekanstan sonrası zayıflatılır. Bu nedenle dalga formunda bozulmalar olmuştur. Ayrıca opamp'ın yükselme eğilimi (*slew rate*) nedeniyle gerilim takipçisi kısmında da kare dalga formunda bozulmalar olmuştur. Bu dalga formu bozulmaları TC4046 ve TC4047 entegrelerinin minimum lojik 1 gerilim seviyesi üstündeki giriş geriliminin çıkışta 12 V'a yükseltilmesi ve maksimum lojik 0 gerilim seviyeleri altındaki gerilimlerin 0 V'a düşürülmesi sayesinde kare dalga formuna dönüştürülmüştür. Ancak kare dalgaların görev döngüsü süresi de değişmiştir. Tam köprü inverteri oluşturan MOSFET'leri sürmek için IR2101 entegresi kullanılmış; üst kısımdakileri sürmek için bootstrap tekniği uygulanmıştır. Üst kısımdaki MOSFET'lerin sürülmesi için Vcc gerilimine şarj olan elektrolitik kondansatörün şarj eğrisine bağlı olarak kare dalganın 0 – 1 konumuna geçiş noktalarında kare dalga formunun bir miktar bozulduğu gözlenmiştir. Bu durum doğal olup MOSFET'lerin tetiklenmesinde herhangi bir soruna neden olmamıştır. Ancak tetikleme sinyallerinde çapraz karışmalar (*crosstalk*) gözlenmiştir. Çapraz karışmayı azaltmak amacıyla data kablosu (CAT6) kullanılmıştır. Değişen malzeme parametrelerine bağlı olarak değişen frekans nedeniyle bobinler arasındaki faz farkında küçük değişimler olmuştur. PLL entegresinin “*comparator 1*” çıkışındaki sinyaller pasif alçak geçiren filtre ile filtrelenmiştir. Ancak filtrenin üst kesim frekansı sebebiyle filtre çıkışında gerilim dalgalanmaları oluşmuştur. Bu dalgalanma seviyesinin azaltılması için pasif alçak geçiren filtrenin şarj ve deşarj zaman sabiti τ değerinin artırılması gereklidir. Bu durum pasif filtrenin üst kesim frekansını azaltmakta ancak sistemin kararlı hale gelmesi için gerekli sürenin uzamasına sebep olmaktadır. Bu sebeple şarj ve deşarj zaman sabiti değeri değiştirilmemiştir. Söz konusu dalgalanmalar sebebiyle VCO çıkış frekansında %1'den daha düşük dalgalanmalar yaşanmıştır.

Ferrit nüve boyutundaki bir demir sac iş parçası kullanılarak yapılan termal ölçümler, indüksiyon bobinleri arasındaki faz açıları değiştirilerek tekrarlanmıştır. Ölçüm sonuçlarının analizinden süre ve enerji tasarrufu yönüyle en ideal faz farkının 90° olduğu; maksimum, minimum ve ortalama sıcaklık değerleri oranına göre ideal faz farkının 110° olduğu görülmüştür. Yüzey üzerinde oluşan sıcaklıkların standart sapmasının en düzgün olduğu faz açısı 30° olarak ölçülmüştür. Bunun nedeni bobinler tarafından üretilen akıların birbirini zayıflatması ve dolayısıyla sıcaklık artış hızının yavaşlamasıdır. Sıcaklık artış hızındaki azalma kullanılan iş parçasının sahip olduğu yüksek ısı iletim katsayısının etkisiyle yüzey üzerinde sıcaklık dağılımının daha dengeli olmasına sebep olmaktadır. Ancak bu faz farkında manyetik akı yoğunlaştırıcı içinden geçen akının azalması sebebiyle enerji tüketimi ve ısıl işlem süresi artmaktadır. Bobinler arasındaki faz farkı

90°'nin altına düştükçe ve üstüne çıktıkça iş parçası üzerinde sıcaklık artış hızının azaldığı görülmektedir. Bu azalma 150° faz farkının üzerinde ve 30° faz farkının altında oldukça belirgindir. Tasarımı yapılan indüksiyon ısıtıcıda 9° ile 171° arasında faz açısı ayarlanabilmektedir. Ayarlanabilecek alt ve üst faz farkı değerleri için iş parçasının merkez noktasının 35 °C'den 75 °C'ye çıkma hızı sırasıyla 59,58 s ve 45,95 s olarak gerçekleşmiştir (Şekil 5.1).



Şekil 5.1. Farklı faz açıları için iş parçası merkez noktası sıcaklığının 35 °C'den 75 °C'ye ulaşma süreleri

Termal ölçüm sonuçlarına göre termal stresi azaltmak ve proses hızını artırmak amacıyla bu tez çalışmasında kullanılan 2 fazlı yürüyen dalga indüksiyon ısıtıcı tasarımı için, indüksiyon bobinlerinin akımları arasında faz farkı 60° – 110° arasında olması ideal olacaktır. Yüksek hassasiyet gereken yüzey sertleştirme uygulamaları için standart sapma ve maksimum minimum sıcaklık oranı yönüyle avantajlı olan 110° faz farkı tercih edilebilir. Ancak verim ve süre yönüyle en ideal faz farkı 90°'dir. Şekil 4.21 – Şekil 4.27 arasında termal ölçümleri verilen tasarımda x eksenini doğrultusunda en az sıcaklık gradyanı 120°'de; y eksenini doğrultusunda en az sıcaklık gradyanı 105°'de ortaya çıkmaktadır.

Tasarlanan indüksiyon ısıtıcı üzerinde bobin ve ferrit nüvenin kapladığı alandan daha büyük bir iş parçası ısıtılmak istendiğinde manyetik akı yoğunlaştırıcı sebebiyle sıcaklık artışının ferrit nüve üzerindeki iş parçası kısmında yoğunlaştığı görülmüştür. Manyetik akı yoğunlaştırıcının yüksek μ_r değeri EM alan için düşük relüktanslı bir yol oluşturmaktadır. Bu nedenle indüksiyon bobinleri tarafından oluşturulan manyetik alan iş parçasının manyetik akı yoğunlaştırıcı üzerinde kalan bölgesinde yoğunlaşmaktadır.

Buna bağılı olarak bu bölgede sıcaklık daha çok artmaktadır. İş parçasının indüksiyon bobini ve manyetik akı yoğunlaştırıcı üzerinde kalan bölgeler dışındaki bölgelerinde manyetik alanın etkisi azaldığından sıcaklık artışı çoğunlukla kondüksiyon yoluyla gerçekleşmektedir.

Dolayısıyla manyetik akı yoğunlaştırıcı kullanılan indüksiyon ısıtıcı tasarımlarında, bobinler ve yoğunlaştırıcının tasarım geometrisine uygun iş parçası malzemesinin kullanılması gerekmektedir. Uygun olmayan geometrideki iş parçası kullanımı verimin düşmesine sebep olacaktır.

5.2. Öneriler

Tasarlanan indüksiyon ısıtma sisteminde frekans değiştirilerek sistemin sürekli olarak rezonansta kalması, böylece maksimum akım çekmesi hedeflenmiştir. Ancak PLL ile yapılan frekans değiştirme işleminde sadece frekans değişikliği yapılmakta; bobinlerin ısınmasına bağılı ve deri olayına bağılı elektriksel direnç değişiklikleri hesaba katılmamaktadır. Sinterlenmiş metal oksit gibi malzemelerde özgül direnç sıcaklık katsayısı (α) negatif olabilmektedir. Ayrıca karbon çelik, alaşımlı çelik ve grafit gibi malzemelerde α katsayısı sıcaklığın doğrusal olmayan bir fonksiyonu da olabilmektedir. Bu tür malzemelerde sabit sıcaklık artış hızının yakalanabilmesi için frekans değişiminin yanında buck dönüştürücü ile MOSFET'lerin Vgs sürme gerilimlerinin artırılması sistem performansını daha iyi hale getirecektir. Analog entegre kullanılarak yapılacak olan PLL indüksiyon ısıtma için Ngoc ve diğerleri (2011) tarafından önerilen RMS genlik kontrollü PLL sisteminin kullanılması iyi bir seçenek olacaktır.

PLL entegresinin karşılaştırıcı çıkışı ne kadar iyi filtrelenirse filtrelensin VCO girişinde gerilim dalgalanması olacaktır. PLL karşılaştırıcı çıkışının filtrelenmesi amacıyla kullanılan alçak geçiren filtrenin şarj ve deşarj zaman sabiti τ değerinin artırılması sistemin kararlı hale gelmesi için gereken süreyi uzatacağından sistemin dinamik cevap süresi olumsuz etkilenecektir. Yeterince filtrelenmemiş karşılaştırıcı çıkışı VCO çıkışında büyük frekans dalgalanmalarına neden olacaktır. Alçak geçiren filtre yerine, kontrol hassasiyetini artırmak ve sistemin cevap süresini kısaltmak amacıyla Bouadi ve diğerleri (2022) tarafından önerilen yapay sinir ağları ve sinirsel kontrollü PLL devresi kullanılması sistemin performansını daha iyi hale getirecektir.

Tasarlanan 2 fazlı yürüyen dalga indüksiyon ısıtma sisteminde bobinler arasındaki faz farkını sağlamak amacıyla kullanılan aktif filtre sinyalin dalga formunun bozulmasına neden olmakta, rezonans frekansının değişmesiyle bobinler arasında belirlenen faz farkından sapmalar yaşanmaktadır. Ayrıca geleneksel PLL kontrolünde ZVS koşullarının sağlanması oldukça güçtür. Bunun sonucunda artan anahtarlama kayıpları nedeniyle verim düşmektedir. Chen ve diğerleri (2001) tarafından yapılan çalışmada olduğu gibi PLL karşılaştırmalı girişine bir faz geciktirme devre katı eklenmek suretiyle ZVS koşulları sağlanmalıdır.

Bobinler arasındaki faz farkının frekanstan bağımsız olarak sabitlenebilmesi, anahtarlama kayıplarının azaltılması ZVS koşullarının sağlanabilmesi, dalga formunun düzgün olabilmesi ve çevre elemanlarının sayısının azaltılabilmesi için en doğru yöntem indüksiyon ısıtma sisteminin DSP veya mikrodenetleyici kullanılarak tasarlanmasıdır. Böylece indüksiyon sisteminin daha hassas bir şekilde kontrolünün yapılması mümkün olacaktır. Proseste kullanılan malzemenin özelliklerini tanımak, evrensel bir indüksiyon sistemi yerine iş parçasının doğrusal olmayan özellikleri de dikkate alınarak tasarım yapmak, daha hızlı ve etkin bir ısıtmanın gerçekleştirilmesine olanak tanıyacaktır.

İndüksiyon ısıtma isteminin tasarımı yapılırken iş parçasının geometrisi de dikkate alınmalıdır. İş parçası ile indüksiyon ısıtma sistemlerinde uyumsuzluk veriminin düşmesine sebep olacaktır.

İndüksiyon ısıtıcı ile iş parçasının arasındaki mesafenin artması durumunda kısa adımlı yürüyen dalga indüksiyon ısıtma tasarımının kullanılması avantaj sağlayacaktır. Bu tez çalışmasında kullanılan bobin geometrisi için gerek sayısal analiz, gerekse deneysel sonuçlar ile iş parçası üzerinde sıcaklık gradyanının minimum olduğu faz farkı 110° , x eksen yönünde 120° , y eksen yönünde 105° olarak tespit edilmiştir. Verimin artırılması ve işlem süresinin kısaltılması için bobinler arasında 90° faz farkı olmalıdır. İş parçası üzerinde sıcaklık değeri arttıkça sıcaklık standart sapmalarının arttığı gözlenmiştir. Yüksek sıcaklıklarda işlem görece malzemeler için sıcaklık dağılımının homojenliğinin artırılması amacıyla 3 veya daha fazla fazlı yürüyen dalga indüksiyon ısıtıcı tasarımları uygulanmalıdır. Yüksek güçlü indüksiyon ısıtıcılar için ferrit manyetik akı yoğunlaştırıcı, düşük saturasyon değerinden dolayı uygun bir tercih olmayacaktır. Bunun yerine nanokristal alaşım, yumuşak manyetik kompozit veya yumuşak şekillendirilebilir kompozit malzemeler tercih edilebilir. Bu malzemelerden nanokristal alaşımların izotropi ve kayıp yönüyle dezavantajları bulunmakta olduğundan yumuşak manyetik kompozit ile yumuşak şekillendirilebilir kompozit malzemelerin manyetik akı yoğunlaştırıcı olarak

kullanımı en uygun olanıdır. Her iki malzemenin de birbirine göre üstünlükleri bulunmakta olup, üretim zorluğu göz ardı edilerek manyetik geçirgenlik yönüyle yumuşak manyetik kompozit malzemelerin; izotropi yönüyle ise yumuşak şekillendirilebilir manyetik kompozit malzemelerin kullanılması uygun olacaktır.



KAYNAKLAR

- Anonymous, (2009). *ASTM Standards Specification*. **A345, A664, A677, A683, A726, A840, A876**.
- Aguilar, C., Ruiz, A., Canales, F. and Lee, F. (2001). Analysis of the half-bridge boost rectifier as integrated electronic ballast with power factor correction. *2001 IEEE 32nd Annual Power Electronics Specialists Conference* (IEEE Cat. No. 01CH37230).
- Ahmed, N. A. (2010). High-frequency soft-switching ac conversion circuit with dual-mode PWM/PDM control strategy for high-power IH applications, *IEEE transactions on industrial electronics*, **58**(4): 1440-1448.
- Bae, J., Kim-E, Y., Son, Y. W., Moon, H., Yoo, C. and Lee, J. (2015). Self-Excited Induction Generator as an Auxiliary Brake for Heavy Vehicles and Its Analog Controller, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* **62**: 3091-3100.
- Baldan, M., Cetin, M., Nikanorov, A. and Nacke, B. (2019). Optimal Design of Magnetic Flux Concentrators in Induction Heating. *2019 IEEE XXI International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP)*.
- Bayındır, N., Kükrer, O. and Yakup, M. (2003). DSP-based PLL-controlled 50–100 kHz 20 kW high-frequency induction heating system for surface hardening and welding applications. *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, **150**(3): 365-371.
- Borup, K. A., Toberer, E. S., Zoltan, L. D., Nakatsukasa, G., Errico M., Fleurial-P J., Iversen, B. B. and Snyder, G. J. (2012). Measurement of the electrical resistivity and Hall coefficient at high temperatures. *Review of Scientific Instruments* **83**(12): 123902.
- Bouadi, A., Naim, H., Della Krachai, M., Fares, R. and Bouchiba, G. (2022). Modeling and Simulation of a Novel Neural PLL controller for Circuit of Series Resonant Inverter in High Frequency Induction Heating. *Przeglad Elektrotechniczny*, **98**(4).
- Chen, M.P., Chen, J.K., Murata, K., Nakahara, M. and Harada, K. (2001). Surge analysis of induction heating power supply with PLL. *IEEE Transactions on power Electronics*, **16**(5): 702-709.
- Cho, S., Liu, H.C., Ahn, H., Lee, J. and Lee, H.W. (2017). Eddy current brake with a two-layer structure: Calculation and characterization of braking performance. *IEEE Transactions on Magnetics*, **53**(11): 1-5.
- Chudjuarjeen, S., Sangswang, A. and Koompai, C. (2010). An improved LLC resonant inverter for induction-heating applications with asymmetrical control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **58**(7): 2915-2925.

- Core, J. S. (2014). Electrical U steel sheets for high-frequency application. *JFE Steel Corporation, Japan, Cat.*
- Dai, Q., Wang, Z. and Mohd Hasan, M. R., (2013). Investigation of induction heating effects on electrically conductive asphalt mastic and asphalt concrete beams through fracture-healing tests. *Construction and Building Materials*, **49**: 729-737.
- Dawson, F. P. and Jain, P. (1991). A comparison of load commutated inverter systems for induction heating and melting applications. *IEEE transactions on power electronics*, **6**(3): 430-441.
- Dede, E. J., Gonzalez, J. V., Linares, J. A., Jordan, J., Ramirez, D. and Rueda, P. (1991). 25-kW/50-kHz generator for induction heating. *IEEE transactions on industrial electronics*, **38**(3): 203-209.
- Dughiero, F., Lupi, S., Nemkov, V. and Siega, P. (1994). Travelling wave inductors for the continuous induction heating of metal strips. *Proceedings of MELECON'94. Mediterranean Electrotechnical Conference*, IEEE.
- Dughiero, F., Lupi, S. and Siega, P. (1995). Analytical calculation of double-side planar travelling wave induction heating systems. *COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*, **14**(4): 251-255.
- Espi-Huerta, J. M., Santamaria, E. J. D. G., Gil, R. G. and Castello-Moreno, J., (2007). Design of the L-LC resonant inverter for induction heating based on its equivalent SRI. *IEEE transactions on industrial electronics*, **54**(6): 3178-3187.
- Esteve, V., Jordan J., Sanchis-Kilders, E., Dede, E. J., Maset, E., Ejea, J. B. and Ferreres, A. (2015). Enhanced pulse-density-modulated power control for high-frequency induction heating inverters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **62**(11): 6905-6914.
- Esteve, V., Sanchis-Kilders, E., Jordán, J., Dede, E. J., Cases, C., Maset, E., Ejea, J. B. and Ferreres, A., (2011). Improving the efficiency of IGBT series-resonant inverters using pulse density modulation. *IEEE transactions on industrial electronics*, **58**(3): 979-987.
- Feynman, R., Leighton, R. and Sands, M., (1964). *The Feynman Lectures on Physics*, Addison Wesley, Reading, Ma. **II**: 17-23.
- Fireteanu, V., Tudorache, T., Geri, A. and Veca, G., (2003). Transverse flux induction heating: comparison between numerical models and experimental validation. *COMPEL-The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering* **22**(1): 98-110.
- Forest, F., Faucher, S., Gaspard, J. Y., Montloup, D., Huselstein, J.J. and Joubert, C., (2007). Frequency-synchronized resonant converters for the supply of

- multiwinding coils in induction cooking appliances. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **54**(1): 441-452.
- Forest, F., Laboure, E., Costa, F. and Gaspard, J. Y. (2000). Principle of a multi-load/single converter system for low power induction heating. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **15**(2): 223-230.
- Fridman, L. and Levant, A. (2002). Sliding mode control in engineering, *Marcel Dekker, Inc.*
- Frogner, K. (2014). Industrial Induction Heating – with a focus on multi coil solutions. Doctoral Thesis (compilation), *Lund University*.
- Frogner, K., Andersson, M., Cedell, T., Siesing, L., Jeppsson, P. and Ståhl, J. E. (2011). Industrial heating using energy efficient induction technology. *44th CIRP Conference on Manufacturing Systems*, 2011.
- Frogner, K., Cedell, T. and Andersson, M., (2014). Induction heating using a two-phase travelling wave setup. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics* **44**(2): 217-226.
- Giuliani, G. (2008). A general law for electromagnetic induction. *Europhysics Letters*, **81**(6): 60002.
- Goldstein, R. (2014). Magnetic flux controllers in induction heating and melting. *ASM Handbook, Volume 4C, Induction Heating and Heat Treatment*, 633-645
- González, A., Norambuena-Contreras, J., Storey, L. and Schlangen, E., (2018). Self-healing properties of recycled asphalt mixtures containing metal waste: An approach through microwave radiation heating. *Journal of Environmental Management*, **214**: 242-251.
- Grajales, L. and Lee, F. C. (1995). Control system design and small-signal analysis of a phase-shift-controlled series-resonant inverter for induction heating. *Proceedings of PESC'95-Power Electronics Specialist Conference*, IEEE.
- Green, A. (1996). Operation of inverters supplying mutually coupled induction heating loads. *IEE Colloquium on Electromagnetics and Induction Heating*, (Digest No: 1996/264), IET.
- Heidari, H., Tavakoli, M. H., Sobhani, S. O. and Honarmandnia, M. (2018). Influence of magnetic flux concentrator on the induction heating process in crystal growth systems-geometry investigation. *CrystEngComm*, **20**(48): 7857-7865.
- Hilzinger, R. and Rodewald, W., (2013). Magnetic materials: fundamentals, products, properties, applications. *Vacuumschmelze Publics*.
- Imbertson, P. and Mohan, N. (1993). Asymmetrical duty cycle permits zero switching loss in PWM circuits with no conduction loss penalty. *IEEE transactions on industry applications*, **29**(1): 121-125.

- Jackson, W. B. (1996). U.S. Patent No. 5,510,600. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office
- Jain, P. K., St-Martin, A. and Edwards, G., (1996). Asymmetrical pulse-width-modulated resonant DC/DC converter topologies. *IEEE transactions on power electronics*, **11**(3): 413-422.
- Kamli, M., Yamamoto, S. and Abe, M. (1996). A 50-150 kHz half-bridge inverter for induction heating applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **43**(1): 163-172.
- Karafil, A., Ozbay, H. and Öncü, S., (2017). Power control of resonant converter MPPT by pulse density modulation. *2017 10th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, IEEE.
- Kawaguchi, Y., Hiraki, E., Tanaka, T., Sadakata, H., Fujita, A., Omori, H. and Nakaoka, M., (2010). A comparative evaluation of DCM control and CCM control for soft-switching PFC converter. *IECON 2010-36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, IEEE.
- Kazimierczuk, M. K. and Czarkowski, D. (1995). Resonant Power Converters, Solutions Manual, *John Wiley & Sons*.
- Kennelly, A. E., Laws, F. A. and Pierce, P. H., (1915). Experimental researches on skin effect in conductors. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, **34**(2): 1953-2021.
- Koertzen, H. W., Van Wyk, J. D. and Ferreira, J. A. (1995). Design of the half-bridge, series resonant converter for induction cooking. *Proceedings of PESC'95-Power Electronics Specialist Conference*, IEEE.
- Komeda, S. and Fujita, H. (2017)., A phase-shift-controlled direct AC-to-AC converter for induction heaters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **33**(5): 4115-4124.
- Komurcugil, H., Bayhan, S. and Abu-Rub, H. (2017). Lyapunov-function based control approach with cascaded PR controllers for single-phase grid-tied LCL-filtered quasi-Z-source inverters. *2017 11th IEEE International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG)*, IEEE.
- Kumar, A., Kumar Sadhu, P., Kumar Mohanta, D. and Bharata Reddy, M. J., (2018). An effective switching algorithm for single phase matrix converter in induction heating applications. *Electronics*, **7**(8): 149.
- Li, F., Li, X., Qin, X. and Rong, Y. K., (2018). Study on the plane induction heating process strengthened by magnetic flux concentrator based on response surface methodology. *Journal of Mechanical Science and Technology*, **32**: 2347-2356.

- Li, G., Sun, K., Huang, L. and Igarashi, S., (2005). RB-IGBT gate drive circuit and its application in two-stage matrix converter. *2005 IEEE Russia Power Tech*, IEEE.
- Li, S. and Deng, X. (2016). The design of phase-locked-loop circuit for precision capacitance micrometer. *MATEC Web of Conferences*, EDP Sciences.
- Liu, K., Fu, C., Wang, H., Wang, F., Xu, P. and Kan, C. (2020). Exploring the energy-saving potential of electromagnetic induction pavement via magnetic concentrating technique. *Energy*, **211**: 118650.
- Lozinskiĭ, M. G. E., (1969). Industrial applications of induction heating, *Pergamon Press*.
- Lu, X., Li, Y., Wu, M., Zuo, J. and Hu, W. (2014). Rail temperature rise characteristics caused by linear eddy current brake of high-speed train. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)* **38**.
- Lucia, O., Almazan, F., Acero, J., Burdio, J. and Carretero, C. (2011). Multiple-output resonant matrix converter for multiple-inductive-load systems. *2011 Twenty-Sixth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, IEEE.
- Lucía, O., Burdío, J., Millán, I., Acero, J. and Llorente, S., (2009). Efficiency optimization of half-bridge series resonant inverter with asymmetrical duty cycle control for domestic induction heating. *2009 13th European Conference on Power Electronics and Applications*, IEEE.
- Lucía, Ó., Burdío, J. M., Barragán, L. A., Acero, J. and Millán, I. (2010). Series-resonant multi inverter for multiple induction heaters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **25**(11): 2860-2868.
- Lucia, O., Burdio, J. M., Millan, I., Acero, J. and Barragan, L. A. (2010). Efficiency-oriented design of ZVS half-bridge series resonant inverter with variable frequency duty cycle control. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **25**(7): 1671-1674.
- Lucia, O., J. Burdio, M., Millan, I., Acero, J. and Puyal, D. (2009). Load-adaptive control algorithm of half-bridge series resonant inverter for domestic induction heating. *IEEE transactions on industrial electronics*, **56**(8): 3106-3116.
- Lucia, O., Maussion, P., Dede, E. J. and Burdío, J. M. (2013). Induction heating technology and its applications: past developments, current technology, and future challenges. *IEEE Transactions on industrial electronics*, **61**(5): 2509-2520.
- Luo, L., Zhai, Q., Li, W., Qian, C. and Liu, H. (2017). Research on an integrated electromagnetic auxiliary disc brake device for motor vehicle. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, **12**(3): 434-439.
- Miodownik, A. (1977). The calculation of magnetic contributions to phase stability. *Calphad*, **1**(2): 133-158.

- Mishima, T., Morinaga, S. and Nakaoka, M. (2017). Single-Stage ZVS-PWM AC-AC Power Converter Using All SiC Power Module for High-Frequency Induction Heating Applications. *Electrical Engineering in Japan*, **201**(3): 69-76.
- Mishima, T., Nakagawa, Y. and Nakaoka, M. (2015). A bridgeless BHB ZVS-PWM AC-AC converter for high-frequency induction heating applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*, **51**(4): 3304-3315.
- Mishima, T., Sakamoto, S. and Ide, C. (2016). ZVS phase-shift PWM-controlled single-stage boost full-bridge AC-AC converter for high-frequency induction heating applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **64**(3): 2054-2061.
- Mohr, G. R. (1994). U.S. Patent No. 5,308,946. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Montes, J. M., Cuevas, F. G., Ternero, F., Astacio, R., Caballero, E. S. and Cintas J. (2017). A method to determine the electrical resistance of a metallic powder mass under compression. *Metals*, **7**(11): 479.
- Moreland, W. (1973). The induction range: Its performance and its development problems. *IEEE Transactions on industry applications*, (1): 81-85.
- Mrozek, K., Muszyński, P. and Poszwa, P. (2020). Application of magnetic concentrator for improvement in rapid temperature cycling technology. *Polymers*, **13**(1): 91.
- Mühlbauer, A. (2008). History of induction heating and melting, *Vulkan-Verlag GmbH*.
- Nagai, S., Nagura, H. and Nakaoka, M. (1992). New load-adaptive variable-frequency high-frequency series-resonant inverter with phase-shifted PWM control strategy for induction-heating power supply. *Memoirs of the Faculty of Engineering, Kobe University;(Japan)* **39**.
- Navarro, D., Luci, Ó., Barragan, L. A., Urriza, I. and Jimenez, O. (2013). High-level synthesis for accelerating the FPGA implementation of computationally demanding control algorithms for power converters. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, **9**(3): 1371-1379.
- Nemkov, V. (2013). Magnetic flux control in induction installations. *Proceedings of the International Conference on Heating by Electromagnetic Sources*, Padua, Italy.
- Nemkov, V. and Goldstein, R. (2007). Increasing inductor life by predicting coil copper temperatures. *Heat Treating Progress*, **7**(6): 44.
- Ngoc, H. P., Fujita, H., Ozaki, K. and Uchida, N. (2009). Dynamic performance of a current-phase control method for zone-control induction heating systems. *2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, IEEE.
- Ngoc, H. P., Fujita, H., Ozaki, K. and Uchida, N. (2011). Phase angle control of high-frequency resonant currents in a multiple inverter system for zone-control induction heating. *IEEE Transactions on power electronics*, **26**(11): 3357-3366.

- Nguyen-Quang, N., Stone, D., Bingham, C. and Foster, M. (2006). Single phase matrix converter for radio frequency induction heating. *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2006. SPEEDAM 2006.*, IEEE.
- Nguyen-Quang, N., Stone, D., Bingham, C. and Foster, M. (2007). Comparison of single-phase matrix converter and H-bridge converter for radio frequency induction heating. *2007 European Conference on Power Electronics and Applications*, IEEE.
- Nguyen, K. L., Caux, S., Keystelyn, X., Pateau, O. and Maussion, P. (2012). Resonant control of multi-phase induction heating systems. *IECON 2012: 38th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Montréal, Canada.
- Nikolov, G. T. and Valchev, V. C. (2009). Nanocrystalline magnetic materials versus ferrites in power electronics. *Procedia Earth and Planetary Science*, **1**(1): 1357-1361.
- Nwosu, E., Ewetumo, T., Arogunjo, A. and Adeyemi, B. (2021). Development of 5 kVA Inductive Heating System. *International Research Journal of Innovations in Engineering and Technology*, **5**(5): 29.
- Okuma, S., Kojima, H., Sasaki, I. and Amemiya, Y. (1983). Cycloconverter system with a high frequency of tank circuit for induction heating. *Electr. Eng. Jpn.(Engl. Transl.)*; United States **103**(6).
- Okuno, A., Hayashi, M., Kawano, H., Yasutsune, H., Hiraki, E. and Nakaoka, M. (1995). Phase-lock loop operated load-resonance inverter using static induction power transistors and its practical characteristic evaluations. *Proceedings IEEE Conference on Industrial Automation and Control Emerging Technology Applications*, IEEE.
- Özbay, H., Karafil, A. and Öncü, S. (2021). Sliding mode PLL-PDM controller for induction heating system. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, **29**(2): 1241-1258.
- Paesa, D., Franco, C., Llorente, S., Lopez-Nicolas, G. and Sagues, C. (2011). Adaptive simmering control for domestic induction cookers. *IEEE Transactions on Industry Applications*, **47**(5): 2257-2267.
- Pham, H. N., Fujita, H., Ozaki, K. and Uchida, N. (2012). Dynamic analysis and control for resonant currents in a zone-control induction heating system. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **28**(3): 1297-1307.
- Raicevic, N. B., Aleksic, S. R., Iatcheva, I. and Barukcic, M. (2020). Enhanced method for pulse skin effect calculation of cylindrical conductors. *COMPEL-The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*.

- Rodriguez, J. I. and Leeb, S. B. (2006). A multilevel inverter topology for inductively coupled power transfer. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **21**(6): 1607-1617.
- Rodriguez, J. I. and Leeb, S. B. (2009). Nonresonant and resonant frequency-selectable induction-heating targets. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **57**(9): 3095-3108.
- Rudnev, V. (2006). Systematic Analysis of Induction Coil Failures, Part 4: Coil Copper Electromagnetic Edge Effect, *Professor Induction Series. Heat Treat. Prog*, 27-28.
- Rudnev, V. (2014). Induction heating of selective regions. *ASM International*, 346 - 358.
- Rudnev, V., Loveless, D. and Cook, R. L. (2017). Handbook of induction heating, *CRC Press*.
- Ruffini, R. S, Ruffini, R. T., and Nemkov, V. (1998). Advanced design of induction heat treating coils-part ii: Magnetic flux concentration and control. *Industrial heating*, **65**(11): 69-72.
- Ruffini, R., Vyshinskaya, N., Nemkov V., Goldstein, R. and Yakey, C. (2013). Innovations in Soft Magnetic Composites and their Applications in Induction Systems. *Proceedings of the 27th Heat Treating Society Conference*.
- Sakimoto, Y., Ishizaka, Y. and Ohno, T. (1988). Induction heating apparatus, U.S. Patent 4 778 971, Oct. 18, 1988
- Salih, A. (2012). IGBT for high performance induction heating applications. *IECON 2012-38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, IEEE.
- Sarnago, H., Lucía, Ó. and Burdio, J. M. (2016). Interleaved resonant boost inverter featuring SiC module for high-performance induction heating. *IEEE transactions on power electronics*, **32**(2): 1018-1029.
- Sarnago, H., Lucia, O., Mediano, A. and Burdio, J. M. (2013). A class-E direct AC–AC converter with multicycle modulation for induction heating systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **61**(5): 2521-2530.
- Sarnago, H., Lucía, O., Mediano, A. and Burdio J. M. (2013). Efficient and cost-effective ZCS direct AC–AC resonant converter for induction heating. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **61**(5): 2546-2555.
- Sarnago, H., Mediano, A. and Lucia, O. (2012). High efficiency AC–AC power electronic converter applied to domestic induction heating. *IEEE transactions on Power Electronics*, **27**(8): 3676-3684.
- Schwerer, F., Jr Spangler, C. and Kelly, J. (1978). Temperature dependence of the magnetic coercivity of pearlite. *Acta Metallurgica*, **26**(4): 579-589.

- Sekine, T., Tomita, H., Obata, S. and Saito, Y. (2009). An induction heating method with traveling magnetic field for long structure metal. *Electrical Engineering in Japan* **168**(4): 32-39.
- Sekine, T., Tomita, H., Saito, Y., Obata, S. and Yoshimura, S. (2007). Induction heating with traveling magnetic field for uniform heating to flat metal. *2007 7th International Conference on Power Electronics and Drive Systems*, IEEE.
- Semiconductor, F. (2000). "Induction Heating System Topology Review."
- Shenkman, A., Axelrod, B. and Berkovich, Y. (2001). Single-switch ac-ac converter with high power factor and soft commutation for induction heating applications. *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, **148**(6): 469-474.
- Stauffer, P. R., Cetas, T. C. and Jones, R. C. (1984). Magnetic induction heating of ferromagnetic implants for inducing localized hyperthermia in deep-seated tumors. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, (2): 235-251.
- Sugimoto, M. (1999). The past, present, and future of ferrites. *Journal of the American Ceramic Society*, **82**(2): 269-280.
- Sugimura, P. Mun H., S., Kwon, S. K., Mishima, T. and Nakaoka, M. (2008). High-frequency resonant matrix converter using one-chip reverse blocking IGBT-based bidirectional switches for induction heating. *2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference*, IEEE.
- Tharmapalan, E., Sivalingam, S., Seyyaf, N. M., Kanagalingam, N., Balasooriya, L. C. and Nissanka, I. D. (2020). Performance Improvement of Industrial Induction Mould Heating Oven. *2020 Moratuwa Engineering Research Conference (MERCon)*, IEEE.
- Tian, J., Berger, G., Reimann, T., Scherf, M. and Petzoldt, J. (2005). A half-bridge series resonant inverter for induction cookers using a novel FPGA-based control strategy. *2005 European Conference on Power Electronics and Applications*, IEEE.
- Tomita, H., Sekine, T. and Obata, S. (2005). Induction heating using traveling magnetic field and three-phase high-frequency inverter. *2005 European Conference on Power Electronics and Applications*, IEEE.
- Topcan, H. C. (2019).** *Enerji yönetimi ve enerji etütleri*. Dünya Enerji Konseyi. <https://www.dunyaenerji.org.tr/wp-content/uploads/2019/11/7Kas%C4%B1m2019Sunum.pdf>. [Ziyaret Tarihi: 13.12.2024]
- Vishnuram, P., Ramachandiran, G., Ramasamy, S. and Dayalan, S. (2020). A comprehensive overview of power converter topologies for induction heating applications. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, **30**(10): e12554.

- Vishnuram, P., Ramachandiran, G., Sudhakar Babu, T. and Nastasi, B. (2021). Induction heating in domestic cooking and industrial melting applications: a systematic review on modelling, converter topologies and control schemes. *Energies*, **14**(20): 6634.
- Wen, H., Zhang, X., Ye, H. and Han, Y. (2021). Research on the mechanism of magnetic flux concentrator in the gap-to-gap induction heating of wind power gear. *International Journal of Thermal Sciences*, **168**: 107055.
- Williams, B. (2013). Power Electronics Principles and Elements, *Barry W. Williams*.
- Yaylacı, E. K. (2018). Sensorless double integral sliding mode MPPT control for the WECS. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, **10**(2).
- Zeng, S. (2012). The application design and study of phase-locked loop CD4046." *Electronics Quality*, **1**: 25-72.
- Zhang, K. and Pu, J. (2014). Low power consumption phase-locked loop 4046 applied research and simulation. *Poplar Science & Technology*, **6**: 124-126.
- Zhou, Y., Matsubara, I., Shin, W., Izu, N. and Murayama, N. (2004). Effect of grain size on electric resistivity and thermopower of (Ca 2.6 Bi 0.4) Co 4 O 9 thin films. *Journal of applied physics*, **95**(2): 625-628.