Bir Ev Tipi İndüksiyonlu Ocağın Soğutma Sisteminin Deneysel ve Sayısal Yöntemlerle Tasarımı

Ayberk Salim MAYIL

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak 2026

Design of the Cooling System of a Household Induction Cooktop Using Experimental and Numerical Methods

Ayberk Salim MAYIL

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Mechanical Engineering

January 2026

Bir Ev Tipi İndüksiyonlu Ocağın Soğutma Sisteminin Deneysel ve Sayısal Yöntemlerle Tasarımı

Ayberk Salim MAYIL

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği Uyarınca

Makine Mühendisliği

Enerji-Termodinamik Bilim Dalında

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Çisil TİMURALP

January 2026

ONAY

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Ayberk Salim MAYIL'ın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı "Bir Ev Tipi İndüksiyonlu Ocağın Soğutma Sisteminin Deneysel ve Sayısal Yöntemlerle Tasarımı" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Çisil TİMURALP
İkinci Danışman : -

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye: Prof. Dr. Haydar ARAS

Üye: Prof. Dr. Hasan YAMIK

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Çisil TİMURALP

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ……..…….. tarih ve ……..…… sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Fatma TÜMSEK

Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Dr. Öğretim Üyesi Çisil TİMURALP danışmanlığında hazırlamış olduğum “Bir Ev Tipi İndüksiyonlu Ocağın Soğutma Sisteminin Deneysel ve Sayısal Yöntemlerle Tasarımı” başlıklı YÜKSEK LİSANS tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 07/01/2026

Ayberk Salim MAYIL

T.C.
ESKİŞEHİR OSMANGAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ÜRETKEN YAPAY ZEKÂ KULLANIMI BEYAN FORMU

Bu tezi/projeyi hazırlarken aşağıdaki Üretken Yapay Zekâ (ÜYZ) araçlarından destek aldığımı beyan ederim:

Aşağıdaki ÜYZ araçlarını kullandım. (Birden fazla seçenek işaretlenebilir)

☐ Claude
X ChatGPT
☐ DeepSeek
☐ Gemini
☐ Copilot
☐ Diğer (Belirtiniz): .....

ÜYZ araçlarını tezimin/projemin aşağıdaki aşamalarında ilgili amaçlar için kullandım. (Birden fazla seçenek işaretlenebilir):

☐ Metin oluşturma
X Literatür tarama
☐ Çeviri
X Düzenleme/dil kontrolü
☐ Veri işleme ve analizi
☐ Veri görselleştirme
☐ Görüntü üretme
☐ Kaynakça düzenleme
☐ Diğer (Belirtiniz): .....

Bu çalışmada ÜYZ kullanımı ***Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Faaliyetlerinde Üretken Yapay Zekâ Kullanımına Dair Etik Rehber***'e ve akademik dürüstlük ilkelerine uygun şekilde gerçekleştirilmiş olup ÜYZ araçlarından alınan destek etik kurallar ve kaynak gösterme esaslarına uygun biçimde belirtilmiştir.

ÜYZ araçlarının sağladığı bilgilerin doğruluğunu kontrol ettiğimi, yanlış veya eksik bilgi bulunması halinde tüm sorumluluğun tarafıma ait olduğunu; ayrıca çalışmamla ilgili bu beyana aykırı bir durumun herhangi bir zamanda tespit edilmesi durumunda ortaya çıkabilecek akademik ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi beyan ederim.

503720230039

Ayberk Salim MAYIL

23/02/2026

(İmza)

ÖZET

Bu tez çalışmasında, indüksiyonlu ocaklarda elektronik bileşenlerin güvenli ve verimli çalışması için soğutma sistemleri deneysel ve sayısal yöntemlerle incelenmiştir. Fan–ısı yutucu kombinasyonlarının hava akışı ve ısıl performansa etkileri değerlendirilmiş, DOE destekli deneyler ANOVA ve Pareto analizleriyle yorumlanarak en baskın etkinin ısı yutucu konumlandırması olduğu belirlenmiştir. Yapılan belirsizlik analizi ise deneysel sonuçların %8,55 bağıl belirsizlikle güvenilir olduğunu göstermiştir.

Sayısal bölümde Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemi kullanılarak akış ve ısı transferi analizleri gerçekleştirilmiştir. FloEFD yazılımında geliştirilen modellerde fan, üretici tarafından sağlanan P–Q eğrisi ile temsil edilmiş ve k–ε türbülans modeli kullanılarak çözüm yapılmıştır. Sayısal ve deneysel veriler karşılaştırıldığında güçlü bir uyum sağlanmış, Z-skoru analizleri farkların belirsizlik sınırları içerisinde kaldığını göstermiştir. Isıl analizlerde, farklı ısı yutucu tiplerinin IGBT modüllerinin yüzey sıcaklıklarını farklı seviyelerde düşürdüğü görülmüş, tüm konfigürasyonlarda sıcaklık değerlerinin güç elektroniğinde güvenli kabul edilen 125–150 °C sınırlarının altında olduğu belirlenmiştir.

Sonuçlar, indüksiyonlu ocakların termal tasarımında ısı yutucu geometrisinin, konumlandırmasının ve entegrasyonunun kritik öneme sahip olduğunu göstermiştir. Ayrıca deneysel ve sayısal yöntemlerin birlikte kullanılması, benzer güç elektroniği içeren ev aletleri için uygulanabilir ve güvenilir bir tasarım metodolojisi sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: İndüksiyonlu ocak, Isı yutucu, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD), Deney tasarımı (DOE), FloED

SUMMARY

In this thesis, the cooling systems of induction cooktops, which are essential for ensuring the safe and efficient operation of electronic components, were comprehensively investigated. The primary aim of the study was to evaluate the effects of fan–heatsink combinations on airflow and thermal performance through both experimental and numerical methods, and to define the optimal design criteria.

In the experimental part, different types of heatsinks were tested, and airflow velocities were measured using an anemometer. The measurement procedure was optimized through a Design of Experiments (DoE) approach. The results were analyzed using ANOVA and Pareto charts, revealing that the dominant factor affecting airflow was the heatsink position. Furthermore, an uncertainty analysis was conducted, confirming the reliability of the experimental data with a relative uncertainty level of 8.55%.

In the numerical part, Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations were carried out to analyze the airflow and heat transfer characteristics. The models were developed using FloEFD software, where the fan was represented by its manufacturer-provided P–Q curve, and the k–ε turbulence model was applied. A strong agreement was found between experimental and numerical results, as Z-score analysis showed that the deviations were within the uncertainty limits. Thermal analyses demonstrated that different heatsink types reduced the surface temperatures of IGBT modules to varying extents, while all configurations maintained the temperatures below the critical range of 125–150 °C, which is considered safe for power electronic components.

The results showed that heatsink geometry, positioning, and integration are critical in the thermal design of induction cooktops. Moreover, combining experimental and numerical approaches offers a reliable methodology applicable to other power-electronics-based household appliances

Keywords: Induction cooktops, Heatsink, Computational Fluid Dynamics (CFD), Design of experiment (DOE), FloEFD

TEŞEKKÜR

Bu yüksek lisans tezimin ilk paragrafını, hayatın her alanında varlıklarıyla mücadele, emek ve fedakârlığın simgesi olan kadınlara ithaf ediyorum. Bu teşekkür, emeği, sevgisi ve vicdanıyla çevresine ışık saçan TÜM kadınlara bir minnettarlığımın ifadesidir.

Bu tezin yazılması sırasında hiçbir desteği esirgemeyen tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Çisil TİMURALP'e teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her anında yanımda olan, en büyük destekçim, yol ve hayat arkadaşım Eda KARABULUT MAYIL'a teşekkürlerimi sunarım.

Türlü mücadelelerle eğitim hayatımın baş mimarı olan, bana belki yardımı olur diye Bilgisayar Programcılığı'nda bölüm derecesi yapan, muhteşem kadın Gönül MAYIL'a, benim felsefi, ahlaki ve milli duygularımın inşasında başrol olan filozof babam Levent MAYIL'a teşekkürürü ve minnettarlığımı bir borç bilirim.

Yüksek lisans öğrenimim sırasında bana tüm imkanları sağlayan müdürüm Tuba ANIK'a, hem takım liderim, hem manevi abim olan Nurhan VATANSEVER'e, dert ortağım Burcu KARA ER'e, pişiricilere fısıldayan adam Can UĞURELLİ'ye, tecrübelerini her daim paylaşan Berkent PARİM'e, benimle türlü göğüs geren Muharrem KEYFOĞLU'na, indüksiyonlu ocaklardaki çalışmalara beraber imza attığımız üstadım, tasarım hocam Ergin KAPLAN'a ve Haier Europe Pişrici Ar-Ge ailesine teşekkür ederim.

Her türlü derin ve kavramsal dünyasıyla bana yön vermiş olan ODTÜ'lü kardeşim Barış MORCA'ya teşekkürlerimi sunarım.

İş hayatımın başlamasında rol oynamış, hayatıma yön veren Esra&Serkan DOĞANAY'a ve değerli hocam Prof. Dr. Alpaslan TURGUT'a teşekkür ederim.

Değerli tecrübelerini benimle her daim paylaşan, mühendisliğimin ilk mentörü, müdürüm Mehmet Ali ACAR'a teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET ..... **vii**

SUMMARY ..... **viii**

TEŞEKKÜR ..... **ix**

İÇİNDEKİLER ..... **x**

ŞEKİLLER DİZİNİ ..... **xi**

ÇİZELGELER DİZİNİ ..... **xii**

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ ..... **xiii**

1. GİRİŞ VE AMAÇ **1**

2. GENEL BİLGİLER **4**

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI **15**

4. MATERYAL VE YÖNTEM **27**

4.1. İndüksiyonlu Ocakların Çalışma Prensibi 27

4.2. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği 30

4.2.1. Temel Denklemler 31

4.2.1. Türbülans Modelleme 32

4.3. Deneysel – İstatistiksel – Nümerik Çalışmalar 33

4.3.1. Alt-Sistem Tasarımı 34

4.3.2. Tüm-Sistem Tasarımı 41

5. BULGULAR VE TARTIŞMA **43**

5.1. Alt-Tasarım Sonuçları 43

5.2. Tüm-Tasarım Sonuçları 53

6. SONUÇ VE ÖNERİLER **54**

KAYNAKLAR DİZİNİ **56**

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil **Sayfa**

2.1. JP2021166120A numaralı Mitsubishi Electric Corp. patenti. 8
2.2. JP2016162703A numaralı Hitachi Appliances Inc. Patenti. ……10
2.3. 2021/021325 numaralı BSH Ev Aletleri Sanayi ve Ticaret A.Ş.'ye ait patent başvurusu. 11
2.4. EP2746672B1 numaralı Groupe Brandt'a ait patent. 12
2.5. EP EP2498577B1 numaralı BSH Hausgeräte GmbH'ye ait patent. 13
2.6. EP2127477B1 numaralı LG Electronics Inc.'e ait patent. 14
3.1. Dünyada 2011 yılı birincil enerji kullanımı. (Şenel, (2013)) 15
3.2. 2016 Dünya genelinde birincil enerji tüketiminin sektörel olarak dağılımı. (Koç vd., (2018) ……..18
4.1. İndüksiyonlu ocak çalışması blok şeması. (Çetin,2005) 27
4.2. Basitleştirilmiş ocak modeli 35
4.3. Isı kuyusu alternatif tasarımları. 35
4.4. Isı kuyusu pozisyonları. 37
4.5. Prob ölçüm noktaları. 38
4.6. Fan basınç-debi eğrisi. 38
4.7. İndüksiyonlu ocak alt gövde grubu. 42
4.8. İndüksiyonlu bobin yerleşimi. 42
4.9. Ankastre indüksiyonlu ocak modeli. 42
5.1. Pareto etki sonuçları. 45
5.2. Ana etki sonuçları. 45
5.3. Tip 1 ısı kuyusu ölçüm sonuçları. 47
5.4. Tip 2 ısı kuyusu ölçüm sonuçları. 48
5.5. Tip 3 ısı kuyusu ölçüm sonuçları. 48
5.6. IGBT 1 Yüzey sıcaklığı sonuçları. 52
5.7. IGBT 2 Yüzey sıcaklığı sonuçları. 52
5.8. Tüm-Tasarım HAD analizi sonuçları. 53

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge **Sayfa**

3.1. Türkiye'nin Beyaz Eşya Üretimi. (Özözen, 2024) 19
4.1. Tam faktöriyel deney tasarımı. 36
4.2. HAD modeli malzeme özellikleri. 39
4.3. HAD modeli güç girdileri. 42
4.4. HAD modeli malzeme özellikleri. 43
5.1. Deney tasarımı ölçüm sonuçları. 44
5.2. Tip 1 HAD ve Deneysel ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması. 49
5.3. Tip 2 HAD ve Deneysel ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması. 50
5.4. Tip 3 HAD ve Deneysel ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması. 50

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	**Açıklama**
°C	Santigrat derece

Kısaltmalar	**Açıklama**
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
AC	Alternatif Akım
IGBT	Isolated Gate BiPolar Transistor
GW	Gigawatt
TEP	Ton Eşdeğer Petrol
RCA	Karşılaştırmalı Rekabet Analizi
cm	Santimetre
mm	Milimetre
m	Metre
Vd.	Ve diğerleri
TBI	Ticaret Denge İndeksi
AB	Avrupa Birliği
SHY	Sonlu Hacimler Yöntemi
RANS	Reynolds Averaged Navier-Stokes
ANOVA	Varyans Analizi
3D	3 Boyut

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Enerji, günümüz dünyasında ekonomik kalkınma, sosyal refah ve yaşam standartlarının temel belirleyicilerinden biridir. Nüfus artışı, sanayileşme ve şehirleşme ile birlikte enerji talebi sürekli yükselmekte, bu da enerji kaynaklarının kullanımını ve yönetimini küresel düzeyde stratejik bir konu haline getirmektedir. Dünyada enerji tüketiminin büyük bir bölümü hâlâ fosil yakıtlardan karşılanmakta, buna bağlı olarak da çevresel etkiler ve karbon salınımları küresel ölçekte ciddi sorunlara yol açmaktadır. Son yıllarda yenilenebilir enerji yatırımlarındaki artış, enerji verimliliği çalışmaları ve sürdürülebilirlik hedefleri, enerji politikalarının şekillenmesinde önemli bir rol üstlenmiştir. Türkiye özelinde de enerji talebi ekonomik büyüme ve nüfus artışıyla birlikte artış göstermekte, bu da enerji verimliliği ve yerli üretim stratejilerini ön plana çıkarmaktadır. Özellikle sanayi sektöründe kullanılan enerji miktarı, toplam enerji tüketiminin büyük bir bölümünü oluşturmaktadır ve bu nedenle verimli teknolojilerin geliştirilmesi ülke ekonomisi açısından kritik öneme sahiptir (Koç vd., 2013, Koç vd., 2018).

Beyaz eşya sektörü, enerji tüketiminde önemli bir paya sahip olan imalat sektörlerinden biridir. Türkiye, Avrupa'nın en büyük ikinci beyaz eşya üreticisi konumunda olup, bu alanda elde edilen başarı büyük ölçüde Ar-Ge yatırımları ve modern üretim teknolojilerine dayanmaktadır. Beyaz eşya sektörü; buzdolabı, çamaşır makinesi, bulaşık makinesi, fırın ve ocak gibi ürün gruplarını kapsamakta, hane halkı enerji tüketiminde doğrudan etkili olmaktadır. Özellikle pişirici ürün grubu, hem günlük yaşamda en sık kullanılan cihazlardan biri olması hem de farklı enerji kaynaklarını (gaz, elektrik, indüksiyon) kullanabilmesi açısından dikkat çekici bir konuma sahiptir.

Pişiriciler içerisinde ocaklar, mutfak kültürünün merkezinde yer almakta ve farklı enerji türlerinin verimlilik açısından karşılaştırılmasına olanak tanımaktadır. Gazlı ocaklar uzun yıllar boyunca yaygın olarak kullanılmıştır; ancak enerji verimliliği ve güvenlik açısından sınırlılıkları mevcuttur. Elektrikli ocaklar (vitroseramik) kullanımı kolaylaştırsa da ısı iletimi cam yüzey üzerinden gerçekleştiği için yüksek enerji kayıpları söz konusudur.

Bu noktada indüksiyonlu ocaklar, doğrudan tencere ve tavayı elektromanyetik alan aracılığıyla ısıtması sayesinde önemli bir avantaj sağlamaktadır. Yapılan çalışmalar, indüksiyonlu ocakların hem pişirme süresini kısalttığını hem de enerji tüketimini belirgin biçimde azalttığını göstermektedir. Ayrıca kullanıcı güvenliği açısından yüzeyin nispeten daha düşük sıcaklıklarda kalması, bu teknolojinin tercih edilme nedenlerinden biridir.

İndüksiyonlu ocakların çalışma prensibi, alternatif akımın bobin üzerinden geçirilmesiyle elektromanyetik alan oluşturulması ve bu alanın ferromanyetik tabanlı tencerelerde girdap akımları üretmesi esasına dayanmaktadır. Bu yöntemle ısıl enerji doğrudan tencere tabanında oluşur ve ısı iletimi hızlı, kontrollü ve verimli bir şekilde sağlanır. Ancak bu yüksek akım ve elektromanyetik indüksiyon süreci sırasında elektronik bileşenlerde kayda değer bir ısınma meydana gelir. Özellikle güç elektroniği kartları, bobinler ve yarı iletken bileşenler, sürekli yüksek sıcaklığa maruz kaldıklarında performans kaybı ve arıza riskleriyle karşı karşıya kalmaktadır. Bu nedenle indüksiyonlu ocakların uzun ömürlü, güvenilir ve yüksek performanslı çalışabilmesi için etkin bir soğutma sistemine ihtiyaç duyulmaktadır.

Soğutma sistemleri, genellikle fan ve soğutucu yüzey kombinasyonlarıyla tasarlanmaktadır. Ancak fan-heatsink sistemlerinin geometrisi, malzeme özellikleri ve yerleşimi doğrudan hava akışını ve ısı transferini etkilemektedir. Dolayısıyla, bu sistemlerin optimize edilmesi yalnızca elektronik bileşenlerin ömrünü uzatmakla kalmaz, aynı zamanda ürünün genel enerji verimliliğini de artırır. Günümüzde indüksiyonlu ocak tasarımlarında fan seçimi, kanal yapısı ve soğutucu tasarımı üzerine yapılan iyileştirmeler, ürün performansında belirleyici faktörler olarak öne çıkmaktadır.

Bu noktada hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yöntemleri, tasarım sürecinde önemli bir araç haline gelmiştir. HAD analizleri sayesinde farklı soğutma stratejileri sanal ortamda test edilebilmekte, hava debisi, basınç kayıpları, sıcaklık dağılımı ve türbülans etkileri ayrıntılı şekilde incelenebilmektedir. Böylece prototip üretimine gerek kalmadan en uygun tasarımın belirlenmesi mümkün olmaktadır.

Bu tez çalışması, öncelikle dünyada ve Türkiye'de enerji tüketiminin genel görünümünü ortaya koyarak başlamakta, ardından beyaz eşya sektörünün enerji tüketimi

içindeki payını ve bu bağlamda pişirici grubunun önemini vurgulamaktadır. Bu çerçevede gazlı, elektrikli (vitroseramik) ve indüksiyonlu ocakların karşılaştırılması yapılacak, indüksiyonlu ocakların enerji verimliliği, pişirme performansı ve güvenlik açısından sunduğu avantajlar detaylandırılacaktır. Daha sonra indüksiyonlu ocakların elektromanyetik indüksiyon esasına dayalı çalışma prensibi açıklanacak ve bu teknolojinin sürdürülebilir performansı için kritik öneme sahip olan soğutma sistemleri ele alınacaktır. Soğutma sistemleri bağlamında, bu tezde öncelikle farklı heatsink konfigürasyonlarının performansını değerlendirmek üzere hem sayısal analizler hem de deneysel ölçümler gerçekleştirilecektir. Heatsink seçimi tamamlandıktan sonra, fan ile birlikte çalışacak heatsink-fan kombinasyonunun etkinliği incelenecek ve elektronik bileşenlerin güvenli sıcaklık sınırları içinde kalabilmesi için en uygun çözüm belirlenmeye çalışılacaktır. İkinci aşamada, indüksiyonlu ocak içindeki hava akışının homojenleştirilmesine yönelik HAD analizleri yapılacak ve tasarım üzerinde iyileştirmeler gerçekleştirilecektir. Ardından, tüm ocağın üç boyutlu sayısal modeli oluşturularak deneysel verilerle doğrulama (validasyon) yapılacak, bu sayede modelin güvenilirliği teyit edilecektir. Son aşamada ise elde edilen bulgular ışığında ocak içi termal tasarımın bütüncül bir şekilde optimize edilmesi hedeflenecektir. Bu süreçte sayısal analizler için FloEFD 2021 paket programı kullanılacak, elde edilen sonuçların istatistiksel olarak değerlendirilmesi ve optimizasyon adımlarının planlanması için ise Minitab yazılımından yararlanılacaktır. Böylelikle hem mühendislik bakış açısıyla sistematik bir tasarım süreci kurgulanacak hem de elde edilen sonuçların istatistiksel güvenilirliği sağlanacaktır.

Sonuç olarak, bu tez çalışması indüksiyonlu ocaklarda soğutma sisteminin tasarımı ve iyileştirilmesi için deneysel ve sayısal yöntemleri bütünleştiren kapsamlı bir yaklaşım ortaya koymaktadır. Çalışmanın çıktıları, yalnızca akademik literatüre katkı sağlamakla kalmayacak, aynı zamanda endüstride enerji verimliliği yüksek, güvenilir ve sürdürülebilir pişirici cihazların geliştirilmesine yönelik somut bir metodoloji sunacaktır.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. İndüksiyonlu Ocakların Çalışma Prensibi

İndüksiyonlu ocaklar, geleneksel gazlı ve elektrikli ocaklardan farklı olarak, ısının doğrudan tencere veya tava tabanında üretilmesini sağlayan elektromanyetik indüksiyon prensibine dayanır. Sistemin temelinde, cam seramik yüzeyin altında yer alan bakır telden sarılmış bobinler bulunur. Bu bobinlerden alternatif akım geçirilmesiyle birlikte yüksek frekanslı bir manyetik alan oluşturulur. Söz konusu manyetik alan, ferromanyetik tabana sahip bir tencere veya tava ile etkileşime girerek girdap akımları (eddy currents) üretir. Girdap akımlarının oluşturduğu Joule ısısı, doğrudan tencere tabanında ortaya çıkar ve böylelikle pişirme süreci başlar. Bu yöntemde ısı kaynağı doğrudan ocak yüzeyinde değil, kabın içinde oluşturulduğu için, enerji kayıpları minimuma iner. Yapılan ölçümlerde gazlı ocaklarda enerji verimliliği yaklaşık %40 seviyelerinde kalırken, elektrikli radyan ocaklarda %70 civarındadır; indüksiyonlu ocaklarda ise bu oran %84–90 aralığına kadar ulaşabilmektedir. Bu da indüksiyonlu ocakları enerji verimliliği açısından en gelişmiş pişirme teknolojilerinden biri haline getirmektedir. Çalışma prensibinin bir diğer önemli yönü de güvenliktir. İndüksiyonlu ocak yüzeyinde doğrudan ısı üretilmediği için, yüzey sıcaklığı görece düşük kalır ve sadece uygun malzemeden yapılmış tencere veya tava yerleştirildiğinde ısıl enerji açığa çıkar. Bu özellik, kullanıcı açısından hem güvenli hem de konforlu bir kullanım imkânı sunar. Ayrıca ocakların elektronik kontrol sistemleri, tencere algılama, boşta çalışmayı önleme, taşma ve aşırı ısınmaya karşı koruma gibi ileri fonksiyonlarla desteklenmektedir. Bununla birlikte, indüksiyonlu ocakların bu yüksek performansı, güç elektroniği bileşenlerinin sürekli yüksek akım ve frekanslarda çalışmasını gerektirir. Bobinler, yarı iletken anahtarlama elemanları, güç kartları ve kontrol devreleri, elektromanyetik alan üretimi sırasında yoğun ısıl yüke maruz kalır. Bu nedenle, elektronik bileşenlerin güvenilirliğini ve ürünün ömrünü belirleyen kritik faktörlerden biri etkin soğutma sisteminin tasarımıdır. Fanlar ve ısı yutucular aracılığıyla sağlanan hava akışı, bileşenlerin sıcaklığını güvenli sınırlar içinde tutarak sistemin sürekli ve kararlı çalışmasına imkân tanır.

Sonuç olarak, indüksiyonlu ocakların çalışma prensibi, elektromanyetik indüksiyon yoluyla doğrudan kabın tabanında ısı üretilmesi esasına dayanır. Bu teknoloji, enerji verimliliği, güvenlik ve pişirme hızında sağladığı üstünlüklerle öne çıkarken; elektronik bileşenlerin termal yönetimi, tasarım sürecinde mutlaka ele alınması gereken en kritik konulardan biri olarak ortaya çıkmaktadır.

2.2. İndüksiyonlu Ocak Bileşenleri

Bir indüksiyonlu ocak, elektromanyetik indüksiyon prensibiyle doğrudan pişirme kabını ısıtan bir sistemdir. Bu sistemin doğru, güvenilir ve verimli çalışabilmesi için birbirini tamamlayan çeşitli elektronik, mekanik ve yapısal bileşenlerden oluşur. İndüksiyonlu ocakların bu çok bileşenli yapısı, her bir parçanın tasarım ve optimizasyonunu stratejik bir mühendislik konusu haline getirmektedir. Güç kartlarının güvenilirliği, bobinlerin elektromanyetik performansı, soğutma grubunun termal yönetimi veya cam yüzeyin kullanıcı deneyimine katkısı, cihazın bütünsel başarısını doğrudan belirlemektedir. Bu nedenle üretici firmalar, yalnızca mühendislik çözümleri geliştirmekle kalmamakta, aynı zamanda fikri mülkiyet stratejileri kapsamında her bir yenilikçi detayı patent altına alarak rekabet avantajı sağlamaya çalışmaktadır. Özellikle bobin yapısı, fan-kanal düzeni, soğutucu konfigürasyonu veya tencere algılama algoritmaları gibi konularda yapılan patent başvuruları hem teknoloji geliştirme sürecini hem de sektörün gelecekteki yönelimlerini anlamak açısından büyük önem taşımaktadır. Dolayısıyla, indüksiyonlu ocaklarda bileşenlerin görevlerini ve önemini ortaya koyduktan sonra, bu alandaki patentlerin incelenmesi, mevcut teknolojilerin sınırlarını görmek ve yenilikçi çözümleri değerlendirmek açısından kritik bir aşamadır.

2.2.1. Evirici Güç Kartı

İndüksiyonlu ocakların kalbinde yer alan güç elektroniği kartları, şebekeden gelen alternatif akımı (AC) yüksek frekanslı alternatif akıma dönüştürerek bobinlerin manyetik alan üretmesini sağlar. Genellikle yarım köprülü rezonans evirici topolojisi kullanılır ve bu kartlar, IGBT gibi yarı iletken anahtarlama elemanları içerir. Güç kartları aynı zamanda

pişirme kademelerinin hassas kontrolünden, verimli enerji dönüşümünden ve aşırı akım/ısınma gibi güvenlik fonksiyonlarından sorumludur.

2.2.2. Filtre Kartı

Elektrik şebekesi ile cihaz arasında konumlandırılan filtre kartları, elektromanyetik girişim ve parazitlerin bastırılmasını sağlar. Bu sayede hem cihazın kendi elektronik bileşenleri korunur hem de çevredeki diğer cihazların olumsuz etkilenmesi engellenir. Filtre kartları, uluslararası standartlara uyum açısından kritik bir rol üstlenir.

2.2.3. Soğutucu Grubu

İndüksiyonlu ocak çalışırken, özellikle güç kartları ve bobinlerde önemli miktarda ısı açığa çıkar. Bu ısının güvenli seviyelerde tutulması için fanlar ve alüminyum soğutucu yüzeyler (ısı kuyusu) kullanılır. Fan, devre kartlarına ve bobinlere taze hava akışı sağlar, ısı kuyusu ise geniş yüzey alanı ile ısının hızlıca uzaklaştırılmasını mümkün kılar. Soğutma grubu, elektronik bileşenlerin ömrünü uzatmak ve cihazın kararlı çalışmasını garanti etmek açısından kritik öneme sahiptir.

2.2.4. Bobin Taşıyıcılar

Bobinlerin cam yüzeyin altına sabitlenebilmesi için kullanılan taşıyıcı kısımlar, genellikle plastik veya metal malzemeden üretilir. Bu parçalar, bobinlerin mekanik olarak doğru konumda durmasını sağlar. Bobin taşıyıcı tasarımı hem montaj kolaylığı hem de ocak ısıtma verimliliği açısından kritik öneme sahiptir.

2.2.5. İndüksiyon Bobinleri

İndüksiyonlu ocağın en kritik bileşenlerinden biridir. Bakır telden sarılmış bobinler, yüksek frekanslı akım ile manyetik alan üretir ve pişirme kabının tabanında girdap akımlarının oluşmasını sağlar. Bobinlerin sarım şekli, tel tipi ve ferit çekirdek yapısı, verimliliği doğrudan etkiler. Ayrıca bobinlerin konumu ve çapı, pişirme alanının büyüklüğünü ve esnekliğini belirler.

2.2.6. Cam Yüzey

Kullanıcının doğrudan temas ettiği bu yüzey hem estetik hem de fonksiyonel bir bileşendir. Cam seramik malzeme, yüksek sıcaklığa dayanıklı, kolay temizlenebilir ve elektromanyetik alanın verimli iletilmesine imkân tanıyacak şekilde tasarlanmıştır. Cam yüzey aynı zamanda dokunmatik kontrol panellerinin yerleştirildiği alandır ve kullanıcı arayüzünün temelini oluşturur.

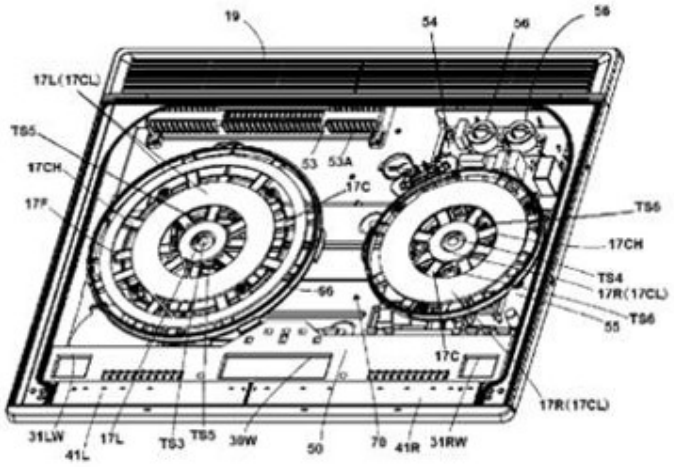
2.2.7. Kontrol ve Arayüz Modülleri

Kullanıcının cihazla etkileşimini sağlayan elektronik modüller, genellikle dokunmatik panel ve mikro denetleyicilerden oluşur. Güç seviyelerinin ayarlanması, güvenlik fonksiyonlarının devreye alınması, pişirme süresinin kontrol edilmesi gibi görevler bu modüller tarafından yürütülür. Günümüzde akıllı arayüzler ve yazılımlar, indüksiyonlu ocakların farklı pişirme senaryolarına adapte olmasına da olanak vermektedir.

2.3. İndüksiyonlu Ocakların Patent İncelemesi

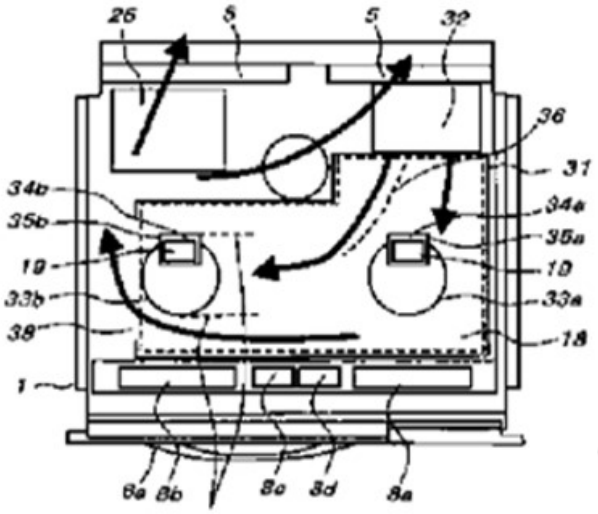
Şekil 2.1.'de gösterilen JP2021166120A numaralı Mitsubishi Electric Corp. patenti (Hoshinho vd., 2021), indüksiyonlu ocaklarda kullanılan soğutma sistemine yönelik bir yenilik sunmaktadır. Patent, özellikle evirici güç devre kartının aşırı ısınmasını önlemek,

bobin montaj alanındaki kalınlığı azaltmak ve ankastre mutfak mobilyalarına daha kolay entegre edilebilecek kompakt bir yapı oluşturmak amacıyla geliştirilmiştir. İndüksiyonlu ocaklarda yüksek güçlü akımlar nedeniyle evirici güç devre kartı ve bobin bölgesinde önemli sıcaklık artışları meydana gelmekte, bu durum hem elektronik bileşenlerin güvenilirliğini azaltmakta hem de ürün ömrünü kısaltmaktadır. Geleneksel tasarımlarda kullanılan tek kanallı hava akışları ise soğutmanın homojenliğini sağlayamamakta, bazı bölgelerde aşırı ısınma, bazı bölgelerde ise yetersiz soğutma gibi sorunlar ortaya çıkarmaktadır. Patent bu teknik sorunlara çift fanlı ve çok yönlü hava kanalı tasarımı ile çözüm getirmektedir. İlk fan çalıştığında alt kısımdan hava emilerek birinci hava kanalına yönlendirilmekte ve evirici güç devresine doğru akış sağlanmaktadır. İkinci fan devreye girdiğinde farklı bir hava girişinden emiş yaparak aynı kanala soğutma havası göndermekte, böylece tek kanal içinde iki fan akışı birleşmektedir. İlk fanın kanat yapısı saat yönünün tersine dönerek havayı girdaplı bir biçimde evirici güç devresine yönlendirmekte ve bu sayede kart üzerinde homojen bir soğutma gerçekleşmektedir. Bu düzen, hem hava akışının sürekliliğini sağlayarak soğutma performansını artırmakta hem de bobin montaj yüksekliğini azaltarak cihazın daha ince ve kompakt hale gelmesine katkıda bulunmaktadır. Sonuç olarak patent, indüksiyonlu ocaklarda elektronik bileşenlerin ömrünü uzatan, termal kararlılığı artıran ve ankastre tasarımlar için daha esnek çözümler sunan yenilikçi bir soğutma mimarisi ortaya koymaktadır.



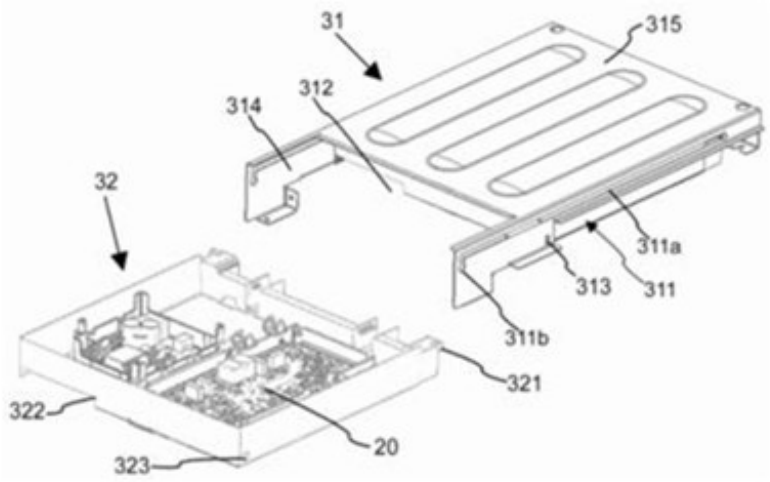
Şekil 2.1. JP2021166120A numaralı Mitsubishi Electric Corp. patenti (Hoshinho vd., 2021).

Şekil 2.2.'de gösterilen JP2016162703A numaralı Hitachi Appliances Inc. Patenti (Arakane, 2016), indüksiyonlu ocaklarda hem ızgara fonksiyonuna sahip tasarımların daha esnek bir şekilde yerleştirilebilmesini hem de kullanılan fanların gürültü seviyesinin azaltılmasını amaçlamaktadır. İndüksiyonlu ocaklara eklenen ızgara bölmesi, cihazın merkezinde veya farklı konumlarda yerleştirildiğinde hava akışının homojenliği ve soğutma performansı sorun yaratabilmektedir. Ayrıca bu tip tasarımlarda kullanılan fanlar, evirici güç devresini, bobinleri ve ızgarayı aynı anda soğutmak zorunda olduğundan, yüksek devirde çalışarak istenmeyen gürültü oluşturabilmektedir. Patent bu teknik sorunlara, özel bir hava akış kanalı düzeniyle çözüm getirmektedir. Tasarımda, bobin ve ızgaranın altına konumlandırılan evirici güç devresi, hem ısı algılama elemanlarıyla kontrol edilmekte hem de özel yönlendirilmiş hava kanalları aracılığıyla soğutulmaktadır. Fan tarafından emilen hava, gövdenin dış yüzeyinden evirici güç devresine, bobinlere ve ızgara bölmesine doğru yönlendirilmekte, böylece hem elektronik bileşenler hem de pişirme bölmesi aynı hava akımıyla soğutulmaktadır. Bu yaklaşım, evirici güç kartının ve bobinlerin güvenli sıcaklıklarda çalışmasını sağlarken, ızgara fonksiyonunun da performans kaybı olmadan kullanılabilmesine imkân tanımaktadır. Ayrıca fan gürültüsünün azaltılması ve hava akışının optimize edilmesi sayesinde kullanıcı konforu artırılmakta, cihazın genel tasarımında daha esnek bir yerleşim mümkün hale gelmektedir. Sonuç olarak bu patent, indüksiyonlu ocaklarda ızgara fonksiyonu entegre edildiğinde ortaya çıkan ısıl yönetim ve gürültü problemlerine yenilikçi bir hava kanalı düzeniyle çözüm getirmekte hem soğutma verimliliğini hem de kullanıcı deneyimini iyileştirmektedir.



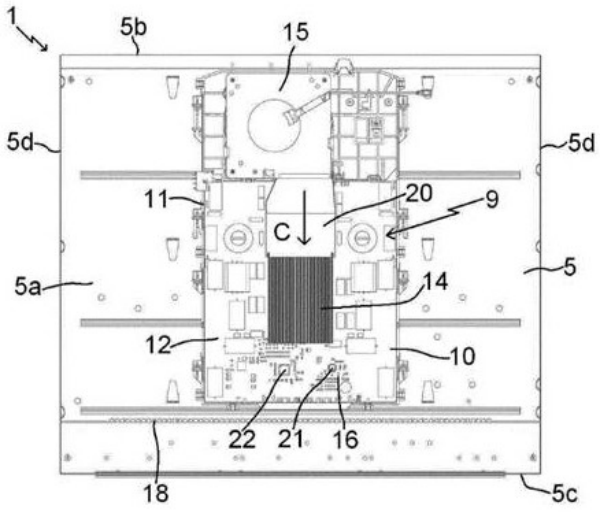
Şekil 2.2. JP2016162703A numaralı Hitachi Appliances Inc. Patenti (Arakane, 2016).

Şekil 2.3.'te gösterilen 2021/021325 numaralı BSH Ev Aletleri Sanayi ve Ticaret A.Ş.'ye ait patent başvurusu (Modi vd., 2023), özellikle soğutucu cihazlarda kontrol ünitesinin konumlandırılması ve servis edilebilirliğinin artırılmasına yönelik bir yenilik sunmaktadır. Mevcut sistemlerde, kontrol ünitelerinin cihaz gövdesine sabit şekilde monte edilmesi bakım ve onarım süreçlerinde zorluklar yaratmakta, üniteye erişim için tüm cihazın sökülmesini gerektirebilmektedir. Ayrıca kompakt yapıdaki soğutucu cihazlarda alan kısıtlı olduğundan, kontrol ünitesinin güvenli ve verimli bir şekilde yerleştirilmesi önemli bir tasarım problemi olarak ortaya çıkmaktadır. Patent bu teknik sorunlara, kontrol ünitesinin üzerinde bulunduğu taşıyıcı tepsi aracılığıyla çözüm getirmektedir. Tasarıma göre, kontrol ünitesi cihaz gövdesinin dış duvar yüzeyinde konumlandırılan bir taşıyıcı tepsi üzerine yerleştirilmiştir. Bu taşıyıcı tepsi, kapalı konumda cihaz gövdesiyle bütünleşirken, gerektiğinde dışarıya doğru kısmen veya tamamen kaydırılarak açık konuma getirilebilmektedir. Böylece kontrol ünitesine kolayca erişim sağlanmakta, bakım ve servis işlemleri cihazın tüm gövdesini sökmeye gerek kalmadan hızlı bir şekilde yapılabilmektedir. Ayrıca bu yapı, üretim sırasında montaj kolaylığı sağlarken, kontrol ünitesinin cihazın soğutma performansına zarar vermeden güvenli şekilde yerleştirilmesini de mümkün kılmaktadır.



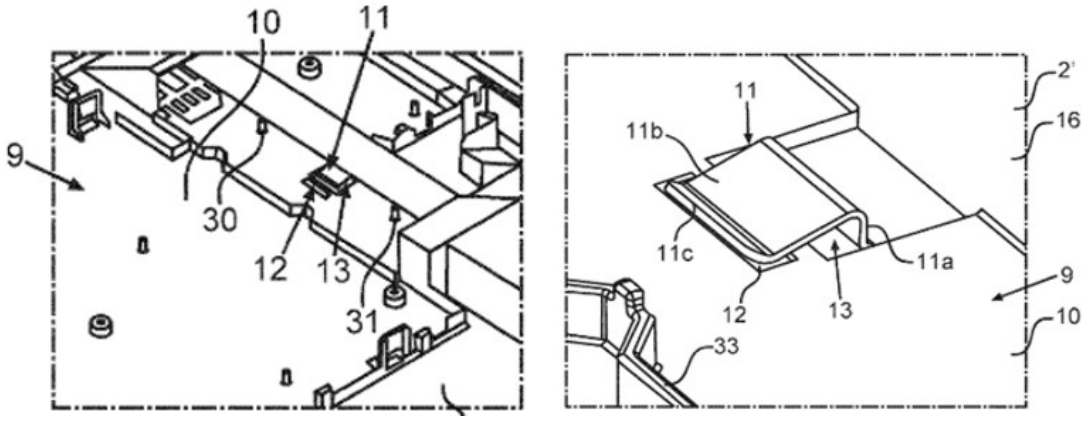
Şekil 2.3. 2021/021325 numaralı BSH Ev Aletleri Sanayi ve Ticaret A.Ş.'ye ait patent başvurusu (Modi vd., 2023).

Şekil 2.4.'te gösterilen EP2746672B1 numaralı Groupe Brandt'a ait patent (Alirol vd., 2016), indüksiyonlu ocaklarda soğutma havası akışına entegre edilmiş tek bir sıcaklık sensörü üzerinden kontrol mekanizması geliştirmektedir. Geleneksel sistemlerde çok sayıda sıcaklık sensörü kullanılması maliyeti artırmakta ve montaj karmaşıklığı yaratmaktadır. Ayrıca farklı bölgelerden alınan sıcaklık verilerinin işlenmesi zaman kaybına yol açabilmekte, bu da hızlı tepki vermesi gereken güç elektroniği devreleri için dezavantaj oluşturmaktadır. Patent, bu soruna fan tarafından üretilen soğutma havası akımına yerleştirilmiş tek bir sıcaklık sensörü ile çözüm getirmektedir. Sensör, soğutucu yüzeyin (ısı kuyusu) hemen ardından konumlandırılmıştır ve böylece güç kartının ve çevresindeki bileşenlerin maruz kaldığı gerçek sıcaklık yükünü dolaylı ama güvenilir biçimde ölçebilmektedir. Ölçülen sıcaklık değeri, mikro denetleyici tarafından değerlendirilmekte ve gerekli görüldüğünde güç devresine aktarılan enerji sınırlandırılmaktadır. Bu yöntem sayesinde elektronik bileşenler aşırı ısınmaya karşı korunmakta, sistem daha düşük maliyetle güvenli şekilde çalıştırılabilmektedir. Sonuç olarak bu patent, indüksiyonlu ocaklarda sıcaklık algılama ve kontrol sürecini basitleştiren, maliyeti azaltan ve termal güvenliği artıran yenilikçi bir yaklaşım sunmaktadır.



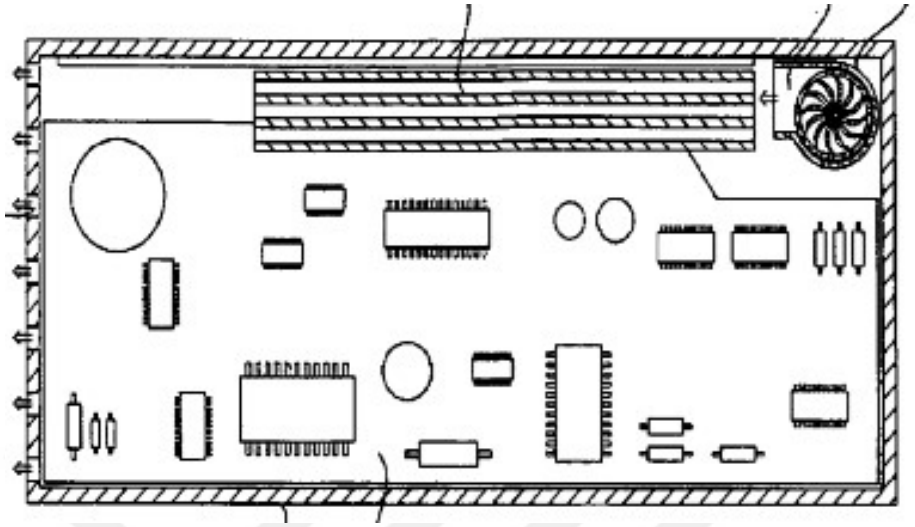
Şekil 2.4. EP2746672B1 numaralı Groupe Brandt'a ait patent (Alirol vd., 2016).

Şekil 2.5.'te gösterilen EP2498577B1 numaralı BSH Hausgeräte GmbH'ye ait patent (Falcon vd., 2015), indüksiyonlu ocaklarda kullanılan taşıyıcı plaka ve elektronik bileşenlerin koruma düzenine odaklanmaktadır. Geleneksel ocak yapılarında, elektronik devrelerin yer aldığı kartlar sabit montajlı metal kutular içinde korunmakta, bu da hem montaj/demontaj işlemlerini zorlaştırmakta hem de bakım süresini uzatmaktadır. Patent, bu soruna plastikten üretilmiş bir taşıyıcı plaka üzerine yerleştirilen devre taşıyıcı (circuit carrier) ve bunun altına kolayca takılıp çıkarılabilen bir metal kapak ile çözüm getirmektedir. Metal kapak, taşıyıcı plakanın alt tarafına monte edilmekte ve özel bir kilit mekanizması sayesinde güvenli şekilde sabitlenmektedir. Bu kilit mekanizması, esnek yapıya sahip yaylı bir kilit dili (spring tongue) ile sağlanmaktadır. Böylece kapak gerektiğinde kolayca çıkarılabilir, bakım veya servis sırasında elektronik bileşenlere hızlı erişim sağlanır. Ayrıca bu yapı, üretim sırasında montaj kolaylığı sunmakta ve cihazın ömrü boyunca servis edilebilirliğini artırmaktadır. Bunun yanında metal kapağın varlığı elektronik devrelerin mekanik darbelere ve çevresel etkilere karşı korunmasını sağlamaktadır. Sonuç olarak bu patent, indüksiyonlu ocaklarda elektronik bileşenlerin korunmasını, montaj kolaylığını ve servis erişilebilirliğini iyileştiren yenilikçi bir tasarım çözümü sunmakta hem kullanıcı güvenliğini hem de üretici açısından maliyet verimliliğini artırmaktadır.



Şekil 2.5. EP EP2498577B1 numaralı BSH Hausgeräte GmbH'ye ait patent (Falcon vd., 2015).

Şekil 2.6.'da gösterilen EP2127477B1 numaralı LG Electronics Inc.'e ait patent (Kim vd., 2012), indüksiyonlu ocaklarda inverter devre kartının aşırı ısınmasını önlemeye yönelik hava yönlendirme ve soğutma sistemi geliştirmektedir. İndüksiyonlu ocaklarda inverter kartı, yüksek akım ve frekansta çalıştığından ciddi miktarda ısı açığa çıkmakta ve bu da hem devre elemanlarının ömrünü kısaltmakta hem de cihazın güvenilirliğini azaltmaktadır. Geleneksel çözümlerde fan doğrudan kart üzerine hava üflemekte, ancak akışın homojen olmaması nedeniyle bazı bölgelerde aşırı sıcaklık birikimi ortaya çıkabilmektedir. Patent, bu soruna boydan boya uzanan bir hava yönlendirme kılavuzu (air guide) ve kartın üzerine yerleştirilmiş heatsink tasarımıyla çözüm getirmektedir. Heatsink, kart yüzeyinin ötesine uzanacak şekilde tasarlanmış ve fan tarafından üflenen havanın etkili şekilde yönlendirilmesini sağlamaktadır. Ayrıca inverter kılavuzu üzerinde yer alan çok sayıda yönlendirici kaburga (guide ribs), fanın üfleme gücünü farklı bölgelere eşit dağıtarak kart üzerindeki sıcaklık gradyanlarını azaltmaktadır. Bu düzenleme sayesinde hava akışı optimize edilmekte, inverter kartı üzerindeki kritik bileşenler güvenli sıcaklık aralıklarında tutulmakta ve cihazın termal dayanıklılığı artırılmaktadır. Sonuç olarak bu patent, indüksiyonlu ocaklarda soğutma verimliliğini yükselten, hava akışını homojenleştiren ve kart ömrünü uzatan yenilikçi bir soğutma mimarisi ortaya koymaktadır.

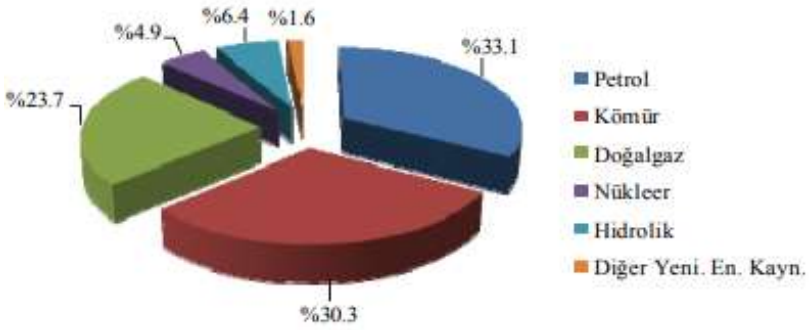


Şekil 2.6. EP2127477B1 numaralı LG Electronics Inc.'e ait patent (Kim vd., 2015).

KR101052130B1 numaralı LG Electronics Inc.'e ait patent (Baek vd., 2010), indüksiyonlu ocaklarda kullanılan ısı kuyusu (heatsink) tasarımının geometrik olarak optimize edilmesine odaklanmaktadır. Geleneksel soğutucu bloklarda tüm kanatların (fin) kalınlığı genellikle sabittir; ancak fanın oluşturduğu hava akışı her bölgeye eşit şekilde dağılmadığından, bazı bölgelerde aşırı soğutma, bazı bölgelerde ise yetersiz soğutma meydana gelebilmektedir. Bu durum hem malzeme kullanımında verimsizlik yaratmakta hem de elektronik bileşenlerin farklı sıcaklıklara maruz kalmasına neden olmaktadır. Patent, bu teknik soruna çözüm olarak hava akışının yoğunluğuna göre farklı kalınlıklarda kanatlara sahip bir heatsink tasarımı önermektedir. Soğutucu, fanın yarattığı hava akımının güçlü olduğu bölgelerde daha ince, zayıf olduğu bölgelerde ise daha kalın kanatlara sahip olacak şekilde şekillendirilmiştir. Böylece ısı transferi tüm yüzeyde dengelenmekte, elektronik bileşenlerin sıcaklığı daha homojen tutulmakta ve soğutma verimliliği artırılmaktadır. Ayrıca malzeme optimizasyonu sayesinde üretim maliyeti düşürülmekte ve cihazın enerji verimliliği yükselmektedir. Sonuç olarak bu patent, indüksiyonlu ocaklarda elektronik bileşenlerin daha dengeli, verimli ve düşük maliyetli bir şekilde soğutulmasını sağlayan yenilikçi bir heatsink tasarım yaklaşımı sunmaktadır.

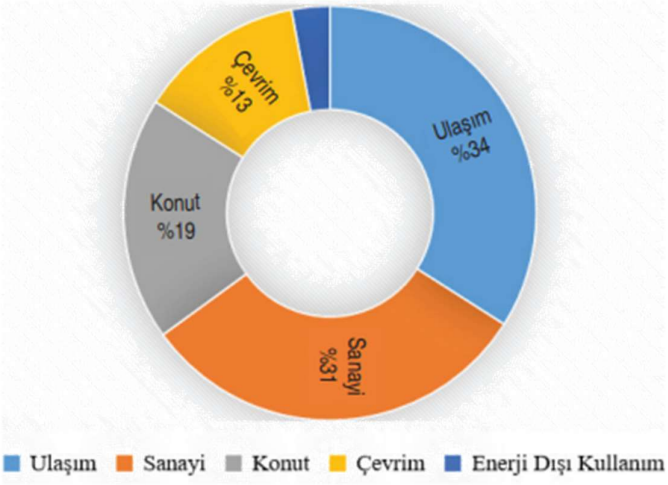
3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Koç ve Şenel, (2013) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, dünya ve Türkiye ölçeğinde enerji kaynaklarının genel durumu ayrıntılı bir biçimde değerlendirilmiştir. Araştırmada öncelikle fosil temelli kaynakların (petrol, kömür, doğal gaz) dünya enerji tüketimindeki belirleyici konumu vurgulanmış, buna karşın nükleer ve yenilenebilir kaynakların paylarının daha sınırlı düzeyde olduğu belirtilmiştir. 2011 yılı verilerine göre dünya birincil enerji tüketiminde petrolün %33, kömürün %30 ve doğal gazın %24 oranında pay aldığı, elektrik üretiminde ise kömürün %41, doğal gazın %21 ve hidrolik kaynakların %16 düzeyinde katkı sağladığı ifade edilmiştir. Türkiye açısından ise enerji üretim-tüketim dengesinin olumsuz yönde seyrettiği, toplam enerji tüketiminde dışa bağımlılığın yüksek olduğu ve 2011 yılı itibarıyla yerli üretimin tüketimi karşılama oranının yalnızca %28 düzeyinde kaldığı ortaya konmuştur. Ayrıca Türkiye'nin enerji tüketiminde doğal gazın %33, petrolün %27 ve kömürün %29 gibi yüksek oranlarla öne çıktığı, buna karşın yenilenebilir kaynakların payının oldukça sınırlı kaldığı belirtilmiştir. Öte yandan yenilenebilir kaynakların küresel ölçekte yükselişte olduğuna işaret edilmiştir. Çalışmada, Çin'in hidroelektrik ve rüzgâr kurulu gücü bakımından öne çıktığı, Almanya'nın fotovoltaik panellerde, ABD'nin ise biyokütle enerjisinde lider konumda bulunduğu aktarılmıştır. Türkiye için ise 2011 yılı itibarıyla 19 GW'lık yenilenebilir elektrik kurulu gücüne ulaşılmış olsa da toplam enerji tüketimindeki payın hâlâ düşük seviyelerde olduğu vurgulanmıştır. Hidrolik enerji, jeotermal potansiyel ve güneşlenme süresi bakımından Türkiye'nin sahip olduğu avantajlara rağmen, bu kaynakların etkin kullanımında çeşitli yapısal engellerin bulunduğu ifade edilmiştir.



Şekil 3.1. Dünyada 2011 yılı birincil enerji kullanımı. (Şenel, (2013))

Koç vd., (2018) enerji kaynaklarının dünya ve Türkiye ölçeğinde genel bir değerlendirmesini yaparak küresel enerji arz-talep dengesine ışık tutmuştur. Çalışmada fosil yakıtların (kömür, petrol, doğalgaz) hâlâ dünya enerji tüketiminde baskın konumda olduğu, ancak yenilenebilir enerji kaynaklarının giderek artan bir ivme kazandığı vurgulanmıştır. 2015 yılı itibarıyla dünya birincil enerji üretimi 13.790 milyon TEP seviyesinde gerçekleşmiş ve tüketim oranlarında petrol %33,3, kömür %28,1, doğalgaz %24,1 ile ilk sıralarda yer almıştır. Buna karşılık yenilenebilir enerji kaynaklarının payı %3,2 düzeyinde kalmış, fakat özellikle rüzgar ve güneş enerjisinde kayda değer artışlar gözlenmiştir. Türkiye açısından değerlendirildiğinde, 2016 yılında toplam birincil enerji üretiminin 35.374 bin TEP olduğu, ancak buna karşın 113.117 bin TEP düzeyinde ithalat yapılması nedeniyle ülkenin enerji arzında dışa bağımlılığın yüksek olduğu görülmektedir. Türkiye'de yerli üretim içinde linyit %39, hidrolik %27 ve rüzgar %8 oranlarıyla öne çıkarken, tüketim tarafında ise petrol %45, doğalgaz %34 ve ithal kömür %21 gibi yüksek oranlarla ithalata dayalı kaynaklar dikkat çekmektedir. Çalışmada ayrıca elektrik üretiminde küresel düzeyde kömürün %40,6'lık oranla başlıca kaynak olduğu, Türkiye'de ise 2018 yılı itibariyle elektrik üretiminin %71'inin termik santrallerden karşılandığı belirtilmiştir. Bunun yanı sıra yenilenebilir enerji kurulu gücünde Türkiye'nin 2017 itibariyle 39,11 GW seviyesine ulaştığı, özellikle hidrolik ve rüzgar yatırımlarının önemli ölçüde arttığı ifade edilmiştir. Çalışma genel olarak, enerji güvenliği, dışa bağımlılık ve sürdürülebilirlik konularında Türkiye'nin kritik bir eşiğe geldiğini, fosil kaynaklara dayalı yapının uzun vadede sürdürülebilir olmadığını ortaya koymaktadır. Aşağıda Şekil 3.2.'de gösterildiği gibi 2016 yılı verileri üzerinden dünya genelinde birincil enerji tüketiminin sektörel dağılımı incelenmiştir. Bulgulara göre, toplam enerji tüketiminin en büyük payı %34 ile ulaşım sektörü tarafından gerçekleştirilmiştir. Ulaştırmayı %31 ile sanayi sektörü izlemekte, bu da üretim faaliyetlerinin hâlâ yüksek enerji yoğunluğuna sahip olduğunu göstermektedir. Konutların enerji tüketimindeki payı %19 düzeyinde kalırken, enerji üretim süreçlerinde dönüşüm kayıplarını ifade eden çevrim sektörünün %13 oranında katkı yaptığı belirtilmiştir. Enerji dışı kullanım ise toplam tüketim içinde oldukça düşük bir paya sahiptir. Bu dağılım, ulaştırma ve sanayi sektörlerinin küresel enerji talebinde başat rol oynadığını, dolayısıyla enerji verimliliği politikalarının ve yeni nesil teknolojilerin bu alanlarda yoğunlaştırılmasının kritik önem taşıdığını ortaya koymaktadır.



Şekil 3.2. 2016 Dünya genelinde birincil enerji tüketiminin sektörel olarak dağılımı. (Koç vd., (2018)

Dünya ve Türkiye ölçeğinde enerji tüketimindeki eğilimler incelendiğinde, artan talebin yalnızca ulusal ekonomilerde değil, bireylerin günlük yaşamında kullandığı teknolojik cihazlar üzerinden de şekillendiği görülmektedir. Hanelerde elektrik tüketiminin önemli bir bölümünü oluşturan beyaz eşyalar, enerji verimliliği politikalarının en doğrudan etki ettiği ürün gruplarından biridir. Bu nedenle genel enerji tüketim yapısının ardından beyaz eşya endüstrisinin ele alınması hem teknolojik yeniliklerin hem de verimlilik odaklı dönüşümün anlaşılması açısından önemli bir bağlam sunmaktadır.

Özkul, (2011) çalışmasında Türkiye'de beyaz eşya sektörünün ekonomik yapı içindeki yükselen rolünü ayrıntılı biçimde incelemektedir. Araştırmaya göre, sektörün ürünlerinin olgunluk aşamasına gelmesi ve gelişmekte olan ülkelerde artan talep, üretim merkezlerini bu ülkelere kaydırmıştır. Türkiye bu süreçten en fazla fayda sağlayan ülkeler arasında yer almakta; başlangıçta fason üretimden hareketle küresel değer zincirlerine dahil olmuş, sonrasında kendi markalarını geliştirerek rekabet gücü kazanmıştır. Bu firmaların Ar-Ge ve teknoloji yatırımlarına yönelmeleri, yalnızca üretim kapasitelerini artırmakla kalmamış, aynı zamanda uluslararası pazarlarda güçlü bir konum elde etmelerine de katkı sağlamıştır.

Tatlı, (2018) tarafından yapılan çalışmada, Türk beyaz eşya sektöründeki piyasa yoğunlaşması ve rekabet düzeyi farklı endeksler kullanılarak incelenmiştir. Çalışmanın amacı, 2005–2015 yılları arasında faaliyet gösteren firmaların üretim ve net satış verilerinden hareketle sektördeki yoğunlaşma oranlarını belirlemektir. Bu kapsamda CR_n, Herfindahl-Hirschman, Entropy, Rosenbluth-Hall Tideron, Hannah-Kay ve Gini endeksleri gibi ölçütler kullanılmıştır. Analiz bulguları, Türkiye beyaz eşya sanayisinde yoğunlaşma oranlarının oldukça yüksek olduğunu ortaya koymuş; dolayısıyla sektörün rekabet yapısının tam rekabetten uzaklaşıp oligopol piyasalara yakın bir karakter sergilediği sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca çalışma, sektörde rekabetin sürdürülebilirliği için politika ve strateji önerileri de sunmaktadır. Bu sonuçlar, beyaz eşya endüstrisinin yalnızca üretim kapasitesi ve ihracat başarısıyla değil, aynı zamanda piyasa yapısı ve rekabet koşullarıyla da Türkiye ekonomisinde kritik bir konumda bulunduğunu göstermektedir.

Özözen (2024), çalışmasında Türk beyaz eşya sektörünün küresel pazardaki rekabet gücünü kapsamlı biçimde analiz etmektedir. Çalışmada, sektörün 1950'li yıllarda montaj sanayisine dayalı bir üretim yapısıyla başladığı, ancak günümüzde yüksek katma değerli ürünler üreten, küresel bilinirliğe sahip markalara dönüşerek Türkiye ekonomisinin lokomotif sektörlerinden biri haline geldiği vurgulanmaktadır. Türkiye, Çin'den sonra dünyanın ikinci, Avrupa'nın ise birinci beyaz eşya üreticisi konumundadır ve toplam üretimin yaklaşık %75'i ihraç edilmektedir. Araştırma, 2013–2022 döneminde sektörün altı temel ürün grubunda (buzdolabı, derin dondurucu, çamaşır makinesi, kurutma makinesi, bulaşık makinesi, fırın/mikrodalga ve diğer pişiriciler) rekabet gücünü Açıklanmış Karşılaştırmalı Üstünlük (RCA) Endeksi ve Ticaret Dengesi Endeksi (TBI) kullanarak incelemiştir. Bulgular, Türkiye'nin hem genel sektörde hem de tüm alt ürün gruplarında net ihracatçı ve güçlü rekabet avantajına sahip olduğunu göstermektedir. Özellikle çamaşır ve bulaşık makineleri ile kurutucular kategorisinde Türkiye'nin rekabet gücü oldukça yüksek bulunmuştur. Ayrıca Polonya, küresel ölçekte Türkiye'nin en yakın rakibi olarak öne çıkarken; Almanya ve İtalya gibi markalaşmış ülkelerin rekabet gücünün görece düşük kaldığı belirtilmiştir. Çalışmada ayrıca beyaz eşya sektörünün dijitalleşme, sürdürülebilirlik ve AB Yeşil Mutabakatı çerçevesinde çevre dostu ürün üretimi gibi dönüşüm alanlarında avantajlarını koruyabilmesi için stratejik önerilere de yer verilmiştir. Aşağıda Çizelge 3.1'de 2019-2023 yıllarında Türkiye'nin beyaz eşya üretim adetleri

verilmiştir. 2023 yılında toplamda 32.361.474 adet beyaz eşya üretilmiş ve bu üretimin 5.830.636 adeti fırın grubuna ait olmuştur. Bir önceki yıla göre azalma görünsede 2019 yılı ile karşılaştırıldığında üretim adet %14,8 artmıştır.

Çizelge 3.1. Türkiye'nin Beyaz Eşya Üretimi. (Özözen, 2024)

Beyaz Eşya	2019	2020	2021	2022	2023
Buzdolabı	6.446.600	6.313.091	7.922.395	8.283.338	7.715.819
Dondurucu	1.181.873	1.803.013	1.756.646	1.313.067	1.651.264
Çamaşır Makinesi	7.495.900	7.062.068	7.667.387	7.660.674	8.355.589
Bulaşık Makinesi	5.285.303	5.725.562	6.867.756	6.858.117	5.893.647
Fırın	5.275.521	5.347.048	6.588.204	5.912.139	5.830.636
Kurutucu	2.512.367	2.945.585	3.278.021	2.820.035	2.914.519
Toplam	28.197.564	29.196.367	34.080.409	32.847.370	32.361.474

Bu kapsamlı değerlendirme, beyaz eşya sektörünün Türkiye ekonomisine katkısını ortaya koyarken, alt sektörler içinde özellikle pişirici grupların (fırınlar, mikrodalga fırınlar ve diğer pişiriciler) küresel ticarette dikkat çekici bir rekabet gücüne sahip olduğunu da göstermektedir. Bu noktada, beyaz eşya sektörünün geneline ilişkin bulgulardan pişirici gruplara odaklanmak, enerji verimliliği ve inovasyonun en yoğun hissedildiği alanlardan birini daha yakından incelemeyi mümkün kılmaktadır.

Mutfak mekânlarının tarihsel süreçte geçirdiği dönüşüm, teknolojik gelişmelerin en yoğun hissedildiği alanlardan biri olarak karşımıza çıkmaktadır. Özellikle pişirme teknolojilerinde yaşanan değişim, geleneksel ateşli ocaklardan elektrikli ve gazlı sistemlere, oradan da günümüzün yüksek verimli indüksiyonlu ocaklarına evrilmiştir. Pişirici gruplar içinde önemli bir kategori olan ocaklar, mutfak kullanıcılarının hem yemek hazırlama pratiklerini hem de yaşam biçimlerini doğrudan etkilemiştir. Gazlı ocaklar uzun

yıllar temel çözüm olarak kullanılmasına rağmen, güvenlik sorunları, enerji kayıpları ve yanma kaynaklı emisyonlar gibi dezavantajlar taşımaktadır. Elektrikli rezistanslı ocaklarda ise daha kontrollü bir pişirme sağlansa da düşük enerji verimliliği ve uzun ısınma-soğuma süreleri kullanıcı deneyimini sınırlamaktadır. Bu bağlamda indüksiyon teknolojisi, hızlı tepki süresi, yüksek enerji verimliliği, hassas sıcaklık kontrolü ve güvenlik avantajları sayesinde pişirici gruplar içinde öne çıkan bir alternatif haline gelmiştir. İndüksiyonlu ocaklarda elektromanyetik indüksiyon prensibine dayalı ısı üretimi, ısıtma süresini önemli ölçüde kısaltmakta ve enerji kayıplarını azaltmaktadır. Böylece mutfak mekânlarında konfor, güvenlik ve verimlilik açısından yeni bir standart ortaya çıkmıştır. Bu gelişmeler, mutfak tasarımında teknolojik yeniliklerin etkisini inceleyen çalışmalarla da örtüşmekte ve indüksiyonlu ocakların yalnızca bir pişirme aracı değil, aynı zamanda modern mutfakların vazgeçilmez bir bileşeni haline geldiğini göstermektedir (Örs, 2020).

Literatürde ev tipi indüksiyonlu ocakların yaşam döngüsü, çalışma prensibi ve termal tasarımını inceleyen çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Elduque vd., (2014) tarafından gerçekleştirilen bir Yaşam Döngüsü Analizi (LCA) ile güncel nesil indüksiyonlu ocakların elektronik devre kartlarının çevresel etkilerini incelemiştir. Araştırmada, dört pişirme gözüne ve 7,2 kW nominal güce sahip bir indüksiyonlu ocak üzerinden analiz yapılmış ve özellikle iki güç elektroniği kartı (ELIN PCBAs) ile bir dokunmatik kontrol kartı (TCPCBA) ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir. SimaPro 7.3.3 yazılımı ve Ecoinvent v2.2 ile Chalmers CPM LCA veri tabanları kullanılarak oluşturulan modelde, her bir elektronik bileşen tek tek analiz edilmiştir. Sonuçlar, çevresel etkilerin en büyük bölümünün ELIN PCBAs tarafından oluşturulduğunu, TCPCBA'nın ise özellikle ozon tabakasının incelmesi kategorisinde anlamlı bir etki yarattığını ancak bu değerin ELIN PCBA emisyonlarının yaklaşık dörtte biri seviyesinde kaldığını ortaya koymuştur. ELIN PCBAs'da toplam etkilerin %70 ila %85'inin elektronik bileşenlerden kaynaklandığı, montaj ve baskı devre kartlarının katkılarının ise görece daha düşük düzeyde olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, bakır çekirdekli endüktörler, film kondansatörleri ve delik içi diyotlar gibi bileşenlerin küresel ısınma potansiyeli ve asidifikasyon gibi çevresel etki kategorilerinde başlıca rol oynadığı vurgulanmıştır. Çalışmada ayrıca, ürünün kullanım aşamasının çevresel etkilerde en baskın faktör olduğu, bu etkinin fotokimyasal oksidasyon kategorisinde %78,8'den başlayarak karasal ekotoksisite kategorisinde %98,3'e kadar

ulaştığı görülmüştür. Araştırmacılar, bu bulgular ışığında çevresel etkilerin azaltılması için bazı ekotasarım önerileri sunmuşlardır. Bunlar arasında, enerji ve hammadde tüketimini azaltacak şekilde yeniden tasarlanmış elektronik bileşenlerin kullanımı, özellikle altın, gümüş ve bakır gibi değerli metallerin geri kazanım oranlarının artırılması ve son kullanım aşamasında daha etkin geri dönüşüm uygulamaları yer almaktadır. Böylece hem üretim sürecinde hem de ürün ömrü sonunda çevresel yükün düşürülmesi hedeflenmektedir.

Viriya vd., (2002) tarafından gerçekleştirilen çalışma yüksek frekanslı indüksiyonlu ocakların yarım köprülü seri rezonans evirici (half-bridge series resonant inverter) yapısıyla analizine odaklanmaktadır. Araştırmada, devre davranışının daha basit ve anlaşılır şekilde modellenebilmesi için Thevenin kısa-açık devre yöntemi kullanılmış, böylece devre eşdeğer bir RLC bağlantısı üzerinden incelenmiştir. Bu yöntemle elde edilen basitleştirilmiş eşdeğer devre sayesinde gerilim ve akım denklemleri kolaylıkla hesaplanabilmiş ve farklı elektriksel büyüklükler teorik olarak elde edilmiştir. Ardından, bu teorik sonuçlar 2 kW gücünde ve 30 kHz frekansında çalışan değişken güç ve frekans kontrollü prototip bir indüksiyonlu ocak üzerinde deneysel olarak doğrulanmıştır. Çalışmada elde edilen bulgular, aynı güç seviyesinde (1,5 kW) çalışan geleneksel ocakla karşılaştırıldığında, indüksiyonlu ocağın kaynatma performansının çok daha hızlı olduğunu göstermektedir. Deneylerde suyun kaynama süresi, indüksiyonlu ocak için 5 dakika, geleneksel ocak için ise 10 dakika olarak ölçülmüştür. Bu sonuç, indüksiyon teknolojisinin yalnızca enerji dönüşüm verimliliği açısından değil, aynı zamanda pişirme süresi bakımından da önemli bir avantaj sağladığını ortaya koymaktadır. Ayrıca, değişken frekans aralığında (30–40 kHz) ve değişken güç aralığında (0,5–2 kW) yapılan deneysel testler, teorik analizlerle yüksek uyum göstermiştir.

Acero vd., (2006) tarafından yapılan çalışma, sandviç düzlemsel sargı yapısının ev tipi indüksiyonlu ocaklarda ısıtma performansına etkisini incelemektedir. Çalışmada, sargının ferrit plakayla birlikte yerleştirilmesinin güç kayıplarını azaltarak eşdeğer direnç artışı üzerinden yükteki enerji dağılımını iyileştirdiği gösterilmiştir. Teorik modellemeler ve deneysel doğrulamalar sonucunda, ferrit kalınlığının 1 mm'nin üzerinde ve bağıl manyetik geçirgenliğinin (μr) 100'den fazla olması durumunda kayda değer iyileşmeler

sağlandığı belirlenmiştir. Ayrıca 20–100 kHz arasındaki frekanslarda, ferrit plakanın varlığının yükteki güç dağılımını yaklaşık %60–70 oranında geliştirdiği görülmüştür. Araştırmada 23 turdan oluşan, 25–105 mm yarıçap aralığında tasarlanmış bir spiral bakır sargı ile 3500 W gücünde ve 25 kHz frekansında çalışan bir sistem modellenmiştir. Deneysel testlerde ise düşük kayıplı ferrit malzeme (3C90, μr≈1000) kullanılmış ve elde edilen sonuçların analitik modellerle yüksek uyum gösterdiği tespit edilmiştir. Çalışmanın en önemli bulgusu, yüksek frekanslara çıkıldığında ferrit katkısının etkisinin azaldığı, ancak düşük frekanslarda ferrit plakanın "görüntü akımı" etkisi nedeniyle yükteki güç dağılımını belirgin şekilde artırdığıdır. Bu durum, yalnızca elektromanyetik kalkanlama değil, aynı zamanda ısıtma verimliliğinin iyileştirilmesi açısından da ferrit plakanın stratejik önemini ortaya koymaktadır.

Meng vd., (2009) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, indüksiyonlu ocakların ısıtma performansı konvansiyonel tasarımlardan farklı olarak manyetik alan dağılımı perspektifinde ele alınmıştır. Araştırmada öncelikle geleneksel indüksiyonlu ocakların bobin yapısı ve manyetik alan karakteristiği incelenmiş, bu yapının sınırlı alanlarda yoğunlaşan manyetik akılar nedeniyle düzensiz ısınma ve düşük verimlilik yarattığı ortaya konmuştur. Çalışma kapsamında geliştirilen yeni bobin tasarımı, bu dezavantajları gidermek amacıyla önerilmiş ve sonlu elemanlar yöntemi (FEM) kullanılarak sayısal simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Hem geleneksel hem de önerilen bobin yapısına sahip ocakların deneysel prototipleri üretilerek karşılaştırmalar yapılmış ve sonuçlar, yeni tasarımın ısı dağılımını daha homojen hale getirdiğini, sıcak nokta oluşumlarını azalttığını ve genel ısıtma performansını belirgin şekilde artırdığını göstermiştir. Bu yönüyle çalışma, indüksiyonlu ocakların verimliliğini artırmaya yönelik literatürde önemli bir katkı sunmakta ve bobin tasarımının termal performans üzerindeki kritik rolünü vurgulamaktadır.

Li vd., (2011) 7075-T6 alüminyum alaşım paneller üzerinde indüksiyonla ısıtma davranışını incelemek amacıyla iki boyutlu (2D) sonlu elemanlar yöntemi kullanmıştır. Çalışmada, üç turdan oluşan bakır bir bobine alternatif akım uygulanmış ve bu bobin panel yüzeyi önüne yerleştirilerek elektromanyetik uyarım sağlanmıştır. Modelleme, kızılötesi

kamera ile elde edilen sıcaklık ölçümleriyle doğrulanmış ve böylece sayısal sonuçların güvenilirliği teyit edilmiştir. Elde edilen metodoloji, sistemin parametrelerinin (örneğin bobin turları arası mesafe, bobinin panel yüzeyine uzaklığı, panel boyutu ve bakır döngü sayısı) sıcaklık dağılımına etkisini değerlendirmek üzere parametre analizlerinde de kullanılmıştır. Analizler, panelin kalınlığı 5 mm olacak şekilde gerçekleştirilmiş, 200 kHz frekans ve 100 A akım koşullarında çalışılmıştır. Sonuçlar, bobin-pano arası mesafenin ve bobin tur sayısının ısıtma verimliliğini önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. Örneğin, bobin panelden 2 mm uzaklıkta konumlandırıldığında 110 saniyelik ısıtma sürecinde sıcaklık artışı yaklaşık 17 °C'ye ulaşırken, bu mesafenin 20 mm'ye çıkarılmasıyla sıcaklık artışı yalnızca 1 °C düzeyinde kalmıştır. Benzer şekilde, üç tur bobin kullanımı tek tur bobine kıyasla ısıtma hızında belirgin artış sağlamıştır. Panel boyutunun büyümesiyle ısı transferi daha homojen hale gelmiş, ancak maksimum sıcaklık seviyeleri düşmüştür. Çalışma ayrıca, 2D modellemelerin hızlı analiz imkânı sunduğunu, fakat daha karmaşık geometriler için 3D modellerin gerekli olduğunu vurgulamaktadır. Bu yönüyle, elde edilen bulgular yalnızca panelin ısıtma davranışını anlamakla kalmamış, aynı zamanda endüstride kullanılan tahribatsız muayene teknikleri için de önemli çıkarımlar sağlamıştır.

Cabeza vd., (2020) yaptığı çalışma, indüksiyonlu ocaklarda pişirme sürecinin ısıl davranışını daha ayrıntılı anlamak amacıyla, tava tabanında oluşan zamana bağlı sıcaklık dağılımlarını hem deneysel hem de sayısal yöntemlerle incelemiştir. Çalışmada, çok katmanlı tabana sahip bir tava üzerinde farklı güç dağılımına sahip iki indüksiyon ocağı kullanılmıştır. Bu ocaklar, pişirilen gıdanın türüne göre belirli bir sıcaklık seviyesini koruyan kontrol sistemleriyle donatılmıştır. Deneysel düzenekte havaya bağlı taşınım ve tava-cam arasındaki ısıl iletkenlik parametreleri ölçülmüş, ayrıca biftek pişirme senaryosu üzerinden gıdanın boyutu ve tavada konumunun sıcaklık dağılımına etkisi değerlendirilmiştir. Sonuçlar, enerji girişinin yaklaşık %25'inin kaybolduğunu, bunun %15'lik kısmının tava ile cam arasındaki ısı geçişinden kaynaklandığını göstermiştir. Ayrıca, halka tipli ve eliptik tipli indüktörlerin farklı güç dağılımları oluşturmasına rağmen, tavada kullanılan alüminyum tabaka sayesinde sıcaklık homojenliğinin büyük ölçüde korunduğu tespit edilmiştir. Sayısal modelleme için sonlu elemanlar yöntemi (FEM) kullanılmış ve elde edilen bulgular deneysel verilerle doğrulanmıştır. Çalışma,

pişirme süresince sıcaklığın homojenliğini sağlamada tava malzemesi ve güç kontrol algoritmasının kritik rol oynadığını vurgulamaktadır.

Kranjc vd., (2010) tarafından yapılan bu çalışma, indüksiyonla ısıtma sürecini hem sayısal hem de deneysel yöntemlerle incelemiş ve özellikle çelik malzemelerin farklı ısıtma protokolleri altındaki davranışlarını analiz etmiştir. Çalışmada, elektromanyetik ve ısıl fiziksel süreçleri birlikte ele alan sonlu elemanlar yöntemi (FEM) kullanılarak sayısal modelleme gerçekleştirilmiş, ayrıca sıcaklığa bağımlı ve bağımsız malzeme özelliklerinin simülasyon sonuçları üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Sayısal modellerden elde edilen sıcaklık dağılımları, kızılötesi termografik kamera ölçümleriyle karşılaştırılmış ve iki yöntem arasında genel olarak iyi bir uyum bulunmuştur. Özellikle kusursuz numunelerde simülasyon ve deneysel sonuçların oldukça tutarlı olduğu rapor edilmiştir. Araştırmada üç farklı ısıtma protokolü uygulanmış ve çelik silindirlerin yüzey sıcaklıklarının zamanla değişimi analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular, sıcaklığa bağımlı malzeme özelliklerinin kullanıldığı modellerin daha doğru sonuçlar verdiğini ve 230 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda, ısıl iletkenlik ve ısı kapasitesi gibi parametrelerin sonuçlar üzerinde belirleyici olduğunu göstermektedir. Ayrıca, çalışmada kullanılan termografik yöntem hem sıcaklık dağılımlarının izlenmesinde hem de malzeme kusurlarının tespitinde etkili bir temasız ölçüm aracı olarak öne çıkmıştır.

Son yıllarda elektronik soğutma uygulamalarında ise fan–ısı yutucu kombinasyonlarının performansı, yalnızca klasik ısı transferi korelasyonları çerçevesinde değil, gerçek fan çıkış akış yapılarının, geometrik optimizasyonun ve hibrit soğutma yaklaşımlarının birlikte değerlendirilmesiyle incelenmeye başlanmıştır. Özellikle impingement akışlı plaka-kanatlı (plate-fin) ısı yutucularda giriş akışının üniform kabul edilmesinin yarattığı sınırlamalar, fan çıkışındaki dönel hız bileşenleri, hız profili asimetrileri ve basınç dağılımı etkilerinin dikkate alınmasını gerekli kılmıştır. Bununla birlikte kanat geometrisi, yüzey yapılandırması, fan tipi ve fan–ısı yutucu mesafesi gibi tasarım parametrelerinin yanı sıra, faz değişimli malzemelerle desteklenen hibrit sistemler de güncel literatürde önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir. Bu kapsamda aşağıda sunulan çalışmalar, fan çıkış karakteristiği, ısı yutucu geometrisi ve gelişmiş soğutma yaklaşımlarının sistem performansı üzerindeki etkilerini ortaya koymaktadır. Kuo ve arkadaşları (2026), eksenel fan tarafından oluşturulan dönel ve üniform olmayan giriş

akışının plaka-kanatlı ısı yutucular üzerindeki etkisini deneysel ve sayısal yöntemlerle incelemiştir. Literatürde impingement akışının çoğunlukla üniform ve dönmesiz kabul edildiği modellere karşılık, bu çalışmada gerçek fan çıkışındaki rotasyonel hız bileşenleri ve akış asimetrileri modele dahil edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, üniform giriş varsayımının taban sıcaklığı ile ortam sıcaklığı arasındaki farkı yaklaşık %15–18 oranında eksik tahmin ettiğini ve optimum kanat aralığını %50–70 mertebesinde hatalı öngörebildiğini göstermiştir. Ayrıca dönel akışın kanatlar arasındaki basınç dağılımını değiştirdiği ve buna bağlı olarak lokal ısı transfer katsayısının önemli ölçüde etkilendiği ortaya konmuştur. Bu bulgular, fan çıkış akış yapısının gerçekçi biçimde modellenmesinin ısı yutucu tasarımında kritik bir parametre olduğunu göstermektedir. Sarvestani ve arkadaşları (2025), eğimli kanatlara ve üçgen boşluklara sahip fan-şekilli yenilikçi bir ısı yutucu tasarımı önermiş ve bu tasarımı hem hava soğutmalı hem de nano-parçacık katkılı faz değişimli malzeme (HcPCM) ile hibrit konfigürasyonlarda üç boyutlu eşlenik ısı transferi modeli kullanarak incelemiştir. COMSOL tabanlı analizlerde 20–30 kW/m² aralığında ısı akısı ve 10–50 W/m²K aralığında taşınım katsayısı koşulları değerlendirilmiştir. Grafen oksit ve karbon nanotüp katkısı sayesinde PCM'nin etkin ısıl iletkenliği artırılmış, böylece maksimum taban sıcaklığı 315–343 K aralığında tutulmuş ve konvektif soğutma ihtiyacının %40'a kadar azaltılabildiği gösterilmiştir. Çalışma, geometrik optimizasyon ile malzeme mühendisliğinin birlikte ele alınmasının yüksek ısı akılı uygulamalarda önemli performans kazanımları sağlayabileceğini ortaya koymaktadır. Kirchhofer ve arkadaşları (2025), plaka-kanatlı ısı yutucular üzerinde bir eksenel ve iki radyal olmak üzere üç farklı elektronik fan kullanarak deneysel ve sayısal inceleme gerçekleştirmiştir. Çalışma kapsamında 264 farklı deney konfigürasyonu test edilmiş, fan–ısı yutucu mesafesi değiştirilmiş ve düz kanat yapıları sinüzoidal yüzeyli kanatlarla karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, incelenen mesafelerde eksenel fanın radyal fanlara kıyasla daha düşük taban sıcaklığı sağladığını ve sinüzoidal yüzeyli kanatların düz kanatlara göre daha iyi ısıl performans gösterdiğini ortaya koymuştur. Ayrıca fan çıkış hız profilinin ve swirl etkisinin, ısı yutucu içerisindeki akış dağılımını belirgin biçimde değiştirdiği ve bazı konfigürasyonlarda ciddi sıcaklık asimetrilerine yol açtığı gözlemlenmiştir. Bu çalışma, fan tipi, çıkış akış yapısı ve yüzey geometrisinin birlikte değerlendirilmesinin ısıl tasarım açısından kritik olduğunu göstermektedir.

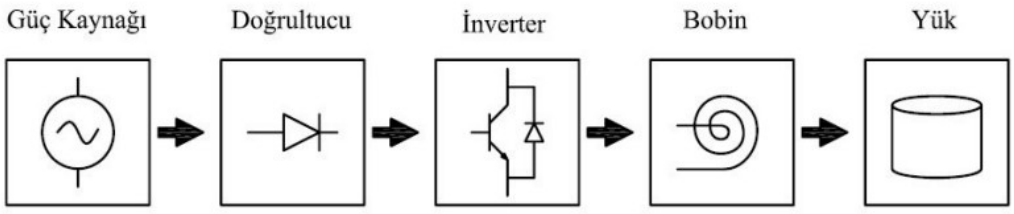
Literatür taraması sonucunda, küresel ve ulusal ölçekte enerji tüketim eğilimlerinden başlayarak beyaz eşya sektörünün ekonomik ve teknolojik önemi, ardından pişirici gruplar ve indüksiyonlu ocakların tasarımına yönelik araştırmalar kapsamlı bir biçimde incelenmiştir. Elde edilen bulgular, indüksiyonlu ocakların değişken güçte çalışabilen, çevreye duyarlı ve güvenilir bir pişirme teknolojisi sunabilmesi için yalnızca elektromanyetik tasarımının değil, aynı zamanda etkin bir soğutma sistemine de ihtiyaç duyduğunu ortaya koymaktadır. Bu çerçevede mevcut tez çalışmasında, uygun soğutma sistemi tasarımının belirlenmesine odaklanılmaktadır. Öncelikle farklı alternatifler değerlendirilerek en uygun ısı kuyusu seçimi yapılacak, ardından fan ve ısı kuyusunun konumlandırılması belirlenerek sistemin performansı optimize edilecektir. Sonraki aşamada, seçilen bileşenler doğrultusunda ocak içinde homojen hava akışı sağlayacak tasarım geliştirilerek elektronik bileşenlerin dengeli soğutulması hedeflenecektir. Nihai olarak ise, indüksiyonlu ocağın çalışma prensibi bütünsel olarak ele alınarak tam kapsamlı bir model oluşturulacak ve elde edilen tasarım deneysel çalışmalarla doğrulanacaktır. Yöntemsel olarak FloEFD 2021 yazılımı aracılığıyla sonlu hacimler yöntemi kullanılacak, istatistiksel analizler Minitab 2021 programı ile gerçekleştirilecek ve deneysel doğrulamalarla sayısal bulgular desteklenecektir. Bu yaklaşım hem akademik literatürde hem de endüstriyel uygulamalarda indüksiyonlu ocakların termal tasarımına yönelik özgün katkılar sunmayı amaçlamaktadır.

4. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde öncelikle bir indüksiyonlu ocağın çalışma prensibi anlatılacak, sonrasında teze konu olan referans ocak ve bileşenleri anlatılacak, bu bileşenlere karar verirken ve termal tasarım gerçekleştirilirken uygulanan nümerik ve istatistiksel yöntemlerden bahsedilecektir.

4.1. İndüksiyonlu Ocakların Çalışma Prensibi

İndüksiyonlu ocaklar, yemek pişirmede yüksek verim ve hassas kontrol imkânı sağlayan modern pişirme teknolojilerinden biridir. Çalışma prensipleri, klasik gazlı veya rezistanslı ocaklardan farklı olarak doğrudan pişirme kabı tabanında ısı üretimine dayanır. Ocak yüzeyinin altında yer alan bakır bobinlerden yüksek frekanslı alternatif akım geçirilir. Bu akım bobin çevresinde hızlı değişen bir manyetik alan oluşturur ve bu alan, üzerine yerleştirilen tencere veya tavaya nüfuz eder. Eğer kap iletken ve ferromanyetik özellikteyse, malzeme içinde girdap akımları indüklenir. Bu akımlar kabın elektriksel direncine karşı akarken Joule etkisiyle ısı açığa çıkar ve yiyecek doğrudan tencere tabanından ısınmaya başlar. Böylece ısı üretimi ocaktan pişirme kabına değil, doğrudan kabın içinde gerçekleştiğinden enerji kayıpları minimuma iner. Ayrıca yüksek frekanslı manyetik alan nedeniyle deri etkisi görülür ve ısı, kap yüzeyinin daha çok taban kısmında yoğunlaşır. Bu durum, hızlı ısınma, daha kısa pişirme süresi ve yüksek enerji verimliliği sağlar. Aşağıda Şekil 4.1.'de bir indüksiyonlu ocağın çalışmasının blok diyagramı verilmiştir (Çetin,2005).



Şekil 4.1. İndüksiyonlu ocak çalışması blok şeması. (Çetin,2005)

İndüksiyonlu ocakların çalışma prensibinin dört temel yasayı temel alır. Bunlar Faraday, Lenz, Ampere ve Joule yasasıdır (Aytekin, 2008, Oktay, 2016, Öztürk vd., 2024) .Bu yasa, zamanla değişen manyetik alanın iletken bir halka veya sargı üzerinde gerilim oluşturduğunu belirtir. Ocak bobininden geçirilen yüksek frekanslı alternatif akım, hızlı değişen manyetik alan üretir. Bu alan tencere tabanına nüfuz ettiğinde iletken malzeme içerisinde girdap akımları indüklenir. Bu akımların dirence karşı akışı Joule ısısı oluşturarak pişirme işlemini sağlar. Aşağıda Eşitlik 4.1.'de gösterilen denklemde, e indüklenen gerilimi, N bobin sarım sayısını, ϕ ise manyetik akıyı temsil eder.

$$e = -N\frac{d\phi}{dt} \tag{4.1.}$$

Faraday yasasına bağlı olarak ortaya çıkan Lenz yasası, indüklenen akımın yönünün kendisini oluşturan manyetik akı değişimine karşı koyacak şekilde oluştuğunu ifade eder. Bu durum, ocak bobini tarafından üretilen manyetik alan ile tencere tabanında oluşan girdap akımları arasında denge sağlar. Böylece ısı üretimi kontrollü gerçekleşir ve enerji dönüşümü sırasında sistem kararlı kalır. Ampere yasası, bir iletken üzerinden geçen akımın çevresinde manyetik alan oluşturduğunu tanımlar. İndüksiyon ocaklarında bobinden geçen yüksek frekanslı akım, tencere tabanına nüfuz eden manyetik alanı meydana getirir. Bu alanın şiddeti, bobin akımı ve sarım sayısı ile doğru orantılıdır. Aşağıda Eşitlik 4.2.'de gösterilen denklemde H, manyetik alan şiddetini, dl eleman uzunluğunu, I_{toplam} ise sarımlardan geçen toplam akımı göstermektedir.

$$\oint H \,.\, dl = I_{toplam} \tag{4.2.}$$

Tencerede oluşan girdap akımlarının metal tabanın elektriksel direncine karşı akışı, Joule yasası ile açıklanır. Bu etkileşim, elektrik enerjisinin doğrudan ısı enerjisine dönüşmesine olanak sağlar. Özellikle ferromanyetik malzemelerde bu kayıplar yüksek verimle ısı üretir. Aşağıda Eşitlik 4.3.'te gösterilen denklemde Q üretilen ısı enerjisini, I akımı, R direnci ve t süreyi göstermektedir.

$$Q = I^2 . R . t \tag{4.3.}$$

İndüksiyon ocaklarında kullanılan yüksek frekanslı akım nedeniyle iletkenlerde akım yoğunluğu yüzeye yakın bölgelerde yoğunlaşır. Bu olaya deri etkisi denir ve ısının tencere tabanında daha yüzeysel bir alanda oluşmasına yol açar. Bu etki, nüfuz derinliği denilen parametreyle ifade edilir. Aşağıda Eşitlik 4.4.'te gösterilen denklemde δ nüfuz derinliğini, ρ malzemenin özdirencini, μ manyetik geçirgenliği ve ω açısal frekansı göstermektedir.

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu\omega}} \tag{4.4.}$$

Ferromanyetik tabanlı tencerelerde manyetik alanın sürekli yön değiştirmesi nedeniyle histerezis kayıpları ortaya çıkar. Bu kayıplar, manyetik alanın malzeme içerisindeki yeniden yönlenme enerjisinden kaynaklanır. İndüksiyon ocaklarında ısı üretimine katkı sağlasa da girdap akımı kayıplarına göre daha düşük seviyededir.

Sonuç olarak, indüksiyonlu ocakların çalışma prensibinin Faraday indüksiyon yasası, Lenz yasası, Ampere yasası, Joule yasası, deri etkisi ve histerezis kayıpları gibi temel elektromanyetik ve ısı transferi yasaları üzerine kurulu olduğu görülmektedir. Bu fiziksel temeller, ocakların yalnızca yüksek frekansta çalışan bir güç devresi değil, aynı zamanda enerji dönüşümünü doğrudan pişirme kabı üzerinde gerçekleştiren özgün bir sistem olduğunu ortaya koymaktadır. Söz konusu yasalar sayesinde, değişken güç kademelerine uyum sağlayabilen, esnek kontrol stratejileri ile farklı pişirme ihtiyaçlarına yanıt verebilen, aynı zamanda enerji verimliliği yüksek ve güvenilir bir pişirme teknolojisinin geliştirilmesi mümkün olmaktadır. Dolayısıyla, indüksiyonlu ocaklarda optimum tasarım için bu yasaların doğru anlaşılması ve uygulamaya yansıtılması, çevreci, güvenli ve kullanıcı dostu ürünlerin geliştirilmesi açısından temel bir gereklilik teşkil etmektedir.

4.2. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği

FloEFD'de kullanılan sayısal çözüm tekniği, Sonlu Hacimler Yöntemi (SHY) üzerine inşa edilmiştir (FloEFD User Guide) . Bu yöntem, korunum denklemlerini kontrol hacimleri üzerinde entegre ederek çözer ve böylece kütle, momentum ve enerji denkliği her bir hücrede sağlanır. Çözüm algoritması, diferansiyel denklemlerin ayrıklaştırılmasıyla elde edilen doğrusal cebirsel sistemlerin çözülmesi esasına dayanır. Bu nedenle ayrıklaştırma şemalarının seçimi, zamansal ve mekânsal yaklaşım yöntemleri ve yakınsama kriterleri çözümün doğruluğu ve kararlılığı açısından kritik rol oynar. Sayısal çözüm sürecinde ilk adım mekânsal ayrıklaştırmadır. FloEFD, hesaplama alanını kontrol hacimlerine bölerken yapısal olmayan kartezyen tabanlı bir mesh sisteminden yararlanır. Bu yapı, karmaşık geometriye sahip ürünlerin hızlı ve otomatik bir şekilde ağ oluşturulmasına olanak tanır. Katı–akışkan ara yüzlerinde özel hücre yapıları tanımlanarak ısı geçişi ve akış davranışı daha hassas bir şekilde modellenir. Mekânsal ayrıklaştırmada, konvektif terimler genellikle ikinci mertebe doğruluk sağlayan şemalarla ifade edilir. Bu yaklaşım, özellikle sınır tabaka çözünürlüğü ve sıcaklık gradyanlarının belirgin olduğu bölgelerde hata payını azaltır. Zamansal ayrıklaştırma aşamasında FloEFD, kararlı (steady) ve geçici (transient) çözümleri destekler. Kararlı çözümlerde zaman türevleri yok sayılarak ortalama akış özellikleri belirlenirken, geçici çözümlerde zamana bağlı terimler ileri veya geri fark şemalarıyla ayrıklaştırılır. Bu yaklaşım, özellikle türbülansın zamana bağlı davranışlarının veya geçici ısıl yüklerin incelendiği çalışmalarda kritik öneme sahiptir. Zaman adımı seçimi, Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) sayısı ile ilişkilendirilerek çözümün stabil kalması sağlanır. Ortaya çıkan ayrık denklemler, doğrusal cebirsel sistemler şeklinde çözülür. FloEFD bu noktada iteratif yöntemlerden yararlanır. Yakınsama süreci, çözümün fiziksel olarak güvenilir olduğunun en önemli göstergesidir. FloEFD'de yakınsama, her iterasyonda kütle, momentum ve enerji denklemlerine ait kalıntıların (residuals) küçülmesiyle takip edilir. Kütle korunumunun sağlandığını göstermek için süreksizlik denkleminin kalıntısı incelenirken, momentum denklemleri için hız bileşenlerine karşılık gelen residual değerleri gözlemlenir. Enerji denklemi açısından ise sıcaklık alanının değişimi belirleyici bir kriterdir. Bu kalıntıların belirli bir eşiğin altına düşmesi, çözümün kararlı ve güvenilir olduğunu gösterir. Ayrıca sadece residual değerlerinin küçülmesi yeterli görülmez; basınç, sıcaklık veya debi gibi mühendislik açısından kritik çıktılarda da

iterasyonlar boyunca sabitlenme beklenir. Sonuç olarak, FloEFD'nin sayısal çözüm algoritması hem sağlam matematiksel temellere hem de pratik mühendislik ihtiyaçlarına dayanmaktadır. Mekânsal ve zamansal ayrıklaştırmaların dengeli kullanımı, uygun iteratif çözüm yöntemlerinin seçilmesi ve yakınsama kriterlerinin doğru tanımlanması sayesinde, indüksiyonlu ocak gibi karmaşık ısı ve akış sistemlerinde yüksek doğrulukta çözümler elde edilebilmektedir.

4.2.1. Temel Denklemler

Hesaplamalı akışkanlar dinamiğinin (HAD) temelini, akışkan hareketini ve enerji taşınımını tanımlayan denklemler oluşturur. FloEFD, Sonlu Hacimler Yöntemi (SHY) üzerine kurulu olup, Navier–Stokes denklemlerinin sayısal çözümünü gerçekleştirir. Bu bölümde süreklilik, momentum ve enerji denklemleri hem diferansiyel formda hem de ayrıklaştırılmış yapılarıyla açıklanmaktadır. Süreklilik denklemi, kütlenin korunumu prensibini ifade eder. Kontrol hacmi içinde zamanla değişen kütle miktarı, hacme giren ve çıkan akış oranları ile dengelenir. Aşağıda süreklilik denklemini gösteren Eşitlik 4.5. ve Eşitlik 4.6.'da ρ akışkan yoğunluğu, $\vec{V}$ hız vektörü, t süre, u, v, w kartezyen koordinatların hız bileşenleri, x, y, z is kartezyen koordinatları ifade etmektedir. FloEFD bu ifadeleri kontrol hacmi üzerinden aşağıda Eşitlik 4.7.'de verilen integral forma dönüştürür.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla . \left(\rho \vec{V}\right) = 0 \tag{4.5.}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho w)}{\partial z} = 0 \tag{4.6.}$$

$$\frac{d}{dt} \int \rho \, dV + \int \rho u \, . \, ndA = 0 \tag{4.7.}$$

Momentum denklemi, Newton'un ikinci yasasının akışkanlar için uyarlanmış halidir. Akışkan parçacığı üzerindeki ivme, basınç gradyanları, viskoz etkiler ve dış kuvvetlerin toplamı ile açıklanır. Aşağıda Eşitlik 4.8.'de gösterilen momentum denklemi ve Eşitlik 4.9.'da gösterilen gerilme tensörü denkleminde ρ akışkan yoğunluğu, $\nabla . (\rho v v)$

konvektif momentum transferi, p basınç, τ gerilme tensörü, f dış kuvvetler, μ dinamik viskozitedir.

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla.(\rho v v) = -\nabla p + \nabla.\tau + f \tag{4.8.}$$

$$\tau = \mu\left(\nabla v + (\nabla v)^T - \frac{2}{3}\mu(\nabla.v)I\right) \tag{4.9.}$$

Enerji denklemi, akışkanın iç enerjisi, kinetik enerjisi ve iletim/taşınım yoluyla gerçekleşen enerji değişimini kapsar. Aşağıda Eşitlik 4.10.'da gösterilen enerji denkleminde e_t toplam enerjiyi, q toplam ısı akısını, φ ise disipasyonu ifade eder.

$$\frac{\partial(\rho e_t)}{\partial t} + \nabla.(\rho v e_t) = -\nabla.q + \varphi \tag{4.10.}$$

4.2.1. Türbülans Modelleme

Akışkanlar mekaniğinde türbülans, düzensiz ve öngörülmesi zor hız dalgalanmaları ile karakterize edilen bir rejimdir. Endüstriyel ölçekte incelenen çoğu akış, özellikle yüksek Reynolds sayılarında türbülanslıdır. Bu nedenle, sayısal analizlerin gerçeğe uygun sonuçlar verebilmesi için türbülansın doğru şekilde modellenmesi gerekir. Ancak türbülansın doğrudan çözümü (Direct Numerical Simulation, DNS) hesaplama maliyeti açısından pratik değildir, çünkü en küçük türbülans yapılarının çözülebilmesi için hücre sayısının Reynolds sayısının dokuzuncu kuvvetiyle orantılı olması gerekir. Bu nedenle FloEFD'de, mühendislik uygulamaları için yaygın olarak kullanılan Reynolds Averaged Navier–Stokes (RANS) yaklaşımı tercih edilmektedir. RANS yaklaşımında akışkan büyüklükleri ortalama ve dalgalı bileşenler şeklinde ayrılır ve aşağıda Eşitlik 4.11.'de gösterildiği gibi yazılır. Aşağıdaki eşitlikte u_i zaman ortalaması alınmış hız, u_i^l ise dalgalı bileşendir.

$$u_i = \overline{u_\iota} + u_i^l \tag{4.11.}$$

Reynolds gerilmeleri türbülansın ortalama akış üzerindeki etkisini temsil eder. Ancak bu ek terimler bilinmediği için problem kapalı değildir ve "türbülans kapanış modelleri" ile çözülür. FloEFD, bu amaçla en yaygın kullanılan modellerden biri olan $k-\varepsilon$ modelini uygular. Bu model iki ek taşınım denklemi çözerek türbülansı temsil eder. Bunlardan ilki, türbülans kinetik enerjisi (k), ikincisi ise enerjinin dağılım (ε) oranıdır. Türbülans kinetik enerji denklemi Eşitlik 4.12.'de, türbülans dağılım hızı denklemi Eşitlik 4.13.'te verilmiştir.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right)+P_k-\rho\varepsilon \qquad (4.12.)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i}=\left(\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right)+C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}P_{k-}C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \qquad (4.13.)$$

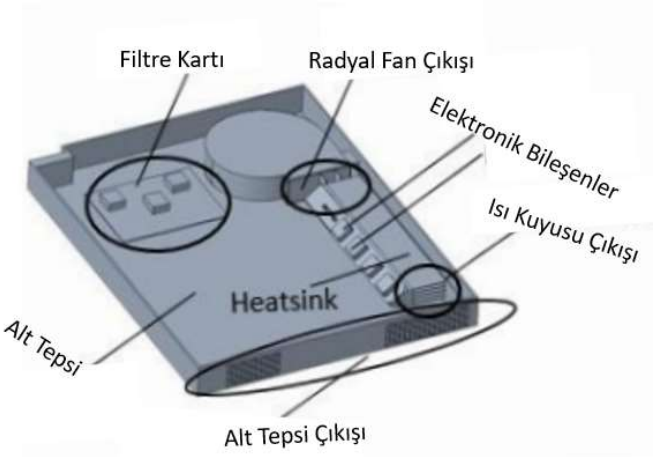
Yukarıdaki denklemlerde verilen k türbülans kinetik enerjisi, μ_t türbülans viskozitesi, σ_k Prandtl sayısı, P_k türbülans kinetik enerji yaratımı, ε türbülans enerji dağılımı, $C_{1\varepsilon}$ ve $C_{2\varepsilon}$ ise deneysel sabitleri ifade eder.

4.3. Deneysel – İstatistiksel – Nümerik Çalışmalar

Bu tez çalışmasında bir indüksiyonlu ocağın soğutma sisteminin tasarımında deneysel, istatistiksel ve nümerik yöntemler kullanılmıştır. Geliştirilen soğutma sisteminde önce bileşen seçimi, sonra bileşenlerin uyumu, ardından sistemin hava akışı ve son olarak tüm sistemin sıcaklık davranışı incelenerek bir soğutma sistemi tasarımına yön verilmiştir. Çalışma temel olarak iki faza ayrılmıştır. İlk faz alt-sistem tasarımı ikinci faz ise tüm sistem davranışının incelenmesidir.

4.3.1. Alt-Sistem Tasarımı

Bu fazda, indüksiyonlu ocakların soğutma düzeneklerinde görev alan radyal fan ile ısı kuyusunun (heatsink) birlikte çalışma performansı incelenmiş ve bu bileşenlerin elektronik devrelerin yüzey sıcaklıklarına olan etkileri değerlendirilmiştir. Hesaplama süresini azaltmak ve ağ (mesh) yapısının doğruluğunu artırmak amacıyla sadeleştirilmiş bir sayısal model oluşturulmuştur. Modelde, radyal fan, yardımcı devre kartı, özel olarak tasarlanan bir ısı kuyusu ve elektronik bileşenlerin yerleştirildiği alt taşıyıcı kısım yer almaktadır. Isı kuyusu, fan çıkışının hemen karşısına yerleştirilmiş olup, hava akımının doğrudan yüzey üzerinde etkili olacak şekilde yönlendirilmesi sağlanmıştır. Fanın hava girişi alt gövdeye, çıkışı ise taban bölümünde yer alan metal ısı kuyusuna yönlenecek biçimde konfigüre edilmiştir. Aşağıda Şekil 4.2.'de basitleştirilmiş model gösterilmiştir. Gösterilen ısı kuyusu tasarımı için 3 alternatif tasarım hazırlanmış ve bu tasarımlar HAD yöntemi ile simüle edilerek elektronik bileşen yüzey sıcaklıklarına etkileri karşılaştırılmıştır. Alternatif olarak hazırlanan 3 ısı kuyusu tasarımı Şekil 4.3.'de gösterilmiştir. Bu ısı yutucular, yüzey alanı ve kanatçık yapısı bakımından birbirinden farklı olacak şekilde tasarlanmıştır. İlk aşamada, söz konusu ısı yutucular ABS malzemeden 3D yazıcı ile üretilmiş ve basitleştirilmiş test düzeneğine monte edilmiştir. ABS'nin tercih edilme nedeni, düşük ısıl iletkenliğine rağmen üretim kolaylığı, mekanik kararlılığı ve hava akışı deneyleri için maliyet açısından avantajlı olmasıdır. Hava hızı ölçümleri, fan çalışırken belirlenmiş çıkış bölgelerinde TESTO cihazı (TESTO SE, Titisee-Neustadt, Almanya) kullanılarak alınmıştır. Prototip ısı kuyusu tasarımları Tip 1, Tip 2 ve Tip 3 sunulmuştur. Isı kuyusu tasarımlarında, üretici kısıtlamaları ve ürün geometrisi dikkate alınmıştır. Kanat yüksekliği ocak tasarımına uyum sağlayacak şekilde 20 mm olarak sabitlenmiş, kanat kalınlığı ise üretilebilirlik koşullarına göre 1.3 mm olarak belirlenmiştir. Bu doğrultuda, Tip 1'de 5 kanat, Tip 2'de 12 kanat ve Tip 3'te 8 kanat kullanılmıştır. Etkin yüzey alanları ise sırasıyla 0.0835 m^2, 0.1040 m^2 ve 0.0683 m^2 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.2. Basitleştirilmiş ocak modeli.



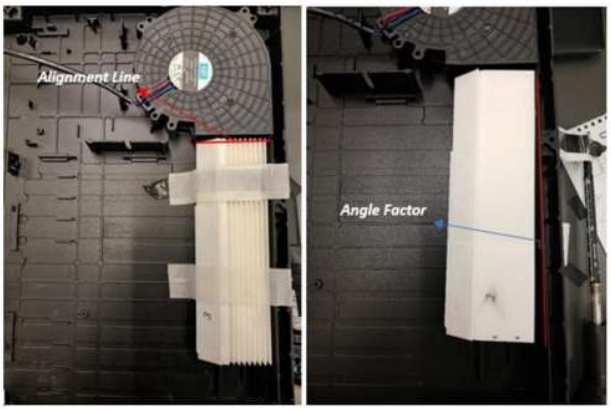
Şekil 4.3. Isı kuyusu alternatif tasarımları.

Tip 1, Tip 2 ve Tip 3 ısı kuyularının performansları HAD yöntemiyle karşılaştırılmıştır. HAD yöntemi validasyonu için hava akışı simülasyonları deneysel ölçümler ile valide edilmiştir. Deneysel ölçüm ile validasyonu sağlanabilmesi için deneysel ölçümdeki değişkenliklerin azaltılabilmesi adına bir Deney Tasarımı (DOE) planlanmıştır (Chiang vd., 2005). Deney tasarımları için Tip 1 ısı kuyusu referans olarak kullanılmıştır. Bu kapsamda üç temel faktör dikkate alınmıştır: ısı kuyusunun konumu, ölçümün yapıldığı nokta ve ölçüm probunun serbestlik durumu. Çizelge 4.1.'de verilen tam faktöriyel tasarımda üç faktör farklı seviyelerde ele alınmış ve toplamda 12 ölçüm gerçekleştirilmiştir. Montaj sırasında, ısı kuyusu kanatçıklarının fan hava akışı ile paralel olacak şekilde konumlandırılması büyük önem taşımaktadır, çünkü bu hizalama ısı transferinin verimliliğini doğrudan etkilemektedir. Üretim ya da test sırasında yaşanan

hizalama hataları, hava akışında bozulmalara neden olabilir ve soğutma performansı hakkında yanlış sonuçlara yol açabilir. Bu etkiyi incelemek için ısı kuyusu konumu ilk faktör olarak seçilmiş ve üç farklı seviyede değerlendirilmiştir. Açısal kaymalar rastgele atanmış olsa da ek değişkenlik oluşmaması için tüm testlerde aynı açı sabit tutulmuştur. "Fan içi" konfigürasyonunda ise ısı kuyusu doğrudan fanın çıkış kanalına yerleştirilmiştir. Ayrıca hava hızı ölçüm doğruluğunu incelemek amacıyla iki ek faktör daha sisteme dahil edilmiştir: ilki ölçüm türü (iki seviye: sabit elde tutulan pozisyon ve serbest elde tutulan pozisyon), diğeri ise prob serbestliği (iki seviye: prob ucu sabit ve prob ucu serbest). Şekil 4.4.'te ısı kuyusu pozisyonunun dik ve açılı durumları gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. Tam faktöriyel deney tasarımı.

Deney Numarası	Isı Kuyusu Pozisyonu	Ölçüm Tipi	Prob Serbestliği
1	Açılı	Sabit	Sabit
2	Dik	Sabit	Serbest
3	Fan İçi	Sabit	Sabit
4	Açılı	Serbest	Serbest
5	Fan İçi	Serbest	Serbest
6	Fan İçi	Serbest	Sabit
7	Açılı	Sabit	Serbest
8	Dik	Sabit	Sabit
9	Dik	Serbest	Sabit
10	Açılı	Serbest	Sabit
11	Fan İçi	Sabit	Serbest
12	Dik	Serbest	Serbest

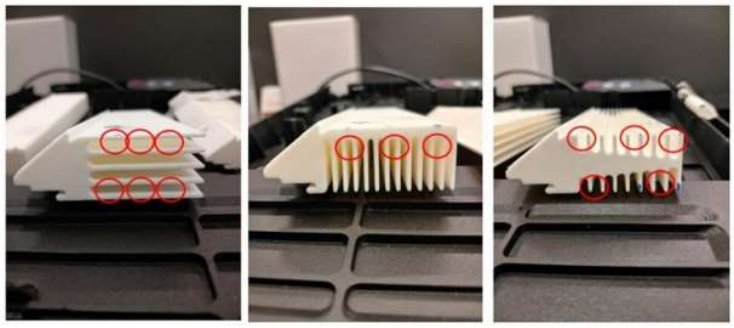


Şekil 4.4. Isı kuyusu pozisyonları.

DOE çalışmasının tamamlanmasının ardından, hava hızları her bir soğutucunun çıkış noktalarında (Tip 1, Tip 2 ve Tip 3) ölçülmüştür. Bu noktalar, radyal fanın karşısında ve aşağıda Şekil 4.5.'te kırmızı dairelerle gösterilen bölgelerde seçilmiştir. Ölçümlerde tutarlılık sağlamak amacıyla Testo anemometre probu kanatçıkların merkezine yerleştirilmiş, yüzeylerin üzerine değil aralarına konumlandırılmıştır. Hava hızı ölçümleri, her bir soğutucunun çıkış bölgesinde belirlenen noktalarda gerçekleştirilmiş ve her ölçüm üç kez tekrar edilmiştir. İki farklı operatör ölçümleri yapmış, böylece operatörden kaynaklanabilecek farklılıklar da değerlendirilmiştir. Elde edilen veriler, operatör, ölçüm noktası ve zamanlamanın hava akışı üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla Tek Yönlü Varyans Analizi (ANOVA) ile analiz edilmiştir. ANOVA, gruplar arasında istatistiksel olarak anlamlı farkların olup olmadığını ortaya koymuştur. İstatistiksel çalışmada, sıfır hipotez (H_0), tüm grup ortalamalarının eşit olduğunu varsayarken; alternatif hipotez (H_1) en az bir grubun ortalamasının farklı olduğunu öne sürmüştür. Gruplar arası varyansların eşit olup olmadığını değerlendirmek için Levene testi uygulanmıştır. Bu testten elde edilen p-değeri, belirlenen anlamlılık düzeyi ($\alpha = 0,05$) ile karşılaştırılmıştır. Eğer p-değeri bu eşikten düşük çıkarsa, varyansların farklı olduğu kabul edilmiştir. Tam tersi durumda, yani p-değeri anlamlılık düzeyinin üzerinde olduğunda, grup varyanslarının eşit olduğu sonucuna varılmıştır (Yin vd.,2001, Li vd., 2012). Ölçüm varyansları arasındaki farkları değerlendirmek amacıyla Bonferroni güven aralıkları kullanılmıştır. Bu yöntem, çoklu karşılaştırmalarda hata oranını kontrol altında tutmak için tercih edilmektedir. Çalışmada %95 güven düzeyinde Bonferroni güven aralıkları hesaplanmış ve her bir ölçüm grubundaki değişimler incelenmiştir. Bu güven aralıkları, ölçümlerin standart sapma (SD) değeri üzerinden aşağıdaki Eşitlik 4.14.'te gösterilen denklem elde edilmiştir.

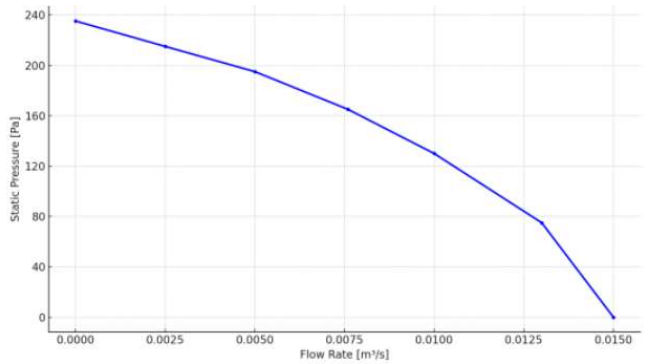
$$I = S \pm t_{\frac{\alpha}{2m},df} \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (4.14.)$$

Eşitlik 4.14.'teki $t_{\frac{\alpha}{2m},df}$ Bonferroni düzeltmesi, m karşılaştırma numarası ve df serbestlik derecesidir.



Şekil 4.5. Prob ölçüm noktaları.

Deneysel çalışmalar sonrasında HAD analizleri çalışmalarına geçilmiştir. HAD analizlerinin hava akışı aşamasında, radyal fan üretici tarafından sağlanan P-Q (basınç-debi) eğrisi kullanılarak modellenmiştir. Böylece fanın iç kanat geometrileri yerine, doğrudan işletim koşullarına karşılık gelen basınç sınır şartı uygulanmıştır. Bu yöntem, MRF (Multiple Reference Frame – Hareketli Referans Çerçevesi) yaklaşımına kıyasla kanat geometrilerinin modellenmemesinden kaynaklı daha az hesaplama yüküne sahiptir. Radyal fanın üretici tarafından sağlanan P-Q eğrisi aşağıda Şekil 4.6.'da gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Fan basınç-debi eğrisi.

Validasyon çalışmaları için gerçekleştirilen hava akışı HAD analizi sonrasında termal etkilerin eklendiği ve ısı yutucuların elektronik bileşenlerin sıcaklıklarına etkisinin incelendiği HAD çalışmalarına başlanmıştır. Bu aşamada, basitleştirilmiş deneysel düzene dayalı bir HAD modeli geliştirilmiştir. Bu modelde üç farklı ısı yutucu tipi simülasyona dahil edilmiş, elektronik bileşenler ısı kaynağı olarak tanımlanmış ve radyal fan üretici verisine dayalı P-Q eğrisi üzerinden çalıştırılmıştır. Böylece bileşen yüzeylerinde oluşan sıcaklıklar kararlı durum koşullarında elde edilmiştir. Analizler FloEFD yazılımı ile yürütülmüş, türbülans modellemesi için ise Lam ve Trebunsikh gibi çalışmaların önerdiği sönüm fonksiyonlarına sahip k-ε türbülans modeli kullanılmıştır (Lam vd., 1981, Trebunskikh vd., 2012). Yazılım, Kartezyen ağ yapısı ile birlikte sınır bölgelerde Van Driest'in evrensel profillerini ve "iki ölçekli duvar fonksiyonları" yaklaşımını uygulamıştır (Amirabedin vd., 2019, Kalitzin vd., 2002). Termal etkiler için ise indüksiyon bobininin altında bulunan IGBT (Elektronik bileşen – Isolated Gate Bi-Polar Transistor) modülleri, yüksek frekanslı akım (20–50 kHz) ile çalıştıklarından dolayı anahtar elemanlar olarak modellenmiş ve bu elemanlar için 1,8 kW güç tüketimi varsayılmıştır. Isı kayıpları üretici verilerinden alınan verimlilik değerleriyle ilişkilendirilmiştir. Modelde kullanılan malzeme özellikleri (ısı iletkenliği, yoğunluk, özgül ısı) deneysel düzene uygun şekilde tanımlanmış ve Çizelge 4.2.'de gösterilmiştir. Enerji denkleminin kararlı akış koşullarında çözülmesiyle, ısı kuyusu ve elektronik bileşenler üzerindeki sıcaklık dağılımları elde edilmiş, özellikle IGBT yüzey sıcaklıkları hesaplanarak farklı ısı kuyusu tasarımlarının soğutma performansları karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.2. HAD modeli malzeme özellikleri.

Bileşen	Malzeme	Yoğunluk [kg/m^3]	Özgül Isı [kJ/kgK]	İletim Katsayısı [W/mK]
IGBT	Yarı İletken	2330	750	125
Alt Tepsi	PA66	1140	1670	0.25
Elektronik Kart	FR4	1850	1100	0.35
Isı Kuyusu	Al 6061	2700	896	167
Diğer Elektronik	Yarı İletken	2330	750	125

Bileşenler				

Isı kaynağı girdisi olarak ise elektronik bileşenler kullanılmıştır. Yüksek frekanslı anahtarlamadan kaynaklı meydana gelen ısıl yayınımlar aşağıda Eşitlik 4.15.'e göre hesaplanmıştır. Eşitlikte verilen Q_{IGBT} termal yayılımı, P_{output} bobin gücünü, α_{IGBT} ise elektronik bileşenin verimini temsil etmektedir.

$$Q_{IGBT} = P_{output}\, x\, \frac{1 - \alpha_{IGBT}}{\alpha_{IGBT}} \qquad (4.15.)$$

Deneysel çalışmalar ve HAD çalışmaları kapsamında, ölçüm sonuçlarının güvenilirliğini sağlamak için belirsizlik analizi kritik bir öneme sahiptir. Ölçümlerin ortalama değerleri sistem performansına dair bir tahmin sunsa da belirsizlik analizi bu ölçümlere eşlik eden olası hata paylarını ortaya koyar. Bu yaklaşım, araştırmacıların deneysel faktörlerden veya rastlantısal ölçüm farklılıklarından kaynaklanan etkileri ayırt edebilmesine imkan tanır.

Belirsizlik analizi aynı zamanda karar verme süreçlerini de destekler; çünkü sonuçların güven aralıklarını ortaya koyarak, deneylerden elde edilen çıkarımların sağlamlığını artırır. İlk adımda, ölçülen değerlerin aritmetik ortalaması Eşitlik 4.16. kullanılarak hesaplanır. Ardından, ölçümlerin ortalama etrafındaki dağılımını gösteren standart sapma Eşitlik 4.17. ile belirlenir. Tekrarlanan ölçümlerdeki istatistiksel değişimlerden kaynaklanan Tip A belirsizliği, Eşitlik 4.18. yardımıyla hesaplanır. Ölçüm cihazlarının hassasiyet sınırlarından veya sistematik etkilerden doğan Tip B belirsizliği ise bağımsız kaynakların bir araya getirilmesiyle değerlendirilir ve bu işlem Eşitlik 4.19. üzerinden yapılır. Son aşamada, toplam belirsizlik Eşitlik 4.20. ile tanımlanır ve deneysel sonuçlarla sayısal simülasyon çıktıları arasındaki uyum Eşitlik 4.21.'de gösterilen Z-skoru yardımıyla incelenir. Bu yöntem, sonuçların belirlenen belirsizlik sınırları içerisinde ne ölçüde güvenilir olduğunu ortaya koyar.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n} \tag{4.16.}$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \tag{4.17.}$$

$$u_a = \frac{s}{\sqrt{n}} \tag{4.18.}$$

$$u_b = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} \tag{4.19.}$$

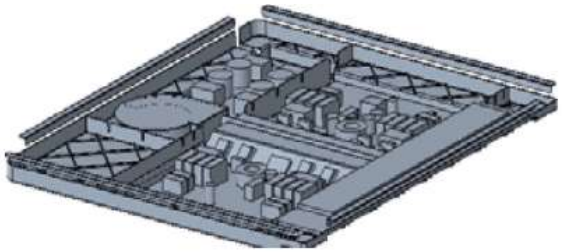
$$u_{total} = \sqrt{u_a^2 + u_b^2} \tag{4.20.}$$

$$Z = \frac{x_{CFD} - \bar{x}}{u_{total}} \tag{4.21.}$$

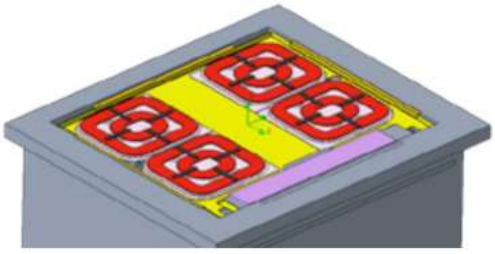
Yukarıdaki eşitliklerde gösterilen $\bar{x}$ ölçümlerin ortalamalarını, n ölçüm sayısını, s standart sapmayı, u_a tip A belirsizliğini, u_b tip B belirsizliğini, u_{total} toplam belirsizliği, x_{CFD} HAD çalışması sonucunu ve Z ise kontrol skorunu temsil etmektedir.

4.3.2. Tüm-Sistem Tasarımı

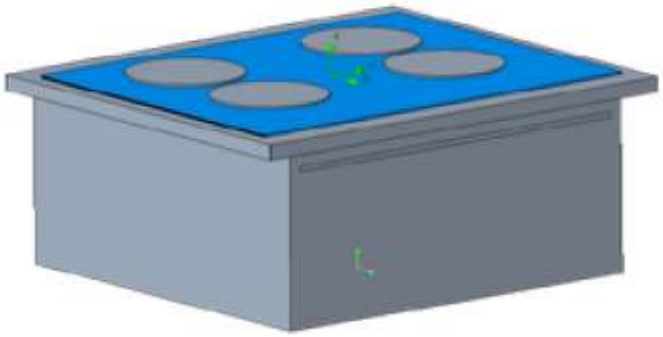
Tezin bu aşamasında bir indüksiyonlu ocağın tam montajlı hali bir ankastre kabinin içerisindeykenki çalışma durumunu simüle edebilmek için bir dizi çalışma yürütülmüştür. Tam montajlı bir indüksiyonlu ocak modelinde alt tepsi, fan, ısı yutucu, elektronik kartlar, ara bağlama braketleri, bobin taşıyıcı plaka, bobin, kullanıcı ara yüz kartı, cam ve kabin gibi bileşenler bulunmaktadır. HAD yöntemi ile incelenecek basitleştirilmiş indüksiyonlu ocak modeli sırası ile Şekil 4.7., Şekil 4.8. ve Şekil 4.9.'da gösterilmiştir.



Şekil 4.7. İndüksiyonlu ocak alt gövde grubu.



Şekil 4.8. İndüksiyonlu bobin yerleşimi.



Şekil 4.9. Ankastre indüksiyonlu ocak modeli.

Aşağıda Çizelge 4.3.'te HAD modeli için ısı kaynağı güç girdileri, Çizelge 4.4.'te ise HAD model elemanlarının malzeme özellikleri gösterilmektedir.

Çizelge 4.3. HAD modeli güç girdileri.

Elektronik Bileşen	Isı Yayınımı [W]
IGBT	10.37
Doğrultucu	6.3

Diğer Elemanlar	1.3 – 1.8
Bobin Bakır Eleman	24
Bobin Al Eleman	13

Çizelge 4.4. HAD modeli malzeme özellikleri.

Eleman İsmi	Eleman Malzemesi	Yoğunluk [kg/m3]	Özgül Isı [J/kgK]	İletim Katsayısı [W/mK]
Kabin	MDF	750	1700	0.3
Cam	Seramik Cam	2600	850	1.6
Orta Taşıyıcı	Al 6061	2700	896	167
Alt Tepsi	PA66	1140	1670	0.25
Elektronik Kart	FR4	1850	1100	0.35
L Braket	Çelik	7800	470	52
Isı Yutucu	Al 6061	2700	896	167

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Tezin bu kısmında 4. Bölüm'de anlatılan deneysel-istatistiksel ve nümerik çalışma sonuçları verilmiştir.

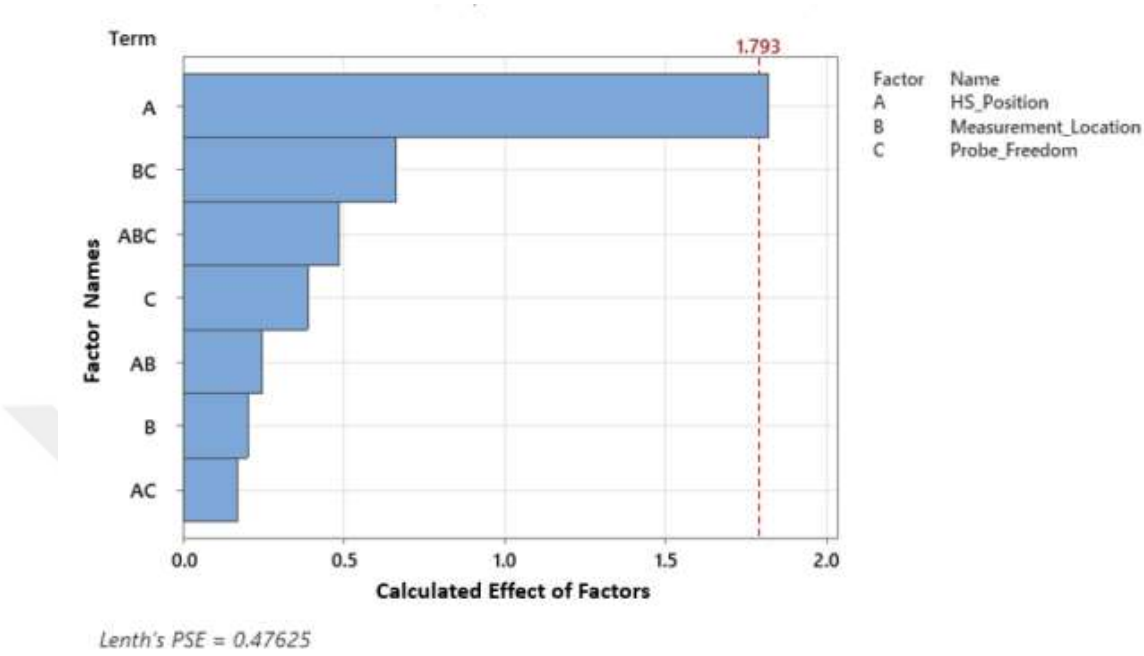
5.1. Alt-Tasarım Sonuçları

Ölçüm yönteminin güvenilirliğini değerlendirmek amacıyla, Tip 2 ısı yutucu üzerinde çeşitli faktörler ve seviyeler dikkate alınarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu faktörler, ısı yutucu konumu, ölçüm noktası ve prob serbestliği olarak belirlenmiş ve her bir kombinasyona ait ölçüm sonuçları kaydedilmiştir. Elde edilen veriler aşağıda Çizelge 5.1.'de sunulmaktadır. Çizelgede görüldüğü üzere, ölçümler üç farklı tekrar halinde yapılmış ve ortalama değerlerin yanı sıra olası sapmaların da gözlenebilmesine olanak tanınmıştır. Bu yöntem, ölçümlerde operatör kaynaklı değişkenlikleri minimize ederek, deneysel tasarımın doğruluğunu artırmayı amaçlamaktadır.

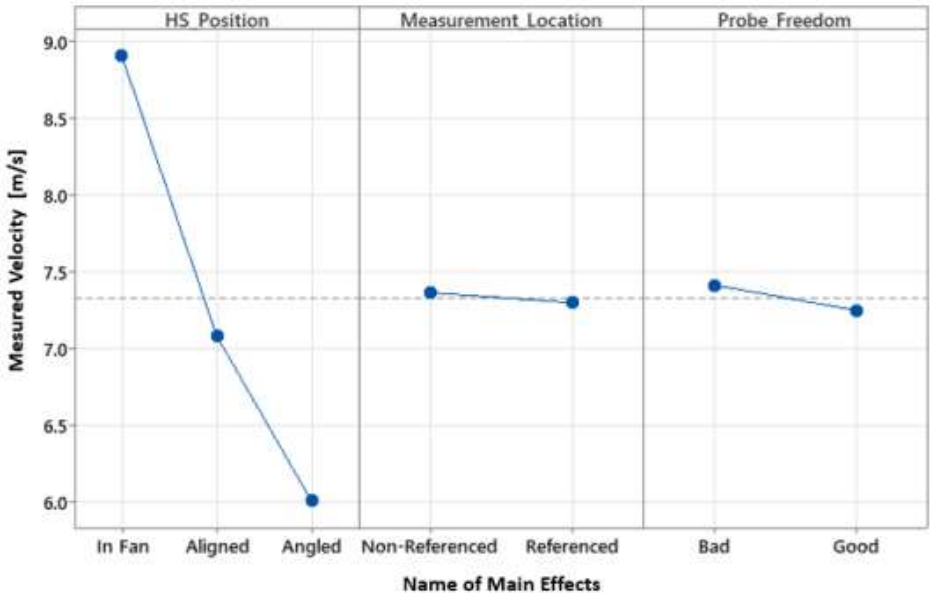
Çizelge 5.1. Deney tasarımı ölçüm sonuçları.

Deney Numarası	Isı Kuyusu Pozisyonu	Ölçüm Tipi	Prob Serbestliği	Ölçüm 1 [m/s]	Ölçüm 2 [m/s]	Ölçüm 3 [m/s]
1	Açılı	Sabit	Sabit	6.14	6.19	6.12
2	Dik	Sabit	Serbest	7.14	7.15	7.09
3	Fan İçi	Sabit	Sabit	8.69	9.00	9.24
4	Açılı	Serbest	Serbest	5.84	5.64	5.50
5	Fan İçi	Serbest	Serbest	10.15	10.84	8.95
6	Fan İçi	Serbest	Sabit	8.30	8.11	8.41
7	Açılı	Sabit	Serbest	6.12	6.05	6.05
8	Dik	Sabit	Sabit	7.09	7.05	7.11
9	Dik	Serbest	Sabit	6.80	6.88	6.99
10	Açılı	Serbest	Sabit	6.45	6.10	5.90
11	Fan İçi	Sabit	Serbest	8.54	8.35	8.25
12	Dik	Serbest	Serbest	7.84	7.03	6.90

Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen bulgular, tam faktöriyel deney tasarımı kapsamında belirlenen faktörlerin ve bu faktörler arasındaki etkileşimlerin hava hızına olan etkilerini ortaya koymuştur. 5.1.'de yer alan Pareto Etki Grafiği, her bir faktörün ölçülen ortalama hava hızına yaptığı katkının büyüklüğünü göstermektedir. Grafikte sütunların yüksekliği, ilgili faktörün etkisinin büyüklüğünü, kırmızı kesikli çizgi ise Lenth'in Pooled Standard Error (PSE) yaklaşımıyla hesaplanan anlamlılık sınırını (1.793) işaret etmektedir. Bu çizginin üzerinde kalan faktörler istatistiksel olarak anlamlı kabul edilmektedir. Sonuçlara göre, özellikle ısı yutucu konumunun en güçlü etkiyi oluşturduğu görülmüştür. Bu bulgu, soğutma performansının büyük ölçüde ısı kuyusu yerleşimine bağlı olduğunu açıkça göstermektedir. Diğer faktörler olan ölçüm noktası ve probların serbestliği de etkiye sahip olmakla birlikte, Pareto analizi bunların göreceli öneminin daha düşük olduğunu ortaya koymaktadır. Pareto etki grafiğindeki etki A ısı kuyusu pozisyonunu, etki B, ölçüm tipini ve etki C ise prob serbestliğini temsil etmektedir. B ve C etkisinin ikili etkisi ve A-B-C etkilerinin üçlü etkileşimlerinin yarattığı etki B ve C ana etkilerinden daha yüksek etkiye sahip olmakla beraber anlamlılık sınırının altında kaldığı için en etkili faktörler arasında seçilmemiştir.



Şekil 5.1. Pareto etki sonuçları.



Şekil 5.2. Ana etki sonuçları.

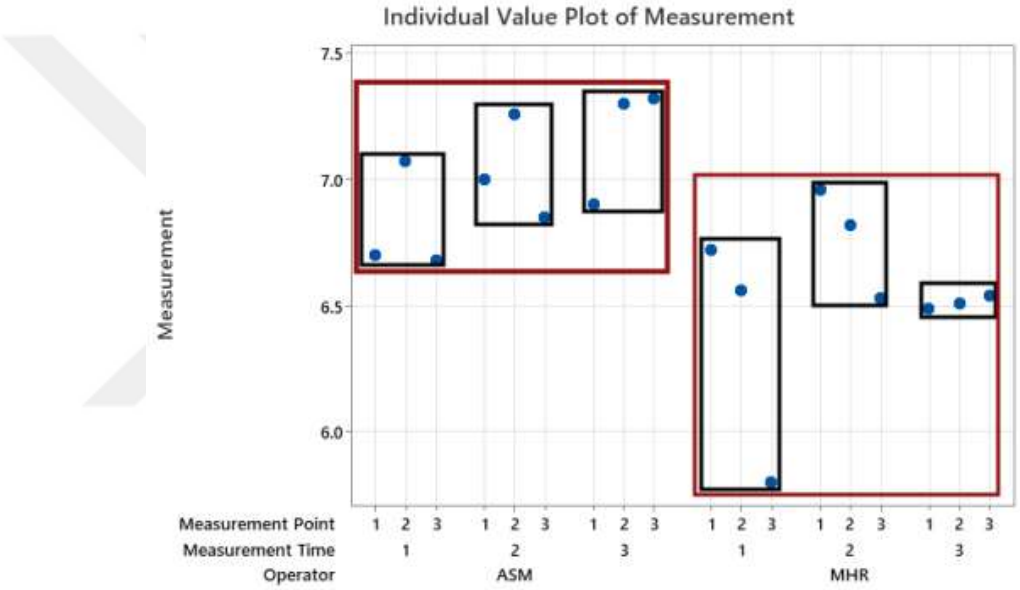
Yukarıda Şekil 5.2.'de gösterilen ana etki grafiği, faktör seviyelerindeki değişimin hava hızına etkisini daha ayrıntılı şekilde ortaya koymaktadır. Bu grafik her bir faktör

seviyesindeki ortalama hava hızını göstermekte ve faktörlerin farklı kombinasyonlardaki etkilerinin karşılaştırılmasına olanak sağlamaktadır. Grafikten elde edilen sonuçlara göre, fan içine yerleştirilen heatsink en yüksek hava hızını sağlamış, açılı yerleşim ise en düşük performansı göstermiştir. Ölçüm noktası değişimlerinin etkisi sınırlı kalmış, prob özgürlüğü faktöründe ise küçük dalgalanmalar gözlenmiştir. Bu durum, özellikle geometrik konumlandırmanın (örneğin ısı kuyusunun fan çıkışına göre hizalanması) akış karakteristikleri üzerinde belirleyici bir rol oynadığını göstermektedir.

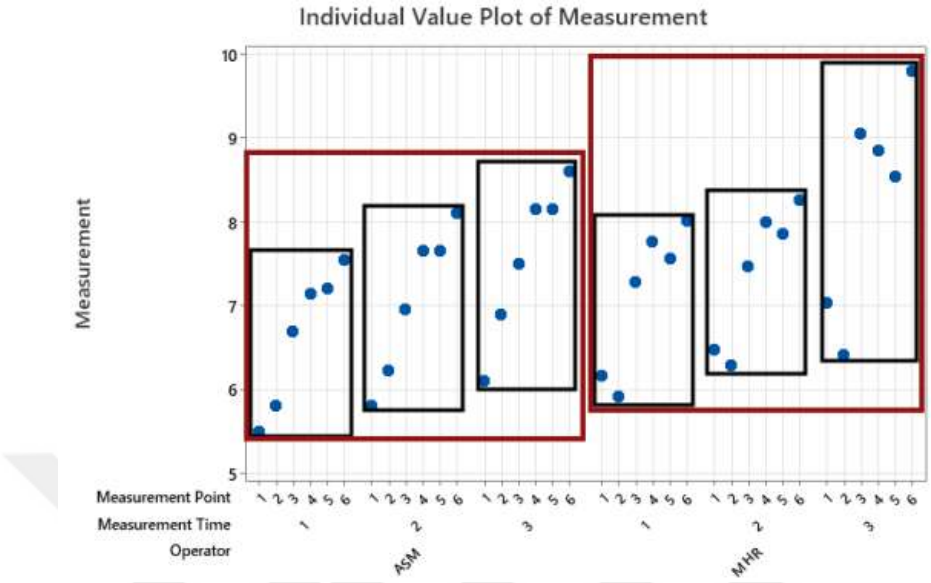
Pareto grafiği ile ana etki grafiği birlikte değerlendirildiğinde, deneysel tasarımın sadece faktörlerin tekil etkilerini değil, aynı zamanda faktörler arası etkileşimleri de ortaya koyduğu görülmektedir. Bu kapsamda, özellikle ısı yutucu konumunun belirlenmesi sırasında tasarımın dikkatli yapılmasının, sistemin genel soğutma verimliliği açısından kritik önemde olduğu söylenebilir. Ayrıca, Pareto grafiğinde yer alan kırmızı anlamlılık çizgisi, hangi faktörlerin modelde gürültüden ayrışarak anlamlı kabul edilmesi gerektiğini istatistiksel güvenilirlikle göstermektedir. Bu durum, deneysel tasarımın sağlamlığını artırmakta ve elde edilen bulguların genellenebilirliğini güçlendirmektedir. Sonuç olarak, deneysel bulgular sistemin hava akışı performansını etkileyen en baskın parametrenin ısı kuyusu konumu olduğunu göstermiştir. Ölçüm noktası ve probların serbestliği ise ikincil derecede etkili parametrelerdir. Bu bulgular, indüksiyonlu ocak soğutma sistemlerinde optimal fan-ısı kuyusu entegrasyonu için tasarım sürecinde hangi parametrelerin öncelikli olarak dikkate alınması gerektiğine ışık tutmaktadır.

Aşağıda Şekil 5.3., Şekil 5.4. ve Şekil 5.5.'te gösterilen sonuçlar sırası ile Tip 1, Tip 2 ve Tip 3 ısı kuyusu hava hızı ölçüm sonuçlarını göstermektedir. Ölçümler Şekil 4.4.'te gösterilen kırmızı daire ile işaretlenmiş alanlardan yapılmış, ölçüm yöntemindeki değişkenlikler ise Şekil 5.1. ve Şekil 5.2.'de incelenen sonuçlar doğrultusunda azaltılmıştır. Ölçümler iki farklı operatör ile gerçekleştirilmiş ve her ölçüm 3 kere tekrar edilmiştir. Sonuçlar bireysel değer grafiklerinde incelenmiş ve ANOVA metodu ile varyans analizi gerçekleştirilmiştir. Siyah kutuların genişliği, ölçüm noktaları arasındaki dağılımı; kırmızı kutular ise genel ölçüm aralığını temsil etmektedir. Tip 1 ısı yutucuya ait bireysel değer grafiği, diğer tasarımlara kıyasla daha dar bir hız aralığında sonuçlar göstermektedir. Operatör 1'in ölçümlerinde ortalama değerler 7 m/s civarında istikrar göstermiştir. Buna karşılık Operatör 2'nin ölçümlerinde dağılım daha heterojen olup, bazı noktalarda 6

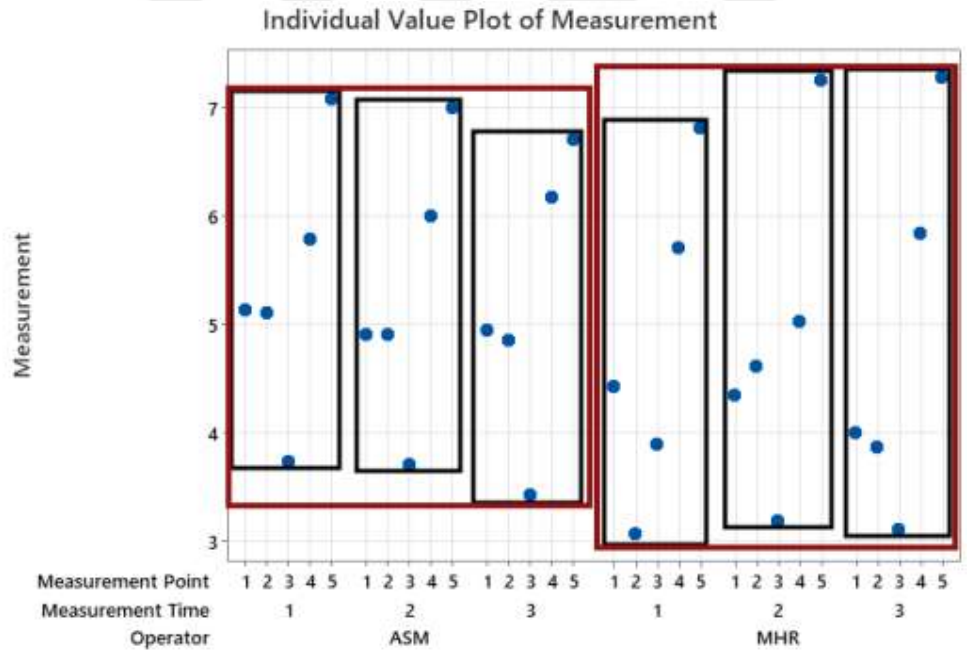
m/s’nin altına düşerken, bazı noktalarda 7 m/s seviyesinde sabitlenmiştir. Bu durum, Tip 1 ısı yutucusunun hava akışında daha dengeli bir karakteristiğe sahip olduğunu, ancak operatör bağımlılığının ölçüm doğruluğu üzerinde etkili olabileceğini göstermektedir. Grafik incelendiğinde siyah ve kırmızı kutuların Operatör 1’de daha dar, Operatör 2’de ise daha geniş bir aralık oluşturduğu görülmektedir. Bu farklılık, özellikle Tip 1 ısı yutucunun küçük tasarım farklılıklarına rağmen ölçüm hassasiyetinde daha güvenilir bir profil sunduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 5.3. Tip 1 ısı kuyusu ölçüm sonuçları.



Şekil 5.4. Tip 2 ısı kuyusu ölçüm sonuçları.



Şekil 5.5. Tip 3 ısı kuyusu ölçüm sonuçları.

Tip 2 ısı emiciye ait bireysel değer grafiği incelendiğinde, ölçüm noktaları arasında belirgin bir hız dağılımı farklılığı olduğu görülmektedir. ASM operatörü tarafından yapılan ölçümlerde değerler 6–9 m/s aralığında yoğunlaşırken, MHR operatöründe benzer dağılım korunmuş ancak üst sınırda daha yüksek hız değerleri kaydedilmiştir. Özellikle MHR'nin 3. ölçüm setinde 9 m/s üzerine çıkan değerler, operatör etkisinin ölçüm sonuçları üzerinde

önemli bir değişkenlik yarattığını göstermektedir. Tip 3 ısı yutucuya ilişkin bireysel değer grafiği en yüksek varyasyonu sergilemektedir. ASM operatörünün ölçümlerinde 3.5–7 m/s arasında oldukça geniş bir dağılım gözlenirken, MHR operatöründe bu dağılım daha da belirginleşmiş ve 3 m/s ile 7 m/s arasında değişim göstermiştir. Özellikle MHR'nin ölçümlerinde noktalar arasında büyük sapmalar görülmesi, bu ısı yutucunun hava akışında daha kararsız bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Bu durum, Tip 3 tasarımının hava akışı açısından tutarlı sonuçlar vermediğini ve operatör bağımlılığını daha da artırdığını göstermektedir.

Bir sonraki adımda HAD analizlerinin ilk fazının sonuçları gösterilmektedir. HAD çalışmasının ilk aşamasında, hava akışı dağılımı deneysel olarak ölçülen hız değerleri ile sayısal modelden elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Çizelge 5.2., Çizelge 5.3. ve Çizelge 5.4.'te verilen kıyaslamalar, deneysel veriler ile sayısal tahminler arasında güçlü bir uyum olduğunu göstermekte ve simülasyon modelinin hava akış davranışını doğru bir şekilde yakaladığını ortaya koymaktadır. Hava akışı özelliklerinin başarıyla doğrulanmasının ardından, kurulan HAD modelinin sistem içerisindeki akış alanını güvenilir biçimde tahmin edebileceği sonucuna varılmıştır.

Çizelge 5.2. Tip 1 HAD ve Deneysel ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması.

Ölçüm Yöntemi	Daire 1 [m/s]	Daire 2 [m/s]	Daire 3 [m/s]	Daire 4 [m/s]
HAD	5.94	6.88	8.06	7.98
Deneysel	6.56	7.94	7.99	8.69
Fark	-9%	-13%	1%	-8%

Çizelge 5.3. Tip 2 HAD ve Deneysel ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması.

Ölçüm Yöntemi	Daire 1 [m/s]	Daire 2 [m/s]	Daire 3 [m/s]
HAD	7.43	6.71	6.54
Deneysel	6.80	6.92	6.62
Fark	9%	-3%	-1%

Çizelge 5.4. Tip 3 HAD ve Deneysel ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması.

Ölçüm Yöntemi	Daire 1 [m/s]	Daire 2 [m/s]	Daire 3 [m/s]	Daire 4 [m/s]
HAD	4.36	4.22	3.58	7.43
Deneysel	4.63	4.40	3.51	7.02
Fark	-6%	-4%	2%	6%

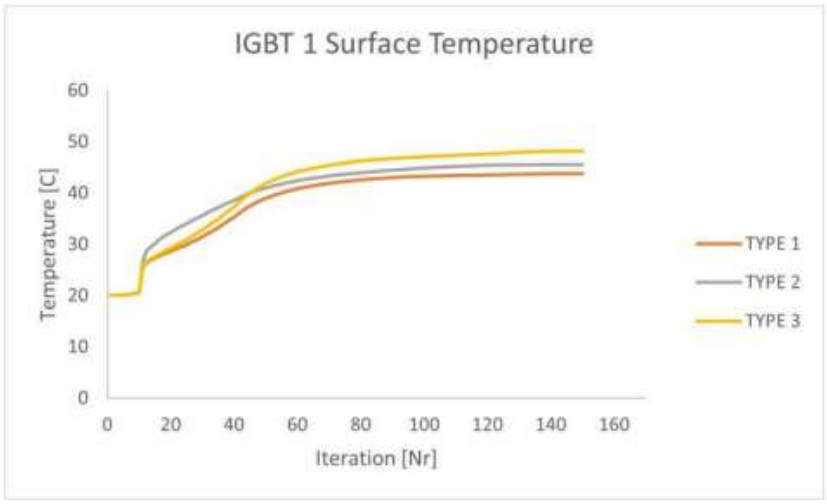
Çizelge 5.2., Çizelge 5.3. ve Çizelge 5.4.'te verilen veriler incelendiğinde, HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) sonuçları ile deneysel ölçümler arasında genel olarak güçlü bir uyum gözlemlenmiştir. Tip 1 ısı yutucusunda, deneysel ve sayısal değerler arasındaki farkın %–13 ile %1 arasında değiştiği görülmektedir. Bu durum, HAD modelinin hava akışı davranışını yüksek doğrulukla yansıtabildiğini, ancak özellikle Daire 2 bölgesinde belirgin sapmaların ortaya çıktığını göstermektedir. Tip 2 ısı yutucusunda ise farkların oldukça düşük seviyelerde gerçekleştiği ve %–3 ile %9 arasında değiştiği tespit edilmiştir. Bu bulgu, özellikle geometrik uyumun daha başarılı olduğu tasarımlarda sayısal ve deneysel verilerin örtüşme oranının arttığını ortaya koymaktadır. Tip 3 ısı yutucusu için elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, farkların %–6 ile %6 aralığında olduğu belirlenmiş ve özellikle Daire 4'te gözlenen %6'lık pozitif fark, HAD modelinin hava akışını yer yer olduğundan daha yüksek öngörebildiğini işaret etmiştir. Genel olarak, üç farklı ısı yutucu tipinde yapılan karşılaştırmalar, kullanılan HAD modelinin güvenilirliğini ve geçerliliğini desteklemektedir. Deneysel ölçümlerin güvenilirliğini değerlendirmek amacıyla hem Tip A (istatistiksel) hem de Tip B (sistematik) belirsizlik bileşenleri dikkate alınarak bir analiz gerçekleştirilmiştir. Tekrarlanan hava hızı ölçümlerine dayalı olarak Tip A belirsizliği 0.2193 m/s olarak hesaplanırken, cihaz hataları, fan performansındaki değişimler ve geometrik konumlandırma etkilerini kapsayan Tip B belirsizliği 0.4807 m/s

olarak belirlenmiştir. Bu iki bileşen, kareler toplamı yöntemi (RSS) kullanılarak birleştirilmiş ve toplam belirsizlik 0.5284 m/s olarak bulunmuştur. Ortalama hava hızı değeri 6.1817 m/s dikkate alındığında, göreceli belirsizlik yaklaşık %8,55 olarak hesaplanmıştır. Akışkanlar mekaniği ve ısı transferi alanında yürütülen deneysel çalışmalar için genel kabul gören %5–10 aralığıyla karşılaştırıldığında, elde edilen %8.55'lik belirsizlik değeri normal ve kabul edilebilir sınırlar içinde yer almaktadır. Bu sonuç, deneysel düzenekle elde edilen verilerin yeterli hassasiyet düzeyinde olduğunu ve HAD doğrulamaları ile farklı ısı yutucu tasarımlarının karşılaştırılmasına sağlam bir temel oluşturduğunu göstermektedir.

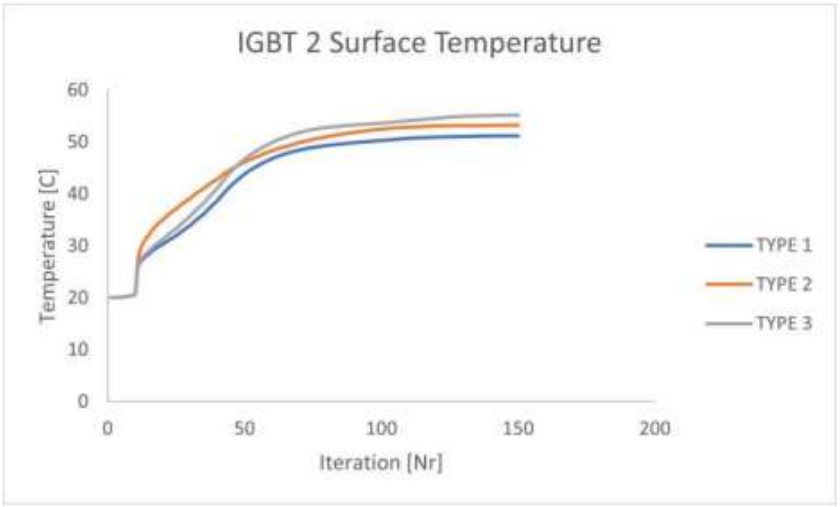
HAD çalışmalarının ikinci fazında ise elektronik bileşenlerin sıcaklıklarının değerlendirilmesi amacıyla indüksiyonlu ocak termal etkiler ile analiz edilmiştir. Model içerisinde, ısı yutuculara bağlı dört elektronik bileşen yer almaktadır (Şekil 4.2.). Sonuçların izlenmesi için oluşturulan grafiklerde, fana en yakın konumda bulunan bileşen (IGBT 1) ve fana en uzak olan bileşen (IGBT 2) referans noktaları olarak seçilmiştir. Aşağıda verilen Şekil 5.6. ve 5.7., üç farklı ısı yutucu tipinde IGBT 1 ve IGBT 2 bileşenlerinin yüzey sıcaklıklarının karşılaştırmasını göstermektedir. Şekil 5.6. ve 5.7.' de görüldüğü üzere, IGBT1 ve IGBT2 modüllerinin yüzey sıcaklıkları ısı yutucu konfigürasyonlarına bağlı olarak farklılık göstermektedir. Gerçek bir indüksiyonlu ocak montajında IGBT modülleri, ısı yutucuya ısıl ara yüzey malzemeleri aracılığıyla bağlanmakta ve bu malzemeler, ısıl temas direncini azaltmaktadır. Ancak bu çalışmada kullanılan basitleştirilmiş HAD modelinde, ısıl macunun etkisi açıkça dikkate alınmamıştır. Üretici verilerine göre kullanılan macun, yaklaşık 0.5 °C/W ek bir ısıl direnç oluşturmaktadır. Dolayısıyla, HAD sonuçları değerlendirilirken bu ek direncin göz önünde bulundurulması, öngörülen IGBT yüzey sıcaklıklarının gerçek koşullarda bir miktar daha yüksek olabileceğini göstermektedir.

Bu modelleme sadeleştirmesine rağmen, farklı ısı yutucu tipleri arasındaki karşılaştırma geçerliliğini korumaktadır. Bunun nedeni, ısıl ara yüzey malzemesinin yokluğunun tüm konfigürasyonlar için aynı şekilde etkili olmasıdır. Ayrıca, IGBT yüzey sıcaklıkları arasındaki farklılıklar, güç elektroniğinde kabul edilen tipik ısıl sınırlar çerçevesinde kalmaktadır. Literatüre göre IGBT modülleri için kritik sıcaklık aralığı güvenli ve kararlı çalışma için 125 °C ile 150 °C arasında değişmektedir. HAD analizinde

elde edilen en yüksek yüzey sıcaklıkları bu kritik aralığın altında kalmıştır. Bununla birlikte, bileşen ömrü açısından çalışma sıcaklıklarının etkisi önemlidir. Arrhenius'un hızlandırılmış yaşlanma modeline göre, çalışma sıcaklığındaki her 10 °C'lik artış, elektronik bileşenlerin ömrünü yaklaşık %50 oranında kısaltmaktadır. Dolayısıyla bu çalışmada incelenen tüm ısı yutucu konfigürasyonları termal açıdan güvenli koşullar sunsa da uzun dönemli güvenilirlik ve sistemin çalışma ömrünü uzatmak için yüzey sıcaklıklarının mümkün olduğunca düşük tutulması kritik öneme sahiptir.



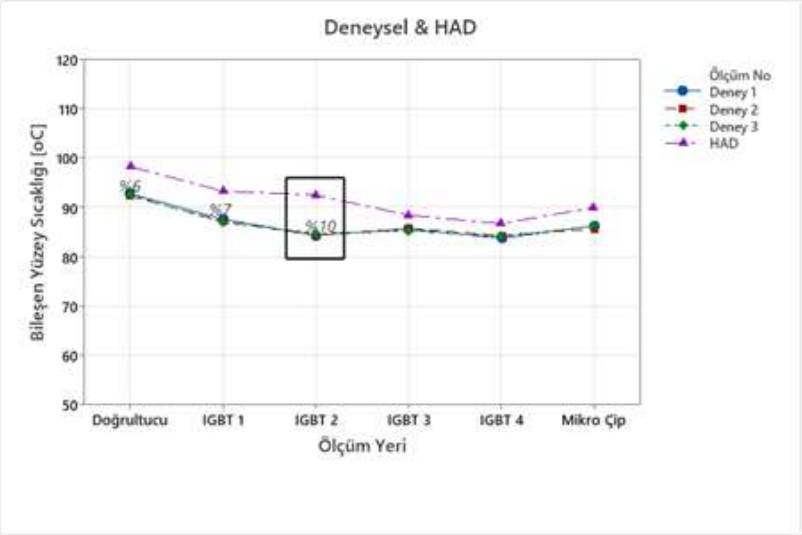
Şekil 5.6. IGBT 1 Yüzey sıcaklığı sonuçları.



Şekil 5.7. IGBT 2 Yüzey sıcaklığı sonuçları.

5.2. Tüm-Tasarım Sonuçları

Alt tasarımda yapılan çalışmalar ile fan-ısı kuyusu uyumuna, metod validasyonuna ve sistem hata oranına dair somut bilgiler edinilmiş olup ocağın tam hali HAD yöntemi ile modellenen bu kısımda Tip 1 ısı kuyusu ile gerçekleştirilen sonuçlar aşağıda Şekil 5.8.'de gösterilmiştir. Isı kuyusuna bağlı tüm elektronik bileşenlerden sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilmiş ve ölçümler 3 kere tekrarlanarak HAD sonuçları ile kıyaslandığında maksimum hata oranı %10 olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.8. Tüm-Tasarım HAD analizi sonuçları.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında elde edilen bulgular, indüksiyonlu ocaklarda kullanılan soğutma sistemlerinin tasarımında hem deneysel hem de sayısal yöntemlerin bütüncül olarak kullanılmasının ne kadar önemli olduğunu göstermiştir. Deneysel çalışmalarda farklı tipte ısı yutucular test edilmiş ve bu yutucuların fan ile birlikte oluşturduğu akış karakteristikleri ayrıntılı biçimde incelenmiştir. Ölçüm sonuçları, fan debisinin tek başına soğutma performansını belirleyici olmadığını, özellikle ısı yutucu konumlandırmasının ve geometrisinin hava hızının dağılımını doğrudan şekillendirdiğini ortaya koymuştur. Yapılan deneysel tasarım (DOE) analizleri, ısı yutucu konumunun hava akışına en baskın etkiyi yaptığını, ölçüm noktalarının ve prob serbestliğinin ise ikincil ancak anlamlı katkılarda bulunduğunu göstermiştir. Ayrıca Pareto grafikleri ve ANOVA sonuçları, hangi parametrelerin kritik, hangilerinin görece daha az etkili olduğunu istatistiksel olarak kanıtlamıştır. Bu bulgular, tasarım süreçlerinde deneysel faktörlerin sistematik bir şekilde ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Deneysel ölçümler yalnızca ortalama değerler üzerinden değil, varyans analizleri ve bireysel değer grafiklerinin değerlendirilmesiyle de ele alınmıştır. Grafiklerden elde edilen sonuçlar, özellikle Tip 1 ve Tip 2 yutucuların daha istikrarlı hava akış profilleri sunduğunu, Tip 3'ün ise daha yüksek varyans nedeniyle kararsız bir davranış sergilediğini göstermiştir. Belirsizlik analizi de ölçümlerin güvenilirliğini desteklemiş ve yaklaşık %8.55 oranında bağıl belirsizlik değeri ile deneysel sistemin kabul edilebilir hassasiyet sınırları içerisinde olduğu doğrulanmıştır. Bu sonuç, deneysel yöntemlerin sayısal analizlerin doğrulanması için güvenilir bir temel sunduğunu açıkça göstermektedir.

Sayısal tarafta ise Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analizleri, fanın üretici verisinden alınan P–Q eğrisi kullanılarak gerçekleştirilmiş ve fanın gerçek çalışma koşullarındaki davranışı simülasyonlara entegre edilmiştir. Bu yaklaşım, karmaşık kanat geometrilerinin çözümünü gereksiz kılmış ve hesaplama maliyetlerini önemli ölçüde azaltmıştır. Akış çözümlerinde kullanılan k–ε türbülans modeli hem hız dağılımlarını hem de ısıl alanı başarılı bir şekilde temsil etmiş, elde edilen sonuçlar deneysel hız ölçümleriyle karşılaştırıldığında yüksek uyum sağlamıştır. Z-skoru analizleri, HAD tahminlerinin belirsizlik sınırları içerisinde kaldığını göstermiş ve modelin doğruluğunu teyit etmiştir. Bu

doğrulama süreci, indüksiyonlu ocaklarda kullanılan ısı yutucu ve fan kombinasyonlarının tasarımında HAD yönteminin güvenle kullanılabileceğini kanıtlamıştır.

Isıl analizler, farklı ısı yutucu tiplerinin IGBT modülleri üzerindeki yüzey sıcaklıklarını farklı seviyelere düşürdüğünü ortaya koymuştur. Tüm konfigürasyonlarda sıcaklıklar, güç elektroniğinde güvenli kabul edilen 125–150 °C sınırının altında kalmıştır. Bu durum, incelenen tasarımların kısa ve orta vadeli güvenli çalışma açısından uygun olduğunu göstermektedir. Ancak Arrhenius yaşlanma modeli dikkate alındığında, sıcaklıktaki her 10 °C'lik artışın bileşen ömrünü yaklaşık %50 oranında kısalttığı hatırlanmalıdır. Dolayısıyla, güvenlik sınırlarının altında kalınsa bile uzun vadeli güvenilirlik ve ürün ömrünün artırılması için yüzey sıcaklıklarının mümkün olduğunca düşük tutulması gerektiği açıktır. Bu bağlamda, Tip 1 ve Tip 2 yutucuların sağladığı daha homojen hava akışı ve daha düşük sıcaklık değerleri, gelecekteki tasarımlar için öne çıkan seçeneklerdir. Genel olarak bu tez çalışması, indüksiyonlu ocaklarda kullanılan soğutma sistemlerinin yalnızca fan kapasitesine bağlı olmadığını, ısı yutucu geometrisinin, konumlandırılmasının ve fan ile entegrasyonunun kritik rol oynadığını ortaya koymuştur. Hava akışının yalnızca belirli bölgelerde yoğunlaşmasının önüne geçmek için homojen akış dağılımını sağlayacak yönlendirme çözümlerine ihtiyaç olduğu görülmüştür. Ayrıca, deneysel tasarım yöntemlerinin ve HAD doğrulamalarının birlikte kullanılmasıyla, ürün geliştirme süreçlerinde güvenilir ve sistematik bir metodoloji oluşturulabileceği kanıtlanmıştır. Bu yaklaşım, yalnızca indüksiyonlu ocaklara değil, güç elektroniği tabanlı diğer ev aletlerine de uygulanabilir bir çerçeve sunmaktadır.

Sonuç olarak, yapılan çalışma endüstriyel ölçekte uygulanabilir, enerji verimliliği yüksek, güvenilir ve uzun ömürlü indüksiyonlu ocak tasarımlarına yönelik yol gösterici bulgular sağlamıştır. Bu bağlamda, ilerleyen çalışmalarda ısı yutucu geometrilerinin daha da optimize edilmesi, fan çıkış kanallarında akış yönlendiricilerin geliştirilmesi ve ısıl ara yüzey malzemelerinin etkilerinin daha ayrıntılı olarak modellenmesi önerilmektedir. Böylece hem termal performans artırılacak hem de ürünlerin kullanım ömrü ve güvenilirliği iyileştirilecektir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Acero, J., Alonso, R., Burdío, J. M., & Barragán, L. A. (2006). Enhancement of induction heating performance by sandwiched planar windings. Electronics Letters, 42(4), 241-242.

Alirol, E., André, X., Boyer, S., & Goumy, C. (2016). Hob comprising a single temperature-detection means (European Patent No. EP2746672B1). European Patent Office.

Amirabedin, E.; Anık, T.; Karaduman, A. Feasibility of Using CFD Analysis for Improving the Gas Hobs Performance In Terms of Efficiency and Emissions. In Proceedings of the 4th World Congress on Momentum Heat and Mass Transfer, Rome, Italy, 10–12 April 2019.

Anton Falcon, D., Ortiz Sainz, D., Pina Gadea, C., & Valencia Betrian, M. (2015). Assembly for a hob and induction hob with such an assembly (European Patent No. EP2498577B1). European Patent Office.

Arakane, N. (2016). Induction heating cooker (Japan Patent No. JP2016162703A). Japan Patent Office.

Aytekin, B. (2008). Endüksiyon ocak elektronik kontrol sistem tasarımı (Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi). YÖK Ulusal Tez Merkezi.

Baek, Y. G., & Kim, K. H. (2010). Heat sink and electric hob comprising the same (Korean Patent No. KR20100010385A). Korean Intellectual Property Office.

Cabeza-Gil, I., Calvo, B., Grasa, J., Franco, C., Llorente, S., & Martínez, M. A. (2020). Thermal analysis of a cooking pan with a power control induction system. Applied Thermal Engineering, 180, 115789.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Chiang, K.-T. (2005). Optimization of the design parameters of parallel-plain fin heat sink module cooling phenomenon based on the Taguchi method. Int. Commun. Heat Mass Transf. 32, 1193–1201.

Çetin, S. (2005). Bir fazlı bir indüksiyon ısıtma sistemi analizi ve dizaynı (Master's thesis, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).

Elduque, D., Javierre, C., Pina, C., Martínez, E., & Jiménez, E. (2014). Life cycle assessment of a domestic induction hob: electronic boards. Journal of cleaner production, 76, 74-84.

Hoshino, K., Yokogawa, Y., Ito, T., Kuriki, Y., Kawada, Y., Kazama, K., & Ikemura, S. (2021). Induction heating cooker, built-in composite type heating cooker, and kitchen furniture (Japan Patent No. JP2021166120A). Japan Patent Office.

Internet, 2018, Mentor Graphics Corporation, https://www.smart-fem.de/media/floefd/TechnicalReferenceV17.pdf

Kalitzin, G.; Iaccarino, G. Turbulence modeling in an immersed-boundary RANS method. CTR Annu. Briefs 2002, 415–426.

Kim, W. T., & Ryu, S. H. (2012). Induction heater (European Patent No. EP2127477B1). European Patent Office.

Kirchhofer, M., Krieger, M., & Hofer, D. (2025). Experimental and numerical investigations of forced convection impingement heat transfer on plate-fin heat sinks using three different electronic cooling fans. Applied Thermal Engineering, 258, 124665.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Koç, A., Yağlı, H., Koç, Y., & Uğurlu, İ. (2018). Dünyada ve Türkiye'de enerji görünümünün genel değerlendirilmesi. Mühendis ve Makina, 59(692), 86-114.

Koç, E., & Şenel, M. C. (2013). Dünyada ve Türkiye'de enerji durumu-genel değerlendirme. Mühendis ve Makina, 54(639), 32-44.

Kranjc, M., Zupanic, A., Miklavcic, D., & Jarm, T. (2010). Numerical analysis and thermographic investigation of induction heating. International Journal of Heat and Mass Transfer, 53(17-18), 3585-3591.

Kuo, T. Y., Wong, S. C., Hsu, C. C., & Lu, C. Y. (2026). Numerical and experimental study on UTVC/plate-fin heatsink modules with an axial impingement fan. International Communications in Heat and Mass Transfer, 171, 110173.

Lam, C.K.G. (1981); Bremhorst, K. A modified form of the k-ε model for predicting wall turbulence. J. Fluids Eng. 103, 456–460.

Li, G., & Genest, M. (2011). Two-dimensional finite element simulation of induction heating of an aluminum alloy panel. Journal of Materials Processing Technology, 211(8), 1409–1419.

Li, Z.-Z.; Cheng, T.-H.; Xuan, D.-J.; Ren, M.; Shen, G.-Y.; Shen, Y.-D. Optimal design for cooling system of batteries using DOE and RSM. Int. J. Precis. Eng. Manuf. 2012, 13, 1641–1645.

Meng, L. C., Cheng, K. W. E., & Chan, K. W. (2009, May). Heating performance improvement and field study of the induction cooker. In 2009 3rd International Conference on Power Electronics Systems and Applications (PESA) (pp. 1-5). IEEE.

Minitab, LLC. (2021). Minitab Statistical Software (Version 20) [Computer software].

KAYNAKLAR DİZİNİ

Modi, A., & Dem Rhan Ku, A. Z. (2023). Bir soğutucu cihazın kontrol ünitesi için bir taşıyıcı tepsi (Turkey Patent No. TR2021021325A1). Turkish Patent and Trademark Office.

Oktay, U. (2016). Ev tipi endüksiyon ocaklarda yük karakteristiğinin belirlenmesi (Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi). YÖK Ulusal Tez Merkezi.

Örs, G. N. (2020). Mutfak mekânları tasarımında teknolojinin etkisi (Yüksek lisans tezi, İstanbul Kültür Üniversitesi). İstanbul Kültür Üniversitesi Akademik Arşivi.

Özkul, M. (2011). Türkiye Ekonomisinde beyaz eşya sektörünün önemi. Ekonomik Yaklaşım, 22(78), 119-136.

Özözen, S. (2024). Küresel Beyaz Eşya Pazarında Türkiye'nin Karşılaştırmalı Rekabet Gücü Analizi. Uluslararası Yönetim İktisat ve İşletme Dergisi, 20(4), 1178-1201.

Öztürk, M., Züngör, F., & Ersoy, D. (2024). Ev Tipi Endüksiyon Isıtmalı Ocakların Analizi. EMO Bilimsel Dergi, 14(2), 117-129.

Sarvestani, A. B., Vakilzadeh, A. H., Javaherdeh, K., Kamali, R., & Panchal, S. (2025). 3D numerical study of a novel fan-shaped heat sink with triangular cavities and nano-enhanced PCMs. Applied Thermal Engineering, 128408.

Siemens Digital Industries Software. (2023). FloEFD (Version 2306) [Computer software]

Tatlı, H. (2018). Piyasa Yoğunluğunun Ölçülmesi: Beyaz Eşya Sektörü Üzerine Bir Uygulama Yönetim ve Ekonomi Araştırmaları Dergisi, 16(1), 64-84.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Trebunskikh, T.V.; Ivanov, A.V.; Dumnov, G.E. FloEFD simulation of micro-turbine engines. In Proceedings of the Applied Aerodynamics Conference on Modelling & Simulation in the Aerodynamic Design Process, New York, NY, USA, 17–19 July 2012.

Viriya, P., Sittichok, S., & Matsuse, K. (2002, April). Analysis of high-frequency induction cooker with variable frequency power control. In Proceedings of the Power Conversion Conference-Osaka 2002 (Cat. No. 02TH8579) (Vol. 3, pp. 1502-1507). IEEE.

Yin, T.; Xu, Q.; Fang, L.; Zhang, J. Numerical investigation for effects of layout factors on temperature distribution in a raised-floor data center using a three-level full-factorial design. In Proceedings of the 4th International Conference on Energy, Electrical and Power Engineering (CEEPE), Chongqing, China, 23–25 April 2021; pp. 351–355.