

## İndüksiyonlu Hava Isıtıcısında Geçici Rejim Durumunun Deneysel Olarak İncelenmesi

Ümit ÜNVER<sup>1\*</sup>, Ahmet YÜKSEL<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Yalova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Enerji Sistemleri Mühendisliği,

<sup>2</sup>Yalova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı,

<sup>3</sup>Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

(Geliş Tarihi/Received: 04.07.2016, Kabul Tarihi/Accepted: 17.10.2016)

### ÖZET

Bu çalışmada yeni geliştirilen, indüksiyonlu hava ısıtıcısı prototipinin geçici rejim durumundaki ısı kayıplarının ve verimlerinin deneysel olarak incelenmesi amaçlanmıştır. Çalışmada iş akışkanın ısıtılması 4 farklı deney protokolü uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Deney verileri Termodinamiğin I. Kanununa göre analiz edilmiş ve sistem sürekli rejime girene kadar meydana gelen ısı kayıpları hesaplanmıştır. Protokol 4'te hava sürekli rejim sıcaklığına, diğer protokollere göre 25-30 dk daha kısa sürede ulaşmıştır. İşletme maliyeti en yüksek olan protokol, enerji cinsinden yıllık 357,21 kWh maliyet ile protokol 1 olmuştur. Diğer yandan en düşük maliyet enerji cinsinden yıllık 221 kWh maliyet ile protokol 4 olduğu hesaplanmıştır.

**Anahtar kelimeler:** İndüksiyonla hava ısıtma, hava ısıtıcısı, hava ısıtıcıların termodinamik analizi, birinci kanun analizi, geçici rejim analizi, hava ısıtıcılarının geçici rejim analizi.

### Experimental Investigation of Transient Condition of Induction Air Heating

#### ABSTRACT

In this study, it was aimed to investigate the heat losses and efficiencies during the transient condition of an induction air heater prototype experimentally. The study was carried out by applying 4 various protocols in the experiments. The results were analyzed according to 1st. Law of Thermodynamics and the thermal losses from the system were calculated during the transient condition. It was found that the system reached to a steady state 25-30 min earlier in protocol 4 than the other protocols. The highest annual operational cost was calculated to be 357,21 in kWh's for protocol 1. The lowest annual operational cost was calculated to be 221 kWh for protocol 4.

**Keywords:** Induction air heating, air heater, thermodynamic analysis of air heaters, 1<sup>st</sup>. Law analysis, transient condition analysis, transient condition analysis of air heaters.

#### 1. Giriş

İndüksiyonlu ısıtma sistemleri başta metal ısıtma, tavlama ve eritme olmak üzere sanayide birçok alanda kullanılmaktadır. Faraday'ın 1831 yılında tesadüfen keşfettiği

indüksiyon etkisi ile başladığı kabul edilir. Lenz ve Neuman, yaptıkları çalışmalar ile bobindeki akım yönüne ters olarak meydana gelen eddy akımlarının malzemenin ısınmasına neden olduğunu ve ısınmanın

verilen frekans ile değiştiğini bulmuştur. İndüksiyon, 1884'te Heaviside'nin yapmış olduğu manyetik alan ile demir nüveye aktarılan enerjinin incelenmesi adlı çalışma ile akademik alanda da tanınmıştır. İkinci dünya savaşından sonra otomotiv sektörünün gelişimiyle indüksiyon ergitme işlemleri dışında diğer ısı işlemlerde de kullanılmaya başlanmıştır. İndüksiyonlu ısıtıcıların seri üretime oldukça elverişli oluşu endüstriyel tesislerin gözünden kaçmamış ve kullanımı günden güne artmıştır. Son zamanlarda yarı iletken malzemelerin gelişimi, indüksiyon sistemlerinin daha ekonomik bir hale getirilmesi için çalışmaların artışı sağlamıştır (Öncü, 2005).

Genel olarak metal endüstrisinin tercih ettiği indüksiyon yöntemi ön ısıtma, son ısıtma, kaynaklama, lehimleme, sertleştirme, ergitme, temperleme gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Sadece metal işleme sürecinde kullanılmayan indüksiyonlu ısıtma sistemleri, asfalt ısıtma, polimerizasyon işlemleri, tıbbi malzemelerin üretimi ve sterilizasyonu, cam ve ayna gibi yüzeylerden suyun uzaklaştırılması, kalorifer tesisatında iş akışkanının ısıtılması gibi pek çok işlemde de kendisine yer bulmaktadır (Ünver ve Ünver, 2013). Ayrıca sıvı buharlaştırma işlemlerinde de indüksiyonlu ısıtma sistemleri kullanılmaktadır (Kuzmichev A. ve Tsybulsky L., 2011).

İndüksiyonlu ısıtıcıların geniş uygulama alanlarına hitap edebilmesi ve giderek yaygınlaşmasında; özellikle metal malzemeleri hızlı bir şekilde ısıtması, bakım

maliyetlerinin oldukça düşük olması, malzeme üzerinde tüm yüzeyden ziyade istenilen bölgenin kolaylıkla ısıtılabilmesi indüksiyonlu ısıtma sistemlerinin avantajlarından. Ayrıca, metal ısıtılırken çevreye ısı kayıplarının daha az olması, hava kirliliği oluşturmaması, ilk çalışma anında devreye girme süresinin oldukça kısa olması, yanıcı ve yakıcı maddelerin kullanılmamasından dolayı yanma, patlama gibi olayların gözlemlenmemesi de sistemin diğer üstün özellikleridir (Ünver vd., 2005), (Rhoades, 2006,).

Bu güne kadar indüksiyonlu ısıtma sistemleriyle ilgili ele alınan çalışmalarda, konunun genellikle elektrik disiplini tarafı incelenmiştir (Altıntaş ve Karahan, 2015, Dereci, 2010 vb.). Ayrıca indüksiyonla akışkan ısıtma konusunda literatürlerde sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Mevcut çalışmalarda ise ısıtma prosesine termodinamik yaklaşımlardan ziyade elektrik açısından değerlendirmeler yapılmıştır. Şimdiye kadar, akışkan ısıtılan sistemlerde iş akışkanı olarak sıvı akışkanlar seçilmiştir. İş akışkanı olarak havayı kullanan Ünver (2016), yaptığı çalışmada kovan içerisine disk yerleştirmiş ancak disksiz uygulamanın daha verimli olduğu tespitini yapmıştır. Bu makalede, endüstride geniş kullanım alanı olan indüksiyonlu ısıtıcıların deneme aşamasında olan yeni bir türünün prototipi üzerinde yapılan çalışmaların, geçici rejim şartlarının termodinamik yaklaşımla incelenmesi kısmına yer verilmiştir. Çalışma kapsamında

incelenen prototip, bir indüksiyonlu hava ısıtıcısıdır.

Çalışmanın amacı, yaş meyve sebze kurutma işlemi yapılan yerlerde, seralarda, hastanelerde, alışveriş merkezlerinde ve benzeri yerlerde şartlandırılmış hava ihtiyacını karşılayacağı düşünülen indüksiyonlu hava ısıtıcısı sisteminin, geçici rejim durumundaki çalışma şartlarının (indüksiyon sistemi-kovan etkileşimi, enerji aktarımı, ısı kayıpları ve verimleri) deneysel olarak incelenmesidir. Deneylerde sisteme elektrik ve akışkan girişi farklı protokoller gözetilerek sağlanmış, verim ve ısı kaybı değerlendirmesi yapılmıştır. Yapılan çalışma kapsamında deneyin elektriksel boyutundan ziyade termodinamik ve ısı transferi analizleri üzerine yoğunlaşmıştır.

### **1.1. İndüksiyonlu Akışkan Isıtma Sistemi**

İndüksiyon akımı, bobin içerisindeki iletken malzeme içerisinde gerilimin indüklenmesi ile ortaya çıkmaktadır. Malzeme üzerine indükleme işlemi iki farklı şekilde oluşturulabilmektedir. Bunların ilki; sabit halde oluşturulan manyetik alan içerisinde hareketli halde bulunan iletken malzeme üzerinde gerilimin indüklenmesidir. Diğeri ise; değişken manyetik alan oluşturularak hareketsiz malzemenin üzerinde gerilim indüklenmesidir. Bu ikinci durumda eddy akımları adı verilen akımlar malzemenin ısınmasını sağlamaktadır (Altıntaş vd., 2012).

İndüksiyonlu ısıtma işlemlerinde üretilen eddy akımları iletken malzemenin en dış

katmanında meydana gelir. Bu sebepten ısınma işlemi de ilk olarak en dış yüzeyde meydana gelerek iç noktalara doğru ilerler. Buna paralel olarak cismin sıcaklığı dış noktadan merkeze doğru inildikçe azalır. Malzemenin iletkenlik vb. özelliklerine bağlı olarak bu ilerleme miktarı değişmektedir. Literatürde, ısının bu şekilde dış yüzeyden orta noktalara doğru ilerlemesi miktarına *dalma derinliği* adı verilmektedir. Yapısı gereği, indüksiyonlu bir ısıtıcı sistemde en yüksek sıcaklık, bobine en yakın dış yüzeyin orta noktasında bulunur (Ünver, 2016). Oluşturulan sıcak yüzeyin ısı kullanılarak, sistemden geçirilen akışkanların ısıtılması kolay bir şekilde sağlanabilir.

İndüksiyonlu ısıtıcıların diğer sistemlere kıyasla tercih edilme nedenlerinden biri de kayıpların diğer sistemlere göre daha az olmasıdır. İndüksiyonlu ısıtma sistemlerinde; elektrik enerjisinden elde edilen ısı, malzeme üzerine aktararak kaybın aksine verim artırma noktasında değerlendirilir.

Malzemelerin üzerinden geçen akıma direnç göstermeleri malzemenin ısınmasını sağlar. Malzemenin manyetik alana maruz kalması ile sahip olduğu manyetik dipoller, manyetik alan yönüne bağlı olarak yön değiştirir. Malzeme iç yapısında meydana gelen bu hareketlilik ilave ısı meydana getirir. Histerizis kayıpları adı da verilen, bu ısı oluşum miktarı düşük olduğundan ihmal edilebilir (Öncü, 2005).

## 2. Materyal ve Metot

İndüksiyon sistemi, termodinamik yaklaşımla açık sistem olarak tanımlanabilir. Bu sebeple açık sistemlere uygulanan enerji ve benzeri denklemler kullanılır. İndüksiyon sistemi için kütleli debi miktarının belirlenmesinde denklem 2.1 ifadesi kullanılabilir.

$$\dot{m} = \rho_{hava} \times V_{hava} \times A \quad 2.1.$$

Burada,  $\rho_{hava}$ ; havanın yoğunluğunu ( $\text{kg/m}^3$ ),  $V_{hava}$ ; havanın hızını ( $\text{m/s}$ ),  $A$ ; havanın geçtiği kesit alanını ( $\text{m}^2$ ) ve  $\dot{m}$ ; havanın kütleli debisini ( $\text{kg/s}$ ) ifade etmektedir.

Denklem 2.1.'de yer alan sıcaklığa bağlı olarak yoğunluk değerleri termodinamik tablolardan elde edilir. Ayrıca, sistem veriminin hesaplanmasında indüksiyon sisteminde kayıp olarak tanımlanan, ısıya dönüşen enerji miktarı ve bunun iş akışkanına (havaya) aktarılan kısmının belirlenmesi esastır. Bu durumda sıcaklığa bağlı olarak  $c_p$  değeri de değiştiği için her ölçüm için  $c_p$  değerleri ayrı ayrı bulunur. Çalışma şartlarında sıcaklık değerleri de zamanla değiştiği için ısı transferi miktarının hesaplanmasında Denklem 2.2 kullanılabilir.

$$\frac{Q_h}{\partial t} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \partial T \quad 2.2.$$

Burada,  $Q_h$ ; havaya aktarılan ısı miktarını (J) ifade etmektedir. İndüksiyonlu akışkan ısıtıcısı sisteminde doğal taşınım ile meydana gelen ısı kayıpları denklem 2.3 ile hesaplanmaktadır (Çengel, 2011).

$$\frac{Q_{taşınım}}{\partial t} = h \times A_s \times (T_i - T_{i-1}) \quad 2.3.$$

Burada,  $h$ ; taşınım katsayısını ( $\text{W/m}^2 \cdot \text{°C}$ ),  $A_s$ ; yüzey alanını ( $\text{m}^2$ ),  $T_i$ ;  $i$  anındaki havanın

çıkış sıcaklığını ifade etmektedir. Taşınım katsayısı denklem 2.4 ile ifade edildiği gibi hesaplanmaktadır (Çengel, 2011).

$$h = \frac{k}{D} Nu \quad 2.4.$$

Burada,  $Nu$ ; Nusselt sayısını,  $k$ ; iletim katsayısını ( $\text{W/m} \cdot \text{°C}$ ),  $D$ ; havanın sistemden çıktığı kesitin çapını ( $\text{m}$ ) temsil etmektedir. İletim katsayısı gerekli termodinamik tablolardan bulunurken Nusselt sayısı denklem 2.5 'te verilen eşitlik ile bulunmaktadır (Çengel, 2011).

$$Nu = \left(0.6 + \frac{0.387 Ra_D^{1/6}}{[1 + (0.559/Pr)^{9/16}]^{8/27}}\right)^2 \quad 2.5.$$

Burada,  $Pr$ ; Prandtl sayısını,  $Ra_D$ ; Rayleigh sayısını ifade etmektedir. Prandtl sayısı havanın sıcaklığına bağlı olarak termodinamik tablolardan elde edilebilirken, Rayleigh sayısı denklem 2.6 ile ifade edilen şekilde hesaplanmaktadır (Çengel, 2011).

$$Ra_D = \frac{g \beta (T_s - T_c) D^3}{\nu^2} Pr \quad 2.6.$$

Burada ise,  $g$ ; yerçekimi ivmesini ( $\text{m/s}^2$ ),  $\beta$ ; hacimsel genleşme katsayısını ( $1/\text{°C}$ ),  $T_c$ ; ortam sıcaklığını ( $\text{°C}$ ),  $\nu$ ; havanın kinematik viskozitesini ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) temsil etmektedir. Denklem 2.6 ile hesaplanan Rayleigh sayısı denklem 2.5'te yerine konularak Nusselt sayısına ulaşılır. Bulunan Nusselt sayısı ise denklem 2.4 'te yerine konularak taşınım katsayısı elde edilir. Termodinamik tablolarından elde edilen ifadeler ( $\nu$ ,  $Pr$ ;  $k$  vb.) her 5 dakikada bir alınan havanın sıcaklık değerlerine karşılık gelen ifadelerdir.

Sistemde meydana gelen bir diğer ısı kaybı türü ışınımır. Işınım ile meydana gelen ısı

transferi miktarı denklem 2.7 ile hesaplanmaktadır (Çengel, 2011).

$$\frac{Q_{ışınım}}{\partial t} = \varepsilon \times A_s \times \sigma \times (T_y^4 - T_o^4) \quad 2.7.$$

Burada,  $\varepsilon$ ; yüzeyin yayıcılığını,  $A_s$ ; ışıının meydana geldiği yüzey alanını,  $\sigma$ ; Stefan-Boltzmann sabitini ( $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ ),  $T_y$  ve  $T_o$  ifadeleri yüzey ve ortam sıcaklık değerlerini göstermektedir. Işınım miktarı da her 5 dakikada bir alınan yüzey sıcaklık değerlerinden yola çıkarak hesaplanmıştır.

Sistemde taşınım ve ışıının dışında enerjinin bir kısmı da boşaltma kaybına ve kinetik enerji değişimine harcanmaktadır. Ancak yapılan hesaplamalar doğrultusunda bu tür kayıpların miktarı  $1 \text{ W}$ 'ı geçmediği için ihmal edilmiştir.

Termodinamik analizlerin ardından ısı veriminin hesaplanması için şebekeden çekilen elektrik gücünün, bobinlere gelen miktarı bilinmelidir. Bobine gelen güç miktarı doğrudan pensampermetre ile ölçülmüştür. Ancak bu gücün hepsi ısıtma işleminde kullanılmamaktadır. Bu nedenle bobinden gelen elektrik enerjisinin güç faktörüyle etkileşimi denklem 2.7 'deki gibi göz önüne alınmaktadır (Ünver, 2016).

$$P_{ind} = P_{bobin} \times \eta_{ind} \quad 2.8.$$

Burada,  $P_{ind}$ ; indüksiyon gücünü (W),  $P_{bobin}$ ; bobinden çekilen güç miktarını (W) ve  $\eta_{ind}$ ; indüksiyon verimini ifade etmektedir. Eddy akımlarının yanında histerezis kayıplarının da malzeme üzerinde ısınmaya neden olduğu bilinmektedir. Histerezis kayıplarının miktarı diğer kayıplarla kıyaslandığında ihmal edilebilir düzeyde olması

münasebetiyle işlemlere dahil edilmemiştir. (Çetin, 2005).

$$P_{his} = P_{bobin} - P_{ind} \quad 2.9.$$

İndüksiyon sisteminde elektriksel verimi, I. kanun verimi ve ısıl/termal verim olmak üzere üç adet verim çeşidi bulunmaktadır ve 2.8 denklemleri ile tanımlanmıştır. Bu verim ifadeleri, sistemin genel olarak durumunun değerlendirilmesi için gerekli olan parametrelere sahiptir. Sistemin geliştirilmesi verim üzerinden yapılan analizler sonucu sağlanmaktadır.

$$\text{Elektriksel Verim; } \eta_{el} = \frac{P_{bobin}}{P_{şebeke}}$$

$$\text{Termal/Isıl Verim; } \eta_{term} = \frac{\dot{Q}_{Hava}}{P_{bobin}} \quad 2.10$$

$$\text{I. Kanun Verimi; } \eta_I = \frac{\dot{Q}_{Hava}}{P_{şebeke}}$$

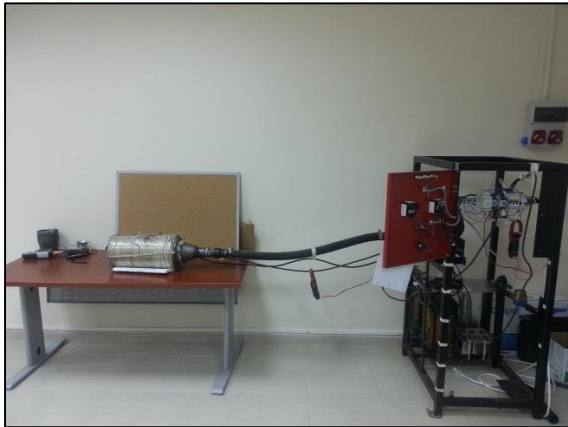
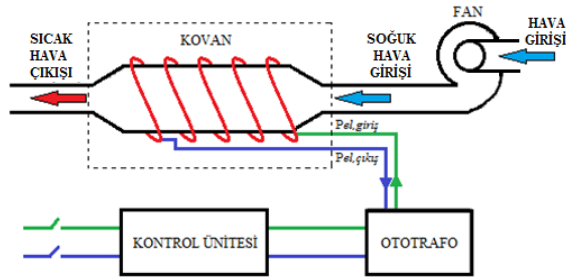
Deneylerde havanın sürekli rejim sıcaklığına ulaşp ulaşmadığı denklem 2.9 ile verilen eşitlikten kontrol edilmektedir. Denkleme verilen  $\Delta T_\varepsilon$  ifadesi 0,3'ten küçük olduğu durumda, sistem sürekli rejim sıcaklığına ulaşmış olmaktadır (Ünver, 2016).

$$\Delta T_\varepsilon = \frac{\sum_{i=-2}^4 (T_{i-1} - T_{i-2})}{4} < 0,3 \quad 2.11.$$

### 2.1. Deneş Düzenegİ

Deneşsel çalışmanın gerçekleştirilmesi için Yalova Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliğı Bölümü Enerji Laboratuvarında indüksiyonlu akışkan ısıtıcısı deneş düzeneğı kurulmuş ve kullanılmıştır. Deneş düzeneğinin şematik görünümü Şekil 2.1 ile gösterilmiştir. Sistem geometrisi, Makimura vd. (2009)'nin yapmış oldukları çalışmadaki geometriye benzemektedir. Ancak Makimura vd.,

indüksiyon sisteminde, bobini ve 41 adet diski kovan içerisinde yerleştirmiştir ve iş akışkanı olarak su kullanılmıştır. Isıtma, kovan etrafına sarılan bobinin indüksiyonla kovanı ısıtması ve kovan içinden geçen havanın kovan tarafından ısıtılmasıyla sağlanmaktadır. Sistemde sıkıştırılabilir iş akışkanının kullanımı, akışkanın önüne çıkan her engelde sıkışmasına ve enerji kaybına neden olmaktadır. Ayrıca bu çalışma kapsamında sadece elektrik enerjisi ve akışkan girişi arasındaki ilişkinin sistemdeki geçici rejim durumuna etkisi değerlendirilmiştir. Kovan tasarımının akış parametrelerine etkisi sürekli rejim göz önünde bulundurularak ayrı bir çalışma konusu kapsamında incelenecektir.



**Şekil 2.1.** İndüksiyonlu Akışkan Isıtıcısı Deney Sistemi Şematik Ve Gerçek Görüntüsü

İndüksiyonlu ısıtma sistemi yaklaşık gücü 1100 W civarında ve 50 Hz şebeke frekansıyla çalışmaktadır. Sisteme enerji bir

oto-trafoyla 110 V gerilimle sağlanmaktadır. Oto-trafo, bobin ve 5 kVar, 400 V, 50 Hz, 12,5 A değerlerine sahip 3x33 (-5+10%) µF gücündeki 3 adet paralel bağlı kondansatör grubu birbirlerine üçgen bağlanmıştır. Deney düzeneğinde havalandırma kanallarındaki akışı benzetmek üzere POBRA 180-70 tipi, 230 V, 50 Hz, 1100 W ve 75 dBa değerlerine sahip 1950 m<sup>3</sup>/h'lik radyal fan kullanılmıştır. Radyal fanlar diğer birçok fan çeşidinde olduğu gibi hacimsel akış elemanıdır. Çıkış kısmına yerleştirilen ventil ile akışkan debisi ayarlanmaktadır.

Deney sisteminin ana gövdesini oluşturan kovan kısmı (Şekil 2.2.), St52 çelik malzemesinden imal edilmiş olup, 450 mm boya, 140 mm çapa sahiptir. Kovanın giriş ve çıkışında koni şeklinde çapı 450 mm'den 76,1 mm'ye düşüren kovan kapakları bulunmaktadır. Kovan etrafına sarılı halde bulunan, 361 spir sayısına ve 4 mm çapa sahip olan bobin, kovanın ısınmasını sağlayan manyetik alanı oluşturmaktadır.



**Şekil 2.2.** İndüksiyonlu Akışkan Isıtıcısı Deney Sisteminin Kovan Kısmı

Havanın çıkış sıcaklığı ve ortam sıcaklığını ölçmek için K tipi termokupl ile anlık veri

kaydetme özelliğine sahip VERTH BT-7xxx marka termometre kullanılmıştır.

Şebekeden çekilen ve bobine verilen güç değerlerini elde etmek için; iki adet BRYMEN BM-157 marka pens ampermetre kullanılmıştır. Havanın çıkış hızı ise TESTO 410-2 marka anemometre ile ölçülmüştür. Kovan dış yüzey sıcaklıkları TESTO marka termal kamera ile görüntülenmiştir.

## 2.2. Deneysel Çalışma

Yapılan çalışmada, indüksiyon sisteminden geçirilen iş akışkanının (hava) ısıtılmasının geçici rejim durumunda gösterdiği davranışlar incelenmiştir. Deneylerde;

- Fan ve indüksiyon sisteminin birlikte çalıştırılması (Protokol 1)
- Fanın indüksiyon sisteminden 5 dakika sonra devreye alınması (Protokol 2)
- Fanın indüksiyon sisteminden 7,5 dakika sonra devreye alınması (Protokol 3)
- Fanın indüksiyon sisteminden 10 dakika sonra devreye alınması (Protokol 4)

Şeklinde dört farklı durum analiz edilmiştir. Her bir protokol deneyinde yapılan ölçümler her 5 dakikada bir ve eş zamanlı olarak alınmıştır. Sistemin sürekli rejimi geçme süresine kadar ölçümler yapılmıştır. Deney verilerinden elde edilen sonuçlar yöntemde verilen bağıntılar kullanılarak değerlendirilmiş ve sistem sürekli rejime

girene kadar meydana gelen ısı kayıpları ve verimi hesaplanmıştır.

Sisteme akışkan ve elektrik girişi protokol 1'de aynı anda yapılmıştır. Daha sonraki deneylerde akışkan girişi elektrik girişinden 5, 7.5 ve 10 dk sonra verilmiştir. 10 dakikalık süre sonunda devreye alınan fanla, akışkanın rejim şartlarına ulaştığı görüldüğünden daha uzun süreli bekleme çalışmaları gereksiz görülerek yapılmamıştır. Sisteme elektrik enerjisi beslendiği andan itibaren kovan ısınırken, kovan etrafındaki sargılar da ısınmıştır. Ayrıca 10 dk'lık bekleme süresince kovan iç cidarı yaklaşık 145°C'ye ulaşmıştır. Prototiplerde kovan ile bobinin arasında bulunan reçinenin hal değişimini engellemek ve bobinin fazla ısınmadan kaynaklanan çalışma aksaklıklarını önlemek amacıyla akışkan geçme süresi kontrollü bir şekilde arttırılarak deneyler yapılmış ve en yüksek süre olan fazla 10 dk tespit edilmiştir. Ancak makalede yapılan deneylerden 4 tanesi örnek durum olarak verilmiştir.

## 3. Araştırma Bulguları ve Tartışma

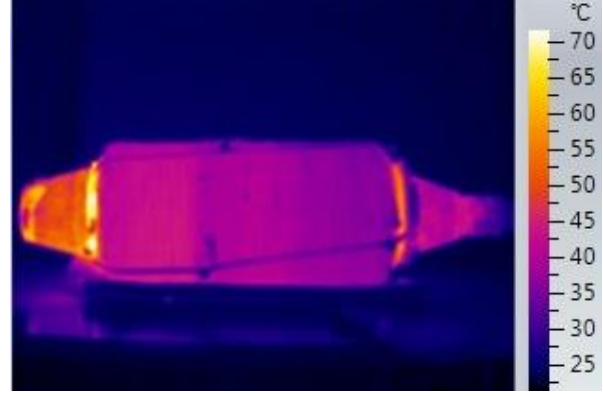
İndüksiyonlu akışkan ısıtıcısında, ısı transferi hesaplamaları için gerekli olan indüksiyon yüzey sıcaklık değerleri termal kamera ile ölçülmüştür. Tüm protokollerde sürekli rejime girme anında alınan görüntünün bir örneği Şekil 3.1 'de verilmiştir. İş akışkanı, indüksiyonlu ısıtıcının içerisinden geçerek ısınmakta, sıcaklık değeri yükselerek sistemden çıkmaktadır. İndüksiyon sistemine ortam sıcaklığında giren hava ısınarak çıktığı için,

giriş bölgesi çıkış bölgesinden daha düşük sıcaklığa sahiptir (Şekil 3.1.).

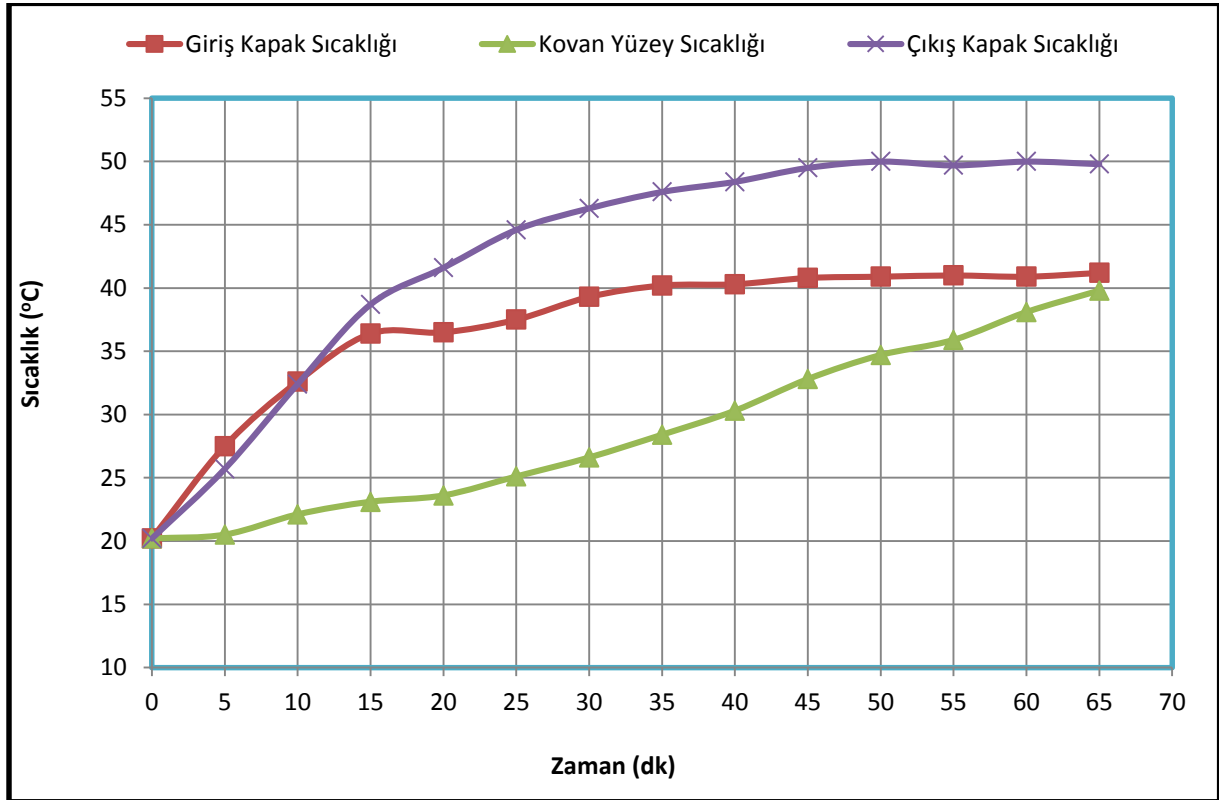
İndüksiyonlu hava ısıtma deney sisteminde, Şekil 3.1.'de görüldüğü gibi havanın ısınmasında kovan ile beraber giriş ve çıkış kapakları da etkilidir. Bu nedenle kovan ile beraber bu kısımların da iç yüzey sıcaklıkları oldukça önem taşımaktadır.

Deneylerin başlamasının ardından yüzey sıcaklıklarının artışı gözlemlenmiştir. Fanın sürekli açık olduğu sistemin ortalama yüzey sıcaklık değerleri örnek olarak Şekil 3.2'de verilmiştir. Diğer protokoller için de yüzey sıcaklıkları benzer şekilde olmaktadır. Kovanın üzerinde sırasıyla reçine, bobin ve izolasyon malzemesinin bulunması, ölçülen

ortalama yüzey sıcaklığının giriş ve çıkış kapağına oranla daha düşük olmasına neden olmuştur. Ancak yalıtım, sistem durdurulduktan sonra kovan yüzeyinin ısınıp çekerek ısınmaya devam etmektedir.



Şekil 3.1 İndüksiyonlu Akışkan Isıtıcısı Kovan Kısımının Sürekli Rejime Girdiği Andaki Termal Kamera Görüntüsü



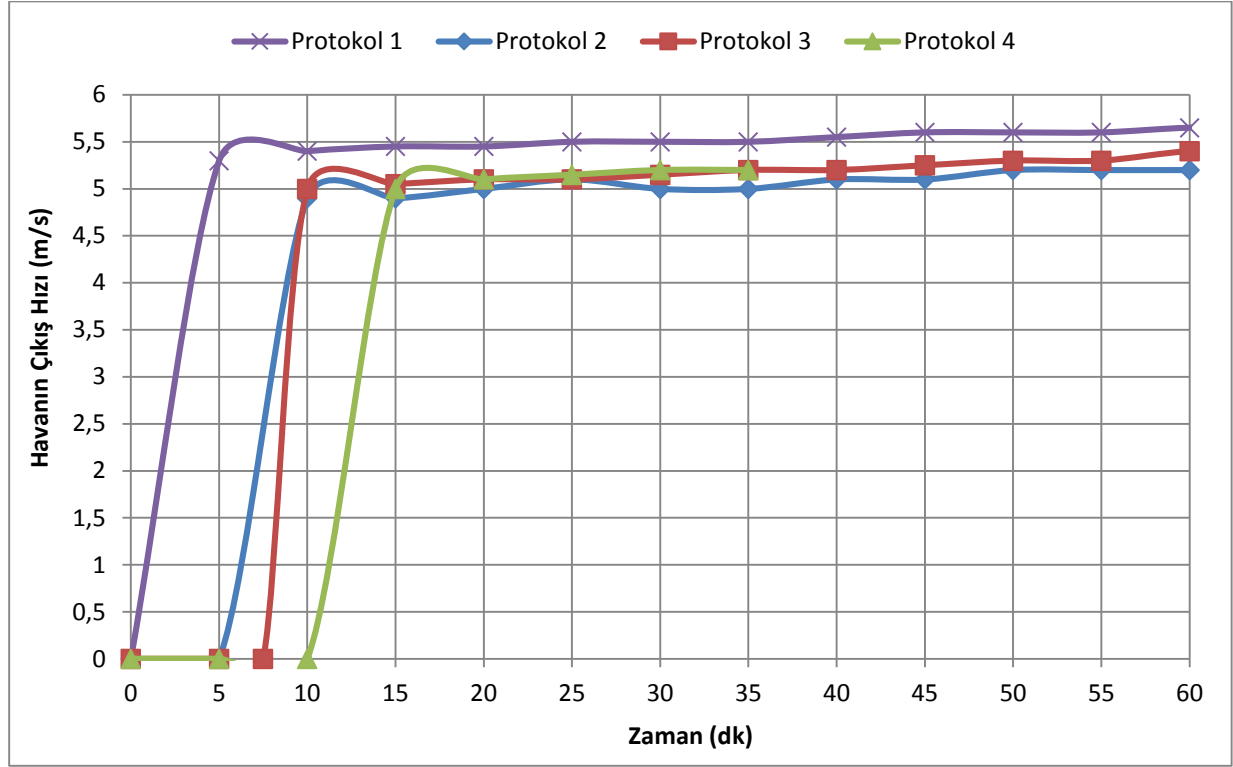
Şekil 3.2. Fanın Tamamen Açık Olduğu Sistemde Termal Kamera İle Çekilen Ortalama Yüzey Sıcaklıkları

Radyal fan ile sağlanan havanın kütesel debi sıcaklığı etkin parametre olarak değerlendirilmiştir; deneyin yapıldığı ortamın görülmektedir. Deneylerde ortam sıcaklığı



değişmediği için sisteme girişte havanın sahip olduğu enerji değerlerinde de sıcaklığa bağlı değişimler göz ardı edilmiştir. Fanın havaya sadece kinetik enerji kazandırdığı, sıcaklığı değiştirmedeği kabul edilmiştir. Debi değeri, kütleinin korunumu prensibi göz

önüne alınarak havanın çıkış koşulları üzerinden denklem 2.1 ile hesaplanmıştır. Denklem 2.1'deki protokollerin hız değeri Şekil 3.3 ile verildiği gibi kullanılmıştır. Yoğunluk ifadesi ise Şekil 3.4 ile verilen sıcaklık değerlerinden elde edilmiştir.



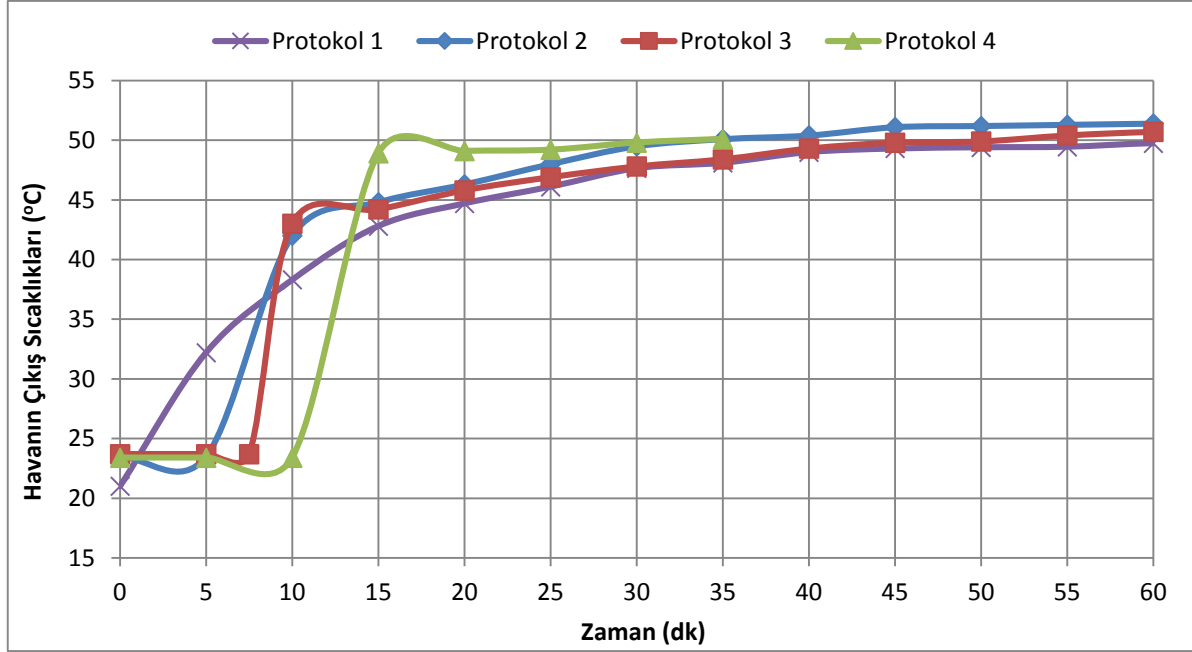
Şekil 3.3. Havanın Çıkış Hız-Zaman Grafiği

Protokollerde, sistemden çıkan havanın sıcaklıklarında Şekil 3.4.'de gösterildiği gibi bir artış gözlenmiştir. Şekil 3.4.'ten elde edilen sonuçlara göre tüm deneylerde hava ortalama 50 °C ( $\pm 2$  °C) civarındaki sıcaklıkta sürekli rejime girmiştir. Protokol 1 için sürekli rejim sıcaklığına ulaşma süresi deney başlangıcından itibaren 45. dakikaya kadar uzamaktadır. Akışkan ve elektrik enerjisi girişi aynı anda başlatıldığında hava akışı kovan malzemesinde ısı birikimini önlediğinden havanın daha geç sürekli rejim sıcaklığına ulaşmasına neden olmuştur. Sürekli rejime ulaşma profilleri farklı olmakla

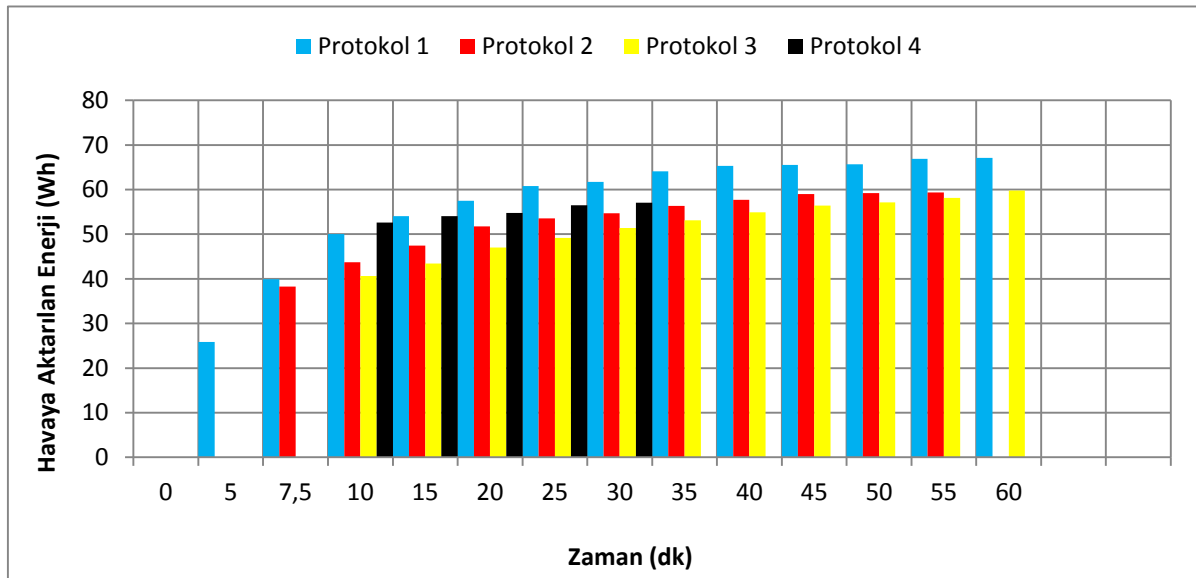
birlikte benzer durumla Protokol 2 ve 3'te de karşılaşılmış, sürekli rejim sıcaklığına 40 dakikaya varan sürelerde ulaşılmıştır. Protokol 4 durumunda ise kovanın hava girişi olmadan ısınması ile hava sıcaklığı 15. dakikadan itibaren rejim sıcaklığına ulaşmıştır.

Fanın devreye alınma süresindeki gecikme miktarı, sistemin rejime girme süresinin kısalmasında etkin parametre olmaktadır (Şekil 3.4.). Sistem, protokol 4'te sürekli rejim şartları elde edilinceye kadar 30 dk daha avantajlı çalışmaktadır. Bütün protokollerde geçici rejim süresince

indüksiyon için şebekeden aynı elektrik gücü kullanılarak rejime girme süresince çekilmekte ve yaklaşık 45 dk boyunca rejime hesaplanan enerji sarfiyatı Şekil 3.5.'te girme süresi beklenmektedir. Şekil 3.2.'de verilmiştir.  
verilen yüzey sıcaklıkları değerleri



Şekil 3.4. Havanın Çıkış Sıcaklık-Zaman Grafiği



Şekil 3.5. İndüksiyonlu Akışkan Isıtıcısında Zamanla Havaya Aktarılan Enerji Miktarı

Enerji sarfiyatındaki değişikliğin sebebi = i.t gereği ısı enerjisine dönüşmüş ve kovan kovan üzerinde eddy akımları meydana malzemesinin sıcaklığı artmaya başlamıştır. gelmesidir. Bu akımlardaki elektrik enerjisi q Isıtma sisteminde fan çalışmaya başladığı

andan itibaren, sistem içerisinde geçirilen hava, kovan üzerinde biriken ısı enerjisini transfer ederek termal dengeye ulaşmaya kadar kovanın ve içerisinde geçen havanın sıcaklığı artmıştır. Birinci kanun gereği sürekli rejim; sistemden geçirilen hava ile transfer edilen enerji, sistemden çevreye olan kayıplar ve elektrik kayıplarının toplamının kovanda indüklenen ısı

enerjisine eşit olmasıdır. Hava Protokol 1’de başlangıçtan itibaren kovanı soğuttuğundan, sürekli rejimin sağlanması 45 dk’yı geçmektedir. Ancak protokol 2, 3 ve 4’de olduğu gibi havanın akışına başlangıçtan itibaren değil de kovan belirli bir sıcaklığa geldikten sonra müsaade edilmesi, geçici rejim süresini ve dolayısıyla sürekli rejime girene kadar harcanan enerjiyi azaltmıştır.

**Tablo 3.1.** İndüksiyonlu Hava Isıtıcısı Sistem Verileri

	<b>Protokol 1 (Fanın Tamamen Açık Olduğu)</b>	<b>Protokol 2 (İlk 5 dk Fan Kapalı)</b>	<b>Protokol 3 (İlk 7,5 dk Fan Kapalı)</b>	<b>Protokol 4 (İlk 10 dk Fan Kapalı)</b>
<b>Geçici Rejime Girme Süresi</b>	45 dk	40 dk	40 dk	15 dk
<b>Kütleli Debi</b>	1,36 kg/s	1,06 kg/s	1,18 kg/s	1,07 kg/s
<b>Şebekeden Alınan Enerji</b>	1386,67 Wh	1250,75 Wh	1293,04 Wh	718,75 Wh
<b>Bobinden Çekilen Enerji</b>	1126,08 Wh	1017,25 Wh	1081,07 Wh	617,33 Wh
<b>Havaya Aktarılan Enerji</b>	871,87 Wh	692,53 Wh	573,31 Wh	294,38 Wh
<b>İşinim Kaybı</b>	27,22 Wh	26,53 Wh	24,42 Wh	16,46 Wh
<b>Taşınım Kaybı</b>	160,22 Wh	153,02 Wh	136,88 Wh	92,26 Wh
<b>Elektriksel Verim</b>	81,2 %	81,3 %	83,6 %	85,9 %
<b>I. Kanun Verimi</b>	62,9 %	55,4 %	44,3 %	41 %
<b>Termal/Isıl Verim</b>	77,4 %	68,1 %	53 %	47,7 %

Deneysel sistem yüzeyinde doğal taşınım ve radyasyon ile meydana gelen ısı kayıpları hesaplanmış, enerji dağılım değerleri, sürekli rejime erişim süreleri Tablo 3.1’de verilmiştir. Burada; sistemin geçici rejime girişi denklem 2.9 ile bulunmuştur. Kütleli debi miktarı denklem 2.1 ile hesaplanmıştır.

Şebekeden ve bobinden çekilen enerji miktarları pensampermetreler ile deneysel olarak bulunmuştur. Havaya aktarılan enerji miktarı ise denklem 2.2 ile verilen ifadenin geçici rejim süresi ile çarpımından elde edilmiştir. Şebekeden alınan enerji ile bobinden alınan enerjinin hesaplanmasında

elektriksel verim ifadesi kullanılmıştır. Bobinden çekilen enerjinin ısıya dönüşen miktarı, ısı verim olarak ifade edilmiştir. Isıl verim, havaya aktarılan enerjinin bobinden çekilen enerji ile oranlanmasıyla elde edilmiştir. Verimler denklem 2.8 ile verildiği gibi hesaplanmıştır. Tablo 3.1'den de görüldüğü gibi protokol 4'de rejime girene kadar sistemden çevreye olan kayıplar da en az seviyededir.

Termal olarak en yüksek verime protokol 1 sahip olmasına rağmen en uzun geçici rejim süresi de bu protokolde meydana gelmiştir.

Her bir protokol için sistem rejime girene kadar harcanan enerji miktarı Tablo 3.2'de

verilmiştir. 8 saatlik bir vardiya çalışması göz önüne alınarak yapılan hesaplamada bir ısıtıcının yıllık rejime girme maliyeti enerji cinsinden yaklaşık 221 kWh olarak tespit edilmiştir. Saat cinsinden işçilik süresi ise en fazla açık protokolde 395,41 h ve protokol 4'de 91,45 h olarak tespit edilmiştir.

Her bir protokol için sistem rejime girene kadar harcanan enerji miktarı Tablo 3.2'de verilmiştir. 8 saatlik bir vardiya çalışması göz önüne alınarak yapılan hesaplamada bir ısıtıcının yıllık rejime girme maliyeti enerji cinsinden yaklaşık 221 kWh olarak tespit edilmiştir. Saat cinsinden işçilik süresi ise en fazla açık protokolde 395,41 h ve protokol 4'de 91,45 h olarak tespit edilmiştir.

**Tablo 3.2.** İndüksiyonlu Hava Isıtıcısı Maliyet Değerleri

	<b>Protokol 1 (Fanın Tamamen Açık Olduğu)</b>	<b>Protokol 2 (İlk 5 dk Fan Kapalı)</b>	<b>Protokol 3 (İlk 7,5 dk Fan Kapalı)</b>	<b>Protokol 4 (İlk 10 dk Fan Kapalı)</b>
<b>Sistemin Sürekli Rejime Girene Kadar Harcanan Enerji</b>	992,24 Wh	872,08 Wh	690,51 Wh	613,37 Wh
<b>Enerji Cinsinden Aylık Maliyet</b>	29,77 kWh	26,16 kWh	20,72 kWh	18,40 kWh
<b>Enerji Cinsinden Yıllık Maliyet</b>	357,21 kWh	313,95 kWh	248,58 kWh	220,81 kWh
<b>İşçilik Süresi Cinsinden Maliyet</b>	395,41 h	365 h	365 h	91,25 h

#### 4. Sonuçlar

İndüksiyonlu akışkan ısıtma sistemleri üzerine yapılan bu çalışmada sistemin geçici rejim şartları deneysel olarak incelenmiştir. Deneylerde 4 farklı protokol durumu incelenmiştir. Giriş ve çıkış kapaklarının

yüzey sıcaklıklarındaki artış, birbirlerine ters şekilde parabolik olarak meydana gelmiştir. Işınım ve doğal taşınım kayıplarında etken olan kovan yüzey sıcaklığı ise bobinin yalıtım malzemesi görevi üstlenmesinden dolayı çıkış kapağına göre daha düşük çıkmıştır.

Deneylerden elde edilen verilere göre havanın sürekli rejime girişte sistemden çıkış sıcaklığı ortalama 500C ve çıkış hızı ortalama 5.3 m/s olarak gözlemlenmiştir. Sistemde akışkan ve elektrik aynı anda verildiği takdirde hava, kovan malzemesinin sıcaklık artışını yavaşlatmıştır. Bu nedenle protokol 4'te diğer deneylere göre hava, sürekli rejim sıcaklığına 15 dk ile diğerlerinden 25-30 dk daha hızlı bir sürede ulaşmıştır. Akışkan girişinin geç sağlanması sistemin I. kanun ve ısıl verimini düşürmüştür. Bu durum enerji maliyetlerine de yansımış olup işletme maliyeti en fazla olan protokol, enerji cinsinden yıllık 357,21 kWh maliyet ile protokol 1 olmuştur. Diğer yandan en düşük maliyet enerji cinsinden yıllık 221 kWh maliyet ile protokol 4 olduğu hesaplanmıştır.

Sıcak havanın kullanılması gereken sistemlerde, hava sıcaklığının kademeli olarak artması isteniyorsa, protokol 1 de Altıntaş, A., Yıldız, M.N. ve Kızılkaya, İ. 2012. İndüksiyon Isıtma Prensipleri İle Çalışan Mikrokontrol Denetimli Bir Sıvı Isıtıcısı Tasarımı. Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, ISSN 29: 1302-3055.

Altıntaş, A. ve Karahan, M. 2015. İndüksiyonlu Isıtma Yöntemiyle Çalışan Sıvı Isıtıcısı Aparatlarının Araştırılması. SDU International Technologic Science, 7(3), 16-26.

Çengel, Y.A. 2011. Isı ve Kütle Transferi, Çeviri Editörü; Tanyıldız, V., Üçüncü Baskıdan Türkçe Çeviri, ISBN:978-975-6240-41-0, İzmir, Güven Kitabevi.

olduğu gibi bir çalışma rejimi uygun olabilir. Ancak başlangıç şartlarının sürekli rejim şartları olması istenen durumlarda protokol 4 hem zaman hem de enerjiden tasarrufu sağlayacaktır.

Bu çalışma ile 'İndüksiyonlu akışkan ısıtıcılarında havanın geçici rejim şartlarındaki enerji tüketiminin azaltılması ve sürekli rejime giriş sürelerinin kısaltılması nasıl mümkün olabilir?' sorularına cevap alınmıştır. Çalışmanın sonuçlarına göre sistemin kovan ve kapak bölgelerine eklenecek olan yalıtım ile sistem iyileştirmesi gerçekleştirilebilir. Kovan içerisinden geçirilen hava hızının optimum şekilde ayarlanması da, havanın kovan iç çeperinden daha fazla ısıyı çekerek sistemi terk etmesini sağlayarak geçici rejim esnasında sistem verimi arttıracığı söylenebilir.

## 5. Kaynaklar

Çetin, S. 2005. Bir Fazlı Bir İndüksiyon Isıtma Sistemi Analizi ve Dizayını. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli.

Dereci, S. 2010. İndüksiyonla Isıtma Sistemlerinin İncelenmesi Ve Bir Uygulama Devresinin Gerçekleştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Kuzmichev, A. ve Tsybulsky, L. 2011. Evaporators with Induction Heating and Their Applications. Advances in Induction and Microwave Heating of Mineral and Organic Materials. Edited by Stanisław Grundas, ISBN 978-953-

307-522-8, InTech Press. Syf: 125-134  
DOI: 10.5772/13841.

Makimura, Y., Tomita, H., Motegi, S. 2009.  
Superheated Steam Generator by  
Induction Heating, Power Electronics  
and Applications. EPE '09. 13th  
European Conference, Barcelona, Syf:1 –  
4, E-ISBN : 978-90-75815-13-9.

Öncü, S. 2005. Bir Fazlı Yüksek Verimli Ev  
Tipi Bir İndüksiyon Isıtma Sistemi.  
Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale  
Üniversitesi, Denizli.

Ünver, H.M., Aydemir, M.T., ve Çelik, V.  
2005. Power and Frequency Control in a  
60 kW Induction Steel Heating Furnaces  
through PLC. IEE Power Engineer.  
Syf:36-393.

Ünver, Ü. 2016. Efficiency Analysis Of  
Induction Air Heater And Investigation  
Of Distribution Of Energy Losses.  
Tehnički vjesnik/Technical Gazette, Vol.  
23, No. 5, pp.1259-1267, DOI:  
10.17559/TV-20151122224719.

Ünver, U., Ünver H.M. 2013. Comparison of  
Natural Gas Fired and Induction  
Heating Furnaces. Progress in Exergy,  
Energy, and the Environment, Part VI,  
pp 1009-1016, 2014 DOI 10.1007/978-3-  
319-04681-5\_96 Print ISBN 978-3-319-  
04680-8, Online ISBN 978-3-319-  
04681-5, Springer International  
Publishing Switzerland.