



Tünel tipi indüksiyon fırını indüktörlerinde ısıtılacak parça çapının değişimine bağlı olarak sistem veriminin analizi

Ümit Ünver^{1*}, Halil Murat Ünver²

¹Yalova Üniversitesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, 77200, Yalova, Türkiye

²Kırıkkale Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 71100, Kırıkkale, Türkiye

Ö N E Ç I K A N L A R

- Eşmerkezli veya eksantrik yerleşimin ısıtma verimi üzerinde etkisi yoktur
- İndüksiyon ocaklarında merkezleme için mekanizma yapılmasına gerek yoktur
- Çalışmada Biyet çapı/İndüktör çapı oranına bağlı olarak ısıtma verimi ifadesi elde edildi

Makale Bilgileri

Geliş: 29.09.2016

Kabul: 28.12.2016

DOI:

10.17341/gazimmfd.406788

Anahtar Kelimeler:

İndüksiyon,
indüksiyon ısıtma verimi,
indüktör verimi,
tavlama verimi,
alüminyum ısıtma

ÖZET

Bu çalışmada indüksiyon ısıtma sistemi kullanan alüminyum ekstrüzyon tesislerinde bobin dizayn çapından farklı çaplarda biyet ısıtılmasına bağlı olarak verim değişiminin deneysel ve sayısal modellemesi ile analiz edilmesi hedeflenmiştir. Isınma deneylerinde Ø178 mm alüminyum tavlama amaçlı imal edilen konik ısıtma indüksiyon ocağı kullanılmıştır. Standart biyet çaplarına uygun çaplarda diskler aynı indüktör ile eş merkezli ve eksantrik yerleşimli olarak denenmiştir. Ayrıca COMSOL programı yardımıyla indüksiyonlu ısıtmanın bilgisayar modellemesi yapılmış ve sonuçlar deney sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Tünel tipi indüksiyon ısıtma sistemi şeklinde imal edilen deney düzeneğinde disklerin bobin içine eş merkezli veya eksantrik olarak yerleştirilmesiyle malzeme sıcaklığının ve çekilen gücün %5 e kadar arttığı fakat ısıtma veriminin değişmediği kanıtlanmıştır. Dolayısıyla malzemeyi bobinle eş merkezli yapmak için bazı ek mekanizmalara gerek olmadığı belirlenmiştir. Çalışmada Ø178 mm biyetler için tasarlanmış bir indüksiyon bobininde farklı çaplı malzeme ısıtma durumunda kullanımı kolay bir verim fonksiyonu elde edilmiştir.

Analysis of efficiency of tunnel type induction furnace inductors with respect to variation of diameter of heated workpiece

H I G H L I G H T S

- Eccentric or concentric placement do not affect the heating efficiency
- There is no need to additional construction to center the billet in the induction furnaces
- In this study, an equation was achieved for heating efficiency depending on Billet/Inductor diameters

Article Info

Received: 29.09.2016

Accepted: 28.12.2016

DOI:

10.17341/gazimmfd.406788

Keywords:

Induction,
induction heating efficiency,
inductor efficiency,
heating efficiency,
aluminum heating

ABSTRACT

In this study, calculations of net efficiency of heating process of aluminum billets those diameters are different from the diameter of the inductor were aimed. The targeted aluminum extrusion facilities utilize induction furnaces. In the heating experiments, an induction coil that was designed to heat Ø178 mm aluminum billets was used. The discs diameters are in accordance with the standard billet diameters. Additionally, a computer simulation of induction heating of discs was performed and the results were evaluated. It was observed that concentric or eccentric location of discs in the inductor induces an increment in the disc temperature and electrical power consumption and contrarily does not affect the heating efficiency. Therefore, it was determined that there is no need to construct some additional mechanisms to supply concentric location of the billet in the inductor. Finally, a user friendly efficiency scale function was obtained for the Ø178 mm inductor which is used for heating different diameter billets than the inductors design diameter.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: umit.unver@yalova.edu.tr / Tel: +90 226 815 5396

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

İlk defa 1900'lü yılların başında metal eritme amaçlı kullanılan indüksiyon fırınları [1] bu gün metallerin ısıtılarak şekillendirildiği birçok imalat alanında ön ısıtma, ısıtma, ergitme, tavlama ve sementasyon gibi işlemler için yaygın olarak kullanılmaktadır [2]. Doğal gazlı tavlama ocaklarında kayıplar %50 civarına [3] veya üzerine kadar çıkabildiğinden [4] ve indüksiyon fırınlarının temiz imalat imkânı, kompakt yapısı [5], sıcaklık değişimine derhal cevap vermesi ve hassas, güvenilir ve temassız sıcaklık kontrolü imkânı sağlaması [6] bu fırınların tercih sebebi olmuştur. Bu yüzden günümüzde konu ile ilgili bilimsel çalışmalar, indüksiyon fırınlarının otomatik kontrolü [7], indüksiyonla ısıtılan metallerin mikro yapıları [8] ve indüksiyonla özel ürünlerin sertleştirme imalatları [9] gibi özel konulara yönelmektedir. Alüminyum sanayide sıklıkla kullanılan, özellikle düşük yoğunluğundan dolayı avantajlı bir metaldir. Bu nedenle literatürde geniş yer bulmaktadır. Alüminyumun mekanik özelliklerinin iyileştirilmesinin araştırılması amacıyla Tunçay ve Özyürek [10] farklı hücre yoğunluğuna sahip seramik köpük filtrelerin Al-Si-Mg alaşımının mikro yapı ve mekanik özellikleri üzerine etkisini, Karacif vd. [11] alüminyumun polianilin ile elektrokimyasal olarak kaplanmasını incelemiştir. Fenercioğlu ve Kartal [12] alüminyum gibi demir barındırmayan kıymetli metallerin indüksiyonla ayrıştırılarak geri dönüşümünü araştırmışlardır. Doğan ve Öney [13] çalışmalarında gözenekli alüminyum köpük ısı alıcılarla genişletilmiş ısı kaynakları bulunan yatay bir kanalda taşınımın gerçekleşen ısı transferi deneysel olarak incelemiştir. Malzemeler ısıtıldıklarında sıcaklık artış hızına bağlı olarak malzeme içindeki ısı gerilim artar [14] ve buna bağlı olarak mikro çatlakların yanı sıra deformasyonlar meydana gelir. Bu problemin önüne geçmek için metallerin ısıtılarak şekillendirildiği imalatlarda sıcaklık dağılımının bilinmesi ve kontrol altında tutulması son derece önemlidir. Özsunar ve Peker'in çalışmalarında [15] toz metalürjisi ile üretilmiş gözenekli paslanmaz çelik silindirlere su verilmesi esnasında numunelerde meydana gelen sıcaklık dağılımları incelenerek, metallerin soğuma eğrileri çizilmiştir. Tüzünalp vd. [16] alüminyum alaşımlarının yönlü katılaştırılabilmesi için doğru sıcaklık kontrolü üzerinde çalışma yapmışlardır.

Mansoor vd. [17] ise geçici sıcaklık alanının hesaplanması için ısı iletim denkleminin çözümü için yeni bir yaklaşım sunmuştur. Alüminyumun en yoğun kullanıldığı imalat yöntemi, sıcak metalin preslenerek çeşitli şekillerde profillerin üretildiği ekstrüzyondur. Alüminyum ekstrüzyon tesislerinde, yüksek kaliteli ürünler üretmek için indüksiyonla ısıtma tercih edilmektedir [18]. Bu yöntemde standart çaptaki alüminyum biyetler (takozlar) 450 ile 550 °C arasına ısıtıldıktan sonra yüksek basınç altında ekstrude edilerek muhtelif şekilli profiller üretilmektedir [19]. Bazı durumlarda aynı indüktör (bobin) ile küçük çaplarda biyetler ısıtılarak imalat yapılmak zorunda kalındığı belirtilmektedir. Sunulan çalışmada farklı biyet ve bobin çapı ile ısıtma verimi ve dolayısıyla maliyetler arasındaki ilişkinin elde edilmesi ve Heisler diyagramının erişim ve kullanımındaki zorluklar nedeniyle kullanımı kolay bir yöntemin geliştirilmesi

hedeflenmiştir. İndüksiyon fırınları ile üretim yapan tesislerde, mühendislerin özel bir alan olan indüksiyon ocakları hakkında derin işletme bilgisine sahip olması beklenemez. Bu yüzden bu çalışmada üretim mühendislerine yardımcı olmak amacıyla sistemin karakteristik davranışlarının reel matematiksel ifadelerle ortaya konulması hedeflenmiştir. Ekstrüzyon tesislerinde üretim planlaması yapılırken farklı çapta biyetle üretime geçmek için indüktör değişimi işçilik süresini arttıran bir parametre olarak değerlendirilmektedir. İndüksiyon ısıtma sistemi kullanan alüminyum ekstrüzyon tesislerinde bobin tasarım çapından farklı çaplarda biyet ısıtılmasına bağlı olarak verim değişiminin net olarak hesaplanabilmesiyle ısıtıcı indüktör kullanımında karar verme mekanizmalarına yardımcı olmak, böylelikle işletme maliyetlerini azaltılmasına katkı sağlamak hedeflenmiştir. Bu çalışmada elde edilmiş olan fonksiyon sayesinde Ø178 mm biyet tav ocağının düşük çaplı malzemelerin ısıtılmasına ilişkin karakteristik verim değerlerinin kolaylıkla hesaplanabilir olması amaçlanmıştır. Bu sayede satış fiyatını belirleyen iş gücü, enerji verimliliği ve işletme maliyeti gibi parametrelerin optimum noktasının hesaplanmasının mümkün olması ile üretim mühendislerine üretim planlamasında bazı kolaylıklar sağlayabileceği düşünülmektedir.

2. MALZEME VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

2.1. Alüminyum indüksiyon Tav Ocağı (Aluminium Induction Heating Furnace)

Deneylerde kullanılmak üzere geleneksel yöntemle üretilen bobin, alüminyumun ekstrüzyonu sırasında meydana gelen kalite ve israf sorunlarını gidermek üzere manyetik alanı uç tarafta yoğunlaştırmak, dolayısıyla konik ısıtma yapabilmek amacıyla her bir bölgede farklı sarım sayıları olacak şekilde tasarlanmıştır. Her bir bölgenin özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Deneylerde kullanılan Alüminyum tav ocağı bobin özellikleri

(Specifications of the inductor of the induction heating furnace that was used in the experiments)

Bölge	Kat	Sarım Sayısı	Toplam Grup Sayısı	Toplam Sarım Sayısı	İndüktans [µH]
I	4	8	11	352	358,95
II	2	4	11	88	202,10
III	1	2	22	44	196,72
Toplam			44	484	757,77

Bobin iletkeni 10x10x1 mm kare kesitli elektrolitik bakırdır. Bobinlerin iç çapı Ø190 mm, toplam boyu 1075 mm'dir. Her bir grupta soğumayı sağlayan su giriş-çıkışı bulunmaktadır. Bobinin iç kısmında alüminyum malzemenin yerleştirildiği Ø178 mm Cr-Ni boru bulunmaktadır. Boru ve bobin arasında ısı izolasyonu için seramik battaniye yerleştirilmiştir. Aynı akı yoğunluğu altında deneylerin yapılabilmesi amacıyla alüminyum disk özel gereçlerle her seferinde I. bölgenin ortasına gelecek şekilde konumlandırılmıştır.

2.2. Alüminyum Disk (Aluminum Disc)

Ekstrüzyonla şekillendirmede çeşitli alüminyum alaşımları kullanılmaktadır. Ancak alüminyum imalat endüstrisinde en yaygın kullanılan AA6063 olarak adlandırılan alaşım deneylerimizde tercih edilmiştir. Bu nedenle deneyler için kullanılan diskler AA6063 levhadan Ø178 x 5 mm ebatlarında kesilerek elde edilmiştir.

2.3. Matematiksel Model (Mathematical Model)

Bu çalışma kapsamında, ekstrüzyon sanayinde en sık kullanılan biyet ölçüsünün (Ø152 mm) bir üstü olan Ø178 mm ye kadar olan Alüminyum biyetlerin ısıtıldığı tavlama prosesi incelenmiştir. Proseste malzeme içinde meydana gelen ısınma iletim yoluyla gerçekleşmektedir. İncelenen malzemeler silindirik olduğundan, Eş. 1 ile ifade edilen, silindirik koordinatlarda zamana bağlı ısı iletimi denklemi kullanılmıştır.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(kr \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{g} = \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

Bu eşitlikte r, Şekil 1’de büyüklüğü gösterilen Alüminyum biyetin merkezinden başlayan radyal koordinat, ϕ belirlenen bir noktanın biyetin çap eksenine ile arasında kalan açı ve z aksel koordinatı temsil etmektedir. Eşitlikteki ikinci terim ϕ açısı boyunca sıcaklık değişimini dikkate almaktadır. Ancak indüksiyonlu ısıtma sistemlerinde ϕ açısı boyunca sıcaklık değişimi olmadığından, diğer bir deyişle $d\phi = 0$ olduğundan 2. terim eşitlikten çıkarılabilir. Bu çalışma kapsamında incelenen alüminyum diskin dz kalınlığı (5 mm), diğer ölçülere kıyasla çok küçük olduğundan ve eşitlikte dz boyunca olan ısı geçişleri çok küçük olduğundan 3. terim de ihmal edilebilir. Bu durumda radyal ısı iletimi Eş. 2 ile tarif edilebilir;

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \dot{g} = \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

Burada k malzemenin ısı iletim katsayısını (W/mK), T sıcaklığı (K), \dot{g} birim hacimde ısı üretimini (W/m³), ρ malzemenin yoğunluğunu (kg/m³), C malzemenin öz ısısını (J/kgK) ve t zamanı (s) ifade etmektedir. Bu diferansiyel denklem, ayrıklaştırma metodu ile [20] veya sonsuz uzunlukta silindirin bir akışkana daldırılması gibi bazı kabuller yapılarak 1947 yılında Heisler tarafından verilen sıcaklık eğrileri yardımıyla teorik olarak çözülebilir [21]. Bu çalışma kapsamında yapılmış olan deneylerde disk ortalama sıcaklığının homojen olmasını sağlamak ve hataları minimize etmek için ısıtma gücü, ısınma hızının ısı yayılma hızından küçük olacağı şekilde düşük olarak belirlenmiştir. Bunun için radyal doğrultuda sıcaklık değişiminin aritmetik ortalaması diskin ortalama sıcaklığı olarak kabul edilmiş ve dolayısıyla r eksenini boyunca meydana gelen sıcaklık değişimleri de ihmal edilmiştir. Sonuç olarak birim hacimde indüklenen ısı güç eşitliği, diğer bir deyişle hacimsel enerji yoğunluğu, Eş. 3’te verildiği gibi sadeleşir;

$$\dot{g} = \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

Bu durumda disk üzerinde indüklenen toplam ısı güç, Eş. 4 ile hesaplanır.

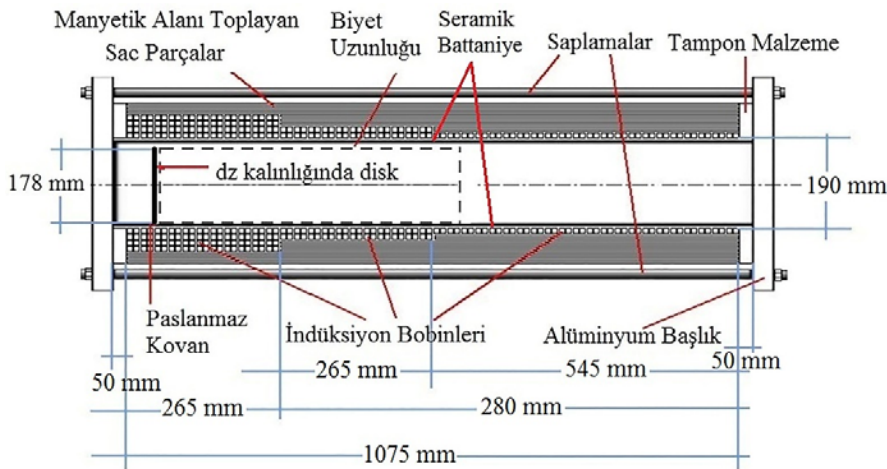
$$\dot{Q}_{\text{ter}} = \rho V C \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4)$$

Çalışmada ortalama sıcaklık, Eş. 5 ile hesaplanmıştır.

$$T_{\text{ort}} = \frac{\sum_{i=1}^n T_{ri}}{n} \quad (5)$$

Birim zamanda diskin ortalama sıcaklığında 10 s lik periyotta meydana gelen artış ise Eş. 6 ile hesaplanmaktadır.

$$\Delta T^j = \frac{\Delta T_{\text{ort}}^j - \Delta T_{\text{ort}}^{j-10}}{\Delta t} \quad (6)$$



Şekil 1. Deneylerde kullanılan, Ø178 x 500 mm ebatlarında Alüminyum biyet tavlama üzerine tasarlanan indüksiyon tav ocağının şematik gösterimi

(Schematic view of Ø178 x 500 mm dimensioned Aluminum billet heating induction furnace that was used in the experiments)

2.4. Deneysel Prosedürü (Experimental Procedure)

Isınma deneylerinde, Bölüm 2.1’de anlatılan, Ø178 mm alüminyum tavlama amaçlı imal edilen indüksiyon ocağı kullanılmıştır. Değişik çaptaki bütün diskler tek indüktörde denenmiştir. Deneyler, disklerin ısınması esnasında radyal yönde sıcaklık dağılımının homojen olmasını sağlamak için düşük bir güçte gerçekleştirilmiştir. Bütün deneylerde diskler, en küçük çaplı diskte merkez ve kenar noktalarındaki sıcaklık farkının belirgin hale geldiği en küçük süre olan 120 s boyunca enerji verilmiş, laboratuvar deneylerinde her 10 s’de bir termal görüntü kaydedilmiş, simülasyonda her 10 s’de bir disk üzerindeki 40 bin hücreden oluşan sıcaklık dağılımı verileri elde edilmiştir.

Disk üzerindeki sıcaklık dağılımının homojen olup olmadığını kontrol etmek üzere kullanılan $r = R$ ve $r = 0$ noktalarındaki sıcaklık artışları Eş. 7 ve Eş. 8 ile hesaplanmıştır;

$$\Delta T_{@r=R} = \frac{(T_{n-3}^i + T_{n-2}^i + T_{n-1}^i)}{3} - \frac{(T_{n-3}^{i-1} + T_{n-2}^{i-1} + T_{n-1}^{i-1})}{3} \quad (7)$$

$$\Delta T_{@r=0} = \frac{(T_0^i + T_1^i + T_2^i)}{3} - \frac{(T_0^{i-1} + T_1^{i-1} + T_2^{i-1})}{3} \quad (8)$$

Son olarak ısı verim Eş. 9 ile hesaplanmıştır.

$$\eta_{\text{ter}} = \frac{\dot{Q}_{\text{ter}}}{P_{\text{bobin}}} \quad (9)$$

Burada P_{bobin} , ısıtma bobini üzerinden ölçülen elektrik gücüdür. Her indüksiyon fırınının tasarımından kaynaklanan nedenlerle elektrik ve indüksiyon verimleri farklıdır. Bu çalışma kapsamına indüksiyon ısıtma sisteminin diğer kayıpları dâhil edilmemiştir. Veriler arasında karşılaştırma yapabilmek için doğrudan bobin üzerinden ölçülen güç değeri kullanılmıştır (Eş. 9).

2.5. Simülasyon Modeli (Simulation Model)

Deneysel çalışmaların ara sonuçları, geometrik verileri ve alınan ölçümler COMSOL programı için veri olarak kullanılmıştır. Simülasyon modelinde programın manyetik alanlar fiziği ve katılarda ısı transferi bileşenleri kullanılmıştır. Isı transferi bileşeninde katılar içerisinde iletimle ısı transferi problemi tanımlanarak çözdürüldü. Oluşturulan modelde ilk olarak indüksiyon ısıtma sistemini barındıran evren tanımlandı. Tanımlanan evren, indüksiyon sisteminin çalışması esnasında meydana gelen manyetik alanı etkilemeyecek kadar büyük olacak şekilde tasarlandı. Daha sonra 2.1.’de detayları verilen tav ocağı aslının aynı olacak şekilde modellendi. Son olarak alüminyum diskte Şekil 1’de olduğu gibi bobin içerisine yerleştirildi. Evren ve içindeki her bir eleman içerisinde ağ yapısı oluşturuldu ve Sonlu Elemanlar Metodu kullanılarak analiz gerçekleştirildi. Evren ve içindeki her bir eleman içerisinde ağ yapısı oluşturuldu ve Sonlu Elemanlar Metodu kullanılarak analiz

gerçekleştirildi. Ø178 mm x 4 mm kalınlığındaki alüminyum diskin indüksiyonla ısıtılmasının COMSOL ile simülasyonunun modelinin girdileri aşağıda detaylandırılmıştır.

2.5.1. Çalışılacak boyut ve fizik bileşenlerinin belirlenmesi (Determination of dimensions and physics)

Simülasyon 3 boyutlu olarak çalışılmıştır. Manyetik alanlar, katılarda ısı transferi ve bu iki modülün birbirine olan etkilerini de çözümlen çoklu fizik bağlantılarını içeren indüksiyonlu ısıtma modülü seçilmiştir.

2.5.2. Geometrinin oluşturulması (Geometry)

Model yz-düzleminde oluşturulmuştur. Geometride;

- 4 kat sarımlı bobin: iç çapı 186mm, dış çapı 266mm, uzunluğu 250 mm,
- 2 kat sarımlı bobin: iç çapı 186mm, dış çapı 226mm, uzunluğu 250 mm,
- Tek kat sarımlı bobin: iç çapı 186mm, dış çapı 206mm, uzunluğu 500 mm,
- 4 kat sarımlı bobin tarafından 100 mm içeride çizilen Ø178 mm alüminyum disk, uzunluğu 4 mm olan bir silindir olarak,
- Hava ise genişliği 1000 mm, derinliği 1200 mm, uzunluğu 1500 mm olan bir dikdörtgenler prizması şeklinde modellenmiştir.
- Bobinler arasında kullanılan izolasyon için 1 mm boşluk tanımlanmıştır.
- Eksantrik yerleşimde bobin ile disk arasındaki en yakın mesafe, aslına uygun olarak 5 mm olarak tanımlanmıştır.

2.5.3. Malzemelerin tanıtılması (Introduction of the materials)

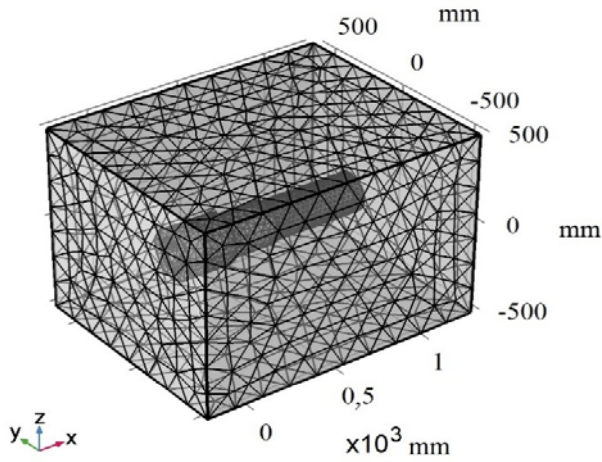
Şekil 2’de verilen deney düzeneği uzayını belirtmek amacıyla oluşturulan dikdörtgenler prizması için programın materyal kütüphanesinde bulunan hava, bobinler için bakır ve disk için alüminyum tanımlanmıştır.

2.5.4. Ağ yapısının oluşturulması (Meshing)

Ağ yapısı program tarafından NORMAL seçeneği ile Şekil 2 de gösterildiği gibi oluşturulmuş, kullanıcı tarafından meshlemeye herhangi bir müdahale yapılmamıştır.

2.5.5. Fizik modüllerinin düzenlenmesi (Physical module settings)

Manyetik alanlar fiziğinin düzenlenmesi COMSOL programının 5.2 versiyonunun model kütüphanesinde bulunan indüksiyonlu biyet ısıtma örneğine göre simülasyona dahil edilmiştir. Geometri kısmında 4 kat bobin, 2 kat bobin, tek kat bobin, disk ve hava katmanlarından oluşturulan 5 adet alan (domain) manyetik alanlar fiziğine eklenmiştir.



Şekil 2. İndüksiyon sisteminin ve içinde bulunduğu uzayın ağ görüntüsü.
(The meshing view of the space where the induction coils are in)

Tüm bobinlere çok sarımlı bobin sınır şartı tanımlanmıştır. 4 kat sarımlı bobinleri tahrik etmek için akım ve gerilim arasından akım seçilmiş ve değeri 62 Amper olarak tanımlanmıştır. Bobinin sarım sayısı 192, 2 kat sarımlı bobinin sarım sayısı 96, tek kat sarımlı bobinin sarım sayısı 100 olarak girilmiştir. Bobin iletkeninin kesit alanı 100 mm^2 olarak girilmiştir. Alan (Domain) uzunluğu $L_{\text{coil}}=(93\text{mm}+133\text{mm})\cdot\pi$ şeklinde tanımlanmıştır. Akımın yönünü tanımlamak için, geometrinin yz- düzlemi üzerinde çizildiğini göz önünde bulundurarak, birim vektörü aşağıdaki Tablo 2'deki gibi girilmiştir.

Tablo 2. Akım birim vektörleri. (Unit vectors of currents)

Bobin akımı		
0		x
e_{bobin}	$z/\sqrt{y^2+z^2}$	y 1
	$-y/\sqrt{y^2+z^2}$	z

2.5.6. Katılarda ısı transferi modülünün düzenlenmesi (Heat conduction module settings)

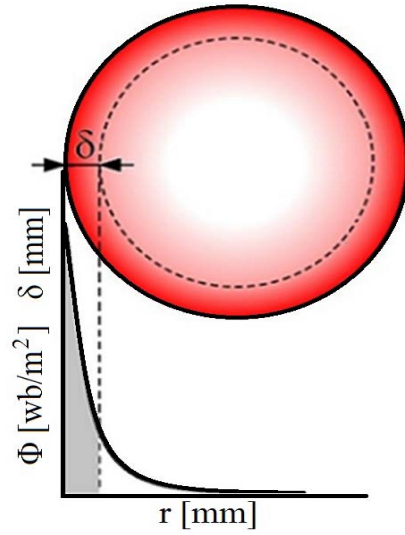
Geometri kısmında 5 adet alandan sadece disk, katılarda ısı transferi modülüne eklenmiştir. Bu modülde sadece alüminyum diskin bulunduğu ortam sıcaklığının başlangıç değeri sınır şartı olarak 27°C girilmiştir.

2.5.7. Modelin çalıştırılması (Study)

Oluşturulan model 2 aşamada çözümlenmiştir. Sadece Manyetik Alanlar fiziğinin çözümü için Adım 1 olarak tanımlanan frekans alanı eklenmiş ve frekans olarak 50 Hz girilmiştir. Sadece Katılarda Isı Transferi modülünün çözümü için Adım 2 olarak tanımlanan zamana bağlı çalışma eklenmiş ve zaman aralığı 0-120 s ve zaman artış miktarı 1 s olacak şekilde girilmiştir. Yakınsama şartı $\epsilon < 10^{-3}$ olarak tanımlanmış, daha sonra program çalıştırılmış ve çözüm yaklaşık 45 saniyede alınmıştır.

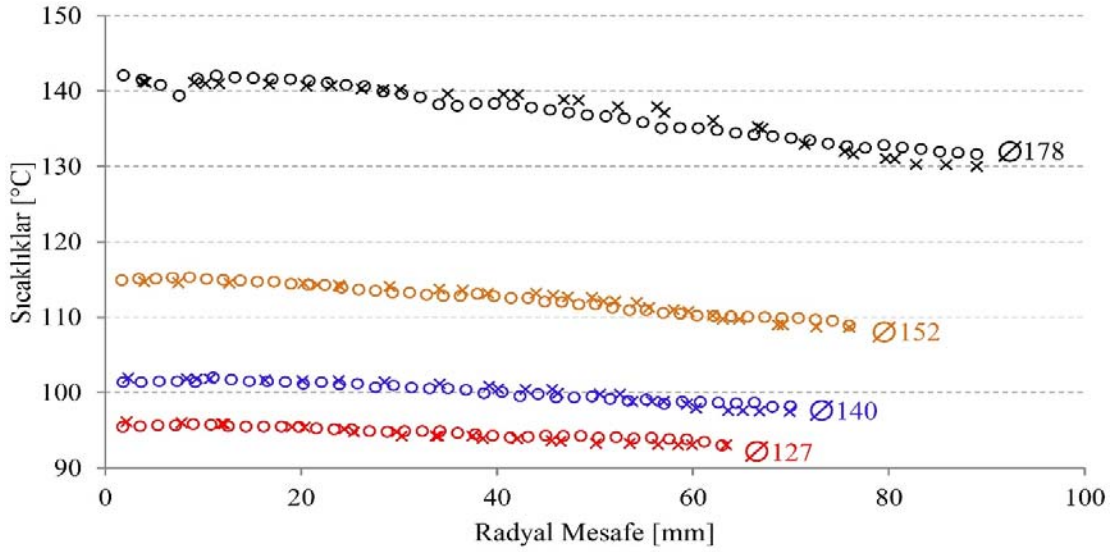
3. ÖLÇÜM-SİMULASYON SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRMELER (MEASUREMENT-SIMULATION RESULTS AND DISCUSSION)

İndüksiyonla ısıtmada, yoğun manyetik alana maruz kalan ve disk üzerinde dalma derinliği olarak ifade edilen bölgede meydana gelen Eddy akımları diskin ısınmasını sağlamaktadır. Şekil 3'de ısınmayı oluşturan akımın %63 gücün %86' sının meydana geldiği dalma derinliği görülmektedir [22, 23]. Literatürde verimli bir ısıtma için dalma derinliğinin malzeme çapının dörtte birinden fazla olmaması gerektiği belirtilmektedir [24]. Bu çalışma kapsamında bobinin iç cidarından merkeze doğru uzaklaştıkça manyetik akı yoğunluğunun azalması ile küçük çaplı diskler üzerinde oluşan Eddy akımlarının azalmasına bağlı olarak verimin düşmesi deneysel olarak ve FEM analiziyle gösterilmiştir.

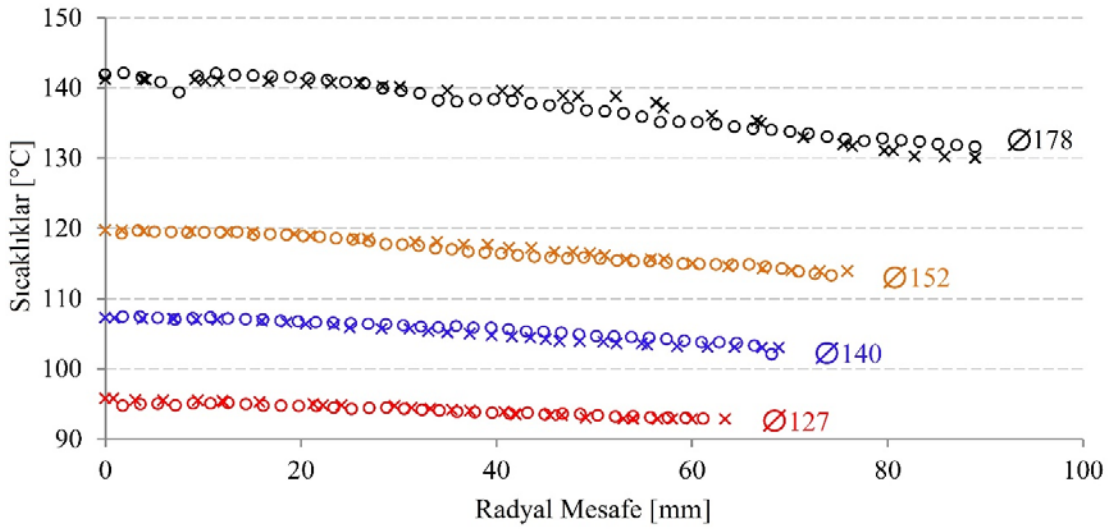


Şekil 3. Dalma derinliğinin şematik gösterimi
(Schematic illustration of the skin effect)

Deneyler esnasında sistemin gerilimi, frekansı sabit tutulmuş ve farklı çaplarda alüminyum diskler ısıtılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Bütün deneylerde diskler 120 s boyunca enerji verilmiş, laboratuvar deneylerinde her 10 s'de bir termal görüntü kaydedilmiş, simülasyonda her 10's de bir sıcaklık dağılımı verileri elde edilmiştir. Anlık ölçüm sonuçlarına örnek teşkil etmesi açısından 120. saniyede alınan ölçümler ve simülasyon sonuçları Şekil 4 ve 5'de verilmiştir. Eş merkezli çalışmalardan elde edilen deney sonuçları ile simülasyon sonuçları Şekil 4'de, eksantrik deney sonuçları ise Şekil 5'de verilmiştir. Her iki şekilde de simülasyon sonuçları noktasal, deney verileri çizgisel olarak gösterilmiştir. Şekil 4 ve Şekil 5'de görüldüğü gibi diskler üzerinden termal kamerayla okunan sıcaklık değerleri ile simülasyon ile elde edilen sıcaklık değerleri uyum içerisindedir. Grafiklerde, disklerin eksantrik olarak yerleştirildiği deneylerde, eş merkezli yerleşimli deneylere göre erişilen sıcaklık değerlerinin 5°C ye kadar daha fazla olduğu gözlemlenmektedir. Merkez ve eksantrik yerleşimli



Şekil 4. Eş Merkezli deneylerde (o) ve eş merkezli simülasyonda (x) 120. saniyede elde edilen sıcaklıklar
(The temperature results of the eccentric experiments (o) and simulation (x) at 120th second)



Şekil 5. Eksantrik deneylerde (o) ve eksantrik simülasyonda (x) 120. saniyede elde edilen sıcaklıklar
(The temperature results of the concentric experiments (o) and simulation (x) at 120th second)

deneylerde kaydedilen görüntülerden elde edilen veriler Tablo 3’de verilmiştir. Tablo 3’de görüldüğü gibi, diskin ortalama sıcaklığında 10 s süresince meydana gelen ortalama sıcaklık artışı 9,8°C ile 5,8°C arasında değişmektedir. Disk çapının %28,5 azalmasıyla, 10 s lik ortalama sıcaklık artış hızı %40,5 oranında azalmıştır. Aynı zamanda yine tabloda görüldüğü üzere, disklerin dış kısmında ve merkezinde ölçülen ortalama sıcaklık artışları da disk çapının azalmasıyla bir miktar azalmıştır. Uygulanacak enerji düzeyinin belirlenmesinde, öngörüldüğü gibi diskin dış kısmında ve disk merkezinde ölçülen ortalama sıcaklık artışı değerlerinin birbirine oldukça yakın değerler olduğu doğrulandı. Diğer yandan, hem 10 s’de bir ölçülen disk ortalama sıcaklığı artışının hem de disk kenarında ve disk merkezinde ölçülen sıcaklık artışı değerlerinin Tablo 3’de verilen eksantrik yerleşim ile gerçekleştirilen deneylerde,

merkezi yerleşimli deneylerden 1 ile 5°C arasında daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Malzeme çapına bağlı olarak 10 s’lik ortalama sıcaklık artış hızı ise %37,4 oranında azalmıştır. Tablo 4’de eş merkezli ve eksantrik yerleşimli deneylerde elde edilen verilerle disklere aktarılan enerji ve sistemin ısıl gücüne ait bulgular verilmiştir. Eş merkezli deneylerde disk çapının %28,6 azalmasıyla malzemeye aktarılan enerji ve deneyin ısıl gücü %30’a kadar, ısı akışı ve enerji yoğunluğu sırasıyla %41 ve %38 değer kaybetmiştir. Eksantrik deneylerde ise benzer şekilde malzemeye verilen enerji ve deneylerin ısıl gücü %33 civarına, ısı akışı %63, enerji yoğunluğu ise %65’e kadar gerilediği gözlenmiştir. Gerilemenin sebebi, bobine en yakın mesafede manyetik akı yoğunluğunun en fazla olmasıdır (Şekil 6). Manyetik akı yoğunluğu ne kadar fazla olursa malzeme üzerinde o kadar fazla Eddy Akımları meydana gelir. Silindirik malzemelerde

Tablo 3. Deney sonuçlarının özeti (Results of the experiments)

Merkez yerleşimli deneyler						
Disk Çapı	m	Grad T _{ort}	ΔT ₁	Δ T ₂	ΔT _{ort}	Δt
mm	kg	C/10s	C	C	C	sn
Ø127	0,1368	5,80	68,80	67,08	68,30	120
Ø140	0,1663	6,67	80,80	78,55	79,68	120
Ø152	0,1960	7,55	92,48	88,05	90,27	120
Ø178	0,2688	9,75	117,75	114,1	115,93	126
Eksantrik deneyler						
Ø127	0,1368	6,10	73,05	71,90	72,48	120
Ø140	0,1663	7,10	85,30	83,50	84,40	120
Ø152	0,1960	7,77	93,92	90,80	92,36	120
Ø178	0,2688	9,75	117,75	114,10	115,93	126

Tablo 4. Deney sonuçlarına göre hesaplanan ısı aktarımları (Calculated heat transfer according to the experiments)

Merkez Deneyler					
Disk Çapı	Isıl Enerji	Isıl Güç	Isı Akısı	Hacimsel Enerji Yoğunluğu	Kütleli Enerji Yoğunluğu
mm	kJ	W	kJ/kg	kW/m ³	kW/kg
Ø127	8,43	70,24	61,61	1386,15	513,39
Ø140	11,95	99,57	71,87	1617,00	598,89
Ø152	15,96	132,97	81,42	1831,93	678,49
Ø178	28,10	223,03	104,56	2240,66	829,88
Eksantrik deneyler					
Ø127	8,94	74,53	65,37	1470,88	544,77
Ø140	12,66	105,47	76,13	1712,90	634,41
Ø152	16,33	136,05	83,31	1874,45	694,24
Ø178	28,10	223,03	104,56	2240,66	829,88

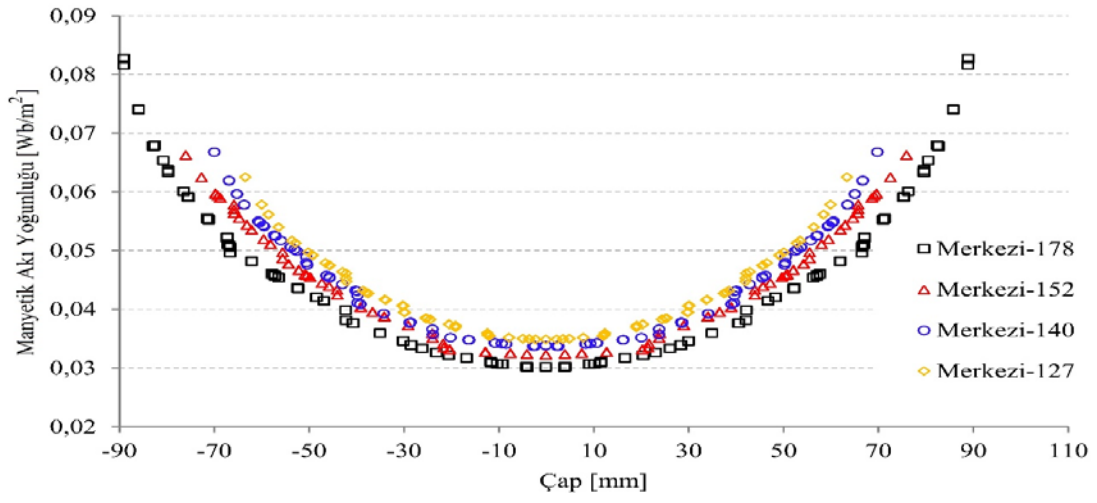
eş merkezli yerleştirmelerde, malzeme her yönden indüktörün iç yüzeyine eşit uzakta olduğundan manyetik akı yoğunluğu Şekil 6 de olduğu gibi simetrik olmaktadır. Çap küçüldükçe malzemenin maruz kaldığı manyetik akı yoğunluğu da azalmaktadır (Şekil 7). Tasarımda disk ile bobin arasında seramik battaniye ve paslanmaz kovan ile hareket için gerekli boşluk olduğundan yaklaşık 10 mm mesafe bulunmaktadır. Şekil 7’deki siyah çemberler sırasıyla en dış katmanda Ø178 mm çapındaki disk, içeriye doğru Ø152 mm, Ø140 mm ve Ø127 mm lik diskleri temsil etmektedir. Ø178 mm çapındaki disk, manyetik akı yoğunluğu 6,5–8 Wb/m² olan bölgenin tam ortasında bulunurken iç bölgelere doğru yoğunluk azalmakta ve Ø127 mm çapındaki disk yaklaşık 4,5 - 5 Wb/m² yoğunluk bölgesinde kalmaktadır. Eş. 1’in açıklamasında belirtildiği gibi manyetik akı yoğunluğu bütün disklerde φ eksenı boyunca sabit kalmaktadır.

İşletme şartlarında, ısıtılacak malzemenin bobinin merkezine yerleştirilmesi ek bir takım eksenleme düzeneklerinin yapılmasını gerektirmektedir. Genellikle malzeme kovan içerisinde eş merkezleme sağlanmadan kovanın alt kısmına temas edecek şekilde eksantrik olarak yerleştirilerek ısıtır. Şekil 8’da sonlu elemanlar modelinden elde edilen manyetik akı yoğunluğu dağılımı ve ısıtılan diskler bobinin alt kısmına eksantrik yerleştirilmiş olarak görülmektedir. Bu deneylerde (r / R) < 1 olan disklerin mümkün olduğu kadar büyük bir kısmının manyetik akı yoğunluğu fazla olan bölgelerde

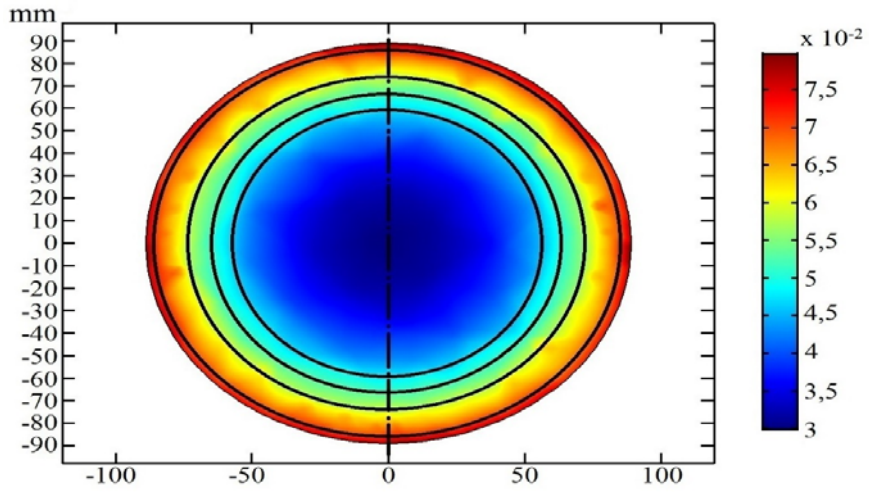
kalması sağlanmış (Şekil 9) ve konumun ısıtma verimine etkisi gözlenmiştir. Eş merkezli ve eksantrik yerleşimli deneylerde şebekeden çekilen enerji ile simülasyonda elde edilen enerji değerleri kıyaslanmıştır. Eş. 9 yardımıyla, tasarım çapı 178 mm olan indüksiyon bobinin farklı çaplardaki diskleri ısıtırken verimi hesaplanmıştır. Sistem veriminin, eksantrik ve eş merkezli yerleşimli deneyler için eş değer olduğu tespit edilmiştir. Isıtma veriminin disk çapı (r) / dizayn çapı (R) oranına göre değişimi Şekil 10’da verilmiştir. Şekilde y-ekseninde yer alan (r/R) oranı, boyutsuz bir kıyas parametresi sağlamak amacıyla kullanılmıştır. (r/R) oranı azaldıkça her iki yerleşim geometrisinde de verimlerin azaldığı gözlemlenmiştir. Maksimum termal verim, Ø178 mm disk ile yapılan deneylerde %74 hesaplanmıştır. Çap oranı değişimiyle verimin Eş. 10 ile hesaplanabileceği tespit edilmiş, eşitlikten elde edilen değerlerle gerçek değerler arasındaki farkın en fazla ± %1,3 olduğu görülmüştür.

$$\eta_r = 0,911 \cdot \frac{r}{R} - 0,164 \quad (10)$$

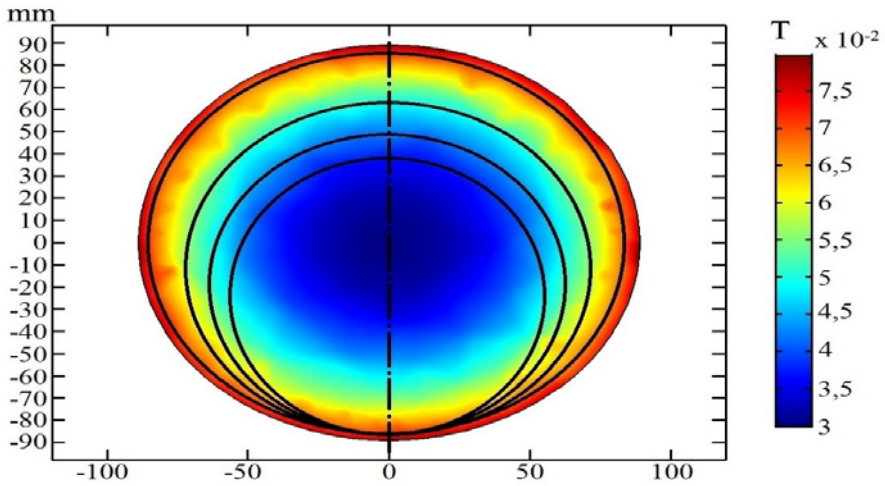
Elde edilen eşitlikte farklı kesitteki malzemelerin sıklıkla kullanılmasından kaynaklanan indüktör değişiklikleri için yeni indüktör yatırımı veya uygun çapta indüktör takılması gerekliliği hususunda işletmenin durma süresi ile indüktördeki verim kaybının karşılaştırılmasına bağlı olarak karar verme mekanizmalarının oluşturulması açısından kolaylık sağlayacağı açıktır.



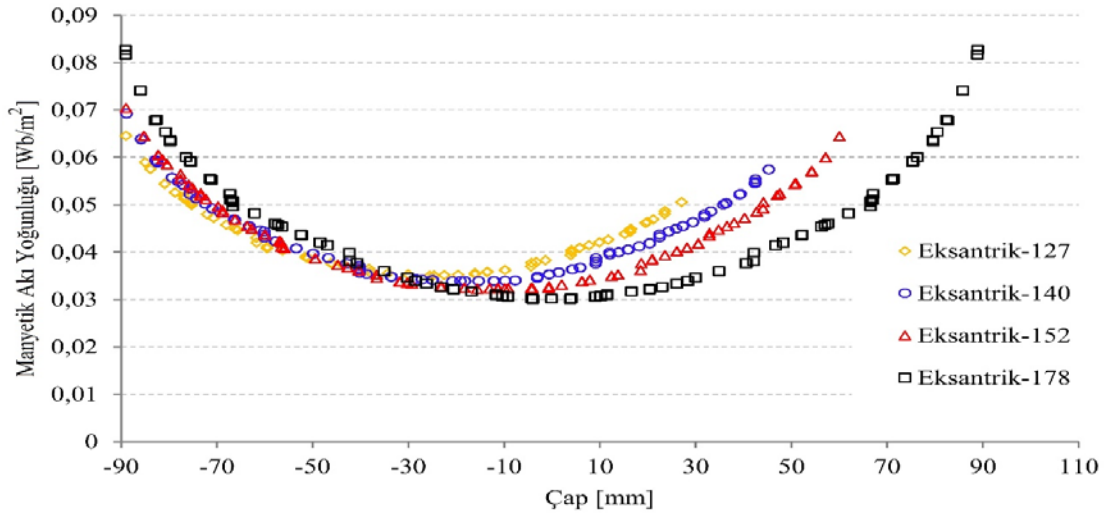
Şekil 6. Eş merkezli yerleştirmede y-ekseni çizgisi üzerindeki manyetik akı yoğunluğunun dağılımı
(The magnetic flux density at y-axis in concentric placement)



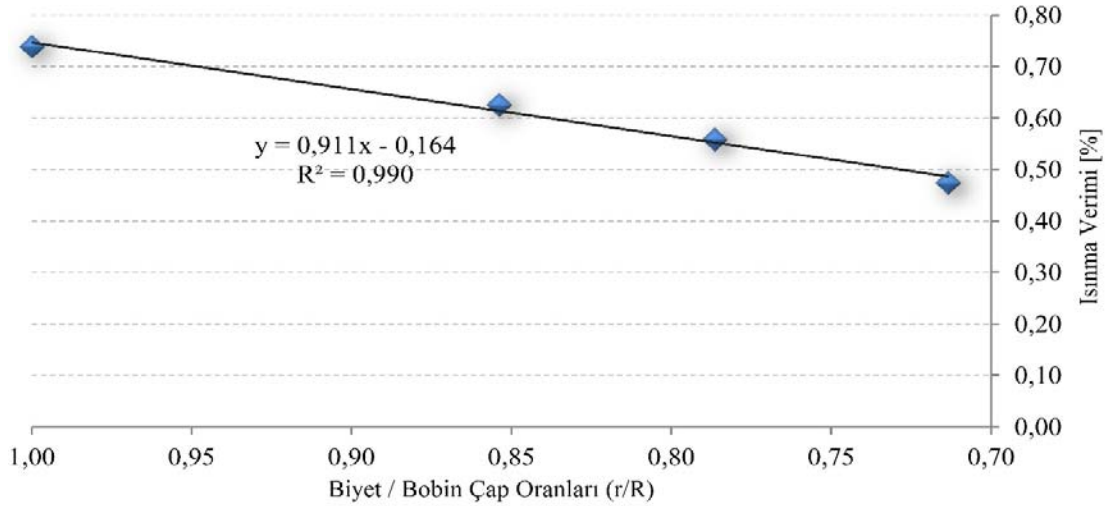
Şekil 7. Eş merkezli yerleştirme durumunda disklerin maruz kaldığı manyetik akı yoğunluğu (Wb/m²)
(The magnetic flux density (Wb/m²) exposed on the disk in concentric placement procedure)



Şekil 8. Eksantrik yerleştirme durumunda disklerin maruz kaldığı manyetik akı yoğunluğu (Wb/m²)
(The magnetic flux density (Wb/m²) exposed on the disk in eccentric placement procedure)



Şekil 9. Eksantrik yerleşimde y-ekseni çizgisi üzerinde manyetik akı yoğunluğunun dağılımı
(The magnetic flux density at y-axis in eccentric placement)



Şekil 10. Tünel tipi indüksiyon ısıtma bobinlerinde biyet/bobin çap oranına göre verim değişimi
(The variation of heating efficiency vs billet/inductor diameter ratio of tunnel type inductors of induction coils)

Büyük kısmı bobine yakın bölgedeki yüksek manyetik alanda kalan $\varnothing 127$ mm çaplı diskle yapılan eksantrik yerleşimli deneylerde ve eş merkezli yerleşim ile yapılan deneylerde verimlerin aynı olduğu görülmüştür. Ayrıca eksantrik yerleşim kullanılan hem bilgisayar modelinde hem de deneylerde malzemenin manyetik akı yoğunluğunun fazla olduğu bölgelere doğru kaydırılmasıyla %4-5 civarında daha yüksek sıcaklık elde edildiği görülmüştür, buna bağlı olarak şebekeden çekilen gücün de %4-5 kadar arttığı tespit edilmiştir. Bunun temel nedeni malzeme üzerine düşen manyetik akı yoğunluğunun daha fazla olmasına bağlı olarak daha yüksek Eddy akımı meydana gelmesidir. Eddy akımlarının artması da, daha yüksek sıcaklığa çıkılmasını sağlamıştır. Bununla birlikte bu durumun ısıtma verimini etkilemediği gözlenmiştir. Yani Eksantrik yerleşimli deneylerde şebekeden çekilen enerji, eş merkezli yerleşimli deneylerde şebekeden çekilen enerji oransal olarak aynı değerde ısıya dönüşmüştür. Dolayısıyla verim, malzemenin bobin içine yerleşiminden etkilenmemektedir. Kayıplar her

fırının hava boşluğu, yalıtım, kullanılan manyetik yastıklar, bobin direnci gibi bileşenlerinden kaynaklanan kendi karakteristik özelliklerine bağlıdır.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Tünel tipi indüksiyon ısıtma sistemi şeklinde geliştirilen deney düzeneğinde yapılan deneylerde ısıtılmak istenen malzemenin indüktör içinde eksantrik olarak yerleştirilmesiyle malzeme sıcaklığının %3-5 çekilen gücün %1-5 arasında arttığı tespit edilmiştir. Ancak malzeme yerleşiminin eş merkezli veya eksantrik olmasının verim üzerinde herhangi bir etkisinin olmadığı dolayısıyla malzemeyi bobinle eş merkezli yapmak için bazı ek mekanizmalara gerek olmadığı belirlenmiştir. Çalışmada $\varnothing 178$ mm biyetler için tasarlanmış bir indüksiyon bobininde küçük çaplı malzeme ısıtma durumunda kullanımı kolay bir verim fonksiyonu elde edilmiştir. Elde edilen fonksiyonla, uzun vadede indüktör yatırımlarının kısa vadede ise vardiya

içerisinde devreye alınması gereken farklı çaplardaki imalatlar için indüktör değişiminin adam saat cinsinden maliyetlerinin, değiştirmeme maliyeti ile kıyaslanabilmesi için verimin hesaplanabilmesi ve yatırım, arıza, bakım vs. gibi durumlarda üretim planlamasına katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Bundan sonraki çalışmalarda burada verilen yöntemin 120 s'den daha uzun süreler, daha yüksek güçler ve farklı ısıtma sistemleri için uygulanması ayrıca ısıtma sürecini 3 boyutta incelemek üzere (dz) uzunluğunun biyeti temsil edecek şekilde artırılması planlanmaktadır. Böylelikle özellikle çelik dövme sektörüne yönelik olarak elde edilecek benzer ifadeler, karar vericilere önemli katkı sağlayabilecektir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma, üniversite sanayi işbirliği kapsamında Kırıkkale Elektrik Makinaları Sanayi (KEMAS) ve Kırıkkale Üniversitesi başlatılmıştır. Üniversitesi'nin Bilimsel Araştırma Koordinasyon Birimi tarafından 2014/057 nolu Bilimsel Araştırma Projesi olarak desteklenmiştir. Bu çalışmamızda bize destek olan Prof. Dr. Fikret YÜKSEL, İ. Muzaffer ÜNVER ve Alper KELEŞOĞLU'na teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Haimbaugh R.E. Practical Induction Heat Treating. ASM International, Ohio, 2001. doi: 10.1361/piht2001.
- Lucía O., Maussion P., Dede E.J., Burdío J.M., Induction Heating Technology and Its Applications: Past Developments, Current Technology and Future Challenges, IEEE Transactions on Industrial Electronics, doi: 10.1109/TIE.2013.2281162. 61 (5), 2509-2520, 2014.
- Eyidoğan M., Kaya D., Dursun Ş., Taylan O., Energy Saving And Emission Reduction Opportunities in an Industrial Annealing Furnaces, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 29 (4), 735-743, 2014.
- Unver U., Ünver H.M., Comparison of Natural Gas Fired and Induction Heating Furnaces, Progress in Exergy, Energy, and the Environment, SPRINGER Part VI: Fuels and Combustion, doi: 10.1007/978-3-319-04681-5_96., 1009-1016, 2014.
- Kenada M., Hishikawa S., Tanaka T., Guo B., Nakaoka M., Innovative Electromagnetic Induction Eddy Current-Based Dual Packs Heater Using Voltage-Fed High-Frequency PWM Resonant Inverter for Continuous Fluid Processing in Pipeline, IEEE Engineering Technologies 2, 797-802, 1999.
- Laohalertdech S., Naphon P., Wongwises S., A review of Electrohydrodynamic Enhancement of Heat Transfer, Renewable and Sustainable Energy Reviews, doi:10.1016/j.rser.2005.07.002., 11, 858-876, 2007.
- Unver H.M., Aydemir M.T., Çelik V., Power and Frequency Control in a 60 kW Induction Steel Heating Furnaces Through PLC, IEE Power Engineer, doi:10.1049/pe:20050307., 19 (3), 36-39, 2005.
- Uzun O., Kilicaslan M.F., Yılmaz F., Formation of Novel Flower-Like Silicon Phases and Evaluation of Mechanical Properties of Hypereutectic Melt-Spun Al-20Si-5Fe Alloys With Addition of V, doi:10.1016/j.msea.2014.04.025. Materials Science and Engineering: A, 607, 368-375, 2014.
- <http://www.efd-induction.com/en/~media/PDF/Applications/Applications.ashx>. last access: 21.01.2016.
- Tunçay T., Özyürek D., The Effects On Microstructure And Mechanical Properties Of Filtration In Al-Si-Mg Alloys, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 29 (2), 271-279, 2014.
- Karacif K., Kiyak T., İnem B., Coating of Aluminum With Conducting Polymer and Investigation of The Effect of Corrosion on Coating Microstructure, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University. 25 (2), 235-241, 2010.
- Fenercioğlu A., Kartal A., Determination of Recycling Performance of Some Non-Ferrous Metals Via Prototype Eddy Current Separator, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 30 (2), 155-161, 2015.
- Doğan A., Öney B., Experimental Investigation of Convection Heat Transfer From Aluminum Foam Heat Sinks, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 29 (1), 71-78, 2014.
- Öztürk A., Gülgeç M., Influence of The Material Properties on The Elastic-Plastic Deformation in a Heat Generating Composite Solid Cylinder, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 28 (2), 283-292, 2013.
- Özsunar A., Peker G., A Numerical Investigation to The Effect of Porosity on The Cooling Curves of The Powder Cylinder Specimen for Quenching Processes, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 25 (2), 299-309, 2010.
- Tüzünalp K.K., Ünalın İ., Öksüz Y.T., Kocatepe K., A System Development for Directional Solidification of Commercially Pure Aluminum, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 25 (2), 321-329, 2010.
- Mansoor bin S., Ozsunar A., Yilbas B.S., A Numerical Formulation of Heat Conduction in Irregular, Static or Translating/Rotating, Planar Domains, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 29 (4), 727-733, 2014.
- Mahmoodkhani Y., Wells M.A., Co-extrusion process to produce Al-Mg eutectic clad magnesium products at elevated temperatures, Journal of Materials Processing Technology, 232, 175-183, 2016.
- Yu J., Zhao G., Chen L., Investigation of Interface Evolution, Microstructure and Mechanical Properties of Solid-State Bonding Seams in Hot Extrusion Process of Aluminum Alloy Profiles, Journal of Materials Processing Technology, 230, 153-166, 2016.
- Özışık N., Heat Conduction, John Wiley & Sons, Inc. New York. ISBN 0 471-53256-8., 145, 1993.

21. Heisler M.P., Temperature Charts for Induction and Constant Temperature Heating., ASME Transactions 69, 227–36, 1947.
22. Bermúdez A., Gómez D., Muñiz M.C., Salgado P., Vázquez R., Numerical Modeling of Industrial Induction, Advances in Induction and Microwave Heating of Mineral and Organic Materials, InTech Press, doi: 10.5772/13525. ISBN 978-953-307-522-8, 75-100, 2011.
23. Öncü S., Bir Fazlı Yüksek Verimli Ev Tipi Bir İndüksiyon Isıtma Sistemi, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2005.
24. Unver H.M., Unver U., Kelesoglu A. Introduction of a Novel Design Approach for Tunnel-Type Induction Furnace Coil for Aluminium Billet Heating, Arab J Sci Eng. <https://doi.org/10.1007/s13369-017-2743-4>, 2017.

