




## İndüksiyon Isıtmada Çalışma Frekansının Isıtma Derinliğine Etkisi The Effect of Working Frequency on Heating Depth in Induction Heating

Adem DALCALI<sup>a</sup> , Harun ÖZBAY<sup>a</sup> , Selim ÖNCÜ<sup>b</sup> 

<sup>a</sup>Bandırma Onyediy Eylül Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Bandırma/Balıkesir, Türkiye

<sup>b</sup>Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Karabük, Türkiye

adalcali@bandirma.edu.tr, hozbay@bandirma.edu.tr, soncu@karabuk.edu.tr

Araştırma Makalesi/Research Article

### ARTICLE INFO

#### Article history

Received: 12 March 2020

Accepted: 6 April 2020

#### Keywords:

Induction Heating, FEM,  
Heating Depth

### ABSTRACT

Metals must be melted, heated and cooled rapidly or partial heating must be performed in order to obtain weld or alloys from metals in daily life. One of the effective methods used for such needs is induction heating (IH) system. Electromagnetic induction method is the use of heat energy generated by core losses on the heating metal part. These core losses consist of eddy current losses produced by the magnetic fields within the core in the work-piece in the electromagnetic field and hysteresis losses to change the direction of the domains in the iron. In this study, a magnetic model was analyzed for different operating frequencies by 5 turns copper induction coil of metal work-pieces of different material structures with the same dimensions. The magnetic flux density (B) distributions and the skin effect on the work-pieces were examined by using finite element analysis and eddy losses were presented.

© 2020 Bandırma Onyediy Eylül University, Faculty of Engineering and Natural Science  
Published by Dergi Park. All rights reserved.

### MAKALE BİLGİSİ

#### Makale Tarihleri

Gönderim: 12 Mart 2020

Kabul: 6 Nisan 2020

#### Anahtar Kelimeler:

İndüksiyon Isıtma, SEM,  
Isıtma Derinliği

### ÖZET

Günlük hayatta metallere alaşım elde etmek veya kaynak yapabilmek için metallere eritilmesi, hızlı bir şekilde ısıtılıp soğutulması veya kısmi ısıtmanın gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu tip ihtiyaçlar için kullanılan etkin yöntemlerden biri de indüksiyon ısıtma sistemidir. Elektromanyetik indüksiyon yöntemi ile ısıtma, metal parçası üzerindeki nüve kayıplarının oluşturduğu ısı enerjisinin kullanılmasıdır. Bu nüve kayıpları, elektromanyetik alan içerisinde bulunan iş parçasında, nüve içinde değişen manyetik alanlar tarafından üretilen eddy akım kayıpları ve demir içinde domainlerin yönünü değiştirmek için oluşan histerisis kayıplarından meydana gelmektedir. Bu çalışmada, aynı ölçülerde farklı malzeme yapısında metal iş parçalarının 5 sarımlı bakır indüksiyon bobini ile farklı çalışma frekansları için bir manyetik model çıkarılarak analiz edilmiştir. Sonlu elemanlar analizleri (SEA) ile manyetik akı yoğunluğu (B) dağılımları ve iş parçalarındaki deri etkisi incelenerek eddy kayıpları sunulmuştur.

© 2020 Bandırma Onyediy Eylül Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi.  
Dergi Park tarafından yayınlanmaktadır. Tüm Hakları Saklıdır.

## 1. GİRİŞ

İndüksiyon ısıtma (IH), yüzey sertleştirme, eritme, tavlama ve pişirme gibi birçok endüstriyel ve evsel uygulamada kullanılmaktadır [1,2]. Bunun nedeni, IH'nin geleneksel ısıtma sistemlerine (direnc, alevlenme vb.) göre birçok avantajının bulunmasıdır. Bu avantajlar arasında, kısa işlem süresi, düzgün ısı dağılımı, yüksek verim, yanma ve patlama gibi tehlikelerin olmaması sıralanabilir. Ayrıca, IH işleminin sonunda hiçbir atık oluşmamaktadır [3]. Bu avantajların tümü indüksiyonla ısıtmanın ısıtma işlemi için güvenilir bir yöntem olduğunu göstermektedir. İndüksiyon ısıtma zamanla değişen bir elektromanyetik alan içerisine yerleştirilen iletkenlerde (metal iş parçası) eddy akımları meydana getirerek malzeme üzerinde oluşan  $I^2R$  kayıpları ile iletkeni ısıtma işlemidir [4]. Bu işlem sırasında malzeme üzerinde normal şartlarda bir elektrik makinasında istenilmeyen kayıplar olan eddy ve histerezis kayıpları oluşur. Bu kayıplar iş parçasının ısınmasına neden olur.

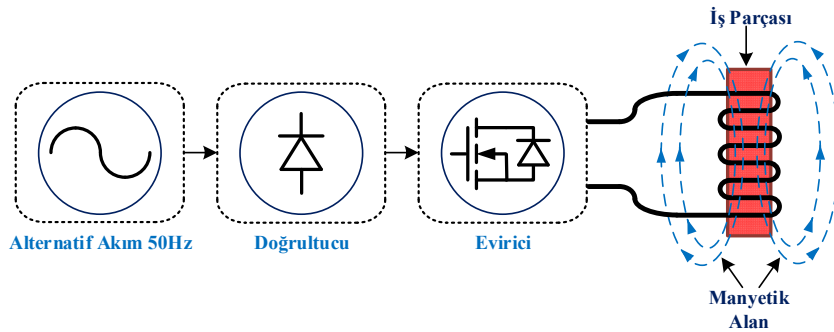
İndüksiyon ısıtma sistemleri, yüksek verim [5], hızlı ısıtma [6], kolay kontrol ve otomasyon [7], güvenli [8] ve temiz [9] ısıtma özellikleri gibi avantajlara sahip olduklarından birçok endüstriyel uygulamalarda [10], ev ve medikal uygulamalarında [11], nükleer atıkların camlaştırılmasında [12] ve gıda sektöründe [13] tercih edilmektedirler. İndüksiyon ısıtma sistemlerinin geleneksel ısıtma yöntemlerine göre avantajları ve dezavantajları vardır. Geleneksel ısıtma sistemlerinde, malzemeyi ısıtmak için konveksiyon yoluyla ısı transferi yapılmakta iken indüksiyon ısıtma sistemlerinde malzemenin kendi yapısından yararlanılarak ısıtma işlemi gerçekleştirilir. Bu sayede çevreye ısı yayılmaz ve ısıtma işlemi daha tasarruflu gerçekleştirilir. İndüksiyon ısıtma sistemleri geleneksel ısıtma sistemlerine göre daha yüksek verimle çalışır. Bu sistemler mikrodenetleyici kontrollü olduğundan hassas güç kontrolü yapılabilir. Isıtma hızı rezistanslı ve gazlı ısıtma sistemlerine göre yüksektir [14,15]. Bunların yanında indüksiyon ısıtma sistemlerinde üretim maliyetinin yüksek olması ve ferromanyetik olmayan malzemelerin ısıtılmasının zor olması gibi dezavantajları da vardır [16].

İndüksiyon ile ısıtmanın, 1831 yılında Michael Faraday'ın elektromanyetik indüksiyonu keşfi ile temelleri atılmış ve ilk ısıtma uygulamaları 1897'de İngiltere'de, 1900'de İsveç'te ve 1906'da Almanya'da yapılmıştır [17]. Tudbury 1974 yılında yaptığı çalışmada indüksiyon ısıtmanın temelinden bahsederek elektromanyetik indüksiyon ile ısıtmanın, ısıtılacak malzeme üzerinde  $I^2R$  kayıplarına yol açarak malzemeyi ısıttığından bahsetmiştir [18]. Çelik 2005 yılında yaptığı çalışmada, ferromanyetik olan ve olmayan metallerin ergitilmesi için transformatörlü bir indüksiyon ısıtıcı tasarımı gerçekleştirmiştir [19]. Öncü'nün 2011 yılında yaptığı çalışmada, herhangi bir kontrolör kullanmadan, absorpsiyonlu soğutma sistemine sahip ve kendinden tetiklemeli bir indüksiyon ısıtıcı tasarımı yapılmıştır [15]. Boşnak 2016 yılında yaptığı çalışmasında demir çelik endüstrisinde kullanılacak PLC ile PLL kontrollü bir indüksiyon ısıtıcı tasarımı çalışılmıştır. Deneysel çalışmaları esnasında 10-12 kHz anahtarlama frekansında yarım köprü seri rezonans evirici topolojisinde 4cm x 1cm x 10cm ebatlarında demir iş parçası ısıtılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda demir iş parçasının yaklaşık 6 dakika gibi bir sürede 600 °C ye kadar ısıtıldığını gözlemlemiştir [20].

Bu çalışmada, aynı ölçülerde farklı yapılarıdaki paramanyetik özellikteki bakır, pirinç iş parçası ile ferromanyetik özellikteki paslanmaz çelik ve kobalt iş parçalarının sonlu elemanlar analizleri ile farklı frekanslarda manyetik akı yoğunluğu dağılımları ve iş parçalarındaki deri etkisi incelenerek karşılaştırma yapılmıştır.

## 2. İNDÜKSİYON ISITMA PRENSİBİ

İndüksiyon ısıtmada, Şekil 1'de görüldüğü gibi elektromanyetik alan içerisinde bulunan parçada eddy akımları ve manyetik domainlerin yer değiştirmesi nedeniyle bir güç harcaması oluşmaktadır.



Şekil 1. İndüksiyon ısıtma sistemi

Isı şeklinde açığa çıkan bu güç kaybının değeri frekansın bir fonksiyonudur. Bir indüksiyon bobinine uygulanan alternatif akım, bobin çevresinde zamanla değişen bir manyetik alan üretir. Bu değişken manyetik alan içerisine metal bir parça yerleştirildiğinde Faraday yasasına göre metal üzerinde bir gerilim indüklenerek parçada Şekil 1'den görüldüğü gibi eddy akımlarının oluşmasına sebep olur. Oluşan bu eddy akımları parçanın direncinden dolayı güç kaybına neden olmaktadır. Bu güç kaybı da ısı olarak açığa çıkmaktadır. Bir ortamdaki elektromanyetik alan dağılımı Denklem 1 ve Denklem 2 ile ifade edilebilir [15];

$$\nabla \times (\mu^{-1} \nabla \bar{A}) = \bar{J}_e - \sigma \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\bar{E} = -J\omega \bar{A} - \nabla V \quad (2)$$

Burada;  $\bar{J}_e$  harici uygulanan akım yoğunluğu,  $\bar{A}$  manyetik vektör potansiyel,  $V$  skaler elektrik potansiyeli,  $\bar{E}$  elektrik alan şiddeti,  $\sigma$  elektriksel iletkenlik,  $\mu$  manyetik geçirgenliktir. Denklem 3'te değişken elektromanyetik alanın oluşturduğu eddy akımları verilmiştir. Denklem 4'te ise bu akımların neden olduğu ısı kayıpları verilmiştir.

$$\bar{J} = J\omega \sigma \bar{A} \quad (3)$$

$$Q = \frac{[\sigma]^{-1} \bar{J} \bar{J}^*}{2} \quad (4)$$

Açığa çıkan ısı, iş-parçasının yüzeyine ve iş-parçasının içinde bulunduğu ortama yayılacaktır. Denklem 5'te verilen klasik ısı akış denklemiyle iş-parçası üzerinde oluşan ısı dağılımı zamana bağlı olarak tanımlanabilir [15];

$$Q = \rho C \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla(-k \nabla T) \quad (5)$$

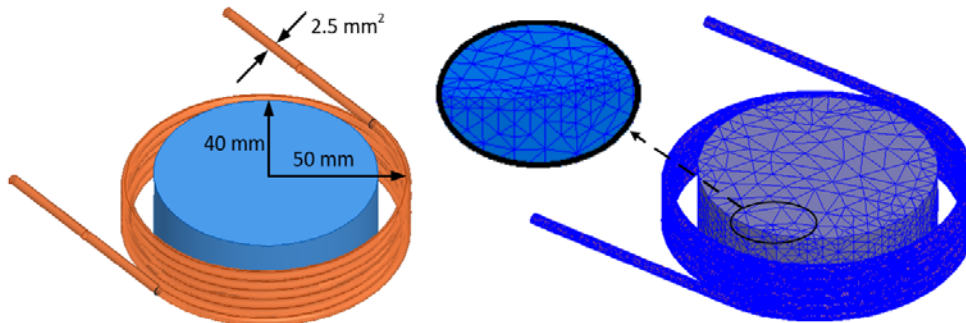
burada,  $k$  termal iletkenlik,  $T$  Kelvin cinsinden sıcaklık,  $\rho$  yoğunluk,  $C$  özgül ısı kapasitesidir. İndüksiyon ısıtmada verimli bir ısıtma işlemi için, manyetik alanın frekansı ve malzeme özelliklerinin uygun değerlerde olması önemlidir. Deri etkisi olarak bilinen etkide, eddy akımları iş-parçasının yüzeyine doğru yoğunlaşma eğilimindedir. Eddy akımları, yüksek frekanslı uygulamalarda iş-parçasının yüzeyinde yoğunlaşır. İç bölgelerdeki eddy akımları ihmal edilebilir seviyededir. Bu durumda iş-parçasının etkin direnci artarak açığa çıkan ısı, yüzeyde yoğunlaşacaktır. Isıtma derinliğinin değeri iş-parçasının elektriksel direncine, bağlı manyetik geçirgenliğe ve çalışma frekansına bağlıdır. Açığa çıktığı derinlik değeri ise Denklem 6 ile hesaplanabilir [15];

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} \quad (6)$$

burada,  $\delta$  ısıtma (dalma) derinliği (mm),  $\omega$  manyetik alanın açısal değişim hızı (rad/s),  $\mu$  iş parçasının manyetik geçirgenliği (H/m),  $\sigma$  iş-parçasının elektriksel iletkenliği (S/m) dir.

### 3. SONLU ELEMANLAR METODU

Sonlu elemanlar metodu (SEM), manyetik alan, elektrik alan vb. belirli bir bölgede sürekli olan ve bu bölgedeki değişimleri kısmi diferansiyel denklemler ile ifade edilebilen büyüklüklerin yaklaşık sayısal çözümlerini bulmak amacıyla kullanılan bir yöntemdir. Sonlu elemanlar yönteminde, çözüm yapılacak bölge sonlu sayıda küçük bölgelere (mesh) ayrılır. Hesaplanmak istenen büyüklüğün, bu küçük bölgeler üzerinde sürekli olduğu ve alanın değişimini ifade eden temel diferansiyel denklemin, her bir eleman üzerinde de geçerli olduğu varsayılır. Bölge üzerinde herhangi bir noktadaki çözümü elde etmek için, o noktayı çevreleyen elemanların o noktaya katkıları hesaba katılır ve bu nedenle bölgedeki bütün elemanların köşe noktalarına veya düğümlere ilişkin büyüklükler zincirleme olarak birbirine bağlanmış olur. Sonuçta düğüm sayısı kadar denklemi olan bir doğrusal denklem takımı elde edilir. Böylelikle bu denklem takımının çözümünden istenenler hesaplanır [21,22]. Şekil 2.a'da tasarlanan indüksiyon bobini ve iş parçası, Şekil 2.b'de ise sistemin mesh yapısı verilmiştir.



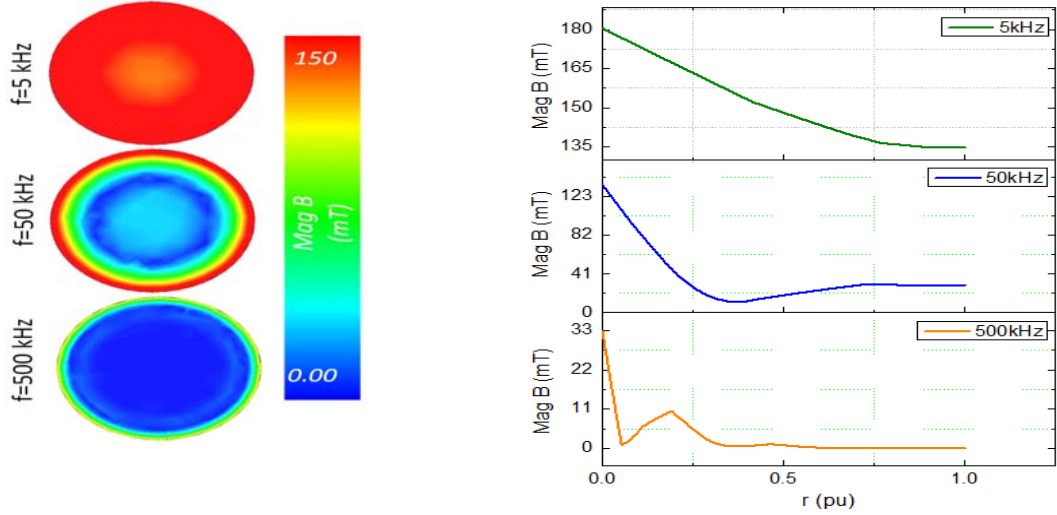
Şekil 2. a) Tasarlanan sistem, b) mesh yapısı

SEM'in indüksiyon ısıtma sistemlerine uygulanması ile elektromanyetik parametrelerin yüksek bir doğrulukta belirlenmesi sağlanabilir. SEM'in kullanılması tasarımcıya zaman ve ekonomik açıdan yarar sağlamaktadır. Bu metodun indüksiyon ısıtma sistemlerine uygulanması ile bobine ait sargı endüktansı, iş parçasındaki eddy kayıpları ve bobin akım yoğunluğu gibi önemli tasarım parametrelerinin çok yüksek bir doğrulukla belirlenmesi sağlanır [23,24].

#### 4. İNDÜKSİYON ISITMA ELEKTROMANYETİK ANALİZİ

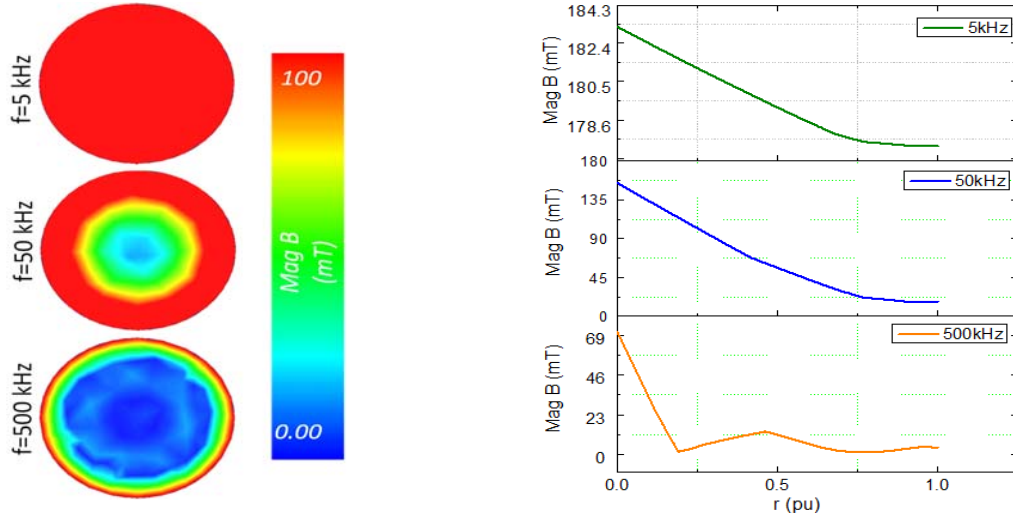
İndüksiyon ısıtma sisteminde, indüksiyon bobini bakırdan ve 5 sipir olarak tasarlanmıştır. İş malzemesi bakır, paslanmaz çelik (SAE 304), kobalt ve pirinç (%33 Zn) olarak tasarlanmıştır. Analizlerde bobine farklı frekanslarda (5 kHz, 50 kHz, 500 kHz) ve 200A akım değerinde uyartım uygulanarak iş parçası üzerindeki akı dağılımları elde edilmiştir. Şekil 3'te bakır iş parçası malzemesi üzerine yatay olarak çizilen kontorda elde edilen manyetik akı değerlerinin ve iş parçasının yüzeyindeki akı dağılımının değişimi verilmiştir.

Şekilden de görüldüğü üzere 5 kHz frekansa sahip uyartımda manyetik akı yoğunluğu iş parçası üzerine neredeyse homojen bir dağılım göstermektedir. Uygulanan frekans arttıkça oluşan akı yoğunlukları merkezde ihmal edilebilecek kadar az olup dış yüzeylere doğru yoğunlaşmaktadır. Bu, deri etkisi olarak tanımlanan durumu doğrulamaktadır. Bakır iş parçası paramanyetik özellikte olması dolayısıyla 5 sarımlı bobine uygulanan 5 kHz frekansa sahip 200A'lık akım sonucunda en fazla 180 mT akı yoğunluğu oluşmaktadır.



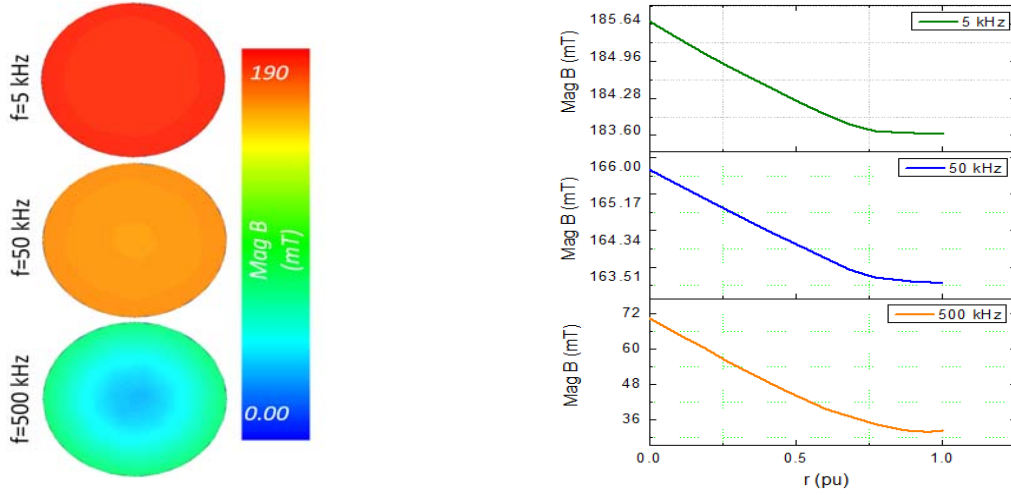
Şekil 3. Bakır iş parçası yüzeyindeki ve kontor üzerindeki akı yoğunluğu değerleri

50 kHz frekans değerinde iş parçasının dış yüzeyinde oluşan akı yoğunluğu yaklaşık 135 mT olduğu görülmektedir. Fakat 5 kHz frekans değerinde oluşan akı yoğunluğu iş parçası yüzeyine neredeyse homojen dağılmışken 50 kHz frekans değerinde oluşan akı yoğunluğu iş parçasının %10'luk kısmına kadar yüksek olup merkeze doğru gidildikçe sifira yaklaşmaktadır. Uygulanan frekans 500 kHz'e çıktığında ise en fazla oluşan manyetik akı yoğunluğu 34 mT olmaktadır. İş parçasının %5'lik kısmına kadar akı yoğunluğu yüksek olup merkeze doğru gidildikçe ise akı yoğunluğu neredeyse sıfır olmaktadır. Bu duruma göre, paramanyetik özellikteki bakır iş parçası için sadece dış yüzey ısıtması istenirse çok yüksek frekanslarda uygulanan akımın da düşük frekanslardaki duruma göre artırılması gerekmektedir. Şekil 4'te pirinç iş parçası malzemesi üzerine yatay olarak çizilen kontorda elde edilen manyetik akı değerlerinin ve iş parçasının yüzeyindeki akı dağılımının değişimi verilmiştir.



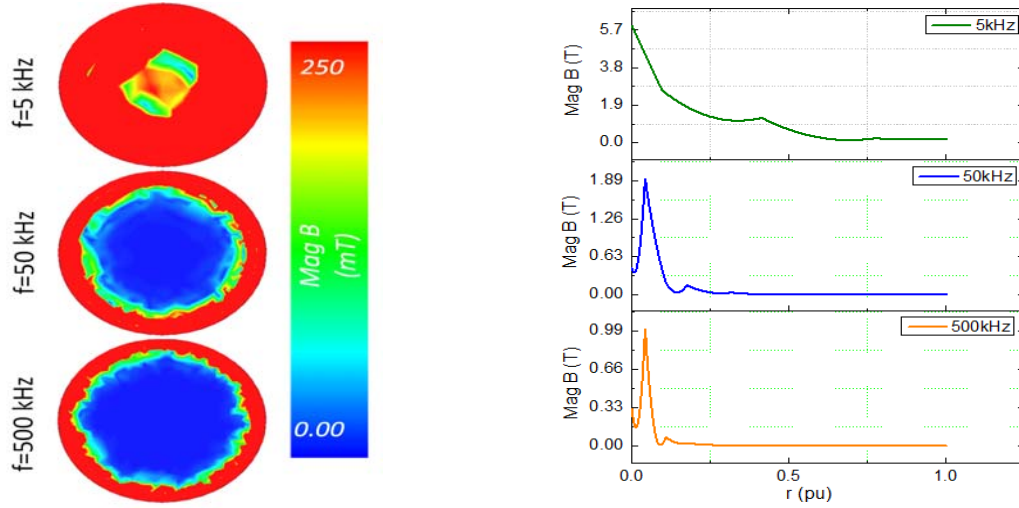
Şekil 4. Pirinç iş parçası yüzeyindeki ve kontor üzerindeki akı yoğunluğu değerleri

Pirinç iş parçası paramanyetik özellikte olması dolayısıyla 5 sarımlı bobine uygulanan 5 kHz frekansa sahip 200A'lık akım sonucunda bakır ve paslanmaz çelik iş parçasına benzer şekilde yaklaşık 183 mT akı yoğunluğu oluşmaktadır. 50 kHz ve 500 kHz frekans analizinde de elde edilen manyetik akı yoğunluklarının tepe değerlerinin benzer olduğu görülmektedir. Buradaki en önemli fark bakır iş parçasına göre pirinç iş parçasının iç direnci yüksek olduğundan dalma derinliği daha çok olmaktadır. 50 kHz frekans değerinde oluşan akı yoğunluğu iş parçasının %35'lik kısmına kadar yüksek olup merkeze doğru gidildikçe sıfıra yaklaşmaktadır. 500 kHz frekans değerinde oluşan akı yoğunluğu ise iş parçasının %10'luk kısmına kadar yüksek olup merkeze doğru gidildikçe sıfıra yaklaşmaktadır. Bu duruma göre, paramanyetik özellikteki pirinç iş parçası için sadece dış yüzey ısıtması istenirse çok yüksek frekanslarda uygulanan akımın da düşük frekanslardaki duruma göre artırılması gerekmektedir. Şekil 5'te paslanmaz çelik iş parçası malzemesi üzerine yatay olarak çizilen kontorda elde edilen manyetik akı değerlerinin ve iş parçasının yüzeyindeki akı dağılımının değişimi verilmiştir.



Şekil 5. Paslanmaz iş parçası yüzeyindeki ve kontor üzerindeki akı yoğunluğu değerleri

Aynı ölçülerde tasarlanan iş parçalarından paslanmaz çelik için yapılan analizde bobine yine aynı frekans değerlerinde 200 A'lık akım uygulanmıştır. Paslanmaz çelik iş parçasının ferromanyetik özelliğinden dolayı bakır iş parçasına göre daha yüksek akı yoğunluğu seviyelerine ulaşabilmektedir. Fakat yüksek frekanslarda uygulanan akımlarda manyetik akı yoğunlukları, bakır iş parçasındaki kadar net şekilde dış yüzeyde yoğunlaşmamaktadır. Bu durumun oluşmasındaki en büyük etken paslanmaz çelik iş parçasının iç direncinin yüksek olmasıdır. 5 sarımlı bobine uygulanan 200A'lık akım 5 kHz – 50 kHz ve 500 kHz frekansta uygulanmasına rağmen dalma derinliği az olmaktadır. Bu durum Denklem 6 da verilen formülü de doğrulamaktadır. Dolayısıyla paslanmaz çelik malzemelerin sadece dış yüzeyinin ısıtılması işleminde bobine daha yüksek akım uygulamak gerekmektedir.



Şekil 6. Kobalt iş parçası yüzeyindeki ve kontor üzerindeki akı yoğunluğu değerleri

Şekil 6’da kobalt iş parçası malzemesi üzerine yatay olarak çizilen kontorda elde edilen manyetik akı değerlerinin ve iş parçasının yüzeyindeki akı dağılımının değişimi verilmiştir. Ferromanyetik özellikteki kobalt iş parçası da aynı şartlar altında analiz edilmiştir. 5 sarımlı bobine 200A’lık akım 5 kHz – 50 kHz ve 50 kHz frekanslarında uygulanmıştır. 5 kHz frekansta yaklaşık 5,8 T’lık akı yoğunluğu oluşmaktadır. Aynı akım şiddetinde frekans 50 kHz’e çıkarıldığında yaklaşık 1,9 T’ya düşmektedir. Oluşan akı yoğunluğu iş parçasının %10’luk kısmına kadar yüksek olup merkeze doğru gidildikçe sifıra yaklaşmaktadır. Uygulanan frekans 500 kHz’e çıktığında ise oluşan manyetik akı yoğunluğu yaklaşık 1 T olmaktadır. Dalma derinliği daha da düşerek, oluşan akı yoğunluğu iş parçasının %5’lik kısmına kadar yüksek olup merkeze doğru gidildikçe sifıra yaklaşmaktadır. Yüksek geçirgenlik ve düşük iç dirence sahip olan kobalt çok yüksek akı yoğunluklarına ulaşmakta ve deri etkisi olayı diğer iş parçalarına göre daha net görülmektedir. Bu durum Denklem 1 ve Denklem 6’yı çok açık bir şekilde doğrulamaktadır.

## 5. SONUÇ

Bu çalışmada, aynı ölçülerde farklı yapılarıdaki paramanyetik özellikteki bakır, pirinç iş parçası ile ferromanyetik özellikteki paslanmaz çelik ve kobalt iş parçalarının 5 sarımlı indüksiyon bobini ile farklı çalışma frekansları için bir manyetik model çıkarılarak analiz edilmiştir. Manyetik akı yoğunluğu (B) dağılımları ve iş parçalarındaki deri etkisi incelenerek eddy kayıpları sunulmuştur. Bakır, pirinç ve paslanmaz çelik iş parçası için 5 kHz frekansa sahip 200A’lık akım sonucunda yaklaşık 180 mT akı yoğunluğu oluştuğu görülmüştür. 50 kHz ve 500 kHz frekanslarında da yakın akı yoğunluklarında değerler elde edildiği görülmektedir. Kobalt iş parçası için ise 5 kHz frekansta 5,6 T manyetik akı yoğunluğu oluştuğu görülmüştür. 50 kHz ve 500 kHz frekanslarında da diğer iş parçalarına göre daha yüksek akı yoğunluğu değerlerinde olduğu görülmüştür. Dalma derinlikleri incelendiğinde ise paramanyetik iş parçalarında geçirgenlik katsayıları çok yakın olduğundan iç direnç değerleri ön plana çıkmaktadır. İç direnci daha yüksek olan pirinç iş parçası, bakır iş parçasına göre daha büyük dalma derinliği gösterdiği görülmektedir. Kobalt iş parçası ise hem yüksek geçirgenlik katsayısına hem düşük iç direnç değerine sahip olmasından dolayı deri etkisini en belirgin şekilde göstermektedir. Bu çalışma sonuçları ile indüksiyon ısıtma işleminde, iş parçasının ısıtılacak bölgesi çalışma frekansına ve malzemenin özelliğine göre değişim gösterdiği SEM analizi ile doğrulanmıştır.

## KAYNAKÇA

- [1] N. S. Bayındır, O. Kukrer, M. Yakup, “DSP-based PLL-controlled 50-100 kHz 20 kW high-frequency induction heating system for surface hardening and welding applications”, IEE Proceedings-Electric Power Applications, Vol. 150, No. 3, pp. 365-371, 2003.
- [2] J. M. Espi-Huerta, E. J. D. G. Santamaria, R. G. Gil, J. C. Moreno, “Design of the L-LC resonant inverter for induction heating based on its equivalent SRI”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 54. No. 6, pp. 3178-3187, 2007.
- [3] O. Lucia, P. Maussion, E. J. Dede, J. M. Burdio, “Induction heating technology and its applications: past developments, current technology, and future challenges”, IEEE Trans. Industrial Electronics, Vol. 61, No. 5, pp. 2509-2520, 2014.
- [4] J. M. Ho, M. T. Lee, “A novel PWM inverter control circuitry for induction heating”, V IEEE International Power Electronics Congress Technical Proceedings, Cuernavaca, Mexico, 113-119, 1996.

- [5] H. Sarnago, A. Mediano, O. Lucia, "High Efficiency AC-AC Power Electronic Converter Applied to Domestic Induction Heating", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 27, No. 8, pp. 3676-3684, 2012.
- [6] M.P. Tarragona, H. Sarnago, O. Lucia, J. M. Burdio, "Full-bridge series resonant multi-inverter featuring new 900-V SiC devices for improved induction heating appliances", IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Long Beach, CA, 1762-1766, March 2016.
- [7] M. H. Tavakoli, H. Karbaschi, F. Samavat, "Computational Modeling of Induction Heating Process", Progress In Electromagnetics Research Letters, Vol. 11, pp. 99-102, 2009,
- [8] W. Han, K. T. Chau, Z. Zhang, "Flexible Induction Heating Using Magnetic Resonant Coupling", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 64, No. 3, pp. 1982-1992, 2017,
- [9] H. S. Park, X. P. Dang, "Optimization of the In-line Induction Heating Process for Hot Forging in Terms of Saving Operating Energy", International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 13, No. 7, pp. 1085-1093, 2012.
- [10] T. Mishima, Y. Nakagawa, M. Nakaoka, "Bridgeless BHB ZVS-PWM AC-AC Converter for High-Frequency Induction Heating Applications", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 51, No. 4, pp. 3304-3315, 2015.
- [11] H. Sarnago, O. Lucia, A. Mediano, J. M. Burdio, "A Class-E Direct AC-AC Converter with Multicycle Modulation for Induction Heating Systems", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 61, No. 5, pp. 2521-2530, 2014.
- [12] P. Charvin, F. Lemont, A. Russello, "Nuclear waste treatment by induction heating and stirring of a metal/glass bath: the PIVIC process", 9th International Symposium on Electromagnetic Processing of Materials, 424, October 2018.
- [13] H. M. El-Mashad, Z. Pan, "Application of Induction Heating in Food Processing and Cooking", Food Eng Rev, Vol. 9, pp. 82-90, 2017.
- [14] S. Çetin, "Bir fazlı bir indüksiyon ısıtma sistemi analizi ve dizaynı", Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, 2005.
- [15] S. Öncü, "Kendinden tetiklemeli indüksiyon ısıtıcı için akım geri beslemeli seri rezonans eviricili sürme devresinin gerçekleştirilmesi ve analizi", Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2011.
- [16] B. Aytekin, "Endüksiyon ocak elektronik kontrol sistem tasarımı", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2008.
- [17] E. Balbozan, "Endüksiyon Isıtma", Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 1984.
- [18] C. Tudbury, "Electromagnetics in induction heating", IEEE Transaction on Magnetics, Vol. 10, No. 3, pp. 694-697, 1974.
- [19] Ö. Çelik, "İndüksiyon Fırını Tasarım ve Yapımı", Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2005.
- [20] İ. Boşnak, "PLC ile PLL kontrollü indüksiyon ısıtma uygulaması", Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 2016.
- [21] M. Akbaba, S. Q. Fakhro, "Field distribution and iron loss computation in reluctance augmented shaded-pole motors using finite element method", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 7, No. 2, pp. 302-307, 1992.
- [22] A. Dalcalı, M. Akbaba, "FEM Study of the Effects of Geometric Changes on the Variable Reluctance Shaded-Pole Motors Performance", Int. Journal of Computing, Communications & Instrumentation Engg., Vol. 4, No. 2, pp. 36-39, 2017.
- [23] L. Ho, W. N. Fu, "Review and Future Application of Finite Element Methods in Induction Motors", Electric Machines & Power Systems, Vol. 26, No. 2, pp. 111-125, 1992.
- [24] N. Öztürk, A. Dalcalı, E. Çelik, S. Sakar, "Cogging torque reduction by optimal design of PM synchronous generator for wind turbines", International Journal of Hydrogen Energy, Vol 42, No. 28, pp. 17593-17600, 2017.