


# Sonlu Elemanlar Analizi Kullanılarak Bir İndüksiyon Isıtma Sisteminin Elektromanyetik ve Termal Analizi

## Electromagnetic and Thermal Analysis of an Induction Heating System Using Finite Element Analysis

Emrullah Aydın<sup>1</sup>   
<sup>1</sup>Malatya Turgut Özal Üniversitesi  
Mühendislik ve Doğa Bilimleri  
Fakültesi  
Malatya, Türkiye  
emrullah.aydin@ozal.edu.tr

**Öz—** İndüksiyon ısıtma sistemleri endüstride geniş kullanım alanına sahip hızlı, temassız ve verimli bir ısıtma yöntemidir. Bu çalışmada indüksiyon sargısına uygulanan 25 kHz çalışma frekansına sahip farklı akım değerleri için çalışma parçasının sıcaklık değişimi Sonlu Elemanlar Analiz tabanlı yazılım kullanılarak Elektromanyetik-Termal analiz ile elde edilmiştir. Dalma derinliği bu frekans değerleri için hesaplanmış ve modellemelerde bu değerler göz önünde bulundurulmuştur. Analiz sonuçlarına göre, 100 A akım değeri uygulandığında çalışma parçasının sıcaklık değeri kalıcı durumda 669 °C'ye kadar ulaşmaktadır.

**Anahtar Kelimeler—** İndüksiyon ısıtma, indüksiyon sargısı, indüksiyon, sonlu elemanlar

**Abstract—** Induction heating systems are a fast, non-contact and efficient heating method with wide usage area in industry. In this study, the temperature change of the workpiece for different current values with 25 kHz operating frequency applied to the induction coil was obtained by Electromagnetic-Thermal analysis using Finite Element Analysis based software. The skin depth was calculated for these frequency values and these values were taken into account in the models. According to the analysis results, when a current value of 100 A is applied, the temperature value of the work piece reaches up to 669 °C in the steady state.

**Keywords—** Induction heating, induction coil, induction, finite element analysis.

### I. GİRİŞ

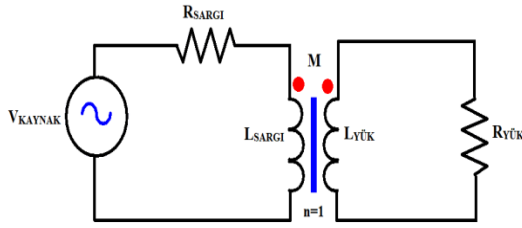
İndüksiyon ısıtma yöntemi metal bir çalışma parçasığında indüklenen girdap akımlarının etkisiyle ısıtılması temeline dayanır. İndüksiyon ısıtma yöntemi endüstride birçok alanda uygulanmaktadır. Geleneksel ısıtma yöntemleri ile karşılaştırıldığında, temassız, hızlı ve verimli bir ısıtma sağlaması nedeniyle tercih edilmektedir. Güç elektroniğinde, manyetik malzeme tasarımında ve gelişen kontrol yöntemleri sayesinde indüksiyon ısıtma özellikle son yıllarda daha geniş bir uygulama alanı bulmaktadır. 1831 yılında İngiliz bilim adamı Micheal Farady'nin elektromanyetik indüksiyon fikrini ortaya atmasından sonra yıllar içerisinde elektrik motorları, transformatörler ve indüksiyon ısıtma gibi birçok ürünün icadı ve geliştirilmesine sebep olmuştur. Fredrik Adolf Kjellin tarafından ilk indüksiyon ocağı uygulamasına ve eritmede kullanımına yönelik patent 1901 yılında alınmıştır [1]. İndüksiyon ısıtmanın temelleri, uygulanması ve karşılaşılan problemlere yönelik yazılan ilk bilimsel makalelerden biri ise 1973 yılında yayınlanmıştır [2]. İlerleyen yıllarda ise bu alanda farklı uygulamalara ait patentler alınmıştır [3,4]. Gelişen teknolojilere paralel olarak endüstride[5,6], biyomedikal uygulamalarda [7,8] ve tüketici

elektroniğinde[9] sıklıkla kullanılan bir ısıtma yöntemi olan indüksiyon ısıtma düşük, orta ve yüksek güçlü olmak üzere tüm güç aralıklarında kullanılabilen bir yöntemdir. İndüksiyon ısıtma sistemlerinin analitik veya sonlu elemanlar analizi (SEA) kullanılarak modellenmesi, tasarımı ve optimizasyonu için literatürde önemli çalışmalar yapılmıştır [10-14]. Her ne kadar Sonlu Elemanlar analiz yöntemleri uzun analiz sürelerine ihtiyaç duyuyor olsa da analitik modeller ile karşılaştırıldığında, analitik modellemelerin birçok kabule dayanması ve karmaşık hesaplamalar içermesi nedeniyle analitik modellere göre daha çok kullanılmakta ve daha doğru sonuçlar elde edilmektedir. Tünel tipi indüksiyon fırını indüktörlerinde çalışma parçasının çapının değişiminin sistem verimine etkisi hem SEA kullanılarak hem de deneysel çalışmalar gerçekleştirilerek incelenmiştir [15]. İndüksiyon ısıtmada PLC(Programlanabilir Lojik Kontrolör) kullanımı ile sıcaklık kontrolü sağlanabilir ve aynı zaman da aşırı akım ve gerilim koruması gibi önemli avantajları da beraberinde getirir [16].

Bu makalede solenoid bir sargı içerisinde bulunan çalışma parçasının ısıtılması ve bu ısı dağılımının Sonlu Elemanlar Analiz programı ANSYS, Maxwell-Icepak paket programlarının ortak koşturulması ile Elektromanyetik-Termal Bağlaşım kullanılarak elde edilmesi amaçlanmaktadır. ANSYS, Maxwell programı ile sistemin üç boyutlu (3B) oluşturulmuş ve elektromanyetik analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu sonuçlar kullanılarak, İcepak paket programı ile çalışma parçasının ısı dağılımı elde edilmiş ve sonuçlar verilmiştir. Bu makalenin ikinci bölümünde bir indüksiyon ısıtma sisteminin eş değer devresi ve çalışma prensibi verilmiştir. Üçüncü bölümde ise tasarımı yapılan sistemin boyutları, üç boyutlu modeli ve analiz sonuçları verilmiştir.

### II. İNDÜKSİYON ISITMA SİSTEMİNİN GENEL YAPISI

İndüksiyon ısıtma sisteminin eşdeğer devresi ve genel yapısının gösterimi Şekil 1'de verilmiştir. Yüksek frekanslı bir gerilim kaynağına bağlanan sargıdan akan akım, zamanla değişen bir manyetik alan üretir. Bu manyetik alan içerisinde konulan metal bir çalışma parçasında bir gerilim indüklenir. İndüklenen bu gerilim neticesinde, çalışma parçasında girdap akımları oluşur ve bu oluşan girdap akımları nedeniyle çalışma parçası ısınır ve indüksiyon ısıtma gerçekleşir.



Şekil 1. İndüksiyon ısıtma sistemine ait eş değer devre

Kullanılan çalışma parçasının özellikleri, uygulanan frekansın ve akan akımın değeri sistem verimini etkileyen en önemli faktörlerdir. Literatürde birçok farklı uygulama alanı olan indüksiyon ısıtma sistemlerinde, farklı sargı yapıları ve farklı malzemelerden yapılmış çalışma parçalarının kullanıldığı çalışmalar yer almaktadır.

İndüksiyon ısıtma sistemlerini etkileyen bir diğer önemli faktör ise deri etkisi (skin effect) ve yol açtığı dalma derinliğidir (skin depth( $\delta$ )). Yüksek frekanslı akım neticesinde indüklenen girdap akımlarının deri etkisi nedeniyle çalışma parçasının yüzeyinden akar ve yüzeyden uzaklaşarak malzemenin içine gidildikçe akım değeri keskin bir şekilde düşer. Akım değerinin değişimi eşitlik (1)'de verilmiştir.

$$I(d) = I_0 e^{-d/\delta} \quad (1)$$

Dalma derinliği ( $\delta$ ) ise eşitlik (2)'de verilmiştir.

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\mu \pi f}} \quad (2)$$

Bu eşitlikte,  $\rho$  çalışma parçasının özdirencini ( $\Omega.m$ ),  $\mu$  çalışma parçasının manyetik bağıl geçirgenliğini ve  $f$  çalışma frekansını göstermektedir.

Özdirenç sıcaklığın bir fonksiyonu olarak eşitlik (3)'te verilmiştir. Manyetik bağıl geçirgenliğin manyetik duyarlılık ile ilişkisi ve manyetik duyarlılığında sıcaklığın bir fonksiyonu olarak değişimlerini gösteren denklemler eşitlik (4) ve (5)'te verilmiştir.

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha \Delta T) \quad (3)$$

$$\mu = \mu_0 (1 + X_m) \quad (4)$$

$$X_m = \frac{C}{T} \quad (5)$$

Eşitlik (4)'te,  $\rho_0$  malzemenin referans sıcaklıktaki özdirencini,  $\alpha$  sıcaklık katsayısını ve  $\Delta T$  sıcaklık değişimini göstermektedir. Eşitlik (5)'te ise  $X_m$  malzemenin manyetik duyarlılığını, C sabiti Curie sabitini göstermektedir ve bu eşitlik Curie kanunu olarak bilinmektedir. Çalışma parçasının elektromanyetik indüksiyonla ısıtma işleminde, malzemenin öz direnci sıcaklıkla artar. Sıcaklık Curie (kritik sıcaklık değeri) sıcaklığının üzerinde olduğunda, malzeme manyetik özelliğini kaybeder ve manyetik bağıl geçirgenliği keskin bir şekilde düşer ve sadece havanın manyetik geçirgenliğine eşit olur ( $\mu_r=1$ ). Malzemenin sıcaklığı arttığında özdirenci artar ve manyetik bağıl geçirgenliği azalır. Böylece girdap akımı dağılımı hassas bir duruma gelir ve dalma derinliği ciddi şekilde artar. Sıcaklık Curie

sıcaklığına ulaştığında ise dalma derinliği onlarca kat artabilir[17].

Girdap akımları çalışma parçasının yüzeyinden akmaya başladığında, çalışma parçasında bir ısınma meydana gelir. Bu da girdap akımlarının termal etkisi olarak tanımlanmaktadır. Girdap akımlarının çalışma parçasında harcadığı ortalama güç değeri eşitlik (6)'da verilmiştir.

$$P = \rho (2\pi f)^2 B_{\max}^2 V \quad (6)$$

Bu eşitlikte  $B_{\max}$  maksimum manyetik akı yoğunluğu ( $Wb/m^2$ ),  $V$  ise çalışma parçasının hacmini ( $m^3$ ) göstermektedir.

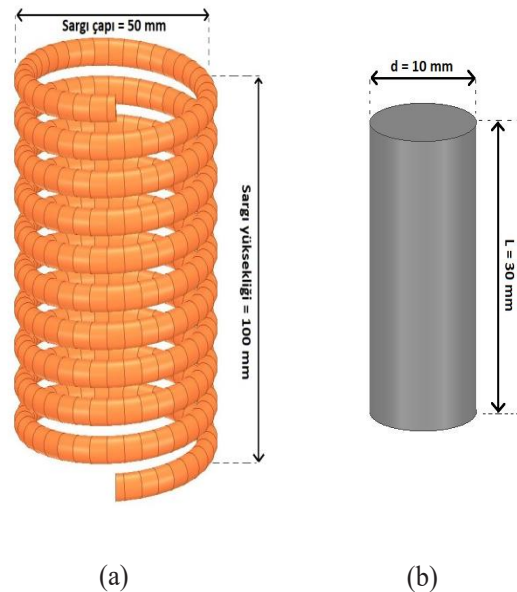
### III. İNDÜKSİYON ISITMA SİSTEMİNİN MODELLENMESİ

İndüksiyon ısıtma sistemi temel olarak üç yapıdan oluşur. Bunlar; yüksek frekans alternatif gerilim kaynağı, indüksiyon sargısı ve çalışma parçasıdır. Bu makalede kullanılacak indüksiyon sargısı ve çalışma parçasına ait boyutlar Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Önerilen indüksiyon ısıtma sistemine ait indüksiyon sargısı ve çalışma parçasının boyutları

Sistem parametresi	Boyutları (mm)
İndüksiyon sargısının çapı	50
İndüksiyon sargısının yüksekliği	100
İndüksiyon sargı iletkeninin çapı	6
Çalışma parçasının çapı	10
Çalışma parçasının yüksekliği	30

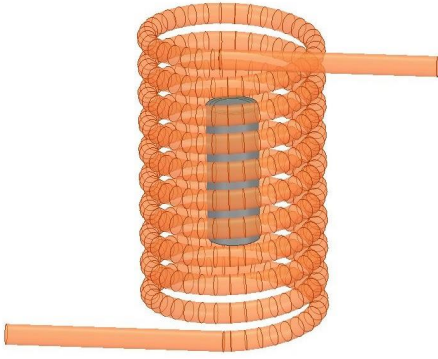
Boyutları belirlenen indüksiyon sargısı ve çalışma parçasının detaylı gösterimi Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. İndüksiyon ısıtma sistemine ait a) indüksiyon sargısı ve b) çalışma parçasının gösterimi

Önerilen indüksiyon ısıtma sisteminin ANSYS, Maxwell programı ile üç boyutlu (3B) modeli oluşturulmuş ve Şekil 3'te verilmiştir. İndüksiyon sargısı 10 sarımdan oluşmaktadır. Ayrıca, indüksiyon sargısına uygulanan çalışma frekansı için dalma derinlikleri hesaplanmalı ve

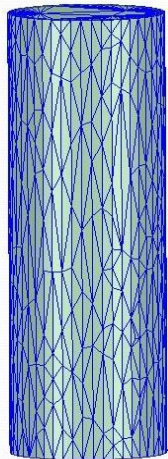
çalışma parçasının modellenmesinde bu değerlere karşılık gelen katmanlar oluşturulmalıdır. Dalma derinliği hesaplanması ve elde edilen değere karşılık gelen yüzey katmanının çalışma parçası modeline eklenmesi ile SEA programında ağ (mesh) sayısı azaltılarak analiz süreleri kısalmakta ve daha doğru sonuçlar elde edilmektedir. Eşitlik (2) kullanılarak 25 kHz çalışma frekansı için dalma derinliği hesaplanmış ve 0.33 mm değeri elde edilmiştir. Çalışma parçasının malzeme seçimi SEA programında malzeme kütüphanesinde bulunan dökme demir (cast iron) olarak belirlenmiştir ve dalma derinlikleri bu malzeme özellikleri göz önünde bulundurularak hesaplanmıştır.



Şekil 3. İndüksiyon ısıtma sisteminin 3B gösterimi

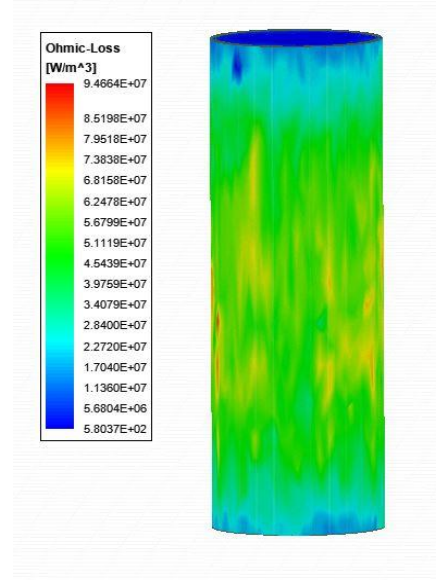
#### IV. ELEKTROMANYETİK-TERMAL BAĞLAŞIM ANALİZ SONUÇLARI

Bu bölümde modellemesi tamamlanan indüksiyon ısıtma sisteminin Elektromanyetik- Termal bağlaşım analizleri gerçekleştirilecektir. Öncelikle 3B modeli oluşturulan sistemin elektromanyetik analizleri yapılacak elde edilen sonuçlar kullanılarak Termal analiz benzetimleri ortak koşuturulacaktır. Manyetik analizler için ANSYS, Maxwell programının Eddy analiz çözüm yöntemi kullanılacak ve sonuçlar yine ANSYS yazılım firmasına ait Icepak paket programı ile ortak koşutularak farklı frekans ve akım değerlerindeki sıcaklık dağılımı ve değerleri elde edilecektir. Şekil 4'te analizi yapılan çalışma parçasının ağ (mesh) dağılımı gösterilmiştir.



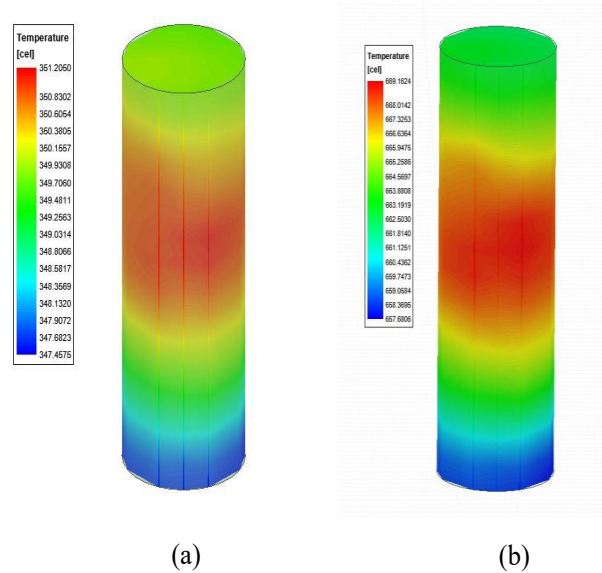
Şekil 4. Çalışma parçasının ağ gösterimi

Eddy analizi ile omik kayıplar ( $W/m^3$ ) hesaplanmış ve kayıpların çalışma parçası üzerinde dağılımı Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5. 25 kHz ve 50 A değerinde akım uygulaması için omik kayıpların gösterimi

Omik kayıplar hesaplandıktan sonra, 25 kHz çalışma frekansında ve indüksiyon sargısına uygulanan 50 ve 100A akım değerleri için benzetim çalışması koşuturulmuş ve çalışma parçasının sıcaklık değişimi bu akım değerleri için elde edilmiştir. Analiz sonuçları Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Çalışma parçasının farklı akım değerleri için sıcaklık dağılım ve değerleri a) 50 A, b) 100 A

Kullanılan iletkenin yarıçapı 3 mm ve iletken kesiti yaklaşık olarak  $28.2 \text{ mm}^2$ 'dir. Bu durumda oluşan akım yoğunlukları 50 ve 100A için sırasıyla  $1.77$  ve  $3.54 \text{ A/mm}^2$ 'dir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde akım değeri arttırıldıkça çalışma parçası üzerindeki sıcaklık değeri beklenildiği gibi artmaktadır. Verilen sıcaklık değerleri kalıcı durum analiz sonucu elde edilmiş ve maksimum erişilebilen

sıcaklık değerlerini göstermektedir. Çalışma parçasının sargıların merkezinde konumlanması ve sargı tarafından üretilen manyetik alanın en çok merkezde yoğunlaşması ve bu noktada girdap akımlarının bir miktar daha fazla oluşmasından dolayı burada omik kayıplar ve sıcaklık değerleri bir miktar daha yüksek olduğu gözlemlenmektedir. Ancak bu değer farklılıkları, şekil 5 ve 6'da verilen renk skalası ve değerler bakımından incelendiğinde beklendiği gibi küçük olarak değerlendirilebilecek farklılıklardır. Elde edilen maksimum sıcaklık değerleri Tablo 2'de verilmiştir.

**Tablo 2.. Farklı akım değerleri için elde edilen maksimum çalışma parçası sıcaklık değerleri**

Frekans (kHz)	Akım değeri (A)	Sıcaklık (°C)
25	50	351
	100	669

Tablo 2'de belirtilen sıcaklık değerleri incelendiğinde çalışma parçasının ulaştığı en yüksek sıcaklık 669 °C ile indüksiyon sargısına 100 A değerinde akım uygulandığında gerçekleşmiştir. Dökme demirin erime noktasının yaklaşık olarak 1204 °C ve Curie sıcaklığı 770 °C'dir. Curie sıcaklığının üzerinde bir sıcaklıkta dökme demir ferromanyetik özelliğini kaybeder ve paramanyetik bir malzeme olur.

#### V. SONUÇ

Bu çalışmada bir indüksiyon ısıtma sistemin modellenmesi ve analizi gerçekleştirilmiştir. Çalışma parçasının sıcaklık değerinin değişimi, indüksiyon sargısına uygulanan farklı akım değerleri için incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. İndüksiyon sargısına sırasıyla 50 ve 100A değerinde akımlar uygulanmış ve Elektromanyetik-Termal analizleri gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları incelendiğinde, 100 A uygulanması durumunda çalışma parçasının kalıcı durumda sıcaklık değeri 669 °C değerine ulaşmıştır. Gelecek çalışmalarda, farklı frekans değerlerine sahip akım uygulanması durumunda oluşacak dalma derinlikleri belirlenerek çalışma parçasının sıcaklık değişimi incelenecektir.

#### REFERANSLAR

[1] F.A. Kjellin "Electric Furnace", U.S. Patent 682088A, 1901.  
 [2] W. C. Moreland, The induction range: Its performance and its development problems, IEEE Trans. Ind. Appl., vol. IA-9, no. 1, pp. 81–85, Jan./Feb. 1973.  
 [3] B. J. Austin, "Work coil for use in an induction cooking appliance," U.S. Patent 4 029 926, 1974.  
 [4] H. Yamamura, K. Matsuo, and N. Nagai, "Induction heating apparatus," U.S. Patent 4 115 677, 1978.  
 [5] J. Egalon, S. Caux, P. Maussion, M. Souley, and O. Pateau, "Multiphase system for metal disc induction heating: Modeling and RMS current control," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 48, no. 5, pp. 1692-1699, September/October 2012.  
 [6] J. Egalon, S. Caux, P. Maussion, M. Souley, and O. Pateau, "Multiphase system for metal disc induction heating: Modeling and RMS current control," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 48, no. 5, pp. 1692-1699, September/October 2012.

[7] P. R. Stauffer, T. C. Cetas, and R. C. Jones, "Magnetic Induction Heating of Ferromagnetic Implants for Inducing Localized Hyperthermia in Deep-Seated Tumors," IEEE Transactions on Biomedical Engineering, vol. BME-31, no. 2, pp. 235-251, February 1984.  
 [8] P. R. Stauffer, P. K. Sneed, H. Hashemi, and T. L. Phillips, "Practical induction heating coil designs for clinical hyperthermia with ferromagnetic implants," IEEE Transactions on Biomedical Engineering, vol. 41, no. 1, pp. 17-28, January 1994.  
 [9] S. Wang, K. Izaki, I. Hirota, H. Yamashita, H. Omori, and M. Nakaoka, "Induction-heated cooking appliance using new quasiresonant ZVS-PWM inverter with power factor correction," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 34, no. 4, pp. 705–712, July/Aug. 1998.  
 [10] F. Dughiero, M. Forzan, C. Pozza, and E. Sieni, "A translational coupled electromagnetic and thermal innovative model for induction welding of tubes," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 48, no. 2, pp. 483-486, 2012.  
 [11] Li, F., Ning, J., Wang, T. et al. Analytical modeling and sensitivity analysis of the temperature distribution in the planar scanning induction heating based on 2D moving heat source. J Mech Sci Technol 33, 5093–5102 (2019).  
 [12] A. A. Khorshev, O. V. Streltsova, A. S. Bondar and F. V. Chmilenko, "Development and Comparison of 3D Nonlinear Electrothermal Models for Induction Heating Problems," 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), 2021, pp. 941-945.  
 [13] S. Saziana, O.M. Zaidi and M. I. Fadhlina "High-Frequency Induction Heating of Al-Si-Cu-Mg aluminum alloy in Thixoforming", Materials Research, v. 22, n. 5, 2019.  
 [14] Wu X, Li C, Sun S, Tong R, Li Q. "A Study on the Heating Method and Implementation of a Shrink-Fit Tool Holder", 12(18), Energies 2019.  
 [15] Ü. Ünver ve M. H. Ünver , "Tünel Tipi İndüksiyon Fırını İndüktörlerinde Isıtılacak Parça Çapının Değişimine Bağlı Olarak Sistem Veriminin Analizi", Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, c. 33, sayı. 1, ss. 0-0, Mar. 2018.  
 [16] H.M. Ünver, M.T. Aydemir "Power and frequency control in a 60 kW induction Steel heating Furnaces through PLC", Power Engineer, 19(3), pp. 36-39, 2005.  
 [17] Chen J.M., Zhang M. "Numerical Simulation of Electromagnetic Induction Heating in the Material Heat Treatment", Advanced Materials Research, vol. 291–294, pp.3377–84, 2011.

## Özgeçmişler



**Emrullah Aydın**, 1986 yılında Elazığ'da doğan Emrullah Aydın, Lisans eğitimini 2009 yılında Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünde tamamladı. 2014 ve 2020 yıllarında Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünde sırasıyla Yüksek Lisans ve Doktora eğitimlerini tamamlamıştır. Doktora eğitimini tamamladıktan sonra Malatya Turgut Özal Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünde Dr. Öğretim Üyesi olarak çalışmaya başlamış ve halen burada çalışmaya devam etmektedir. İlgi duyduğu araştırma alanları arasında Kablosuz Güç Aktarımı, Elektrik Makinaları, Güç Elektronikliği ve İndüksiyon Isıtma Sistemleri yer almaktadır.