





# İmplant Isıtma İçin D-Sınıfı Eviricili İndüksiyon Isıtma Sisteminin Gerçekleştirilmesi

## Implementation of Class-D Inverter Induction Heating System for Implant Heating

<sup>1</sup>Selim ÖNCÜ , <sup>2</sup>Tansel MUTLU , <sup>3</sup>Şerife YILMAZ , <sup>4</sup>Fatih AKOĞLU 

<sup>1,2,3,4</sup>Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Karabük, Türkiye

<sup>1</sup>soncu@karabuk.edu.tr, <sup>2</sup>tanselmutlu@yahoo.com,

<sup>3</sup>serifeyilmaz@karabuk.edu.tr, <sup>4</sup>fatihakoglu@karabuk.edu.tr

Araştırma Makalesi/Research Article

### ARTICLE INFO

#### Article history

Received : 11 June 2025

Accepted : 21 August 2025

#### Keywords:

Induction Heating, Series Resonant Inverter, Antibiotic Resistance, Biofilm, Implant Infections

### ABSTRACT

Induction heating is widely used in many industrial applications such as heating, melting, surface hardening, local heating and welding of metals. For various reasons, infections can occur on metal implants placed in various parts of the human body. In these cases, antibiotic treatment is used to eliminate the infection. The formation of a bacterial biofilm layer on the implant after implantation surgery and the antibiotic resistance of the bacterial colony are the most important factors that increase treatment costs. For this purpose, induction heating can also be used to heat metal implants placed within the body. This study focused on the induction heating system that helps eliminate biofilm-induced infections as an adjunct or alternative to antibiotic treatment. Different implant models and materials have been heated using induction heating. The bacterial mass that continued to grow in the swab sample taken from the implant kept at 60-65°C was investigated. As a result of heating experiments conducted under in vitro conditions, it was shown that the bacterial viability on the implant decreased to a traceable value.

© 2025 Bandırma Onyedi Eylül University, Faculty of Engineering and Natural Science. Published by Dergi Park. All rights reserved.

### MAKALE BİLGİSİ

#### Makale Tarihleri

Gönderim : 11 Haziran 2025

Kabul : 21 Ağustos 2025

#### Anahtar Kelimeler:

İndüksiyon Isıtma, Seri Rezonans Evirici, Antibiyotik Direnci, Biyofilm, İmplant Enfeksiyonları

### ÖZET

İndüksiyon ısıtma metallerin ısıtılması, eritilmesi, yüzey sertleştirilmesi, bölgesel ısıtılması, kaynak yapılması gibi birçok endüstriyel uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır. Çeşitli nedenler ile insan vücudunun farklı yerlerine yerleştirilen metal implantların üzerinde enfeksiyon oluşabilmektedir. Bu durumda enfeksiyonun kurutulmasında antibiyotik tedavisi kullanılır. İmplantasyon ameliyatları sonrası implant üzerinde bakteri biyofilm tabakası oluşumu ve bakteri kolonisinin antibiyotik direnci tedavi maliyetlerini artıran en önemli unsurdur. Bu amaçla vücut içine yerleştirilen metal implantın ısıtılmasında indüksiyon ısıtma tekniğinde istifade edilebilmektedir. Bu çalışmada antibiyotik tedavisine ek veya alternatif olarak biyofilm kaynaklı enfeksiyonların ortadan kaldırılmasına yardımcı olan indüksiyon ısıtma sistemi üzerinde durulmuştur. Farklı implant modellerinin ve materyallerinin indüksiyon ısıtma tekniği ile ısıtılması gerçekleştirilmiştir. 60-65°C aralığında bekletilen implantın üzerinden alınan sürüntü örneğinde üremeye devam eden bakteri kitlesi araştırılmıştır. İn vitro koşullarda yapılan ısıtma deneyleri sonucunda implant üzerindeki bakteri canlılığının izlenebilir değerde azaldığı gösterilmiştir.

© 2025 Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi. Dergi Park tarafından yayımlanmaktadır. Tüm Hakları Saklıdır.

ORCID ID: <sup>1</sup>0000-0001-6432-063

<sup>2</sup>0000-0002-8927-2664

<sup>3</sup>0000-0002-8002-092X

<sup>4</sup>0009-0007-6558-9724

## 1. GİRİŞ

İndüksiyonla ısıtma, değişken manyetik alan içerisindeki metallerin Eddy akımları kullanılarak temassız ve yüksek verimle ısıtılmasını sağlamaktadır. Endüstri, ev tipi ısıtma ve tıp alanında birçok uygulaması bulunmaktadır.

Tıp alanında vücut içine takılan protez ve implantlar titanyum, krom nikel gibi metal alaşımlardan oluşmaktadır. Gün geçtikçe artan implantasyon ameliyatlarının sağlık bütçelerini etkileyen en önemli yanı implantlarda meydana gelen enfeksiyonlardır. Ameliyat sonrası implant üzerinde bakteri üremesi olabilmektedir. Üreyen bakteri kolonisi üzerinde vücut savunma mekanizmasına ve mekanik etkilere karşı dirençli glikokaliks biyofilm tabakası görülebilmektedir. Bu durumda implantın hasta üzerinden çıkartılması gerekmektedir. Kemikle irtibatlanan, hatta vücudun belirli bir bölgesinin yerini alan implantların tekrar vücuttan çıkartılması sağlık riskleri oluşturan ve uzun süreli tedavi gerektiren bir durumdur. Bu durum sağlık riskleri ve hastanın sağlığına geç kavuşmasının yanı sıra göz ardı edilemeyecek maddi etkileri de bulunmaktadır. Ameliyat tekrarları ve antibiyotik tedavileri ABD'deki sağlık hizmetleri sistemine yıllık 1 milyar dolardan fazla yük getirmektedir [1].

Vücut içerisinde takılan implant yüzeyinde, bakterilerin oluşturduğu biyofilm tabakası önemli bir klinik zorluk oluşturmaktadır. Oluşan biyofilm tabakaları, enfeksiyonu antibiyotiğe karşı dirençli hale getirerek farmakolojik desteğin yetersiz kalmasına sebep olmaktadır. Oluşan komplikasyonların sonucunda sıklıkla implantın çıkartılması gerekmektedir [5]. Bu hususta indüksiyon ısıtma, cerrahi müdahaleye gerek kalmadan biyofilm tabakasının ortadan kaldırılmasında alternatif veya yardımcı bir tedavi yöntemidir. Yapılan çalışmalar, indüksiyon ısıtma ile implantın 60°C'te tutulmasının Staphylococcus aureus ve Staphylococcus epidermidis gibi bakterilerin canlılığını koruyamadığını ve biyofilm yapılarının bozulmasını sağladığını göstermektedir [6], [7]. Linezolid, vankomisin ve rifampisin gibi antibiyotiklerle yapılan tedavi çalışmalarına paralel olarak implanta dışarıdan uygulanan alternatif manyetik alanın ısıtma etkisi ile antibiyotik etkinliğini artırdığı, bakteri ve enfeksiyon yükünü azalttığı gösterilmiştir [2], [6], [7], [8], [9]. Antibiyotik kaplı implantların kullanımı ile antibiyotiğin vücut içinde lokal salınımı indüksiyon ısıtma ile gerçekleştirilerek iyileşme süreci hızlandırılabilir [4], [9].

Konu hakkındaki gelişmelere rağmen yapılan çalışmalarda genelde mutfak tipi indüksiyon ısıtıcı ve özel olmayan bobinler kullanılmaktadır. Bu durum sistemin esnekliğinin azalmasına ve ısının istenen bölgede yoğunlaştırılmamasına sebep olmaktadır. Yapılan son çalışmalarda klinik esnekliği artırmak ve çevre dokulara yönelik termal risklerin azaltılması için özel bobin ve indüksiyon ısıtıcı tasarımları hedeflenmektedir [3], [10].

Ferromanyetik implantlar ve nanopartikül parçacıklar üzerinde yapılan çalışmalarda indüksiyon ısıtmanın onkolojide de hedefli hipertermi uygulamalarına rastlanmaktadır. İndüksiyon ısıtma bu alanda da kontrollü, verimli ve minimal cerrahi müdahale ile önemli bir potansiyel teşkil etmektedir [10], [11].

Bu çalışmada vücut içine yerleştirilen implantlarda oluşabilecek bakteriyel enfeksiyonun ortadan kaldırılması için indüksiyon ısıtmanın lokal termoterapi kaynağı olarak kullanılabilmesi gösterilmiştir. Protez eklem enfeksiyonlarının giderilmesinde indüksiyon ısıtma uygulamasından iyi şekilde yararlanabilmek için disiplinler arası araştırmalar ve klinik çalışmaları ile desteklenmelidir. Bu amaç ile seri rezonans eviricili bir güç kaynağı tasarlanarak kalça femoral implant ısıtması için özel olarak sarılmış düzlemsel indüksiyon bobini ile temassız ısıtma deneyleri gerçekleştirilmiştir. İndüksiyonla ısıtma tekniği sayesinde implant, vücut içinde, ameliyata ihtiyaç duyulmadan istenilen sıcaklıkta belirlenen sürede tutulabilecektir. Bu yöntem sayesinde cerrahi müdahale gerekmez; daha az ilaç kullanımı, daha hızlı iyileşme, sağlık hizmetlerinin daha az meşgul edilmesi ve iyileşme masraflarının azaltılması hedeflenmektedir.

## 2. İNDÜKSİYON ISITMA

İndüksiyon ısıtma, manyetik alan içerisine yerleştirilen metallerde Eddy veya Faucault olarak bilinen akımların ısıtma amacı için kullanılmasıdır.  $I^2R$  kayıpları olarak da adlandırılan bu kayıplar elektrik makinelerinde istenmeyen bir durumken, metallerin ısıtılması söz konusu olduğunda temassız enerji aktarımı sağlayan hızlı, güvenli, temiz ve verimli bir teknoloji olarak kullanılmaktadır [12], [13], [14], [15].

Elektromanyetik indüksiyon yolu ile bir malzemenin ısıtılması için kullanılan temel bileşenler; ısıtılacak malzeme, bu malzemeye uygun tasarlanmış bir bobin ve bu bobinde manyetik akım üretmek için gerekli olan alternatif akım kaynağı olarak sıralanabilir.

İndüksiyon bobini tasarımında iş parçasının şekli ve özellikleri göz önünde bulundurulurken aynı zamanda içerisinden geçecek akımın genlik ve frekansı da dikkate alınmalıdır. İndüksiyon bobininin ihtiyaç duyduğu alternatif akım bir rezonans evirici vasıtasıyla sağlanmaktadır. Eviricinin sağladığı alternatif akım ile indüksiyon bobini bir transformatör eş değer devresinde primer sargı gibi, yük ise sekonder devre gibi davranmaktadır. Yükün öz direncine bağlı olarak oluşan Eddy akımları tarafından ısıtma sağlanır.

Kullanılan rezonans eviriciler anahtar sayısı, rezonans kolunun seri veya paralel oluşuna göre sınıflandırılabilir. Rezonans eviriciler sıfır gerilim anahtarlama (SGA) veya sıfır akım anahtarlama (SAA) koşullarını sağlayarak anahtarlama kayıplarını azaltmaktadırlar. Seri rezonans eviricilerin, 2 anahtarlı yarım köprü ve 4 anahtarlı tam köprü topolojileri mevcuttur. Seri rezonans eviricide yük akımının tamamı anahtarlar üzerinden geçmektedir. Bu sebeple düşük akımlı uygulamalarda daha sık tercih edilir. Rezonans frekansında çalışıldığında yumuşak anahtarlama koşulları sağlanabildiğinden anahtarlama kayıpları ve elektromanyetik girişim azalır.

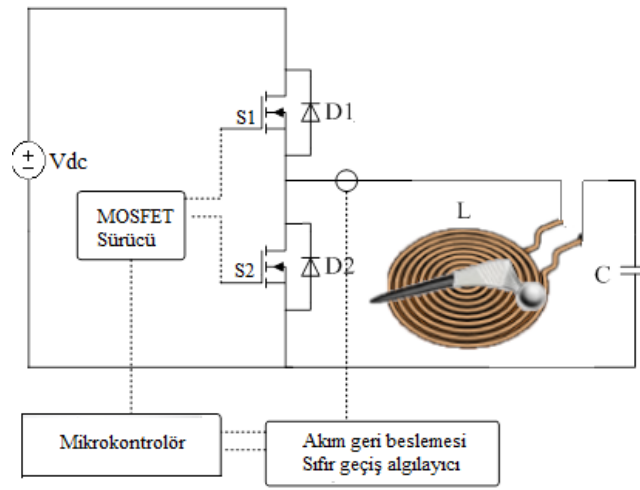
Paralel rezonans eviricilerde ise iş bobini ve rezonans kondansatörleri paralel bağlıdır. Yüksek yük akımları sağlanırken anahtar akımları daha düşük olabilmektedir. Yüksek akım ihtiyacının olduğu uygulamalarda tercih edilmektedir. Fakat güç kontrolü seri rezonans eviriciye göre daha zor yapılmaktadır.

Bir diğer rezonans evirici çeşidi de tek anahtar kullanan E-sınıfı eviricidir. Yük akımı tek bir anahtar tarafından karşılandığından teorik olarak mümkün olsa da genel olarak 3kW'ın üzerinde kullanılmamaktadır [16].

Bu çalışmada implantın temassız ısıtılması için seri rezonans evirici topolojili induksiyon ısıtıcı kullanılarak DA-AA güç dönüşümü gerçekleştirilmiştir. Seçilen evirici, yüksek güçlerde çalışma, farklı güç kontrol yöntemlerinin uygulanabilir olması gibi üstünlükleri sebebiyle tercih edilmiştir.

### 3. D SINIFI SERİ REZONANS EVİRİCİ

Şekil 1'de Gerilim beslemeli D-sınıfı seri rezonans evirici devresi verilmiştir. Devre, doğru gerilim kaynağı, anahtar sürücü devresi, iki güç anahtarı, yüklü induksiyon bobini ve rezonans kondansatöründen oluşmaktadır. Kalite faktörünün yeterince büyük seçilmesine anahtarların sırayla kapanıp açılması ile rezonans kolu üzerinde sinüzoidal bir akım oluşturulur. Akım dalga formunun düzgün olabilmesi, kalite faktörüne bağlıdır. Çalışma frekansının belirlenmesindeki temel parametreleri ise rezonans kolundaki iş bobini ve kondansatör grubu oluşturmaktadır. Sırayla kapanıp açılan anahtarların yayılım gecikmesine bağlı olarak anahtarlama sinyallerine ölü zaman eklenmesi olası bir kısa devreyi engeller.



Şekil 1. Gerilim beslemeli d-sınıfı seri rezonans evirici.

Çalışma frekansı rezonans frekansından küçük, büyük veya eşit seçilebilir. Çalışma frekansının rezonans frekansından küçük seçilmesi durumunda devre kapasitif etki gösterir. Çalışma frekansının rezonans frekansına eşit olduğu durumda SAA koşulları sağlanır. Anahtarlama kayıpları ve elektromanyetik girişim düşük düzeydedir. Çalışma frekansının rezonans frekansından yüksek seçilmesi durumunda devre endüktif etki gösterir. Bu çalışma bölgesinde anahtarların iletme geçme anında sıfır gerilim anahtarlama şartları sağlanmaktadır. Güç kontrol yöntemlerinden biri anahtarlama frekansının değiştirilmesidir [17], [18]. Anahtarlama frekansının artırılması eşdeğer endüktansı artırarak güç kontrolünü mümkün kılmaktadır [19]. D-sınıfı seri rezonans eviricinin endüktif bölgede çalıştırılması Şekil 2'deki gibi 4 durumda özetlenebilmektedir. Bu dört duruma ait gerilim akım grafikleri Şekil 3 ile verilmiştir.

Eviricide anahtarlar sırayla devreye girmektedir. Endüktif bölge olarak adlandırılan rezonans frekansının üstündeki çalışma durumunda, anahtarların devreye girme anında akım yolu paralel diyotlar üzerindedir. Böylece anahtarlar SGA şartları altında iletme geçer. SGA'nın aynı zamanda anahtar giriş kapasitansının Miller etkisi sebebiyle artmaması, anahtar sürücü devresi tarafından daha düşük akıma ihtiyaç duyulması ve anahtarın daha hızlı kapanması gibi avantajları da bulunmaktadır [20].

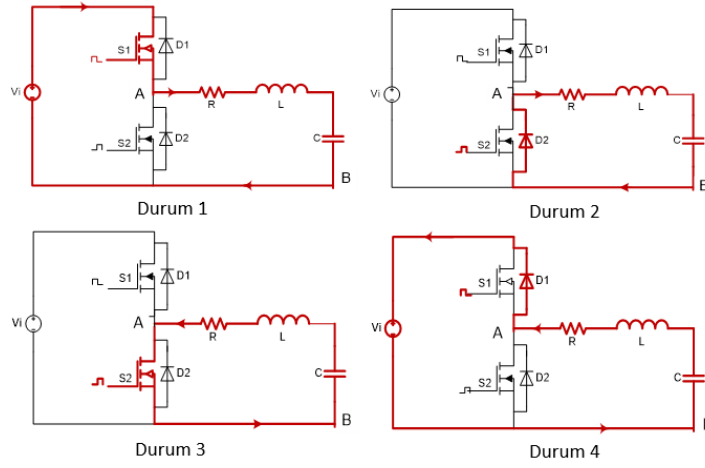
### 4. D SINIFI EVİRİCİ ANALİZİ

Evirici devresindeki doğru gerilim iki anahtarın sırayla kapanıp açılması sonucu rezonans koluna kare dalga olarak uygulanmaktadır. Rezonans koluna uygulanan kare dalganın Fourier serisindeki temel bileşeni ( $v_1$ ) Eşitlik 1 ile verilmektedir [21].

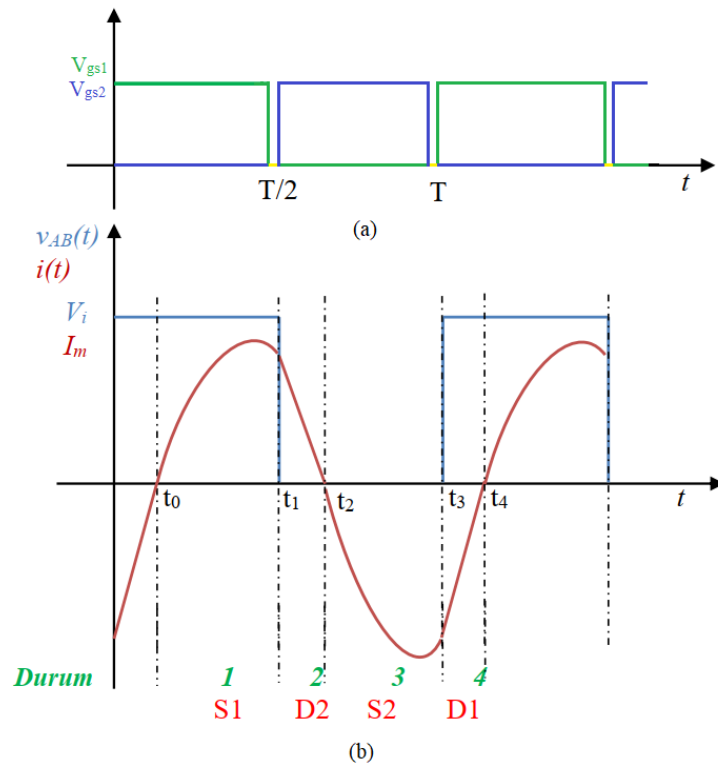
$$v_1 = V_m \sin \omega t \quad (1)$$

Eşitlik 1'de verilen temel bileşene ait tepe değeri ( $V_m$ ) Eşitlik 2 de verilmiştir.

$$V_m = \frac{2V_i}{\pi} \quad (2)$$



Şekil 2. Eviricinin endüktif bölgede çalıştırılmasını özetleyen 4 durum.



Şekil 3. Eviricinin endüktif bölgede çalıştırılmasına ait (a) anahtar iletim-yalıtım durumu ve (b) rezonans kolu gerilim-akım grafikleri.

Benzer şekilde rezonans kol akımı ( $i_L$ ) ve tepe değeri ( $I_m$ ) Eşitlik 3-4 şeklinde gösterilebilir.

$$i_L = I_m \sin(\omega t - \varphi) \quad (3)$$

$$I_m = \frac{V_m}{|Z|} = \frac{2V_i}{\pi|Z|} = \frac{2V_i \cos \varphi}{\pi R} \quad (4)$$

Çalışma frekansı ve anahtarlama frekansının değerlerine göre devre endüktif veya kapasitif özellik gösterebilmektedir. Bu da rezonans kol gerilimi ve akımı arasında faz farkının oluşmasına neden olur. Oluşan faz farkı ( $\varphi$ ); kalite faktörü ( $Q_L$ ), anahtarlama açılma hızı ( $\omega$ ) ve rezonans açılma hızı ( $\omega_r$ ) ile orantılıdır. Bu değerler Eşitlik 5-8 ile verilmiştir.

$$\varphi = \tan^{-1} \left[ Q_L \left( \frac{\omega}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{\omega} \right) \right] \quad (5)$$

$$Q_L = \frac{\omega_r L}{R} = \frac{Z_r}{R} \quad (6)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (7)$$

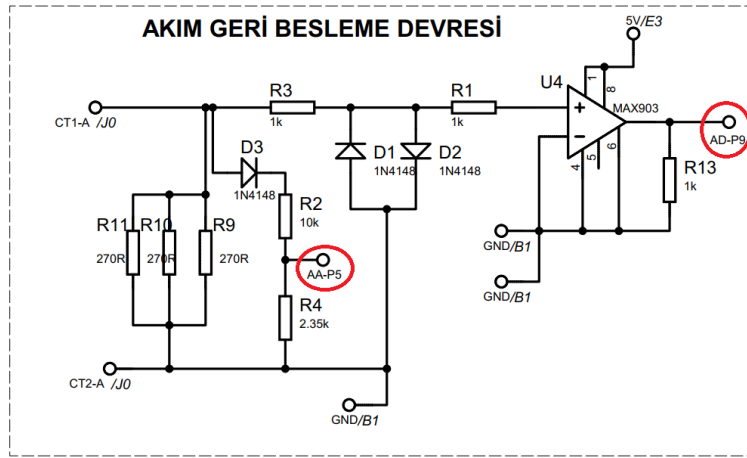
$$\omega_r = 2\pi f_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (8)$$

Yüke aktarılan güç Eşitlik 9 ile verilmiştir.

$$P_o = \frac{2V_i^2 \cos^2 \varphi}{\pi^2 R_{yük}} \quad (9)$$

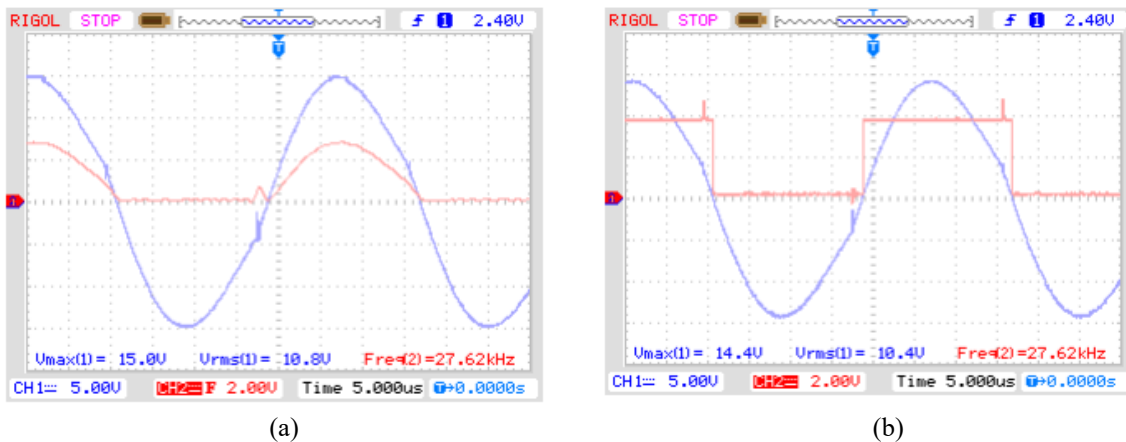
## 5. DENEYSEL ÇALIŞMA

Deneysel çalışma düzeneğinde; 250 telli bir Litz teli 3 boyutlu yazıcıda oluşturulan bir kalıbın içine yerleştirilerek 25 tur sarımlı dairesel bobin haline getirilmiştir. 33nF ve 25nF'lık rezonans kondansatör bloklarıyla farklı ısıtma testleri gerçekleştirilmiştir. Güç anahtarı olarak IRFP260 MOSFET'ler kullanılmıştır. Kontrol elemanı olarak Microchip firmasının dsPIC30f2020 mikrodenetleyicisi seçilmiştir. 30 MIPS hızında çalışabilen mikrodenetleyici 3,7MHz PWM sinyali için 8 bit, 100kHz'lik PWM sinyali için ise 13 bit çözünürlük sağlayabilmektedir. Akım geri beslemesi ve sıfır geçiş bilgisinin tespiti için 1:117 oranında çevrim oranına sahip bir akım transformatörü hazırlanmıştır. Akım geri beslemesi Şekil 4'teki devre ile işlenerek mikrodenetleyiciye verilmektedir. AA-P5 düğümünde akımın geri beslemesinin sadece artı alternansı gerilim bölücü dirençlerle ölçeklendirilerek mikrodenetleyicinin analog karşılaştırıcı birimine gönderilmiştir. Analog karşılaştırıcı birimi 20 ns'de cevap verebilmekte ve PWM modülü ile donanımsal olarak bağlantı kurabilmektedir. AD-P9 düğümünde ise sıfır geçiş algılama için akım geri beslemesi kare dalgaya çevirerek bir dijital girişe verilmiştir.



Şekil 4. Mikrodenetleyicinin analog karşılaştırıcı ve dijital girişine gönderilen akım geri besleme sinyali.

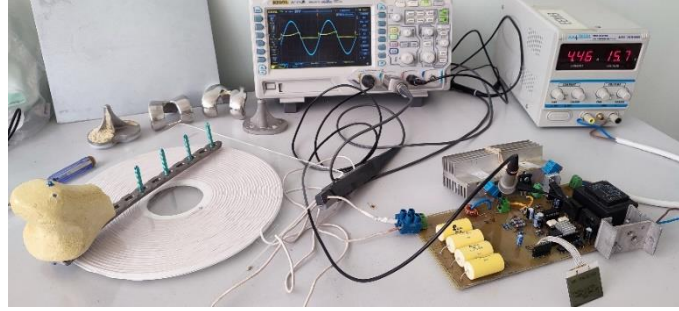
Akım geri beslemesinin analog karşılaştırıcı ve sıfır geçiş algılama girişine gönderilen dalga şekillerine ait osiloskop görüntüleri Şekil 5 ile verilmiştir. Osiloskop görüntülerindeki mavi sinyaller akım transformatöründen elde edilen akım geri beslemesini gösterirken, kırmızı sinyaller ise (a) ölçeklendirilmiş akım geri beslemesi ve (b) ise sıfır geçiş sinyalini vermektedir.



Şekil 5. Akım geri beslemesinin, (a) analog karşılaştırıcıya verilen ölçeklendirilmiş akım sinyali ve (b) dijital girişine verilen sıfır geçiş sinyali.

D-sınıfı seri rezonans eviricide güç kontrolü frekans modülasyonu ile yapılmıştır. Güç değerinin ayarlanmasında analog karşılaştırıcı ve sıfır geçiş sinyalleri kullanılarak bir algoritma oluşturulmuştur. İlk çalışma, sistemin yüklü ve yüksüz durumunda rezonansa giremeyeceği yüksek bir frekansta başlar. Geri besleme akım tepe değeri, set edilen akım değerine gelene kadar frekans azaltılır. Sıfır geçiş sinyalinin anahtarlama sinyali ile aynı faza gelmesi sistemin rezonans frekansına vardığını, çekilecek maksimum akım değerinde olduğunu gösterir. Bu durumda frekans azaltma işlemi iptal edilir. Akımın anlık değerinden daha düşük bir akım set edildiğinde de frekans artırılır.

İmplantın veya bobinin hareket ettirilmesi durumunda eş değer empedans ve endüktanstaki değişim çekilen akımı etkileyecektir. Algoritma akım tepe değerini set edilen değerde tutacak şekilde frekansı değiştirerek regülasyon sağlamaktadır. Deneysel çalışma düzeneği Şekil 6’te verilmiştir.



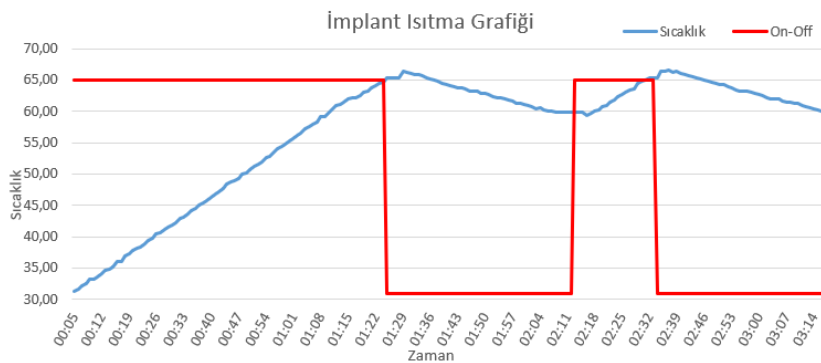
Şekil 6. Deneysel çalışma düzeneği.

Elektronik laboratuvarında farklı implant ve rezonans kondansatör bloğu ile yapılan ısıtma testlerinde elde edilen parametreler Tablo 1’de verilmiştir. Isıtılan metalin ferromanyetik olmaması yük empedansının düşük olmasına neden olmaktadır. Rezonans frekansının artırılması yük üzerindeki girdap akımlarının artırılmasına katkıda bulunacağından bakterisidal testler için rezonans kondansatörleri 25nF olarak seçilmiştir.

Tablo 1. Farklı implant ve rezonans kondansatörleri ile yapılan ısıtma test parametreleri.

Isıtma Test Parametreleri				
C	nF	33	25	25
L	uH	144,3	138	145
$f_r$	kHz	72,5	85,5	83,5
$I_m$	A	9,75	14,4	9
$V_i$	V	15	15,8	15
$I_i$	A	3,1	4,58	2,864
$R_{es}$	Ohm	0,98	0,699	1,06
$Q_L$		67	106	72
$P_o$	W	46,5	72,4	43

Isıtma testlerinde rezonans frekansında çalıştırılan sistemin implantı oda sıcaklığından 65 °C’ye çıkarması 90 saniye olarak ölçülmüştür. 65-60 °C aralığında ON-OFF yöntemi ile ısıtılan implanta ait sıcaklık zaman grafiği Şekil 7’de verilmiştir.



Şekil 7. İmplantın oda sıcaklığından 60-65 °C’de aralığında tutulmasına ait ısıtma-zaman grafiği.

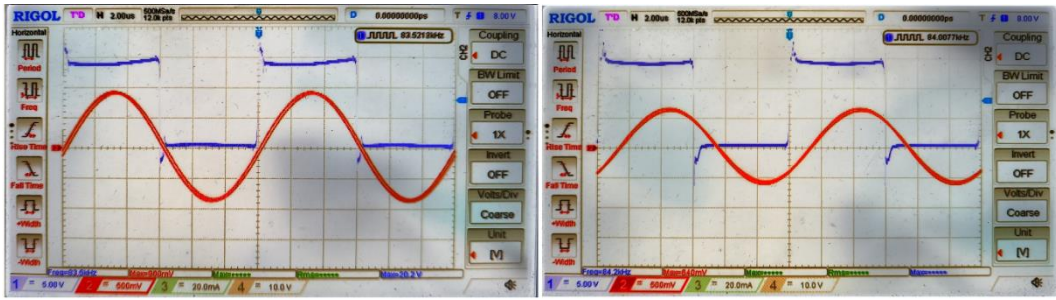
Mikrobiyoloji Laboratuvarlarında kalça femoral stem implantı ile ısıtma testleri yapılmıştır. Staphylococcus Aureus (MSSA) ATCC 29213 bakterisi implant üzerine ekilerek biyofilm tabakası oluşturması sağlanmıştır. Enfekte implant üzerine kontrollü bir şekilde elektromanyetik indüksiyon yolu ile ısı uygulanmıştır. İmplant 30 dk. boyunca 60-65 °C’de tutulmuştur.

İmplant termal kamera ile takip edilerek istenilen sıcaklık aralığında kalması için frekans modülasyonu ile ısıtıcı gücü ayarlanmıştır ve ON-OFF kontrol yerine rezonans frekansının üzerinde bir frekansta sürekli ısıtma sağlanmıştır. Kalite faktörünün yüksek olması güç kontrolünün çok düşük bir frekans aralığında yapılmasına izin vermektedir. 83,5 kHz’den 84,2 kHz’e çıkartılan anahtarlama frekansı için  $I_m$  değeri 9 A’den 6,4 A’ye düşmüştür.



Şekil 8. 60-65 °C aralığında tutulan implant.

Güç değeri ise rezonans frekansı olan 83,5 kHz'de 43 W, 84,2 kHz'de ise 20W olarak ölçülmüştür. Bu güç değeri termal kameranın sürekli gözlenmesi sonucu yükün 63-65°C aralığında kaldığı değer olarak tespit edilmiştir. Şekil 9'da bu iki anahtarlama frekanslarındaki akım-gerilim grafiklerine ait osiloskop görüntüleri verilmiştir.



(a)

(b)

Şekil 9. Rezonans kol akım-gerilim grafiği (a) anahtarlama frekansı 83,5 kHz (rezonans frekansı) ve (b) anahtarlama frekansı 84,2 kHz.

İncelenen yöntemde implantın lokal olarak dışarıdan ısıtıldığı in-vitro koşullarda yapılan bir test sunulmuştur. ATCC 29213 enfekte implantın indüksiyon yolu ile ısıtma öncesi ve sonrası alınan örneklerinin Mikrobiyoloji Laboratuvarında yapılan kanlı agara ekim sonuçları Şekil 10 ile verilmiştir.



Şekil 10. ATCC 29213 enfekte implanttan alınan örneklerin kanlı agara ekim sonuçları.

Isıtma öncesi alınan sürüntü örneğinin besiyerine ekilmesi ile bakteri üremesinin devam ettiği, ısıtma sonrası besiyerine ekilen sürüntü örneğinde ise bakteri üremesinde gözle görülür bir azalmanın olduğu tespit edilmiştir. İndüksiyon ısıtma ile metal implantın doğrudan yüzeyine ısı uygulanmaktadır. İmplant üzerinde oluşan biyofilm tabakasının antibiyotik direnci, klinik tedavilerinin uzamasına veya başarısızlıkla sonuçlanmasına sebep olabilmektedir [22]. Antibiyotik tedavisinin olumlu cevap vermediği durumlarda revizyon cerrahisi ile protezin yerinden çıkartılması söz konusudur [23]. Antibiyotik tedavisinin sınırlı etkilerine karşı indüksiyon ısıtma yöntemi bakterilerin yok edilmesinde tedaviye olumlu katkı sağlayabilmektedir.

## 6. SONUÇ

Bu çalışma ile vücut içerisine yerleştirilen implantlar üzerinde oluşan biyofilm kaynaklı enfeksiyonların tedavisine alternatif bir yöntem sunulmuştur. Bakterilerin oluşturduğu biyofilm tabakası farmakolojik tedavi yöntemlerine yetersiz cevap verebilmektedir. Hazırlanan indüksiyon ısıtma sistemi ile in-vitro koşullarda enfekte implantın belirli bir sıcaklık aralığında tutulmasının bakteri canlılığına baskılayıcı bir etki gösterdiği doğrulanmaktadır.

Çalışma, vücut içine yerleştirilen implantlarda oluşabilecek enfeksiyonlara karşı lokal bir tedavi yöntemi sunmaktadır.

## Yazar Katkıları

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamışlardır.

## Çıkar Çatışması

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

## Teşekkür

Bu çalışma, TÜBİTAK 1005- Ulusal Yeni Fikirler ve Ürünler Araştırma Destek Programı (Proje No: 123E371) desteğiyle yürütülmüştür. Desteklerinden dolayı TÜBİTAK'a teşekkür ederiz.

## KAYNAKÇA

- [1] V. Sadaphal et al., "Feasibility of heating metal implants with alternating magnetic fields (AMF) in scaled up models," *International Journal of Hyperthermia*, vol. 39, no. 1, pp. 81–96, 2022.
- [2] B. G. Pijls, I. M. J. G. Sanders, E. J. Kuijper, and R. G. H. H. Nelissen, "Non-contact electromagnetic induction heating for eradicating bacteria and yeasts on biomaterials and possible relevance to orthopaedic implant infections: In vitro findings," *Bone Joint Res*, vol. 6, no. 5, pp. 323–330, May 2017.
- [3] I. Álvarez-Gariburo et al., "A portable induction heating system for implanted prosthesis disinfection," *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, vol. 75, no. 2, pp. 131–143, Apr. 2024.
- [4] J. C. Kwan, R. S. Flannagan, M. Vásquez Peña, D. E. Heinrichs, D. W. Holdsworth, and E. R. Gillies, "Induction Heating Triggers Antibiotic Release and Synergistic Bacterial Killing on Polymer-Coated Titanium Surfaces," *Adv Healthc Mater*, vol. 12, no. 22, Sep. 2023.
- [5] H. O. Gbejuade, A. M. Lovering, and J. C. Webb, "The role of microbial biofilms in prosthetic joint infections: A review," *Acta Orthop*, vol. 86, no. 2, pp. 147–158, Apr. 2015.
- [6] B. G. Pijls, I. M. J. G. Sanders, E. J. Kuijper, and R. G. H. H. Nelissen, "Synergy between induction heating, antibiotics, and N-acetylcysteine eradicates *Staphylococcus aureus* from biofilm," *International Journal of Hyperthermia*, vol. 37, no. 1, pp. 130–136, Jan. 2020.
- [7] B.G. Pijls, I.M.J.G Sanders., E.J. Kuijper, and R.G.H.H. Nelissen, "Induction heating for eradicating *Staphylococcus epidermidis* from biofilm," *Bone Joint Res*, vol. 9, no. 4, pp. 192–199, 2020.
- [8] I. A. Somawardana et al., "Alternating magnetic fields (AMF) and linezolid reduce *Staphylococcus aureus* biofilm in a large animal implant model," *Journal of Infection*, vol. 89, no. 106271, pp. 1–11, 2024.
- [9] Q. Wang et al., "Alternating magnetic fields and antibiotics eradicate biofilm on metal in a synergistic fashion," *NPJ Biofilms Microbiomes*, vol. 7, no. 1, Dec. 2021.
- [10] P. R. Stauffer, P. K. Sneed, H. Hashemi, and T. L. Phillips, "Practical Induction Heating Coil Designs for Clinical Hyperthermia with Ferromagnetic Implants," *IEEE Trans Biomed Eng*, vol. 41, no. 1, pp. 17–28, 1994
- [11] E. A. Kwizera, S. Stewart, M. M. Mahmud, and X. He, "Magnetic Nanoparticle-Mediated Heating for Biomedical Applications," *J Heat Transfer*, vol. 144, no. 3, Mar. 2022.
- [12] O. Kaya and F. İçer, "İndüksiyon ve Ohmik Isıtma İşlemlerinin Gıdalara Uygulanabilirliğinin Karşılaştırılması," *Akademik Gıda*, vol. 17, no. 1, pp. 111–120, 2019.
- [13] A. Pascual, J. Acero, S. Llorente, C. Carretero, and J. M. Burdio, "Self-Adaptive Overtemperature Protection Materials for Safety-Centric Domestic Induction Heating Applications," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 1193–1201, 2023.
- [14] J. Choi et al., "Efficient Synthesis of High-Quality Carbon Nanotubes Using Induction Heating Technology," in *36th IEEE International Vacuum Nanoelectronics Conference, IVNC 2023*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2023, pp. 216–218.
- [15] G. Aquino, D. Raul, and C. Quispe Ancasí, "Proposal for Implementation of Induction Stoves for Electrification of the Peruvian Energy Matrix," in *2021 10th International Conference on Power Science and Engineering, ICPSE 2021*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021, pp. 17–22.
- [16] H. W. Koertzent, J. D. Van Wyk, and J. A. Ferreira, "Design of the Half-Bridge, Series Resonant Converter for Induction Cooking," 1995.
- [17] S. Nacar, S. Öncü, and G. Bal, "Comparison of Control Techniques for Series Resonant Converter," *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, vol. 9, no. 2, pp. 283–296, Jun. 2021.
- [18] H. Özbay, A. Karafil, and S. Öncü, "Sliding mode PLL-PDM controller for induction heating system," *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, vol. 29, no. 2, pp. 1241–1258, 2021.
- [19] A. Karafil, "PDM kontrollü rezonans dönüştürücü MPPT içeren bir fazlı şebeke etkileşimli eviricinin gerçekleştirilmesi," *Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük*, 2018.
- [20] M. K. Kazimierczuk and D. Czarkowski, *Class D series-resonant inverter*. John Wiley & Sons Inc, Canada , 2011.
- [21] G. Bal, S. Öncü, and S. Börekci, "Kendinden Tetiklemeli İndüksiyon Isıtıcı Tasarımı Ve Deneysel Uygulaması," *Gazi Univ. Müh. Mim. Fak. Der.*, vol. 26, no. 4, pp. 771–776, 2011.
- [22] D. Gür Vural, İ. Bıyık, E. G. Torun, Y. Tanrıverdi ÇAYCI, K. Bilgin, and A. Birinci, "Staphylococcus aureus İzolatlarının Biyofilm Oluşturma Özelliklerinin Karşılaştırılması," *Sağlık Bilimlerinde Değer*, vol. 13, no. 2, pp. 245–249, May 2023.
- [23] M. Ali Deveci, E. Şener, and S. Aykın Şimşek, "Türk Ortopedi ve Travmatoloji Birliği Proteze bağlı enfeksiyonların tedavisinde iki aşamalı revizyon Two-stage revision in the treatment of prosthesis-related infections," 2011.