



***VI. ELEKTRİK TESİSAT
ULUSAL KONGRE ve SERGİSİ
16-19 Ekim 2019, İzmir***



**SIVI GIDALARIN
İNDÜKSİYON İLE ISITILMASINDA
HOMOJEN SICAKLIK PROFİLİ SAĞLAYAN
YENİ BİR GÜÇ KONTROL YÖNTEMİ**

Yeliz Tezcan ve Mutlu Boztepe

Ege Üniversitesi, İzmir, Türkiye

İçerik

- Motivasyon
- Giriş
- İndüksiyon Isıtma Sisteminin Modellenmesi
- İndüksiyon Isıtma Sisteminin Analizi
- Çoklu Bobin Sistemleri
- İndüksiyon Isıtma Sisteminin Sonlu Elemanlar ile Analizi
- Önerilen Özgün Kontrol Yöntemi
- Deneysel Çalışmalar
- Sonuç ve Öneriler

Motivasyon

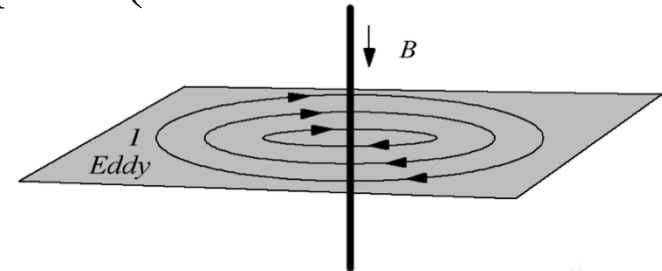
- İndüksiyon ısıtma sistemlerinin endüstride kullanımı çok yaygındır.
- Gıda sanayinde ise, geleneksel ısıtma yöntemlerinin, uzun sürede ısıtma işlemini gerçekleştirmeleri ve gıdanın içeriğinde değişime sebep olmaları gibi dezavantajları nedeniyle son yıllarda sıvı gıdaların indüksiyon yöntemiyle ısıtılması üzerine çalışmalar yoğunlaşmıştır.
- Bu çalışmada, sıvı gıdaları indüksiyon ile ısıtmakta kullanılan bir sistemin modelleme, analiz ve kontrolünün teorik ve deneysel olarak incelenmesi amaçlanmıştır.

Giriş

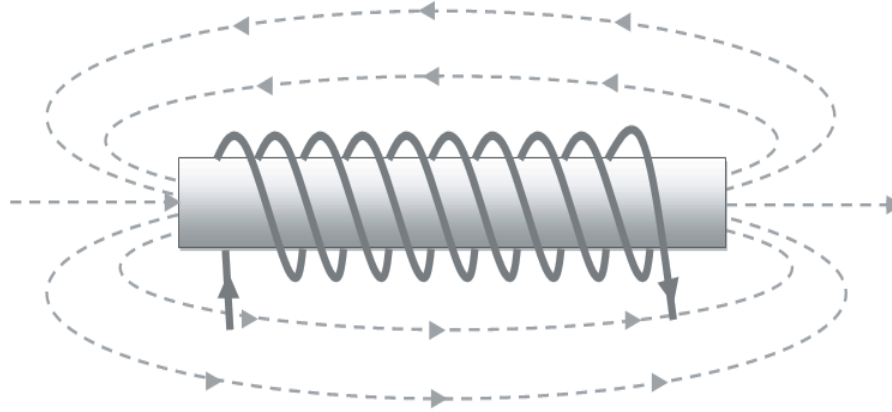
•1831'de elektromanyetik indüksiyonun Faraday tarafından keşfinden sonra, indüksiyon ısıtma sistemi transformatör, jeneratör ve diğer manyetik tasarımlar gibi birçok uygulamada geniş bir biçimde kullanılmıştır.

•Genellikle metal parçaların birbirlerine kaynak yapılması, eritilmesi gibi uygulamalarda kullanılırken, son yıllarda gıda endüstrisinde, ısıtma amacıyla kullanımı da yaygınlaşmaktadır.

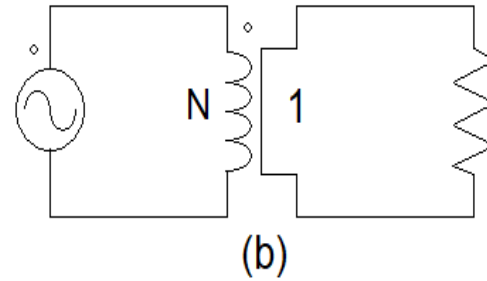
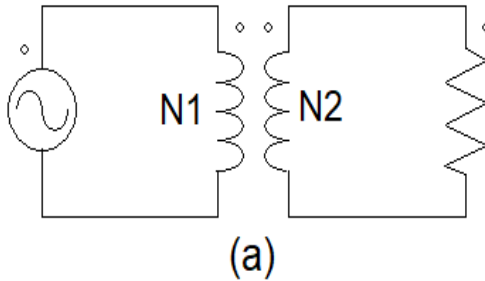
•İndüksiyon ısıtma sisteminin temeli, iletken malzemede yani iş paraçasında, manyetik alanın etkisiyle oluşan eddy akımlarıdır. Kısa devre şeklinde malzeme içinde dolanan bu akımlar, malzeme üzerinde Joule ısı kayıpları (Omik kayıp) oluşturur.



İndüksiyon Isıtma Sisteminin Modellenmesi



- İndüksiyon bobininin elektriksel eşdeğer devresini elde etmek için transformatör eşdeğer devresinden faydalanılmaktadır.



İndüksiyon Isıtma Sisteminin Modellenmesi

- Genişletilmiş eşdeğer devre

$$R_{eq} = R_w + R_c$$

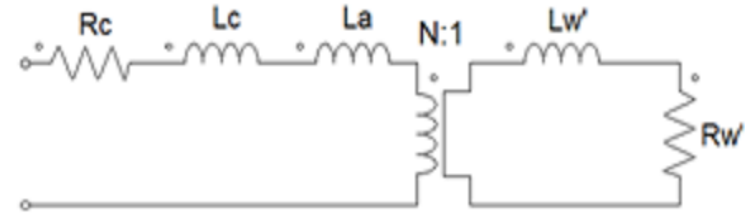
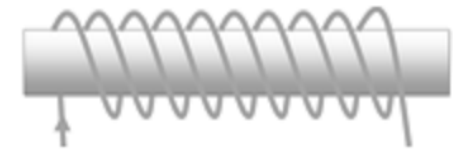
$$L_{eq} = L_w + L_c + L_a$$

- R_c 'nin gücü indüksiyon sargısının kayıplarını,

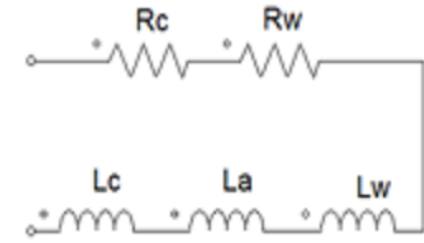
$$P_c = I_{rms}^2 R_c$$

- R_w 'nin gücü ise iş parçasının üzerindeki gücü göstermektedir.

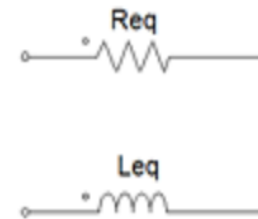
$$P_w = I_{rms}^2 R_w$$



(a)



(b)



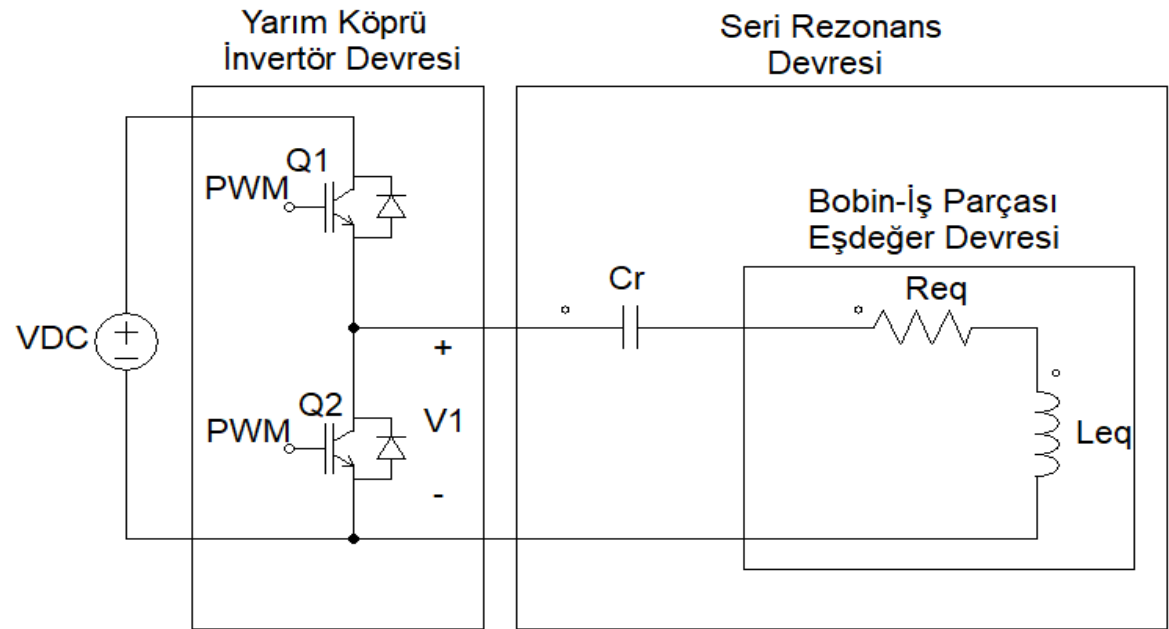
(c)

İndüksiyon Isıtma Sisteminin Analizi

- İndüksiyon bobini bir DA-AA evirici ile sürülebilir.
- Evirici çıkışında bir rezonans tank devresi olduğundan harmonik frekanslardaki akımlar çok küçük kalmaktadır.
- Dolayısıyla evirici çıkışındaki kare dalga gerilimin temel harmonik bileşeni olan V_1 , tank devresi giriş gerilimi olarak kullanılabilir.

$$V_1 = \frac{2V_{dc}}{\pi} \sin(\pi D)$$

- Temel bileşen görev oranına ve giriş gerilimine bağlı olarak değişmektedir.



İndüksiyon Isıtma Sisteminin Analizi

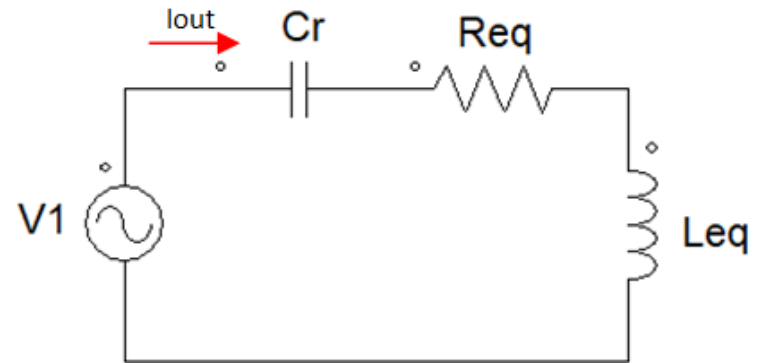
- En basit haliyle, eşdeğer devremiz şekildeki gibidir.
- Evirici çıkışının temel harmonik değeri olan V_1 gerilimi, giriş empedansının genliği Z_{in} 'e bölünerek akım değeri I_{out} hesaplanmaktadır.
- P_{out} bobin ve iş parçasının toplam güç değeri iken, ısıya dönüşen güç değeri ise, iş parçası üzerindeki Q_{out} değeridir.

$$Z_{in} = R_{eq} + j\omega L_{eq} + \frac{1}{j\omega C_r}$$

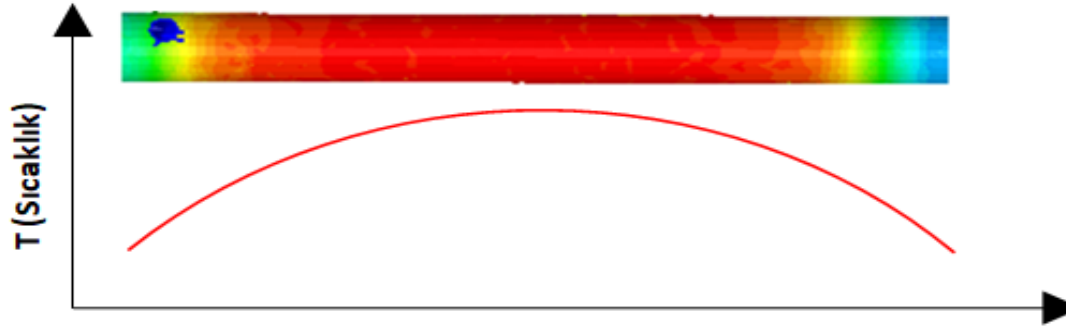
$$I_{out} = \frac{V_1}{|Z_{in}|}$$

$$P_{out} = R_{eq} I_{out}^2 = (R_c + R_w) I_{out}^2$$

$$Q_{out} = R_w I_{out}^2$$

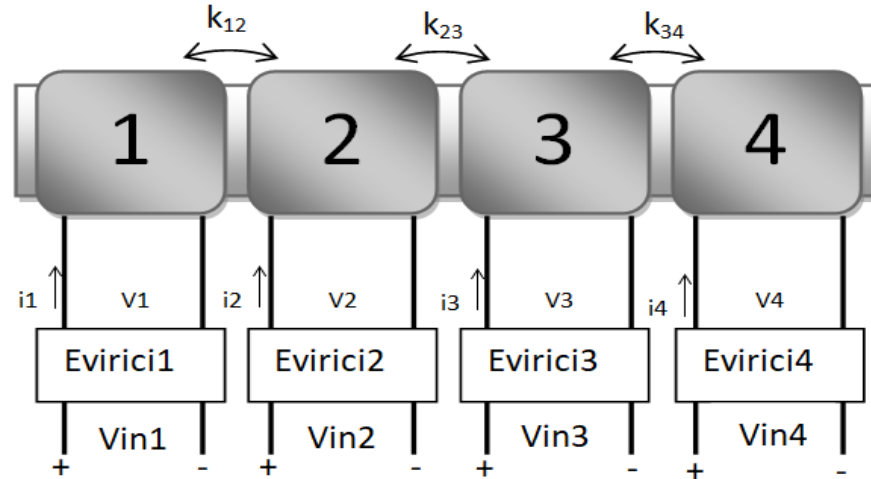


Çoklu Bobin Sistemleri



- Genel olarak tekli bobin sisteminde yapılan analizler sonucunda, iş parçası üzerinde sıcaklık dağılımının homojen olmadığı ve merkezdeki sıcaklığın uç kısımlara göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.
- Bu durum
 - uzun iş parçasının olduğu durumlarda
 - sıcaklık dağılımının homojen olması gereken yerlerde
 - hassas veya belirli bir profile sahip sıcaklık kontrolünün gerektiği sistemlerde sorun yaratmaktadır.
- Bu duruma çözüm olarak, literatürde çoklu bobin gruplarının kullanıldığı görülmektedir.

Dörtlü bobin Sistemi (1/3)



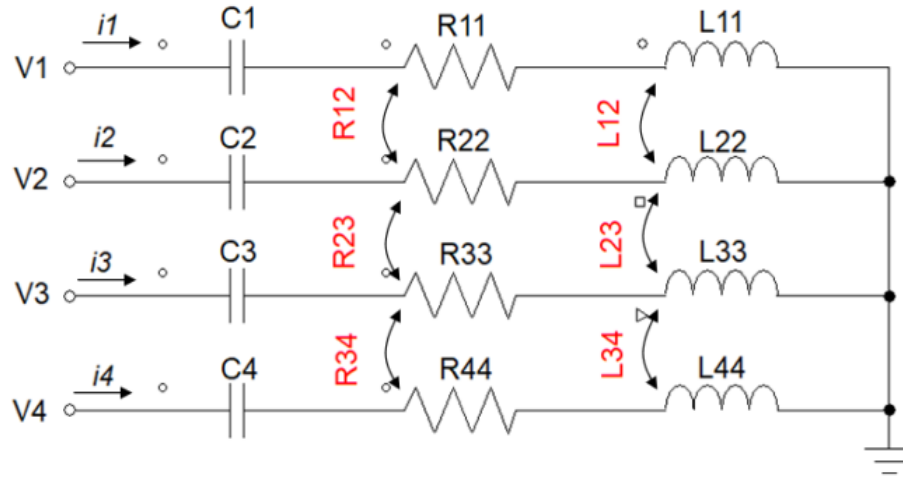
- Bobinlerden birisinin yarattığı manyetik alan, komşu bobinlerin bulunduğu alana da etki ederek ısıtma gücü yaratmaktadır.
- Bu durum eşdeğer devreye bir karşılıklı direnç ekleyerek modellenebilmektedir. Kuplaj etkisiyle oluşan bu karşılıklı direnç ve endüktans değerleri aşağıdaki gibi hesaplanabilmektedir aşağıdaki gibi hesaplanabilir

$$R_{mn} = k_{mn} \sqrt{R_m R_n}$$

$$L_{mn} = k_{mn} \sqrt{L_m L_n}$$

Dörtlü bobin Sistemi (2/3)

- Dörtlü bobin eşdeğer devre modeli:



Eşdeğer Direnç Hesabı:

$$R_1 = R_{11} + R_{12}$$

$$R_2 = R_{22} + R_{21} + R_{23}$$

$$R_3 = R_{33} + R_{32} + R_{34}$$

$$R_4 = R_{44} + R_{43}$$

Eşdeğer İndüktans Hesabı:

$$L_1 = L_{11} + M_{12}$$

$$L_2 = L_{22} + M_{21} + M_{23}$$

$$L_3 = L_{33} + M_{32} + M_{34}$$

$$L_4 = L_{44} + M_{43}$$

Dörtlü bobin Sistemi (3/3)

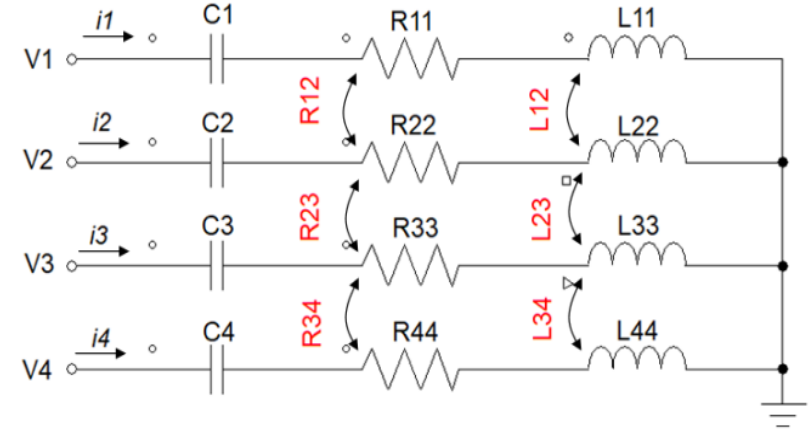
- Bobinlerdeki ısıtma gücü:

$$Q_1 = R_{w1}I_1^2 + R_{12}I_1I_2$$

$$Q_2 = R_{w2}I_2^2 + R_{21}I_2I_1 + R_{23}I_2I_3$$

$$Q_3 = R_{w3}I_3^2 + R_{32}I_3I_2 + R_{34}I_3I_4$$

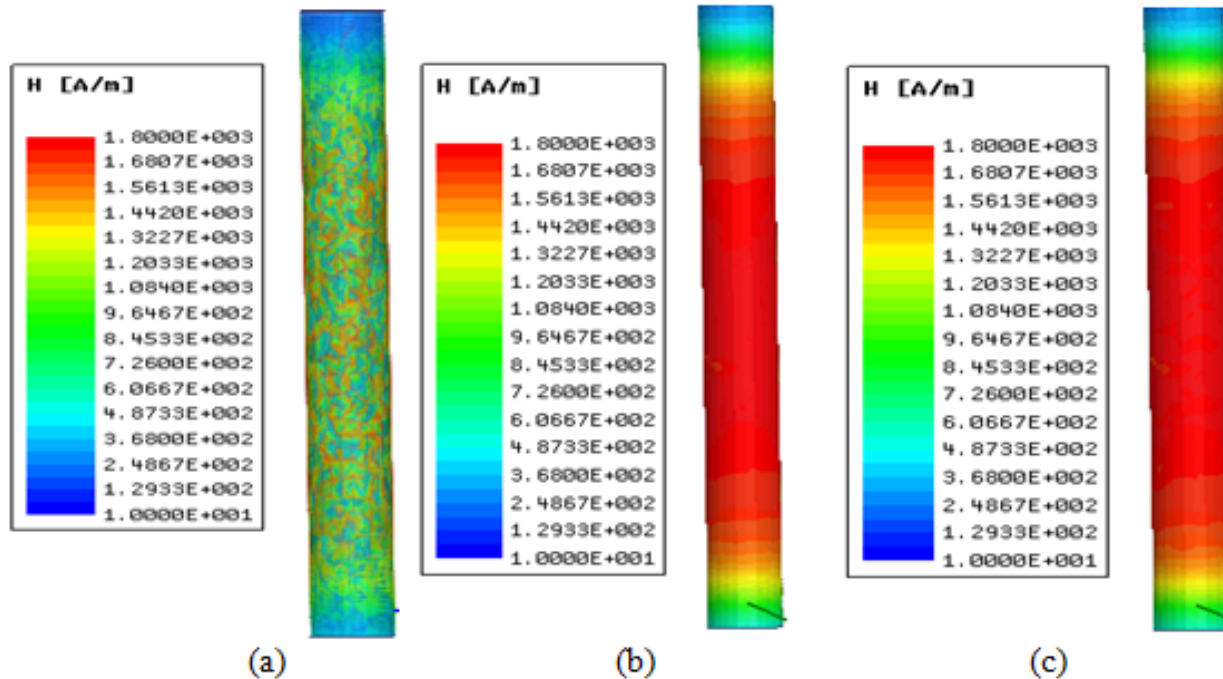
$$Q_4 = R_{w4}I_4^2 + R_{43}I_4I_3$$



- Güç denklemlerinden de görüleceği üzere, aynı yapısal özelliklere sahip bobin grupları için, merkezdeki ve uçtaki bobin grupları farklı ısıtma gücüne sahiptirler.
- Dolayısıyla iş parçası üzerinde homojen bir sıcaklık dağılımını elde etmek için bobin gruplarının güçleri bağımsız olarak kontrol edilmesi gerekir.

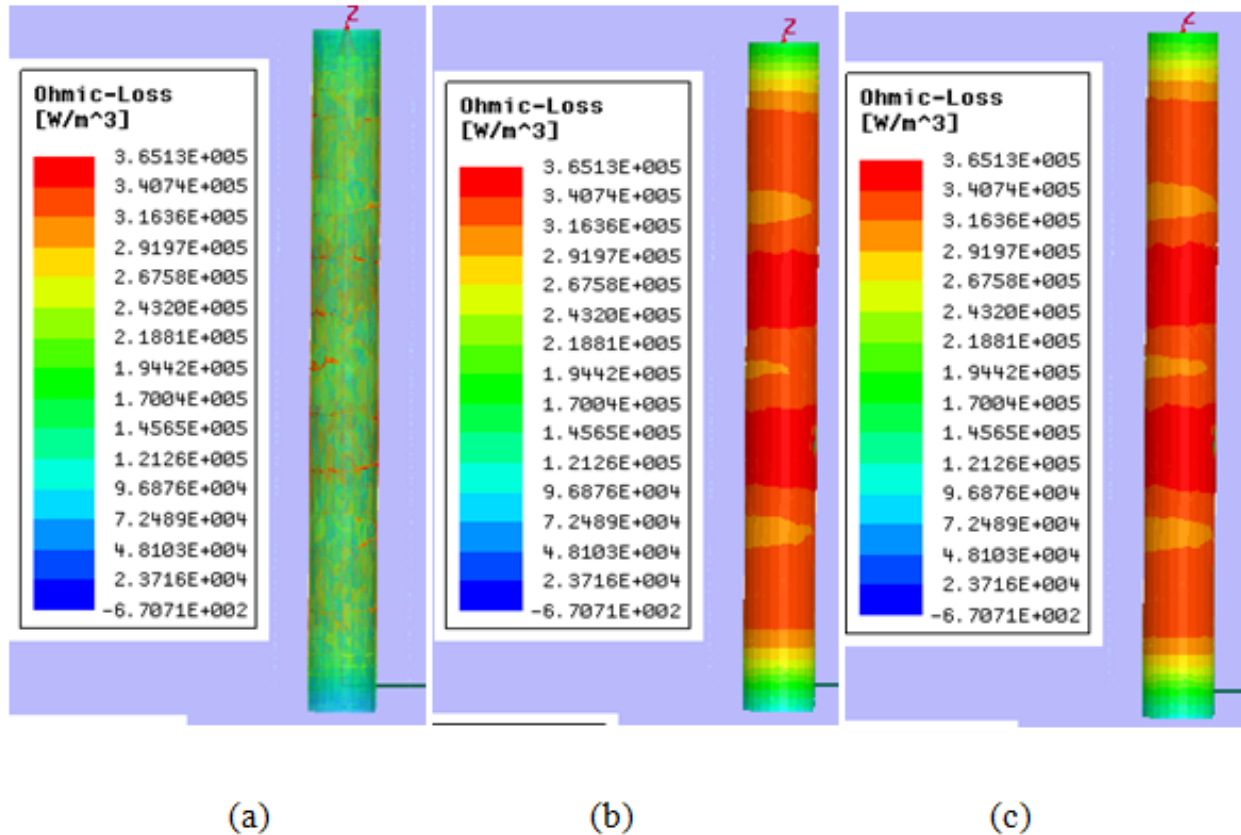
Sonlu Elemanlar Analizi – Tek bobinli sistem

- Tekli bobin iş parçası üzerindeki frekansa bağlı manyetik alan dağılımı (a:@60Hz, b:@10kHz, c=@20kHz)

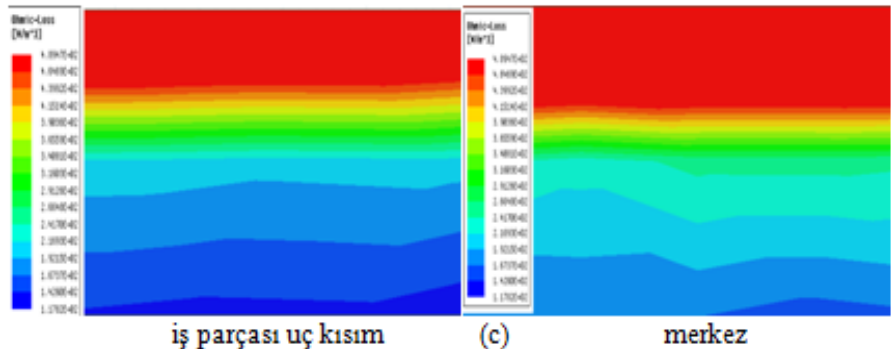
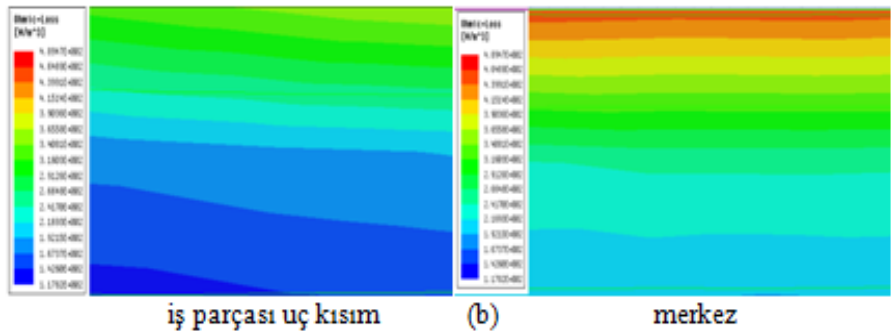
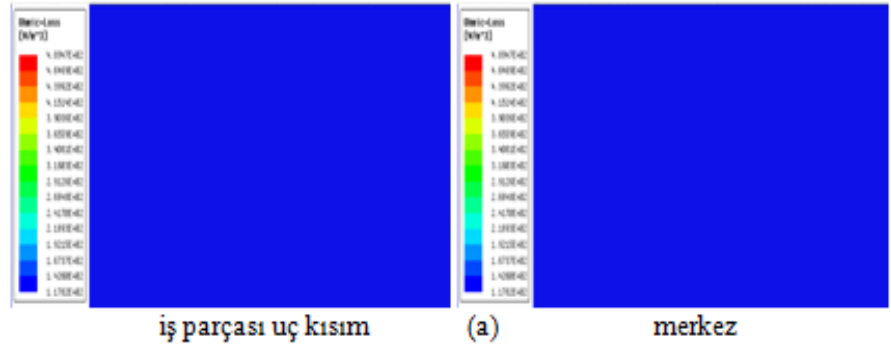
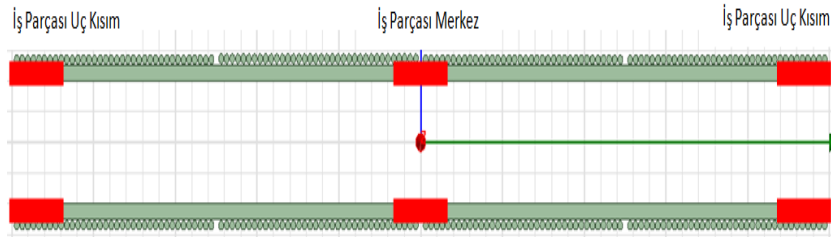


Sonlu Elemanlar Analizi – Dört bobinli sistem

- Dörtlü bobin sistemi iş parçası üzerindeki frekansa bağlı ohmic kayıplar (a:@60Hz, b:@10kHz, c=@20kHz)



Sonlu Elemanlar Analizi – Dört bobinli sistem

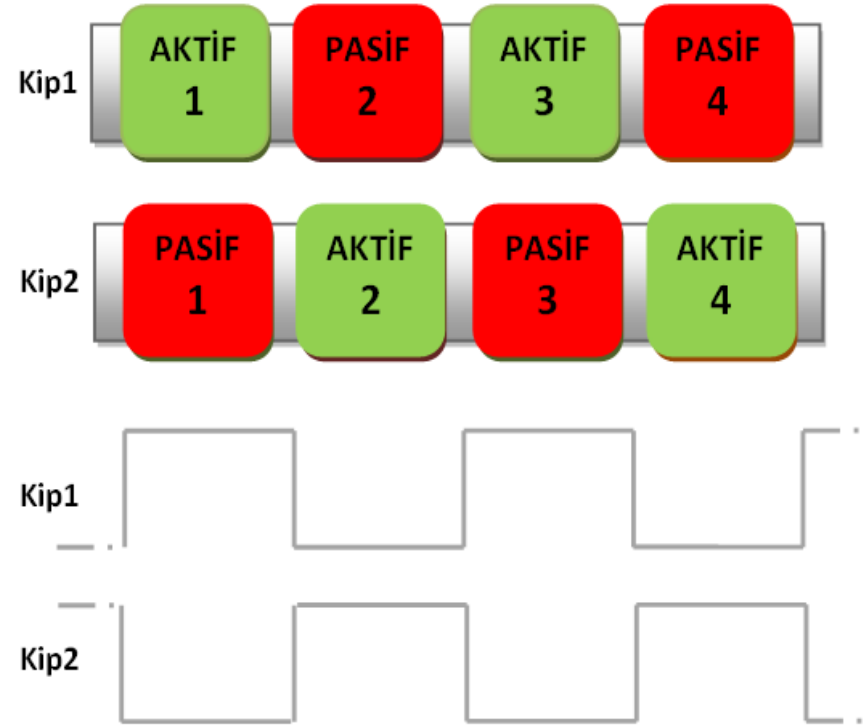


- Dörtlü bobin sistemi iş parçası omik kayıpları (a:@60Hz, b:@10kHz, c=@20kHz)

Önerilen Özgün Kontrol Yöntemi

Bölgesel ON/OFF Kontrol:

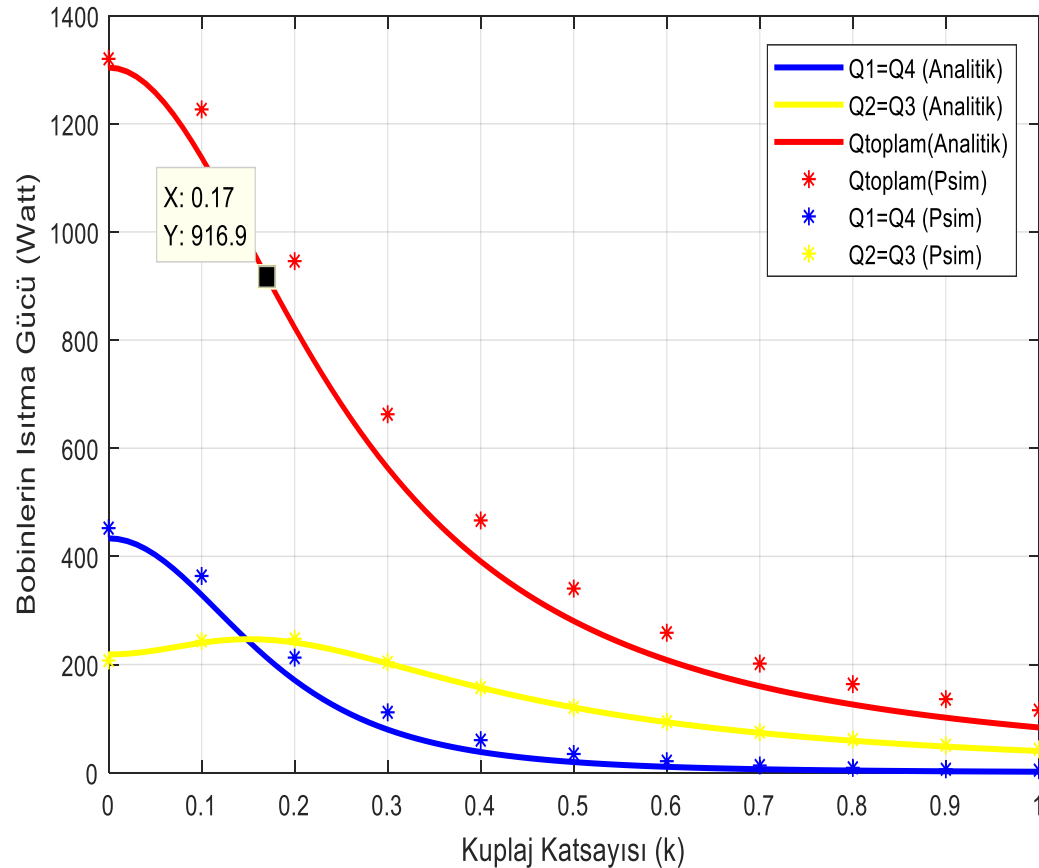
- Bu yöntemde, kuplajın etkisinin en fazla olduğu komşu bobinlerin, birbirlerine olan etkilerini en aza indirmek amaçlanmıştır.
- Bu nedenle yanyana olan bobinler aynı zamanda aktif edilmeyerek kuplajın etkisi en aza indirilmiştir.



Bölgesel ON/OFF kontrol yok iken

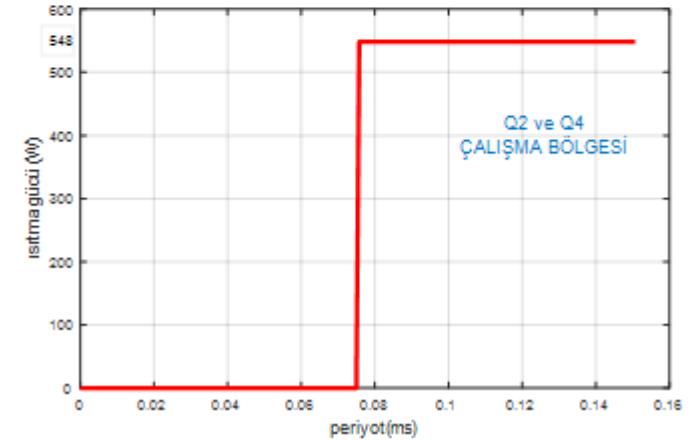
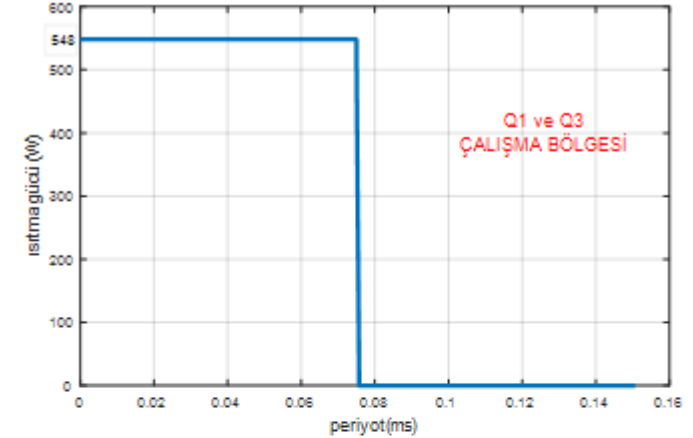
- ON/OFF kontrol olmadığı durum için dörtlü bobin sistemi, analitik analizleri ve Psim simülasyon sonuçları verilmiştir.

(916.9W @ $k=0.17$)



Bölgesel ON/OFF kontrol var iken

- Eğer aynı sistem $k=0.17$ kuplaj değeri için önerilen kontrol yöntemi ile kontrol edilir ise bobin grupları için ısıtma gücü değerleri bir periyot için şekildeki gibi olmaktadır.
- Sonuç olarak her bir bobinden 274W güç elde edilebilirken, toplam güç değeri ise 1096 W olmaktadır.

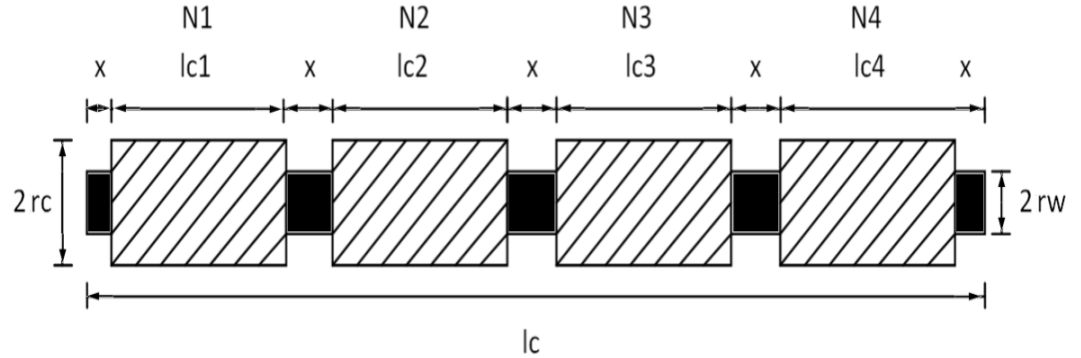


Bölgesel ON/OFF kontrol

- Sistemde bobinlerin aktif ve pasif olduğu zaman dilimleri değiştirilerek bobin güç değerleri kontrol edilebilir.
- Böylece homojen veya farklı bir zarfa sahip sıcaklık dağılımları elde edilebilir.
- Bu yöntemde bobinlerin açma/kapama hızları iş parçasının ısı zaman sabitinden çok daha yüksek bir frekansta gerçekleştirildiğinden iş parçasının sıcaklığındaki dalgalanmanın çok küçük olması beklenmektedir.

Deneyisel Çalışmalar

- İndüksiyon ısıtma sisteminin 1200W gücünde olması gerektiğinden, şekilde görüldüğü gibi, her biri 300W gücünde 4 adet indüksiyon bobininden oluşması uygun görülmüştür.



Tasarım kriterleri:

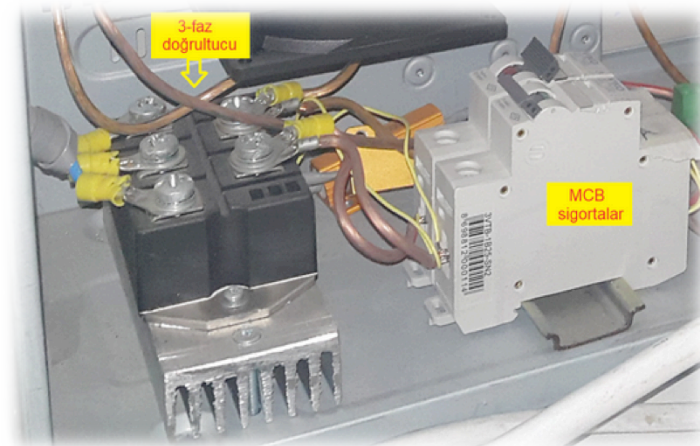
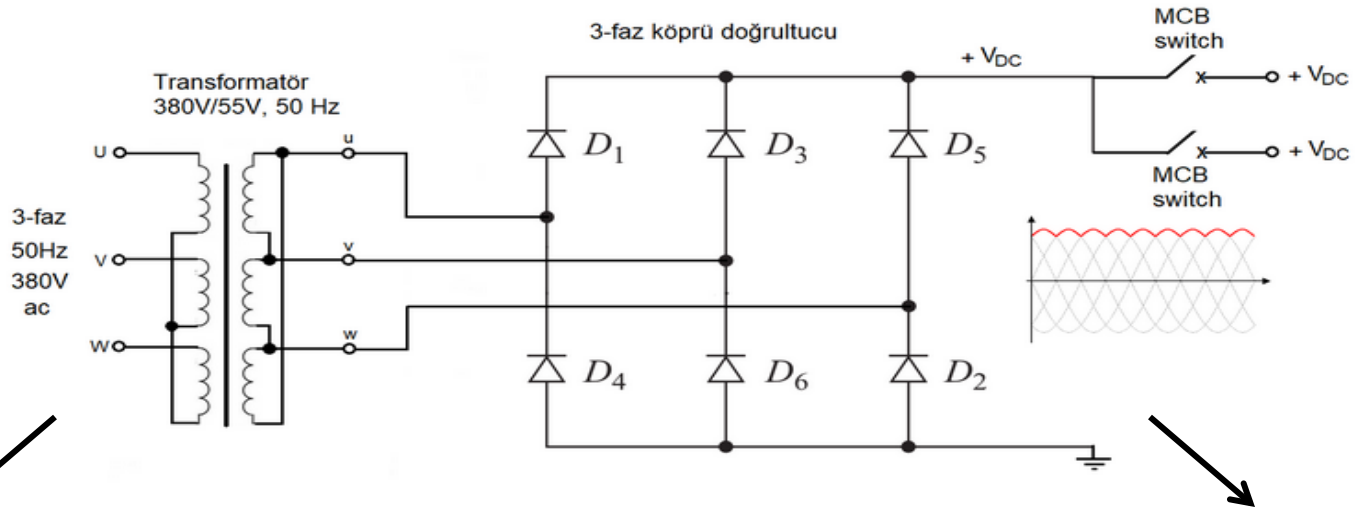
Giriş gerilimi ($V1=V2=V3=V4$)	60V
Görev oranı($D1=D2=D3=D4$)	0.5
Rezonans frekansı($fr1=fr2=fr3=fr4$)	6.67kHz
x (bobinler arası mesafe)	≈ 0
İş parçası yarıçapı (r_w)	24 mm
Bobin yarıçapı (r_c)	55 mm

Hesaplanan değerler:

Sarım sayısı($N1=N2=N3=N4$)	36 Tur
Bobin uzunluklukları($l_{c1}=l_{c2}=l_{c3}=l_{c4}$)	125 mm

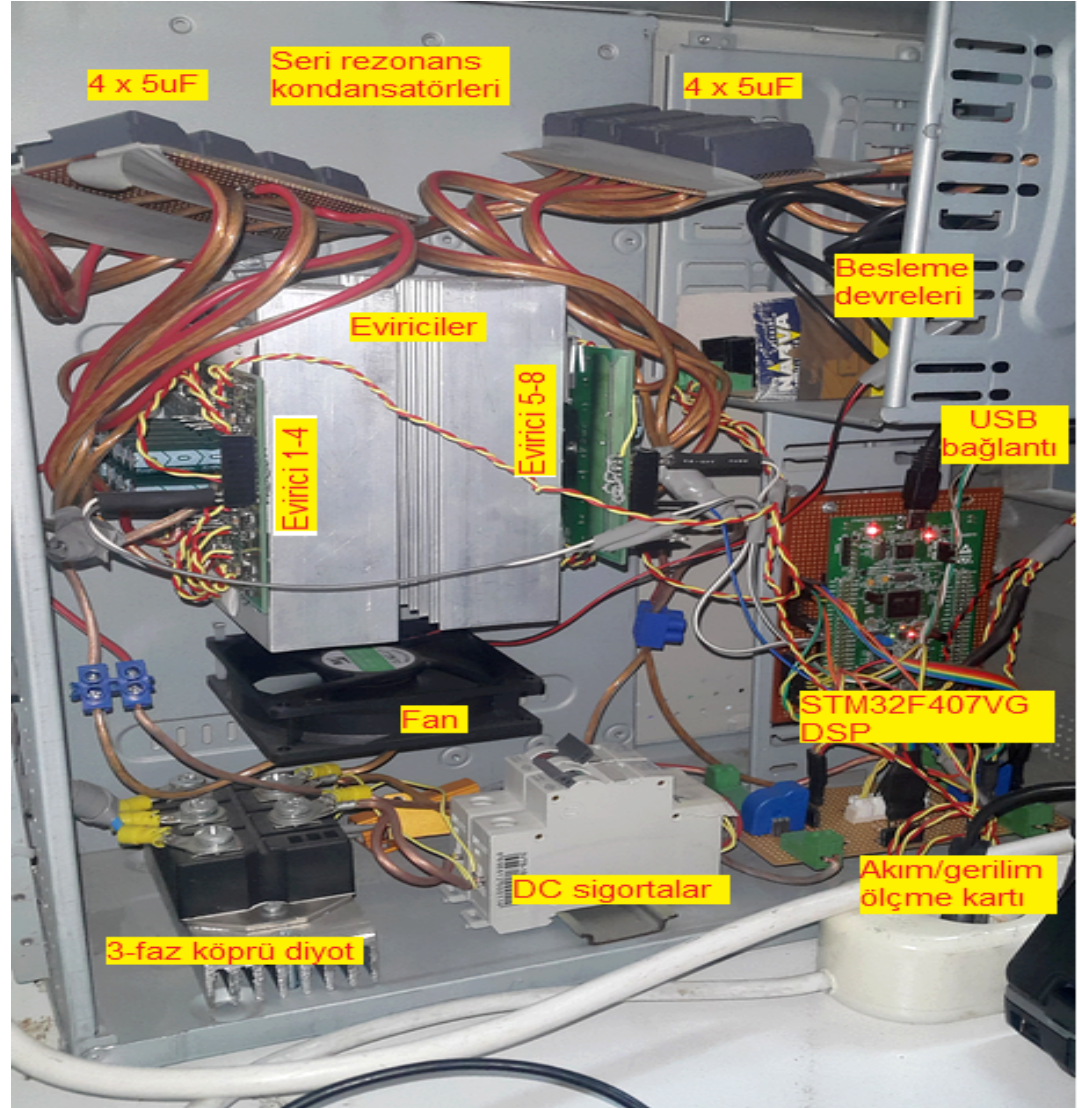
Deneysel Çalışmalar

- 3-Faz Trafo ve Doğrultucu Devresi :**



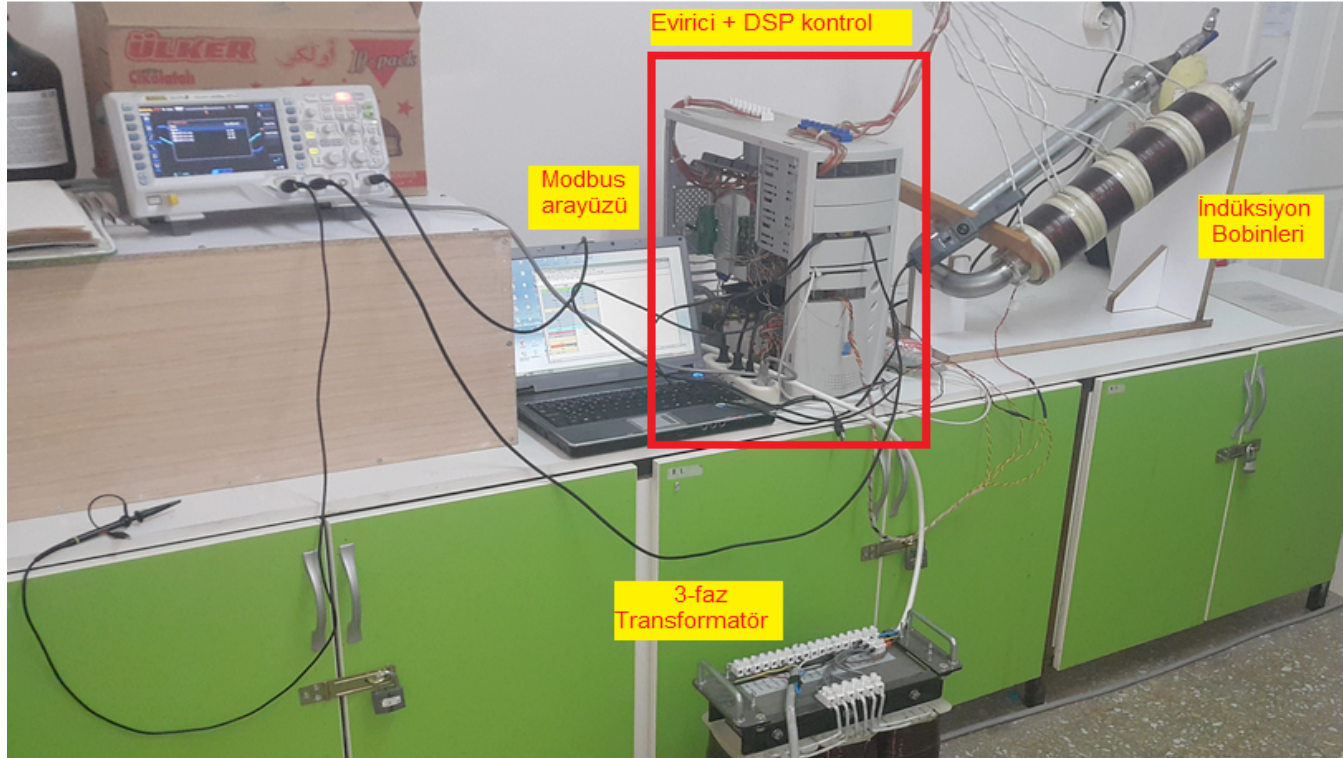
Deneysel Çalışmalar

- Şekilde görüldüğü gibi bütün güç devreleri bir bilgisayar kasasının içine yerleştirilerek kompakt ve güvenli bir prototip oluşturulmuştur.



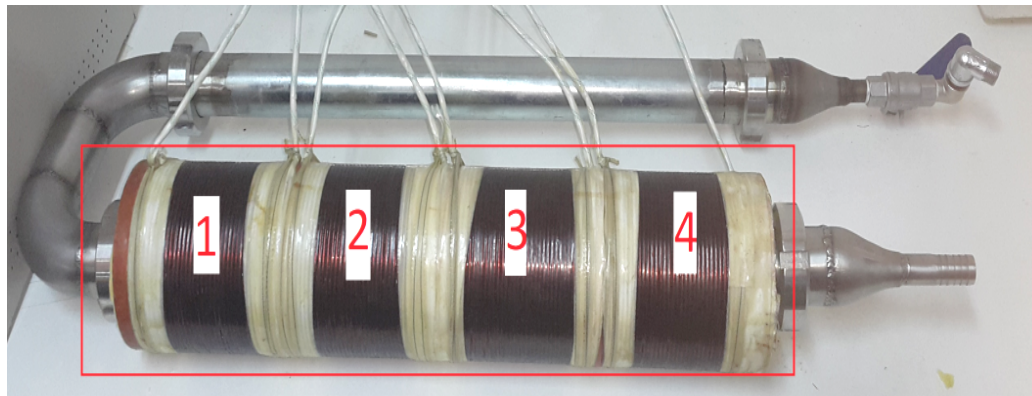
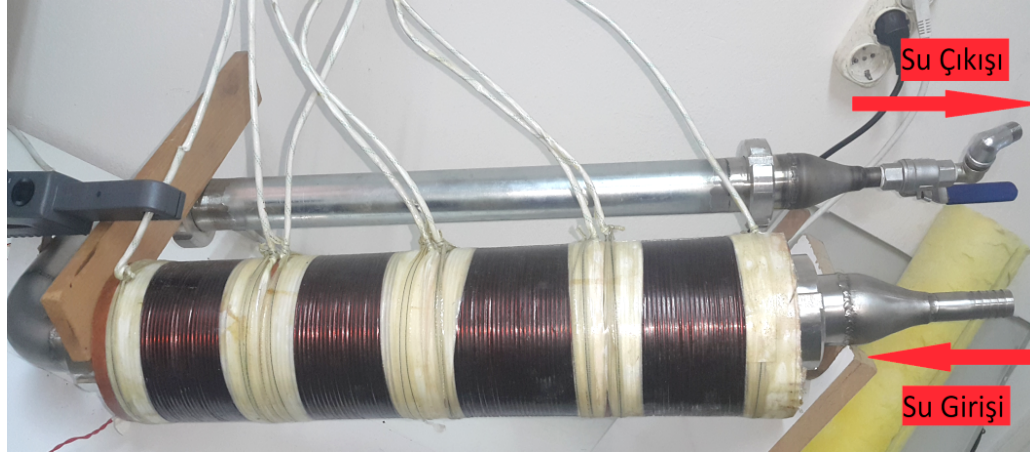
Deneysel Çalışmalar

- Deney düzeneğinin genel olarak, eviriciler ve DSP kontrolünün içinde bulunduğu güç kontrol birimi, 3 faz transformatör, indüksiyon bobinleri ve Modbus arayüzünden oluşmaktadır.



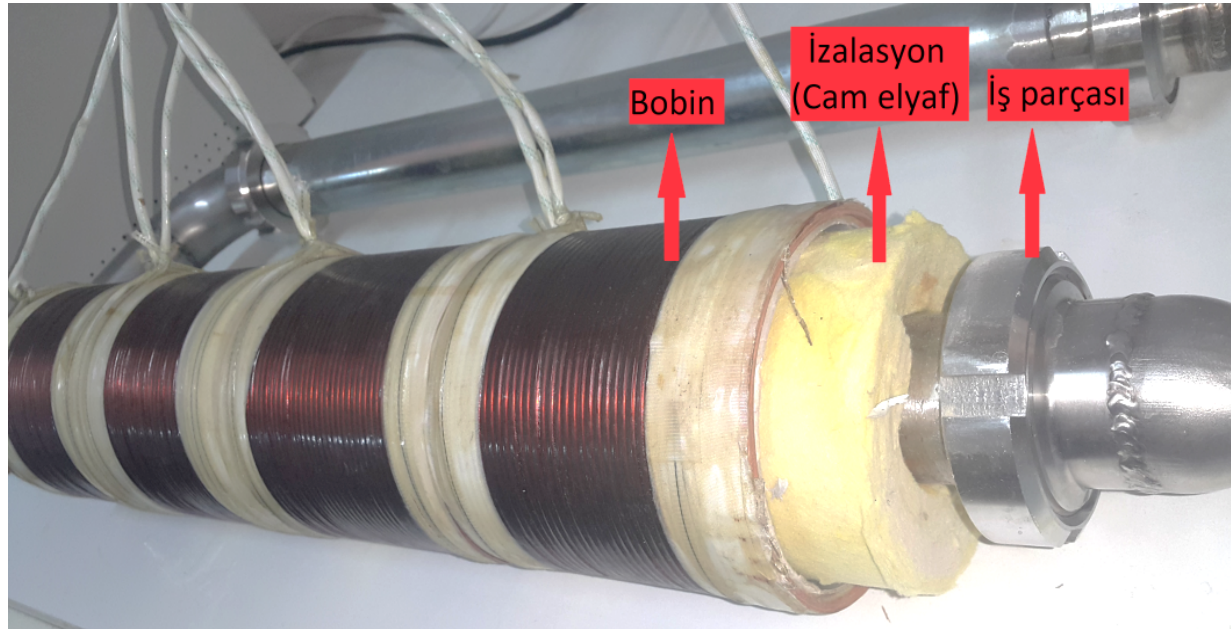
Deneysel Çalışmalar

- Dörtlü bobin ve iş parçasının genel görünüşü:



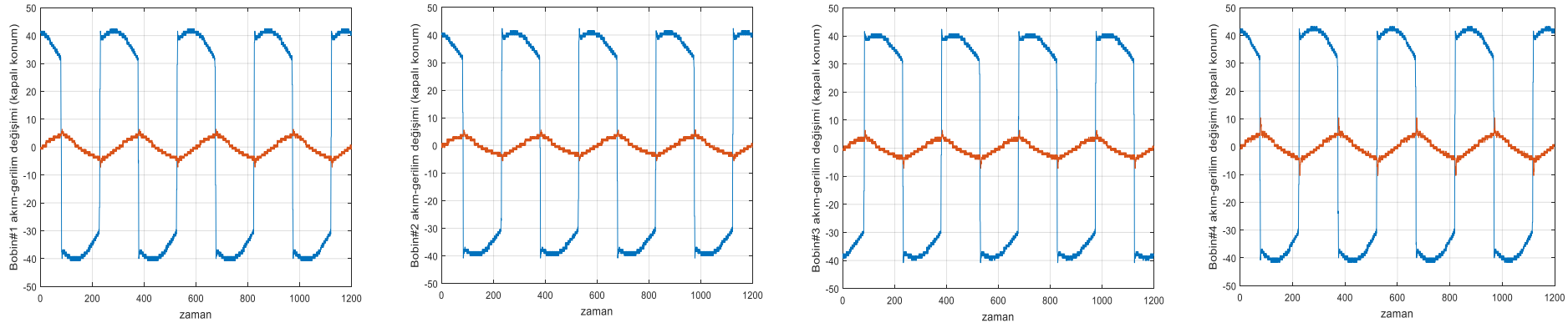
Deneysel Çalışmalar

- Bobin-iş parçası sisteminin iç yapısı:

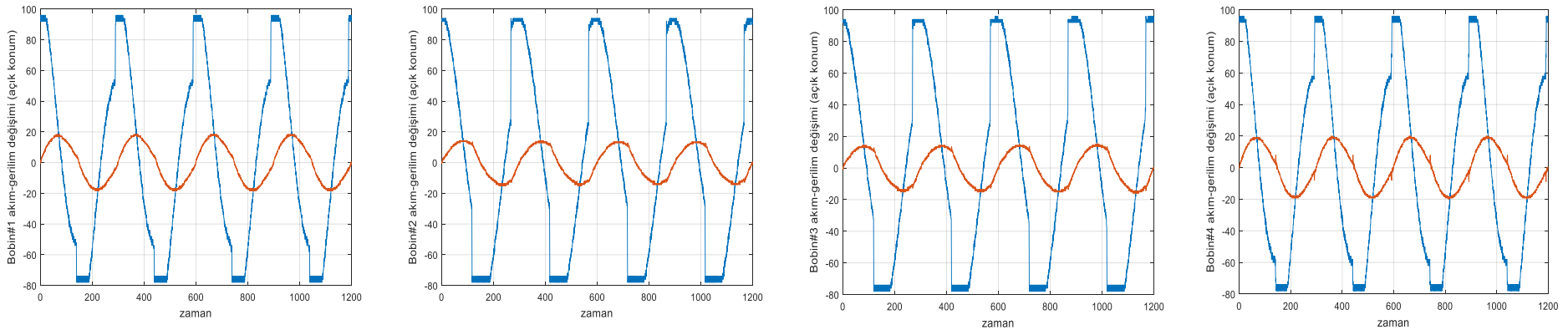


- Bobinlerin akım ve gerilim dalga şekilleri “ON” ve “OFF” durumlarındayken ölçülmüştür. Daha sonra akım ve gerilim çarpımının bir periyot boyunca ortalaması alınarak ortalama güçler elde edilmiştir.

Bobinler “OFF” durumunda iken elde edilen ölçümler



Bobinler “ON” durumunda iken elde edilen ölçümler



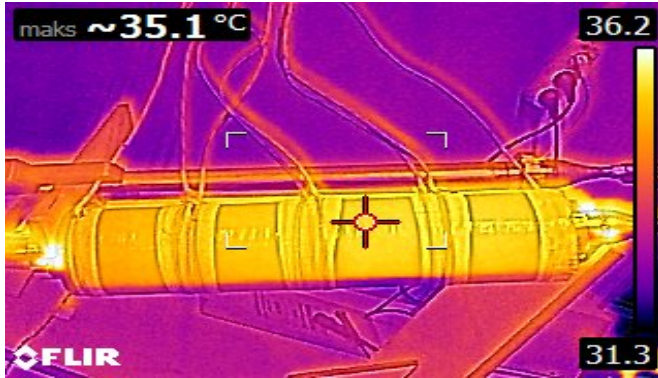
Deneyisel Çalışmalar

- Bobinlerin akım ve gerilim dalga şekilleri “ON” ve “OFF” durumlarındayken ölçülmüştür. Daha sonra akım ve gerilim çarpımının bir periyot boyunca ortalaması alınarak ortalama güçler elde edilmiştir.

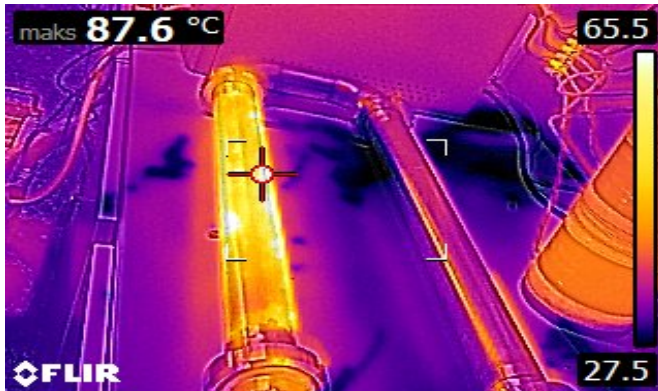
	Bobin#1		Bobin#2		Bobin#3		Bobin#4	
	I1(A)	P1(W)	I2(A)	P2(W)	I3(A)	P3(W)	I4(A)	P4(W)
Analitik	11.78	239.2	10.84	288.8	10.84	288.8	11.78	239.2
Deneyisel	12.77	269.0	10.25	271.6	10.69	291.0	13.56	301.6

Deneyisel Çalışmalar

- Termal kamera ile elde edilen ölçümler:
- Dört bobin aktif konumda iken: (Bobin üzeri 35°C)



- Dört bobin aktif konumda iken: (İş parçası üzeri 87.6°C)



Deneysel Çalışmalar

- Tek bobin aktif konumda iken: (Bobin üzeri 43.8°C)



- Tek bobin aktif konumda iken: (İş parçası üzeri 107°C)

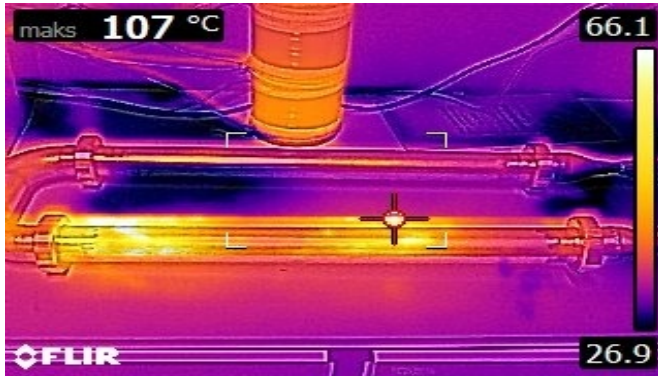


Deneysel Çalışmalar

- 1# ve 3# numaralı bobinler aktif iken: (Bobin üzeri 39.3°C)



- 1# ve 3# numaralı bobinler aktif iken: (İş parçası üzeri 107°C)



Sonuç ve Öneriler

Sonuç

- Sıvı gıdaların ısıtılması için bir indüksiyon ısıtıcı analizi ve tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Sonuç

- 1200W gücünde bir prototip üretilerek test edilmiştir.

Sonuç

- İndüksiyon sargısını 4 parçaya bölen ve her bir sargının gücünü ayrı ayrı kontrol ederek homojen bir sıcaklık dağılımı elde etmeye çalışan yeni bir kontrol yöntemi önerilmiştir.

Sonuç

- Sargılar üzerinde bağımsız güç kontrolü sağlanarak, eğer istenirse eşit olmayan ve farklı bir zarfa sahip sıcaklık dağılımlarının elde edilmesi de mümkündür.

Öneri

- Yapısal olarak farklı bobin grupları modellenerek, yani farklı sarım önerileri ile de önerilen kontrol stratejisine ek olarak mekaniksel iyileştirmeler de sisteme eklenebilir.

Öneri

- Kompakt yapıya sahip olan bobin gruplarının sayısı değiştirilerek, daha uzun veya kısa hatlar yapılarak sıvıların ısıtılması sağlanabilir.

DİNLEDİĞİNİZ İÇİN TEŞEKKÜRLER