

**KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNA ANA BİLİM DALI
DOKTORA TEZİ**

**ELEKTROMANYETİK ALAN ETKİSİNDEKİ METALLERİN ISIL
MODELLEMESİ**

Kadir GÜNDOĞAN

HAZİRAN 2011

Makine Anabilim Dalında Kadir GÜNDOĞAN tarafından hazırlanan ELEKTROMANYETİK ALAN ETKİSİNDEKİ METALLERİN ISIL MODELLEMESİ adlı Doktora Tezinin Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylım.

Prof. Dr. Ali ERİŞEN
Anabilim Dalı Başkanı

Bu tezi okuduğumu ve tezin **Doktora Tezi** olarak bütün gereklilikleri yerine getirdiğini onaylım.

Yrd. Doç. Dr. H. Murat ÜNVER
Yardımcı Danışman

Prof. Dr. Veli ÇELİK
Danışman

Jüri Üyeleri

Başkan	: Prof. Dr. Duran ALTIPARMAK	_____
Üye (Danışman)	: Prof. Dr. Veli ÇELİK	_____
Üye	: Prof. Dr. İbrahim UZUN	_____
Üye	: Prof. Dr. Şefaatdin YÜKSEL	_____
Üye	: Yrd. Doç. Dr. H. Murat ÜNVER	_____

27/06/2011

Bu tez ile Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Doktora derecesini onaylamıştır.

Prof. Dr. İhsan ULUER
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ÖZET

Elektromanyetik Alan Etkisindeki Metallerin Isıl Modellemesi

GÜNDOĞAN, KADİR

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Anabilim Dalı, Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Veli ÇELİK

Haziran 2011,121 sayfa

İndüksiyonlu ısıtma, metal şekillendirmede kaliteli ürün üretebilmek için vazgeçilmez bir yöntemdir. Özellikle ISO standartlarının sağlanabilmesi için indüksiyonlu ısıtma işlemi uygulanmalıdır. İndüksiyonla ısıtma, üstünlükleri dolayısıyla mümkün olan her alanda katı ve sıvı yakıtlı ısıtmanın yerini alacaktır. Bu da metal işleme sektöründe indüksiyonlu ısıtmanın önemini daha da artıracaktır. Ülkemizde indüksiyonlu ısıtma ve ergitme fırınları üretimi üzerine çalışan az sayıda firma bulunmaktadır. Bu firmalar büyük ölçüde ya kopya ya da deneme yanılma yöntemi ile imalatlarını sürdürmektedirler. Yapılan işleme uygun indüktör tasarımı için deneme yanılma yerine mutlaka bilgisayar ortamında modelleme yapılması gerekmektedir.

Bu tez çalışmasında, indüksiyonla ısıtma yöntemi hakkında detaylı bir literatür araştırması yapılmış; indüksiyonla ısıtmada metal malzemedeki sıcaklık dağılımını etkileyen elektromanyetik ve termal parametreler belirlenerek, ANSYS sayısal çözümleme programında bir model oluşturulmuştur. Oluşturulan simülasyon modelinde silindirik bir metalik malzemedeki bir, iki ve üç boyutlu olarak sayısal çözümleme sonuçları elde edilmiştir. Simülasyon programında indüksiyon bobini tasarımı için ihtiyaç duyulan güç ve frekans ile malzemenin manyetik geçirgenlik, öz direnç, ısı iletim katsayısı ve malzemenin indüktör

içerisindeki konumu sınır şartları olarak belirlenmiştir. Bu değişkenlere bağlı olarak malzeme üzerindeki sıcaklık ve manyetik alan dağılımları elde edilmiştir.

Sayısal çözümlene yanında sayısal çözümlenenin doğrulanabilmesi için, özel olarak imal edilmiş bir indüksiyon bobini içerisine özellikleri bilinen silindirik metal malzeme yerleştirilerek ısıtılmış ve deneysel olarak malzeme üzerindeki sıcaklık değerleri ölçülmüştür. Deneyde kullanılan malzeme boyutları ve özellikleri ile diğer parametreleri aynı seçilen ANSYS modelleme sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırmalı olarak verilmiş ve irdelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: İndüksiyon, ısı, Ansys, frekans, elektromanyetik alan

ABSTRACT

Thermal Modeling of the Materials in Electromagnetic Field

GÜNDOĞAN, KADİR

Kırıkkale University

Institute of Science, Machine Department

Doctorate Thesis

Consultant : Prof. Dr. Veli ÇELİK

June-2011, 121 pages

Shaping metals by using induction heating is indispensable to produce high quality products. Especially to catch up with the ISO standards induction heating should be applied. With the benefits it brings, induction heating will take over oil-fired heating's place in every possible field. As a result of it; the importance of induction heating will increase in metal processing sector. In our country, there are limited number of companies that produces heating and melting ovens. These companies continues to produce their products in a way using trial and error method or majorly facsimileing. Using computer aided modeling is vital while designing inductors instead of using trial and error method.

In this thesis, a comprehensive literature search about induction heating is done and an ANSYS numerical analysis which is created in a way carefully considering the electromagnetic and thermal parameters that shows up in induction heating. By using the simulation model, there are 1D, 2D and 3D numerical analysis has been done on the cylindrical metal material. On the simulation software; power and frequency required for designing the induction coil and magnetic permeability, resistivity, heat transfer coefficient and position and boundaries of the material, is determined. Depending on these variants, dispersion of the heat and the magnetic field are obtained.

Besides numerical analysis, to correct numerical analysis, a cylindrical metal material which has known features, is placed into a specially produced induction coil and heated. After that temperature values are experimentally measured. Size and features of the material which is used in the tests are compared and explored with the ANSYS modeling results that uses the same size and features.

Keywords: Induction, Heat, ANSYS, Frequency, Electromagnetic field

TEŞEKKÜR

Tezimin hazırlanması sırasında yardımını esirgemeyen, çalışmalarında destek olan, bilimsel bilgi ve tecrübelerini bana aktaran, gündelik yaşamı ve çalışma davranışlarıyla örnek aldığım tez yöneticisi hocam; Sayın Prof. Dr. Veli ÇELİK 'e, tez çalışmalarında ve bilimsel konularda daima yardımını gördüğüm, üstün özellikleri ve desteğiyle sürekli gelişmemde emeği olan hocam Sayın Prof. Dr. İbrahim UZUN'a, yoğun çalışma temposuna rağmen sürekli zaman ayırarak bilgi ve birikimleriyle desteğini esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Duran ALTIPARMAK ve Prof. Dr. Sayın Şefaatdin YÜKSEL hocama, tezimin deneysel aşamasında yardımlarını ve imkânlarını esirgemeyen Sayın Yrd. Doç. Dr. H. Murat ÜNVER 'e, büyük fedakârlıklarla bana destek olan başta babam ve annem olmak üzere tüm aile fertlerime teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	iv
İÇİNDEKİLER	v
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
1.GİRİŞ	1
1.1. Literatür Araştırması	2
1.2. Tez Çalışmasının Amaç ve Kapsamı.....	6
1.3. İndüksiyon Ocaklarını Gelişimi.....	8
1.4. Elektrikle Isıtma Sistemlerinin Türleri.....	10
1.4.1. İndüksiyonla Isıtma Sistemlerinin Üstünlükler.....	11
1.4.2. İndüksiyonla Isıtma Sistemlerinin Çalışma Prensibi.....	11
1.4.3. İndüksiyon Ocaklarının Temel Diyagramı.....	14
1.4.4. İndüksiyonla Isıtma Sistemlerinin Referans (nüfuz) Derinliği.....	15
1.4.5. Nüfuz Derinliği.....	16
2. MATERYAL VE YÖNTEM	25
2.1. İndüksiyonla Isıtma Teorisi.....	26
2.2. Metallerin Elektromanyetik Özellikleri.....	27
2.2.1. Bağıl geçirgenlik.....	27
2.2.2. Direnç, Özdirenç, Ohm Yasası.....	30
2.2.2.1. Sıcaklığın Dirence Etkisi.....	33
2.3. Elektromanyetik Etki.....	35
2.3.1. Yüzey Etkisi.....	35
2.4. İndüksiyon Bobini Tasarımı.....	37

2.5. Elektromanyetik Alanın Matematiksel Modeli.....	40
2.6. Isı İletiminin Matematiksel Modeli.....	46
2.7. Tek Boyutlu Elektromanyetik Termal Analiz.....	46
2.7.1.Problemin Tanıtılması.....	47
2.7.2. Eleman Seçimi.....	47
2.7.3. Geometrinin Meshlenmesi.....	49
2.7.4. İzlenecek Yol.....	50
2.7.5. Sonuç.....	52
2.8. İki Boyutlu Elektromanyetik Termal Analiz.....	53
2.8.1. Eleman Seçimi.....	54
2.8.2. Düğümler – Nodes.....	54
2.8.3. Malzeme Özelliklerinin Girilmesi.....	55
2.9. Üç Boyutlu Elektromanyetik Termal Analiz.....	59
2.9.1. Eleman Seçimi.....	59
2.9.1.1.Solid 236 Geometrisi.....	59
3.6.1.2.Solid 90 Geometrisi.....	60
2.9.2. Malzeme Özelliklerinin Girilmesi.....	61
2.9.3. Elemanlarına Ayırma.....	62
2.9.4.İzlenecek Yol.....	62
2.9.5. Sınır Şartları.....	63
3. ARAŞTIRMA BULGULARI VE SONUÇLAR.....	64
3.1.Farklı Akım Değerlerindeki Sayısal Çözümleme Sonuçları.....	64
3.2. Farklı Frekans Değerlerindeki Sayısal Çözümleme Sonuçları.....	74
3.3. Farklı Konumlarda Elde Edilen Sayısal Çözümleme Sonuçları.....	83
3.4. Farklı Malzeme Çaplarında Elde Edilen Sayısal Çözümleme Sonuçları.....	94
3.5. İndüksiyonla Isıtmanın Deneysel Uygulamaları.....	105
3.5.1. Deney Cihazının Tanıtımı.....	105
3.5.2. Deney Sonuçları Görüntüleri.....	108
4.SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	113
KAYNAKLAR.....	116

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

J_x : Yüzeyden x mesafesindeki akım yoğunluğu

J_s : Yüzeydeki akım yoğunluğu

W_x : Yüzeyden x mesafesindeki güç yoğunluğu

W_s : Yüzeydeki güç yoğunluğu

B = Akı yoğunluğu (indüktans) (tesla veya Wb/m²),

$B H_0 = \mu H$ =manyetik alan şiddeti (A/m)

μ_0 =Bir vakumun manyetik geçirgenliğidir. ($4\pi \times 10^{-7}$ Wb/A.m)

E = Elektrik alan şiddeti (V/m)

D = Elektriksel akış yoğunluğu (Coulomb/m²)

H = Manyetik alan şiddeti (A/m)

J = İletilen akım yoğunluğu (A/m²)

ρ^{sarj} = Elektrik şarj yoğunluğudur (Coulomb, A.s).

ϵ =Dielektrik sabiti (F/m)

μ_r =Bağıl manyetik geçirgenlik

σ =Elektriksel iletkenlik (Siemens) ($\sigma = 1/\rho$ ρ , elektriksel direnç)

μ_0 =Boşluğun bağıl geçirgenliği ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m veya Wb/(Axm))

ϵ_0 =Boşluğun dielektrik sabiti ($\epsilon_0 = 8.84 \times 10^{-12}$ F/m)

T =Sıcaklık (C°)

γ =Metalin yoğunluğu ($\frac{kg}{m^3}$) m

c =Özgül ısı ($\frac{J}{m^3 C}$)

k =Metalin ısı iletkenlik katsayısı ($\frac{W}{mC}$)

$\partial T / \partial n$ =Ele alınan noktadaki yüzeye dik yöndeki termal gradyan

k_n =Yüzeye dik termal geçirgenlik

α =Konveksiyon yüzey ısı iletim katsayısı ($\frac{W}{m^2C^4}$)

ϵ = Radyasyon ısınım katsayısı (emissivity)

$q(x, y, z, t)$ =Belirtilen yüzey kayıpları ($\frac{W}{m^2}$)

d = referans derinliği

p = özgül direnç

μ = iş parçasının manyetik geçirgenliği

f = frekans

ρ = özdirenç ($\Omega .m$)

L = akım doğrultusunda malzemenin boyu (m)

A = akımın geçtiği doğrultuya dik kesit alanı (m^2)

V = potansiyel farkı

R = elektrik direnci (Ohm)

I = akım (Amper)

ρ_0 = 0°C deki özdirenç ($\Omega .m$)

f = akımın frekansı

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>ŞEKİL</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Magnetik gerçirgenliğin sıcaklıkla değişimi.....	7
1.2. İndüksiyon ile ısıtmanın temel prensibi	12
1.3. Trafnsformatör eşdeğer devresi	12
1.4. İndüksiyonla Isıtmada Parça Üzerindeki Akım İndüklenmesi	13
1.5. İndüksiyon ocağının temel diyagramı	15
1.6. Bobindeki magnetik alan ve akım yönü	18
1.7. Yüzeyden d mesafesine akım yoğunluğu	19
1.8. Sert tabaka derinliğinin frekans ile değişimi	20
1.9. Dairesel kesitli bir parçada kenar etkisi	22
1.10. İndüksiyonla sertleştirmede kullanılan bobin türleri	22
2.1. Malzeme çevresindeki akım taşıyan bir bobinin oluşturduğu manyetik alan ile ısı oluşumu	27
2.2. İçerisinden akım geçen bir bobinin vakumda ve içerisine bir nüve yerleştirildiğinde oluşturduğu akı yoğunluğu (indüktans)	28
2.3. Sıcaklık ve manyetik alan şiddetinin orta karbonlu çeliğin bağıl geçirgenlik değerine etkisi	30
2.4. İletkenin iki noktası arasındaki potansiyel farkı	31
2.5. Omik bir iletkenle yarı iletken bir diot için akım voltaj değerleri.....	33
2.6. Özdirencin sıcaklığa göre değişimi	34
2.7. Homojen bir kesit alana sahip bir iletkendeki doğru ve alternatif(dalgalı) akımın dağılımı	35
2.8. Karbon çeliği çalışma parçasının indüksiyonla ısıtma esnasındaki yüzey(nüfuz) derinliği değişimi	36
2.9. İndüksiyonla ısıtmada sarmalın geometrik merkezinin dışına konulan malzeme.....	38
2.10. indüktansı olan-olmayan bobin tasarımları	39
2.11. Tipik indüksiyon bobinleri	39
2.12. Değişik şekilli ısıtma amaçlı çok amaçlı bobinler	40

2.13. Diverjansın büyük ve sıfır olduğu vektör çizgileri	41
2.14. Rotasyoneli büyük değere sahip vektör çizgileri	42
2.15. tek boyutlu sistem geometrisi	47
2.16. Plane 53 eleman tipi geometrisi	48
2.17. Plane 57 eleman tipi geometrisi	48
2.18. Tek boyutlu sistemin elemanlarına ayrılmış görünümü	49
2.19. Elektromanyetik-Termal analiz akış diagramı	50
2.20. Bobine atanan akım yoğunluğu	51
2.21. Demir çubuktaki yalıtım ve bobinin tesir ettiği yüzeydeki ışınlam	51
2.22. Analiz sonucu demir çubuk üzerinde oluşan sıcaklık dağılımı	52
2.23. 10 sn sonunda demir çubuğun iç ve dış kısımlarındaki sıcaklık artışının zamana bağlı değişimi	52
2.24. Plane 53 eleman tipi geometrisi	54
2.25. Plane 55 eleman tipi geometrisi	55
2.26. İki boyutlu sistemin elemanlarına ayrılmış görünümü	57
2.27. Manyetik alan dağılımı	57
2.28. Sıcaklık dağılımı	58
2.29. İç ve dış sıcaklık artış grafiği	58
2.30. Solid236 eleman tipi geometrisi	60
2.31. Solid90 eleman tipi geometrisi	60
2.32. Üç boyutlu sistemin elemanlarına ayrılmış görünümü	62
2.33. Üç boyutlu modelin sınır şartları ve yüklemeleri	63
3.1. 1000 Amperde Metal malzemede alınan sayısal çözümleme sonuçları	66
3.2. 2000 Amperde Metal malzemede alınan sayısal çözümleme sonuçları	68
3.3. 2500 Amperde Metal malzemede alınan sayısal çözümleme sonuçları	70
3.4. 3000 Amperde Metal malzemede alınan sayısal çözümleme sonuçları	72
3.5. Akım Değişimine Bağlı olarak z-ekseni Boyunca Malzemedeki Sıcaklık Değişimi.....	73
3.6. 1000 Hz. Frekansta Metal malzemedden alınan sayısal çözümleme sonuçları.....	76
3.7. 2000 Hz. Frekansta Metal malzemedden alınan sayısal çözümleme sonuçları.....	78

3.8. 3000 Hz. Frekansta Metal malzemeden alınan sayısal çözümleme sonuçları.....	80
3.9. 4000 Hz. Frekansta Metal malzemeden alınan sayısal çözümleme sonuçları.....	82
3.10. Frekans Değişimine Bağlı olarak x-ekseni Boyunca Malzemedeki Sıcaklık Değişimi	82
3.11. 1000-800 konumu için Metal malzemede alınan sayısal çözümleme sonuçları	85
3.12. 800-600 konumu için Metal malzemede alınan sayısal çözümleme sonuçları....	87
3.13. 600-400 konumu için Metal malzemede alınan sayısal çözümleme sonuçları.....	89
3.14. 400-200 konumu için Metal malzemede alınan sayısal çözümleme sonuçları....	91
3.15. 200-0 konumu için Metal malzemede alınan sayısal çözümleme sonuçları.....	93
3.16. Konum Değişimine Bağlı olarak z-ekseni Boyunca Malzemedeki Sıcaklık Değişimi.....	94
3.17. 70 mm çapındaki Metal malzemeden alınan sayısal çözümleme sonuçları	96
3.18. 65 mm çapındaki Metal malzemeden alınan sayısal çözümleme sonuçları	98
3.19. 60 mm çapındaki Metal malzemeden alınan sayısal çözümleme sonuçları	100
3.20. 55 mm çapındaki Metal malzemeden alınan sayısal çözümleme sonuçları	102
3.21. 50 mm çapındaki Metal malzemeden alınan sayısal çözümleme sonuçları	104
3.22. Geliştirilen sistemin kontrol ünitesinin görünümü.....	105
3.23. Şekil Doğrultucunun görünümü.....	106
3.24. IGBT ve bastırıcının üstten görünümü.....	106
3.25. Rezonans kondansatörünün görünümü	107
3.26. İndüksiyon fırınının imalat aşamasından bir görüntü.....	108
3.27. Deneysel ölçümlerle elde edilen, X eksenini boyunca sıcaklık değişimi grafiği..	109
3.28. İndüksiyon fırınından çıkmış bir malzeme.....	109
Şekil 3.29. 70 mm çapındaki Metal malzemede alınan sayısal çözümleme sonuçları..	111
Şekil 3.30. x- eksenini boyunca analiz sıcaklık değerleri ile deney sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması.....	112

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>ÇİZELGE</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Seçilen bazı metallerin bağıl geçirgenlik değerleri.....	29
2.2. Bazı maddelerin özdirençleri ve sıcaklık katsayıları	32
2.3. Demir malzeme için sıcaklığa bazı materyal özellikleri.....	49
2.4. Demir malzeme için sıcaklığa bazı materyal özellikleri	56
2.5. Demir malzeme için sıcaklığa bazı materyal özellikleri	61

1. GİRİŞ

İndüksiyonla ısıtma, metalik iş parçalarını belirtilen sıcaklık ve sürelerde ısıtmakta kullanılan temassız bir ısıtma yöntemidir. Denetim kolaylığı, yüksek verimliliği, madde kayıplarının son derece düşük olması tam otomatik üretime uygunluğu ve çevre kirliliği yaratmaması gibi nedenlerden dolayı indüksiyonla ısıtma, ergitme ve sertleştirme günümüzde giderek yaygın bir kullanım kazanmaktadır.

İndüksiyonla ısıtma sistemleri, düşük frekanslar ($f < 1\text{kHz}$), orta frekanslar ($1\text{kHz} < f < 100\text{kHz}$) ve yüksek frekanslar ($f > 100\text{kHz}$)'a göre sınıflandırılan ve en düşük frekanslar için, 100MW'tan başlayıp en yüksek frekanslar için, 5kW'a kadar malzemelerin ısıtılması, eritilmesi, işlenmesi ve birleştirilmesi için ucuz, verimli ve hızlı bir ısıtma metodu olarak geniş çıkış güç aralığında yaygın olarak kullanılmaktadır. Şebeke frekansı gibi düşük frekanslar, büyük çalışma parçalarının indüksiyonla eritilmesinde kullanılabilir. Orta frekans aralığı ise malzemeleri sertleştirmek, tavlama, şekillendirmek ve birleştirmek için kullanılır.

Herhangi bir iletken malzeme bir alternatif akım devresinin yanına getirildiğinde, kısmen de olsa ısınabilir. İndüksiyonla ısıtma prensibinde alternatif akımın geçeceği bobin ısıtılacak parçanın etrafını sarmakta, fakat parçaya temas etmemektedir. Bobin içinden geçen alternatif akımın yarattığı manyetik alan içindeki veya yakınındaki metal parçalardan devresini tamamlamaktadır. Akımın yön ve değerindeki değişiklik, manyetik alanda da aynı değişikliği yaratır. Manyetik alandaki değişiklik, parça içinde bir gerilim doğurur. Bu gerilim, parça içinden büyük değerlerde fuko akımı dolaştırır. Parça direncinden geçen bu akım parça içinde ısı yaratır. Isı indüksiyon akımı meydana getirdiğinden, bu işleme indüksiyonla ısıtma denir.

1.1. Literatür Araştırması

Tez konusu olan “İndüksiyonla Isıtılan Metallerin Isıl Modellemesinin İndüktör Tasarımında Kullanımının Araştırılması” ile ilgili diğer çalışmalarla ait özet bilgiler aşağıda verilmiştir.

B. Drobrenko ve arkadaşları [1] çalışmalarında, elektrik iletkenliği yüksek metallerin indüksiyonla yüksek sıcaklıklara ısıtılmalarının matematiksel simülasyonunu yapmışlardır. İçi dolu silindir paslanmaz çeliğin ısıl modellemesini gerçekleştirmiş ve nümerik sonuçların ışığında sıcaklık artışının malzemenin elektrik iletkenliği ve manyetik karakteristiklerine bağlı bulunduğunu belirlenmiştir. Paslanmaz çelik için aldığı değerleri hem elektrik iletkenliği hem de manyetik karakteristikleriyle karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Statik olmayan matematiksel model; dış akımların üretmesi önerilen elektromanyetik alanların konu edildiği polarize ve manyetize edilebilen aksi simetrik katılar ve ayrıca elektromanyetik ve termal süreçler ile birleştirmişlerdir. Sürecin parametreleri, ısı kaynağı ve materyal karakteristiklerinin sıcaklığa bağlılığı ile bağdaştırılmıştır. Çalışmalarında, sonlu çelik silindirin indüksiyon ısıtma sürecini ele alarak sıcaklık artışıyla malzemelerin manyetik geçirgenliklerinin değişimini incelemişlerdir.

Jiin-Yuh Jang ve Yu-Wei Chiu [2] yaptıkları çalışmada içi boş silindir çeliğin elektromanyetik indüksiyonda ısıtılmasını adım adım deneysel olarak incelemiş ve nümerik analizleriyle karşılaştırmışlardır. Aynı malzemenin üç farklı boy, çap ve et kalınlığındaki formlarını alarak çalışmalarını yapmışlardır.

H. Shen, Z.Q. Yao, Y.J. Shi ve J. Hu [3] çalışmalarında, Maxwell denklemlerini kullanarak yüksek frekanslı indüksiyonla ısıtmada elektromanyetik ve sıcaklık dağılımlarının matematiksel modellemesini yapmışlardır. Maxwell eşitliğine göre sıcaklık alanının geliştirilmesi için yüksek frekans indüksiyon ısıtma durumu için matematiksel model oluşturmuş ve çözülmesi gereken; elektromanyetik ve sıcaklık

alanlarını birleştirerek bir eşitlik elde etmişlerdir. Bu modellemeyi FEMLAB programında simüle etmişlerdir ve program verileriyle deneysel sonuçları karşılaştırmışlardır. Y¼ksek frekanstaki ısıtma parametrelerinin, plaka-bobin mesafesinin etkilerini bu model aracılığıyla irdelemişlerdir.

Diğer bir çalışmada I. Magnabosco ve arkadaşları [4], ind¼ksiyonla ısıtılan ISO C45 elik çubuğun ısı analizini n¼merik ve deneysel olarak karşılaştırmıştır. Normalize yapılan ve tavlanmış iki ¼rnek malzeme ele alarak, malzemelerin metalurjik ve termal analizlerini Sysweld-2000 sayısal modelleme programıyla analiz etmişler ve deneysel sonuçlarla ind¼ksiyonla ısıtma s¼recinde malzemenin termo-metalurjik modelini oluşturmuşlardır.

Na Xu ve Bernie Yaping Zong [5] al¼minyum malzemenin gerilim analizini ve ısı modellemesini ANSYS programında yapmışlardır. Y¼ksek frekanslı elektromanyetik alan altındaki s¼rekli d¼k¼m kalıbının yumuşak temastaki ilk katılaşma kabuğunun ısı transferi ve deformasyonunu analiz etmişlerdir.

Başka bir çalışmada Jianhua Zhang ve ¼ arkadaşı [6] AISI1020 eliğini sertleştirme işlemi esnasındaki ısı davranışını ANSYS programında modellemiştir.

NA Xion-Zhao, XUE Min, ZHANG Xing-zhong ve GAN Yong [7] çalışmalarında, y¼ksek frekanslı elektromanyetik alan altında s¼rekli d¼k¼m esnasında çeliğin sıcaklık dağılımını ve yapısal deformasyonunu incelemişlerdir. Ayrıca malzemenin bu elektromanyetik alan içerisindeki ısı davranışının sayısal modellemesini gerçekleştirmişlerdir

H. Murat Ünver [8] doktora tez çalışmasında indüksiyonlu çelik tav fırınlarının güç ünitelerinin PLC ile denetimini araştırmıştır. İndüksiyon fırınları ile iletişim düzeyinin artması sayesinde, basit parametre girişleriyle birbirinden farklı şekil ve ısıtma özelliklerine sahip malzemeler kolaylıkla tavlatabilmesinin mümkün olduğunu belirlemiştir.

Y. Favennec ve arkadaşları [19] yaptıkları çalışmada indüksiyonla ısıtma işleminde kontrol sistemlerini sonlu eleman yöntemiyle analiz ederek maksimum verim elde etmek için optimum çalışma derinliğini belirlemek amacıyla matematiksel modelleme yapmışlardır.

Jaroslav Mackerle [10] çalışmasında, 1976-2001 yılları arasındaki süreçte, ısı davranışı modellemek için kullanılmış sonlu eleman yöntemi ve bilgisayar simülasyonlarını kaynakça olarak derlemiştir.

Mehmet Cengiz Kayacan ve Oğuz Çolak [11] ortak çalışmalarında, indüksiyonla tavlama işlemindeki parametrelerin seçiminde bulanık mantık yöntemini uygulamışlardır.

Caner Şimşir ve arkadaşı [12] çalışmalarında, çelik tavlama esnasındaki ısı dağılımını FEM bilgisayar programında modellemiş ve simüle etmişlerdir.

Bir diğer çalışmada E. Paffumi ve arkadaşları [13], 316L modeli paslanmaz çelik boru malzemenin ısı aşınmasını bilgisayar programında modellemişlerdir. Deneysel sonuçlarla karşılaştırmasını yapmışlardır.

Y. Safa, M. Flueck ve J. Rappaz [14] çalışmalarında, alüminyum malzemenin eritilmesi esnasında taneciklerin manyetik alan içerisindeki hidrodinamik davranışlarını incelemiş ve ilk erime başladığı anda malzemenin katı ve sıvı fazları arasındaki ısı dağılımının sayısal modellemesini yapmışlardır.

Fatma Serap Aykan ve Zafer Dursunkaya [15] çalışmalarında, iki boyutlu dış yüzeylerde ısı aşınabilen metallerin ısı tepkilerini analiz eden bir yöntem geliştirmişlerdir. Yöntem, ilk olarak bir boyutlu kartezyen geometriler için geliştirilmiş ve literatürdeki deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Geliştirilen yöntem iki boyutlu kartezyen geometrilere uygulanmış ve değişen kalınlığa sahip geometrilerin analiz edilebilmesi için matematiksel dönüşümlerle fiziksel alan boyutsuz kare çözüm alanına çevrilmiştir. İki boyutlu kartezyen modelleme sonlu uzunluktaki silindirik geometrilere uyarlanmış, değişken çaplı silindirik geometrilerin çözülebilmesi için problem boyutsuz çözüm alanına dönüştürmüşler ve tüm problemlerde malzeme ilk durumda sabit sıcaklıkta alınmış ve sınır koşulu olarak radyasyon, sabit ısı akısı ve yalıtımlı yüzey sınır koşullarını uygulamışlardır.

Y. S. Kwon ve arkadaşları [16], elektronik kontrol ünitelerini iyileştirmek ve geliştirmek amaçlı yaptıkları çalışmalarında, yatay sarılı bobin üzerinde çelik ve farklı özelliklerde iki alüminyum kap ısıtmışlardır. Bu çalışma ile alüminyum gibi manyetik olmayan metallerde de hassas frekans ve güç kontrolü yapılabileceği görülmüştür.

Bir başka çalışmada S. Okudaira ve arkadaşları [17], indüksiyonla dişlilerin düzensiz ısıtılmasında arzu edilen sıcaklıkta hem yüksek frekansta hem de daha düşük frekansta çalıştırılmasını gerçekleştirmişlerdir. Isıtma işinin derinliğinin sadece çıkış frekansına değil sağlanan güce de bağlı olduğu ilkesini vurgulamışlardır.

1.2. Tez Çalışmasının Amaç ve Kapsamı

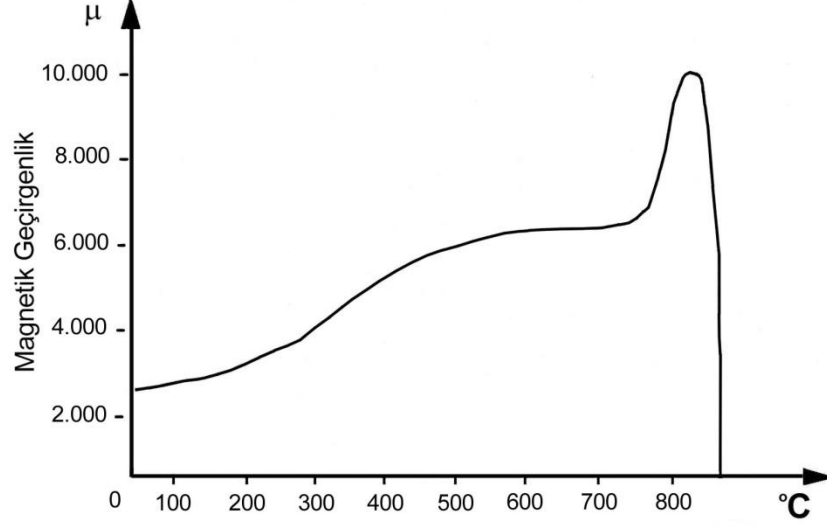
İndüksiyonla ısıtma, ilk tezgâhların üretiminin başladığı günden bu yana geçen yaklaşık 60 yıl içinde kullanım kolaylığı ve işlem gören malzeme kalitesinin çok yüksek olması nedeniyle yoğun ilgi görmektedir. Fakat sektördeki uygulamalar ve literatürdeki çalışmalar incelendiğinde indüksiyon fırınları, yüksek kalitede ürün verdiği için metal sektöründe yaygın bir kullanıma sahip olmasına rağmen bu güne kadar üretilen fırınlar özel tasarlanmış, veri iletişim seviyesi düşük, kullanım esneklikleri bulunmayan yapıdadırlar.

Bu tez çalışmasında sırasıyla aşağıdaki kazanımlar gerçekleştirilecektir.

- Öncelikle ANSYS programında gerçekleştirilen modellemelerin gerçek hayatta kabul edilebilir bir karşılığının olup olmadığı elde edilecektir.
- Daha önce tasarımı gerçekleştirilen indüksiyonlu çelik tav fırını geliştirilerek sanayide kullanılabilir hale getirilmesi,
- İndüksiyon işlemiyle ısıl işleme tabi tutulan farklı malzemelerin içyapılarındaki değişimlerin değerlendirilmesi sağlanacaktır.
- Çalışma manyetik alan-malzeme özellikleri-sıcaklık dağılımı ve sistem kontrolü konularında disiplinler arası bir çalışma özelliği taşımaktadır.
- Malzeme üzerinde ısıl hareketlerin incelenebilmesi özel formlara sahip malzemelere ısıl işlem uygulanabilmesine imkân sağlayacaktır.
- Farklı metalik malzemelere istenilen özelliklerin kazandırılması daha hassas olarak sağlanabilecektir.

Nüfuz derinliği sıcaklığa, malzeme yapısına, malzemeyi oluşturan bileşenlere ve malzemeye uygulanan manyetik alana göre değişiklikler gösterdiğinden bu alanda büyüklük sıralamasını tanımlamak oldukça güçtür. Demir alaşımları hariç diğer tüm metallerin manyetik geçirgenliği bire eşit veya çok yakındır.

Bütün demirli ferromanyetik alaşımlar, yüksek ısıya (saf demir için 700°C) maruz kaldıklarında manyetik geçirgenliği aniden bire ($1'e$) düşer. Bu durum aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



Şekil 1.1. Manyetik geçirgenliğin sıcaklıkla değişimi[4]

Eldeki bu veriler ışığında orta frekanstaki bir indüksiyon fırınında değişik malzemelerdeki ve değişik geometrilerdeki metallerin ısı analizlerinin sayısal modellemeleri yapılarak ANSYS programında ısı modellemeleri yapılacaktır. Daha önce yayınlanan araştırmalara ek olarak, simülasyon programı ile yapılan inceleme ile ısıtma için model geliştirilecek elde edilen veriler üretilen fırın üzerinde denenerek ihtiyaç duyulan güç, frekans ve bobin tasarımı arasında ilişkinin durumu incelenecektir.

1.3. İndüksiyon Ocaklarının Gelişimi

İndüksiyonla ısıtmanın dayandığı temel prensip, teorik düzeyde Faraday (1791 – 1867) zamanında biliniyordu. Ancak bu devrede indüksiyonla ısıtma için yeterli güç kaynaklarının bulunmamış olması nedeniyle teorik prensiplerin uygulamaya geçmesi mümkün olmadı.

İndüksiyon ocakları ile ilgili ilk patent 1897’de İngiltere’de Ferranti tarafından alındı. Bulunan bu ocak tipine, metal bobinin dışına konduğu için “ halka” veya “nüveli” ocak adı verildi. Ticari ilk uygulama ise 1900 yılında İsveç’te Gysimge’de Kjellin tarafından kurulan 80 kg kapasite ve 73 kW güçlü çelik ergitme ocağı oldu.

Daha sonraları 1906’da Essen’de (Almanya) Röchling Roden hauser ocağı geliştirdi. Bu ocağın en önemli özelliği 750 kW’lık bir güç ve 5 Hz frekans ile çalıştırılmasıydı. Güç faktörünün daha iyi olacağı umularak bu ocakta frekans çok düşük tutulmuştur.

İndüksiyon ocaklarının bu devirdeki en büyük problemi özel, pahalı ve bakım güçlükleri fazla olan jeneratörlere ihtiyaç gösteren frekans düşüklüğü olmasıdır. Nitekim 1900-1910 yılları arasında metalin karbon almasını engelleyen cüruf örtüsü altında çalıştırılan ilk Heroult tipi ocaklarının piyasaya çıkarılması ile bu indüksiyon ocakları bütün özelliklerini kaybederek terk edilmiştir.

1916’ da Ajax Metel Company’den Dr.G.H.Clamer, Leeds and Northrup’tan elektrik enerjisi ile ısı enerjisi elde edilmesi konusunda temel prensiplerle herhangi bir yanlışlığın bulunup, bulunmadığının araştırılmasını istedi. Dr. Northrup bu konudaki çalışmaları sonunda ümit verici olarak görünen tek yöntemin yüksek frekanslı indüklenmiş akımlarla ısıtma yöntemi olduğunu belirtiyordu.

O dönemde Őebeke frekansında daha yűksek bir frekans ile çalıŐmada karŐılaŐılan en bűyűk sorun kompanzasyon kondansatűrlerinin yarattıđı sorunlardır. General Electric Company'nin kâđıt kondansatűr űretimi ile bu sorun da űzűmlenmiŐ ve Őebeke frekansının űzerinde çalıŐma imkânları artmıŐtır.

İlk orta frekans ergitme ocağı 1927 yılında Sheffield' da Electric Furnace Company (EFCO) tarafından gerçeklenmiŐ, bu tarihten sonra paslanmaz elik űretimi ve űzel alaŐım hazırlanmasında kullanımı yaygınlaŐmaya baŐlamıŐtır.

Ergitme ocaklarında karıŐtırma űzelliđi dolayısıyla dűzgűn bir metal ve ısı dađılımı, alaŐım kayıplarının azlıđı, sıcaklık ve bileŐim kontrolűnűn çok iyi olması, iŐlem gűrecek malzeme űzelliklerinin sınırlı olmaması, istenildiđi zaman kısa sűre içerisinde sođuktan iŐletime alınabilmesi hava kirliliđi probleminin olmayıŐı indűksiyon ergitme ocakları kullanımının yaygınlaŐmasında temel faktűrlerdir.

İndűksiyon ocaklarının elik ergitiminde en hızlı geliŐme gűsterdiđi konu paslanmaz elik űretimi ve elik dűkűmhanelerindeki uygulamaları oldu. Karbon kayıp veya kazanımının bulunmaması, hurdayı seri olarak ergitebilmesi, krom ve diđer alaŐım elementlerindeki oksitlenme, kayıplarının dűŐűklűđű nedeni ile bu ocaklar paslanmaz çeliklerin űretiminde kolaylıkla uygulanabilmiŐtir.

İkinci dűnya savaŐından sonra otomotiv endűstrisinin geliŐimi elektromanyetik indűksiyon ile ısıl iŐlemin űnemini arttırmıŐ, daha deđiŐik uygulamaları için çalıŐmalar hızlandırılmıŐ ve yűzey sertleŐtirme iŐlemleri için radyo frekansında ısıtıcılar geliŐtirilmiŐtir. Dalma etkisi dolayısıyla kontrol edilebilir nűfuz derinliđi, kayıpların diđer sistemlere gűre az oluŐu, bantta seri űretim için uygulama kolaylıkları, yűzey sertleŐtirme iŐlemlerinde elektromanyetik indűksiyon ile ısıtma yűnteminin kullanımını yaygınlaŐtırmıŐtır.

İndüksiyon ısıtıcılarının ilk kullanılmaya başlandığı dönemlerde ilk yatırım maliyetlerinin diğer sistemlere göre yüksek olduğu bir gerçektir. Özellikle orta frekans ısıtıcılar (motor-alternatör grupları) hem ilk yatırım, hem de periyodik bakım giderleri açısından pahalı bir sistem oluşturmaktadır. 1966 yılından itibaren yarı iletken güç sistemlerinin geliştirilmesi ile indüksiyon ısıtmada yeni bir devir başladı. Bu devrede son zamanlarda kaydedilen en önemli gelişme değişen frekanslı (VSP) indüksiyon ocakları olmuştur. Yarı iletken teknolojinin gelişimi ile bu ekonomi sorunu önemini kaybetmiş ve bu alandaki çalışmaları günümüzde oldukça yaygınlaşmasını sağlamıştır.[18]

1.4. Elektrikle Isıtma Sistemlerinin Türleri

Elektrik enerjisinin diğer enerji türlerine kolay çevrilmesi, üretimin kolay olması özellikle de tüketiminde diğer fosil kaynaklı yakıtlar gibi çevreye zarar vermemesi, kontrollü bir düzen olması ve çok çeşitli kaynaklardan elde edilebilmesi üstünlükleridir. Elektrikle ısıtma sistemleri çeşitli şekillerde yapılmaktadır. Bunlar:

Rezistans ile Isıtma

İletim ile Isıtma

Enfraruj Radyasyon ile Isıtma

İndüksiyon ile Isıtma

Dielektrik Histerizis ile Isıtma

Plazma ile Isıtma

Elektrik Arkı ile Isıtma

Elektron Demeti ile Isıtma

Lazer ile Isıtma

Bu sistemlerden en yaygın olarak kullanılan rezistans ile ısıtmadır.[19]

1.4.1. İndüksiyonla Isıtma Sistemlerinin Üstünlükleri

İndüksiyonla ısıtmanın aşağıdaki üstünlüklerinden dolayı bu yöntem, metal endüstrisinde çok geniş kullanım alanı bulmuştur.

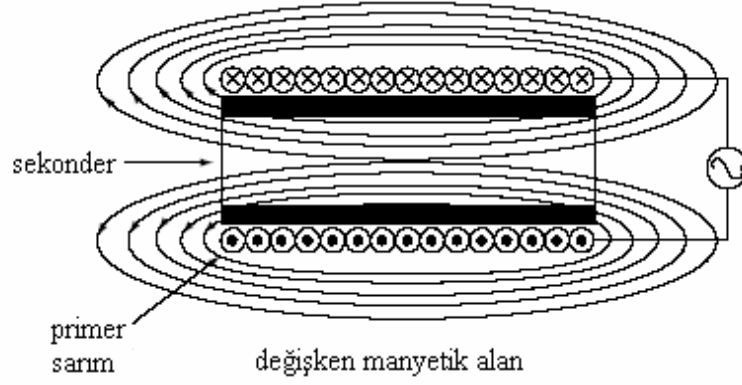
- Metallerin çabuk ısıtılmasından dolayı oksidasyon ve kabuklaşma olmaz.
- Bütün parça yerine parçanın sınırlı bir yeri veya yüzeyi ısıtılabilir.
- Fırın sıcaklığının devamlı kontrolüne lüzum kalmadan yalnız istendiği zaman ısıtma gücünü kullanabilir.
- Alaşımları eritme esnasında karıştırma kendi kendine olur.
- Parça yakıt gazları ile kirletilmez.
- İşçiler için akaryakıt veya gaz alevli fırınlardan daha elverişli bir çalışma ortamı bulunur.

İndüksiyonla ısıtma; eritme, yumuşatma, sertleştirme, sarı kaynağı ve metallerin kaynağı problemlerini kolayca halleder. Ancak bu iş için gerekli bobin teşkili, frekans seçimi ve güç tayini doğru bir şekilde yapılmalıdır. [18]

1.4.2. İndüksiyonla Isıtma Sistemlerinin Çalışma Prensibi

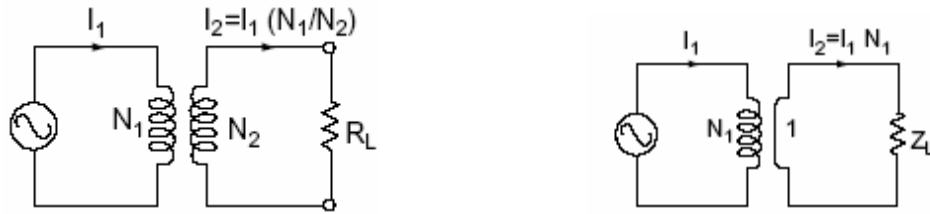
İndüksiyonla ısıtmanın temel prensibi elektromanyetik enerjinin ısı enerjisi haline dönüştürülmesine dayanır. Şekil 1.2’de görüldüğü gibi bir bobine alternatif akım uygulandığında Amper Yasasına göre bobinin etrafında değişken bir manyetik alan oluşur.

Bu manyetik alan, Faraday Kanuna göre ısıtılacak parçaya bir gerilim indükler. İndüklenen bu gerilim, Lenz Kanuna göre manyetik alan içinde kalan indüksiyon bobini içine yerleştirilmiş olan çalışma parçasında eddy akımlarının geçmesine sebep olur.



Şekil 1.2 İndüksiyon ile ısıtmanın temel prensibi

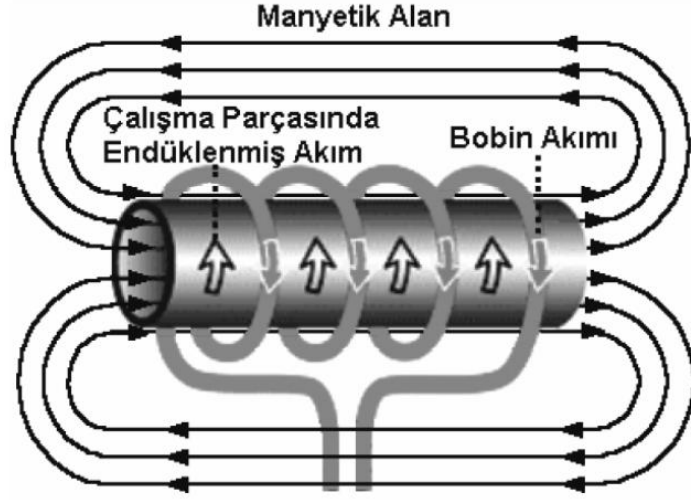
Asıl olarak indüksiyonla ısıtmanın temel prensibi transformatöre benzemektedir. Sekonderi tek sarımdan oluşmuş ideal bir transformatör ele alınır.(Şekil 1.3) Eğer primer sarım sayısının, sekonder sarım sayısına oranı n ve primer akımı da I_p , sekonder akımı $I_s = n \cdot I_p$ olacaktır. Primer akımına göre hayli yüksek olan bu akım, iş parçasını çevreleyen indüksiyon bobininden geçerken güçlü bir manyetik akım oluşturur. Bu akım da iş parçasına bir gerilim indükleyip akım oluşturur.



a) Standart bir transformatörün eşdeğer devresi

b) Sekonderi tek sarımdan oluşmuş transformatör eşdeğer devresi

Şekil 1.3 Transformatör eşdeğer devresi



Şekil 1.4 İndüksiyonla Isıtmada Parça Üzerinde Akım İndüklenmesi

İndüksiyonla ısıtmada, ısıtılacak parçanın her tarafı eşit miktarda ısı almamaktadır. Yalnız ısıtılacak parça ısıyı çok iyi ileten cinsten ise, parçanın her tarafı birbirine yakın miktarda ısıtılabilir. İndüksiyon ısıtma parçanın yüzeyinde çok yüksek, iç kısımlarında az, merkezinde ise daha az bir ısı meydana getirmektedir. Bu ısınma akım kaynağının frekansına ve nüfuz derinliğine bağlı olarak değişmektedir.

Isının derinlere girmesine ihtiyaç duyulan büyük, kalın parçalar için düşük frekans (5 Khz – 30 Khz); ısının çok derinlere girmesine ihtiyaç duyulmayan küçük parçaların ergitilmesinde ve yüzey sertleştirme işlemlerinde ise daha yüksek frekans (100 Khz – 400 Khz) kullanılmalıdır. Mikroskobik parçaların ısıtılmasında ise frekans değeri 60 Mhz'e kadar çıkabilmektedir.

İndüksiyonla ısıtmada frekans seçimi ve güç tayini için birçok formül kullanılır. Fakat bu değerlerin tayininde tecrübe ve testler esas teşkil eder.

İndüksiyonla ısıtmanın özelliklerini belli başlı şu noktalarda özetleyebiliriz:

Belirli bir materyal için ısı derinliği, frekansın karekökü ile ters orantılıdır. Şu halde frekansın çoğalması, parça üzerinde daha ince bir tabakanın ısıtılmasını sağlamış olur.

Belirli akı yoğunluğu, frekans ve direnç için birim hacme giren ısı, manyetik geçirgenliğin karekökü ile orantılıdır. Bu da demek oluyor ki manyetik malzemeler, manyetik olmayanlardan daha çabuk ısınırlar.

Belirli akı yoğunluğu ve ısı derinliği için birim hacme giren sıcaklık, dirençle değişir. Yani yüksek dirençli malzemeler daha çabuk ısınır.

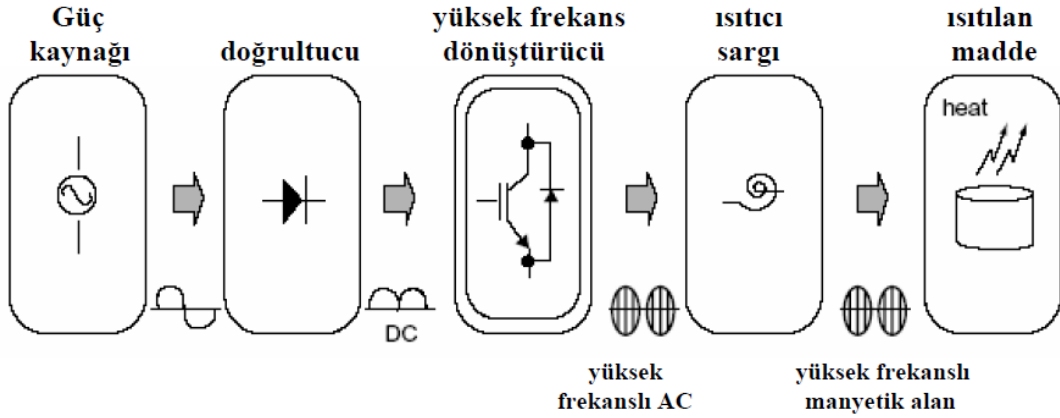
Belirli bir malzeme ve frekans için birim hacme giren sıcaklık akı yoğunluğunun karesi ile orantılıdır. Yani verilen sıcaklık, sarım sayıları ile veya bobin akımı ile veya her ikisiyle birden kontrol edilir.

Yüksek frekansla çalışmanın diğer bir avantajı da, bobinle ısıtılacak parça arasında daha büyük hava aralığı bırakılabilmesidir. Yüksek frekansla bobine daha büyük gerilim uygulanır. Bu yüzden emniyet bakımından bobinle ısıtılacak parça arasında yeterli bir hava aralığı bırakmak gerekir. Yüksek frekansla çalışmada bu durum sakıncasız olarak gerçekteşirilmiş olur. [18,20]

1.4.3. İndüksiyon Ocaklarının Temel Diyagramı

İndüksiyon ocağının basitleştirilmiş diyagramı Şekil 1.5'deki gibidir. İlk olarak güç kaynağından alınan alternatif akım, diyot modülü ile doğru akıma dönüştürülür. Elde edilen doğru akım yüksek frekanslı tetikleme yapan anahtarlama elemanları (IGBT, MOSFET, SCR vb.) kullanılarak istenilen frekansta alternatif akıma dönüştürülür ve ısıtıcı sargıya uygulanır. Bunun sonucunda Amper Yasasına uygun olarak ısıtıcı

bobinin çevresinde yüksek frekanslı bir manyetik alan oluşur. Eğer oluşan manyetik alanın içerisine iletken bir madde konulursa, Faraday kanuna göre iletken üzerinde bir gerilim indüklenir ve Lenz kanuna göre bir eddy akımı oluşur. Bu eddy akımı da iletken yüzeyinde ısı enerjisi olarak açığa çıkar. [19]



Şekil 1.5 İndüksiyon ocağının temel diyagramı

1.4.4. İndüksiyonla Isıtma Sistemlerinin Nüfuz Derinliği

Yüzeyle alevle ısıtma sırasında bazı sınırlamalar vardır. Yüzeyle uygulanan ısı, derinlere nüfuz edene kadar, yüzeyle bir erime oluşabilir. Isıyı parçanın yüzeyle bir alevle uygulamak yerine, elektriksel indüksiyon ile parçanın içinde üretmek, bu tür sınırlamaları ortadan kaldıracaktır.

İndüksiyon sertleştirme işlemi, manyetik alan uygulanması ile elektriksel olarak iletken malzemeleri ısıtma yöntemidir. Prensip olarak alev ile yüzeyle sertleştirme işleminden bir farkı yoktur ve metalografik inceleme sonucunda iç yapıda bir farklılık görülmez.

İndüksiyon ısıtma sistemi; bir indüksiyon bobini, bir alternatif akım güç kaynağı ve iş parçasından meydana gelir. Güç kaynağı ile bağlantılı olan bobin, istenilen ısıtma yönüne bağlı olarak farklı şekillerde tasarlanır ve üzerindeki akımdan dolayı

manyetik alan meydana gelir. Manyetik alanın büyüklüğü akıma ve bobin üzerindeki sargı sayısına bağlıdır.

Uygulanan yüksek frekanslar 500Hz-15MHz arasında değişir. Çelik östenite dönüştükçe, indüksiyon akımına gösterdiği direnç de düşer. Çeliğin östenitlenmesi istendiğinden, indüksiyon ünitesi ısıtmayı kritik değerin üstüne taşıyabilmek için adaptif bir şekilde güç arttırmalıdır.

İndüksiyon sertleştirme işleminde iş parçası, indüktör diye adlandırılan ince bakır borudan yapılmış, yüksek frekanslı akım ileten bir bobinin içinde tutulur. Aynen bir transformatör halinde olduğu gibi, bobinin meydana getirdiği manyetik alan, nasıl transformatörün sekonder sargısında bir akım oluşturuyor ise, burada iş parçası transformatörün çekirdeği ve sekonder sargıları durumunda olduğundan, parçanın yüzeyinde aynı frekansta fakat ters yönde indüksiyon akımları ortaya çıkar.

1.4.5. Nüfuz Derinliği

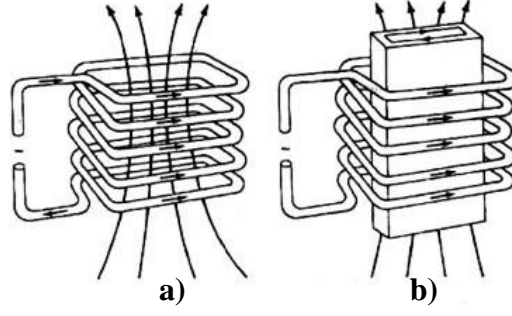
İletken bir çalışma parçası bobin içine yerleştirildiğinde manyetik alan, çalışma parçası ve bobin arasındaki hava aralığında kuvvetli; iletken malzemede ise yoğunluğu azalarak nüfuz edecek şekilde dağılmıştır. Deri olayından dolayı indüksiyonlu ısıtmada akımın çoğu, çalışma parçasının yüzeyinden geçer. Çalışma parçasının merkezine doğru akım yoğunluğu üstel olarak azalır ve merkezde akım akışı neredeyse sıfır (0) olur. Bütün akımın malzeme yüzeyinden itibaren yüzeydeki yoğunlukla geçmesi halinde erişebileceği derinliğe Nüfuz Derinliği denir. Isıtma işlemi süresince manyetik parçaların sıcaklığı, Curie sıcaklığına ulaştığında yükün direnci ve indüktansı değişir. (Kalıcı olarak mıknatıslanabilen malzemelerin -ferromanyetikler- bu özelliklerini kaybettikleri sıcaklığa Curie sıcaklığı denir. Bu isim, bu malzemelerin manyetik özelliklerinin sıcaklıkla değişimini inceleyen Pierre Curie'nin anısına verilmiştir. Curie sıcaklığı erime sıcaklığıyla aynı değildir. Örneğin, saf demirin Curie sıcaklığı 770°C ama erime sıcaklığı 1535°C.)

Pratikte, çalışma parçası, hem manyetik (demir veya çelik gibi) hem de manyetik olmayan (altın veya alüminyum gibi) malzeme olabilir. Manyetik malzemelerde ek olarak mıknatıslanma kayıpları olduğundan bu tip malzemelerin ısıtılması daha kolaydır.[21]

İndüksiyonla ısıtmada önemli bir büyüklük olarak malzemenin cinsine, büyüklüğüne ve amaca göre uygun frekansın belirlenmesini sağlayan nüfuz derinliği, e^{-1} değerine bağlı olarak değişen manyetik alanın büyüklüğüdür. [22]

Malzemenin iletkenliği büyük ölçüde sıcaklığa bağlı olduğundan ortalama sıcaklığın alınması gerekir. Aynı şekilde bağıl manyetik geçirgenliği de sıcaklığa bağlıdır. Bağıl manyetik geçirgenlik demir cinsi malzemelerde alan şiddetine de bağlıdır. Curie noktasının üzerinde demir cinsi malzemeler manyetik özelliklerini kaybettiklerinden bağıl manyetik geçirgenlik=1 olur. Karbon yüzdesi az olan karbon çeliklerinde Curie noktası 768°C ' dir.

Kullanılan frekans ne kadar büyük olursa, Akım Nüfuz Derinliği o kadar küçük olur. Demir cinsi malzemelerde Curie noktasının altındaki hayli küçük olur. Curie noktasının üstünde ise demir olmayan metallere de büyüktür. Isıtmada iyi bir verim sağlayabilmek için ısıtılacak parçanın kalınlığı veya çapı en az akım nüfuz derinliğinin 4 katı olmalıdır. Pratik olarak frekansın seçilmesi bu şart sağlanacak şekilde yapılabilir. [20]



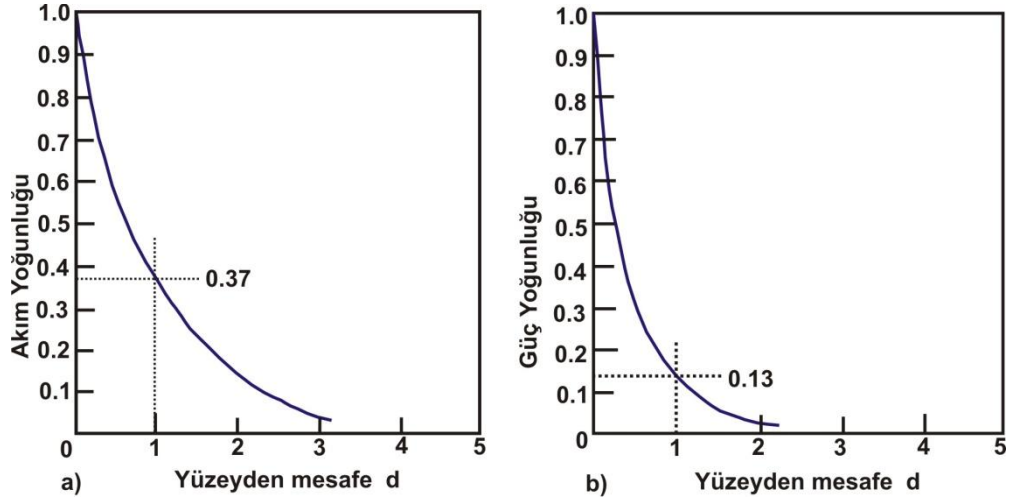
Şekil 1.6 Bobindeki manyetik alan ve akım yönü(a) ve iş parçasında meydana gelen ancak bobine zıt yönde olan akım (b).

$$d = \sqrt{\frac{\rho}{\mu_0 \mu f}} \quad (1.1)$$

Yüzeydeki güç yoğunluğunun d referans derinliğinde $1/e^2$ (%14) kadar düşmesine ise ısıtma etkisi denir (Şekil 1.7)

İndüksiyon işlemi, aşağıda gösterilen ve imalat sanayinde yaygın olarak kullanılan bir uygulamadır.

- Yüzey sertleştirme ve tüm kesit boyunca sertleştirme,
- Temperleme ve gerilme gevşemesi,
- Normalizasyon ve tavlama,
- Çökelme sertleşmesi ve yaşlandırma,
- Tane saflaştırması,

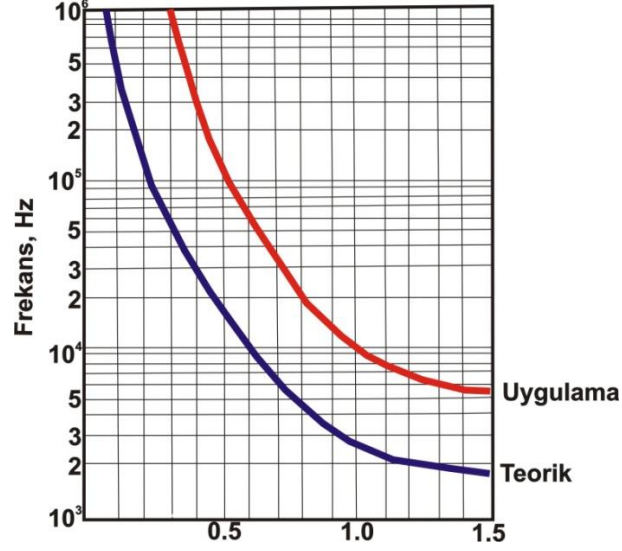


Şekil 1.7 Yüzeyden d mesafesinde akım yoğunluğu(a) ile güç yoğunluğunun değişimi(b). [8]

Bu yöntem ile elde edilen sertliğin derinliği malzemenin özgül direnci, manyetik geçirgenlik, bobinin formu daha doğrusu bobin ile iş parçasının yüzeyi arasındaki uzaklık ve frekans ile değişir. Bu yöntemde milimetrenin ondalığından 75 mm kalınlığa varan yüzeysel sert tabaka elde etmek mümkündür. Sert tabakanın derinliğine en büyük etken, belirli bir malzeme için akımın frekansıdır. Frekans yükseldikçe sert tabakanın derinliği azalır. (Şekil 1.8)

İndüksiyon işlemi ile sertleştirilen çelikler;

- Otomobil tahrik milleri ve dişlileri için kullanılan 1030 ve 1040 gibi orta karbonlu çelikler,
- Kaya matkabı ve el takımları için kullanılan 1070 gibi yüksek karbonlu çelikler,
- Yataklar, otomobil valfleri ve makine takım bileşenleri için kullanılan alaşımlı çeliklerdir.



Şekil 1.8 Sert tabaka derinliğinin frekans ile değişimi. [8]

İndüksiyon ile sertleştirme işleminde frekans ve güç seçimi yüzey derinliğini etkileyen önemli faktörlerdendir. 0.25 - 1.5 mm aralığında ve tamamen sertleştirilmiş sığ bir sertlik tabakası, düşük-orta yük içeren uygulamalarda iyi bir aşınma direnci sağlar. Bu çeşit bir sertleştirme işlemi için ostentizasyon derinliği, 10 kHz - 2 MHz frekans, 800 - 8000 W/cm² güç yoğunluğu ve birkaç saniyeden fazla olmayan ısıtma zamanı kullanılarak kontrol edilebilir. Pompa milleri, kavrama kolu milleri ve piston kolları aşınma direnci için sığ sertleştirme tabakası oluşturulan parçalardır. [23]

Özellikle yüksek frekanslarla ince yüzey sertleştirmelerinde yüzeydeki ısı, soğuk iç kısım tarafından çekilerek, kendi kendine soğuma (self quenching) sağlanır. Parça ya da bobinler hareket ettirilmeden su verilir. Bobinlerin içi boş üretildiklerinden, yüzeylerinde birçok delik açılarak, içlerinden geçen suyun parçada hiçbir kuru yer bırakmayacak biçimde püskürtülmesi sağlanabilir.

Eğme ve bükme gibi yüksek gerilmelerin etkili olduğu makine parçalarında, yüzeyden itibaren herhangi bir derinlikte uygulanan maksimum gerilmenin parçanın akma mukavemetini geçtiği durumlarda metalin mukavemetleştirilmesi gerekir. Gerilmeler malzemenin yüzeyinden merkezine doğru üstel olarak düştüğünden yüksek sertliğe sahip derin bir yüzey tabakası, parçayı mukavemetleştirmede oldukça

etkili olabilir. Bu nedenle, eğme ve bükme gibi ağır yükler etkisindeki parçalar için kalın yüzey sertliği gerekli olmaktadır. Bu amaçla, 1,5 - 6,4 mm aralığındaki sertlik derinliği, 10 kHz - 1 kHz frekans, 80 - 1550 W/cm² güç yoğunluğu ve birkaç saniye ısıtma zamanı ile elde edilir.

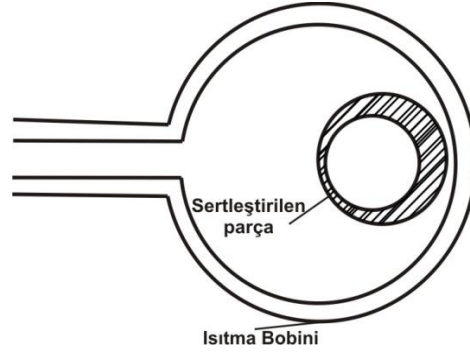
Isıtma işleminin hızı yüksek tutulursa, yüzeyde tufallanma, oksitlenme veya dekarbürizasyon oluşumuna imkân verilmemiş olur. Parlak yüzeyler elde etmek istendiğinde kısa süreler için kontrollü atmosfer oluşturmak kolaylaşır.

İndüksiyonla sertleştirmede uygulanan sertleştirme sıcaklıkları alışlagelmiş sertleştirme için kullanılan sıcaklıklardan 50°C daha yüksektir. Sertleştirme sıcaklığında tutma süreleri ise aşırı derecede kısadır, birçok hallerde hiç uygulanmaz, sertleşme sıcaklığına ulaşıldığında soğutma hemen başlatılır.

İndüksiyon ile yüzey sertleştirme uygulamasında iki ayrı yöntem kullanılır. Küçük parçalar veya parça üzerinde sadece küçük yüzeylerin sertleştirilmesi durumunda iş parçası gereken büyüklükteki indüksiyon bobini içinde östenitize oluncaya kadar tutulur ve sonra soğutucu banyoya atılır. Miller, merdaneler gibi parçalar halinde ise parça bobin içinden ısıtmayı sağlayan bir hızla geçirilir ve aynen alevle sertleşme durumunda olduğu gibi hemen bobinin altına yerleştirilmiş fiskiyelerden soğutucu akışkan püskürtülür. Soğutucu akışkan olarak çeliğin türüne bağlı olarak su veya yağ kullanılır. Bugün bu tür uygulamalarda, parçanın hareketini sağlayan ve işlemi kolaylaştıran özel donanımlar geliştirilmiştir. Ve bu şekilde parçalar çok seri olarak el değmeden sertleştirilebilmektedir.

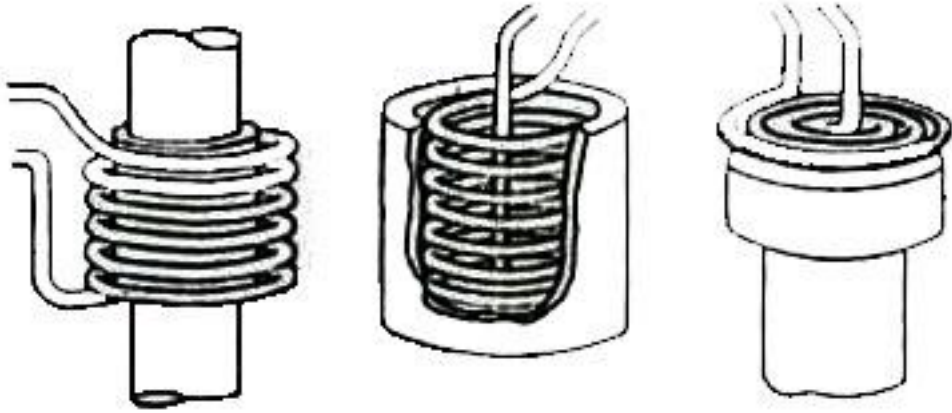
Karışık şekilli parçalarda, kenar etkisi denilen bir konu göz önünde bulundurulmalıdır. Bu durumda iş parçasının bobine yakın olan kısımlarında indüksiyon akımı yoğunluğu yükselir ve dolayısıyla, parçanın tamamı ısındığında, bu

bölgeler daha derin ısınmış olduklarından buralarda sert tabakanın kalınlığı artar ve bu durum parçada homojenliği bozduğu için istenmez (Şekil 1.9)



Şekil 1.9 Dairesel kesitli bir parçada kenar etkisi.

Kenar etkisini ortadan kaldırmak amacı ile özel formda, parçanın dış şekline uyacak biçimde bobinler yapılır ve parça bobin içinden geçerken bobinle iş parçası yüzeyi arası her nokta eşit hale gelir (Şekil 1.10) [24]



Şekil 1.10 İndüksiyonla sertleştirmede kullanılan bobin türleri

Bobinin şekli, bobindeki sarım sayısı, çalışma frekansı ve alternatif akımın giriş gücü, indüksiyonla elde edilecek ısınmayı belirler. İndükleme bobinleri ile oluşturulan ısıtma değerleri, parçanın yaydığı manyetik alanın kuvvet tesirine bağlıdır. Yüksek frekans akımı, yayvan ısıtma istendiği zaman kullanılır. Orta ve

alçak frekanslar, derin ısıtma gerektiren uygulamalarda kullanılır. 0,5 - 50kHz değerleri 1,3 mm sertlik derinliği için, 50kHz-10MHz değerleri de 0,1-1 mm sertlik derinliği elde etmek için kullanılmaktadır. Çapları çok küçük parçalar MHz mertebesinde yüksek frekanslarla ısıtılır. Bobinler genellikle sarımlar arası mesafe 2-5 mm olacak şekilde sarılırlar. Bobin ile iş parçası arasında da kabaca aynı mesafe tutulur. % 0,35 - 0,55 C' lu ıslah çeliklerine indüksiyon ile yüzey sertleştirme başarıyla uygulanabilir.

İndüksiyonla yüzey sertleştirmede ısınmanın hızla gelişmesi nedeni ile ostenitizasyon, normal dengeli ısıtmaya göre çok daha yüksek sıcaklık gerektirir. Zira dönüşümün gerçekleşmesi için kuluçka ve dönüşüm periyotlarına gerek vardır.

Isınmanın hızla gelişmesi çekirdekleşme hızının, tane büyüme hızından yüksek olmasına olanak verdiği için elde edilen östenitin tane büyüklüğü, normal sertleştirme işleminde elde edilenden daha küçüktür. Bu bakımdan bu şekilde sertleştirilmiş parçalar normal bir fırında veya tuz banyosunda ısıtılarak yapılan sertleştirmeye göre şu üstünlükleri gösterirler:

- Çeliğin sıcaklığının gerek soğutucu ortam tarafından absorbe edilmesi ve gerekse de ısınmamış çekirdek bölgesine kondüksiyonla iletimi sonucu ortaya çıkan şiddetli soğutma hızı, normal sertleştirme ile elde edilenden daha yüksek bir sertlik oluşturur ve parçanın aşınma dayanımını artırır.
- Aynı çekme mukavemeti için daha iyi bir çentik darbe mukavemeti gösterir.
- Parçalar korozyon etkisindeki bir ortamda çalışsalar dahi, daha iyi bir yorulma mukavemeti gösterirler. Bu olay yüzeyde sertleşen tabakanın iç kısma uyguladığı basınç gerilmeleri nedeni ile ortaya çıkmaktadır.
- Isıl işlem için gerekli süre kısaldığından verim artar
- Isıl işlem sonucu ortaya çıkan şekil değişimi çok azdır ve çoğu kez, ikinci bir alıştırma işlemi gerektirmez.

- Parçaların yüzeylerinde tufallaşma görülmez.

İndüksiyonla yüzey sertleştirmenin dezavantajları ise:

- Yüksek kaliteli cihazların yüksek ilk yatırım maliyetleri.
- Sadece indüksiyonla sertleştirmeye uygun şekle sahip parçalara bu yöntem uygulanabilir.
- Sadece belli çelik türleri indüksiyonla sertleştirilebilir.

Küçük parçaların manyetik alan etkisiyle yer değiştirmemeleri için çok sıkı tutulmaları gerekir. Metalik bir malzeme sargının çok yakınına geldiğinde indüksiyon akımının etkisiyle ısınabilir. Bu olaydan kaçınmak için tutucu ve merkez yıkayıcı normal olarak *sindengo* gibi yalıtkan ve ısı dirençli bir malzemedен veya ısı dirençli bir plastikten yapılır.

Spin sertleştirme adı da verilen indüksiyon sertleştirme sırasında parçanın döndürülmesi, modülü 5'e kadar olan dişliler için de genellikle uygundur. Büyük dişlilerin yüzey sertleştirilmesinde, kademeli bir ısıtmayla bir defada bir diş sertleştiren makineler kullanılır.

İndüksiyonla sertleştirme işleminde ısıtma sıcaklığı derecesi ve ısıtma hızı sert tabakanın kalınlığına etkileyen iki önemli faktördür. Aynı ısıtma hızında, yüksek östenitizasyon sıcaklığı sert tabaka kalınlığının artmasına yol açar. Aynı östenitizasyon sıcaklığı için ısıtma hızının artması sert tabakanın incelmesine neden olur. İndüksiyonla yüzey sertleştirmede, frekansın yanı sıra, sert tabakanın kalınlığının kontrolü bakımından bu iki parametre birbirinden bağımsız olarak düşünülemez.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Elektromanyetik alanlar, katılarda yüksek sıcaklık uygulamalarında modern teknoloji ile sıklıkla kullanılır. Özellikle indüksiyon ısıtma, sertleştirme, lehimleme, su verme ve diğer çelik ısıtma işlemleri için çok fazla kullanılmaktadır. Ancak genel olarak her metalin ısıtma işlemi esnasındaki davranışları farklı, karmaşık ve doğrusal değildir. Genelde katıdaki elektromanyetik alan dağılımı parçanın tüm termal geçişine bağlıdır. Isıtma işlemi esnasında elektrik iletkenliği manyetize olabilirler. Ferro-manyetik maddelerin manyetik geçirgenliği manyetik alan yoğunluğuna bağlıdır. Bu nedenle, katıların ısıtma işlemleri esnasında yeterli olacak kadar fiziksel değişkenlerin matematiksel modelle ifade edilmesi ihtiyacı ortaya çıkar.

Bu bağlamda, analizi kolay olmayan matematiksel modellerin zamana bağlı sıcaklık dağılımı unsuruna dikkat çekmek gerekir. Isıtma işlemi sırasında sıcaklık dağılımı ve doğrusal olmayan özellikleri saptamak güçtür. Bunun için sıkça kullanılan nümerik yöntemlerin başında “sonlu elemanlar yöntemi” gelir.

Birçok matematiksel modelde katılardaki elektromanyetik alanı değerlendirmek için “harmonik yaklaşım” kullanılır. Bu yaklaşım doğrusal manyetik materyaller için geçerlidir. Doğrusal olmayan manyetik materyallere uygulanması yanlış olur. Doğrusal ve durağan olmayan elektromanyetik alanlar ve manyetize edilebilen katılardaki termal sürecin matematiksel modeli ve nümerik çözümlemesi dış akımlar tarafından sağlanan elektromanyetik alanlar için geliştirilmelidir. Malzemedeki elektromanyetik alan; Maxwell eşitliği yardımıyla belirlenebilir. Sıcaklıktaki değişim klasik ısı transferi eşitlikleri ile ifade edilebilir ve çözüm elde edilebilir. Elde edeceğimiz matematiksel model, tüm elektriksel ve manyetik alanların genişliği adına, tüm malzeme katsayılarının sıcaklıkla ilişkisinin hesabını dikkate alacaktır.

2.1. İndüksiyonla Isıtma Teorisi

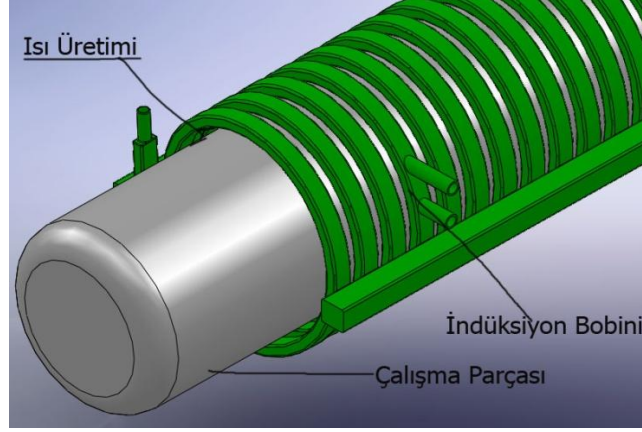
İndüksiyonla ısıtma, parçanın yüzeyinde oluşan alternatif manyetik alanın eddy akımlarını ve histerizis kayıplarını parçada indüklemesiyle ısı oluşturan bir yöntemdir. Alternatif manyetik alan, çalışma parçası etrafını çevreleyen veya çalışma parçasına paralel olarak tutulan, üzerinden alternatif akım geçen indüksiyon bobini tarafından oluşturulur. [25]

İndüksiyon bobinine alternatif voltaj uygulanması, bobin içinde alternatif akım akmasına neden olur. Bu durum çevrede zamana göre değişen manyetik alan oluşur ve bu alanın frekansı uygulanan akımın frekansı ile aynıdır.[23] Elektromanyetik alan değiştirildiğinde herhangi bir geçirgen malzemede manyetik kuvvet oluşur. Eğer akım geçişine malzeme içerisindeki bütün bir yolda izin verilirse, indüklenen kuvvet bu yol boyunca bir akım oluşturur. Malzemenin direncinden dolayı Joule etkisi gözlenir ve $I R^2$ ile orantılı olarak ısı üretimi gerçekleşir. Burada I manyetik akım, R malzemenin direncidir.[26] Devamlı akım durumunda, düzgün bir kesit alanına sahip homojen malzemenin direnci;

$$R = \frac{\rho L}{A} \text{ (Ohm, } \Omega \text{)} \quad (2.1)$$

olarak tanımlanır.

İndüksiyonla ısıtma, malzemenin bobine yakın komsu bölgelerinde malzeme üzerinde joule etkisinin gelişimine dayanır. Şekil 2.1’de manyetik alan içerisine yerleştirilmiş malzemedeki ısı oluşumu şematik olarak sunulmuştur.



Şekil 2.1. Isıtma indüktörü ve içinde bulunan iş parçasının görünümü

2.2. Metallerin Elektromanyetik Özellikleri

Doğadaki malzemelerin hepsi manyetik davranış gösterir. Oldukça az manyetik etki gösteren bazı malzemeler manyetik olmayan malzemeler olarak sayılır. Bununla beraber, vakum manyetik olmayan bir özellik gösterir. Malzemelerin manyetik karakteristikleri olarak açıklanan birçok özellik bulunmaktadır. Burada sadece indüksiyonla ısıtma işlemi için kritik öneme sahip olan bağıl geçirgenlik ve elektriksel direnç malzeme özellikleri anlatılacaktır.

2.2.1. Bağıl geçirgenlik

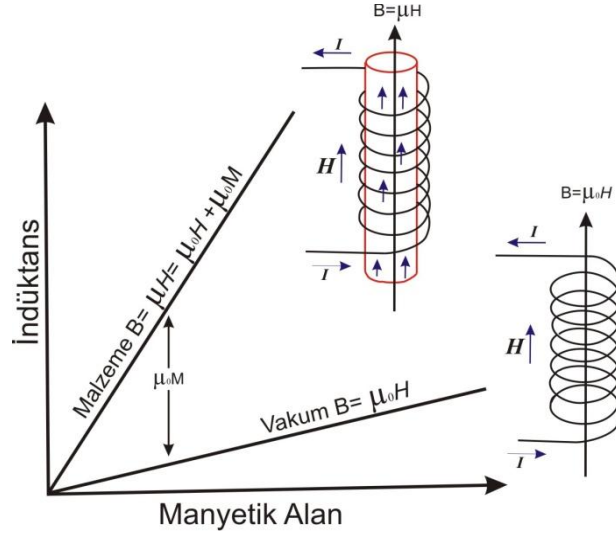
Manyetik özellikler düşünüldüğünde, manyetik geçirgenlik malzemenin en önemli özelliklerinden biridir. Bir vakumda bir manyetik alan uygulandığında manyetik akı hatları üretilir. (Şekil 2.2) Akı hatları sayısının büyük bir sayıya ulaşması ile manyetik alan başarılabilmiş olur. Akı yoğunluğu veya indüktans uygulanan alanla ilgilidir.

$$B = \mu_0 H \quad (2.2)$$

Manyetik alana bir malzeme yerleştirildiğinde manyetik indüktans, uygulanan ve manyetik kutup çiftinin alanla etkileşimiyle belirlenir. Manyetik indüktans burada μ , alandaki malzemenin manyetik geçirgenliğidir.

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (2.3)$$

Büyük bir bağıl geçirgenliğin anlamı malzemenin manyetik alanın büyütülmüş bir etkiye sahip olması demektir.[27]



Şekil 2.2 İçerisinden akım geçen bir bobinin vakumda ve içerisine bir nüve yerleştirildiğinde oluşturduğu akı yoğunluğu (indüktans) [36]

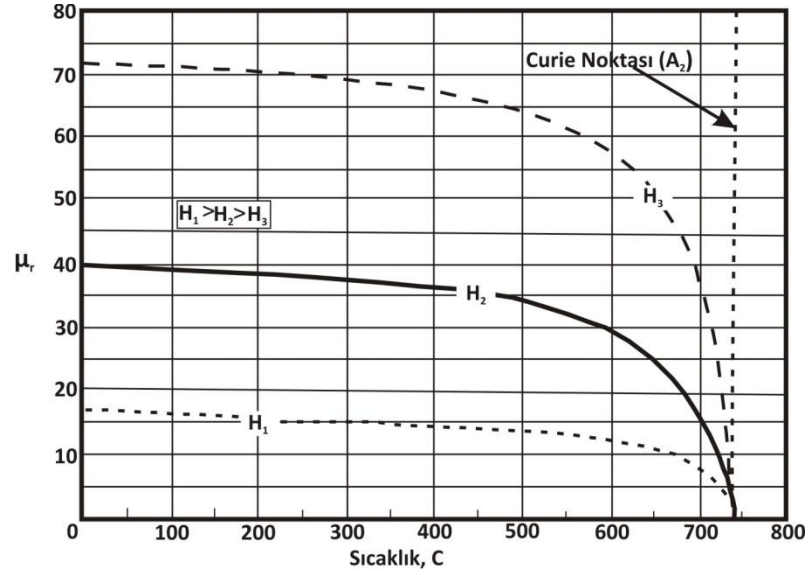
Malzemeler, mıknatıslanma kabiliyetlerine göre diamanyetik, paramanyetik ve ferromanyetik olarak adlandırılan üç gruba ayrılırlar. Paramanyetik malzemeler 1'den çok az miktarda büyük bağıl geçirgenlik değerine sahip iken, diamanyetik malzemeler için bu değer 1'in çok az altındadır. İndüksiyonla ısıtmada bu malzemeler manyetik olmayan malzemeler olarak adlandırılır. Bakır, alüminyum, titanyum ve tungsten bu tipin bazı örneklerindedir. Diğer taraftan ferromanyetik malzemeler yüksek μ_r değerlerine sahiptirler. Çelik, kobalt ve nikel oda sıcaklığında ferromanyetik özellikler gösteren malzemelerdir. Bazı seçilen malzemelerin bağıl geçirgenlik değerleri Çizelge 2.1'de verilmiştir.[23]

Çizelge 2.1. Seçilen bazı malzemelerin bağıl geçirgenlik değerleri

Malzeme	Tip	Bağıl Geçirgenlik
Bizmut	Diamanyetik	0.99983
Hava	Paramanyetik	1.0000004
Aluminyum	Paramanyetik	1.000021
Ferroskub(Mn-Zn)	Ferrimanyetik	1500
Yumusak Çelik (0.2 C)	Ferromanyetik	2000
Demir (%99,91 saf))	Ferromanyetik	5000
Saf Demir(%99.95 saf))	Ferromanyetik	200000

Farklı malzemelerin farklı bağıl geçirgenlik değerleri farklı karakteristikler gösterir. Diamanyetik ve paramanyetik maddelerin bağıl geçirgenlikleri bir dışsal manyetik alanın varlığını değiştirmez. Diğer taraftan ferromanyetik malzemeler farklı uygulanan manyetik alanlar için önemli ölçüde değişiklikler gösterir. Maksimum, farklı malzemeler için uygulanan farklı alanlarda meydana gelebilir.

İndüksiyonla ısıtmada sıklıkla kullanılan çelikler için bağıl geçirgenlik sıcaklığa ve manyetik alan şiddetine bağlı olarak küçük değerlerden (2 veya 3), 500'den daha büyük değerlere kadar değişiklik gösterebilir. Bağıl geçirgenliğin manyetik alanla değişimi ile ilgili bir örnek Şekil 2.3'te verilmiştir. Üç farklı manyetik alan kuvveti için numunenin manyetik geçirgenliği H1, H2, H3 gösterilmiştir. Bağıl geçirgenlik, sıcaklık artışıyla beraber azalır. Azalma trendinin 500°C üzerinde olduğu söylenebilir. 750°C de μ_r değeri 0 olur. Bu sıcaklık değerine malzemenin Curie noktası adı verilir. Bu sıcaklıkta ferromanyetik malzemeler manyetik olmayan malzeme özelliklerini gösterirler.[23]



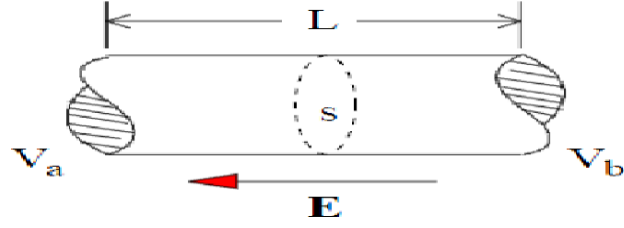
Şekil 2.3. Sıcaklık ve manyetik alan şiddetinin orta karbonlu çeliğin bağıl geçirgenlik değerine etkisi

Mıknatıslanma eğrisi olarak da adlandırılan B-H eğrisi genellikle lineer değildir. μ_r 'nin en yüksek değeri manyetik alanın belirli bir değerinde sağlanır. H_{Cr} , manyetik geçirgenlik H ile, $H < H_{Cr}$ ise artar, $H > H_{Cr}$ ise azalır.

İndüksiyonla ısıtma sırasında, manyetik alan şiddeti çalışma parçası içerisinde değişir. Akım dağılımı gibi, H'da yüzeyden çekirdeğe doğru üstel olarak değişir. Bu gerçek μ_r 'nin parça içerisinde değişimi ile sonuçlanır. Manyetik alan şiddetinin parça yüzeyinde H_{Cr} 'den büyük olduğu uygulamalarda bağıl geçirgenlik değeri maksimuma ulaşınca kadar çalışma parçası içinde artar ve daha sonra azalır.[23]

2.2.2. Direnç, Özdirenç, Ohm Yasası

Elektrik akımını bir iletkenin içinde devamlı olarak tutabilmek için iletkenin bir elektrik alanı veya uçları arasında bir potansiyel farkının da devamlı olarak olması gerekir. İletken malzemelerde, bunlara uygulanan belli bir elektrik alanı tarafından oluşturulan akım yoğunluğunun büyüklüğü, iletken malzemenin cinsine bağlıdır. Ele alınan iletkenden geçen akım I, iletkenin kesiti S ise iletkenin akım yoğunluğu $J = I / S$ olacaktır. İletkenin ele alınan kesitinden geçen elektrik alan şiddeti E ise, akım yoğunluğu elektrik alanla doğru orantılıdır. Buna göre,



Şekil 2.4. iletkenin iki noktası arasındaki potansiyel farkı

$$J = S.E \quad (2.4)$$

olacaktır. Burada ki orantı sabiti σ değerine, *ele alınan malzemenin öz iletkenliği* adı verilir. Akım yoğunluğu yönü, elektrik alan yönü ile aynı olan vektörel bir büyüklüktür, (2.4) bağıntısının vektörel şekli,

$$\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E} \quad (2.5)$$

dir. Şekil 2.4 'den, iletkenin iki noktası arasındaki sabit potansiyel farkı V olduğuna göre, iletken boyunca sabit olan elektrik alan şiddeti $E = V / l$ olacaktır.

Buna göre,

$$V = V_b - V_a = E \cdot l = \frac{J}{\sigma} \cdot l = \frac{J}{\sigma S} \cdot I \quad (2.6)$$

$$R = \frac{J}{\sigma S} \quad \text{alınırsa} \quad (2.7)$$

$$V = I \cdot R \quad \text{veya} \quad R = \frac{V}{I} \quad (2.8)$$

bulunur. Bu bağıntı fizikte Ohm yasası olarak bilinmektedir. Bu yasanın sözel açıklaması: " Sabit sıcaklıktaki metal bir iletkenin iki noktası arasındaki potansiyel farkının, bu iletkenden geçen I akım şiddetine oranı sabittir. Bu sabite ele alınan iki nokta arasındaki parçanın R elektrik direnci adı verilir." Bu yasaya, birçok iletkenler, özellikle metaller geniş sıcaklık aralıklarına oldukça iyi uyarlar. Bunlara Ohmik iletkenler denir. Bir çok metal olmayan cisimler, özel olarak yarı iletkenler, elektrik arki ve boşluk tüpleri Ohm yasasına uymazlar. Metal olmayan iletkenlerde akım şiddeti, potansiyel farkı ile orantılı değildir. Örnek olarak boşluk tüplerinde, akım

şiddeti ile potansiyel farkı arasındaki ilişki $I = c.V^{3/2}$ gibidir. Buna göre iletken parçasının elektrik akımına karşı gösterdiği direnç,

$$R = \frac{1}{\sigma} \frac{1}{S} = \rho \frac{1}{S} \quad (2.9)$$

olarak ifade edilir. $\rho = 1 / \sigma$ ya iletkenin *özdirenci* denilmektedir. Bazı maddelerin 20°C deki öz dirençleri (ρ) Çizelge 2.2. de gösterilmiştir.

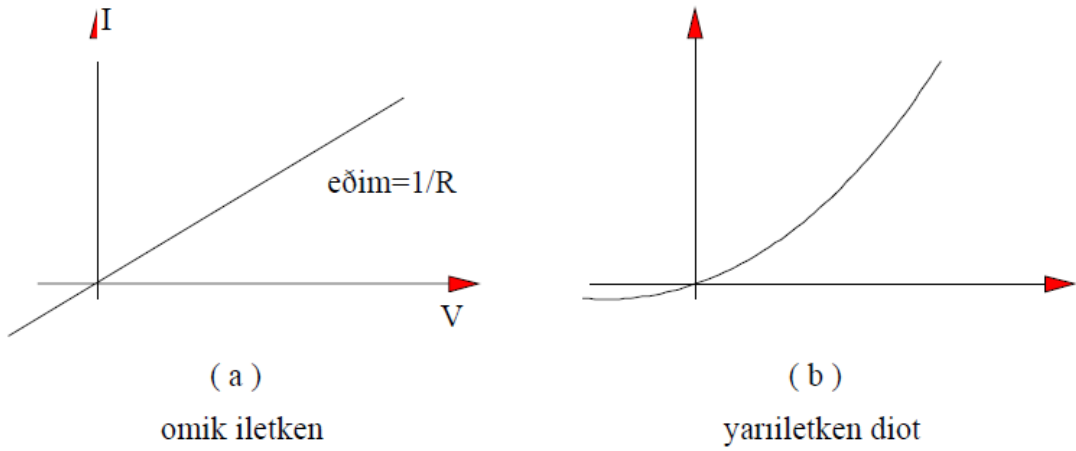
Çizelge 2.2. Bazı Maddelerin Özdirençleri ve Sıcaklık Katsayıları [35]

Bazı Maddelerin Özdirençleri ve Sıcaklık Katsayıları			
	Madde	Özdirenç C ($\Omega \cdot m$)	Sıcaklık Katsayısı $\alpha[(C^\circ)^{-1}]$
1	Gümüş	$1,59 \cdot 10^{-8}$	$3,80 \cdot 10^{-3}$
2	Bakır	$1,70 \cdot 10^{-8}$	$3,90 \cdot 10^{-3}$
3	Altın	$2,44 \cdot 10^{-8}$	$3,40 \cdot 10^{-3}$
4	Alüminyum	$2,82 \cdot 10^{-8}$	$3,90 \cdot 10^{-3}$
5	Tungsten	$5,60 \cdot 10^{-8}$	$4,50 \cdot 10^{-3}$
6	Demir	$10,00 \cdot 10^{-8}$	$5,00 \cdot 10^{-3}$
7	Platin	$11,00 \cdot 10^{-8}$	$3,92 \cdot 10^{-3}$
8	Kurşun	$22,00 \cdot 10^{-8}$	$3,90 \cdot 10^{-3}$
9	Nikrom	$150,00 \cdot 10^{-8}$	$0,40 \cdot 10^{-3}$
10	Karbon	$3500,00 \cdot 10^{-8}$	$-0,50 \cdot 10^{-3}$
11	Germanyum	0,46	$-48,00 \cdot 10^{-3}$
12	Silisyum	640	$-75,00 \cdot 10^{-3}$
13	Cam	$10^{10} - 10^{14}$	
14	Sert Plastik	$\approx 10^{13}$	
15	Kükürt	10^{15}	
16	Kuarts (erimiş)	$75 \cdot 10^{16}$	

Galen, selenyum, germanyum, silisyum, bakır oksit, demir oksit ve demir piritleri yarı iletken cisimlerdir. Bu tip iletkenler Ohm yasasına uymazlar. Bütün yarı iletkenler, n-tip ve p-tip yarı iletkenler adı altında iki grupta toplanırlar. p-tip yarı

iletkenlerde (p artı demek) serbest elektronlar yoktur ve akım artı taşıyıcılarla oluşur. n-tip yarı iletkenler (n eksi demek) akım, metallerde olduğu gibi serbest elektronlarla oluşur. Yarı iletkenler her türlü elektronik alet ve cihazlarda bol miktarda kullanılır.

Şekil 2.5. de omik bir iletkenle yarı iletken bir diot için akım voltaj eğrileri çizilmiştir.



Şekil 2.5 omik bir iletkenle yarı iletken bir diot için akım voltaj eğrileri

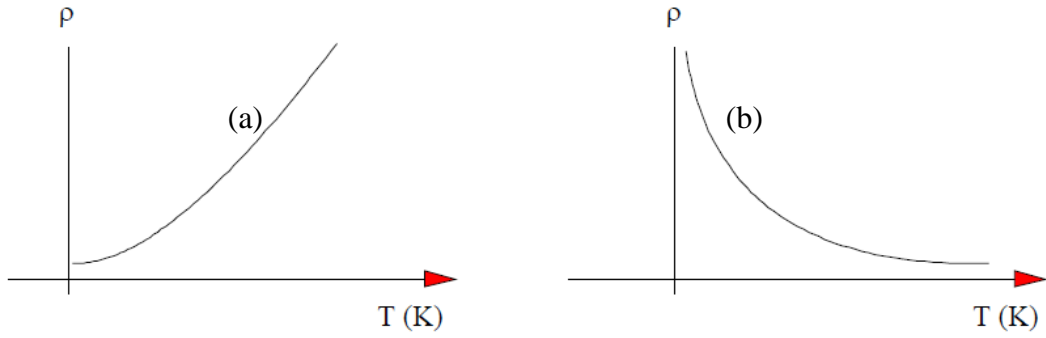
Şekil 2.5. a'dan görüldüğü omik iletken için akım voltaj eğrisi doğrusal (lineer)dir ve eğim iletkenin direncini verir. Şekil 2.5 b.'de yarıiletken için doğrusal olmayan Akım - Gerilim eğrisi gösterilmiştir. Diot ohm yasasına uymamaktadır.

2.2.2.1. Sıcaklığın Dirence Etkisi

Denklem (2.9) ve uygulamaların sonuçlarına göre, sabit sıcaklıktaki bir iletkenin direnci, iletkenin uzunluğu ile doğru, kesiti ile ters orantılı olup bu da telin cinsine veya maddesine bağlıdır.

$$\text{Buna göre; } R = \rho \frac{1}{S} \quad (2.10)$$

Sıcaklık ve maddeye bağlı olan orantı katsayısı ρ ' ya *özdirenç* adı verilmiştir. Bir metalik iletkenin direnci ve sonuçta direnci sıcaklıkla artar. Bir metal iletkene ait özdirençlerin sıcaklığa bağlı değişimi Şekil 2.6. 'de gösterilmiştir. Eğri sıcaklığın geniş bir aralığında doğrusal (lineer)dir ve artan sıcaklıkla ρ artmaktadır. T nin mutlak sıfıra ulaşması ile direnç sonlu bir ρ_0 değerine ulaşır. Şekil 2.6. b.' deki silisyum ve germanyum gibi saf bir yarı iletkenin özdirencinin sıcaklığa göre değişimi gösterilmiştir. Yarı iletkenlerin özdirenci sıcaklık arttıkça azalır. Ohmik iletkenlerde ise sıcaklık arttıkça direnç artar.



Şekil 2.6. özdirencin sıcaklığa göre değişimi

Şekil 2.6.a 'daki, özdirencin sıcaklığa göre değişimini veren eğrinin bağıntısı,

$$\rho = \rho_0 + at + bt^2 + \dots \quad (2.11)$$

dır. Çok büyük olmayan sıcaklıklar için t^2 terimi ihmal edilebilir ve

$$\rho_0 = \rho_0 + at \quad (2.12)$$

yazılabilir. (2.12) bağıntısı

$$\rho = \rho_0 + \frac{\rho_0 at}{\rho_0} \quad \text{veya} \quad \sigma = \frac{a}{\rho_0} = \frac{\rho_0 - \rho_0}{\rho_0 t} \quad \text{şeklinde alınarak}$$

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha t) \quad (2.13)$$

şekline getirilebilir. Verilen bir metalik iletkenin direnci, onun özdirenci ile orantılı olduğunda

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha t) = R_0 (1 + \alpha t) \quad (2.14)$$

olarak yazılır. Referans sıcaklığı olarak 20° C olan oda sıcaklığı alınır, direncin herhangi bir sıcaklıktaki değeri için

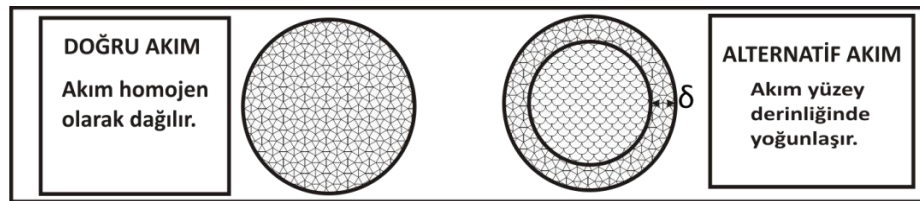
$$R = R_{20} [1 + \alpha(T - T_{20})] \quad (2.15)$$

bağıntısı geçerlidir.

2.3. Elektromanyetik Etki

2.3.1. Yüzeysel etki

Doğru akım parça boyunca aktıkça, kesit alandaki akım dağılımı homojendir. Fakat, alternatif akım uygulandığı takdirde, parçanın içine doğru akım dağılımı kesinlikle frekansa bağlıdır. Akım, parçanın yüzeyinden akma eğilimindedir. Bu durum yüzeysel etki (skin effect) olarak adlandırılır. Yüzeysel etki Şekil 2.7.'de şematik olarak gösterilmiştir. İndüksiyonla ısıtmada belirli bir frekansta Eddy akımı oluşturulur. Yüzeysel etkisinden dolayı Eddy akım dağılımı homojen olmayacaktır. Bu dağılım, sıcaklık dağılımında kritik öneme sahiptir.



Şekil 2.7. Homojen bir kesit alanına sahip bir iletkendeki doğru ve alternatif (dalgalı) akımın dağılımı

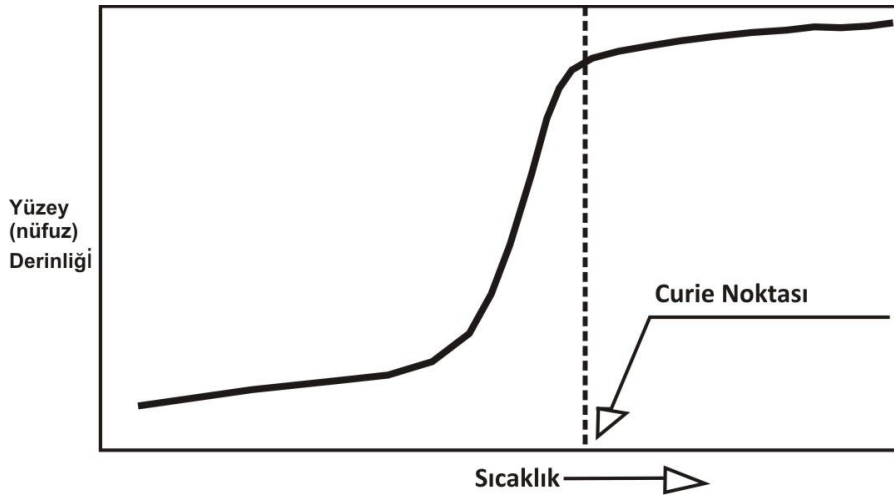
Akım dağılımını çalışma parçası yüzeyinden çekirdeğe doğru logaritmik olarak azalır. Toplam üretilen gücün %86'sı yüzey (nüfuz) derinliği olarak tanımlanmış yüzeyden belirli bir derinlikte yoğunlaşır. Kondüktörün çekirdeğinden yüzeyine kadar olan mesafede, güç yoğunluğu ve akım $1/e$ ve $1/e^2$ oranında yüzeydeki değerden küçüktür.[23]

Yüzeysel derinliği formülü: [28]

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu_r \mu_0}} \quad (2.16)$$

Denklem 2.16' da açıkça görüldüğü gibi yüzey derinliği elektriksel direnç, bağıl geçirgenlik gibi bazı malzeme özelliklerine ve frekansa bağlıdır. Yüksek frekans uygulamalarında veya geniş çaplı çalışma parçalarında yüzey etkisi daha kritik öneme sahip olur. Isı üretimi yüzeye yakın sınırlı bir hacimde sınırlandırılır.

Yüzey derinliği sıcaklığa kuvvetli bir şekilde bağlıdır. Isınma esnasında direncin önemli oranda artmasından dolayı artar. Bu nedenle, indüksiyon ısıtma uygulamalarında, yüzey derinliği denklemini gerçek durumlar için yürürlüğe koymak zor olabilir. Malzeme içerisindeki sıcaklık değişiminden dolayı, bağıl manyetik geçirgenlik bir özel anda büyük ölçüde değişiklik gösterebilir. Teorik olarak bir çalışma parçası için farklı yüzey derinliği değerleri hesaplanabilir. Bunun yerine, mühendislik uygulamalarında parçanın yüzeyindeki μ_r değeri yüzey derinliği değerini belirleme için kullanılır.[23]



Şekil 2.8. Karbon çeliği çalışma parçasının indüksiyonla ısıtma esnasındaki yüzey (nüfuz) derinliği değişimi [35]

İndüksiyonla ısıtma uygulamalarında yüzey derinliği sert bir şekilde değişir. Isıtmanın ilk bölümünde direnç değerinin artması ve bağıl geçirgenlik değerinin azalmasından dolayı nüfuz etme kalınlığı artar. Curie noktasına ulaşıldığında manyetik bağıl geçirgenlik aniden düşer ve sonuç olarak, yüzey derinliğinde ani bir sıçrama oluşur. Isıtmanın devam etmesi sonucunda, yüzey etkisi elektriksel direncin artmasından dolayı önemsiz bir miktarda artacaktır.

Bu çalışmada daha önce ifade edildiği gibi, literatürde akım dağılımının yarıçap boyunca üstel olarak azaldığı varsayılır. Bununla beraber bu gerçek sadece sabit elektriksel dirence sahip homojen manyetik olmayan malzemeler için geçerlidir.

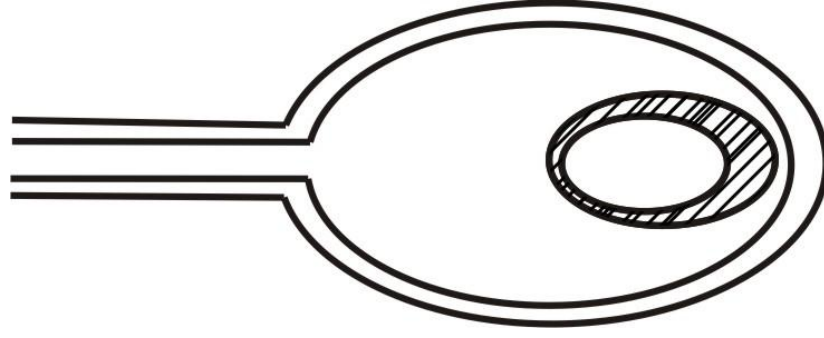
Denklem 2.16 indüksiyonla ısıtma uygulamaları yüksek termal artışlar oluşturduğundan çoğu zaman kullanılamaz. Elektriksel direnç ve bağlı geçirgenlik sıcaklıkla oldukça değişir. Sıcaklık değişiminin yanında, düzgün olmayan manyetik alan yoğunluğu dağılımı da μ_r 'nin değişimine sebep olur. Bu karmaşık uygulamalarda akım dağılımı yarıçap boyunca dalgalı bir form şeklinde görülür. [23]

2.4. İndüksiyon Bobini Tasarımı

İndüksiyonla ısıtma için yapılan bobin tasarımları ve bunların gelişimi, basit birçok indüksiyon geometrilerinden, örneğin sarmal bobinden, geniş kapsamlı deneysel verilerden elde edilen bilgiler üzerine kurulmuştur. Bu nedenle bobin tasarımı genellikle deneyimlere dayanır. İndüksiyonla ısıtma için herhangi bir bobin tasarımında birçok durum göz önünde bulundurulmalıdır. [24]

Birincil bobinden ikincil bobine (ısıtılacak malzeme) maksimum enerji transferi için, malzeme bobine olabilecek en yakın mesafede olmalıdır. Isıtılacak alanda bulunan parçanın içinden maksimum miktarda manyetik akı çizgilerinin sayısının olabilecek en yüksek miktarda geçmesi istenir. Malzeme üzerindeki manyetik akı yoğunlaştıkça, malzeme içinde üretilen akım o derecede artar. Bir selenoidde akı çizgileri bobinin merkezinde birbirine doğru yaklaşır. Akı çizgilerinin sayısı bobinin içinde yoğunlaşmıştır ve burada maksimum ısınma elde edilir.

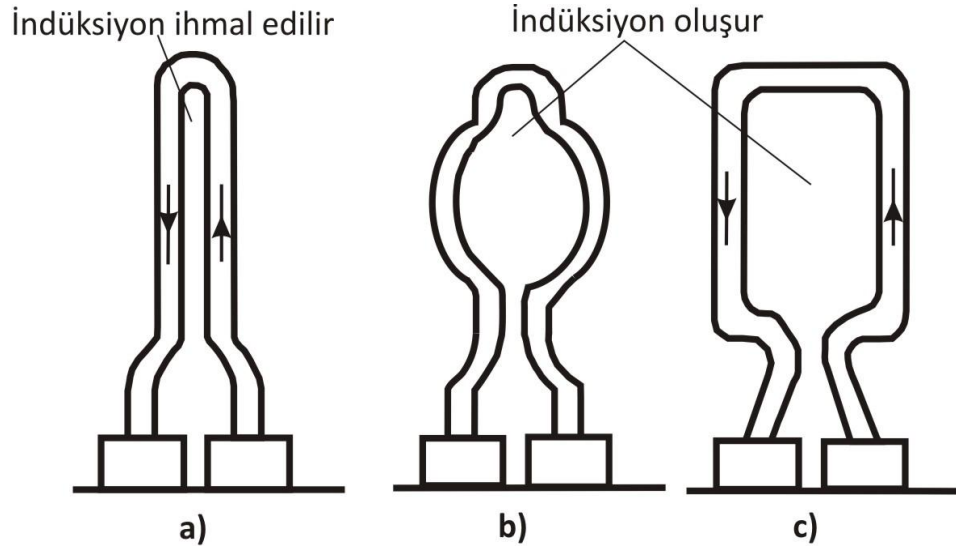
Akı çizgilerinin sayısının bobin sarmallarına yakın noktalarda yoğunlaşmaları ve iletkenlerden uzaklaştıkça azalmaları nedeniyle bobinin geometrik merkezi yetersiz bir akı bölgesidir. Bu nedenle, manyetik alandan etkilenecek bir parça bobin içinde bobinin geometrik merkezinin dışına yerleştirilecek olursa, bobin sarmallarına yakın bölgelerde daha çok sayıda akı çizgileriyle kesişir ve malzeme daha yüksek oranda ısınır. Buna karşın hafif bağlantılı parçaların alanı daha yavaş bir oranda ısınır ve Şekil 2.7'deki şematik olarak gösterilen deseni oluştururlar. Bu etki yüksek frekanslı indüksiyon ısıtmalarında daha etkilidir.



Şekil 2.9. İndüksiyonla ısıtmada sarmalın geometrik merkezinin dışına konulan Malzeme

Sarmalın bağlantı noktalarında yani bobinlerin kaynak noktalarında manyetik alan diğer bölgelere göre daha zayıftır (kacak fazladır). Bu nedenle bobinin manyetik merkezinin aynı zamanda bobinin geometrik merkezi olması şart değildir. Bu etki en çok tek sarmal bobinlerde görülür. Bobinin sarmal sayısı arttıkça ve her sarmaldaki akı bir önceki sarmaldakine eklendikçe bu durumun önemi azalır. Her zaman bobinin içindeki malzemeyi bobin merkezine koymak kolay olmadığından malzeme bu alandan biraz saptırılmalıdır. Ayrıca malzemenin her yerinde aynı etkiyi oluşturabilmek için eğer uygunsa malzeme bobin içinde döndürülmelidir.

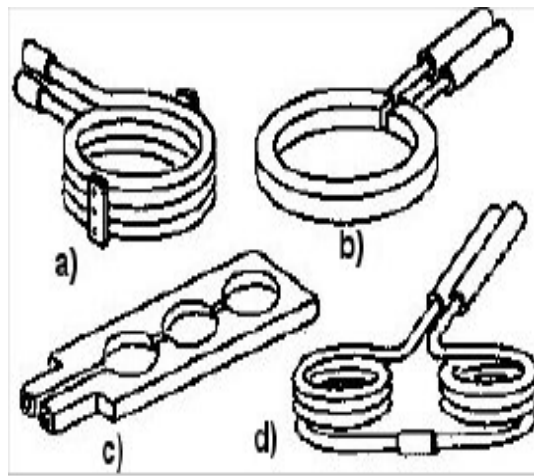
Bobin, bobin içindeki manyetik akı çizgilerinin sayısının azalmasını engelleyecek şekilde tasarlanmalıdır. Şekil 2.10. a'daki kangalın indüktansı neredeyse yoktur. Çünkü bobin içinden geçen akımlar yanı bobinin ters tarafları birbirine çok yakındır. Şekil 2.10. b ve Şekil 2.10. c'deki bobinlerin indüktansı olacak ve bu halkalara yeni halkalar eklemekle, indüktans değerinde bir artış sağlanmış olacaktır. İndüktansı olan bu halkaların içine konulan manyetik özellikleri olan bir malzeme ısınacaktır. Şekil 2.10. b ve Şekil 2.10. c'deki tasarım, indüktansı olan iyi bir bobin tasarımını gösterir.



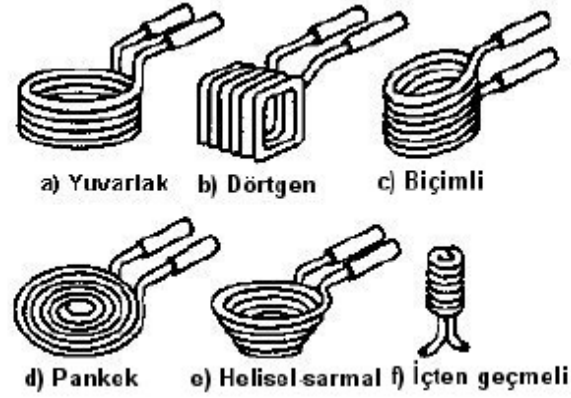
Şekil 2.10. a) indüktansı olmayan b) ve c) indüktansı olan bobin tasarımları

Deneysel verilere dayanan yukarıdaki şekillerden ve açıklamalardan bazı bobinlerle, ısıtılacak yüzeyde manyetik akı yoğunlaştırılabilmekte ve güç yani ısı yükü daha kolay bir şekilde aktarılmaktadır. Örneğin, malzemeyi ısıtmak için kullanılacak bobinler üç şekilde olabilir:

- Parça ya da ısıtılacak alanın, bobinin içinde olması durumunda, yani manyetik akının en yüksek olduğu sarmal solenoitler;
- Sadece bir yüzeye gelen akı ile ısıtmanın yapılabileceği pankek tipi bobinler;
- Sadece bobinin dışındaki akıdan yararlanarak oyukların ısıtmasında kullanılan iç bobinleri.



Şekil 2.11. Tipik indüksiyon bobinleri: a) çoklu sarım, tek pota b) tek sarım, tek pota, c) tek sarım, çoklu pota d) çoklu sarım çok pota [17]



Şekil 2.12 Değişik şekilli ısıtma amaçlı çok sarımlı bobinler:

a) yuvarlak, b) Dörtgen, c) biçimli,d) pankek,e) Helisel-sarmal, f) içten geçmeli [17]

2.5. Elektromanyetik Alanın Matematiksel Modeli

Elektromanyetik alanı hesaplama tekniği Maxwell denklemlerinin çözülebilmesine bağlıdır. Genel olarak zamana bağlı olarak değişen elektromanyetik alanlar için, Maxwell denklemleri aşağıdaki gibi diferansiyel formda yazılabilirler. [29,30]

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \text{ (Amper Kanunundan)} \quad (3.1)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \text{ (Faraday Kanunundan)} \quad (3.2)$$

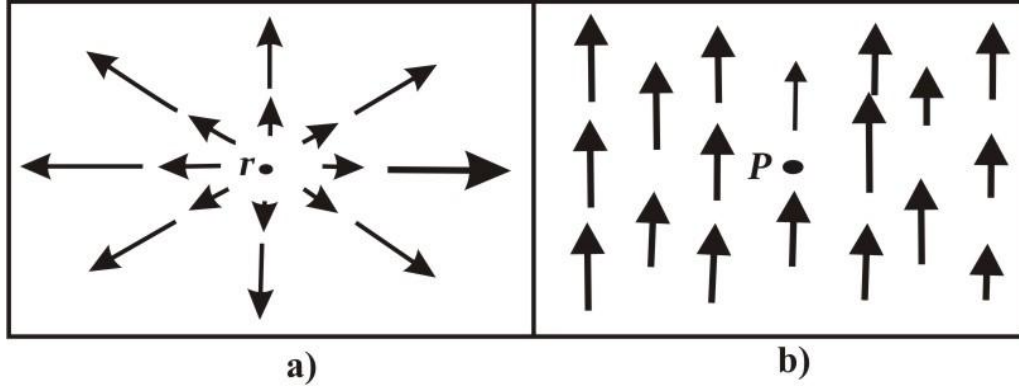
$$\nabla \cdot B = 0 \text{ (Gauss Kanunundan)} \quad (3.3)$$

$$\nabla \cdot D = \rho^{sarj} \text{ (Gauss Kanunundan)} \quad (3.4)$$

Yukarıdaki denklemleri daha iyi anlayabilmek için ∇U (Gradyan), $\nabla \cdot$ (Diverjans), $\nabla \times$ (Rotasyonel), sembollerini kısaca açıklayalım. Gradyan, üç değişkenli bir vektörel büyüklük olup, türevi genelleştirmek için aradığımız büyüklüktür. Türev küçük bir yer değiştirme için fonksiyonun ne kadar hızlı değiştiğini veren bir bağıntıdır. Eğer fonksiyonumuz üç bağımsız değişkene $U(X,Y,Z)$ sahip ise, değişkenlerdeki küçük yer değiştirmelerin fonksiyonu ne kadar hızla arttıracacağı kısmi türevle bulunabilir.[23]

$$\nabla U = \text{grad}U = i \frac{\partial U}{\partial x} + j \frac{\partial U}{\partial y} + k \frac{\partial U}{\partial z} \quad (3.5)$$

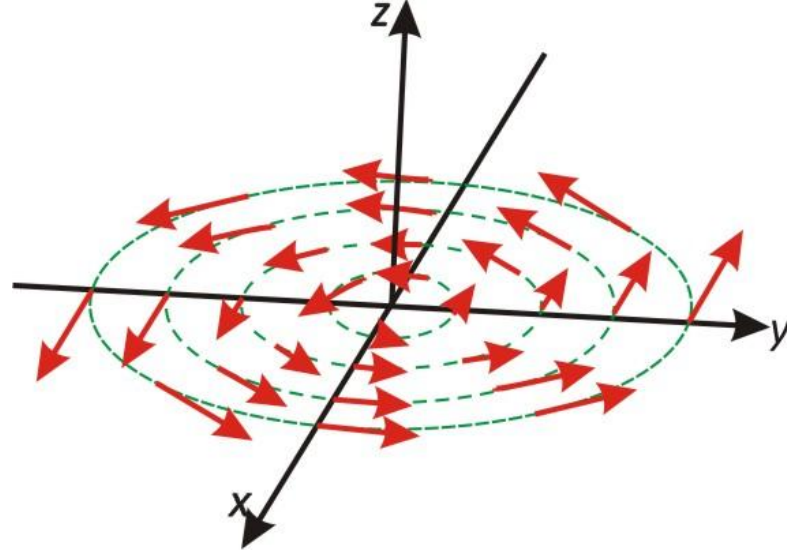
Diverjans U ($\nabla \cdot U$) bir noktadaki U vektör çizgilerinin ne kadar ıraksandığının bir ölçüsüdür. Şekil 2.13. a'daki vektör fonksiyonunun P noktasındaki diverjansı büyük (pozitif) olur. (oklar içe doğru olsaydı, negatif diverjans olurdu). Buna karşılık, Şekil 2.13. b'deki fonksiyonun p noktasındaki diverjansı sıfırdır; çünkü oklar ıraksamadan geçer.



Şekil 2.13 a) Diverjansın büyük olduğu vektör çizgileri b) Diverjansın sıfır olduğu vektör çizgileri

$$\nabla \cdot U = \text{div}U = \frac{\partial U_x}{\partial x} + \frac{\partial U_y}{\partial y} + \frac{\partial U_z}{\partial z} \quad (3.6)$$

$\nabla \times U$ rotasyoneli, U vektörünün bir nokta etrafında dolanış miktarının bir ölçüsüdür. Şekil 2.14'deki fonksiyonun rotasyoneli büyük olur. Üstelik sağ-el kuralına göre rotasyonel vektörü z yönünde olur. [31]



Şekil 2.14. Rotasyoneli büyük değere sahip vektör çizgileri [31]

$$\nabla \times U = \text{rot}U = \dot{i} \begin{vmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ U_x & U_y & U_z \end{vmatrix}$$

$$= \dot{i} \left(\frac{\partial U_z}{\partial y} - \frac{\partial U_y}{\partial z} \right) + \dot{j} \left(\frac{\partial U_z}{\partial z} - \frac{\partial U_z}{\partial x} \right) + \dot{k} \left(\frac{\partial U_y}{\partial x} - \frac{\partial U_x}{\partial y} \right) \quad (3.7)$$

Maxwell denklemleri sadece matematiksel bir anlama sahip değildir, somut fiziksel anlamlara da sahiptir. Örneğin denklem 3.1 H'nin rotasyonelinin devamlı iki kaynağa sahip olduğunu ifade eder. Bunlar; iletim (J) ve yer değiştirme (ρ^{sarj}) akımlarıdır. Ne zaman bir manyetik alan oluşturulsa, çevrelenen maddede elektrik akımı akışı vardır. Denklem 3.2'den şu sonuç çıkarılabilir; manyetik akış yoğunluğu değişiminin zamana oranı olan B, çevrelenen alanda rotasyonel E alanını indükleme akımlarını oluşturur. Diğer bir deyişle elektrik alanı oluşturur. Denklem 3.2 deki eksi işareti bu indüklenen elektrik alanının yönünü belirtir. Bu temel sonuçlar uzaydaki herhangi bir alanda uygulanabilir. [23]

İndüksiyon bobinine alternatif voltaj uygulanması, bobin devresinde alternatif akım meydana gelmesiyle sonuçlanır. Denklem 3.1'e göre bir alternatif bobin akımı, çevrelediği alanda, kaynak akım (bobin akımı) ile aynı frekansa sahip, alternatif

(değişken) manyetik alan oluşturur. Manyetik alan kuvveti, indüksiyon bobininden geçen akıma, bobin geometrisine ve bobin mesafesine bağlıdır. Değişken manyetik alan çalışma parçasında ve bobin yanında yerleştirilmiş diğer maddelerde eddy akımları oluşturur. Denklem 3.2'ye göre indüklenen akımlar, bobindeki kaynak akımla aynı frekansa sahiptir fakat bu akımların yönü bobin akımları ile karşı yönlüdür. Bu durum denklem 3.2'de eksi işareti ile tanımlanmıştır. Denklem 3.1'e göre; çalışma parçasında indüklenen eddy akımları, bobinin ana manyetik alanının karşı yönünde kendi manyetik alanlarını oluştururlar. İndüksiyon bobininin oluşturduğu toplam manyetik alan, kaynak manyetik alan ve indüklenen manyetik alanların bir sonucudur.[23]

Denklem 3.2'nin kısa notasyonu, elektrik geçirgen maddeleri indüksiyonla ısıtması ve ısı işleminde gerçekten önemli bir yere sahiptir. Manyetik akış yoğunluğunun diverjansının sıfır olduğunu söylemek, manyetik akış çizgilerinin (B) meydana çıktığı veya son bulduğu kaynak noktalarına sahip olmadığını söylemekle eş anlama sahiptir. Diğer bir deyişle, manyetik akış çizgileri devamlı olarak sürekli döngü formundadır.[23]

Yukarıda tanımlanan Maxwell denklemleri, denklem sayısının bilinmeyen sayısından daha az olmasından dolayı belirsiz durumdadır. Bu denklemler, manyetik alanın nicelikleri arasındaki ilişkiler tanımlandığında belirli hale gelirler. Aşağıda bu yapısal ilişkiler lineer izotropik ortam için açıklanmıştır.

$$D = \epsilon\epsilon_0 E \quad (3.8)$$

$$B = \mu_r \mu_0 H \quad (3.9)$$

$$J = \sigma E \quad (3.10)$$

Denklem 3.8 hesaba katıldığında denklem 3.1 aşağıdaki gibi tekrar yazılabilir.

$$\nabla \times H = \sigma E + \frac{\partial(\epsilon_0 \epsilon_0)}{\partial t} \quad (3.11)$$

Metallerin indüksiyonla ısıtılması pratik uygulamalarında, akımın frekansı 10 Mhz'den az, indüklenen kondüktor akımı yoğunluğu J yer değiştirme akımı yoğunluğundan ($\partial D / \partial t$) çok büyüktür. Bu nedenle denklem 3.11'in sağ tarafının son kısmı ihmal edilebilir. Sonuç olarak denklem 3.11 aşağıdaki gibi tekrar yazılabilir.

$$\nabla \times H = \partial E \quad (3.12)$$

bazı vektörel cebir işlemlerinden sonra, denklem 3.1, 3.2 ve 3.9 aşağıdaki gibi gösterilebilir.

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\sigma} \nabla H \right) = -\mu_r \mu_0 \frac{\partial H}{\partial t} \quad (3.13)$$

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu_r} \nabla E \right) = \sigma_r \mu_0 \frac{\partial E}{\partial t} \quad (3.14)$$

Denklem 3.9 manyetik vektör potansiyeli (A) açısından aşağıdaki gibi açıklanabilir;

$$B = \nabla \times A \quad (3.15)$$

ve daha sonra, denklem 3.2;

$$\nabla \times E = \nabla \times \frac{\partial A}{\partial t} \quad (3.16)$$

İntegrasyondan sonra aşağıdaki denklem elde edilir,

$$E = -\frac{\partial A}{\partial t} - \nabla \varphi \quad (3.17)$$

burada φ elektrik skaler potansiyelidir. Denklem 3.10 aşağıdaki gibi yazılabilir,

$$J = -\sigma \frac{\partial A}{\partial t} + j_s \quad (3.18)$$

Burada $J_s = -\sigma \nabla \varphi$ induksiyon bobinindeki kaynak(uyarma) akım yoğunluğudur. Malzeme özellikleri göz önünde tutulur, histerizis ve manyetik doyunluk ihmal edilirse denklem aşağıdaki gibi gösterilebilir.

$$\frac{1}{\mu_r \mu_0} (\nabla \times \nabla \times A) = J_s - \sigma \frac{\partial A}{\partial t} \quad (3.19)$$

Sertleştirme, dövme ve haddeleme öncesi indüksiyonla ısıtma ve kalıba basma gibi indüksiyonla ısıtma uygulamalarına histerizis kayıplarının neden olduğu ısı etkisi, Eddy akım kayıplarının neden olduğu ısı etkisinin %7'si kadardır. Bu uygulamalarda histerizisin ihmal edilmesi yaklaşımı doğrudur.[23]

Bununla beraber, indüksiyonla tavlama, gerilim giderme, galvanizleme öncesi ısıtma gibi bazı uygulamalarda histerizis kayıplarının neden olduğu ısı etkisi, eddy akımlarının oluşturduğu ısı etkisiyle karşılaştırılabilecek değerdedir. Histerizis kayıplarının toplam ısı oluşumuna katkısı %40 civarındadır. Bu durumdan dolayı histerizis kayıpları bu uygulamalarda hesaba katılmalıdır. [23]

Bazı vektörel cebir işlemlerinden sonra denklem 3.13, 3.14, ve 3.19 sırasıyla aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{1}{\sigma} \nabla^2 H = j\omega \mu_r \mu_0 H \quad (3.20)$$

$$\frac{1}{\mu_r} \nabla^2 E = j\omega \sigma_r \mu_0 E \quad (3.21)$$

$$\frac{1}{\mu_r} \nabla^2 E = j\omega \sigma_r \mu_0 E \quad (3.22)$$

Denklem 3.22 iki boyutlu kartezyen koordinat sistemi için Laplace açılımı gerçekleştirildiğinde aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\frac{1}{\mu_r \mu_0} \left(\frac{\partial^2 A}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial Y^2} \right) = -J_s + j\omega \sigma A \quad (3.23)$$

2.6. Isı İletiminin Matematiksel Modeli

Genel olarak, bir metal çalışma parçasında zamana bağımlı ısı transfer işlemi Fourier ısı iletim denklemi ile tanımlanabilir, [32]

$$c\gamma \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) = \dot{q} \quad (3.24)$$

Isı iletim denkleminin Laplace açılımı yapılırsa, denklem diferansiyel formda aşağıdaki şekilde tekrar yazılabilir,

$$c\gamma \frac{\partial T}{\partial t} = kx \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + ky \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + kz \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \dot{q} \quad (3.25)$$

\dot{q} = Eddy akımlarının oluşturduğu birim hacimdeki, birim zamandaki ısı kaynağı yoğunluğu (ısı üretimi olarak adlandırılır). Isı kaynağı yoğunluğu elektromanyetik problemler çözülerek elde edilir (W/m^3).

İndüksiyonla ısıtmanın çoğu mühendislik problemleri için, sınır şartlarına konveksiyon ve radyasyondan kaynaklanan ısı kayıpları eklenir. Bu durumda sınır şartları aşağıdaki şekilde gösterilebilir,

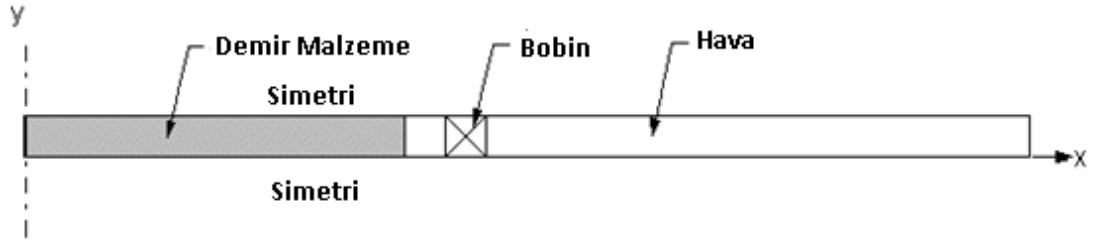
$$kx \frac{\partial T}{\partial n} + \alpha(T - T_0) + \sigma \epsilon (T^4 - T_0^4) + \dot{q} \quad (3.26)$$

2.7. Tek Boyutlu Elektromanyetik Termal Analiz

Tek boyutlu çözümlerde, indüksiyon fırını içindeki malzeme üzerinde sıcaklık, manyetik alan, ısı üretimi değişimleri bir tek doğrultuda, silindir yüzeyinden merkeze doğru olduğu varsayılmıştır. Problemin çözümlenmesi aşamasında elektromanyetik harmonik analiz ve zamana bağlı ısı analiz döngüleri ANSYS kullanılarak sonuca bağlanmıştır.

2.7.1.Problemin Tanıtılması

Çok uzun bir demir çubuğun yüzey sıcaklığının indüksiyon bobinin ile ısıtılması ve yüzeyde oluşan sıcaklık artışının iç kısımlara doğru ilerlemesi sonucu oluşan sıcaklık dağılımı incelenecektir. Bobin ile demir çubuk arasındaki mesafe yakın tutulmuş ve demir çubuk, bobinden kaynaklanan yüksek frekanstaki alternatif akımla uyarılmıştır. Oluşan alternatif akım, demir çubuğun ısınıp indüklemeye başlar. İndükleme, özellikle yüzeyde oluşur ve yüzey sıcaklığında hızlı bir artışa neden olur.



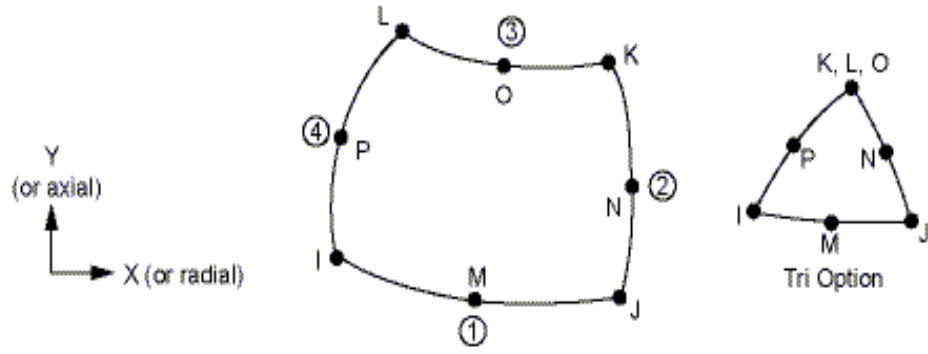
Şekil 2.15 Tek boyutlu sistem geometrisi

2.7.2. Eleman Seçimi

Sayısal çözüm için manyetik alan büyüklükleri yanında sıcaklık değerlerini de barındıran elementler seçilmek durumundadır. İki aşamalı bir sayısal çözüm uygulandığında birinci aşama çözüm olan düzlemsel dört düğümlü ANSYS içerisinde tanımlı Plane 53 kullanılmıştır. Bu element özellikleriyle ilgili açıklamalar aşağıda verilmiştir.[33,34]

Plane 53 Geometrisi:

Plane 53; 2 boyutlu manyetik alan içeren, 8 düğümlü ve her düğümde 4 serbestlik derecesine sahip bir eleman tipidir. Bu eleman tipi elektromanyetik analiz kısmında kullanıldı.

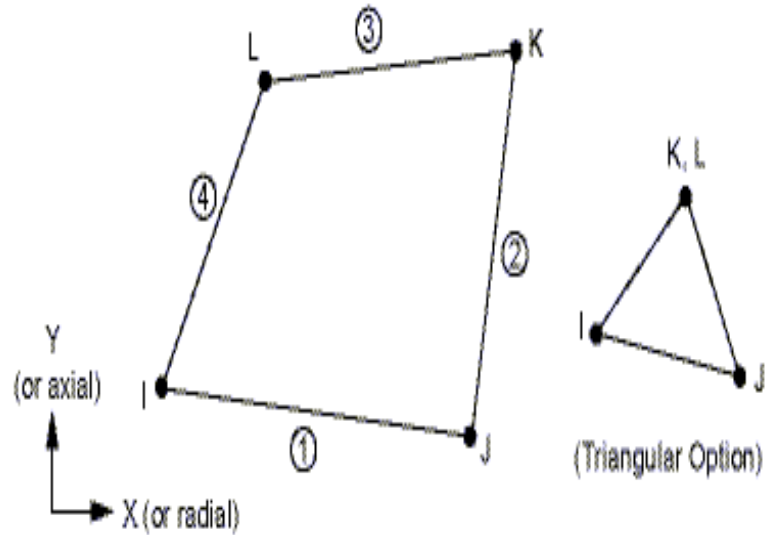


Şekil 2.16 Plane 53 eleman tipi geometrisi

Isıl analizin aşaması olan ikinci aşama çözümde düzlemsel ve dört düğümünden oluşan Plane 55 standart element tipi kullanılmıştır. Bu elementin düğümlerinde sadece sıcaklık barındırıldığından çözüm sonunda düzlemde sıcaklık dağılımı elde edilmektedir. Bu elemente ilişkin element özellikleri aşağıda verilmiştir.

Plane 55 Geometrisi;

Plane 55; 2 boyutlu, 4 düğümlü ve her düğümünde tek serbestlik derecesi olarak sıcaklık içeren bir eleman tipidir. Bu eleman tipi termal analiz kısmında kullanıldı.



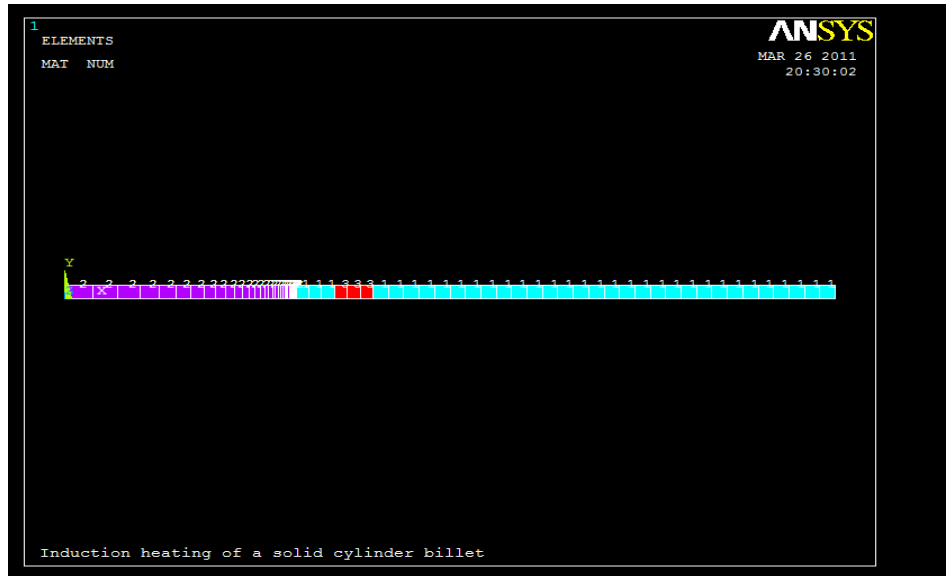
Şekil 2.17 Plane 55 eleman tipi geometrisi

Çizelgede gösterilenin dışında havanın ve indüktörün manyetik geçirgenlik değeri 1 olarak girilmiştir.

Çizelge 2.3 Demir malzeme için sıcaklığa bağlı bazı materyal özellikleri

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10
Sıcaklık	0	27	127	327	527	727	765	927		
Entalpi	7.89E-27	9.16E+11	4.53E+12	1.27E+13	2.25E+13	3.34E+13	3.55E+13	4.35E+12		
Sıcaklık	0	730	930	1000						
Isıl iletkenlik	60.64	29.5	28	28						
Sıcaklık	25.5	160	291.5	477.5	635	698	709	720.3	742	761
Manyetik geçirgenlik	200	190	182	161	135	104	84	35	17	1
Sıcaklık	0	125	250	375	500	625	750	875	1000	
Özdirenç	1.84E-7	2.72E-7	3.84E-7	5.12E-7	6.56E-7	8.24E-7	1.03E-3	1.15E-3	1.2E-6	
Sıcaklık	0									
Emissivity	0.68									

2.7.3. Geometrinin Bölüntülenmesi

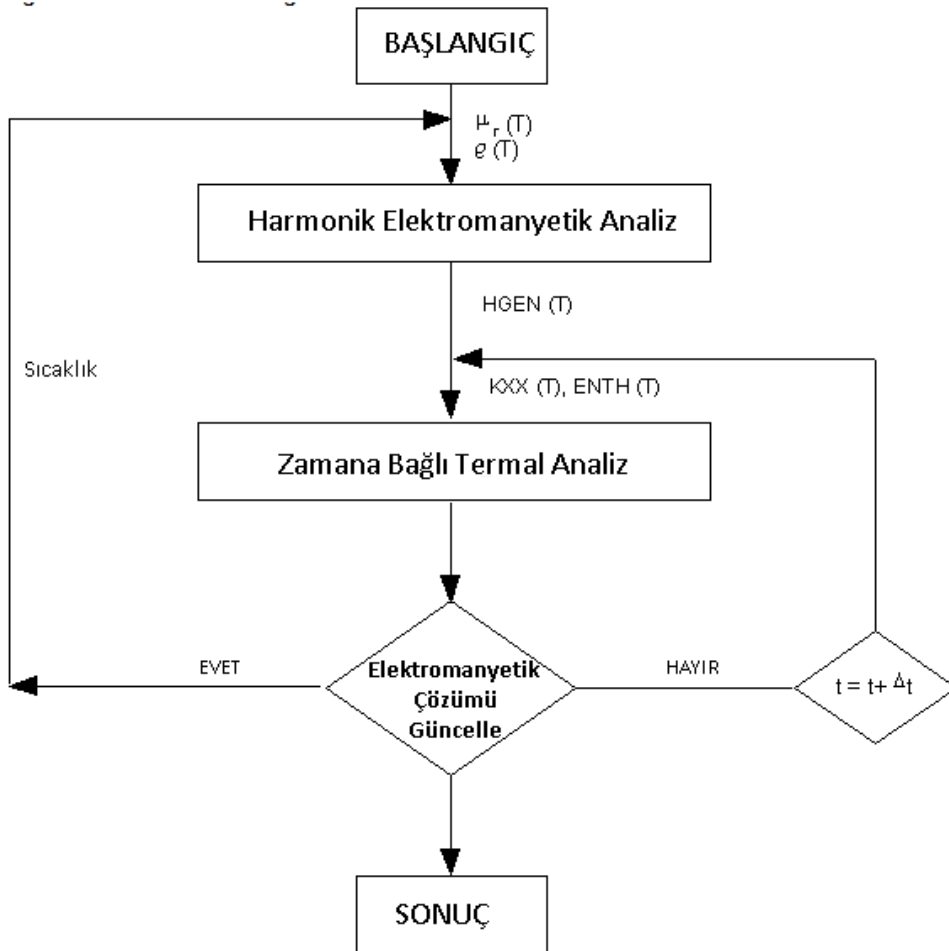


Şekil 2.18 Tek boyutlu sistemin elemanlarına ayrılmış görünümü

Şekil 2.18'de 1 numaralı materyal havayı, 2 numaralı materyal demir çubuğu, 3 numaralı materyal bobini göstermektedir.

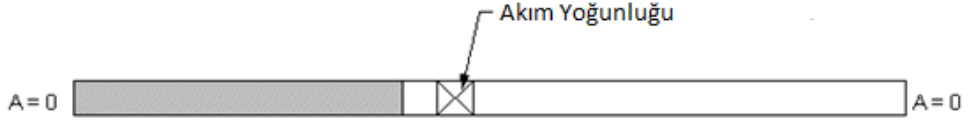
2.7.4.İzlenecek Yol

Metal malzemenin sıcaklığı kaç dereceye kadar artırılmak isteniyorsa o sıcaklıklar arasında materyal değerlerin sıcaklıkla değişimleri hem elektromanyetik hem de termal çözümleme için ANSYS e aktarılmalıdır. Problemin çözümlendirilmesi sıralı olarak yapılmalıdır. İlk olarak elektromanyetik analiz harmonik olarak daha sonra termal analiz zamana bağlı olarak çözdürülmelidir. Son olarak elektromanyetik analiz çeşitli zaman aralıklarında tekrarlanmalı ki çözümü etkileyecek olan sıcaklığın zamana bağlı özellikleri doğrulansın ve ısı metal malzemeye aktarılsın.



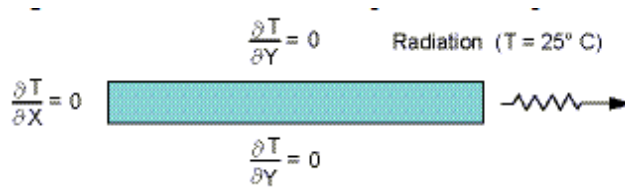
Şekil 2.19 Elektromanyetik-Termal analiz akış diyagramı

Sınır şartı olarak elektromanyetik çözümler için bobine akım yoğunluğu değeri atanması yapılır. Termal çözümler için atanan sınır şartı ise ışıınım değeri dir. Bu değ erler oda sıcaklığı olan 25⁰ C de atanır.



Şekil 2.20 Bobine atanan akım yoğunluğu

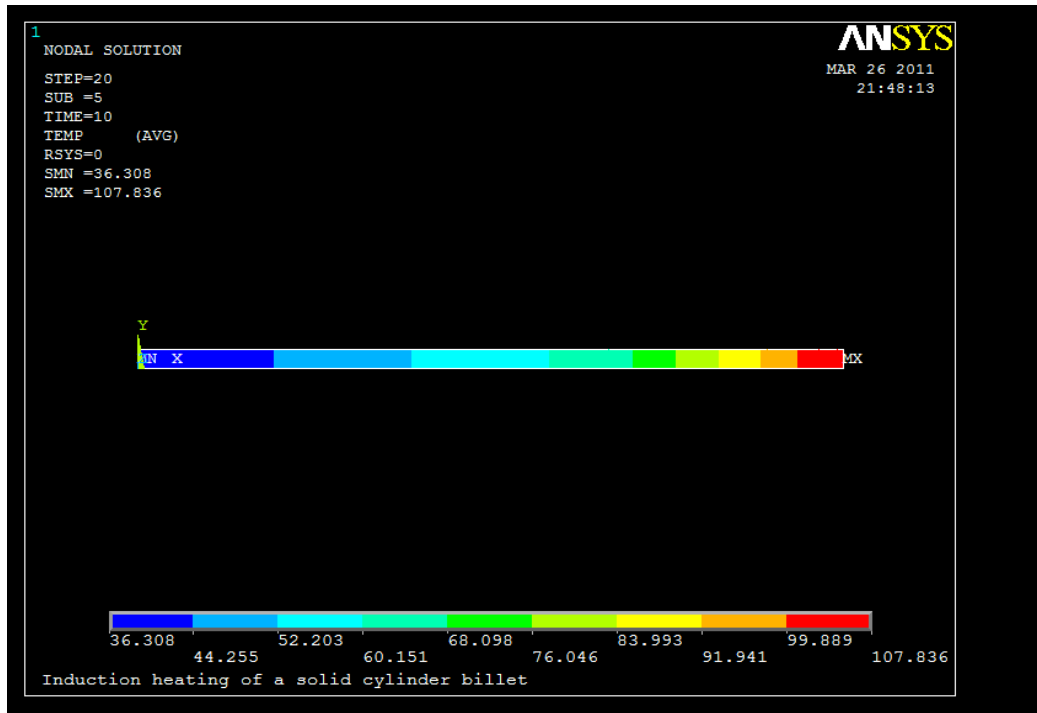
Şekil 2.20’de bobine atanan akım yoğunluğu görülmektedir.



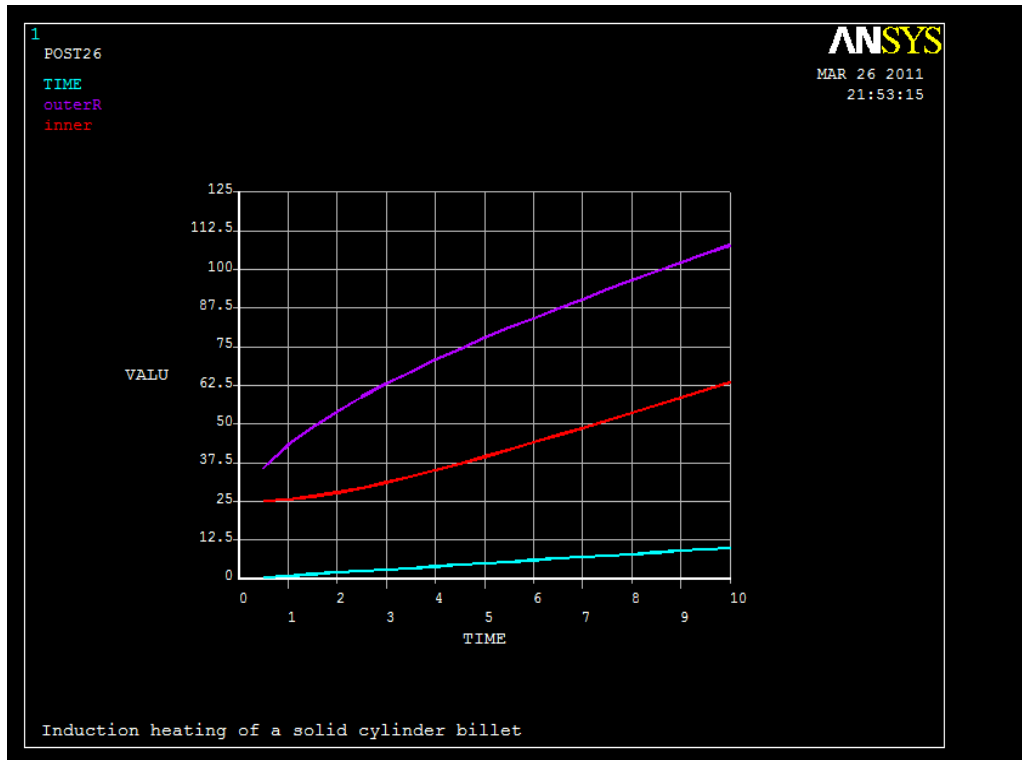
Şekil 2.21 Demir çubuktaki yalıtım ve bobinin tesir ettiği yüzeydeki ışıınım

Şekil 2.21’de demir çubuktaki yalıtım ve bobinin tesir ettiği yüzeydeki ışıınım görülmektedir.

2.7.5. Sonuç



Şekil 2.22 Analiz sonucu demir çubuk üzerinde oluşan sıcaklık dağılımı



Şekil 2.23 10. saniye sonunda demir çubuğun iç ve dış kısımlarındaki sıcaklık artışının zamana bağlı değişimi.

2.8. İki Boyutlu Elektromanyetik Termal Analiz

Tek boyutlu çözümlerde, indüksiyon fırını içindeki malzeme üzerinde sıcaklık, manyetik alan, ısı üretimi değişimleri bir tek doğrultuda, silindir yüzeyinden merkeze doğru olduğu varsayılmıştır. Ancak, bu değişimler gerçekte sadece silindir yüzeyinden merkeze doğru değil, radyal yönde de değişimler söz konusudur. Bunun için analizin, tek boyutluya göre daha gerçekçi bir sonucunun iki boyutlu bir düzlem üzerinde çözümlenmesi yapılmıştır. Bu çözümlemede değişimlerin xy düzlemi üzerinde olduğu varsayılmıştır.

Sayısal çözümlerde sonuca ulaşmak için, bir başka deyişle birleştirilmiş (couple) çözüm için ilk aşama ısı üretimi değerlerinin noktasal olarak bütün düzlemde elde edilmesidir. Bu değerlerin eldesinden sonra ısı enerjisinin korunumu denkleminde sıcaklık dağılımı çözümüne geçilebilmektedir. Bu sıcaklık dağılımı indüksiyon işleminde hangi noktalarda daha yüksek, hangi noktalarda daha düşük ve ergimenin ya da tavlamanın düzlem üzerinde hangi büyüklüklerde olduğu çözüm sonunda görülebilmektedir.

İki boyutlu çözümde sınır ve başlangıç şartları aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır. Problemin zamana bağlı kararsız rejimde bir problem olduğu unutulmamalıdır. Isı üretimi ve sıcaklık dağılımları bütün zamanlar için elde edilmek durumundadır.

Başlangıç Şartları;

$$t=0, \quad T=25^{\circ}\text{C}, \quad f=1000 \text{ Hz.} \quad A=1000 \text{ A}$$

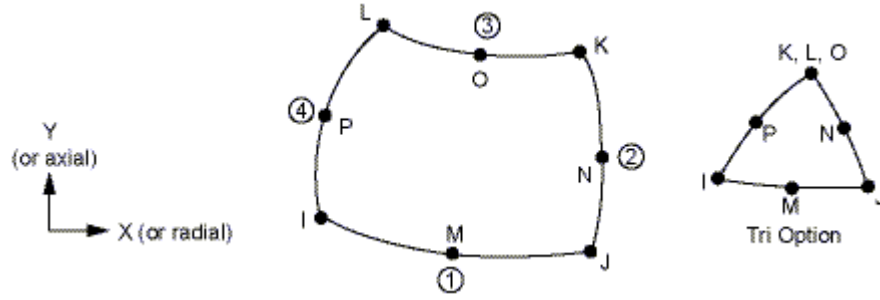
Sınır Şartları;

$$R=70, \quad q=0$$

2.8.1. Eleman Seçimi

Sayısal çözüm için manyetik alan büyüklükleri yanında sıcaklık değerlerini de barındıran elementler seçilmek durumundadır. İki aşamalı bir sayısal çözüm uygulandığında birinci aşama çözüm olan düzlemsel dört düğümlü ANSYS içerisinde tanımlı Plane 53 kullanılmıştır. Bu element özellikleriyle ilgili açıklamalar aşağıda verilmiştir.

Plane 53 Geometrisi:



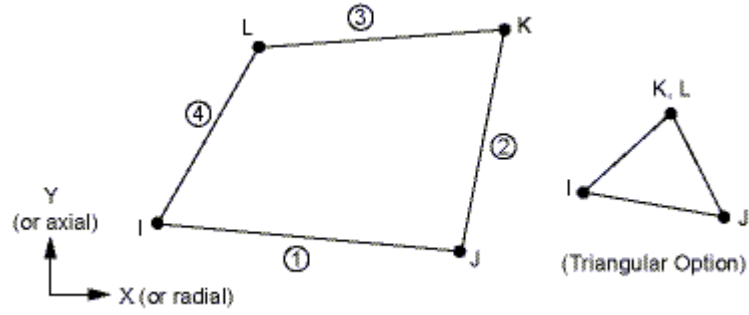
Şekil 2.24 Plane 53 eleman tipi geometrisi

2.8.2. Düğümler - Nodes

Bu element sekiz(8) düğümden oluşmaktadır. Bu düğümler elementi oluşturan köşelerde ve köşeler ortasında olmak üzere yerleşmiştir(I, J, K, L, M, N, O, P). Bu düğümlerde sayısal çözüm değişken değerleri saklanmaktadır. Bu değişkenler sıcaklık, ısı üretimi miktarı büyüklükleridir.

Isıl analizin aşaması olan ikinci aşama çözümde düzlemsel ve dört düğümden oluşan Plane 55 standart element tipi kullanılmıştır. Bu elementin düğümlerinde sadece sıcaklık barındırıldığından çözüm sonunda düzlemde sıcaklık dağılımı elde edilmektedir. Bu elemente ilişkin element özellikleri aşağıda verilmiştir.

Plane 55 Geometrisi;



Şekil 2.25 Plane 55 eleman tipi geometrisi

2.8.3. Malzeme Özelliklerinin Girilmesi;

İndüksiyon fırınının yapısından dolayı indüktör, hava ve ısıtılacak malzeme özellikleri tanımlanarak bu özellikler üzerinden hesaplama yapılacaktır.

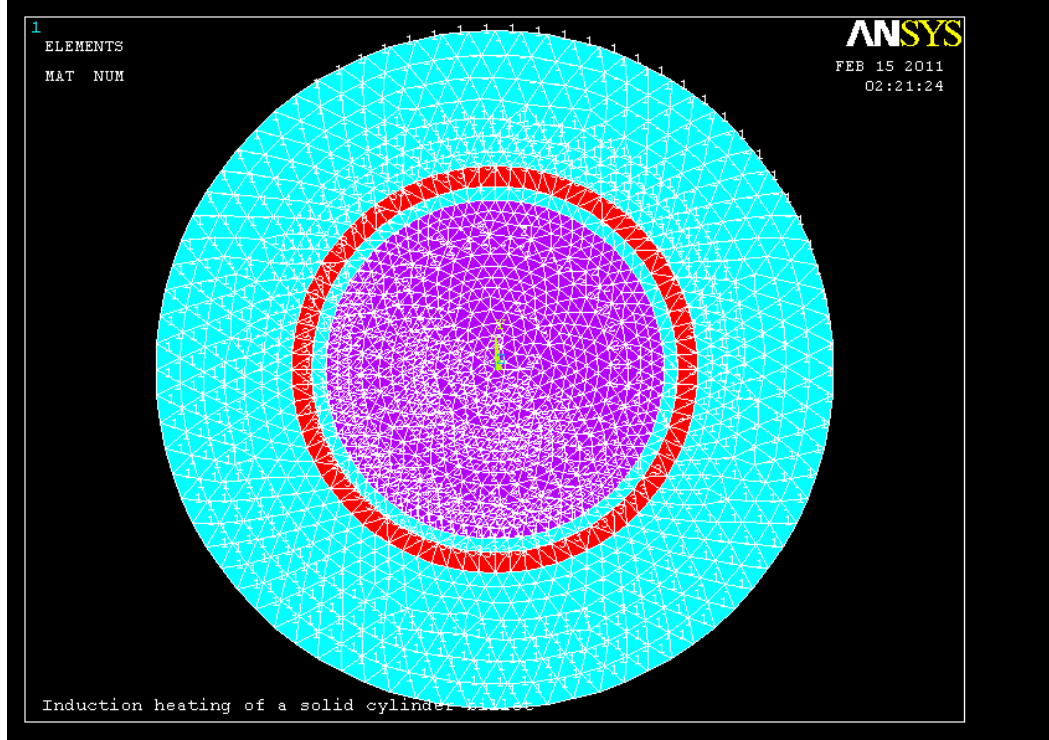
Isıtılacak malzemeye ilişkin manyetik geçirgenlik, özdirenç, entalpi değerleri ve ısı iletkenlik değerleri sıcaklığa bağlı olarak analize dahil edilmişlerdir. Bu büyüklüklerin sayısal değerleri aşağıdaki çizelgede verilmiştir.

Çizelge 2.4 Demir malzeme için sıcaklığa bağlı bazı materyal özellikleri

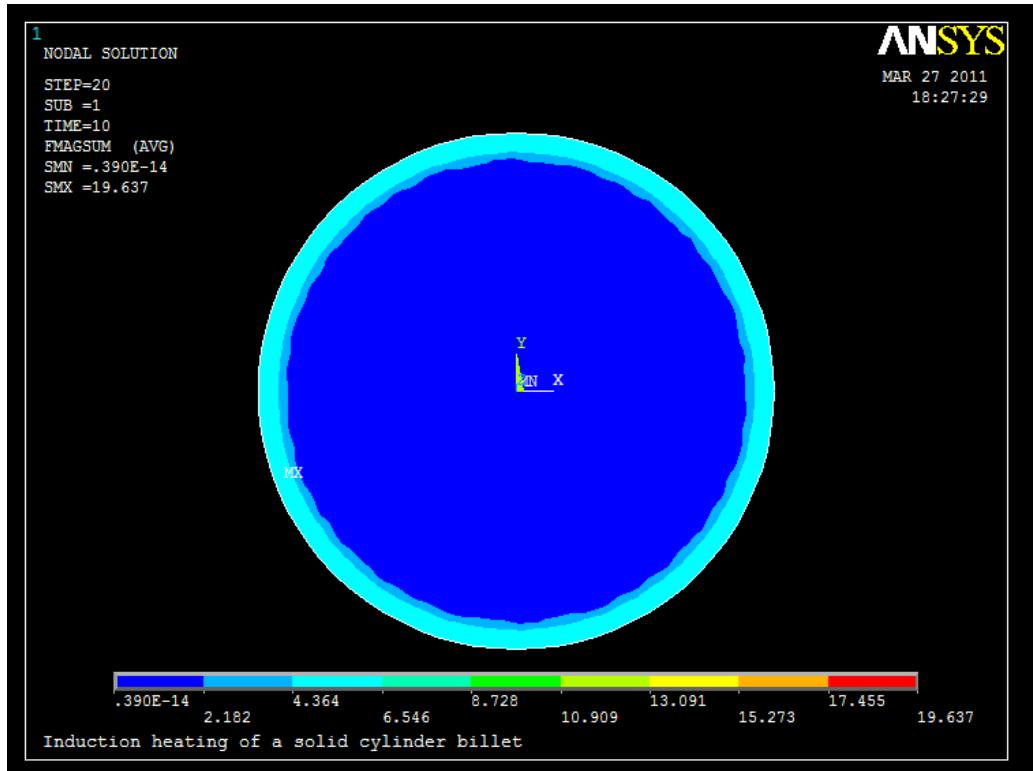
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10
Sıcaklık	0	27	127	327	527	727	765	927		
Entalpi	7.89E-27	9.16E+11	4.53E+12	1.27E+13	2.25E+13	3.34E+13	3.55E+13	4.35E+12		
Sıcaklık	0	730	930	1000						
Isıl iletkenlik	60.64	29.5	28	28						
Sıcaklık	25.5	160	291.5	477.5	635	698	709	720.3	742	761
Manyetik geçirgenlik	200	190	182	161	135	104	84	35	17	1
Sıcaklık	0	125	250	375	500	625	750	875	1000	
Özdirenç	1.84E-7	2.72E-7	3.84E-7	5.12E-7	6.56E-7	8.24E-7	1.03E-3	1.15E-3	1.2E-6	
Sıcaklık	0									
Emissivity	0.68									

Çizelgede gösterilenin dışında havanın ve indüktörün manyetik geçirgenlik değeri 1 olarak girilmiştir.

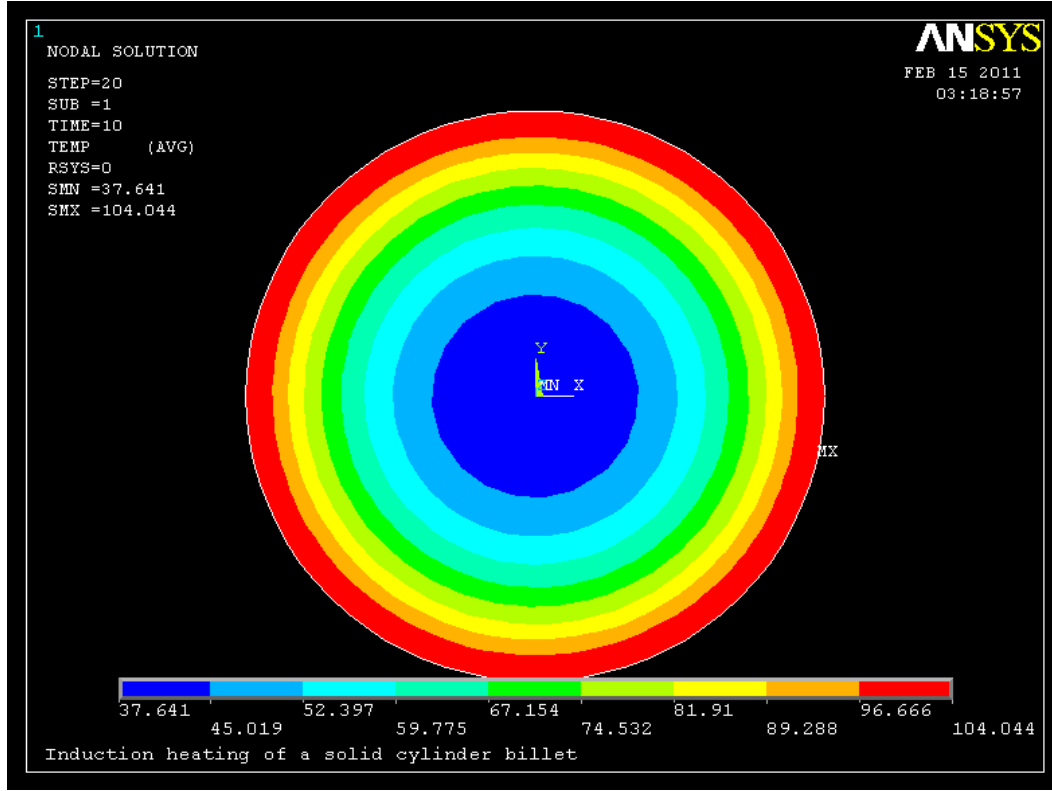
Sayısal çözümde tanımlamaları takiben çözüm düzleminin elementlere ayırma işlemi (meshing) yapılmalıdır.



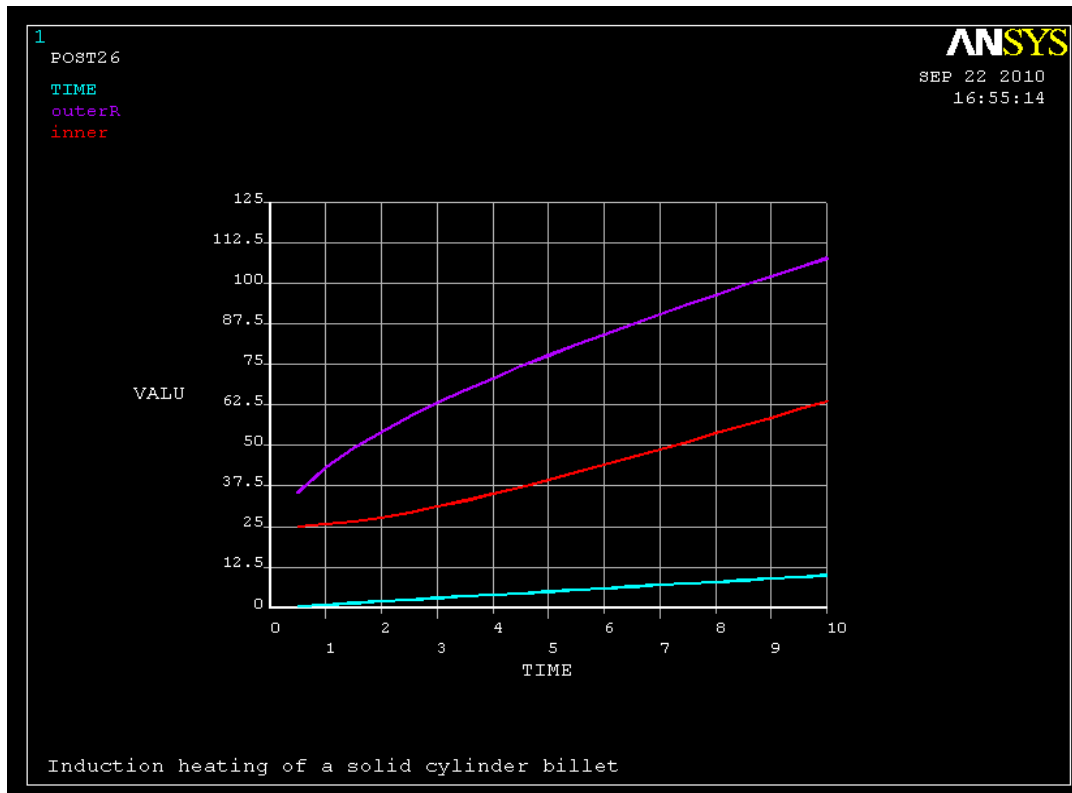
Şekil 2.26 10. Saniye sonunda iki boyutlu sistemin elemanlarına ayrılmış görünümü



Şekil 2.27 10.saniye sonunda manyetik alan dağılımı



Şekil 2.28 10. Saniye sonunda sıcaklık dağılımı



Şekil 2.29 10. saniye sonunda iç ve dış sıcaklık artış grafiği

2.9. Üç Boyutlu Elektromanyetik Termal Analiz

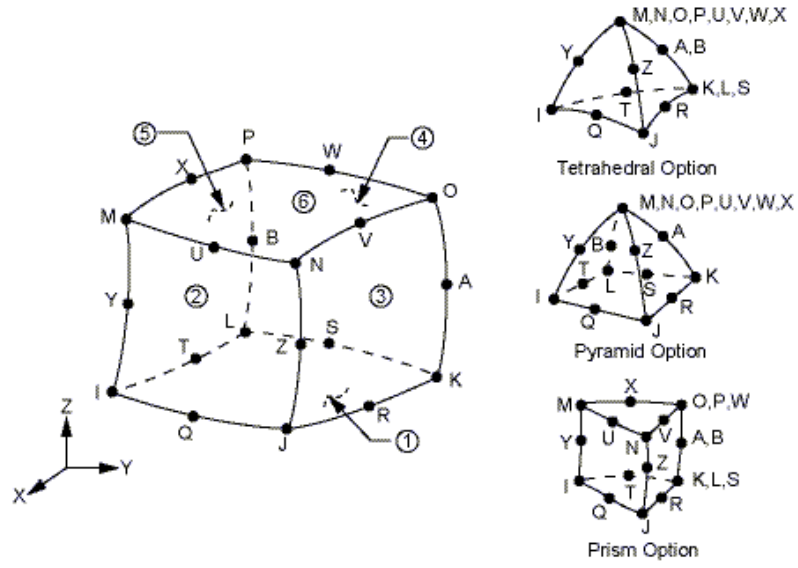
Tek ve iki boyutlu çözümlerlerde indüktör ve ısıtılan malzemenin yüzey kesitlerindeki manyetik alan ve termal çözümlere dikkate alınmış ve bu varsayım, sayısal olarak çözülmüş, sonuçlar elde edilmiştir. Fakat gerçek bir indüksiyonla ısıtma işleminde, hem elektromanyetik hem de termal çözümlere için indüktör ve malzemenin boyu da önem arz etmektedir. Bunun için analizin, tek ve iki boyutlu çözümlerini baz alınarak çözümlere genişletilmiş ve gerçek bir indüksiyon fırını ölçüleri ve malzeme boyutları modellenerek, elektromanyetik ve termal değişimler xyz uzayı üzerinde üç boyutlu olarak çözümlenmiştir.

2.9.1. Eleman Seçimi

Üç boyutlu analizde ilk olarak analiz tipleri tanıtılacaktır. Seçilen eleman tiplerinin serbestlik dereceleri belirtilerek yapılacak analiz için uygunlukları açıklanmış olacaktır.

2.9.1.1.Solid 236 Geometrisi

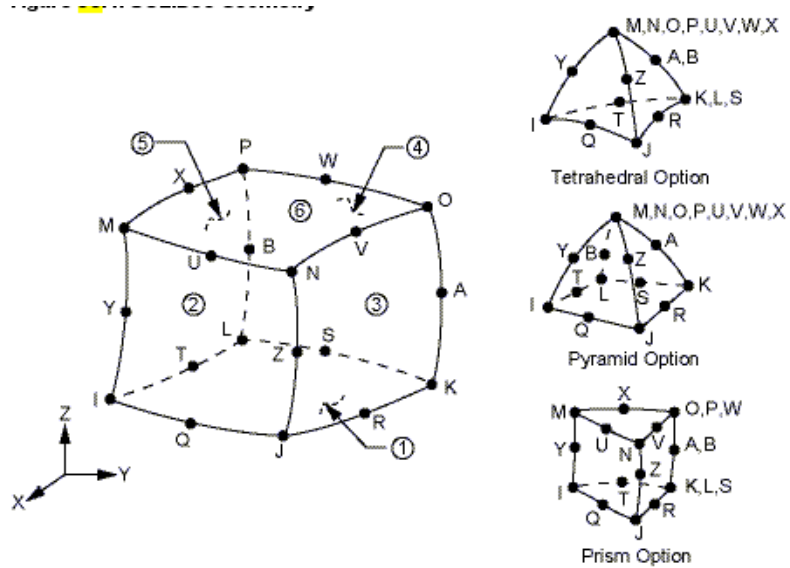
Bu eleman tipi elektromanyetik analiz için kullanılmıştır. Cismin geometrisi, uygulanabilir sınır şartı değerleri, serbestlik dereceleri bu eleman tipini elektromanyetik analiz için uygun kılmıştır. Solid 236; 3 boyutlu, 20 düğümlü, elektromanyetik alan içeren bir eleman tipidir. Bu eleman tipi manyetik ve elektrik serbestlik derecelerine sahiptir.



Şekil 2.30 Solid 236 eleman tipi geometrisi

2.9.1.2.Solid 90 Geometrisi

Bu eleman tipi termal analiz için seçilmiştir. Cismin geometrisine uygunluğu, uygulanabilen sınır şartları ve serbestlik dereceleri bu eleman tipini termal analiz için uygun kılmıştır. Solid 90; 3 boyutlu, 20 düğümlü, termal serbestlik derecelerine sahip bir eleman tipidir.



Şekil 2.31 Solid 90 eleman tipi geometrisi

2.9.2. Malzeme Özelliklerinin Girilmesi

İndüksiyon fırınının yapısından dolayı indüktör, hava ve ısıtılacak malzeme özellikleri tanımlanarak bu özellikler üzerinden hesaplama yapılacaktır.

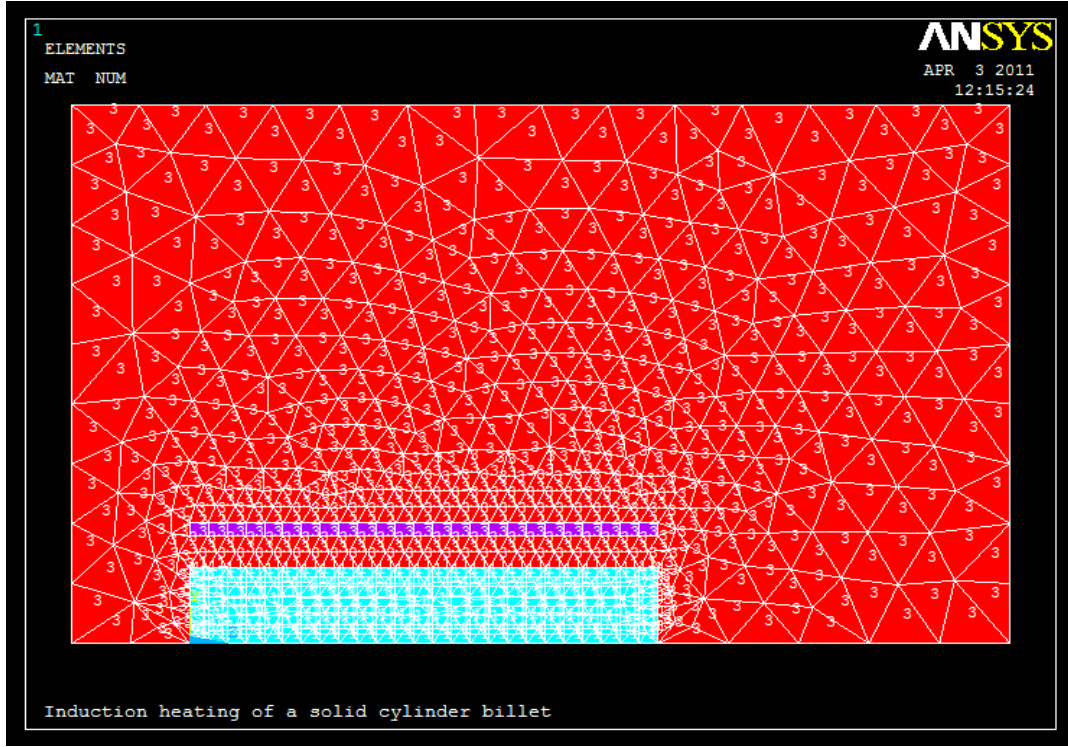
Isıtılacak malzemeye ilişkin manyetik geçirgenlik, öz direnç, entalpi değerleri ve ısı iletkenlik değerleri sıcaklığa bağlı olarak analize dâhil edilmişlerdir. Bu büyüklüklerin sayısal değerleri aşağıdaki çizelge verilmiştir.

Çizelge 2.5 Demir malzeme için sıcaklığa bağlı bazı materyal özellikleri

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10
Sıcaklık	0	27	127	327	527	727	765	927		
Entalpi	7.89E-27	9.16E+11	4.53E+12	1.27E+13	2.25E+13	3.34E+13	3.55E+13	4.35E+12		
Sıcaklık	0	730	930	1000						
Isıl iletkenlik	60.64	29.5	28	28						
Sıcaklık	25.5	160	291.5	477.5	635	698	709	720.3	742	761
Manyetik geçirgenlik	200	190	182	161	135	104	84	35	17	1
Sıcaklık	0	125	250	375	500	625	750	875	1000	
Özdirenç	1.84E-7	2.72E-7	3.84E-7	5.12E-7	6.56E-7	8.24E-7	1.03E-3	1.15E-3	1.2E-6	
Sıcaklık	0									
Emissivity	0.68									

Çizelgede gösterilenin dışında havanın ve indüktörün manyetik geçirgenlik değeri 1 olarak girilmiştir.

2.9.3. Elemanlarına Ayırma



Şekil 2.32 Üç boyutlu sistemin elemanlarına ayrılmış görünümü

Yukarıdaki şekilde indüktör ve demir çubuğun elemanlarına ayrılmış hali görülmektedir. İç kısımda demir çubuk dış kısımda ise indüktör bulunmaktadır. En dışta kırmızı renkte görülen materyal ise havadır.

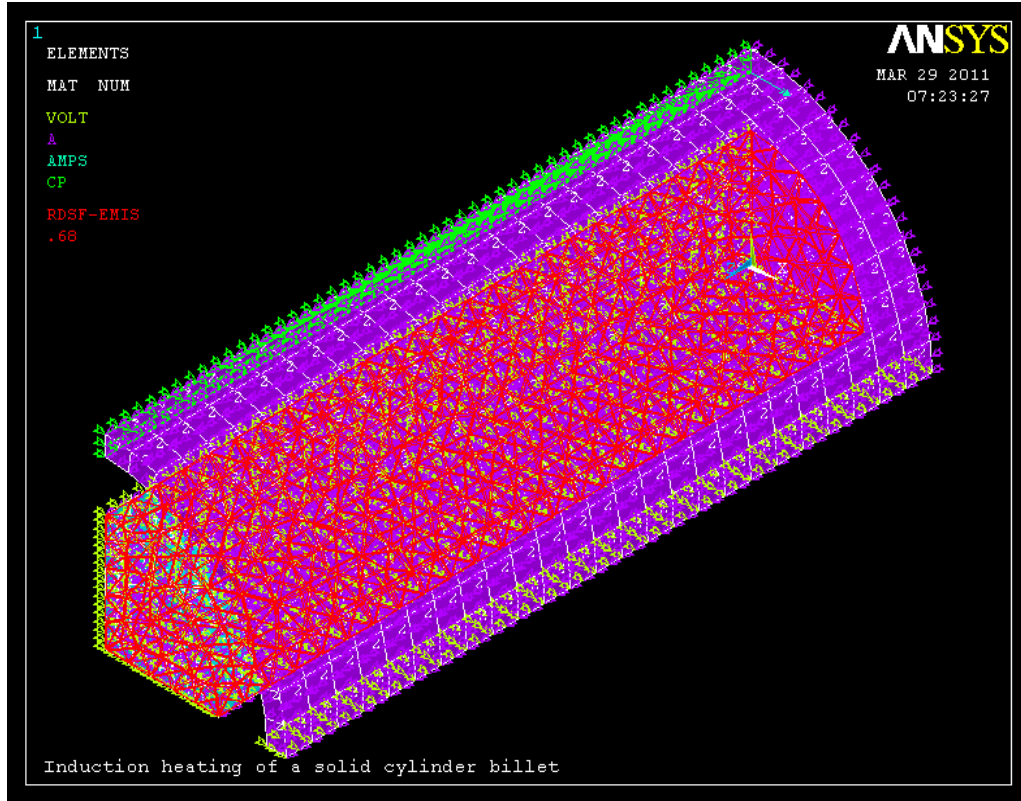
Resimde görüldüğü gibi analiz için hazırlanan geometriler dörtte bir hacminde alınmışlardır. Bunun nedeni sistemin tam hacimde alınması halinde mesh sayısında, dolayısıyla düğüm noktası sayısında oluşacak fazlıktan dolayı analizin çok uzun sürmesini önlemektir. Zira sistem simetrik bir sistem olduğundan dörtte bir hacminde gerçekleşecek her türlü değişiklik tüm hacimde aynı şekil ve oranda gerçekleşecektir.

2.9.4.İzlenecek Yol

Metal malzeme sıcaklığını kaç dereceye kadar artırılmak isteniyorsa o sıcaklıklar arasında materyal değerlerin sıcaklıkla değişimleri hem elektromanyetik hem de termal çözümleme için ANSYS programına aktarılmalıdır. Problemin

çözümlemlenmesi sıralı olarak yapılmalıdır. İlk olarak elektromanyetik analiz harmonik olarak daha sonra termal analiz zamana bağlı olarak çözdürülmelidir. Son olarak elektromanyetik analiz çeşitli zaman aralıklarında tekrarlanmalı ve çözümü etkileyecek olan sıcaklığın zamana bağlı özellikleri doğrulanmalı ve ısı demir çubuğa aktarılmış olmalıdır.

2.9.5. Sınır Şartları



Şekil 2.33 Üç boyutlu modelin sınır şartları ve yüklemeleri

Şekil 2.33'de indüktöre ve demir çubuğa uygulanmış olan sınır şartları görülmektedir. Bunlar; indüktöre uygulanan Akım değeri, demir çubuğa uygulanan Işınım değeri ve her ikisine de uygulanan yalıtımdır.

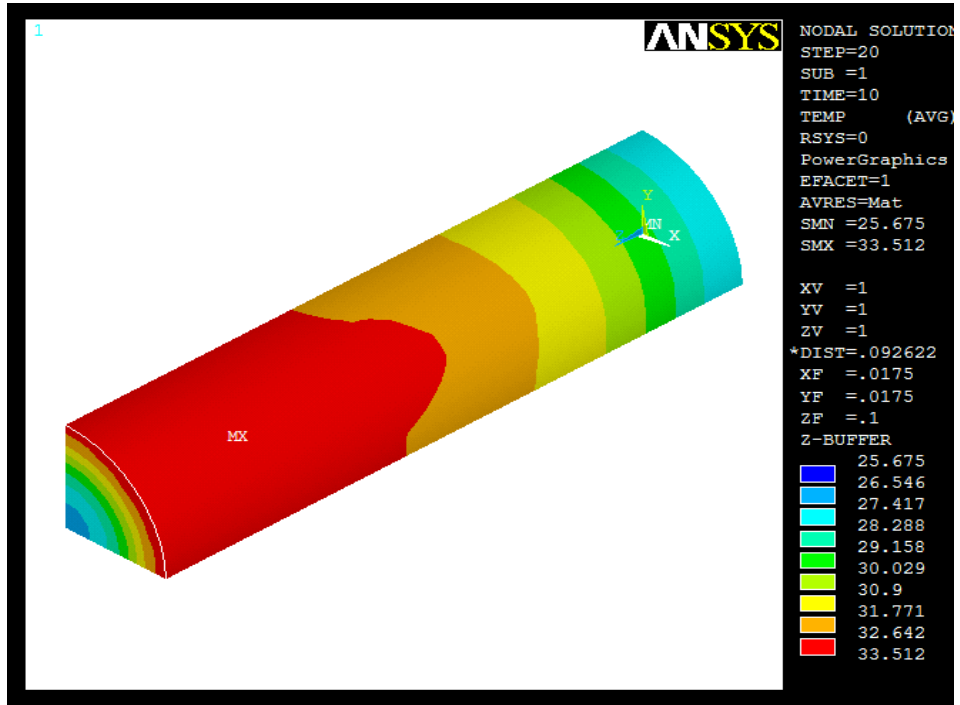
3. ARAŞTIRMA BULGULARI VE DENEYSEL SONUÇLAR

İndüksiyon bobini tasarımında en etken ve belirleyici unsurların zaman, frekans, güç ve ısıtılacak malzemenin belirli bir noktası için özel sıcaklık değerine erişmesi olduğu bilinmektedir. Bu unsurlar dikkate alınarak, sayısal çözümleme farklı akım değerlerinde, farklı frekans değerlerinde, farklı zaman aralıklarında ve ısıtılacak metalin indüksiyon bobini içerisindeki konumu değiştirilerek çözülmüş ve sayısal çözümleme sonuçları elde edilmiştir.

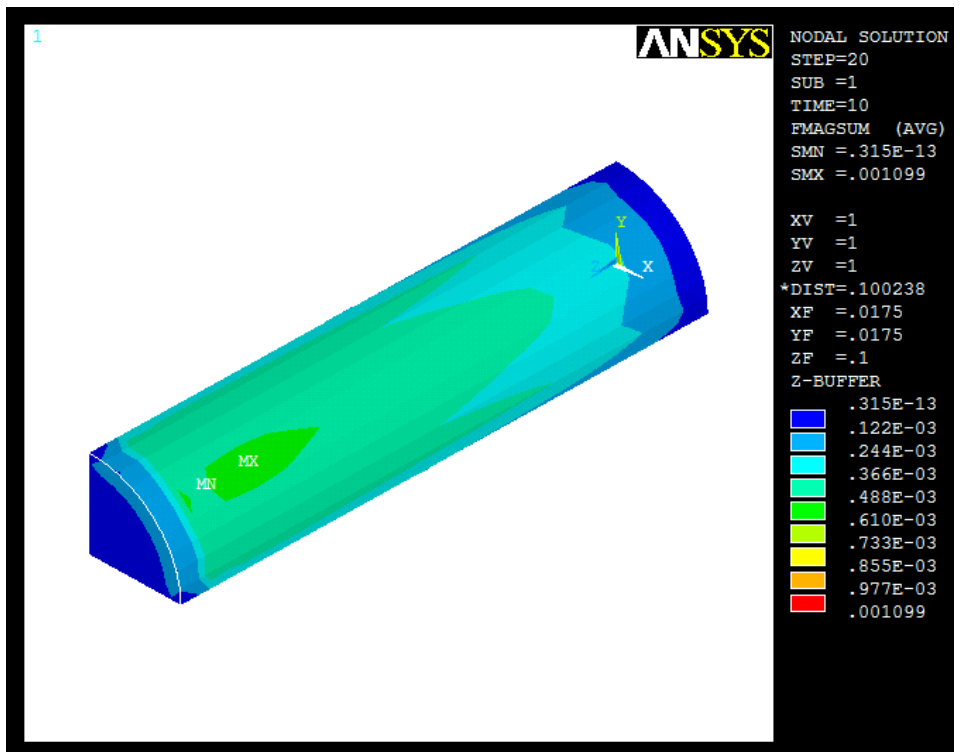
3.1. Farklı Akım Değerlerindeki Sayısal Çözümleme Sonuçları

1 m boyundaki indüksiyon bobini içerisindeki 70 mm çapındaki metal malzemenin boyu 200 mm alınmıştır. Bobine uygulanan akımın doğrudan sistem parametrelerine etki ettiği bilinmektedir. Bu nedenle indüksiyon bobinine uygulanan akım değeri sırasıyla 1000 A, 2000 A, 3000 A ve 4000 A alınarak model hazırlanmış ve sistem parametreleri girilerek sayısal çözümleme sonuçları elde edilmiştir. Metal malzeme bobinin ön tarafında konumlandırılmıştır.

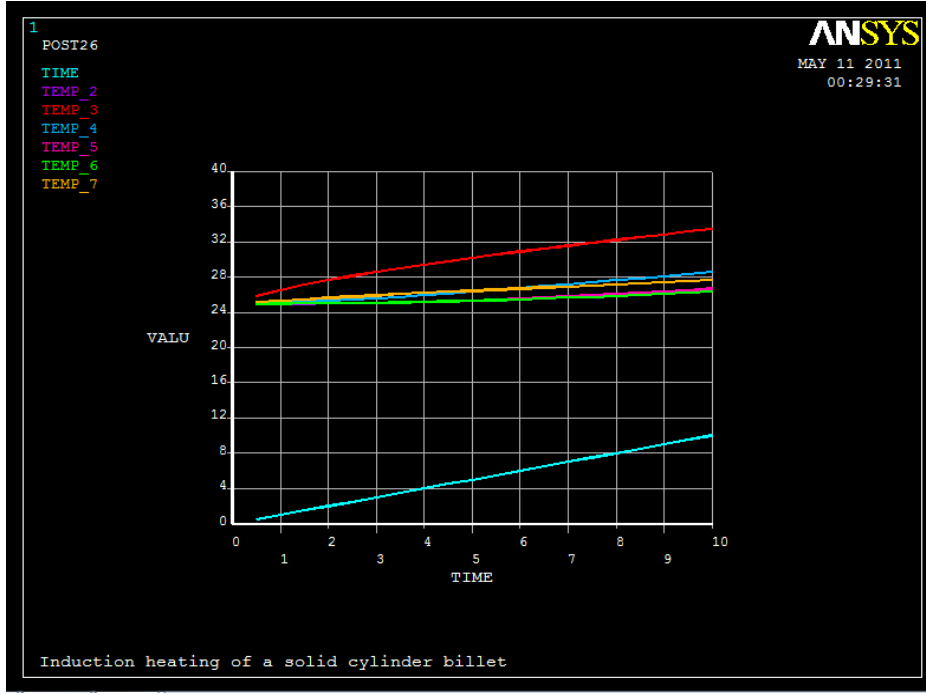
1000 Amper akım için elde edilen sonuçlar aşağıda gösterilmiştir.



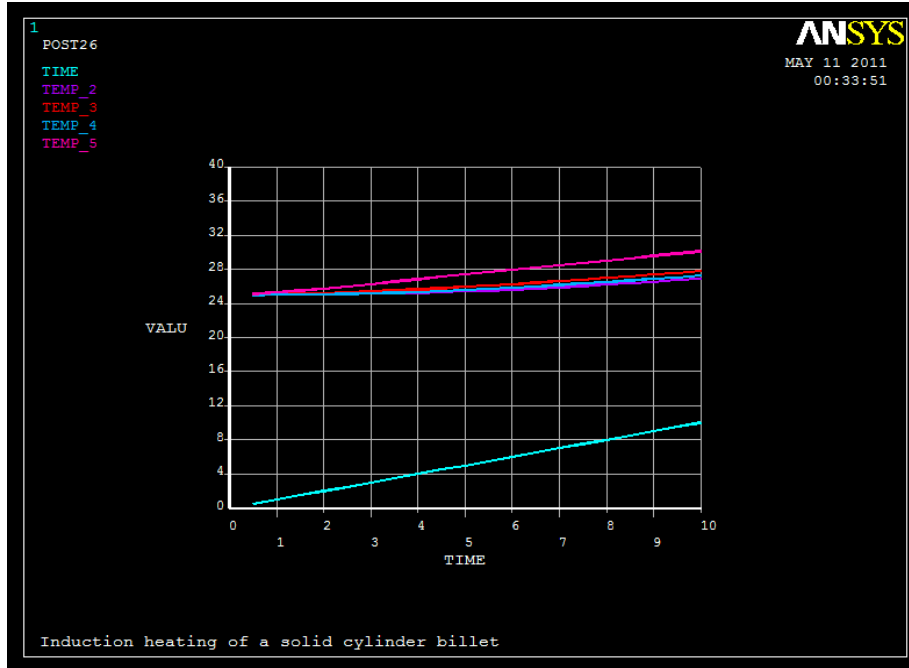
a) 1000 A Akım Değerinde 10. Saniye sonunda 3-D Sıcaklık Dağılımı



b) 1000 A Akım Değerinde 10. saniye sonunda 3-D Manyetik Alan Oluşumu



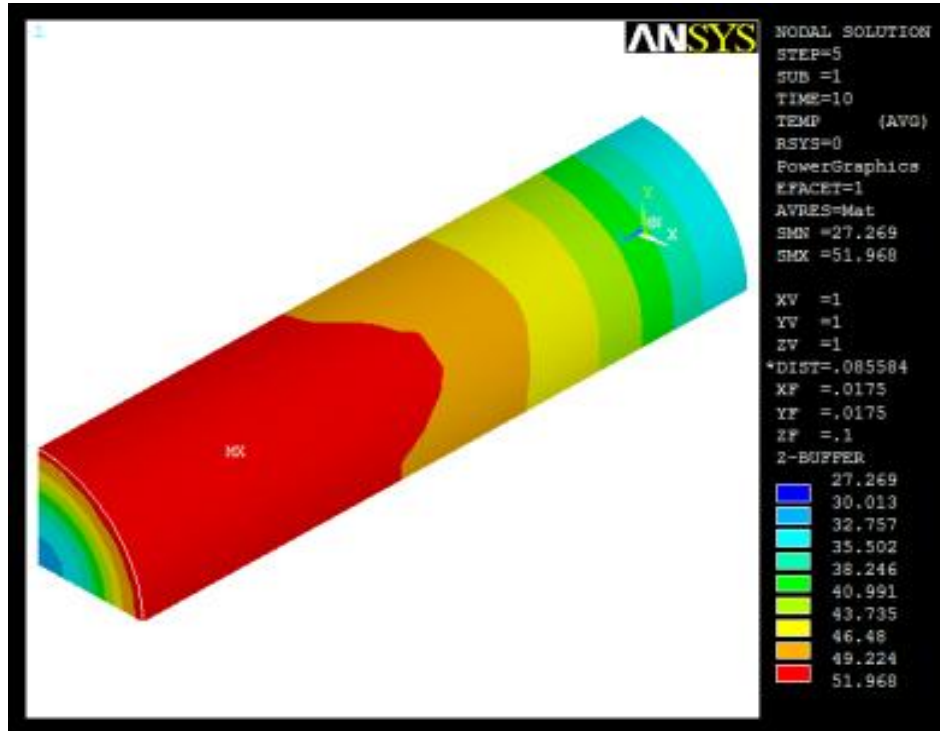
c) 1000 A Akım Değerinde 10. saniye sonunda z-ekseni boyunca sıcaklık değişimi



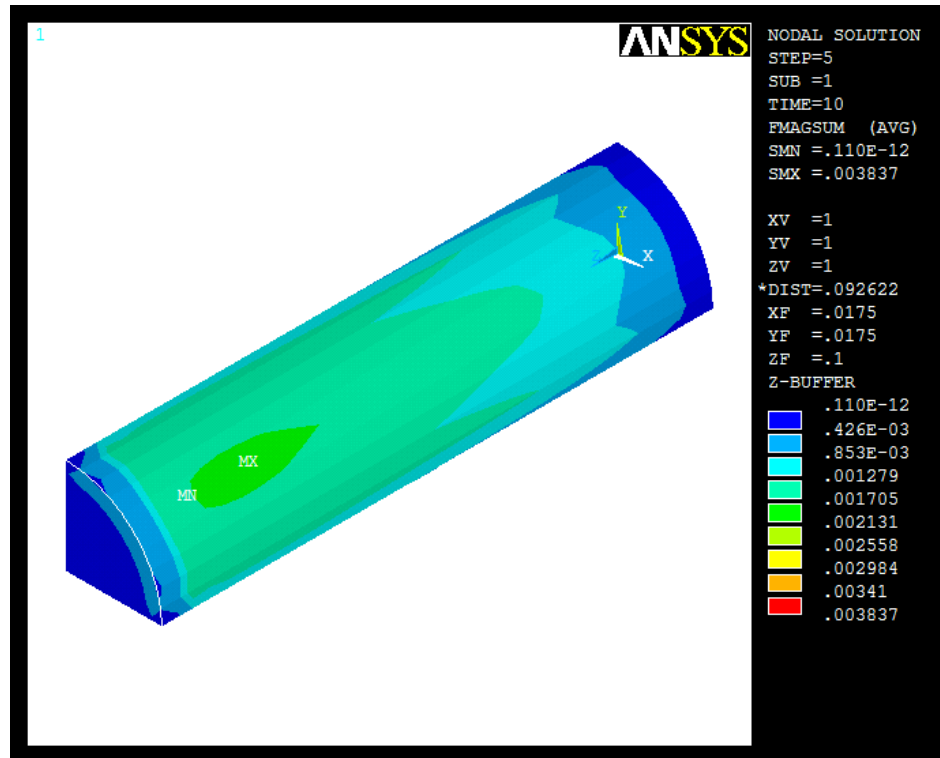
d) 1000 A Akım Değerinde 10.saniye sonunda x-ekseni boyunca sıcaklık değişimi

Şekil 3.1. 1000 A Akım Değerinde Metal malzemeden alınan sayısal çözümleme sonuçları

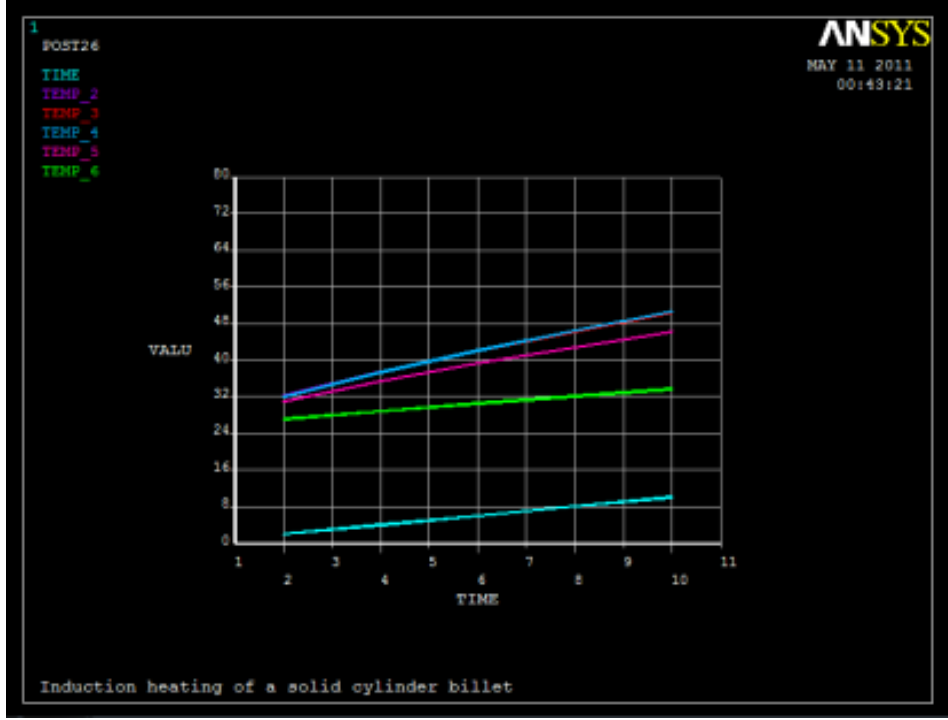
2000 Amper için elde edilen sonuçlar aşağıda gösterilmiştir.



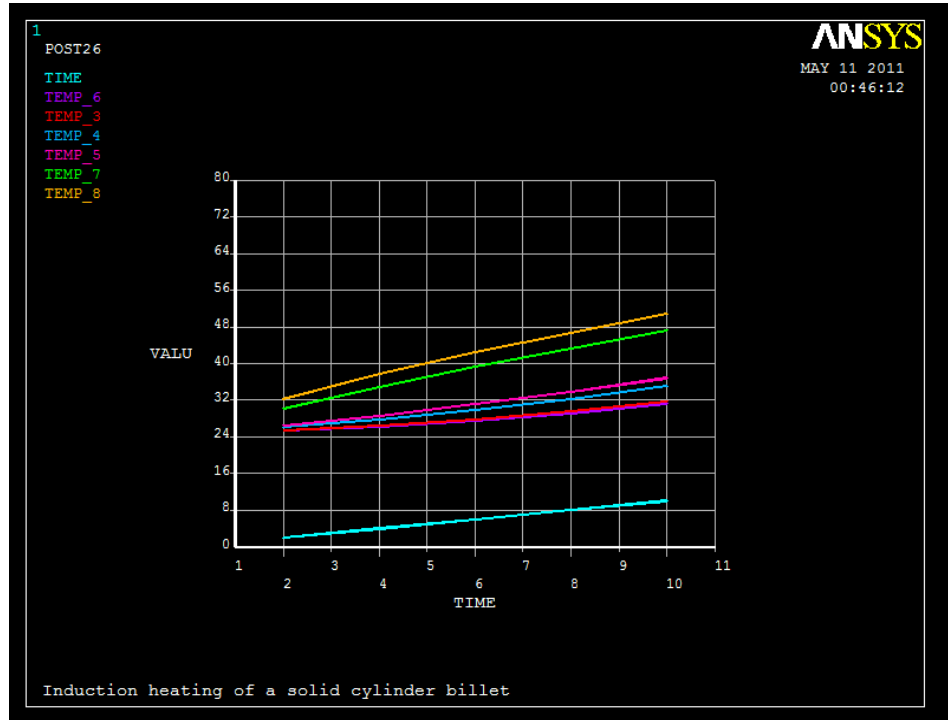
a) 2000 A Değerinde 10.saniye sonunda 3-D Sıcaklık Dağılımı



b) 2000 A Değerinde 10.saniye sonunda 3-D Manyetik Alan Oluşumu



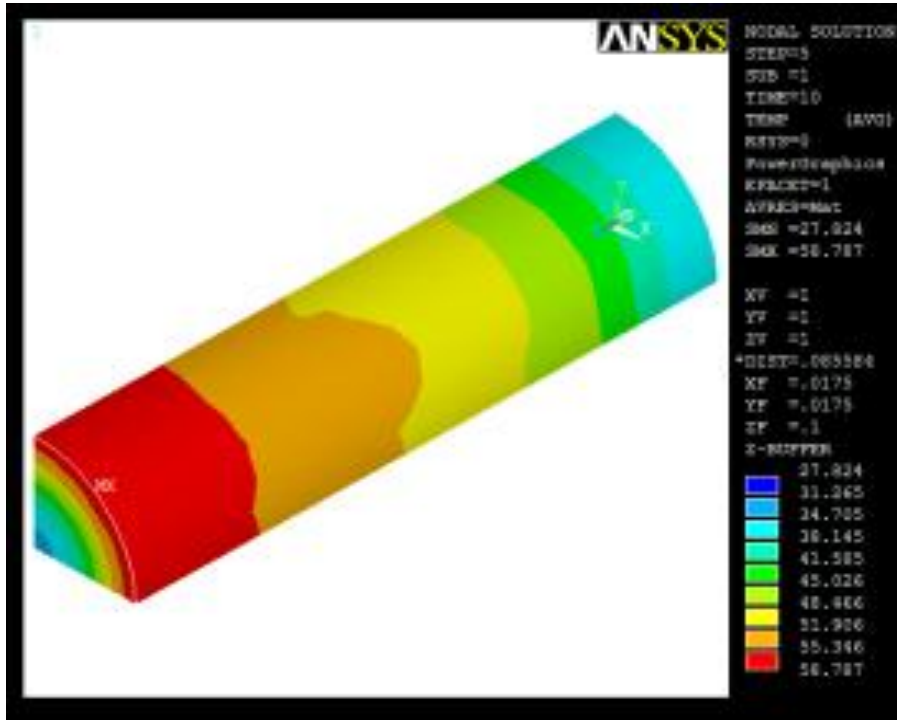
c) 2000 A Değerinde 10.saniye sonunda z-ekseni boyunca sıcaklık değişimi



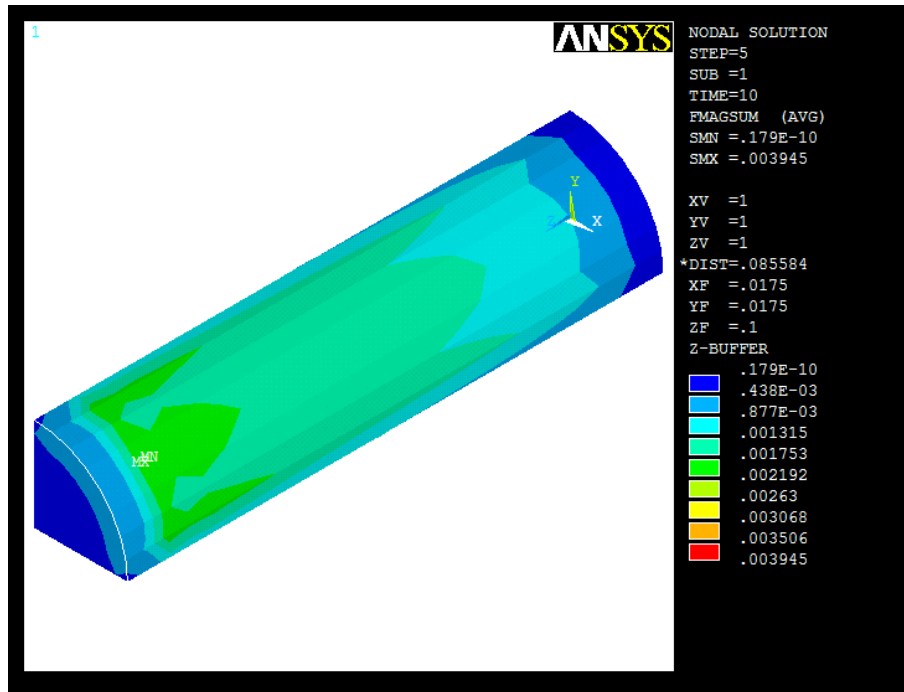
d) 2000 A Değerinde 10.saniye sonunda x-ekseni boyunca sıcaklık değişimi

Şekil 3.2. 2000 A Değerinde Metal malzemedan alınan sayısal çözümlleme sonuçları

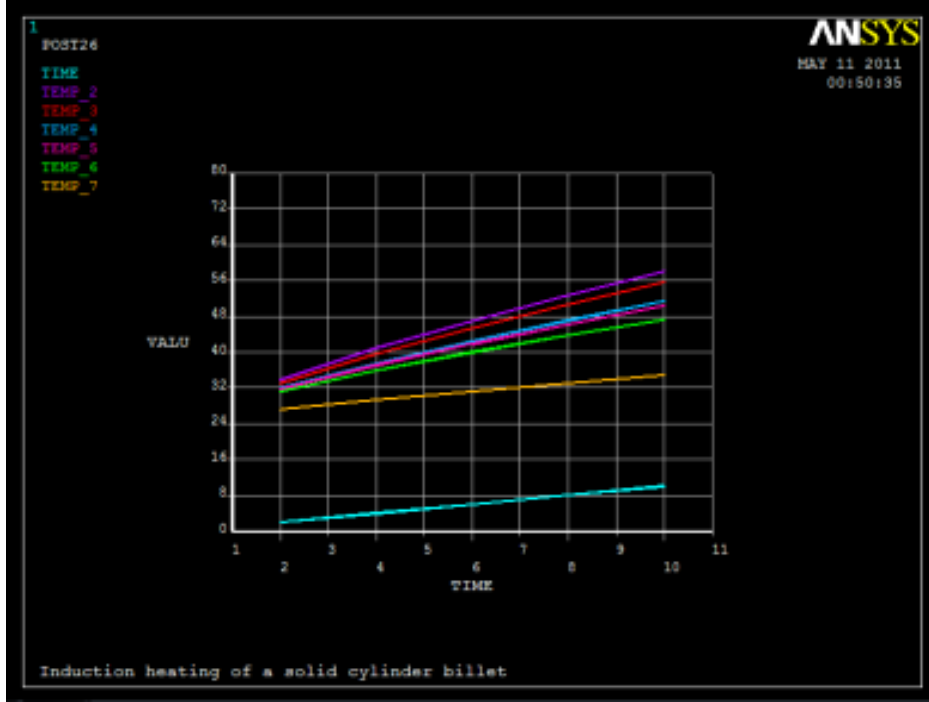
3000 Amper için elde edilen sonuçlar aşağıda gösterilmiştir



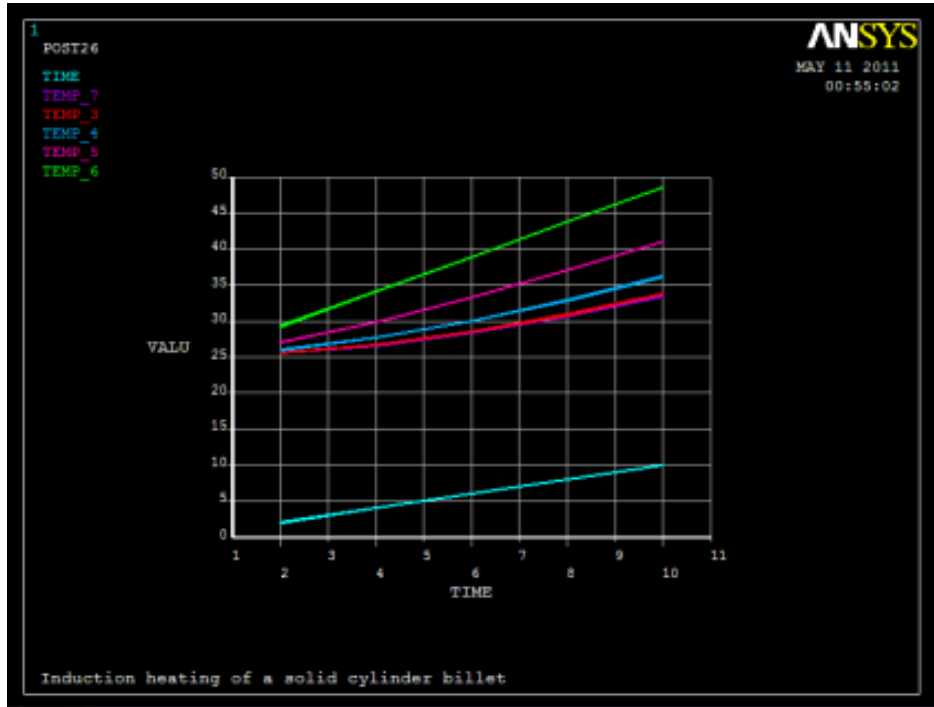
a) 3000 A Değerinde 10.saniye sonunda 3-D Sıcaklık Dağılımı



b) 3000 A Değerinde 10.saniye sonunda 3-D Manyetik Alan Oluşumu



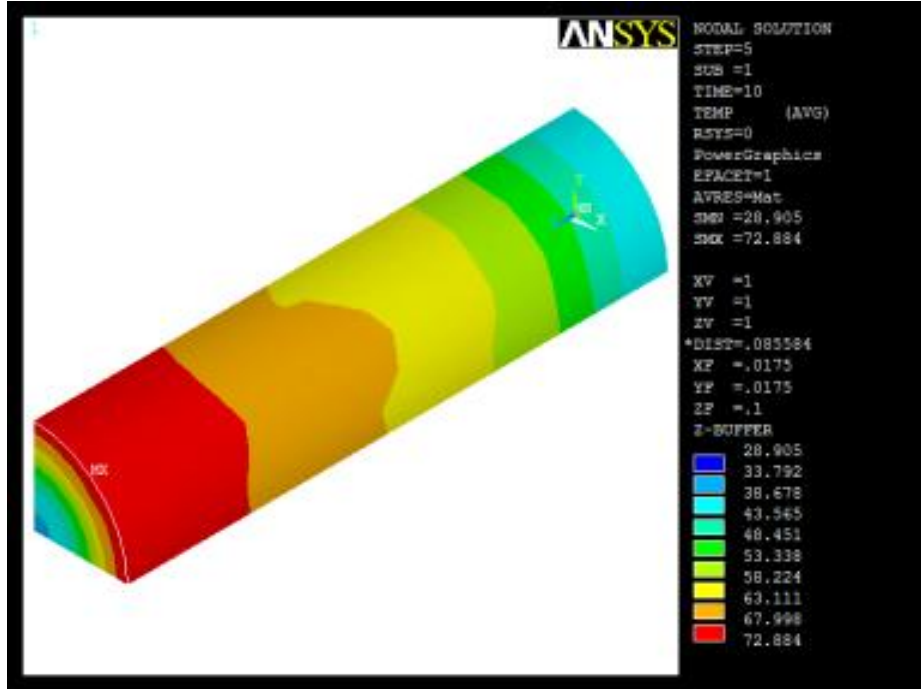
c) 3000 A Değerinde 10.saniye sonunda z-ekseni boyunca sıcaklık değişimi



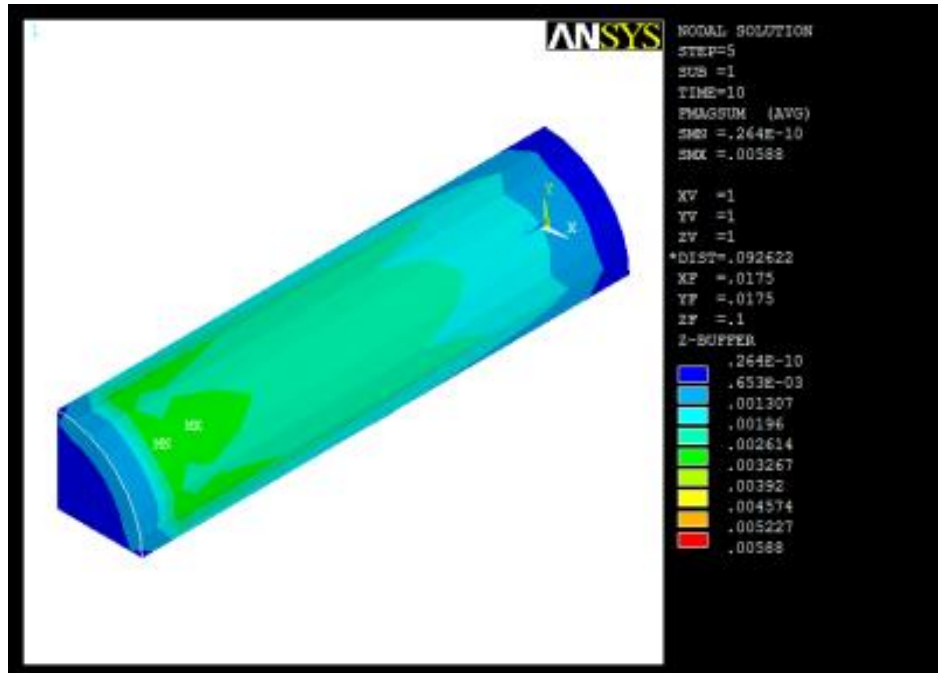
d) 3000 A Değerinde 10.saniye sonunda x-ekseni boyunca sıcaklık değişimi

Şekil 3.3. 3000 A Değerinde Metal malzemedan alınan sayısal çözümleme sonuçları

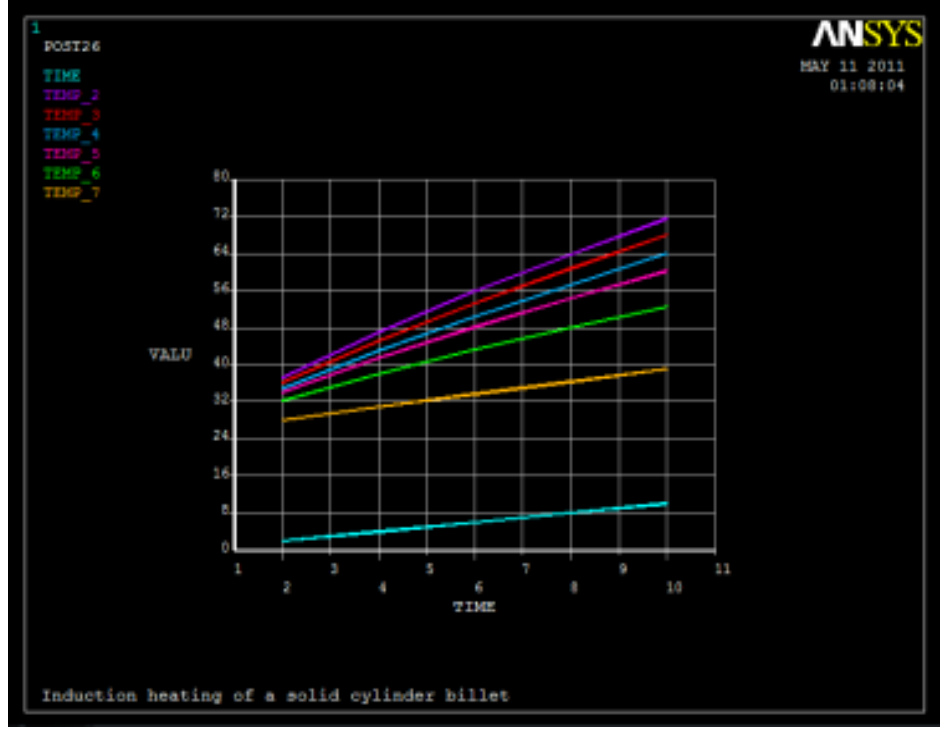
4000 Amper için elde edilen sonuçlar aşağıda gösterilmiştir



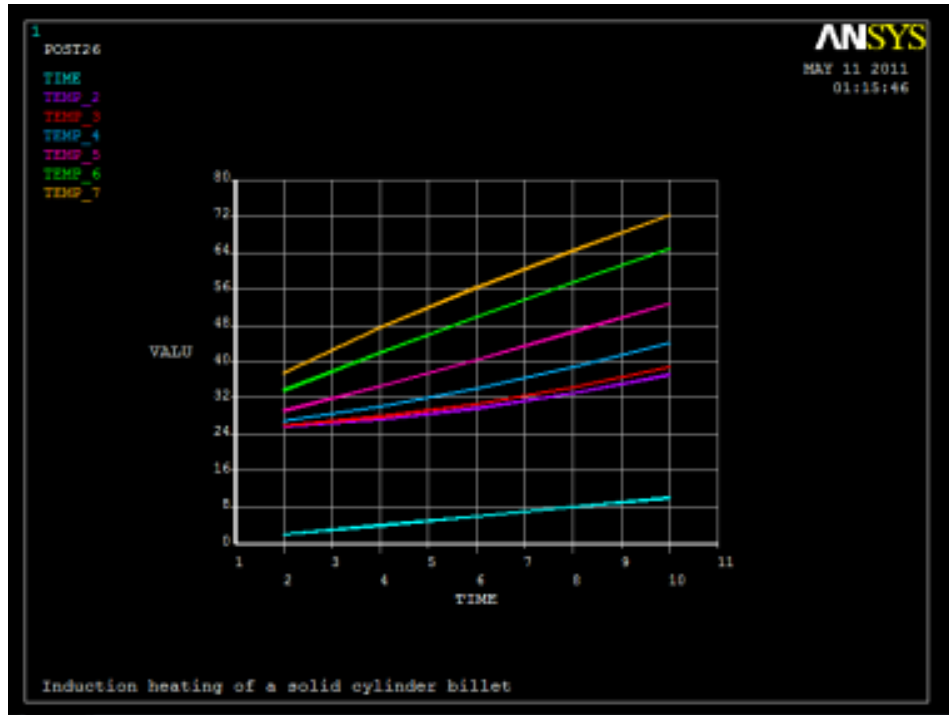
a) 4000 A Değerinde 10.saniye sonunda 3-D Sıcaklık Dağılımı



b) 4000 A Değerinde 10.saniye sonunda 3-D Manyetik Alan Oluşumu



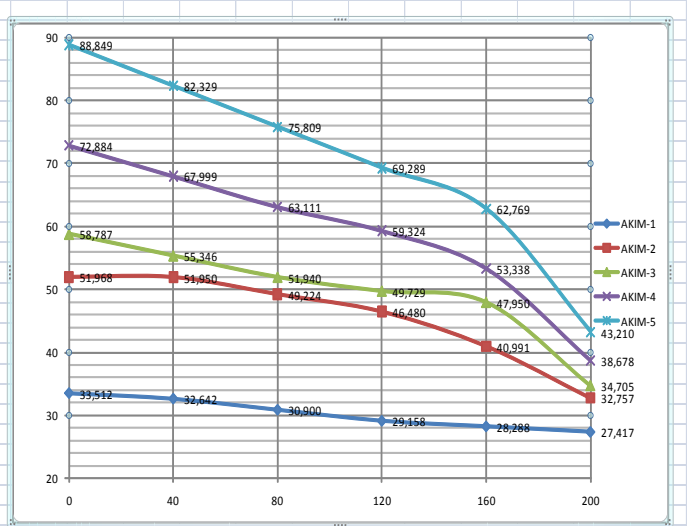
c) 10.saniye sonunda z-ekseni boyunca sıcaklık değişimi



d) 4000 A Değerinde 10.saniye sonunda x-ekseni boyunca sıcaklık değişimi

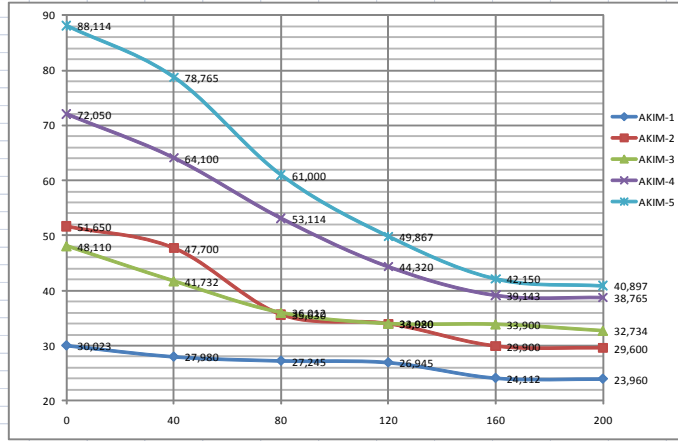
Şekil 3.4. 4000 A Değerinde Metal malzemedan alınan sayısal çözümlene sonuçları

	AKIM1	AKIM2	AKIM3	AKIM4	AKIM5
0	33,512	51,968	58,787	72,884	88,849
40	32,642	49,224	55,346	67,999	82,329
80	30,900	46,480	51,940	63,111	75,809
120	29,158	44,800	49,729	59,324	69,289
160	28,288	40,991	47,950	53,338	62,769
200	27,417	32,757	34,705	38,678	43,210



(a)

	AKIM1	AKIM2	AKIM3	AKIM4	AKIM5
0	30,023	51,650	48,110	72,050	88,114
40	27,980	47,700	41,732	64,100	78,765
80	27,245	35,630	36,012	53,114	61,000
120	26,945	33,980	34,020	44,320	49,867
160	24,112	29,900	33,900	39,143	42,150
200	23,960	29,600	32,734	38,765	40,897



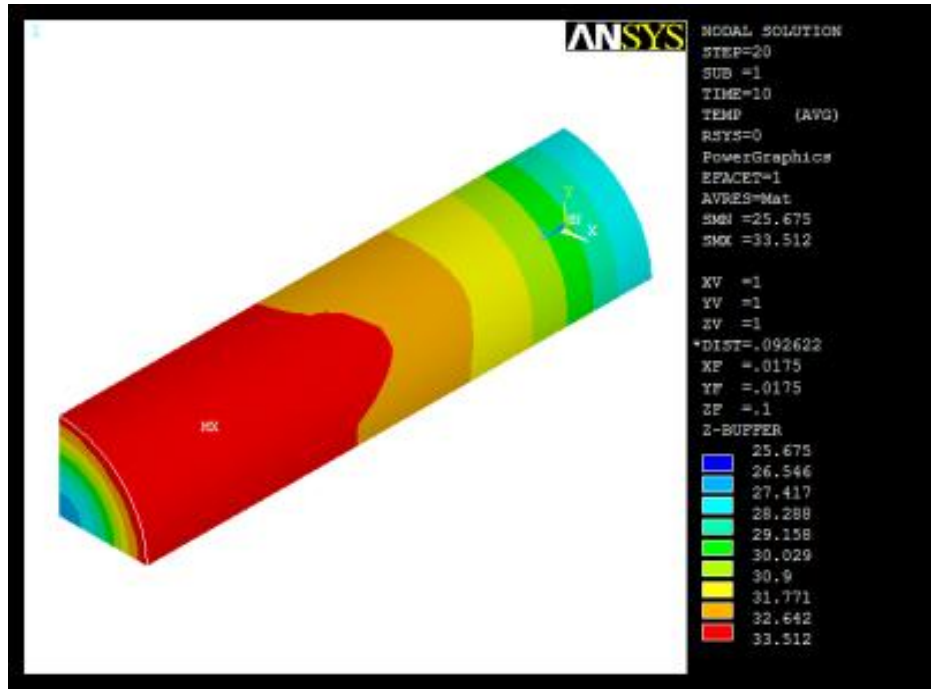
(b)

Şekil 3.5. Akım Değişimine Bağlı olarak z(a) ve x(b) eksenini Boyunca Malzemedeki Sıcaklık Değişimi

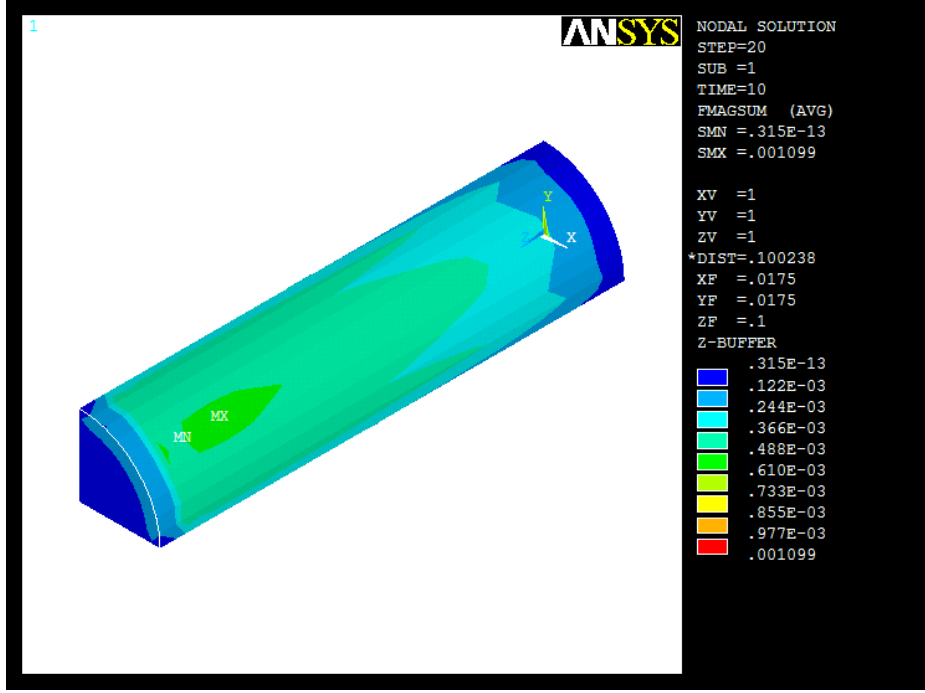
Manyetik alan kuvveti, indüksiyon bobininden geçen akıma, bobin geometrisine ve bobin mesafesine bağlıdır. Değişken manyetik alan, çalışma parçasında ve bobin yanında yerleştirilmiş diğer maddelerde eddy akımları oluşturur. Eddy akımlarının oluşturduğu ısı üretimi çalışma parçasının sıcaklığını artırır. Sonuç olarak çalışma parçasına uygulanan akım değeri artırdıkça ısı üretimi değeri de artacağından, çalışma parçasının maksimum sıcaklık değeri de artacaktır.

3.2. Farklı Frekans Değerlerindeki Sayısal Çözümleme Sonuçları

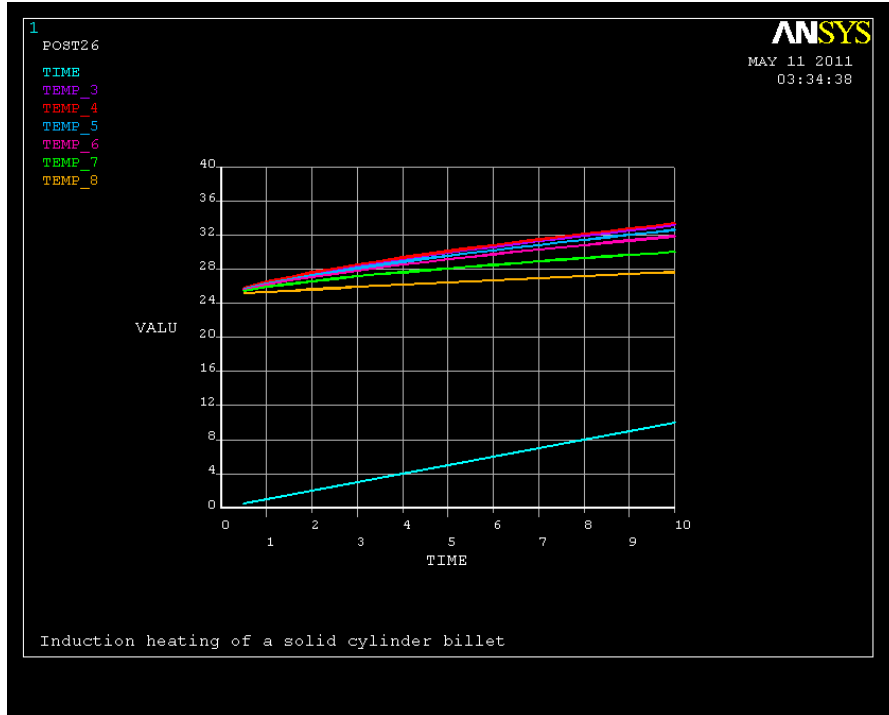
1000 mm boyundaki indüksiyon bobini içerisindeki 70 mm çapındaki metal malzemenin boyu 200 mm alınmıştır. Bobine uygulanan frekansın doğrudan sistem parametrelerine etki ettiği bilinmektedir. Bu nedenle indüksiyon bobinine uygulanan frekans değeri sırasıyla 1000 Hz, 2000 Hz, 3000 Hz ve 4000 Hz alınarak model hazırlanmış ve sistem parametreleri girilerek sayısal çözümleme sonuçları elde edilmiştir. Metal malzeme bobinin ön tarafında konumlandırılmıştır.



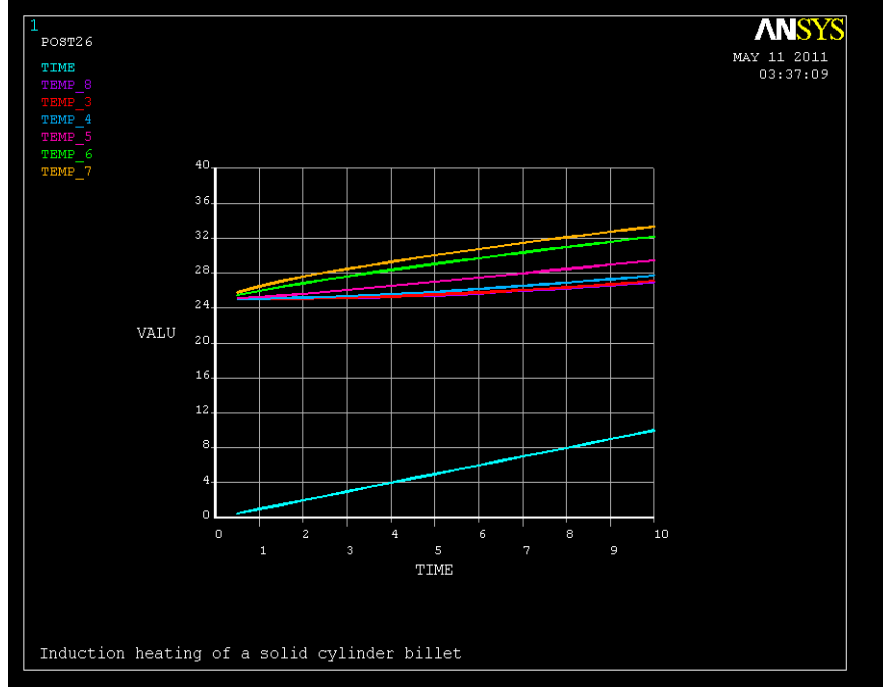
a) 1000 Hz. Frekansta 10.saniye sonunda 3-D Sıcaklık Dağılımı



b) 1000 Hz. Frekansta 10.saniye sonunda 3-D Manyetik Alan Oluşumu

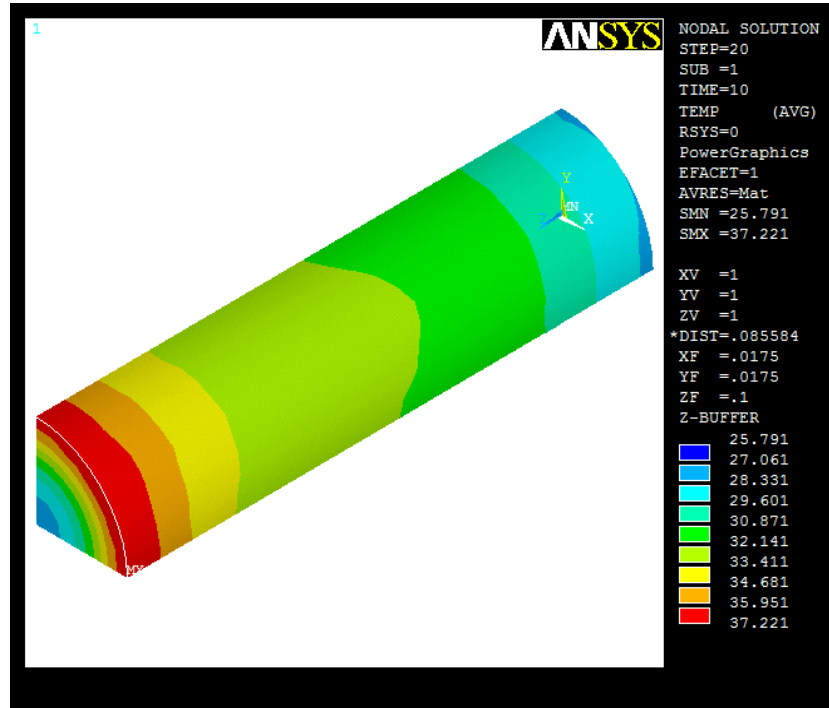


c) 1000 Hz. Frekansta 10.saniye sonunda z-ekseni boyunca sıcaklık dağılımı

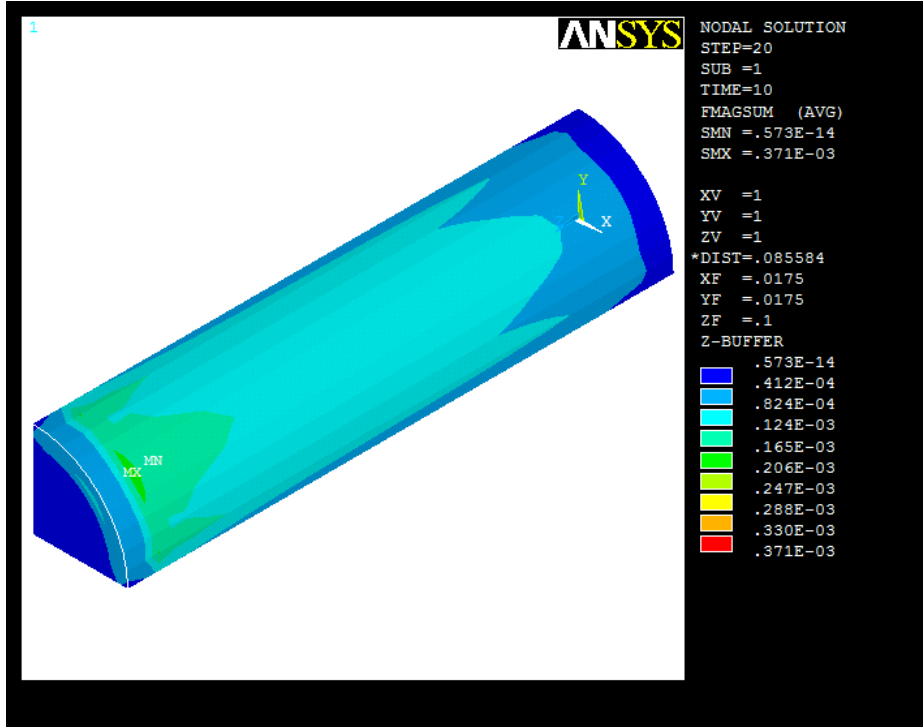


d) 1000 Hz. Frekansta 10.saniye sonunda x-ekseni boyunca sıcaklık değişimi

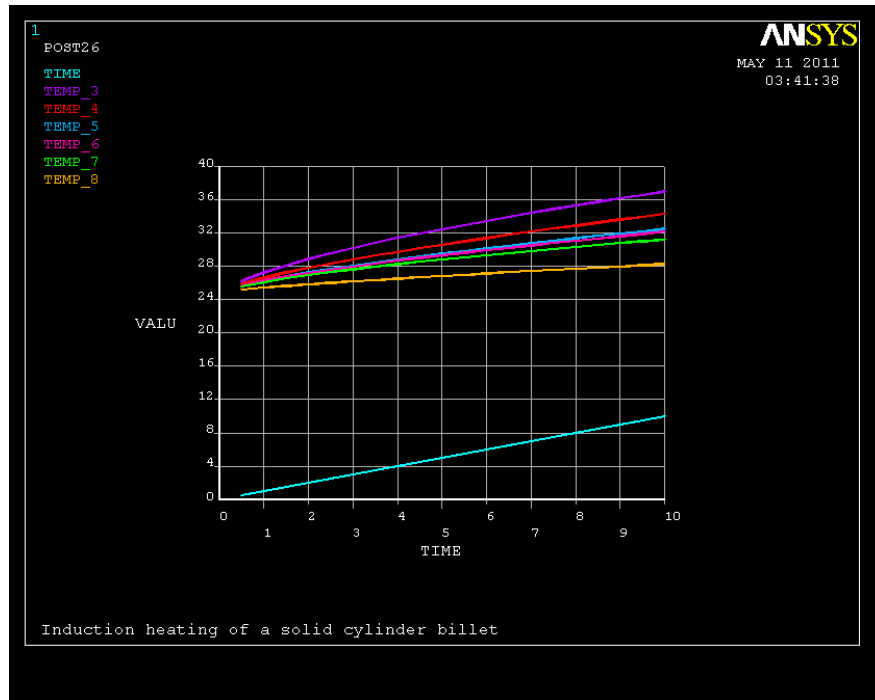
şekil 3.6. 1000 Hz. Frekansta Metal malzemeden alınan sayısal çözümlleme sonuçları



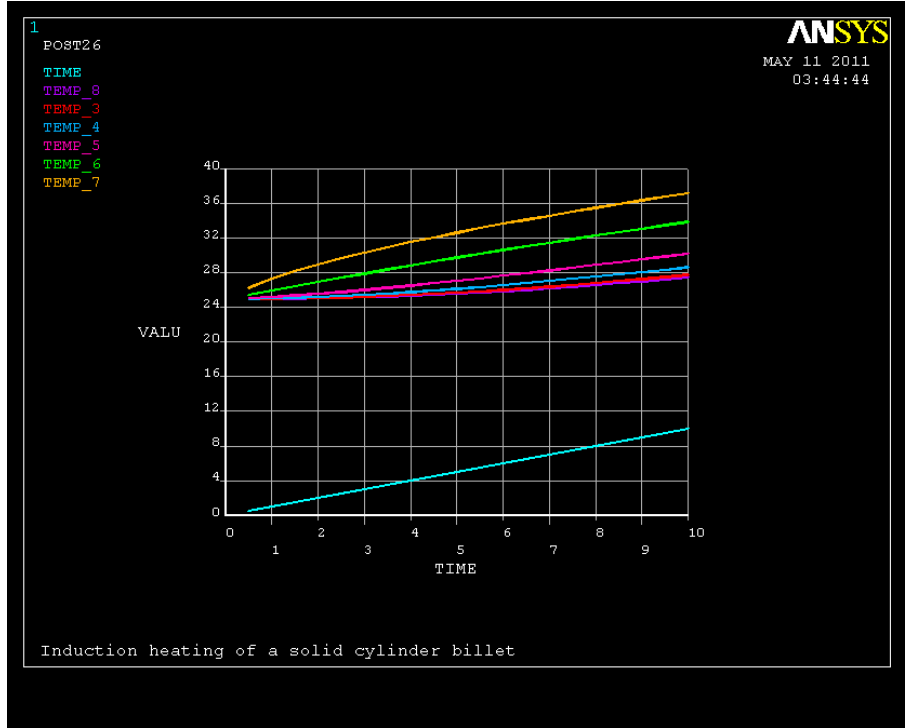
a) 2000 Hz. Frekansta 10.saniye sonunda 3-D Sıcaklık Dağılımı



b) 2000 Hz. Frekansta 10.saniye sonunda 3-D Manyetik Alan Oluşumu

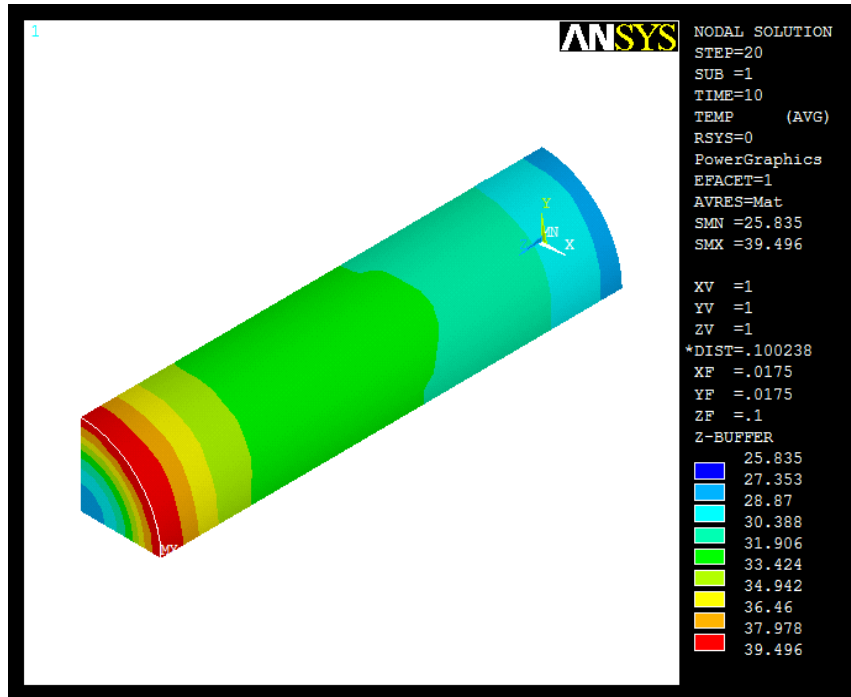


c) 2000 Hz. Frekansta 10.saniye sonunda z-ekseni boyunca sıcaklık değişimi

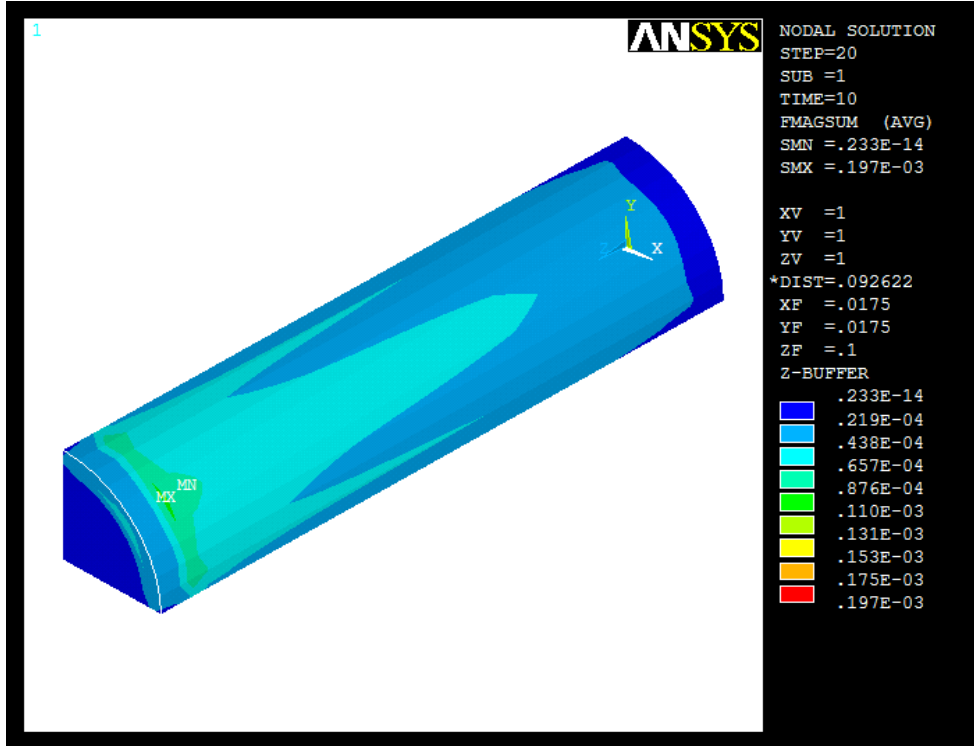


d) 2000 Hz. Frekansta 10.saniye sonunda x-ekseni boyunca sıcaklık değişimi

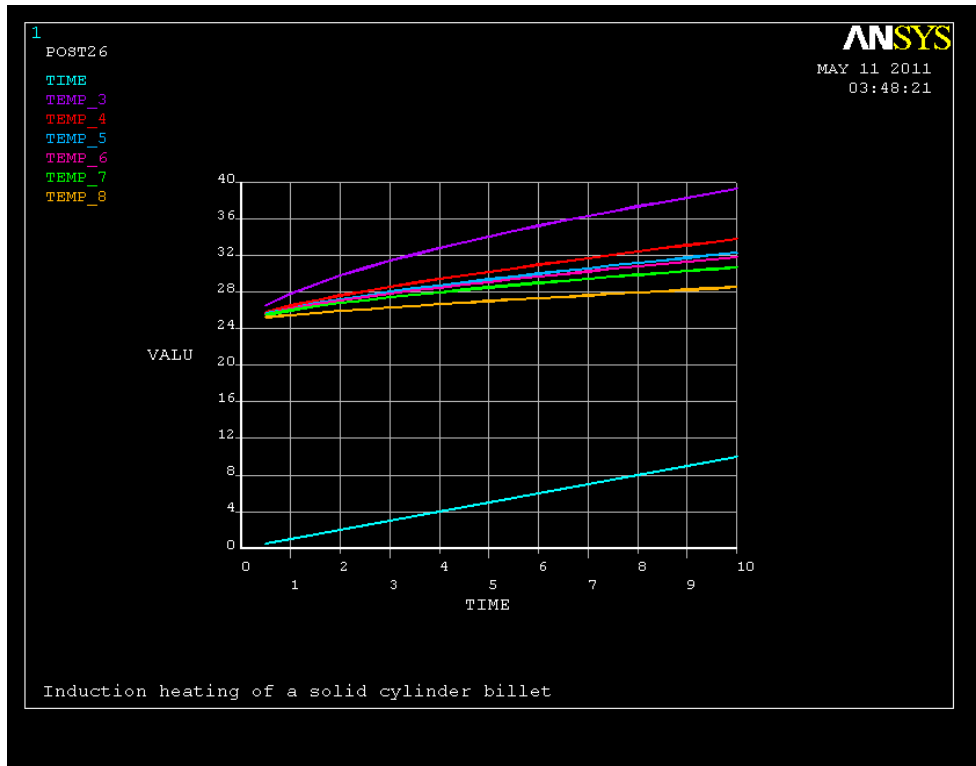
şekil 3.7. 2000 Hz. Frekansta 10.saniye sonunda x-ekseni boyunca sıcaklık değişimi



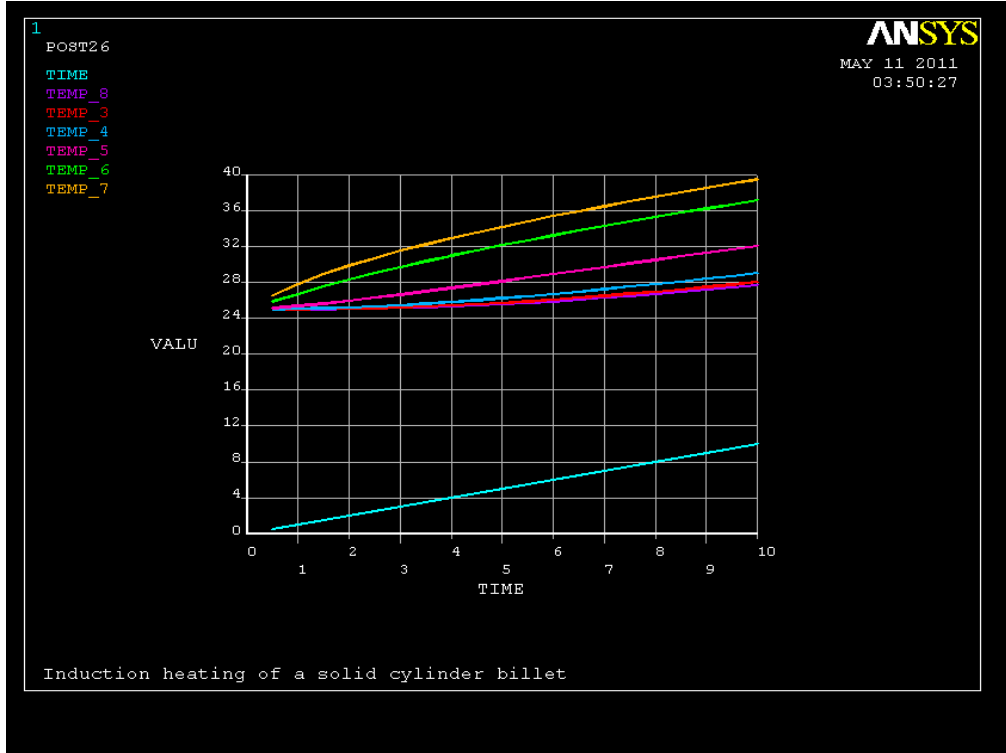
a) 3000 Hz. Frekansta 10.saniye sonunda 3-D Sıcaklık Dağılımı



b) 3000 Hz. Frekansta 10.saniye sonunda 3-D Manyetik Alan Oluşumu

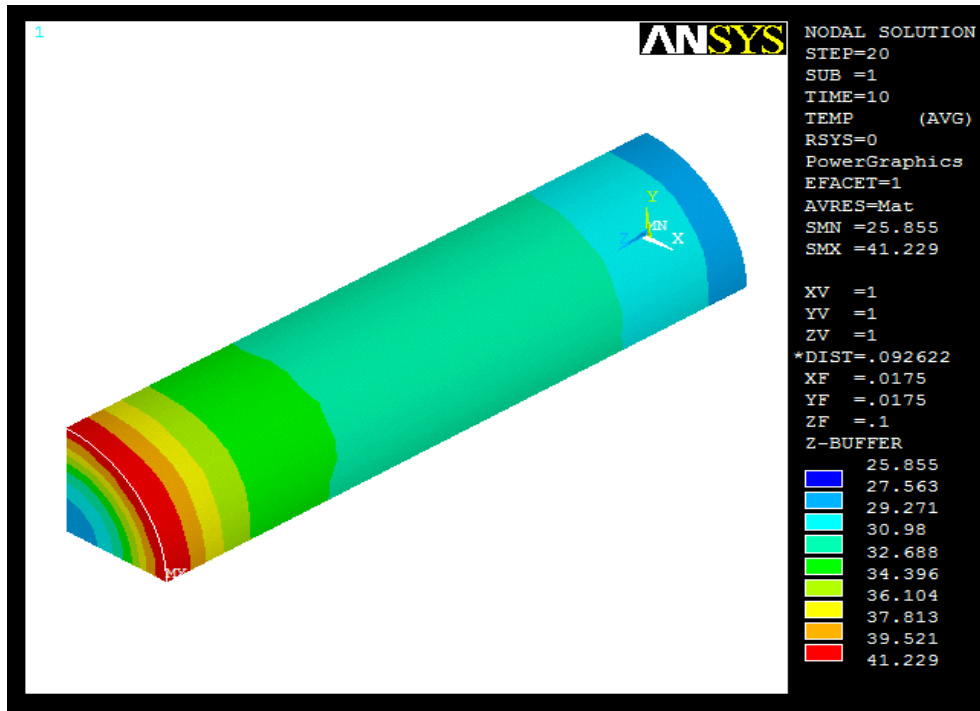


c) 3000 Hz. Frekansta 10.saniye sonunda z-ekseni boyunca sıcaklık değişimi

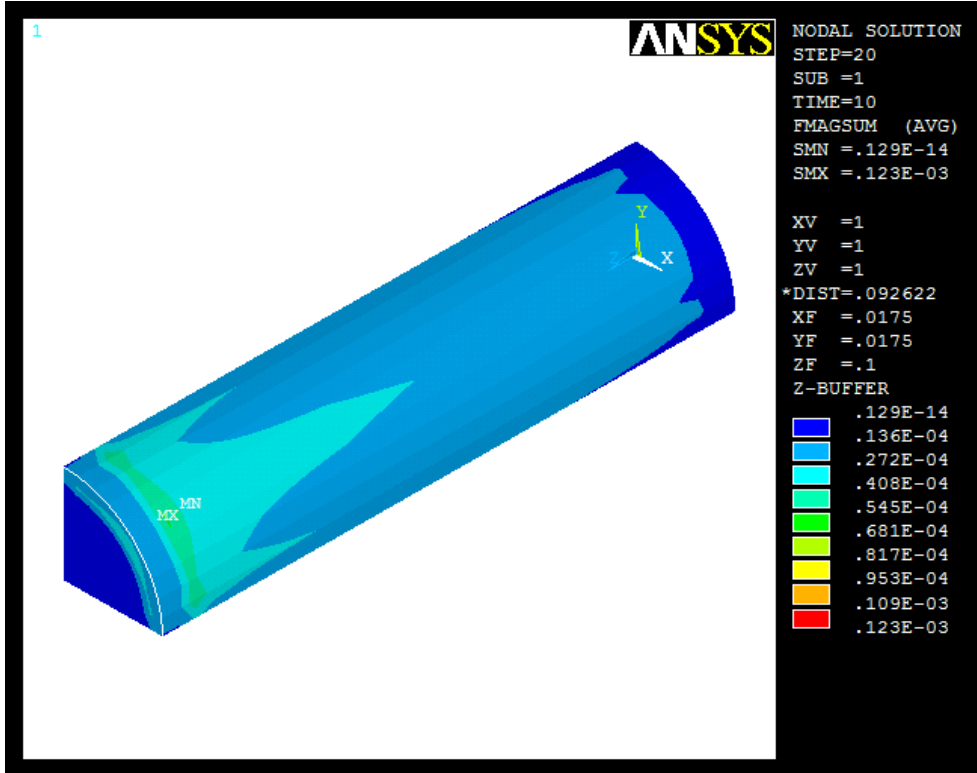


d) 3000 Hz. Frekansta 10.saniye sonunda x-ekseni boyunca sıcaklık değişimi

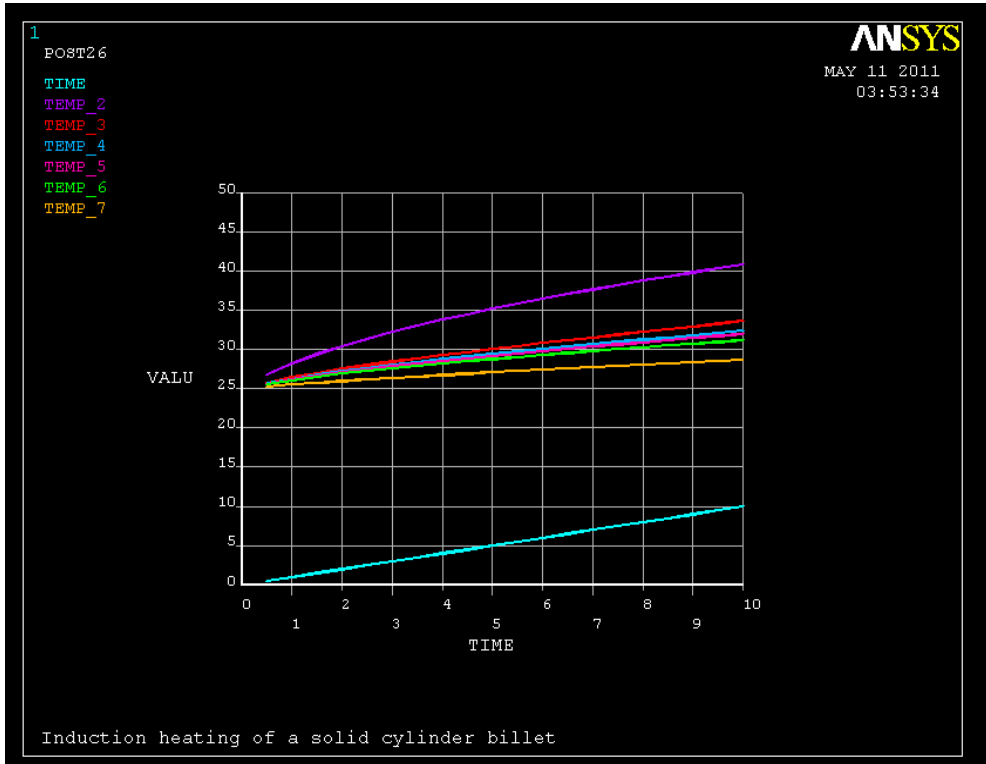
şekil 3.8. 3000 Hz. Frekansta Metal malzemeden alınan sayısal çözümlleme sonuçları



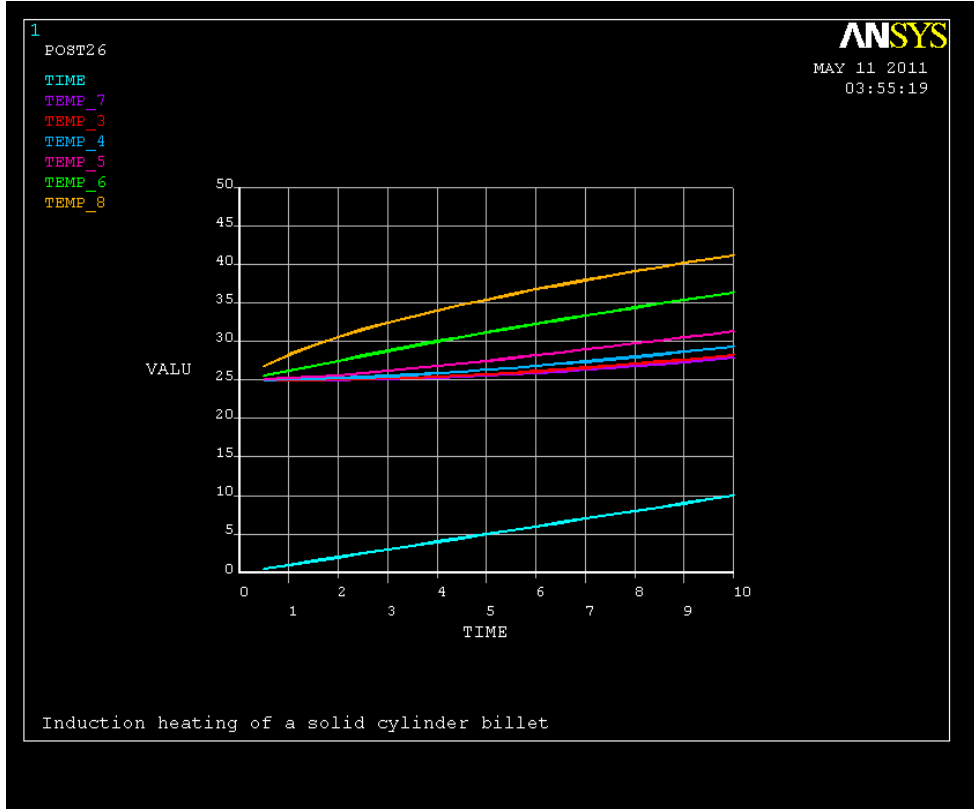
a) 4000 Hz. Frekansta 10.saniye sonunda 3-D Sıcaklık Dağılımı



b) 4000 Hz. Frekansta 10.saniye sonunda 3-D Manyetik Alan Oluşumu

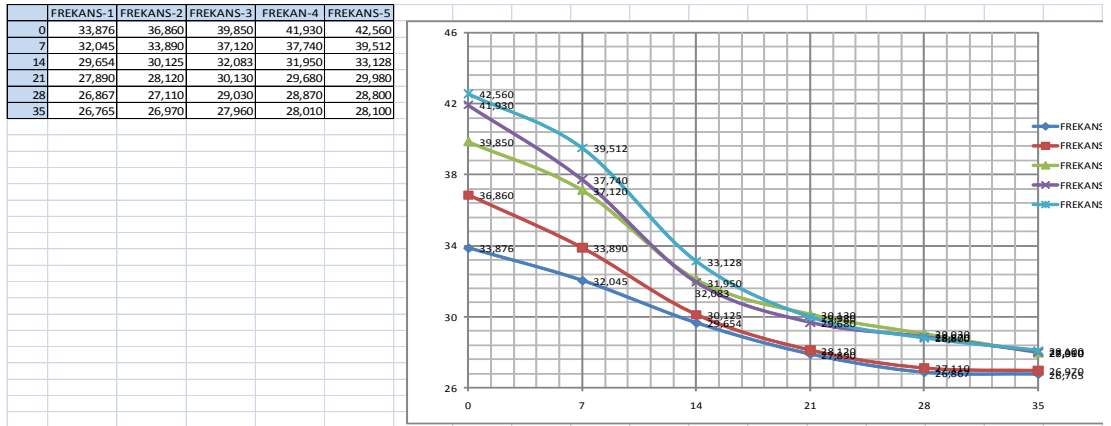


c) 4000 Hz. Frekansta 10.saniye sonunda z-ekseni boyunca sıcaklık değişimi



d) 4000 Hz. Frekansta 10.saniye sonunda x-ekseni boyunca sıcaklık değişimi

Şekil 3.9. 4000 Hz. Frekansta Metal malzemedan alınan sayısal çözümlene sonuçları



Şekil 3.10. Frekans Değişimine Bağlı olarak x-ekseni Boyunca Malzemedeki Sıcaklık Değişimi

Çalışma parçasına alternatif akım uygulandığı takdirde, parçanın içine doğru akım dağılımı frekansa bağlıdır.

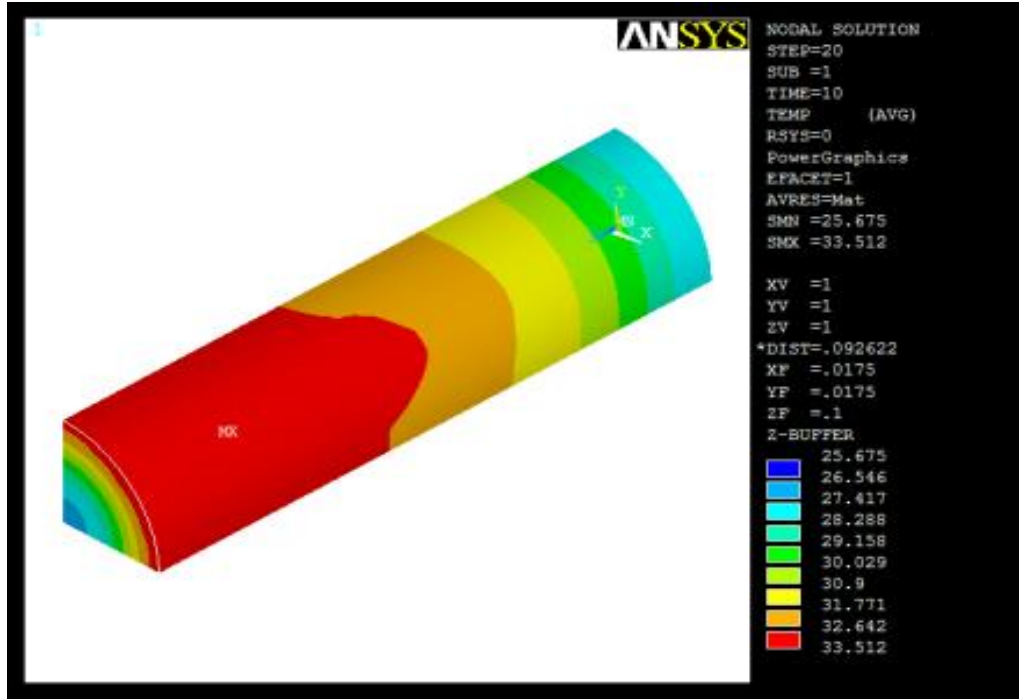
İndüksiyonla ısıtmada belirli bir frekansta eddy akımı oluşturulur. Frekans değeri arttıkça oluşacak eddy akım değeri de artacak, dolayısıyla ısı üretimi de artmış olacaktır.

Frekans değerinin artışı ısı üretimini artıracak, çalışma parçasının da maksimum sıcaklık değeri artmış olacaktır. Aynı zamanda frekans değeri arttıkça malzemenin yüzey sıcaklığı artacak fakat ısı üretiminin oluştuğu derinlik yani nüfuz derinliği azalacaktır.

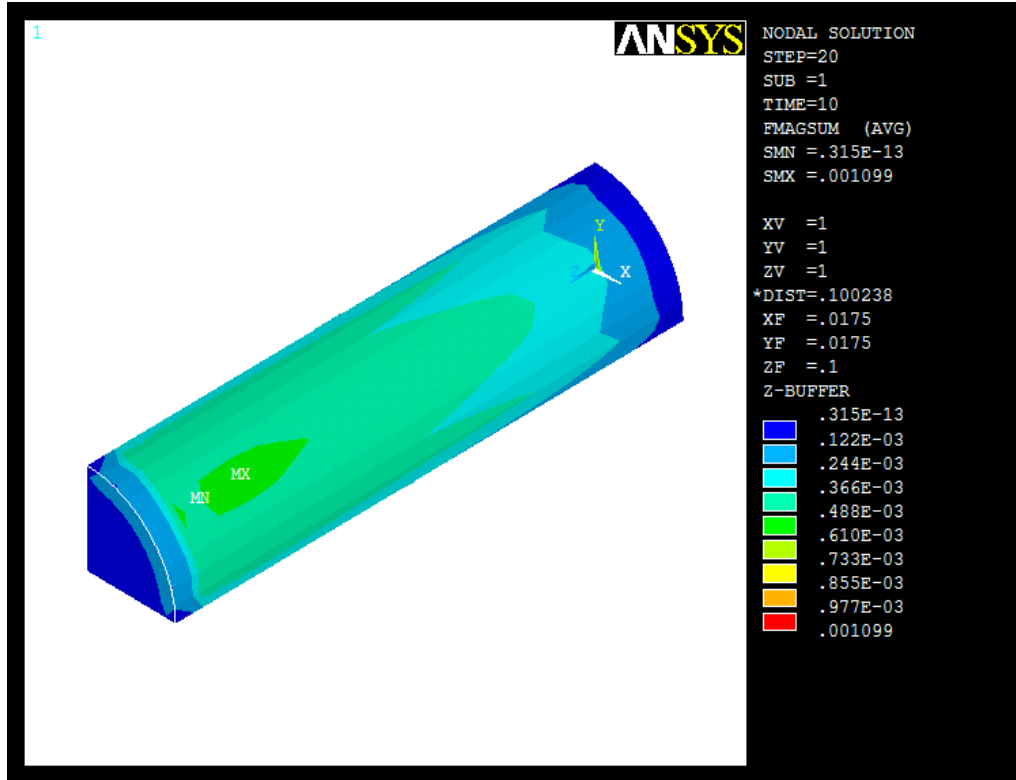
3.3. Farklı Konumlarda Elde Edilen Sayısal Çözümleme Sonuçları

Metal malzemenin indüksiyon bobini içerisindeki konumu 200 mm lik aralıklarla kaydırılarak sayısal çözümler yapılmıştır. Bobinin boyu 1 metre alınmıştır. 200 mm lik metal malzeme sırasıyla $z=1000-800$, $z=800-600$, $z=600-400$, $z=400-200$ ve $z=200-0$ koordinatlarında konumlandırılarak model oluşturulmuştur. Tüm analizlerde indüksiyon ocağının çalışma frekansı 1000 Hz ve indüktöre uygulanan akım 1000 A olarak alınmıştır. Ortam sıcaklığı ortalama 25 °C ve malzemenin ilk sıcaklığında ortam sıcaklığında alınmıştır.

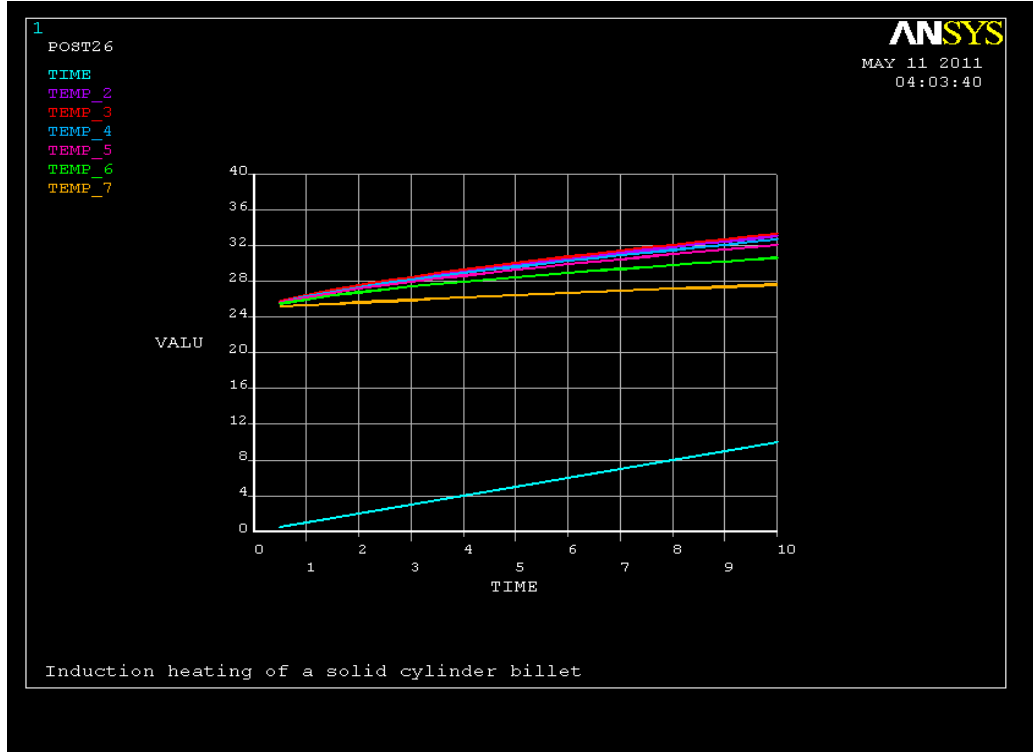
$z=1000-800$ mm konumu için 10 sn sonunda elde edilen sayısal çözümleme sonuçları aşağıda gösterilmiştir.



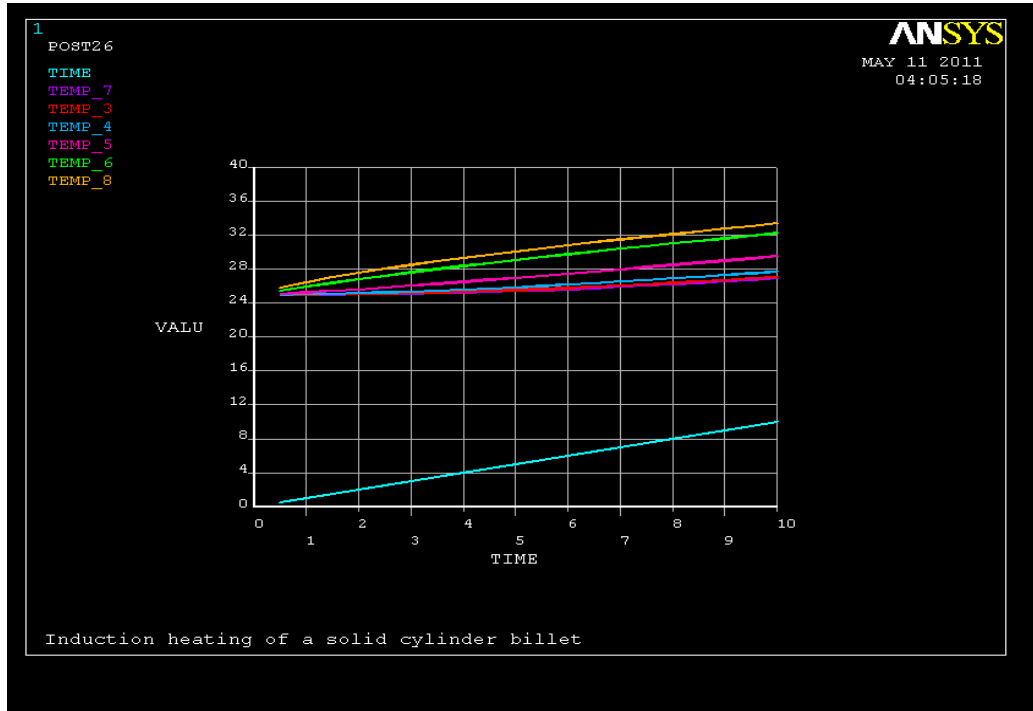
a) $z=1000-800$ mm konumu için 10.saniye sonunda 3-D Sıcaklık Dağılımı



b) $z=1000-800$ mm konumu için 10.saniye sonunda 3-D Manyetik Alan Oluşumu

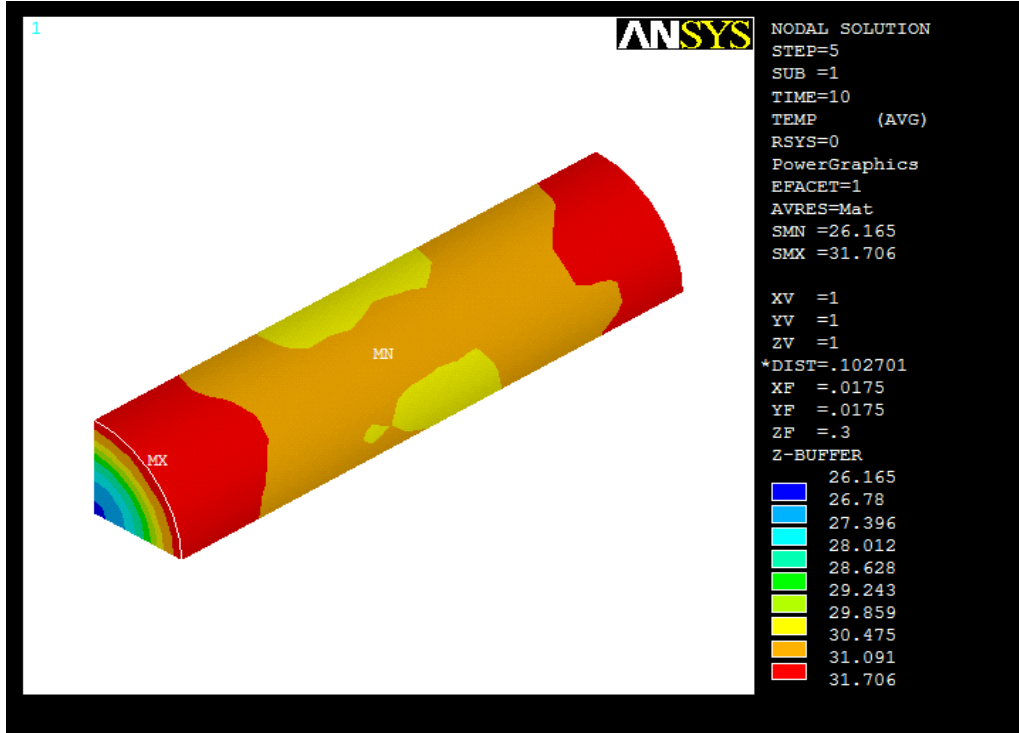


c) $z=1000-800$ mm konumu için 10.saniye sonunda z-ekseni boyunca sıcaklık değişimi

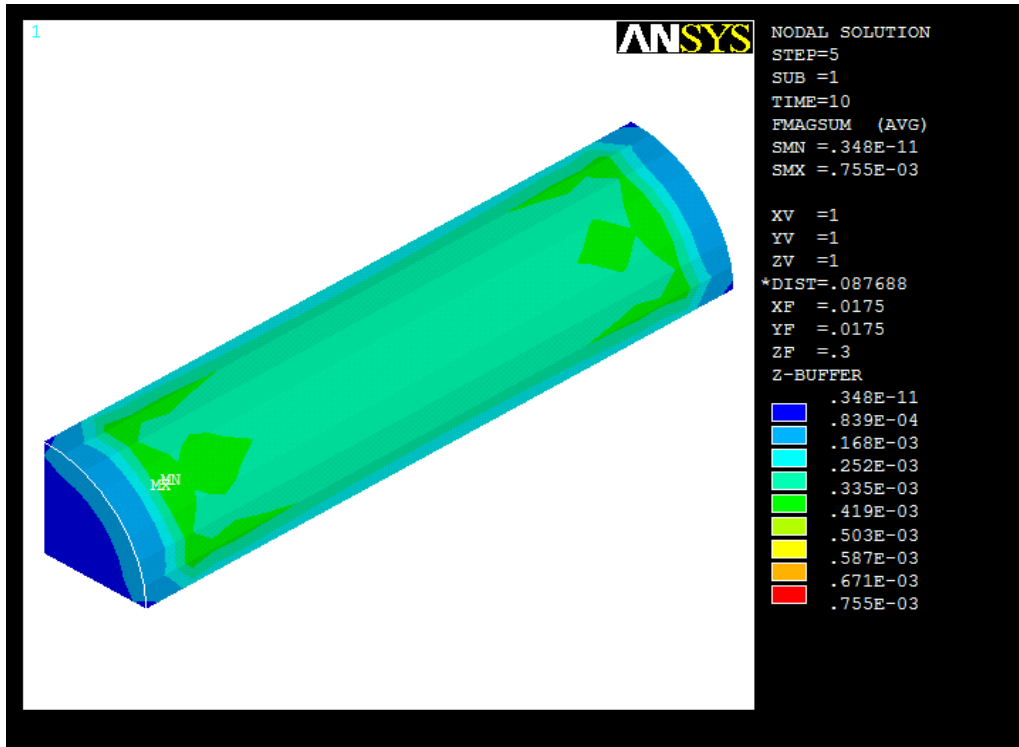


d) $z=1000-800$ mm konumu için 10.saniye sonunda x-ekseni boyunca sıcaklık değişimi

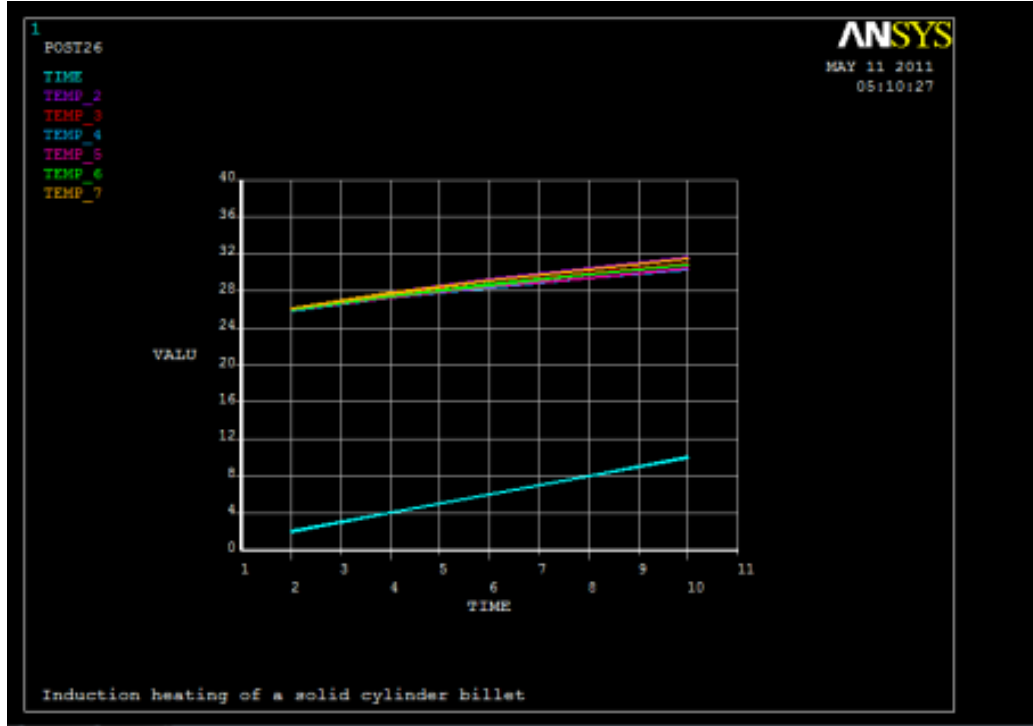
Şekil 3.11. $z=1000-800$ mm konumu için Metal malzemeden alınan sayısal çözümlene sonuçları



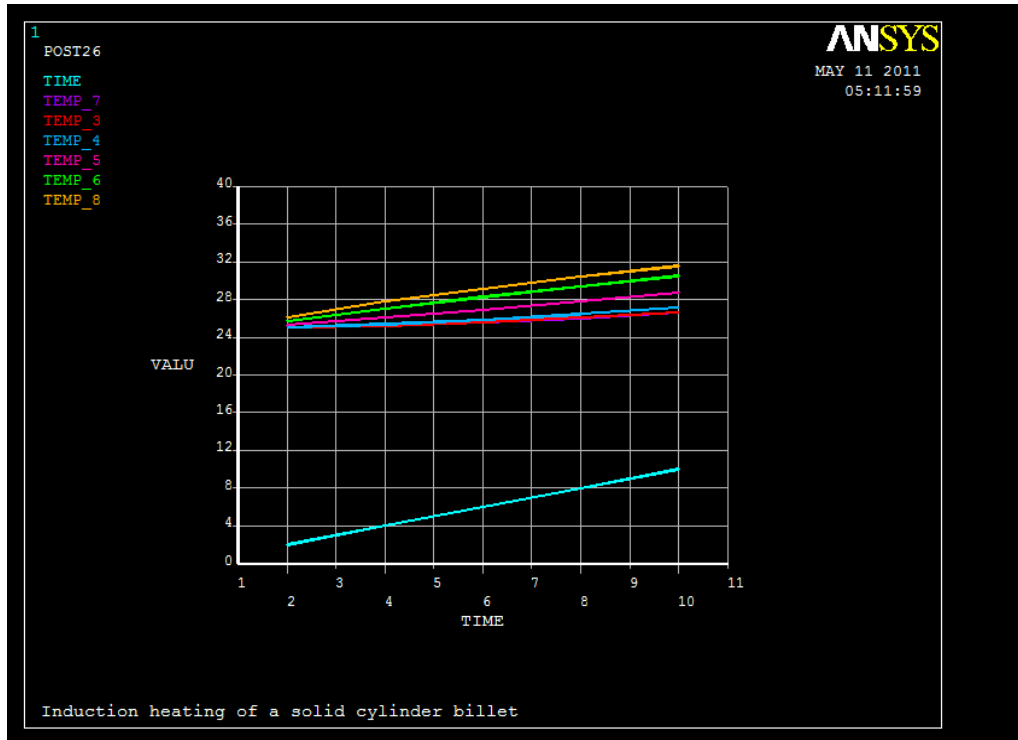
a) $z=800-600$ mm konumu için 10.saniye sonunda 3-D Sıcaklık Dağılımı



b) $z=800-600$ mm konumu için 10.saniye sonunda 3-D Manyetik Alan Oluşumu

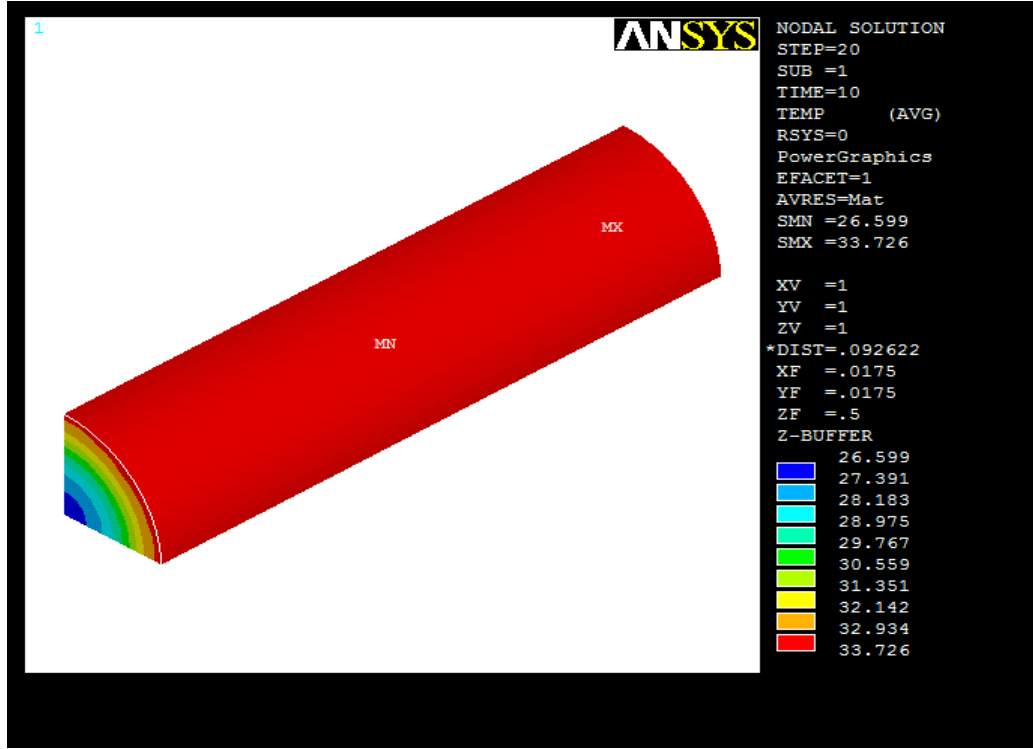


c) $z=800-600$ mm konumu için 10.saniye sonunda z-ekseni boyunca sıcaklık değişimi

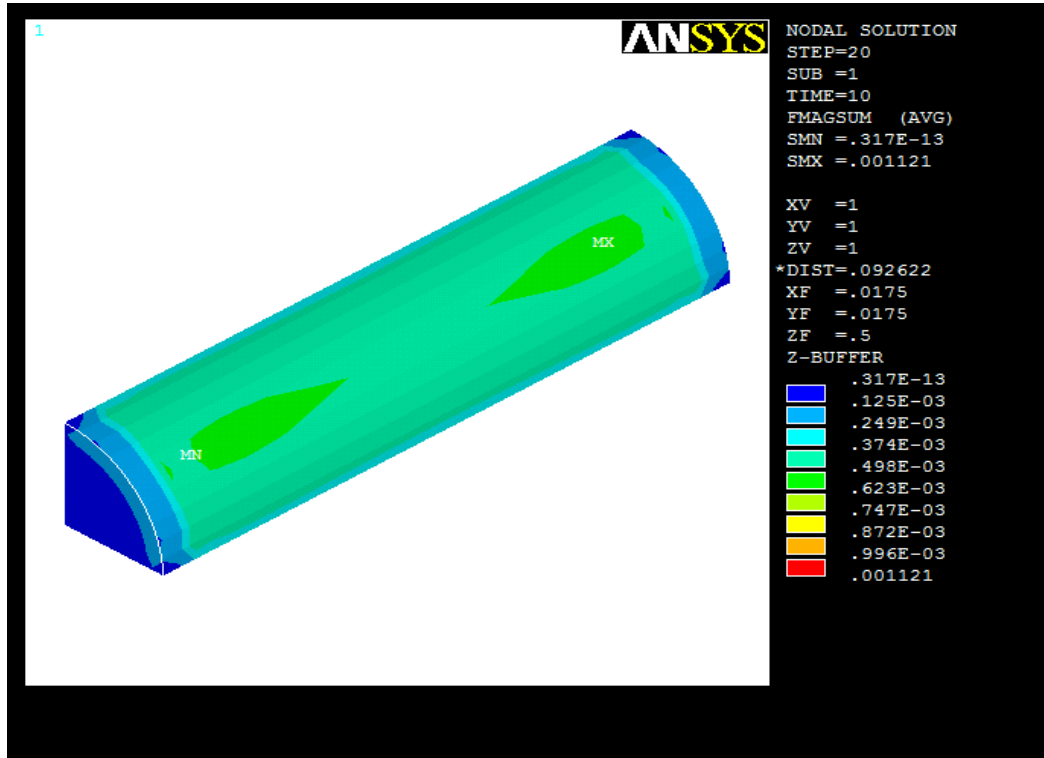


d) $z=800-600$ mm konumu için 10.saniye sonunda x-ekseni boyunca sıcaklık değişimi

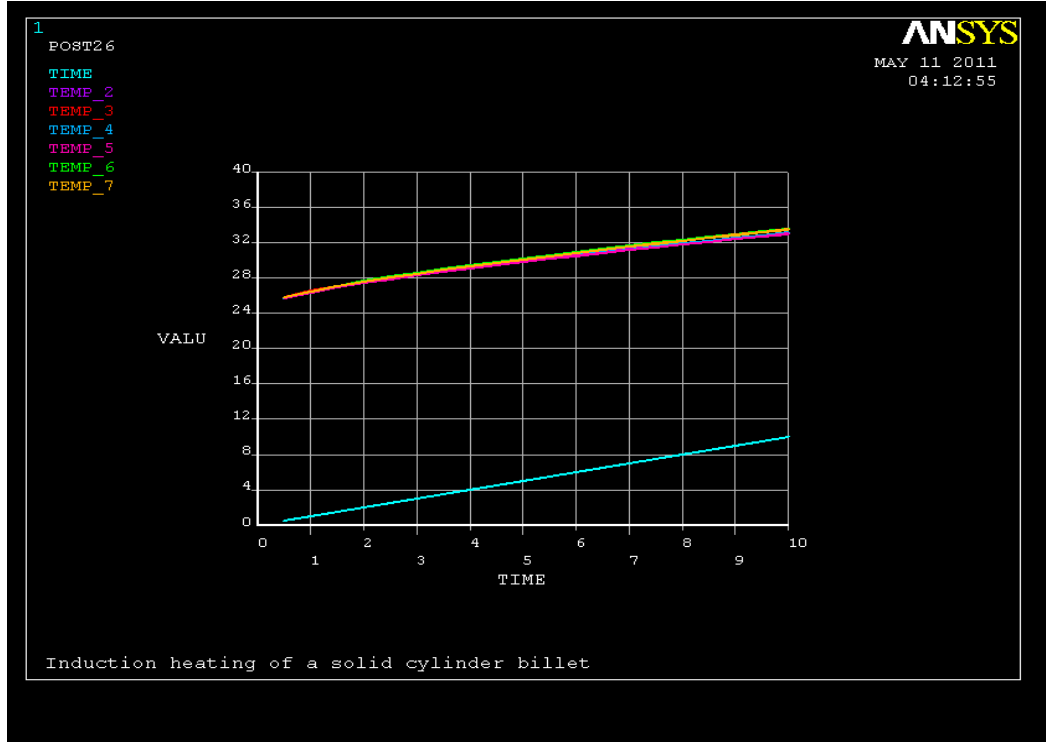
Şekil 3.12. $z=800-600$ mm konumu için Metal malzemeden alınan sayısal çözümlene sonuçları



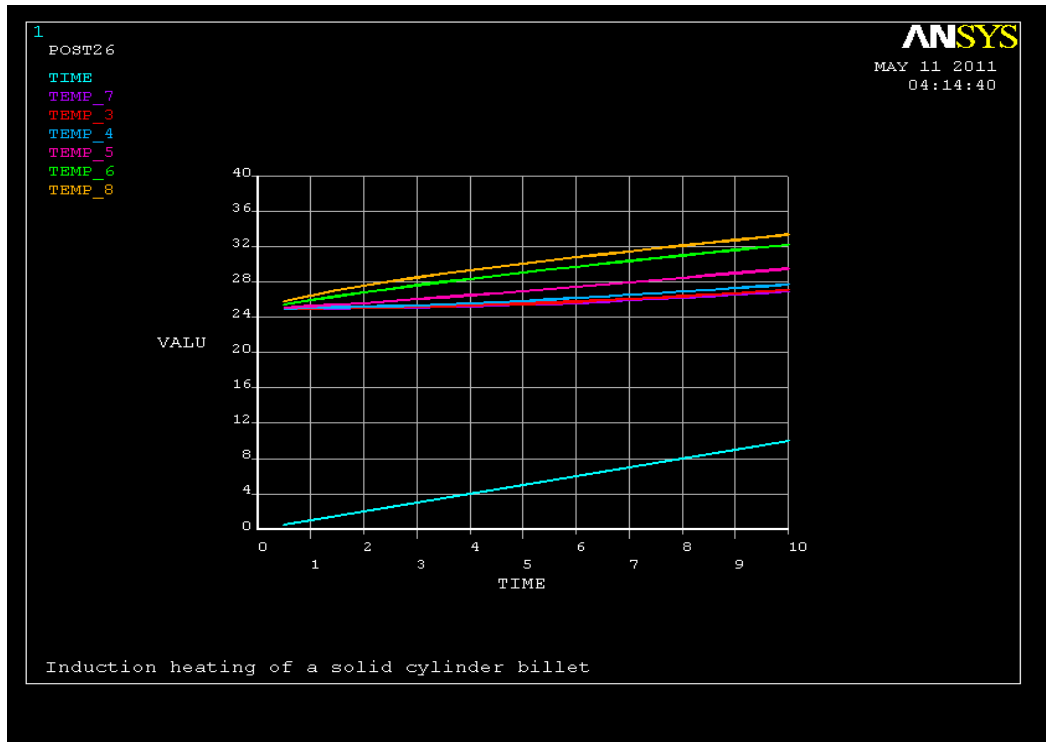
a) $z=600-400$ mm konumu için 10.saniye sonunda 3-D Sıcaklık Dağılımı



b) $z=600-400$ mm konumu için 10.saniye sonunda 3-D Manyetik Alan Oluşumu

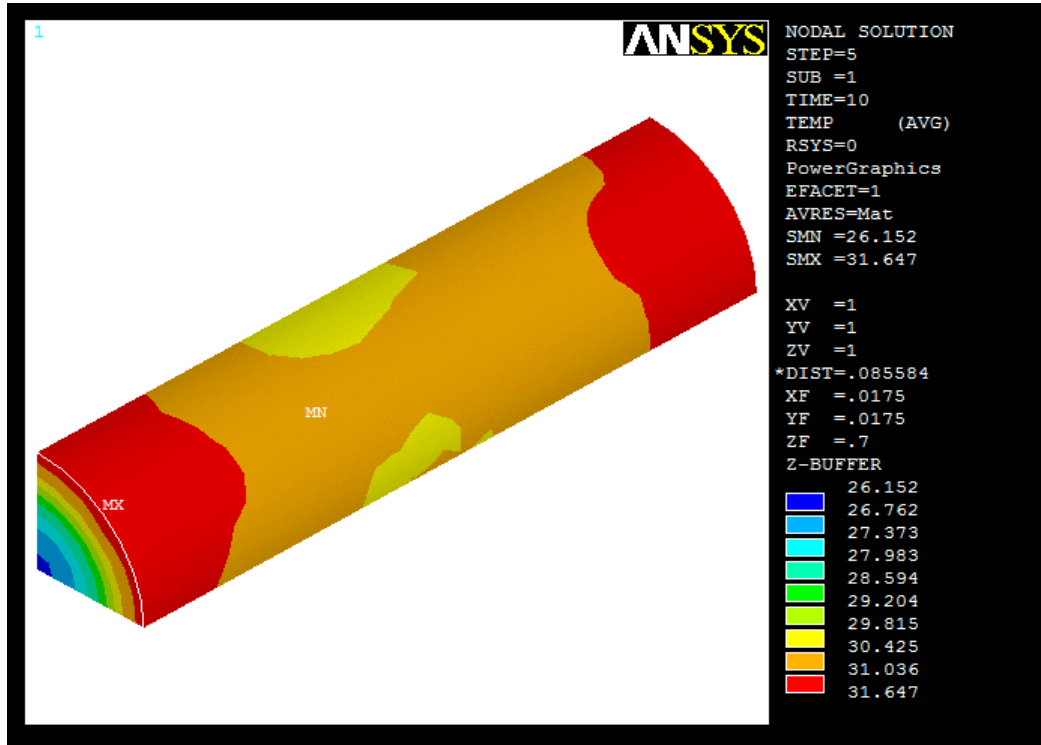


c) $z=600-400$ mm konumu için 10.saniye sonunda z-ekseni boyunca sıcaklık değişimi

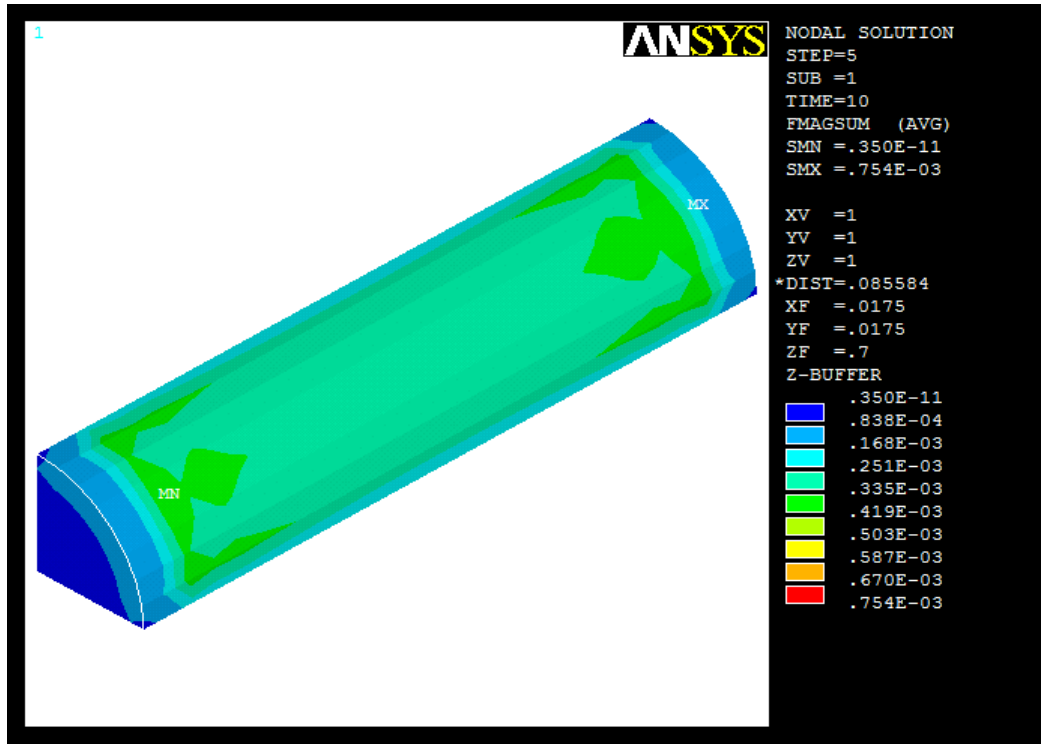


d) $z=600-400$ mm konumu için 10.saniye sonunda x-ekseni boyunca sıcaklık değişimi

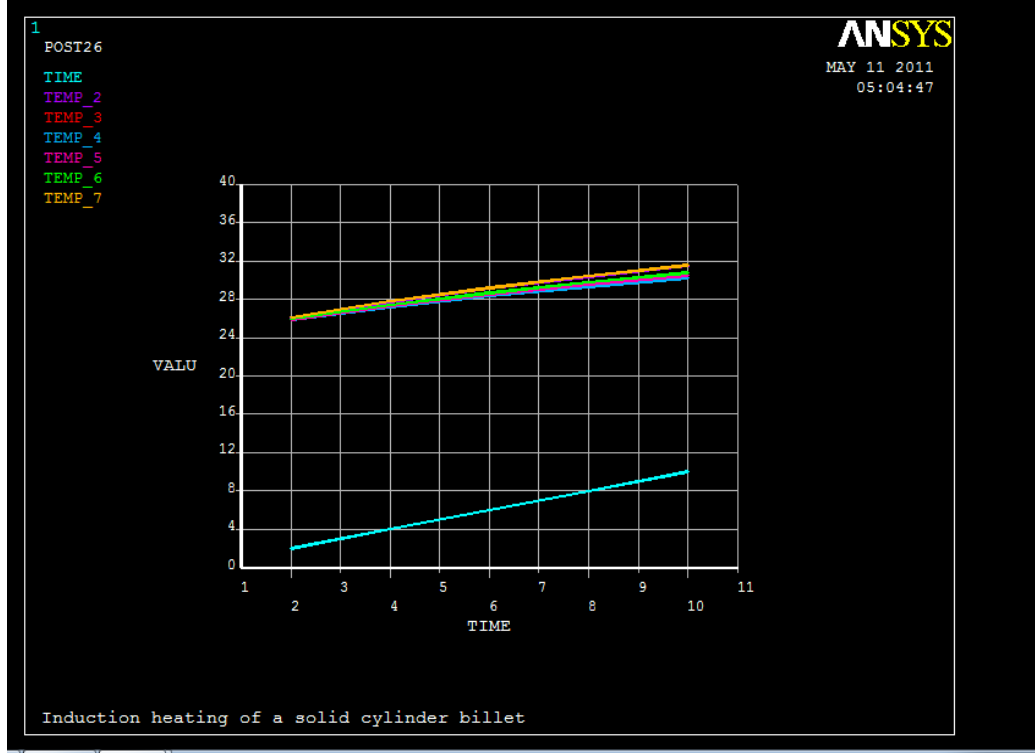
Şekil 3.13. $z=600-400$ mm konumu için Metal malzemedan alınan sayısal çözümlene sonuçları



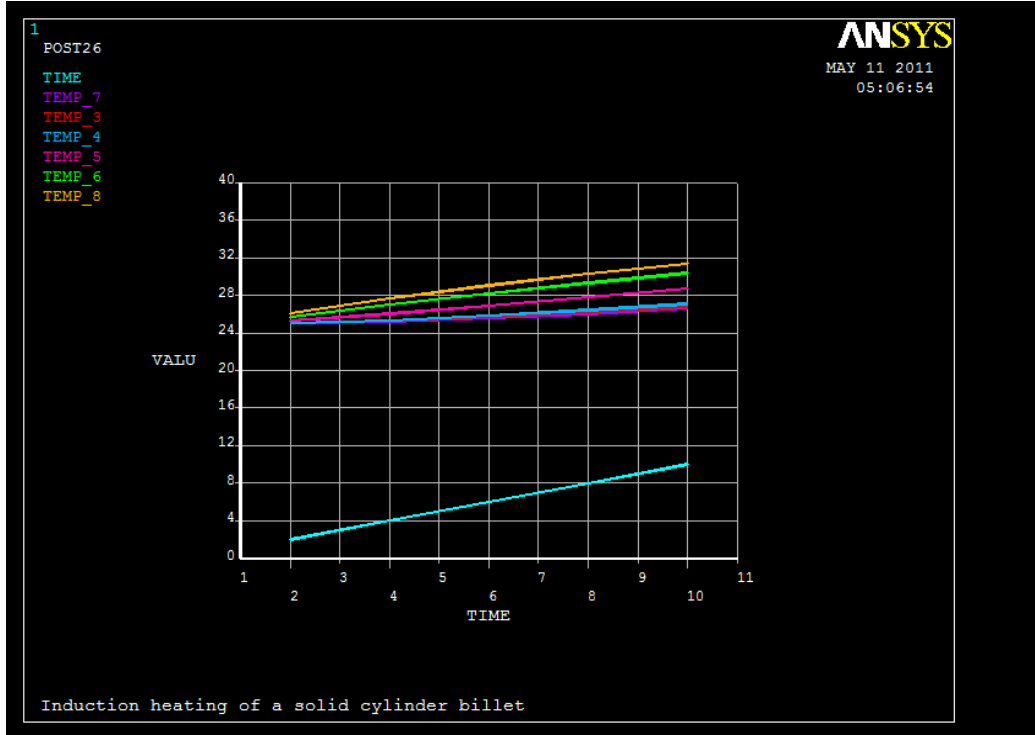
a) $z=400-200$ mm konumu için 10.saniye sonunda 3-D Sıcaklık Dağılımı



b) $z=400-200$ mm konumu için 10.saniye sonunda 3-D Manyetik Alan Oluşumu

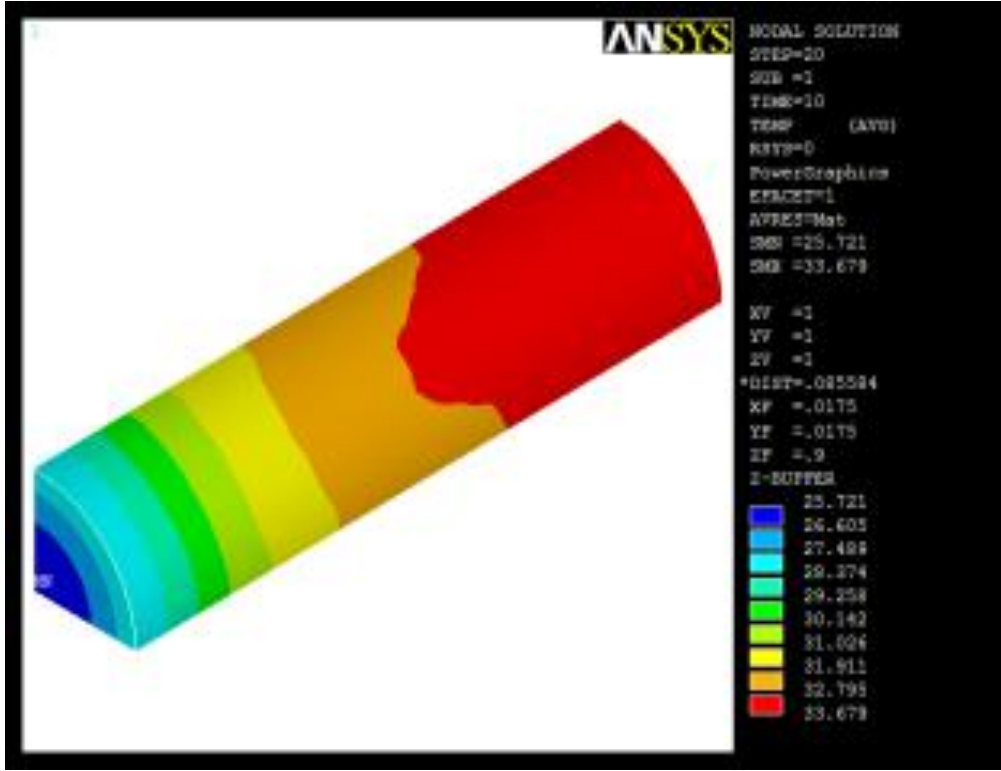


c) $z=400-200$ mm konumu için 10.saniye sonunda z-ekseni boyunca sıcaklık değişimi

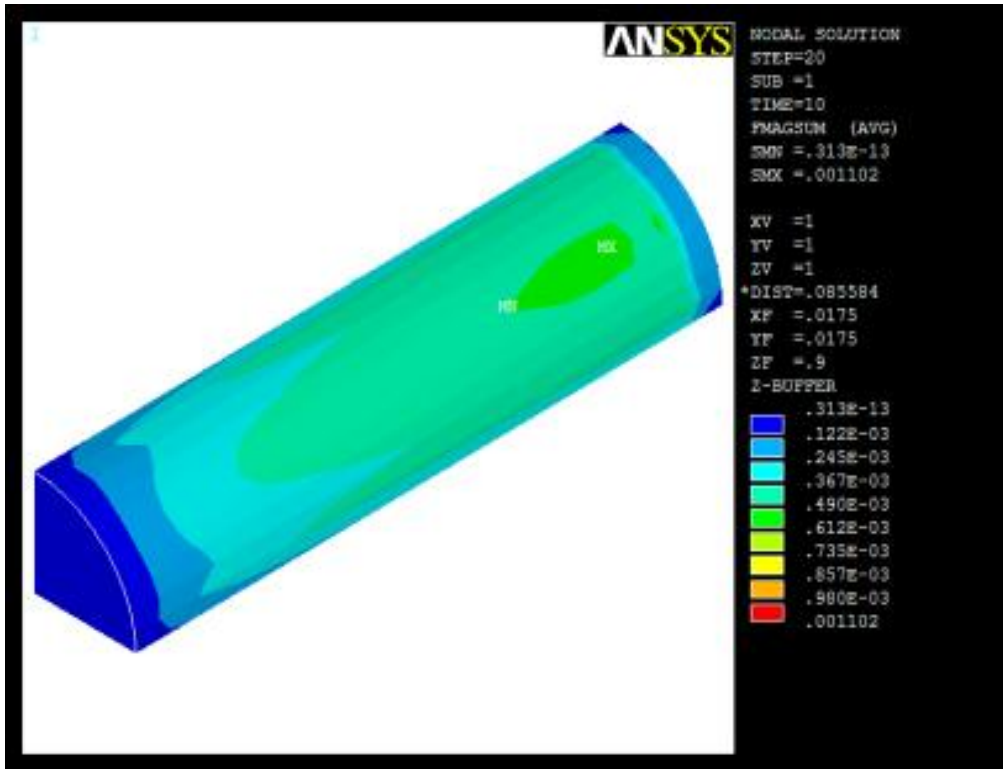


d) $z=400-200$ mm konumu için 10.saniye sonunda x-ekseni boyunca sıcaklık değişimi

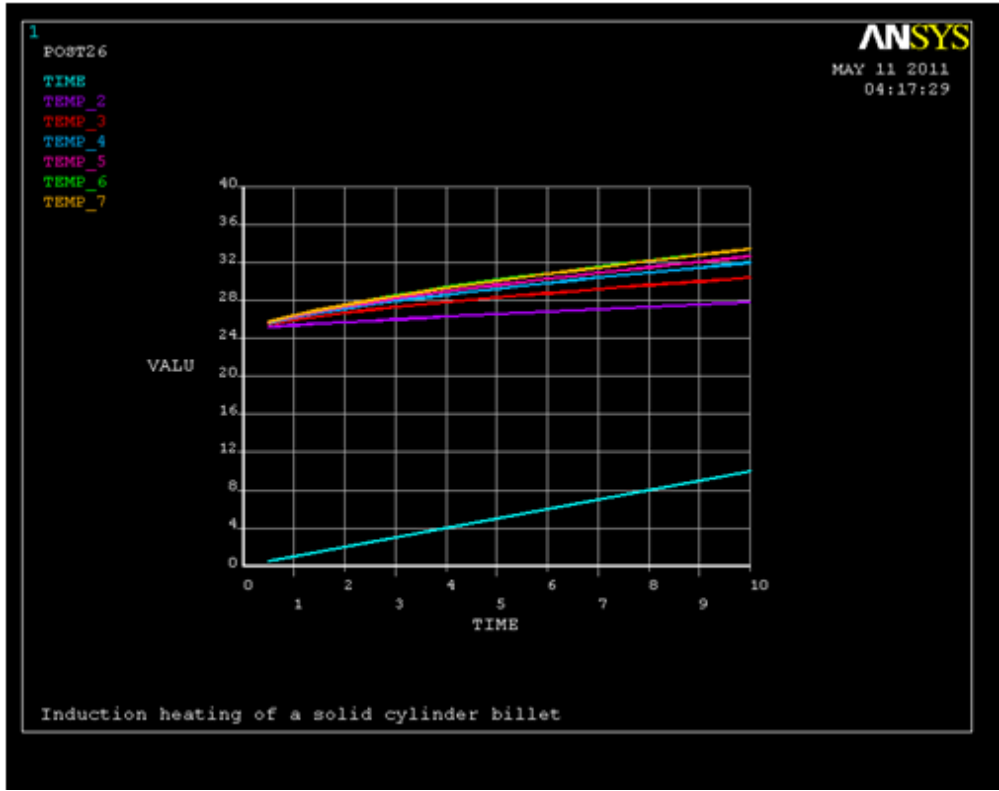
Şekil 3.14. $z=400-200$ mm konumu için metal malzemedan alınan sayısal çözümleme sonuçları



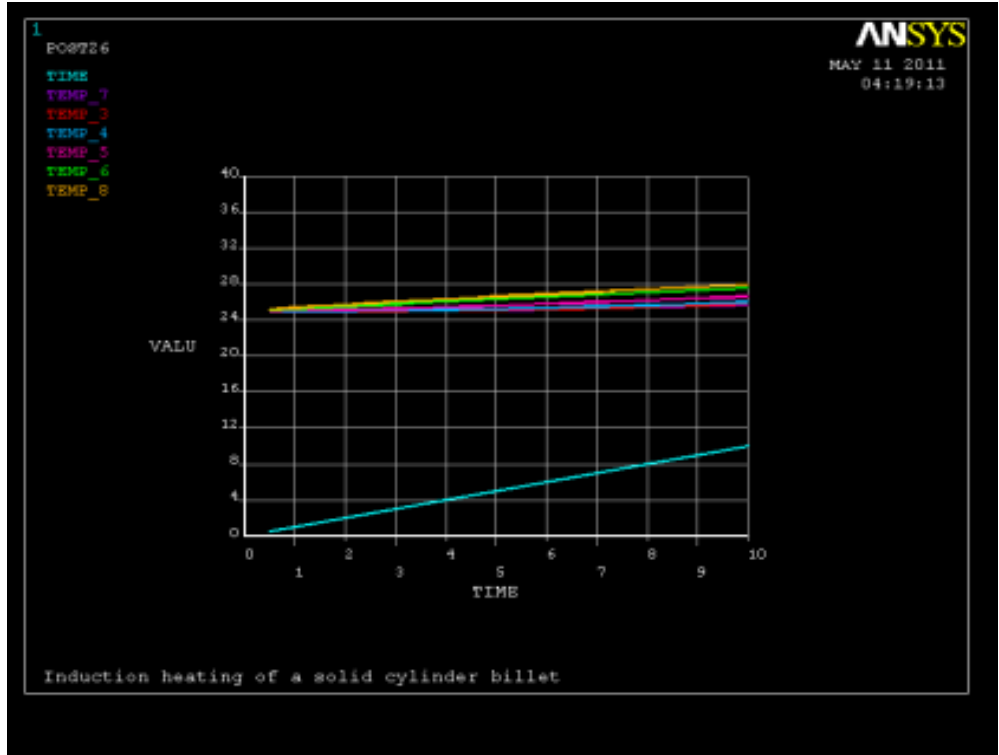
a) $z=200-0$ mm konumu için 10.saniye sonunda 3-D Sıcaklık Dağılımı



b) $z=200-0$ mm konumu için 10.saniye sonunda 3-D Manyetik Alan Oluşumu

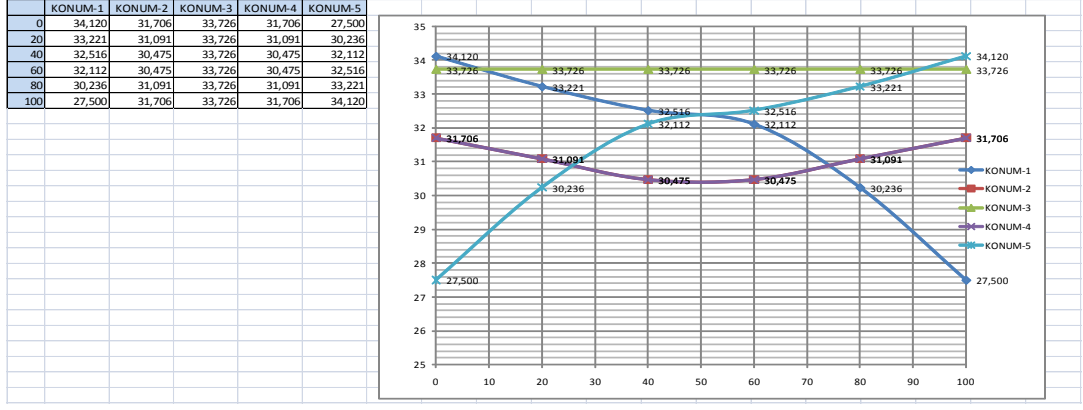


c) $z=200-0$ mm konumu için 10.saniye sonunda z-ekseni boyunca sıcaklık değişimi



d) $z=200-0$ mm konumu için 10.saniye sonunda z-ekseni boyunca sıcaklık değişimi

Şekil 3.15. $z=200-0$ mm konumu için Metal malzemedan alınan sayısal çözümleme sonuçları



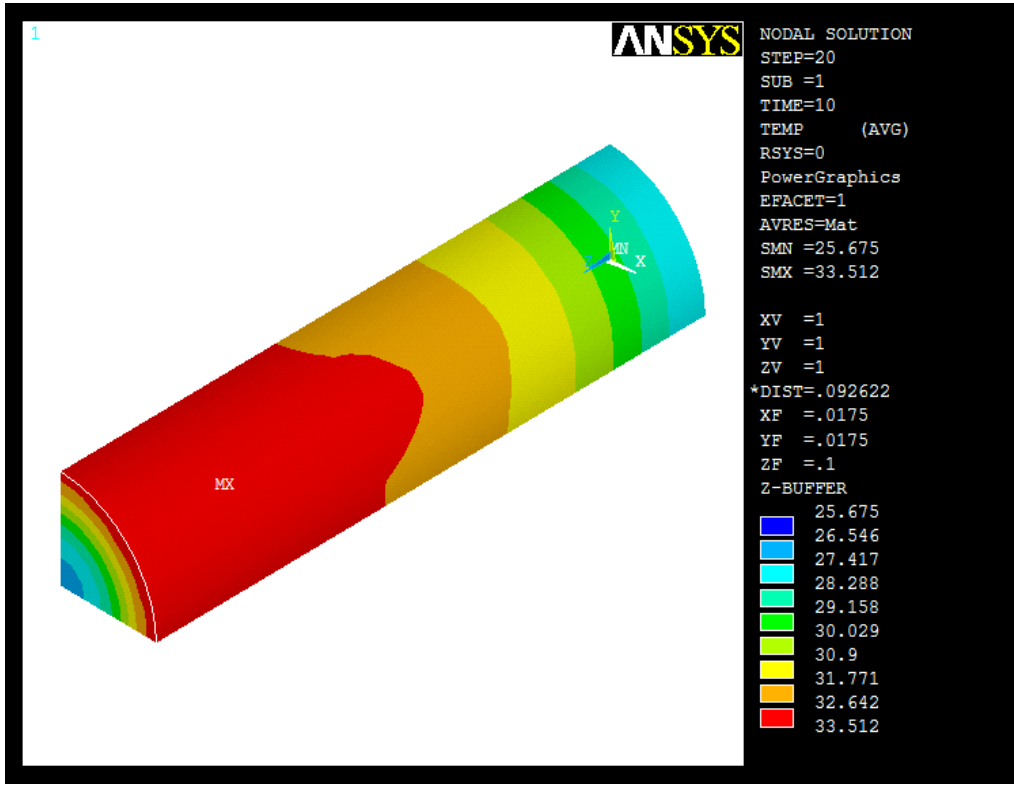
Şekil 3.16. 10. Saniye Sonunda Konum Değişimine Bağlı olarak z-ekseni Boyunca Malzemede Sıcaklık Değişimi

İndüksiyonla ısıtmada parça üzerinde akım indüklenmesi bobinin tam ortasındaiken en fazla değerine ulaşacağından bu noktada çalışma parçası üzerinde oluşan sıcaklık maksimumdur.Çalışma parçasının konumu, bobinin uç kısmına doğru değiştirildikçe, parça üzerinde oluşan sıcaklık değeri azalmaya başlar. Bunun nedeni, oluşan manyetik alanın bobinin orta noktasında yoğunlaşmasından kaynaklıdır. Sıcaklık dağılımı, çalışma parçasının konum değişikliğinin bobine göre simetri göstermesi halinde aynı değerleri alacaktır.

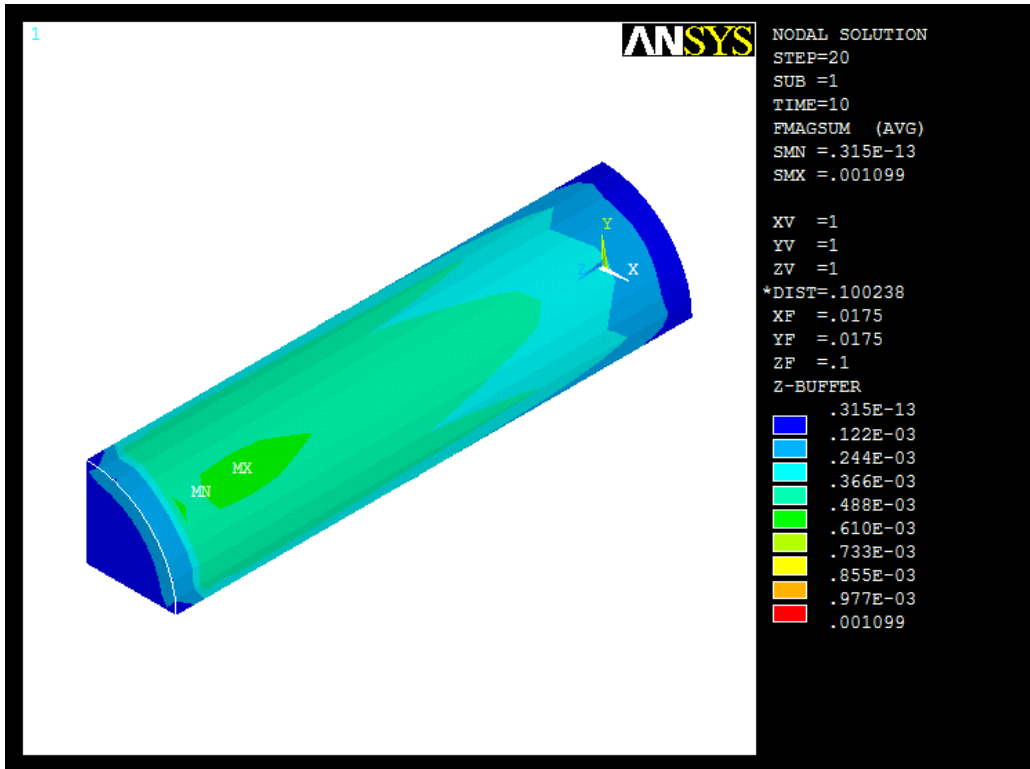
3.4. Farklı Malzeme Çaplarında Elde Edilen Sayısal Çözümleme Sonuçları

1000mm boyundaki indüksiyon bobininin ön kısmına sırasıyla 70-65-60-55 ve 50 mm çaplarında 200 mm boyunda demir malzemeler yerleştirilerek model oluşturulmuş ve indüksiyon bobinine 1000 A akım değeri ve 1000 Hz. frekans değeri çalışma parametreleri olarak belirlenerek sayısal çözümleme sonuçları elde edilmiştir.

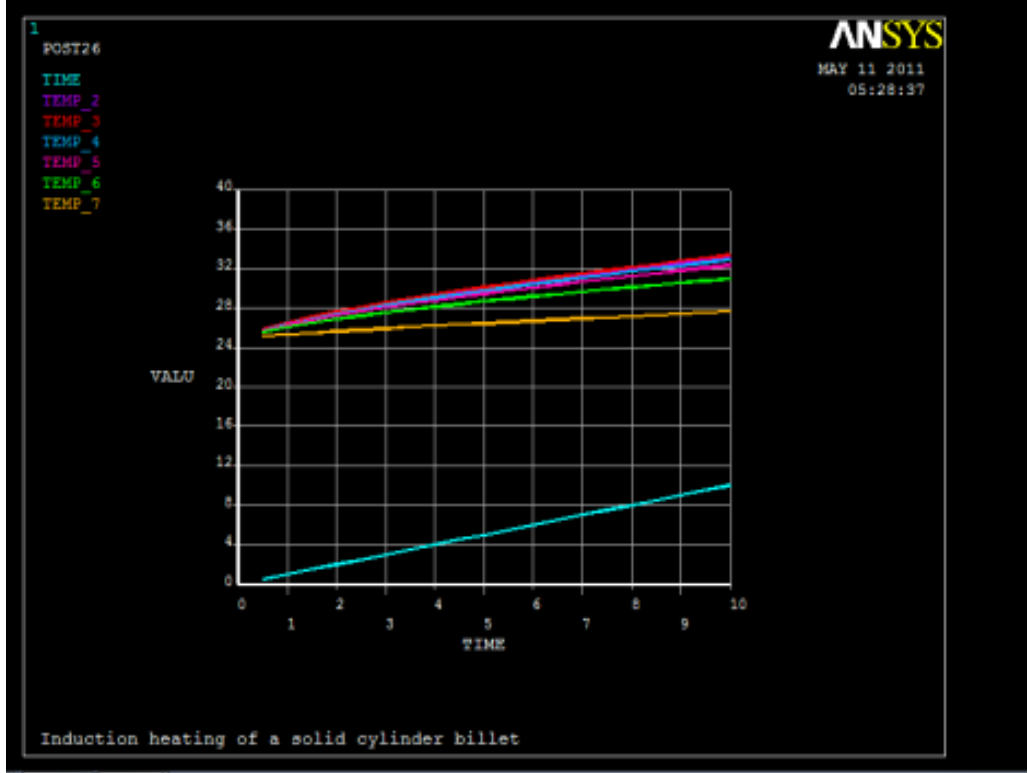
70 mm çapındaki malzeme için elde edilen sayısal sonuçlar aşağıda gösterilmiştir.



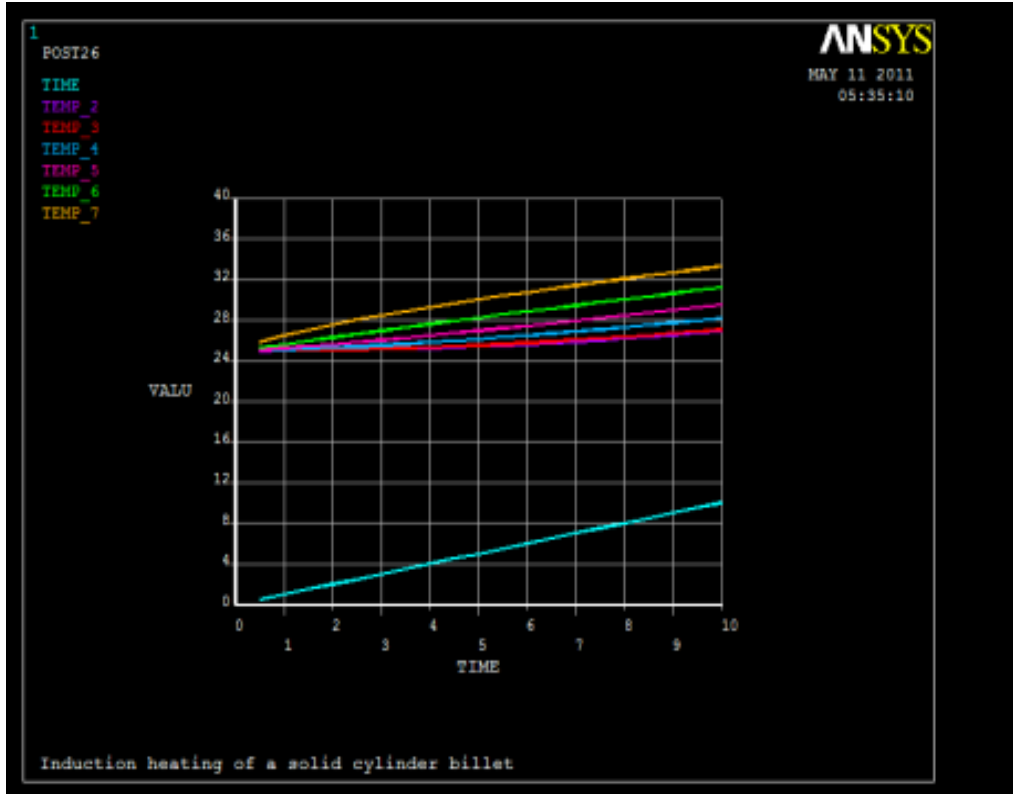
a) 10.saniye sonunda 3-D Sıcaklık Dağılımı



b) 70 mm çapındaki 10.saniye sonunda 3-D Manyetik Alan Oluşumu

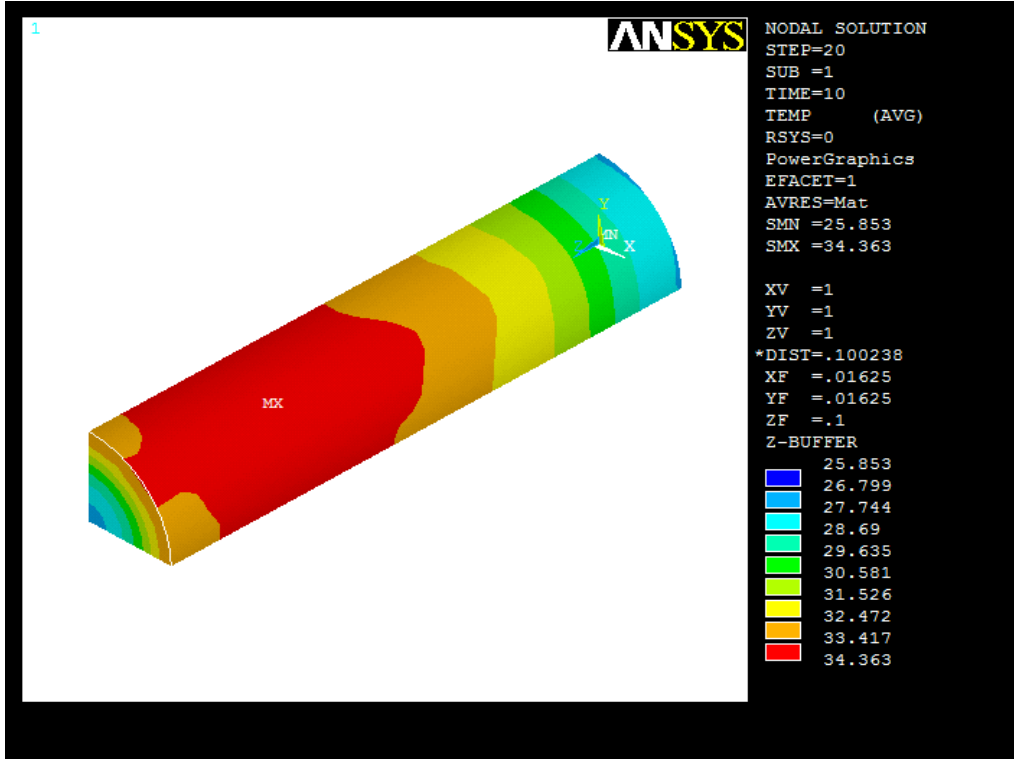


c) 70 mm çapındaki 10.saniye sonunda z-ekseni boyunca sıcaklık değişimi

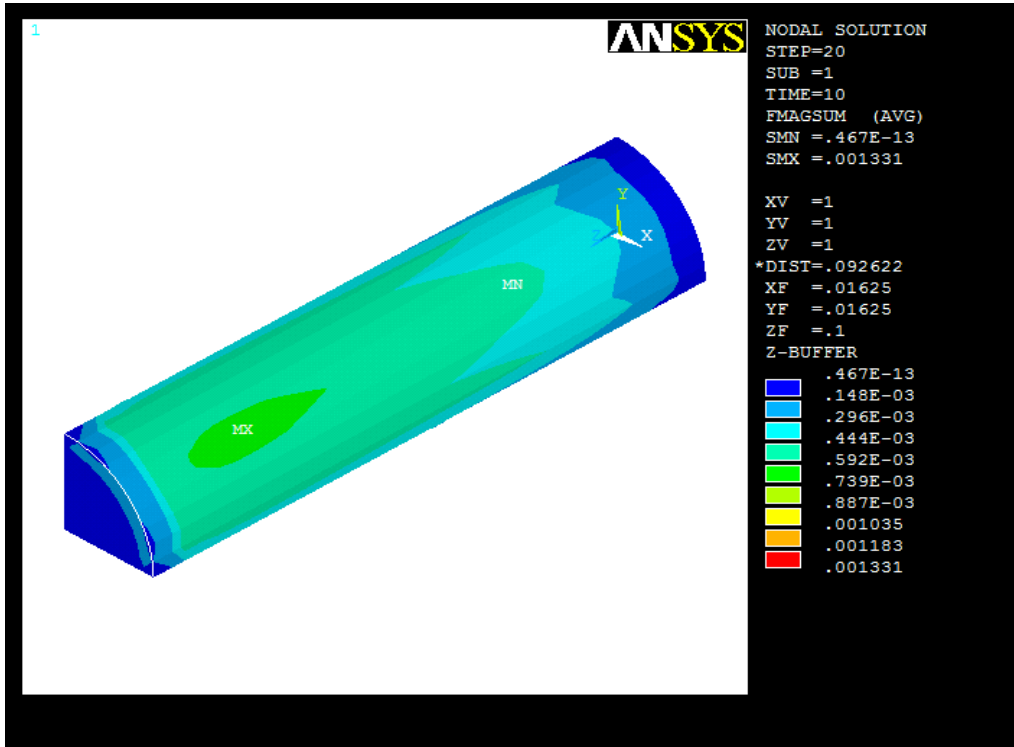


d) 70 mm çapındaki 10.saniye sonunda x-ekseni boyunca sıcaklık değişimi

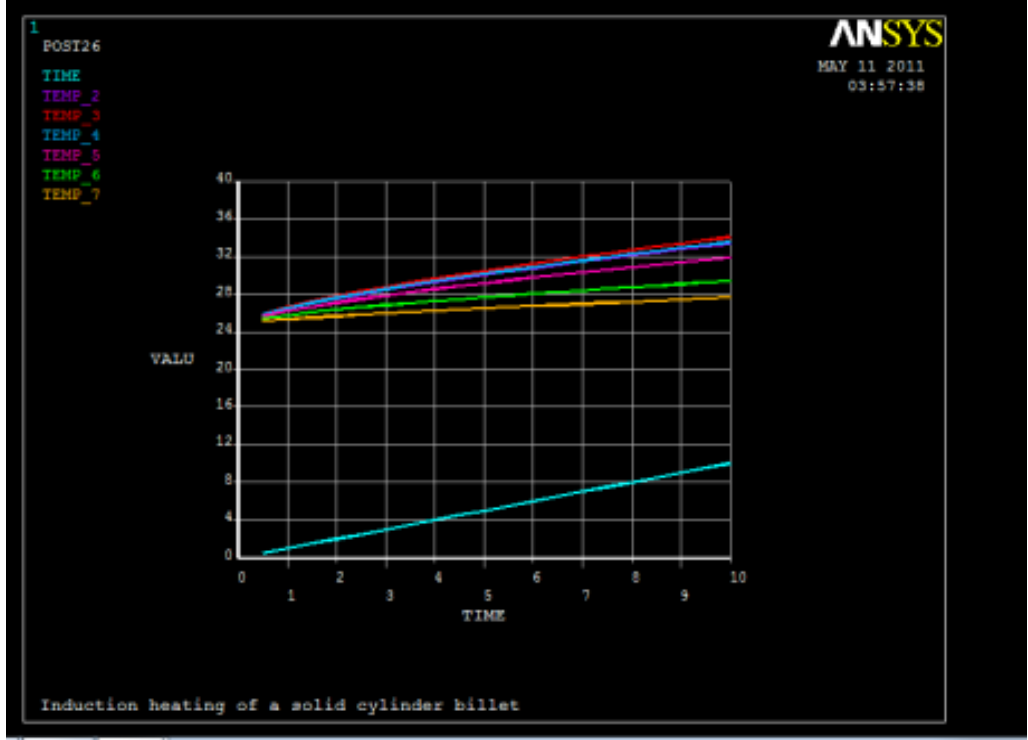
Şekil 3.17. 70 mm çapındaki Metal malzemeden alınan sayısal çözümlene sonuçları



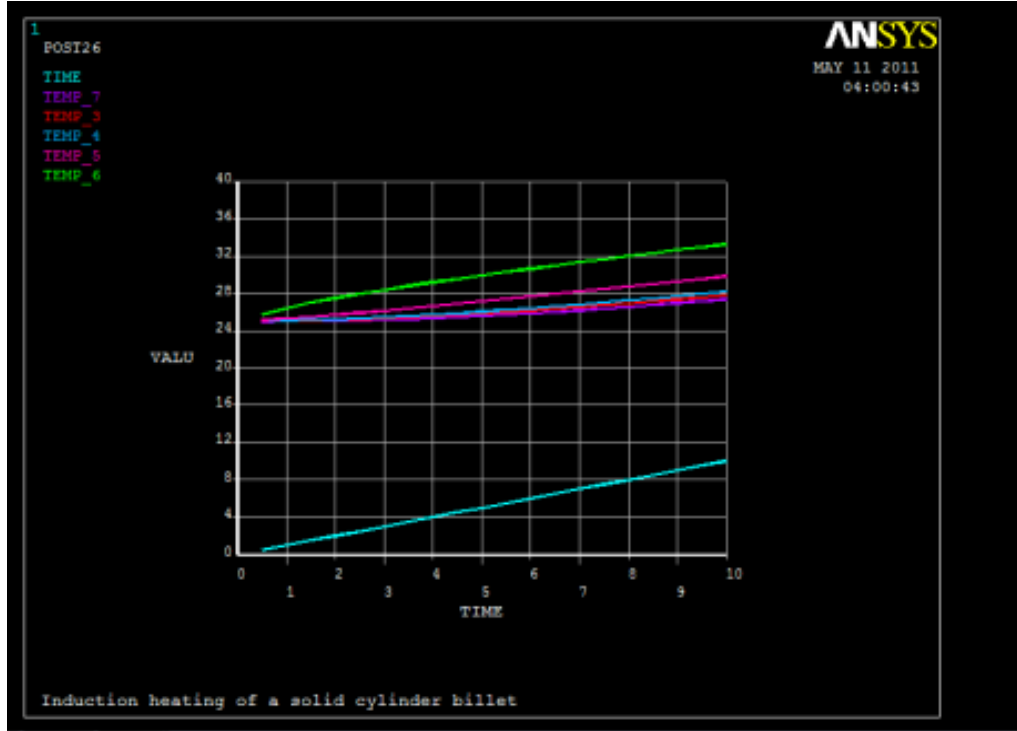
a) 65 mm çapındaki 10.saniye sonunda 3-D Sıcaklık Dağılımı



b) 65 mm çapındaki 10.saniye sonunda 3-D Manyetik Alan Oluşumu

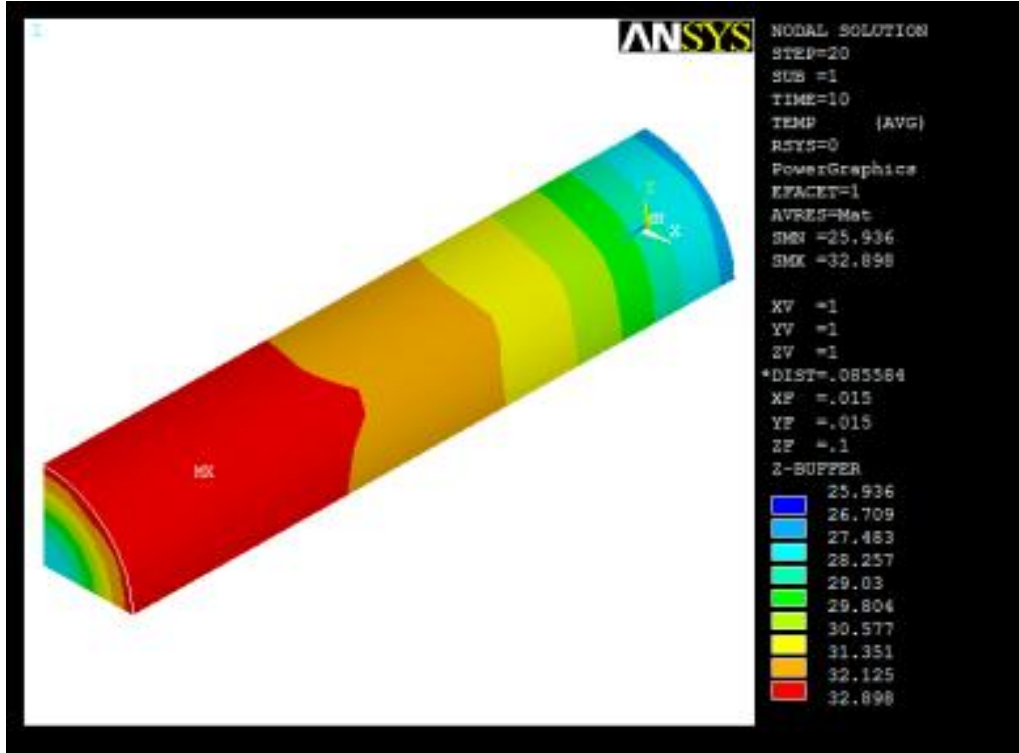


c) 65 mm çapındaki 10.saniye sonunda z-ekseni boyunca sıcaklık değişimi

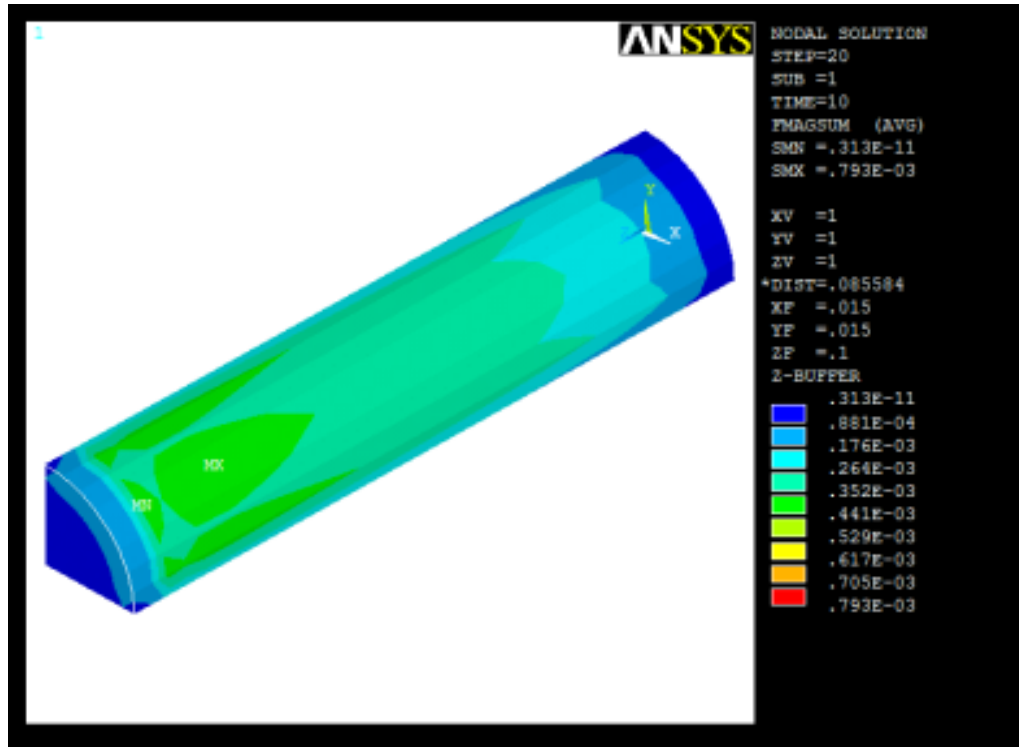


d) 65 mm çapındaki 10.saniye sonunda x-ekseni boyunca sıcaklık değişimi

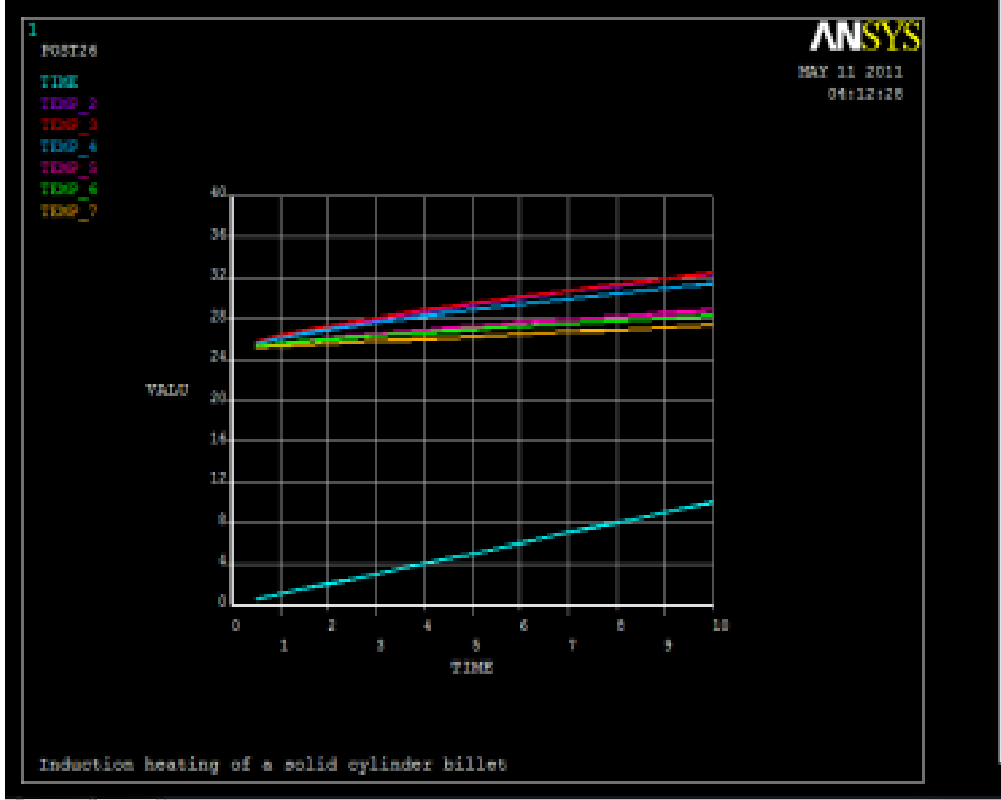
Şekil 3.18. 65 mm çapındaki Metal malzemedен alınan sayısal çözümleme sonuçları



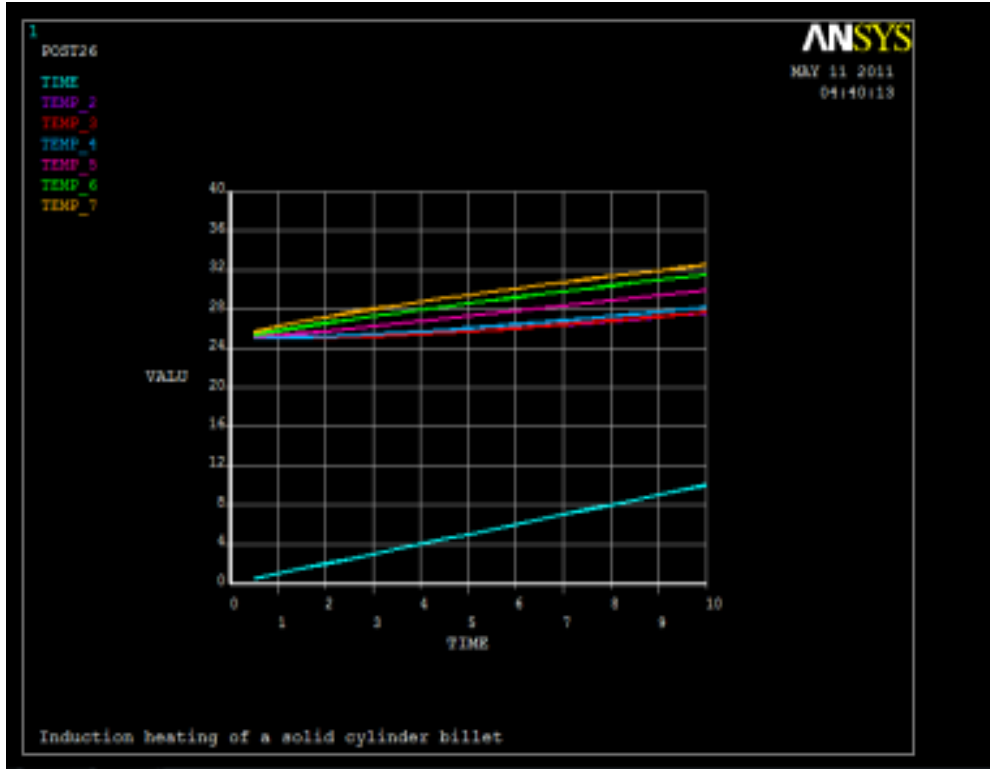
a) 60 mm çapındaki 10.saniye sonunda 3-D Sıcaklık Dağılımı



b) 60 mm çapındaki 10.saniye sonunda 3-D Manyetik Alan Oluşumu

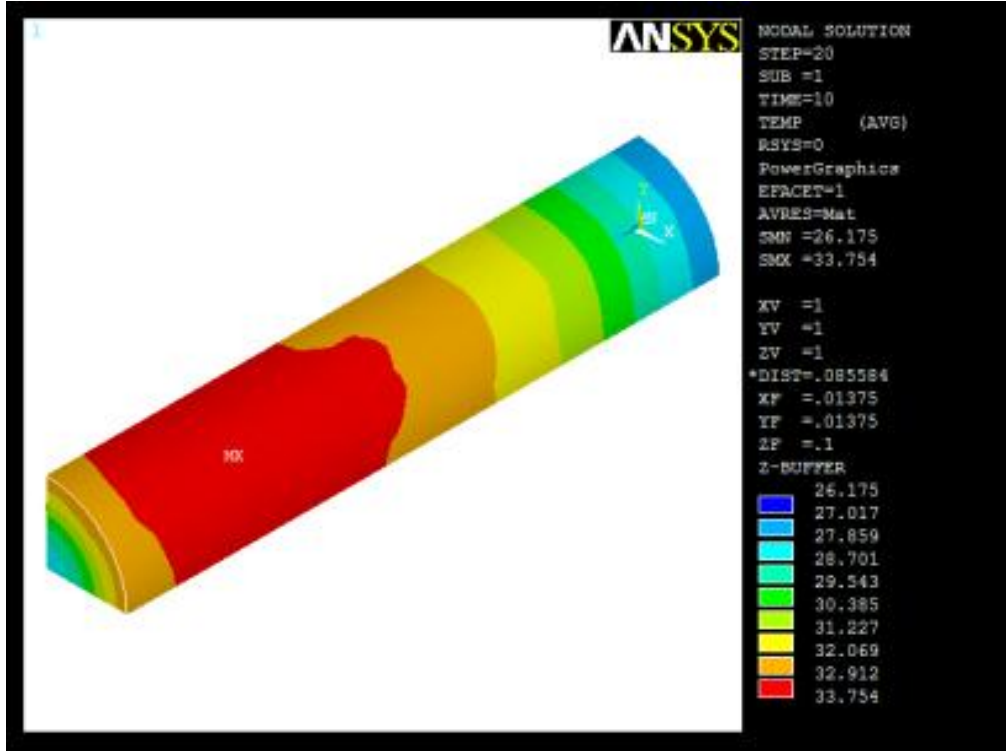


c) 60 mm çapındaki 10.saniye sonunda z-ekseni boyunca sıcaklık değişimi

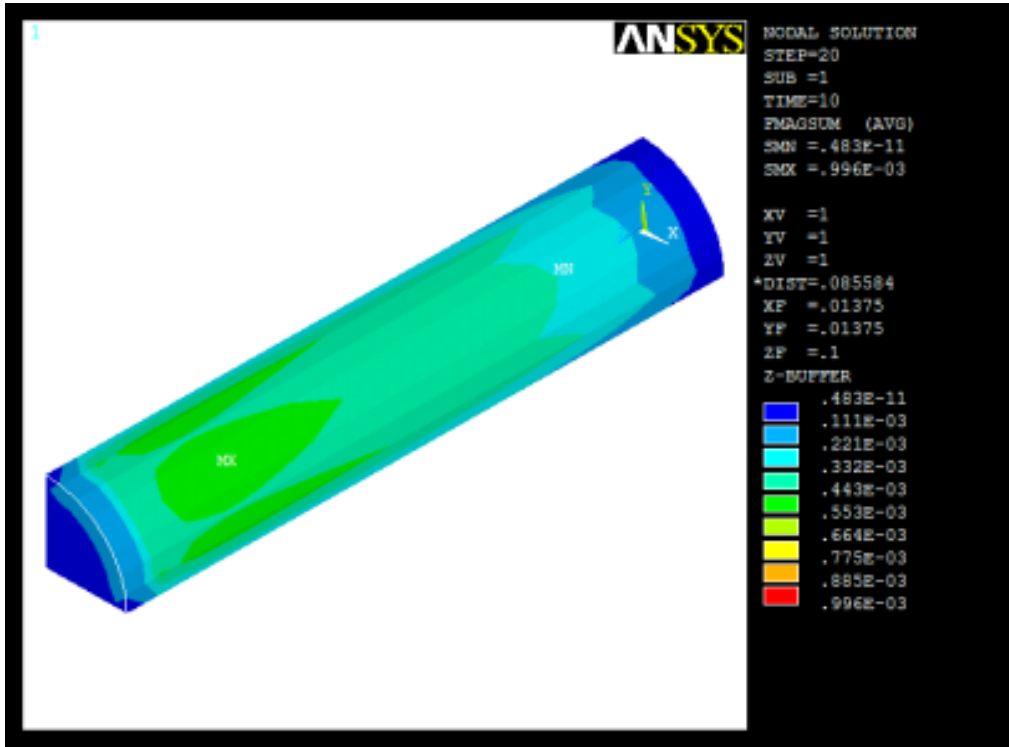


d) 60 mm çapındaki 10.saniye sonunda x-ekseni boyunca sıcaklık değişimi

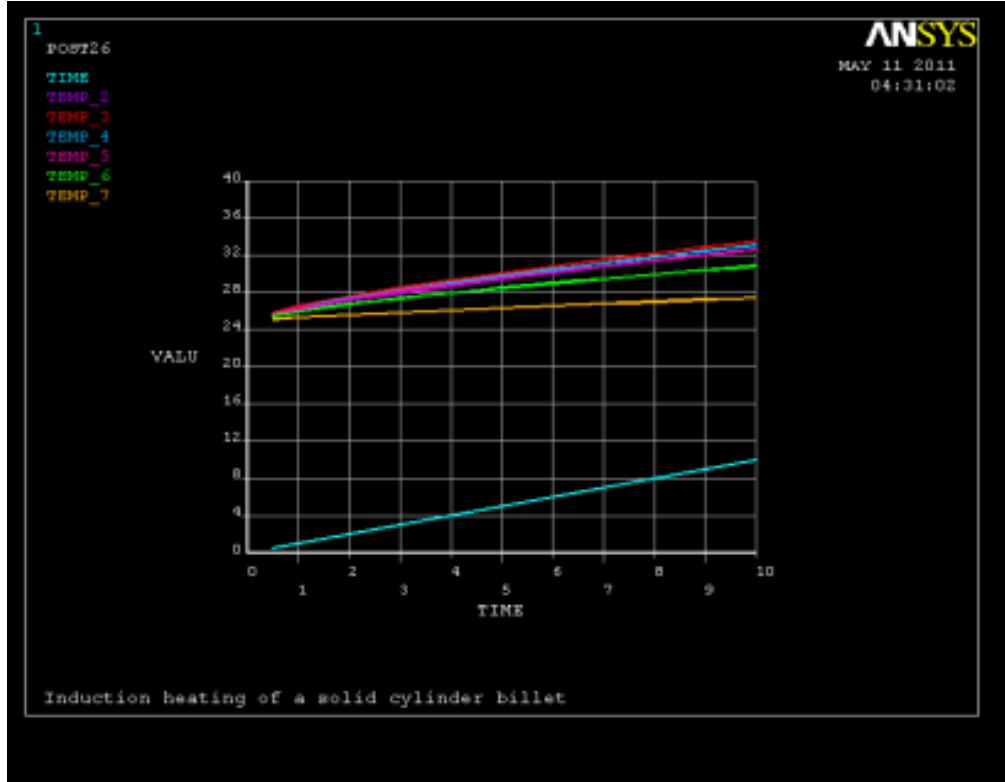
Şekil 3.19. 60 mm çapındaki Metal malzemeden alınan sayısal çözümlene sonuçları



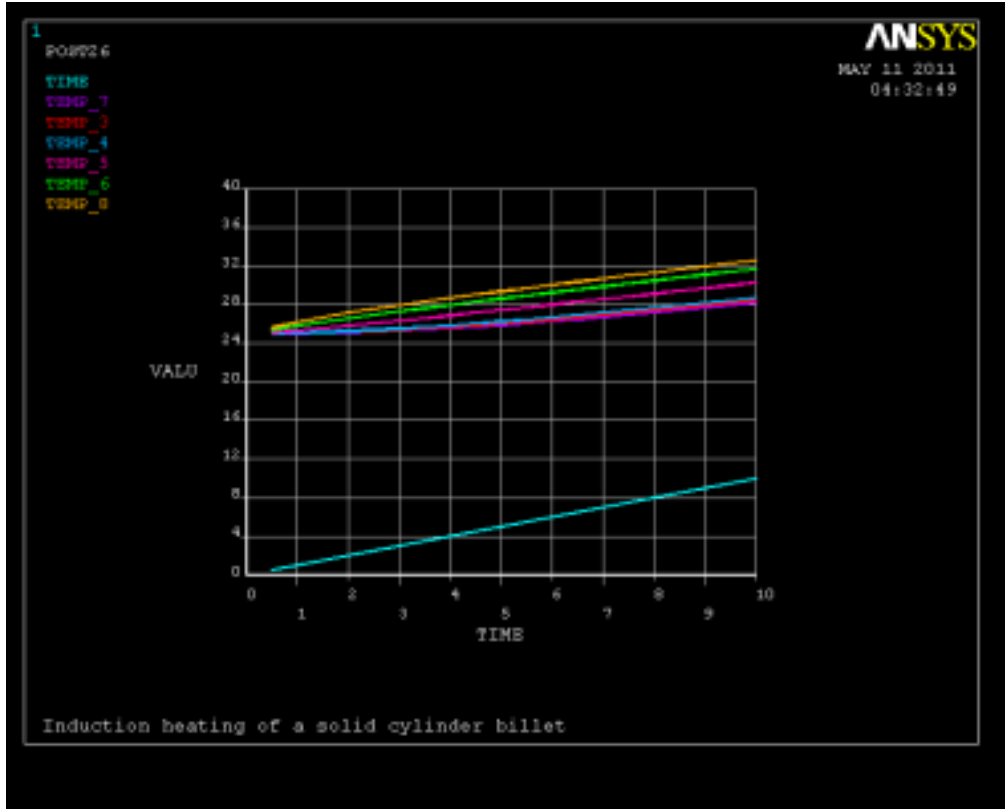
a) 55 mm çapındaki 10.saniye sonunda 3-D Sıcaklık Dağılımı



b) 55 mm çapındaki 10.saniye sonunda 3-D Manyetik Alan Oluşumu

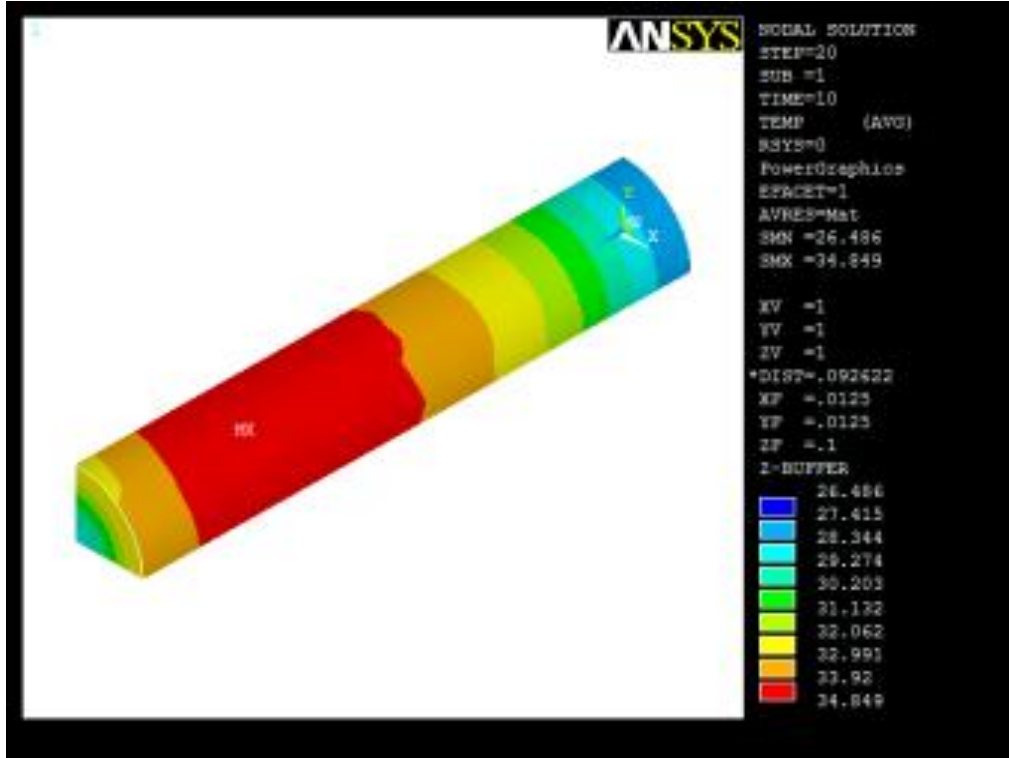


c) 55 mm çapındaki 10.saniye sonunda z-ekseni boyunca sıcaklık değişimi

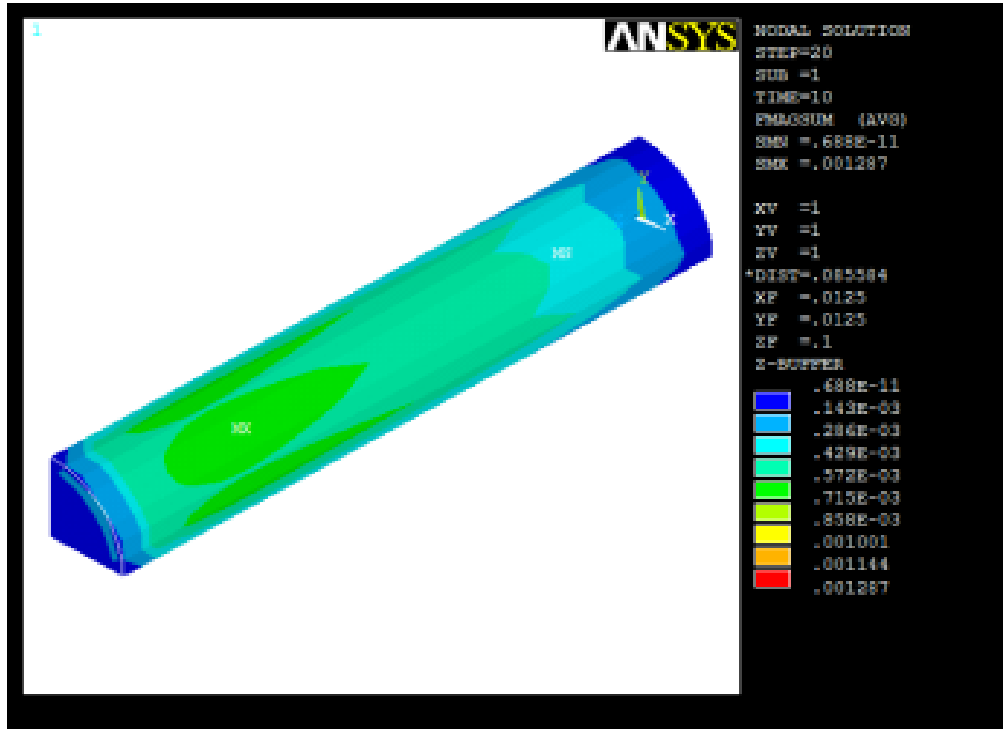


d) 55 mm çapındaki 10.saniye sonunda x-ekseni boyunca sıcaklık değişimi

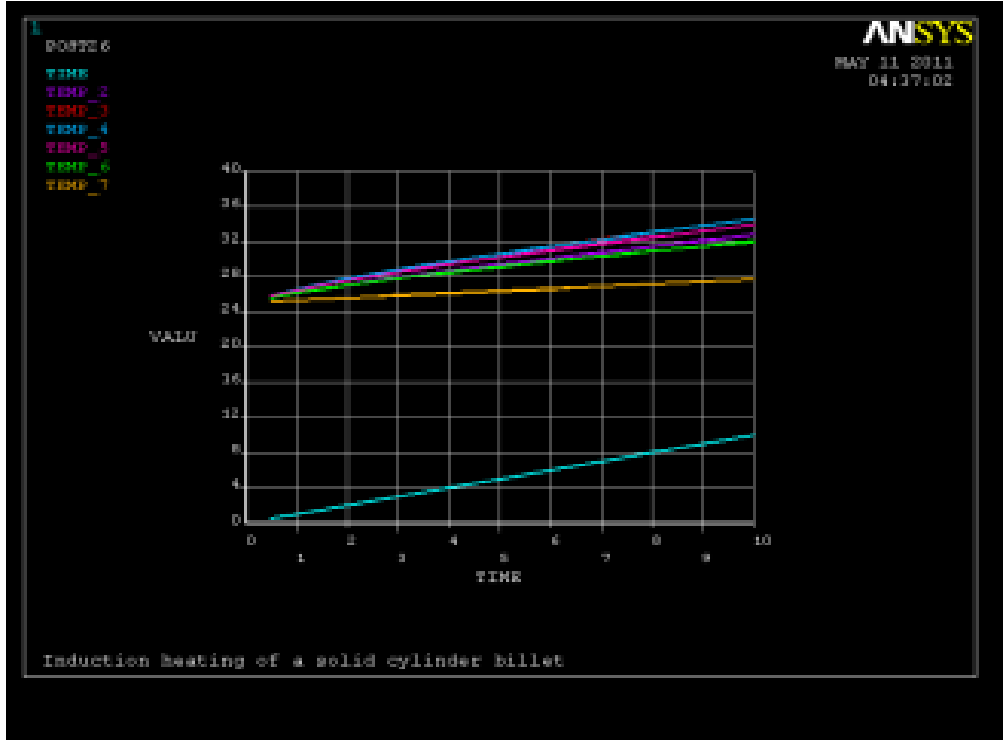
Şekil 3.20. 55 mm çapındaki Metal malzemedен alınan sayısal çözümlеme sonuçları



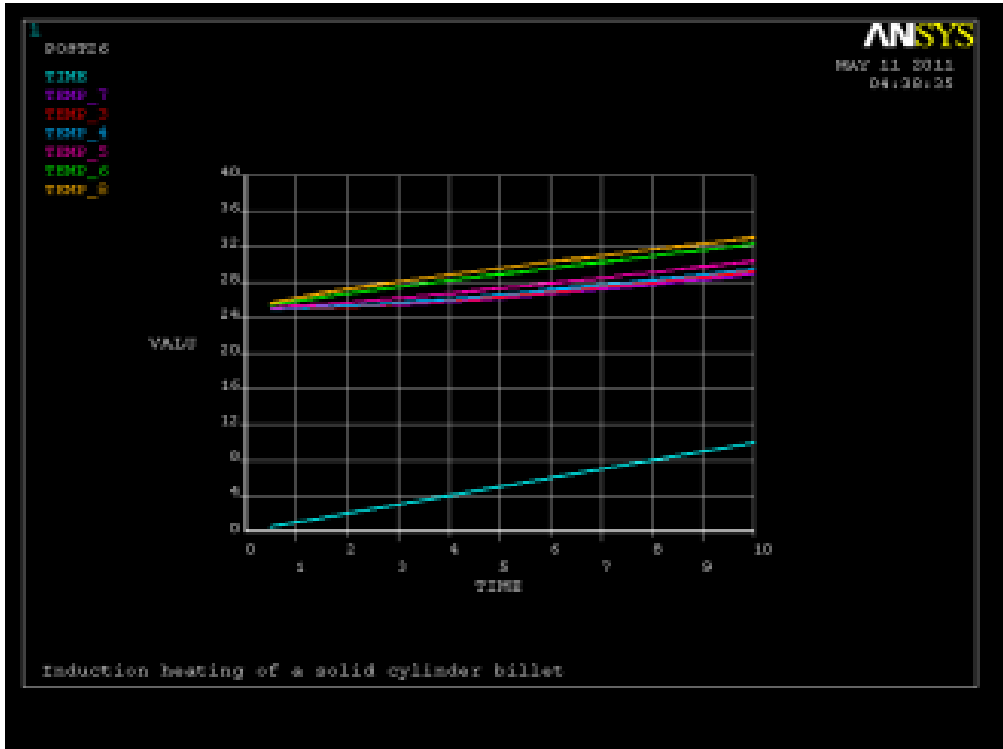
a) 50 mm çapındaki 10.saniye sonunda 3-D Sıcaklık Dağılımı



b) 50 mm çapındaki 10.saniye sonunda 3-D Manyetik Alan Oluşumu



c) 50 mm çapındaki 10.saniye sonunda z-ekseni boyunca sıcaklık değişimi



d) 50 mm çapındaki 10.saniye sonunda x-ekseni boyunca sıcaklık değişimi

Şekil 3.21. 50 mm çapındaki Metal malzemedен alınan sayısal çözümlene sonuçları

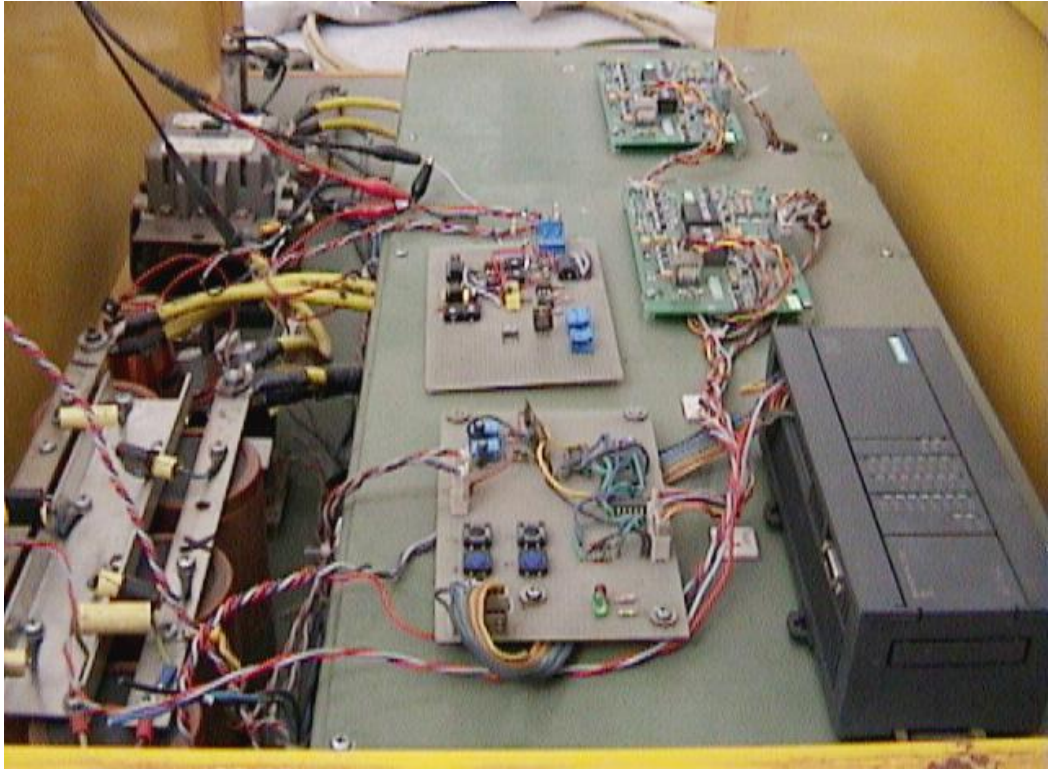
3.5 İndüksiyonla Isıtmanın Deneysel Uygulamaları

İndüksiyonla ısıtma işlemi malzeme testleri, termal yorulma deneyleri, ısı altında çalışan makine parçalarının deneysel uygulamaları vb. alanlarda bilimsel araştırmalar amacıyla kullanılmaktadır.

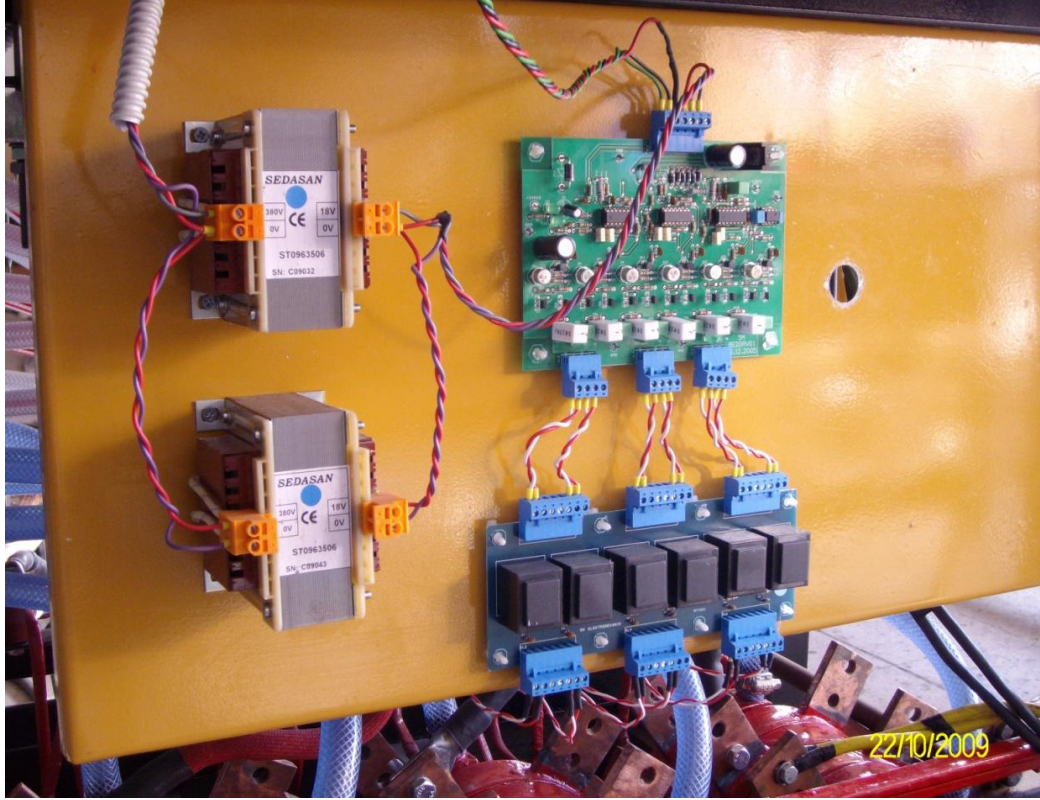
3.5.1. Deney Cihazının Tanıtımı

Bu çalışmada orta frekanslı PLC kontrolü ile çalışan 1000 mm uzunluğunda bobini kontrol eden bir indüksiyon uygulaması kullanılmıştır. 50 mm uzunluğunda 70 mm çapında malzeme özellikleri bilinen demir çubuk indüksiyon bobininin orta noktasına yerleştirilmiş ve 150 sn boyunca bobin üzerinde 2000 A akım oluşturularak 1000 Hz frekans değerinde ısıtılmıştır.

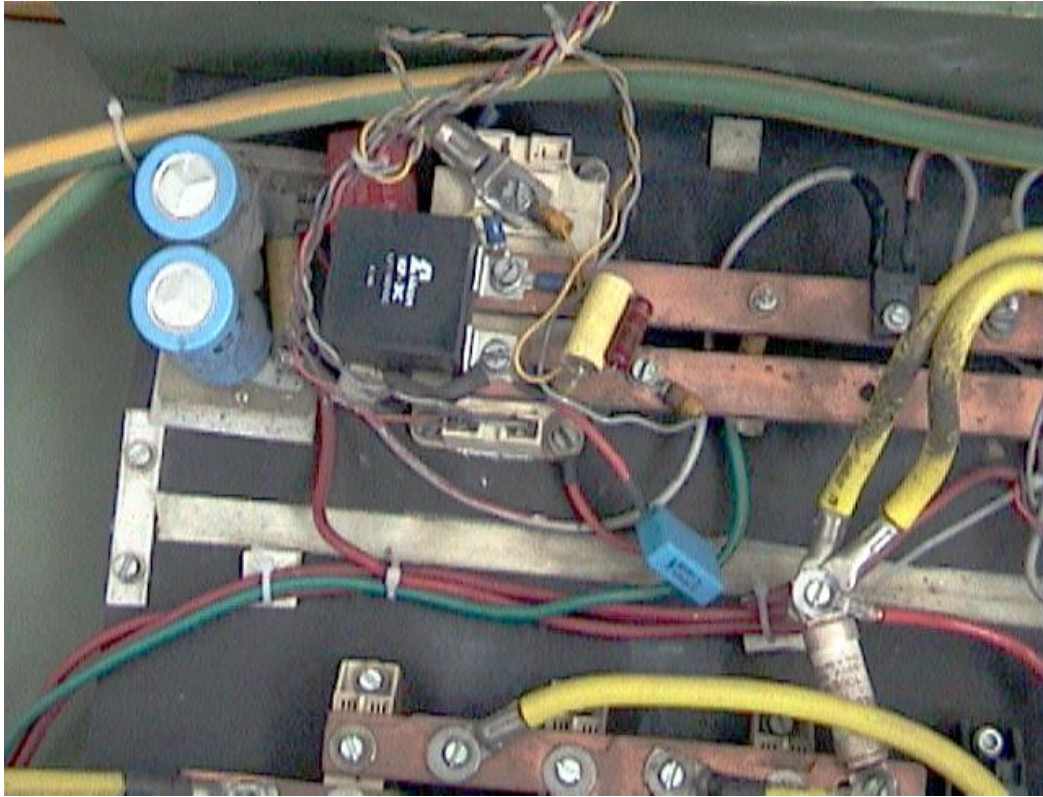
Aşağıda deney cihazının üniteleri ve sistem tam olarak görülmektedir.



Şekil 3.22. Geliştirilen sistemin kontrol ünitesinin görünümü



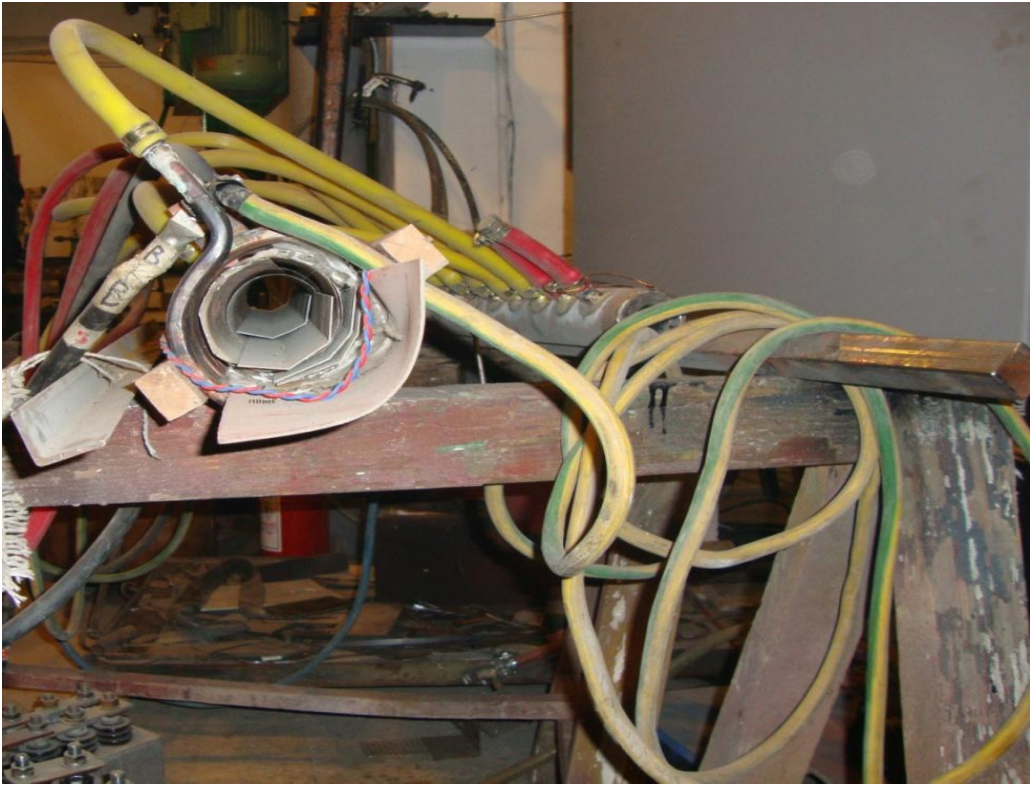
Şekil 3.23. Doğrultucunun görünümü



Şekil 3.24. IGBT ve bastırıcının üstten görünümü



Şekil 3.25. Rezonans kondansatörünün görünümü



(a)



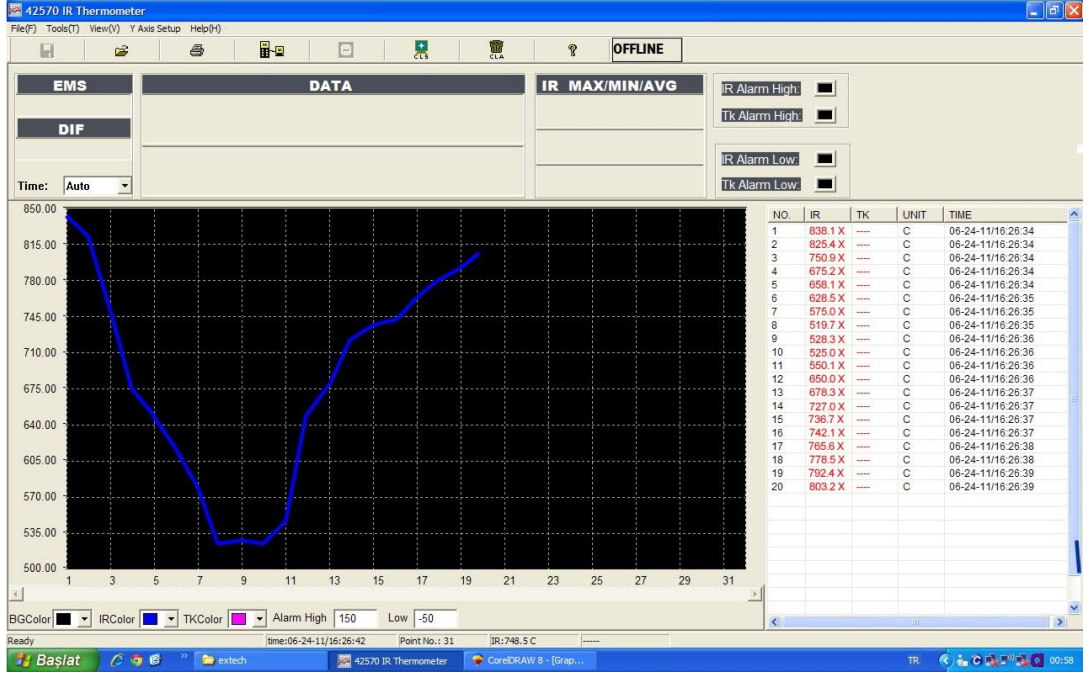
(b)

Şekil 3.26. İmalat aşamasındaki ısıtıcı indüktör

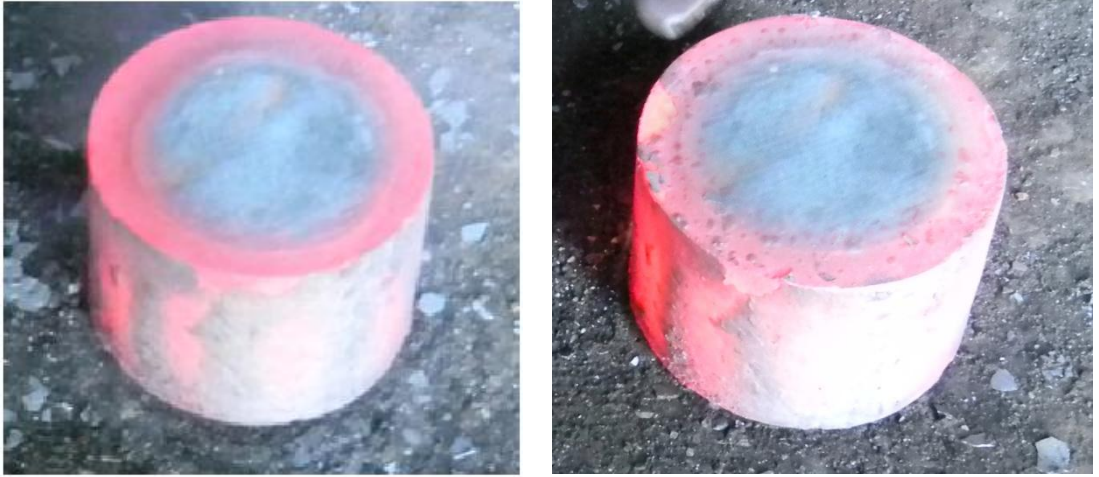
3.5.2. Deney Sonuçları

Kontrol ünitesi, doğrultucu ve diğer ekipmanlarıyla aktif hale getirilen indüksiyon ocağı çalıştırılarak demir malzeme indüksiyon altında ısıtılmış ve sıcaklık değerleri elde edilerek sayısal çözümleme sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

Deney çalışması 1000mm boyunda ve iç çapı 100 mm olan indüktörün ortasına yerleştirilen, 70 mm çapında 50 mm uzunluğunda ve malzeme özellikleri bilinen silindirik demir parça kullanılarak yapılmıştır. İndüktörün ortasında 150 sn. boyunca 2000 A akım değeri ve 1000 Hz. frekans değerlerinde indüksiyonla ısıtmaya tabii tutulmuş ve indüktör içerisinden çıkarılarak EXTECH 42570 marka çift lazerli uzaktan ısıölçer ile metal parçanın merkezinden geçen bir eksen boyunca sıcaklık ölçümü yapılmıştır. Isıölçerin depoladığı sıcaklık değerleri ile sıcaklık değişim grafiği bilgisayar ortamına aktarılmıştır.



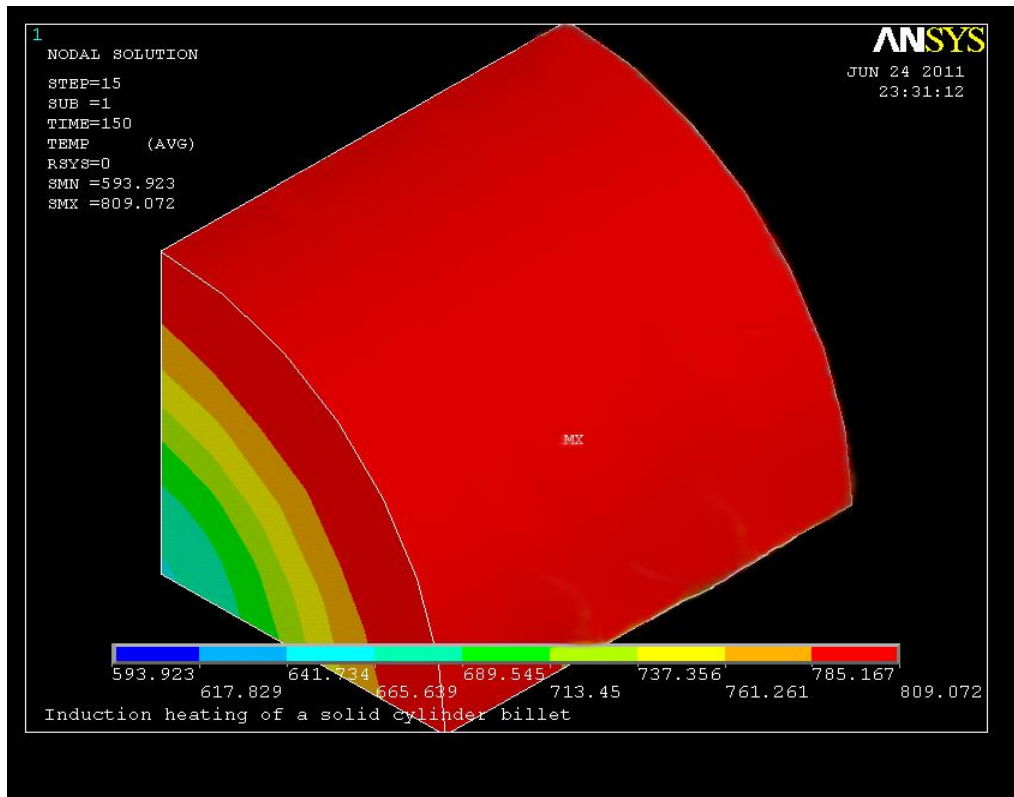
Şekil 3.27. Deneysel ölçümlerle elde edilen, X eksenı boyunca sıcaklık değışimi grafiği



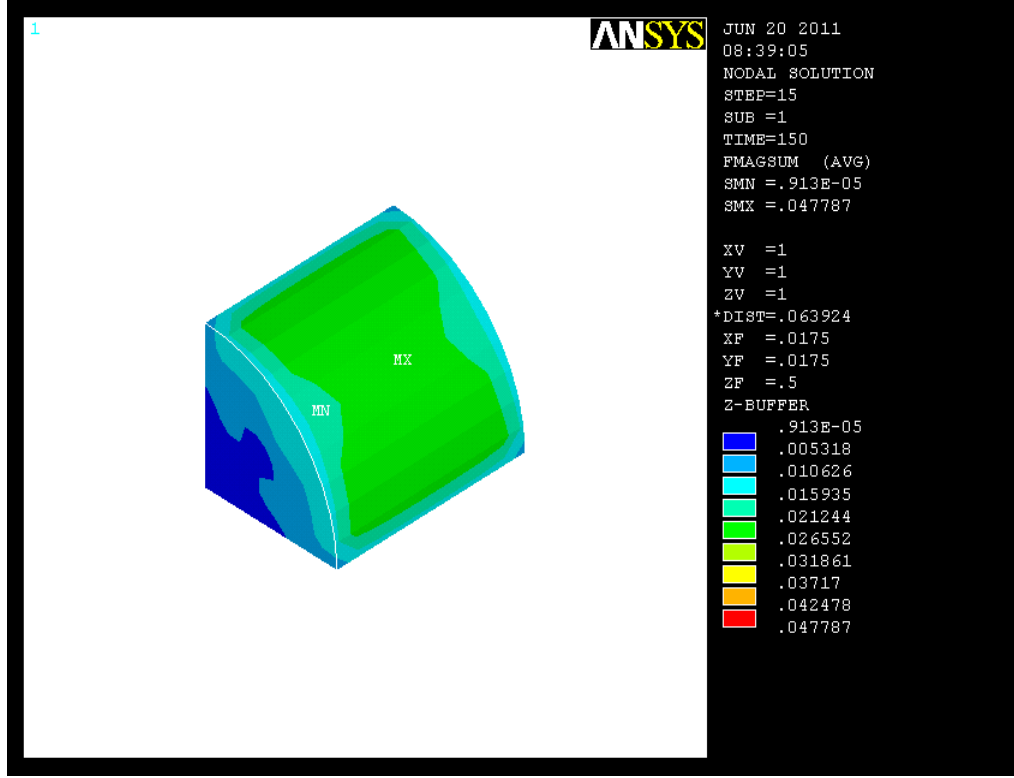
Şekil 3.28. İndüksiyon fırınından çıkmış demir malzeme

3.5.3. Deneysel Sonuçlarla Sayısal Çözümleme Sonuçlarının Karşılaştırılması

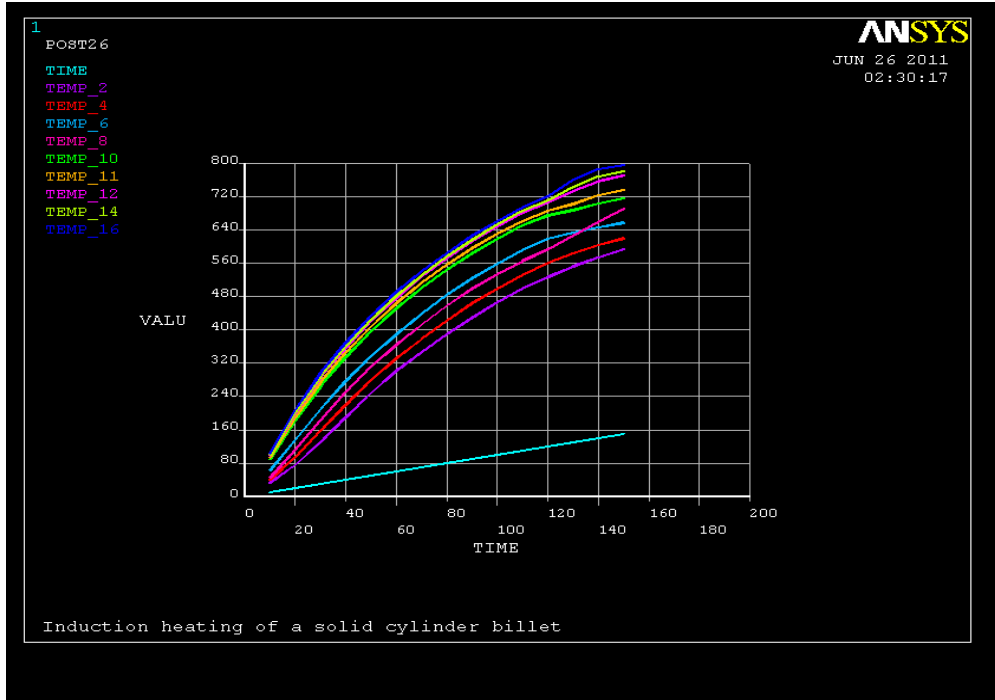
Deneysel çalışmada kullanılan malzeme boyu, geometrisi ve metal özellikleri ile indüksiyon bobininin çalışma frekansı ve akım değeri uygulanarak Ansys programında model oluşturulmuş ve sayısal çözümleme yapılmıştır. Yapılan sayısal çözümlemede malzeme çapı 70 mm ve boyu 50 mm alınmıştır. İndüksiyon bobini çalışma frekansı 1000 Hz. ve akım değeri 2000 A olarak belirlenmiştir. Sayısal çözümleme sonucunda elde edilen değerler aşağıda gösterilmiştir.



a) 70 mm çapında 150. saniye sonunda 3-D Sıcaklık Dağılımı

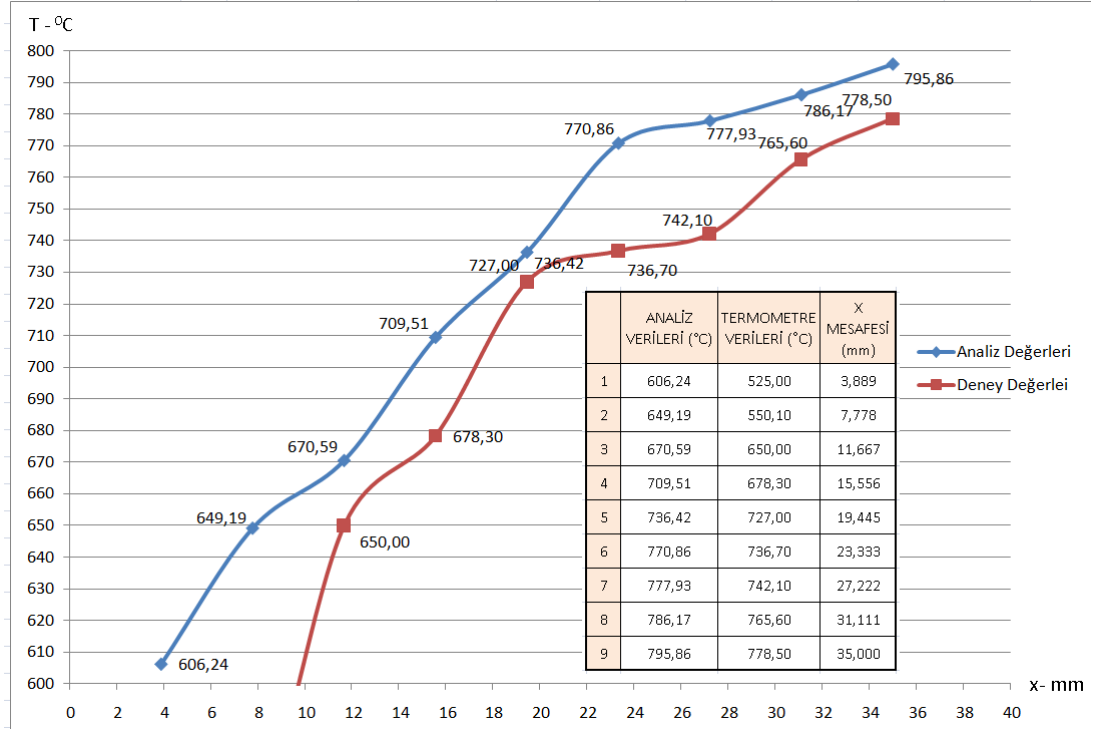


b) 70 mm çapında 150. saniye sonunda 3-D Manyetik Alan Oluşumu



c) 70 mm çapında 150. saniye sonunda x-ekseni boyunca sıcaklık değişimi grafiği

Şekil 3.29. 70 mm çapındaki metal malzemeden alınan sayısal çözümleme sonuçları



Şekil 3.30. x- eksenı boyunca analiz sıcaklık değeri ile deney sıcaklık değeri karşılaştırılması

Yukarıdaki grafikte, kullanılan demir çubuğun merkezinden dışına doğru X eksenı boyunca deneysel ve sayısal olarak elde edilmiş sıcaklık değeri karşılaştırılması yapıldığında grafiklerin birbirine yakın değeri verdiği görülmektedir.

Grafiklerde görülen farklılıklar; deneye etki eden dış etkenlere, ölçüm yapılan ısıölçerde oluşabilecek sapmalara ve ölçüm yapılırken geçen süre zarfı içinde demir çubuğun dış ortamla temas halinde olmasına bağdaştırılabilir.

4. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında ANSYS simülasyon programının indüksiyon ısıtma uygulamalarının simülasyonunda kullanılabilirliğinin incelenmesi hedeflenmiştir.

İnceleme için $\Phi 70\text{mm} \times 200\text{ mm}$ boyutlarındaki metal malzemenin 1000 mm uzunluğundaki ısıtma bobini içindeki fiziksel davranışı incelenmiştir. Çeşitli konumlarda, frekanslarda ve güç değerlerindeki simülasyonlar oluşturulmuştur. Bu simülasyonlarda indüksiyonla ısıtma deneysel verileriyle uyumlu sonuçlar elde edilmiştir.

Simülasyonun deneysel sonuçlarla karşılaştırılması amacıyla $70\text{mm} \Phi \times 50\text{mm}$ boyutlarında malzemenin özel olarak imal edilen indüksiyon ocağında bobinin orta noktasında ısıtılmıştır. Aynı şekilde tasarlanan simülasyon değerleri elde edilmiş ve her iki sonuç birbiri ile karşılaştırılmıştır.

Deneysel çalışma koşullarında ortam, akım, gerilim, frekans, sıcaklık ölçüm şartları, ölçme süresi gibi fiziksel parametrelerin etkisi ile ölçülen değerlerde farklılık oluşması kabul edilebilir bir durum olduğu bilinmektedir. Dolayısıyla simülasyon ve deneysel sonuçlarda elde edilen değerlerin belli bir ölçüde benzeşmesi arzu edilen bir sonuçtur.

Yapılan çalışmalarda simülasyon sonuçları ile deneysel sonuçların önemli ölçüde benzeşme gösterdiği görülmüştür. Bu durum indüksiyonla ısıtma modellemesinin ve simülasyonunun ANSYS programı üzerinde gerçekleştirilebileceği hususunda olumlu bir kanaat oluşmasını sağlamıştır. Gerçekleştirilen bu çalışma sayesinde indüksiyon fırınının güç ünitesi ve daha ziyade ısıtma bobininin tasarımında çok önemli katkı sağlayacağı aşikardır.

Bilindiği üzere dişli çarkların dişlerini sertleştirmeden kaynak işlerine kadar çok çeşitli alanlarda indüksiyonla ısıtma kullanılmaktadır. Genelde ısıtma indüktörü deneyime ve tecrübeye bağlı olarak geliştirilmektedir ve verimliliği hususunda ise hiçbir veri bulunmamaktadır. Bu çalışma ile ANSYS programının elektromanyetik modülü kullanılmak suretiyle indüksiyon ısıtma simülasyonları gerçekleştirilebilecek her durum için –doğru modellenmesi kaydıyla- verimli ısıtma bobini tasarımı söz konusu olabilecektir.

Özel olarak imal edilen bir indüksiyon bobini ve malzeme özellikleri bilinen ve sık olarak kullanılan silindirik geometrideki $\Phi 70\text{mm} \times 200\text{ mm}$ ebatlarındaki demir malzeme baz alınarak model oluşturulmuştur. ANSYS paket programında oluşturulan bu model couple analiz olarak bir, iki ve üç boyutlu modeller çözdürülmüş ve sonuçlar hem animasyon hem grafik hem de liste değerler olarak elde edilmiştir. Bir, iki ve üç boyutlu analiz sonuçları birbirlerine paralel şekilde elde edilmiştir. Bu da kurulan modelin ve analizin güvenilir olduğunu, sınır ve başlangıç şartlarında herhangi bir uyumsuzluk olmadığını ve doğru sonuç verdiğini göstermektedir.

Üç boyutlu analizler ideal bir indüktör uzunluğu ve sanayide ihtiyaca cevap verecek malzeme boyutlarıyla ilişkilendirilerek sayısal çözümler, indüksiyon fırınlarının ve malzemelerin parametreleri değiştirilerek çoğaltılmış ve indüktör tasarımını geliştirmek için gerekli yaklaşımlar yapılabilmesi mümkün hale getirilmiştir.

Yapılan analizde malzeme özellikleri, frekans değeri ve diğer sınır şartları sabit tutularak akım değeri değiştirilmiş ve akım değerinin artmasıyla birlikte malzemede oluşan manyetik alan yoğunluğunun ve ısı üretimi miktarlarının arttığı belirlenmiştir. Maxwell denklemlerinde belirtilen Amper yasası, Gauss kanunu ve Faraday yasasından oluşan denklemlerin genel neticesinin de bu şekilde olacağı açıktır.

Bir diğer analizde ise indüktöre uygulanan akım, malzeme özellikleri ve diğer sınır şartları sabit tutularak indüktörün çalışma frekansı değiştirilmiştir. Frekans değeri arttıkça manyetik alan, malzemenin yüzeyinden daha az bir derinliğe kadar etki etme davranışı göstermiş ve ısı üretimi malzemenin daha az bir et kalınlığı boyunca oluşmuştur. Bu nedenle malzemenin yüzeyi ile merkezi arasındaki sıcaklık farkı çok daha fazla olmaktadır. Frekans değeri düştükçe malzemenin yüzeyi ile merkezi arasındaki sıcaklık farkı azalmaktadır.

Yapılan bir başka analizde 200 mm uzunluğundaki standart malzeme 1000 mm indüktör içerisinde farklı konumlarda modellenerek sayısal çözümler elde edilmiştir. İndüktörün hangi bölgesinde malzemenin nasıl bir elektromanyetik-termal davranış gösterdiği belirlenmiştir. İndüktörün ön kısmında malzemenin indüktörün içerisinde kalan kısmında daha fazla manyetik alana maruz kaldığı ve buna bağlı olarak ta daha yüksek sıcaklıklara ulaştığı gözlenmiştir. Maksimum ısı üretiminin, manyetik alan yoğunluğunun ve sıcaklık artışının, malzemenin indüktörün tam ortasında bulunduğu konumda olduğu sayısal sonuçlardan ve animasyonlardan net bir şekilde görülmektedir.

Bir diğer analizde ise malzemenin çapı değiştirilerek hem indüktörle malzeme arasındaki mesafenin arttığında manyetik alanların nasıl oluştuğu hem de malzeme çapı değişikçe malzemenin yüzeyinden merkezine doğru zamana bağlı ısı iletiminin ne şekilde olduğu belirlenmiştir. İndüktör ile malzeme arasındaki mesafe arttıkça manyetik alan yoğunluğu belirgin şekilde azalmaktadır. Malzeme çapı azaldıkça ise merkez ile yüzey arasındaki sıcaklık farkı azalmaktadır.

Yapılan analizler sonucunda, indüksiyonla ısıtmanın metal malzemeler için hızlı, verimli ve kontrollü bir ısıtma aracı olduğu görülmüştür. Hızlı ısıtma kabiliyetinden dolayı, indüksiyonla ısıtmanın diğer yöntemlerle ısıtmaya göre daha üstün olacağı aşikârdır. Üç boyutlu sayısal çözümler ile hem elektromanyetik veriler harmonik olarak elde edilmiş ve eş zamanlı olarak birim zaman aralıklarında analizler güncellenmiş ve termal verilerde zamana bağlı olarak elde edilmiştir. Bu analizler ile kontrollü ısıtma kabiliyetinden dolayı indüksiyon ocaklarının sanayide daha elverişli kullanılması gerçekleşecek ve indüksiyon ocağı kullanımı yaygınlaşacaktır. Çalışmada elde edilen deneysel sonuçların, daha hassas ölçüm cihazları kullanılarak belirlenmesi modelleme sonuçlarına daha yakın değerlere ulaşılabilmesini sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

1. B. Drobrenko, O. Hachkevyc, T. Kornys'tkyi, "A mathematical Simulation of High Temperature Induction Heating of Electroconductive Solids", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 50, Pages:616-624, 2007
2. Jiin-Yuh Jang ve Yu-Wei Chiu, "Numerical and Experimental Thermal Analysis for a Metallic Hollow Cylinder Subjected to Step-wise Electromagnetic Induction Heating" [Applied Thermal Engineering, Vol. 27, Issues 11-12](#), Pages 1883-1894, 2007
3. H. Shen, Z. Q. Yao, Y. J. Shi, J. Hu, "Study on Temperature Field in High Frequency Induction Heating", Acta Metallurgica Sinica (English Letters), Vol. 19, No:3, Pages:190-196, 2006
4. I. Magnabosco, P. Ferro, A. Tiziani, F. Bonollo, "Inductiin Heat Treatment of a ISO C45 Steel Bar: Experimental and Numerical Analysys", Computational Materials Science, Vol. 35, Pages:98-106, 2006
5. Na Xu, Bernie Yaping Zong, "Stres in Particular Reinforcements and Overall Stres Response on Aluminum Alloy Matrix Composites During Straining by Analytical and Numerical Modeling", Computational Material Science, Vol. 43, Pages:1094-1100, 2008
6. Jianhua Zhang, Peiqi Ge, Tien-Chien Jen, Lei Zhang, "Experimental and Numerical Studies of AISI1020 Steel in Grind-hardening", International Journal of Heat and Mass Transfer, Article in Pres, 2008

7. NA Xion-Zhao, XUE Min, ZHANG Xing-zhong, GAN Yong, “Numerical Simulation of Heat Ttansfer and Deformation of Initial Shell in Soft Contact Continuous Casting Mold Under High Frequency Elecktromagnetic Field”, Journal of Iron and Steel Research, International. Pages:14-21, 2007
8. Murat ÜNVER, “İndüksiyonlu Çelik Tav Fırınlarında Güç Ünitelerinin PLC ile Denetimi”, Doktora Tezi, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, KIRIKKALE, Ocak 2004.
9. Y. Favennec, V. Labbe, F. Bay, “Induction Heating Processes Optimization a General Optimal Control Aproach”, Journal of Computational Physics, Vol. 187, Pages:68-94, 2003
10. Jaroslav Mackerle, "Finite Element Analysis and Simulation of Quenching and Other Heat Treatment Process, a Bibliography (1976-2001)", Computational Materials Science, Vol. 27, Pages:313-332, 2003
11. Mehmet Cengiz Kayacan, Oğuz Çolak, “A Fuzzy Aproach For Induction Hardening Parameters Selection”, Materials and Design, Vol. 25, Pages:155-161, 2004
12. Caner Şimşir, Cemil Hakan Gür, “A FEM Based Framework for Simulation of Thermal Treatments: Application to Steel Quenching”, Computational Materials Science, Vol. 44, Pages:588-600, 2008
13. E. Paffumi, K. –F. Nilsson, N. G. Taylor, “Simulation of Thermal Fatigue Damage in a 316L Model Pipe Component”, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 85, Pages:798-813, 2008

14. Y. Safa, M. Flueck, J. Rappaz, “Numerical Simulation of Thermal Problems Coupled With Magnetohydrodynamic Effects in Aluminium Cell”, Applied Mathematical Modelling, Vol. 33, Pages:1479-1492, 2009
15. Fatma Serap Akyan, Zafer Dursunkaya, “İki Boyutlu Dış Yüzeylerde Isıl Aşınma Sayısal Analizi”, Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi, Vol. 28, Issue. 1, Pages: 43-49, 2008
16. CHABAY, R.W., SHERWOOD, B.A., Electric an Magnetic Interactions, Wiley, New York, 1995.
17. F.W.Curtis, High Frequency Induction Heating, McGraw-Hill, New York, 1950
18. “Endüksiyonla Isıtma” www.dokumanlar.com (erişim tarihi:27.09.2005)
19. “Enduction Heating System Topology Review” Fairchild Semiconductor Inc. (2000)
20. Akaya R. Anadol M.A. “Akım Beslemeli Paralel Rezonans Devreli İnverter İçeren Bir İndüksiyonlu Isıtma Uygulaması” Elektrik -Elektronik - Bilgisayar Mühendisliği 10. Ulusal Kongresi
21. Bodur,H., Akkaya, R., Yaman, C., Endüksiyonla Isıtmada Rezonans Devreli İnverterler ve Örnek bir Endüksiyonla Isıtma Uygulaması, ELMEKSEM’93 Bursa, pp. 384-391 , 1993.
22. Mohan, N., Undeland, T.M., and Robbins, W.P., Power Electronics; Converters, Applications and Design , 2nd ed. John Wiley, 1995.
23. RUDNEV, V., Handbook of induction heating, Manufacturing engineering and materials processing, Marcel Dekker, New York, 2003.

24. ZINN S., SEMIATIN S.L., Coil design and fabrication:basic design and modifications, Heat Treating , pp 32-33, June1988.
25. OKMAN, O., Free Forming of Locally Induction Heated Specimens, Yuksek Lisans, Orta Doğu Teknik Universitesi, Makine Muhendisliği Bolumu, Mart 2005, sf. 17-25
26. ERIKSON, C.J., Handbook of electrical heating for industry, Institute of Electrical and Electronics Engineers, p 629, New York, 1995.
27. ASKELAND, D.R., The sciense and engineering of materials,university of Missouri,Rolle, pp 560-570.
28. CHENG, D.K., Fundamentals of engineering electromagnetics, xv, Reading Mass.: Addison-Wesley Pub. Co., p 488,. 1993.
29. BEWLEY, L.V., Flux Linkages and Elektmagnetic Induction, Dover, New York, 1964.
30. NEMKOV, V., DEMİDOVİCH, V., Theory of Indution Heating, Energoatomizdat, St. Petersburg, Russia, 1988.
31. GRIFFITHS, D.J., Elektromagnetk Teori, Arte Guven Yayınevi, sf 13-18, 1996.
32. NART, E., SAHİN, A., Modelling of Thermal Stresses around a Barrier in an Infinite Strip, 4. International Advanced Tecnologies Symposium, Konya, 28-30 September 2005.
33. CHARİ, M.V.K., Finite element analysis of nonlinear magnetic fields in electric machines, Ph.D. Dissertation, McGill University, Montreal- Canada, 1970.

34. CHARĪ, M.V.K., SĪLVESTER, P.P., Finite element analysis of magnetically saturated DC machines, IEEE Trans, pp 90:2362, 1971.
35. ONARAN K., Malzeme Bilimi, Bilim Teknik yayınevi, sf 175-177-188, Eskisehir, 2003.
36. POPOV, E.P., Mukavemet Katı Cisimlerin Mekanigine Giris, Çağlayan Kitabevi, sf 2-6-7, _stanbul, 1990.
37. HUEBNER, K.H., THORNTON, A., The Finite Element Method for Engineers, John Wiley and Sons, 217,New York, 1982.
38. MAHAPATR M.M., DATTA G.L., PRADHAN B., MANDAL N.R., Three-dimensional finite element analysis to predict the effects of SAW process parameters on temrature distribution and angular distortions in single-pass butt joints top and bottom reinforcements, International Journal of Pressure Vessels and Piping, pp 83:721-729, 2006.
39. ONARAN K., Malzeme Bilimi, Bilim Teknik yayınevi, sf 175-177-188, Eskisehir, 2003.
40. KRAUS, J.D., Electromagnetics. 4th ed. McGraw-Hill series in electrical engineering. Electromagnetics. 1992, New York: McGraw-Hill. Xix, 847 p.
41. NEELAKANTA, P., Hendbook of Electromagnetic Materials, CRC Pres, Boca Raton, 1995.
42. DESMĪER, G., RUDREV, V., COOK, R., İnduction Hardening and Tempering of Critical Powetrain Compnents, Global Powertrain Congress, Michigan, USA, 2002.

43. HAMMOND. P., Elektromagnetism for Engineers, Pergamon, New York, 1978.
44. <http://www.ceia-power.com/application.asp?app=Hardening>, 01.09.2008
45. <http://www.ceia-power.com/application.asp?app=Heating> , 01.09.2008
46. <http://www.ceia-power.com/application.asp?app=Brazing> , 01.09.2008
47. <http://www.ceia-power.com/application.asp?app=Soldering> , 01.09.2008
48. http://www.ameritherm.com/PDFs/heating_9.pdf, 01.09.2008
49. <http://www.ameritherm.com/PDFs/autoheat.pdf>, 01.09.2008
50. ANSYS 12, Help,.

ÖZGEÇMİŞ

1979 yılında Ankara'nın Polatlı ilçesinde doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Polatlı'da tamamladı. 1997 yılında başladığı Kırıkkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği bölümünden 2002 yılında mezun olarak Makine Mühendisi ünvanı aldı. 2003 yılında Kırıkkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'ne Araştırma Görevlisi olarak atandı. 2005 yılında Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Ana Bilim Dalı'nda Yüksek Lisansını tamamladı. 2011 yılında Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Ana Bilim Dalı'nda doktorasını tamamladı.