

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**İNDÜKSİYON ISIL YÜKLEME İLE BİR ÇATLAK
ETRAFINDA OLUŞAN GERİLMELERİN
MODELLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Şenol SERT

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA EĞİTİMİ

Tez Danışmanı : Yrd.Doç. Dr. Ergün NART

Eylül 2008

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNDÜKSİYON ISIL YÜKLEME İLE BİR ÇATLAK
ETRAFINDA OLUŞAN GERİLMELERİN
MODELLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Şenol SERT

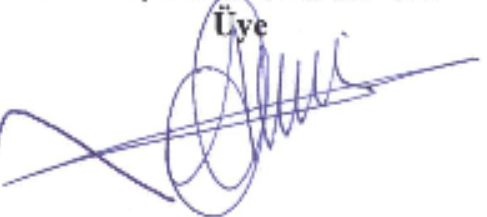
Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA EĞİTİMİ

Bu tez 04 / 09 /2008 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Yrd. Doç. Dr. Ergün NART
Jüri Başkanı

Yrd. Doç. Dr. Muhammet CERİT
Üye

Yrd. Doç. Dr. Ahmet DEMİRER
Üye



TEŞEKKÜR

Bu çalıőmanın ortaya çıkarılması ve yürütülmesinde desteğini esirgemeyen baőta tez danıőmanım Yrd.Doç.Dr Ergün NART olmak üzere bölümümüz ğretim üyelerine teşekkür ediyorum.

Bu çalıőmanın her aşamasında maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen anneme, babama ve eőime gönülden teşekkür ediyorum.

Şenol SERT

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	vi
TABLolar LİSTESİ.....	ix
ÖZET.....	x
SUMMARY.....	xi
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
1.1. İndüksiyonla Isıtmanın Endüstriyel Uygulamaları.....	1
1.1.1. Isıl işlem.....	1
1.1.2. Isıtma.....	3
1.1.3. Özel uygulamalar.....	4
1.2. İndüksiyonla Isıtmanın Deneysel Uygulamaları.....	5
BÖLÜM 2.	
İNDÜKSİYONLA ISITMA TEORİSİ.....	7
2.1. Giriş.....	7
2.2. İndüksiyonla Isıtma Mekanizması.....	7
2.3. Metallerin Elektromanyetik Özellikleri.....	8
2.3.1. İzafi geçirgenlik.....	9
2.3.2. Elektriksel direnç.....	11
2.4. Elektromanyetik Etki.....	13
2.4.1. Yüzey etkisi.....	13
2.4.2. Manyetik yaklaştırma etkisi.....	15

2.5. İndüksiyon Bobini Tasarım.....	16
BÖLÜM 3.	
MATEMATİKSEL MODEL.....	20
3.1. Giriş.....	20
3.2. Elektromanyetik Alanın Matematiksel Modeli.....	20
3.3. Isı İletiminin Matematiksel Modeli.....	26
3.4. Gerilmenin Matematiksel Modeli.....	27
3.4.1. Gerilmenin tanımı.....	27
3.4.2. Gerilme-şekil değiştirme bağıntısı.....	27
3.4.3. Termal şekil değiştirme ve termal gerilme.....	29
BÖLÜM 4.	
SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ.....	30
4.1. Giriş.....	30
4.2. Elektromanyetik Alan Hesabının Sonlu Elemanlar Yöntemi.....	32
4.3. Isı Transferinin Sonlu Elemanlar Yöntemi.....	37
4.4. Termal Gerilme Hesabının Sonlu Elemanlar Yöntemi.....	39
BÖLÜM 5.	
ANSYS İLE SONLU ELEMANLAR ANALİZİ.....	40
5.1. Giriş.....	40
5.2. ANSYS Sonlu Elemanlar Yazılımı.....	40
5.3. Modelleme ve Bölüntüleme(Meshing).....	41
5.3.1. Malzeme özellikleri.....	42
5.3.2. Kullanılan elemanlar.....	44
5.3.3. Bölüntüleme.....	45
5.4. Yüklerin ve Sınır Şartlarının Uygulanması.....	47
5.4.1. Elektromanyetik yükleme ve sınır şartları.....	47
5.4.2. Termal yükleme ve sınır şartları.....	48
5.4.3. Yapısal yükleme e sınır şartları.....	49
5.5. Çözüm.....	49
5.6. Analiz Sonuçları.....	53

5.6.1. Manyetik sonuçlar.....	53
5.6.2. Termal sonuçlar.....	54
5.6.3. Yapısal sonuçlar.....	58
BÖLÜM 6.	
DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER.....	61
KAYNAKLAR.....	63
ÖZGEÇMİŞ.....	66

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

A	: İletken kesit alanı
B	: Manyetik akı yoğunluğu
c	: Özgül ısı
D	: Elektriksel akış yoğunluğu
E	: Elektrik alan şiddeti
F	: Akımın frekansı
H	: Manyetik alan şiddeti
I	: İletkenden geçen akım
J	: İletkenden geçen akım yoğunluğu
k	: Metalin ısı iletkenlik katsayısı
L	: İletkenin boyu
R	: Malzemenin direnci
T	: Sıcaklık
V	: Akımın voltajı
ν	: Poisson oranı
ϵ	: Dielektrik sabiti
ϵ_0	: Boşluğun dielektrik sabiti
γ	: Metalin yoğunluğu
δ	: Yüzey etki kalınlığı
μ_r	: İzafi manyetik geçirgenlik
μ_0	: Vakumun izafi manyetik geçirgenliği
ρ	: Özdirenç
$\rho^{\text{Şarj}}$: Elektrik şarj yoğunluğu
α	: Konveksiyon ısı iletim katsayısı
σ	: Öz iletkenlik

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	İndüksiyonla ısıl işlem yöntemi ile dişli çark sertleştirme.....	2
Şekil 1.2.	İndüksiyonla ısıl işlem yöntemi ile rod başı sertleştirme.....	2
Şekil 1.3.	İndüksiyonla ısıtma işlemi ile çelik plaka ısıtma.....	3
Şekil 1.4.	İndüksiyonla ısıtma işlemi ile çelik tüp ısıtma.....	3
Şekil 1.5.	İndüksiyonla ısıtma yöntemi ile sıkı geçme işlemi.....	4
Şekil 1.6.	İndüksiyonla ısıtma yöntemi ile kaynak işlemi.....	4
Şekil 1.7.	İndüksiyonla ısıtma yönteminin, katalitik konverterin kaynak bağlantılarının ısıl testi amacıyla kullanılması.....	5
Şekil 1.8.	İndüksiyonla ısıtma yönteminin motor supabının termal gerilme deneyi için kullanılması.....	6
Şekil 2.1.	Malzeme çevresindeki akım taşıyan bir bobinin oluşturduğu manyetik alan ile ısı oluşumu.....	8
Şekil 2.2.	İçerisinden akım geçen bir bobinin vakumda ve içerisine bir nüve yerleştirildiğinde oluşturduğu akı yoğunluğu (indüktans)...	9
Şekil 2.3.	Sıcaklık ve manyetik alan şiddetinin orta karbonlu çeliğin izafi geçirgenlik değerine etkisi.....	11
Şekil 2.4.	Homojen bir kesit alana sahip bir iletkendeki doğru ve alternatif(dalgalı) akımın dağılımı.....	13
Şekil 2.5.	Karbon çeliği çalışma parçasının indüksiyonla ısıtma esasındaki yüzey(nüfuz) derinliği değişimi.....	14
Şekil 2.6.	Manyetik Yaklaştırma Etkisinin Şematik Gösterimi.....	15
Şekil 2.7.	İndüksiyonla ısıtmada sarmalın geometrik merkezinin dışına konulan malzeme.....	17
Şekil 2.8.	a) indüktansı olmayan, b) ,c) indüktansı olan bobin tasarımları...	18
Şekil 2.9.	Tipik indüksiyon bobinleri:.....	18
Şekil 2.10.	Değişik şekilli ısıtma amaçlı çok sarımlı bobinler.....	18

Şekil 2.11.	Bölgesel ısıtma için değişik şekilli bobinler.....	19
Şekil 2.12.	İç kısımları ısıtma amaçlı değişik şekilli bobinler.....	19
Şekil 3.1.	Diverjansı büyük olan ve sıfır olan vektör çizgileri.....	21
Şekil 3.2.	Rotasyoneli büyük değere sahip vektör çizgileri.....	22
Şekil 4.1.	Bir sonlu eleman modelinde düğüm noktaları ve elemanlar.....	30
Şekil 5.1.	Çalışma parçası ve indüksiyon bobinini.....	41
Şekil 5.2.	İndüksiyonla ısıtma sisteminin iki boyutlu modeli.....	42
Şekil 5.3.	Çalışma parçasının izafi manyetik geçirgenlik değerinin sıcaklıkla değişimi.....	43
Şekil 5.4.	Çalışma parçasının elektriksel direnç değerinin sıcaklıkla değişimi.....	43
Şekil 5.5.	Plane13, plane 55 elemanlarının geometrisi.....	45
Şekil 5.6.	Surf151 yüzey elemanının geometrisi.....	45
Şekil 5.7.	Elemanlara ayrılmış model.....	46
Şekil 5.8.	Bölüntülenmiş model, çatlak etrafının bölüntülenmesi, yüzeyin bölüntülenmesi.....	47
Şekil 5.9.	Manyetik yüklerin ve sınır şartlarının verilmesi.....	48
Şekil 5.10.	Termal sınır şartlarının model üzerinde gösterilmesi.....	48
Şekil 5.11.	Yapısal sınır şartlarının model üzerinde gösterilmesi.....	49
Şekil 5.12.	Çatlak ağzındaki karşılıklı noktala sınır şartı uygulanması.....	49
Şekil 5.13.	Manyetik-Termal Çözüm döngüsünün akış şeması.....	50
Şekil 5.14.	Çözüm döngüsünün APDL programı.....	50
Şekil 5.15.	Yapısal analiz akış şeması.....	51
Şekil 5.16.	600 °C-400 °C arasında tekrarlı ısıl yükleme oluşturmak için APDL çözüm döngüsü.....	52
Şekil 5.17.	Elektromanyetik analiz sonucu bulunan manyetik alan çizgileri...	51
Şekil 5.18.	Çalışma parçası yüzeyindeki manyetik alan çizgileri.....	52
Şekil 5.19.	Elektromanyetik çözüm sonucu yüzeyde oluşan ısı üretim oranları.....	54
Şekil 5.20.	İndüksiyonla ısıtma ile çalışma parçası ön ve ara yüzeyindeki sıcaklığın zama bağlı değişimi.....	54
Şekil 5.21.	Parçadaki ve çatlak etrafındaki 0,5. saniyedeki sıcaklık dağılımı..	55
Şekil 5.22.	Parçadaki ve çatlak etrafındaki 1. saniyedeki sıcaklık dağılımı....	55

Şekil 5.23.	Parçadaki ve çatlak etrafındaki 2. saniyedeki sıcaklık dağılımı....	56
Şekil 5.24.	Parçadaki ve çatlak etrafındaki 3. saniyedeki sıcaklık dağılımı....	56
Şekil 5.25.	Parçadaki ve çatlak etrafındaki 4. saniyedeki sıcaklık dağılımı....	57
Şekil 5.26.	Çalışma parçası yüzeyinin 600 °C-400 °C arasında tekrarlı ısı yüklemesi.....	57
Şekil 5.27.	Isıtmanın 0,5. saniyesindeki Von misses gerilme değerleri.....	58
Şekil 5.28.	Isıtmanın 1. saniyesindeki Von misses gerilme değerleri.....	58
Şekil 5.29.	Isıtmanın 2. saniyesindeki Von misses gerilme değerleri.....	59
Şekil 5.30.	Isıtmanın 3. saniyesindeki Von misses gerilme değerleri.....	59
Şekil 5.31.	Isıtmanın 4. saniyesindeki Von misses gerilme değerleri.....	60
Şekil 5.32.	Isıtmanın 2. saniyesinde çatlak boyunca von misses gerilme değerlerinin değişimi.....	60

TABLULAR LİSTESİ

Tablo 2.1.	Seçilen bazı malzemelerin izafi geçirgenlik değerleri.....	10
Tablo 2.2.	Bazı malzemelerin oda sıcaklığındaki elektriksel direnç değerleri	12
Tablo 5.1.	Kullanılan çelik malzemenin termal ve yapısal malzeme özellikleri.....	44
Tablo 5.2.	Modellemede kullanılan manyetik ve ısı elemanlar.....	44

ÖZET

Anahtar kelimeler: İndüksiyonla ısıtma, sonlu elemanlar yöntemi, çatlak analizi

Bu tezde indüksiyonla ısıtma yöntemi ile kaplamaların ara yüzeylerinde oluşan termal gerilmelerin bulunması hedeflenmiştir. Termal gerilmelere maruz kaplamaların ömür tahmini ile ilgili etkili modellerin geliştirilmesi ile kaplamaların endüstride güvenilir bir şekilde kullanımı mümkün olmaktadır. Bunun için deneysel yorulma çalışmalarında çevrimsel termal yükleme yapılabilmesi için kontrol edilebilir ısıtmaya ihtiyaç vardır.

İndüksiyonla ısıtmada, indüksiyon bobinine uygulanan alternatif voltaj, bobindeki akım ile aynı frekansta, değişken voltaj üreten alternatif bir manyetik alan oluşturur. Bu zamana bağlı elektro-manyetik alan bobindeki elektrik akısının ters yönünde bir akı oluşturan “eddy” akımını meydana getirir. Bu “eddy” akım “Joule” etkisi ile ısı üretir. Bu ısı üretme işlemi hassas bir şekilde sonlu elemanlar yöntemi ile yapılabilmektedir.

Bu çalışmada ara yüzünde çatlak bulunan bir parçasının indüksiyonla ısıtma sonucunda çatlak boyunca oluşan termal fark ve çatlak boyunca oluşan gerilme değişimi ANSYS sonlu elemanlar paket programı kullanılarak yapılmıştır. Analiz iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk olarak elektromanyetik-termal analiz bir çözüm döngüsü kurularak birleşik (couple) olarak yapılmış ve birleşik analiz sonucunda elde edilen sıcaklık verileri mekanik analize girdi olarak ikinci aşamada kullanılmıştır. Mekanik analiz sonucunda çatlak boyunca oluşan gerilmeler hesaplanmıştır.

MODELLING OF THE STRESSES AROUND A CRACK LOADED BY INDUCTION HEATING

SUMMARY

Keywords: Induction heating, Finite Element Method, Fracture Mechanics

In this research, the aim is to determine thermal stresses along a crack formed in an interface between a substrate and its coating using induction heating process. It is well known that developing accurate life prediction methods for coatings makes safe usage of coatings possible in industrial applications. Therefore, controllable thermal heating is needed for cyclic thermal loading in experiments.

In induction heating process, an alternating voltage applied to the induction coil produces an alternating magnetic flux, which produces an alternating voltage at the same frequency with the current of the coil. The time-varying electro-magnetic field induces the eddy current, which generate a flux opposite to the direction of the coil flux. The eddy current then produces heat by the Joule effect. This heating process is accurately simulated by using finite element method.

In this thesis, thermal and stress analysis along a crack between coating and substrate exposed to induction heating were done by using Ansys finite element analysis software. The analysis is performed in two steps. In the first step, couple electromagnetic-thermal analysis was done using Ansys solution loop written in APDL language. The resulting temperature history was used in uncouple structural analysis. Finally, stress distribution along the crack was determined.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

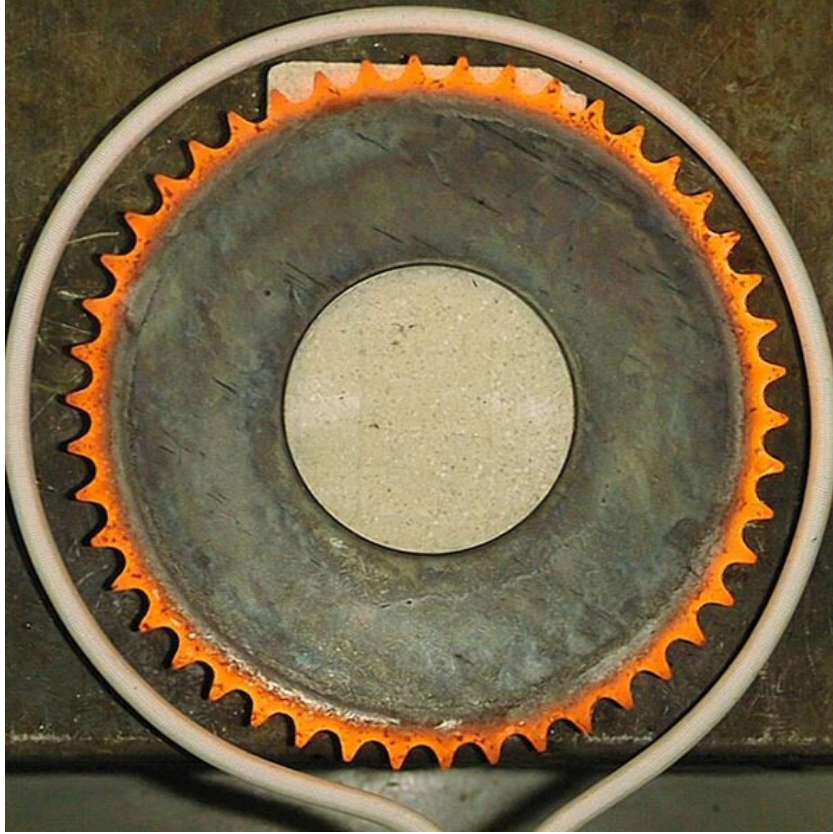
İndüksiyonla ısıtma, elektriksel kondüktörlerin oluşturduğu manyetik alan içerisine yerleştirilmiş metalik malzemelerde indüklenen akım ile ısı oluşturulmasıdır. Kondüktör ile malzeme arasında fiziksel temas bulunmamaktadır. Malzemede akımın indüklenmesi Faraday prensibine dayanmaktadır.

Elektromanyetik indüksiyon prensibi Michael Faraday'ın 1800'lü yıllardaki keşfiyle başlar. Faraday bir demir nüveyi çevreleyen iki tel bobinden meydana gelen deney düzeneğinde; bir bataryaya anahtar düzeneği ile bağlı birinci bobin kapatıldığında, ikinci bobinde anlık akım oluşumunu gözlemiştir. Aynı anlık akım birinci bobinin anahtarı ani olarak açıldığında da gözlenmiştir. Bu araştırmadan, elektromanyetik alandan elektrik akımı üretilebileceği sonucu çıkarılabilir. Görüldüğü gibi iki bobin arasında temas olmadığı halde, birinci bobindeki akım ikinci bobinde akımı indüklemiştir. Başlangıçta elektromanyetik indüksiyon, transformatör tasarımında devrelerdeki voltaj değişimlerini sağlamak için kullanılmıştır. Bu uygulamalarda ısı üretimi istenmeyen bir sonuçtu. Bu nedenle demir nüveler, ısı etkisini azaltmak için üst üste konulmuş çelik ince tabakalardan üretilmekteydi. Ancak 1800'lü yılların sonu 1900'lü yılların başlarına doğru indüksiyonla ısıtma, metal malzemelerin ısıtılmasında kullanışlı bir yöntem olarak görülmeye başlanmıştır [1].

1.1. İndüksiyonla Isıtmanın Endüstriyel Uygulamaları

1.1.1. Isıl İşlem

Sertleştirme, tavlama, gerilim giderme tavlama, menevişleme, normalize etme, sinterleme vb. ısıl işlemlerde indüksiyonla ısıtma tekniği kullanılmaktadır.



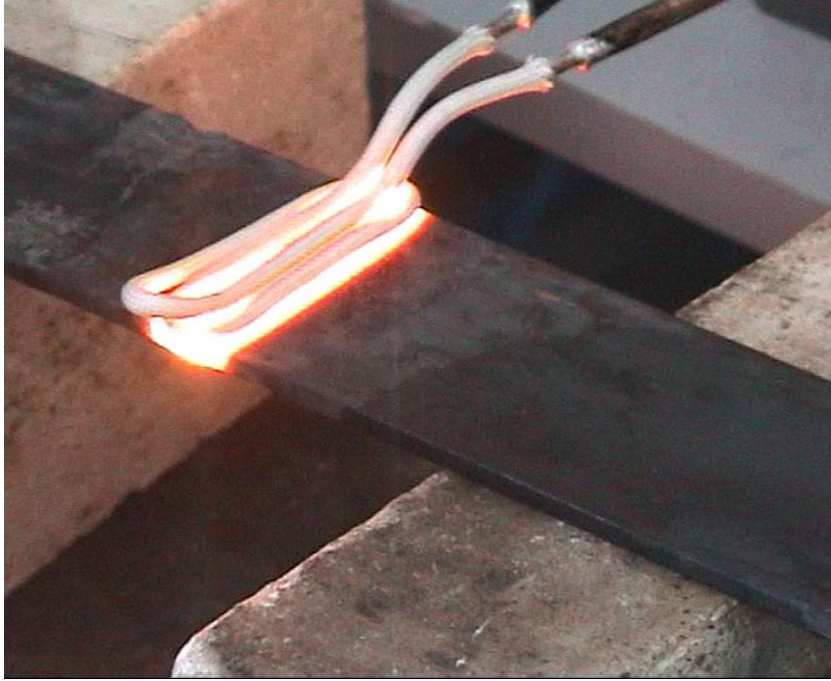
Şekil 1.1. İndüksiyonla ısıtım yöntemi ile dişli çark sertleştirme [2]



Şekil 1.2. İndüksiyonla ısıtım yöntemi ile rod başı sertleştirme [2]

1.1.2. Isıtma

Çubuk ve bar ısıtma, levha ve külçe ısıtma, şerit ve plaka ısıtma, tel ısıtma, tüp ve boru ısıtma vb. işlemlerde indüksiyonla ısıtma tekniği kullanılmaktadır.



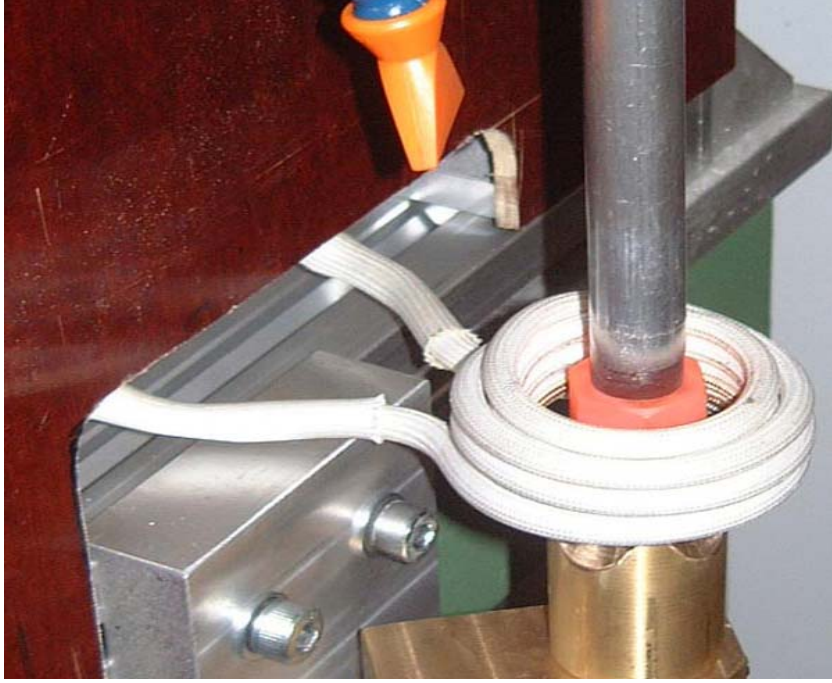
Şekil 1.3. İndüksiyonla ısıtma işlemi ile çelik plaka ısıtma [3]



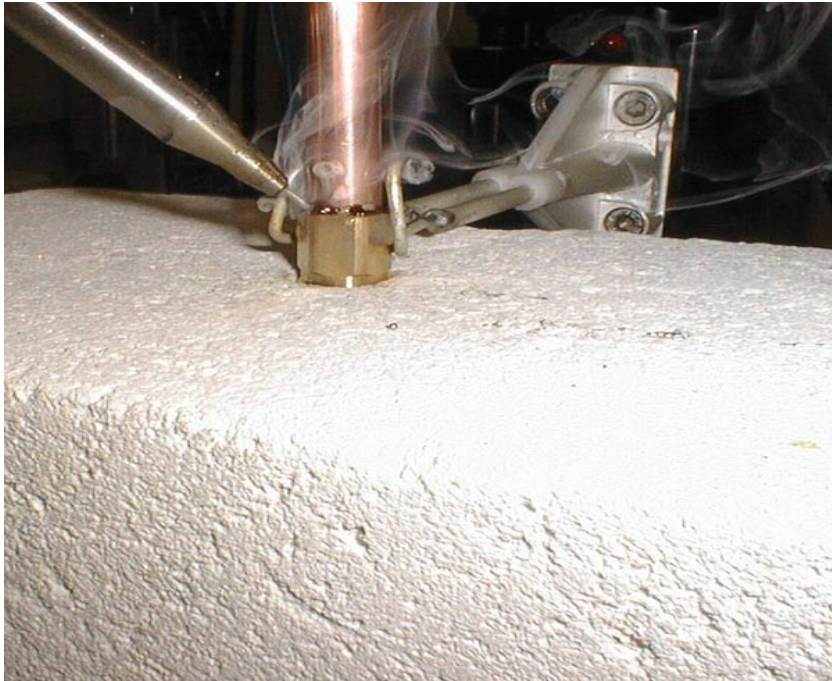
Şekil 1.4. İndüksiyonla ısıtma işlemi ile çelik tüp ısıtma [3]

1.1.3. Özel uygulamalar

İndüksiyonla ergitme, indüksiyon kaynağı, birleştirme, lehimleme, prinç lehimleme, yapıştırma, sıkı geçme, sürtünme kaynağı vb. uygulamalarda ve otomotiv endüstrisi, gıda ve kimya endüstrisi gibi alanlarda indüksiyonla ısıtma tekniği kullanılmaktadır.



Şekil 1.5. İndüksiyonla ısıtma yöntemi ile sıkı geçme işlemi [4]



Şekil 1.6. İndüksiyonla ısıtma yöntemi ile kaynak işlemi [5]

1.2. İndüksiyonla Isıtmanın Deneysel Uygulamaları

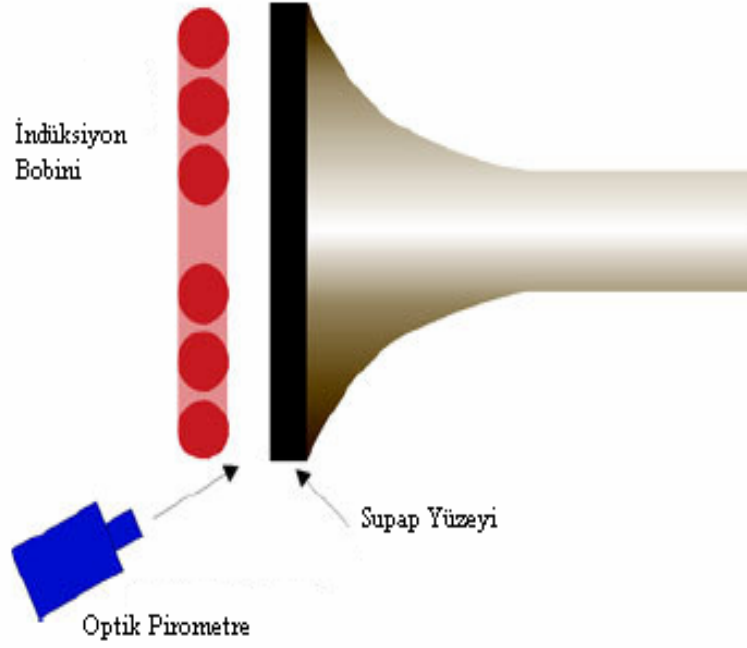
İndüksiyonla ısıtma işlemi malzeme testleri, termal yorulma deneyleri, ısı altında çalışan makine parçalarının deneysel uygulamaları vb. alanlarda bilimsel araştırmalar amacıyla kullanılmaktadır.

Aşağıda verilen örnekte, otomotiv egzoz sisteminin parçası olan katalitik konverterin kaynak bağlantılarının testi amacıyla indüksiyonla ısıtma sistemi kullanılmaktadır. Katalitik konverterin çalışma sıcaklığı olan 450-500 °C' ye 5 saniyede ulaşılmaktadır. Daha sonra 200 saat boyunca katalitik konverter bu sıcaklıkta tutulmakta ve kaynak bağlantılarında çatlak oluşup oluşmadığı araştırılmaktadır. İndüksiyonla ısıtma sayesinde, katalitik konverterin çalışma koşulları deneysel amaçlarla kolaylıkla sağlanmaktadır.



Şekil 1.7. İndüksiyonla ısıtma yönteminin, katalitik konverterin kaynak bağlantılarının ısıl testi amacıyla kullanılması [6]

Aşağıdaki deney düzeneğinde ise, bir motor süpabını termal gerilme deneyi için indüksiyonla ısıtma tekniği kullanılmaktadır. Süpab yüzeyi 4 saniyede 500 °C ye kadar ısıtılmaktadır. Bu ısıtma işlemi istenmesi halinde tekrarlı olarak sağlanabilmektedir.



Şekil 1.8. İndüksiyonla ısıtma yönteminin motor süpabının termal gerilme deneyi için kullanılması [7]

BÖLÜM 2. İNDÜKSİYONLA ISITMA TEORİSİ

2.1.Giriş

Bu bölümde, indüksiyonla ısıtmanın teorik yönleri açıklanmıştır. İndüksiyonla ısıtma işlemi için gerekli olan çok önemli malzeme özellikleri ve elektromanyetik özellikler incelenmiştir.

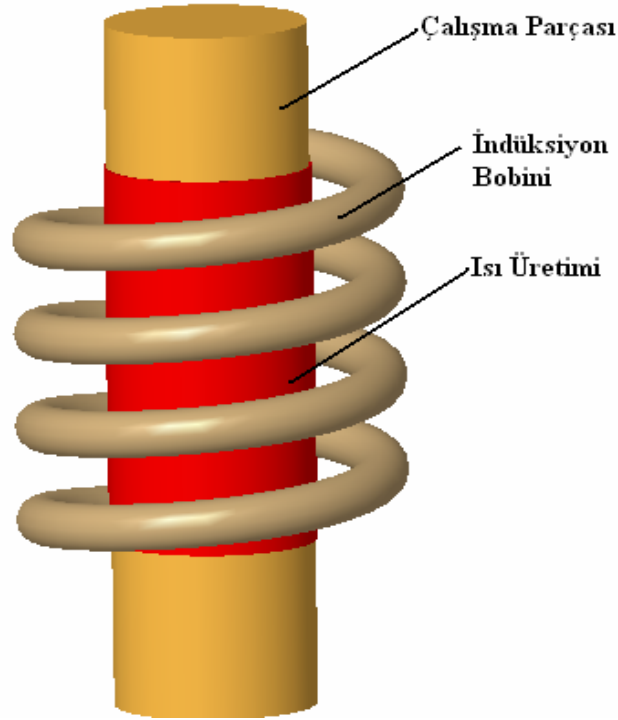
2.2. İndüksiyonla Isıtma Mekanizması

İndüksiyonla ısıtma, parçanın yüzeyinde oluşan alternatif manyetik alanın eddy akımlarını ve histerezis 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 [8].

İndüksiyon bobinine alternatif voltaj uygulanması, bobin içinde alternatif akımın gelişmesine sebep olur. Çevrede zamana göre değişen manyetik alan oluşur ve bu alanın frekansı uygulanan akımın frekansı ile aynıdır [9]. 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^2R ile orantılı olarak ısı üretimi gerçekleşir. Burada I manyetik akım, R malzemenin direncidir [10]. Devamlı akım durumunda, düzgün bir kesit alanına sahip homojen malzemenin direnci;

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

olarak tanımlanır. Burada ρ öz direnç ($\Omega.m$), L (m) akım doğrultusunda malzemenin boyudur. A (m^2) ise akımın geçtiği doğrultuya dik kesit alanıdır [11]. İndüksiyonla ısıtma, malzemenin bobine yakın komşu bölgelerinde malzeme üzerinde joule etkisinin gelişimine dayanır. Şekil 2.1’de manyetik alan içerisinde yerleştirilmiş malzemedeki ısı oluşumu şematik olarak sunulmuştur.



Şekil 2.1. Malzeme çevresindeki akım taşıyan bir bobinin oluşturduğu manyetik alan ile ısı oluşumu

2.3. 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 izafi geçirgenlik ve elektriksel direnç malzeme özellikleri anlatılacaktır.

2.3.1. İzafi 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.

$B = \text{Akı yoğunluğu (indüktans) (tesla veya Wb/m}^2\text{)},$

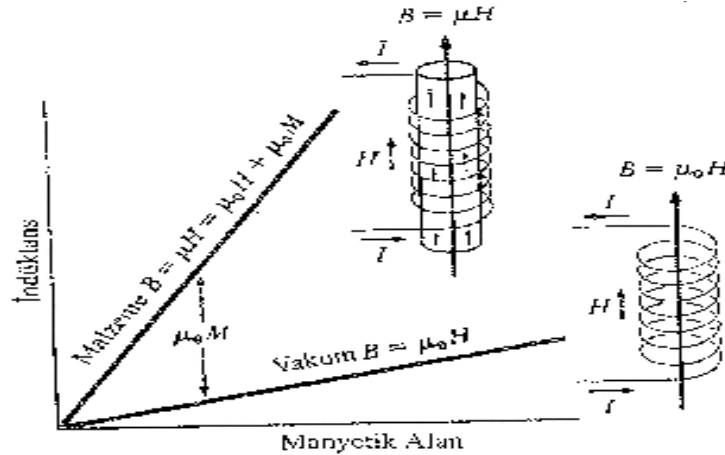
$$B = \mu_0 H \quad H = \text{manyetik alan şiddeti (A/m)} \quad (2.2)$$

$\mu_0 = \text{Bir vakumun manyetik geçirgenliğidir. (4}\pi \times 10^{-7} \text{ Wb/A.m)}$

Manyetik alana bir malzeme yerleştirildiğinde manyetik indüktans, uygulanan ve manyetik kutup çiftinin alanla etkileşimiyle belirlenir. Manyetik indüktans şimdi burada μ alandaki malzemenin manyetik geçirgenliğidir. Manyetik malzemenin etkisi izafi geçirgenlikle μ_r tarif edilebilir. Burada,

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

Büyük bir izafi geçirgenliğin anlamı malzemenin manyetik alanın büyütülmüş bir etkisine sahip olması demektir [12].



Şekil 2.2. İçerisinden akım geçen bir bobinin vakumda ve içerisine bir nüve yerleştirildiğinde oluşturduğu akı yoğunluğu (indüktans) [12]

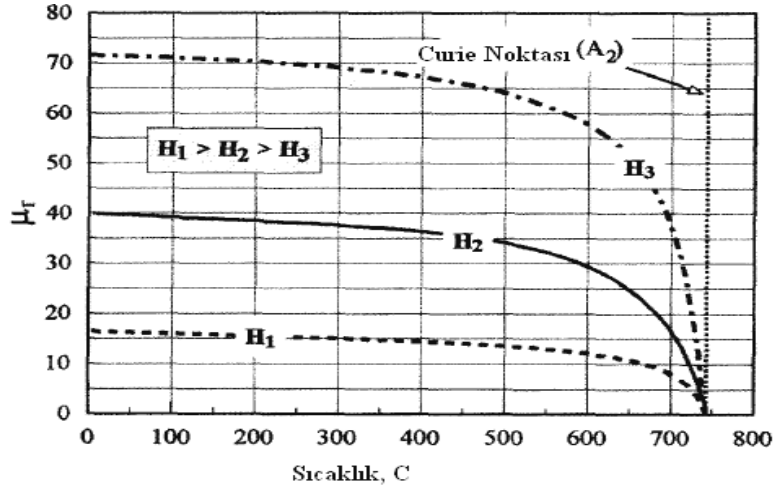
Malzemeler, mıknatıslanma kabiliyetlerine göre diamanyetik, paramanyetik ve ferromanyetik olarak adlandırılan üç gruba ayrılırlar. Paramanyetik malzemeler 1' den çok az miktarda büyük izafi geçirgenlik değerine sahip iken, diamanyetik malzemeler için bu değer 1'in çok az altındadır. İndüksiyonla ısıtmada 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 [9]. Bazı seçilen malzemelerin izafi geçirgenlik değerleri Tablo 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2.1. Seçilen bazı malzemelerin izafi geçirgenlik değerleri [13]

Malzeme	Tip	İzafi Geçirgenlik
Bizmut	Diamanyetik	0.99983
Hava	Paramanyetik	1.0000004
Alüminyum	Paramanyetik	1.00002
Ferroksüb(Mn-Zn)	Ferrimanyetik	1500
Yumuşak Çelik (0.2 C)	Ferromanyetik	2000
Demir (%99,91 saf)	Ferromanyetik	5000
Saf Demir(%99.95 saf)	Ferromanyetik	200000"

Farklı malzemelerin farklı izafi geçirgenlik değerleri farklı karakteristikler gösterir. Diamanyetik ve paramanyetik maddelerin izafi 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 [13]. İndüksiyonla ısıtmada sıklıkla kullanılan çelikler için izafi geçirgenlik sıcaklığa ve manyetik alan şiddetine bağlı olarak küçük değerlerden (2 veya 3), 500'den daha büyük değerlere kadar değişiklik gösterebilir. İzafi geçirgenliğin manyetik alanla değişimi ile ilgili bir örnek Şekil 2.3'te verilmiştir. Üç farklı manyetik alan kuvveti için numunenin manyetik geçirgenliği H_1 , H_2 , H_3 gösterilmiştir. İzafi 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 [9].



Şekil 2.3. Sıcaklık ve manyetik alan şiddetinin orta karbonlu çeliğin izafi geçirgenlik değerine etkisi [9]

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 izafi geçirgenlik değeri maksimuma ulaşıncaya kadar çalışma parçası içinde artar ve daha sonra azalır [9].

2.3.2. Elektriksel direnç

Malzemelerin elektriği kolaylıkla geçirebilme kabiliyetine elektriksel iletkenlik (σ , siemens) denir. Elektriksel iletkenliğin ters karşılığı elektriksel dirençtir ($\rho = 1/\sigma$) [14].

İndüksiyonla ısıtmada elektriksel direnç kritik rol oynar. Joule etkisinden dolayı, ısı üretimi doğrudan elektriksel direnç ile orantılıdır. Çalışma parçası içine doğru akım ve ısı dağılımı da bu değere bağlıdır.

Ohm kanununun bilinen yapısı aşağıdaki gibidir.

$$\begin{aligned}
 V &= \text{Voltaj (volt,v)} \\
 I &= \text{Akım (amper,A)} \\
 R &= \text{Akıma karşı direnç (ohm, } \Omega \text{)}.
 \end{aligned}
 \tag{2.4}$$

Direnç, devreyi tamamlayan malzemenin özelliğine bağlıdır. Aşağıdaki tabloda bazı malzemelerin öz direnç değerleri verilmiştir;

Tablo 2.2. Bazı malzemelerin oda sıcaklığındaki elektriksel öz direnç değerleri [15]

Malzeme	Elektriksel Direnç ($\mu\Omega \times m$)
Gümüş	0.015
Bakır	0.017
Altın	0.024
Alüminyum	0.027
Hafif Karbonlu Çelik	0.16
Paslanmaz Çelik	0.7

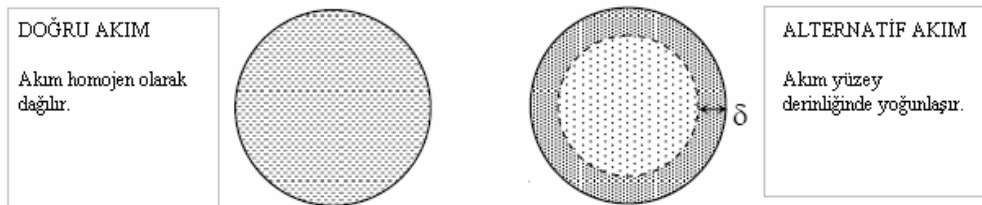
$$R = \rho \frac{L}{A} = \frac{L}{\sigma A}
 \tag{2.5}$$

Burada L iletkenin boyu (m), A iletkenin kesit alanı (m^2), ρ ise iletkenin öz direnci (ohm.m) olup σ 'de ρ 'nin tersi öziletkenliktir ($ohm^{-1}m^{-1}$) [12].

2.4. Elektromanyetik Etki

2.4.1. Yüzey etkisi

Doğru akım parça boyunca aktıkça, kesit alandaki akım dağılımı homojendir. Fakat, alternatif akım uygulandığı taktirde, parçanın içine doğru akım dağılımı kesinlikle frekansa bağlıdır. Akım, parçanın yüzeyinden akma eğilimindedir. Bu durum ‘yüzey etkisi (skin effect) olarak adlandırılır. Yüzey etkisi Şekil 2.4’te şematik olarak gösterilmiştir. İndüksiyonla ısıtmada belirli bir frekansta eddy akımı oluşturulur. Yüzey etkisinden dolayı eddy akım dağılımı homojen olmayacaktır. Bu dağılım, sıcaklık dağılımında kritik öneme sahiptir.



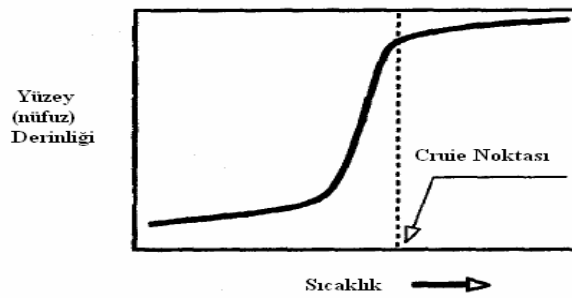
Şekil 2.4 Homojen bir kesit alana sahip bir iletkendeki doğru ve alternatif(dalgalı) akımın dağılımı

Akım dağılımı 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 [9]. Yüzey derinliği formülü [11]:

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu_r \mu_0}} \quad (2.6)$$

Burada, f akımın frekansıdır. Denklem 2.6’da açıkça görüldüğü gibi yüzey derinliği elektriksel direnç, izafi 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, izafi manyetik geçirgenlik bir özel anda büyük ölçüde değişiklikler 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 [9].



Şekil 2.5. Karbon çeliği çalışma parçasının indüksiyonla ısıtma esnasındaki yüzey(nüfuz) derinliği değişimi

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

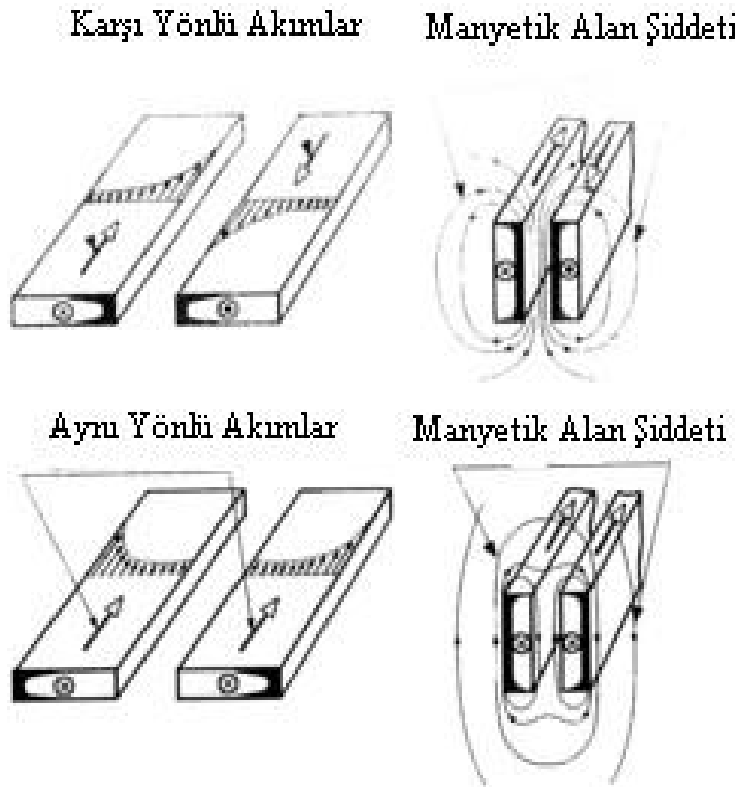
Bu çalışmada daha önce ifade edildiği gibi, literatürde akım dağılımının yarıçap boyunca üstel olarak azaldığı varsayılır. Bununla beraber bu gerçek sadece sabit elektriksel dirence sahip homojen manyetik olmayan malzemeler için geçerlidir. Denklem 2.6 indüksiyonla ısıtma uygulamaları yüksek termal artışlar oluşturduğundan çoğu zaman kullanılamaz. Elektriksel direnç ve izafi 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 [9].

2.4.2. Manyetik yaklaştırma etkisi

Kondüktördeki akım dağılımı ile ilgili önceki tartışmalar, çevrede karışan diğer manyetik alanlar olmadığı varsayılarak geliştirilmiştir. Fakat genellikle gerçekteki durum bu değildir.

İki akım geçen kondüktör birbiri devamına yerleştirildiğinde, her birinin akımı birbirine karışacaktır. Eğer kütlelerdeki akımlar birbirine karşı yönde akıyorsa her bir kondüktördeki akım diğer kütlenin karşı yüzeyinde yoğunlaşacaktır. Eğer akımlar aynı yönlü ise akım kondüktörlerin karşılıklı yüzeylerinde yoğunlaşacaktır.

Sonuç olarak, manyetik alan var olan ikinci bir kondüktörü de etkileyecektir. Akımların karşı yönde akması halinde iki kondüktör arasındaki boşluktaki manyetik alan yoğunluğu artacaktır. Fakat her iki kondüktörün çevresindeki alanda manyetik alan yoğunluğu azalacaktır. Eğer akımlar aynı yönde akıyorsa çevredeki alandaki manyetik alan yoğunluğu artarken, boşluktaki manyetik alan yoğunluğu azalacaktır. Şekil 2.6'da manyetik yaklaştırma etkisi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Manyetik Yaklaştırma Etkisinin Şematik Gösterimi

İndüksiyonla ısıtma işleminde, eddy akımları da bobinin karşı yönünde bir manyetik alan yaratır. İndüksiyon bobini ile parça arasındaki mesafe endüksiyonla ısıtmanın etkinliğinde büyük öneme sahiptir. Bobin ve parça aralarında küçük bir boşluk olacak şekilde beraber tutulduğunda, çalışma parçasında indüklenen eddy akımlarının konumlanması bobindeki akım ile yüksek derecede etkilenecektir. Eddy akımları bobinin hemen karşısındaki komşu hacimde konumlanacaktır. Malzemenin yüzey alanından çalışma parçası içerisine doğru uzanan komşu bir hacimde ısı oluşur. İki kütle arasındaki mesafe artarsa, yakınlık etkisinin gücü azalır. Eddy akımı dağılımı, çalışma parçası yüzeyindeki daha geniş bir alanda daha düz olabilir. Bu durumda ısı oluşumunun derinliği azalacaktır [9].

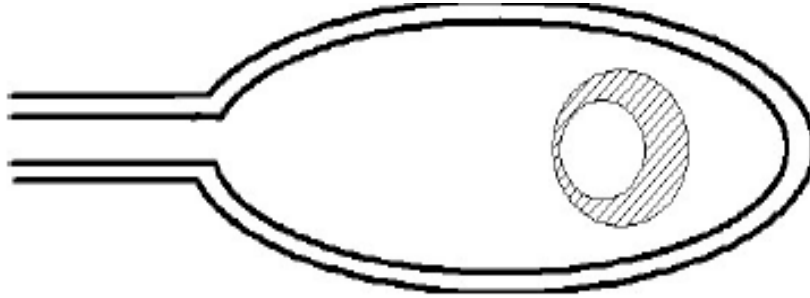
2.5. İndüksiyon Bobini Tasarımı

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 [16].

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 solenoitte 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

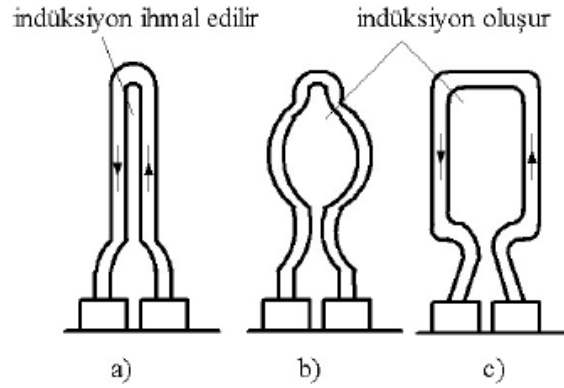
bölgelerde daha çok sayıda akı çizgileriyle kesişir ve malzeme daha yüksek oranda ısınır. Buna karşın hafif bağlantılı parçaların alanı daha yavaş bir oranda ısınır ve Şekil 2.9'daki şematik olarak gösterilen deseni oluştururlar. Bu etki yüksek frekanslı indüksiyon ısıtmalarında daha etkilidir.



Şekil 2.7. İndüksiyonla ısıtmada sarmalın geometrik merkezinin dışına konulan malzeme[16]

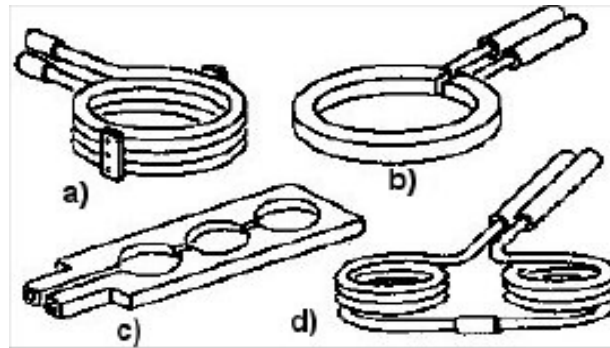
Sarmalın bağlantı noktalarında yani bobinlerin kaynak noktalarında manyetik alan diğer bölgelere göre daha zayıftır (kaçak fazladır). Bu nedenle bobinin manyetik merkezinin aynı zamanda bobinin geometrik merkezi olması şart değildir. Bu etki en çok tek sarmal bobinlerde görülür. Bobinin sarmal sayısı 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 yani 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 kangalların 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.

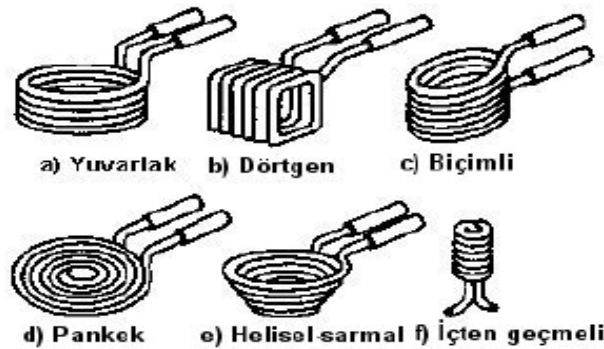


Şekil 2.8. a) indüktansı olmayan b), c) indüktansı olan bobin tasarımları [16]

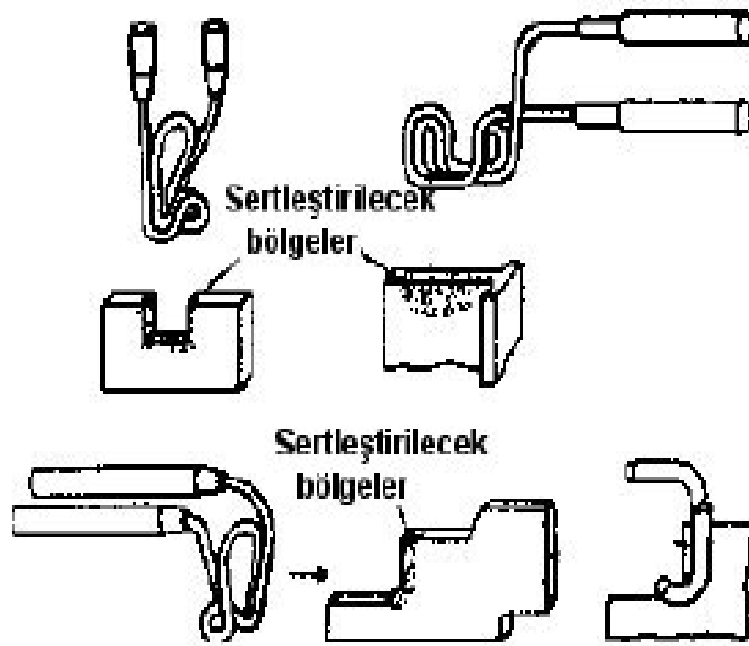
Deneysel verilere dayanan yukarıdaki şekillerden ve açıklamalardan bazı bobinlerle, ısıtılacak yüzeyde manyetik akı yoğunlaştırılabilmekte ve güç yani ısı yüküne daha kolay bir şekilde aktarılmaktadır. Örneğin, malzemeyi ısıtmak için kullanılacak bobinler üç şekilde olabilir: Parça yada ısıtılacak alanın, bobinin içinde olması durumunda, yani manyetik akının en yüksek olduğu sarmal solenoidler; Sadece bir yüzeye gelen akı ile ısıtmanın yapılabileceği pankek tipi bobinler; Sadece bobinin dışındaki akıdan yararlanarak oyukların ısıtmasında kullanılan iç bobinleri [16].



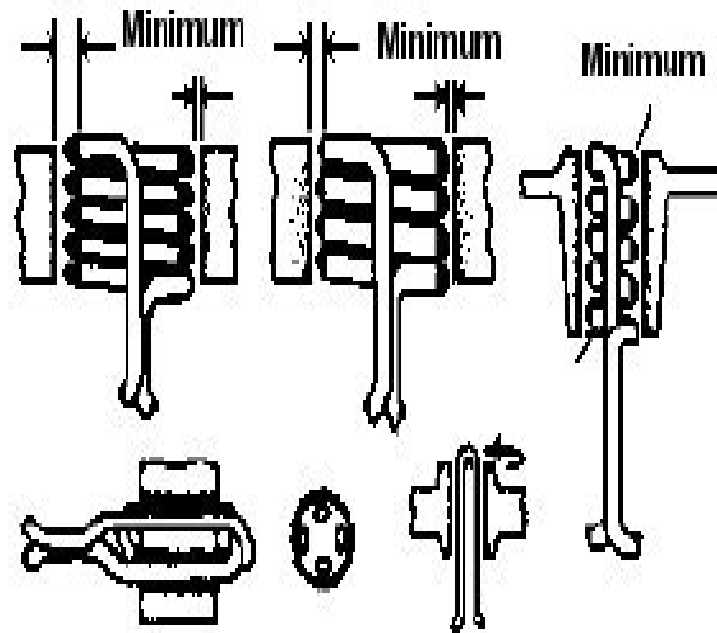
Şekil 2.9. Tipik indüksiyon bobinleri: a) çoklu sarmal, tek pota b) tek sarmal, tek pota, c) tek sarmal, çoklu pota d) çoklu sarmal çok pota [17]



Şekil 2.10 Değişik şekilli ısıtma amaçlı çok sarmımlı bobinler: a) yuvarlak, b) Dörtgen, c) biçimli, d) pankek, e) Helisel-sarmal, f) içten geçmeli [17].



Şekil 2.11. Bölgesel ısıtma için değişik şekilli bobinler [17]



Şekil 2.12. İçten geçmeli, iç kısımları ısıtma amaçlı değişik şekilli bobinler [17]

BÖLÜM 3. MATEMATİKSEL MODEL

3.1. Giriş

Bu bölümde indüksiyonla ısıtma yönteminin elektromanyetik ve ısı matematiksel modelleri anlatılmıştır. Daha sonra indüksiyonla ısıtma ile çalışma parçasında oluşturulan sıcaklık değişiminin oluşturacağı termal gerilmelerin matematiksel modeli anlatılmıştır.

3.2. Elektromanyetik Alanın Matematiksel Modeli

Elektromanyetik alanı hesaplama tekniği Maxwell denklemlerinin çözülebilmeye bağlıdır. Genel olarak zamana bağlı olarak değişen elektromanyetik alanlar için, Maxwell denklemleri aşağıdaki gibi diferansiyel formda yazılabilirler [18,23].

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

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

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

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

Burada ,

E= Elektrik alan şiddeti (V/m)

D= Elektriksel akış yoğunluğu (Coulomb/m²)

H= Manyetik alan şiddeti (A/m)

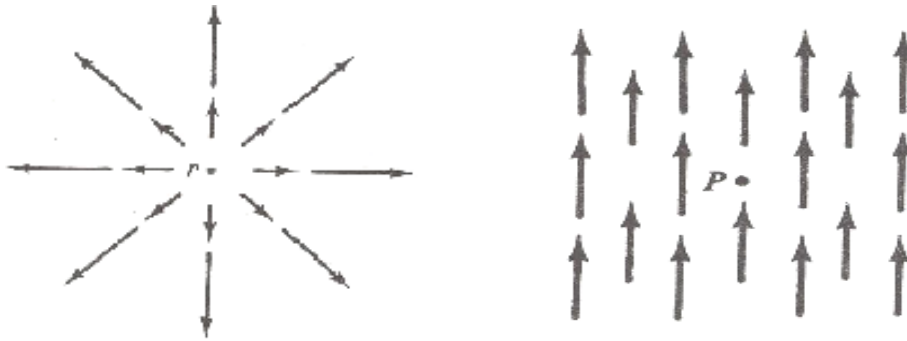
J= İletilen akım yoğunluğu (A/m²)

$\rho^{\text{Şarj}}$ = Elektrik şarj yoğunluğudur (Coulomb, A.s).

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 [24].

$$\nabla U = \text{grad}U = i \frac{\partial U}{\partial X} + j \frac{\partial U}{\partial Y} + k \frac{\partial U}{\partial Z} \quad (3.5)$$

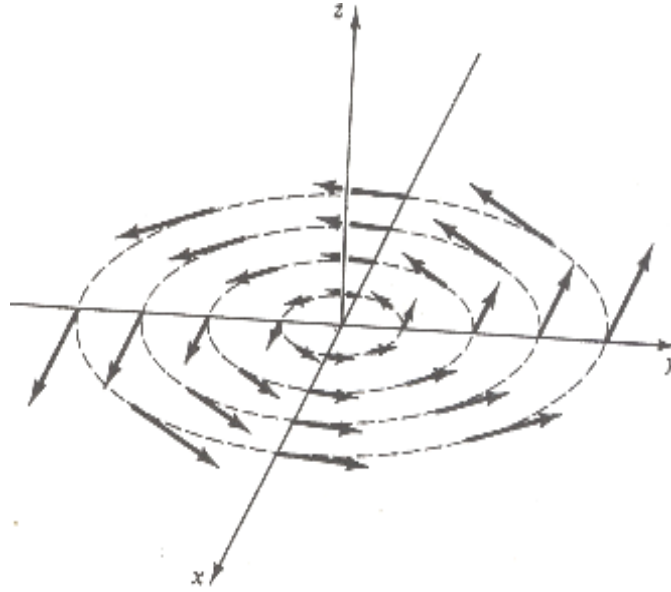
Diverjans U ($\nabla \cdot U$) bir noktadaki U vektör çizgilerinin ne kadar ıraksandığının bir ölçüsüdür. Şekil 3.1.a'daki vektör fonksiyonunun P noktasındaki diverjansı büyük (pozitif) olur. (oklar içe doğru olsaydı, negatif diverjans olurdu). Buna karşılık, Şekil 3.1.b'deki fonksiyonun p noktasındaki diverjansı sıfırdır; çünkü oklar ıraksamadan geçer [25].



Şekil 3.1. a) Diverjansın büyük olduğu vektör çizgileri b) Diverjansın sıfır olduğu vektör çizgileri[25]

$$\nabla \cdot U = \text{div}U = \frac{\partial U_x}{\partial X} + \frac{\partial U_y}{\partial Y} + \frac{\partial U_z}{\partial Z} \quad (3.6)$$

$\nabla \times U$ rotasyoneli, U vektörünün bir nokta etrafında dolanış miktarının bir ölçüsüdür. Şekil 3.2'deki fonksiyonun rotasyoneli büyük olur. Üstelik sağ-el kuralına göre rotasyonel vektörü z - yönünde olur [25].



Şekil 3.2. Rotasyoneli büyük değere sahip vektör çizgileri [25]

$$\nabla \times U = \text{rot}U = \begin{vmatrix} i & j & k \\ \frac{\partial}{\partial X} & \frac{\partial}{\partial Y} & \frac{\partial}{\partial Z} \\ U_x & U_y & U_z \end{vmatrix} \quad (3.7)$$

$$= i\left(\frac{\partial U_z}{\partial Y} - \frac{\partial U_y}{\partial Z}\right) + j\left(\frac{\partial U_x}{\partial Z} - \frac{\partial U_z}{\partial X}\right) + k\left(\frac{\partial U_y}{\partial X} - \frac{\partial U_x}{\partial Y}\right)$$

Maxwell denklemleri sadece matematiksel bir anlama sahip değildir, somut fiziksel anlamlara da sahiptir. Örneğin denklem 3.1 H'ın rotasyonelinin devamlı iki kaynağa sahip olduğunu ifade eder. Bunlar; iletim (J) ve yer değiştirme (ρ^{sarf}) 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 indüklemeye 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 [24].

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 [24].

Denklem 3.2'nin kısa notasyonu, elektrik geçirgen maddeleri indüksiyonla ısıtması ve ısıtma 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 [24].

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.

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

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

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

burada,

ϵ =Dielektrik sabiti (F/m)

μ_r =İzafi manyetik geçirgenlik

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

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

ε_0 =Boşluğun dielektrik sabiti ($\varepsilon_0 = 8.84 \times 10^{-12}$ F/m)

Denklem 3.8 hesaba katıldığında denklem 3.1 aşağıdaki gibi tekrar yazılabilir.

$$\nabla \times H = \sigma E + \frac{\partial(\varepsilon_0 \varepsilon E)}{\partial t} \quad (3.11)$$

Metallerin indüksiyonla ısıtılması pratik uygulamalarında, akımın frekansı 10 Mhz'den az, indüklenen kondüktör 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

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

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 deklemler elde edilir,

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

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

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

burada $J_s = -\sigma \nabla \phi$ indüksiyon bobinindeki kaynak(uyarma) akım yoğunluğudur. Malzeme özellikleri göz önünde tutulur, histerezis ve manyetik doyumluk 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 histerezis kayıplarının neden olduğu ısı etkisi, eddy akım kayıplarının neden olduğu ısı etkisinin %7 si kadardır. Bu uygulamalarda histerezisin ihmal edilmesi yaklaşımı doğrudur [24].

Bununla beraber, indüksiyonla tavlama, gerilim giderme, galvanizleme öncesi ısıtma gibi bazı uygulamalarda histerezis kayıplarının neden olduğu ısı etkisi, eddy akımlarının oluşturduğu ısı etkisiyle karşılaştırılabilir. Histerezis kayıplarının toplam ısı oluşumuna katkısı %40 civarındadır. Bu durumdan dolayı histerezis kayıpları bu uygulamalarda hesaba katılmalıdır [24].

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

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

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

$$\frac{1}{\mu_r \mu_0} \nabla^2 A = -J_s + j\omega \sigma A \quad (3.22)$$

Denklem 3.22 iki boyutlu kartezyen koordinat sistemi için laplasyen açılımı gerçekleştirildiğinde aşağıdaki şekilde yazılabilir [24].

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

3.3. Isı İletiminin Matematiksel Modeli

Genel olarak, bir metal çalışma parçasında zamana bağımlı ısı transfer işlemi Fourier ısı iletim denklemi ile tanımlanabilir [26],

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

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

$$c\gamma \frac{\partial T}{\partial t} = k_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + Q \quad (3.25)$$

burada;

T=Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)

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

c=Özgül ısı ($\frac{\text{J}}{\text{m}^3\text{C}}$),

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

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

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

$$k_n \frac{\partial T}{\partial n} + \alpha(T - T_0) + \sigma\varepsilon(T^4 - T_0^4) + q = 0 \quad (3.26)$$

burada ;

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

k_n =Yüzeye dik termal geçirgenlik

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

σ =Stefan-Boltman sabiti ($\frac{W}{m^2C^4}$)

ε = Radyasyon ışınım katsayısı (emissivity)

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

3.4. Gerilmenin Matematiksel Modeli

3.4.1. Gerilme tanımı

Gerilme birim alana gelen kuvvet yoğunluğudur ve boyutu kuvvet/alan olarak verilir. Kesit düzlemine dik veya normal olan kuvvet yoğunluğuna, o noktadaki normal gerilme adı verilir. Gerilmenin kesit düzleminde olması halinde oluşan gerilmeye ise kayma gerilmesi denmektedir. Bir kesit yüzeyinden dışa doğru etkiyen normal gerilmeleri çekme gerilmesi, içe doğru olan olan normal gerilmeye basınç gerilmesi

denir. Aşağıdaki bağıntıda, σ gerilme, N normal kuvvet (Newton), A normal kuvvetin etkilediği kesit alanıdır(m²) [27].

$$\sigma = \frac{N}{A} \text{ (N/m}^2\text{,Pa)} \quad (3.27)$$

3.4.2. Gerilme-şekil değiştirme bağıntısı

Malzemeler düşük gerilmeler altında çoğunlukla lineer elastik davranış gösterirler. Lineer elastik davranışta gerilmelerle şekil değiştirmeler orantılıdır ve şekil değiştirmeler tersinirdir. Bu davranış aşağıdaki ‘Hooke Kuralı’ ile ifade edilir[28].

$$\sigma = E.\varepsilon \quad (3.28)$$

Burada orantı katsayısı E elastisite modülüdür(N/m²). Bu değer malzemenin elastik şekil değiştirmeye karşı gösterdiği direnç veya rijitlik anlamına gelir. ε şekil değiştirme oranıdır ve birimsizdir.

Yapılan deneyler, kuvvetin etkilediği normal gerilme yönündeki deformasyonla birlikte bu doğrultuya dik düzlem içerisinde de bazı yanal genişleme ve daralmaların olduğunu göstermektedir. Uygulanan aksenal gerilmenin doğrultusuna bağlı olarak yanal gerilmenin doğrultusu kolaylıkla bulunabilir. Yanal şekil değiştirmenin mutlak değerinin, aksenal şekil değiştirmeye oranına poisson oranı adı verilir. X eksenini doğrultusunda uygulanan bir kuvvetin oluşturduğu aksenal şekil değiştirme ε_x , yanal şekil değiştirme ε_y olarak alınırsa, ν poisson oranı aşağıdaki bağıntı ile ifade edilebilir[27]:

$$\nu = \frac{|\varepsilon_y|}{\varepsilon_x} \quad (3.29)$$

3.4.3 Termal şekil değiştirme ve termal gerilme

Gerilmelerden başka, cisimlerdeki sıcaklık değişimlerinde de formasyonlara sebep olur. Homojen ve izotropik malzemeler için δT ($T-T_0$) miktarındaki bir sıcaklık değişimi, her doğrultuda lineer şekil değiştirmelere sebep olur. Bir denklem ile ifade edilen termal şekil değiştirmeler

$$\varepsilon_x = \varepsilon_y = \varepsilon_z = \alpha \cdot \delta T$$

olarak verilir. Burada α ($1/^\circ\text{C}$), adı geçen malzemenin termal genleşme katsayısıdır. Bunun değeri deneysel olarak belirlenir. Makul bir sıcaklık değişim sınırları içerisinde α sabite yakın bir değerde kalır [27].

Eğer malzemenin şekil değiştirmesi kısıtlanmış ise malzemedeki sıcaklık değişince gerilmeler oluşur. Bu gerilmeler denklem 3.28’de belirtilen Hooke kuralı ile bulunabilir. Denklem 3.28’deki ε şekil değiştirme oranı yerine termal şekil değiştirme bağıntısı yazılırsa aşağıdaki bağıntı bulunur.

$$\sigma = E \cdot \alpha \cdot \delta T \tag{3.30}$$

Burada E malzemenin elastik modülü, δT ısı değişim miktarı, σ oluşan termal gerilmelerdir [28].

BÖLÜM 4. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

4.1. Giriş

Sonlu elemanlar yöntemi; nümerik bir teknik olup, katı mekaniği, akışkanlar mekaniği, ısı transferi, titreşim ve elektromanyetik alan gibi problemlerin bilgisayar yardımıyla çözümünde kullanılan çok gelişmiş bir tekniktir. Yöntem ilk olarak gerilme analizi problemlerine uygulanmıştır.

Mühendislikte karşılaşılan fiziksel olaylar diferansiyel denklemlerle ifade edilir. Bu diferansiyel denklemlerin klasik analitik yollarla çözümü çok zor ve de karmaşıktır. Bu nedenle diferansiyel denklemlerin yaklaşık çözümleri için sonlu elemanlar yöntemi geliştirilmiştir [29].

Sonlu elemanlar yönteminde yapı, davranışı daha önce belirlenmiş olan bir çok elemana bölünür. Elemanlar düğüm noktası adı verilen noktalarda tekrar birleştirilirler (Şekil 4.1). Bu şekilde cebrik bir denklem takımı elde edilir. Gerilme analizinde bu denklemler düğüm noktalarındaki denge denklemleridir. İncelenen probleme bağlı olarak bu şekilde yüzlerce hatta binlerce denklem elde edilir. Bu denklem takımının çözümü ise bilgisayar kullanımını zorunlu kılmaktadır [30].



Şekil 4.1. Bir sonlu eleman modelinde düğüm noktaları ve elemanlar

Sonlu elemanlar metodu, karmaşık olan problemlerin daha basit alt problemlere ayrılarak her birinin kendi içinde çözülmesiyle tam çözümün bulunduğu bir çözüm şeklidir. Metodun üç temel niteliği vardır; İlk olarak geometrik olarak karmaşık olan çözüm bölgesi sonlu elemanlar olarak adlandırılan geometrik basit alt bölgelere ayrılır. İkincisi her elemandaki, sürekli fonksiyonlar, cebirsel polinomların lineer kombinasyonu olarak tanımlanabileceği kabul edilir. Üçüncü kabul ise, aranan değerlerin her eleman içinde sürekli olan tanım denklemlerinin belirli noktadaki (düğüm noktaları) değerleri elde edilmesinin problemin çözümünde yeterli olmasıdır. Kullanılan yaklaşım fonksiyonları interpolasyon teorisinin genel kavramları kullanılarak polinomlardan seçilir. Seçilen polinomların derecesi ise çözülecek problemin tanım denkleminin derecesine ve çözüm yapılacak elemandaki düğüm sayısına bağlıdır [29].

Sonlu elemanlar yönteminde temel fikir, sürekli fonksiyonları bölgesel sürekli fonksiyonlar ile temsil etmektir. Bunun anlamı; bir eleman içerisinde hesaplanması istenen büyüklüğün değerinin o elemanın düğüm noktalarındaki değerler kullanılarak interpolasyon ile bulunmasıdır. Bu nedenle sonlu elemanlar bilinmeyen ve hesaplanması istenen değerler, düğüm noktalarındaki değerlerdir. Bir varyasyonel prensip (örneğin; enerjinin minimum olması prensibi) kullanılarak büyüklük alanının düğüm noktalarındaki değerleri için bir denklem takımı elde edilir [30].

Bu denklem takımının matris formundaki gösterimi ise,

$$[K] \cdot [Q] = [F] \quad (4.1)$$

şeklinde. Burada $[Q]$ büyüklük alanının düğüm noktalarındaki bilinmeyen değerlerini temsil eden vektör, $[F]$ bilinen yük vektörü ve $[K]$ ise bilinen sabitler matrisidir. Gerilme analizinde $[K]$, rijitlik matrisi olarak bilinmektedir [30].

Günümüzde sonlu elemanlar yöntemi çeşitli bilimsel ve mühendislik problemlerinin çözümü için kullanılan çok popüler bir yöntem haline gelmiştir. Bilgisayar kapasitelerindeki çok büyük gelişmelerle birlikte sonlu elemanlar metodunun çok farklı varyasyonları geliştirilmiştir. Bunlardan bazıları,

- a) Ritz metodu,
- b) Galerkin metodu,
- c) Pseudo-Varyasyonel metodu,
- d) Enerji fonksiyonunun minimizasyonunu temel alan metod.

4.2. Elektromanyetik Alan Hesabının Sonlu Elemanlar Yöntemi.

Varyasyonel prensibin genel kabulüne göre, elektromanyetik alanın hesaplanması, ana denklem 3.23'ün doğrudan çözümü yerine, çözüm ana denkleme 3.23'e uygun olan enerji fonksiyonunun minimize edilmesiyle sağlanır [24].

Minimum enerji prensibi, vektör potansiyeli dağılımının her bir birim uzunluktaki potansiyel alan enerjisinin minimumunun benzeri olmalıdır. Bu yaklaşımda sonuç olarak, eş zamanlı global denklem takımlarının bilinmeyenlerle ilgili olarak çözülmesi gereklidir. Her bir düğüm noktasının vektör potansiyeli buna örnek olarak verilebilir. İki boyutlu (kartezyen sistem) ve eksenel simetrik (silindirik sistem) indüksiyonla ısıtma problemleri için, sonlu elemanlar denklem takımları ile minimize edilen enerji fonksiyonunun formülasyonu ve çözüm teknikleri oluşturulur [24].

İki boyutlu durumlar için akım yoğunluğu J yönünde hareket eden manyetik vektör potansiyeli A , iki boyutlu kısmi diferansiyel denklem ile 3.23' te tanımlanmıştır. Alanın sınırları boyunca manyetik vektör potansiyeli A sıfır alınabilir. Bunun anlamı sınırdaki eğiminin, diğer bölgelerdeki eğim değerlerine nispetle önemsenmeyecek derecede küçük olduğudur [24]. (Dirichlet, Neuman sınır şartı durumu, $(\frac{\partial A}{\partial n} = 0)$)

İki boyutlu ana denklem denklem 3.23'e karşılık gelen enerji fonksiyonu aşağıdaki gibi yazılabilir [31,32].

$$F = \int_V \left(\frac{1}{2\mu_r \mu_0} \left(\left| \frac{\partial A}{\partial X} \right|^2 + \left| \frac{\partial A}{\partial Y} \right|^2 \right) + j \frac{\omega \sigma}{2} |A|^2 - J_s A \right) dV \quad (4.1)$$

Burada V modelin toplam alanı ve J_s kaynak akım yoğunluğudur. İntegralin içinin birinci, ikinci ve üçüncü bölümleri sırasıyla manyetik alanın enerjisini, eddy akımlarını ve kaynak akımını göstermektedir.

Sonlu elemanlar yöntemine göre, çalışma alanı iç içe geçmeyen çok sayıda sonlu elemanlara bölünür (mesh). Bu nedenle, bu fonksiyonun minimize edilmesi her elemanın her düğüm noktasının minimize edilmesini sağlar.

Fonksiyon 4.1'in minimize edilmesi iki boyutlu eddy akımı alan probleminin kendi sınır şartları ile çözümüne karşılık gelir.

Bir üçgen eleman için manyetik vektör potansiyeli,

$$A(X, Y) = a_1 + a_2 X + a_3 Y \quad (4.2)$$

Doğrusal yakınsama kanunları temel alındığında, $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ katsayıları sabittir ve A_1, A_m, A_n değerlerinin üçgen elemanın üç düğüm noktasındaki manyetik vektör potansiyel A nin üst tepe değerleri olarak kabul edilmesi ile elde edilen üç bağımsız eş zamanlı denklemin çözülmesi ile bulunabilir. Bu nedenle lokal denklem takımları aşağıdaki gibi yazılabilirler [24].

$$\begin{aligned} A_1 &= a_1 + a_2 X_1 + a_3 Y_1 \\ A_m &= a_1 + a_2 X_m + a_3 Y_m \\ A_n &= a_1 + a_2 X_n + a_3 Y_n \end{aligned} \quad (4.3)$$

Yukarıdaki denklem takımları matris formunda aşağıdaki şekilde yazılabilirler

$$\begin{bmatrix} A_1 \\ A_m \\ A_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & X_1 & Y_1 \\ 1 & X_m & Y_m \\ 1 & X_n & Y_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Elemanların geometrisinin ve elemanın her düğüm noktasının manyetik vektör potansiyeli değerinin bilinmesi A nin değerinin elemanın içinde herhangi bir

noktadaki değerinin sağlanmasına imkan tanır. Lokal yakınsamanın tüm elemanlara yayılması ile A'nın tüm alan boyunca yakınsaması elde edilir [24].

Model alanı içindeki enerji dengesi, her düğüm noktası için enerjinin minimize edilmesi ile tanımlanır. Modelin bütün alanında birleşen toplam(global) enerji tüm elemanların enerjisinin toplamına eşittir. Sonuç olarak, her bir düğüm noktasındaki manyetik vektör potansiyelinin bilinmeyen değeri ile ilgili eş zamanlı bir denklem takımı sağlanabilir[24].

Bazı cebirsel işlemlerden sonra, herhangi bir üçgen eleman içinde enerji fonksiyonunun minimize edildiği lokal matris denklemini aşığıdaki gibi yazılabilir.

$$[[V]_e + j[W]_e][A] = [Q]_e \quad (4.5)$$

$$[V]_e = \frac{1}{4\mu_r\mu_0\Delta} \begin{bmatrix} (b_l b_l + c_l c_l) & (b_l b_m + c_l c_m) & (b_l b_n + c_l c_n) \\ (b_m b_l + c_m c_l) & (b_m b_m + c_m c_m) & (b_m b_n + c_m c_n) \\ (b_n b_l + c_n c_l) & (b_n b_m + c_n c_m) & (b_n b_n + c_n c_n) \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

$$\begin{bmatrix} a_l & a_m & a_n \\ b_l & b_m & b_n \\ c_l & c_m & c_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (X_m Y_n - X_n Y_m) & (X_n Y_l - X_l Y_n) & (X_l Y_m - X_m Y_l) \\ (Y_m - Y_l) & (Y_n - Y_l) & (Y_l - Y_m) \\ (X_n - X_m) & (X_l - X_n) & (X_m - X_l) \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

$$[W]_e = \frac{\omega\sigma\Delta}{12} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

$$[Q]_e = \frac{J_s\Delta}{3} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

$$[A]_e = \begin{bmatrix} A_l \\ A_m \\ A_n \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

Δ , tek bir üçgen elemanın kesit alanı.

Sonlu elemanların birleştirilmesi ve uygun sınır şartının açıkça belirtilmesinden sonra, global matris denklemi aşağıdaki gibi sağlanabilir:

$$[G][A] = [Q] \quad (4.11)$$

Eksenel simetrik durumlar için denklem 4.5'ten 4.11'e kadar olan denklemler için lokal ve global matrisler benzerdir [34]. Deklem 4.5 için lokal matris parametreleri aşağıdaki gibidir.

$$[V]_e = \frac{R_c}{4\mu_r\mu_0\Delta} \begin{bmatrix} (\beta_l\beta_l + c_l c_l) & (\beta_l\beta_m + c_l c_m) & (\beta_l\beta_n + c_l c_n) \\ (\beta_m\beta_l + c_m c_l) & (\beta_m\beta_m + c_m c_m) & (\beta_m\beta_n + c_m c_n) \\ (\beta_n\beta_l + c_n c_l) & (\beta_n\beta_m + c_n c_m) & (\beta_n\beta_n + c_n c_n) \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

Burada R_c sonlu elemanın merkez yarıçapı, $\beta_i = b_i + 2\nabla/3r_c$, $i=1,m,n$

$$\begin{bmatrix} a_l & a_m & a_n \\ b_l & b_m & b_n \\ c_l & c_m & c_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (R_m Z_n - R_n Z_m) & (R_n Z_l - R_l Z_n) & (R_l Z_m - R_m Z_l) \\ (Z_m - Z_l) & (Z_n - Z_l) & (Z_l - Z_m) \\ (R_n - R_m) & (R_l - R_n) & (R_m - R_l) \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

$$[W]_e = \frac{\omega\sigma R_c \Delta}{12} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

$$[Q]_e = \frac{J_s R_c \Delta}{3} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

$$[A]_e = \begin{bmatrix} A_l \\ A_m \\ A_n \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

Cebirsel denklemler sisteminin çözülmesinden ve model alanındaki manyetik vektör potansiyeli dağılımları sağlandıktan sonra, elektromanyetik alanın tüm gerekli parametreleri bulunabilir.

Kondüktörlerdeki indüklenen akım yoğunluğu,

$$J_e = -J\omega\sigma A \quad (4.17)$$

Kondüktörlerdeki toplam akım yoğunluğu,

$$J = J_s - J\omega\sigma A \quad (4.18)$$

Manyetik akı yoğunlu bileşenleri B_x ve B_y 3.15 bağıntısından aşağıdaki gibi hesaplanabilir [33,34],

$$\frac{\partial A}{\partial Y} = -B_x ; \quad \frac{\partial A}{\partial X} = B_y \quad (4.19)$$

4.19 bağıntısındaki yoğunluğu aşağıdaki şekilde bulunabilir,

$$B = [B_x^2 + B_y^2]^{1/2} \quad (4.20)$$

Eksenel simetrik durumlar için manyetik akı yoğunlu bileşenleri B_R ve B_Z , 3.45 bağıntısından aşağıdaki gibi hesaplanabilir

$$B_R = -\frac{\partial A}{\partial Z} ; \quad B_Z = \frac{\partial A}{\partial R} + \frac{A}{R} \quad (4.21)$$

Manyetik alan şiddeti,

$$H = \frac{B}{\mu_r \mu_0} \quad (4.22)$$

Elektrik alan şiddeti,

$$E = -j\omega A \quad (4.23)$$

Akım taşıyan kondüktördeki ve çalışma parçasındaki elektromanyetik kuvvet yoğunluğunu, toplam akım yoğunluğu vektörü ve manyetik akı yoğunluğu vektörünün çarpımı ile bulunabilir :

$$F_x = J_x B_y \quad ; \quad F_y = -J_x B_x \quad (4.24)$$

Manyetik vektör potansiyeli çözümü, işlemin depolana enerji, akı kaçağı, toplam güç ve bobin empedansı gibi önemli niceliklerinin hesaplanmasına imkan tanır.

4.3. Isı Transferinin Sonlu Elemanlar Yöntemi

Isı trasferinde sonlu elemanlar yönteminin temeli, her elemanın içindeki sıcaklık alanı için parçalı polinom yakınsamasıdır:

$$\bar{T} = \sum_{i=1}^{10,12} N_i T_i \quad (4.25)$$

Burada N_i sadece elemanın tipine, şekline ve boyutuna bağlı olan temel fonksiyondur. Fiziksel olarak $T_i(t)$, t zamanındaki noktasal sıcaklık değeridir. Matematiksel olarak bunlar kararsız katsayılarıdır. Herhangi bir noktadaki (x,y,z) sıcaklık gradyenleri aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$\left[\frac{\partial T}{\partial x}, \frac{\partial T}{\partial y}, \frac{\partial T}{\partial z} \right] = \left[\frac{\partial N_i}{\partial x} T_i, \frac{\partial N_i}{\partial y} T_i, \frac{\partial N_i}{\partial z} T_i \right] \quad (4.26)$$

Burada $\sum N_i(x, y, z, t)T_i(t)$, $N_i T_i$ 'ye kısaltılır. $T_i(t)$ Galerkin metodu izlenerek, bu hesaplamalar için çok elverişli yollar sağlanabilir. Eğer polinom 4.25, denklem 3.25 içinde kullanılırsa çözüm elde edilir. Galerkin Sonlu Elemanlar Modeli aşağıdaki bağıntıyı gerektirir:

$$\int_{\Omega} \varepsilon N_i d\Omega = 0 \quad (4.27)$$

Matematiksel olarak, N_i denklem 4.27'de test fonksiyonu olarak adlandırılır. Bununla beraber N_i denklem 4.25'te deneme fonksiyonu olarak adlandırılır. İ düğüm noktası olduğu için, denklem 4.25 lineer olmayan cebirsel denklemlerden integre edilmiş i adet sıradan diferansiyel denklem oluşturur:

$$[K][T] = [R] \quad (4.28)$$

Burada $[K]$ efektif geçirgenlik veya direngenlik matrisi ve $[R]$ efektif yük veya artık vektördür. Sistemin çözülmesi ile alandaki(Ω) sıcaklık dağılımı bulunmuş olur [26].

4.4. Termal Gerilme Hesabının Sonlu Elemanlar Yöntemi

Termal gerilmenin hesaplanması için alana minimum enerji prensibi uygulanır. Termal etkinin bir sonucu olarak ortaya çıkan şekil değiştirmeler tanımlandıktan sonra, buna bağlı olan termal gerilmeler aşağıdaki formül ile hesaplanır [35].

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon_e\} = [D](\{\varepsilon\} - \alpha(T - T_0)) \quad (4.29)$$

burada

$$D = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \end{bmatrix} \quad (4.30)$$

Düzlem gerilme durumu için, malzeme matrisi D aşağıdaki şekilde yazılır:

$$D = \frac{E}{(1-\nu^2)} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2(1-\nu)} \end{bmatrix} \quad (4.31)$$

BÖLÜM 5. ANSYS İLE SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

5.1. Giriş

Çalışma parçası yüzeyine yakın bir noktada konumlandırılmış olan alternatif akım taşıyan indüksiyon bobini çevresinde ve çalışma parçası yüzeyinde manyetik alan oluşturur. Çalışma parçası yüzeyinde oluşan manyetik alan, yüzeyde akım indüklemesine sebep olur ve yüzeyde eddy akımları oluşur. Eddy akımları malzemenin elektriksel direncinden dolayı joule etkisi gösterir ve ısı üretimine sebep olur. Çalışma parçası yüzeyindeki ısı üretiminin malzeme üzerinde oluşturduğu sıcaklık dağılımını hesaplamak için harmonik elektromanyetik ve ısı analizi bir çözüm döngüsü kurularak birleşik (couple) olarak çözülmüştür. Son olarak hesaplanan sıcaklık dağılımlarının malzemede ve malzeme üzerinde bulunan çatlak etrafında oluşturduğu termal gerilmeler hesaplanmıştır. Tüm bu analizler ANSYS.10 sonlu elemanlar paket programı kullanılarak yapılmıştır.

5.2. ANSYS Sonlu Elemanlar Yazılımı

Sonlu elemanlar yönteminin genel uygulanabilirliği, onu geniş bir sahada problemler için güçlü ve esnek bir kullanım aracı haline getirmiştir. Bu nedenle yapısal ve mekanik problemlerin çözümü için çok sayıda yapısal program geliştirilmiştir. ANSYS sonlu elemanlar analiz programında 1970'li yıllarda Dr. John Swanson tarafından bilgisayarlar üzerinde geliştirilen bir sayısal analiz programıdır. Sürekli olarak geliştirilen ve yenilenen bu program, mühendisliğin hemen her dalında (yapı, otomotiv, endüstri, elektronik, uzay bilimleri vs.) kullanılabilen genel maksatlı bir paket program haline getirilmiştir. Kullanım alanları arasında; statik ve dinamik yapı analizleri, statik ve dinamik diğer analizler, termal analizler, elektromanyetik alan analizleri, akışkanlar mekaniği analizleri, akustik, optimizasyon, yapı burkulma analizleri ve nonlineer yapı analizleri sayılabilir.

ANSYS programında çözümlerin elde edilmesi üç aşamada gerçekleşir.

Bu aşamalar,

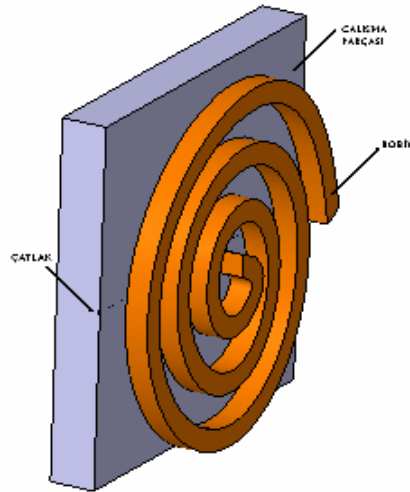
Ön işleme (preprocessing)

İşleme (processor)

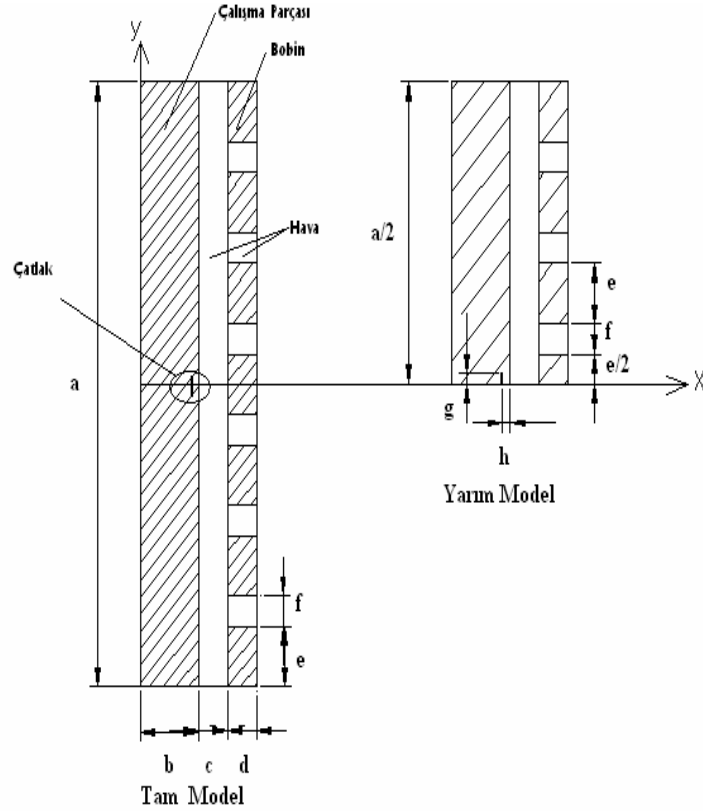
Son işleme (postprocessor)

aşamalarıdır. Ön işleme aşamasında çözüm esnasında gerekli olan dataların oluşturulması söz konusudur. Bu aşamada program kullanıcısı koordinat sisteminin seçimi, eleman tipinin belirlenmesi, malzeme sabitlerinin ve özelliklerinin belirlenmesi, modelin oluşturulması ve sonlu elemanlara ayrılması işlemlerini yapar. Daha sonra çözüm aşamasına geçilir. Bu aşamada kullanıcı analiz tipini, analiz opsiyonlarını, yükleme durumlarını ve sonlu eleman çözüm tekniğini belirler ve problemi çözdürür [30].

5.3. Modelleme ve Bölüntüleme (Meshing)



Şekil 5.1. Çalışma parçası ve indüksiyon bobinini

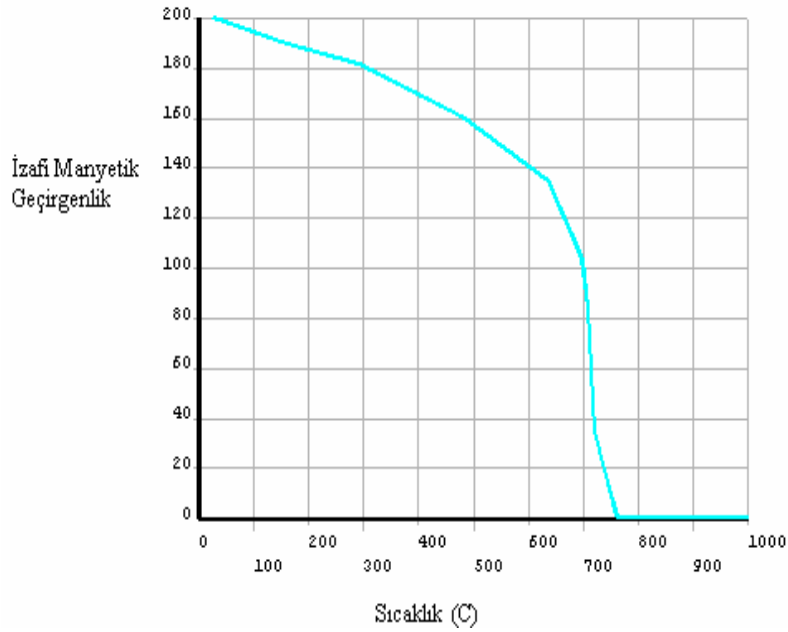


Şekil 5.2. İndüksiyonla ısıtma sisteminin iki boyutlu modeli ($a=80$, $b=9.26$, $c=4$, $d=4$, $e=8$, $f=4$, $g=0.276$, $h=0.276$, mm'dir.)

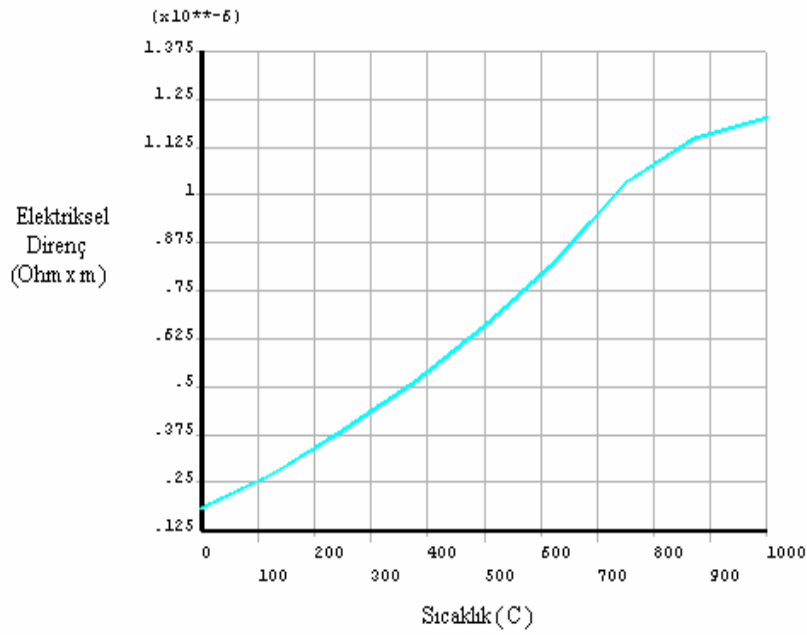
5.3.1 Malzeme özellikleri

Bu bölümde çalışma parçasının, manyetik, elektriksel, termal ve yapısal malzeme değerleri ile, bobin ve havanın manyetik malzeme değerleri verilecektir.

İndüksiyonla ısıtma sisteminde en kritik malzeme özelliği manyetik malzeme özellikleri olan izafi manyetik geçirgenlik ve elektriksel direnç değerleridir. Bu değerler malzemenin indüksiyonla ısıtma kapasitelerini vermektedir. İzafi manyetik geçirgenlik ve elektriksel direnç değerleri yüksek olan malzemeler indüksiyon ile daha kolay ısıtılmaktadır. Çalışma parçasının izafi manyetik geçirgenlik değeri sıcaklık ile birlikte düşmekte ve nihai olarak parçanın curie sıcaklığı olan 750 C değerinde 1 olmaktadır. Bu noktadan sonra malzeme manyetik olmayan malzeme davranışı gösterir Elektriksel direnç değeri sıcaklık artışı ile artmaktadır. Sıcaklık ile direnç artışı belirli bir sıcaklıktan sonra yavaşlamaktadır. Havanın ve bobinin izafi manyetik geçirgenlik değerleri 1 olarak alınmıştır. Parçanın izafi manyetik geçirgenlik ve elektriksel direnç değerleri Şekil 3.4 ve 3.5 'te gösterilmiştir.



Şekil 5.3. Çalışma parçasının izafi manyetik geçirgenlik değerinin sıcaklıkla değişimi



Şekil 5.4. Çalışma parçasının elektriksel direnç değeri.

Çalışma parçasını yapısal malzeme özellikleri olan elastik modülü, poisson oranı, termal genleşme katsayısı değerleri ile termal malzeme özellikleri olan termal geçirgenlik katsayısı, özgül ısı kapasitesi değerleri Tablo 3.1'de verilmiştir. Ayrıca malzemenin yoğunluk değeri de Tablo 3.1'de verilmiştir. Çalışma parçasının radyasyon ışınlam katsayısı 0.56 olarak alınmıştır.

Tablo 5.1. Kullanılan çelik malzemenin termal ve yapısal malzeme özellikleri [36]

Sıcaklık (°C)	Termal Geçirgenlik (W/mK)	Özgül Isı (J/kgK)	Poisson Oranı	Elastik Modülü (Gpa)	Termal Genleşme Katsayısı ($10^{-6} 1/^{\circ}\text{C}$)	Yoğunluk (kg/m ³)
0	51.9	450	0.2786	200	10	7850
100	51.1	499.2	0.3095	200	11	
300	46.1	565.5	0.331	200	12	
450	41.05	630.5	0.338	150	13	
550	37.5	705.5	0.3575	110	14	
600	35.6	773.3	0.3738	88	14	
720	30.64	1080.4	0.3738	20	14	
800	26	931	0.4238	20	15	

5.3.2. Kullanılan elemanlar

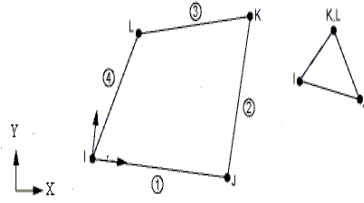
Tablo 5.2 Modellemede kullanılan manyetik, termal ve yapısal elemanlar.

	Kullanılan Eleman (Manyetik Analiz)	Kullanılan Eleman (Isı Analizi)	Kullanılan Eleman (Yapısal Analiz)
Çalışma Parçası	PLANE13	PLANE55 / SURF151	PLANE42
Bobin	PLANE13	****	****
Hava	PLANE 13	****	****

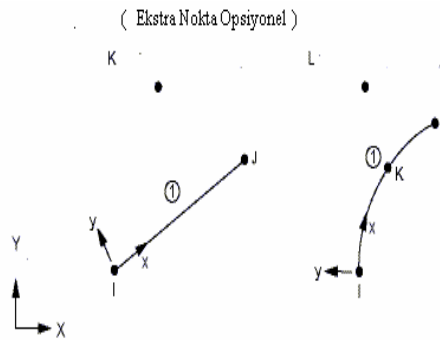
Plane13 elemanı, iki boyutlu manyetik, termal, elektriksel ve piezoelektrik kabiliyetleri birleşik (couple) analizlerle sınırlı bir elemandır. Plane13 elemanı her bir noktası UX(X yönünde yer değiştirme), UY(Y yönünde yer değiştirme), AZ (Manyetik Vektör Potansiyeli), VOLT (Voltaj) olmak üzere dört serbestlik derecesine sahip dört sonlu elemanlar noktası ile tanımlanır.

Plane55 elemanı, iki boyutlu termal iletkenlik kabiliyeti olan bir elemandır. Her bir noktası TEMP (Sıcaklık) serbestlik derecesine sahip dört nokta ile tanımlanır. Surf151 elemanı, iki boyutlu termal radyasyon kabiliyeti olan bir elemandır.

Plane42 elemanı, iki boyutlu yapısal elemandır. Düzlem gerilme, düzlem gerinme ve eksenel simetrik problemler için kullanılabilir. Eleman her bir noktası UX,UY olmak üzere iki serbestlik derecesine sahip dört sonlu elemanlar noktası ile tanımlanır. Eleman, elastik deformasyon, plastik deformasyon, genleşme, geniş deformasyonlar gibi kabiliyetlere sahiptir.



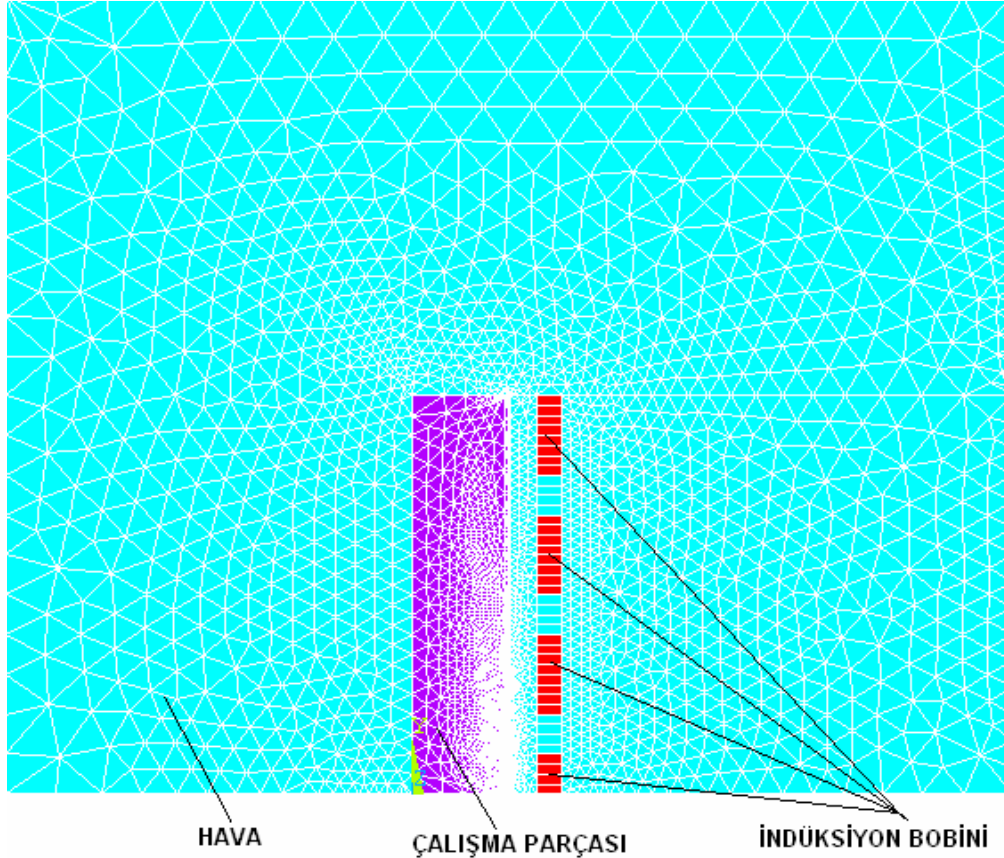
Şekil 5.5. Plane13, plane 55 ve Plane42 elemanlarının geometrisi [37]



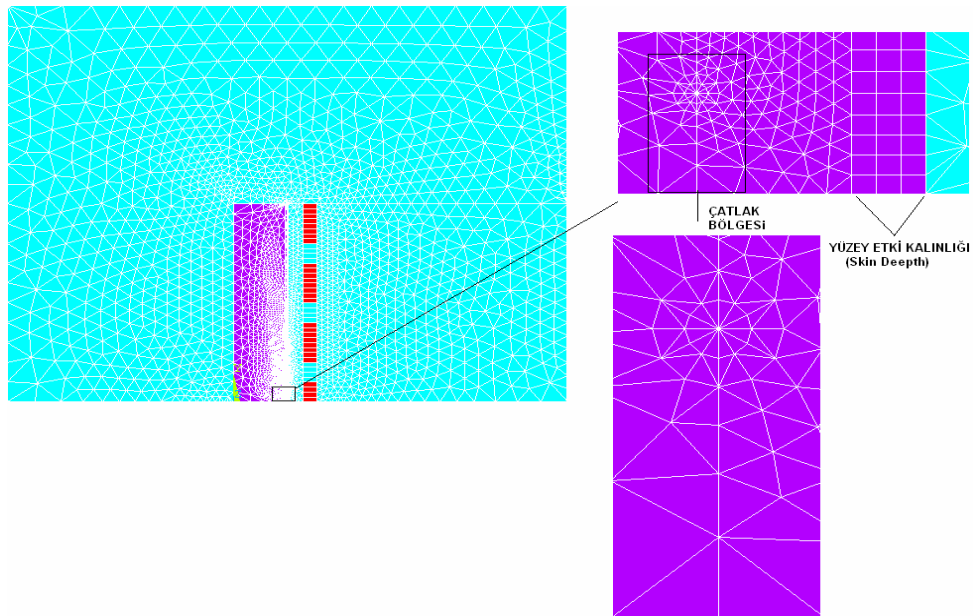
Şekil 5.6. Surf151 yüzey elemanının geometrisi [37]

5.3.3. Bölüntüleme

Modeli bölüntülemek için, çalışma parçasında üçgen eleman, çalışma parçası yüzeyinde, yüzey etki kalınlığını verebilmek amacıyla dörtgen elemanlar kullanılmıştır. Bobini bölüntülerken, akım yoğunluğunu düzgün ve eşit oranda bobin elemanlarına verebilmek için dörtgen elemanlar kullanılmıştır. Havanın bölüntülenmesinde üçgen elemanlar kullanılmıştır.



Şekil 5.7. Elemanlara ayrılmış model



Şekil 5.8 Bölüntülenmiş model, çatlak etrafının bölüntülenmesi, yüzeyin bölüntülenmesi.

Bölüm 2’de bahsedildiği gibi alternatif manyetik alan parçanın yüzeyinden belirli bir derinlikte etkili olabilmektedir. Bu derinliğe yüzey etki kalınlığı demiştik. Modelimizi bölüntülerken yüzey etki kalınlığı dikkate alınmış ve yüzeydeki

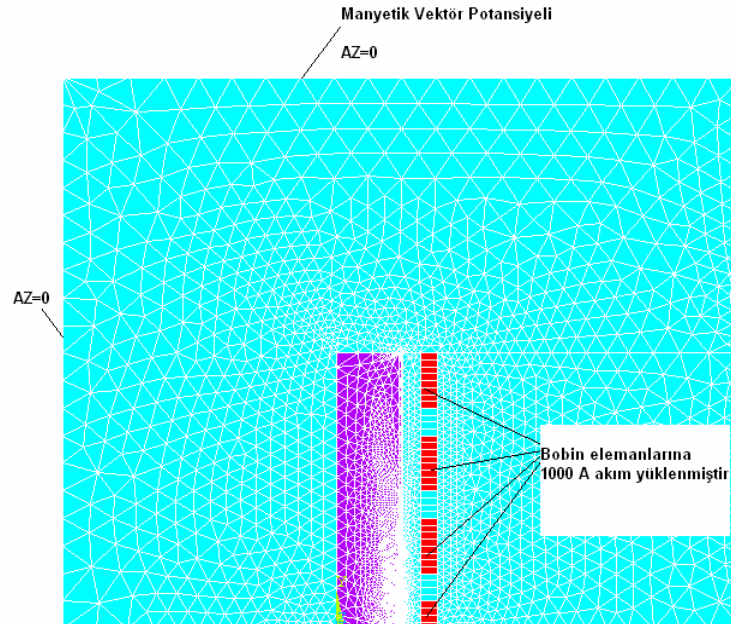
elemanlar bu kalınlıkta bölüntülenmiştir (Bkz. Şekil 5.8). Çatlak bölgesi bölüntülenirken, sonlu elemanlar hesaplamasında çatlakın uç noktasında oluşacak olan tekilliği(singularity) engellemek için, bölüntüleme Şekil 5.8’de gösterildiği gibi çatlak uç bölgesinde yoğunlaştırılarak yapılmıştır.

5.4. Yüklerin ve Sınır Şartlarının Uygulanması

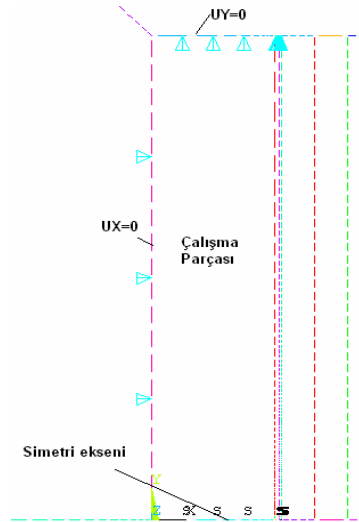
5.4.1. Elektromanyetik yükleme ve sınır şartları

İndüksiyonla ısıtma işlemini bobinden geçen alternatif akım oluşturmaktadır. Bobinlere akım yüklemesi, bobin elemanlarına akım yoğunluğu uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Elemanlara 1000 Amper ($50 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$) alternatif akım uygulanmıştır. Uygulana alternatif akımın frekansı 25 kHz dir.

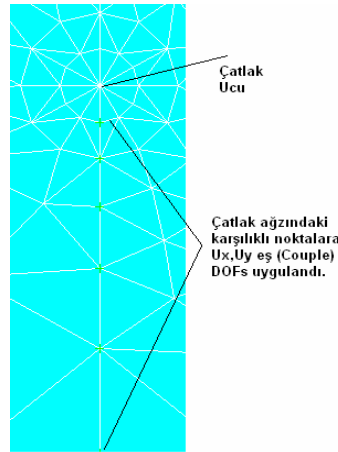
Bölüm 3’te ifade edildiği gibi indüksiyonla ısıtma işleminin sonlu elemanlar analizinde, elektromanyetik sınır şartı olarak çalışma alanının yani modelin dış sınırlarında manyetik vektör potansiyeli (AZ) değeri sıfır alınmıştır.



Şekil 5.9. Manyetik yüklerin ve sınır şartlarının verilmesi.



Şekil 5.11. Yapısal sınır şartlarının model üzerinde gösterilmesi

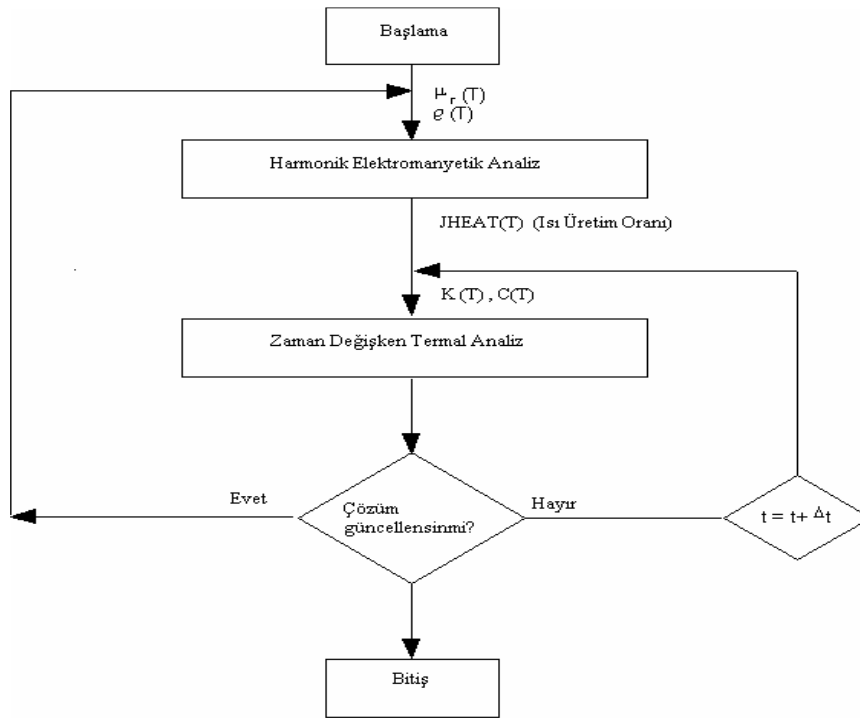


Şekil 5.12. Çatlak ağzındaki karşılıklı noktala sınır şartı uygulanması

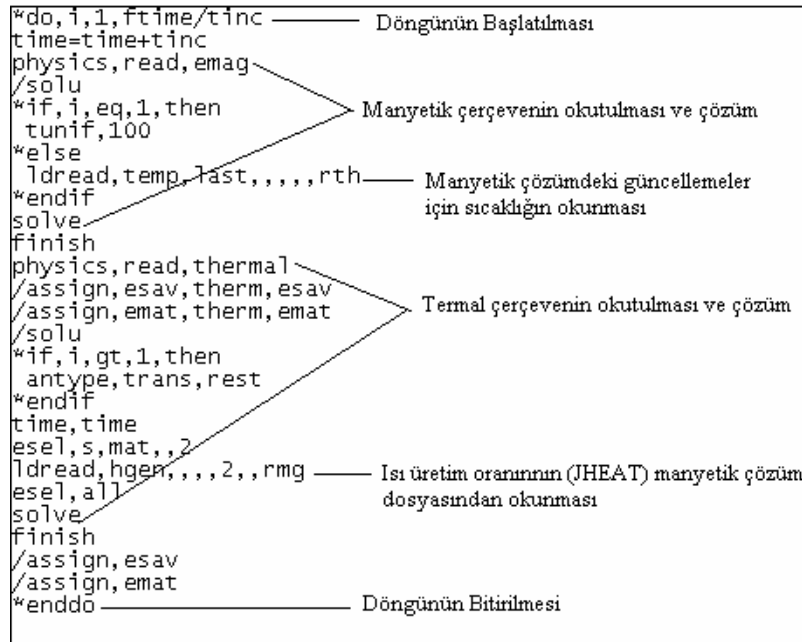
5.5. Çözüm

Çözüm iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk olarak elektromanyetik-termal analiz birleşik (couple) olarak çözülmüştür. Birleşik analiz sonucunda elde edilen sıcaklık verileri yapısal analize girdi olarak ikinci aşamada kullanılmıştır.

Manyetik-Termal birleşik çözümü için APDL kodları kullanılarak bir döngü kurulmuş ve oluşturulan manyetik ve termal fiziksel çerçeveler eş (couple) olarak çözülmüştür. Çözüm döngüsünün akış şeması şekil 3.13'te verilmiştir. Manyetik analiz için harmonik çözüm frekansı , bobinden geçen alternatif manyetik alanın frekansı olan 25 khz olarak alınmıştır.

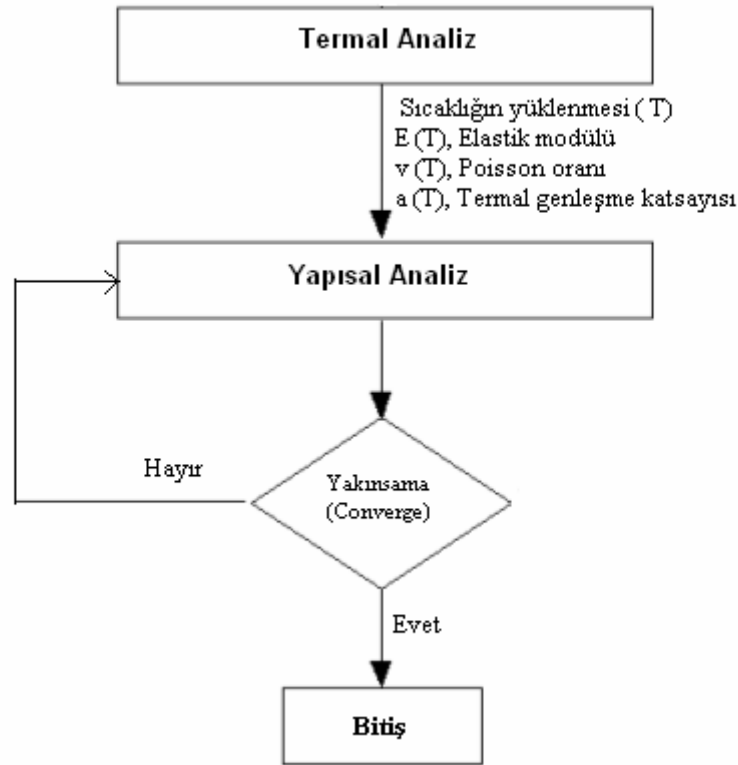


Şekil 5.13. Manyetik-Termal birleşik analiz çözüm döngüsünün akış şeması [37]



Şekil 5.14. Çözüm döngüsünün APDL programı [37]

Çözümün ikinci aşamasında, manyetik-termal birleşik analizi sonucu elde edilen sıcaklık değerleri, yapısal analize LDREAD komutu ile yüklenmiş ve termal gerilmeleri bulmak amacıyla çözüm yapılmıştır.



Şekil 5.15. Yapısal analiz akış şeması

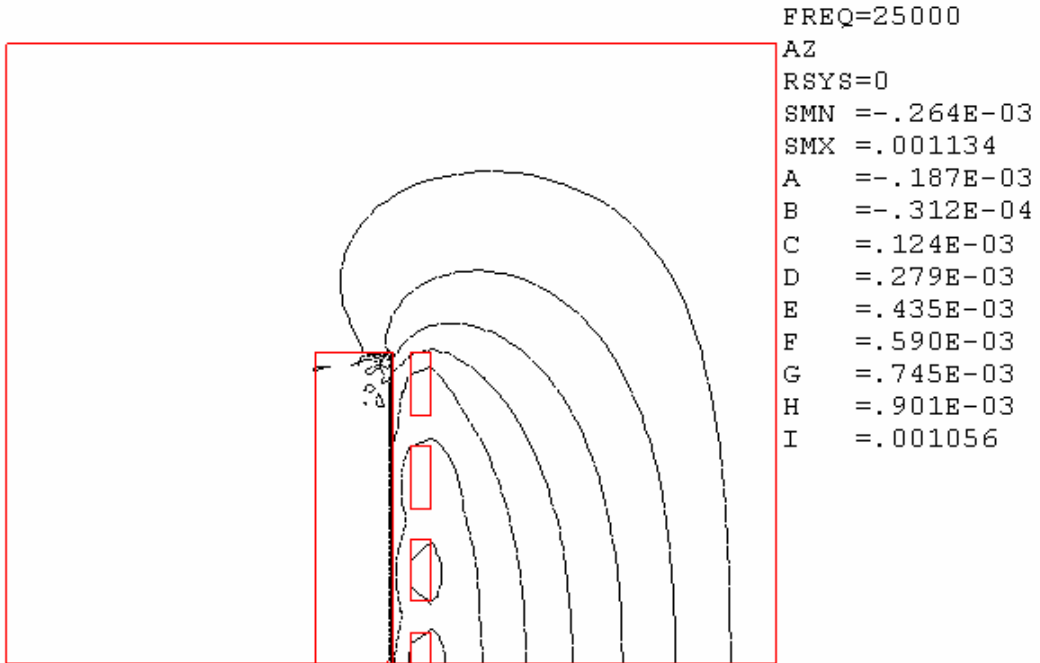
Bir diğer analizde ise, indüksiyonla ısıtma ile termal yorulma uygulaması için sonlu elemanlar çözümü geliştirilmiştir. Çalışma parçasının yüzeyini 600 C^0 ile 400 C^0 arasında tekrarlı ısıl yükleme ile termal yorulmaya tabi tutmak için APDL çözüm döngüsü kurulmuştur. İlk olarak parça yüzey sıcaklığı 600 C^0 dereceye çıkıncaya kadar bobine akım yüklemesi yapılmaktadır. Yüzey sıcaklığı 600 C^0 dereceye ulaştığında bobin akımı kesilerek indüksiyon ısıtmaya ara verilmekte, soğutma evresine geçilmektedir. Soğutma evresinde parçaya 0 C^0 sıcaklığında soğuk hava üflenmektedir ve parçanın yüzey sıcaklığı 400 C^0 ye ulaşıncaya kadar soğutma devam etmektedir. Parça yüzeyi 400 C^0 ye düştükten sonra soğuk hava üflenmesi kesilmekte ve bobine tekrar akım yüklemesi yapılmakta ve parça yüzeyi 600 C^0 ye çıkmaktadır. Bu işlem istenilen termal yorulma süresince tekrarlanabilmektedir. İşlemin çözüm döngüsü aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



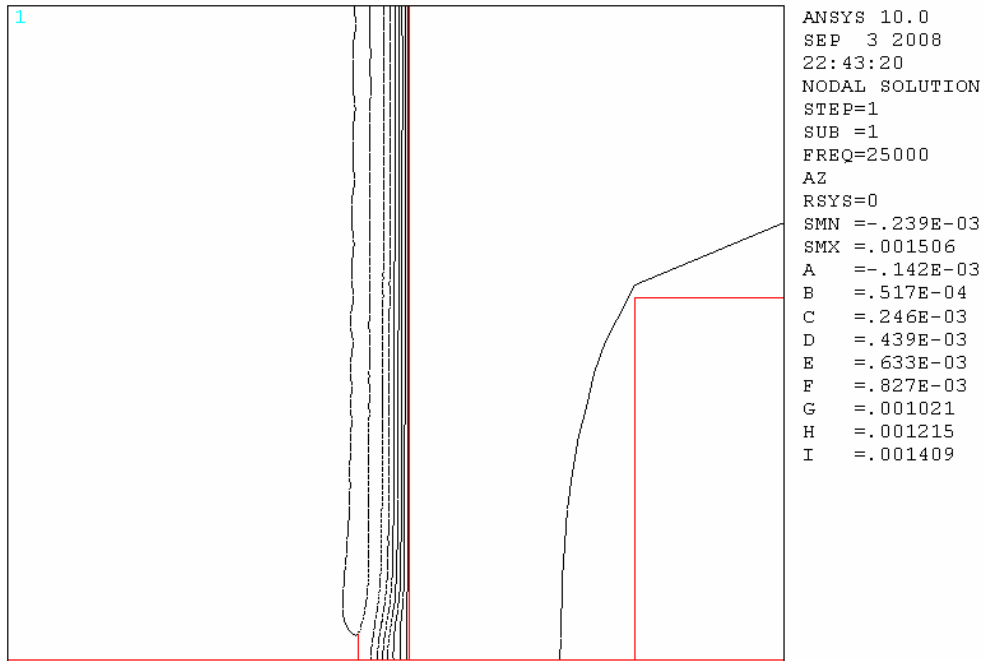
Şekil 5.16. 600 °C-400 °C arasında tekrarlı ısı yüklemesi için APDL çözüm döngüsü

5.6. Analiz Sonuçları

5.6.1. Manyetik sonuçlar

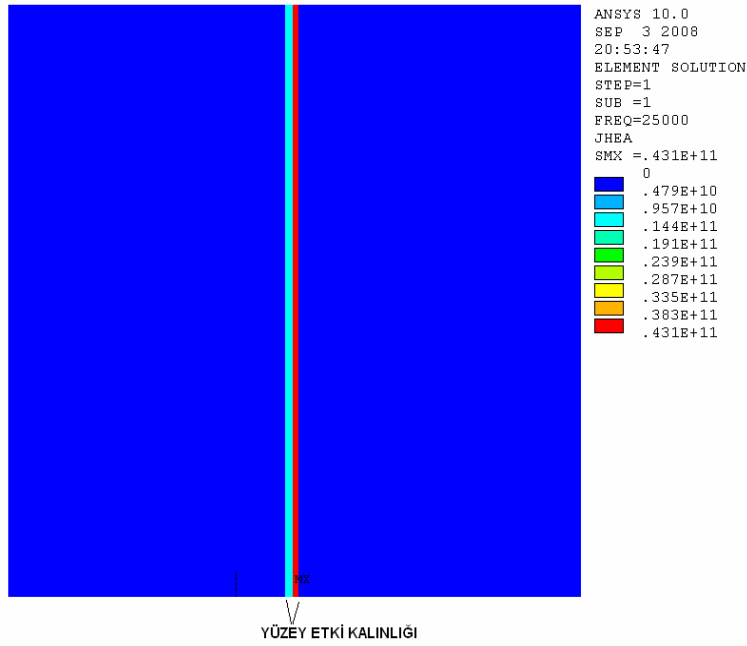


Şekil 5.17. Elektromanyetik analiz sonucu bulunan manyetik alan çizgileri



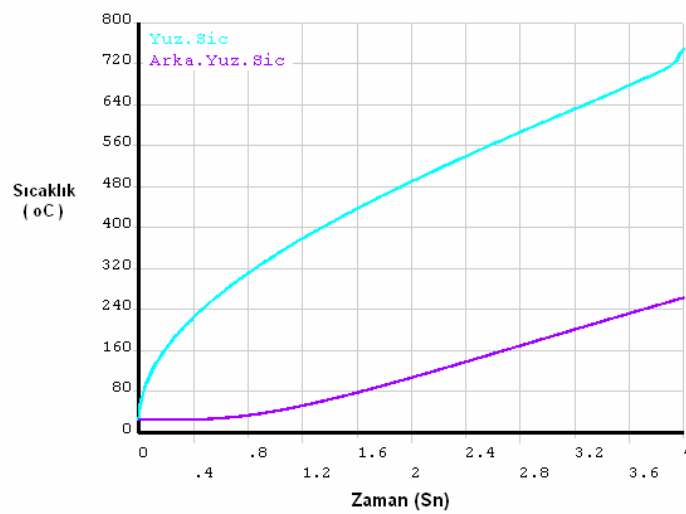
Şekil 5.18. Çalışma parçası yüzeyindeki manyetik alan çizgileri

Bölüm 2’de indüksiyon bobininin parça yüzeyinde oluşturduğu manyetik alanın yüzeyde akım indüklediği ve indüklenen bu akımların joule etkisine neden olduğu söylenmişti. Aşağıdaki şekilde çalışma parçası yüzeyinde oluşan birim hacim için joule ısı üretim oranı (W/m^3) gösterilmiştir.



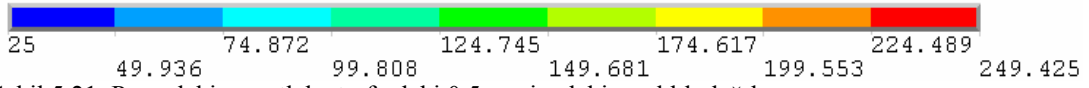
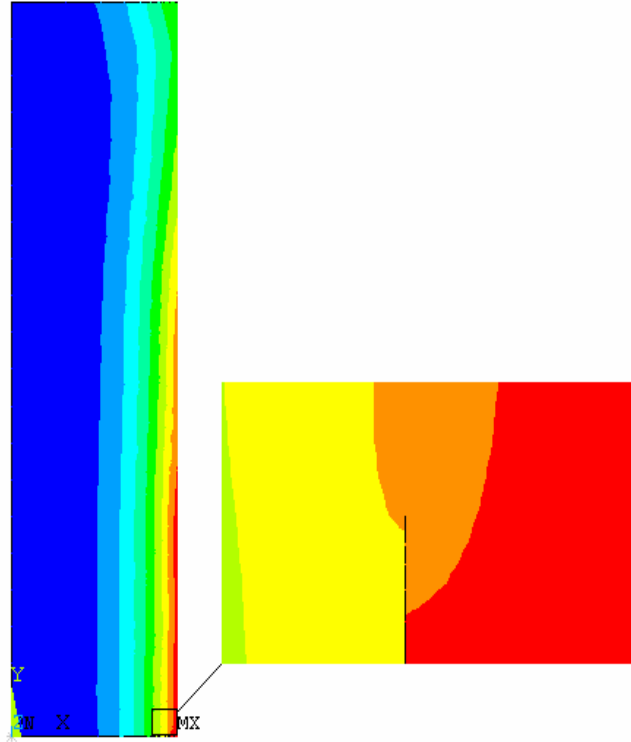
Şekil 5.19. Elektromanyetik çözüm sonucu yüzeyde oluşan ısı üretim oranları

5.6.2. Termal sonuçlar



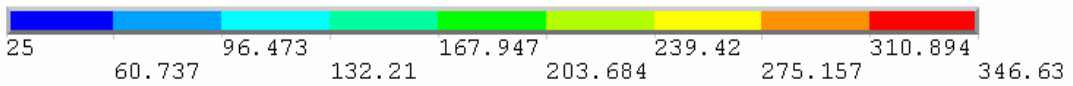
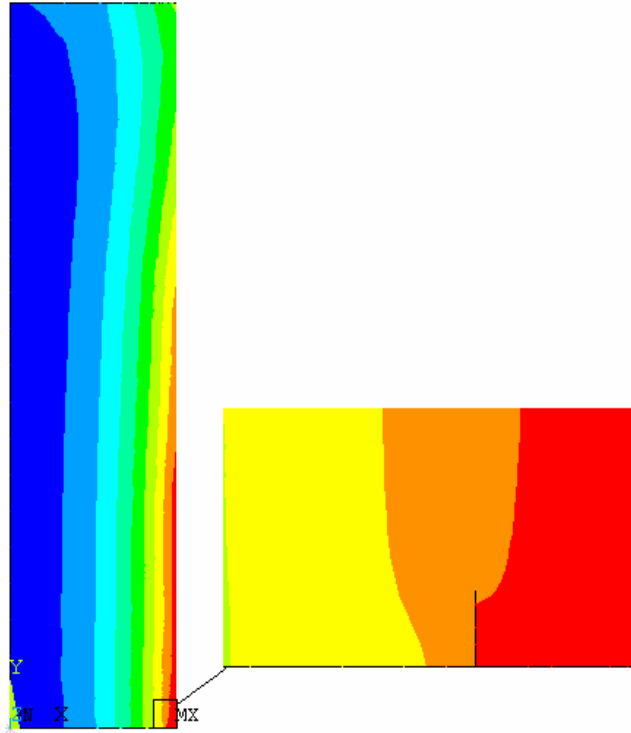
Şekil 5.20. İndüksiyonla ısıtma ile çalışma parçası ön ve arka yüzeyindeki sıcaklığın zama bağlı değişimi

NODAL SOLUTION
 TIME=.5
 TEMP (AVG)
 RSYS=0
 SMN =25
 SMX =249.425

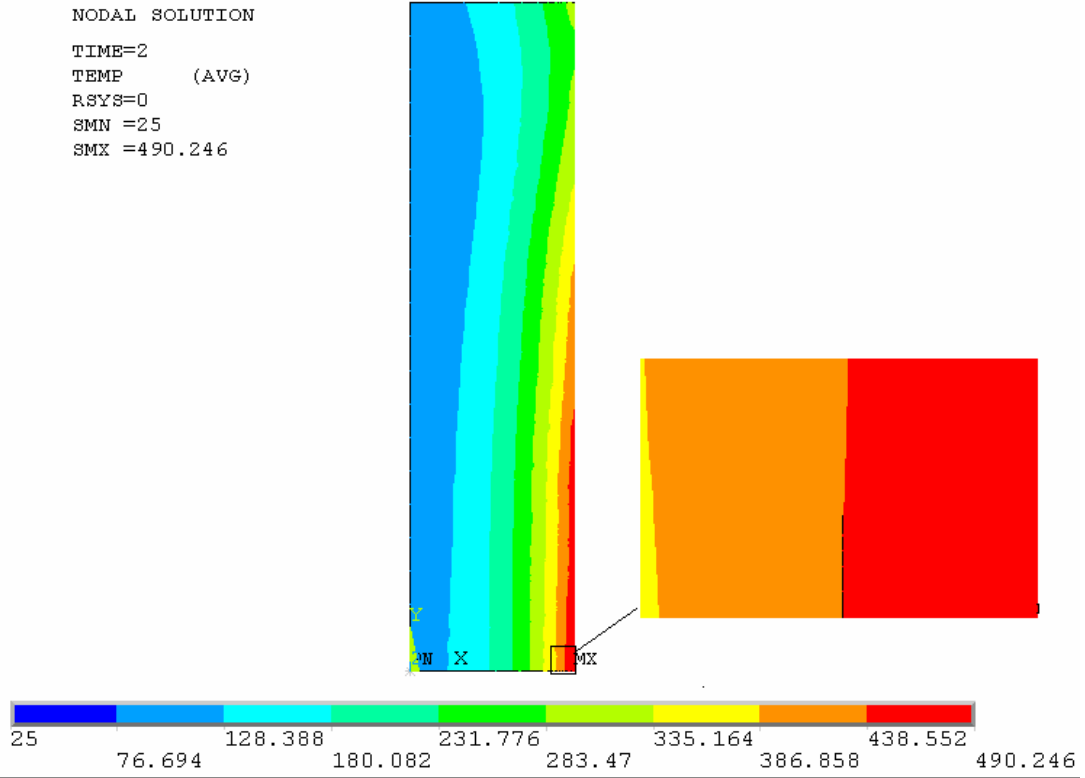


Şekil 5.21. Parçadaki ve çatlak etrafındaki 0,5. saniyedeki sıcaklık dağılımı

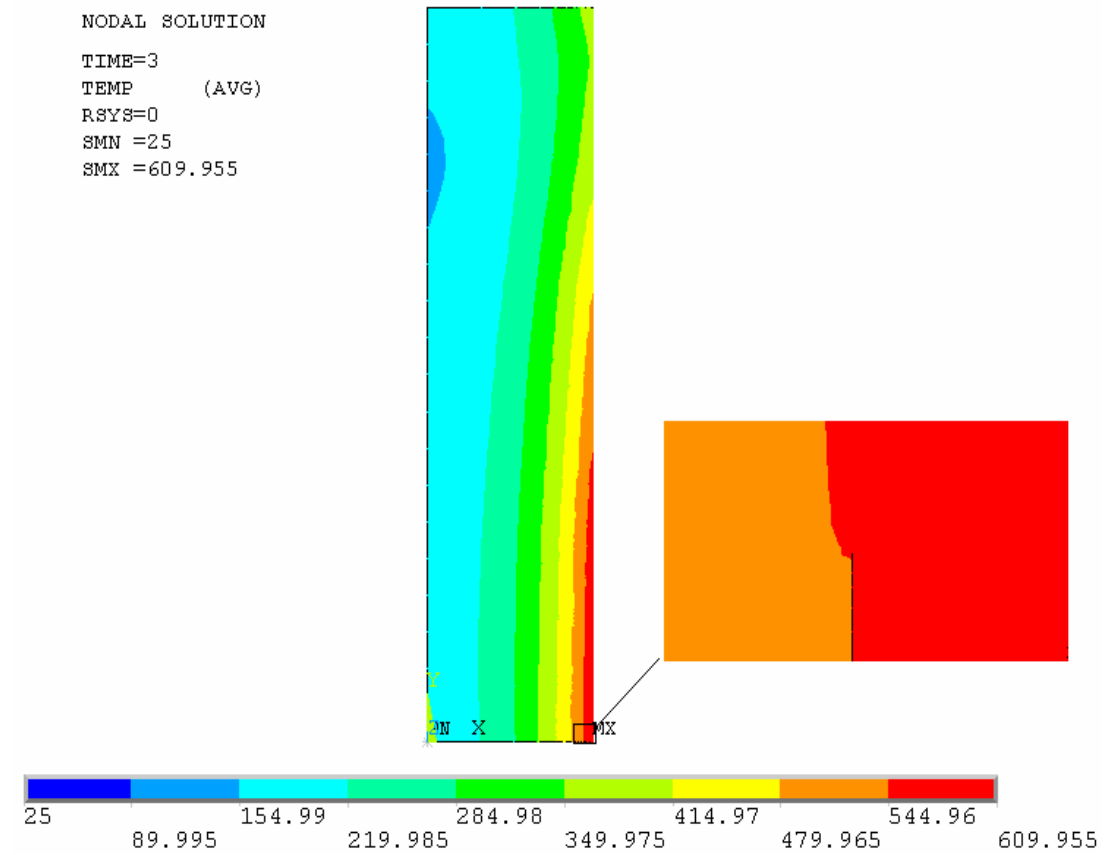
NODAL SOLUTION
 TIME=1
 TEMP (AVG)
 RSYS=0
 SMN =25
 SMX =346.63



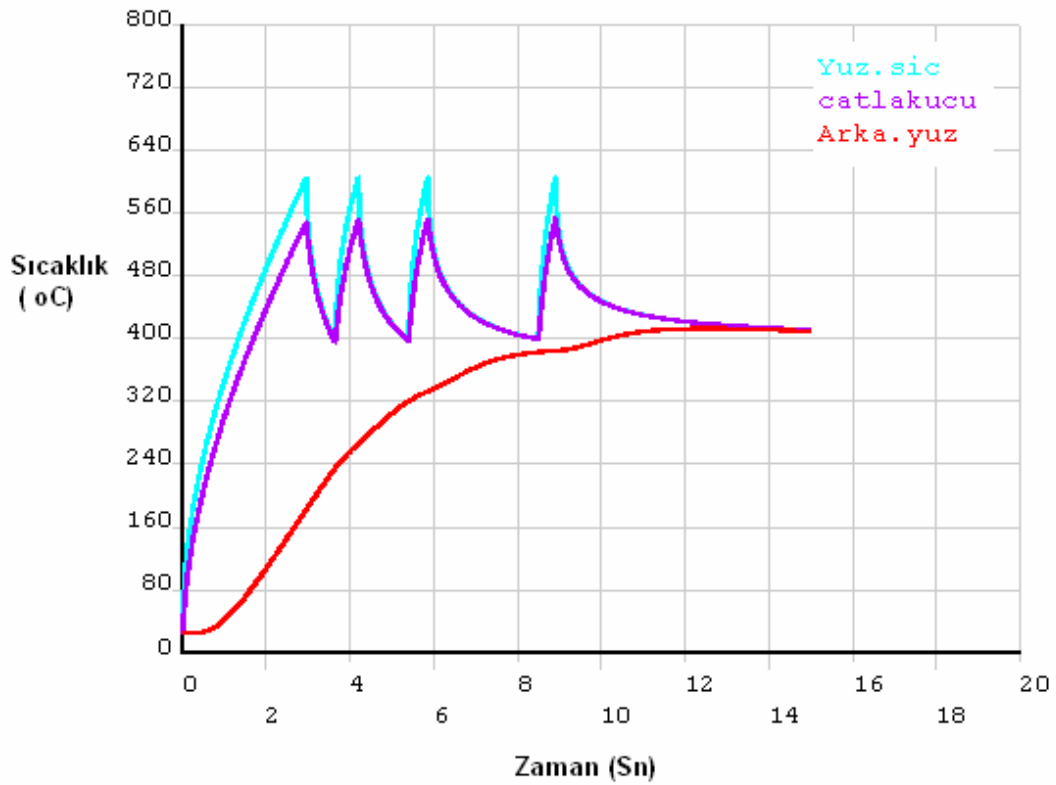
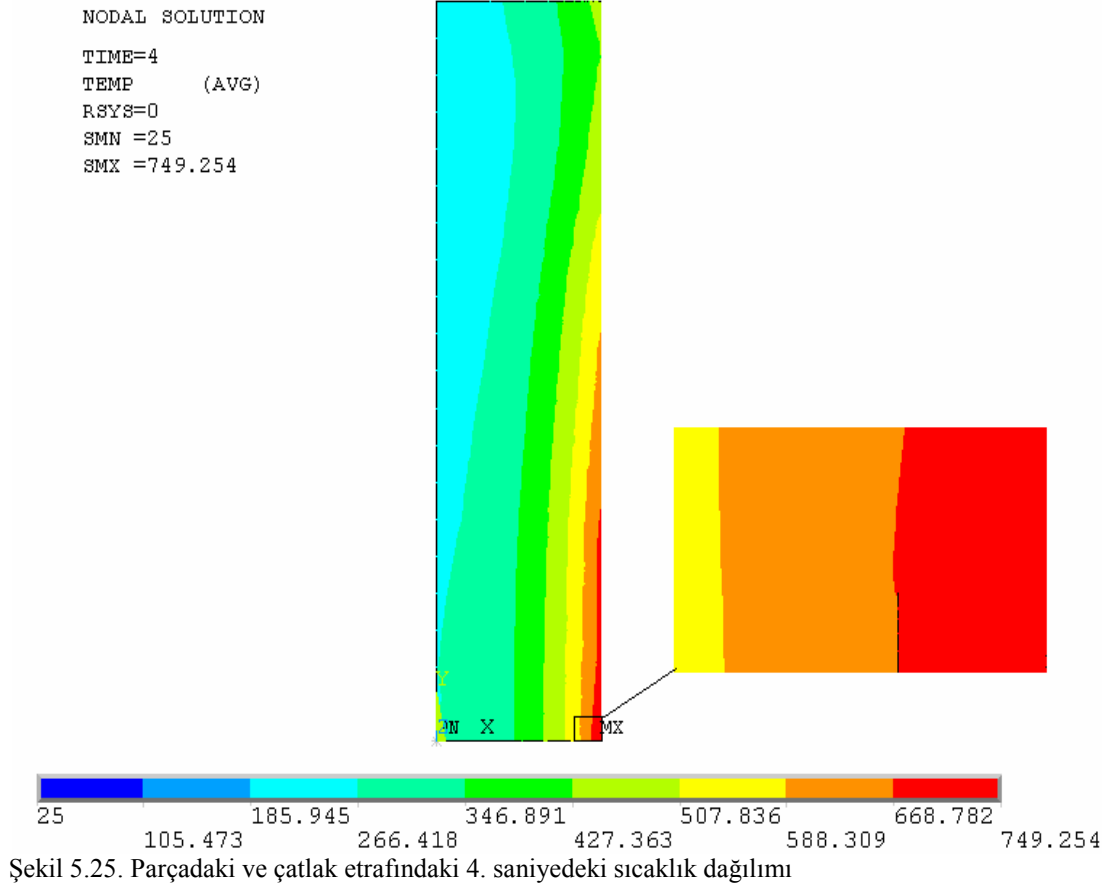
Şekil 5.22. Parçadaki ve çatlak etrafındaki 1.saniyedeki sıcaklık dağılımı



Şekil 5.23 Parçadaki ve çatlak etrafındaki 2. saniyedeki sıcaklık dağılımı.



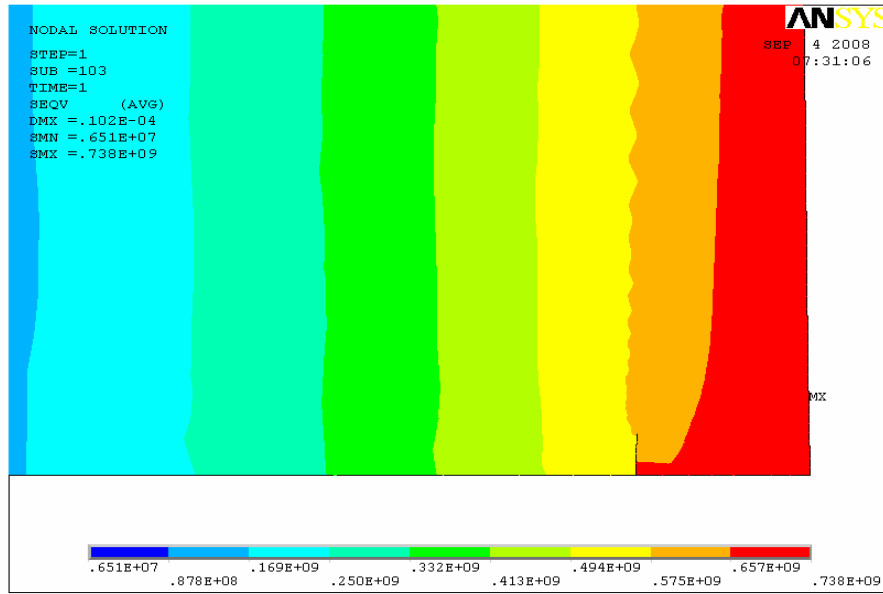
Şekil 5.24 Parçadaki ve çatlak etrafındaki 3. saniyedeki sıcaklık dağılımı



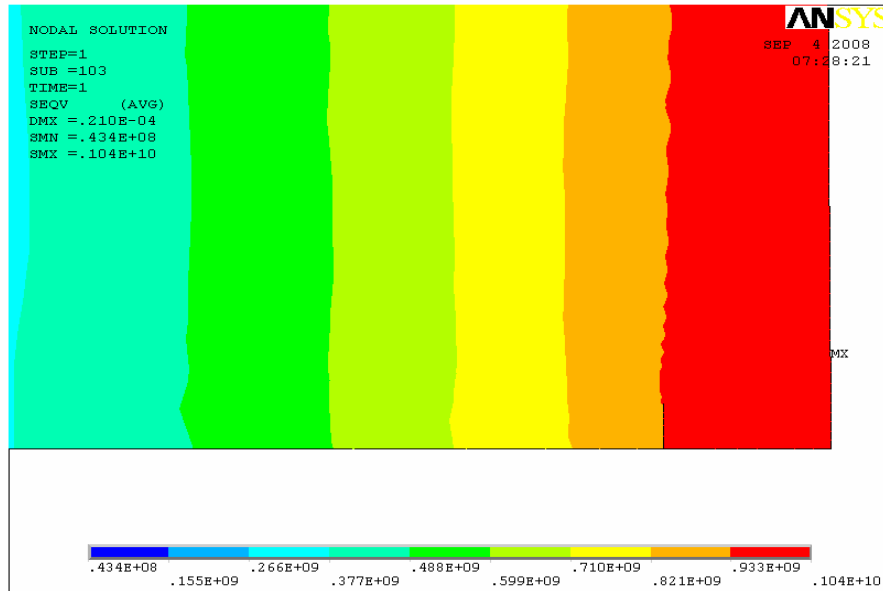
Şekil 5.26. Çalışma parçası yüzeyinin 600 °C-400 °C arasında tekrarlı ısıl yükleme

5.6.3 Yapısal sonuçlar

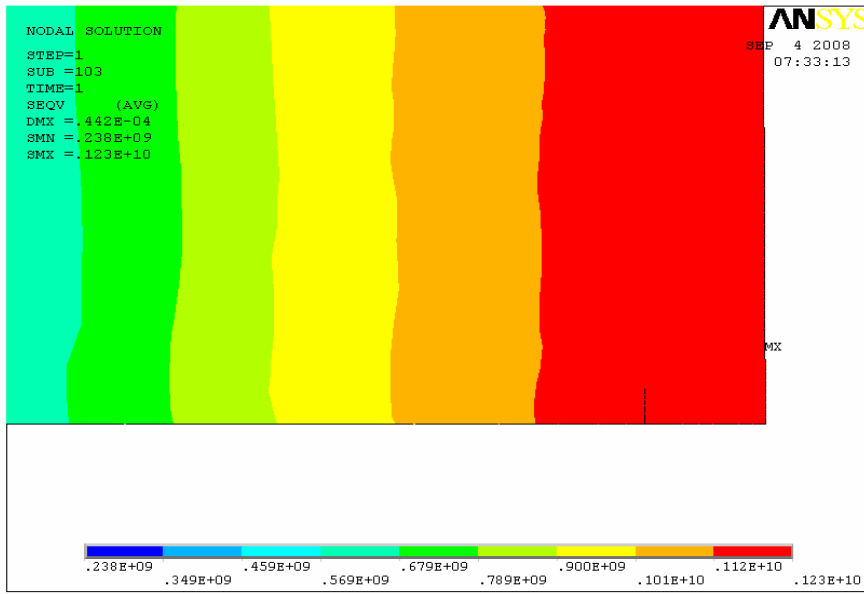
Yapısal analiz sonucunda çatlak bölgesinde oluşan von misses gerilme değerleri incelenmiştir. Sonuçlar aşağıda verilmiştir.



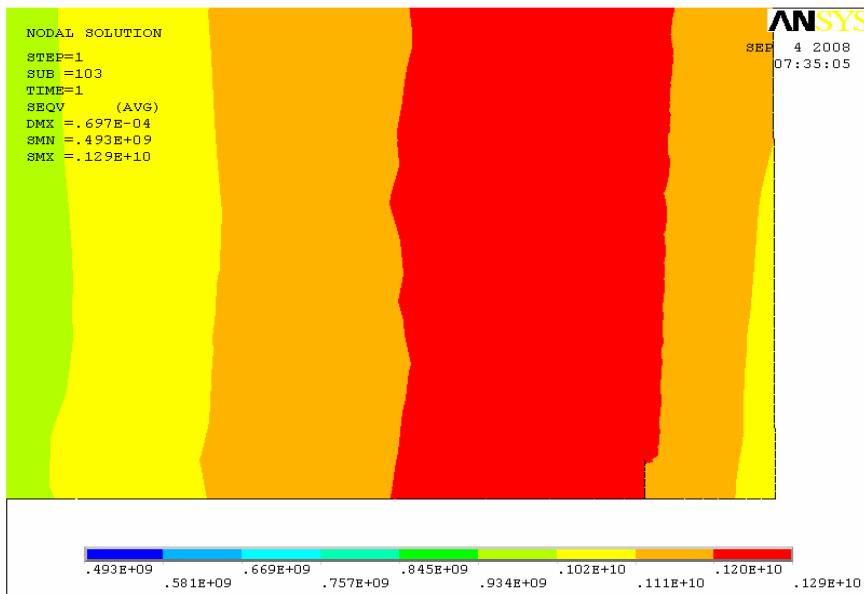
Şekil 5.27. Isıtmanın 0,5. saniyesindeki Von misses gerilme değerleri



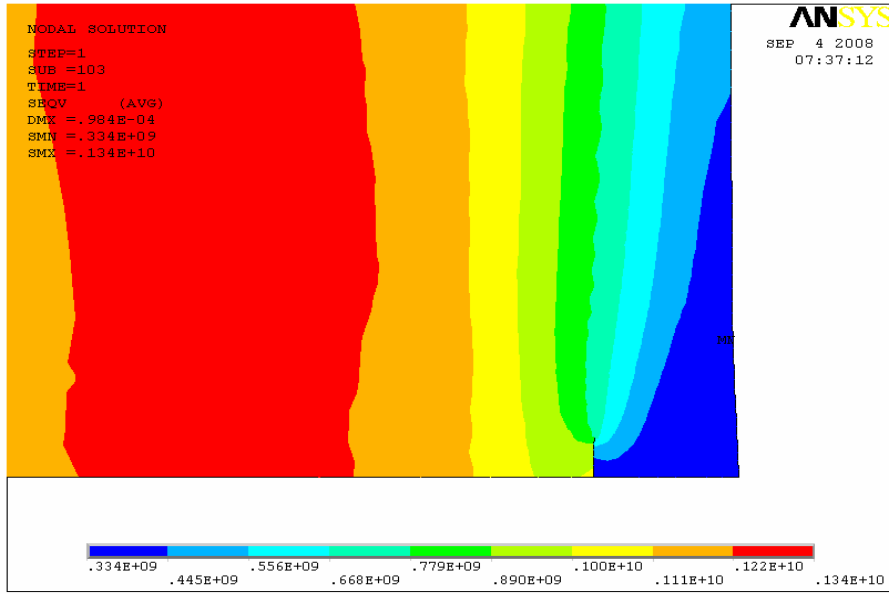
Şekil 5.28. Isıtmanın 1. saniyesindeki Von misses gerilme değerleri



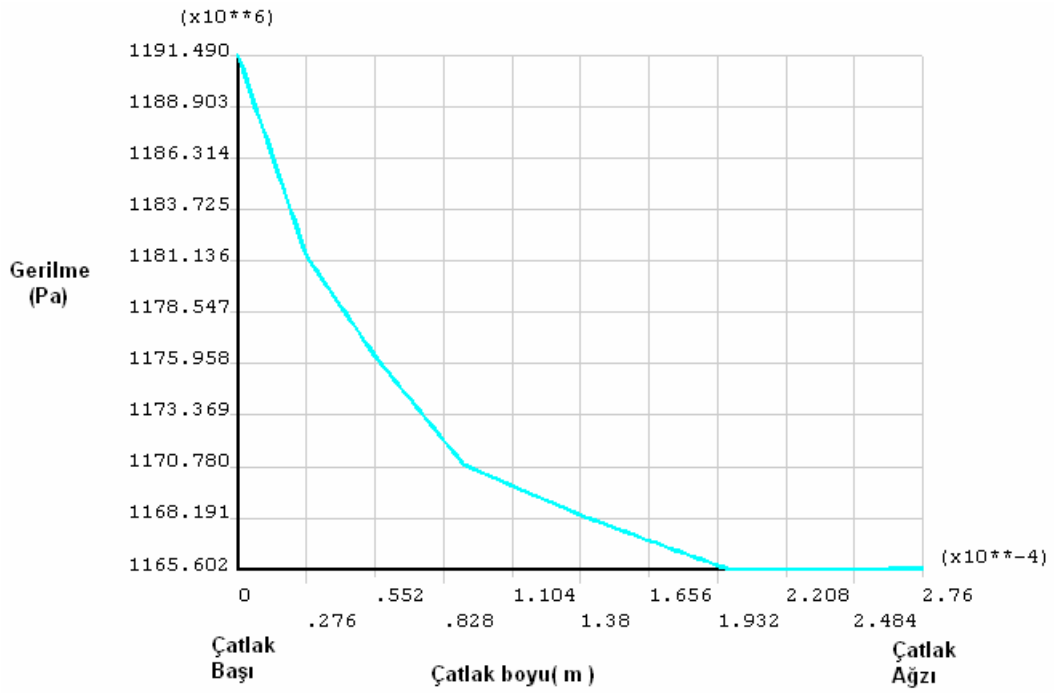
Şekil 5.29 Isıtmanın 2. saniyesindeki Von misses gerilme değerleri



Şekil 5.30. Isıtmanın 3. saniyesindeki Von misses gerilme değerleri



Şekil 5.31. Isıtmanın 4. saniyesindeki Von misses gerilme değerleri.



Şekil 5.32. Isıtmanın 2. saniyesinde çatlak boyunca von misses gerilme değerlerinin değişimi.

BÖLÜM 6. DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER

Bu tezde indüksiyonla ısıtma yöntemi ile kaplamaların ara yüzeylerindeki çatlak etrafında oluşan termal gerilmelerin bulunması hedeflenmiştir.

Yapılan analiz sonucunda, çalışma parçası yüzeyinin kısa bir sürede yüksek sıcaklıklara ulaştığı gözlenmiştir. Kaplama ara yüzeyinde bulunan çatlağın termal bariyer görevi yaparak ısı iletimini engellediği ve bu durum sonucunda, çatlak bölgesindeki sıcaklıkların parçanın diğer bölgelerine nazaran daha yüksek olduğu ve çatlağın ön ve arka yüzeyleri arasında sıcaklık farklılıklarının olduğu gözlenmiştir. Çatlağın ısıtma yönündeki yüzeyinde, diğer yüzeye nazaran sıcaklık değerleri daha yüksektir. Yüzeyler arasındaki sıcaklık farklılıklarından dolayı, çatlak boyunca farklı termal gerilmeler oluşmuştur. Gerilme değerleri çatlak uç noktasından, orta noktaya doğru düşmüştür. Bu durum çatlağı açmaya zorlamaktadır. Bu analizden, yüksek sıcaklıklara maruz kalan kaplamalı veya üzerinde çatlak bulunan parçaların termal gerilme dayanımlarının daha düşük olacağı ve daha kısa sürede deformasyona uğrayacakları sonucu çıkarılabilir.

Diğer bir analizde, aynı çalışma parçası 600-400 °C sıcaklık değerleri arasında indüksiyonla ısıtma ile termal yorulmaya tabi tutulmuştur. Isıtma esnasında, önceki analize benzer olarak çatlak bölgesindeki sıcaklıkların yüksek olduğu ve çatlağın ön ve arka yüzeyleri arasında sıcaklık farklılıklarının olduğu gözlenmiştir Soğutma esnasında da ara yüzde bulunan çatlağın ısı geçişini engellemesi bu bölgedeki soğumanın diğer bölgelere nazaran yavaş olmasına sebep olmaktadır. Bu durum, sıcaklık farklılıklarını daha da arttırmaktadır. Bu analizden, termal yorulmaya maruz kalan kaplamalı veya üzerinde çatlak bulunan parçaların yorulma dayanımlarının daha düşük olacağı ve daha kısa sürede parçanın hasara uğrayacağı sonucu çıkarılabilir.

Yapılan analizler sonucunda, indüksiyonla ısıtmanın metal malzemeler için hızlı ve kontrollü bir ısıtma aracı olduğu görülmüştür. Hızlı ısıtma kabiliyetinden dolayı, termal şoklara maruz kalan ve yüksek sıcaklıklarda çalışan makina parçalarının deneysel uygulamaları için indüksiyonla ısıtmanın elverişli olduğunu görülmektedir. Kontrollü ısıtma kabiliyetinden dolayı ise, belli sıcaklık aralıklarında çalışan makine parçalarının termal yorulma deneyleri için indüksiyonla ısıtma oldukça elverişlidir.

KAYNAKLAR

- [1] JUSTIN, F., Induction Heat Treated High Stregth Suspension Spring steels, Y.Lisans, Toronto Üniversitesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü, 2006, sf. 24.
- [2] <http://www.ceia-power.com/applications.asp?app=Hardening> ,01.09.2008
- [3] <http://www.ceia-power.com/applications.asp?app=Heating> , 01.09.2008
- [4] <http://www.ceia-power.com/applications.asp?app=Brazing>, 01.09.2008
- [5] <http://www.ceia-power.com/applications.asp?app=Soldering>, 01.09.2008
- [6] http://www.ameritherm.com/PDFs/heating_9.pdf, 01.09.2008
- [7] <http://www.ameritherm.com/PDFs/autoheat.pdf>, 01.09.2008
- [8] OKMAN, O., Free Forming of Locally Induction Heated Specimens, Yüksek Lisans, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Mart 2005, sf. 17-25
- [9] RUDNEV, V., Handbook of induction heating. Manufacturing engineering and materials processing; Marcel Dekker, p 61, New York, 2003.
- [10] ERIKSON, C.J., Handbook of electrical heating for industry, Institute of Electrical and Electronics Engineers, p 629, New York, 1995.
- [11] CHENG, D.K., Fundamentals of engineering electromagnetics, xv, Reading Mass.: Addison-Wesley Pub. Co., p 488,. 1993.
- [12] ASKELAND, D.R., The sciense and engineering of materials,university of Missouri,Rolle, pp 560-570.
- [13] KRAUS, J.D., Electromagnetics. 4th ed. McGraw-Hill series in electrical engineering. Electromagnetics. 1992, New York: McGraw-Hill. xix, 847 p.
- [14] NEELAKANTA, P., Hendbook of Elektromagnetic Materials,CRC Pres, Boca Raton, 1995.
- [15] DESMIER, G., RUDNEV, V., COOK, R., Induction Hardening and Tempering of Critical Powertrain Compnents,Global Powertrain Congress, Michigan, USA, 2002.

- [16] ZINN S., SEMIATIN S.L., Coil design and fabrication: basic design and modifications, Heat Treating , pp 32-33, June 1988.
- [17] F.W.Curtis, High Frequency Induction Heating, McGraw-Hill, New York, 1950
- [18] BEWLEY, L.V., Flux Linkages and Elektromagnetic Induction, Dover, New York, 1964.
- [19] CHABAY, R.W., SHERWOOD, B.A., Electric and Magnetic Interactions, Wiley, New York, 1995.
- [20] HAMMOND. P., Elektromagnetism for Engineers, Pergamon, New York, 1978.
- [21] NEMKOV, V. , POLEVODOV B., GUREVICH, S., Mathematical Modelling of High Frequency Heating Equipment, 2.nd ed., St. Petersburg, Russia, 1991.
- [22] RUDNEV V., SCHWEIGERT, K., Designing induction equipment for modern forge shops, Forging, Winter, pp 56-58, 1994.
- [23] NEMKOV, V., DEMIDOVICH, V., Theory of Induction Heating, Energoatomizdat, St. Petersburg, Russia, 1988.
- [24] RUDNEV, V., Handbook of induction heating, Manufacturing engineering and materials processing, Marcel Dekker, pp 150-154 166-172, New York, 2003.
- [25] GRIFFITHS, D.J., Elektromagnetik Teori, Arte Güven Yayınevi, sf 13-18, 1996.
- [26] NART, E., ŞAHİN, A., Modelling of Thermal Stresses around a Barrier in an Infinite Strip, 4. International Advanced Technologies Symposium, Konya, 28-30 September 2005.
- [27] POPOV, E.P., Mukavemet Katı Cisimlerin Mekanikine Giriş, Çağlayan Kitabevi, sf 2-6-7, İstanbul, 1990.
- [28] ONARAN K., Malzeme Bilimi, Bilim Teknik Yayınevi, sf 175-177-188, Eskişehir, 2003.
- [29] MERGEN, R., HSS Kalemindeki Talaş Açısının Kesmeye Etkisinin Sonlu Elemanlar Metoduyla Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, 2005.
- [30] ÖZDEMİR, A., Seramik Malzemelerin Kırılma Tokluğu Değerlerinin Üç Boyutlu Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Teorik Olarak Belirlenmesi, Y. Lisans, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, sf 33-34-35, Kasım 2006.

- [31] CHARĪ, M.V.K., Finite element analysis of nonlinear magnetic fields in electric machines, Ph.D. Dissertation, McGill University, Montreal-Canada, 1970.
- [32] CHARĪ, M.V.K., SILVESTER, P.P., Finite element analysis of magnetically saturated DC machines, IEEE Trans, pp 90:2362, 1971.
- [33] LORD, W., Development of a finite element model for eddy current NDT phenomena, Electrical Engineering Department, Colarado State University, 1983.
- [34] LORD, W., Appilication of numerical field modeling to electromagnetik methods of non-destructive testing, IEEE Trans.,pp 19(6): 2437-2442, 1983.
- [35] HUEBNER, K.H., THORNTON, A., The Finite Element Method for Engineers, John Wiley and Sons, p 217,New York, 1982.
- [36] 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.
- [37] ANSYS 10., Help

ÖZGEÇMİŞ

Şenol Sert, 1979 yılında Düzce' de doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Düzce'de tamamladı. 1996 yılında Düzce İmam-Hatip Lisesinden mezun oldu. 1997 yılında başladığı Kocaeli Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Makine Eğitimi Bölümünü 2002 yılında bitirdi. 2004 yılında Çanakkale ili Yenice ilçesi Mesleki ve Teknik Eğitim Merkezinde motor öğretmeni olarak göreve başladı. Şu anda Hendek A.K.V A.T.L, A.M.L, E.M.L ve Mesleki Eğitim Merkezinde Motorlu Araçlar Teknolojisi alanı öğretmeni olarak görev yapmaktadır.