



T.C.
MALTEPE ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

**İNDÜKSİYON İLE KOMPOZİT MALZEMELERİN
ISITILMALARININ İNCELENMESİ**

Ayhan ALINCA

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı

Yrd. Doç. Dr. Ali AKMAN

İSTANBUL - 2012

T.C.
MALTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

İNDÜKSİYON İLE KOMPOZİT MALZEMELERİN
ISITILMALARININ İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ayhan ALINCA

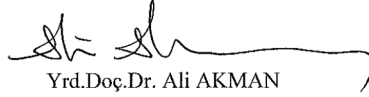
TEZ DANIŞMANI

Yrd. Doç. Dr. Ali AKMAN

İSTANBUL-2012

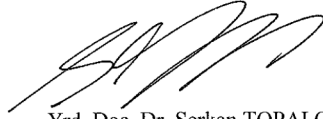
Bu tez çalışması, Maltepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 30/12/2011 tarih ve 2011/20 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından **Elektronik Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ



Yrd.Doç.Dr. Ali AKMAN

Üye(Danışman)



Yrd. Doç. Dr. Serkan TOPALOĞLU

Üye



Yrd. Doç. Dr. Ebru MENŞUR ALKOY

Üye

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi, İndüksiyon ile Kompozit Malzemelerin Isıtılmalarının İncelenmesi, T.C. Maltepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı.

Kompozit malzemeler ve indüksiyon ile ısıtma her geçen gün önemi artan mühendislik konularıdır. Kompozit malzemelerin üretimi aşamasında ve üretimi sonrasında ısıtmaya ihtiyaç vardır. Isıtma için günümüzde çeşitli ısıtma kaynakları kullanılmaktadır. İndüksiyon ile ısıtma birçok avantajından dolayı endüstride her geçen gün yaygınlaşmaktadır. Bu iki konuda da teknolojik gelişmeler sürekli devam etmektedir.

Bu tez toplam altı bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde teze giriş yapılarak problem tanımlanmış ve konuyla ilgili literatür taraması sunulmuştur. İkinci bölümde ise kompozit malzemelerin tanımı, çeşitleri ve üretim aşamaları gibi konular incelenmiştir. Üçüncü bölümde indüksiyon fırınlarının yapısı, çalışma prensipleri ve özelliklerinden bahsedilmiştir. Dördüncü bölümde ise indüksiyon fırınlarında ısıtmayı sağlayan eddy akım problemi ve elektromanyetik alanın matematiksel modeli incelenmiştir. Beşinci bölüm de Al-Epoxy kompozit malzeme indüksiyon ısıtma sistemi ile modellenmiştir. Modelleme de alüminyum oranı değiştirilerek farklı frekanslarda simülasyon yapılmıştır.

Bu tez 2012 yılında tamamlanmıştır ve 57 sayfadan oluşmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Kompozit Malzemeler, İndüksiyon Fırınları, İndüksiyon ile Isıtma.

ABSTRACT

Master Thesis, Investigation of Induction Heating of Composite Materials, T.C. Maltepe University, Graduate School of Natural And Applied Sciences, Department of Electronical Engineering.

Composite materials and induction heating are subjects of engineering and the importance of them has been increasing day by day. The heating is necessary during the production step and after the production. For heating, different heating sources have been used. Induction furnaces become common in industry day by day because of their advantages. Technological development on two subject goes on continuously.

This thesis consist of six sections. In the first section, the introduction was given by describing the problem and the literature searching was presented. In the second section, assortments, description and production step of composite materials have been investigated. In the third section, working principle, construction and other properties of induction furnaces have been discussed. In the fourth section, eddy current problem that provides heating in induction furnaces and mathematical model of electromagnetic field have been analysed. In the fifth section, Al-Epoxy composite material is modelled with induction heating system. In modelling, the ratio of aluminum is changed and also the frequency is changed.

This thesis written in 2012 and consists of 57 pages.

Keywords: Composite Materials, Induction Furnaces, Heating with Induction

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezini belirlemede yardımcı olan, tezin her aşamasında bilgi birikimini ve deneyimini benimle paylaşan danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Ali AKMAN' a, tezin her aşamasında bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan eşim Sayın Elektronik Yüksek Mühendisi Yıldız ALINCA' ya, maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen çok değerli aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	v
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER	x
KISALTMALAR	xii
ŞEKİLLER	xiii
TABLolar	xv
1. GİRİŞ	1
1.1. Literatür Tarama	2
2. KOMPOZİT MALZEMELER	4
2.1. Kompozit Malzemeleri Avantajları ve Dezavantajları	5
2.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	7
2.2.1. Elyaf takviyeli kompozit malzemeler	7
2.2.2. Parçacık veya partikül takviyeli kompozit malzemeler	8
2.2.3. Tabakalı kompozitler	9
2.3. Kompozit Malzemelerde Kullanılan Takviye Elemanları	10
2.4. Kompozit Malzemelerde Kullanılan Matris Malzemeler	11
2.5. Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri	11
2.5.1. Katı faz üretim yöntemleri	12
2.5.1.1. Toz metalürjisi teknikleri	12
2.5.1.2. Difüzyon bağı yöntemi	12
2.5.2. Sıvı faz üretim yöntemleri	14
2.5.2.1. Sıvı metal emdirilmesi	14
2.5.2.2. Sıvı metal karıştırılması	14
2.5.2.3. Sıkıştırılmalı veya sıvı dövme döküm tekniği	15
2.5.2.4. Yarı katı karıştırma	16
2.5.2.5. Plazma püskürtme yöntemi	16

2.5.2.6. Sıcak presleme	17
2.6. Kompozit Malzemelerin Elektriksel İletkenliği	19
3. İNDÜKSİYON FIRINLARI	21
3.1. İndüksiyonla Isıtmanın Temel Prensipleri	21
3.2. İndüksiyonla Isıtmada Nüfuz Derinliği	23
3.3. İndüksiyon Fırınlarının Temel Yapısı	24
3.4. İndüksiyon Fırınlarında Rezonans	26
3.5. İndüksiyon Bobinleri	28
3.6. Bobin Tasarımı	31
4. İNDÜKSİYON İLE ISITMANIN MATEMATİKSEL TEMELLERİ	34
4.1. Eddy Akım Problemi	34
4.2. Maxwell Denklemleri	35
4.3. Bünge Denklemleri	36
4.4. Çeşitli Manyetik Vektör Potansiyel Formülasyonları	38
4.4.1. A,V-A Formülasyonu	38
4.4.2. H Formülasyonu	39
4.4.3. T-Ø Formülasyonu	39
5. ALÜMİNYUM-EPOXY KOMPOZİT MALZEMELERİN İNDÜKSİYON ISITMA İLE 3D MODELLENMESİ	41
5.1. Al-Epoxy Kompozit Malzemeler	41
5.2. Al-Epoxy Kompozit Malzemelerin Elektriksel Özellikleri	43
5.3. Al-Epoxy Kompozit Malzemelerin İndüksiyon Isıtma ile Modellenmesi	45
5.4. Modelleme	45
5.5. Modelleme Sonuçları	46
6. SONUÇLAR	52
KAYNAKLAR	53
ÖZGEÇMİŞ	57

SİMGELER

\vec{A}	Manyetik vektör potansiyel
A	Bobinin alanı (m ²)
\vec{B}	Manyetik akı yoğunluğu (Wb/m ²)
C	Kondansatör kapasitesi (F)
\vec{D}	Elektrik alan deplasman vektörü (C/m ²)
\vec{E}	Elektrik alan şiddeti (V/m)
E	Malzeme üzerinde indüklenen elektro motor kuvvet (V)
ϵ	Dielektrik geçirgenlik (F/m)
ϵ^*	Kompozit malzemenin dielektrik sabiti
ϵ_2	Matris malzemenin dielektrik sabiti
d_0	Nüfuz derinliği (m)
F	Frekans (Hz)
f_0	Rezonans frekansı (Hz)
\vec{H}	Manyetik alan şiddeti (A/m)
I	Malzeme üzerinde indüklenen akım (A)
\vec{J}	Akım yoğunluğu (A/m ²)
\vec{J}_s	Kaynak akım yoğunluğu (A/m ²)
K	Tüm çalışma bölgesi
K_1	İletken malzeme bölgesi
K_2	Dielektrik bölge
L	Bobin indüktansı (H)
L	Bobinin uzunluğu (m)
N	Bobinin tur sayısı

P	Malzeme üzerinde indüklenen güç (W)
R	Malzemenin direnci (Ω)
V	Elektrik skaler potansiyel (V)
V_1	Takviye malzemenin hacmi
V_2	Matris malzemenin hacmi
V_m	Matris malzemenin oranı
V_t	Matris malzemenin oranı
\vec{T}	Elektrik vektör potansiyel
\emptyset	Skaler manyetik potansiyel
$\vec{\nabla}$	Nabla operatörü
Γ_B	Çalışma bölgesini uzaydan ayıran arayüz
Γ_H	Çalışma bölgesini uzaydan ayıran arayüz
Γ_{12}	İletken bölge ile dielektrik bölge arasındaki arayüz
P	Özgül direnç (Ωm)
R	Bobinin yarıçapı (m)
μ	Manyetik geçirgenlik (H/m)
μ_r	Bağıl manyetik geçirgenlik
σ_k	Kompozit malzemenin elektrik iletkenliği (S/m)
σ_m	Matris malzemenin elektrik iletkenliği (S/m)
σ_t	Takviye malzemenin elektrik iletkenliği (S/m)
P	Hacimsel yük yoğunluğu (C/cm^3)

KISALTMALAR

Kısaltma	İngilizcesi	Türkçesi
MMK	Metal Matrix Composite	Metal Matrisli Komposit
Al	Aluminum	Alüminyum
Al-SiC	Aluminum Silicon Carbide	Alüminyum Silisyum Karbür
Al ₂ O ₃	Aluminum Oxide	Alüminyum Oksit
Si ₃ N ₄	Silicon Nitride	Silisyum Nitrür
TiC	Titanium Carbide	Titanyum Karbür
AC	Alternative Current	Alternatif Akım
DC	Direct Current	Doğru Akım
EM	Electromagnetic	Elektromanyetik
İB	Induction Coil	İndüksiyon Bobini
IGBT	İsolated Gate Bipolar Transistör	

ŞEKİLLER

Şekil 2.1.	Mühendislik malzemelerinin sınıflandırılması	4
Şekil 2.2.	Değişik şekilli elyaf takviyeli kompozitler	8
Şekil 2.3.	Parçacık takviyeli kompozit malzemelerin mikroskopik görüntüsü	9
Şekil 2.4.	Tabakalı kompozit malzeme yapısı	10
Şekil 2.5.	Toz metalurjisi yönteminin temel aşamaları	12
Şekil 2.6.	Difüzyon bağı ve vakumda presleme ile kompozit üretimi akış şeması	13
Şekil 2.7.	MMK malzeme üretim fırını, karıştırıcı ve kontrol ünitesinin şematik görünüşü	15
Şekil 2.8.	Sıkıştırılmalı sıvı metal döküm tekniği	16
Şekil 2.9.	Osprey yöntemi prensip şeması	17
Şekil 2.10.	Folyo matriks ile flementlerin görüntüsü	18
Şekil 3.1.	İndüksiyon bobininde iletken malzeme üzerinde gerilim indüklenmesi	22
Şekil 3.2.	İndüksiyon fırını genel görünüş	24
Şekil 3.3.	İndüksiyon fırınları temel yapısı	25
Şekil 3.4.	Rezonans devresi	26
Şekil 3.5.	Endüstride kullanılan örnek bir indüksiyon bobini	29
Şekil 3.6.	Endüstride kullanılan çeşitli bobin şekilleri	30
Şekil 3.7.	Bölgesel sertleştirmeler için çeşitli bobin şekilleri	30
Şekil 3.8.	Çeşitli bobin şekilleri	31
Şekil 3.9.	Çeşitli bobin şekilleri	32

Şekil 4.1.	Tipik bir eddy akım problemi	34
Şekil 5.1.	Al-Epoxy kompozit malzemenin indüksiyon bobini ile gösterimi	45
Şekil 5.2.	Modelleme sonucunda elde edilen manyetik alan şiddeti 3D görüntüsü	46
Şekil 5.3.	10 kHz Frekansta %10-20-30-40-050 alüminyum oranlarında Al-Epoxy kompozit malzeme üzerinde Y eksenî yönünde indüklenen eddy akımları grafiği	47
Şekil 5.4.	100 kHz Frekansta %10-20-30-40-50 alüminyum oranlarında Al-Epoxy kompozit malzeme üzerinde Y eksenî yönünde indüklenen eddy akımları grafiği	47
Şekil 5.5.	%20 Alüminyum oranında 10 kHz ve 100 kHz frekanslarda Al-Epoxy kompozit malzeme üzerinde Y eksenî yönünde indüklenen eddy akımlarının karşılaştırılması	48
Şekil 5.6.	10 kHz Frekansta %10-20-30-40-50 alüminyum oranlarında Al-Epoxy kompozit malzeme üzerinde Y eksenî yönünde oluşan manyetik alan şiddeti grafiği	49
Şekil 5.7.	100 kHz Frekansta %10-20-30-40-50 alüminyum oranlarında Al-Epoxy kompozit malzeme üzerinde Y eksenî yönünde oluşan manyetik alan şiddeti grafiği	49
Şekil 5.8.	%20 Alüminyum oranında 10 kHz – 100 kHz ve 1 MHz frekanslarda Al-Epoxy kompozit malzeme üzerinde Y eksenî yönünde oluşan manyetik alan şiddeti grafiği	50

TABLULAR

Tablo 2.1.	Kompozit ve klasik malzemelerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması	6
Tablo 3.1.	Seri ve paralel devrelerin karşılaştırılması	27
Tablo 5.1.	10kHz 30 °C için %10-20-30-40-50 Al karışım oranlarına göre Al-Epoxy kompozit malzemenin elektriksel özellikleri	43
Tablo 5.2.	100kHz 30 °C için %10-20-30-40-50 Al karışım oranlarına göre Al-Epoxy kompozit malzemenin elektriksel özellikleri	44
Tablo 5.3.	1 MHz 30 °C için %20 Al karışım oranına göre Al-Epoxy kompozit malzemenin elektriksel özellikleri	44

1. GİRİŞ

İndüksiyon fırınları elektrik enerjisini manyetik alanlar yardımıyla ısı enerjisine çeviren ısıtma aracıdır. Günümüzde özellikle metallerin üretiminde ve üretim sonrası dövme, haddeleme, tavlama, sertleştirme gibi işlemlerde endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. İndüksiyon fırınlarında manyetik alanın oluştuğu kısım indüksiyon bobinidir. İndüksiyon bobininde oluşan manyetik alan ısıtılacak malzeme üzerinde eddy akımlarını indükler ve malzeme, iç direncinden dolayı oluşan kayıplarla ısınır.

Kompozit malzemeler ve indüksiyon fırınları önemi her geçen gün artan mühendislik konularıdır. Kompozit malzeme en az iki farklı maddenin üstün özelliklerinden yararlanmak amacıyla yeni bir malzeme oluşturulmasıdır. Klasik mühendislik malzemelerine göre bir çok avantajları vardır. Bir çok avantajlarının olmasına karşılık bu malzemelerin üretimi zor ve pahalıdır. Bu malzemelerin günümüzde otomotiv, inşaat, uzay, havacılık, elektrik, elektronik gibi sanayi dallarında kullanımı hızla artmaktadır. Kompozit malzemelerin bir çok türünün üretiminde ve üretim sonrası haddeleme, dövme gibi işlemlerde ısıtmaya ihtiyaç vardır. Günümüzde bu ısıtma işlemi rezistanslı fırın, tuğlalı fırın gibi çeşitli ısıtma kaynaklarıyla sağlanmaktadır. Kompozit malzemelerin üretiminde ve üretim sonrası ısıtma işlemlerinde indüksiyon fırını ile ısıtma çalışmaları devam eden mühendislik konularıdır.

Bu tezin amacı, kompozit malzemelerin indüksiyon fırınları ile ısıtıldığında ne gibi sonuçların ortaya çıkabileceğini araştırmaktır.

1.1. Literatür Taraması

Dikici B. ve arkadaşları çalışmalarında; Sıcak presleme yöntemi ile MMK üretmişlerdir. MMK üretiminde sıkça kullanılan iki farklı kuvvetlendirici partikülün (SiC ve TiC), yüksek oranlarda (%40) 2xxxx serisi alüminyum matris alaşımına takviye edilerek, kompozitin elektrokimyasal davranışı üzerinde oluşan değişimlerini araştırmışlardır[1].

Şahin V. çalışmasında; Toz metalurjisi üretim yöntemi kullanılarak, değişik oranlarda (%5, %10, %15) Al₂O₃ içeren alüminyum matrisli toz-metal kompozit malzeme üretimi ve mekanik özellikleri incelenmiştir[2].

İnem B. ve arkadaşları çalışmalarında; Döküm yoluyla SiC takviyeli kompozitlerin gelişim yöntemini incelemiştir[3].

Günay V. çalışmasında; Si₃N₄ Seramiklerinin sinterleme yöntemiyle elde edilmesini incelemiştir[4].

Bensaid ve arkadaşları çalışmalarında; Anisotropik kompozit malzeme, induksiyon yöntemiyle ısıtılmış ve üç boyutlu simülasyonu Samir Bensaid ve arkadaşları tarafından yapılmıştır[5]. Simülasyon ve deney sonuçlarından elde edilen verileri karşılaştırmışlar ve kompozit malzemenin anisotropik karakteristiğinin induksiyon ısıtma üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğunu göstermişlerdir. Aynı zamanda, çok tabakalı anisotropik kompozit malzemelerin elektromagnetik ve termal davranışını incelemiştir[6].

Trichet D. ve arkadaşları çalışmalarında; kompozit malzemelerin induksiyon yöntemiyle ısıtılması yöntemini araştırmışlardır[7].

Rudolf R. ve arkadaşları çalışmalarında; Karbon fiber katkılı termoplastiklerin induksiyon ile ısıtılması yöntemini incelemiştir[8].

Miller E. ve arkadaşları çalışmalarında; Grafit fiberli ve polimer matrisli kompozit malzemelerin induksiyon ile ısıtılması konusunu araştırmışlardır[9].

Sturman C.P. çalışmasında; Elektriksel olarak iletken fiber içeren polimer matris kompoziti ısıtmak için induksiyon ısıtma yöntemini kullanmıştır. Bu yöntemde, helisel induksiyon bobini kullanmıştır[10]. Aynı zamanda Sturman C.P. ve arkadaşları kalıp pres içinde polimer matrisli kompoziti induksiyon yöntemi ile

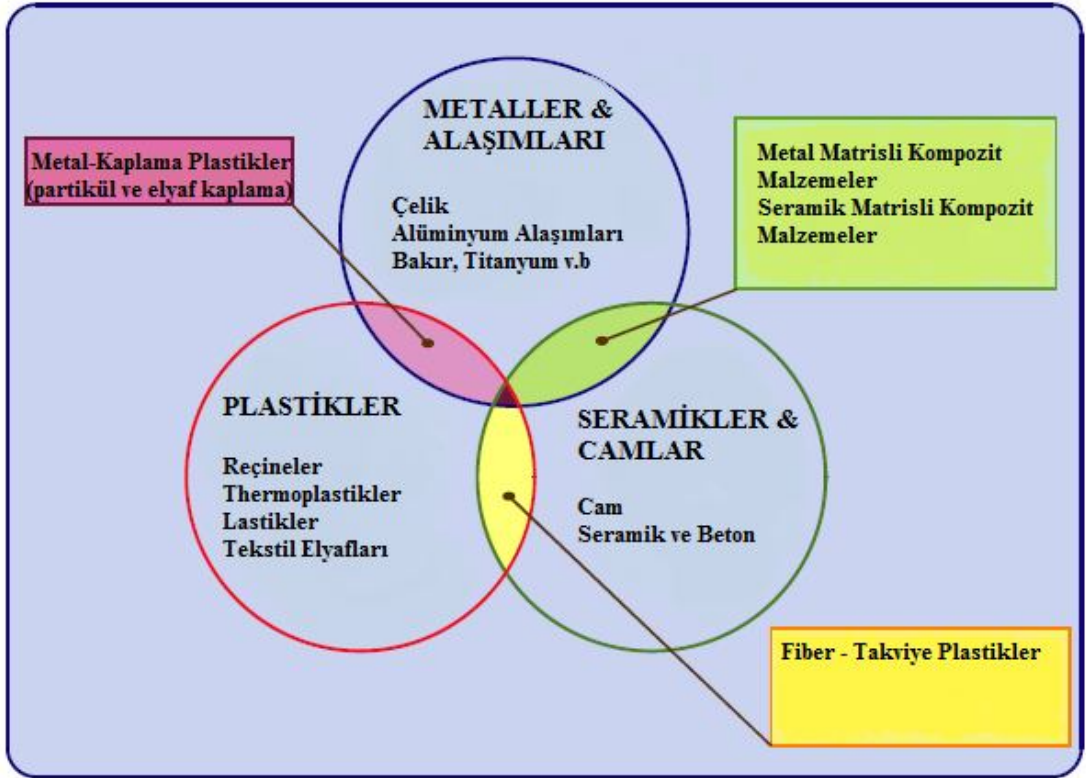
ısıtmaya çalışmışlardır. Kalıp içinde birinci ve ikinci olarak adlandırılan iki indüksiyon bobini yer almaktadır. Alternatif olarak, iki kalıp nüvenin etrafına tek bir helisel bobin koyarak deneme yapılabileceğini çalışmalarında belirtmişlerdir[11].

Viwes Ch. ve arkadaşları çalışmalarında; Helisel indüksiyon karıştırıcı kullanarak, metal matrisli kompozit üretme konusu üzerinde çalışma yapmışlardır. Sabit mıknatısın dönme prensibine bağlı olarak yeni bir elektromanyetik alan çalışması geliştirmişlerdir. Bu yöntem demir kütüklere, levhalara ve tüplere uygulanabilir, ayrıca elektrik tüketim miktarının azaldığını da bildirmişlerdir[12].

Bensaid S. doktora tezi çalışmasında; Anizotropik kompozit malzemelerin elektromanyetik ve termal modellemesini incelemiştir[13].

2. KOMPOZİT MALZEMELER

Kompozit malzemeler, belirli bir amaca yönelik olarak en az iki farklı malzemenin bir araya getirilmesiyle oluşan malzeme grubudur. Bu malzemeler uzay, uçak, roket, otomotiv, inşaat gibi üretim endüstrilerinde oldukça geniş bir kullanım alanına sahiptirler [14]. Özellikle II. Dünya savaşı esnasında mevcut konvansiyonel malzemelerin tek başlarına teknoloji karşısında belli ihtiyaçlara cevap veremez hale gelmiş olmalarından dolayı, kompozit malzemelerin üretimi ve mekanik özellikleri üzerine yapılan araştırma ve geliştirme faaliyetleri artmıştır. Bu çalışmalarda amaç yüksek dayanım, yoğunluk ve yüksek elastik modül yoğunluk oranı elde etmektir. Onun için kompozit malzemelerin özel uygulama alanlarında kullanımları hızla artmaktadır [15].



Şekil 2.1. Mühendislik malzemelerinin sınıflandırılması[16]

Şekil 2.1’de Mühendislik malzemelerinin sınıflandırılması ve kompozit malzemelerin bu sınıflandırmada ki yeri görülmektedir.

Kompozit malzeme; iki yada daha fazla sayıdaki aynı veya farklı gruptaki malzemelerin en iyi özelliklerini, yeni ve tek bir malzemedeki toplamak amacıyla, makro düzeyde birleştirilmesinden oluşturulan malzemelerdir. Amaç, bileşenlerden daha üstün özelliklere sahip bir malzeme üretmektir. Bileşenlerin iç yapıları çıplak gözle incelendiğinde (makroskobik kontrol), bileşenlerin yapıları ayırt edilebilir. Yapılarında birden fazla sayıda fazın yer aldığı klasik alaşımlar makro ölçüde homojen olmalarına rağmen, mikro ölçüde heterojen malzemelerdir [15].

Bir kompozit malzemedeki çekirdek olarak adlandırılan takviye elemanı ve bunun etrafını çevreleyen matris malzemesi yer alır [17]. Takviye elemanı olarak değişik morfolojiye sahip kısa ve uzun elyaflar, whiskerler (kılcal kristaller), kırılmış veya parçacıklı seramikler kullanılmaktadır. Bunların kullanım amacı, gelen yükü taşımak ve matrisin rijitlik ve dayanımını arttırmaktır. Matrisin görevi ise, plastik deformasyona geçişte olabilecek çatlak ilerlemelerini önleyici rol oynayarak, kompozit malzemenin kopmasını geciktirmektir. Diğer bir amaç da, takviye elemanlarını yük altında bir arada tutmak ve yükü lifler arasında homojen olarak dağıtmaktır. Böylece takviye elemanlarında plastik deformasyon gerçekleştiğinde ortaya çıkacak çatlak ilerlemesi olayı önlenmiş olur [15].

2.1. Kompozit Malzemelerin Avantajları ve Dezavantajları

Kompozit malzemelerin avantajlarını şöyle sıralayabiliriz.

- a) Yüksek Mukavemet: Kompozitlerin çekme ve eğilme mukavemeti, metallere göre çok daha yüksektir. Ayrıca kalıplama özelliklerinden dolayı, kompozitlere istenen yönde ve bölgede gerekli mukavemet verilebilir. Böylece, malzemedeki tasarruf yapılarak, daha ucuz ve hafif ürünler elde edilebilir [15].

Tablo 2.1. Kompozit ve klasik malzemelerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması [15][16]

Malzeme Cinsi	Özgül Ağırlığı (gr/cm ³)	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastik Modülü (GPa)
Alüminyum	2.8	84	71
Boron	2.6	2780	380
SiC	2.55	2760	200
Al ¹ %50SiC Komp.	2.67	780	135
Al/50%B Komp.	2.7	1130	207

Tablo 2.1’de klasik malzemelerle kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması sunulmuştur.

- b) Kolay Şekillendirme: Büyük ve kompleks parçalar tek işlemle bir parçada kalıplanabilir [16]. Böylece malzeme ve işçilikten kazanılır.
- c) Elektriksel Özellikler: Uygun malzemenin seçilmesiyle, üstün özelliklere sahip kompozit malzemeler elde edilebilir [18].
- d) Korozyona ve Kimyasal Etkilere Karşı Mukavemet: Kompozitler, hava etkilerinden, korozyondan ve çoğu kimyasal etkilerden zarar görmezler [18]. Bu özelliklerinden dolayı kompozitler kimyevi madde tankları, boru ve aspiratörler, tekne ve diğer deniz araçları yapımında kullanılmaktadırlar. Özellikle korozyona karşı dayanıklı olması, endüstride birçok avantaj sağlamaktadır [15].
- e) Isıya ve Ateşe Dayanıklılığı: Kompozit malzemelerin ısı iletim katsayıları ve thermal genleşme katsayıları düşüktür [18]. Isı iletim katsayıları düşük malzemelerden oluşan kompozitlerin ısıya dayanıklılık özelliği, yüksek ısı altında kullanılabilmesine olanak sağlar.

- f) Kalıcı Renklendirme: Kalıplama esnasında, reçineye ilave edilen pigmentler sayesinde, kompozit malzemeye istenen renk verilebilir. Bu işlem, ek bir masraf ve işçilik gerektirmez [18].
- g) Titreşim Sönümlendirme: Kompozit malzemelerin elastik özellikleri yüksek olduğundan doğal bir titreşim sönümlenme ve şok yutabilme özellikleri vardır. Çatlak yürümesi olayı da böylece en az seviyeye indirilmiş olmaktadır [15].

Bu avantajların aynı anda oluşması beklenemez. Zaten herhangi bir uygulama için böyle bir gereksinim duyulmaz.

Kompozit malzemelerin bu avantajlarının yanında bazı dezavantajları da bulunmaktadır [18] [19]. Bunlar;

- Üretiminin güçlüğü
- Maliyet yüksekliği
- İşlenmesinin zorluğu
- Gerekli yüzey kalitesinin elde edilememesi
- Diğer malzemeler gibi geri dönüşümünün olmayışı
- Kırılma uzamasının az oluşu şeklinde sayılabilir.

2.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler takviye elemanlarına ve takviye elemanlarının geometrisine göre üç gruba ayrılırlar.

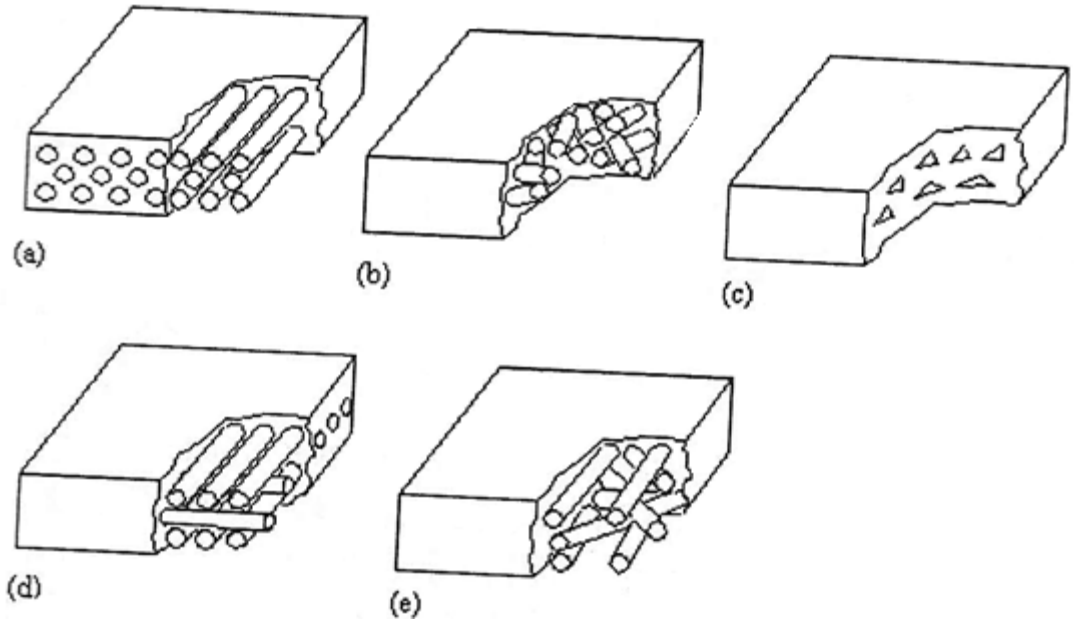
1. Elyaf takviyeli kompozit malzemeler
2. Parçacık takviyeli kompozit malzemeler
3. Tabakalı kompozit malzemeler

2.2.1. Elyaf takviyeli kompozit malzemeler

Elyaf takviyeli kompozit malzemeler, yumuşak bir matris malzemesi içerisine sert, dayanıklı, elastikliği yüksek elyaflar ilave edilerek çekme dayanımı, yorulma dayanımı, özgül çekme dayanımı daha iyi malzemeler elde edilir. Elyaf takviyeli kompozit malzemeler elyafların dizilişine göre üç gruba ayrılırlar.

- 1- Kısa elyaf takviyeli kompozitler
- 2- Rastgele düzlemsel yönlendirilmiş kompozitler
- 3- Parçacıklarla takviyeli kompozitler

Şekil 2.2’de değişik şekilli elyaf takviyeli kompozitler sunulmuştur.

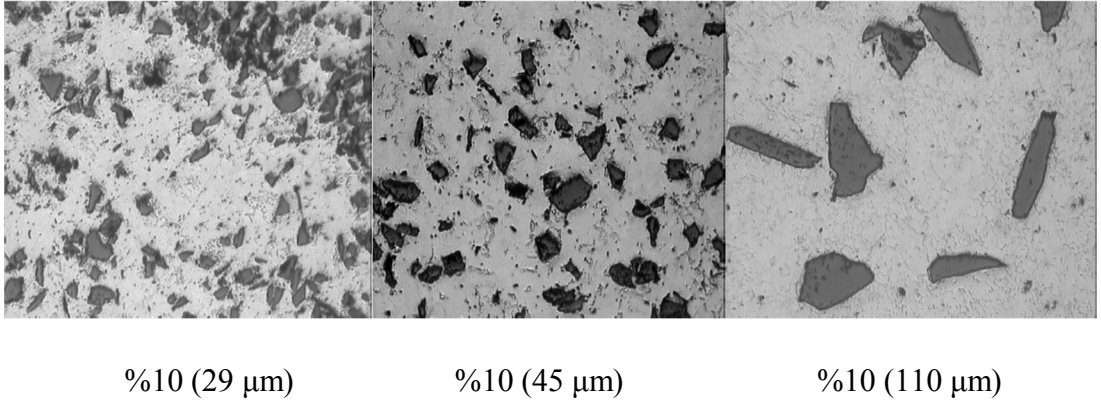


Şekil 2.2. Değişik şekilli elyaf takviyeli kompozitler a) Tek yönlü ve sürekli elyaflar b) Kesikli elyaflar c) Parçacık şekilli elyaflar d) Ortogonal elyaflar e) Rastgele düzlemsel yönlendirilmiş elyaflar[15]

2.2.2 Parçacık veya partikül takviyeli kompozit malzemeler

Bu tip kompozit malzemelerde, takviye elemanı birkaç mikrometre den başlayan boyutlarda kare, yuvarlak veya üçgen ve benzeri şekilli parçacıklardan oluşmaktadır. Takviye parçacıklar matris içerisine çeşitli yöntemlerle yerleştirilir. Partikül oranı %28'den fazla kullanılmamaktadır. Bu tür kompozit malzemeler izotropik özellikler göstermektedir[18].

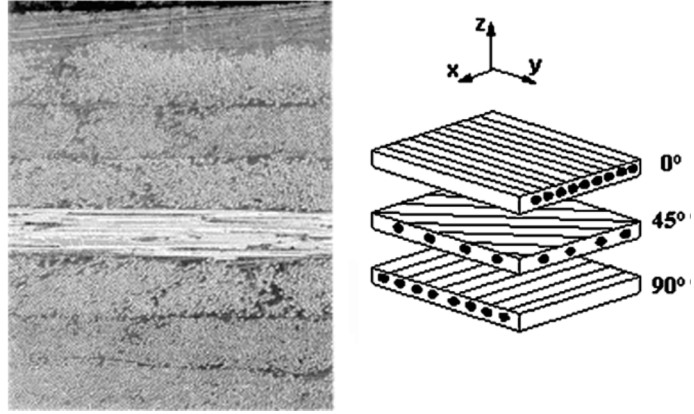
Şekil 2.3.'te parçacık takviyeli Al-SiC MMK malzemenin takviye oranları ve tanecik boyutlarının matris içindeki mikroskobik görüntüsü sunulmuştur.



Şekil 2.3. Parçacık takviyeli kompozit malzemelerin mikroskobik görüntüsü[20]

2.2.3. Tabakalı kompozitler

Şekil 2.4.'te tabakalı (laminat) kompozit malzeme yapısı sunulmuştur. Bu yapıda plaka şeklindeki kompozitler temel malzeme eksenine doğrultusunda üst üste yönleri istenen özelliklere göre ayarlanarak yerleştirilmiştir. Tabakalar kısa fiber veya uzun fiber gibi değişik elyaflarla takviyelendirilmiş olabilmektedir. Bu tür kompozitler anizotropik özellikler gösterirler[6].



Şekil 2.4. Tabakalı kompozit malzeme yapısı[6]

2.3. Kompozit Malzemelerde Kullanılan Takviye Elemanları

Kompozit malzemelerde takviye elemanın görevi yükü taşıyarak kompozitin dayanımını ve rijitliğini arttırmaktır. Kompozit malzemelerde kullanılan takviye elemanlarını şöyle sıralayabiliriz [16];

- 1-Cam
- 2-Karbon
- 3-Boron
- 4-Alüminyum Oksit
- 5-Silisyum Karbür
- 6-Organik Moleküller

Yukarıda belirtilen takviye elemanları istenen özelliklere göre kompozit malzeme yapımında kullanılmaktadır.

2.4. Kompozit Malzemelerde Kullanılan Matris Malzemeler

Kompozit malzemelerde düzenlenmiş elyafları bir arada tutarak kuvvetleri elyafa ileten, elyafları çevresel etkilerden ve darbelerden koruyan, çatlakları durdurmayı sağlayan matris dediğimiz kısımlardır. Kullanılan matris malzemenin cinsine göre kompozit malzemeler üç çeşittir [19]. Bunlar;

1-Metal Matrisli Kompozit Malzemeler (MMK)

Alüminyum ve alaşımları, döküm alaşımları, magnezyum alaşımları, çinko alaşımları, titanyum alaşımları vb. metal özellikli malzemeler matris olarak kullanılmaktadır.

2-Plastik Matrisli Kompozit Malzemeler

Termoplastikler ve termosetler ve elastomerler gibi plastik özellikler gösteren malzemelerdir.

3-Seramik Matrisli Kompozit Malzemeler

2.5. Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri

Kompozit malzemeler geleneksel malzemelere göre üstün özellikler gösterirler. Bu nedenden dolayı kullanım alanları her geçen gün artmaktadır. Artan bu öneme karşılık üretimleri zor ve pahalıdır. Kompozit malzemelerin üretim yöntemlerini iki ana grup altında inceleyebiliriz. Bunlar ;

1. Katı Faz Üretim Yöntemleri

- Toz metalürjisi teknikleri
- Difüzyon bağı yöntemi

2- Sıvı Faz Üretim Yöntemleri

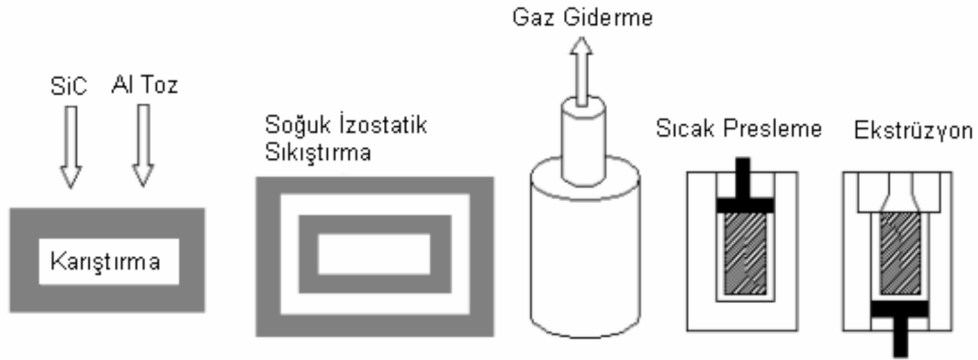
- Sıvı metal emdirilmesi (İnfiltrasyon)
- Sıvı metal karıştırması
- Sıkıştırılmalı veya sıvı dövme döküm tekniği

- Yarı katı karıştırma
- Plazma püskürtme
- Sıcak presleme

2.5.1. Katı faz üretim yöntemleri

2.5.1.1. Toz metalürjisi teknikleri

Bu yöntemle üretimde, istenilen büyüklükte ve istenilen oranda tozlar karıştırılarak ara yüzeyde reaksiyon istenmeksizin kompozit üretilebilmektedir. Şekil 2.5'te toz metal metalürjisi yönteminin temel aşamaları görülmektedir. Üretim aşamaları incelendiğinde; öncelikle takviye parçacıkları ve matris tozları karıştırılarak kalıp içerisine yerleştirilir. Katı hal difüzyonu için ergime sıcaklığının altındaki bir sıcaklığa kadar ısıtılarak basınç altında sinterleme sağlanır. Daha yoğun bir malzeme istenirse sıcak presleme yapılabilir. Sıcak preslemenin ardından üretilen parça ekstrüzyon, haddeleme ve dövme gibi işlemlerle kullanıma hazır hale gelir[15].

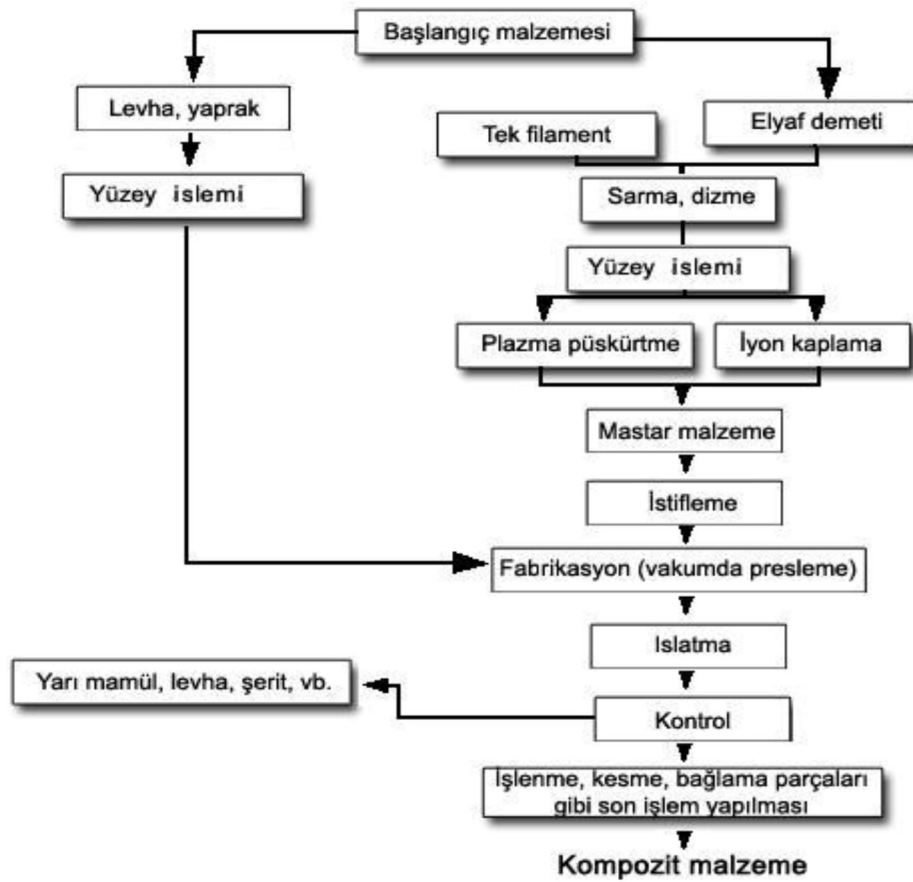


Şekil 2.5. Toz metalürjisi yönteminin temel aşamaları [21]

2.5.1.2. Difüzyon bağı yöntemi

Bu yöntem yüksek basınç ve sıcaklık altında vakumlu ortamda yapılır. Silisyum karbür, boron, karbon gibi tek flementli elyaflar, tabaka halindeki alüminyum, titanyum gibi matrisler üzerine istenilen açılarda ve istenilen aralıklarda dizilerek ısıtma ve pres öncesi hazır hale getirilir. Hazır halde olan bu levhalar

vakuma alınır ve sızdırmazlık sağlanır. Vakum altındaki levhalar ergime sıcaklığına yakın bir sıcaklığa kadar ısıtılır ve difüzyon ile birleştirmenin gerçekleştirilmesi için preslenir veya haddelenir. İyi bir difüzyon bağı oluşturabilmek için takviyelerin ve matris malzemelerin temiz ve oksitsiz olması gerekmektedir[22]. Şekil 2.6’ da difüzyon bağı ve vakumda presleme yöntemi ile kompozit üretiminin akış şeması görülmektedir.



Şekil 2.6. Difüzyon bağı ve vakumda presleme ile kompozit üretimi akış şeması [22]

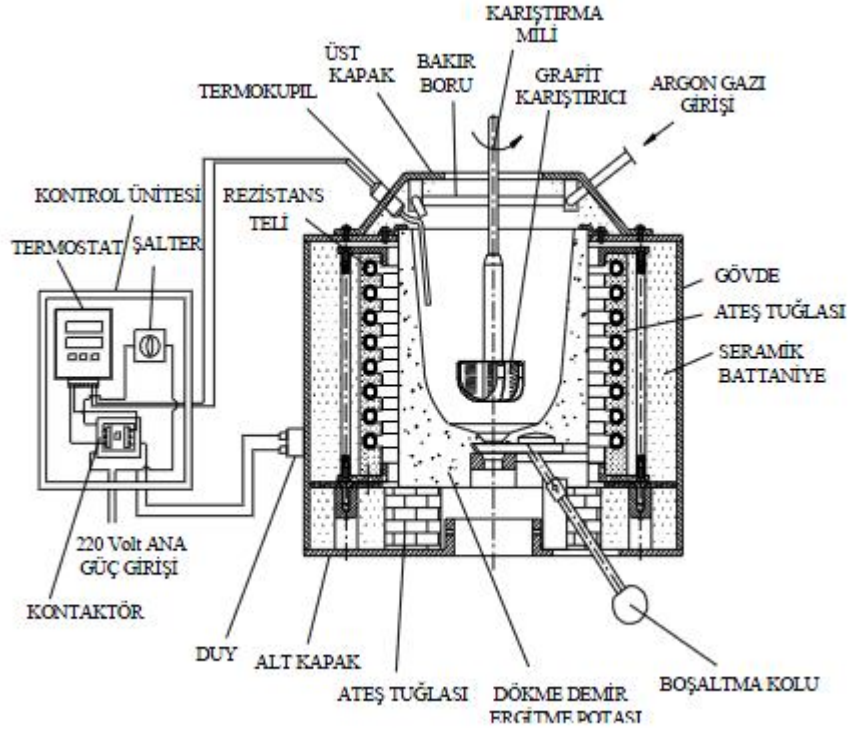
2.5.2. Sıvı faz üretim yöntemleri

2.5.2.1. Sıvı metal emdirilmesi (infiltrasyon)

Sıvı metal emdirilmesi yöntemi MMK malzeme üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemde öncelikle takviye malzemeleri bir kalıp içerisine istenilen özelliklere göre tutturulmaktadır. Bu işlemden sonra tutturulmuş fiberler arasına sıvı metal basınç altında veya vakumlu ortamda emdirilir. Basınç altında veya vakum ortamında emdirme işlemi fiberlerin yoğun olduğu durumlarda daha çok tercih edilir. Çünkü fiberler yani takviye elemanları yoğun olduğunda sıvı metalin emdirilmesi ancak basınç altında veya vakumlu ortamda sağlanabilmektedir. Sıvı metal emdirme işleminden sonra malzeme soğumaya bırakılır.

2.5.2.2. Sıvı metal karıştırılması

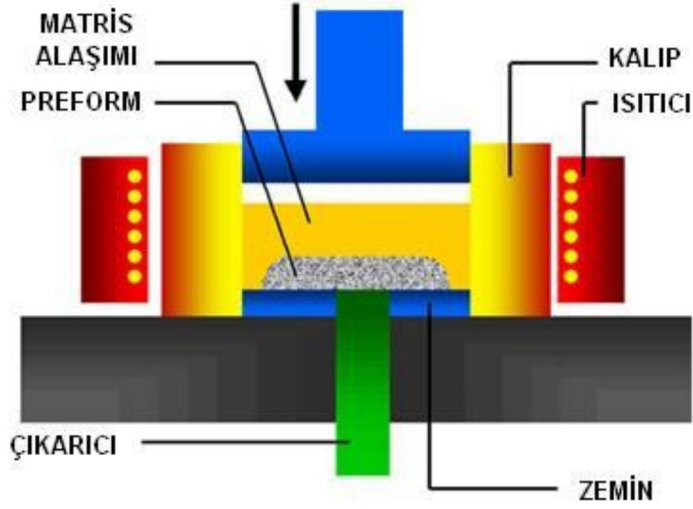
Sıvı metal karıştırması yönteminde önceden ön ısıtmaya tabi tutulmuş takviye elemanları sürekli karıştırılmakta olan eriyik haldeki metal içerisine çeşitli yöntemlerle ilave edilir. Bu ilave işleminden sonra istenilen şekillerde döküm yapılır. Karıştırma işlemi atmosfere açık ortamlarda yapıldığında eriyik metalin atmosferden gaz alması gibi sebeplerden dolayı işlemin vakum altında veya koruyucu gazlar altında yapılması önerilmektedir. Şekil 2.7.'de Al-SiC MMK malzemenin sıvı metal karıştırma yöntemi ile üretim şekli sunulmuştur.



Şekil 2.7. MMK malzeme üretim fırını, karıştırıcı ve kontrol ünitesinin şematik görünüşü [20]

2.5.2.3. Sıkıştırılmalı veya sıvı dövme döküm tekniği

Sıkıştırılmalı veya sıvı dövme döküm tekniği; Önceden hazırlanmış fiberler üzerine basınç altında eriyik metal emdirilmesi ve yüksek basınç altında katılaşmaya bırakılmasıdır. Bu yöntem ayrıca sıvı metal karıştırmasından sonra da döküm tekniği olarak kullanılabilir. Şekil 2.8.'de bu yöntemin prensip şekli sunulmuştur. Takviye malzemeleri ve kalıbında ön ısıtmaya tabi tutulması kompozitin kalitesini belirleyen etkenler arasındadır. Silisyum karbür (SiC), alüminyum oksit (Al_2O_3) ve silisyum nitrür (Si_3N_4) içeren alüminyum matrisli kompozitler bu yolla üretilmektedir.



Şekil 2.8. Sıkıştırımlı sıvı dövme döküm tekniği[22]

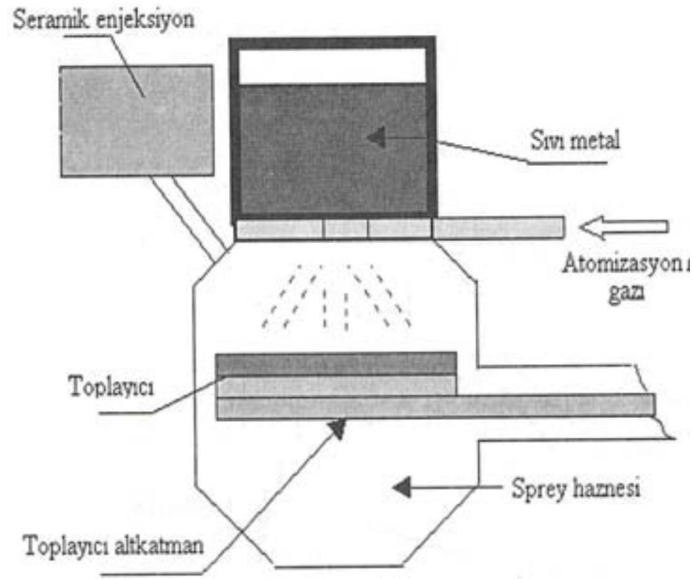
2.5.2.4. Yarı katı karıştırma

Yarı katı karıştırma yönteminde karıştırma özelliğine sahip bir ergitme fırınında metal matris malzemesi ergime sıcaklığının 40-50 °C üzerinde ısıtılarak hızlı bir şekilde karıştırılır. Sıcaklık homojen olduğunda eriyik matris malzeme soğumaya bırakılır ve %40-50 katı halde iken takviye malzemeleri eklenmeye başlanır aynı anda sıcaklık artırılmaya başlanır ve karıştırılmaya devam edilir. Ergime sıcaklığına kadar karıştırılıp döküm yapılarak istenilen şekillerde kompozit malzemeler üretilir. Günümüzde helisel indüksiyon karıştırıcı kullanılarak kompozit üretimi çalışmaları yapılmaktadır[12].

2.5.2.5. Plazma püskürtme yöntemi

Plazma püskürtme yöntemi genellikle parçacık takviyeli kompozit malzemelerin üretiminde kabul görmüş bir yöntemdir. Bu yöntemde ergimiş haldeki metal bir sprej yardımıyla takviye elemanının üzerine püskürtülerek uygulanır. Püskürtülen eriyik takviyeye yapıştığı anda donmaya başladığından matris takviye yüzeyleri arasında ki istenmeyen ara yüzey reaksiyonları gerçekleşmediği için diğer yöntemlere göre avantajlıdır. Püskürtülen matris malzemesi istenilen kalınlıkta

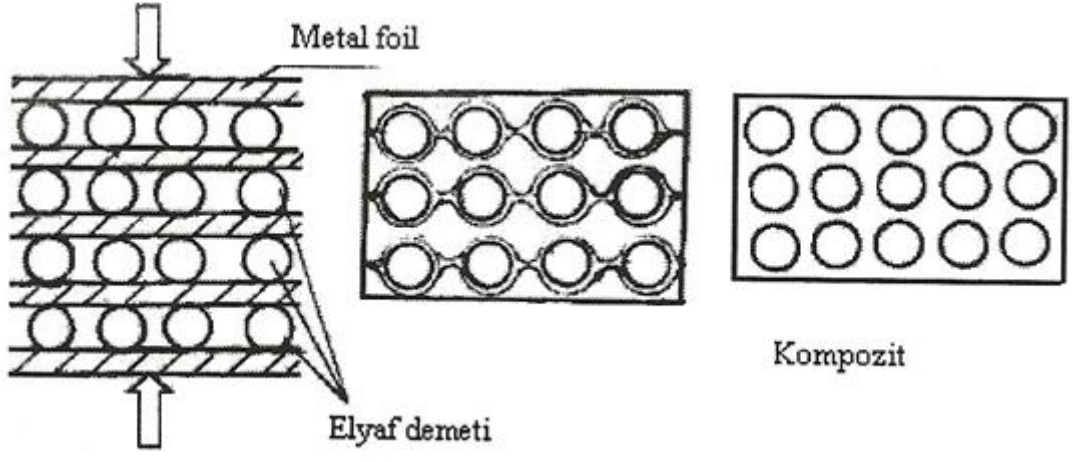
püskürtülerek istenilen kalınlık rahatça sağlanabilir. Bu yöntemle bağı diğer bir yöntem ise toz halindeki takviye elemanının sıvı matris ile aynı anda püskürtülmesi dir bu yöntemle de Osprey yöntemi denir. Şekil 2.9.'da Osprey yönteminin temel şeması sunulmuştur. Şekilde sıvı metal seramik takviye elemanı ile birlikte toplayıcı üzerine püskürtülerek kompozit malzeme üretilmektedir[23].



Şekil 2.9. Osprey yöntemi prensip şeması[23]

2.5.2.6. Sıcak presleme

Sıcak presleme yöntemi plaka şeklindeki kompozitlerin üretimi için daha uygun bir yöntemdir. Bu yöntemde ince plakalar halindeki matris malzemelerinin aralarına takviye elemanları şekil 2.10.'da olduğu gibi yerleştirilir. Daha sonra bu kompoziti yerinde tutmak için bir bağlayıcı ile spreylenebilir (Daha sonra bu bağlayıcı yakılır). Preform haldeki kompozit istenilen ölçülerde kesildikten sonra sıcak presle istiflenir. İstiflenen malzeme bağlayıcı sıcaklığına ulaşmaya dek ısıtılır ve tam bağ basıncı uygulanır. Daha sonra kalıcı gerilmeleri engellemek amacıyla kompozit malzeme yavaş şekilde soğumaya bırakılır.



Şekil 2.10. Folyo matris ile flementlerin görüntüsü [15]

2.6. Kompozit Malzemelerin Elektriksel İletkenliği

Kompozit malzemelerin elektriksel iletkenliği direkt olarak bileşenlerin iletkenliğine bağlı olarak değişir. İletkenliği etkileyen diğer faktör ise kompozit malzeme geometrisidir [13].

Kompozit malzeme grupları arasında elektriksel iletkenliği en iyi olanlar MMK lardır. MMK malzemelerde matrisi oluşturan metaller olduğundan bu grup kompozit malzemeler iyi elektriksel iletkenliğe sahip olabilmektedir. Kompozit malzemeler her konuda esneklik sağladığı gibi elektriksel iletkenlikte de esneklik sağlar. Elektrik iletkenliği yüksek bir malzeme üretilmek istenirse elektrik iletkenliği yüksek bileşenler seçilmelidir. İletkenliği etkileyen diğer bir faktör ise takviye malzeme geometrisidir. Takviye oranı %70 den az olan ve matris malzemesi yalıtkan olan kompozit malzemelerin elektrik iletkenliği takviye malzemenin elektrik iletkenliğinin 2/3 den az olabilmektedir. Dahası takviye mimarisine göre elektrik iletkenliği yarıya düşebilir [13].

İzotropik özellik gösteren kompozit malzemelerin elektrik iletkenliği karışımın oranlarına göre karışımlar kuralı ile hesaplanabilir. Formül 2.1 iletkenliği hesaplamak için kullanılabilir [15].

$$\sigma_k = \sigma_t \cdot V_t + \sigma_m \cdot V_m \quad 2.1$$

σ_k : Kompozit malzemenin elektriksel iletkenliği (S/m), σ_t : Takviye malzemenin elektriksel iletkenliği (S/m), V_t : Takviye malzemenin genel malzeme içindeki oranı, σ_m : Matris olarak kullanılan malzemenin elektriksel iletkenliği (S/m) V_m : Matris malzemenin genel malzeme içindeki oranı.

Ayrıca kompozit malzemelerin dielektrik özelliklerini hesaplamak için çeşitli formüller bulunmaktadır. Bu formüller daha çok dielektrik bir matris malzeme ve iletken bir takviye malzemeye sahip kompozit malzemeler için uygundur [24]. Bu formüller aşağıda sunulmuştur [25].

Bruggman formülü:	$\epsilon^* = [\epsilon_2 / (1- V_1)^3]$	2.3
Van Beek formülü:	$\epsilon^* = \{ [\epsilon_2 (1+ V_1)] / (1- 4V_1) \}$	2.4
Bottcher formülü:	$\epsilon^* = \epsilon_2 / (1- 3V_1)$	2.5
Lichtenecker formülü:	$\log (\epsilon^*) = V_1 \log (\epsilon_1) + V_2 \log (\epsilon_2)$	2.6

ϵ^* : Kompozit malzemenin dielektrik sabiti, ϵ_2 : Matris malzemenin dielektrik sabiti ve V_1 : Takviye malzemenin hacmi, V_2 : Matris malzemenin hacmi.

3. İNDÜKSİYON FIRINLARI

İndüksiyon fırınları, günümüzde iletken malzemelerin işlenmesinin ısıtma kısmında önemli bir yere sahiptir. Sanayinin çeşitli kollarında özellikle metal sektöründe ısıtma, ergitme, tavlama, sertleştirme, birleştirme gibi ısı işlemlerde geniş bir kullanım alanı vardır.

İndüksiyon fırınlarının temel prensibini şöyle açıklayabiliriz. Değişken bir manyetik alan içerisine iletken bir malzeme sokulduğunda bu malzeme içerisinde bir gerilim indüklenir, indüklenen bu gerilim iletken malzeme üzerinde büyük değerlerde eddy akımları dolaştırır, dolaşan bu akımlara karşılık malzemenin iç direnciyle malzeme hızlı bir şekilde ısınır bu ısıtma şekline indüksiyonla ısıtma denir.

İndüksiyon fırınları günümüzde çalışma frekanslarına göre üçe ayrılırlar. 1.Düşük frekanslı ($f < 1$ kHz), 2.Orta frekanslı ($1 \text{ kHz} < f < 100 \text{ kHz}$), 3.Yüksek frekanslı ($f > 100 \text{ kHz}$). Güçleri ise düşük frekanslar için 100 MW 'tan başlayıp yüksek frekanslar için 5 KW 'a kadardır [26].

3.1. İndüksiyonla Isıtmanın Temel Prensibi

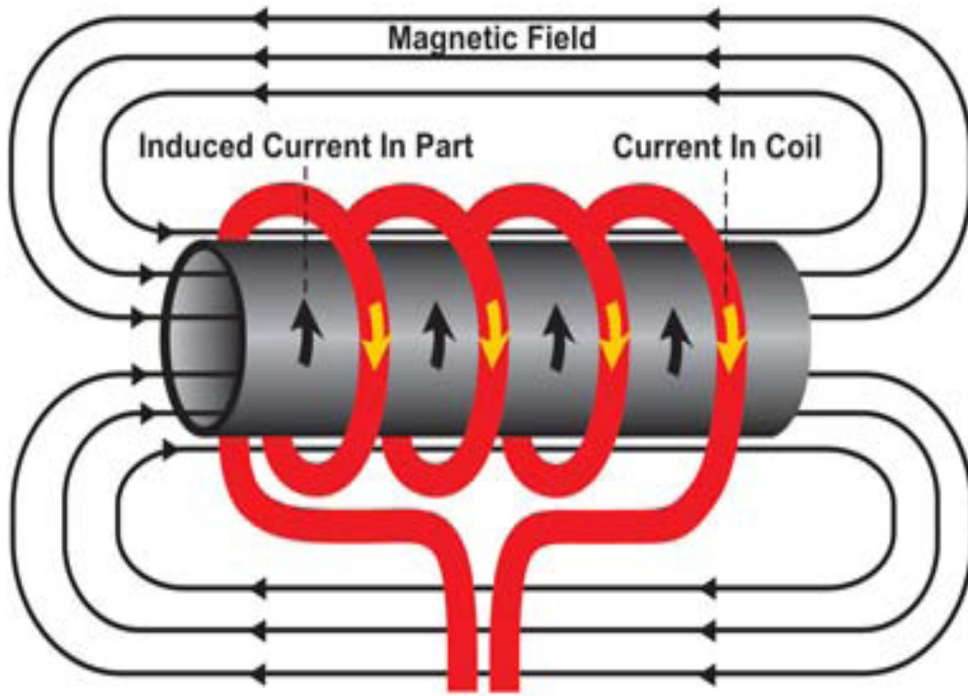
İndüksiyonla ısıtmanın temel prensibi indüksiyon bobinine zamanla değişen akım uygulamaktır. Zamanla değişen akım bobin üzerinde Amper yasasına göre zamanla değişen bir manyetik alan oluşturur. Bu manyetik alan, içerisinde veya yakın çevresinde iletken bir malzeme var ise bu malzeme üzerinde Faraday kanuna göre bir gerilim indükler. İndüklenen bu gerilim malzeme üzerinde Eddy akımlarının dolaşmasını sağlar. Eddy akımları malzeme üzerinde dolaşırken malzemenin iç direnciyle oluşan kayıplarla malzeme hızlı bir şekilde ısınır [26]. Formül 3.1'de malzeme üzerinde oluşan ısı enerjisi görülmektedir.

$$P = E^2 / R = I^2 R$$

3.1

P: Malzeme üzerinde indüklenen güç (W) E: Malzeme üzerinde indüklenen elektro motor kuvvet (V), İ: Malzeme üzerinde indüklenen akım (A), R: Malzemenin iç direnci (Ω) [27].

Şekil 3.1.'de bir bobin içerisine iletken bir malzeme yerleştirilmiş ve bobine zamanla değişen akım uygulanmıştır. Zamanla değişen akım ile bobin içerisinde değişken bir manyetik alan meydana gelmiştir. Sağ el kuralından akımın yönüne göre manyetik alanın yönü kolayca bulunabilmektedir. Oluşan manyetik alan, iletken malzeme üzerinde gerilim indükler ve indüklenen gerilim parça üzerinde, uygulanan zamanla değişen akıma ters yönde eddy akımlarını doğurur.



Şekil 3.1. İndüksiyon bobininde iletken malzeme üzerinde gerilim indüklenmesi[28]

3.2. İndüksiyonla Isıtmada Nüfuz Derinliği

İndüksiyon bobini içerisinde manyetik alan şiddeti her yerde aynı değildir. Manyetik alan İndüksiyon bobini ile malzeme arasında ki hava aralığında yoğun, malzemenin yüzeyinden merkeze doğru üstel olarak azalmaktadır. Manyetik alanın kuvvetli olduğu bölgelerde indüklenen akımda kuvvetlidir. Eddy akımlarının en yoğun olduğu bölge malzemenin yüzeyidir, bu yoğunluğun malzeme içerisinde indiği derinliğe nüfuz derinliği denir. Nüfuz derinliği frekansa ve malzemenin cinsine bağlı bir büyüklüktür. Nüfuz derinliğinden yararlanarak malzemelerin istenilen bölgeleri ısıtılabilir, sanayide yüzey sertleştirme, tavlama ve benzeri uygulamalar indüksiyon fırınlarının nüfuz derinliği özelliğinden yararlanılarak yapılmaktadır.

Nüfuz derinliğini Formül 3.2'den yararlanılarak yaklaşık olarak hesaplanabilmektedir [29].

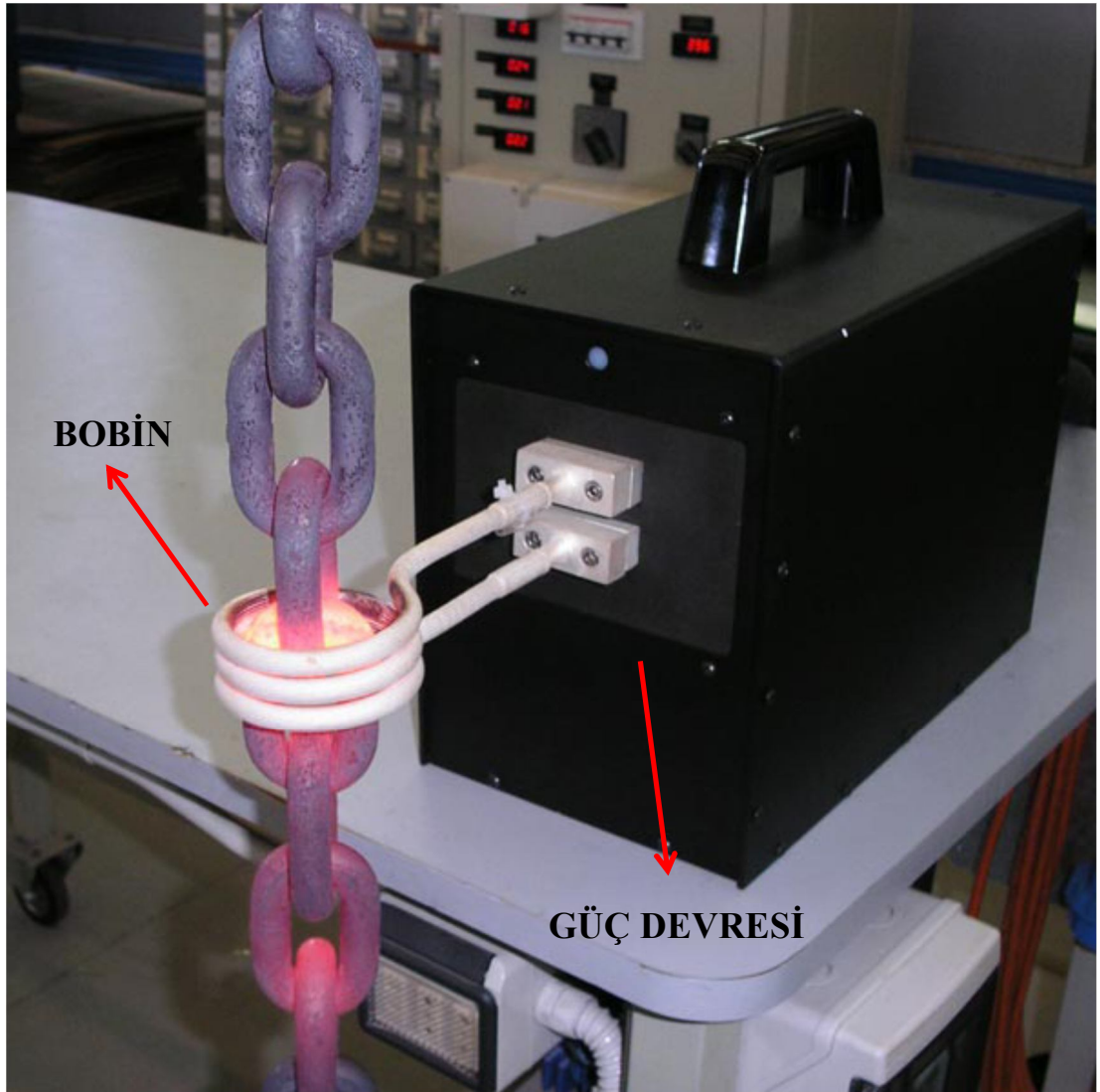
$$d_0 = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r \cdot f}} \quad 3.2$$

d_0 : Nüfuz derinliği (mm), ρ : Özgül direnç (Ωm), μ_r : Bağıl manyetik geçirgenlik , f : Frekans (Hz)

Formül 3.2'den görüleceği gibi frekansın artması nüfuz derinliğini azaltır. Dolayısıyla akım ısıtılacak malzemenin en dış yüzeyinden akar.

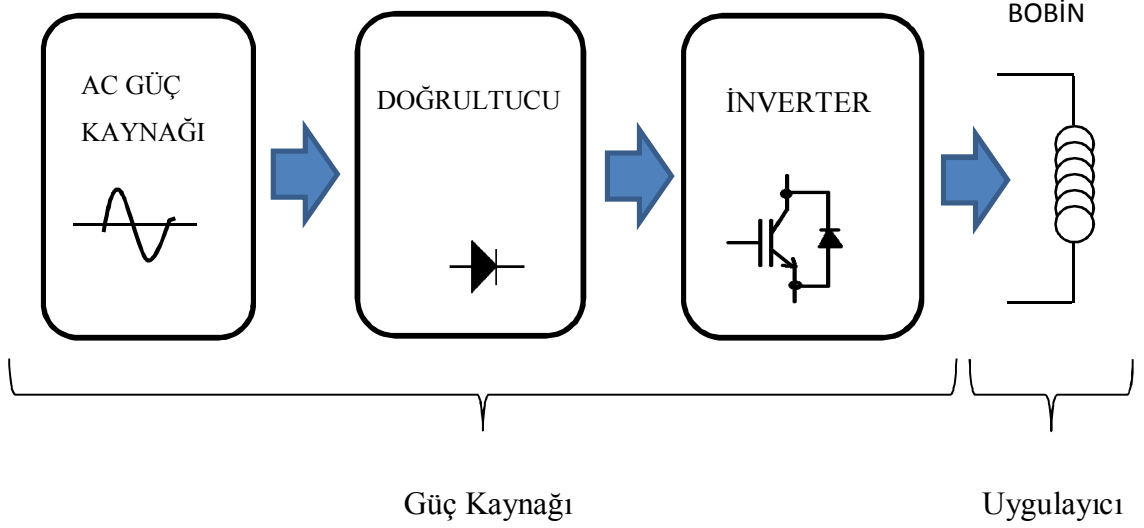
3.3. İndüksiyon Fırınlarının Temel Yapısı

İndüksiyon fırınlarını iki bölümde inceleyebiliriz. Birinci bölüm, bobin kısmına güç sağlayan güç devresi, ikinci kısım ise manyetik alanın oluştuğu bobin kısmıdır.



Şekil 3.2. İndüksiyon fırını genel görünüşü[30]

Şekil 3.2.'de sanayide kullanılan bir indüksiyon fırınının bobin kısmı ve güç devresi görülmektedir. Bobin kısmı daha sonraki bölümde incelenecektir.



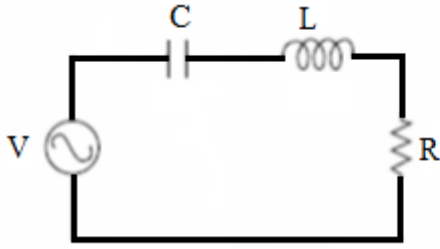
Şekil 3.3. İndüksiyon fırınları temel yapısı [31]

İndüksiyon fırınlarının temel yapısı Şekil 3.3.' de görülmektedir. İndüksiyon fırınları genellikle AC 380 V veya AC 220 V – 50 Hz şehir şebeke voltaj beslemeli olarak tasarlanırlar. Fırın girişine uygulanan bu voltaj doğrultucu bloğunda doğru akıma (DC) çevrilir. Doğrultucu kısımda AC-DC ye doğrultma, diyot gibi yarı iletken devre elemanları ile doğrultulur. Aynı zaman da tristör (SCR) gibi yarı iletken devre elemanları ile kontrol kartları kullanılarak kontrollü doğrultma yapılır. Endüstride en çok kullanılan doğrultucular bu yapıdadır. Elde edilen DC, inverter de yüksek frekansta anahtarlama yapan anahtarlama elemanları (IGBT, MOSFET, SCR vb.) vasıtasıyla istenilen frekanslarda AC' ye çevrilir. Elde edilen orta frekanslı, zamanla değişen akım bobine uygulandığında bobin üzerinde amper yasasına göre değişken bir manyetik alan meydana gelir. Değişken manyetik alan bobin içerisinde iletken bir malzeme var ise bu malzeme üzerinde Faraday yasasına göre bir gerilim indükler. İndüklenen bu gerilim Lenz kanuna göre iletken malzeme üzerinde eddy

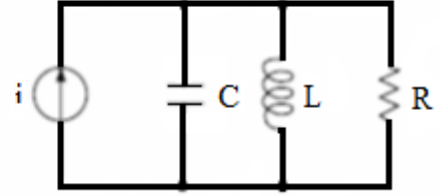
akımlarının akmasını sağlar. Eddy akımları malzemenin iç direnciyle oluşan kayıplarla malzeme hızlı bir şekilde ısınır.

3.4. İndüksiyon Fırınlarında Rezonans

İndüksiyon fırınlarında güç devresi ile bobin arasında paralel veya seri rezonans kondansatörü bağlanır. Bağlanan kondansatör sistemin rezonansa girmesini ve güç katsayısını düzeltmek amacıyla kullanılır. İndüksiyon fırınları kondansatörün bağlantı şekline göre seri rezonanslı veya paralel rezonanslı olmak üzere iki şekilde imal edilirler. İndüksiyon fırınlarında esas olarak bobin yük gibi davranır, iletken malzeme ise bobine seri veya paralel bağlı bir dirençle gösterilir. Şekil 3.4’de seri rezonans ve paralel rezonans devreleri görülmektedir.



a) Seri rezonans devresi



b) Paralel rezonans devresi

Şekil 3.4. Rezonans devresi [26]

Seri rezonans devresinde yük, seri indüktanstan dolayı akım kaynağı gibi davranır ve bu yüzden bobin gerilim kaynağı tarafından (gerilim beslemeli inverter) beslenmelidir. İkinci durumda yük, paralel rezonans devresidir ve paralel bağlı kondansatörden dolayı bir gerilim kaynağı gibi davranır bu yüzden akım kaynağı tarafından (akım beslemeli inverter) beslenmelidir. Tablo 3.1’de iki devrenin bir birlerine göre avantajları ve dezavantajları sunulmuştur.

Tablo 3.1. Seri ve paralel devrelerin karşılaştırılması[28]

	Seri Rezonans Devresi	Paralel Rezonans Devresi
AVANTAJLARI	Basit bir yapıya sahiptir bu yüzden maliyeti daha ucuzdur	Boşta yüksüz çalıştırılabilir
	Güç katsayısı kontrolü daha kolaydır	Yüksek gerilim kondansatörleri gerekli değildir
	Kontrolsüz doğrultucular ile beslenir	Transistörler sadece aktif akımı iletir
	Kısa devre kabiliyeti yoktur.	
DEZAVANTAJLARI	Boşta yüksüz çalışması karmaşık bir sistemle sağlanabilir	Kontrolü daha karmaşıktır
	Değişken frekansla yapılan güç kontrolü bazı uygulamalarda probleme neden olur	Bir kıyıcı DC-DC kıyıcı veya kontrollü doğrultucu ile beslenirler
	Transistörler indüktör akımının tümünü iletmek zorundadır	Boyutları daha büyüktür
		Girişinde filtre olarak bir şok bobine ihtiyaç vardır

İndüksiyon fırınlarının frekansı ısıtılacak malzemenin cinsine, malzemenin ısıtılacak kısmına, yapılacak işe göre belirlenir. Isıtılacak malzemeye, yapılacak işe göre bobin tasarımı yapılır, sarılan bobinin endüktansı ve bobine bağlanacak kondansatörün kapasitesi sistemin rezonans frekansını belirler. Yapılacak işe uygun frekans belirlenip bu frekansa en yakın rezonans frekansını sağlamak için bobin tasarımı çok önemlidir. Rezonans frekansını hesaplamak için Formül 3.3 kullanılır.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad \text{Hz} \quad 3.3$$

f_0 : Rezonans frekansı (Hz), L: Bobin indüktansı (H), C: Kondansatör kapasitesi (F).

İndüksiyon fırınlarında Formül 3.3 ile hesaplanan rezonans frekansına göre inverter elektronik sürücü devreler ile rezonans frekansında sürülür bu frekansa, kaynak frekansı denir. Kaynak frekansın daima rezonans frekansında anahtarlama yapması istenir. Çünkü kaynak frekansı, rezonans frekansına eşit olduğunda devreden çekilen akım maximum olur ve sistem verimli çalışır.

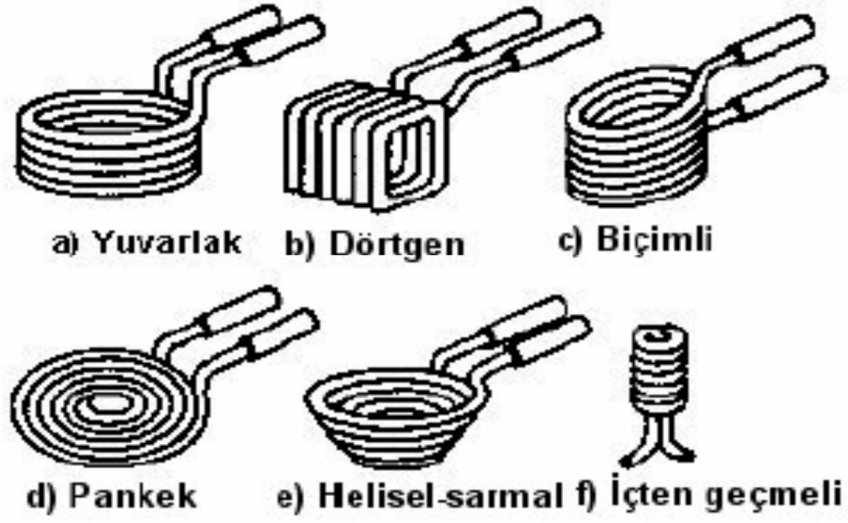
3.5. İndüksiyon Bobinleri

İndüksiyon ile ısıtmada manyetik alanın oluştuğu kısım indüksiyon bobinidir (İB). Diğer bir ifadeyle bütün indüksiyon sistemini göz önüne aldığımızda işin yapıldığı kısımdır. İB'nin şeklini belirleyen yapılacak ısıtılacak malzemenin şeklidir. Günümüzde endüstride kullanılan çeşitli şekillerde bobinler mevcuttur. Şekil 3.5.' de endüstride kullanılan örnek bir indüksiyon bobini sunulmuştur.



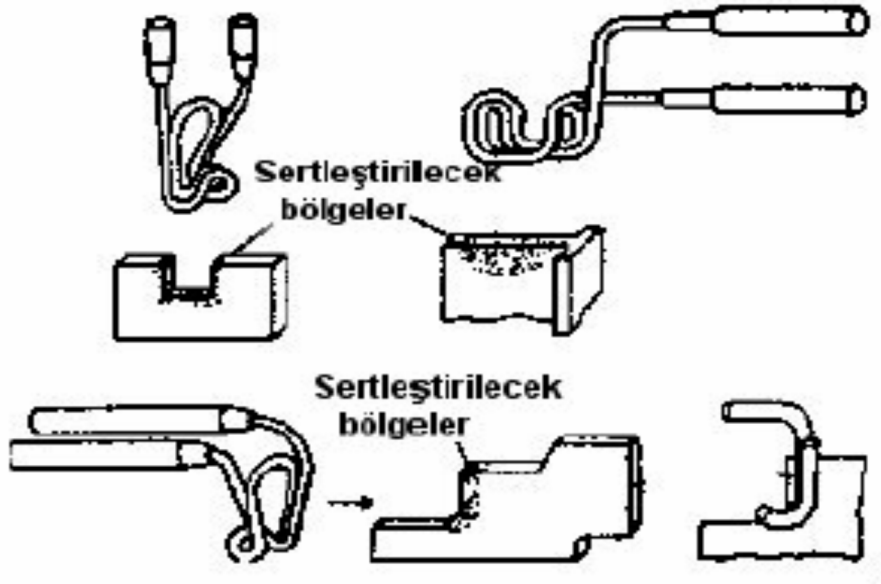
Şekil 3.5. Endüstride kullanılan örnek bir indüksiyon bobini[32]

İB'leri ısıtılacak malzemeye göre şekillendirilerek tasarlanırlar. Şekil 3.6.'da çeşitli bobin şekilleri sunulmuştur. Şekil 3.7. (a) , (b) , (c) ve (e) bobinleri malzeme şekline göre sarılmış ısıtma amaçlı bobinlerdir. Şekil 3.11 (d) ve (f) şekilli bobinler ise daha çok yüzeysel ısıtmada kullanılırlar.



Şekil 3.6. Endüstride kullanılan çeşitli bobin şekilleri[33]

Şekil 3.7.'de malzemelerin belirli bölgelerinin ısıtılması için çeşitli bobin şekilleri görülmektedir. Bu bobinler genellikle bölgesel veya yüzeysel sertleştirmeler için kullanılmaktadır.



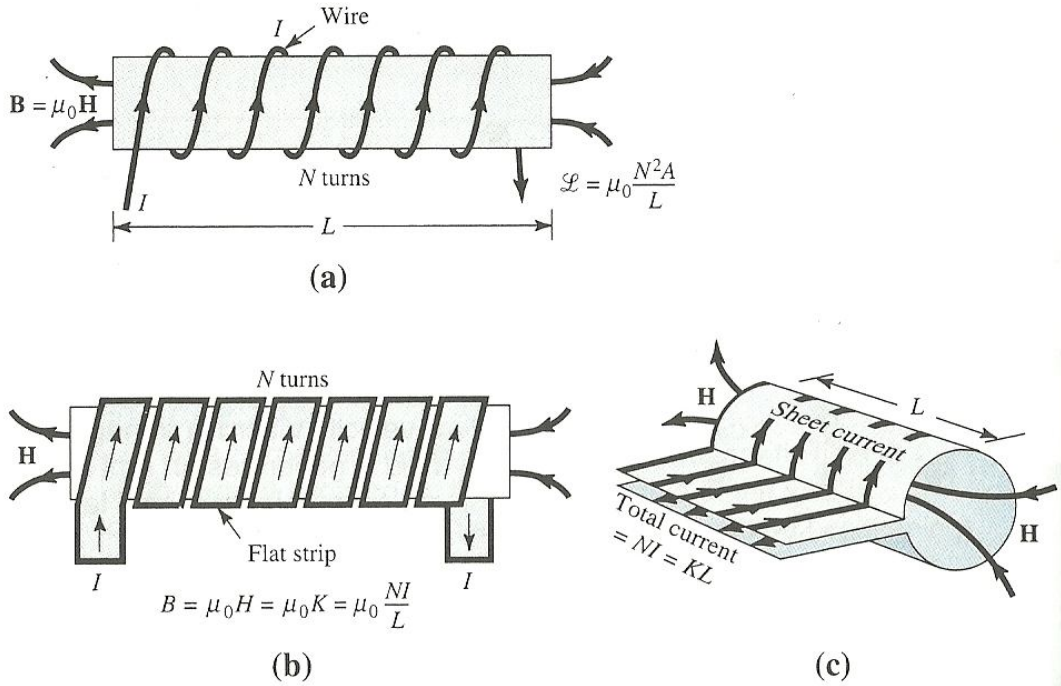
Şekil 3.7. Bölgesel sertleştirmeler için çeşitli bobin şekilleri[33]

3.6. Bobin Tasarımı

İndüksiyon fırınlarında manyetik alanın meydana geldiği kısım İB' dir. Bir önceki bölümde yuvarlak, helisel vb. bobin şekilleri sunulmuştur. Bu bobinler tasarım aşamasında iken indüktansları hesaplanmalıdır. Bu bölümde bobin tasarımında indüktans hesaplama tanıtılacaktır.

İB'inde meydana gelen manyetik alan şiddeti akım, frekans gibi değişkenlere bağlı olduğu kadar bobin geometrisine de bağlıdır. Bobin geometrisinin etkisi indüktans değişikliği ile ortaya çıkmaktadır. İndüktans aynı zamanda formül 3.3 deki rezonans frekansının hesaplanması için bilinmesi gereken bir değerdir.

Aşağıda çeşitli bobin şekilleri sunulmuştur.



Şekil 3.8. a) Yuvarlak tel şeklinde sargılı bobin, b) Yassı şerit sargılı bobin, c) Levha sargılı bobin[34]

Şekil 3.8. de gösterilen bobinlerde oluşan manyetik alan:

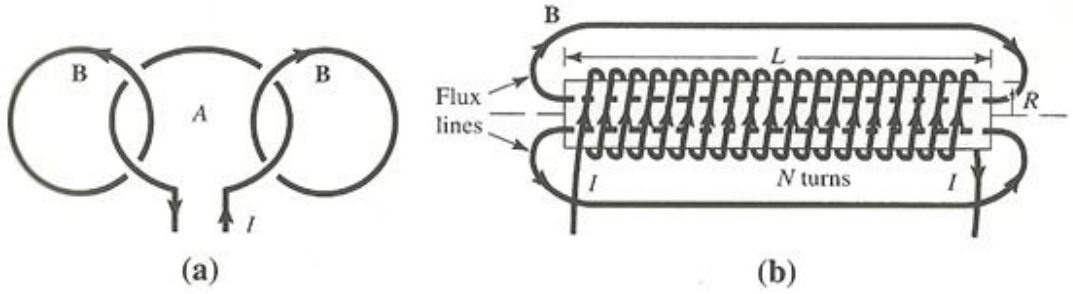
$$H = \frac{NI}{L} \quad (\text{A/m}) \quad 3.4$$

N: Bobinin spir sayısı, I: Bobin akımı (A), L: Bobinin uzunluğu (m).

Manyetik akı yoğunluğu Formül 3.5 ile verilir.

$$B = \mu_0 H = \mu_0 \frac{NI}{L} \quad (\text{wb/m}^2) \quad 3.5$$

B: Manyetik akı yoğunluğu (wb/m²), μ_0 : Havanın manyetik geçirgenliği,
I: Bobin akımı (A), L: Bobinin uzunluğu (m).



Şekil 3.9 Çeşitli bobin şekilleri[34]

Şekil 3.9. a' daki tek turlu bobinin indüktansı :

$$\ell = \frac{\Psi_m}{I} = \frac{\iint B \, ds}{I} \quad (\text{H}) \quad 3.6$$

Şekil 3.9. b' de ise tur sayısı N olan bir bobinin indüktansı ise formül 3.7 ile belirlenir.

$$\ell = \frac{\mu N^2 A}{L} \quad (\text{H}) \quad 3.7$$

Formül 3.7' de A: Bobinin alanıdır ve $A = \pi R^2$ ile bulunur. R: Bobinin yarıçapıdır.

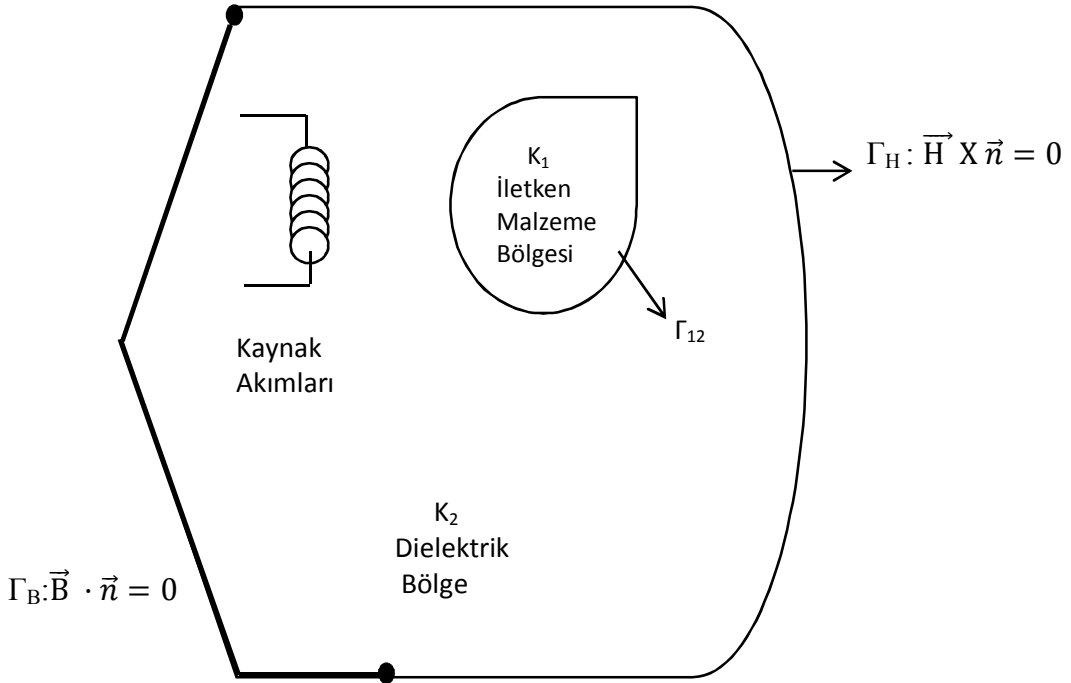
Sonuç olarak bobinin indüktansı geometrisi ile belirlenir [34].

4. İNDÜKSİYON İLE ISITMANIN MATEMATİKSEL TEMELLERİ

Bu bölümde indüksiyonla ısıtmayı sağlayan eddy akım problemi tanımlanmıştır. Bu problemin çözümü için öncelikle maxwell denklemleri verilmiştir. Maxwell denklemlerinden Quasistatik kabulle denklemler basitleştirilerek, sınır şartları belirlenmiştir. Basitleştirilmiş denklemlerdeki potansiyelleri teke indirmek amacıyla A-V, H ve T-Ø formülasyonları sunulmuştur.

4.1. Eddy Akım Problemi

İndüksiyonla ısıtma da ısıtmayı sağlayan eddy akımları ve malzemenin direncidir. Tipik bir eddy akım problemi Şekil 4.1' de verilmiştir.



Şekil 4.1. Tipik bir eddy akım problemi[35]

K_1 iletken malzeme bölgesi, K_2 dielektrik bölge, K ise tüm çalışma bölgesini göstermektedir. Γ_{12} iletken bölge ile dielektrik bölge arasındaki arayüzdür. Γ_H ile Γ_B çalışma bölgesini uzaydan ayıran ara yüzlerdir. Γ_B üzerinde akım yoğunluğunun normal bileşeni, Γ_H üzerinde ise manyetik alan şiddetinin tanjant sal bileşeni verilir [35].

Zamanla değişen manyetik alan, elektromanyetik dalgalar yardımıyla enerjiyi çalışma alanına taşır. Değişken manyetik alandan ya da manyetik alandaki değişimden elektrik alan (\vec{E}) oluşur.

4.2. Maxwell Denklemleri [36]

Elektromanyetik alanı tanımlamak için kullanılan eşitlikler Maxwell denklemleri olarak adlandırılır. Genel olarak zamana bağlı değişen elektromanyetik alanlar için, Maxwell denklemleri aşağıda ki gibi diferansiyel formda yazılır.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad 4.1$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad 4.2$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad 4.3$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J}_s + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad 4.4$$

ρ : Hacimsel yük yoğunluğu (C/m^3), J : Akım yoğunluğu (A/m^2), E : Elektrik alan (V/m), D^1 : Elektrik alan deplasman vektörü (C/m^2), B : Manyetik indüksiyon (Wb/m^2), H : Manyetik alan şiddeti (A/m)

Denklem 4.3 faraday kanununa göre; Değişken manyetik alandan ya da manyetik alandaki değişimden elektrik alan (\vec{E}) oluşur.

Denklem 4.4 amper yasasına göre; Bobine bir akım uygulandığında bobin üzerinde manyetik alan oluşur.

4.3. Bünye Denklemleri

Madde özellikleri B, D ve J yi belirler. Lineer ve izotropik bir ortam için bünye denklemleri:

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad 4.5$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad 4.6$$

İletken madde içerisindeki akımların iletilmesi, elektrik alanın varlığına bağlı olarak yük taşıyıcılarının sürüklenme hareketinin bir sonucu olarak oluşur. Bu olgu ohm kanunu tarafından formülize edilir.

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad 4.7$$

σ : Öz elektrik iletkenliğidir (S).

Birçok fiziksel uygulamada Maxwell-Amper kanundaki deplasman ihmal edilebilir. Bu kabule Quastatik kabul denilir[36]. Bu kabülle maxwell denklemleri:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad 4.8$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{j} \quad 4.9$$

¹ D: Elektrik alan deplasman vektörü, elektrostatikte dielektrik malzemeler bir elektrik alan içerisine konulduğunda ortamda D deplasman vektörü oluşur. [37]

Buradan sınır şartlarını göz önüne alarak basitleştirilmiş denklemler aşağıdaki gibi yazılır. İletken bölgede hem elektrik alan hem de manyetik alandan bahsedilir.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad 4.10$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0 \quad 4.11$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} - \sigma \vec{E} = 0 \quad 4.12$$

İletken olmayan K_2 bölgesinde \vec{E} alan sıfırdır, sadece manyetik alandan bahsedilir.

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{j}_s \quad 4.13$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad 4.14$$

$$\vec{B} \cdot \vec{n} = 0 \quad \Gamma_B \text{ üzerinde} \quad 4.15$$

$$\vec{H} \times \vec{n} = 0 \quad \Gamma_H \text{ üzerinde} \quad 4.16$$

K_1 ile K_2 bölgeleri arasındaki Γ_{12} arayüzde ise ;

$$\vec{B}_1 \cdot \vec{n}_1 + \vec{B}_2 \cdot \vec{n}_2 = 0 \quad 4.17$$

$$\vec{H}_1 \times \vec{n}_1 + \vec{H}_2 \times \vec{n}_2 = 0 \quad 4.18$$

1 ve 2 Ekleri K_1 ve K_2 bölgelerindeki nicelikleri belirler.

J_s : Verilen kaynağın akım yoğunluğu, n : Çevreleyen yüzeyin dış normali, B_1 : K_1 bölgesindeki manyetik alan, B_2 : K_2 bölgesindeki manyetik alan, H_1 : K_1 bölgesindeki manyetik alan şiddeti, H_2 : K_2 bölgesindeki manyetik alan şiddeti.

4.4. Çeşitli Manyetik Vektör Potansiyel Formülasyonları

Üzerinden akım akan iletken tel çevresinde manyetik alan oluşur ve bu manyetik alanın hesabı Maxwell denklemleri ile yapılır. İndüksiyonla ısıtma probleminde olduğu gibi, daha karmaşık geometriye sahip problemlerde manyetik alan hesabı, Maxwell denklemlerinden elde edilen değişik formülasyonların nümerik çözümleriyle elde edilebilir.

Bu formülasyonlar, Maxwell denklemlerinde \vec{E} 'nin indirgenmesiyle sadece \vec{H} 'a bağlı dalga denklemi, skaler ve vektör potansiyellerden elde edilen A-V ve T-Ø formülasyonlarıdır.

4.4.1. A,V-A Formülasyonu[35][36]

Alan vektörleri potansiyellerden şöyle elde edilir. Manyetik vektör potansiyel \vec{A} ve elektrik skaler potansiyel V cinsinden denklemler 4.19 ve 4.20' de verilmiştir.

$$\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A} \quad 4.19$$

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \vec{\nabla}V \quad 4.20$$

Denklem 4.20' yi, denklem 4.12' de yerine yazarsak; Denklem 4.21 elde edilir.

$$\vec{\nabla} \times \frac{\vec{B}}{\mu} - \sigma \left(-\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \vec{\nabla}V \right) = 0 \quad 4.21$$

Denklem 4.19'u denklem 4.21'de yerine yazdığımızda; Denklem 4.22 elde edilir.

$$\vec{\nabla} \times \frac{1}{\mu} \vec{\nabla} \times \vec{A} + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \sigma \vec{\nabla}V = 0 \quad 4.22$$

4.4.2. H Formülasyonu[13]

Denklem 4.7 ohm kanunu, denklem 4.9'de amper yasasında yerine yazılırsa denklem 4.23 elde edilir.

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \sigma \vec{E} \quad 4.23$$

Denklem 4.23' de \vec{E} yalnız bırakılırsa denklem 4.24 elde edilir.

$$\vec{E} = \sigma^{-1} \vec{\nabla} \times \vec{H} \quad 4.24$$

Denklem 4.8 faraday yasasında, denklem 4.24 yerine konulursa denklem 4.25 elde edilir.

$$\vec{\nabla} \times \left[\frac{1}{\sigma} (\vec{\nabla} \times \vec{H}) \right] = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad 4.25$$

4.4.3. T-Ø Formülasyonu[13]

Akım yoğunluğu \vec{j} , Elektrik vektör potansiyel \vec{T} cinsinden denklem 4.26 deki gibi belirtilir.

$$\vec{j} = \vec{\nabla} \times \vec{T} \quad 4.26$$

Denklem 4.26, denklem 4.9 amper yasasında ki \vec{j} yerine yazılırsa denklem 4.27 elde edilir.

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{\nabla} \times \vec{T} \quad 4.27$$

Denklem 4.27 vektör cebir işlemlerinden sonra denklem 4.28 elde edilir.

$$\vec{\nabla} \times [\vec{H} - \vec{T}] = 0 \quad 4.28$$

Skaler manyetik potansiyel \emptyset ;

$$\vec{H} - \vec{T} = -\vec{\nabla}\emptyset \quad 4.29$$

Denklem 4.7'de \vec{E} yalnız bırakılırsa denklem 4.30 elde edilir.

$$\vec{E} = \frac{1}{\sigma} \vec{j} \quad 4.30$$

Denklem 4.30, denklem 4.8 faraday kanununda yerine yazılırsa denklem 4.31 elde edilir.

$$\vec{\nabla} \times \frac{1}{\sigma} \vec{j} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad 4.31$$

Denklem 4.26, denklem 4.30' da yerine yazılırsa denklem 4.32 elde edilir.

$$\vec{\nabla} \times \left[\frac{1}{\sigma} \vec{\nabla} \times \vec{T} \right] = -\frac{\partial \mu \vec{H}}{\partial t} \quad 4.32$$

Denklem 4.32' de \vec{H} yerine denklem 4.29 yazılırsa denklem 4.33 elde edilir.

$$\vec{\nabla} \times \left[\frac{1}{\sigma} \vec{\nabla} \times \vec{T} \right] + \frac{\partial [\mu [\vec{T} - \vec{\nabla}\emptyset]]}{\partial t} = 0 \quad 4.33$$

5. ALÜMİNYUM-EPOXY KOMPOZİT MALZEMELERİN İNDÜKSİYON ISITMA İLE 3D MODELLENMESİ

Bu bölümde Al-Epoxy kompozit malzemeler indüksiyon ısıtma ile 3D modellenmiştir. Modelleme öncesinde modellemeye hazırlık olarak Al-Epoxy kompozit malzemeler hakkında bilgi verilmiştir. İndüksiyon ısıtma ile modellemede, malzemenin elektriksel özellikleri modellemenin doğruluğu açısından çok önemlidir. Al-Epoxy kompozit malzemenin elektriksel özellikleri Vishal Singh, A.R. Kulkarni, T.R. Rama Mohan' ın "Dielectric Properties of Aluminum-Epoxy Composites " adlı makalesinden alınmıştır. Al-Epoxy kompozit malzemenin elektriksel özellikleri değişik frekans ve değişik alüminyum oranların da tablo da verilmiştir. Modelleme öncesi gerekli bilgiler verildikten sonra modellemeye geçilmiştir.

5.1. Alüminyum-Epoxy Kompozit Malzemeler

Modellemede kullanılan Al-Epoxy kompozit malzeme plastik matrisli kompozit malzemeler sınıfına girmektedir. Bu malzemede matris malzemesi epoxy, takviye malzemesi ise alüminyumdur. Takviye geometrisine göre ise parçacık takviyeli kompozitler grubundadır. Modellemede kullanılan Al-Epoxy kompozit malzeme elektriksel özellikler bakımından yalıtkan matris malzemesi ile iletken takviye malzemesinin birleşiminden meydana gelmiştir.

Al-Epoxy kompozit malzemede takviye malzemesi alüminyum tozlardan oluşmaktadır. Matris malzemesi epoxy ise iki kısımdan oluşur, reçine ve sertleştirici bunlar matrisi oluşturmak için eşit hacimde karıştırılırlar.

Kompozit örnekler hazırlamak için parçacık halindeki alüminyum değişik oranlarda (%10-20-30-40-50), sıvı haldeki epoxy reçine içine katılarak üzerine eşit hacimde sertleştirici eklenerek düzgün bir kompozit elde etmek amacıyla iyice karıştırılmıştır. Bu işlemler alüminyumun değişik oranları için tekrar edilmiştir. Elde edilen kompozit karışımlar 40 MPa basınçta, 120 °C sıcaklıkta ½ saat süre ile

preslenmiştir. Sonuçta %10 dan %50 ye değişen alüminyum oranlarında Al-Epoxy kompozit malzeme örnekleri hazırlanmıştır.

Dielektrik ölçümler için örnekler dairesel diskler şeklinde oluşturulmuştur. Mükemmel yüzeyler elde etmek için disklerin iki yüzeyi de zımparalanmıştır. Disk yüzeyleri iyi bir elektrik teması sağlamak amacıyla gümüş boya ile boyanmıştır.

Örnekler ısıtma fırını içerisine yerleştirilen ve empedans analizörüne bağlı test donanımı ile yalıtımlı kablolarla bağlanarak test hazırlığı tamamlanmıştır. Ölçümler 30 - 130 °C sıcaklık aralığının da ve sıcaklık 1 °C/dk lık sabit sıcaklık artışı ile yapılmıştır. Dielektrik sabit ve kayıp faktörü ($\tan\delta$) değerleri her 5 °C lik sıcaklık artışında ve 10kHz – 1 MHz frekans aralığında kayıt edilmiştir [25].

5.2. Al-Epoxy Kompozit Malzemenin Elektriksel Özellikleri

Al-Epoxy kompozit malzemenin indüksiyon ile modellenmesinde gerekli olan elektriksel özellikler 10 kHz, 100 kHz ve 1 MHz frekanslarda ve 30 °C derece sıcaklıkta, alüminyumun %10-50 karışım oranında tablo 5.1., 5.2. ve 5.3. de sunulmuştur. Bu tablolardaki dielektrik sabite(ϵ_r') ve kayıp faktörü($\tan\delta$) Vishal Singh, A.R. Kulkarni, T.R. Rama Mohan' ın "Dielectric Properties of Aluminum-Epoxy Composites" adlı makalede elde ettikleri grafiklerden alınmıştır.

Tablo 5.1. 10kHz 30°C için Al-Epoxy %10-20-30-40-50 Al karışım oranlarına göre Al-Epoxy kompozit malzemenin elektriksel özellikleri[25]

10 kHz 30°C de %10-50 Alüminyum Oranlarında Al-Epoxy Kompozit Malzemenin Elektriksel Özellikleri				
	ϵ_r'	ϵ_r''	Tan δ	σ (S/m)
Epoxy	6,5	0,0903	0,0139	$50,13 \cdot 10^{-9}$
Al-Epoxy / %10 Al	11,2	0,3763	0,0336	$208,73 \cdot 10^{-9}$
Al-Epoxy / %20 Al	16,8	0,6938	0,0413	$385,16 \cdot 10^{-9}$
Al-Epoxy / %30 Al	20,5	0,6949	0,0339	$385,77 \cdot 10^{-9}$
Al-Epoxy / %40 Al	23,2	0,4129	0,0178	$229,22 \cdot 10^{-9}$
Al-Epoxy / %50 Al	48	3,0048	0,0626	$166,8 \cdot 10^{-8}$

Tabloda ϵ_r' : Malzemenin bağıl dielektrik sabiti, ϵ_r'' : Malzemenin dielektrik geçirgenliğinin imajyanel kısmı, $\tan\delta$: Kayıp faktörü, σ : Malzemenin elektriksel iletkenliği (S/m) dir.

Tablo 5.2. 100kHz 30 °C için Al-Epoxy %10-20-30-40-50 Al karışım oranlarına göre malzemenin elektriksel özellikleri [25]

100 kHz 30 °C de Değişik Alüminyum Oranlarında Al-Epoxy Kompozit Malzemenin Elektriksel Özellikleri				
	ϵ_r'	ϵ_r''	Tan δ	σ (S/m)
Epoxy	6	0,201	0,0336	$115 \cdot 10^{-8}$
Al-Epoxy / %10 Al	10,99	0,45	0,0410	$249 \cdot 10^{-8}$
Al-Epoxy / %20 Al	15,88	0,697	0,0439	$386 \cdot 10^{-8}$
Al-Epoxy / %30 Al	19,11	0,812	0,0425	$45 \cdot 10^{-7}$
Al-Epoxy / %40 Al	22,77	0,487	0,0214	$27 \cdot 10^{-7}$
Al-Epoxy / %50 Al	43,55	2,613	0,06	$145 \cdot 10^{-7}$

Kaynak olarak alınan makalede 1 MHz de alüminyumun %20 karışım oranında ki değeri için yapılan ölçümler alınmıştır modellemeye de bu değerler kullanılmıştır. Tablo 5.3.' de bu değerler sunulmuştur.

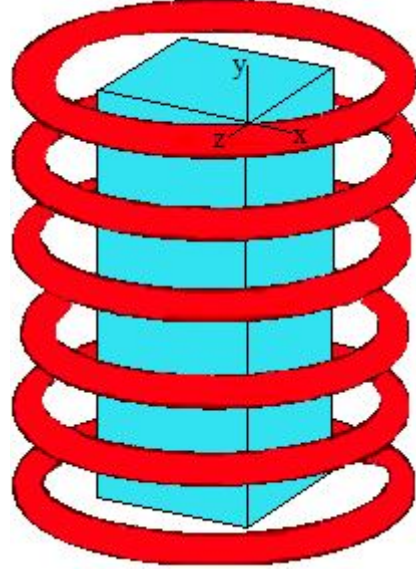
Tablo 5.3. 1 MHz 30 °C için Al-Epoxy %20-40 Al karışım oranlarına göre malzemenin elektriksel özellikleri [25]

1 MHz 30 °C de Değişik Alüminyum Oranlarında Al-Epoxy Kompozit Malzemenin Elektriksel Özellikleri				
	ϵ_r'	ϵ_r''	Tan δ	σ (S/m)
Al-Epoxy / %20 Al	14	0.65	0.046	$36 \cdot 10^{-6}$

5.3. Al-Epoxy Kompozit Malzemenin İndüksiyon Isıtma ile Modellenmesi

Önceki bölümde modellemede kullanılan Al-Epoxy kompozit malzemenin elektriksel özellikleri tablo 5.1., 5.2. ve 5.3. de sunulmuştur. Bir sonraki aşamada model resimleri çizilmiş ve şekil 5.1' de verilmiştir.

Al-Epoxy kompozit malzemenin modelinin boyutları; Uzunluğu (y) 50 mm, genişliği (x) 20 mm ve yüksekliği (z) 20 mm olarak çizilmiştir. Bobin yarıçapı kompozit malzemenin merkezine göre 20 mm olarak verilmiştir.



Şekil 5.1. Al-Epoxy kompozit malzemenin indüksiyon bobini ile gösterimi

5.4. Modelleme

Al-Epoxy kompozit malzemenin elektriksel özellikleri değişik alüminyum oranlarında ve değişik frekanslarda farklılık göstermektedir. Bu yüzden %10-20-30-40-50 alüminyum oranları için 10kHz, 100 kHz ve 1 MHz frekanslarda modelleme yapılmıştır. Modellemede her frekans için bobine 1000 A zamanla değişen akım

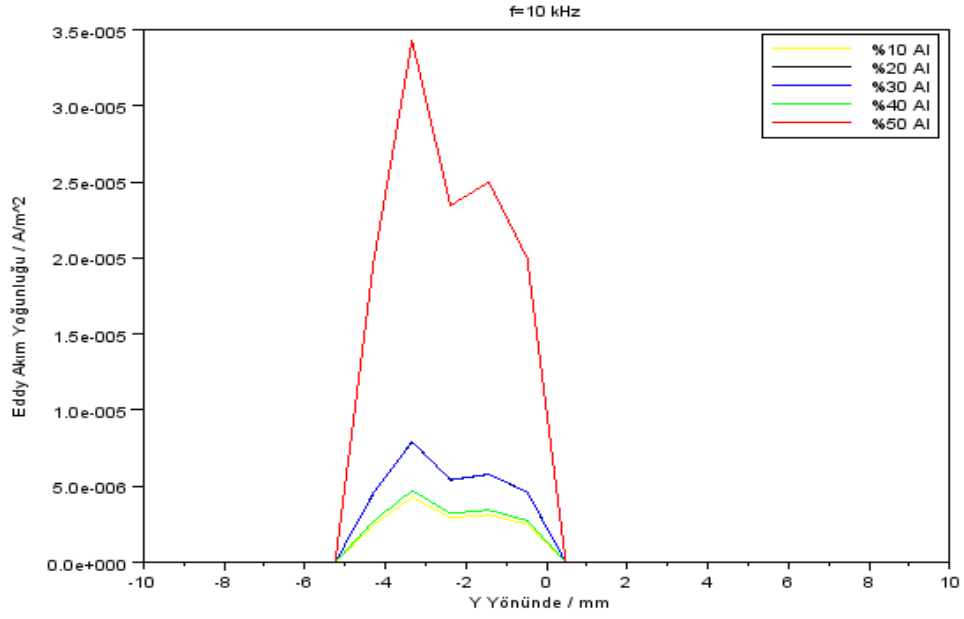
uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar grafik halinde sunulmuştur. Ayrıca şekil 5.2.'te elde edilen örnek bir 3D modelleme sunulmuştur.



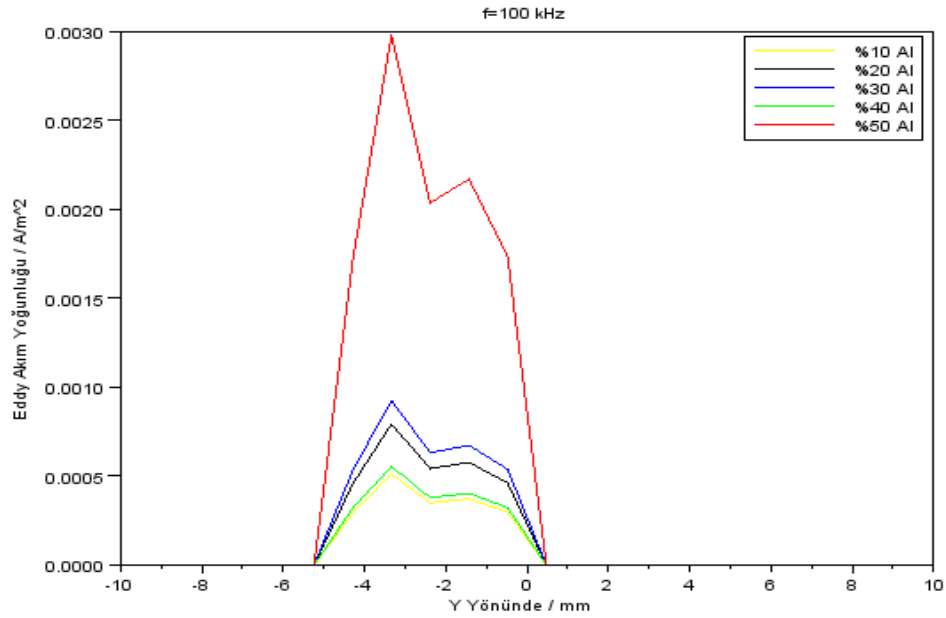
Şekil 5.2. Modelleme sonucunda elde edilen manyetik alan şiddeti 3D görüntüsü

5.5. Modelleme Sonuçları

Modelleme sonucunda malzeme üzerinde indüklenen eddy akımları ve manyetik alan şiddeti değerleri, malzemenin, X ekseninde -1 ve Z ekseninde -1 den başlayarak Y yönündeki değerleridir.

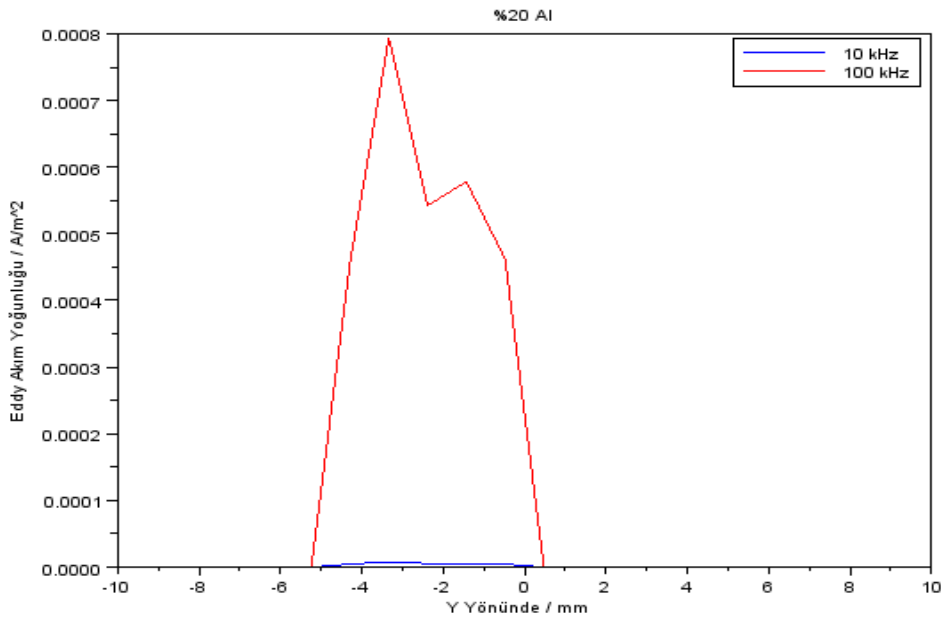


Şekil 5.3. 10 kHz Frekansta %10-20-30-40-50 alüminyum oranlarında Al-Epoxy kompozit malzeme üzerinde Y eksenı yönünde indüklenen eddy akımları grafiği



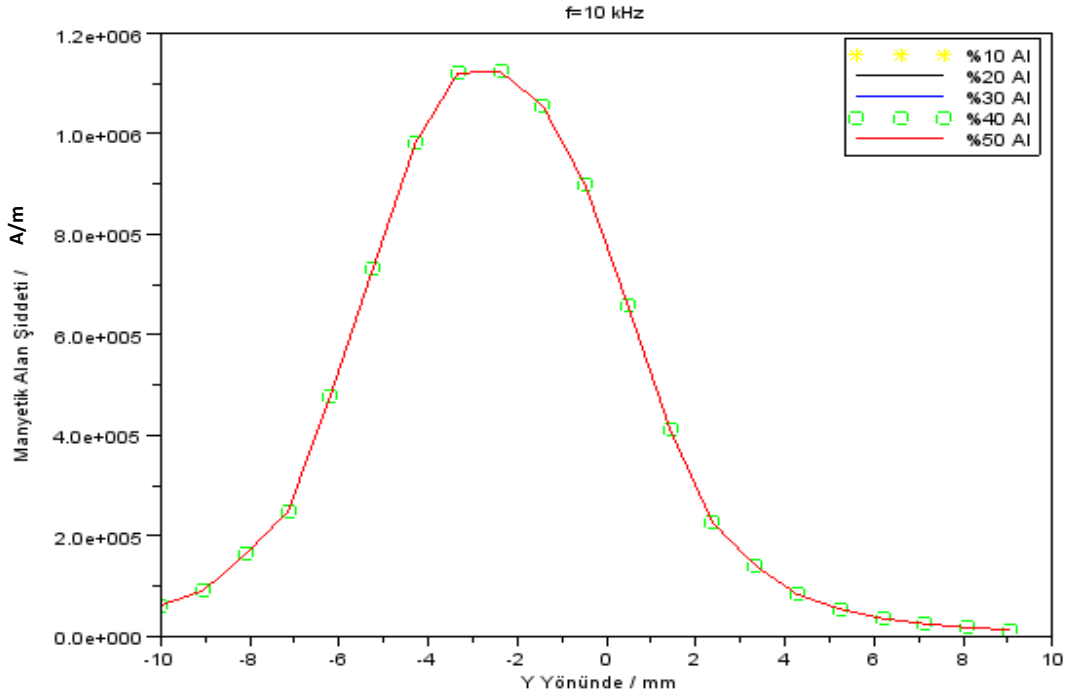
Şekil 5.4. 100 kHz Frekansta %10-20-30-40-50 alüminyum oranlarında Al-Epoxy kompozit malzeme üzerinde Y eksenı yönünde indüklenen eddy akımları grafiği

Şekil 5.3. ve 5.4. incelendiğinde Al-Epoxy kompozit malzemenin alüminyum oranı arttıkça indüklenen eddy akımları artmaktadır. Artan alüminyum oranıyla Al-Epoxy kompozit malzemenin iletkenliği artmaktadır. Bu artış tablo 5.1., 5.2., 5.3. de görülmektedir. İndüksiyon ısıtmanın matematiksel temelleri incelendiğinde (Formül 4.7) ohm kanununda akım yoğunluğunun artışı iletkenliğin (σ) artışına bağlıdır. Bu modellemede de eddy akımlarının artışı iletkenliğin artışından kaynaklanmaktadır.

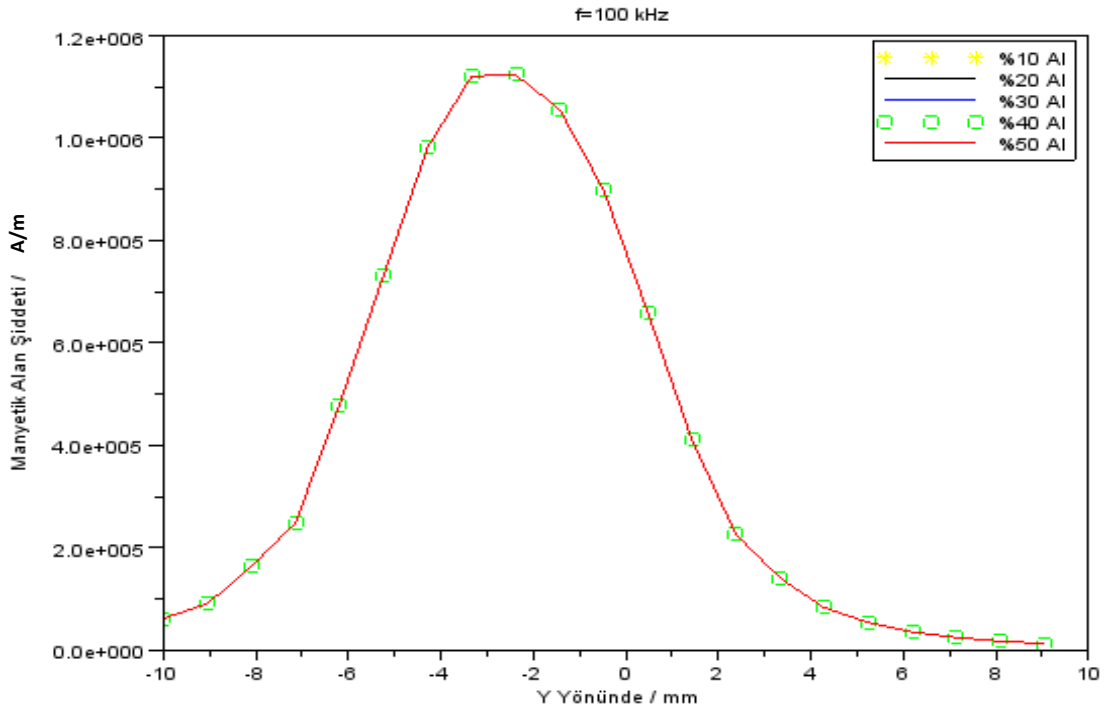


Şekil 5.5. %20 Alüminyum oranında 10 kHz ve 100 kHz frekanslarında Al-Epoxy kompozit malzeme üzerinde Y ekseninde indüklenen eddy akımlarının karşılaştırılması

Şekil 5.5. de görüldüğü gibi %20 alüminyum oranında frekans arttıkça Al-Epoxy kompozit malzeme üzerinde indüklenen eddy akım yoğunluğu artmaktadır. Bu artışın sebebi frekans arttıkça kompozit malzemenin elektrik iletkenliği artmaktadır. Elektrik iletkenliğindeki artışla eddy akım yoğunluğu artmaktadır.

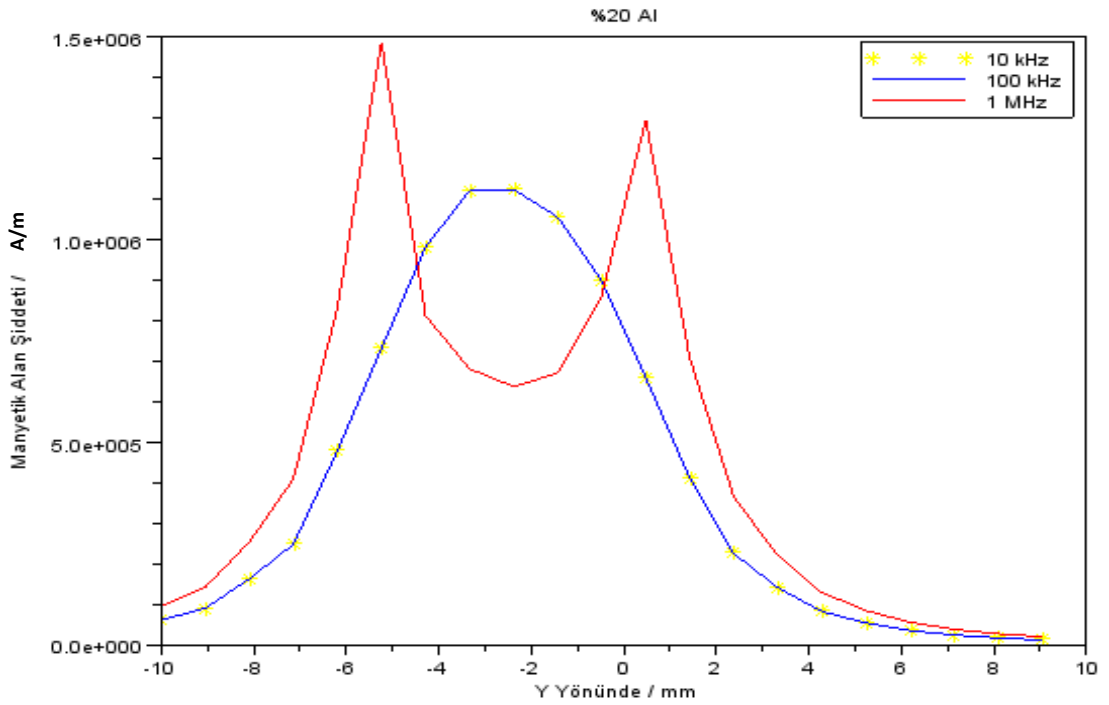


Şekil 5.6. 10 kHz Frekansta %10-20-30-40-50 alüminyum oranlarında Al-Epoxy kompozit malzeme üzerinde Y eksenı yönünde oluşın manyetik alan şiddeti grafiği



Şekil 5.7. 100 kHz Frekansta %10-20-30-40-50 alüminyum oranlarında Al-Epoxy kompozit malzeme üzerinde Y eksenı yönünde oluşın manyetik alan şiddeti grafiği

Şekil 5.6. ve 5.7. incelendiğinde değişik alüminyum oranlarında aynı frekansta manyetik alan şiddetinin değişmediği görülmektedir. Al oranı arttıkça iletkenlik artmaktadır. İletkenliğin artmasına rağmen manyetik alan şiddeti değişmemektedir. Bölüm 4’ te induksiyon ısıtmanın matematik temellerinde Ampere yasası incelendiğinde (Formül 4.4.) manyetik alan şiddeti kaynak akım yoğunluğuna (J_s) ve elektrik alan deplasman vektörüne (\vec{D}) bağlı olduğu görülür. Quasitatic kabulle düşük frekanslarda \vec{D} ihmal edilir. Bu yüzden modellemede malzemenin iletkenliği artsa da manyetik alan şiddeti değişmemektedir. Manyetik alan şiddeti, sadece kaynak akımın değişmesi durumunda ve yüksek frekanslarda değişmektedir.



Şekil 5.8. %20 Alüminyum oranında 10 kHz – 100 kHz ve 1 MHz frekanslarda Al-Epoxy kompozit malzeme üzerinde Y ekseninde oluşan manyetik alan şiddeti grafiği

Şekil 5.8.’ de %20 Alüminyum oranında 10 kHz – 100 kHz ve 1 MHz frekanslarda Al-Epoxy kompozit malzeme üzerinde Y ekseninde oluşan

manyetik alan şiddeti grafiği sunulmuştur. Şekil incelendiğinde 10 kHz ve 100 kHz frekanslarda manyetik alan şiddetinde değişiklik olmamıştır. 1 MHz frekansta ise manyetik alan şiddeti değişmiştir. Bu değişikliğin sebebi olarak frekansın 1 MHz lik seviyelere çıkması ve Quasistatic kabulün bu frekanslarda etkisinin kaybolmasıdır. Çünkü quasistatic kabul düşük frekanslarda geçerlidir.

6. SONUÇLAR

Bu tezde Al-Epoxy kompozit malzeme değişik alüminyum oranlarında ve 10 kHz, 100 kHz ve 1 MHz frekanslarda indüksiyon ısıtma ile modellenmiştir. Modelleme sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

1. Al-Epoxy kompozit malzeme içerisindeki alüminyum oranı arttıkça iletkenlik artmaktadır. İletkenliğin artmasıyla malzeme üzerinde indüklenen eddy akımları artar. Eddy akımları indüksiyon ile ısıtmada malzemenin ısınmasını sağlayan akımlardır. Al-Epoxy kompozit malzemenin alüminyum oranı arttıkça eddy akımları artacağından malzeme daha iyi ısınacaktır.
2. %20 Alüminyum oranında frekans arttıkça Al-Epoxy kompozit malzeme üzerinde indüklenen eddy akım yoğunluğu artmaktadır. Bu artışın sebebi frekans arttıkça kompozit malzemenin elektrik iletkenliği artmaktadır. Tablo 5.2. ve 5.3. incelendiğinde 100 kHz %20 Al oranındaki elektrik iletkenliği 10 kHz deki iletkenliğin on katıdır. Bu artış indüklenen eddy akım yoğunluğunu da arttırmaktadır.
3. Al-Epoxy kompozit malzeme içerisindeki alüminyum oranı arttığı halde 10 kHz ve 100 kHz frekanslarda manyetik alan şiddeti değişmemektedir. Buradan manyetik alan şiddetinin elektrik iletkenliğine bağlı olmadığı sonucuna varılabilir. Ampere yasası incelendiğinde statik gibi kabullerle düşük frekanslarda elektrik alan deplasman vektörü ihmal edilebilir. Bu ihmal sebebiyle düşük frekanslarda manyetik alan şiddeti sadece kaynak akım yoğunluğu ile değişmektedir.
4. Aynı alüminyum oranında yüksek frekanslarda manyetik alan şiddeti değişmektedir. Bu değişimin sebebi ise elektrik alan deplasman vektörünün yüksek frekanslarda ihmal edilemeyecek değerlere ulaşmasıdır. Sonuç olarak yüksek frekanslarda (>100 kHz) manyetik alan şiddeti aynı oranda ki malzemeler için değişmektedir.

KAYNAKLAR

1. Dikici B., Bedir F., Altun H., Galgalı M., “%40 TiC ve SiC Partikül Katkılı Metal Matrisli Kompozitlerin Potansiyodinamik Ve EIS Analizleri”, IV. Makine Tasarım ve İmalat Teknolojileri Kongresi, Konya, Türkiye, 24-25 Kasım 2007.
2. Şahin V., “Alümina Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozit Malzeme Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2007.
3. İnem, B., Gül, F., "Döküm Yoluyla SiC Takviyeli Kompozitlerin Geliştirilmesi", Uluslar Arası Katılımlı 2. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı, ODTÜ, 999-1005, Ankara, 1999.
4. Günay, V., "Si₃N₄ seramiklerin sinterlenmesi", 7. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, 717-722, Ankara, 1993.
5. Bensaïd S., Trichet D., Fouladgar J., “3D- Simulation of Induction Heating of Anisotropic Composite Materials”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol: 41, No: 5, PP:1567-1571, May 2005.
6. Bensaïd S., Trichet D., Fouladgar J., “Electromagnetic and Thermal Behaviors of Multilayer Anisotropic Composite Materials ”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol: 42, No: 4, PP:995-998, April 2006.
7. Trichet D., Chauveau E., Fouladgar J., “ Induction Heating of Composite Materials”, in Proc. CEFC’2000, Milwaukee, WI, P.431, January 2000.
8. Rudolf R., Mischang P., and Neitzel M., “Induction Heating of Continuous Carbon-Fiber-Reinforced Thermoplastics”, Composite Part A: Appl. Sci. Manuf., Vol:31, No: 11, PP:1191-1202, November 2000.
9. Miller A. K., Cthang C., Payne A., Gun M., Menzei E., and Peled A., “The Nature of Induction Heating in Graphite-Fiber, Polymer-Matrix Composite Materials,” in *SAMPE J.*, Vol. 26, 1990, PP: 37–54.
10. Sturman C. P., “Induction Heating of Polymer Matrix Composite Fiber Strands”, Ser. No 08/160, 706, US Pat. No. 5.357.085.
11. Sturman C. P., Rexford Jr., Gray, R. A., “Induction Heating of Polymer Matrix Composite In A Mold Press”, Ser. No 08/160, 712, US Pat. No. 5.483.043.
12. Vives Ch., Bas J., Beltran G., Fontaine G., “Fabrication of Metal Matrix Composites Using A Helical Induction Stirrer”, Materials Science and Engineering, Vol. 173, No. 1-2, December 1993, PP: 239-242.
13. Bensaïd S., “Contribution A la Caracterisation Et A la Modelisation Electromagnetique Et Thermique Des Materiaux Composites Anisotropes”, Universite de Nantes, Cedex France, December 2006.

14. Yalçın H., Gürü M., “Malzeme Özellikleri Malzeme Bilgisi”, Palme Yayıncılık, Ankara, 1-42, (2002).
15. Şahin Y., “Kompozit Malzemelere Giriş”, Seçkin Yayınları, ISBN: 975 02 0328 3, Ankara, 2006.
16. Harris B., “Engineering Composite Materials ”, The Institute of Materials, London, 1999.
17. Soy U., “Metal Matris Kompozit Malzemeler”, Sakarya Üniversitesi (2009).
18. Pandey P.C., “Composite Materials”, Dept.of Civil Eng. IISc Bangalore, August 2004.
19. Pop P. A., Bejinaru G., “ Manufacturing Process And Applications of Composite Materials “, Fascicle of Management and Technological Engineering, Volume IX (XIX), 2010, NR2.
20. Sur G., Şahin Y., Gökkaya H., “Ergimiş Metal Karıştırma ve Basınçlı Döküm Yöntemi ile Alüminyum Esaslı Tanecik Takviyeli Kompozitlerin Üretimi”, J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ. Vol 20, No 2, 233-238, Ankara, 2005.
21. Deniz M.E., “Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri ve Isıl İşleme Presleme Tekniğini Kullanarak Kompozit Malzeme Üretecek Bir Düzeneğin Tasarım ve İmalatı”, Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Şanlıurfa, 2005.
22. Eker A.A., “Metal Matrisli Kompozit Malzemeler ve Üretim Yöntemleri”, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Kasım 2008.
23. Apelian D., Lawley A., Mathur P., Luo, X.J., “Fundamentals of Droplet Consolidation During Spray Deposition”, Pow. Metall. Conf., 19, 397-424 USA, 1988.
24. Beek V., “L.K.H. Progress in Dielectrics ”, Heywood, Vol. 7, P.69, London, 1967.
25. Singh V., Kulkarni A.R., Mohan T.R., “Dielectric Properties of Aluminum-Epoxy Composites ”, Journal of Applied Polymer Science , Vol. 90, 3602-3608, India, 2003.
26. Fahircahild Semiconductor, “ İnduction Heating System Topology Review” , July 2000.
27. Callebaut J., “İnduction Heating”, Section:7, Energy Efficiency, February 2007.
28. http://www.inductionatmospheres.com/induction_heating.html, (02.03.2011)

29. Inan S.U.,Inan S.A., "Engineering Electromagnetic". Addison Wesley,Melno Park California, 1999.
30. <http://www.ceia-power.com/applications.asp?app=Annealing>, (06.05.2011)
31. Wai H., Aung S.S., Jr., Win T., "Work Coil Design Used in İnduction Hardening Machine", World Academt of Science, Engineering and Technology 42, 2008.
32. Çavdar U., "Demir Esaslı Toz Metal Parçaların İndüksiyonla Sinterlenmesinde Parametrelerin Belirlenmesi", Doktora Tezi, Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa, 2009.
33. Zinn, S., Semiatin, S.L., "Elements of Induction Heating Design, Control and Applications", EPRI, ASM International, USA, p.p. 3, 12-13, 1988.
34. Kraus J.D., Fleisch D.A., "Elektromagnetics With Applications", Mcgraw-Hill İnternational Editions, Fifth Edition, New York, 1999.
35. Bıró O., Preis K., "On the Use of the Magnetic Vector Potential in the Finite Element Analysis of Three-Dimensional Eddy Currents", IEEE Transactions on Magnetics, Vol:25, No:4, july 1989.
36. Bermúdez A., Rodríguez R., Salgado P., "Finite Element Methods for 3D Eddy Current Problems in Bounded Domains Subject to Realistic Boundary Conditions. An Application to Metallurgical Electrodes", Commun. Numer. Meth. Engrg., 14, 581.593.
37. Griffiths D.J., "Elektromagnetik Teori", Güven Kitap Yayın, İstanbul, 1996.
38. Durukan İ.,"Effects of İnduction Heating Parameters on Forging Billet Temperature", The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Tecnical University, Ankara, September 2007.
39. <http://tr.wikipedia.org/> (25.10.2011)
40. Kim H.,Yarlagadda S.,Gillespie J.W., Shevchenko N.B., Fink B.K. , "A Study On the İnduction Heating of Carbon Fiber Reinforced Thermoplastic Composites."
41. Roylance D.,"İntroduction to Composite Material", Department of Materials Science end Engineering Massachusetts İnstitute Technology, Cambridge, March 2000.
42. Brendan J., " İntroduction to Composite Material ", Departman of Mechanical Engineering University of Nevada Las Vegas, MEG 495/695, Las Vegas, 2005.
43. Yu H.T., Shao K.R., Zhou K.D., Kavers J.D., "H Method for Solving 3D Eddy Current Problems" IEEE Transactions on Magnetics, Vol: 31, No: 6, November 1995.

44. Balakrishnan A., Palmer W.D., Joines W.T., Wilson T.G., "The Indutance of Planar Structures", IEEE Transactions on Magnetics, 0-7803-0/93, 1993.
45. Schmidt Ī., Enders A., "Characterization and Consept for Optimazation of Planar Spiral High Power High Frequency Coils", IEEE, 978-1-4244-4267-6/09, 2009.
46. Rudnev V., " Handbook of induction heating, Manufacturing engineering and materials processing", Marcel Dekker, pp 150-154 166-172, New York, 2003.

ÖZGEÇMİŞ

Ayhan Alınca, 1979 yılında Bolu/Kıbrısık' da doğdu. Abant İzzet Baysal Üniversitesin'den 2003 yılında mezun oldu. Askerlik görevini Ankara' da 2005 yılında tamamladı. İş kariyerine 2005-2007 yılında özel bir şirkette Üretim ve kalite kontrol şefi olarak başladı. 2007 yılında özel bir şirkette Elektrik-Elektronik bakım şefi olarak çalışmaya başladı, halen bu şirkette çalışmaktadır. 2009 yılında Maltepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde başladığı yüksek lisansı tez aşamasında halen devam etmektedir.