

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FERROMANYETİK REZONANS TEKNİĞİ
İLE GÖRÜNTÜLEME (FMRI)**

ADEM ALBAYRAK

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FİZİK ANABİLİM DALI

GEBZE

2011

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FERROMANYETİK REZONANS TEKNİĞİ
İLE GÖRÜNTÜLEME (FMRI)**

ADEM ALBAYRAK

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FİZİK ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI

DOÇ.DR. MUSTAFA ÖZDEMİR

GEBZE

2011



YÜKSEK LİSANS TEZİ JÜRİ ONAY SAYFASI

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 04.07.2011 tarih ve 201.../21... sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 08.09.2011 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Adem ALBAYRAK' ın tez çalışması FİZİK anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Doç. Dr. Mustafa ÖZDEMİR

ÜYE

: Yrd. Doç. Dr. NUMAN AKDOĞAN

ÜYE

: Yrd. Doç. Dr. Fikret YILDIZ

ONAY

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/...../20... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

TEZ BAŞLIĞI: FERROMANYETİK REZONANS TEKNIĞİ İLE GÖRÜNTÜLEME (FMRI)

YAZAR ADI: ADEM ALBAYRAK

Anahtar kelimeler: Ferromanyetik Rezonans, FMR Görüntüleme, Mikro şerit FMR Prop, Tahribatsız Muayene (NDT)

Bu çalışmada manyetik rezonansın (MR) ana ilkesi dikkate alınarak mikro şerit hat üzerine Yttrium Iron Garnet (YIG) uç koyulmuş olan yeni bir tip ferromanyetik rezonatör (FMR) önerilmektedir. Mikro şerit hat benzetimi gerçekleştirilip üzerine yerleştirilmiş olan uç ile manyetik rezonans görüntüleme (MRI) tekniği sayesinde hassasiyet sağlanmıştır: özellikle altını çizmek gerekir ki açık elektrodinamik (mikro şerit hat) yapıya sahiptir. Bu yöntemle etkili görüntüleme sistemi tasarımı da benzetimle elde edilen özelliklerin elde edilmesi amaçlanmıştır.

MRI sistemi FMR perturbasyon yöntemini temel alarak oluşturulur. Çalışma frekans aralığı 1-20 GHz'tir.

Mikroşerit hat FMR spektrometresi kullanılarak FMR deneyleri yapılmıştır. Prob olarak Yttrium Iron Garnet (YIG) uç kullanılmıştır. FMR sinyal perturbasyonu kullanılan örneğin iletkenliğine bağlıdır. Elde edilen görüntüler; üzerinde çalışılan malzemenin (manyetik olmayan malzemeler için) iletkenlik dağılımı hakkında bilgi vermektedir. Diğer bir yandan malzemenin manyetik olarak homojen olmayan yapısının ortaya çıkarılmasında da kullanılabilir.

Bu yaklaşım yarı iletken yonga için tahribatsız muayene yapmak üzere MRI mikroskop yapılmasında da kullanılabilir. Bu yöntemle güneş paneli yapısının tahribatsız muayene (NDT) için kullanılmıştır.

SUMMARY

TITLE OF THESIS: FERROMAGNETIC RESONANCE IMAGING (FMRI)

AUTHOR: ADEM ALBAYRAK

Key Words: Ferromagnetic Resonance, FMR Imaging, Microstrip FMR Probe, Non-Destructive Testing (NDT)

That thesis have been considered the main principle of Magnetic Resonance (MR) where is fixed Yttrium Iron Garnet (YIG) tip proposed new type of FMR spectrometer on the bases of micro strip line application. Demonstrated micro strip line simulation of micro strip after for development magnetic resonance imaging (MRI) technique getting sensitivity with tip which is creating magnetic resonance imaging (MRI); especially should be underlined that we have applied open electro dynamic structure (micro strip line) which shown sufficient properties for creating imaging system obtained results demonstrated efficiency of properties method.

MRI system is based by using FMR perturbation method. It's operated in the frequency range in between 1 to 20 GHz.

FMR observations were done by using strip line FMR spectrometer. Probe has been created by using yttrium iron garnet tip. Perturbation FMR signal depending on conductivity of sample. Obtained image is giving information about conductivity distribution of studied objects (for non-magnetic samples). From another hand method may be used for magnetic inhomogeneous mapping. Method considered may be is going to used for creating new kind of tomography –spin wave tomography-.

This approach will be used it for creating MRI microscopy for semi-conductor chips Non Destructive Testing (NDT) controls. In fact this method could be used NDT for solar panel defects detection.

TEŞEKKÜR

Çalışmasının fikir olarak ortaya atılmasından uygulamanın sonuçlanmasına kadar sabırlı desteklerini ve değerli bilgi birikimlerini paylaşan, gerekli yönlendirmeleriyle tez çalışmasının sonuçlanmasında desteklerini esirgemeyen değerli danışmanım Doç. Dr. Mustafa ÖZDEMİR'e, fikrin uygulanması konusunda ekipman desteği sağlayan ve desteklerini sunan TÜBİTAK MAM Malzeme Enstitüsü Uluslararası Yüksek Teknoloji Laboratuvarı (UYTL) Müdürü Prof. Dr. Alexey VERTII' ye ve tezin tashihinde emeğini esirgemeyen Atilla UNAL'a, Dr. Sinan KAZAN'a teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iV
SUMMARY	V
TEŞEKKÜR	Vi
İÇİNDEKİLER	Vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	iX
ŞEKİLLER DİZİNİ	Xii
TABLolar DİZİNİ	XVi

BÖLÜM 1.

GİRİŞ	1
-------	---

BÖLÜM 2.

TEMEL KAVRAMLAR VE BİLGİLER	3
2.1. Ferromanyetizma	3
2.2. Ferromanyetik Rezonans	5
2.3. Manyetik Rezonansı	11
2.4. YIG' in Manyetik Özellikleri ve Kristal Yapısı	13
2.5. Tahribatsız Muayene ve Girdap Akımları (Eddy Current)	16
2.5.1. Tahribatsız muayene	16
2.5.2. Girdap akımları (eddy current) muayenesi	18

BÖLÜM 3.

DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE VERİLER	21
3.1. Rezonans Şartının genel ifadesi	21
3.2. Mikroşerit Hat Tasarımı	25
3.3. Mikroşerit İletim Hattı Teorik Tasarımı	29
3.4. Bilgisayar Program Uygulamaları	32
3.5. Ansoft HFSS (Yüksek Frekans Yapı Benzetimi)	35
3.6. Program Sonuçları	40
3.7. FMR Spektroskopisi	42
3.8. Farklı Malzemeler İçin Spektroskopisi Geliştirilmesi	47

BÖLÜM 4.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER	62
KAYNAKLAR	68
ÖZGEÇMİŞ	71

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

<u>Simge</u>	<u>Açıklama</u>
FMR	: Ferromanyetik Rezonans
MRI	: Manyetik Rezonans Görüntüleme
NDT	: Tahribatsız Muayene
RF	: Radio Frekansı
E	: Elektrik Alan Bileşeni
N_d	: Demagnetizasyon Faktörü
MD	: Mikrodalga
G	: Spektroskopik Yarılma Faktörü
H	: Manyetik Alan Bileşeni
J	: Değiş Tokuş İntegrali
M	: Doyum Magnetizasyonu
M	: Spin Açısal Momentumu
M_b	: Bohr Manyetonu
VNA	: Vektör Network Analizör
ω_0	: Öz Titreşim (Larmour) Frekansı
YIG	: Yttrium Ion Grnet
N	: Özdeş Spin Sayısı
P	: Spin Numarası
G	: Spinin Açısal Momentumu
M_p	: Spektroskopik Yarılma Faktörü
E_r	: Bağlı Dielektrik Sabiti
3D	: Üç Boyutlu
M	: YIG Doyum Magnetizasyonu
H_{dc}	: Harici Mıknatıs Tarafından Oluşturulan DC Alan
H_{RF}	: Bobinin Kuplajı Tarafından Oluşturulan RF Alan
H_{rf}	: Kuplaj Döngüsünün Dinamik Alanının Genliği
Lift Off	: Proben Test Yüzeyinden Uzaklığı
I	: Bobine Uygulanan Akım
U_d	: Heisenberg Değiş tokuş Etkileşme Enerjisi

J	: Değiştokuş (Exchange) İntegrali
U	: Spin Dalga Genliği
V	: Spin Dalga Genliği
N_x	: Örneğin Geometrisine Bağlı X Eksenli Demanyetizasyon Faktörü
N_y	: Örneğin Geometrisine Bağlı Y Eksenli Demanyetizasyon Faktörü
N_z	: Örneğin Geometrisine Bağlı Z Eksenli Demanyetizasyon Faktörü
B_p	: Manyetik Momentin Sahip Olduğu Enerji
H	: Plank Sabiti
N_d	: Örneğin Geometrisine Bağlı Demanyetizasyon Faktörü
F	: Toplam Efektif Manyetik Alan Serbest Enerji Yoğunluğu
R	: Probun Giriş Empedansı
X	: Probun Giriş Reaktansı
M	: Miknatıslanma Vektörü
H_m, H_θ, H_r	: Dış Manyetik Bileşen Vektörü
H_0	: Zeeman Yarılanmasını Sağlayan Sabit Manyetik Alan
W_{ik}	: Geçiş Frekansı
M_{rf}	: Yüzeye Dik Hareket Eden Zamana Bağlılık Terimi
G	: Lande Faktörü
E_i, E_k	: Manyetik Alan Etkisiyle Yarılanan Enerji Seviyeleri
F_D	: Domain Duvarı (Domain Wall) Enerjisi
F_{mc}	: Kristal Anizotropi Enerjisi
F_{me}	: Manyeto Elastik (Gerilim) Anizotropi
H_{dc}	: Zeeman Enerjisi İkinci Terimi
$H_{(I)}$	: Etkin İç Alan
$H_{(0)}$	: Uygulanan Manyetik Alan
F_{ex}	: Değiş-Tokuş (Exchange) Enerjisi
In Plane	: Örnek Düzleminde

Out Of Plane	:	Örnek Düzlemine Dik Olarak
T	:	Tork
SWR	:	Duran Dalga Oranı

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>		<u>Sayfa</u>
2.1.	Basit bir ferromanyetik maddede taban enerji durumunda spinlerin sıralanışı.	3
2.2.	Birçok bölgeden oluşmuş bir ferromanyetik madde içinde spinlerin yönelimleri.	5
2.3.	Hesaplamalarda kullanılan eksen takımı ile mıknatıslanma ve manyetik alanın birbirlerine göre yönelimleri.	9
2.4.	Bir nikel kristalinde ferromanyetik domenler.	11
2.5.	Saf YIG'in kübik yapısı.	15
2.6.	Girdap Akımları Yöntemi.	19
3.1.	H dış alan etrafında serbest presesyon hareketi.	21
3.2.	a) 3-boyutlu mikro şerit hat , b) 2-boyutlu mikro şerit hattın kesit görünümü.	27
3.3.	Mikro şerit hattın değişik dielektrik malzemeleri için karakteristik empedansın W/h oranı ile değişimi.	28
3.4.	Mikroşerit iletim hattı gösterimi.	29
3.5.	Mikro şerit iletim hattının üstten görünümü.	29
3.6.	$\varepsilon_r = 6,15$ dielektrik malzeme için değerler.	33
3.7.	$\varepsilon_r = 9,8$ ve $4,4$ dielektrik malzemeler için mikroşerit parametreleri.	33
3.8.	$\varepsilon_r = 9,8$ ve $4,4$ dielektrik malzemeler için mikroşerit parametreleri.	34

3.9.	Projenin bütün yapısını gösteren pencere.	35
3.10.	Model parametrelerinin değiştirilebildiği pencere.	36
3.11.	Tasarlanan modeli ve modeli oluşturan bileşenleri gösteren pencere.	36
3.12.	Modelin oluşturulduğu bileşenler ve nasıl oluşturulduğunu gösteren kısım da aşağıda verilmiştir. “Material “ , bileşenin malzemesinin türünü gösterir.”Object” 3boyutlu Nesneyi, “Object command history “ de nesnenin hangi işlemlerden geçerek oluşturulduğunu gösteren kısımdır.	37
3.13.	3D Modeller diye tanımlanan grafik alanına koordinatlar - istenilen boyutlar sağlanacak şekilde – girilerek 3-boyutlu model oluşturulur. “Property Window” yardımıyla modelin özellikleri belirlenir. “Objects” altında air , ceramic,copper ” olarak ilgili bileşenler görülmektedir.	38
3.14.	Mikro şerit iletim hattı benzetimi.	38
3.15.	Analiz frekans aralığı ve çözünürlük HFSS → Analysis Setup → Add Sweep yoluyla tanımlanır.	39
3.16.	Modelin doğru oluşturulup oluşturulmadığını, programın derlenecek hale gelip gelmediğini görmek için “validation check” ile kontrol gerçekleştirilir.	39
3.17.	Analizi başlatmak için HFSS → Analyze All ,, a basılarak analiz başlatılır.	40
3.18.	Gerilim duran dalga oranları.	40
3.19.	Duran dalga oranı.	41

3.20.	FMR Spektroskopi Düzeneği.	42
3.21.	FMR Spektrometrede kullanılan mikro şerit hat (1 örnek düzlemi (in plane), 2 örneğe dik düzlem.	43
3.22.	FMR Spektrometre Blok Diyagramı.	44
3.23.	FMR Spektrometrede Örnek Düzleminde Elde Edilen Rezonans Frekansları.	44
3.24.	Ölçülen ve Hesaplanan Rezonans Çukur Değerleri.	45
3.25.	Ölçülen ve Hesaplanan Rezonans Çukur Değerleri.	45
3.26.	FMR Spektrometrede Örnek Düzleminde Elde Edilen Rezonans Frekansları.	46
3.27.	Ölçülen ve Hesaplanan Rezonans Çukur Değerleri.	46
3.28.	Ölçülen ve Hesaplanan Rezonans Çukur Değerleri.	47
3.29.	Rezonatör kaviteli FMR Spektrometre.	48
3.30.	Mikro şerit hatlı FMR Spektrometre.	49
3.31.	a)Alüminyum Malzeme için Uzaklığa Bağlı Olarak Değişen Frekans-Faz Grafiği b) a grafiğindeki 5.4 GHz ile 5.6 GHz arasının büyütölmüş grafiği.	51
3.32.	a)Alüminyum Malzeme için Uzaklığa Bağlı Olarak Değişen Rezonans Grafiği b) a grafiğindeki 5.44 GHz ile 5.5 GHz arasının büyütölmüş grafiği.	52
3.33.	Alüminyum Malzeme için a) Mikro şerit Hat örnek arasındaki mesafe Frekans Grafiği, b) Mikro şerit Hat örnek arasındaki mesafe Rezonans Çukuru genliği grafiği.	53
3.34.	a) Pirinç Malzeme için Uzaklığa Bağlı Olarak Değişen Frekans-Faz Grafiği b) a grafiğindeki 5.2 GHz ile 5.6 GHz arasının büyütölmüş grafiği.	54

3.35.	a) Pirinç Malzeme için Uzaklığa Bağlı Olarak Değişen Rezonans Grafiği b) a grafiğindeki 5.2 GHz ile 5.6 GHz arasının büyütülmüş grafiği.	55
3.36.	Pirinç Malzeme için a) Mikro şerit Hat Örnek arasındaki mesafe Frekans Grafiği, b) Mikro şerit Hat Örnek arasındaki mesafe Rezonans Çukuru genliği grafiği.	56
3.37.	a) Bakır Malzeme için Uzaklığa Bağlı Olarak Değişen Frekans-Faz Grafiği b) a grafiğindeki 5.4 GHz ile 5.6 GHz arasının büyütülmüş grafiği.	57
3.38.	a) Bakır Malzeme için Uzaklığa Bağlı Olarak Değişen Rezonans Grafiği b) a grafiğindeki 5.4 GHz ile 5.6 GHz arasının büyütülmüş grafiği.	58
3.39.	Bakır Malzeme için a) Mikro şerit Hat Örnek arasındaki mesafe Frekans Grafiği, b) Mikro şerit Hat Örnek arasındaki mesafe Rezonans Çukuru genliği grafiği.	59
3.40.	a) Birleşik malzeme için Uzaklığa Bağlı Olarak Değişen Mesafe - Frekans Grafiği b) Birleşik malzeme için Uzaklığa Bağlı Olarak Değişen Mesafe – Doğrusal Genlik Grafiği.	60
4.1.	FMRI Düzeneği fotoğrafı.	62
4.2.	FMRI Düzeneği blok diyagramı.	63
4.3.	Güneş Panelinin FMRI Uygulaması.	63
4.4.	Güneş panelinin 2D FMRI renkli sonucu.	64
4.5.	Güneş panelinin 2D FMRI renkli sonucu.	66

TABLÖLAR DİZİNİ

<u>Tablo</u>		<u>Sayfa</u>
2.1.	YIG’in özellikleri	15

1.GİRİŞ

Spektroskopi; moleküllerin, iyonların ve çekirdeklerin kuantumlanmış enerji düzeylerini inceleyen bir yöntemdir. İki enerji düzeyi arasındaki geçişe karşı gelen soğurma enerjisine bir spektral çizgi ya da spektrum denir. Spektroskopide geçiş frekanslarına karşılık gelen spektrumlar gözlenir ve bu spektrumların yerleri frekans olarak belirlenir. Net bir spine sahip olan elektron ve çekirdek gibi yüklü parçacıklar bir H alanının etkisinde kalınca manyetik moment ile alanın etkileşmesi sonucu dejenere olan enerji düzeyi ikili durumlara yarılır. Bu durumlar arasındaki geçişler $h\nu$ enerjisine sahip yüksek frekanslı bir fotonun soğurarak alt enerji durumundan üst enerji durumuna veya fotonu yayarak üst enerji durumundan alt enerji durumuna geçerler ve bu olay Manyetik Rezonans olarak adlandırılır [1,16].

Yetmişli yıllarda medikal alanda kullanıma geçmesiyle büyük teknolojik gelişmeler yaşayan manyetik rezonans günümüzde de yaygın olarak kullanılmaktadır. Yöntem, sadece en yüksek doku kontrastını değil, çok düzlemde kesit alınabilmesiyle önemli avantajlar sağlamaktadır. Canlılarda kullanımı; X-ışını gibi zararlı etkilerinin olmaması da yöntemin değerini artıran önemli bir özelliğidir [2].

Üstünlüklerine karşın, görüntülerinin yorumlanmasındaki zorluk, yöntemi itici kılan önemli bir faktördür. Röntgende ve Bilgisayarlı Tomografide bunu bilmek kolaydır. X-ışınının az düştüğü yerler beyaza yakın, fazla düştüğü kesimler siyaha yakın gri tonlarda görülürler. MR görüntülerinin yorumlanmasını güçleştiren neden görüntülerdeki beyazlık ve siyahlığın bu kadar kolay açıklanamamasıdır [2].

Ferromanyetizma çalışmalarında ince filmler kullanılarak ferromanyetik rezonans (FMR) elde edilmesi amaçlanmıştır.

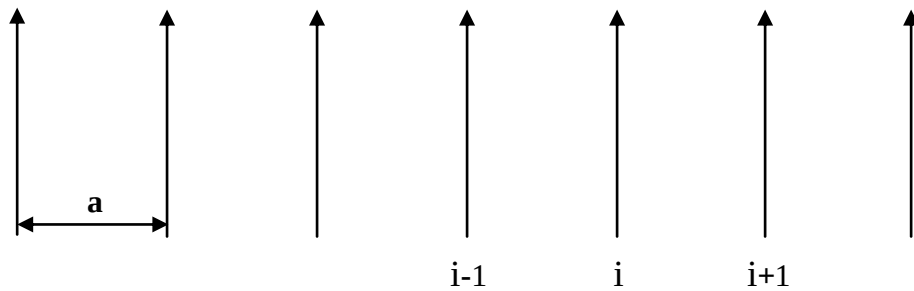
Bu alışmada YIG' in Ferromanyetik Rezonans Görüntüleme (FMRI) uygulamalarında prob olarak kullanılabileceğini gösterdik. Yüksek frekanslarda bile keskin pikler elde ettik. Böylece daha kaliteli grntlemer elde edilebileceğini gösterdik. Tıpta şuanda kullanılmakta olan görüntüleme uygulamaları yüksek manyetik alan altında gerçekleşmektedir. Fakar FMRI uygulamaları ile düşük manyetik alan altında görüntü elde edilebileceği gözlendi.

2. TEMEL KAVRAMLAR VE BİLGİLER

2.1. Ferromanyetizma

Ferromanyetik bir madde dış manyetik alanın bulunmaması halinde bile kendiliğinden oluşmuş net bir manyetik momente sahiptir [3]. Bu manyetik momentin oluşumu, elektron spinlerinin düzenli yönelimine bağlı olarak manyetik momentlerin uyumlu bir şekilde yerleşmiş olduklarını gösterir. Spinler güçlü iç etkileşme nedeniyle paralel durumdadır. Sıcaklık arttıkça gelişi güzel hale gelmeye ve Curie noktası üzerinde paramanyetik malzeme gibi davranmaya başlar. Manyetizasyon eğrisi ve sabit manyetizasyon miktarı, ferromanyetik ve ferrimanyetik malzemelerin önemli özellikleridir [4].

Ferromagnetizma da her birinin büyüklüğü μ olan kalıcı atomik dipollerin bir düzen içine girmesi, çiftlenmemiş elektronlara sahip olan atomlardan kaynaklanır. Klasik olarak sıvı helyum sıcaklığında bile spinleri aynı yönde yönlendirebilmek için, Langevin denkleminde göre çok büyük manyetik alana ihtiyaç vardır. Yani spinler arası etkileşme manyetik olmaktan çok elektrostatik temele dayanmaktadır. İşte bu etkileşmeye değiş-tokuş (exchange) etkileşmesi denir.



Şekil.2.1. Basit bir ferromanyetik maddede taban enerji durumunda spinlerin sıralanışı [5].

N tane benzer spinden oluşan bir sistemde Heisenberg tarafından önerilen değiş-tokuş etkileşme enerjisi şu şekilde verilir:

$$U_{\text{değiş-tokuş}} = -2JN \sum_{p=1}^N \mathbf{S}_p \cdot \mathbf{S}_{p+1} \quad (2.1)$$

Burada J değiş-tokuş etkileşme sabitidir.

Ferromanyetik maddelerin karakteristik özelliklerinden birisi, manyetik alana konulan bu tür maddelerin alan yönündeki net mıknatıslanmasının belli bir alan değerinden sonra sabit bir (M_0) değerini almasıdır ki bu değer doyum mıknatıslanması olarak adlandırılır [3]. M_0 doyum mıknatıslanması maddeden maddeye değişen yani maddenin karakteristik özelliği olan bir niceliktir. Ferromanyetizmanın diğer bir özelliği ise dış alan değişirken mıknatıslanmanın histeristik davranış sergilemesidir [4].

Ayrıca ferromanyetizma yalnızca belirli bir kritik sıcaklığın altında gözlenir. Bu karakteristik sıcaklık ferromanyetik geçiş sıcaklığı veya Curie sıcaklığı (T_c) olarak bilinir. Curie sıcaklığının üzerinde momentler düzensizdir ve bu düzensizlik mıknatıslanmayı sıfıra götürür. Bu bölgede malzeme paramanyetiktir.

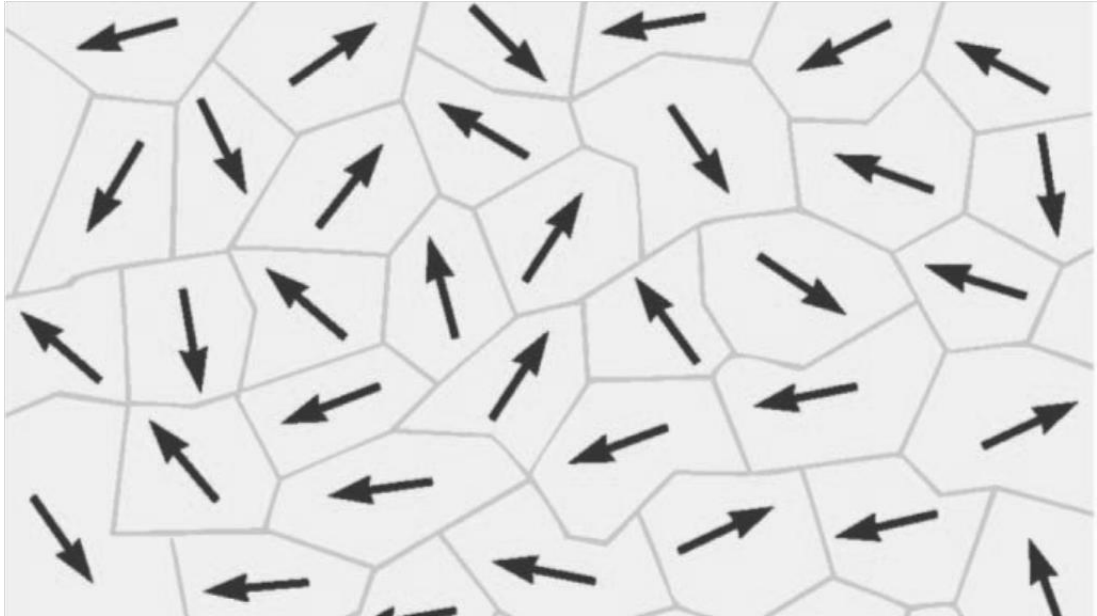
Ferromanyetik fazda manyetik duyguluk χ , Cruie-Weiss yasasına göre;

$$\chi = \frac{M}{H} = \frac{C}{T - c\lambda} \quad (2.2)$$

şeklinde verilir.

Burada C , Cruie sabitidir; T , sıcaklık ve λ' da ortalama iç alan sabitidir. Buna göre manyetik uygunluğun değeri sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir.

Ferromanyetik maddelerdeki manyetik rezonans, temelde elektron paramanyetik rezonans tekniğine benzer. Ancak ferromanyetik örneklerde manyetik alinganlığın enine bileşenleri çok büyüktür. Bunun nedeni, manyetik alan içindeki ferromanyetik maddenin mıknatıslanmasının, aynı alan değerindeki paramanyetik maddenin mıknatıslanmasından çok daha büyük olmasıdır. Ayrıca incelenen örneğin geometrisi de ferromanyetik örnekler için çok önemli rol oynar.



Şekil 2.2. Birçok domain bölgeden oluşmuş bir ferromanyetik malzeme içinde spinlerin yönelimleri [6].

2.2. Ferromanyetik Rezonans

Ferromanyetlerde elektron spin rezonansı, genel olarak çekirdek spin rezonansı ile aynıdır. Ancak ferromanyetik örneklerde alternatif manyetik uygunluğun enine bileşenleri oldukça büyüktür. Bunun nedeni, manyetik alan içindeki ferromanyetik

maddenin mıknatıslanmasının, aynı alan değerindeki paramanyetik maddenin mıknatıslanmasından çok daha büyük olmasıdır [7]. Bununla birlikte incelenen örneğin geometrik yapısı da önem kazanır. Çünkü mıknatıslanma büyük olduğundan, örneğin mıknatıslanmadan kaynaklanan ve mıknatıslanmaya ters yönde ortaya çıkan demagnetizasyon alanının H_d , büyüklüğü,

$$H_d = -N_d M_d \quad (2.3)$$

bağıntısı ile verilen ve değeri çoğu kez uygulanan alanla karşılaştırılabilecek büyüklüktedir. Burada N_d , uygulanan alan doğrultusuna karşı gelen ve örneğin geometrisine bağlı olarak değişen “demagnetizasyon” faktörü dür. M_d ise ilgili doğrultudaki mıknatıslanmanın bileşenidir.

Ferromanyetik rezonans frekansı;

$$\omega_0 = \gamma(H - NM) \quad (2.4)$$

olarak yazılır.

Ferromanyetik rezonans tekniğiyle manyetik malzemelerin manyetik özellikleri hakkında çok yararlı bilgiler elde edilebilir. Ferromanyetik bir örnek statik bir H dış manyetik alanı içine yerleştirildiğinde, manyetik momentler malzemeye özgü karakteristik bir ω_0 frekansı ile presesyon hareketi yaparak denge durumuna geçerler.

H alanına dik yönde uygulanan bir dış mikrodalga alanının frekansı ile momentlerin presesyon frekansı çakıştıkları anda bir güç soğurması olur. Bu soğurulan güç malzemenin sadece iç manyetik yapısına bağlı olmayıp, aynı zamanda dış manyetik alanın büyüklüğüne ve yönelimine de bağlıdır. Spinlerin presesyon frekansı (ω_0) ile (H) arasında malzemenin yapısıyla da ilişkili olan bir bağıntı vardır.

Bu bağıntı kullanılarak malzemenin manyetik yapısını belirleyen değiş-tokuş etkileşme parametresi, hacimsel (bulk) anizotropi enerji yoğunluğu, yüzey anizotropi

enerji yoğunluğu, spektroskopik yarıma faktörü, kristal anizotropisi, durulma zamanları ve benzeri parametreler elde edilebilir. (ω_0) öz frekansı sadece iç manyetik enerjilere değil, aynı zamanda uygulanan (H) statik manyetik alanına da bağlıdır. Dispersiyon bağıntısı olarak adlandırılan (ω) ile (H) arasındaki ilişkinin bir sonucu olarak manyetik enerjileri belirlemek mümkündür. Burada tek tabakalı ve üç tabakalı Ferromanyetik filmlerin dispersiyon bağıntısı elde edilecektir.

Ferromanyetizmaya katkıda bulunan çiftlenmemiş elektron spinleri arasındaki değiş-tokuş etkileşme enerjisi, çizgi genişliğine neden olan ve ferromanyetik elektronlarda oldukça kuvvetli olması beklenen di-polar genişlemenin etkisini büyük oranda yok edecek biçimde, çizgi daralmasına neden olur. Bu yüzden ferromanyetik rezonans çizgileri beklenenden çok daha keskin bir şekilde ortaya çıkar. Dışardan uygulanan statik H alan doğrultusu etrafında $\omega=2\pi\nu$ açısal frekansı ile presesyon yapan bir Ferromagnetik örneğin toplam manyetik momenti H' a bağlıdır [8].

Bir ferromanyetik sistemde, belirli mikrodalga frekansı için karmaşık (kompleks) alınganlığın değeri belli bir alan değerinde maksimumdan geçer. Bu durumda örnek rezonanstadır denir. Rezonans alanları ferromanyetik örneğin manyetik özelliklerine bağlıdır. Böylece ferromanyetik rezonans deneylerinden incelenen örnek hakkında bilgiler edinilir. Klasik olarak, bir H alanı etkisindeki μ manyetik momenti üzerine etki eden dönme momenti (Tork) denklemi:

$$\tau = \mu \times H \quad (2.5)$$

olarak verilir. Diğer taraftan klasik olarak bu torkun, bir atomdaki μ vektörünün eşlik ettiği J açısal momentum vektörünün zamana göre değişim hızına eşit olduğu bilinmektedir. Açısal momentum ile manyetik moment arasında;

$$\mu = \gamma J \quad (2.6)$$

biçiminde bir ilişki olduğu hatırlanırsa bu örnek üzerindeki mıknatıslanmanın düzgün olduğu kabul edilirse (2.5) bağıntısı kullanılarak makroskopik mıknatıslanma için hareket denklemi:

$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} = -\gamma (\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{\text{eff}}) \quad (2.7)$$

olarak yazılır [26]. İfade de $\mathbf{M}$ küresel koordinat sisteminde Manyetizasyondur. Burada $\mathbf{H}_{\text{et}}$, sadece dışarıdan uygulanan alan olmayıp, örnek üzerine etkiyen toplam (etkin) alanı göstermektedir. Yani etkin alan:

$$\mathbf{H}_{\text{et}} = \mathbf{H}_d + \mathbf{H}_0 \quad (2.8)$$

olarak tanımlanır ve $\mathbf{H}_d$ ise mıknatıslanmayı giderici alan (demanyetizasyon) olarak bilinir. (2.7) denkleminin sönüm türü bir etkileşme içermesi için Landau-Lifshitz, Gilbert, Bloch tarafından önerilen sönüm terimlerinden birisi bu ifadeye eklenebilir.

Landau-Lifshitz [Heinrich,1985]

$$\frac{1}{\gamma} \frac{d\mathbf{M}}{dt} = \mathbf{M} \times \mathbf{H}_{\text{et}} - \frac{\lambda}{\gamma M_0^2} (\mathbf{M} \times \mathbf{M} \times \mathbf{H}) \quad (2.9)$$

Gilbert [Frait, et al, 1985]

$$\frac{1}{\gamma} \frac{d\mathbf{M}}{dt} = \mathbf{M} \times \mathbf{H}_{\text{et}} - \frac{\alpha}{\gamma M_0^2} \mathbf{M} \times \frac{d\mathbf{M}}{dt} \quad (2.10)$$

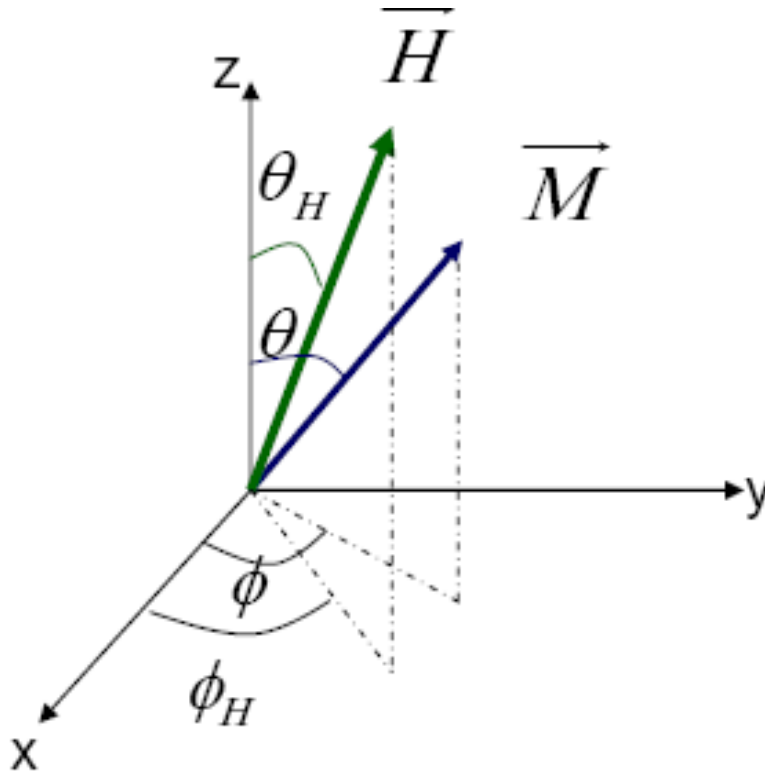
veya Bloch-Bloembergen [Bloembergen, 1950]

$$\frac{1}{\gamma} \frac{d\mathbf{M}}{dt} = \mathbf{M} \times \mathbf{H}_{\text{et}} - \frac{\mathbf{M}_{x,y}}{T_1} - \frac{\mathbf{M}_z - \mathbf{M}_0}{T_1} \quad (2.11)$$

şeklinde yazabiliriz. Yukarıdaki denklemlerde λ Landau-Lifshitz sönüm sabiti, α Gilbert sönüm sabiti, T_1 spin - örgü durulma zamanı, T_2 'de spin- spin durulma

zamanıdır. Bu denklemlerden herhangi biri ferromagnetik bir maddenin H alanı içindeki mıknatıslanmasının genel dinamik davranışını ifade eder [7].

Burada λ , α , T_1 ve T_2 parametreleri durulma zamanını karakterize ederler ve dolayısıyla rezonans eğrisinin çizgi genişliği üzerinde etkilidirler. Her üç tür sönüm terimi de soğurma enerjisinde yaklaşık olarak aynı etkiyi gösterirler. Dolayısıyla amaca göre herhangi birisi kullanılabilir. Çözümlerde işlem kolaylığı bakımından en cazip olan Bloch tipi sönüm terimi içeren ifade olduğundan bu tercih edilmiştir [7]. Ferromanyetik bir örneğin şekli demanyetizasyonun sebebini büyük oranda etkiler.



Şekil 2.3. H dış manyetik alanı altındaki toplam mıknatıslanması M olan sistem için koordinat eksen takımının gösterimi [9].

Deneylerde kullanılan iki farklı geometri vardır. Out-of-plane(örnek x-y düzleminde statik manyetik alan z yönünde iken örneğin x-z yönünde döndürülmesi) geometride alınan deneysel data lar örneğin x-y ve x-z düzleminde döndürülmesi ile

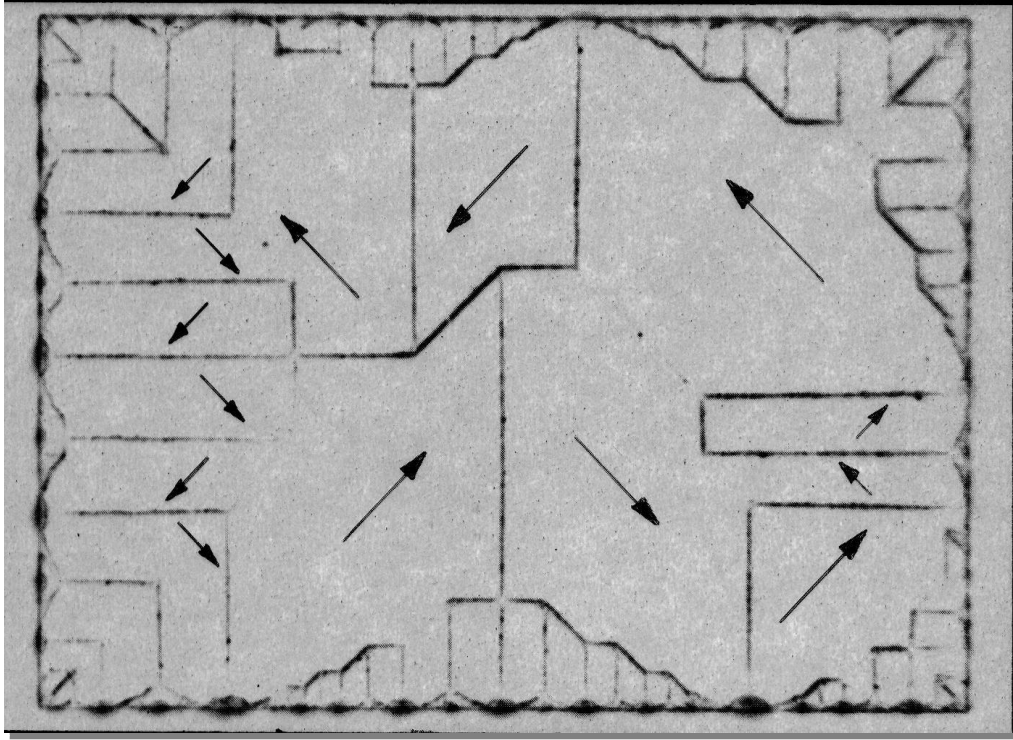
elde edilen deneysel spektraları temsil etmektedir. Benzer olarak in-plane geometrideki deneysel data lar örneğin x-y düzleminde döndürölmesi ile elde edilen deneysel spektraları temsil etmektedir [8].

Bir ferromanyetik örne k Curie sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda doyum değeri ne çok yakın bir değerde mıknatıslandırılabilir. Bu ger çek, gözlenenlere göre zıt görünmektedir. Örneğin, bir demir parçası mıknatıslanmış veya mıknatıslanmamış halde bulunabilir. Bu paradoksa cevap şöyle olacaktır: Bir ferromanyetik malzeme domenlerden oluşur [10].

Her bir domen tamamen Mıknatıslanmıştır ama çeşitli domenler rasgele yönelmiştir ve dolayısıyla makroskopik bir bakış açısıyla bakılırsa mıknatıslanmamış bir görünüm sunulur.Domenlerin varlığının postülası ilk olarak Weiss tarafından 1907’de sunulmuştur [11]. Ferromanyetik malzemelerde, atomik dipoller, bölgeler veya domenler içinde kendilerini aynı yöne yönlendirmeye meyillidirler [12].

Ferromanyetik malzemeler atomik seviyede bir uzun-menzil-düzen yapısı sergilerler. Bu yapı domen içindeki elektronların birbiriyle paralel olmasına sebep olur. Bir domenin büyüklüğü değişir ama genellikle milyarlarca atom içerir [13].

Domenlerin temel uzantısı ferromanyetik malzemelerdeki bireysel domenlerin içinde zaten yüksek derecede bir mıknatıslanmanın bulunmasıdır, ama manyetik alanın kaldırılması durumunda domenler rasgele yöneleceklerdir. Domenlerin bu gösterimleri sadece kavramsaldır ve hassas bir büyüklük ölçüsü veya domenlerin şekillerini veriyor anlamına gelmez. Mıknatıslanma hakkındaki mikroskobik kanıt şunu gösterir: Dış manyetik alana tepki gösteren ferromanyetik malzemelerin net mıknatıslanması aslında uygulanan manyetik alana paralel domenlerin büyümesi ile fazlaca oluşabilir [13].



Şekil 2.4. Bir nikel kristalinde ferromanyetik domenler [14].

2.3. Manyetik Rezonans

Manyetik Rezonans; manyetik momentleri ve açısal momentumu olan manyetik sistemlerde gözlenen bir olaydır. Rezonans kelimesi, dış bir etkenin, manyetik sistemin doğal frekansı ile uyum içinde olmasını açıklar. Bu frekans durgun dış manyetik alanda manyetik momentin jiroskobik presesyonuna karşılık gelir.

Atomik spektrumun belirgin frekansları arasındaki benzerliği ve manyetik rezonans frekanslarının tipik olarak radyo frekans bölgesine (çekirdek spinleri için) yahut mikrodalga frekansı bölgesine (elektron spinleri için) düşmesi nedeniyle pek çok defa radyo frekans (RF) spektroskopisi veya mikrodalga (MD) spektroskopisi olarak adlandırılmıştır [15].

Ferromanyetik bir örnek statik bir manyetik alan içerisine yerleştirildiğinde, manyetik momentler malzemeye özgün karakteristik bir ω_0 (Larmour frekansı) ile presesyon hareketi yaparak denge durumuna geçerler. Eğer statik alana dik yönde ω frekanslı mikrodalga alanı uygulanırsa, statik alanın artmasıyla ω_0 öz titreşim frekansı ile aynı değeri aldığı anda bir güç soğurma olur. Bu güç her iki frekans değerlerinin birbirlerine yaklaşması ile artar ve frekanslar eşitlendiğinde en yüksek seviyeye ulaşır. Bu olaya manyetik rezonans denir. Bu soğrulan güç malzemenin sadece içyapısına bağımlı olmayıp, aynı zamanda dış manyetik alanın büyüklüğüne ve yönelimine bağlıdır [16].

Rezonans yönteminin üstünlüğü, incelenen örnekte tümü ile karşılaştırıldığında çok zayıf olabilen bir katkıyı seçip ayırmayı mümkün kılmasıdır. Manyetik rezonansın fizik ile bütünleşmesinin en büyük sebebi atomik düzeyde süreçler hakkında bilgi verebilmesidir. Burada, açısal momentumu olan manyetik sistemler söz konusudur [16].

Elektron ve çekirdek manyetik rezonansları arasındaki en temel fark, çekirdeksel spin, manyetik moment ve dört kutuplu (quadropol) moment gibi özelliklerinin büyük bir olasılıkla çevreden etkilenmemeleri, buna karşın çok daha büyük fiziksel hacimde olan uyarılmış durumlarını çok daha küçük enerji istemeleri yüzünden çevreye kuvvetle bağlı olmalarıdır. Bir kristale konulan atom serbest haldeki atomdan tamamen farklı açısal momentum, manyetik moment ve dört kutuplu momente sahip olabilir. Spin çiftlenimleri yüzünden yalıtkanlar rezonans göstermez. Demir grubu veya nadir toprak elementleri grubu gibi bazı atomlar tamamlanmamış iç tabakalara sahiptir. Hatta iyonlaştırıldıkları zaman bile yine net bir momente sahiptirler [16].

Özel durumlarda genel durumların geçersiz kalmasına rağmen manyetik rezonansın umulduğu madde sınıflarını ve koşullarını şöyle sıralayabiliriz.

- a. Demir grubu ve nadir toprak elementleri gibi doldurulmamış iç tabakaları olan geçiş elementlerinin bulunduğu maddeler.
- b. Metallerdeki iletkenlik elektronları.
- c. Ferro ve ferrimanyetler.
- d. Yalıtkanlarda elektron ve boşluklar yakalayabilen bozukluklar. Bir alkali halojenden çıkarılan halojenin yerinde yakalanan bir elektron veya yarı iletkenlerde donör ve kabul edici bölgeler [15].

Kuantum mekaniğinde rezonans olayını daha kolay açıklayabilmek için örnek olarak, ışık ile maddenin etkileşmesi verilebilir [1]. Bu durumda atom ile elektromanyetik alan birbiri ile kenetlenen iki periyodik sistem olarak düşünülür. Atomların doğal frekansları geçiş frekansları olarak bilinir ve gelen ışığın frekansı da bu frekanslara göre ayarlanabilir. O halde elektromanyetik alanın frekansı, atomun doğal frekansına ayarlandığı zaman, bu kuantum mekaniksel sistem klasik mekanikteki sarkaç sistemi gibi davranır.

Yani, ya elektromanyetik alandan atoma enerji aktarılır ya da başlangıçta uyarılmış durumda olan atomdan elektromanyetik alana enerji aktarılır. Bu olaylardan birincisine enerji soğurulması ve ikincisine de enerji salınması denir.

Çekirdek spinlerinin uygulanan manyetik alanla etkileşmelerine benzer şekilde, elektronların spinlerinin de manyetik alanla etkileşme içinde oldukları bilinmektedir. Ancak bu etkileşmeler enerji bakımından çekirdeklere ait etkileşmelerden yaklaşık 10^3 kez daha büyüktür ve elektromanyetik spektrumun mikrodalga bölgesine düşmektedir.

2.4. YIG' in Kristal Yapısı ve Manyetik Özellikleri

İttrium demir garnet oda sıcaklığında büyük manyetik doygunlukta ve keskin bir ferromanyetik rezonansa ferromanyetik bir yalıtandır. Bu özelliklerinden dolayı mikrodalga uygulamaları için çok idealdir. Son yarım yüzyıl içinde, YIG ve diğer

ferritler haberleşme ve mikrodalga mühendisliğinde önemli rol oynadılar. Onlar her aletin içindeki merkez parçaların içindedir , mikrodalga filtreler, osilatörler, izolatör, circulator ve phase shifter gibi aletlerde bulunurlar [17].

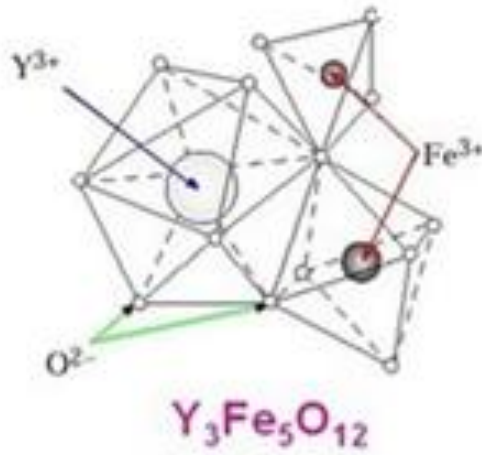
YIG temel bilim perspektifine çok ilginç gelmiştir. 1950'lerin sonlarında, malzemelerde düzensiz bir ferromanyetik rezonans gözlemlendi. Böylece manyetostatik modların gelişiminde etkili oldu. Aynı zaman aralığında, Düzensiz manyetik sistemlerde ve doğrusal olmayan işlemlerin çalışmasında uygun bir deneysel sistem olarak görev yaptı. İlerleyen zamanlarda YIG ince filmlerin, zarf solitonların detaylı çalışmaları ve üretimi için ideal olduğu kanıtlandı [17].

YIG şekil 2.5 den görüleceği üzere, örgü parametresi $a=12.376$ Å olan kübik garnet yapıda 3 çeşit katyon site içeren bir kristal yapıya sahiptir. 3 manyetik olmayan Y^{+3} iyonu c-sitelerinde oturur ve dodecahedral koordinasyona sahiptir. 2 Fe^{+2} iyonu octahedral a-site ye yerleşmiştir ve kalan 3 Fe^{+3} iyonuda tetrahedral d-site lere yerleşmiştir.

Tek kristal itriyumdemir garnet YIG ($Y^3 Fe^5 O^{12}$) ın önemli parametreleri olarak

- 1) Doyum mıknatıslanması
- 2) g-faktörü
- 3) Ferromanyetik rezonans çizgi genişliği ve anisotropi alanı (K_1/M_s) sayılabilir.

Bu özelliklerin doğru olarak ölçülebilmesi mikrodalga bölgesinde çalışan filter ve osilator gibi cihazların doğru çalışmasında son derece önem arz etmektedir. Biz bu çalışma ile yukarıdaki parametreleri kullanarak Ferromanyetik görüntüleme cihazını tasarladık. YIG in diğer fiziksel özellikleri Tablo 2.1 de görülebilir.



Şekil 2.5. Saf YIG'in kübik yapısı [18].

Tablo 2.1. YIG'in manyetik özellikleri [19].

25 °C de Özelliği	Saf YIG
Deneysel Formül	$Y^3Fe^5O^{12}$
Moleküler Ağırlık (grams)	737.95
Kristal Yapısı	Kübik
Uzay Gurubu	La3d
Yoğunluk (g/cm^3)	5.17
Erime Noktası (°C)	1555
Sertlik (moh)	6.5 - 7.0
Örgü Sabiti (°Å)	12.376
Doygunluk Miknatıslanması (Gauss)	1780
Ferrimanyetik Rezonans Çizgi Genişliği (O_e)	<0.30
Manyetik Anizotropi (erg/cm^3)	-6.20×10^{-3}
Manyetik Anizotropi (erg/cm^3)	-0.05×10^{-3}

Etkin g faktörü	2
Gyromanyetik oran (MHz/Gauss ⁻¹)	2.8
Manyetostriktif Katsayı	-2.73 x 10 ⁻⁶
Manyetostriktif Katsayı	-1.25 x 10 ⁻⁶
Manyetostriktif Katsayı	-2.20 x 10 ⁻⁶
Electriksel Özdirenç (Ω/cm)	1 x 10 ¹⁴
Young Modeli	2 x 10 ¹²
Poisson Oranı	0.29
Dielektrik Sabiti	15.0
Curie Sıcaklığı (K)	553
Isıl iletkenlik (W/cm ⁻¹ /°C ⁻¹)	0.074
Isıl Genleşme Katsayı (°C ⁻¹)	1.04 x 10 ⁻⁵
Kırılma Oranı, 1550 nm	2.19
Öz Isı	4.5
Optik Soğurma, 1310 nm (cm ⁻¹)	0.05
Faraday Rotasyon, 1310 nm (omm ⁻¹)	21.4
Aktarganlık 1 (%)	>95
Manyeto-optik Hassasiyet (°A ⁻¹)	0.14
Kırılma Oranı, 1310 nm	2.20

2.5. TAHRİBATSIZ MUAYENE VE GİRDAP AKIMLARI (EDDY CURRENT)

2.5.1 Tahribatsız muayene

Ülkemizde profesyonel anlamda özel sektör tarafından büyük döküm fabrikaları 70’li yıllarda kurulmaya başlamıştır. Öncelikle yaş kum kalıba döküm

teknolojisinin öğrenilmesi, özgün ürün üreten yani döküm bilgisini kendileri oluşturan döküm fabrikalarının sayısı zamanla artış göstermiştir. 90'lı yıllardaki ekonomik krizler döküm sektörünün dışarıya açılma yılları olmuş, bu da yeni üretim teknolojilerinin yanında yeni kontrol teknolojilerine duyulan ihtiyaçları beraberinde getirmiştir. Ülkemizde özellikle 90'lı yıllardaki aşırı otomobil ve traktör talebi, ileri kontrol teknolojilerinin kullanımını ikinci planda bırakırken, 21. Yüzyıla girildiğinde sınırların kalkması, dünya ticaretinin globalleşmesi, büyük otomotiv firmalarının globalleşme eğilimi, döküm sektörünü ileri teknoloji kontrol tekniklerini kullanarak yeni ürünlerin hızlı bir şekilde ve bir defada seri üretime sokmaya mecbur kılmıştır. Özellikle 2000'li yıllarda otomotiv sektöründe kıran kırana bir rekabet başlamıştır. Firmalar çelikten imal ettikleri parçaları sfero dökme demirden üretmek için çalışmalar yapmaya başlamışlardır [20].

Tahribatsız malzeme muayenesi, kalite kontrolün en önemli bölümü olup, üretimin tamamlayıcı son kısmıdır. Tahribatsız muayene, incelenen malzemelere herhangi bir zarar vermeden muayene edilerek, dinamik ve statik yapıları hakkında bilgi edinilen muayene yöntemlerinin tümüne verilen addır. Tahribatsız muayene yöntemi ile malzemelerin imalat esnasında veya belli bir süre kullandıktan sonra örneğin, korozyon veya aşınma gibi nedenlerden dolayı oluşan çatlak, iç yapıda meydana gelen boşluk, kesit azalması vb. hataların tespiti gerçekleştirilir. Bu işlemlerde, malzemelerden herhangi bir numune alma ihtiyacı yoktur. Testler doğrudan iş parçası üzerinde yapılır ve böylece parçaların % 100 muayenesi gerçekleştirilebilir. Kullanıma uygun olmayan veya kullanıma uygunluğunu yitirmiş olan parçalar çoğunlukla kullanımdan kaldırılır [13].

Tahribatsız muayene yöntemleri çeşitli fiziksel prensiplerle, farklı şekillerde uygulanır. Seçilecek yöntem, incelenen malzemenin cinsine ve aranan hata türüne göre belirlenir. Her bir yöntemin diğerine göre üstün tarafları olup, genellikle birbirlerinin tamamlayıcısı durumundadırlar. Tahribatsız muayenede uygulanan yöntemler şu şekilde sıralanabilir:

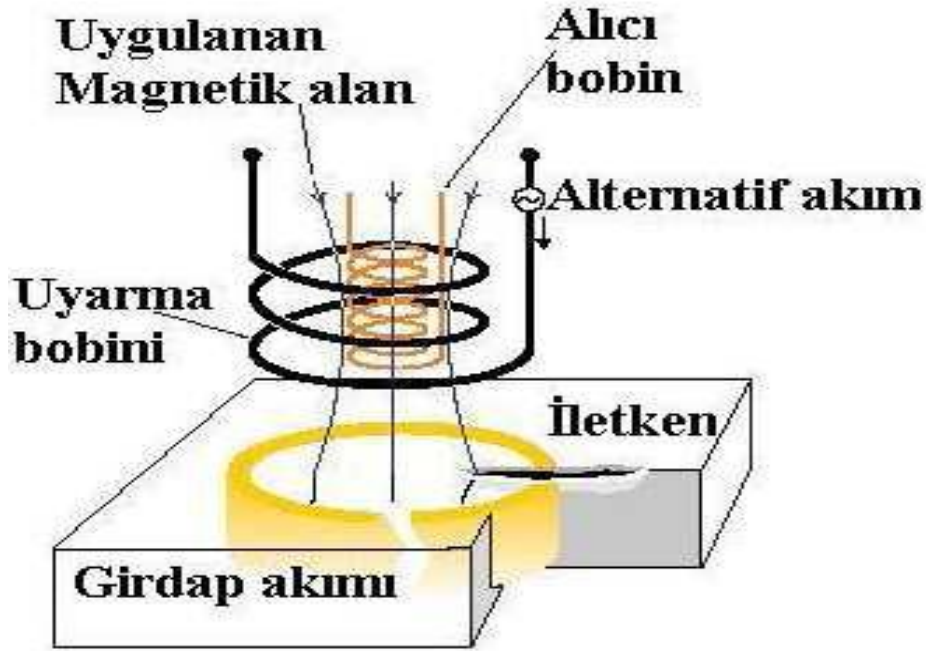
1. Manyetik Parçacık(MT)
2. Radyografik-Radyoskopik Kontrol(RT)
3. Ultrasonik Kontrol (UT)
4. Kaçak Testi(LT)
5. Sonik Kontrol
6. Girdap Akımları(ET)

Burada sadece çalışma konumuz ile benzerliği bulunan Girdap akımları muayenesi hakkında detaylı bilgi verilecektir.

2.5.2 Girdap akımları (eddy current) muayenesi

İletken bir bobine elektrik akımı uygulandığında, bobinde bir manyetik alan oluşur, Eğer iletken bir malzeme bu akımı taşıyan bobine yaklaştırılırsa, iletkenin (test parçası) üzerinde bir girdap akımı meydana gelir. Girdap akımının şiddeti alaşımın veya metalin kimyasal bileşimine veya yapısal durumuna bağlıdır. Girdap akımının frekansının değiştirilmesi, bobin sistemi içerisinde, parçanın yapısal durumunun bir elektromanyetik parmak izinin elde edilmesini sağlar. Bu ise yine alıcı bir bobin ile cihaz tarafından alınır ve değerlendirilir. Parçanın yapısal durumundaki bir değişim, bileşimindeki bir değişim, malzemedeki karışım durumları, karışmış durumdaki iki parti üretim veya yanlış, yetersiz ısıtma işlemi girdap akımı sinyallerinin değişmesine neden olur [16].

Girdap akımları muayenesi gerek elektrik ve gerekse manyetik olarak iletken olan her tür malzemeye uygulanabilir. Bu durumda girdap akımları yöntemi tüm metalik malzemeleri içine alır.



Şekil 2.6. Girdap Akımları Yöntemi [21].

Girdap akımları yöntemi, mutlak değer veren bir yöntem değildir. Tamamıyla bir karşılaştırma yöntemidir. Bu özelliği nedeniyle döküm parçalarda ± 10 HB (10 mm bilya ve 3000 kg yük) hassasiyetle ayırım mümkün olabilmektedir. Fakat burada sınırlayıcı nokta o parçaya uygun bobinleri bulmaktır.

Bu yöntemde malzemedeki homojensizlikler, numunedeki boyutsal toleranslar, bobinlerin sabitlenmesindeki boyutsal değişimler ve sıcaklık değişimleri sonuçları çok fazla etkilemektedir. Özellikle gri dökme demir parçalarda sertlik ayırımı başarılı bir şekilde yapılırken sfero parçalarda örneğin küreselliğe göre ayırırda bu kadar başarılı olunamamaktadır. Ferritik – Perlitik parçaların kimyasal ve dolayısıyla mikroyapı değişimleri cihazdan küresellik için doğru değerlerin alınmasını zorlaştırmaktadır. Fakat bu problem tamamen perlitik (örneğin krank millerinde) parçaların küresellik esaslı ayırımlarında ortadan kalkmaktadır [16].

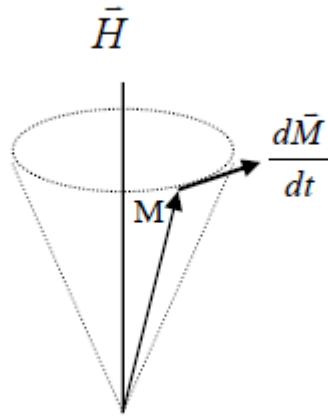
Parçaların çok iyi taşlanmaları ve temizlenmeleri gerekmektedir. Aksi takdirde alınan sonuçlar güvenilirliğini yitirmektedir. Yine her iki bobinin de çok iyi

yerleştirilmesi ve eğer mümkün ise ahşaptan bir aparat(kestamit türü plastik malzemeler de olabilir) zerine sabitlenmesi çalışmalara çok yardımcı olmaktadır.

Girdap akımı yöntemiyle çatlak analizinin genel teorisi, düşük frekans standartları ve feromanyetik rezonans problemlerinin teorisine uygundur, bunlar saf 2 boyut ve 3 boyutlu açık ve kapalı yarık geometrilerinin analizi için geliştirilmiştir. Bu analiz, problemin yüklenmesi ile alanın yarığa uygulanması üzerine temellendirilmiştir. Bu yarıkların yanıtları problemin çalışma frekansına göre arttığını gösterir. Farklı problemler için de deney sonuçlar, pratikte tüm gerçeklenebilir geometriler için, çeşitli çatlak ve yarıkların boyutları hakkında önemli bilgiler edinmemizi sağlar [16].

3.DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE VERİLER

3.1. Rezonans Şartının Genel İfadesi



Şekil3.1. H dış alan etrafında serbest presesyon hareketi [9].

Şekilden görüleceği üzere statik H alanı altında bulunan ferromanyetik malzemenin mıknatıslanma vektörünün hareket denklemi eşitlik (3.1)' de tanımladığımızı daha önce görmüştük.

$$\text{Mıknatıslanma için genel hareket denklemi } \frac{d\vec{M}}{dt} = \gamma \vec{M} \times \vec{H} \quad (3.1)$$

gibidir.

Şimdilik sönüm terimlerini dikkate almamaktayız. Burada küresel koordinat sistemini kullanmak daha elverişli olacaktır. Buna göre mıknatıslanma vektörü ve dış manyetik alanın bileşenleri;

$$\begin{aligned}
M_x &= M \cdot \sin \theta \cdot \cos \varphi \\
M_y &= M \cdot \sin \theta \cdot \sin \varphi \\
M_z &= M \cdot \cos \theta
\end{aligned} \tag{3.2}$$

ve

$$\begin{aligned}
H_{M(Radial)} &= H_x \sin \theta \cdot \cos \varphi + H_y \sin \theta \cdot \sin \varphi + H_z \cos \theta \\
H_{\theta(Polar)} &= H_x \cos \theta \cdot \cos \varphi + H_y \cos \theta \cdot \sin \varphi + H_z \sin \theta \\
H_{r(azimuthal)} &= H_x \sin \varphi + H_y \cos \varphi
\end{aligned} \tag{3.3}$$

Hareket denklemi için;

$$\begin{aligned}
\frac{d\theta}{dt} &= \gamma H_\varphi \\
\frac{d\varphi}{dt} \sin \theta &= -\gamma H_\theta
\end{aligned} \tag{3.4}$$

elde edilir.

Termodinamik denge durumunda mıknatıslanma vektörü $\vec{M}$, toplam efektif manyetik alan yönünü tercih eder. Toplam efektif manyetik alan serbest enerji yoğunluğunun (F') türevi şeklinde verilir;

$$\vec{H}_{eff} = \frac{\partial F}{\partial \vec{M}} \left\{ \text{veya } \vec{H}_{eff} = -\nabla_M F \right\} \tag{3.5}$$

Denge durumunda mıknatıslanma $\vec{H}_{eff}$ 'e paralel olur ve H 'ın θ ve φ bileşenleri olmaz. Öyleyse denge durumu serbest enerjinin minimum koşullarından bulunur;

$$\begin{aligned}
F_{\theta} &\equiv \frac{\partial F}{\partial \theta} = 0 \\
F_{\varphi} &\equiv \frac{\partial F}{\partial \varphi} = 0
\end{aligned}
\tag{3.6}$$

Hareket denklemlerini analitik olarak çözebilmek için bazı ön kabuller yapmalıyız. Öncelikle sistem tam olarak denge durumunda değil de, denge durumu etrafında çok küçük salınımlar yapsın. Bu durumda H_{θ} ve H_{φ} bileşenleri artık 0 değildir ve

$$\begin{aligned}
H_{\theta} &= -\frac{F_{\theta}}{M} \\
H_{\varphi} &= -\frac{F_{\varphi}}{M \sin \theta}
\end{aligned}
\tag{3.7}$$

olur.

Denge durumundan küçük ötelemeler için

$$\begin{aligned}
\delta\theta(t) &= \theta(t) - \theta_0 \\
\delta\varphi(t) &= \varphi(t) - \varphi_0
\end{aligned}
\tag{3.8}$$

yazarak serbest enerji türevleri Taylor açılımı yardımıyla

$$\begin{aligned}
F_{\theta} &= F_{\theta\theta}\delta\theta + F_{\theta\varphi}\delta\varphi \\
F_{\varphi} &= F_{\varphi\theta}\delta\theta + F_{\varphi\varphi}\delta\varphi
\end{aligned}
\tag{3.9}$$

olur. Burada $F_{\theta\theta}$, $F_{\varphi\varphi}$ ve $F_{\theta\varphi}$ ifadelerinden kasıt sırasıyla θ 'ya göre iki kere türev, φ 'ye göre iki kere türev ve önce θ sonra da φ ye göre türev anlamına gelmektedir.

Diğer taraftan bu türevlerin $F_{\theta\theta} = \left(\frac{\partial^2 F}{\partial \theta^2} \right)_{\theta=\theta_0}$ da olduğu gibi

$\theta_0 = \varphi_0 \left(\frac{\partial^2 F}{\partial \theta^2} \right)_{\theta=\theta_0}$ denge durumunda hesaplandığı ve yazım kolaylığı açısından

kısaltılmış olduğu unutulmamalıdır.

Denklem (3.15) ve denklem (3.12) birlikte ifade edilirse;

$$\begin{aligned} F_{\theta} &= \frac{M \sin \theta_0}{\gamma} \dot{\varphi} = F_{\theta\theta} \delta\theta + F_{\theta\varphi} \delta\varphi \\ F_{\varphi} &= \frac{M \sin \theta_0}{\gamma} \dot{\theta} = F_{\varphi\theta} \delta\theta + F_{\varphi\varphi} \delta\varphi \end{aligned} \quad (3.10)$$

ve sapmalar denge durumu etrafında olduğundan $\begin{pmatrix} \dot{\varphi} = \delta \dot{\varphi} \\ \dot{\theta} = \delta \dot{\theta} \end{pmatrix}$ alınabilir çünkü

$$\left(\frac{d\delta\theta}{dt} = \frac{d(\theta - \theta_0)}{dt} = \frac{d\theta}{dt} \right). \quad (3.11)$$

şeklindedir.

Böylece;

$$\begin{aligned} \frac{M \sin \theta_0}{\gamma} \delta \dot{\varphi} &= F_{\theta\theta} \delta\theta + F_{\theta\varphi} \delta\varphi \\ -\frac{M \sin \theta_0}{\gamma} \delta \dot{\theta} &= F_{\varphi\theta} \delta\theta + F_{\varphi\varphi} \delta\varphi \end{aligned} \quad (3.12)$$

halini alır.

Yukarıda verilen diferansiyel denklemlerin çözümünün harmonik bir fonksiyon olacağı bilinmektedir ve ω frekans olmak üzere $\delta\theta, \delta\varphi = e^{j\omega t}$ şeklinde arandığında Denklem (3.15) lineer denklemlere dönüşür.

Bu denklem sisteminin çözümü için katsayılar determinanı sıfır olmalıdır.

$$F_{\varphi\theta}^2 - F_{\theta\theta}F_{\varphi\varphi} + \frac{\omega^2}{\gamma^2} M^2 \sin^2 \theta_0 = 0 \quad (3.13)$$

Buradan rezonans koşulu elde edilmiş olur.

$$\omega_0 = \gamma H_{eff} = \frac{\gamma}{M \sin \theta} = \left\{ F_{\theta\theta}F_{\varphi\varphi} - F_{\varphi\theta}^2 \right\}^{1/2} \quad (3.14)$$

veya

$$\left(\frac{\omega_0}{\gamma} \right)^2 = \frac{1}{M^2 \sin^2 \theta} \left\{ \frac{\partial^2 F}{\partial \theta^2} \cdot \frac{\partial^2 F}{\partial \varphi^2} - \left(\frac{\partial F}{\partial \theta} \frac{\partial F}{\partial \varphi} \right)^2 \right\} \quad (3.15)$$

elde edilir [9].

3.2. Mikro şerit Hat Tasarımı

Mikro şerit hat tasarımında, dielektrik taban malzemesi iki fonksiyonun yerine getirilmesini sağlar. Bunlardan birincisi devre elemanlarının uygun bir şekilde monte edilmesini sağlamak ve mekanik açıdan devre elemanlarına destek olmaktır. İkinci fonksiyon olarak bir iletim hattının parçası olarak görev yapmak ve dielektrik

geçirgenliği ve kalınlığı itibari ile antenin ve ya devrenin özelliklerini belirlemektir [16].

Tasarımda taban malzemedeki dalganın yayılım sabitinin iyi bilinmesi gereklidir. Bu sayede rezonans frekansı, rezonans direnci ve diğer parametreler belirlenebilir. Mikro şeritlerin performansını etkileyen en önemli parametre taban malzemenin dielektrik sabiti ve üretici toleransıdır.

Mikro şerit tasarımda ilk olarak uygun bir dielektrik taban malzemesinin seçilmesi gerekmektedir. Bakır, alüminyum veya altınla kaplı çok sayıda taban malzemesi bulunmaktadır.

Bir tasarımın gerçekleşmesinde genel olarak belli bir sıra takip edilerek hem zamandan tasarruf yapılır, hem de daha iyi sonuçlar elde edilir. İlk yapılması gereken, yapının teorik olarak tasarımının yapılmasıdır. Teorik tasarım vasıtasıyla gerçek tasarım için istenen koşulların sağlandığı yapı değerleri (boyutları, ölçüleri vs.) elde edilir.

İkinci aşamada ise elde edilen değerler yazılım tabanlı simülörler yardımıyla test edilir. İstenilene ne kadar yaklaşıldığı gözlemlenir ve simülör analizinde de optimizasyonlar yapılarak gerçeğe en yakın değerler belirlenir. En son olarak da çeşitli analizler yoluyla elde edilen değerlerle istenen yapı pratik olarak gerçekleştirilir.

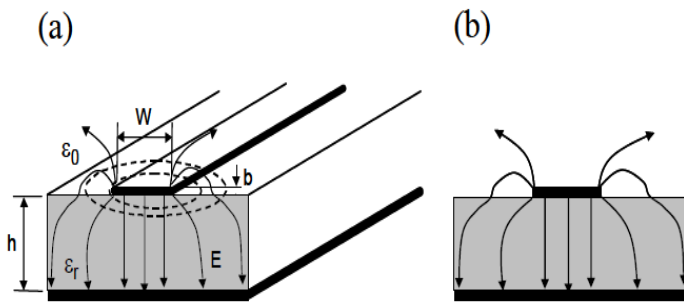
Bir mikro şerit iletim hattının değişik dielektrik malzemeler için tasarımında izlenen yollar anlatılacaktır.

Mikrodalga teknolojisinin gelişmeye başladığı ilk yıllarda dalga kılavuzlarıyla yapılan çalışmalar, sonraki yıllarda şerit tabanlı yapıların gündeme gelmesiyle yerini büyük ölçüde mikro şerit yapılara bırakmıştır. İlk zamanlar araştırmacılar ucuz ve üretiminin basit olması nedeniyle dikkatlerini mikro şerit yapılara yönlendirmişlerdir. Askeri mikrodalga sistemlerinde, seramik ara tabakalı ince film devreleri ve teflon ara tabakalı mikro şerit yapılarla birlikte önemli gelişmeler gerçekleştirilmiştir.

Günümüzde birçok RF ve yüksek hızda çalışan sayısal sistemlerde, çok katlı, mikro şerit ve şerit hat geometrilerinin kombinasyonundan oluşan PCB lerde kullanılmaktadır [22].

Mikro şerit hat, alt kısmı tamamı ile üst kısmı ise kısmen iletken tabaka ile kaplı kayıpsız kabul edilebilecek dielektrik malzemedir. Şekil-3.2’ de mikro şerit hattın üç boyutlu şekli ve iki boyutlu kesiti gösterilmiştir. Mikro şerit yapının elektriksel özelliklerini belirleyen parametreleri vardır. Bu parametreler, dielektrik tabakanın yüksekliği (h) , tabakanın üst kısmında bulunan mikro şerit genişliği (W), bağıl dielektrik sabiti taban malzemesi ϵ_r dir. b ile gösterilen kısım ise mikro şerit hattın kalınlığıdır. Mikro şerit iletim hattında dalga, kılavuzlanarak ilerlemektedir [23].

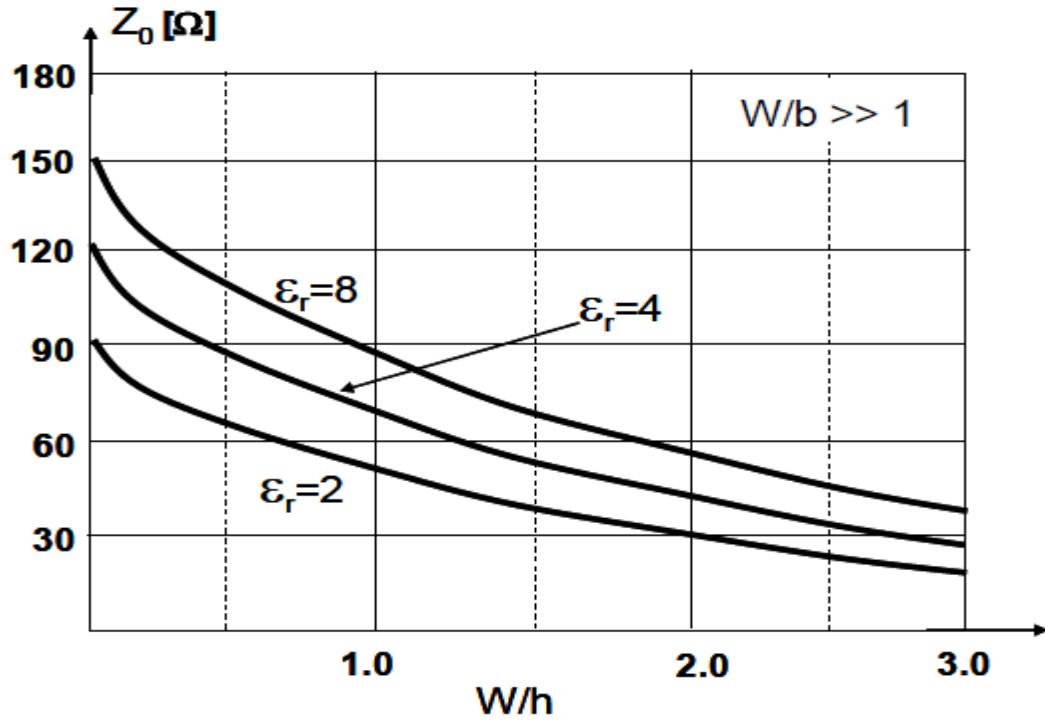
Aşağıdaki şekilde hat üzerindeki elektrik alan çizgileri ve manyetik alan çizgileri gösterilmiştir. Görüldüğü gibi elektrik alan çizgileri çoğunlukla alt ve üst iletkenler arasında (mikro şerit hat altında) yoğunlaşmaktadır. Manyetik alan çizgileri ise kendi üzerinde kapanan ve mikro şerit hattı saran dairesel çizgiler şeklinde bulunmaktadır [24].



Şekil3.2. a)3-boyutlu mikro şerit hat, b) 2-boyutlu mikro şerit hattın kesit görünümü [16].

Mikro şerit hat yapısının parametrelere bağlılığı şu şekilde özetlenebilir. Taban dielektrik sabiti ϵ_r arttıkça enerji daha fazla mikro şerit altında kalacaktır ve iletim

verimi artacaktır. Taban dielektrik yüksekliği h genelde milimetreden de küçük olmaktadır. Üst mikro şerit hattın genişliği W ile dielektrik taban yüksekliği h arasındaki oran genellikle $0.1 \leq W/h \leq 3$ arasındadır. Bu oran hattın karakteristik empedansını belirleyen ana etkindir. Şekil 3.3’ de karakteristik empedansın W/h oranı ile değişimi, farklı dielektrik malzemeler için gösterilmiştir.

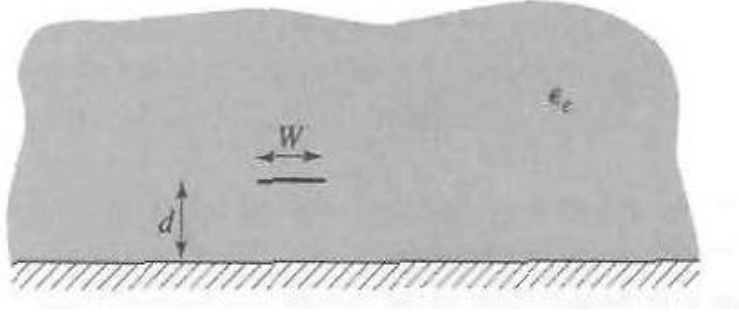


Şekil 3.3. Mikro şerit hattın değişik dielektrik malzemeleri için karakteristik empedansın W/h oranı ile değişimi [16].

Tipik bir mikro şerit hattın karakteristik empedansı (Z_0) 20-30 Ω ile 150-250 Ω arasında değişmektedir. Pratikte bir mikro şerit hattın karakteristik empedansı 50 Ω dur.

Bir mikro şerit hattın karakteristik empedansını arttırmak iki şekilde gerçekleştirilir. Bağlı dielektrik sabiti daha büyük olan taban dielektrik malzeme seçilebilir. Ya da mikro şerit genişliğinin, taban dielektrik malzemenin yüksekliğine oranı (W/h) küçültülebilir [24].

3.3. Mikro şerit İletim Hattı Teorik Tasarımı

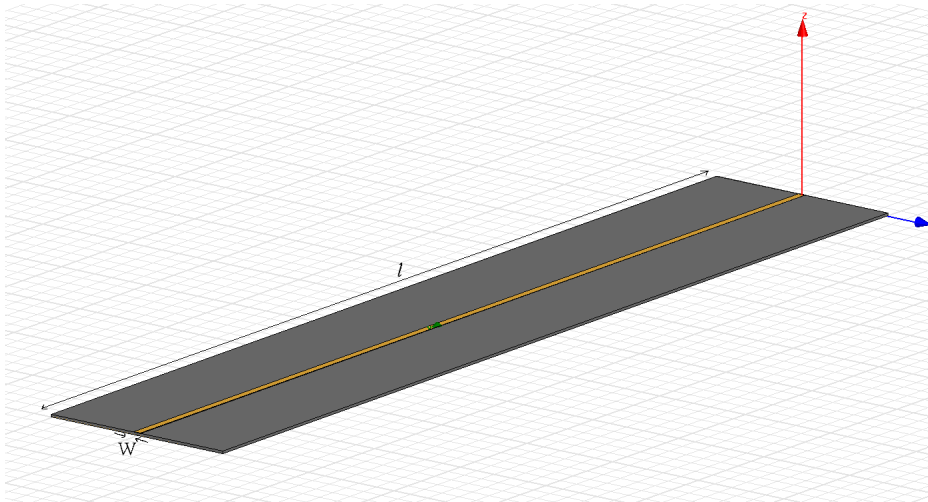


Şekil3.4. Mikro şerit iletim hattı gösterimi

Seçilen dielektrik malzemeler ve ölçülen kalınlıkları:

“ $Z_0 = 50 \Omega$ ” olmak üzere;

- 1- FR_4 epoxy , ($\epsilon_r = 4,4$) , $d = 1,14$ mm
- 2- Duroid , ($\epsilon_r = 6,15$) , $d = 0,71$ mm
- 3- Al_02.03 Ceramic , ($\epsilon_r = 9,8$) , $d = 0,64$ mm



Şekil 3.5. Mikro şerit iletim hattının üstten görünümü.

Teorik Hesaplamalar:

Efektif Dielektrik Sabiti, Karakteristik Empedans ve W/h Formülleri:

$$\varepsilon_e = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + (12d/W)}} \quad (3.16)$$

$$Z_0 = \begin{cases} \frac{60}{\sqrt{\varepsilon_e}} \ln\left(\frac{8d}{W} + \frac{W}{4d}\right) & , W/d \leq 1 \\ \frac{120\pi}{\sqrt{\varepsilon_e} [W/d + 1,393 + 0,667 \ln(W/d + 1,444)]} & , W/d \geq 1 \end{cases} \quad (3.17)$$

$$W/d = \frac{8e^A}{e^{2A} - 2} \quad , W/d < 2$$

$$\frac{2}{\pi} [B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\varepsilon_r - 1}{2\varepsilon_r} \{\ln(B - 1) + 0,39 - \frac{0,61}{\varepsilon_r}\}] \quad , W/d > 2 \quad (3.18)$$

$$A = \frac{Z_0}{60} \sqrt{\frac{\varepsilon_r + 1}{2}} + \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 1} (0,23 + \frac{0,11}{\varepsilon_r})$$

$$B = \frac{377\pi}{2Z_0 \sqrt{\varepsilon_r}} \quad (3.19)$$

Formüllerin Seçilen Malzemelere Uygulanışı:

1 için : ($\epsilon_r = 4,4$)

$$A = \frac{50}{60} \sqrt{\frac{4,4+1}{2}} + \frac{4,4-1}{4,4+1} (0,23 + \frac{0,11}{4,4}) = 1,529$$

$$B = \frac{377\pi}{2.50.\sqrt{4,4}} = 5,643$$

$W/d < 2$ ise;

$$W/d = \frac{8e^{1,529}}{e^{2.1,529} - 2} = 1,913$$

$$\rightarrow W = 2,18 \text{ mm}$$

2 için : ($\epsilon_r = 6,15$)

$$A = \frac{50}{60} \sqrt{\frac{6,15+1}{2}} + \frac{6,15-1}{6,15+1} (0,23 + \frac{0,11}{6,15})$$

$$= 1,575$$

$$B = \frac{377\pi}{2.50.\sqrt{6,15}}$$

$$= 4,773$$

$W/d > 2$ ise;

$$W/d = \frac{8e^{1,575}}{e^{2.1,575} - 2} = 1,468$$

$$\rightarrow W = 1,042 \text{ mm}$$

3 için : ($\epsilon_r = 9,8$)

$$A = \frac{50}{60} \sqrt{\frac{9,8+1}{2}} + \frac{9,8-1}{9,8+1} \left(0,23 + \frac{0,11}{9,8}\right)$$

$$= 2,133$$

$$B = \frac{377\pi}{2.50 \cdot \sqrt{9,8}}$$

$$= 3,781$$

$W/d < 2$ ise;

$$W/d = \frac{8e^{2,133}}{e^{2,2,133} - 2} = 0,975$$

$$\rightarrow W = 0,624 \text{ mm}$$

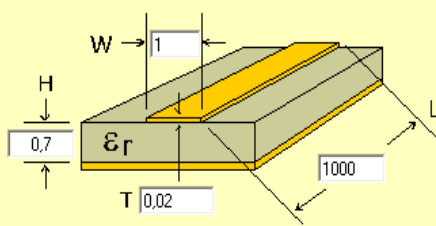
3.4. Bilgisayar Programı Uygulamaları

Bilgisayar ortamında bulunan değerler simule edilerek $Z_0 = 50 \Omega$ değerine en yakın değerler kestirilmiştir. Ve gerçekleştirilecek mikro şerit iletim hattının W (genişlik) değerleri, aşağıda görülen değerlerde seçilmiştir.

AppCAD - [Microstrip]

File Calculate Select Parameters Options Help

Microstrip



Calculate Z0 [F4]

Z0 = **50.18** Ω

Elect Length = **8.353** λ

Elect Length = **3007.2** degrees

1.0 Wavelength = **119.712** mm

Vp = **0.479** fraction of c

εeff = **4.355**

W/H = **1.429**

Dielectric: εr = **6.15**

RO3006 @

Frequency: **1.2** GHz

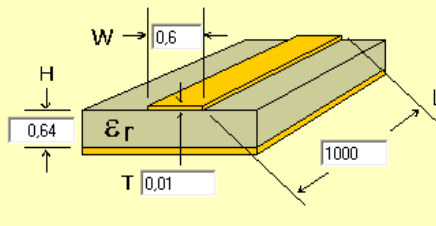
Length Units: **mm**

Şekil 3.6. $\epsilon_r = 6,15$ dielektrik malzeme için değerler

AppCAD - [Microstrip]

File Calculate Select Parameters Options Help

Microstrip



Calculate Z0 [F4]

Z0 = **50.38** Ω

Elect Length = **10.193** λ

Elect Length = **3669.6** degrees

1.0 Wavelength = **98.103** mm

Vp = **0.393** fraction of c

εeff = **6.485**

W/H = **0.938**

Dielectric: εr = **9.8**

TMM @ 10I

Frequency: **1.2** GHz

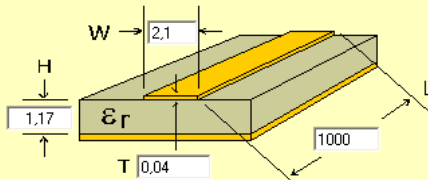
Length Units: **mm**

Şekil 3.7. $\epsilon_r = 9,8$ ve $4,6$ dielektrik malzemeler için mikro şerit parametreleri

AppCAD - [Microstrip]

File Calculate Select Parameters Options Help

Microstrip



Dielectric: $\epsilon_r = 4.6$

FR-4

Frequency: 1.2 GHz

Length Units: mm

Calculate Z0 [F4]

Z0 = 50.23 Ω

Elect Length = 7.406 λ

Elect Length = 2666.0 degrees

1.0 Wavelength = 135.034 mm

Vp = 0.541 fraction of c

$\epsilon_{eff} = 3.423$

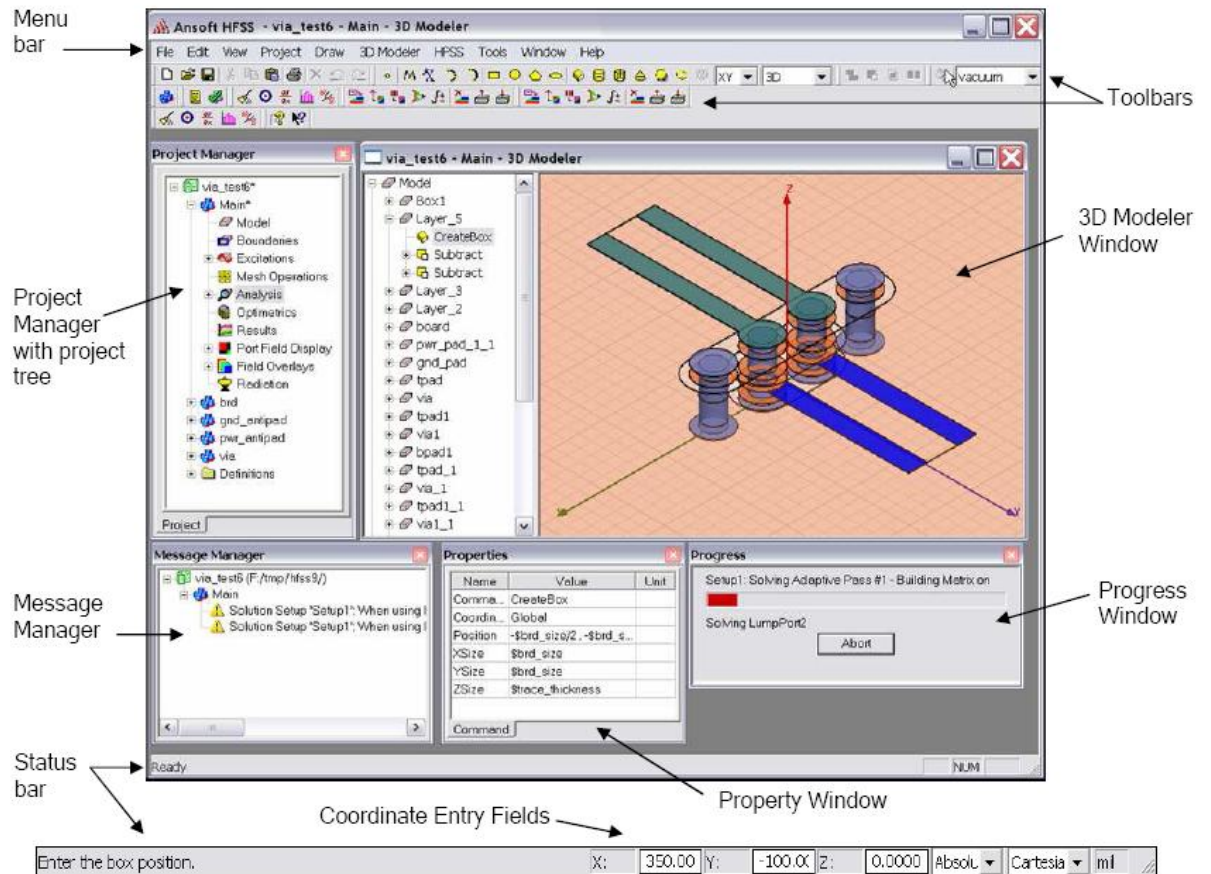
W/H = 1.795

Şekil 3.8. $\epsilon_r = 9,8$ ve $4,6$ dielektrik malzemeler için mikro şerit parametreleri

3.5. Yüksek Frekans Yapı Benzetimi (Ansoft HFSS)

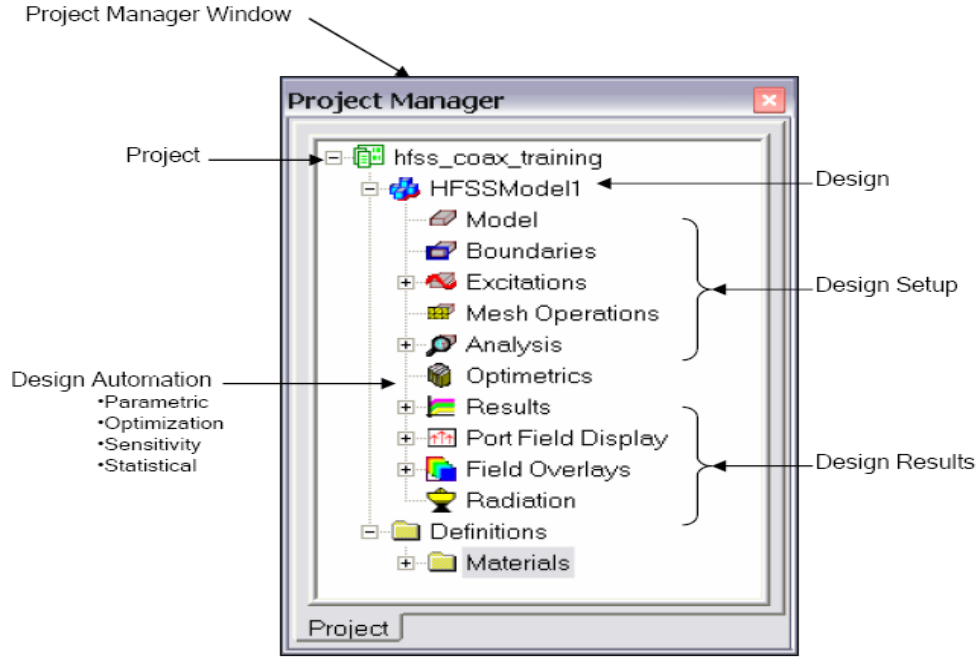
HFSS 3-boyutlu pasif RF yapı modellemesi için kullanılan, yüksek performanslı elektromanyetik alan simülatörüdür. Bu program kullanılarak; geometrik model oluşturulması, model dizaynında kullanılan değişken parametrelerin tanımlanması ve değiştirilmesi, simülasyonu, S parametresi çözümlemesi, alan dağılımı çizimleri ve faz animasyonu yapılabilmektedir.

HFSS programı ile çalışırken görülen birtakım ana pencereler vardır. Bunlar Project Manager, Message Manager, Property Window, Progress Window ve 3D Modeler Window dur. Sık kullanılan analiz bileşenlerinden oluşan toolbarı ise görüldüğü gibi geniştir.



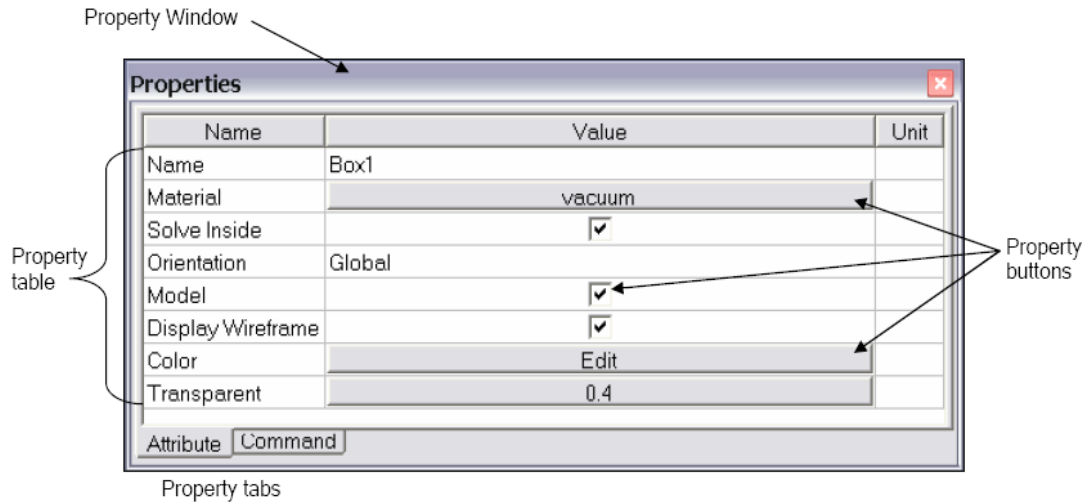
Şekil 3.9. Projenin bütün yapısını gösteren pencere.

Analizin nelerden ve nasıl oluşturulduğu burada görülebilmektedir. “Design Setup” olarak adlandırılan kısım tasarımın ana bileşenleridir ve simülasyon için mutlaka doğru bir şekilde oluşturulmalıdır.”Design Results “ ise, oluşturulan model simule edildikten sonra istenilen parametrelerin görüldüğü kısımdır.



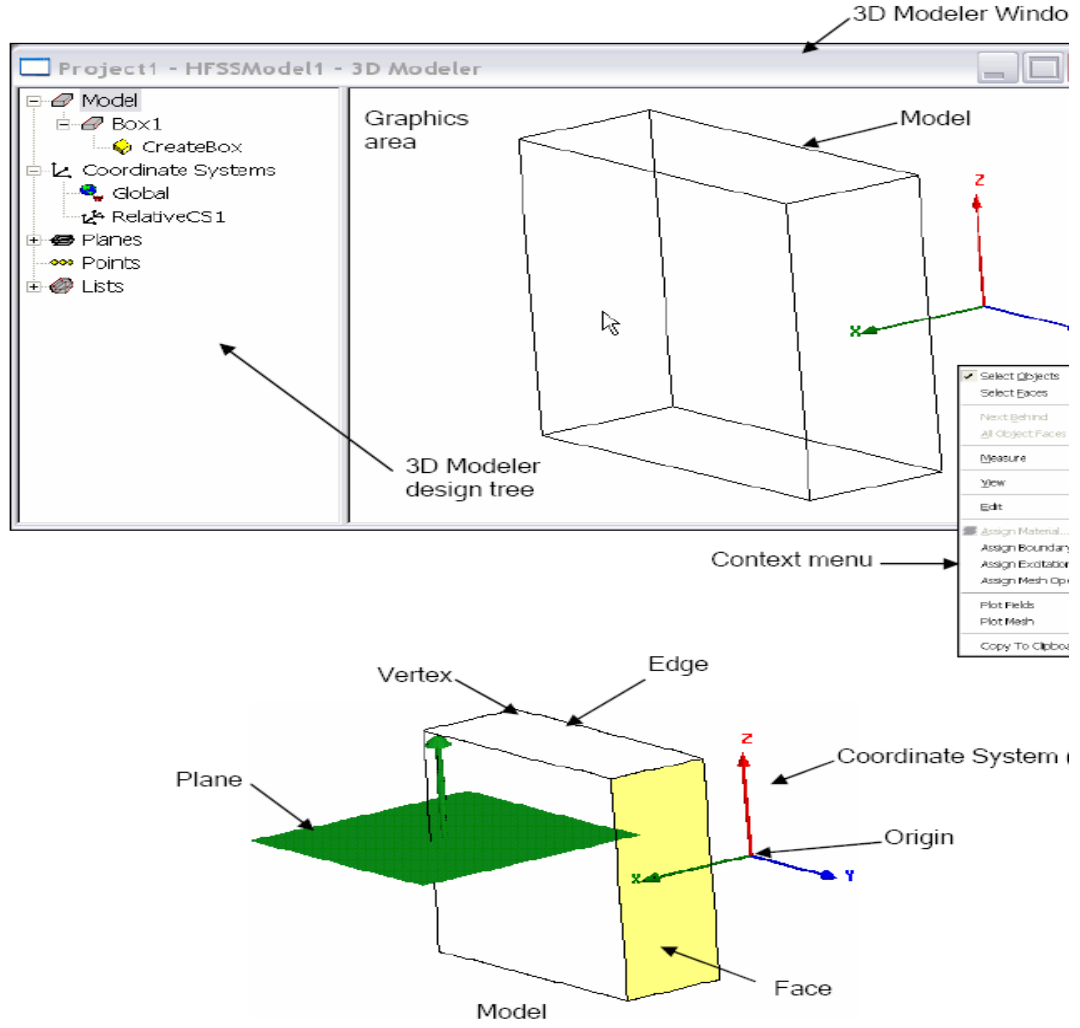
Şekil3.10. Model parametrelerinin değiştirilebildiği pencere.

Kullanılan malzemelerin özelliklerini ve görünümünü değiştirebileceğimiz kısımdır.

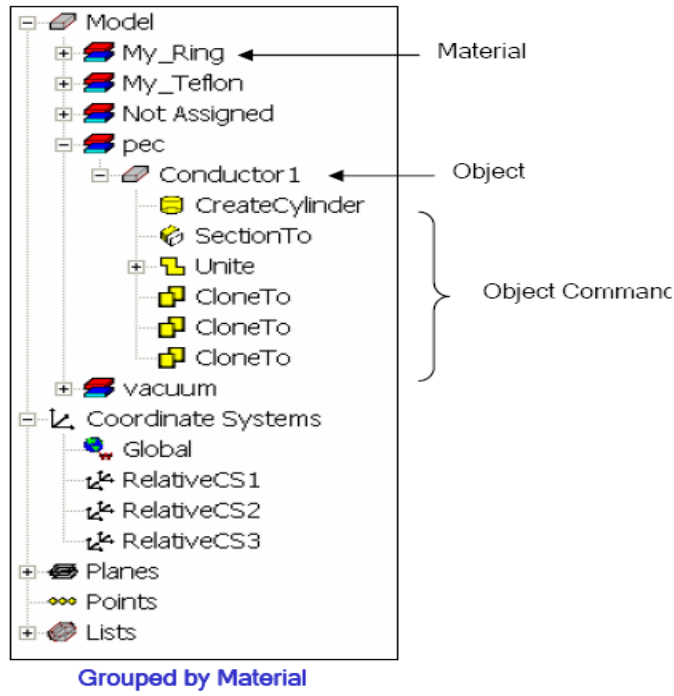


Şekil3.11. Tasarlanan modeli ve modeli oluşturan bileşenleri gösteren pencere.

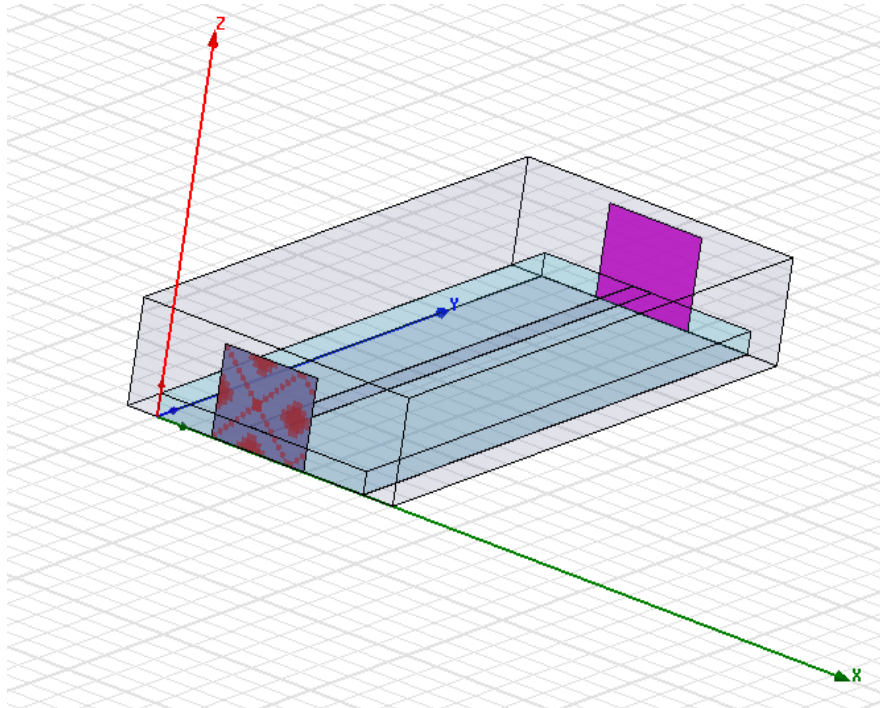
Aşağıdaki gösterimde model olarak bir kutu ve kutunun oluşum kısmını ilgilendiren “3 Modeler design three” verilmiştir.



Şekil3.12. Modelin oluşturulduğu bileşenler ve nasıl oluşturulduğunu gösteren kısım da aşağıda verilmiştir. “Material “ , bileşenin malzemesinin türünü gösterir.”Object” 3boyutlu Nesneyi, “Object command history “ de nesnenin hangi işlemlerden geçerek oluşturulduğunu gösteren kısımdır.

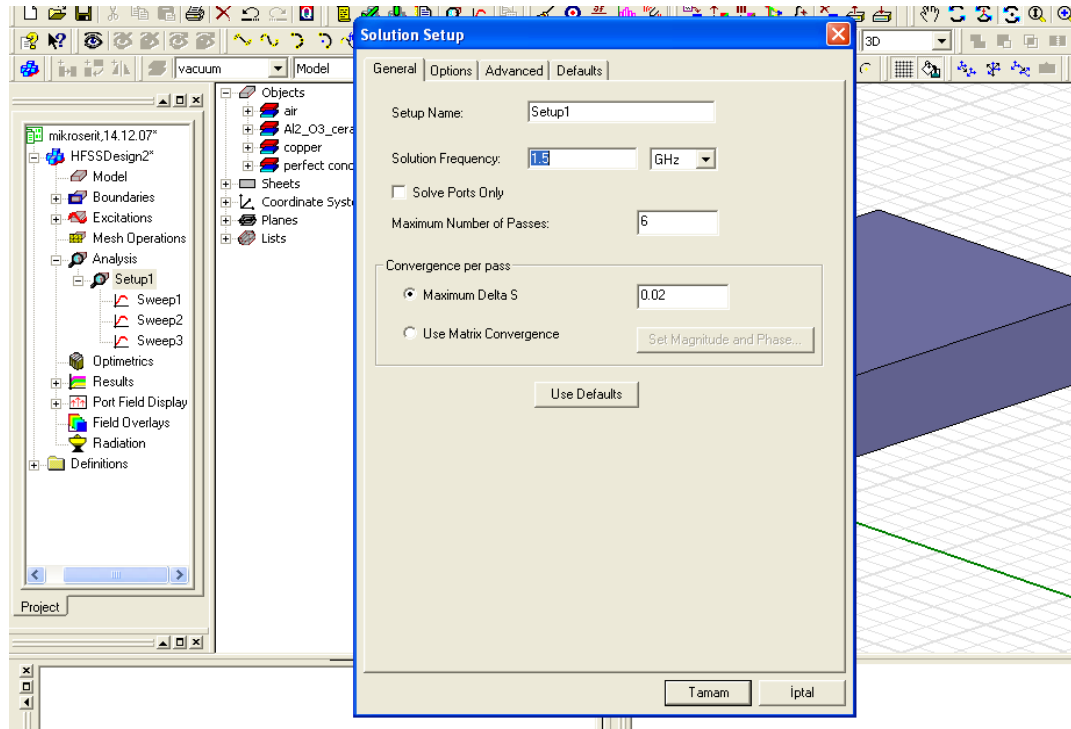


Şekil3.13. 3D Modeller diye tanımlanan grafik alanına koordinatlar -istenilen boyutlar sağlanacak şekilde – girilerek 3-boyutlu model oluşturulur. “Property Window” yardımıyla modelin özellikleri belirlenir. “Objects” altında air , ceramic,copper ” olarak ilgili bileşenler görülmektedir.

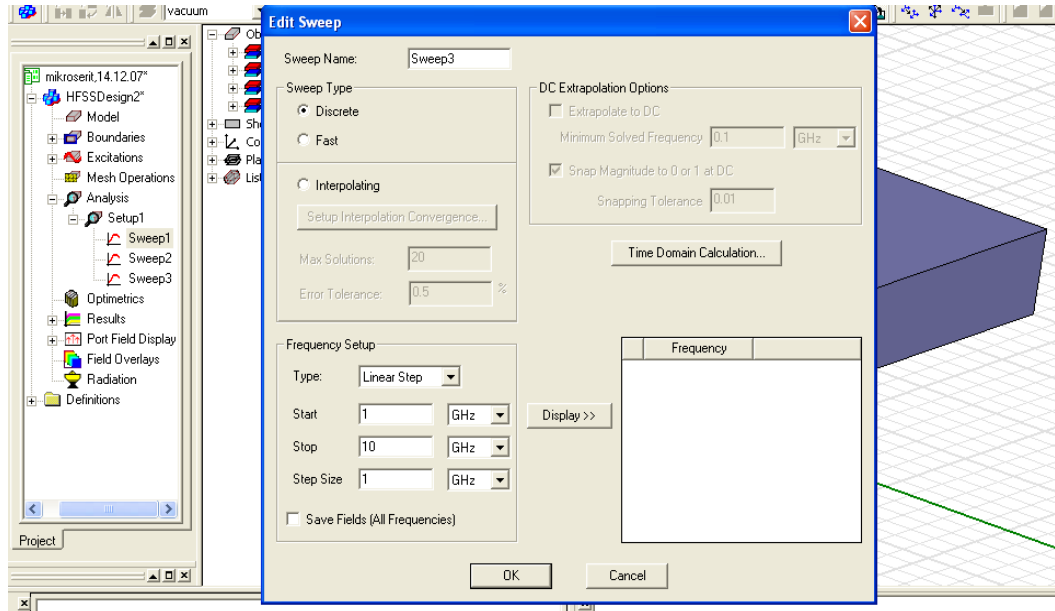


Şekil3.14. Mikro şerit iletim hattı benzetimi.

HSS → Analysis Setup → Add Solution Setup ‘tan istenilen ayarlar yapılır.

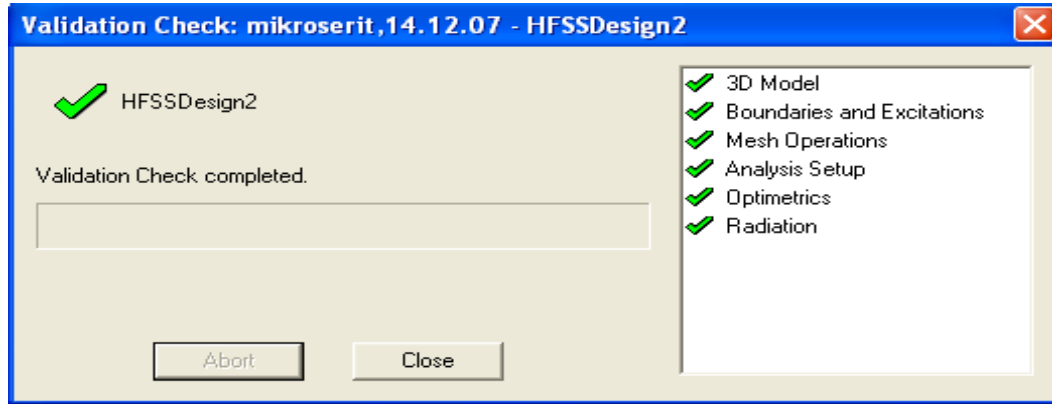


Şekil3.15. Analiz frekans aralığı ve çözünürlük HFSS → Analysis Setup → Add Sweep yoluyla tanımlanır.



Şekil3.16. Modelin doğru oluşturulup oluşturulmadığını, programın derlenecek hale gelip gelmediğini görmek için “validation check” ile kontrol gerçekleştirilir.

Eğer sorun yoksa da analize geçilir.

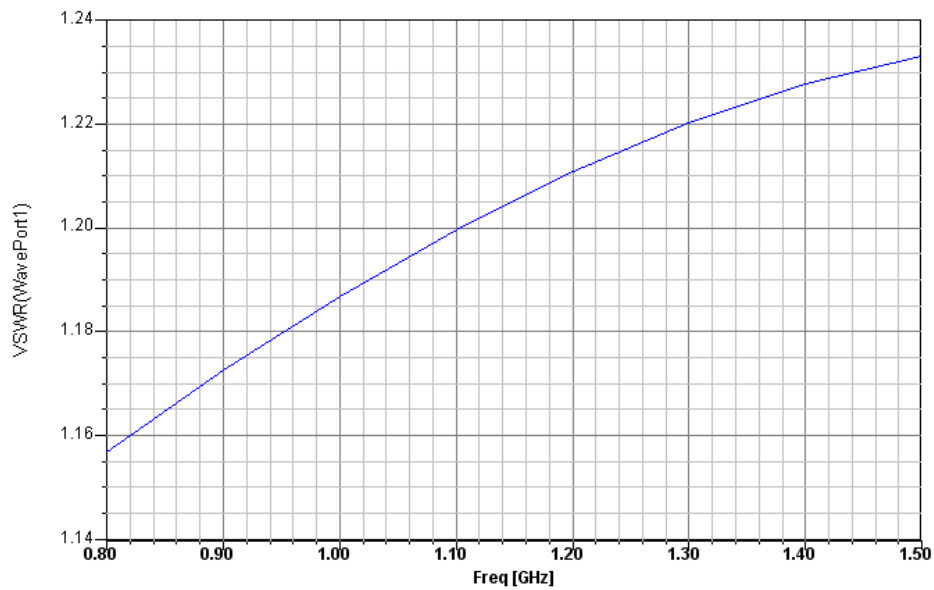


Şekil3.17. Analizi başlatmak için HFSS → Analyze All ‘ a basılarak analiz başlatılır.

Artık istenilen testler bilgisayar tarafından yapılır. Analiz sırasında “Message Manager” kısmında hatalar ile ilgili uyarılar çıkar.

3.6. Program Sonuçları

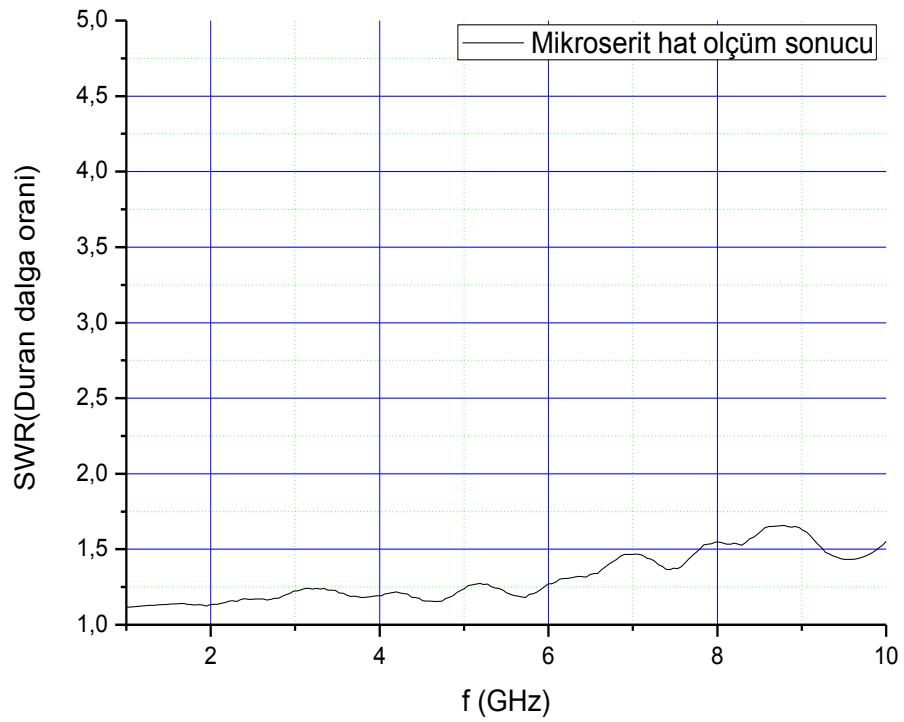
Tasarıma ilişkin istenilen parametreler hakkında bilgi istenilir.



Şekil 3.18. Gerilim duran dalga oranı.

Şekilde çizimin parametresi görüldüğü gibi 1. porttaki VSWR dir. Frekans aralığı olarak 0.8-1.5 GHz alınmıştır. Bunun gibi çok çeşitli parametreler incelenebilir.

HFSS→Results → Create Report altındaki “display type” dan aşağıda görüldüğü gibi ışıma paterni, polar diyagramı,düzlem diyagram, veri tablosu ve 3-boyutlu çizimler istenebilir.



Şekil 3.19. Duran dalga oranı (SWR).

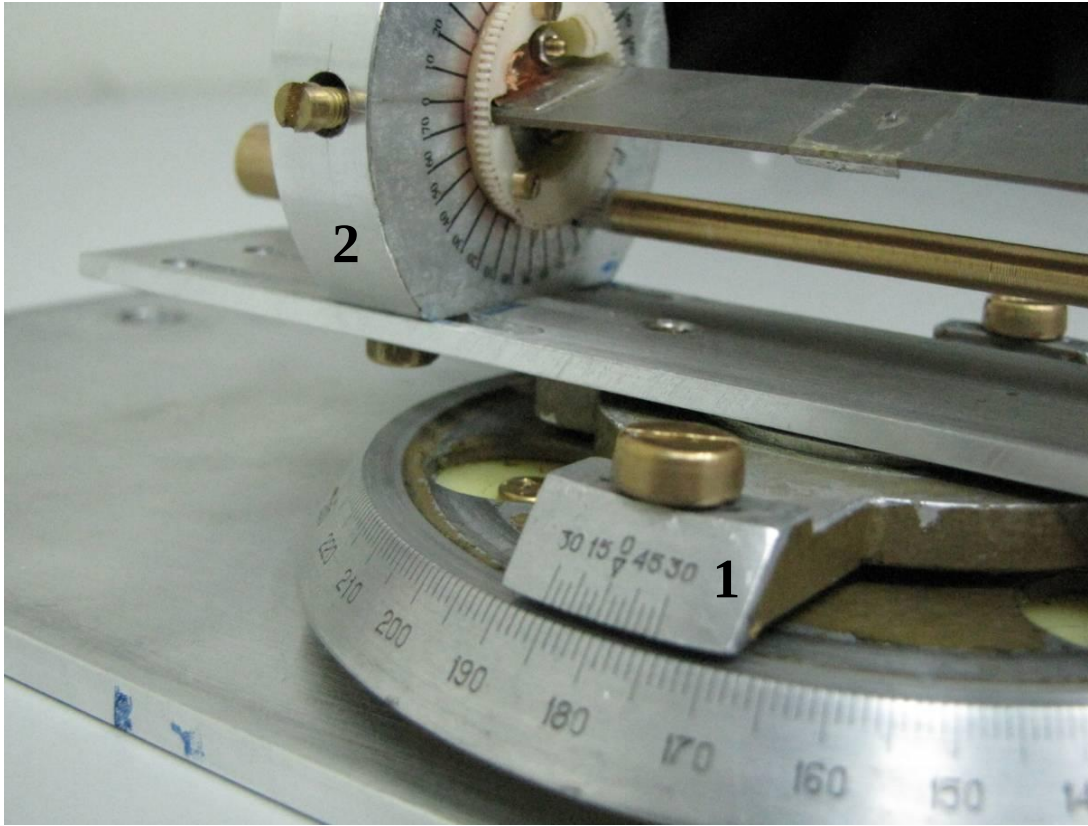
3.7. FMR Spektroskopisi

Spektrometre bir örneğin elektromanyetik alan altındaki davranışını incelemek için gerçekleştirilen düzendir. Şekil 3.20’te FMR Spektroskopisi Düzenegi görülmektedir.

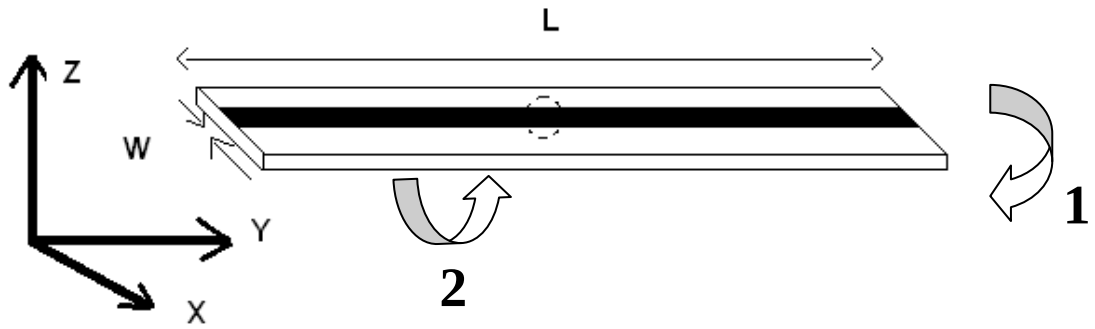


Şekil 3.20. FMR Spektroskopisi Düzenegi

Bir örneğin kristal anizotropisini belirlemek için örnek düzleminde (in plane) ve örneğe dik düzlemde (out of plane) ölçümleri yapılarak manyetik malzemenin manyetik anizotropileri hakkında bilgi edinilir. Bu amaçla elimizdeki standart YIG’in ölçümleri farklı statik alanlarda örnek düzleminde frekansa bağlı Vektör Network Analizör (VNA) ile ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde kullanılan düzeneğe ait çizim ve döndürme düzeneği Şekil 3.21’te verilmiştir.

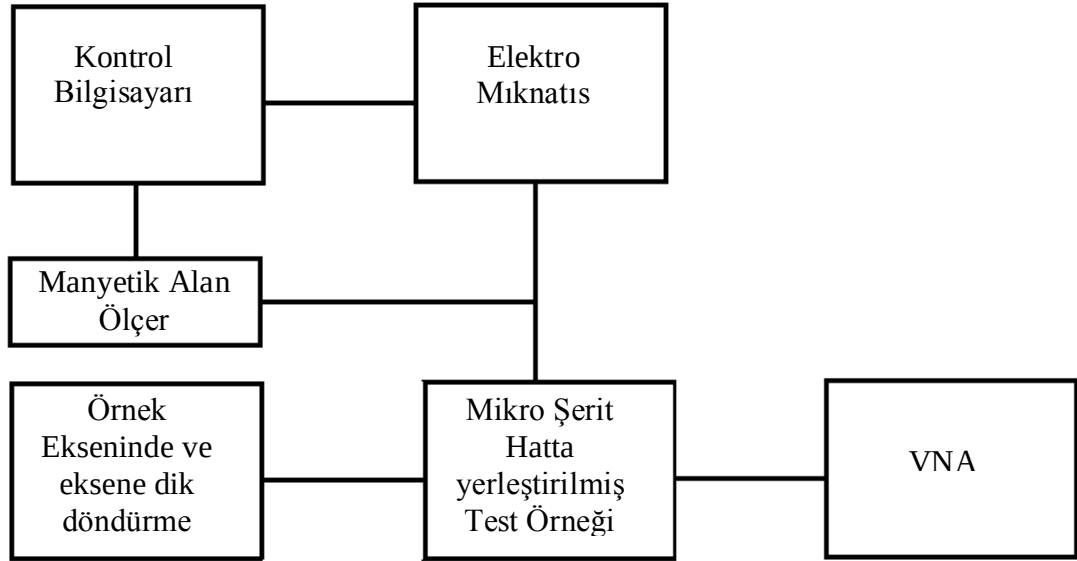


(a)

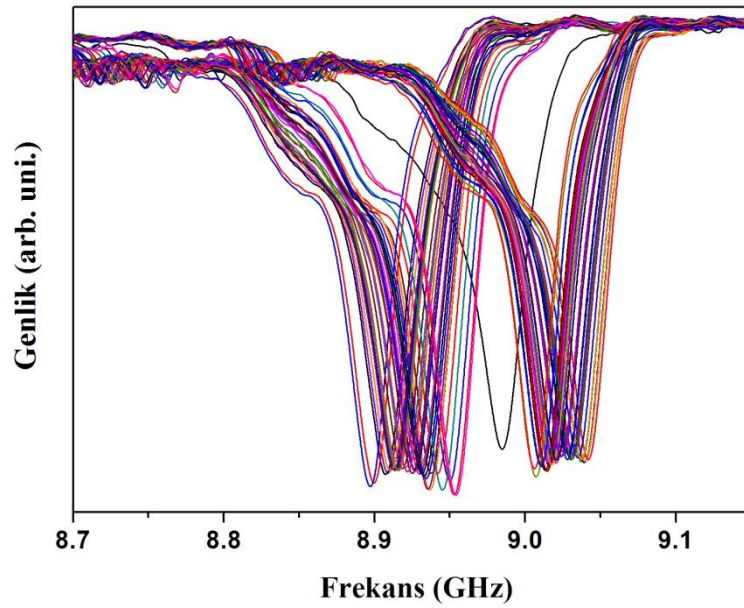


(b)

Şekil 3.21. FMR Spektrometrede kullanılan mikro şerit hat (1 örnek düzlemi (in plane), 2 örneğe dik düzlem (Örnek ekseninde, out of plane) ölçüm eksenleri)



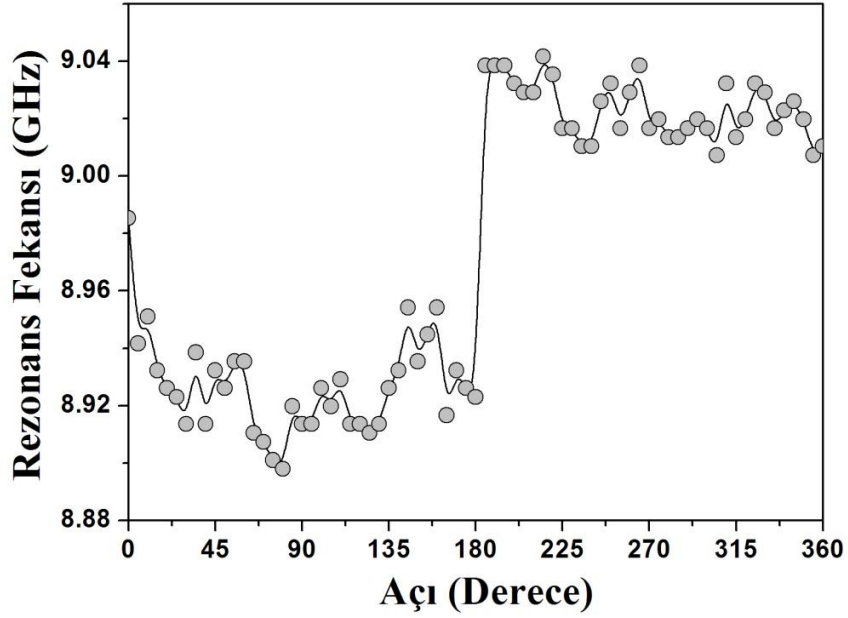
Şekil 3.22. FMR Spektrometre Blok Diyagramı [16].



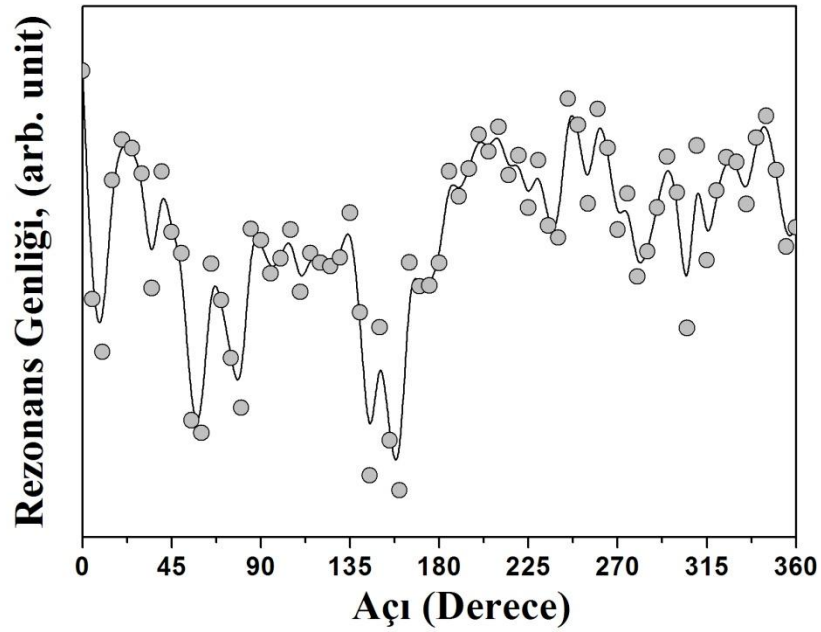
Şekil 3.23. FMR Spektrometrede Örneğin İn plane düzlemde 5 er derece döndürülmesi ile elde edilen spektrumlar.

Yukarıda gösterilen düzenekte 2.5 KOe manyetik alanda farklı açılarda alanlarında Şekil 3.21'de verilen 1 ve 2 yönlerinde döndürülerek ölçümler

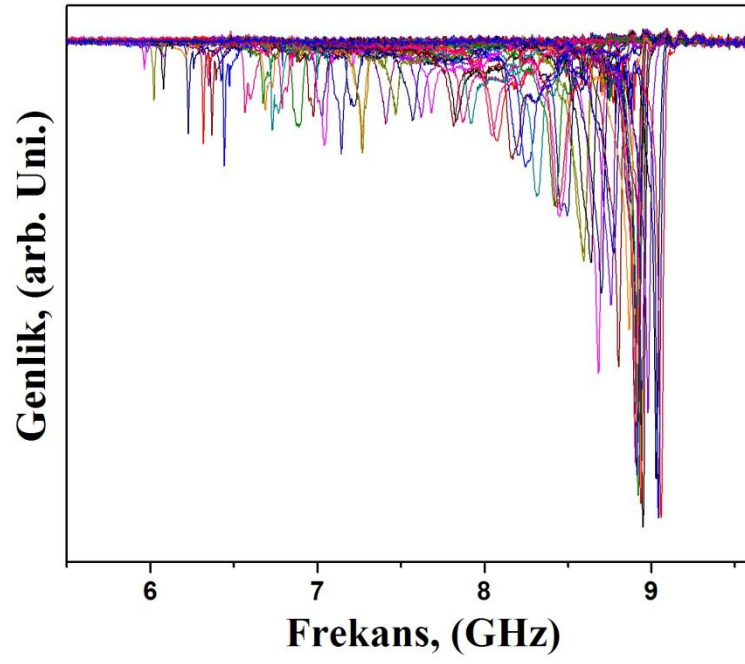
gerçekleştirilmiştir. Her beş derecede bir alınan açı değerine karşılık gelen rezonanslar için elde edilen grafik Şekil 3.23 ve Şekil 3.26`de verilmiştir.



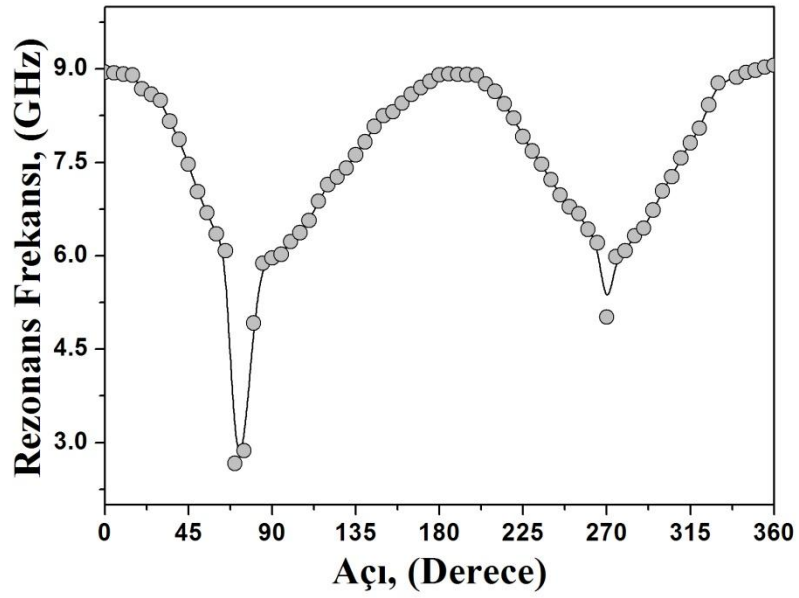
Şekil 3.24. Ölçülen Rezonans Çukur Değerleri



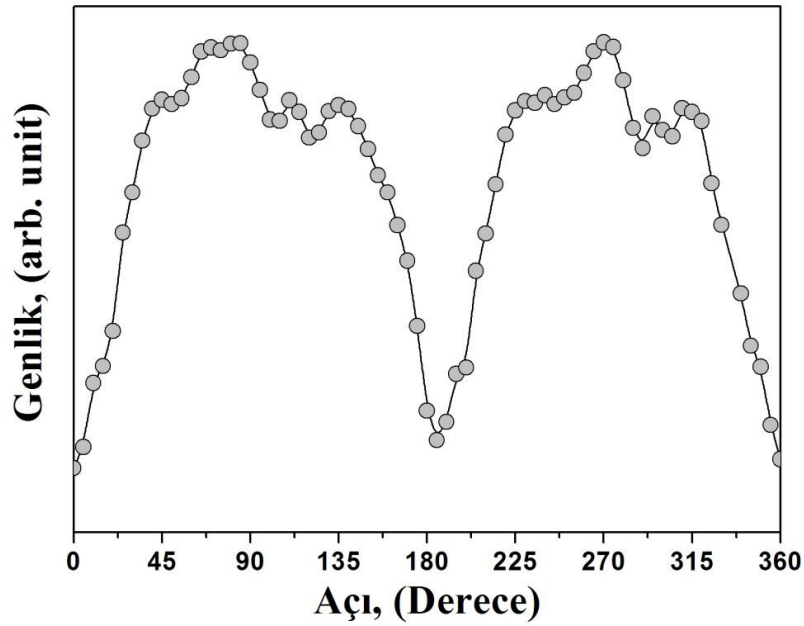
Şekil 3.25. Ölçülen Rezonans Çukur Değerler



Şekil 3.26. FMR Spektrometrede Örneğin out of plane düzlemde 5 er derece döndürülmesi ile elde edilen spektrumlar.



Şekil 3.27. Ölçülen Rezonans Çukur Değerleri



Şekil 3.28. Ölçülen Rezonans Çukur Değerleri

3.8. Farklı Malzemeler İçin Spektroskopi Geliştirilmesi

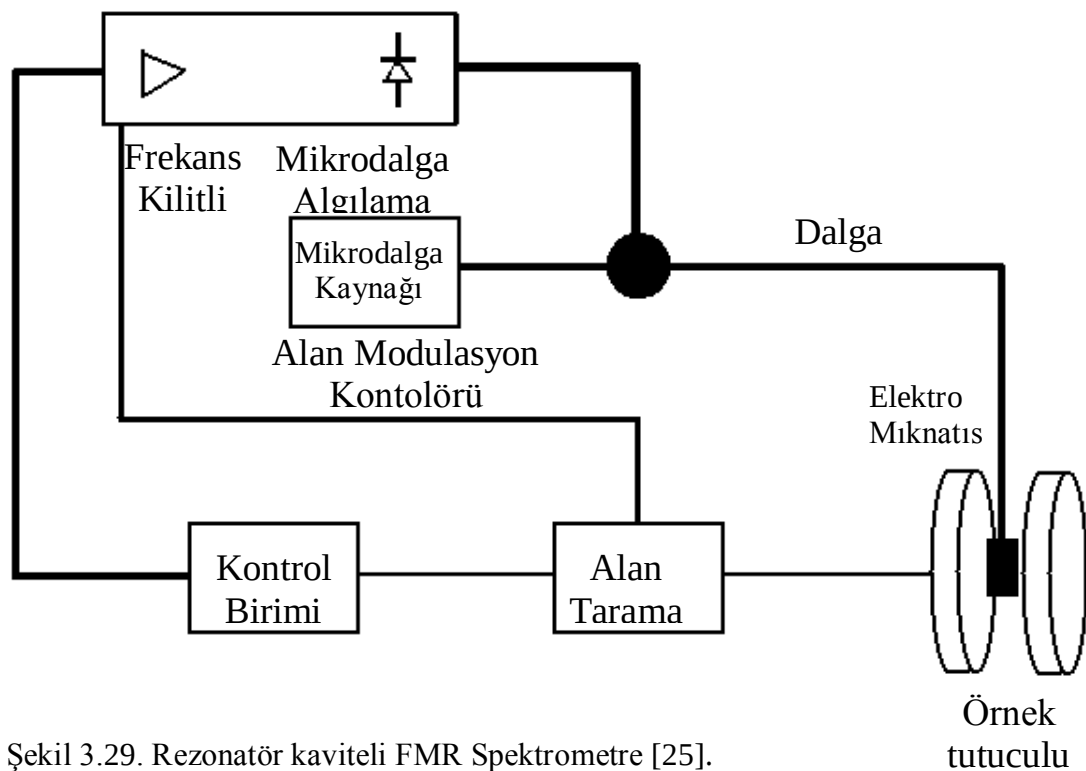
Manyetik rezonans elde etmek için çeşitli spektrometreler tasarlanmıştır. Bunlar genellikle ince manyetik filmlerle manyetik rezonans elde etmektedirler. Bu bölümde özellikle bu tür spektrometrelere değinilecek ve kendi geliştirdiğimiz spektrometre ile rezonans elde edilmesi, ölçüm yüzeyine uzaklık ve farklı metallere karşı davranışı değerlendirilecektir.

Deney düzeneğinde kullandığımız FMR spektrometre blok diyagramı Şekil.3.29' da gösterilmektedir. Bu tür spektrometreler kural olarak malzemenin manyeto rezonans özelliklerini araştırmak için kullanılır. Diğer bir hassas FMR spektrometre uç türü olarak ko-planar hatlar rezonatörün kullanıldığı VNA-FMR dır.

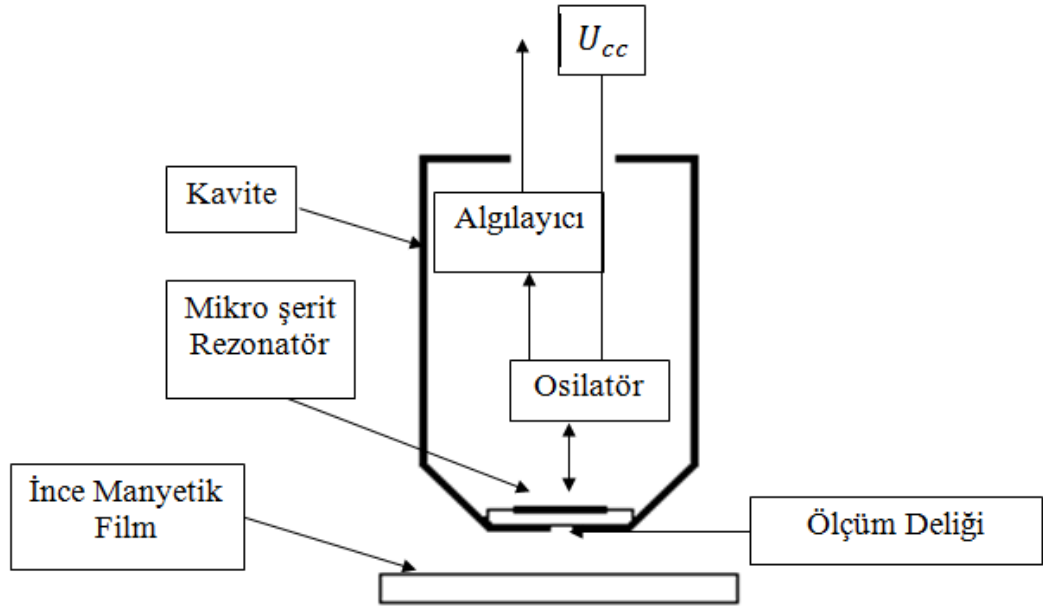
Hassas bir mikro şerit hat oluşturmak için hesaplamalar yapıldı. Bu tür bir mikro şerit hat hesaplanırken MRI yöntemiyle görüntü elde edilmesi amaçlanmakta

olup, ferromanyetik uç mikro şerit hattın metal zemininde açılmış olan bir deliğin içine yerleştirilmiştir.

FMR spektrum kaydı ve işlemesi bilgisayarla yapılmaktadır. Elde edilen FMR spektrumları geliştirilen bir bilgisayar programı ile benzeşim yapılarak görüntülenecek malzemenin manyetik özellikleri hakkında bilgi edinilmektedir. Program zor ve kolay manyetizasyon eksenlerinin aranmasına, tek eksenli manyetik anizotropik alanın değerlerinin incelenmesine, etkin doyum manyetizasyonunun belirlenmesine olanak verir. FMR spektrometresinin blok diyagramı Şekil 3.30'da gösterilmiştir. Diyagram üç ayrı blokta oluşmaktadır.



Şekil 3.29. Rezonatör kaviteli FMR Spektrometre [25].



Şekil 3.30. Mikro şerit hatlı FMR Spektrometre [16].

Şekil 3.30 da, ilk blok (algılayıcı bloğu), bir film örneğinin, Helmholtz sargılarının ve modülasyon sargılarının bulunduğu kat olan mikrodalga başlığını içerir. Bu kat, yatay düzlemde ölçülmüş iki koordinat boyunca hareket ettirilebilir ve incelenen film örneği ile birlikte, ölçüm başlığı ile çakışan eksen etrafında döndürülebilir. Helmholtz sargıları 1 kHz'lik frekans ile modüle edilmiş taramalı statik manyetik alanı üretir. Modüle eden alanın genliği, inceleme altındaki filmin FMR hat genişliğine ve statik alan şiddetine bağlı olarak $0,01 \pm 5.0$ Oe sınırları dahilinde ayarlanabilir. Bir bütün halinde bakılırsa, algılayıcı bloğu 270 x 180 x 350 mm ölçülerinde kompakt bir masaüstü aygıtı biçiminde yapılmıştır [16].

İkinci blok (işaret işleme bloğu) 365 x 380 x 165 mm. ölçülerine sahiptir ve aşağıdaki parçalardan oluşmaktadır:

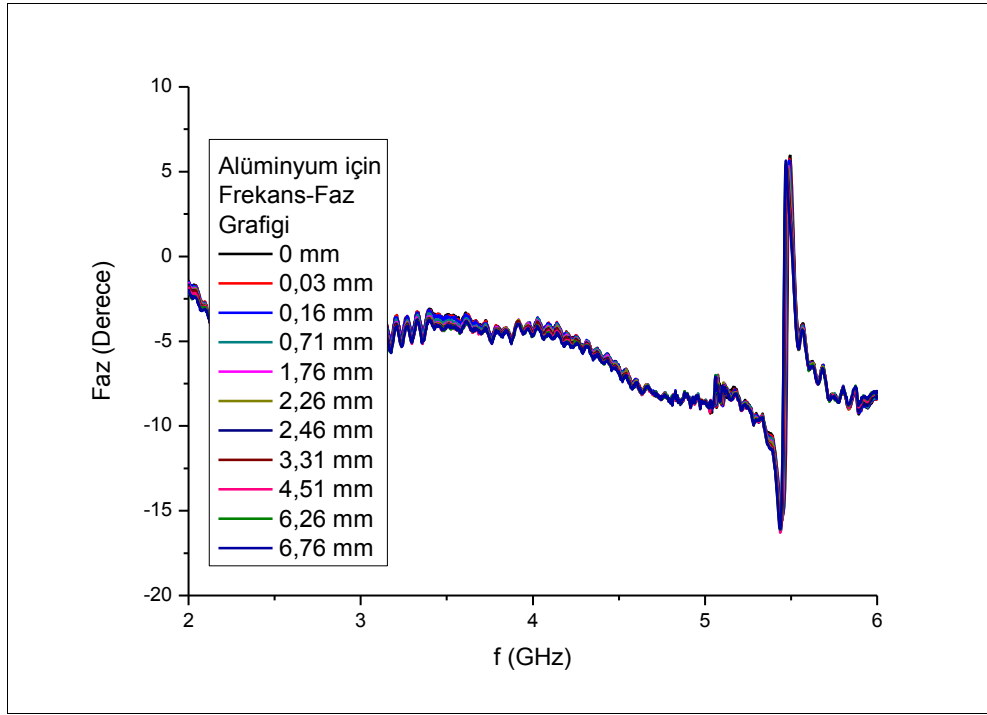
1. İşaret alışı kanalı - ölçüm başlığındaki mikrodalga üreticinin mevcut çalışma modunu sürekli biçimde destekler ve eşzamanlı işaret sezimini gerçekleştirir,
2. Tarama ve modülasyon birimi - tarama ve modülasyon sargılarının beslemesini sağlar.

3. Döner birim sürücüsü denetleme birimi.

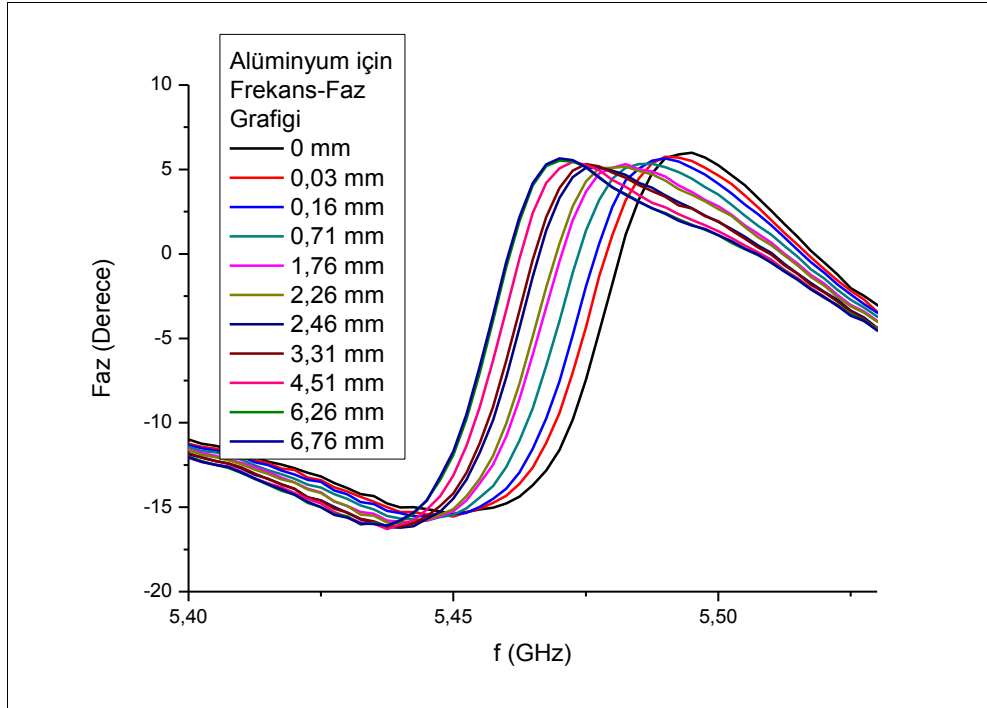
4. Hızlı sıralı kanal üzerinden bilgisayar bağlantısı denetleme birimi

Üçüncü blok (spektrometre kontrol ve veri işleme bloğu), belirli programların arayüz modunda çalıştığı bir bilgisayardır. Zayıf işaret durumunda, örneğin filmler çok ince (100 Å ve altı) veya FMR hattı geniş olduğunda, işaret birikim ihtimali sağlanır. Ne var ki, birikim olmasa bile, 100 Å kalınlığındaki nikel-demir alaşımı film için işaret/gürültü oranı (SNR) 10 civarındadır [26].

Bu deneyde iletkenliği birbirinden farklı üç metal kullanılmıştır (Bakır $59 \times 10 \text{ s/m}$, Alüminyum $37,8 \times 10 \text{ s/m}$ ve Pirinç $16,2 \times 10 \text{ s/n}$). İletkenlikle orantılı benzer davranışları rezonans çukuru genliğinde de elde ettik. Bakır, alüminyum ve pirinçten üretilip yüzeyi pürüzsüz hale getirilen üç farklı metalle yapılmış olan uygulama Şekil 3.31 de gösterilmektedir. YIG uç' un yüzeye yaklaşması ile rezonans frekansını değiştiği gözlenmiştir. Alüminyum, pirinç ve bakır için elde edilen rezonans frekansının YIG uç' un yüzeye olan uzaklığıyla değişimi grafikleri verilmiştir. Ferromanyetik uç'un manyetik momenti girdap akımı oluşturmuş olup bu da frekans kaymasının ortaya çıkmasına sebep olmuştur.

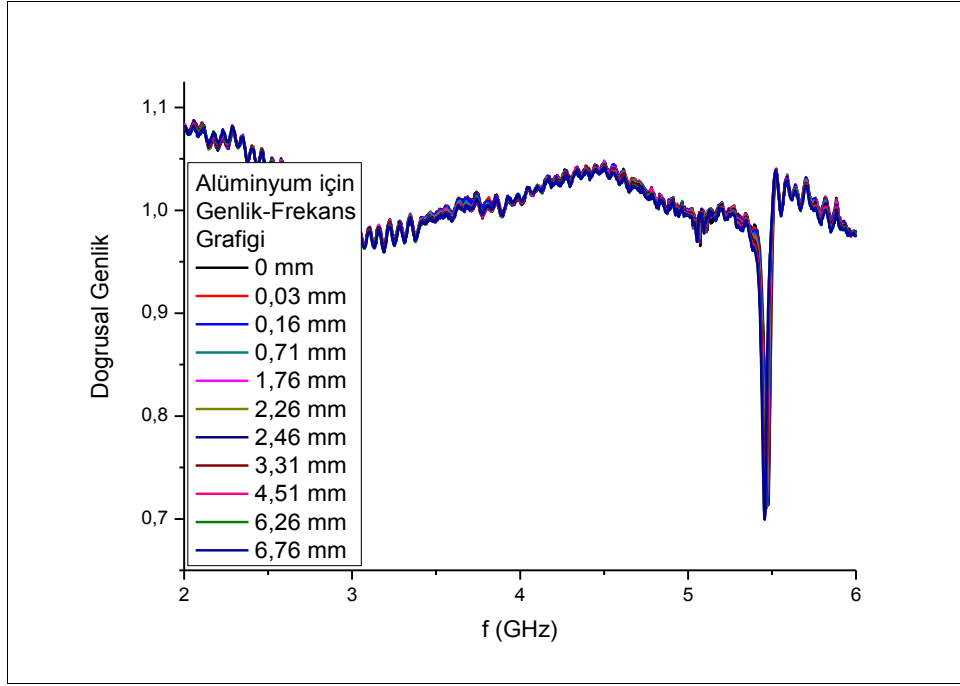


a)

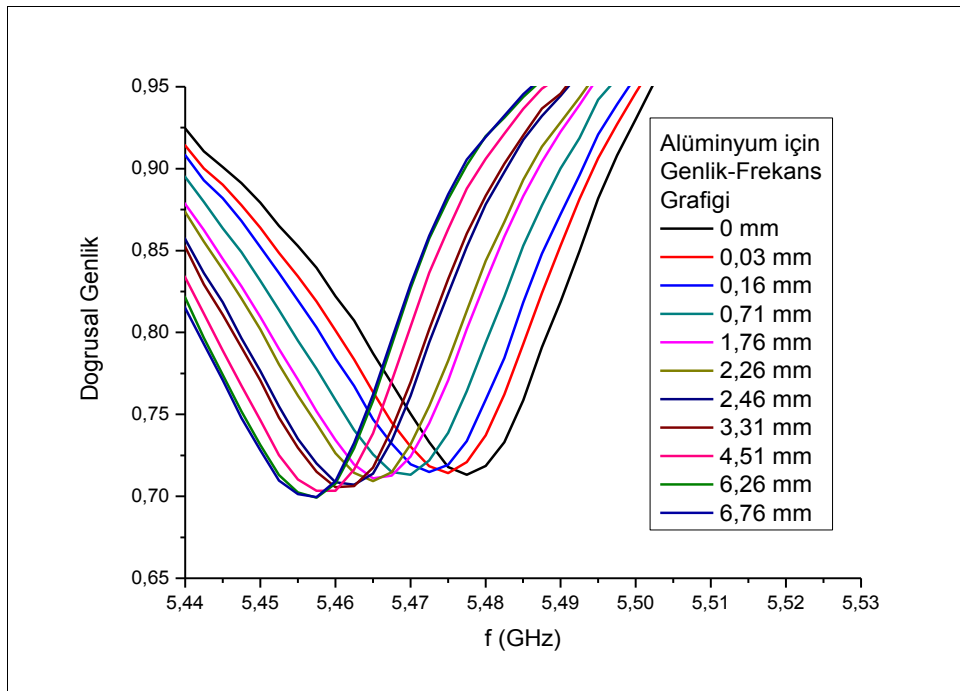


b)

Şekil 3.31. a)Alüminyum Malzeme için Uzaklığa Bağlı Olarak Değişen Frekans-Faz Grafiği b) a grafiğindeki 5.4 GHz ile 5.6 GHz arasının büyütülmüş grafiği.

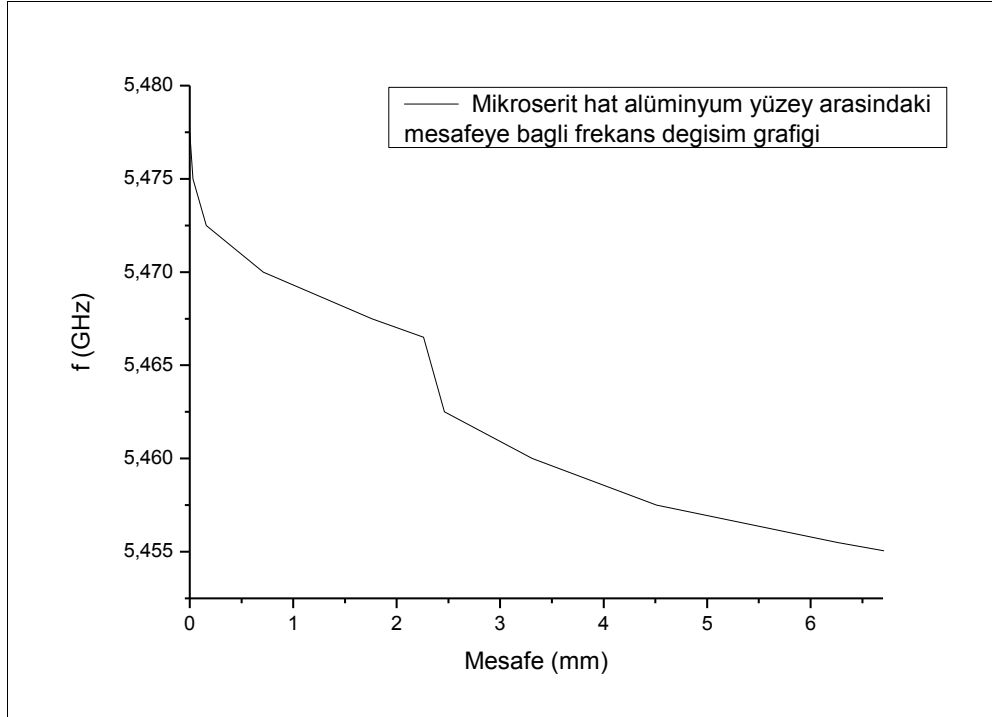


a)

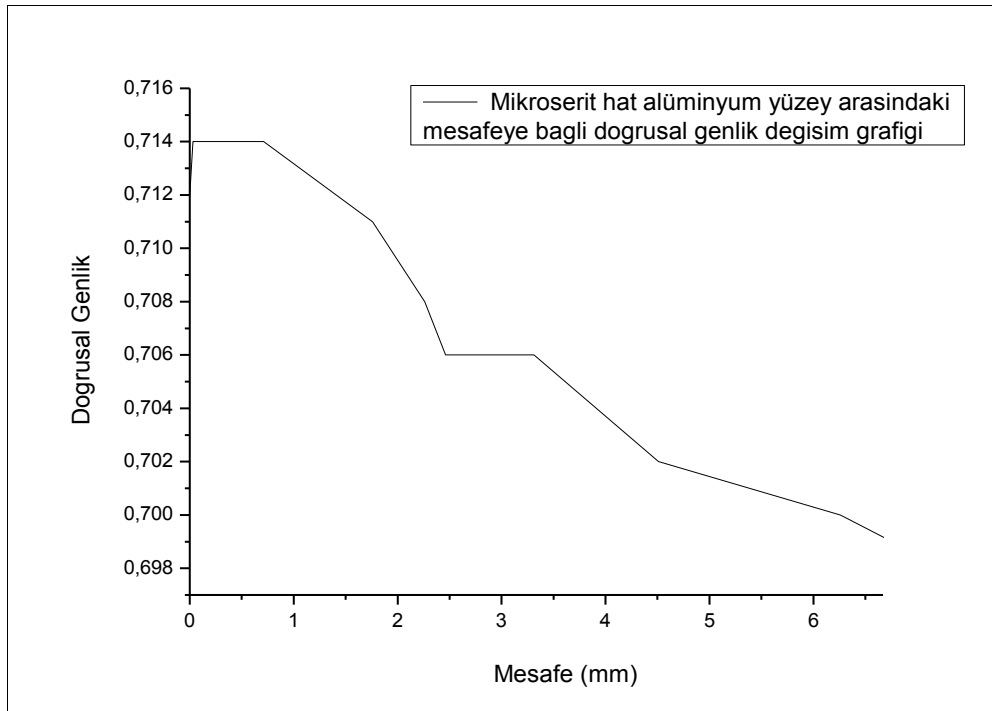


b)

Şekil 3.32. a) Alüminyum Malzeme için Uzaklığa Bağlı Olarak Değişen Rezonans Grafiği b) a grafiğindeki 5.44 GHz ile 5.5 GHz arasının büyütülmüş grafiği.

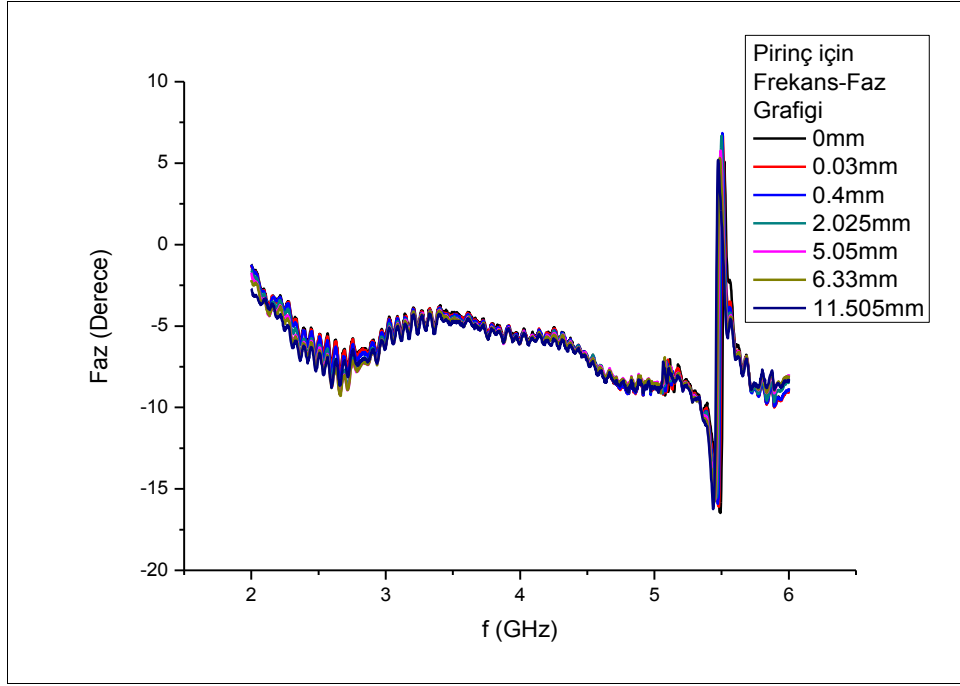


a)

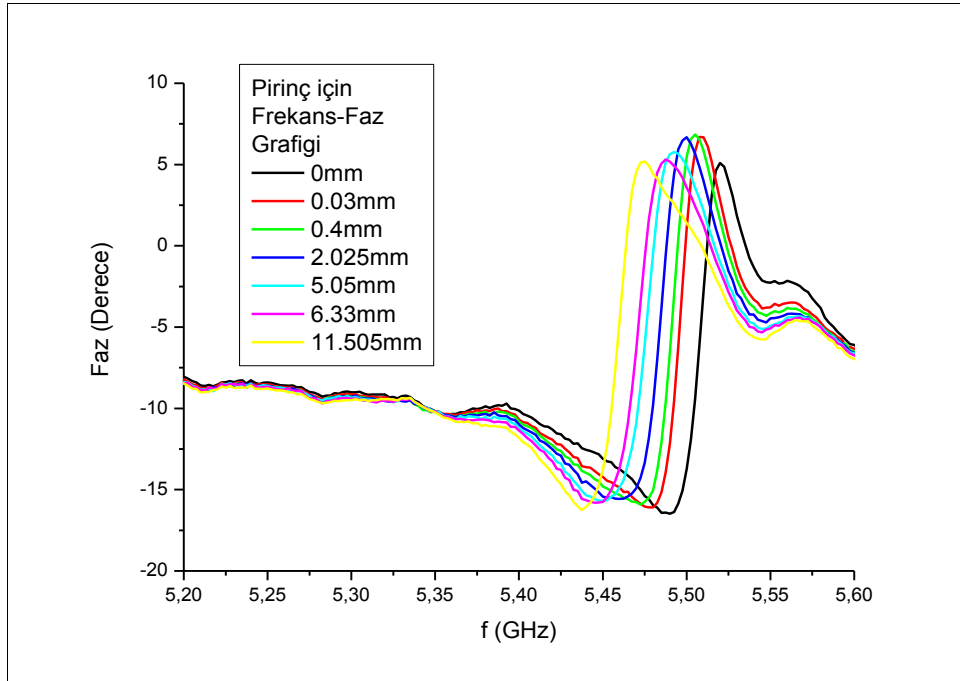


b)

Şekil 3.33. Alüminyum Malzeme için a) Mikro şerit Hat örnek arasındaki mesafe Frekans Grafiği, b) Mikro şerit Hat örnek arasındaki mesafe Rezonans Çukuru genliği grafiği.

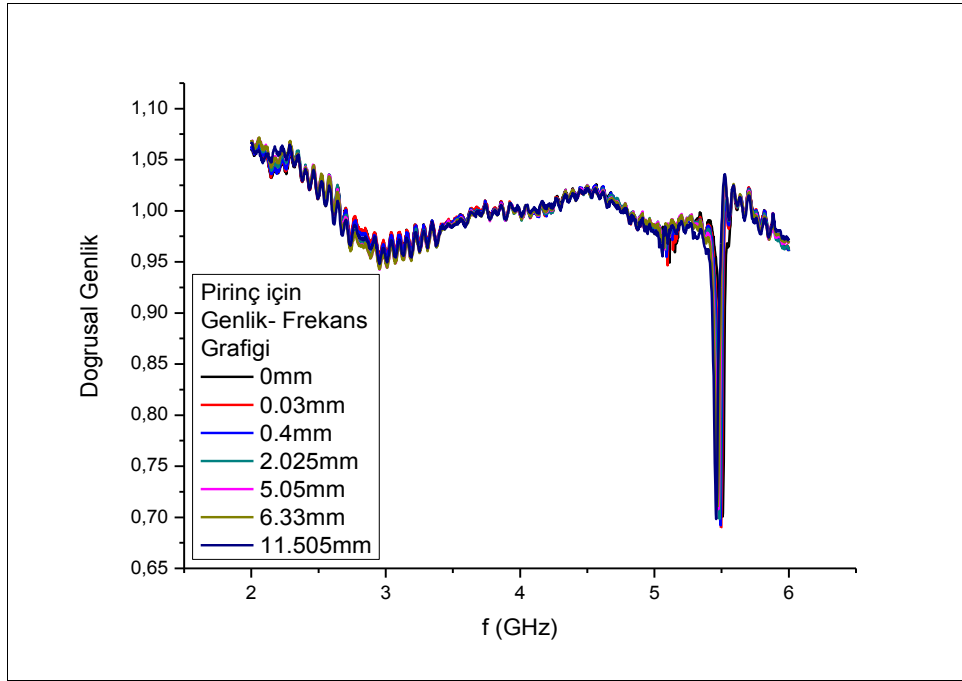


a)

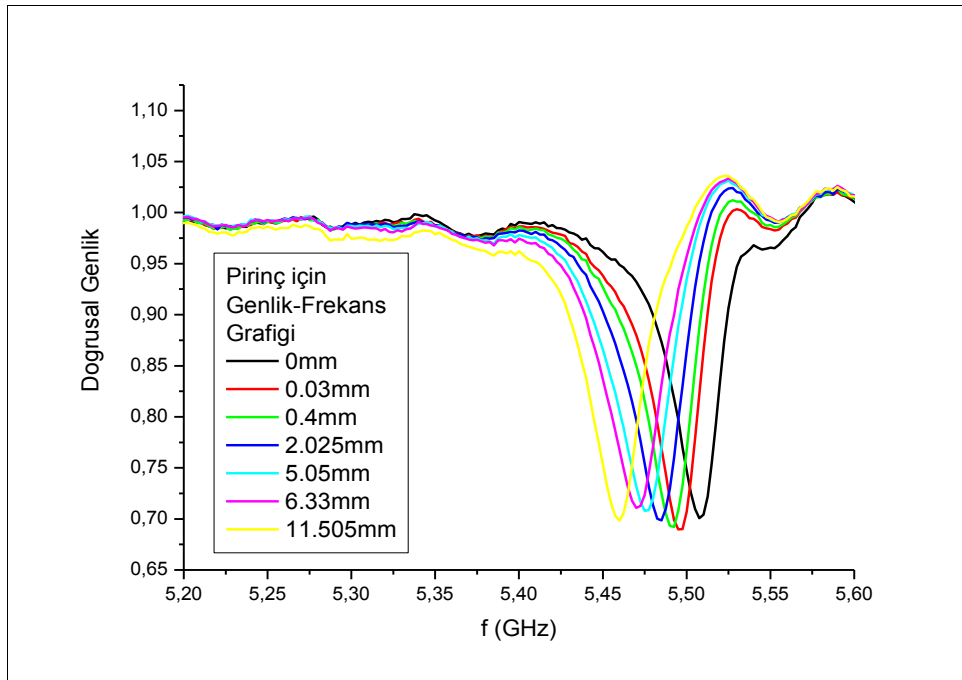


b)

Şekil 3.34. a) Pirinç Malzeme için Uzaklığa Bağlı Olarak Değişen Frekans-Faz Grafiği b) a grafiğindeki 5.2 GHz ile 5.6 GHz arasının büyütülmüş grafiği.

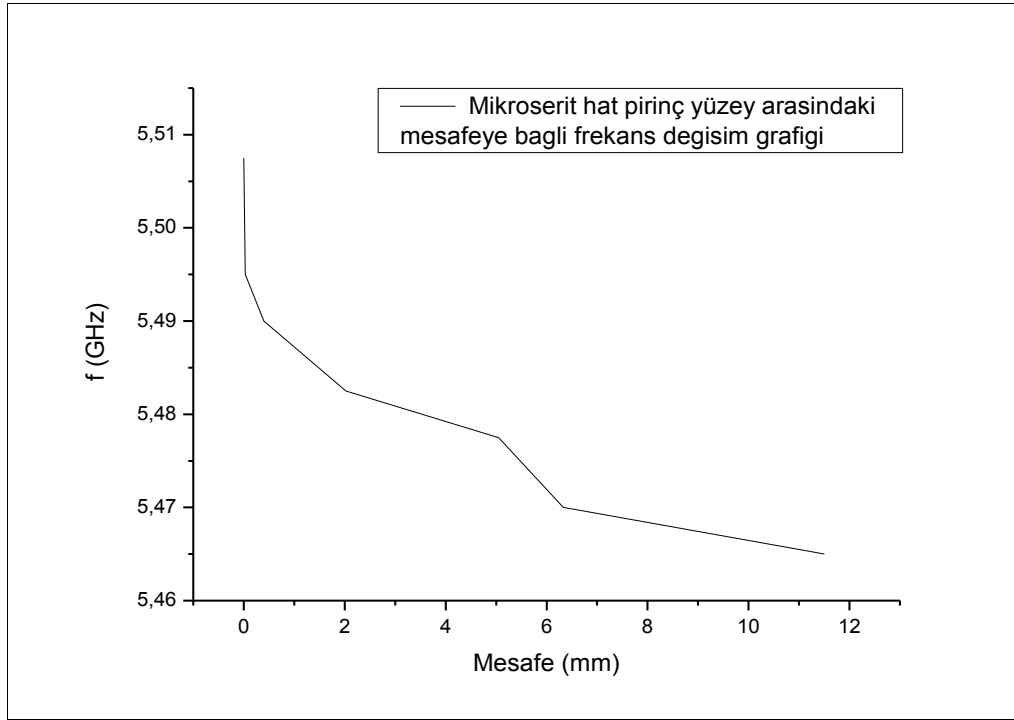


a)

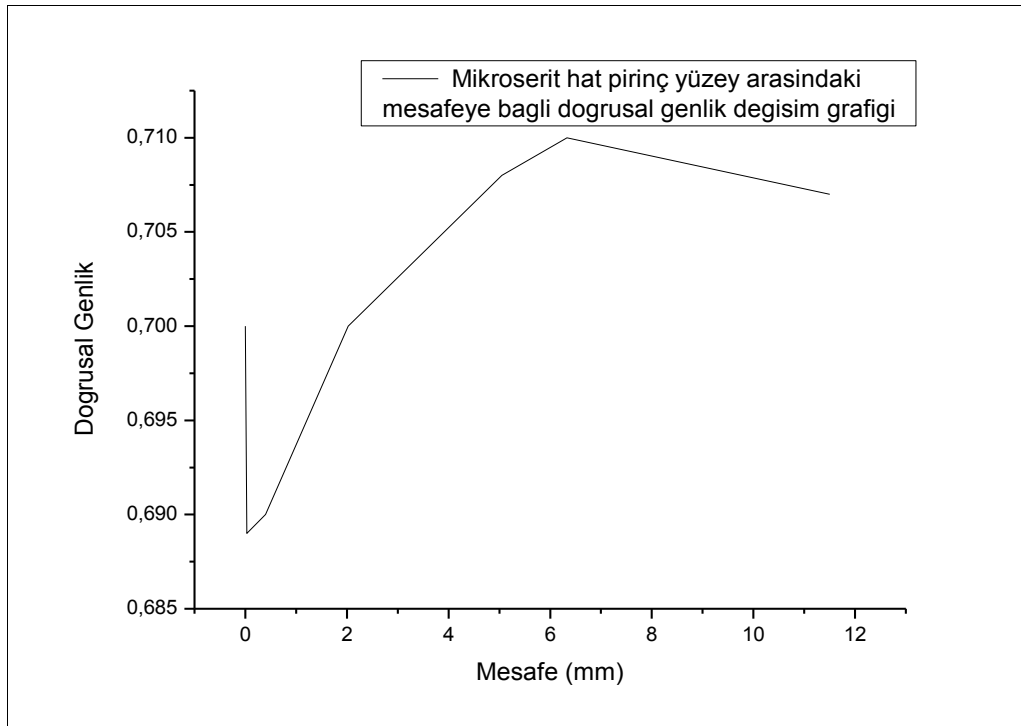


b)

Şekil 3.35. a) Pirinç Malzeme için Uzaklığa Bağlı Olarak Değişen Rezonans Grafiği
b) a grafiğindeki 5.2 GHz ile 5.6 GHz arasının büyütülmüş grafiği.

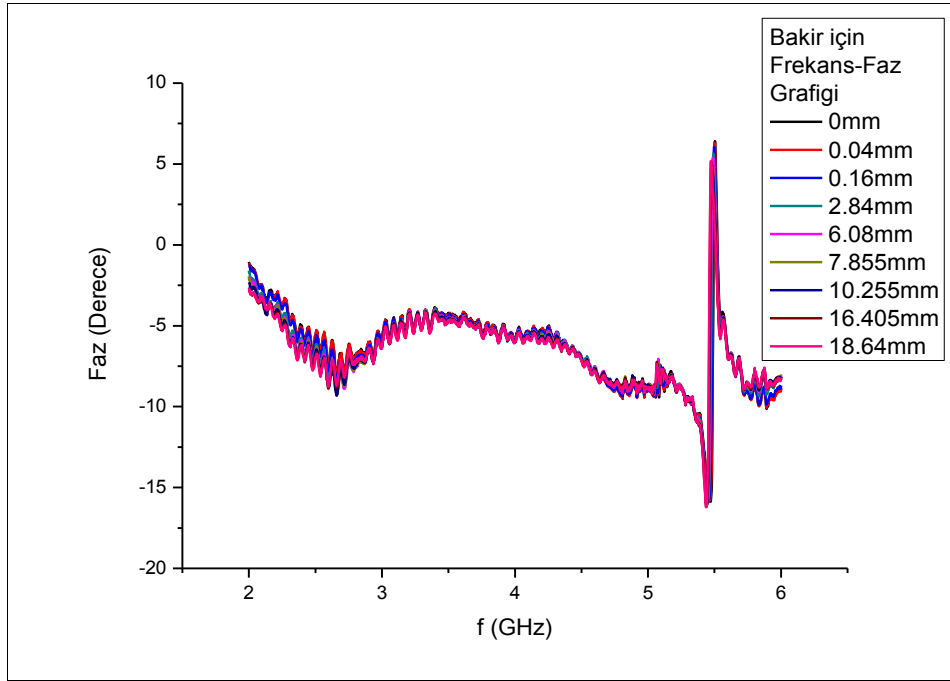


a)

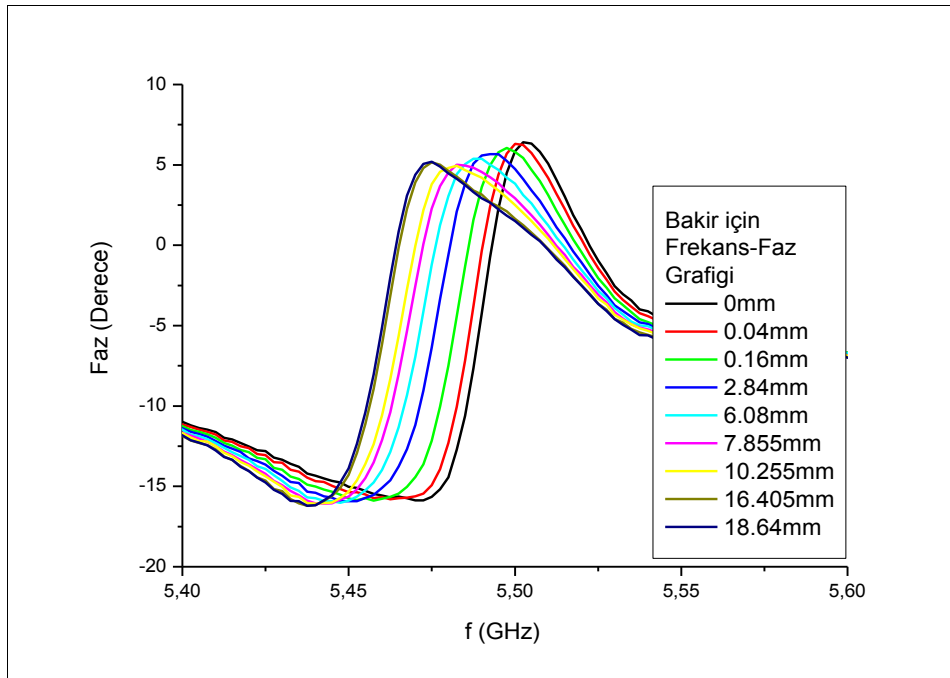


b)

Şekil 3.36. Piriç Malzeme için a) Mikro şerit Hat Örnek arasındaki mesafe Frekans Grafiği, b) Mikro şerit Hat Örnek arasındaki mesafe Rezonans Çukuru genliği grafiği.

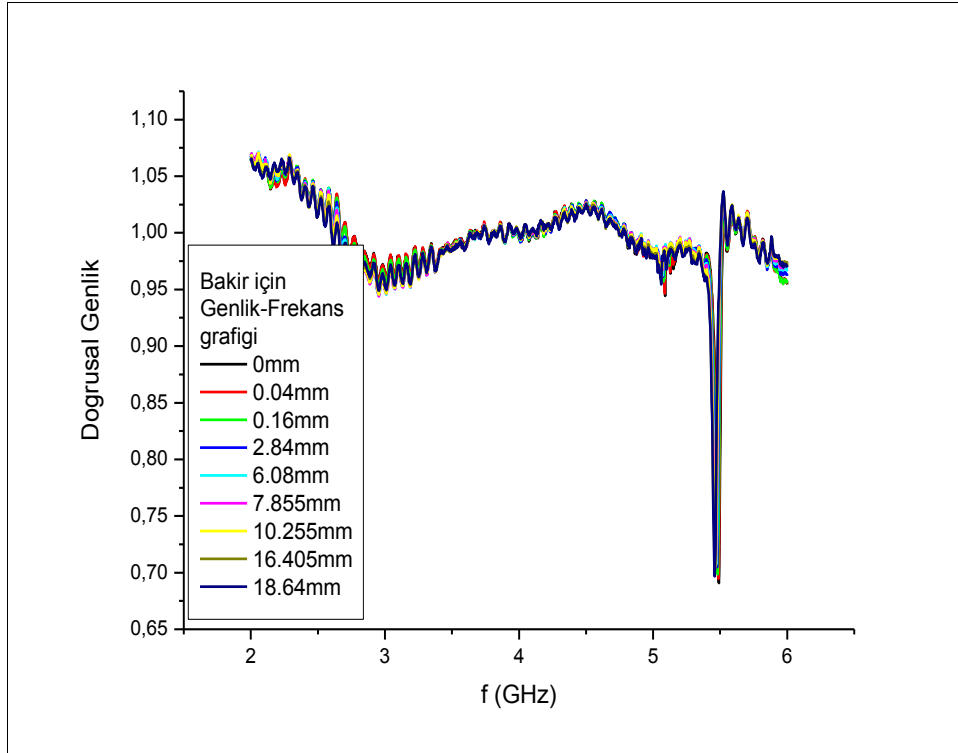


a)

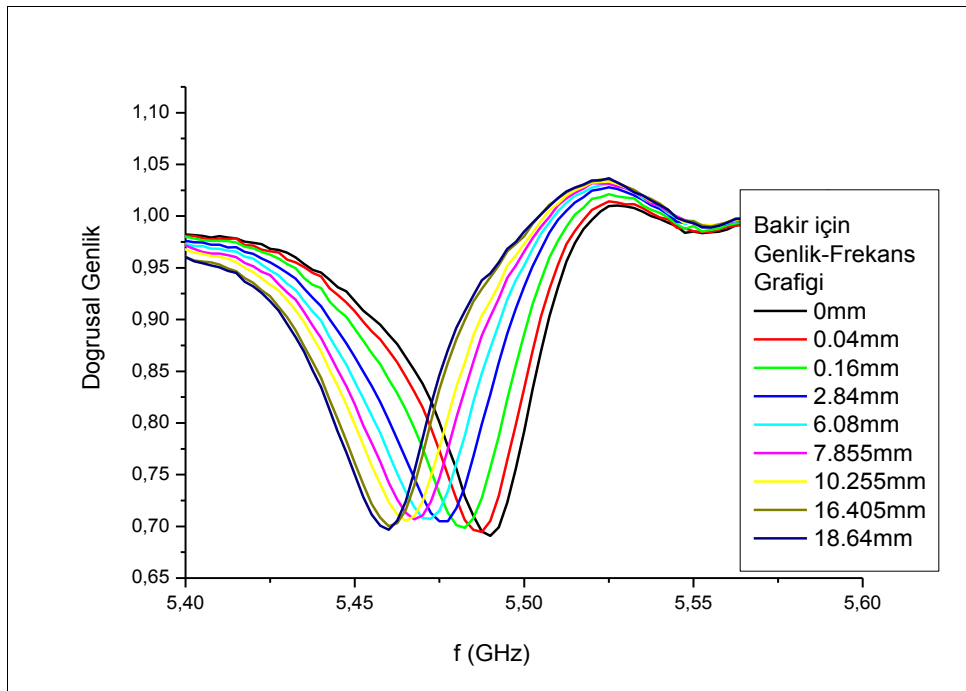


b)

Şekil 3.37. a) Bakır Malzeme için Uzaklığa Bağlı Olarak Değişen Frekans-Faz Grafiği b) a grafiğindeki 5.4 GHz ile 5.6 GHz arasındaki büyütülmüş grafiği.



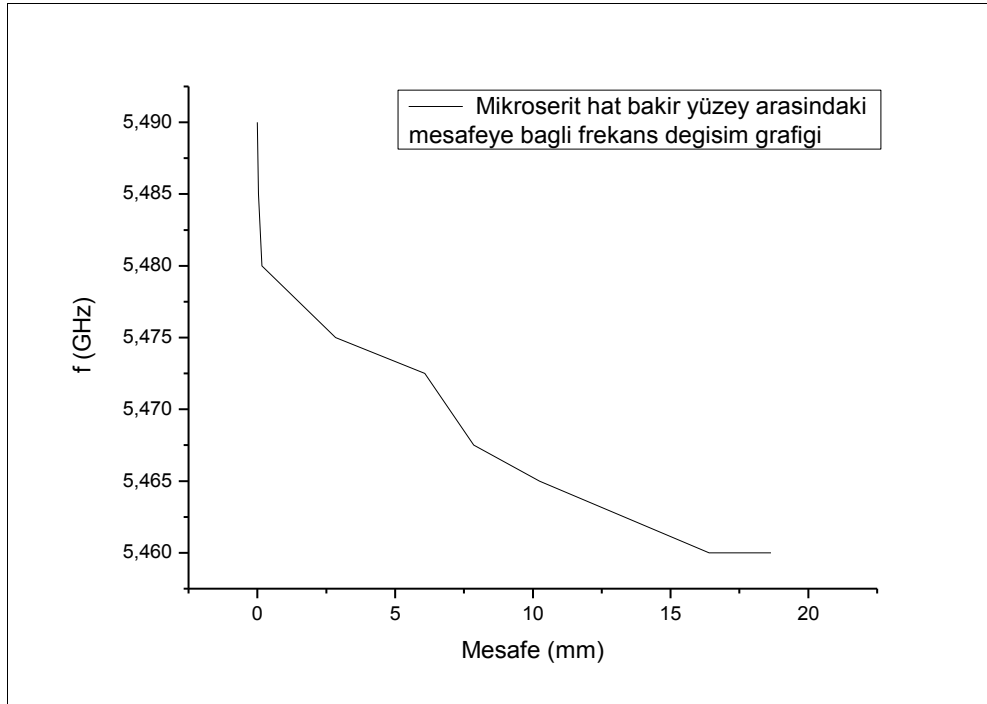
a)



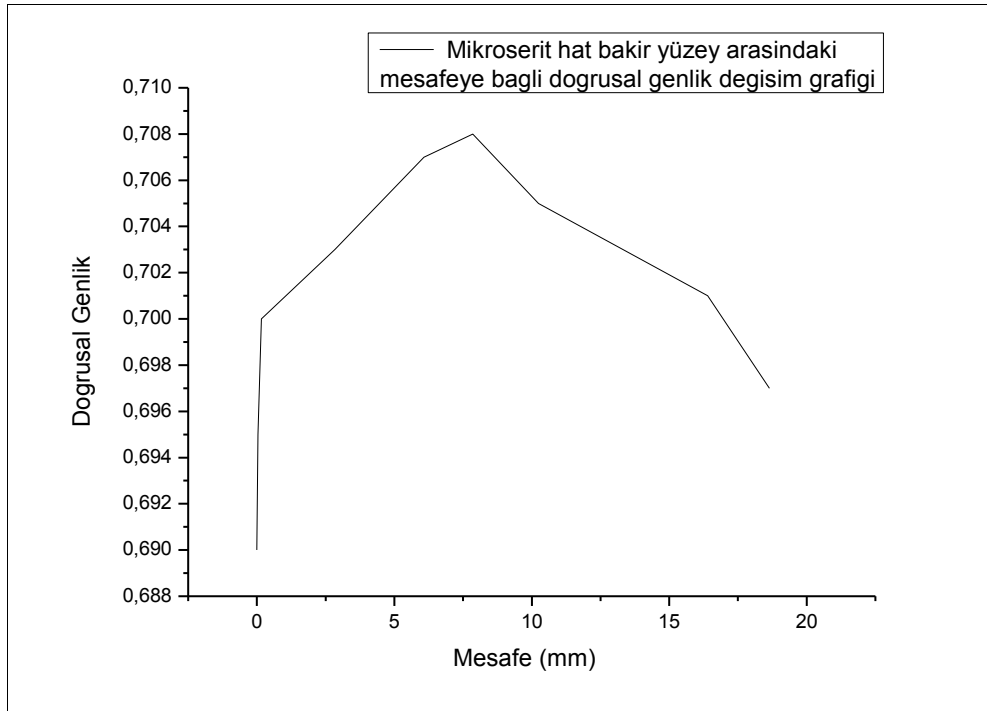
b)

Şekil 3.38. a) Bakır Malzeme için Uzaklığa Bağlı Olarak Değişen Rezonans Grafiği

b) a grafiğindeki 5.4 GHz ile 5.6 GHz arasının büyütülmüş grafiği.

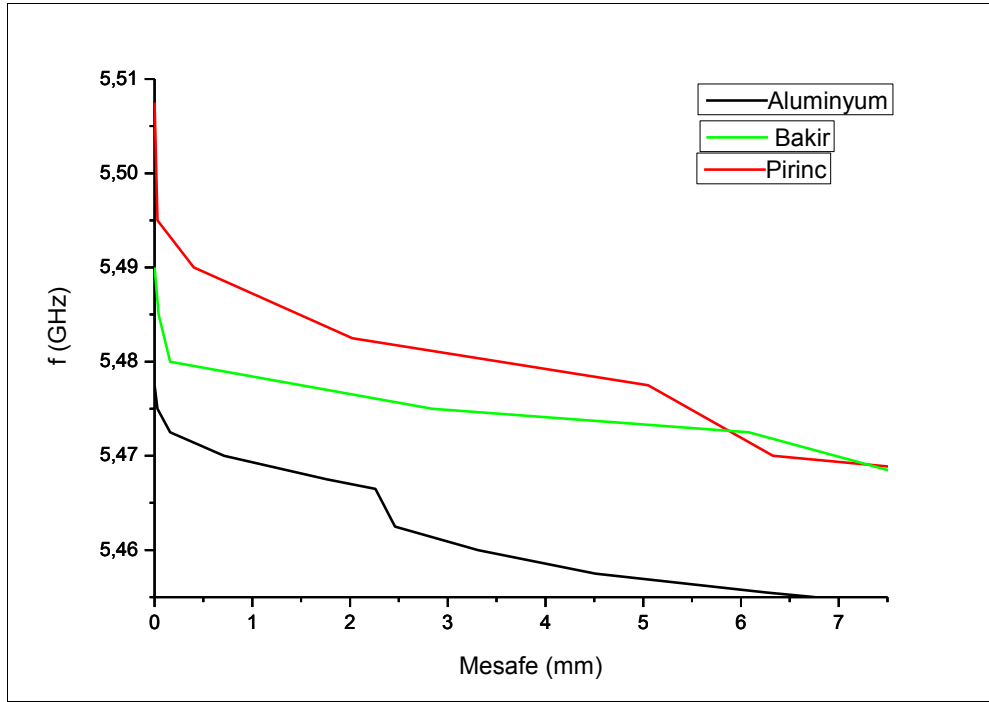


a)

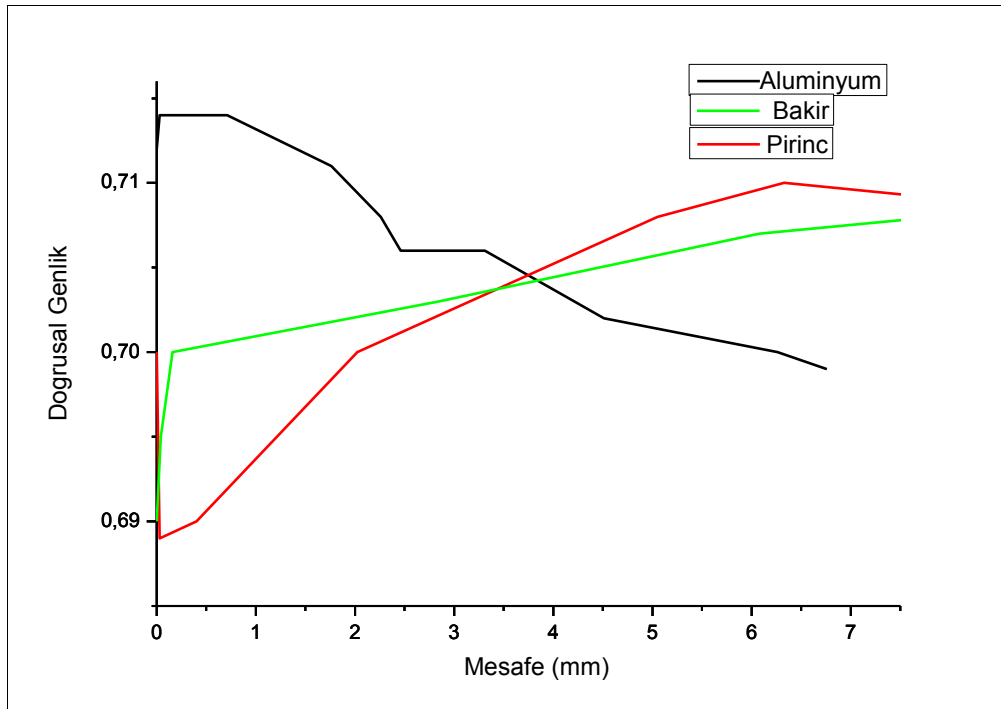


b)

Şekil 3.39. Bakır Malzeme için a) Mikro şerit Hat Örnek arasındaki mesafe Frekans Grafiği, b) Mikro şerit Hat Örnek arasındaki mesafe Rezonans Çukuru genliği grafiği.



a)



b)

Şekil 3.40. a) Birleşik malzeme için Uzaklığa Bağlı Olarak Değişen Mesafe - Frekans Grafiği b) Birleşik malzeme için Uzaklığa Bağlı Olarak Değişen Mesafe – Doğrusal Genlik Grafiği.

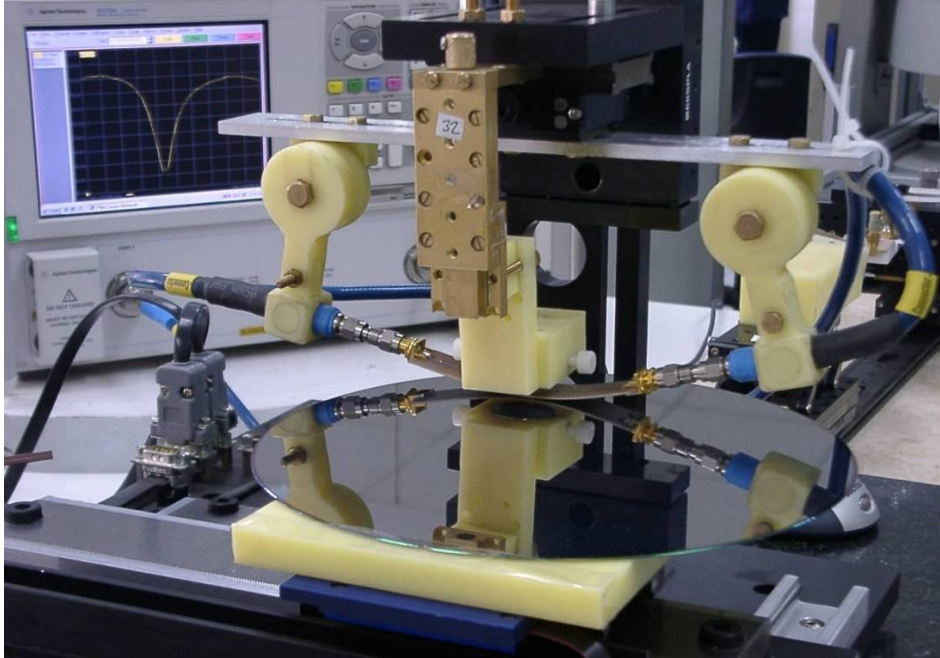
Uygulanan alan nedeni ile meydana gelen girdap akımı metal örnek yüzeyinde perturbasyon ile ferromanyetik rezonans oluşturur. Bu perturbasyon frekans kaymasına sebep olur, artan frekans perturbasyonun artmasına sebep olur.

Bilindiği gibi rezonans sisteminde perturbasyon derecesi artmasıyla tanımlanır ve bu rezonans frekansında bir kaymaya sebep olur. Şekil 3.33, Şekil 3.36 ve Şekil 3.39'de FMR probunun metal yüzeyinden uzaklaşmasıyla oluşan frekans kaymasının grafiği verilmiştir. En yüksek hassasiyete ulaşıldığı mesafenin milimetreler bazında olduğu görülmektedir.

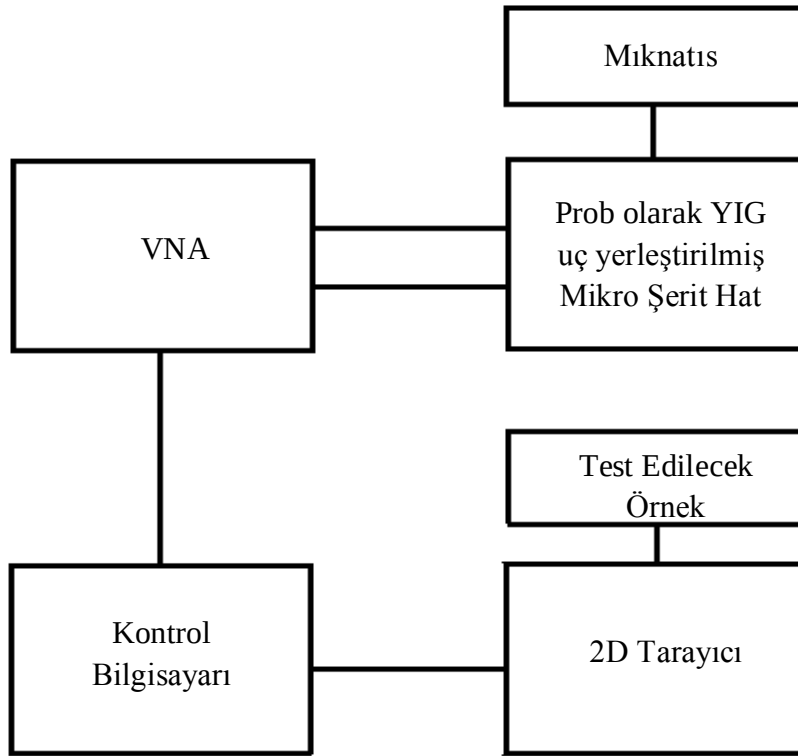
Hazırlanan ferromanyetik uç' un farklı iletken malzemelerde, farklı kusurların (çatlak, yüzey pürüzü, homojen olmama vs.) görüntülenmesi amacıyla kullanılabilir.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu bölüme kadar belirtilen yaklaşımla ferromanyetik uç için MRI teknolojisinin çok yönlü olarak kullanılabileceği düşüncesi ortaya çıkmaktadır. Bu tür bir yaklaşımla FMR fenomeninin uygulamaya dönüştürüldüğü belirtebilir. Bu durumda frekans kayması ve genlik değişimi yüksek hassasiyetli bir görüntülemeye nasıl dönüştürüldüğü belirtilmektedir.



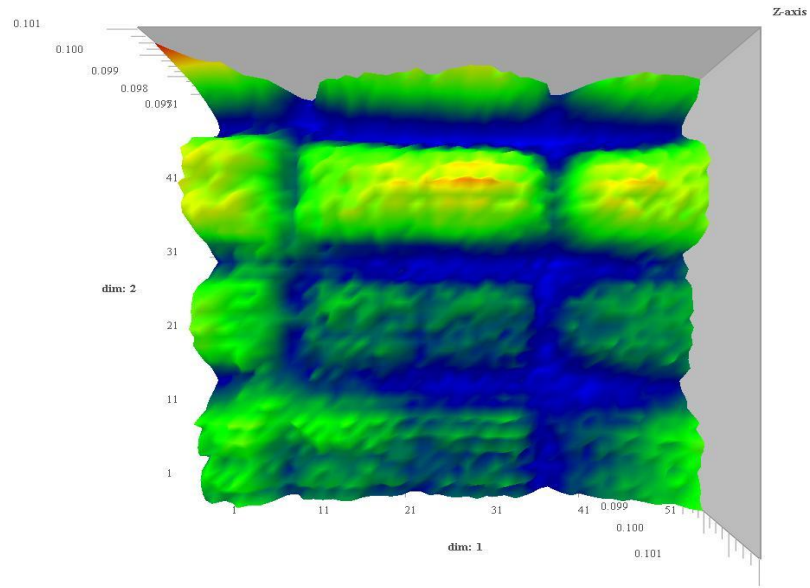
Şekil 4.1. FMRI Düzeneği fotoğrafı [27].



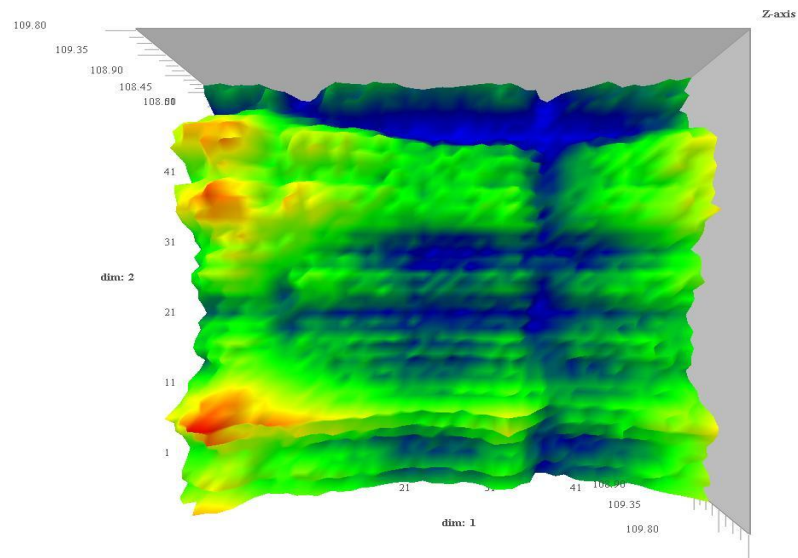
Şekil 4.2. FMRI Düzenegi blok diyagramı.



Şekil 4.3. Güneş Panelinin FMRI Uygulaması.



(a)



(b)

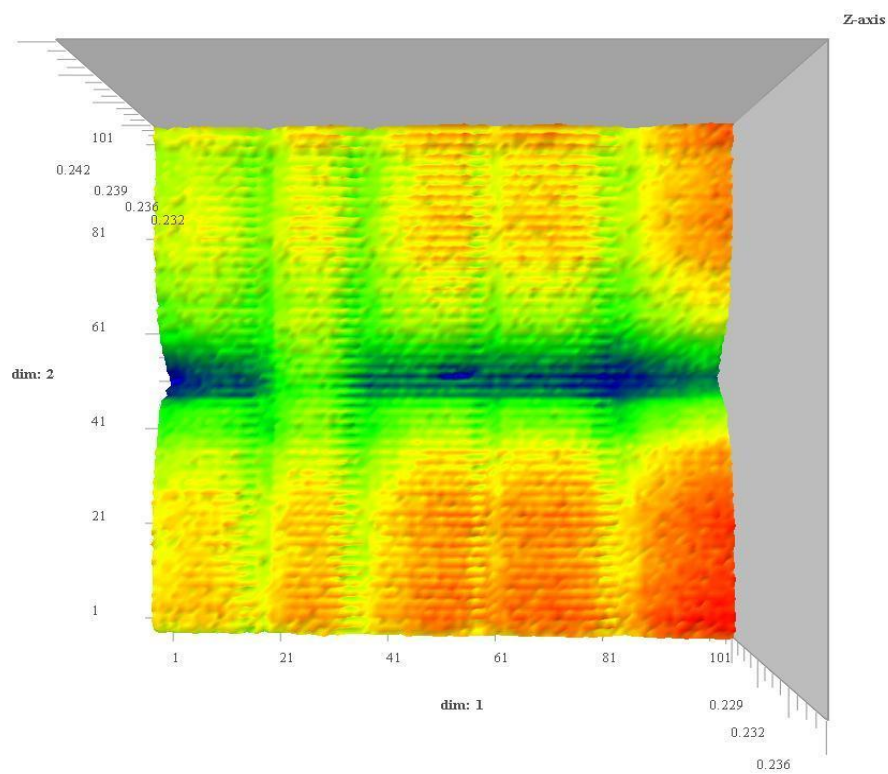
Şekil 4.4. Güneş panelinin 2D FMRI renkli sonucu

Ölçüm Frekans Aralığı: 5.25- 5.33 GHz

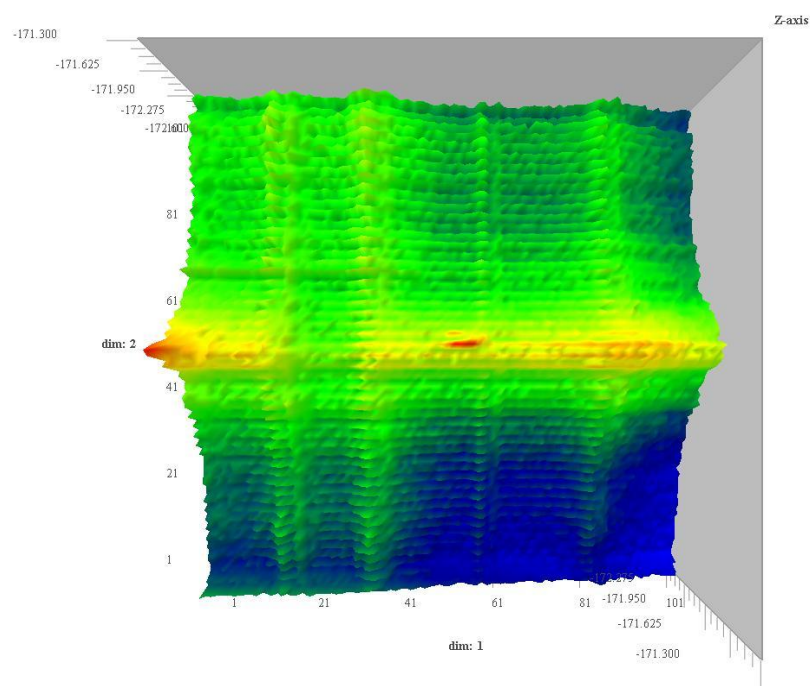
Tarama Alanı: 20mm X 20mm

Tarama Adımı: 400um X 400um

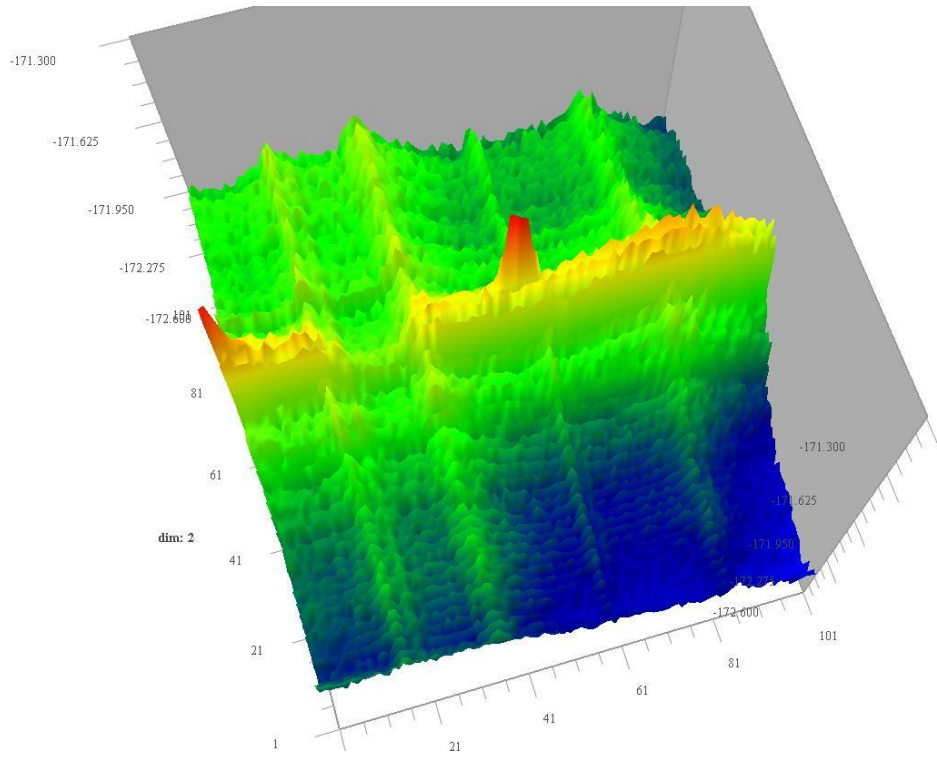
a) Lin Mag Ölçümü 4.53 GHz, b) Phase Ölçümü 4.50 GHz



(a)



(b)



c)

Şekil 4.5. Güneş panelinin 2D FMRI renkli sonucu

Ölçüm Frekans Aralığı : 4.40- 4.55 GHz

Tarama Alanı: 3mm X 3mm

Tarama Adımı: 15um X 15um

a) Lin Mag Ölçümü 4.52 GHz, b) Phase Ölçümü 4.52 GHz, c) Phase Ölçümü 4.52 GHz

Tezde manyetik olmayan alüminyum bakır pirinç malzemeler üzerinde rezonans eğrisinin mesafeye değişiminden bahsedilmişti. Bu bölümde ise görüntü alınması süresinin saniyeler içinde olması için sanayide kullanımı konusunda öneride bulunmak amacıyla güneş paneli hücrelerinin 3D görüntülemesi yapılmıştır. Panelin hazırlık aşamalarında gerçekleştirilen baskıların kat kat ne aşamada olduğunun belirlenmesi amacıyla bu yöntem kullanılabilir. Her bir kat büyütmesi (depozition) gerçekleştirildiğinde sorun varsa bu yöntem Tahribatsız Muayene Testi (NDT) olanağı tanımaktadır. Gerçekleştirilen yöntem sayesinde zamanla güneş paneli üzerinde oluşacak her türlü bozulmanın tespiti mümkün olabileceği ön

görülmektedir. Bu tez sürecinde sadece güneş paneliyle çalışılmış olsa da bunun yanı sıra silikon, tungsten, germanyum gibi yarı iletken alttaşlar ve mekanik parçalar üzerindeki kırılma çatlama ya da zamanla bozulmanın tespitine de imkan vereceği yapılmış çalışmalar ışığında söylenebilir.

KAYNAKLAR

- 1- APAYDIN, F., Manyetik Rezonans, 1991.
- 2- Dr. KONEZ, O., Manyetik Rezonans Görüntüleme Temel Bilgiler.
- 3- KITTEL, Solid State Physics, 1986.
- 4- CHIKAZUMI, S., Physics of Magnetism, Robert E. Krieger Publishing, 1978.
- 5- YİLGİN, R.. Manyetik Parametrelerin Elektron Spin Rezonans Tekniği ile araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, 1999.
- 6- BRIAN F.P, (1999), " An Inclusive Model of Ferromagnetic Hysteresis" Queen'sUniversity Kigston,Ontario, Canada, Power Point Sunu.
- 7- ÖZDEMİR, M., Ferromagnetik alaşımlarda spin dalga rezonansı incelemeleri Yüksek Lisans Tezi, 1991.
- 8- $Co_{0,7}Pt_{0,3}$ İnce Filminin Yüzey ve Manyetik Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, 2008.
- 9- KÜÇÜKÖZET, A. S., Network analizör tekniği ile ferromanyetik rezonans ölçümlerinin yapılması, Yüksek Lisans Tezi, 2009.
- 10- GRIFFITHS, Elektromanyetik Teori, ARTe-Güven Yayınları, 204-205, (1996).
- 11- HELLEMANS, Alexander and Bryan Bunch.The Timetables of Science.New York, New York, Simon and Schuster, 411, (1988).
- 12- HALLİDAY, RESNİCK, Walker: Fundamentals of Physics, 7th Edition,

Wiley, (1997).

- 13- YAYLALI, G., DEĞİRMENCİ, S., ŞİRİN, B. İ., Metalurji Dergisi Sayı:136, Sayfa:3946 Demir Döküm Sektöründe Tahribatsız Muayenenin Önemi Ve Uygulamaları.
- 14- KİTTEL, Katıhal Fizikine Giriş, Güven Yayını, 6. basımdan çeviri, 334, (1996).
- 15- SLICHTER, C.P., “Principles of Magnetic Resonance”, Harper & Row. 1963.
- 16- ÜNAL, A., Ferromanyetik rezonans görüntüleme, Yüksek Lisans Tezi, 2010.
- 17- L.Q. ENGLISH, C.KERESTES, G.RYDZAG Department of physics and Astronomy, Dickinson College, Carlise, Pennsylvania 17013.
- 18- <http://www.larsenglish.com/magneticresonance>.
- 19- http://www.isowave.com/pdf/materials/Yttrium_Iron_Garnet.pdf
- 20- SOOHOO, R.F., Magnetic Thin Films, Harper & Row Publishers Inc. 1965.
- 21- ONURSAL,M.. Uçak Parçalarına Uygulanan Tahribatsız Muayeneler, Bitirme Tezi.
- 22- TRAUT, G. R., “Clad laminates of PTFE composites for microwave antennas”, Microwave J., vol.23, no.11, pp.47-51, 1980.
- 23- SAINATI, R.A., CAD of Microstrip Antennas for Wireless Applications, Artech Hause, London, 1996.

- 24- ÇAKIR, G., SEVGİ, L., Geniş Bandlı Mikroşerit Filtre Tasarımı, 2006.
- 25- HALA, M., RANNO L., Ferromagnetic Resonance and Magnetic Films
<http://www.cernocky.com/matej/france/labs/FMR%20poster.pdf>
- 26- BELYAEV, B. A., IZOTOV, A. V., and LEKSİKOV, A. A., Magnetic Imaging in Thin Magnetic Films by Local Spectrometer of Ferromagnetic Resonance, 2005.
- 27- Bu bölümdeki uygulamalar TÜBİTAK MAM ME UYTL Müdürü Prof.Dr. Alexey VERTIY' nin laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

ÖZGEÇMİŞ

Adem ALBAYRAK, 1986 yılında Erzurum’da doğdu. Lise öğrenimini 2002 yılında Darıca Neşet Yalçın Lisesinde tamamlamış, 2003 yılında Atatürk Üniversitesi Fizik bölümünde öğrenimine devam etmiştir. 2007 yılında Fizik bölümünden mezun olduktan sonra aynı yıl Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Bölümün de yüksek lisans öğrenimine başlamıştır. Yüksek lisans öğrenimi sırasında 2 yıl Fen ve Teknoloji öğretmenliği (ücretli) yapmıştır. Evli ve bir çocuk babasıdır.