



**T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



YÜKSEK LİSANS TEZİ

**UHF BANDINDA RF DOLAŞTIRICI TASARIMI, ÜRETİMİ VE
ÖLÇÜMLERİ**

Oğuz KOÇER

Fizik Anabilim Dalı

Yüksek Enerji Ve Plazma Fiziği Programı

DANIŞMAN

Doç. Dr. Aytül ADIGÜZEL

II. DANIŞMAN

Doç. Dr. N. Gökhan ÜNEL

Temmuz, 2019

İSTANBUL

Bu alışma 04.07.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Fizik Anabilim Dalı Yüksek Enerji ve Plazma Fiziğı Programında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi



Doç. Dr. Aytöl ADIGÜZEL (Danışman)
İstanbul Üniversitesi
Fen Faköltesi



Prof. Dr. V. Erkan ÖZCAN
Boğaziçi Üniversitesi
Fen Edebiyat Faköltesi



Doç. Dr. İ. Alper DİZDAR
İstanbul Üniversitesi
Fen Faköltesi

20.04.2016 tarihli resmi gazetede yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi'nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

Bu tez 116E221 numaralı TÜBİTAK projesi ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Yirminci yüzyıl ile birlikte fizik bilim araştırmalarına en büyük katkıyı sağlayan araçların başında hızlandırıcılar yer almaktadır. Hızlandırıcılar yüksek enerjili atom altı parçacık üretiminde ve bu parçacıkları belirlenen hedeflere göndermek için kullanılan cihazlardır. İlk olarak kullanılan elektrostatik hızlandırıcılar, sadece belirli bir enerji seviyesine kadar çıkabildiğinden, günümüze kadar geline süreçte RF (radyo frekans) salınımları kullanılarak yüksek enerji seviyelerine çıkılabilmektedir. Bunu sağlayan, RF salınımı yapan alternatif akım üreteçleri, "RF Güç Kaynakları"dır. RF güç kaynaklarından RF hızlandırıcılara güç aktarılması RF iletim hattı üzerinden yapılır ve aksi bir durumda RF güç kaynaklarının zarar görmesi önlenir. Bunu sağlayan RF iletim hattı bileşeni olan dolaştırıcılardır. Bu çalışma ile bir dolaştırıcı tasarımının, üretiminin hangi süreçlerden geçtiği deneyimine sahip olunmuş, bu deneyim ile gelecekteki farklı frekans ve güç değerlerinde çalışan dolaştırıcıların tasarlanmasına ışık tutacağı düşünülmüştür.

Birlikte çalışmaya başladığımızdan beri geçen bu süreçte değerli zamanını ve düşüncelerini esirgemeyen, her zaman yol gösteren danışmanım Doç. Dr. Aytül Adıgüzel'e teşekkür ederim.

Tez için gereken alt yapı ve donanımı sağlayan, tez çalışmalarım boyunca beni yalnız bırakmayan KAHVE-Lab ekibine, KAHVE-Lab'ın tüm olanaklarını sağlayan ve bilimsel anlamda her türlü desteği veren ikinci danışmanım Doç. Dr. N. Gökhan Ünel'e ve Prof. Dr. V. Erkcan Özcan'a teşekkür ederim

Benzetim ve deneysel çalışmalarında, tezimin şekillenmesinde büyük emeği geçen, bilgi ve birikimlerini paylaşarak destek gösteren Dr. Hakan Çetinkaya'ya teşekkür ederim.

Hızlandırıcı fiziği alanına ilk adımımı atmamı sağlayan Dr. Salim Oğur'a, deneysel çalışmalarında yardımcı olan Atacan Kılıçgedik'e teşekkür ederim.

Üniversite eğitimimdeki katkılarından dolayı ve tez jüri üyesi olan İstanbul Üniversitesi öğretim üyesi Doç. Dr. İ. Alper Dizdar'a teşekkür ederim.

Ayrıca malzeme üretimi sırasında yardımcı olan Met Makine'ye teşekkür ederim.

Hayatımın her adımında beni destekleyen ve yanımda olan sevgili aileme teşekkür ederim.

Lisansüstü eğitimim boyunca 116E221 nolu proje ile maddi desteklerinden dolayı TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Temmuz, 2019

Oğuz KOÇER

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
ÖNSÖZ	i
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİL LİSTESİ	vii
TABLO LİSTESİ	viii
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ	x
ÖZET	xi
SUMMARY	xii
1. GİRİŞ	1
2. GENEL KISIMLAR	2
2.1. ELEKTROMANYETİK DALGALAR VE FORMÜLASYONU	2
2.1.1. Maxwell Denklemleri	2
2.1.2. Dalga Denklemi ve Çözümü	4
2.1.3. Dikdörtgen Dalga Kılavuzu ve Modları	6
2.1.3.1. <i>TE Modu (Enine Elektrik Alan)</i>	8
2.1.3.2. <i>TM Modu (Enine Manyetik Alan)</i>	9
2.1.3.3. <i>TEM Modu (Enine Elektromanyetik Alan)</i>	11
2.1.4. Saçılma Parametreleri	12
2.1.4.1. <i>Desibel (dB)</i>	14
2.2. MANYETİZMA VE MANYETİZMA TÜRLERİ	16
2.2.1. Ferrit	17
2.2.1.1. <i>Doyum Manyetizasyonu ($4\pi M_s$)</i>	18
2.2.1.2. <i>Rezonans Genişlik Çizgisi (ΔH)</i>	19
2.2.1.3. <i>Curie Sıcaklığı (T_c)</i>	21
2.2.2. Ferrimanyetizmanın Fiziksel Teorisi	22
2.2.3. Ferrit İçinde Elektromanyetik Dalganın Yayılımı	25
2.3. DOLAŞTIRICI	28
2.3.1. Dolaştırıcının Gelişim Süreci	28

2.3.2.	Çalışma Prensipleri	29
2.3.2.1.	<i>Ferrit Bölgesi</i>	30
2.3.2.2.	<i>Dolaştırıcının Çalışma Frekansı, Bant Genişliği</i>	33
3.	MALZEME VE YÖNTEM	34
3.1.	GENEL AMAÇ	34
3.2.	DOLAŞTIRICI BENZETİMİ, TASARIMI VE ÜRETİMİ	34
3.2.1.	Dolaştırıcı Benzetim ve Tasarımı	34
3.2.2.	Dolaştırıcının Üretimi	38
3.2.3.	RF İletim Hattı Bileşenleri	40
3.3.	YÖNLÜ BAĞDAŞTIRICI (COUPLER) BENZETİMİ, TASARIMI VE ÜRETİMİ	42
3.3.1.	Yönlü Bağdaştırıcı	42
3.3.2.	Yönlü Bağdaştırıcı Karakterizasyon Parametreleri	43
3.3.2.1.	<i>Bağdaştırıcı</i>	43
3.3.2.2.	<i>Yalıtım</i>	43
3.3.2.3.	<i>Yönlülük</i>	43
3.3.3.	İlmeğin Tipi Yönlü Bağdaştırıcı	44
3.3.3.1.	<i>Tasarım ve Benzetim</i>	44
3.3.3.2.	<i>Yönlü Bağdaştırıcının Üretimi</i>	48
4.	BULGULAR	49
4.1.	DOLAŞTIRICI VE İLETİM HATTI DENEYSEL ÖLÇÜMLERİ	49
4.1.1.	Dolaştırıcının Manyetik Alan Profili	49
4.1.1.1.	<i>I. Ölçüm: Kalıcı Mıknatıslar ve Solenoidlere Akım Verilerek Alınan Manyetik Alan Ölçümü</i>	51
4.1.1.2.	<i>II. Ölçüm: Sadece Kalıcı Mıknatısların ve Ferritlerin Oluşturduğu Manyetik Alan Ölçümü</i>	53
4.1.2.	S-parametre Ölçümleri	54
4.1.3.	100 Watt Güç İle Alınan Ölçümler	58
4.1.4.	Yönlü Bağdaştırıcı Ölçümleri	62
4.1.4.1.	<i>İlerleyen Dalgalar için Bağdaştırıcı ve Yalıtım Ölçümleri</i>	62
4.1.4.2.	<i>Yansıyan Dalgalar için Bağdaştırıcı ve Yalıtım Ölçümleri</i>	65
5.	TARTIŞMA VE SONUÇ	70
	KAYNAKLAR	72

EKLER	75
EK 1. S-Parametre Sonuçları.....	75
EK 2. Manyetik Alan Dağılımları	79
ÖZGEÇMİŞ	81

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa No
Şekil 2.1: Dikdörtgen dalga kılavuzu [1].	7
Şekil 2.2: İki kapılı ağ gösterimi.	13
Şekil 2.3: Ferrit malzemenin H_{dis} ve B (manyetizasyon) grafiği [17].	19
Şekil 2.4: Rezonans genişlik çizgisi " ΔH " [1].	19
Şekil 2.5: Rezonans bölgeleri [13].	20
Şekil 2.6: Farklı frekansta rezonans bölgeleri [17].	20
Şekil 2.7: Sıcaklık ile manyetizasyon değişimi [17].	21
Şekil 2.8: Spin manyetik dipol moment ve açısal momentum vektörleri [1].	22
Şekil 2.9: Uygulanan $\mathbf{B}$ alan yönü [11].	26
Şekil 2.10: Dolaştırıcı sinyalin akış diyagramı [19].	30
Şekil 2.11: Üç kapılı dolaştırıcıda dönüş modları [13].	31
Şekil 2.12: Manyetik alan uygulanan ferrit [13].	31
Şekil 2.13: Manyetize olmayan ferrit [13].	32
Şekil 3.1: Dolaştırıcının CST programındaki benzetim görünümü.	35
Şekil 3.2: Tasarlanan dolaştırıcının s-parametre benzetim sonuçları.	36
Şekil 3.3: Manyetik alan kaynakları.	36
Şekil 3.4: Dolaştırıcının manyetik alan profil benzetim sonuçları; Sol: Kalıcı mıknatıs, Sağ: Kalıcı mıknatıs + solenoid.	37
Şekil 3.5: Tasarlanan dolaştırıcının Solid Works çizimi.	38
Şekil 3.6: Dolaştırıcı yapısı.	39
Şekil 3.7: Sol: Ferrit, Sağ: Kalıcı mıknatıslar.	39
Şekil 3.8: Giriş kapısı ve çıkış kapısı (dönüştürücüler) 1: T_y ayarlayıcı, 2: T_a ayarlayıcı, 3: T_r ayarlayıcı.	40
Şekil 3.9: Sol: E büküm, Sağ: H büküm.	41
Şekil 3.10: RF çöp.	41
Şekil 3.11: 50 cm ve 1 m uzunluğundaki dalga kılavuzları.	41

Şekil 3.12: Yönlü bağdaştırıcı dört kapı.....	42
Şekil 3.13: İlmek tipi yönlü bağdaştırıcı görünümü.....	44
Şekil 3.14: İlmek tipi yönlü bağdaştırıcı bölümleri [31].	44
Şekil 3.15: İlmek tipi yönlü bağdaştırıcı bölümleri [31].	45
Şekil 3.16: İlerleyen ve yansıyan dalga ölçüm şekilleri.....	45
Şekil 3.17: İlmek tipi yönlü bağdaştırıcı iç görünümü.	46
Şekil 3.18: Tasarlanan yönlü bağdaştırıcı diğer görünümleri.....	46
Şekil 3.19: Düşük ve yüksek mesh görüntüleri.....	46
Şekil 3.20: Düşük mesh benzetim sonucu.	47
Şekil 3.21: Yüksek mesh benzetim sonucu.	47
Şekil 3.22: Yönlü bağdaştırıcı üretim sırasında.	48
Şekil 4.1: Tasarlanan düzenek.	49
Şekil 4.2: Sol: Ölçüm doğrultuları, Sağ: Doğrultuları çizili olan daire kağıt.....	50
Şekil 4.3: Manyetik alan ölçümü yapılırken.	50
Şekil 4.4: Kalıcı mıknatıs ve ölçüm düzeneği.....	51
Şekil 4.5: Kalıcı mıknatısların oluşturduğu manyetik alan dağılımı.	51
Şekil 4.6: Dolaştırıcıda kullanılan solenoidler.	52
Şekil 4.7: Solenoidlere akım verildiğinde manyetik alan değerleri.	52
Şekil 4.8: Sol: Ferritler; Sağ: Ölçüm alınırken.....	53
Şekil 4.9: Ferritsiz ile ferritli sistemlerin manyetik alan dağılımlarının karşılaştırılması.	53
Şekil 4.10: Dolaştırıcı kapılarının gösterimi.	54
Şekil 4.11: Ayarlayıcı (tuner) durumları.....	55
Şekil 4.12: S-parametreler gösterimi.	55
Şekil 4.13: 21. Deney setinin görüntüsü.	57
Şekil 4.14: 21. Deney setinin s-parametre ölçüm sonucu.	57
Şekil 4.15: Sol: RF güç kaynağı ve spektrum analyzer, Sağ: 40 dB sönmölendirici.....	58
Şekil 4.16: RF güç kaynağının yüzdelik ifadesine karşılık gelen Watt değerleri.	59
Şekil 4.17: Sol: RF güç kaynağı güç değeri ölçümü, Sağ: Koaksiyel kablo güç kaybı ölçümü.	59
Şekil 4.18: RF güç ölçüm şeması.....	59
Şekil 4.19: 100 Watt'lık güç ölçümü yapılırken alınan görüntü.	61

Şekil 4.20: Bağdaştırıcı ölçüm şeması S_{31}	62
Şekil 4.21: İlerleyen dalga için bağdaştırıcı ölçüm esnasında alınan bir resim.	62
Şekil 4.22: İlerleyen dalga için bağdaştırıcı ölçüm düzeneği.	63
Şekil 4.23: İlerleyen dalga için bağdaştırıcı ölçüm sonucu.	63
Şekil 4.24: Yalıtım ölçüm şeması S_{41}	64
Şekil 4.25: İlerleyen dalga için yalıtım ölçüm düzeneği.	64
Şekil 4.26: İlerleyen dalga için yalıtım ölçüm esnasında alınan bir resim.	65
Şekil 4.27: İlerleyen dalga için yalıtım ölçümü.	65
Şekil 4.28: Bağdaştırıcı ölçüm şeması S_{42}	66
Şekil 4.29: Yansıyan dalga için bağdaştırıcı ölçüm düzeneği.	66
Şekil 4.30: Yansıyan dalga için bağdaştırıcı ölçüm esnasında alınanan bir resim.	66
Şekil 4.31: Yansıyan dalga için bağdaştırıcı ölçüm sonucu.	67
Şekil 4.32: Yalıtım ölçüm şeması S_{32}	67
Şekil 4.33: Yansıyan dalga için yalıtım ölçüm düzeneği.	68
Şekil 4.34: Yansıyan dalga için yalıtım ölçümü.	68
Şekil 4.35: Yansıyan dalga için yalıtım ölçüm sonucu.	68

TABLO LİSTESİ

	Sayfa No
Tablo 3.1: Kullanılan ferritlere ait özellikler.	35
Tablo 3.2: Benzetim sonuçları.	36
Tablo 3.3: Yönlü bağdaştırıcı benzetim sonuçları.	48
Tablo 4.1: Oluşturulan RF iletim hatlarının s-parametre ölçüm sonuçları.	56
Tablo 4.2: RF iletim hattının iletim değerleri.	60
Tablo 4.3: Yönlü bağdaştırıcının ölçüm sonuçları.	69

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
c	: Işık Hızı
ϵ_0	: Dielektrik Sabiti
μ_0	: Manyetik Geçirgenlik
λ	: Dalga Boyu
k	: Dalga Sayısı
f	: Frekans
ω	: Açısal Frekans
ω_0	: Larmor Frekans
k_c	: Eşik Dalga Sayısı
β	: İletim Sabiti
f_c	: Eşik Frekans
H_{dis}	: Dış Manyetik Alan
H_{ic}	: İç Statik Manyetik Alan
T_c	: Curie Sıcaklık
ΔH	: Rezonans Genişlik Çizgisi
$4\pi M_s$	: Doyum Manyetizasyon
γ	: Jiromanyetik Sabiti
κ	: Duyarlılık
γ	: Yayılma Sabiti
σ	: İletkenlik Katsayısı
α	: Sönümlenme Terimi
β	: Faz Terimi
μ_{eff}	: Etkili Geçirgenlik Değeri
$\frac{\kappa}{\mu}$	: Bölme Miktarı

Kısaltmalar	Açıklama
RF	: Radyo Frekans
TE	: Enine Elektrik Alan

TM	: Enine Manyetik Alan
TEM	: Enine Elektromanyetik Alan
dB	: Desibel
dBm	: desibel-miliwatt
RFQ	: Radyo Frekans Dört Kutup
UHF	: Ultra Yüksek Frekans
CST	: Bilgisayar Simülasyon Teknolojileri
CERN	: Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi
S – parametre	: Saçılma Parametre
DC	: Doğrusal Akım
AC	: Alternatif Akım
VNA	: Vektör Ağ Analizör

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

UHF BANDINDA RF DOLAŞTIRICI TASARIMI, ÜRETİMİ VE ÖLÇÜMLERİ

Oğuz KOÇER

İstanbul Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Aytül ADIGÜZEL

II. Danışman: Doç. Dr. N. Gökhan ÜNEL

Modern teknolojilerin kullanıldığı farklı bilim ve mühendislik konularını içeren radyo frekansında (RF) çalışan parçacık hızlandırıcıları, yirminci yüzyılın bilim ve teknolojisinin en etkileyici ürünlerinden biridir. RF güç kaynakları ve bu güç kaynaklarından hedefe gönderilen gücün iletimini sağlayan RF iletim hatları, RF parçacık hızlandırıcıları için temel yapılardır. RF iletim hattı dalga kılavuzları, dolaştırıcı, RF çöp gibi RF bileşenlerden oluşmaktadır. Bu bileşenlerden en önemli olanlardan biri de dolaştırıcılardır. Bu çalışmada, Boğaziçi Üniversitesi KAHVE Laboratuvarı'nda benzetimi, tasarımı ve üretimi gerçekleştirilen 800 MHz RF iletim hattı bileşenlerinin S-parametre ve güç ölçümleri yapılmıştır. Ayrıca RF iletim hattı içerisinde geçen güç hakkında bilgi almak için ilmek tipi yönlü bağdaştırıcının benzetimi, tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiş, bağdaştırıcının S-parametre ölçümleri yapılmıştır.

Temmuz 2019, 96 sayfa.

Anahtar kelimeler: RF Dolaştırıcı, Radyo Frekansı, RF İletim Hattı.

SUMMARY

M.Sc. THESIS

DESIGN, PRODUCTION AND MEASUREMENTS OF AN RF CIRCULATOR IN THE UHF BAND

Oğuz KOÇER

İstanbul University

Institute of Graduate Studies in Science

Department of Physics

Supervisor: Doç. Dr. Aytül ADIGÜZEL

Co-Supervisor: Doç. Dr. N. Gökhan ÜNEL

Radio Frequency (RF) particle accelerators, constructed using a variety of science and engineering are amongst the most impressive products of science and technology of the twentieth century. RF power supply and RF transmission line are important structures for these accelerators. An RF transmission line consists of waveguides, circulators and RF dumps. In this study, S-parameter and power measurements of 800 MHz RF transmission line components, which have been simulated, designed and manufactured at the KAHVE Laboratory of Boğaziçi University, are performed. In addition, in order to obtain information about the power passing through the RF transmission line, the simulation, design and production of a Loop-Type Directional Coupler have been carried out and S-parameters have been measured.

July 2019, 96 pages.

Keywords: RF Circulator, Radio Frequency, RF Transmission Line.

1. GİRİŞ

Geçmişten günümüze bakıldığında Radyo Frekans (RF) teknolojisinin kullanımının bir çok alanda arttığı görülmektedir. Özellikle haberleşme ve iletişimin hızla büyümesi RF bileşenlerinin ihtiyacının artmasına sebep olmuştur. Bunun yanı sıra radar, navigasyon sistemleri, uydu iletişim sistemleri, astronomi, fizik ve benzeri bir çok alanda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. RF, 3 kHz ile 300 GHz frekans aralığında olan elektromanyetik dalgalardır. Buna karşılık gelen dalga boyu aralığı 100 km ile 1 mm arasındadır. Çok sayıda RF bileşenleri vardır. Bunlar, RF güç kaynak cihazları, dalga kılavuzları, ferrit malzemesine dayalı dolaştırıcılar vb. bileşenlerdir. Bu çalışmada ferrit malzemesine dayalı RF bileşeni olan dolaştırıcıdan bahsedilecektir.

Dolaştırıcılar, RF iletim hattındaki elektromanyetik sinyallerin akışını yönlendirmek için kullanılan üç veya daha fazla kapılı ferromanyetik cihazlardır. Bu cihazlara ferromanyetik özelliğini kazandıran, dolaştırıcı içinde bulunan ferritlerdir. Dışardan uygulanan manyetik alan, dolaştırıcı içindeki ferrit malzemesi ile etkileşerek sinyal akışını yönlendirir. Dolaştırıcılar, MHz'den GHz'e kadar olan sistemlerde kullanılabilir. Dolaştırıcının çalışma frekans bandı kullanılan malzemenin geometrisine ve iletim hattının tasarımına bağlıdır. Bu çalışmada RF dolaştırıcının ve iletim hattının çalışma frekansı 800 MHz'dir. 800 MHz'lik bu iletim hattı, bu frekansta çalışacak Radyo Frekans Dört Kutuplu (RFQ) proton hızlandırıcısı için Kandilli Algıç Hızlandırıcı ve Enstrümantasyon Laboratuvarında (KAHVELab) tasarlanmış ve üretilmiştir.

KAHVELab, 2016 yılında faaliyete geçen 200 m² çalışma alanına sahip algıç, hızlandırıcı ve enstrümantasyon laboratuvarıdır. Hızlandırıcı ve algıç yapımında gerekli olan malzemeleri üretebilen mekanik atölyesi, elektronik devre kartlarını, lehimleme işlemlerini yapabilen elektronik atölyesi ve Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi (CERN)'ndeki dört büyük algıçtan biri olan ATLAS algıcından alınan verilerin analizi, benzetim işlerinin yapılması için oluşturulan bilgisayar çiftliği bölümü olmak üzere üç ana bölümden oluşmaktadır.

2. GENEL KISIMLAR

2.1. ELEKTROMANYETİK DALGALAR VE FORMÜLASYONU

2.1.1. Maxwell Denklemleri

Maxwell denklemleri hem elektrik alan hem de manyetik alan davranışlarını tanımlayan denklemlerdir. Dört maddeden oluşan bu eşitliklerin her biri ayrı ifadeyi tanımlar. Bu denklemler;

- Elektrik yüklerin nasıl elektrik alan ürettiğini,
- Manyetik yükün olmadığını,
- Akım ve değişen elektrik alanların nasıl manyetik alan ürettiğini,
- Değişen manyetik alanların nasıl elektrik alanları ürettiğini

matematiksel formda ifade eder. Maxwell denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir (denklemlerde kalın ile yazılan nicelikler vektör olduklarını belirtmektedir):

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho, \quad (2.1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad (2.2)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \quad (2.3)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} - \mathbf{M}. \quad (2.4)$$

Denklemlerdeki nicelikler şu şekilde tanımlanır: $\mathbf{D}$ elektrik akı yoğunluğunu, $\mathbf{B}$ manyetik akı yoğunluğunu, $\mathbf{H}$ manyetik alanı, $\mathbf{E}$ elektrik alanı, $\mathbf{J}$ elektrik akım yoğunluğunu, ρ elektrik yük yoğunluğunu, $\mathbf{M}$ manyetik akım yoğunluğunu tanımlar. Bu niceliklerden $\mathbf{J}$, ρ ve $\mathbf{M}$ elektromanyetik alanın kaynaklarıdır. $\mathbf{M}$ matematiksel kolaylık olması bakımından tanımlanmış hayali bir kaynaktır. Manyetik akımın gerçek kaynağı, aslında elektrik akım döngüsüdür. Manyetik alanı oluşturacak manyetik yük yoktur. Elektrik akımı ise yüklerin

hareket etmesiyle oluşmaktadır; bu da elektromanyetik alanın nihai kaynağının elektrik yük yoğunluğu ve bunun zamanla evrimi olduğunu gösterir [1].

Boş uzayda, elektrik ve manyetik alanların yoğunlukları ile akı yoğunlukları arasında basit ilişki vardır ve şu şekilde ifade edilir:

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E}, \quad (2.5)$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}. \quad (2.6)$$

Burada dielektrik sabiti " ϵ_0 ", manyetik geçirgenlik " μ_0 " alanların bulunduğu ortama bağlıdır. Boşlukta şu şekilde ifade edilirler:

$$\epsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 c^2} = 8.854 \times 10^{-12} Fm^{-1}, \quad \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} Hm^{-1}$$

Bu sabitler malzemenin elektrik ve manyetik alanlar ile olan ilişkisini belirler. Genelleştirirsek, her malzemenin kendine özgü manyetik geçirgenlik ve dielektrik sabiti vardır. Gerçekte, geçirgenlik ve dielektrik sabiti mevcut alanlarda karmaşık bir ilişkiye sahip olabilir, bu sebepten malzemenin geçirgenlik ve dielektrik sabitinin boşluktaki geçirgenlik ve dielektrik sabitine oranı olarak kullanılırlar:

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}, \quad \mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}. \quad (2.7)$$

Yük yoğunluğu ve akım yoğunluğu belirtilen bir sistemin olası elektrik ve manyetik alanları Maxwell'in 2.1 ve 2.3'teki denklemleri ile bulunabilir. Bunun sonucunda bulunan olası alanlar modlar ile ifade edilir [2]. Her mod elektromanyetik dalgaların özelliklerini yani dalgaların yönünü ve boyunu belirtir [3].

2.1.2. Dalga Denklemi ve Çözümü

Boş uzayda elektrik yüklerin, elektrik akımın ve herhangi bir maddenin bulunmadığı ortamda Maxwell denklemleri aşağıdaki şekilde yazılır [3]:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 0, \quad (2.8)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad (2.9)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = -\frac{1}{c^2} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}, \quad (2.10)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}. \quad (2.11)$$

$\mathbf{E}$ ve $\mathbf{B}$ alanlarının bir arada bulunmadığı denklemlerin bir formu yazılması istenirse, ilk olarak 2.11 ifadesinin her iki tarafının rotasyoneli alınır:

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial}{\partial t} \nabla \times \mathbf{B}. \quad (2.12)$$

$\nabla \times \mathbf{B}$ yerine 2.10'daki ifade yazılırsa,

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2}, \quad (2.13)$$

ifadesi sadece elektrik alan içeren duruma gelir ve denklemin sol tarafı matematiksel tanım kullanarak düzenlenebilir:

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{E}) - \nabla^2 \mathbf{E}. \quad (2.14)$$

2.8 denklemi yerine konulup yeniden düzenlendiğinde ifade basitleşir:

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0. \quad (2.15)$$

Bu ifade üç boyutta bir dalga denklemidir. $\mathbf{k}$ vektörü yönünde ilerleyen bir düzlem dalga düşündüğümüzde, bu düzlem dalgayı temsil eden çözüm şu şekilde bulunur:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 \cos(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t + \phi_0). \quad (2.16)$$

Burada E_0 genlik, ϕ_0 faz, ω açısal frekans ve $\mathbf{k}$ dalga sayısıdır. ω ve $\mathbf{k}$, frekans f ve dalgaboyu λ ile ilişkilidir:

$$\omega = 2\pi f, \quad (2.17)$$

$$\lambda = \frac{2\pi}{|\mathbf{k}|}. \quad (2.18)$$

2.18, 2.17'deki ifadenin içine yazıldığında ışık hızı elde edilir:

$$\frac{\omega}{|\mathbf{k}|} = c. \quad (2.19)$$

Bu ifade c ışık hızını ifade eder ve ışığın elektromanyetik bir dalga olduğuna işaret eder. Aynı işlemler 2.10'daki denkleme uyguladığında üç boyutlu dalga denklemi elde edilir:

$$\nabla^2 \mathbf{B} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2} = 0. \quad (2.20)$$

$\mathbf{k}$ yönünde ilerleyen bir düzlem dalgayı temsil eden çözümü şu şekilde ifade edilir:

$$\mathbf{B} = B_0 \cos(\mathbf{k} \cdot \mathbf{x} - \omega t + \phi_0). \quad (2.21)$$

Bu ifadedeki terimlerin de elektrik alanında kullanılan terimler ile benzer formda olduğu görülmektedir. Elektrik ve manyetik alan arasındaki ilişkiye daha detaylı bakmak için konum (x) ve zamana (t) bağlı olan $\mathbf{j}$ yönündeki elektrik alanının rotasyoneli şu şekilde alınır:

$$\nabla \times \mathbf{E}_{(x,t)} \mathbf{j} = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & \mathbf{E}_{(x,t)} & 0 \end{vmatrix} = \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} \mathbf{k}. \quad (2.22)$$

Bu denklem, 2.11 de yerine konulursa aşağıdaki ifade elde edilir:

$$\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial \mathbf{x}} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial \mathbf{t}}. \quad (2.23)$$

2.16'daki ifadenin x 'e göre, 2.21'deki ifadenin t 'ye göre türevi alınıp, birbirine eşitlendiğinde aşağıdaki ifade elde edilir:

$$\frac{\mathbf{E}_0}{\mathbf{B}_0} = \frac{\omega}{k} = c. \quad (2.24)$$

2.24'teki eşitlik, elektrik ve manyetik alan arasındaki ilişkiyi tanımlar. Serbest uzayda yayılan elektromanyetik dalganın görünebileceği sonsuz sayıda mod vardır ve tüm modların toplamı en genel çözümü ifade eder. Boş uzayda düzlem dalgayı temsil eden çözüm 2.16 ve 2.21'de belirtilmiştir. Bu çözümler kompleks sayılar kullanılarak yazılabilir:

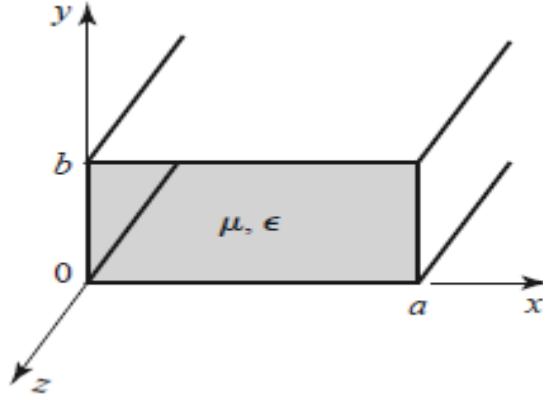
$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 e^{i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{x} - \omega t + \phi_0)}, \quad (2.25)$$

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 e^{i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{x} - \omega t + \phi_0)}. \quad (2.26)$$

Bu ifadeler matematiksel olarak geçerli çözümler sağlar. Böylece doğrusal denklemler ile uğraşıldığı sürece, kompleks alan vektörlerini kullanarak cebirsel çözümler gerçekleştirilebilir [2-4].

2.1.3. Dikdörtgen Dalga Kılavuzu ve Modları

Dalga kılavuzları, elektromanyetik enerjinin farklı konumlar arasındaki iletimini gerçekleştirmek için kullanılan iletken yapılardır. Dalga kılavuzundan geçen elektromanyetik dalgaların enerjisinin çoğu dalga kılavuzunun iletken yüzeyinden yansır ve böylece enerjinin depolanması sağlanır. Şekillerine göre dikdörtgen ve silindirik olmak üzere iki tip dalga kılavuzu kullanılmaktadır [2]. Bu çalışmada dikdörtgen dalga kılavuzu kullanıldığı için bu yapıdan söz edilecektir. Dikdörtgen dalga kılavuzları elektromanyetik dalgaların iletiminde kullanılan ilk yapılardır ve bir çok uygulamada kullanılmaktadır [1]. Bir sonraki bölümde dikdörtgen dalga kılavuzun **TM** ve **TE** modlarından ve kesme frekansından söz edilecektir.



Şekil 2.1: Dikdörtgen dalga kılavuzu [1].

Bir dikdörtgen dalga kılavuzu Şekil 2.1’de gösterilmektedir. Bu dalga kılavuzunun içinin dielektrik sabiti ϵ ve geçirgenlik katsayısı μ olan bir madde ile dolu olduğu ve dalga kılavuzun dikdörtgen kesidinin uzun kenarının x- eksenı yönünde ($a > b$) olduğu varsayıldığında, dalga kılavuzunun içinden geçen elektromanyetik alanlar aşağıdaki Maxwell denklemlerini sağlamalıdır:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -j\omega\mu\mathbf{H}, \quad (2.27)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = j\omega\epsilon\mathbf{E} + \mathbf{J}, \quad (2.28)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho, \quad (2.29)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0. \quad (2.30)$$

Dalga kılavuzu içinde bir kaynak olmadığı ($J=0$, $\rho=0$) durumunda 2.27 ve 2.28’deki vektör denklemlerin her birinin bileşenleri iletim yönündeki alan bileşenleri cinsinden çözüldüğünde şu çözümler elde edilir:

$$H_x = \frac{j}{(k_c)^2} (\omega\epsilon \frac{\partial E_z}{\partial y} - \beta \frac{\partial H_z}{\partial x}), \quad (2.31)$$

$$H_y = -\frac{j}{(k_c)^2} (\omega\epsilon \frac{\partial E_z}{\partial x} + \beta \frac{\partial H_z}{\partial y}), \quad (2.32)$$

$$E_x = -\frac{j}{(k_c)^2} (\beta \frac{\partial E_z}{\partial x} + \omega\mu \frac{\partial H_z}{\partial y}), \quad (2.33)$$

$$E_y = \frac{j}{(k_c)^2} (-\beta \frac{\partial E_z}{\partial y} + \omega\mu \frac{\partial H_z}{\partial x}). \quad (2.34)$$

Burada $k_c^2 = k^2 - \beta^2$ ve k_c eşik dalga sayısı olarak tanımlanır [1].

Dikdörtgen dalga kılavuzu **TM** enine manyetik alan ($B_z = 0$) ve **TE** enine elektrik alan ($E_z = 0$) modlarını yayabilir.

2.1.3.1. TE Modu (Enine Elektrik Alan)

TE modunda enine elektrik dalgaları, z yönünde manyetik alan bileşeni içeren elektrik alan bileşeni içermeyen ($E_z = 0$) durumu ifade eder [5]. Bu modda iletim yönündeki alan bileşenleri aşağıdaki gibidir:

$$H_x = -\frac{j\beta}{(k_c)^2} \frac{\partial H_z}{\partial x}, \quad (2.35)$$

$$H_y = -\frac{j\beta}{(k_c)^2} \frac{\partial H_z}{\partial y}, \quad (2.36)$$

$$E_x = -\frac{j\omega\mu}{(k_c)^2} \frac{\partial H_z}{\partial y}, \quad (2.37)$$

$$E_y = \frac{j\omega\mu}{(k_c)^2} \frac{\partial H_z}{\partial x}. \quad (2.38)$$

Bu durumda $k_c \neq 0$ iletim sabiti $\beta = \sqrt{k^2 - k_c^2}$ ile ifade edilir. 2.35, 2.36, 2.37 ve 2.38 ifadelerindeki H_z , aşağıda ifade edilen Helmholtz dalga denkleminde bulunabilir:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} + k^2\right) H_z = 0. \quad (2.39)$$

Burada $H_z(x, y, z) = h_z(x, y)e^{-j\beta z}$ eşitliğinden h_z için iki boyutlu dalga denkleminin ifadesi şu şekilde verilir:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + k_c^2\right) h_z = 0. \quad (2.40)$$

2.40'daki denklemin çözümü dalga kılavuzunun sınır koşullarına bağlıdır. h_z için genel çözüm şu şekilde verilmektedir:

$$h_z(x, y) = (A \cos k_x x + B \sin k_x x)(C \cos k_y y + D \sin k_y y). \quad (2.41)$$

2.42 ve 2.43'te ifade edilen sınır koşulları şu şekildedir:

$$e_x(x, y) = 0 \quad , \quad y = 0, b, \quad (2.42)$$

$$e_y(x, y) = 0 \quad , \quad x = 0, a. \quad (2.43)$$

Dalga kılavuzunun duvarlarına teğet olan elektrik alanın bileşenleri şu şekildedir:

$$e_x = -\frac{j\omega\mu}{k_c^2}k_y(A\cos k_x x + B\sin k_x x)(-C\sin k_y y + D\cos k_y y), \quad (2.44)$$

$$e_y = -\frac{j\omega\mu}{k_c^2}k_x(A\sin k_x x + B\cos k_x x)(C\cos k_y y + D\sin k_y y). \quad (2.45)$$

2.42'deki sınır koşulu 2.44'teki denkleme uygulandığında $k_y = \frac{n\pi}{b}$; 2.43'deki sınır koşulu 2.45'deki denkleme uygulandığında $k_x = \frac{m\pi}{a}$ olarak bulunur. Bu durumda H_z 'nin genel çözümü şu şekilde ifade edilir:

$$H_z(x, y, z) = A_{mn} \cos \frac{m\pi x}{a} \cos \frac{n\pi y}{b} e^{j\beta z}. \quad (2.46)$$

2.46'daki ifadeyi kullanarak TE_{mn} modun enine olan bileşenleri elde edilir:

$$E_x = \frac{j\omega\mu n\pi}{k_c^2 b} A_{mn} \cos \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} e^{-j\beta z}, \quad (2.47)$$

$$E_y = -\frac{j\omega\mu m\pi}{k_c^2 a} A_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \cos \frac{n\pi y}{b} e^{-j\beta z}, \quad (2.48)$$

$$H_x = \frac{j\beta m\pi}{k_c^2 a} A_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \cos \frac{n\pi y}{b} e^{-j\beta z}, \quad (2.49)$$

$$H_y = \frac{j\beta n\pi}{k_c^2 b} A_{mn} \cos \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} e^{-j\beta z}. \quad (2.50)$$

İletim sabiti $\beta = \sqrt{k^2 - k_c^2} = \sqrt{k^2 - (\frac{m\pi}{a})^2 - (\frac{n\pi}{b})^2}$ 'dir. İletimin sağlanabilmesi için $k > k_c = \sqrt{(\frac{m\pi}{a})^2 + (\frac{n\pi}{b})^2}$ şartı sağlanmalıdır. Her modun eşik frekansı vardır. Bu frekans değerinin altında bir sistemin etkili şekilde çalışmadığını belirtir ve şu şekilde ifade edilir [1,2,6]:

$$f_{Cmn} = \frac{k_c}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{(\frac{m\pi}{a})^2 + (\frac{n\pi}{b})^2}. \quad (2.51)$$

2.1.3.2. *TM Modu (Enine Manyetik Alan)*

TM modunda enine manyetik alan dalgaları, z yönünde elektrik alan bileşeni içeren manyetik alan bileşeni içermeyen ($H_z = 0$) durumu ifade eder [5]. Bu modda iletim

yönündeki bileşenleri aşağıdaki gibidir:

$$H_x = \frac{j\omega\epsilon}{(k_c)^2} \frac{\partial E_z}{\partial y}, \quad (2.52)$$

$$H_y = -\frac{j\omega\epsilon}{(k_c)^2} \frac{\partial E_z}{\partial x}, \quad (2.53)$$

$$E_x = -\frac{j\beta}{(k_c)^2} \frac{\partial E_z}{\partial x}, \quad (2.54)$$

$$E_y = \frac{j\beta}{(k_c)^2} \frac{\partial E_z}{\partial y}. \quad (2.55)$$

2.52, 2.53, 2.54 ve 2.55 ifadelerindeki E_z , 2.56'da ifade edilen Helmholtz dalga denkleminden bulunur.

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} + k^2\right) E_z = 0. \quad (2.56)$$

Burada $E_z(x,y,z) = e_z(x,y)e^{-j\beta z}$ eşitliğinden e_z için iki boyutlu dalga denkleminin ifadesi şu şekilde verilir:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + k_c^2\right) e_z = 0. \quad (2.57)$$

2.57'deki ifadenin e_z için genel çözümü şu şekildedir.

$$e_z(x,y) = (A \cos k_x x + B \sin k_x x)(C \cos k_y y + D \sin k_y y). \quad (2.58)$$

$$e_z(x,y) = 0 \quad , \quad x = 0, a, \quad (2.59)$$

$$e_z(x,y) = 0 \quad , \quad y = 0, b. \quad (2.60)$$

2.59 ve 2.60'daki ifadeler sınır koşullarını belirtmektedir. Burada 2.59'daki sınır koşulu 2.58'deki denkleme uygulandığında $k_x = \frac{m\pi}{a}$; 2.60'daki sınır koşulu 2.58'deki denkleme uygulandığında $k_y = \frac{n\pi}{b}$ olarak bulunur. Bu durumda E_z 'nin genel çözümü şu şekilde ifade edilir:

$$E_z(x,y,z) = B_{mn} \sin \frac{mx\pi}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} e^{j\beta z}. \quad (2.61)$$

2.61'deki ifadeyi kullanarak TM_{mn} modun enine olan bileşenleri elde edilir:

$$E_x = \frac{-j\beta n\pi}{k_c^2 a} B_{mn} \cos \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} e^{-j\beta z}, \quad (2.62)$$

$$E_y = \frac{-j\beta n\pi}{k_c^2 b} B_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \cos \frac{n\pi y}{b} e^{-j\beta z}, \quad (2.63)$$

$$H_x = \frac{j\omega\epsilon n\pi}{k_c^2 b} B_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \cos \frac{n\pi y}{b} e^{-j\beta z}, \quad (2.64)$$

$$H_y = \frac{j\omega\epsilon m\pi}{k_c^2 a} B_{mn} \cos \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} e^{-j\beta z}. \quad (2.65)$$

TE modunda olduğu gibi iletim sabiti $\beta = \sqrt{k^2 - k_c^2} = \sqrt{k^2 - (\frac{m\pi}{a})^2 - (\frac{n\pi}{b})^2}$ olup, eşik frekansı da 2.51'deki ifade ile aynıdır [1, 2].

2.1.3.3. TEM Modu (Enine Elektromanyetik Alan)

TEM modunda enine elektromanyetik dalgalar z yönünde hem elektrik alan hem de manyetik alan bileşeni içermeyen ($E_z = H_z = 0$) durumu ifade eder. 2.27 ve 2.28 vektör denklemlerin her birinin bileşenleri şu şekilde yazılır:

$$\frac{\partial E_z}{\partial y} + j\beta E_y = -j\omega\mu H_x, \quad (2.66)$$

$$-j\beta E_x - \frac{\partial E_z}{\partial x} = -j\omega\mu H_y, \quad (2.67)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\nabla E_x}{\nabla y} = -j\omega\mu H_z, \quad (2.68)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial y} + j\beta H_y = j\omega\epsilon E_x, \quad (2.69)$$

$$-j\beta H_x - \frac{\partial H_z}{\partial x} = j\omega\epsilon E_y, \quad (2.70)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} = j\omega\epsilon E_z. \quad (2.71)$$

2.67 ve 2.69 ifadelerinde $E_z = H_z = 0$ değerlerini koyulduğunda şu ifade elde edilir:

$$\beta = \omega\sqrt{\mu\epsilon} = k. \quad (2.72)$$

Aynı işlemleri 2.66 ve 2.70 ifadelerinde de uyguladığında 2.72'deki sonuç elde edilir. Bu mod için eşik dalga sayısı $k_c = \sqrt{k^2 - \beta^2} = 0$ dır. E_x için helmholtz dalga denklemi şu

şekilde yazılır:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}\right)E_x = 0. \quad (2.73)$$

Bu ifade E_y içinde yazılabilir. Bu bileşenleri $\mathbf{E}$ formunda yazıldığında şu ifade elde edilir:

$$\nabla_t^2 \mathbf{E}_{(x,y)} = 0. \quad (2.74)$$

∇_t^2 iki boyutta Laplace operötörünü temsil eder. 2.74'ün sonucu, TEM dalgasının enine elektrik alanlarının Laplace denklemini sağladığını göstermektedir. Aynı şekilde manyetik alan bileşenlerin helmholtz denklemleri çözümünden şu ifade elde edilir:

$$\nabla_t^2 \mathbf{H}_{(x,y)} = 0. \quad (2.75)$$

Bir TEM dalgasının enine alanları, iletkenler arasında bulunabilecek statik alanlarla aynıdır. İki veya daha fazla iletken olduğunda TEM dalgaları görülür. Dikdörtgen dalga kılavuzları tek iletken mevcut olduğundan **TEM** enine elektromanyetik alan modu yayamaz.

2.1.4. Saçılma Parametreleri

Saçılma parametreleri, elektrik sinyalleri ile uyarılmakta olan doğrusal elektrik devrelerin davranışlarını tanımlayan parametrelerdir. Devre elemanlarının iletim, yansıma kat sayısı gibi bir çok elektriksel özelliği S-parametreleri kullanılarak ifade edilebilir [7]. Saçılma bir elektromanyetik dalga farklı dielektrik ortamlar arasında geçiş yaptığında görülen etkiyi tanımlar. S-parametreleri bir iletim hattında ilerlemekte olan akım ve gerilimin, hattın bir devreyle kesintiye uğraması sonucu karşılaştıkları süreksizlikten etkilenmesi olarak ifade edilir. Bu durum, hattın karakteristik empedansından farklı büyüklükte bir empedansla karşılaşması anlamına gelir. S-parametreleri daha çok sinyal güç ve enerjisinin; akım ve gerilimlerden daha kolay hesaplandığı radyo frekanslarında çalışan devrelerde kullanılır. Bir devrenin S-parametre sayısı, o devredeki kapı sayısına bağlıdır. Çok kapılı bir devrede, her kapıya 1'den N'e kadar bir tam sayı verilir, burada N toplam kapı sayısını ifade eder. N kapılı bir devrenin S-parametre sayısı N^2 dir [6,8]. Örnek olarak iki kapılı bir sistemin S-parametre sayısı dördür. S-parametresi aşağıdaki gibi ifade

edilmektedir:

$$S_{ij} = \frac{\text{i kapısındaki Normalize Yansıyan Dalga}}{\text{j kapısındaki Normalize Giren Dalga}}. \quad (2.76)$$

Normalize giren dalga **a**, normalize yansıyan dalga **b** ile ifade edildiğinde 2.76'daki ifade şu şekilde gösterilir:

$$S_{ij} = \frac{b_i}{a_j}. \quad (2.77)$$

Normalize giren dalga (**a**) ve normalize yansıyan dalga (**b**), voltaj değerlerinin karakteristik empedanslarına bölümüne eşittir:

$$a_j = \frac{V_j^+}{\sqrt{Z_{0j}}}, \quad b_i = \frac{V_i^-}{\sqrt{Z_{0i}}}. \quad (2.78)$$

V_j^+ ifadesi j kapısından giren sinyalin voltajı, V_i^- i kapısından çıkan sinyalin voltajını temsil etmektedir.



Şekil 2.2: İki kapılı ağ gösterimi.

Şekil 2.2'de gösterilen iki kapılı sistemin S-parametreleri aşağıdaki gibidir:

$$S_{11} = \frac{b_1}{a_1}, \quad S_{12} = \frac{b_1}{a_2}, \quad S_{21} = \frac{b_2}{a_1}, \quad S_{22} = \frac{b_2}{a_2}. \quad (2.79)$$

S-parametrelerindeki normalize giren dalga ile normalize yansıyan dalga, voltaj ve karakteristik empedans cinsinden yazıldığında S-parametreleri şu şekilde ifade edilir:

$$S_{11} = \frac{V_1^-}{V_1^+}, \quad S_{12} = \frac{V_1^-}{V_2^+} \sqrt{\frac{Z_{02}}{Z_{01}}}, \quad S_{21} = \frac{V_2^-}{V_1^+} \sqrt{\frac{Z_{01}}{Z_{02}}}, \quad S_{22} = \frac{V_2^-}{V_2^+}. \quad (2.80)$$

Eğer karakteristik empedanslar eşit ise ($Z_{01} = Z_{02} = Z_0$) S-parametreleri şu şekilde ifade edilir:

$$S_{11} = \frac{V_1^-}{V_1^+}, \quad S_{12} = \frac{V_1^-}{V_2^+}, \quad S_{21} = \frac{V_2^-}{V_1^+}, \quad S_{22} = \frac{V_2^-}{V_2^+}. \quad (2.81)$$

2.81 eşitliğinde verilen yansıyan dalgalar, giren dalgalar ve S-parametreleri matris şeklinde yazılabilir. Bu matrsten elde edilen bağıntılar aşağıdaki gibidir [8].

$$V_1^- = S_{11}V_1^+ + S_{12}V_2^+, \quad (2.82)$$

$$V_2^- = S_{21}V_1^+ + S_{22}V_2^+. \quad (2.83)$$

Devredeki tüm kapılardan giren güçlerin toplamı, tüm kapılardan çıkan güçlerin toplamına eşit olduğu durum "kayıpsız devre" olarak tanımlanır. ($\sum |a_n|^2 = \sum |b_n|^2$). Bu durumdaki devrelerde S matrisi üniterdir. Yani, şu şekilde ifade edilir:

$$[S]^T [S]^* = [I]. \quad (2.84)$$

Burada;

$$[S] = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix}, \quad [S]^T = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{21} \\ S_{12} & S_{22} \end{pmatrix}, \quad [S]^* = \begin{pmatrix} S_{11}^* & S_{12}^* \\ S_{21}^* & S_{22}^* \end{pmatrix}. \quad (2.85)$$

şeklinde verilirse 2.84'teki işlemi uyguladığımızda aşağıdaki ifadeler elde edilir.

$$|S_{11}|^2 + |S_{21}|^2 = 1, \quad (2.86)$$

$$|S_{12}|^2 + |S_{22}|^2 = 1. \quad (2.87)$$

Eğer kapılara giren güçlerin toplamı, çıkan güçlerin toplamından büyük ise bu tür devreler kayıplı devrelerdir, yani devre üzerinde güç harcanır. $\sum |a_n|^2 \neq \sum |b_n|^2$ ve $[I] - [S]^T [S]^*$ ifadesi pozitif tanımlıdır [7,9].

2.1.4.1. Desibel (dB)

RF sistemlerinde iki güç seviyesi arasındaki oran desibel (dB) ile ifade edilir:

$$dB = 10 \log \frac{P_1}{P_2}. \quad (2.88)$$

P_1 'in P_2 'ye oranı 2 olan sistemin desibel cinsinden değeri 3, oranı 0,1 olan sistemin -10'a eşit olduğunu görebiliriz. dB'de güç oranlarının kullanılması, her kademedeki dB'ye kayıp ya da kazanç olarak eklenerek hesaplanabildiği için güç kaybını veya kazancını hesaplamak kolaylaşır. Ayrıca güç ifadeleri voltaj cinsinden $P_1 = \frac{V_1^2}{Z_1}$, $P_2 = \frac{V_2^2}{Z_2}$ şeklinde ifade edilebilir. Böylelikle güç oranlarında voltaj cinsinden şu şekilde ifade edilebilir:

$$dB = 10 \log \frac{V_1^2 Z_2}{V_2^2 Z_1} = 20 \log \frac{V_1}{V_2} \sqrt{\frac{Z_2}{Z_1}}. \quad (2.89)$$

Burada Z_1 ve Z_2 yük empedanslarıdır. Eğer bu empedanslar birbirine eşitse bu durumda dB aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$dB = 20 \log \frac{V_1}{V_2}. \quad (2.90)$$

Desibel birimi dBm (desibel-miliwatt) olarak da ifade edilebilir. dBm, bir güç oranının bir miliwatt referans alınarak desibel cinsinden ifade edildiğini belirtmek için kullanılan güç birimidir. Eğer $P_2 = 1mW$ ise P_1 , dBm olarak ifade edilebilir:

$$dBm = 10 \log \frac{P_1}{1mW}. \quad (2.91)$$

Böylece 1 mW'lık güç 0 dBm'ye eşittir. 1 W'lık güç ise 30 dBm'ye eşittir [10].

2.2. MANYETİZMA VE MANYETİZMA TÜRLERİ

Manyetizma elektronların yörüngesel hareketleri, spin hareketleri ve bunların birbirleri ile nasıl etkileştikleriyle ilgili bir kavramdır. Farklı manyetizma tiplerini göstermenin en iyi yolu, malzemelerin manyetik alana karşı nasıl tepki gösterdiklerini tanımlamaktır. Tüm malzemeler manyetik özellik gösterir. Malzemeler arasındaki manyetik özelliğin farklılığını belirleyen etmen ise atomik manyetik momentlerinin etkileşimidir.

Malzemelerin manyetik davranışı beş farklı gruba ayrılır. Bunlar diyamanyetizma, paramanyetizma, ferromanyetizma, antiferromanyetizma ve ferrimanyetizmadır. Ferromanyetik ve ferrimanyetik malzemeler genellikle manyetik olarak kabul edilir. Diğer üçü zayıf manyetik davranış gösterdiğinden genellikle manyetik olmayan malzemeler olarak düşünülürler [11,12]. Elektronlar, spinlerinden dolayı manyetik momente sahiptirler. Elektronlara dışarıdan bir manyetik alan (H_{dis}) uygulandığında, manyetik moment nedeniyle bir tork oluşur ve her elektronun momenti uygulanan alanla aynı hizada olur. Bu hizalanmış elektronların etkisi, manyetizmanın sebebidir. Manyetik malzemelerin uygulanan alana tepkisi, duyarlılık denilen bir terim ile değerlendirilebilir. Duyarlılık, malzemenin manyetizma tipi hakkında bilgi verir, malzemenin manyetize edilebilme derecesinin ölçüsü olarak düşünülebilir [11]. Bu konu, sonraki bölümde daha detaylı bir şekilde tartışılacaktır.

Diyamanyetizma : Genellikle çok zayıf manyetizma özelliğine sahip olmasına rağmen bütün maddelerin temel bir özelliğidir. Diyamanyetik malzemeler, net manyetik momente sahip olmayan atomlardan oluşmaktadır. Yani yörüngesel kabukların tümü doludur ve çiftlenmemiş elektronları yoktur. Bir alana maruz kaldıklarında iterler yani negatif bir manyetizasyon gösterirler. Bu tür malzemelerin duyarlılığı çok küçük ve negatiftir. Bu malzemelere örnek olarak radyum, bakır, gümüş, altın verilebilir [12].

Paramanyetizma : Paramanyetik malzemelerdeki bazı atomlar veya iyonlar yörüngelerdeki eşleşmemiş elektronlar nedeniyle net bir manyetik momente sahiptir. Bu malzemeler manyetik alana maruz kaldıklarında, atomik manyetik momentleri uygulanan alan ile kısmen aynı yönde yönelim gösterirler. Bu yönelim zayıf bir pozitif manyetizasyon ve pozitif duyarlılığa yol açar. Bu malzemelere örnek olarak alüminyum, silisyum verilebilir [11].

Ferromanyetizma : Paramanyetik malzemelerin aksine, ferromanyetik malzemelerin atomik momentleri çok güçlü bir etkileşim gösterirler. Ferromanyetik malzemelerin manyetik momentleri paralel dizilim gösterirler. Ferromanyetik malzemelerdeki

manyetizma, diğer manyetizma türlerine göre daha büyüktür. Bu malzemelere örnek olarak demir, nikel, kobalt verilebilir [12].

Antiferromanyetizma : Antiferromanyetik malzemeler manyetik alanları eşit ve zıt olan iki farklı alt yapı A ve B alanları içerirler. Bu alanlardaki manyetik momentler eşit olduğundan net manyetik momentleri sıfırdır.

Ferrimanyetizma : Ferrimanyetik malzemeler manyetik alanları eşit olmayan ve zıt olan iki farklı alt yapı içerirler. Bu alt yapılar A ve B alanı olarak ifade edilir. Bu A ve B alanlardaki manyetik momentler eşit olmadığından net bir manyetik momente sahiptirler. Ferrimanyetik malzemeler sıcaklığa göre mıknatıslanma davranışında farklılıklar gösteren manyetik geçirgenliğe (μ) sahiptirler. Bu nedenle dışarıdan uygulanan bir manyetik alan ile oluşan mıknatıslanma değeri de artar. RF dolaştırıcı yapılarının en önemli bileşeni olan ferrit bir ferrimanyetik malzemelerdir. Bu malzemelere örnek olarak manyetit Fe_3O_4 verilebilir [11,12].

2.2.1. Ferrit

Hemen hemen tüm RF dolaştırıcıları ferrimanyetik malzemeler içerir. Bu nedenle dolaştırıcının çalışma prensibini daha iyi anlamak için bu malzemelerin manyetik özelliklerinin altında yatan teoriyi bilmek önemlidir. Ferrimanyetik malzemeler doğada manyetit formlarında bulunurlar. Bu malzemeler "ferrit" olarakta adlandırılır. Ferritler demir içeren iyonik kristallerdir. Demir yörüngelerindeki elektron durumlarındaki düzensizlikler nedeniyle büyük bir manyetik momente sahiptirler. Ayrıca kristal içerisindeki iyonlar, manyetik alan ile etkileşime girmeden kendi içlerinde paramanyetizmaya yol açan manyetik momentlere sahiptirler. Bu manyetik momentlerin oluşum sebeplerinden biri elektronun dönüşü, diğeri ise elektronların yörünge hareketleridir. Böylece bir iyonun manyetik momenti iki farklı momentin toplamına eşittir. Ferritler üç gruba ayrılır. Bunlar, spinel, garnet ve heksagonal ferritlerdir. Ferrit çeşitlerinin adları, malzemelerin kristal yapılarını tanımlar [11,13].

Spineller : Spineller, $A_8B_{16}O_{32}$ formülüne karşılık gelen formül birimlerinden oluşurlar. A tetrahedral alanındaki katyonları, B oktahedral alanındaki katyonları belirtir. Oksijen anyonları, tetrahedral ve oktahedral alanlarında bulunan katyonların olduğu yüzey merkezli kübik latisini oluşturur [14]. Spinel ferritler $(MOFe_2O_3)_8$ formülüne sahiptirler. Bu formüldeki M; manganez, nikel, bakır veya bunların karışımı gibi iki değerli bir metali temsil eder [13]. Oksijen atomları manyetik değildir, ancak elektriksel ve manyetik

özelliklerin düzenlemesinde rol oynarlar. Ayrıca spinel yapısı çok karmaşık bir yapı olduğundan katyonların dağılım bilgisi malzemenin elektriksel manyetik özelliklerini belirtir [15]. Genelde spinel ferritler, düşük manyetik anizotropiye sahiptirler, yani mıknatıslanmanın kristalografik yönlerle bağımlılığını gösterirler.

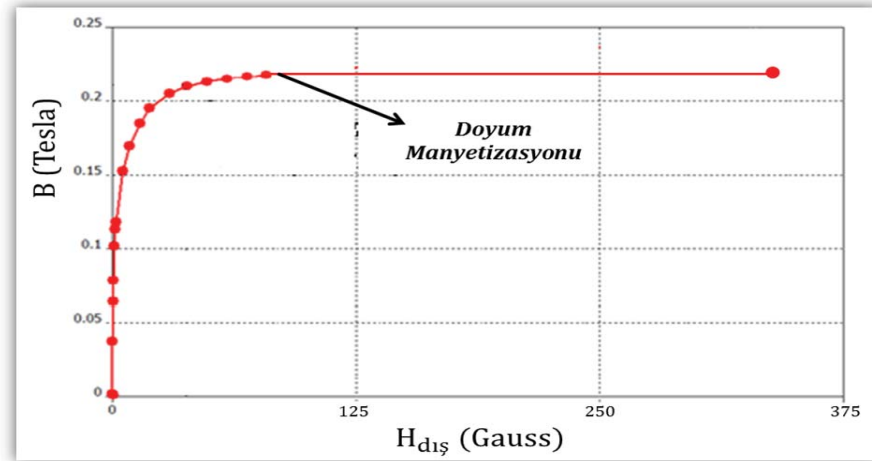
Garnetler : $M_3Fe_5O_{12}$ formülüne sahiptirler. Burada M, itriyum ya da başka nadir bulunan toprak elementini temsil eder. Garnetler tetrahedral, oktahedral ve dodekahedral alanlara sahiptirler. Bu nedenle net ferrimanyetizma üç alan arasında anti-paralel spin hizalanmasının karmaşık sonucudur. Garnetler yüksek elektriksel dirence sahip olduğundan RF uygulamalarında faydalı malzemelerdir. Bu malzemenin yapısal parametreleri aynı zamanda manyetik özellikler ve malzemenin bileşimini düzenlenerek ayarlanabilir. Bu çalışmada garnet tipi ferrit kullanılmıştır [13,16].

Heksagonal Ferritler : Heksagonal kristal yapılarına sahiptirler. Genellikle bu ferritlere M tipi ferritler de denir. Bu tür ferritler $BaFe_{12}O_{19}$ formülüne sahiptirler. Baryum (Ba) atomları yerine Stronsiyum (Sr) atomları; Demir (Fe) atomları yerine Alüminyum (Al) atomları yer alabilir, böylece manyetik davranışları değiştirilebilir. Heksagonal ferritler yüksek derecede manyetik anizotropiye sahiptir ve sert ferrit olarak sınıflandırılırlar.

Ferrit malzemelerin üç parametresi dolaştırıcı tasarımında önemlidir. Bu parametreler, doyum manyetizasyonu ($4\pi M_s$), rezonans genişlik çizgisi (δH) ve Curie sıcaklığı (T_c)'dir.

2.2.1.1. Doyum Manyetizasyonu ($4\pi M_s$)

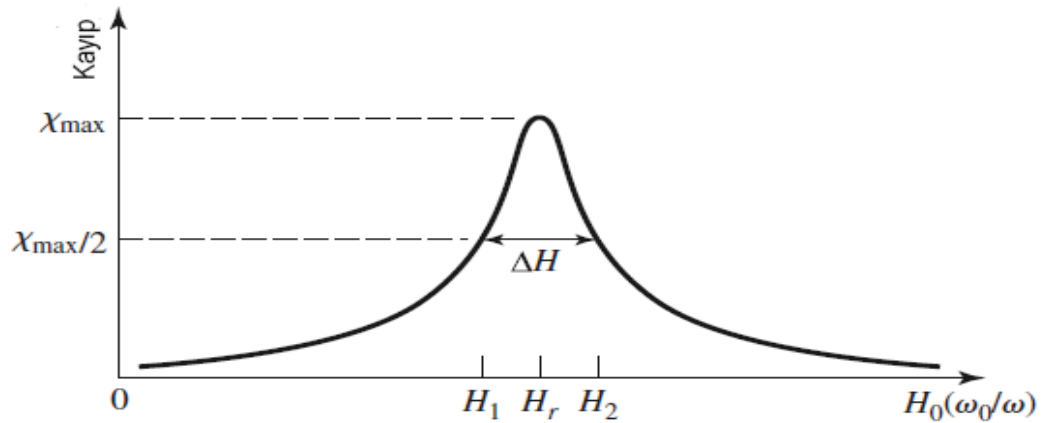
Doyum manyetizasyonu manyetik bir alanda elde edebilecek maksimum indüklenen manyetik momenttir. Ferrite dışardan statik bir manyetik alan (H_{dis}) uygulandığında manyetizasyon, uygulanan statik manyetik alan oranında artar. Fakat dışarıdan uygulanan statik manyetik alanın belli bir değerinde ferrit malzemenin içerisindeki tüm manyetik dipol moment hizalandığı için manyetizasyon artmaz. Bu maksimum manyetizasyon değerine doyumluk (doyum) manyetizasyonu ($4\pi M_s$) denir. Bu parametre ferrit malzemenin manyetik etkinliğini belirler. Şekil 2.3'te bir ferritin doyum manyetizasyonunu gösteren grafik verilmiştir.



Şekil 2.3: Ferrit malzemenin H_{dis} ve B (manyetizasyon) grafiği [17].

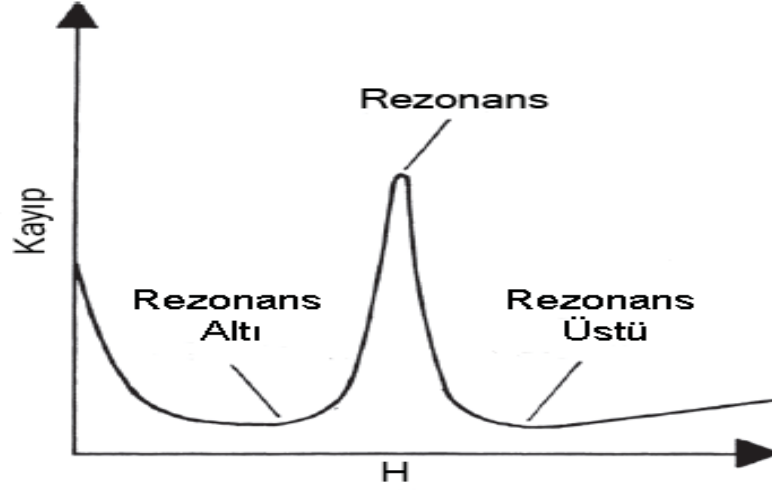
2.2.1.2. Rezonans Genişlik Çizgisi (ΔH)

Ferritlere, dışarıdan bir manyetik alan uygulandığında ferritler de manyetizasyon oluşur. Oluşan manyetizasyon ile uygulanan manyetik alan arasındaki ilişki önceki bölümde duyarlılık (κ) kavramıyla belirtilmişti. Uygulanan manyetik alanın belirli değerleri arasında ferritlerde ferrimanyetik rezonans oluşur. Bu rezonanstan dolayı manyetik kayıplar meydana gelir. Bu kayıplar rezonans genişlik çizgisi ile ifade edilir. Rezonans genişlik çizgisi, maksimum statik kayıp yarı maksimum noktaları arasındaki genişlik olup iç statik manyetik alan aralığını belirten niceliktir (Şekil 2.4). Bu nedenle, ferritlerdeki kayıp kavramı rezonans genişlik çizgisi ile ifade edilir. Ferrit malzemenin kaybı, iç statik manyetik alan " H_{ic} "'ye; RF sinyalin frekansı " f "'ye; rezonans genişlik çizgisi " ΔH "'a bağlıdır.



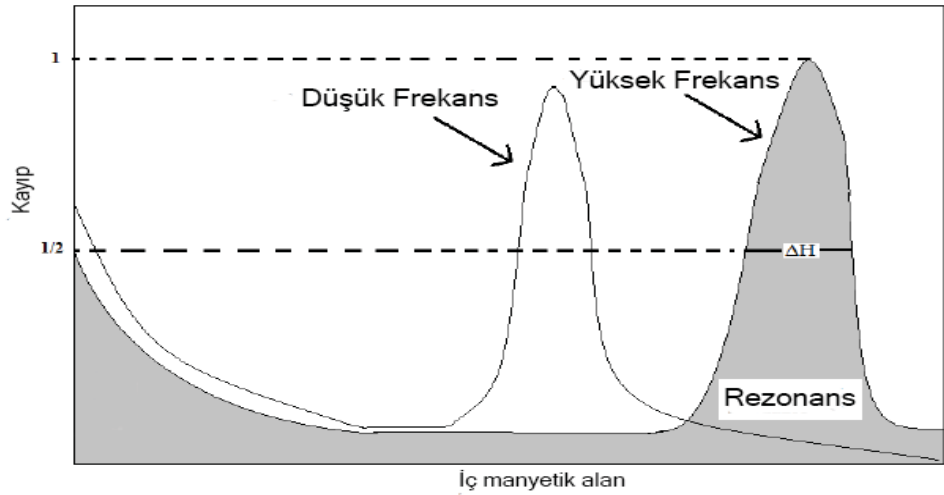
Şekil 2.4: Rezonans genişlik çizgisi " ΔH " [1].

Ferit malzemesindeki iç statik manyetik alanı, ferit malzemenin çalışma bölgesi üzerinde bir etkiye sahiptir. Üç farklı çalışma bölgesi vardır. Bunlar, Şekil 2.5'te gösterildiği gibi rezonans üstü bölgesi, rezonans altı bölgesi ve rezonans bölgesidir [13].



Şekil 2.5: Rezonans bölgeleri [13].

RF dalga sinyalinin frekans değeri arttıkça, kayıp eğrisi olarak da ifade edilen rezonans bölgesi sağ tarafa kayar. Şekil 2.6'da görüldüğü gibi, frekans değeri arttıkça, rezonans genişlik çizgisinin arttığı görülmektedir [18].



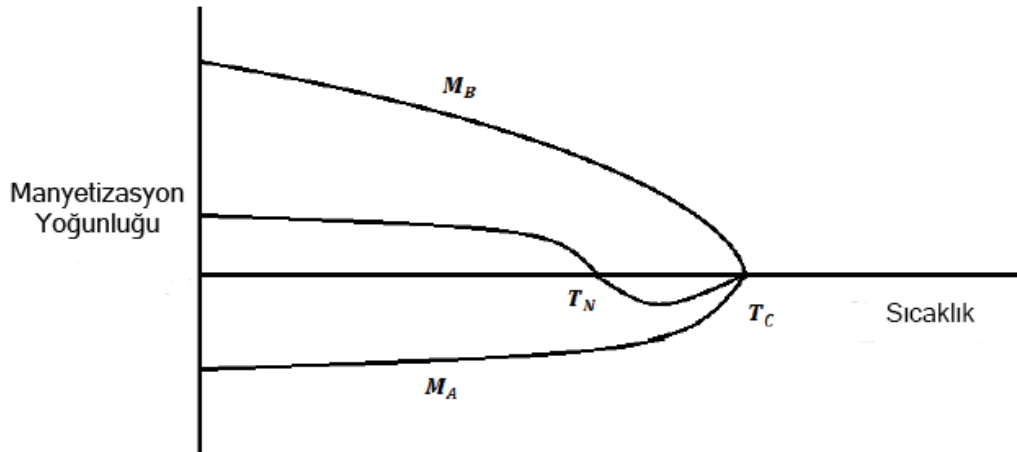
Şekil 2.6: Farklı frekansta rezonans bölgeleri [17].

Bununla birlikte rezonans altındaki bölgede çalışmak, daha küçük boyutlu mıknatıslar kullanmamıza olanak sağlar [19,20]. Bu çalışmada rezonans altında çalışılmaktadır.

Dışarıdan iki farklı manyetik alan kaynağına (kalıcı mıknatıs ve solenoidler) sahip olduğumuz için kalıcı mıknatısların uyguladıkları manyetik alanın yetersiz olduğu durumlarda solenoidler ile ek manyetik alan oluşturulacaktır. Kalıcı mıknatısların ve solenoidlerin oluşturduğu toplam manyetik alanın rezonans bölgesinin üstüne geçebilmesi için rezonans genişlik çizgisi dar olan garnet tipi ferrit seçilmiştir.

2.2.1.3. Curie Sıcaklığı (T_C)

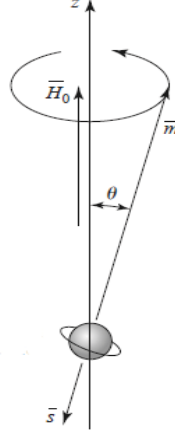
Curie sıcaklığı malzemenin sıcaklık kararlılığını gösteren bir parametredir. Geniş bir sıcaklık aralığında çalışılması durumunda, malzemenin doyum manyetizasyonu sıcaklığın değişimi ile farklı değerlere sahip olabilir ve ferrit malzemenin Curie sıcaklığı üzerinde bir sıcaklık değerine ulaşıldığında manyetizasyon sıfıra düşebilir. Ferrimanyetik malzemelerde manyetik alanlar zıt iki yönde hizalanır. Belli bir sıcaklığın üzerinde zıt alanlar birbirlerini yok ederler [21]. Şekil 2.7’de ferritler için değişen sıcaklığın manyetizasyon değişimi gösterilmektedir. Burada M_A ve M_B , ferrimanyetik malzemenin içindeki zıt iki manyetik alandır. Zıt alanların yönleri eşit büyüklükte olduğunda manyetizasyon sıfır olur. Bu noktaya ferrit malzemenin "manyetik dengesi" denir ve sıcaklık değeri " T_N " ile gösterilir. Bununla birlikte M_A ve M_B ’nin her ikisinin de 0 olduğu nokta ise Curie sıcaklığıdır ve " T_C " olarak ifade edilir.



Şekil 2.7: Sıcaklık ile manyetizasyon değişimi [17].

2.2.2. Ferrimanyetizmanın Fiziksel Teorisi

Malzemelerin manyetik özelliğinin olmasının sebebinin, elektronların spinlerinden oluşan manyetik dipol momentten kaynaklandığı önceki bölümde belirtilmişti.



Şekil 2.8: Spin manyetik dipol momenti ve açısal momentum vektörleri [1].

Manyetik moment ve açısal momentum arasındaki vektör ilişkisi şu şekilde verilir (Şekil 2.8):

$$\mathbf{m} = -\gamma \mathbf{S}. \quad (2.92)$$

2.92 denklemindeki " γ " jiromanyetik sabitidir. Bu sabit, malzemenin manyetik momentinin açısal momente oranı olarak ifade edilir. Manyetik alan uygulandığında, manyetik dipol üzerinde bir tork oluşur:

$$\mathbf{T} = \mathbf{m} \times \mathbf{B}_0 = -\mu_0 \gamma \mathbf{S} \times \mathbf{H}_0. \quad (2.93)$$

Tork açısal momentumun değişim oranına eşittir. Bu, manyetik dipol moment için hareket denklemini verir. Bu hareket denkleminin vektör bileşenleri şu şekilde ifade edilir:

$$\frac{dm_x}{dt} = -\mu_0 \gamma m_y H_0, \quad (2.94)$$

$$\frac{dm_y}{dt} = \mu_0 \gamma m_x H_0, \quad (2.95)$$

$$\frac{dm_z}{dt} = 0. \quad (2.96)$$

m_x ve m_y için 2.94 ve 2.95 ifadeleri kullanılarak şu ifadeler elde edilir:

$$\frac{d^2 m_x}{dt^2} + \omega_0^2 m_x = 0, \quad (2.97)$$

$$\frac{d^2 m_y}{dt^2} + \omega_0^2 m_y = 0. \quad (2.98)$$

Burada $\omega_0 = \mu_0 \gamma H_0$ ifadesi "Larmor frekansı" olarak adlandırılır. Larmor frekansı, bir manyetik dipolün bir manyetik alan içindeki devinme frekansıdır. Bu frekans uygulanan manyetik alanın şiddetine ve malzemenin jiromanyetik " γ " oranına bağlıdır. 2.97 ve 2.98'deki ifadeleri çözmek için $m_x = A \cos \omega_0 t$, $m_y = A \sin \omega_0 t$ ifadeleri kullanılabilir, 2.96 denkleminin m_z 'nin sabit olduğunu belirtir ve bu durumda $\mathbf{m}$ 'nin büyüklüğü aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$|\mathbf{m}|^2 = \left(\frac{q\hbar}{2m_e}\right)^2 = m_x^2 + m_y^2 + m_z^2 = A^2 + m_z^2. \quad (2.99)$$

Böylece devinme açısı θ , $\mathbf{m}$ ve H_0 ile ilişkilidir:

$$\sin \theta = \frac{\sqrt{m_x^2 + m_y^2}}{|\mathbf{m}|} = \frac{A}{|\mathbf{m}|}. \quad (2.100)$$

Ferrit malzemenin fiziksel özelliğine bağlı olarak manyetizasyon doyumu " M_s " ile belirtilir (Şekil 2.3). Sisteme alternatif akım "AC" manyetik alan $\mathbf{H}$ uygulandığında toplam manyetik alan şu şekilde ifade edilir:

$$H_t = H_0 \mathbf{z} + \mathbf{H}. \quad (2.101)$$

Ferrit malzemesindeki toplam manyetizasyon şu şekilde verilir:

$$M_t = M_s \mathbf{z} + \mathbf{M}. \quad (2.102)$$

Burada M_s doğrusal akım (DC) manyetizasyon doyumu, $\mathbf{M}$ alternatif akım (AC) manyetizasyon doyumu olarak belirtilir. Hareket denkleminin bileşenleri yeniden

düzenlendiğinde denklemler şu hali alır:

$$\frac{dM_x}{dt} = -\omega_0 M_y + \omega_m H_y, \quad (2.103)$$

$$\frac{dM_y}{dt} = \omega_0 M_x - \omega_m H_x, \quad (2.104)$$

$$\frac{dM_z}{dt} = 0. \quad (2.105)$$

Burada $\omega_0 = \mu_0 \gamma H_0$, $\omega_m = \mu_0 \gamma M_s$ 'dir. M_x , M_y için 2.103 ve 2.104 denklemleri çözüldüğünde, uygulanan alternatif akım (AC) $\mathbf{H}$ alanı, $e^{j\omega t}$ harmonik zamana bağlıysa AC durum formu faz denklemleri şeklinde ifade edilebilir:

$$(\omega_0^2 - \omega^2) M_x = \omega_0 \omega_m H_x + j\omega \omega_m H_y, \quad (2.106)$$

$$(\omega_0^2 - \omega^2) M_y = -j\omega \omega_m H_x + \omega_0 \omega_m H_y. \quad (2.107)$$

Bu eşitlikler $\mathbf{H}$ ve $\mathbf{M}$ 'nin arasındaki doğrusal ilişkiyi gösterir. $\mathbf{H}$ ve $\mathbf{M}$, bir maddenin manyetik alanın varlığında ne kadar mıknatıslanabileceğini belirten parametre olan duyarlılık tensörü $[\kappa]$ ile ilişkisi aşağıdaki gibidir:

$$\mathbf{M} = [\kappa] \mathbf{H} = \begin{pmatrix} \kappa_{xx} & \kappa_{xy} & 0 \\ \kappa_{yx} & \kappa_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \mathbf{H}. \quad (2.108)$$

κ 'ın bileşenleri şu şekilde verilir [1]:

$$\kappa_{xx} = \kappa_{yy} = \frac{\omega_0 \omega_m}{\omega_0^2 - \omega^2}, \quad (2.109)$$

$$\kappa_{xy} = -\kappa_{yx} = \frac{j\omega \omega_m}{\omega_0^2 - \omega^2}. \quad (2.110)$$

2.109 ve 2.110'deki varsayımlar altında ferrit malzemesine z-yönünde bir DC manyetik alan uygulandığında $\mathbf{B}$ ve $\mathbf{H}$ ilişkisi şu şekilde ifade edilir:

$$\mathbf{B} = \mu_0 [\mathbf{M} + \mathbf{H}] = [\mu] \mathbf{H}. \quad (2.111)$$

Bu eşitlikte "[μ]" geçirgenlik tensörüdür ve şu şekilde ifade edilir:

$$[\mu] = \mu_0 ([U] + [\kappa]) = \begin{pmatrix} \mu & j\kappa & 0 \\ -j\kappa & \mu & 0 \\ 0 & 0 & \mu_0 \end{pmatrix}. \quad (2.112)$$

Geçirgenlik tensör elemanları μ , κ , ve μ_0 'dır. Aralarındaki ilişki şu şekilde verilmektedir:

$$\mu = \mu_0 (1 + \kappa_{xx}) = \mu_0 (1 + \kappa_{yy}) = \mu_0 \left(1 + \frac{\omega_0 \omega_m}{\omega_0^2 - \omega^2}\right), \quad (2.113)$$

$$\kappa = -j\mu_0 \kappa_{xy} = j\mu_0 \kappa_{yx} = \mu_0 \frac{\omega \omega_m}{\omega_0^2 - \omega^2}. \quad (2.114)$$

Geçirgenlik tensör elemanları κ ve μ radyal frekanslar olan ω , ω_m ve ω_0 'a bağlıdır.

$$\omega_m = 2\pi f_m = \mu_0 4\pi M_s \gamma, \quad (2.115)$$

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \mu_0 \mathbf{H} \gamma. \quad (2.116)$$

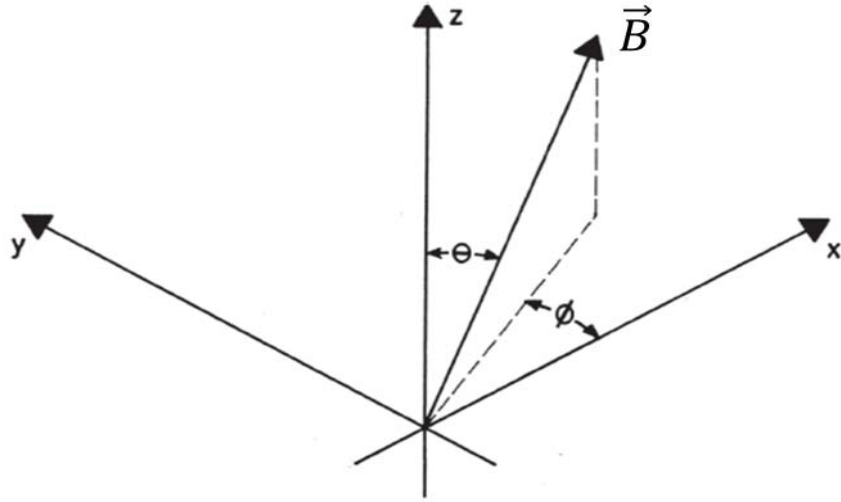
ω_m , ferrit malzemesinin radyan manyetizasyon frekansı, ω_0 , iç statik alanın radyan frekansını ifade eder. Burada ω_0 , geçirgenlik tensör elemanları μ ve κ 'yı belirleyen ferrit malzemesinin iç statik manyetik alanına (H_{ic}) bağlıdır [13].

2.2.3. Ferrit İçinde Elektromanyetik Dalganın Yayılımı

Bir önceki bölümde ferrit malzemesinin geçirgenlik tensör elemanlarının ω , ω_m ve ω_0 'a bağlı olduğu gösterildi. Çeşitli geometrik yapılarda olan ferrit malzemelerinde dalga yayılımını ifade eden terim, Maxwell denklemlerinin çözümüyle elde edilir.

Şekil 2.9'da gösterildiği gibi bir dalganın uygulanan DC manyetik alanın z-ekseni ile θ ve x eksenine ile ϕ açısı yaptığı varsayılırsa, Maxwell denklemlerinden aşağıdaki ifade elde edilir [13]:

$$\mathbf{B} = \frac{\Gamma^2}{\varepsilon(j\omega)^2} [h_x - (\sin \theta \cos \phi h_x + \sin \theta \sin \phi h_y + \cos \theta h_z) \sin \theta \cos \phi]. \quad (2.117)$$



Şekil 2.9: Uygulanan $\mathbf{B}$ alan yönü [11].

Burada Γ yayılma sabitidir. Denklem 2.111'deki gibi manyetik indüksiyon $\mathbf{B}$, geçirgenlik tensörüne eşitlenebilir:

$$\mathbf{B} = [\mu]\mathbf{H} = \begin{pmatrix} \mu & j\kappa & 0 \\ -j\kappa & \mu & 0 \\ 0 & 0 & \mu_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h_x \\ h_y \\ h_z \end{pmatrix} \quad (2.118)$$

2.117 denkleminde eşitliğin sol tarafına 2.118'deki ifade yazıldığında Γ yayılma sabitinin çözümü şu şekilde ifade edilir:

$$\Gamma_{\pm} = j\omega\sqrt{\mu_0\epsilon}\sqrt{\frac{(\mu^2 - \mu - \kappa^2)\sin^2\theta + 2\mu \pm \sqrt{(\mu^2 - \mu - \kappa^2)^2\sin^4\theta + 4\kappa^2\cos^2\theta}}{2[(\mu - 1)\sin^2\theta + 1]}} \quad (2.119)$$

Burada Γ_+ ve Γ_- , z yönünde hareket eden dalgalar için yayılma sabitleridir. + ve - işaretleri eliptik olarak polarize dalgaların farklı polarizasyonlarını gösterir. Bu dalgalar ferrit boyunca farklı hızlarda yayılır. Yayılma sabitleri dalgaların x eksenine ile yaptığı açıya bağlı değildir. Yayılma sabiti bir elektromanyetik dalganın belirli bir ortamda yayılmasını açıklar. Yayılma sabiti +,- bileşenleri cinsinden şu şekilde ifade edilir:

$$\Gamma = \pm j\omega\sqrt{\mu_0\mu\epsilon}\sqrt{1 - \frac{j\sigma}{\omega\epsilon}}. \quad (2.120)$$

Bu eşitlikte ε ortam için dielektrik sabiti, σ iletkenlik katsayısıdır. Γ , sönümlenme terimi (α) ve faz terimi (β) olarak iki ayrılabilen karmaşık bir niceliktir:

$$\Gamma = \alpha + j\beta. \quad (2.121)$$

Sönümlenme ve faz terimleri ayrı şekilde yazabilirler:

$$\alpha = \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu_0 \mu}{\varepsilon}}, \quad (2.122)$$

$$j\beta = j\omega \sqrt{\mu_0 \mu \varepsilon} \left(1 + \frac{1}{8} \sqrt{\frac{\sigma}{\omega \varepsilon}}\right). \quad (2.123)$$

Sönümlenme terimi α , yayılma yolundaki birim uzunluk başına elektrik veya manyetik alan yoğunluğunun genliğindeki değişimin bir ölçüsüdür. Faz terimi β , birim uzunluk başına elektrik veya manyetik alan vektörlerinin fazındaki değişimin bir ölçüsüdür. Eğer ortamın iletkenliği çok düşük ise faz terimi şu şekilde yazılır:

$$j\beta = j\omega \sqrt{\mu_0 \mu \varepsilon}; \quad (2.124)$$

ve sönümlenme terimi ihmal edilir. Bu nedenle sönümlenme terimi küçükse, ilerleme sabiti faz terimiyle veya bunun tersi ile değerlendirilebilir. Sönümlenme ve faz terimleri sırasıyla birim uzunluk başına nepers ve birim uzunluk başına radyan olarak ifade edilirler. Yayılma sabitlerinin özel durumları vardır. Bunlardan biri olan enine durum DC manyetik alanın yayılma yönüne paralel olduğu durumdur. Bu Faraday rotasyon ve rezonans emilim durumudur. Eğer yayılma yönü uygulanan DC manyetik alanına dik ise $\theta = \pi$ olur ve bu denklem 2.119'a uygulandığında yayılma sabitlerinin bileşenleri basitleşir:

$$\Gamma_+ = j\omega \sqrt{\mu_0 \varepsilon} \sqrt{\frac{\mu^2 - \kappa^2}{\mu}}, \quad (2.125)$$

$$\Gamma_- = j\omega \sqrt{\mu_0 \varepsilon}. \quad (2.126)$$

Bu durumda h_x ve h_y 'nin ilişkisi şu şekilde ifade edilir:

$$h_y = -j \frac{\kappa}{\mu} h_x. \quad (2.127)$$

Enine durum bağlantı (junction) dolaştırıcıları için geçerlidir ve ferritin belirli manyetik çalışma noktalarını belirtmek için " $\frac{\kappa}{\mu}$ " oranı kullanılır.

Bir dolaştırıcıda DC manyetik alan, ferrit malzemesine uygulanır. Böylece RF yayılım yönü, DC manyetik alan yönünün enine olur. Ferrit içerisinde denklem 2.125 ve 2.126 ile verilen yayılma sabitleri bulunan iki eliptik polarize dalga vardır. Ferritler disk biçimindeyse, iki dalga disklerde ters yönlerde dönerler. Uzunlamasına durumunda $\theta = 0$ dır. $\theta = 0$ olduğu durum denklem 2.119'a uygulandığında şu ifade elde edilir:

$$\Gamma_{+,-} = j\omega\sqrt{\mu(\mu_{+,-} - \kappa)}\epsilon. \quad (2.128)$$

Uzunlamasına manyetizasyona sahip bir ferritin sebep olduğu faraday rotasyon miktarı şu ifade ile verilir:

$$\phi = \left(\frac{\beta_{+} - \beta_{-}}{2}\right)L. \quad (2.129)$$

Burada L, ferritin uzunluğunu belirtir. Denklem 2.129, eliptik olarak iki polarize dalganın sebep olduğu dönmenin ortalamasını verir. Bu iki dalganın β_{+} ve β_{-} ile verilen faz sabitleri vardır. Uygulanan DC manyetik alanın düşük bir değerinde, β_{+} ve β_{-} ile Γ^{+} ve Γ^{-} benzetilebilir. Bu Γ 'nın sönümleme sabiti bileşenin düşük değerinde olduğundan kaynaklanır [1,13].

2.3. DOLAŞTIRICI

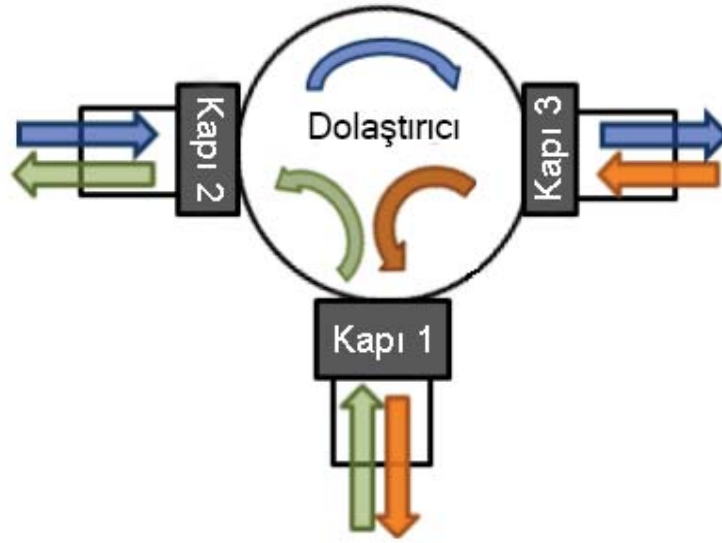
2.3.1. Dolaştırıcının Gelişim Süreci

RF dolaştırıcılar ilk olarak 1950 'li yılların başlarında ortaya çıkmıştır. Dolaştırıcıların en önemli bileşeni olan ferritlerde, dışarıdan uygulanan manyetik alanlarla elektromanyetik dalgaların etkileşmesi sonucu Faraday rotasyonu (dönmesi) olarak adlandırılan elektromanyetik dalgaların yönelme olayı gerçekleşir. Bu etkileşmenin incelenmesini ilk olarak Faraday, camdan polarize ışık geçirerek 1845 yılında yapmıştır. İkinci dünya savaşı sırasında özellikle radarların önem kazanması ve bunun sonucunda yüksek frekanslı RF güç kaynaklarının gelişmesiyle bu etkinin önemi artmış ve kullanım alanları fazlaşmıştır. Bu etki RF frekanslarındaki elektromanyetik dalgalarda ferrimanyetik malzemeler kullanılarak elde edilir.

1948 yılında, nobel ödüllü fizikçi Neel tarafından tanımlanan ferrimanyetik özellik, ferrit malzemeler üzerinde gösterilmiştir [22]. Ferrit malzemeler manyetik geçirgenlik özelliğine sahiptirler. Bu manyetik geçirgenlik karakteristiği manyetizasyon, frekans ve doygunluk manyetizasyonu açısından matematiksel olarak Dirk Polder tarafından tanımlanmıştır ve tensör ile ifade edilmiştir. Günümüzde dolaştırıcı tasarımında kullanılan en önemli unsur ferrit malzemeleridir. Ferrit malzemeleri dolaştırıcının davranışını belirler. Bir çok araştırmacı Y tipi bağlantılı dolaştırıcıların, elektromanyetik dolaşım mekanizmasını açıklamak için çalışmalar yapmışlardır [23]. 1964'te H.Bosma rezonans üstü şerit dolaştırıcı ile ilgili çalışmalarda bulunmuştur. Bu tip dolaştırıcıya uygulanan manyetik sapmanın, çoğu durumda rezonans için gereken alanın dört katından fazla olduğunu belirtmiştir [24]. 1965'te Fay ve Camstock, dolaştırıcının manyetize olan ferrit disklerinde iki zıt yönde dönen modun bulunduğunu belirtmiştir. Bu mod ayrışması (κ/μ) ferrimanyetik rezonans frekansı ile dalga frekansı (ω_0/ω) arasındaki ilişki ile açıklamıştır [25]. Auld, dolaştırıcının çalışmasını saçılma matrisini dikkate alarak açıklamıştır. Dolaştırıcıdan istenilen performansı elde etmek için gereken ayarların simetrik olarak belirlenmesinin gerektiğininde öne sürmüştür [26]. Böylece dolaştırıcının bağlantı noktası dalga kılavuzların duvarları şekillendikten sonra, ferrit yarıçapının ve manyetik alanın ayarlanmasını gerektirir. Simon, geniş bant aralığında empedans eşleştirme sorununu ilk kez ele almıştır. Bunu, dolaştırıcının empedans karakteristiğinin eşleşmesi için değişen ferrit ve yapısal parametreleri inceleyerek yapmıştır [27]. 1974'te Green ve Sandy, kısmen manyetize olan ferritlerin mikrodalga geçirgenliğini karakterize etmiş ve bu verileri, ölçülen verilerle eşleşen ampirik denklemlerle sunmuştur [28]. Uzun yıllardan beri dolaştırıcılar, radar bileşenlerinin yeri doldurulmayan unsurlarıdır. Ferritler eskiden beri bilinmesine rağmen günümüzde hala bir çok teknolojiye kullanılmaktadırlar.

2.3.2. Çalışma Prensibi

Dolaştırıcılar gelen RF sinyallerini, statik manyetik alan uygulanan ferritler aracılığıyla bir sonraki kapıya yönlendirmek için kullanılan yapılardır. Dolaştırıcıdaki sinyal akış diyagramı Şekil 2.10'da gösterilmiştir. Bir dolaştırıcının genellikle üç kapısı vardır; 1. kapıdan gönderilen RF sinyalleri giriş yapar. Bu sinyaller dolaştırıcı içerisinde yönlendirilerek 2. kapıya yani RF sinyallerini hedeflenen yere iletir. 3. kapı ise 2. kapıdan yansıyan RF sinyallerinin 1. kapıya gelmesini engellemek için yansıyan dalgaların soğurulduğu kapıdır. Dolaştırıcılar dalgaları saat yönünde veya saat yönünün tersine



Şekil 2.10: Dolaştırıcı sinyalin akış diyagramı [19].

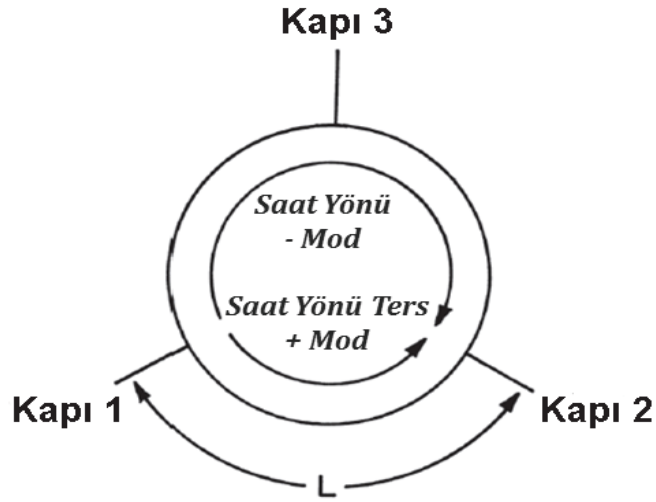
yönlendirir. Bu yönlendirme, mıknatıslar ve manyetik geçirgenlik özelliklerine sahip olan ferritler tarafından yapılır. Bir dolaştırıcının çalışma parametrelerini belirleyen en önemli unsurlar, tasarlanan dolaştırıcıda kullanılan ferritler, dışardan uygulanan manyetik alan bant genişliği vb. gibi özelliklerdir [13,18,19]. Bir dolaştırıcının çalışmasını belirleyen parametreler ferrit bölgesi, dolaştırıcının çalışma frekansı ve bant genişliği olarak açıklayabiliriz.

2.3.2.1. Ferrit Bölgesi

Dolaştırıcıda ferrite uygulanan RF sinyal, zıt yönde dönen iki dalga bileşeni veya modlar üretecektir. Şekil 2.11’de gösterildiği gibi dönen modlar analiz edilebilir. Manyetize olan ferrit malzemesinde yayılan polarize bir dalganın hızı dönme yönüne bağlı olacaktır. Bu iki mod, dolaştırma işleminin gerçekleşmesi için farklı yönde hareket etmelidirler. Yani Kapı 1’den Kapı 2’ye veya Kapı 3’e gelen bu iki dalga bileşenlerinin yada modlarının (saat yönünde (-) veya saat yönünün tersine (+) modları) fazlarının farklı olması gerekir. Matematiksel olarak şu şekilde ifade edilir:

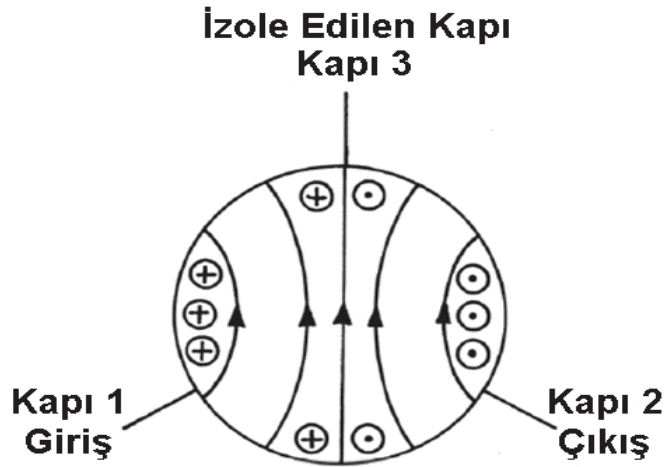
$$\beta_{-L} = \frac{4N + 2M - 1}{3} \pi, \quad (2.130)$$

$$\beta_{+L} = \frac{2N + 4M - 2}{3} \pi. \quad (2.131)$$



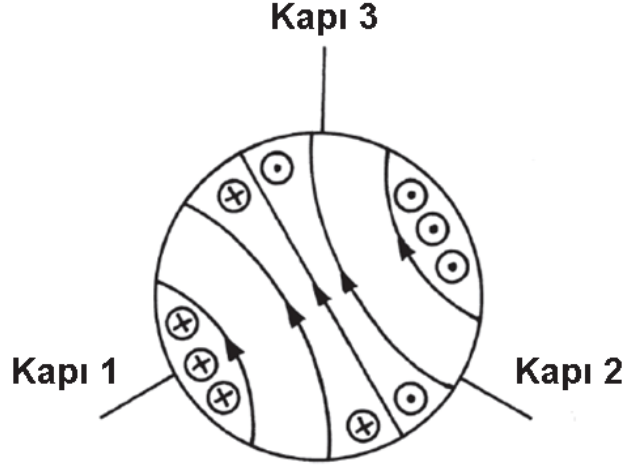
Şekil 2.11: Üç kapılı dolaştırıcıda dönüş modları [13].

Bu ifadeler, iyi bir dolaşımın olduğunu belirtir. Burada β_- ve β_+ faz sabitlerini; N ve M iki farklı modun faz farklarından istenen tamsayıları; L ise dalga tarafından geçilen mesafeyi ifade eder.



Şekil 2.12: Manyetik alan uygulanan ferrit [13].

Şekil 2.12 ve Şekil 2.13'te manyetize olan ve olmayan ferritler için duran dalga formları gösterilmiştir. Manyetik olmayan bir ferritte, 2 ve 3 numaralı kapılarda görüntülenen sinyallerin faz ve genliği eşittir. Dolayısıyla iki dönen modun frekansları aynıdır. Ferrite DC manyetik alan uygulandığında, pozitif ve negatif yönde dönen modların yayılma sabitleri eşit olmaz, dolayısıyla iki modun rezonans frekansları ω^+ ve ω^- farklı olur. Bu zıt yönde dönen modlar denklem 2.127'deki κ/μ ile ilişkilidir. Bu ilişki iki rezonans frekansın arasındaki frekans bölünme miktarını tanımlar. Ayrıca duran dalga formunun



Şekil 2.13: Manyetize olmayan ferrit [13].

dönme miktarını ve ferritin anizotropisini belirler. Ferrit malzeme özellikleri göz önünde bulundurulursa dalga sayısı (k) şu şekilde ifade edebilir:

$$k^2 = \omega^2 \mu_0 \epsilon_0 \mu_{eff} \epsilon = \omega^2 \mu_0 \epsilon_0 \epsilon \frac{\mu^2 - \kappa^2}{\mu}. \quad (2.132)$$

Burada μ_{eff} , manyetize olan ferritin etkili geçirgenlik ilişkisini tanımlar ve şöyle verilir:

$$\mu_{eff} = \frac{\mu^2 - \kappa^2}{\mu} = \frac{H_{dc} + \mu_0}{H_{dc}}. \quad (2.133)$$

Rezonans modları elektromanyetik sınır koşulları uygulanarak bulunabilir. Elektromanyetik alanların çözümleri N. dereceden Bessel fonksiyonlarını içerir. N=1 için

$$J_1^l(kR) = 0 = J_0(kR) - \frac{J_1(kR)}{kR} \left(1 \pm \frac{\kappa}{\mu}\right). \quad (2.134)$$

ifadesi elde edilir. Bu ifade de yer alan $\frac{\kappa}{\mu}$ 'nin önündeki + ve - işaretleri dönme yönünü belirler. J, Bessel fonksiyonudur. k, dalga sayısı; R, ferritin yarı çapını ifade eder. Eğer ferrit manyetizasyona sahip değilse $kR=1.84$ ile ifade edilir. Ferritin yarı çapı şu şekilde ifade edilir:

$$R = \frac{1.84 \lambda}{2\pi \sqrt{\mu_{eff} \epsilon}} = \frac{1.84 \lambda}{2\pi \sqrt{\epsilon}} \sqrt{\frac{H_{dc}}{H_{dc} + 4\pi M_s}}. \quad (2.135)$$

2.3.2.2. *Dolaştırıcının alışma Frekansı, Bant Genişliği*

Dolaştırıcının bant genişliği iki ters yönde dönen moddan dolayı rezonans frekansları arasındaki bölme miktarı " κ/μ " oranıyla orantılıdır. şu şekilde ifade edilir:

$$\frac{f_2 - f_1}{f_0} = 2.90 \frac{\kappa}{\mu} \rho. \quad (2.136)$$

2.136'daki denklemde yer alan f_0 merkez frekans, f_2 üst sınır frekans, f_1 alt sınır frekans, ρ maksimum voltaj yansıma katsayıdır. Bölme miktarı ferrimanyetik rezonansın üzerindeki frekanslarda yüksek değerdedir. Bu da rezonans altı dolaştırıcılar kullanılarak daha fazla bant genişliğinin elde edilebileceği anlamına gelir. Bölme miktarının rezonans altındaki bölgede doğunluk manyetizasyonu ile birlikte hızla değiştiği görülür. Bu sebepten $4\pi M_s$ seğimi rezonans altındaki dolaştırıcılar için önemlidir. 2.134 denkleminden elde edilen rezonans frekansı, feritlerin manyetizasyona sahip olduğu durumda zıt yönde dönen iki moduların rezonans frekansı arasında olduğu için dolaştırıcının çalışma frekansının bir değerini ifade eder [13].

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1. GENEL AMAÇ

UHF’da çalışan ve yüksek güç (100-1000 km mertebesinde) gerektiren uzun menzilli radar RF sistemleri, televizyon verici istasyonları RF sistemleri, endüstriyel hızlandırıcı gibi uygulamalarda, Klystron ve katıhal yükseltici benzeri RF yüksek güç kaynakları kullanılmaktadır. RF güç kaynaklarını empedans uyumsuzluğundan oluşan elektromanyetik güç yansımalarından korumak için pasif bir bileşen olan RF dolaştırıcılar kullanılmaktadır. Dolaştırıcı kavramındaki temel fikir güç kaynağındaki gücü hedefe mümkün olan en az kayıpla iletmek ve hedeften yansıyan gücü de kaynağa zarar vermeden RF çöpüne (kör yük) göndererek sönmölendirip yok etmektir. Bu proje, 800 MHz’de çalışacak olan RF dolaştırıcının ve ilgili RF iletim hattının tasarlanmasını, benzetim ile incelenmesini ve tasarlanan RF iletim hattının üretimini kapsamaktadır. Bununla birlikte önümüzdeki günlerde başlaması planlanan Radyo Frekans Dört Kutuplu (RFQ) başlıklı bir proton hızlandırıcısı projesine ortalama 100kW güç sağlanması üretilen iletim hattı üzerinden gerçekleştirilecektir. Ayrıca, tasarlanan dolaştırıcının üretimi, denenmesi, verimliliğinin artırılması, farklı frekans ve güç değerlerinde çalışan değişik özelliklerde dolaştırıcıların tasarlanması, bununla birlikte daha kompakt hızlandırıcılara yol verecek ve ileride savunma sanayisinde yararlı olabilecek UHF bandında çalışan bir düzenek üretimi amaçlanmıştır.

3.2. DOLAŞTIRICI BENZETİMİ, TASARIMI VE ÜRETİMİ

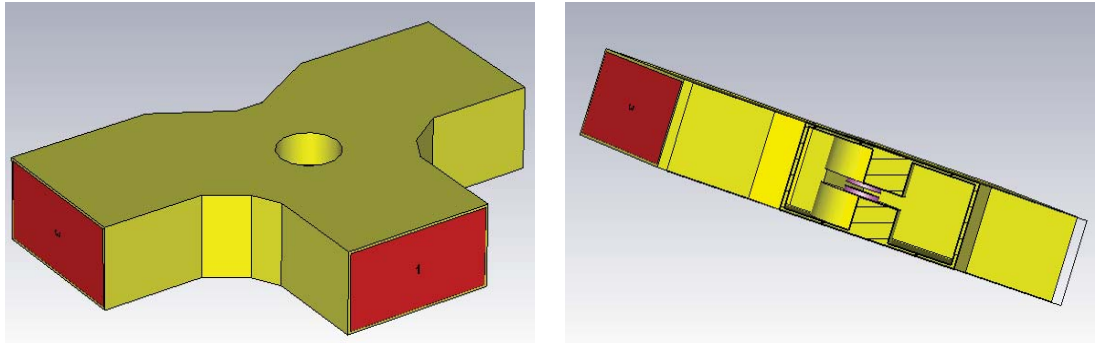
3.2.1. Dolaştırıcı Benzetim ve Tasarımı

Dolaştırıcı, üç veya dört kapıya sahip ve boyutları dalga kılavuzları ile uyumlu olan bir sistemdir. Sistemin içinde RF güç kaynağından gelen elektromanyetik dalgaların dönmesini sağlayan ferrit diskler bulunmaktadır. Bu tasarımda kalsiyum-vanadyum katkılı bir garnet ferrit türü seçilmiştir. Bu ferritlere ait özellikler Tablo 3.1’de verilmiştir. Bu ferritlere uygulanacak manyetik alan değerinin maksimum 2200 Gauss’a kadar

Tablo 3.1: Kullanılan ferritlere ait özellikler.

Ferrit Disk Çap:	68.2 mm
Doyum Manyetizasyon:	1200 Gauss
Çizgi Genişliği:	10 Oe
Cruie Sıcaklığı:	180°C
Ferrit Türü:	Kalsiyum - Vanadyum Garnet

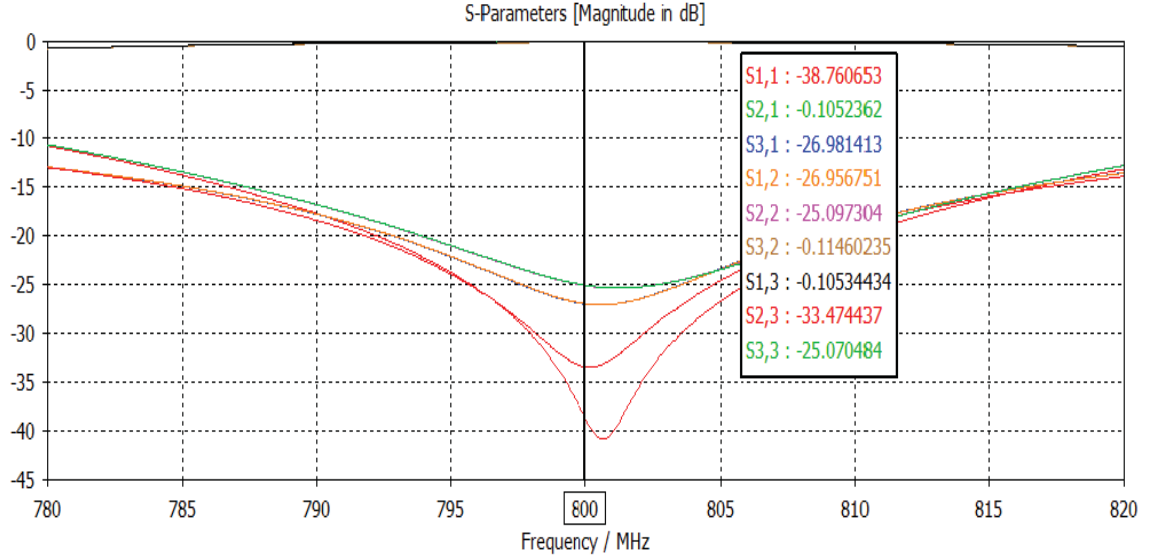
ulaşmasını sağlayan manyetik alan kaynaklarından biri olan kalıcı mıknatıslar ve dolaştırıcının alt ve üst kısımlarında solenoidler olacak şekilde bir tasarım yapılmıştır. Böylelikle kalıcı mıknatısların oluşturduğu manyetik alan değeri, solenoidler sayesinde arttırılabilecektir. 800 MHz’de çalışacak olan dolaştırıcının benzetimi için bir çok alt program barındıran Bilgisayar Benzetim Teknolojisi (CST STUDIO Suite) benzetim programı kullanılmıştır. Ferrit disklerin iç statik manyetik alan dağılımlarını çözen CST EM STUDIO ve dolaştırıcının yapısının S-parametrelerini veren CST Microwave STUDIO programı kullanılarak benzetim işlemleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.1).

**Şekil 3.1:** Dolaştırıcının CST programındaki benzetim görünümü.

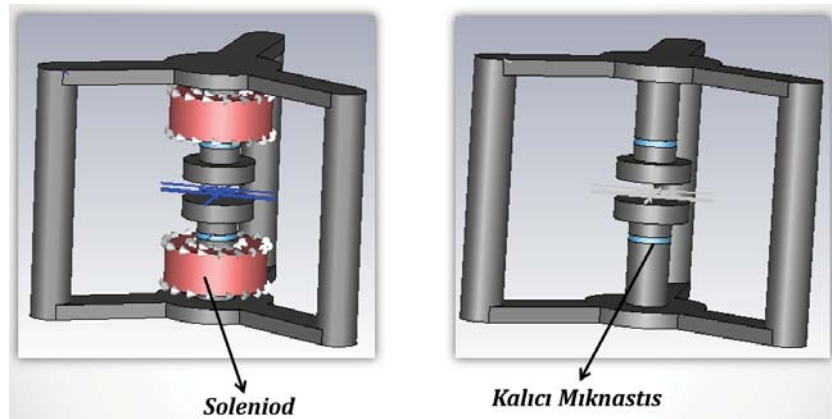
Benzetim işleminde ilk olarak WR1150 dalga kılavuzuna göre kapılar tanımlanmıştır. Sonrasında dolaştırıcı tasarımına ait ferritin yarı çapı, ferritler arası mesafe, ferritlerin kalınlığı vb. gibi parametreler mesh sayısı artırılarak optimize edilmiştir. Benzetim işlemi sonucunda dışarıdan manyetik alan uygulandığında, giriş kapısından verilen gücün tekrar giriş kapısına geldiğini gösteren parametrenin S_{11} : -38.76 dB, giriş kapısından verilen gücün hedef kapıya ne kadarlık bir güç ilettiğini gösteren parametrenin S_{21} : -0.10 dB, hedef kapıdan yansıyan gücün dolaştırıcının üçüncü kapısına gittiğini gösteren parametrenin S_{32} : -0.11 dB ve hedef kapısından giriş kapısına gelen gücü gösteren parametrenin S_{12} : -26.95 dB olduğu gözlemlenmiştir. Benzetim sonuçları Şekil 3.2 ve Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.2: Benzetim sonuçları.

S_{11} : -38.76 dB	S_{12} : -26.95 dB	S_{21} : -0.10 dB	S_{32} : -0.11 dB
----------------------	----------------------	---------------------	---------------------

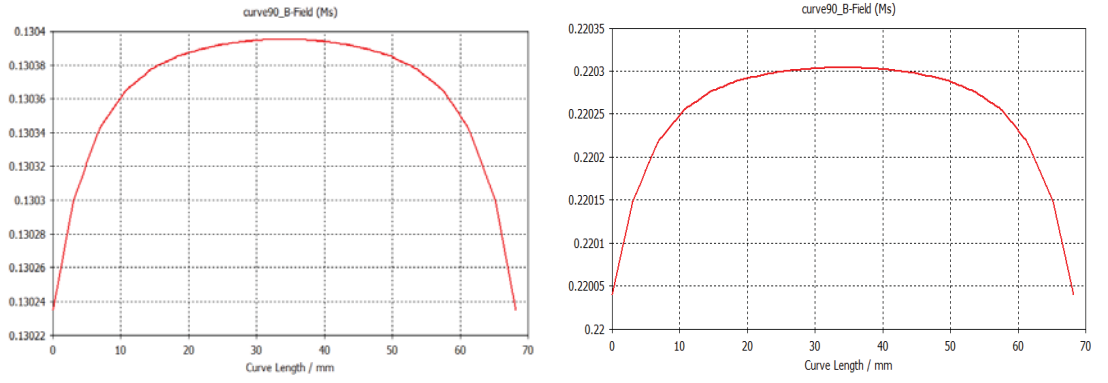
**Şekil 3.2:** Tasarlanan dolaştırıcının s-parametre benzetim sonuçları.

Son olarak iki durum ele alınarak tasarlanan dolaştırıcının manyetik alan profili için benzetim işlemi yapılmıştır. İlk durumda sadece kalıcı mıknatısların oluşturduğu, ikinci durum da ise kalıcı mıknatıslar ve solenoidlere 9.3 Amper akım verildiğinde oluşan manyetik alan profil benzetim işlemleri yapılmıştır.

**Şekil 3.3:** Manyetik alan kaynakları.

Bu dolaştırıcı iki farklı manyetik alan kaynağı kullanılacak şekilde tasarlanmıştır. (Şekil 3.3). Bunlardan biri kalıcı mıknatıslar diğeri ise solenoidlerdir. Kalıcı mıknatısların kalınlığı 10 mm, çapı 70 mm, solenoid iç çapı 90 mm, dış çapı 174 mm, uzunluğu

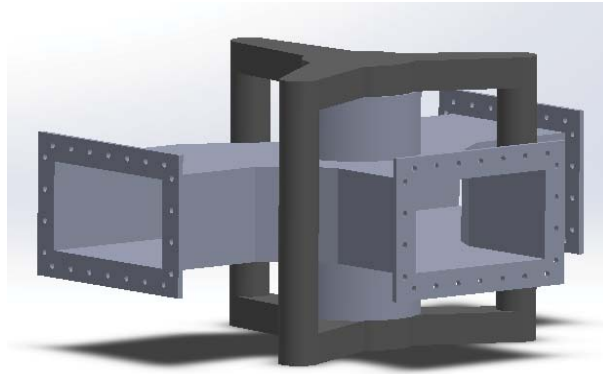
70 mm ve sarım sayısı 375 olacak şekilde parametreleri tanımlanmıştır. Manyetik alan kaynaklarını taşıyan dış gövde demirden olması düşünülmüş, bu gövde de yer alan solenoidler en üst ve en alt kısımda, kalıcı mıknatıslar ise dolaştırıcının merkezine 80 mm uzaklıkta olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu benzetim işleminde manyetik alanın doğrusal olarak dağılım göstermesi beklenilmektedir. Bu benzetim sonuçlarına göre ferrit bölgesindeki manyetik alan dağılımının yeterince düzgün olduğu görülmüştür (Şekil 3.4).



Şekil 3.4: Dolaştırıcının manyetik alan profil benzetim sonuçları; Sol: Kalıcı mıknastus, Sağ: Kalıcı mıknatıs + solenoid.

3.2.2. Dolaştırıcının Üretimi

Bu çalışmada ferritler ve kalıcı mıknatıslar dışında dolaştırıcının tüm parçaları Türkiye’de üretilmiştir. CST programında tasarlanan dolaştırıcının benzetim çalışmaları sonucunda hedeflenen S-parametreleri gözlemlenip, tasarım ölçülerine göre Solid Works programı kullanılarak üretilecek olan dolaştırıcı parçalarının çizimleri yapılmıştır. Toplanan dolaştırıcının Solid Works’teki çizimi Şekil 3.5’te gösterilmiştir.



Şekil 3.5: Tasarlanan dolaştırıcının Solid Works çizimi.

Dolaştırıcı üretiminde hassasiyet 100 mikron olarak ön görülmüştür. Bu hassasiyete ulaşılabilmesi için üretici tarafından önerilen yöntemler şu şekilde özetlenebilir:

- Maliyet ve işlemin diğer kullanılabilecek malzeme türlerine göre daha avantajlı olması ve üretim süresince bir hata olması durumunda bunun düzeltilmesinin kolay olarak yapılması için plakanın alüminyumdan üretilmesi,
- Malzeme kalınlığının en az 5 mm olması,
- Her bir parçanın birbiriyle kaynak işlemi ile birleştirilmesi sırasında malzemenin ısınması sonucunda yüzeyin içe doğru çökmemesi için destek malzeme üretilmesi.

Bu öneriler dikkate alınarak tasarlanan dolaştırıcının üretimi Şekil 3.6’da verilmektedir. Dolaştırıcının solenoidleri ve kalıcı mıknatısları sabitleyici ayakların dış gövde çevresine yerleştirilmiştir. Dolaştırıcı merkezinde yer alan ferrit malzemenin seçiminde, önceki bölümde belirtildiği gibi sistem rezonans altı bölgesinde çalıştığı için kullanılacak ferritlerin rezonans genişlik çizgisi dar, Curie sıcaklığı 180°C olan kalsiyum-vanadyum

garnet türüne karar verilmiş ve ferritler benzetime uygun olarak ürettirilmiştir (Şekil 3.7).



Şekil 3.6: Dolaştırıcı yapısı.

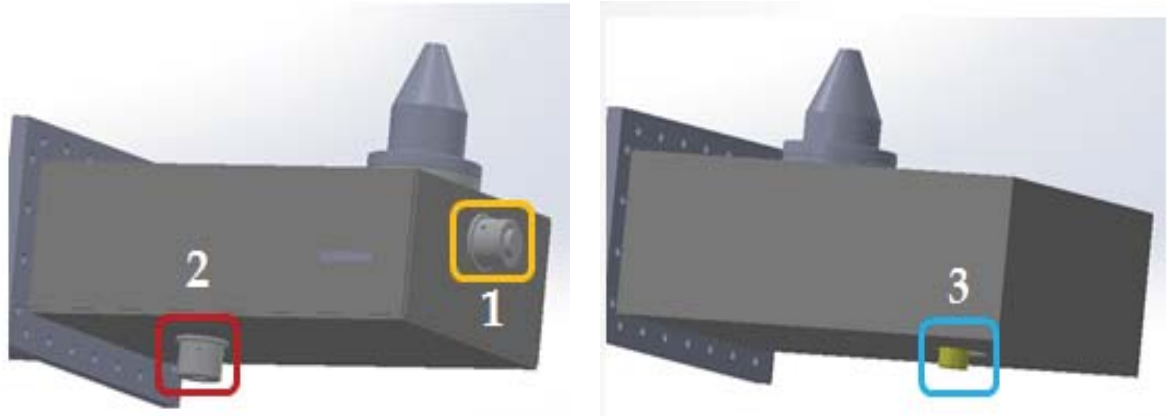


Şekil 3.7: Sol: Ferrit, Sağ: Kalıcı mıknatıslar.

Supermagnete firmasından temin edilen N35 (Neodimyum) kalıcı mıknatıs türü kullanılmıştır (Şekil 3.7). Ferritler kırılgan yapıya sahip olduklarından, üreticeye istenilen boyutta yaptırılmıştır. Solenoidler (375 sarım) ve dolaştırıcının diğer parçaları Türkiye’de yaptırılmıştır. Kalıcı mıknatıslar kelepçeli bir sistem de monte edilip ile solenoidlerin alt kısımlarına yerleştirilmiştir. Ferritler ise dolaştırıcı kılavuzunun iç kısmına yapıştırılmıştır. Ferrit ve mıknatısların yerleştirilmesiyle dolaştırıcı montajı tamamlanmıştır.

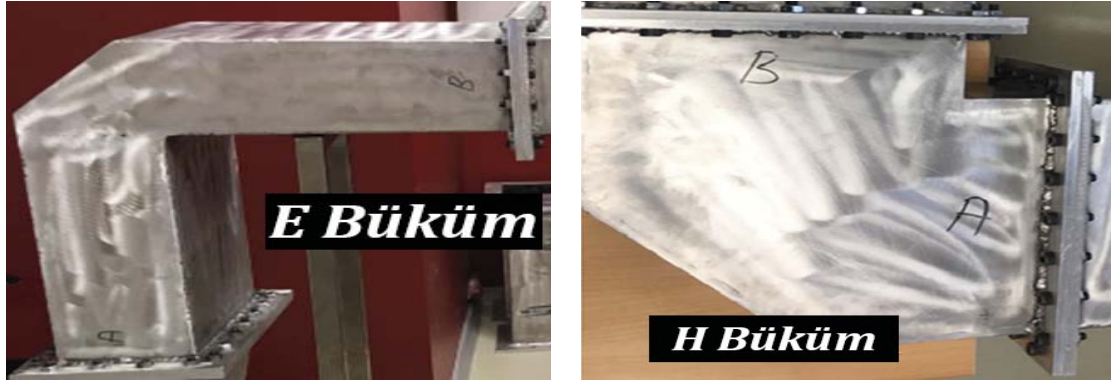
3.2.3. RF İletim Hattı Bileşenleri

Bu çalışmada üretilen diğer RF iletim hattı bileşenleri şunlardır: iki dönüştürücü, üç adet dalga kılavuzu, E büküm (Elektrik alan bükücü), H büküm (Manyetik alan bükücü), RF çöp [28]. Tasarlanan iletim hattında iki tip dönüştürücü bulunmaktadır. Bunlardan biri N tipinden 3 1/8" e koaksiyelden dalga kılavuzuna "giriş kapı"sı, diğeri ise 3 1/8" den N tipine dalga kılavuzundan koaksiyele "çıkış kapı"sıdır. Bu iki dönüştürücü de sistemi ayarlamak için ayarlayıcılara (tuner) sahiptir. Giriş kapısında alt ve yan olmak üzere iki, çıkış kapısında alt kısımda bir adet olmak üzere toplamda üç ayarlayıcıya sahiptir. Ayarlayıcılar Şekil 3.8'de gösterilmiştir. Bunlar bulunduğu dalga kılavuzunun geometrik yapısını değiştirerek içinden geçen elektromanyetik dalgayı etkiler. Bunun sayesinde sistemin güç kaybının en aza indirilmesi sağlanmaktadır.



Şekil 3.8: Giriş kapısı ve çıkış kapısı (dönüştürücüler) 1: T_y ayarlayıcı, 2: T_a ayarlayıcı, 3: T_r ayarlayıcı.

RF iletim hattında E büküm ve H büküm olmak üzere iki tip büküm dalga kılavuzu vardır (Şekil 3.9). H büküm iletim hattı bölümünde, E büküm ise RF çöp dediğimiz yansıyan dalgaları soğuran yapı ile birlikte kullanılmak üzere tasarlanan dalga kılavuzlarıdır. Burada H büküm asimetrik olarak tasarlanmıştır. Merkezden her iki flanşa olan uzaklığı farklıdır. Bu yüzden iki flanş kısmı A ve B olarak adlandırılmıştır.



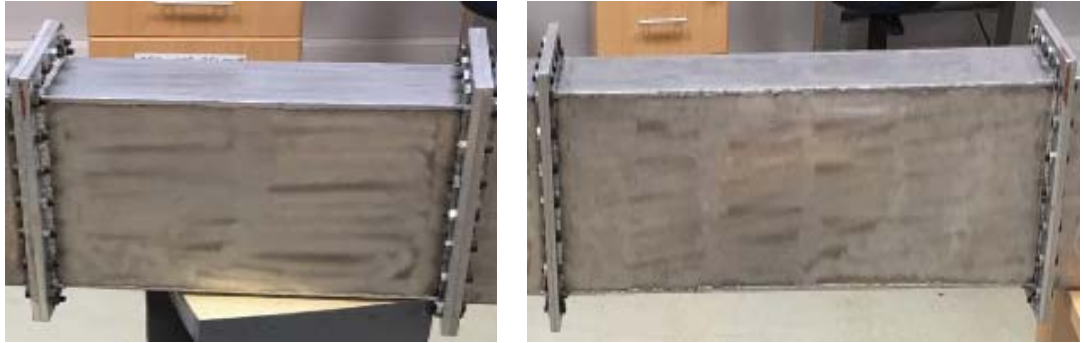
Şekil 3.9: Sol: E büküm, Sağ: H büküm.

RF çöp, hedeften yansıyan gücü soğurmak için kullanılan RF iletim hattı bileşenidir. RF çöpün iç yapısında gücü soğurmak için silisyum karbür (SiC) kullanılmıştır (Şekil 3.10).



Şekil 3.10: RF çöp.

Tasarlanan iletim hattında iki adet 50 cm'lik uzunluğunda ve bir adet 1 m uzunluğunda olmak üzere üç adet dalga kılavuzları kullanılmıştır (Şekil 3.11). Kısa dalga kılavuzları DK1, DK2; uzun dalga kılavuzu DK3 olarak adlandırılmıştır [29].



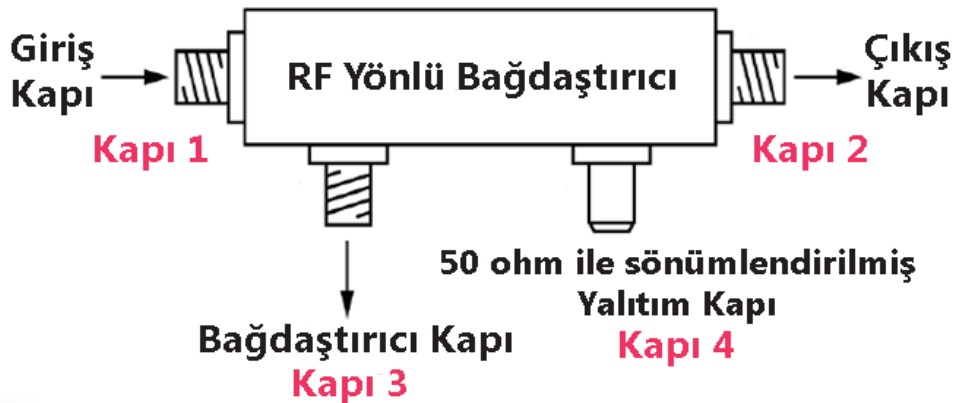
Şekil 3.11: 50 cm ve 1 m uzunluğundaki dalga kılavuzları.

3.3. YÖNLÜ BAĞDAŞTIRICI (COUPLER) BENZETİMİ, TASARIMI VE ÜRETİMİ

3.3.1. Yönlü Bağdaştırıcı

Yönlü Bağdaştırıcı, "Directional Coupler", iletim hattından geçen elektromanyetik sinyallerin güç seviyesini ölçmek için kullanılan pasif dalga kılavuz bileşenidir [30]. Güç ölçümü için kullanılan cihazların çoğu yüksek güç ölçümünde uygun değildirler. Uygun olan cihazların ise maliyeti çok yüksektir. Yönlü bağdaştırıcılar güç ölçümü yapan cihazların ölçüm aralığından daha düşük sinyal sağlarlar ve cihazların zarar görmesini de önlerler. Yönlü bağdaştırıcı, iletim hattındaki 50 cm'lik dalga kılavuzu için CST benzetim programında tasarlanıp benzetimi yapılmış ve üretilmiştir. Bu çalışmada "İlmek Tipi Yönlü Bağdaştırıcı" tasarlanmıştır. Yönlü bağdaştırıcılar üç ya da dört kapıya sahiptirler (Şekil 3.12). Bunlar şunlardır:

- **Giriş Kapısı:** Sinyali sisteme verdiğimiz kapıdır.
- **Çıkış Kapısı:** Sinyalin sistemden çıktığı kapıdır.
- **Bağdaştırıcı Kapısı:** Giriş kapısından verilen sinyalin örneğini gözlemlediğimiz kapıdır.
- **Yalıtım Kapısı:** 50 Ω ile örnek sinyali sönmülendiren kapıdır.



Şekil 3.12: Yönlü bağdaştırıcı dört kapı.

3.3.2. Yönlü Bağdaştırıcı Karakterizasyon Parametreleri

Yönlü bağdaştırıcının performansı üç önemli değer ile karakterize edilir. Bunlar; bağdaştırıcı, yalıtım ve yönlülüktür [1].

3.3.2.1. Bağdaştırıcı

Giriş kapısından gelen güç " P_1 ", bağdaştırıcı kapısında bu gücün bir örneğini " P_3 "ü oluşturur. Bağdaştırıcı değeri P_1 ve P_3 arasındaki güç oranı olarak tanımlanır. Giriş kapısından verilen güç " P_1 "i arttırdığımızda, aynı şekilde bağdaştırıcı kapısındaki " P_3 " güç değeri de artacaktır. Böylece, bağdaştırıcı kapısı ile giriş kapısından verilen güç belirlenebilir.

Bağdaştırıcı parametresinin desibel ifadesi aşağıdaki eşitlikle verilir:

$$C(dB) = 10 \log \frac{P_1}{P_3} = -20 \log |S_{31}|. \quad (3.1)$$

3.3.2.2. Yalıtım

Yönlü bağdaştırıcının yönlülük özelliğini tanımlar. Giriş kapısından verilen gücün (P_1), yönlü bağdaştırıcının yalıtım kapısındaki güce (P_4) oranıdır.

Yalıtım parametresinin desibel ifadesi aşağıdaki eşitlikle verilir:

$$I(dB) = 10 \log \frac{P_1}{P_4} = -20 \log |S_{41}|. \quad (3.2)$$

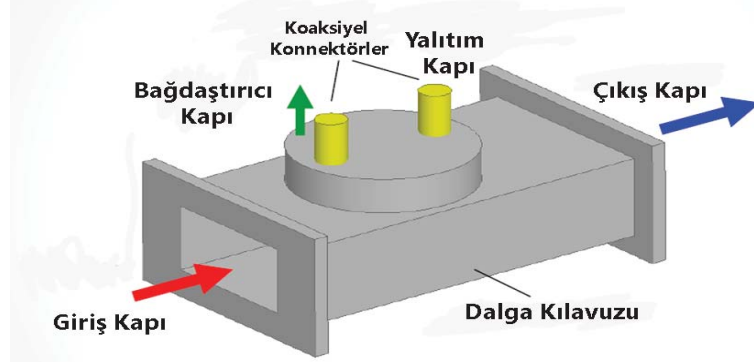
3.3.2.3. Yönlülük

Yönlü bağdaştırıcının ne kadar iyi çalıştığını gösteren önemli parametrelerden biridir. Yönlü bağdaştırıcının bağdaştırıcı kapısında algılanan gücün (P_3), yalıtım kapısındaki güce (P_4) oranıdır [1].

Yönlülük parametresinin desibel ifadesi aşağıdaki eşitlikle verilir:

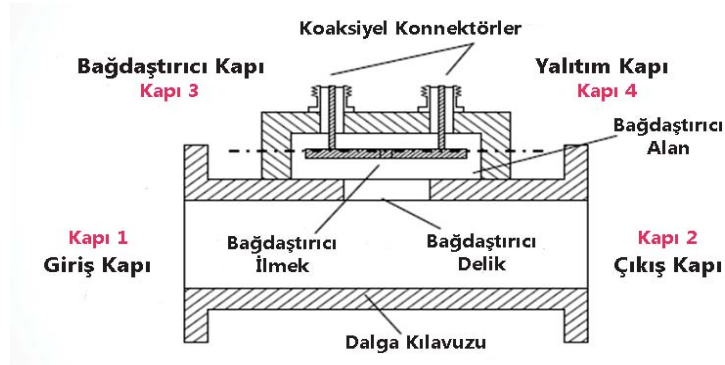
$$D(dB) = 10 \log \frac{P_3}{P_4} = -20 \log \frac{|S_{31}|}{|S_{41}|}. \quad (3.3)$$

3.3.3. İlmek Tipi Yönlü Bağdaştırıcı



Şekil 3.13: İlmek tipi yönlü bağdaştırıcı görünümü

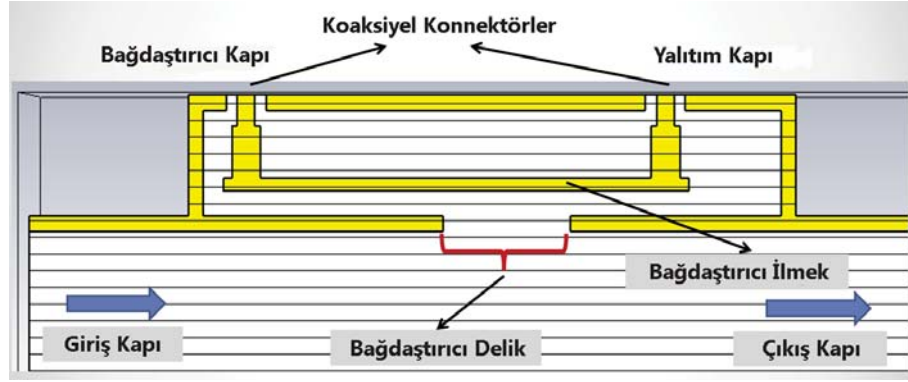
İlmek tipi yönlü bağdaştırıcı (Şekil 3.13), ana hat, koaksiyel hat ve bağdaştırıcı alan bölümleri olmak üzere üç kısımdan oluşmaktadır. Bu bölümler Şekil 3.14'te gösterilmiştir. Ana hat, elektromanyetik dalganın geçtiği kısımdır (dalga kılavuzu). Koaksiyel hat, ana hattan geçen dalganın belirli bir oranının ölçülmesi için cihaza iletilen bölümdür. Bağdaştırıcı alan ise, ana hattan geçen dalganın belirli bir oranının etkileştiği bölümdür [31].



Şekil 3.14: İlmek tipi yönlü bağdaştırıcı bölümleri [31].

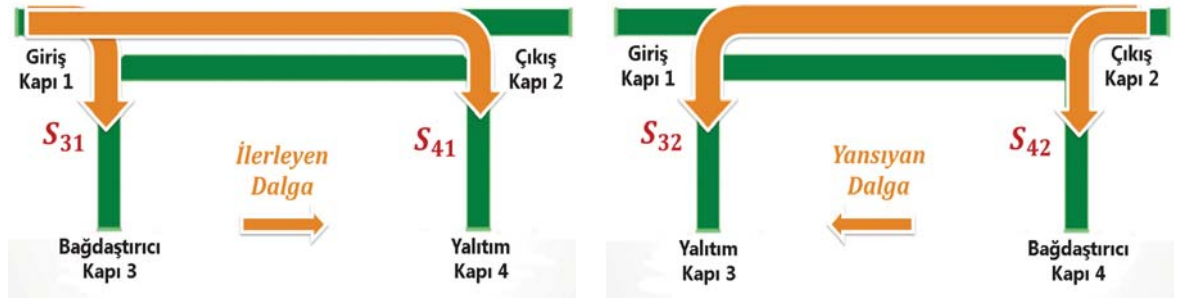
3.3.3.1. Tasarım ve Benzetim

İlmek tipi yönlü bağdaştırıcı 800 MHz'de çalışan RF iletim hattındaki 50 cm uzunluğundaki dalga kılavuzu için tasarlanmıştır. Yönlü bağdaştırıcının bağdaştırıcı parametresi -30 dB, yönlülük parametresi en az 20 dB olacak şekilde, CST programı ile benzetim işlemi gerçekleştirilmiştir. CST programında tasarlanan yönlü bağdaştırıcının bölümleri Şekil 3.15'te gösterilmiştir.



Şekil 3.15: İlmek tipi yönlü bağdaştırıcı bölümleri [31].

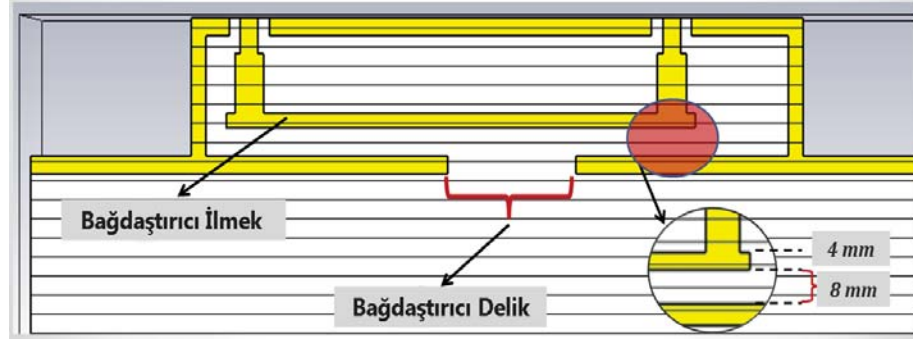
Tasarlanan yönlü bağdaştırıcı iki yönlü bağdaştırıcı (bi-directional) yapısındadır. Hem ilerleyen dalganın gücünü hem de yansıyan dalganın gücünün belirli bir kısmını örnekleyerek bilgi vermektedir. Giriş kapısından çıkış kapısına giden dalgaya "ilerleyen dalga", çıkış kapısından giriş kapısına giden dalgaya "yansıyan dalga" denir. İlerleyen dalganın gücünü örnekleyen kapı bağdaştırıcı kapısıdır ve S-parametresi S_{31} 'dir. Yalıtım değeri ise S_{41} 'dir. Yansıyan dalganın bağdaştırıcı kapısı, ilerleyen dalganın yalıtım kapısıdır ve S-parametresi S_{42} , yalıtım kapısı ise ilerleyen dalganın bağdaştırıcı kapısıdır ve S-parametresi S_{32} 'dir [32]. Bu parametreler Şekil 3.16'da ayrıntılı biçimde gösterilmiştir.



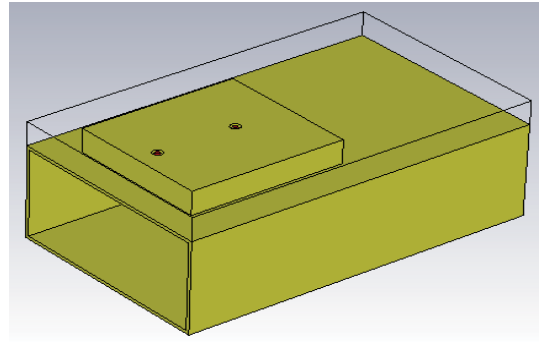
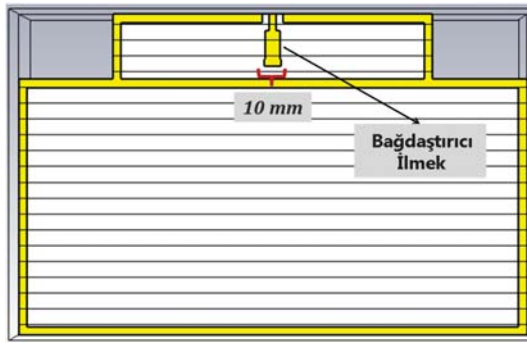
Şekil 3.16: İlerleyen ve yansıyan dalga ölçüm şekilleri.

Yönlü bağdaştırıcının ana hat ve bağdaştırıcı ilmek kısmında kullanılmak üzere alüminyum malzeme seçilmiştir. Ana hattan geçen elektromanyetik dalganın, bağdaştırıcı hattı ile etkileşmesini sağlayan yarı çapı 22 mm büyüklükte olan bir delik oluşturulmuştur ve bağdaştırıcı ilmwk ile dalga kılavuzunun dış duvarı arasındaki mesafe 8 mm olarak ayarlanmıştır (Şekil 3.17). Yönlü bağdaştırıcının, bağdaştırıcı ve yalıtım kapısı için kullanılan N tipi konnektörler ile sistemin empedansı (50Ω) eşleşecek şekilde delik

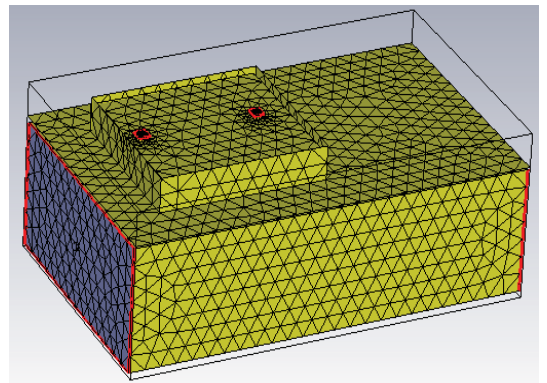
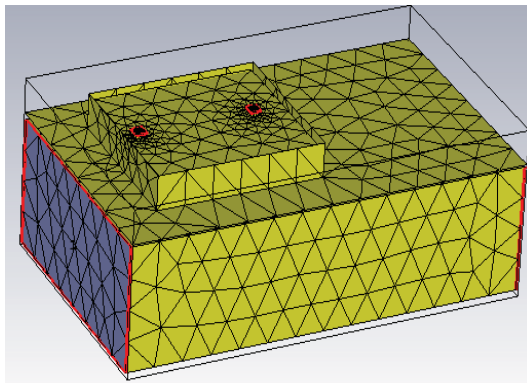
tasarlanmıştır. Şekil 3.18’de belirtildiği gibi bağdaştırıcı ilmek kısmı, 5 mm ve 3 mm yarıçaplara sahip iki parça çubuktan oluşturulmuştur. Bu tasarım, düşük ve yüksek mesh olmak üzere iki şekilde benzetimi yapılmıştır (Şekil 3.19).



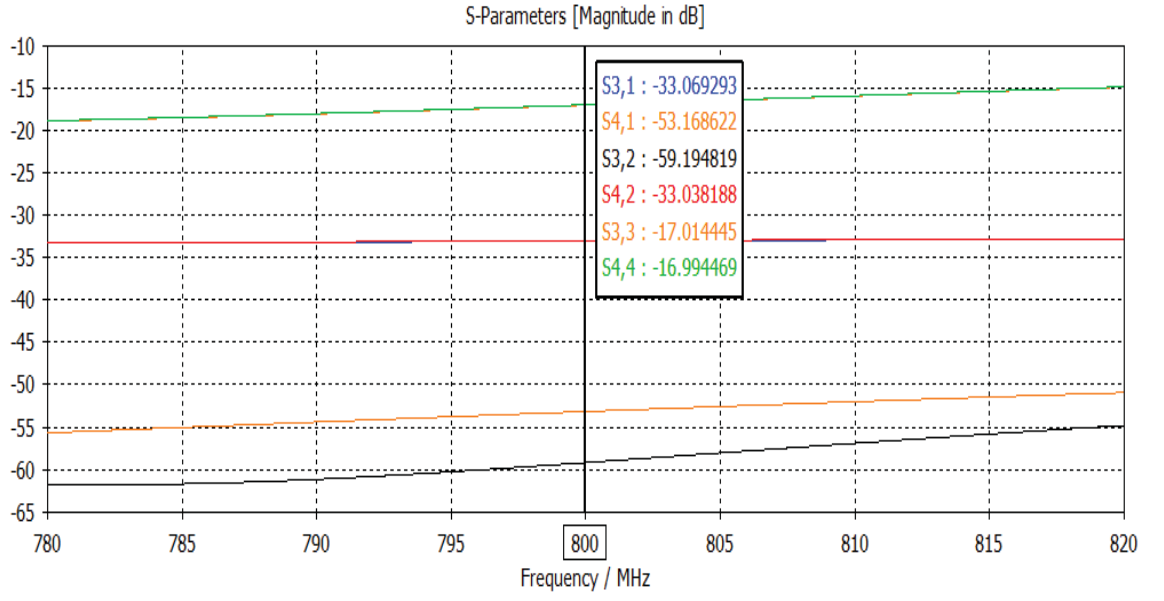
Şekil 3.17: İlmek tipi yönlü bağdaştırıcı iç görünümü.



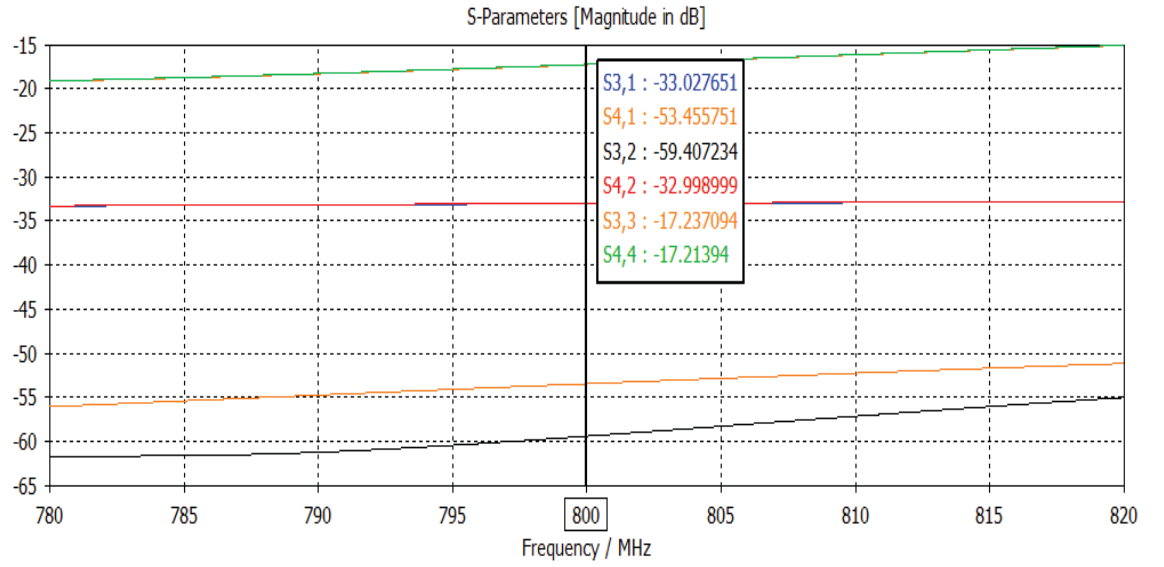
Şekil 3.18: Tasarlanan yönlü bağdaştırıcı diğer görünümü.



Şekil 3.19: Düşük ve yüksek mesh görüntüleri.



Şekil 3.20: Düşük mesh benzetim sonucu.



Şekil 3.21: Yüksek mesh benzetim sonucu.

Yönlü bağdaştırıcının CST’de düşük ve yüksek meshte benzetimi yapıp çıkan sonuçların birbiriyle tutarlı olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 3.20 ve Şekil 3.21 sırasıyla düşük mesh ve yüksek mesh benzetim sonuçlarını göstermektedir. Ayrıca bu sonuçlar Tablo 3.3’te özetlenmiştir.

Tablo 3.3: Yönlü bağdaştırıcı benzetim sonuçları.

	İlerleyen Dalga	Yansıyan Dalga
Bağdaştırıcı:	-33.02 dB	-32.99 dB
Yalıtım:	-53.45 dB	-59.40 dB
Yönlülük:	20.43 dB	26.41 dB

Bu benzetim sonuçlarından ilerleyen elektromanyetik dalga gücünün %0.049'unun, yansıyan elektromanyetik dalga gücünün %0.05'nin örneklenilebildiği (bağdaştırıcı) ve yönlülük ve yalıtım parametrelerinin hedeflenen değerlerde oldukları gözlemlenmiştir.

3.3.3.2. Yönlü Bağdaştırıcının Üretimi

Yönlü bağdaştırıcının önceki bölümdeki benzetim çalışmalarında elde edilen ölçülere göre üretimi gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.22'de yönlü bağdaştırıcının üretimi sırasında çekilmiş bir fotoğrafı verilmektedir. Yönlü bağdaştırıcı 50 cm'lik dalga kılavuzunun dış yüzeyine dikdörtgen şeklinde kanal açılarak monte edilmiştir. Böylece yönlü bağdaştırıcının, ilerleyen ve yansıyan dalgalar için bağdaştırıcı ve yalıtım parametrelerinin ölçümleri 800 MHz'de çalışan RF iletim hattı üzerinde alınmıştır.

**Şekil 3.22:** Yönlü bağdaştırıcı üretim sırasında.

4. BULGULAR

4.1. DOLAŞTIRICI VE İLETİM HATTI DENEYSEL ÖLÇÜMLERİ

4.1.1. Dolaştırıcının Manyetik Alan Profili

Bu ölçümdeki amaç dolaştırıcının iç kısmının belirli bir bölümünün manyetik alan dağılımını incelemek ve dolaştırıcı tasarımında kullanılan kalıcı mıknatısların, solenoidlerin ve ferritlerin manyetik alan dağılımına etkilerini gözlemlemektir. Bunun için iki farklı ölçüm alınmıştır:

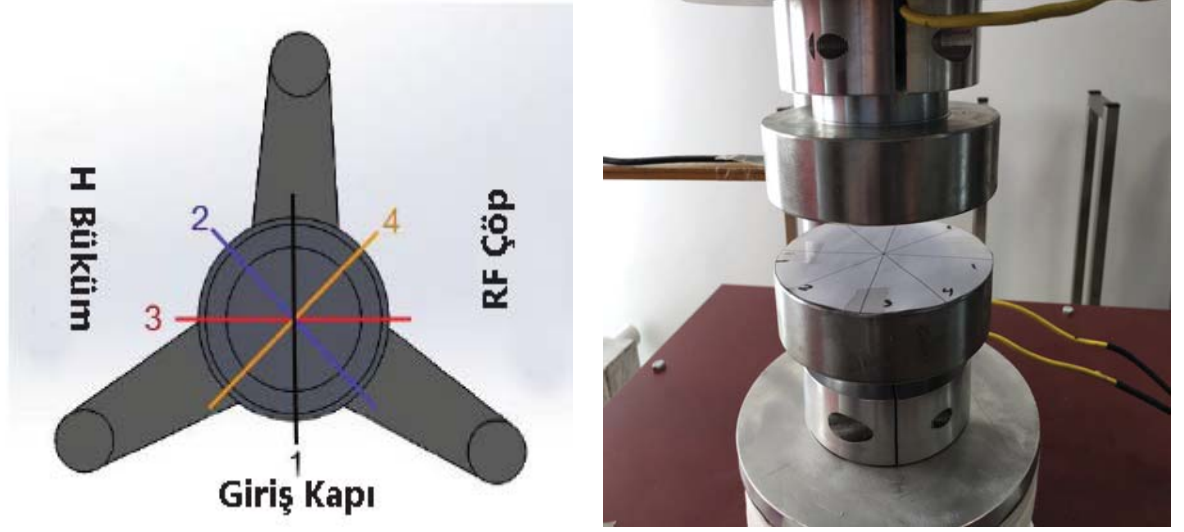
- Kalıcı mıknatıslar ve solenoidlere akım verilerek alınan manyetik alan ölçümü
- Sadece kalıcı mıknatıslar ve ferritlerin oluşturduğu manyetik alan ölçümü

Manyetik alan ölçümü için gauss metrenin radyal manyetik alan sonda kullanılmıştır. Bu sondanın üç ekseninde de hareketini sağlayacak düzenek Şekil 4.1’deki gibi tasarlanmıştır.



Şekil 4.1: Tasarlanan düzenek.

Sistemin manyetik alan ölçümü dolaştırıcının tam ortasından geçecek şekilde ve dört farklı yönde 5 mm aralıklar ile alınmıştır. Dört farklı yönde ölçüm alınmasının sebebi belli aralıkta manyetik alan dağılımının homojen olup olmadığını ve manyetik alan



Şekil 4.2: Sol: Ölçüm doğrultuları, Sağ: Doğrultuları çizili olan daire kağıt.

değerlerinin nasıl değiştiğini gözlemlemektir. Ölçüm yönleri Şekil 4.2’de gösterilmiştir.

Ölçüm aralığı merkezin her iki tarafından 11 cm uzaklıkta olacak şekilde toplamda 22 cm’lik bir alandır. Her bir doğrultu için alınan ölçüm sayısı 855, toplamda alınan ölçüm sayısı 3420 adettir. Şekil 4.3’te manyetik alan ölçümü alınırken çekilmiş fotoğraflar gösterilmektedir.



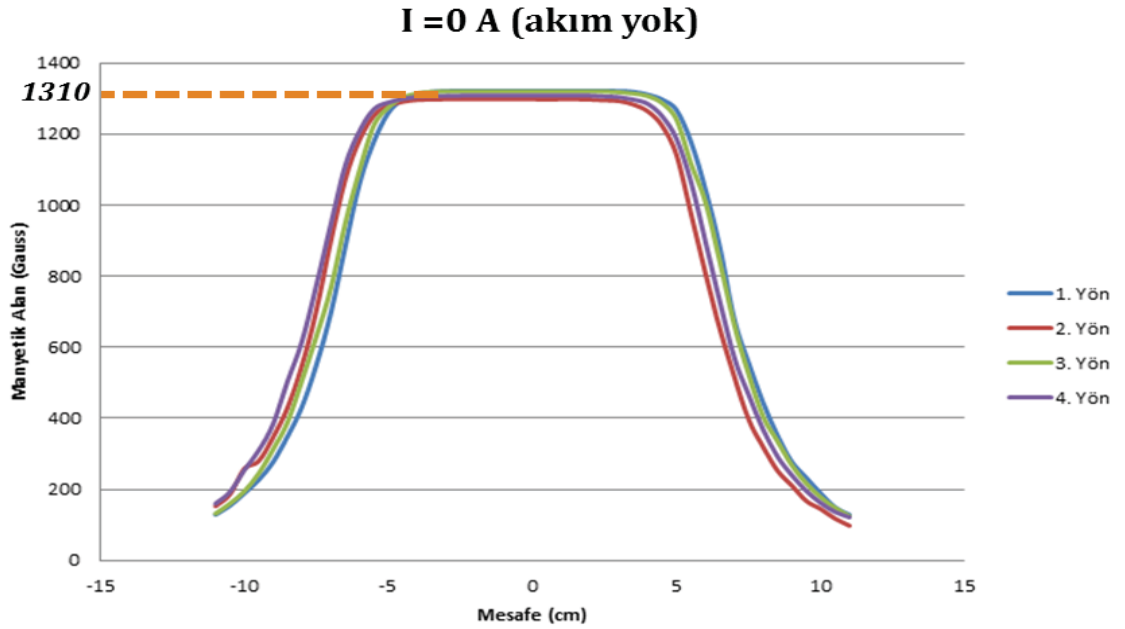
Şekil 4.3: Manyetik alan ölçümü yapılırken.

4.1.1.1. I. Ölçüm: Kalıcı Mıknatıslar ve Solenoidlere Akım Verilerek Alınan Manyetik Alan Ölçümü

Üretilen dolaştırıcının alt ve üst kısımlarında iki kalıcı mıknatıs ve iki solenoid bulunduğu önceki bölümde belirtilmiştir. Bu ölçümde ilk olarak sadece kalıcı mıknatısların (Şekil 4.4) oluşturduğu manyetik alan dağılımı gözlemlendi. Şekil 4.5'te manyetik alan dağılımı gösterilmiştir.



Şekil 4.4: Kalıcı mıknatıs ve ölçüm düzeneği.

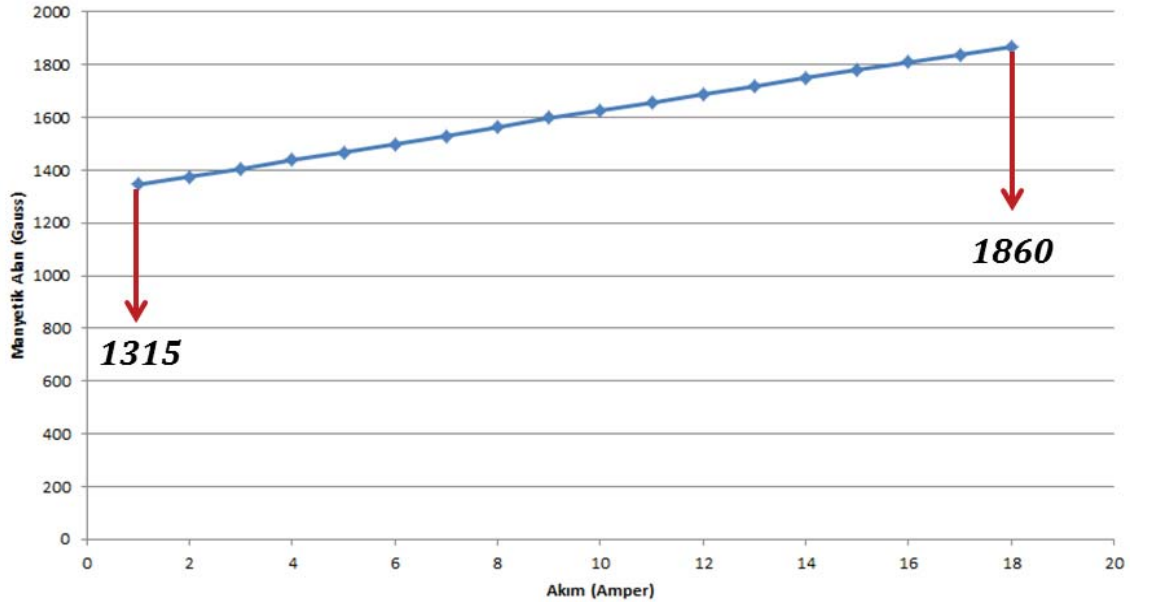


Şekil 4.5: Kalıcı mıknatısların oluşturduğu manyetik alan dağılımı.

Kalıcı mıknatısların manyetik alan dağılımı gözlemlendikten sonra Şekil 4.6'da gösterilen solenoidlere 1 Amper'den 18 Amper'e kadar akım değeri birer birer arttırılarak uygulanmış ve her akım değerindeki manyetik alan dağılımları gözlemlenmiştir. Şekil 4.7'de her akım değerine karşılık gelen maksimum manyetik alan değeri gösterilmiştir. Ek 2'de her akım değerindeki manyetik alan dağılımlarının grafikleri bulunmaktadır.



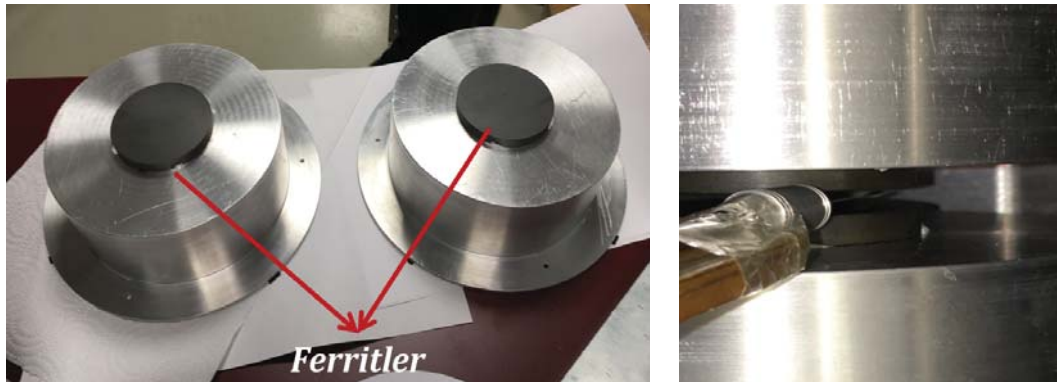
Şekil 4.6: Dolaştırıcıda kullanılan solenoidler.



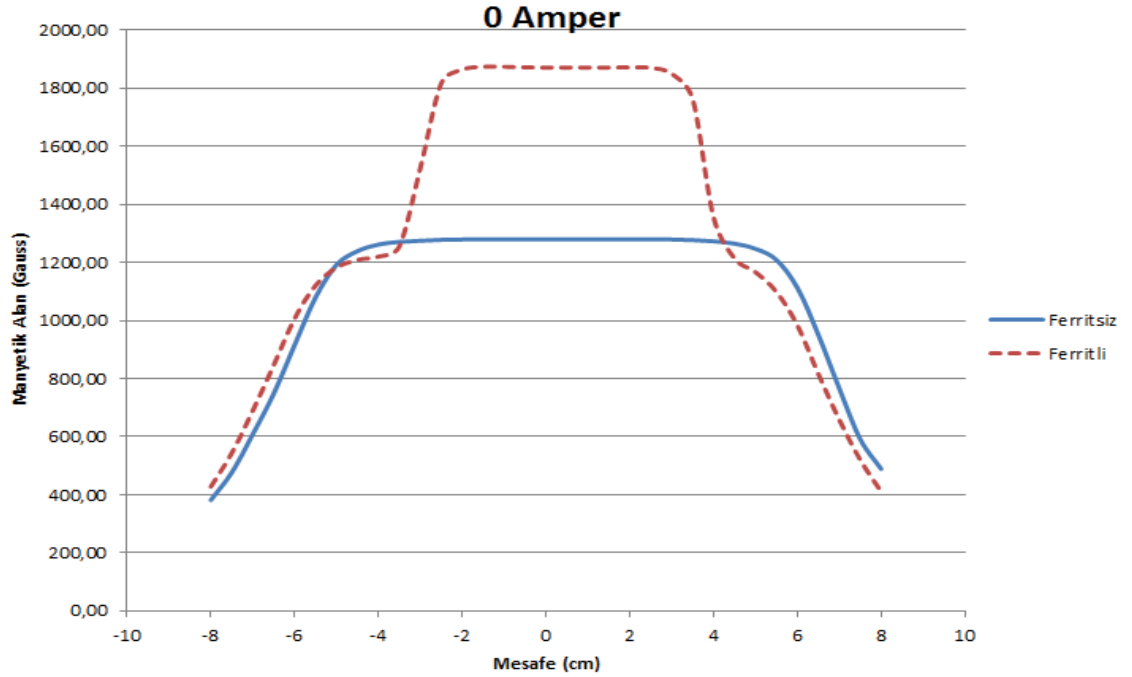
Şekil 4.7: Solenoidlere akım verildiğinde manyetik alan değerleri.

4.1.1.2. II. Ölçüm: Sadece Kalıcı Mıknatısların ve Ferritlerin Oluşturduğu Manyetik Alan Ölçümü

Bu ölçümde, kalıcı mıknatısları ve ferritlerin bulunduğu sistemin (Şekil 4.8) manyetik alan dağılımına bakılmıştır. Sonrasında sadece iki kalıcı mıknatısın oluşturduğu manyetik alan dağılımlarına bakılmış ve bir önceki feritlerin bulunduğu sistemle karşılaştırılması yapılmıştır. Böylece ferritlerin manyetik alan altında nasıl davrandığı gözlemlenmiştir (Şekil 4.9).



Şekil 4.8: Sol: Ferritler; Sağ: Ölçüm alınırken.

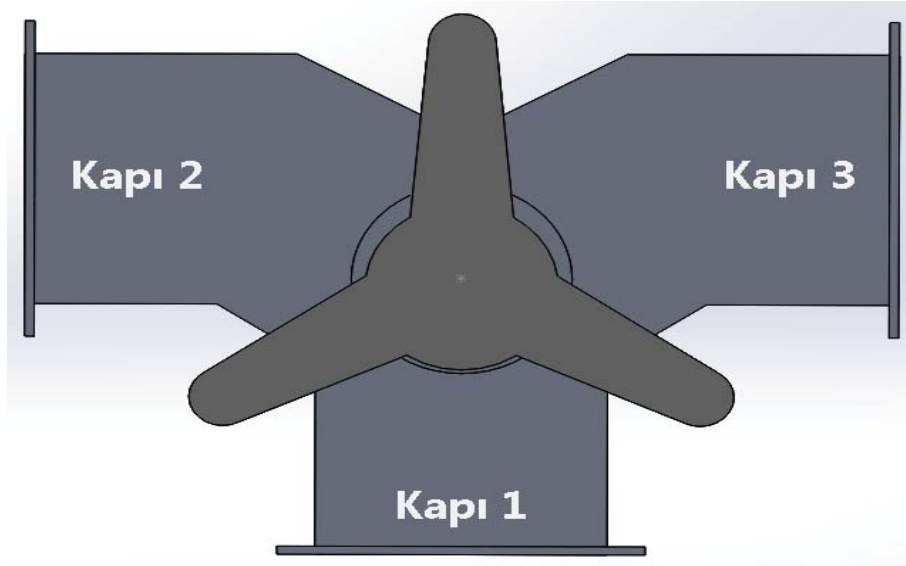


Şekil 4.9: Ferritsiz ile ferritli sistemlerin manyetik alan dağılımlarının karşılaştırılması.

4.1.2. S-parametre Ölçümleri

Üretilen dalga kılavuzları ve iki dönüştürücü, dolaştırıcı ile birleştirilerek bir RF iletim hattı oluşturulmuş ve tüm sistemin S-parametreleri ölçülmüştür. Bu ölçüm sırasında kullanılan RF iletim hattı bileşenlerinden Bölüm 3.2’de bahsedilmiştir.

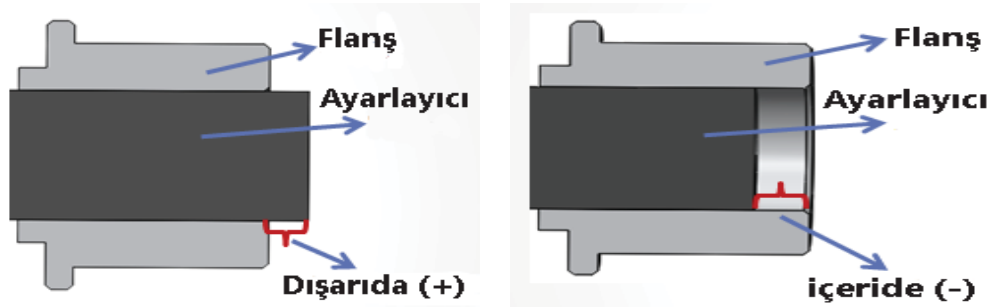
Şekil 4.10’da gösterilen dolaştırıcının 1.kapısı, sisteme güç verilen giriş kapısına bağlanan kapıdır. 2. kapı sisteme verilen gücü dolaştırıcı içinde bulunan ferritler sayesinde iletilmesini istediğimiz hedefe yönlendiren kapıdır. 3.kapı ise 2.kapıdan yansıyan gücün soğurma işlemini gerçekleştirmek için RF çöpe bağlanan kapıdır.



Şekil 4.10: Dolaştırıcı kapılarının gösterimi.

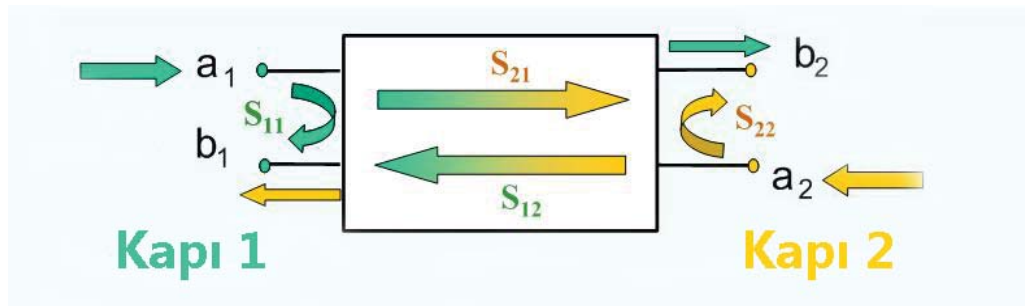
Bu ölçümde ayrıca dolaştırıcı ile birlikte tüm RF bileşenlerinin oluşturabileceği mümkün olan RF iletim hattı sistemleri oluşturuldu ve her bir sistemin S-parametre ölçümleri yapıldı. S-parametre ölçümleri yapılırken markası ve modeli Anritsu MS2026C olan VNA (Vektör Ağ Analizör) cihazı kullanıldı. VNA, mikrodalga frekanslarında çalışan sistemlerin, çalışma ve performansı hakkında bilgiler sunan önemli bir cihazdır. Bu çalışmada VNA cihazı, üretilen iletim hattının, iletilen ve yansıyan sinyallerin S-parametreleri hakkında bilgi almak için kullanılmıştır. VNA cihazı ile bu ölçümler 1 mW gücünde bir sinyal gönderilerek gerçekleştirmiştir. Kullanılan VNA iki kapıya sahip olduğundan iki kapılı ölçüm alınmıştır. Tüm ölçümler 780 - 820 MHz frekans aralığında alınıp her ölçüm öncesi VNA cihazı kalibre edilmiştir. VNA cihazı ile ölçüm almamızı sağlayan VNA’nın kapılarına bağlanan iki koaksiyel kablo kullanılmıştır. Oluşturulan

tüm RF iletim hattı sistemlerinin en ideal S-parametre değerlerini gözlemlemek için dönüştürücülerdeki ayarlayıcılar ile ayar yapılmış ve bunların ölçümleri kumpas (vernier) yardımıyla alınmıştır. Şekil 4.11’de gösterildiği gibi ayarlayıcıların flanşın dışında olduğu durum "+", içinde olduğu durum "-" olarak tanımlanarak ölçüm sonuçlarında bu durumlar belirtilmiştir. Giriş kapısında bulunan ayarlayıcılardan T_y -2.57 mm ile -1.04 mm arasında, T_a +4.72 mm ile + 24.68 mm arasındaki çıkış kapısında bulunan ayarlayıcı T_r -20.45 mm ile +19.11 mm arasında ayarlanmıştır.



Şekil 4.11: Ayarlayıcı (tuner) durumları.

RF iletim hattı giriş ve çıkış olmak üzere iki kapıya sahip olduğundan toplamda dört adet S-parametresi okunur. Bu parametreler Şekil 4.12’de gösterilmiştir.



Şekil 4.12: S-parametreler gösterimi.

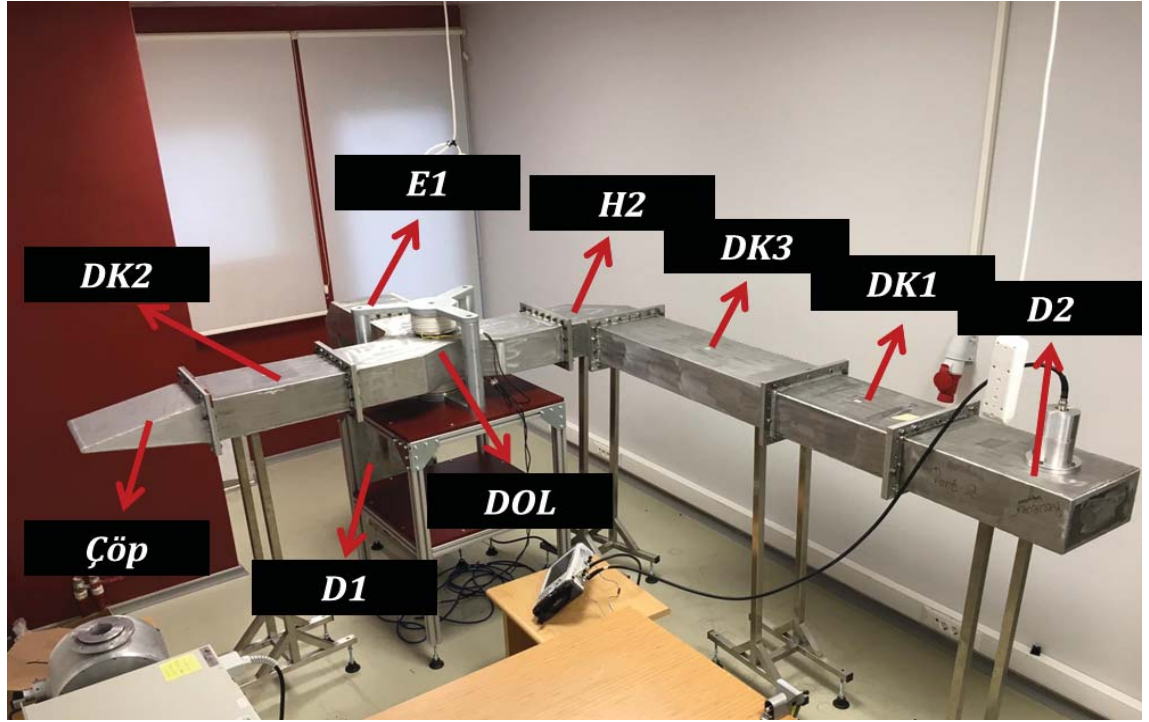
Bunlardan; S_{11} : 1.kapıdan 1.kapıya gelen dalganın gücünü, S_{12} : 2.kapıdan 1.kapıya gelen dalganın gücünü, S_{21} : 1.kapıdan 2.kapıya gelen dalganın gücünü, S_{22} : 2.kapıdan 2.kapıya gelen dalganın gücünü desibel olarak veren parametrelerdir. Bu parametrelerden S_{21} iletim parametresidir. Sisteme verilen gücün ne kadarının hedeflenen kapıya gittiğini belirten S-parametresidir. Bu parametrenin 0 dB’ye yakın bir değerde olması gerekmektedir. S_{11} ve S_{22} yansıyan parametrelerdir. Bu parametrelerin, RF güç kaynak cihazının zarar görmesini engellemek için düşük olması gerekmektedir. S_{12} parametresi, giriş kapısından verilen gücün çıkış kapısında belirli bir kısmının yansıması durumunda tekrar birinci kapıya ne kadarlık bir güç geldiği hakkında bilgi veren parametredir.

Bu parametrenin de düşük olması gerekmektedir. Bunu da sağlayan RF bileşeni dolaştırıcılarıdır. Tasarlanan RF iletim hattının iyi şekilde çalışmasını belirten bu dört parametrenin değeri için CERN'ün belirttiği kriter şu şekildedir [33]: S_{11}, S_{22}, S_{12} parametreleri -28 dB'den düşük, S_{21} parametresi -0.10 dB den yüksektir. Bu nedenle tüm ölçümlerde sistemin ayarlayıcıları ayarlanarak bu değerlere yakın değerler elde edilmeye çalışılmıştır. Toplamda 22 RF iletim hattı konfigürasyonu oluşturulmuş ve S-parametre ölçümleri alınmıştır. Sonuçlar Tablo 4.1'de gösterilmiştir. Bu sistemlerin arasında en ideal sonuç 21. deney setinde gözlemlenmiştir. 21. deney seti Şekil 4.13'te, ölçüm sonucu Şekil 4.14'te gösterilmiştir. Diğer sonuçlar Ek-1'de gösterilmiştir.

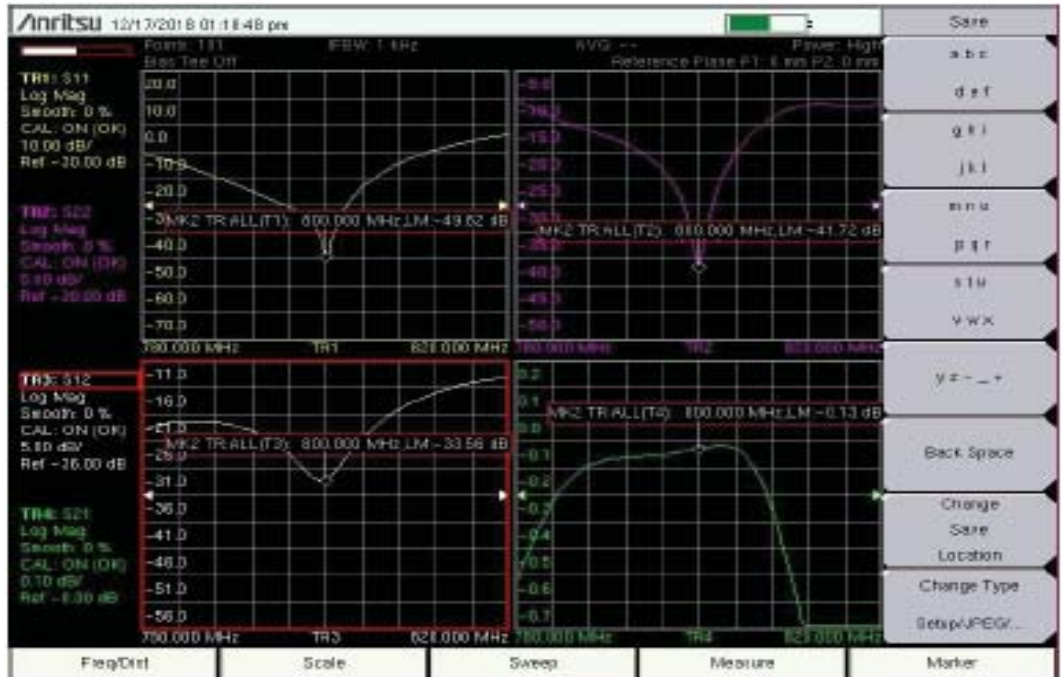
Tablo 4.1: Oluşturulan RF iletim hatlarının s-parametre ölçüm sonuçları.

No	Düzenek	S_{11} dB	S_{12} dB	S_{21} dB	S_{22} dB	İletim
1	D1-Dol-D2/Ç	-44.08	-24.26	-0.06	-33.92	%98.62
2	D1-Dol-D2/E1-Ç	-26.00	-11.10	-0.15	-17.57	%96.60
3	D1-Dol-H1-D2/Ç	-45.14	-19.56	-0.11	-25.90	%97.49
4	D1-Dol-H1-D2/E1-Ç	-45.09	-10.46	-0.07	-23.34	%98.40
5	D1-Dol-H1-DK2-D2/Ç	-44.80	-20.74	-0.07	-28.34	%98.40
6	D1-Dol-H1-DK2-D2/E1-Ç	-36.94	-10.57	-0.11	-29.03	%97.49
7	D1-Dol-H1-DK3-D2/Ç	-31.56	-19.31	-0.03	-30.37	%99.31
8	D1-Dol-H1-DK3-D2/E1-Ç	-48.16	-10.46	-0.14	-39.21	%96.82
9	D1-Dol-H2-D2/Ç	-29.44	-23.05	-0.15	-22.46	%96.60
10	D1-Dol-H2-D2/E1-Ç	-61.26	-10.60	-0.10	-24.98	%97.72
11	D1-Dol-H2-DK2-D2/Ç	-41.68	-21.14	-0.05	-26.51	%98.85
12	D1-Dol-H2-DK2-D2/E1-Ç	-37.24	-10.68	-0.09	-35.84	%97.94
13	D1-Dol-H2-DK3-D2/Ç	-45.27	-22.06	-0.11	-30.41	%97.49
14	D1-Dol-H2-DK3-D2/E1-Ç	-35.05	-10.71	-0.11	-41.29	%97.49
15	D1-E2-Dol-H2-DK3-D2/Ç	-56.30	-23.28	-0.14	-35.84	%96.82
16	D1-E1-Dol-H2-DK3-D2/Ç	-54.78	-23.02	-0.11	-24.51	%97.49
17	D1-E1-Dol-H2-DK2-D2/Ç	-60.24	-21.90	-0.13	-21.19	%97.05
18	D1-E2-Dol-H2-DK2-D2/Ç	-54.55	-23.99	-0.19	-29.06	%95.71
19	D1-E1-Dol-H2-DK3-DK2-D2/Ç	-47.19	-23.30	-0.09	-52.71	%97.94
20	D1-E1-Dol-H2-DK3-D2/DK2-Ç	-52.49	-34.51	-0.14	-25.27	%96.82
21	D1-E1-Dol-H2-DK3-DK1-D2/DK2-Ç	-49.82	-33.56	-0.13	-41.72	%97.05
22	D1-Dol-H2-DK3-DK1-D2/DK2-Ç	-42.25	-31.75	-0.15	-35.97	%96.60

Tablo 4.1 de kullanılan kısaltmalar şu şekildedir: **D1**: koaksiyelden dalga kılavuzuna dönüştürücü giriş kapısı; **D2**: dalga kılavuzundan koaksiyele dönüştürücü çıkış kapısı; **Dol**: dolaştırıcı; **E1**: E Büküm, a kenarından b kenarına E_{ab} ; **E2**: E Büküm, b kenarından a kenarına E_{ba} ; **H1**: H Büküm, a kenarından b kenarına H_{ab} ; **H2**: H Büküm, b kenarından a kenarına H_{ba} ; **DK1**, **DK2**, **DK3**: Dalga Kılavuzları; **Ç**: RF Çöp



Şekil 4.13: 21. Deney setinin görüntüsü.



Şekil 4.14: 21. Deney setinin s-parametre ölçüm sonucu.

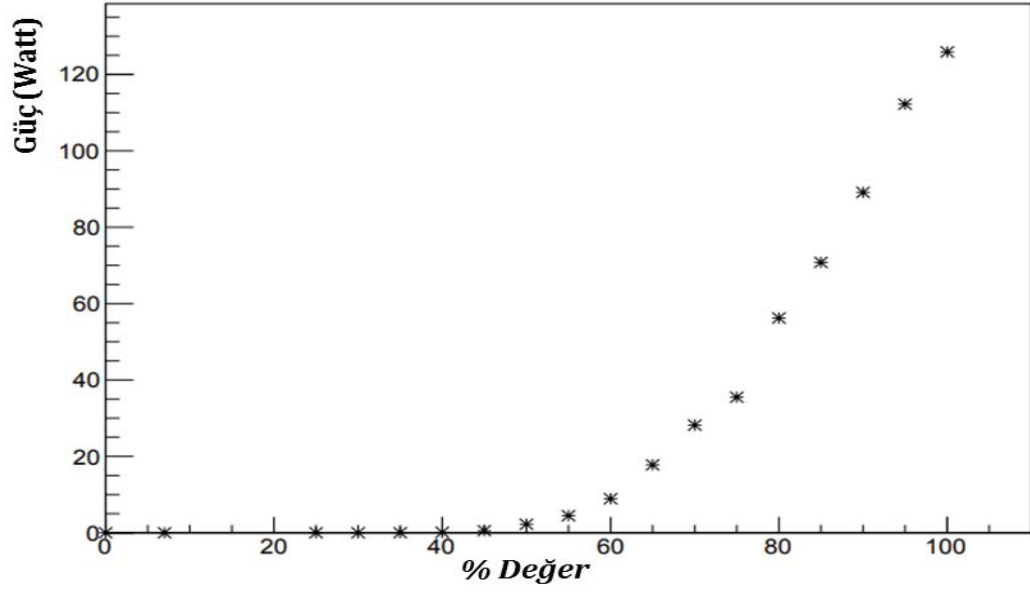
4.1.3. 100 Watt Güç İle Alınan Ölçümler

Bir önceki bölümde bahsedilen Şekil 4.13'te gösterilen 21. deney seti ideal S-parametre değerlerini verdiğinden, 100 Watt'lık güç ölçümü bu deney setindeki RF iletim hattı üzerinden yapılmıştır. Bu ölçümde RF güç kaynağından RF iletim hattının giriş kapısına 100 Watt'lık elektromanyetik güç verilerek RF iletim hattının çıkış kapısına gelen yani "iletilen" güç değeri ölçülmüştür. RF güç kaynağı ile RF iletim hattının giriş kapısındaki bağlantı koaksiyel kablo ile sağlanmıştır. RF iletim hattının çıkış kapısında iletilen güç değeri spektrum analizör cihazı ile ölçülmüştür. Spektrum analizör cihazları, RF sinyalleri içeren sistemlerde giren sinyallerin güç büyüklüğünü ölçen cihazlardır. Kullanılan spektrum analizör cihazına 1 Watt ve üstü değerdeki bir güç gönderildiğinde cihaz bozulmaktadır. Bu nedenle cihazın zarar görmesini engellemek için 40 dB'lik sönümlendirici kullanılmıştır (Şekil 4.15).

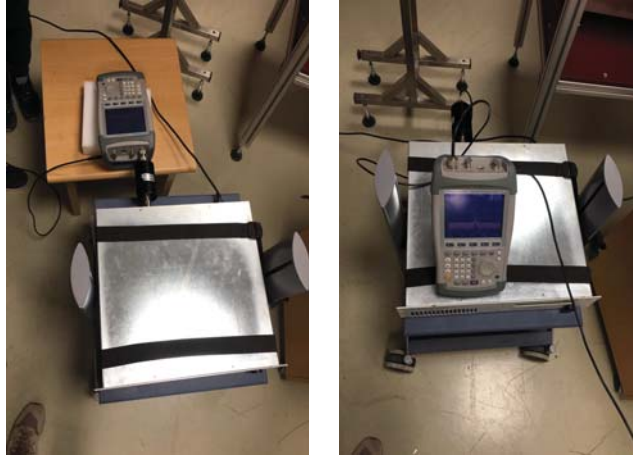


Şekil 4.15: Sol: RF güç kaynağı ve spektrum analyzer, Sağ: 40 dB sönümlendirici.

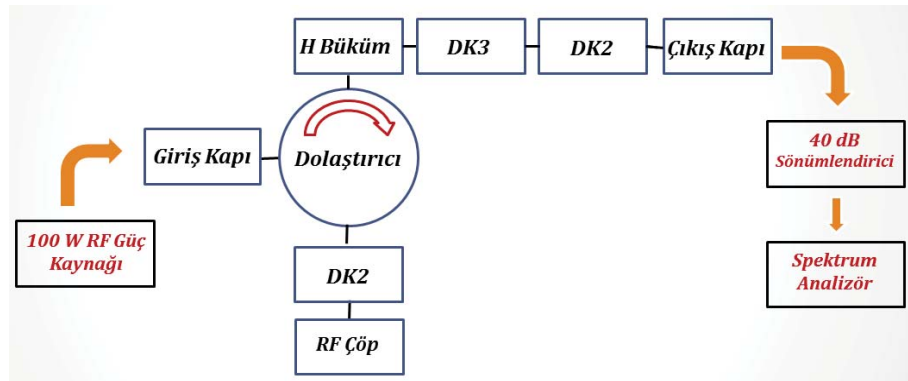
RF güç kaynağı özel yapım olduğu için verilen güç değerini "%" (yüzde) şeklinde gösterdiğinden her yüzdelik değere karşılık gelen gücün miliwatt (mW) değeri ölçülmüştür, ayrıca üretici firma tarafından bu değerler grafik olarak belirtilmiştir (Şekil 4.16). Bu ölçüm, RF güç kaynağına 40 dB'lik sönümlendirici ile birlikte marka ve modeli Rodhe & Schwarz FSH6 olan spektrum analizör cihazı bağlanılarak alınmıştır. RF güç kaynağı güç değeri ölçümü ve koaksiyel kablonun güç kaybı ölçümünün yapıldığı deney düzenekleri Şekil 4.17'de gösterilmiştir.



Şekil 4.16: RF güç kaynağının yüzdelik ifadesine karşılık gelen Watt değerleri.



Şekil 4.17: Sol: RF güç kaynağı güç değeri ölçümü, Sağ: Koaksiyel kablo güç kaybı ölçümü.



Şekil 4.18: RF güç ölçüm şeması.

Daha sonra kullanılan koaksiyel kablodaki güç kayıp değerleri ölçülmüştür. Bu ölçümler yapıldıktan sonra RF iletim hattındaki iletilen güç değerleri ölçme işlemine geçilmiştir. Güç ölçümünün şeması Şekil 4.18’de gösterilmiştir. Burada RF iletim hattının giriş kapısına RF güç kaynağı, çıkış kapısına sönümlendirici ve spektrum analizör cihazı bağlanmıştır (Şekil 4.19). RF güç kaynağından verilen belirli güç değerlerine göre RF iletim hattının çıkış kapısına gelen güç değerleri ölçülüp, bu değerler arasındaki fark hesaplanarak hem RF iletim hattındaki hem de koaksiyel kablodaki toplam güç kaybı elde edilmiştir. Buradan RF iletim hattındaki güç kaybı hesaplanmıştır ve sonuçlar Tablo 4.2’de özetlenmiştir.

Tablo 4.2: RF iletim hattının iletim değerleri.

GKÜ %	GKÜ Güç mW	İ.H.Ö.D. mW	K. Kaybı mW	İ.H. Kaybı mW	İ.G.Y. %
%0	0,071	0,047	0,023	0,001	%98,5
%5	0,112	0,076	0,033	0,004	%96,8
%10	0,191	0,135	0,053	0,003	%98,4
%15	0,31	0,22	0,08	0,01	%96,7
%20	0,49	0,34	0,14	0,01	%98,4
%25	0,72	0,5	0,21	0,01	%98,4
%30	2,14	1,48	0,59	0,07	%96,7
%35	26,9	18,6	7,9	0,4	%98,4
%40	208,9	141,3	57,6	10,1	%95,2
%45	812,8	549,5	224	39,3	%95,2
%50	2570,2	1698,2	750,7	121,5	%95,3
%55	6025,1	4073,8	1660,4	291,4	%95,2
%60	12301,7	8317,6	3593,1	391	%96,8
%65	20415,7	13803,8	5963	648,9	%96,8
%70	33110,5	22387,2	9124,8	1598,5	%95,2
%75	47859,2	32359,4	13189,3	2310,5	%95,2
%80	64560,3	44668,4	17791,9	2100	%96,7
%85	79426,5	53703,2	21888,8	3834,5	%95,2
%90	93318	63095,7	24142,3	6079,9	%93,5
%95	102321,1	72443,6	24704,6	5172,9	%94,9
%100	112192	77624	29025	5543	%95,1

Yukarıda verilen tabloda **GKÜ Güç:** güç kaynağı ünitesinden verilen güç değerini; **İ.H.Ö.D:** iletim hattında ölçülen değerini; **K. Kaybı:** Kullanılan koaksiyel kablodaki güç kaybı; **İ.H. Kaybı:** iletim hattındaki kayıp gücü ve **İ.G.Y.:** iletilen güç yüzdesini belirtmektedir.



Şekil 4.19: 100 Watt'lık güç ölçümü yapılırken alınan görüntü.

Tablo 4.2'deki sonuçlar incelendiğinde iletim güç yüzdelere göre, düşük güçten yüksek güce gidildiğinde iletim yüzdesinde bir azalma görülmektedir. Ayrıca bu sonuçlar VNA cihazı ile ölçülen iletim S-parametresine (S_{21}) karşılık gelen yüzde değeriyle karşılaştırıldığında ortalama %1'lik farklılık görülmektedir. Bu farkın sebepleri, spektrum analizör cihazından kaynaklanan ölçüm süresinin kısıtlı olması veya kullanılan koaksiyel kablodaki güç kaybının çok olması şeklinde açıklanmaktadır. Bu güç kaybı, kabloda kullanılan yalıtkan malzemeden ya da kullanılan iletken kaynaklanabilmektedir. Ayrıca sistemin empedansı ile uyuşmadığında da güç kayıpları olabilmektedir.

4.1.4. Yönlü Bağdaştırıcı Ölçümleri

Tasarlanan ve üretilen ilmek tipi yönlü bağdaştırıcının, ilerleyen ve yansıyan dalgalar için bağdaştırıcı ve yalıtım parametrelerinin ölçümleri RF iletim hattı üzerinde VNA cihazı kullanılarak yapıldı.

4.1.4.1. İlerleyen Dalgalar için Bağdaştırıcı ve Yalıtım Ölçümleri

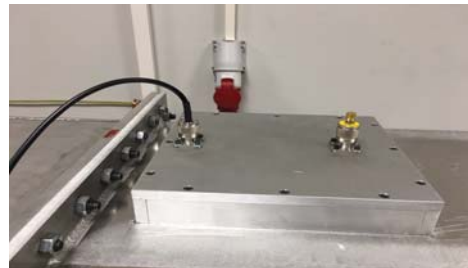
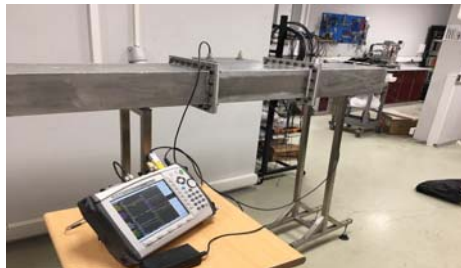
Bu ölçümde RF iletim hattının giriş kapısından çıkış kapısına ilerleyen elektromanyetik dalganın yönlü bağdaştırıcının üzerindeki bağdaştırıcı ve yalıtım parametreleri, VNA (Vektör Ağ Analizör) cihazı kullanılarak alınmıştır.

Bağdaştırıcı Parametresi: S_{31}

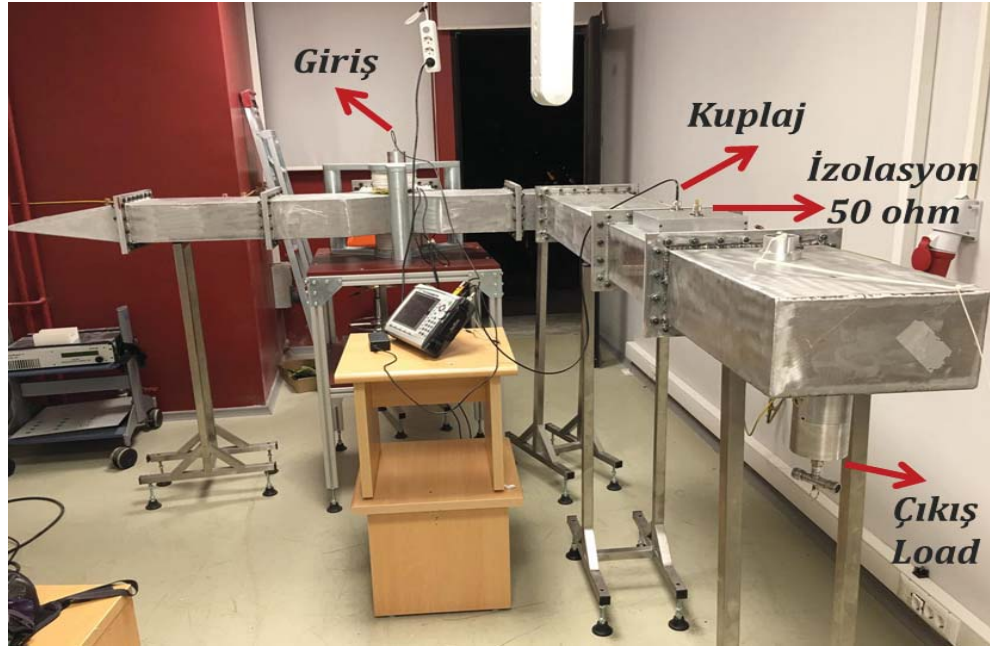
VNA'nın birinci kapısı RF iletim hattının giriş kapısına; VNA'nın ikinci kapısı yönlü bağdaştırıcının bağdaştırıcı kapısına bağlanmıştır. Yönlü bağdaştırıcının yalıtım kapısına ve RF iletim hattının çıkış kapısına gelen elektromanyetik dalgayı sönmölendirmek için 50Ω direnç kullanılmıştır. Bağdaştırıcı ölçüm şeması Şekil 4.20'de gösterilmiştir. İlerleyen dalga için bağdaştırıcı ölçüm düzeneği Şekil 4.21 (yakın) ve Şekil 4.22'de (tüm sistemin uzaktan çekimi) gösterilmektedir. Bu ölçüm ile elde edilen sonuçlar Şekil 4.23'te verilmektedir.



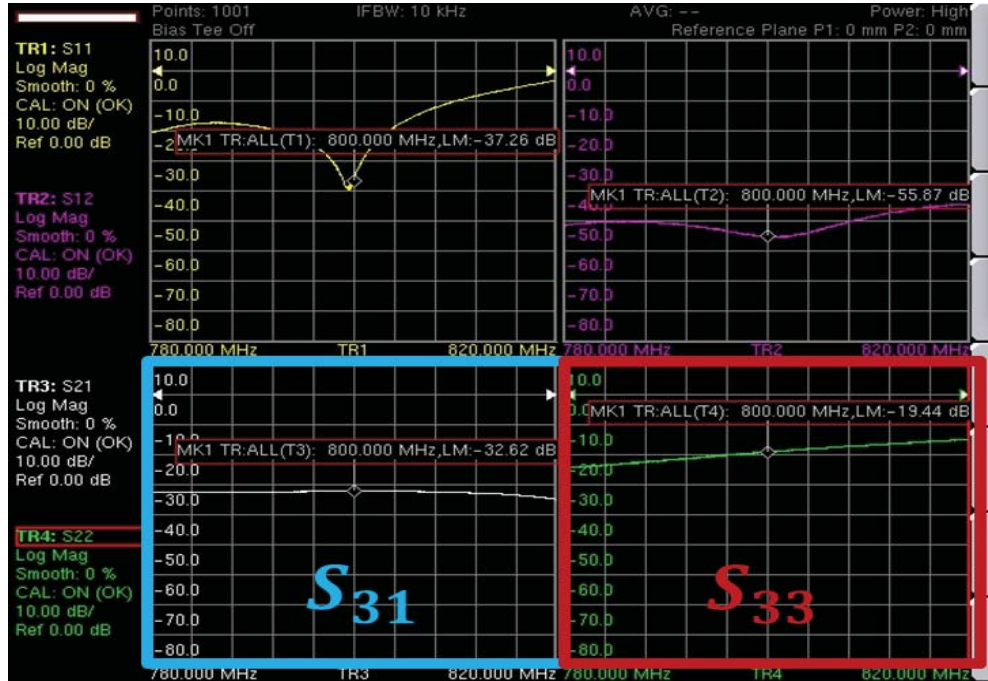
Şekil 4.20: Bağdaştırıcı ölçüm şeması S_{31} .



Şekil 4.21: İlerleyen dalga için bağdaştırıcı ölçüm esnasında alınan bir resim.



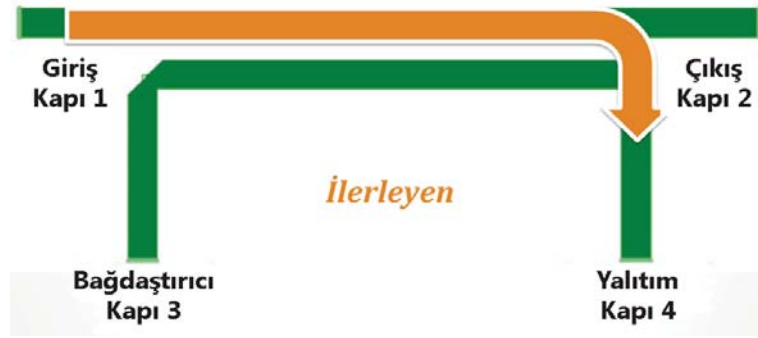
Şekil 4.22: İlerleyen dalga için bağdaştırıcı ölçüm düzeneği.



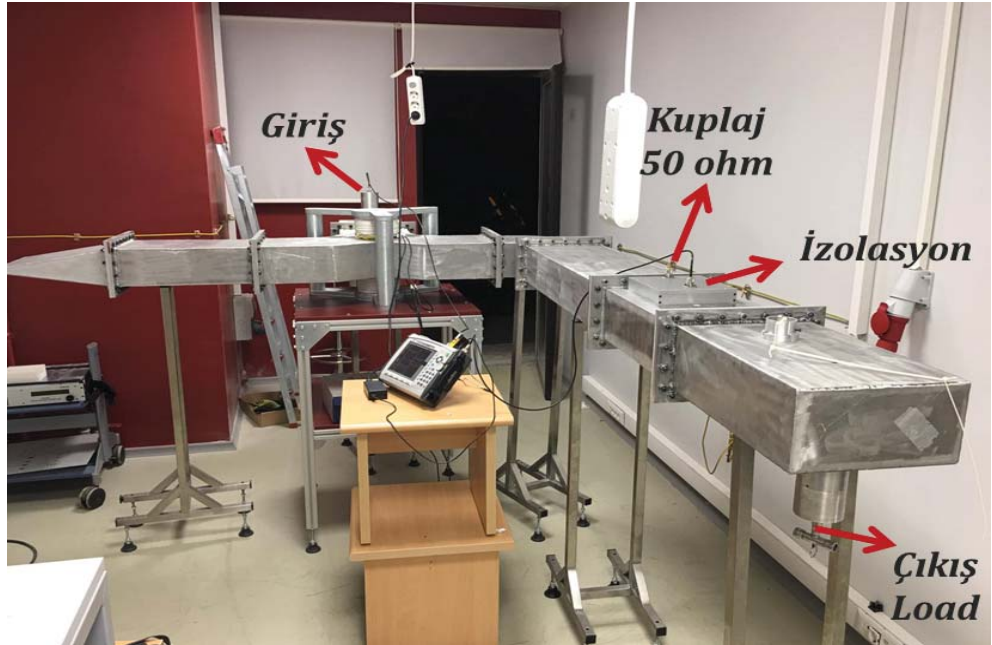
Şekil 4.23: İlerleyen dalga için bağdaştırıcı ölçüm sonucu.

Yalıtım Parametresi: S_{41}

İlerleyen dalga için alınan bağdaştırıcı ölçümünden farklı olarak VNA'nın ikinci kapısı yönlü bağdaştırıcının yalıtım kapısına takılıp, bağdaştırıcı kapısına gelen elektromanyetik dalgayı sönmölendirmek için $50\ \Omega$ direnç kullanılmıştır. Bu ölçümün şeması Şekil 4.24'te gösterilmiştir. İlerleyen dalga için yalıtım ölçüm düzeneği Şekil 4.25'te, yalıtım ölçümü sırasında alınan bir resim ise Şekil 4.26'da gösterilmiştir. Ayrıca ilerleyen dalga için yalıtım ölçüm sonuçları Şekil 4.27'de verilmektedir.



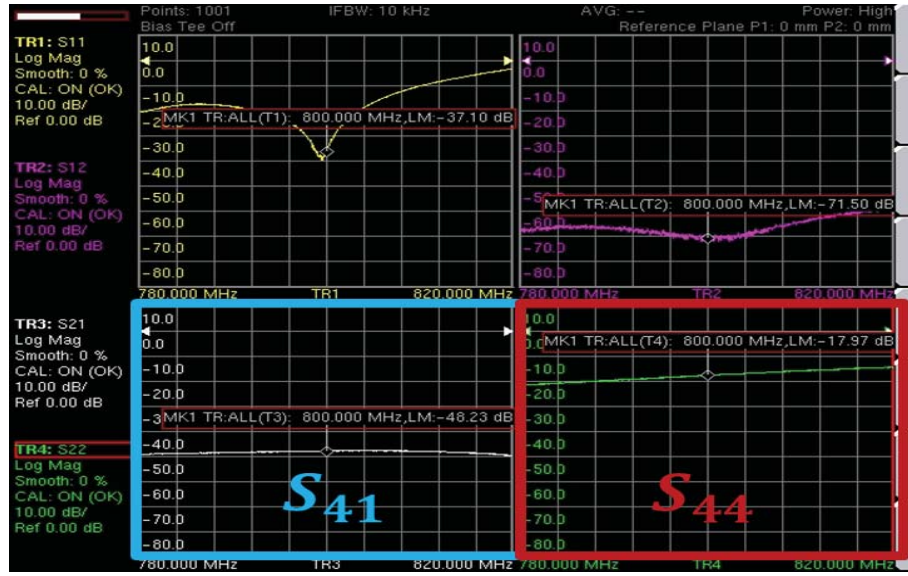
Şekil 4.24: Yalıtım ölçüm şeması S_{41} .



Şekil 4.25: İlerleyen dalga için yalıtım ölçüm düzeneği.



Şekil 4.26: İlerleyen dalga için yalıtım ölçüm esnasında alınan bir resim.



Şekil 4.27: İlerleyen dalga için yalıtım ölçümü.

4.1.4.2. Yansıyan Dalgalar için Bağdaştırıcı ve Yalıtım Ölçümleri

Bu çalışmada RF iletim hattının çıkış kapısından giriş kapısına yansıyan elektromanyetik dalganın, yönlü bağdaştırıcının üzerindeki bağdaştırıcı ve yalıtım parametreleri ölçümü alınmıştır.

Bağdaştırıcı Parametresi: S_{42}

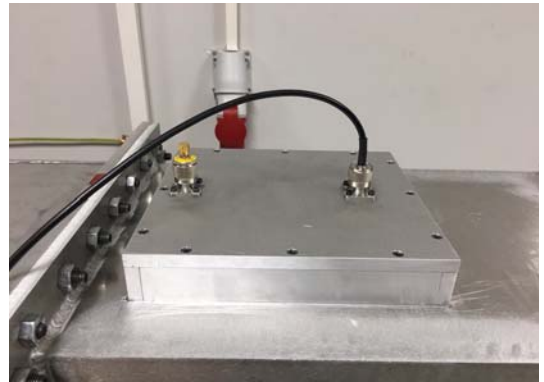
VNA'nın birinci kapısı, RF iletim hattının çıkış kapısına; VNA'nın ikinci kapısı, yönlü bağdaştırıcının yalıtım kapısına bağlanmıştır. Yönlü bağdaştırıcının bağdaştırıcı kapısına ve RF iletim hattının giriş kapısına gelen elektromanyetik dalgayı sönmülmendirmek için 50Ω direnç kullanılmıştır. Şekil 4.28'de ölçüm şeması, Şekil 4.29'da ölçüm düzeneği gösterilmiştir. Şekil 4.30'da yansıyan dalga için bağdaştırıcı ölçümü sırasında alınan bir resmi göstermektedir. Yansıyan dalga için bağdaştırıcı ölçüm sonucu Şekil 4.31'de verilmiştir.



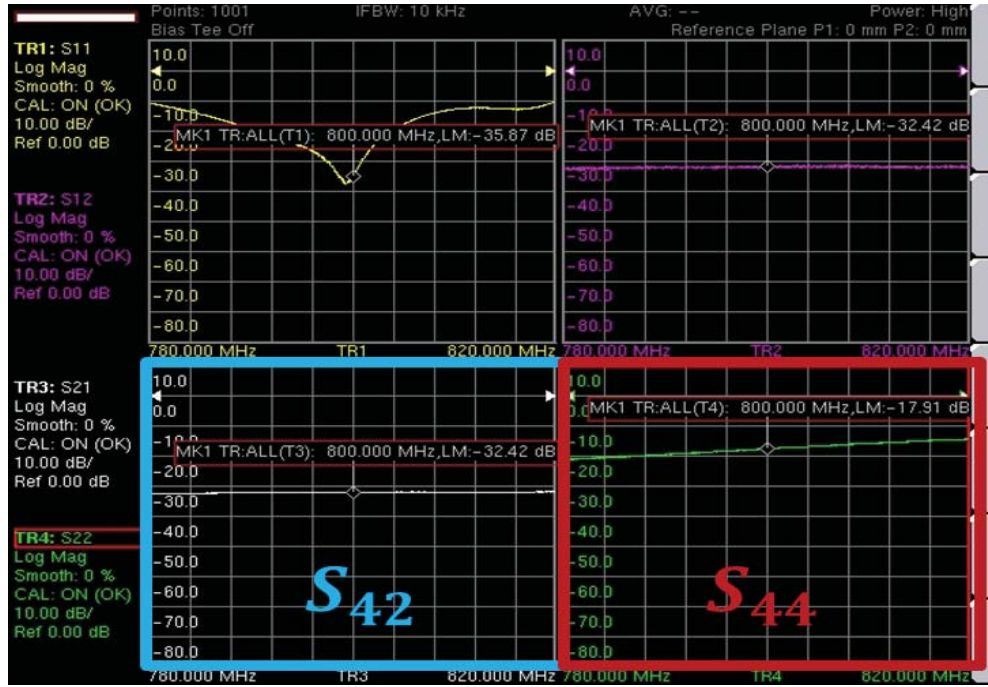
Şekil 4.28: Bağdaştırıcı ölçüm şeması S_{42} .



Şekil 4.29: Yansıyan dalga için bağdaştırıcı ölçüm düzeneği.



Şekil 4.30: Yansıyan dalga için bağdaştırıcı ölçüm esnasında alınmış bir resim.



Şekil 4.31: Yansıyan dalga için bağdaştırıcı ölçüm sonucu.

Yalıtım Parametresi: S_{32}

Yansıyan dalga için alınan bağdaştırıcı ölçümünden farklı olarak, VNA'nın ikinci kapısı, yönlü bağdaştırıcının bağdaştırıcı kapısına takılıp, yalıtım kapısına gelen elektromanyetik dalgayı sönmülendirmek için 50Ω direnç kullanılmıştır. Şekil 4.32'de ölçüm şeması, Şekil 4.33'te ölçüm düzeneği gösterilmiştir. Şekil 4.34'te yansıyan dalga için yalıtım ölçümü sırasında alınan bir resmi göstermektedir. Yansıyan dalga için yalıtım ölçümü sonucu Şekil 4.35'te verilmiştir.



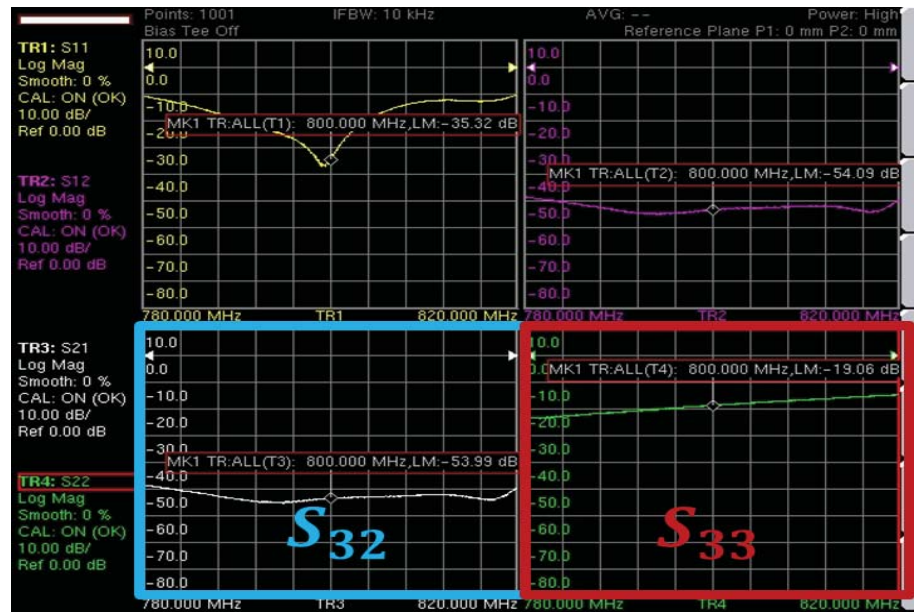
Şekil 4.32: Yalıtım ölçüm şeması S_{32} .



Şekil 4.33: Yansıyan dalga için yalıtım ölçüm düzeneği.



Şekil 4.34: Yansıyan dalga için yalıtım ölçümü.



Şekil 4.35: Yansıyan dalga için yalıtım ölçüm sonucu.

Özetle bu çalışmada tasarlanılan ve üretilen yönlü bağdaştırıcının hem ilerleyen hem de yansıyan dalgalar için bağdaştırıcı, yalıtım ve yönlülük parametreleri ölçülmüştür. Tüm parametrelerin değerleri Tablo 4.3'te belirtilmiştir.

Tablo 4.3: Yönlü bağdaştırıcının ölçüm sonuçları.

	İlerleyen Dalga	Yansıyan Dalga
Bağdaştırıcı:	-32.62 dB	-32.42 dB
Yalıtım:	-48.23 dB	-53.99 dB
Yönlülük:	15.61 dB	21.57 dB
Gücün:	% 0.054	% 0.057

Bu tablodaki sonuçlara göre, ilerleyen elektromanyetik dalganın gücünün %0.054'ünün örneklenebildiği (bağdaştırıcı), yansıyan elektromanyetik dalganın gücünün %0.057'sinin örneklenebildiği (bağdaştırıcı) gözlemlenmiştir. Ayrıca yansıyan dalganın, ilerleyen dalga gücünün ölçüldüğü bağdaştırıcı değerine etkisi -53.99 dB'dir. Bu değeri ilerleyen dalganın bağdaştırıcı değeriyle karşılaştırdığımızda (-32.62 » -53.99) yansıyan dalgadan gelen güç değeri önemsizdir. Aynı durum yansıyan dalga gücünün ölçüldüğü bağdaştırıcı değeri için de geçerlidir.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Dolaştırıcılar, RF hızlandırıcılarına güç sağlayan ve RF güç kaynak cihazlarını koruyan önemli bir pasif RF bileşenleridir. Bu nedenle dolaştırıcı tasarlamak ve üretmek, RF güç kaynak cihazları açısından kritik önemdedir. Bu çalışmada 800 MHz'de dolaştırıcı tasarımı, benzetimi, üretiminin gerçekleştirilmesi, dolaştırıcı içerisindeki manyetik alan dağılım ölçümleri, RF iletim hattı ve dolaştırıcı üzerindeki tüm sistemin S-parametre ölçümleri, 100 Watt'lık güç ölçümü, ayrıca RF iletim hattı için ilmek tipi yönlü bağdaştırıcı tasarımı, benzetimi ve S-parametre ölçümleri ile ilgili detayları verilmiştir.

RF dolaştırıcısının yapımı için genel bir süreçten geçilmiştir. İlk olarak RF dolaştırıcı tasarımının literatür araştırılması yapılarak teorik temel oluşturulmuş, sonrasında CST MW Studio ve CST EM Studio programları kullanılarak dolaştırıcı benzetimi işlemleri yapılmıştır. Üretilen dolaştırıcı yapısının iletim hattı üzerinden ölçümleri yapılarak benzetim sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. RF iletim hattı için ilmek tipi yönlü bağdaştırıcının tasarımı, üretimi ve ölçümleri de dolaştırıcı ile aynı süreç izlenerek tamamlanmıştır.

Üretilen dolaştırıcı yapıda, iki farklı şekilde ölçüm alınarak dolaştırıcının iç kısmındaki manyetik alan dağılımlarının gözlenmesi amaçlanmıştır. Bu ölçüm ile dolaştırıcı içerisinde oluşan manyetik alanın minimum, maksimum değerlerine ve dolaştırıcı içerisinde bulunan ferritlerin manyetik alan katkısına bakılmış, kalıcı mıknatıslar ve solenoidlere akım verilerek oluşturulan manyetik alan değerinin 1310 Gauss ile 1860 Gauss arasında olduğu gözlemlenmiştir. Ferritlerin manyetik alana katkısı ise 564 Gauss olarak hesaplanmıştır. Dolaştırıcının manyetik alan dağılım ölçümleri elde edildikten sonra dolaştırıcı ile daha önceden tasarlanan, üretilen farklı boyutlardaki dalga kılavuzları birleştirilerek 22 ayrı konfigürasyonda farklı RF iletim hattı oluşturulmuş ve S-parametre ölçümleri ayarlayıcılar ayarlanarak yapılmıştır. Oluşturulan RF iletim hatları üzerinde yapılan ölçümlerin sonuçlarına göre 21. RF iletim hattının en ideal S-parametre ölçümlerini verdiği gözlenmiştir. Bu S-parametre sonuçlarına göre iletim verimi %97,05 olarak hesaplanmış ve iletim hattı uzatılarak daha az kayıpla iletim sağlanma durumuna ve diğer S-parametre değerlerine bakılmıştır. İletim hattı uzatıldıkça S-parametre değerlerinin daha iyi sonuç verdiği gözlenmiştir.

S-parametre ölçümlerine göre belirlenen en ideal konfigürasyondaki RF iletim hattına, RF güç kaynağından 100 Watt'lık elektromanyetik güç verilerek hedeflenen kapıya iletilen güç ölçülmüş ve sonuçlar S-parametre ölçüm sonuçları ile karşılaştırılmıştır. İletimde bu sonuçlar arasında yaklaşık olarak %1'lik farklılık gözlenmiştir.

RF dolaştırıcı sistemine ek olarak, iletim hattından geçen gücün belirli bir miktarını ölçerek, iletim hattından geçen güç hakkında bilgi veren yönlü bağdaştırıcı (Directional Coupler) tasarlanmıştır. Hangi tür yönlü bağdaştırıcının üretilen RF iletim hattı için en uygun olduğu literatürde araştırılarak ilmek tipi yönlü bağdaştırıcı seçilip tasarlanmıştır. CST programı ile benzetim işlemi gerçekleştirilmiş, uygun S-parametre değerlerini veren tasarım parametrelerine göre üretilmiştir. Bu bağdaştırıcının RF iletim hattına montajı yapılarak S-parametre ölçümleri alınmıştır. S- parametre sonuçları, benzetim sonucundaki S-parametre değerleriyle karşılaştırıldığında bağdaştırıcı değerleri arasındaki farkın 1 dB'den daha az, yalıtım değerleri arasındaki farkın 5 dB'den daha az olduğu gözlenmiştir. Bununla birlikte üretilen yönlü bağdaştırıcının ilerleyen dalgalardaki gücün %0,054'ünü, yansıyan dalgalardaki gücün %0,057'sini örneklediği gözlenmiştir. Yönlülük parametresi ise 21,57 dB olarak hesaplanmıştır.

Bu çalışmada üretilen dolaştırıcının ferritler ve kalıcı mıknatıslar hariç diğer tüm parçaları Türkiye 'de üretilmiştir. Elde edilen deneyim, farklı frekans ve güç değerlerinde çalışan farklı özelliklere sahip dolaştırıcıların ve yönlü bağdaştırıcıların tasarlanmasına, ileride düşünülen veya düşünülecek olan hızlandırıcı tesislerinde ve diğer teknolojik alanlardaki RF uygulamaları için alt yapı oluşturmaya katkı sağlaması adına bir kazanç olarak düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Pozar D.M., 2012, *Microwave engineering 4th edition*, John Wiley & Sons, USA, ISBN: 978-0-470-63155-3.
- [2] Wolski A., 2011, Theory of electromagnetic fields, *CERN accelerator school CAS*, 8-17 June 2010, Ebeltoft Denmark, CERN, Creative Commons Attribution, 15-67.
- [3] Feynman R., Leighton R. and Sands M., 2016, *Feynman fizik dersleri cilt:2 elektromanyetizma ve madde*, ALFA, İstanbul, ISBN:978-605-171-343-4.
- [4] Fitzpatrick R., 2008, *Maxwell's equations and the principles of electromagnetism*, Infinity Science Press LLC, Hingham USA, ISBN:978-1-934015-20-9.
- [5] Engan H., 2006, *Waveguide propagation norwegian university of science and technology*, <https://tr.scribd.com/document/323319278/Waveguide-Propagation-pdf>, [Ziyaret Tarihi: 16 Mart 2019].
- [6] Balanis C.A., 2012, *Advanced engineering electromagnetics 2.nd edition*, John Wiley & Sons, USA, ISBN:978-0-470-58948-9.
- [7] Adam S.F., 1969, *Microwave theory and applications "Hewlett Packard"*, <http://uspas.fnal.gov/materials/MicrowaveTheory.pdf>, [Ziyaret Tarihi: 12 Nisan 2019].
- [8] Caspers F., 2011, RF engineering basic concepts s-parameters, *CERN accelerator school CAS*, 8-17 June 2010, Ebeltoft Denmark, CERN, Creative Commons Attribution, 67-95.
- [9] Doyal M. and Kumar A., 2015, S-parameter comparison of common source and common gate low noise amplifier, *International journal of computer applications*, 120, 15-18.
- [10] Rohde & Scharwz, 2014, *dB or not dB ?*, http://www.ab4oj.com/test/docs/rs_db.pdf, [Ziyaret Tarihi: 4 Nisan 2019].
- [11] Maskowitz B.M., 1991, *Hitchhiker's guide to magnetism*, http://www.irm.umn.edu/hg2m/hg2m_index.html, [Ziyaret Tarihi: 15 Nisan 2019].
- [12] Snelling E.C., 1969, *Soft ferrites properties and applications second edition*, ILIFFE Book, London.
- [13] Linkhart D.K., 2014, *Microwave circulator design second edition*, Artech House, Boston, ISBN:978-1-60807-583-6.
- [14] Kumar S., Shinde T.J. and Vasambekar P.N., 2013, Microwave synthesis and characterization of nanocrystalline Mn-Zn ferrites, *Advanced materials letters*, 4, 373-377.

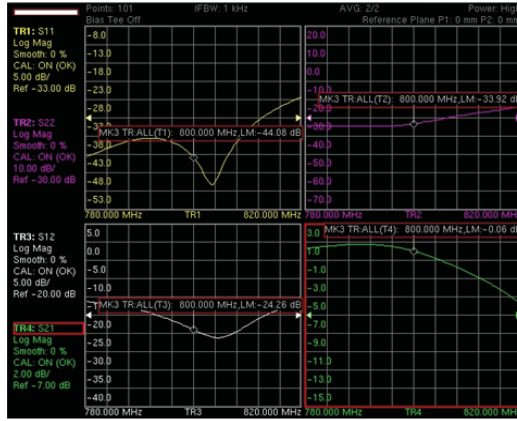
- [15] Gopalan E.V., Omari I.A., Malini K.A., Joy P.A., Kumar D.S., Yoshida Y. and Anonthoroman M.R., 2009, Impact of zinc substitution on the structural and magnetic properties of chemically derived nanosized manganese zinc mixed ferrites, *Science direct*, 321, 1092-1099.
- [16] Cruickshank D.B., 2011, *Microwave materials for wireless applications*, Artech House, Boston, ISBN:978-1-60807-092-3.
- [17] Yılmaz Dayanıklı, G., 2012, *Design and implementation of wideband stripline circulators*, Thesis (Master), Middle East Technical University.
- [18] Lox B. and Button K.J., 1962, *Microwave ferrites and ferrimagnetics*, McGraw-Hill Book Company, New York.
- [19] Valvo, 1989, *Circulator application note anv001*,
<https://valvo.com/wp-content/uploads/2017/12/CIRCULATOR.pdf>, [Ziyaret Tarihi: 19 Mart 2019].
- [20] Novamicrowave, 2014, *Understanding circulators & isolators nova microwave*,
<http://www.novamicro.com/understanding-circulator-and-isolaters.php>, [Ziyaret Tarihi:25 Mart 2019].
- [21] Chang K., 2005, *Encyclopedia of RF and microwave engineering*, John Wiley & Sons, New York, ISBN:978-0-47127-053-9.
- [22] Goldman A., 2010, *Modern ferrite technology 2nd edition*, Springer, New York, ISBN:978-0-387-28151-3.
- [23] Polder D., 1949, On the theory of ferromagnetic resonance, *Philosophical magazine series 5*, 40, 99-115.
- [24] Bosma H., 1964, On stripline Y-circulator at UHF, *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, 12, 61-72.
- [25] Fay C.E. and Comstock R.L., 1965, Operation of the ferrite junction circulator, *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, 13, 15-27.
- [26] Auld B.A., 1959, The synthesis of symmetrical waveguide circulators, *IRE transactions on microwave theory and techniques*, 7, 238-246.
- [27] Simon J.W., 1965, Broadband strip-transmission line Y-junction circulators, *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, 13, 335-345.
- [28] Green J.J. and Sandy F., 1974, Microwave characterization of partially magnetized ferrites, *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, 22, 641-645.
- [29] Çetinkaya H., Çağlar A., Çiçek C., Özbey A., Sunar E., Türemen G., Yıldız H., Yüncü A., Özcan E., Ünel G. and Yaman F., 2018, KAHVE laboratory RF circulator and transmission line project, *American institute of physics*, 1935, 070002-1 - 070002-4.

- [30] Matzner H. and Shimshon L., 2002, *Basic RF technic and laboratory manual*, https://www.hit.ac.il/upload/engineering/experiment_7_-_rflaboratory5power.pdf, [Ziyaret Tarihi: 17 Mayıs 2019].
- [31] Ishibashi H., Kurihara M., Tahara Y., Yukawa H., Owada T. and Miyashiya H., 2015, Waveguide loop-type directional coupler using a coupling conductor with protuberances *IEEE 2015 european microwave conferance*, 1026-1029.
- [32] Jorgesen D. and Marki C., 2012, *Directivity and VSWR measurements understanding return loss measurements*, https://www.markimicrowave.com/assets/appnotes/directivity_and_vswr_measurements.pdf, [Ziyaret Tarihi:25 Mayıs 2019].
- [33] Linac4 Group, 2011, *Market survey technical description waveguide junction circulators for Linac4*, CERN, Switzerland.

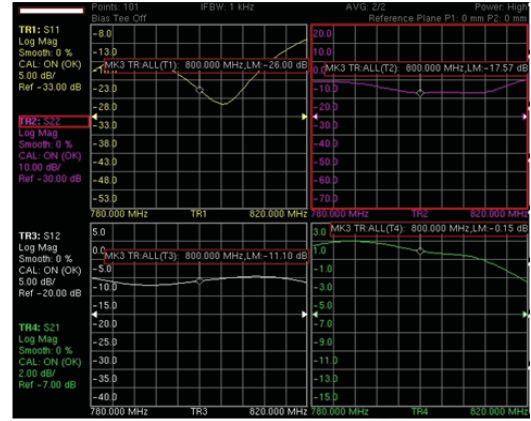
EKLER

EK 1. S-Parametre Sonuçları

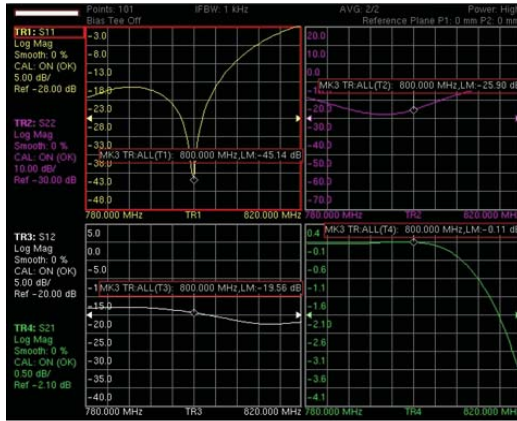
Tablo 4.1'deki S-parametre Sonuçlarının Görüntüleri



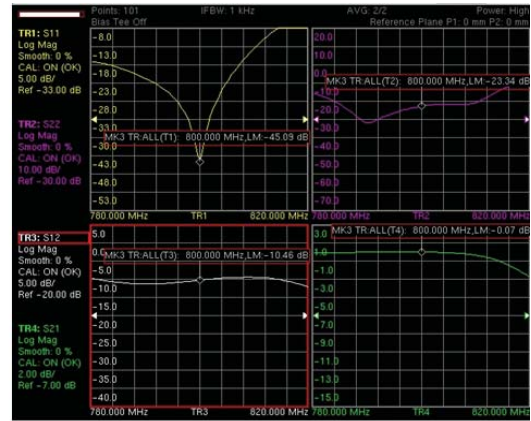
Düzenek: 1



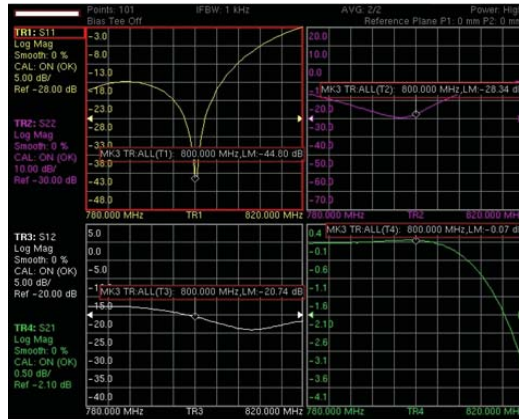
Düzenek: 2



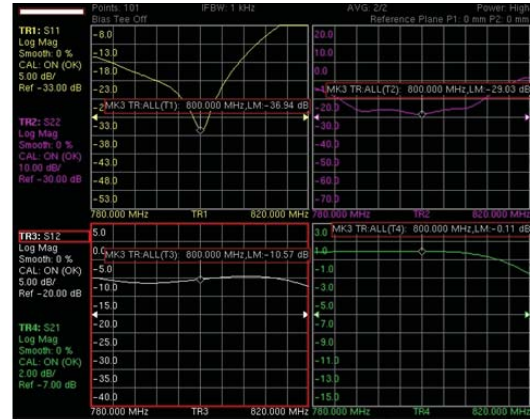
Düzenek: 3



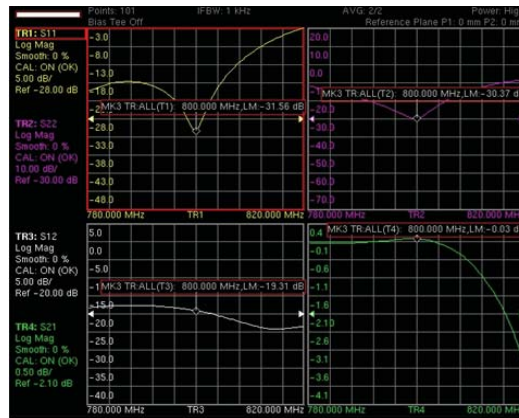
Düzenek: 4



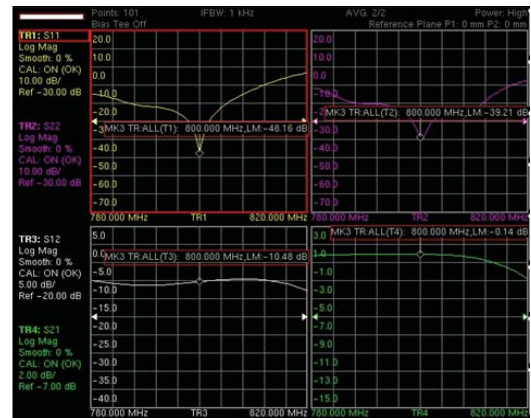
Düzenek: 5



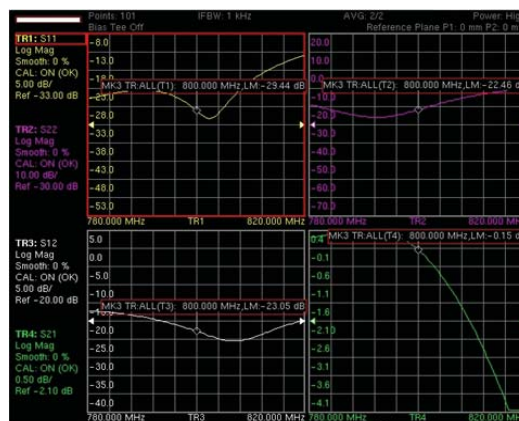
Düzenek: 6



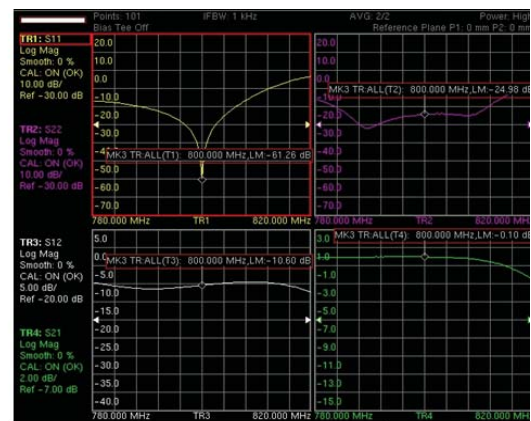
Düzenek: 7



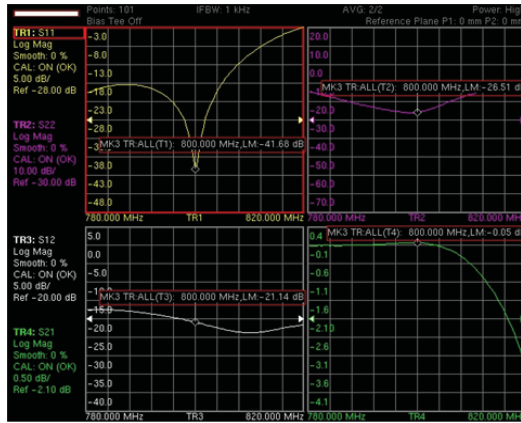
Düzenek: 8



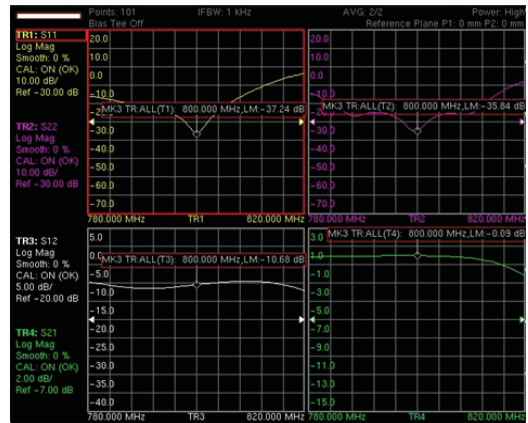
Düzenek: 9



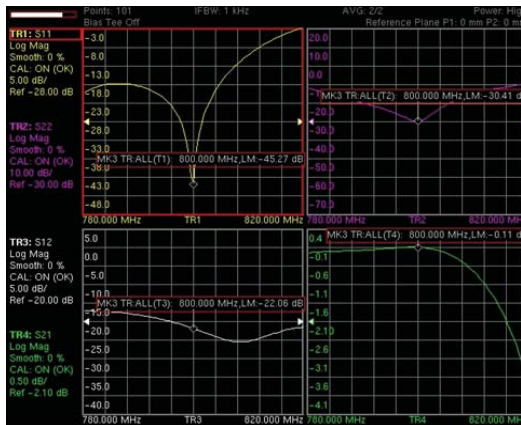
Düzenek: 10



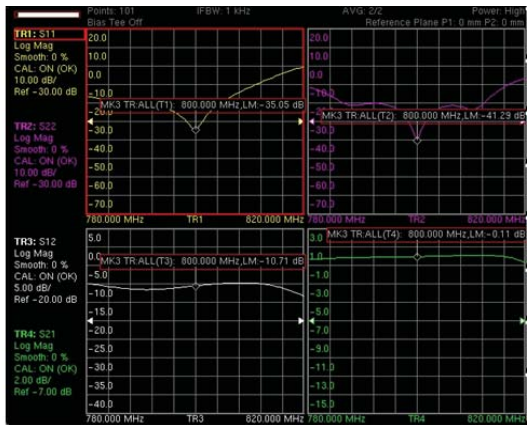
Düzenek: 11



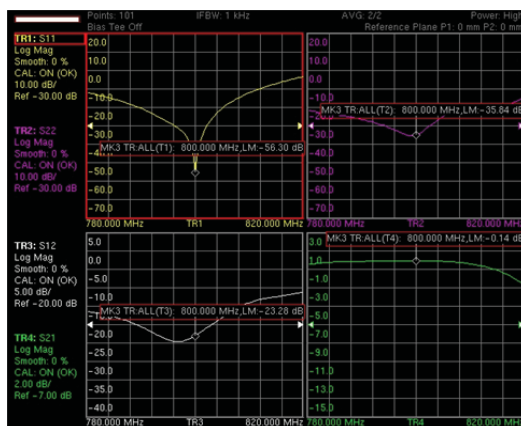
Düzenek: 12



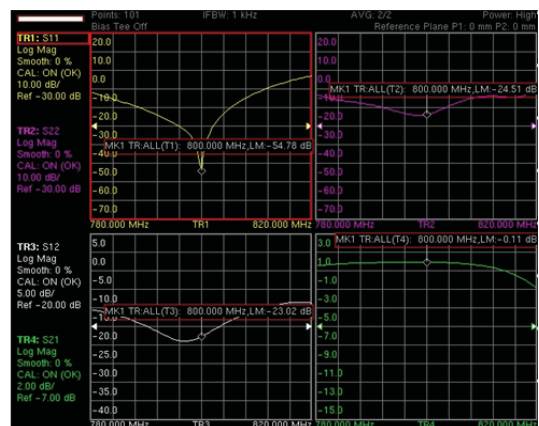
Düzenek: 13



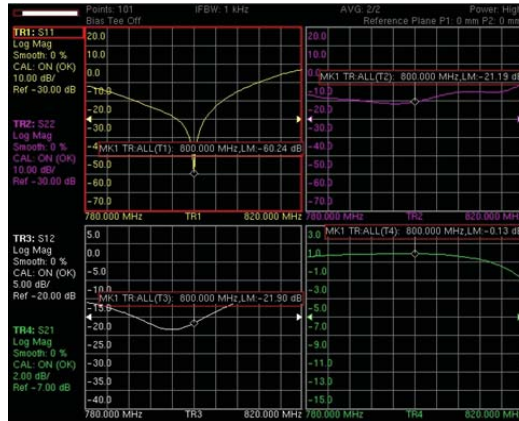
Düzenek: 14



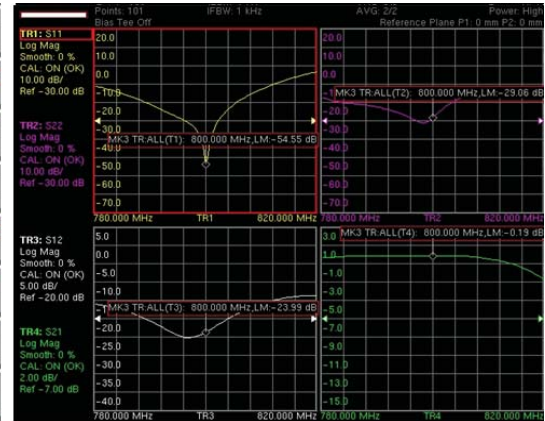
Düzenek: 15



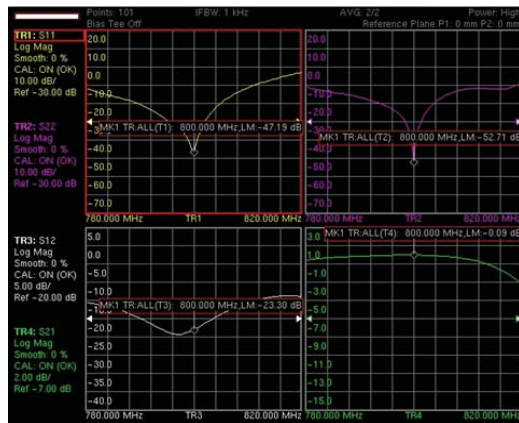
Düzenek: 16



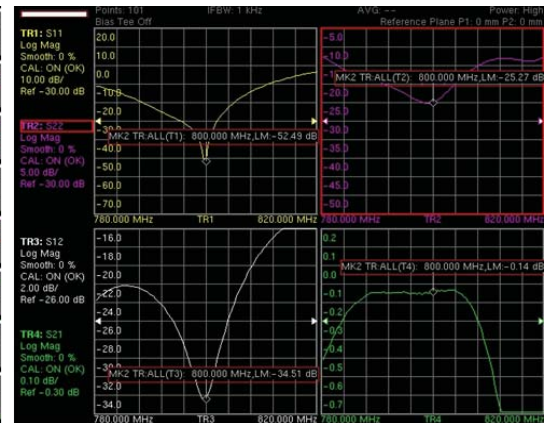
Düzenek: 17



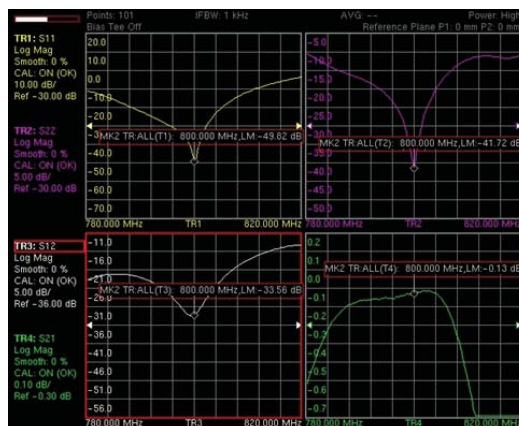
Düzenek: 18



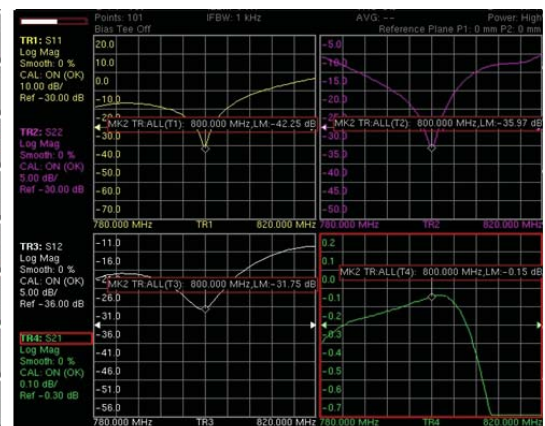
Düzenek: 19



Düzenek: 20



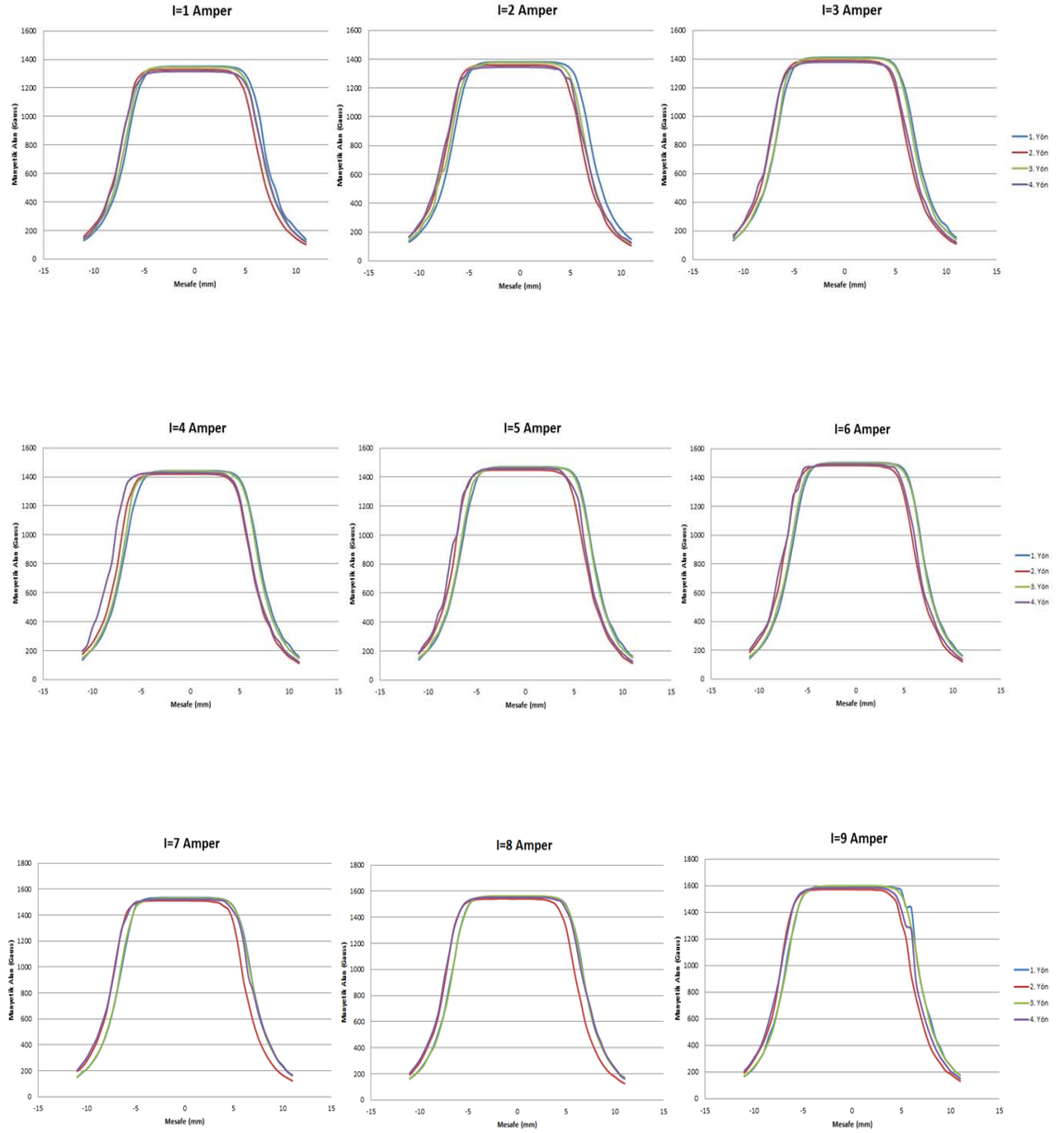
Düzenek: 21

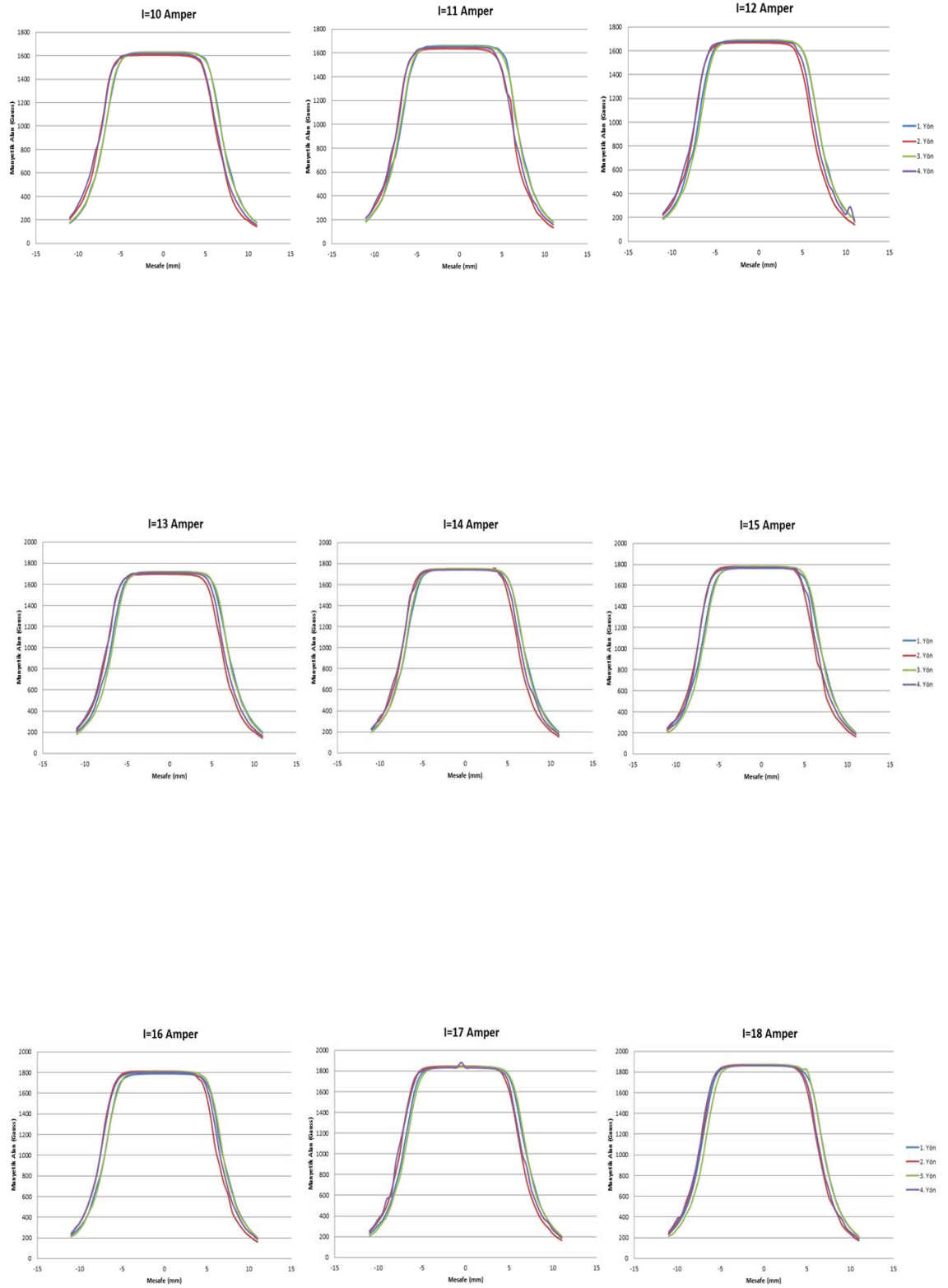


Düzenek: 22

EK 2. Manyetik Alan Dağılımları

Kalıcı mıknatıslar ve solenoidlerin bulunduğu sistemde solenoidlere akım verilerek manyetik alan dağılımları aşağıdaki gibidir:





ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Oğuz KOÇER
Doğum Yeri	İstanbul - Şişli
Doğum Tarihi	30.08.1990
Uyruğu	☒ T.C. ☐ Diğer:
Telefon	0507 809 65 66
E-Posta Adresi	oguzkocer34@gmail.com
Web Adresi	http://



Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Fakülte	Fen Fakültesi
Bölümü	Fizik
Mezuniyet Yılı	2016

Yüksek Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Enstitü Adı	Fen Bilimleri
Anabilim Dalı	Fizik Anabilim Dalı
Programı	Yüksek Enerji ve Plazma Fiziği Programı
Mezuniyet Tarihi	2019

Makale ve Bildiriler	
Makaleler	
Bildiriler	
Koçer O., Oğur S., Adıgüzel A., Özcan V.E., 2018, Design and construction of button type beam position monitor, Turkish physical society 34. international physics congress, 5-9 September 2018 Bodrum, Turkey, 506	