

ANKARA ÜNİVERSİTESİ
HIZLANDIRICI TEKNOLOJİLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SÜPERİLETKEN RF KAVİTELER İÇİN YÜKSEK
RF GÜÇ GİRİŞİ VE HOM KUPLÖR TASARIMI

SELÇUK ÜSTÜNDAĞ

HIZLANDIRICI TEKNOLOJİLERİ ANABİLİM DALI

ANKARA

2024

Her hakkı saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

SÜPERİLETKEN RF KAVİTELER İÇİN YÜKSEK RF GÜÇ GİRİŞİ VE HOM KUPLÖR TASARIMI

Selçuk ÜSTÜNDAĞ

Ankara Üniversitesi Hızlandırıcı Teknolojileri Enstitüsü
Hızlandırıcı ve Dedektör Teknolojileri Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Hatice YILDIZ

Her geçen gün gereksinimi artan hızlandırıcı teknolojisi, başta yüksek enerji fiziği olmak üzere; sağlık, malzeme, kimya, uzay çalışmaları gibi pek çok endüstride kullanılmaktadır. Hızlandırıcı sistemler birçok alt sistemden oluşmaktadır. Bunlar, elektromanyetik alan (RF alan) içeren metalik bölmeli süperiletken veya normal iletken yapıdan oluşturulmuş sistemler, odaklayıcı sistemler, vakum, destek, soğutma, kontrol sistemleridir. Metalik iletken yapılara kavite adı verilir. Parçacık demetleri elektrik alan tarafından ileri doğru hızlandırılarak itilir ve kavite hücreleri içerisinde yol alır. Bazen geçen parçacık (elektron, proton vb.) kavite içerisinde enerji alabilir veya kavite alanına enerji verebilir. Parçacıkların hızlanarak geçtiği bir RF kavitede istenmeyen (parazit) olarak uyarılan durumlara Yüksek Mertebe Modlar (HOM) denir; HOM'lar demet dinamiği için tehlikeli olduğundan istenilmez fakat kavite içerisinde RF alanından kaynaklı hızlanan parçacığın olduğu durumlarda HOM'ların demet yolundan dışarı alınması için farklı kuplörler kullanılmaktadır. Ayrıca kavite içerisine RF alanlar, RF Güç girişi denilen, demet yolu üzerine monte edilen RF güç girişleri sayesinde verilmektedir. Bu tezde, süperiletken RF kavite için Güç Girişi ve HOM Kuplör Tasarımları CST ve Superfish/Poisson kodları kullanılarak yapılmıştır. Tasarımlar yapıldıktan sonra kavite hücreleri içerisindeki alanların davranışları incelenerek optimize tasarımlar elde edilmiştir.

Ocak 2024, 59 sayfa

Anahtar Sözcükler: RF güç kuplörü, HOM, SRF Kavite, demet yolu, parazit modlar

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

HOM AND HIGH RF POWER INPUT COUPLER DESIGN FOR SUPERCONDUCTING CAVITIES

Selçuk ÜSTÜNDAĞ

Ankara University Accelerator Technologies Institute

Supervisor: Prof. Dr. Hatice YILDIZ

We have to use accelerator technologies. The use of this technology is increasing day by day. Especially in high energy physics. Accelerator Technologies is used by many industries such as health, materials, chemistry and space studies. Accelerator systems consist of many sub-systems. These are systems made of superconducting or normal conductive structure with metallic partitions containing electromagnetic field (RF field), focusing systems, vacuum, support, cooling and control systems. Metallic conductive structures are called cavities. Electromagnetic fields limited to certain regions are needed to accelerate the particles passing through the cavity. Particle beams are accelerated and pushed forward by the electric field and travel within the cavity cells (electrons, protons, etc.). In some cases, the passing particle can receive energy from within the cavity or give energy to the cavity area. Situations excited as unwanted (interference) in an RF cavity through which particles accelerate are called Higher Order Modes (HOM); HOMs are undesirable because they are dangerous for the beam dynamics, but in cases where there are particles accelerating due to the RF field in the cavity, HOMs are inevitable and different couplers are used to remove the formed HOMs from the beam path. Additionally, RF fields are introduced into the cavity through RF power inputs mounted on the beam path, called RF Power inputs. In this thesis, High RF Power Input and HOM Coupler Designs for superconducting RF cavities were made using CST and Superfish/Poisson codes. After the designs were made, the behavior of the areas within the cavity cells was examined and optimized designs were obtained.

January 2024, 59 pages

Key Words: RF power coupler, HOM, SRF Cavity, Beamline, parasite modes

TEŞEKKÜR

Çalışma sürecimde bana her türlü yol gösteren ve büyük destek olan değerli danışman hocam Prof. Dr. Hatice YILDIZ'a sonsuz teşekkür ederim. Her konuda beni destekleyen ve her zaman yanımda olan aileme, ablam Nur Üstündağ'a, dayım İbrahim Sünger'e, tez sürecimde bana her konuda destek olan Sertaç Sümer'e, her zaman desteğini esirgemeyen arkadaşlarıma, enstitümüzün kıymetli personeline teşekkürlerimi sunarım.

Selçuk ÜSTÜNDAĞ

Ankara, Ocak 2024

İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEZ ONAY SAYFASI

ETİK.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
1.1 Elektromanyetik Spektrum.....	3
1.2 Hızlandırıcılara Giriş.....	5
1.2.1 Lineer hızlandırıcılar	6
1.2.1.1 Elektron tabancası	6
1.2.1.2 Eğici magnetler	7
1.2.1.3 Odaklayıcı yapılar	8
1.2.1.4 Süperiletken radio frekans kavite	8
1.2.1.5.Demet kapağı (Beam dump)	9
1.2.1.6 Deney istasyonları	9
1.2.2 Dairesel hızlandırıcılar	10
1.2.3 SRF Kavite Modları.....	13
1.2.4 Dalga Kılavuzları	14
1.2.5 Süperiletken Kavitelerde RF Güç Girişi ve HOM kuplörleri.....	24
1.2.5.1 Yüksek RF güç giriş kuplörleri.....	24
1.2.5.1.1 Koaksiyel yüksek RF giriş kuplörleri.....	24
1.2.5.1.2 Dalga kılavuzu yüksek RF giriş kuplörleri.....	25
1.2.5.2 Yüksek dereceli mod kuplörleri.....	26
2. KULLANILAN SİMULASYON PROGRAMLARI	28
2.1 Computer Simulation Technology (CST)	28
2.2 Poisson / Superfish	31
3. YÜKSEK RF GÜÇ GİRİŞİ VE HOM KUPLÖR TASARIMI VE MODELLEME ÇALIŞMALARI	32
3.1 Yüksek Güç Girişi Tasarımı	32
3.1.1 RF kuplör tasarım ve modelleme sonuçları.....	35
3.2 Yüksek Mertebe Mod Kuplörleri	46
3.2.1 9-Hücrelik kavite sisteminde HOM'ların tasarımı ve analizi	47
4. SONUÇ VE TARTIŞMA.....	55
KAYNAKÇA	56
ÖZGEÇMİŞ.....	59

SİMGE VE KISALTMALAR

RF	Radyo Frekansı
SEL	Serbest Elektron Lazeri
EM	Elektromanyetik Dalga
RADAR	Radio Detecting And Ranging
LINAC	Lineer Accelerator
eV	Elektron Volt
MeV	Mega elektron volt
T	Periyot
Hz	Hertz
MHz	Mega Hertz
e.m.k	Elektromotor kuvveti
TE	Transverse Electric
TM	Transverse Magnetic
CST	Computer Simulation Technology
EDA	Electronic Design Automation
EMC	Electromagnetic Compatibility
EMI	Elektromagnetic Interference
mm	Milimetre
K	Kelvin
CW	Continuous Wave
VSWR	Voltage Standing Wave Ratio
dB	Desibel
f	Frekans
CERN	The European Organization for Nuclear Research
DESY	Deutsches Elektronen-Synchrotron
SLAC	Stanford Linear Accelerator Center
UNESCO	The United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
KeV	Kiloelektronvolt
GeV	Gigaelektronvolt

DC	Direct Current
SRF	Superconducting Radio Frequency
HOM	Higher Order Modes
LHe	Liquid Helium
CST	Computer Simulation Technology
e	Elektron



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 Elektromanyetik Spektrum.....	4
Şekil 1.2 Lineer Hızlandırıcı Bileşenleri.....	6
Şekil 1.3 Wiggler ve Undulator	8
Şekil 1.4. Dünyadaki Hızlandırıcı Tesisleri.....	10
Şekil 1.5. Dairesel Hızlandırıcı Bileşenleri.....	11
Şekil 1.6 Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi	12
Şekil 1.7 Alman Elektron Sinkrotronu FLAH / PETRA III.....	13
Şekil 1.8 TM Dalgalar.....	15
Şekil 1.9 TE Dalgalar.....	20
Şekil 1.10 Dalga Kılavuzu Yüksek RF Giriş Kuplörü.....	26
Şekil 2.1 CST Uygulama Alanları.....	29
Şekil 2.2 Parçacık Dinamiği.....	30
Şekil 2.3 Hızlandırıcı Bileşenleri.....	30
Şekil 2.4 Birim Parametrelerin Belirlenmesi.....	30
Şekil 3.1 1.5 Hücreli RF Güç Giriş Kuplörü.....	35
Şekil 3.2 Yüksek Güç Giriş Kuplör İç Uzunlukları.....	36
Şekil 3.3 Yüksek Güç Giriş Kuplör Uzunlukları.....	36
Şekil 3.4 Kavite ve Kuplör Üzerinde Elektrik Alan Dağılımları.....	37
Şekil 3.5 1.299 GHz Çalışma Frekansında Superfish/Poisson İle Kavitede Elektrik Alan Dağılımları	38
Şekil 3.6 Demet Yolunda z-Ez Grafiği	38
Şekil 3.7 Kavite ve Kuplör Üzerinde Elektrik Alan Dağılımları.....	38
Şekil 3.8 Kavite ve Kuplör Üzerinde Manyetik Alan Dağılımları.....	39
Şekil 3.9 1.5 Hücrelik Kavitenin Manyetik Alan Dağılımları.....	40
Şekil 3.10 9 Hücrelik Süperiletken Kavitede Yüzey Akımları.....	40
Şekil 3.11 İki Bağlantılı Bir Hat.....	41
Şekil 3.12 Şekil 3.12 İki Bağlantılı Mikrodalga Ağı.....	43
Şekil 3.13 S_{11}	44
Şekil 3.14 S_{22}	44
Şekil 3.15 S_{21}	45
Şekil 3.16 S_{12}	46

Şekil 3.17 Tasarlanan L Tipi Yüksek Mertebe Kuplörün 2 Boyutlu Kesit Alanı.....	50
Şekil 3.18 Tasarlanan L Tipi Yüksek Mertebe Kuplörün 2 Boyutlu Yan Kesit Alanı..	51
Şekil 3.19 Tasarlanan I Tipi Yüksek Mertebe Kuplörünün 2 Boyutlu Kesit Alanı.....	52
Şekil 3.20 Tasarlanan I Tipi Yüksek Mertebe Kuplörün 2 Boyutlu Yan Kesit Alanı...	53
Şekil 3.21 9 Hücreli Kavite.....	54



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1 Koaksiyel Radyo Frekans Kuplör Avantaj ve Dezavantajları.....	25
Çizelge 1.2 Dalga Kılavuzu Radyo Frekans Kuplör Avantaj ve Dezavantajları.....	26
Çizelge 3.1 CST’de Çalıştırılan 15 Mod.....	49
Çizelge 3.2 CST Programında Hesaplamalar.....	54



1. GİRİŞ

Günlük yaşantımızda hızlandırıcı teknolojileri ile birçok alanda karşılaşılmaktadır. Başta parçacık fiziği olmak üzere özellikle sağlık alanında hızlandırıcı teknolojinin önemi her geçen gün daha fazla anlaşılmaktadır. Örneğin, hastanelerde kullanılan bilgisayarlı tomografi cihazlarında lineer hızlandırıcı teknolojisi kullanılmaktadır. Bu sebeple dünyada birçok ülkede hızlandırıcı tesisleri bulunmakta ve çalışmalarını sürdürmektedirler. Başta Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi (CERN) ve Alman Elektron Sinkrotronu (DESY) olmak üzere bu tesislerde parçacık demetleri doğrusal veya dairesel yörüngelerde hızlandırılmaktadır. Tesislerdeki hızlandırıcıların bazılarında teknoloji ve temel bilim araştırmaları için güçlü yoğunlukta ışık kaynağı veya lazer elde edilmektedir. Güçlü yoğunlukta ışık oluşturulmasının amacı, bazı bilimsel sorulara cevap bulmak içindir, örneğin, bir virüs yapısı nasıl görülebilir? Kapalı bir sistemin içi 3 boyutlu nasıl görüntülenebilir? Buna benzer soruların cevabını bulmak için hızlandırıcı tesislerine ve hızlandırıcı sistemlerine ihtiyaç vardır.

Hızlandırıcı teknolojileri en yaygın sağlık alanında kullanılmaktadır. Daha verimli aşılar nasıl üretilebilir veya virüs gibi mikroorganizma yapıları nasıl görüntülenebilir? Bunun gibi daha birçok sorunun cevabının bulunması için güçlü yoğunlukta ışık kaynağına ihtiyaç vardır. Bilim insanları biyolojik moleküllerin 3 boyutlu yapısını incelemek için X-Işını serbest elektron lazeri (SEL) kullanmaktadır. Bir cismin görülmesi için de ışık kaynağına ihtiyaç vardır. Işık kaynağının (örneğin güneş) o cisme çarpması sonrasında görme gerçekleşmektedir. X-Işını SEL ile de bu şekilde görüntüleme gerçekleştirilmektedir. Hızlandırıcılarda ilk olarak elektronlar (veya proton) üretilir ve ışık hızına yakın bir hıza kadar hızlandırılır. Yüksek enerji seviyesine ulaştıktan sonra hızlandırıcı sistemlerinde kullanılan magnetler tarafından uyarıldıktan sonra elektronlar aşağı-yukarı salındırma adı verilen salınım yapmaya zorlanır, bu durum da onların enerjilerini ultra parlak ışın şeklinde serbest bırakmalarına neden olur. Elektron atıldıktan sonra geriye sadece ışın kalır ve bu ışınlar deney odalarına incelenmek üzere dedektörlere gönderilir. Örneğin buralarda görüntülenme gerçekleştirilebilir ve 3 boyutlu moleküler yapıyı ortaya çıkartılır.

Maddelerin hücre içine girmesi, hücrenin dışına taşınması veya mikroorganizmaların üzerinde etkilerinin görülmesi amacıyla yeni aşıların geliştirilmesi için SEL sistemleri kullanılmaktadır. Bu SEL ışık kaynağı hızlandırıcı teknolojisi ile elde edilmektedir. Elde edilmeye çalışılan ışık farklı dalga boylarında olabilir. Dalga boylarına göre çeşitli uygulama ve çalışmalar yapılmaktadır.

Sağlık ve tıp alanında hızlandırıcı teknolojilerinin gelişimi 1895'te Wilhelm Roentgen tarafından X-Işınlarının bulunmasına dayanmaktadır. 1896'da Amy Colbert, Leopold Font ve Victor de Pina X-Işınlarını tümör tedavisinde kullanmaya başlamışlardır. İlk doğrusal hızlandırıcı 1928'de Rolf Widerøe tarafından tasarlanmış ve ilk kez radyoterapi için elektron doğrusal hızlandırıcısı 1953 yılında kullanılmıştır. Dünyada radyoterapi için elektron lineer hızlandırıcılarının kullanımı oldukça yaygındır. 2010 yılından itibaren radyoterapi için kullanılan proton hızlandırıcılarının sayısında da önemli artış olmuştur.

Hızlandırıcılar, 2020 yılında tüm dünyada görülen COVID-19 virüsü yapısındaki proteinleri incelemek amacıyla da kullanılmıştır. Bilim insanları, COVID-19'u durdurabilmek veya tedavisini bulabilmek amacıyla COVID-19 hastalığına neden olan virüsün atomik yapısını ve davranışını Amerika Birleşik Devletleri'nde bulunan Stanford Linear Accelerator Center (SLAC)'da incelemişlerdir. Ayrıca dünyadaki birçok hızlandırıcı merkezlerinde de bu alanda çalışmalar yapılmıştır. Birleşik Krallık'ta bulunan Diamond Light Source'da COVID-19 virüsünün bir insan hücresine fiziksel olarak nasıl girdiği ve aşılardan sonrası virüs komplikasyonlarının nasıl ortaya çıktığını anlamak için deneyler yapılmıştır. Burada hızlandırıcı sistemin demet yolunda ilerleyen parçacıkların yaydığı yoğun X-Işınları kullanılmıştır. Proteinlerin atomik düzeyde 3 boyutlu yapısı oluşturulmuş ve bu görüntülenme sayesinde virüsün atomik yapısı anlaşılmış, hastalığın önlenmesi ve tedavi edilmesi amacıyla aşıların geliştirilmesi sağlanmıştır (Diamond 2020).

Son yıllarda birçok ülkenin sınır güvenliğinde de hızlandırıcı teknolojisi kullanılmaktadır. X-Işın teknolojisinin kullanıldığı X-Işını "Kargo Tarayıcılar" hem zaman hem de yön açısından fayda sağlamakta olup X-Işınları sayesinde yüklü konteyner ve ağır ticari

araçların iç kısımları görüntülenmekte, kaçakçılık ve güvenlik açısından ekiplere kolaylık sağlamaktadır.

Hızlandırıcılar günümüzde gıdadan tıba, uzay çalışmalarına, robot sanayiinden, nükleer çalışmalara birçok alanda yaygın şekilde kullanılmakta ve her geçen gün teknolojik gelişmeler sayesinde hızlandırıcı sistemler ve altyapısındaki bileşenler ayrı ayrı büyük önem kazanmaktadır.

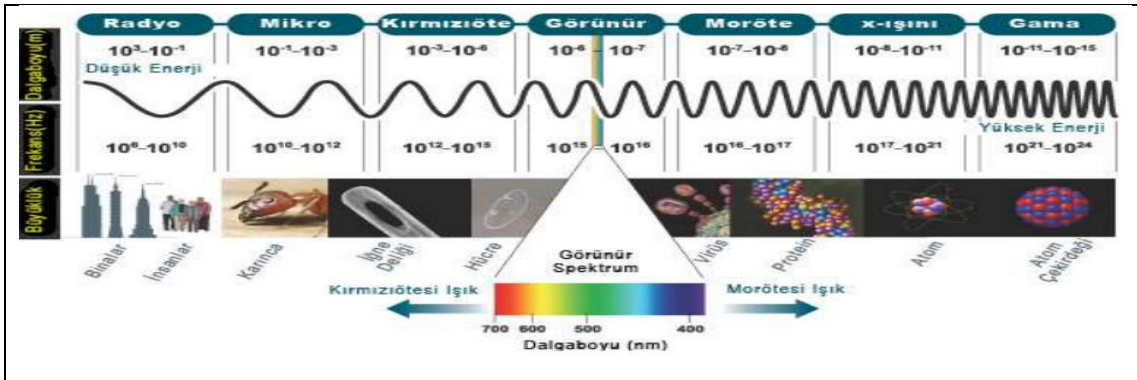
1.1 Elektromanyetik Spektrum

Günlük yaşantımızda birçok cihazda elektromanyetik (EM) dalgalar kullanılmaktadır. Örneğin cep telefonu ile bir arama yaptığımızda elektronların hareketiyle ortaya çıkan radyo dalgaları sayesinde konuşma gerçekleştirebiliyoruz. Cep telefonu ile konuşurken sesimiz, telefonumuzdaki mikrofona iletilir. Sensörler ile analog sinyal örneğin sesimiz dijital sinyale dönüştürülür. Cep telefonumuzun içindeki anten bunları alır ve EM dalgalar sayesinde iletir. Bu antende ileri geri giden elektronlar vardır. Bu hareketler radyo dalgaları olarak adlandırılır. Mobil haberleşmede radyo dalgaları uzak mesafelere iletilmez. Çevresel faktörler engeller. Bu sorunları engellemek için baz istasyonları kurulmuştur. Şekil 1.1’de gösterilen radyo dalgaları mobil haberleşme dışında askeri teknolojilerde de kullanılmaktadır. İkinci Dünya Savaşı ile başlayan radar teknolojisi günümüzde çok kapsamlı ve ileri düzeydedir. Radarlarda kullanılan radyo dalgaları sayesinde uzakta bulunan nesnelerin detayı bilinmeden tespit edilebilmesi sağlanmıştır. Radar cihazları EM dalgalar ile nesnelerin konumunu belirleyen cihazlardır ve ismi İngilizce “Radio Detecting And Ranging” harflerinin kısaltılmasından gelmektedir. Türkçe’ye Radyo Hedef Algılama ve Menzil Tayini olarak çevrilmiştir. Hatta bu dalga boyları kullanılarak farklı çeşitte ve amaçta radarlar tasarlanmıştır. Bu ifade EM dalgaları yansıtıcı maddelerin varlığını algılayan, bunların yön, menzil, rotasını, yüksekliğini ve ayrıca hızını da belirleyebilen, ölçebilen elektronik cihazları ifade etmektedir. Bir radar cihazı, gece karanlıkta da yayılabilen ve görüş mesafesinin az olduğu sis ya da bulutların içinden engelsiz ilerleyebilen EM dalgalar sayesinde büyük menzillerde, kötü hava

koşullarında ya da karanlık sebebiyle insan gözünün seçemeyeceği havada, denizde ve başka konumlardaki araçların konumlarını tespit edebilir (Radartutorial 2023).

İkinci Dünya Savaşı sırasında hayatımıza daha çok giren EM dalgalar sonraki yıllarda birçok alanda kullanılmaya başlanmıştır. Avrupa'da bulunan dünyanın en büyük hızlandırıcı laboratuvarı olan CERN'ün kurulmasına zemin hazırlamıştır. İkinci Dünya Savaşı ve sonrasında Avrupa'da bilim dünya standartlarından gerideydi. Atom ve çekirdek fiziği çalışan bazı bilim insanları, Avrupa'da çekirdek fiziği laboratuvarı kurmayı hayal etmiştir. Fransa'da Pierre Auger, Raoul Dautry, ve Lew Kowarski; Danimarka'da Niels Bohr ve İtalya'da Edoardo Amaldi bu öncüler arasındadır. Böyle bir laboratuvar, Avrupalı bilim insanlarını birleştirmenin yanı sıra nükleer fizik tesislerinin artan maliyetlerini paylaşmalarına da olanak tanımıştır.

Louis de Broglie, 1949'un sonlarında Lozan'da yapılan Uluslararası Avrupa Kültür Konferansı'nda (UNESCO) özel bir Avrupa laboratuvarının kurulması üzerine ilk resmi öneriyi getirmiştir. 1950'de Floransa'da yapılan 5. UNESCO Genel Konferansı'nda ikinci bir hamle ile Amerikalı fizikçi ve Nobel ödüllü Isidor Rabi, UNESCO'ya "uluslararası bilimsel iş birliğini artırmak amacıyla bölgesel araştırma laboratuvarının oluşumuna yardımcı destek olmak ve teşvik etmek" yetkisi veren bir karar önermiştir. UNESCO'nun 1951'de Fransa, Paris'teki toplantısında, Avrupa Nükleer Araştırma Konseyi'nin kurulması için ilk karar onaylanmıştır. Bu karardan 2 ay sonra 11 ülke geçici konseyini kuran bir ortaklık anlaşması imzalamış ve CERN kurulmuştur (CERN 2023).



Şekil 1.1 Elektromanyetik spektrum

1.2 Hızlandırıcılara Giriş

Çevremizde bulunan örneğin bina, ağaç vb. çoğu nesne görünür ışık aralığında görülebilmektedir. Ancak, daha küçük Deoxyribonucleic Acid (DNA) molekülü veya atom yapılarını incelemek istediğimizde, ultraviyole ve X-Işın bölge aralığı kullanılmaya başlanmaktadır. Bu ışımayı elde etmemiz için parçacık hızlandırıcıları kullanılmaktadır.

Atom çekirdeği, 1911 yılında Ernest Rutherford tarafından keşfedilmiştir. 1924 yılında Gustav Ising parçacıkları düzenli olarak salınan bir elektrik alanda tutan sürüklenme tüpü (drift tube) ile bir hızlandırıcı konsepti yayınlamış fakat konsepti uygulamalı olarak gösterememiştir. Sürüklenme tüpleri ardışık olarak gelen voltaj (atmalı) aralıkları sırasında hızlanan alanlar üretmektedir (Wangler 2011).

1927'de Aachen Üniversitesi'nde Norveçli yüksek lisans öğrencisi Rolf Widerøe, Ising'in 1924 yılındaki hızlandırıcı konusundaki yayını üzerine çalışmıştır. Widerøe, kıvılcım aralığını Alternatif akım osilatörle değiştirerek Ising'in içeriğini basitleştirmiştir. Widerøe doktora tezini iki hızlanan boşluk arasında bir sürüklenme tüpüne sahip basit bir lineer hızlandırıcı (LINAC) yaparak göstermiştir.

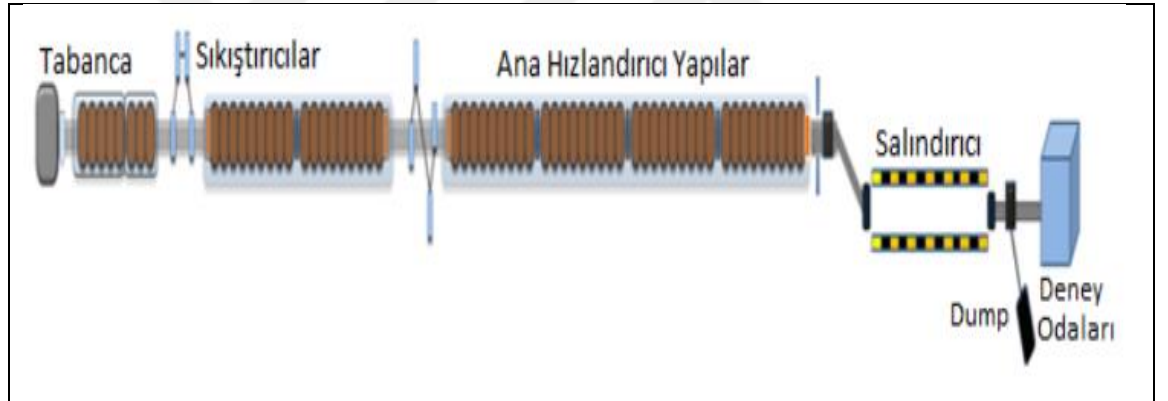
1932'de E. T. S. Walton ve J. D. Cockroft, protonları yaklaşık 400 KeV değerindeki enerjiye kadar hızlandırmış ve lityum elementi tabakasına göndererek çarptırmışlardır. Protonlar lityum atomunun çekirdeğini parçalamış ve iki He atomu çekirdeği meydana getirmiştir. Bu deneyde atomun çekirdeği ilk kez parçalanmış nükleer enerjiye yönelik araştırmaların önü açılmıştır. (Yıldız, 2018). İlk proton ve elektron lineer hızlandırıcıları II. Dünya Savaşından sonra yapılmıştır. Luis Alvarez, 12 m uzunluğunda, 1 m çapında, 4 MeV ile 32 MeV arasında bir proton sürüklenme tüpü linak tasarlamıştır (Wangle 2011).

Birçok alanda kullandığımız özellikle maddelerin alt yapısının incelenebilmesi için gerekli olan yüksek güçlü, şiddetli, düşük dalga boylu ışımaların elde edilmesi için parçacık hızlandırıcılarının kullanılması gerekmektedir. Hızlandırıcılar; dairesel hızlandırıcılar ve doğrusal hızlandırıcılar olmak üzere ikiye ayrılır.

1.2.1 Lineer hızlandırıcılar

Bir lineer(doğrusal) hızlandırıcıda yüklü parçacıklar, doğrusal bir yolda hareket ettirilerek enerji kazanmaktadırlar. Lineer hızlandırıcılar, parçacık hızlandırıcı yapıların her birinden yalnızca bir kez geçmektedir (Vretenar 2013).

Lineer hızlandırıcılar 100 MHz'den birkaç GHz'e kadarki frekans aralık değerlerinde çalışır. Yüksek kalitede yoğun ışın demetleri üretirler ve bilimsel araştırmalara başta temel parçacık fiziği olmak üzere askeri, endüstri veya tıbbi alanlarda uygulanırlar. Lineer hızlandırıcılar, elektron, pozitron gibi yüklü parçacıkların EM alanlar ile doğrusal bir yörüngede hızlandırılmasına izin veren sistemlerdir (Şekil 1.2.).



Şekil 1.2 Lineer hızlandırıcı bileşenleri (Yıldız H. 2018)

1.2.1.1 Elektron tabancası

Elektronun kaynak yüzeyinden kopartıldığı ve elektronun enerji seviyesinin yükseltilmeye başlandığı kısımdır. Elektronların ileri doğru, demet yolu boyunca itilmesi burada başlamaktadır. Elektronlar, termiyonik DC tabancası veya fotokatot RF tabancası gibi bir elektron kaynağından sökülebilir ve sonrasında ilk hızlandırılma enjektörde verildikten sonra Megaelektron Volt (MeV) – Gigaelektron Volt (GeV) enerjilerine kadar hızlandırılmak üzere lineer hızlandırıcılar kullanılmaktadır. Elektronların demet haline

getirilmesi ve sıkıştırılması enjektör sisteminde gerçekleştirilmektedir. Bu sistemde, demet davranışına göre sürekli ve kesikli (atmalı yapı) demet için uygun elektron tabancası seçilmelidir.

Elektron tabancalarında elektronların üretilmesi veya sökülmesi için farklı yöntemler vardır. Başlıca tabanca türleri, termoiyonik ve fotokatot tabancadır. Termoiyonik tabanca, katot materyalinin ısıtılarak materyal yüzeyinden e^- salınımı durumudur. Elektronların materyalden ayrılması için e^- ların hız bileşenlerinin yüzey ile uygun açılarda bulunması ve kazandıkları kinetik enerjilerinin materyal içerisinden geçecek miktarda olması gerekmektedir. Bu nedenlerden dolayı katot seçiminde göz önünde bulundurulan en önemli unsurlar seçilen malzemenin yani e^- ların bağlanma enerjisinin düşük olduğu materyalinin seçimidir. Fotokatot tabancalarda, ışığa hassas bir malzeme üzerine dalga boyu belirli bir lazerin (fotonun), gönderilmesiyle elektronlar sökülmeaktadır. Fotokatot malzemesi üzerine gönderilen lazerin enerjisi materyal üzerindeki e^- ların bağlanma enerjisine yakın olması halinde e^- lar materyal içindekilerle bağlarını kopararak bağımsız duruma geçmektedir. Böylece katottan e^- koparmak için yüzeye gelmiş olan lazer enerjisi minimum iş fonksiyonu (e^- bağıni engellemek için gerekli enerji) değerinde olmalıdır (Yıldız, 2018).

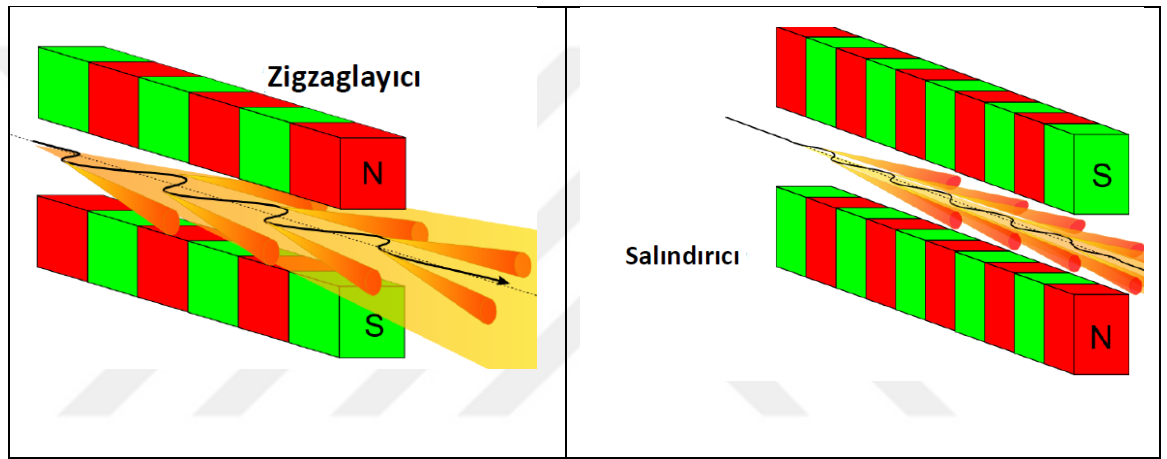
1.2.1.2 Eğici magnetler

Eğici magnetler, elektronun yolunu bükmek ve yönünü değiştirmek amacıyla kullanılmaktadır. Bu magnetlere dipol magnet de denir, iki zıt kutba sahiptir. Genelde bakım zamanlarında veya teknik destek gerekli durumlarda demetin başka yöne alınması durumunda kullanılır, önemi büyüktür.

Kuadrupol magnet 4 kutuplu mıknatıslardır. Odaklayıcı magnet olarak da bilinir. Demetin odaklanmasını sağlar. Steering magnet (yönlendirme mıknatısı) yüklü parçacığın hızlandırıcı içinde hizalanmasını sağlamaktadır. Parçacığın demet hattında hassas bir şekilde taşınmasında görev alır. Solenoid ise parçacık demetlerini odaklamak için kullanılır.

1.2.1.3 Odaklayıcı yapılar

Zikzaklayıcılar (Wiggler) ve salındırıcılar (undulator), hızlandırıcı sistemlerin son kısmına yerleştirildikleri, elektron demetlerinden foton ışınlarının elde edildiği ve odaklandığı kısımlar olduğu için genellikle odaklayıcı sistemler olarak adlandırılırlar. Her ikisi de elektronların zikzak bir yolda hareket ettirilmesini sağlar (Şekil 1.3); aralarındaki fark ise zikzaklayıcılar daha güçlü mıknatıslardan oluşur salındırıcılar daha zayıf mıknatıslardır.



Şekil 1.3 Wiggler ve Undulator (Ketenoglu 2022)

1.2.1.4 Süperiletken RF kavite

Belirli bir sıcaklığın altında malzemeler süperiletken duruma geçer ve elektrik akımının geçişine karşı hiçbir direnç göstermez. İki temel özellik süperiletken duruma geçerler. Birincisi, elektrik akımının geçişine karşı hiçbir direnç göstermezler. Direnç sıfıra düştüğünde, malzemenin içinde herhangi bir enerji kaybı olmaksızın bir akım dolaşabilir. İkinci olarak, yeterince zayıf olmaları koşuluyla, dış manyetik alanlar süperiletkene nüfuz etmez (CERN, 2023).

Elektromanyetik alan içeren metalik odacıklardan oluşan yapılardır. Bu yapılar, yüklü parçacıkların içerisinde hızlanması, enerji kazanmasını fakat demetlerin

mümkün olduğunca kavite içi magnetik alandan kaynaklı odaklı şekilde kalmasını sağlamaktır. RF kaviteler parçacıkları hızlandırmak için RF gücünü kullanmaktadır. Bu metalik yapılara, kavite adı verilmiştir. Süper iletken durumda mikron boyutta neobium kaplı çelikten kavite, normal iletken durumda çelikten kavite yapılmaktadır (Yıldız 2018).

Kavitelerin şekli ve boyutu çok önemlidir ve tüm sistemin farklı farklı kullanım amaçlarını belirlemektedir. Kavite içerisinden geçen parçacık demetlerinin hızlandırılması için elektrik alanı ihtiyacı vardır. Parçacıklar elektrik alanı, dolayısıyla oluşan gradyant tarafından itilir ve parçacıkların enerjisi yükselerek kavite hücrelerini geçer ve demet tüpüne ulaşır. Geçen parçacık demetleri bazı durumlarda kavite hücreleri içerisinden enerji alabilir veya kavite hücresi alanına enerji verebilir. Demetler çok fazla sayıda parçacıklardan oluşmaktadır. Demetin kavite içerisine enerji vermesi istenmeyen bir durumdur ve bu durumun gerçekleşmesi halinde enerjisi artan kaliteli bir demet oluşumu sağlanamaz (Habel 1996).

1.2.1.5 Demet kapama (Beam dump)

Enjektör kısmında demetin akım vb. özelliklerinin ölçülmesi için veya ana hızlandırıcıdan geçen demetlerin lazer elde edildikten sonra elektron demetlerinin çevreye zarar vermeden sönmelenmesi gerektiğinden yer altına Faraday Kup denilen silindirik bir sistem ile elektron demetinin dışarı alınma işlemine “Demet Kapanı” denir. Diğer bir deyişle, bir demetteki parçacıkların enerjisinin emildiği, demetin atıldığı kısımdır (CERN, 2023).

1.2.1.6 Deney istasyonları

Hızlandırılma sonrası elde edilen tek renkli, yüksek parlaklıklı, yoğun lazer demetinin uygulama odalarına alınarak dedektör, spektrometre vb. cihazlarla analizlerin yapıldığı kısımdır (CERN, 2023).

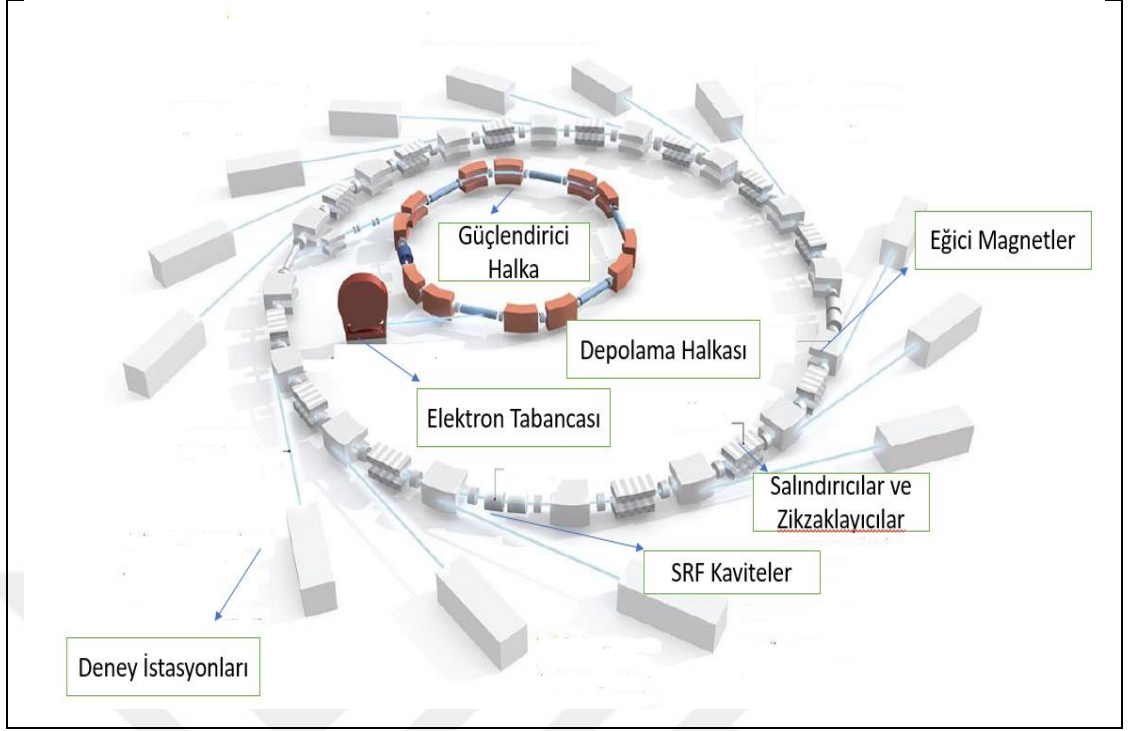
Ayrıca doğrusal hızlandırıcılarda hızlandırıcı sistemi boyunca vakum sistemi pompaları, demetin özelliklerinin belirlendiği demet diyagnostik sistemi cihazları, klystron, kriyojenik sistemler yerleştirilmiştir. Tüm sistemin kontrol edildiği kontrol sistemi, radyasyon güvenlik sistemi de bulunmaktadır.

1.2.2 Dairesel hızlandırıcılar

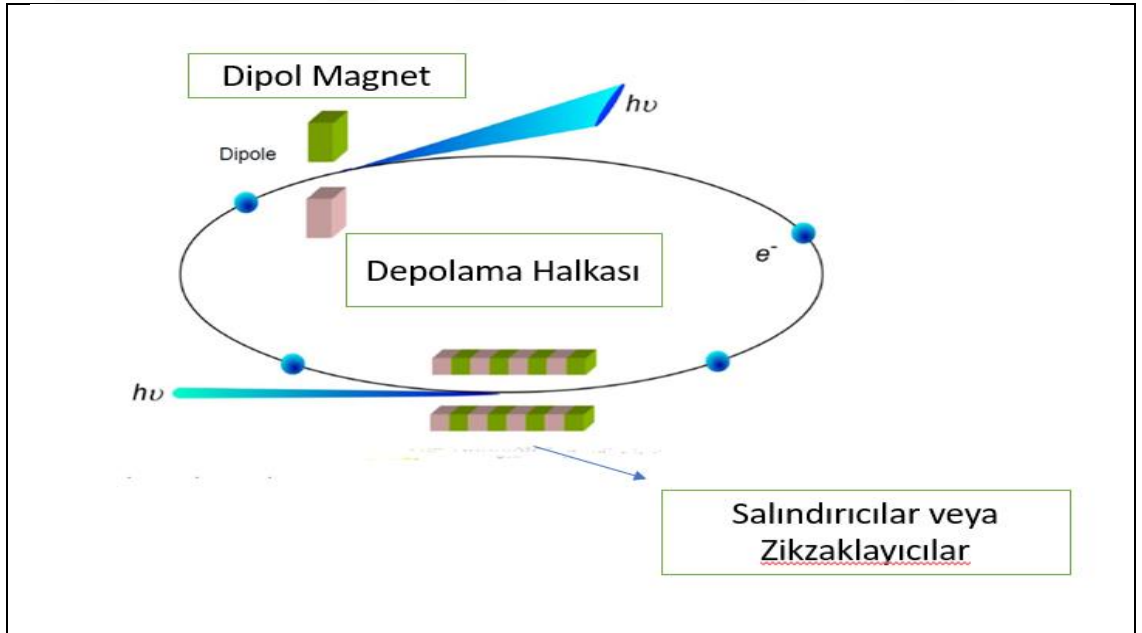
Bir dairesel hızlandırıcıda yüklü parçacık dairesel yolda hareket ettirilerek enerji kazanır. Dünyada birçok dairesel hızlandırıcı vardır. Bunlardan başlıcaları İsviçre’de CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire), Almanya’da DESY (Deutsches Elektronen - Synchrotron) ve Amerika Birleşik Devletleri’nde SLAC (Stanford Linear Accelerator Center)’dır. Şekil 1.4’te dünyadaki hızlandırıcı tesisleri görülmektedir.



Şekil 1.4 Dünyadaki hızlandırıcı tesisleri

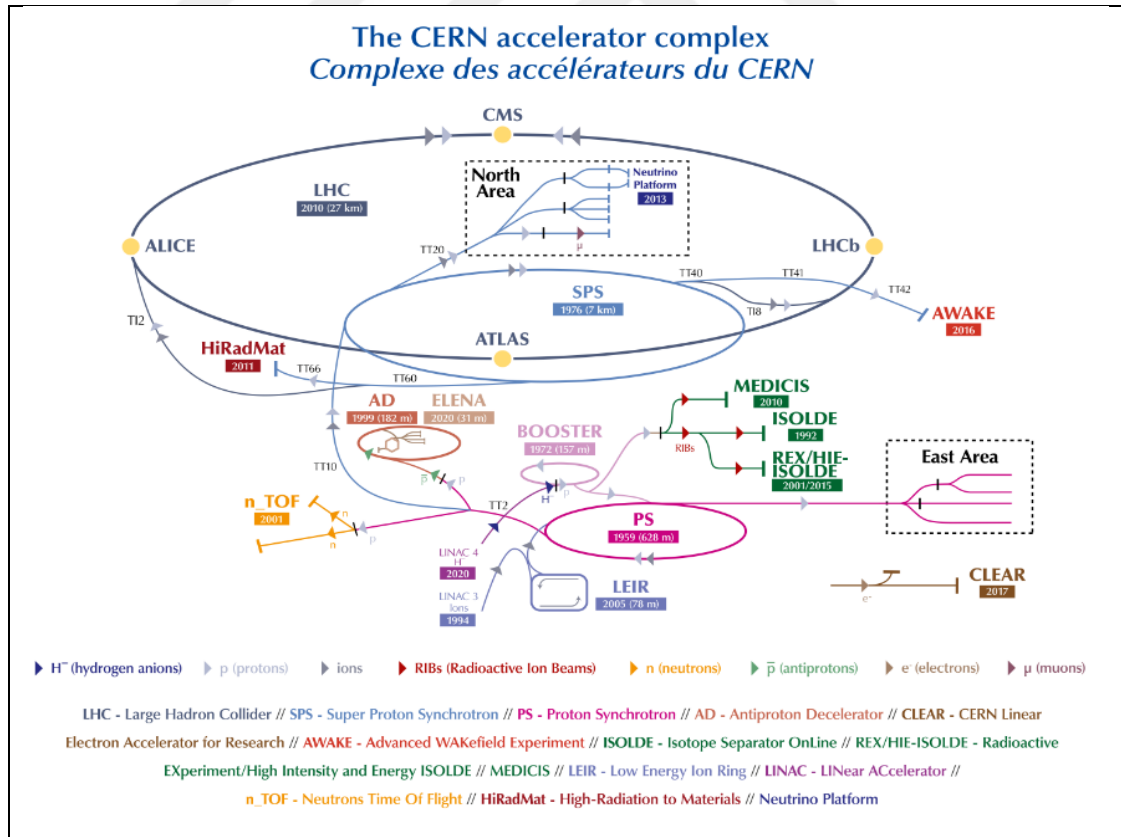


Şekil 1.5 a) Dairesel hızlandırıcı bileşenleri (Ketenoglu 2022)

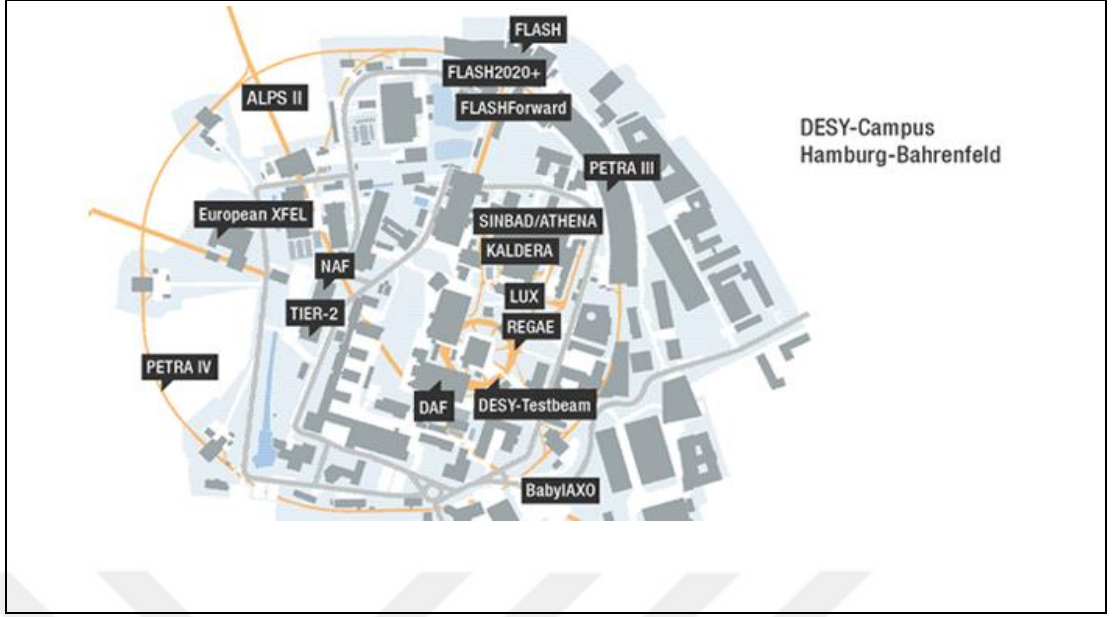


Şekil 1.5 b) Dairesel hızlandırıcı bileşenleri (Ketenoglu 2022)

Dairesel Hızlandırıcı kısımları: Elektron Tabancası, Depolama Halkası (Storage Ring), Güçlendirici Halka (Booster Ring) ve Deney istasyonlarıdır. Dairesel hızlandırıcılarda hızlandırma işlemi uzun bir doğrusal hızlandırıcı ile başlamaktadır. Bu hızlandırma işlemi iki ana kısımdan oluşmaktadır. Bunlar bir elektron tabancası ve lineer (doğrusal) hızlandırıcıdır. Parçacık doğrusal hızlandırıcıdan sonra güçlendirici halka'ya aktarılmaktadır. Burada parçacığın enerjisi daha da artırılır ve magnetler sayesinde da dairesel bir yolda hareket ettirilmesi sağlanır. Daha sonra tüm araştırmaların yapıldığı depolama halkası'na girmektedir. Parçacık demetleri burada saatlerce döndürülür. Demetler bu kısımda mıknatıslar ve uygulanan elektrik alanlar sayesinde tutulmaktadır. Mıknatıslarla, eğici magnetler (Bending Magnets) sayesinde parçacığın dairesel bir yol izlemesi sağlatılır. Dairesel hızlandırıcıların düz bölgelerine yerleştirilen zikzaklayıcılar ve salındırıcılar yerleştirme cihazları olarak da adlandırılmaktadır. Mıknatıslar sayesinde parçacıkların zikzak bir yolda hareket ettirilmesi sağlanmaktadır. Bu magnetlerden geçen demet araştırmaların yapıldığı deney istasyonlarına yönlendirilmektedir.



Şekil 1.6 CERN'deki Büyük Hadron Çarpıştırıcısı (LHC)



Şekil 1.7 DESY FLAH / PETRA III (DESY, 2023)

1.2.3 SRF kavite modları

Elektromanyetiğin temelleri 19. yüzyılda yaşamış J. Clerk Maxwell tarafından atılmıştır. Maxwell denklemleri manyetik ve elektrik alanların boş uzayda ve yük yoğunluğu, akım yoğunluğuna sahip uzay ortamlarında ilerlemesini, yayılmasını açıklamaktadır. Bu denklemler elektromanyetiği anlamak için büyük öneme sahiptir.

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{a} = \frac{Q_{enc}}{\epsilon_0} \quad (1.1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad \oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{a} = 0 \quad (1.2)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\int \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{a} \quad (1.3)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad \oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 \cdot I_{enc} + \mu_0 \epsilon_0 \int \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \cdot d\mathbf{a} \quad (1.4)$$

Denklem (1.1)'de gösterilen formüller Gauss yasasına göre kapalı bir yüzeyden çıkan Elektrik akısının o yüzeyde oluşan toplam yük ile orantılı olduğunu göstermektedir. İlk denklemde belirtilen ρ serbest elektrik yükü yoğunluğu, ϵ_0 ise boş uzayın elektriksel geçirgenliğidir ve dielektrik sabiti olarak da adlandırılır.

(1.2)'de gösterilen ifade kapalı bir yüzeyinden geçen manyetik akı kapalı yüzeyde bulunan manyetik yüke eşittir. Manyetik alan çizgileri başlangıç ve bitiş noktalarına sahip olmadığı için kapalı yüzeyden geçen net manyetik akım sıfıra eşittir.

(1.3)'te gösterilen formüller Faraday yasasına göre zamanla değişen manyetik ve elektrik alan oluşturur. Bu oluşan elektrik alan eğer korunumlu değilse yani sürekli olarak değişiyorsa bu indüklenmiş e.m.k (elektromotor kuvveti) oluşturur. Eğer zamanla değişen manyetik akı bilinirse indüklenmiş e.m.k bulunabilir. Manyetik akı toplam manyetizmanın ölçüsüdür. Diğer bir ifade ile yüzeye temas eden manyetik alan kuvvet çizgileridir. Bu zamanla değişen manyetik akı ile indüklenen akının değişimine zıt yöndedir, formülde belirtilen negatif durumun sebebi budur.

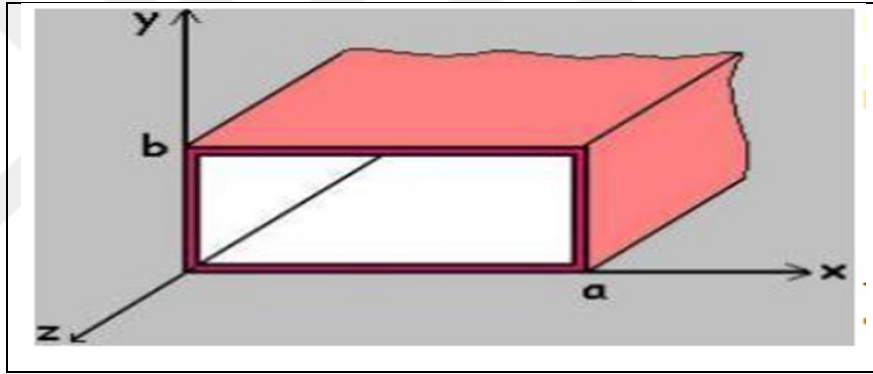
(1.4)'te gösterilen formüllerde Amper yasası, zamana göre farklılaşan elektrik alan ve manyetik alan meydana getirir. Zamana bağlı olarak değişen manyetik alanlar bu yüzeyden geçen elektrik alanlar tarafından oluşturulmaktadır. J , serbest akım yoğunluğunu ifade etmektedir. ϵ_0 denklem 1.1'de belirtildiği gibi dielektrik sabiti veya yalıtkanlık sabiti olarak da belirtilir, malzemenin çeşidine göre değişmektedir. Malzemenin üzerine yük depolayabilmesini gösteren bir katsayıdır.

1.2.4 Dalga kılavuzları

Bir elektromanyetik dalga Transvers Manyetik (TM) modu ve Transvers Elektromanyetik (TE) modu olarak iki yolla bir dalga kılavuzunda yayılabilmektedir. TEM Modu dalga kılavuzunda ilerleme meydana getirmez, yayılamaz. Transvers Elektromanyetik (TEM)

Modları daha çok koaksiyel kablolarda kullanılır. Hem elektrik alanın hem de manyetik alanın yayılma eksenine dik düzlemde kaldığı durum enine (Transvers Elektromanyetik) mod olarak isimlendirilir. Elektromanyetik dalgalar, düzlem dalga şeklinde yayılır ve klasik dalga denkleminin davranışına uyarlar. Elektromanyetik dalgalar, Elektrik ve Manyetik alanın yayılma eksenine göre isimlendirilir. Elektrik alanın dalga yayılma eksenine dik düzlemde kaldığı durum enine (Transvers Elektrik) mod olarak ifade edilir. Eğer dalga, manyetik alanın yayılma eksenine dik düzlemde kalırsa (Transvers Manyetik) mod olarak isimlendirilir (Sevinç 2019). Dalga kılavuzları içindeki çözümler sadece TE veya TM modlarından olabileceği gibi bu tür modların her ikisinden de oluşabilir.

TM modları



Şekil 1.8 TM dalgalar (Bilkent, 2023)

Yukarıdaki şekilde a ve b boyutlarını ($a > b$ olacak şekilde) ve permittivity (ϵ) geçirgenlik olarak adlandırılan bir maddenin elektriksel polarize geçirgenliği ve permeability (μ) bir maddenin kendi içinde manyetik alan oluşabilmesini destekleyen bir ölçü parametreleridir. Bu parametrelere sahip dikdörtgen dalga kılavuzunun şeklini düşünelim:

TM dalgaları için $H_z=0$ ve E_z TM Modu denkleminde çözülmelidir.

Sınır koşullarına (Boundary Conditions) göre

$y=0$ ve $y=b$ için E_x ve $E_z = 0$ olduğundan ve

$x=0$ ve $x=a$ için E_y ve $E_z = 0$ olduğu durumda TM modu için laplace denklemi:

$$N_{xy}^2 E_Z^0 + h^2 E_Z^0 = 0 \quad (1.5)$$

$$E_Z(x, y, z) = E_Z^0(x, y) e^{-gz} = 0 \quad (1.6)$$

Boş uzayda kartezyen koordinatlarda değişkenlerine ayırma metodu kullanılarak:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + h^2 \right) E_Z^0(x, y) = 0 \quad (1.7)$$

x, y değişkenleri için değişkenlerine ayırma yöntemi:

$$-\frac{1}{X(x)} \frac{d^2 X(x)}{dx^2} = -\frac{1}{Y(y)} \frac{d^2 Y(y)}{dy^2} + h^2 \quad (1.8)$$

şekline dönüşür.

Sağ tarafta yalnızca x terimi, sol tarafta ise yalnızca y terimi bulunduğundan her ikisi de bir sabite eşittir. Bu sabit k_x^2 alınırsa,

$$\frac{d^2 X(x)}{dx^2} + k_x^2 X(x) = 0 \quad (1.9)$$

$$\frac{d^2 Y(y)}{dy^2} + k_y^2 Y(y) = 0 \quad (1.10)$$

$$k_y^2 = h^2 - k_x^2 \quad (1.11)$$

Sınır koşulları x, y, a, b için uygulandığında

$$E_Z^0(0, y) = 0 \quad (1.12)$$

$$E_Z^0(a, y) = 0 \quad (1.13)$$

$$E_Z^0(x, 0) = 0 \quad (1.14)$$

$$E_Z^0(x, b) = 0 \quad (1.15)$$

$X(x)$ $\sin k_x x$ formundadır $k_x = m\pi/a$, burada $m=1,2,3,\dots$

$Y(y) \sin k_y y$ formundadır $k_y = n\pi/b$, burada $n=1,2,3,\dots$ şeklinde olup;

$$E_z^0(x,y)=E_0 \sin\left(\frac{m\pi}{a} x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{b} y\right) \quad (\text{V/m}) \quad (1.16)$$

şeklinde salınım yapar.

$$k_y^2 = h^2 - k_x^2 \quad \text{eşitliğini kullanarak}$$

$$h^2 = \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 \quad \text{elektrik ve manyetik alanların } x, y \text{ bileşenleri:}$$

$$H_x^0 = \frac{j\omega\epsilon \partial E_z^0}{h^2 \partial y} \quad (1.17)$$

$$H_y^0 = \frac{j\omega\epsilon \partial E_z^0}{h^2 \partial x} \quad (1.18)$$

$$E_x^0 = -\frac{Y}{h^2} \frac{\partial E_z^0}{\partial x} \quad (1.19)$$

$$E_y^0 = -\frac{Y}{h^2} \frac{\partial E_z^0}{\partial y} \quad (1.20)$$

Bu eşitlikler kullanılarak

$$E_x^0(x,y) = -\frac{Y}{h^2} \left(\frac{m\pi}{a}\right) E_0 \cos\left(\frac{m\pi}{a} x\right) + \sin\left(\frac{n\pi}{b} y\right) \quad (1.21)$$

$$E_y^0(x,y) = -\frac{Y}{h^2} \left(\frac{n\pi}{b}\right) E_0 \sin\left(\frac{m\pi}{a} x\right) + \cos\left(\frac{n\pi}{b} y\right) \quad (1.22)$$

$$H_x^0(x,y) = \frac{j\omega\epsilon}{h^2} \left(\frac{n\pi}{b}\right) E_0 \sin\left(\frac{m\pi}{a} x\right) + \cos\left(\frac{n\pi}{b} y\right) \quad (1.23)$$

$$H_y^0(x,y) = -\frac{j\omega\epsilon}{h^2} \left(\frac{m\pi}{a}\right) E_0 \cos\left(\frac{m\pi}{a} x\right) + \sin\left(\frac{n\pi}{b} y\right) \quad (1.24)$$

$$Y = j\beta = j\sqrt{w^2\mu\varepsilon - \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 - \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \quad (1.25)$$

denklemleri elde edilir.

Burada m, n olası dalga klavuzu modlarını temsil etmektedir, TM_{mn} modu olarak da adlandırılmaktadır.

Buradaki ifadelerde m terimi, x yönündeki alanların yarım döngü değişimlerinin sayısını, n terimi ise y yönündeki alanların yarım döngü değişimlerinin sayısını ifade eder.

Yukarıdaki denklemler incelendiğinde dikdörtgen dalga kılavuzlarındaki TM modları için m'nin ve n'nin sıfır olamayacağı görülmektedir. Bunun nedeni m veya n'nin sıfır olması durumunda alan ifadelerinin de sıfır olmasıdır. Bu sebeple dikdörtgen dalga kılavuzu TM modu için en alt, düşük mod TM_{11} ' dir.

Kesme (cut off) dalga sayısı ise

$$k_c = \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \quad \text{olarak elde edilir.} \quad (1.26)$$

$$\beta = \sqrt{k^2 - k_c} \quad (1.27)$$

$$\text{Kesme frekansı: } f_c = \frac{1}{2\sqrt{\mu\varepsilon}} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2} \quad \text{Hz} \quad (1.28)$$

$$\text{Kesme dalga boyu: } \lambda_c = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}} \text{ m} \quad (1.29)$$

şeklinde elde edilir.

Belirli bir f çalışma frekansında, yalnızca $f_c < f$ olan frekanslar yayılacaktır. $f < f_c$ olan frekanslar hayali bir b'ye yol açacaktır, bu alan bileşenlerinin üstel olarak azalacağı ve yayılmayacağı anlamına gelmektedir. Bu çeşit modlara kesme modları denir. En düşük

kesme frekansına sahip mod, baskın (dominant) mod olarak ifade edilir. Bu duruma göre dikdörtgen dalga kılavuzları için TM baskın modları TM_{11} başlar.

$$(f_c)_{11} = \frac{1}{2\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{1}{a}\right)^2 + \left(\frac{1}{b}\right)^2} \quad (1.30)$$

Dalga empedansı, enine elektrik ve manyetik alanların oranı olarak tanımlanmaktadır. Burada E_x ve H_y ifadelerinin oranı olarak elde edilir.

$$Z_{TM} = \frac{E_x}{H_y} = \frac{2\pi}{j\omega\epsilon} = \frac{j\beta}{j\omega\epsilon} = Z_{TM} = \frac{\beta\eta}{k} \quad (1.31)$$

Dalga kılavuzu uzunluğunca iki eşit faz düzlemi arasındaki uzunluk kılavuz dalga boyu olarak tanımlanır, bu duruma göre eşitlik:

$$\lambda_g = \frac{2\pi}{\beta} > \frac{2\pi}{k} = \lambda \quad (1.32)$$

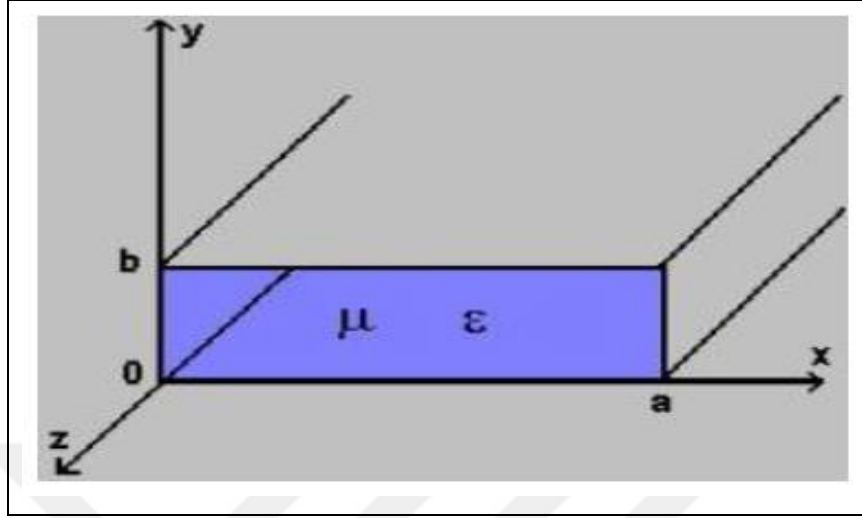
Faz hızı $\frac{w}{\beta} > \frac{w}{k} = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}}$ şeklindedir.

Diğer taraftan yayılma modları için zayıflama, dielektrikte ve kusurlu/problemlili iletken dalga kılavuzu duvarlarında kayıplar olduğunda ortaya çıkar. Bu kayıplar

$$Y = j\beta = j\sqrt{k^2 - k_c^2} = jk\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2} = j\omega\sqrt{\mu\epsilon}\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2} = j\omega\sqrt{\mu}\sqrt{\epsilon + \frac{\sigma}{j\omega}}\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2} \quad (1.33)$$

şeklinde ifade edilir.

TE modları



Şekil 1.9 TE dalgalar

a ve b boyutları ($a > b$ varsayalım)

TE dalgaları için $E_z = 0$ ve H_z , TE modu denkleminde çözülmelidir;

$$N_{xy}^2 E_z^0 + h^2 H_z^0 = 0 \quad (1.34)$$

$$H_z(x, y, z) = H_z^0(x, y)e^{-gz} = 0 \quad (1.35)$$

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + h^2 \right) H_z^0(x, y) = 0$$

Burada da değişkenlerine ayırma yöntemi kullanılırsa

$$-\frac{1}{X(x)} \frac{d^2 X(x)}{dx^2} = \frac{1}{Y(y)} \frac{d^2 Y(y)}{dy^2} + h^2 \quad (1.36)$$

Sağ tarafta yalnızca x terimini, sol tarafta ise yalnızca y terimi bulunduğu için her ikisi de bir sabite eşittir. Bu sabiti k_x^2 alınırsa,

$$\frac{d^2 X(x)}{dx^2} + k_x^2 X(x) = 0 \quad (1.37)$$

$$\frac{d^2 Y(y)}{dy^2} + k_y^2 Y(y) = 0 \quad (1.38)$$

$$k_y^2 = h^2 - k_x^2 \quad \text{eşitliğini kullanarak}$$

$$\frac{\partial H_z^0}{\partial x} = 0 (E_y = 0) \quad x=0 \quad (1.39)$$

$$\frac{\partial H_z^0}{\partial x} = 0 (E_y = 0) \quad x=a \quad (1.40)$$

$$\frac{\partial H_z^0}{\partial y} = 0 (E_x = 0) \quad y=0 \quad (1.41)$$

$$\frac{\partial H_z^0}{\partial y} = 0 (E_x = 0) \quad y=b \quad (1.42)$$

$$H_z^0(x,y) = H_0 \cos\left(\frac{m\pi}{a} x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b} y\right) \quad (1.43)$$

$$h^2 = \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 \quad (1.44)$$

Değişkenlerine ayırma yöntemi kullanılarak

$$H_x^0 = -\frac{Y}{h^2} \frac{\partial H_z^0}{\partial x} \quad (1.45)$$

$$H_y^0 = -\frac{Y}{h^2} \frac{\partial H_z^0}{\partial y} \quad (1.46)$$

$$E_x^0 = -\frac{j\omega\epsilon}{h^2} \frac{\partial H_z^0}{\partial y} \quad (1.47)$$

$$E_y^0 = -\frac{j\omega\epsilon}{h^2} \frac{\partial H_z^0}{\partial x} \quad (1.48)$$

Bu eşitlikler alındığında

$$E_x^0(x,y) = -\frac{jw\mu}{h^2} \left(\frac{n\pi}{b}\right) H_0 \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \quad (1.49)$$

$$E_y^0(x,y) = -\frac{jw\mu}{h^2} \left(\frac{m\pi}{a}\right) H_0 \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \quad (1.50)$$

$$H_x^0(x,y) = \frac{Y}{h^2} \left(\frac{m\pi}{a}\right) H_0 \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \quad (1.51)$$

$$H_y^0(x,y) = \frac{Y}{h^2} \left(\frac{n\pi}{b}\right) H_0 \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \quad (1.52)$$

$$Y = j\beta = j\sqrt{w^2\mu\varepsilon - \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 - \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \quad (1.53)$$

Burada m ve n olası modları temsil etmektedir, TE_{mn} modu olarak adlandırılmaktadır. m, x yönündeki alanları yarım döngü değişimlerinin sayısını, n ise y yönündeki alanların yarım döngü değişimlerinin sayısını belirtmektedir.

Burada kesme dalga sayısı

$$k_c = \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \quad (1.54)$$

$$\beta = \sqrt{k^2 - k_c^2} \quad (1.55)$$

$$f_c = \frac{1}{2\sqrt{\mu\varepsilon}} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2} \quad \text{Hz} \quad (1.56)$$

$$\lambda_c = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}} \quad \text{m} \quad (1.57)$$

Belirli bir f çalışma frekansında, yalnızca f > f_c olan frekanslar yayılacaktır. f < f_c içeren modlar yayılmayacaktır.

En düşük/küçük kesme frekansına sahip olan mod, baskın mod olarak ifade edilir. TE_{10} modu, dikdörtgen dalga kılavuzları için en küçük sıfırdan farklı alan ifadeleri veren ve mümkün olan minimum mod olduğundan, $a > b$ şeklinde dikdörtgen dalga kılavuzunun en baskın olan modudur, baskın frekans ise:

$$(f_c)_{10} = \frac{1}{2a\sqrt{\mu\epsilon}} \quad (1.58)$$

Dalga empedansı, enine elektrik ve manyetik alanların oranı olarak tanımlanır. Denklem 1.38'de olduğu gibi E_x ve H_y ifadelerinden elde edilmektedir.

$$Z_{TE} = \frac{E_x}{H_y} = \frac{jw\mu}{Y} = \frac{jw\mu}{j\beta} = Z_{TE} = \frac{k\eta}{\beta} \quad (1.59)$$

Daha önce de belirtildiği gibi dalga kılavuzu boyunca iki eşit faz düzlemi arasındaki uzunluğa kılavuz dalga boyu denir, eşitliği ise:

$$\lambda_g = \frac{2\pi}{\beta} > \frac{2\pi}{k} = \lambda \text{ şeklindedir} \quad (1.60)$$

$$\text{Faz hızı } \frac{w}{\beta} > \frac{w}{k} = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}}$$

Dielektrikteki kayıplardan kaynaklanan zayıflama sabiti şu şekilde elde edilmektedir.

$$Y = j\beta = j\sqrt{k^2 - k_c^2} =$$

$$jk\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2} = jw\sqrt{\mu\epsilon}\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2} = jw\sqrt{\mu}\sqrt{\epsilon + \frac{\sigma}{jw}}\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2} \quad (1.61)$$

1.2.5 Süperiletken kavitelerde RF güç girişı ve HOM kuplörleri

1.2.5.1 Yüksek RF güç giriş kuplörleri

Hızlandırıcı bir sistemde parçacık demetinin hızlandırılması için en azından Megaelektron Volt (MeV) seviyesine çıkarılması gerekmektedir. Hızlandırmayı sağlamak için süperiletken veya normal iletken kavite içi EM alan kullanılmaktadır. Belli GHz çalışma frekansı değeriindeki EM alanlar bu kaviteler içerisinde salınım yapmaktadır. Bu kaviteler içersine gönderilen/giririlen EM alanlar RF kavitelerdeki demet tüpü üzerinde bulunan RF güç giriş kuplörleri tarafından sağlanmaktadır. Elektrik alan ile parçacığın enerji kazanması, magnetik alan ile faz uzayında dağılmaması sağlanmaktadır. Elektron tabancası ile başlatılan sistem sonrasında lineer hızlandırıcı ile parçacık demetleri maksimum enerji değeri ve minimum yayınıma sahip olması beklenmektedir.

Yüksek RF güç giriş kuplörünün başlıca rolü, parçacık enerjisini artırmak için güçlü elektromanyetik hızlandırıcı alanlar oluşturan, oda sıcaklığındaki klistronlardan kaviteye büyük miktarda radyo frekansı gücü (~MWatt) aktarmaktır. Klistron yüksek mikrodalga frekansları için yükselteç olarak kullanılan özel bir vakum tüpüdür. Bu nedenle RF güç giriş kuplörü ile süper iletken radyo frekanslı kaviteler arasında köprü görevi görmektedir. Birçok farklı yapıda Radyo Frekans Giriş Kuplörleri geliştirilmiştir ve günümüzde iki türe ayrılmaktadır.

- Koaksiyel Radyo Frekans Giriş Kuplörleri
- Dalga Kılavuzu Radyo Frekans Giriş Kuplörleri

1.2.5.1.1 Koaksiyel yüksek RF giriş kuplörleri

RF giriş kuplörü, RF iletim hattı ile Süperiletken Radio Frekans (SRF) kaviteyi birbirine bağlamaktadır. RF gücü, ısı ve vakum işlevlerini sağlamaktadır. Bu RF giriş kuplörleri

güç seviyelerini süperiletken RF kavitelere ve demete aktarmaktadırlar. Klistron ve RF dağıtım sisteminin empedansı, kaviteye uygun bir empedans değerinde olması gereklidir. Demet yokluğunda, SRF kavitelere tam yansıma yol açan güçlü bir uyumsuzluk vardır. RF giriş kuplörü farklı demet yüklerinin değiştirilmesine imkân sağlamaktadır.

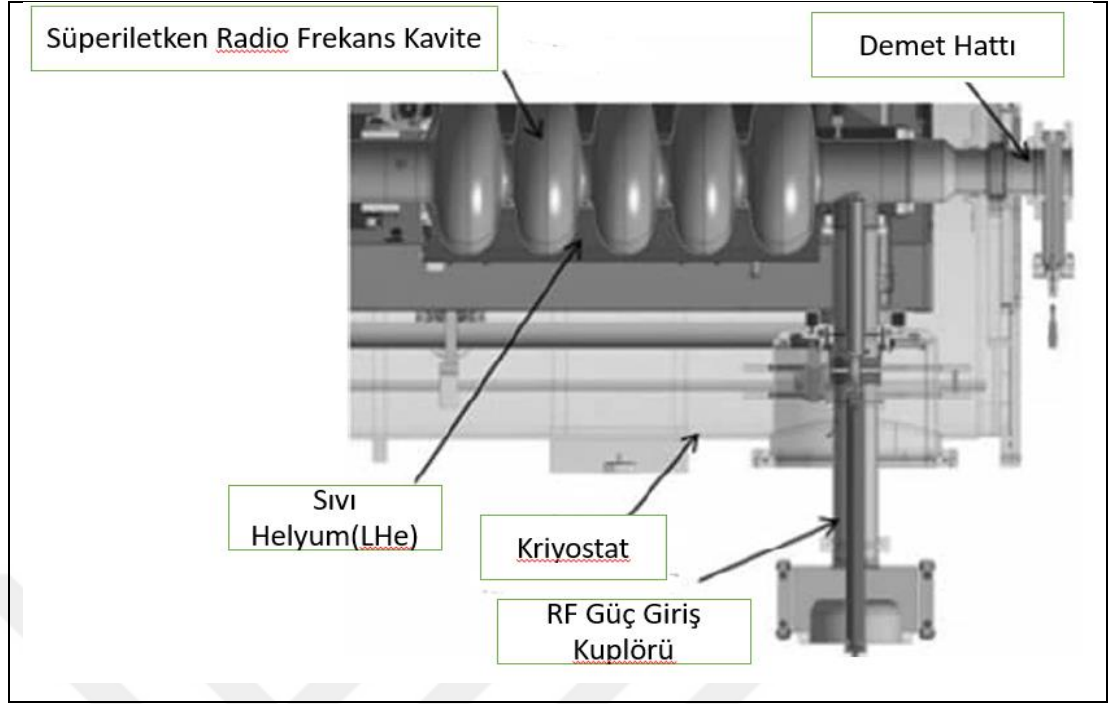
Bu kuplörlerin avantajları ve dezavantajları aşağıdaki çizelgede gösterilmektedir.

Çizelge 1.1 Koaksiyel Radyo Frekans kuplör avantaj ve dezavantajları

Koaksiyel Radyo Frekans Kuplör	
Avantaj	Dezavantaj
Daha sıkı ve yoğundur.	Tasarımı zordur.
Daha küçük ısı sızıntısına sahiptir.	Güç kullanımı iyi değildir.
Dairesel parçaların işlenmesi, montajı ve sızdırmazlığı kolaydır.	Soğutulması zordur.
Anten nüfuz etkisi değiştirilebilir.	Düşük pompalama hızına sahiptir.

1.2.5.1.2 Dalga kılavuzu yüksek RF giriş kuplörleri

Dalga kılavuzu yüksek RF giriş kuplörleri yüksek frekans ve çok yüksek güçlü uygulamalar için tercih edilmektedir ve soğutması basittir çünkü sadece dış duvarlarının soğutulması yeterlidir (Shu Q., Demko J., ve Fesmire J.).



Şekil 1.10 Dalga kılavuzu yüksek RF giriş kuplörü (Shu , Demko, ve Fesmire 2022).

Çizelge 1.2 Dalga kılavuzu Radyo Frekans kuplör avantaj ve dezavantajları

Dalga Kılavuzu Radyo Frekans Kuplörü	
Avantaj	Dezavantaj
Tasarımı basittir.	Daha büyük boyutludur.
Güç kullanımı daha iyidir. Düşük yüzey elektriksel alanına sahiptir.	Daha fazla ısı sızıntısına sahiptir, yüksek termal ışıma yapar.
Soğutması daha kolaydır.	Ayarlaması kolay değildir.
Daha Yüksek pompalama hızına sahiptir.	Dikdörtgen parçaları geniştir.

1.2.5.2 Yüksek dereceli mod kuplörleri

Elektromanyetik alanların istenmeyen yüksek dereceli modları Higher Order Modes (HOM), kaviteden geçen hızlanan yüklü parçacık demetleri tarafından üretilmektedir.

HOM yeterince sönümlenmezse, demette dengesizliklere veya parlaklık kaybına yol açabilir. HOM, sıvı helyum (LHe) sıcaklığında (1 K–4.2 K) kavite duvarındaki ek güç dağılımı nedeniyle kriyojenik kayıpları da arttırmaktadır (Shu , Demko , ve Fesmire 2022).

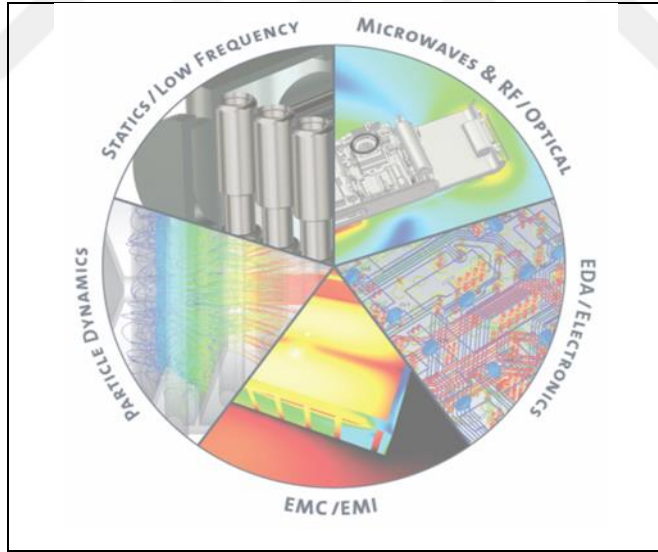
HOM kuplörleri, HOM dalgalarını kaviteden çıkarmak ve bunları sönümlmek için SRF kavite sistemlerinin ekinde geliştirilmiş ve konumlandırılmıştır. Ayrıca, HOM Kuplör için düşük maliyet ve etkili bir şekilde montaj edilebilirlik de önemlidir. HOM enerjisini verimli bir şekilde sönümlmek için, Ferrit SiC, AlN, camlı karbon ve benzeri gibi vakumda düşük gaz çıkışı özelliğine sahip geniş bant emici malzemeler tercih edilmektedir (Rusnak 2003).

2. KULLANILAN SİMULASYON PROGRAMLARI

Bu tez kapsamında, Yüksek Mertebe Modlu Kuplörler ve Yüksek RF Güç Giriş Kuplörü, Computer Simulation Technology (CST) birleşik programlar bütünü ile tasarlanmış ve simülasyon sonuçlarına göre hesaplamalar elde edilmiştir.

2.1 Computer Simulation Technology (CST)

CST, Dassault Systèmes Simulia Corp. tarafından geliştirilmiş bir EM hesaplama programıdır. Her türlü EM uygulamalar için güçlü simülasyon imkânı sağlar. CST, birden fazla projeyi aynı anda, eşzamanlı yapma kolaylığı da sağlamaktadır. Bu programın en önemli özelliklerinden biriside hızlı entegrasyon kolaylığı ve entegrasyon sonrası hızlı çalışabilirlik sunmasıdır (CST Studio Suite Version Getting Started Book Version 2020.0 - 8/16/2019).



Şekil 2.1 CST uygulama alanları

CST Studio Suite 5 uygulama kısmından oluşmaktadır (Şekil 2.1), bunlar:

- Parçacık Dinamiği,
- Statik Düşük Frekans,
- Mikrodalga & RF/Optikak,

- EDA (Elektronik Tasarım Otomasyonu)/Elektronik,
- EMC (Elektromanyetik Uyumluluk)/EMI (Elektromanyetik Girişim)

şeklindedir (CST Studio Suite Getting Started Book Version 2020.0 - 8/16/2019).

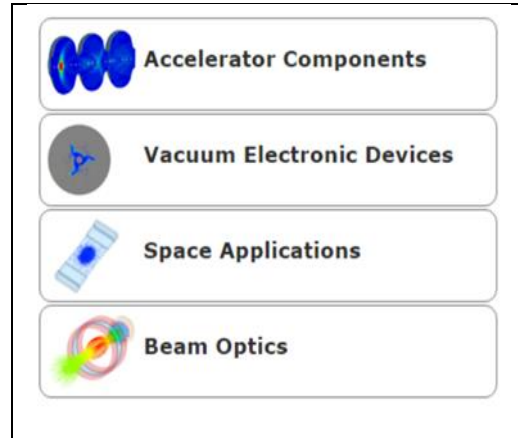
Yapılan Kuplör tasarımlarında CST Studio Suite/ Parçacık Dinamiği uygulaması kullanılarak çalışmalar tamamlanmıştır.

PARÇACIK DİNAMİĞİ

Parçacık Dinamiği 4 kısımdan oluşmaktadır. Bunlar:

- Hızlandırıcı Bileşenleri,
- Vakum Elektronik Aletleri,
- Uzay Uygulamaları ve
- Demet Optiği'dir.

Yüksek frekanslı çalışmalar için 3D EM Simülasyon yapma imkânı sağlamaktadır. Hem zaman hem de frekans alanlarında çalışmalar yapılabilir. Yapılan tasarım çalışmaları 'Accelerator Components' altında 'Cavities' Kavite tasarımı, Kuplör tasarımı ise 'Couplers' altında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.2 CST programında parçacık dinamiği

Parçacıkların kavite veya parçacık fiziğinde kullanılan bileşenleri EM alanların 3D simülasyonu ve hesaplamalarının elde edilmesini sağlamaktadır.



Şekil 2.3 Hızlandırıcı bileşenleri

Simülasyona başlamadan önce birim uzunluklarının belirlenmesi gerekmektedir (Şekil 2.4). İlk olarak uzunluklar mm (milimetre) seçilerek detaylı çizimlerin yapılabilmesi, hassas ölçümlerle büyük ölçüde değişimlerin rahat görülmesi sağlanmıştır. Bir saniyede meydana gelen tekrar sayısı frekans olarak belirtilmektedir ki programda çalışma frekansı SRF kavite geometrisi açısından önemlidir. Hızlandırıcı RF Kavitelerde frekans seçiminde birim Mega Hertz; zaman saniye; sıcaklık ise Kelvin olarak seçilmiştir.

Dimensions:	mm
Frequency:	MHz
Time:	s
Temperature:	Kelvin
Voltage:	V
Current:	A
Resistance:	Ohm
Conductance:	S
Inductance:	H
Capacitance:	F

Şekil 2.4 CST ile birim parametrelerin belirlenmesi

Yapılan modelleme çalışmalarında en küçük birim olarak tetrahedral seçilerek mesh ayarlanmıştır, diğer bir deyişle alınan en küçük modelleme alanı olarak tetrahedral bölge alınarak ilerleme kaydedilmiştir. Frekans bölgesinde (frequency domain) program çalıştırılmış olup çalışma frekansı elde edilmiş; elektrik alan ve magnetik alan dağılımları, yoğunlukları ve birçok farklı modda HOM'lar elde edilmiş ve optimize çalışılmalar yapılmıştır.

2.2 Poisson / Superfish

İki boyutlu bir programlar bütünü olan Poisson /Superfish, Ronald Holsinger isimli araştırmacı tarafından Klaus Halbach'ın teorik desteğiyle farklı iki soruna çözüm bulmak, manyetostatik ve elektrostatik alanların hesaplanması ve iki boyutlu silindirik geometride RF kavitedeki rezonans frekansı ve alanların kartezyen ve silindirik geometrilerde hesaplanması için yazılan programlar dizisidir. Bu program ile magnet yapılarının (steerer magnet, solenoid, kuadrupol, dipol, ...) ve RF kavitelerin tasarımı yapılmaktadır. Program ortak alt programlardan yararlandığı için birlikte gruplandırılmıştır. Superfish programı, duran dalga RF kavitelerdeki rezonans frekanslarını belirlemek için tasarımcılara özgün çözüm yöntemleri sunmaktadır (Menzel, Stokes 1987). Poisson programı ile magnet tasarımı yapılmaktadır.

Programlar dizisinde kullanılan Fish radyo frekansı için çözücü programdır, Automesh'ten sonra çalışır. CFish ise Radyo Frekans alanlar, elektriksel ve manyetik alanların ilerlemesi yani geçirgenlik için detaylı değişkenler, parametreler kullanan Fish kodudur. Poisson durgun alanlar için çözücü programdır, Automesh'ten sonra çalışır. SFO bir Poisson superfish ardişlemcisidir. SF7 eğriler, çizgiler boyunca elektrik ve manyetik alanlar için ara değer belirleme (interpolation) yapan ardişlemcidir. Program, problem şekli ve geometrisindeki belirlenen bölge ve yerler için, ara değerleri bularak, hesaplanmış alan değerlerini OUTSF7.TXT'nin içerisine yazar.

3. YÜKSEK RF GÜÇ GİRİŞİ VE HOM KUPLÖR TASARIMI VE MODELLEME ÇALIŞMALARI

Hızlandırıcı sistemlerde parçacıklar katottan söküldükten sonra süperiletken veya normal iletken hızlandırıcı kaviterler sayesinde hızlandırılmakta; demet yolu boyunca monte edilen magnetler sayesinde de odaklandırılmaktadır. Süperiletken hızlandırıcı kavitelere verilen EM alan RF güç giriş kuplörleri sayesinde sağlanmaktadır. Bu sebeple yapılan çalışmalarda tasarlanan Yüksek RF güç giriş kuplörünün önemi büyüktür. Diğer yandan hızlandırıcı kaviterler içerisindeki parçacıkları hızlandırmayan ve hatta içeride parçacıkların düzgün hızlanmasını engelleyen, hızlandırıcı mod dışında farklı modlar ortaya çıkabilmektedir. Bunların hızlı bir şekilde kaviteden uzaklaştırılması, dışarı alınması gereklidir. Dışarı alınma işlemi HOM kuplörleri (Yüksek Mertebe Modlu Kuplörler) tarafından sağlanmaktadır.

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalarda RF güç giriş kuplörleri ve 9 Hücrelik hızlandırıcı kaviterlerde oluşan yüksek mertebe modlar (Higher Order Modes) için yüksek mertebe modlu kuplörler (HOM Couplers) tasarlanmıştır.

Hem RF Güç Girişi tasarımı hem de Yüksek Mertebe Modlu Kuplörlerin tasarımı CST (Computer Simulation Technology)'de Particle Dynamics alt programı tarafından yapılmıştır.

3.1 Yüksek Güç Girişi Tasarımı

RF Güç Giriş Kuplörleri bir kriyomodülde hızlandırıcı süper iletken kavitelere RF enerjisi sağlayan / çeken yapılardır. Yapılan çalışmada güç kuplörü f frekansında (çalışma frekansı olarak da isimlendirilir) 1.3 GHz elde edilmiş ve kullanılmıştır. RF Güç Giriş Kuplörleri istenilen RF gücünü kayıplar olmadan SRF kaviteye sağlar. RF Güç Giriş Kuplörü tipiksel olarak koaksiyel veya dalga kılavuzu şeklinde olabilir ve bulunduğu ortam ile kriyojenik ortamı arasında mekaniksel bir köprü görevi görmektedir. Dalga kılavuzları iletken borulardan oluşur ve yüksek frekanslarda düşük kayıpla yüksek güç

iletebilir. Yüksek frekans uygulamalarda öncelikle koaksiyel kablolar, mikroşerit hatlar veya da ortaları boş dikdörtgen veya küresel kesitli metalik dalga kılavuzları kullanılır.

Güç Giriş Kuplörü demet ile birlikte kavite içerisindeki alanları yönetmek için yeterli RF gücünü sürekli olarak kavite içerisine taşır. Güç giriş kuplörleri ark (kıvılcımlanma) eşliğinin altında çalışır. Çalışma frekansı civarında ‘multipacting’ olmayacak şekilde tasarlanmalıdır diğer deyişle kavite içerisinde demetteki parçacıkların birbirleriyle ve kavite duvarıyla çarpışması tümüyle engellenmelidir. Ortamda yoğunlaşmış veya dağılan gazlar ile parçacıkların etkileşimi de engellenmelidir. Güç giriş kuplörü tasarlanırken HOM alan stresi göz önünde bulundurulmalıdır (Rusnak 2003).

RF güç kayıplarının fazla olması durumunda verim düşüklüğü, yüksek frekanslı ve yüksek güçlü EM alanın ortama sızması, ısı artışı sebebiyle (özellikle kavite hücrelerinde) oluşacak metal genleşmesine bağlı olarak çalışma (rezonans) frekanslarından kaymalar, ve bunlara bağlı olarak kayıplı alan durumları elde edilebilir.

Çalışma kapsamında yüksek giriş güç kuplörünü tasarlamak için fiziksel spesifikasyonlar, kuplörler için RF alanlarının detayları oluşturulmuş ve sonrasında dizayn prosesi CST ile yapılmıştır.

RF kayıplarının fazla olmaması için ısınmanın minimumda tutulması (modellemelerde 2 K kavite için, 9.2 K diğer ortamlar için kullanılarak), termal ısı akışının minimumda iletilmesi gerekmektedir.

Gereksinimler: RF kayıpları sebebiyle ısı sızıntısının minimumda tutulması, düşük R_s (shunt empedans) ile çalışılması ve multipacting’in minimumda tutulması gerekir. Mekaniksel olarak termal açılımın uygun toleransı montaj ve erime noktası, uygun vakum pompaları, temiz oda temizliği, kavitelerin temiz birleştirilmesi, zamanlı bakımları ve benzeri mühendislik içerikleri RF Kuplör tasarımı ve üretiminde dikkat edilmesi gereken

noktalar olup bunlarla ilgili gerekli parametreler tasarımlarda, CST içerisinde optimize edilmiştir. Tez çalışması kapsamında yüksek giriş güç kuplörünün SRF kaviteli lineer hızlandırıcı için modellenmesinde yukarıdaki belirtilen özellikler göz önünde bulundurulmuştur (Rusnak 2003)

RF Güç Girişi Özellikleri

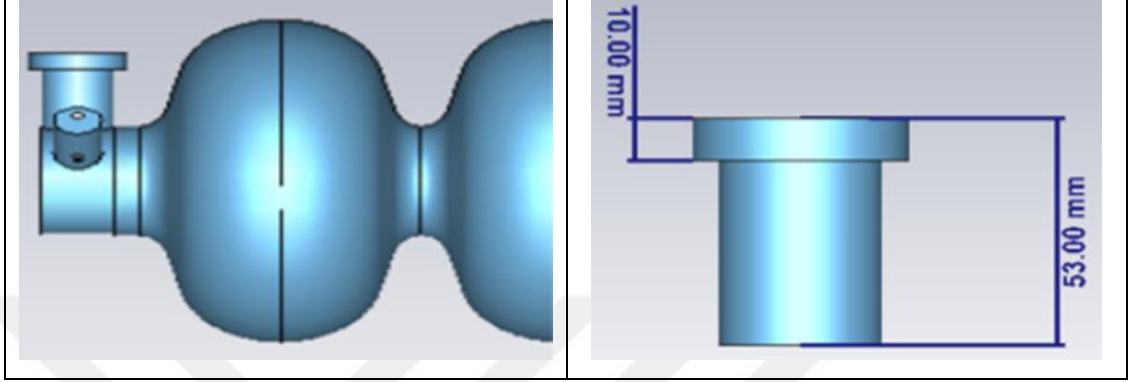
- Elektriksel olarak MegaWatt mertebelerine çıkan bir RF Güç Girişi tasarlanmış olup, ortalama gücü 10 - 100 kW arasında olmalıdır.
- Kriyojenik ortama dayanıklı olacak şekilde tasarlanmıştır. Tasarım ısı döngüsüne karşı sağlam durabilecek durumdadır.
- Üretim aşamalarında SRF Kavitenin ultra temiz iç bölgesine sahip olması ve hermetik yapıya yani hava geçirmez bir yapıya sahip olması gerekmektedir. Modellemelerde Ultra High Vakum özellikleri kullanılmıştır.
- RF Güç Giriş Kuplörü güvenilir bir şekilde üretilmiş olup, maliyetinin de uygun olması gerekmektedir.
- RF Kuplörün çalışmadığı durumlarda sadece hızlandırıcı düzgün olarak çalışmamakla kalmayıp önemli miktarda maliyet ve zaman kaybı da meydana gelmektedir (Rusnak 2003).

RF Güç Giriş Kuplörlerinin iki farklı kategoride tasarımı yapılabilir ve sonrasında üretimi gerçekleştirilebilir:

- 1- Atmalı Güç Yapısı (Pulsed Power): Yüksel voltajlar da çalışabilir fakat ortalama güç ısınması makuldür.
- 2- Sürekli Dalga Güç Yapısı (CW- Continuous Wave Power): Yüksek voltajlarda çalışmak zorundadır fakat yüksek ortalama güç ısınmasına dayanıklıdır (Rusnak 2003).

3.1.1 RF kuplör tasarım ve modelleme sonuçları

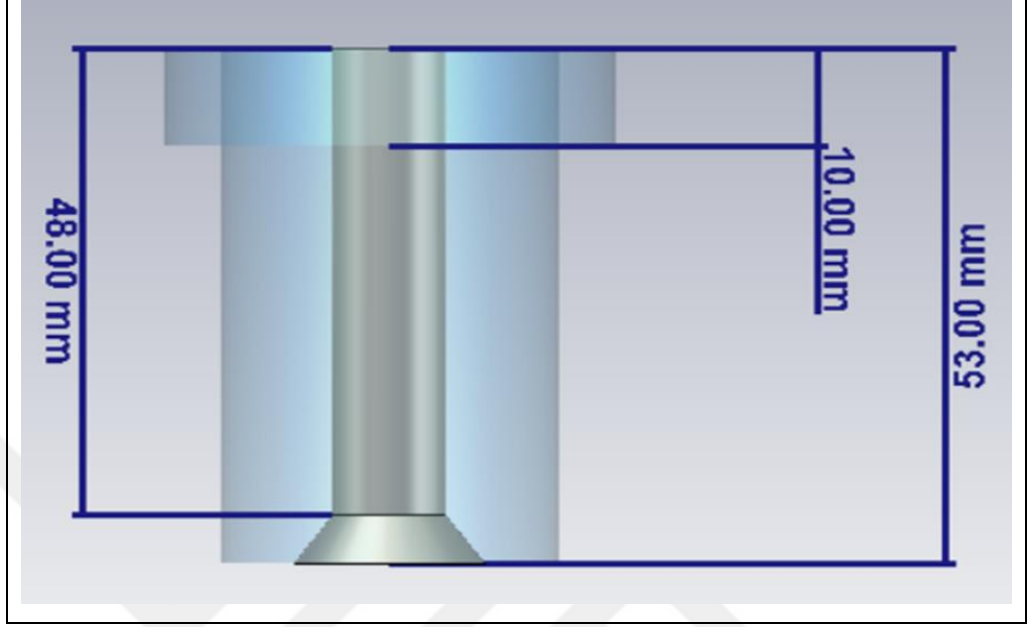
Tez çalışması kapsamında, güç durumuna göre ve RF Kuplör için hızlandırıcı kavite gereksinimlerine göre uygun çalışan RF Güç Giriş Kuplörü tasarlanmıştır (Şekil 3.1).



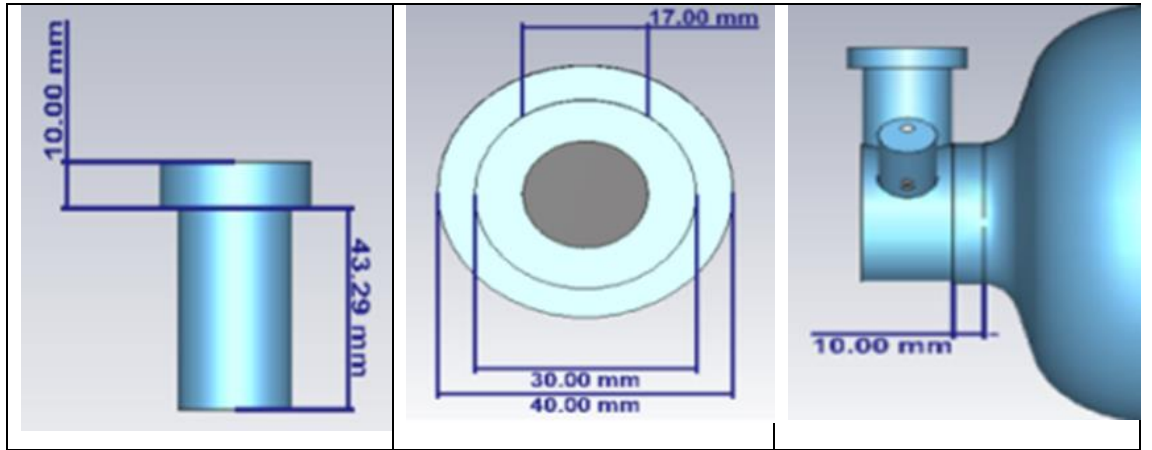
Şekil 3.1 1.5 Hücreli RF güç giriş kuplörü

Tasarımda 1.5 hücreli kavite için RF Giriş Kuplörünün uzunluğu 53 mm alınmıştır. Üst silindir genişliği 10 mm seçilmiştir. Kuplör kaviteden 10 mm uzaklığa yerleştirilmiştir. Kuplörün içindeki iç boru çapı 17 mm alınmış olup dış boru çapı 40 mm seçilmiştir. İç boru materyali mükemmel iletken (Perfect Electrical Conducting - PEC), dış boru materyali ise vakum olarak belirlenmiştir. İç boru uzunluğu 48 mm seçilmiş olup kuplörün tamamının uzunluğu 53 mm'dir. Buradaki değerler SRF kavite içerisindeki elektrik alan dağılımının simetrik şekilde olmasını ve demetin hızlanma modunda enerjisini artırarak ilerleyebilmesini sağlayacak şekilde seçilmiştir. Ayrıca, parçacıkların maksimum enerjiyle itilmesi ve enerjiye sahip olmalarının yanında demet fazla yayınmadan, çalışma frekansı pi-modunda ve 1.3 GHz olacak şekilde (veya en yakın değer), hücre komşuluğunun (kcc) birbirini fazla etkilemeyecek şekilde elde edilecek şekilde olup, SRF kavitenin geometrik tasarımıyla da uyum içerisinde çalışması gerekir. RF güç kuplörü girişinden sağlanan RF alanı ile demetin fazı birbirini destekleyici şekilde olmalı ve demetin enerjisini negatif etkilememelidir. Örneğin, kuplör kaviteden 17 ve 20 mm uzaklığa konularak içeri verilen RF alanının parçacık demetleri üzerine etkisi ve kavite aksamının mekanik davranışları incelenmiş olup 10 mm optimize değerine karar

verilmiştir. Ayrıca demet kayıpları, vakum ve iç-dış basınç (Lorentz Force Detuning) gibi mekanik yapı dengeleri ve problemleri de modellemede önemsenmiştir.



Şekil 3.2 Yüksek güç giriş kuplör iç uzunlukları



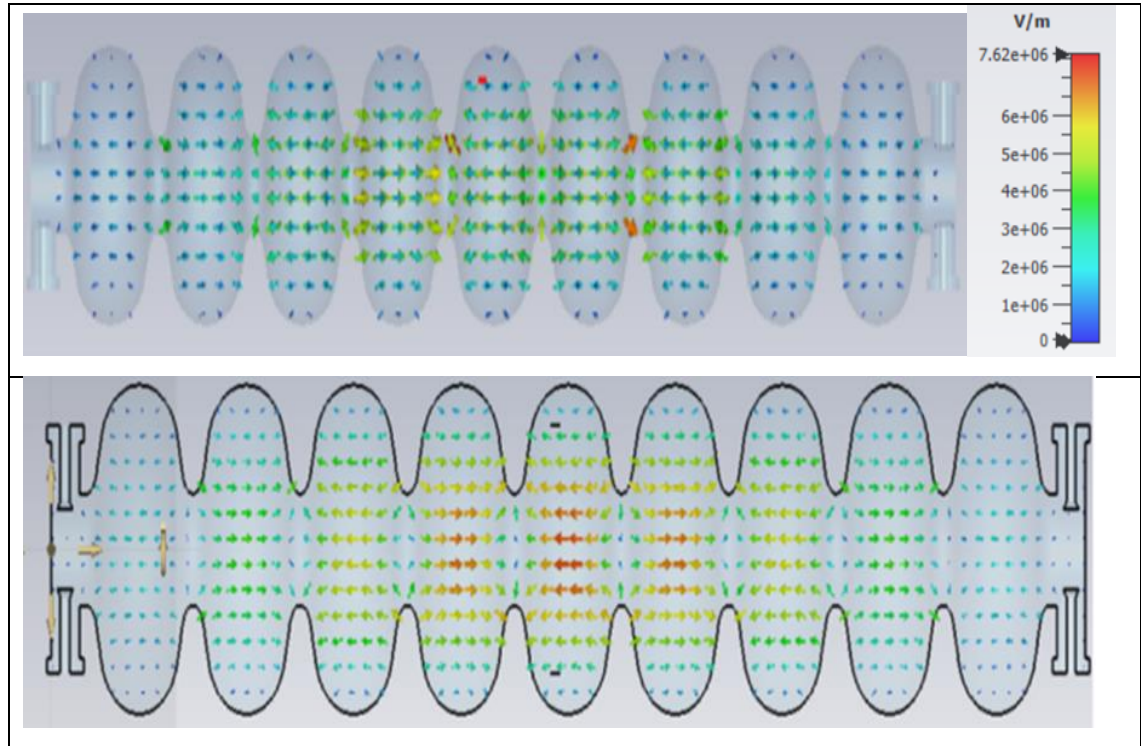
Şekil 3.3 Yüksek güç giriş kuplör uzunlukları

Daha önce yapılan benzer çalışmalarda, kavite hücre sine 48 mm uzağa konulduğunda (demet yolu üzerine) dahi başarılı RF kavite kuplörü elde edilmiş örnekler olmasına rağmen; bu tez kapsamında yapılan çalışmalarda RF ve parçacık kayıpları en az olacak

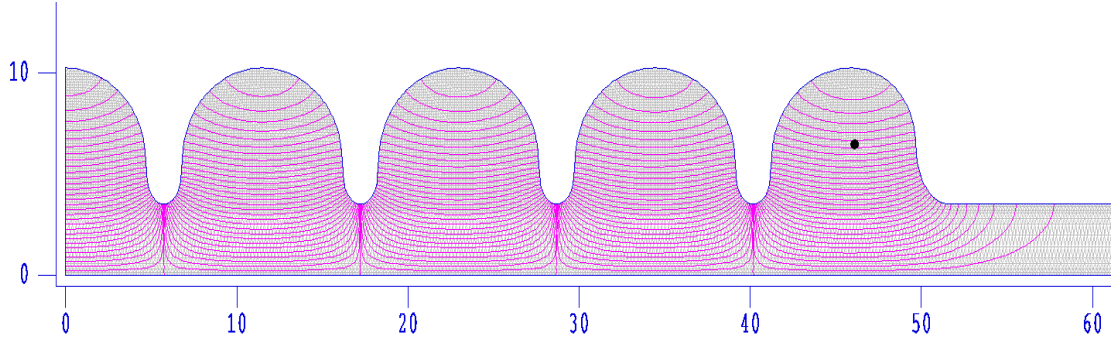
şekilde, demet için optimize bir iletim hattı oluşturulması amaç edinilmiş ve böylece en fazla RF alan iletimi sağlanması için dış kavite hücresinden 10 mm uzaklık seçilmiştir.

RF güç kuplörü ile kavite içerisine verilen RF alanından sonra, kavite içerisinde alan dağılımlarını ve gücü belirlemek ve görmek için Elektromanyetik model, CST MWS (Microwave Studio) çalıştırılmıştır. Kaliteli bir hızlandırıcı tasarımı için kuplördeki iletilen RF alanından azalma olmadan, RF alanı kaviteye iletilmeli ve kavite içerisinde de elektrik alan düzgün ve simetrik bir dağılım göstermeli, kavitenin mekanik yapısının kaldırabileceği değerde olmalıdır. Yapılan çalışmalarda simetrik dağılım elde edilmiştir. Parçacık demetlerinin demet yolu boyunca enerji kazanarak hızlanması için demet yolu boyunca ve çevresinde (iris bölgesinde) yüksek ve yoğun ve elektrik alan çizgileri elde edilmelidir. Şekilde görüldüğü üzere bu yapılan çalışmada sağlanmıştır ve şekillerde görülmektedir.

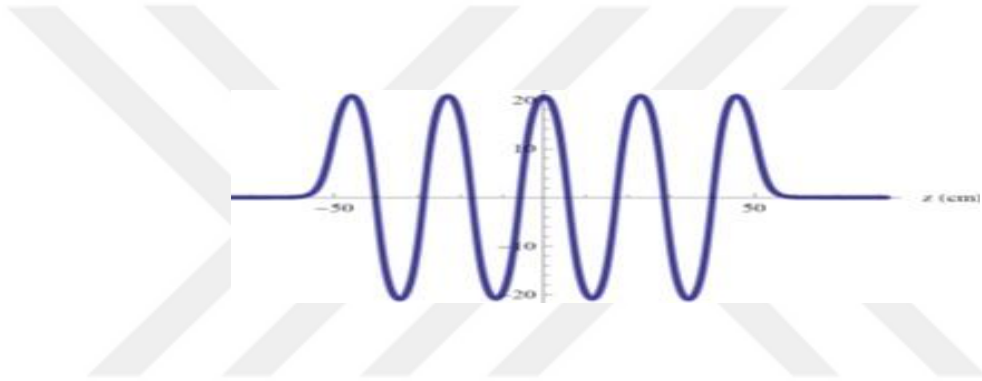
Aşağıda CST ve süperfish/poison programları ile elde edilen elektrik alan dağılımları hem enjektör (Şekil 3.4, Şekil 3.5, Şekil 3.6 'da) hem de ana hızlandırıcı kaviteler için gösterilmektedir.



Şekil 3.4 Kavite ve kuplör üzerindeki elektrik alan dağılımları (CST)

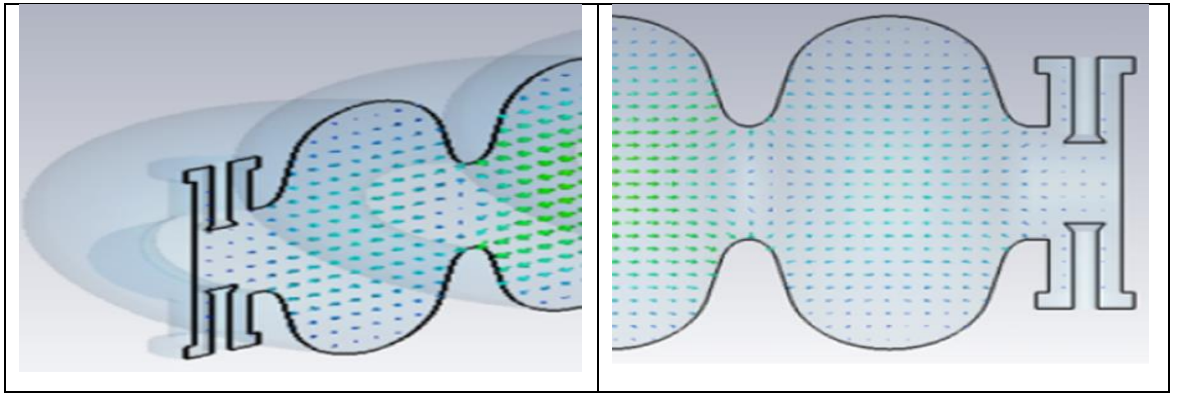


Şekil 3.5 1.299 GHz çalışma frekansında Superfish/Poisson ile kavitede elektrik alan dağılımları



Şekil 3.6 Demet yolunda z-Ez grafiği (Superfish/Poisson)

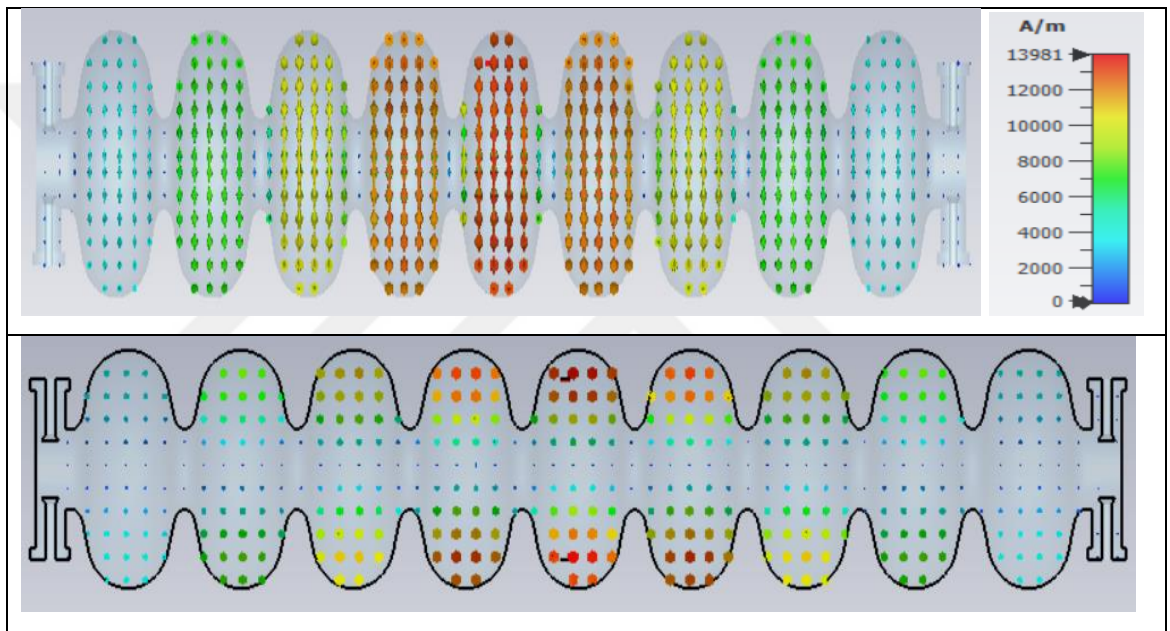
Tasarlanan RF kuplörünün kavite hücreleri içerisine girdirdiği RF alanının sağladığı düzgün ve simetrik EM alan sayesinde parçacıklar bir kavite hücresinden diğerine ileri doğru enerji kazandırılarak itilmektedir.



Şekil 3.7 Kavite ve kuplör üzerinde elektrik alan dağılımları

RF Güç Giriş Kuplörü, Yüksek Mertebe Kuplörleri ve 9 Hücrelik ana hızlandırıcı yapının Elektrik Alanlarının elde edildiği sistem 1.3 GHz çalışma frekansında modellenmiştir ve çalışmaktadır.

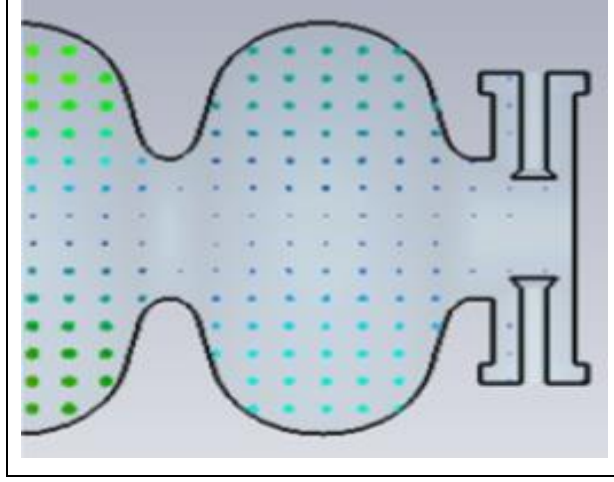
RF Güç Giriş Kuplörü, Yüksek Mertebe Kuplörleri ve 9 Hücrelik ana hızlandırıcı yapının Manyetik Alan dağılımları Şekil 3.8’de görülmektedir. Beklenildiği üzere kavite yüzeyinde yüksek manyetik alanlar içeride demetin kompakt halde bulunmasını sağlamaktadır.



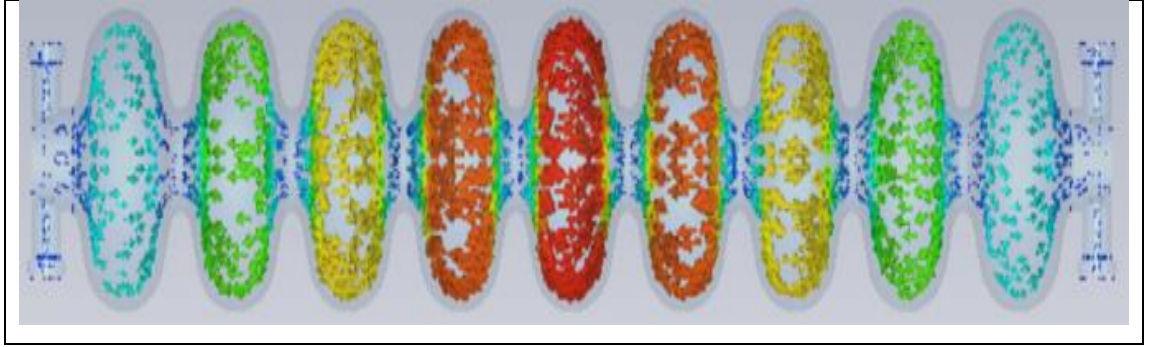
Şekil 3.8 Kavite ve kuplör üzerinde manyetik alan dağılımları

Manyetik Alan Helis şeklinde yol izlediğinden, hızlandırıcı sistemlerde kavite içerisinde dairesel hareket yapar ve kavite içi duvarlarına yoğunlaştığından, bu durum Şekil 3.8’de görüldüğü üzere kavite duvarına yakın kısımlarda ve kavitenin ekvator kubbesi denilen en üst kısmında en yüksek değerine ulaşır. (Manyetik alanın yüksekliği özellikle alt şekilde daha belirgin olarak görülmektedir.).

1.5 Hücrelik kavite hızlandırıcı sistemi ve RF Güç giriş kuplörü üzerindeki Manyetik Alan dağılımları Şekil 3.9’da gösterilmektedir. Dokuz hücrelik kavite sistemine kıyasla alan yoğunluğu fazla olmadığından şiddeti de düşüktür.



Şekil 3.9 1.5 Hücrelik kavitenin manyetik alan dağılımları



Şekil 3.10 9 Hücrelik süperiletken kavitede yüzey akımları

Yüzey direnci, RF yüzeyindeki manyetik alanı desteklemek için ortaya çıkan yüzey akımları tarafından güç dağılımına sebebiyet verir. Yüzey akımları manyetik alanın davranışına paralel olacak şekilde olduğundan Şekil 3.10’da gösterildiği gibidir.

Hem yüzey akımları hem de parçacığın hızlandırılması 9 hücrelik kavitenin orta hücrelerinde (4., 5., ve 6. hücreler) maksimum değerlerine ulaşır, parçacık demetleri bu yüksek hız ve enerji ile ana hızlandırıcının sonuna kadar giderler. Bu durum orta kısımlarda elektrik alan (V/m) ve manyetik alan (A/m) değer ve dağılımları kavite

sisteminin orta hücrelerinde yüksek değerlerde (Turuncu-kırmızı renklerde) açıkça görülmektedir.

S Parametreleri

S Parametreleri ‘Scattering’ (Saçılım) kelimesinden türetilmiştir. Yüksek frekansta çalışan mikrodalga devreleri için kullanılmaktadır. Mikrodalga frekanslarının voltaj ve akımı direk olarak ölçülemez. Vektör analizör kullanarak gönderilen ve yansıyan dalgalar ölçülebilir (Caspers 2010). Bu sebeple portlara giren ve çıkan değerlerin oranlarına bakılarak ölçüm yapılması sağlanmaktadır. S Parametreleri bir elektronik cihazda portları sayesinde cihaz hakkında bilgi sahibi olunmasını sağlar. S Parametreleri ile kazanç, kayıp, gerilim duran dalga oranı (VSWR) ve empedansı hesaplanabilir (Antenna Theory, 2015).



Şekil 3.11 İki bağlantılı bir hat

Mikrodalga cihazının birden fazla giriş ve çıkışı olabilir. İki girişli ve iki çıkışlı bir mikrodalga devresi düşünüldüğünde bu mikrodalğanın giriş ve çıkışların her birisi bir hat şeklinde göz önüne alınabilir. Ölçmek istenilen voltaj, akım, güç bu hatlarda ilerleyen elektromanyetik dalgalardır. Bu portlara dalgaların girdiği ve bu portlardan dalgaların çıktığını düşünülürse, örneğin ilk olarak a_1 ’e bir dalga uygulansın. Bu dalga ilk olarak b_1 ’den geri yansırken dalganın diğer kısmı b_2 ’den çıkar. S_{11} bu devrenin dört saçılma parametrelerinden birisidir. a_1 ’e uygulanan dalganın b_1 ’den geri yansımasını ifade etmektedir, diğer bir deyişle çıkan dalganın gönderilen dalgaya oranıdır.

$$S_{11} = \frac{b_1}{a_1} \quad (a_2) = 0 \quad (3.1)$$

a_2 'ye bir dalga uygulandığında bu dalga ilk olarak b_2 'den geri yansırken dalganın diğer kısmı b_1 'den çıkar. S_{22} bu devrenin diğer dört saçılma parametrelerinden birisidir ve a_2 'ye uygulanan dalganın b_2 'den yansımısını ifade etmektedir (Dunleavy 2020).

$$S_{22} = \frac{b_2}{a_2} \quad (a_1) = 0 \quad (3.2)$$

a_2 'ye bir dalga uygulandığını bu dalganın b_1 'den çıktığını düşünelim. b_1 'den çıkan dalganın ve a_2 'ye giren dalgaya oranı S_{12} olarak ifade edilmektedir.

$$S_{12} = \frac{b_1}{a_2} \quad (a_1) = 0 \quad (3.3)$$

a_1 'e bir dalga uygulandığında ise b_2 'den dalganın çıktığı tekrar düşünülürse; b_2 'den çıkan dalganın ve a_1 'e giren dalgaya oranı S_{21} olarak ifade edilmektedir.

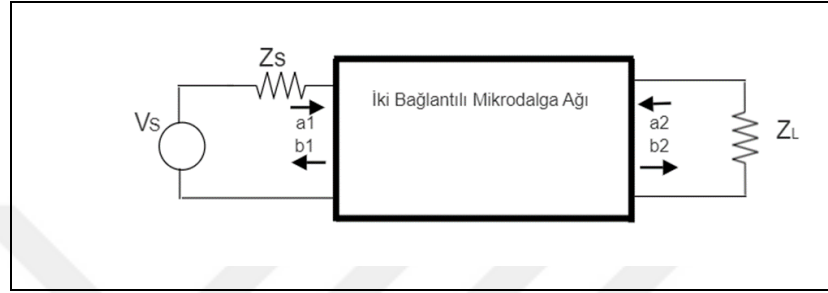
$$S_{21} = \frac{b_2}{a_1} \quad (a_2) = 0 \quad (3.4)$$

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}$$

Giren dalganın büyüklüğüne göre iletilen ve yansıyan dalgaların büyüklüğü ve fazı değişebilir. Faz ve büyüklük ile ifade edilmektedir. Bu sebep ile S Parametreleri kompleks sayılardır.

Pozitif gerçekte reel empedans Z_0 olarak göz önüne alınırsa, gelen gerilim a_1, a_2 ; yansıyan gerilim b_1, b_2 kaynak empedansı Z_S yük empedansı Z_L, V_S güç kaynağı olarak ifade

edilebilir. Z_0 bir referans empedansıdır. Genellikle bir hattın empedansı karakteristik empedansı ($Z_0 = 50\Omega$) olarak kullanılır. $Z_S = Z_L = Z_0$ olduğu varsayılırsa, V_1 kaynak empedansı sonrasındaki gerilimdir. Bu gerilim ve bu empedans üzerinden geçen akım I_1 , aynı şekilde yük empedansı sonrasındaki gerilim V_2 ve bu empedans üzerinden geçen akım I_2 'dir. Buna göre,



Şekil 3.12 İki bağlantılı mikrodalga ağı

$$a_1 = \frac{V_{1+} I_1 Z_0}{2\sqrt{Z_0}} = \frac{V_{i1}}{\sqrt{Z_0}} \quad \text{Port 1'e gelen voltaj dalgası} = V_{1+} I_1 Z_0 \quad (3.5)$$

$$a_2 = \frac{V_{2+} I_2 Z_0}{2\sqrt{Z_0}} = \frac{V_{i2}}{\sqrt{Z_0}} \quad \text{Port 2'e gelen voltaj dalgası} = V_{2+} I_2 Z_0 \quad (3.6)$$

$$b_1 = \frac{V_{1-} I_1 Z_0}{2\sqrt{Z_0}} = \frac{V_{r1}}{\sqrt{Z_0}} \quad \text{Port 1'den yansıyan voltaj dalgası} = V_{1-} I_1 Z_0 \quad (3.7)$$

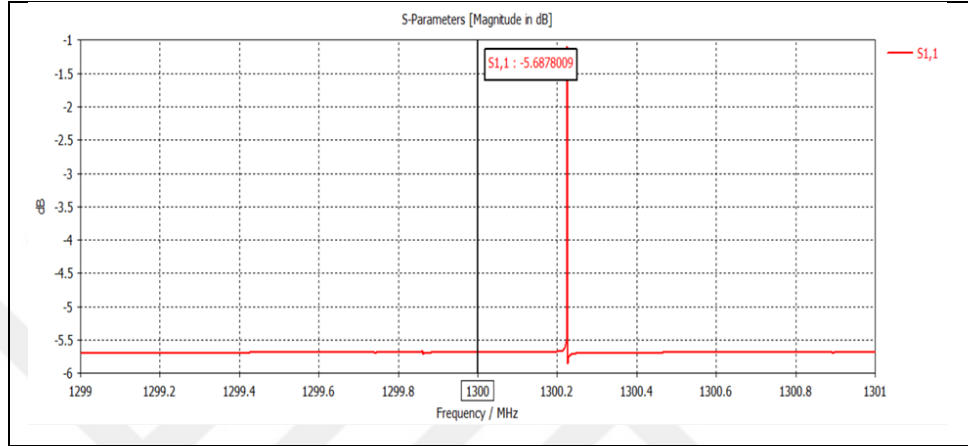
$$b_2 = \frac{V_{2-} I_2 Z_0}{2\sqrt{Z_0}} = \frac{V_{r2}}{\sqrt{Z_0}} \quad \text{Port 2'den yansıyan voltaj dalgası} = V_{2-} I_2 Z_0 \quad (3.8)$$

$$b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2 \quad (3.9)$$

$$b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2 \quad (3.10)$$

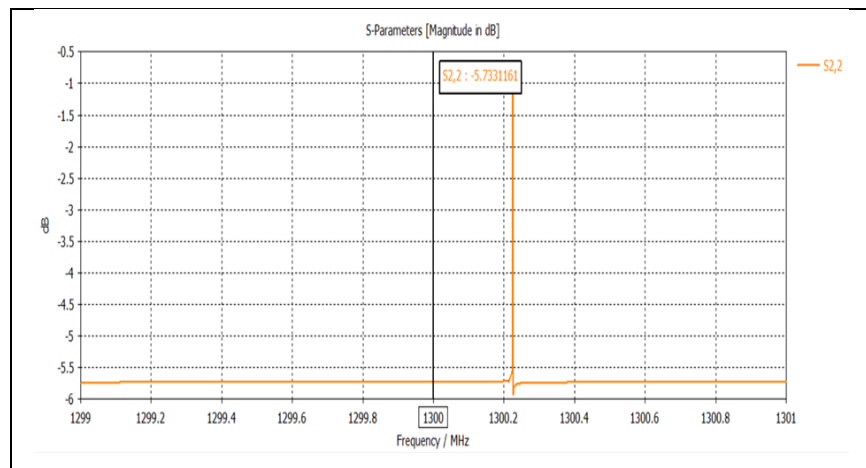
HOM Kuplörlü kavitenin 1.3 GHz çalışma frekansında S Parametreleri incelenmiştir. RF kaviterlerde S Parametreleri ile güç, kayıp, gerilim duran dalga oranı hesaplanır. RF gücü süperiletken kaviterlerde S parametreleri sayesinde hesaplamalar yapılır. Bu parametrelerdeki büyüklük dB (Desibel) ile ifade edilmektedir çünkü iki fiziksel

parametrik değerin oranını vermesi için ortaya çıkarılmış logaritmik güç bir birimdir dBm ise 1 mW'a referans verilen logaritmik güç birimidir (UNSW Sydney 2023). S parametreleri mikrodalga için ortaya atılmış ve türetilmiş olsa da teknik olarak aynı sistematik kullanılmaktadır. Şekil 3.13'te çalışma frekansına karşı S-parametresinin değişimi görülmektedir (S_{11}).



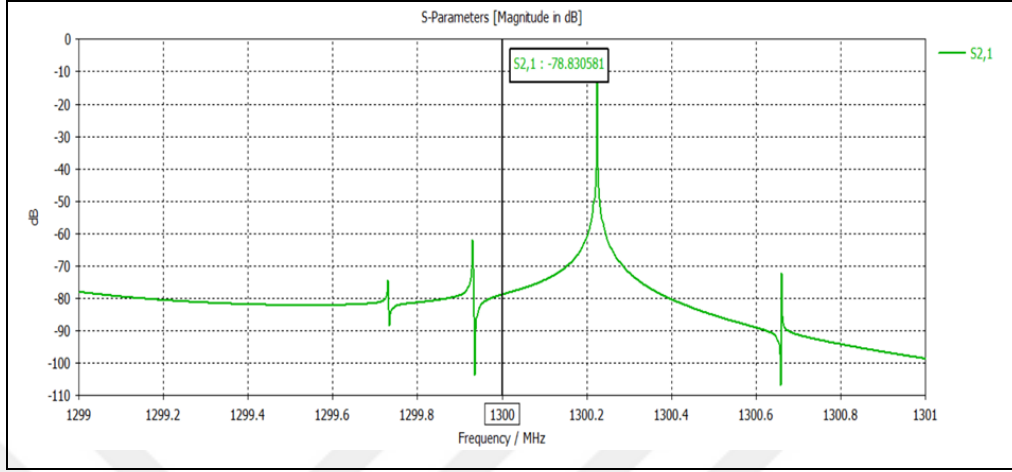
Şekil 3.13 S_{11}

S_{11} grafiği, geri dönüş kaybının 1.3 GHz civarında -5.68 dB'lik bir geri dönüş kaybına sahip olduğu görülmektedir. S_{11} yansıtma katsayısı olarak bilinmektedir.



Şekil 3.14 S_{22}

S_{22} grafiği incelendiğinde, 1.3 GHz frekansında Port 2 giriş ve çıkışlı geri dönüş kaybının -5.73 dB olduğu görülmektedir.



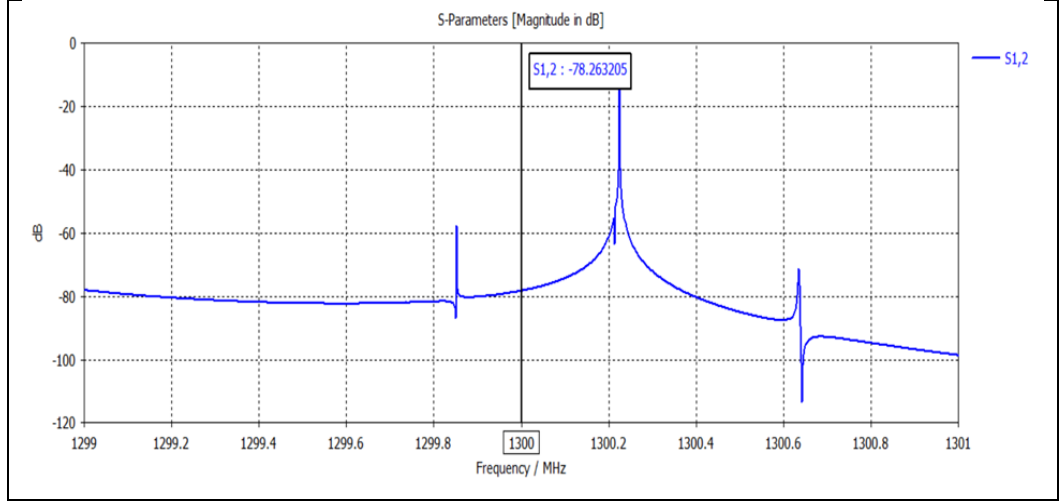
Şekil 3.15 S_{21}

S_{21} port 1'e verilen güç girişi port2'de alınan gücü ifade etmektedir.

$S_{21} = -78$ dB, Port 1'e iletilen gücün Port 2'ye iletildiğini ifade etmektedir.

Eğer $S_{21} = 0$ olsaydı. Port 1'e iletilen tüm gücün Port 2'de bittiği anlamına gelmektedir.

S_{12} port 2'e verilen güç girişi port 1'de alınan gücü ifade etmektedir. $S_{12} = -78$ dB'dir. 1300 MHz frekansında bu durumda 78 dB'lik bir gücün, port 2'den port 1'e gücün iletildiğini ifade etmektedir.



Şekil 3.16 S_{12}

3.2 Yüksek Mertebe Mod Kuplörleri

Bir kaviteden geçen elektron demetleri kendisinden sonra gelecek yükleri ciddi şekilde etkileyecek modları uyarır. Bu modlar yeterince sönümlenmezlerse, demetin stabil olmamasına ve demet kayıplarına yol açar. Demetin bozunumu olmasa bile yüksek mertebe modlar demet kalitesini düşürerek hızlandırıcılarda demetlerin yeterince enerji kazanamamasına ve parlaklığın kaybına yol açar. SRF Kavitelerde yüksek mertebe modlar (HOM) kavite duvarlarındaki ek güç dağılımından dolayı kriyojenik kayıplara da yol açar. HOM Kuplörün esas fonksiyonu demet tarafından etkilenmiş HOM güçlerinin dışarı alınmasıdır ve bir kavitede bir klistron tarafından sağlanan hızlandırıcı mod gücü dışındaki modların dışarı atılmasıdır. 3 ana HOM Kuplör çeşidi vardır, bunlar: Dalga kılavuzu, koaksiyel ve demet tüpü.

Koaksiyel HOM Kuplör, düşük ve orta düzeyde HOM gücünün dışarı alınması için kompakt ve uygundur.

3.2.1 9- Hücrelik kavite sisteminde HOM'ların tasarımı ve analizi

Kavite tarafından yüksek akımlı demeti hızlandırabilmek için tehlikeli modlar belirlenmelidir. Bu durum 3 kısıma ayrılır.

1-Demet eksenini boyunca boylamsal elektrik alan şiddetlidir.

2-Demet ekseninden uzaklaştıkça boylamsal elektrik alan vardır fakat demet ekseninde uzaklaştıkça yok olur.

3-Elektrik alan eninedir ve güçlüdür (Belomestnykh, Shemelin 2005).

Yüksek Mertebe Modlar demetin stabilitesini, hızlandırıcı sistemin verimini ve soğutma gereksinimlerini etkileyen en önemli hızlandırıcı bileşenlerindendir. Yüksek Mertebe Mod Kuplörleri, kavitede demetin dolaştığı hızlandırıcı modlardan arta kalan, kullanılmayan RF güçlerini kavite sisteminden dışarı almakta kullanılır. Diğer bir deyişle Yüksek Mertebe Mod Kuplörleri kavite içerisindeki hızlandırıcı mod dışındaki temel güçleri uygun bir şekilde reddetmek için monte edilir. Ayrıca HOM çoklu modlara bağlaşım yapmak için kullanılır, dejenere ortogonal modlara bağlaşım yapmak için de kullanılır. Diğer yandan geniş bant aralığında HOM enerjisini yeterli miktarda dışarı atılması için kullanılır. Demetin davranışına ve özelliklerine minimum düzeyde etki edecek şekilde ve multipacting'den kaçınılacak şekilde tasarlanmalıdır. Ayrıca ortamda dağılan ve ısı oluşturan gücü yapının dışına almak için; kavite içerisinde daha geniş kısımlardaki modları yönetmek için yüklenmiş durumdaki kavitelerde uygun soğutma ortamını sağlamak içinde Yüksek Mertebe Kuplörleri kullanılmaktadır. Bu Yüksek Mertebe Mod Kuplörleri tasarlamak için fiziksel spesifikasyonları, kuplörler için RF Mühendisliği içeriği oluşturularak ve sonrasında dizayn prosesi CST ile yapılmıştır.

Bir kavite sisteminde hızlandırıcı hücre elektromanyetik dizaynının oluşturulması, hızlandırıcı alanların pik yüzey alanlarına (elektrik ve manyetik) göre oranlarının beklenen değerlerde (E_{pk}/E_{acc} 'nin tipik değerleri 2...2,6'dır; tipik H_{pk}/E_{acc} değerleri 40...50 Oe/(MV/m) elde edilmesi gereklidir (Belomestnykh, Shemelin 2005).

Ayrıca düşük sıcaklıkta güç dağılımı, radyasyon basıncına (Lorentz Kuvveti) ve atmosferik basınca karşı mekanik dayanıklılık gibi konular çalışma verimini doğrudan etkilediğinden üzerinde detaylı modelleme çalışmaları yapılmıştır.

RF güç kuplöründe belirtilen spesifikasyonlara ek olarak E_{pk}/E_{acc} , H_{pk}/E_{acc} ve radyasyon basıncı ve dengesi (Lorentz Kuvveti), atmosferik basıncı, mekanik dayanıklılık gibi ek özelliklerde gözönüne alınarak HOM kuplör tasarlanmıştır.

Yüksek Mertebeli Kuplörlerin Özellikleri

- Demet tarafından etkilenmiş olan yüksek mertebe modların oluşturduğu istenmeyen RF gücünü kaviteden uzaklaştırmaya yarar,
- Dalga Kılavuzu veya koaksiyel benzeri filtre tipinde olabilir.
- Kavite kriyojenik ortamından enerjinin uzaklaştırılmasını veya bölgesel olarak dağıtılmasını sağlar.
- Çalışılan frekansı etkilemeden geniş frekans bantları üzerinden RF gücünün verimli bir şekilde taşınmasına gereksinim duyar.
- Yüksek Mertebe Gücünün kriyojenik modül içerisinde dağılıp dağılmadığına bağlı olarak bulunduğu ortamla kriyojenik ortam arasında bağlantı kurabilir(Rusnak 2003).

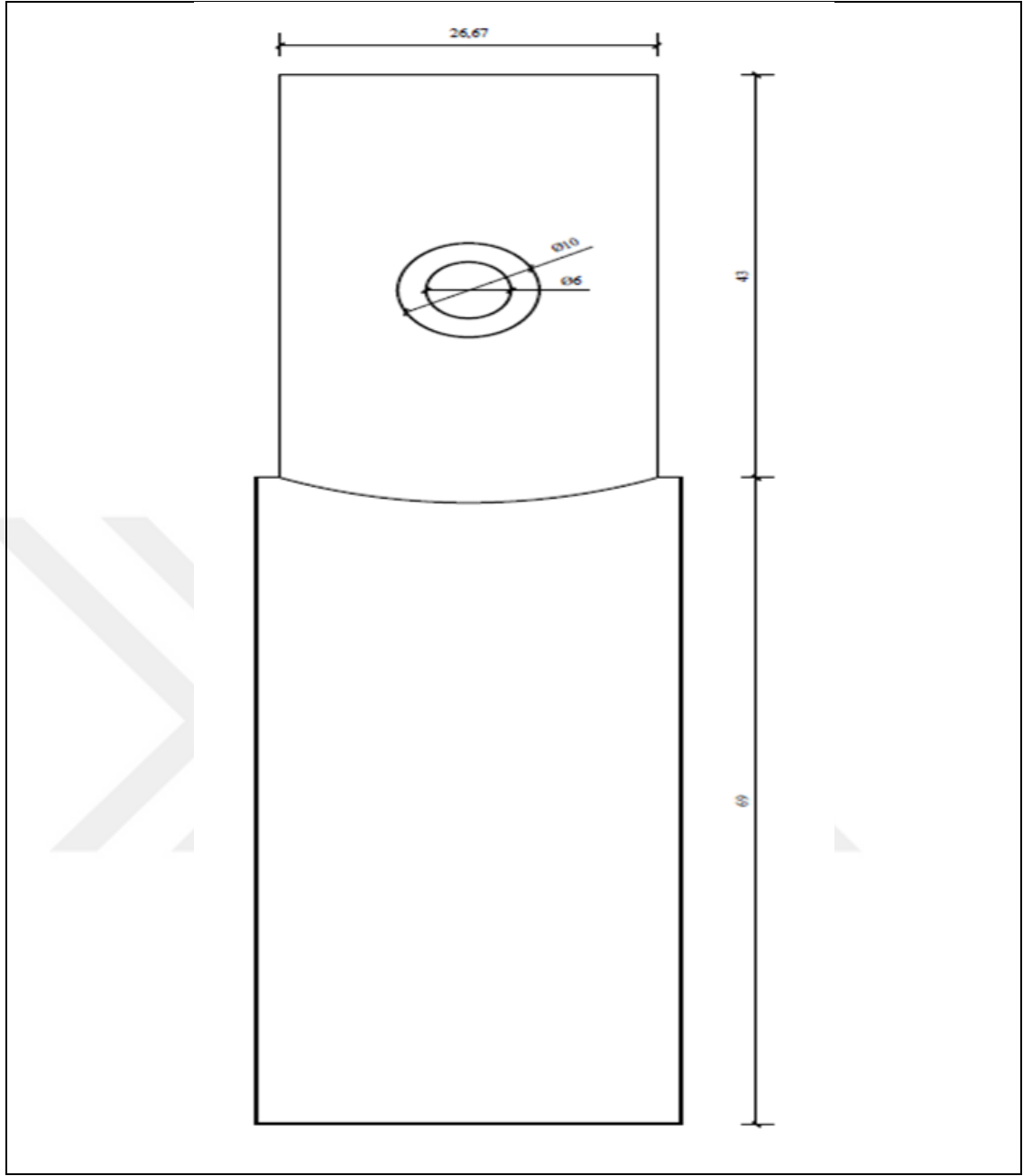
Bu tez kapsamında tasarlanan Koaksiyel benzeri HOM kuplörü Şekil 3.17’de görülmektedir. Burada problemlili, hızlandırıcı olmayan modlar reddedilmiştir.

HOM Kuplörü için CST’de 15 tane mod çalıştırılmış olup, bunların bir tanesi pi modunda hızlandırıcı moddur ve kalanı da HOM modlarıdır, bu HOM modlarının özellikleri Çizelge 3.1’ de verilmiştir.

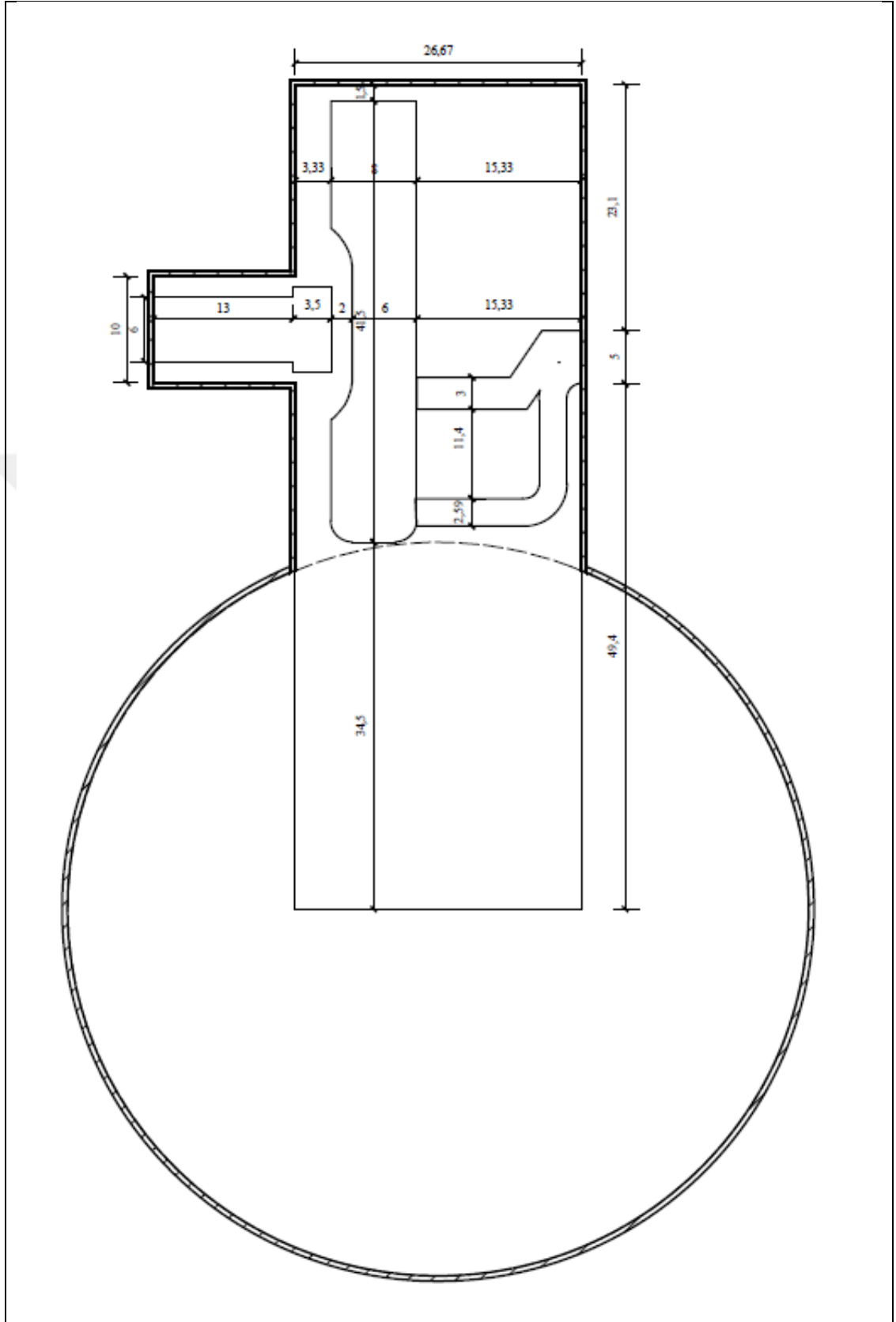
Çizelge 3.1 CST’de çalışma frekansı temel alınarak çalıştırılan 15 mod

Mod	Frekans (MHz)	E(Elektrik)-Alan (V/m)	H(Manyetik)-Alan (A/m)	Yüzey Akımı (A/m)
1	1300.25	7.4970×10^6	14012.8	13244.8
2	2298.76	7.6530×10^6	31423.2	31766
3	2300.33	7.2880×10^6	30131.9	31272.5
4	2302.78	7.6330×10^6	27914.7	29069.1
5	2305.93	7.2510×10^6	26290	26920.4
6	2309.45	7.6130×10^6	24335.2	25149
7	2313.03	7.5460×10^6	23240.2	23744.3
8	2316.28	7.5688×10^6	21907.6	22573.2
9	2318.88	7.3308×10^6	21383.1	21428.6
10	2320.54	7.5020×10^6	20788.4	21188.2
11	2382.06	8.5823×10^6	19498.4	19440.2
12	2386.61	8.4957×10^6	18684.7	18708.5
13	2393.91	8.1210×10^6	19512.3	19406.5
14	2403.56	7.7593×10^6	19169.8	19185.8
15	2414.98	6.7080×10^6	19836.9	19779.2

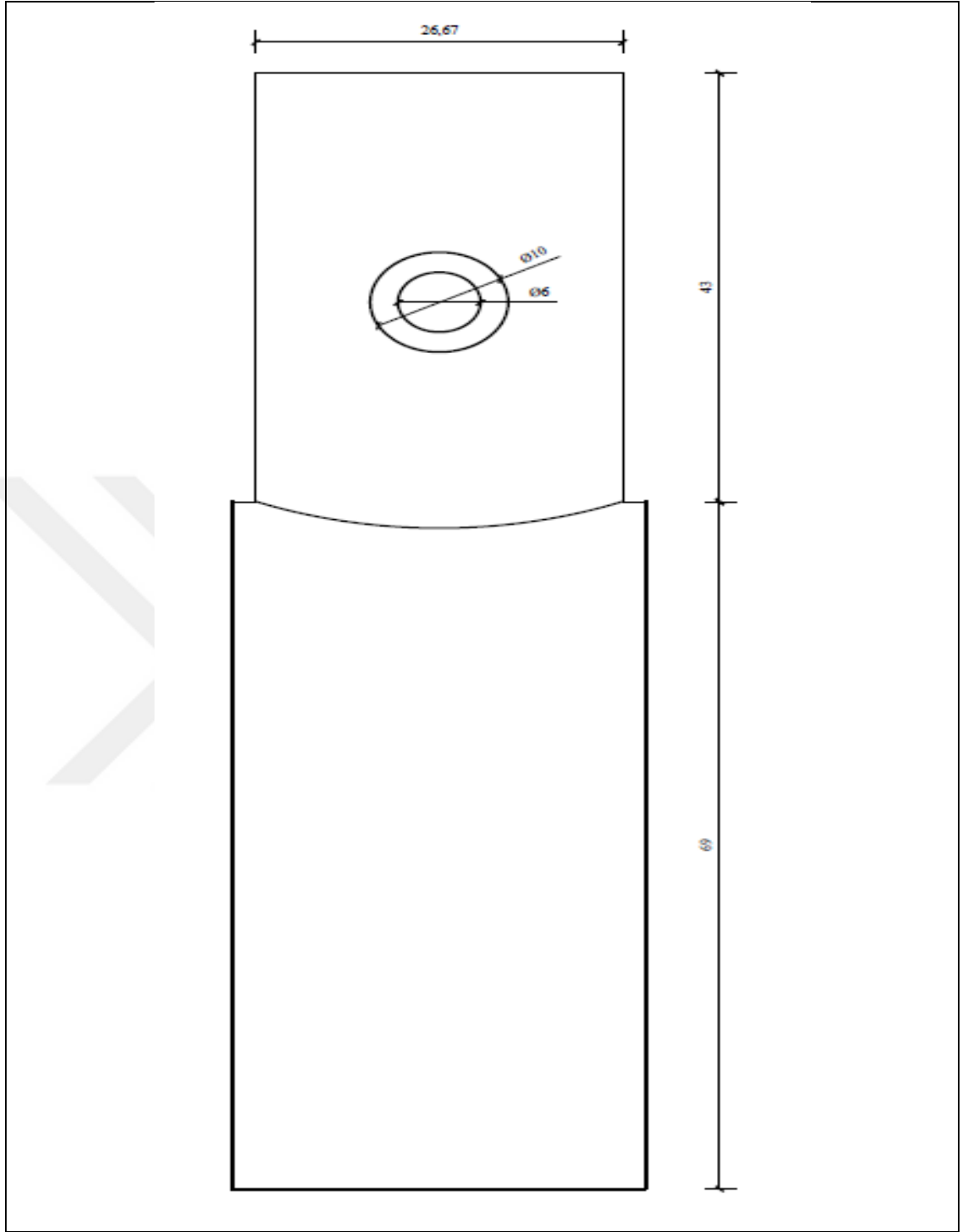
Tasarlanan HOM Kuplör bir LC devresidir ki ayarlama aralığının kapasitansını ve iç iletkenin indüktansını içerir. Ayrıca L uzunluğunda olup yukarı taslağa kadar uzanır. Burada kapasitif bağlantı ile, HOM gücünün toplama probu tarafından çıkarılması gerçekleştirilir. Hızlandırıcı mod dışındaki modların kavite dışarısına alınabilmesi için tasarladığımız en optimize HOM Kuplör parametreleri: HOM Kuplörün yüksekliği 77.5 mm, filtre uzunluğu (indüktans) 25.5 mm, çıkış toplama probu 6 mm, demet boru çapı 69 mm, ayarlama aralığı (kapasitans) 1.5 mm HOM iç boru çapı 8 mm değerlerindedir.



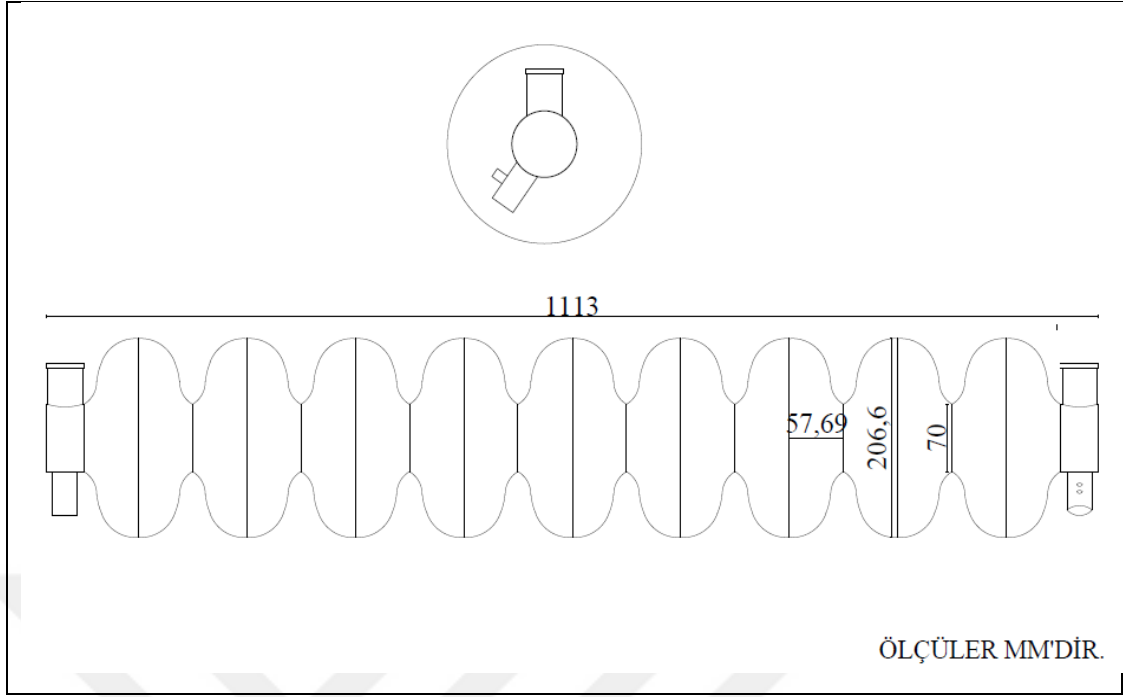
Şekil 3.18 Tasarlanan L tipi yüksek mertebe kuplörün 2 boyutlu yan kesiti [mm]



Şekil 3.19 Tasarlanan I tipi yüksek mertebe kuplörünün 2 boyutlu kesiti [mm]



Şekil 3.20 Tasarlanan I tipi yüksek mertebe kuplörün 2 boyutlu yan kesiti [mm]



Şekil 3.21 9 Hücreli kavite

Çizelge 3.2 Yüksek HOM Kuplör ve Yüksek Güç Giriş Kuplör Tasarım sonrası CST Programında Hesaplamalar

Parametre	Birim	Kavite 9 Hücre
Epk	MV/m	7.599
Hpk	A/m	12815
B	T	0.016
Eacc	MV/m	2.423
Epk/Eacc		3.135
Hpk/Eacc	Oe/(MV/m)	66.5

Hızlandırıcı alanların elektrik ve manyetik alanlarına göre oranlarının beklenen değerlerde (Epk/Eacc'nin tipik değerleri 3.135'dir; tipik Hpk/Eacc değeri 66.5 Oe/(MV/m) elde edilmiştir. Epk değeri 7.599 MV/m, Hpk değeri 12815 A/m'd

4. SONUÇ VE TARTIŞMA

Yapılan tez çalışması kapsamında, süperiletken doğrusal hızlandırıcı sistemler için RF Güç Kuplörü ve HOM Kuplörü tasarımları yapılmıştır. Hem SRF Güç kuplörleri hem de HOM kuplörleri hızlandırıcı tasarımlarının en önemli ve hassas bileşenlerindendir. Hızlandırıcı sistemler için fabrikasyonu yapılırken birçok dikkat edilmesi gereken hususlar: çalışma frekansı, RF alanlarının kavite hücreleri içerisindeki dağılımı ve simetrik davranışları, sistemin mekanik yapısı, alanların simetrikliği, mekanik ve alan problemleri, hücre bağlaşımı vb. vardır. Her iki tasarım da hızlandırıcı sistemlerde demet kalitesi ve demet enerjisini doğrudan etkilediğinden RF ve HOM kuplör tasarımlarının hassas yapılması önemlidir. Tasarımlar 3 boyutlu CST ve 2 boyutlu superfish/Poisson programları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan tasarımlarda SRF kavite sistemlerinin geometrisi, fiziği, mekanik, radyasyon ve soğutma, vakum gereksinimleri de göz önünde bulundurulmuş olup, yapılan çalışmalarda hızlandırıcı mod olan pi-modu frekansı ayrılarak diğer modlardaki problemlili modların kavite dışarısına alınabildiği görülmüştür. Güç kuplörü ile de kavite sistemi içerisine yeterli ve uygun düzeyde RF alanı sağlandığı kavite içerisindeki elektrik ve manyetik alanların yüksek değerlerde ve simetrik yapıda dağılımının görülmesinden anlaşılmaktadır. Yapılan çalışmalarda elektrik alan boylamsal doğrultuda, eksenel simetriye sahip bir şekilde eksen çevresinde maximum olacak şekilde, manyetik alan ise kavitenin eksenden uzak, kavite duvarına yakın bombeli kısımlarında yoğun olacak şekilde dağılım göstermiştir. Bu durum RF alanının içeriye kayıpsız ve düzgün sağlandığının dolayısıyla RF güç kuplörünün optimize ve verimli tasarlandığının kanıtıdır. SRF Güç Kuplörü ile kavite içine alınan RF gücünün analizleri yapılmıştır. Ayrıca HOM Kuplör ile de kavite içerisindeki hızlandırıcı pi-modu dışındaki (çalışma frekansı ve elektrik alan davranışları ile belirlenir) problemlili RF modlarının dışarı atılması 5 farklı mod üzerinde çalışılmış ve 4 HOM modu HOM kuplörü ile dışarı alınabilmektedir.

KAYNAKÇA

[1] Belomestnykh, S., Shemelin, V. (2005). "High-B Cavity Design – A Tutorial". 12th International Workshop on RF Superconductivity (SRF2005) içinde, Ithaca, NY, Temmuz, 2005.

[2] Caspers, F. (2010). "RF Engineering Basic Concepts: Basic Concepts: S -Parameters". CAS.

[3] CERN. (2023). "CERN's accelerator complex". <https://www.home.cern/science/accelerators/accelerator-complex> [Erişim Tarihi : 26 Ağustos 2023].

[4] CERN. (2023). "CERN Accelerating: Radiofrequency cavities". <https://home.cern/science/engineering/accelerating-radiofrequency-cavities> [Erişim Tarihi: 26 Ağustos 2023].

[5] CERN. (2023). "CERN Beam Dump". <https://home.cern/tags/beam-dump>, [Erişim Tarihi : 25 Ağustos 2023].

[6] CERN. (2023). "CERN Superconductivity". <https://home.cern/science/engineering/superconductivity> [Erişim Tarihi : 26 Ağustos 2023].

[7] Demko, J., Fesmire, J., Shu, Q. (2022). "Cryogenic Heat Management: Technology and Applications for Science and Industry". In First edition, Chapter 11.

[8] Diamond Light Source. (2020). "COVID-19'a Karşı Yeni Bir Antiviral İlaç Adayı Tespit Edildi". <https://www.diamond.ac.uk/Home/News/LatestNews/2020/10-11-2020-1.html;jsessionid=ED1BA3D389D5D6FF348507C47AA0FCD6> [Erişim Tarihi : 18 Ağustos 2023].

[9] Dunleavy, L. (n.d.). "S-parameters". University of South Florida, USA. Retrieved from: https://www.uvm.edu/~muse/modules/RFH/MUSE_S-parameters_081003.pdf, [Erişim Tarihi : Ağustos 2023].

- [10] Elektromanyetik spektrum. (2023).
https://gozlemevi.omu.edu.tr/depo/elektromanyetik_spektrum.pdf [Erişim Tarihi : 18 Aralık 2023].
- [11] Giammarco, N. (Mart, 2020). "Synchrotron radiation and Synchrotron light sources".
<https://www.nottingham.ac.uk/aspire-itn/aspire-blog/aspire-blogs-2020/synchrotron-radiation-and-synchrotron-light-sources.aspx> [Erişim Tarihi : 15 Mart 2023].
- [12] Haebel, E. (1996). "Couplers For Cavities". CERN, Geneva, Switzerland.
- [13] Introduction to Rectangular Waveguides.
<http://www.ee.bilkent.edu.tr/~microwave/programs/magnetic/rect/info.htm> [Erişim Tarihi : 1 Eylül 2023].
- [14] J. Demko, J. Fesmire Shu 'Q. Cryogenic Heat Management' Technology and Applications for Science and Industry Chapter 11 First edition s. 295-315, 2022.
- [15] Ketenoglu, D. (2022). "Işınım Kaynaklarına Giriş Ders Notları". Ankara Üniversitesi, Fizik Mühendisliği, Ankara.
- [16] Marhauser, F. (19-30 Ocak 2012). "SRF Hands On Course at JLab".
- [17] Menzel, T., Stokes, K. (1987). "User's Guide for the Poisson/Superfish Group of codes". Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico.
- [18] Physics Masterclasses. (2023). "Experiment: Forward Scattering".
https://www.physicsmasterclasses.org/exercises/erlangen/de/exp_forsc/exp_forsc_03.html [Erişim Tarihi : 28 Ağustos 2023].
- [19] Radartutorial. (2023). "Radar Principle".
<https://www.radartutorial.eu/01.basics/Radar%20Principle.en.html> [Erişim Tarihi : 20 Ağustos 2023].

- [20] Rusnak, B. (2003). "RF Coupler Tutorial". In 11th Workshop on RF Superconductivity, Lawrence Livermore National Laboratory, Lübeck, Germany.
- [21] Rusnak, B. (2003). "RF Coupler Tutorial". Lawrence Livermore National Laboratory, Lübeck, Germany.
- [22] S-Parameters, Antenna Theory. (2015).
<https://www.antenna-theory.com/definitions/sparameters.php> [Erişim Tarihi : 20 Eylül 2023].
- [23] Sevinç, A. (2019). "Dalga Kılavuzları". Kırıkkale Üniversitesi.
http://atasevinc.net/md/dalga_kilavuzlari.pdf [Erişim Tarihi : 10 Aralık 2023].
- [24] UNSW Sydney. "The Decibel".
<https://www.animations.physics.unsw.edu.au/jw/dB.html> [Erişim Tarihi: 2023].
- [25] USPAS notes Barletta, Spentzouris, Harms. (2023). "Emittance and Lattice".
<https://uspas.fnal.gov/materials/12MSU/emitlect.pdf>, [Erişim Tarihi: 2023].
- [26] Vretenar, M. (2013). "Linear Accelerators". In Advanced Accelerator Physics, Trondheim, Norveç, 19–29 Ağustos 2013, edited by W. Herr, CERN, Geneva.
- [27] Wangler, T. (2011). "Linear Accelerators Principles, History, and Applications". Los Alamos National Laboratory, and Michigan State University.
- [28] Yıldız, H. (2018). "Lineer Hızlandırıcılarda Salındırıcı Yapılarının Tasarımı ve Optimizasyonu". Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi Fen Dergisi, 13(1); 28-37.
- [29] Yıldız, H. (2022). "Hızlandırıcı Fiziğine Giriş Ders Notları". Ankara Üniversitesi, Hızlandırıcı Teknoloji Enstitüsü, Ankara.