

**RF DOĞRUSAL HIZLANDIRICI KOVUK VE  
FOTOKATOT RF-TABANCA TASARIMI VE  
SİMÜLASYONU ÇALIŞMALARI**

**DESIGN AND SIMULATION STUDY ON AN  
RF LINEAR ACCELERATOR CAVITY  
AND PHOTOCATHODE RF-GUN**

**MUSTAFA ÖZCAN**

**DOÇ. DR. AKIN BACIOĞLU**

**TEZ DANIŞMANI**

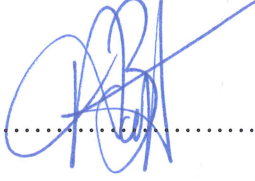
Hacettepe Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin  
Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü  
YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

Mustafa ÖZCAN' ın hazırladığı “*RF Doğrusal Hızlandırıcı Kovuk ve Fotokatot RF-Tabanca Tasarımı ve Simülasyonu Çalışmaları*” adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **FİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Dr. Öğr. Üy. Avni AKSOY  
Başkan



Doç. Dr. Akın BACIOĞLU  
Danışman




Doç. Dr. Emre TAŞÇI  
Üye



Doç. Dr. Bora KALKAN  
Üye



Dr. Öğr. Üy. Sercan ŞEN  
Üye



Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Menemşe GÜMÜŞDERELİOĞLU  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## YAYINLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/raporumun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kağıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Hacettepe üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

- Tezimin/Raporumun tamamı dünya çapında erişime açılabilir ve bir kısmı veya tamamının fotokopisi alınabilir.**  
(Bu seçenekle teziniz arama motorlarında indekslenebilecek, daha sonra tezinizin erişim statüsünün değiştirilmesini talep etmeniz ve kütüphane bu talebinizi yerine getirirse bile, tezinin arama motorlarının önbelleklerinde kalmaya devam edebilecektir.)
- Tezimin/Raporumun ..... tarihine kadar erişime açılmasını ve fotokopi alınmasını (İç Kapak, Özet, İçindekiler ve Kaynakça hariç) istemiyorum.**  
(Bu sürenin sonunda uzatma için başvuruda bulunmadığım takdirde, tezimin/raporumun tamamı her yerden erişime açılabilir, kaynak gösterilmek şartıyla bir kısmı ve ya tamamının fotokopisi alınabilir)
- Tezimin/Raporumun ..... tarihine kadar erişime açılmasını istemiyorum, ancak kaynak gösterilmek şartıyla bir kısmı veya tamamının fotokopisinin alınmasını onaylıyorum.**
- Serbest Seçenek/Yazarın Seçimi**

27 / 06 / 2018

*Mustafa*  
(İmza)

Öğrencinin Adı Soyadı

*Mustafa Çayan*

## ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içeriğindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçlar bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversitede veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

27.06/2018



Mustafa ÖZCAN

## ÖZET

# RF DOĞRUSAL HIZLANDIRICI KOVUK VE FOTOKATOT RF-TABANCA TASARIMI VE SİMÜLASYONU ÇALIŞMALARI

**Mustafa ÖZCAN**

**Yüksek Lisans, Fizik Mühendisliği Bölümü**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Akın BACIOĞLU**

**Haziran 2018, 66 sayfa**

Bu tez çalışması kapsamında, radyo frekansında çalışan doğrusal bir hızlandırıcının kritik öneme sahip alt sistemlerinden, *Fotokatot RF Tabanca* ve *Hızlandırıcı Kovuğun* tasarımı 2,99855 GHz'de çalışacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla nümerik elektromanyetik analiz yeteneğine sahip *Superfish*<sup>®</sup> ve *CST Microwave Studio*<sup>®</sup> adlı simülasyon programları kullanılmıştır. Çalışmaya, hızlandırılacak elektronları üreten *Fotokatot RF Tabanca* tasarımı ile başlanmıştır. İki farklı program kullanılarak tamamlanan tasarıma ait sonuçların birbirleri ile oldukça uyumlu oldukları gözlemlenmiştir. Sonuçlarda gözlemlenen küçük farklılıkların da programların problem çözmede kullandıkları nümerik yöntemlerden kaynaklanabileceği öngörülmektedir. Bu süreç sonunda elde edilen bilgiler kullanılarak, *Hızlandırıcı Kovuk* tasarımı da gerçekleştirilmiştir. Hızlandırma için mümkün olan modlar değerlendirilerek en etkin olan moda göre tasarım sonlandırılmıştır. Yapılan çalışmada tasarlanan birimlere ait şönt empedansı, kalite faktörü,  $R/Q$  oranı ve güç kaybı tepe değeri gibi sistemin karakteristiğini ifade eden değişkenler hesaplanarak elde edilen sonuçlar tartışılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Doğrusal hızlandırıcı, Fotokatot RF tabanca, Hızlandırıcı kovuk, Şönt empedans, Kalite faktörü,  $R/Q$  oranı, Güç kaybı tepe değeri.

## ABSTRACT

### DESIGN AND SIMULATION STUDY ON AN RF LINEAR ACCELERATOR CAVITY AND PHOTOCATHODE RF-GUN

Mustafa ÖZCAN

Master of Science, Department of Physics Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Akın BACIOĞLU

June 2018, 66 pages

In this study, two important parts of a radio frequency linear accelerator (Linac), *Photocathode RF Gun* and *Accelerator Cavity* are designed for an operation at 2.99855 GHz. Two commercially available powerful simulator programs, *Superfish*<sup>®</sup> and *CST Microwave Studio*<sup>®</sup>, are used to make design and simulations numerically. First, the electron generating *Photocathode RF Gun* design is completed. The results of two simulators were found to be consistent with each other. The small differences were attributed to the different algorithms and numerical approximations of the both software. By using the design parameters of the gun, the design of *Accelerator Cavity* is made to accelerate the particles coherently with the gun. Finally, the fundamental design parameters describing the characteristics of linac such as shunt impedance, quality factor,  $R/Q$  ratio and peak power dissipation are calculated and discussed.

**Keywords:** Linear accelerator, *Photocathode RF gun*, *Accelerator Cavity*, Shunt impedance, Quality factor,  $R/Q$  ratio, Dissipation at peak power

## TEŞEKKÜR

Tez çalışması sürecinde birçok üniversite ve bilim insanı ile iletişim kurma şansı yaratarak büyük bir ilerleme kat etmeme imkân veren, lisans hayatımdan bugüne danıştığım her konuda bilimsel birikimi ve insaniyeti sayesinde doğru yolu bulmamı sağlayan değerli danışmanım Doç. Dr. Akın Bacıoğlu'na teşekkür ederim.

Ayrıca bu tez fikrinin ortaya çıkmasına sebep olan ve uzunca bir sürede danışmanlığımı yapan hocam Prof. Dr. Recai Ellialtıoğlu'na da teşekkür ederim.

Tezin tam da umutla umutsuzluk arasında sıkıştığı noktada gösterdiği yol ve aktardığı bilgiler sayesinde tezi sonlandırmamda büyük katkıları olan hocam Dr. Öznur Mete Apsimon'a teşekkür ederim.

Tez çalışmamın her anında, kendi tez çalışması olmasına rağmen, yanımda olan, destek veren ve umudumu hiç kaybetmeme sebep olan biricik eşim, periciğim Gizem'e bu sayfalara sığmayacak ve benim de kelimelerle tarif edemeyeceğim teşekkürlerimi sunarım.

# İÇİNDEKİLER

## Sayfa

ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	ii
TEŞEKKÜR .....	iii
İÇİNDEKİLER .....	iv
ÇİZELGELER .....	vi
ŞEKİLLER .....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR .....	ix
1. GİRİŞ .....	1
1.1 Literatür Özeti ve Araştırmanın Amacı .....	1
1.2 Tezin İçeriği .....	6
2. DOĞRUSAL HIZLANDIRICI TEORİSİ .....	8
2.1 RF Hızlandırıcılar .....	8
2.1.1 Basit Bir RF Hızlandırıcı: “hap kutusu (pill box)” kovuk .....	12
2.1.2 Alan Aktarımlı Doğrusal Hızlandırıcılar .....	16
2.2 İlerleyen Dalga/Duran Dalga Hızlandırıcılar .....	18
2.2.1 İlerleyen Dalga Sabit Empedans (İD-SE) Yapısı .....	19
2.2.2 İlerleyen Dalga Sabit Gradyent (İD-SG) Yapısı .....	20
2.2.3 Duran Dalga (DD) Hızlandırıcılar .....	21
2.3 Hızlandırıcı İçerisindeki Elektronun Hareketi .....	22
2.3.1 Geçiş Zaman Faktörü ve Faz Uyumlu Parçacık .....	22
2.3.2 Elektromanyetik Alan Altında Elektron Hareketi .....	23
2.3.2.1 Temel Denklemler .....	23
2.3.2.2 Paraksiyel Yaklaşım .....	24
2.3.2.3 Enerji Kazancı Hesaplaması .....	25
2.3.3 Boyuna Parçacık Dinamiği .....	25
2.3.3.1 Elektrik Alan Modeli .....	26
2.3.3.2 Hareket Denklemi .....	27
2.4 Tasarım Parametrelerinin Optimizasyonu .....	33
3. DOĞRUSAL HIZLANDIRICI TASARIMI .....	36
3.1 Fotokatot RF Tabanca Tasarımı .....	36



3.2 Kovuk Tasarımı .....	44
4. SONUÇLAR.....	52
KAYNAKLAR.....	57
EKLER .....	60
EK-1 Superfish Fotokatot RF Tabanca Tasarım Dosyası .....	60
EK-2 Superfish Kovuk Tasarım Dosyası .....	62

## ÇİZELGELER

### Sayfa

Çizelge 3.1 Superfish ve CST programlarından elde edilen Fotokatot RF tabanca tabanca parametreleri.....	40
Çizelge 3.2 CST ve Superfish'ten elde edilen rezonans frekansları.....	42
Çizelge 3.3 Superfish ve CST programlarından elde edilen karakteristik Kovuk parametreleri.....	47
Çizelge 3.4 CST ve Superfish'ten elde edilen rezonans frekansları.....	50
Çizelge 4.1 Superfish ve CST programlarından elde edilen Fotokatot RF Tabanca ve Kovuk parametreleri.....	52
Çizelge 4.2 CST ve Superfish'ten elde edilen rezonans frekansları.....	54

# ŞEKİLLER

## Sayfa

Şekil 1.1 Çift periyotlu kovuk (a) aksenal alan aktarımı, (b) eksen dışı alan aktarımı [9] .....	3
Şekil 1.2 Fotokatot RF tabanca [14].....	5
Şekil 2.1 Doğrusal hızlandırıcı blok diyagramı [1] .....	9
Şekil 2.2 RF Doğrusal hızlandırıcıdaki kümelenendirilmiş (paketlendirilmiş) parçacıklar [1] .....	9
Şekil 2.3 Silindirik kovukde oluşan TM moduna ait Elektrik (E) ve Manyetik (B) alanlar .....	10
Şekil 2.4 Disk-Yüklenmiş (ing. <i>disk-loaded</i> ) ilerleyen dalga yapısı [26] .....	10
Şekil 2.5 Alvarez DTL [29].....	11
Şekil 2.6 RFQ yapısı [33].....	12
Şekil 2.7 Vakum ortamındaki basit bit hap kutusu hücresi .....	13
Şekil 2.8 Silindirik hap kutusu kovuğunda TM modu için Elektrik ve Manyetik alan dağılımı.....	15
Şekil 2.9 3 hücreden oluşan sistemin devre modeli .....	17
Şekil 2.10 İlerleyen dalga (a) ve duran dalga (b) hızlandırıcıların temelleri [2] .....	19
Şekil 2.11 Boyuna faz uzayında parçacık hareketleri. (a) $\beta s_{ys} = \text{sabit}$ , (b) Adiyabatik hızlanma, <i>golf sopası</i> demet giriş kısmını göstermektedir (1,kırmızı). Mavi grafik (2) ise iki parçacığın yörüngesini göstermektedir. İki parçacığın hareketinde faz salınımasının genliği hızlanma ile zayıflar [35].....	29
Şekil 2.12 Parçacıkların enerji kazanç gösterimi.....	29
Şekil 2.13 Senkron fazın fonksiyonu cinsinden kova boyutları [35] .....	31
Şekil 3.1 CST’de tasarımın üç boyutlu görünümü .....	37
Şekil 3.2 Tasarımın boyutlar-cm .....	37
Şekil 3.3 CST Microwave Studio’den elektrik alan dağılım.....	38
Şekil 3.4 Superfish’te elektrik alan dağılımı (x ve y eksenleri uzunluktur, cm) .....	38
Şekil 3.5 Fotokatot RF tabancanın eksen boyunca oluşan elektrik alan .....	39
Şekil 3.6 Yapı içerisinde eksen boyunca oluşan elektrik alan ile harici uygulanan elektrik alan .....	39

Şekil 3.7 Farklı modlara ait rezonans frekansları.....	41
Şekil 3.8 Tasarıma ait $S_{11}$ değerleri.....	42
Şekil 3.9 Birim hücre modellenmesi (a) rezonans frekansı : 2998,41 MHz, (b) 2998,77 MHz.....	45
Şekil 3.10 CST’de kovuk yapısına ait görsel .....	46
Şekil 3.11 Tasarımın boyutlar- <i>cm</i> .....	46
Şekil 3.12 Kovuk içerisinde oluşan $\pi$ modu .....	47
Şekil 3.13 Kovuk içerisindeki elektrik alan.....	48
Şekil 3.14 Kovuk içerisinde eksen boyunca oluşan elektrik alan ile harici uygulanan elektrik alan .....	48
Şekil 3.15 Farklı modlara ait rezonans frekansları.....	49
Şekil 3.16 Tasarıma ait $S_{11}$ değerleri.....	51

# SİMGELER VE KISALTMALAR

## KISALTMALAR

**CST** : Computer Simulation Technology

**DTL** : Drift Tube Linac

**Linac** : Linear Accelerator

**RF** : Radio Frequency

**SLAC** : Stanford Linear Accelerator Center

**RFQ** : Radio Frequency Quadrupole

**TM** : Transverse Magnetic

# 1. GİRİŞ

## 1.1 Literatür Özeti ve Araştırmanın Amacı

Doğrusal hızlandırıcı, içerisinde yüklü parçacıkların hareket ettiği ve dışardan uygulanan elektromanyetik alan ile bu parçacıkların hızlandırıldığı bir ayardır. Genel olarak İngilizce'deki isminin (*ing. Linear Accelerator*) ilk harflerinden türetilen bir kısaltma olan *linac*<sup>1</sup> ile adlandırılır [1]. Aygıt içerisinde hızlandırılma işlemi frekansa bağılı RF elektromanyetik alanlar tarafından gerçekleştirildiği için literatürde daha çok RF *linac* olarak isimlendirilirler [2]. Tarihte ilk defa Rolf Wideröe tarafından 1928 yılında önerilmiş ve test edilmiş olmasına rağmen, 2. Dünya Savaşı süresince meydana gelen mikrodalga teknolojisindeki gelişmelere kadar dikkate değer bir ilerleme gösterememiştir. Bu tarihten sonra ise başta nükleer ve temel parçacık araştırmaları olmak üzere birçok önemli uygulama alanında çok hızlı bir gelişme göstermiştir [1], [2].

Parçacık hızlandırıcısı oluşturulan elektrik alan ile yüklü parçacık demetine enerji aktarır. İlk parçacık hızlandırıcılar, demetin enerjisini sabit bir elektrik alandan aldığı elektrostatik hızlandırıcılardır [3]. Böyle bir sistemde her parçacık  $q \times \Delta V$  kadarlık bir enerji kazanır ( $q$ : yük ve  $\Delta V$ : potansiyel fark). Bu durum birkaç on megavoltluk potansiyel farklarından sonra meydana gelen elektrik atlamalarından dolayı elektrostatik hızlandırıcıların maksimum enerjilerinin kısıtlanmasına sebep olmaktadır. Bu sınırlama, demete zamanla değişen elektrik alan uygulanarak ortadan kaldırılmıştır [1]. Uygulanan alanın polaritesi sürekli değiştiğinden dolayı demet kümelenmeye başlar ve doğru polarizasyonda da sürekli hızlanma meydana gelir. Demet, harici güç kaynakları tarafından uyarılarak içerisinde elektromanyetik modların oluşmasına imkan veren elektromanyetik kovuk yapıları tarafından hızlandırılır. Hızlanmanın gerçekleşebilmesi için demette bulunan parçacıklar ile harici olarak uygulanan alan birbirleri ile uygun fazda bulunmalı, kesintisiz enerji kazancının gerçekleşebilmesi için de parçacıkların alan ile senkron olması gerekmektedir. Senkronizasyon koşulundan dolayı bu yapılar *rezonans hızlandırıcılar* olarak da bilinirler [4].

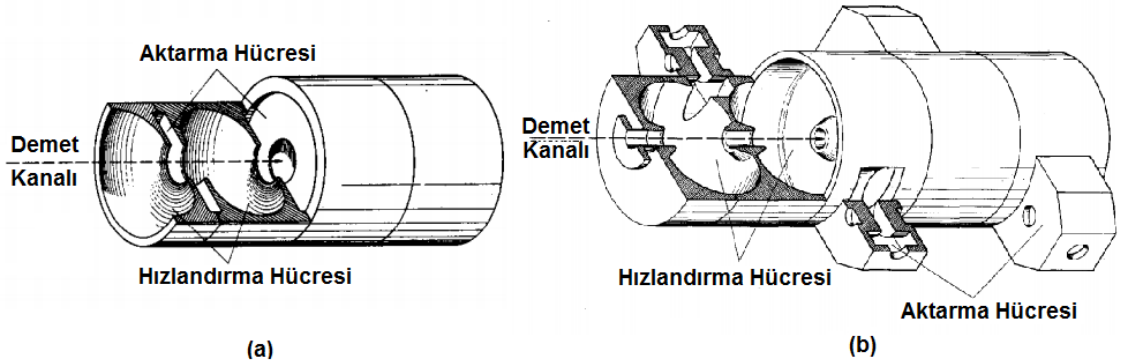
---

<sup>1</sup> Tez içerisinde çoğunlukla doğrusal hızlandırıcı olarak adlandırılmakla birlikte kısaltmaya ihtiyaç duyulduğunda *linac* kısaltması kullanılmıştır.

Parçacıkların hızlandırılması için duran dalga ve ilerleyen dalga olmak üzere iki farklı kovuk yapısı kullanılabilir. Bu tip kovuklar arasındaki temel fark kovuğun nasıl ve ne kadar hızlı olarak RF alan ile doldurulacağıdır [5]. İlerleyen dalga yapıları basit bir ifade ile hücreden hücreye alanla doldurma anlamına gelen “uzayda” kavramı ile alanla doldurulurlar. Örneğin çalışma frekansının MHz’in 100’de 1’i olduğu bir yapıda kovuk ışık hızının % 1’i ile ya da % 3’ü gibi bir hız ile mikro saniyelerin çok çok altında bir sürede alan ile dolacaktır. Diğer taraftan duran dalga yapılarında kovuk “zamanda” kavramı ile alanla doldurularak yapının her iki ucundan yansıyan alan ile istenilen genlikte duran dalga örüntüsü elde edilir. Normal iletken yapılmış bir yapı için bu işlem mikro saniyeler içerisinde gerçekleşir. Bu şu anlama gelmektedir; eğer sistemin kullanılacağı uygulamada çok çok kısa süreli ( $< 1\mu s$ ) demet atmalarına ihtiyaç var ise ilerleyen dalga yapıları güç açısından çok daha etkindir. Uzun süreli atmalar için iki yapı da benzer etkinlik ve fiyat optimizasyonuna sahip olacak şekilde geliştirilebilirler. İlerleyen dalga yapılarında çok kısa RF atmalar elde edildiğinden bu yapılarda duran dalga yapılarına göre daha yüksek tepe alan değerlerine de ulaşılabilir. Duran dalga yapıları teorik olarak rölativistik olmayan parçalar için tasarlanmış olsalar da genel olarak rölativistik parçacıklar için de kullanılmaktadırlar. İlerleyen ve duran dalga yapılarını kıyaslarken atma uzunluğu ve parçacık hızı dışında genel bir ölçüt bulunmamaktadır. Bu sebeple linac tasarlanırken kullanılacak olan yapının seçiminde optimizasyonlar, bütçe hesaplamaları, çalışma modu ve elde edilmek istenen enerji gibi değerler göz önüne alınarak bir karar verilmesi gerekmektedir [6], [7]. Bu tez kapsamında, kullanılan elektromanyetik simülasyon programlarında kolaylık olması açısından duran dalga kovuk tasarlanmıştır.

Tasarlanan kovuk yapıları içerisinde dalga boyuna bağımlı hücre uzunluğuna göre farklı elektromanyetik dalga modları oluşmaktadır. Bu modların seçimi tamamen elde edilmek istenen sonuca göre belirlenmektedir. Bugün dünya üzerinde bulunan birçok doğrusal hızlandırıcı da yüksek şönt empedansı elde edilmesine imkân verdiği için  $\pi$  modu kullanılmaktadır. Şönt empedans, kovuk içerisinde parçacığın birim uzunluk başına kazandığı enerjinin tepe değerinin, birim uzunlukta harcanan güce oranının bir göstergesi olarak tanımlanmaktadır. Bu sebeple yüksek şönt empedansına sahip yapılar tercih edilmektedir. Ancak bu yapılarda kovuk içerisinde oluşan elektrik alan frekans

değişimi, yapının fiziksel toleransı ve hücreden hücreye olan faz değişimine karşı çok hassastır. Bu değişkenlerin herhangi birisinde meydana gelen çok küçük değişimlerde dahi yapı içerisindeki elektrik alan kararlılığını kaybederek değişmektedir [8]. Bununla birlikte doğrusal hızlandırıcılarda çoğunlukla tercih edilen bir diğer mod da  $2\pi/3$ 'tür. Bu mod yapısal hatalara ve frekans değişimlerine karşı daha az hassas olmakla birlikte hızlandırmayı oluşturan alan yeterince yüksek değildir [8]. Doğrusal hızlandırıcının üretilmesi sırasında meydana gelebilecek hataları ve frekans değişimini  $2\pi/3$  moduna göre daha çok tolere edecek diğer bir mod ise  $\pi/2$ 'dir [8], [9]. Bu mod en hassas moddur, ama yapının sahip olduğu şönt empedans diğer iki moda göre daha düşüktür. Bu sebeple tasarımcılar çalışması bakımında  $\pi/2$  buna karşın şönt empedansı, enerji değeri gibi fiziksel değişkenler bakımından ise  $\pi$  modunda çalışan yapılar tasarlamaktadır. Şekil 1.1'de bir örneği verilen bu yapılar da iki hücre arasındaki alan aktarımı aksel veya eksen dışında bulunan ilave hücreler vasıtası ile yapılmaktadır. Eğer alan aktarımı ekseninde ise bunlara elektriksel aktarım (*ing. electric coupling*), eksen dışında ise manyetik aktarım (*ing. magnetic coupling*), denilmektedir. Yapı sadece hızlandırma hücresinden oluşmadığından bu yapılar çift-periyotlu (*ing. biperiodic*) olarak adlandırılır [9].



**Şekil 1.1 Çift periyotlu kovuk (a) aksel alan aktarımı, (b) eksen dışı alan aktarımı [9]**

Böyle bir yöntem ile tasarlanmış kovukta hücreden hücreye faz değişimi  $\pi/2$  olmasına karşın, geometrik hatalara ve hızlandırma alanının frekansının ayarlanması sırasında oluşabilecek küçük sapmalara karşı ise yapı  $\pi$  modundaymış gibi davranmaktadır. Bu sebeple yapının çalışma modu  $\pi$  olarak kabul edilir. Alan aktarımı için gerekli olan

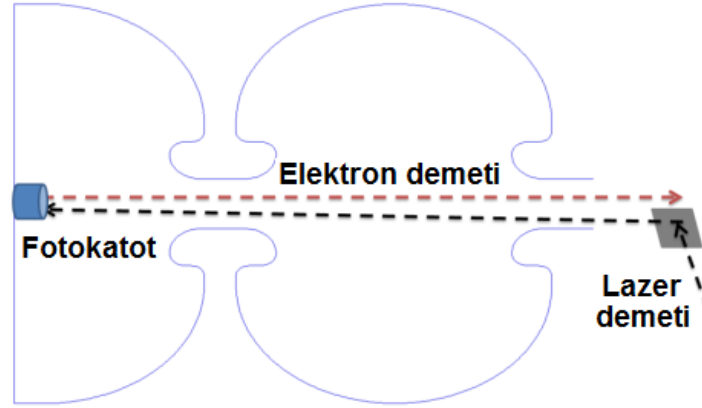


hücrelerin eksende olması durumunda yapının şönt empedansı  $\pi$  moduna göre düşük olmaktadır. Bu, eksen boyunca olan hücrelerin eksen dışına alınması ile çözülebilecek bir problem olmasına karşın, bu durumda yapıdaki geometrik karışıklıkların sebep olduğu üretim zorlukları ve tasarım aşamasında uzun simülasyon zamanı gibi dezavantajlara da sebep olmaktadır [10], [11]. Bu sebeple tez çalışmasında aksenel aktarıma sahip kısmen periyodik ve  $\pi$  modunda çalışan bir kovuk tasarlanmıştır.

Bir doğrusal hızlandırıcı için çalışma modu, duran dalga veya ilerleyen dalga yapısı olması kadar önemli diğer bir değişken ise çalışma frekansıdır. Bir hızlandırıcının çalışma frekansı birçok değişkene bağlıdır. Örneğin, enerjisi 10 MeV'den daha fazla olan rölativistik elektronlar için genelde çalışma frekansı GHz mertebesinde iken protonlar için birkaç yüz MHz'dir. Şönt empedans ile frekans arasında doğru orantı bulunduğundan genel olarak yüksek frekansta çalışan hızlandırıcılar daha verimlidirler [12]. Ayrıca yüksek yüzey elektrik alanların sebep olduğu bozulmalar yüksek frekanslarda daha az meydana gelmektedir. Bu avantajlara karşın yüksek frekans geometrik olarak küçük bir yapıya gerek duyduğundan, yapı içinde yüksek demet yoğunluğunu oluşturacak parçacık için giriş açıklığı bulunmamaktadır [12]. Bu sebeple, teze referans olarak alınan çalışmalardan birisi olan [13]'teki tabancanın da çalışma bantı olan S bant tezde çalışma frekans bölgesi olarak belirlenmiş, daha özel olarak ise 2,99 GHz çalışma frekansı olarak seçilmiştir.

Hızlandırıcı sistemlerinde bulunan en önemli aygıtlardan bir diğeri de hızlandırılacak elektronları üretecek olan tabanca sistemidir. Bu amaçla kullanılan tabancalarda katottan elektron sökmek için kullanılan bilinen iki yöntem vardır. Bunlardan ilki katot malzemesinin ısıtılması sonucu elektron koparılması yöntemi olan *termiyonik yayılım*, diğeri ise fotonların katot malzemesinden elektron söktüğü *fotoelektrik olay*'dır. Termiyonik yayılımda katot malzemesi genel olarak DC kaynak ile beslenirken fotoelektrik olayda RF elektromanyetik dalgalar kullanılmaktadır. Günümüzde fotoelektrik olay ile çalışan RF tabancalar (*fotokatot RF tabanca*), termiyonik yayılım (*termiyonik tabanca*) yaparak çalışanlara göre yüksek elektrik alan değişimi sağladıklarından dolayı daha çok tercih edilmektedirler. Bu sayede elektronlar çok hızlı bir şekilde rölativistik hızlara çıkabilmektedirler. Ayrıca fotokatot RF tabancalarda

elektron yayılımı termiyonik tabancaların aksine kısa-atımlı lazer sistemi yardımı ile kontrol edilebilmektedir. Örnek bir fotokatot RF tabanca şematığı Şekil 1.2’de verilmiştir.



**Şekil 1.2 Fotokatot RF tabanca [14]**

Ayrıca RF fazın elektron hızlandırma için uygun olmadığı durumlarda lazer etki etme süresinin ayarlanabilmesi ile elektronun fotokatottan yayılımı kontrol edilebilmektedir. Bu sayede kullanım süresini azaltarak katot yüzeyine zarar verebilen ve demet içerisindeki elektron yoğunluğunu etkileyebilen “ters elektron bombardıman etkisi” nin oluşması engellenir [14]. Ek olarak, fotokatot RF tabanca enine polarizasyonda ışık yayımı daha küçük buna karşın demet içerisindeki yük yoğunluğu fazla olan bir elektron demeti üretebilir [15]. Bu avantajlarından dolayı tezde, kovuk ile benzer olarak  $\pi$  modunda çalışan fotokatot RF tabanca tasarlanmıştır.

Bu tez çalışması kapsamında, doğrusal hızlandırıcı sistemini oluşturan alt sistemlerden iki tanesi olan elektron tabancası ve hızlandırıcı kovuk birimleri tasarlanmıştır. Bu sistemlerin tasarlanması sırasında model olarak literatürde var olan benzer yapılar göz önünde bulundurulmuştur [9], [13]. Çalışma kapsamında modelleme ve simülasyon işlemleri *CST Microwave Studio*<sup>®</sup> ve *Superfish*<sup>®</sup> olmak üzere iki farklı elektromanyetik modelleme programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir [16], [17]. İki farklı programda elde edilen sonuçlar mümkün mertebe birbirleri ile karşılaştırılmış ve farklılıkların sebepleri tartışılmıştır. Ayrıca tartışmalara *CST Microwave Studio*<sup>®</sup> içerisindeki farklı nümerik hesaplama yaklaşımına sahip çözücüler de dâhil edilmiştir.

## 1.2 Tezin İçeriği

Bu çalışma kapsamında ikisi de  $\pi$  modunda ve duran dalga yapısında olan fotokatot RF elektron tabancası ile kısmen periyodik aksenal alan aktarımına sahip kovuk tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarım sonucunda yapılara ait şönt empedansı, kalite faktörü, enerji değerleri gibi yapıların etkinliğini belirleyen değişkenler iki farklı elektromanyetik simülasyon programı ile hesaplanmış ve birbirleri ile karşılaştırılmıştır.

Bu tezin içeriğinde başlıca aşağıdaki bilgiler verilmiş ve bu konulara yoğunlaşmıştır;

- tasarlanan elektron tabancası ve kovuğa ait RF teorisi ile elektron demet özellikleri,
- simülasyon programları ile tasarımların gerçekleştirilmesi ve sonuçların karşılaştırılması,
- elde edilen sonuçların RF ve mikrodalga açısından tartışılması.

Doğrusal hızlandırıcıyı oluşturan yapılardan elektron tabancası ve hızlandırma işleminin gerçekleştirildiği kovuk sistemlerinin teorik temellerine ait bilgiler 2. bölümde verilmiştir. Bu kesimde, yapılar özellikle RF açısından irdelenmiş ve simülasyon ile bulunması amaçlanan değişkenlere ait temel eşitlikler açıklanmıştır. Ayrıca yapı içerisindeki demete ait alan modelleri, hareket denklemi gibi temel bilgiler de açıklanarak tasarım sonucunda elde edilmesi planlanan demet dinamiğinin anlaşılması için ortam kurulmaya çalışılmıştır.

Tez çalışması boyunca yapılan temel çalışmaların, tasarım ve simülasyon ayrıntılarının anlatıldığı kısım ise 3. bölümdür. Bu bölümde kullanılan nümerik elektromanyetik simülasyon programlarından, hesaplanan değişkenlerin değerlerine ve bu değerlerin farklı çözücülerdeki farklarına kadar geniş bir perspektifte bilgilendirme yapılması amaçlanmıştır.

Elde edilen sonuçların tartışıldığı ve farklılıkların açıklandığı kesim ise tezin son bölümünü oluşturan 4. bölümdür. Bu bölümde tez çalışması boyunca yapılan hesaplamalar ve simülasyon çıktıları birbirleri ile karşılaştırılmış ve sonuçlar yorumlanmıştır. Bununla birlikte elde edilen çalışma sonuçlarının literatürde bulunan

benzer çalışmalar ile kıyaslaması da yapılmıştır. Son bölümde, yapılan çalışmanın eksik kalan ve geliştirilmeye muhtaç kısımlarına değinilmiştir.

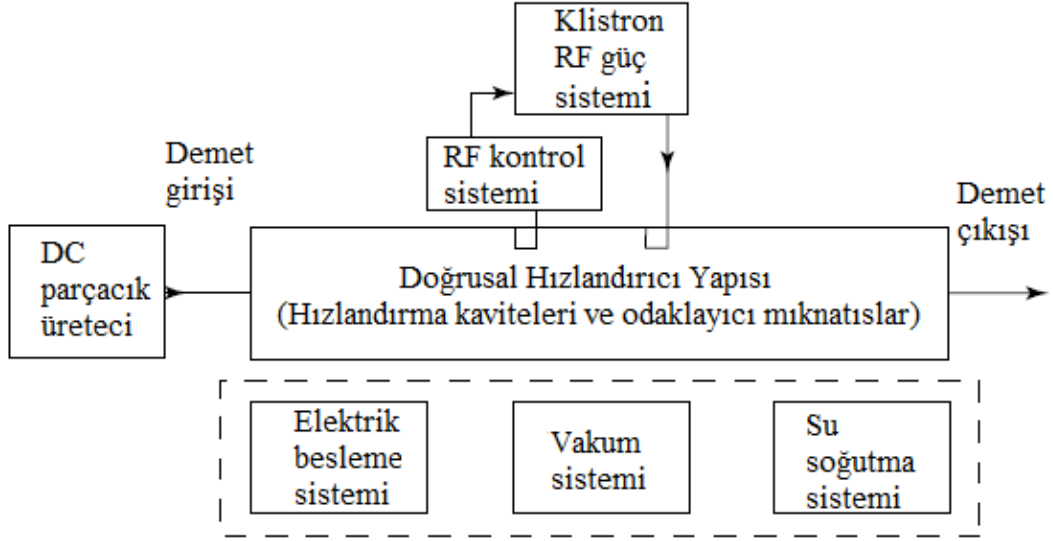
## 2. DOĞRUSAL HIZLANDIRICI TEORİSİ

Bu bölümde, doğrusal bir hızlandırıcının çalışmasına dair teorik bilgiler verilmiştir. Bu bilgiler, sistem tasarlanırken seçilen geometrik büyüklüklerden, sistemin çalışırken bağlı kaldığı prensiplere kadar, birçok noktada referans niteliğindedir.

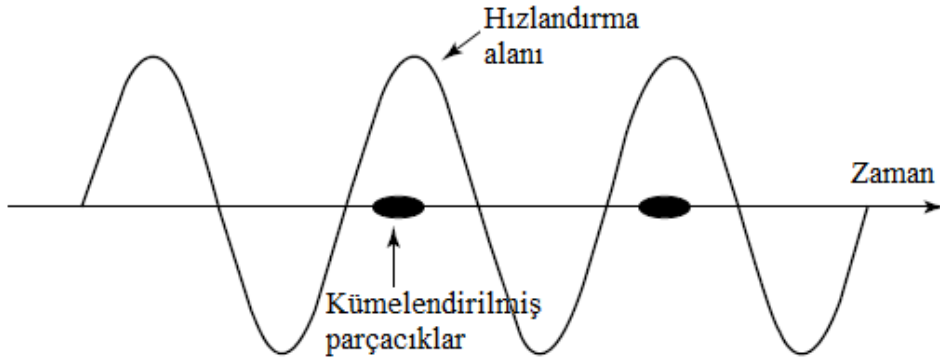
Öncelikle parçacığın hızlandırıldığı kovuğun tasarlanabilmesi için gerekli olan *şönt empedans*, *kalite faktörü*, *geçiş süresi* gibi parametrelerin hesaplanmasında kullanılan denklemler paylaşılmıştır. Bu bilgiler tezde geliştirilen “*hap kutusu kovuk*” (*ing. pill-box cavity*) göz önünde bulundurularak verilmiş olmakla beraber tüm kovuklar için de geçerliliğini korumaktadır. Bununla birlikte elektromanyetik dalganın enerjisini artırarak ilerleyebilmesini sağlayan aktarım (*ing.coupling*) mekanizmasından da bahsedilmiştir. Hızlandırılan elektron demetinin sahip olduğu özellikler ise Bölüm 2.3’te bahsedilmiştir. Ayrıca sistem tasarlanırken kalite faktörü, şönt empedansı ve hızlandırıcı alan gradyenti gibi değerlerin nasıl optimize edileceğine dair açıklayıcı bilgiler de bu kısmın son konusu olarak açıklanmıştır. Bölüm boyunca verilen bilgilerin detayları için [1], [18]- [37] numaralı kaynaklara bakılabilir.

### 2.1 RF Hızlandırıcılar

Basit bir doğrusal hızlandırıcı blok diyagramı Şekil 2.1’de verilmiştir. Demet parçacık üreticinde (elektron tabancası) üretilerek vakuma alınmış kovuğa iletilmektedir. Kovuk, ortam içerisindeki demet iletiminin parçacıklar arası etkileşime uğramadan yapılabilmesi amacıyla vakuma alınmaktadır. Sistemin, özellikle de RF cihazların, güç ihtiyacının karşılanması amacıyla güç kaynağı olarak elektrik besleme sistemi kullanılmaktadır. Elektrik alan içerisinde hızlandırılan elektronların kovuk duvarlarına çarpması sonucunda oluşan ısı ise soğutma sistemi kullanılarak kontrol altında tutulmaktadır. Ayrıca kovuk içerisinde elektronların etkili bir şekilde hızlandırılabilmesi amacıyla Şekil 2.2’de verildiği gibi paketlenmektedir. Bu işlem hızlandırıcı kovuk öncesinde yerleştirilen özel paketlenme kovukları ile yapılabilirdiği gibi fotokatot RF tabancada da yapılabilir. Katot malzemesinden elektron koparan lazer RF olduğundan dolayı koparılan elektronlar otomatik olarak paketlenmiş olmaktadır.

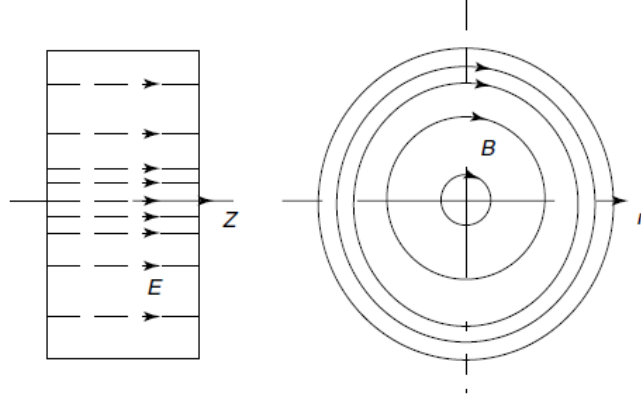


Şekil 2.1 Doğrusal hızlandırıcı blok diyagramı [1]



Şekil 2.2 RF Doğrusal hızlandırıcıdaki kümelendirilmiş (paketlendirilmiş) parçacıklar [1]

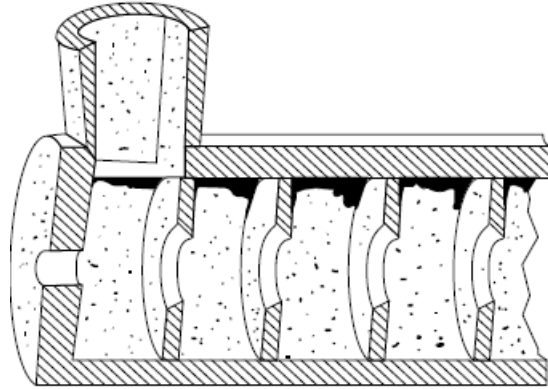
Silindirik bir kovuk içerisinde sadece belirli frekans ve modlarda elektromanyetik dalga yayılabilmesi, kovuğun çapı ve içerisindeki hücrelerin arasındaki mesafe gibi fiziksel değişkenlere kuvvetle bağlıdır. Kovuk içerisinde bir parçacığın hızlandırılabilmesi bu modlardan TM (*ing. Transverse Magnetic*) olarak adlandırılan mod sayesinde mümkün olmaktadır [18]. TM modda elektrik alan vektörü eksene paralel olduğundan dolayı bu tarz hızlandırma sistemleri için ideal bir çözüm olmaktadır [18]. Bu modda oluşan elektrik ve manyetik alana ait örüntü Şekil 2.3'te verilmiştir.



**Şekil 2.3 Silindirik kovukde oluşan TM moduna ait Elektrik (E) ve Manyetik (B) alanlar**

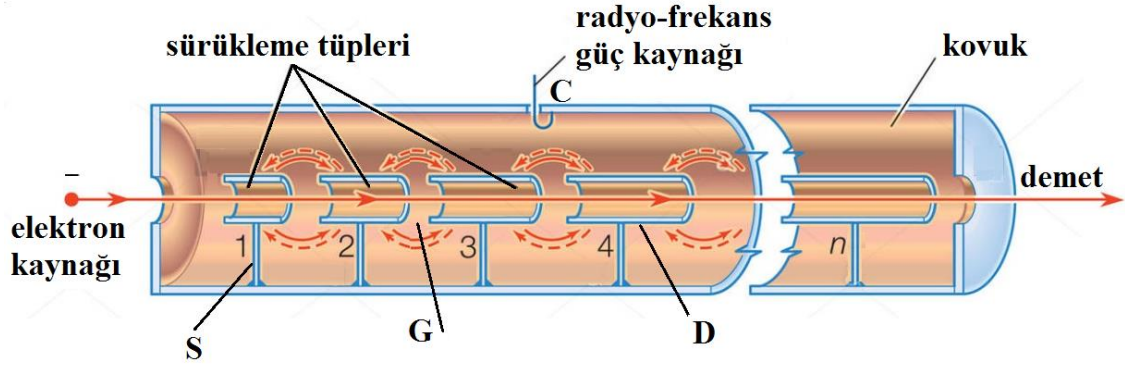
Bu tip kovuklar kullanarak etkin bir doğrusal hızlandırıcının tasarımı çeşitli araştırmalara konu olmuştur [20]–[22]. Kovuktaki her bir hücrenin kendisine ait RF üreticinin olduğu ve her birindeki fazın birbirinden bağımsız olarak değiştirilebildiği, bağımsız hücrelerden oluşan bir kovuk bu araştırmalara bir örnektir [23].

Diğer bir örnek ise içerisinde ilerleyen elektromanyetik dalganın oluştuğu ve bunun hücreden hücreye aktarılabilirdiği bir yapı kullanmaktır. Bu şekildeki 50 GeV’lik bir ilerleyen dalga yapısı, SLAC (*Stanford Linear Accelerator Center*)’ta kullanılmaktadır [24]. Bu şekilde basit bir silindir kullanarak hızlandırıcı yapılması kolay görünmesine rağmen oluşan dalganın faz hızı, ışık hızını daima aştığından dolayı fiziksel olarak yapılması mümkün değildir [25]. Bu durumda faz hızını yavaşlatmak amacıyla silindirik yapının değiştirilmesi gerekmektedir. Bu da Şekil 2.4’te verildiği gibi yapı içerisine periyodik diskler yerleştirilerek gerçekleştirilmektedir.



**Şekil 2.4 Disk-Yüklenmiş (ing. *disk-loaded*) ilerleyen dalga yapısı [26]**

Doğrusal hızlandırmanın gerçekleştirildiği diğer yaygın bir metot ise birden fazla hücreden oluşan kovukta duran dalga oluşturmaktır [27]. Proton ve diğer iyonları ışık hızının 0.04 katından 0.4 katına kadar hızlandırmak amacıyla kullanılan Alvarez DTL (*Drift Tube Linac*) bu amaçla kullanılan örneklerden birisidir [28]. Yapıya ait şematik Şekil 2.5'te verilmiştir.



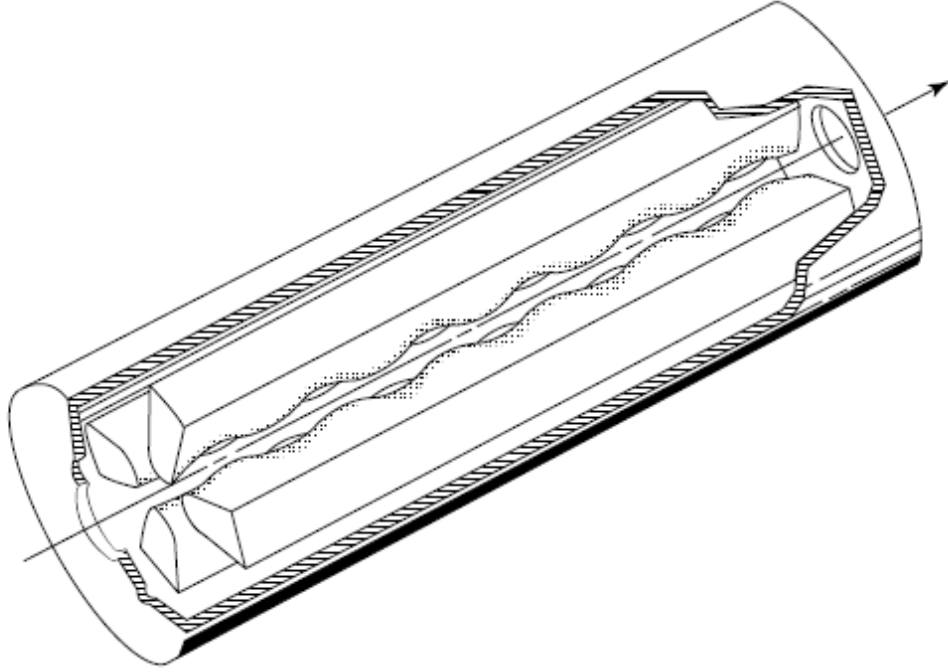
Şekil 2.5 Alvarez DTL [29]

Alvarez DTL yapısı orta hızlı iyonlar için kullanılmaktadır. Demetteki parçacıklar kovuğa girmeden önce kümelendirilir (*ing.bunch*) ve Şekil 2.5'te G ile gösterilen boşlukta hızlandırılmaktadır. Bu sayede DTL'deki alan ters polarizasyonda da olsa parçacıklar bundan etkilenmezler. Yapıdaki sürüklenme tüpleri (D) kovuğa S adı verilen çubuklar ile tutturulmuşlardır. Kovuk C ile gösterilen koaksiyel hat üzerinden taşınan RF akım ile uyarılmaktadır [30]. SLAC'daki disk-yüklü yapıların aksine DTL yapısında komşu boşluklar aynı fazdadır ve hızlandırma boşluklarının arasındaki mesafe de demetin bir RF periyodunda kat edeceği mesafeye eşittir. DTL yapısı, hafif olduklarından dolayı, hızları elektron tabancası çıkışında uygulanabilir bölgenin zaten çok üstünde olan elektronlar için kullanılmaz. Hızların ışık hızının yaklaşık 0.4 katı olan bu tür parçacıklar için diğer hızlandırıcı yapıları kullanılır [30].

Işık hızının 0.01 katından 0.06 katına kadar olan çok çok düşük hızlarda kullanmak amacıyla RFQ (*ing. Radio Frequency Quadrupole*) adı verilen farklı bir sistem de geliştirilmiştir. Sisteme ait görsel Şekil 2.6'da verilmiştir. RFQ sistemi güçlü bir enine (*ing.transverse*) elektrik alan oluşturmaktadır, bu da düşük hızlı iyonların ve protonun hızlandırılması için oldukça önemlidir. Bununla birlikte RFQ' da hızlandırma, mekanik



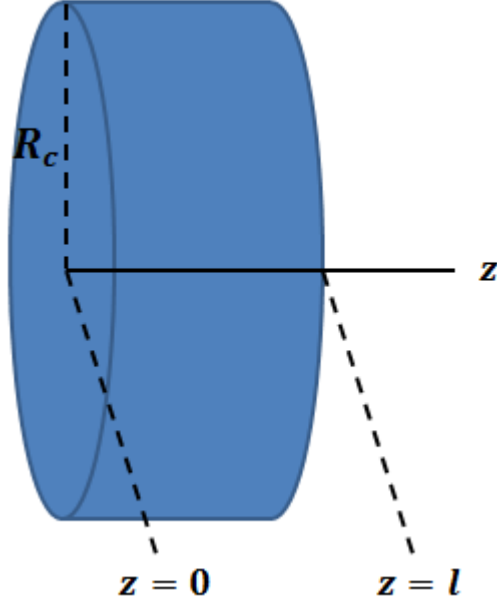
yöntemlerle şekillendirilmiş kanatların sebep olduğu modülasyon sayesinde bir dizi hızlandırma hücresi içerisinde boyuna (eksen boyunca) olarak gerçekleştirilir [31]. RFQ ayrıca iyon kaynağından gelen DC demeti DTL için yeterli enerjiye hızlandırmak ve kümelemek amacıyla da kullanılmaktadır [32]. Tüm bu işlemlerin sonucunda daha yüksek akımlı demetler düşük hızlarda başarılı bir şekilde odaklanarak hızlandırma gerçekleştirilebilir.



Şekil 2.6 RFQ yapısı [33]

### 2.1.1 Basit Bir RF Hızlandırıcı: “hap kutusu (pill box)” kovuk

Kovuk kullanan hemen her elektron ve proton hızlandırıcısı hap kutusu kovuk veya basit silindirik kovuk temel alınarak tasarlanmıştır. Bu durumda hap kutusu kovukta oluşan elektromanyetik dalganın analitik çözümünün olması da büyük etkindir. Bu kısımda bu çözümlerin türetilmesi ile ilgili denklemler hakkında bilgi verilmektedir. Bunun için  $z = 0$  ve  $z = l$  noktalarına iletken kapaklar yerleştirilmiş yarıçapı  $R_c$  olan şematiği Şekil 2.7’de verilen bir silindir kullanılmıştır.



**Şekil 2.7 Vakum ortamındaki basit bit hap kutusu hücresi**

Hap kutusu kovuğunda türetilen denklemlerde demetin giriş ve çıkışı için gerekli olan kapaklarda bulunan delikler önemsenmez. Basitçe  $z$  yönündeki deneme elektrik alan çözümünün  $E_z(r, t) = R(r)e^{j\omega t}$  şeklinde olduğu kabul edilebilir. Bu çözüm, sınır koşullarından dolayı dalga denklemini  $r = R_c$ 'de,  $E_z = 0$  olacak şekilde sağlamalıdır. Bu durumda elektrik alan için dalga denklemi, Eş. (2.1)'de verildiği şekilde olur.

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial r} + \frac{\partial^2 E_z}{\partial r^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E_z}{\partial t^2} = 0 \quad (2.1)$$

$z$  yönündeki alan çözümü Eş. (2.1)'de yerine yazılır ise elektrik ve manyetik alan çözümü Eş. (2.2) gibi olur.

$$\begin{aligned} E_z &= E_0 J_0(k_r r) \cos(\omega t) \\ B_\theta &= -\frac{E_0}{c} J_1(k_r r) \sin(\omega t) \end{aligned} \quad (2.2)$$

Buradaki  $E_0$  elektrik alanın tepe değeri,  $k_r$  radyal dalga sayısı,  $r$  kovuk ekseninden olan radyal uzaklık.  $\omega$  açısal RF frekansı,  $J_0$  ve  $J_1$  sıfıncı ve birinci dereceden Bessel fonksiyonlarıdır. Bu modda elektrik alan sadece radyal konuma ve zamana bağlıdır.

Elektron demetleri eksen boyunca üretildiğinden ve kovuk yarıçapına göre daha küçük bir yarıçapa sahip olduğundan Bessel fonksiyonu için küçük açı yaklaşımı kullanılabilir ve bu sayede konumsal değişim de ihmal edilebilir. Bu noktada denklemlerin ideal koşullar için türetildiği, gerçek bir hızlandırıcı da demet taşıyan borular, çiftlenim yarıkları ve vakum portları gibi bileşenlerinde olduğu, haliyle bunların alanda bozulmalara sebep olabileceği unutulmamalıdır. Böyle bir yapıda radyal alan dağılımı Şekil 2.8’de grafiksel olarak gösterilmiştir. Sınır koşullarını sağlamak için bu moddaki rezonans frekansı  $w_c = k_r c = 2,405c/R_c^2$  şeklinde olmalıdır. Bu mod üst satırlarda da açıklanan enine manyetik (TM) moddur ve manyetik alanın z bileşeninin sıfır olmasından dolayı bu isimle adlandırılır. Böyle bir kovukta depolanan toplam elektromanyetik enerji depolanan maksimum seviyedeki elektrik enerjisinden Eş.(2.3) kullanılarak hesaplanabilir.

$$U = \frac{\pi \epsilon_0 l R_c^2}{2} E_0^2 J_1^2(2,405) \quad (2.3)$$

Burada  $\epsilon_0$  boş uzayın dielektrik sabitidir. Silindir duvarlarında harcanan ortalama güç ise Eş. (2.4)’te verilmiştir.

$$P = \pi R_c R_s E_0^2 \left( \frac{\epsilon_0}{\mu_0} \right) J_1^2(2,405) (l + R_c) \quad (2.4)$$

Burada  $R_s = 1/\sigma\delta$ , RF yüzey direnci,  $\mu_0$  boş uzayın manyetik geçirgenliğidir. Kalite faktörü ise Eş. (2.5) ile verilmiştir.

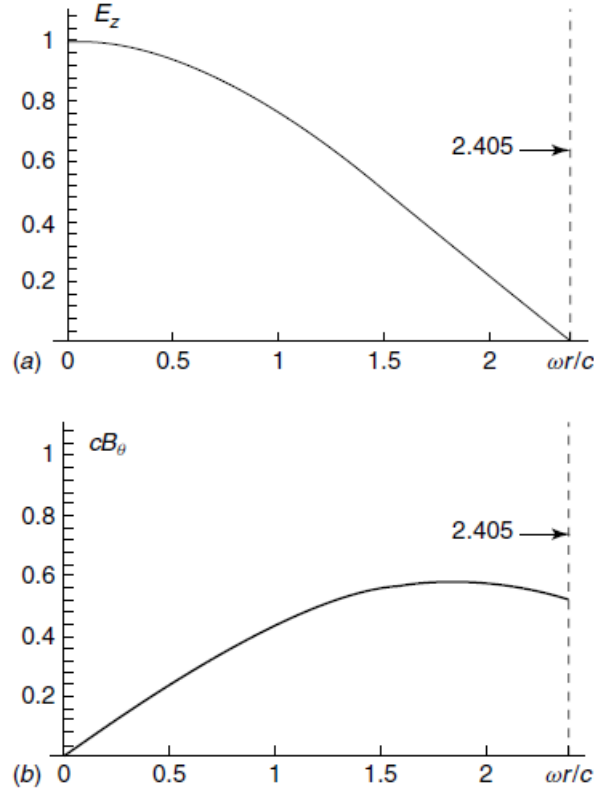
$$Q = \frac{w_c U}{P} = \frac{2,405 \sqrt{\mu_0/\epsilon_0}}{2R_s} \frac{1}{(1 + R_c/l)} \quad (2.5)$$

Elektrik alanın maksimum olduğu  $r = 0$  noktasında  $J_0$  maksimumdur. Bu noktada ayrıca, birinci dereceden Bessel fonksiyonun maksimum olduğu iki değer de oldukça önemlidir. Bunlar,  $J_1(1,841) = 0,5819$  ve  $J_1(2,405) = 0,5191$ ’dir. Eş. (2.2)’den de

---

<sup>2</sup>Sınır koşullarından;  $r = R_c$  noktasında  $E_z = 0$  olmalıdır. Bu durumda  $J_0(k_r R_c) = 0$  bağıntısı kullanılarak ilgili eşitlik elde edilir.

görüüleceği üzere manyetik alan  $J_1$  'e bağlıdır ve onun maksimum olduğu yerde maksimum olur. Bu sayede manyetik alanın maksimum değerinin elektrik alanının maksimum değerine oranı,  $B_{max}/E_{max} = 0,5819/c$  şeklinde bulunur. Bu eşitliklerin türetilmesi ile ilgili detaylı açıklamalar [2]'de bulunmaktadır.



**Şekil 2.8 Silindirik hap kutusu kovuğunda TM modu için Elektrik ve Manyetik alan dağılımı**

Kovuk için diğer bir önemli nicelik ise demetin kovuktan geçmesi için gerekli olan süredir. Geçiş zaman faktörü (*ing. transit time factor*) denilen bu büyüklük Eş. (2.6) ile hesaplanır.

$$T = \frac{\int_{-l/2}^{l/2} E(0, z) \cos(\omega t(z)) dz}{\int_{-l/2}^{l/2} E(0, z) dz} \quad (2.6)$$

Bu ifade genel bir ifade olup hızlandırılan parçacıkların boşluktan geçişleri sırasındaki hızlarında meydana gelen değişimleri de kapsamaktadır. Daha özel olarak ise geçiş zaman faktörü, kovuk boyunca oluşan hızlandırma voltajı sayesinde kovuk içerisinden geçen parçacığın yükü başına kazandığı maksimum enerji olarak tanımlanır ve

birimsizdir. Bu faktör parçacık hızı ve hızlandırma boşluğunun uzunluğuna bağlıdır. Hap kutusu kovukta bu değişim önemsenmeyecek derece de az olduğu için ifade basitleştirilerek Eş. (2.7) ile verilen hale dönüştürülebilir. Eş. (2.7)'te verilen  $\vartheta$  parçacığın hızıdır.

$$T = \frac{\sin\left(\frac{wl}{2\vartheta}\right)}{\frac{wl}{2\vartheta}} \quad (2.7)$$

Kovuk tasarımında diğer önemli bir parametre ise şönt empedanstır. Bu ifade kovuğun ne kadar etkin şekilde tasarlandığı, kovuk içerisindeki demet enerjisinin kayıplardan ne oranda etkilendiği gibi değişkenler hakkında bilgi verir. Matematiksel olarak ise eksen boyunca oluşan gerilimin karesinin güç kaybına oranı olarak ifade edilir. Hap kutusu kovuk için bu değer Eş. (2.8) kullanılarak hesaplanır.

$$r_s = \frac{Z_0 l}{\pi \rho_s R_c} \frac{T^2}{\left(1 + \left(\frac{R_c}{l}\right)\right) J_1^2(2,405)} \quad (2.8)$$

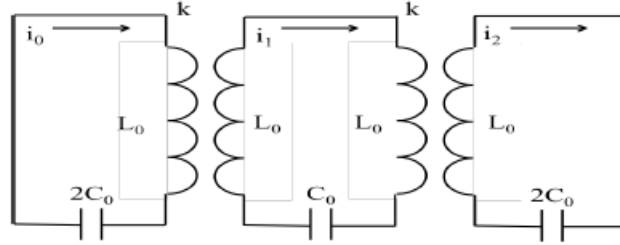
Bu eşitlikte  $Z_0$  boş uzayın empedansı,  $J_1$  birinci dereceden Bessel fonksiyonu ve  $T$  ise geçiş zaman faktörüdür [1].

3. bölümde anlatılan Fotokatot RF Tabanca ve Kovuk tasarımı bu kesim içerisinde verilen denklem setlerini kullanan nümerik elektromanyetik simülasyon programları kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

### 2.1.2 Alan Aktarımlı Doğrusal Hızlandırıcılar

Demetin çabucak hızlandırılabilmesi için elektrik alanın tepe değerinin 10-20 MV/m veya daha büyük seviyelerde olması gerekmektedir. Bu alanları üretebilmek için, enerjinin büyük miktarı kovuğun eksenini boyunca bulunmalıdır. Kovuk duvarlarında enerji kaybı yaşandığından dolayı, alan seviyesinde düşme olmaması için ek enerjiye ihtiyaç duyulmaktadır. Bu kayıpların ne mertebede olduğunun bir ifadesi olan kalite faktörünün nasıl hesaplanacağına dair eşitlik Bölüm 2.1.1'de Eş.(2.5) ile verilmişti. Bu

kısımda ise alan aktarımlı kovuk yapısı eşdeğer devre modeli ile modellenerek matematiksel olarak analiz edilmiştir. Böylelikle kovuk içerisinde oluşan modlar hesaplanabilmiştir. Bu amaçla 3 hücreden oluşan bir kovuğa ait devre modeli Şekil 2.9'da verilmiş ve bu model kullanılarak sistem analiz edilmiştir.



**Şekil 2.9 3 hücreden oluşan sistemin devre modeli**

Şekil 2.9'da verilen modelde,  $k$  coupling sabiti,  $L_0$  hücre indüktansı,  $C_0$  hücre kapasitansıdır. Eşdeğer devre her bir halkadaki (*ing. loop*) farklı akımlar için çözülür ise Eş. (2.9) ile elde edilir.

$$\begin{aligned}
 x_0 \left( 1 - \frac{w_0^2}{\Omega^2} \right) + x_1 k &= 0 \\
 x_1 \left( 1 - \frac{w_0^2}{\Omega^2} \right) + (x_0 + x_2) \frac{k}{2} &= 0 \\
 x_2 \left( 1 - \frac{w_0^2}{\Omega^2} \right) + x_1 k &= 0
 \end{aligned} \tag{2.9}$$

Burada  $x_n$  normalize akımdır ve  $x_n = i_n \sqrt{2L_0}$  şeklinde verilir,  $w_0$  herbir halkanın rezonans frekansıdır ve  $w_0^2 = 1/L_0 C_0$  şeklinde tanımlanır,  $\Omega$  ise kararlı durumdaki salınım frekansıdır. Bu devre modelinde ortada bulunan hücre yandakilere göre iki kat daha fazla indüktansa sahiptir. Bu sebepten dolayı üç hücrenin de aynı karakteristik rezonans frekansına sahip olabilmesi için dışardaki hücreler ortadakine göre 2 kat daha fazla kapasitans değerine sahiptir. Eş. (2.9) ile verilen eşitlikler matris formunda yazılır ve çözülürse sistemin öz durumları (*ing.eigenstate*) elde edilebilir. Bu öz durumlar kararlı durumdaki salınımlara ait bağımsız modları temsil eder. Bu modlara ait frekans ve akım eşitlikleri Eş. (2.10), (2.11) ve (2.12) ile verilmiştir. Bu denklemlerde  $X$

normalize akım vektörüdür. İlk mod sıfır modu olarak adlandırılır ve ardışık hücreler arasında oluşan elektrik alanda sıfır derecelik bir faz farkının olduğunu gösterir.

$$\Omega_0 = \frac{w_0}{\sqrt{1+k}}, \quad X = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

İkinci modda komşu hücreler arasında 90 derecelik bir faz farkı vardır ve bu sebeple  $\pi/2$  modu diye adlandırılır.  $\pi/2$  modu özel bir moddur çünkü bu modda sistemin kararlı durum frekansı sistemin rezonans frekansına eşittir. Bu durumu gösteren denklem seti Eş. (2.11) ile verilmiştir.

$$\Omega_0 = w_0, \quad X = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Eş. (2.11) numaralı eşitlikte verilen akım vektöründen açık bir şekilde görülmektedir ki komşu hücreler arasında 90 derecelik bir faz farkı oluşmaktadır. Üç hücreli kovuk yapısında oluşan son mod  $\pi$  modudur ve bu moda ait dikleştirilmiş akım ve rezonans frekansı Eş. (2.12) numaralı eşitlik ile verilmiştir

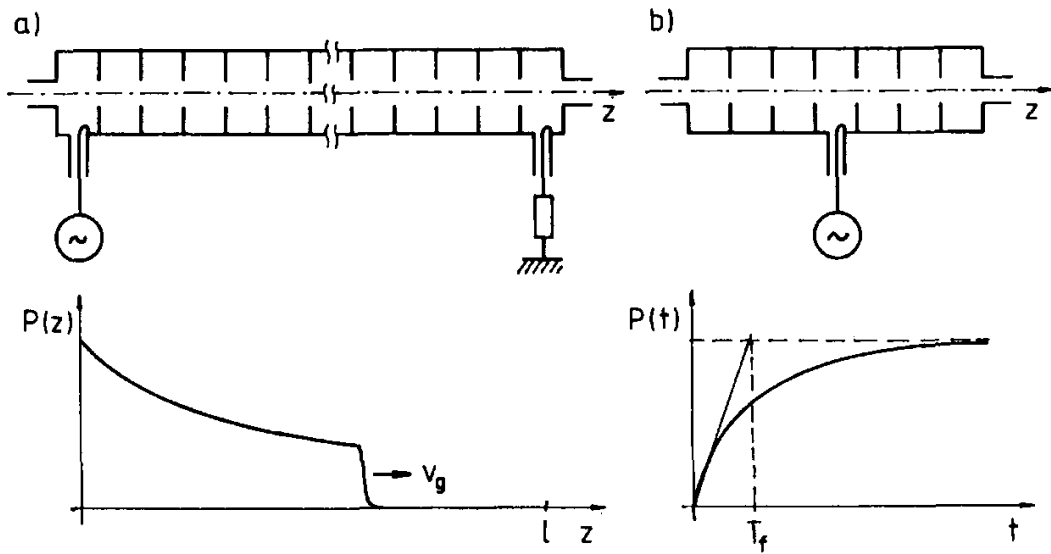
$$\Omega_0 = \frac{w_0}{\sqrt{1-k}}, \quad X = \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Normalize akım vektörü komşu hücreler arasında 180 derecelik bir faz farkı olduğunu açıkça göstermektedir. (2.10), (2.11) ve (2.12) denklemlerden (2.11) numaralı eşitliğin diğer ikisinden farklı olduğu görülmektedir. Bu eşitliğin tanımladığı  $\pi/2$  modunda, güç kaybının ve rezonans frekansının kovuğu oluşturan hücrelerin geometrisine diğer modlara oranla daha az bağımlı olduğu pertürbasyon teknikleri kullanılarak gösterilmiştir. Bu konu ile ilgili detaylar [34] ve [35]'te verilmiştir.

## 2.2 İlerleyen Dalga/Duran Dalga Hızlandırıcılar

Periyodik RF yapılar iki farklı şekilde çalıştırılabilirler: ilerleyen dalga (İD) hızlandırıcılar ve duran dalga (DD) hızlandırıcılar. Şekil 2.10'daki gibi bir İD

yapısında, alanlar uzayda grup hızında ilerleyen dalga cephesiyle oluşmaktadırlar. Yapının çıkışı bir yük ile uyumlandırılmıştır böylelikle ilerleyen dalgadan arta kalan enerji bu yükte harcanarak sonlandırılır. DD yapısında ise alanlar, Şekil 2.10'da verildiği gibi, İD ile benzer şekilde fakat bu kez uzayda değil zamanda oluşturulur. Gelen dalga, yapı boyunca zayıflatılır daha sonra yapının sonundan girişe doğru yansıtılır sonrasında girişten sona doğru tekrar yansıtılır ve bu süreç böyle devam eder. Yapının giriş ve çıkışından olan yansımaya süreci dalgaların oluşma ve yok olmaları arasında bir denge kurulana kadar devam eder.



Şekil 2.10 İlerleyen dalga (a) ve duran dalga (b) hızlandırıcıların temelleri [2]

İlerleyen dalga yapıları sabit empedans ve sabit gradyent olmak üzere ikiye ayrılmaktadırlar. Bu yapılar ve duran dalga yapılarına ait detaylar bundan sonraki kesimde verilmiştir.

### 2.2.1 İlerleyen Dalga Sabit Empedans (İD-SE) Yapısı

SE yapısı simetrik (düzgün) bir yapıya sahiptir ve alanlar üstel olarak azalır. Böyle bir yapı içerisindeki bir yükün sabit bir faz açısında kazandığı enerji Eş. (2.13) ve (2.14)'te verilen gerilim eşitlikleri kullanılarak türetilbilir [2].

$$V = \int_0^l E(z) dz = E_0 \cos \varphi \int_0^l e^{-\alpha z} dz = E_0 l \cos \varphi \frac{1 - e^{-\tau}}{\tau} \quad (2.13)$$



$$V = \frac{1 - e^{-\tau}}{\sqrt{\tau}} \sqrt{2R'lP_0} \cos\varphi, \quad \tau = \alpha l \quad (2.14)$$

Burada  $\varphi$  faz açısı,  $\alpha$  sönümlenme sabiti,  $l$  yapının uzunluğu ve  $P_0$  giriş gücüdür.  $\tau$  ise doldurma zamanı olarak adlandırılmış olup yapının tamamının enerji ile dolması için geçen süredir.

### 2.2.2 İlerleyen Dalga Sabit Gradyent (İD-SG) Yapısı

Eğer yapı içerisinde düzgün bir alan ve güç dağılımı istenirse bu durumda geometri enerjinin çok yavaş bir biçimde ilerleyeceği şekilde değiştirilmelidir. Bu, yapı içerisindeki engel (iris) çapını ve hücre çapını küçülterek mümkün olmaktadır. Bu durumda gücün konuma göre değişimi sabit olacağından;

$$P'_d = \frac{dP}{dz} = \text{sabit} \quad (2.15)$$

ve

$$P(z) = P_0 - (P_0 - P(l)) \frac{z}{l} = P_0 \left[ 1 - (1 - e^{-2\tau}) \frac{z}{l} \right] \quad (2.16)$$

denklemleri ile verilmektedir. Burada  $\tau = \int_0^l \alpha(z) dz$ 'dir. Böyle bir yapı içerisindeki güç ve gerilim ise Eş. (2.17) ve (2.18) ile verilmektedir [2].

$$E^2 = R'_{sh} P'_d = -R'_{sh} \frac{dP}{dz} = R'_{sh} P_0 (1 - e^{-2\tau}) / l \quad (2.17)$$

ve

$$V = El = \sqrt{R'_{sh} l P_0 (1 - e^{-2\tau})} \quad (2.18)$$

SG yapılarda enerji kazancı SE yapılara oranla görece daha yüksektir. Ek olarak, SG yapısı frekans değişimine daha az hassastır ve daha yüksek bir yapısal verimliliğe sahiptir.

### 2.2.3 Duran Dalga (DD) Hızlandırıcılar

DD' de yapılarda gelen dalga yapının sonuna doğru ilerlerken zayıflatılır ve geri yansıtılır, dalga yapının başına doğru ilerlerken tekrar zayıflatılır. Başlangıç portunda dalga kısmen besleme hattına doğru geri yansır kalan kısım ise kovuk içerisine yayılır. Yansıyan kısım ilerlemeye devam eder ve yapının ucundan tekrar yansır ve tekrar ilerleyip tekrar yansır. Bu süreç bu şekilde devam eder. Eğer yapının uzunluğu dalga boyunun tam katlarında ise ilerleyen ve yansıyan dalgalar eş fazlı olurlar ve zamanla enerji kaybının sebep olacağı bir denge noktası oluşana kadar bir birbirlerini güçlendirmeye devam ederler. Denge noktasında eğer üreteç ile sistem düzgün bir şekilde ise yansıyan dalganın hiçbir kısmı üretecin içerisine girmeyecektir. Bu durumda giriş gücü  $P_0$ , ilerleyen dalganın girişteki gücü  $P_{f0}$  ve yansıyan dalganın girişteki gücü  $P_{b0}$  arasındaki farka eşit olacaktır.

$$P_0 = P_{f0} - P_{b0} = (1 - e^{-4\tau})P_{f0} \quad (2.19)$$

Kararlı durum enerjisi ilerleyen dalga yapılarında olduğu gibi Eş. (2.13) ve (2.14)'dekine benzer bir şekilde hesaplanırsa Eş. (2.20) elde edilir.

$$V = \left[ \frac{\tanh(\frac{\tau}{2})}{\tau/2} \frac{1}{1 + e^{-2\tau}} \right] \sqrt{R'lP_0} \cos\varphi \quad (2.20)$$

Eş.(2.14) ve Eş. (2.20) karşılaştırılırsa

$$\frac{V_{sw}}{V_{Tw}} = (1 - e^{-4\tau})^{-1/2} \quad (2.21)$$

eşitliği elde edilir. Bu eşitlik duran dalga yapılarıdaki enerji kazancının ilerleyen dalga yapılardan daha fazla olduğunu göstermektedir. Kazanç, düşük  $\tau$  değerlerinde daha fazla olmaktadır. Fakat bu durum yapının tamamının enerji ile dolması için geçen süreyi artırmaktadır.

Diğer bir dezavantaj ise düşük şönt empedans (sadece ilerleyen dalga hızlanmaya katkı sağlar yansıyan dalga ek kayıplara neden olur) ve hücreler içerisindeki özdeş olmayan (*ing. non-uniform*) alan dağılımlarıdır. Bu durum hücre yüzeyinden elektron yayılımı olasılığını artırdığından yüksek gradyent hızlandırıcılar için istenmeyen bir durumdur.

## 2.3 Hızlandırıcı İçerisindeki Elektronun Hareketi

Bu noktaya kadar sadece alanlar ve tek bir parçacığın hareketi incelenmiştir. Bu kısımdan sonra ise parçacıklardan oluşan bir demetin davranışı tartışılacaktır. Bu amaçla öncelikle demeti tanımlamakta kullanılan terimler hakkında bilgi verilecektir.

### 2.3.1 Geçiş Zaman Faktörü ve Faz Uyumlu Parçacık

Eksen boyunca hareket eden yüklü bir parçacığın kovuk içerisinde kazanacağı enerji Eş. (2.22) ile verilmiştir.

$$\Delta W = \int_{s_0}^{s_0+L} qE_z(s) \cdot \cos[\phi(s)] \cdot ds \quad (2.22)$$

Burada  $L$  kovuk uzunluğu,  $s_0$  parçacığın hareket ettiği yatay eksen,  $E_z(s)$  boyuna elektrik alan büyüklüğü,  $q$  yüklü parçacık  $\phi(s)$  ise parçacığın yatay eksenindeki herhangi bir  $s$  noktasındaki fazıdır ve Eş. (2.23) ile tanımlanmıştır.

$$\phi(s) = \phi_0 + \frac{w}{c} \int_{s_0}^{s_0+s} \frac{ds'}{\beta_z(s')} \quad (2.23)$$

Burada parçacık kovuğa girdiğindeki RF faz  $\phi_0 = \phi(s_0)$ 'dir. [36] ile önerilen şekliyle yapılan bir takım matematiksel hesaplamaların ardından enerji ve geçiş zaman faktörü Eş. (2.24) ve Eş. (2.25) ile verilmektedir.

$$\Delta W = \left( q \int_{s_0}^{s_0+L} |E_z(s)| \cdot ds \right) \cdot T \cdot \cos\phi_s = qV_0 \cdot T \cdot \cos\phi_s \quad (2.24)$$

$$T = \frac{1}{V_0} \int_{s_0}^{s_0+L} E_z(s) \cdot \cos[\phi(s) - \phi_s] \cdot ds \quad (2.25)$$

Geçiş zaman faktörü  $T$  alanın büyüklüğü kadar parçacığın ilk hızına da bağlıdır. Parçacığın kovuk içerisindeki hız kazancı ilk başlangıç hızından daha düşük ise bu durumda  $T$  sadece hıza bağımlı olacaktır. Eş. (2.25) kullanılarak  $T$  'nin hesaplanmasında  $\phi_s$  'nin de bilinmesi gerektiğinden bu işlem bir miktar zordur. Bu sebeple hız kazancının az olduğu durumlarda  $\phi_s$  ihmal edilebilir bu durumlar için Eş. (2.26) kullanılmaktadır.

$$T = \frac{1}{V_0} \int E_z(s) \cdot e^{j\phi(s)} \cdot ds \quad (2.26)$$

### 2.3.2 Elektromanyetik Alan Altında Elektron Hareketi

Bu kısımda temel denklemler ve yaklaşımlar ile parçacığın elektromanyetik alan altında nasıl davrandığı ve kazanacağı enerjiye dair bilgiler verilmektedir.

#### 2.3.2.1 Temel Denklemler

Elektromanyetik alan elektrik ( $\vec{E}$ ) ve manyetik ( $\vec{B}$ ) alanlardan oluşmaktadır. Bu alanlar altındaki  $q$  yüklü bir parçacığın hareket denklemi Eş. (2.27)'de verilmiştir.

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = q \cdot (\vec{v} \times \vec{B} + \vec{E}) \quad (2.27)$$

Eşitlikte  $\vec{p}$  parçacığın momentumu  $\vec{v}$  ise hızıdır. Parçacık, yatay eksenindeki konumu  $s$  ve eksen boyuna hızı  $v_z$  sabit olmak üzere, doğrusal hızlandırıcı içerisinde hareket ettiğinde hareket denklemi Eş. (2.28)'de verildiği şekilde olur.

$$\frac{d\vec{p}}{ds} = q \cdot \frac{\vec{v} \times \vec{B} + \vec{E}}{v_z} \quad (2.28)$$

Burada  $v_z$  parçacığın boyuna hızıdır. Bu denklem Kartezyen koordinatlara uygulanır ise Eş. (2.29)'da verilen denklem seti elde edilir.

$$\begin{aligned}
\frac{d\gamma\beta_x}{ds} &= \frac{q}{mc} \cdot \left( y'\beta_z - \beta_y + \frac{E_x}{v_z} \right) = \frac{d\gamma\beta_z x'}{ds} \\
\frac{d\gamma\beta_y}{ds} &= \frac{q}{mc} \cdot \left( \beta_x - x'\beta_y + \frac{E_y}{v_z} \right) = \frac{d\gamma\beta_z y'}{ds} \\
\frac{d\gamma\beta_z}{ds} &= \frac{q}{mc} \cdot \left( x'\beta_y - y'\beta_x + \frac{E_z}{v_z} \right)
\end{aligned} \tag{2.29}$$

Burada,

$$x' = \frac{dx}{ds} = \frac{p_x}{p_z} = \frac{\beta_x}{\beta_z}$$

$$y' = \frac{dy}{ds} = \frac{p_y}{p_z} = \frac{\beta_y}{\beta_z}$$

$$\beta = \frac{v}{c}$$

olarak tanımlanmaktadır. Eşitliklerde verilen  $\beta$  normalize hız,  $\gamma$  rölativistik kütle faktörü,  $m$  ise parçacığın kütesidir.

Bu eşitliklerden açıkça görülmektedir ki enine ve boyuna hareketler birbirlerine bağlıdır. Fakat genellikle bu bağlılık çok zayıf olduğundan dolayı enine ve boyuna hareket birbirinden bağımsız olarak düşünülür. Bu bağımsız hareketin oluşabilmesi için parçacık paraksiyel yaklaşıma uygun olarak davranmalıdır. Paraksiyel yaklaşım aşağıda tanımlanmıştır.

### 2.3.2.2 Paraksiyel Yaklaşım

Paraksiyel yaklaşım;  $p_{x'}^2 + p_{y'}^2 \ll p_{z'}^2$  durumu sağlanırsa kullanılabilir ve tüm hızın  $z'$  eksenine boyunca olduğu anlamına gelmektedir. Bu durumda

$$\beta_z = \beta \sqrt{1 + x'^2 + y'^2} \approx \beta \tag{2.30}$$

eşitliği geçerli olmaktadır. Örneğin  $x' < 100 \text{ mrad}$  ve  $y' < 100 \text{ mrad}$  ise  $\beta$ 'daki hata % 1'den daha küçük olmaktadır. Bu yaklaşım demet ıraksamasının az olduğu yüksek

enerjilerde yeterince kesin sonuç vermektedir fakat çok küçük enerjilerde doğrulamak çok zor olmaktadır.

### 2.3.2.3 Enerji Kazancı Hesaplaması

Eş. (2.29) kullanılarak enerji kazancı Eş. (2.31) ve (2.32)'de verildiği şekilde elde edilebilir.

$$\frac{d\gamma}{ds} = \beta_z \cdot \left( x' \frac{d\gamma\beta_x}{ds} + y' \frac{d\gamma\beta_y}{ds} + \frac{d\gamma\beta_z}{ds} \right) \quad (2.31)$$

$$\frac{d\gamma}{ds} = \frac{q}{mc^2} \cdot (x'E_x + y'E_y + E_z) \quad (2.32)$$

Eşitlikler, enerji kazancına tek katkının elektrik alandan geldiğini göstermektedir.

### 2.3.3 Boyuna Parçacık Dinamiği

Yatay eksen  $s$  olmak üzere boyuna parçacık hareketini tanımlamak üzere kullanılan değişkenler şu şekildedir;

- $\phi$ , mutlak parçacık fazı, RF frekansından hesaplanmaktadır.
- $W$ , parçacığın kinetik enerjisi

Bu değişkenler yardımıyla aşağıdaki eşitlikler elde edilir.

$$\frac{d\phi}{ds} = \frac{w_{rf}}{\beta_z c} = \frac{2\pi}{\beta \lambda_{rf} \sqrt{1 - x'^2 - y'^2}} \quad (2.33)$$

$$\frac{dW}{ds} = q \cdot (x'E_x(s, \phi, r) + y'E_y(s, \phi, r) + E_z(s, \phi, r))$$

Bu eşitlikler senkron parçacığa uygulanınca;

$$\begin{aligned} \frac{d\phi_s}{ds} &= \frac{2\pi}{\beta_s \lambda_{rf}} \\ \frac{dW_s}{ds} &= qE_z(s, \phi_s, 0) \end{aligned} \quad (2.34)$$

eşitlikleri elde edilir. Burada  $\beta_s$  senkron parçacığın normalize hızıdır. Eş. (2.34)'ten faz ve enerji için indirgenmiş değişkenler tanımlanarak Eş. (2.35)'te verilen hareket denklemi elde edilir.

$$\frac{d\phi}{ds} = \frac{2\pi}{\lambda_{rf}} \left( \frac{2\pi}{\beta \sqrt{1 - x'^2 - y'^2}} - \frac{1}{\beta_s} \right) \quad (2.35)$$

$$\frac{d\psi}{ds} = q \cdot (x'E_x(s, \phi, r) + y'E_y(s, \phi, r) + E_z(s, \phi, r) - E_z(s, \phi_s, 0))$$

Burada

$$\phi = \phi - \phi_s \text{ ve } \psi = W - W_s \quad (2.36)$$

indirgenmiş değişkenlerdir.

Demet, duran dalga kovuk yapısı tarafından hızlandırıldığında, senkronize parçacıklar hücrelerin içerisine onlara büyük bir enerji kazandırarak girerler ve hızlanmanın olmadığı bölgelere doğru birbirlerinden ayrılırlar. Bu olayın fiziğini anlamak için periyodik olan hızlandırma yapısının sürekli olan bir başkasıyla değiştirildiği kabul edilebilir. Bu durumda demet senkronize parçacıkla aynı hızda olan bir ilerleyen dalga tarafından hızlandırılacaktır. Böyle bir yapıdaki hareketi tanımlayan denklemlerde elektrik alan sabit olacaktır.

### 2.3.3.1 Elektrik Alan Modeli

Elektrik alan genellikle  $s$ 'nin fonksiyonu olacak şekilde sabit seçilir. Eksen boyunca oluşan ilerleyen dalganın alanın büyüklüğü  $E_0 T$  (ortalama elektrik alan)'dir. Burada  $E_0$  bir hücrede oluşan maksimum elektrik alan,  $T$  ise *geçiş zaman* faktörüdür. Kovuk ekseninde oluşan elektrik alanın boyuna bileşeni Eş. (2.37) ile verilmiştir.

$$E_z(s, \phi, r = 0) = E_0 T \cdot \cos(\phi + \phi_{s0}) \quad (2.37)$$

$\phi_{s0}$  senkron parçacığın RF alana senkron olma fazı olarak tanımlanır. Bu durumda parçacığın metre başına kazancı Eş. (2.38) ile tanımlanır.

$$G = qE_0T_s \cdot \cos\phi_{s0} \quad (2.38)$$

Burada  $T_s$  senkron parçacın *geçiş zaman* faktörüdür.

Burada elektrik alanın eksene göre silindirik simetri gösterdiği kabul edilmiştir, haliyle bu durumda sadece boyuna bir alan oluşmaktadır. Eğer hızlandırıcıdaki alan asimetrik olursa bu durumda eksen dışındaki bir noktadaki boyuna alan Eş.(2.39)'da verilen şekilde olacaktır.

$$E_z(s, \varphi, r) = E_0T \cdot R(r) \cdot \cos(\varphi + \phi_{s0}) \quad (2.39)$$

Hızlandırma alanı asimetrik olduğunda elektrik alanın radyal ekseni boyunca Eş.(2.40)'da verilen bir bileşeni daha olacaktır.

$$E_z(s, \varphi, r) = -\frac{E_0T}{\beta_s \lambda} \cdot \sin(\varphi + \phi_{s0}) \cdot \left( \frac{r}{2} + O(r^3) \right) \quad (2.40)$$

Bu eşitliğin türetilmesi sırasında  $\nabla \cdot E = 0$  ve elektrik alanının enine bileşenin boyuna ekseninde sıfır olduğu kabul edilmiştir. Ayrıca boyuna elektrik alanının radyal konumdan bağımsız olduğu da paraksiyel yaklaşım kullanılarak gösterilmiştir.

### 2.3.3.2 Hareket Denklemi

[36]'te verilen yaklaşımlar ile Eş. (2.35)'te verilen eşitlik sadeleştirilerek Eş. (2.41)'e dönüştürülür.

$$\frac{d\varphi}{ds} = \frac{2\pi}{\lambda} \left( \frac{1}{\beta(s)} - \frac{1}{\beta_s(s)} \right) \quad (2.41)$$

$$\frac{d\psi}{ds} = -q \cdot E_0T \cdot (\cos\phi_{s0} \cdot (1 - \cos\varphi) + \sin\phi_{s0} \cdot \sin\varphi)$$

Bu denklem boyuna eksenindeki hareket tanımlamaktadır. Burada Eş.(2.42), Eş.(2.43) ve Eş.(2.44) kullanılır ise boyuna eksenindeki hareketi tanımlayan denklem Eş. (2.45)'e dönüşür.



$$\frac{1}{\beta} - \frac{1}{\beta_s} = \delta\beta^{-1} \ll \frac{1}{\beta_s} \quad (2.42)$$

$$\delta\beta^{-1} = -\frac{\psi}{(\beta_s \gamma_s)^3 \cdot mc^2} \quad (2.43)$$

$$T(w\psi) = T_s \quad (2.44)$$

$$\frac{d\varphi}{ds} = -2\pi \cdot \frac{\psi}{(\beta_s \gamma_s)^3 \cdot mc^2 \cdot \lambda} = \frac{\partial H_{\phi\psi}}{\partial \psi}$$

$$\frac{d\psi}{ds} = -q \cdot E_0 T_s \cdot [\cos\phi_{s0} \cdot (1 - \cos\varphi) + \sin\phi_{s0} \cdot \sin\varphi] = \frac{\partial H_{\phi\psi}}{\partial \varphi} \quad (2.45)$$

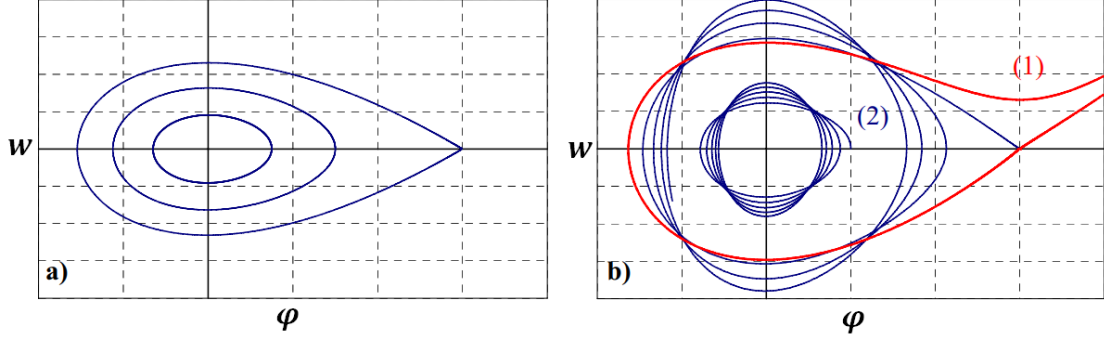
Burada  $\psi$  ve  $\varphi$  kanonik değişkenlerdir ve  $s$ 'den bağımsızdır. Eş.(2.46) ile verilen Hamiltonyen  $H_{\phi\psi}$  ise parçacık hareketini tanımlamaktadır. Genel olarak Hamiltonyen, parçacık hareketi gibi sistem dinamiklerini momentum ve koordinat bileşenleri cinsinden tanımlamak için kullanılan bir fonksiyondur ve sistemin toplam enerjisini ifade eder.

$$H_{\phi\psi} = -\frac{2\pi}{(\beta_s \gamma_s)^3 \cdot mc^2 \cdot \lambda} \cdot \frac{\psi^2}{2}$$

$$- q \cdot E_0 T_s \cdot R(r) \cdot [\sin\phi_{s0} \cdot (\cos\varphi - 1)$$

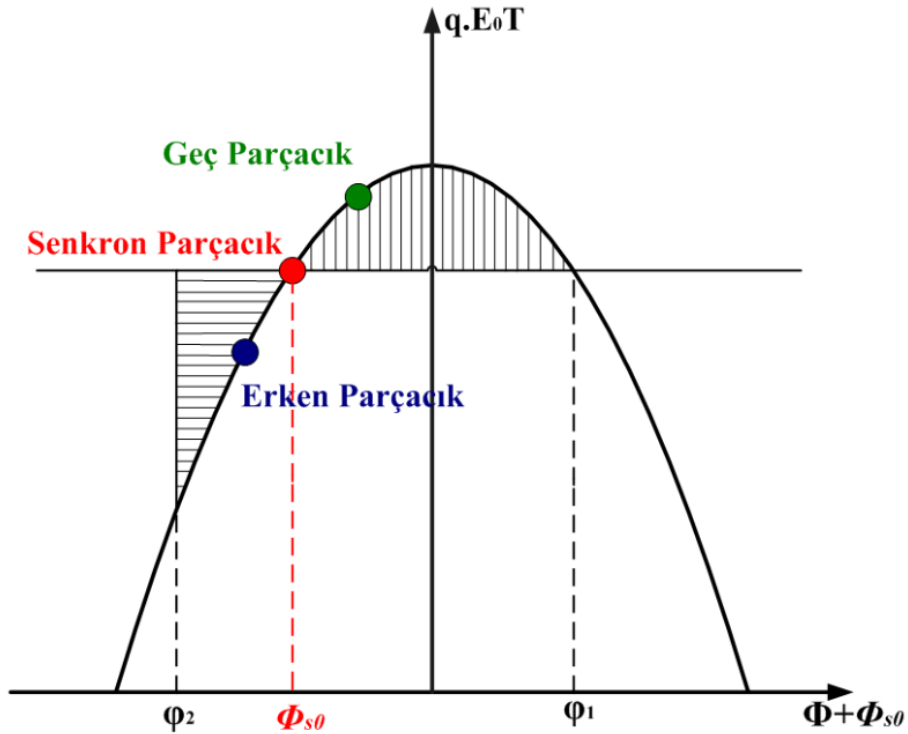
$$+ \cos\phi_{s0} \cdot (\sin\varphi - \varphi)] \quad (2.46)$$

$(\varphi, w)$  faz uzayında parçacık, Hamiltonyen sabit kalacak bir eğri boyunca hareket eder. Eksende hareket eden bir parçacık için bu hareket çeşitleri Şekil 2.11'de verilmiştir.



**Şekil 2.11 Boyuna faz uzayında parçacık hareketleri. (a)  $\beta_s \gamma_s = \text{sabit}$ , (b) Adiyabatik hızlanma, *golf sopası* demet giriş kısmını göstermektedir (1,kırmızı). Mavi grafik (2) ise iki parçacığın yörüngesini göstermektedir. İki parçacığın hareketinde faz salınımlarının genliği hızlanma ile zayıflar [36].**

Şekil 2.11 (a)'da verilen harekette  $\beta_s \gamma_s$  değeri sabit iken (b)'de bu değer sabit değildir ve bu yüzden şekil çok bilinen *golf sopası* şeklini alır. Parçacık senkronize olduktan sonra kovuk içerisine girerse daha çok enerji kazancı elde eder. Senkronize olmadan önce girer ise enerji kazancı daha az olur. Bu durumdaki parçacık *erken parçacık* diye adlandırılır. Bu durumu anlatan grafik Şekil 2.12' de verilmiştir.



**Şekil 2.12 Parçacıkların enerji kazanç gösterimi**

Senkronize parçacığın senkronize olma fazı  $-\pi/2$  ve  $0^3$  arasında sabit bir noktadır. Senkronizasyon fazın seçimi sistemin fazına da bir sınırlama getirir. Fazın üst limitinin  $\phi_1$  olduğu durumda kovuğa erken giren parçacığın enerji kazancı senkron parçacık ile aynı olur. Bu durumda,

$$\phi_1 = -\phi_{s0} \Rightarrow \varphi_1 = -2 \cdot \phi_{s0} \quad (2.47)$$

olacaktır. Fazın alt limitinin  $\phi_2$  olduğu durumda, sınırlayıcı potansiyel fazın üst limitindeki değere eşit olacaktır. Potansiyel, kuvvetin integrali olduğundan,  $\phi_2$  Şekil 2.12'de verilen yatay ve dikey taranmış bölgelerin birbirine eşit olduğu noktadaki fazdır. Bu Eş. (2.46) ile verilen Hamiltonyen kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$H_{\varphi\psi}(\varphi = \phi_2 - \phi_{s0}, \psi = 0) = H_{\varphi\psi}(\varphi = \phi_1 - \phi_{s0}, \psi = 0) \quad (2.48)$$

$\phi_2$ 'yi elde etmek için;

$$(\sin\phi_2 - \phi_2 \cos\phi_{s0}) + ((\sin\phi_{s0} - \phi_{s0} \cos\phi_{s0}) = 0 \quad (2.49)$$

eşitliği çözülür. Senkronizasyon fazının seçimi aynı zamanda *enerji kabul* ( $\Delta E$ ) değerini de belirler. Bu değer senkron parçacığın potansiyel enerjisi ile  $\phi_1$  fazına sahip parçacığın potansiyel enerjileri arasındaki fark olarak tanımlanır ve Eş. (2.46) ile verilen Hamiltonyen kullanılarak hesaplanabilir.

$$H_{\varphi\psi}(\varphi = 0, \psi = \Delta E) = H_{\varphi\psi}(\varphi = \phi_1 - \phi_{s0}, \psi = 0) \quad (2.50)$$

Bu durumda;

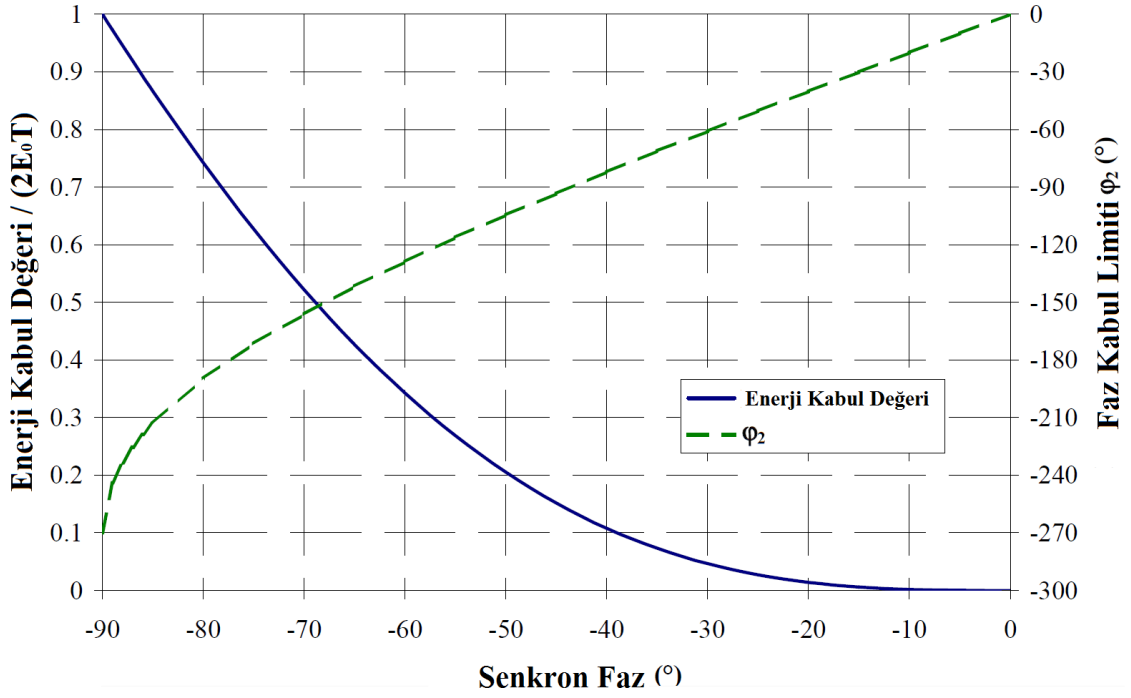
$$\Delta E = 2 \cdot qE_0 T (\phi_{s0} \cos\phi_{s0} - \sin\phi_{s0}) \quad (2.51)$$

---

<sup>3</sup> Bu durum pozitif işaretli parçacıklar içindir, negatif yüklü parçacıklar için  $qE_0 > 0$  veya  $E_0 > 0$  olup olmadığına bakılmalıdır.

$$\Delta E = \left( \frac{(\beta_s \gamma_s)^3 \cdot mc^2 \cdot \lambda}{\pi} \cdot 2 \cdot q E_0 T (\phi_{s0} \cos \phi_{s0} - \sin \phi_{s0}) \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.52)$$

olacaktır. Faz-enerji uzayında *kabul alanı kova (bucket)*, sınırı ise *separatrix* olarak adlandırılır. Şekil 2.13'te enerji kabul değeri ( $\Delta E$ ) ve faz ( $\phi_2$ ) senkronizasyonun bir fonksiyonu olarak verilmiştir.



Şekil 2.13 Senkron fazın fonksiyonu cinsinden kova boyutları [36]

Küçük faz salınımlarında Eş.(2.45);

$$\frac{d\phi}{ds} = -2\pi \cdot \frac{\psi}{(\beta_s \gamma_s)^3 \cdot mc^2 \cdot \lambda} = \frac{\partial H_{\phi\psi}}{\partial \psi} \quad (2.53)$$

$$\frac{d\psi}{ds} = -q \cdot E_0 T_s \cdot \sin \phi_{s0} \cdot \phi$$

halini alır. Bu eşitlikler faz hesaplanması için ikinci dereceden bir diferansiyel denklem olarak yazılabilir. Bu durumda eşitlik;

$$\frac{d^2\varphi}{ds^2} + \frac{2}{\zeta} \cdot \frac{d\varphi}{ds} + k_z^2 \cdot \varphi = 0 \quad (2.54)$$

olacaktır. Burada  $k_z^2$ ;

$$k_z^2 = \frac{2\pi q \cdot E_0 T_s \cdot \sin(-\phi_{s0})}{(\beta_s \gamma_s)^3 \cdot mc^2 \cdot \lambda} \quad (2.55)$$

olarak verilmiştir ve demet merkezinin fazının metre başına ilerlemesi olarak tanımlanmaktadır. Periyodu  $L$  olan periyodik yapılarda boyuna faz merkezi ilerlemesi  $\sigma_z = k_z L$  olarak ifade edilir. Eş. (2.54) ile  $\zeta$  salınım merkezlerinin sönümlenme uzunluğudur ve

$$\zeta = \frac{2}{3} \cdot \frac{\beta_s \gamma_s}{d(\beta_s \gamma_s)/ds} \quad (2.56)$$

olarak verilir.  $\zeta$  ve  $k_z$ 'deki değişim faz salınımlarının sönümlenmesine katkı sağlar. Faz genliği salınımindaki ( $\varphi_a$ ) sönümlenme,  $\zeta$ 'den gelen katkı önemsiz olduğundan Eş. (2.56) kullanılarak hesaplanabilir.

$$\varphi_a \sim (\beta_s \gamma_s)^{-3/4} \quad (2.57)$$

Liouville's teoremi kullanılırsa enerji genliğindeki salınım;

$$\psi_a \sim (\beta_s \gamma_s)^{3/4} \quad (2.58)$$

eşitliği kullanılarak bulunabilir. Bu durumda doğrusal kuvvet altındaki Hamiltonyen;

$$H_{\varphi\psi} = -\frac{2\pi}{(\beta_s \gamma_s)^3 \cdot mc^2 \cdot \lambda} \cdot \frac{\psi^2}{2} + q \cdot E_0 T_s \cdot \sin\phi_{s0} \cdot \frac{\varphi^2}{2} \quad (2.59)$$

eşitliği ile verilir. Bu durumda Eş. (2.59) ile verilen Hamiltonyenin sabit olduğu durumdaki eğriler elipstir.

## 2.4 Tasarım Parametrelerinin Optimizasyonu

Fotokatot RF tabanca ve Kovuk için farklı tasarım ve optimizasyon parametresi belirlemek mümkündür. Farklı yaklaşımlar genellikle tasarlanacak sistemlerin kullanım amaçlarındaki fayda-zarar ilişkisi göz önünde bulundurularak belirlenir. Bununla birlikte tasarımın ne ölçüde gerçekleştirilebileceğinin mevcut teknolojik imkanlar dâhilinde belirleneceğine de dikkat edilmelidir. Bu bölümde, Fotokatot RF tabanca ve Kovuk sistemlerinin tasarımları sırasında belirleyici olan RF frekansı, maksimum elektrik alan gradyenti, şönt empedansı gibi parametrelerin değerlerinin nasıl belirlenebileceği sorusuna yanıt aranmıştır.

### RF Frekansı

Sistem tasarlanırken belirlenecek ilk parametre yapının çalışacağı RF frekansıdır. Özellikle RF tabancanın frekansı, yük üretimi, kovuk boyutu gibi diğer birçok parametrenin belirlenmesinde önemli rol oynar. Maksimum gerçekleştirilebilen gradyent frekansın bir fonksiyonudur. Ayrıca kovuğun hacmi frekansın küpüyle ters orantılıdır ( $V \sim 1/f^3$ ). Yüksek frekanslarda çalışmak üzere tasarlanmış bir kovuğun hacmi düşük frekanslardaki göre daha küçüktür. Küçük hacimli yapılarda ortamı vakuma almak çok daha kolaydır. Fotokatottan elektron koparmak için yüksek vakum gerektiğinden bu oldukça önemlidir. Bu yaklaşımlar altında frekans aralığının  $144 \text{ MHz} \leq f \leq 17 \text{ GHz}$  olarak belirlenebilir [19].

### Maksimum Gradyent

Fotokatot RF tabanca gibi yüksek parlaklığa (*ing. brightness*) sahip kaynaklarda demet hareketleri uzay yükü tarafından (*ing. space charge*) baskılanmıştır. Daha düşük yayılım elde edebilmek için uzay yükün etkisiyle oluşan yayılımdaki artış mümkün olduğu kadar baskılanmalıdır. Bu da mümkün olan en yüksek seviye de hızlandırıcı gradyent sağlanarak mümkün olur. İletken hızlandırıcı kovuklar bu şekilde hızlandırma gradyenti üretme yeteneğine sahiptirler. Fakat bu hızlandırmanın da Eş.(2.60) ile verilen ve Killpatrick kriteri olarak bilinen bir sınırı vardır [19].

$$E_{0,max}[MV/m] = 8,47 + 1,57\sqrt{f[MHz]} \quad (2.60)$$

Yapı içerisinde oluşturulabilecek maksimum gradyent rezonans frekansının fonksiyonu olarak Eş.(2.60)'da verilen eşitlik ile hesaplanır. Bu tezde sistemler 3GHz civarında çalışmak üzere planlandığından maksimum alan yaklaşık 93 MV/m'dir.

### **Kalite Faktörü**

Sistem tasarlanırken göz önünde bulundurulması gereken önemli parametrelerden biri de kalite faktörüdür. Genel olarak yapı içerisinde depolanan enerjinin yapıda meydana gelen kayıplara oranının bir göstergesi olarak değerlendirilir. Bu sebeple yapıda meydana gelen kayıplar aslında yapının ne kadar verimli bir şekilde çalıştığına da bir göstergesidir. Bu kayıplar, yapının duvarlarından kaynaklanacağı gibi yapı içerisinde bulunan dielektrik ve magnetik malzemelerden de oluşabilmektedir. Böyle bir durumda toplam kalite faktörü Eş. (2.61) ile tanımlandığı şekilde verilmektedir.

$$\frac{1}{Q_{yüklenmiş}} = \frac{P_{duvar} + P_{harici}}{w_0 W} = \frac{1}{Q_0} + \frac{1}{Q_{harici}} \quad (2.61)$$

Burada  $Q_{harici}$  magnetik ve dielektrik malzemelerin oluşturduğu kalite faktörü,  $Q_0$  yalnızca yapının duvarının sebep olduğu kalite faktörü,  $Q_{yüklenmiş}$  ise yapının toplam kalite faktörüdür. Ayrıca  $P_{duvar}$  sadece yapının duvarlarının sebep olduğu güç kaybı,  $P_{harici}$  ise dielektrik ve magnetik malzemelerin sebep olduğu güç kayıplarıdır. Yapının tamamına ait kalite faktörü için daha yaygın olarak Eş. (2.62) kullanılmaktadır.

$$Q_{yüklenmiş} = \frac{Q_0}{(1 + \beta)} \quad (2.62)$$

Eş. (2.62)'deki  $\beta$  aktarma sabiti olarak adlandırılır ve  $P_{harici}/P_{duvar}$  olarak verilir. Bu tez çalışması kapsamında kayıpların sadece yapının duvarlarından kaynaklandığı durum göz önüne alınmıştır. Vakuma alınmış ve bakırdan yapılmış sistemler için kalite faktörü genel olarak  $10^3$ - $10^6$  aralığındadır [37].

### **R/Q Oranı**

RF hızlandırıcı yapıları için önemli bir diğer parametre de  $R/Q$  oranıdır. Bu oran her ne kadar türetilmiş bir parametre gibi görünse de yapının kayıplarından bağımsız oluşu ve sadece geometriye bağımlı olması bu değeri kritik bir değer haline getirmektedir. Genel olarak Eş.(2.63) ile verilmektedir.

$$\frac{R}{Q} = \frac{V_{hız}^2}{2w_0W} \quad (2.63)$$

Burada  $V_{hız}$  yapı içerisindeki hızlandırma voltajı,  $W$  yapı içerisinde depolanan enerji ve  $w_0$  ise açılal hızdır. Bu oran doğrudan yapının geometrisi ile ilgili olduğundan yapının içerisindeki hücrelerin şeklinin optimizasyonu ile değer maksimum olacak şekilde ayarlanabilir [2].

### **Sönt Empedans**

Sistemin tasarlanması sırasında göz önünde bulundurulması gereken son parametre ise şönt empedanstır. Eş.(2.64) ile verilen bu değer kalite faktörü ve  $R/Q$  oranının çarpılması sonucu elde edilir.

$$R = \frac{R}{Q} \cdot Q = \frac{V_{hız}^2}{2P} \quad (2.64)$$

Minimum güç kaybı ile maksimum hızlandırma voltajı elde etmek için sönt empedansının maksimum olması gerektiği Eş.(2.64)'ten açıkça görülmektedir. Bunun için ya kalite faktörünün ya da  $R/Q$  oranının maksimum yapılması gerekmektedir. Kalite faktörünü maksimum yapmak için örneğin süper iletken bir yapı kullanılabilir. Fakat bu tüm sistemin değişmesi anlamına geldiğinden tercih edilen bir yöntem değildir. Bunu yerine sadece şekil optimizasyonu ile maksimum yapılabildiği için  $R/Q$  oranını değiştirmek daha çok tercih edilen bir yöntemdir [37].

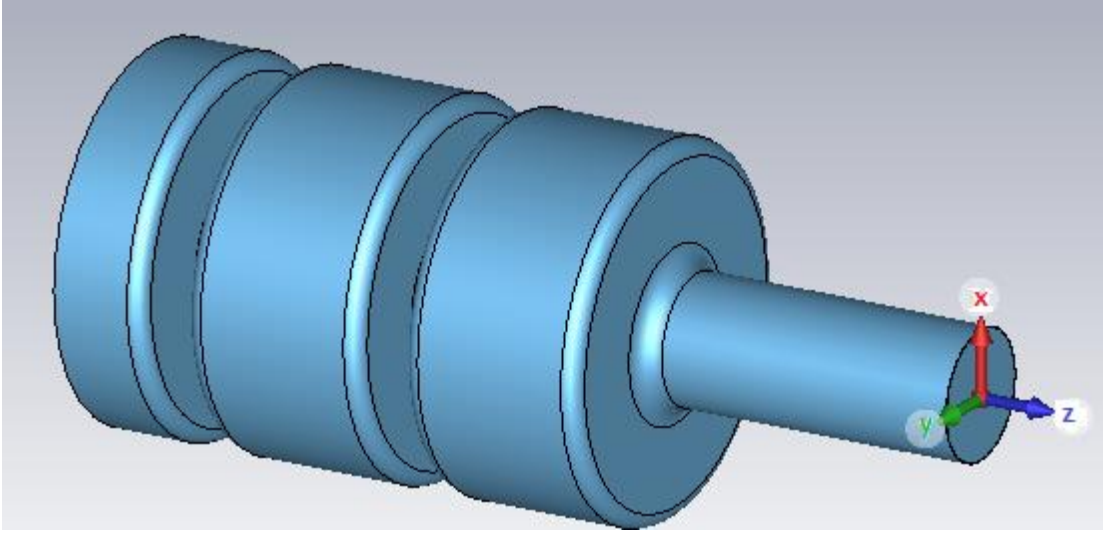


### 3. DOĞRUSAL HIZLANDIRICI TASARIMI

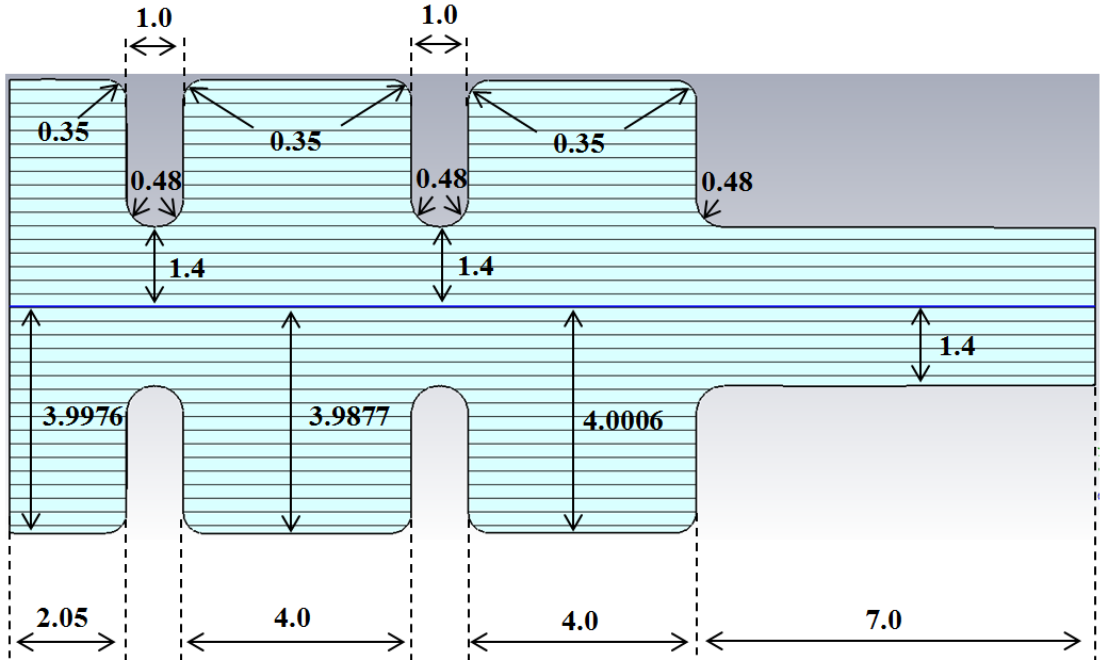
Tezin bu kesiminde elektronların üretilmesini sağlayan RF foto-tabanca ve hızlandırma işleminin gerçekleştirildiği kovuğun tasarımına dair detaylı bilgi verilmiştir. Bu amaçla öncelikle ilgili birimlerin tasarımları anlatılmış, sonrasında ise tasarımlara ait *Superfish*<sup>®</sup> ve *CST Microwave Studio*<sup>®</sup> programlarından elde edilmiş sonuçlar verilmiştir. Gerçekleştirilen tasarımların sonuçlarının hesaplanmasında CST’de bulunan *Eigenmode Solver*, *Transient Solver* ve *Frequency Solver*’lar kullanılmıştır. Özellikle rezonans frekansı ve mod oluşumlarının incelenmesinde *Eigenmode Solver*, yapının mikrodalga ve RF özelliklerinin incelenmesinde ise *Transient Solver* ve *Frequency Solver* kullanılmıştır. Tasarımlar özellikle birden fazla çözücü kullanılarak yapılmış, böylelikle sonuçların karşılaştırılması ve tutarlılık açısından irdelenmesi mümkün olmuştur.

#### 3.1 Fotokatot RF Tabanca Tasarımı

Bu başlık altında tasarlanan elektron tabancasının fiziksel yapısı, boyutları, çalışma frekansı, demet dinamikleri gibi tasarımı oluşturan karakteristik özellikler hakkında bilgi verilmiştir. Tasarım temel olarak iki ana ve bir yarım hücreden oluşan ve genel olarak 2+1/2 hücre olarak tanımlanan bir yapıdan oluşmaktadır. Yapının bu şekilde belirlenmesinin temel sebebi benzer bir çalışma olan [13] ile sonuçları karşılaştırabilmektir. Yapı ilk olarak *CST Microwave Studio*<sup>®</sup>’da tasarlanmıştır, bu programda sonuçlar elde edildikten sonra hem sonuçların karşılaştırılması hem de demet dinamiklerine yönelik daha fazla bilgi edinmek amacıyla tasarım *Superfish*<sup>®</sup>’te de gerçekleştirilmiş ve sonuçlar alınmıştır. Ayrıca, simülasyon süresi açısından *Superfish*’in *CST Microwave Studio*’ya göre daha hızlı olmasının da bu kararda etkisi olmuştur. Bununla birlikte *CST Microwave Studio*’da yapının üç boyutlu halinin görülebilmesi, fiziksel olarak yapılması muhtemel modifikasyonlara kolaylıkla izin vermesi ve parametrik çalışmanın çok basit bir şekilde yapılabilmesi de bu simülasyon programının göz ardı edilmemesi gereken avantajlarıdır. Tasarıma ait görsel Şekil 3.1’de, boyutlara dair bilgi ise Şekil 3.2’de verilmiştir.

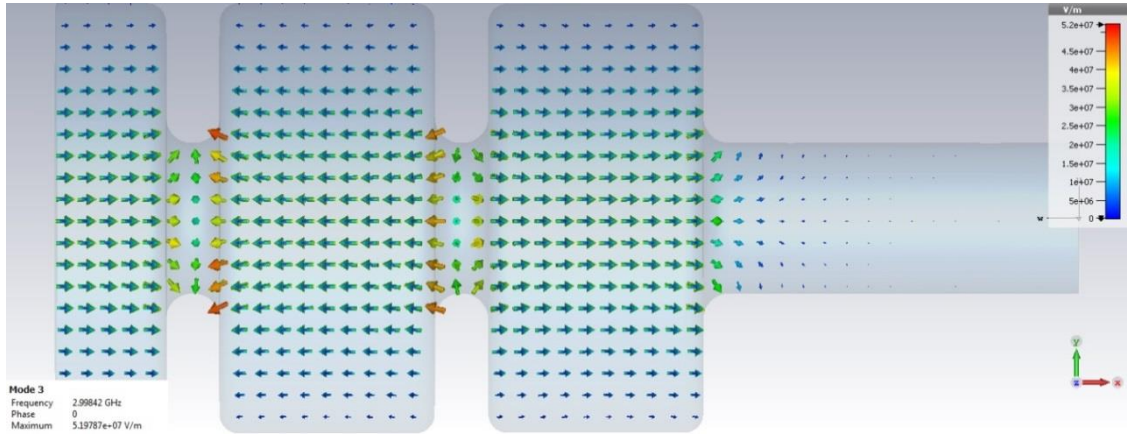


Şekil 3.1 CST’de tasarımın üç boyutlu görünümü

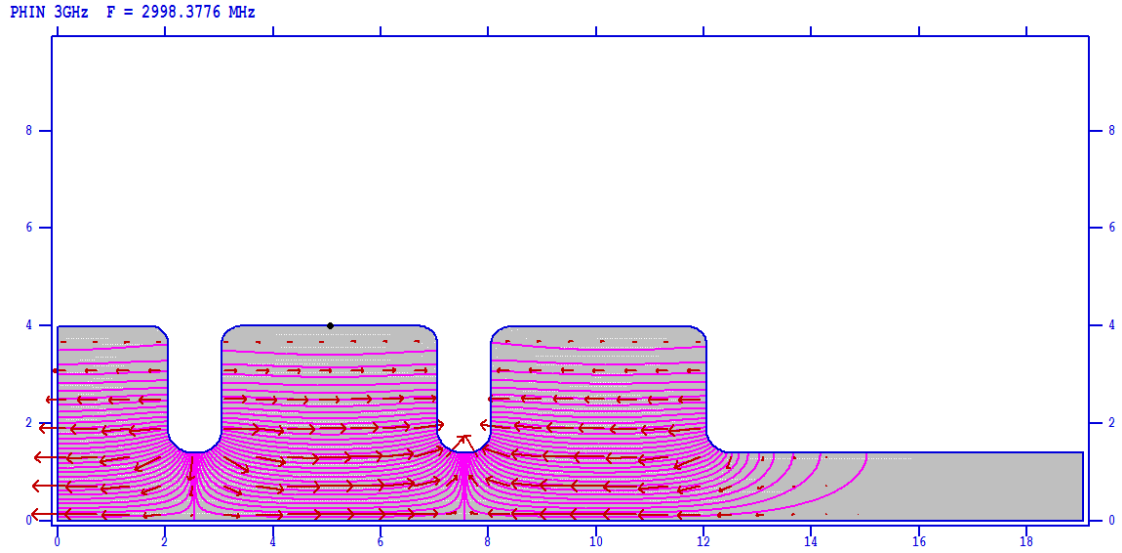


Şekil 3.2 Tasarımın cm cinsinden boyutları.

Tasarım, giriş bölümünde de belirtildiği üzere optimum hızlandırmanın gerçekleştirilmesine imkan vermesi sebebiyle  $\pi$  modunda gerçekleştirilmiştir. Tasarımda oluşan moda dair elektrik alan çizgileri Şekil 3.3 ve Şekil 3.4’te görülmektedir. Tasarıma ait Superfish dosyası ise EK-1’de verilmiştir.

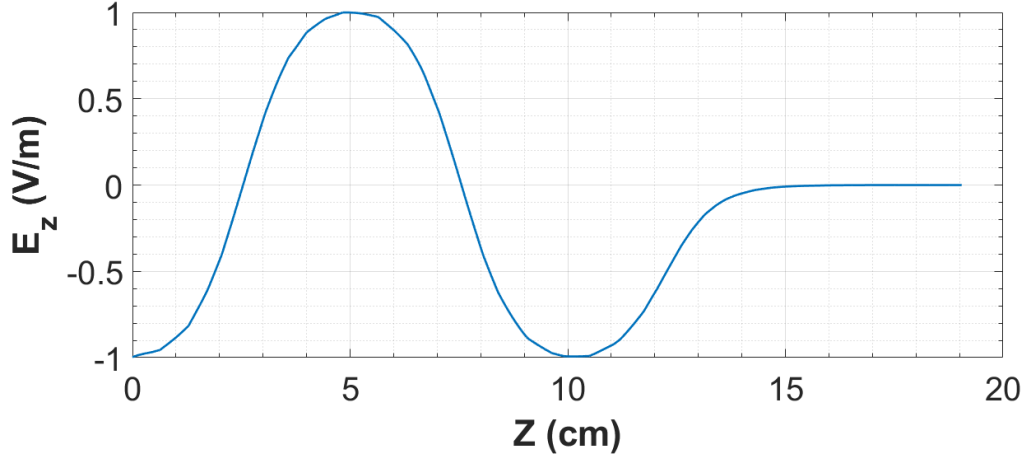


Şekil 3.3 CST Microwave Studio'dan elektrik alan dağılım



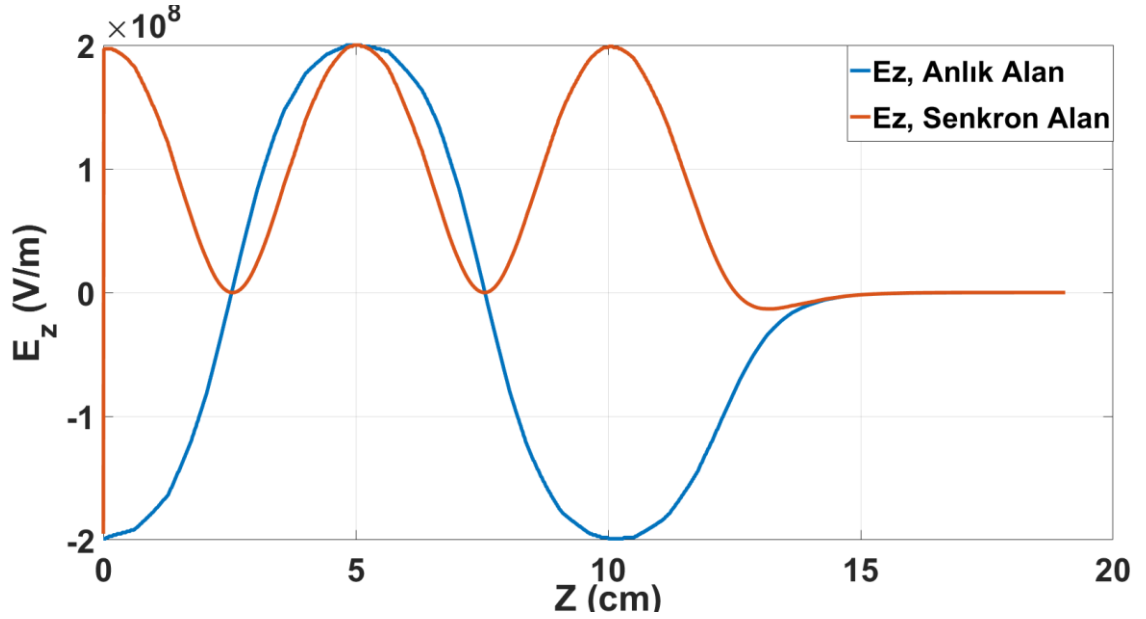
Şekil 3.4 Superfish'te elektrik alan dağılımı (x ve y eksenleri uzunluktur, cm)

Yapılan tasarımda hücrelerin eksenleri boyunca oluşan elektrik alanın tepe noktalarının her bir hücrede eşit olması parçacıkların senkronize bir şekilde hızlanacağını gösteren bir parametre olduğundan önem arz etmektedir. Bu sebeple yapılan tasarımda da eksen boyunca oluşan elektrik alanın her bir hücredeki tepe değerinin birbirleri ile eşit veya aralarındaki farkın en fazla %3 civarında olması beklenmektedir. Şekil 3.4'te verilen tasarımdaki hücrelerde oluşan elektrik alanın normalize edilmiş çizimi Şekil 3.5'te verilmiştir. Alanın *Eigenmode Solver*'da edilen değeri ise 37 MV/m'dir.



**Şekil 3.5 Fotokatot RF tabancanın eksen boyunca oluşan elektrik alan**

Şekil 3.5'te verilen grafikte alanın tepe değerleri arasındaki fark yaklaşık %1'dir. Yalnız bu noktada bahsedilen alan değerlerinin büyüklük olduğu unutulmamalıdır. Hücreler içerisindeki elektrik alan değerlerinin bu şekilde benzer olması aynı zamanda yapı içerisindeki bir parçacığın senkron olarak hızlanacağı anlamına da gelmektedir. Bu, Şekil 3.6'dan da açık bir şekilde görülmektedir.



**Şekil 3.6 Yapı içerisinde eksen boyunca oluşan elektrik alan ile harici uygulanan elektrik alan**

Senkron alan ;

$$E_{z, \text{senkron alan}} = E_{z, \text{anlık alan}} \cdot \sin(2\pi ft + \varphi) \quad (3.1)$$

eşitliği kullanılarak elde edilmiştir. Bu eşitlikte,  $E_{z, \text{senkron alan}}$  kovuk içerisindeki hücrelerin parçacığın senkron şekilde hızlanmasına imkan verecek şekilde tasarlanması sonucu oluşan elektrik alanı,  $E_{z, \text{anlık alan}}$  tasarım programları tarafından kovuk içerisinde z eksenini boyunca elde edilen elektrik alanı,  $f$  frekansı,  $t$  zamanı ve  $\varphi$  ise senkron olmayı sağlayan rastgele faz farkını ya da faz açısını ifade etmektedir. Burada sadece senkron hızlandırma incelendiğinden alanlar 200 MV/m'ye normalize edilerek çizilmiştir. Bu grafik aslında Bölüm 2.3.3.2'de açıklanan ve görsel olarak da Şekil 2.12'de verilen senkron parçacık durumunun gerçekleştiğini göstermektedir. Kovuk içerisindeki hücrelerin boyutları parçacığın senkron bir şekilde hızlanmasına sebep olduğundan Şekil 3.6'da anlık ve senkron alan grafiklerinde tepeler ve dip noktalar birbirleri ile örtüşmektedir. Eğer bu noktalar birbirleri ile kesişmez ise bu durumda parçacık *erken parçacık* veya *geç parçacık* diye adlandırılan durumda kalacaktır ve haliyle de istenilen hızlanma gerçekleşmeyecektir. Konu ile ilgili teorik açıklama Bölüm 2.3.3.2'de verilmiştir.

Gerçekleştirilen tasarıma ait rezonans frekansı,  $R/Q$  empedansı, kalite faktörü ve güç kaybının tepe değeri gibi bilgiler Çizelge 3.1'de verilmiştir.

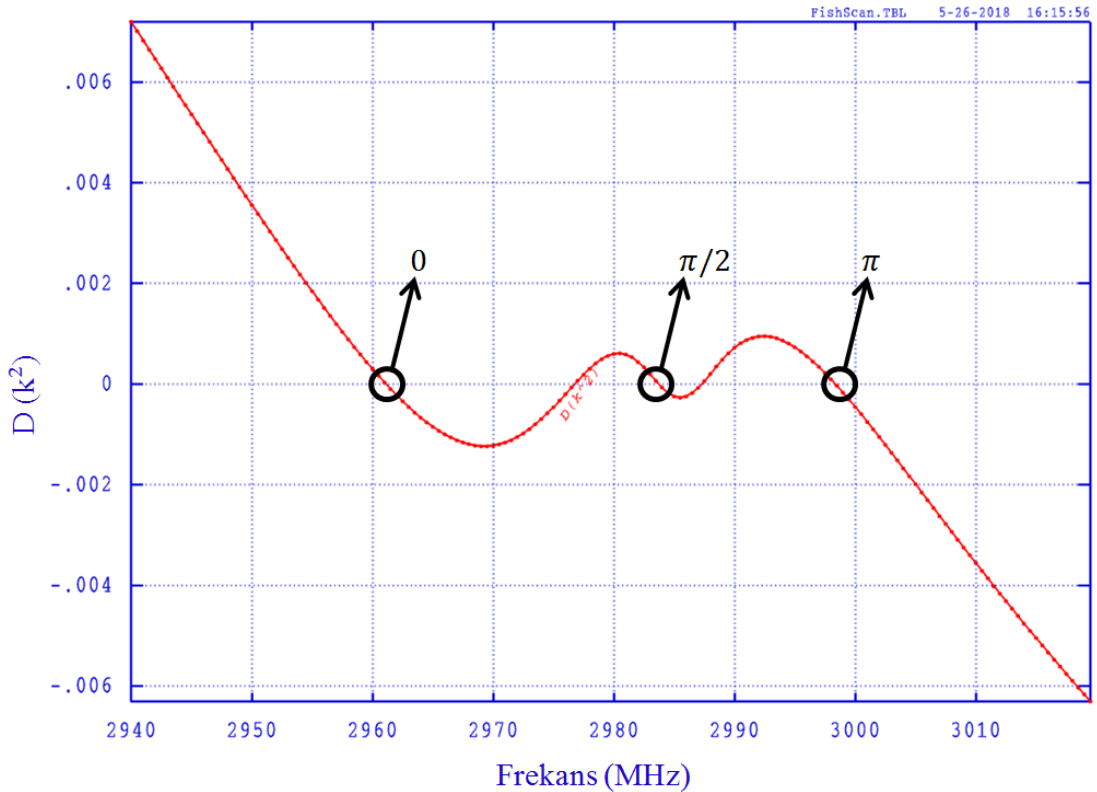
**Çizelge 3.1 Superfish ve CST programlarından elde edilen Fotokatot RF tabanca tabanca parametreleri**

Parametre	Superfish	CST
Frekans (MHz)	2998,38	2998,36
Çalışma Sıcaklığı ( °C)	20	20
Kalite Faktörü , $Q$	17390	15650
$R/Q$ , ( $\Omega$ )	328	347
Güç Kaybı Tepe Değeri (kW)	3,3	-

Tablodan iki program arasındaki en büyük farkın kalite faktörü sonucunda elde edildiği açıkça görülmektedir. İki programda kalite faktörünü hesaplarken Eş. (2.5)' te verilen

$Q = w_c U/P$  eşitliğini kullanmaktadır. Burada  $w_c$  değeri her iki programda da birbirine çok yakın olmakla beraber yapıda hapis olan enerji ve yapıdan kaynaklanan kayıp hesaplamalarında her program kendi nümerik analiz yöntemini kullanmaktadır. Ayrıca programların problemi çözerken kullandıkları örgü yapılarının (*ing. mesh*) farklı olmasının sonuçların farklı olmasına sebep olduğu değerlendirilmektedir.

Elektron tabanca tasarımı geometrik olarak tamamlandıktan sonra yapı içerisinde uyarılabilecek modların bulunması amacıyla frekans taraması yapılmıştır. Bunun sonucunda da  $D(k^2) - f$  eğrisi, Şekil 3.7’de verildiği şekilde elde edilmiştir. Bu bağtıda  $D$  Dirichlet fonksiyonu,  $k$  dalga sayısı,  $f$  frekanstır.



**Şekil 3.7 Farklı modlara ait rezonans frekansları**

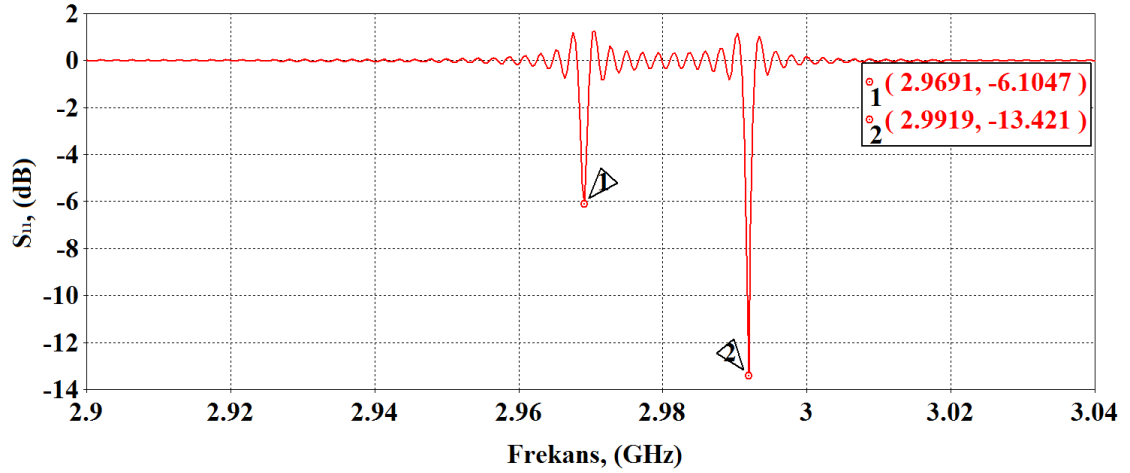
Şekil 3.7’de, eğimin negatif olduğu,  $D(k^2) = 0$  noktalarına karşılık gelen frekanslar yapı içerisinde oluşan modlara ait rezonans frekanslardır. Bu rezonans noktalarının bulunması ile ilgili detaylı hesaplamalar [38]’de açıklanmaktadır. *CST Microwave Studio*<sup>®</sup> ve *Superfish*<sup>®</sup>, ten elde edilen sonuçlar Çizelge 3.2’de verilmiştir.

**Çizelge 3.2 CST ve Superfish'ten elde edilen rezonans frekansları**

Mod (rad)	Frekans (MHz)	
	Superfish	CST
0	2961,20	2961,12
$\pi/2$	2983,75	2983,72
$\pi$	2998,38	2998,36

Çizelge 3.2 farklı modlara ait rezonans noktalarının her iki programda da birbirlerine uyumlu olarak hesaplandığını açıkça göstermektedir.

Tasarlanan yapıya ait önemli diğer bir parametre ise geri dönüş kaybı (*ing. return loss*) olarak adlandırılan ve basitçe, yapıya gönderilen enerjinin yapının çıkışından geri yansıyan miktarının yapıdan dışarı çıkan miktarına oranı olarak tanımlanır. Geri dönüş kaybı, mikrodalgada çokça kullanılan S matrisinin elemanı olduğundan  $S_{11}$  olarak da isimlendirilir [39]. Bu değişkene ait *CST Microwave Studio*<sup>®</sup>’den elde edilen sonuç Şekil 3.8’de verilmiştir.



**Şekil 3.8 Tasarıma ait  $S_{11}$  değerleri**

Çizelge 3.2’de verilen rezonans modları bu yapı içerisinde, ilgilenilen frekans bölgesinde 0,  $\pi/2$  ve  $\pi$  olmak üzere 3 tane modun bu yapı içerisinde yayılabildiğini göstermektedir. Buradan hareketle, Şekil 3.8’te verilen  $S_{11}$  grafiğinde 3 noktanın değerinin 0 dB’den daha düşük olması beklenmektedir. Fakat grafikte yalnızca 2969,1 ve 2991,9 MHz olmak üzere 0 ve  $\pi$  modlarına ait olduğu değerlendirilen 2 noktaya ait

değerler görülmektedir. Bu simülasyon program içerisinde *Transient Solver* adı verilen ve zaman uzayında çalışan bir çözücü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu çözücü rezonans modlarının hesaplandığı çözücünden farklı olarak yapıyı uyaracak ve enerji giriş-çıkış bölgelerini simüle edecek *port* adı verilen simülasyon araçlarına ihtiyaç duyar. Bu portlar vasıtasıyla uyarılan yapıdan ne kadar enerji çıktığı ya da ne kadarının geri yansıdığı kolaylıkla hesaplanabilmektedir. Fakat yapının beklenen şekilde uyarılabilmesi için hassas bir örgü yapısı kullanılması gerekmektedir. Bu da çok uzun simülasyon süresi, yüksek kapasiteli *CPU* ve *RAM* ihtiyacına sebep olmaktadır. Simülasyonların yapıldığı bilgisayarın böyle bir altyapıyı desteklememesinden dolayı bu hassasiyette bir hesaplama yapılamamıştır. Buna rağmen yapıya ait 0 ve  $\pi$  modları Şekil 3.8'den rahatlıkla görülmektedir. Bu noktada modlara ait  $S_{11}$  değerlerinin birbirinden farklı çıktığına da dikkat edilmesi gerekmektedir. Bunun sebebi yapının temel olarak çalışması için tasarlandığı  $\pi$  modudur. Eğer iki modun da  $S_{11}$  değeri aynı olsaydı bu durumda yapı içerisinde istenmeyen bir şekilde 2 ayrı modun yayılması gibi bir durum meydana gelecektir. Modların  $S_{11}$  değerlerinin farklı olması, tasarımın geliştirilmesinde beklenen temel sonuçlardan birisidir. Simülasyonda diğer  $\pi/2$  modunun bulunamamasının temel nedeni de budur. Rezonans frekanslarının bulunduğu *Eigenmode Solver*'da bu modun diğer modlara göre daha belirsiz bir şekilde oluştuğu açıkça görülmektedir. Bu sebeple de *Transient Solver* içerisinde çok hassas bir örgüleme ile modellenmesi gerekmektedir. Tüm bunlara rağmen Şekil 3.8'nin yapının RF yönünden beklenen şekilde tasarlandığını gösteren değerli bir sonuç olduğuna dikkat edilmelidir.

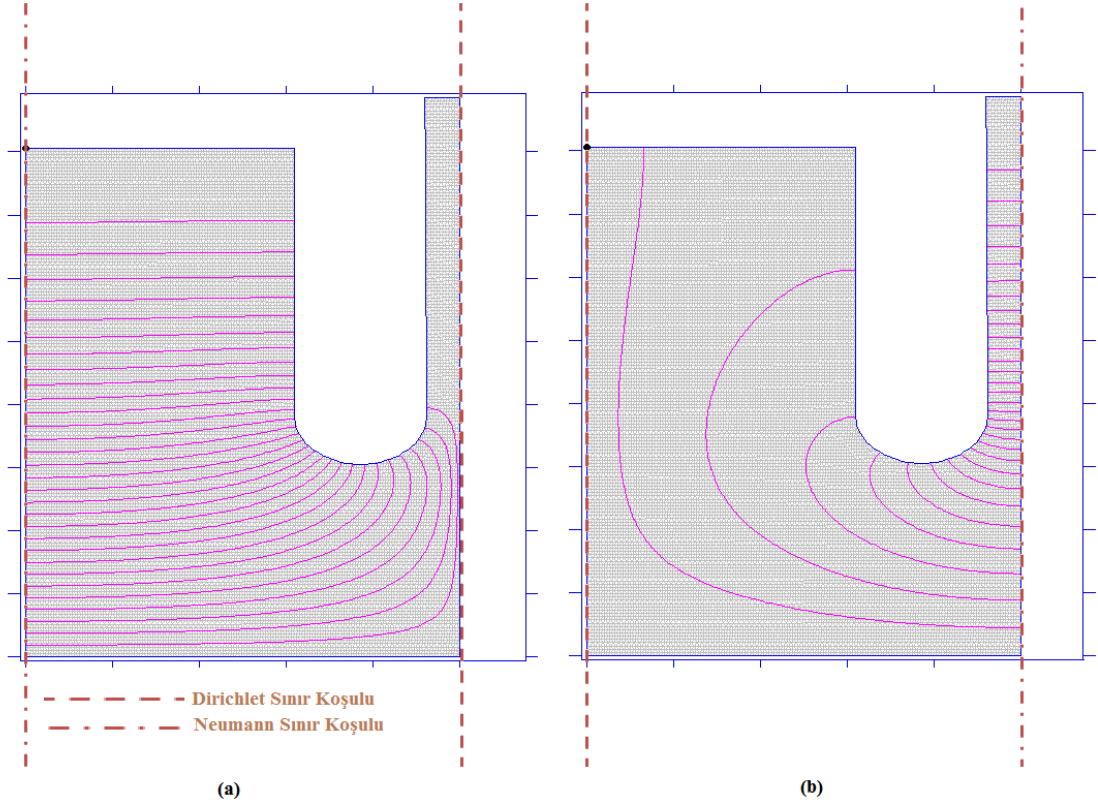
Bu noktaya kadar Fotokatot RF Tabanca tasarımı sürecinde elde edilen ve özellikle RF yönünden sistemin karakteristik yapısını tanımlayan değişkenlere dair simülasyon sonuçları paylaşılmış ve sonuçlar tartışılmıştır. Elde edilen sonuçlara dair detaylı irdeleme tezin son bölümü olan "Sonuçlar" kısmında da ayrıca verilmiştir. Bundan sonra kesimde tezin var olması açısından kritik bir öneme sahip olan kovuk tasarımına dair detaylar ve elde edilen sonuçların yorumlanmasına dair bilgiler verilmiştir.



### 3.2 Kovuk Tasarımı

Bu kesimde doğrusal hızlandırıcının önemli alt sistemlerinden diğeri birisi olan ve hızlandırma sürecinin gerçekleştiği kovuğun tasarımına dair detaylar anlatılmıştır. Bu süreç bir önceki kesimde anlatılan yöntemler izlenerek gerçekleştirilmiştir. Yapının karakteristiğine dair verdiği önemli bilgi sebebiyle kalite faktörü ve şönt empedansı gibi değerler nümerik elektromanyetik analiz programları kullanılarak hesaplanmış ve yorumlanmıştır. Ancak yapının tasarımına öncelikle Superfish programında yarım hücre ile başlanmış sonrasında her iki programda da tüm hücreler eklenerek tasarım tamamlanmıştır.

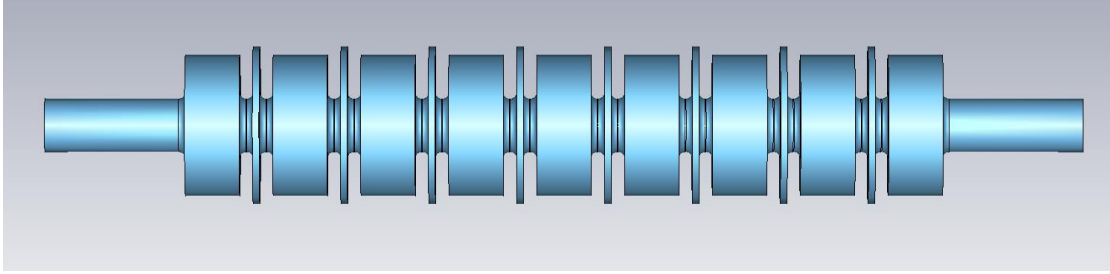
Kovuk, Bölüm 1.1’de açıklandığı üzere, çift periyotlu bir yapıda  $\pi$  modunda çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Bunun gerçekleşebilmesi için hücreler arasındaki elektrik alan aktarımını sağlamak amacıyla ilave olarak daha küçük eksenel uzunluğa sahip hücreler, her iki uzun hücrenin arasına gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Bu ilave hücreler kovuk yapısı ile benzer rezonans frekansında olacak şekilde tasarlanmıştır. Eğer tasarım bu noktaya dikkat edilmeden yapılacak olur ise hücreler birbirinden ayrı frekanslarda rezonansa gelecekleri için düzgün bir  $\pi$  modunun oluşması mümkün olmayacaktır. Rezonans koşulunun sağlanması alan aktarımını sağlayan ilave hücrelerin çapının bir miktar artırılması ile mümkün olmuştur. Bu durumda ana hücreler ile aktarım hücrelerinin rezonans frekansları birbirleri ile hemen hemen aynı olmuştur. Tasarımın başlangıcı sayılabilecek bu işlemler *Superfish* programında yapının en küçük birim hücresinin yani kovuk hücresi ile aktarım hücresinin yarısının modellenmesi ile gerçekleştirilmiştir. Yarım birim hücrenin kullanılmasının sebebi silindirik simetridir. Ayrıca çözümün elde edilmesinde Dirichlet ve Neumann sınır koşulları da dikkate alınmıştır. Bu şekilde tasarlanmış birim hücrede oluşan elektrik alan Şekil 3.9’de verilmiştir.



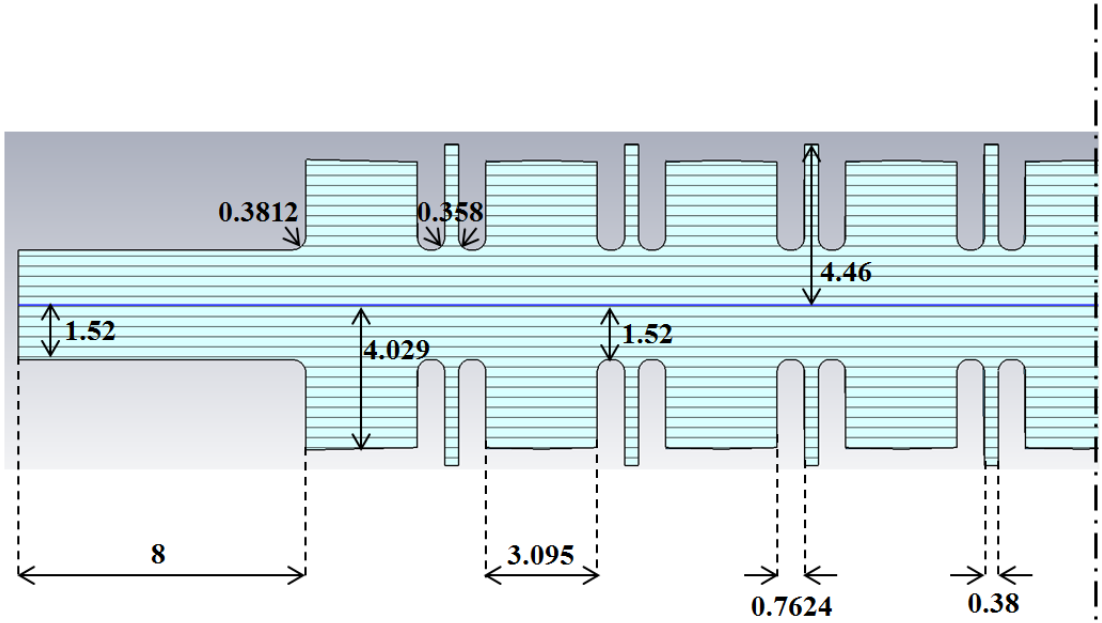
**Şekil 3.9 Birim hücre modellenmesi (a) rezonans frekansı : 2998,41 MHz, (b) 2998,77 MHz**

Şekil 3.9 (a)'da birim hücreye soldan Neumann sınır koşulu, sağdan ise Dirichlet sınır koşulu uygulanmıştır. Bu durum, yapının rezonans frekansı 2998,41 MHz olarak bulunmuştur. Sınır koşullarının yerleri Şekil 3.9 (b)'de verildiği şekilde değiştirildiğinde ise yapının rezonans frekansı 2998,77 MHz değerinde elde edilmiştir. Aslında sınır koşulları ile yapılan şey şudur; elektromanyetik dalga öncelikle ana hücre de yayılır ki bu Şekil 3.9 (a)'ya karşılık gelmektedir, bu durumda aktarma hücresinde herhangi bir alan oluşmaz. Bu sayede ana hücrenin rezonans frekansı bulunabilir. Sonrasında dalga ilerleyerek aktarma hücresine gelir ki bu da Şekil 3.9 (b)'ye karşılık gelir. Bu durumda da ana hücre de yayılan herhangi bir alan olmaz, buradan da aktarma hücresinin rezonans frekansı bulunur. Beklenen iki hücredeki rezonans frekansının da aynı olmasıdır. Simülasyon sonucunda 0,36 MHz'lik bir fark elde edilmiştir. Bu tarz yapılarda kovuk yarıçapının fonksiyonu olarak mekanik toleranslardan kaynaklanan hassasiyet 1,8MHz/ $\mu\text{m}$ 'dir [40]. İki yapının rezonans frekansları arasındaki fark bu değerin altında kaldığı için önemsizdir.

İstenilen rezonans frekansında çalışan birim hücre yapısının tasarlanmasından sonra tüm hücrelerden oluşan hızlandırıcı kovuk yapısı tasarlanmıştır. Tasarlanan kovuğa ait görsel Şekil 3.10'da, yapının boyutlarına dair bilgi ise Şekil 3.11'de verilmiştir. Yapının büyüklüğünden dolayı boyutlara ait bilgi yapının simetrisinden dolayı yarısı dikkate alınarak verilmiştir. Tasarıma ait Superfish dosyası ise EK-2'de verilmiştir.

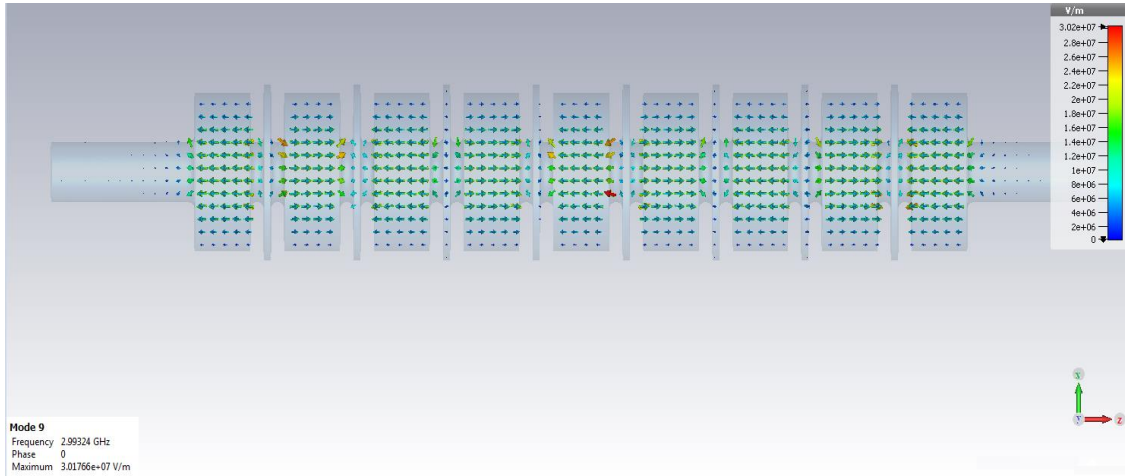


Şekil 3.10 CST'de kovuk yapısına ait görsel



Şekil 3.11 Tasarımın cm cinsinden boyutları.

Bölüm 3.1'de açıklandığı gibi, ilgilenilen frekansta yapı içerisinde yalnızca belirli modlar yayılabilmektedir. İki yapının senkron bir şekilde çalışabilmesi amacıyla kovukta  $\pi$  modunda çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Oluşan moda dair elektrik alan yayılımı Şekil 3.12'de gösterilmiştir.



**Şekil 3.12 Kovuk içerisinde oluşan  $\pi$  modu**

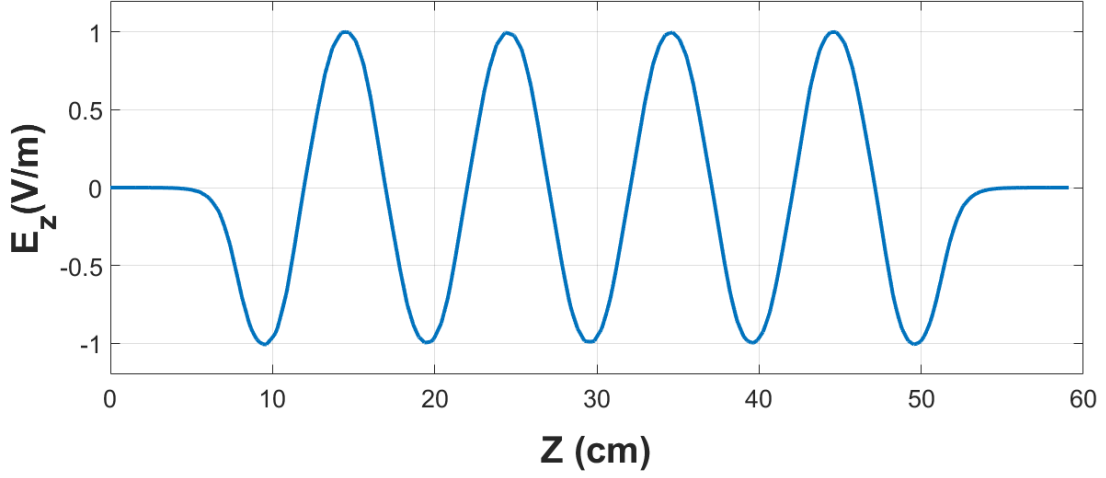
Kovuk içerisinde hücrelerde oluşan elektrik alanın birbirleri ile eş büyüklükte olması veya aralındaki farkın en fazla %3 civarında olmasının önemi Bölüm 3.1’de açıklanmıştı. Gerçekleştirilen tasarıma ait rezonans frekansı, kalite faktörü, şönt empedansı ve güç kaybı tepe değeri gibi bilgiler Çizelge 3.3’te verilmiştir.

**Çizelge 3.3 Superfish ve CST programlarından elde edilen karakteristik Kovuk parametreleri**

Parametre	Superfish	CST
Frekans (MHz)	2993,56	2993,27
Çalışma Sıcaklığı ( °C)	20	20
Kalite Faktörü , $Q$	14158	14153
$R/Q$ , ( $\Omega$ )	1016	1116
Güç Kaybı Tepe Değeri (kW)	0,427	-

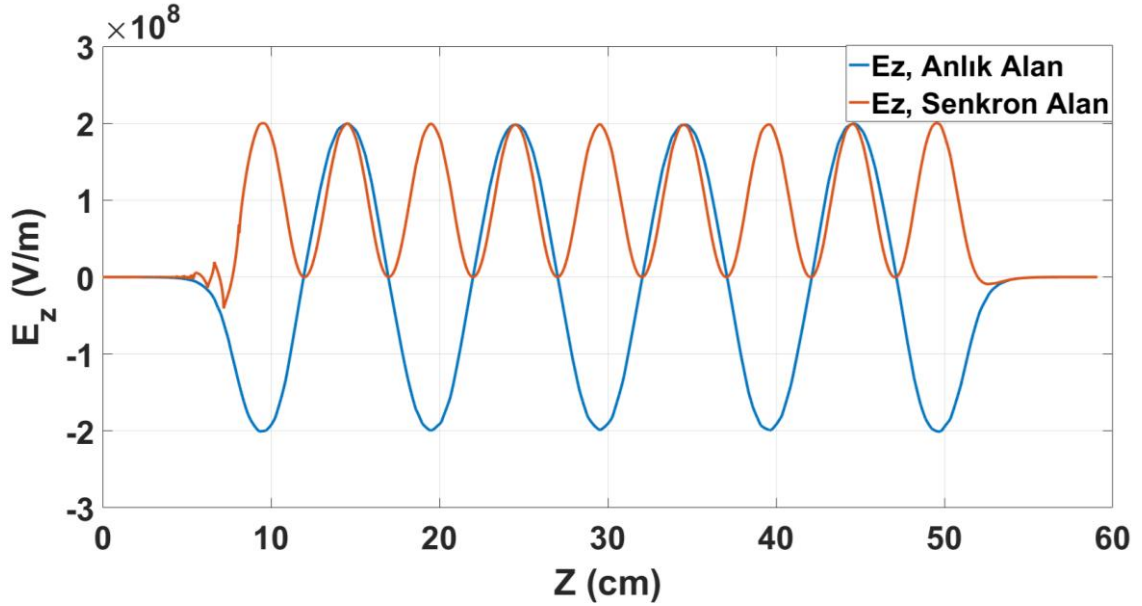
Çizelge 3.3 iki farklı program tarafından elde edilen sonuçların birbirleri ile uyumlu olduğunu göstermektedir.

Tasarlanan kovuk içerisinde yayılan elektrik alan dağılımı da Şekil 3.13’te verilmiştir. Alanın *Eigenmode Solver*’da edilen değeri ise 20 MV/m’dir.



**Şekil 3.13 Kovuk içerisindeki elektrik alan**

Şekil 3.13'da verilen normalize edilmiş elektrik alan tepe değerleri arasındaki sapma yaklaşık %1'dir. Bu kovuk içerisindeki parçacıkların senkron bir şekilde hızlanacağını göstermektedir. Bölüm 3.1'de anlatıldığı şekilde, senkron olarak hızlanmanın gerçekleştiği Şekil 3.14'den rahat bir şekilde görülmektedir.

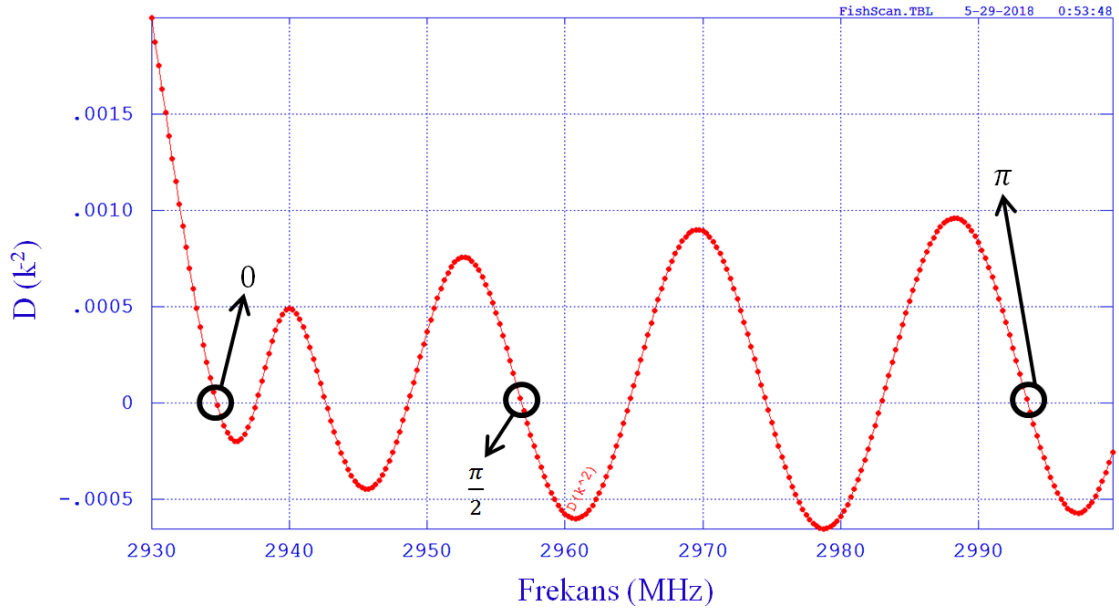


**Şekil 3.14 Kovuk içerisinde eksen boyunca oluşan elektrik alan ile harici uygulanan elektrik alan**

Şekilde dikkat edilirse ilk hücre bölgesine karşılık gelen noktalarda senkron alanın oluşturulmasında düzgün yapıyı bozan bir takım değerler oluşmuştur. Buna simülasyon programından alınan elektrik alan değerlerinde programdaki örgüleme yapısının sebep olabileceği küçük değişikliklerin neden olabileceği değerlendirilmektedir. Bu tarz

küçük sapmaları giderebilmek amacıyla örgü sayısında yapılacak bir artış ise bir önceki bölümde de açıklandığı üzere uzun simülasyon sürelerine sebep olmaktadır. Burada da Bölüm 3.1’de olduğu gibi alan 200 MV/m’ye normalize edilmiştir.

Elektron tabanca tasarımında olduğu gibi hızlandırıcı kovuk tasarımı tamamlandıktan sonra yapı içerisinde uyarılabilecek modlara ait rezonans frekanslarını bulmak amacıyla Superfish programında frekans taraması yapılmıştır. Bunun sonucunda da  $D(k^2) - f$  eğrisi, Şekil 3.15’te verildiği şekilde elde edilmiştir. Bu bağlamda  $D$  Dirichlet fonksiyonu,  $k$  dalga sayısı,  $f$  frekanstır.



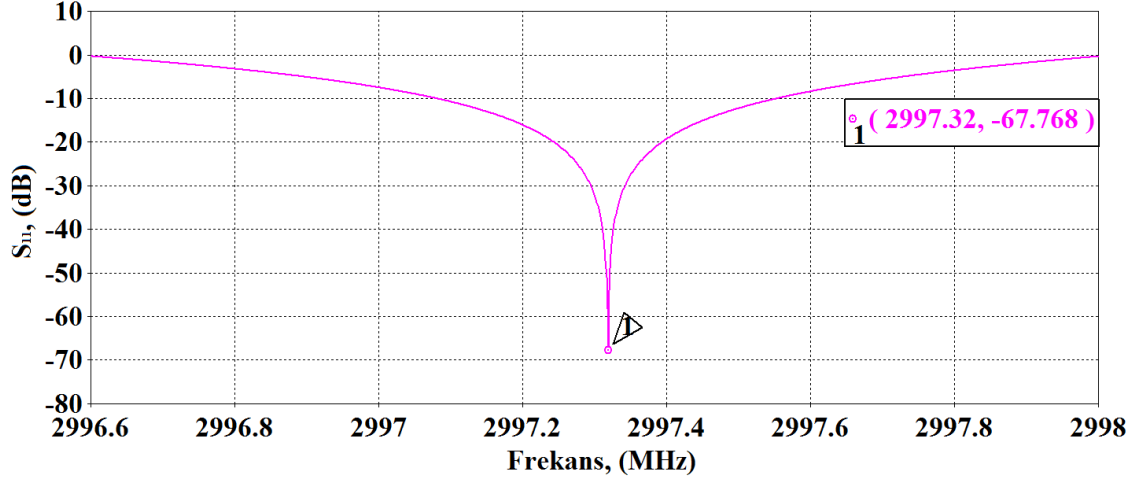
**Şekil 3.15 Farklı modlara ait rezonans frekansları**

Şekil 3.15’te, eğimin negatif olduğu,  $D(k^2) = 0$  noktalarına karşılık gelen frekanslar yapı içerisinde oluşan modlara ait rezonans frekanslardır. Rezonans noktalarına ait frekansların belirlenmesinde kullanılan matematiksel eşitliklere dair detaylı hesaplamalar [38]’de verilmiştir. *CST Microwave Studio*<sup>®</sup> ve *Superfish*<sup>®</sup>’ten elde edilen sonuçlar Çizelge 3.4’te verilmiştir.

**Çizelge 3.4 CST ve Superfish'ten elde edilen rezonans frekansları**

Mod (rad)	Frekans (MHz)	
	Superfish	CST
0	2934,71	2934,20
$\pi/2$	2956,84	2956,28
$\pi$	2993,57	2993,24

Fotokatot RF tabanca gibi hızlandırıcı kovukta aslında bir filtredir ve bu yüzden sadece tasarlandığı frekansı geçirip diğerlerini engellemelidir. Bununla ilgili temel parametre olan  $S_{11}$  ile ilgili detaylı açıklama Bölüm 3.1'de verilmişti. Ancak burada hesaplama CST içerisinde bulunan diğer bir çözücü olan *Frequency Solver* kullanılarak yapılmıştır. Bunun sebebi iki farklı çözücü kullanılsa da S parametresi ile ilgili bilgiye ulaşılabileceğinin gösterilmesidir. Burada belirtmek gerekir ki *Transient Solver* belirlenen frekans bantında tarama yaparak çalışırken, *Frequency Solver* ilgili banttaki rezonans frekanslarını bulup, onları uyararak çalışmaktadır. Bu sebeple rezonant yapılar ile çalışırken hem daha kısa simülasyon süresi hem de rezonans noktalarının tam olarak uyarılabilmesinden dolayı *Frequency Solver* kullanılmalıdır. Bu sonuç yeterli donanımsal alt yapı olması durumunda *Transient Solver* kullanılarak da elde edilebilir. Bu noktada *Transient Solver* ile çalışırken daha geniş bir frekans aralığı, *Frequency Solver* ile çalışırken ise daha dar bir aralık kullanılması gerektiğine dikkat edilmelidir. *Frequency Solver* kullanılarak rezonans frekansında elde edilen  $S_{11}$  grafiği Şekil 3.16'da verilmiştir.



**Şekil 3.16** Tasarıma ait  $S_{11}$  değerleri

Şekil 3.16'dan hızlandırıcı kovuğun tasarlandığı rezonans noktasındaki frekansı geçirip diğerlerini engellediği açıkça görülmektedir.

Tezin bu bölümünde iki farklı simülasyon programı kullanılarak Fotokatot RF Tabanca ve Kovuk tasarımı gerçekleştirilmiştir. Yapılan tasarımların karakteristik özellikleri olan şönt empedansı ve kalite faktörü gibi değerler ile birlikte mikrodalga açısından yapılara dair önemli bir parametre olan geri dönüş kabı değerleri de hesaplanmıştır. Elde edilen değerler ve literatürde bulunan benzer sistemler ile yapılan karşılaştırmalara dair bilgiler ise Sonuçlar bölümünde verilerek tartışılmıştır.



## 4. SONUÇLAR

Bu tez çalışması kapsamında doğrusal bir hızlandırıcıya ait iki önemli alt sistem olan *Fotokatot RF Tabanca* ile parçacıkların hızlandırıldığı kısım olan *Hızlandırıcı Kovuğun* tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarıma silindirik bir kovuk içerisinde oluşan kesim frekansının (*ing. cut-off*) bulunması gibi basit teorik hesaplamalar kullanılarak başlanmış sonrasında ise ileri düzey numerik elektromanyetik simülasyon programları kullanılarak nihai sonuçlar elde edilmiştir. Bu amaçla *Superfish*<sup>®</sup> ve *CST Microwave Studio*<sup>®</sup> programları kullanılmıştır. Özellikle *CST Microwave Studio*<sup>®</sup> içerisinde bulunan *Eigenmode*, *Transient Solver* ve *Frequency Solver* yardımı ile hem yapının rezonans frekansları bulunmuş hem de özünde filtre olan silindirik kovuğun mikrodalga açısından performansı değerlendirilmiştir. Bu amaçla yapının S değerleri bulunmuş ve geri dönüş kaybı değeri olan  $S_{11}$  ayrıca değerlendirilerek tartışılmıştır. Tasarımın gerçekleştirilmesi sırasında iki ayrı program kullanılması hem yapılan işin doğrulanması hem de iki ayrı numerik analiz yöntemi kullanan programın karşılaştırılması açısından dikkate değer bilgiler edinilmesine imkân vermiştir. Tezde yapılan çalışmada genel olarak tasarlanan sistemlere dair gerek geometrik anlamda gerekse de malzeme anlamında yapının direkt kendi karakteristiğini belirleyen değişkenler hesaplanmıştır. Tasarım süreci sonucunda elde edilen rezonans frekansı, kalite faktörü ve  $R/Q$  oranı gibi değişkenlerin iki ayrı programda hesaplanması sonucunda birbirlerine oldukça yakın sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuçlar Çizelge 4.1’de paylaşılmıştır.

**Çizelge 4.1 Superfish ve CST programlarından elde edilen Fotokatot RF Tabanca ve Kovuk parametreleri**

Parametre	Fotokatot RF Tabanca		Kovuk	
	Superfish	CST	Superfish	CST
Frekans (MHz)	2998,38	2998,36	2993,56	2993,27
Kalite Faktörü , $Q$	17390	15650	14158	14153
$R/Q$ , ( $\Omega$ )	328	347	1016	1116

Birden fazla simülasyon programı kullanarak Çizelge 4.1'te verilen değerlerin hesaplanmasına yönelik bir hesaplama [2]'de yapılmıştır. Sonuçlar kalite faktörü hesaplanmasında CST'nin %10 gibi bir hata yapma olasılığı bulunduğunu göstermiştir. Haliyle bu hata kendini  $R/Q$  hesaplanması sırasında da göstermektedir. Bununla birlikte [8]'de S bantta çalışan normal iletken bir yapının kalite faktörünün 15.000-20.000 arasında bulunması [6]'da yapılan çalışmada ise  $10^4$  seviyesinde olması gerektiği belirtilmiştir. Bu sebeple elde edilen sonuçların literatür ile karşılaştırılmasında kalite faktörünün 15.000 ile 20.000 arasında olması durumunda sonuçlar birbirleri ile uyumlu şekilde yorumlanmıştır.  $R/Q$  oranı karşılaştırmasında bu değerlerin hücre geometrisine olan bağımlılığı bilindiğinden kalite faktöründeki hata oranı kadar farklılık ile sonuçlar yorumlanmıştır. Literatürde yapılan benzer çalışmalar da kalite faktörü için sonuçlar 17.379, 15.747, 15.272<sup>4</sup> ve 15.000 olarak elde edilirken  $R/Q$  oranı için 192  $\Omega$ , 393  $\Omega$ , 258  $\Omega$  şeklinde bulunmuştur [10], [41], [42], [43]. Ayrıca Fotokatot RF tabanca için referans olarak alınan [13] numaralı çalışmada da kalite faktörü yaklaşık 15.000,  $R/Q$  değeri ise yaklaşık 400  $\Omega$  olarak bulunmuştur. Özellikle  $R/Q$  değeri hücrenin konikliği, elipsliği, kesişim bölgelerindeki büküm çapı gibi hücre şekline çok fazla bağımlı olduğundan literatürde bulunan benzer çalışmalar ve tezde edilen sonuç arasındaki fark beklenen bir sonuçtur.

Buna rağmen farklılıkların giderilebilmesi amacıyla *CST Microwave Studio*<sup>®</sup> içerisinde bulunan diğer çözümler kullanılarak da kalite faktörü hesaplanmıştır. Fakat bu durumda da *Superfish*<sup>®</sup>'te elde edilen sonuca yakın bir değer elde edilememiştir. Bu amaçla, *CST Microwave Studio*<sup>®</sup> içerisinde bulunan *Transient Solver* ve *Frequency Solver* kullanılmıştır. *Transient Solver*, zaman uzayında yapının giriş ve çıkış uçlarına tanımlanan *portlar* ile yapıyı uyararak problemi çözmektedir. Bu işlemi zaman uzayında ve tanımlanan alt ve üst frekans noktaları arasında yapıyı tarayarak gerçekleştirir. Bunun için ise uzun simülasyon süresi ve yüksek bilgisayar donanımı gereklidir. Çözümler, kendini adapte edebilen ve daha doğru sonucu bulma kabiliyetine sahip bir algoritma ile çalıştığından iteratif olarak ilerlemektedir. Bu sebeple problemi çözmek için kullandığı örgü sayısı sonuç için yeterli kriteri sağlayana kadar sürekli artmaktadır. Literatürde bulunan çalışmalar ile elde edilen sonuçlar arasındaki uyum

---

<sup>4</sup> İlgili çalışmada şönt empedans hesaplanmadığı için  $R/Q$  değeri paylaşılammıştır.

dolayısıyla bu hassasiyette bir hesaplama yapmaya tez çalışmasında gerek duyulmamıştır. *Frequency Solver*'da *Transient Solver*'a benzer şekilde problemi *port* yapısı ile belirlenen frekans aralığında çözmektedir. Yalnız bu çözücü sadece rezonans noktalarında çözüm yaptığından daha hızlı bir şekilde çalışmaktadır. Fakat bu nokta da çözüm uzayının alt ve üst frekansları rezonans frekansını içerisine alacak kadar büyük olmalıdır. Bu aralığın artırılması durumunda sonuçlarda hatalar veya doğru sonuç elde etmek için uzun zaman ve donanım gereksinimine ihtiyaç olacağına dikkat edilmelidir.

Fotokatot RF tabanca yapısının S parametreleri *Transient Solver* kullanılarak hesaplanmış ve beklenildiği gibi rezonans frekanslarında yapının bant geçiren bir filtre gibi davrandığı net bir şekilde gösterilmiştir. Rezonans noktaları 2969,1 MHz ve 2991,9 MHz olarak bulunmuştur. Bu rezonans noktalarının 0 ve  $\pi$  modlarına karşılık geldiği, grafikte görünmeyen  $\pi/2$  modunun ise bir önceki paragrafta anlatıldığı şekilde yapılacak bir çalışma neticesinde bulunabileceği değerlendirilmektedir. Bu tarz hızlandırıcı sistemlerinin tasarlanmasında kullanılan ana çözücü olan *Eigenmode Solver*'da ise sonuçlar yeterli hassasiyet ve doğruluk ile Çizelge 4.2'de verildiği şekilde bulunmuştur.

Yapıda oluşan modlara karşılık gelen rezonans frekanslarının belirlenmesi için *Superfish*<sup>®</sup> kullanılarak, çalışma frekansına bağlı olarak bir dağınım (*ing. dispersion*) grafiği de elde edilmiştir. Bu grafikten oluşan modlara ait rezonans frekansları Çizelge 4.2'de paylaşılmıştır.

**Çizelge 4.2 CST ve Superfish'ten elde edilen rezonans frekansları**

Mod (rad)	Frekans, (MHz)			
	Fotokatot RF Tabanca		Kovuk	
	Superfish	CST	Superfish	CST
0	2961,20	2961,12	2934,71	2934,20
$\pi/2$	2983,75	2983,72	2956,84	2956,28
$\pi$	2998,38	2998,36	2993,57	2993,24

Çizelge 4.2'den her iki programda da rezonans frekanslarının büyük bir uyum ile hesaplandığı açıkça görülmektedir. Ayrıca yapı içerisindeki parçacığın senkron bir şekilde hızlandığının gösterilmesi amacıyla yapılan hesaplama da Bölüm 3.1 ve Bölüm 3.2'de ayrıca paylaşılmıştır.

Tezde, Fotokatot RF Tabanca tasarımına ek olarak, hızlandırma işleminin gerçekleştirildiği bölüm olan *Kovuk* tasarımı da yapılmıştır. Bu bölümde yapılan hesaplamalar ve bulunmaya çalışan değişkenler Fotokatot RF tabanca kısmında elde edilen sonuçlar ile benzerlik göstermektedir. Yapıların her ikisi de RF yönünden incelendiğinden dolayı bu aslında beklenen bir durumdur. Bununla beraber yapıların kullanıma amacının birbirinden tamamen farklı olması tasarımlarının da farklı değişkenler üzerinden ilerlemesine sebep olmaktadır. Burada tasarlanan yapı kendisinden bir önce gelen tabanca sistemi ile mod ve rezonans frekansı açısından uyumlu olmalıdır. Bu sebeple tabanca ile aynı modda yani  $\pi$  modunda çalışan bir sistem tasarlanmıştır. Fakat Bölüm 1'de anlatıldığı üzere,  $\pi$  modu geometriden kaynaklanabilecek çok küçük hatalara veya değişimlere karşı, içinde oluşan elektrik alanın kararlılığı açısından son derece hassastır. Yani, sistemin fiziksel yapısında üretim sırasında meydana gelebilecek çok küçük bir hatada sistemin çalışması istenilen rezonans frekansı ve modundan farklı bir bölgede çalıştığı gözlemlenebilir. Bununla birlikte, bu modda çalışan bir yapının yüksek şönt empedans değerine sahip olması yapıyı değerli kılmaktadır. Bu sebeple periyodik bir hızlandırma sistemi yerine farklı boyutta hücrelerden oluşan kısmen periyodik bir kovuk tasarlanmıştır. Böyle bir sistemde elektrik alan aktarımı ana hücreye ilave olarak yapılan ek aktarım hücresi vasıtası ile gerçekleştirilmektedir. Bu aktarım hücreleri ana hücre ile aynı eksen de olabileceği gibi eksen dışarısında da olmaktadır. Hatta eksen dışında olmaları yapının daha yüksek şönt empedansına sahip olmasına imkân vermektedir. Bununla birlikte hem yapıdaki karmaşıklığı arttırdığı, hem de üretimde meydana gelen zorluklardan dolayı genel olarak ana eksen de olan yapılar tercih edilmektedir. Bu tezde ana hücreler ile aynı eksen de olan aktarım hücreleri tercih edilmiştir. Böyle bir yapının tasarımına *Superfish*<sup>®</sup> te yarım birim hücre kullanılarak başlanmıştır. Bu sayede hem simülasyon süresi azaltılmış hem de sınır koşulları kolaylıkla uygulanabilmiştir. Yapılan tasarımda ana hücre ile aktarım hücresinin aynı rezonans frekansına sahip olması için aktarım hücresinin çapının bir miktar artırılması gerektiği sonucuna varılmıştır. Bu yaklaşım ile

yapılan tasarımda beklenen sonuca ulaşılmış ve aynı rezonans frekansına sahip hücreler elde edilmiştir. Sonrasında tüm yapı CST kullanılarak modellenmiş ve RF parametreler hesaplanmıştır. Ayrıca, özellikle tüm yapıya ait kalite faktörü, şönt empedansı ve rezonans frekanslarının bulunması amacıyla bütün hücrelerden oluşan kovuk Superfish ile de modellenmiştir ve sonuçlar Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2’de verilmiştir. Ayrıca *Frequency Solver* ile yapının  $S_{11}$  değeri 2997,32 MHz’ de yaklaşık – 68 dB olarak hesaplanmıştır. Özellikle rezonans yapılar da daha hızlı çözüm elde etmek mümkün olduğundan dolayı hesaplama bu çözücü kullanılarak yapılmıştır. Bununla birlikte *Transient Solver* ile daha büyük bir frekans aralığında tarama yapmak mümkünken *Frequency Solver* ile rezonans noktasını içerisine alan dar bir bölgede sonuç alınabildiğine dikkat edilmelidir.

Tez çalışması kapsamında Fotokatot RF tabanca ve hızlandırıcı Kovuğun tasarımı RF parametreler göz önüne alınarak gerçekleştirilmiştir. Çalışma sürecinde gerçekleştirilemeyen elektron demet dinamiğine yönelik çalışmaların gelecek dönemde tamamlanarak sistemin tasarımının iyileştirilmesi öngörülmektedir.

## KAYNAKLAR

- [1] T. P. Wangler, *RF Linear Accelerators*, 2nd ed. Darmstadt, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH, **2008**.
- [2] H. Wiedemann, D. Brandt, and Eugene A Perevedentsev, Eds., *Physics and Technology of Linear Accelerator Systems*. Long Beach, California: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., **2002**.
- [3] H. Wiedemann, *Particle Accelerator Physics*. Switzerland: Springer International Publishing, **2015**.
- [4] P. Waloschek, *The Infancy of Particle Accelerators*. Braunschweig/Wiesbaden: Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, **1994**.
- [5] M. Vretenar, Linear Accelerators, in *CAS - CERN Accelerator School: Advanced Accelerator Physics Course*, **2013**.
- [6] F. Gerigk, Cavity Types, *CERN Accelerator School CAS 2010: RF for Accelerators*, no. 2. pp. 277–298, **2011**.
- [7] N. S. Kulkarni, R. Dhingra, and V. Kumar, Physics Design of a 10 MeV, 6 kW Travelling Wave Electron Linac for Industrial Applications, *Pramana - Journal of Physics*, vol. 87, no. 5, **2016**.
- [8] P. Lapostolle and A. L. Septier, *Linear Accelerators*. Amsterdam: Wiley Interscience Division, **1970**.
- [9] E. A. Knapp, B. C. Knapp, and J. M. Potter, Standing Wave High Energy Linear Accelerator Structures, *Review of Scientific Instruments*, vol. 39, no. 7, pp. 979–991, **1968**.
- [10] N. Nepal, Y. K. Kim, Y. S. Bae, I. S. Ko, M. H. Cho, and W. Namkung, Design Study on Standing-Wave Linear Accelerator, *PACS2001. Proceedings of the 2001 Particle Accelerator Conference (Cat. No.01CH37268)*, vol. 4, pp. 2802–2804, **2001**.
- [11] A. Deshpande *et al.*, S-band Linac-Based X-ray Source with  $\pi/2$ -Mode Electron Linac, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 637, no. 1 SUPPL., pp. S62–S66, **2011**.
- [12] M. Weiss, Introduction to RF Linear Accelerators, in *CAS: CERN Accelerator School: 5th General Accelerator Physics Course*, S. Turner, Ed. Jyväskylä, Finland: CERN-94-01, **1994**.
- [13] R. Roux, G. Bienvenu, C. Prevost, and B. Mercier, Design of an RF Photo-Gun, no. CARE-NOTE-2004-034-PHIN, **2004**.
- [14] K. Buakor and S. Rimjaem, Beam Dynamics Simulation of Photocathode RF Electron Gun at the PBP-CMU Linac Laboratory, *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 901, no. 1, **2017**.
- [15] A. W. Chao and M. Tigner, Eds., *QC787.P3 H36 1998 (A.W.Chao et al-Handbook of Accelerator Physics and Engineering).pdf*. Singapore: World

Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., **1998**.

- [16] <https://www.cst.com/>, CST Microwave Studio. .
- [17] <http://laacg.lanl.gov/laacg/services/>, Poisson SUPERFISH. .
- [18] C. A. Balanis, *Advanced Engineering Electromagnetics*, 2nd ed. United States of America: John Wiley & Sons, Inc., **2012**.
- [19] C. Travier, High-Brightness Photocathode Electron Sources, *American Institute of Physics Conference Proceedings*, vol. 335, pp. 57–74, **1995**.
- [20] A. M. Lombardi, Overview of Linacs, *CERN Accelerator School 2015: Accelerators for Medical Applications*, pp. 79–89, **2015**.
- [21] D. W. Kerst, The Acceleration of Electrons by Magnetic Induction, *Physical Review*, vol. 60, no. 47, pp. 1–13, **1941**.
- [22] G. Pancheri and L. Bonolis, The Path to High-Energy Electron-Positron Colliders: from Wideroe’s Betatron to Touschek’s AdA and to LEP, *arXiv preprint arXiv:1710.09003*., pp. 1–14, **2017**.
- [23] A. P. Banford and G. H. Stafford, The Feasibility of a Superconducting Proton Linear Accelerator, *Journal of Nuclear Energy. Part C, Plasma, Physics, Accelerators, Thermonuclear Research*, vol. 3, no. 4, pp. 287–290, **1961**.
- [24] P. R. Larse, O. A. Altenmueller, and G. A. Loew, Investigations of Travelling-Wave Separators for the Stanford Two-Mile Linear Accelerator, *Review of Scientific Instruments*, vol. 35, no. 4, pp. 1044–1058, **1964**.
- [25] J. B. Rosenzweig, *Fundamentals of Beam Physics*. New York, United States: Oxford University Press, **2003**.
- [26] W. Lawson *et al.*, RF Breakdown Studies in a SLAC Disk-Loaded Structure, *Proceedings of the 1986 International Linac Conference, Stanford, California, USA*, pp. 166–168, **1986**.
- [27] D. H. Whittum, Introduction to Electrodynamics for Microwave Linear Accelerators, *Frontiers of Accelerator Technology*, no. April, pp. 1–135, **1999**.
- [28] V. Teotia *et al.*, RF Cavity Design and Qualification for Proton Accelerator, *Proceedings - International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, ISDEIV*, pp. 641–643, **2014**.
- [29] Schematic Diagram of a Linear Proton Resonance Accelerator, <https://www.alamy.com/stock-photo-schematic-diagram-of-a-linear-proton-resonance-accelerator-24898414.html>, **2018**. .
- [30] J. Le Duff, Dynamics and Acceleration in Linear Structures, *CAS - CERN Accelerator School*, **2005**.
- [31] C. Li *et al.*, RF structure design of the China Material Irradiation Facility RFQ, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 869, no. June, pp. 38–45, **2017**.
- [32] P. F. Ma *et al.*, Physical Design of a Single-Amplifier-Driven Proton Linac

- Injector for a Synchrotron-Based Proton-Therapy System in China, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 900, pp. 32–39, **Aug. 2018**.
- [33] A. Lombardi, The Radio Frequency Quadrupole (RFQ), *CAS - CERN Accelerator School*, Zeegse, Holland, pp. 201–207, **2005**.
- [34] A. W. Chao, H. O. Moser, and Z. Zhao, Eds., *Accelerator Physics, Technology and Applications*. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., **2002**.
- [35] J. P. Edelen, *Design and Simulation of the Colorado State University Linear Accelerator System*, Yüksek Lisans Tezi, Colorado State University, Colorado, **2014**.
- [36] N. Pichoff, Introduction to RF linear accelerators, *CAS - CERN Accelerator School*, pp. 105–128, **2006**.
- [37] E. Jensen, RF Cavity Design, *CERN Accelerator School*, no. 1, pp. 1–73, **2007**.
- [38] K. Halbach and R. Holsinger, SUPERFISH-a computer program for evaluation of RF cavities with cylindrical symmetry, *Particle Accelerators*, vol. 7, no. 4, pp. 213–222, **1976**.
- [39] D. Pozar, *Microwave Engineering Fourth Edition*, 4 th. United States of America: John Wiley & Sons, Inc., **2005**.
- [40] B. Spataro *et al.*, A Bi-Periodic X-Band Cavity for SPARC, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 586, no. 2, pp. 133–142, **2008**.
- [41] K. K. Pant, A. Kumar, S. Krishnagopal, and S. Chouksey, RF Results and Beam Dynamics Simulations of a Prototype S-Band Photocathode Gun, *Proceedings of LINAC2002*, pp. 421–423, **2002**.
- [42] S. Rimjaem, K. Kusoljariyakul, and C. Thongbai, RF study and 3-D simulations of a side-coupling thermionic RF-gun, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 736, pp. 10–21, **Feb. 2014**.
- [43] J. Mondal *et al.*, Design and Experiments of RF Transverse Focusing in S-Band, 1 MeV Standing Wave Linac, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 795, pp. 343–350, **2015**.



## EKLER

### EK-1 Superfish Fotokatot RF Tabanca Tasarım Dosyası

&reg kprob=1,  
dx=0.03,  
freq=2998.36 ,  
dslope=-1,  
xdri=0,ydri=4.0006&  
nbslf=1,nbsrt=0&  
&po x=0.0,y=0.0 &  
&po x=0.0,y=3.9976 &  
&po x=1.7,y=3.9976 &  
&po nt=2, x0=1.7, y0=3.6476, x=0.35, y=0.0&  
&po x=2.05,y=1.88 &  
&po nt=2, x0=2.53, y0=1.88, x=0.0, y=-0.48&  
&po x=2.57,y=1.4 &  
&po nt=2, x0=2.57, y0=1.88, x=0.48, y=0.0&  
&po x=3.05,y=3.6506 &  
&po nt=2, x0=3.4, y0=3.6506, x=0.0, y=0.35&  
&po x=6.7,y=4.0006 &  
&po nt=2, x0=6.7, y0=3.6506, x=0.35, y=0.0&  
&po x=7.05,y=1.88 &  
&po nt=2, x0=7.53, y0=1.88, x=0.0, y=-0.48&  
&po x=7.57,y=1.4 &  
&po nt=2, x0=7.57, y0=1.88, x=0.48, y=0.0&  
&po x=8.05,y=3.6377 &  
&po nt=2, x0=8.4, y0=3.6377, x=0.0, y=0.35&  
&po x=11.7,y=3.9877 &  
&po nt=2, x0=11.7, y0=3.6377, x=0.35, y=0.0&  
&po x=12.05,y=1.88 &  
&po nt=2, x0=12.53, y0=1.88, x=0.0, y=-0.48&

&po x=19.05,y=1.4 &

&po x=19.05,y=0.0 &

&po x=0.0,y=0.0 &

## EK-2 Superfish Kovuk Tasarım Dosyası

&reg kprob=1,  
dx=0.03,  
freq=2993.56 ,  
dslope=-1,  
xdri=29.5467, ydri=4.029  
nbslf=1,nbsrt=0&  
&po x=0.0,y=0.0 &  
&po x=0.0,y=1.52&  
&po x=7.6188,y=1.52&  
&po nt=2, x0=7.6188, y0=1.9012, x=0.3812, y=0.0&  
&po x=8.0,y=4.029&  
&po x=11.095,y=4.029&  
&po x=11.095,y=1.878&  
&po nt=2, x0=11.453, y0=1.878, x=0.0, y=-0.358&  
&po x=11.4994,y=1.52&  
&po nt=2, x0=11.4994, y0=1.878, x=0.358, y=0.0&  
&po x=11.8574,y=4.46&  
&po x=12.2374,y=4.46&  
&po x=12.2374,y=1.878&  
&po nt=2, x0=12.5954, y0=1.878, x=0.0, y=-0.358&  
&po x=12.6418,y=1.52&  
&po nt=2, x0=12.6418, y0=1.878, x=0.358, y=0.0&  
&po x=12.9998,y=4.029&  
&po x=16.0948,y=4.029&  
&po x=16.0948,y=1.878&  
&po nt=2, x0=16.4528, y0=1.878, x=0.0, y=-0.358&  
&po x=16.4992,y=1.52&  
&po nt=2, x0=16.4992, y0=1.878, x=0.358, y=0.0&  
&po x=16.8572,y=4.46&  
&po x=17.2372,y=4.46&

&po x=17.2372,y=1.878&  
&po nt=2, x0=17.5952, y0=1.878, x=0.0, y=-0.358&  
&po x=17.6416,y=1.52&  
&po nt=2, x0=17.6416, y0=1.878, x=0.358, y=0.0&  
&po x=17.9996,y=4.029&  
&po x=21.0946,y=4.029&  
&po x=21.0946,y=1.878&  
&po nt=2, x0=21.4526, y0=1.878, x=0.0, y=-0.358&  
&po x=21.4990,y=1.52&  
&po nt=2, x0=21.4990, y0=1.878, x=0.358, y=0.0&  
&po x=21.8570,y=4.46&  
&po x=22.2370,y=4.46&  
&po x=22.2370,y=1.878&  
&po nt=2, x0=22.5950, y0=1.878, x=0.0, y=-0.358&  
&po x=22.6414,y=1.52&  
&po nt=2, x0=22.6414, y0=1.878, x=0.358, y=0.0&  
&po x=22.9994,y=4.029&  
&po x=26.0944,y=4.029&  
&po x=26.0944,y=1.878&  
&po nt=2, x0=26.4524, y0=1.878, x=0.0, y=-0.358&  
&po x=26.4988,y=1.52&  
&po nt=2, x0=26.4988, y0=1.878, x=0.358, y=0.0&  
&po x=26.8568,y=4.46&  
&po x=27.2368,y=4.46&  
&po x=27.2368,y=1.878&  
&po nt=2, x0=27.5948, y0=1.878, x=0.0, y=-0.358&  
&po x=27.6412,y=1.52&  
&po nt=2, x0=27.6412, y0=1.878, x=0.358, y=0.0&  
&po x=27.9992,y=4.029&  
&po x=31.0942,y=4.029&  
&po x=31.0942,y=1.878&  
&po nt=2, x0=31.4522, y0=1.878, x=0.0, y=-0.358&  
&po x=31.4986,y=1.52&

&po nt=2, x0=31.4986, y0=1.878, x=0.358, y=0.0&  
&po x=31.8566,y=4.46&  
&po x=32.2366,y=4.46&  
&po x=32.2366,y=1.878&  
&po nt=2, x0=32.5946, y0=1.878, x=0.0, y=-0.358&  
&po x=32.6410,y=1.52&  
&po nt=2, x0=32.6410, y0=1.878, x=0.358, y=0.0&  
&po x=32.9990,y=4.029&  
&po x=36.0940,y=4.029&  
&po x=36.0940,y=1.878&  
&po nt=2, x0=36.4520, y0=1.878, x=0.0, y=-0.358&  
&po x=36.4984,y=1.52&  
&po nt=2, x0=36.4984, y0=1.878, x=0.358, y=0.0&  
&po x=36.8564,y=4.46&  
&po x=37.2364,y=4.46&  
&po x=37.2364,y=1.878&  
&po nt=2, x0=37.5944, y0=1.878, x=0.0, y=-0.358&  
&po x=37.6408,y=1.52&  
&po nt=2, x0=37.6408, y0=1.878, x=0.358, y=0.0&  
&po x=37.9988,y=4.029&  
&po x=41.0938,y=4.029&  
&po x=41.0938,y=1.878&  
&po nt=2, x0=41.4518, y0=1.878, x=0.0, y=-0.358&  
&po x=41.4982,y=1.52&  
&po nt=2, x0=41.4982, y0=1.878, x=0.358, y=0.0&  
&po x=41.8562,y=4.46&  
&po x=42.2362,y=4.46&  
&po x=42.2362,y=1.878&  
&po nt=2, x0=42.5942, y0=1.878, x=0.0, y=-0.358&  
&po x=42.6406,y=1.52&  
&po nt=2, x0=42.6406, y0=1.878, x=0.358, y=0.0&  
&po x=42.9986,y=4.029&  
&po x=46.0936,y=4.029&

&po x=46.0936,y=1.878&  
&po nt=2, x0=46.4516, y0=1.878, x=0.0, y=-0.358&  
&po x=46.4980,y=1.52&  
&po nt=2, x0=46.4980, y0=1.878, x=0.358, y=0.0&  
&po x=46.8560,y=4.46&  
&po x=47.2360,y=4.46&  
&po x=47.2360,y=1.878&  
&po nt=2, x0=47.5940, y0=1.878, x=0.0, y=-0.358&  
&po x=47.6404,y=1.52&  
&po nt=2, x0=47.6404, y0=1.878, x=0.358, y=0.0&  
&po x=47.9984,y=4.029&  
&po x=51.0934,y=4.029&  
&po x=51.0934,y=1.9012&  
&po nt=2, x0=51.4746, y0=1.9012, x=0.0, y=-0.3812&  
&po x=59.9340,y=1.52&  
&po x=59.9340,y=0.0&  
&po x=0.0,y=0.0&

# ÖZGEÇMİŞ

## Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı : Mustafa ÖZCAN

Doğum Yeri : ANKARA

Medeni Hali : Evli

E-posta : musozcn@gmail.com

Adresi : Mehmet Akif Ersoy Mahallesi Yeşilay Caddesi No:5 C/31,  
Yenimahalle/ANKARA

## Eğitim

Lisans : Hacettepe Üniversitesi Fizik Mühendisliği

Yüksek Lisans : ODTÜ Elektrik-Elektronik Mühendisliği

Doktora :-

## Yabancı Dil Düzeyi

Akıcı

## İş Deneyimi

2011-halen, Roketsan A.Ş

## Deneyim Alanları

Mikro şerit anten tasarım, üretim ve test çalışmaları, numerik elektromanyetizma, füze üstü veri toplama sistemleri, telemetri yer istasyonları

## Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçesi

-

## Tezden Üretilmiş Yayınlar

-

## Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster Sunumu ile Katıldığı Toplantılar

-



HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
YÜKSEK LİSANS/DOKTORA TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ  
FİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA

Tarih: 27/06./2018

Tez Başlığı / Konusu: *RF Doğrusal Hızlandırıcı Kovuk ve Fotokatot RF-Tabanca Tasarımı ve Simülasyonu Çalışmaları*

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam 58 sayfalık kısmına ilişkin, 27 / 06 / 2018 tarihinde ~~çalışmam~~ tez danışmanım tarafından *Turnitin* adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezin benzerlik oranı % 1 'dir.

Uygulanan filtrelemeler:

- 1- Kaynakça hariç
- 2- Alıntılar dâhil
- 3- 5 kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

27/06/2018

*Mustafa Özcan*

Tarih ve İmza

Adı Soyadı: Mustafa Özcan

Öğrenci No: N14222380

Anabilim Dalı: Fizik Mühendisliği

Programı: Yüksek Lisans

Statüsü:  Y.Lisans  Doktora  Bütünleşik Dr.

**DANIŞMAN ONAYI**

UYGUNDUR.

*(Signature)*

*Doç. Dr. AKIN BACIOĞLU*

(Unvan, Ad Soyad, İmza)