



**6 MeV ENERJİLİ ELEKTRON HIZLANDIRICISI İÇİN 800 MHz
FREKANSLI RF KOVUK TASARIMI**

Tuğçe Sevinç DAĞ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2019

Tuğçe Sevinç DAĞ tarafından hazırlanan “6 MeV ENERJİLİ ELEKTRON HIZLANDIRICISI İÇİN 800 MHz FREKANSLI RF KOVUK TASARIMI” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Fizik Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç Dr. Aynur ÖZCAN

Fizik Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Başkan: Prof. Dr. Ömer YAVAŞ

Fizik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ankara Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Prof. Dr. Pervin ARIKAN

Fizik Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Tez Savunma Tarihi: 28/06/2019

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Tuğçe Sevinç DAĞ

28/06/2019

6 MeV ENERJİLİ ELEKTRON HIZLANDIRICISI İÇİN 800 MHz FREKANSLI RF
KOVUK TASARIMI
(Yüksek Lisans Tezi)

Tuğçe Sevinç DAĞ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2019

ÖZET

Bu çalışmada bilimsel arenada yeri ve önemi her geçen gün biraz daha artan parçacık hızlandırıcılarının en önemli kısmı olan RF kovuklarla ilgili bir tasarım çalışması yapılmıştır. Çalışmada hedeflenen, 6 MeV enerjili bir elektron hızlandırıcısı için 800 MHz frekanslı bir RF kovuk tasarımı yapmaktır. Tasarım için bilgisayar ortamında simülasyonlar yapılmış ve 6 MeV enerjili bir elektron hızlandırıcısı için RF kovuk tasarlanmıştır. Çalışma birden fazla simülasyon programı ile test edilmiş ve elde edilen sonuçlar doğrultusunda RF kovuk yapımı için gerekli olan parametreler belirlenmiştir.

Bilim Kodu : 20216
Anahtar Kelimeler : Doğrusal hızlandırıcı, RF, kovuk, tasarım, demet enerjisi,
SUPERFISH, PARMELA
Sayfa Adedi : 59
Danışman : Doç. Dr. Aynur ÖZCAN

800 MHz FREQUENCY RF CAVITY DESIGN FOR 6 MeV ELECTRON
ACCELERATOR
(M. Sc. Thesis)

Tuğçe Sevinç DAĞ

GAZİ UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
June 2019

ABSTRACT

In this study, a design study on RF cavities, which is the most important part of the particle accelerators, which has become more and more important in the scientific arena, has been made. The aim of the study is to design an 800 MHz frequency RF cavity for an electron accelerator with 6 MeV energy. For design, computer simulations were made and the RF cavity was designed for an electron accelerator with 6 MeV energy. The study was tested with more than one simulation program and the results were determined according to the results.

Science Code : 20216
Key Words : Linear accelerator, RF, cavity, simulation, beam energy,
SUPERFISH, PARMELA
Page Number : 59
Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Aynur ÖZCAN

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım süresince bana her daim yol gösteren, yardımlarını ve tecrübelerini benden hiçbir zaman esirgemeyen başta rahmetli sayın hocam Doç. Dr. Metin YILMAZ'a ve danışman hocam Doç. Dr. Aynur ÖZCAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Beni her fırsatta teşvik eden, ne zaman ihtiyacım olsa elinden geldiğince yanımda olan ve desteğini benden hiç esirgemeyen kıymetli eşime, en çok da beni şimdiki ben yapan anneme, babama, canım aileme sonsuz teşekkürü bir borç bilirim.

Bu çalışma, hayatımda oldukları için bana ne kadar şanslı bir birey olduğumu nefes aldığım her an hissettiren biricik aileme adanmıştır.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. ELEKTRON HIZLANDIRICILARINA GENEL BAKIŞ	5
2.1. RF Güç Kaynakları.....	7
2.1.1. Klystron	7
2.1.2. Magnetron.....	8
2.2. RF Alanların Kullanıldığı Hızlandırıcı Sistemleri	9
2.2.1. Doğrusal hızlandırıcılar (Linac)	9
2.2.2. RFQ (radyo frekans dört kutuplusu- radio frequency quadrupole)	9
2.2.3. Siklotron	10
2.2.4. Mikrotron.....	10
2.2.5 Sinkrotron	11
2.3. RF Elektron Doğrusal Hızlandırıcılarının Kullanım Alanları	12
3. RF HIZLANDIRICILARI İÇİN FİZİK PRENSİPLERİ	15
3.1. Dalga-Parçacık Senkronizasyonu	15
3.2. Dikdörtgen Dalga Kılavuzu	18
3.3. Silindirik Dalga Kılavuzu.....	21

	Sayfa
3.4. Dalga Kılavuzu Modları.....	24
3.5. Kovuk Çalışma Modları	27
3.6. Salıncı Olarak RF Kovuklar.....	28
3.7. RF Kovuk Parametreleri.....	31
4. TASARIMDA KULLANILAN PROGRAMLAR.....	37
4.1. POISSON/SUPERFISH	37
4.2. PARMELA.....	42
5. SONUÇLAR.....	47
KAYNAKLAR	57
ÖZGEÇMİŞ	59

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.1. SUPERFISH tarafından hesaplanmış RF parametreleri	51



ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Cockcroft Walton hızlandırıcısı.....	1
Şekil 1.2. Doğrusal hızlandırıcı örneği	2
Şekil 2.1.Wideröe'nin doğrusal hızlandırıcısının basit şeması	6
Şekil 2.2.Alvarez hızlandırıcısının basit şeması	7
Şekil 2.3.Varian klystronu	7
Şekil 2.4.Magnetron tüpü.....	8
Şekil 2.5. RFQ rezonatörünün şematik çizimi	10
Şekil 2.6.Siklotron	10
Şekil 2.7. Mikrotron.....	11
Şekil 2.8. Sinkrotron	11
Şekil 3.1. Dikdörtgen dalga kılavuzu.....	19
Şekil 3.2. Silindirik kovuk (hap kutusu kovuğu)	21
Şekil 3.3. Silindirik bir boruda dalga yayılımı için Brioullin diyagramı	23
Şekil 3.4. Silindirik bir kovukta TM modu için elektrik ve manyetik alan bileşenleri ..	26
Şekil 3.5. Bir LC devresinden kovuk simülasyonu.....	27
Şekil 3.6. Bir DTL'de 0 modunda çalışan bir rezonatör zinciri.....	28
Şekil 3.7. (a) π modunda (b) $\pi/2$ modunda çalışan kovuklar ve elektrik alan gösterimleri	28
Şekil 3.8. Sönümlü bir salındırıcı için rezonans eğrisi	29
Şekil 3.9. Eş. 3.67'ye göre çizilmiş Kilpatrick formülü	34
Şekil 4.1. POISSON/SUPERFISH işleyiş şeması	39
Şekil 4.2. SUPERFISH girdi dosyası örneği	40
Şekil 4.3. SUPERFISH tarafından oluşturulan RF kovuk geometrisi	41

Şekil	Sayfa
Şekil 4.4. SUPERFISH ara değer hesaplama işlemcisinin ekran görüntüsü	42
Şekil 4.5. PARMELA için örnek girdi dosyası.....	44
Şekil 4.6. PARGRAF örneği.....	45
Şekil 5.1. SUPERFISH için hazırlanan örnek girdi dosyası	48
Şekil 5.2. Kovuk boyunca elektrik alan değişimi	49
Şekil 5.3. Dricklet fonksiyonu eğrisi	50
Şekil 5.4. PARMELA girdi dosyası.....	52
Şekil 5.5. Kovuk boyunca hızlandırma alan gradyeninin değişimi	52
Şekil 5.6. Kovuk boyunca kinetik enerji kazanımı	53
Şekil 5.7. Giriş faz açısına göre çıkan demet enerjisindeki değişim	54
Şekil 5.8. Kovuk boyunca demet yayını	54
Şekil 5.9. Demetin PARGRAF görüntüsü	55
Şekil 5.10. Kovuk boyunca manyetik alan	55

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
α	sönüm katsayısı
b	cesaret katsayısı
$\vec{B}$	manyetik alan
c	ışık hızı
$\vec{E}$	elektrik alan
E_k	kilpatrick alanı
E_s	pik yüzey alanı
ϵ	dielektrik sabiti
eV	elektron volt
f	frekans
G	geometri faktörü
GeV	giga elektron volt
GHz	giga hertz
Hz	hertz
J_m	bessel fonksiyonu
k	dalga sayısı
k_c	kesim dalga sayısı
l_n	n. sürüklenme tüpünün boyu
MeV	mega elektron volt
MHz	mega hertz
mm	milimetre
mrاد	mili radyan
MW	mega watt
μ	manyetik geçirgenlik
Ω	ohm
P_{diss}	harcanan güç
R	paralel direnç

Simgeler**Açıklamalar**

R_s	yüzey direnci
r_s	spesifik paralel direnç
R/Q	geometrik paralel direnç
q	elektronun yükü
Q	kalite faktörü
δ	yüzey derinliği
σ	metalin iletkenliği
T	periyod
U	depolanan enerji
v_g	grup hızı
v_{ph}	faz hızı
V_{RF}	rf voltajı
ω	açısal frekans
Z_0	boş uzayın dalga direnci
ZT^2	etkin paralel direnç

Kısaltmalar**Açıklamalar**

AC	Alternatif akım
DC	Doğru akım
DTL	Sürüklenme tüpü doğrusal hızlandırıcı
LINAC	Doğrusal hızlandırıcı
RF	Radyo frekansı
RFQ	Radyo frekansı dört kutuplusu
SCC	Yandan eşlenmiş kovuk
TE	Enine elektrik
TEM	Enine elektromanyetik
TM	Enine manyetik
TTF	Geçiş zaman çarpanı

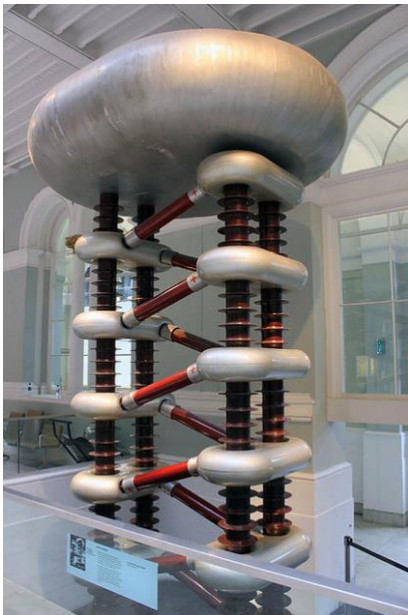
1. GİRİŞ

On dokuzuncu yüzyılda elektromanyetizmanın keşfi yirminci yüzyılın ilk yarısında, doğrusal hızlandırıcılarda dikkate değer bir gelişme yaşatmıştır. Süper iletkenliğin keşfi ise hızlandırıcı çalışmalarının daha büyük bir ivme ile ilerlemesine zemin hazırlamıştır.

Yüklü bir parçacık sabit bir gerilim altında elektriksel kuvvet etkisinde kalır ve bu kuvvet etkisinde ivme kazanır. Yüklü parçacıkları hızlandırmanın en kolay yolu parçacığı sabit bir gerilim farkı (∇V) altında tutmaktır. Parçacık bu potansiyel altında $q\nabla V$ kinetik enerjisi kazanarak hızlanır.

Bir elektrostatik (DC) makinede, hızlandırma alanı, hızlandırma bölgesine doğru uzanan yüksek DC voltaj uygulanması ile elde edilir. Bu tip makinelerde elde edilebilecek maksimum voltaj, sınır olarak kabul edilir ve bu tip makineler düşük ve orta enerjili sürekli (DC) demet elde etmek için kullanılır.

Nükleer fizik uygulamaları için hızlandırıcılarda ilk gelişme 1932’de oldu. Cockcroft ve Walton, 800 keV gerilime ulaşan bir aygıt yapmayı başardılar. Cockcroft Walton hızlandırıcısı, tarihsel ilgiden çok, tasarımındaki sadelikten dolayı halen kullanılmaktadır. Günümüzde bu hızlandırıcı, nötron kaynağı üretimi ve daha yüksek enerjili hızlandırıcılar için parçacık (özellikle proton) enjektörü olarak kullanılmaktadır.



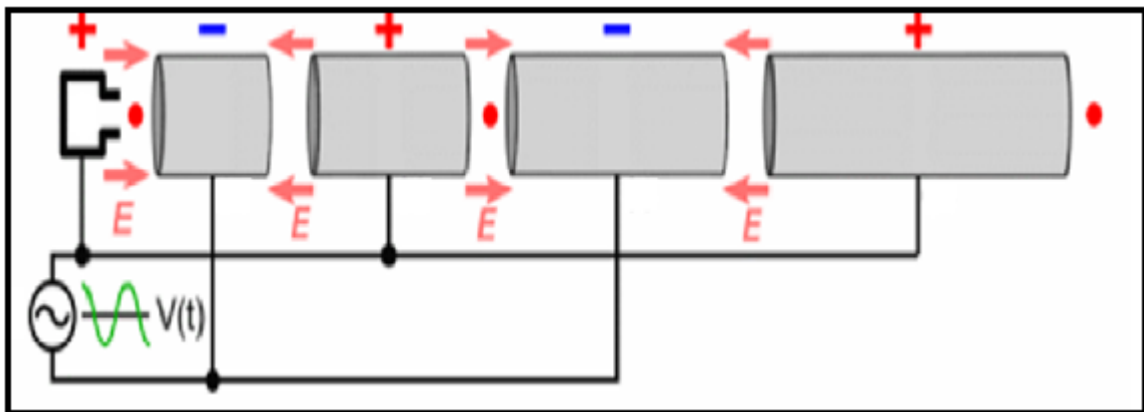
Şekil 1.1. Cockcroft Walton hızlandırıcısı

Nükleer fizik laboratuvarlarında halen yaygın olarak kullanılan Van de Graaff jeneratörü ile çalışan hızlandırıcılar, Cockcroft Walton hızlandırıcısına göre, terminal geriliminin kararlılığından dolayı AC dalgalanması göstermeme avantajına sahiptir. Buna rağmen, Van de Graaff hızlandırıcısının bir dezavantajı, çıkış akımının mikroamper mertebesinde Cockcroft Walton'ın çıkış akımından bin kat küçük olmasıdır.

Teknolojinin gelişmesiyle Van de Graaff Tandem hızlandırıcıları geliştirilerek on binde bir gibi bir hata ile mükemmel enerji çözünürlüğü ve kararlılığında bir DC demet elde edilmiştir. Bu düzenekte demet enerjisi ve iyon türü rahatlıkla değiştirilebildiği gibi hata oranı da en aza indirilebilir. Amerika Oak Ridge'de bulunan tandem hızlandırıcısının çıkış voltajı 20 MV üzerindedir ve bu voltajda 40 MeV'lik proton, 60 MeV'lik He ve 180 MeV'lik O iyon demetleri üretilir. Bunlar birçok nükleer araştırma için yeterli enerjidedir fakat daha yüksek enerjilere ihtiyaç duyulduğunda AC tipi bir hızlandırıcı kullanılmalıdır [1].

Alternatif akım (AC) kullanılan hızlandırıcılara örnek olarak doğrusal hızlandırıcı (linac), siklotron ve sinkrotron verilebilir. Bu cihazlarda voltaj sınırlaması yoktur ve özellikle sinkrotron oldukça yüksek enerjilere (550 MeV'e kadar) ulaşabilir [1].

İngilizce "Lineer Accelerator" kelimeleri kısaltılarak 'LinAc' olarak adlandırılan doğrusal hızlandırıcılar, parçacıkları yüksek frekans (radyo frekansı, RF) voltajının periyodik olarak tekrar tekrar uygulanması ile hızlandırmaktadır.



Şekil 1.2. RF doğrusal hızlandırıcının şematik gösterimi

Parçacıkların sürekli ve düzgün ivmelendirilmesi için, parçacık demetinin hem doğrultu hem de frekans olarak, RF frekansı ile uygun (faz uyumlu) odaklanmaya sahip olması gerekmektedir. Doğrusal hızlandırıcılar, parçacıkları ışık hızına yakın hızlara ulaştırmak için sahip olmaları gereken yüksek enerjileri sağlayacak en uygun cihazlardır. Parçacıklar göreceli hale geldikten sonra enerji kazansalar da hızları fazlaca değişmediğinden, elektron demetleri faz uyumlu kalırlar.

Parçacık demeti, birbiri ardına bağlanmış olan içi boş boru biçimli elektrot dizisi boyunca hareket eder. Bu elektrot dizisi AC gerilim kaynağının zıt kutuplarına bağlanmış olarak sıralanmış ve parçacıkları elektrotların içindeki boşluğu geçtikten sonra hızlandırmaktadır (Şekil 1.2.). Parçacıklar AC geriliminin periyodunun yarısına eşit bir zaman için, alan olmayan bir bölgeye sürüklendiğinden bu elektrotlara sürüklenme tüpü adı verilmiştir. Bu hızlandırıcılarda parçacığın hızlandırılması, her boşluk girişi ve çıkışında elektrik alanla rezonans olması koşuluna bağlıdır.

RF alanlarına ve sürüklenme tüplerine dayalı doğrusal hızlandırıcı prensibi, Ising ve Wideröe tarafından önerildi. Wideröe böyle bir hızlandırıcıyı inşa etti ve potasyum iyonlarını 50 keV'e kadar hızlandırabildi.

Potasyum iyonlarının Wideröe tarafından başarılı bir şekilde hızlandırılmasıyla, Berkeley'de Sloan ve Lawrence liderliğindeki bir grup, 10 MHz'de salınım yapan ve 42 kV'luk bir boşluk voltajı veren 50 kW'lık bir RF jeneratör inşa etti. Bunu 30 hızlandırma tüpüne uygulayarak civa iyonlarını 1,26 MeV'lik bir kinetik enerjiye kadar hızlandırdılar [2].

İlk elektron doğrusal hızlandırıcı 1946'da Stanford'da ve Massachusetts Teknoloji Enstitüsü'nde (MIT) çalışıldı.

Doğrusal hızlandırıcılar, yüksek enerjilere kadar şiddetli demetler üretebilme yeteneğine sahiptir. Örneğin, ABD, Los Alamos'ta bulunan doğrusal hızlandırıcı 800 MeV'lik proton demeti üretirken, Kaliforniya, Stanford'da bulunan yaklaşık 3,2 km uzunluğundaki doğrusal hızlandırıcı (SLAC) ise 50 GeV'e kadar elektron ve pozitron üretebilir [3].

Hızlandırıcı fiziğinin ilerlemesi yolunda ilklere kısa bir bakış açısından bazı önemli buluşlar ve olaylar aşağıda verilmiştir [2]:

- 1867; Elektromanyetik alan teorisi üzerine J. C. Maxwell ile paralel çalışan L. Lorenz, henüz hareketli nokta yükleri için olmasa da geciktirilmiş potansiyeller kavramını formüle etti.
- 1883; J. Maxwell, elektrik ve manyetizma üzerine çalışmalarını yayınladı.
- 1883; T. Edison, termiyonik emisyonu keşfetti.
- 1887; G. Hertz, elektromanyetik dalgaların iletimini ve fotoelektrik etkiyi keşfetti.
- 1891; G. J. Stoney elektron kavramını ve tanımını yayınladı.
- 1895; E. Wiedemann, elektrik kıvılcımlarını inceleyen yeni bir radyasyon türü hakkında rapor verdi.
- 1905; A. Einstein özel görelilik teorisini yayınladı.
- 1907; G. A. Schott, atomik spektrumları açıklamak için ilk sinkrotron radyasyon teorisini formüle etti.
- 1909; Milikan, elektronun elektrik yükünü ölçtü.
- 1913; J. Franck ve G. Hertz, atomları hızlandırılmış elektronlar ile uyarmak için ilk kez deney yaptılar.
- 1928; R. Wideroe, ilk doğrusal hızlandırıcıyı yaptı.
- 1931; R.J. Van de Graaff ilk yüksek gerilim jeneratörünü kurdu.
- 1932; Lawrence ve Livingston ilk proton demetini zayıf odaklanma kullanarak 1,2 MeV siklotrondan hızlandırdı.
- 1939; Hansen ve Varian kardeşler Stanford'da klystronu icat etti.
- 1941; D. W. Kerst ve R. Serber ilk işleyen betatronu tamamladılar.
- 1941; B. Touschek ve R. Wideroe, depolama halkası prensibini formüle ettiler.
- 1945; V.I. Veksler ve E.M. McMillan bağımsız olarak faz odaklama ilkesini keşfettiler.
- 1947; L. W. Alvarez, Berkeley'de ilk proton doğrusal hızlandırıcıyı tasarladı.
- 1948; E. L. Ginzton ve diğerleri Stanford'da Mark I ile elektronları 6 MeV'e kadar hızlandırdı.
- 1950; Kerst, dünyanın en büyük (300 MeV) betatronunu kurdu.
- 1955; M. Chodorow ve arkadaşları, 600MeV MARK III elektron doğrusal hızlandırıcısını tamamladılar.

2. ELEKTRON HIZLANDIRICILARINA GENEL BAKIŞ

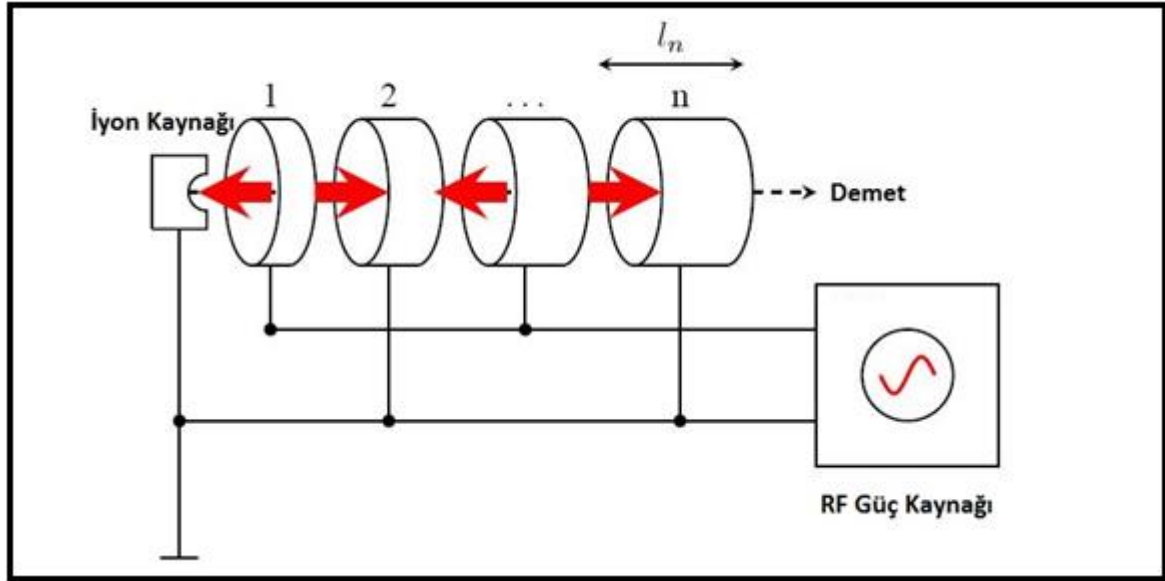
Elektrostatik hızlandırıcıların verimsizliği ve yüksek voltajlı jeneratörlerin hacimsel büyüklüğü istenilen verimin sağlanmasını engellediği için, parçacıkları hızlandırmakta başka yöntemlere ihtiyaç duyulmuştur. 1924'te, İsveçli fizikçi Gustav Ising parçacıkları hızlandırmak için değişen RF alanları kullanılabileceğine değinmiştir.

İlk RF doğrusal hızlandırıcı ise 1927/1928 yıllarında Rolf Wideröe tarafından tasarlanmış ve test edilmiştir. Topraklanmış iki elektrotun arasındaki bir sürüklenme tüpünü 1MHz frekans ve 25 keV bir RF kaynağına bağlamış, bu deneyde potasyum iyonlarını 50 keV'e hızlandırmıştır ve böylece RF hızlandırıcıların çalışma prensibini kanıtlamış oldu. DC makinelerdeki yüksek voltajın elektrik boşalmasına neden olmasından dolayı yapılan voltaj sınırlamasının RF cihazlarında ortadan kalktığı bu çalışma ile ispatlandı ve bu temele dayanan birçok hızlandırıcı yapıldı [4].

Bu sistemde parçacığın kazanacağı enerji ΔE , bir RF kovuğun boşluk sayısının RF voltajı ile çarpımına bağlıdır.

$$\Delta E = qn_{boşluk}V_{RF} \quad (2.1)$$

Parçacıklar bir tüpten diğerine geçerken, RF kaynağının polaritesi değişir ve bu sayede parçacıklar boşluklarda daima hızlandırma gradyenini görürler. Parçacık ilk girdiği boşlukta hareket doğrultusunda bir kuvvete maruz kalırken bu esnada ölü zamanında olan ikinci boşluk ters yönde kuvvet uygulamaktadır. RF özelliğinden dolayı parçacık ikinci boşluğa girdiği anda, ikinci boşluk eş zamanlı olarak ters kutuplanmaya uğrar ve ilk boşluktaki gibi parçacığa hareket doğrultusunda kuvvet uygular. Bu sırada üçüncü boşluk ölü zamanında hareket yönüne zıt yönde kuvvet uygulayacak şekilde kutupludur. Başka bir deyişle, RF salınımları hızlandırılan parçacıkların boşluğu geçme zamanı ile eş zamanlı halde olmalıdır.



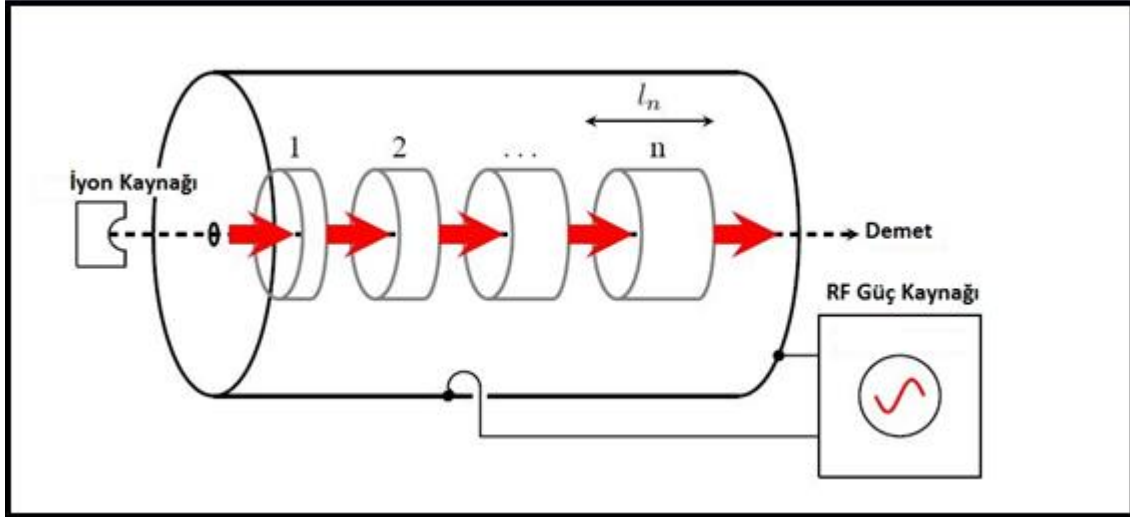
Şekil 2.1. Wideröe'nin doğrusal hızlandırıcısının şematik görünümü

Eş zamanlılık koşulu;

$$l_n = vT/2 = v/2f \quad (2.2)$$

Bu formüle bakıldığında, birbiri ardına sıralanacak sürüklenme tüplerinin boylarının giderek artacağı görülür. Yani, ulaşılabilir maksimum enerji sınırlıdır. Ağır iyon ya da proton hızlandırmak istenildiğinde, çok büyük tasarımlara ihtiyaç duyulur. Bu sorun ancak yüksek frekanslara çıkılarak çözülebilir. Fakat 10 MHz'in üzerine çıkıldığında yine bir sorun ortaya çıkar. Sürüklenme tüpleri anten görevi yapmaya başlar. Bu soruna ise çözüm 1946 yılında Louis Alvarez'den gelmiştir.

Alvarez, Wideröe'nin doğrusal hızlandırıcısını iletken bir silindir içine yerleştirmiş ve böylece ışıınım enerjisi sorununu ortadan kaldırmıştır. Alvarez'in hızlandırıcısında, şekil 2.2'de görüldüğü gibi, sürüklenme tüpleri aynı fazda sıralanmıştır [4].



Şekil.2.2. Alvarez hızlandırıcısının basit şeması

1931 yılında, Sloan ve Lawrence, 30 sürüklenme tüpü ve 10 MHz RF kaynağı kullanarak civa iyonlarını 1,26 MeV'e hızlandırmıştır [4].

2.1. RF Güç Kaynakları

Bir elektron hızlandırıcısında parçacığı hızlandırmak için kullanılan kovuklarda gerekli olan RF gücü, RF güç kaynaklarından sağlanır. RF güç kaynakları başlıca klystron ve magnetrondur.

2.1.1. Klystron

1939 yılında klystron, Varian kardeşler tarafından icat edilmiştir.



Şekil 2.3. Varian klystronu

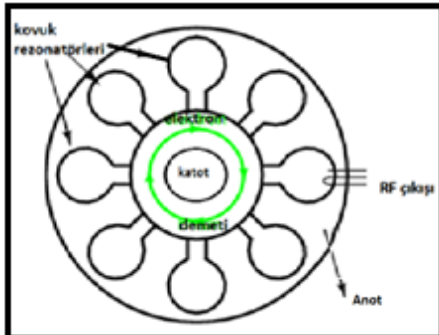
Klystron, çoklu güç kaynaklarına sahip olan ve mikrodalga frekanslarında çalışan hemen hemen tüm doğrusal elektron hızlandırıcılarında kullanılan bir yükselticidir. Klystronlar, yüksek frekanslara ve güce ihtiyaç duyulduğunda RF güç kaynağı olarak kullanılırlar.

Bu cihaz özellikle çok uzun bir makinede fazlama ve sürüş sorunlarını basitleştiren, gerekli ortalama ve tepe güçleri kolayca elde edebilen bir yapıya sahiptir. Klystron, ilk kez Stanford doğrusal hızlandırıcı için çoklu güç kaynağı olarak kullanılmıştır.

RF doğrusal hızlandırıcıların gelişimindeki ilerleme, II. Dünya savaşı sırasında radar tekniklerindeki gelişme ile bağlantılı olarak, yüksek frekanslı RF donanımlarının gelişiminden önemli ölçüde etkilenmiştir. II. Dünya Savaşı'ndan sonra, 3 GHz'de yaklaşık 1 MW RF gücü sağlayabilecek klystron ve magnetron üretebilecek RF teknolojisi geliştirilmeye başlandı [5].

2.1.2. Magnetron

Albert Wallace tarafından 1921 yılında geliştirilen ve 1940 yılında ilk kez kullanılan magnetron, klystron tüpleri gibi çalışır. Birbirine dik kuvvetli elektrik ve manyetik alan oluşturarak yüksek güç elde edilir. Yüksek frekanslı salınımlar üreten ve genellikle radarlarda gerekli yüksek darbe gücünü elde etmekte kullanılan magnetron gerçekte bir vakum tüpüdür. Katottan kopup boşluğa saçılan elektronlar, katot tüpü etrafında elektron bulutu oluştururlar. Magnetronun altında ve üstünde bulunan mıknatısların oluşturduğu manyetik alanın etkisiyle elektronlar dönmeye başlar. Hızlanan elektronlar kovuklar üzerinde kapasitif etki yaratarak değişken bir akı meydana getirirler ve bir elektromanyetik dalga ışımasına sebep olurlar. Elektronların hızlarının artırılması elektromanyetik dalga frekansını da artırır. Günümüzde en yaygın kullanım alanı mikrodalga fırınlardır.



Şekil 2.4. Magnetron tüpü

2.2. RF Alanların Kullanıldığı Hızlandırıcı Sistemleri

RF alanlar parçacık hızlandırmada farklı sistemlerde kullanılmaktadır. Bu sistemler başlıca:

- Doğrusal hızlandırıcılar
- RFQ (radyo frekans dört kutuplusu)
- Siklotron
- Mikrotron
- Sinkrotron

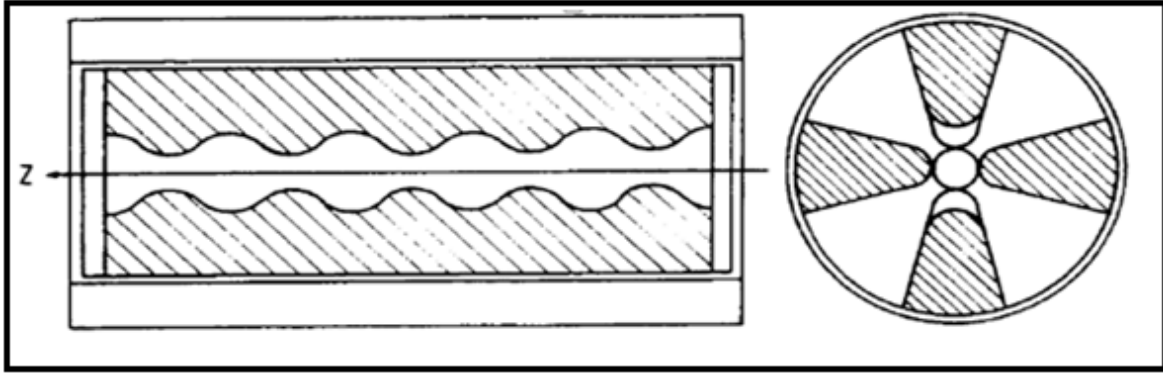
2.2.1. Doğrusal hızlandırıcılar (Linac)

Yükü parçacıkların doğrusal bir yol boyunca zamana bağlı elektromanyetik alanlarla hızlandırıldığı cihazlara denir. İlk doğrusal hızlandırıcı Wideröe tarafından (1927) yapılmış olmasına rağmen nükleer ve temel parçacık araştırmalarında kullanılmak üzere doğrusal hızlandırıcılar II. Dünya Savaşındaki mikrodalga teknolojisindeki gelişmelere kadar pek bir gelişme gösteremedi. O zamandan günümüze ise ilerleme hızlı olmuştur ve günümüzde dünyada sadece ar-ge çalışmaları için değil daha birçok alanda kullanılmak üzere farklı enerji mertebelerinde çalışan birçok doğrusal hızlandırıcı inşa edilmiştir.

2.2.2. RFQ (radyo frekans dört kutuplusu- radio frequency quadrupole)

1970 yılında Kapchinski ve Teplyakov, hızlandırma için kullanılan RF alanlarının enine odaklanma için de kullanabileceği bir cihaz önerdi.

Bir elektrik 4 kutuplu mod, demet ekseni etrafında simetrik olarak yerleştirilmiş 4 iletken çubuk veya kanatla yüklü bir kovuk rezonatöründe uyarılır. RFQ elektrik alanı düşük hızlı protonlar ve ağır iyonlar için gerekli olan enine elektrik odaklanmasını sağlar. RFQ'daki hızlanma boyuna bir hızlanma alanı oluşturmak için bu dört eleman üzerinde boyuna bir modülasyon modeli işlenerek elde edilir. RFQ iyon kaynağından enjekte edilen bir DC ışını demetler ve sonra demeti DTL (sürüklenme tüpü doğrusal hızlandırıcı) içine göndermek için yüksek enerjilere çıkarır. Genel sonuç, düşük hızlarda odaklama kuvvetinde ciddi derecede bir artıştır ve bu da doğrusal hızlandırıcılarda yüksek akımlı demetlerin hızlandırılmasını sağlar. RFQ, aynı RF alanındaki odaklama ve ivmeyi birleştirir [6].

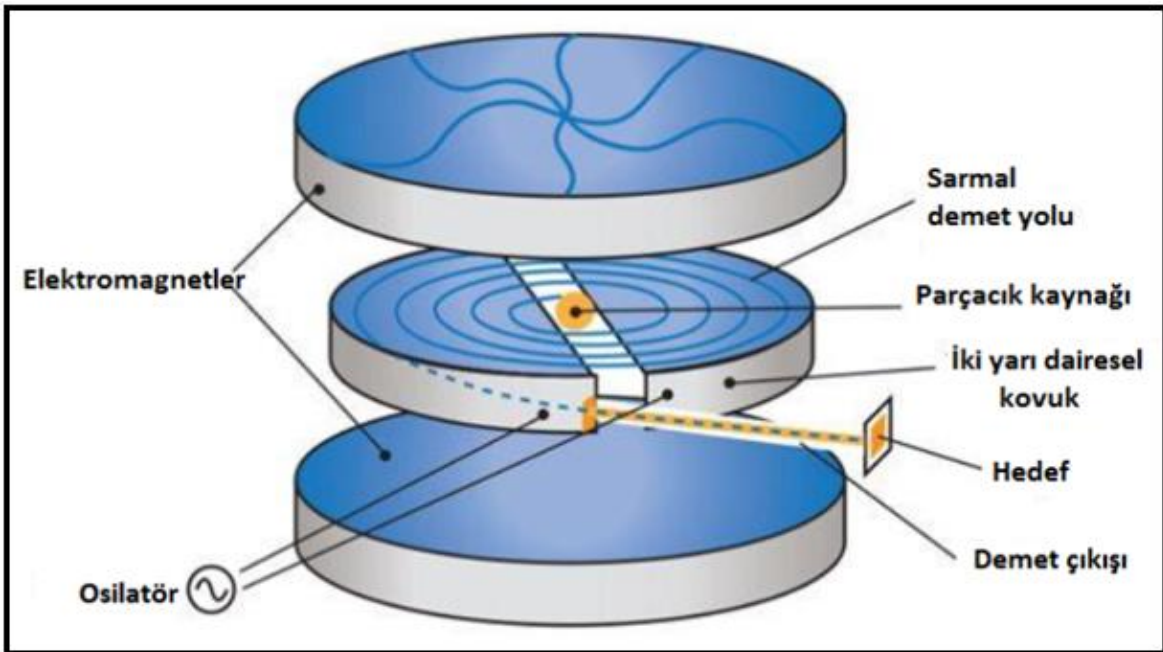


Şekil 2.5. RFQ rezonatörün şematik çizimi

2.2.3. Siklotron

Manyetik rezonans hızlandırıcısı da denir. Demet manyetik alanın etkisiyle dairesel bir yol izler ve parçacıklar yarım daire şeklindeki (D) metal odalar içinde hareket ederler. D'ler AC gerilim kaynağına bağlıdır. Parçacıklar manyetik alanın etkisiyle dairesel bir yörünge boyunca hareket ederken elektrik alandan etkilenmezler. D'ler arasında parçacıklar hızlandırıcı gerilimin etkisinde kalırlar ve her dönüşte küçük bir miktar enerji kazanırlar.

Siklotron 1929'da, Wideröe ve Ising'den ilham alan Lawrence tarafından tasarlandı ve Lawrence'ın siklotronunda 1,25 MeV'lik proton demeti üretildi. Lawrence, 1939'da Nobel Ödülü'nü aldı.



Şekil 2.6. Siklotron

2.2.4. Mikrottron

2.3. RF Elektron Doğrusal Hızlandırıcılarının Kullanım Alanları

Hızlandırıcılar, en genel haliyle bahsedilecek olursa, nükleer fizik araştırmalarında ve yüksek enerjilere ihtiyaç duyulan özellikle parçacık fiziği deneylerinde kullanılmaktadır. Daha küçük sistemler ise, tıp başta olmak üzere pek çok temel araştırma tesislerinde yerini almıştır.

- Sinkrotronlar için enjektör olarak
- Tıpta; radyoterapi veya radyoizotop üretiminde
- Çeşitli malzeme ve ürünlerin endüstriyel ışınlamasında
- Serbest elektron lazerlerinde
- Elektron-pozitron doğrusal hızlandırıcılarında
- Gıda ve malzeme sterilizasyonunda
- Yoğun madde fiziği araştırmalarında
- Yer bilimleri, malzeme bilimleri, kimya, moleküler ve hücre biyolojisi alanlarında
- Endüstride (örneğin baca gazı temizlemede)
- X-ışınları ile radyografide

Elektron doğrusal hızlandırıcılarının kullanıldığı alanlar yukarıdaki liste ile sınırlı olmayıp sadece örnek olarak sıralanmış kaba bir listedir. Elektronlar düşük kütleli parçacıklar olmaları sebebiyle ağır iyonlara nazaran daha kolay göreceli hızlara ulaştıklarından, yüksek enerji gerektiren alanlarda daha çok tercih edilirler.

Elektron demetleri, temel bilimler, uygulamalı bilimler, tarım, endüstri ve daha pek çok alanda anahtar rol oynamaktadır. Demet gücüne ve enerjisine bağlı olarak elektron demetleri, örnek olarak gıda koruma, ziraat, biyoloji gibi alanlarda kullanıma elverişlidir. Bu çalışmada tasarımı yapılan enerji aralığında bir demet, özellikle cihazın boyutları açısından kullanım olarak tercih edilme sebebi olabilir. Gıda ışınlama ile yiyeceklerin ömürlerinin uzatılması, ameliyathanelerde malzeme sterilizasyonu ya da baca gazı temizlenmesi bu sistemlerle mümkündür ve bu örnekler çoğaltılabilir.

Diğer hızlandırıcılarla kıyaslandığında RF elektron doğrusal hızlandırıcılarının özellikleri şu şekilde sıralanabilir:

- Demet girişi ve çıkışında dairesel hızlandırıcılarla kıyaslandığında hiç zorluk yaşanmaz.
- Elektronları birkaç keV gibi düşük enerjilerden TeV mertebesinde yüksek enerjilere hızlandırabilir. DC yüksek voltaj hızlandırıcılarda DC voltaj kırılma limiti vardır. Dairesel hızlandırıcılarda ise sinkrotron radyasyonu kaynaklı demet enerji kaybından bahsedilebilir.
- Enine odaklanma ve boyuna demetleme dahil yüksek akımlı demetler sağlayabilirler. Herhangi bir görev faktörü ile atmalı modda ve/veya sürekli modda çalışabilir.
- Bölüm bölüm tasarlanabilir, kurulabilir ve devreye alınabilirler.
- Hızlandırıcıların çoğu RF hızlandırma yapılarıyla donatılmıştır, yüksek kararlılık ve güvenilirlikle işletilmesi ve bakımı kolay değildir ve birim demet gücü başına yapım ve işletme maliyetleri dairesel hızlandırıcılara kıyasla pahalıdır [8].



3. RF HIZLANDIRICILARI İÇİN FİZİK PRENSİPLERİ

Bu bölümde yüklü parçacıkların RF alanları ile hızlandırılma prensipleri matematiksel ifadelerle özetlenmiştir. RF alanlar yüklü parçacıklara pozitif enerji aktarımı sağlar. Bu işlem, RF kovuklar içinde hızlanma boşluğu ve demet etkileşimi ile gerçekleşir.

Hızlandırıcılarda istenilen sonuçlara ulaşmayı engelleyen teknik sınırlamalar nedeniyle bu sonuçların elde edilmesi zorlaşır. Bir RF kovuk tasarlanırken, tüm bu teknik sınırlamalar göz önünde bulundurularak çalışma yapılmalıdır.

Yüklü parçacıkları hızlandırmak için yüksek frekanslı RF alanları kullanıldığında elektromanyetik dalganın yüklü parçacıklar ile etkileşimi parçacıkları sürekli olarak hızlandırma sağlayacak şekilde gerçekleştirilmelidir. Yani, parçacık ancak elektromanyetik dalga ile senkronize olursa sürekli hız kazanır.

Elektrik alan yüklü parçacığa $\vec{F}_E = q\vec{E}$ kuvveti uygulayarak parçacığın elektrik alan doğrultusunda hızlanmasına yani enerji kazanmasına neden olurken bu hızla manyetik alana giren parçacık manyetik alan tarafından $\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B}$ kuvvetine maruz kalır. Yani, parçacık kovuk içerisinde $\vec{F}_{net} = q(\vec{E} + (\vec{v} \times \vec{B}))$ Lorentz kuvvetinin etkisiyle hareket edecektir. Bu hareketi esnasında parçacığa enerji kazandırma rolünü sadece elektrik alan üstlenecek, manyetik alan hızlanmaya katkı vermeyecektir [2].

3.1. Dalga-Parçacık Senkronizasyonu

Parçacığı hızlandıran elektromanyetik dalganın alan bileşenlerini parçacıkların hareket yönüne bağlı olarak tanımlamak hızlandırma olayını açıklamak açısından faydalı olacaktır. Parçacık dalga senkronizasyonu iki şekilde tanımlanır:

1. Bir elektromanyetik dalga, parçacık hızına eşit olan bir faz hızıyla parçacığın hareket yönünde ilerler. Bu durumda, alan kuvvetinin en büyük olduğu dalganın tepesinde olan parçacık, dalga ile birlikte hareket ettikçe (sörf hareketi simülasyonunda olduğu gibi) maksimum oranda sürekli olarak hızlanacaktır.

2. Parçacıkları hızlandırmanın başka bir yolu, parçacığın ilerleme yolu üzerinde belirli yerlere yerleştirilen RF boşluklarında oluşturulan elektromanyetik alanları kullanmaktır.

Parçacığın sürekli hızlanması için elektromanyetik dalganın fazı parçacığın sürekli hızlanmasını sağlayacak şekilde ayarlanmalıdır.

Elektromanyetik alan bileşenlerini dalga yayılımı yönünde üretmek için serbest düzlem dalgaları kullanmalıyız. Ancak, elektromanyetik dalgayı istenen forma sokmak için metalik yüzeyleri düzgün bir şekilde yerleştirerek belirli sınır koşullarını uygulamak zorunluluğu vardır.

Yüksüz ve akımsız ortamlarda elektromanyetik dalga teorisi Maxwell denklemleri ile

$$\vec{\nabla} \cdot (\epsilon \vec{E}) = 0 \quad (3.1)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (3.2)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{d\vec{B}}{dt} \quad (3.3)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \frac{\epsilon\mu}{c^2} \frac{d\vec{E}}{dt} \quad (3.4)$$

şeklinde tanımlanır [9].

Bu denklemler için, ω frekansı ile salınan RF alanları için $\vec{U} = \vec{U}_0 e^{i\omega t}$ şeklinde $\vec{U} = \vec{E}$ ya da $\vec{B}$ olacak çözümler beklenir. Çözümlerden, ortamın vakum gerektirmeyen, ancak bir dielektrik sabiti ve manyetik geçirgenliğe sahip olabileceği homojen bir ortam olduğu varsayılmaktadır.

Maxwell denklemlerinin rotasyonundan

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -i\omega \vec{B} \quad (3.5)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \frac{i\epsilon\mu\omega}{c^2} \vec{E} \quad (3.6)$$

eşitlikleri elde edilir.

$$\vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{a}) = \vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{a}) - \nabla^2 \vec{a} \quad (3.7)$$

vektör ilişkisini kullanarak

$$\nabla^2 \vec{E} + k^2 \vec{E} = 0 \quad (3.8)$$

$$\nabla^2 \vec{B} + k^2 \vec{B} = 0 \quad (3.9)$$

düzlem dalga denklemleri elde edilir. Burada

$$k = \epsilon\mu \frac{\omega^2}{c^2} \quad (3.10)$$

z eksenini boyunca ilerleyen düzlem dalga için enine kısmi türevler aşağıdaki gibidir.

$$\frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} = 0 \quad (3.11)$$

Eş. 3.8 ifadesi

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial z^2} + k^2 \right) \vec{E} = 0 \quad (3.12)$$

olarak tanımlanabilir. Bu denklemin çözümünden

$$\vec{E} = \vec{E}_0 e^{i(\omega t - kz)} \quad (3.13)$$

elde edilir.

Dalga sayısının gerçekte k değerleri için Eş. 3.8 ve Eş. 3.9 denklemlerinin çözümleri faz hızıyla yayılan dalgaları tanımlar.

$$v_{ph} = \frac{z}{t} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}} \leq c \quad (3.14)$$

3.2. Dikdörtgen Dalga Kılavuzu

Dalga yapısı metalik sınırlarla şekillenir. Dalgaya kılavuzluk yapan metalik bir borunun eksenini boyunca yayılan dalga için elektrik alanının ilerleme doğrultusunda sonlu bir değer elde etmek için gereken sınır koşulları aranır. İletken sınırlar arasında dalga sayısı gerçektir. 3 boyutlu dalga kılavuzunun eksenini boyunca yayılan elektrik alan için

$$E_z = \psi_x(x)\psi_y(y)\psi_z(z) \quad (3.15)$$

ifadesi yazılabilir. Bu elektrik alanının sonlu değerini elde etmek için sınır koşulları aranır. Eş. 3.8 kullanılarak

$$\frac{\psi_x''(x)}{\psi_x(x)} + \frac{\psi_y''(y)}{\psi_y(y)} + \frac{\psi_z''(z)}{\psi_z(z)} = -\epsilon\mu \frac{\omega^2}{c^2} = -k^2 \quad (3.16)$$

elde edilir. Her bir terim sabit bir değeri vereceğinden ifade

$$k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = k^2 \quad (3.17)$$

elde edilmiş olur. Bu ifade elektrik alanının z bileşeni için 2. derece diferansiyel denklem olarak yazılabilir.

$$\frac{d^2 E_z}{dz^2} = -k_z^2 E_z \quad (3.18)$$

Bu diferansiyel denklemin çözümünden, z yönünde ilerleyen dalgalar gerçek dalgalardır ve

$$k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = k^2 \quad (3.19)$$

$$k_c^2 = k_x^2 + k_y^2 \quad (3.20)$$

yazılabilir.

Metalik bir borudaki elektromanyetik bir dalga z doğrultusunda yayılıyor ise dalga sayısı k daima kesim dalga sayısı k_c 'den büyüktür. Ancak bu durumda ilerleyen dalga gerçek dalgadır. Dolayısıyla,

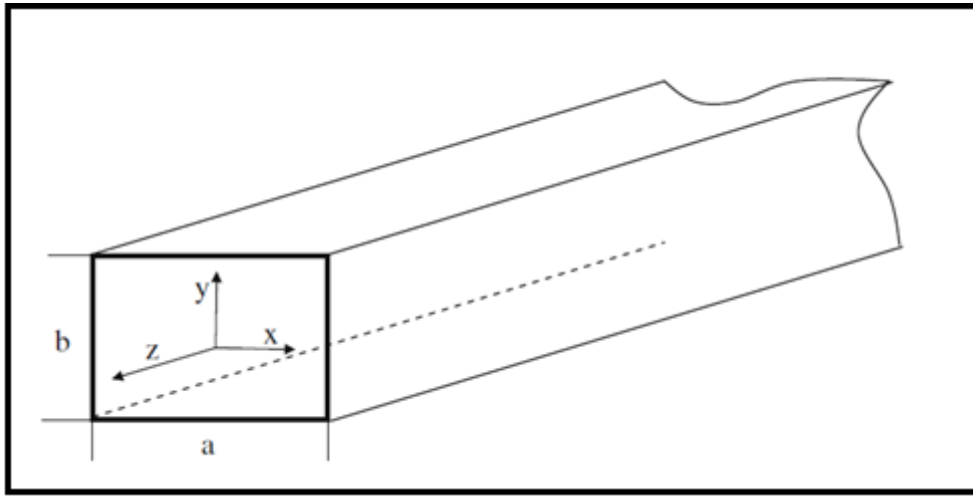
$$k_z^2 = k^2 - k_c^2 \quad (3.21)$$

olur.

Eş. 3.15'in çözümünden

$$E_z = E_0 \psi_x(x) \psi_y(y) e^{i(\omega t - k_z z)} \quad (3.22)$$

elde edilir.



Şekil 3.1. Dikdörtgen dalga kılavuzu

Yüklü bir parçacığın gerçek anlamda hızlanması bu denklemdeki parametrelere bağlıdır. Bu durumda, faz hızı

$$v_{ph} = \frac{\omega}{k_z} = \frac{\omega}{\sqrt{k^2 - k_c^2}} \quad (3.23)$$

ile verilir.

Faz hızı gerçek bir sayı ise, yani $k > k_c$ ise dalga z doğrultusunda yayılabilir. Eğer $k_c > k$ ise yani k_z değeri eşik değerinden daha küçük bir dalga sayısına sahipse faz hızı gerçeklikten çıkarak imajiner hale geçer ve dalga üssel olarak $\exp(-\sqrt{|k^2 - k_c^2|}z)$ şeklinde azalır.

Kullanılan iletkenin sınırları elektromanyetik dalgaları sonlu boyuna elektrik alan bileşenlerini üretecek şekilde değiştirir. Dolayısıyla, parçacık bu elektrik alan sayesinde hız kazanır.

Elde edilen çözümler uygun görülse de düzgün bir boru içinde yayılan bir dalga kullanılamaz. Eş. 3.17 denklemini Eş. 3.23 denklemine yerleştirirsek, borudaki faz hızı

$$v_{ph} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu} \sqrt{1 - \left(\frac{k_c}{k}\right)^2}} \quad (3.24)$$

şeklinde elde edilir. Vakum veya havada $k > k_c$ ve $\epsilon \approx \mu_0 \approx 1$ dir. Dolayısıyla, faz hızı ışık hızından daha büyük olur. Dalga, ışık hızından daha hızlı hareket edemeyen parçacıkların üzerinden geçeceği için parçacıkta net bir hızlanma gerçekleşmez. Bu nedenle, dalganın faz hızının düşürüleceği ve sabit bir dalga desenine izin verecek uygun durumlar aranmalıdır.

Duran dalga deseni için $k_z = 0$ ya da $k = k_c$ durumunda kesim frekansı

$$\omega_c = \frac{ck_c}{\sqrt{\epsilon\mu}} \quad (3.25)$$

İlerleyen dalga için bu ifade düzenlenecek olursa

$$\omega = \omega_c \sqrt{1 + \frac{k_z^2}{k_c^2}} \quad (3.26)$$

elde edilir.

Elektromanyetik enerji dalga kılavuzu boyunca tanımlanan grup hızı olarak adlandırılan

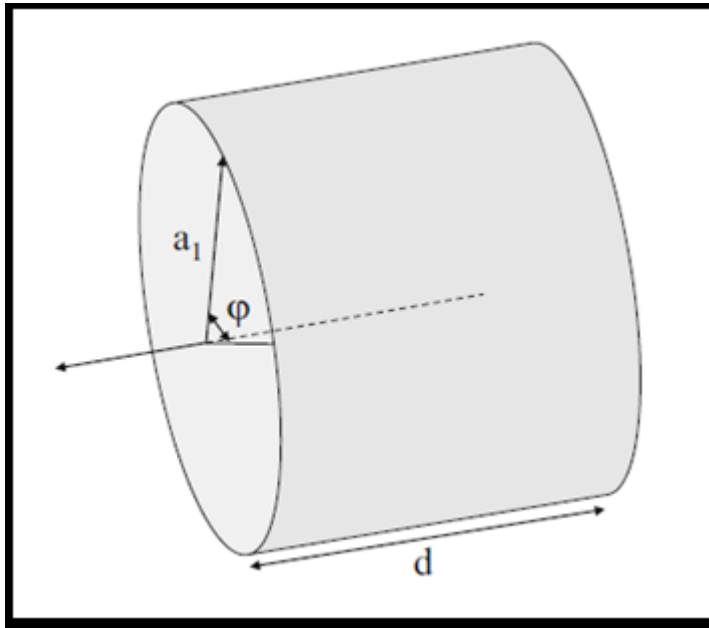
$$v_g = \frac{d\omega}{dk_z} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}} \sqrt{1 - \frac{k_c^2}{k^2}} < \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}} < c \quad (3.27)$$

ile ilerler. Faz hızının tersine grup hızı daima ışık hızından küçüktür.

Dikdörtgen dalga kılavuzları çoğunlukla, yüksek frekanslı mikrodalgaları jeneratörden hızlandırıcı boşluğa taşımak için kullanılır. Dalga kılavuzlarının bant genişliği oldukça geniştir ve mekanik toleranslar rahatlatılmıştır [2].

3.3. Silindirik Dalga Kılavuzu

Silindirik RF kovuklarda mümkün olan en yüksek elektrik alanlara ulaşmak daha kolaydır. Bunun için dikdörtgen kovuklardaki dalga denklemine benzer şekilde düzenlemeler yapılırsa dikdörtgen dalga kılavuzlarındaki gibi silindirik dalga kılavuzları elde edilir. Bunun için dalga denklemi silindirik koordinatlarda (r, φ, z) tanımlanıp elektrik alanın z bileşeni için yazılır [2].



Şekil 3.2. Silindirik kovuk (hap kutusu kovuğu)

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 E_z}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 E_z}{\partial z^2} + k^2 E_z = 0 \quad (3.28)$$

Silindirik koordinatlarda φ ve z ye göre türevler

$$\frac{\partial}{\partial \varphi} = -im, \quad \frac{\partial}{\partial z} = -ik_z \quad (3.29)$$

olup burada m bir tam sayıdır.

Bu ifadeler Eş. 3.28'de yerine konulursa elektrik alanın z bileşeni için

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial r} + \left(k_c^2 - \frac{m^2}{r^2} \right) E_z = 0 \quad (3.30)$$

elde edilir. Burada $k_c^2 = k^2 - k_z^2$ olup bu diferansiyel denklemin çözümünden Bessel fonksiyonları formunda

$$E_z = E_0 J_m(k_c r) e^{i(\omega t - m\varphi - k_z z)} \quad (3.31)$$

elde edilir.

Bu ifadede, silindirik dalga kılavuzu yarıçapı $r=a$ için $E_z=0$ sınır şartı geçerlidir. $m=0$ için birinci kök a_1 'dir.

$$a_1 = \frac{2.405}{k_c} \quad (3.32)$$

Dalga kılavuzu dalga sayısı ($k_z^2 = k^2 - k_c^2$), dalga kılavuzu boyunca üstel olarak zayıflayan bir dalga yerine ilerleyen bir dalga elde etmek için pozitif olmalıdır ($k_z^2 < 0$). $\omega_c = ck_c$ için k_z denklemi yeniden düzenlendiğinde

$$k_z^2 = k^2 \left(1 - \frac{\omega_c^2}{\omega^2}\right) \quad (3.33)$$

şeklinde yazılabilir.

Dalganın faz hızı (dikdörtgen dalga kılavuzunda olduğu gibi), $v_{ph} = \frac{\omega}{k_z}$ bağıntısında

Eş. 3.33 denklemi yerine yazıldığında, tekrar ışık hızını aşan bir faz hızı ve dolayısıyla bir malzeme parçacığının ulaşabileceği herhangi bir hız elde edilir. Kesim frekansı, dalga kılavuzunun çapı ile belirlenir ve elektromanyetik dalgaların dairesel dalga kılavuzlarındaki boru çapından daha düşük dalga boylarında yayılmasını sınırlar. Düzlem elektromanyetik dalgalar, istenen boyuna elektrik alan bileşenini üretecek şekilde değiştirilebilir, ancak bu alanların henüz parçacık hızlanması için uygun olmadığına dikkat edilmelidir, çünkü faz parçacıkların üzerinde yuvarlanır ve net hızlanma sıfırdır. Bu gibi elektromanyetik dalgaların parçacık hızlandırmada uygun hale getirilmesi için, faz hızının azaltılması gerekir [2].

Dalga kılavuzu boyunca elektromanyetik enerji aktarımının hızı olan grup hızı

$$v_g = \frac{d\omega}{dk_z} \quad (3.34)$$

ile ifade edilir.

Eş. 3.33'ün k_z ye göre türevi sonucu

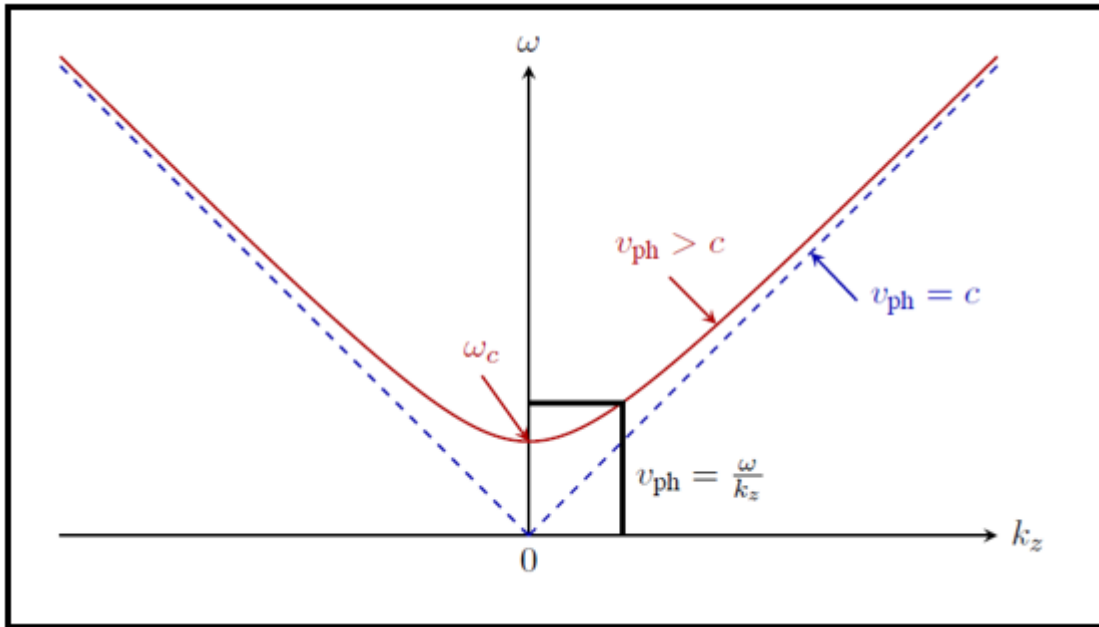
$$k_z = \frac{\omega}{c^2} \frac{d\omega}{dk_z} \quad (3.35)$$

ya da $v_{ph} > 0$ iken

$$v_g = \frac{d\omega}{dk_z} = \frac{c^2 k_z}{\omega} = c \frac{c}{v_{ph}} < c \quad (3.36)$$

şeklinde yeniden yazılabilir.

Eş. 3.33 dispersiyon bağıntısı olarak adlandırılacak olursa, bu denklemin grafiği çizildiğinde Brioullin diyagramı elde edilir.



Şekil 3.3. Silindirik bir boruda dalga yayılımı için Brioullin diyagramı

Dispersiyon bağıntısı ve Brioullin diyagramı incelenecek olursa çıkarımı yapılacak sonuçlar maddeler halinde şu şekilde sıralanabilir:

1. Her frekans belirli bir faz hızına karşılık gelir.
2. Faz hızı $v_{ph}^2 = c^2 \frac{\omega^2}{\omega^2 - \omega_c^2}$ daima ışık hızından büyüktür.
3. $\omega = \omega_c$ durumunda, yayılım sabiti k_z sıfıra gider ve faz hızı $v_{ph} = \omega/k_z$ sonsuz olur.
4. Dairesel dalga kılavuzunda parçacıkları hızlandırmak imkansızdır. Sebebi, RF ile parçacıkların senkronize olmasının imkansızlığından kaynaklanmaktadır. Parçacıkların RF ile eş zamanlı olması için ışık hızından daha hızlı hareket etmelidir.
5. Enerji, grup hızıyla $v_g = d\omega/dk_z$ hareket eder ve bu hız daima ışık hızından küçüktür [4].

3.4. Dalga Kılavuzu Modları

Dalga kılavuzlarında çok sayıda dalga uyarılabilir. Her bir olası dalgaya mod adı verilir. Dalga kılavuzu çözümleri iletilen modların (dalgaların) bazı alan bileşenlerinin mevcut olup olmamasına göre sınıflandırılır. Dalga iletimi z yönünde olduğu için sınıflandırmada E_z ve B_z bileşenleri esas alınır [10].

Modların tanımı genellikle aşağıdaki kurallara göre yapılır:

- TM_{mnp} veya diğer adıyla E_{mnp} modlar

Enine manyetik (Transverse Magnetic, TM) dalgalar, E dalgaları olarak da adlandırılır.

Manyetik alan bileşenleri sadece enine yönde olup boyuna manyetik alan bileşeni mevcut değildir.

$B_z = 0$ ve $E_z \neq 0$ ile tanımlanır.

- TE_{mnp} veya diğer adıyla B_{mnp} modlar

Enine elektrik (Transverse Electric, TE) dalgalar, B dalgaları olarak da adlandırılır.

Elektrik alan bileşenleri sadece enine yönde olup boyuna elektrik alan bileşeni mevcut değil.

$E_z = 0$ ve $B_z \neq 0$ ile tanımlanır.

- Enine elektromanyetik (TEM, Transverse Electric Magnetic) modlar

$E_z = B_z = 0$ ile tanımlanır.

Silindirik koordinatlarda m,n,p indisleri;

m, azimutal yöndeki alan bileşenlerinin tam zamanlı şekillenme sayısıdır. Silindirik rezonatörlerde, $\vec{E}$ ve $\vec{B}$, $\cos(m\varphi)$ ya da $\sin(m\varphi)$ ile orantılıdır.

n, boyuna alan bileşenlerinin radyal doğrultuda taban geçiş sayısıdır. Silindirik rezonatörlerde, E_z ve B_z , $J_m(\frac{x_{mn}r}{R_c})$ ile orantılıdır.

p, boyuna alan bileşenlerinin yarı periyod değişimlerinin sayısıdır. Silindirik rezonatörlerde, $\vec{E}$ ve $\vec{B}$, $\cos(p\pi z/l)$ ya da $\sin(p\pi z/l)$ ile orantılıdır [4].

Hem TM hem de TE modlarına uygulanabilir alan bileşenlerinin en genel şekli aşağıda verilmiştir. Denklemleri düzenlerken yapılması gereken, TM modlar için $B_0 = 0$ ve TE modlar için $E_0 = 0$ yazmak olacaktır [2].

$$E_r = -\frac{k_z}{k_c^2} \left(i \frac{\partial E_z}{\partial r} + \frac{1}{k_z} \frac{m}{r} \omega B_z \right) \quad (3.37)$$

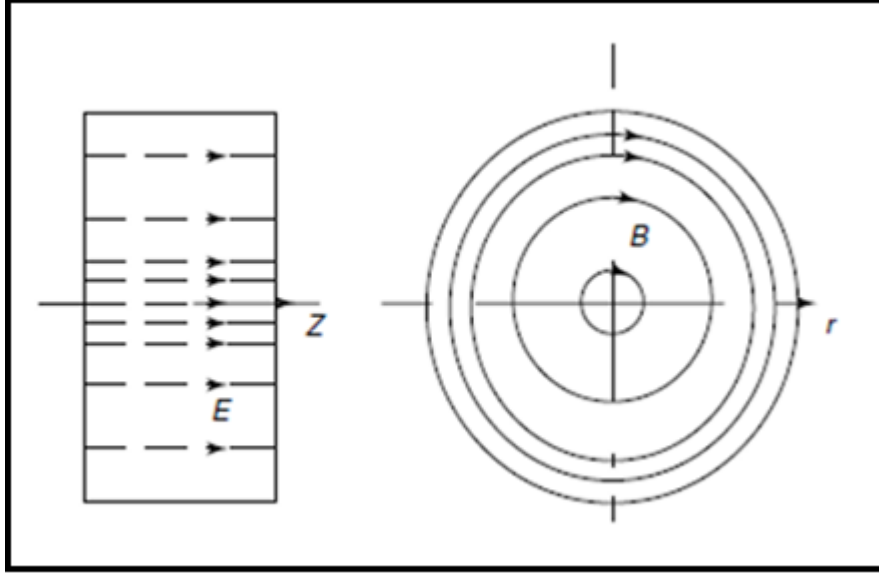
$$E_\varphi = \frac{1}{k_c^2} \left(-\frac{m}{r} k_z E_z + i \omega \frac{\partial B_z}{\partial r} \right) \quad (3.38)$$

$$E_z = E_0 J_m(k_c r) e^{i(\omega t - m\varphi - k_z z)} \quad (3.39)$$

$$c B_r = \frac{1}{k_c^2} \left(-i k_z c \frac{\partial B_z}{\partial r} + \epsilon \mu \frac{\omega}{c} \frac{m}{r} E_z \right) \quad (3.40)$$

$$cB_\varphi = -\frac{1}{k_c^2} \left(k_z \frac{m}{r} cB_z + i\epsilon\mu \frac{\omega}{c} \frac{\partial E_z}{\partial r} \right) \quad (3.41)$$

$$cB_z = B_0 J_m(k_c r) e^{i(\omega t - m\varphi - k_z z)} \quad (3.42)$$



Şekil 3.4. Silindirik bir RF kovukta TM modu için elektrik ve manyetik alan bileşenleri

Silindirik koordinatlarda, TM_{010} modu için pozitif z yönünde alan bileşenleri:

$$E_r = j \frac{k_z}{k_c} E_0 J_1(k_c r) e^{-jk_z z} e^{j\omega t} \quad (3.43)$$

$$E_z = E_0 J_0(k_c r) e^{-jk_z z} e^{j\omega t} \quad (3.44)$$

$$B_\varphi = j \frac{k}{Z_0 k_c} E_0 J_1(k_c r) e^{-jk_z z} e^{j\omega t} \quad (3.45)$$

E_0 elektrik alan genliği, J_0 ve J_1 sırasıyla 1. ve 2. Bessel fonksiyonları, ω açısal frekans, k dalga sayısı ve Z_0 ise boş uzayın dalga direncini tanımlamaktadır.

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \omega c \quad (3.46)$$

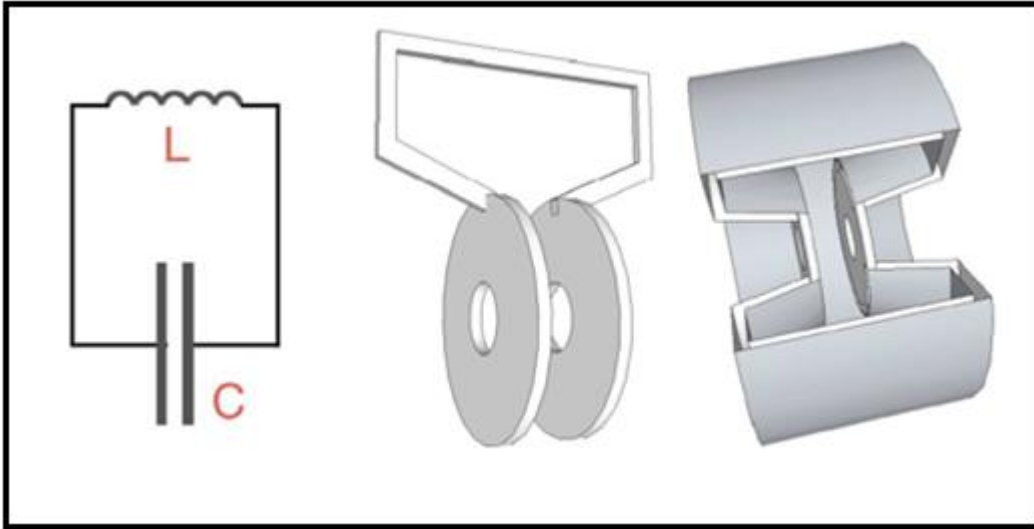
$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 377\Omega \quad (3.47)$$

Rezonans kovukları bir indüktör (manyetik enerjiyi depolayan) ve kapasitörden (elektrik enerjisini depolayan) oluşan devre gibi düşünüldüğünde en basit durum, iletken yüzeyli boş bir silindirden ibaret olan hap kutusu kovuğudur (pill box cavity). Bu kovuktaki en basit mod, temel mod olarak da bilinen TM_{010} modudur ve bu modun alan bileşenleri aşağıdaki sıralanabilir:

$$E_r = 0 \quad (3.48)$$

$$E_z = E_0 J_0(k_r r) \cos(\omega t) \quad (3.49)$$

$$B_\phi = -\frac{E_0}{Z_0} J_1(k_r r) \sin(\omega t) \quad (3.50)$$

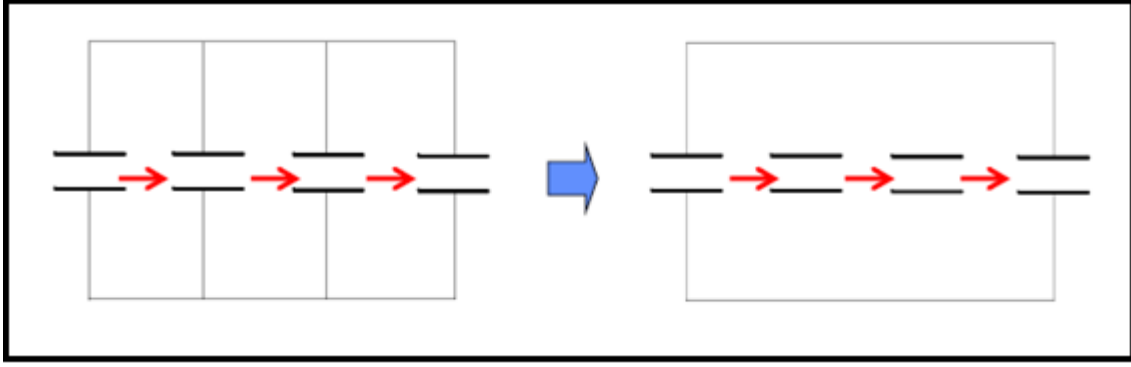


Şekil 3.5. Bir LC devresinden kovuk simülasyonu

3.5. Kovuk Çalışma Modları

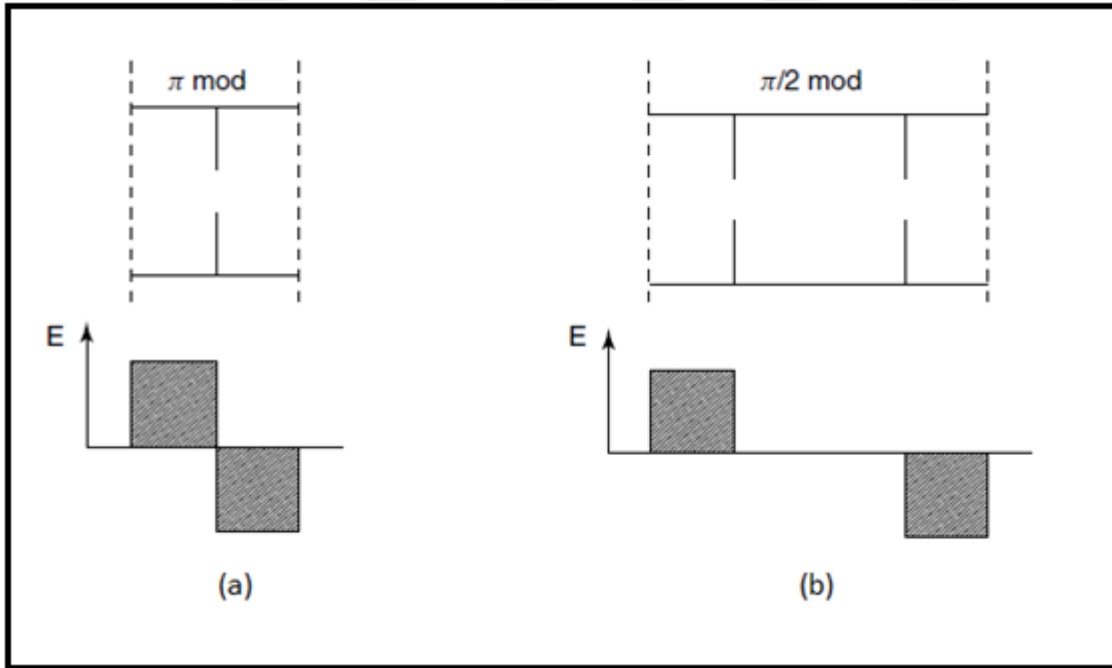
Bir hızlandırıcı yapısı içerisinde, iki ardışık hızlanma boşluğu arasındaki RF faz farkı, yapı kipi olarak adlandırılır. Yapı kipine çalışma modu da denir.

0 mod, hızlanma boşluklarında oluşan elektrik alanlar arasında faz farkı olmadığını belirtir (DTL 0 kipte çalışır) [11].



Şekil 3.6. Bir DTL'de 0 modunda çalışan bir rezonatör zinciri (Oklar, eksen üzerindeki elektrik alanının yönünü göstermektedir.)

π modunda çalışan yapıların ardışık iki kovuğu arasında 180 derece faz farkı vardır. $\pi/2$ modunda, her iki kovuktan biri boş kabul edilip boş kovuk hızlandırma için gereksizdir. Basit bir mantıkla, boş kovuğu parçacıkların gittiği eksenden çıkarıp dışarı konulduğunda parçacıkların hissettiği elektrik alan modu π modu olmaktadır (SCC, yandan eşlenmiş kovuk bu modda çalışır.) [12].



Şekil 3.7. (a) π modunda ve (b) $\pi/2$ modunda çalışan kovuklar ve elektrik alan gösterimleri

3.6. Salıncık Olarak RF Kovuklar

Hızlandırıcı kovuklar sönümlü salıncıklar olarak tanımlanabilirler. Bu sönümleme, kovuğun duvarlarındaki enerji kayıplarından ve RF alanlara güç vermek için kovuğa bağlı RF güç

kaynağından kaynaklanmaktadır. Hızlandırıcı kovukların birçok özelliği, sönümün en genel tanımlaması olan harmonik salındırıcı denklemiyle açıklanabilir:

$$\ddot{x} + 2\alpha\dot{x} + \omega_0^2 x = D e^{i\omega t} \quad (3.51)$$

Bu denklemde; α sönüm katsayısı, ω_0 başlangıç frekansını ve D ise ω frekansıyla sürülmüş kuvvetin genliğini tanımlamaktadır.

Denge durumunda çözüm, $x = A e^{i\omega t}$ şeklinde yazılabilir. A genliği için ise çözüm önerisi ise;

$$A = \frac{D}{\omega_0^2 - \omega^2 + i2\alpha\omega} = a e^{i\phi} \quad (3.52)$$

şeklindedir.

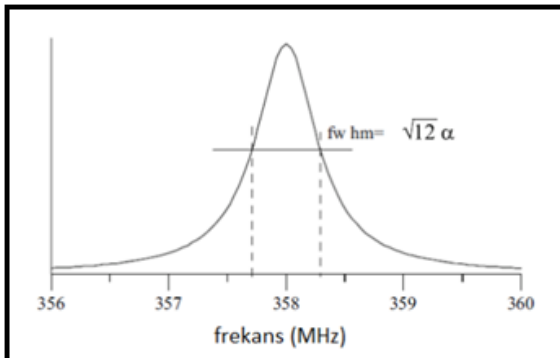
ϕ açısı faz kaymasını tanımlamaktadır.

$a = Re(A)$ genliği, Eş. 3.52'den

$$a = \frac{D}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\alpha^2 \omega^2}} \quad (3.53)$$

olarak yazılabilir.

Salınım genliği a 'nın uyarma frekansı ω 'nın fonksiyonu olarak eğrisi çizildiğinde, salınıcının salınım eğrisini elde etmiş oluruz.



Şekil 3.8. Sönümlü bir salındırıcı için rezonans eğrisi

Salıncı maksimum genliğe ulaştığındaki salınım frekansı sönüme bağlıdır ve Eş. 3.54'teki gibi ifade edilebilir.

$$\omega_r = \sqrt{\omega_0^2 - 2\alpha^2} \quad (3.54)$$

Salıncı, salınım frekansından sonlu bir uzaklıkta uyarılabilir ve yarı maksimum genlikte salınım eğrisinin genişliği Eş. 3.55 gibi yazılabilir.

$$\Delta\omega_{1/2} \approx \pm 2\sqrt{3}\alpha \quad \alpha \ll \omega_r \text{ için} \quad (3.55)$$

Eğer, salınımı devam ettirmek adına herhangi bir dış uyarma yoksa genlik $e^{-\alpha t}$ ile sönme eğilimindedir.

Salıncının enerjisi W , A^2 ile orantılı şekilde değişir. Birim zamanda enerji kaybı,

$P = -dW/dt = 2\alpha W$ olarak yazılırsa, bu ifade kullanılarak salıncının kalite faktörü belirlenebilir.

$$Q = \frac{\omega_r}{2\alpha} \quad (3.56)$$

Sönümün artmasıyla kalite faktörünün azaldığı görülür.

Hızlandırma kovuğunun durumuna göre farklı Q değerleri tanımlanır. Demet yokken, Q_0 olarak adlandırılan yüksüz (unloaded) Q değerinin yüksek bir değer olması beklenir. Demet varken kovuktan enerji çekeceğinden kalite faktörünün değerinin düşmesi beklenir ve bu değer ise yüklü (loaded) Q olarak adlandırılır.

Hem malzeme özellikleri hem de RF kovuk geometrisi ile bir genelleme yapılacak olursa, normal iletken malzemeden yapılan kovuklar için yaklaşık 10^4 ve 2 Kelvin'deki süper iletken kovuklar için 10^{10} mertebesindedir.

Salınım genliğini düşüren zaman sabiti ya da başka bir deyişle kovuk sönüm zamanı

$$t_d = \frac{1}{\alpha} = \frac{2Q}{\omega_r} \quad (3.57)$$

şeklinde yazılabilir ve alan genliği Q/π salınımlarının süresince $1/e$ ile azalır [2].

3.7. RF Kovuk Parametreleri

Kovuk parametrelerinden en önemlisi parçacığın hızlandırılması için gerekli olan elektrik alanı sağlayacak olan hızlandırma voltajı olarak adlandırılan V_{acc} parametresidir. Hızlandırmanın istenilen verimde gerçekleştirilmesi için faz açısının doğru seçilmesi önemlidir.

Hızlandırma voltajı yüklü parçacığın kovuk boyunca kazandığı enerjinin ölçüsüdür.

$$V_{acc} = \int_{-\infty}^{+\infty} E_{acc}(z) \cos(\omega t + \phi) dz = \int_{-\infty}^{+\infty} E_{acc}(z) \cos\left(\frac{\omega z}{\beta c} + \phi\right) dz \quad (3.58)$$

z eksenini demetin ilerleme yönü, $\beta = v/c$ olup sabit bir değer kabul edilir ve ϕ V_{acc} 'yi maksimum yapan faz kayması (phase offset) değeridir.

Alanlar zamanla değiştiği için hızlanan parçacıklar için bir miktar enerji kaybı, beklenen bir durumdur. Bir kovuktan elde edilebilecek maksimum enerji kazancı;

$$V_0 = \int_{-\infty}^{+\infty} |E_{acc}(z)| dz = L E_0 \quad (3.59)$$

yazılabilir.

E_0 , eksen üzerinde oluşan en yüksek alanların ortalaması olup, kovuk geometrisine, tipine ve frekansa bağlıdır.

V_{acc} 'nin V_0 'a oranı, geçiş zaman çarpanı (Transit Time Factor, TTF) olarak adlandırılan değeri verir. Geçiş zaman çarpanı, parçacık kovuğu geçerken, alanın zaman içinde değişmesinden dolayı parçacık hızlanması üzerinde düzeltme sağlar [13].

$$TTF = \frac{V_{acc}}{V_0} = \frac{\sin(\frac{\omega_0 L}{2\beta c})}{(\frac{\omega_0 L}{2\beta c})} = \frac{\sin(\frac{\pi}{2})}{\frac{\pi}{2}} = \frac{2}{\pi} \quad (3.60)$$

Parçacık hızı ve hızlandırma alanının faz hızı arasındaki fark, hızlandırmanın etkin bir şekilde düşmesine yol açar. Geçiş zaman çarpanı gerçek verimliliği karakterize eder.

Bir RF alanı yüzeyine uygulandığında gücü dağıtmayacak hiçbir malzeme yoktur. Birim alan başına harcanan güç (dissipated power);

$$\frac{dP_{diss}}{dA} = \frac{1}{2} R_s |B|^2 \quad (3.61)$$

şeklinde ifade edilebilir. R_s , yüzey özdirenci olup, normal iletken bir malzeme için $m\Omega$ mertebesinde bir değere sahip iken yüksek kaliteli süperiletken bir malzeme için bu değer $n\Omega$ mertebesinde dir. Bu değer minimum olması beklenir.

Bu kayıplar rezonatördeki değişen manyetik alanların neden olduğu yüzey akımları tarafından üretilir [13].

$$R_s = \sqrt{\frac{\pi f \mu_0}{\sigma}} = \frac{1}{\sigma \delta} \quad (3.62)$$

Burada σ metalin iletkenliği ve δ yüzey derinliğidir (skin depth).

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_0 \sigma}} \quad (3.63)$$

Alanların ve yüzey akımlarının iletken içine nüfuz etme derinliği, yüzey derinliği olarak bilinir.

Yüzey derinliği, elektromanyetik alanların iletkene ne kadar derinden girdiği ile alakalı karakteristik bir uzunluk verir. Örnek olarak, 1 GHz frekansta elektriksel iletkenliği

$\sigma = 6 \times 10^7$ S/m olan bir bakır yüzey için bu değer yaklaşık olarak $2\mu m$ 'dir.

Ayrıca, frekans arttıkça, yüzey derinliği azalır. Yüzey derinliği, rezonatörün dalga boyu ile kıyaslandığında çok küçük olduğundan, kovuk özelliklerinin iyileştirmesinde göz ardı edilebilir.

Paralel direnç (shunt impedance), RF gücünün yararlı bölgede ne kadar toplandığını gösterir ve dolayısıyla hızlandırıcının verimliliğini ölçer.

Klystrondan gelen RF gücünün kovuktan parçacık demetine nasıl aktarıldığını anlamak için kovuğu eşdeğer bir paralel RLC devresi gibi düşünecek olursak, bu verimin paralel ohmik direnç olarak adlandırılması yanlış olmaz [14].

$$R = \frac{V_{acc}^2}{P_{diss}} \quad (3.64)$$

Daha yüksek paralel direnç, belirli bir mikrodalga gücü için daha yüksek enerji kazancı anlamına gelir. Yani, hızlandırmada maksimum verim elde etmek adına, kayıpların en aza indirilmesi için, bu parametrenin maksimum değerinde olması gerekmektedir.

Paralel direncin değeri elektrik iletkenliğinin karekökü ile orantılı olduğundan, bakır, gümüş ve altın gibi metaller kovuk yapmak için uygundur. Ayrıca, kovuk üretiminde iyi iletken bakır ve alüminyum kullanılarak yüzey derinliği en aza indirilebilir.

OFHC (oxygen free high conductivity), farklı bakır türleri arasında, yüksek elektrik iletkenliği ve düşük oksijen miktarı nedeniyle kovuk üretiminde daha uygundur [15].

Hızlandırıcı tasarımında bazen spesifik paralel direnç olarak da adlandırılan birim uzunluk başına paralel direnç kullanılabilir. Bir hap kutusu kovuğu için spesifik paralel direnç, yalnızca frekansın bir fonksiyonu olarak basit bir şekilde ifade edilebilir [2].

$$r_s(M\Omega/m) \approx 1.28\sqrt{f_{rf}(MHz)} \quad \text{bakır için} \quad (3.65)$$

$$r_s(M\Omega/m) \approx 1.06\sqrt{f_{rf}(MHz)} \quad \text{alüminyum için} \quad (3.66)$$

Bir diğer parametre ise etkin paralel direnç (effective shunt impedance) ZT^2 olup, paralel direncin geçiş zaman çarpanının karesi ile çarpılmasıyla elde edilen bu değer, güç kaybını

en aza indireceği için yüksek olması beklenir. Böylece, normal iletken kovuklar genellikle burun koniklerine (nose cone) sahiptir ki bunlar geçiş zaman faktörünü ve eksen etrafındaki pik alanlarını azaltır [2]. Tasarım sürecinde, genellikle yüksek bir paralel direnç elde etmek adına bu burun bölgelerindeki tepe alanları en yüksek uygulanabilir değere kadar arttırılır.

Ulaşılabilecek maksimum pik alanları için Kilpatrick 1957’de bir çalışma yapmış ve sonucunda bir sınırlama getirmiştir [16].

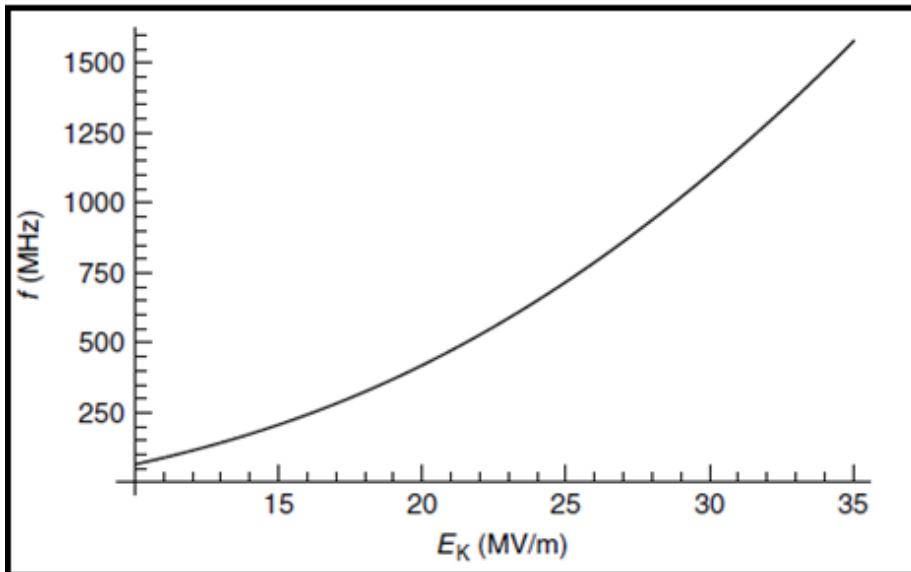
$$f[\text{MHz}] = 1.64E_k^2 e^{-8.5/E_k} \quad (3.67)$$

E_k MV/m cinsindendir. Kilpatrick formülünde E_k , artan frekans ile artar.

Kilpatrick kriteri, temiz vakum sistemleri yaygın olmadan önce bir dönemde elde edilen deneysel sonuçlara dayanmaktadır. Bu nedenle, Kilpatrick kriteri günümüz standartlarına göre muhafazakar kabul edilir. Bununla birlikte, aynı ifade, gerçek pik yüzey alanı E_s hariç, kovukları hızlandırmak için tasarım alanı seviyesinin seçilmesi için yaygın olarak kullanılır.

$$E_s = bE_k \quad (3.68)$$

Cesaret katsayısı (bravery factor) olarak bilinen b için, hızlandırıcı tasarımcıları tarafından seçilen değer aralığı 1-2 arasındadır. Daha büyük b değerleri, atma uzunlukları yaklaşık 1 ms'den az olan hızlandırıcılar için sıklıkla seçilir [12].



Şekil 3.9. Eş. 3.67’e göre çizilmiş Kilpatrick formülü

Geometrik paralel direnç (R/Q), paralel direncin, yüzey direncinden ve kovuk büyüklüğünden bağımsız kalite faktörüne oranıdır. Kovuğun depolanan enerjisini (U) içinden geçen demete ne kadar verimli bir şekilde aktardığının bir ölçüsüdür.

$$\frac{R}{Q} = \frac{V_{acc}^2}{\omega_0 U} \quad (3.69)$$

Hap kutusu kovuk için $R/Q = 196\Omega$ dur.

Güç kaybı, frekans ve depolanan enerji bilindiğinde kalite faktörü Eş. 3.70 kullanılarak hesaplanabilir.

$$Q = \frac{2\pi f U}{P_{diss}} \quad (3.70)$$

Kalite faktörüne ek olarak, geometri faktörü adı verilen yüzey direncine (R_s) bağlı olmayan bir değer vardır ve yalnızca kovuk geometrisine bağlıdır. Belirli bir geometri için geometri faktörünü hesaplamak için önce depolanan enerjiyi ve harcanan gücü hesaplamalıyız.

$$G = R_s Q = \frac{\omega U}{\frac{P_{diss}}{R_s}} \quad (3.71)$$

Hap kutusu kovuk için $G = 257\Omega$ dur.

Kovuk tasarımı için faydalı bir niceliktir çünkü R_s malzeme saflığı, yüzey kalitesi, kovuğun ısıtıl işlemi gibi elektromanyetik tasarım dışındaki birçok faktöre bağlıdır. Bu, farklı frekanslardan farklı geometrileri karşılaştırmak için de yararlı bir niceliktir [13].



4. TASARIMDA KULLANILAN PROGRAMLAR

4.1. POISSON/SUPERFISH

POISSON / SUPERFISH grup kodları, iki farklı sorunu çözmek için Klaus Halbach'ın teorik yardımı ile Ronald Holsinger tarafından yazılmış bir dizi programdır. Manyetostatik ve elektrostatik alanların hesaplanması ve iki boyutlu bir kartezyen yada üç boyutlu bir silindirik koordinatta ve RF kovuklarındaki rezonans frekanslarının ve alanların hesaplanması için kullanılır. Ayrıca bu kodlar, mıknatısların ve radyo frekansı kovuklarının tasarımında yaygın olarak kullanılır ve ortak programların yanı sıra ortak arayüzleri kullandıkları için birlikte gruplandırılmıştır [17].

Bu kodlar şu anda, Los Alamos Ulusal Laboratuvarı gözetiminde ve yönetiminde tutulmakta, güncellenmekte ve dağıtılmaktadır.

Bir mıknatıs veya kovuk probleminin başlangıcında, verilen giriş geometrisi için örgü ağı (mesh) oluşturmak üzere iki ortak program kullanır: AUTOMESH ve LATTICE. Bu programlar, diğer programlardan herhangi birinden önce yürütülür.

AUTOMESH, kullanıcıların çalışma yükünü azaltarak ve basitleştirerek LATTICE için girdi oluşturur.

Temel olarak, AUTOMESH girdisi, aşağıdakileri belirtir:

- ✓ Problem başlığı
- ✓ Örgü ağı boyutu ve problemi tanımlayan bölgelerin tanımı
- ✓ Her bölgenin sınırlarını ve her bir koordinat çiftini önceki çifte bağlayan çizgi türünü tanımlayan koordinat listeleri

AUTOMESH, verilen sınırı en doğru şekilde tanımlayan örgü ağı geometrisinde yolu belirler. AUTOMESH'in TAPE73 çıkış dosyasına yazdığı, LATTICE tarafından istenen verilerdir.

AUTOMESH, iki çıktı dosyası oluşturur: TAPE73 ve OUTAUT etkileşimli bir şekilde çalışıyorsa terminalde çıkış mesajları yazdırır.

Örgü ağı oluşturulduğunda ve uygun malzemeler ve sınır şartları belirlendiğinde, sonlu fark denklemleri, denklem çözme programlarından biri tarafından kurulur ve çözülür.

Kovuk problemleri için bu programlar SUPERFISH ve SFO1 iken, magnet problemleri için PANDIRA, POISSON veya MIRT olabilir.

POISSON ve PANDIRA programları elektrostatik ve manyetostatik problemleri çözer. POISSON, potansiyelin türevlerini, yani alanlar ve gradyenlerini hesaplar, depolanan enerjiyi hesaplar ve potansiyelin harmonik (çok kutuplu) analizini gerçekleştirir. Girdi dosyasında KROB=0 olarak belirtilmiş problemler için AUTOMESH'ten sonra çalışır.

PANDIRA buna ek olarak kalıcı magnet problemlerini çözer.

POISSON, 'SPOR' yöntemi olarak adlandırılan bir yöntem ile problemleri çözmektedir. PANDIRA ise "direkt" bir yöntemle çözülür ve sadece doğrusal olmayan problemler için yineleme gerekir.

Ağın topolojik olarak düzenli olması, sonlu fark denklemlerinin katsayılı matrisinin herhangi bir problem için aynı yapıya sahip olduğu anlamına gelir. Bu yapı her zaman aynı olduğundan, tipik olarak binlerce denklem içeren bu sistemleri çözmek için çok etkili bir seyrek matris yöntemi kullanılır. SUPERFISH, duran dalga RF kovuklarında rezonans frekanslarını belirlemek için öz değer problemi için doğrudan bu çözüm yöntemini kullanır.

TEKPLOT, POISSON/SUPERFISH grup programlarında, programın çoğu tarafından oluşturulan verilerin grafik görüntüsünü sağlayan etkileşimli bir programdır. Şunları çizdirir:

- ✓ LATTICE çalışmasından elde edilen fiziksel sınırlar ve örgü ağı
- ✓ POISSON/PANDIRA/MIRT çalışmasından elde edilen eş potansiyel çizgiler
- ✓ SUPERFISH/SFO1 çalışmasından elde edilen alan çizgileri

FORCE, POISSON veya PANDIRA çözümlerinden potansiyel olarak bobinler ve metal bölgelerindeki kuvvet ve torkları hesaplar.

MIRT, kullanıcı tarafından tanımlanan bir alan spesifikasyonuna göre magnet profillerini, bobin şekillerini ve mevcut yoğunlukları optimize eder.

SUPERFISH, RF boşluğunda iki boyutlu kartezyen veya üç boyutlu silindirik simetriye sahip TM ve TE rezonans frekansları ve alan dağılımlarını çözer.

Silindirik simetrik kovuklar için sadece azimutal simetrik modlar bulunur. Modlar birer birer bulunur. SUPERFISH ayrıca, TE ve TM dalga kılavuzu modlarının kesim frekanslarını ve mod modellerini de çözer.

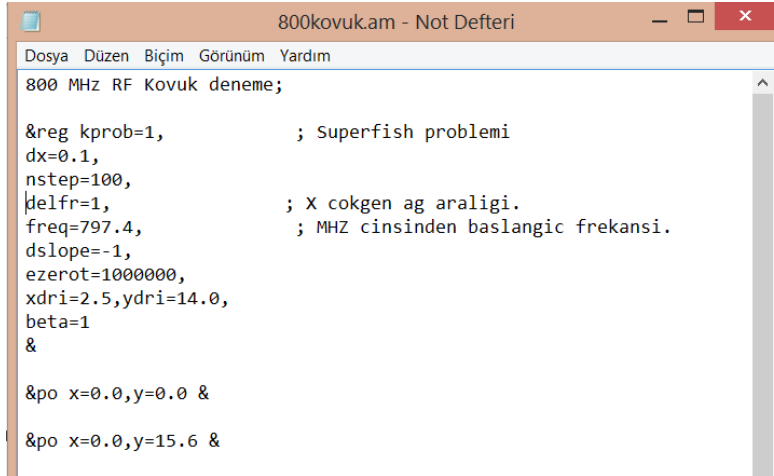


Şekil 4.1. POISSON/SUPERFISH işleyiş şeması

Bilgisayara SUPERFISH kurulduğunda, bir LANL dosyası ve alt dosyalar oluşur. Bu ana dosyanın içinde birçok problemin örnek dosyasından oluşan bir EXAMPLES dosyası ve yardımcı bilgiler içeren DOCS adında bir dosya bulunmaktadır.

EXAMPLES dosyasında elektrostatik, manyetostatik, PARMELA, TRACE 3D gibi dosyalar ve bu başlıklarla alakalı problemler bulunmaktadır.

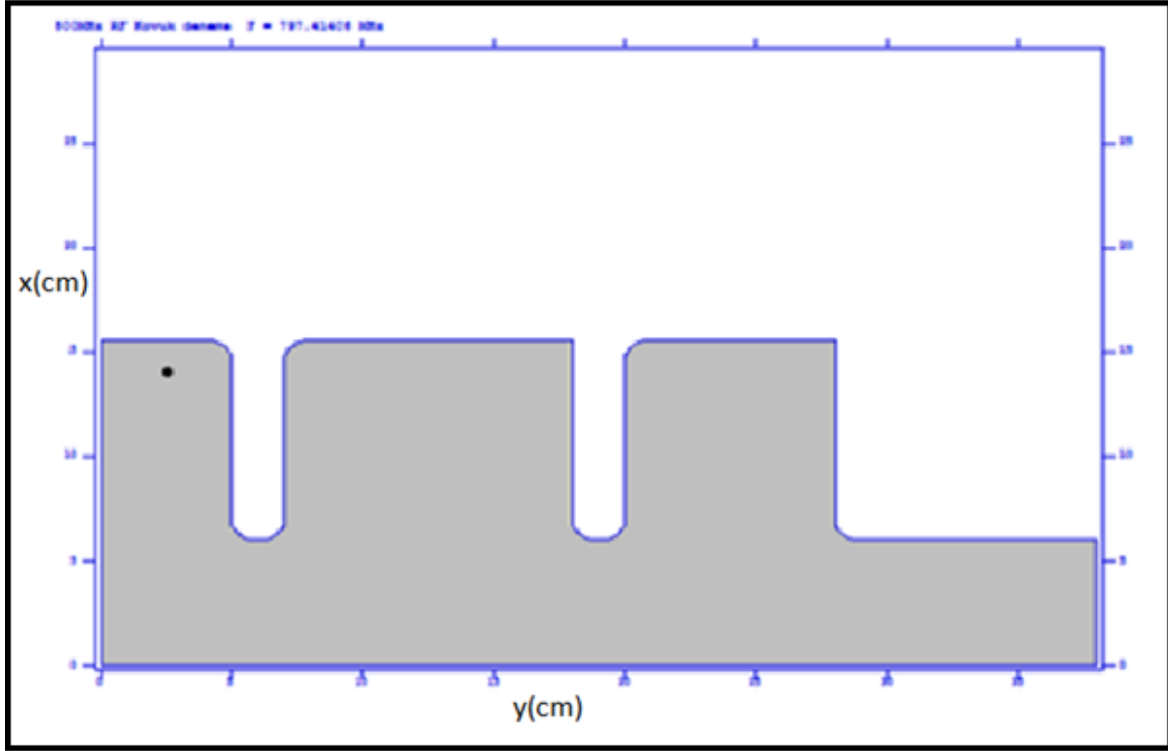
SUPERFISH'te kullanılmak üzere hazırlanan girdi dosyası için bir örnek şekildeki gibidir. Geometri adım adım koordinatlar vererek ve bu koordinatları birbirine bağlayan düz çizgi ya da eğrilerden oluşmaktadır.



Şekil 4.2. SUPERFISH girdi dosyası örneği

Girdi dosyasının ilk kısmında problemin tanımlandığı değişkenler görülmektedir. Örneğin, frekans taramasının hangi aralıkta ne adımla yapılacağı bu kısımda tanımlanır. İkinci kısımda ise simülasyonu yapılacak geometri çizilir. Not defterinde oluşturulan bu dosya 'am' uzantısıyla kaydedildiğinde dosyanın sembolü bir balığa dönüşür. Bu dosya çalıştırıldığında oluşturduğu sonuç dosyalarından birinde kovuğun geometrisini sunar. Elektrik ve manyetik alan desenlerini de çizen bu dosya için geometri çıktısı şekil 4.3'teki gibidir.

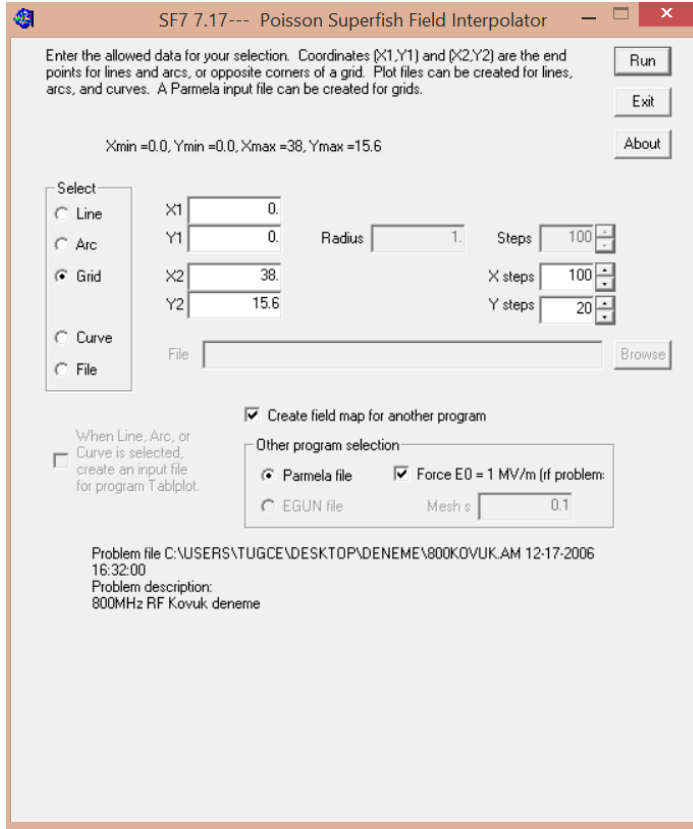
Girdi dosyasında KPROB=1 girildiğinde RF problemlerini çözen FISH çağırılmış olur ve AUTOMESH'ten sonra çalışır. Kod, AUTOMESH tarafından oluşturulmuş dosyayı okur ve çıktı dosyalarını hazırlar. Çıktı dosyalarında kabaca, problemin tanımı, frekans taramasının kaydı, çoğu tasarım parametrelerinin içinde geçen ve program tarafından hesaplanmış yararlı niceliklerin bir listesi bulunur. Eğer problemde bir hata varsa hata mesajını da program çoğu zaman bir dosyada sunar.



Şekil 4.3. SUPERFISH tarafından oluşturulan RF kovuk geometrisi

SUPERFISH problemleri için SFO isimli çıktı dosyası, problem değişkenlerini, güç kayıplarını, kovuk boyunca alan değerlerini, kovuk verisinin bir özetini ve kod tarafından hesaplanan diğer nicelikleri (kalite faktörü, geçiş zaman çarpanı, depolanan enerji gibi) içerir.

SF7, çizgiler, yaylar, dörtgen ızgaralar veya kullanıcı tarafından tanımlanmış eğriler üzerindeki alanlar için ara değer saptama (interpolation) yapan bir art işlemcidir ve 2 boyutlu alan haritalarını PARMELA ve EGUN programları için bir çıktı dosyasında yazabilir. POISSON/SUPERFISH çözüm dosyasına sağ tıklayıp “interpolate (SF7)” seçildiğinde ve şekil 4.4’teki ekrandan gerekli seçimler yapıldığında program PARMELA’da girdi dosyası olarak kullanılmak üzere T7 uzantılı bir dosya oluşturur. Programın çalışabilmesi için bu dosyanın adının diğer dosyalarla aynı olması gerekliliğine dikkat edilmelidir.



Şekil 4.4. SUPERFISH ara değer hesaplama işlemcisinin ekran görüntüsü

4.2. PARMELA

PARMELA kelimesi; Türkçe karşılığı "Elektron Doğrusal Hızlandırıcılarda Faz ve Radyal Hareket" olan "Phase And Radial Motion in Electron Linear Accelerators" tanımlamasının oluşturduğu kelimelerin baş harflerinden meydana gelmiştir. Kod, 1980 yılında Kenneth R. Crandall tarafından ABD Los Alamos laboratuvarında yazılmıştır [18].

PARMELA elektron doğrusal hızlandırıcıları için çok parçacıklı demet dinamiği simülasyon kodudur ve bir demet hattı veya doğrusal hızlandırıcı tasarlamaz. Kodun girdi dosyası bir dizi anahtar kelimeyle tanımlanır ve demet hattı bileşenleri ve hızlandırıcı yapıları için veri sağlar [19].

PARMELA, demetin + z yönünde hareket ettiği ve + y yukarı bakarken + x'in sağa yönlendirildiği koordinat sistemini kullanır.

PARMELA, hızlandırıcı elemanların hemen hemen tamamı boyunca parçacıkları izlemek için kullanılabilir. Örnek olarak; RF kovuklar, duran dalga ve ilerleyen dalga doğrusal hızlandırıcılar, iki ve dört kutuplu mıknatıslar verilebilir.

PARMELA, diğer kodlarla hesaplanan elektromanyetik alanları kullanabilir. Bu alanlar RF elektromanyetik, durgun manyetik veya elektrostatik olabilir. Bu üç tipin tamamı için 2 boyutlu silindirik simetrik ya da 3 boyutlu alan haritaları kullanılabilir.

Elektromanyetik alanlar, girdi dosyası adı verilen bir kontrol dosyası veya başka bir kod (SUPERFISH) tarafından oluşturulan bir alan haritasını içeren dosyalar tarafından tanımlanır.

PARMELA'nın girdi dosyası anahtar kelime stiline dayanmaktadır. Anahtar kelimeler, alınacak eylemi veya üretilecek çıktının türünü belirleyen demet hattı öğelerini tanımlar. PARMELA çalışırken kod, anahtar kelimeleri ve girdi dosyasının satır parametrelerini satır satır okur ve işler. Hesaplamaların süresi özellikle girilen parçacık sayısına göre değişkenlik gösterir. Simülasyonda kullanılacak maksimum parçacık sayısı bilgisayarın hafızası ile sınırlıdır. Uzay yük etkisi de eklendiğinde süre biraz daha uzayabilir.

PARMELA zamanı bağımsız değişken olarak kullanır ve yerçekimi göz ardı edilir.

Şekil 4.5' te PARMELA için örnek bir girdi dosyası görülmektedir [20].

```

run 1 2 2856. -.00113 1.e-5
title
PHOTOCATHODE RF GUN + SLAC Linac.
INPUT 9 9999 9. .1 30. 5 0 3 5
Cathode 0 1 1 0 -.5
poisson 0.00 0.5 0 0 0 0 1
ecompl0.po7
CELL 2.625 1. 1 0. 63.75 1 5 -1
cfield 1
atfnum.t7
cell 2.625 1. 1 180. 63.75 1 5 1
cell 5.2464 1. 1 180. 32.05 2 5 -1
drift 10.0 5 1
drift 10.0 5 1
cell 5.2464 0.9547 1 90.0 4.7452 2 5 1 2856.
cfield 2
slac1.t7
trwave 1.75 0.9547 1 0.0 10.6289 1 5 2856. 1 -5 5 .666667 84
trwave 3.50012 1.311 1 0.0 10.6289 1 5. 2856. 1
...
trwave 3.50012 0.955 1 0.0 10.6289 1 5. 2856. 1
trwefield 1
slac2.t7
slac2b.t7
adjust 4 7 7 120 7
adjust 4 8 97 120 9
zout 1000 30 0 80 .8
OUTPUT 5
scheff 2.86 .33 3 20 1000 0 0 7 1.5 0
start 39. 1. 330 1 10
continue 15 1500 1 3
end

```

Şekil 4.5. PARMELA için örnek girdi dosyası

Satırlar (komutlar) kart diye de adlandırılır. Bu kartların her birinin görevi, içeriği ve hangi satırın hangi değişkenin nasıl ve hangi birimde yazılacağı PARMELA'nın manuelinde mevcuttur [18]. Probleme göre girdi dosyasının içereceği kartlar ve bileşenleri değişkenlik gösterecektir.

RUN kartında gönderilen parçacık sayısı, çalışma frekansı, parçacıkları giriş enerjisi mevcuttur.

CELL kartı bu çalışma için SUPERFISH'te simülasyonu yapılan kovuğun uzunluğu, parçacıkların kovuğa gönderildikleri faz açısı, hızlandırma alan gradyenini içermektedir.

SUPERFISH'ten elde edilen alan haritası (SF7 uzantılı dosya) da girdi dosyasında bir satıra eklenir.

COIL kartı eklenen magnetlerin konumlarını içermektedir.

Uzay yük etkisi 2 boyutlu ya da 3 boyutlu olarak hesaplamalara dahil edilebilir. 3 boyutlu uzay yük etkisi, SPCH3D satırını kullanarak çağırılır. Ayrıca, SCHEFF komutu daha sağlıklı

sonuç elde etmek adına uzay yük etkisini de hesaba katarak problemi çözmek için eklenmelidir.

RUN ile başlayan girdi dosyası tüm kartlar eklendikten sonra END satırı ile bitirilir ve “acc” uzantısı ile kaydedilen dosya çalıştırılmaya hazır hale gelir.

PARMELA, parçacığı 6 boyutlu faz boşluğunda $(x, xp, y, yp, \phi, E_k)$ izler. (x, y) cm cinsinden yatay ve dikey konum, (xp, yp) boyutsuz enine momentum bileşenleri, ϕ derece cinsinden boyuna yer değiştirme açısı ve E_k MeV cinsinden parçacığın kinetik enerjisi.

PARMELA'nın varsayılan çıktı dosyası, her demet hattı elemanının (beam line element) çıkışında 6 boyutlu parçacık koordinatlarını içeren TAPE2.T2'dir. Grafik çıktısı için ayrıca PARGRAF ve TABPLOT ardişlemcileri de kullanılabilir.

PARGRAF, PARMELA'nın iki çıktı dosyasına yazdığı parçacıkların koordinatlarını kullanan grafik kodudur. Bir dosya, girdi dosyasının çıktı istediği her bir elemanın sonundaki parçacık koordinatlarıdır. Diğer dosya, bir zaman adımının sonunda parçacık koordinatlarını içerir. Çıkışın istendiği zaman adımları uygun “BAŞLAT”, “DEVAM” veya “TEKRAR BAŞLAT” satırlarında ayarlanır [20].

```
subnum 8
output 2 1 1 500
optcon 11 12 0 340 10 0 5 1 200 1
begin
subnum 7
output 2 1 1 500
optcon 2 0.1 0 0 0 0 0
begin
subnum 5
output 2 1 1 2000
optcon -1. 1.0 8 1. 2 1. 2 200 0
begin
end
```

Şekil 4.6. PARGRAF örneği

OUTPAR dosyası problem değişkenlerinin bir özeti ile birlikte problem bitiminde hesaplanan nicelikleri sunar. Ayrıca, yayınım ve manyetik alan gibi hesaplanması istenen değerler için de bir grafik çıktısı oluşturur.

PARMELA ile kullanmak amacıyla grafik için birkaç dosya mevcuttur. Çalışma şekli parçacık koordinatlarını kaydetmektir ve diğer bilgiler disk dosyasına yazılır ve PARMELA'nın çalışması bittikten sonra bu disk dosyaları kullanıcı programları tarafından işlenebilir. Bunlar; parmout, parmdesz, parmdes, parmtrch, parmemit, parmsnap, parmback, parmback1 ve parmstat isimli dosyalardır [18].



5. SONUÇLAR

Teknolojik ilerlemeler dünyayı küçülttüğü gibi bilgiye ulaşma zamanını da saniyelere indirmiştir. Hatta teknolojik gelişmeler laboratuvarlarda günlerce aylarca hatta yıllarca sürececek bir çalışmayı bilgisayar ortamında uygun bir altyapı ve programlama sistemiyle saatlere haftalara aylara taşımıştır. Bu sistemler sayesinde zamandan paradan tasarruf yapıldığı gibi daha kesin sonuçlar alınması ve yapılan deneysel çalışmaların sayesinde benzer tasarımların hayata geçirilmesi mümkündür.

Bu çalışmada 2+1/2 hücreli, salınım frekansı 800 MHz olan bir RF kovuk tasarımı yapıldı. Çalışma boyunca, kovuğun 2 boyutlu tasarımı için SUPERFISH paket programı (program, Los Alamos National Laboratory'e ait olup Accelerator Code Group'ta internet sayfalarında açık erişimdedir.) ve demet dinamiği simülasyonları için PARMELA programı kullanıldı.

Tasarıma başlarken ilk parametre olarak RF frekansı belirlenmelidir. Frekans seçiminde tüm ayrıntıların dikkatlice gözden geçirilmesi gereklidir. Çünkü frekans diğer birçok nicelik için anahtar rolü oynar (yük üretimi, kovuğun boyutları ve vakum ihtiyacı gibi). Tasarıma bu parametre ile başlanmalı ve diğer tüm çalışma parametreleri buradan yola çıkarak optimize edilmelidir.

Ulaşılabilecek maksimum gradyen, frekansın bir fonksiyonudur [21]. Dolayısıyla, frekans seçimi, gradyenle bağlantılı olan yük üretiminde etkilidir.

$$E_{0,max}[MV/m] = 8,47 + 1,57\sqrt{f[MHz]} \quad (5.1)$$

Kovuğun hacmi frekansın kübü ile ters orantılıdır ($V \sim f^{-1/3}$). Yüksek frekanslarda kovuk hacmi küçük frekanslara oranla daha küçüktür. Küçük boyutlu kovuklarda iyi vakum yakalamak büyük hacimlilere kıyasla daha kolay olmasına rağmen üretimin hassasiyeti açısından bir dezavantaj söz konusudur.

Seçilen frekans aralığında, dünyada çalışan mevcut sistemleri incelemek bu aşamada yararlı olacaktır. Dikkat edilmesi gereken önemli bir husus da şudur ki; frekansa karar verip tasarıma başladıktan sonra frekans seçiminde değişiklik yapmak, özellikle elde edilmesi beklenen ya da istenen diğer tüm niceliklerin de değişimine sebep olacağından, yapılan tüm

işlere sıfırdan başlanması anlamına gelir. Frekansın diğer tasarım parametreleri ile nasıl bağlantılı olduğu hakkında kısa bir özet olması açısından, maddeler halinde sıralanacak olursa aşağıdaki gibi yazılabilir [8]:

- Paralel direnç $R \sim f^{1/2}$
- Toplam RF pik gücü $P_{tot} \sim f^{-1/2}$
- Depolanan enerji: $U \sim f^{-2}$
- Kalite faktörü $Q \sim f^{-1/2}$
- Minimum depolanan enerji $R/Q \sim f$
- Güç dolum zamanı $t_F \sim f^{-3/2}$

SUPERFISH tasarımı için girdi dosyası şekil 5.1’ deki gibidir. Programın çalışması bittiğinde kovuğun 2 boyutlu geometrisini sunar. SUPERFISH 2 boyutlu kartezyen koordinatlarda silindirik simetrik çalıştığından, yarı geometri tanımlamak, problemi çözmek açısından yeterli olacaktır.

```
800MHZ RF Kovuk deneme;

&reg kprob=1,
dx=0.1,
nstep=100,
delfr=1,
freq=800,
dslope=-1,
ezerot=1000000,
xdri=2.5,ydri=14.0,
beta=1
&

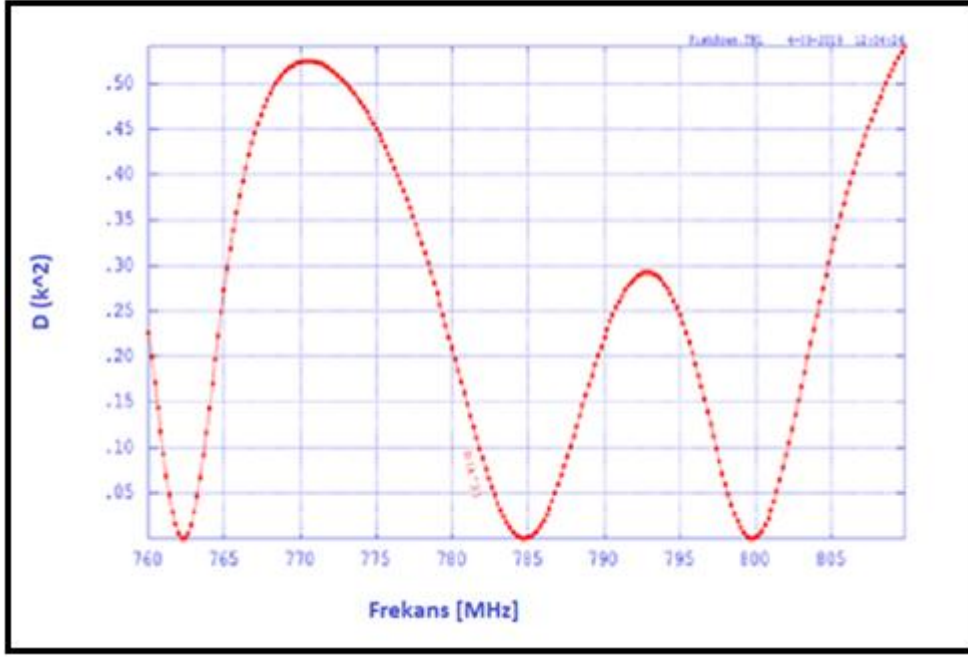
&po x=0.0,y=0.0 &

&po x=0.0,y=15.6 &

&po x=4.0,y=15.6 &
```

Şekil 5.1. SUPERFISH için hazırlanan örnek girdi dosyası

Kovuğun 2 boyutlu görüntüsü ve kovuk boyunca elektrik alan davranışını gösteren şekil 5.2 SUPERFISH tarafından çizilmiştir. Elektrik alan çizgilerinin hücreler içinde ve özellikle kovuklar arası geçiş bölgelerinde düzgün olması, hızlandırma verimi açısından önemlidir.



Şekil 5.3. Dricklet fonksiyonu eğrisi

Kovuk üzerinde oynamalarla sonuç parametreleri değiştirilebilir. Örneğin; CERN'in RF tabancası tasarımında iyileştirme, yüksek yük için, yarım hücrenin duvarına giriş açısı eklenerek, enine odaklanmayı sağlamak üzere yapılmıştır [22].

Kalite faktörünün verimin bir ölçütü olduğu düşünülerek olabildiğince yüksek değerde olması beklenir. Normal iletken kovuklarda kalite faktörünün beklenen değerinin 10^4 mertebesinde olduğu bilinmektedir. Tasarımı yapılan kovuk için bu değer 25000,1 olarak SUPERFISH tarafından hesaplanmıştır.

Dikkat edilmesi gereken bir diğer önemli tasarım parametresi olan paralel direnç 13,345 MOhm/m hesaplanmıştır. Eş. 3.64'te açıkça görüldüğü gibi, minimum güç kaybıyla maksimum bir hızlanma voltajı elde etmek için paralel direncin yüksek olması beklenir.

R'yi artırmanın bir diğer yolu, belirli bir hızlanma voltajı için depolanan enerjiyi en aza indirmek amacıyla geometriyi optimize etmek için R/Q oranını arttırmaktır.

SUPERFISH tarafından hesaplanan SFO uzantılı dosyada bu parametrelere ulaşılabilir. Ayrıca; kovuk boyunca alan değerleri, maksimum alanlar, geçiş zaman çarpanı, R/Q değerleri de bu çıktı dosyasında mevcuttur. Bu dosyadan elde edilen verilerle oluşturulan çizelge aşağıda sunulmuştur.

Çizelge 5.1. SUPERFISH tarafından hesaplanmış RF parametreleri

Frekans	797,41406 MHz
Çalışma sıcaklığı	20°C
Kalite faktörü (Q)	25001,4
Shunt empedans	13,345 MOhm/m
Güç kaybı	28,4758 kW

Özet olarak; bir kovuk tasarlarken öncelik, kovuk içerisinde istenen alanları verecek geometriyi bulmaktır. Kovuk duvarlarındaki kaybolan enerjiyi en aza indirmek ve kovuk içinde depolanan enerjiyi maksimuma çıkarmak gereklidir.

Fiziksel kısıtlaması olan parametrelerin değerleri belirlenip kovukta iyileştirmeler bu yönde yapılmalıdır. Bununla birlikte, bir kovuk tasarlarken dikkat edilmesi gereken önemli bir diğer husus, bazı yapılarda küçük hatalar bile büyük elektrik alan bozulmalarına sebep olacağından, mekanik olarak üretim kolaylığı olmalıdır.

2 boyutlu tasarım tamamlandıktan sonraki adım demet dinamiği simülasyonu olacaktır. Simülasyona başlamadan önce dikkat edilmesi gereken iki önemli husustan bahsedilecek olursa bunlar; parçacıklar ile alanlar arasındaki eş zamanlılığı sağlamak ve demetin en küçük alana sıkıştırılıp hızlandırıldığından emin olmak olacaktır.

Kovuk geometrisini ve alanları tanımlamak için SUPERFISH'ten elde edilen alan haritası PARMELA'da kullanılmaktadır. Bu iki program birbirini destekler niteliktedir.

PARMELA demet bileşenlerinin incelenmesi için olanak sağlar. Çeşitli demet dinamiği simülasyonları ile demeti karakterize etmeye yardımcı olur.

PARMELA simülasyonunda, kovuğa kaç parçacık gönderileceğinin kararı tasarımcıya aittir. Parçacık sayısı bilgisayarın hafızası ile sınırlıdır. Program sonlandığında iyi parçacık sayısını sunar. İyi parçacık kavramı kovuk boyunca hızlanan demette kovuktan çıkmayı başarabilen yani aslında kalan parçacık sayısını tanımlamakta kullanılır. Maksimum verim için minimum parçacık kaybı beklenir. Bununla birlikte bir diğer ve asıl önemli husus bu parçacıkların oluşturduğu demetin hacminin olabildiğince küçük bir alan kaplamasıdır. Buna demet yayılımı denir ve en basit tabirle demet kalitesini belirler.

```

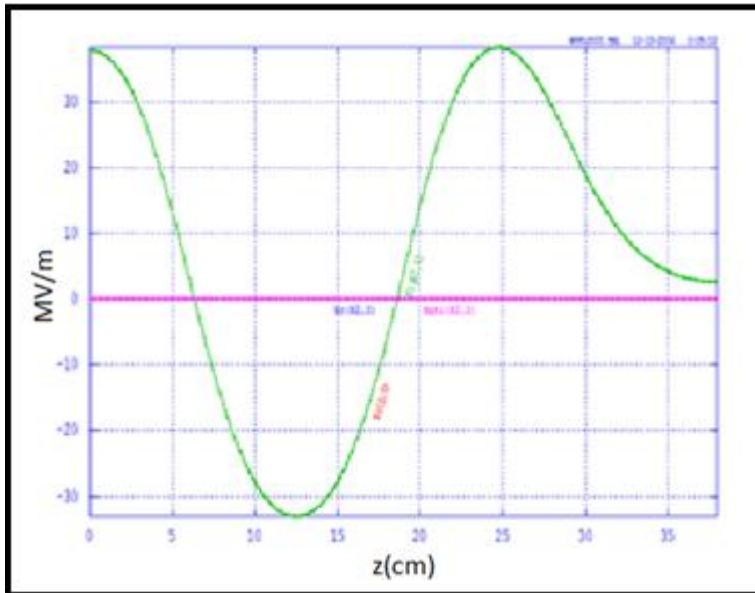
800 MHz RF kovuk
run 1 999999 797.4 0.0 1e-3 1
cell 38 6 1 131 28 1 5.0 -1
cfield 1
800KOVUK.T7
output 5
input 9 999999 0.1 1 3 10

```

Şekil 5.4. PARMELA girdi dosyası

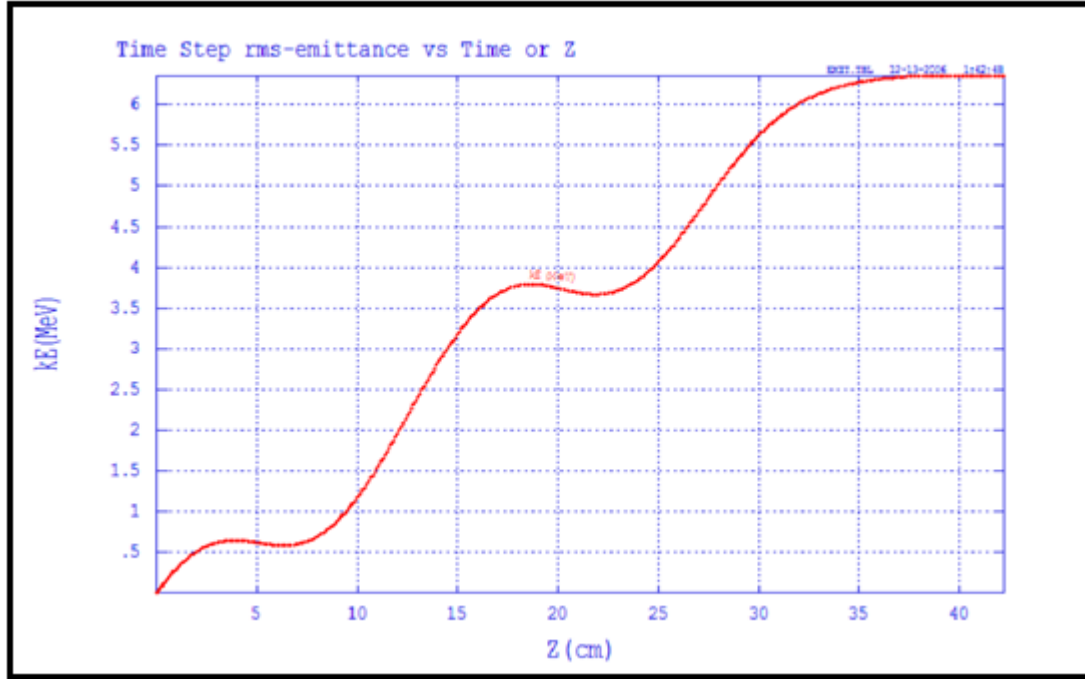
Şekil 5.4'te PARMELA için bir girdi dosyasının birkaç satırı mevcuttur. Kovuğa elektronlar başlangıç enerjisi 1 keV olarak gönderilmiştir. CELL satırında parçacıkların alanlar ile arasındaki eş zamanlılığı sağlama parametresi olan faz açısının 131° seçildiği görülmektedir. Çıkan demette kaybın az olması ve demet kararlılığı açısından doğru faz açısının seçimi önemlidir. Yanlış faz açısıyla gönderildiğinde parçacıklarda geri hızlanma söz konusu olacaktır ki bu istenmeyen bir durumdur.

Çıktı dosyalarından ilki; kovuk boyunca hızlandırma alan gradyeninin değişimini gösteren grafik şekil 5.5'teki gibidir. Bu eğrinin bir sinüs eğrisi olduğu görülmektedir ve kovuk boyunca simetrik olması beklenir.

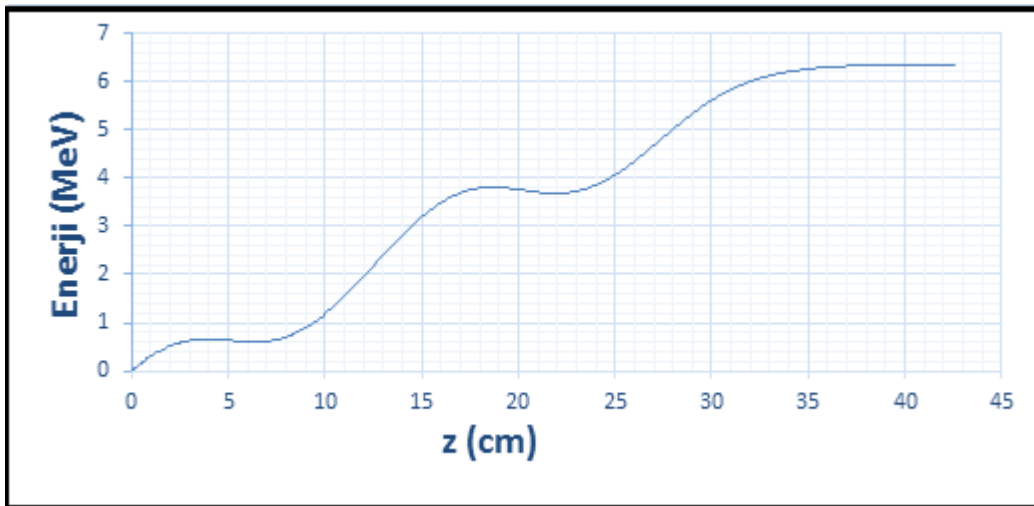


Şekil 5.5. Kovuk boyunca hızlandırma alan gradyeninin değişimi

Kovuk boyunca parçacığın kinetik enerjisini gösteren eğri şekil 5.6'daki gibidir. Şekil 5.6 (a) program tarafından çizilmiş olup (b) grafiği ise program çıktısından alınan verilerle çizdirilmiştir. Elektronların giriş enerjisi 1keV olup 28 MV/m hızlandırma gradyeni etkisiyle 38 cm sonunda yaklaşık 6,42 MeV e ulaşmıştır.



(a)

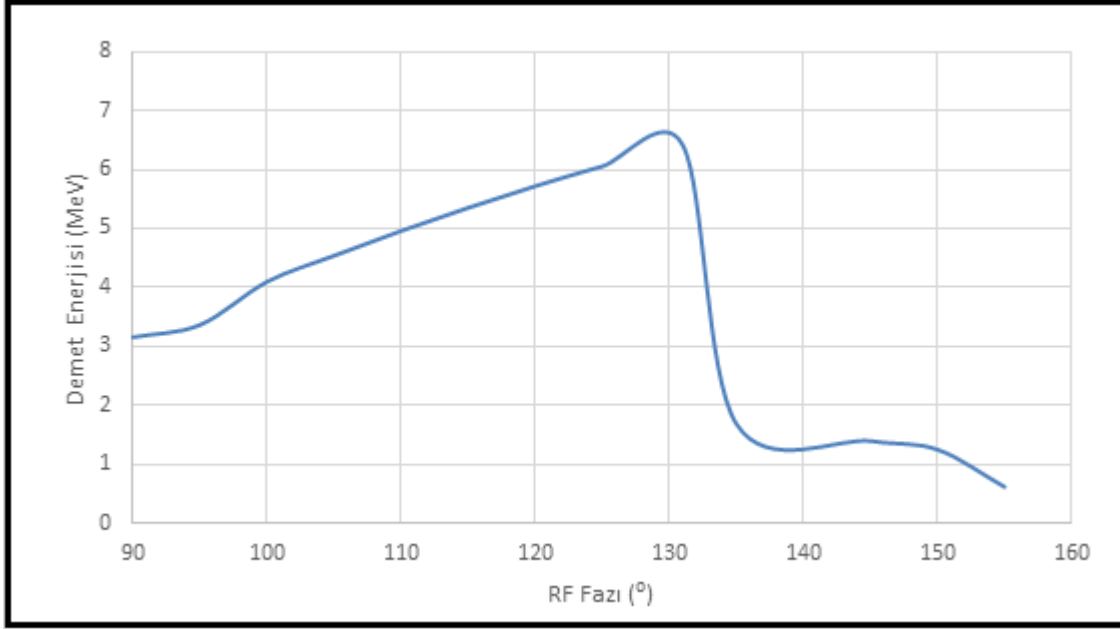


(b)

Şekil 5.6. (a) (b) Kovuk boyunca kinetik enerji kazanımı

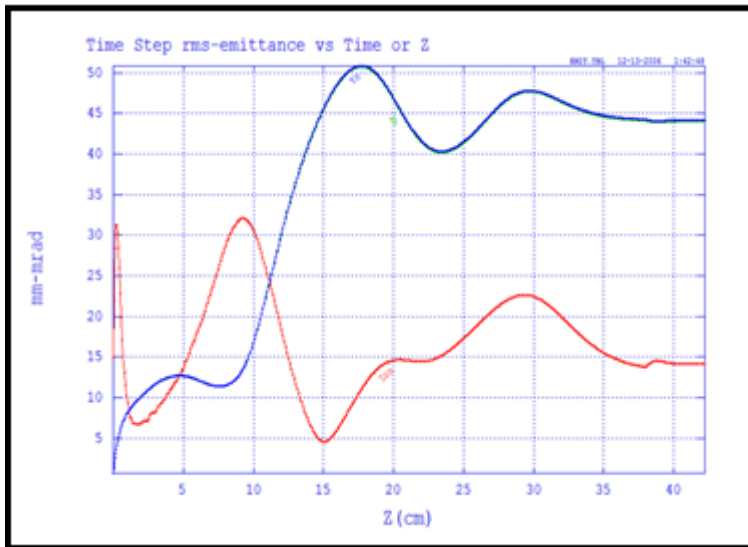
Doğru faz açısı belirlenene kadar küçük aralıklarla tarama yapılmaya devam edilmelidir. Maksimum hızlandırma veriminin olduğu faz açısı, tasarımı yapılan kovuk için 131°

bulunmuştur. Belirlenen faz açısı civarında yapılan tarama sonucu demet enerjisindeki değişimi gösteren grafik aşağıdaki şekilde verilmiştir.



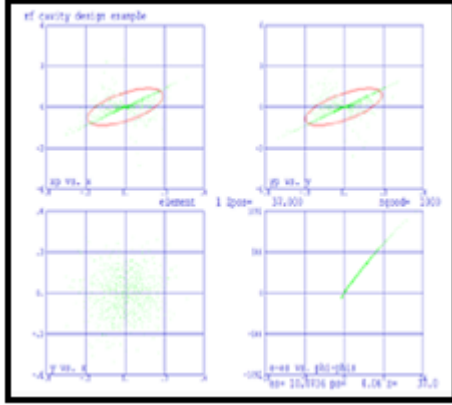
Şekil 5.7. Giriş faz açısına göre çıkan demet enerjisindeki değişim

PARMELA çıktı dosyalarından bir diğeri ise kovuk boyunca demet yayılımı için çizdirdiği eğrinin grafiğidir. Enine normalize yayılım (kırmızı eğri) 25 mm.mrad değerinin altında bulunmuştur ki bu değer sağlıklı bir demet için kabul edilebilir aralıktadır. Ayrıca PARGRAF kullanılarak demet görüntüsü kovuk boyunca izlenebilir.



Şekil 5.8. Kovuk boyunca demet yayılımı

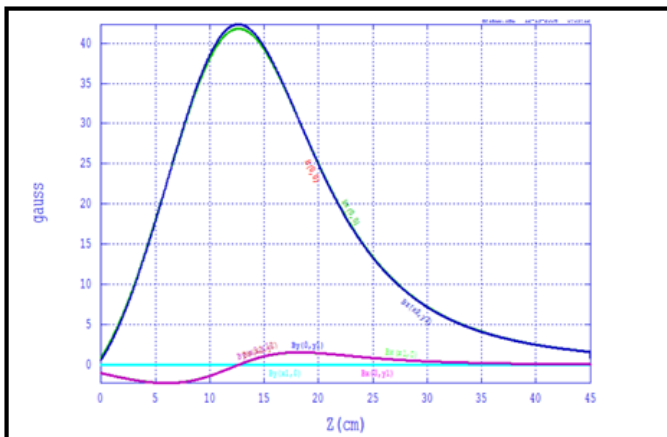
Demetteki her paketçik 3 konum ve 3 momentum koordinatı olmak üzere toplamda her paketçik için 6 koordinatla tanımlanır. Yani, her bir paketçik 6 boyutlu faz uzayında bir nokta ile tanımlanır. Demet faz uzayı hatları, bir doğrusal hızlandırıcıda elips olmaya yatkın bir şekildedir.



Şekil 5.9. Demetin PARGRAF görüntüsü

Uzay yük etkisi hesaplamaları SCHEFF komutu ile yapılır ve buradaki asıl önemli parametre demet akımıdır. Demet akımının yüksek olması istenir fakat akım değeri arttıkça demet yayını da artacağından demet kalitesizleşecektir ve bunun önüne geçmek için odaklayıcı magnetlere ihtiyaç duyulacaktır. Şekil 5.9, magnetler eklenmeden önceki dağılmış demet görüntüsü için örnek olarak gösterilebilir.

COIL satırı kullanılan magnetlerin alan değerleri ve konumlarını tanımlamak için kullanılmıştır. Kullanılan iki magnetten biri kovuk girişinde, katottan gelen demetin kalitesini artırmak için, diğeri ise 12. cm’de dağılan demeti toplamak için kullanılmıştır. PARMELA da hesaplanan ortalama alan için değer maksimum 40 G civarındadır.



Şekil 5.10. Kovuk boyunca manyetik alan

Bu çalışmada sunulan 2 boyutlu SUPERFISH tasarımına ve PARMELA simölasyonuna ek olarak daha detaylı bir şekilde çalışmaya devam edilmek istenirse bir sonraki adım 3 boyutlu bir analiz yapmak olacaktır. Bunun için COMSOL Multiphysics gibi bir program kullanılabilir. Özellikle, eğer üretime geçilecek bir parçanın tasarımı yapılıyorsa, gerçeğe daha yakın sonuçlar elde etmek açısından buna gerek duyulacaktır.



KAYNAKLAR

1. Lilley, J. (2002). *Nuclear Physics: Principles and Applications*. USA: John Wiley&Sons, 171-173.
2. Wiedemann, H. (2015). *Particle Accelerator Physics* (Fourth Edition). New York: Springer, 603-623.
3. Krane, S. K. (2002). *Introductory Nuclear Physics*. Ankara: Palme Yayıncılık, 559-563.
4. Gerigk, F. (2011). Cavity Types. In Bailey R. (Ed.), *CERN Accelerator School (CAS)*. Geneva: CERN, 277-298.
5. Lee, S.Y. (2011). *Accelerator Physics* (Third Edition). USA: World Scientific, 1-24.
6. Wangler, T.(1998). *Principles of RF Linear Accelerators*. USA: John Wiley&Sons, 6-15.
7. Lidbjörk, P. (1994). Microtrons. In Turner, S. (Ed.), *CERN Accelerator School (CAS)*. Geneva: CERN, 971-981.
8. Chao, A. W., Moser, H. O., Zhao, Z. (2004). *Accelerator Physics, Technology And Applications: Selected Lectures Of OCPA International Accelerator School 2002*. Singapore: World Scientific, 256-291.
9. Griffiths, D.J. (2005). *Introduction to Electrodynamics* (Third Edition). Ankara: Gazi Kitabevi, 336.
10. Şimşek, S., Işık, C., Topuz, E. (2015). *Mikrodalga Tekniği: Pasif Devreler ve Çözümlü Problemler* (İkinci Basım). İstanbul: Papatya Yayıncılık, 135-144.
11. Vretenar, M. (2014). Linear Accelerators. In Bailey R. (Ed.), *CERN Accelerator School (CAS)*. Geneva: CERN, 294-330.
12. Wangler, T. (2008). *RF Linear Accelerators* (Second Edition). USA: John Wiley&Sons, 67.
13. Holzbauer, J. (2012). *RF Theory and Design*. USA: Fermilab, 1-20.
14. Sharma, V. (2008). *RF Cavity and RFQ Design and Simulation*. USA: Physics Division Argonne National Laboratory, 4-5.

15. Ghasemi, F., Davani, F. A., Rashti, M. L. and Abbasi, M. M. (2012). Implementation of MainWaveguide Cavities of Electron Linear Accelerator Using Integrated and Separable Methods and Comparing Their Performance. *International Journal of Electromagnetics and Applications*, 2(6), 163-168.
16. Hyder, A. D., Rose, M. F. and Guenter, A. H. (1988). *High-Brightness Accelerators*. USA: Springer, 497-506.
17. Menzel, M. T. and Stokes, H. K. (1987). *User's Guide for the POISSON/SUPERFISH Group of Codes*. USA: Los Alamos National Laboratory, 1-88.
18. Mouton, B. (1997). *The PARMELA Program (Phase and Radial Motion in Electron Linacs)*. FRANCE: Laboratoire de L'accelerateur Lineaire, 7-41.
19. Garnett, R. W. (2005). *Status of the Los Alamos Accelerator Code Group*. USA: Los Alamos National Laboratory, 3-5.
20. Young, L. and Billen, J. (2004). *The Particle Tracking Code PARMELA*. Proceedings of the 2003 Particle Accelerator Conference, USA.
21. Mete, Ö. (2011). *Study and Experimental Characterization of a Novel Photo Injector for the CLIC Drive Beam*, Doktora Tezi, Ecole Polytechnique Fédéral de Lausanne, İsviçre, 123-136.
22. Roux, R., Bienvenu, G., Prevost, C. and Mercier, B. (2004). *Design of a RF Photo-Gun*. Geneva: CERN, 1-12.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : DAĞ, Tuğçe Sevinç
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 01.01.1990, Ankara
Medeni hali : Evli
Telefon : 0 (507) 211 25 19
e-mail : tugcesevincturkmen@gmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi / Fizik	Devam ediyor
Lisans	Gazi Üniversitesi / Fizik	2013
Lise	Aydınlıkevler Lisesi	2007

İş Deneyimi

-

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

Dağ, T. S. (2015). *Design of RF Cavities for Industrial Electron Accelerator (IEA)*. ICCESN 2015, Antalya.

Hobiler

Doğa yürüyüşü, kampçılık, yemek tarifleri keşfetmek, örgü örmek



GAZİ GELECEKTİR..