

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**DÜŞÜK AKIMLI PROTON HIZLANDIRICI SİSTEMLERİ İÇİN
RADYO FREKANS KUADRUPOL KOVUĞUNUN ELEKTROMANYETİK RF
TASARIMI**

Zafer SALI

FİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ANKARA
2019**

Her hakkı saklıdır

TEZ ONAYI

Zafer SALI tarafından hazırlanan “**Düşük Akımlı Proton Hızlandırıcı Sistemleri için Radyo Frekans Kuadropol Kuvvetinin Elektromanyetik RF Tasarımı**” adlı tez çalışması 19/09/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Ali Ulvi YILMAZER
Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Eş Danışman: Doç. Dr. Deniz YILMAZ
Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Jüri Üyeleri:

Başkan: Prof. Dr. Ali Murat Güler
Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fizik Anabilim Dalı

Üye: Prof. Dr. Ömer YAVAŞ
Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye: Prof. Dr. Ali Ulvi YILMAZER
Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Özlem YILDIRIM
Enstitü Müdürü

ETİK

Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

19/09/2019


Zafer SALI

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

DÜŞÜK AKIMLI PROTON HIZLANDIRICI SİSTEMLERİ İÇİN RADYO FREKANS KUADRUPOL KOVUĞUNUN ELEKTROMANYETİK RF TASARIMI

Zafer SALI

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ali Ulvi YILMAZER
Eş Danışman: Doç. Dr. Deniz YILMAZ

Radyo Frekans Kuadrupol (RFQ), protondan uranyuma kadar birçok iyon türünün yüksek verimde ivmelendirilebildiği bir doğrusal hızlandırıcı bileşenidir. Bu tez çalışmasında bir RFQ kovuğunun elektromanyetik tasarımı için gereken teori incelenerek, kovuğun kritik performans parametreleri tanıtılmıştır. LANL Superfish ve CST Studio Suite yazılım araçları kullanılarak RFQ tasarımı yapılmıştır. Tasarım faaliyetlerinin bir kısmı TAEK RHTDB'nin A1.H4.P1.03 numaralı "1-5 MeV RF Kovuklu Proton Hızlandırıcı Sistemi Geliştirilmesi" isimli projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir.

Eylül 2019, 56 sayfa

Anahtar Kelimeler: RFQ, RF Kovuk, Proton, Hızlandırıcı

ABSTRACT

Master Thesis

RF ELECTROMAGNETIC DESIGN OF RADIO FREQUENCY QUADRUPOLE CAVITY FOR LOW CURRENT PROTON ACCELERATOR SYSTEMS

Zafer SALI

Ankara University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Physics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Ali Ulvi YILMAZER
Co-Supervisor: Doc. Dr. Deniz YILMAZ

The Radio Frequency Quadrupole (RFQ) is a linear accelerator in which many types ions (e.g. proton, uranium) can be accelerated with high efficiency. In this thesis, the operating principle of a resonant cavity of an RFQ type is discussed and critical performance parameters of the cavity are introduced. Using the LANL SUPERFISH and CST STUDIO SUITE tools, the electromagnetic design of an RFQ type cavity structure was made. Some parts of the design activities were carried out within the scope of TAEK RHTDB 's project with the number of A1.H4.P1.03 “Development of 1-5 MeV Proton Accelerator System”.

September 2019, 56 pages

Key Words: RFQ, RF Cavity, Proton, Accelerator

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarım boyunca bana her konuda yardımcı ve destek olan danışmanlarım Prof. Dr. Ali Ulvi YILMAZER (Ankara Üniversitesi) ve Doç. Dr. Deniz YILMAZ'a (Ankara Üniversitesi), bu konuda çalışmamı sağlayan ve çalışmalarımda bana yardımcı olarak beni yönlendiren hocalarım Dr. Ali ALAÇAKIR (Türkiye Atom enerjisi Kurumu) ve Doç. Dr. Gökhan ÜNEL'e (CERN, UCI) teşekkürlerimi sunarım.

Tüm desteğini, sevgisini ve sabırlarını her daim yanımda hissettiğim eşim Işıl SALI ve aileme, yüksek lisans süresince yardımlarını esirgemeyen dostum Mustafa ÇELİK'e teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmanın bir kısmı Türkiye Atom Enerjisi Kurumu'nda A1.H4.P1 numaralı "1-5 MeV RF Kovuklu Proton Hızlandırıcı Yapımı" isimli proje kapsamında gerçekleştirilmiştir.

Zafer SALI

Ankara, Eylül 2019

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAY SAYFASI

ETİK.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iii
ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR.....	iv
KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
1. GİRİŞ.....	1
1.1 SANAEM Prometheus Projesi (SPP)	2
2. HIZLANDIRICI TEKNOLOJİLERİ	3
2.1 Hızlandırıcı Teknolojilerinin Tarihsel Gelişim Süreci	3
2.2 RFQ Tipi Çınlayıcı Kovukların Keşfinden Önce Hızlandırıcı Sistemler.....	7
2.3 RFQ Tipi Çınlayıcı Kovuğun Keşfi ve Gelişimi	11
3. RADYO FREKANS KUADRUPOL	14
3.1 Dört Kanath RFQ Çınlayıcı Kovuğun Çalışma İlkesi	15
3.2 Dört Kanath RFQ Çınlayıcı Kovuğu RF Yapısı	18
3.3 Dört Kanath RFQ Çınlayıcı Kovuk İçerisinde Alan Dağılımı.....	19
3.3.1 İki terimli potansiyel	21
3.3.2 Sekiz terimli potansiyel.....	27
4. RFQ KOVUĞU KRİTİK PERFORMANS PARAMETRELERİ.....	29
4.1 Kovuk İşletimsel Salınım Sıklığı	29
4.2 Kovuk Kilpatrick Ölçütü	30
4.3 Kovuk Giriş Enerjisi	33
5. RFQ KOVUĞU TASARIM METODOLOJİSİ	34
5.1 Kanat Ucu Geometrisi	35
5.2 Çınlayıcı Kovuk RF Tasarımı	37
5.2.1 Poisson/Superfish	37
5.2.2 CST STUDIO SUITE.....	39
6. RFQ KOVUĞU ELEKTROMANYETİK TASARIMI.....	40

6.1 İki Boyutta RF Tasarımı.....	40
6.2 Üç Boyutta RF Tasarımı.....	43
7. SONUÇ ve TARTIŞMA.....	52
KAYNAKLAR	54
ÖZGEÇMİŞ.....	56



KISALTMALAR DİZİNİ

ABD	Amerika Birleşik Devletleri
CAD	Computer Aided Design
CERN	Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi
CST	Computer Simulation Technology
DC	Direct Current
DEDA	Düşük Enerjili Demet Aktarım Hattı
İSS	İşletimsel Salınım Sıklığı
LANL	Los Alamos National Laboratory
LAACG	Los Alamos Accelerator Code Group
MIT	Massachusetts Institute of Technology
PEC	Perfect Electrical Conductor
RHTDB	Radyasyon ve Hızlandırıcı Teknolojileri Daire Başkanlığı
RF	Radyo Frekans
RFQ	Radyo Frekans Kuadrupol
RMS	Root Mean Square
SANAEM	Sarayköy Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi
SPP	SANAEM Project Prometheus
TAEK	Türkiye Atom Enerjisi Kurumu
TE	Transverse Electric
TEM	Transverse Electric and Magnetic
TM	Transverse Magnetic

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 SPP Proton Hızlandırıcı Sistemi Genel Görünümü	2
Şekil 2.1 Cockcroft-Walton Sistemi Şematik Gösterimi (Hinterberger 2006)	4
Şekil 2.2 Van De Graaff Üreteci Şematik Gösterimi (Hinterberger 2006).....	5
Şekil 2.3 Wideroe Deneysel RF Doğrusal Hızlandırıcı (Vretenar 2012).....	5
Şekil 2.4 Wideroe Doğrusal Hızlandırıcısının Şematik Gösterimi	8
Şekil 2.5 Alvarez Doğrusal Hızlandırıcısının Şematik Gösterimi	9
Şekil 2.6 Proton ve Elektron için Beta-Enerji dağılımı.....	9
Şekil 2.7 Sürüklenme tüpü içerisinde odaklayıcı kuadrupol şematik gösterimi	10
Şekil 2.8 Zaman bağımlı alan ile odaklama ve hızlandırma şematik gösterimi	13
Şekil 3.1 RFQ tipi çınlayıcı kovuk sınıfları (Maus 2010).....	14
Şekil 3.2 Bir elektrik kuadrupolün enine kesit görünümü (Wangler 2008).....	15
Şekil 3.3 RFQ tipi bir kovuğun enine kesit kanat ucu geometrisi (Wangler 2008).....	16
Şekil 3.4 RFQ tipi bir kovuğun boyuna kesiti için kanat ucu yerleşimi	16
Şekil 3.5 Boyuna kesitte alan dağılımı (Wangler 2008)	17
Şekil 3.6 Enine kesitte alan dağılımı (Yasatekin 2015)	17
Şekil 3.7 Bir RF kovuk içerisinde ilerleyen parçacıklar için eşzamanlılık koşulu	18
Şekil 3.8 Silindirik kovuk (sol) ve dört kanatlı RFQ kovuğu (sağ) TE_{210} kipi	19
Şekil 4.1 RF kovuk Kilpatrick Kısıtı	31
Şekil 5.1 RF kovuk tasarım beşgeni.....	35
Şekil 5.2 RFQ kovuğu içerisinde dört kesit dağılımı (Wangler 2008)	36
Şekil 5.3 SPP için kovuk kanat ucu geometri fonksiyonları.....	36
Şekil 5.4 Superfish Rezonans Frekansı Hesaplama Algoritması.....	38
Şekil 6.1 RFQ kovuğu çeyreği için SUPERFISH girdi kütüğü	40
Şekil 6.2 RFQ tipi RF kovuğu çeyrek kesik (enine) değiştirgesel gösterim	41
Şekil 6.3 Dört kanatlı RFQ tipi çınlayıcı kovuğu konfigürasyon modelleri.....	42
Şekil 6.4 Kanat ucu geometrik fonksiyonları ve kiplenimli profil.....	43
Şekil 6.5 Kanat ucu kiplenimin geometrisinin çizdirilmesi	44
Şekil 6.6 Kanat ucu geometrisi ve çınlayıcı kovuk yapısı	44
Şekil 6.7 Üç boyutlu RFQ kovuğun giriş ve çıkış bölgeleri şematik gösterimi.....	45
Şekil 6.8 Üç boyutlu RFQ kovuğu giriş ve çıkış bölgesi parametrik modeli	45

Şekil 6.9 SPP RFQ kovuğu TE110 kipleri alan davranışları (Enine Kesit)	46
Şekil 6.10 Üç boyutlu RFQ kovuğu elektrik alan dağılımı (Enine Kesit)	47
Şekil 6.11 Üç boyutlu RFQ kovuğu manyetik alan dağılımı (Enine Kesit)	47
Şekil 6.12 Enine kesitte tek kuadrant için elektrik alan dağılımı ($\theta = 45^\circ$)	48
Şekil 6.13 Enine kesitte tek kuadrant için manyetik alan dağılımı ($\theta = 45^\circ$).....	48
Şekil 6.14 Üç boyutlu RFQ kovuğu elektrik alan dağılımı.....	49
Şekil 6.15 Üç boyutlu RFQ kovuğu manyetik alan dağılımı.....	49
Şekil 6.16 Üç boyutlu RFQ kovuğu boyuna elektrik alan	49
Şekil 6.17 Üç boyutlu RFQ kovuğu boyuna manyetik alan	50
Şekil 6.18 Üç boyutlu RFQ kovuğu ve bağlaştırmacı.....	51
Şekil 7.1 SPP RFQ kovuğu boyuna kesit görünümü	52
Şekil 7.2 SPP RFQ kovuğu CAD modeli (Yasatekin, 2015).....	53

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1 RFQ tipi çınlayıcı kovuk sınıfları karşılaştırma.....	14
Çizelge 3.2 <i>TEnml</i> kipi için “n” alt indisi tanımlaması	18
Çizelge 3.3 Sekiz terimli potansiyel katsayıları ve tanımlaması.....	28
Çizelge 4.1 RFQ kovuk nitelikleri ile İSS ilişkisi.....	29
Çizelge 4.2 İyon kaynağı tasarım parametreleri (Türemen 2019)	33
Çizelge 5.1 SPP RFQ çınlayıcı kovuk tasarım parametreleri	34
Çizelge 6.1 Dört kanatlı RFQ kovuğu için iki boyut tasarım değıştirgeleri	41
Çizelge 6.2 RFQ kovuğu konfigürasyon modelleri hesapları	42
Çizelge 7.1 İki boyut ve üç boyutlu kovuk hesapları.....	52

1. GİRİŞ

Radyo Frekans Kuadrupol (RFQ), protondan uranyuma kadar birçok iyon türünün radyo frekans (RF) alanlar aracılığıyla odaklama, boğçalama ve hızlandırma işlevlerinin elde edilebildiği çınlayıcı kovuk yapısıdır.

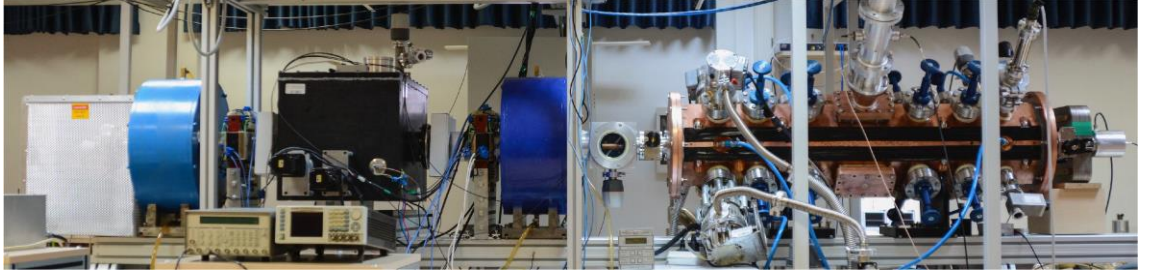
Günümüzde RFQ tipi çınlayıcı kovuklar aracılığıyla keV mertebesinde enerjiye (~20-100 keV) sahip yüksek akımlı (>1 mA) iyon demetleri MeV mertebesindeki enerji seviyelerine (~1-3MeV) yüksek verimlilikte (>%80) çıkartılabilmektedir.

Bu tezin,

- Birinci bölümünde tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmalar özetlenerek, TAEK bünyesinde gerçekleştirilen SANAEM Prometheus Projesi (SPP) hakkında kısa bir bilgilendirme verilmiştir.
- İkinci bölümünde hızlandırıcı teknolojilerinin tarihsel gelişim süreci ve RFQ tipi RF kovuk yapılarının bu gelişim sürecindeki rolü ve önemi tartışılmıştır.
- Üçüncü bölümünde RFQ tipi çınlayıcı kovuk yapısının çalışma ilkesi ve kovuk içi alan dağılımı ve kanat uçlarının geometrisi tartışılmıştır.
- Dördüncü bölümünde RFQ tipi çınlayıcı kovuğun kritik performans parametreleri özetlenerek, tasarım gereksinimleri üzerinde tartışılmıştır.
- Beşinci bölümünde bir RFQ tipi çınlayıcı kovuğun tasarım metodolojisi üzerinde tartışılmış, iki boyutta ve üç boyutta tasarım ve hesaplamalarda kullanılan SUPERFISH ve CST STUDIO SUITE arayüzleri tanıtılmıştır.
- Altıncı bölümünde RFQ tipi bir çınlayıcı kovuğun iki boyutlu üç boyutlu elektromanyetik RF tasarımları yapılarak sonuçlar özetlenmiştir.

1.1 SANAEM Prometheus Projesi (SPP)

SANAEM Prometheus Projesi (SPP), Türkiye Atom Enerjisi Kurumu'nun (TAEK) "Nükleer Alanda Uygulama ve Araştırmalar Yapmak ve Teknoloji Geliştirmek" başlıklı stratejik amacı kapsamında "Hızlandırıcı Teknolojisi Geliştirilmesi ve Araştırmalar Yapılması" hedefiyle Radyasyon ve Hızlandırıcı Teknolojileri Daire Başkanlığı (RHTDB; eski adıyla Sarayköy Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi) bünyesinde A1.H4.P1.03 numaralı "1-5 MeV RF Kovuklu Proton Hızlandırıcı Sistemi Geliştirilmesi" isimli projeyi tanımlar (TAEK 2016). Bu projede, çıkış enerjisi MeV mertebesinde olan bir RFQ tipi çınlayıcı kovuklu proton hızlandırıcı sisteminin milli imkanlarla geliştirilip; tasarım, üretim, bütünleme, doğrulama ve geçerleme kabiliyetinin oluşturulması hedeflenmiştir.



Şekil 1.1 SPP Proton Hızlandırıcı Sistemi Genel Görünümü

SPP kapsamında geliştirilen proton hızlandırıcı sisteminde iyon kaynağından elde edilen DC parçacık (H^+) demeti RFQ tipi çınlayıcı kovuğun giriş gereksinimlerini sağlayacak formda sarmal bobin tipi mıknatısları (solenoid) ve ölçüm istasyonunu içeren Düşük Enerjili Demet Aktarım (DEDA) hattından geçerek kovuk içerisine giriş yapar. Parçacıklar, kovuk içerisinde RF alanlar aracılığıyla odaklanır, bohçalanır ve hızlanır. Kovuk çıkışında bohçalı formda elde edilen hızlandırılmış parçacık demeti ölçüm istasyonunda tanısı yapılır ve demet çöpü ile sonlandırılır.

2. HIZLANDIRICI TEKNOLOJİLERİ

Maddenin en küçük yapıtaşlarını görmek ve bunların davranışlarını yöneten temel kuvvetleri anlamak deneysel yüksek enerji fiziğinin ana araştırma konusudur. De Broglie kuramına göre bir parçacığın dalga boyu ile momentumu ters orantılıdır. Gözlem çerçevesini küçültmek için parçacığın dalga boyunun azaltılması yani momentumunun artırılması gerekir. Yine kuantum mekaniğine göre yüksek enerjili iki parçacık demetinin çarpışması ile yeni bir parçacık yaratma olasılığı vardır. Bu nedenle yüksek momentuma sahip parçacık demetlerinin elde edebildiği gereçler deneysel yüksek enerji fiziği açısından önemlidir. Günümüzde bu tip gereçlere hızlandırıcı denilir.

Elektrik, elektromanyetik alan ve/veya plazma alanları kullanarak yüklü parçacıkları ivmelendirilebildiği hızlandırıcılar, son kullanıcı ihtiyaçlarına göre belirlenen demet gereksinimlerini sağlamak üzere geliştirilen sistem veya sistemler bütünü olarak tanımlanabilir. Esasında bu sistemler Archimedes, Copernicus, Newton ya da Dirac' ın saf bilimsel sorularına modern yanıtlar vermek için mümkün olan en yüksek enerjili makinayı inşa etmekten çok daha fazlasıdır (Sesler ve Wilson 2014).

Günümüzde hızlandırıcı teknolojileri deneysel yüksek enerji fiziği araştırmalarının yanı sıra çevre, endüstri, gıda, sağlık, enerji, güvenlik, uzay ve savunma sektörlerinde polimerlerin çapraz bağlanmasından malzemelerin işlenmesine, atık gazlarının temizlenmesinden gıdaların mikroorganizmalardan arındırılmasına, iyon ekiminden malzeme karakterizasyonuna, kanser tedavisinden petrol ve gaz yataklarının aranmasına, nükleer atıkların temizlenmesinden radyoizotop üretimine, toryuma dayalı enerji santrallerinden serbest elektron lazerlerine kadar değişen birçok ileri teknolojiye dayalı uygulama alanına sahiptir.

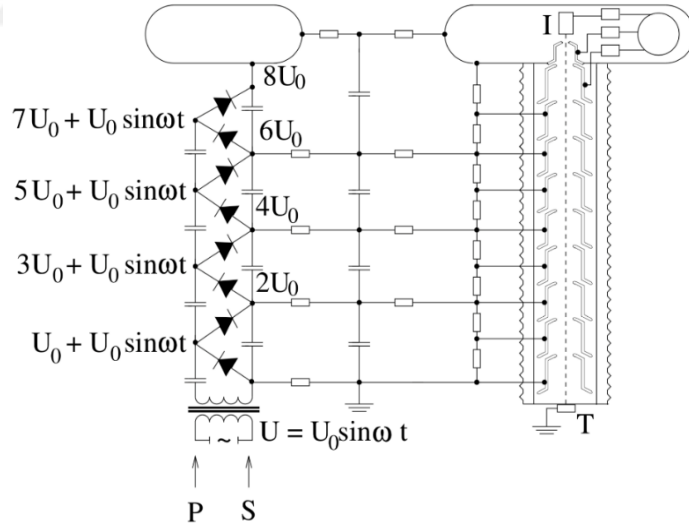
2.1 Hızlandırıcı Teknolojilerinin Tarihsel Gelişim Süreci

Ernest Rutherford' un radyum elementinin radyoaktif bozunumuyla elde edilebilen alfa parçacıklarını kullanarak azot gazını bombardımana tutması ve azot çekirdeğini parçalayarak düşük bir oranda hidrojen üretmesi deneysel nükleer fizik araştırmaları için

önemli bir kilometre taşıdır. Doğal radyoaktif bozunumlarla elde edilen parçacıkların enerjisi yalnızca birkaç hafif atomun incelenebilmesini mümkün kılmaktadır. Bu kısıtı aşmak için, 1927 yılında Londra Kraliyet Bilimleri Akademisi'nde Rutherford tarafından yapılan (Rutherford 1927) çekirdeği parçalamak için gereken enerjide büyük miktarda yüklü parçacıkları sağlayabilen aygıtların geliştirilmesi çağrısı hızlandırıcı teknolojilerinin doğuşunu simgeler (Vretenar 2012).

Rutherford'un çağrısının ardından tarihteki ilk hızlandırıcı sistemi 1930 yılında İngiltere Cambridge'deki Cavendish Laboratuvarında John Douglas Cockcroft ve Ernest Thomas Sinton Walton tarafından inşa edilmiştir (Şekil 2.1).

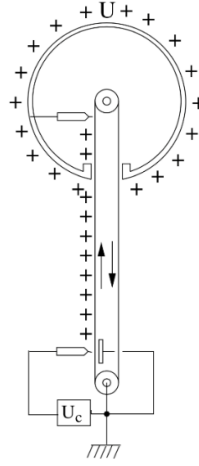
1921 yılında Heinrich Greinacher tarafından keşfedilen yüksek gerilim trafosu, kapasitörler ve diyotlar içeren gerilim çoklayıcı devresinden esinlenerek inşa edilen Cockcroft-Walton hızlandırıcı sistemiyle proton demeti 400 keV'luk enerji mertebesine çıkartılarak lityum atomu parçalanmıştır.



P: Enerjilendirme, S: Düzeltme, I: İyon Kaynağı, T: Hedef

Şekil 2.1 Cockcroft-Walton Sistemi Şematik Gösterimi (Hinterberger 2006)

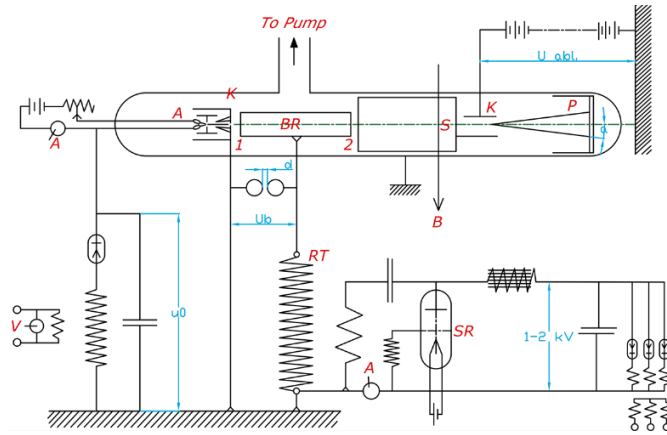
Diğer bir önemli gelişme ise 1929 yılında Robert Jemison Van de Graaff tarafından icat edilen elektrostatik üreteçtir. Bu üreteçte hareketli bir kayış aracılığıyla içi boş bir kürede yüksek gerilim üretimi sağlanmıştır (Şekil 2.2).



Şekil 2.2 Van De Graaff Üreteci Şematik Gösterimi (Hinterberger 2006)

Van de Graaff tipi gerilim üreteçleri ilk olarak 1932 yılında parçacık hızlandırmak için kullanılmış ve ardından birçok elektrostatik hızlandırma yöntemi geliştirilmiştir (Cockcroft ve Walton, 1932). Elektrostatikle hızlandırmanın kıvılcıklar arası yük boşalımı gibi fiziksel kısıtlarından dolayı yeni tip bir teknolojiye ihtiyaç duyulmuştur.

Gustav Ising'in kıvılcım boşalmasından elde edilen yüksek gerilim dalgalarının bir sürüklenme tüpü dizisi içerisinde yayılmasıyla yüklü parçacıkları hızlandırılabilceği fikrinden esinlenen Rolf Wideröe, 1927 yılında zaman bağımlı radyo frekans alanlar altında parçacıkları hızlandırma ilkesini öne sürerek 1928 yılında ilk deneysel radyo frekans (RF) hızlandırıcıyı geliştirmiştir (Şekil 2.3).



Şekil 2.3 Wideroe Deneysel RF Doğrusal Hızlandırıcı (Vretenar 2012)

Wideroe, 1 MHz frekansa sahip RF dalgalarıyla üretilen 25 kV'luk zaman bağımlı gerilimi bir sürüklenme tüpüne uygulayarak, potasyum iyonlarını 50 keV'luk enerjiye çıkartmayı başarmıştır. Wideroe' nin bu çalışması RF hızlandırıcı teknolojileri açısından kritik öneme sahiptir.

Rolf-Wideroe'nin çalışmalarından esinlenen Ernest Orlando Lawrence ve ekibi parçacıkların büküldüğü, dairesel bir yörüngede hızlandırma fikrini öne sürmüştür. 1931 yılında ise döndürgeç tipi hızlandırıcı sistemini geliştirerek protonları 1.2 MeV'luk enerjiye hızlandırmış ve ardından 1932 yılında ilk nükleer parçalanmayı elde etmiştir. 1935 yılına gelindiğinde döndürgeç tipi hızlandırıcı sistemleriyle parçacıkların 5 MeV'luk enerji seviyelerine kadar hızlandırılabilmesi, parçacık hızlandırıcılarda RF alanların yaygın bir şekilde kullanımına yol açmıştır. Ancak makul fiziksel boyutlarda daha yüksek enerjilere çıkabilmek için yüksek güç ve yüksek işletimsel salınım sıklığına sahip RF alanlara ihtiyaç duyulması RF hızlandırma tekniği için teknolojik bir kısıt oluşturmuştur.

William Webster Hansen, Berkeley'de bir doğrusal hızlandırıcı sistemi üzerindeki çalışmaları sırasında çınlayıcı kovuk (Cavity Resonator) fikrini önermiştir. Ardından 1937 yılında Stanford Üniversitesi'nde çınlayıcı kovuklar üzerindeki çalışmalarına devam edip, bu süreçte Russell ve Sigurd Varian kardeşler ile yapmış olduğu iş birliğiyle birlikte Klystron yapısı keşfedilmiştir (Vretenar 2012). Klystron, kovuk teknolojisini kullanarak parçacık demeti ve RF etkileşimiyle kuvvetlendirme işlevselliğinin elde edilebildiği vakum elektroniği cihazıdır. Geliştirilen ilk klystron, GHz mertebesinde işletimsel salınım sıklığına ve mWatt mertebesinde güç kuvvetlendirebilme kabiliyetine sahiptir. Bu teknoloji ikinci dünya savaşı (1939-1945) boyunca radar sistemlerinde kullanılmıştır. Savaşın ardından Varian kardeşler tarafından birçok yüksek güçlü klystron sistemleri geliştirmiştir. O dönemde hızla gelişen yayıncılık sektöründe kullanılmak üzere geniş ölçekte birçok klystron üretip ticarileştirmek için 1948 yılında Stanford'tan ayrılarak firma kurmuşlardır. Bu durum hızlandırıcı uygulamaları için geliştirilen çınlayıcı kovuk teknolojisinin sanayiye aktarılmasının ilk örneği olmuştur (Vretenar 2012).

1930'lu yıllarda birçok gelişmiş ülkenin radar programı olmasına rağmen, modern güçlü radar cihazları 1940'lı yılların başlarında İngiltere'deki yüksek güç magnetron kuvvetlendiriciler üzerindeki çalışmalarla elde edilmiştir. İngiltere hükümeti, 1940 yılının sonunda stratejik radar teknolojisi olarak görülen magnetron teknolojisini ABD ile paylaşmıştır. Ardından ABD 'nde yüksek güçlü radar cihazlarının geliştirilmesi hedefiyle RF ve mikrodalga teknolojisi üzerinde büyük bir araştırma çabası başlamıştır.

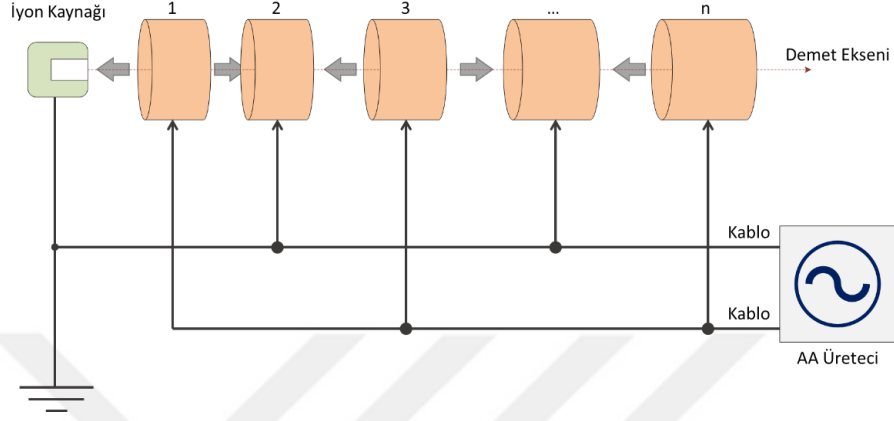
ABD'nde bulunan MIT Radyasyon Laboratuvarı gibi birçok ulusal araştırma merkezi RF ve mikrodalga teknolojisi üzerinde çalışmalarını daha da genişletebilmek için yüksek frekans deneyimine sahip hızlandırıcı fizikçilerini bünyelerine katmışlardır. Ardından bu ekipler ikinci dünya savaşının birkaç yılı boyunca dalga kılavuzu teorisi, bağlaşım teknikleri ve RF ölçüm teknikleri gibi modern RF teknolojisinin temelini oluşturan birçok konuda uzmanlaşmıştır. Savaş sonrasında radar ile ilgili araştırmalarla elde edilen bütün sonuçlar ABD hükümeti tarafından gizlilik dereceli olarak sınıflandırılmasına karar verilmiştir. Elde edilen bu sonuçlar günümüzde haberleşme, yayın, radar ve parçacık hızlandırıcı gibi RF teknolojisine dayanan birçok uygulama alanının altyapısını oluşturmuştur (Vretenar 2012).

RF ve mikrodalga teknolojilerinin gelişimiyle parçacık hızlandırıcı teknolojileri açısından yüksek salınım sıklığı ve yüksek güçlü kaynak kısıtı aşılmıştır. Günümüzde parçacık hızlandırıcı sistemlerinde RF alanların yanı sıra elektrostatik yöntemler hala kullanılmakta, plazma ardıl ve dielektrik duvar gibi çeşitli teknikler keşfedilip teknolojik kısıtları aşarak gelişimini sürdürmektedir.

2.2 RFQ Tipi Çınlıyıcı Kovukların Keşfinden Önce Hızlandırıcı Sistemler

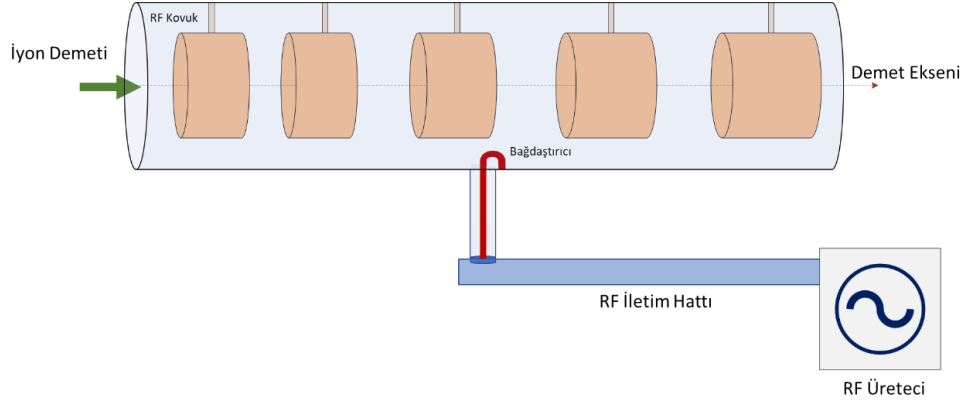
Wideroe doğrusal hızlandırıcısı, parçacıkların söküldüğü bir iyon kaynağından ve RF üreticine bağlanmış bir dizi metal sürüklenme tüpünden oluşmaktadır. Birbirini takip eden her bir sürüklenme tüpü alternatif akım üreticinin zıt kutuplarına bağlı olup, birbirlerine göre zıt elektrik yükleri ile yüklenir. Sürüklenme tüpleri arasındaki boşluklarda elektrik alan oluşur. Parçacık demeti boşluklarda hızlanırken, tüplerin içerisinde sabit hızla ilerler. Hızlanma boşluğundaki elektrik alan her yarım periyotta bir

yön değiştirir. Art arda dizilmiş tüm boşluklarda uygun hızlanma alanı elde edebilmek için parçacıkların her bir sürüklenme tüpünden yarım periyot sresinde geçmesi gerekir. Bu nedenle, hızlanma arttıkça sürüklenme tüplerinin uzunluğu da artmaktadır (şekil 2.4).



şekil 2.4 Wideroe Doğrusal Hızlandırıcısının şematik Gösterimi

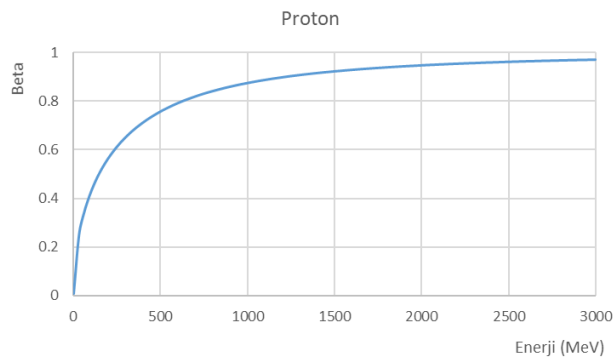
Hafif parçacıklar çok hızlı bir şekilde ivme kazanabilmekteyken, ağır iyonlar daha yavaştır. Hafif parçacıkların eş zamanlılığının sağlanması için çok uzun sürüklenme tüplerine ihtiyaç duyulur. Bu nedenle Wideröe tipi bir RF doğrusal hızlandırıcılar hafif parçacıklar için kullanımı pratik değildir. Daha yüksek işletimsel salınım sıklığına sahip üreteçlerin kullanımı durumunda sürüklenme tüplerinin ve hızlandırıcı yapısının boyutunun küçültülmesi mümkündür. Ancak Wideroe'nin hızlandırıcı yapısında alternatif akım sinyalleri sürüklenme tüplerine kablolar aracılığıyla iletilmektedir. Kablolar yüksek salınım sıklıklarında anten davranışı gösterir. Bu kısıt, Luis Alvarez'in Sloan tipi bir sürüklenme tp yapısını bir silindirik çınlayıcı kovuk içerisine yerleştirmesiyle aşılmıştır. Bu yöntemde, kovuk içerisine bir anten aracılığıyla gönderilen zaman bağımlı elektromanyetik sinyaller silindirik kovuğun işletimsel salınım sıklığına bağlı olarak hızlandırma alanı oluşturmaktadır. Bu teknik, modern RF hızlandırıcı teknolojilerinin temelini oluşturmakta olup, günümüzde iyon demetlerinin 3 MeV ile 1000 MeV enerji aralığında hızlandırmak için kullanılan sürüklenme boşluklu doğrusal hızlandırıcı sistemler (Drift Tube Linac) bu prensibe dayanmaktadır (şekil 2.5).



Şekil 2.5 Alvarez Doğrusal Hızlandırıcısının Şematik Gösterimi

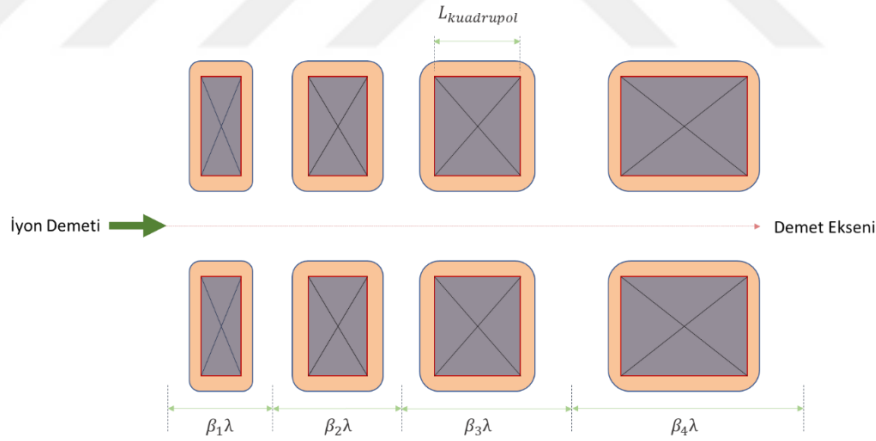
İyon hızlandırıcı sistemlerinde yüksek enerjili ($>GeV$) demetler düşük enerjilerden ($>keV$) kademeli olarak hızlandırılarak elde edilir. Düşük enerjilerde kullanılan hızlandırma tekniği tüm hızlandırıcı sisteminin hedef başarımları açısından önemlidir. Özellikle ilk kademesinde yer alan iyon kaynağı ve ilk sürüklenme boşluğu tipi hızlandırma yapısı arasındaki düşük enerji kesimi kritiktir.

İyon demetini oluşturan yüklü parçacıklar arasındaki itici (Coulomb) etkileşimler düşük enerjilerde yüksektir. Bu tip parçacık demetleri uzay yükü baskın demetler olarak tanımlanır ve uzay yükü kuvvetleri demetin odağını bozar. Parçacık demeti ancak göreceli enerji seviyelerine ulaştığında uzay yükü kuvveti etkileri azalır. Işık hızına yakın mertebelerde ilerleyen parçacıklar arasındaki çekim Coulomb itme kuvvetini dengeler. İyon demetleri için uzay yükü etkisi ancak birkaç MeV enerji mertebesi aşıldığında azalmaya başlar (Şekil 2.6).



Şekil 2.6 Proton ve Elektron için Beta-Enerji dağılımı

İyon hızlandırıcıların düşük enerji kesiminde uzay yükü etkilerini dengeleyebilmek için parçacık demeti güçlü bir odaklama alanı altında tutulmalıdır. Erişebilir odaklama gücü için önemli bir kısıt, hızlandırma hücrelerinin kısa olmasından kaynaklanır. Kısa odak periyodu ve birçok yüksek gradyanlı kuadropollere ihtiyaç duyulur. Daha açık bir ifadeyle bir sürüklenme boşluğu tipi hızlandırma yapısında, sürüklenme boşluğu içerisine yerleştirilen iki kuadropol merkezi arasındaki mesafe $\beta\lambda$ ' dir. Bu durumda kuadropol için kullanılabilir alan yalnızca $\beta\lambda/2$ ' dir (Şekil 2.7). Bu durumu 1 MeV'luk enerjiye sahip bir iyon demeti açısından değerlendirdiğimizde demetin görelilik parametresi $\beta = 0.046$ 'dır. Böyle bir demet için 300 MHz'lik işletimsel salınım sıklığına sahip ($\lambda = \sim 1m$) bir çınlayıcı kovuk içerisine yerleştirilmiş sürüklenme tüplerinde bulunan bir kuadropolün maksimum uzunluğu yaklaşık 23mm'dir. Daha düşük enerji için bu durum değerlendirildiğinde kuadropol uzunluğu pratik olmayan ölçülere kadar küçülecektir. Bu nedenle, yüksek uzay yükü kuvvetlerinin söz konusu olduğu enerji seviyesini kontrol edebilecek seviyede odaklama alanlarının fringe alanlarının baskın olduğu küçük kuadropol yapılarıyla elde etmek oldukça güçtür.



Şekil 2.7 Sürüklenme tüpü içerisinde odaklayıcı kuadropol şematik gösterimi

Düşük enerjili iyon hızlandırıcı sistemlerde demet hızının her bir birim hücre uzunluğuyla uyumlandırılması hızlandırıcı sistemini daha karmaşık ve daha hantal bir hale gelmesine sebep olmaktadır. Diğer taraftan kısalan hücrelerde kaçak kapasitanslar yüksektir ve bu kaçaklar demet için gerekli olan efektif hızlandırma alanını düşürür. Başka bir deyişle demet eksenini üzerinde hızlandırma için gerekli olan boyuna elektrik alanı elde etmek güçleşir ve RF verimliliği düşer.

Yine düşük enerjili iyon hızlandırıcı sistemler incelendiğinde iyon kaynağı çıkışında elde edilen sürekli demet ilk sürüklenme boşluğu tipi hızlandırıcı yapı içerisine girdiğinde bohçalı formda olmalıdır. Ayrıca, bu yapı içerisinde eşzamanlı hızlandırma sağlayabilmek için demetin boyuna yayılımı hızlandırıcı yapısının kabul koşullarıyla eşleşmesi gerekmektedir. Eşleşme gerçekleşmemesi halinde parçacık demetinin büyük bir kısmı girişte kaybedilir.

İyon hızlandırıcı sistemlerinin düşük enerji kesiminde, RFQ tipi RF kovuklu hızlandırıcıların keşfine kadar geleneksel olarak Cockcroft-Walton ve elektrostatik (Van de Graaff veya Tandem) tipi hızlandırıcılar kullanılmıştır. Cockcroft-Walton tipi bir hızlandırıcıyla demet akımı mA mertebesindeki iyonlar için keV mertebesinde hızlandırma yapmak mümkünken; elektrostatik tipli hızlandırıcılarla demet akımı 100 μ A mertebesindeki iyonlar rahatlıkla MeV mertebesine çıkarılabilir. Ancak yüksek enerji (>1MeV) ve yüksek akım (>1mA) ihtiyacı RFQ tipi RF kovuklu hızlandırıcıların keşfine ve gelişimine zemin hazırlamıştır.

2.3 RFQ Tipi Çınlayıcı Kovuğun Keşfi ve Gelişimi

RFQ tipi çınlayıcı kovuk yapısının keşfi öncesinde iyon hızlandırıcı sistemlerin düşük enerji kesimlerinde kıvılcım boşalması gibi arızalar dikkate alınarak güvenli gerilim seviyelerinde çalışabilir iyon kaynaklarından mümkün olan en yüksek sökme geriliminde iyon demeti elde edilip, düşük işletimsel salınım sıklığına sahip sürüklenme boşluğu tipi hızlandırıcı yapılar içerisine aktarılmıştır. Burada teknoloji limitlerindeki yüksek gerilim üreteçleri kullanılmış, düşük işletimsel salınım sıklığına sahip sürüklenme boşluğu tipi hızlandırıcı yapısının demet kabul gereksinimlerini sağlayan yeterli hızdaki iyon demetleri iyon kaynaklarından sökülmüştür. Bu sistemlerde iyon kaynağı ve sürüklenme tüpü arasında bulunan iletim hattındaki uzay yükü etkilerinden dolayı yüksek akımlı iyon demetlerin hızlandırılması oldukça güçtür (Vretenar 2013).

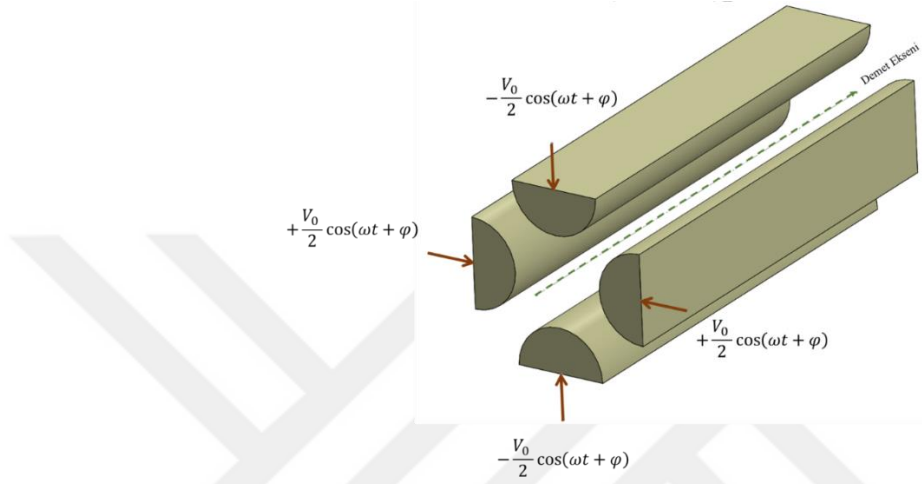
İyon kaynağı ve sürüklenme tüpü arasında bulunan iletim hattında iyon demetini bohçalı forma getirebilmek için özel bohçalayıcı RF kovuklar kullanılmıştır. Bohçalayıcı kovukta iyon demetinin hızına ve enerjisine bağlı olarak bir kipleme alanı uygulanmıştır. Kipleme

alanının yükselen yamacında bulunan parçacıklar gruplanma eğilimindedir. Burada bohçalayıcı kovuğa gelen ilk parçacıklar yavaşlarken sonradan gelen parçacıklar hızlanmaktadır. Böylece kipleme alanının yükselen yamacındaki enerjisi değişmeyen eş zamanlı parçacığın etrafında yüksek yoğunluklu bohçalı demet elde edilir. Bohçalayıcı kovuk ile sürüklenme boşluğu tipi hızlandırıcı yapısı arasındaki mesafe ile doğru evrede demet kabulünün sağlanabilmesi gerekmektedir. Uygun mesafe sağlanamaması halinde sürüklenme boşluğu tipi hızlandırıcı yapısının ilk hücrelerinde parçacık demeti dağılır ve çok büyük bir bölümü kaybedilir. Tek kovuklu bohçalayıcılar düşük iletim verimliliğine sahip olup, sürüklenme boşluğu tipi hızlandırıcı yapısı ile arasında uzun bir mesafe gerektirir. Ancak düşük enerjili iyon demeti uzun mesafede uzay yükü etkileri nedeniyle genişleme eğilimindedir, bu bölgede demet yayılımı büyür. İletim verimliliğini arttırmak için ikincil harmonik kovuk gibi birçok bohçalayıcı çözümleri geliştirilmiştir. Bu çalışmaların tümü iyon hızlandırıcı sistemlerin düşük enerji kesiminde karmaşık tasarım ve üretim gereksinimleri ortaya çıkartmıştır. Diğer taraftan düşük bohçalama verimliliği ve uzay yükü limitleri, hem hızlandırılabilir en yüksek demet akımı hem de sistem idamesi ile güvenilirliği açısından önemli bir teknolojik kısıt oluşturmuştur (Vretenar 2013).

Yüksek enerji fiziği çalışmalarında kullanılmak üzere geliştirilen iyon hızlandırıcı teknolojileri geçmişte çok büyük ve karmaşık sistemlerden oluşmuştur. Bu sistemler için boyut ve karmaşıklık birincil öncelik olmamıştır. Diğer taraftan 1960'lı yılların sonlarına doğru iyon demetlerinin uzay uygulamaları konusunda araştırmalar hız kazanmıştır. İyon hızlandırıcıların, yüksek enerji fiziği ve uzay uygulamaları arasındaki temel farklılığı demet akım ihtiyacından kaynaklanmaktadır. 1960'lı yıllarda yüksek enerji fiziği uygulamaları için iyon hızlandırıcı sistemlerinde mikro amper ile mili amper arasındaki demet akım mertebeleri kullanılmıştır. Buna karşın uzay uygulamaları için araştırılan iyon hızlandırıcı sistemlerde 100 mili amperin üzerinde akım gereksinimi söz konusudur.

Yüksek akımlı ve düşük enerjili iyon demetlerini hızlandırabilmek için yapılan çalışmalar neticesinde 1960'lı yılların başında elektrik alanların yüklü parçacık demetlerini hızlandırabilmesinin yanı sıra odaklama için de kullanılabileceği keşfedilmiştir.

Dört adet uzun kıvrılıç üzerine uygulanan zaman bağımlı elektromanyetik alanlar aracılığıyla odaklama işlevselliği elde edilir. Bu dört uzun kıvrılıç eksenini boyunca hareket eden parçacıklar zamanla değişen alternatif gerilime maruz bırakıldığında net bir odaklama etkisi hisseder (Şekil 2.8). Elektrik alanla odaklama sayesinde düşük enerjili (uzay yükü baskın) demetler için güçlü odaklama sağlanabilmektedir.

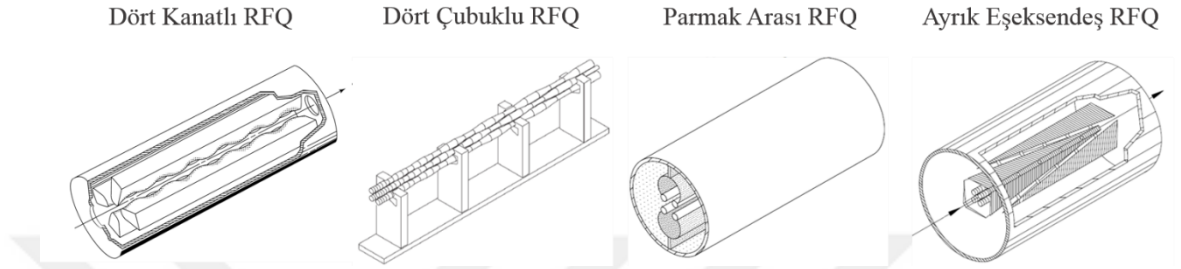


Şekil 2.8 Zaman bağımlı alan ile odaklama ve hızlandırma şematik gösterimi

Elektrik alanlar aracılığıyla güçlü odaklama kuvvetlerinin oluşturabilmesi fikrinden esinlenen I. M. Kapchinsky ve V. A. Teplyakov, elektrik kuadropol yapısının kutup ucu formu üzerine yoğunlaşmış ve parçacık demetinin elektrik alanlar kullanarak hem odaklanabileceğini hem de hızlandırılabilirliğini önermiştir (Kapchinsky ve Teplyakov 1969). I. M. Kapchinsky ve V. A. Teplyakov potansiyel fonksiyon kullanarak hem odaklama hem de hızlandırma işlevselliğine sahip bir kanat ucu geometrisinin form (kiplenim) parametrelerini türetmiştir. Yine aynı ikilinin 1970 yılında yaptığı diğer bir çalışmada, kanat ucu formu üzerinden elektrik alan kuvvetleri altında parçacık demetinin boğçalanma ilkesi tanımlanmıştır.

3. RADYO FREKANS KUADRUPOL

RFQ tipi çınlayıcı kovuk, düşük enerjili sürekli bir parçacık demetinin keV mertebesinde MeV mertebesindeki enerjilere kadar hızlandırırken hem odaklayan hem de bohçalayan özel bir doğrusal hızlandırıcı yapısıdır.



Şekil 3.1 RFQ tipi çınlayıcı kovuk sınıfları (Maus 2010)

Hızlandırılabilir parçacık türüne, işletimsel salınım sıklığına, çalışma kipine ve boyutlarına bağlı olarak farklı konseptlerde geliştirilen RFQ tipi çınlayıcı kovuk yapılar mevcuttur. Bu yapılar dört kanatlı (Four Vane), dört çubuklu (Four Rod), ayrık eşeksendeş (Split Coaxial) ve parmakarası (Interdigital H-Mode) olarak sınıflandırılabilir (Şekil 3.1). Bu kovuk sınıfları için karşılaştırma tablosu Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1 RFQ tipi çınlayıcı kovuk sınıfları karşılaştırma

RFQ RF Kovuk	Çalışma Kipi	İyon Türü	Salınım Sıklığı (MHz)	Salınım Sıklığı Bağımlı Kovuk Boyutu Ölçeği
Dört Kanatlı	TE ₂₁₀	Hafif	100 – 750	Radyal boyut
Dört Çubuklu	$\pi - 0 - \lambda/2$	Hafif ve Ağır	5 – 200	Bağımsız
Parmak Arası	TE ₁₁₀	Hafif	100 – 400	Radyal boyut
Ayrık Eşeksendeş	TEM	Ağır	100 – 500	Boyuna ve radyal boyut

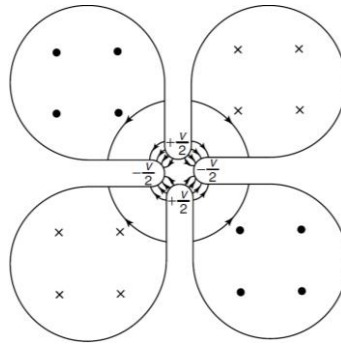
SPP projesi kapsamında dört kanat sınıfı RFQ tipi çınlayıcı kovuk geliştirilmesi hedeflenmiştir. Bu nedenle tez kapsamında dört kanat yapı sınıfı üzerine odaklanılmıştır. Dört kanatlı RFQ tipi çınlayıcı kovuk yapısı esasen uzun bir kuadrupol tipi odaklayıcı mıknatısa benzer. Kanat uçları kiplenimli bir geometriye sahiptir. Bu tip bir kovuk

yapısında hızlandırma ve odaklama işlevselliğini sağlayabilen uygun alanları üretebilmek için TE_{210} ile ifade edilen kuadropol simetrisinde enine elektrik alan kipi uyarılması gerekmektedir.

Dört kanatlı RFQ tipi çınlayıcı kovuk yapısının geometrik boyutları işletimsel salınım sıklığıyla (İSS) ölçeklenir. Düşük İSS'nda dört kanat konsepti pratik olmayan ölçülerde bir çapa sahip olabilir. Örneğin; 100 MHz 'lik bir dört kanatlı yapının çapı yaklaşık 1m mertebesindedir. 300 MHz üzerindeki İSS durumunda uygun boyut ve yüksek RF başarımı elde edebilmek için genellikle dört kanatlı RFQ tipi çınlayıcı kovuğu tercih edilir. 100 MHz altındaki İSS durumunda ise daha tıkız yapı boyutuna sahip olan dört çubuklu veya parmak arası tipinde RFQ RF kovukları tercih edilebilmektedir. 100 MHz ile 300 MHz arasında ise dört çubuklu, dört kanatlı veya parmak arası tipindeki RFQ RF kovuklar kullanılabilir.

3.1 Dört Kanatlı RFQ Çınlayıcı Kovuğun Çalışma İlkesi

Dört kanatlı RFQ tipi çınlayıcı kovuğun çalışma ilkesini anlamak için ilk olarak elektrik kuadropolün işlevsel tanımlaması yapılır. Bir elektrik kuadropol zaman bağımlı potansiyel alan $(\pm V_0 \cos(\omega t + \varphi) / 2)$ uygulanırsa demet ekseni dışında kalan parçacıklar net bir odaklama kuvveti hisseder (Şekil 3.2).

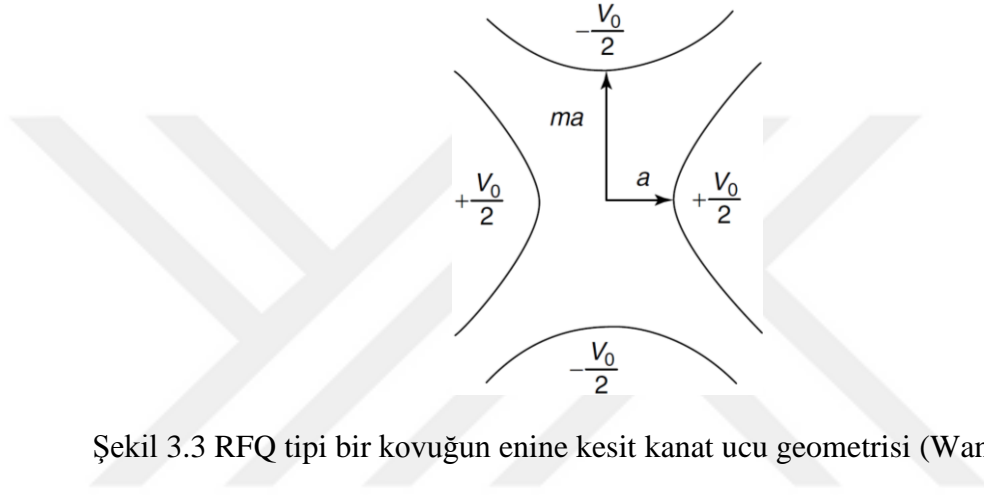


Şekil 3.2 Bir elektrik kuadropolün enine kesit görünümü (Wangler 2008)

RFQ tipi çınlayıcı kovuğun bir elektrik kuadropolden farklılığı ise kanat uçlarının kiplenimli formundan kaynaklanmaktadır. Kovuğun kiplenimli kanat ucu formu

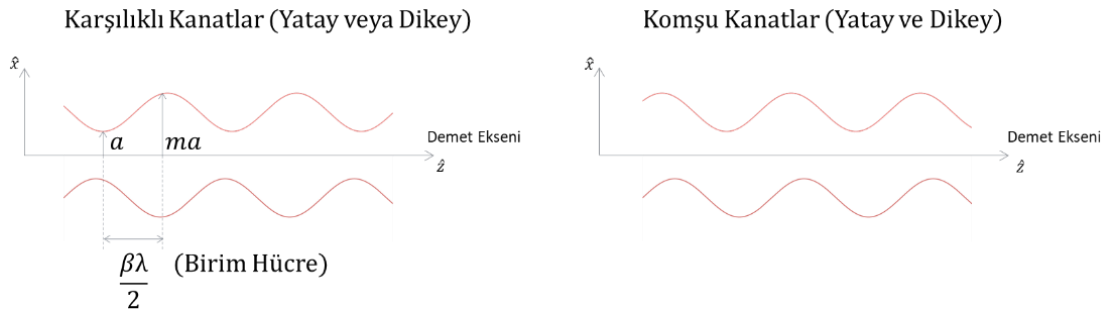
nedeniyle konum ve zaman bağımlı enine ve boyuna alanlar elde edilebilmektedir. Bu sayede kovuk içerisinde ilerleyen parçacık demeti bir taraftan kademeli olarak değişen odaklama kuvveti hissederken diğer taraftan hem boğçalanabilmekte hem de hızlanabilmektedir.

RFQ tipi çınlayıcı kovuk yapılarının kanat uç geometrisinin kiplenimli formundan dolayı demet ekseni yakınlarındaki kuadrupol simetrisi bozular (Şekil 3.3).



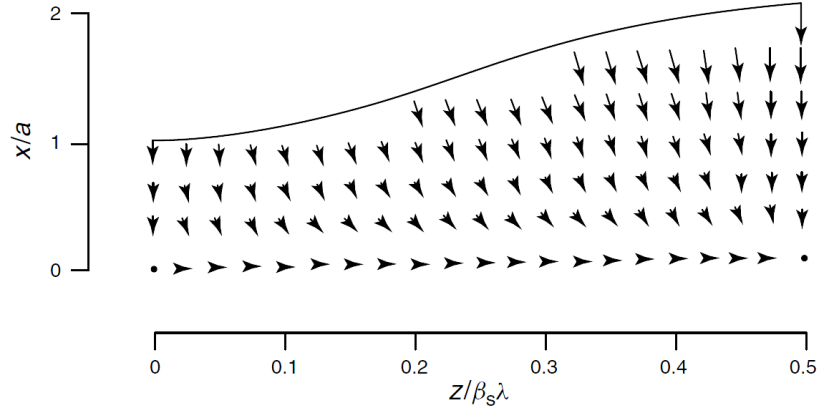
Şekil 3.3 RFQ tipi bir kovuğun enine kesit kanat ucu geometrisi (Wangler 2008)

Kanat uçlarındaki kiplenimin etkisini basitçe tartışabilmek için kanat uçları karşılıklı konumlandırılan yatay ve dikey kanat çiftleri olarak tanımlanır. Kiplenimli uç profillerine sahip dikey ve yatay kanat çiftlerinin demet eksenine en yakın uzaklıkları birbirinden farklıdır. Yatay ve dikey kanatların demet ekseninden uzaklıkları sırasıyla a ve ma terimleri ile ifade edilebilir. Buradaki m ifadesi kiplenim çarpanı olup, kanat uzunluğu boyunca değişmektedir. Bu çarpan, demet dinamiği tasarımı ile belirlenir.

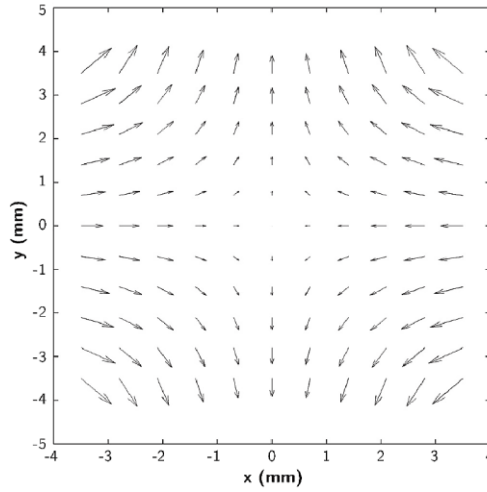


Şekil 3.4 RFQ tipi bir kovuğun boyuna kesiti için kanat ucu yerleşimi

Kovuk içerisinde ilerleyen parçacık demetinin RF alanlarla eşzamanlılığını sağlayabilmek için kanat uçlarının her bir hücresi sinüzoidal bir forma sahip olması gerekir. Aynı fazda konumlandırılan karşılıklı kanatlar ile 90° lik bir faz farkına sahip komşu kanatlar sayesinde boyuna ekseninde sinüzoidal bir alan dağılımı elde edilebilmektedir (Şekil 3.5 ve Şekil 3.6).

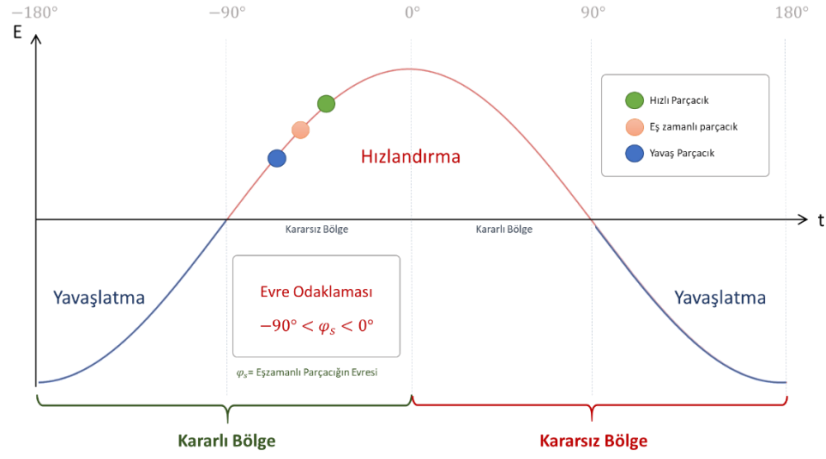


Şekil 3.5 Boyuna kesitte alan dağılımı (Wangler 2008)



Şekil 3.6 Enine kesitte alan dağılımı (Yasatekin 2015)

Parçacık demeti, çınlayıcı kovuğun kanat uçlarının her bir hücresinden geçerken hızlandırma alanına maruz kalabilmesi için kanat ucu potansiyeli her bir yarım periyotta değiştirilmesi zorunludur. Diğer taraftan kovuk içerisindeki RF alanlar ile parçacık demeti arasında eşzamanlılık koşulunu sağlayabilmek için her bir hücre uzunluğu eşzamanlı parçacığın hızına uygun olmalıdır.



Şekil 3.7 Bir RF kovuk içerisinde ilerleyen parçacıklar için eşzamanlılık koşulu

3.2 Dört Kanatlı RFQ Çınlayıcı Kovuğu RF Yapısı

Dört kanatlı RFQ tipi bir çınlayıcı kovuğun RF yapısını tartışabilmek için başlangıçta kip tanımlaması yapılmalıdır. Çınlayıcı kovuklarda TE ile ifade edilen kip ifadesi enine elektrik, TM ile ifade edilen kip ifadesi enine manyetik anlamına gelmektedir. TE kip, silindirik geometriye sahip bir çınlayıcı kovuk içerisindeki elektrik alanın demet eksenine dik olduğunu ifade ederken, TM kipi ise demet eksenine paralel olduğunu ifade eder.

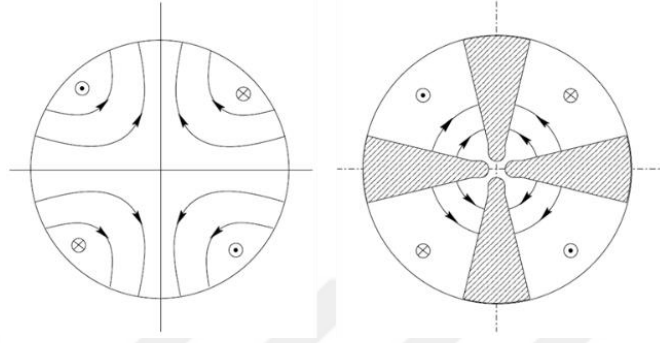
TE ve TM kipleri “n”, “m” ve “l” ile tanımlı üç alt indise sahiptir. Bu indisler sırasıyla silindirik simetriye sahip yapılarda aksenal, çapsal ve boyuna alan bileşenlerini ifade eder. Aksenal alan bileşenlerini temsil eden “n” kip indisinin demet üzerine etkileri Çizelge 3.2’de tanımlanmıştır.

Çizelge 3.2 TE_{nml} kipi için “n” alt indisi tanımlaması

Kip	n	Demet Üzerine Etkisi
Tek Kutuplu	0	Hızlandırma ve yavaşlatma
Çift Kutuplu	1	Enine tekmeleme (dağıtıcı)
Dört Kutuplu	2	Enine tekmeleme (odaklayıcı)

Dört kanatlı RFQ tipi bir çınlayıcı kovuk yapısında elektrik alanlar demet eksenine dik, manyetik alanlar ise demet eksenine paraleldir. Enine elektrik ve boyuna manyetik

alanların sürekliliğini devam ettirebilmek için manyetik alanlar kanatların etrafında dolaşır. Elektrik alanlar ise kanatlar arasında mevcuttur. Demet eksenine yakınlaştıkça elektrik alan artmaktayken, manyetik alan zayıflamakta; demet ekseninden uzaklaşıp kovuk dış duvarına yaklaştıkça elektrik alan zayıflayıp, manyetik alan artmaktadır.



Şekil 3.8 Silindirik kovuk (sol) ve dört kanatlı RFQ kovuğu (sağ) TE_{210} kipi

Bir RFQ tipi çınlayıcı kovuğun spesifik işlevlerini yerine getirebilmesi için TE_{210} ile ifade edilen kuadrupol simetrisinde enine elektrik alan salınım kipinde uyarılması gerekmektedir. Enine odaklama kuvvetlerinin boyuna dalgalanmalarından kaçınmak için salınım kipi endekslerinden üçüncü terim sıfır olmak zorundadır. Bu tip bir çınlayıcı kovuk yapısında boyuna elektrik alanlar yalnızca kovuğun kanat ucu kiplenimli formu sayesinde elde edilir.

RFQ tipi çınlayıcı kovukların kanat uçları arasındaki mesafe tipik olarak serbest uzay dalgaboyunun binde biri mertebesinde dir. Bu nedenle çınlayıcı kovuk için ana işletim kipi açısından kiplenimin etkisi ihmal edilir.

3.3 Dört Kanatlı RFQ Çınlayıcı Kovuk İçerisinde Alan Dağılımı

Dört kanat sınıfı RFQ tipi çınlayıcı kovuk yapılarında demet eksenini yakınlarında yalnızca elektrik alan bulunup, manyetik alan yoktur. Bu nedenle kanatlar arasındaki bölge tamamen kapasitif olarak kabul edilebilir. Kanat uçları yakınlarında alan çözümlemesi yapabilmek ilk olarak skaler ve vektörel potansiyel bağımlı olarak alan tanımlaması yapılabilir (Duperrier 2000).

$$\vec{E} = -\vec{\nabla}U - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad 3.1$$

Demet eksenini yakınlarında manyetik alanın olmayışı vektör potansiyelini ($\vec{A} = 0$) ihmal etmemize olanak verir. Bu yüzden elektrik alan skaler potansiyelin iraksaması olarak yazılabilir. Bu sonuç kovuk içerisindeki alanların çözümlenebilmesi açısından son derece önemlidir.

$$\vec{E} = -\vec{\nabla}U \quad 3.2$$

Vektör potansiyelin ihmali, kovuğun RF yapısından bağımsız olarak demet dinamiğinin çözümlenmesine olanak sağlar. Böylece elektrostatik Laplace eşitliğinin çözülmesi yeterlidir.

$$U = V \sin(\omega t + \varphi) \quad 3.3$$

Bu durumda, Denklem 3.3 ile ifade edilen skaler potansiyelin elektrostatik kısmı, Laplace denklemini sağlamaktadır.

$$\nabla^2 V = \frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0 \quad 3.4$$

Laplace denkleminin silindirik koordinatlardaki çözümü değişkenlere ayırma yöntemi ile elde edilebilmektedir. Silindirik koordinatlarında tipik olarak Bessel fonksiyonları kullanılır. RFQ tipi bir çinlayıcı kovuk için $r = 0$ demet eksenini, $r = a$ kanat ucunun demet ekseninden uzaklığı ve $z = 0$ kanat ucunun başlangıcı olarak kabul edilir ve sınır koşulları uygulanır. Bu koşullar altında elde edilen potansiyel çözümü sonsuz terimli bir dizisi olarak elde edilir.

$$V(r, \theta, z) = \frac{V_0}{2} \sum_p A_{o(2p+1)} r^{2(2p+1)} \cos[2(2p+1)\theta] + \frac{V_0}{2} \sum_m \sum_n A_{mn} I_{2n}(mkr) \cos(2n\theta) \cos(mkz) \quad 3.5$$

Denklem 3.4'deki V_0 ile ifade edilen terim pozitif kanat ile negatif kanatlar arasındaki gerilim farkını temsil etmekte olup; $p = 0,1,2, \dots, m \geq 1, m + n = 2p + 1, k = 2\pi/\beta_s\lambda$ ifade eder. β_s ile ifade edilen terim ise eşzamanlı parçacıkların hızı, A_{ij} denklem sabitleri, I_n ise Bessel fonksiyonu katsayılarıdır. Bu genel çözüm sonsuz serilerde potansiyelin tüm harmoniklerini içermektedir.

Bir RFQ tipi RF kovuğu içerisinde ilerleyen parçacık demetini odaklama, bohçalama ve hızlandırma için gereken potansiyel alanları üreten kanat ucu geometrisinin belirlemek için genelleştirilmiş potansiyel fonksiyonu kullanılır. Genelde, bu potansiyel serisinin yalnızca birkaç harmoniği ile alan davranışı analiz edilebilir. Bu fonksiyon uygun sınır koşulları altında çözümlenerek özgün bir demet davranışını sağlayan kanat ucu geometrisi elde etmek üzere demet dinamiği tasarımı yapılır. Bu tez kapsamında iki terimli potansiyel tartışması yapılarak ardından sekiz terimli potansiyel tanımlanmıştır.

3.3.1 İki terimli potansiyel

İki terimli potansiyel fonksiyonu demet eksenine yakınlarındaki alanları yaklaşık olarak tahmin etmek ve anlamak için kullanışlı bir yöntemdir. İki terimli potansiyel fonksiyonu Denklem 3.6 ile tanımlanmıştır.

$$V(r, \theta, z) = \frac{V_0}{2} [A_{01}r^2 \cos(2\theta) + A_{10}I_0(kr) \cos(kz)] \quad 3.6$$

RFQ tipi çınlayıcı kovuk yapısı için genelleştirilmiş potansiyel fonksiyonunun ilk iki katsayısı A_0 ve A_{10} terimleridir. İki terimli potansiyelin ilk terimi elektriksel odaklama alanını, ikinci terim ise hızlandırma alanını temsil eder. A_0 ve A_{10} ile tanımlı katsayılar kanat ucu geometrisine uygun sınır koşullarıyla belirlenir. A_0 ile tanımlanan katsayı enine alanla ilişkili kuadrupol terimi olup, kovuk içerisindeki demetin enine düzlemde değişken kademeli olarak odaklanmasından sorumludur. A_{10} ile tanımlanan katsayı ise boyuna alan ile ilişkili monopole terim olup, hızlandırmadan sorumludur.

Dört kanat sınıfı RFQ tipi çınlayıcı kovuk yapısı yatay ve dikey kanatlara sahiptir. Potansiyel fonksiyonu daha ayrıntılı analiz edebilmek için kanat ucu geometrisine uygun sınır koşulları uygulanır. Hem yatay hem de dikey kanatların boyuna düzlemdeki başlangıç noktası için $z = 0$ konumu referans alınır. Yatay ve dikey kanat uçlarının demet ekseninden uzaklıkları sırasıyla a ve ma kadardır. Burada a uzaklığı temsil ederken m kiplenim parametresidir. Yatay kanat ve dikey kanat için kutupsal açılar ise sırasıyla 0° ve $\pi/2$ 'dir. RF periyodunun belirli bir anında yatay ve dikey kanat uçları $+V_0/2$ ve $-V_0/2$ potansiyellerine sahiptir. İki terimli potansiyel fonksiyonuna yatay kanat sınır koşulları uygulandığında Denklem 3.7 ile tanımlanan eşitlik, dikey kanat sınır koşulları uygulandığında Denklem 3.8 ile tanımlanan eşitlik elde edilir.

$$\frac{V_0}{2} = A_0 a^2 + A_{10} I_0(ka) \quad 3.7$$

$$-\frac{V_0}{2} = A_0 (ma)^2 + A_{10} I_0(kma) \quad 3.8$$

Böylece A_0 ve A_{10} katsayıları kolayca türetilir.

$$A_0 = \frac{V_0}{2a^2} \left[\frac{I_0(ka) + I_0(kma)}{m^2 I_0(ka) + I_0(kma)} \right] \quad 3.9$$

$$A_{10} = \frac{V_0}{2} \left[\frac{m^2 - 1}{m^2 I_0(ka) + I_0(kma)} \right] \quad 3.10$$

A_0 ve A_{10} katsayılarını ifade eden eşitlikler iki boyutsuz terime sahiptir. Bu terimler χ ve A terimleri ile ifade edilir.

$$\chi = \frac{I_0(ka) + I_0(kma)}{m^2 I_0(ka) + I_0(kma)} \quad 3.11$$

$$A = \frac{m^2 - 1}{m^2 I_0(ka) + I_0(kma)} \quad 3.12$$

χ ve A boyutsuz terimleri kullanılarak A_0 ve A_{10} ifadeleri daha basit bir forma dönüştürülür.

$$A_0 = \frac{V_0}{2a^2} \chi \quad 3.13$$

$$A_{10} = \frac{V_0}{2} A \quad 3.14$$

İki terimli potansiyel fonksiyonu zaman bağımlı olarak ifade edilir ve Denklem 3.16 formunu alır.

$$U_{(r,\theta,z,t)} = V_{(r,\theta,z)} \sin(\omega t + \phi) \quad 3.15$$

$$U_{(r,\theta,z,t)} = \frac{V_0}{2} \left[\frac{r^2}{a^2} \chi \cos(2\theta) + A I_0(kr) \cos(kz) \right] \sin(\omega t + \phi) \quad 3.16$$

Demet dinamiği benzetimlerinde genellikle elektrik alan bileşenleri kullanılır. Alan bileşenleri potansiyel fonksiyonun kısmi türevi alınarak bulunur. Böylece silindirik koordinatlarda elektrik alan bileşenleri türetilir.

$$E_{(r,\theta,z)} = -\nabla U_{(r,\theta,z,t)} \quad 3.17$$

$$E_r_{(r,\theta,z)} = -\frac{\partial U_{(r,\theta,z)}}{\partial r} = -\chi \frac{V_0 r}{a^2} \cos(2\theta) - A \frac{V_0 k}{2} I_1(kr) \cos(kz) \quad 3.18$$

$$E_\theta_{(r,\theta,z)} = -\frac{1}{r} \frac{\partial U_{(r,\theta,z)}}{\partial \theta} = \chi \frac{V_0 r}{a^2} \sin(2\theta) \quad 3.19$$

$$E_z_{(r,\theta,z)} = -\frac{\partial U_{(r,\theta,z)}}{\partial z} = A \frac{V_0 k}{2} I_0(kr) \sin(kz) \quad 3.20$$

Denklem 3.18'in ilk terimi $V_0 \chi / a^2$ 'ye bağımlı olarak kuadropol odaklamayı ifade etmekte olup, ikinci terimi ise boyuna alan bileşeni kaynaklı RF odak bozulmasını temsil eder. Kanat ucunda kiplenim yok ise boyuna alan bileşeni oluşmaz böylece RF odak bozulması ortaya çıkmaz. Bu durum $A_{(m=1)} = 0$ koşuludur. Kiplenim arttıkça RF odaklama gücü azalır ve RF odak bozulması artar. Bu durum χ ve A arasında sıkı bir ilişki ortaya çıkartır.

$$A = 1 - \chi I_0(ka) \quad 3.21$$

Kiplenim parametresi boyuna hızlandırma alanlarını oluşturmaktayken aynı zamanda odaklama gücü azalsa bile enine odaklama devam eder. Ancak RFQ kovuğunun enine odaklanması çok küçük olduğunda kiplenim parametresinin bir üst sınırı vardır. Parçacık demetini hızlandırırken kiplenim parametresi kovuğun belirli bir kesitinden sonra bazı pratik değerlerde sabit tutulmalıdır. Hız kazanan parçacık demeti için hücre boyu artar, boyuna alanların üretimi verimsiz hale gelir ve böylece yüksek RF güç tüketimine yol açar. Bu nedenle RFQ kovuk yapıları parçacık demetinin çok yüksek enerjilere hızlandırmak için uygun değildir.

Silindirik koordinatlarda tanımlanan elektrik alan bileşenleri $x = r \cos \theta$ ve $y = r \sin \theta$ dönüşüm eşitlikleri kullanarak kartezyen koordinatlarda ifade edilebilir.

$$E_x = -\chi \frac{V_0}{a^2} x - A \frac{V_0 k}{2} I_1(kr) \frac{x}{r} \cos(kz) \quad 3.22$$

$$E_y = \chi \frac{V_0}{a^2} y - A \frac{V_0 k}{2} I_1(kr) \frac{y}{r} \cos(kz) \quad 3.23$$

$$E_z = A \frac{V_0 k}{2} I_0(kr) \sin(kz) \quad 3.24$$

Bir RFQ kovuğu içerisinde ilerleyen parçacık demetinin hareket denklemleri Lorentz kuvvet eşitliği ($F = qE$) aracılığıyla türetilir. Analizi kolaylaştırmak için $I_0(kr)$ ve $I_1(kr)$ tanımlanan Bessel fonksiyonları yaklaşık olarak sırasıyla 0 ve $kr/2$ olarak alınarak elektrik alan bileşenleri yeniden yazılır. Böylece Denklem 3.25 ile tanımlanan enine hareket denklemi elde edilir.

$$\frac{\partial^2 x}{\partial t^2} + x \left[\frac{q\chi V_0}{ma^2} + \frac{qk^2 AV_0}{4m} \cos(kz) \right] \sin(\omega t - \phi) = 0 \quad 3.25$$

Parçacıkların boyuna koordinatı $kz = \omega t$ eşitliği aracılığıyla ifade edilebilir. Burada Denklem 3.25 ile ifade edilen eşitliği ikinci terimi RF odak bozulmasını temsil etmekte olup $\cos(kz) \sin(kz - \phi)$ 'ye bağlıdır. Bu bağımlılığı sadeleştirebilmek için

$\cos(kz) \sin(kz - \phi)$ ifadesinin birim hücre uzunluğu ($l = \beta\lambda/2$) boyunca ortalaması alınabilir.

$$\begin{aligned} \frac{2}{\beta\lambda} \int_0^{\beta\lambda/2} \cos(kz) \sin(kz - \phi) dz &= -\frac{2}{\beta\lambda} \sin(\phi) \int_0^{\beta\lambda/2} \cos^2(kz) dz \\ &\approx -\frac{\sin(\phi)}{2} \end{aligned} \quad 3.26$$

Denklem 3.26 ile tanımlanan enine hareket denklemi $\tau = (\omega t - \phi)/2$ eşitliği kullanılarak Mathieu eşitliği olarak bilinen enine hareket denklemine dönüştürülür.

$$\frac{\partial x}{\partial \tau^2} + (\Delta_{RF} + B \sin(2\tau))x = 0 \quad 3.27$$

Burada Δ_{RF} ve B terimleri sırasıyla RF odak bozulma çarpanı ve enine odaklama çarpanıdır.

$$\Delta_{RF} = \frac{qAV_0 \sin(\phi)}{2mc^2\beta^2} \quad 3.28$$

$$B = \frac{2q\chi V_0}{ma^2\omega^2} \quad 3.29$$

Aslında, B ile tanımlanan odaklama çarpanı χ ile tanımlanan odaklama verimliliğinden daha sıklıkla kullanılan fiziksel bir niceliktir. β parçacıkların görelî hızıdır. Δ_{RF} , ω ile tanımlanan frekans ve A ile tanımlanan hızlandırma verimliliği ile orantılıdır. B uygulanan gerilim ile doğru orantılı açıklığın karesi ile ters orantılıdır. Güçlü bir enine odaklama için küçük bir açıklık ve kıvılcımlanma sınırında yüksek gerilim seçilir. Boyuna kararlılığı sağlamak için $\sin(\phi) < 0$ ve RF odak bozulma çarpanı $\Delta_{RF} < 0$ seçildiğinde demet ekseninden uzakta ola parçacıklar ıraksama eğilimi gösterecektir. Parçacıkların enine hareketini kararlı halde tutabilmek için kararlı bir bölgeyi sağlayan Mathieu eşitliğinin çözümlerine uygun olarak RFQ kovuk parametreleri seçilmesi gerekir. Parçacık demetinin boyuna hareketi için eşitlik Denklem 3.30 ile verilir.

$$\frac{\partial z}{\partial \tau^2} - 2Bz = 0 \quad 3.30$$

Parçacıklar uzunlamasına olarak eşzamanlı bir parçacık etrafında basit bir salınım gerçekleştirir. Bir parçacık eşzamanlı bir parçacığın önüne geçtiğinde hızlı parçacık hücre merkezine daha erken varır. Ancak RF alan tam değerine ulaşmadığı için eş zamanlı parçacığa göre daha düşük hızlandırma alanına maruz kalır. Eşzamanlı bir parçacığın gerisinde kalan parçacık ise hücre merkezine daha geç varır. Bu parçacık ise eş zamanlı parçacığa göre yüksek hızlandırma alanına maruz kalır. Eş zamanlı parçacığa göre faz farkı belirli bir değer üzerinde çıktığında uyumluluk bozulur ve parçacıklar RF kovuğu terk eder.

Hem enine hem de boyuna düzlemde bir eşzamanlı parçacık etrafındaki parçacık salınımı birim RF periyodu veya birim hücre boyu başına faz ilerlemesi ile ifade edilebilir. Bu ifade eş zamanlı parçacıklara göre birim uzunluk başına fazın ne kadar değiştiğinin ölçüsünü verir. Enine ve boyuna faz ilerlemesi sırasıyla Denklem 3.31 ve Denklem 3.32 ile ifade edilir.

$$\sigma^2_t = \Delta_{RF} + \frac{B^2}{8\pi} - \frac{I\lambda^3(1-f_f)}{a^3b\gamma^3}k \quad 3.31$$

$$\sigma^2_l = -2\Delta_{RF} - \frac{2I\lambda^3f_f}{a^3b\gamma^3}k \quad 3.32$$

Bu eşitliklerde a demetin enine RMS yarıçapını ve b demetin boyuna RMS yarıçapını, λ RF dalga boyunu, I demet akımını, f_f elipsoit şekil çarpanını, γ görelî gamayı ifade eder. k ile tanımlanan çarpan ise Denklem 3.33'de verilmiştir. Bu eşitlikteki Z_0 ifadesi boş uzayın empedansını (376.73Ω) temsil eder.

$$k = \frac{3 \times 10^{-6}}{8\pi m_0 c^2} Z_0 q \quad 3.33$$

Düşük enerjili ve yüksek akımlı parçacık demetlerde uzay yükü yüksektir. Akım arttıkça uzay yükü artarken, enerji arttıkça uzay yükü etkisi azalır. Benzer şekilde akım azaldıkça uzay yükü azalırken enerji azaldıkça uzay yükü etkisi artar.

Uzay yükü enine ve boyuna faz ilerlemesi üzerinde sönümleyici bir etkiye sahiptir. Enerjinin yüksek olduğu durumlarda uzay yükü etkisi ihmal edilir ve Denklem 3.34 ve Denklem 3.35 elde edilir.

$$\sigma^2_{t0} = \Delta_{RF} + \frac{B^2}{8\pi} \quad 3.34$$

$$\sigma^2_{l0} = -2\Delta_{RF} \quad 3.35$$

3.3.2 Sekiz terimli potansiyel

İki terimli potansiyel fonksiyonu kullanılarak kanat ucu geometrisi elde edilebilmesine karşın bazı hücrelerin mekanik işlemesi zordur. Bessel fonksiyonu yerine sinüzoidal bir boyuna profilin işlenmesi daha kolaydır. Ayrıca sinüzoidal bir profil aracılığıyla kanat uçları arasında daha yüksek hızlanma gradyanı elde edilebilmektedir. Bu nedenle bir RFQ kovuğunun kanat ucu geometrisi tasarımında genellikle dairesel kanat ucu ve boyuna sinüzoidal kiplenim referans alınarak sekiz terimli potansiyel kullanılır.

$$\begin{aligned} V_{(r,\theta,z)} = \frac{V_0}{2} [& A_{01}r^2r_0^{-2} \cos(2\theta) \\ & + A_{03}\rho^6r_0^{-6} \cos(6\theta) \\ & + A_{10}I_0(k\rho) \cos(kz) \\ & + A_{12}I_4(kr) \cos(4\theta) \cos(kz) \\ & + A_{21}I_2(2kr) \cos(2\theta) \cos(2kz) \\ & + A_{23}I_6(2kr) \cos(6\theta) \cos(2kz) \\ & + A_{32}I_4(3kr) \cos(4\theta) \cos(3kz) \\ & + A_{30}I_0(3kr) \cos(3kz)] \end{aligned} \quad 3.36$$

Sekiz terimli potansiyel fonksiyonun katsayıları ve tanımlamaları Çizelge 3.3'de verilmiştir.

Çizelge 3.3 Sekiz terimli potansiyel katsayıları ve tanımlaması

Katsayı	Tanımlama
A_{01}	Periyodik olmayan kuadrupol terim
A_{03}	Dodecapolar terim
A_{10}	Birincil devirli monopolar terim
A_{12}	Birincil devirli octopolar terim
A_{21}	Birincil devirli kuadrupolar terim
A_{23}	Birincil devirli dodecapolar terim
A_{32}	İkincil devirli octopolar terim
A_{30}	İkincil devirli periyodik monopolar terim

Sonuç olarak bir RFQ tipi çınlayıcı kovuğu tasarımı yapılırken parçacık demetinin maruz kaldığı form bağımlı alanlar ile bu alanlar altında demetin dinamik davranışları arasındaki ödünleşim analizi yapılır. Bu analiz kapsamında kovuk içerisindeki alanlar belirlenir ve bu alanların demet üzerindeki etkileri çözümlenir. Kanat ucu geometrisi, parçacık demetinin hedef başarımlarına göre eniyelenir. Demetin maruz kaldığı alanları belirlemek için demet eksenine yakınlarında (çınlayıcı kovuğun işletimsel dalga boyuna göre çok küçük bir alanda) potansiyel çözümlenmesi yapılır.

4. RFQ KOVUĞU KRİTİK PERFORMANS PARAMETRELERİ

4.1 Kovuk İşletimsel Salınım Sıklığı

Bir RFQ tipi bir çınlayıcı kovuğun işletimsel salınım sıklığı (İSS) belirlenirken RF, demet dinamiği ve yapısal hususlar göz önünde bulundurularak ödünleşim analizi yapılır. Kovuğun ve kanat ucu hücrelerinin boyutu İSS (dalga boyu) ile ters orantılıdır. RFQ kovuğu için yüksek bir İSS seçimi durumunda yapının ve kanat ucu hücrelerinin boyutları küçülmekteyken düşük bir İSS seçimi durumunda yapının ve kanat ucu hücrelerinin boyutları artar. İSS'nin yüksek seçimi her ne kadar daha tıkHz bir yapı elde edilmesine olanak sağlasa da işleme toleransının azalması ve dolayısıyla işleme maliyetinin artması gibi dezavantajları da beraberinde getirir. Öyle ki, geleneksel üretim yöntemleriyle işlenmesi mümkün olmayan bir kanat ucu hücre boyutları söz konusu olabilir.

Düşük bir İSS seçimi durumunda yapı boyutunun artışıyla birlikte toplam yüzey kayıpları da artmakta ve daha yüksek RF güç ihtiyacı söz konusu olmaktadır. RF güç verimini arttırabilmek için genellikle yüksek açıklık empedansı ve yüksek yüzey elektrik alanı istenir. İSS yükseldikçe açıklık empedansı ve oluşturulabilecek en yüksek yüzey elektrik alanı da artmaktadır. Ancak İSS'nin artışıyla RF odak bozunumu da artar. Ödünleşim analizi kapsamında RFQ tipi çınlayıcı kovukların bazı temel özelliklerinin İSS ile ilişkileri Çizelge 4.1'de tanımlanmıştır.

Çizelge 4.1 RFQ kovuk nitelikleri ile İSS ilişkisi

RF Kovuk Nitelikleri	Ölçekleme
RF Odak Bozunumu	$\sim f$
Hücre Boyu ($\sim \beta\lambda$)	$\sim \sqrt{f}$
Tepe Elektrik Alan	$\sim \sqrt{f}$
Açıklık Empedansı	$\sim \sqrt{f}$
Yapı Boyutu	$\sim 1/f$
İşleme Toleransı	$\sim 1/f$

Sonuç olarak, yüksek bir İSS'na sahip bir RFQ tipi çınlayıcı kovuğun küçük yapısı, düşük RF gücü, yüksek açıklık empedansı, yüksek yüzey elektrik alanı, hafif ve az malzeme gibi üstünlüklerinin yanı sıra işletim maliyetini de düşürür. Ancak, hassas üretim ihtiyacı arttıkça kovuk bileşenleri imalat ve bütünleme süreçlerindeki zorluklardan kaynaklı üretim maliyeti de artar. Ayrıca, RF güç kaynaklarının mevcudiyeti (kolay erişebilir olması) ve maliyeti kovuğun İSS'nın seçiminde kritik öneme sahip olan diğer bir etkidir. Bütün bu gereksinimler göz önünde bulundurulduğunda günümüzde dört kanatlı RFQ tipi RF kovuklar için 325 MHz – 425MHz aralığındaki İSS değerleri standart haline gelmiştir (Vretenar 2013). Ancak, literatür incelendiğinde belirtilen bu aralığın üzerinde daha yüksek bir İSS'na (750 MHz) sahip dört kanatlı RFQ tipi çınlayıcı kovuk yapısı hadron terapi gibi medikal uygulamalarda kullanılmak üzere CERN bünyesinde geliştirildiği görülmektedir (Vretenar vd. 2014).

Kanat ucu hücre boyutu, RFQ tipi çınlayıcı kovuğun düşük enerjili giriş kesiminden yüksek enerjili çıkış kesimine doğru artarak büyür. SPP kapsamında geliştirilen dört kanat sınıfı RFQ tipi çınlayıcı kovuğun İSS üretim açısından düşük riskli bir kanat ucu kiplenim geometrisi (mm ölçeğinde en küçük hücre boyu) elde edebilmek ve benzer İSS'na sahip RFQ tipi çınlayıcı kovuklar ile karşılaştırma yapabilmek için 352.21 MHz olarak seçilmiştir.

4.2 Kovuk Kilpatrick Ölçütü

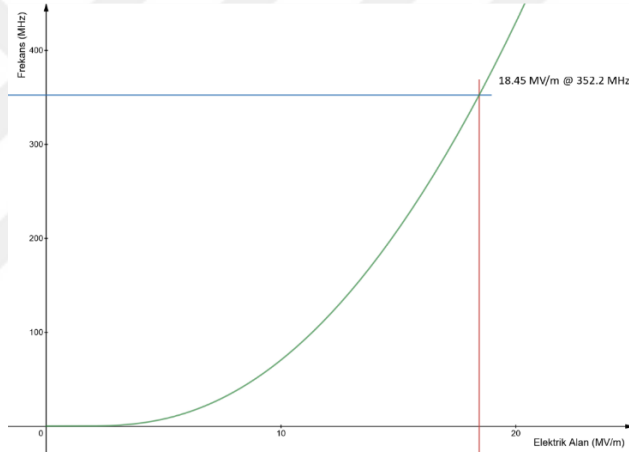
Bir çınlayıcı kovuk içerisinde kullanılabilir en yüksek RF alan Killpatrick ölçütü ile sınırlıdır. En yüksek alan kısıtının aşıldığında işletim güvenliği açısından yüksek risk oluşturan RF delinmeler (RF Breakdown) oluşabilmektedir (Kilpatrick 1957). Delinme, kovuk yüzeylerindeki alan-salımı (Field Emission) ve ikincil elektron salımı kaynaklı akımlardan beslenir ve yüksek alan altında çalışan çınlayıcı kovuk yapıları için kontrol altında tutulmalıdır.

Deneysel veriler aracılığıyla elde edilen Kilpatrick ölçütü hem DC hem de RF yapılar için geçerli bir yaklaşımdır. Belirli bir İSS'na sahip bir çınlayıcı kovuk yapısı için güvenli

alan seviyesinde tasarım yapabilmeye olanak sağlayan deneysel formül Denklem 4.1 ‘de tanımlanmıştır.

$$f_{[MHz]} = 1.64 \times E_k [MV/m]^2 \times e^{-8.5/E_k[MV/m]} \quad 4.1$$

Çınlayıcı kovuk yapısının İSS arttıkça RF delinmeler olmaksızın kullanılabilir en yüksek alan seviyesi artmaktadır. Bu seviye, çınlayıcı kovuğun işletimsel vakum seviyesine ve duvarlarının yüzey kalitesine bağlıdır. Günümüzde, RF alanlara maruz kalan yüzeylere özgü tanımlanmış son işlem teknikleri (mikro talaş kaldırma, pürüzlülük giderme, kaplama vs.) uygulanarak Kilpatrick ölçütü ile tanımlanan eşik değerlerin ötesine geçilebilmektedir.



Şekil 4.1 RF kovuk Kilpatrick Kısıtı

Bir çınlayıcı kovuk tasarımında en yüksek alan kısıtını tanımlamak için Kilpatrick ölçütü (E_k) referans alınır. Kilpatrick ölçütünün üzerinde bir alan (E_s) hedeflenmesi durumunda bir cesaret çarpanı (b) kullanılır.

$$b = \frac{E_s}{E_k} \quad 4.2$$

Dört kanat sınıfı RFQ tipi çınlayıcı kovuk yapısının kanat uçları arasında oluşturulabilir en yüksek alan kovuğun kritik performans parametrelerinden biridir. Kovuğun kanat ucu yakınındaki alanların artırılması durumunda hızlandırma ve odaklama kabiliyeti de

artar. Ancak, bu durum kanat uçları arasındaki mesafenin ve salınım sıklığının bir fonksiyonu olarak RF delinme risklerinin de artmasına neden olur.

Dört kanat sınıfı RFQ tipi çınlayıcı kovuk yapısı içerisinde oluşturulabilir en yüksek alan için diğer bir bağımlılık ise kanat ucu geometrisinden gelir. Kanat uçları, yarıçapı “ a ” olan silindirik bir profile sahip olduğu ve bu uçların demet eksenine olan mesafesi yaklaşık “ a ” mertebesinde olduğu kabul edilirse; bu durumda kanat uçları arasındaki en yüksek alan $1.25V_0/a$ mertebesinde dir. Burada komşu kanat uçlarının $+V_0/2$ ve $-V_0/2$ potansiyelleri altında olduğu ve kanatların kiplenimsiz olduğu varsayılmıştır. İdeal bir kanat ucu geometrisi hiperbolik profile sahiptir. Silindirik profile olduğu gibi yine kanat ucu yarıçapı ve demet ekseninden uzaklığı “ a ” mertebesinde olduğu kabul edilirse; bu durumda kiplenimsiz bir kanat ucu profili için en yüksek alan $1.38V_0/a$ mertebesinde dir. Bu durum kiplenimli bir kanat ucu profili açısından değerlendirildiğinde “ m ” ile tanımlı kiplenim çarpanının 1’den büyük olması nedeniyle kanat uçları ile demet eksenindeki mesafe “ ma ” ‘nın bir fonksiyonu olarak artmakta ve böylece oluşturulabilir en yüksek alanda artmaktadır. En yüksek alanın kanat ucu profili geometrisine bağımlılığı “ k ” ile tanımlanan alan arttırım çarpanı üzerinden değerlendirilebilir.

$$E_s = k \frac{V_0}{r_0} \quad 4.3$$

SPP projesi kapsamında geliştirilen dört kanat sınıfı RFQ tipi çınlayıcı kovuğun kanatlar arası gerilimi (V_0) 60 kV olup, kanat uçlarının demet ekseninden uzaklığı (r_0) 0.2799 cm’dir. Bu kovuğun 352.2 MHz’lik İSS’na karşılık gelen Kilpatrick ölçütü (E_k) 18.45 MV/m’dir. Projede cesaret çarpanı (b) 1.5 olarak belirlenmiş olup, kovuk içerisinde en yüksek izin verilebilir alan değişimi (E_s) 27.675 MV/m olarak kısıtlandırılmıştır. Bu durumda alan arttırım çarpanı (k) 1.29 olan bir kanat ucu profil gereksinimi ortaya çıkmaktadır. Bu gereksinim, kanat ucu profilinin üretimini rahatlatan seviyededir.

RFQ tipi çınlayıcı kovuk yapılarında yüksek güvenilirliği sağlayabilmek için genellikle cesaret çarpanı 2’nin altında tutulur. Cesaret çarpanı çalışma kipine göre değerlendirilirse, sürekli kip çalışan RFQ kovuğu için cesaret çarpanı darbeli mod çalışan RFQ kovuğa göre daha düşüktür.

4.3 Kovuk Giriş Enerjisi

Bir parçacık demetinin enerjisi düştükçe uzay yükü kuvvetleri etkisi artmaktadır. SPP kapsamında geliştirilen RFQ tipi çınlayıcı kovuğa iyon demetini sağlayan kaynağın (iyon kaynağı) tasarımında yüksek gerilim izolasyonunun rahatça sağlanabilmesi için parçacık sökme gerilimi 20 kV'u aşmayacak şekilde kısıtlandırılmıştır.

Çizelge 4.2 İyon kaynağı tasarım parametreleri (Türemen 2019)

Parametre	Değer	Birim
Sökme Enerjisi	20	keV
Çıkış Akımı	<15	mA
Enine Yayınım	<1	$\pi. mm. mrad$
Atma Uzunluğu	<100	μs
Tekrarlama Frekansı	1	Hz

Çınlayıcı kovuğun demet dinamiği tasarımında giriş enerjisinin yanı sıra demet akımı ve yayınımı gibi değişkenler de tasarım parametresi olarak ele alınmıştır. RFQ kovuğunun kanat uç geometrileri elde edilirken demet giriş parametreleri açısından ödünleşim analizi yapılmıştır. Bu parametreler iyon kaynağı gereksinimlerini oluşturmuştur.

5. RFQ KOVUĞU TASARIM METODOLOJİSİ

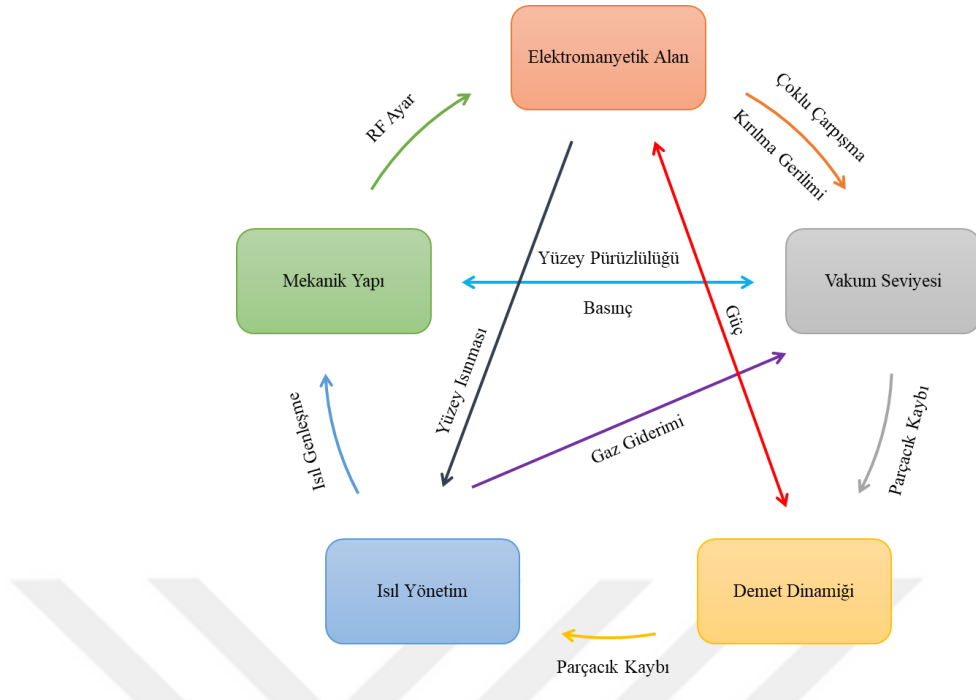
RFQ tipi çınlayıcı kovuklar için geliştirilmiş farklı tasarım stratejileri bulunmaktadır. Her bir RFQ tipi çınlayıcı kovuk için belirli kullanıcı ihtiyaçlarına göre oluşturulmuş özgün gereksinimler bulunur. Bu tip çınlayıcı kovukların belirli bir dereceye kadar serbest olarak seçilebilen birbirleri arasında etkileşimli birçok farklı tasarım parametresi bulunur.

SPP projesi kapsamında geliştirilen dört kanat sınıfı RFQ tipi kovuk yapısı için tasarım parametreleri Çizelge 5.1’de verilmiştir. Tez kapsamında yapılan çalışmalarda SPP tasarım parametreleri referans alınmıştır.

Çizelge 5.1 SPP RFQ çınlayıcı kovuk tasarım parametreleri

Parametre	Değer	Birim
RFQ Sınıfı	4-Kanat	-
Çalışma Modu	Darbeli	-
Giriş Enerjisi	≤ 20	keV
Çıkış Enerjisi	> 1	MeV
Salınım Sıklığı	352.21	MHz
Kovuk Boyu	<1.5	m
Çıkış Akımı	<15	mA
Atma Uzunluğu	<100	μs
Tekrarlama Frekansı	1	Hz

RFQ tipi bir çınlayıcı kovuğun tasarımı elektromanyetik alan, demet dinamiği, ısı yönetim, mekanik yapı ve vakum performansı arasında ödünleşim gerektirir (Şekil 5.1).

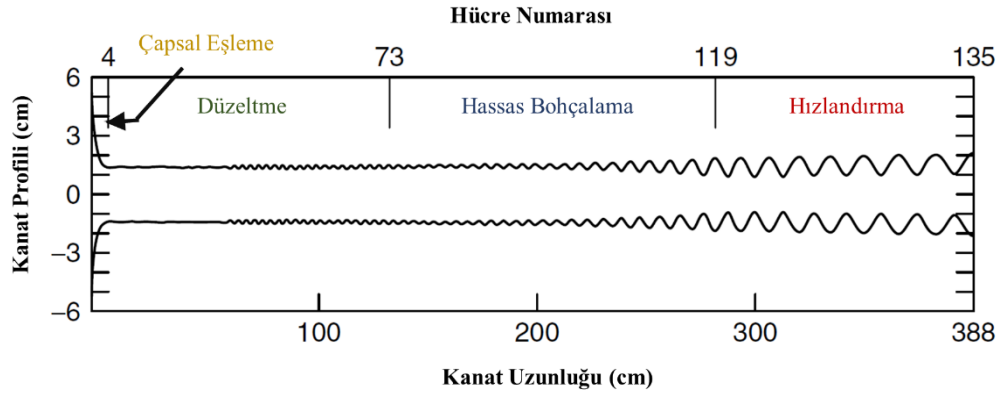


Şekil 5.1 RF kovuk tasarım beşgeni

Bir RFQ tipi çınlayıcı kovuk tasarımı yapılırken hızlandırılacak iyon türü, hedeflenen giriş ve çıkış enerjisi, işletimsel salınım sıklığı ve kanatlar arası gerilimi gibi karakteristik özellikleri tanımlandığında, ilk olarak demet dinamiği tasarımı yapılır. Demet dinamiği tasarımıyla $a(z)$, $m(z)$, $L(z)$ ve $\varphi_s(z)$ gibi geometrik fonksiyonlara bağımlı kanat ucu kiplenimli geometrisi üretilir. Burada $a(z)$ terimi kanat boyunca açıklığı, $m(z)$ terimi kanat boyunca kiplenim çarpanını, $L(z)$ terimi kanat boyunca hücre boylarını ve $\varphi_s(z)$ terimi ise eş zamanlı parçacıkların evresini ifade eder. Kanat ucu geometrisini elde edebilmek için LANL dört kesit yöntemi kullanılabilir.

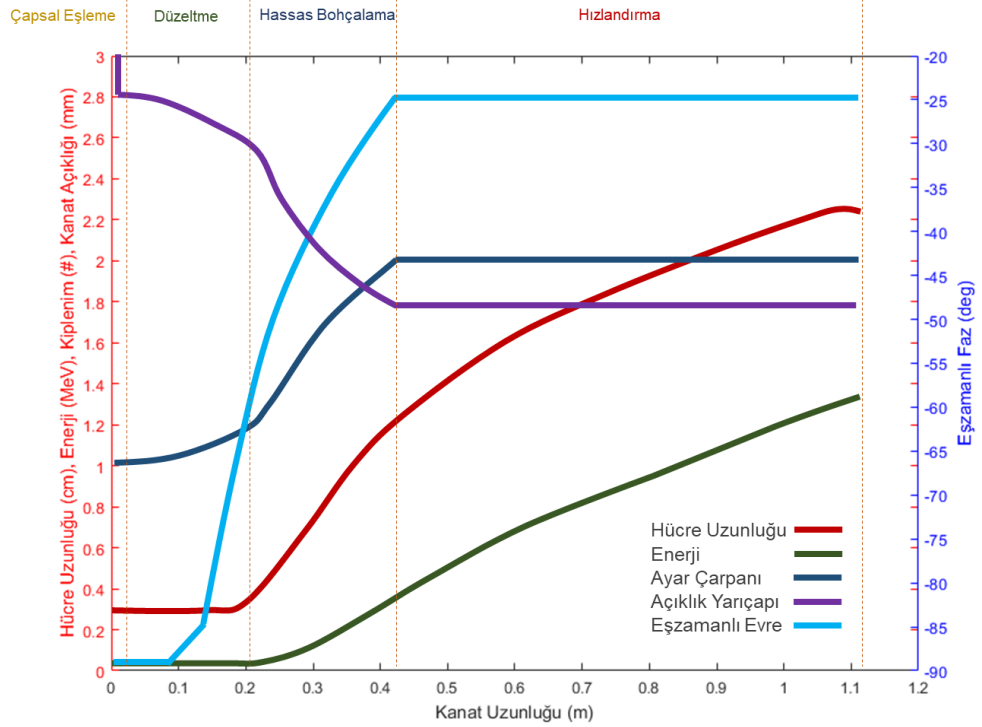
5.1 Kanat Ucu Geometrisi

Bir RFQ tipi hızlandırıcı kovuğun kanat ucu geometrisi demet dinamiği tasarımıyla belirlenir. LANL'nda geliştirilen dört kesit yöntemi, demet dinamiği tasarımı için standartlaşmış bir yöntemdir. Bu yöntemde, RFQ kovuğunun kanat uçları çapsal eşleme, düzeltme, hassas bohçalama ve hızlandırma olmak üzere dört ana işlevi yerine getiren kesimlere ayrılır (Şekil 5.2).



Şekil 5.2 RFQ kovuğu içerisinde dört kesit dağılımı (Wangler 2008)

Çınlayıcı kovuğun çapsal eşleme kesiminde DEDA hattından gelen DC demetin kovuk içerisindeki güçlü odaklama alanı için uyumlandırılır. Düzeltici kesimde parçacık demeti için bohçalama süreci başlar. Ardından hassas bohçalayıcı kesimine giren parçacık demeti tamamen bohçalanır ve yavaş yavaş hızlandırılır. Hızlandırma kesiminde ise bohçalı demet tamamen hızlandırılır. LANL tasarım yöntemi demet yayınının küçük bir artışla kısa bir RFQ tipi çınlayıcı kovuk yapısını elde edebilmemize olanak sağlar.



Şekil 5.3 SPP için kovuk kanat ucu geometri fonksiyonları

SPP kapsamında geliştirilen RFQ tipi çınlayıcı kovuk yapısı için TOUTATIS, LIDOS ve DEMIRCI kodları aracılığıyla demet dinamiği tasarımı yapılmıştır. Demet dinamiği tasarımı sonucunda elde edilen kanat ucu geometrik fonksiyonları Şekil 5.3'de gösterilmiştir.

5.2 Çınlayıcı Kovuk RF Tasarımı

RFQ tipi çınlayıcı kovuğun iki boyutta RF tasarımı için Poisson/Superfish, üç boyuttu RF tasarımı CST Studio Suite yazılım aracı kullanılmıştır. Hem CST Studio Suite hem de Superfish araçları elektrik ve manyetik alanların bulunduğu etkileşim bölgesinin örgülenip ayrıklaştırılmasıyla alanların çözümlenmesi tekniğine dayanır. Sınır koşullarıyla belirlenen uygun noktalardan başlayarak örgünün tanımlandığı ızgara üzerinde kısmi ayrımsal eşitlikler sayısal olarak çözülür. Sınır koşulları hem Neumann hem de Dirichlet olabilir. Neumann sınır koşullarında sınırlar mükemmel iletken ve elektrik alan bu sınırdaki yüzeye dik, Dirichlet sınır koşulunda elektrik alan sınıra paraleldir.

5.2.1 Poisson/Superfish

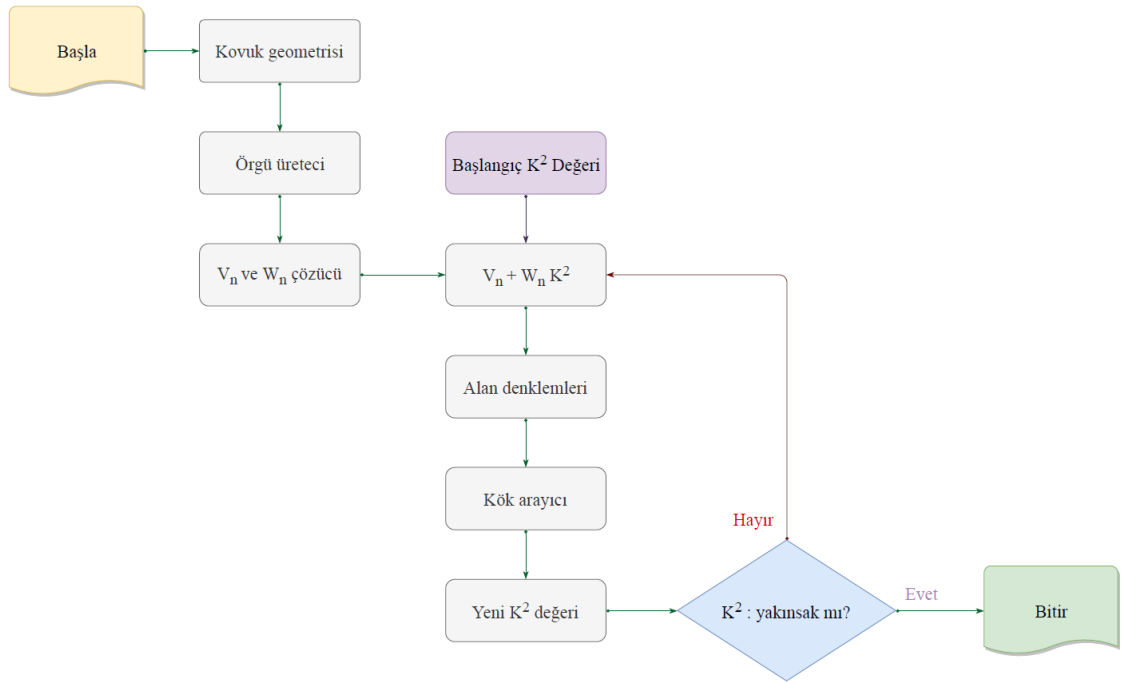
LAACG bünyesinde geliştirilen Poisson/Superfish durgun elektrik, durgun manyetik ve RF alanları içeren problemlerin kartezyen ve silindirik koordinatlarda çözümünün sağlanabildiği bir çözücü ortamdır. Bu çözücü Windows işletim sisteminde Lahey Fujitsu Fortran derleyicisi varlığında çalışmaktadır. Silindirik simetrik çınlayıcı kovuk tasarımında sıklıkla kullanılmaktadır. Bu kod, geometri tanımlama, örgü oluşturma, elektromanyetik alan çözme, çözüm sonrası yeniden işleme (Post-processing) ve elektromanyetik alan parametrelerini çizdirmek için gerekli verilerin elde edildiği betiklerin birleşiminden oluşur.

Superfish arayüzünde tasarlanan yapının geometrisi 2 boyutta x-y düzleminde tanımlanır. Tüm boyutlar cm ölçeğindedir. Örgüleme modülüyle (AUTOMESH), yapının örgü modeli elde edilir ve sınır koşulları uygulanır. Alan çözücü modülü (FISH) yapının rezonans frekansını çözer ve T35 isimli ikili kütük üretir. Bu kütükler *Post processing*

modülleri tarafından kullanılır. Altprogram SFO, yapı tarafından desteklenen özdeğer modunun elektromanyetik alan parametrelerini hesaplar. WSFLOT, alan konturlarını çizmek için kullanılır.

Poisson denklemi çözülürken uygun sınır koşulları tanımlanmalıdır. Poisson/Superfish çözücü ortamında Dirichlet ve Neumann olmak üzere iki tip sınır koşulu kullanılmaktadır. Dirichlet sınır koşulu problemin tanımlandığı ortamın sınırlarında potansiyelin varlığını, Neumann sınır koşulu ise potansiyelin türevinin tüm sınırlara dik doğrultuda olduğunu belirtmektedir.

RFQ tipi çınlayıcı kovuğun iki boyutlu enine kesit tasarımı ve eniyileme sürecinde Poisson Superfish çözücü ortamında yer alan CavityTuning, Electrostatic, RadioFrequency ve PlottingCodes isimli alt belgeliklerden yararlanılmıştır. Hızlandırıcı kovuklarında özdevinimli ayara olanak sağlayan CavityTuning alt belgeliği ile RFQ çınlayıcı kovuğu için eniyileme çalışmaları yapılmıştır. Bu eniyileme çalışmaları sürecinde RFQFish arayüzü kullanılmıştır.



Şekil 5.4 Superfish Rezonans Frekansı Hesaplama Algoritması

SUPERFISH, girdi dosyasında yer alan başlangıç frekansını referans olarak hesaba başlar. Sınır koşullarını sağlayan rezonans frekans için yakınsamayı bulmak için dalga parametrelerini değiştirir. Superfish ile rezonans frekansının belirleme algoritması Şekil 5.4’de gösterilmiştir.

5.2.2 CST STUDIO SUITE

CST STUDIO SUITE, 1966 yılında Kane Yee’nin 1966 yılında yön bağımsız bir ortam için Maxwell eşitliklerini içeren başlangıç sınır değer problemlerinin sayısal çözümü hakkında yaptığı çalışmaların ardından 1976 yılında Thomas Weiland tarafından tanımlan sonlu tümlene tekniklerine dayanan üç boyutlu yazılım aracıdır.

RF güç besleme, vakum ve RF ayarlayıcılar için farklı portların varlığından dolayı RF hızlandırıcı yapıların çoğu eksenel simetrik değildir. Bu nedenle SUPERFISH gibi iki boyutlu tasarım kodlarıyla doğru bir tasarım yapmak mümkün değildir. Üç boyutlu tasarım araçlarına ihtiyaç duyulur. Bu nedenle tez çalışması kapsamında CST STUDIO SUITE aracı kullanılmıştır.

CST STUDIO SUITE, çinlayıcı kovuk içerisindeki alanları çözmek için uygun sınır koşulları altında Maxwell denklemlerini çözer ve sonlu tümlene tekniklerini kullanır. Verilen bir frekans aralığında olabilecek kipler için elektromanyetik alan dağılımları ve rezonans frekansını hesaplamak için Eigensolver kullanılır. Burada yapı sınırları mükemmel elektrik iletken olarak (PEC) varsayılır ve malzeme kayıpları ihmal edilir. Sonlu iletkenliğe sahip metallerin gerçek yapısını tasarlamak için, bu kod zaman alan ve frekans alan çözücülerini sunmaktadır. Kalite faktörü, şönt empedansı, geçiş süresi faktörü ve herhangi bir yön boyunca alan bileşenlerindeki değişiklikler kodda sağlanan post processorler kullanarak hesaplanmaktadır.

6. RFQ KOVUĞU ELEKTROMANYETİK TASARIMI

RFQ tipi çınlayıcı kovuğun elektromanyetik tasarım sürecinde uygun sınır koşulları (Neumann ve Dirichlet) uygulanarak sonlu öğeler yöntemleriyle çözümlenip, çınlayıcı kovuğun elektromanyetik alan davranışları analiz edilmiştir. Alan çözümleri yapıldıktan sonra açıklık direnci, güç kaybı, nitelik çarpanı, geometrik değişimlerin salınım sıklığı üzerine etkisi gibi fiziksel değiştirgeler farklı kovuk geometri sınırları için eniyilenmiştir. Bu çalışmalar için Superfish ve CST Studio Suite yazılımları kullanılmıştır.

6.1 İki Boyutta RF Tasarımı

İlk olarak RFQ çınlayıcı kovuk geometrisinin iki boyutlu modeli oluşturulmuştur. Kovuğun enine kesit geometrisi SUPERFISH arayüzü kullanılarak çözümlenmiştir. Oluşturulan geometri için örnek bir girdi kütüğü Şekil 6.1’de verilmiştir.

```
RFQ full quadrant
Lowest dipole-mode frequency = 352.2 MHz
Bore radius at quadrupole symmetry point r0 = 0.2799 cm
Vane-tip radius of curvature rho = 0.25 cm

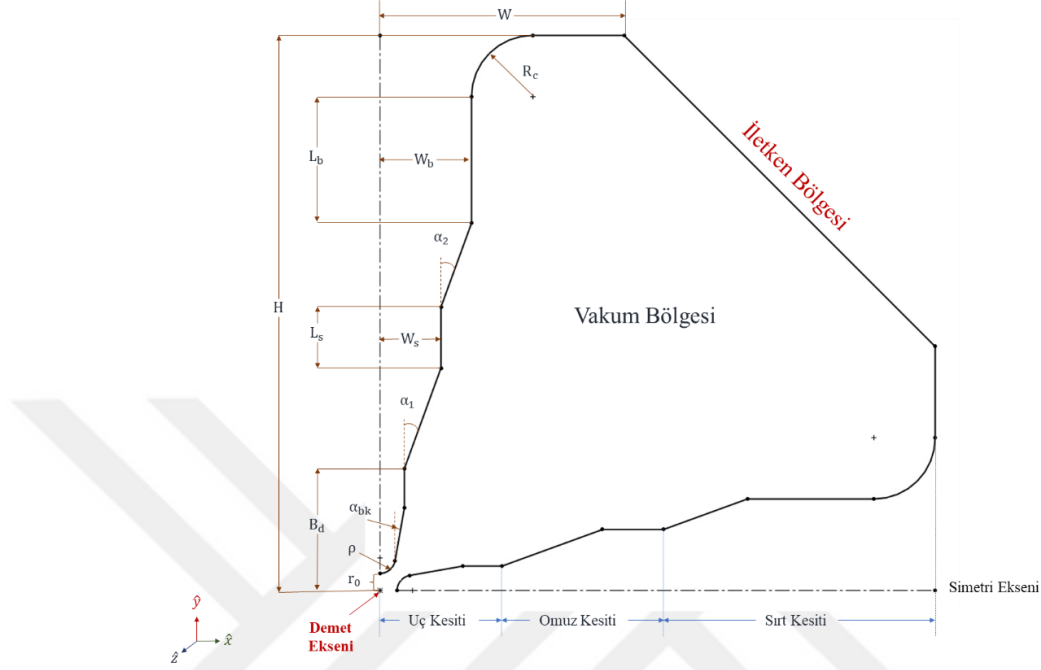
&reg kprob=1, ; Superfish problem
; Define X (physical) and K (logical) line regions:
xreg1=0.70, kreg1=50,
xreg2=1.4, kreg2=80,
xreg3=2.1, kreg3=95,
kmax=120,
; Define X (physical) and K (logical) line regions:
yreg1=0.70, ireg1=50,
yreg2=1.4, ireg2=80,
yreg3=2.1, ireg3=95,
lmax=120,
icylim=0, ; Cartesian coordinates
freq=352.2, ; Starting frequency
dslope=-1, ; Allow convergence in one iteration
rfq=1, ; Cavity type is RFQ
; The following line is for dipole modes; use nbslf=0 for quadrupole modes
nbslf=0, ; Neumann boundary condition at left edge
lines=0 & ; allow line region points to move in mesh optimization

&PO X=0.0,Y=0.0 &
&PO X=0.0,Y=0.2799 &
&PO NT=2,X0=0.0,Y0=0.5299, X=0.2462019382531,Y=-0.0434120444167 &
&PO X=0.4,Y=1.358720107061 &
&PO X=0.4,Y=2 &
&PO X=1,Y=3.648486451673 &
&PO X=1,Y=4.648486451673 &
&PO X=1.5,Y=6.0222251614 &
&PO X=1.5,Y=8.105535945011 &
&PO NT=2,X0=2.5,Y0=8.105535945011, X=0.0,Y=1 &
&PO X=3.771636481099,Y=9.105535945011 &
&PO X=9.105535945011,Y=3.771636481099 &
&PO X=9.105535945011,Y=2.5 &
&PO NT=2,X0=8.105535945011,Y0=2.5, X=0.0,Y=-1 &
&PO X=6.0222251614,Y=1.5 &
&PO X=4.648486451673,Y=1 &
&PO X=3.648486451673,Y=1 &
&PO X=2,Y=0.4 &
&PO X=1.358720107061,Y=0.4 &
&PO X=0.4864879555833,Y=0.2462019382531 &
&PO NT=2,X0=0.5299,Y0=0.0, X=-0.25,Y=0.0 &
&PO X=0.0,Y=0.0 &
```

Şekil 6.1 RFQ kovuğu çeyreği için SUPERFISH girdi kütüğü

İki boyuttaki kovuk modelinin ana hedefleri demet dinamiği ve mekanik tasarım ile uyumlu uygun salınım sıklığında, yüksek kalite faktörüne sahip enine kesit geometrisi

elde etmektedir. RFQ tipi çınlayıcı kovuk yapısının çeyrek simetrlili parametrik modeli Şekil 6.2’de verilmiştir.



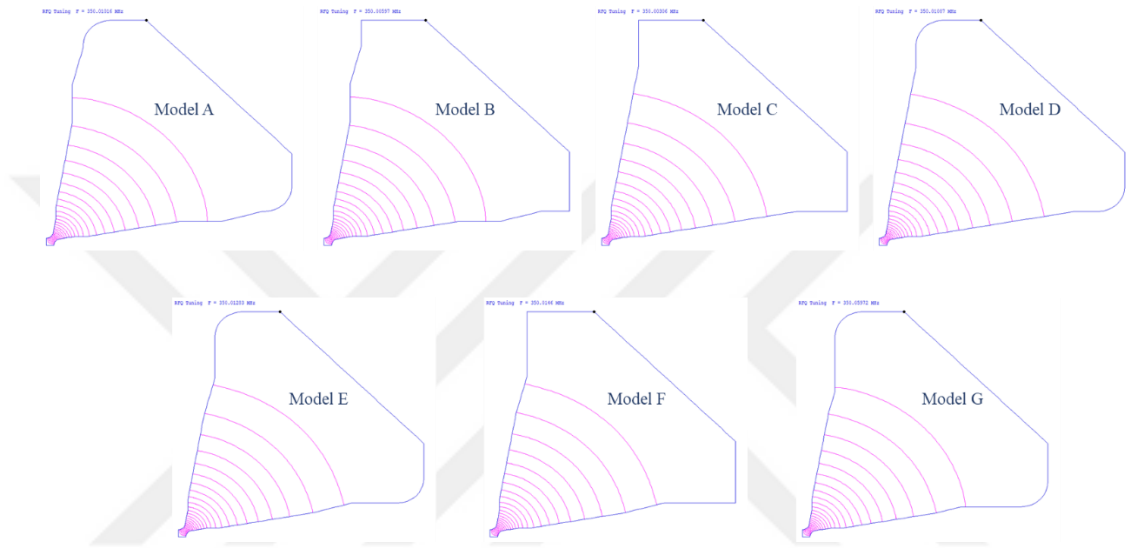
Şekil 6.2 RFQ tipi RF kovuğu çeyrek kesik (enine) değiştirgesel gösterim

Çizelge 6.1 Dört kanatlı RFQ kovuğu için iki boyut tasarım değiştirgeleri

Değiştirge	Tanımlama	Birim
r_0	Kanatlar arası ortalama açıklık yarıçapı [cm].	cm
ρ	Kanat ucu eğrilik yarıçapı	cm
α_{bk}	Kanat ucu eğrilik yarıçapından işleme bölgesine koparma açısı	°
α_1	Kanat ucu işleme bölgesinden omuz bölgesine yükselme açısı	°
α_2	Kanat omuz bölgesinden sırt bölgesine yükselme açısı	°
B_w	Kanat ucu işleme bölgesinin yarı genişliği	cm
B_D	Kanat ucu işleme bölgesinin demet ekseninden uzaklığı	cm
W_s	Kanat omuz bölgesi yarı genişliği	cm
L_s	Kanat omuz bölgesi uzunluğu	cm
W_b	Kanat sırt bölgesi yarı genişliği	cm
L_b	Kanat sırt bölgesi uzunluğu	cm
R_c	Kanat tabanı dış duvar yarıçapı	cm
H	Kanat tabanının demet ekseninden uzaklığı	cm
W	Kanat tabanı yarı genişliği	cm

Parametrik model için iki boyutlu tasarım değiştirgeleri Çizelge 6.1’de tanımlanmıştır.

SPP gereksinimleri referans alınarak RFQ tipi çınlayıcı kovuk yapısı için parametrik model üzerinden yedi ana konfigürasyon oluşturulmuştur (şekil 6.2). Bu modellerde açıklık yarıçapı 0.2799 cm ve kanat uçlarının eğrilik yarıçapları 0.25 cm’dir. Bu değerler demet dinamiği tasarımından gelen geometrik kısıtlardır.



şekil 6.3 Dört kanatlı RFQ tipi çınlayıcı kovuğu konfigürasyon modelleri

Sırasıyla Model A, Model B, Model C, Model D, Model E, Model F ve Model G ile tanımlanan yedi ana konfigürasyon modeli SUPERFISH ara yüzü kullanarak eniyelenmiş ve işletimsel salınım sıklığı (TE_{210} kipi), nitelik arpanı (Q), açıklık empedansı (Z), r/Q ve güç kaybı ve güç kaybı (P_d) gibi RF kovuk karakteristik özellikleri hesaplanmıştır.

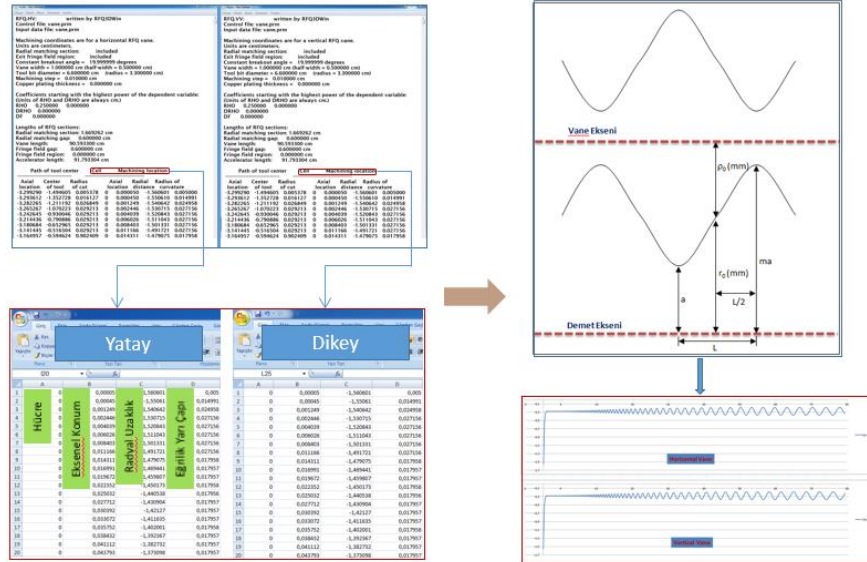
Model A ile tanımlanan konfigürasyon modelinin karakteristik özellikleri SPP gereksinimlerini karşılamıştır. Burada işletimsel salınım sıklığının 350 MHz’e göre eniyelenmesinin sebebi üretim ve bütünleme sürecinde karşılaşılabilecek olası kusurlara karşı önlemdir. Burada 2.2 MHz’lik salınım sıklığı kayması kovuk üzerinde bulunan RF ayarlayıcılar aracılığıyla düzeltilbilir mertebededir.

Çizelge 6.2 RFQ kovuğu konfigürasyon modelleri hesapları

Model	f (MHz)	Q	Z (Mohm/m)	r/Q (ohm)	P _d (W/cm)
A	350.01016	10566.6	2630.061	6.065	122.2570
B	350.00597	10293.5	2562.161	6.065	125.4969
C	350.00306	10189.8	2531.324	6.053	127.0258
D	350.01087	10485.0	2614.342	6.075	122.9921
E	350.01283	10430.2	2598.729	6.071	123.7310
F	350.01460	10168.8	2533.683	6.071	126.9075
G	350.05972	10432.6	2601.387	6.075	123.6046

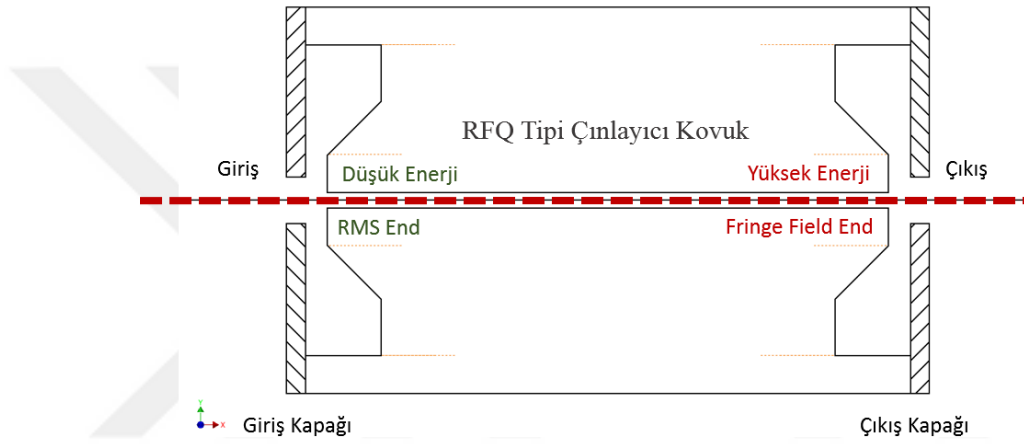
6.2 Üç Boyutta RF Tasarımı

Kovuğun iki boyutlu enine kesit geometrisi ve kanat ucu geometrik fonksiyonları ile üretilen kiplenimli uç profili kullanılarak kovuğun üç boyutlu modeli oluşturulur. Bunun için ilk olarak demet dinamiği tasarımıyla elde edilen kanat ucu geometrik fonksiyonlar (Şekil 5.3) kullanılarak kiplenimli uç profili çizdirilir (Şekil 6.4).



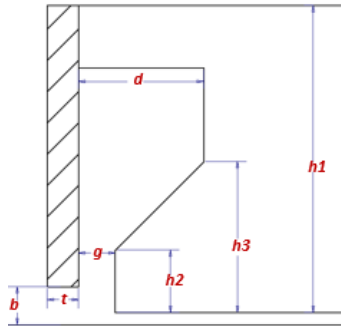
Şekil 6.4 Kanat ucu geometrik fonksiyonları ve kiplenimli profil

Elde edilen üç boyutlu yapı enine elektrik ve boyuna manyetik alanların sürekliliğini devam ettirebilmek için uygun değildir. TE_{210} kipinde çalışan RFQ tipi çınlayıcı kovuğun çalışma prensibi gereği kovuk içi alan dağılımına göre manyetik alanlar giriş ve çıkış kapaklarına paralel olmak zorundadır. Burada uygun kipte gerekli RF alanların demet eksen üzerinde oluşturulabilmesi için kanat profil kiplenimi ve iç hacmin enine kesit sınırları sabit kalmak koşuluyla üç boyutlu modelin giriş ve çıkış bölgeleri için empedans uyumlama tasarımı yapılır. Empedans uyumlama için kovuğun giriş ve çıkış bölgelerinin şematik gösterimi Şekil 6.7’de verilmiştir.



Şekil 6.7 Üç boyutlu RFQ kovuğun giriş ve çıkış bölgeleri şematik gösterimi

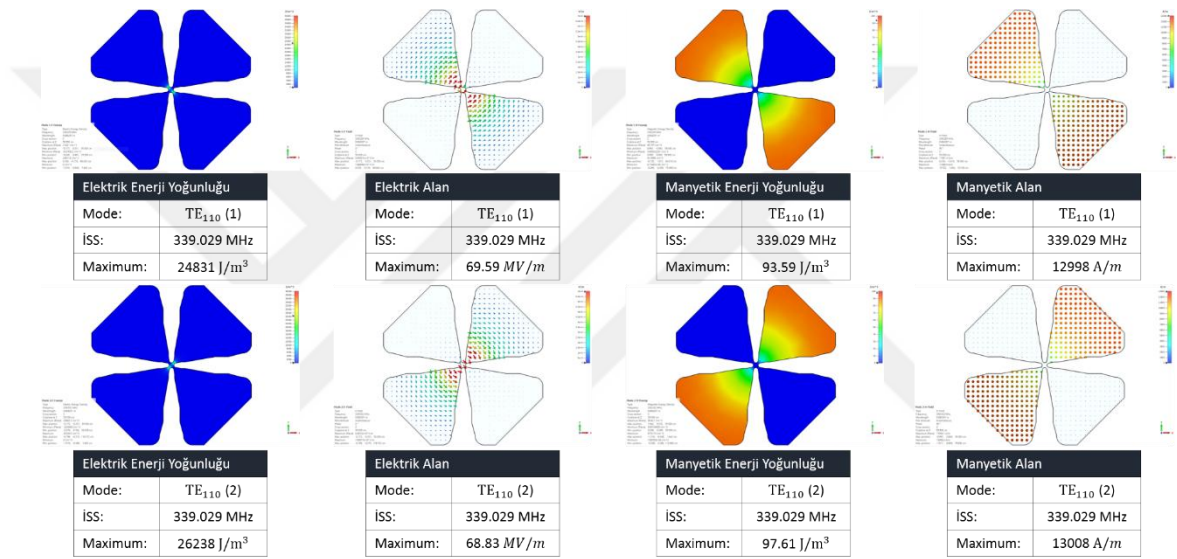
Çınlayıcı kovuğun empedans uyumlama çalışmaları yapabilmek için giriş ve çıkış bölgelerinin parametrik modelleri oluşturulmuştur (Şekil 6.8). Bu modeller üzerinde uygun (TE_{210} kipi) elektrik alan ve manyetik alan dağılımını elde etmek üzere eniyileme çalışmaları yapılmıştır.



Şekil 6.8 Üç boyutlu RFQ kovuğu giriş ve çıkış bölgesi parametrik modeli

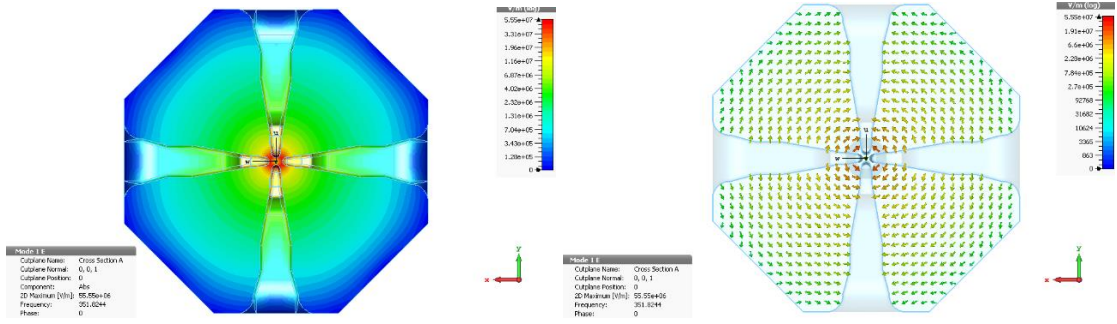
İki boyutlu enine kesit geometrisi ve kanat-ucu profili geometrik fonksiyonları kullanılarak oluşturulan üç boyutlu kovuğun giriş ve çıkış empedans uyumlamaları yapılarak elde edilen eniyilenmiş kovuk modelinde kovuğun işletimsel salınım frekansı 351 MHz olarak hesaplanmıştır.

Elde edilen kovuğun TE_{110} kipleri için enine kesit alan davranışları (elektrik alan ile elektrik enerji yoğunluğu ve manyetik alan ile manyetik enerji yoğunluğu) işletimsel salınım frekansı ile birlikte Şekil 6.9’da verilmiştir.

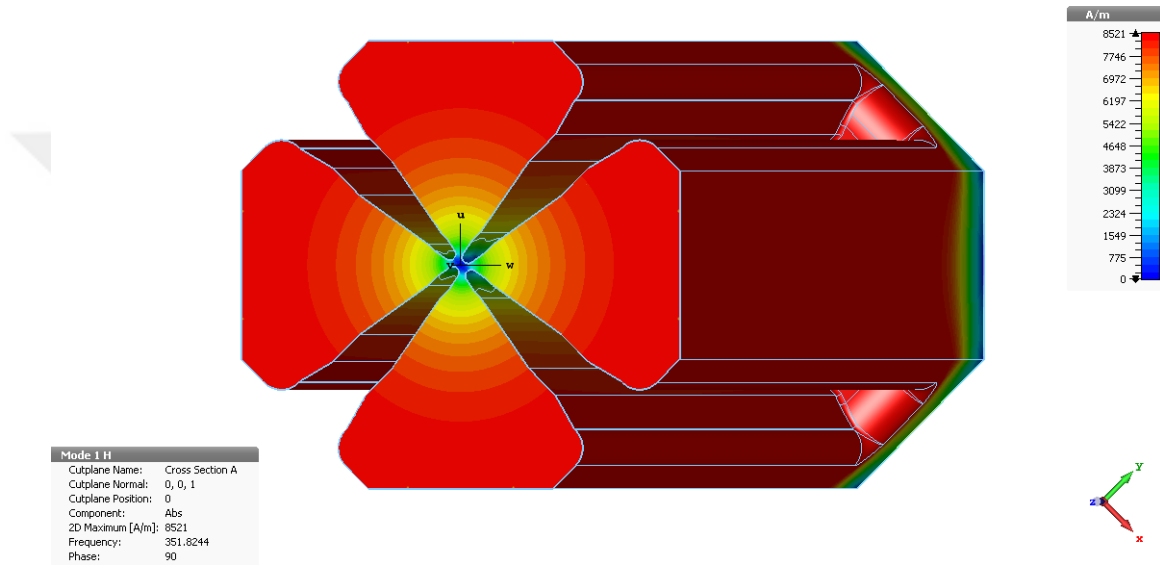


Şekil 6.9 SPP RFQ kovuğu TE_{110} kipleri alan davranışları (Enine Kesit)

Eniyileme çalışmaları sonucunda elde edilen üç boyutlu RFQ kovuğu yapısının ana işletim kipi TE_{210} için enine kesit elektrik alan dağılım ve çizgileri Şekil 6.10’da verilmiştir. Ayrıca yine enine kesit için manyetik alan dağılımı Şekil 6.11’de verilmiştir. Enine düzlemdeki kanatlar arasında hızlandırılmış iyonları odaklayan elektrik alan kovuk merkezinde maksimum değerdedir ve kovuk duvarlarına doğru gidildikçe minimum değere ulaşmaktadır.

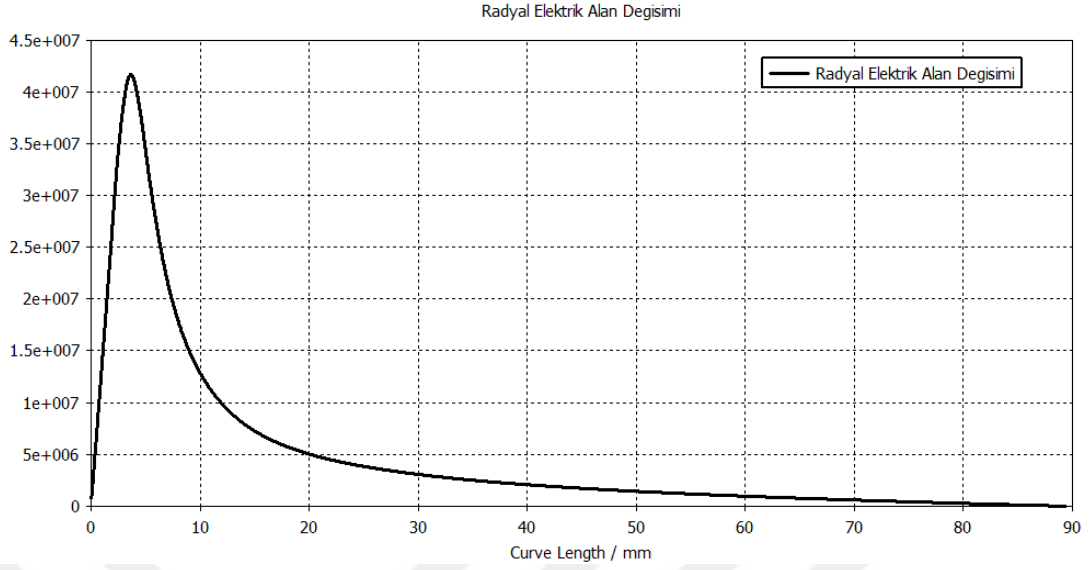


Şekil 6.10 Üç boyutlu RFQ kovuğu elektrik alan dağılımı (Enine Kesit)

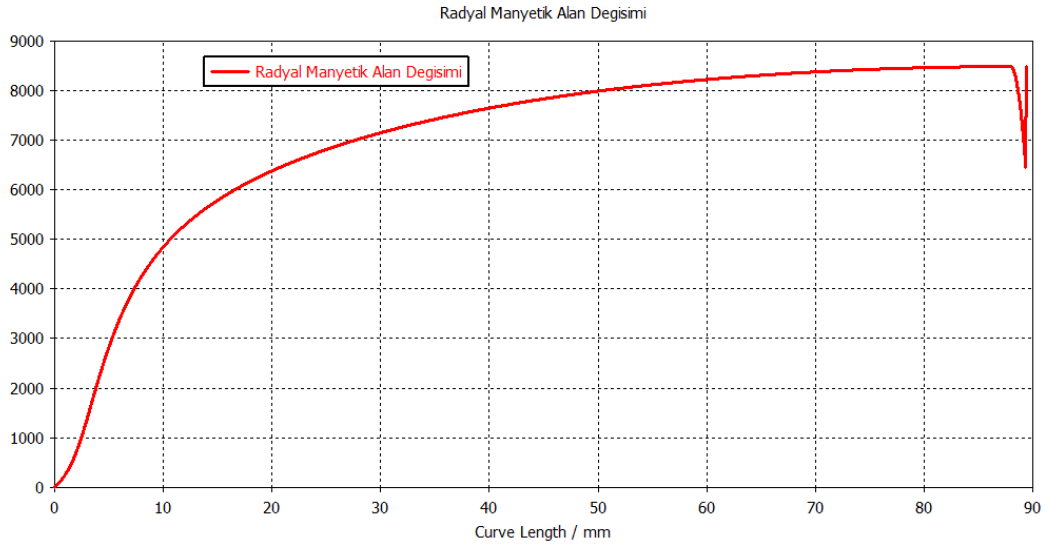


Şekil 6.11 Üç boyutlu RFQ kovuğu manyetik alan dağılımı (Enine Kesit)

RFQ kovuğu yapısının enine kesitinin çeyrek kuadrantı üzerinde $\theta = 45^\circ$ içi radyal yöndeki elektrik ve manyetik alan dağılımları Şekil 6.12 ve Şekil 6.13'de verilmiştir. Kovuk merkezinden radyal olarak kovuk duvarlarına doğru bir çizgi çizilerek bu alan dağılımları elde edilmiştir ve Şekil 6.12'den görüleceği üzere, elektrik alan $\sim 3.65\text{mm}$ sonra logaritmik olarak kovuk duvarlarına doğru azalmaktadır. Manyetik alan için ise, kovuk merkezinde sıfırdır ve kovuk duvarlarına doğru artar ve duvarda maksimum değerine ulaşır.



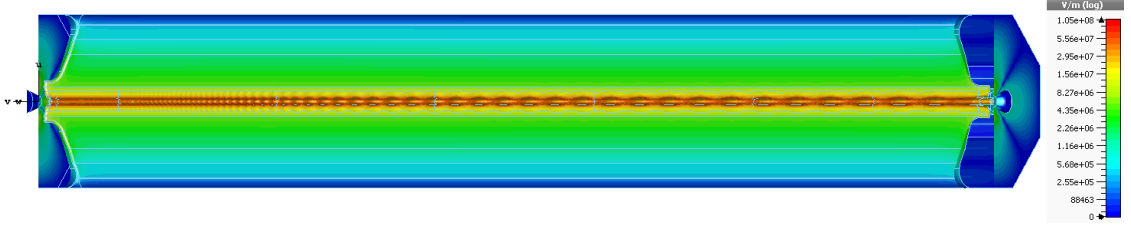
Şekil 6.12 Enine kesitte tek kuadrant için elektrik alan dağılımı ($\theta = 45^\circ$)



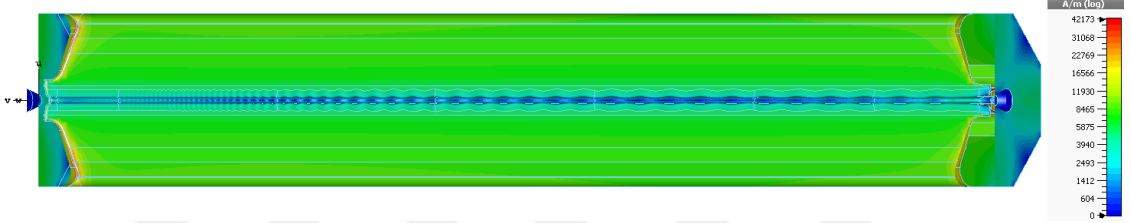
Şekil 6.13 Enine kesitte tek kuadrant için manyetik alan dağılımı ($\theta = 45^\circ$)

TE_{210} kipinde çalışan bir RFQ kovuk için elektrik alan kanatlar arasında indüklenirken manyetik alan kovuk duvarları boyunca maksimum değerdedir ve kanat eksenleri boyunca boyuna hareket eder. Kovuk yapısının ana salınım kipindeki boyuna kesitte parçacığın hızlanmasını ve bohçalanmasını sağlayan elektrik alan Şekil 6.14'de gösterilmiştir. Dağılımdan görüleceği üzere elektrik alan kovuk eksenı boyunca maksimum değerdedir ve kovuk duvarlarına doğru giderek azalmaktadır. Kovuk yapısının ana salınım kipindeki boyuna kesitte manyetik alan dağılımı ise Şekil 6.15'de

gösterilmiştir. Manyetik alanın duvarlarda maksimum değere ulaştığını görülmektedir. Böylece, eniyileme çalışmaları sonucu CST yazılımı ile kovuk için benzetilmiş elektrik ve manyetik alan sonuçları teori ile tutarlıdır ve kovuğun düzgün modellendiğini göstermiştir.

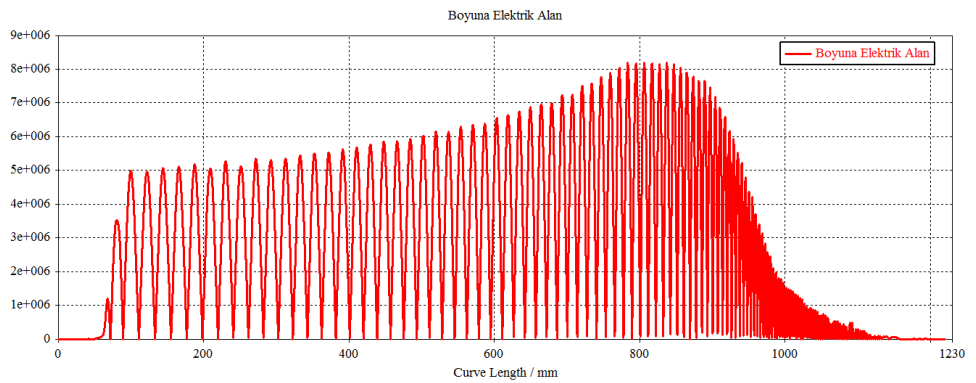


Şekil 6.14 Üç boyutlu RFQ kovuğu elektrik alan dağılımı

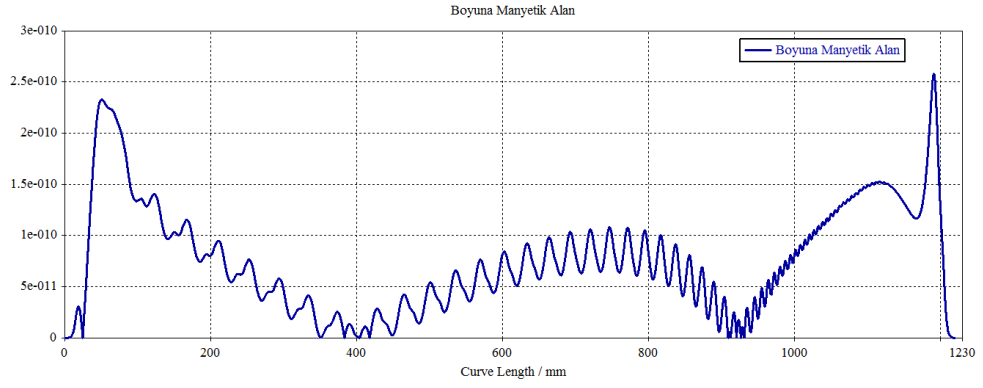


Şekil 6.15 Üç boyutlu RFQ kovuğu manyetik alan dağılımı

Kovuğun demet ekseninde oluşan boyuna elektrik ve manyetik alanlar sırasıyla Şekil 6.16 ve Şekil 6.17’de gösterilmiştir. Burada demet ekseninde yakınlarında manyetik alan minimum ve elektrik alan maksimum seviyededir.

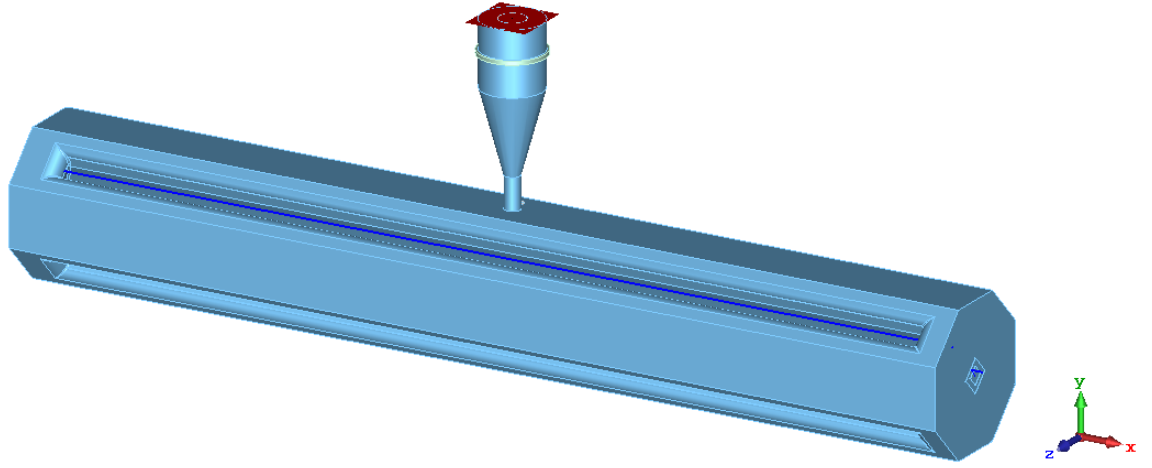


Şekil 6.16 Üç boyutlu RFQ kovuğu boyuna elektrik alan



Şekil 6.17 Üç boyutlu RFQ kovuğu boyunca manyetik alan

Sabit frekansta salınımın olduğu kovuklarda, kovuk duvarlarında kaybolan gücü karşılayacak ve kovuk eksenini boyunca parçacığın hızlandırılması için gerekli olan elektrik alanın indüklenmesini sağlayacak özgün en az bir RF bağdaştırıcıya ihtiyaç vardır. RF bağdaştırıcı istenilen RF gücünü kovuğa depolanabilmesini sağlamak amacıyla kullanılır. Hızlandırıcı kovuğun beslenmesi için endüktif ve kapasitif olmak üzere iki çeşit yöntem vardır. RFQ hızlandırıcısının geometrisinden dolayı, kovuk kanatları boyunca elektrik alanının ve duvarlarda manyetik alan oluşması bağdaştırıcı tasarımında endüktif besleme yöntemi (manyetik bağdaştırma) seçilmesini gerektirmektedir. Bunun için birçok RFQ hızlandırıcısında tercih edilen bakırdan oluşan ve farklı geometrilere sahip ilmek kullanılmaktadır. SPP projesinin gereksinimlerini karşılayacak şekilde 120 kW pik RF gücünü kovuğa aktaracak eş eksenli tipi geometri kullanılarak CST Studio Suite yazılımı yardımıyla eniyileme çalışmaları gerçekleştirilerek üretime uygun bir bağdaştırıcı tasarlanmıştır. Üç boyutlu RFQ kovuğu ile bağdaştırıcısının EM benzetimleri, CST yazılımının "CST Microwaves" paketinin "eigenmode" ve "frekans alanı" çözümleri ile yapılmıştır (Şekil 6.18). Eigenmode çözümleri yardımıyla kovuk ve bağdaştırıcının kalite faktörleri, harcanan güç değerleri gibi RF özelliklerinin yanı sıra kovuk ve bağdaştırıcı arasında güç aktarımının ölçüsü olan β bağdaştırma katsayısı elde edilmiştir. $\beta = 1$ durumunda kovuk ve bağdaştırıcı arasında güç eşleşmesi, yani bağdaştırıcıdan kovuğa minimum kayıpla güç aktarımı elde edilmiş olur. "frekans alanı" çözümleri yardımıyla da yine gerekli eniyileme çalışmaları yapılarak sistemin saçılma parametreleri elde edilmiştir.



Şekil 6.18 Üç boyutlu RFQ kovuğu ve bağlaştıracısı

Ek olarak, hızlandırıcı sistemlerinde önemli ve dikkate alınması gereken “Elektron Çığ Oluşumu” (Multipacting-Multiple impaction) etkisi de dikkate alınarak bağlaştıracı için en uygun geometri elde edilmiştir.

7. SONUÇ ve TARTIŞMA

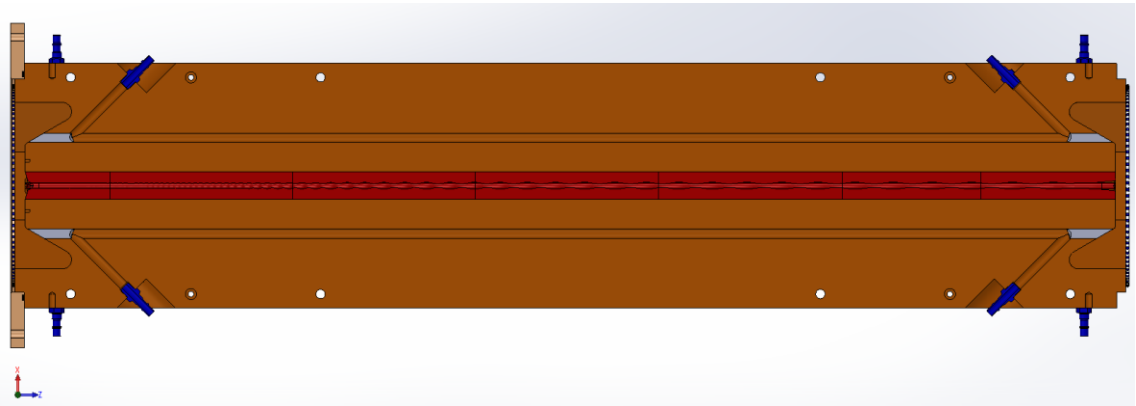
İki ve üç boyutlu kovuk tasarım faaliyetleri sonucunda elde edilen kovuk yapısı için bazı karakteristik kovuk nicelikleri için özet tablo Çizelge 7.1’de verilmiştir.

Çizelge 7.1 İki boyut ve üç boyutlu kovuk hesapları

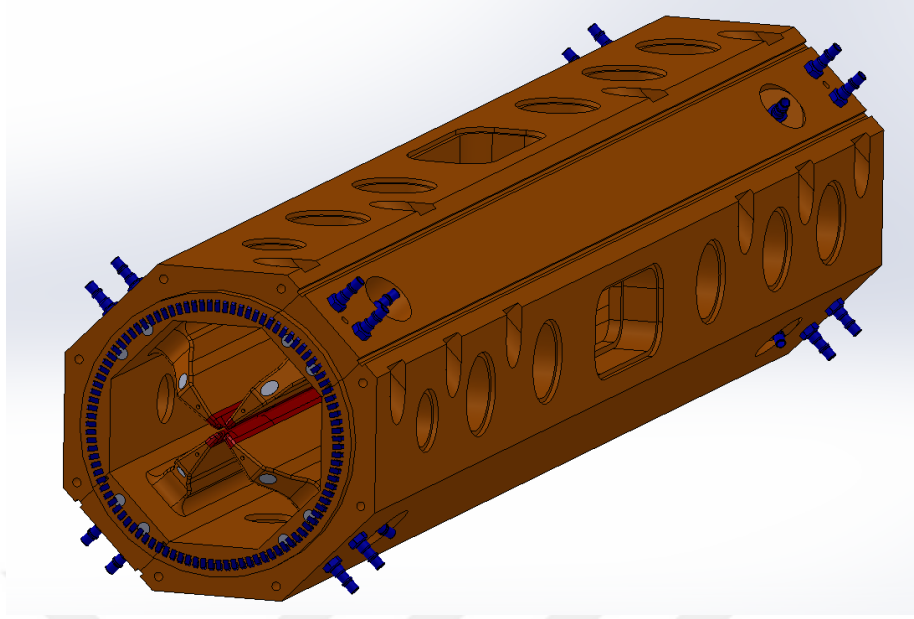
Fiziksel Nicelikler	İki Boyut	Üç Boyut (Kiplenimsiz)	Üç Boyut (Kiplenimli)
İşletimsel Salınım Sıklığı (MHz)	350.01	349.14	351.82
Nitelik Çarpanı (Q)	10566.6	10598	9242.1
Güç Kaybı (kWatt)	58.194	57.94	66.44

İki boyutlu ve üç boyutlu tasarım ve eniyileme faaliyetleri sonucunda elde edilen esas kip işletimsel salınım sıklığı ve nitelik çarpanı farklılıkları kanat ucu profilinin kiplenimli yapısından kaynaklanmaktadır. Elde edilen sonuçlar SPP gereksinimlerini karşılamıştır.

Demet dinamiği ve elektromanyetik tasarım çıktıları referans alınarak mekanik ve ısısal tasarımlar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar tez kapsamında değildir. Eniyilenen SPP RFQ kovuk yapısının boyuna eksende kesit görünümü Şekil 7.1’de, üç boyutlu tam görünümü ise Şekil 7.2’de verilmiştir.



Şekil 7.1 SPP RFQ kovuğu boyuna kesit görünümü



Şekil 7.2 SPP RFQ kovuğu CAD modeli (Yasatekin, 2015)

KAYNAKLAR

- Cockcroft, J. and Walton, E. 1932. Experiments with high velocity positive ions.—(I) Further developments in the method of obtaining high velocity positive ions. Proceedings of the Royal Society of London, 619-630.
- Duperrier, R. 2000. Intense Beam Dynamics in RFQs. Doktora tezi. Paris-Sud University, UFR Sciences, Paris.
- Hinterberger, F. 2006. Electrostatic accelerators. Proceeding of CERN Accelerator School and KVI: Specialised CAS Course on Small Accelerator, D. Brandt (Ed.) CERN 2006-012, 95-112.
- Kapchinsky, I. M. and Teplyakov, V. A. 1969. A Linear Ion Accelerator with Spatially Uniform Hard Focusing. ITEP-673.
- Kilpatrick, W. D. 1957. Criterion for Vacuum Sparking Designed to Include Both rf and dc. The Review of Scientific Instruments, 28(10), 824-826.
- Maus, J. M. 2010. Development of RFQ Particle Dynamics Simulation Tools and Validation with Beam Tests. Doktora tezi. Johann Wolfgang Goethe University, Department of Physics, Frankfurt.
- Rutherford, E. 1927. Address of the President, Sir Ernest Rutherford, OM, at the Anniversary Meeting. Proceedings of the Royal Society, 300-316.
- Sesler, A. and Wilson, E. 2014. Engines of Discovery, A Century of Particle Accelerators. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.
- TAEK. 2016. TAEK 2016 Yılı Faaliyet Raporu. Ankara: TAEK.
- Türemen, G. 2019. Radyo Frekans Dörtkutuplu Proton Hızlandırıcı Sistemin Tasarımı, Üretimi ve Testleri. Doktora tezi. Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Ankara.
- Vretenar, M. 2012. Radio frequency for particle accelerators: evolution and anatomy of a technology. CAS - CERN Accelerator School: Specialised Course on RF for Accelerators, CERN Yellow Report CERN-2011-007, 1-14.
- Vretenar, M. 2013. Linear Accelerators. Proceedings of the CAS-CERN Accelerator School: Advanced Accelerator Physics, W. Herr (Ed.) CERN-2014-009, 295-329.
- Vretenar, M. 2013. The Radio-Frequency Quadrupole. CERN Yellow Report CERN-2013-001, 207-223.
- Vretenar, M., Dallocchio, A., Dimov, V. A., Garlasché, M., Grudiev, A., Lombardi, A. M., Mathot, S., Montesinos, E., Timmins, M. 2014. A Compact High-Frequency RFQ for Medical Applications. Proceedings of LINAC2014 - THPP040, 935-938.

Wangler, T. P. 2008. RF Linear Accelerators. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, United States of America.

Yasatekin, H. B. 2015. Radyo Frekans Dörtkutuplusu Tasarım ve Demet Dinamiği Hesapları. Yüksek Lisans tezi. Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Ankara.



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı: Zafer SALI
Doğum Yeri: Trabzon
Doğum Tarihi: 30.08.1988
Medeni Hali: Evli
Yabancı Dili: İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise: Namık Kemal Lisesi (2005)
Lisans: Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,
Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı (2011)
Yüksek Lisans: Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,
Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı (2019)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl

Anadolu Üniversitesi, İleri İnce Film Üretim Laboratuvarı (2011 – 2012)
TAEK, Radyasyon ve Hızlandırıcı Teknolojileri Daire Başkanlığı (2012 – 2014)
CERN, ATLAS (2014)
PROFEN İletişim Teknolojileri, Ar-Ge Merkezi (2015 – Devam Etmekte)

Uluslararası Kongre Yayın ve Sunum

Turemen, G., Yasatekin, B., Mete, O., Celik, M., Sali, Z., Akgun, Y., Alacakir, A., Bolukdemir, S., Durukan, E., Karadeniz, H., Recepoglu, E., Cavlan, E., Unel, G. ve Erhan, S. 2013. Project PROMETHEUS: Design and Construction of a Radio Frequency Quadrupole at TAEK. Proceedings of the International Beam Instrumentation Conference 2013 (IBIC'13), 16-19 Sep 2013, Oxford, UK.

Turemen, G., Sali, Z., Yasatekin, B., Yildiz, V., Celik, M., Alacakir, A., Unel, G. ve Mete, O. 2014. SPP Beamline Design and Beam Dynamics. The 5th International Particle Accelerator Conference (IPAC'14), 15-20 June 2014, Dresden, Germany.