

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**RADYO FREKANS DÖRTKUTUPLUSU TASARIMI VE  
DEMET DİNAMIĞI HESAPLARI**

**Halime Betül YASATEKİN**

**FİZİK ANABİLİM DALI**

**ANKARA  
2015**

**Her hakkı saklıdır**

## TEZ ONAYI

Halime Betül YASATEKİN tarafından hazırlanan “**Radyofrekans Dörtkutuplusu Tasarımı ve Demet Dinamiği Hesapları**” adlı tez çalışması 24/07/2015 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman** : Prof. Dr. Orhan ÇAKIR  
Ankara Üniversitesi Fizik Anabilim Dalı

**Eş Danışman** : Doç. Dr. Gökhan ÜNEL  
UCI, Irvine

### Jüri Üyeleri :

**Başkan** : Prof. Dr. Ali YAMAN  
Ankara Üniversitesi Fizik Anabilim Dalı

**Üye** : Prof. Dr. Orhan ÇAKIR  
Ankara Üniversitesi Fizik Anabilim Dalı

**Üye** : Yrd. Doç. Dr. Avni AKSOY  
Ankara Üniversitesi Hızlandırıcı Teknolojileri Enstitüsü

**Yukarıdaki sonucu onaylarım.**

**Prof. Dr. İbrahim DEMİR**  
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.

24/07/2015

Halime Betül YASATEKİN

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### RADYO FREKANS DÖRT KUTUPLUSU TASARIMI VE DEMET DİNAMIĞI HESAPLARI

Halime Betül YASATEKİN

Ankara Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Orhan ÇAKIR

Eş Danışman: Doç. Dr. Gökhan ÜNEL

Küçük kütleli elektronların aksine ağır olan protonları hızlandırmak hiç de kolay değildir. Özellikle düşük betada protonları ve hafif iyonları hızlandırmak üzere 70li yılların sonunda icat edilmiş aletlerin en önemlisi radyo frekansı dört kutuplusu (RFQ) dur. Bu tez çalışmasında bir RFQ'nun tasarımı ve çalışması için gereken formüller incelenmiş ve bilgisayarlı RFQ tasarımı yapılması için DEMIRCI isimli bir yazılım geliştirilmiştir. Ayrıca, demet dinamiği çalışmaları da yapılmıştır. Benzetim çalışmaları TAEK-SANAEM'de yapılmakta olan 1.5 MeV'lik proton hızlandırıcısının parametreleri kullanılarak yapılmıştır. Bunlara ek olarak hesaplama sonuçları RFQ tasarımı ve demet dinamiği yapmaya olanak sağlayan ve bu alanda yaygın olarak kullanılan LIDOS ve TOUTATIS programlarının sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Böylelikle analitik formüllerin sonuçlarının ve demet dinamiğinde elde edilecek sonuçların doğruluğu test edilmiştir. Tez konusuyla ilgili olarak bir makale yayımlanmış uluslararası hakemli bir dergide basılmıştır. Bu tez çalışması kapsamında yerli bir RFQ tasarım yazılım paketi ülkemize kazandırılmış ve hızlandırıcı fiziğine katkıda bulunulmuştur.

**Temmuz 2015, 40 sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** RFQ, proton, hızlandırıcı, demet dinamiği

## **ABSTRACT**

Master Thesis

### **DESIGN AND BEAM DYNAMICS CALCULATIONS IN RADIO FREQUENCY QUADRUPOLES**

Halime Betül YASATEKİN

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

Supervisor: Dr. Orhan ÇAKIR  
Co-Supervisor: Dr. Gökhan ÜNEL

It is not easy at all to accelerate protons which are heavier, unlike electrons with small mass. The most important of the instruments, which were invented at the end of the 70s for the purpose of accelerating especially low beta protons and light ions, is radio frequency quadrupole. In this thesis the formulae needed to design and run RFQ were analyzed and a software called DEMIRCI was developed to perform computerized RFQ design. Beam dynamics studies were also made. Simulation studies were carried out using the parameters of 1.5 MeV proton accelerator which is being done in TAEK-SANAEM. In addition to these, calculation results are compared with the results of LIDOS and TOUTATIS software packages that allow to design RFQ and make beam dynamics. Thus the accuracy of results of the analytical formulae and the accuracy of the results obtained in the beam dynamics were tested. An article, regarding the thesis topic, was published in a refereed international journal. A native RFQ design software package has been gained within the framework of this thesis and has been contributed to the accelerator physics.

**July 2015, 40 pages**

**Key Words:** RFQ, proton, accelerator, beam dynamics

## ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Çalışmalarımı yönlendiren, araştırmalarımın her aşamasında bilgi, öneri ve yardımlarını esirgemeyerek akademik ortamda olduğu kadar beşeri ilişkilerde de engin fikirleriyle yetişmeme ve gelişmeme katkıda bulunan çok değerli tez danışmanlarım Prof. Dr. Orhan Çakır (Ankara Üniversitesi Fizik Anabilim Dalı) ve Doç. Dr. Gökhan Ünel'e sonsuz teşekkürlerimi bir borç bilir;

114F106 numaralı "*Radyo Frekans Dörtkutuplusu Tasarımı ve Benzetimi isimli*" projesiyle desteği için TÜBİTAK'a,

A1.H4.P1 numaralı "*1-5 MeV RF Kovuklu Proton Hızlandırıcısı Yapımı*" projesi kapsamında Türkiye Atom Enerjisi Kurumu'na (TAEK),

Yardım ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen değerli hocam Dr. Ali ALAÇAKIR ve arkadaşım Görkem TÜREMEN'e ayrıca teşekkür eder;

bu tezi hayatım boyunca hiçbir fedakarlıktan kaçınmayan, her koşulda yanımda olan ve beni teşvik eden, bu günlere gelmemde sınırsız sabır ve desteğini asla eksik etmeyen anneme ithaf ederim.

H. Betül YASATEKİN  
Ankara, Temmuz 2015

## İÇİNDEKİLER

TEZ ONAYI SAYFASI	
ETİK .....	i
ÖZET .....	ii
ABSTRACT .....	iii
ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR.....	iv
İÇİNDEKİLER .....	v
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ .....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Tarihçe .....	2
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ÖZETLERİ.....	4
2.1 RFQ Yapısı ve Çalışma İlkesi .....	4
2.2 Salınım Kipleri .....	7
2.2.1 4-Kanath Yapı ve TE-TM Kipleri .....	8
2.2.2 Kovuk İçinde Potansiyel Fonksiyonu.....	10
2.3 Kovuk İçinde Elektrik Alanı .....	12
2.4 Diğer Rezonatör (Salındırıcı) Türleri.....	12
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	14
3.1 Kanat Ucu Geometrisi .....	15
3.2 Çok Kutuplu Terimlerin Hesaplanması.....	18
4. BULGULAR ve TARTIŞMA .....	20
4.1 DEMIRCI: RFQ Tasarım Yazılımı .....	20
4.1.1 Tasarım aşamaları .....	25
4.1.2 Yöntem.....	25
4.1.3 SPP RFQ’sunun diğer RFQ parametreleri ile karşılaştırması.....	25
4.1.4 CPHS RFQ’sunun DEMIRCI ile hesaplama sonuçlarının karşılaştırılması.....	30
4.1.5 DEMIRCI’nin TOUTATIS ve LIDOS tasarım sonuçlarıyla karşılaştırılması.....	32
5. SONUÇ.....	36
KAYNAKLAR .....	37
ÖZGEÇMİŞ.....	39

## SİMGELER DİZİNİ

$B_0$	Odaklama parametresi
$C_p, k$	Birim hücre uzunluğu, Dalga boyu
$R$	Açıklık yarıçapı
$A$	Hızlandırma verimliliği
$A_{10}, A_0$	Kanat geometrisine bağlı sabitler
$\chi$	Odaklama verimliliği
$B$	Odaklama kuvveti
$E_0$	Birim hücre başına eksensel tepe hızlandırma alanı
$\Delta W$	$C_1$ başına eşzamanlı parçacıkların enerji kazancı
$E_s$	Tepe yüzey alanı
$W$	Depolanan enerji
$Q$	Kalite faktörü



## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Kovuk içinde ilerleyen parçacıkların hareketi .....	4
Şekil 2.2 Sekizgen radyo frekans dört kutuplusunun görünüşü (Mathot vd. 2010).....	5
Şekil 2.3 AC gerilim uygulanan elektrik dört kutuplusu .....	6
Şekil 2.4 Uzaklık ve zamana bağlı olarak değişken alan odaklaması grafikleri.....	6
Şekil 2.5 Boyuna alanlar elde etmeye yarayan kiplenimli RFQ kanatları .....	7
Şekil 2.6 $TE_{210}$ kipinde 4-kanatlı kovuk ve boş kovuğun iki boyutlu çizimleri .....	8
Şekil 2.7 $TE_{110}$ kipinde 4-kanatlı kovuk ve boş kovuğun iki boyutlu çizimleri .....	9
Şekil 2.8 RFQ kanatları arası bölgenin elektriksel eşdeğeri .....	10
Şekil 2.9 Tutucu ayaklar üzerine elektrotlar yerleştirilerek tasarlanan 4- çubuklu yapı .....	13
Şekil 3.1 Bir RFQ salındırıcının şematik çizimi .....	16
Şekil 4.1 DEMIRCI komut satırı arayüzü.....	21
Şekil 4.2 DEMIRCI yardım menüsü.....	21
Şekil 4.3 DEMIRCI'nin grafiksel tasarım ekranı .....	22
Şekil 4.4 DEMIRCI'nin çizdirilebilir değişkenler listesi.....	23
Şekil 4.5 DEMIRCI'nin SUPERFISH ile 2 boyutlu tasarım penceresi .....	24
Şekil 4.6 Karşılıklı kanatların 2 boyutlu görünümü.....	24
Şekil 4.7 LINAC4 (kırmızı), Tsinghua (mavi), ESS-2 (yeşil), Bilbao (turkuaz) ve SANAEM (siyah) RFQ'larının kanatlar arası gerilim eğrileri .....	26
Şekil 4.8 LINAC4 (kırmızı), Tsinghua (mavi), ESS-2 (yeşil), Bilbao (turkuaz) ve SANAEM (siyah) RFQ'larının kanat ucu yarıçapı eğrileri.....	27
Şekil 4.9 LINAC4 (kırmızı), Tsinghua (mavi), ESS-2 (yeşil), Bilbao (turkuaz) ve SANAEM (pembe) RFQ'larının hücre uzunluğu eğrileri .....	28
Şekil 4.10 LINAC4 (kırmızı), Tsinghua (mavi), ESS-2 (yeşil), Bilbao (turkuaz) ve SANAEM (siyah) RFQ'larının enerji eğrileri.....	28
Şekil 4.11 LINAC4 (kırmızı), Tsinghua (mavi), ESS-2 (yeşil), Bilbao (turkuaz) ve SANAEM (lila) RFQ'larının kiplenim eğrileri .....	29
Şekil 4.12 LINAC4 (kırmızı), Tsinghua (mavi), ESS-2 (yeşil), Bilbao (turkuaz) ve SANAEM (turuncu) RFQ'larının eşzamanlı faz eğrileri .....	29
Şekil 4.13 CPHS (Tsinghua) RFQ'su boyunca bir hücrenin orta noktasından demet eksenine olan çapsal uzaklık değerlerinin değişiminin DEMIRCI ile hesaplama sonuçlarının karşılaştırılması .....	30
Şekil 4.14 CPHS (Tsinghua) RFQ'su boyunca aksenal ortalama elektrik alanı değişiminin DEMIRCI ile hesaplama sonuçlarının karşılaştırılması .....	31
Şekil 4.15 CPHS (Tsinghua) RFQ'su boyunca tepe yüzey elektrik alanı değişiminin DEMIRCI ile hesaplama sonuçlarının karşılaştırılması .....	31
Şekil 4.16 CPHS (Tsinghua) RFQ'su boyunca odaklama gücü değişiminin DEMIRCI ile hesaplama sonuçlarının karşılaştırılması .....	32

Şekil 4.17 SPP RFQ'su boyunca hücre uzunluğu, beta ve kinetik enerji değişimlerinin LIDOS ve DEMIRCI ile yapılan hesaplama sonuçlarının oranı .....	33
Şekil 4.18 SPP RFQ'su boyunca hücre konumu, maksimum açıklık ve açıklık yarıçapı değişimlerinin LIDOS ve DEMIRCI ile yapılan hesaplama sonuçlarının oranı .....	33
Şekil 4.19 SPP RFQ'su boyunca hücre uzunluğu, hızlandırma verimliliği, $A_{10}$ ve odaklama gücü değişimlerinin TOUTATIS ve DEMIRCI ile yapılan hesaplama sonuçlarının oranı .....	35

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 TE-TM kiplerindeki n alt işaretinin aldığı sayısal değere göre tanımlanması .....	8
Çizelge 4.1 SPP RFQ'su tasarım parametreleri .....	26

## 1. GİRİŞ

Radyo frekans dört kutuplusu (RFQ) bir doğrusal hızlandırıcıdır. İlk olarak 1960lı yılların sonunda, Moskova'daki Teorik ve Deneysel Fizik Enstitüsü'nde (ITEP), Kapchinsky tarafından ortaya atılmıştır. Diğer önemli adımlar Los Alamos Ulusal Laboratuvarı'nda (LANL) atılmış ve 1989 yılında ilke kanıtı çalışması (Proof-of-Principle) RFQ üretilmiştir. Bundan sonra RFQ'ya olan ilgi artmış ve birkaç yıl içinde onlarca RFQ dünyanın çeşitli üniversite ve laboratuvarlarında tasarlanıp üretilmiştir.

RFQ'nun en belirgin özelliği, yüklü parçacık demetini yalnızca RF alanları kullanarak boğçalaması, odaklaması ve hızlandırmasıdır. Özellikle düşük enerji aralığında iyonları hızlandırmaya elverişlidir. Bu nedenle bugüne kadar geliştirilen en iyi makinelerdir. RFQ tasarım ve hesaplarının bilgisayar ortamında yapılması için geçmişten bugüne birçok yazılım geliştirilmiştir. PARMTEQ, LIDOS, TOUTATIS programları yaygın olarak kullanılmakla birlikte daha öncesinde geliştirilmiş ya da halen geliştirilmekte olan programlar vardır (Crandall vd. 1988, Bondarev vd. 2000, Duperrier 2000). PARMTEQ ve LIDOS yapı tasarımı ve demet dinamiği hesaplarının her ikisini de yaparken TOUTATIS yalnızca demet dinamiği benzetimi yapmaktadır. Programların bir takım eksikliklerinin bulunması, başlangıçta ülkemize satılmıyor olması ve ücretlerinin bir hayli fazla olması gibi sebepler Türk malı bir yazılım geliştirilmesine ön ayak olmuştur. Bu çalışma çerçevesinde geliştirilen DEMIRCI yazılımı ile Türkiye Atom Enerjisi Kurumu Sarayköy Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi'nde (SANAEM) yapılmakta olan SPP (SANAEM Project Prometheus) RFQ'su parametreleri kullanılarak tasarım geliştirilmiş, hesaplama sonuçlarının doğruluğu test edilmiş ve diğer yazılımlarla karşılaştırmaları yapılmıştır.

Bu tezin birinci bölümünde RFQ'ların kısa bir tarihçesi ile tezde yapılan çalışmalar özetlenmiştir. İkinci bölümde RFQ'nun yapısı ve çalışma ilkesinden, salınım kovuklarında elektromanyetik alanların özelliklerinden ve hızlandırıcı olarak kullanılan kovuklar tasarlanırken göz önünde bulundurulması gereken koşullardan bahsedilmiştir. Üçüncü bölümde RFQ kanat geometrilerine göre elektrik alanların nasıl oluştuğu incelenmiş ve kullanılan formüller detaylı olarak çözümlenmiş ve çıkarımları

yapılmıştır. Dördüncü bölümde tasarlanan yazılımın testleri yapılmış, dünyadaki diğer birkaç RFQ ile SPP RFQ'sunun karşılaştırmaları yapılmış, hesaplamaların doğruluğunu test etmek için Tsinghua Üniversitesi'nde yapılan CPHS RFQ'sunun parametreleri kullanılarak DEMIRCI ile bir tasarım yapılmış ve sonuçları karşılaştırılmıştır (Xing vd. 2010). Ek olarak DEMIRCI, TOUTATIS ve LIDOS'ta aynı parametreler kullanılarak üç farklı tasarım yapılmış ve sonuçların tutarlılığı karşılaştırılmıştır. Beşinci bölümde ise yapılan çalışmaların sonuçları tartışılmıştır.

## 1.1 Tarihçe

1960'lı yıllarda özellikle SSCB ve Amerika'da daha yüksek akımlı proton hızlandırıcılarına olan ihtiyaç bazı grupları geleneksel düşük enerjili doğrusal hızlandırıcı kısımlarının akım kısıtlamalarına çözüm üretmek yönünde çalışmalar yapmaya yöneltmiştir. O dönemde Moskova Teorik ve Deneysel Fizik Enstitüsü'nde (ITEP) çalışan Kapchinsky, uzay yükü baskın doğrusal hızlandırıcı demetinin davranışını anlamada dikkat çekecek bir çalışma yapmış ve bu çalışmalarını çerçevesinde standart elektromanyetik dört kutuplularına alternatif olarak RF frekansında uyarılan düşük enerjide bir elektrik dört kutuplu odaklama kanalı kullanma fikrini geliştirmeye başlamıştır.

Elektrik dört kutuplu kuvvetleri manyetik dört kutuplu alanının Lorentz kuvveti gibi düşük parçacık hızlarında azalmamaktadır. Eğer elektrik alan RF dalgası tarafından üretilirse, bu elektrik dört kutuplusunda ilerleyen parçacık demeti net odaklama gücünün sonucu olarak değişken bir alanla karşılaşmaktadır.

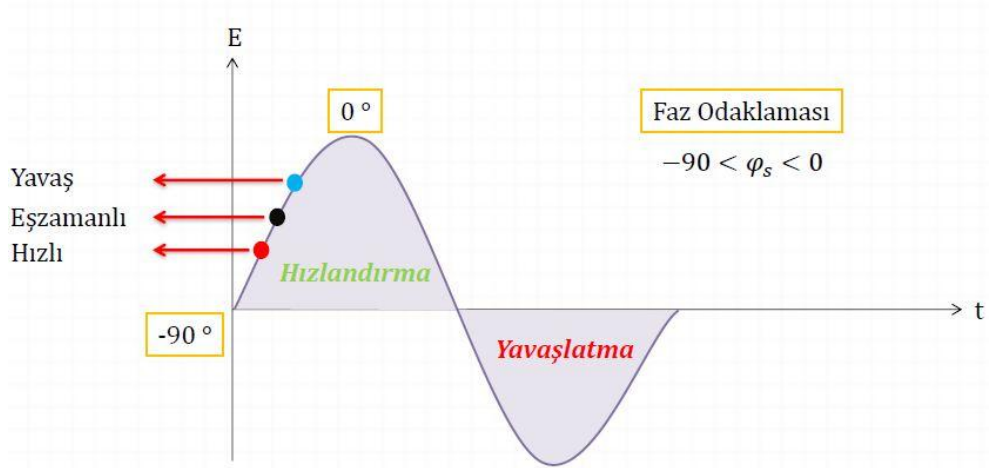
Kapchinsky, dört kutuplu alanını oluşturan elektrotlara fazladan boyuna elektrik alan bileşeni üretecek boyuna bir kiplenim (sinüs benzeri profil gibi) eklemeyi düşünerek önemli bir adım atmıştır. Zamanla değişen boyuna alanın parçacık demetinin hızı ve fazı ile eşlenebilmesi, bu yapının hem demetin bohçalanmasında hem de düzgün hızlandırılmasında kullanılmasını mümkün kılmıştır.

Dört kutuplu RF alanının üretimi Protvino Yüksek Enerji Fiziği Enstitüsü'nden (IHEP) bir başka rus bilim adamının dikkatini çekmiştir ve 1969 yılında Vladimir Teplyakov ve Kapchinsky birlikte ilk makalelerini yayınlamışlardır (Kapchinsky ve Teplyakov 1969). Bu makalede RFQ'nun tasarımı ve 1974'te yapılacak ilk deneysel RFQ'nun sonuçları rusça olarak tartışılmıştır. Bir ÇEK mültecinin orijinal makalenin bir kopyasını Amerika'daki Los Alamos doğrusal hızlandırıcı ekibine getirip İngilizceye çevirisi yapılanaya kadar Kapchinsky ve Teplyakov'un makalesi 1977 yılına kadar batıda bilinmemiştir. Kapchinsky ve Teplyakov'un cihazı düşük enerjili yüksek akımların üretimi için uzun süredir araştırılan bir çalışmadır. Los Alamos ekibi bu fikir üzerine çalışmalar yapmışlar ve ilk teknolojik testleri yapmak üzere bir yazılım geliştirmeye başlamışlardır. Los Alamos'un çalışmaları özellikle odaklama kanalına çapsal eşleme kısmının geliştirilmesinden ve dört kutuplu olmayan alan bileşenlerini büyük ölçüde azaltan yeni bir salındırıcı tasarımından oluşmaktadır. Malzemelerin birleştirme testlerini yapmak amacıyla ilk ilke kanıtı çalışması (Proof-of-Principle) RFQ Los Alamos'ta yapılmış ve 1980'de başarıyla üretilmiştir (Vretenar 2011).

## 2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ÖZETLERİ

### 2.1 RFQ Yapısı ve Çalışma İlkesi

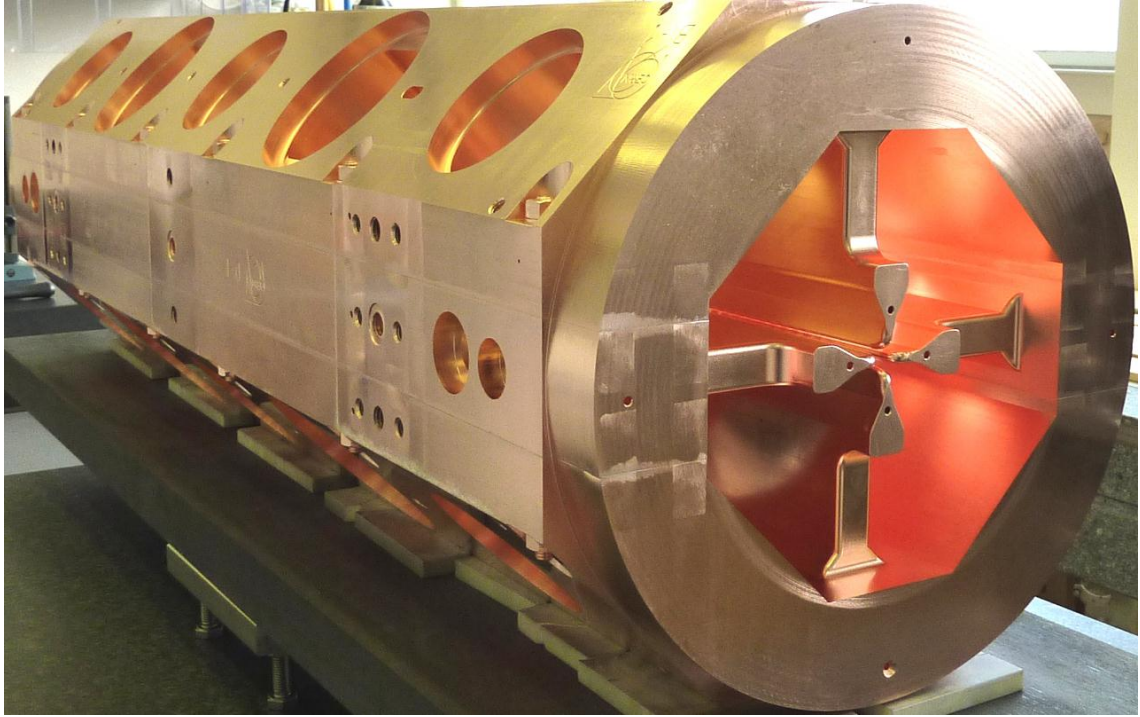
Sürekli bir demet önce boğçalanıp sonra hızlandırılırken, parçacıklar enine ve boyuna ekseninde bir arada tutulmalıdır. Çünkü parçacıklar eşzamanlı parçacık etrafında sinkrotron ve betatron salınımları yaparlar (Wille 2000). Dikey kanatların eksene olan minimum uzaklığı ile yataydaki kanatların eksenden minimum uzaklığı arasındaki potansiyel farktan dolayı enine elektrik alan üretilir. Bir RFQ'da ardışık boşluklar arasındaki alan zıt yöndedir. Böylece boşlukların birinde demet hızlandırılırken diğerinde yavaşlatılır (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 Kovuk içinde ilerleyen parçacıkların hareketi

Düşük enerjilerde standart boğçalama sistemlerinin kullanılması demette yaklaşık %50 oranında bir kayba neden olur. Boğçalayıcı kovuklarda sürekli gelen boğçalanmamış demete RF elektrik alanı uygulanır. Böylece ilerideki parçacıklar yavaşlar, gerideki parçacıkları ise hızlanır. Demet  $-90^\circ$  lik bir başlangıç fazıyla adyabatik olarak (boyuna boğçalama) odaklanır. Demetin yakalanması ve boğçalanmasından sonra bu faz (evre) değeri artar. 4-kanatlı veya çubuklu simetrik yapılar güçlü bir odaklama kanalı sağlar ve

parçacıklar zamanla değişen enine bir alana maruz kaldığında alternatif bir alan oluşur. Bu oluşan elektriksel odaklama, manyetik odaklamadan daha güçlü bir odaklama sağlar.



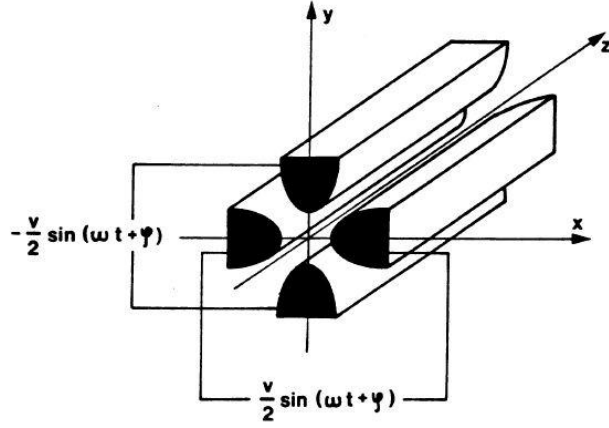
Şekil 2.2 Sekizgen radyo frekans dört kutuplusunun görünüşü (Mathot vd. 2010)

Parçacıkların RF dalga ile eş zamanlı olarak hareket ettiği çerçevede

$$\nabla \vec{E} = \frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z} = 0 \quad (2.1)$$

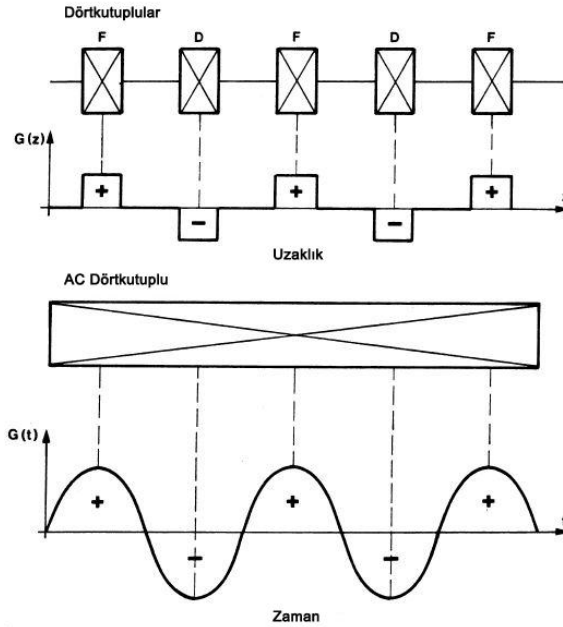
denklemleri geçerlidir. Merkezci kuvvetler için tüm terimler negatif olmalıdır fakat Denklem 2.1 için tüm terimlerinin negatif olması sifıra eşitliği sağlayamaz. Eğer boyuna ekseninde kararlılığı sağlamak için  $\partial E_z / \partial z < 0$  seçilirse, diğer iki terimden en az biri pozitif olur ve hareket enine ekseninde kararsızdır. Bu sebepten her durumda fazladan bir odaklama uygulanmalıdır ve bu da genellikle dört kutuplular veya solenoidler ile sağlanır (Weiss 1986). Şekil 2.3'te elektrotları üzerinde değişken gerilime sahip bir elektrik dört kutuplusu gösterilmektedir.





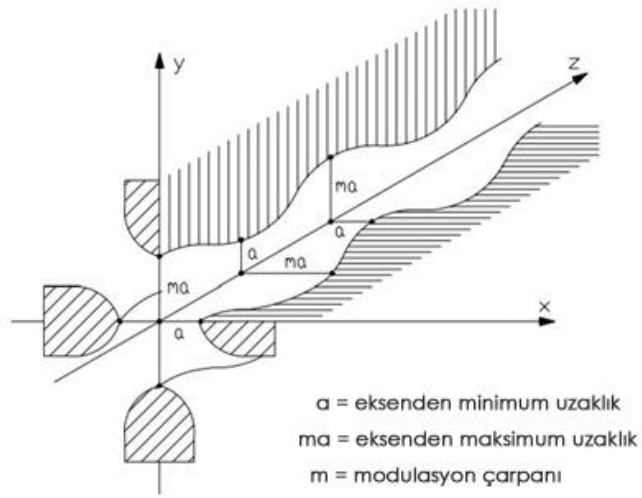
Şekil 2.3 AC gerilim uygulanan elektrik dört kutuplusu

Parçacıkların z eksenini boyunca hareket ettiği düşünülürse ve bunlar yeteri kadar yavaşlarsa (ya da dört kutuplu yeteri kadar uzunsa); parçacıklar değişen gerilimle değişken bir elektrik alanına maruz kalırlar ve değişken bir alan odaklamasına uğrarlar. Bu yüzden, değişken kutupluluk ile parçacıkları uzaysal olarak dağıtan dört kutuplular yerine, aynı etki tek bir dört kutuplu tarafından zamanla değişen alanlarla yaratılabilir. Bu etki Şekil 2.4’te görülebilir.



Şekil 2.4 Uzaklık ve zamana bağlı olarak değişken alan odaklaması grafikleri

Boyuna alanlar incelenecek olursa, dört kutuplunun kiplenimli elektrotları tarafından periyodik olarak oluşturulur (Weiss 1986).



Şekil 2.5 Boyuna alanlar elde etmeye yarayan kiplenimli RFQ kanatları

Yani enine elektrik alanın bir kısmı boyuna doğrultuda sapar. Şekil 2.5'te görüldüğü gibi yatay ve düşey elektrotlardaki tam bir sinüs dalgası bir odacığa karşılık gelir. Kiplenim, RFQ'nun en önemli özelliğidir: Hızlandırma için gerekli olan parçacık ile dalga arasındaki eşzamanlılığı sağlar. Bunun yanında enine ekseninde değişken bir alan odaklaması üretir. RFQ'lar MHz mertebesinde yüksek frekanslarda verimlidirler. Kanat olarak adlandırılan elektrotlar kovuk (rezonatör) içine yerleştirilirler.

## 2.2 Salınım Kipleri

Demet dinamiği yapılırken, boyuna RFQ ekseninde etrafında yani demetin ilerleme yönünde küçük bir bölgede hesaplama yapılır. Laplace denklemi bu küçük bölgede var olan alanları tanımlamak için yeterlidir. Buna karşılık elektrodinamik yapılırken, örneğin verilen frekansta dalga yapısını ve kipini belirlemek için gereken durumlarla, sadece küçük bir bölge değil tüm salınım kovuğu ele alınmalıdır. Bu durumda ışın fiziği dalga denklemi ile belirlenir (Weiss 1986).

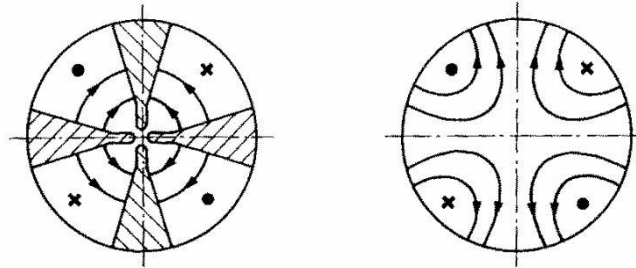
### 2.2.1 4-Kanatlı Yapı ve TE-TM Kipleri

RFQ larda kullanılan çeşitli salındırııcı türleri vardır. Bunlardan en yaygın olanı LANL tarafından geliştirilen 4-kanatlı salındırııcı yapısıdır (Crandall 2005). TE enine elektrik (transverse electric) kelimelerinin kısaltmasıdır. Bir silindirik kovukta elektrik alanın ilerleme doğrultusuna dik olduğunu ifade eder. TM ise enine manyetik (transverse magnetic) kelimelerinin kısaltmasıdır ve manyetik alanın kanat etrafındaki dolanım doğrultusuna dik olduğunu ifade eder.  $TE_{nml}$  ve  $TM_{nml}$  n,m ve l alt işaretleriyle gösterilir ve sırasıyla eksensel, çapsal ve boyuna bileşenleri temsil ederler (Lombardi 2005). Elektromanyetik kiplerin n alt işaretine göre sınıflandırılması Çizelge 2.1’de görülebilir.

Çizelge 2.1 TE-TM kiplerindeki n alt işaretinin aldığı sayısal değere göre tanımlanması

n=0	Tek kutuplu kip	Demeti hızlandırma ve yavaşlatma işleminde kullanılır.
n=1	İki kutuplu (dipol) kip	Demete enine tekmeleyici (kicker) etkisi yapar.
n=2	Dört kutuplu (quadropole) kip	Demete tekmeleyici etkisi yapar ancak eksen yakınında etkisi zayıftır.

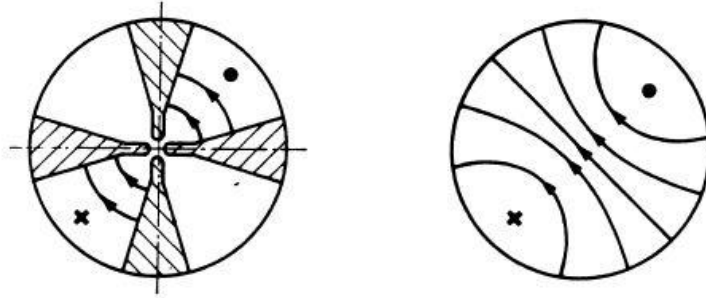
RFQ, demet ilerleme yönünde elektrik alan bileşenine sahip olmayan, yalnızca demeti odaklayan  $TE_{210}$  kipinde çalışmaktadır. Demetin hızlandırması için gerekli olan elektrik alan ise demetin ilerleme yönünde kiplenimli kanatlar tarafından üretilir (Staples vd. 2011b).  $TE_{210}$  kipindeki yapının boş bir kovukta gösterildiği iki boyutlu resmi Şekil 2.6’da gösterilmektedir. Aynı kiplin kanatların varlığıyla birlikte nasıl değiştiği açıkça görülebilmektedir.



Şekil 2.6  $TE_{210}$  kipinde 4-kanatlı kovuk ve boş kovuğun iki boyutlu çizimleri

TE<sub>210</sub> kipi enine bir elektrik alan ve boyuna manyetik alan bileşenine sahiptir. Boyuna elektrik alan oluşturmak için, aynı zamanda yalnızca demet çevresinde olmak kaydıyla, kanat uçları değiştirilir. Salındırıcı için bu kiplenim ihmal edilebilecek kadar küçüktür.

Örnek olarak RFQ kovuğunun boyutlarını, salınım frekansı ve TE<sub>210</sub> kipinde belirlemek için bilgisayar programları kullanılır. Bununla birlikte RFQ'ların TE<sub>210</sub> kipi dışında ve farklı frekanslarda salınıma girebildiği başka kipleri de vardır. Frekanstaki değişim bazen çok küçüktür ve diğer kipler de TE<sub>210</sub> frekansında çalışırken eklenebilir. TE<sub>210</sub> kipi için sınır koşulları düzgün olmadığında böyle bir durumla karşılaşılabilir. Kovuğu uygun kipte ayarlamak için çeşitli yöntemler vardır. Fazla detayına inmeden açıklamak gerekirse, uygun kipte ayarlamamanın anlamı; istenen dalganın grup hızındaki artışa eşit olarak frekans aralığındaki artıştır. Bu çalışma kipine en yakın olan kip Şekil 2.7'de gösterilen TE<sub>110</sub> dur.

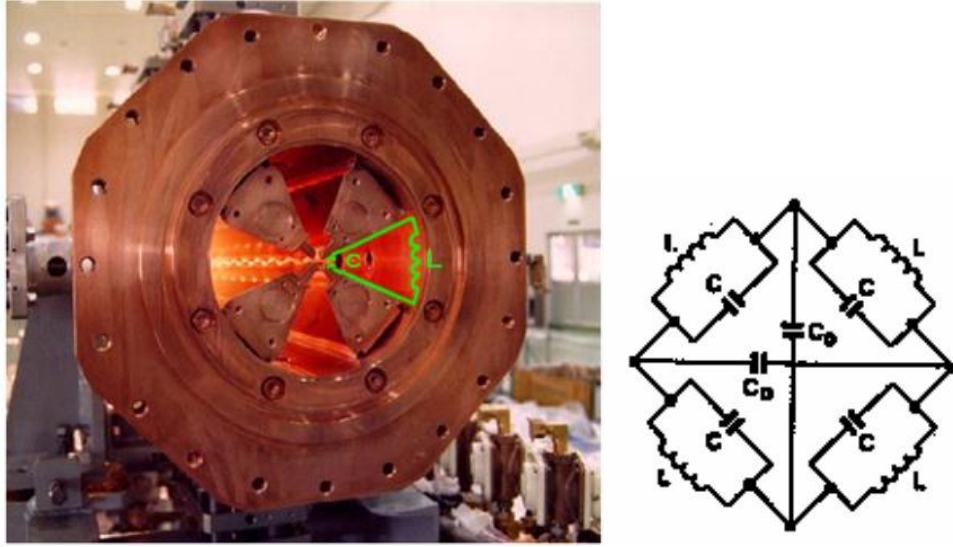


Şekil 2.7 TE<sub>110</sub> kipinde 4-kanatlı kovuk ve boş kovuğun iki boyutlu çizimleri

Bu kipte çalışmak zordur. Çünkü uyarılan kipler ya enine dört kutuplu simetriyi ya da kanatların boyuna gerilimini etkiler. Sabit kanat gerilimi için boyuna manyetik alan  $z$  boyunca sabit olmalıdır (Weiss 1986):

$$\begin{aligned}
 B_z(x, y, z) &\neq f(z) \\
 \nabla \times \vec{E} &\neq f(z) \\
 U(x, y, z) &\neq f(z)
 \end{aligned}
 \tag{2.2}$$

Burada  $f(z)$   $z$ 'ye bağılı değişen bir fonksiyonu belirtir. Basit olarak sistemin eődeęer devresi Şekil 2.8'de gösterilmiştir. Kanat uçları arasında toplanmıő kısımlar sığaya, kanatlar arası boşluk ise indüktansa karşılık gelmektedir. Ayrıca Şekil üzerinde karşılıklı kanatlar arasına eődeęer  $C_D$  sığası da gösterilmiştir.



Şekil 2.8 RFQ kanatları arası bölgenin elektriksel eşdeğeri

Şekil 2.8'de gösterilen 4-kanatlı yapılar, hafif iyonları hızlandırmak için uygundur. Salınım frekansı silindirik boyutlarla ters orantılı olduğundan, frekansın 200 MHz'ten daha büyük seğilmesi gerekmektedir. Yani alıőma frekansını daha düşük frekanslarda seğmek tank çapını artırmakta dolayısıyla malzeme maliyetini artırmaktadır.

### 2.2.2 Kovuk İçinde Potansiyel Fonksiyonu

Kovuk içinde alanların kaynağı olan elektrik potansiyeli  $U(r, \theta, z)$  Laplace denklemini sağlar ve

$$\nabla^2 U(r, \theta, z) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 U}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0 \quad (2.3)$$

ile verilir (Weiss 1986). Bu denklemin genel özümü,

$$U(r, \theta, z) = \frac{V}{2} \left[ \sum_{n=0}^{\infty} A_{0n} r^{2n} \cos 2n\theta + \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} A_{mn} I_{2n}(mkr) \cos 2n\theta \cos mkz \right] \quad (2.4)$$

Şeklinde (Weiss 1986). Burada  $m + n = 2p + 1$ ; ( $p = 0, 1, 2, \dots$ ),  $\pm V/2$  kanat gerilimi,  $I_{2n}(x)$  modifiye Bessel fonksiyonu ve  $k = 2\pi/\beta\lambda$ ' dir ( $\beta$  görelî hız ve  $\lambda$  dalgaboyu). Potansiyel fonksiyonunun genel çözümü sonsuz serilerde tüm harmonikleri içerir. Genellikle bir RFQ sadece birkaç harmonikle tanımlanabilir. Çözümlemeyi kolaylaştırmak için iki terimli çözümü göz önüne alınabilir.

$$U(r, \theta, z) = \frac{V}{2} [A_{01} r^2 \cos 2\theta + A_{10} I_0(kr) \cos kz] \quad (2.5)$$

Denklem 2.5'teki ilk terim elektriksel odaklamayı ve ikinci terim hızlandırma alanının temsil etmektedir.  $U(r, \theta, z)$ 'nin kanat boyunca sabit olduğu koşullar uygulanırsa,

$$U(a, 0, 0) = U\left(ma, 0, \frac{\beta\lambda}{2}\right) = \frac{V}{2} \quad (2.6)$$

sabitler elde edilir ve hızlandırma parametresi,

$$A_{10} = \frac{m^2 - 1}{m^2 I_0(ka) + I_0(mka)} \quad (2.7)$$

olarak; odaklama parametresi ise,

$$A_{01} = \frac{1}{a^2} [1 - A_{10} I_0(ka)] = \frac{1}{a^2} \frac{I_0(ka) + I_0(mka)}{m^2 I_0(ka) + I_0(mka)} = \frac{x}{a^2} \quad (2.8)$$

olarak belirlenir. Sabitler geometrik parametrelere ( $a$  ve  $m$ ) bağlıdır. Örneğin  $m$  artarsa odaklama azalırken hızlandırma artar. Parçacıklar hızlandırıldığında, hızları ( $v = \beta c$ ) artar ve periyot ( $\beta\lambda$ ) da artar (dalga ve parçacık arası eşzamanlılıkla). Yani RFQ'lar sözde periyodik sistemlerdir.

### 2.3 Kovuk İçinde Elektrik Alanı

Silindirik koordinatlarda denkleminin çözümünden alan bileşenleri elde edilir. 2 terimli potansiyel için bu bileşenler aşağıdaki gibidir:

$$E_r = -\frac{\partial U}{\partial r} = -\frac{V}{2} [2A_{01}r \cos 2\theta + kA_{10}I_1(kr) \cos kz] \quad (2.9a)$$

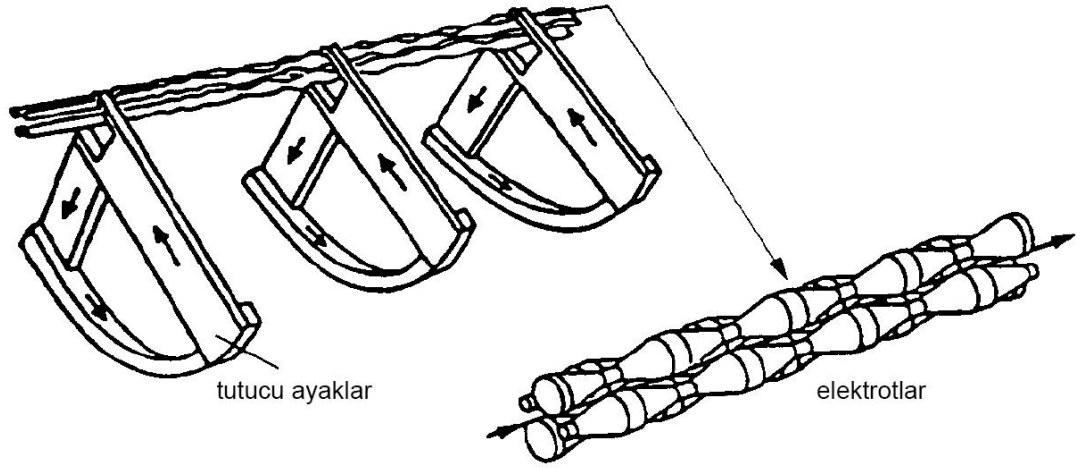
$$E_\theta = -\frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial \theta} = VA_{01} r \sin 2\theta \quad (2.9b)$$

$$E_z = -\frac{\partial U}{\partial z} = \frac{V}{2} kA_{10}I_0(kr) \sin kz \quad (2.9c)$$

Demet dinamiği için gereken alanları üretirken kanat yapısı buna göre ayarlanmalıdır. Laplace denkleminin çözümünden elde edilen alanlara, demet dinamiğinin gerektirdiği koşullar uygulanırsa, uygun gerilim ve kanat yapısı bulunur. Bunun için enine ve boyuna demet dinamikleri ayrı ayrı incelenmelidir.

### 2.4 Diğer Rezonatör (Salıncı) Türleri

Önceki bölümlerde ayrıntılı olarak incelenen 4-kanatlı yapı dışında başka yapılar da bulunmaktadır. Düşük frekanslarda 4-kanatlı yapı verimli değildir. Çünkü RF dalgaboyu ile doğru orantılı olarak gövde çapı artacaktır. Dört çubuklu yapı tutucu ayaklar ile silindirik kovuk merkezine yerleştirilmiş çubuk şeklindeki elektrotlardan oluşmaktadır. Kovuğun sınır koşulları tutucu ayakların indüktansı ve elektrotların sığasına bağlıdır. Şekil 2.9'da bahsedilen yapının basit bir çizimi görülebilir.



Şekil 2.9 Tutucu ayaklar üzerine elektrotlar yerleştirilerek tasarlanan 4-çubuklu yapı

Burada elektrot yapısı 4-kanatlı yapıya göre daha basittir ve tamamen simetrik yapılardır. Ağır iyonları hızlandırmada daha verimlidir ve üretimleri kolaydır.



### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

Hızlandırıcı topluluğunda RFQ hızlandırıcılar yaygın olarak kullanılmaktadır. RFQ'lar, düşük enerjilerdeki iyon demetlerinin yüksek iletim verimi sağlanarak eşzamanlı bohçalanmasında ve demetin geleneksel hızlandırıcılarda (Büyük Hadron Çarpıştırıcısı gibi) kullanılabilen enerjilere hızlandırılmasında önemli bir yere sahiptir. Bunun için bir kaç çeşit kanat ucu geometrisi önerilmiştir. Elektrik alanları bu geometrilere göre oluşmaktadır.

RFQ hızlandırıcılarda kanat uçları arasında uzaklık RF dalga boyundan daha küçüktür. Dolayısıyla kanat uçları eşpotansiyel yüzeyler olarak göz önünde bulundurulmalı ve kanat uçları yakınındaki potansiyel Laplace denklemine uymalıdır. Çözümdeki sıfır olmayan en düşük mertebeli iki terimden biri kuadropol odaklama terimi ve diğeri hızlandırma terimidir. Bu iki terim eşpotansiyel yüzeylerin türünü tanımlamaktadır. Kanat uçları, tanımlanan eşpotansiyel yüzeylere uydurularak üretildiğinde, kanatlar arası bölgedeki elektrik alanlar bulunmaktadır.

Herhangi bir boyuna konumda, bu eşpotansiyel yüzeylerin kesit alanları hiperbole yakındır. Pratikte kanat uçları bu şekle tam olarak uydurulamamaktadır. Aksi takdirde komşu kanatlar birbirlerine asimptotik olarak yerleşirler ve kanat yüzeylerindeki elektrik alan şiddeti sonlu olmaksızın artar. Ayrıca hiperbolik yüzeyleri üretmek dairesel kesit alanları üretmekten daha zordur. Bu nedenlerle RFQ kanat uçları daire kesitli üretilmektedirler.

Daha kısa doğrusal hızlandırıcılar ve daha yüksek akım sınırları gibi önemli artılar yüksek elektrik alan şiddetiyle elde edilmektedir. Bir diğeri yandan tepe yüzey alanı kıvılcım olma (spark) sınırının altında olmalıdır. Bu yüzden tepe yüzey alanının uygun bir değere atanması çok önemlidir.

2-Boyutlu çözümler, kanat uçlarının kesit alanları kuadropol simetrisine sahip ve kanatlar arası uzaklığın en küçük olduğu durumlarda tepe yüzey alanlarının her odacığın merkezinde oluştuğunu gösterir. Bu alanın büyüklüğü  $1.36 V/r_0$  olacak şekilde

hesaplanır. Burada  $V$  kanatlar arası potansiyel farkı ve  $r_0$  ise her bir kanat ucunun demet ekseninden olan uzaklığıdır (Crandall 1983).

CERN’de kullanılacak bir RFQ tasarımıdaki kısa kanat ucu kesitlerinin üretiminden sonra tepe yüzey alanındaki boyuna eğrilik yarıçapının etkisiyle ilgilenilmeye başlanmıştır (Boltezar vd. 1981). CERN’deki 200 MHz RFQ, 50 keV’lik düşük demet enerjisine ve yüksek demet akımı almak için 0.78 cm gibi oldukça büyük açıklığa (aperture) sahiptir. Bu üç boyutlu yüzeylerdeki tepe alanlarını hesaplamak için bilgisayar programlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Önceki 2 boyutlu sürümü aynı ilkeyle çalışan CHARGE 3-D isimli bir bilgisayar programı, kanat ucu yüzeylerinde indüklenen yük yoğunluğunu hesaplamak için yazılmıştır (Crandall 1966). Kullanılan teknik Bölüm 3.2’de kısaca açıklanmıştır. Yüzey alanı doğrudan yük yoğunluğu ile orantılıdır. CERN’in tasarımı için tepe yüzey alanı 2 boyutlu çözümlerden %20 daha yüksek olarak tahmin edilmiştir. Sonuç olarak, CERN RFQ’su en başta belirlenen daha düşük tepe alan değerine göre yeniden tasarlanmıştır.

Herhangi bir kanat ucu geometrisi için yük yoğunluğu hesaplandıktan sonra, bu yük yoğunluğu tarafından kanat uçları etrafındaki noktalarda üretilecek gerilim hesaplanabilmektedir. Sonra bu potansiyele alanın çok kutuplu bileşenlerini bulmak için Fourier çözümlenmesi uygulanabilmektedir. Bu bileşenleri elde etmekle, kanat ucu geometrileri 2-terimli potansiyel fonksiyonu ile belirlenenden farklı olarak hesaba katılabilmektedir.

### 3.1 Kanat Ucu Geometrisi

4 kanatlı bir RFQ hızlandırıcısı  $z$ -ekseni etrafında simetrik olarak konumlanmış iki yatay ve iki düşey kanattan oluşmaktadır (Şekil 3.1). Kanat uçları  $z$  boyunca  $2L$  periyodu ile kiplenmiştir ( $L$ , bir hücrenin uzunluğu).  $z=0$  noktası odacıkların başı olmak üzere yatay kanatlar  $z$  ekseninden  $a$  kadar uzaklıktadır.  $m$  kiplenim parametresi olmak üzere düşey kanatlar arası uzaklık,  $ma$ , en büyüktür. Odacığın sonunda yani  $z=L$  noktasında yatay kanat uçları  $ma$ , düşey kanat uçları ise  $a$  uzaklıklarına yer değiştirirler.

Yatak ve düşey kanatlar arası gerilim farkı  $V$ 'dir. Böylelikle yatay ve düşey kanatlardaki gerilim sırasıyla  $V/2$  ve  $-V/2$  olur.

Kanat uçları çevresindeki gerilim denklem (2.3)'te verildiği gibi Laplace denkleminin uyar. Simetri koşullarına uyan düşük mertebeli iki terimi alınarak silindirik koordinatlarda gerilim ifadesi denklem (2.5) kullanılarak,

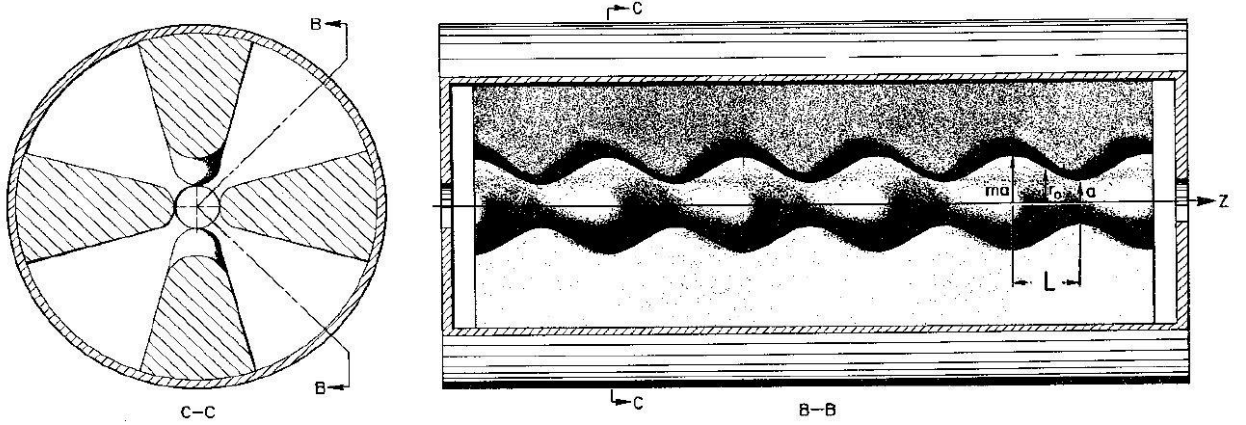
$$U(r, \theta, z) = \frac{V}{2} \left[ \left( \frac{r}{r_0} \right)^2 \cos 2\theta + A I_0(kr) \cos kz \right] \quad (3.1)$$

şeklinde elde edilir. Burada  $k = \pi/L$  ve  $I_0$  ise sıfırıncı mertebeden modifiye Bessel fonksiyonudur.  $r_0$  ve  $A$  sabitleri sınır koşullarından bulunur:

$$U(a, 0, 0) = U(ma, 0, 0) = V/2$$

veya

$$U(ma, \pi/2, 0) = U(a, \pi/2, L) = -V/2 \quad (3.2)$$



Şekil 3.1 Bir RFQ salındırıcının şematik çizimi

Buradan,

$$\left(\frac{ma}{r_0}\right)^2 + AI_0(ka) = 1 \quad (3.3)$$

ve

$$\left(\frac{ma}{r_0}\right)^2 - AI_0(mka) = 1 \quad (3.4)$$

olmak üzere

$$A = \frac{m^2 - 1}{m^2 I_0(ka) + I_0(mka)} \quad (3.5)$$

ve

$$r_0 = a[1 - AI_0(ka)]^{-1/2} \quad (3.6)$$

olarak bulunur. (3.5) ve (3.6) denklemlerinde  $m$ ,  $a$ ,  $L$  ve  $k$  bağımsız,  $r_0$  ve  $A$  ise bağımlı değişkenler olarak yazılır. Aslında dört kutuplu kuvvetin  $1/r_0^2$  ile orantılı olmasından dolayı  $r_0$  genellikle tüm RFQ boyunca sabit kalır (çapsal eşleme kısmı hariç). Bütün uzunluklar  $r_0$ 'a bölünerek oranlanırsa,  $m$  ve  $l = L/r_0$  bağımsız değişken olurlar ve  $a$  ile  $A$  Denklem (3.5) ve (3.6)'in kullanılmasıyla hesaplanabilir. Bu durumda,

$$kr = \frac{\pi r}{L} = \frac{\pi r/r_0}{L/r_0}$$

ve

$$kr_0 = \frac{\pi}{L/r_0} = \frac{\pi}{l}$$

ifadelerinden görülebilir. Denklem (3.1)'in parantez içerisindeki terimi,

$$\left(\frac{r}{r_0}\right)^2 \cos 2\theta + AI_0(kr) \cos kz = \pm 1 \quad (3.7)$$

hesaplanan yüzeyleri tanımlar. Standart bir kanat ucu geometrisi Denklem (3.7)'ye sadece her kanadın ucunda uyar ( $\theta = 0, \pm \frac{\pi}{2}, \pi$ ). Her kanat ucu dairesel bir kesite

sahiptir. Dairenin yarıçapı, denklem (3.7)'den hesaplanan enine eğrilik yarıçapıyla aynı olmalıdır veya sabit olmalıdır.  $\theta = 0$  ve  $\pi$  iken yatay kanat ucu profili,

$$\left(\frac{x}{r_0}\right)^2 = 1 - AI_0(kx) \cos kz \quad (3.8)$$

denkleminin  $x$  için çözümü yapılarak bulunur. Bu pozitif çözüm  $\alpha(z)$  şeklinde tanımlanabilir.  $\theta = \pm \frac{\pi}{2}$  noktasında düşey kanat profili ise benzer şekilde,

$$\left(\frac{y}{r_0}\right)^2 = 1 + AI_0(ky) \cos kz \quad (3.9)$$

denkleminde elde edilir. Hücrenin tam ortasında,  $\cos kz=0$ 'da, her hücrenin yer değiştirmesinin  $r_0$  olduğu görülebilir. Sözü geçen tüm kanat ucu geometrileri için  $r_0$ 'ın temel tanımı bu olacaktır.

### 3.2 Çok Kutuplu Terimlerin Hesaplanması

Eğrilik yarıçapının minimum açıklık değerinden küçük olduğu sabit bir yarıçaptaki potansiyel,  $0$  ile  $\pi/2$  arasındaki azimuthal açılar için ve  $0 \leq z \leq L/2$  arasındaki boyuna konumlar için hesaplanarak potansiyelin çok kutuplu bileşenleri tanımlanabilir. Silindirik koordinatlarda potansiyel fonksiyonu aşağıdaki simetrik koşullarda,

$$\begin{aligned} U(r, \theta, z) &= U(r, -\theta, z), \\ U(r, \theta, z) &= U(r, \theta, -z), \\ U(r, \theta, z) &= U(r, \theta \pm \pi, z) \text{ ve} \\ U(r, \theta, z) &= -U\left(r, \theta \pm \frac{\pi}{2}, L - z\right) \end{aligned} \quad (3.10)$$

şeklindedir. İlk iki koşul, çözümü Laplace denkleminde ifade etmek için  $\theta$  ve  $kz$ 'nin cosinuslu terimlerinin kullanılabileceğini belirtir. Üçüncü koşul  $\theta$ 'nın sadece çift tamsayı değerlerinin sıfıra eşit olmadığını gösterir. Dördüncü simetri koşulu ise yalnızca,

$$(\cos m\pi)(\cos n\pi) = -1 \quad (3.11)$$

durumunda sağlanır. Bunun anlamı  $m$  sıfır veya çift olursa  $n$  tek olmalı, veya  $n$  çift veya sıfır olursa  $m$  tek olmalıdır. Bu sınır koşulları uygulanara denklem (2.4)'ten hesaplanan potansiyel fonksiyonunun integrasyonu ile,

$$A_{0m} = \frac{16}{\pi^2 V \rho^{2m}} \int_0^{\pi/2} \int_0^{\pi/2} U(\rho, \theta, kz) \cos 2m\theta \, d\theta \, d(kz) \quad (3.12)$$

ve

$$A_{nm} = \frac{32}{\pi^2 V I_{2m}(nk\rho)} \int_0^{\pi/2} \int_0^{\pi/2} U(\rho, \theta, kz) \cos 2m\theta \cos nkz \, d\theta \, d(kz) \quad (3.13)$$

$A_{10}, A_{01}, A_{12}, A_{03}, A_{30}, A_{21}, A_{32}$  ve  $A_{23}$  çokkutuplu 8 terimin değerleri denklem (3.12) ve (3.13)'ten hesaplanmaktadır (Crandall 1983).

#### **4. BULGULAR ve TARTIŞMA**

RFQ hesaplamalarını yapmak için çeşitli bilgisayar yazılımları bulunmaktadır. Yalnızca demet dinamiği hesaplarında kullanılanların yanında hem demet dinamiği yapan, hem tasarım ve benzetim yapan yazılımlar vardır. Bir RFQ'yu tasarlamak için bilgisayar kullanmak elzemdir ve hepsinin yanında kullanımı kolay, gerçeğine en yakın benzetimleri yapan ve hassas hesaplama sonuçları veren yazılımlar geliştirilmektedir. Burada Türkiye Atom Enerjisi Kurumu'nun (TAEK) A1.H4.P1 numaralı 1-5 MeV RF Kovuklu Proton Hızlandırıcısı Yapımı projesi (Turemen vd. 2013) ve TÜBİTAK 114F106 numaralı Radyo Frekans Dört Kutuplusu Tasarımı ve Benzetimi projesi (Yasatekin vd. 2015) bünyesinde geliştirilen DEMIRCI yazılımından bahsedilmektedir. Bu bölümde DEMIRCI ile yapılan bir tasarım üzerinden kullanımı açıklanacak, diğer RFQ tasarım programları ile sonuçları karşılaştırılacaktır.

##### **4.1 DEMIRCI: RFQ Tasarım Yazılımı**

Bütün iyon hızlandırıcılarının en önemli kısımlarından biri olan RFQ'ların tasarımı için 1980'lerden günümüze bilgisayar ortamında çalışmalar devam etmektedir. Öyle ki bazı yazılımların hızla değişen ve gelişen bilgisayarlara ayak uyduramaması yeni yazılımların geliştirilmesine önayak olmaktadır. Aynı sebeplerle C++ gibi en yeni programlama dillerinden biri kullanılarak geliştirilen DEMIRCI'nin amacı, nesne odaklı ROOT ortamından da faydalanarak kullanıcıya görsellik ve uygulamada kolaylık sağlamaktır (Brun ve Rademakers 1997). Bu zamana kadar en iyi tasarım yazılımlarından olan ve en yaygın olarak kullanılan LIDOS ve PARMTEQ'in yalnızca Windows ortamında kullanılabilen oluşları negatif özellikleri arasında ilk sırayı almaktadır. DEMIRCI ilk olarak Unix benzeri ortamlarda geliştirilmeye başlanmıştır. Windows ortamında da çalışması için çalışmalar devam etmektedir. DEMIRCI'nin bir diğer önemli özelliği hem komut satırı arayüzünden hem de grafik arayüzünden tasarım yapılabilir olmasıdır. Şekil 4.1'de DEMIRCI'nin komut satırı arayüzünden bir ekran görüntüsü verilmiştir.

```
demirci — bash — 80x19
Betul-MacBook-Pro:demirci byasatekin$ ./demirci.exe
~~~~~
Welcome to Demirci v1.93
~~~~~
./share/dmr.in operates at 352.2 MHz, corresponding to lambda=85.1199 cm.
max KP factor is 1.8 where Esurface @1KP: 18.4328 MV/m.
RFQ entry energy is: 20 keV, corresponding to an initial beta=0.00652918
Vmean=60.000000 kV Rs=4.896168 mOhm ZTT=1900.103314 MOhm/m
UBI=5.985000E-04 J/cm/Quad UEL:0.128807E-04 J/cm/Quad
Q0=10836.768139 Q:10393.221779 Cl [F/m]=0.000000
RFQ exit energy is: 2.18732 MeV, corresponding to a final beta=0.06779 in 28
3.92959 ns.
RFQ total length is: 2.31400 m. corresponding to 200 cells and 2.71852 lambda
Ps(kW/m):48.88702 W/cm/Quad:122.21756 Pv(kW/m):3.18336 Ptotal(kW/m):52.07038
Pbeam(kW):2.18732
Ps(kW) :113.12474 Pv(kW) :7.36630 Ptotal(kW) :120.49104 Q:10393.22178
ZT^2 (Mohm/m):770.93194 or:3.34411
preparing main output file ... ok.
Betul-MacBook-Pro:demirci byasatekin$
```

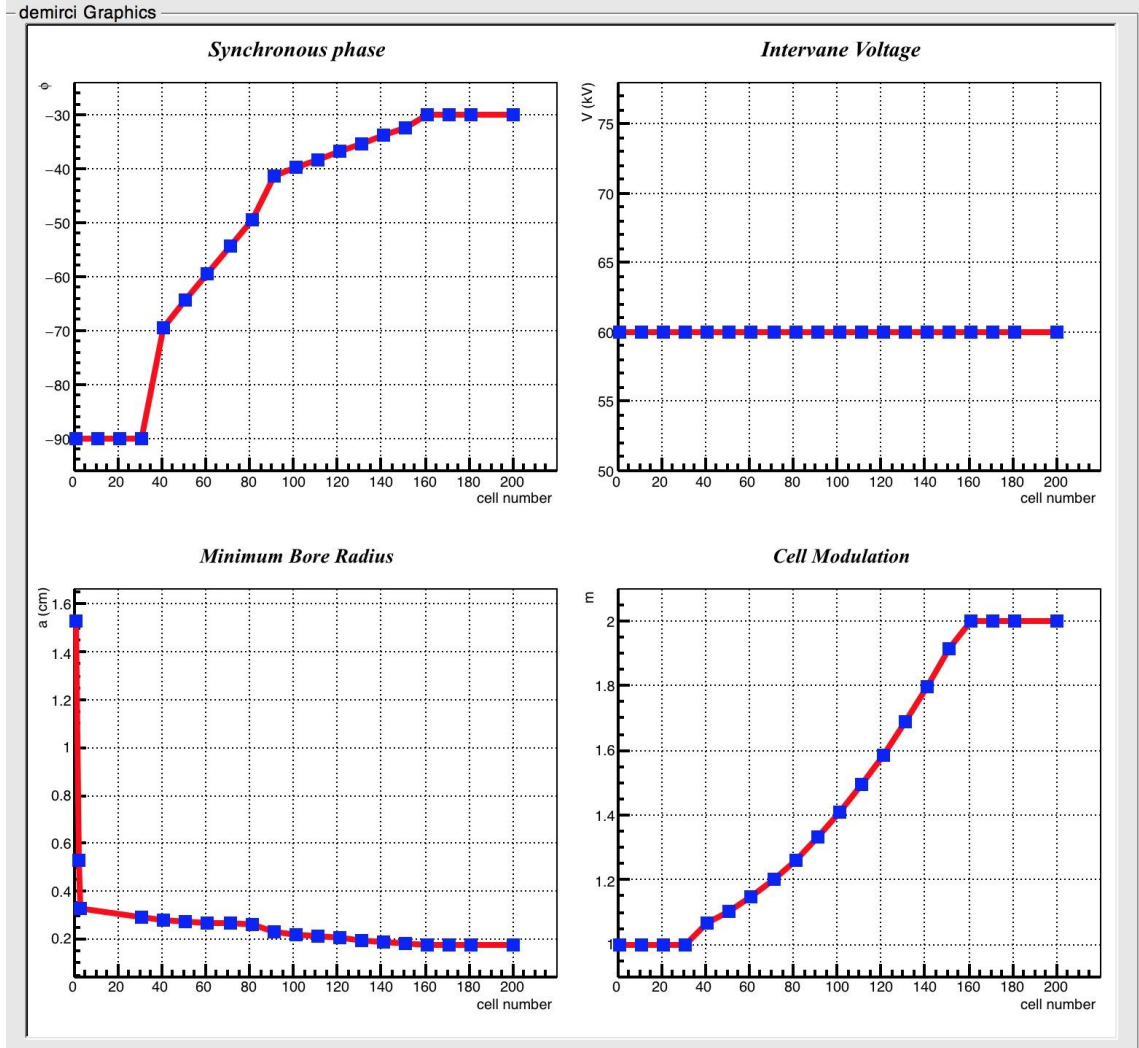
Şekil 4.1 DEMIRCI komut satırı arayüzü

DEMIRCI'nin derlendikten sonra oluşturulan çalıştırılabilir dosyası komut satırından açıldığında varsayılan değerlerle yapılan tasarımın sonuçları gösterilmektedir. “-h” komutu ile Şekil 4.2’de gösterilen yardım listesine ulaşılmaktadır.

```
demirci — bash — 95x22
Betul-MacBook-Pro:demirci byasatekin$ ./demirci.exe -h
~~~~~
Welcome to Demirci v1.93
~~~~~
This is Demirci v1.93, a library calculating the proton behaviour in an RFQ.
It expects an input design file, and outputs the resulting calculations in various formats.
-f: use the design from file [filename]
-v: verbose, verbosity level: BitCodedInteger
-c: redefine cell numbers and phases from cmdline, ignore design file.
-p: redefine cell numbers and phases from phi.in, ignore design file.
-V #: force a voltage, # [kV]
-t #: target energy [MeV], stops calculations if the target Energy is reached.
-l: dump the results in LidosAdvisor format
-L: dump the design as input to LidosAdvisor
-S: see the vane shape
-P: plot the results (w/ Gnuplot)
-s: use gap information from gap.in
-g: enter gap information from the cmdline
-h: help, print this help
-T #: calculate twiss parameters and plot phase space for N particles
-r: run beam dynamics (requires -T #)
_____ 2013 (C) G. Unel & Team Prometheus _____
```

Şekil 4.2 DEMIRCI yardım menüsü

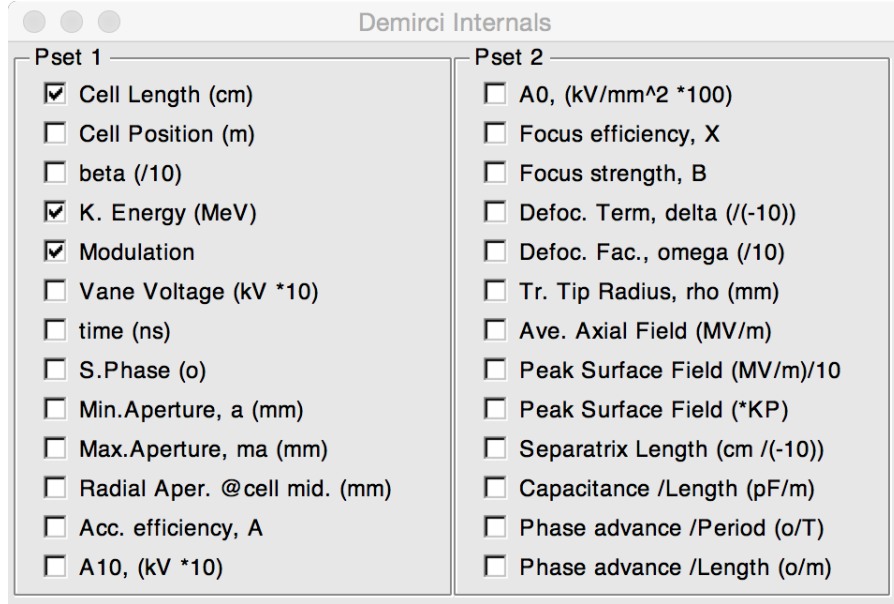




Şekil 4.3 DEMIRCI'nin grafiksel tasarım ekranı

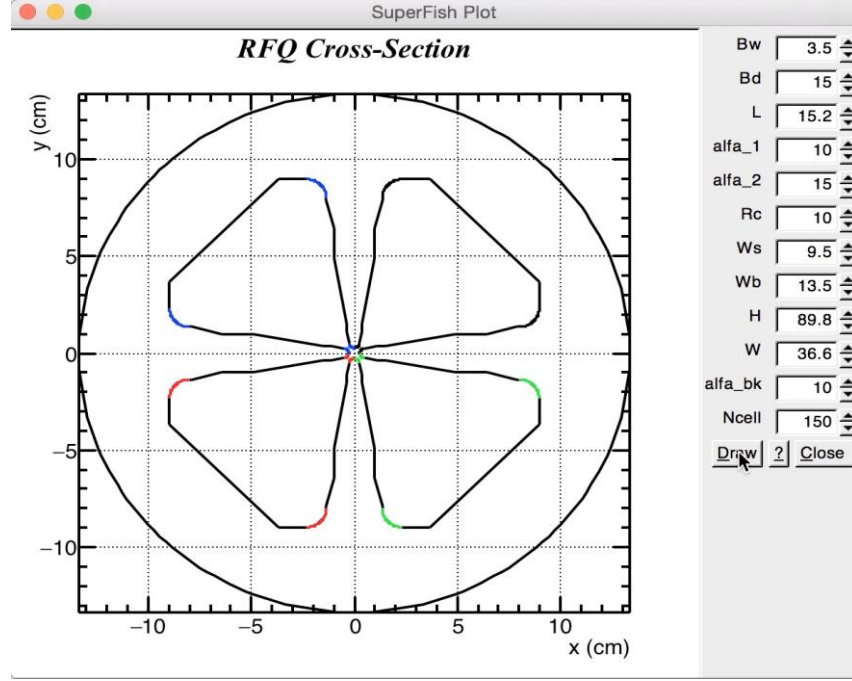
RFQ tasarımı yapılırken belli başlı adımları takip etmek gerekmektedir. Başlangıçta RFQ'ya girecek demetin enerjisi ve akımı, Kilpatrick değeri, RF frekansı ve RFQ uzunluğu belirlenmelidir. Bu değerler belirlendikten sonra DEMIRCI grafik arayüzünde Şekil 4.3'te görülen bir RFQ'yu tasarlamak için gereken 4 ana parametre (eşzamanlı faz ( $\phi$ ), kanatlar arası gerilim (V), minimum açıklık yarıçapı (a) ve hücre kiplenim (m)) için grafik üzerinde sürükle-bırak yöntemiyle tasarım kolaylığı sağlamaktadır. Bu yöntem ile o parametrenin istenen hücrede artması, azalması veya sabit kalması ayarlanabilmektedir. Varsayılan olarak 200 hücre için 20 tane referans hücre (mavi kareler) belirlenmiştir. Bu referans hücreleri arasındaki değerler interpolasyon ile hesaplanmaktadır. Tasarım tamamlanıp çalıştırıldıktan sonra hesaplama sonuçları bir

metin kütüğüne kaydedilir. Şekil 4.4'te hesaplama sonuçları doğrultusunda çizdirilebilecek değişkenlerin bir ekran resmi gösterilmektedir. Bir veya birden fazla değişken aynı grafik üzerinde RFQ uzunluğuna ya da hücre numarasına göre çizdirilebilmektedir.



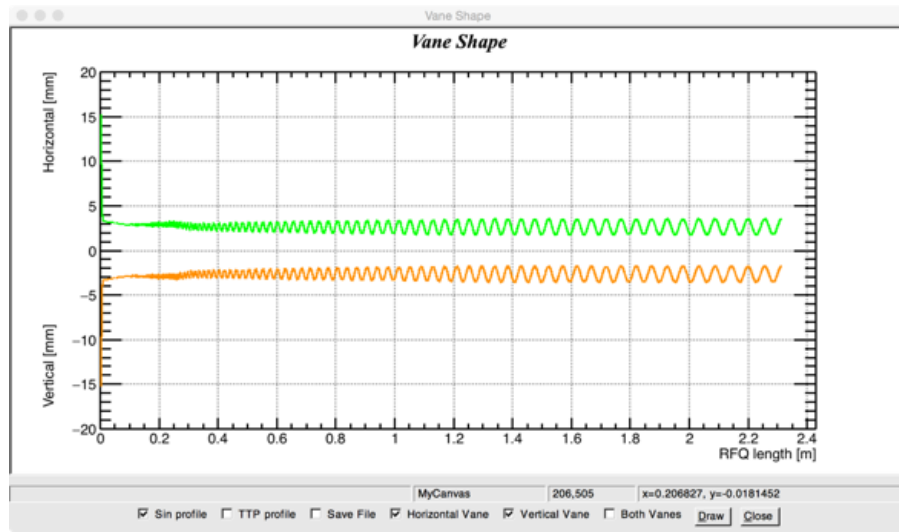
Şekil 4.4 DEMIRCI'nin çizdirilebilir değişkenler listesi

DEMIRCI Türkçe ve İngilizce olarak iki farklı dil seçeneğine sahiptir. RFQ parçalar halinde tasarlanacaksa parçalar arasındaki boşluğun özellikleri belirlenebilmektedir. DEMIRCI'nin TOUTATIS ve LIDOS ile etkileşmesi, her iki programda çalıştırılacak uygun kütükler hazırlaması ve sonuçları karşılaştırmak üzere LIDOS çıktısıyla uyumlu kütük hazırlaması şeklindedir. Bunlara ek olarak SUPERFISH programına da uygun girdi kütüğünü hazırlayarak kanatların 2 boyutlu çizimini yapmaktadır (Şekil 4.5).



Şekil 4.5 DEMIRCI'nin SUPERFISH ile 2 boyutlu tasarım penceresi

DEMIRCI ile yatay ve düşey kanatlar çizdirilebilmekte ve kanat parametreleri bir kütüğe kaydedilerek üretimde kullanılabilir. İstenilen bölgeye yaklaşılarak kiplenimin davranışı gözlenebilmekte, eğer iki veya daha fazla parça halinde tasarlanmış bir RFQ ise kanatlar arasındaki boşluk gözlenebilmektedir. Şekil 4.6'da bahsedilen kanat tipi penceresi gösterilmektedir.



Şekil 4.6 Karşılıklı kanatların 2 boyutlu görünümü

#### **4.1.1 Tasarım aşamaları**

RFQ tasarımına başlamadan önce belirlenmesi gereken temel RFQ değişkenleri vardır. İlk olarak hangi parçacığın hızlandırılacağı belirlendikten sonra frekans değeri, iyon kaynağından çıkan parçacıkların ilk enerjisi, ulaşılması hedeflenen çıkış enerjisi, Kilpatrick sınırı gibi kritik değişkenler belirlenmelidir. Bu değişkenlerin ışığında tasarlanacak RFQ'nun kanatlar arası gerilimi, kanatların kiplenimi, kanatların demet eksenine olan en küçük uzaklıkları ve eşzamanlı faz değerleri bütün RFQ boyunca hesaplanmalıdır. Tasarımın üretimine geçilmeden önce en az iki farklı yazılımla karşılaştırılmalarının yapılması üretimde doğacak hataları en aza indirmektedir.

#### **4.1.2 Yöntem**

DEMIRCI'nin tasarım adımları tasarlanırken LANL'ın (Los Alamos National Laboratory) 4 kısımdan oluşan RFQ tasarım yöntemi göz önüne alınmıştır (Crandall 2005). Bu yöntemde göre RFQ çapsal eşleme, şekillendirici, hassas bohçalayıcı ve hızlandırma kısımları olarak 4 kısma ayrılmıştır. Çapsal eşleme kısmında iyon kaynağından çıkan sabit çaplı DC demet alınır ve RFQ içerisindeki güçlü değişken-gradyent odaklama örgüsüne eşlenecek demete dönüştürülür. Şekillendirici kısmında odaklama başlar. Hassas bohçalayıcı kısmında demet tamamen bohçalanıp hafif hızlanmaya başlayana kadar odaklama süreci devam eder. Bu kısımda sabit faza ulaşılır. Son olarak hızlandırma kısmında ise demet doğrudan hızlandırma alanına maruz kalır ve son enerjisine ulaşır (Staples vd. 2011a).

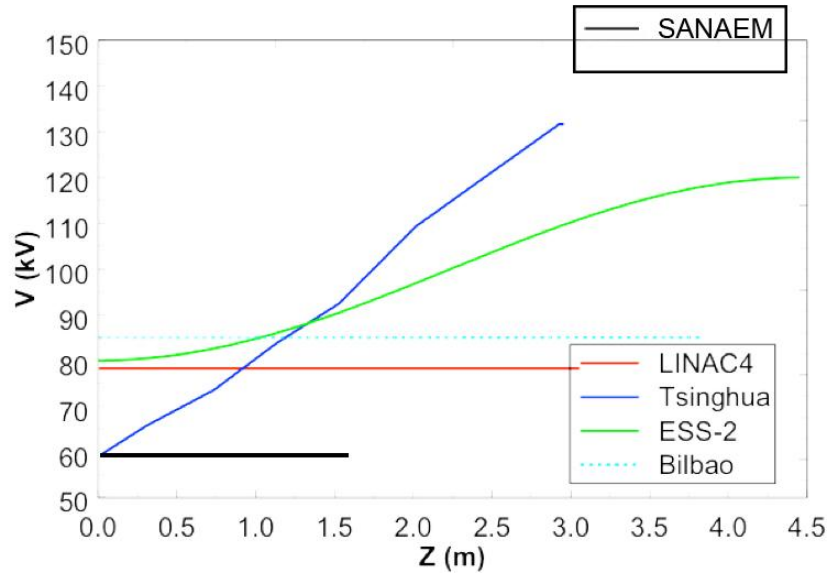
#### **4.1.3 SPP RFQ'sunun diğer RFQ parametreleri ile karşılaştırması**

Bu kısımda SPP RFQ'su parametreleri kullanılarak DEMIRCI ile hesaplamalar yapılmıştır (Çizelge 4.1). Elde edilen sonuçlar LINAC4, CPHS (Tsinghua), ESS-2 ve Bilbao RFQ'ları ile karşılaştırılmıştır (Garoby vd. 2004, Xing vd. 2010, Neri vd. 2013, Bermejo ve Bustinduy 2013). LINAC4, CPHS (Tsinghua), ESS-2 ve Bilbao RFQ'larının grafikleri James Stovall'dan edinilerek DEMIRCI ile üretilen grafiklerle üst üste çizmek suretiyle karşılaştırmalar gerçekleştirilmiştir (Stovall, 2015).

Çizelge 4.1 SPP RFQ'su tasarım parametreleri

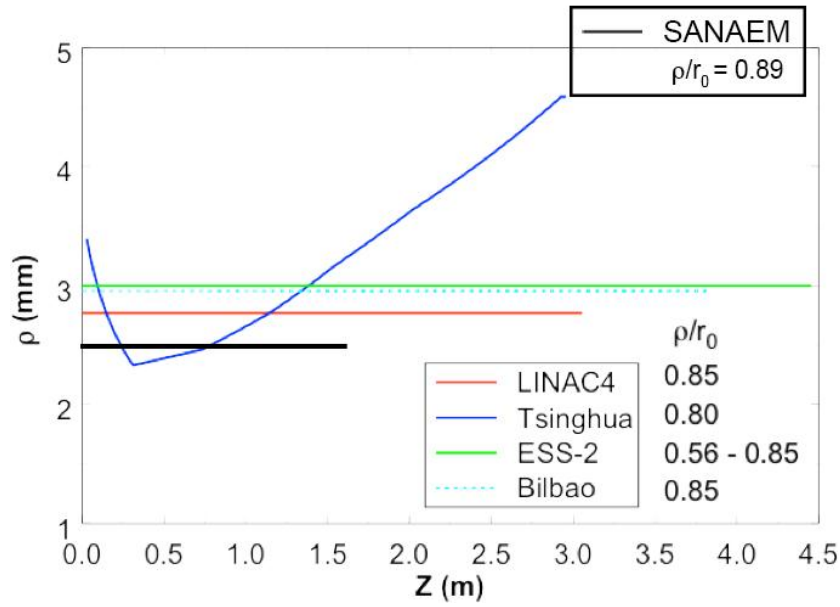
Parametre	Değeri	Birimi
Salınım Frekansı	352.21	MHz
İşlem Faktörü	2.5	%
Giriş Enerjisi	0.02	MeV
Demet Akımı	1	mA
Normalize giriş yayını	1	$\pi$ .mm.mrad
Kanatlar arası gerilim	60	kV
Kilpatrick sınırı	1.5	-
Ortalama açıklık yarıçapı	2.799	mm
Çıkış enerjisi	1.5	MeV
İletim	96.2	%
Toplam uzunluk	164.6	cm

Bu dört RFQ'nun kanatlar arası gerilim, kanat ucu yarıçapı, hücre uzunluğu, demet enerjisi, kiplenim, eşzamanlı faz ve enine odaklama faktörü parametreleri için elde edilen grafikleri ile SPP RFQ'sunun DEMIRCI hesaplamaları aynı grafiklerde gösterilmiştir (Şekil 4.7-4.12).



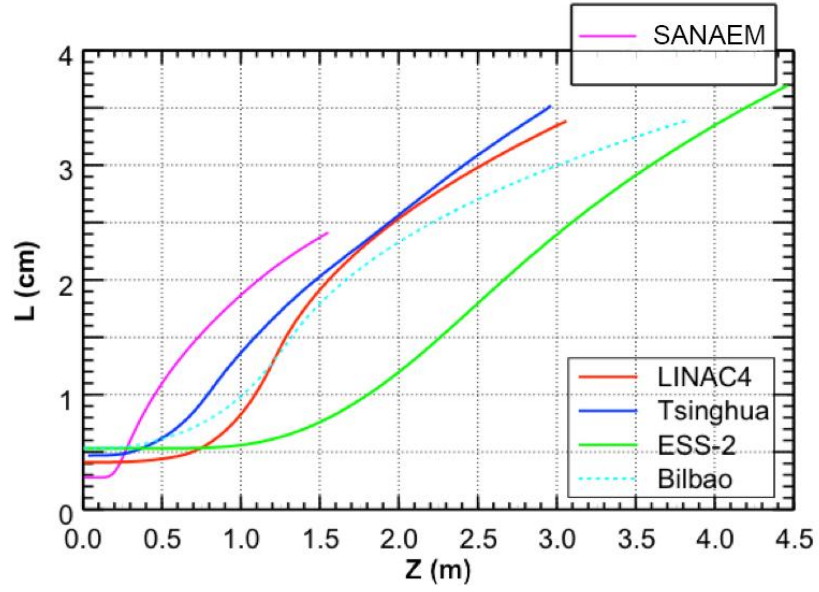
Şekil 4.7 LINAC4 (kırmızı), Tsinghua (mavi), ESS-2 (yeşil), Bilbao (turkuaz) ve SANAEM (siyah) RFQ'larının kanatlar arası gerilim eğrileri

Şekil 4.7’de LINAC4, Tsinghua, ESS-2, Bilbao ve SANAEM RFQ’ları için elde edilen grafikte x-ekseni RFQ uzunluğunu, y-ekseni ise kanatlar arası gerilim değerini temsil etmektedir. SANAEM’de SPP RFQ’su için sabit gerilim değeri sisteme fazla yük binmesini engellemek amacıyla 60 kV olarak belirlenmiştir. LINAC4 ve Bilbao RFQ’ları da RFQ boyunca sabit gerilime sahipken, Tsinghua ve ESS-2 RFQ’larının gerilimleri değişkendir.



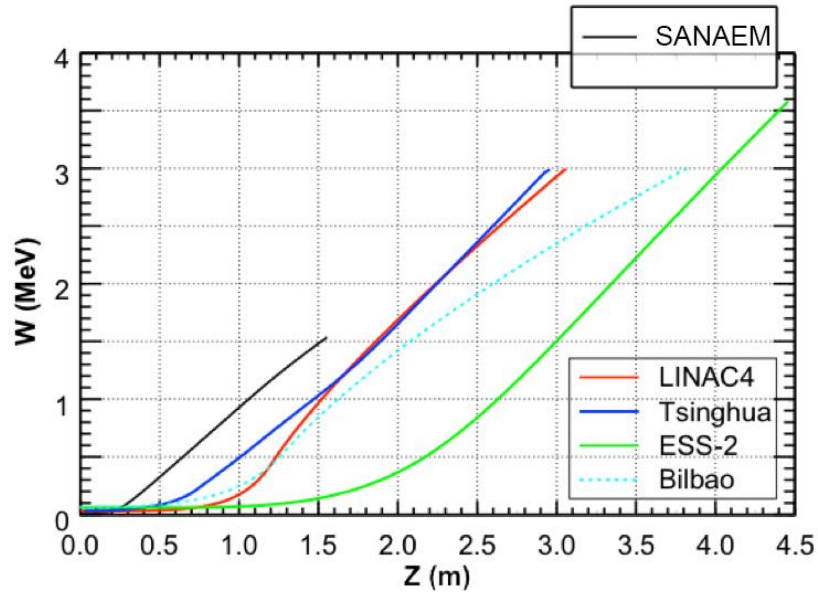
Şekil 4.8 LINAC4 (kırmızı), Tsinghua (mavi), ESS-2 (yeşil), Bilbao (turkuaz) ve SANAEM (siyah) RFQ’larının kanat ucu yarıçapı eğrileri

Şekil 4.8 RFQ uzunluğuyla değişen kanat ucu yarıçapı grafiğini göstermektedir. Tsinghua RFQ’su hariç diğer RFQ’larda üretim kolaylığı açısından bu parametrenin sabit seçildiği görülmektedir.



Şekil 4.9 LINAC4 (kırmızı), Tsinghua (mavi), ESS-2 (yeşil), Bilbao (turkuaz) ve SANAEM (pembe) RFQ'larının hücre uzunluğu eğrileri

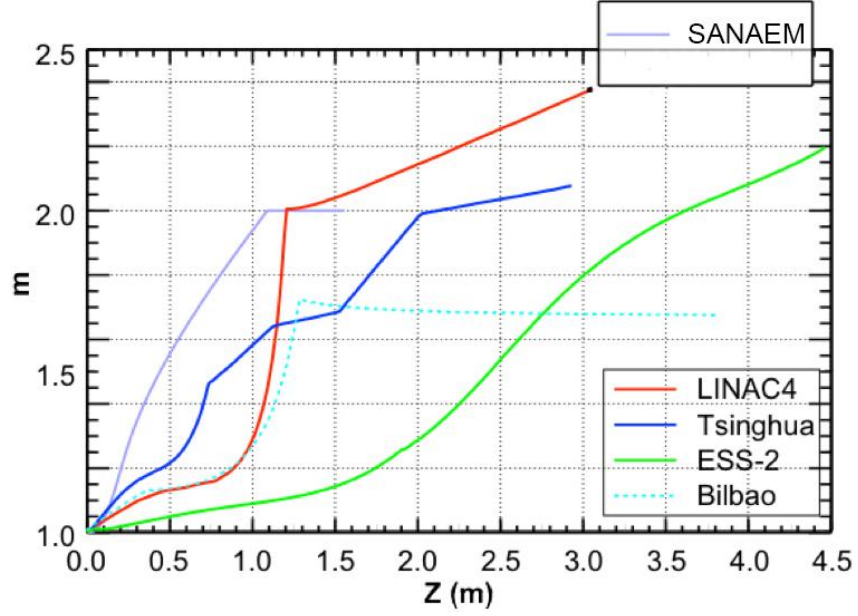
RFQ'nun boyuna göre değişen hücre uzunluğu grafiği şekil 4.9'da gösterilmektedir. Bir hücredeki enerji kazancı o hücrenin uzunluğuyla doğru orantılı olacağından, kiplenimli kanatlar sayesinde enerjisi artan demetin hücre uzunluğunun da kinetik enerjisinin de RFQ'nun uzunluğu arttıkça artması gerekmektedir (Şekil 4.10).



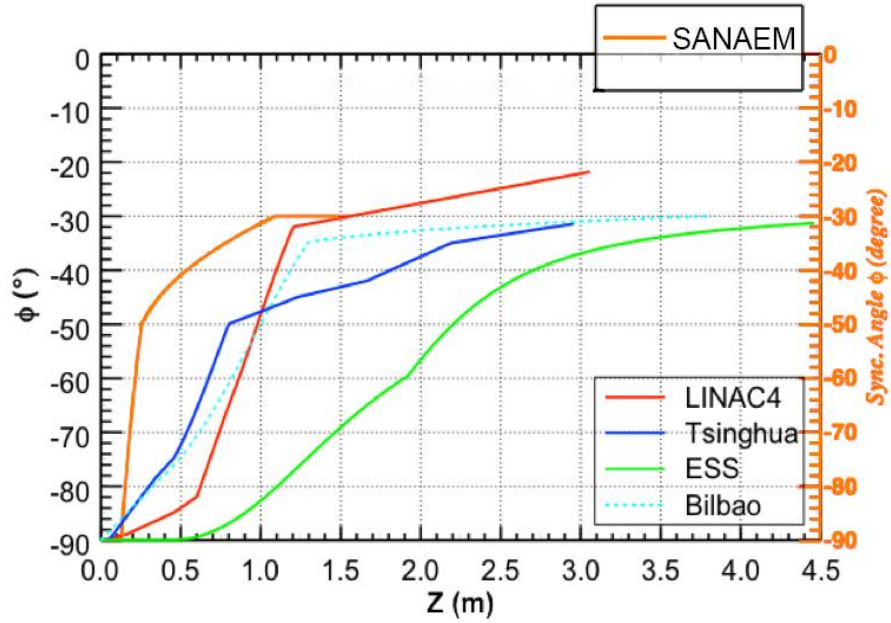
Şekil 4.10 LINAC4 (kırmızı), Tsinghua (mavi), ESS-2 (yeşil), Bilbao (turkuaz) ve SANAEM (siyah) RFQ'larının enerji eğrileri



Hızlandırma için gerekli olan boyuna alan bileşeni üreten kiplenimli kanatlar ile parçacık demeti ve RF dalgasının eşlemesi sağlanmaktadır. Artan demet enerjisi kiplenimin de artmasını gerektirmektedir. Şekil 4.11’de RFQ uzunluğuyla değişen kiplenim grafiği gösterilmektedir.



Şekil 4.11 LINAC4 (kırmızı), Tsinghua (mavi), ESS-2 (yeşil), Bilbao (turkuaz) ve SANAEM (lila) RFQ'larının kiplenim eğrileri



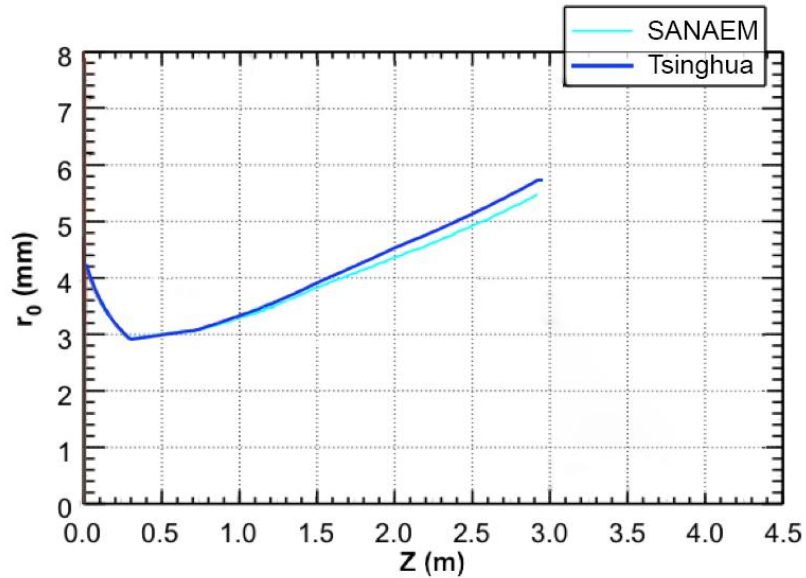
Şekil 4.12 LINAC4 (kırmızı), Tsinghua (mavi), ESS-2 (yeşil), Bilbao (turkuaz) ve SANAEM (turuncu) RFQ'larının eşzamanlı faz eğrileri



Eşzamanlı faz değeri 0 ile 90° arasındayken parçacık demeti boyuna kararlılığa sahiptir (Humphries 1986). LANL 4 bölge yöntemine göre RFQ'nın ilk çapsal eşleme kısmında faz değeri -90° olarak alınır, akabinde şekillendirici ve hassas bohçalayıcı kısımlarında faz değeri hızlı bir artış gösterirken, hızlandırma kısmına gelindiğinde faz değeri sabit veya yavaş artacak şekilde alınabilir. Şekil 4.12'de LINAC4, Tsinghua, ESS-2, Bilbao ve SANAEM RFQ'larının RFQ boyunca faz değişim eğrileri gösterilmiştir.

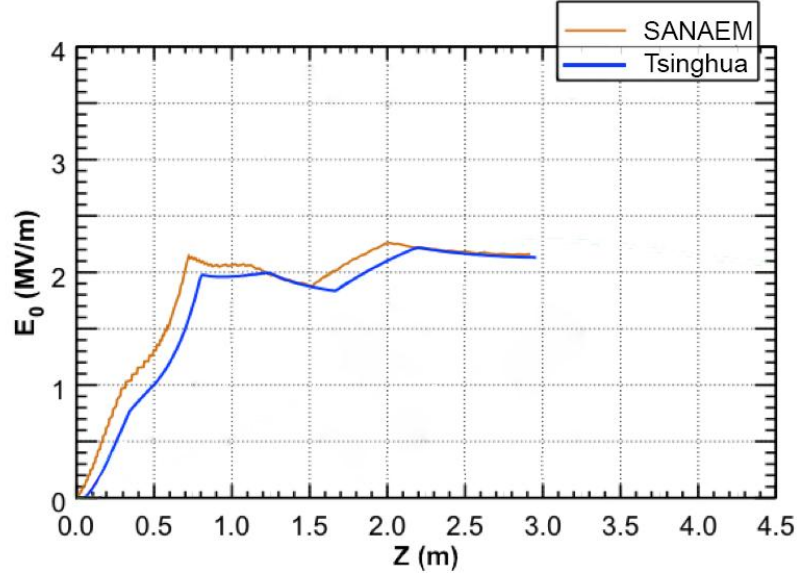
#### 4.1.4 CPHS RFQ'sunun DEMIRCI ile hesaplama sonuçlarının karşılaştırılması

Bu bölümde DEMIRCI'nin hesaplama sonuçlarını teyit etmek amacıyla CPHS (Tsinghua) RFQ'su DEMIRCI ile tekrar tasarlanmış ve orjinal sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Şekil 4.13'te gösterilen grafikte açıklık yarıçapı değerleri için karşılaştırma yapılmıştır. Koyu mavi eğri Tsinghua RFQ'sunun kendi orjinal sonuçlarının eğrisini, turkuaz eğri ise aynı parametreler kullanılarak DEMIRCI ile yapılan hesaplama sonuçlarının eğrisini temsil etmektedir. Görüleceği üzere DEMIRCI gerçeğine çok çok yakın sonuçlar vermekte, bu da güvenilirliğini desteklemektedir.

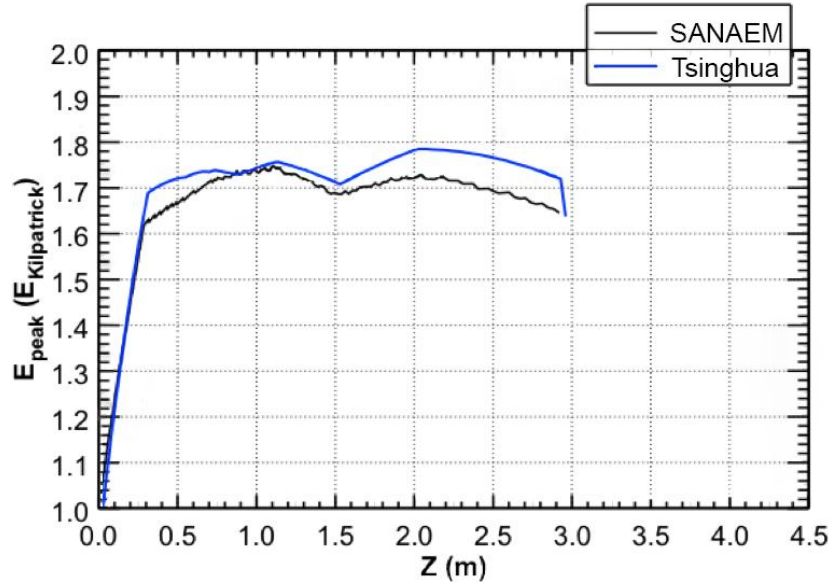


Şekil 4.13 CPHS (Tsinghua) RFQ'su boyunca bir hücrenin orta noktasından demet eksenine olan çapsal uzaklık değerlerinin değişiminin DEMIRCI ile hesaplama sonuçlarının karşılaştırılması

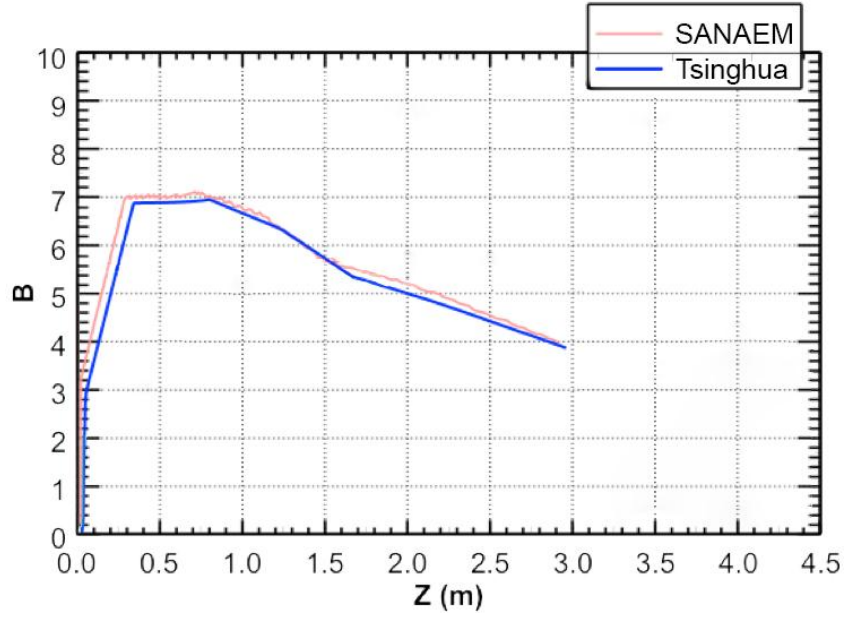
Benzer şekilde ortalama elektrik alanı, tepe yüzey elektrik alanı ve odaklama gücü parametreleri için karşılaştırmalar yapılmış (Şekil 4.14-4.16) ve gerçek sonuç eğrileriyle ufak sapmalarla aynı sonuçlar elde edilmiştir. Sapmaların sebepleri arasında aynı formüller kullanılmasına rağmen bazı sabitlerin farklı belirlenmesi veya birim çevirmelerindeki hassasiyet gösterilebilir.



Şekil 4.14 CPHS (Tsinghua) RFQ'su boyunca aksel ortalama elektrik alanı değişiminin DEMIRCI ile hesaplama sonuçlarının karşılaştırılması



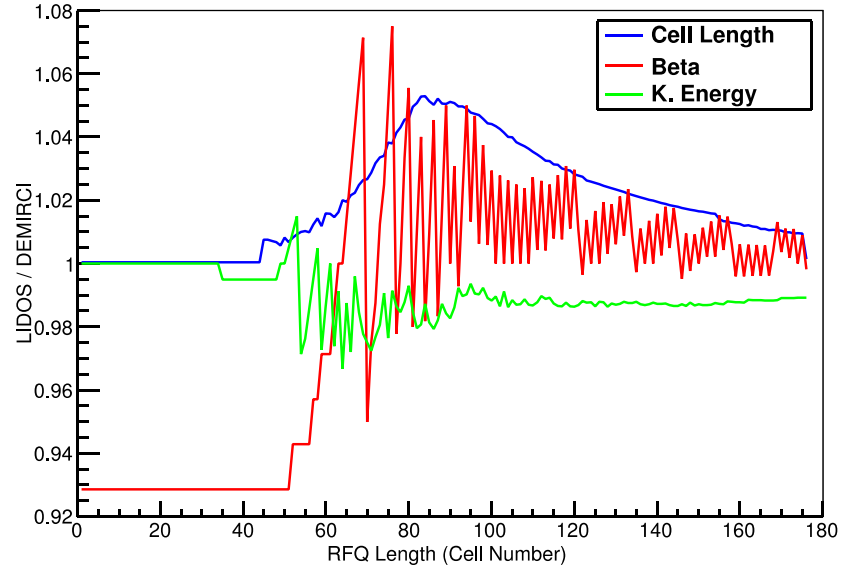
Şekil 4.15 CPHS (Tsinghua) RFQ'su boyunca tepe yüzey elektrik alanı değişiminin DEMIRCI ile hesaplama sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 4.16 CPHS (Tsinghua) RFQ'su boyunca odaklama gücü değişiminin DEMIRCI ile hesaplama sonuçlarının karşılaştırılması

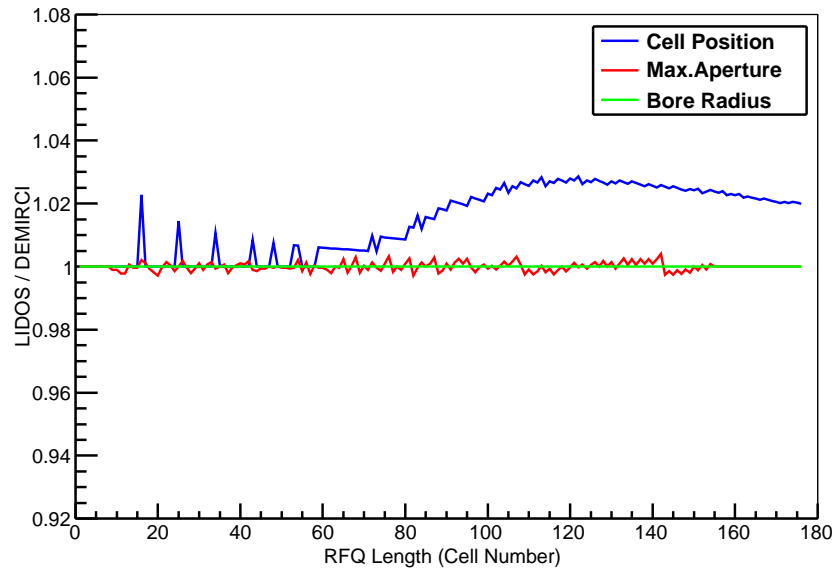
#### 4.1.5 DEMIRCI'nin TOUTATIS ve LIDOS tasarım sonuçlarıyla karşılaştırılması

Bir yazılımın sonuçlarını kontrol etmek için en iyi yöntem eşdeğeri diğeri yazılımların sonuçlarıyla karşılaştırmaktır. Aynı girdiler kullanılarak yapılan tasarımların sonuçlarının birbirleriyle uyumlu olması yeni yazılımda yapılacak geliştirmeleri yönlendirmektedir. DEMIRCI, TOUTATIS ve LIDOS yazılımlarına girdi dosyaları hazırlayabilmektedir. Böylelikle yapılan tasarımın bu iki yazılımda çalıştırılıp sonuçlarının karşılaştırılmasına olanak sağlanır. Bu bölümde DEMIRCI sonuçlarının TOUTATIS ve LIDOS yazılımlarının RFQ boyunca değişimlerinin karşılaştırılması yapılmıştır.



Şekil 4.17 SPP RFQ'su boyunca hücre uzunluğu, beta ve kinetik enerji değişimlerinin LIDOS ve DEMIRCI ile yapılan hesaplama sonuçlarının oranı

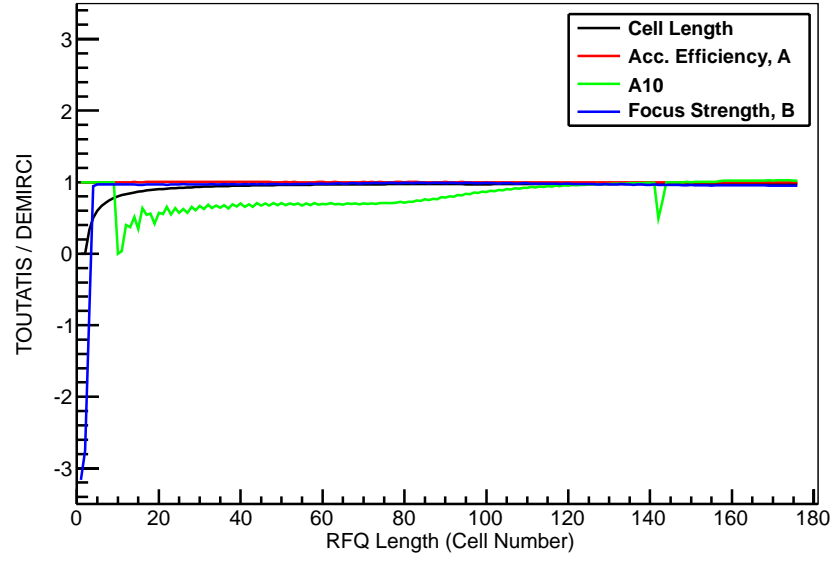
Şekil 4.17'de hücre uzunluğu, beta ve kinetik enerji parametreleri için LIDOS ve DEMIRCI hesaplama sonuçları oranlanmıştır. Grafikten de görüleceği üzere oranın 1 civarında çıkması hesaplama sonuçlarının birebir örtüştüğünü göstermektedir.



Şekil 4.18 SPP RFQ'su boyunca hücre konumu, maksimum açıklık ve açıklık yarıçapı değişimlerinin LIDOS ve DEMIRCI ile yapılan hesaplama sonuçlarının oranı

LIDOS yazılımı tasarım, analiz ve benzetim kısımları olmak üzere üç kısım tasarım aşamasından oluşmaktadır. Karşılaştırmalar ilk tasarım kısmı sonuçlarıyla yapılmıştır. Bunun yanında DEMIRCI ve LIDOS farklı tasarım yöntemleri kullanmaktadır. LIDOS RFQ parametrelerini 8 terimli potansiyel fonksiyonu kullanarak hesaplarırken, DEMIRCI ise 2 terimli potansiyeli fonksiyonunun kullanmaktadır. Şekil 4.18'den görüleceği üzere hücre konumu, maksimum açıklık ve açıklık yarıçapı parametreleri için yapılan oranlamada çok küçük farklılıklarla aynı sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Şekil 4.17 ve 4.18 için elde edilen %3-%5 oranındaki uyumsuzluk DEMIRCI'nin hesaplamalarını henüz 8 terimli potansiyel kullanarak yapmıyor olmasından kaynaklanmaktadır.

DEMIRCI'nin girdi kütüğü hazırlayarak demet dinamiği hesaplarını üzerinde yapabildiği diğer bir program olan TOUTATIS, tek başında RFQ tasarımı yapamamaktadır. Yani TOUTATIS geometrik tasarım parametrelerinin başka bir program ile elde edilerek girdi kütüğü şeklinde programa verilmesi suretiyle demet dinamiği benzetimi yapan bir yazılımdır. DEMIRCI bu programa girdi dosyası hazırlayabilmesinin yanında TOUTATIS'in hesapladığı hücre uzunluğu, hızlandırma verimliliği,  $A_{10}$  ve odaklama gücü parametrelerini de hesaplayabildiği için karşılaştırma sonuçlarına bakılmış odaklama gücü parametresi dışında diğerleri için birbiriyle uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 4.19'dan görüleceği üzere hücre uzunluğu (siyah), hızlandırma verimliliği (kırmızı) ve  $A_{10}$  (yeşil) parametrelerinin oranlaması 1 civarında küçük sapmalarla elde edilmiştir. Odaklama gücü parametresi için ilk 3 ile 5 hücre civarındaki negatif oranın sebebi TOUTATIS programının bu değerleri negatif hesaplıyor oluşundan kaynaklanmaktadır. Konu ile ilgili programın yazarıyla irtibata geçilmiş, negatif hesaplamasının nedenleri araştırılmıştır. Sebebinin TOUTATIS başka bir programa bağımlılığından kaynaklandığı anlaşılmış; bazı değerlerin bu diğer programın hazır tablolarından çekildiği ve RFQ'nun girişinde  $L/r_0$  değerlerinin tablonun dışında kalıyor olmasından negatif değerler verdiği ancak bu değerlerin negatif olmasının parçacık hareketini bozmayacağı ve analiz sonuçlarını etkilemeyeceği cevabı alınmıştır (Duperrier 2015).



Şekil 4.19 SPP RFQ'su boyunca hücre uzunluğu, hızlandırma verimliliği,  $A_{10}$  ve odaklama gücü değişimlerinin TOUTATIS ve DEMIRCI ile yapılan hesaplama sonuçlarının oranı

## 5. SONUÇ

Bu tez kapsamında hafif iyonları hızlandırmak için kullanılan RFQ tasarımı için dünyada yaygın olarak kullanılan LIDOS ve TOUTATIS yazılım paketleri öğrenilmiş, bir RFQ tasarlamak için gereken tüm hesaplar ayrıntılarıyla yapılmış ve yeni bir RFQ tasarım yazılımı C++ ve ROOT tabanlı olarak geliştirilmiştir. Geliştirilen program, TUBITAK 114F106 numaralı projesi kapsamında desteklenmiş ve ülkenin RFQ tasarım programı konusunda dışa bağımlılığını azaltmasına katkıda bulunmuştur. DEMIRCI programı ile yapılan hesaplama ve tasarımlar bu alandaki diğer programlar ile karşılaştırılmış ve tutarlılığı belirlenmiştir. Aynı zamanda dünyada yapımı devam etmekte olan diğer RFQ'lar ile Türkiye Atom Enerjisi Kurumu'nda yapılmakta olan SPP RFQ'sunun karşılaştırılmaları yine DEMIRCI programı kullanılarak yapılmıştır. Bunlara ek olarak Tsinghua Üniversitesi'nde yapılmakta olan CPHS RFQ'sunun tasarım parametreleri edinilmiş, sonuçları karşılaştırılmak üzere DEMIRCI'de tasarlanarak kontrol edilmiştir.

Dünyada RFQ üretimine ilgi arttıkça bu tür programlara olan ihtiyaç orantılı olarak artış göstermektedir. Hesaplamalarda hataların en aza indirgenmesi için bilgisayarlı tasarımlara ihtiyaç duyulmasının yanısıra kullanıcı dostu olması, kullanıcının işletim sistemi gereksinimlerini karşılayabilecek durumda olması ve de komut satırına ek olarak grafik arayüzüne sahip olması gibi özellikler önem kazanmaktadır. Bu tür bir programın ülkeye kazandırılmış olması ülke ekonomisine de katkı sağlayabilecektir.

## KAYNAKLAR

- Bermejo, F.J. and Bustinduy, I. 2013. Technical Design Report:ESS-BILBAO RFQ. ISBN-13:978-84-616-5445-1.
- Boltezar, E., Haseroth, H., Pirkl, W., Plass, G., Weiss, M., Crandall, K. R., Hamm, R. W., Potter, J. M., Stokes, R. H., Stovall, J. E. and Wangler, T. P. 1981. Experimental RFQ as Injector to the CERN Linac 1. Proc. 1981 International Linac Conf. 19-23 Ekim 1981. Los Alamos National Laboratory Raporu, LA-9234-C (Şubat 1982); Santa Fe, NM, USA.
- Bondarev, B., Durkin, A., Vinogradov, S., Shumakov, I. 2000. New Tasks And New Codes For RFQ Beam Simulation. Proceedings of the XX International LINAC Conference, 21- 25 August, pp. 830-832. Monterey, California.
- Brun, R. and Rademakers, F. 1997. ROOT - An Object Oriented Data Analysis Framework, Proceedings AIHENP'96 Workshop, Lausanne, Sep. 1996, Nucl. Inst. & Meth. in Phys. Res. A 389 81-86.
- Crandall, K. R. 1966. Computation of Charge Distribution On or Near Equipotential Surfaces. Los Alamos Scientific Laboratory Raporu, LA-3512.
- Crandall, K. R. 1983. Effect of Vane-Tip Geometry on the Electric Fields in Radio-Frequency Quadrupole Linacs. Los Alamos Scientific Laboratory Raporu, LA-3695.
- Crandall, K. R., Wangler, T. P., Young, L. M., Billen, J. H., Neuschaefer, G. H., Schrage, D. L. 1988. PARMTEQ-RFQ design codes.
- Crandall, K. R. 2005. LANL Internal Report, Nr. LA-UR- 96-1836
- Duperrier, R. 2000. TOUTATIS: A Radio Frequency Quadrupole Code. Phys. Rev. Vol.3, 124201.
- Duperrier, R. 2015. Yazılı görüşme. CEA Saclay, CEA/DSM/Irfu/SACM/LEDA.
- Garoby, R., Hanke, K., Lombardi, A., Rossi, C., Vretenar, M. and Gerigk, F. 2004. LINAC4, A New H- Linear Injector at CERN. The XIX Russian Particle Accelerator Conference (RUPAC'04), 4-9 October 2004, Dubna, Russia.
- Humphries, S. 1986. Principles of Charged Particle Acceleration. Courier Corporation, No: 49818201, 488 p., the United States.
- Kapchinsky, I. M. and Teplyakov, V. A. 1969. A Linear Ion Accelerator with Spatially Uniform Hard Focusing. ITEP-673.
- Lombardi, A. 2005. Radio Frequency Quadrupole. CAS, Zeegse, The Netherlands.



- Mathot, S., Bourquin, P., Briswalter, A., Callamand, Th., Carosone, J., Favre, N., Geisser, J.M., Lombardi, A., Maire, V., Malabaila, M., Pugnât, D., Richerot, Ph., Riffaud, B., Rossi, C., Timmins, M., Vacca, A., Vandoni, G. and Vretenar, M. 2010. Mechanical Design, Brazing and Assembly Procedures of the LINAC4 RFQ. IPAC'2010, MOPD054, Kyoto, Japan.
- Neri, L., Celona, L., Gammino, S., Mascali, D., Castro, G., Torrissi, G., Cheymol, B., Ponton, A., Galata, A., Patti, G., Gozzo, A., Lega, L. and Ciavola, G. 2013. Improved Design of Proton Source and Low Energy Beam Transport Line for European Spallation Source. The 15th International Conference on Ion Sources, doi: 10.1063/1.4832135, Chiba, Japan.
- Staples, J., Gillespie, G. and Kim, S. 2011a. Fundamentals of Proton Linear Accelerators with Simulations Lab: Chapter 7 - Accelerator Structures III - RFQ. U.S. Particle Accelerator School (USPAS), January 2011, Norfolk, VA, USA.
- Staples, J., Gillespie, G. and Kim, S. 2011b. Fundamentals of Proton Linear Accelerators with Simulations Lab: Chapter 9 - Structures IV - Tuning and Stabilization. U.S. Particle Accelerator School (USPAS), January 2011, Norfolk, VA, USA.
- Stovall, J. 2015. Yazılı görüşme. Linear Accelerators LLC, USA.
- 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 2nd International Beam Instrumentation Conference 2013 (IBIC'13), 16-19 Eylül 2013, WEPC02, p. 652; Oxford, UK.
- Vretenar, M. 2011. The Radio-Frequency Quadrupole. CAS: Course on High Power Hadron Machines, Bilbao, Spain.
- Weiss, M. 1986. Radio Frequency Quadrupole. CAS, Aarhus, Denmark, CERN- PS/87-51.
- Wille, K. 2000. The Physics of Particle Accelerators-An Introduction. Oxford University Press, 315, New York.
- Xing, Q.Z., Cai, J.C., Bai, Y.J., Cheng, C., Du, T.B., Guan, X.L., Wei, J., Xiong, Z.F., Zhang, H.Y., Zheng, S.X., Guan, W.Q., Billen, J., Stovall, J. and Young, L. 2010. Design of the CPHS RFQ Linac at Tsinghua University. IPAC'2010, TU6PFP035, Kyoto, Japan.
- Yasatekin, B., Turemen, G. ve Unel, G. 2015. A Graphical Approach to Radio Frequency Quadrupole Design. Computer Physics Communications, Volume 192, 108-113.

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : H. Betül YASATEKİN

Doğum Yeri : Ankara

Doğum Tarihi : 08.01.1989

Medeni Hali : Evli

Yabancı Dili : İngilizce

### **Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)**

Lise : Cumhuriyet Anadolu Lisesi (2006)

Lisans : Ankara Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü (2012)

Yüksek Lisans : Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı  
(Eylül 2012 – Haziran 2015)

### **Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl**

Ankara Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü – 2012

Türkiye Atom Enerjisi Kurumu, Sarayköy Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi – 2014

### **Yayımlar (SCI)**

Yasatekin, B., Turemen, G. and Unel, G. 2015. A Graphical Approach to Radio Frequency Quadrupole Design. Computer Physics Communications, Volume 192, 108-113.

### **Ulusal Kongre Sunum**

Yasatekin, B. ve Aşilar, E. 2012. THM PF İçin Bir Dairesel Hızlandırıcı Tasarım Çalışması. Parçacık Fabrikalarında Fizik Çalıştayı, 16-18 Mart 2012, Hızlandırıcı Teknolojileri Enstitüsü, Ankara, Türkiye.

Yasatekin, B. 2012. D Mezon Bozunumlarında CP İhlali. XI. THM YUUP Çalıştayı, 30 Kasım-2 Aralık 2012, Hızlandırıcı Teknolojileri Enstitüsü, Ankara, Türkiye.

## **Uluslararası Kongre Sunum**

Turemen, G., Yasatekin, B., Ogur, S., Yildiz, V., Mete, O., Oz, S., Ozbey, A., Yildiz, H., Yaman, F., Akgun, Y., Alacakir, A., Bolukdemir, S., Bozbey, A., Sahin, A., Unel, G. ve Erhan, S. 2015. Current Status of the SANAEM RFQ Accelerator Beamline. The 6th International Particle Accelerator Conference (IPAC'2015), 3-8 May 2015, Richmond, VA, USA.

Yasatekin, B., Turemen, G., Alacakir, A. ve Unel, G. 2014. Design Studies with DEMIRCI for SPP RFQ, 27th Linear Accelerator Conference (LINAC14), 1-5 September 2014, Geneva, Switzerland.

Turemen, G., Yasatekin, B., Yildiz, H., Alacakir, A. ve Unel, G. 2014. Status of the SPP RFQ project, 27th Linear Accelerator Conference, LINAC14, 1-5 September 2014, Geneva, Switzerland.

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.

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.

Yasatekin, B. 2012. Fotoçoğaltıcı Tüplerin Uygulama Alanları ve Benzetim. Türk Fizik Derneği 29. Uluslararası Fizik Kongresi, 5-8 Eylül 2012, Bodrum, Muğla, Türkiye.