

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**RADYO FREKANS KUADRUPOL KOVUK YAPILARDA BONCUK-ÇEKME  
ÖLÇÜM TEKNİĞİ İLE ELEKTROMANYETİK ALAN  
KARAKTERİZASYONU**

**Mustafa ÇELİK**

**FİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ANKARA  
2019**

**Her hakkı saklıdır**

## TEZ ONAYI

Mustafa ÇELİK tarafından hazırlanan “**Radyo Frekans Kuadrupol Kovuk Yapılarda Boncuk-Çekme Ölçüm Tekniği ile Elektromanyetik Alan Karakterizasyonu**” 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



Mustafa ÇELİK

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### RADYO FREKANS KUDRUPOL KOVUK YAPILARDA BONCUK-ÇEKME ÖLÇÜM TEKNİĞİ İLE ELEKTROMANYETİK ALAN KARAKTERİZASYONU

Mustafa ÇELİK

Ankara Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

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

Radyo Frekans Kuadropol (RFQ), tek bir kovukta parçacık demetinin RF alan altında odaklanabildiği, bohçalanabildiği ve hızlandırabildiği doğrusal hızlandırıcı yapısının bir parçasıdır. RFQ kovuk parametreleri (özellikle RF alan dağılımı), üretim hatalarına ve güç bağlaşımı gibi diğer elemanların neden olduğu alan bozulmalarına karşı çok hassastır. Gerçekte tüm RFQ elemanlarını benzetimlere dahil edebilmek ve hatasız RFQ geometrisini yüksek doğrulukla modellemek mümkün değildir. Genellikle, olabildiğince basitleştirilen RFQ modelleri RF tasarımı için kullanılmaktadır. Ayrıca, tasarım aşamasında mümkün olan üretim tolerans sınırları göz önünde tutulduğu için, toleransı daha da arttırmak mümkün değildir. Sonuç olarak, tüm RFQ kovukları, kusursuz üretim ve bütünleme sağlanmış olsa bile, tasarlanan RF parametrelerini elde edebilmek için sistem çalıştırılmadan önce elektromanyetik alan ayarının yapılması gerekmektedir. Boncuk çekme, yaygın olarak kullanılan bir RF alan ölçüm tekniği olup kovuk parametrelerinin karakterizasyonunda kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında RFQ kovuğun karakterizasyon çalışmaları için boncuk çekme tekniği ayrıntılı olarak irdelenerek, boncuk çekme sistemi tasarlanmıştır. 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, Hızlandırıcı, Pertürbasyon, Boncuk-Çekme

## ABSTRACT

Master Thesis

### ELECTROMAGNETIC FIELD CHARACTERISATION of RADIO FREQUENCY QUADRUPOLE CAVITIES USING BEAD-PULL MEASUREMENT TECHNIQUE

Mustafa CELIK

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 part of a linear accelerator structure in which a single cavity can focus, bunch and accelerate the beam under the RF field. RFQ cavity parameters (especially RF field distribution) are very sensitive to manufacturing errors and field distortion caused by other elements such as power coupling. In reality, it is not possible to incorporate all RFQ elements into simulations and to model perfect RFQ geometry with high accuracy. In general, RFQ models that are simplified as much as possible are used for RF design. Furthermore, it is not possible to increase the tolerance further, as the possible production tolerance limits are considered at the design stage. As a result, all RFQ cavities have to be tuned in terms of the electromagnetic field before the system is started in order to obtain the designed RF parameters, even if perfect production and integration is achieved. Bead-Pull is a widely used RF field measurement technique used for characterization of cavity parameters. In this thesis, the bead-pull technique for the characterization studies of the RFQ cavity was examined in detail and the bead-pull system is designed. 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, Accelerator, Perturbation, Bead-Pull

## 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 Ayşegül ÇELİK, kız kardeşim Rabia Sultan ÇELİK ve tüm aileme, yüksek lisans süresince yardımlarını esirgemeyen dostum Zafer SALI'ye ve desteklerinden dolayı Yakup ESMER'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.

Mustafa ÇELİK

Ankara, Eylül 2019

## İÇİNDEKİLER

TEZ ONAY SAYFASI	
ETİK .....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT .....	iii
ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR .....	iv
KISALTMALAR DİZİNİ .....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. RADYO FREKANS KUADRUPOL .....	5
2.1 RFQ Yapısına Genel Bakış.....	5
2.2 RFQ Demet Dinamiği.....	8
2.3 Çınlayıcı Kovuk RF Yaklaşımı .....	9
2.4 RFQ Mekanik Yapı.....	15
2.5 RFQ Bileşenlerinin Hepsini Bir Araya Getirme .....	18
3. PERTÜRBASYON TEORİSİ .....	20
3.1 Kovuk Pertürbasyonu.....	20
3.1.1 Malzeme pertürbasyonu .....	21
3.1.2 Hacim pertürbasyonu .....	23
3.2 Slater Pertürbasyon Teorisi .....	28
4. BONCUK ÇEKME SİSTEMİ.....	38
4.1 SPP RFQ Elektromanyetik Benzetimler .....	38
4.2 Boncuğun RFQ İçindeki Konumu .....	41
4.3 Boncuk Malzemesi ve Boyutları.....	42
4.4 Boncuk Hizalaması.....	45
4.5 Kavramsal Boncuk-Çekme Sistemi .....	47
5. TARTIŞMA ve SONUÇ.....	49
KAYNAKLAR .....	51
ÖZGEÇMİŞ.....	55

## KISALTMALAR DİZİNİ

ABD	Amerika Birleşik Devletleri
BLDC	Brushless DC Electric Motor
CAD	Computer Aided Design
CERN	Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi
CST	Computer Simulation Technology
DEDA	Düşük Enerjili Demet Aktarım Hattı
ESS	European Spallation Neutron Source - Bilbao
HF	High Frequency
INFN	National Institute for Nuclear Physics
LANL	Los Alamos National Laboratory
LBNL	Lawrence Berkeley National Laboratory
LINAC	Linear Accelerator
NEMA	National Electrical Manufacturers Association
OFHC	Oxygen-Free High Conductivity Copper
POP	Proof-of-Principle Experiment
PXIE	PIP-II Injector Experiment
RHTDB	Radyasyon ve Hızlandırıcı Teknolojileri Daire Başkanlığı
RAL	Rutherford Appleton Laboratory
RF	Radyo Frekans
RFQ	Radyo Frekans Kuadrupol
SPP	SANAEM Project Prometheus
SANAEM	Sarayköy Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi
SNS	Spallation Neutron Source
TAEK	Türkiye Atom Enerjisi Kurumu
TE	Transverse Electric
TEM	Transverse Electric and Magnetic
TM	Transverse Magnetic



## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 SPP proton hızlandırıcı genel yapısı (Turemen vd. 2013).....	5
Şekil 2.2 SPP proton hızlandırıcı genel görünümü (Turemen 2019).....	5
Şekil 2.3 CERN LINAC4 dört kanatlı RFQ kovuğu (Mathot vd. 2010) .....	6
Şekil 2.4 RFQ yapısı uzunluğu boyunca artan kipleme genliği (Unel 2015) .....	6
Şekil 2.5 Kovuk içerisinde ilerleyen parçacıklar için faz odaklaması (Unel 2015).....	7
Şekil 2.6 RFQ kovuğu içerisinde boyuna elektrik alanlar (Wangler 2008).....	8
Şekil 2.7 RFQ hücrelerinin parametreleri (Vretenar 2013).....	8
Şekil 2.8 Boş silindir TE <sub>210</sub> kipi ve dört kanatlı RFQ çınlayıcı kovuk (Vretenar 2013).	11
Şekil 2.9 RFQ kuadrupol ve iki dikgen dipol kipi alan dağılımları .....	11
Şekil 2.10 RFQ kanat altı derinlikler ve E-H alanlar (Vretenar 2013, Shin vd. 2014) ...	12
Şekil 2.11 Boncuk çekme karakterizasyon tekniğinin şematik gösterimi.....	14
Şekil 2.12 SNS RFQ soğuk model boncuk çekme test düzeneği (Staples 2013) .....	14
Şekil 2.13 Kanat hizalama hatası etkileri (Garmendia vd. 2014, Rossi 2018).....	16
Şekil 2.14 İki farklı 352MHz RFQ yapısının parçaları ve bütünlemesi (Mathot 2008) .	17
Şekil 2.15 RFQ termal benzetim ile mekanik yer değiştirmeler (Pisent vd. 2000) .....	17
Şekil 2.16 CERN RFQ boncuk-çekme düzeneği (Koubek 2016, Koubek vd. 2017).....	19
Şekil 3.1 Pertürbe olmayan ve malzeme ile pertürbe olan kovuk (Wang ve Guo 2015)	21
Şekil 3.2 Pertürbe olmayan ve hacim ile pertürbe olan kovuk (Wang ve Guo 2015).....	23
Şekil 3.3 Uzamış küre; harici düzgün elektrik ve manyetik alan (Nasserdine vd. 2014)	30
Şekil 3.4 Homojen bir küre ile düzgün elektrik alanın pertürbasyonu (Kerker 1969)....	31
Şekil 3.5 Boncuk kovuk içerisindeyken frekans ve faz kayması (Koubek vd. 2017).....	34
Şekil 4.1 CST SPP RFQ model geometrisi .....	39
Şekil 4.2 SPP RFQ model kovuğunun giriş ve çıkış empedans ayar parametreleri .....	40
Şekil 4.3 SPP RFQ Model derinlik sırasıyla 25,30 ve 35mm elektrik alan dağılımı.....	40
Şekil 4.4 SPP RFQ model kesit görünümü, kanat altı derinlik tasarımı .....	40
Şekil 4.5 SPP RFQ ön kapak yarık boyutları .....	41
Şekil 4.6 SPP RFQ model manyetik alan ve elektrik alan dağılımları .....	42
Şekil 4.7 SPP RFQ merkeze uzaklığa göre manyetik ve elektrik alan dağılımları.....	42
Şekil 4.8 SPP RFQ metal ve dielektrik boncuk frekans kayması .....	44
Şekil 4.9 RFQ merkez elektrik alan ve boncuk hareket yönü.....	45

Şekil 4.10 SPP RFQ model elde edilen elektrik alan düzlüğü.....	47
Şekil 4.11 SPP RFQ kavramsal boncuk-çekme sistemi tasarımı ön ve arka görüntüsü .	47
Şekil 4.12 SPP RFQ boncuk, ip ve motorlu makara yapısı tasarımı.....	48
Şekil 4.13 SPP RFQ boncuk-çekme sistemi elemanları .....	48



## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 Elektromanyetik kiplerin n alt indisine göre sınıflandırılması .....	10
Çizelge 2.2 CERN Linac4 RFQ Hata Sınırları (Rossi vd. 2010).....	16
Çizelge 4.1 SPP RFQ Model Tasarım Parametreleri .....	38
Çizelge 4.2 SPP RFQ Metal Boncuk Frekans Kayması .....	43
Çizelge 4.3 SPP RFQ Dielektrik Boncuk Frekans Kayması.....	44



## 1. GİRİŞ

Radyo frekans kuadrupol (RFQ) tipi doğrusal hızlandırıcılar, 1970'lerin sonunda hızlandırıcı sektöründe ortaya çıkmış olup o günden itibaren düşük enerjili proton ve iyon hızlandırıcı yapılarına yön vermiştir. RFQ, düşük enerjili doğrusal hızlandırıcı biriminin üç temel işlevini (odaklama, bohçalama ve hızlandırma) yerine getiren tıkHz bir radyo frekans (RF) çınlayıcı içerisinde güvenilir iyon demeti yoğunluklarının üretilmesini sağlamaktadır. RFQ'nun sahip olduğu karmaşık kıvrıluç yapısı ile birlikte zorlu RF ve demet dinamiği gereksinimleri, mekanik yapının oluşturulmasında ve RF bileşenlerinin yerleşiminde ciddi kısıtlar açığa çıkarmakta ve RFQ yapısının ortaya çıkarılmasını zorlaştırmaktadır. Bu nedenle RFQ'nun demet dinamiği, RF ve mekanik özelliklerinin birbiriyle ilişkisi ve RFQ'nun nihai performansına katkıları, tasarım aşamasından itibaren göz önünde tutularak RFQ yapısı ortaya çıkarılmalıdır. (Vretenar 2013)

RF tipi doğrusal hızlandırıcılarda hedeflenen performansta parçacık demetine enerji kazandırmak için gerekli olan kovuk parametreleri tam olarak karakterize edilmesi gerekir. Boncuk çekme (Bead-Pull), yaygın olarak kullanılan bir RF alan ölçüm tekniği olup kovuk parametrelerinin karakterizasyonunda önemli rol oynamaktadır (Bazyl vd. 2013). Bu kapsamda Türkiye Atom Enerjisi Kurumu (TAEK) Radyasyon ve Hızlandırıcı Teknolojileri Daire Başkanlığı (RHTDB; eski adıyla Sarayköy Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi) bünyesinde yürütölen A1.H4.P1.03 numaralı SPP projesi için geliştirilen RFQ kovuğunun (Turemen vd. 2013) karakterizasyon çalışmaları için boncuk çekme tekniği ayrıntılı olarak irdelenerek, boncuk çekme sistemi tasarlanmıştır.

RFQ, tek bir kovukta parçacık demetinin odaklanabildiği, bohçalanabildiği ve hızlandırabildiği bir yapıya sahiptir (Wangler 2008). RFQ kovuğunda bu etkilerin sağlanabilmesi için kiplenimli kanat yapısının çok hassas (~25µm) bir ayarı söz konusudur ve SPP RFQ yapısında 1.5MeV'lik bir hızlandırma gerçekleştirilebilmesi için 1 metrenin üzerinde bir kovuk yapısı tasarlanmıştır. Eksenel oranı kiplenimli kanat yapısı hassasiyetine oranla çok yüksek olan bu tip yapılarda imalat ve bütünleme kaynaklı kusurların kontrol altında tutulması ve RF davranışı açısından izin verilebilir tolerans dahilinde elde edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle üretim sonrası elde edilen RFQ

parçalarındaki imalat kusurları ve parçaların birleştirilmesi ile elde edilen kovuk yapısındaki toplam kusurların, kovuk parametreleri üzerindeki etkilerini belirlemek için boncuk çekme ölçüm tekniğinin kullanılması gerekmektedir.

Slaterin pertürbasyon teorisine (Maier ve Slater 1951) dayanan boncuk çekme karakterizasyon tekniği ile RFQ kovuk yapısının baskın kiplerinin (kuadropol ve dipol) alan dağılımlarının analizleri yapılmaktadır. Bead-Pull karakterizasyon tekniği herhangi bir kovuk içerisinde sabit hızda hareket ettirilen, RF alan dağılımındaki değişimleri ihmal edebilecek kadar küçük bir hacmin (boncuk) pertürbasyonu ile kovuğun rezonans frekansının temel kip frekansından kayma ilkesine dayanmaktadır. Bu teknik ile kovuk yapılarının alan karakterizasyonları yapılarak kalite faktörleri, depolanabilir enerji seviyeleri hesaplanabilmekte, böylece ideal koşullarda geliştirilen kovuk yapısının yapısal ve hizalama kusurları tespit edilebilmektedir.

Boncuk çekme tekniği ile RF kovuk yapılarının karakterizasyonu, bu zamana kadar ortaya çıkartılmış olan neredeyse tüm hızlandırıcı yapılarında uygulanmıştır ve günümüz hızlandırıcı yapılarında uygulanmaya devam etmektedir. Gerçekleştirilen uygulamalarda farklı birçok boncuk malzemesi, farklı taşıyıcı ip malzemesi test edilmiş olup boncuk çekme test sonuçları analiz edilerek hızlandırıcı yapılarının üretim sonrası ortaya çıkan imalat ve hizalama kusurları telafi edilmiş ve istenilen alan düzlüğü elde edilmiştir. 1982 yılında Japonya Tokyo Üniversitesi Numatron doğrusal hızlandırıcısında ağır iyonları keV mertebesinde MeV mertebelerine hızlandırmak için tasarlanan RFQ yapısının soğuk modeli üzerinde boncuk çekme yöntemi kullanılarak elde edilen sonuçların analizi ile elektromanyetik alan düzlüğü elde edilmiştir (Nakanishi vd. 1982). 1983 yılında CERN Linac 1 hızlandırıcı projesinde 202.57 MHz frekansındaki RFQ yapısında ilk örneklerinden olan boncuk çekme yöntemi ile RFQ kovuk karakterizasyonu dielektrik masa tenisi topu kullanılarak frekans farkına bağlı gerçekleştirilmiştir (Pirkl 1983). 1992 yılında ABD LANL desteklediği RFQ1-1250 projesinde 267 MHz çalışma frekansına sahip RFQ yapısında dielektrik metalik boncuk kullanılarak boncuk çekme yöntemi ile RFQ kovuk karakterizasyonu faz farkına bağlı gerçekleştirilmiştir (Smith vd. 1992, Sheikh ve Burton 1992). 2003 yılında Kore PEFP projesinde 350 MHz çalışma frekansına sahip RFQ yapısında alüminyum boncuk ve plastik taşıyıcı ip kullanılarak boncuk çekme

yöntemi ile dördüncü alan ayarının ardından hedeflenen uzunlamasına alan dağılımı elde edilmiştir (Jang vd. 2003). 2006 yılında İngiltere RAL proton hızlandırıcısı için geliştirilen dört kanatlı RFQ projesinde 324 MHz çalışma frekansına sahip RFQ yapısında termal etkilerle birlikte boncuk çekme yöntemi ile uzunlamasına alan dağılımı elde edilmiştir (Letchford vd. 2006). 2014 yılında ABD LBNL PXIE projesinde 162.5 MHz çalışma frekansına sahip RFQ yapısında boncuk çekme yöntemi faz farkına bağlı gerçekleştirilerek elde edilen ölçümler sayesinde elektromanyetik alan ayarı yapılmıştır (Berrutti vd. 2014). 2014 yılında İspanya ESS Bilbao doğrusal hızlandırıcı projesi için tasarlanan 352.2 MHz çalışma frekansına sahip RFQ yapısının soğuk modelinde boncuk çekme yöntemi sonuçları analiz edilerek her bir kuadrantta elektromanyetik alan düzlüğü elde edilmiştir (Garmendia vd. 2014). 2017 yılında Çin Peking Üniversitesi'nde geliştirilen 162.5 MHz çalışma frekansına sahip RFQ yapısında boncuk çekme yöntemi ile her bir kpin (kuadrupol ve dipol) frekansı belirlenmiş ve sonuçlar analiz edilerek işletim kpinin alan düzlüğü elde edilmiştir (Fu vd. 2017). 2017 yılında CERN'de medikal uygulamalarda kullanılmak üzere tasarlanan CERN HF-RFQ projesinde 750MHz çalışma frekansına sahip RFQ yapısında daha önce CERN LINAC4 RFQ üzerinde kullanılan boncuk çekme test düzeneği ile faz farkına bağlı elektrik ve manyetik alan ölçümleri gerçekleştirilmiş ve sonuçlar analiz edilerek uygun tüner konumları ile alan düzlüğü sağlanmıştır (Koubek vd. 2017). 2018 yılında Türkiye'de TAEK SANAEM bünyesinde araştırma faaliyetleri için yürütülen Al.H4.P1.03 numaralı SPP projesi için geliştirilen 352.2 MHz çalışma frekansına sahip RFQ kovuğunun soğuk modeli üzerinde boncuk çekme yöntemi ile testler gerçekleştirilmiş ve sonuçlar benzetim sonuçlarıyla karşılaştırılıp analiz edilerek elektromanyetik alan düzlüğü elde edilmiştir (Akkurt 2018).

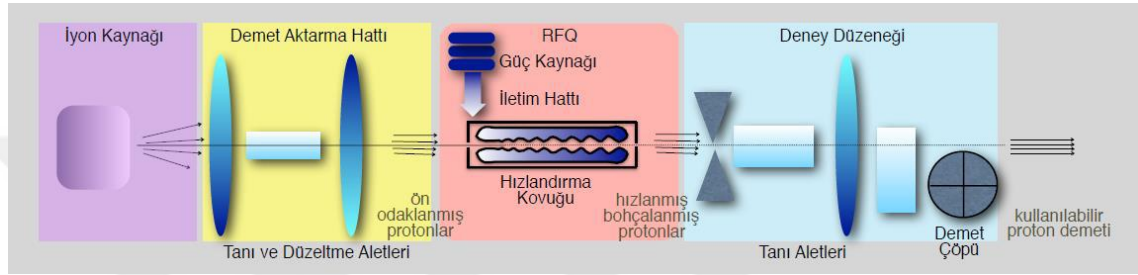
Tez çalışmaları kapsamında Slater'in pertürbasyon teorisi derinlemesine incelenerek boncuk yapılarının kovuk içerisindeki alan dağılımı üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Bu yöntem SANAEM bünyesinde SPP projesi kapsamında geliştirilen radyo frekans kuadrupol kovuğunun alan karakterizasyonu için uygulanabilecek olup ideal şartlarda geliştirilen radyo frekans kuadrupol kovuğunun üretim kaynaklı yapısal ve hizalama kusurları belirli sınırlar çerçevesinde düzeltilebilecektir.

Tez çalışmaları kapsamında RFQ kovuğunun alan karakterizyonunu boncuk çekme tekniği ile yapmak için boncuk geometrisi ve malzemesi eniyilenmiştir. Sonlu tümlene yöntemlerine dayanan Superfish, CST Microwave Studio gibi benzetim arayüzleri kullanılarak SPP RFQ kovuk yapısının temel kipinin analizi yapılmıştır (Sali 2019). Bu RFQ geometrisi üzerine boncuk çekme tekniği uygulanarak temel kipin davranışı ve kovuk parametreleri incelenmiştir.

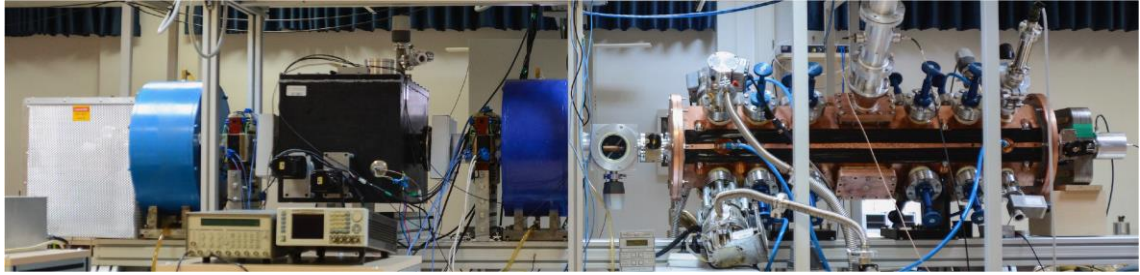


## 2. RADYO FREKANS KUADRUPOL

TAEK SANAEM bünyesinde geliştirilen SPP projesi demet hattı Şekil 2.1’de genel yapısı ve Şekil 2.2’de genel görünümde gösterildiği gibi; hızlandırmak için proton demetinin üretildiği iyon kaynağından, açığa çıkan proton demetini uygun biçimde RFQ içerisine gönderilmesini sağlayan demet aktarım hattından (DEDA) ve RF alan altında protonları hedeflenen enerjide hızlandıran RFQ kovuk yapısından oluşmaktadır.



Şekil 2.1 SPP proton hızlandırıcı genel yapısı (Türemen vd. 2013)



Şekil 2.2 SPP proton hızlandırıcı genel görünümü (Türemen 2019)

### 2.1 RFQ Yapısına Genel Bakış

Radyo frekans Kuadrupol (RFQ) kovuğu, sürekli bir düşük enerjili parçacık demetini keV mertebesinde MeV mertebesindeki enerjilere kadar hızlandırırken hem odaklayan hem de bohçalayan özel bir doğrusal hızlandırıcı yapısıdır. Yapısal olarak dört adet kıvrılıktan oluşmakta olup, bu kıvrılıkların geometrisi kovuk yapısını, dolayısıyla demet karakteristiğini belirlemektedir. Farklı tip (4-kanatlı veya çubuklu) RFQ kovuk yapıları uygulama alanlarına göre kullanılmakta olup (Sali 2019) tez çalışmaları kapsamında Şekil 2.3’de gösterilen dört kanatlı kovuk yapısı incelenmiştir.

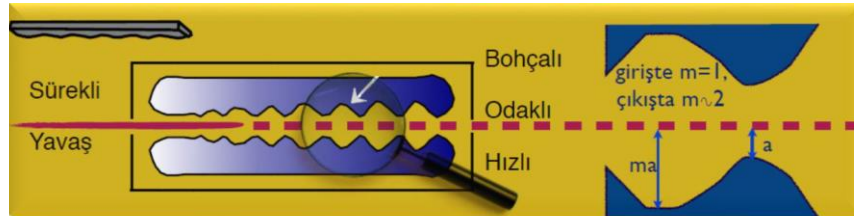




Şekil 2.3 CERN LINAC4 dört kanatlı RFQ kovuğu (Mathot vd. 2010)

Radyo frekans kuadrupol kovuk yapısındaki dört kıvıluç yapısının yerleşimi, enine veya boyuna karşılıklı kıvıluçların eş potansiyel altında olmasıyla elde edilmekte olup bu durum elektrik kuadrupol yapısını oluşturmaktadır. RF alanların salınımı sırasında kıvıluçlardaki potansiyelin işareti sürekli yer değiştirmektedir.

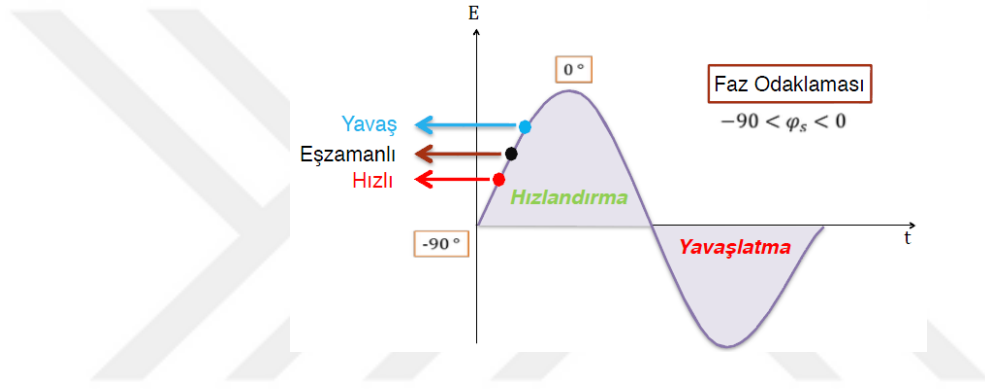
Radyo frekans kuadrupol içerisinde uygun fazda sıkışan parçacık demeti ayırıştır ve ilerlerken hızlanır. Bohçalamayı, odaklamayı ve hızlanmayı RF alan sağlamakta olup bu gereksinimlerin sağlanabilmesi için Şekil 2.4'de gösterildiği gibi gittikçe büyüyen kipleme genliğinin olması gerekmektedir.



Şekil 2.4 RFQ yapısı uzunluğu boyunca artan kipleme genliği (Unel 2015)

Radyo frekans kuadrupol kovuk yapısında parçacık demetini hızlandırabilmek için aksenal elektrik alan bileşenlerine ihtiyaç vardır. Bunu sağlamak için kıvıluçların iç yüzeyi sinüzoidal bir şekilde kiplenimli bir geometriye sahiptir. Kiplenimli kıvıluç yapısı sayesinde kanatlar RF alan altında beslenirken, aksenal bir alana sahip olan kıvıluçlarda boyuna elektrik alan oluşmaktadır. Boyuna elektrik alan parçacık demetinin hızlanmasını sağlamaktadır.

Radyo frekans kuadrupol kovuk yapısının diğer bir önemli özelliklerinden birisi de parçacık demetini adyabatik olarak bohçalamasıdır. 4-kanatlı veya çubuklu simetrik yapılardaki radyo frekans kuadrupol kovuklar güçlü bir odaklama kanalı sağlamakta olup, parçacık demeti zamanla değişen enine bir alana maruz kaldığında alternatif bir alan oluşmaktadır. Buradaki temel olgu, dikey kanatların eksene olan asgari uzaklığı ile yataydaki kanatların eksenden asgari uzaklığı arasındaki potansiyel farktan dolayı enine elektrik alan üretilmektedir. Bir radyo frekans kuadrupol kovuğun kıvrılıçlarındaki kiplenimli hücrelerin ardışık boşlukları arasındaki alan zıt yöndedir. Böylece Şekil 2.5'te gösterildiği gibi boşlukların birinde demet hızlanmaktayken diğerinde yavaşlamaktadır.



Şekil 2.5 Kovuk içerisinde ilerleyen parçacıklar için faz odaklaması (Unel 2015)

Demet  $-90^\circ$  lik bir başlangıç fazıyla adyabatik olarak (boyuna bohçalama) odaklanır. Demetin yakalanması ve bohçalanmasından 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 2.6'te gösterilen kiplenimli kıvrılıç yapısı incelendiğinde yatay ve düşey kıvrılıçlardaki bir tam sinüs dalgası bir odacığa karşılık gelmektedir. Bu odacıklar  $m$  kiplenim katsayısıyla kontrol edilen bir geometriye sahiptir. Hızlandırma için gerekli olan parçacık ile dalga arasındaki eşzamanlılık odacıklar içerisinde sağlanmaktadır.



Radyo frekans kuadrupol kiplenimli kıvıluç yapısının tasarımı, her bir  $i$  hücresi için uygun  $(a, m, \varphi)_i$  setini, mümkün olan en az sayıdaki hücre içinde, aşağıda belirtilen fonksiyonların gerçekleşmesini sağlayan  $V$  gerilimi ile birlikte sağlanabilir;

- DEDA'dan çıkan demetin RFQ odaklama kanalı girişine eşleştirilmesi,
- Demetin enine düzlemde asgari yayım (emittance) artışıyla taşınması,
- Demetin asgari demet kaybı ile bohçalanması ve boyuna düzlemde uygun yayım oluşturulması,
- Demete uygulanacak enerji ile belirlenen enerjiye kadar hızlandırılması.

Bahsi geçen RFQ tasarımı bir takım giriş parametresi ile belirli bir gerilim değeri için  $(a, m, \varphi)$  dizisini tanımlayarak demet çıkış parametrelerinin, geliştirilen PARMTEQ (Crandall vd.), TOUTATIS, LIDOS ve DEMIRCI (Yasatekin vd. 2015) gibi bilgisayar kodları kullanılarak hesaplanması ile yapılmaktadır. Tasarım süresince tasarım ekibinin teknik tecrübesi en önemli unsurlardan biri olup bir kısım parametrelerin RFQ'nun diğer yönleri üzerindeki etkisinin belirlenmesinde, RF ve mekanik tasarım ile birlikte kovuk yapısının fiziki olarak ortaya çıkartılması da bulunmaktadır. Örneğin, yüksek gerilimler odaklamayı arttırmaya karşın kıvıluçlar arası gerilimin bozulma riskini artırır, ayrıca kıvıluçlar arası çok küçük açıklıklar kıvıluç üretimi ve hizalanmasında mümkün olmayan toleranslara yol açabilir. Bu nedenle RFQ demet dinamiği tasarımı süresince, özellikle üretilebilir ve hizalanabilir kıvıluçlar varlığında, gerçekçi hata değerleri ile demet karakteristiğini belirleyen benzetimler yapılmalıdır. Genellikle en iyi tasarım, en iyi performansı sağlayacak olan, küçük yayım artışına ve küçük demet kaybına sahip daha kısa RFQ'lar değil, RF ve mekanik hatalara daha az duyarlı olan tasarımlardır (Vretenar 2013).

### **2.3 Çınlayıcı Kovuk RF Yaklaşımı**

Radyo frekans kuadrupol RF bakış açısından, sabit gerilim altında kuadrupol tipinde bir elektrik alanı oluşturulmasını içermektedir. Bahsi geçen alanı oluşturmak için kıvıluçlar RF çınlayıcı kovuğun (rezonatör cavity) bir parçası olması gerekir. POP RFQ için Los Alamos'ta geliştirilen "dört kanatlı" çınlayıcı kovuk, RFQ'lar için en yaygın kullanılan

çınlayıcı kovuk tipidir. Bu çınlayıcı kovuk sadece enine elektrik alan bileşenleri ve uzunluğu boyunca sabit alanları bulunan kuadrupol ( $TE_{210}$ ) kipini uyaran silindirik bir çınlayıcı kovuk olarak düşünülebilir.

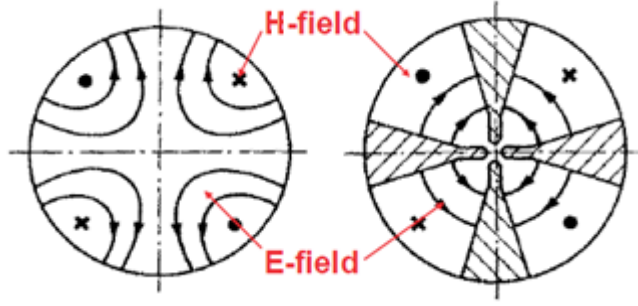
RFQ çınlayıcı kovuk içerisinde belirtilen TE kipi, silindirik kovuk içerisinde elektrik alanın ilerleme doğrultusuna dik olduğunu ifade etmekte olup TM kipi, manyetik alanın kanat boyunca ilerleme doğrultusuna dik olduğunu ifade eder. Bahsi geçen kipler literatürde  $n, m$  ve  $l$  alt indisleriyle  $TE_{nml}$  ve  $TM_{nml}$  şeklinde belirtilmektedir ve alt indisler sırasıyla yönsel (azimuthal), çapsal (radial) ve boyosal (longitudinal) bileşenleri temsil etmektedir.

Elektromanyetik kiplerin  $n$  alt indisine göre sınıflandırılması Çizelge 2.1’de belirtilmiştir (Yasatekin 2015).

Çizelge 2.1 Elektromanyetik kiplerin  $n$  alt indisine göre sınıflandırılması

<b>n</b>	<b>Kip</b>	<b>Demet Üzerine Etkisi</b>
0	Tek kutuplu (monopol)	Parçacık demetini hızlandırma ve yavaşlatma işleminde kullanılır.
1	İki kutuplu (dipol)	Parçacık demetine enine tekmeleyici (dağıtıcı) etki yapar.
2	Dört kutuplu (kuadrupol)	Parçacık demetine boyuna tekmeleyici (Odaklayıcı) etki yapar.

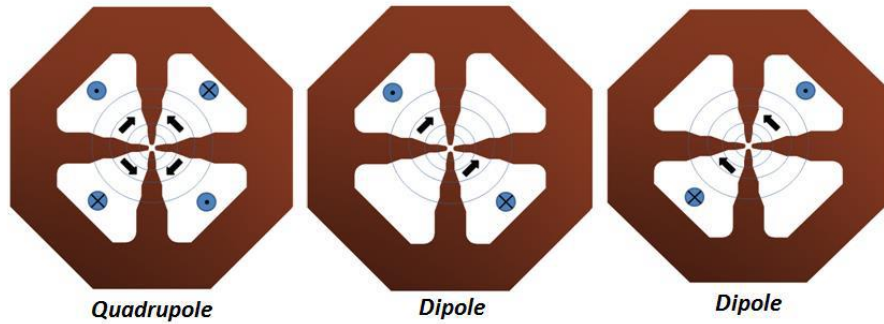
Elektrik ve manyetik alan dağılımı Şekil 2.8’nin sol tarafında gösterilen boş silindirin  $TE_{210}$  kipi, Şekil 2.8’nin sağ tarafında gösterildiği gibi elektrik alanını eksene doğru odaklayan dört kanat tarafından enine doğru yüklenir. Bu nedenle RFQ yapısı tüm uzunluğu boyunca silindire bitişik dört kanadı bulunan silindirden oluşacaktır.



Şekil 2.8 Boş silindir TE<sub>210</sub> kipi ve dört kanatlı RFQ çınlayıcı kovuk (Vretenar 2013)

RFQ yapısı demet ilerleme yönünde elektrik alan bileşeni bulunmayan, yalnızca demeti odaklayan TE<sub>210</sub> kipinde çalışmaktadır. Demetin hızlandırılabilmesi için gerekli olan elektrik alan demet ilerleme yönündeki kiplenimli kanatlar tarafından üretilmektedir (Yasatekin 2015).

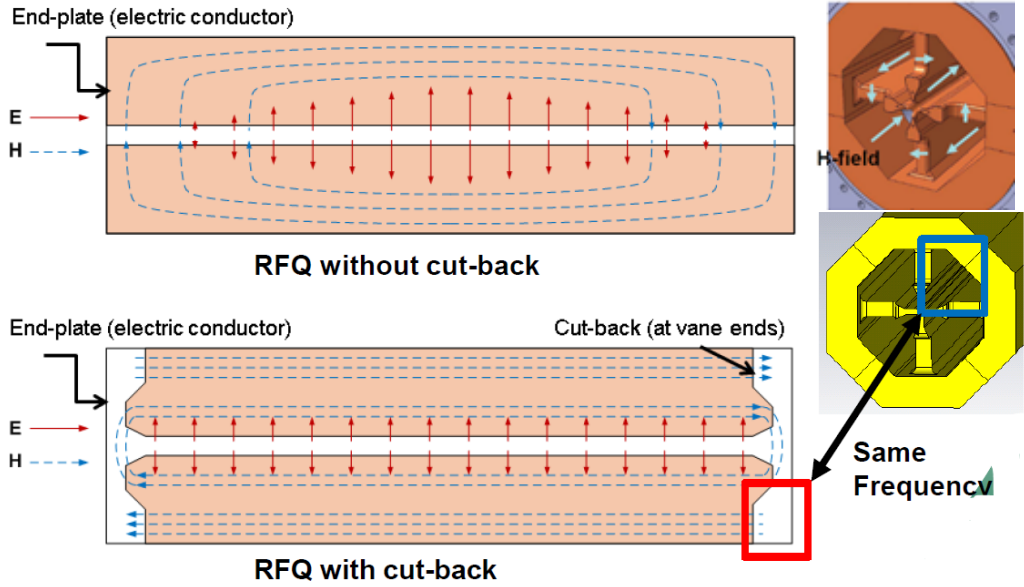
Kanatlar, TE<sub>210</sub> kipi üzerinde iki yönlü bir etkiye sahiptir; bir yandan kuadrupol alanı eksene doğru odaklayarak yapının RF güç verimliliğini artırırken diğer taraftan bu özel kip için kapasitansı artırarak frekansını silindirik çınlayıcı kovuğun diğer birçok kiplerinin altına düşürür. Ancak kanatların varlığı benzer şekilde alan dağılımı Şekil 2.9’de gösterilen TE<sub>110</sub> dipol kipin frekansını da düşürür. Bu nedenle RFQ çınlayıcı kovuğu, ana işletim kipi TE<sub>210</sub> kipi biraz altındaki frekansta, bu kipi iki dikgen (orthogonal) polarizasyonuna karşılık gelen TE<sub>110</sub> tipinde iki dipol kipini de oluşturur. (Vretenar 2013)



Şekil 2.9 RFQ kuadrupol ve iki dikgen dipol kipi alan dağılımları

Kanatların silindire bağlanmasının ardından çınlayıcı kovuğun iki ucunun da doğru biçimde sonlandırılması önemlidir. Ana işletim kipi saf bir TE<sub>210</sub> olması için kanatlar

arasındaki boyuna gerilim sabit olmalıdır. Ancak normal koşullar altında elektrik alan enine eksene yönlendirildiği ve çınlayıcı kovuğu kapatan uç kapaklarda elektrik alanı metal bir duvara paralel olacağı için kapalı silindirik bir çınlayıcı kovukta  $TE_{210}$  kipi mümkün olmamaktadır. Bu kipi uyarılabilmesi için RFQ'nun iki uç bölgesi, Şekil 2.10'da gösterildiği gibi, her bir kanadın sonundaki alt kısım kesilmelidir. “Kanat altı derinlik (undercuts)” olarak belirtilen derinlikler, her kuadrantta boyuna ilerleyen manyetik alanın kanatlar etrafında dönmesini ve bir sonraki kuadrantta devam etmesini sağlar. Dönen manyetik alanın elektrik alanı uyardığı yerde küçük bir boşluk oluşturulmalı, kanatların uçları kapaklara temas etmemelidir. Eğer ortaya çıkan uç hücre  $TE_{210}$  kipi frekansında rezonansa girerse, kipi elektromanyetik alanı uç hücrelerin varlığını göremeyecek ve böylece kipi açısından sonsuz uzun bir RFQ oluşturularak kanatlar boyunca gerilim sabit olabilecektir. (Vretenar 2013)



Şekil 2.10 RFQ kanat altı derinlikler ve E-H alanlar (Vretenar 2013, Shin vd. 2014)

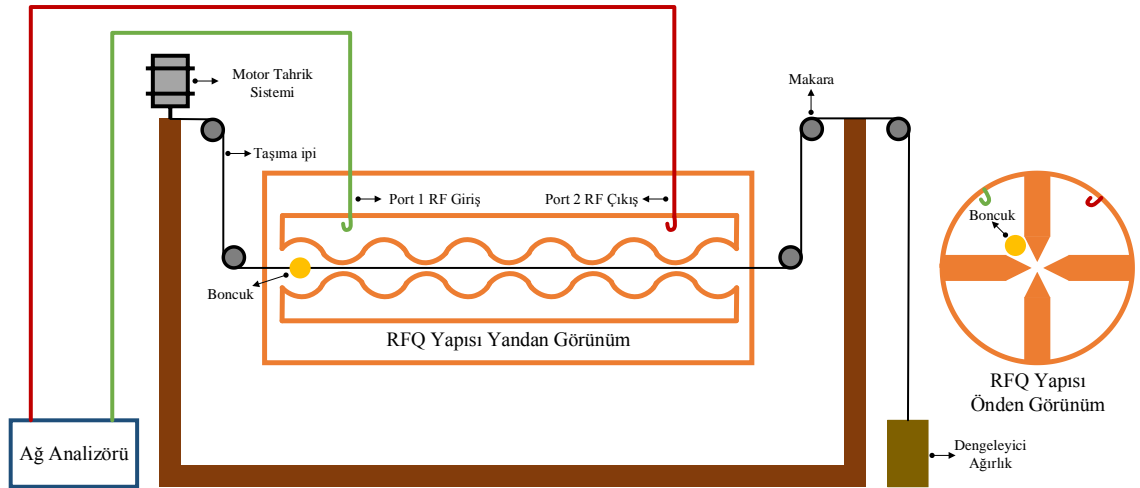
RFQ ne kadar uzun olursa ve ana işletim kipi ile yüksek dereceli kipler arasındaki boşluk ne kadar düşük olursa, çınlayıcı kovuğun elektromanyetik alan kararlılığı üzerindeki zararlı etkilerinin olasılığı artacaktır. Her ne kadar RFQ,  $TE_{210}$  kipiinde sabit frekansta çalışıyor olsa da kanatların üretimi ve/veya hizalamasında kaçınılmaz olan mekanik hatalar ana işletim kipi frekansında görünen bitişik kiplerin alan bileşenlerinin

yükselmeye neden olacaktır. Sonuç olarak RFQ ne kadar uzun olursa, mekanik toleranslar üretim ve hizalama açısından çok daha zorlayıcı olacaktır.

Yaklaşık  $2\lambda$ 'dan daha uzun olan RFQ'ların üretim ve bütünleme toleranslarını makul seviyede tutabilmek için genellikle özel alan ayar bileşenleri kullanılır. Örneğin kuadrantlarda farklı uzunluklara yerleştirilen alan ayarlayıcıları (tuner) ile hacim değiştirilerek kanatlardaki mekanik kusurların, kuadrant endüktansının bölgesel bir değişimi ile dengelenmesi sağlanabilir.

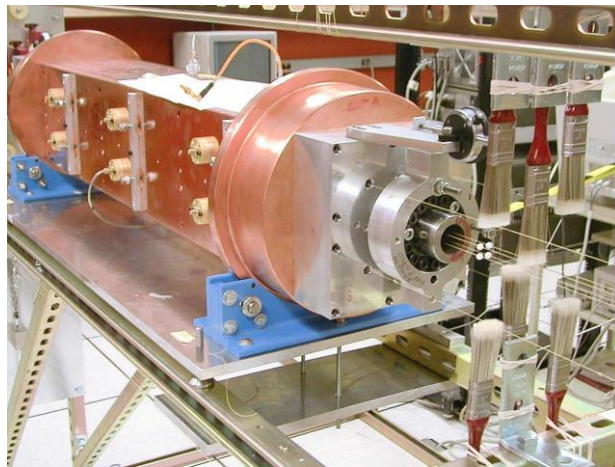
RFQ çınlayıcı kovuğu, pertürbe olmuş kiplerden kaynaklanan hatalara karşı çok hassas olması sebebiyle bu kipler, RFQ tasarımında, imalatında ve elektromanyetik alan ayarında göz önünde tutulmalıdır. Tasarımın ilk adımında RFQ uzunluğu ve sonlandırmaların tasarımı, dipol kiplerin, kuadropol ana işletim kipine yakın olmasını engelleyecek biçimde belirlenmelidir. Neredeyse tüm RFQ'larda, üretim ve bütünlemeden sonra birçok gerilim ölçümü yapılması gerekir. Farklı uzunluklara yerleştirilen her bir alan ayarlayıcıları istenilen biçimde çınlayıcı kovuk hacmini değiştirdiğini belirleyebilmek adına elde edilen ölçümler bir algoritma ile analiz edilir. Bahsi geçen ölçümlerin yapılması ve alan ayarlayıcıları pozisyonlarının belirlenmesi işlemi RFQ alan ayarının yapılması olarak adlandırılmaktadır. RFQ alan ayarı ile, kuadropol ana işletim kipi frekansını belirlenen tasarım değerine getirmeyi hedefleyen, her bir kuadrantta eşit ve RFQ uzunluğunca düz bir gerilim elde edilir. RFQ içerisindeki hassas alan ölçümleri, Şekil 2.11'de şematik olarak gösterildiği gibi bir plastik ip (ör. misina ipi) üzerine yerleştirilen ve alan pertürbasyonuna yol açan metalik bir boncuğun, bölgesel alanın karesiyle orantılı frekans kaymasını kayıt altında tutarak dört kuadrantın içinde yavaşça (sabit hızda) hareket ettiği "boncuk çekme" tekniğiyle yapılabilir. (Vretenar 2013)





Şekil 2.11 Boncuk çekme karakterizasyon tekniğinin şematik gösterimi

Şekil 2.11’de gösterildiği gibi boncuğu sabit hızda hareket ettirebilmek için, boncuğu taşıyan ip bir elektrik motoruna bağlanmalıdır. RFQ yapısı içerisinde boncuğun hedeflenen konumda hareketini sağlayabilmek için ip birçok makaradan geçirilmektedir. Hassas alan ölçümleri sırasında ip üzerindeki boncukta meydana gelebilecek titreşimler ölçüm sonuçlarına etkilemektedir. Bu nedenle makaralara bağlı bulunan taşıyıcı ipte meydana gelebilecek titreşimleri engellemek ve ipi gergin biçimde tutabilmek için makaralar yardımıyla karşı ağırlık eklenebilir. Bazı uygulamalarda ise Şekil 2.12’de gösterildiği gibi ölçümler esnasında taşıyıcı ipte oluşabilecek titreşimleri engellemek için boya fırçası kullanılmaktadır.

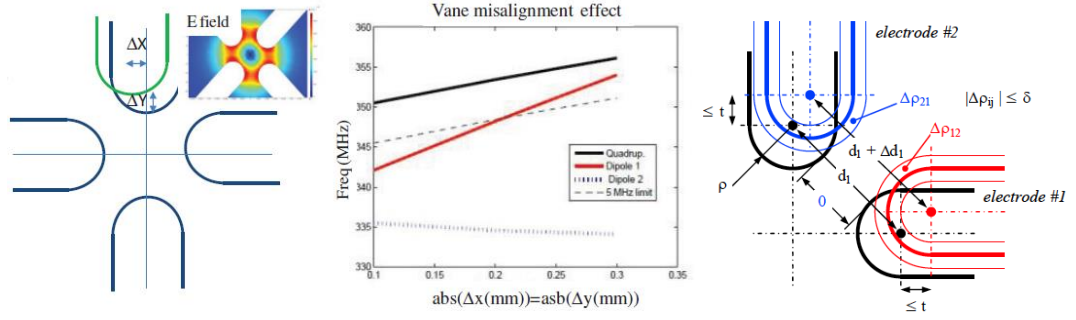


Şekil 2.12 SNS RFQ soğuk model boncuk çekme test düzeneği (Staples 2013)

## 2.4 RFQ Mekanik Yapı

RFQ'nun mekanik tasarımı ve üretimi, iki ana sebepten dolayı zorlu bir süreçtir. Birincisi, zorlayıcı toleranslara göre kıvıluçların hassas üretimi ( $\approx 25\mu m$ ) ile bütünlemesinin sağlanabilmesi ve işletim süresince korunması gerekmektedir. İkincisi ise aşırı RF güç tüketimini ve/veya aşırı ısınmayı önlemek için, belirlenen toleranslara bağlı kalmak ve mükemmel elektriksel ve termal bağlantıyı sağlamak için birçok farklı mekanik parçanın bir araya getirilmesi gerekmektedir. Ayrıca, birçok RF alan ayarlayıcıları ve vakum pompası için yeteri kadar giriş-çıkış noktaları sağlanmalıdır.

RFQ kıvıluçlarının üretimi ve hizalamasındaki olağan demet dinamiği toleransları, demet kanalının asgari yarıçapının (Şekil 2.6'te belirtilen  $a$  değeri) yaklaşık %1'ine karşılık gelen  $\mu m$  mertebelerindedir. Daha büyük hatalar için ortaya çıkan çoklu kipler, demet optiğinin pertürbasyonuna ve RFQ'da demet kaybının artmasına neden olmaktadır. Dört kanatlı RFQ'larda RF bileşenleri, Şekil 2.13'te gösterildiği gibi kanatların hizalama hataları ile orantılı olarak ek dipol ve daha yüksek dereceli kip bileşenleri üretebilir. RF bileşenleri ile ilgili hatalar, dengeleme sistemi (tunerler) tarafından telafi edilebilir, bununla birlikte izin verilen azami kanat hizalama hataları, dengeleme sisteminin fiziki yapısını (ör, alan ayarlayıcıların sayısı ve boyutunu) belirler. RF bileşenleri için azami hatayı daha küçük veya demet dinamiği hatası ile aynı seviyede belirlemek ve daha sonra dengeleme sisteminin fiziki yapısını belirlemek RFQ tasarımlarında genellikle uygulanan yöntemdir. Örneğin, Çizelge 2.2'de rasgele hataların varlığında bir takım demet dinamiği hesaplarından sonra tanımlanan CERN Linac4 RFQ'nun hata sınırları belirtilmiştir. Ardından RF dengeleme sisteminin (alan ayarlayıcılarının) fiziki yapısı, mekanik hataları tamamen ortadan kaldıracak şekilde belirlenmiştir. (Vretenar 2013)

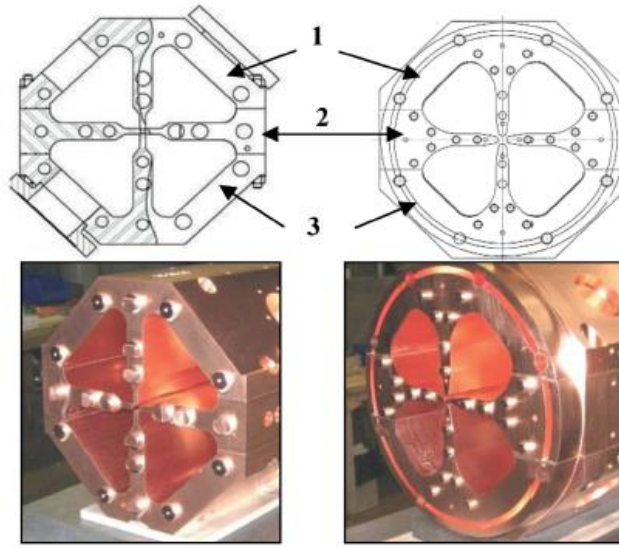


Şekil 2.13 Kanat hizalama hatası etkileri (Garmendia vd. 2014, Rossi 2018)

Çizelge 2.2 CERN Linac4 RFQ Hata Sınırları (Rossi vd. 2010)

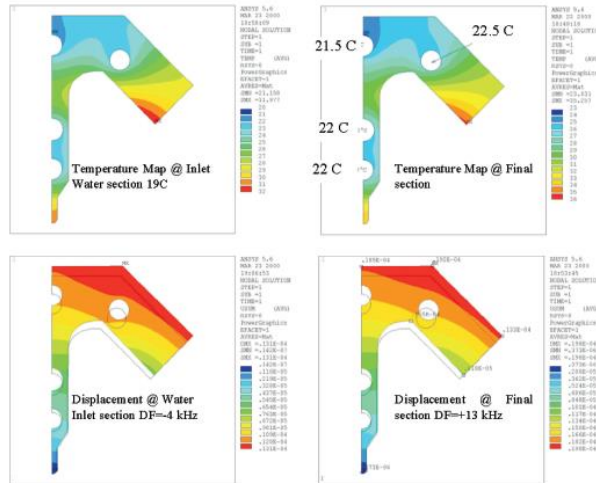
Linac4 RFQ Mekanik Toleranslar	Değer	Birim
İmalat hatası	$\pm 20$	$\mu m$
Kanat kiplenim hatası	$\pm 20$	$\mu m$
1m üzerinde kanat eğimi	$\pm 100$	$\mu m$
Kanat hizalama hatası (yer değiştirme y+d)	$\pm 30$	$\mu m$
Kanat kalınlık hatası	$\pm 10$	$\mu m$
Kanatlar arası boşluk (bitişik modüller)	$100 \pm 15$	$\mu m$
1m üzerinde kesit eğimi	$\pm 30$	$\mu m$
Elektromanyetik alan hatası	$\pm 1$	%

RFQ yapısında bulunması gereken farklı parçaların hassas biçimde bir araya getirilmesi yüksek teknoloji gerektiren üretim ve bütünleme (sert lehimleme, gasketler vb.) yöntemlerinin kullanılması ile sağlanabilmektedir. Yüksek frekanstaki dört kanatlı RFQ'lar Şekil 2.14'de gösterildiği gibi bakır bileşenlerin hassas biçimde işlenerek birbirlerine sert lehimleme (brazing) yöntemi kullanılarak entegre edilmesi ile ortaya çıkarılabilmektedir. Ayrıca sert lehimleme yüzeyini en aza indirmek için dört kıvrıluç özel bir bakır malzeme (OFHC) kullanılarak tek bir kanattan yapılır, ardından soğutma kanalları bakırın içinde işlenir ve tüm kanatlar RFQ geometrisini oluşturabilmek için birbirlerine hassas biçimde sert lehim ile entegre edilmektedir. Sert lehimleme yöntemi, vakum sızdırmazlığını sağlamakta ve aynı zamanda yüksek termal ve elektriksel iletkenlik sağlamaktadır. (Mathot 2008)



Şekil 2.14 İki farklı 352MHz RFQ yapısının parçaları ve bütünleşmesi (Mathot 2008)

Ek olarak kıvrılıçların hassas hizalaması, RFQ yapısının duvarlarına ve destek yapılarına harcanan RF gücü ile ısındığı zaman değişmemelidir. Bu nedenle su soğutma kanallarının sayısı ve konumu hassas biçimde hesaplanmalı ve boyutlandırılmalıdır. Isı ile açığa çıkabilecek deformasyonlar hesaplandıktan sonra demet dinamiği ve RF hatalarına çevrilerek dengelenmelidir. Örneğin, Şekil 2.15, INFN'in TRASCO RFQ tasarımı için oluşturulan termal çalışmaların benzetimi gösterilmektedir.



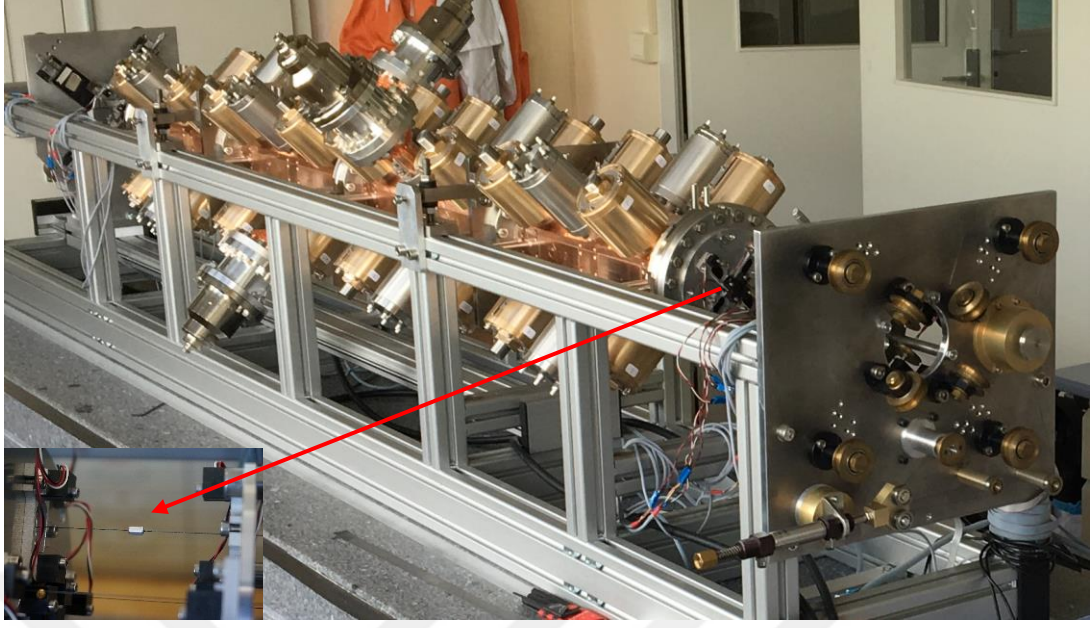
Şekil 2.15 RFQ termal benzetim ile mekanik yer değiştirmeler (Pisent vd. 2000)

## 2.5 RFQ Bileşenlerinin Hepsini Bir Araya Getirme

RFQ yapısının performansı demet dinamiği, elektrodinamik ve hızlandırıcı mekaniğinden oluşan üç temel disiplin arasındaki karmaşık bir dengeye dayanan ve vakum, RF güç üretimi, hassas ölçüm/denetim vb. gibi hızlandırıcı teknolojisinin diğer yönlerinden önemli girdilerle ortaya çıkan çok disiplinli bir sistemdir. Bir yandan mekanik hatalar, deformasyonlar ve ideal RF alan dağılımından sapmalar RFQ demet iletiminin azalmasına neden olurken, diğer yandan aşırı zorlayıcı üretim ve hizalama tolerans gereksinimleri yapının ortaya çıkarılmasını zorlaştırmakta ve ciddi maliyetler açığa çıkarmaktadır.

RFQ yapısını oluşturmanın esas zorluğu, her bir bileşenin hassas biçimde tasarlanıp üretilmesinden ziyade, tüm bileşenleri hassas biçimde bir araya getirmekte yatmaktadır. Ancak bu denli zorlu süreçlerin yanı sıra RFQ'lar doğru biçimde tasarlanıp üretildiğinde ısı dengesi değişmediği sürece birkaç yıl boyunca herhangi bir ayarlamaya gerek kalmadan güvenilir biçimde çalışabilmektedir. (Vretenar 2013)

Kısaca aksel oranı kanat kiplenim hassasiyetine oranla çok yüksek olan RFQ yapılarında üretim ve bütünleme kaynaklı kusurların kontrol altında tutulması ve RF davranışı açısından izin verilebilir tolerans dahilinde elde edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle üretim sonrası elde edilen RFQ parçalarındaki imalat kusurları ve parçaların birleştirilmesi ile elde edilen kovuk yapısındaki toplam kusurların kovuk parametreleri üzerindeki etkilerini belirlemek için boncuk çekme ölçüm tekniğinin kullanılması gerekmektedir. İdeal tasarımda belirlenen kovuk yapısının kalite faktörü, temel kip frekansı, birim hacimdeki elektrik ve manyetik alan yoğunluğu, enine ve boyuna düzlemde elektrik-manyetik alan değişimleri gibi kovuk parametreleri ile imalat ve kurulum sonrası ideal olmayan kovuk yapısının parametreleri boncuk çekme tekniği ile karşılaştırılmalıdır. Şekil 2.16'te gerçek bir örneği bulunan boncuk çekme yöntemi ile yapılan ölçümlerin sonuçları analiz edilerek ve dengeleme planı uygulanarak tasarım aşamasında belirlenen ideal uzunlamasına alan dağılımı elde edilmelidir.



Şekil 2.16 CERN RFQ boncuk-çekme düzeneği (Koubek 2016, Koubek vd. 2017)

### 3. PERTÜRBASYON TEORİSİ

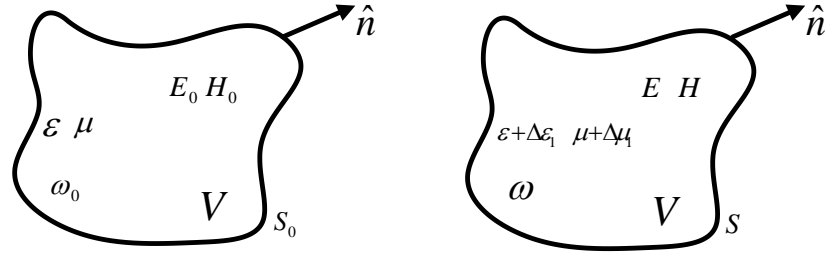
#### 3.1 Kovuk Pertürbasyonu

Pratik uygulamalarda, çınlayıcı kovuklar genellikle yapısal küçük değişiklikler yapılarak veya küçük dielektrik veya metalik malzeme parçalar ile yapılan ölçümler analiz edilerek düzeltilir. Örneğin, bir çınlayıcı kovuk rezonans frekansı, kovuk hacmine giren küçük bir boncuk (dielektrik veya metalik) ile elde edilen sonuçlar analiz edilerek kovuk hacmini değiştiren ayar mekanizmaları ile ayarlanabilir. Başka bir uygulama ise küçük bir dielektrik boncuk kovuk içerisine gönderildiğinde rezonans frekansındaki kayma ölçülerek kovuğun dielektrik sabiti belirlenebilir.

Bazı durumlarda, birinci paragrafta belirtilen pertürbasyonların kovuk performansı üzerindeki etkisi tam olarak hesaplanabilir, ancak çoğu durumda yaklaşımlar sayesinde hesaplanabilmektedir. Bu yaklaşım tekniklerinden en kullanışlı olanı, küçük bir hacim veya malzeme pertürbasyonuna sahip bir kovuğun başlangıçtaki alanlarının pertürbasyon sonrası alanlara kıyasla çok farklı olmadığını varsayan pertürbasyonel yöntemdir. Bu nedenle, iyi iletkenlerde ortaya çıkabilecek kayıpları ortadan kaldırmak için kullanılan bu teknikte iyi iletken olan kovuk elektromanyetik alanları ile mükemmel iletken kovuk elektromanyetik alanları arasında önemli bir fark olmadığı varsayılmaktadır. (Pozar 2011)

Böylece, bir rezonans kovuk elektromanyetik alanları içerisine gönderilen boncuğun hacmi veya malzemesindeki küçük değişiklikler ile kovuk rezonans frekansındaki değişim oransal olarak hesaplanabilecektir.

### 3.1.1 Malzeme pertürbasyonu



Şekil 3.1 Pertürbe olmayan ve malzeme ile pertürbe olan kovuk (Wang ve Guo 2015)

Şekil 3.1, elektriksel geçirgenlik ( $\Delta\epsilon$ ) veya manyetik geçirgenlik ( $\Delta\mu$ ) değişimi ile kovuğun pertürbasyonunu göstermektedir. Eğer kovuğun başlangıçtaki elektromanyetik alanları  $E_0$  ve  $H_0$  ve pertürbe olmuş kovuğun elektromanyetik alanları  $E$  ve  $H$  olarak tanımlanırsa, Maxwell (Maxwell, 1873) denklemleri iki durum için aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\text{a. } \nabla \times E + \frac{\partial B}{\partial t} = 0 \quad \text{b. } \nabla \times H - \frac{\partial D}{\partial t} = 0 \quad 3.1$$

$$\text{a. } \nabla \times E_0 = -j\omega_0 B_0 = -j\omega_0 \mu H_0 \quad 3.2$$

$$\text{b. } \nabla \times H_0 = j\omega_0 D_0 = j\omega_0 \epsilon E_0$$

$$\text{a. } \nabla \times E = -j\omega(\mu + \Delta\mu)H \quad \text{b. } \nabla \times H = j\omega(\epsilon + \Delta\epsilon)E \quad 3.3$$

Burada belirtilen  $\omega_0$  kovuğun başlangıçtaki rezonans frekansı olup  $\omega$  pertürbe olmuş kovuğun rezonans frekansıdır. Denklem 3.2a eşleniği  $H$  ile çarpılır ve denklem 3.3b  $E_0^*$  ile çarpılarak aşağıdaki denklemler elde edilir;

$$H \cdot \nabla \times E_0^* = j\omega_0 \mu H \cdot H_0^* \quad 3.4$$

$$E_0^* \cdot \nabla \times H = j\omega(\epsilon + \Delta\epsilon)E_0^* \cdot E \quad 3.5$$

Denklem 3.4 ve denklem 3.5 taraf tarafa çıkartılarak ve  $\nabla \cdot (A \times B) = B \cdot \nabla \times A - A \cdot \nabla \times B$  vektör eşitliği kullanılarak aşağıdaki ifade elde edilir;



$$\nabla \cdot (E_0^* \times H) = j\omega_0 \mu H \cdot H_0^* - j\omega(\varepsilon + \Delta\varepsilon)E_0^* \cdot E \quad 3.6$$

Benzer şekilde denklem 3.2b eşleniği  $E$  ile çarpılır ve denklem 3.3a  $H_0^*$  ile çarpılarak aşağıdaki denklemler elde edilir;

$$E \cdot \nabla \times H_0^* = -j\omega_0 \varepsilon E_0^* \cdot E \quad 3.7$$

$$H_0^* \cdot \nabla \times E = -j\omega(\mu + \Delta\mu)H_0^* \cdot H \quad 3.8$$

Denklem 3.7 ve denklem 3.8 taraf tarafa çıkartılarak ve vektör eşitliği kullanılarak aşağıdaki ifade elde edilir;

$$\nabla \cdot (E \times H_0^*) = -j\omega(\mu + \Delta\mu)H_0^* \cdot H + j\omega_0 \varepsilon E_0^* \cdot E \quad 3.9$$

Denklem 3.6 ve denklem 3.9 taraf tarafa toplanır ve  $V$  hacmi üzerinden integral alınır, ardından diverjans teorimi kullanılarak aşağıdaki eşitlik elde edilir;

$$\begin{aligned} \int_V \nabla \cdot (E_0^* \times H + E \times H_0^*) dv &= \oint_{S_0} (E_0^* \times H + E \times H_0^*) ds = 0 \\ &= j \int_V \{[\omega_0 \varepsilon - \omega(\varepsilon + \Delta\varepsilon)]E_0^* \cdot E + [\omega_0 \mu - \omega(\mu + \Delta\mu)]H_0^* \cdot H\} dv \end{aligned} \quad 3.10$$

Denklem 3.10'da belirtilen  $S_0$  üzerinde  $\hat{n} \times E = 0$  olduğu için yüzey integrali sıfırdır. Böylece aşağıdaki eşitlik elde edilir;

$$\frac{\omega - \omega_0}{\omega} = \frac{-\int_V (\Delta\varepsilon E \cdot E_0^* + \Delta\mu H \cdot H_0^*) dv}{\int_V (\varepsilon E \cdot E_0^* + \mu H \cdot H_0^*) dv} \quad 3.11$$

Denklem 3.11'de ortaya çıkan ifade malzeme pertürbasyonundan dolayı kovuk rezonans frekansındaki değişimi tam olarak vermektedir ancak pertürbe olmuş kovuktaki  $E$  ve  $H$  elektromanyetik alanları kesin olarak bilinemediği için kullanışlı bir eşitlik değildir. Bu nedenle,  $\Delta\varepsilon$  ve  $\Delta\mu$  değerlerinin çok küçük olduğu varsayılarak, pertürbasyon sonrası oluşan  $E$  ve  $H$  alanları, başlangıçtaki  $E_0$  ve  $H_0$  alanlarına ve denklem 3.11 paydasında

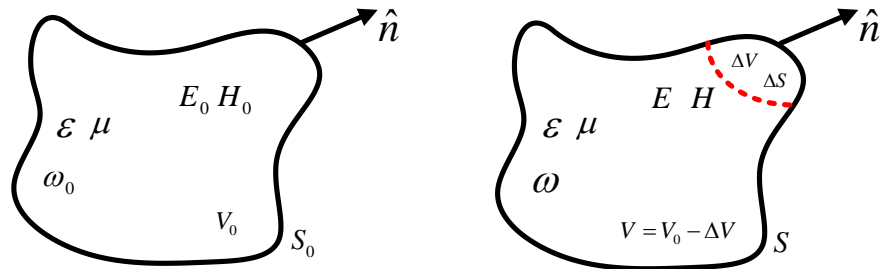
bulunan  $\omega$  terimi  $\omega_0$  eşit kabul edilebilir ve böylece rezonans frekansındaki yaklaşık oransal değişim aşağıdaki ifadeye dönüşür;

$$\frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} \cong \frac{-\int_V (\Delta\varepsilon |E_0|^2 + \Delta\mu |H_0|^2) dv}{\int_V (\varepsilon |E_0|^2 + \mu |H_0|^2) dv} \quad 3.12$$

Denklem 3.12’de belirtilen eşitlikten kovuk içerisinde herhangi bir noktada  $\varepsilon$  veya  $\mu$  değerindeki artışın, rezonans frekansını azalttığı anlaşılmaktadır. Burada belirtilen terimlerin başlangıçta ve pertürbasyondan sonra kovuk içerisinde depolanan elektrik ve manyetik enerjilerle ilgili olduğu ve böylece rezonans frekansındaki azalmanın pertürbe olmuş kovuk içerisinde depolanan enerjinin artışıyla ilgili olduğu gözlenebilir. (Pozar 2011)

### 3.1.2 Hacim pertürbasyonu

Kovuğun boyutlarını değiştirmek veya ayar mekanizması ile kovuk hacmini değiştirmek, kovuk biçimini değiştirmek olarak düşünülebilir ve çok küçük hacimsel değişimler pertürbasyon yöntemi ile incelenebilir. Şekil 3.2 küçük bir hacim pertürbasyonu gerçekleşen herhangi bir kovuğu göstermektedir. Bu durumda da malzeme pertürbasyonuna benzer şekilde rezonans frekansındaki değişim için bir ifade oluşturulabilir.



Şekil 3.2 Pertürbe olmayan ve hacim ile pertürbe olan kovuk (Wang ve Guo 2015)

Malzeme pertürbasyonuna benzer şekilde başlangıçtaki kovuğun elektromanyetik alanları ve rezonans frekansı  $E_0$ ,  $H_0$ ,  $\omega_0$  ve pertürbe olmuş kovuğun elektromanyetik

alanları ve rezonans frekansı  $E$ ,  $H$ ,  $\omega$  olarak tanımlanırsa, Maxwell denklemleri iki durum için aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\text{a. } \nabla \times E_0 = -j\omega_0\mu H_0 \qquad \text{b. } \nabla \times H_0 = j\omega_0\varepsilon E_0 \qquad 3.13$$

$$\text{a. } \nabla \times E = -j\omega\mu H \qquad \text{b. } \nabla \times H = j\omega\varepsilon E \qquad 3.14$$

Denklem 3.13a eşleniği  $H$  ile çarpılır ve denklem 3.14b  $E_0^*$  ile çarpılarak aşağıdaki denklemler elde edilir;

$$H \cdot \nabla \times E_0^* = j\omega_0\mu H \cdot H_0^* \qquad 3.15$$

$$E_0^* \cdot \nabla \times H = j\omega\varepsilon E_0^* \cdot E \qquad 3.16$$

Denklem 3.15 ve denklem 3.16 taraf tarafa çıkartılarak ve vektör eşitliği kullanılarak aşağıdaki ifade elde edilir;

$$\nabla \cdot (E_0^* \times H) = j\omega_0\mu H \cdot H_0^* - j\omega\varepsilon E_0^* \cdot E \qquad 3.17$$

Benzer şekilde denklem 3.13b eşleniği  $E$  ile çarpılır ve denklem 3.14a  $H_0^*$  ile çarpılarak aşağıdaki denklemler elde edilir;

$$E \cdot \nabla \times H_0^* = -j\omega_0\varepsilon E_0^* \cdot E \qquad 3.18$$

$$H_0^* \cdot \nabla \times E = -j\omega\mu H_0^* \cdot H \qquad 3.19$$

Denklem 3.18 ve denklem 3.19 taraf tarafa çıkartılarak ve vektör eşitliği kullanılarak aşağıdaki ifade elde edilir;

$$\nabla \cdot (E \times H_0^*) = -j\omega\mu H_0^* \cdot H + j\omega_0\varepsilon E_0^* \cdot E \qquad 3.20$$

Denklem 3.17 ve denklem 3.20 taraf tarafa toplanır ve  $V$  hacmi üzerinden integral alınır, ardından diverjans teorimi kullanılarak ve  $S$  üzerinde  $\hat{n} \times E = 0$  olduğu için aşağıdaki eşitlik elde edilir;

$$\begin{aligned} \int_V \nabla \cdot (E \times H_0^* + E_0^* \times H) dv &= \oint_{S_0} (E \times H_0^* + E_0^* \times H) ds \\ &= \oint_S E_0^* \times H \cdot ds = -j(\omega - \omega_0) \int_V (\epsilon E \cdot E_0^* + \mu H \cdot H_0^*) dv \end{aligned} \quad 3.21$$

Pertürbe olmuş yüzey  $S = S_0 - \Delta S$  olduğu için aşağıdaki eşitlik yazılabilir, çünkü  $S_0$  üzerinde  $\hat{n} \times E = 0$ 'dır;

$$\begin{aligned} \oint_S E_0^* \times H \cdot ds &= \oint_{S_0} E_0^* \times H \cdot ds - \oint_{\Delta S} E_0^* \times H \cdot ds \\ &= - \oint_{\Delta S} E_0^* \times H \cdot ds \end{aligned} \quad 3.22$$

Denklem 3.22'de elde edilen eşitlik denklem 3.21'de kullanılarak aşağıdaki eşitlik elde edilir;

$$\omega - \omega_0 = \frac{-j \oint_{\Delta S} E_0^* \times H \cdot ds}{\int_V (\epsilon E \cdot E_0^* + \mu H \cdot H_0^*) dv} \quad 3.23$$

Denklem 3.23'de ortaya çıkan ifade kovuk yeni rezonans frekansındaki değişimi tam olarak vermektedir ancak genellikle başlangıçta  $E$ ,  $H$  elektromanyetik alanları veya  $\omega$  bilinemediği için kullanışlı bir eşitlik değildir.

Genellikle bir elektromanyetik enerji kaynağı, elektrik ve manyetik enerji depolayan ve ileten veya kayıp olarak harcanan gücü taşıyan alanları meydana getirir. Sinüzoidal durgun durumda,  $V$  hacminde depolanan elektrik enerjinin zamanda ortalaması; basit, kayıpsız isotropik, homojen ve doğrusal bir ortam için,  $\epsilon$  gerçel skaler bir sabit olduğu için denklem 3.24'te belirtildiği gibi yazılabilir.

$$U_E = \frac{\varepsilon}{4} \int_V E \cdot E^* dv \quad 3.24$$

Benzer şekilde  $V$  hacminde depolanan manyetik enerjinin zamanda ortalaması da;  $\mu$  gerçel skaler bir sabit olduğu durumda denklem 3.25'de belirtildiği gibi yazılabilir.

$$U_M = \frac{\mu}{4} \int_V H \cdot H^* dv \quad 3.25$$

Ayrıca elektromanyetik alan ve kaynaklar için enerjinin korunumunu ifade edecek olan Poynting teoremi (Poynting 1884) çıkarılabilir. İletkenlik kaynak akımı  $J_s$  ve iletkenlik akımı, iletkenliği  $\sigma$  olan bir malzeme içerisinde  $J = \sigma E$  olmak üzere, toplam elektrik akım yoğunluğu  $J = J_s + \sigma E$  olur. Doğrusal ortamda (yani  $\varepsilon$  ve  $\mu$ 'nün,  $E$  ve  $H$  göre değişmediği ortamda) Maxwell denklemleri fazör biçimde denklem 3.26'deki biçimde yazılabilir.

$$\text{a. } \nabla \times E = -j\omega\mu H - M \quad \text{b. } \nabla \times H = j\omega\varepsilon E + J \quad 3.26$$

Denklem 3.26 a'nın  $H^*$  ile çarpılması ve denklem 3.26 b eşleniğinin  $E$  ile çarpılması ile denklem 3.27 elde edilir.

$$\begin{aligned} \text{a. } H^* \cdot (\nabla \times E) &= -j\omega\mu |H|^2 - H^* \cdot M_s \\ \text{b. } E \cdot (\nabla \times H^*) &= E \cdot J_s^* - j\omega\varepsilon^* |E|^2 = E \cdot J_s^* + \sigma |E|^2 - j\omega\varepsilon^* |E|^2 \end{aligned} \quad 3.27$$

Denklem 3.27'de belirtilen  $M_s$  manyetik kaynak akımıdır. Denklem 3.27 a ve b ifadeleri vektör özdeşliği kullanılarak denklem 3.28 ifadesine dönüşür.

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (E \times H^*) &= H^* \cdot (\nabla \times E) - E \cdot (\nabla \times H^*) \\ &= -\sigma |E|^2 + j\omega(\varepsilon^* |E|^2 - \mu |H|^2) - (E \cdot J_s^* + H^* \cdot M_s) \end{aligned} \quad 3.28$$

Denklem 3.28 ifadesinin  $V$  hacmi üzerinden integrali alınarak ve diverjans teoremi kullanılarak denklem 3.29 elde edilir.

$$\begin{aligned}
\int_V \nabla \cdot (E \times H^*) dv &= \oint_S E \times H^* \cdot ds \\
&= -\sigma \int_V |E|^2 dv + j\omega \int_V (\epsilon^* |E|^2 - \mu |H|^2) dv - \int_V (E \cdot J_s^* + H^* \cdot M_s) dv
\end{aligned} \tag{3.29}$$

Denklem 3.23’de belirtilen  $\Delta S$  değerinin çok küçük olduğu varsayılarak, pertürbasyon sonrası oluşan  $E$  ve  $H$  alanları, başlangıçtaki  $E_0$  ve  $H_0$  alanlarına eşit kabul edilebilir ve böylece denklem 3.23 payında bulunan ifade aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\oint_{\Delta S} E_0^* \times H \cdot ds \cong \oint_{\Delta S} E_0^* \times H_0 \cdot ds = -j\omega_0 \int_{\Delta V} (\epsilon |E_0|^2 - \mu |H_0|^2) dv \tag{3.30}$$

Denklem 3.30’da belirtilen ifade gücün korunumu ilkesinden gelmektedir ve  $\sigma, J_s$  ile  $M_s$  sıfır alınarak denklem 3.29 eşleniğinden türetilmiştir. Denklem 3.30’da belirtilen ifade denklem 3.23’de yerine yazılarak rezonans frekanstaki oransal değişim için denklem 3.31’de belirtilen ifade elde edilir.

$$\frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} = \frac{\int_{\Delta V} (\mu |H_0|^2 - \epsilon |E_0|^2) dv}{\int_{V_0} (\mu |H_0|^2 + \epsilon |E_0|^2) dv} \tag{3.31}$$

Denklem 3.31’de pertürbe olmuş kovuk içerisinde depolanan enerjiyi gösteren denklem 3.23 paydasındaki ifadenin pertürbe olmamış kovuk ile yaklaşık olarak aynı olduğu kabul edilmiştir.

Denklem 3.31 depolanan enerjiler cinsinden denklem 3.32’de belirtilen biçimde yazılabilir.

$$\frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} = \frac{\Delta U_{man} + \Delta U_{elek}}{U_{man} + U_{elek}} = \frac{\Delta U}{U} \tag{3.32}$$

Denklem 3.32’de belirtilen  $\Delta U_{man}$  ve  $\Delta U_{elek}$ , sırasıyla, hacim (şekil) pertürbasyonu sonrasında depolanan manyetik ve elektrik alan değişimidir.  $U = U_{man} + U_{elek}$  ise kovuk içerisinde başlangıçta depolanan toplam enerjiyi ifade etmektedir. Elde edilen

sonuçlar, pertürbasyonun kovuk içerisinde hangi konumda olduğuna göre ve kovuk hacminin artmasına veya azalmasına göre rezonans frekansının artabileceğini veya azalabileceğini göstermektedir. (Pozar 2011)

Denklem 3.31’de paydanın 1/4’ü pertürbasyon öncesi kovukta depolanan enerjidir ve payın 1/4’ü zamana bağlı kuvvet bileşenidir. Elde edilen denklem yorumlanacak olursa;

- E alanı pertürbasyonu ile frekans değişimi azalır ve H alan pertürbasyonu ile artar.
- Metal bir malzemeyi kovuk içerisinde hareket ettirmek aslında kovuk içerisindeki hem E hem de H alanlarını ölçmektedir.
- Birbirinden bağımsız E ve H alanlarını elde edebilmek için ise, metalik ve dielektrik olmak üzere iki farklı tür malzemenin ayrı ayrı kovuk içerisinde hareket ettirilmesi gerekmektedir. (İleri seviye ölçümler ve hesaplar gerektirir.) (Wang ve Guo 2015)

### **3.2 Slater Pertürbasyon Teorisi**

Hızlandırıcı kovukların analizi kapsamında RF kovuklarda elektromanyetik dalgaların ölçümü için uzun yıllardır pertürbasyon teknikleri kullanılmaktadır. 1952 yılında Maier ve Slater (Slater 1946, Maier, 1949, Maier ve Slater 1951) elektromanyetik alan kuvvetinin ölçümü için rezonans pertürbasyon metodunu ortaya atmıştır. Bahsi geçen teknikle, dielektrik veya iletken bir boncuk tarafından çınlayıcı kovuk frekansının pertürbasyonu, elektromanyetik alan profilini elde etmek için kullanılmaktadır.

Rezonanstaki bir RF kovuk için, depolanmış elektrik ve manyetik alan enerjileri eşittir. Kovuk içerisindeki ana işletim kipin sınır koşuluna boncuk ile küçük bir pertürbasyon getirilerek depolanmış ortalama elektrik ve manyetik alan enerjisinde dengesizlik elde edilir. Böylece, iki enerjinin tekrar dengelenmesi esnasında pertürbe olmuş kipin rezonans frekansı hareket edecektir. Yavaş pertürbasyon hızı ve küçük pertürbatif boncuk yaklaşımında, rezonans frekansının yüzde değişimi elektrik ve manyetik alan yoğunluğu ile orantılı olacaktır. Frekans değişimi ve ölçülen elektromanyetik alan, kovuk içerisindeki boncuk konumuna göre kaydedilecektir (Persichelli 2010).

Kısaca Slater pertürbasyon teoremi ile  $V$  hacimli kovuk içerisinde küçük bir  $\Delta V$  ortadan kaldırıldığında rezonans frekansının kayması hesaplanabilir;

$$\frac{\Delta\omega_0}{\omega_0} = \frac{\Delta U}{U} = \frac{\int_{\Delta V} (\mu|H_0|^2 - \varepsilon|E_0|^2) dv}{\int_V (\mu|H_0|^2 + \varepsilon|E_0|^2) dv} \quad 3.33$$

Böylece, eğer manyetik alan duvarların dibinde büyükse frekans artar ve burada elektrik alan büyükse azalır. Bu sonucun, manyetik alanın büyük olduğu yerlerde etkili endüktansta bir miktar azalma ve elektrik alanın büyük olduğu yerlerde etkin kapasitansta bir miktar artış tespit edip etmediğini anlamak daha kolaydır (Persichelli 2010).

Pertürbasyonun kovuk dalga boyuna göre küçük olması durumunda denklem 3.33'te belirtilen pertürbasyon formülü, kovuk içerisine yerleştirilmiş bozucu hacim için geçerlidir. Pertürbasyon için kullanılan küresel boncuğun boyutuna getirilen kısıtlamanın nedeni, boncuğun dalga boyu kovuk dalga boyuna yaklaştığında rezonans etkilerinin ortaya çıkma olasılığı bulunmaktadır. Böyle bir rezonansın neden olduğu frekans kaymaları, pertürbasyon formülü ile hesaplanan frekans kaymalarını tamamen gizleyecektir. Bu durumdan kaçınmak için, kullanılacak tüm boncuk şekilleri kovuk dalga boyundan çok daha küçük boyutlarda seçilmeli ve hesaplamalar yalnızca denklem 3.33'te belirtilen pertürbasyon teorisi kullanılarak yapılmalıdır (Maier 1949).

Bir boncuk  $V$  hacimli RF alan içerisine girdiğinde, içeride bulunan mevcut alan  $\Delta V$  boncuk hacmine oranla ortadan kaldırılmaktadır. Bunun anlamı RF kovuk içerisinde mevcut depolanan elektrik alan, boncuk içerideyken oluşan elektrik alana göre daha fazla olmaktadır. Yani boncuk içeride daha az depolanmış bir enerjiye neden olur. Slater'in pertürbasyon teorisine göre bu tarz küçük değişiklikler için, enerji üzerindeki görece değişim, frekans veya faz değişimine eşit olmaktadır. Bu nedenle kovuk içerisinde  $r$  yarıçaplı dielektrik küresel boncuk hareket ettirildiğinde 3.34 denkleminde belirtilen eşitlik sayesinde 3.44 denklemi elde edilir.



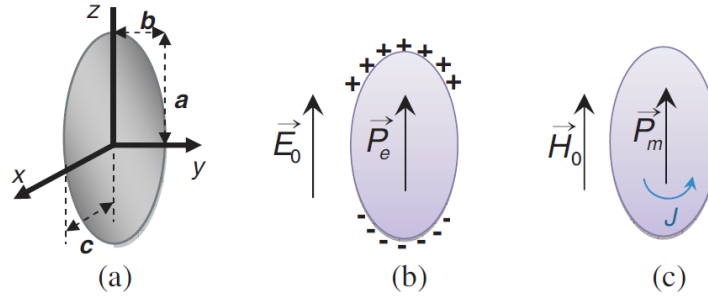
$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{\Delta \omega_0}{\omega_0} = \frac{\Delta f}{f} \quad 3.34$$

$U$  ile belirtilen ifade boncuk RF alan içerisine girmeden önce başlangıçta depolanan enerjidir.  $\Delta U$  ise boncuk RF alan içerisine girdikten sonra depolanan enerjideki değişimi ifade eder  $\Delta U = U - U_p$ .

$$\Delta U = \int_0^V \frac{1}{2} \varepsilon E_0^2 dv - \int_{\Delta V}^V \varepsilon (E_0 + E_{dip})^2 dv - \int_0^{\Delta V} \frac{1}{2} \varepsilon \varepsilon_r E_p^2 dv \quad 3.35$$

$E_p$  ve  $H_p$  sırasıyla küresel boncuk içerisindeki homojen elektrik ve manyetik alanı belirtmektedir.

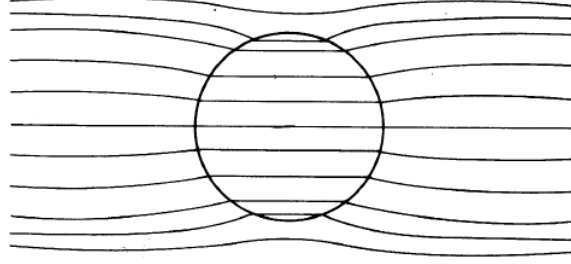
Rayleigh teoremi (Strutt (Lord Rayleigh) 1871), elektromanyetik ışınının küçük küresel boncuğun dipol momentine dayanan saçılmasını açıklar. Ayrıca küresel boncuğun dalga boyu, kovuk dalga boyundan küçük seçilir (Merschdorf 2002) ve böylece boncuk içindeki elektrik alan elektromanyetik dalga nedeniyle Şekil 3.3'de gösterildiği gibi düzgündür (uniform). (Zhong 2010)



Şekil 3.3 Uzamış küre; harici düzgün elektrik ve manyetik alan (Nasserdine vd. 2014)

Küresel boncuk boyunca uyarıcı elektromanyetik alan iletken elektronların yerini alır ve küresel boncuğun bir yarısının yüzeyinde fazla miktarda negatif yük oluşturarak ve diğer yarısında pozitif bir yük bırakarak geçer. Bu yük ayrımı, orijinal elektromanyetik alana eklenen bir polarizasyona neden olur. Yarı-statik/yarı-durgun yaklaşımda, yani küresel boncuk boyunca düzgün bir harici elektromanyetik alan olduğunda, küresel boncuktaki

toplam elektromanyetik alan homojendir ve Şekil 3.4’de gösterildiği gibi gelen elektromanyetik alana paralel yönlendirilmiştir. Harici elektromanyetik alan, başlangıçtaki düzgün elektromanyetik alanın ve dipol alanın indüklenmiş yük dağılımının üst üste bindirilmesiyle (superposition) verilir. (Merschdorf 2002)



Şekil 3.4 Homojen bir küre ile düzgün elektrik alanın pertürbasyonu (Kerker 1969)

Zamana bağlı elektromanyetik alan içeren bazı uygulamalar için, çalışma frekansı mikrodalga bölgesinde olsa bile, alanların konuma göre dağılımı, durgun elektromanyetik alan problemiyle neredeyse aynıdır. Bu durumlarda, elektrik alan bileşenleri, Laplace denklemini karşılayan zamana bağlı sayısal potansiyelden türetilebilir. Bu yöntem yarı-durgun yaklaşım olarak adlandırılmakta ve genellikle elektromanyetik alandaki hacimsel değişiklikler, kovuk dalga boyuna kıyasla çok küçük olduğu durumlarda geçerli olmaktadır (Wangler 2008). Pertürbasyon denklemi türetilirken kovuk içerisine yerleştirilecek hacmin kovuk dalga boyuna göre çok küçük olması gerektiği belirtilmiştir. Bu nedenle yarı-durgun yaklaşım pertürbasyon teorisine hassas biçimde uygulanabilir.

Kabul edilen yarı-statik/yarı-durgun (quasi-static) yaklaşımda, aşağıdaki ilişkiler geçerlidir. (Klein 1992)

$$E_p = \frac{3}{\epsilon_r + 2} E_0 \quad H_p = \frac{3}{\mu_r + 2} H_0 \quad 3.36$$

Burada belirtilen faktör 3, küresel boncuk yapısının elektrik ve manyetik depolarizasyon faktörü  $N$ 'den kaynaklanmaktadır;  $N = 1/3$  .  $p$  değeri dipol moment,  $P$  değeri ise polarizasyonu ifade etmektedir (Nakamura 1968, Bladel 2007, Hill 2009, Nasserline vd. 2014). Küresel boncuk yapısının yerine, elipsoit yapılar da kullanılabilir. Ancak bu

durumda depolarizasyon faktörü değişecektir. Küre için  $N = 1/3$  olan katsayı, kutupları basık elipsoit için  $1/3 < N < 1$  aralığında, iki ucu kabarık elipsoit için  $0 < N < 1/3$  aralığında olacaktır (Klein 1992).

$$p_E = 4\pi r^3 \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} \epsilon E_0 = 3\Delta V \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} \epsilon E_0 \quad P_E = \epsilon \frac{3(\epsilon_r - 1)}{\epsilon_r + 2} E_0 \quad 3.37$$

Denklem 3.36 ve 3.37’de belirtilen ilişkiler çok küçük pertürbasyonların kısıtlanması ile boncuk çapı kovuk dalga boyundan çok küçük olan küresel boncuklar için kullanılabilir ve aşağıdaki gibi gösterilebilir;

$$\Delta U \approx -\frac{1}{2} \Delta V P E_0 = -\frac{1}{2} p E_0 \quad 3.38$$

Denklem 3.38’da belirtilen homojen bir  $E_0$  alanda dipol momentuma sahip bir dipol enerjidir. Böylece;

$$\Delta U = -\frac{1}{2} \Delta V \epsilon \frac{3(\epsilon_r - 1)}{\epsilon_r + 2} E_0^2 \quad 3.39$$

$\Delta V = 4/3 \pi \cdot r^3$  boncuk hacmi denklem 3.39’ta yerine yazıldığında;

$$\Delta U = -2\pi r^3 \epsilon \frac{(\epsilon_r - 1)}{\epsilon_r + 2} E_0^2 \quad 3.40$$

Denklem 3.40’nin ortalaması alındığında boncuk RF alan içerisine girdikten sonra depolanan elektriksel enerjideki değişim aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$\Delta U_{elek} = -\pi r^3 \epsilon \frac{(\epsilon_r - 1)}{\epsilon_r + 2} E_0^2 \quad 3.41$$

Benzer yaklaşımlar ve denklemler manyetik alan özelinde uygulandığında boncuk RF alan içerisine girdikten sonra depolanan manyetik enerjideki değişim aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$\Delta U_{man} = -\pi r^3 \mu \frac{\mu_r - 1}{\mu_r + 2} H_0^2 \quad 3.42$$

Depolanan enerjideki toplam değişim aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$\Delta U = \Delta U_{elek} + \Delta U_{man} \quad 3.43$$

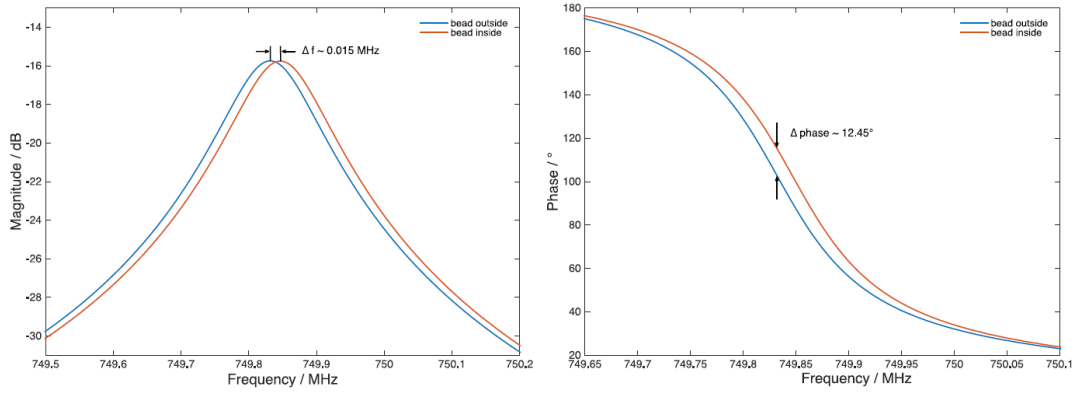
Böylece denklem 3.34, 3.41, 3.42 ve 3.43 ifadeleri kullanılarak denklem 3.44’de belirtilen eşitlik elde edilir;

$$\frac{\Delta \omega_0}{\omega_0} = \frac{\Delta f}{f} = -\frac{\pi \cdot r^3}{U} \left( \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} \epsilon |E_0|^2 + \frac{\mu_r - 1}{\mu_r + 2} \mu |H_0|^2 \right) \quad 3.44$$

$$\frac{\Delta \omega_0}{\omega_0} = \frac{\Delta f}{f} = -\frac{3\Delta V}{4U} \left( \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} \epsilon |E_0|^2 + \frac{\mu_r - 1}{\mu_r + 2} \mu |H_0|^2 \right) \quad 3.45$$

- $\omega_0$  : Pertürbe olmamış (başlangıçtaki) açısız rezonans frekans [rad/s]
- $f$  : Pertürbe olmamış (başlangıçtaki) rezonans frekans [Hz]
- $\Delta f$  : Frekans sapması (kayması) [Hz]
- $U$  : Başlangıçta depolanan enerji [Watt]
- $\Delta U$  : Depolanan enerjideki değişim [Watt]
- $\Delta V$  : Boncuk hacmi [ $m^3$ ]
- $r$  : Boncuk yarıçapı [m]
- $\epsilon$  : Vakum (hava) elektriksel geçirgenliği [F/m]
- $\mu$  : Vakum (hava) manyetik geçirgenliği [F/m]
- $\epsilon_r$  : Boncuk elektriksel geçirgenliği [F/m]
- $\mu_r$  : Boncuk manyetik geçirgenliği [F/m]
- $E_0$  : Pertürbe olmamış (başlangıçtaki) elektrik alan genliği [V/m]
- $H_0$  : Pertürbe olmamış (başlangıçtaki) manyetik alan genliği [T]

Boncuk-çekme ölçüm tekniği ile rezonans frekansının yüzde değişimi elektrik ve manyetik alan yoğunluğu ile orantılı olacaktır. Ancak boncuk-çekme ölçüm tekniği ile kaydedilen rezonans frekansındaki değişim çok az miktarda olup hassas sistemler ile ölçülebilmektedir. Kovuğun rezonans frekansındaki çok küçük değişimlerin aksine fazındaki kaymalar çok daha kolay biçimde ölçülebilmektedir (Gapais 2018). Şekil 3.5'te boncuk RFQ içerisinde iken frekans ve faz kaymasındaki değerler gösterilmektedir. Bu nedenle boncuk-çekme ölçüm tekniği ile genellikle faz farkındaki değişim gözlenerek elektromanyetik alan dağılımları gözlenmektedir.



Şekil 3.5 Boncuk kovuk içerisindeyken frekans ve faz kayması (Koubek vd. 2017)

Prensip RFQ içerisindeki alan profili denklem 3.44 kullanılarak basit ve doğru biçimde elde edilebilir. Ancak RFQ yapısı gibi uzun kovuklar için frekans sapmasının ölçümü uzun zaman alabilecek bir süreçtir. Bu tarz uzun süreçler geçici ortam sıcaklığı veya nem gibi çevresel etkilerin değişmesine ve dolayısıyla ölçüm hatalarına neden olabilir. Bu nedenle geçici etkilerin neden olabileceği hatalardan kaçınmak için ölçüm süresi mümkün olduğu kadar kısa tutulmalıdır. Zaman alıcı bir frekans taramasından ziyade faz kayması çok daha hızlı biçimde ölçülebilmektedir. (Caspers ve Dome 1985) Bu nedenle doğrudan frekans sapmasını ölçmek yerine, frekans sapması faz sapması ölçülerek hesaplanabilir. Ölçülen faz kayması denklem 3.46 kullanılarak ve her bir faz taramasından hemen önce ölçülen bir faz eğrisi kullanılarak frekans sapmasına dönüştürülebilir. (Park 2017)

Boncuk-çekme ölçüm tekniği ile kovuk içerisinde belirlenen frekans farkı  $\Delta f$  ve  $\phi$  faz farkı arasında yüksek  $Q_L > 50$  sistemlerinde aşağıdaki denklemde belirtilen ilişki bulunmaktadır (Jurgens 1990, Som vd. 2011).

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{f_p - f}{f} = \frac{\tan\phi(f)}{2Q_L} \quad 3.46$$

Denklem 3.46'de belirtilen  $f_p$  pertürbe olmuş frekansı,  $Q_L$  ise pertürbe olmamış kalite faktörünü ve  $\phi(f)$ ,  $f$ 'nin bir fonksiyonu olan faz açısındaki sapmayı belirtmektedir.

Denlem 3.44'te  $E_0$  ve  $H_0$  pertürbe olmamış alan genliklerini belirtirken  $\epsilon_r$  ve  $\mu_r$  boncuk dielektrik sabitlerini ifade emektedir ve malzemenin vakum seviyesine bağlı manyetik geçirgenliğini de ifade ettiği için vakum seviyesine bağlı değişkenlerdir.

$E_0$  ve  $H_0$  alanlarının her ikisinin de pertürbasyonu kovuk frekansının düşmesine neden olabilir.  $\epsilon_r > 1$  ve  $\mu_r = 1$  olan dielektrik bir boncuk kovuk içerisinde hareket ettirilirse aslında yalnızca E alanı ölçülür. H alanını ölçmek için yüksek  $\mu_r$  sahip malzeme kullanılabilir, ancak metalik bir boncuktan daha az performans gösterebilir. Ayrıca  $\epsilon_r \gg 1$  veya  $\mu_r \gg 1$  olduğunda,  $\Delta E$  ve  $\Delta H$  sifıra yaklaşılamaz (Wang ve Guo 2015).

Frekans veya faz farkındaki değişim gözlenerek yapılması hedeflenen boncuk-çekme ölçümleri için, elektrik alanın en yüksek olduğu kovuğun merkezine (manyetik alanın ihmal edilebilecek kadar düşük olduğu) yakın kısımlardan ölçümler alınmak istendiğinde, küresel dielektrik boncuk için  $\mu_r = 1$  seçilir ve böylece Denklem 3.45 aşağıdaki ifadeye dönüşür (Klein 1992, Nasserine vd. 2014);

$$\frac{\Delta\omega_0}{\omega_0} = \frac{\Delta f}{f} = -\frac{3\Delta V}{4U} \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} \epsilon |E_0|^2 \quad 3.47$$

Faz farkındaki değişim gözlenerek yapılması hedeflenen boncuk-çekme ölçümleri için denklem 3.47 elektrik alan özelinde aşağıdaki biçimde yazılabilir;

$$\frac{\tan\phi(f)}{2Q_L} = -\frac{3\Delta V}{4U} \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} \epsilon |E_0|^2 \quad 3.48$$

$$|E_0|^2 = \left[ \frac{\tan\phi(f)}{2Q_L} \right] \left[ -\frac{4U}{3\Delta V} \right] \left[ \frac{\epsilon_r + 2}{(\epsilon_r - 1)\epsilon} \right]$$

Böylece, eğer rezonans frekanstaki sapma ölçülürse ve depolanan enerji U ve güç dağılımı ölçümlerinden hesaplanırsa, elektrik alan doğrudan denklem 3.47'e göre elde edilebilir. Safir,  $\epsilon_r \approx 9$  göreceli bir dielektrik sabiti olan yaygın olarak kullanılan bir dielektrik malzemedir. Metalik küresel boncuk (mükemmel elektriksel iletken) için ise  $\epsilon_r \rightarrow \infty$  ve  $\mu_r = 0$  alınır, böylece Denklem 3.45 aşağıdaki ifadeye dönüşür ve dolayısıyla frekans kayması denklem 3.49'da gösterildiği gibi elektrik ve manyetik alanın kombinasyonu olarak ifade edilir (Wangler 2008, Guillaume 2015);

$$\frac{\Delta\omega_0}{\omega_0} = \frac{\Delta f}{f} = -\frac{3\Delta V}{4U} \left( \epsilon |E_0|^2 - \frac{1}{2} \mu |H_0|^2 \right) \quad 3.49$$

Ayrıca benzer şekilde frekans veya faz farkındaki değişim gözlenerek yapılması hedeflenen boncuk-çekme ölçümleri için, manyetik alanın en yüksek olduğu ve elektrik alanın ihmal edilebilecek kadar düşük olduğu kovuğun duvarlarına yakın kısımlardan ölçümler alınmak istendiğinde,  $E \cong 0$  alınır ve böylece Denklem 3.45 aşağıdaki ifadeye dönüşür;

$$\frac{\Delta\omega_0}{\omega_0} = \frac{\Delta f}{f} = -\frac{3\Delta V}{4U} \frac{\mu_r - 1}{\mu_r + 2} \mu |H_0|^2 \quad 3.50$$

Kısaca 3.47 ve 3.49 denklemlerinden anlaşılacağı gibi dielektrik bir boncuk güçlü elektrik alanlarında etkili olmasına karşın metal bir boncuk elektrik veya manyetik alanın hâkim olduğu alanlarda etkilidir (Bazyl vd. 2013).

U, pertürbe olmamış alan genliği E ve H cinsinden ifade edilen toplam depolanan enerjidir. Yukarıda belirtilen denklemler, boncuk varlığından dolayı alan iyileştirme (enhancement) etkilerini içerir. Yukarıda belirtilen denklemler aynı zamanda kovuk duvarına yakın bir boncuk durumunu da ele almaktadır. Kovuk sisteminin belirli bir kip

için depolanan enerjisi 3.33 denklemini paydasının dörtte birine eşittir (Jurgens 1990, Wangler 2008);

$$U = \frac{1}{4} \int_V (\epsilon |E_0|^2 + \mu |H_0|^2) dV \quad 3.51$$

Ayrıca depolanan enerji kovuğun başlangıçtaki kalite faktörü  $Q_0$  ile başlangıçtaki gücü  $P_0$  çarpımının  $\omega$  açısal frekansına bölümüyle elde edilmektedir (Koubek vd. 2017).

$$U = \frac{Q_0 \cdot P_0}{\omega} \quad 3.52$$

Bir rezonans devresinin kalite faktörü  $Q$ , depolanan enerjinin bir çevrimde harcanan enerjiye oranı olarak tanımlanır. Kalite faktörü  $Q$  farklı terimlerle gösterilebilir;

- $Q_0$  : Pertürbe olmamış sistemin yüksüz kalite faktörü
- $Q_L$  : Ölçüm devresi bağlı durumda yüklü kalite faktörü
- $Q_{dış}$  : Ölçüm devresinin harici kalite faktörü

Dış kalite faktörü  $Q_{dış}$  ve kavitenin boş durumdaki kalite faktörü  $Q_0$  olmak üzere;  $Q_L$  için aşağıdaki eşitlik yazılabilir (Park 2017).

$$\frac{1}{Q_L} = \frac{1}{Q_0} + \frac{1}{Q_{dış}} \quad 3.53$$



## 4. BONCUK ÇEKME SİSTEMİ

### 4.1 SPP RFQ Elektromanyetik Benzetimler

TAEK SANAEM bünyesinde geliştirilen SPP doğrusal hızlandırıcı projesi demet hattı; hızlandırmak için proton demetinin üretildiği iyon kaynağından, açığa çıkan proton demetini uygun biçimde RFQ içerisine gönderilmesini sağlayan demet aktarım hattından (DEDA) ve RF alan altında protonları hedeflenen enerjide hızlandıran RFQ kovuk yapısından oluşmaktadır. Doğrusal hızlandırıcı içerisinde belirtilen RFQ ile proton demeti enerjisi keV mertebesinde MeV mertebesine hızlandırılması hedeflenmektedir. SPP RFQ için tasarlanan RFQ modelin tasarım parametreleri Çizelge 4.1'de belirtilmektedir (Sali 2019).

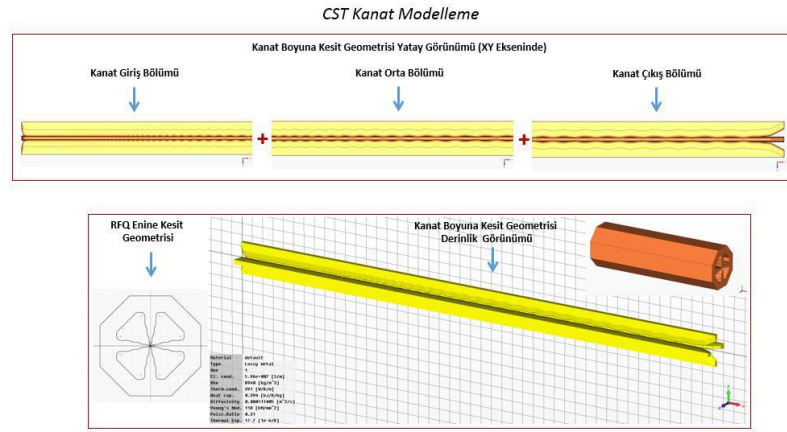
Çizelge 4.1 SPP RFQ Model Tasarım Parametreleri

SPP RFQ Parametreler	Değer	Birim
Frekans	351.82	MHz
Uzunluk	1,19	m
Güç Kaybı	66,44 (*1,8)	kW
Kalite Faktörü	9242,1	

SPP RFQ modeli, dört kanatlı RFQ yapısında tasarlanmıştır. Dört kanatlı RFQ kovuklarda toplam dört kuadrant bulunur ve alan ölçümleri her bir kuadrantta ayrı ayrı yapılması gerekmektedir. Bu nedenle, normalde RFQ'larda bulunan kuadrant başına bir ip ve bir boncuk kullanılmasına karşın, dört kanatlı RFQ kovukları için yapılacak boncuk-çekme sistemleri özel olarak tasarlanmaktadır. Özel olarak tasarlanmasının nedeni bir kuadranttaki alan düzlüğü belirlenirken aynı zamanda diğer kuadrantlarda bulunacak olan ip veya boncuk ölçüm hassasiyetini etkilemektedir. Dolayısıyla, tek bir kuadranttaki bir boncuk ile birlikte çok ince bir ip bile, kuadrantlar arasındaki alan dengesini kabul edilebilir sınırların üzerinde değiştirebilmektedir. Bahsi geçen bu hassasiyet, kanatların üretim ve hizalama toleranslarını çok daha zorlayıcı ve RFQ alan ayarını çok daha karmaşık hale getirebilir. Bu nedenle üzerinde tek bir boncuk bulunan tek bir ipin

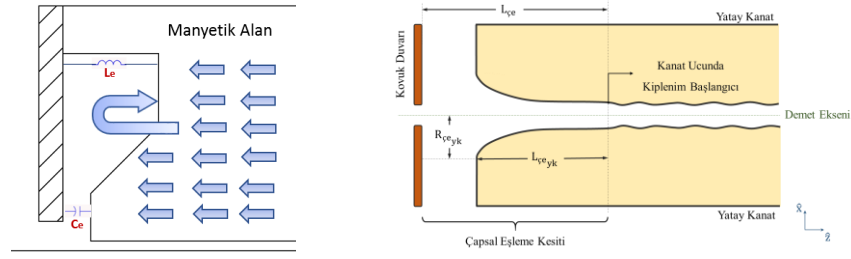
kuadrantlar arasında hareket ettirilebildiği ve her bir kuadranta simetrik biçimde hizalanabilen boncuk-çekme sistemi kullanılmalıdır. Bu sistem ile uygun mekanik tasarım ve yazılım geliştirildiği takdirde boncuk-çekme ölçümleri, ipin otomatik olarak hareket ettirilmesiyle, RF alan değerlerinin otomatik olarak toplanmasıyla ve uygun tüner konumlarının belirlenmesiyle tam otomatik biçimde yapılabilir.

Radyo frekans kuadrupol kovuğu için elde edilen enine kesit geometri parametreleri ve demet dinamiği çalışmaları ile elde edilen kıvrılıç geometrisi 3B tasarım programı kullanılarak 3B katı kıvrılıç CAD modeli oluşturulur ve elektromanyetik analizlerin yapılabileceği Şekil 4.1’de gösterildiği gibi CST STUDIO SUITE yazılımına aktarılır (Sali 2019).



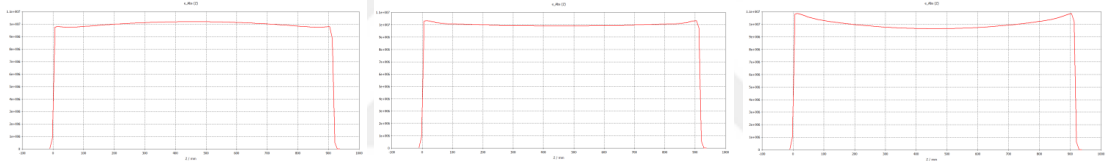
Şekil 4.1 CST SPP RFQ model geometrisi

Aktarılan bu kıvrılıç yapılar kullanılarak kovuk tasarım çalışmaları ve elektromanyetik benzetimler gerçekleştirilmektedir. RFQ kovuğu için giriş çıkış empedans eşleşmesi için, Bölüm 2.3’te anlatıldığı gibi kovuğu  $TE_{210}$  kipinde uyarabilmek için Şekil 4.2’de gösterilen biçimde kanat altı derinlikler belirlenir. Burada kanat profil kiplenimi ve iç hacmin enine kesit sınırları sabit kalmak koşuluyla giriş ve çıkışlarda empedans ayarı yapılır.  $TE_{210}$  kipinde çalışan radyo frekans kuadrupol kovuğunun çalışma prensibi gereği kovuk içi alan dağılımına göre manyetik alanlar giriş ve çıkış kapaklarına paralel olmak zorundadır.



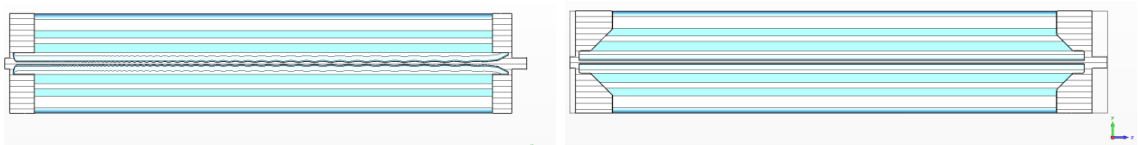
Şekil 4.2 SPP RFQ model kovuğunun giriş ve çıkış empedans ayar parametreleri

Kanat altı derinliği ( $d$ ) için 10mm değerinden – 50mm değerine kadar 5mm adımlarla benzetimler yapılmıştır ve sistemin hedeflenen rezonans frekansı 352.19 MHz değerinde RFQ merkezine yakın kısımda elektrik alan dağılımı gözlenmiştir. Elde edilen sonuçlardan Şekil 4.3'te gösterilen elektrik alan dağılım grafikleri analiz edildiğinde kanat altı derinlik değerinin 30mm eşit olduğu durumda 352.19 MHz frekans değerinde düzgün elektrik alan dağılımı elde edilmiştir.



Şekil 4.3 SPP RFQ Model derinlik sırasıyla 25,30 ve 35mm elektrik alan dağılımı

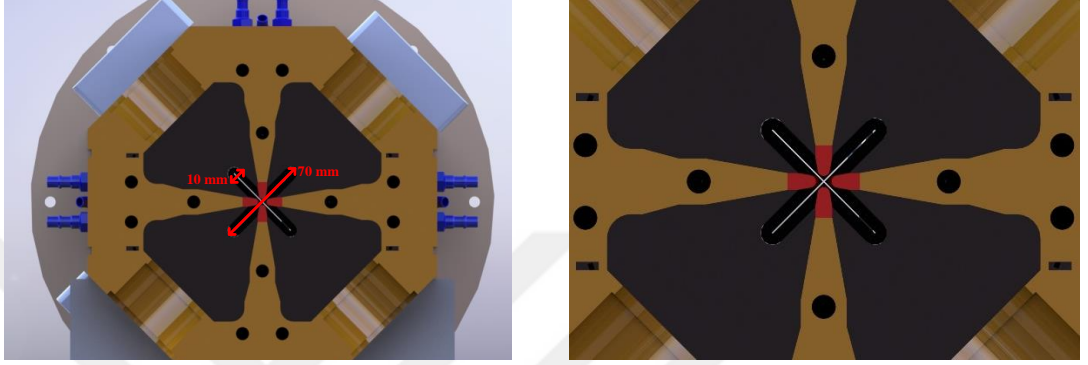
Böylece SPP RFQ model yapısı Şekil 4.4 gösterildiği biçimde 352.19 MHz frekansında  $TE_{210}$  kuadrupol kipinin uyarılabilmesi için, kanat altı derinlikler düzenlenmiştir.



Şekil 4.4 SPP RFQ model kesit görünümü, kanat altı derinlik tasarımı

Boncuk-çekme ölçümleri için kullanılacak taşıyıcı ipin RFQ uzunluğunca düzgün bir şekilde sabitlenebilmesi ve üzerinde boncuk hareket ettirebilmek için RFQ yapısının merkezinde bir pozisyon belirlenmiştir. Ön ve arka kapakta bulunan çapraz yarıklar kullanılarak tek iplik bir kuadranttan diğer kuadranta kolaylıkla geçirilebilecektir.

Yarıkların boyutları Şekil 4.5 gösterilmektedir. Bu yarıkların RFQ alan dağılımı üzerinde pertürbasyon oluşturma olasılığına karşı benzetimler analiz edilmiştir. RFQ ana işletim kipi kuadropol simetrisi sebebiyle, kapaklarda bulunan yarıkların sıfır elektromanyetik alan noktalarında bulunduğu ve olası pertürbasyonun kesinlikle ihmal edilebileceği anlaşılmıştır.

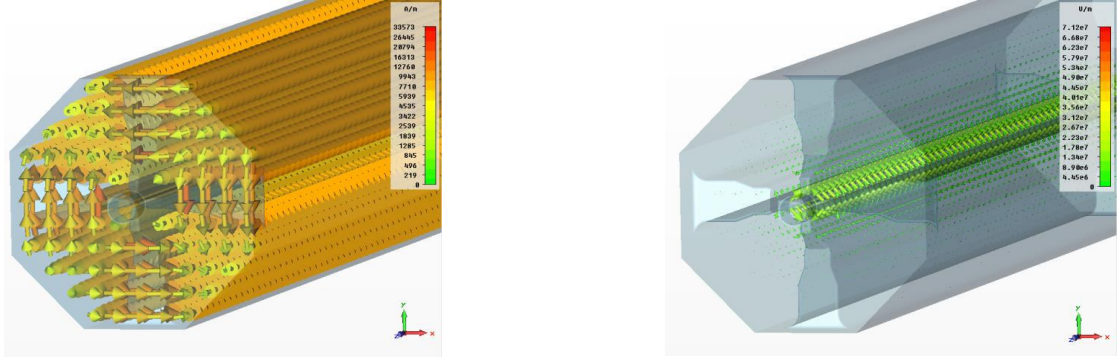


Şekil 4.5 SPP RFQ ön kapak yarık boyutları

#### 4.2 Boncuğun RFQ İçindeki Konumu

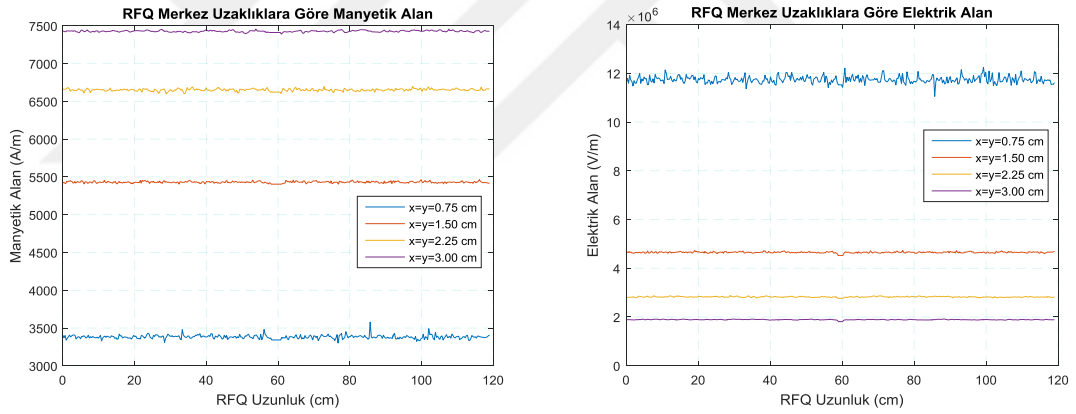
RFQ yapılarında parçacıkları hızlandıran ve odaklayan elektromanyetik alan kanatların uç kısımlarında olmasına rağmen, bu küçük aralık boncuk çekme ölçümleri için uygun değildir. Yani güvenilir boncuk çekme ölçümleri için kanatların arasında ölçüm alınabilecek yeterli alan bulunmamaktadır. Bu nedenle boncuk çekme ölçümleri RFQ'nun her bir kuadrantında gerçekleştirilir. Daha önce yapılan birçok teorik ve deneysel denemelerde RFQ boncuk çekme ölçümlerinde kuadrantlardan hesaplanan elektromanyetik alan dağılımlarının hızlandırıcı RF alan hakkında doğru bilgi sağladığı kanıtlanmıştır. Yalnızca burada dikkat edilmesi gereken konu, boncuğun RFQ kuadrantında bulunan pozisyonu veya taşıyıcı ip ile çekileceği çizgi yeterli frekans kaymasını sağlamalıdır.

Şekil 4.6'da gösterildiği gibi RFQ kesitinde elektrik alan kanat uçlarına yakın kısımlarda baskın olmasına karşın manyetik alan RFQ duvarlarına yakın kısımlarda baskındır.



Şekil 4.6 SPP RFQ model manyetik alan ve elektrik alan dağılımları

Şekil 4.7’de gösterildiği gibi boncuğun RFQ merkezinden belirli uzaklıklarında manyetik alan ve elektrik alan dağılımı hesaplamaları yapılmıştır. Şekil 4.7 grafiklerinden anlaşılacağı gibi RFQ merkezinden uzaklaştıkça manyetik alan değeri azalmakta, elektrik alan değeri artmaktadır.



Şekil 4.7 SPP RFQ merkeze uzaklığa göre manyetik ve elektrik alan dağılımları

### 4.3 Boncuk Malzemesi ve Boyutları

SPP RFQ boncuk-çekme ölçümleri için kullanılacak olan boncuğun malzemesi ve boyutu güvenilir ölçümler yapılabilmesi açısından çok önemlidir. Boncuk yeterli frekans kaymasını sağlayabilecek kadar büyük olmalı ve aynı zamanda ip sarkmasını veya ip gerginliği önlemek açısından yeteri kadar hafif olmalıdır. Aslında boncuk-çekme ölçümleri için RFQ üzerinde kullanılacak malzeme seçimi çok geniş bir yelpazeye sahip değildir; bölüm 3.2’de anlatıldığı gibi ya yüksek geçirgenliğe sahip dielektrik

malzeme ya da metal malzeme seçilebilmektedir. Bu iki malzeme için frekans kayması bölüm 3.2’de anlatıldığı gibi aşağıdaki formüllerden elde edilmektedir.

r yarıçaplı dielektrik küresel boncuk için;

$$\frac{\Delta\omega_0}{\omega_0} = -\frac{\pi \cdot r^3}{U} \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} \epsilon |E_0|^2 \quad 4.1$$

r yarıçaplı metal (diamanyetik) küresel boncuk için;

$$\frac{\Delta\omega_0}{\omega_0} = -\frac{\pi \cdot r^3}{U} \left( \epsilon |E_0|^2 - \frac{1}{2} \mu |H_0|^2 \right) \quad 4.2$$

Ölçümler dielektrik küresel boncuk ile faz farkına dayalı biçimde yapılmak istenirse, elektrik alanın karesi aşağıdaki formülden elde edilmektedir;

$$|E_0|^2 = \left[ \frac{\tan\phi(f)}{2Q_L} \right] \left[ -\frac{U}{\pi \cdot r^3} \right] \left[ \frac{\epsilon_r + 2}{(\epsilon_r - 1)\epsilon} \right] \quad 4.3$$

Denklem 4.1 ve 4.2’den anlaşılacağı üzere, dielektrik boncuk güçlü elektrik alanlarında etkili olmasına karşın metal bir boncuk ise elektrik veya manyetik alanın hakim olduğu alanlarda etkilidir. SPP RFQ için her iki malzemenin farklı yarıçaplarda ve RFQ merkezine farklı uzaklık konumlarında frekans kayması Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3’de gösterilmektedir.

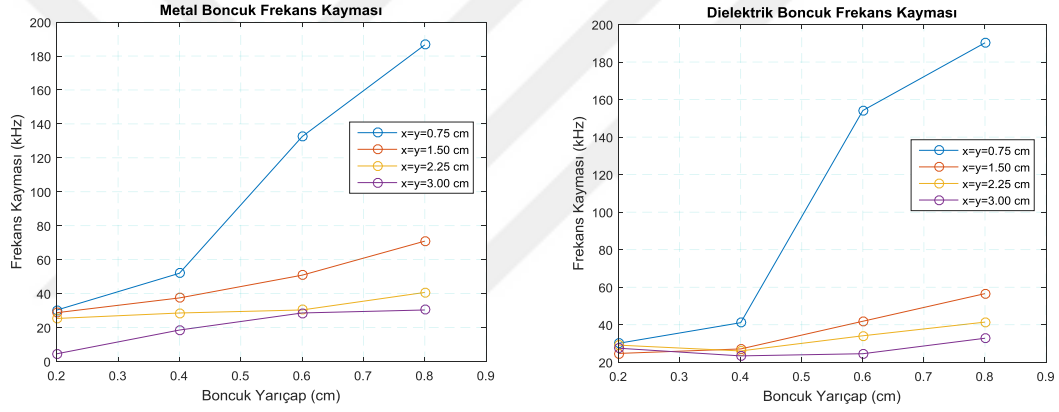
Çizelge 4.2 SPP RFQ Metal Boncuk Frekans Kayması

Boncuk yarıçapı r / RFQ merkezine uzaklık (cm)	Frekans Kayması $\Delta f$ (kHz)			
	0.75	1.5	2.25	3
0.2	3.026	2.872	2.532	0.450
0.4	5.197	3.743	2.855	1.850
0.6	13.520	5.084	3.034	2.857
0.8	18.659	7.091	4.068	3.033

Çizelge 4.3 SPP RFQ Dielektrik Boncuk Frekans Kayması

Boncuk yarıçapı, r / RFQ merkezine uzaklık (cm)	Frekans Kayması $\Delta f$ (kHz)			
	0.75	1.5	2.25	3
0.2	3.012	2.472	2.914	2.750
0.4	4.110	2.712	2.605	2.341
0.6	15.416	4.187	3.413	2.457
0.8	19.025	5.659	4.141	3.281

Ayrıca SPP RFQ için elde edilen, farklı malzeme ve farklı uzaklıklarda elde edilen frekans kayması benzetim sonuçlarının grafiği Şekil 4.8’de gösterilmektedir.



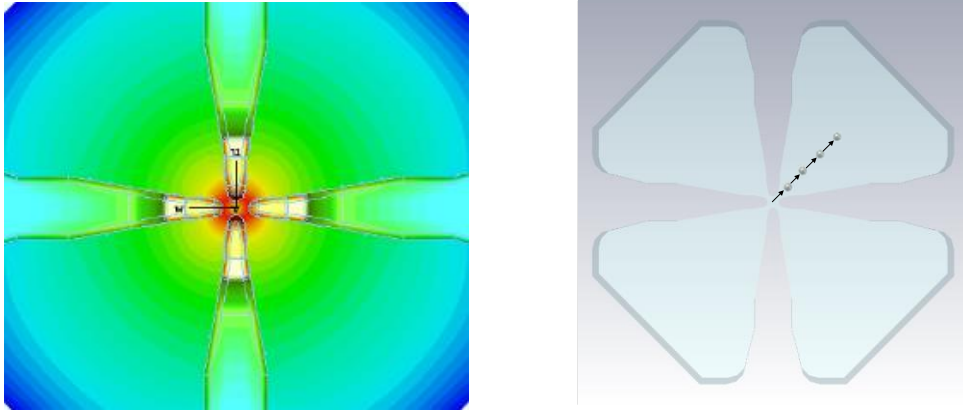
Şekil 4.8 SPP RFQ metal ve dielektrik boncuk frekans kayması

Son olarak boncuk büyüklüğü ve malzemesi özel seçimlere bağlı seçilmelidir. Örneğin RFQ kanatlarına temas olmadan boncuk-çekme ölçümleri yapılacaktır, metal bir boncuk tercih edilir. Kullanılacak olan metal boncuk, içi dolu küreye göre daha hafif olan içi boş küre şeklinde seçilebilir. Bahsi geçen ölçüm yönteminin aksine RFQ kanatları kılavuz ray olarak kullanılacaksa ve boncuk kanatlara temas edecekse, yüzey temas noktalarından ve boncuk ile RFQ duvarları arasında oluşan elektrik akımı nedeniyle açığa çıkabilecek ek kararsızlıkları önlemek için dielektrik boncuk kullanılmalıdır. Her iki malzeme için de boncuk boyutu RFQ kesiti içerisinde boncuğun hangi konumda hareket edeceğine ve RFQ uzunluğuna bağlıdır. Eğer daha uzun boylu RFQ’lar için boncuk-çekme ölçümü yapılması planlanırsa, frekans kayması kovuk uzunluğu ile doğrusal olarak düşeceği için, daha büyük boyutta boncuk seçilmesi gerekecektir.

#### 4.4 Boncuk Hizalaması

RFQ boncuk-çekme ölçümü tek ipe sahip bir sistem olduğunda, uzunlamasına ip yapısının bir RFQ kuadrantından diğerlerine sık sık yeniden konumlandırılması gerekmektedir. Bu yeniden konumlandırma işlemi yüksek doğrulukta yapılabilmesi ve tekrarlanabilir olmalıdır. Boncuğu taşıyan ipin ve dolayısıyla boncuğun yeniden konumlandırma işlemi, SPP RFQ boncuk-çekme yönteminde planlandığı gibi kanatlar kılavuz ray olarak kullanılmazsa hassas bir biçimde yapılmalıdır. Bu nedenle SPP RFQ için kullanılması hedeflenen boncuk-çekme sistemi bu tarz hassas konumlandırmaları yapabilen otomatik ip konumlandırma yapısına sahip olacaktır. Böyle bir otomatik konumlandırma işlemi, gerekli hassasiyeti sağlayabilmek için doğruluğundan emin olunan bir referans noktasına ihtiyaç duymaktadır. RFQ kovuklar için bu tarz doğal referans RFQ'nun merkezine denk gelen elektromanyetik eksendir.

RFQ kovuk için elektromanyetik eksen koordinatlarını bulmak için, boncuk-çekme RFQ enine kesitte Şekil 4.9'da gösterildiği gibi kullanılmalıdır. Burada uygulanan yaklaşım, elektrik alanın Şekil 4.9'da gösterildiği gibi RFQ merkezinde sıfır olduğu gerçeğine dayanmaktadır. Bu yaklaşımla birlikte elde edilen bir dizi ölçüm noktası ile, elektrik alanın asgari noktası belirlenerek elektromanyetik eksen koordinatları tanımlanabilir. Ölçümler kovuk boyunca birçok pozisyonda yapılmalıdır. Bu işlem boncuk-çekme ölçümleri öncesinde, boncuk-çekme sistemi RFQ kovuğa bağlandığında yalnızca bir kez yapılması gerekmektedir.



Şekil 4.9 RFQ merkez elektrik alan ve boncuk hareket yönü

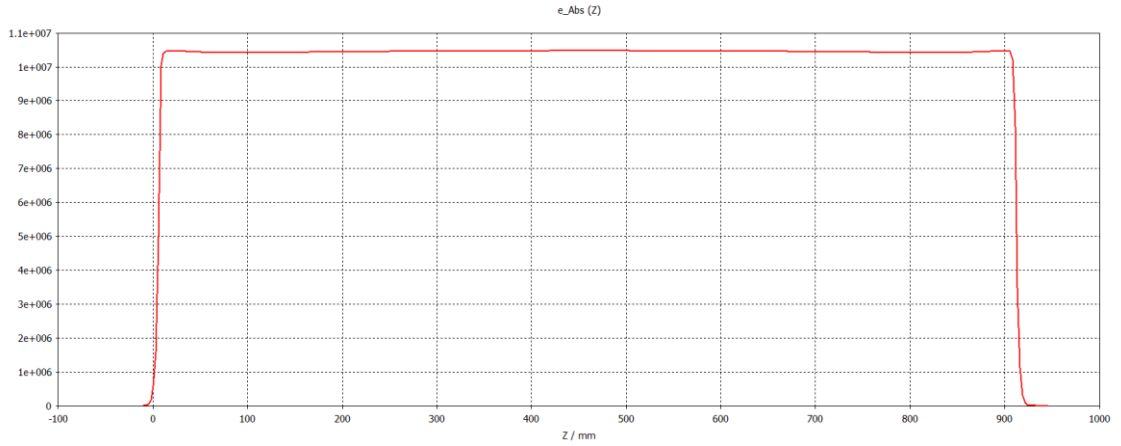


RFQ merkezinde elektrik alan kesinlikle hakimdir ve çok güçlüdür, bu nedenle her iki malzeme de RFQ merkezinde aynı değerdedir. RFQ merkezine yakın yapılacak ölçümlerde boncuk boyutu daha kritiktir, boncuk boyutu kanat uçları arasındaki açıklıktan daha küçük olmalı ve aynı zamanda elektromanyetik alan bozunumuna neden olmadan yeterli frekans kaymasını sağlayabilmelidir.

Farklı yarıçaplardaki boncuk boyutuna ve 2mm yarıçaplı boncuğun aksel pozisyonundan uzaklığa göre frekans kayması belirlenmiştir. Benzetimlerde mutlak alan dağılımı beklenmediği için kanat uçlarında bulunan kiplenim geometrisi olmadan gerçekleştirilmiştir. Sonuçlardan 2mm'lik boncuk çapının en uygun boyutta olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca sonuçlardan küçük pertürbasyon ilkesinin ihlalinin büyük olduğu anlaşılmaktadır ve bu nedenle bu tür ölçümler alan dağılımı değerlendirmesi için kabul edilemez değerler açığa çıkarmaktadır. Ancak burada kesin alan profili konumunun değil, asgari frekans kaymasına tekabül eden elektromanyetik eksen konumunun tespit edilmesi gerekir.

Boncuk konumunun hizalanabilmesi için bir sonraki adım, belirlenen enine kesit noktası boyunca boncuğu RFQ içerisinde hareket ettirmektir. İşletimsel boncuk konumunun belirlenebilmesi için birbiriyle çelişen iki parametre; frekans kayması ve boncuk konum hassasiyeti incelenir. Elektrik alanın enine kesitte dağılım grafiği (manyetik alan ihmal edilebilir, katkısı büyük değildir), RFQ merkezine daha yakın olan boncuk konumunun daha büyük frekans kayması sağladığını, ancak güçlü alan gradyeni sebebiyle boncuk konumlandırma hassasiyetinin çok önemli olduğunu göstermektedir.

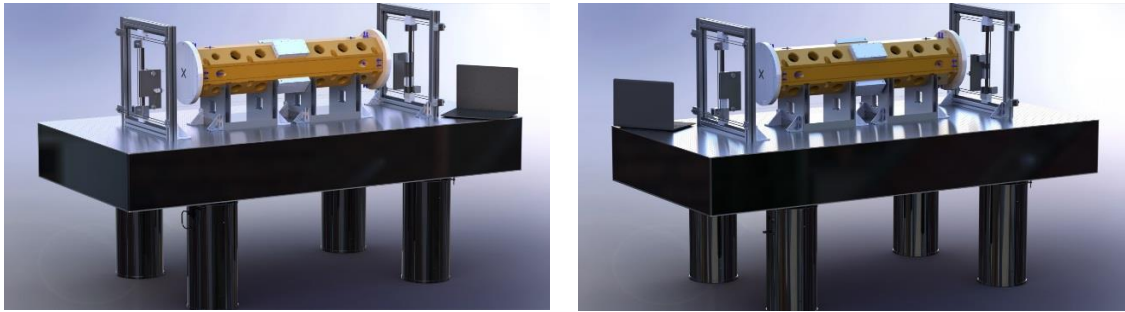
RFQ boncuk-çekme ölçümleri elektromanyetik alan dağılımı düzgünlük gereksinimlerine bağlı olarak, boncuk-çekme sistemi mekaniğinin hassasiyeti, en uygun boyutta boncuk seçimi ve RFQ enine kesitte boncuk konumu belirlenebilmektedir. Boncuk-çekme sistemi ile ilgili elde edilen benzetim sonuçları fikir vermektedir ancak nihai ölçüm sistemine karar verebilmek için kesin deneyler ve testler gerekmektedir. Şekil 4.10 gösterilen grafikte SPP RFQ modeli için yapılan analizlerde elde edilen elektrik alan düzlüğü gösterilmektedir.



Şekil 4.10 SPP RFQ model elde edilen elektrik alan düzlüğü

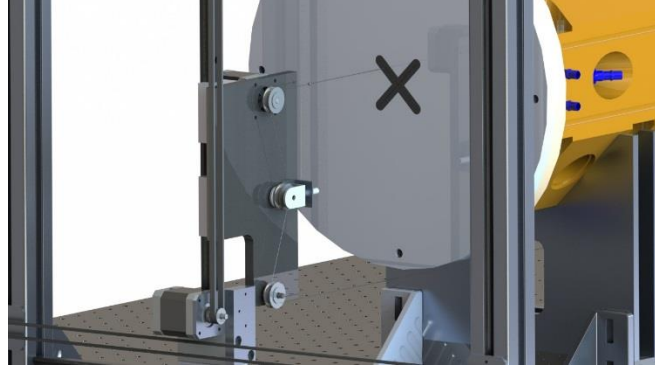
#### 4.5 Kavramsal Boncuk-Çekme Sistemi

Yukarıda belirtilen hususlar göz önüne alındığında, boncuk-çekme sistemi mekanik tasarımının küçük değişikliklere uygun yapıda olması gerekmektedir. SPP RFQ için geliştirilen boncuk-çekme sistemi temelde tek bir ipin tüm kuadrantlara gidebildiği ölçüm sistemi olacaktır. Boncuğun hızlı ve hassas biçimde yeniden konumlandırılmasına izin vermek için, boncuk-çekme sistemi Şekil 4.11’de gösterildiği gibi bilgisayar kontrollü otomatik olarak boncuğun enine kesitte hareket etmesini sağlayacaktır. İki çift eyleyici (actuator), ipi bağımsız olarak yatay ve düşey ekseninde hareket ettirebilecektir.



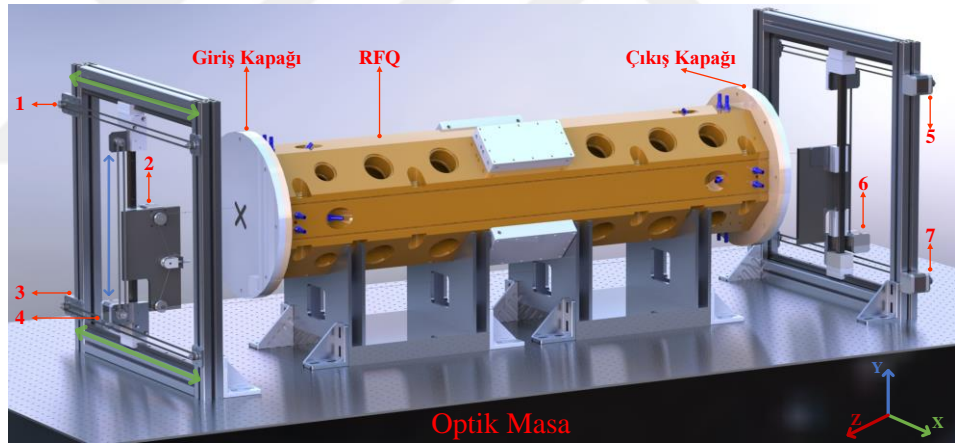
Şekil 4.11 SPP RFQ kavramsal boncuk-çekme sistemi tasarımı ön ve arka görüntüsü

Boncuğu taşıyacak ipliğin Şekil 4.12’te gösterildiği gibi çok esnek olmayan ve güçlü bir yapıya sahip olan kevlar malzemeden kullanılması önerilmektedir. Farklı çaplarda muhtemel küresel boncukların testler esnasında hazır bulundurulması, olası tüm ihtiyaçları karşılayabilecektir.



Şekil 4.12 SPP RFQ boncuk, ip ve motorlu makara yapısı tasarımı

Boncuk-çekme ölçüm sistemi ile bir bilgisayar, boncuk hizalamasını ve RFQ boyunca boncuğun hareketini kontrol edebilir. Aynı zamanda ağ analizörü cihazından elektromanyetik alan verilerini toplayarak işleyebilir ve frekans kaymasını hesaplayarak RFQ alan ayarı için öneriler oluşturabilir.



Şekil 4.13 SPP RFQ boncuk-çekme sistemi elemanları

SPP RFQ için tasarlanan boncuk çekme sistemi Şekil 4.13'te gösterildiği gibi toplam 7 adet NEMA 17 BLDC elektrik motorundan, toplam 5 adet makara sisteminden ve ip ile boncuktan oluşmaktadır. Şekil 4.13'te belirtilen 1, 3, 5, 7 numaralı motorlar ipin bulunduğu sistemi X ekseninde hareket ettirmekte olup 4, 6 numaralı motorlar sistemi Y ekseninde hareket ettirmektedir. Sistemde bulunan 2 numaralı motor ise makaralar yardımıyla boncuğun RFQ içerisinde sabit hızla hareket etmesini sağlamaktadır. Boncuk çekme sisteminin tamamı hassas ölçüm gereksinimleri sebebiyle, güvenilir bir düzlemde yapılmalıdır. Bu nedenle tüm sistem optik masa üzerinde tasarlanmıştır.

## 5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Tez çalışmaları içerisinde RFQ yapısı, demet dinamiği, RF çınlayıcı kovuk ve mekanik yapının ortaya çıkartılabilmesi açısından incelenmiştir. RFQ yapısını oluşturmanın esas zorluğu, her bir bileşenin hassas biçimde tasarlanıp üretilmesinden ziyade, tüm bileşenleri hassas biçimde bir araya getirmekte yatmaktadır.

Bu tez çalışmasında RFQ yapılarında üretim ve bütünleme kaynaklı kusurların kontrol altında tutulması ve RF davranışı açısından izin verilebilir tolerans dahilinde elde edilmesi için kullanılması bir zorunluluk olan boncuk-çekme yöntemi incelenmiştir. Tez içerisinde RF kovuk yapıları için malzeme ve hacim pertürbasyonu derinlemesine incelenmiştir. Ardından Slater pertürbasyon teorisi incelenerek, Slaterin pertürbasyon teorisine dayanan boncuk çekme karakterizasyon tekniği ile SPP RFQ model kovuk yapısının baskın kiplerinin (kuadropol ve dipol) alan dağılımlarının analizleri yapılmıştır. Ayrıca SPP RFQ modeli üzerinde yapılan analizlerde elektrik alan düzlüğünün elde edilebildiği ve TE<sub>210</sub> kipinin uyarılabildiği kanat altı derinlikler belirlenmiştir.

RFQ'larda, üretim ve entegrasyondan sonra birçok elektromanyetik alan ölçümü yapılması gerekir. Farklı uzunluklara yerleştirilen her bir alan ayarlayıcının istenilen biçimde çınlayıcı kovuk hacmini değiştirdiğini belirleyebilmek adına elde edilen ölçümler bir algoritma ile analiz edilir. Bahsi geçen ölçümlerin yapılması ve alan ayarlayıcı pozisyonlarının belirlenmesi işlemi RFQ alan ayarının yapılması olarak adlandırılmaktadır. SPP RFQ modeli ile benzetim ortamında yapılan alan ayarı ile, kuadropol kip frekansını belirlenen tasarım değerine getirmeyi hedefleyen, her bir kuadrantta eşit ve RFQ uzunluğunca düz bir elektrik alan elde edilmiştir. Boncuk-çekme sistemi ile ilgili elde edilen benzetim sonuçları fikir vermektedir ancak nihai ölçüm sistemine karar verebilmek için kesin deneyler ve testler gerekmektedir.

Boncuk çekme yöntemi ile elde edilecek ölçümler için dört kanatlı SPP RFQ modeli üzerinde bir boncuk tüm kuadrantlar boyunca art arda hareket edecek biçimde boncuk-çekme sistemi tasarlanmıştır. Boncuk çekme yöntemi ile yapılacak ölçümler için kevlar malzemeden bir ip, gerginliği özel bir düzenek ile ayarlanacak biçimde tasarlanmıştır. İp

yapısı, tüm kuadrantlar arasında dolaşabilmesi için, kasnak düzeneği ile dört kuadrantı ard arda dolaşabilen kapalı bir döngü sistemi biçiminde tasarlanmıştır.

Boncuk-çekme ölçümleri için tasarlanan sistemde boncuğu sabit hızda hareket ettirebilmek için, boncuğu taşıyan ip bir elektrik motoruna bağlanmıştır. RFQ yapısı içerisinde boncuğun hedeflenen konumda hareketini sağlayabilmek için ip birçok makaradan geçirilmiştir. Hassas alan ölçümleri sırasında ip üzerindeki boncukta meydana gelebilecek titreşimler ölçüm sonuçlarını etkilemektedir. Bu nedenle makaralara bağlı bulunan taşıyıcı ipte meydana gelebilecek titreşimleri engellemek ve ipi gergin biçimde tutabilmek için ipin geçtiği yarıklara ipi sıkı biçimde tutabilecek kauçuklar eklenmiştir.

Bu tez çalışması ile elde edilen metodolojik ve teorik bilgi birikimi ülkemizde endüstriyel, medikal ve araştırma uygulamalarına hizmet verebilecek proton hızlandırıcı sistemlerinin geliştirilmesinin hedeflenmesi halinde, bu sistemlerde ihtiyaç duyulabilecek benzeri kovuk yapılarının karakterizasyonu için kılavuz niteliği taşıyacaktır.

## KAYNAKLAR

- Akkurt, N. 2018. RFQ Kovuğun Elektromanyetik Özelliklerinin Ölçülmesi. Doktora tezi. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fizik Anabilim Dalı, Eskişehir.
- Bazyl, D., Gonin, I., Khabiboulline, T., Poloubotko, V. and Romanov, G. 2013. Notes on the Bead-Pull System Design for PXIE RFQ TD-13-012 (Version 1.0). Batavia, Illinois: Fermilab.
- Berrutti, P., Khabiboulline, T. N., Poloubotko, V., Romanov, G., Steimel, J., Yakovlev, V., Li, D. and Staples, J. 2014. PXIE RFQ Bead Pull Measurements. Proceedings of LINAC2014, TUPP047, 535-537.
- Bladel, J. G. 2007. Electromagnetic Fields 2nd Edition, s251. New Jersey, United States of America: John Wiley & Sons, Inc.
- Caspers, F. and Dome, G. 1985. Precise Perturbation Measurements Of Resonant Cavities and Higher Order Mode Identification. CERN SPS/85-46.
- Crandall, K. R., Wangler, T. P., Young, L. M., Billen, J. H., Neuschaefer, G. H. and Schrage, D. L. PARMTEQ-RFQ Design Codes.
- Fu, Q., Zhu, K., Lu, Y. R., Easton, M. J., Gao, S. L., Wang, Z., Jia, F. J., Li, H. P. and Gan, P. P. 2017. Design and Cold Model Experiment of a Continuous-Wave Deuteron Radio-Frequency Quadrupole. Physical Review Accelerators and Beams, 120101, 20, 1-16.
- Gapais, P. F. 2018. Bead-Pull measurements techniques and Multipole components of DQW crab-cavity. CERN Summer Student 2018 Report.
- Garmendia, N., Gonzalez, P., Muguira, L., Gonzalez, O., Madariaga, I., Muñoz, J.L., Bustinduy, I. and Velez, A. 2014. Low Power RF Characterization of ESS Bilbao RFQ Cold Model. Proceedings of IPAC2014, THPME038, (s. 3308-3310). Dresden, Germany.
- Guillaume, J. 2015. RF Bead Pull Measurements of the DQW Cavity. CERN Summer Student 2015 Report.
- Hill, D. A. 2009. Electromagnetic Fields in Cavities: Deterministic and Statistical Theories Ch1. Piscataway, New Jersey, United States of America: A John Wiley & Sons, Inc. - IEEE Press.
- Jang, J., Cho, Y., Jeong, K., Sul, K., Kwon, H., Kim, Y. and Na, J. 2003. The First Tuning Result of the PEFP RFQ. Proceedings of the Korean Nuclear Autumn Meeting, 35(14).
- Jurgens, T. G. 1990. Equations For Bead Pull Cavity Measurements. FERMILAB-LU-159.

- Kerker, M. 1969. *The Scattering of Light and Other Electromagnetic Radiation Ch3 - Scattering by a Sphere*. New York: Academic Press, Inc.
- Klein, H. 1992. *CERN Accelerator School Proceedings Basic Concepts I*, Report CERN 92-03. CERN.
- Koubek, B. 2016. *Tuning of the 750 MHz RFQ for Medical Applications*. Zurich: CERN - KT Medical Applications Seminar - Early-Career Researchers in Medical Applications.
- Koubek, B., Grudiev, A. and Timmins, M. 2017. *RF Measurements and Tuning of the 750 MHz HF-RFQ*. CERN, Geneva, Switzerland: CERN-ACC-NOTE-2017-0006.
- Koubek, B., Grudiev, A., and Timmins, M. 2017. *RF Measurements and Tuning of the 750 MHz Radio Frequency Quadrupole*. *Physical Review Accelerators and Beams* - 080102, 20, 1-12.
- Letchford, A., Savage, P., Pozimski, J. and Cheng, Y. A. 2006. *Mechanical Design and RF Measurement on RFQ for Front-end Test Stand at RAL*. *Proceedings of EPAC 2006*, MOPCH117, 318-320.
- Maier, L. C. 1949. *Field Strength Measurements in Resonant Cavities*, Technical Report No. 143. Massachusetts Institute of Technology.
- Maier, L. C. and Slater, J. C. 1951. *Field Strength Measurements in Resonant Cavities*. *Journal of Applied Physics*, 23(1), 68-77.
- Mathot, S. 2008. *RFQ Vacuum brazing at CERN - TUPD032*. Eleventh European Particle Accelerator Conference, EPAC'08, 1494-1496.
- Mathot, S., Bourquin, P., Briswalter, A., Callamand, T., Carosone, J., Favre, N., Geisser, J.M., Lombardi, A., Maire, V., Malabaila, M., Pognat, 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*. *Proceedings of IPAC'10 - MOPD054*, (s. 807-809). Kyoto, Japan.
- Maxwell, J. 1873. *A Treatise on Electricity and Magnetism, Volume 2 Chapter IX, General Equations of the Electromagnetic Field*. Oxford, U.K.: Clarendon Press.
- Merschdorf, M. 2002. *Femtodynamics in Nanoparticles The Short Lives of Excited Electrons in Silver*. *Doktora tezi*. University of Würzburg, Physics and Astronomy, Würzburg.
- Nakamura, M. 1968. *Theory of Field Strength Determination in RF Structures by Perturbation Techniques*. *Japanese Journal of Applied Physics*, 7(2), 146-155.

- Nakanishi, T., Ueda, N., Arai, S., Hori, T., Takanaka, M., Noda, A. and Kratayama, T. 1982. Measurement of the RF Field on RFQ Linac Model Cavities. Study Group of Numatron and high-Energy Heavy-Ion Physics Institute for Nuclear Study University of Tokyo.
- Nasserdine, M., Mengue, S., Bourcier, C. and Richalot, E. 2014. Field Measurements within a Large Resonant Cavity Based on the Perturbation Theory. Progress In Electromagnetics Research B, 57(57), 1-20.
- Park, B. S. 2017. Commissioning of an 81.25 MHz Four-vane Radio Frequency Quadrupole Accelerator with a Ramped Field Profile. Doktora tezi. Seoul National University, Energy System Engineering, Seoul.
- Persichelli, S. 2010. Methods of Characterization and Tuning of RF High Frequency Accelerating Structures. Yüksek lisans tezi. Sapienza - University of Rome, Electronic Engineering, Rome.
- Pirkl, W. 1983. Tuning of the RFQ. CERN-PS/RF Note 83-4.
- Pisent, A., Comunian, M., Palmieri, A., Lamanna, G. and Barni, D. 2000. TRASCO RFQ. Proceedings of the XX International Linac Conference. Monterey, California.
- Poynting, J. 1884. On the Transfer of Energy in the Electromagnetic Field. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 175, 343-361.
- Pozar, D. M. 2011. Microwave Engineering 4th Ed. John Wiley & Sons, Inc., 306-311, United States of America.
- Rossi, C. 2018. LINAC4 RFQ Design, Construction, Commissioning, and Operation. CERN - The LINAC4 RFQ Project.
- Rossi, C., Bourquin, P., Lallement, J., Lombardi, A., Mathot, S., Pugnât, D., Timmins, M., Vandoni, G., Vretenar, M., Desmons, M., France, A., Noa, Y. Le, Novo, G. and Piquet, O. 2010. Progress in the Fabrication of the RFQ Accelerator for the CERN Linac4. Proceedings of Linear Accelerator Conference LINAC2010 - TUP042, (s. 497-499). Tsukuba, Japan.
- Sali, Z. 2019. Düşük Akımlı Proton Hızlandırıcı Sistemleri için Radyo Frekans Kuadropol Kovuğunun Elektromanyetik Tasarımı. Yüksek Lisans Tezi (Basılmamış). Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Ankara.
- Sheikh, J. Y. and Burton, R. 1992. Tuning and Conditioning of RFQ1-12S0 Cavity. Proceedings of the 1992 Linear Accelerator Conference, TH4-37, 710-712.
- Shin, K. R., Kang, Y. W., & Fathy, A. E. 2014. Feasibility of Folded and Double Dipole Radio Frequency Quadrupole (RFQ) Cavities for Particle Accelerators. IEEE Transactions on Nuclear Science, 61(2), 799-807.
- Slater, J. C. 1946. Microwave Electronics. Reviews of Modern Physics, 18(4), 441-512.



- Smith, B., Burton, R. and Hutcheon, R. 1992. High Speed Resonant Frequency Determination Applied to Mield Mapping Using Perturbation Techniques. Proceedings of the 1992 Linear Accelerator Conference, TU4-55, 468-470.
- Som, S., Seth, S., Mandal, A. and Ghosh, S. 2011. Bead-pull Measurement using Phase-Shift Technique in Multi-cell Elliptical Cavity. 2nd International Particle Accelerator Conference (IPAC 2011) C11-09-04, (s. 280-282). San Sebastian, Spain .
- Staples, J. 2013. Tuning the PXIE RFQ - PXIE RFQ Fabrication Readiness Review. Lawrence Berkeley National Laboratory - Fermilab.
- Strutt (Lord Rayleigh), J. W. 1871. On the scattering of light by small particles. Philosophical Magazine Series 4, 41(275), 447-454.
- 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. and 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), WEPC02, (s. 652). Oxford, UK.
- Türemen, G. 2019. Radyo Frekans Dörtkutuplu Proton Hızlandırıcı Sistemin Tasarımı, Üretimi ve Testleri. Doktora tezi. Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Ankara.
- Unel, G. 2015. Radio Frequency Quadrupole - Işıma Sıklığı Dörtüçlusu. Hızlandırıcı ve Parçacık Fiziğinde Bilgisayar ve Uygulamalar Okulu (HPFBU).
- Vretenar, M. 2013. The Radio-Frequency Quadrupole. CERN Yellow Report CERN-2013-001, 207-223.
- Wang, H., and Guo, J. 2015. Bead-pulling Measurement Principle and Technique Used for the SRF Cavities at JLab. Thomas Jefferson Lab, USPAS.
- Wangler, T. P. 2008. RF Linear Accelerators. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, s165-168, Weinheim, United States of America.
- Yasatekin, B., Turemen, G., Celebi, E., Unel, G. and Cakir, O. 2015. DEMIRCI: An RFQ Design Software. Proceedings of the International Computational Accelerator Physics Conference (ICAP'15), 81-83.
- Yasatekin, H. B. 2015. Radyo Frekans Dörtkutuplusu Tasarım ve Demet Dinamiği Hesapları. Yüksek Lisans tezi. Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Ankara.
- Zhong, M. 2010. Light Scattering by Small Particles.

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı: Mustafa ÇELİK  
Doğum Yeri: Ankara  
Doğum Tarihi: 19.10.1988  
Medeni Hali: Evli  
Yabancı Dili: İngilizce

### Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise: Keçiören Anadolu Lisesi (2006)  
Lisans: Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,  
Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı (2012)  
Yüksek Lisans: Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,  
Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı (2019)

### Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl

TAEK, Radyasyon ve Hızlandırıcı Teknolojileri Daire Başkanlığı (2012 – 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.

Hancioglu, O.K, Celik, M., Tumerdem, U., Kinematics and Tracking Control of a Four Axis Antenna for Satcom on the Move. 2018 International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018-ECCE Asia). IEEE, 2018. p. 1680-1686. Niigata, Japan.

Celik, M., Hancioglu O.K., Bogosyan, S., Bastl, M., Najman, J., Grepl, R. Cascade Control of SATCOM on the Move (SOTM) Antennas with Jacobian Operator. The 7th International Conference on Control, Mechatronics and Automation, 2019. TU Delft, Netherlands.

Aykent, B., Koca, K., Celik, M. System identification-based dynamics control for X-Y pedestal satellite antenna. The 7th International Conference on Control, Mechatronics and Automation, 2019. TU Delft, Netherlands.