ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

RADYO FREKANS DÖRTKUTUPLU PROTON HIZLANDIRICI SİSTEMİNİN TASARIMI, ÜRETİMİ VE TESTLERİ

Görkem TÜREMEN

FİZİK ANABİLİM DALI

ANKARA
2019

Her hakkı saklıdır

TEZ ONAYI

Görkem TÜREMEN tarafından hazırlanan "**Radyo Frekans Dörtkutuplu Proton Hızlandırıcı Sisteminin Tasarımı, Üretimi ve Testleri**" adlı tez çalışması 20/06/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Şemsettin TÜRKÖZ
Ankara Üniversitesi Fizik Anabilim Dalı

Jüri Üyeleri :

Başkan : Prof. Dr. Saleh SULTANSOY
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Malzeme Bilimi ve Nanoteknoloji Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye : Prof. Dr. Şemsettin TÜRKÖZ
Ankara Üniversitesi Fizik Anabilim Dalı

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

Üye : Prof. Dr. Veysi Erkcan ÖZCAN
Boğaziçi Üniversitesi Fizik Anabilim Dalı

Üye : Prof. Dr. Şengül KURU
Ankara Üniversitesi Fizik Anabilim Dalı

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Özlem YILDIRIM
Enstitü Müdür Vekili

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.

20/06/2019



Görkem TÜREMEN

ÖZET

Doktora Tezi

RADYO FREKANS DÖRTKUTUPLU PROTON HIZLANDIRICI SİSTEMİNİN TASARIMI, ÜRETİMİ VE TESTLERİ

Görkem TÜREMEN

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Şemsettin TÜRKÖZ
Eş Danışman: Doç. Dr. Gökhan ÜNEL

Günümüzde proton hızlandırıcıları, tahribatsız malzeme analizi ve radyasyon testlerinden, kanserli dokuların tanılanması ve tedavi edilmesine, hızlandırıcı sürümlü sistemlerden, temel bilim araştırmalarına kadar bir çok alanda kullanılan araçlardır. Bu aracın ülkemizde de kullanılabilir duruma gelmesinin sağlanması amacıyla, TAEK bünyesinde gerçekleştirilen SPP kapsamında yerli bir proton hızlandırıcı sistemi kurulmuştur. Protonları 1.3 MeV'ye çıkaracak bir RFQ kovuğunun hayata geçirilmesi için gerekli olan; iyon kaynağı, düşük enerjili demet taşıma hattı, RF güç kaynağı ve RF iletim hattı gibi bir çok bileşen tasarlanmış, üretilmiş ve devreye alınmıştır. Ek olarak RFQ kovuğunun tasarımı ve üretimi tamamlanmış, devreye alma süreci ise devam etmektedir. Bu tezde, SPP kapsamında yazar tarafından gerçekleştirilmiş olan demet hattı ve RF bileşenlerinin tasarım, üretim ve test çalışmaları açıklanacaktır.

Haziran 2019, 136 sayfa

Anahtar Kelimeler: Proton hızlandırıcı, RF iletim hattı, RF güç kaynağı, kovuk, mıknatıs, iyon kaynağı, dolaştırıcı, demet dinamiği, RFQ

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

DESIGN, MANUFACTURE AND TESTS OF A RADIO FREQUENCY QUADRUPOLE PROTON ACCELERATOR SYSTEM

Görkem TÜREMEN

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

Supervisor: Prof. Dr. Şemsettin TÜRKÖZ
Co-supervisor: Doç. Dr. Gökhan ÜNEL

Today, proton accelerators are used in broad areas ranging from non-destructive material analysis and radiation tests to diagnosis and treatment of cancerous tissues, from accelerator driven systems to basic science research. In order to make this tool available in our country, a local proton accelerator system was built within the scope of the SPP realized under the auspices of TAEK. Components necessary for an RFQ cavity that would accelerate protons to 1.3 MeV, such as ion source, low energy beam transport line, RF power supply and RF transmission line have been designed, manufactured and commissioned. In addition, the design and production of the RFQ cavity has been completed and the commissioning process is ongoing. In this thesis, the tasks carried out by the author within the scope of SPP such as the design, production and commissioning of the beam line and RF components will be presented.

June 2019, 136 pages

Key Words: Proton accelerator, RF transmission line, RF power supply, cavity, magnet, ion source, circulator, beam dynamics, RFQ

TEŞEKKÜR

Doktora çalışmalarımın yürütülmesi sırasında yaptığı yönlendirmeler ile desteğini esirgemeyen danışmanım Prof. Dr. Şemsettin TÜRKÖZ'e teşekkürlerimi sunarım.

Ülkemizdeki birçok çalışmaya ve benim de içinde bulunduğum sayısız araştırmacıya yaptığı yol göstericilik, destek ve bilgi aktarımlarına 2012 yılından beri tanık olduğum, yaptığım teorik ve deneysel çalışmalarda büyük katkısı olan ve "bilimsel yöntem" ilkelerini izlememde beni sürekli yönlendiren, dostluğuyla benim için bir danışmandan öte olan, Doç. Dr. Nafız Gökhan ÜNEL'e sonsuz teşekkür ederim.

Tez çalışmalarım kapsamında, deneysel ve sosyal alanlarda deneyim kazanmamı sağladığı için SPP proje yürütücüsü Dr. Ali ALAÇAKIR'a teşekkürlerimi bir borç bilirim. Ayrıca, tezin konusu olan çalışmalarda emeği geçen tüm çalışma arkadaşlarıma, hem projeye yaptıkları katkılar hem de çalışmalarıma destekleri için teşekkür ederim. Özellikle Dr. Salim OĞUR'a RF tasarım ve demet ölçüm çalışmalarında yaptığı çok değerli katkılar, Sinan ÖZ, Dr. Hüseyin YILDIZ ve Aydın ÖZBEY'e mekanik modelleme ve enstrümantasyon çalışmalarındaki katkıları, Ezgi ERGENLİK ve Ezgi SUNAR'a demet özelliklerinin belirlenmesi konusunda yaptıkları katkılar nedeniyle teşekkür ederim.

SPP'nin hayata geçmesinde en önemli bileşenlerden biri olan RF güç kaynağının üretimi ile ilgili çalışmaları için Fatih AHISKA ve Cengiz ATMACA'ya teşekkürlerimi sunarım.

SPP için karar alma süreçlerinde yaptığı bilgi paylaşımlarının yanı sıra bu tezde gösterilen demet dinamiği hesaplarının gerçekleştirilebilmesi için her zaman destek olan Dr. Veli YILDIZ'a çok teşekkür ederim.

SPP kapsamında tasarlanan parçaların üretilmesinde büyük bir özveri gösteren, işini en iyi ve doğru şekilde yapan, bir dost olarak gördüğüm Kemal DOĞAN'a ve TAEK-RHTDB Mekanik Atölye ve Ağaç İşleri çalışanlarına teşekkürlerimi sunarım.

Hızlandırıcı fiziğiyle beni tanıştıran ve bu alana yönelmemi sağlayarak desteğini hiç bir zaman esirgemeyen Dr. Öznur METE'ye teşekkür ederim.

Tezin konusu olan çalışmalar sürecinde SPP üyesi olmamalarına rağmen desteklerini esirgemeyen ve her zaman yanımda olan arkadaşlarım Ümit KAYA, Dr. Cafer BAYAR ve Dr. Hakan ÇETİNKAYA'a teşekkür ederim.

Bu çalışma TAEK A1.H4.P1 kodlu proje kapsamında gerçekleştirilmiştir. Böyle bir projenin hayata geçmesini sağlayan TAEK'e teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim hayatım boyunca benden sabır ve desteklerini eksik etmeyen aileme, tezimi yazmamda beni teşvik eden ve yardımcı olan Merih KIRCAL'a sonsuz teşekkür ederim.

Görkem TÜREMEN
Ankara, Haziran 2019

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAY SAYFASI

ETİK . . . . . **i**

ÖZET . . . . . **ii**

ABSTRACT . . . . . **iii**

TEŞEKKÜR . . . . . **iv**

SİMGE ve KISALTMALAR DİZİNİ . . . . . **viii**

ŞEKİLLER DİZİNİ . . . . . **xi**

ÇİZELGELER DİZİNİ . . . . . **xvii**

1. GİRİŞ **1**

1.1 Türkiye'deki Parçacık Hızlandırıcı Çalışmaları **1**

1.2 TAEK SANAEM (RHTDB) Prometheus Projesi (SPP) **2**

2. SPP DEMET HATTI **4**

2.1 İyon Kaynağı **6**

2.1.1 İyon kaynağı tasarımı **6**

2.1.2 İyon kaynağı üretimi ve birleştirilmesi **14**

2.1.3 İyon kaynağı testleri **15**

2.2 Düşük Enerjili Demet Aktarım (DEDA) Hattı **22**

2.2.1 DEDA hattı tasarımı **22**

2.2.2 DEDA hattı mıknatıslarının üretimi ve birleştirilmesi **31**

2.2.3 DEDA hattı bileşenlerinin testleri **32**

2.2.4 DEDA hattı demet tanılama ölçümleri **35**

2.3 Radyo Frekans Dörtkutuplusu (RFQ) **42**

2.3.1 RFQ tasarımı **52**

2.3.2 RFQ kanatlarının üretimi ve birleştirilmesi **67**

2.3.3 RFQ kovuğunun testleri **74**

3. SPP RF GÜÇ KAYNAĞI VE RF İLETİM HATTI **87**

3.1 RF Güç Kaynağı **87**

3.1.1 SPP RF güç kaynağı **90**

3.1.2 RF güç kaynağının geliştirilmesi ve testleri **91**

3.2 RF İletim Hattı 96
3.2.1 SPP RF iletim hattı 98
3.2.2 RF iletim hattının tasarlanması ve testleri 100
4. SİSTEMİN DEVREYE ALINMASI 111
4.1 RFQ Demet Kabulüne Demet Eşleme 111
4.2 Yüksek Güç RF Testleri 113
4.3 RFQ Kovuğu RF Tavlama 116
4.4 RFQ Sonrası Enerji Ölçümü 121
5. SONUÇ VE TARTIŞMA 123
KAYNAKLAR 125
EK 1 SPP Kontrol Sistemi 131
ÖZGEÇMİŞ 133

SİMGE ve KISALTMALAR DİZİNİ

n_i	Yüklü parçacık yoğunluğu
n_e	Elektron parçacık yoğunluğu
n_n	Yüksüz parçacık yoğunluğu
q	Parçacık yük seviyesi
ε_0	Vakum dielektrik katsayısı
u	Atomik kütle
d	Elektrotlar arası mesafe
E_s	Sökülen demet enerjisi
a_p	Plazma elektrot açıklığı
m_i	İyon kütlesi
I_i	İyon akımı
ε_{geo}	Enine demet yayınımı (geometrik)
ε_n	Enine demet yayınımı (normalize)
ω	Açısal frekans
a	Kanatların demet eksenine en yakın mesafesi
m	Kiplenim katsayısı
ma	Kanatların demet eksenine en uzak mesafesi
r_0	Komşu kanatlar arasındaki mesafe
β_g	Göreli hız
β_c	Bağlaşım sabiti
α	Twiss alfa
β	Twiss beta
λ	RF dalga boyu
ϕ_s	Eşzamanlı parçacık fazı
$U_{r,\theta,z}$	Silindirik koordinatlarda elektrik potansiyeli
$I_{2n}(x)$	2n'inci dereceden değiştirilmiş Bessel fonksiyonu
k	Dalga sayısı

V_0	Kanat gerilimi
V	Kanatlararası gerilim farkı
V_d	Elektrotlar arası gerilim farkı
A_{10}	Hızlandırma verimliliği
X	Odaklama verimliliği
B	Odaklama gücü
ρ	Kanat eğrilik yarıçapı
f	RF salınım frekansı
Q_0	Yüksüz kovuk kalite etkeni
Q_L	Yüklü kovuk kalite etkeni
U_s	Depolanan enerji
P_d	Harcanan güç
E_0	En yüksek elektrik alan
H_0	En yüksek manyetik alan
η	RF verimi
G	RF kazancı
$Z_{esmerkezli}$	Eşmerkezli hat tipik empedans
$P_{esmerkezli(ort)}$	Eşmerkezli hat (ortalama) güç taşıma kapasitesi
f_c	RF kesilim frekansı
Z_0	Boş uzayın empedansı
$P_{wg(ort)}$	Dikdörtgensel dalga kılavuzu (ortalama) güç taşıma kapasitesi

Kısaltmalar

CAD	Computer Aided Design
CERN	Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi
CMM	Coordinate Measuring Machine
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
DC	Doğru Akım
DE	Demet Ekranı
DEDA	Düşük Enerjili Demet Taşıma
DTK	Demet Tanılama Kutusu

DTL	Drift Tube Linac
FB	Faraday Bardağı
FET	Field Effect Transistor
FETS	Front End Test Stand
ICP	Inductively Coupled Plazma
IOT	Inductive Output Tube
JPARC	Japan Proton Accelerator Research Complex
LANL	Los Alamos National Laboratory
LDMOS	Laterally Diffused Metal Oxide Semiconductor
LEBT	Low Energy Beam Transport
LINAC4	Linear Accelerator 4
OSB	Organize Sanayi Bölgesi
OSTİM	Ortadoğu Sanayi ve Ticaret Merkezi
PFN	Pulse Forming Network
PHT	Proton Hızlandırıcı Tesisi
PLC	Programmable Logic Controller
PLL	Phase-Locked Loop
PXIE	PIP-II Injector Experiment
RF	Radyo Frekansı
RFQ	Radio Frequency Quadrupole
RHTDB	Radyasyon ve Hızlandırıcı Teknolojileri Dairesi Başkanlığı
SANAEM	Sarayköy Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi
SM	Sarmal Mıknatıs
STL	Standard Triangle Language
SPP	SANAEM Prometheus Projesi
TAEK	Türkiye Atom Enerjisi Kurumu
TARLA	Turkish Accelerator and Radiation Laboratory
THM	Türk Hızlandırıcı Merkezi
TY	Tam Yükseklik
VNA	Vector Network Analyzer
YY	Yarım Yükseklik

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 SPP demet hattı bileşenleri 5
Şekil 2.2 SPP demet hattı kurulumu 5
Şekil 2.3 Farklı akım yoğunlukları ve sökme elektrodu mesafesi için enine yayınım (norm-rms) değişimi 12
Şekil 2.4 Farklı akım yoğunlukları ve sökme elektrodu mesafesi için demet akımı değişimi 12
Şekil 2.5 İyon kaynağı demet sökme sisteminin benzetimi. Sol: demet sökme bölgesi, sağ: sökülen demetin y-y′ faz uzayı 13
Şekil 2.6 Ayarlanabilir sökme elektrodu 14
Şekil 2.7 SPP iyon kaynağı ve bileşenleri 15
Şekil 2.8 ICP iyon kaynağı H_2 gazı besleme sistemi 17
Şekil 2.9 Sol: Hidrojen plazması üretimi, sağ: RF ve yüksek gerilim güç kaynakları 17
Şekil 2.10 PFN sisteminin tasarımı ve benzetimi 19
Şekil 2.11 PFN sistemi ve bileşenleri 20
Şekil 2.12 PFN ile elde edilmiş 120 μs uzunluğundaki 20 kV'luk gerilim sinyali . 20
Şekil 2.13 Sürekli (sol) ve atmalı (sağ) plazma için oluşan sıcaklıklar 21
Şekil 2.14 10 ms uzunluğundaki atmalı yapıda 20 keV proton demet sinyali 21
Şekil 2.15 Sarmal mıknatısların manyetik alan benzetimleri. Sol: POISSON, sağ: OPERA 24
Şekil 2.16 Yönlendirici mıknatısların manyetik alan benzetimleri. Sol: POISSON, sağ: OPERA 25
Şekil 2.17 Sol: İyon kaynağı çıkışı, orta: DEDA hattı boyunca demet boyutu (rms), sağ: RFQ girişi (mor: RFQ demet kabulu) 26
Şekil 2.18 DEDA hattında H^+ harici iyonların davranışı. Sol: İyon kaynağı çıkışı, orta: SM1 çıkışı, sağ: RFQ girişi. Sarı: H^+, yeşil: H_2^+, mor: H_3^+ 27
Şekil 2.19 Yönlendirici mıknatısların demet dinamiği benzetimleri 27
Şekil 2.20 FB1'in benzetimi. Siyah: 20 keV proton demeti, yeşil ve kahverengi: ikincil elektronlar (sırasıyla, merkezde ve köşede oluşabilecek), kırmızı: elektrik alan çizgileri 29

Şekil 2.21 RFQ önü demet tanılama kutusu 29
Şekil 2.22 Akım trafosunun temel elemanları. Sol: birleştirilmiş kutu, sağ: trafolar ve sinyal yükseltici devre 30
Şekil 2.23 Akım trafosunun kalibrasyonu. Sol: kalibrasyon düzeneği, sağ: kalibrasyon eğrisi 31
Şekil 2.24 Sarmal mıknatıs kasnağının üretimi 31
Şekil 2.25 Sarmal mıknatısların demet hattına yerleştirilmesi 32
Şekil 2.26 Yönlendirici mıknatısların demet hattına yerleştirilmesi 33
Şekil 2.27 Sarmal mıknatısların manyetik alan ölçümleri 34
Şekil 2.28 Sarmal mıknatısların benzetim ve ölçümlerinin karşılaştırılması 34
Şekil 2.29 Yönlendirici mıknatısların manyetik alan testleri 35
Şekil 2.30 FB1 demet akımı ölçümü (0.8 μA/div) 36
Şekil 2.31 FB2 demet akımı ölçümü (4.0 μA/div). Yeşil: FB2, sarı: Trafo-1, mavi: Trafo-2 37
Şekil 2.32 DE1 (sol) ve DE2 (sağ) üzerinden alınan demet görüntüleri. Demet çapı ölçümleri metin içinde açıklanmıştır 38
Şekil 2.33 Farklı SM1 akımları için DE1 üzerinde ölçülen demet boyutları 38
Şekil 2.34 DE2 üzerinde ölçülen demetin enine profili. Sol: x ekseni, sağ: y ekseni 39
Şekil 2.35 Tuzluk yöntemi ile enine yayınım ölçüm düzeneği 39
Şekil 2.36 Tuzluk plakası (sol) ve delikleri (sağ) 40
Şekil 2.37 Tuzluk düzeneği ile alınan demet görüntüsü 41
Şekil 2.38 Tuzluk düzeneği ile ölçülen enine demet özellikleri 41
Şekil 2.39 RFQ kovuğu ve kanat yapısı (Crandall vd. 1979) 43
Şekil 2.40 RF dört-kutuplu yapısı (Wangler 2008) 44
Şekil 2.41 RFQ kovuğunda elektrotların yerleşimi (Vretenar 2009). Kırmızı oklar elektrik alan yönlerini göstermektedir 45
Şekil 2.42 RFQ kovuğunun boyuna yapısı (sol) ve elektrik alan vektörleri (sağ) (Weiss 1987),(Wangler 2008) 45
Şekil 2.43 TE_{210} ve TE_{110} kovuk kiplerinin kovuk içindeki davranışı (Weiss 1987) Sol: boş kovuk, sağ: 4-kanatlı kovuk 49
Şekil 2.44 RFQ kovuğunun eşdeğer devresi (Weiss 1987) 50

Şekil 2.45 RFQ kanat-altı bölgesi için eşdeğer devresi (Weiss 1987) 51
Şekil 2.46 2-boyutlu kovuk tasarımı 54
Şekil 2.47 2-boyutlu RF kovuk parametreleri (SUPERFISH simgeleri) 55
Şekil 2.48 Kovuk boyunca elektrik alan dağılımı (üst), elektrik (sol) ve manyetik (sağ) alan benzetimleri (alt) 57
Şekil 2.49 350 ve 340 MHz'de salınan dört kutuplu (sol) ve iki kutuplu (sağ) kovuk kipleri 58
Şekil 2.50 Kovuğun kip ayrışması için teorik ve benzetim karşılaştırması 58
Şekil 2.51 LANL dört bölge yöntemine göre RFQ bölgeleri (Wangler 2008) 60
Şekil 2.52 RFQ boyunca parametrelerin değişimi 61
Şekil 2.53 LIDOS 2-terimli demet dinamiği 61
Şekil 2.54 LIDOS demet dinamiği 62
Şekil 2.55 TOUTATIS demet dinamiği 63
Şekil 2.56 CST PS demet dinamiği 64
Şekil 2.57 RFQ giriş değişkenleri için hata taraması 64
Şekil 2.58 Kovuğun 3-boyutlu elektromanyetik benzetimi sonucu elde edilen elektrik alan dağılımı 66
Şekil 2.59 Kovuğun farklı konumlarındaki boyuna elektrik alan dağılımları 67
Şekil 2.60 RF ayarlayıcıların kovuk salınım frekansı ve kalite etkenine etkisi . . . 68
Şekil 2.61 Kanatların üretimi. Üst: RF ayarlayıcı ve vakum deliklerinin işlenmesi, alt: kanat-altı giriş ve çıkış bölgelerinin işlenmesi 68
Şekil 2.62 Üst: üretilen kanatlar, alt: kanat üretim hataları (Yeşil: ideal kanat profili, Kırmızı: kanat hataları) 69
Şekil 2.63 Bakır kaplanmış büyük kanat 71
Şekil 2.64 Bakır kaplama kalınlık ölçümü 71
Şekil 2.65 CMM masasında RFQ kanatlarının birleştirilmesi. Üst: Cu-Be şeritler ve pimler ile birleştirilmiş 3 kanat, alt: tüm kanatların birleştirilmesi ve hizalama ölçümleri 72
Şekil 2.66 RFQ kanatlarının birleştirme hataları (ölçüler: μm) 72
Şekil 2.67 Sol: Parçaları birleştirilmiş RF ayarlayıcı, sağ: Kaplama öncesi RF ayarlayıcı ve Be-Cu şeritler 73

Şekil 2.68 Birleştirilmiş RFQ'nun iç görünümü 74
Şekil 2.69 Kovuğun ölçülen kip davranışı 75
Şekil 2.70 3 dB yöntemi ile kalite etkeni ölçümü. Üst: RF bağdaştırıcı ve RF kapıcı antenlerin empedansı, alt: S21 parametresi ile kalite etkeninin ölçülmesi 77
Şekil 2.71 RF sönme zamanı yöntemi ile kalite etkeni ölçümü 78
Şekil 2.72 Kovuğun salınım frekans ölçümü 80
Şekil 2.73 Boncuk-çekme deneyinin şematik gösterimi 82
Şekil 2.74 Boncuk-çekme deney düzeneği 82
Şekil 2.75 Boncuk-çekme deneyi için yazılan programın kullanıcı arayüzü 83
Şekil 2.76 Boncuk-çekme deneyi öncesi (kırmızı) ve sonrası (yeşil) elde edilen kovuk boyunca elektrik alan profili 84
Şekil 2.77 Kanat sıcaklıklarının RF salınım frekansına etkisi 85
Şekil 2.78 Su soğutma sisteminin RF salınım frekansına etkisi. 133. dakikada sarmal mıknatıslara akım verilmiştir 86
Şekil 3.1 RF güç kaynakları. Kırmızı: tepe RF güç, mavi: sürekli RF güç (Montesinos 2013) 88
Şekil 3.2 Tetrode RF tüpünün şematik gösterimi (Montesinos 2013) 89
Şekil 3.3 RF güç için melez yükseltme yöntemi 90
Şekil 3.4 RF ön-yükseltecin şematik gösterimi 91
Şekil 3.5 Sol: RF güç transistörü, orta: yükselteç devresi, sağ: tetrode RF vakum tüpü 92
Şekil 3.6 RF ön-yükselteç birimi 93
Şekil 3.7 RF ön-yükselteç birimi çıkış gücü ve yükselme-zamanı ölçümleri . . . 93
Şekil 3.8 Mikroşerit türü RF dolaştırıcı birimi 93
Şekil 3.9 Tetrode güç kaynağı ve hava soğutma sistemi panoları 94
Şekil 3.10 RF güç kaynağı panoları. Sağda, Tetrode güç kaynağı çıkışı ve TEM-TE dönüştürücü görülebilir 94
Şekil 3.11 RF güç kaynağı hızlı-kesme sistem şeması 95
Şekil 3.12 Eşmerkezli hat (sol) ve dalga kılavuzu (sağ) (Cooper ve Carter 2005) . 96
Şekil 3.13 RF iletim hattının şematik gösterimi 98
Şekil 3.14 RF iletim hattının 3-boyutlu çizimi 99

Şekil 3.15 RF iletim hattının CST MWS ile benzetimi 99
Şekil 3.16 TEM-TE dönüştürücü 101
Şekil 3.17 TEM-TE dönüştürücünün S11 parametresi ölçüm kurulumu 102
Şekil 3.18 TEM-TE dönüştürücünün ölçülen S11 parametresi 102
Şekil 3.19 Eşmerkezli düşürücülerin ölçümleri 103
Şekil 3.20 Eşmerkezli düşürücülerin S-parametresi ölçüm sonuçları 103
Şekil 3.21 YY-TY dikdörtgensel dalga kılavuzu dönüştürücüsü 104
Şekil 3.22 NG-1600 ferrit malzeme 105
Şekil 3.23 RF dolaştırıcının elektrik alan dağılımı (üst) ve S-parametreleri (alt) . . 106
Şekil 3.24 RF dolaştırıcının CAD çizimi 106
Şekil 3.25 RF dolaştırıcı ve çevre bileşenlerinin görünümü 107
Şekil 3.26 TE-TEM dönüştürücü 108
Şekil 3.27 TE-TEM dönüştürücüsünün S11 ölçümü 108
Şekil 3.28 RF çöpü ve 90 derece dalga kılavuzu 109
Şekil 3.29 Dolaştırıcısız RF iletim hattı için S-parametresi ölçüm kurulumu 110
Şekil 3.30 Dolaştırıcısız (sol) ve dolaştırıcılı (sağ) RF iletim hattı için S21 ölçümü 110
Şekil 4.1 RFQ girişi için x-x′ faz uzayı. Kırmızı: RFQ demet kabulu, yeşil: eşlenen demet 112
Şekil 4.2 DEDA hattında benzetim ve ölçümlerin karşılaştırılması 112
Şekil 4.3 DEDA hattı rms demet zarfı 113
Şekil 4.4 Katı-hal yükselteci için çıkış gücü ölçümleri 114
Şekil 4.5 Sol: Tetrode güç kaynağının çıkış gücü ve RF kazancı, sağ: Ölçülen ve hesaplanan Tetrode güç kaynağını çıkış güçleri 115
Şekil 4.6 RF iletim hattı sonunda RF güç testleri için kurulum 115
Şekil 4.7 RF iletim hattı sonunda alınan RF güç ölçümleri 116
Şekil 4.8 RFQ'nun RF ile tavlanması. Mavi: Gelen güç, pembe: yansıyan güç, sarı: kovuk içi 117
Şekil 4.9 Adım motoru kontrollü RF ayarlayıcı 118
Şekil 4.10 RF tavlama süreçlerinde kovuk vakum seviyeleri 119
Şekil 4.11 RFQ kanatlar-arası gerilim ölçümü düzeneği 120
Şekil 4.12 YS-Ge algıcı ile alınan ölçümler 120

Şekil 4.13 RFQ sonrasındaki iki-kutuplu mıknatıs ve FB3 için demet dinamiği benzetimi 121

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 İyon kaynağı için gereksinimler ve kısıtlamalar 7
Çizelge 2.2 İyon kaynağı parametreleri 13
Çizelge 2.3 DEDA hattı için gereksinimler ve kısıtlamalar 23
Çizelge 2.4 Sarmal mıknatıs parametreleri 24
Çizelge 2.5 Yönlendirici mıknatıs parametreleri 25
Çizelge 2.6 Tuzluk yöntemi ile ölçülen Twiss parametreleri 41
Çizelge 2.7 RFQ kovuğu için gereksinimler ve kısıtlamalar 52
Çizelge 2.8 2-boyutlu geometrik tasarım parametreleri 55
Çizelge 2.9 2-boyutlu RF kovuk parametreleri 56
Çizelge 2.10 Kovuk için SUPERFISH ve CST MWS benzetim sonuçları 58
Çizelge 2.11 RFQ demet kabulü için hesaplanan Twiss parametreleri 60
Çizelge 2.12 Kanat açıklığı için hata taraması 70
Çizelge 2.13 Ölçülen RF kovuk kipleri 76
Çizelge 2.14 Boncuk-çekme deneyi ile belirlenen RF ayarlayıcı konumları 84
Çizelge 4.1 Tetrode güç kaynağı test parametreleri 114

1. GİRİŞ

Ülkemizin yüksek teknoloji ürünlerinin geliştirilmesi ve üretimi konusundaki eksikliği göz önüne alındığında, parçacık hızlandırıcı teknolojisi gibi bir çok alt bilim dalını kapsayan öncü bir konuda yapılan çalışmalar oldukça değerlidir. Günümüzde, gelişmiş tüm ülkelerde, bir çok farklı alanda çeşitli amaçlar için kullanılan parçacık hızlandırıcılar mevcuttur. Bu hızlandırıcılara ve bu alanda yetişmiş yeterli insan sayısına sahip olmadan bilim ve teknoloji alanında kayda değer faaliyetler gerçekleştirebilmek imkansızdır.

Bu tez ile, proton hızlandırıcı teknolojisi alanında ülkemizde gerçekleştirilen ilk çalışmalar özetlenmiştir. Tezin konusu olan proton hızlandırıcısı sisteminin demet hattı ile ilgili tasarım, üretim ve test çalışmaları Bölüm 2'de açıklanmıştır. Proton hızlandırıcı kovuğunu besleyecek olan RF güç kaynağı ve RF iletim hattının tasarım, üretim ve test çalışmaları Bölüm 3'te anlatılmıştır. Proton hızlandırıcı sisteminin devreye alma (commissioning) süreçlerinde gerçekleştirilen ölçümler ve hesaplar ile ilgili çalışmalar Bölüm 4'te verilmiştir. Bölüm 5'te ise tez çalışmaları ile ilgili sonuçlar tartışılmıştır.

1.1 Türkiye'deki Parçacık Hızlandırıcı Çalışmaları

Ülkemizdeki parçacık hızlandırıcı çalışmalarına, 1997'de fizibilite çalışmaları başlayan Türk Hızlandırıcı Kompleksi (TAC) projesi ile ilk adım atılmıştır. 2002 yılında proje, "Sinkrotron Işınımı ve Serbest Elektron Lazeri Üretimi ve Kullanımı için Genel Tasarımı" ve "Türk Hızlandırıcı Kompleksi (TAC) Genel Tasarımı" isimli iki ayrı projeye bölünmüştür. 2006-2015 yılları arasında Devlet Planlama Teşkilatı'nın desteği ile Ankara Üniversitesi koordinatörlüğünde yürütülen, yeni adıyla Türk Hızlandırıcı Merkezi (THM) projesi boyunca edinilen bilgi birikimi ve insan gücünün ülkemiz için etkin kullanılamaması ve bu alanda ülkemizde yeterli iş imkanının bulunmaması, yetişmiş bir çok araştırmacının bu alandan uzaklaşmalarına veya ülke dışına çıkmalarına sebep olmuştur. THM projesi, 2015 yılında, Kalkınma Bakanlığı tarafından desteklenen ve bir ithal süpe-

riletken elektron hızlandırıcısı (40 MeV) içeren Turkish Accelerator and Radiation Laboratory (TARLA) tesisinin kurulumuna indirgenmiştir. Günümüzde, TARLA ile ilgili kurulum çalışmaları sürmektedir (Anonim 2019).

Ülkemizde, proton hızlandırıcısı ile ilgili çalışmalar Türkiye Atom Enerjisi Kurumu (TAEK) bünyesinde devam etmektedir. TAEK Radyasyon ve Hızlandırıcı Teknolojileri Dairesi Başkanlığı (RHTDB) bünyesinde bulunan 30 MeV'lik ithal bir proton hızlandırıcısı bulunduran Proton Hızlandırıcı Tesisi (PHT) 2012 yılında kurulmuştur. TAEK PHT'de hem sağlık sektörü için radyofarmasötikler üretilirken hem de Ar-Ge faaliyetleri yürütülmektedir (Anonim 2012). Ayrıca, TAEK RHTDB'de hızlandırıcı teknolojileri alanında yürütülen ve bu tezin ana konusu olan, yerli bir proton hızlandırıcısının tasarım, üretim ve testlerini içeren çalışmalar sürmektedir.

2015 yılında Türkiye'nin Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi'ne (CERN) ortak üye olmasıyla, CERN ile ülkemiz arasındaki teknoloji transferi imkanlarının artması, yeterli olmasa da önemli bir adımdır. Ülkemizde bu alanda daha fazla çalışmanın gerçekleştirilerek, bu imkanlardan daha etkin yararlanılabilmesi için ulusal bir yol haritasının belirlenmesine ihtiyaç olduğu açıktır.

1.2 TAEK SANAEM (RHTDB) Prometheus Projesi (SPP)

TAEK RHTDB (eski adıyla SANAEM (Sarayköy Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi))'de 2012 yılında "1-5 MeV RF Kovuklu Proton Hızlandırıcısı Yapımı" (Proje kodu: A1.H4.P1) isimli bir proje başlatılmıştır. Bu projenin amaçları; 1) Yerli kaynaklarla en az 1 MeV çıkış enerjili bir RF kovuklu proton hızlandırıcısının tasarımını, üretimini ve testlerini gerçekleştirmek; 2) Parçacık hızlandırıcı teknolojisi alanında genç araştırmacıların yetişmesini sağlamak; 3) Yerli sanayinin hızlandırıcı teknolojisi alanındaki bilgi birikimini arttırmak olarak sıralanabilir. Projenin TAEK, üniversiteler ve yurtdışı danışmanlardan oluşan 15 kişilik proje ekibi ile birlikte, 105 m^2'lik Hızlandırıcı Teknolojileri Birimi (HTB) laboratuvarında gerçekleştirilmesi planlanmıştır. Proje üye-

leri tarafından proje çıktılarının yurtiçi ve yurtdışında daha rahat tanıtılabilmesi için proje adı yerine SPP (SANAEM Prometheus Projesi) kullanılmıştır. SPP sayesinde doğrudan veya dolaylı olarak hızlandırıcı teknolojisi alanında bir çok akademik çalışma yapılmıştır. Bunlardan en önemlisi, bir proton hızlandırıcısı tasarımı ve demet dinamiği programı olan DEMIRCI'nin (Yasatekin vd. 2015) oluşturulmasıdır. SPP ile yazılım alanındaki çıktıların yanında, hızlandırıcı ve RF teknolojisi bileşenlerinin tasarımı, üretimi ve testleri konusunda ülkemize bir çok deneyim kazandırılmıştır. Bu bilgi birikiminin özellikle deneysel çalışmalara dayanması ayrıca önemlidir.

2. SPP DEMET HATTI

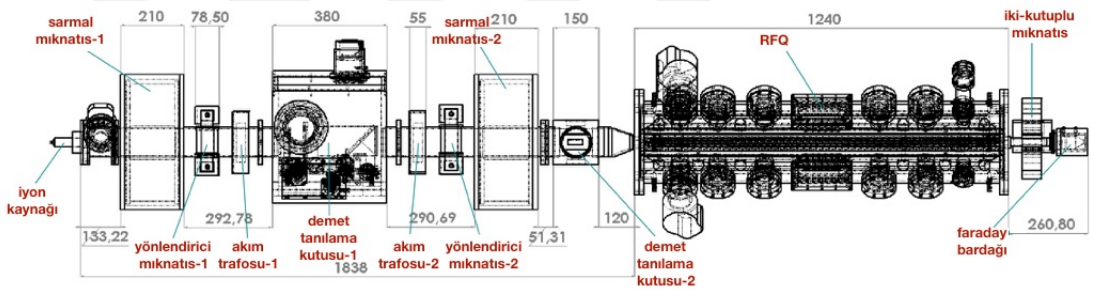
Bölüm 1.2'de açıklanan SPP amaçlarına ulaşılabilmesi için gerekli olan, hızlandırıcı ve diğer demet hattı bileşenlerinin tanımlanması, tasarım, üretim ve test süreçleri bu bölümde anlatılacaktır. SPP demet hattının tasarımı için öncelikle, proje hedefleri uyarınca proton demet enerjisini 1 MeV'in üzerine çıkartacak RF kovuklu hızlandırıcı türü seçilmiştir. Bunun için halihazırda kurulmuş (PXIE (Solyak vd. 2010), JPARC (Sun vd. 2012), vb.) ve kurulmakta olan (LINAC4 (Rossi vd. 2010), FETS (Letchford 2012), vb.) proton hızlandırıcı sistemleri üzerine ayrıntılı araştırmalar yapılmıştır. Doğrusal hızlandırıcı kovukları arasında yapılan araştırmalar ve güncel doğrusal hızlandırıcı teknolojisi incelendiğinde kullanılması en uygun RF kovuk türü, radyo frekans dörtkutuplu (RFQ) kovuğu olarak tespit edilmiştir. Bunun temel nedeni, RFQ'nun sürekli yapıdaki yüksek akımlı demeti RF ile hızlandırabilen tek iyon hızlandırıcısı olmasıdır. Bu sayede iyon kaynağından çıkan proton demetinin RF kovuğa girmeden önce bir bohçalayıcı kovuk (buncher cavity) ile bohçalanmasına ihtiyaç duyulmayacaktır. RFQ kovuğunun önemli üstünlüklerine karşın tasarım, üretim ve devreye alma süreçlerinin zorluğu da bilenen bir gerçektir. Tamamen yerli kaynaklarla üretilecek bir RF hızlandırıcı kovuğunun ülkemizde hızlandırıcı teknolojisi alanındaki bilgi birikimine yapacağı katkı düşünüldüğünde, bu zorlukların aşılabilmesi için gerekli motivasyon sağlanmıştır. SPP RFQ kovuğunun tasarım, üretim ve test süreçleri ile ilgili ayrıntılı bilgiler Bölüm 2.3'te verilmiştir.

Proje isterleri için gerekli olan RF hızlandırıcı kovuğu türünün seçilmesiyle birlikte kavramsal olarak tasarlanan SPP demet hattı temelde üç ana kısımdan oluşmaktadır; iyon kaynağı, DEDA hattı ve RF hızlandırıcı kovuk. Toplamda yaklaşık 3.5 m uzunluğundaki demet hattının bileşenleri; protonların üretildiği, hızlandırıldığı (DC) ve demet haline getirildiği bir iyon kaynağı, oluşan proton demetinin hızlandırıcı (RF) kovuğa istenilen yayınımda girilmesini sağlayan iki adet sarmal mıknatıs, demetin hızlandırıcı kovuğa hizalanmasını sağlayan iki adet yönlendirici mıknatıs, demetin çeşitli özelliklerini (akım, enine (x,y) profil, enine yayınım) ölçmek için kullanılan demet tanılama araçları ve demeti keV mertebesinden MeV mertebesine hızlandıracak olan RF kovuk olarak sıralanabilir.

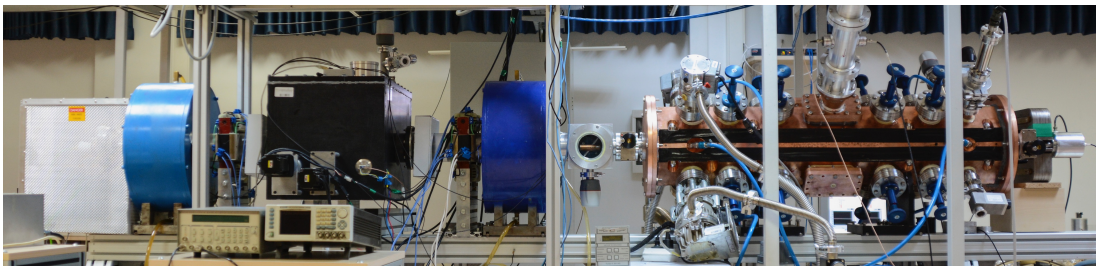
Tüm bu bileşenlerin gereksinim ve kısıtlamalarının belirlenmesinde RF hızlandırıcı kovuğunun ve laboratuvarın sahip olduğu malzemelerin önemli etkisi olmuştur.

SPP demet hattı bileşenleri tasarlanırken, proje hedeflerine yönelik isterlerin sağlanması ile birlikte bileşenlerin üretim maliyetlerinin mümkün olduğunca düşük tutulması ve yerlileştirilmesi amaçlanmıştır. Bu nedenle demet hattı bileşenlerinin tasarımında yerli sanayide üretilebilirlik ve maliyet önemli etkenler olmuştur.

Bu bölümde bahsedilecek çalışmalar sonucunda, SPP demet hattı bileşenleri şekil 2.1'de gösterildiği şekilde tasarlanmış ve tamamen yerli sanayide üretilerek şekil 2.2'de gösterildiği gibi demet hattı üzerine kurulmuştur. Burada demet yönü soldan sağa doğrudur.



Şekil 2.1 SPP demet hattı bileşenleri



Şekil 2.2 SPP demet hattı kurulumu

2.1 İyon Kaynağı

İyon kaynakları, hedeflenen uygulama için istenilen iyon türüne, enerjisine ve akımına göre farklı özellikteki iyon demetlerinin elde edilmesi için kullanılan araçlardır. İyon kaynakları uzay itki sistemlerinden, endüstriyel iyon aşılama, nükleer uygulamalar ve hızlandırıcılara kadar bir çok alanda kullanılmaktadır. İyon hızlandırıcılarının başlangıç noktası olan iyon kaynakları, arkasından gelen tüm sistemlerin besleyicisi olduğundan son derece önemli bir bileşendir. Bu bölümde SPP için tasarlanan, üretilen ve testleri gerçekleştirilen iyon kaynağı ile ilgili ayrıntılı bilgiler verilecektir.

2.1.1 İyon kaynağı tasarımı

Temel olarak iyon kaynaklarında, istenilen iyonların üretilebilmesi için uygun gaz türü ve basınç ortamında plazmanın oluşturulması gerekmektedir. Plazmanın oluşturulabilmesi için istenen iyon türüne uygun gaz, bir vakum odası içerisinde tutulur. Gazın plazma haline geçirilmesi için çeşitli uyaranlar kullanılabilir. Bu uyaranlardan bazıları; elektron bombardımanı, ark boşalması, lazer, mikrodalga, RF, vb. olarak sıralanabilir. Uyaranlar aracılığıyla oluşturulan plazma (iyon, elektron ve yüksüz atom karışımı) ortamı içinden, istenilen iyon türünün sökülerek demet haline getirilebilmesi için yüksek gerilim ile beslenen bir elektrot sistemine ihtiyaç vardır. Buna yönelik olarak farklı geometri, sayı ve özelliklerde elektrot sistemi tasarlanabilir.

SPP demet hattında kullanılabilecek iyon kaynağı çeşitleri, laboratuvarda var olan güç kaynakları ve proje isterleri düşünüldüğünde, RF sürümlü iyon kaynaklarına yönelinmiştir. Bunun için iki ayrı RF sürümlü iyon kaynağı türü üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bunlar, dahili ve harici RF antenli iyon kaynakları olarak gruplandırılabilir. İlk olarak dahili RF antenli iyon kaynakları üzerinde tasarım, üretim ve testler gerçekleştirilmiştir. Üretilen dahili RF antenli (multicusp türü) iyon kaynağı ile ilgili çalışmalara (Turemen vd. 2014)'ten ulaşılabilir. SPP demet hattında ise, daha düşük

güç kaynağı gereksinimleri bulunan harici RF antenli iyon kaynağı kullanılmıştır. Harici anten sayesinde daha küçük çaplı bir vakum odası ve daha düşük RF güç seviyelerinde çalışma imkanı oluşmuştur. Bir diğer seçim nedeni ise, harici RF antenin yüksek gerilim izolasyonunun sağlanmasındaki kolaylıktır. Bu tip iyon kaynaklarına, plazmanın indüktif olarak olarak uyarılması nedeniyle İndüktif Bağlaşımlı Plazma (Inductively Coupled Plazma (ICP)) iyon kaynakları denir. SPP demet hattı için ICP iyon kaynağının tasarımı bu bölümde anlatılacaktır.

2.1.1.1 İyon kaynağı için gereksinimler ve kısıtlamalar

Demet hattını besleyen proton demetini sağlayacak olan iyon kaynağının tasarlanabilmesi için Bölüm 2.3.1.3'te söz edilen RFQ girişindeki demet özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. Kanat-ucu tasarımı ile belirlenen RFQ girişindeki demet enerjisi, akımı, profili ve yayınımı, iyon kaynağı tasarımı için hedef değişkenleri olarak ele alınmıştır. Bunun yanı sıra, iyon kaynağından çıkacak proton demetinin zaman yapısı ise RFQ'yu besleyen RF güç kaynağının zaman yapısına bağlı olarak belirlenmiştir. Bunun nedeni, iyon kaynağından üretilecek demetin zaman yapısının, RFQ kovuğunun RF zaman yapısı ile uyumlu olması gerekliliğidir. Bu sayede demet, sadece hızlandırıcı kovuk RF ile yüklü iken kovuk içinde bulunacak, aksi durumda kovuk kanatlarına çarpması engellenecektir. Tüm bu gereksinimler ve kısıtlamalar göz önüne alındığında iyon kaynağı tasarımı için isterler çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1 İyon kaynağı için gereksinimler ve kısıtlamalar

Değişken	Değer	Birim
Enerji	20	keV
Akım	$<$15	mA
Enine yayınım (toplam-normalize)	$<$1	π.mm.mrad
Atma uzunluğu	$<$100	μs
Tekrarlama frekansı	1	Hz

İyon kaynağı tasarımı için laboratuvarın sahip olduğu malzemeler arasında bulanan 13.56 MHz RF frekansında ve en fazla 1 kW RF güçte çalışabilen RF güç kaynağının (Anonymous 2014i) kısıtlamaları göz önünde tutulmuştur. Plazma odasının üretimi için gerekli olan seramik (Al_2O_3 ya da alumina) ve metal arasındaki bağlantının vakum tutabilecek şekilde ülkemizde kolaylıkla yapılamaması, bu bağlantı için vakum yapıştırıcısının (düşük buhar basınçlı Epoxy, TorrSeal (Anonymous 2013e)) kullanılmasını gerektirmiştir. Bu yapıştırıcının özelliğini kaybetmemesi için yapıştırılan bileşenlerde çıkılabilecek en yüksek sıcaklık $120°C$'dir. Bu durum, plazma odasının sürekli olarak yüksek güçlerde çalıştırılabilmesi için bir kısıtlama getirmiştir.

2.1.1.2 ICP iyon kaynağı

ICP iyon kaynağının tasarımında, RF kovuk için gereken demet özelliklerinin kararlı bir şekilde sağlanması hedeflenmiştir. Bölüm 2.1.1'de de belirtildiği gibi iyon kaynağı; plazma odası ve sökme elektrotlarını içeren iki kısımdan oluşmaktadır. Gereken iyonların üretileceği plazma odası 28 mm çaplı bir seramik (alumina) boruya uygun olarak tasarlanmıştır. 1750°C'ye kadar yüksek sıcaklıklara dayanabilen bu malzeme sayesinde plazma odasının, plazmanın yaratacağı sıcaklığa herhangi bir soğutma (doğal hava akışı haricinde) olmadan dayanabilmesi sağlanmıştır. İyon kaynağından proton demetinin sökülebilmesi için plazma odasında hidrojen plazmasının oluşturulması gerekmektedir. Bu amaçla, plazma odasına hidrojen gazının beslenebilmesi için bir gaz girişi tasarlanmıştır.

Plazma odasından iyonların sökülebilmesi ve istenilen enerjiye çıkarılabilmesi için gereken yüksek gerilimin, plazma odası çıkış bölgesinde sağlanması gereklidir. Bunun için plazma odasına uygun geometride bir plazma elektrodu tasarlanmıştır. Alumina plazma odası ile aluminyum plazma elektrodunun ısıl genleşme katsayılarındaki fark nedeniyle, sıcaklık farklarında oluşacak genleşme ve büzüşmenin dengelenmesi için plazma odasının oturacağı çevreye 20 adet delik açılmıştır (Şekil 2.7). Plazma odasında gereken plazmanın üretilebilmesi için 13.56 MHz'lik RF dalgaları ile beslenen 2.5 sarımlı bir RF

anten tasarlanmıştır. RF anten ile RF güç kaynağı arasında ihtiyaç duyulan empedans eşlemesinin yapılabilmesi için bir empedans eşleyici (Anonymous 2014g) kullanılmıştır.

İyon kaynağının plazma odasında oluşturulacak olan hidrojen plazması içerisinde, hidrojen atomunun oluşturduğu iyonizasyon süreçlerinden bazıları:

$$\begin{aligned} &H_2 + iyonizasyon \rightarrow H_2^+ + e^- \quad , \\ &H_2 + e^- \rightarrow H_2^+ + 2e^- \quad , \\ &H_2^+ + e^- \rightarrow H^+ + H^0 + e^- \quad , \\ &H^0 + e^- \rightarrow H^+ + 2e^- \quad , \\ &H_2^+ + H_2 \rightarrow H_3^+ + H^0 \quad , \\ &H_3^+ + e^- \rightarrow H_2^+ + H^0 + e^- \end{aligned} \tag{2.1}$$

şeklinde sıralanabilir (Mendez vd. 2006). Görüldüğü gibi hidrojen plazmasının içinde elektronların yanı sıra, bir çok farklı hidrojen iyonu oluşabilmektedir. Plazma içinde oluşan elektron, iyon ve yüksüz parçacıkların, parçacık yoğunlukları n_i, n_e, n_n olarak gösterilebilir. Plazma içindeki iyonların yük seviyeleri ise q ile gösterilirse, oluşan iyon ve elektronların oluşturduğu toplam yük:

$$\sum q_j n_j = 0 \tag{2.2}$$

şeklinde yazılabilir. Plazmanın içinde oluşan tüm iyonların tek yüklü olduğu yaklaşımı ile bu duruma yük nötrlüğü denir. Plazma içindeki parçacıklar birbirlerinden etkilenirler ve birlikte hareket etme eğilimindedirler. Bu sayede manyetik kuvvetler yardımıyla plazma istenilen bölgede yoğunlaştırılabilir. İyon kaynaklarında, parçacık yoğunlukları $10^{12}/\text{cm}^3$

mertebesindedir (Brown 2004). Üretilecek plazma yoğunluğunun arttırılarak, sökülebilecek iyon sayısının mümkün olduğunca yüksek tutulması, iyon kaynağından alınabilecek demet akımını arttıracağından önemlidir. Fakat iyon kaynağı çıkış akımını etkileyen geometrik etkenler de vardır.

Hidrojen plazması içinde oluşan protonların plazma odasından sökülebilmesi için uygun elektrot tasarımının yapılması gereklidir. İyon kaynağının iyon sökme elektrotlarının tasarımı, elde edilecek proton demetinin özellikleri (akım, enerji ve yayınım) için büyük önem taşımaktadır. Plazma içindeki parçacıkların oluşturduğu uzay yükü (space charge) kuvvetleri nedeniyle, iyon kaynağından sökülebilecek demet akımı sınırlıdır. Buna göre ulaşılabilecek en fazla akım yoğunluğu Child-Langmuir eşitliği:

$$j = 1.72\sqrt{\frac{q}{u}}\frac{V_d^{3/2}}{d^2} \tag{2.3}$$

ile verilir (Wolf 1995). Burada, en yüksek akım yoğunluğu j [mA/cm^2], atomik kütle u [amu], elektrotlar arasındaki gerilim farkı V_d [kV] ve elektrotlar arası mesafe d [mm] ile gösterilmiştir. Buna göre SPP iyon kaynağı için, 20 kV'luk gerilim farkı ve 15 mm'lik elektrot mesafesi ele alındığında en yüksek akım yoğunluğu 68.4 mA/cm^2 olarak bulunmuştur.

Plazmadan sökülecek demetin enerjisi (E_s) ise, plazma ve sökme elektrotları arasında oluşturulacak potansiyel farkına bağlıdır (Brown 2004):

$$E_s = eqV_d \quad . \tag{2.4}$$

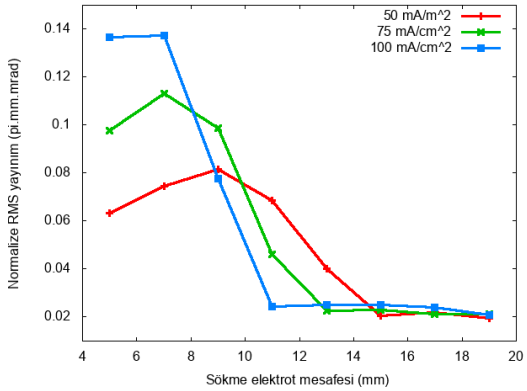
Buna göre, iyon kaynağı çıkışında gereken 20 keV'lik proton enerjisinin sağlanabilmesi için elektrotlar arasında 20 kV'luk bir potansiyel fark yaratılmalıdır. Teorik olarak, plazma elektrot açıklığı a_p, vakum dielektrik sabiti ε_0 ve iyon kütlesi m_i olmak üzere, silindirik simetrik bir demet sökme sistemi için ulaşılabilecek toplam iyon akımı (I_i):

$$I_i = \frac{1}{9}\pi\varepsilon_0\sqrt{\frac{2eq}{m}}\left(\frac{a_p}{d}\right)^2 V_d^{3/2} \tag{2.5}$$

ile verilir (Brown 2004). Görüldüğü gibi iyon kaynağından sökülecek demet akımının arttırılabilmesi için plazma elektrodu ile sökme elektrodu arasındaki mesafenin kısaltılması gereklidir. Ancak bu, vakum altında iki elektrot arasındaki elektron atlama (spark) sınırına kadar uygulanabilir bir koşuldur. Aynı amaçla plazma elektrodunun açıklığının arttırılması düşünülebilir. Fakat bu durumda, hem demetin enine yayınımının büyüyeceği hem de sökme bölgesindeki basıncın yükseleceği tasarım aşamasında düşünülmelidir.

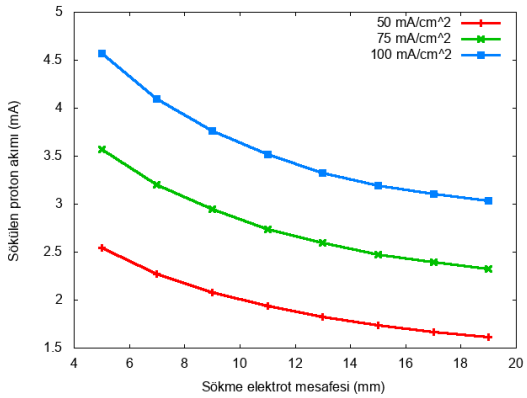
Plazma ve iyon sökme elektrotları arasındaki bölgenin benzetimi, açık kaynaklı IBSIMU (Kalvas vd. 2010) programı ile yapılmıştır. Tasarım için giriş değişkenlerinden olan bazı plazma özelliklerinin, bu sistemde ölçülememesi nedeniyle literatür (Lieberman ve Lichtenberg 1994) değerleri kullanılmıştır. IBSIMU'da tasarım yapılırken silindirik simetrik bir geometri ile çalışılmıştır. Böylece benzetim süresi uygun seviyelere düşürülmüştür ($\sim$5.5 dk). Tasarımda kullanılan elektrotlar CAD (Computer Aided Design) çizimlerinden STL (Standard Triangle Language) formatında alınarak IBSIMU'ya aktarılmıştır. Benzetim için giriş parametrelerinden olan plazma akım yoğunluğu, plazmanın oluşturulabilmesi için iletilen RF güç ile doğru orantılı olduğundan farklı akım yoğunluklarında ve elektrot uzaklıklarında benzetimler yapılarak sökülecek demetin özellikleri hesaplanmıştır. Şekil 2.3'te gösterildiği gibi 15 mm'lik sökme elektrodu uzaklığı, sökülen demetin yayınımı için en uygun değeri vermektedir. Buna göre, 50 mA/cm^2'lik akım yoğunluğu için elektrotlar arası mesafe 15 mm olduğunda 1.7 mA'lik demet akımı

sökülebilmektedir (Şekil 2.4).

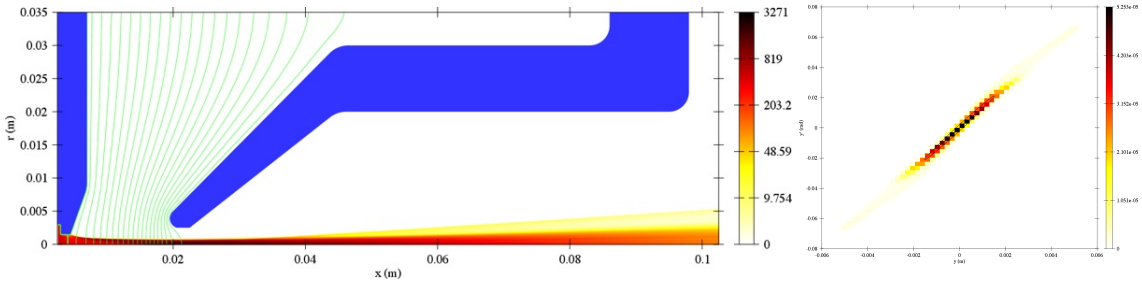


Şekil 2.3 Farklı akım yoğunlukları ve sökme elektrodu mesafesi için enine yayınım (norm-rms) değişimi

Farklı geometri ve elektrot açıklıkları ile yapılan benzetimler sonucu en-iyileştirilen 20 keV'lik iyon kaynağının, IBSIMU ile gerçekleştirilen benzetim sonuçları şekil 2.5'te verilmiştir. Şekil 2.5-sol'da kesiti (silindirik simetrik) gösterilen elektrotların (mavi) geometrileri, plazma odasından sökülen demetin (kırmızı) elektrotlar ile oluşturulacak elektrik alanlar (yeşil) ile uygun şekilde etkileşebilmesi için şekillendirilmiştir. Gereksinimler ve kısıtlamalar göz önüne alınarak yapılan tasarım sonrası, elde edilen iyon kaynağı parametreleri çizelge 2.2'de verilmiştir.



Şekil 2.4 Farklı akım yoğunlukları ve sökme elektrodu mesafesi için demet akımı değişimi



Şekil 2.5 İyon kaynağı demet sökme sisteminin benzetimi. Sol: demet sökme bölgesi, sağ: sökülen demetin y-y′ faz uzayı

İyon kaynağının demet söküm bölgesindeki basınç, plazma odası hidrojen gazı ile beslendiğinde 10^{-4} mBar mertebelerine kadar yükseleceğinden elektron atlaması riskine karşı, plazma-sökme elektrot uzaklığı mümkün olduğunca uzun (15 mm) tutulmuştur. Bu sayede elektron atlaması sınırından uzak durularak iyon kaynağının kararlı bir şekilde çalışması sağlanmıştır. Bu seçimin sonucu olarak, sökülen demet akımındaki azalma SPP hedefleri açısından değerlendirildiğinde önemsizdir. Plazma elektrot açıklığı ise enine demet yayınımını düşük seviyelerde tutabilmek için 3 mm seçilmiştir. Bu boyuttaki plazma elektrot açıklığından benzetimler sonucu elde edilen demet akımı, SPP amaçları açısından fazlasıyla yeterlidir.

Çizelge 2.2 İyon kaynağı parametreleri

Değişken	Değer	Birim
Plazma elektrot açıklığı	3.0	mm
Sökme elektrot açıklığı	5.0	mm
Plazma-sökme elektrot uzaklığı	15.0	mm
Plazma gerilimi	15.0	V
Elektron sıcaklığı	5.0	eV
İyonların başlangıç enerjisi	10.0	eV
İyonların enine sıcaklığı	0.5	eV
Akım yoğunluğu	50.0	mA/cm^2
Demet akımı	1.7	mA
Demet enerjisi	20.0	keV
Demet çapı	6.0	mm
Demet yayınımı (RMS-normalize)	0.02	π.mm.mrad

2.1.2 İyon kaynağı üretimi ve birleştirilmesi

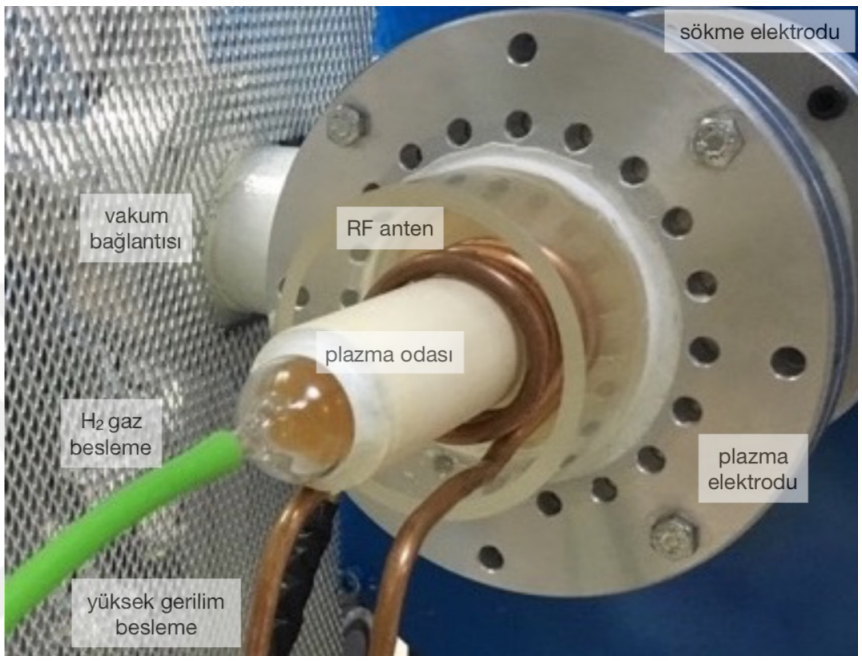
Plazma odası olarak kullanılmak üzere tasarlanan seramik, Çin'de bulunan bir firmaya (Anonymous 2014a) özel olarak yaptırılmıştır. İyon kaynağının elektrotları ve diğer bileşenleri ise TAEK-RHTDB mekanik atölyesi ve Ankara OSTİM OSB'de üretilmiştir. Alumina plazma odası, alüminyum plazma elektroduna açılan yuvaya; plazma odasının cam gaz girişi ise plazma odasının ucuna vakum yapıştırıcısı ile yapıştırılmış, böylece vakum sızdırmazlığı sağlanmıştır. Plazma odasına güç aktarımı sırasında RF antende oluşacak sıcaklığın soğurulması için, RF anten su soğutmalı olarak üretilmiştir. RF anten, yüksek ısıl ve elektrik iletkenliğine sahip olması ve aynı zamanda içinde soğutma suyunun dolaşabilmesi için 6 mm çaplı bakır borudan sarılmıştır. Plazma odası içinden protonların sökületeceği çıkış bölgesinde yüksek yoğunluklu plazmanın üretilmesi için, RF antenin mümkün olduğunca çıkış deliğine yakın tutulması hedeflenmiştir. Bunun için yüksek gerilimde (20 kV) tutulması gereken plazma elektrodu ile RF anten arasına plexiglass bir boru ile elektron atlamalarına karşı yalıtım sağlanmıştır. İyon kaynağının demet sökme elektrodu (Şekil 2.6) yapılan tasarıma uygun, aynı zamanda devreye alma testleri sırasında yapılacak iyileştirmelere imkan verebilmesi için demet ekseni yönünde hareket edebilecek şekilde üretilmiştir.



Şekil 2.6 Ayarlanabilir sökme elektrodu

Plazma elektrodu ve demet sökme elektrodu arasındaki yüksek gerilim izolasyonun sağlanabilmesi ve turbo moleküler vakum pompası bağlantısının yapılabilmesi için "T" geometrisinde bir plexiglass parça üretilmiştir. Plazma elektrodu, demet sökme elektrodu

ve turbo moleküler vakum pompası bağlantı flanşı, bu plexiglass'a vakum yapıştırıcısı ile yapıştırılarak yapının vakum sızdırmazlığı sağlanmıştır. Tüm bileşenleri vakum sızdırmaz şekilde bir araya getirilen iyon kaynağı, demet hattındaki yerine yerleştirilmiştir (Şekil 2.7).



Şekil 2.7 SPP iyon kaynağı ve bileşenleri

2.1.3 İyon kaynağı testleri

İyon kaynağının devreye alınması sürecinde vakum, yüksek gerilim, RF eşleme ve demet sökme gibi testler gerçekleştirilmiştir. İlgili çalışmalar bu bölümde açıklanacaktır. Testler sonrası iyon kaynağı başarıyla devreye alınmıştır.

2.1.3.1 Vakum testleri

İyon kaynağının demet hattına yerleştirilmesi sonrası, istenilen vakum değerlerine ulaşabilmesi için vakum testleri gerçekleştirilmiştir. Vakum kaçaklarının belirlenebilmesi

için He kaçak algıcı (Anonymous 2015d) kullanılarak kaçak bölgeleri tespit edilmiş ve gerektiğinde düzeltmeler vakum yapıştırıcısı ile yapılmıştır. İyon kaynağında kullanılan "T" şeklindeki plexiglass parçanın gaz kusma (outgassing) miktarını düşürebilmek için, bazı iç yüzeyler vakum yapıştırıcısı ile kaplanmıştır. Bu plexiglass parça sayesinde iyon kaynağı demet sökme bölgesinden turbo moleküler vakum pompasına bağlanmıştır. Yapılan çalışmalar sonucu iyon kaynağındaki basınç, plazma odasına gaz beslenmediği durum için 10^{-7} mBar mertebesine kadar indirilebilmiştir. Bu seviyenin iyon kaynağının kararlı çalışabilmesi için yeterince uygun olduğu değerlendirilmiştir.

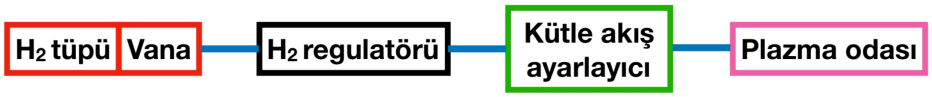
2.1.3.2 Yüksek gerilim testleri

Üretilen iyon kaynağında elektron atlamasının gerçekleşebileceği iki bölge vardır: RF anten-plazma elektrodu arası ve plazma elektrodu-demet sökme elektrodu arası. Bu iki bölgede çalıştırma sırasında oluşacak elektron atlamalarını test edebilmek için plazma elektroduna, bir yüksek gerilim güç kaynağı (Anonymous 2013b) ile 20 kV gerilim verilmiştir. Testler önce hidrojen gazı olmadan ve dolayısıyla plazmanın oluşturulmadığı durumda gerçekleştirilmiştir. Bu durumda, plazma elektrodu ve demet sökme elektrodu arasında herhangi bir elektron atlaması gözlenmemiştir. Bu testler sonucunda RF antenin plazma elektroduna en uygun mesafesi 7 mm olarak belirlenmiştir. Hidrojen gazının plazma odasına beslenmesiyle (10^{-4} mBar) gerçekleştirilen yüksek gerilim testlerinde ise, sökme elektrodu ile plazma elektrodu arasındaki 15 mm'lik mesafenin elektron atlama riskine karşı yeterli olduğu deneylerle de görülmüştür. Böylece iyon kaynağının elektron atlaması olmadan kararlı bir şekilde çalışabileceği şartlar belirlenmiştir.

2.1.3.3 RF eşleme ve plazma üretim çalışmaları

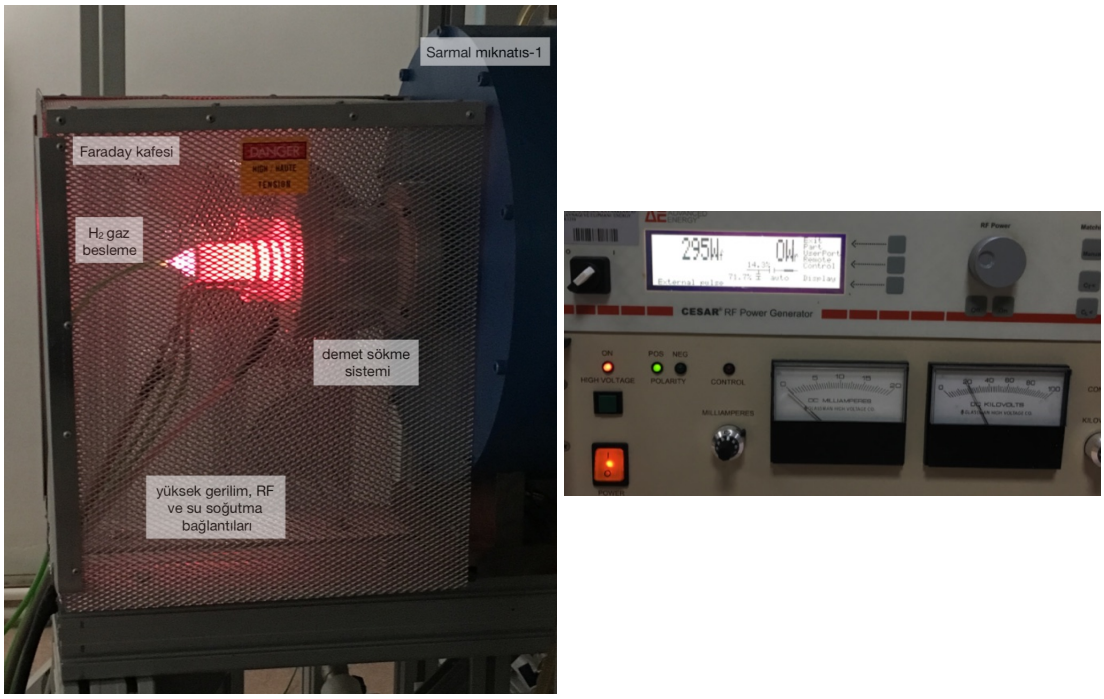
Plazma odasında hidrojen plazmasının üretilebilmesi için, beslenen hidrojen gazı akış miktarının kontrol edilebilir olması, plazmanın ve dolayısıyla sökülen demetin kararlılığı açısından çok önemlidir. Bu amaçla bir uzaktan kontrollü kütle akış kontrolcüsü (Anonymous 2015c) kullanılmıştır. İyon kaynağının kararlı bir şekilde çalıştırılabilmesi için kul-

lanılan hidrojen gazı kontrol sisteminin şematik gösterimi şekil 2.8'deki gibidir. Farklı kütle akış değerleri için yapılan deneyler sonucunda en iyi kütle akış değeri 6 sccm (standard cubic centimeters per minute) olarak bulunmuştur.



Şekil 2.8 ICP iyon kaynağı H_2 gazı besleme sistemi

Plazma odasına uygun gaz akışının sağlanmasının yanı sıra plazma oluşumu için RF antenin RF gücü etkin bir şekilde plazma odasına iletmesi gerekmektedir. RF anten ile RF güç kaynağı arasında kullanılan empedans eşleyici sayesinde, 295 W için yüksek verimde RF iletimi sağlanabilmiştir. Gerçekleştirilen plazma üretim testlerinde, RF güç kaynağından iletilen güç neredeyse tümüyle (0 W geri yansıma ile) plazma üretimi için kullanılabilmiştir (Şekil 2.9).



Şekil 2.9 Sol: Hidrojen plazması üretimi, sağ: RF ve yüksek gerilim güç kaynakları

2.1.3.4 Sürekli yapıda demet sökümü testleri

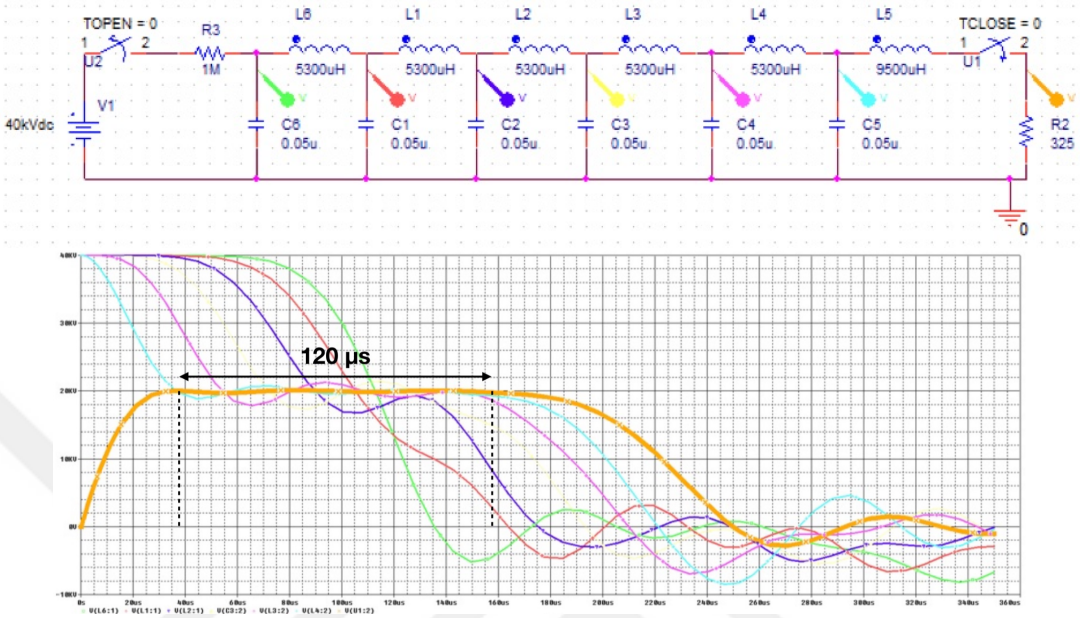
İyon kaynağından proton demeti sökme testleri ilk olarak sürekli zaman yapısında (CW) gerçekleştirilmiştir. Sürekli zaman yapısında proton demetinin sökülebilmesi için hem plazmanın hem de sökme geriliminin sürekli zaman yapısında olması gereklidir. Sökme geriliminin sürekli olarak uygulanması bir sorun yaratmazken, plazmanın sürekli yapıda olması özellikle plazma odasının ve dolayısıyla plazma elektrodunun yüksek sıcaklıklara çıkmasına neden olmaktadır. Bu durumda plazma odası ve plazma elektrot malzemelerinin ısıl genleşme katsayıları arasındaki fark nedeniyle, özellikle plazma odası seramiğinin çatlama riski ortaya çıkmaktadır. Aynı zamanda parçaların vakuma dayanıklı bir şekilde birleştirilebilmesi için kullanılan vakum yapıştırıcısının, yüksek sıcaklıklarda özelliklerini kaybetme riski vardır. Bu durumda, iyon kaynağının sürekli yapıda çalıştırılabilmesi için plazma odası ve plazma elektroduna soğutma uygulanması şarttır. Bahsedilen zorluklar göz önüne alındığında ve Bölüm 2.1.1.1'de de belirtilen SPP ihtiyaçları için sürekli yapıda demet eldesi gerekli olmadığından, sürekli yapıda demet sökümü testleri sonlandırılmıştır.

2.1.3.5 Atmalı yapıda demet sökümü testleri

İyon kaynağından atmalı yapıda demet sökümü testleri iki ayrı yaklaşım ile yapılmıştır. Birinci yaklaşım, sürekli plazma-atmalı yüksek gerilim ile yapılan çalışmaları içermektedir. İkinci yaklaşım ise, atmalı plazma-sürekli yüksek gerilim ile yapılan çalışmaları kapsamaktadır.

Birinci yaklaşım için plazma odası, Bölüm 2.1.3.4'te de bahsedildiği gibi sürekli yapıda RF gücü ile beslenmiş ve sürekli yapıda bir plazma oluşturulmuştur. Bu durumda proton demetinin atmalı olarak sökülebilmesi için, uygulanan yüksek gerilimin atmalı yapıda olması gerekmektedir. Atmalı zaman yapısında yüksek gerilimin sağlanabilmesi için bir atma şekillendirme sistemi (Pulse Forming Network (PFN)) PSpice programı (Anonymous 2015f) ile tasarlanmıştır. Tasarlanan PFN 6 adet yüksek gerilim kapasitörü (0.05 uF), bir bobin (36 mH), bir spark-anahtarı, doldurma ve yük dirençlerinden oluşmaktadır

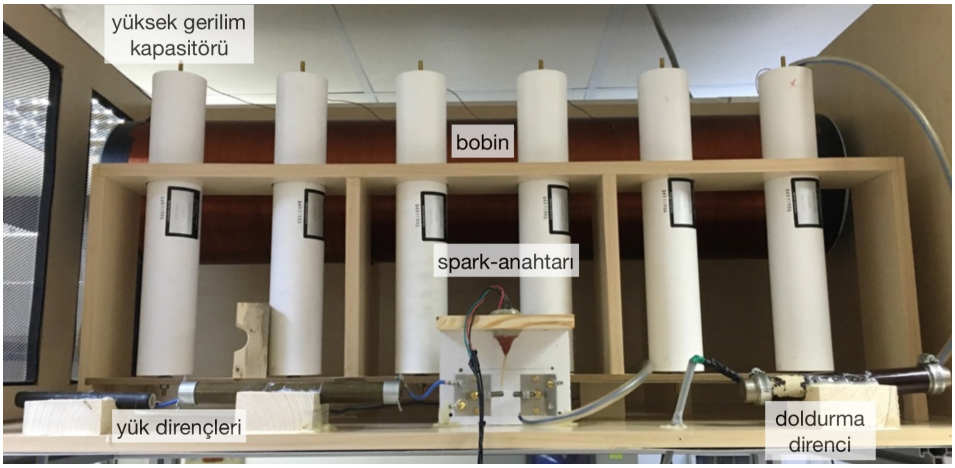
(Şekil 2.10). Tasarlanan bu yapı ile 40 kV'luk sürekli yapıdaki gerilim, 20 kV ve 120 μs'lik atmalı gerilime dönüştürülebilmektedir.



Şekil 2.10 PFN sisteminin tasarımı ve benzetimi

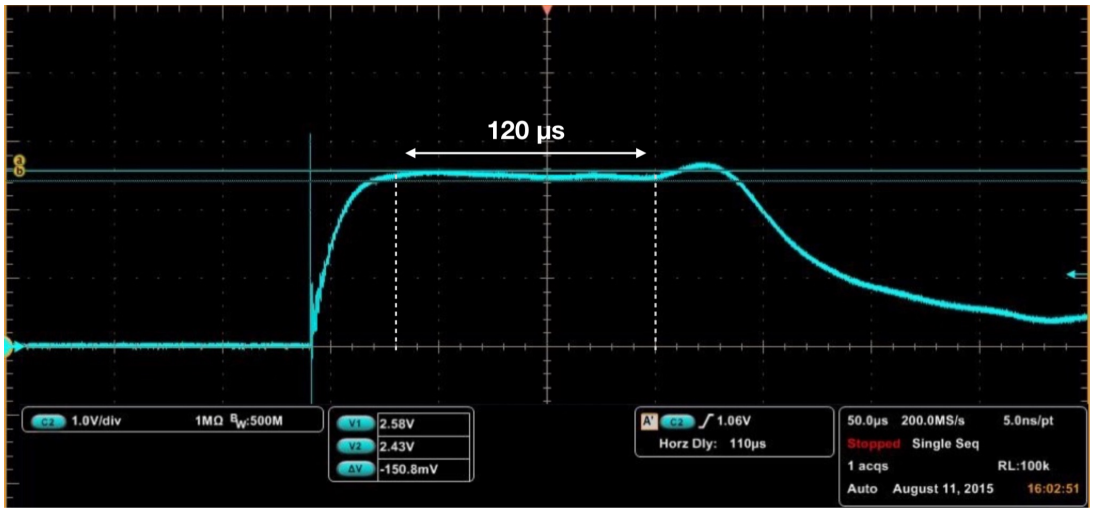
Tasarlanan yapı için kullanılması gereken yüksek indüktansa sahip bobin TAEK-RHTDB mekanik atölyede 2 mm çaplı bakır telden sarılmıştır. Sistemi taşıyacak olan yalıtkan yapı TAEK-RHTDB ağaç atölyesinde suntadan yapılmış ve kurulumu tamamlanmıştır (Şekil 2.11). PFN sisteminin yüksek gerilim testleri şekil 2.12'de gösterildiği gibi başarıyla sonuçlanmış ve 20 kV'luk gerilim istenilen zaman yapısında oluşturulmuştur. Bu yaklaşımda, demet sökümü için plazmanın sürekli etkin olması nedeniyle, Bölüm 2.1.3.4'te sözü edilen sıcaklık sorunu ile karşılaşılacağından, ikinci yaklaşım tercih edilmiştir.

İkinci yaklaşımda, yüksek gerilim plazma elektroduna sürekli yapıda uygulanırken proton demetinin atmalı yapıda sökülebilmesi için, plazmayı oluşturan RF güç, atmalı yapıda beslenmiştir. Bu durumda, plazmanın aktif olduğu zaman dilimi ms mertebesinde olacağından plazma odasının ısınması ile iyon kaynağının zarar görme ihtimali ortadan kalkmıştır. 60 s'lik çalıştırma zamanı için sürekli ve atmalı yapıdaki plazmanın



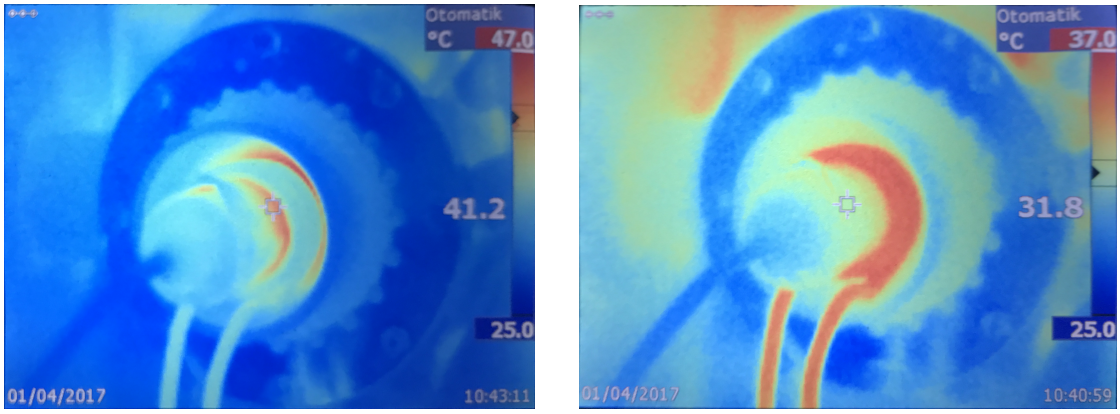
Şekil 2.11 PFN sistemi ve bileşenleri

yarattığı sıcaklıklar bir termal kamera (Anonymous 2014c) ile ölçülmüş ve şekil 2.13'te gösterilmiştir. Görüldüğü gibi sürekli yapıdaki plazma durumunda, sistem atmalı yapıdaki duruma göre daha fazla ısınmaktadır. Ayrıca, sürekli yapıda bu ısınma, özellikle plazma elektrodu bölgesinde oluşmaktadır. Bu nedenlerle, SPP iyon kaynağı için sürekli zaman yapısında yüksek gerilim ve atmalı zaman yapısında plazmanın oluşturulması tercih edilmiştir.



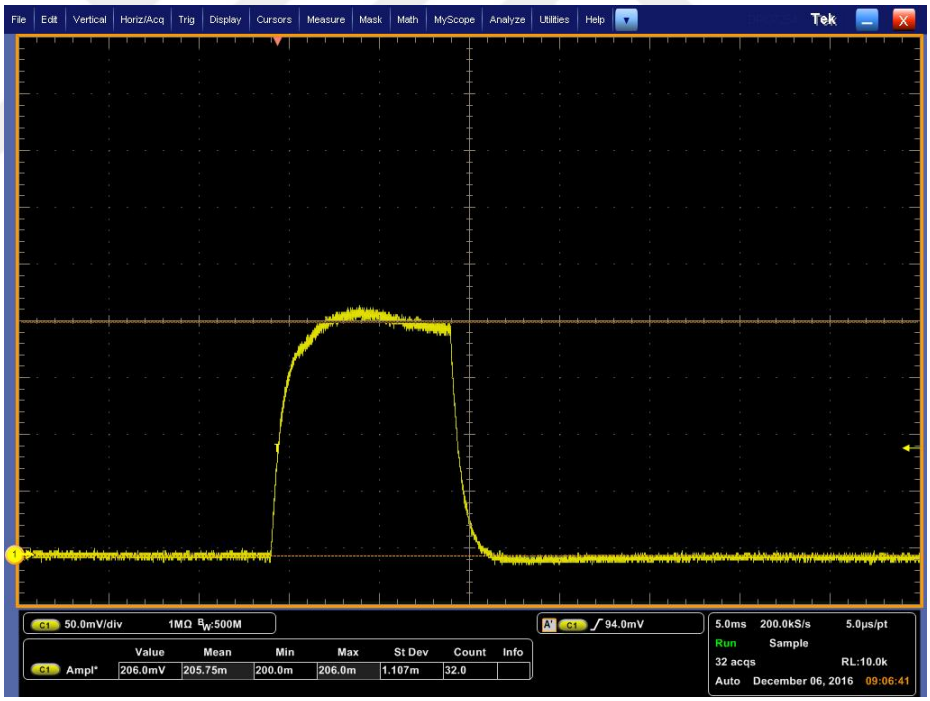
Şekil 2.12 PFN ile elde edilmiş 120 μs uzunluğundaki 20 kV'luk gerilim sinyali

SPP iyon kaynağında plazmanın üretileceği zaman yapısı RF güç kaynağının kısıtlamalarına bağlıdır. Mevcut güç kaynağı atmalı yapıda en kısa 10 ms'lik atmalar



Şekil 2.13 Sürekli (sol) ve atmalı (sağ) plazma için oluşan sıcaklıklar

üretebilmektedir. Dolayısıyla bu yaklaşımda, proton kaynağından sökülen proton demeti 10 ms uzunluğundadır (Şekil 2.14). Bu yaklaşım sayesinde, iyon kaynağının kararlı bir şekilde ve uzun süreli çalıştırılması mümkün olmuştur.



Şekil 2.14 10 ms uzunluğundaki atmalı yapıda 20 keV proton demet sinyali

2.2 Düşük Enerjili Demet Aktarım (DEDA) Hattı

DEDA (Low energy beam transport (LEBT)) hattı, iyon hızlandırıcılarını besleyen enjektör hatlarında bulunan iyon kaynağı ve RFQ kovukları arasındaki, demet tanılama ve düzeltme araçları ile demet eşleme bileşenlerini bulunduran demet hatlarına DEDA hattı denmektedir. Negatif yüklü iyonları hızlandıracak yapılar için DEDA hattında iyon kaynağından sökülen elektronların uzaklaştırılabilmesi için bazı elektrostatik bileşenler de bulunmaktadır (Batygin 2014). Bu bölümde SPP için yapılan DEDA hattı tasarımı, üretimi ve testleri ile ilgili ayrıntılı bilgiler verilecektir.

2.2.1 DEDA hattı tasarımı

SPP DEDA hattı, RF kovuğun demet kabulüne uygun demet özelliklerinin oluşturulabilmesi için bileşenler içerirken, aynı zamanda demet özelliklerinin tanılanmasına yarayan araçları da barındırmalıdır. Orta ve yüksek enerjili demet hatlarında manyetik bileşen olarak çoğunlukla kullanılan dört kutuplu mıknatıslar yerine, DEDA hatlarında sarmal (solenoid) mıknatıslar kullanılmaktadır. Bunun temel nedenleri olarak; İyon kaynağından çıkan demet ve RF kovuk girişinde istenen demetin, faz uzayında iki eksende de eş fazlı olması ve sarmal mıknatısların bu yapıyı bozmaması; aynı demet özelliklerinin sağlanabilmesi için dört kutuplu mıknatısa göre daha az sayıda sarmal mıknatısa ihtiyaç olması ve dolayısıyla gereken güç kaynağı sayısının daha az olması sıralanabilir. Bu nedenlerle SPP DEDA hattında da iki adet sarmal mıknatıs kullanılmıştır. Sarmal mıknatısların yanı sıra, bileşenlerin hizalama hatalarından kaynaklanan demet kaymalarını düzeltebilmek için iki adet yönlendirici mıknatıs kullanılmıştır. Manyetik bileşenlerin dışında, DEDA hattının farklı noktalarında iki adet demet tanılama kutusu kullanılmıştır.

2.2.1.1 DEDA hattı için gereksinimler ve kısıtlamalar

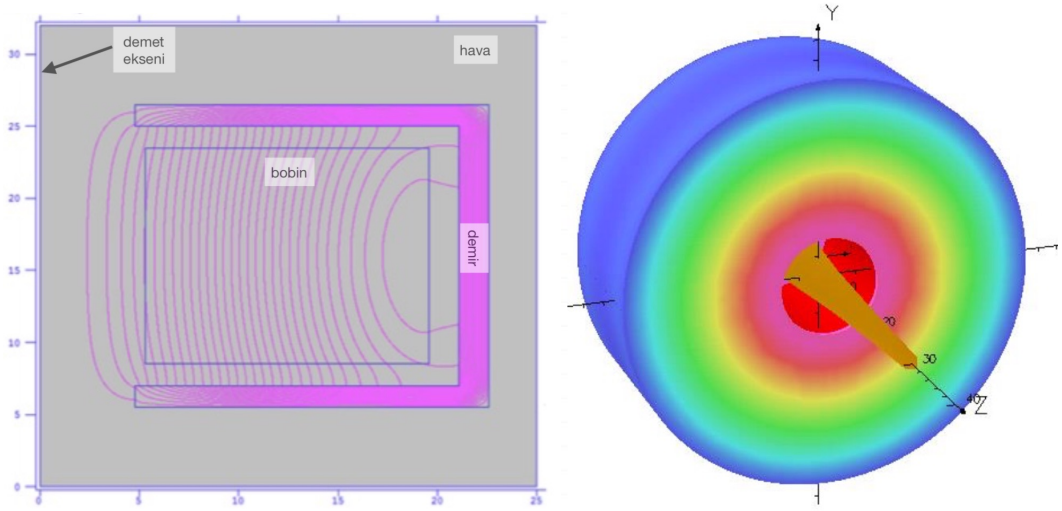
Demet hattının önemli bir bölümünü oluşturan DEDA hattında kullanılması gereken bileşenler için, çizelge 2.3'te gösterilen gereksinim ve kısıtlamalar göz önüne alınmıştır. DEDA hattında kullanılması gereken sarmal mıknatısların sayısı ve manyetik alan kuvvetleri Bölüm 2.2.1.3'te gösterilen demet dinamiği hesaplamaları sonucu belirlenmiştir. Bu mıknatısların tasarımları, mevcut bulunan güç kaynaklarının kısıtlamalarına (100 V, 33 A DC) uygun olacak şekilde gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 2.3 DEDA hattı için gereksinimler ve kısıtlamalar

Değişken	Açıklama	Değer	Birim
Odaklayıcı manyetik bileşen sayısı	-	2	#
Yönlendirici manyetik bileşen sayısı	-	2	#
Tanılama kutusu sayısı	-	2	#
Eşlenecek Twiss parametreleri	α	0.6399	#
	β	0.0128	mm/mrad
	ε_{geo}	153.15	mm.mrad
Uzunluk	-	<2	m

2.2.1.2 Sarmal ve yönlendirici mıknatıs tasarımları

DEDA hattında kullanılacak sarmal mıknatısların (SM1 ve SM2) manyetik tasarımı iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, kesik-kenar (hard-edge) yaklaşımı kullanılarak, iyon kaynağı çıkışındaki demeti RFQ'ya eşleyebilecek sarmal mıknatısların temel parametreleri (manyetik alan, uzunluk ve demet borusu açıklığı) belirlenmiştir. Daha sonra, sarmal mıknatıslar hedeflenen bu parametrelere uyacak şekilde iki boyutta POISSON (Billen ve Young 2000) programı ile tasarlanmış (Çizelge 2.4) ve üretilen manyetik alan haritaları Bölüm 2.2.1.3'te sözü edilen demet dinamiği hesapları için kullanılmıştır. Sarmal mıknatısların POISSON ile gerçekleştirilen tasarımları, OPERA (Anonymous 2004) programı ile yapılan üç boyutlu benzetimler ile doğrulanmıştır.



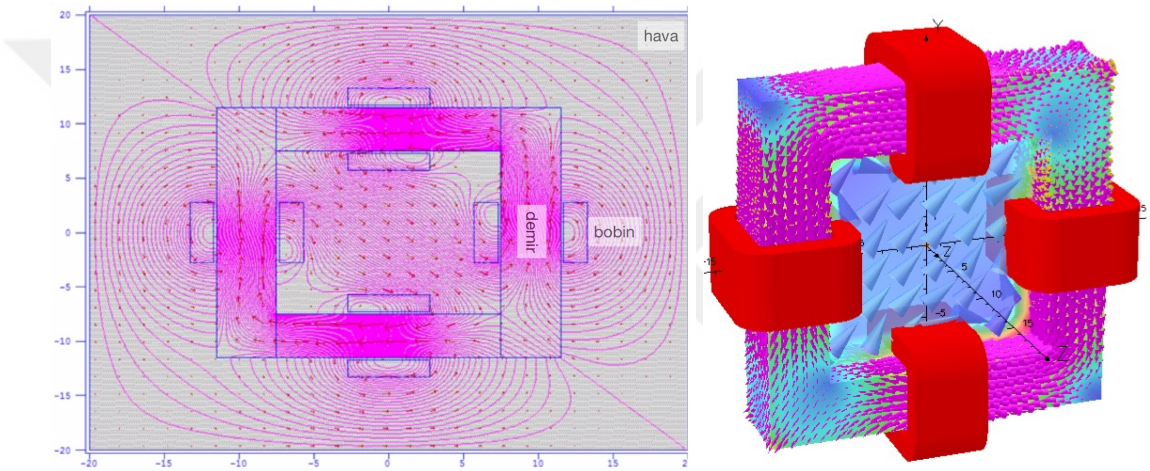
Şekil 2.15 Sarmal mıknatısların manyetik alan benzetimleri. Sol: POISSON, sağ: OPERA

Tasarlanan sarmal mıknatıslarda kullanılan bobin akımı 15 A mertebelerine çıkarılabileceğinden, tek bir sarmal mıknatıs yaklaşık 1.3 kW güç harcayabilmektedir. Bu nedenle sarmal mıknatıslar su soğutmalı olarak tasarlanmıştır. Sarmal mıknatıs için bobinin etrafı manyetik geçirgenliği yüksek bir malzeme (demir) ile çevrelenerek manyetik alanın demet borusu üzerinde yoğunlaşması sağlanmıştır. Sarmal mıknatısların tasarımı yapılırken bobinin üzerine sarılacağı kasnak da düşünülerek, bobin ile demir yapı arasında gerekli mesafe bırakılmıştır.

Çizelge 2.4 Sarmal mıknatıs parametreleri

Değişken	Değer	Birim
Kablo çapı	2.4	mm
En yüksek akım	15.0	A
Mıknatıs açıklığı	110.0	mm
Sarım uzunluğu	150.0	mm
Tur sayısı	2678	#
Sarım direnci	5.9	ohm
Sarım ağırlığı	86.4	kg
Sarım çapı	195.0	mm
Tepe manyetik alan	2.74	kG

DEDA hattında demetin enine eksende RFQ kovuğuna eşlenebilmesi için kullanılacak yönlendirici mıknatısların, mümkün olduğunca az sayıda ve küçük boyutta tasarlanması hedeflenmiştir. Bunun için tek eksende çalışan yönlendirici mıknatıslar yerine iki eksende çalışan yönlendirici mıknatıslar tasarlanmıştır. Böylece mıknatıs sayısı yarı yarıya düşürülerek, sadece iki yönlendirici mıknatıs (YM1 ve YM2) ile DEDA hattındaki demet, RFQ girişine yönlendirilebilmiştir. Yönlendirici mıknatıslar her biri dört bobin içerek şekilde POISSON programında tasarlanmıştır ve etkileri OPERA programı ile doğrulanmıştır (Şekil 2.16, Çizelge 2.5).



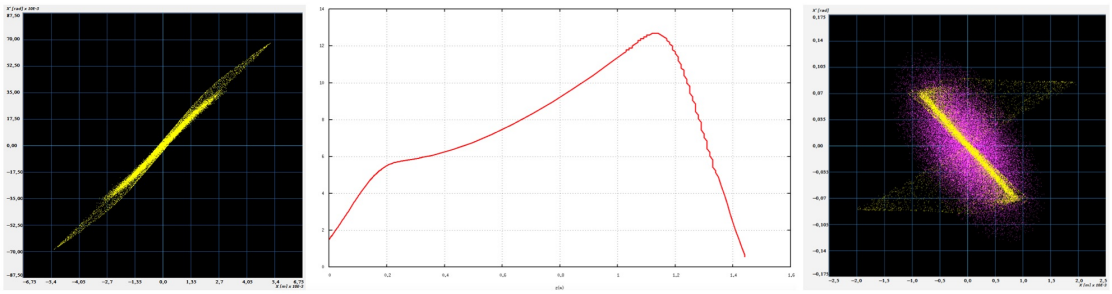
Şekil 2.16 Yönlendirici mıknatısların manyetik alan benzetimleri. Sol: POISSON, sağ: OPERA

Çizelge 2.5 Yönlendirici mıknatıs parametreleri

Değişken	Değer	Birim
Kablo çapı	2.4	mm
Tur sayısı	60	#
Mıknatıs açıklığı	110.0	mm
En yüksek akım	10.0	A
Tepe manyetik alan	135	G

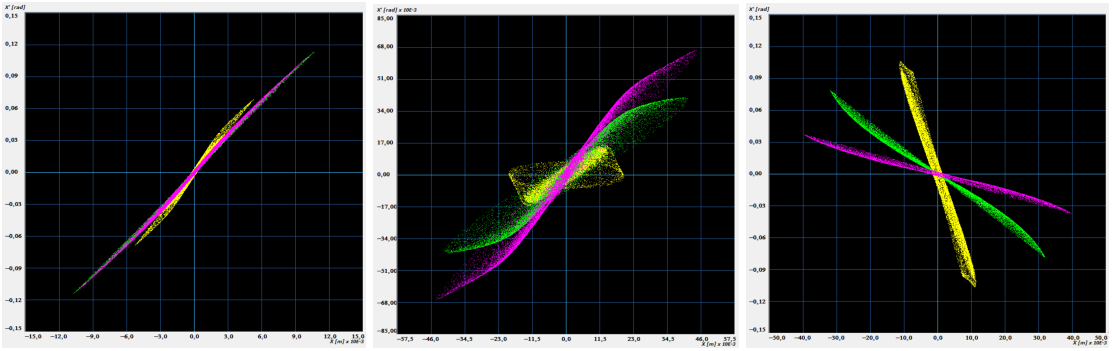
2.2.1.3 DEDA hattı demet dinamiği

DEDA hattındaki sarmal mıknatıslar için demet dinamiği hesapları, CERN'de geliştirilen ve yaygın olarak kullanılan TRAVEL (Perrin vd. 2007) programı ile yapılmıştır. Bölüm 2.1.1.2'de gösterilen iyon kaynağı tasarımı sonucunda elde edilen demet bilgisi, TRAVEL programının okuyabileceği biçime dönüştürülerek DEDA hattı tasarımı için girdi demeti olarak kullanılmıştır. POISSON programından alınan sarmal mıknatısların manyetik alan haritaları TRAVEL programına okutturularak demet dinamiği hesaplarında kullanılmıştır. TRAVEL'ın alt programı olan DELTA ile sarmal mıknatısların manyetik alan değerleri taratılmış ve RFQ girişinde hedeflenen Twiss parametrelerine (alfa (α) ve beta (β)) yaklaşılana kadar taratılmıştır. Bu sayede demetin RFQ demet kabulüne eşlenebilmesi için gerekli olan sarmal mıknatıs bobin akımları (14 A) benzetimler ile belirlenmiştir. Benzetim sonucu iyon kaynağı çıkışındaki demetin, RFQ demet kabulüne uygun özelliklere getirilebildiği görülmüştür (Şekil 2.17).



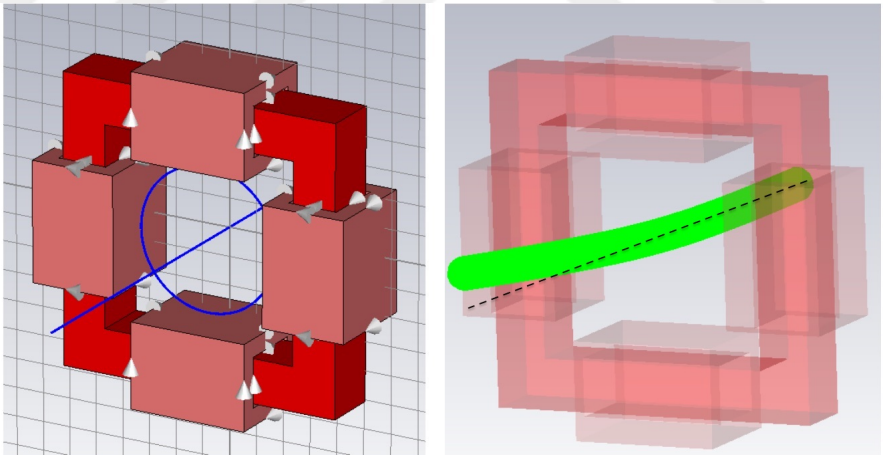
Şekil 2.17 Sol: İyon kaynağı çıkışı, orta: DEDA hattı boyunca demet boyutu (rms), sağ: RFQ girişi (mor: RFQ demet kabulu)

İyon kaynağında üretilen protonların yanı sıra hidrojen plazmasından gelebilecek diğer pozitif (H_2^+ ve H_3^+) iyonların DEDA hattındaki davranışları benzetimler ile incelenmiş ve RFQ'nun demet kabulüne uygun olarak kovuğa ulaşamayacakları belirlenmiştir (Şekil 2.18). Bu nedenle proton hariç diğer iyonların yok edilmesi için herhangi bir çalışmaya gerek duyulmamıştır.



Şekil 2.18 DEDA hattında H^+ harici iyonların davranışı. Sol: İyon kaynağı çıkışı, orta: SM1 çıkışı, sağ: RFQ girişi. Sarı: H^+, yeşil: H_2^+, mor: H_3^+

Yönlendirici mıknatısların demet dinamiği hesaplamaları ise CST PS (Anonymous 2013a) kullanılarak yapılmış ve bobinler için gereken akım seviyeleri belirlenmiştir (Şekil 2.19). 20 keV'lik protonlar için bobinlerden geçirilecek akımın en fazla 1.5-2 A mertebesinde olması sayesinde yönlendirici mıknatıslar için herhangi bir soğutma sistemine ihtiyaç duyulmamıştır.



Şekil 2.19 Yönlendirici mıknatısların demet dinamiği benzetimleri

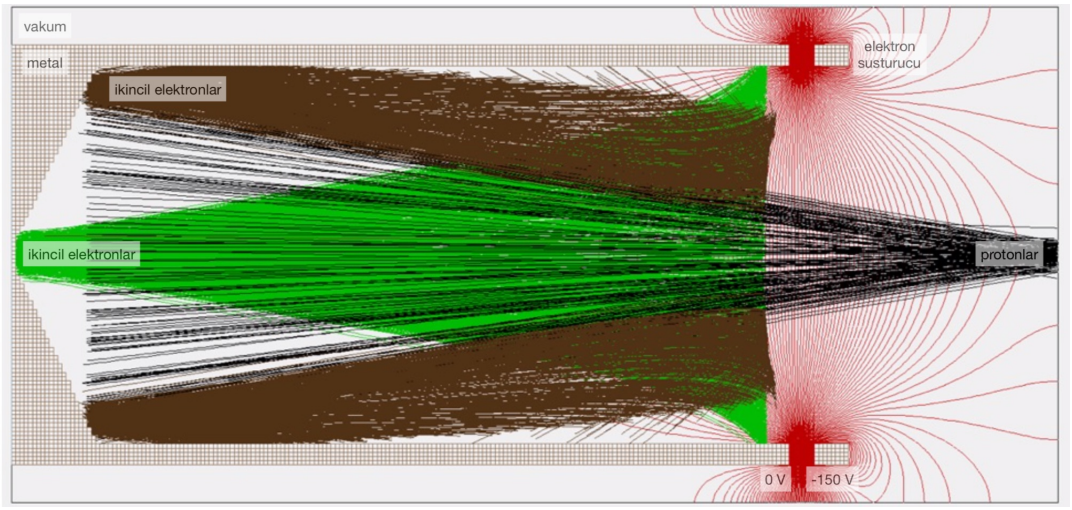
2.2.1.4 Demet tanılama bileşenleri

DEDA hattında demet özelliklerinin ölçülebilmesi için iki adet demet tanılama kutusu kullanılmıştır. Bunlardan biri (DTK1 (Yildiz vd. 2017)) iki sarmal mıknatıs arasında bu-

lunurken diğeri (DTK2) ise RFQ'nun hemen önüne konumlandırılmıştır. DTK1 içinde demet akımının ölçülebilmesi için bir Faraday bardağı (FB1), demetin enine boyutu ve profilinin belirlenebilmesi için bir fosfor (P43) ekran (DE1) ve demetin enine yayınımının belirlenebilmesi için bir tuzluk (pepper-pot) düzeneği bulunmaktadır. Bu bileşenler sayesinde iyon kaynağından çıkan demetin RFQ'ya eşlenebilmesi için gerekli tüm parametreler ölçülebilmektedir.

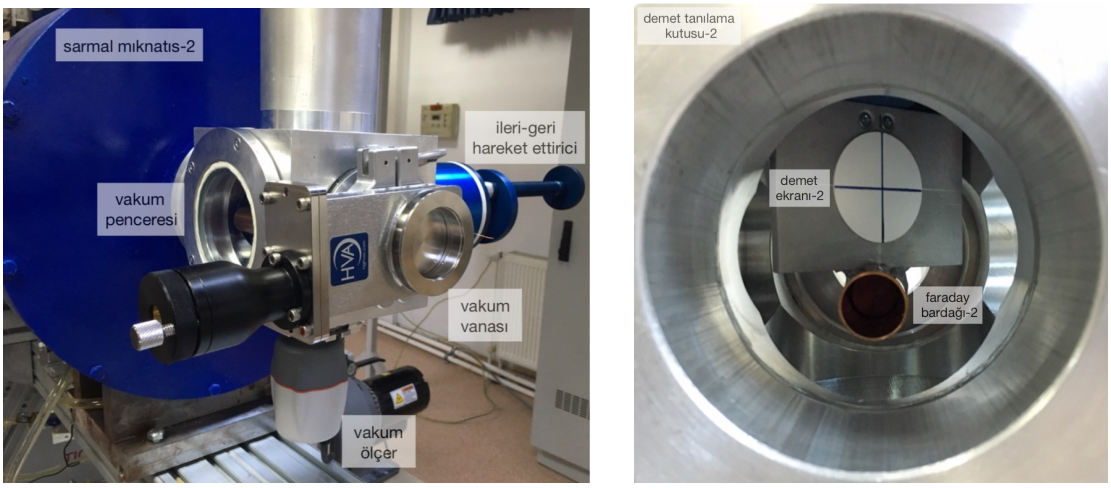
DTK1 içinde bulunan FB1, gelen proton demetininin tamamını içeri alacak şekilde geniş çaplı (80 mm) ve geri yansıyan protonları sistem içinde tutabilecek şekilde derin (200 mm) olarak tasarlanmıştır. FB1'in tabanı, yüksek akım yoğunluklu demeti oluşturan parçacıkların, farklı noktalara çarpması ve protonların daha az geri yansımasını sağlayacak şekilde açılı olarak tasarlanmıştır. Ayrıca FB1'e gelen protonların yarattığı ikincil elektronların, sistemden dışarı kaçarak demet akımının ölçümünde hataya yol açmasını engellemek amacıyla FB1 girişine bir elektron susturucu halka konulmuştur. Bu halkanın FB1'e göre negatif gerilimde tutulmasıyla elektronların sistem dışına kaçması engellenmiştir. FB1'in elektrostatik tasarımı SIMION (Manura ve Dahl 2008) programı kullanılarak yapılmıştır (Şekil 2.20). Görüldüğü gibi elektron susturucu halkaya uygulanan -150 V'luk gerilim ile FB1 içinde oluşacak ikincil elektronların sistem dışına kaçması engellenebilmektedir. DTK1'e gelen proton akımının ölçülebilmesi için FB1 elektriksel olarak sistemden izole edilmiş ve akım sinyali bir kablo ile DTK1 dışına alınmıştır.

DTK1 içinde bulunan DE1 yurtdışından satın alınmıştır. DE1'in çapı (90 mm) benzetimler ile tahmin edilen DEDA hattı demet boyutundan büyük olacak şekilde ve malzemesi 20 keV'lik protonlar ile etkileşebilecek şekilde seçilmiştir. DE1'in arkasında konulan bir ayna, DTK1'in içine proton demetinin geliş doğrultusu ile 45 derece açı yapacak şekilde yerleştirilmiştir. Böylece DE1'de oluşan ışık, ayna aracılığı ile 45 derece açıyla vakum dışarısına yerleştirilmiş bir CMOS kamera ile görüntülenebilmektedir. Bu demet görüntüsü demet boyutu, profili ve yayınımı ölçümleri için kullanılmıştır. DEDA hattında enine demet yayınımının ölçülebilmesi için DTK1 içine bir tuzluk düzeneği kurulmuştur. Bu düzenek ile ilgili ayrıntılı açıklamalar Bölüm 2.2.4.3'te verilmiştir.



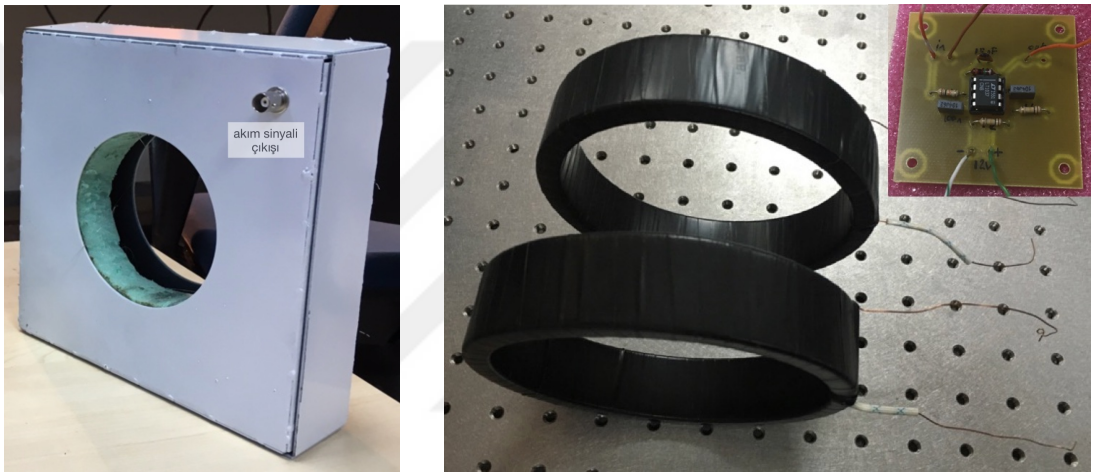
Şekil 2.20 FB1'in benzetimi. Siyah: 20 keV proton demeti, yeşil ve kahverengi: ikincil elektronlar (sırasıyla, merkezde ve köşede oluşabilecek), kırmızı: elektrik alan çizgileri

DEDA hattında, RFQ'dan hemen önce demetin özelliklerini ölçebilmek ve SM2'nin etkinliğinin ölçülebilmesi için DTK2 (Şekil 2.21) içinde bir Faraday bardağı (FB2) ve bir fosfor ekran (DE2) bulunmaktadır. DTK2 içinde kullanılan bileşenler demetin, RFQ önündeki boyutlarına uygun olarak tasarlanmıştır. Floresan tozunun pelet haline getirilmesi ile üretilen DE2 (40 mm) ve bakır bir borudan üretilen FB2 (30 mm) ile RFQ önündeki demet parametreleri doğrulanabilmektedir.



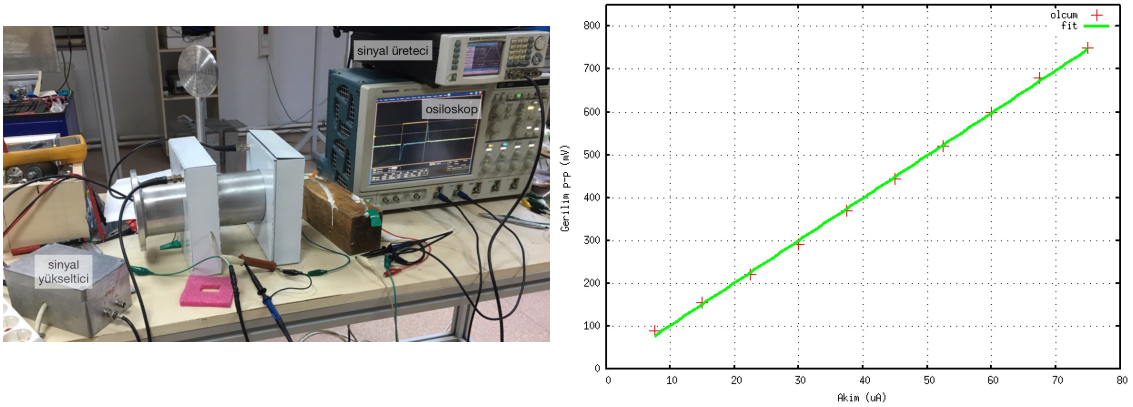
Şekil 2.21 RFQ önü demet tanılama kutusu

DEDA hattında demeti durdurarak (destructive) alınan ölçümlerin yanı sıra, demeti durdurmadan (non-destructive) demet akımı ölçebilmek de hedeflenmiştir. RF kovuğun çalışması sırasında demeti kesmeden demet akımının sürekli olarak ölçülebilmesi oldukça yararlıdır. Bu amaçla iki adet akım transformatörü (AC current transformer (ACCT)) yerli olarak imal edilmiştir. Trafodan alınan gerilimin, osiloskop ile okunabilecek seviyelere yükseltilebilmesi için OpAmp (Anonymous 2016b) tabanlı bir sinyal yükseltici devresi tasarlanmıştır (Ergenlik 2018). Akım trafoları, demet hattına takılabilmeleri için birer kutu içine yerleştirilmişlerdir (Şekil 2.22).



Şekil 2.22 Akım trafosunun temel elemanları. Sol: birleştirilmiş kutu, sağ: trafolar ve sinyal yükseltici devre

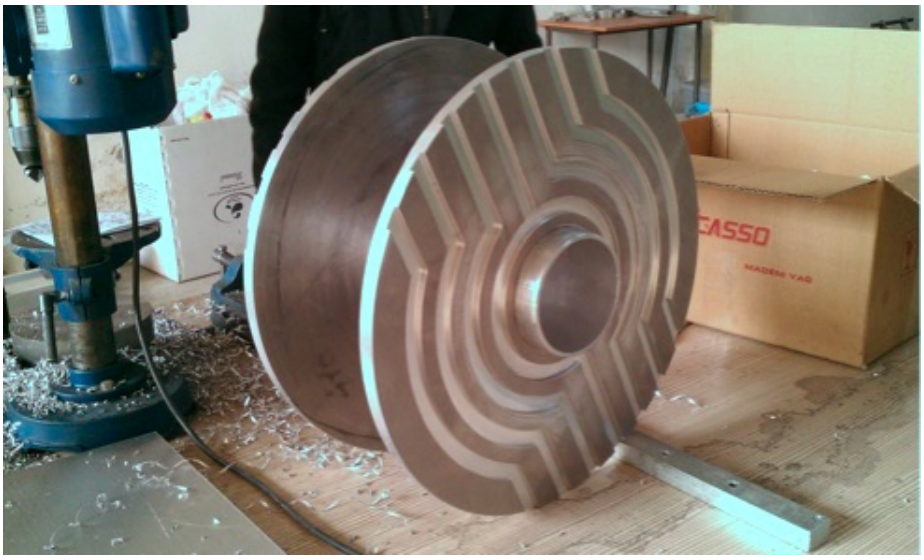
Akım trafosunun kalibrasyonunun yapılabilmesi amacıyla, demeti temsil edebilmek için bir tel, trafonun içinden geçirilmiştir. Sinyal üreteci ile tele verilen farklı akımlar için trafodan alınan yükseltilmiş gerilim değerleri osiloskop ile okunmuş ve şekil 2.23'te verilmiştir. Elde edilen verilere atılan doğrusal fit sonucu kalibrasyon etkeni 9.92 mV/μA olarak bulunmuştur. Kalibrasyon sonrası akım trafoları demet hattındaki yerlerine takılmıştır.



Şekil 2.23 Akım trafosunun kalibrasyonu. Sol: kalibrasyon düzeneği, sağ: kalibrasyon eğrisi

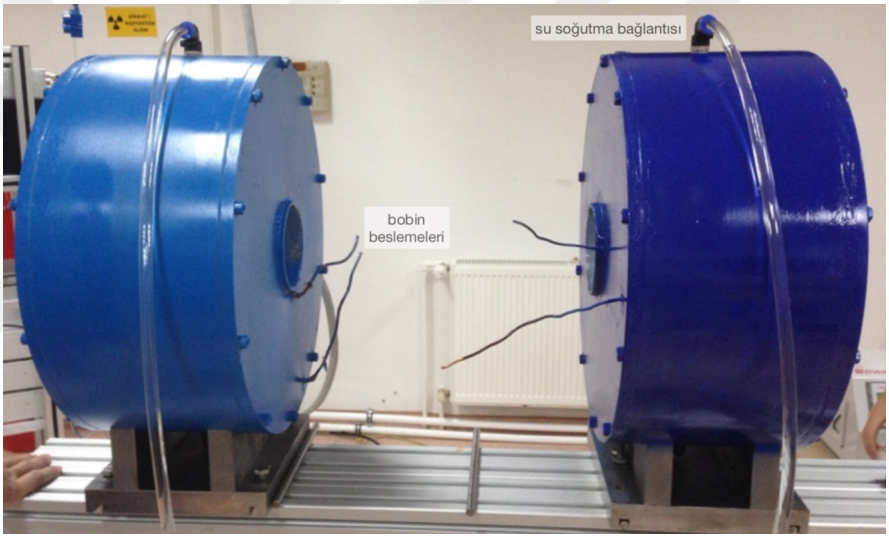
2.2.2 DEDA hattı mıknatıslarının üretimi ve birleştirilmesi

Bölüm 2.2.1'de sözü geçen bileşenlerin tasarımı sonrası üretilebilmeleri için gerekli CAD çizimleri INVENTOR (Anonymous 2016a) programında yapılarak bileşenler üretime hazır hale getirilmiştir. DEDA hattı bileşenlerinden SM1, SM2, YM1, YM2 ve DTK1 Ankara OSTİM OSB'de; FB1, FB2, DTK2 ve DE2 ise TAEK-RHTDB mekanik atölyesinde üretilmiştir.



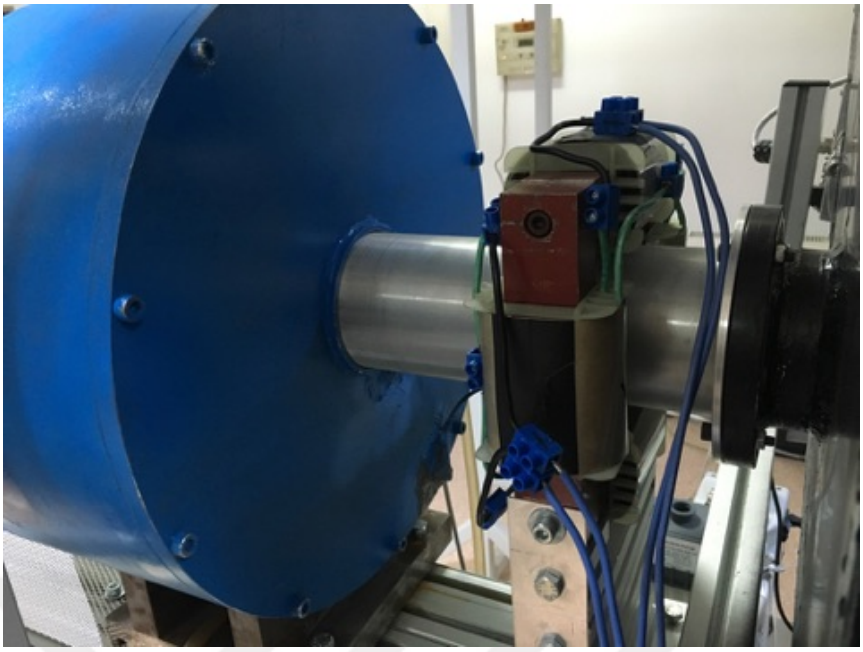
Şekil 2.24 Sarmal mıknatıs kasnağının üretimi

Sarmal mıknatısların üretimi amacıyla ilk olarak, bakır tellerin sarılarak istenen sarım sayısında bobinin oluşturulabilmesi için aluminyum bir kasnak üretilmiştir (Şekil 2.24). Bu kasnak, bobin boyunca soğutma suyunun dolaşabilmesi için kanallı şekilde üretilmiştir. Daha sonra bu kasnak üzerine 2678 tur bobin sardırılmıştır (Anonim 2014b). Bobinleri çevreleyecek boru ve iki adet kapak demirden üretilmiştir (Anonim 2014a). Bu boru ve kapakların su sızdırmazlığı sıvı conta kullanılarak sağlanmıştır. Su ile temas eden tüm demir yüzeyler astar ile kaplanarak paslanmaları engellenmiştir. Tüm bileşenleri üretilmiş olan sarmal mıknatıslar birleştirilerek, bir vinç ile demet hattına taşınmıştır (Şekil 2.25).



Şekil 2.25 Sarmal mıknatısların demet hattına yerleştirilmesi

Yönlendirici mıknatıs bobinleri için piyasada bulunan standart plastik kasnaklar kullanılmıştır. Mıknatıs boyunca manyetik alanının bağlaşımını sağlayacak olan manyetik yol (yoke), demirden üretilerek mıknatıs birleştirilmiş ve demet hattına yerleştirilmiştir (Şekil 2.26).



Şekil 2.26 Yönlendirici mıknatısların demet hattına yerleştirilmesi

2.2.3 DEDA hattı bileşenlerinin testleri

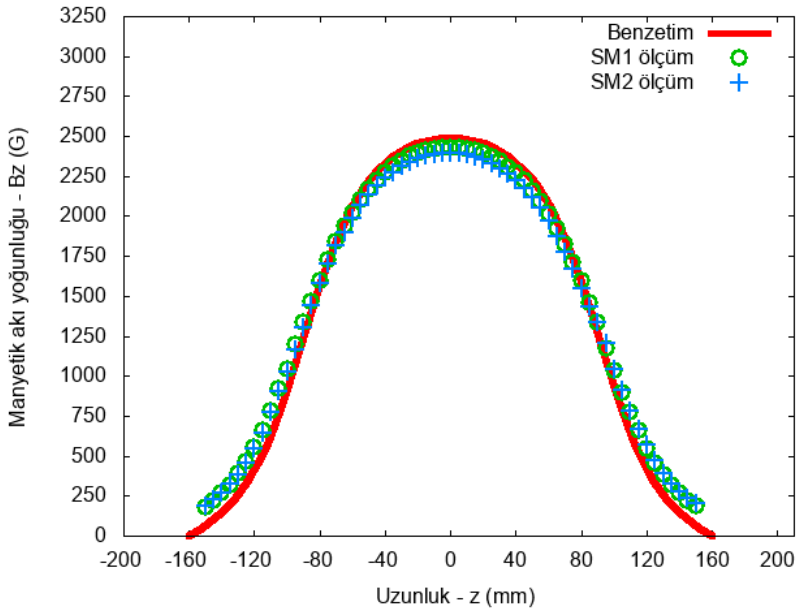
DEDA hattında kullanılan mıknatısların manyetik alan testleri bir akım kaynağı (Anonymous 2013d) ve bir manyetik alan ölçer (Anonymous 2012c) ile yapılmıştır. Ayrıca sarmal mıknatıslarındaki su soğutma performasının belirlenebilmesi için kararlılık testleri gerçekleştirilmiştir.

2.2.3.1 Sarmal mıknatıs manyetik alan ölçümleri ve kararlılık testleri

Sarmal mıknatısların manyetik alan ölçümleri için bir eksenel manyetik alan sondası (Anonymous 2012a) kullanılmıştır (Şekil 2.27). Bu sonda yardımıyla mıknatıs merkezinde (r=0), mıknatıs uzunluğu boyunca ölçümler alınarak, boyuna manyetik alan profili çıkartılmıştır. Şekil 2.28'de gösterildiği gibi, SM1 ve SM2 için alınan ölçümler ile benzetim sonuçları arasındaki fark %2'den azdır.



Şekil 2.27 Sarmal mıknatısların manyetik alan ölçümleri

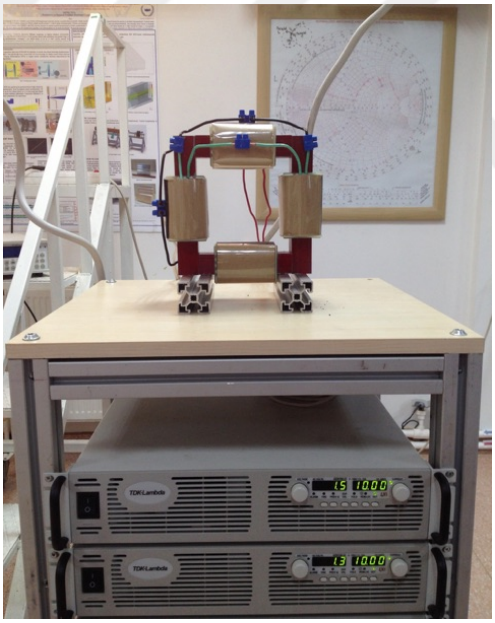


Şekil 2.28 Sarmal mıknatısların benzetim ve ölçümlerinin karşılaştırılması

Sarmal mıknatısların, sabit akımda (14 A) soğutma sistemi ile birlikte kararlılık testleri yapılarak devreye alma süreçleri tamamlanmıştır.

2.2.3.2 Yönlendirici mıknatıs manyetik alan ölçümleri ve kararlılık testleri

Yönlendirici mıknatısların manyetik alan ölçümleri için bir enine manyetik alan sondası (Anonymous 2012b) kullanılmıştır. Bu sonda ile ilgili konumlarda manyetik alan şiddetleri ölçülmüş (10 A için 115 Gauss) ve DEDA hattı için gerekli olan manyetik alana karşılık gelen bobin akımları belirlenmiştir ($<$2 A). Sabit akımda yapılan kararlılık testleri sonrasında mıknatısların devreye alınması tamamlanmıştır.



Şekil 2.29 Yönlendirici mıknatısların manyetik alan testleri

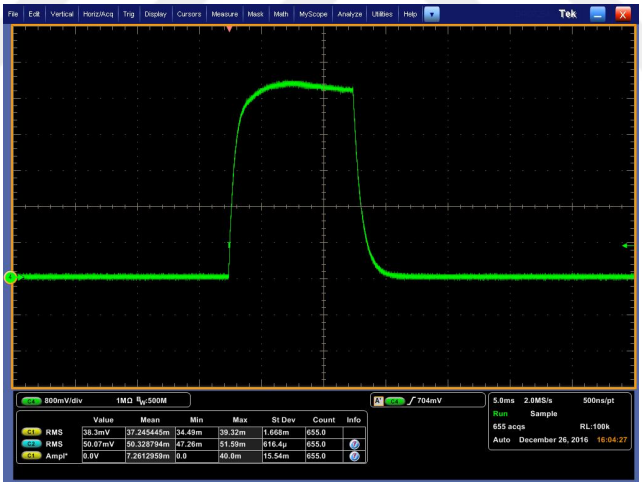
2.2.4 DEDA hattı demet tanılama ölçümleri

SPP DEDA hattında iyon kaynağından çıkan demetin özelliklerinin belirlenebilmesi için bazı çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar demet akımının ölçülmesi, demet enine boyutu

ve profilinin ölçülmesi ve enine demet yayınımının ölçülmesi olarak sıralanabilir.

2.2.4.1 Demet akımı ölçümü

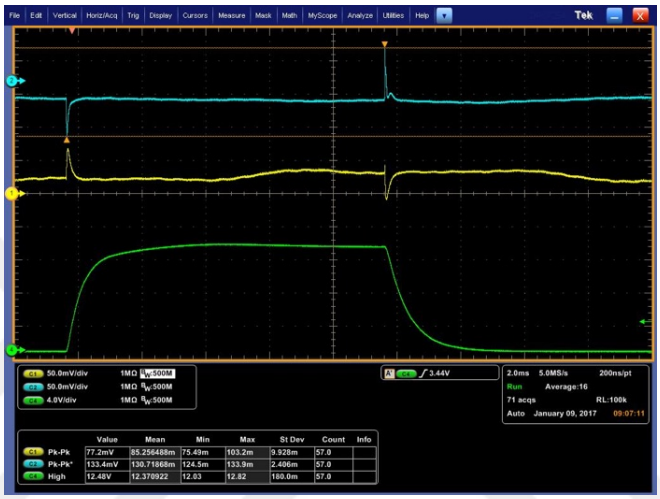
DEDA hattında demet akımı ölçümleri iki ayrı noktada (FB1, FB2) gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümler için FB1 ve FB2'den gelen akım sinyalleri 2.5 GHz'lik bir osiloskop (Anonymous 2012d) yardımıyla okunmuştur. Akım sinyalleri ile osiloskopun empedans uyumu, bir eşleme kutusu ile sağlanarak demet akımı ölçümleri alınmıştır. İlk olarak, iyon kaynağından çıkan atmalı demetin kayıpsız bir şekilde ölçülebilmesi için, parçacıklar SM1'den geçirilerek DE1 üzerinde odaklanmıştır. FB1'in açıklığından daha küçük boyuta getirilen 20 keV'lik proton demetinin FB1 ile ölçülen akımı şekil 2.30'da gösterildiği gibi 4.4 μA olarak ölçülmüştür. Bu ölçüm için iyon kaynağının gücü ve zaman yapısı 100 W, 10 ms ve 1 Hz olarak ayarlanmıştır.



Şekil 2.30 FB1 demet akımı ölçümü (0.8 μA/div)

DEDA hattında bir diğer demet akımı ölçümü RFQ önünde gerçekleştirilerek RFQ'ya girecek demet akımı ölçülebilmiştir. Bunun için öncelikle SM2 ile DE2 üzerinde odaklanan proton demeti, FB2'nin açıklığına girebilecek boyutlara getirilmiştir. Bu şekilde FB2'ye odaklanan proton demet akımı, daha önce sözü edilen eşleme kutusu yardımıyla osiloskop üzerinde okunmuştur (Şekil 2.31). Ölçümlerde 200 W'lık iyon kaynağı gücü için RFQ

girişinde okunan demet akımı 12.5 μA mertebesindedir. Bu ölçümler sırasında DTK1'in önünde ve arkasında bulunan akım trafolarından alınan sinyaller de incelenmiştir. Bu sinyaller için ilgili kalibrasyon etkeni uygulandığında demet akımı için 13.2 μA değeri bulunmuştur. Trafo-1 ve Trafo-2'nin sinyallerinin ters olmasının nedeni, demet hattına takılan trafo sarım yönlerinin ters olmasıdır. İki tanılama aracının verdiği değerler %5'lik hata değerinin içindedir.

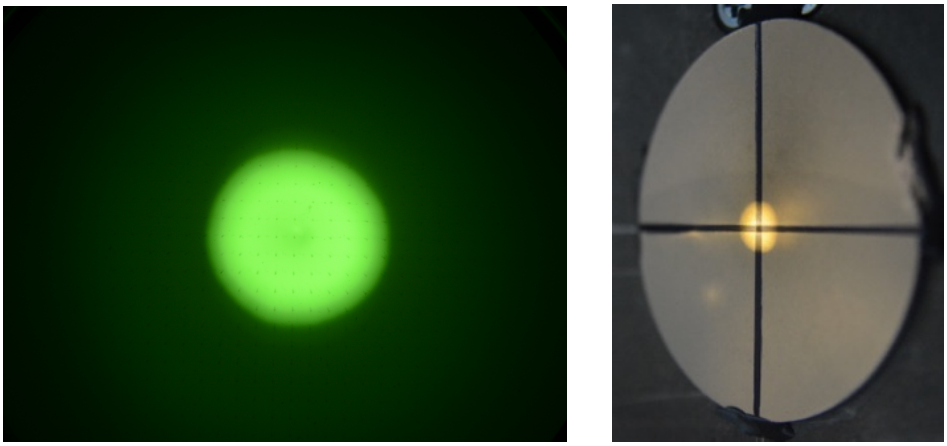


Şekil 2.31 FB2 demet akımı ölçümü (4.0 μA/div). Yeşil: FB2, sarı: Trafo-1, mavi: Trafo-2

2.2.4.2 Enine demet boyutu ve profili ölçümü

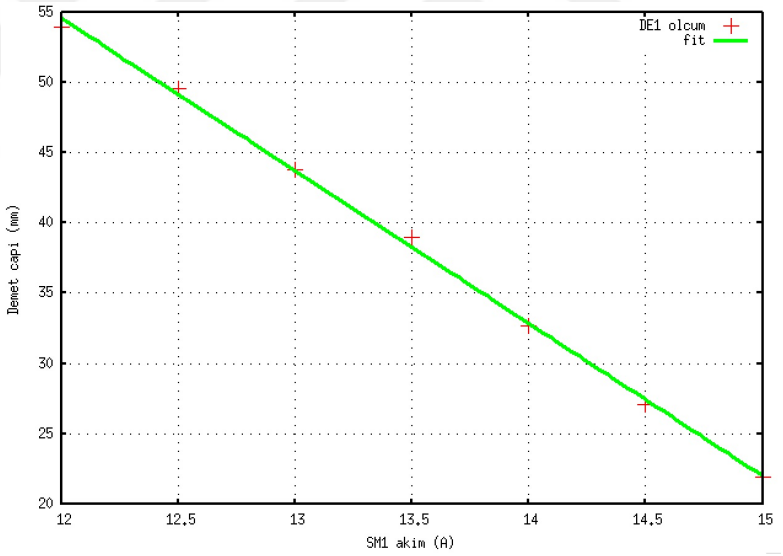
DEDA hattında demet boyutu ve şiddet profilinin ölçülebilmesi için DE1 ve DE2 üzerine proton demetleri düşürülmüştür. DTK1 içinde bulunan DE1 üzerine düşürülen proton demetinin görüntüsü şekil 2.32-sol'da verilmiştir. Bu ölçüm için 20 keV'lik demet enerjisi ve SM1 akımı olarak 15.0 A kullanılmıştır. Ölçüm öncesi yapılan kalibrasyon (0.024 mm/px) ve fotoğraf üzerinde yapılan görüntü işleme işlemi ile DE1 üzerinde demetin çapı 22 mm olarak ölçülmüştür.

Farklı SM1 akımları için DE1 üzerindeki demet çapları ölçülmüş ve şekil 2.33'te grafik halinde verilmiştir. DTK2 içinde bulunan DE2 üzerinden alınan ölçümler için kalibrasyon



Şekil 2.32 DE1 (sol) ve DE2 (sağ) üzerinden alınan demet görüntüleri. Demet çapı ölçümleri metin içinde açıklanmıştır

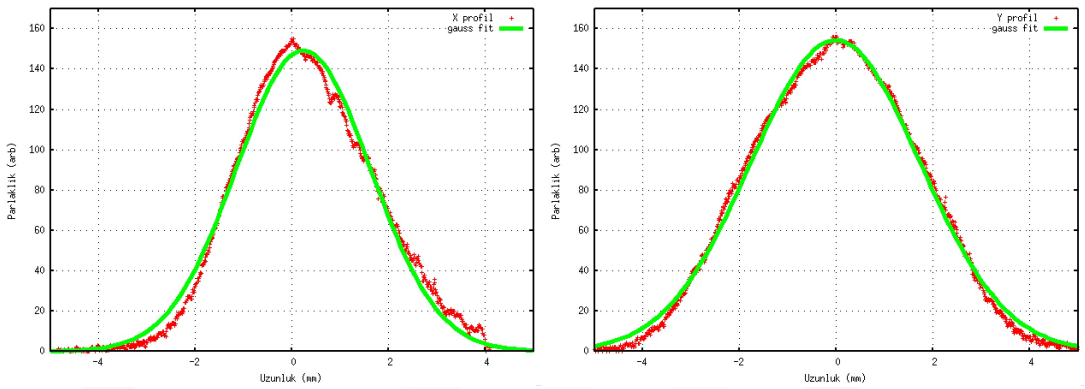
etkeni 0.014 mm/px olarak bulunmuştur. Şekil 2.32-sağ'da gösterilen DE2 üzerindeki demet çapı, 13.0 A'lik SM1 ve 12.8 A'lik SM2 akımı için 5.2 mm olarak ölçülmüştür.



Şekil 2.33 Farklı SM1 akımları için DE1 üzerinde ölçülen demet boyutları

Proton demetinin enine profilinin belirlenebilmesi için öncelikle ölçüm sistemine uygun bir akımla çalışılması ve CMOS sensör doymadan fotoğrafın çekilebilmesi gereklidir. Bunun için iyon kaynağı mümkün olduğunca düşük güçte çalıştırılmıştır. DE2 üzerinden alınan demet görüntüsü için yapılan görüntü işleme işlemi ile şekil 2.34'te gösterilen gauss dağılımları elde edilmiştir. Ölçülen demetin x ve y yönü için sigma değerleri 1.39

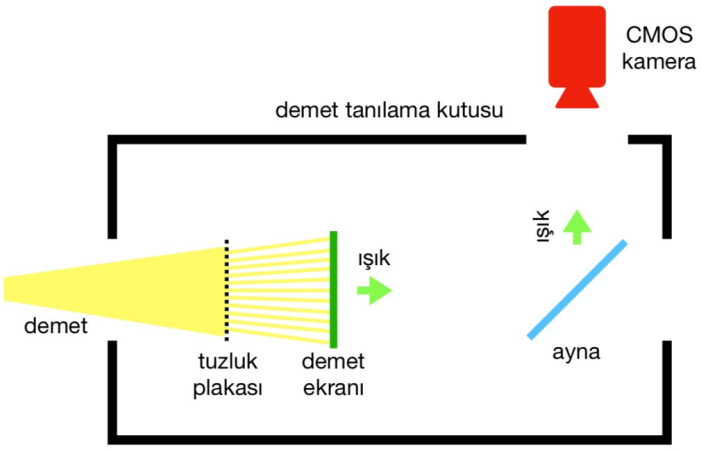
∓ 0.004 mm ve 1.75 ∓ 0.003 mm olarak hesaplanmıştır. Demetin enine şiddet profilinin "gaussian" profilde olması beklenen bir durumdur.



Şekil 2.34 DE2 üzerinde ölçülen demetin enine profili. Sol: x ekseni, sağ: y ekseni

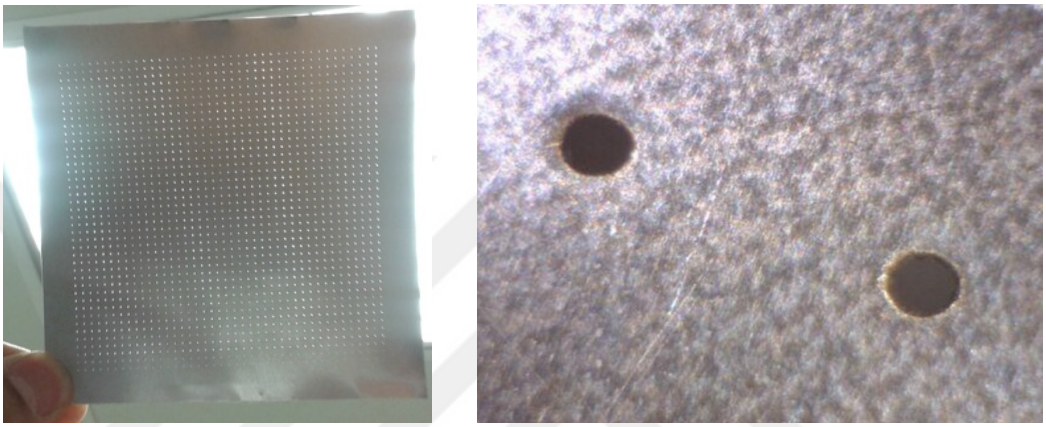
2.2.4.3 Enine demet yayınımı ölçümü

DEDA hattında demetin enine yayınımı tuzluk yöntemi ile ölçülmüştür. Bu yöntemin uygulanabilmesi için DTK1 içine bir tuzluk düzeneği kurulmuştur. Kurulan tuzluk düzeneğinin şematik gösterimi şekil 2.35'te verilmiştir.



Şekil 2.35 Tuzluk yöntemi ile enine yayınım ölçüm düzeneği

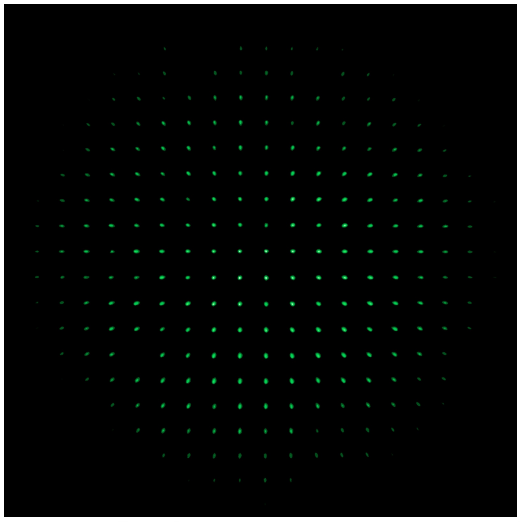
Düzeneğin oluşturulabilmesi için tuzluk plakasının delik boyutları, delik aralıkları ve tuzluk plakası ile demet ekranı arasındaki mesafenin belirlenmesi gereklidir. Bunun için DEDA hattında oluşabilecek farklı demet özellikleri için çeşitli benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar ile ilgili ayrıntılı bilgilere (Oğur 2015)'ten ulaşılabilir. Tuzluk yöntemi için 100 μm kalınlığında çelik bir plakaya FİBERLAST (Anonim 2015b) firmasında 80-100 μm aralığında değişen delikler lazer ile açılmıştır (Şekil 2.36).



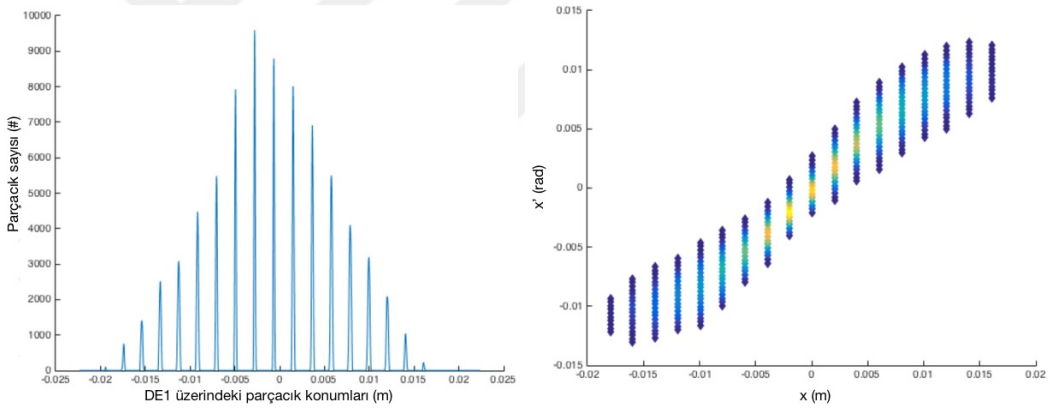
Şekil 2.36 Tuzluk plakası (sol) ve delikleri (sağ)

Ölçümler, iyon kaynağından elde edilen 20 keV enerjili, 10 ms-1 Hz zaman yapısındaki demet ile ve 13.0 A'lik SM1 akımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tuzluk plakasından geçerek 76 mm mesafedeki demet ekranına ulaşan demetin, CMOS kamera (85 mm-f/2.8) ile kaydedilmiş görüntüsü şekil 2.37'de verilmiştir.

Tuzluk ölçüm sistemi ile elde edilen görüntü, (Oğur 2015)'te yayınlanmış olan bir program ile çözümlenmiştir. Bunun sonucunda şekil 2.38-sol'da gösterilen demetin DE1 ekranı üzerindeki izdüşümü elde edilmiş ve şekil 2.38-sağ'da gösterilen x-x' faz uzayı oluşturulmuştur. Bu sayede, demetin enine Twiss parametreleri ve yayınımı deneysel olarak belirlenmiştir (Çizelge 2.6). Ölçülen bu yayınım, RFQ'nun demet kabulü için uygundur.



Şekil 2.37 Tuzluk düzeneği ile alınan demet görüntüsü



Şekil 2.38 Tuzluk düzeneği ile ölçülen enine demet özellikleri

Çizelge 2.6 Tuzluk yöntemi ile ölçülen Twiss parametreleri

Parametre	Açıklama	Değer	Birim
α	x	-4.526	-
	y	-4.154	-
β	x	5.676	mm/mrad
	y	5.628	mm/mrad
ε_n (rms)	x	0.058∓0.001	π.mm.mrad
	y	0.050∓0.001	π.mm.mrad

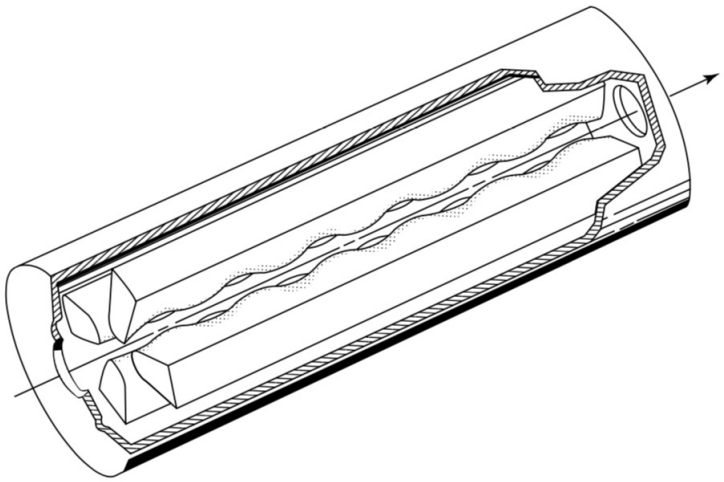
2.3 Radyo Frekans Dörtkutuplusu (RFQ)

İyon hızlandırıcılarında verimli bir hızlandırma yapılabilmesi için, iyon kaynağından sökülen parçacıkların enerjilerinin (20-50 keV) DTL (Drift Tube Linac) hızlandırıcı kovuğunun verimli olduğu en düşük enerji sınırına (3 MeV) çıkartılabilmeleri gerekmektedir. DTL kovuğunun oda uzunluğu $\beta_g\lambda$ ile orantılı olduğundan, düşük hızlarda oda uzunluklarının kısa olması DTL tüplerine yerleştirilebilecek dörtkutuplu mıknatısların uzunluklarını sınırlamaktadır. Fakat bu hızlarda parçacıklar arasındaki uzay-yükü etkisi güçlü olduğundan düşük hızlarda DTL içinde demet kayıpları kaçınılmazdır. Aynı zamanda, DTL kovuğu ile parçacıkların hızlandırılabilmesi için gelen demetin bohçalı yapıda olması gerekmektedir. Bu amaçla kullanılacak bohçalayıcı kovuklarda oluşacak boyuna demet kaybı da hızlandırıcıda yüksek akımlara çıkılabilmesini engellemektedir (Vretenar 2009).

RFQ kovuğu diğer hızlandırıcı kovukları arasında görece yeni bir kovuk çeşitidir. RFQ düşük hızlardaki (0.01c-0.1c) iyon demetlerini hızlandırmada oldukça verimlidir. RFQ, demeti hızlandırmanın yanında bohçalayabildiği için iyon kaynağı sonrasında bir bohçalayıcı bileşen kullanılmasına gerek kalmamıştır. Kovuk, iyon kaynağı çıkış enerjileri (20-50 keV) ile diğer RF kovuklarının giriş enerjileri (birkaç MeV) arasındaki bölgeyi kapsayabildiğinden, yüksek gerilimli DC hızlandırıcılara olan ihtiyaç ortadan kalkmıştır. Aynı zamanda kovuk, elektrik alanlar ile güçlü odaklama yapabildiğinden, yüksek akımlı demetler için oldukça verimlidir (Wangler 2008). Bu özellikleri nedeniyle RFQ kovuğu, günümüz doğrusal ve dairesel iyon hızlandırıcı sistemlerinin ilk hızlandırma bileşenidir.

Doğrusal hızlandırıcıların icadından sonra, düşük hızlarda demetin radyal ve boyuna yönlerdeki kararlılığı arasındaki uyumsuzluk sorunu üzerine çalışılmıştır. 1956'dan sonra elektrik alanların demeti hızlandırmanın yanında radyal odaklama kuvveti için kullanılabileceği gösterilmiştir. Bu fikir, elektrik kuvvet, hızdan bağımsız olduğundan, hız değişiminin fazla olduğu RF kovuk yapısı için oldukça kullanışlıdır (Crandall vd. 1979). Bu sayede hızlandırıcıdaki hız değişimi odaklama kuvvetini değiştirmeyeceğinden, hıza bağlı manyetik kuvvet ile yapılan odaklamanın aksine güçlü odaklama kuv-

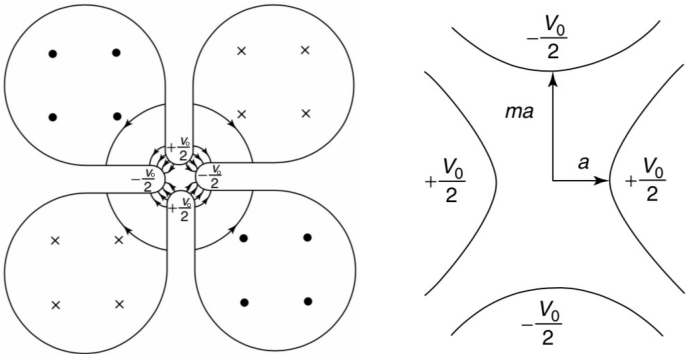
veti sağlanabilmiştir. 1970'de Kapchinsky ve Tepliakov bu fikri kullanarak, bir RF dört-kutuplunun elektrotlarının yapısı değiştirilerek RF elektrik alanlar ile hem radyal yönde odaklama hem de boyuna yönde hızlandırma yapılabileceğini göstermiştir. Bu elektrotların yapısının nasıl değiştirilmesi gerektiği, potansiyel fonksiyonu kullanılarak gösterilmiştir (Kapchinskiy ve Tepliakov 1970a). Kapchinsky ve Tepliakov 1970'de ikinci bir çalışma (Kapchinskiy ve Tepliakov 1970b) ile, RFQ parametrelerinin yavaşça değiştirilerek demetin RF dört-kutuplu kuvvetleri altında nasıl bohçalanabildiğini göstermiştir. Bu sayede, kovuğa beslenen demetin bohçalanıp, RF kovasına oturtularak (RF bucket) verimli bir şekilde hızlandırılabileceği gösterilmiştir. Aynı zamanda 1974 yılında ilk deneysel RFQ çalışmasını da yapmışlardır. 1979'da Los Alamos Ulusal Laboratuvarı (LANL), bu yapıyı test edebilmek için bir kovuk geliştirmiş ve kovuğun verimin arttırılabilmesi için önemli demet dinamiği çalışmaları yapmıştır (Şekil 2.39). Bu çalışmalar ile RFQ'nun kanat-ucu tasarımı için önemli bir yöntem olan LANL dört bölge yöntemi (4-section procedure) geliştirilmiştir (Crandall vd. 1979). Bu yöntem Bölüm 2.3.1.3'te açıklanmış ve kullanılmıştır. 1980'de LANL'ın ürettiği RFQ ilk kez başarılı bir şekilde çalıştırılmıştır. İlerleyen yıllarda RFQ, yüksek akımlı iyon hızlandırıcıları için olmazsa olmaz bir bileşen haline gelmiştir (Vretenar 2009).



Şekil 2.39 RFQ kovuğu ve kanat yapısı (Crandall vd. 1979)

RFQ'nun çalışma prensibinin anlaşılabilmesi için ilk olarak RF dört-kutuplu yapısı incelenmiştir. Şekil 2.40-sol'da gösterilen simetrik RF dört-kutuplu yapısına zamanla

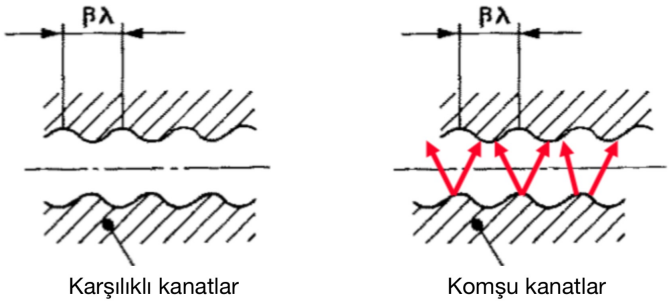
değişen bir $\mp V_0 \cos(\omega t)/2$ gerilimi uygulanırsa, demet ekseni dışında kalan parçacıklar enine ve zamanla değişen bir elektrik odaklama kuvveti hissedecektir. Bu kuvvet, düşük hızdaki parçacıklar için manyetik kuvvetten daha baskın olduğundan, parçacıkların kovuk içinde odaklanabilmesi açısından daha üstündür. RF dört-kutuplu içinde ilerleyecek bir parçacık, zamanla değişen bir kuvvet etkisinde kalacağından kademeli bir odaklama (alternating gradient focussing) hissedecektir. Bu sayede parçacıklar, arka arkaya yerleştirilmiş farklı kutupluluktaki dört-kutuplu mıknatıslar yerine, tek bir dört-kutuplu içinde aynı odaklama kuvvetlerini hissedeceklerdir (Weiss 1987). Fakat eğer boyuna elektrot geometrisi sabit ise, böyle bir yapı içinde parçacıkları hızlandıracak boyuna eksende elektrik alanların oluşması mümkün değildir. Boyuna elektrik alan bileşenini yaratabilmek için RF dört-kutuplu yapısının simetrisinin bozulması gereklidir (Şekil 2.40-sağ). Sınır durumlar için, yatay elektrotların demet eksenine uzaklıkları "a", dikey elektrotların demet eksenine uzaklığı "ma" olarak tanımlanabilir. Eğer bu geometri, boyuna eksende elektrotların merkeze olan uzaklıkları değiştirilerek hareket ettirilirse, bu durumda demet ekseni üzerindeki potansiyel "0" değildir ve dolayısıyla boyuna eksende bir elektrik alan oluşturulabilir (Wangler 2008).



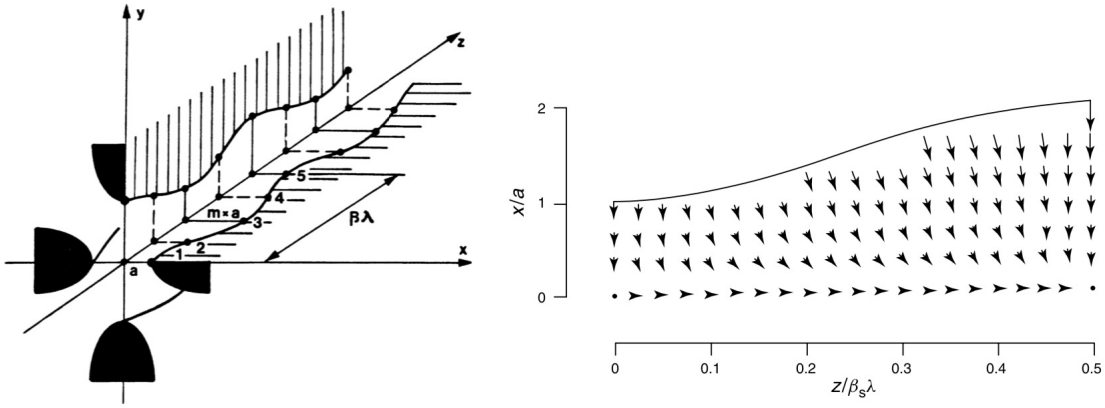
Şekil 2.40 RF dört-kutuplu yapısı (Wangler 2008)

Kovuk boyunca elektrotların demet eksenine ve birbirlerine olan uzaklarının seçimi, parçacıkların kovuk içinde hissedeceği elektrik kuvvetler açısından belirleyicidir. Elektrotların demet eksenine en büyük uzaklıklarını belirleyen kiplenim parametresi (m), parçacıklar üzerine etkiyen özellikle boyuna elektrik alan değerini belirlemektedir (Şekil 2.42-sol). Elektrotların boyuna eksende, dalgaboyu artan sinüsel bir yapıda olması,

parçacık ve elektrik alanın birbiriyle eşzamanlılığının sağlanabilmesi için olmazsa olmaz bir koşuldur. RFQ geometrisi gereği, karşılıklı elektrotlar eş fazda iken, komşu elektrotlar 90 derece faz farkı ile konumlandırılırlarsa (Şekil 2.41), boyuna eksendeki potansiyel de sinüsel şekilde değişecektir. Bu durumda, en yüksek boyuna potansiyel, elektrotlar demet eksenine "ma" uzaklığında iken oluşur. En yüksek boyuna elektrik alan ise elektrotlar demet eksenine eşit uzaklıkta "r_0" olduklarında oluşur (Weiss 1987).



Şekil 2.41 RFQ kovuğunda elektrotların yerleşimi (Vretenar 2009). Kırmızı oklar elektrik alan yönlerini göstermektedir



Şekil 2.42 RFQ kovuğunun boyuna yapısı (sol) ve elektrik alan vektörleri (sağ) (Weiss 1987),(Wangler 2008)

Şekil 2.42-sağ'da bir RFQ odası içindeki elektrik alan vektörleri gösterilmiştir. Dört-kutuplu yapısında eğer elektrotların (kanat) potansiyeli zamanla değiştirilmez ise bir RFQ odasına giren demet ilk odada hızlandırılıp, ikinci odada yavaşlayacağı için

herhangi bir hızlandırma gerçekleştirilemez. RFQ'da ilerleyen parçacığın her odada doğru yönlü elektrik alan vektörü görebilmesi için kanat potansiyellerinin her yarı-periyotta değiştirilmesi gereklidir. Aynı zamanda kovuk alanları ile parçacık arasındaki eşzamanlılığın sağlanabilmesi için, oda uzunluklarının bir eşzamanlı parçacığın bir RF periyodunda alacağı yola uygun olarak değiştirilmesi gereklidir (Wangler 2008). Bu nedenle bir RFQ odasının uzunluğu ($\beta_g\lambda/2$) eşzamanlı parçacığın göreli hızına (β_g) göre belirlenir.

RFQ'da demet dinamiği hesapları yapabilmek için elektrot uçlarında oluşan ve demete etkiyen kuvvetlerin hesaplanabilmesi gereklidir. Kovuk içinde RF dalga boyundan (λ) çok küçük radyal bölgelerde (r$\ll\lambda$) manyetik alan sıfır kabul edilir. Bunun sonucu olarak, bu bölgenin incelenmesi silindirik koordinatlardaki Laplace eşitliğinin:

$$\nabla^2 U_{(r,\theta,z)} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial U}{\partial r}\right) + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 U}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0 \tag{2.6}$$

çözülmesi ile yapılabilir. Burada $U_{(r,\theta,z)}$ elektrik alan potansiyelidir ve zamanla değişen alanlar için $sin(\omega t + \phi)$ ile çarpılmalıdır.

Eşitlik 2.6'nın genel çözümü:

$$U_{(r,\theta,z)} = \frac{V}{2}\left[\sum_n A_{0n} r^{2n} cos(2n\theta) + \sum_n \sum_m A_{mn} I_{2n}(mkr) cos(2n\theta) cos(mkz)\right] \tag{2.7}$$

ile verilir. Burada, $m+n = 2p+1,\ p = 0,1,2,...$; V kanatlar-arası potansiyel; $I_{2n}(x)$ 2n'inci dereceden değiştirilmiş Bessel fonksiyonu; $k = 2\pi/\beta_g\lambda$ olarak verilir. Potansiyel fonksiyonunun elde edilen genel çözümü tüm harmonikleri içerir. Fakat RFQ'yu

tanımlayabilmek için birkaç harmonik yeterlidir (Weiss 1987). Kapchinsky ve Tepliakov tarafından ortaya atılan yaklaşım ile, ilk toplamda sadece dört-kutuplu terimi ve ikinci toplamda sadece tek-kutuplu terimi ele alınarak, potansiyel fonksiyonu:

$$U_{(r,\theta,z)} = \frac{V}{2}\left[A_{01} r^2 cos(2\theta) + A_{10} I_0(kr) cos(kz)\right] \tag{2.8}$$

iki terimli olarak yazılabilir. Burada ilk terim odaklama, ikinci terim ise hızlandırma ile ilgili bileşenleri ifade eder. Bu potansiyel fonksiyonuna, bir RFQ odası için:

$$U_{(a,0,0)} = U_{\left(ma,0,\frac{\beta_g \lambda}{2}\right)} = \frac{V}{2} \tag{2.9}$$

ile verilen sınır koşulları uygulanırsa hızlandırma (A_{10}) ve odaklama parametreleri (A_{01}):

$$\begin{aligned} A_{10} &= \frac{m^2 - 1}{m^2 I_0(ka) + I_0(mka)} \\ A_{01} &= \frac{1}{a^2} \frac{I_0(ka) + I_0(mka)}{m^2 I_0(ka) + I_0(mka)} = \frac{X}{a^2} \end{aligned} \quad , \tag{2.10}$$

olarak elde edilebilir.

Eşitlik 2.10'dan elde edilen iki birimsiz sabit, hızlandırma verimliliği (A_{10}=A) ve odaklama verimliliği (X) olarak isimlendirilir. X'e bağlı olarak odaklama gücü (B)

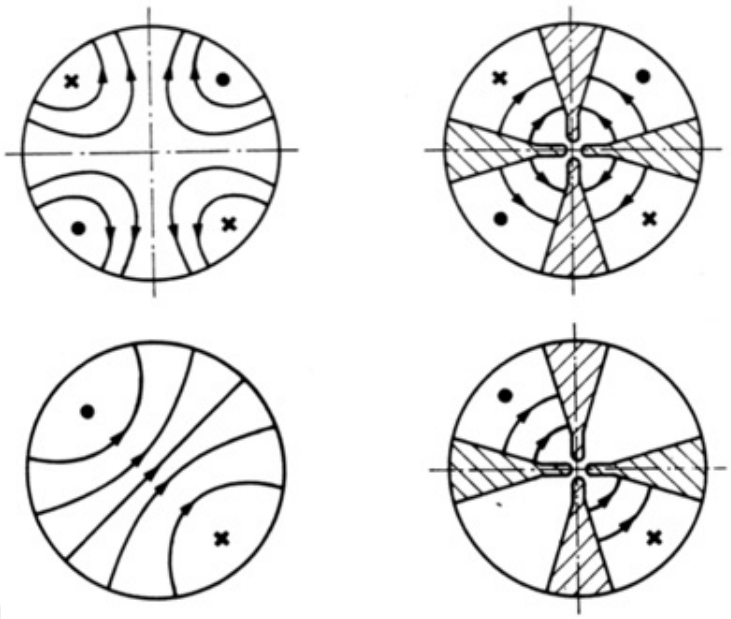
$$B = \frac{q\lambda^2}{m_i c^2}\frac{XV}{a^2} \tag{2.11}$$

ile verilir. Burada m_i iyon kütlesidir. İki terimli potansiyel fonksiyonu ile yapılan tasarım çalışmaları kanat-ucu geometrisi için yapılan yaklaşım (hiperbolik kanat-ucu) sayesinde hızlı sonuç verir. Bu fonksiyon kullanılarak gerçekleştirililen benzetimler ile RFQ'nun temel parametreleri belirlenebilir. Fakat hiperbolik kanat-ucu geometrisi ile gerçek bir üretim yapılamaz. Üretilebilir bir kanat-ucu geometrisi ile yapılacak demet dinamiği hesapları için ise, bu alandaki programlar tarafından en az sekiz terimli potansiyel açılımı:

$$\begin{aligned} U_{(r,\theta,z)} = \frac{V}{2}[&A_{01}\left(\frac{r}{r_0}\right)^2 cos(2\theta) + A_{03}\left(\frac{r}{r_0}\right)^6 cos(6\theta) \\ &+ A_{10}I_0(kr)cos(kz) + A_{30}I_0(3kr)cos(3kz) \\ &+ [A_{12}I_4(kr)cos(kz) + A_{32}I_4(3kr)cos(3kz)]\,cos(4\theta) \\ &+ [A_{21}I_2(2kr)cos(2\theta) + A_{23}I_6(2kr)cos(6\theta)]\,cos(2kz)] \end{aligned} \tag{2.12}$$

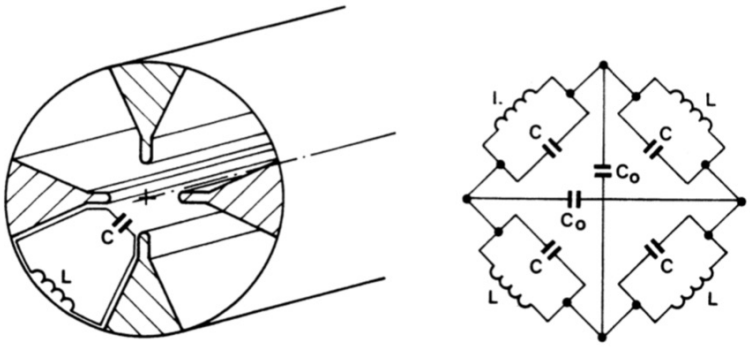
kullanılır (Wangler 2008). Buradan türetilen elektrik alanlar ile parçacıkların RFQ odaları içindeki davranışları benzetilebilmektedir. SPP RFQ kovuğu için demet dinamiği hesapları Bölüm 2.3.1.3'te açıklanmıştır.

Demet dinamiği hesapları kovuğun görece küçük (kanat-ucu) bölgesinde gerçekleştirilirken, RFQ kovuğunun elektromanyetik yapısını inceleyebilmek için kovuğun tamamının (salındırıcı) incelenmesi gereklidir. RFQ'da istenen kovuk kiplerinin ve salınım frekansının oluşturulabilmesi için farklı salındırıcı geometrileri (kanatlı, çubuklu, vb.) kullanılabilir. LANL tarafından ortaya atılan 4-kanatlı RFQ kovuk yapısı en yaygın kullanılan salındırıcı yapısıdır. Boş ve 4-kanatlı bir kovuk yapısı için TE_{210} ve TE_{110} kovuk kiplerinin davranışı şekil 2.43'te gösterilmiştir.



Şekil 2.43 TE_{210} ve TE_{110} kovuk kiplerinin kovuk içindeki davranışı (Weiss 1987) Sol: boş kovuk, sağ: 4-kanatlı kovuk

TE_{210} dört-kutuplu RF kovuk kipinde, elektrik alan enine eksende iken manyetik alan boyuna eksende yayılır. Bu dört-kutuplu kip, RFQ'nun ana çalışma kipidir. Bunun yanında kovukta istenmeyen iki-kutuplu TE_{110} kipleri de oluşmaktadır. Bu iki-kutuplu kipler, kovuğun ana çalışma kipine en yakın kipler olduğundan tasarım aşamasında özel olarak incelenmelidir (Weiss 1987). Dört ve iki-kutuplu kipleri birbirine yakın (<5 MHz) olan kovuklarda, üretim ve birleştirme hatalarının, kovukta oluşan elektrik alana etkisi artmaktadır. RFQ kovuğunun salınım frekansı ve kip davranışını inceleyebilmek için, şekil 2.44'te gösterildiği gibi bir eşdeğer devre oluşturulabilir. Bu yaklaşımda kanat-uçlarında oluşan elektrik alanlar ile kovuk duvarlarında oluşan manyetik alanlar ayrıştırılmış, ayrıca kanat kiplenimleri de ihmal edilmiştir. Kovuğun enine düzleminde oluşturulan bu eşdeğer devreye göre, kapasitans (C) kanat-uçlarını, indüktans (L) ise kovuğun duvar kısmını ifade etmektedir. Karşılıklı kanat-uçları arasını temsil eden bağlaşım kapasitansı (C_0) ise iki-kutuplu kip ile ilgili olduğundan özellikle kovuğun kip ayrışması için önemlidir.



Şekil 2.44 RFQ kovuğunun eşdeğer devresi (Weiss 1987)

RFQ kovuğu için oluşturulan eşdeğer devrenin incelenmesiyle, iki-kutuplu ve dört-kutuplu kiplerin salınım frekansları (f_2 ve f_4) için,

$$f_2 = \frac{f_4}{\sqrt{1+K}} \quad , \qquad f_4 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \tag{2.13}$$

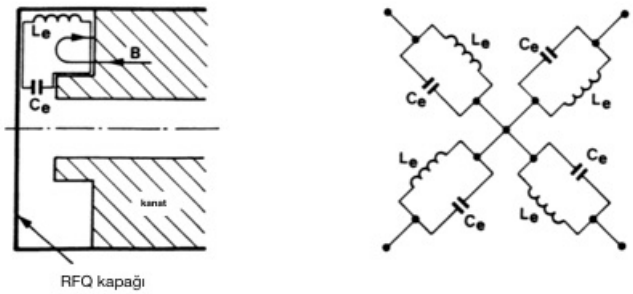
eşitlikleri yazılabilir. Burada, bağlaşım $K = C_0/C$ olarak tanımlanabilir (Weiss 1987). Bu yaklaşımdan da görüleceği gibi kovuğun enine geometrisi (dolayısıyla L ve C), kovuğun salınım frekansını ve kovuk kiplerini belirlemektedir. RFQ'nun enine geometrisinin tasarımında kovuk içinde oluşan dört-kutuplu kipin istenen frekansta salınması için kovuğun enine kanat geometrisi en-iyileştirilir. Aynı zamanda iki-kutuplu kiplerin, ana çalışma kipinden frekans olarak mümkün olduğunca uzaklaştırılması kovuğun RF kararlılığı açısından önemlidir. RFQ içinde oluşan kovuk kiplerinin frekansları,

$$f_n = \sqrt{f_0^2 + (n_k c/2L_k)^2} \tag{2.14}$$

ile hesaplanabilir. Burada n_k, kip derecesi L_k ise kovuk uzunluğudur. Özellikle 2λ'dan

uzun RFQ'lar için istenmeyen iki-kutuplu kipler, dört-kutuplu kipe daha fazla yaklaşma eğilimindedirler (Vretenar 2009). Böyle durumlarda kovuk boyunca elektrik alanın sabit tutulması zorlaşır. Bu nedenle uzun RFQ'ların RF kararlılığı açısından bir kaç parça halinde üretilmeleri gerekmektedir. Günümüzde kovuğun enine geometrisinin belirlenmesinde ve incelenmesinde 2 ve 3-boyutlu benzetim programları kullanılır. SPP RFQ'su için kovuğun enine geometrik tasarımı Bölüm 2.3.1.2'de açıklanmıştır.

RFQ kovuğunun giriş ve çıkış bölgelerinde TE_{210} kovuk kipi gereği, manyetik alan kovuk kapaklarına dik yöndedir. Kovuğun giriş ve çıkış bölgelerinde kanat potansiyelinin sabit kalabilmesi için manyetik alanın kesintisiz bir şekilde kovuk içinde dolaştırılması gerekmektedir. Bu amaçla şekil 2.45'te gösterildiği gibi kovuğun giriş ve çıkışlarında kanatlar kapaklardan uzakta tutulur. Aynı zamanda manyetik alanın yoğun olduğu kovuk duvarına yakın bölgeler boşaltılarak manyetik alanın kovuğun komşu çeyreği üzerinden kapalı bir çevrim yapması sağlanır. Böylece bu bölgelerde oluşacak güç kaybı da engellenmiş olur.



Şekil 2.45 RFQ kanat-altı bölgesi için eşdeğer devresi (Weiss 1987)

RFQ kanat-altı bölgesi için oluşturulabilecek eşdeğer devreye göre, kovuğun giriş ve çıkış bölgelerindeki kanat-uçları ile kovuk kapakları arasında oluşan bölge C_e kapasitansı ile, kanat-altı bölgeleri ile kovuk kapakları arasındaki yol ise L_e indüktansı ile gösterilebilir. Buna göre RFQ boyunca kanat geriliminin sabit tutulabilmesi için $L_eC_e = LC$ koşulunun sağlanması gereklidir (Weiss 1987). RFQ kovuğunun giriş ve çıkış bölgelerinin tasarlanabilmesi için 3-boyutlu benzetim programları kullanılır. SPP RFQ'su için kovuğun 3-boyutlu tasarımı Bölüm 2.3.1.4'te açıklanmıştır.

2.3.1 RFQ tasarımı

RFQ kovuğunun tasarım süreçleri; iki boyutlu geometrik tasarım, kanat-ucu tasarımı, demet dinamiği ve üç boyutlu kovuk tasarımı olarak sıralanabilir. Bu bölümde SPP RFQ kovuğunun tasarım süreçleri ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

2.3.1.1 RFQ için gereksinimler ve kısıtlamalar

SPP hedefleri ve yerli sanayinin üretim kabiliyetleri göz önüne alınarak RFQ tasarımı için bazı kısıtlamalar belirlenmiştir (Çizelge 2.7). Kovuğa giriş enerjisi 20 keV ile sınırlandırılmıştır. Bu kısıtlama için iki ayrı neden belirtilebilir; 1) Giriş enerjisi iyon kaynağına uygulanacak yüksek gerilim ile belirlendiğinden, iyon kaynağının izolasyon kolaylığı için 20 kV'nin altında çalışılması tercih edilmiştir. 2) RFQ kovuğunun çalışma prensibi gereği, aynı çıkış enerjisine ulaşabilmek için gerekli kovuk boyunun kısa tutulabilmesi, giriş enerjisinin düşük tutulması ile sağlanabilir. Giriş enerjisinin düşük seçilmesinin olumsuz etkileri, iyon kaynağından sökülebilecek demet akımındaki azalma ve uzay yükünün güçlenmesidir. Fakat bu olumsuzluklar SPP hedefleri açısından kabul edilebilir sınırlar içindedir.

Çizelge 2.7 RFQ kovuğu için gereksinimler ve kısıtlamalar

Değişken	Değer	Birim
Giriş enerjisi	$\leq$20.0	keV
Çıkış enerjisi	$>$1.0	MeV
Salınım frekansı	352.21	MHz
Uzunluk	$<$1.5	m
Demet iletimi	$>$90.0	%
RF güç kaybı	$<$120	kW
Çalışma etkeni	0.01	%
Tekrarlama frekansı	1.0	Hz
Kilpatrick etkeni	1.5	#

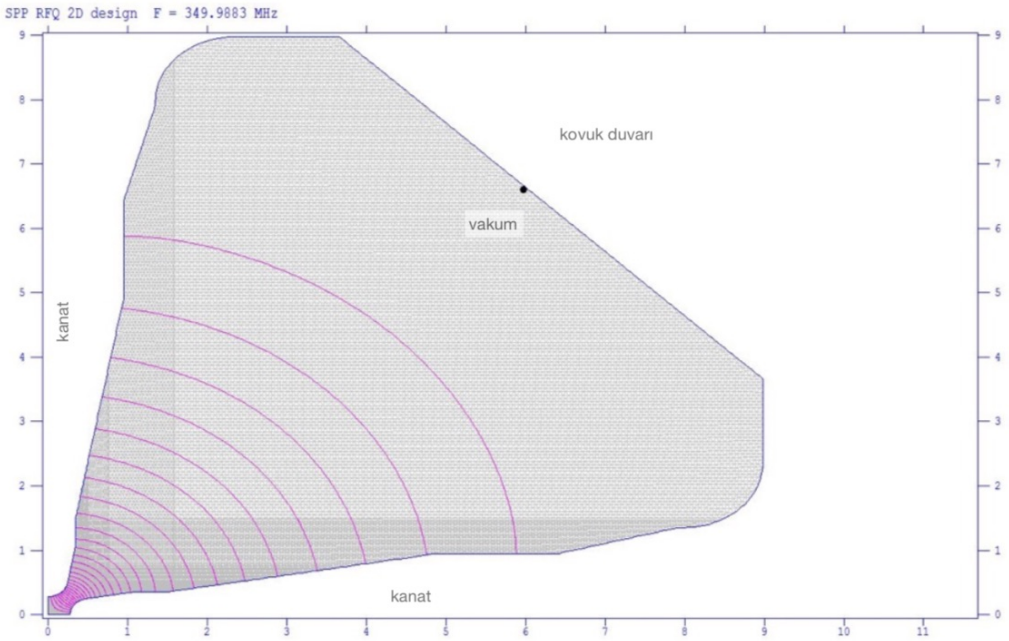
SPP hedefi gereği, üretilecek hızlandırıcının proton demet enerjisini 1 MeV'in üzerine çıkarabilmesi gerekmektedir. RFQ kovuğu kanatlarının yerli sanayide üretimi, hızlandırıcının yerliliği açısından en önemli konudur. Yerli üreticiler ile yapılan görüşmeler sonucu, 1.5 m'den uzun bir kanadın istenen hassasiyetle (∓ 30 μm) üretilemeyeceği değerlendirilmiştir. Bu nedenle tasarım sürecinde, mümkün olduğunca kovuğun boyu kısa tutulmaya çalışılmıştır. Ülkemizde ilk kez üretilecek olan bu kovuğun parametreleri, olabildiğince güvenli bölgede seçilmeye çalışılmıştır. Bu kapsamda kovuk içinde elektron atlaması (RF) ile ilgili bir parametre olan Kilpatrick (cesaret) katsayısının 1.5 ve altında tutulması uygun bulunmuştur. SPP hedefleri açısından, RFQ kovuğunda demet iletimi için ise %90'lık iletim alt sınır olarak belirlenmiştir.

RFQ kovuğunun RF çalışma frekansı 352.21 MHz olarak sabitlenmiştir. Bunun üç nedeni; 1) Bu frekans mertebesinin RFQ'nun başlangıç (en kısa) odalarının üretilebilirliği (uzunluk en az birkaç mm olmalı) açısından uygun olması, 2) Dünya'daki bir çok tesiste bu frekansın seçilmiş olması ve dolayısıyla tasarım aşamasında kolay karşılaştırma ve bilgi alışverişi yapılabilecek olması, 3) RFQ'yu besleyecek RF güç kaynaklarının bulunabilirliğinin 300-400 MHz aralığında daha kolay olması olarak sıralanabilir. SPP bütçesi ve hedefleri, RF güç kaynaklarının bulunabilirliği ve maliyetleri ile birlikte değerlendirildiğinde RFQ kovuğunun 120 kW (tepe gücü) altı bir RF güç kaybı ile tasarlanması gerektiği kararlaştırılmıştır. Kovuğun %0.01'lik bir çalışma etkeni ve 1 Hz'lik tekrarlama frekansı ile çalıştırılmasının hedeflenmesi ile hem RF güç kaynağı gereksinimleri hem de RFQ'nun soğutma ihtiyacı açısından güvenli bir bölgede kalınması sağlanmıştır.

Kovuk üretiminin basitleştirilebilmesi için, hızlandırma veriminden feragat edilerek RFQ boyunca kanatların enine kesiti eş tutulmuştur. Bu da kovuk boyunca V, r_0 ve B'nin sabit tutulması anlamına gelmektedir. Tasarlanacak RFQ için kullanılabilecek RF güç ve Kilpatrick etkeni göz önüne alındığında, 1.5 m'nin altında 1 MeV üzerine çıkılabilmesi için gerekli kanatlar-arası gerilim, yapılan ön çalışmalar ile 60 kV olarak belirlenmiştir.

2.3.1.2 Kovuğun 2-boyutlu geometrik tasarımı

RFQ kovuğunun yüksek kalite etkeni ile istenen RF frekansında salınım yapabilmesi için kovuğun enine geometrisi SUPERFISH (Billen ve Young 2000) programı ile tasarlanmıştır. Kovuğun RF özelliklerinin önemli bir kısmı 2-boyutta yapılan bu tasarım ile belirlenmektedir. İlk olarak SUPERFISH programlar bütünü içerisinde yer alan RF-QFish alt-programı ile istenen RF salınım frekansı için kovuğun çeyrek geometrisinin boyutları kabaca belirlenmiştir. Daha sonra bu geometri kovuk kalite etkeni, kovuk paralel direnci (shunt impedence), RF güç kaybı, RF kipleri ve RF salınım frekansı dikkate alınarak en-iyileştirilmiştir (Şekil 2.46). Bu çalışma sonrasında ortaya çıkan 2-boyutlu tasarıma ilişkin geometrik parametreler çizelge 2.8'de gösterilmiştir. Parametrelerin açıklamaları şekil 2.47'de verilmiştir.



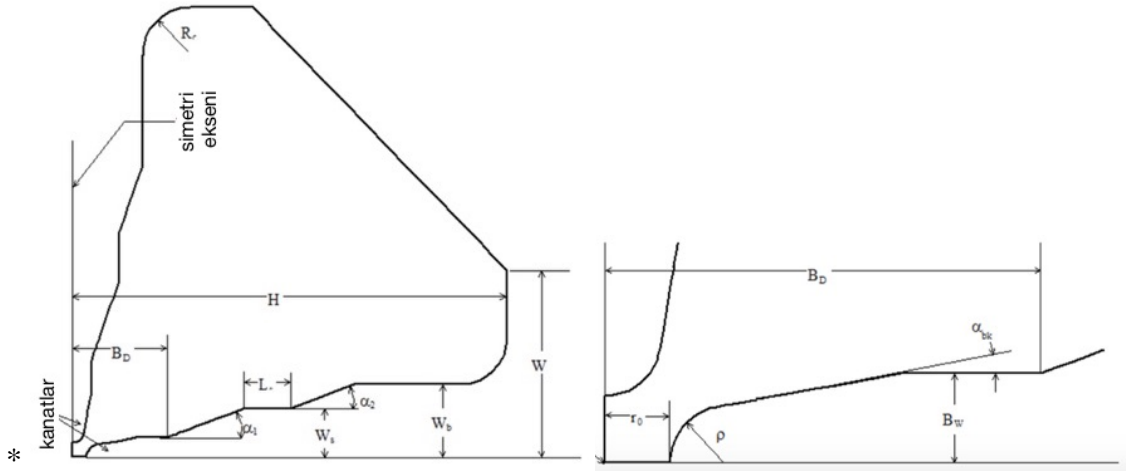
Şekil 2.46 2-boyutlu kovuk tasarımı

Şekil 2.46'da gösterilen 2-boyutlu RF tasarımı sonucu hesaplanan RF parametreleri çizelge 2.9'da verilmiştir. Görüleceği gibi RFQ kovuğu, literatür (Piquet vd. 2010) ile uyumlu olarak, asıl çalışma frekansından (352.2 MHz) 2.2 MHz daha düşük olarak

Çizelge 2.8 2-boyutlu geometrik tasarım parametreleri

Değişken	Değer	Birim	Açıklama
r_0	2.8	mm	açıklık yarıçapı
ρ	2.5	mm	eğrilik yarıçapı
α_{bk}	10.0	derece	üst etek açısı
B_w	3.5	mm	üst etek kalınlığı
B_D	15.0	mm	üst etek derinliği
α_1	10.0	derece	orta etek açısı
α_2	15.0	derece	alt etek açısı
L	15.2	mm	orta etek uzunluğu
W_s	9.5	mm	orta etek kalınlığı
W_b	13.5	mm	alt etek kalınlığı
H	89.8	mm	merkez-duvar uzaklığı
W	36.6	mm	etek altı yarı-genişliği
R_c	10.0	mm	etek altı eğrilik yarıçapı

tasarlanmıştır. Bunun seçimin amacı; kovuğun üretimi sırasında oluşacak hataların kovuk frekansını arttırma olasılığı, kovuğun vakuma alınması sırasında kovuk frekansının yükselme olasılığı ve kovuk boyunca kullanılacak RF ayarlayıcıların (tuner) kovuk frekansını arttırma yönünde daha baskın olarak kullanılabilmesi olarak sıralanabilir. RFQ kovuğu bu nedenlerle asıl çalışma frekansından daha düşük bir frekansta tasarlanarak, kovuk üretimi sonrası yapılacak RF ayarlamaları açısından güvenli bölgede kalınması hedeflenmiştir.



Şekil 2.47 2-boyutlu RF kovuk parametreleri (SUPERFISH simgeleri)

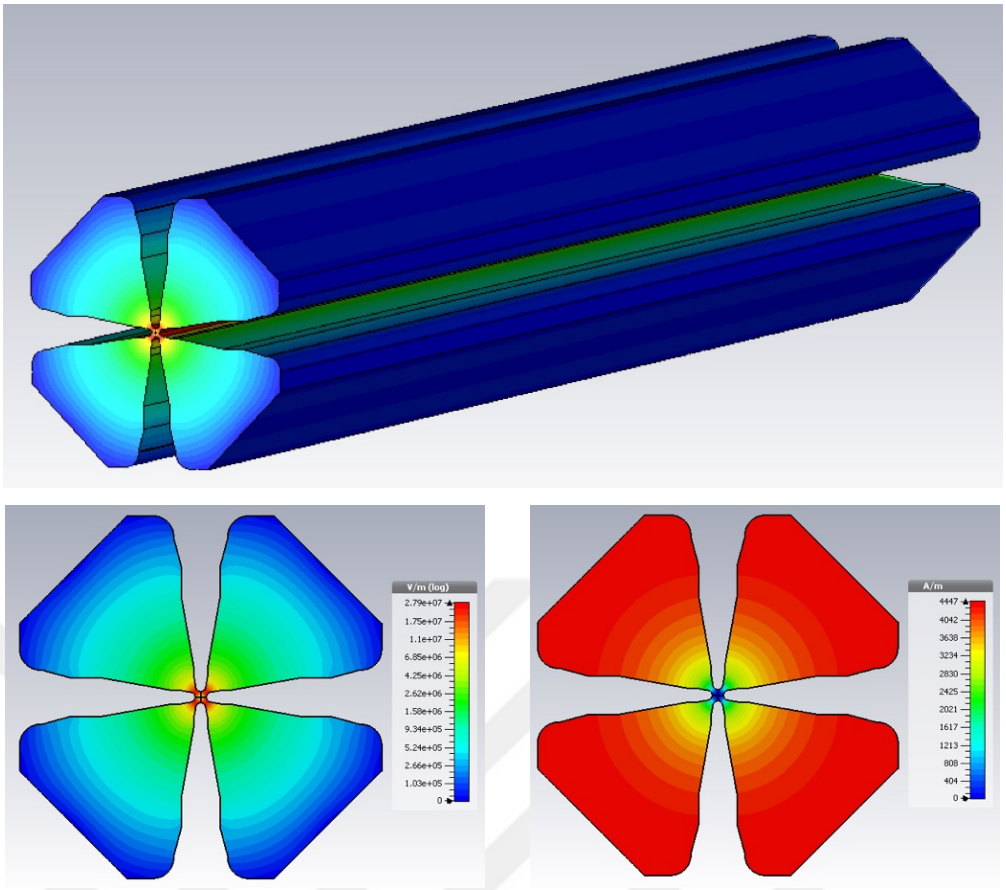
Tasarım aşamasında Bölüm 2.3.1.1'de belirtilen 1.5 Kilpatrick etkeni sınırının aşılmaması için kovuk kanatları-arasında oluşacak 60 kV'luk gerilime karşılık, kanatlar-arası mesafenin (r_0) 2.8 mm'de tutulması yeterlidir. 352.21 MHz için RF Kilpatrick sınırı 18.4 MV/m'dir. Seçilen 1.5 cesaret etkeniyle birlikte kanat yüzeylerindeki tepe elektrik alan 27.6 MV/m'e kadar yükseltilebilir. Bu değer günümüz malzeme özellikleri, üretim kabiliyetleri ve vakum seviyeleri için güvenli bölgededir.

Kovuğun 2-boyutlu RF tasarımı için başlangıç parametrelerinden olan, kanat-uçlarının eğrilik yarıçapı (ρ) 2.5 mm olarak seçilmiştir. Bu seçim yapılırken kanatların üretim kolaylığı açısından, ρ değerinin mümkün olduğunca yüksek seçilmesi amaçlanmıştır. Aynı zamanda, kovuğun paralel direncinin ve kanatlar arasındaki yük atlaması (spark) sınırının yüksek tutulması amacıyla, ρ/r_0 oranının mümkün olduğunca düşük seçilmesi gerekmektedir. Bu iki etken göz önüne alındığında ρ'nun 2.5 mm'lik değeri uygun bulunmuştur.

Çizelge 2.9 2-boyutlu RF kovuk parametreleri

Değişken	Açıklama	Değer	Birim
Salınım frekansı	4-kutuplu	349.98	MHz
	2-kutuplu	339.79	MHz
Kalite ekteni	Q_0	10554.2	#
Güç kaybı	-	482.4	W/cm

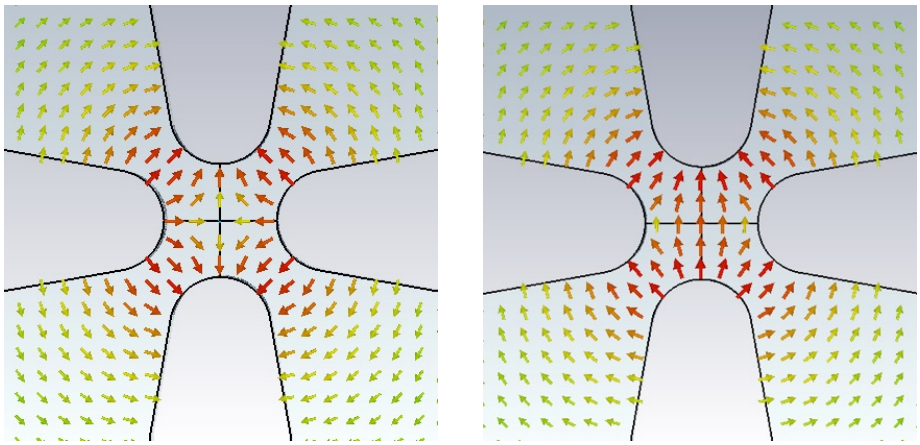
SUPERFISH ile oluşturulan 2-boyutlu geometrik tasarımın karşılaştırılabilmesi için CST MWS programı kullanılmıştır. SUPERFISH'den elde edilen geometri CST MWS ile birebir olarak oluşturulmuş ve "Eigenmode Solver" kullanılarak çözülmüştür (Şekil 2.48-üst). Bu benzetimde SUPERFISH'ten alınan 2-boyutlu enine geometri 1 m boyunca kiplenimsiz olarak uzatılmıştır. Benzetim sonucunda kovuğun enine kesiti için elektrik ve manyetik alan dağılımları şekil 2.48-alt'ta verildiği gibidir.



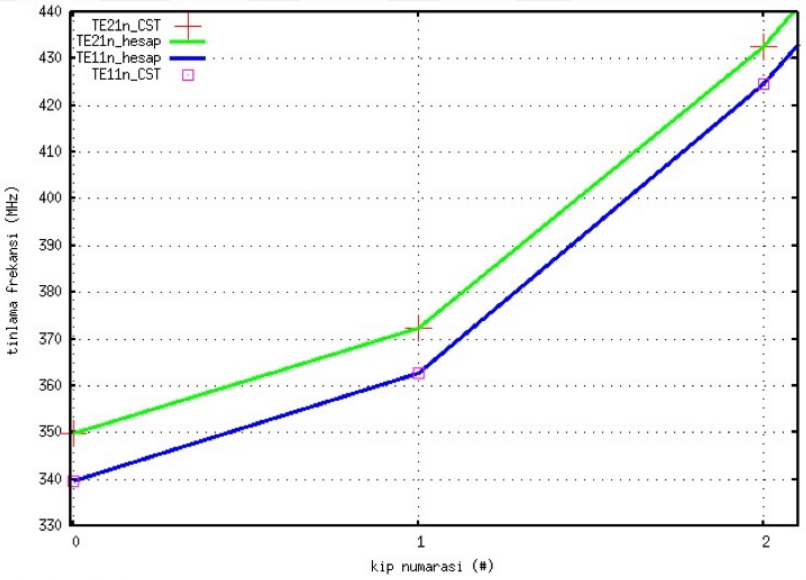
Şekil 2.48 Kovuk boyunca elektrik alan dağılımı (üst), elektrik (sol) ve manyetik (sağ) alan benzetimleri (alt)

RFQ kovuğunun demeti dağıtmadan hızlandırabilmesi için yapıda istenmediği halde oluşan iki-kutuplu kiplerin, dört-kutuplu kiplerden frekans bakımından mümkün olduğunca uzak tutulması gerekmektedir (Şekil 2.49). Tasarlanan RFQ geometrisi içinde oluşacak kovuk kiplerinin teorik (Eşitlik 2.14) ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması şekil 2.50'de gösterilmiştir. Kovuğun geometrik tasarımı için elde edilen 10 MHz'lik kip ayrışmasının yeterli olduğu bilinmektedir.

İki ayrı programda gerçekleştirilen benzetimler sonucu, SUPERFISH ve CST MWS'de elde edilen sonuçlar çizelge 2.10'da verilmiştir. Gösterildiği gibi iki program arasındaki fark tüm parametreler için %0.5'in altındadır.



Şekil 2.49 350 ve 340 MHz'de salınan dört kutuplu (sol) ve iki kutuplu (sağ) kovuk kipleri



Şekil 2.50 Kovuğun kip ayrışması için teorik ve benzetim karşılaştırması

Çizelge 2.10 Kovuk için SUPERFISH ve CST MWS benzetim sonuçları

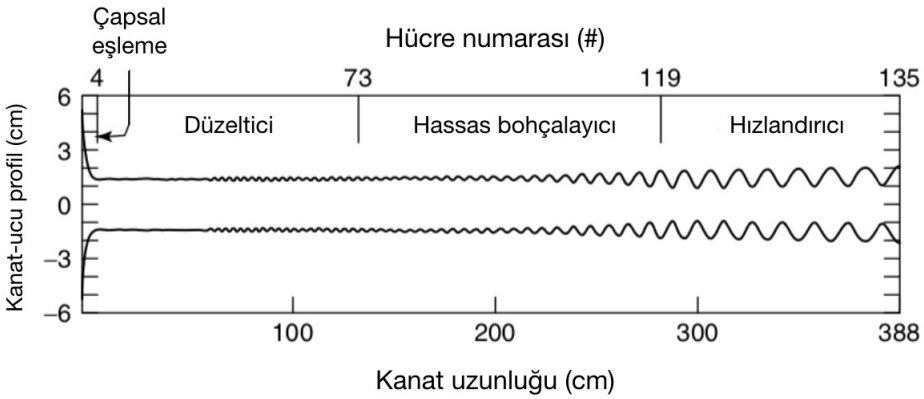
Program	f (MHz)		Q_0 (#)	U_s (J)	P_d (kW)	E_0 (MV/m)	H_0 (A/m)
	4 kutup	2 kutup		@ 60 kV			
SUPERFISH	349.98	339.79	10554.2	0.2727	56.81	27.97	4453.3
CST MWS	349.92	339.73	10601.7		56.58	27.86	4447.0

2.3.1.3 Kanat-ucu tasarımı ve demet dinamiği

RFQ kovuğunun tasarımı için ikinci aşama olan kanat-ucu tasarımı LIDOS programı (Anonymous 2013c) ile gerçekleştirilmiştir. LIDOS programında kanat-ucu tasarımı yapılırken kullanılan giriş parametreleri, Bölüm 2.3.1.1'de gösterilen kısıtlama ve gereksinimlere uygun olarak seçilmiştir. Bu parametrelere ek olarak, Bölüm 2.3.1.2'de gerçekleştirilen benzetimler sonucu, tasarım için giriş parametresi olan kanatlar-arası gerilim, kanatlar-arası mesafe ve kanat-ucu eğrilik yarıçapı sırasıyla 60 kV, 2.8 mm ve 2.5 mm olarak seçilmiştir. Kanatların üretim kolaylığı açısından RFQ boyunca bu parametreler sabit tutulmuştur.

LIDOS programında kanat-ucu tasarımının yapılabilmesi için, RFQ hücreleri boyunca kiplenim (m) ve eşzamanlı evre (ϕ_s) parametrelerinin en-iyileştirilmesi gerekmektedir. Bu parametrelerin en-iyileştirilmesi, "LANL dört bölge yöntemi"ne uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Bu yönteme göre; iyon türü, giriş ve çıkış enerjisi, salınım frekansı ve kanatlar-arası gerilimi bilenen bir RFQ'nun kanat-ucu tasarımı a, m ve ϕ_s parametreleri ile oluşturulabilir. Kanat-ucu tasarımının yapılabilmesi için RFQ dört ayrı bölgede (radyal eşleyici, düzeltici, hassas bohçalayıcı ve hızlandırıcı) incelenebilir (Şekil 2.51). Radyal eşleyici bölgesi, kovuğa gelen zamandan bağımsız yapıdaki demetin, RFQ'nun zaman yapısına uyacak şekle dönüştürülmesi için kullanılır. Bu amaçla odaklama gücü (B) kovuk girişinde neredeyse sıfır iken, 5-10 periyot içinde en yüksek değerine çıkartılır. Böylece gelen demet etkin bir şekilde kovuğa eşlenebilir. Bu bölgede kanat-uçları dört-kutuplu simetrisinde tutulur (m=0, ϕ_s=-90°). Radyal eşleyici bölgesinden sonra, RFQ boyunca m arttırıldıkça, B sabit kalacak şekilde kanat açıklığı düşürülür. Bu sayede demet, hızlandırıcı içinde kaybolmadan yoluna devam eder. Düzeltici bölgesinde yüksek demet yakalama verimi elde edebilmek için, hızlandırma alanı m ile arttırılırken ϕ_s düşük değerlerde tutulur. Bu aşamada demet, kiplenim nedeniyle oluşan enerji dağılımı sonucu boyuna faz uzayında eşzamanlı parçacık etrafında salınım yapar. Böylece bu bölgede demetin bohçalanması başlamış olur. Hassas bohçalayıcı bölgesinde, hızlandırma alanı en yüksek seviyesine çıkartılırken, ϕ_s de son değerine yükseltilir. Böylece demetin bohçalanması tamamlanarak, parçacıklar hızlandırıcı bölgesine hazır hale getirilir.

Hızlandırıcı bölümünde ise, ϕ_s, m ve a sabit tutularak demetin son enerjisine çıkarılması sağlanır (Crandall vd. 1979).



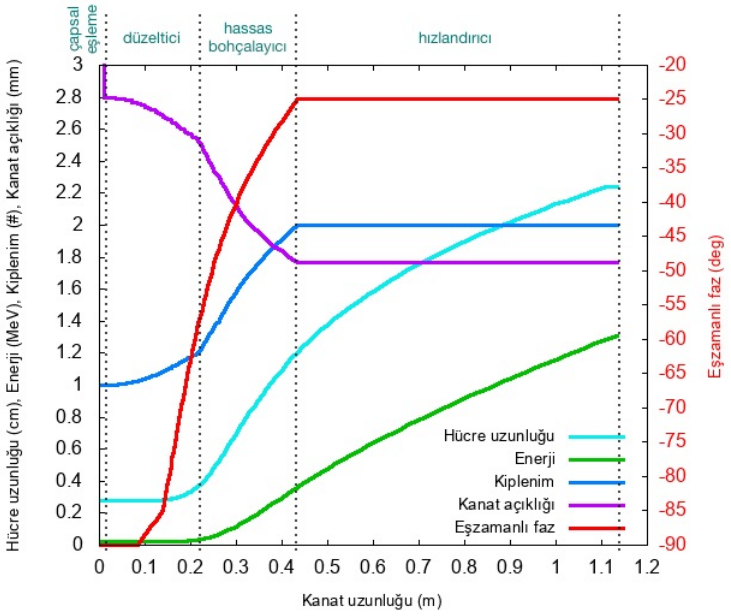
Şekil 2.51 LANL dört bölge yöntemine göre RFQ bölgeleri (Wangler 2008)

Kanat-ucu tasarımı sonucu elde edilen RFQ parametrelerinin kovuk boyunca davranışı şekil 2.52'de gösterilmiştir. Tasarım sonucunda yapılan 2-terimli demet dinamiği benzetimleri ile protonların 1.1 m'de 1.3 MeV'lik enerjiye çıkartılabildiği görülmüştür (Şekil 2.53). Ayrıca bu benzetim ile RFQ kovuğuna beslenmesi gereken proton demetinin özellikleri (demet kabulu) belirlenmiştir. Belirlenen RFQ demet kabulüne göre kovuğa girmesi gereken demetin Twiss parametreleri çizelge 2.11'de verilmiştir.

Çizelge 2.11 RFQ demet kabulü için hesaplanan Twiss parametreleri

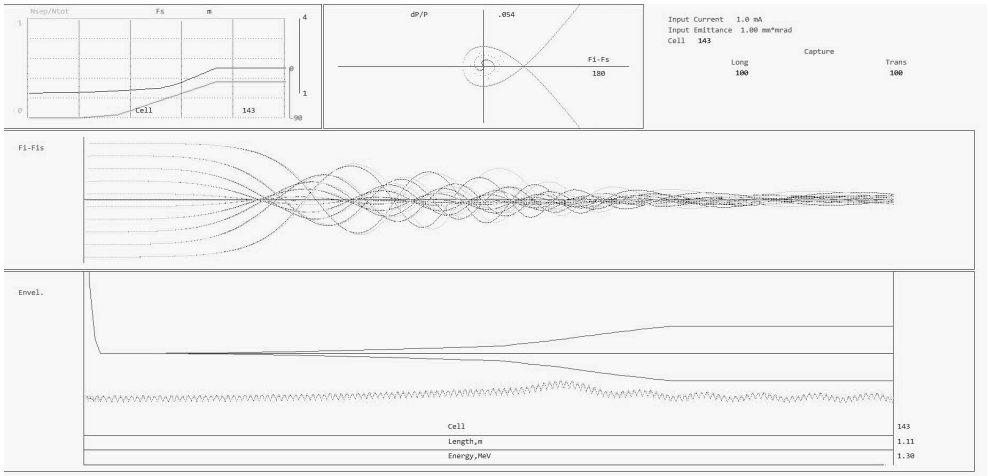
Parametre	Değer	Birim
α	0.6399	-
β	0.0128	mm/mrad
ε_n (%100)	1.0	π.mm.mrad

2-terimli demet dinamiği benzetimleri sonrası, LIDOS programı ile kanat-uçlarının baş ve son bölgeleri tasarlanmış, Bölüm 2.3.1.2'de belirlenen 2-boyutlu geometrik parametreler de kullanılarak gerçeğe daha yakın alan çözümleri yapılmıştır. Bu hesaplar sonucunda LIDOS programı ile, üretime uygun kanat-ucu geometrisini oluşturarak çok

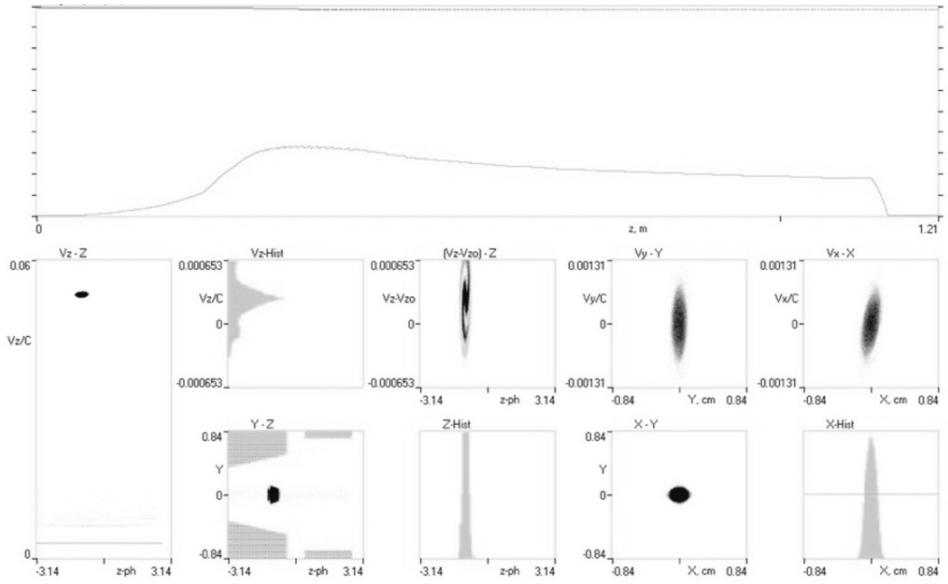


Şekil 2.52 RFQ boyunca parametrelerin değişimi

terimli alan çözümlerine dayalı demet dinamiği benzetimleri yapılmıştır (Şekil 2.54). Buna göre %99.0'lık toplam demet iletimi ile protonların %94.1'i 1.2 m'de 1.3 MeV'e ulaştırılabilmektedir. Burada istenen şekilde hızlandırılamayan demetin %4.9'luk kısmı ise, kanat uzunluğunun kısa tutulabilmesi için gerçekleştirilen hızlı bohçalamanın sonucu olarak RF kovasına oturtulamayan parçacıklardan oluşmaktadır.



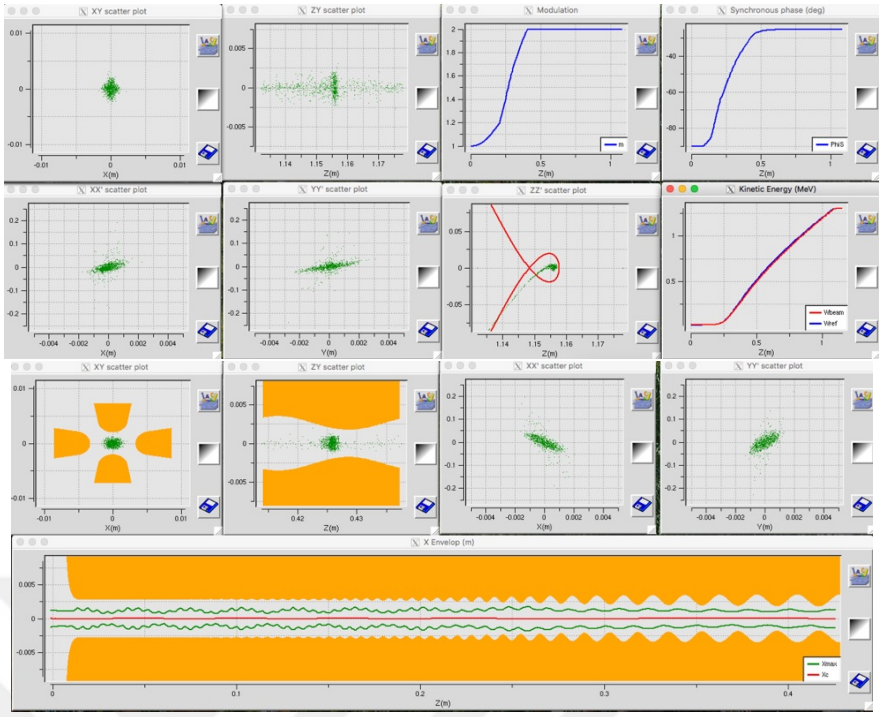
Şekil 2.53 LIDOS 2-terimli demet dinamiği



Şekil 2.54 LIDOS demet dinamiği

LIDOS ile yapılan demet dinamiği sonuçlarının karşılaştırılabilmesi için, TOUTATIS (Duperrier 2000) ve CST PS programları ile benzetimler gerçekleştirilmiştir. LIDOS'tan alınan kanat-ucu geometrisinin, TOUTATIS programına girdi olabilecek biçime getirilebilmesi için, LIDOS çıktısı DEMIRCI programı ile okunmuş ve ilgili değişkenler tanımlanarak gerekli dönüşüm işlemi yapılmıştır. TOUTATIS benzetimlerinde RFQ'ya girecek demetin parametreleri, LIDOS'un hesapladığı RFQ demet kabulü ile aynı olacak şekilde tanımlanmıştır. TOUTATIS programıyla gerçekleştirilen demet dinamiği hesabı sonucu RFQ boyunca toplam demet iletimi %98.9 olarak bulunmuştur (Şekil 2.55). Enerjileri 1.3 MeV'e ulaştırılabilen parçacıklar için demet iletimi ise %93.7 olarak hesaplanmıştır.

CST PS kullanılarak yapılan benzetimler için, LIDOS'un üretmiş olduğu kanat-ucu geometrisi INVENTOR programı kullanılarak katı model haline getirilmiş ve CST PS'e aktarılmıştır. "PIC solver" ile gerçekleştirilen demet dinamiği benzetimleri için RFQ'ya girecek demetin özellikleri LIDOS ile hesaplanan RFQ demet kabulüne uygun olarak aktarılmıştır. Benzetimlerin sonucu olarak %94.3 demet iletimi ve 1.38 MeV'lik proton enerjisi elde edilmiştir. Birbirinden çok farklı çözüm yöntemleri içeren bu üç programın sonuçları oldukça uyumlu bulunmuştur.

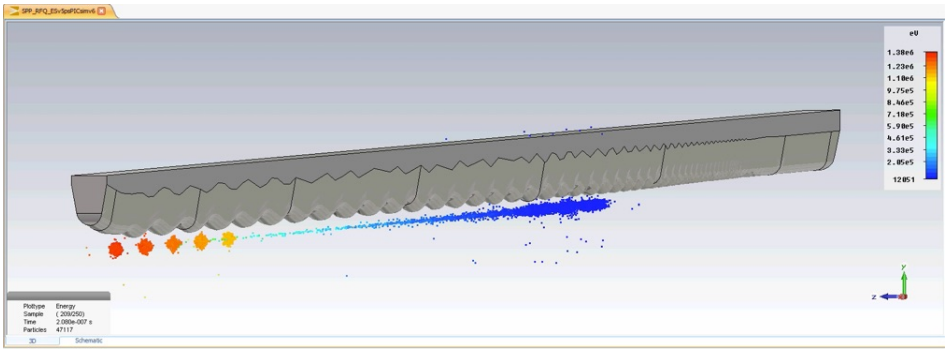


Şekil 2.55 TOUTATIS demet dinamiği

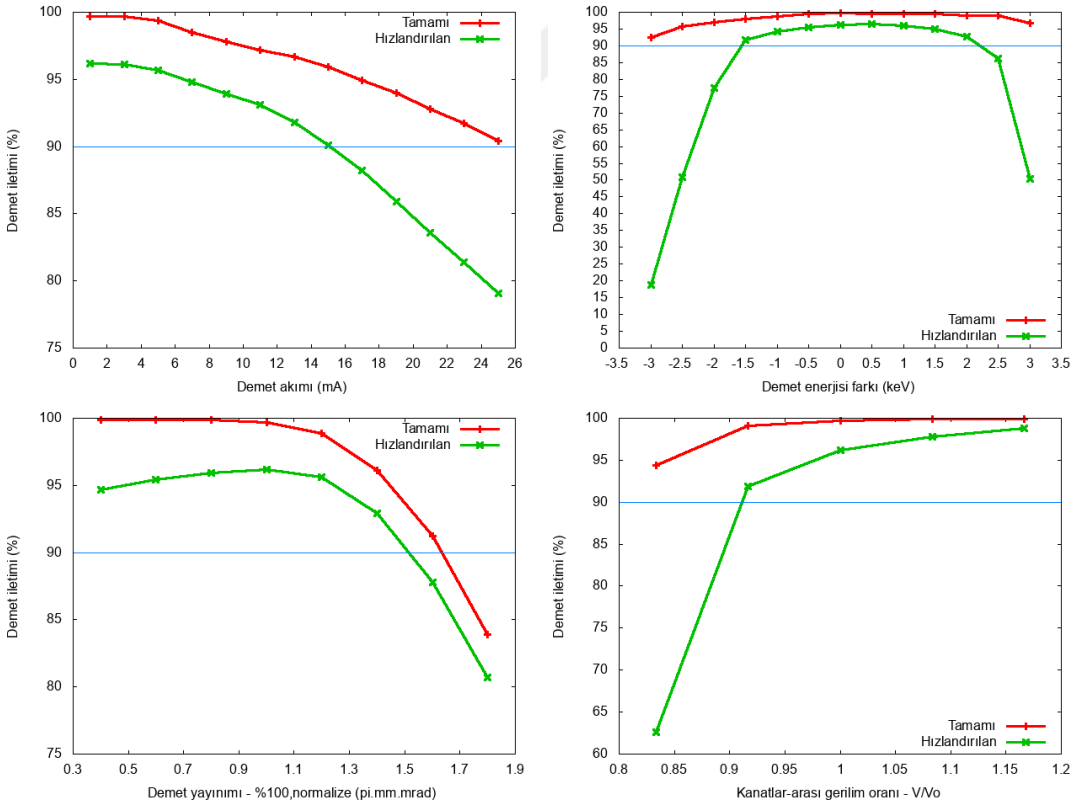
Tasarlanan kanat-ucu geometrisinin RFQ giriş parametrelerine hassasiyetini hesaplayabilmek için LIDOS programı kullanılarak hata taraması yapılmıştır. Demet akımı, enerjisi ve enine yayınımının yanı sıra RFQ kanatları-arası gerilimi için gerçekleştirilen hata taraması sonuçları şekil 2.57'de verilmiştir. Kovuk boyunca demet iletimi için %90 alt sınırı belirlendiğinden, tasarlanan RFQ -1.5/+2.3 keV giriş enerjisi hatasını, 15 mA'lik demet akımını ve 1.5 kat yüksek yayınımdaki demeti kabul edebilecek durumdadır. Kanatlar-arası gerilim için ise, 55.2 kV ve üzeri gerilimler için %90 demet iletiminin sağlanabileceği görülmüştür.

2.3.1.4 Kovuğun 3-boyutlu RF tasarımı

RFQ'nun TE_{210} kovuk kipinde salınabilmesi için, kovuğun giriş ve çıkış kanat-altı bölgelerinin tasarlanması gerekmektedir. Aynı zamanda demet dinamiği ile sabitlenen kanat-ucu geometrisinin, kovuk boyunca salınım frekansına getireceği etkinin de hesaba katılması gereklidir. Yine RFQ kovuğu boyunca kullanılacak RF ayarlayıcıların, RF ve vakum girişlerinin kovuk üzerindeki etkileri incelenmelidir. 3-Boyutta incelenmesi gere-



Şekil 2.56 CST PS demet dinamiği



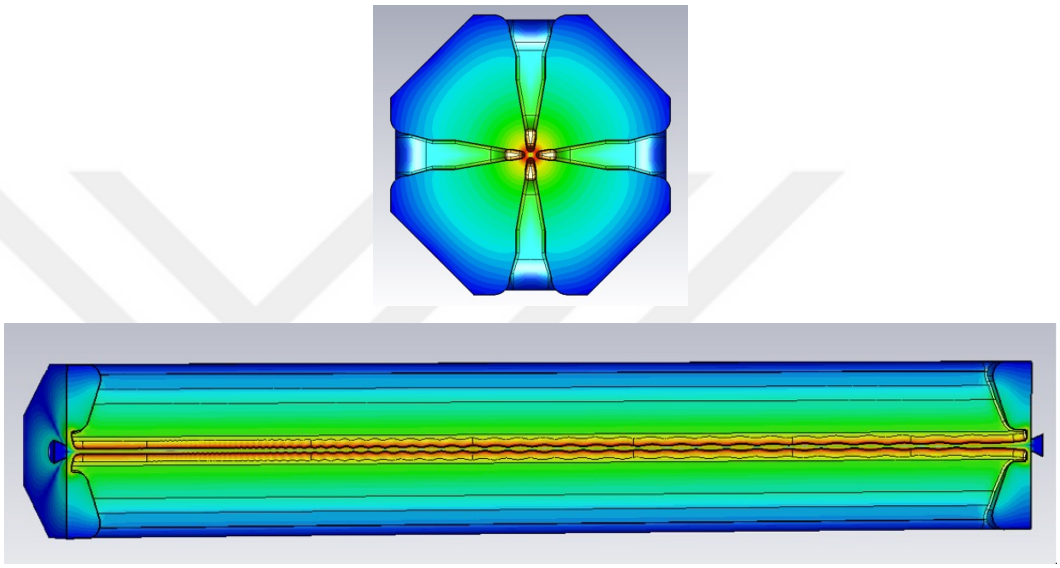
Şekil 2.57 RFQ giriş değişkenleri için hata taraması

ken bu hesaplar için CST MWS programı kullanılmıştır.

Kovuğun 3-boyutlu RF tasarımının gerçekleştirilebilmesi için 2-boyutlu ve kanat-ucu tasarımları sonucu ortaya çıkan geometrik verilerin CST MWS içinde modellenmesi gerekmektedir. Bölüm 2.3.1.2'de tasarlanan enine geometri, CST MWS programı içinde 2-boyutlu bir kesit olarak yeniden modellenmiştir. Kanat-ucu tasarımı ile belirlenen kovuk uzunluğu için bu kesit uzatılmış ve temel kanat modeli oluşturulmuştur. Bu temel model üzerine Bölüm 2.3.1.3'te belirlenen kanat-ucu geometrisinin aktarılabilmesi için, LIDOS'tan alınan kanat kütüğü INVENTOR programı ile 3-boyutlu katı model haline getirilmiştir. Bu katı model oluşturulurken gerekli hassasiyetin sağlanabilmesi için her bir kanat-ucu, boyuna 9 ayrı parçadan oluşacak şekilde modellenmiştir. Oluşturulan bu 3-boyutlu model, temel kanat modeli üzerine oturtularak RFQ kovuğunun modeli CST MWS üzerinde tamamen oluşturulmuştur. Oluşturulan modelin karmaşıklığını en aza indirerek hassas bölgelerin (kanat-ucları) daha doğru çözülebilmesi için tüm yapı üç ayrı çözüm ağı (mesh) bölgesine bölünmüş ve her bir bölge hassasiyet derecesine göre ayrı özelliklerde çözülmüştür. Oluşturulan kiplenimli model ile gerçekleştirilen benzetimler sonucu, kovuğun salınım frekansı 351.0 MHz olarak bulunmuştur. Buna göre kanat-uçlarındaki kiplenim nedeniyle 1 MHz'lik bir frekans artışı gözlenmiştir. Bu artış kiplenim geometrisi nedeniyle oluşan sığa (kapasitans) azalmasından kaynaklanmaktadır.

3-boyutlu RF tasarımının en önemli konusu olan giriş ve çıkış kanat-altı bölgelerinin (vane cutbacks) tasarlanması için parametrik benzetimler gerçekleştirilmiştir. Bu benzetimlerde hedef, kovuğun salınım frekansının istenilen değerde sabit tutulması ve kovuk boyunca elektrik alan dağılımının düzgünlüğünün sağlanmasıdır. Kanat-ucu yapısının kovuk boyunca farklı olması nedeniyle, kovuğun giriş ve çıkış bölgelerindeki yerel salınım frekansı ve elektrik alan şiddeti farklıdır. Bu nedenle kovuğun giriş ve çıkış alt bölgeleri için tasarımlar farklı olacaktır. Kanat-altı geometrileri belirlenirken bir diğer etken de RF güç kaybı, dolayısıyla kalite etkenidir. Kovuk içindeki manyetik alanının en yoğunlaştığı bölge olan kanat-altlarındaki RF güç kaybının azaltılabilmesi için, kanat-altlarının mümkün olduğunca kovuk duvarlarına uzak olması gereklidir. Fakat kovuk üretimi açısından bu durum zorlayıcı bir etkendir. Tüm bu etkenler dik-

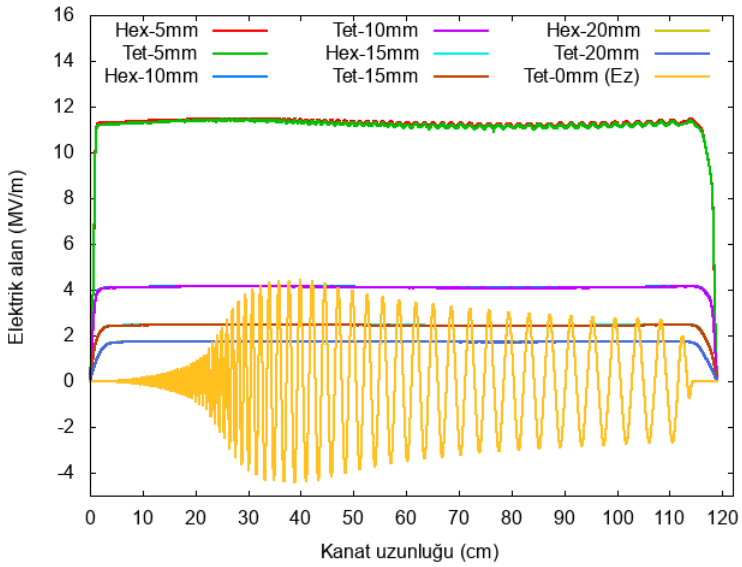
kate alınarak gerçekleştirilen benzetimler sonucu, kovuk giriş ve çıkış kanat-altı bölgeleri tasarlanmıştır. Oluşturulan yapının "Eigenmode Solver" kullanılarak gerçekleştirilen benzetimi sonucu RF salınım frekansı 351.2 MHz, kalite etkeni 9242 ve elektrik alan düzlüğü %97.5 olarak elde edilmiştir (Şekil 2.58). Elde edilen 3-boyutlu RF tasarımı sonrası, kanatlar-arasında 60 kV'luk gerilim farkının elde edilebilmesi için 65.5 kW'lık bir RF güce ihtiyaç duyulacağı öngörülmektedir.



Şekil 2.58 Kovuğun 3-boyutlu elektromanyetik benzetimi sonucu elde edilen elektrik alan dağılımı

Kovuğun demet merkezine farklı uzaklıklardaki bölgeler için iki ayrı (tetrahedral ve hexahedral) çözüm ağı ile kovuk boyunca elde edilen elektrik alan dağılımları şekil 2.59'da verilmiştir. Görüldüğü gibi 10 mm ve üzeri uzaklıklarda, kiplenim geometrisinin elektrik alan dağılımı üzerine bir etkisi olmamaktadır.

Kovuk salınım frekansını istenilen değere sabitleyebilmek için kovuk boyunca 16 adet 57 mm çaplı ve vakum sızdırmaz şekilde hareket edebilen RF ayarlayıcılar tasarlanmıştır. Bu ayarlayıcıların kovuk salınım frekansına etkisi, benzetim zamanının kısaltılabilmesi için basitleştirilmiş bir RFQ geometrisi üzerinde incelenmiştir. Benzetimler sonucu, 4 RF ayarlayıcının şekil 2.60'da gösterildiği gibi kovuk frekansını geniş bir aralıkta değiştirebildiği hesaplanmıştır. Bu değişim, kovukta 16 adet RF ayarlayıcının olduğu

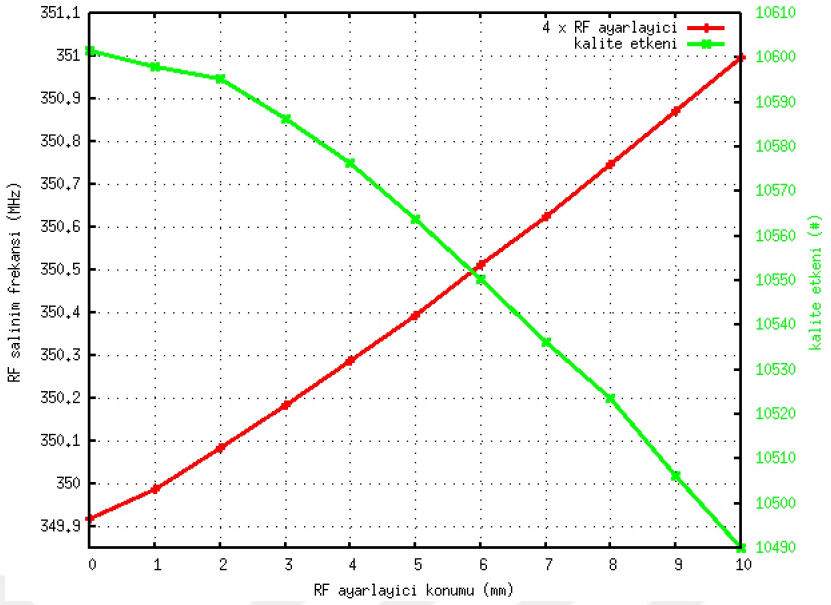


Şekil 2.59 Kovuğun farklı konumlarındaki boyuna elektrik alan dağılımları

düşünülürse, kovuğun RF ayarlanabilirliği açısından yeterlidir. Ayrıca bu benzetimler ile RF ayarlayıcıların kovuk içine girmesiyle, kovuğun kalite etkenindeki azalma miktarı da incelenebilmiştir.

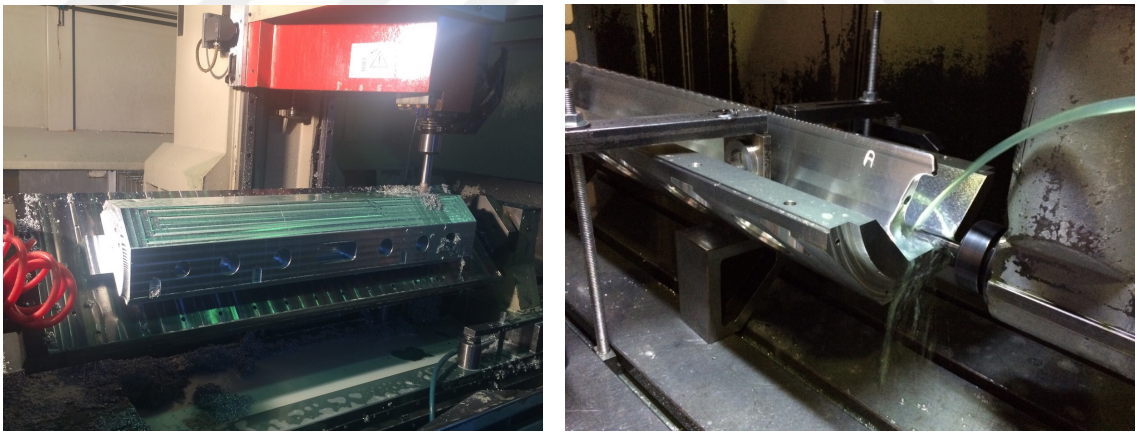
2.3.2 RFQ kanatlarının üretimi ve birleştirilmesi

RFQ kovuğunu oluşturacak kanatların üretimi ve birleştirilmesi, yüksek hassasiyet ve teknoloji gerektiren bir süreçtir. Kovuk kanatlarının hassas bir şekilde üretilmesi, kovuğun verimi için belirleyici bir etkendir. RFQ'nun kanat-ucu geometrisi için üretimin kalitesi, özellikle demet dinamiği açısından önemlidir. Kovuğun kalite etkeninin yüksek tutulabilmesi ve aynı zamanda yüksek hassasiyet ve doğrulukta birleştirilebilmesi için özel teknikler kullanılmaktadır. Dünya genelinde RFQ kovukları çoğunlukla bakır (Oxygen Free Copper (Anonymous 2019)) malzemeden, ikişerli dört ayrı kanat şeklinde üretilir. Bu malzeme özellikle; yüksek elektriksel iletkenliği, ısıl iletkenliği ve saflığı sayesinde, sert lehim (brazing) işlemi ile birleştirilebilmeye uygun olması nedeniyle seçilmektedir. Kanat-uçlarının OFC malzemeden CNC (Computer Numerical Control) ile işlenmesinde özel CNC takımları (tool) kullanılır. Üretilen kanatların birleştirilmesi için tercih edilen,



Şekil 2.60 RF ayarlayıcıların kovuk salınım frekansı ve kalite etkenine etkisi

sert lehim yöntemi özellikle RF kaçaklarının engellenmesi ve vakum verimi açısından değerlidir.



Şekil 2.61 Kanatların üretimi. Üst: RF ayarlayıcı ve vakum deliklerinin işlenmesi, alt: kanat-altı giriş ve çıkış bölgelerinin işlenmesi

Alışılagelmiş RFQ üretim süreçlerinin aksine; proje amaçları, yerli sanayinin durumu ve proje bütçesi doğrultusunda, RFQ kanatlarının aluminyum (7075 T6 serisi) malzemeden üretilmesi, sonrasında yüzeylerin bakır ile kaplanmasının hem maliyet hem de işlenebilirlik açısından uygun olduğu kararlaştırılmıştır. Bu seçimin temel nedeni,

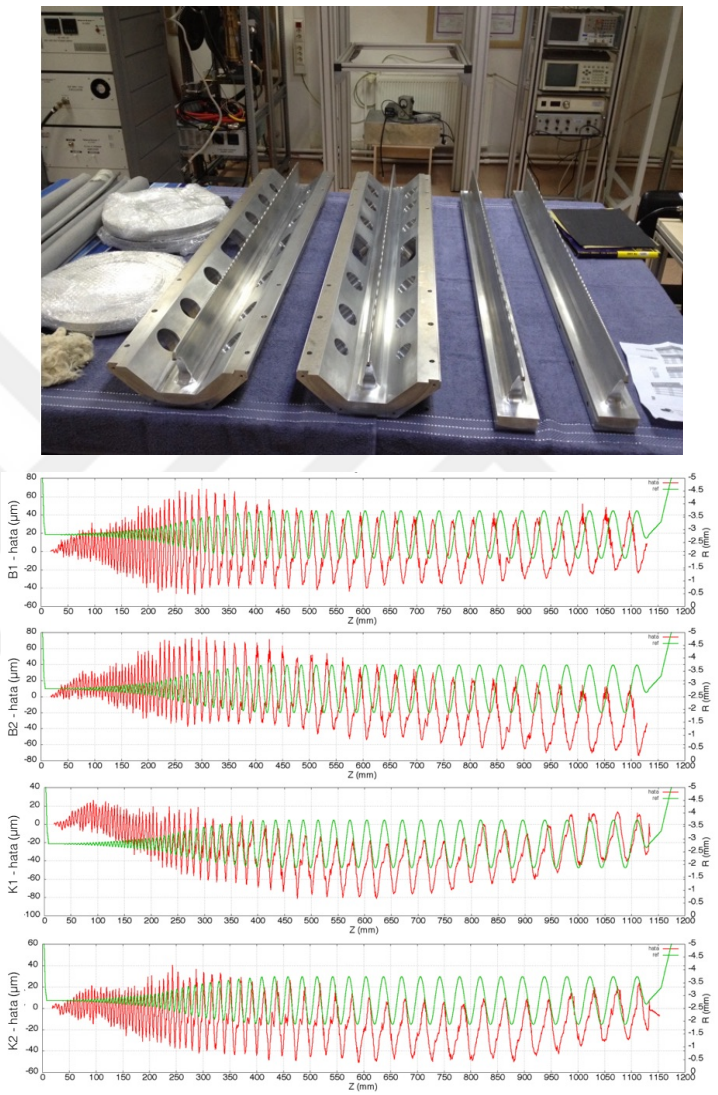
ülkemizdeki sert lehim teknolojisinin yeni yeni sanayimize girmesinden dolayı kanatların bu yöntem ile birleştirilmesinde imkansızlıkların veya teknik zorlukların yaşanma olasılığıdır. Bu nedenle kanatların birleştirilmesinde civatalar ile birlikte iletken pasta ve vakum yapıştırıcısı kullanılmıştır. Kovuğu oluşturacak olan iki küçük ve iki büyük, dört kanat yapısının üretimi ve birleştirilmesi MAKSAMAK (Anonim 2015c) firmasında yapılmıştır. Kanatların üretimi için süreç; su kanallarının açılması, kanat dış yapısının işlenmesi, kanat iç yapısının işlenmesi, RF ayarlayıcı, RF güç ve vakum girişlerinin açılması, kiplenim geometrisinin işlenmesi ve kanat-altı açıklıklarının işlenmesi olarak sıralanabilir (Şekil 2.61).

Üretim sonrası kanatlar CMM (Coordinate Measuring Machine) ile 1800 adımda test edilerek, kanat-ucu kiplenim profilindeki hatalar incelenmiştir. Sırasıyla büyük-1, büyük-2, küçük-1 ve küçük-2 kanatları için ölçülen kanat-ucu üretim hataları şekil 2.62-alt'ta verilmiştir. Görüleceği gibi dört kanat için kanat-ucu üretim hataları ∓ 80 μm'nin altındadır. Türkiye'de ilk kez üretilen böyle bir RF hızlandırıcı kovuğu için bu hataların kabul edilebilir olduğu değerlendirilmiştir.

Kanat açıklığındaki hataların RFQ demet iletimine etkisini inceleyebilmek için LIDOS programı ile hata taraması yapılmıştır (Çizelge 2.12). Yapılan bu benzetimler ile 80 μm'lik kanat açıklığı hatasının %21'lik demet iletimi azalmasına neden olacağı hesaplanmıştır. Kanatların üretim hataları nedeniyle oluşacak bu azalma, öngörülen demet iletimi hedeflerine uymasa da proje amaçları için kabul edilebilir olduğu değerlendirilmiştir. Bu hataların azaltılabilmesi için, kanatların birleştirilmesi sırasında, kanat-ucu hatalarının yapısına uygun olarak bazı iyileştirmeler yapılması planlanmıştır. Bunun için, kanat birleşim yüzeyleri ve birleşim pimleri üzerinde ayarlamalar yapılarak, hataların daha aşağı seviyelere indirilmesi amaçlanmıştır.

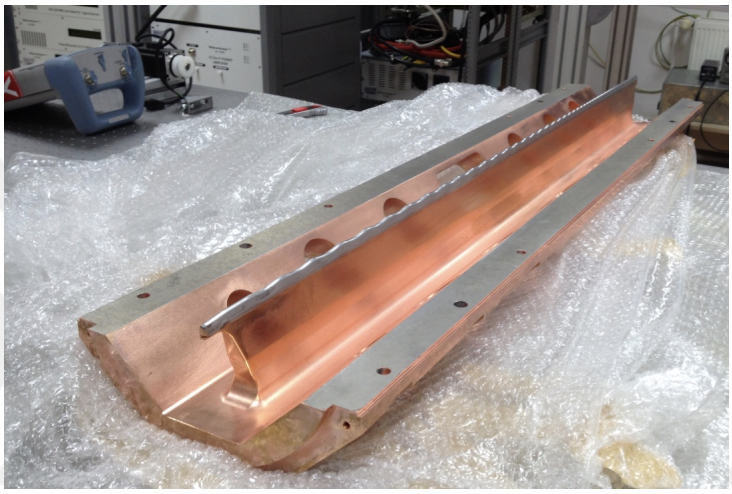
Çizelge 2.12 Kanat açıklığı için hata taraması

Kanat açıklığı hatası [μm]	0	20	50	80	100	200
Demet iletimi [%]	99.2	98.3	94.4	78.0	67.2	24.6



Şekil 2.62 Üst: üretilen kanatlar, alt: kanat üretim hataları (Yeşil: ideal kanat profili, Kırmızı: kanat hataları)

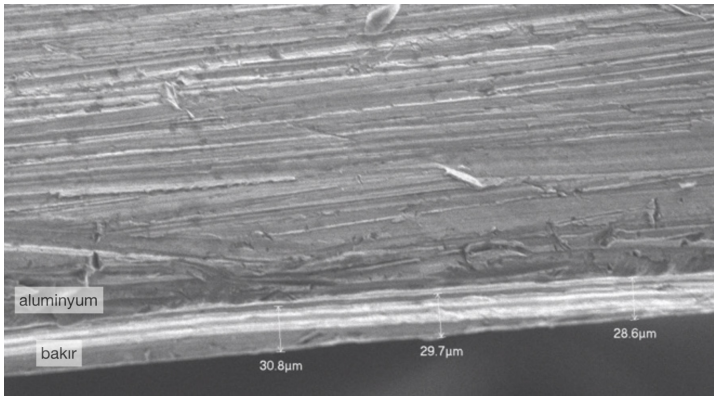
Yapılan incelemeler sonucu uygun bulunan kanat yüzeyleri, ANKOR (Anonim 2015a) firmasında bakır ile kaplanmıştır. 352.21 MHz için RF etki kalınlığı (skin depth) 3.4 μm olduğundan elektrokaplama yöntemi ile gerçekleştirilecek 30 μm'lik bakır kaplamanın yeterli olacağı değerlendirilmiştir. Yüksek hassasiyet gerektiren kanat-ucu kiplenim geometrisi yüzeyleri ve kanat birleşim yüzeyleri işlem öncesi bir bant ile kaplanarak bakır ile kaplanması engellenmiştir. Bu sayede ilgili yüzeylerin üretim hassasiyetleri kaplama sürecinde bozulmamıştır. Bakır kaplanan büyük kanatlardan biri şekil 2.63'te gösterilmiştir.



Şekil 2.63 Bakır kaplanmış büyük kanat

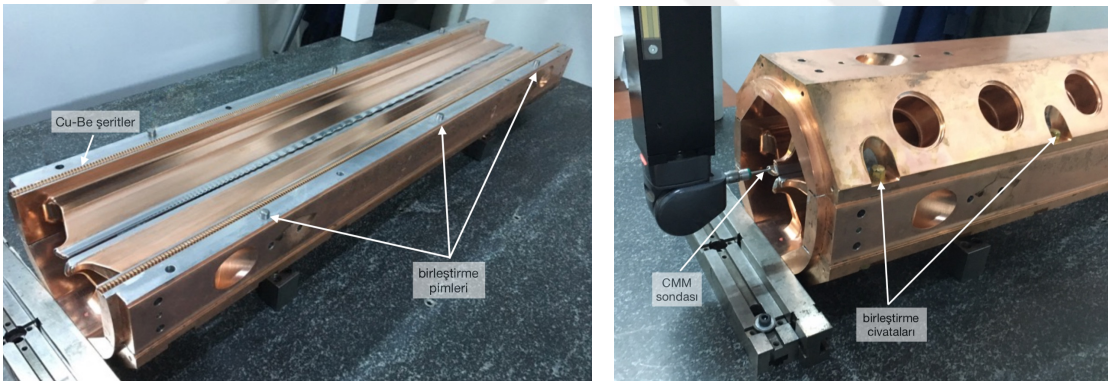
Kanatlar üzerindeki bakır kaplama kalınlığının belirlenebilmesi için yapılan ölçümler ile, kaplamanın $\mp$2.2 μm hassasiyet içerisinde yapıldığı tespit edilmiştir (Şekil 2.64).

Bakır kaplanan kanatların, 6 adet pim ile birleştirilebilmesi için işlem sırasında CMM ile ölçümler alınmıştır. Bu sayede kanatların birleştirilmesi sırasında hatalar en aza indirilmiştir. Kovuğun RF sızdırmazlığının sağlanabilmesi için, kanatların bağlantı yüzeylerinde bulunan yuvalara Cu-Be şeritler takılarak kanatlar birleştirilmiştir (Şekil 2.65). CMM ile konumları belirlenen kanatlar, 8 civata yardımıyla sabitlenmiştir. Kanatların birleştirilmesi sonrasında ölçülen birleştirme hataları şekil 2.66'da gösterilmiştir. RFQ'nun birleştirme hatalarının kanat-uçları arasındaki kapasitansı etkileyerek kovuk salınım frekansında bir fark yaratacağı öngörülmektedir. Bu farkın RF ayarlayıcıları ile düzeltilebileceği değerlendirilmiştir.



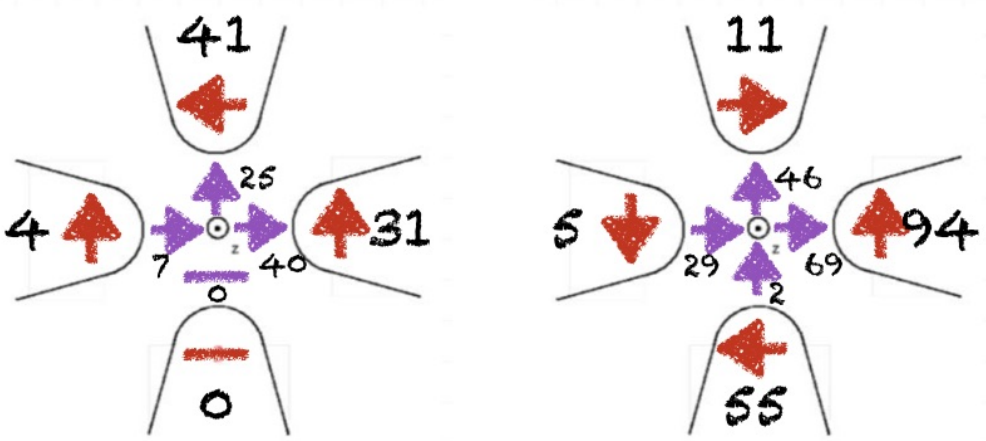
Şekil 2.64 Bakır kaplama kalınlık ölçümü

Civata ile sabitlenen RFQ kanatlarının, RF ve vakum sızdırmazlıklarının sağlanabilmesi için sırasıyla, gümüş içeren iletken pasta (Anonymous 2014f) ve vakum yapıştırıcısı kullanılmıştır. İlk olarak kanatların birleşme yüzeylerindeki yuvalar iletken pasta ile doldurulmuştur. Daha sonra bu katmanın üstü, düşük buhar basıncına sahip vakum yapıştırıcısı ile doldurulmuş ve RFQ kanatları sabitlenmiştir.



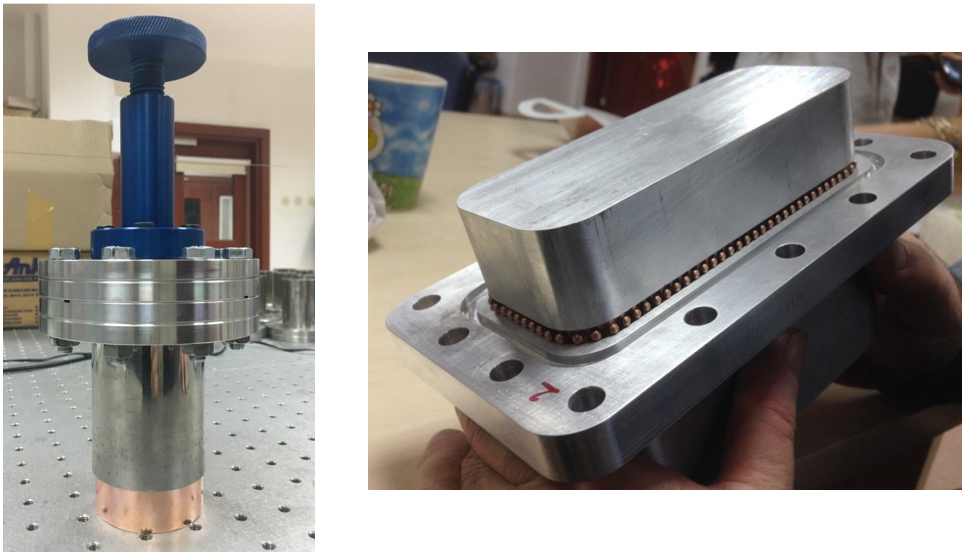
Şekil 2.65 CMM masasında RFQ kanatlarının birleştirilmesi. Üst: Cu-Be şeritler ve pimler ile birleştirilmiş 3 kanat, alt: tüm kanatların birleştirilmesi ve hizalama ölçümleri

RFQ üzerine takılacak olan RF ayarlayıcı parçalarının üretimi TAEK-RHTDB mekanik atölyesi ve Ankara OSTİM OSB'de gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.67). Vakum sızdırmaz şekilde RFQ içine ve dışına hareket edebilecek şekilde tasarlanan RF ayarlayıcılar aluminyum malzemeden üretilmiştir. Daha sonra bakır kaplanan RF ayarlayıcıların çevresi Cu-Be şerit ile sarılmış, böylece hareket kabiliyetini bozmayacak şekilde RF kaçakları



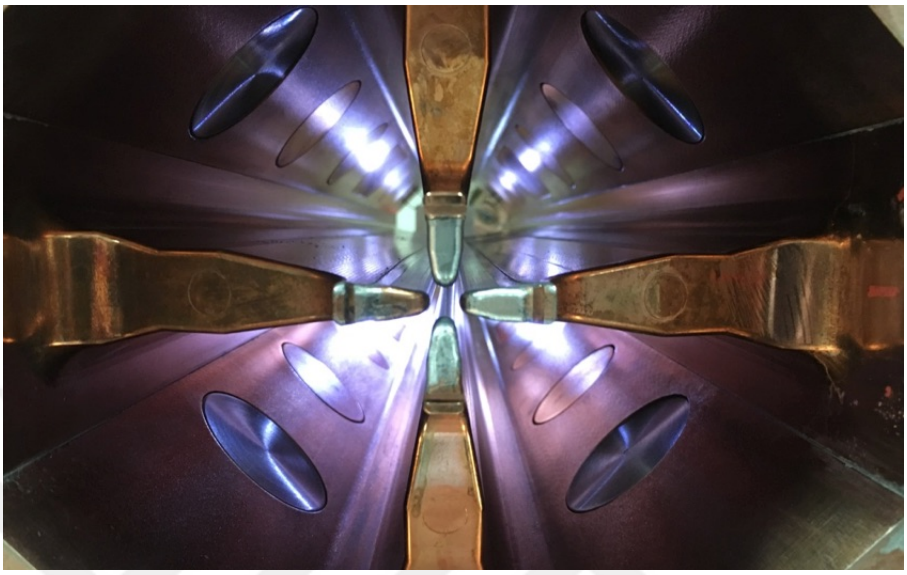
Şekil 2.66 RFQ kanatlarının birleştirme hataları (ölçüler: μm)

engellenmiştir. RF ayarlayıcıların çelik flanşları, RFQ gövdesine sırasıyla gümüş pasta ve vakum yapıştırıcısı uygulanarak sabitlenmiştir. Bunlara ek olarak RFQ'da bulunan dört adet RF güç girişinden üç tanesinin de RF ayarlayıcı olarak kullanılabilmesi için alüminyum malzemeden parçalar üretilmiştir (Şekil 2.67-sağ). Bu parçalar da bakır kaplanmış ve RFQ üzerine gümüş pasta ve vakum yapıştırıcısı kullanılarak yerleştirilmiştir.



Şekil 2.67 Sol: Parçaları birleştirilmiş RF ayarlayıcı, sağ: Kaplama öncesi RF ayarlayıcı ve Be-Cu şeritler

RFQ'yu oluşturan tüm elemanların birleştirilmesi sonrası elde edilen kovuğun iç görünümü şekil 2.68'de gösterildiği gibidir.



Şekil 2.68 Birleştirilmiş RFQ'nun iç görünümü

2.3.3 RFQ kovuğunun testleri

Tamamlanan RFQ kovuğunun devreye alma sürecinin başlatılabilmesi için gerekli olan testler bu bölümde tartışılacaktır. Kovuğun kip yapısı, kalite etkeni, salınım frekansı ve elektrik alan düzlüğü gibi RF özelliklerinin belirlenmesi yanında, vakum ve su soğutma testleri de yapılmıştır. İlgili testler bu bölümde açıklanacaktır.

2.3.3.1 Kovuk kip yapısının belirlenmesi

RFQ'nun kip yapısının belirlenebilmesi için kovuk içine bir RF bağdaştırıcı (coupler) ve bir RF kapıcı (pick-up) anten yerleştirilmiştir. Bu antenler ve bir VNA (Vector Network Analyzer (Anonymous 2014d)) tarafından beslenen düşük güçlü (mW mertebesinde) RF sinyalleri kullanılarak kovuğun kip yapısı belirlenmiştir. VNA ile ölçülen S21 parametresi

kullanılarak, yaklaşık 40 MHz'lik bir frekans aralığında kovuğun davranışı şekil 2.69'da gösterilmiştir. Bu ölçüm ile tespit edilen iki ve dört-kutuplu kovuk kipleri çizelge 2.13'te verilmiştir.



Şekil 2.69 Kovuğun ölçülen kip davranışı

Kovuğun ana çalışma kipi olan dört-kutuplu Q_{210} kipi, tüm RF ayarlayıcılar kovuk duvarı ile silme (flush) konumda iken, 353.6 MHz frekansında gözlenmiştir. Görüldüğü gibi bu sonuç, benzetimler sonucu elde edilen 351.2 MHz salınım frekansından 2.4 MHz daha yüksektir. Bu yükseliş, Bölüm 2.3.1.2'de de öngörülen kanat üretim ve birleştirme hataları ile açıklanabilir. Ölçülen salınım frekansı, RFQ'nun hedeflenen salınım frekansı olan 352.2 MHz'den 1.4 MHz daha yüksektir. Bölüm 2.3.1.4'te belirtildiği gibi, tasarlanan RF ayarlayıcılar bu frekans farkını kapatabilecek kapasitededir.

RFQ'nun demet dinamiği açısından önemli olan, D_{111} iki-kutuplu kovuk kipinin, Q_{210} dört-kutuplu kipine uzaklığı 7.3 MHz'dir. Bu farkın 5 MHz'den fazla olmasının yeterli olduğu Bölüm 2.3'te açıklanmıştır.

Çizelge 2.13 Ölçülen RF kovuk kipleri

Kovuk kipi	Benzetim (MHz)	Ölçüm (MHz)
Q_{210}	351.2	353.6
Q_{211}	374.0	373.5
Q_{212}	434.7	-
D_{110}	344.2	345.3
D_{111}	344.2	346.3
D_{112}	373.1	375.1
D_{122}	373.3	376.3

2.3.3.2 Kalite etkeninin ölçülmesi

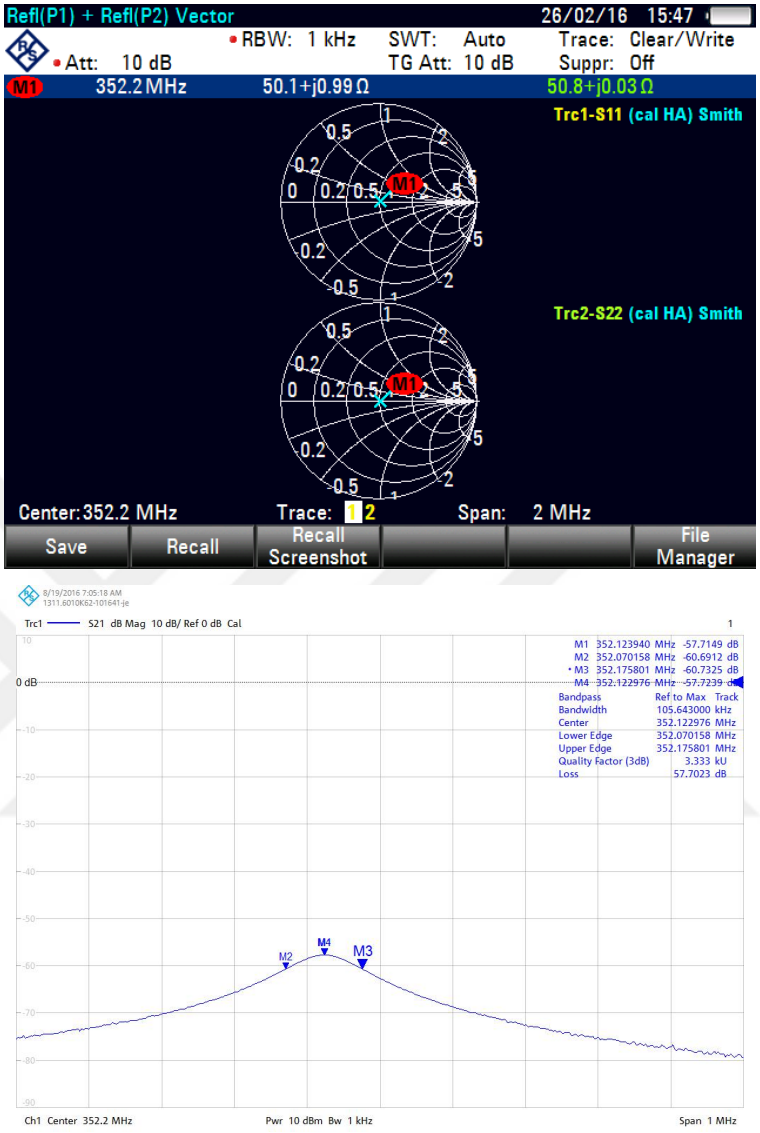
Kovuğun kalite etkeninin ölçülebilmesi için RF bağdaştırıcı ve RF kapıcı antenler birer eşleme kutusu ile 50 ohm empedansına eşlenmiştir. Kovuğun kalite etkeni hem "3 dB yöntemi" (Coakley vd. 2003) hem de "RF sönme zamanı yöntemi (decay)" (Jonsson 2015) ile ölçülmüştür.

3 dB yöntemi ile kalite etkeninin hesaplanabilmesi için VNA ile S21 parametresi ölçülmüştür (Şekil 2.70). S21 ölçümü üzerinden 3 dB yöntemi kullanılarak, kovuğun yüklü (loaded) kalite etkeni Q_L, 3333 olarak bulunmuştur. Kovuğun yüklü kalite etkeni ile yüksüz (unloaded) kalite etkeni Q_0 arasındaki ilişki, bağlaşım sabiti β_c olmak üzere:

$$Q_0 = Q_L(1+\beta_c) \tag{2.15}$$

ile verilir. Buna göre kritik bağlaşım koşulunda, kovuğun yüksüz kalite etkeni, $Q_0 = 6666$ olarak bulunabilir. Bu ölçümler öncesi, kovukta RF kaçaklarının engellenebilmesi için kullanılan Cu-Be şeritlerin etkisinin görülebilmesi için, kovuğun kalite etkeni şeritli ($Q_0 = 6423$) ve şeritsiz ($Q_0 = 4482$) olarak ölçülmüş ve Cu-Be şeritlerin önemi ortaya çıkartılmıştır. Ayrıca kovuk kalite etkeninin, aluminyum malzemeden üretilen vakum girişi tıpalarının (8 adet) bakır kaplanmasıyla arttığı ($Q_0 = 6666$) gözlemlenerek, yüzey

iletkenliğinin önemi deneysel olarak da ortaya konmuştur.

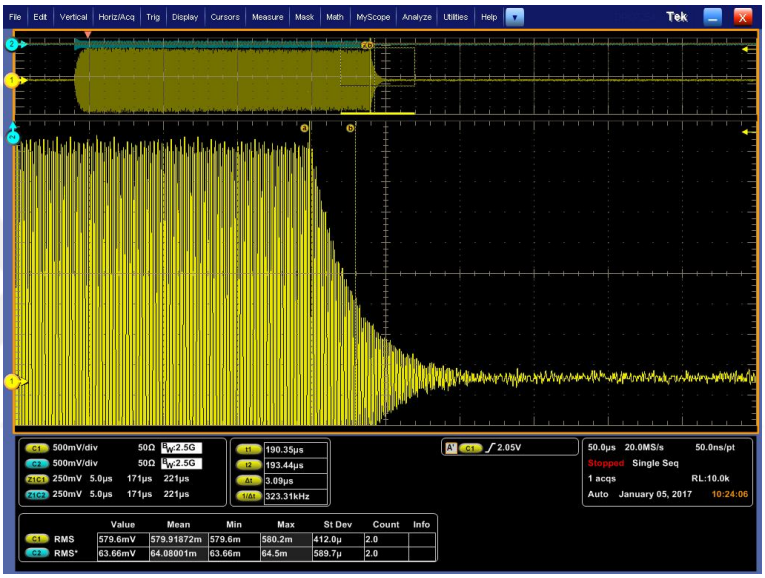


Şekil 2.70 3 dB yöntemi ile kalite etkeni ölçümü. Üst: RF bağdaştırıcı ve RF kapıcı antenlerin empedansı, alt: S21 parametresi ile kalite etkeninin ölçülmesi

RFQ'nun kalite etkeninin RF sönme zamanı yöntemi ile ölçülebilmesi için, 352.21 MHz frekansında 100 W mertebesinde RF güç üretebilen bir RF güç kaynağı (Anonim 2017) ve 2.5 GHz'lik bir osiloskop kullanılmıştır. Bu yöntemde, kovukta biriken elektromanyetik enerjinin sönme zamanının (τ_{RF}) ölçülmesi gereklidir. τ_{RF} ile Q_L arasındaki ilişki:

$$\tau_{RF} = 2Q_L/\omega \tag{2.16}$$

ile verilir. Burada ω açısal frekanstır. Buna göre, 50 W mertebesinde atmalı (1 ms, 1 Hz) RF güç ile beslenen kovukta biriken RF gücün, sönmesi için gerekli zaman (τ_{RF} =3.09μs) ölçülmüş ve kalite etkeni $Q_0 = 6838$ olarak bulunmuştur (Şekil 2.71).

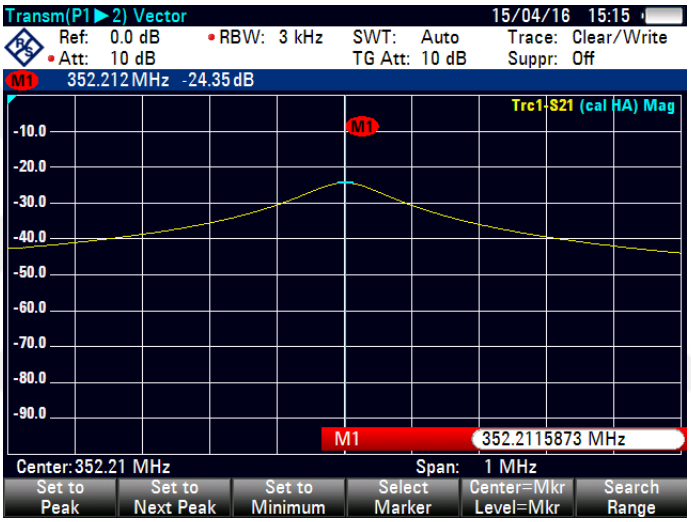


Şekil 2.71 RF sönme zamanı yöntemi ile kalite etkeni ölçümü

Ölçülen kalite etkeni (Q_0=6666), ideal durumda tasarlanan kovuğun kalite etkeninin (Q_0=9242) %72'si mertebesindedir. Bu düşüşün nedenleri olarak, kaplanan bakırın ideal yüzey iletkenliğini sağlayamaması ve kanatların birleştirme yöntemi nedeniyle oluşan RF kaçakları sayılabilir. İki farklı yöntem ile ölçülen kovuğun kalite etkeni değerlerinden, düşük olan değer (6666) seçilerek en kötü durumda kovukta 60 kV'luk kanatlar-arası gerilimin oluşturulabilmesi için 90.8 kW'lık RF gücün gerektiği hesaplanmıştır.

2.3.3.3 Salınım frekansının ayarlanması

RFQ'nun salınım frekansının istenilen değere ayarlanabilmesi için kullanılan RF ayarlayıcıların 1 tur çevrilmesi, metalin kovuk içine 2.88 mm girmesine karşılık gelmektedir. Bu sayede RF ayarlayıcıların kovuk içindeki konumları yaklaşık 40 μm adımlarla (5 derecelik dönüş için) ayarlanabilmektedir. 16 adet RF ayarlayıcının 5.75 mm kovuk dışına çıkarılması ile kovuk salınım frekansının 352.21 MHz'e indirilebildiği görülmüştür (Şekil 2.72).



Şekil 2.72 Kovuğun salınım frekans ölçümü

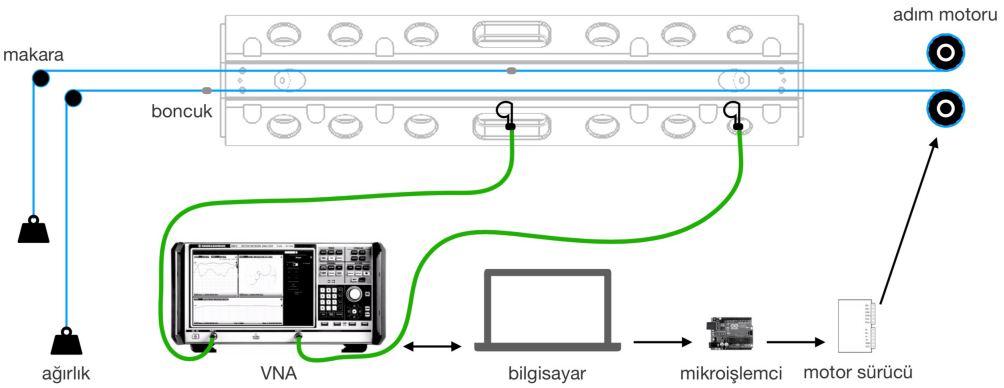
2.3.3.4 Elektrik alan profilinin ölçülmesi ve ayarlanması

RFQ boyunca oluşan elektrik alan profilinin ölçülebilmesi ve ayarlanabilmesi için boncuk-çekme (beadpull) deney düzeneği kurulmuştur (Şekil 2.73). Boncuk-çekme deneyinin temeli, pertürbasyon teorisine dayanmaktadır. Buna göre yalıtkan bir küre ile pertürbe edilen kovuk için,

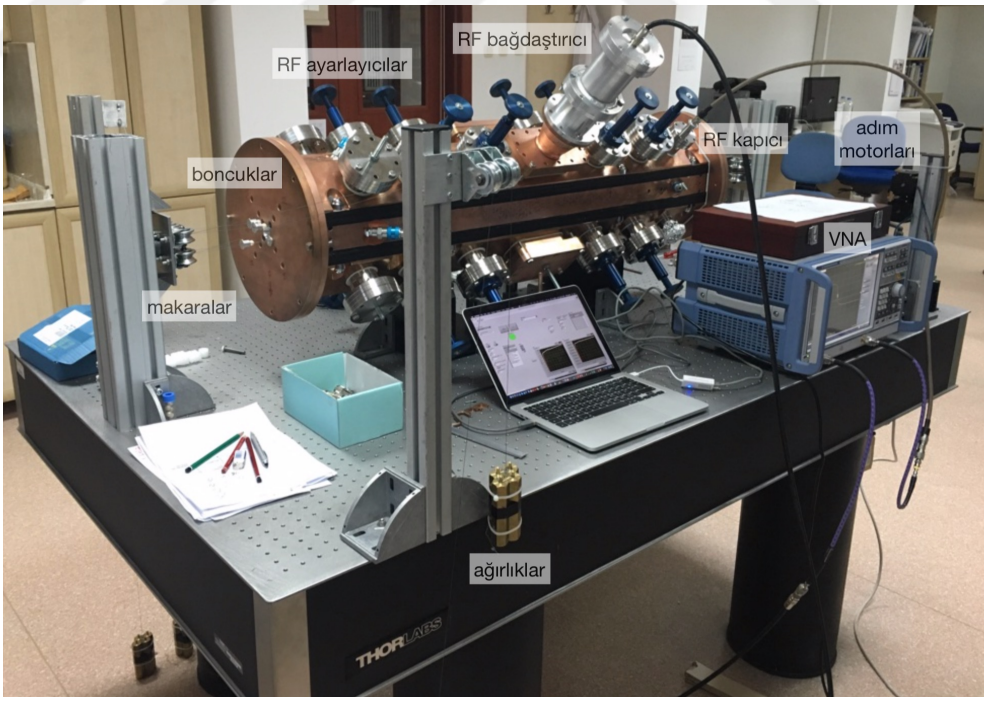
$$\sqrt{\frac{\Delta f}{f_0}} = -\frac{3\Delta V_h}{4U_s}\frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 2}\varepsilon_0 E \tag{2.17}$$

eşitliği yazılabilir. Burada Δf pertürbe (f) ve pertürbe olmayan (f_0) salınım frekansları arasındaki fark, ε_r kürenin dielektrik katsayısı, ΔV_h kürenin hacmi, U_s kovuk içinde depolanan güç, E ise elektrik alan genliğini göstermektedir. Görüldüğü gibi, kovuk içindeki elektromanyetik alanın pertürbe edilmesiyle gerçekleşecek kovuğun salınım frekansındaki değişimin karekökü, kovuk içindeki elektromanyetik alan genliği ile orantılıdır (Letchford vd. 2006). Boncuk-çekme deneyi için kovuğun dört ayrı çeyreğinden geçecek şekilde ayrı ayrı geçirilen misinalar (Dyneema), birer makara düzeneği ile adım (step) motorlarına bağlanmıştır. Sistem üzerindeki adım motorları, misinalar üzerindeki 10 mm çapındaki teflon boncukları kovuk boyunca hareket ettirebilmek için motor sürücüler (Anonymous 2016c) ve Arduino (Anonymous 2015a) yardımıyla sürülmüştür. Tüm sistemi bilgisayar üzerinden kontrol edebilmek için LABVIEW (Anonymous 2014e) programı ile Arduino ve VNA (Anonymous 2017a) arasında haberleşme sağlanmıştır. Tüm düzenek ve kovuk, ortam titreşimlerini en aza indirecek bir masa üzerine yerleştirilmiştir (Şekil 2.74). Kovuğun giriş ve çıkış kapakları deney için gerekli olan teflon boncukların geçebileceği boyutta delinmiştir. Bu deliklere misinanın titreşiminin alınabilmesi için 8 adet aluminyum parça geçirilmiştir. Bu sayede kovuğun elektromanyetik yapısı bozulmadan, boncukların kovuk içinde mümkün olduğunca titreşimsiz olarak hareket edebilmeleri sağlanmıştır. Bölüm 2.3.1.4'te belirtilen, kovuk elektrik alanına kiplenim geometrisinin etkisini ortadan kaldırmak için boncuklar demet merkezinden 15 mm uzaklıktan geçirilmiştir.

Boncuk-çekme deneyinde, boncuğun kovuk içinde yaratacağı etkinin (perturbation) ölçülebilmesi için RF antenler arasındaki faz kayması VNA ile incelenmiştir. Elde edilen veriler LABVIEW'da yazılan bir program (Şekil 2.75) ile çözümlenerek, ilgili noktadaki elektrik alan genliği hesaplanmıştır. Belirtilen sistem ile kovukta herhangi bir ayarlama yapılmadan alınan ölçümler sonucu, kovuk boyunca elektrik alan düzlüğü %95.4

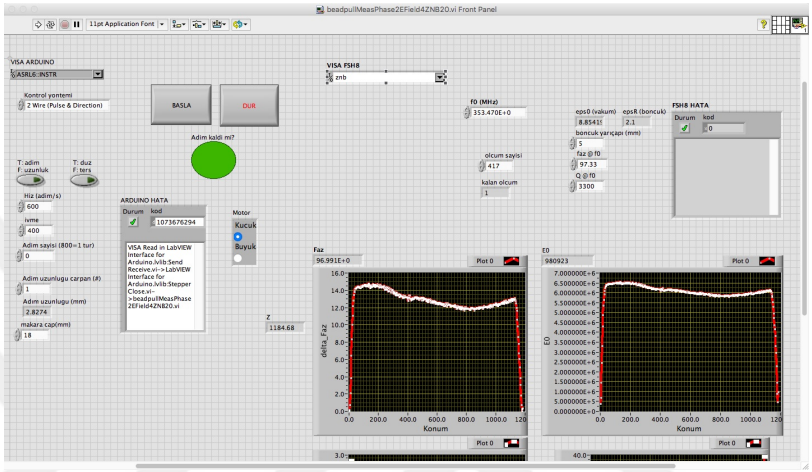


Şekil 2.73 Boncuk-çekme deneyinin şematik gösterimi



Şekil 2.74 Boncuk-çekme deney düzeneği

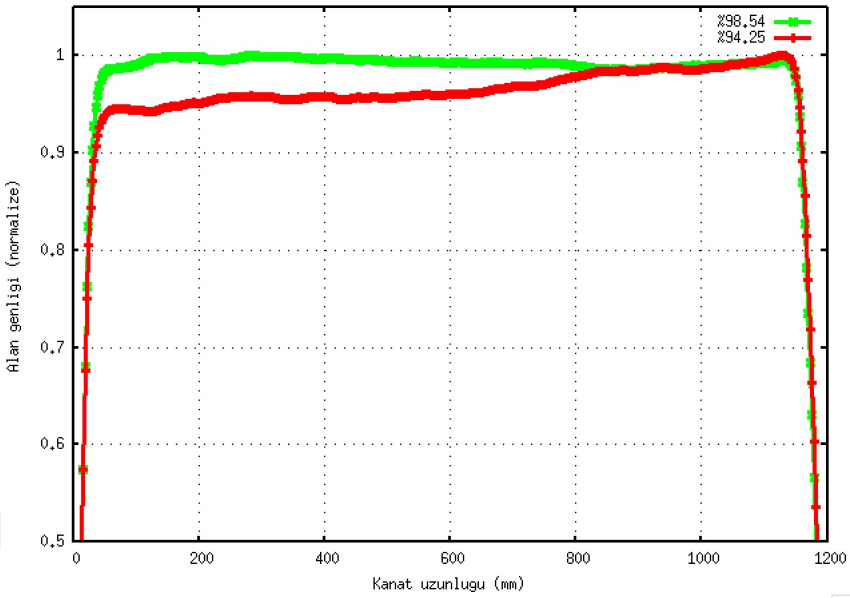
olarak bulunmuştur. Elektrik alan düzlüğünü bozan bölgelerdeki RF ayarlayıcılar kullanılarak kovuk, yaklaşık 50 ayarlama turu sonucunda %98.5 alan düzlüğü mertebesine ulaşmıştır (Şekil 2.76). RFQ üzerinde bulunan tüm RF ayarlayıcılar, bu deney ile belirlenen yerlerine sabitlenmiştir (Çizelge 2.14). Böylece kovuğun alan düzlüğü istenilen değerde tutulmuştur.



Şekil 2.75 Boncuk-çekme deneyi için yazılan programın kullanıcı arayüzü

2.3.3.5 Vakum testleri

Kovuk, tüm bileşenleri (kapaklar, RF ayarlayıcılar, vakum girişleri) vakum sızdırmaz şekilde sabitlendikten sonra demet hattı üzerindeki yerine taşınmıştır. Kovuğun yüksek vakum (10^{-6} mBar mertebesi) altına alınabilmesi için üç adet mekanik pompa, üç adet turbo moleküler pompa, bir adet getter pompa ve bir adet iyon pompası kullanılmıştır. Vakum seviyesinin belirlenebilmesi için ise vakum ölçerler (pirani/inverted magnetron) kullanılmıştır. Kovuğun, sırasıyla mekanik, turbo moleküler, iyon ve getter pompalar ile uzun sürelerle pompalanması ile yüzeylerden gaz çıkışı sağlanmış ve kovuk $5x10^{-6}$ mBar mertebesine getirilmiştir. Bu değer protonların hızlandırıcı içinde ilerlemesi için yeterlidir.



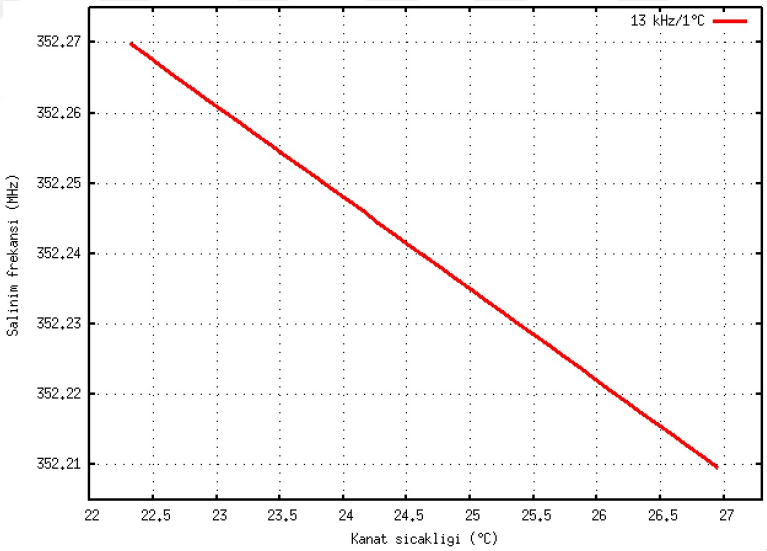
Şekil 2.76 Boncuk-çekme deneyi öncesi (kırmızı) ve sonrası (yeşil) elde edilen kovuk boyunca elektrik alan profili

Çizelge 2.14 Boncuk-çekme deneyi ile belirlenen RF ayarlayıcı konumları

Çeyrek	RF ayarlayıcı (#)	Konum (mm)
Çeyrek-1	1	+7.20
	2	-0.36
	3	-0.72
	4	+4.32
Çeyrek-2	1	+5.33
	2	-0.07
	3	+2.16
	4	+6.12
Çeyrek-3	1	0.0
	2	-6.48
	3	-4.68
	4	-6.12
Çeyrek-4	1	-14.40
	2	-20.16
	3	-12.60
	4	-17.64

2.3.3.6 Kovuk su soğutma ve kararlılık testleri

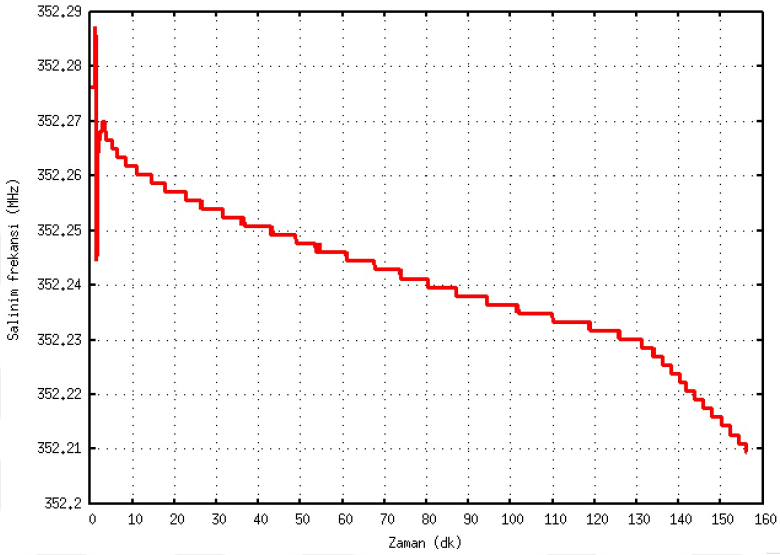
RFQ'nun sıcaklığı kovuğun RF salınım frekansı açısından büyük öneme sahiptir. RFQ kanatlarında boydan boya açılan su soğutma kanalları sayesinde kovuk duvarlarının sıcaklığı ayarlanabilmektedir. Kovuk iç yapısının, sıcaklık farkı nedeniyle mekanik olarak hareket etmesi sonucu RF salınım frekansında oluşan değişiklikler, kanat sıcaklığına bağlı olarak incelenmiştir. Kanat sıcaklığının ölçülebilmesi için kovuk duvarına termal macun ile sabitlenen bir sıcaklık algıcı (Anonymous 2015b) kullanılmıştır. Şekil 2.77'de gösterildiği gibi 1°C'lik bir fark, kovuk frekansında 13 kHz'lik kaymaya neden olmaktadır. RFQ'nun çalışma frekansının 352.21 MHz olduğu düşünülürse, kovuk için sağlanması gereken salınım frekansı hassasiyeti 10 kHz'dir. Dolayısıyla kovuk duvarlarının sıcaklığının 1°C'den yüksek bir hassasiyet ile kontrol edilmesi ve sabitlenmesi gerekmektedir.



Şekil 2.77 Kanat sıcaklıklarının RF salınım frekansına etkisi

RFQ'nun su soğutma sistemiyle beslenmesi ile RF salınım frekansının değişimi şekil 2.78'de gösterilmiştir. Görüldüğü gibi RFQ içinde su dolaşımı başladığında RF salınım frekansında yaklaşık 40 kHz'lik bir kayma meydana gelmektedir. Su soğutma sistemi ile kovuğun RF salınım frekansının 352.21 MHz'e getirilmesi için yaklaşık 150 dk

geçmektedir. SPP su soğutma sisteminde, RF güç kaynağı ve demet hattı için iki ayrı su tankı mevcuttur. Demet hattında bulunan RFQ ve sarmal mıknatısların su soğutması aynı su çevrimi içinde olduğundan, sarmal mıknatıslardaki sıcaklık değişimi de kovuk salınım frekansını etkilemektedir. Testler sonucunda sistemin ortam ile sıcaklık dengesine ulaşarak kararlı duruma gelebilmesi için yaklaşık 5 saat gerektiği belirlenmiştir.



Şekil 2.78 Su soğutma sisteminin RF salınım frekansına etkisi. 133. dakikada sarmal mıknatıslara akım verilmiştir

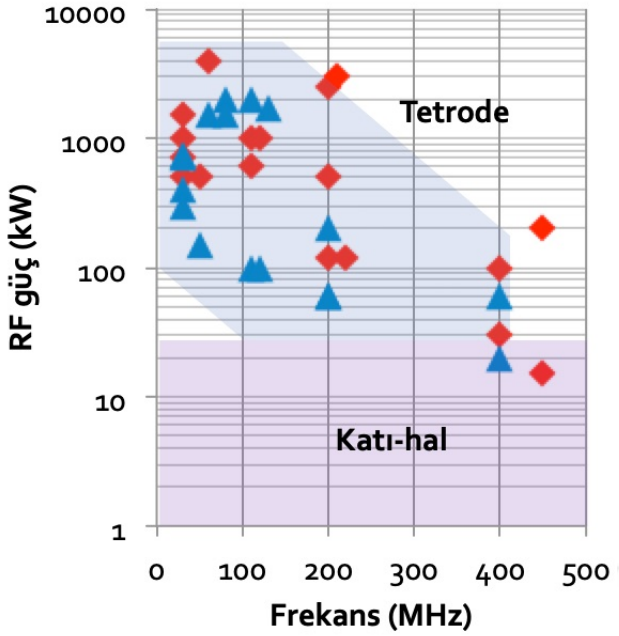
3. SPP RF GÜÇ KAYNAĞI VE RF İLETİM HATTI

Bölüm 2.3.1.4'te belirtildiği üzere ideal durumda (Q_0=9242), tasarlanan RFQ'nun RF güç ihtiyacı 65.5 kW'dır. Fakat RFQ'nun üretimi ve birleştirilmesi süreçlerindeki hatalar nedeniyle oluşacak kalite etkeni düşüşünün yanında, RF kaçakları ve RF iletim hattında oluşacak RF kayıpları da dikkate alındığında, RF güç kaynağında 120 kW mertebesinde bir RF gücün (tepe) elde edilmesi gerekmektedir. Üretilecek olan RF güç kaynağının bu tepe RF gücünü verebilmesi yanında hızlı-kesme sistemleri (interlocks), uzaktan kontrol, RF güç ve frekans ayarı, atma uzunluğu ayarı, faz ayarı, vb. özelliklere sahip olması gerekmektedir. SPP ihtiyaçlarına uygun olarak tasarlanan, üretilen ve testleri gerçekleştirilen RF güç kaynağı, Bölüm 3.1'de ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

RF güç kaynağında oluşturulan RF gücün mümkün olan en az kayıpla RFQ kovuğuna iletilebilmesi için bir RF iletim hattına ihtiyaç vardır. Bu amaçla bir çok farklı bileşen içeren bir RF iletim hattı tasarlanmış, üretilmiş ve testleri gerçekleştirilmiştir. Tümü yerli imkanlarla tamamlanan RF iletim hattı ile ilgili ayrıntılı bilgiler Bölüm 3.2'de verilmiştir.

3.1 RF Güç Kaynağı

Hızlandırıcı kovukları içinde parçacıkları hızlandıracak elektrik alanların oluşturulabilmesi için kovuk içinde yeterli RF gücün depolanması gerekmektedir. Günümüzde hızlandırıcı kovukları için RF güç kaynakları olarak RF vakum tüpleri (Klystron, IOT (inductive output tube), Tetrode) ve katı-hal yükselteçleri (transistör tabanlı) kullanılmaktadır (Şekil 3.1). RF vakum tüpleri ile atmalı yapıda 150 MW RF güçlere ulaşılabilirken, tek bir katı-hal transistörü ile günümüzde atmalı yapıda ancak birkaç kW elde edilebilmektedir. Bu nedenle katı-hal yükselteçler ile yüksek RF güçlere ulaşabilmek için transistörlerin çok sayıda ve paralel olarak çalıştırılması gereklidir.



Şekil 3.1 RF güç kaynakları. Kırmızı: tepe RF güç, mavi: sürekli RF güç (Montesinos 2013)

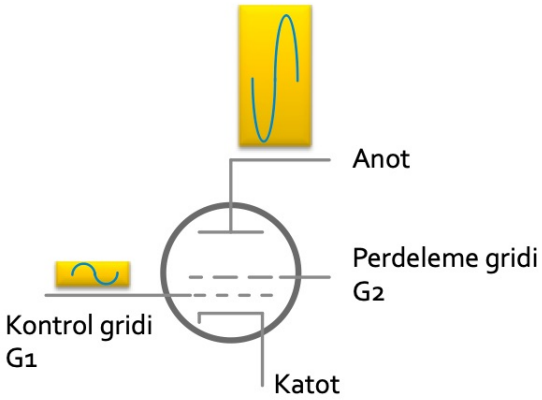
RF yükselteçler temelde, DC giriş gücünü RF çıkış gücüne dönüştüren yapılardır. Bu güç dönüşümündeki frekans, genlik ve faz, yükselticiye beslenen düşük seviyeli RF sinyali ile belirlenir. Yükselteçler RF gücünü, düşük enerjili ve yüksek akımlı elektron bohçalarından çekerler. RF yükselteçlerde RF giriş güçleri, DC giriş güçlerine kıyasla ihmal edilebilir seviyededir. Bir RF yükselteç için verim (η) ve kazanç (G):

$$\eta = \frac{P_{RF\,cikis}}{P_{DC\,giris} + P_{RF\,giris}} \approx \frac{P_{RF\,cikis}}{P_{DC\,giris}} \quad , \tag{3.1}$$

$$G = 10log_{10}\left(\frac{P_{RF\,cikis}}{P_{RF\,giris}}\right) \tag{3.2}$$

ile verilir (Carter 2011).

RF vakum tüplerinden olan Tetrode yükselteci, birkaç MHz'den 400 MHz'e kadar frekans aralığında kullanılır. Tetrode temelde katot, kontrol gridi (G_1), perdeleme gridi (G_2) ve anottan oluşur (Şekil 3.2). Tetrode tüpün çalışma prensibi şu şekildedir; katotun ısıtılmasıyla elde edilen elektronlar katot ve anot arasına uygulanan yüksek gerilim farkı ile anoda doğru sürüklenirler. Kontrol gridine beslenen RF sinyali sayesinde elektronlar bohça halinde katottan sökülürler. Perdeleme gridi ise, kontrol gridi ve anot arasındaki geri-bildirimi engellemek için kullanılır. Tetrode yükselteçlerinin kazançları 13 dB, verimleri ise %65 mertebesindedir.

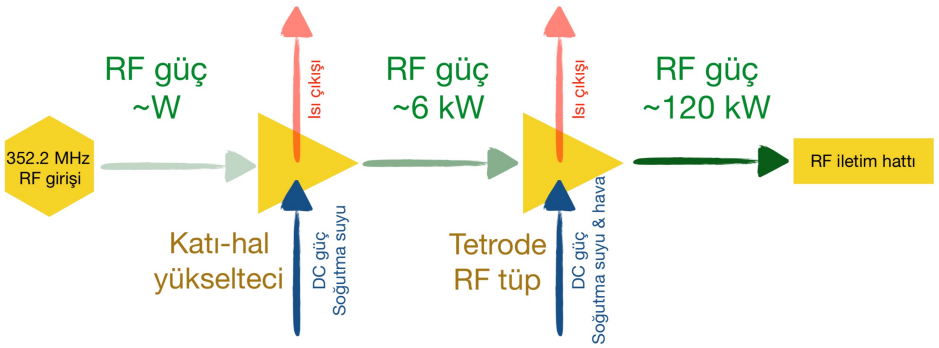


Şekil 3.2 Tetrode RF tüpünün şematik gösterimi (Montesinos 2013)

Katı-hal yükselteçleri, birden çok LDMOS FET (laterally diffused metal oxide semiconductor field effect transistor) gibi yüksek güç transistörlerinin birleştirilmesi ile oluşturulan yapılardır. Bu katı-hal yükselteçlerinin birleştirilebilmesi için RF güç birleştirici ve RF güç bölücülerin kullanılması gerekmektedir. Katı-hal yükselteci tabanlı RF güç kaynaklarında transistörlerden birisi arızalansa bile önemli bir RF güç kaybı yaşanmaz. Bu RF vakum tüplerine karşı büyük bir üstünlüktür. Fakat katı-hal yükselteçlerinin, görece düşük güç çıkışları nedeniyle tek başına bir hızlandırıcıyı besleyebilecek RF güce ulaşabilmesi kolay değildir (Jacob 2014). Bu nedenle katı-hal yükselteçleri genelde RF vakum tüplerinin RF giriş gücünü sağlamakta kullanılırlar. Günümüz katı-hal yükselteçlerinde kullanılan transistörlerin kazançları 20 dB, verimleri ise %70 mertebesindedir.

3.1.1 SPP RF güç kaynağı

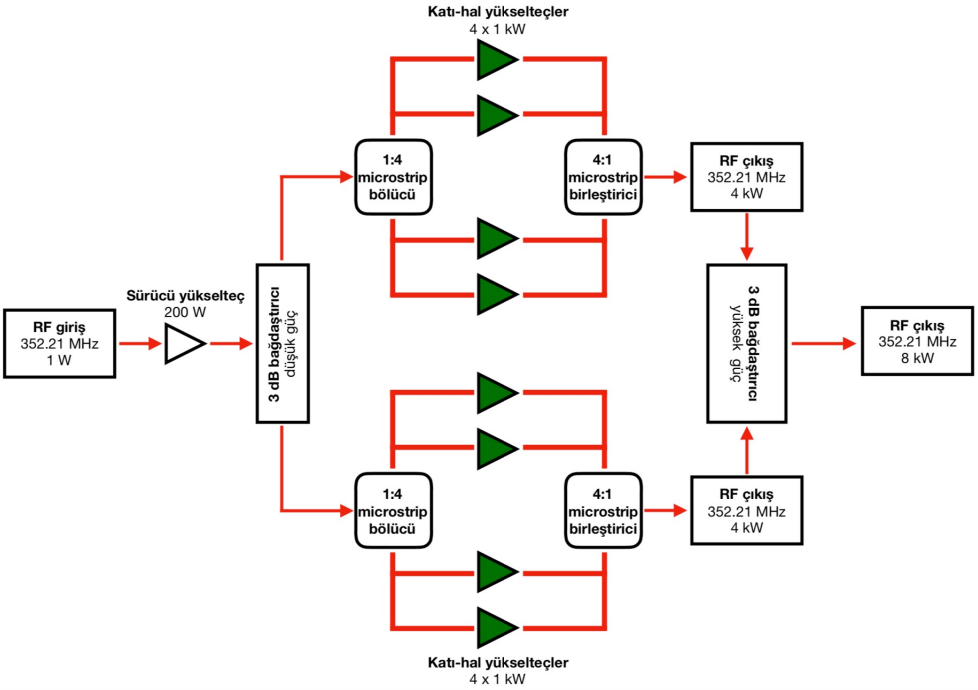
Proje ihtiyaçlarına göre hedeflenen 120 kW'lık RF gücün üretilebilmesi için melez bir RF güç kaynağı tasarımı yapılmıştır. Bunun için 6 kW'a kadar katı-hal yükselteçlerinin kullanılması, RF gücün 120 kW'a yükseltilmesi için ise bir RF vakum tüpünün (Tetrode) kullanılması planlanmıştır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3 RF güç için melez yükseltme yöntemi

İlk aşama için 8 adet NXP BLF-578XR (Anonymous 2014b) güç transistörü kullanılarak her birinden atmalı yapıda (<500 ms) 1 kW RF gücün çekilmesi planlanmıştır. Katı-hal yükselteçlerin RF güç ile beslenebilmesi ve elde edilecek RF gücün birleştirilmesi için şekil 3.4'te gösterildiği gibi bir ön-yükselteç yapısı (RF bölücü/RF yükseltici/RF birleştirici) EPROM (Anonim 2017) firması tarafından tasarlanmıştır.

Tasarlanan RF güç yükseltme yönteminin ilk aşaması şu şekilde tanımlanabilir; Düşük güçlü RF sinyali üreten PLL (phase-locked loop) kontrollü bir kaynaktan alınan RF güç, bir ön-yükselteç ile 1 W'a yükseltilecektir. 1 W'lık bu güç, PLC (programmable logic controller) kontrollü bir sürücü yükselteci ile 100 W mertebelerine yükseltilecektir. Katı-hal yükselteçlerine giren RF gücün ayarlanabilmesi için sürücü yükseltecin RF kazancı kontrol edilebilecektir. Düşük güç 3 dB bağdaştırıcısı ile elde edilen RF güç ikiye bölünerek RF bölücülere verilecektir. Wilkinson (Chen 2005) türü RF bölücüler, gelen RF gücü 4 ayrı katı-hal yükseltece besleyecektir. RF güç transistörleri ile kW mertebe-



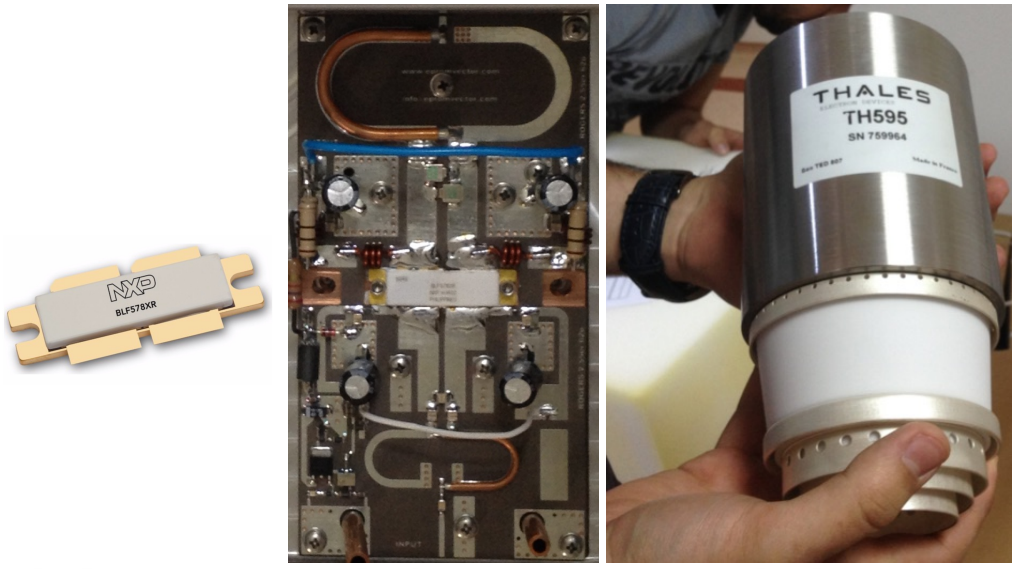
Şekil 3.4 RF ön-yükseltecin şematik gösterimi

sine yükseltilen RF güç, yine Wilkinson türü bir birleştirici ile birleştirilip, yüksek güç 3 dB bağdaştırıcısı ile RF vakum tüpüne verilebilecek seviyeye ($\sim$8 kW) ulaştırılacaktır.

İkinci aşamada ise katı-hal yükselteçlerinden elde edilen RF güç, Thales TH595 (Anonymous 2014h) RF vakum tüpüne (Şekil 3.5-sağ) bir mikroşerit (microstrip) türü RF dolaştırıcı birimi aracılığıyla beslenerek Thales TH 18595A RF güç kovuğu (Anonymous 2014h) ile birlikte 120 kW mertebesine yükseltilecektir.

3.1.2 RF güç kaynağının geliştirilmesi ve testleri

RF güç kaynağının geliştirilmesi ve üretimi EPROM firmasında yerli olarak gerçekleştirilmiştir. RF ön-yükselteç biriminin üretiminde kullanılan mikroşerit hat için dielektrik malzeme olarak teflon kullanılırken, şeritler 35 μm gümüş kaplı bakırdan üretilmiştir. 4 Adet üst ve 4 adet alt kısımda bulunan ve katı-hal yükselteçleri ve çevre elemanlarını taşıyan birimler, bakır kütüklerden üretilmiştir. Bu birimlere çalışması sırasında



Şekil 3.5 Sol: RF güç transistörü, orta: yükselteç devresi, sağ: tetrode RF vakum tüpü

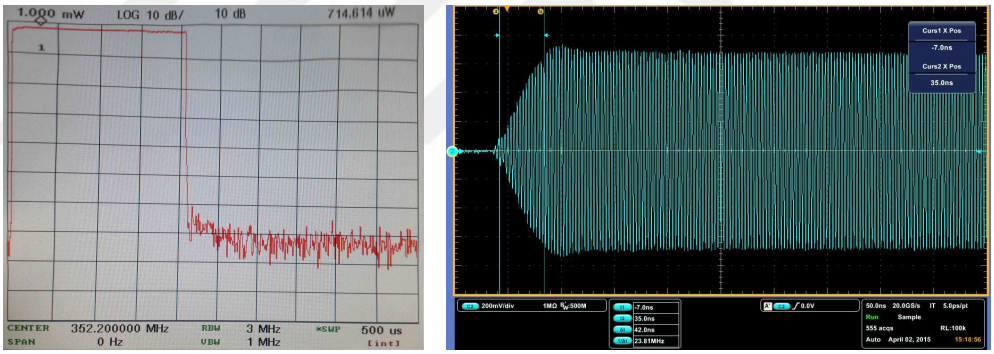
soğutulabilmeleri için su kanalları açılmıştır. Üretilen RF ön-yükselteç biriminin test aşamasından bir görünüm şekil 3.6'da verilmiştir.

Üretilen RF ön-yükselteç biriminin RF güç testlerinin yapılabilmesi için bir spektrum analizör ve 70 dB'lik bir RF düşürücü kullanılmıştır. Testler sonucunda birim çıkışından 200 μs uzunluğunda 7.15 kW'lık bir RF güç elde edilmiştir (Şekil 3.7). Elde edilen bu RF güç, Tetrode güç kaynağına giriş ($\sim$6 kW) için fazlasıyla yeterlidir. Ek olarak çıkış sinyali osiloskop ile incelendiğinde atmanın yükselme zamanı (rise time) 42 ns olarak ölçülmüştür. Bu değer kovuğun RF zaman yapısı için uygundur.

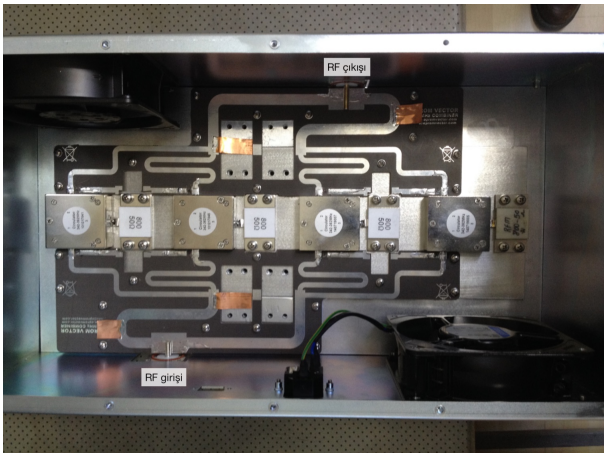
RF ön-yükselteç biriminden elde edilen RF gücün, RF vakum tüpü ve RF kovuğuna iletimi sırasında oluşabilecek empedans uyumsuzlukları nedeniyle geri yansıyacak RF gücün yok edilebilmesi için RF ön-yükselteç birimi ile RF vakum tüpü arasına bir mikroşerit türü RF dolaştırıcı birimi üretilmiştir (Şekil 3.8). Bu birimde Wilkinson türü bölücüler kullanılarak bölünen RF güç, mikroşerit türü RF dolaştırıcılardan geçirilmiş ve daha sonra tekrar birleştirilmiştir. Bu sayede daha düşük güçlü RF dolaştırıcılar kullanılabilmiş ve RF ön-yükselteç birimi RF geri yansımalarına karşı korunaklı hale getirilmiştir.



Şekil 3.6 RF ön-yükselteç birimi

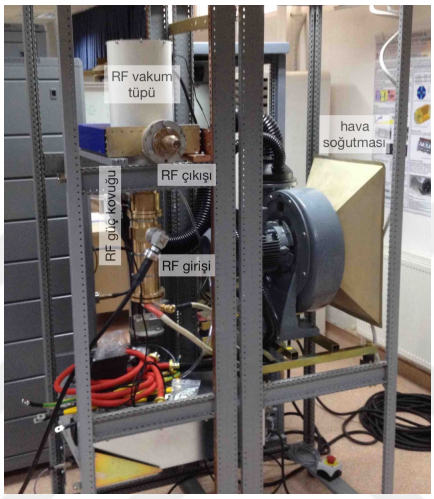


Şekil 3.7 RF ön-yükselteç birimi çıkış gücü ve yükselme-zamanı ölçümleri



Şekil 3.8 Mikroşerit türü RF dolaştırıcı birimi

Melez RF güç kaynağının ikinci aşaması olan Tetrode güç kaynağı (RF vakum tüpü ve kovuğu), bir kabin üzerine sabitlenmiştir (Şekil 3.9). RF vakum tüpü için gerekli olan filaman güç kaynağı, anot güç kaynağı, G_1 ve G_2 güç kaynakları yine EPROM firması tarafından yerli olarak geliştirilmiş ve üretilmiştir. Tetrode güç kaynağı için gerekli olan hava ve su soğutma sistemlerinin kurulmasının ardından RF güç kaynağının TAEK-RHTDB'ye kurulumu tamamlanmıştır (Şekil 3.10).



Şekil 3.9 Tetrode güç kaynağı ve hava soğutma sistemi panoları

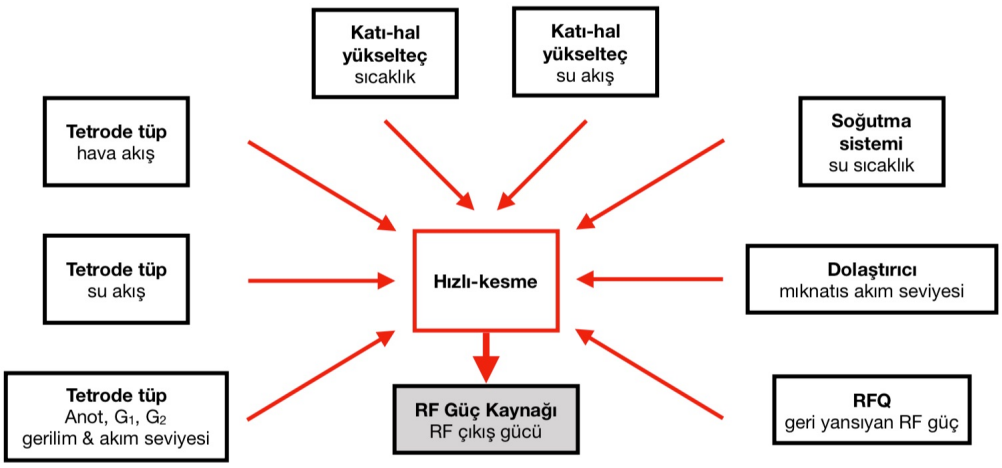


Şekil 3.10 RF güç kaynağı panoları. Sağda, Tetrode güç kaynağı çıkışı ve TEM-TE dönüştürücü görülebilir

3.1.2.1 RF güç kaynağı hızlı-kesme sistemi

Üretilen RF güç kaynağının, sistemde oluşabilecek hatalara karşı korumalı bir şekilde çalışabilmesi için gerekli olan hızlı-kesme sistemi şeması şekil 3.11'de verilmiştir. Tüm bu sinyallerden herhangi birinin önceden belirlenen sınırlar çerçevesinde kalıp kalmadığı sistem tarafından izlenerek, aksi bir durum oluştuğunda RF güç kaynağı 100 ns içinde kapatılmaktadır.

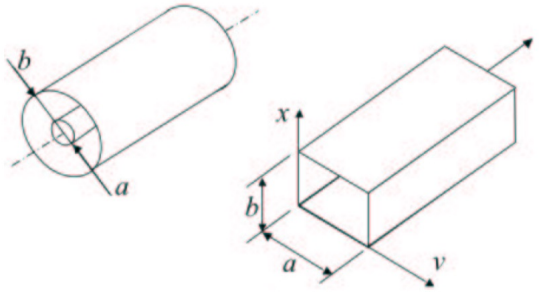
Hızlı-kesme sisteminin izlediği sinyaller, RF güç kaynağının yanı sıra diğer sistemlerden de gelmektedir. RF iletim hattında kullanılan dalga kılavuzu türü RF dolaştırıcının çalışabilmesi için gerekli olan elektromıknatısın akım seviyesi, LABVIEW ve Arduino tabanlı sistemler ile izlenmektedir. Elektromıknatısın akım seviyesindeki herhangi bir olumsuzlukta, bir röle aracılığıyla RF güç kaynağının hızlı-kesme sisteminin devreye girmesi sağlanmıştır. Yine RFQ kovuğundan yansıyan RF güç bir yönelimsel bağdaştırıcı (directional coupler) ve osiloskop aracılığıyla izlenerek, herhangi bir yükselişte hızlı-kesme sistemi devreye girmektedir. Tüm bu koruma sistemleri hem RF güç kaynağının hem de RFQ kovuğunun sağlığı için hayati öneme sahiptir.



Şekil 3.11 RF güç kaynağı hızlı-kesme sistem şeması

3.2 RF İletim Hattı

RF iletim hatları özellikle hızlandırıcı kovuklarının ihtiyaç duyduğu yüksek seviye RF gücün, RF güç kaynağından kovuğa iletilmesi için kullanılır. Yüksek seviye RF gücün iletilebilmesi için eşmerkezli (coaxial) hatlar ve dalga kılavuzları (waveguide) kullanılabilir (Şekil 3.12).



Şekil 3.12 Eşmerkezli hat (sol) ve dalga kılavuzu (sağ) (Cooper ve Carter 2005)

Eşmerkezli hatlar TEM_{00} kipinde çalışır ve dalga kılavuzlarının aksine kesilim frekansları yoktur. Bu kipte, elektrik alan radyal yönde oluşurken manyetik alan azimuthal yöndedir. Merkezde bulunan metalin dış çapı (a) ile dış metalin iç çapı (b) arasındaki oran eşmerkezli hattın tipik empedansını ($Z_{esmerkezli}$) belirler. Buna göre eşmerkezli bir hattın tipik empedansı:

$$Z_{esmerkezli} = \frac{138}{\sqrt{\mu_r \varepsilon_r}} log\left(\frac{b}{a}\right) \tag{3.3}$$

ile verilir. Burada μ_r göreli geçirgenlik ve ε_r göreli dielektrik katsayısıdır. Hızlandırıcı kovuklarını besleyen RF iletim hatlarında genellikle tipik empedans olarak 50 ohm kullanılır. Bu durumda hava ile yalıtılmış 50 ohm'luk eşmerkezli hat için b/a oranı 2.3 olarak yazılabilir. Eşmerkezli hatlarda taşınabilecek teorik olarak en yüksek ortalama RF güç:

$$P_{esmerkezli(ort)} = \frac{E_0^2 a^2}{Z_0} \pi log\left(\frac{b}{a}\right) \tag{3.4}$$

ile verilir. Burada E_0 tepe elektrik alanı, Z_0 ise boş uzayın empedansını (377 Ω) göstermektedir. Görüleceği gibi eşmerkezli hattın güç taşıma kapasitesi, hattın geometrik boyutlarına bağlıdır. Eşmerkezli hatlarda, yüksek frekanslarda oluşacak yüksek dereceli kipler (TE ve TM) nedeniyle güç taşıma kapasitesinde azalma olmaktadır (Cooper ve Carter 2005). Bu nedenle yüksek frekans ve yüksek RF güç uygulamalarında genellikle dalga kılavuzları tercih edilir.

Hızlandırıcı sistemlerinin RF iletim hatlarında genellikle dikdörtgensel dalga kılavuzları ve TE_{10} kipi kullanılır. Standart dalga kılavuzlarının boyutları 2:1 (a:b) oranında iken bazı özel durumlarda yüksekliği değiştirilmiş şekilde de kullanılabilir. En düşük dereceden yayılma kipi için kesilim frekansı (f_c):

$$f_c = \frac{c}{2a} \tag{3.5}$$

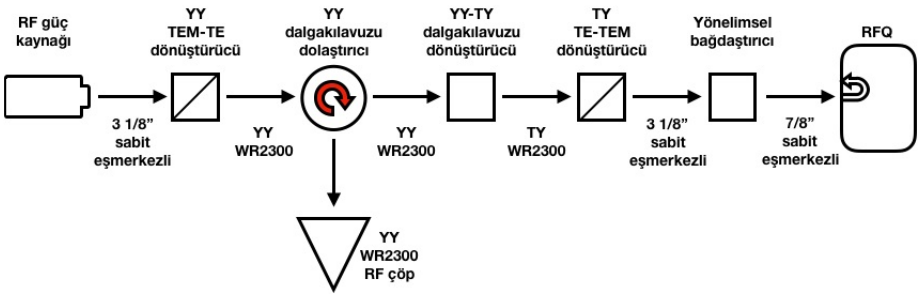
ile verilir. Buradan WR2300 standartı için kesilim frekansı 256.8 MHz olarak bulunabilir. Belirli bir frekans (f) için dalga kılavuzlarında taşınabilecek teorik olarak en yüksek ortalama RF güç:

$$P_{wg(ort)} = \frac{E_0^2 a^2}{Z_0} ab\sqrt{1-(f_c/f)^2)} \tag{3.6}$$

ile verilir (Cooper ve Carter 2005).

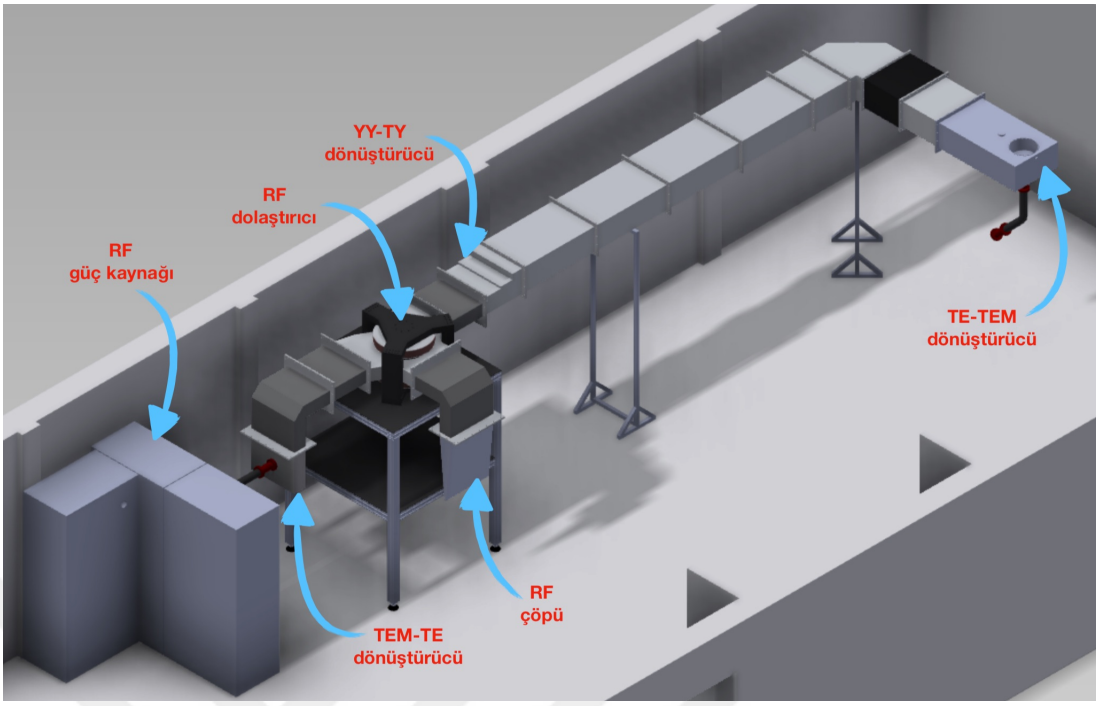
3.2.1 SPP RF iletim hattı

SPP için RF güç kaynağında üretilen RF gücün, RFQ kovuğuna mümkün olduğunca kayıpsız olarak iletilebilmesi için yaklaşık 13 m uzunluğunda bir RF iletim hattı tasarlanmıştır (Şekil 3.13). Tasarlanan RF iletim hattı, hem eşmerkezli hatlardan hem de dikdörtgensel dalga kılavuzlarından oluşmaktadır. Bölüm 3.1'de sözü edilen Tetrode güç kaynağının çıkış flanşı 3 1/8" eşmerkezli hat standartında olduğundan, tasarımlar da bu boyuta uygun olarak gerçekleştirilmiştir. RF sisteminin çalışma frekansı olan 352.2 MHz'e uygun olacak şekilde dikdörtgensel dalga kılavuzları için WR2300 standardı seçilmiştir. Dikdörtgensel dalga kılavuzları RF iletim hattında, yarım yükseklik (YY) ve tam yükseklik (TY) olarak iki ayrı boyutta kullanılmıştır. Bazı dalga kılavuzlarının YY-WR2300 boyutunda kullanılmasının nedeni, dikdörtgensel dalga kılavuzu türü RF dolaştırıcının tasarımındaki kolaylıktır. İki ayrı dalga kılavuzu türünün birbirine dönüştürülebilmesi için RF kip dönüştürücüleri tasarlanmıştır. RF iletim hattının laboratuvar içindeki yerleşimi şekil 3.14'te gösterildiği gibi planlanmıştır.



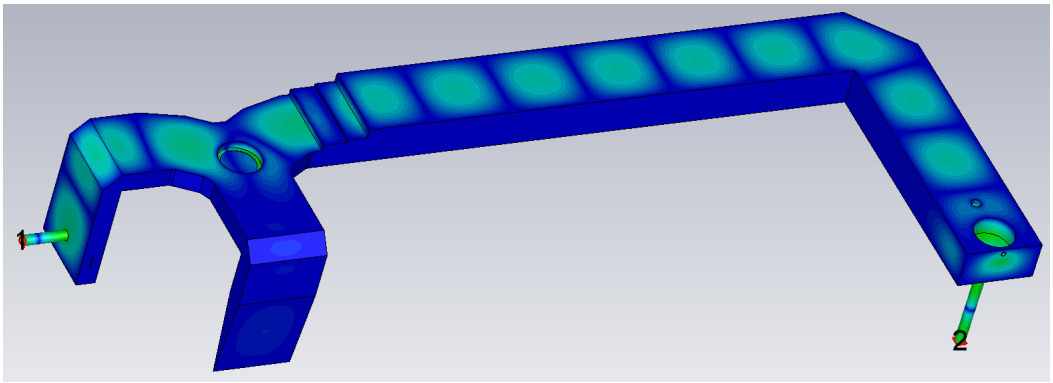
Şekil 3.13 RF iletim hattının şematik gösterimi

RF iletim hattında taşınacak olan RF gücün en fazla 120 kW mertebesinde olması sayesinde, dalga kılavuzları içinde kullanılmak üzere herhangi bir izolasyon gazına ihtiyaç duyulmamıştır. Ayrıca sistem, %0.01 çalışma etkeni (duty factor) ve 1 Hz tekrarlama frekansı ile çalışacağından RF sisteminin bileşenleri için herhangi bir ısıl etki öngörülmemiştir. RF iletim hattı bileşenlerinin CST MWS ile gerçekleştirilen toplu elektromanyetik benzetimi şekil 3.15'te verilmiştir. Bu benzetim ile 1 No'lu girişten (RF güç



Şekil 3.14 RF iletim hattının 3-boyutlu çizimi

kaynağı çıkışı) beslenen elektromanyetik dalganın, 2 No'lu çıkışa (RFQ kovuğu girişi) iletildiği gösterilmiştir.



Şekil 3.15 RF iletim hattının CST MWS ile benzetimi

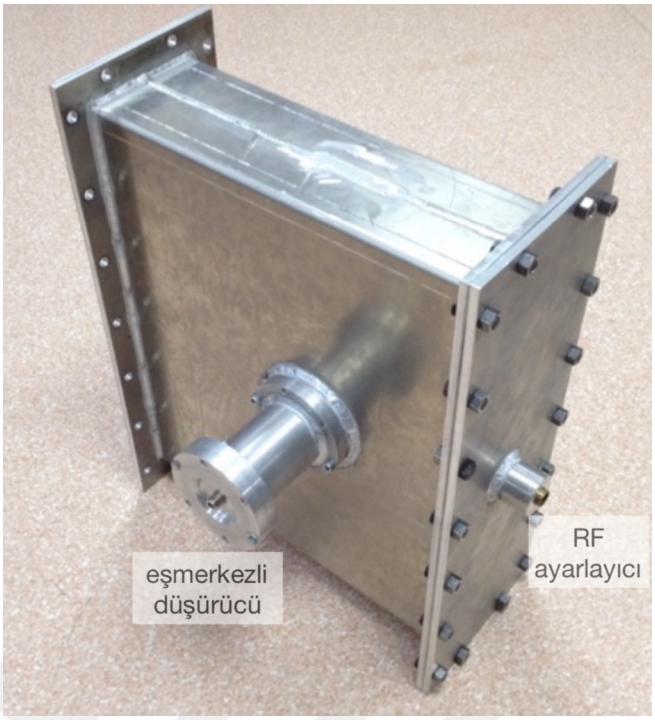
3.2.2 RF iletim hattının tasarlanması ve testleri

Alt bölümler halinde açıklanacak olan SPP RF iletim hattı bileşenlerinin tamamının tasarımı CST MWS kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Üretim için gerekli olan 3-boyutlu çizimler INVENTOR programında yapılmıştır. S-parametreleri ölçümleri için ise RG58 ve RG214 eşmerkezli kablolar ve VNA kullanılmıştır.

3.2.2.1 Eşmerkezli-Dalga kılavuzu dönüştürücü

Bölüm 3.1'de de bahsedildiği gibi Tetrode RF güç kaynağının çıkışı 3 1/8" eşmerkezli hat boyutundadır. Bu çıkışın, RF güç kaynağı ile RFQ kovuğu arasında kullanılan dikdörtgensel dalga kılavuzu yapısına uyum sağlaması için eşmerkezli hattan dikdörtgensel dalga kılavuzu yapısına geçilmesi gerekmektedir. Bu amaçla bir eşmerkezli-dalga kılavuzu dönüştürücüsü tasarlanmıştır. Eşmerkezli hatlarda RF dalga TEM_{00} kipinde ilerlerken, dikdörtgensel dalga kılavuzunda TE_{10} kipinde ilerlemelidir. Tasarlanan dönüştürücü (TEM-TE) ile TEM_{00} kipinden TE_{10} kipine en az kayıpla geçilmesi hedeflenmiştir. 50 ohm empedansa sahip eşmerkezli hattın, dikdörtgensel dalga kılavuzunun empedansına eşlenebilmesi için, merkez iletkenin dikdörtgensel dalga kılavuzu duvarlarına kısa devre edildiği bir yapı tasarlanmıştır. Bölüm 3.2.2.4'te açıklanan dikdörtgensel dalga kılavuzu türü RF dolaştırıcının boyutunun küçültülebilmesi için, TEM-TE dönüştürücü YY-WR2300 boyutlarında tasarlanmıştır. Bu sayede TEM-TE dönüştürücüden sonra RF iletim hattında bulunan RF dolaştırıcı ile uyum sağlanmıştır. TEM-TE dönüştürücünün testler sırasında ayarlanabilmesi amacıyla, birisi arka kapak diğeri alt tabanda olmak üzere iki adet RF ayarlayıcı tasarlanmıştır.

Tasarımı tamamlanan TEM-TE dönüştürücünün CAD çizimi yapılarak üretime hazır hale getirilmiş ve KALİTEK firmasına yaptırılmıştır. TEM-TE dönüştürücüsünün üretimi için aluminyum levhalar büktürülmüş ve kaynaklanarak dönüştürücü hazır hale getirilmiştir (Şekil 3.16). RF ayarlayıcılar ise TAEK-RHTDB mekanik atölyesinde pirinç malzemeden üretilmiş ve dönüştürücüye sabitlenmiştir.

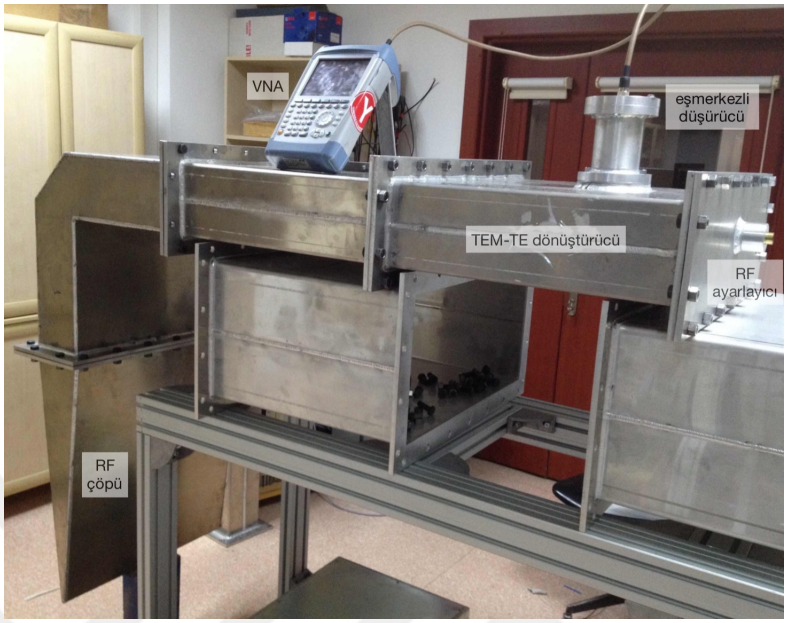


Şekil 3.16 TEM-TE dönüştürücü

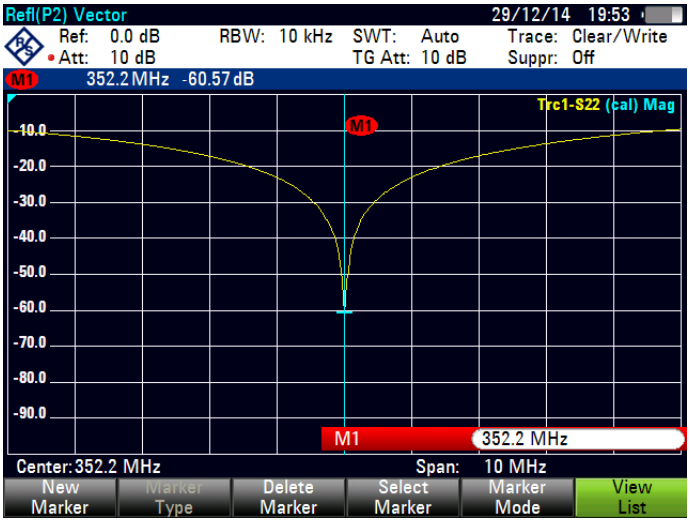
Üretilen TEM-TE dönüştürücünün S-parametresi ölçümlerinin yapılabilmesi için VNA, Bölüm 3.2.2.2'de tanımlanan eşmerkezli düşürücü ve RG214 eşmerkezli kablosu aracılığıyla TEM-TE dönüştürücüye bağlanmıştır. TEM-TE dönüştürücü ise Bölüm 3.2.2.6'da tanımlanan RF çöp ile sonlandırılarak sistemin S11 parametresi ölçülmüştür (Şekil 3.17). Bu ölçüm sonucunda elde edilen S11 parametresi sistemin çalışma frekansı olan 352.2 MHz'de -60.6 dB olarak bulunmuştur (Şekil 3.18). Bu sonuç ile, üretilen TEM-TE dönüştürücü devreye-alma testlerine hazır hale gelmiştir.

3.2.2.2 Eşmerkezli düşürücü

RF iletim hattında kullanılmak üzere üretilen bileşenlerin, S-parametresi ölçümlerinin gerçekleştirilebilmesi için bileşenlerin 3 1/8" boyutundaki girişlerinin, N-tipi RF konnektöre bağlanabilecek boyutlara düşürülmesi gerekmektedir. Bunun için bir eşmerkezli düşürücü tasarlanmıştır. Tasarlanan eşmerkezli düşürücü TAEK-RHTDB mekanik atölyesinde üretilerek birleştirilmiştir. Düşürücünün dış iletkeni aluminyum malzemeden, iç iletkeni ise pirinç malzemeden üretilmiştir. Eşmerkezli düşürücünün, TE-TEM ve TEM-



Şekil 3.17 TEM-TE dönüştürücünün S11 parametresi ölçüm kurulumu

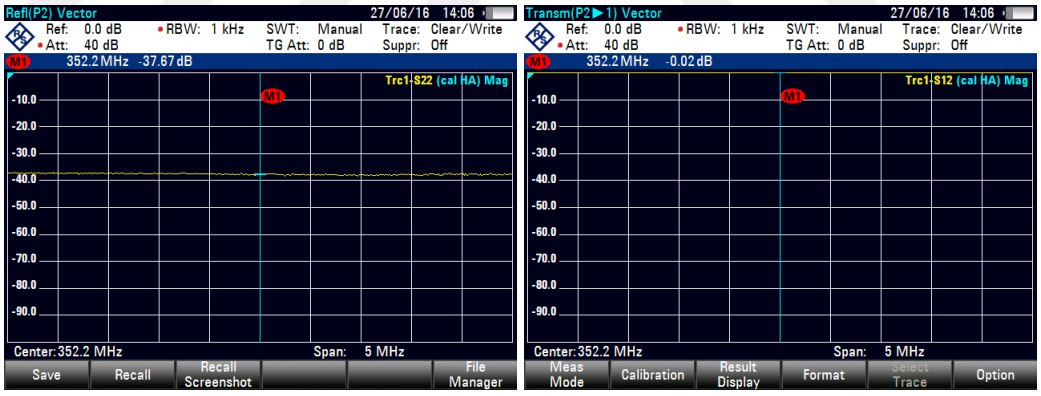


Şekil 3.18 TEM-TE dönüştürücünün ölçülen S11 parametresi

TE dönüştürücülerine bağlanabilmesi için iç iletkenler arasına ek bağlantı parçaları imal edilmiştir. Şekil 3.19'da gösterildiği gibi birbirlerine bağlanan eşmerkezli düşürücülerin S11, S22 ve S21 parametreleri sırasıyla -40.9 dB, -37.7 dB, -0.02 dB olarak ölçülmüştür (Şekil 3.20).



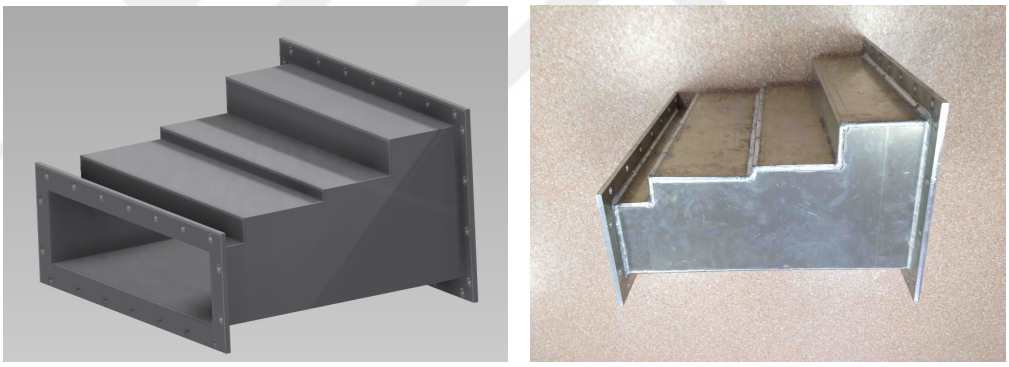
Şekil 3.19 Eşmerkezli düşürücülerin ölçümleri



Şekil 3.20 Eşmerkezli düşürücülerin S-parametresi ölçüm sonuçları

3.2.2.3 Yarım yükseklik-Tam yükseklik dalga kılavuzu dönüştürücü

RF iletim hattında bulunan YY-WR2300 boyutlarına sahip dikdörtgensel dalga kılavuzları ile TY-WR2300 boyutlarına sahip dikdörtgensel dalga kılavuzları arasında RF iletiminin sağlanabilmesi için bir YY-TY dikdörtgensel dalga kılavuzu dönüştürücüsü tasarlanmıştır. Hedeflenen RF iletiminin sağlanabilmesi için iki farklı tasarım (konik ve basamaklı) üzerine benzetimler gerçekleştirilmiştir. Konik geometrideki YY-TY dönüştürücünün, basamaklı geometriye sahip yapıya göre üretilebilirliğinin daha kolay olmasına rağmen, bu yapıdaki dönüştürücünün uzunluğu yaklaşık 2 kat fazladır. Bu nedenle basamaklı yapıdaki tasarım seçilmiştir. Tasarlanan yapının CAD çizimi yapılarak, KALİTEK firmasında aluminyum malzemeden üretilmiş ve testlere hazır hale getirilmiştir (Şekil 3.21).

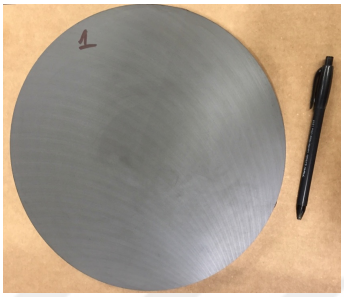


Şekil 3.21 YY-TY dikdörtgensel dalga kılavuzu dönüştürücüsü

3.2.2.4 RF dolaştırıcı

RF iletim hattında, RF gücün güç kaynağından RFQ kovuğuna iletilmesi sırasında oluşabilecek empedans uyumsuzluğunda, RF gücün RF güç kaynağına geri yansımasını engelleyebilmek için dikdörtgensel dalga kılavuzu türü bir RF dolaştırıcı tasarlanmıştır. RF dolaştırıcı 3 kollu pasif bir RF bileşenidir. Bu bileşen ile, Şekil 3.23'te gösterilen 1 numaralı koldan gelen elektromanyetik dalga 2 numaralı kola iletilirken, 2 numaralı koldan

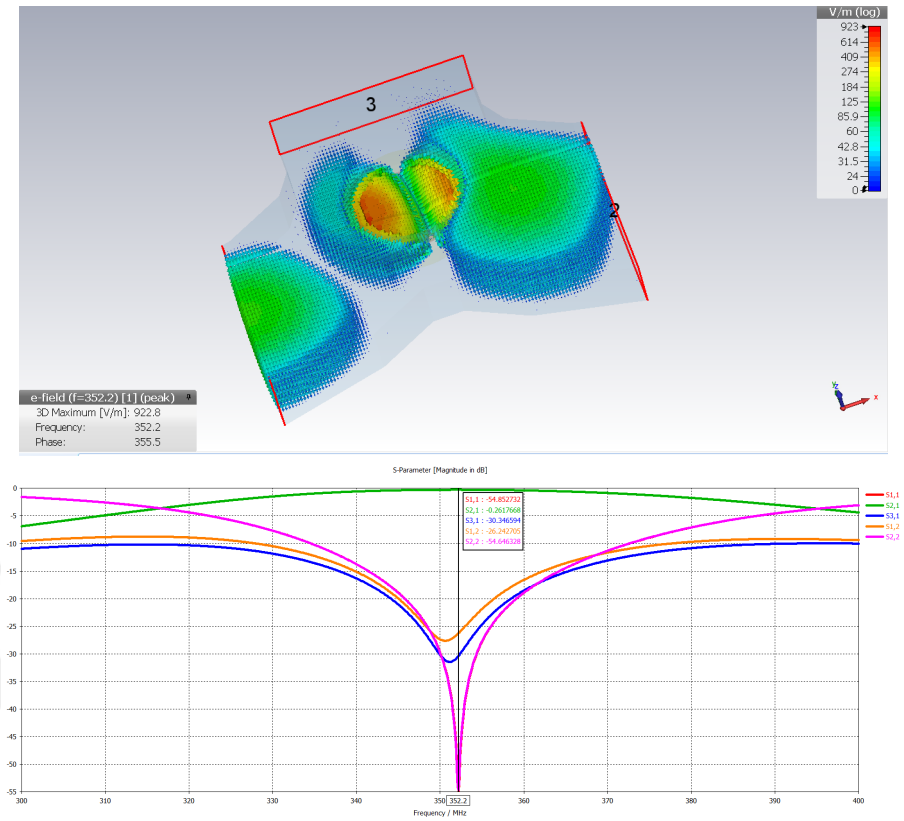
gelen elektromanyetik dalga 3 numaralı kola aktarılmaktadır. Gelen elektromanyetik dalgayı istenilen kola yönlendirebilmek için gerekli olan ferrit malzemesinin seçimi, tasarımı yönlendiren önemli bir unsurdur. RF dolaştırıcı için, Magnetics Group (Anonymous 2015e) firmasından satın alınan NG-1600 ferrit malzemesi (Şekil 3.22) kullanılmıştır.



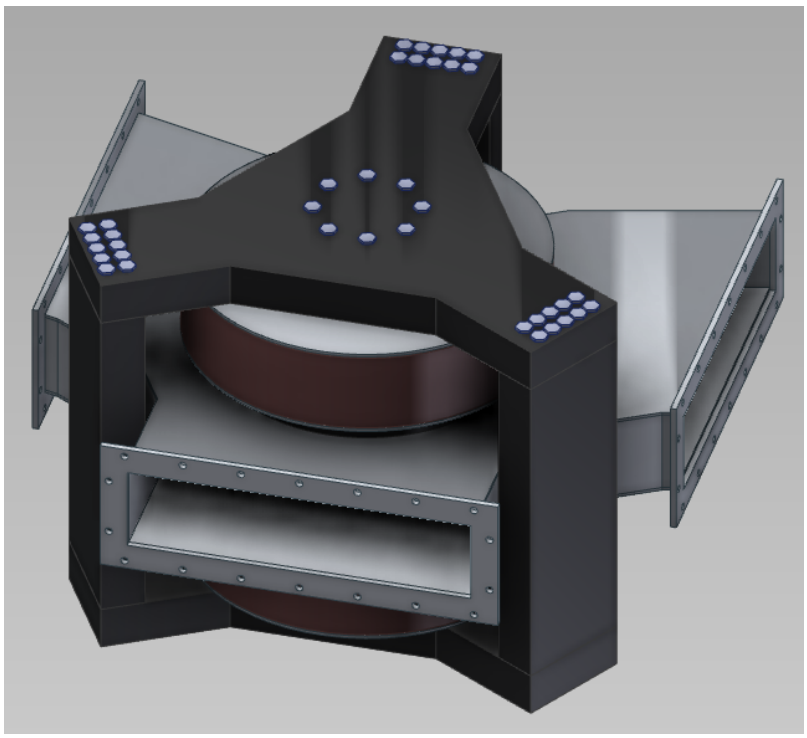
Şekil 3.22 NG-1600 ferrit malzeme

Gerçekleştirilen benzetim çalışmaları sonucu seçilen ferritin, $4\pi M_s$ doyum mıknatıslanması (saturation magnetization) 1600 Gauss, ferromanyetik rezonans band genişliği (ferromagnetic resonance line width) ise 10 oersted'dir. CST MWS ile gerçekleştirilen en-iyileştirme çalışmaları sonucunda elde edilen RF dolaştırıcıya ait elektrik alan dağılımı ve S-parametreleri şekil 3.23'te verilmiştir. Sistemin çalışma frekansı olan 352.21 MHz frekansındaki S11, S21, S31 parametreleri sırasıyla -55 dB, -0.26 dB ve -30 dB olarak hesaplanmıştır.

Tasarlanan RF dolaştırıcı ferritlerinin kutuplanabilmeleri için gerekli olan dış manyetik alan şiddeti 1910 Gauss'tur. Dolaştırıcının tasarımı ile ilgili daha ayrıntılı bilgi için (Turemen vd. 2017) incelenebilir. Ferritler üzerinde istenen manyetik alan şiddetinin elde edilebilmesi için RF dolaştırıcı yapısını çevreleyen bir iki-kutuplu elektromıknatıs CST EMS kullanılarak tasarlanmıştır. Tasarlanan mıknatıs ile, bobinler 17 A'lik akım ile beslendiğinde, ferrit bölgesinde 2300 Gauss'luk manyetik alan şiddetinin elde edileceği hesaplanmıştır. Manyetik kutupların ve manyetik yolun oluşturulabilmesi için gerekli demir levhalar ve iki-kutuplu elektromıknatısı oluşturan iki bobin ile birlikte RF dolaştırıcının toplam ağırlığı yaklaşık 1 Ton'a ulaşmıştır. RF dolaştırıcı ve iki-kutuplu mıknatısın CAD çizimi şekil 3.24'te verilmiştir.



Şekil 3.23 RF dolaştırıcının elektrik alan dağılımı (üst) ve S-parametreleri (alt)



Şekil 3.24 RF dolaştırıcının CAD çizimi

RF dolaştırıcı ve iki-kutuplu mıknatıs KALİTEK firmasında üretilmiş ve laboratuvarda birleştirilerek RF iletim hattındaki yerine taşınmıştır (Şekil 3.25). Burada sistemin devreye-alma testleri sırasında kullanılmak üzere bir RF kapıcı anten, RF dolaştırıcı ile RF çöpü arasına yerleştirilerek RF dolaştırıcıya geri yansıyan gücün ölçülebilmesi sağlanmıştır.



Şekil 3.25 RF dolaştırıcı ve çevre bileşenlerinin görünümü

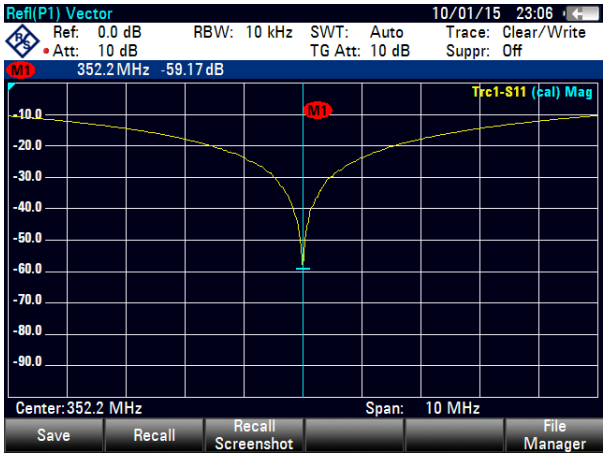
3.2.2.5 Dalga kılavuzu-Eşmerkezli dönüştürücü

RF iletim hattı sonunda RF gücün RFQ kovuğuna aktarılabilmesi için, dikdörtgensel dalga kılavuzlarından tekrar eşmerkezli hatta geçilmesi gerekmektedir. Bu amaçla bir TE-TEM RF kip dönüştürücüsü tasarlanmıştır. Dikdörtgensel dalga kılavuzu kısmı TY-WR2300 boyutlarında tasarlanan dönüştürücünün eşmerkezli hat çıkışı 3 1/8" boyutlarındadır. Elektromanyetik dalganın dönüştürücü ile iletimini arttırabilmek için iki adet RF ayarlayıcı tasarlanmıştır. TEM-TE dönüştürücüsüne benzer yöntemler ile aluminyum malzemeden üretilen dönüştürücü şekil 3.26'da gösterilmiştir.



Şekil 3.26 TE-TEM dönüştürücü

TE-TEM dönüştürücüsünün düşük güçlü RF testleri VNA, eşmerkezli düşürücü ve RF çöpü kullanılarak yapılmış ve S11 parametresi şekil 3.27'de gösterildiği gibi 352.2 MHz'de -59.2 dB olarak ölçülmüştür.



Şekil 3.27 TE-TEM dönüştürücüsünün S11 ölçümü

3.2.2.6 RF çöpü

RF dolaştırıcının yansıma kolunda ve RF iletim hattı bileşenlerinin S-parametresi ölçümlerinde kullanılmak üzere YY-WR2300 boyutlarında bir RF çöpü tasarlanmıştır. RF çöpü, gelen RF gücü sönümlendirebilmesi için gerekli olan yüzey alanının arttırılabilmesi amacıyla konik yapıda tasarlanmıştır (Şekil 3.28). RF gücü sönümlendirebilmek için kullanılan SiC (silisyum karbür) plakalar, aluminyumdan üretilen gövdenin iç yüzeylerine yapıştırılmıştır.



Şekil 3.28 RF çöpü ve 90 derece dalga kılavuzu

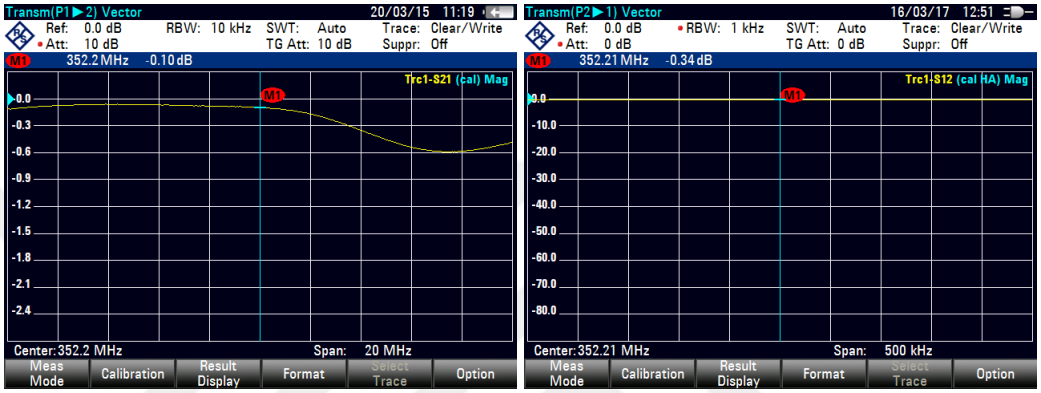
3.2.2.7 Tüm RF iletim hattı S-parametresi ölçümleri

SPP RF iletim hattını oluşturan RF dolaştırıcı dışındaki tüm bileşenler birleştirilerek S21 parametresi incelenmiştir (Şekil 3.29). TEM-TE ve TE-TEM dönüştürücüler üzerinde bulunan RF ayarlayıcıların en-iyileştirilerek uygun konumlara getirilmesiyle şekil 3.30-sol'da gösterildiği gibi 352.2 MHz için S21 parametresi -0.1 dB olarak ölçülmüştür.

Dikdörtgensel dalga kılavuzu RF dolaştırıcının RF iletim hattına dahil edilmesiyle, dolaştırıcının da performansı ölçülebilmiştir. Dolaştırıcının her iki mıknatıs bobininin besleme akımı, RF iletim hattı boyunca güç iletiminin en yüksek değere çıkarılması için en-iyileştirilmiş ve 16.12 A olarak sabitlenmiştir. Bu değerde tüm RF iletim hattı için S21



Şekil 3.29 Dolaştırıcısız RF iletim hattı için S-parametresi ölçüm kurulumu



Şekil 3.30 Dolaştırıcısız (sol) ve dolaştırıcılı (sağ) RF iletim hattı için S21 ölçümü

parametresi -0.34 dB olarak ölçülmüştür (şekil 3.30-sağ). Böylece tüm RF iletim hattı bileşenlerinde oluşan toplam güç kaybı %7.5 olarak tespit edilmiştir.

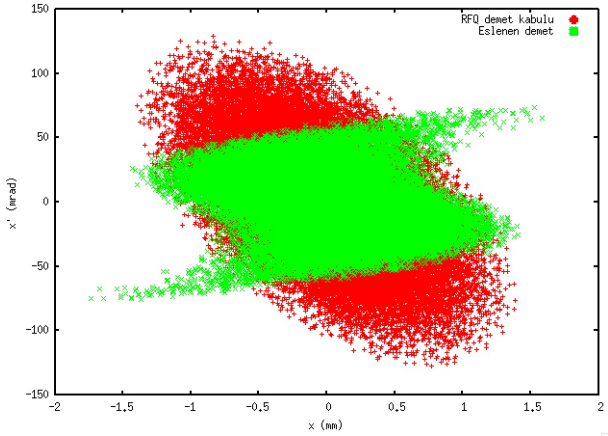
4. SİSTEMİN DEVREYE ALINMASI

Bu bölümde tüm hızlandırıcı sisteminin kurulumu tamamlandıktan sonra gerçekleştirilen, devreye alma çalışmaları ve ilgili ölçümler açıklanacaktır. Demet hattı ve RF iletim hattı ile ilgili gerçekleştirilen ölçümlerin yanı sıra RFQ kovuğuna RF gücün beslenmesi ile ilgili çalışmalardan da bahsedilecektir.

SPP demet hattında bulunan tüm bileşenlerin, taşıyıcı masa üzerine yerleştirilmesi sonrası tüm bileşenler birbirleri ile hizalanarak yerlerine sabitlenmiştir. Bu hizalama çalışmaları ile tüm demet hattı bileşenlerinin, çıkış flanşlarına uygun olarak üretilen parçalar ve bileşen taşıyıcıları üzerinde bulunan vidalar yardımıyla eş-merkezli hale getirilmeleri sağlanmıştır. Demet hattının hizalanması sonrası, RF iletim hattının RFQ ile bağlantısının kurulabilmesi için RF iletim hattı bileşenlerini taşıyan ayakların konumları ayarlanmış ve RF iletim hattı RFQ kovuğuna bağlanmıştır.

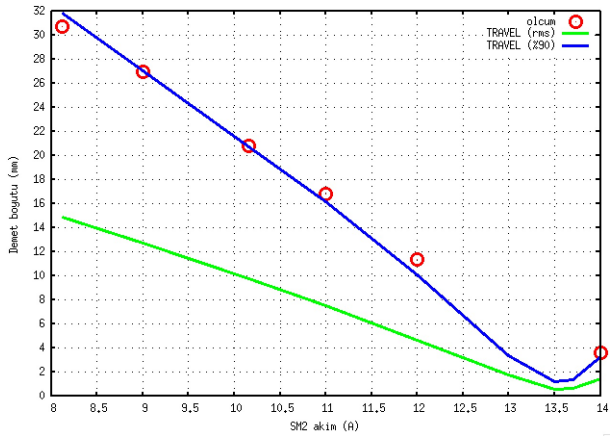
4.1 RFQ Demet Kabulüne Demet Eşleme

Bölüm 2.3.1.3'te belirlenen RFQ demet kabulüne uygun demetin elde edilebilmesi için yapılacak çalışmalarda, DEDA hattında alınan yayınım ölçümlerinden (Bölüm 2.2.4.3) elde edilen deneysel parametreler (Twiss) kullanılmıştır. Buna göre DEDA hattındaki (DTK1 içinde) proton demeti, ölçülen Twiss parametreleri kullanılarak TRAVEL programında 50000 makro-parçacık ile yeniden yaratılmıştır. RFQ demet kabulüne uygun demetin elde edilebilmesi için gerekli olan SM2 mıknatısının akımı, yeniden yaratılan bu demet ile gerçekleştirilen demet dinamiği benzetimleri sonucu belirlenmiştir. Bunun için, DELTA programı ile SM2 mıknatısının akımları 5000 farklı değer ile taranarak RFQ demet kabulüne en yakın Twiss parametrelerini veren akım değeri 10.16 A olarak bulunmuştur. Benzetimler sonucu elde edilen RFQ demet kabulü ve eşlenen demet şekil 4.1'de gösterilmiştir.



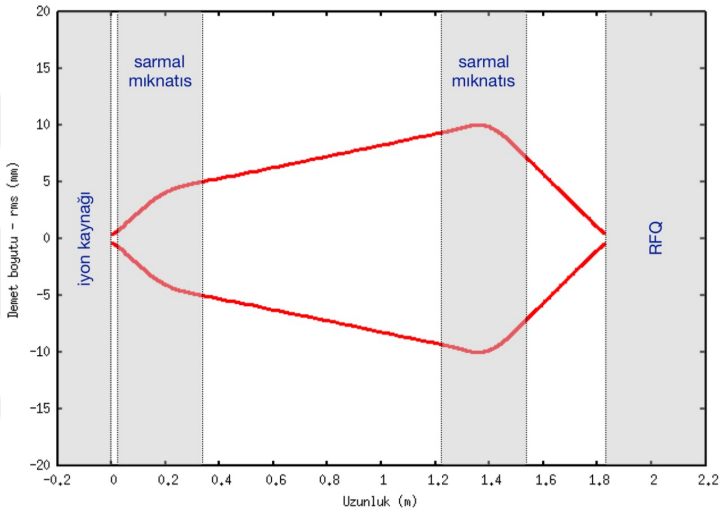
Şekil 4.1 RFQ girişi için x-x′ faz uzayı. Kırmızı: RFQ demet kabulu, yeşil: eşlenen demet

DEDA hattı demetinin RFQ demet kabulüne eşlenmesi için kullanılan yöntemin doğrulanabilmesi için, DTK1 içinde yeniden yaratılan demet, DEDA hattında ileri yönde taşınmış ve farklı SM2 mıknatısı akımları için gerçekleştirilen benzetimler ile ölçüm sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu amaçla, yayınım ölçümü sonucu yeniden yaratılan demetin, 9 farklı SM2 akımı için DE2 konumundaki boyutları TRAVEL programı ile hesaplanmıştır. Benzetim sonucu elde edilen bu değerler ile karşılaştırılabilmesi amacıyla 6 farklı SM2 akımı için demet çapı ölçümleri DE2 üzerinde alınmıştır. Sonuç olarak elde edilen verilerin, şekil 4.2'de gösterildiği gibi benzetim sonuçları ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.2 DEDA hattında benzetim ve ölçümlerin karşılaştırılması

Doğrulanan yöntem ile demet DEDA hattında, önce geri (iyon kaynağı çıkışına), sonra ileri (RFQ girişine) taşınarak DEDA hattı boyunca demet zarfı hesaplanmıştır. Bunun için öncelikle tuzluk düzeneği konumunda (DTK2 içinde) yeniden yaratılan demet, Twiss alfa parametresinin işareti değiştirilerek ters yöne çevrilmiştir. Elde edilen demet, TRAVEL programı ile iyon kaynağı çıkışına taşınmıştır. Burada tekrar ters yöne çevrilerek 13.0 A ve 10.16 A'lik SM1 ve SM2 akımları ile RFQ girişine kadar taşınmıştır. Böylece RFQ'nun demet kabulüne uygun olan demetin DEDA hattı boyunca rms demet zarfı hesaplanmıştır (Şekil 4.3).



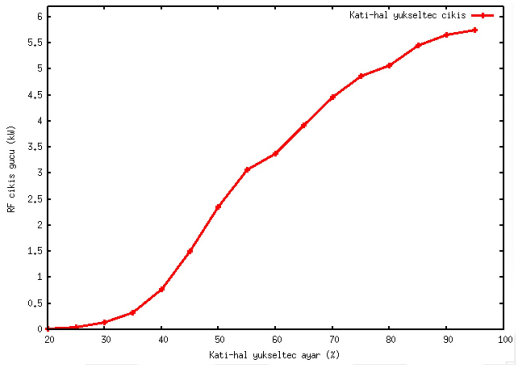
Şekil 4.3 DEDA hattı rms demet zarfı

4.2 Yüksek Güç RF Testleri

RF güç kaynağı ve RF iletim hattının yüksek RF gücünde testleri üç ayrı noktada gerçekleştirilmiştir; Katı-hal yükselteci çıkışı, Tetrode yükselteci çıkışı ve RF iletim hattı sonu. Bu testlerde, RF gücün (kW'lar) osiloskop aracılıyla okunabilecek seviyelere (mW'lar) düşürülebilmesi için toplam 60 dB'lik RF zayıflatıcılar kullanılmıştır.

İlk aşamada, RF güç kaynağı kontrol sistemi ile kontrol edilen katı-hal yükseltecin, RF çıkış güçleri ölçülmüştür. Bu ölçümlerde, şekil 4.4'te gösterildiği gibi yaklaşık 5.75

kW'lık RF güç elde edilmiştir. Bu güç ile beslenen Tetrode güç kaynağının çıkışında SPP'de hedeflenen 120 kW'lık RF gücün elde edilebilmesi için, Tetrode tüpün en az 13.2 dB kazanç ile çalışması gerektiği hesaplanmıştır.

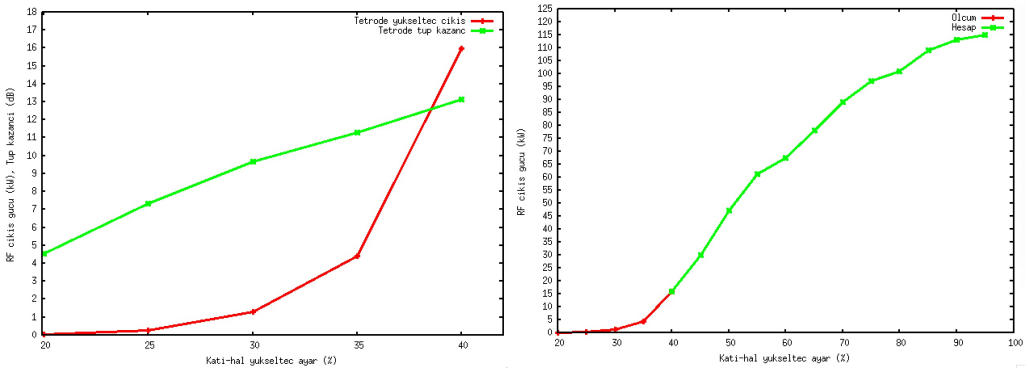


Şekil 4.4 Katı-hal yükselteci için çıkış gücü ölçümleri

İkinci aşamada, Tetrode güç kaynağının RF çıkış gücü ölçülerek, bu sayede deneysel olarak tetrode tüpünün kazancı da belirlenmiştir. Testlerde kullanılan Tetrode güç kaynağı parametreleri çizelge 4.1'de verilmiştir. 16 kW seviyesine kadar alınan ölçümler sonucu, gerekli olan 13 dB'lik RF kazancının rahatlıkla sağlanabileceği gösterilmiştir (Şekil 4.5-sol).

Çizelge 4.1 Tetrode güç kaynağı test parametreleri

Parametre	Değer	Birim
G_1 gerilimi	-200	V
G_2 gerilimi	900	V
Filaman gerilimi	7.4	V
Filaman akımı	168	A
Anot gerilimi	13.5	kV



Şekil 4.5 Sol: Tetrode güç kaynağının çıkış gücü ve RF kazancı, sağ: Ölçülen ve hesaplanan Tetrode güç kaynağını çıkış güçleri

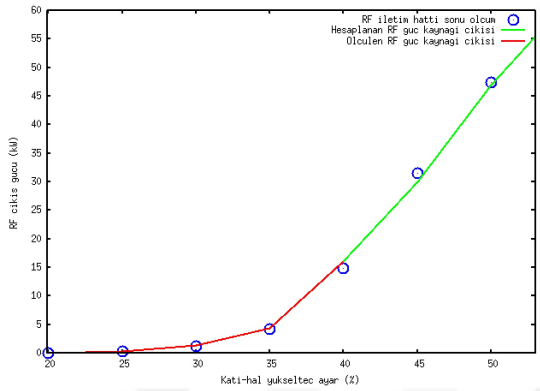
Tetrode tüp için kazancın yüksek güçlerde daha da artacağı düşünülürse en kötü senaryo için, 13 dB'lik kazanç ile RF güç kaynağının verebileceği çıkış güçleri, katı-hal yükseltecinden alınan ölçümler referans alınarak hesaplanmıştır (Şekil 4.5-sağ). Buna göre RF güç kaynağının 115 kW'lık RF gücü sağlayabileceği öngörülmüştür.



Şekil 4.6 RF iletim hattı sonunda RF güç testleri için kurulum

Üçüncü aşama olarak, RF iletim hattı sonunda 47.4 kW seviyesine kadar RF güç ölçümleri yapılmıştır (Şekil 4.6). Bunun nedeni, mevcut bulunan RF zayıflatıcı için daha yüksek RF gerilimlerinde yük atlama riskinin oluşmasıdır. Bu ölçümler ile RF güç kaynağında üretilip, RF iletim hattı sonuna kadar taşınan RF gücün seviyesi belirlenmiştir. Şekil 4.7'den

de görüleceği gibi bir önceki aşamada yapılan beklentiler ile deneysel ölçümler yeterince tutarlıdır. Daha yüksek RF güç seviyelerine ise RFQ kovuğu içinde çıkılacaktır.



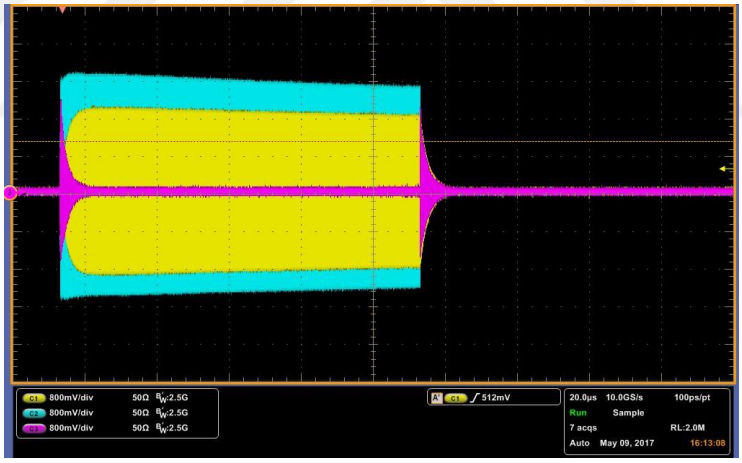
Şekil 4.7 RF iletim hattı sonunda alınan RF güç ölçümleri

4.3 RFQ Kovuğu RF Tavlama

RFQ kovuğunda, kanatlar-arasında 60 kV'luk potansiyel farkın yaratılabilmesi için gerekli olan RF gücün (90.8 kW @ Q_0=6666) oluşturulabilmesi için RF iletim hattı çıkışı, bir yönelimsel bağdaştırıcı ve RF güç bağdaştırıcısı ile RFQ kovuğuna bağlanmıştır. Burada yönelimsel bağdaştırıcı, RF iletim hattından kovuğa beslenen ileri yönlü RF güç ile RFQ'dan geri yansıyan RF gücün ayrı ayrı izelenebilmesini sağlamaktadır. RF güç bağdaştırıcısı ise, RF iletim hattından gelen RF gücün RFQ kovuğuna en az kayıpla aktarılmasını sağlamalıdır. RFQ kovuğunun RF ile tavlanabilmesi (RF conditioning) için kovuğa beslenen RF gücün kademeli olarak arttırılması ve RF tavlama sırasında ilgili parametreler (vakum seviyesi, ileri/geri RF güç, kovuk içi RF güç) izlenerek, istenmeyen bir durumda (elektron atlaması, elektron çığı (multipacting), vb.) beslenen RF gücün en kısa sürede kesilmesi gerekmektedir. Aksi durumda, RF güç bağdaştırıcısı ve RFQ kovuğunda oluşabilecek elektron çığı ve elektron atlaması nedeniyle bileşenler üzerinde geri dönülemez hasarlar oluşabilir. Bu nedenle, kovuk üzerinde bulunan vakum ölçerden alınan vakum seviyesi bilgisi ve yönelimsel bağdaştırıcıdan alınan geri yansıyan RF güç üzerinden tetiklenen güvenlik kilitleri aracılığıyla RF güç kaynağı otomatik olarak kapatılarak, RF

güç bağdaştırıcı ve RFQ kovuğu korumaya alınmıştır.

RFQ kovuğunun RF ile tavlanabilmesi için kovuğun içine beslenen ve geri yansıyan RF güçlerin yanı sıra kovuk içinde depolanan RF gücün de bilinmesi gerekmektedir. Bunun için kovuk içine yerleştirilen bir RF kapıcı, VNA ile gerçekleştirilen S21 ölçümleri sonucu kalibre edilerek (-61.8 dB) testlere hazır hale getirilmiştir. Yönelimsel bağdaştırıcının ileri ve geri yönlü bağlaşımlarını kalibre edebilmek için, iki ucuna eşmerkezli düşürücüler bağlanmıştır. İlgilenilen yön harici tüm girişler 50 ohm ile sonlandırılarak, yönelimsel bağdaştırıcı ileri ve geri yönlü güçler için sırasıyla -59.1 dB ve -60.9 dB olarak kalibre edilmiştir. Tüm bu kalibrasyonlar RF kapıcıların kendi eksenleri etrafında çevrilmesi ile gerçekleştirilmiştir. Bu sayede istenilen RF bağlaşım değerleri ayarlanmıştır. Bu çalışmalar sonucu, RF gücün RFQ kovuğuna beslenmesi sırasında osiloskop ile alınan ileri/geri yönlü ve kovuk içi RF güç ölçüm sonuçları şekil 4.8'de verilmiştir.

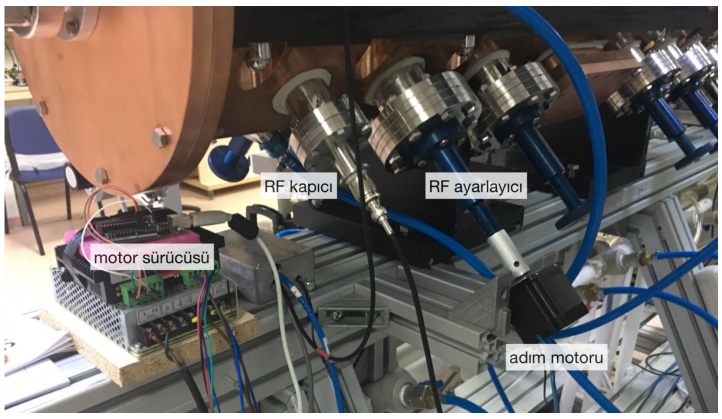


Şekil 4.8 RFQ'nun RF ile tavlanması. Mavi: Gelen güç, pembe: yansıyan güç, sarı: kovuk içi

Kovuğun RF iletim hattına bağlanarak RF ile tavlanması gerçekleştirilirken, kovuk salınım frekansının VNA'dan S21 ölçümü yöntemi ile belirlenmesi mümkün değildir. Bu nedenle, doğru frekansta çalışıldığının tespit edilmesi ancak dolaylı yollardan gerçekleştirilebilir. Bunun için bir yöntem, kovuktan geri yansıyan güç sinyalinin incelenmesidir. Şekil 4.8'den görüleceği gibi kovuğun RF ile dolmasıyla birlikte geri yansıyan

RF güç gürültü seviyesine kadar düşmektedir. Buradan RF iletim hattından gelen RF gücün, RFQ kovuğuna başarılı bir şekilde iletildiği, dolayısıyla kovuğun RF salınım frekansı ile RF güç kaynağının RF frekansının birbirleri ile uygun olduğu tespit edilebilmektedir. Bir diğer yöntem ise, kovuğa beslenen RF güç sinyali ile kovuk içinde okunan RF güç sinyali arasındaki faz kaymasının testip edilmesidir. Bu yöntem ile kovuğun anlık salınım frekansı sayısal olarak bulunabilir. Bu sebeple AD8302 (Anonymous 2017b) entegresine dayalı bir faz algıcı ile yönelimsel bağdaştırıcı (ileri yönlü) ve kovuk içi RF kapıcı arasındaki faz farkı incelenelerek kalibre edilmesi planlanmıştır.

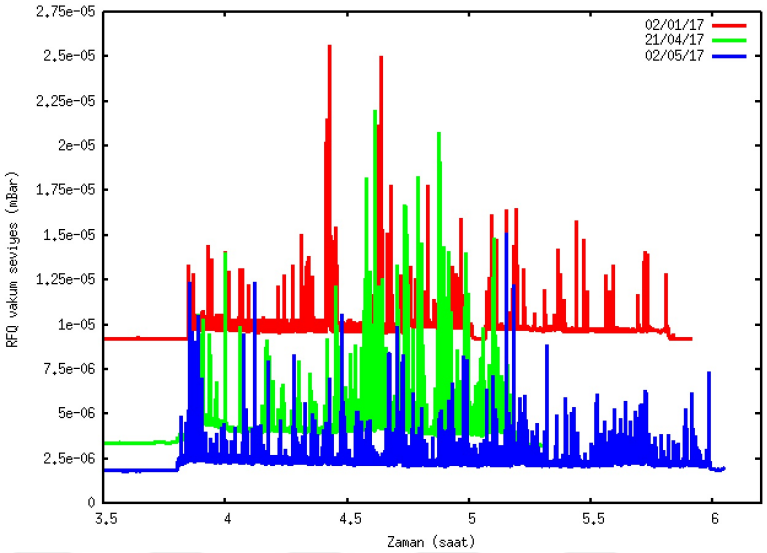
RFQ'nun devreye alınması sürecinde kovuk salınım frekansının sabitlenebilmesi için kovukta dolaşan soğutma suyunun sıcaklığının hassas bir şekilde istenilen seviyede tutulması gereklidir. Mevcut su soğutma sistemi ile bu ayarlamanın anlık olarak yapılabilmesi mümkün değildir. Bu nedenle ikinci bir frekans kontrol yöntemi olarak, kovuğun RF ayarlayıcılarından bir tanesi adım motoru ile kontrol edilebilir hale getirilmiştir (Şekil 4.9). Bu sayede sıcaklık değişimlerine karşı RFQ'nun salınım frekansı anlık olarak kontrol edilebilmektedir.



Şekil 4.9 Adım motoru kontrollü RF ayarlayıcı

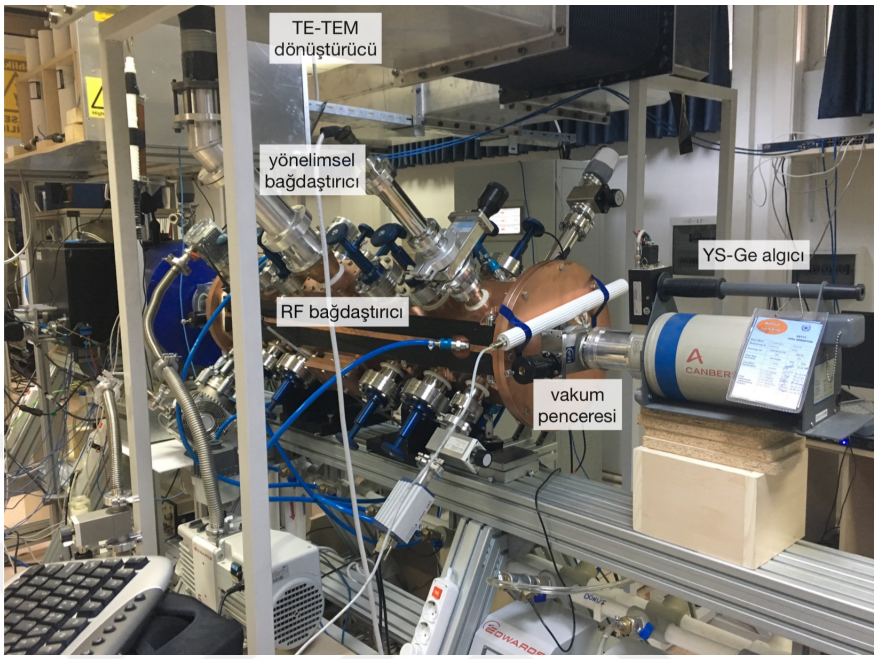
Kovuğun RF ile tavlanması sırasında kovukta depolanan RF güç ile birlikte eşzamanlı olarak kovuk vakum seviyesi de izlenerek, beslenen RF güç seviyesi kademeli olarak arttırılmıştır. Kovuk yüzeylerinin RF ile tavlanması sayesinde, yüzeylerdeki mikro çıkıntılar kontrollü elektron atlamaları ile temizlenerek kovuk içinde daha yüksek RF

gücün depolanması sağlanmıştır. Ayrıca RF tavlama sürecinde kovuk vakum seviyesi $1.5x10^{-6}$ mBar mertebelerine kadar düşmüştür (Şekil 4.10). Bu sayede kanatlar-arasında elektron atlaması olasılığı da azaltılmıştır.

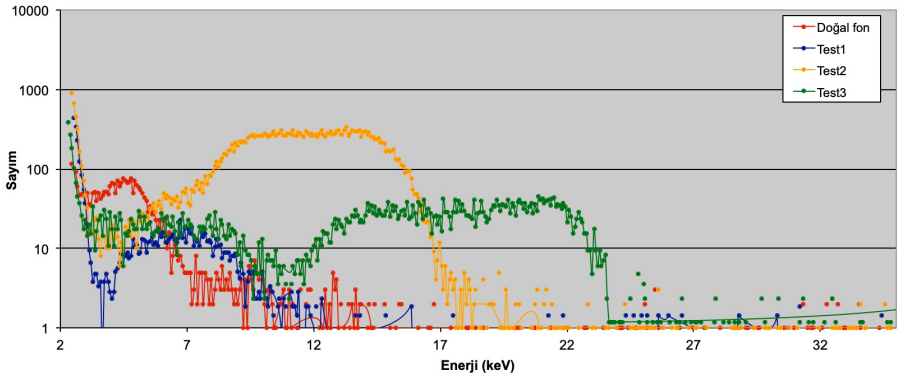


Şekil 4.10 RF tavlama süreçlerinde kovuk vakum seviyeleri

RFQ'nun RF ile tavlanması sırasında kanatlar-arasında oluşan gerilim, kanatlar-arasında oluşan X-ışınlarının en yüksek enerjisi ölçülerek bulunmuştur (Şekil 4.11). Bunun için taşınabilir bir yüksek saflıkta germanyum (YS-Ge) algıcı kullanılmıştır. Kanatlar-arasında oluşan X-ışınlarının kovuk dışına alınabilmesi için RFQ'nın demet çıkış flanşına bir vakum penceresi (cam) yerleştirilmiştir. Camdan geçen X-ışınları algıç ile algınalarak enerjileri ölçülmüştür (Şekil 4.12). Görüleceği gibi kovuk içinde depolanan güç arttırıldıkça, ölçülen X-ışınlarının en yüksek enerjisi 23.6 kV'a kadar yükseltilmiştir.



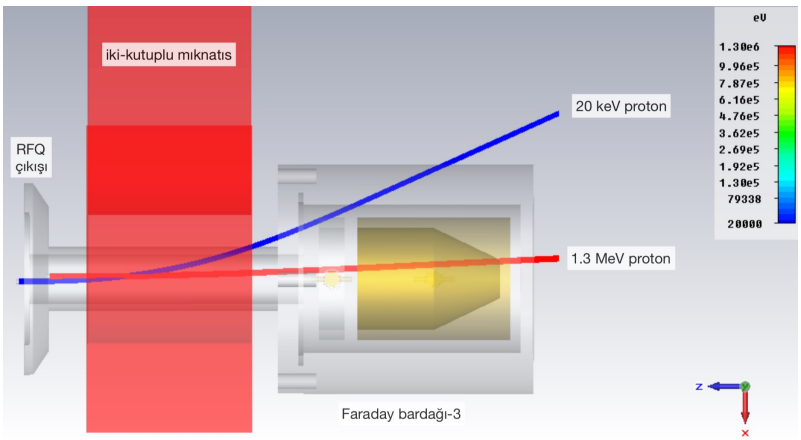
Şekil 4.11 RFQ kanatlar-arası gerilim ölçümü düzeneği



Şekil 4.12 YS-Ge algıcı ile alınan ölçümler

4.4 RFQ Sonrası Enerji Ölçümü

RFQ'nun RF ile tavlanarak, kovuk içinde istenilen RF gücün oluşturulmasından sonra, kovuk içerisinden geçirilecek proton demetinin enerjisinin ölçülmesi gerekmektedir. Bunun için RFQ çıkışında, bir iki-kutuplu mıknatıs ve bir Faraday bardağının (FB3) kullanılması hedeflenmiştir. RFQ çıkışındaki demetin enerjisini ölçebilmek için demet, bilinen bir manyetik alandan geçirilip FB3'e çarptırılacaktır. Oluşacak akım sinyali incelenerek RFQ çıkışındaki demetin enerjisi hakkında bilgi edinilebilecektir. Manyetik alanın arttırılmasıyla FB3'ten kaybolacak akım sinyali için gerekli olan manyetik alan ve dolayısıyla demet enerjisi belirlenecektir. RFQ'nun giriş enerjisi olan 20 keV'lik protonların FB3 dışına bükülebilmesi için gerekli manyetik alanı bularak, RFQ içinde demetin hızlandırılıp hızlandırılmadığı tespit edilebilir. Bu yöntem için laboratuvar malzemeleri arasında bulunan bir iki-kutuplu mıknatıs kullanılacaktır. CST PS ile modellenen bu iki-kutuplu mıknatıs için demet benzetimleri gerçekleştirilerek, 20 keV'lik proton demetini PB3 dışına atacak mıknatıs akımı 10 A olarak bulunmuştur (Şekil 4.13). Burada kullanılan FB3, 1.3 MeV'lik protonların ölçülebilmesi için tasarlanmıştır. Gerçekleştirilen benzetimler sonucu 1.3 MeV'lik protonların bakır malzemeden 20 keV'lik protonlara göre 200 kat daha az geri saçıldığı bulunmuştur. Bu nedenle DEDA hattında kullanılan FB'lerin aksine, FB3'ün akım toplayıcı metalinin boyu kısa tutulabilmiştir. RFQ çıkışında FB3'ün kullanılması ile demetin zaman yapısı ile ilgili ölçümler de yapılabilecektir.



Şekil 4.13 RFQ sonrasındaki iki-kutuplu mıknatıs ve FB3 için demet dinamiği benzetimi

RF güç kaynağından elde edilen 100 μs'lik RF güç ile iyon kaynağından elde edilen 10 ms'lik demetin zaman farkı nedeniyle RFQ kovuğu çıkışında hızlandırılan demetin yanı sıra 20 keV'lik giriş demeti de gözlenecektir. Bahsedilen yöntem ile RFQ çıkışında bu iki enerji ayrıştırılabilecektir. Bir başka çözüm olarak, RF güç kaynağı ve iyon kaynağının zaman yapılarının eşleştirilebilmesi için DEDA hattında bulunan DTK2 içinde bir demet doğrayıcının (chopper) kullanılması düşünülmektedir. Bu sayede 10 ms'lik demet, RFQ'ya girmeden 100 μs'nin altına indirilebilecektir. Böylece, RFQ çıkışında sadece hızlandırılmış parçacıkların ölçülebilmesi sağlanacaktır.

5. SONUÇ VE TARTIŞMA

Türkiye Atom Enerjisi Kurumu Radyasyon ve Hızlandırıcı Teknolojileri Dairesi Başkanlığın'da (TAEK-RHTDB (eski adı ile SANAEM)) gerçekleştirilen SANAEM Prometheus Projesi (SPP) ile yerli proton hızlandırıcısının tasarım, üretim ve testlerini kapsayan çalışmalar yapılmıştır. Bu sayede, hızlandırıcı teknolojisi alanında ülkemizde eksikliği bulunan deneysel çalışmalar gerçekleştirilebilmiştir. Bu deneysel çalışmalar ile birçok genç araştırmacının iş üstünde eğitim alması sağlanmıştır. Ayrıca bu proje ile, hızlandırıcı teknolojisi alanında bir çok başka projenin gerçekleştirilmesinin de önü açılmıştır. Sadece bu çıktılar bile SPP'yi şimdiden başarılı bir proje haline getirmiştir. Yürütülen bu doktora tez çalışması ile, özellikle hızlandırıcı ve RF teknolojisi bileşenlerinin tasarımı, üretim aşamaları ve devreye alma süreçleri ile ilgili çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

SPP demet hattı için gerekli olan iyon kaynağı, sarmal ve yönlendirici mıknatıslar, Radyo Frekans Dörtkutuplu (RFQ) kovuğu ve Faraday bardağı gibi bileşenlerin tasarımı, gerekli benzetimler gerçekleştirilerek tamamlanmıştır. Tasarlanan bileşenler, TAEK-RHTDB Mekanik Atölyesi ve yerli sanayide (Ankara OSTİM) üretilmiştir. Özellikle RFQ gibi üretimi meşakkatli olan bir RF hızlandırıcı kovuğunun yerli sanayide üretilebilmesi oldukça önemlidir. RFQ kovuğuna kadar üretilen tüm parçaların kabul testleri ve devreye alma çalışmaları Hızlandırıcı Teknolojisi Birimi (HTB) laboratuvarında tamamlanmıştır. Bunun sonucunda, RFQ girişine kadar gerekli olan demet parametreleri deneysel olarak elde edilmiş ve demet, RFQ demet kabulüne eşlenmiştir. RFQ kovuğu ile ilgili olarak, kovuk özelliklerinin ve RF davranışının belirlenmesi ve kovuk boyunca elektrik alanın ayarlanması çalışmaları tamamlanmıştır. Proje yürütücüsünün talebi ve idari bir kararla, yazarın proje ile ilişkisinin sonlandırılması (19 Haziran 2017) sonucunda, RFQ kovuğunun RF ile tavlanması ile ilgili çalışmaların ve dolayısı ile proton hızlandırıcısının tamamlanması mümkün olamamıştır. Yazar, tasarlanan ve üretilen bu ilk yerli proton hızlandırıcısında, MeV enerjisine ulaşmak için gereken tüm altyapının olduğuna inanmakta ve doğru kararlar ile bir gün bu projenin başarıyla tamamlanacağını ummaktadır.

SPP RF güç kaynağı, proje ekibi ve EPROM firmasının işbirliği ile tasarlanmış ve EPROM firması tarafından üretimi tamamlanmıştır. RF güç kaynağının kabul testleri ve devreye alma çalışmaları HTB laboratuvarında sonuçlandırılmıştır. Tüm SPP RF iletim hattı bileşenleri tasarlanarak, TAEK-RHTDB Mekanik Atölyesi ve yerli sanayide (Ankara OSTİM) üretilmiştir. Tüm RF iletim hattı bileşenlerinin S-parametresi ölçümleri ve yüksek güç testleri yine HTB laboratuvarında tamamlanmıştır. Böylece, RF güç kaynağı ve RF iletim hattının, RFQ kovuğuna yeterli gücü verebileceği gösterilmiştir.

Bu tezde anlatılan çalışmalar ile, hızlandırıcı ve RF bileşenlerinin hem tasarımları hem de testleri yapılarak, benzetim yöntemleri ve sonuçları karşılaştırılabilmiştir. SPP demet hattı ve RF iletim hattında bulunan bileşenler için benzetim sonuçları ile ölçüm sonuçlarının tutarlı olması, gelecekte yapılabilecek çalışmalar açısından yol göstericidir.

Günümüzde RFQ kovuğu, Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi'nde (CERN) üretilen yüksek frekanslı RFQ'lar ile birlikte farklılaşmaktadır. Özellikle sağlık ve malzeme karakterizasyonu alanında kullanılmak üzere dünyanın en yüksek frekanslı (750 MHz) RFQ'sunun geliştirilmesi CERN'de devam etmektedir (Anonymous 2017c). RFQ'nun frekansı arttıkça boyutlarının da küçülmesiyle taşınabilir olarak kullanılabilmesi, birçok uygulama için oldukça ilgi çekicidir. Ülkemizde bu çalışmaların yansıması olarak, yazarın da içinde olduğu yerli bir 800 MHz'lik RFQ yapımı projesi başlamak üzeredir.

KAYNAKLAR

Anonim. 2012. TAEK Proton Hızlandırıcısı Tesisi Kitapçığı. Web Sitesi: kurumsalarsiv.taek.gov.tr/bitstream/1/164/4/10058.pdf. Erişim Tarihi: 08.05.2019.

Anonim. 2014a. Kalitek Makina Kalıp ve Tasarım Ltd. Şti. Ankara. Türkiye.

Anonim. 2014b. OMSAN Trafo Ltd. Şti. Ankara. Türkiye.

Anonim. 2015a. Ankor Metal Kaplama Sanayi Tic. Ltd. Şti. Ankara. Türkiye.

Anonim. 2015b. FiberLAST Inc. Ankara. Türkiye.

Anonim. 2015c. Maksamak Makina Ltd. Şti. Ankara. Türkiye.

Anonim. 2017. EPROM Electronic Project & Microwave Ind. and Trade Ltd. Co. Ankara. Turkey.

Anonim. 2019. Türk Hızlandırıcı Merkezi Projesi. Ankara Üniversitesi. Web Sitesi: http://thm.ankara.edu.tr/proje/proje-asamalari/fizibilite-1997-2001. Erişim Tarihi: 15.05.2019.

Anonymous. 2004. OPERA-3D User Guide. Opera/Vector Fields Limited.

Anonymous. 2012a. HMMA-2504-VF Hall Probe. LakeShore.

Anonymous. 2012b. HMMT-6J04-VF Hall Probe. LakeShore.

Anonymous. 2012c. 475 DSP Gaussmeter User's Manual. LakeShore.

Anonymous. 2012d. DPO 7254 Data Sheet. Tektronix.

Anonymous. 2013a. Computer Simulation Technology. CST GmbH.

Anonymous. 2013b. LT Series High Voltage Power Supply 100 kV 20 mA. XP/Glassman.

Anonymous. 2013c. LIDOS RFQ Designer 1.3. Accelsoft.

Anonymous. 2013d. 2U Genesys 3.3kW Programmable DC Power Supply User Manual. TDK-Lambda Americas Inc.

Anonymous. 2013e. Torr Seal Specifications. Kurt J. Lesker Company.

Anonymous. 2014a. Zhok Material Technical Co. Ltd.

Anonymous. 2014b. BLF578XR. NXP Semiconductors.

Anonymous. 2014c. Ti401 Thermal Camera. Fluke.

Anonymous. 2014d. FSH8 Spectrum Analyzer. Rohde and Schwarz GmbH Co. Germany.

Anonymous. 2014e. LabView Development System. National Instruments.

Anonymous. 2014f. High Performance Silver Paste Technical Notes. Pelco.

Anonymous. 2014g. Navio RF Matching Network. Advanced Energy.

Anonymous. 2014h. RF Solutions for Science. Thales.

Anonymous. 2014i. CESAR RF Power Generator Data Sheet. Advanced Energy.

Anonymous. 2015a. Arduino Uno Board. Web Sitesi: https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction. Erişim Tarihi: 12.05.2019.

Anonymous. 2015b. DS18B20 Temperature Sensor Data Sheet.

Anonymous. 2015c. Whisper MCW-20SCCM-D Model Mass Flow Controller. Alicat.

Anonymous. 2015d. VS Series Helium Mass Spectrometer Leak Detector. Agilent/Varian.

Anonymous. 2015e. National Magnetics Group Inc. TCI Ceramics Inc. 1210 Win Dr. Bethlehem, PA 18017-7061. USA.

Anonymous. 2015f. PSpice Designer Lite. Orcad.

Anonymous. 2016a. Autodesk Inventor Professional.

Anonymous. 2016b. LT1037 OpAmp. Low Noise-High Speed Precision Operational Amplifier. Linear Technology.

Anonymous. 2016c. DM542 Stepper Motor Driver Data Sheet.

Anonymous. 2017a. ZNB20 Vector Network Analyzer. Rohde and Schwarz GmbH Co. Germany.

Anonymous. 2017b. AD8302 RF/IF Gain and Phase Detector. Analog Devices.

Anonymous. Design and Construction of a Transportable RFQ for PIXE Analysis. 2017c.

Anonymous. 2019. Oxygen-free Copper (OFC). Wikipedia. Web Sitesi: https://en.wikipedia.org/wiki/Oxygen-free_copper. Erişim Tarihi: 10.05.2019.

Batygin, Y. 2014. High Intensity RF Linear Accelerators Low Energy Beam Transport for Intense Beams. LA-UR-14-23756.

Billen, J. H. ve Young, L. M. 2000. Poisson-Superfish. LA-UR-96-1834.

Brown, I. G. 2004. Physics and Technology of Ion Sources, Wiley-Vch. s.62.

Carter, R. G. 2011. Radio-Frequency Power Generation.

Chen, W. K. 2005. The Electrical Engineering Handbook. s. 600.

Coakley, K. J., Splett, J. D., Janezic, M. D. ve Kaiser, F. 2003. Estimation of Q Factors and Resonant Frequencies.

Cooper, R. K. ve Carter, R. G. 2005. High-Power RF Transmission.

Crandall, K. R., Stokes, R. H. ve Wangler, T. P. 1979. RF Quadrupole Beam Dynamics Design Studies. Linac Accelerator Conference 79. Montauk. NY.

Duperrier, R. 2000. TOUTATIS: A Radio Frequency Quadrupole Code. Phys. Rev. Vol.3, 124201.

Ergenlik, E. 2018. Design Simulation and Construction of Particle and Accelerator Detectors. Master Thesis.

Jacob, J. 2014. Radio Frequency Solid State Amplifiers.

Jonsson, P. 2015. High Precision RF Measurement for ESS Cavity Parameters. Master Thesis.

Kalvas, T., Tarvainen, O., Ropponen, T., Steczkiewicz, O., Arje, J. ve Clark, H. 2010. IBSIMU: a Three-dimensional Simulation Software for Charged Particle Optics. Rev. Sci. Instrum. 81. 02B703.

Kapchinskiy, I. M. ve Tepliakov, V. A. 1970a. Linear Ion Accelerator with Spatially Homogeneous Strong Focusing. Prib. Tekh. Eksp. No. 2. 19–22.

Kapchinskiy, I. M. ve Tepliakov, V. A. 1970b. Prib. Tekh. Eksp. No. 4. 17–19.

Letchford, A. 2012. Overview of the Front End Test Stand at RAL. Proton Accelerators for Science and Innovation Workshop. Fermilab.

Letchford, A., Savage, P., Pozimski, J. ve Cheng, Y. A. 2006. Mechanical Design and RF Measurement on RFQ for Front End Test Stand at RAL. Proceedings of EPAC16.

Lieberman, M. A. ve Lichtenberg, A. J. 1994. Principles of Plasma Discharges and Materials Processing, John Wiley and Sons.

Manura, D. ve Dahl, D. 2008. SIMION 8.0 User Manual. Scientific Instrument Services Inc.

Mendez, I., Gordillo-Vazquez, F. J., Herrero, V. J. ve Tanarro, I. 2006. Atom and Ion Chemistry in Low Pressure Hydrogen DC Plasmas. J. Phys. Chem. A. 110, 6060-6066.

Montesinos, E. 2013. TIARA-Uppsala University Workshop on RF Power Generation for Accelerators.

Oğur, S. 2015. Emittance Measurements for Low Energy Proton Beams. Master Thesis.

Perrin, A., Amand, J. F., Mütze, T. ve Lallement, J. B. 2007. TRAVEL v4.07 User Manual.

Piquet, O., Delferriere, O., Desmons, M., France, A. C., Lombardi, A., Rossi, C. ve Vretenar, M. 2010. The RF Design of the LINAC4 RFQ. Proceedings of IPAC10. MOPD027.

Rossi, C., Bourquin, P., Lallement, J.B., Lombardi, A.M., Mathot, S., Pugnat, D., Timmins, M., Vandoni, G., Vretenar, M., Desmons, M., France, A., Noa, Y. Le, Novo, G. ve Piquet, O. 2010. Progress in the Fabrication of the RFQ Accelerator for the CERN LINAC4. Proceedings of Linear Accelerator Conference LINAC10. TUP042.

Solyak, N., Nagaitsev, S., Lebedev, V., Ostiguy, J-F., Perunov, N., Gianfelice-Wendt, E., Gonin, I., Romanov, G., Kazakov, S. ve Yakovlev, V. 2010. The Concept Design of the CW Linac of the Project-X. IPAC'10. MOPEC081.

Sun, L., Shi, L., Xu, X., Li, C., Zhang, Z., Wang, W., Lu, L., Shi, A., Y.He ve Zhao, H. 2012. Beam Dynamics Design of a New Radio Frequency Quadrupole for Beam-current Upgrade of the Japan Proton Accelerator Research Complex Linac. Phys. Rev. ST Accel. Beams 15, 080101.

Turemen, G., Yasatekin, B., Yildiz, V., Celik, M., Sali, Z., Alacakir, A., Unel, G. ve Mete, O. 2014. SPP Beamline Design and Beam Dynamics, THPME050, IPAC'14, 3338, Dresden.

Turemen, G., Ogur, S., Ahiska, F., Yasatekin, B., Cicek, E., Ozbey, A., Kilic, I., Unel, G. ve Alacakir, A. 2017. Design and Manufacture of the RF Power Supply and RF Transmission Line for SANAEM Project Prometheus. Journal of Instrumentation. Volume 12.

Vretenar, M. 2009. The Radio Frequency Quadrupole. CAS. Darmstadt.

Wangler, T. P. 2008. RF Linear Accelerators. 2nd Completely Revised and Enlarged Edition. Wiley-VCH Verlag GmbH Co. KGaA. Weinheim.

Weiss, M. 1987. Radio-Frequency Quadrupole. CERN-PS/87-51(LI).

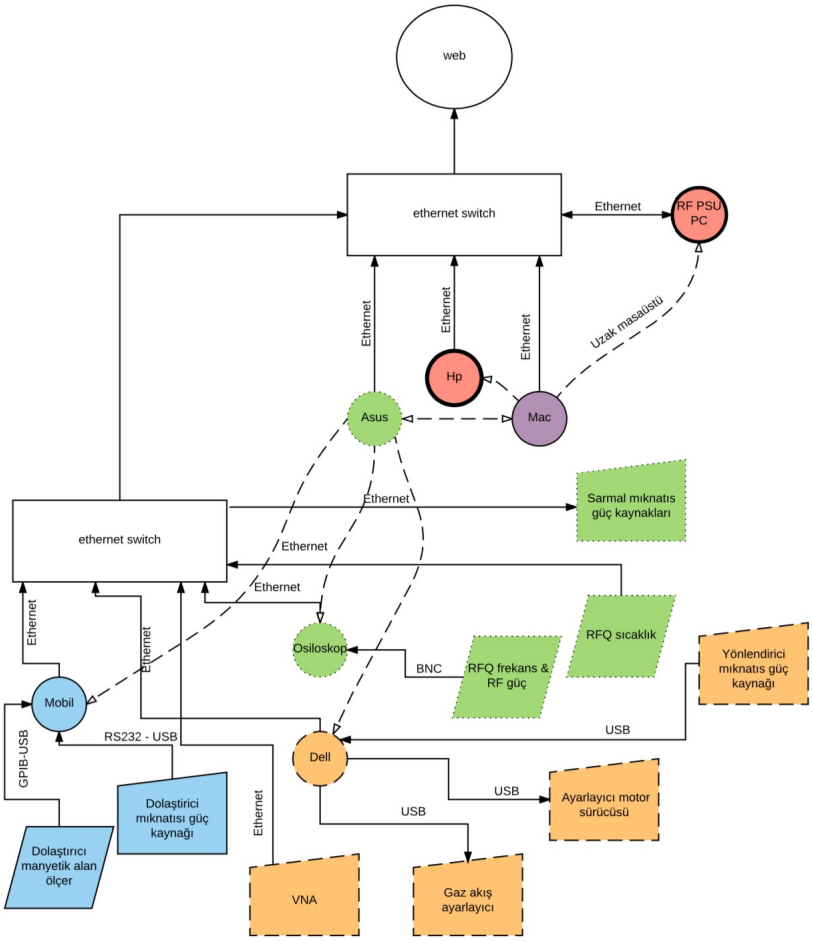
Wolf, B. 1995. Handbook of Ion Sources.

Yasatekin, B., Turemen, G. ve Unel, G. 2015. A Graphical Approach to Radio Frequency Quadrupole Design. Comput. Phys. Commun. 192. 108-113.

Yildiz, H., Ozbey, A., Oz, S., Yasatekin, B., Turemen, G., Ogur, S., Sunar, E., Aydin, O., Dimov, V. A., Unel, G. ve Alacakir, A. 2017. Compact Measurement Station for Low Energy Proton Beams. Journal of Instrumentation. vol 12.

EK 1 SPP Kontrol Sistemi

SPP'de kullanılmakta olan donanım ve sistemlerin uzaktan kontrolü ve izlenebilmesi için bir kontrol sistemi kurulmuştur (Şekil 1.1). Kontrol sistemi sayesinde güç kaynakları, vakum pompaları, atma üreteci, gaz akış ayarlayıcı, manyetik alan ölçer, motor sürücüsü, osiloskop, VNA ve sıcaklık algıçları uzaktan kontrol edilebilmektedir (Çizelge 1.1). Tüm sistem iki ethernet anahtarı ile yerel bir ağ üzerinde toplanmıştır. Arıza durumlarına karşı, donanımların kontrolü mümkün olduğunca farklı bilgisayarlara paylaştırılmıştır. Tüm kontrol ve izleme programları LABVIEW ve Arduino tabanlı yazılmıştır. Kontrol sistemi ile elde edilen veriler istenilen sıklıkla bilgisayara kayıt edilebilmektedir.



Şekil 1.1 SPP kontrol sisteminin şeması

Çizelge 1.1 SPP kontrol sistemi

Sistem	Protokol	Donanım
Vakum	RS232-USB	Pompalar ve vakum ölçerler
Mıknatıs	TCP/IP USB	Dolaştırıcı ve sarmal mıknatıs güç kaynakları Yönlendirici mıknatıs güç kaynağı
İyon kaynağı	RS232-USB	Gaz akış ayarlayıcısı
Sıcaklık	Arduino-TCP/IP USB	Soğutma suyu ve RFQ duvar sıcaklığı Dolaştırıcı ve sarmal mıknatıs sıcaklık algıçları
Dolaştırıcı	GPIB-USB	Manyetik alan ölçer
Eşzamanlama	GPIB-USB	Atma üreteci
RF sistemi	TCP/IP Arduino-USB	RF güç kaynağı, osiloskop ve VNA RF ayarlayıcı adım motoru
Demet görüntüleme	USB	CMOS kameralar

Kurulan kontrol sistemi ile, iyon kaynağından sökülen demet ile RF güç kaynağından çıkan RF gücün RFQ kovuğu içinde doğru zamanda eşleşmelerini sağlamak amacıyla atma üreteci kontrol edilmektedir. Hem RF güç kaynağının hem de iyon kaynağının tetikleme sinyali atma üreteci tarafından beslenmektedir. Bu üreteç ile iyon kaynağı tetikleme sinyaline gerekli gecikme verilerek, RFQ içinde RF güç ve demet zamansal açıdan eşleştirilebilmektedir. Ayrıca, atma üretecinin kontrolü sayesinde herhangi bir durumda demetin kesilebilmesi de mümkündür.

Kontrol sistemi ile, mıknatısların üzerinde bulunan sıcaklık algıçlarından önceden belirlenmiş eşik seviyelerinin üzerinde değerler alındığında mıknatıs güç kaynakları otomatik olarak anında kapatılır. Böylece mıknatıs bobinlerinin aşırı ısınmadan dolayı hasar alması önlenmiştir.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Görkem TÜREMEN

Doğum Tarihi : 23.11.1987

Doğum Yeri : Ankara

Eğitim Durumu

Celal Bayar Üniversitesi F.E.F. Fizik Bölümü (2010)

Celal Bayar Üniversitesi F.B.E. Genel Fizik Yüksek Lisans (2012)

Çalıştığı Kurum ve Yıl

Türkiye Atom Enerjisi Kurumu, 2014 - ...

Proje Çalışmaları

TAEK Proton Hızlandırıcı Tesisi Ar-Ge Demet Hattında Düşük Akımlı Işınlama Düzeneğinin Kurulması ve Demet Özelliklerinin Belirlenmesi, TAEK-RHTDB, 2018 - ...

Demirci-Pro: Hafif İyonlar için Radyofrekans Dörtkutuplusu Tabanlı Doğrusal Hızlandırıcı Tasarımı ve Benzetimi, TÜBİTAK - 1001, 2017-...

1-5 MeV RF Kovuklu Proton Hızlandırıcısı Tasarımı ve Üretimi, TAEK-RHTDB, TAEK-RHTDB, 2012 - 2016

Radyo Frekans Dörtkutuplusu Tasarımı ve Benzetimi, TÜBİTAK - 1005, 2014 - 2016

Türk Hızlandırıcı Merkezi Projesi (THM), Proton Hızlandırıcısı Alt Grubu, Kalkınma Bakanlığı, 2010 - 2015

Yayınlar (SCI)

G. Turemen, S. Ogur, F. Ahiska, B. Yasatekin, E. Cicek, A. Ozbey, I. Kilic, G. Unel, A. Alacakir. Design and Manufacture of the RF Power Supply and RF Transmission Line for SANAEM Project Prometheus. Journal of Instrumentation, Volume 12, DOI:10.1088/1748-0221/12/08/P08011, 2017.

G. Turemen, Y. Akgun, A. Alacakir, I. Kilic, B. Yasatekin, E. Ergenlik, S. Ogur, E. Sunar, V. Yildiz, F. Ahiska, E. Cicek, G. Unel. Pulsed Beam Tests at the SANAEM RFQ Beamline. Journal of Physics: Conference Series, Ser. 874, 012045, DOI:10.1088/1742-6596/874/1/012045, 2017.

H. Yildiz, A. Ozbey, S. Oz, B. Yasatekin, G. Turemen, S. Ogur, E. Sunar, Y.O. Aydin, V.A. Dimov, G. Unel, A. Alacakir. Compact Measurement Station for Low Energy Proton Beams. Journal of Instrumentation, Volume 12, DOI:10.1088/1748-0221/12/02/T02006, 2017.

B. Yasatekin, G. Turemen, G. Unel. A Graphical Approach to Radio Frequency Quadrupole Design. Computer Physics Communications, DOI: 10.1016/j.cpc.2015.03.001, 2015.

R. Kucer, N. Kucer, G. Turemen. Monte Carlo Computation of the Energy Deposited by Protons in Water, Bone and Adipose. J.Korean Phys. Soc., DOI: 10.3938/jkps.62.0, 2013.

Uluslararası Bilimsel Toplantılarda Sunulan Sözlü Bildiriler

G. Türemen, S. Bulut, A. N. Yüksel, N. Ö. Serin, A. Özbey, E. Recepoğlu. Multi-purpose Proton Beam Irradiation Setup and Beam Characterization Studies at TAEA-PAF. International Conference on Theoretical and Experimental Studies in Nuclear Applications and Technology (TESNAT'19), Book of Abstracts p. 55, Amasya, Turkey, 2019

H. Çetinkaya, E. Ergenlik, U. Kaya, A. Özbey, E. Özcan, G. Türemen, G. Ünel, A. Yüncü. A Prototype Component of an Electron Beam Welding Machine: 20 kV Electron Gun. Turkish Physical Society 34th International Physics Congress, 06OP3, Mugla,

Turkey, 2018.

O. Çakır, E. Çelebi, E. Ergenlik, G. Türemen, Z. Uysal, N. G. Ünel. DEMIRCI PRO: A Single Interface for RFQ, Ion Source and LEBT Design. Turkish Physical Society 34th International Physics Congress, 06OP12, Mugla, Turkey, 2018.

S. Bulut, A. N. Yüksel, G. Türemen, N. Ö. Serin, E. Recepoğlu, A. Özbey. The Studies for Establishing a Low-current Irradiation System and Determination of Beam Properties at TAEA Proton Accelerator Facility RnD Irradiation Vault. Turkish Physical Society 34th International Physics Congress, 06OP50, Mugla, Turkey, 2018.

G. Türemen, O. Çakır, E. Çelebi, G. Ünel. Beam Dynamics and RF Design of an 800 MHz RFQ. Turkish Physical Society 34th International Physics Congress, 06OP6, Mugla, Turkey, 2018.

H. Çetinkaya, E. Alğın, G. Türemen, Ü. Doğan, U. Işık, L. Şahin, C. Aşıcı. A Prototype 2.45 GHz Microwave Discharge Ion Source. International Conference on Theoretical and Experimental Studies in Nuclear Applications and Technology (TES-NAT'16), Book of Abstracts p. 66, Hatay, Turkey, 2016

G. Türemen, V. Yıldız, A. Alaçakır. RF Dort-Kutuplusu icin Dusuk Enerjili Demet Tasima Hatti Tasarimi. Turkish Physical Society 5th International Participation Particle Accelerator and Applications Congress, Book of Abstracts p. 20, Mugla, Turkey, 2013.

G. Türemen, A. Alaçakır, E. Recepoğlu. Design and Construction of a Multi-cusp H+ Ion Source at SNRTC. Turkish Physical Society 30th International Physics Congress, Book of Abstracts p. 245, Mugla, Turkey, 2013.

Uluslararası Bilimsel Toplantılarda Sunulan Poster Bildiriler

E. Çelebi, O. Çakır, G. Türemen, B. Yasatekin, G. Ünel. Recent Developments in DE-MIRCI, the RFQ Design Software. Proceedings of the International Particle Accelerator

Conference 2017 (IPAC'17), THPAB052, p. 3830, Copenhagen, Denmark, 2017.

E. Çelebi, O. Çakır, G. Türemen, B. Yasatekin, G. Ünel. Recent Developments in DEMIRCI, the RFQ Design Software. Proceedings of the International Particle Accelerator Conference 2017 (IPAC'17), THPAB052, p. 3830, Copenhagen, Denmark, 2017.

G. Türemen, A. Alaçakır, Y. Akgün, S. Bölükdemir, I. Kılıç, B. Yasatekin, H. Yıldız, G. Ünel. Manufacturing and the LLRF Tests of the SANAEM RFQ. Proceedings of the International Particle Accelerator Conference 2016 (IPAC'16), MOPOY051, p. 964, Busan, Korea, 2016.

B. Yasatekin, G. Türemen, E. Çelebi, G. Ünel, O. Çakır. DEMIRCI: An RFQ Design Software. Proceedings of the International Computational Accelerator Physics Conference (ICAP'15), WEP10, p. 81, Shanghai, China, 2015.

G. Türemen, B. Yasatekin, Y. Akgün, A. S. Bölükdemir, A. Alaçakır, A. Bozbey, A. Şahin, S. Erhan, O. Mete, S. Oğur, V. Yıldız, S. Öz, A. Özbey, H. Yıldız, G. Ünel, F. Yaman. Current Status of the SANAEM RFQ Accelerator Beamline. Proceedings of IPAC 2015, THPF103, p. 3952, Richmond, VA, USA, 2015.

S. Oğur, F. Ahıska, A. Alaçakır, G. Türemen, G. Ünel. Development of a Hybrid Power Supply and RF Transmission Line for SANAEM RFQ Accelerator. Proceedings of IPAC 2015, WEPHA051, p. 3228, Richmond, VA, USA, 2015.

G. Türemen, B. Yasatekin, H. Yıldız, A. Alaçakır, G. Ünel. Status of the SPP RFQ Project. Proceedings of LINAC 2014, THPP067, p. 1004, Geneva, Switzerland, 2014.

G. Türemen, B. Yasatekin, A. Alaçakır, G. Ünel. Design Studies with DEMIRCI for SPP RFQ. Proceedings of LINAC 2014, TUPP139, p. 740, Geneva, Switzerland, 2014.

G. Türemen, Z. Sali, B. Yasatekin, V. Yıldız, M. Çelik, A. Alaçakır, G. Ünel, O. Mete. SPP Beamline Design and Beam Dynamics. Proceedings of IPAC 2014, THPME050, p. 3338, Dresden, Germany, 2014.

G.Türemen, B. Yasatekin, O. Mete, M. Çelik, Z. Sali, Y. Akgün, A. Alaçakır, S. Bölükdemir, E. Durukan, H. Karadeniz, E. Recepoğlu, E. Cavlan, G. Ünel, S. Erhan. Project Prometheus: Design and Construction of a Radio Frequency Quadrupole at TAEK. Proceedings of IBIC 2013, WEPC02, Oxford, UK, 2013.