



<http://kahvelab.boun.edu.tr/>



800 MHz RFQ TEST MODÜLÜNÜN RF ÖLÇÜMLERİ VE AYARLANMASI

25.09.2022

ATACAN KILIÇGEDİK

İSTİNYE ÜNİVERSİTESİ, VADI KAMPÜSÜ, İSTANBUL

Giriş

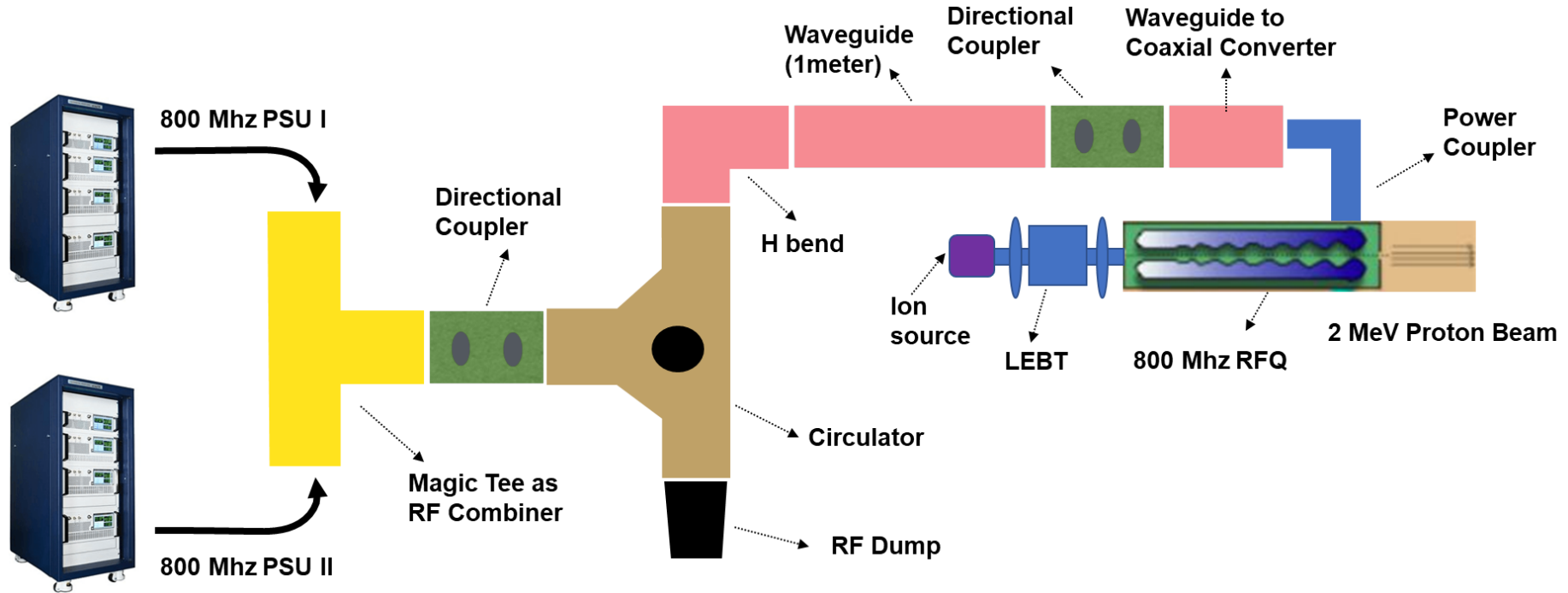
Önemli bir hızlandırıcı yapısı olan dünyanın en küçük Radyo Frekansı Dörtlü kutuplusu kullanılarak 2 MeV çıkış enerjisine ulaşacaktır.

CERN HF – medikal uygulamalarda
CERN PIXE – malzeme bilimi (PIXE analiz metodu) uygulamalarında

Tablo 1: KAHVELab'daki PTAK'ın benzer RFQ'larla karşılaştırılması.

	symbol	HF	PIXE	PTAK
Input E (keV)	W_{in}	40	20	20
Output E (MeV)	W_{out}	5	2	2
RF (MHz)	f_0	750	750	800
Number of modules		4	2	2
RFQ Length (mm)		1964	1073	980
Quality Factor	Q_0	6440	5995	7036
RF Power Loss (kW)	P_0	350	64.5	48.5

Giriş

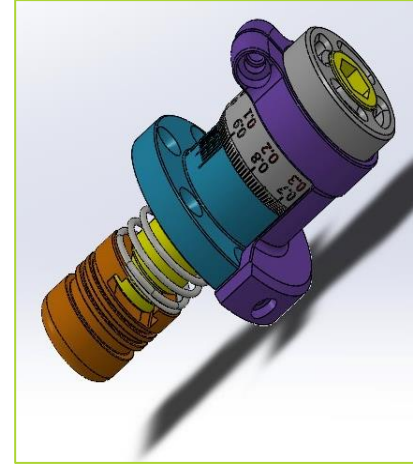


Şekil 1: 800 MHz RF Sisteminin ve Kompakt Proton Hızlandırıcının KAHVElab'daki Yerleşimi

RFQ'nun Test Modülü

- 800 MHz RFQ test modülü, üretim maliyetlerini azaltmak için sıradan bakırdan üretildi.

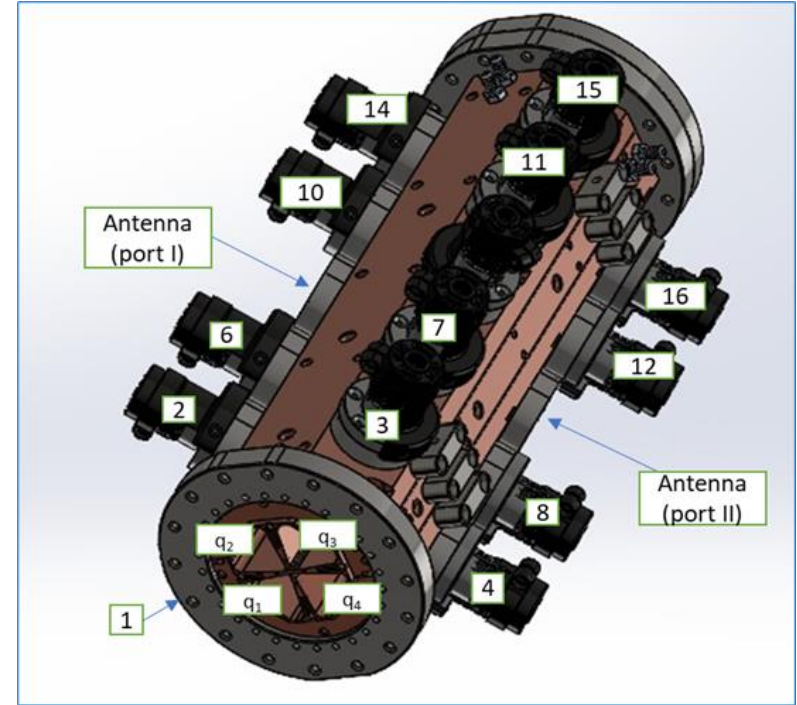
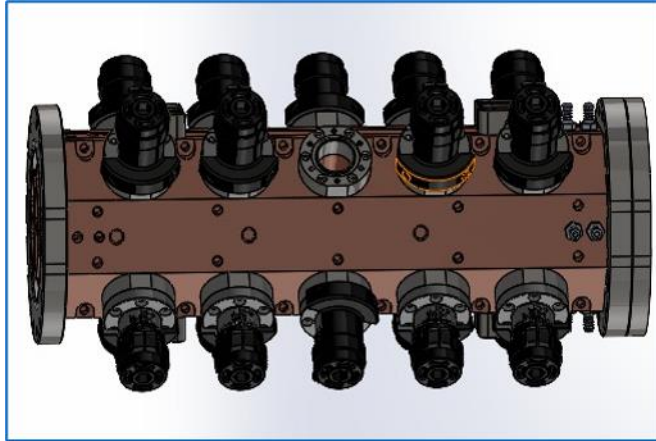
Üretim hatalarını telafi etmek için, test modülü üzerinde EM alan ayarı yapmak için her dikey düzlemde dört adet olmak üzere toplam **16 tuner** yerleştirildi.



Şekil 2: Kilitli kapak sistemli Tunerlerin 3D Katı Model (sağda) ve 10 Mikrometre Hassasiyete Sahip Üretimi Tamamlanan Tunerların Görünümü (solda)

Kadran ve Tuner Numaralandırma:

Tunerlar, 1. kuadranttan başlayarak ve sarmal yörünge boyunca T1-T16 olarak numaralandırılmıştır.

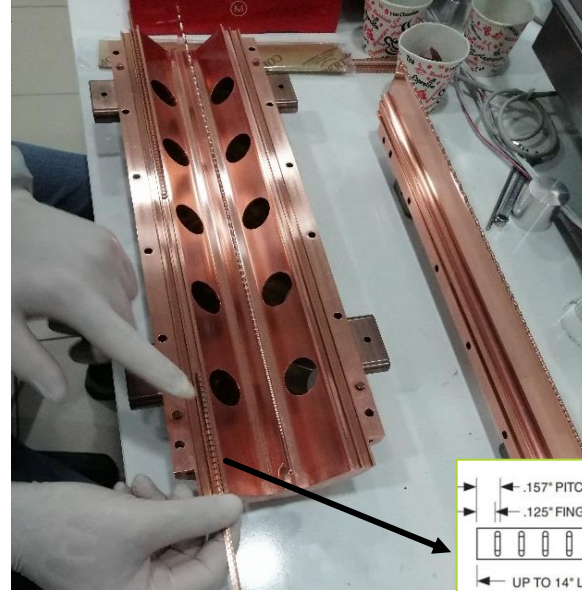


Şekil 3: Test Modülü üzerinde RFQ'nun Tüm Kadran ve üzerindeki Tunerların Numaralandırılmasının Düzeni

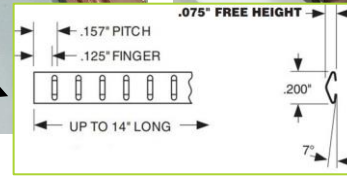
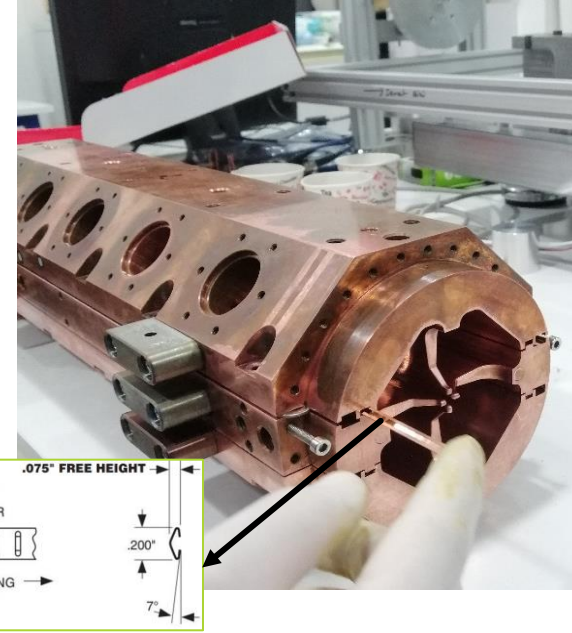
RFQ'nun Test Modülünün Birleştirilmesi



Şekil 4: RFQ Test Modülüne ait 4 kanadın Montaj Öncesi Görünümü



Şekil 5: RF Sızıntılarını Önlemek İçin Modül Üzerindeki Yuvalara Yerleştirilen Bakır C Şeklindeki RF Korumaları (fingers)



Şekil 6: Yerli Alıcı (Pick-up) Anten

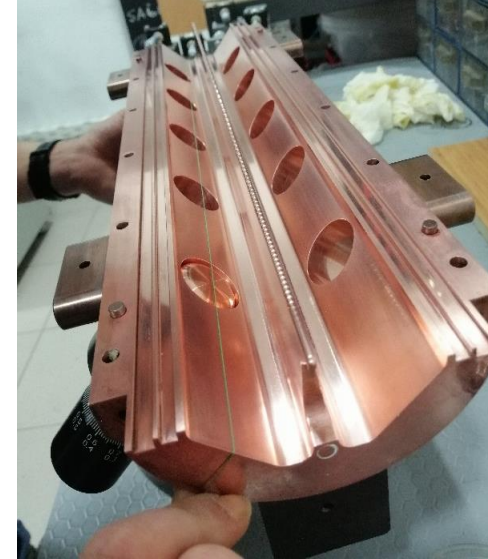
RF Ölçümleri İçin Modülün Hazırlanması

Modül uçlarında bir uçta alüminyum malzemedен yapılmış silindirik bir tüp, diğer uçta alüminyum kapak vasıtasıyla sınır koşulları uygulanmıştır.



Şekil 7: Uç Kapakların Montajı Sonrası RFQ Test Modülünün Görünümü

Tüm tunerler, hassas bir ölçüm ile aynı hizada modül üzerine yerleştirildi.



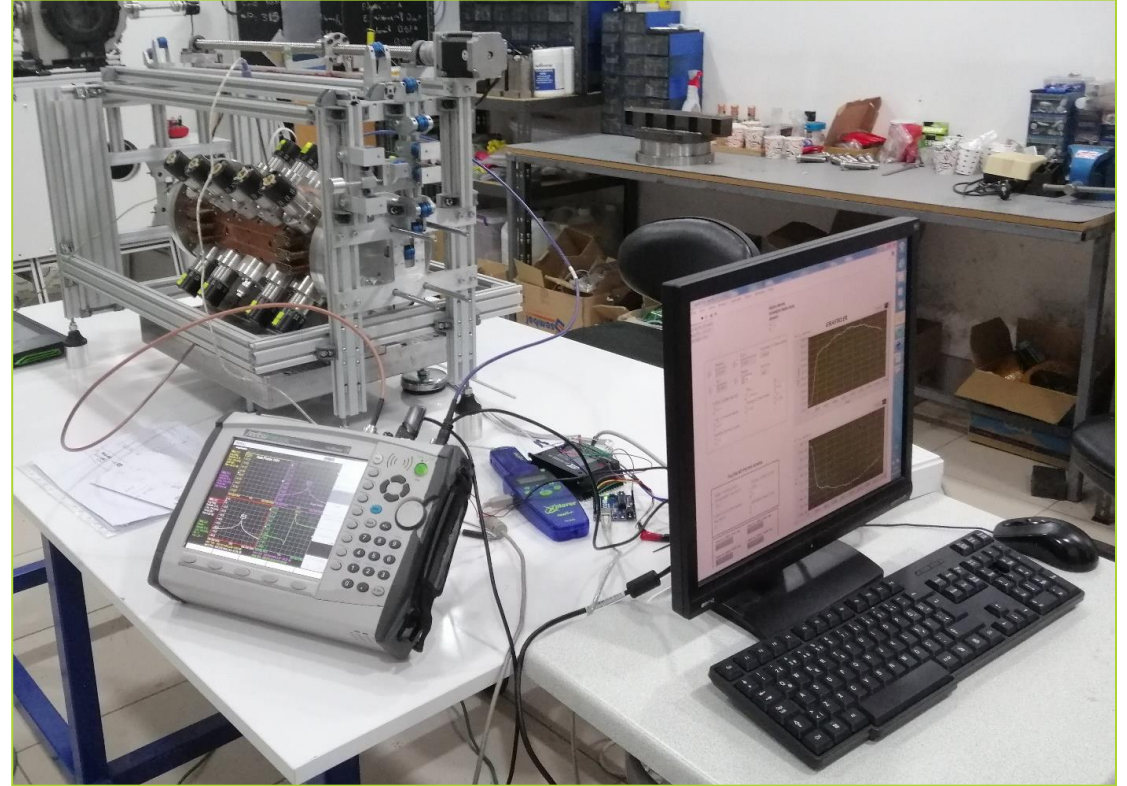
Şekil 8: Tunerlerin Modül Üzerindeki Aynı Hizada Konumlandırılmasının Görünümü

RF Ölçüm Ekipmanları

- ▶ VNA (Vektör Ağ Analizörü) (Anritsu)
- ▶ Kalibrasyon Kiti (50Ω)
- ▶ 2 adet N tipi kablo (50Ω)
- ▶ Sıcaklık Ölçüm Göstergesi (Capstone)
- ▶ Ev yapımı alıcı antenler.

Test Modülün RF ölçümleri

- ▶ Hem üretim kalitesinden emin olmak hem de kavite alanını ayarlamak için boncuk çekme ölçümleri yapıldı.
- ▶ Boncuk çekme ölçümleri yoluyla alan ayarı, dört kadran boşluğunun her çeyreğine her bir tuner belirli bir uzunlukta yerleştirilerek veya çıkarılarak yapılır.



Şekil 9: KAHVELab'daki Boncuk Çekme Deneyi için Ölçüm Düzenegi

EM Alan Ayarlama Sürecinde Hedefler

- Modülün EM alan ayarlama işleminin hedefi, tüm örnekleme noktalarında $Q = \%100 = \text{sabit}$ ve $DS = DT = 0$ olarak tanımlanabilir.

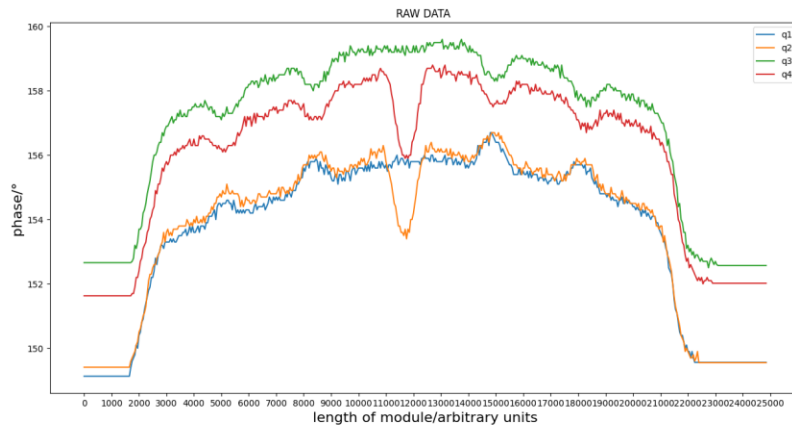
$$Q = \frac{q1 - q2 + q3 - q4}{4}, \quad D_s = \frac{q1 - q3}{2}, \quad D_t = \frac{q2 - q4}{2}$$

- Ortalama Q , D_s ve D_t bileşene göre $\pm\%2$ 'lik hatalar, ışın dinamiği açısından üç alan bileşeninin her birinde kabul edilebilir. (2m uzunluğunda 750MHz HF-RFQ, CERN).

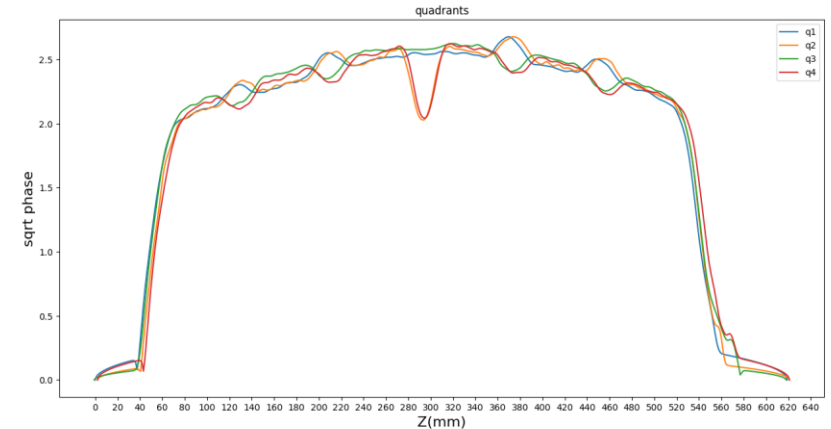
Test Modülün RF ölçümleri ve Hesaplamalar

- Boncuk çekme ölçümlerinin çıktısı olarak faza ait ham veriler elde edilmiştir. Tüm kadrantların alan bileşenleri birkaç veri işleminden [5,6] sonra hizalandı Kernel regresyonu kullanılarak düzeltildi.

Kuadrupol (Q) ve dipol bileşenleri (D_s, D_t) ile ifade edilen alan düzlüğü, göreceli kadrant genliklerine (q_1, q_2, q_3, q_4) dayanmaktadır. Göreceli kadrant genlikleri, fazın [1,2] karekökü alınarak hesaplanır.



Şekil 10: Herbir Kuadrant için Faza ait Ham Veriler

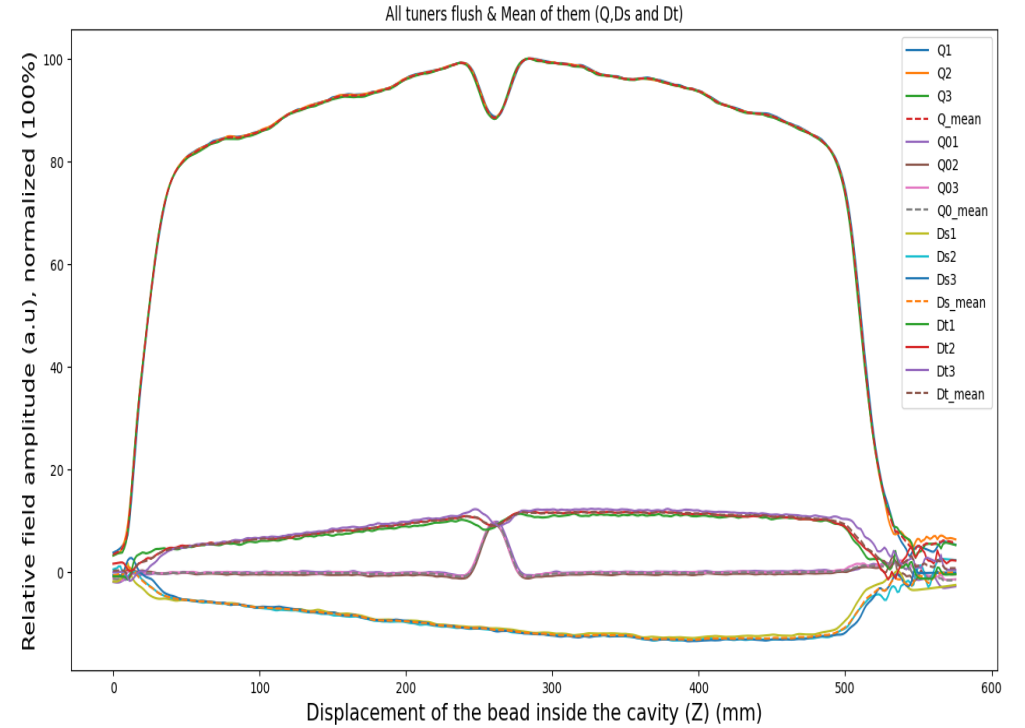


Şekil 11: Hesaplama İçin Kullanılacak Veriler

Test Modülün RF ölçümleri ve Hesaplamalar

11

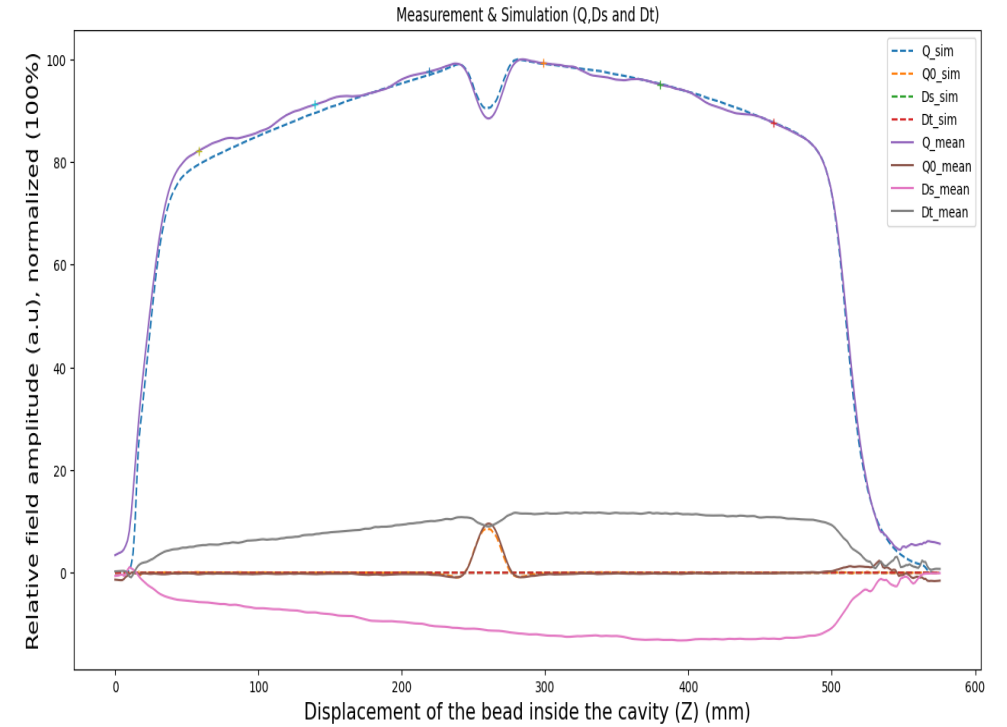
- Verilerin güvenilirliğini kontrol etmek için bir dizi ölçüm tüm tunerlerin aynı hizada olması durumunda alındı.
- Q, Ds, Dt bileşenleri birden çok kez ölçüldü ve ortalama değerlerden büyük sapmalar gözlenmedi.



Şekil 12: Ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması ve ortalamaları (Q, Ds, Dt bileşenleri).

Test Modülün RF ölçümleri ve Hesaplamalar

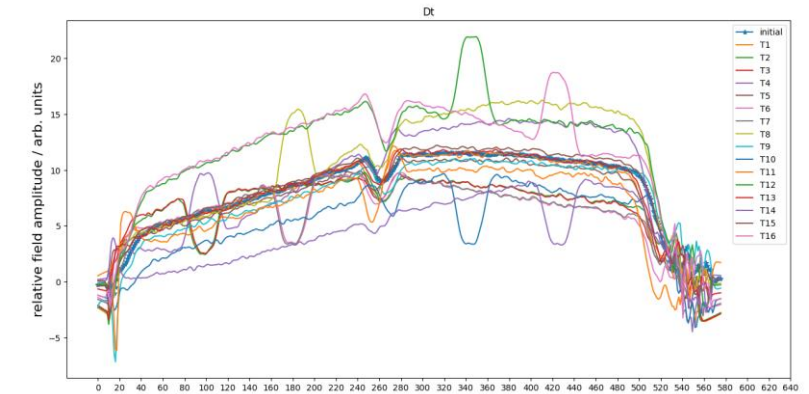
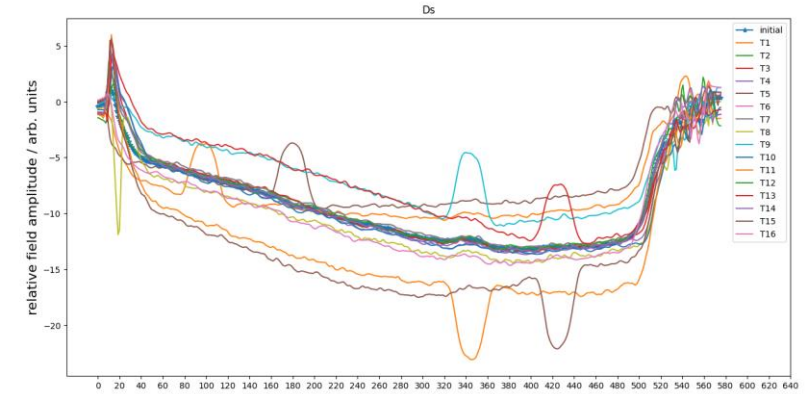
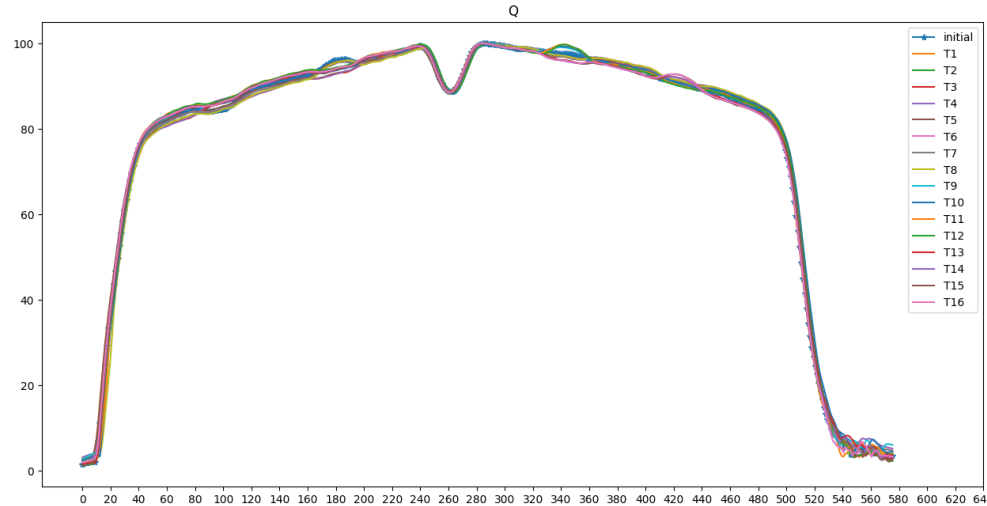
- Q , D_s , D_t bileşenlerinin ortalama değerleri ve simülasyonları arasındaki karşılaştırma yapılmıştır.
- Ölçümden elde edilen Q bileşeninin simülasyon sonuçlarıyla oldukça uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 13: Q , D_s , D_t bileşenleri için ölçümlerin ortalamaları ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması.

Matrisin Kullanacağı Verilerin Hazırlanması

Tüm tunerlar bireysel olarak 3mm kavite içine sokuldu ve herbir tüner için Q , D_s , D_t bileşenleri hesaplandı.



Şekil 14: Herbir Tuner Kavite İçine 3 mm Sokulduktan Sonra Q , D_s , D_t Bileşenleri

Yeni Kod Yardımıyla Modül Üzerindeki Tuner Uzunlarının Tahmini

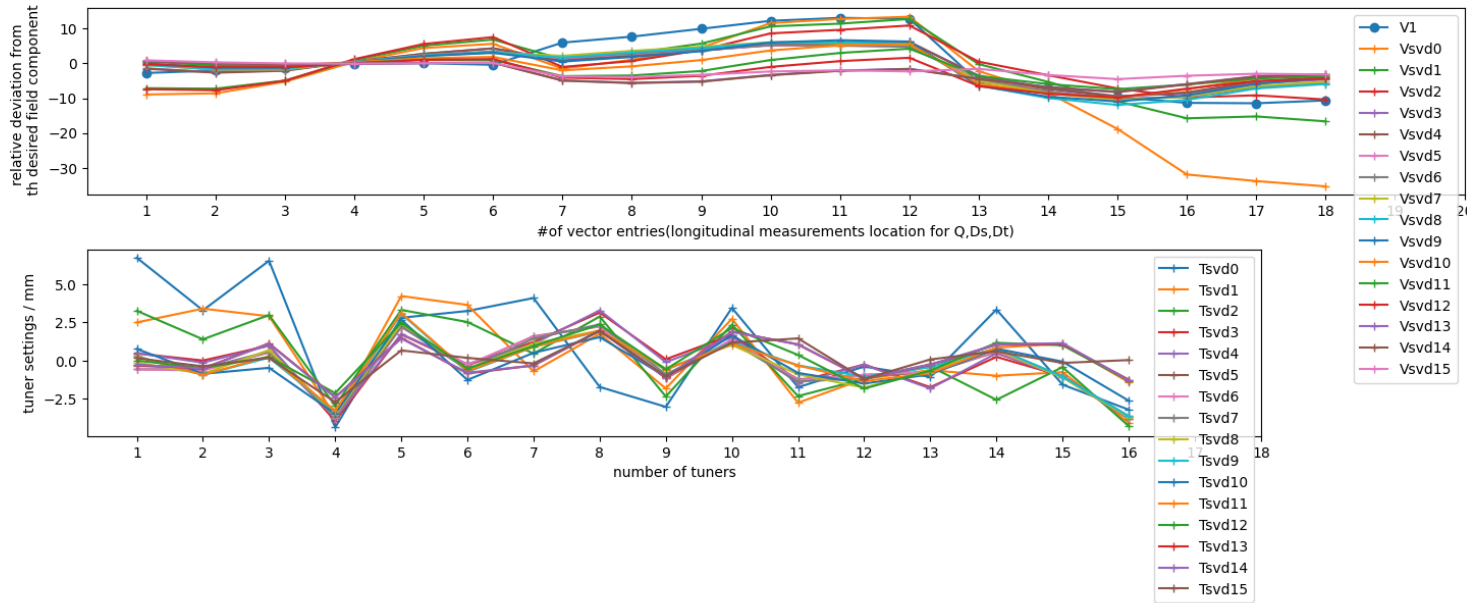
- ▶ Dipol bileşenlerini istenilen değerlere getirmek ve Q bileşeni ile aynı seviyede tutmak için CERN [2] tarafından geliştirilen matris tabanlı kod kullanılmıştır.
- ▶ Daha önce CERN'de [2] oluşturulan kodun dayandığı yanıt matrisi, 6 test noktası ve 16 tuner için 18x16 matris olarak optimize edilmiştir.
- ▶ Test kurulumunda, matrisin tersini elde etmek için Singular Value Decomposition (Tekil Değer Ayrıştırması) metodu kullanıldı.

Denklem yardımıyla, düzgün bir alan dağılımı için gerekli olan tuner uzunluklarını tahmin eden kod çalıştırılır.

$$\begin{array}{l}
 80,2 - V1 \\
 89,8 - V2 \\
 97,1 - V3 \\
 99,1 - V4 \\
 95,1 - V5 \\
 87,8 - V6 \\
 0 - V7 \\
 0 - V8 \\
 0 - V9 \\
 0 - V10 \\
 0 - V11 \\
 0 - V12 \\
 0 - V13 \\
 0 - V14 \\
 0 - V15 \\
 0 - V16 \\
 0 - V17 \\
 0 - V18
 \end{array}
 =
 \begin{array}{l}
 \frac{\partial Q1}{\partial T1} \quad \frac{\partial Q1}{\partial T2} \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \frac{\partial Q1}{\partial T16} \\
 \vdots \quad \vdots \quad \ddots \quad \vdots \quad \vdots \quad \vdots \\
 \frac{\partial Q6}{\partial T1} \quad \frac{\partial Q6}{\partial T2} \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \frac{\partial Q6}{\partial T16} \\
 \frac{\partial Ds1}{\partial T1} \quad \frac{\partial Ds1}{\partial T2} \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \frac{\partial Ds1}{\partial T16} \\
 \vdots \quad \vdots \quad \ddots \quad \vdots \quad \vdots \quad \vdots \\
 \frac{\partial Ds6}{\partial T1} \quad \frac{\partial Ds6}{\partial T2} \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \frac{\partial Ds6}{\partial T16} \\
 \frac{\partial Dt1}{\partial T1} \quad \frac{\partial Dt1}{\partial T2} \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \frac{\partial Dt1}{\partial T16} \\
 \vdots \quad \vdots \quad \ddots \quad \vdots \quad \vdots \quad \vdots \\
 \frac{\partial Dt6}{\partial T1} \quad \frac{\partial Dt6}{\partial T2} \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \frac{\partial Dt6}{\partial T16}
 \end{array}
 *
 \begin{array}{l}
 T1 - 0 \\
 T2 - 0 \\
 T3 - 0 \\
 T4 - 0 \\
 T5 - 0 \\
 T6 - 0 \\
 T7 - 0 \\
 T8 - 0 \\
 T9 - 0 \\
 T10 - 0 \\
 T11 - 0 \\
 T12 - 0 \\
 T13 - 0 \\
 T14 - 0 \\
 T15 - 0 \\
 T16 - 0
 \end{array}$$

Program Çıktısı Olarak Tuner Tahminleri

İstenilen alan değerlerinden sapmalar ve karşılık gelen tuner uzunlukları tahminleri program çıktısı olarak elde edilir.

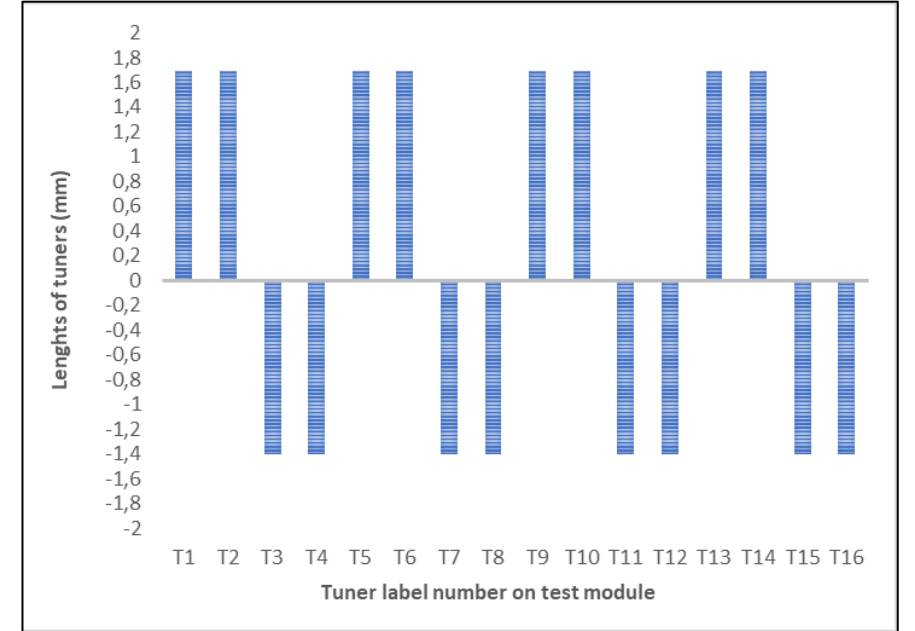


Alan düzlüğü, ilk tahmin sonucunda elde edilemedi. Tunerlere uygulanan tahminler sonrasında alınan ölçüm verileri yine girdi olarak kod ile hesaplamaya dahil edilmiştir. Bu işlem alan düzlüğü elde edilene kadar tekrarlanmıştır.

Şekil 15: 1.İterasyon için tahminler ve karşılık gelen tuner uzunlukları

Tunerlerin Nihai Uzunlukları

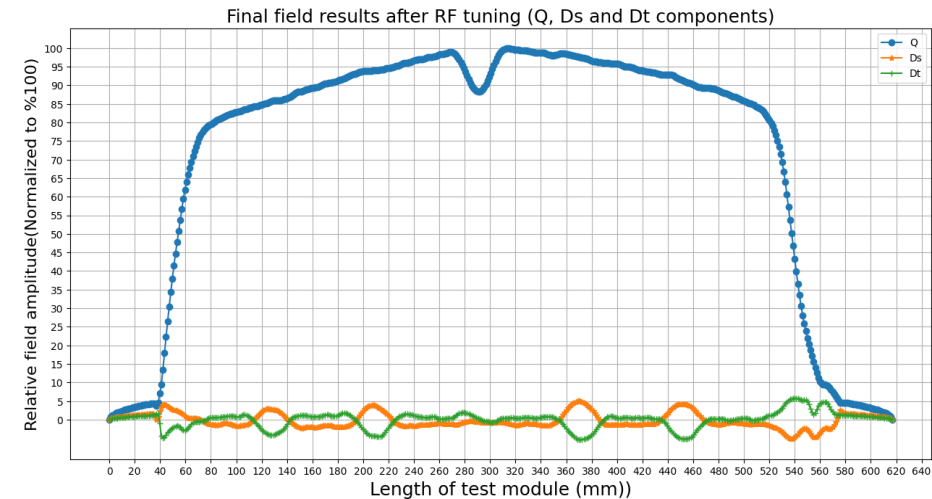
- ▶ Kodun verdiği tuner uzunluk tahminleri tunerlere uygulandıktan sonra birkaç ölçüm yapıldı.
- ▶ Birden fazla iterasyona rağmen dipol bileşenlerinin alan dağılımının istenilen düzeye ulaşamadığı gözlemlenmiştir.
- ▶ Kod ile elde edilen tuner uzunluk tahminleri tunerlere uygulanmış ve elde edilen ölçümler detaylı olarak incelenmiştir.
- ▶ Dipol bileşenlerinin alan dağılımında en iyi sonucu veren 1 numaralı tuner ve 4 numaralı tuner uzunlukları sırasıyla 2 ve 3 numaralı tunerlere uygulanmıştır.
- ▶ Daha sonra bu uzunluklar, sırasıyla dikey düzlemde her dört tuner grubuna uygulandı.



Şekil 16: Test Modülün Üzerindeki Tunerlerin Nihai Uzunlukları

Q, Ds, Dt Bileşenleri için Nihai EM Alan sonuçları

- ▶ Dipol bileşenlerinin alan dağılımları da son tuner ayarlarından sonra istenilen seviyeye ayarlanmıştır.
- ▶ Boncuk çekme ölçümünden sonra **frekans 799.980 MHz'e** ayarlandı.
- ▶ **Tüm tunerler 0,1 mm içeriye doğru yeniden ayarlandı ve sonuç olarak frekans 800,010 MHz'e** ayarlandı.



Şekil 17: Q, Ds, Dt bileşenleri için nihai alan sonuçları.

Sonuç

- ▶ Deneme çalışması sırasında ortaya çıkan kolaylaştırıcı çözümler sayesinde OFE-Cu malzemedен üretilecek son iki modül hızla tamamlanacak. OFE-Cu RFQ'nun kalite faktörünün test modülüne kıyasla iyileşmesi beklenmektedir.
- ▶ Tuner ayarı için optimize edilen Python programlama dilinde yazılan kod, 2 modül ve 32 tunere sahip RFQ'nun EM alan dağılımı ayarı için oluşturulacak yanıt matrisine göre yeniden optimize edilecektir.
- ▶ Test modülü için sıcaklık ve nemin faz üzerindeki etkileri gözlemlenmiş ve ölçüm sırasında tüm veriler kayıt altına alınmıştır. Ancak, bunların RFQ'nun çalışma frekansı üzerindeki etkileri, test modülünün son frekans ayarında dikkate alınmamıştır.

Referanslar

- ▶ [1] Koubek, B., *et al.*, “rf measurements and tuning of the 750 MHz radio frequency quadrupole”, *Phys. Rev. Accel. Beams* vol. 20, 080102, Aug. 2017. doi: 10.1103/PhysRevAccelBeams.20.080102
- ▶ [2] Koubek, B., *et al.*, “RF measurements and tuning of the 750 MHz HF-RFQ”, CERN, Geneva, Switzerland, Rep. CERN- 2017-0006, Feb. 2017.
- ▶ [3] Pommerenke, Hermann W., *et al.*, “rf measurements and tuning of the 1-m-long 750 MHz radio-frequency quadrupole for artwork analysis”, *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. Sec. A*, vol. 1011, 165564, Sept. 2021. doi: 10.1016/j.nima.2021.165564
- ▶ [4] Açiksöz, S., *et al.*, “Beam diagnostics at KAHVE Lab proton source and LEFT line”, presented at EPS-HEP’21, online conference, vol. 398, paper 856, July 2021. doi: 10.22323/1.398.0856,
- ▶ [5] Adıgüzel, A., *et al.*, “Ion source and LEFT of KAHVELab proton beamline”, e-Print: 2208.00529 [physics.acc-ph], July 2022.
- ▶ [6] Esen, S., *et al.*, “Compact proton accelerator in UHF-band at KAHVELab”, presented at LINAC’22, Liverpool, United Kingdom, Sep. 2022, paper TUPOPA11, this conference.
- ▶ [7] Halis, D., *et al.*, “Emittance measurements from the proton testbeam at KAHVELab”, presented at LINAC’22, Liverpool, United Kingdom, Sep. 2022, paper TUPORI17, this conference.
- ▶ [8] Kilicgedik, A., *et al.*, “Electromagnetic and vacuum tests PTAK RFQ module 0”, in preparation, 2022.
- ▶ [9] <https://www.delftstack.com/howto/py-thon/smooth-data-in-python>

Yapılan Çalışmanın Çıktısı



Rf Measurements and Tuning of the Test Module of 800Mhz Radio-Frequency Quadrupole

A. KILICGEDİK^{1†}, A. ADIGUZEL², B. BARAN⁶, A. CAGLAR⁴, E. CELEBI³, S. ESEN², U. KAYA⁵, V. E. OZCAN³, G. TUREMEN⁸, N. G. UNEL⁹, F. YAMAN⁷

¹ Marmara University, Istanbul, Turkey, ² Istanbul University, Istanbul, Turkey, ³ Bogazici University, Istanbul, Turkey,

⁴ Yildiz Technical University, Istanbul, Turkey, ⁵ Istinye University, Istanbul, Turkey, ⁶ Ankara University, Ankara, Turkey,

⁷ Izmir Institute of Technology, Izmir, Turkey, ⁸ TENMAK-NUKEN, Ankara, Turkey, ⁹ UCI, Irvine California, USA

The 800 MHz RFQ (radio-frequency quadrupole), developed and built at KAHVElab [1,2,3,4] at Bogazici University in Istanbul, Turkey, has been designed to provide protons that has an energy of 2 MeV within only 1 m length. The RFQ consists of two modules and the test module of RFQ was constructed. The algorithm developed by CERN, based on the measurements generated by the tuner settings estimated through the response matrix [1,2], has been optimized for a single module and 16 tuners. The desired field consistent with the simulation was obtained by bead pull measurements. In this study, we present low-power rf measurements and field tuning of test module.

This project are supported by The Scientific and Technological Research Council of Turkey(TUBITAK) Project no: 118E838.

TEŞEKKÜRLER...