

Elektron ve Proton Hızlandırıcıları için RF Çalışmaları

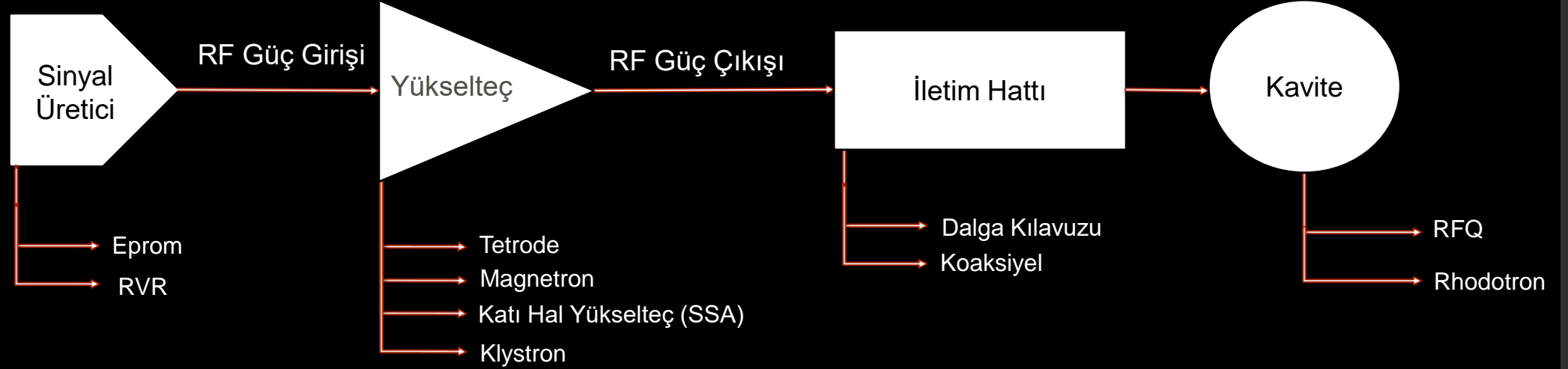
Aslıhan Çağlar, KAHVELab ekibi adına



İçerik

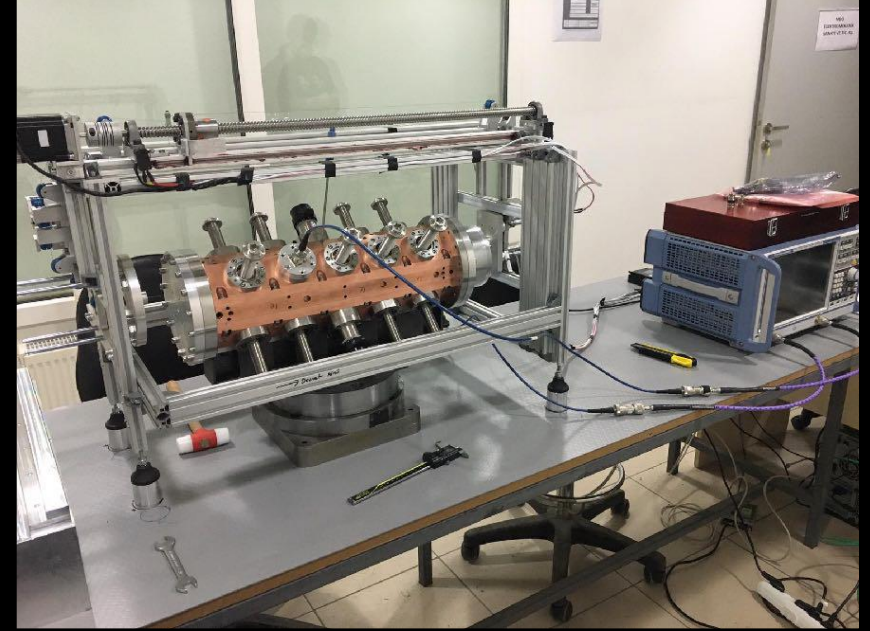
- Hızlandırıcılar için RF Güç Sistemi
- Proton Hızlandırıcısı
- Elektron Hızlandırıcısı

Hızlandırıcılar için RF Güç Sistemi

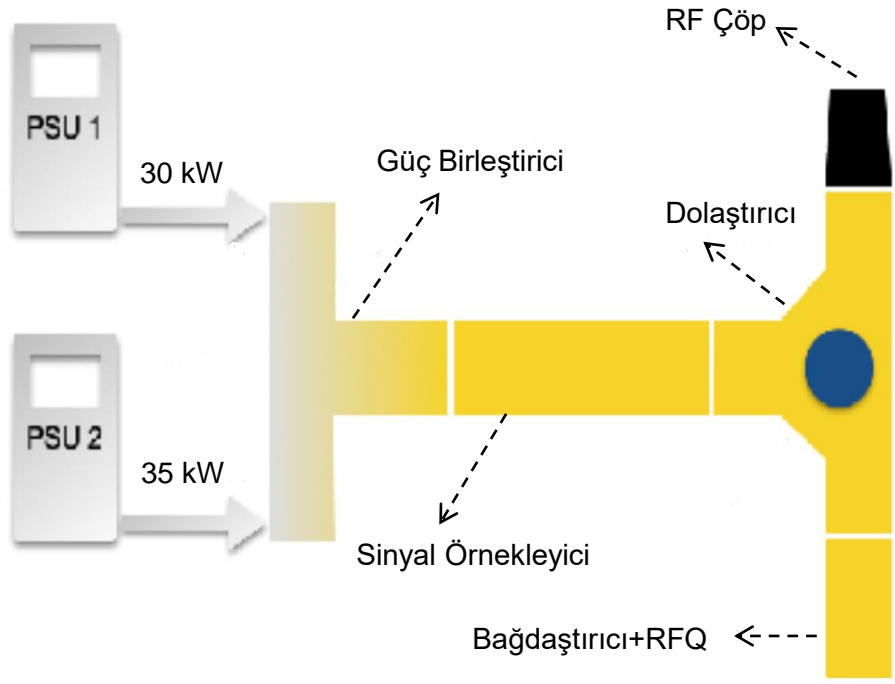


Proton Hızlandırıcısı: RF Dört Kutuplusu (RFQ)

- KAHVE Laboratuvarında 800 MHz RFQ'nun RF güç gereksinimi DemirciPRO ve Poisson Superfish yazılımları tarafından 50 kW olarak hesaplanmıştır.
- İletim hattındaki 3 boyutlu etkilerin ve kayıpların dahil edilmesi yaklaşık 60 kW'a çıkar.
- Güç kaynakları, 100 W'lık bir sinyal üretici, 1.2 kW'a kadar iki katı hal güç amplifikatörü, TH382 ve TH582 tetrod tüplerden oluşur.
- Her bir PSU, yaklaşık 100 μ s tipik bir darbe süresi için 35 kW'a kadar tepe gücü sağlayacağı ön görülmektedir.



Proton Hızlandırıcısı: İletim Hattı

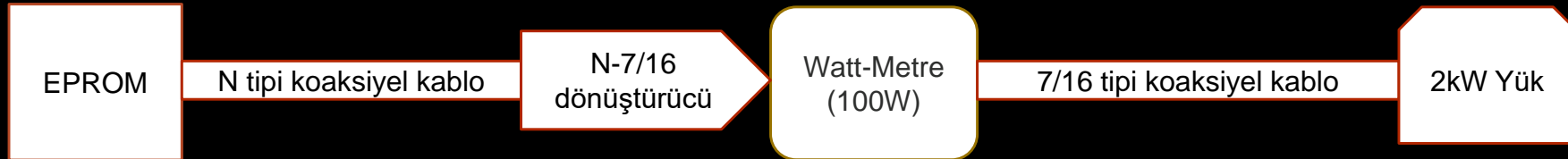
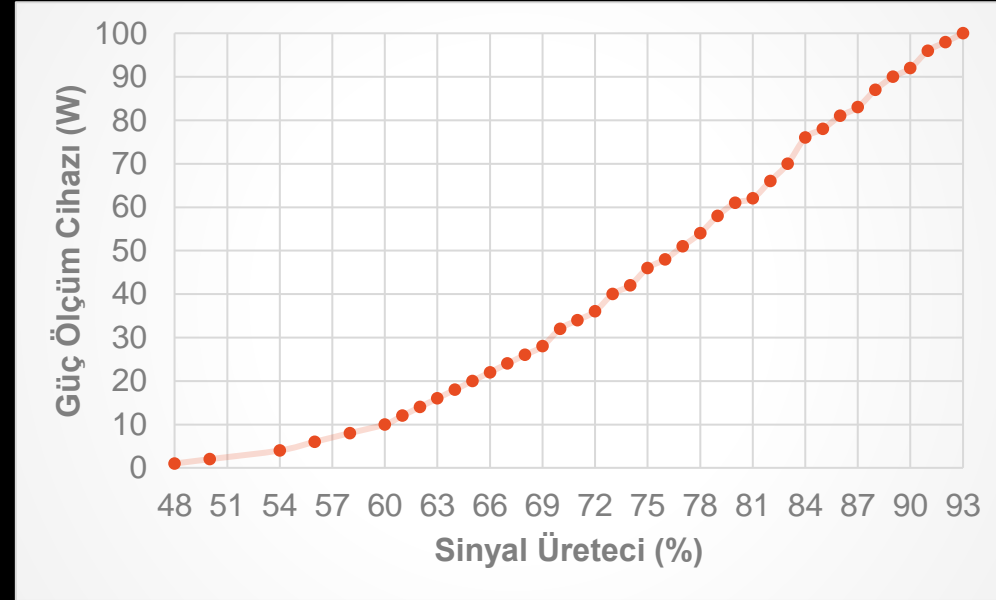


RF Tetrodlarında Maksimum Çalışma Değerleri

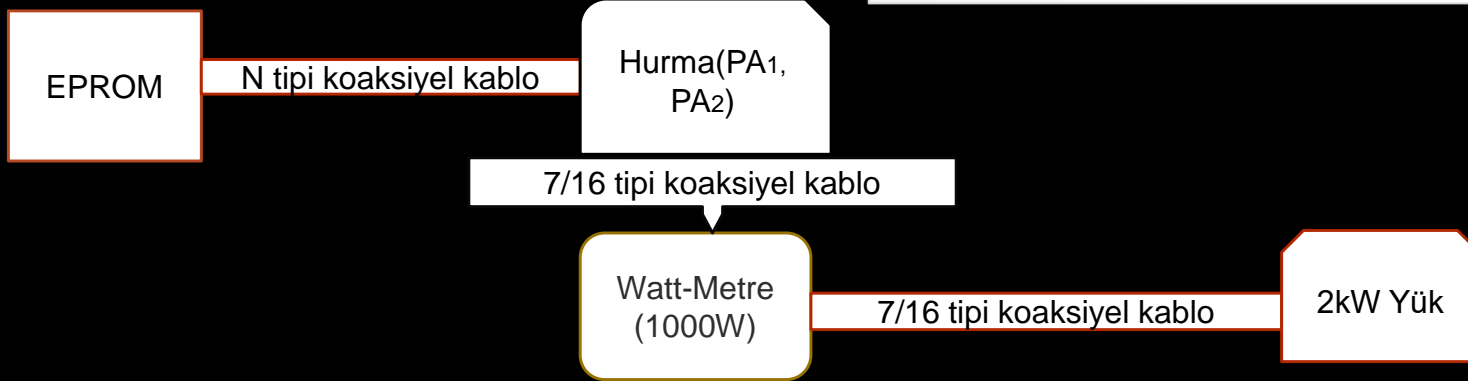
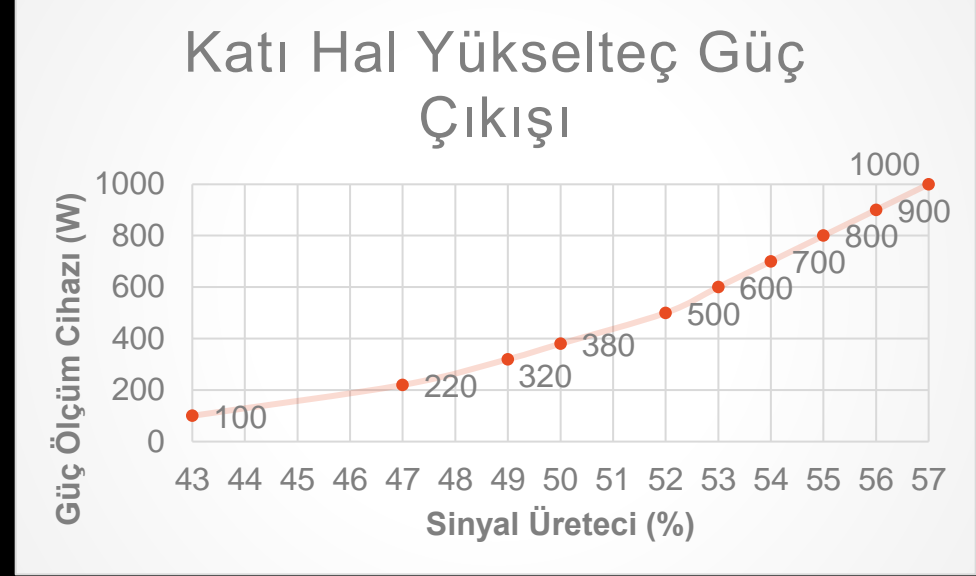
Tüp Model	F MHz	Po (peak≤1ms) kW	Po (sürekli) kW	Soğutma
TH382	1000	30	10	hava
TH582	1000	35	20	su

	F MHz	Po kW	Va kV	Ia A	Vg2 V	Vg1 V	tp msec	Duty %
TH382	500	20	5	5.1	600	-120	0.01	30
TH582	500	25	6	6.4	700	-80	1	60

Proton Hızlandırıcısı: Sinyal Üreteci



Proton Hızlandırıcısı: Katı Hal Yükselteç

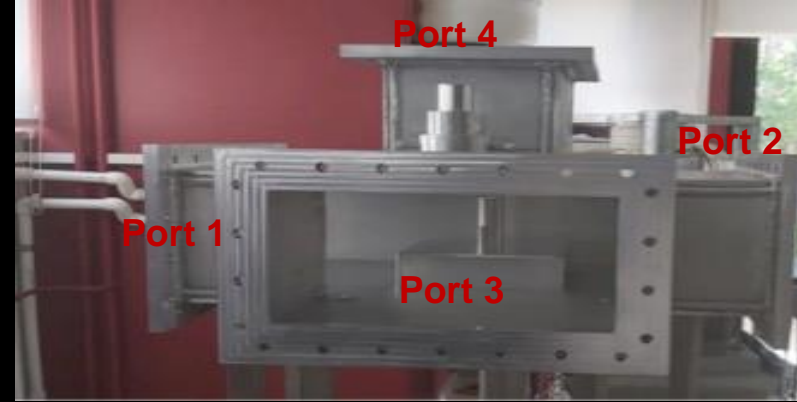


Proton Hızlandırıcısı: Magic Tee-Güç Birleştirici

S-Parametre Ölçümü



- Yapılan benzetimler sonucunda %99 verimle çalıştığı belirlenmiştir.
- Test 100 W üzerinden gerçekleştirilmiş.
- Watt-metrede 250 W'lık ölçüm elemanı kullanılmıştır.
- 2 kW'lık yük kullanılmıştır.
- Sonuçta 100 W verildiğinde tüm sistem kayıpları dahil yaklaşık 93 W güç değeri ölçülmüştür.



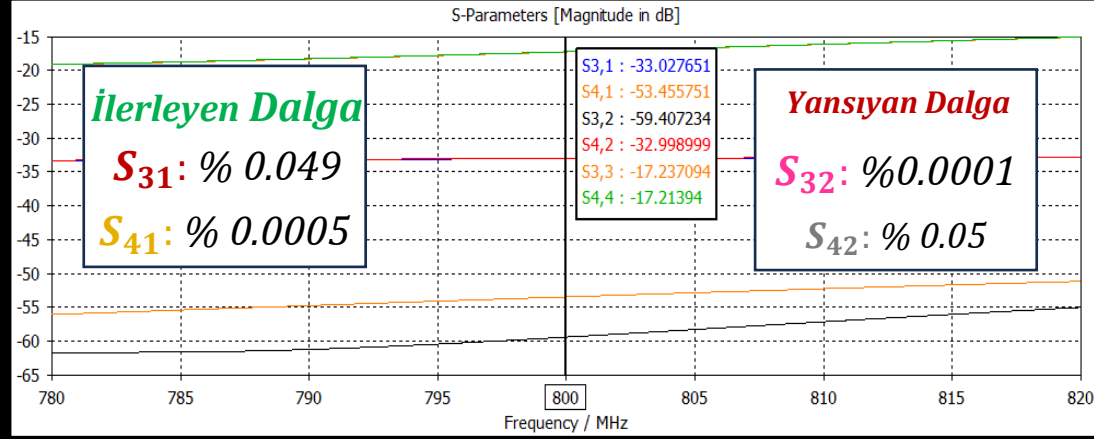
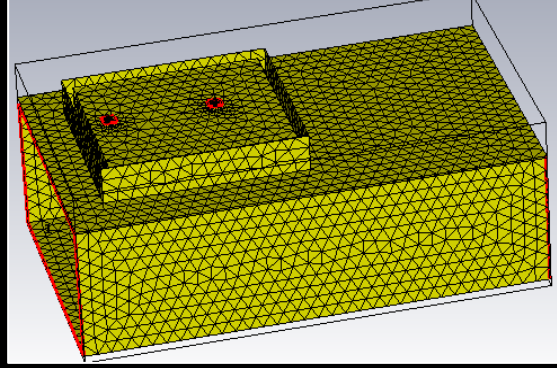
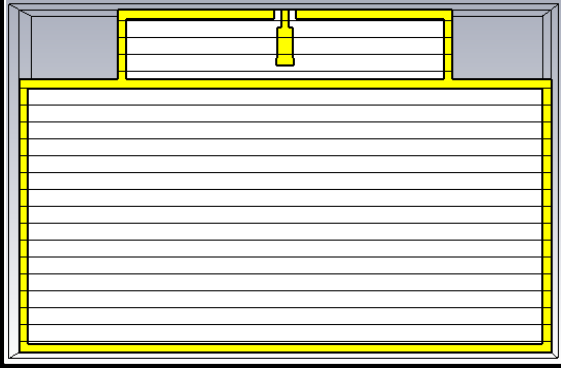
Deneysel Sonuçlar

S	dB	%		S	dB	%
S11	-37.453	0.018	Yansımalar	S11	-43.8	0.0015
S22	-38.68	0.014		S22	-43.8	0.0015
S33	-30	0.1		S33	-32.8	0.052
S12	-34.44	0.036	İzolasyon	S12	-31.8	0.066
S21	-34.144	0.039		S21	-31.8	0.066
S31	-2.98	50.35	Birleşme	S31	-3.01	50
S32	-3.04	49.66		S32	-3.01	50

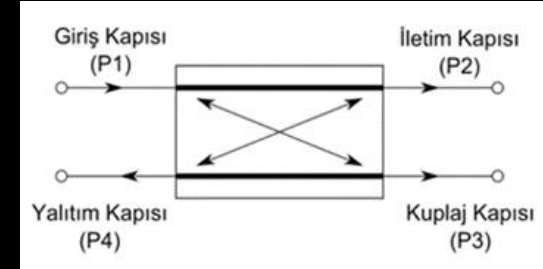
Benzetim Sonuçları

- Port 1 ve port 2 'den eşit büyüklükte ve aynı fazda iki sinyal ile beslendiğinde, port 4'te sıfır ve port 3'te iki sinyalin toplamı elde edilir.
- Port 3'ten bir sinyal gönderildiğinde, port 1 ve port 2 arasında sinyal aynı fazda ve eşit büyüklükte bölünür. Port 4'e sinyal iletimi gözlenmez.
- Port 4'ten bir sinyal gönderildiğinde, port 1 ve port 2 arasında sinyal eşit büyüklükte ancak 180 derece faz farkı ile bölünür. Port 3'e sinyal iletimi gözlenmez.

Proton Hızlandırıcısı: Sinyal Örnekleyici-Yönlü Kuplör



Benzetim Sonuçları



- o Bağlaşım: C (dB) = $10 \log P_1/P_3 = -20 \log |S_{31}|$
- o Yönlülük: D (dB) = $10 \log P_3/P_4 = -20 \log |S_{31}| / |S_{41}|$
- o Yalıtım: I (dB) = $10 \log P_1/P_4 = -20 \log |S_{41}|$
- o Ekleme kaybı: IL (dB) = $10 \log P_1/P_2 = -20 \log |S_{12}|$

İlerleyen Dalgalar

Bağdaştırıcı (S_{31}) : -32.62 dB

İzolasyon (S_{41}) : -48.23 dB

Yönlülük : 15.61 dB

10 kW Güçte Gücün: % 0.054 5.4 Watt

Yansıyan Dalgalar

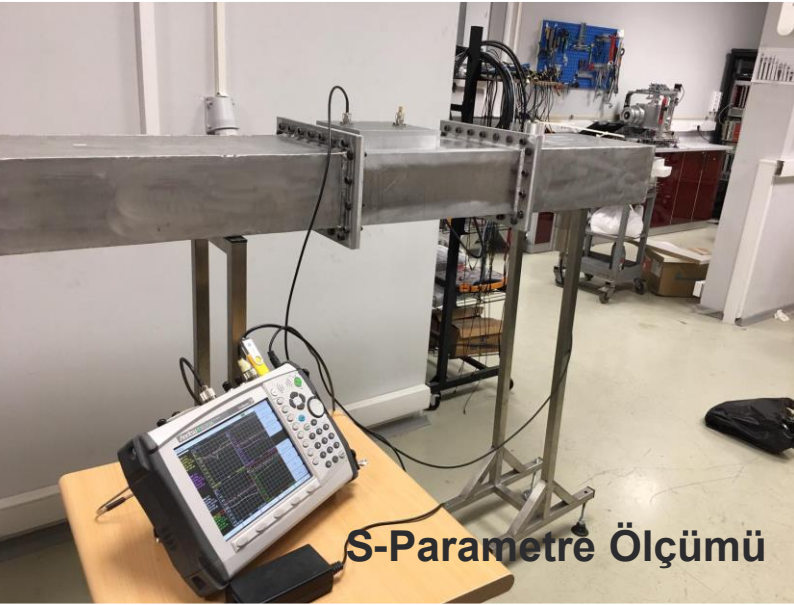
Bağdaştırıcı (S_{31}) : -32.42 dB

İzolasyon (S_{41}) : -53.99dB

Yönlülük : 21.57 dB

10 kW Güçte Gücün: % 0.057 5.7 Watt

Yönlü kuplörler, iletim hattının herhangi bir noktasındaki gücün ölçülebilmesi veya sinyalleri karakterize (bant genişliği, merkez frekansı gibi) edebilmek için kullanılırlar.

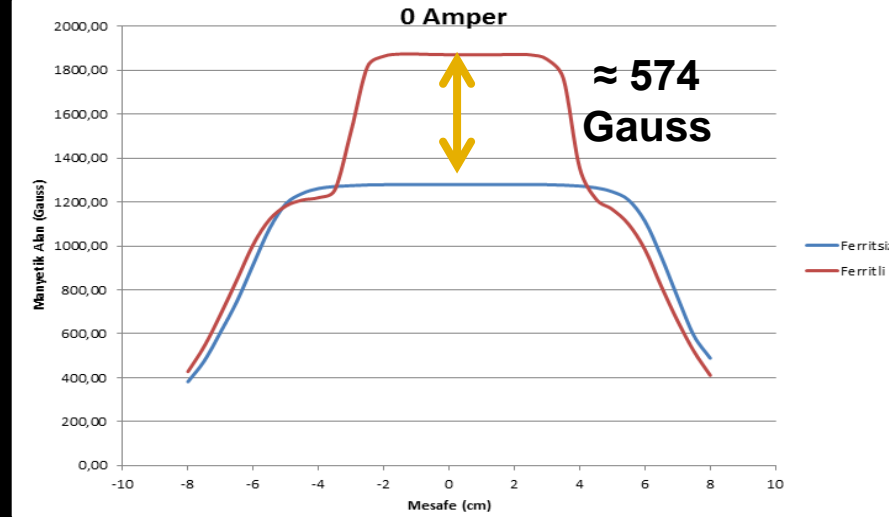
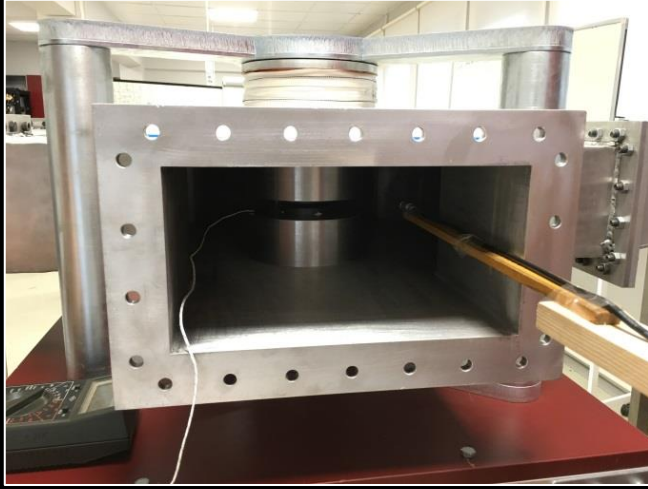


S-Parametre Ölçümü

- O. Kocer, UHF Bandında RF Dolaştırıcı Tasarımı, Üretimi ve Ölçümleri, İÜ Yüksek Lisans Tezi, 2019.

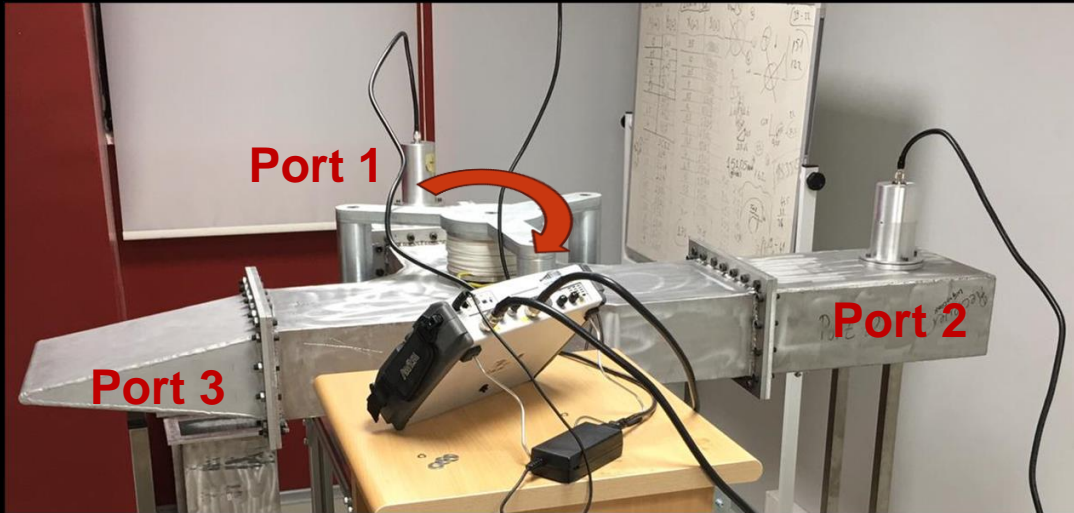
Proton Hızlandırıcısı: Dolaştırıcı

Manyetik Alan Ölçümü

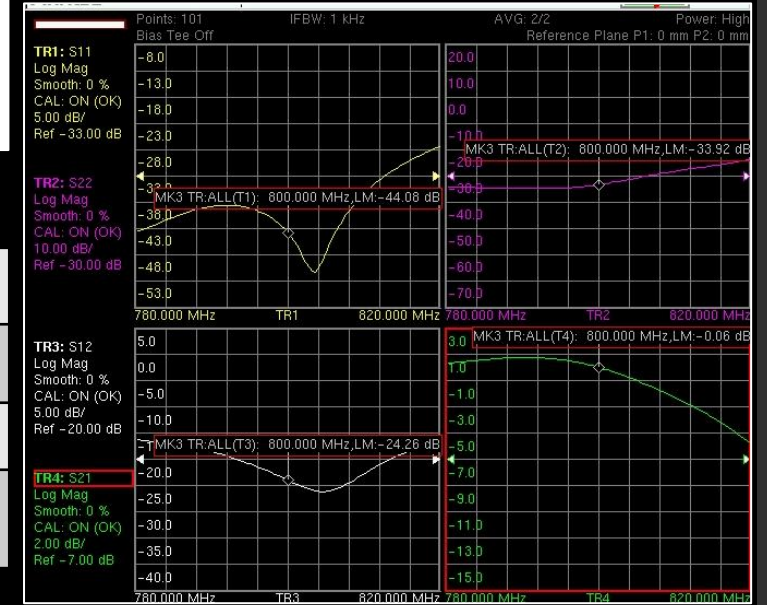


- Port 1: Giriş
- Port 2: Gücün kullanılacak alana aktaran port
- Port 3: Yansıyan gücü soğurmak için kullanılan port

S-Parametre Ölçümü

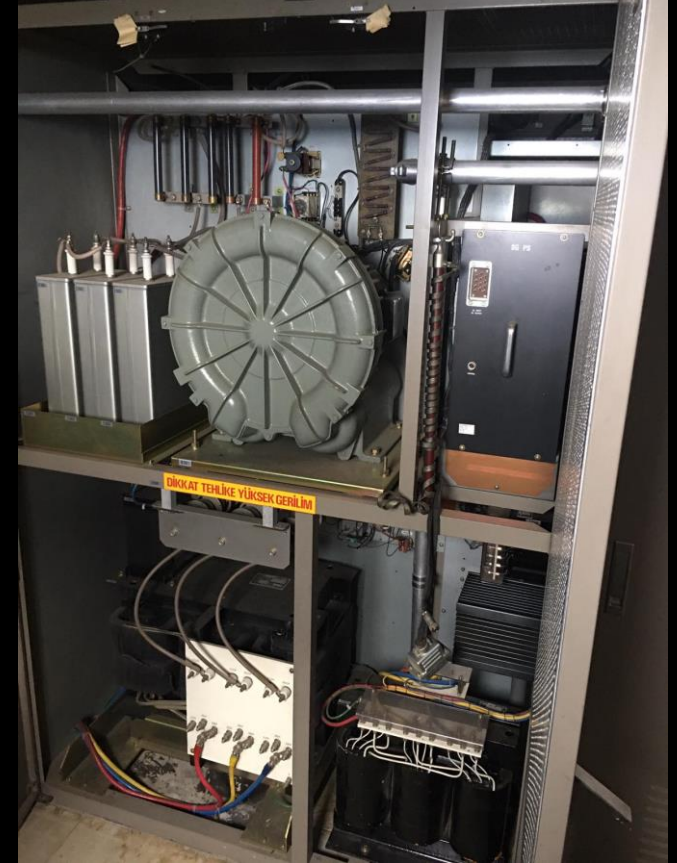


S11	-44.08 dB	% 0.004
S12	-24.26 dB	% 0.375
S21	-0.06 dB	% 98.63
S22	-33.92 dB	% 0.041



- O. Kocer, UHF Bandında RF Dolaştırıcı Tasarımı, Üretimi ve Ölçümleri, İÜ Yüksek Lisans Tezi, 2019.

Proton Hızlandırıcısı: RF Güç Kaynakları



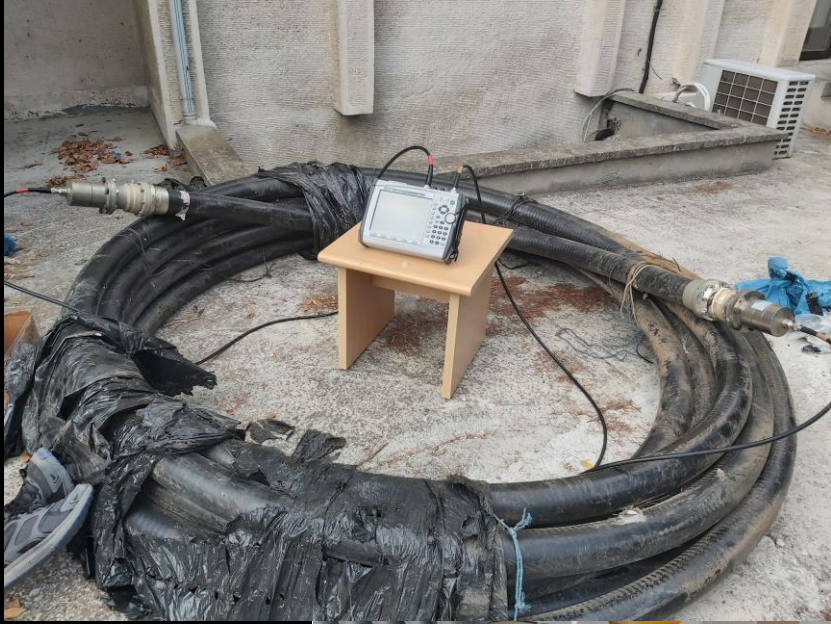
TRT'den hibe olarak alınan TH 582 tüpü, bu tüpü kullanmak için kurulu RF güç dolabı, soğutma sistemi gibi aksamın Kartepe İstasyonu'nundan teslim alınması ve Kandilli'deki laboratuvarımıza taşınmasından bazı kareler.

Proton Hızlandırıcısı: RF Güç Kaynakları

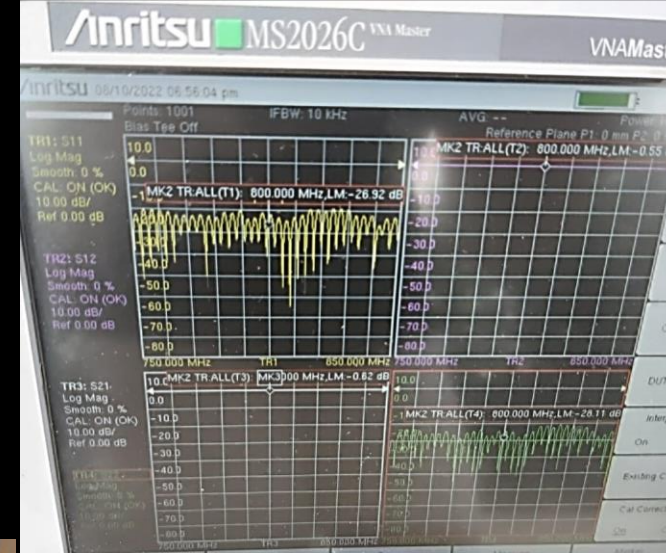


Show Tv'den hibe olarak alınan TH 382 tüplü verici Çamlıca Tepesinden teslim alınıp Kandilli'deki laboratuvarımıza taşınmasından bazı kareler.

Proton Hızlandırıcısı: 3 1/8" Koaksiyel Kablo



S11	-26.92 dB	% 0.2
S12	-0.55 dB	% 88.1
S21	-0.62dB	% 86.7
S22	-28.11 dB	% 0.15



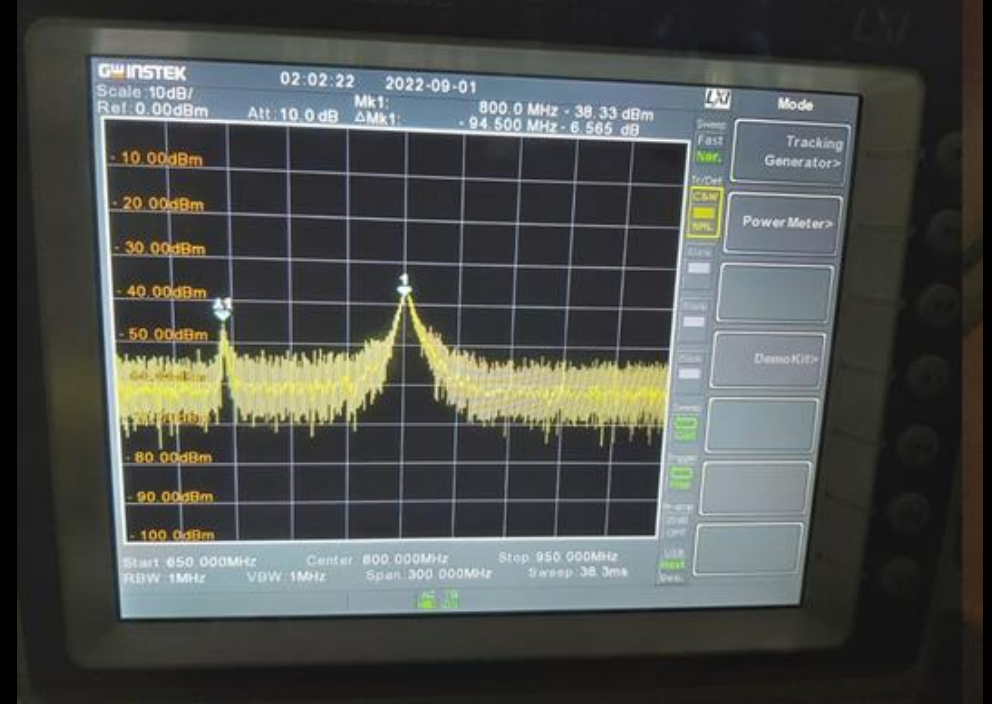
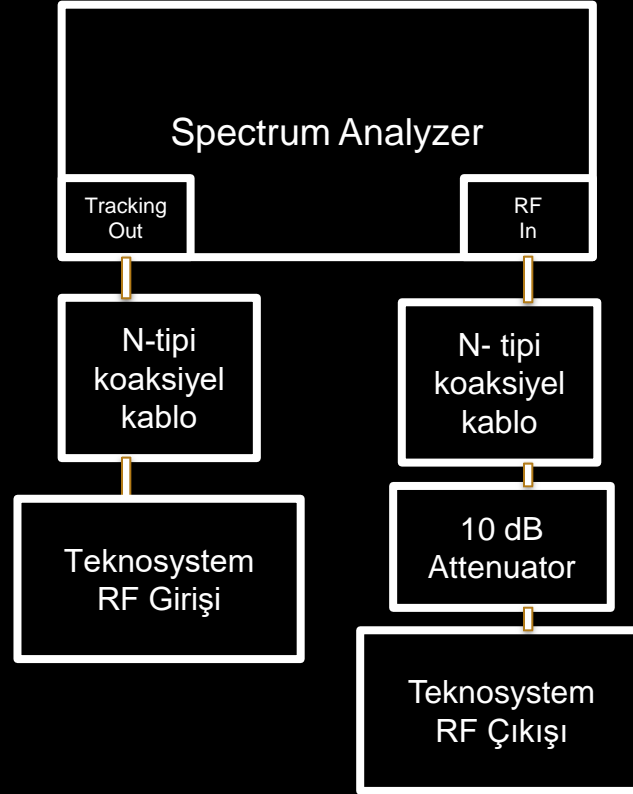
Cihazlardan elde edilen gücün Magic Tee'ye iletilmesi satın alınan 50 m 3 1/8" eş-eksenli kablo sağlanacaktır. Kablonun görünümü ve VNA ile düşük güç ölçümleri yukarıdaki gibidir. Ayrıca hibe olarak alınan kablolarda kullanılacak konnektörlerin temizliği yapılmıştır.

Proton Hızlandırıcısı: Tekno-System



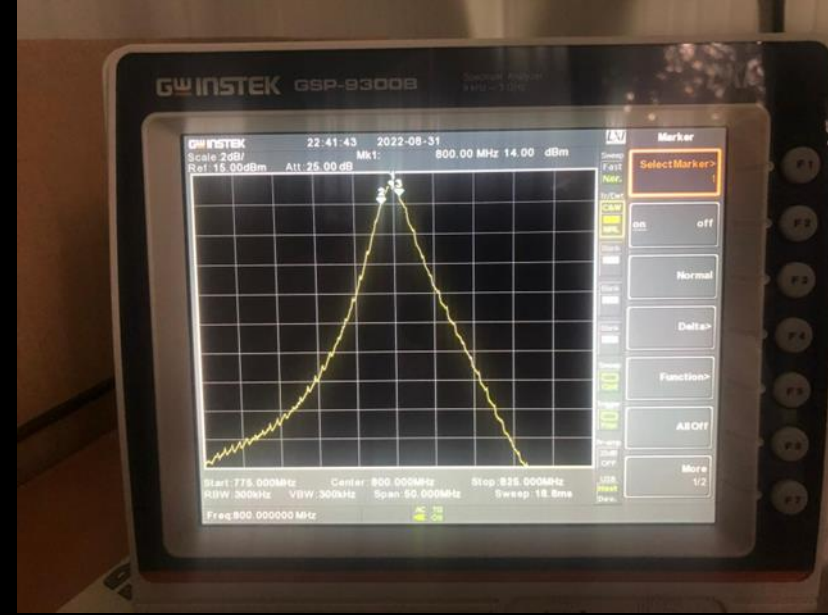
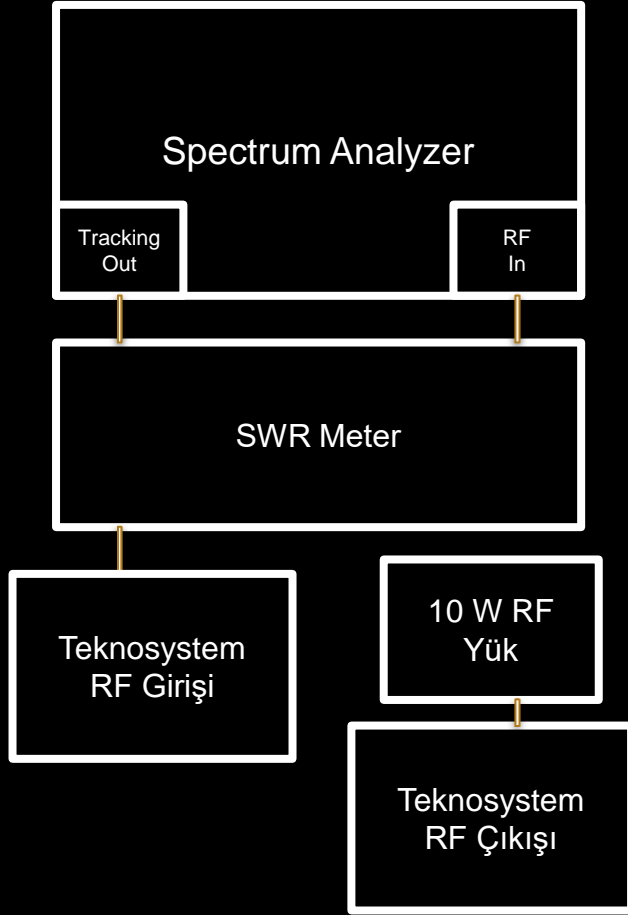
- Vericinin ayağa kaldırma süreci, elektrik bağlantılarının yapılması ve cihazın çalışma testinin ardından başlamıştır. Uzun süre aynı frekansta çalışmanın etkisiyle frekans ayarlayıcılarının ilerlemediği tespit edilmiş, bu sorunu çözmek için cihazın kavitesi sökülerek temizleme işlemi yapılmıştır.
- Öncelikle sistemin tamamı çok özenli bir şekilde görüldüğü gibi parçalarına ayrılmıştır. Her bir parçanın temizliği yapılarak tekrar montaj yapılmıştır. Temizlik işlemi krem cif, skoç ve alkol kullanarak gerçekleştirilmiştir.

Proton Hızlandırıcısı: Tekno-System



- Cihazın 800 MHz için kalibrasyon (giriş ve çıkış empedans eşleme, nötralizasyon ve bant) ayarları yapılmıştır.
- Nötralizasyon işlemi vakum tüpünden kaynaklanan istenmeyen bir harmoniğin çalışma bandından en az 70 MHz aşağısına alınarak yapılır. Yukarıda gösterilen ölçüm düzeneği kullanılarak yaklaşık 95 MHz fark ile nötralizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir.

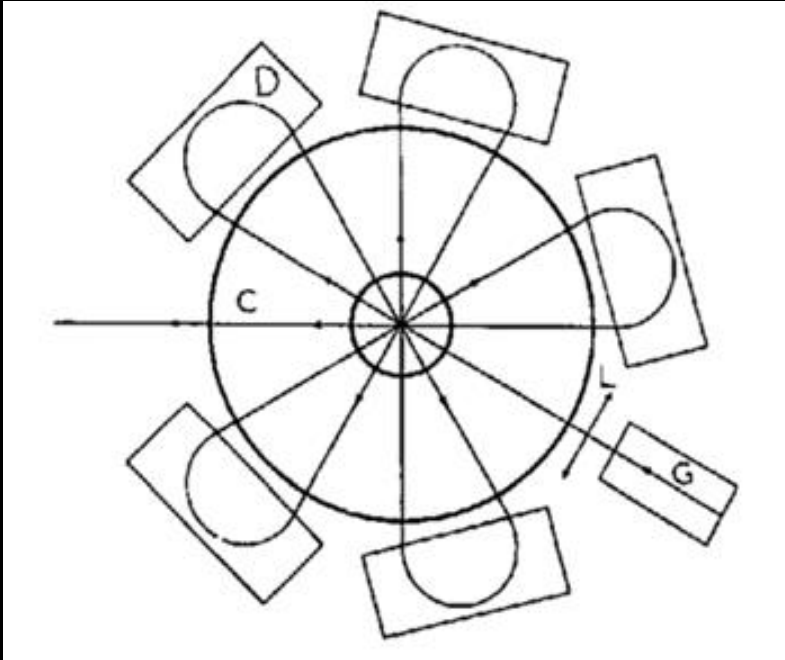
Proton Hızlandırıcısı: Tekno-System



- Yukarıdaki ölçüm düzeneği kullanılarak 800 MHz 'de vericinin giriş geri dönüş kaybı 40 dB'ye ayarlanmıştır.
- Ayrıca ölçüm düzeneğinde anot voltajını vererek kavitenin kazancı 14 dB olarak ölçülmüştür.

Elektron Hızlandırıcısı: Rhodotron

- Rhodotron tasarım parametreleri doğrultusunda, kovuk içerisinde gönderilen 40 keV enerjiye sahip elektronlar, her geçişte yaklaşık 670 keV enerji kazanacak ve hedeflenen minimum 1 MeV enerjiye sadece 1 dönüş miktatısı kullanarak 2 geçişte ulaşabilecektir.
- Elektronalara 1 MeV enerjiyi kazandırabilmek için gerekli olan RF gücü yaklaşık 50 kW düzeyindedir.



- 120F342 kodlu proje TÜBİTAK 1005 desteği ile yapılmıştır.

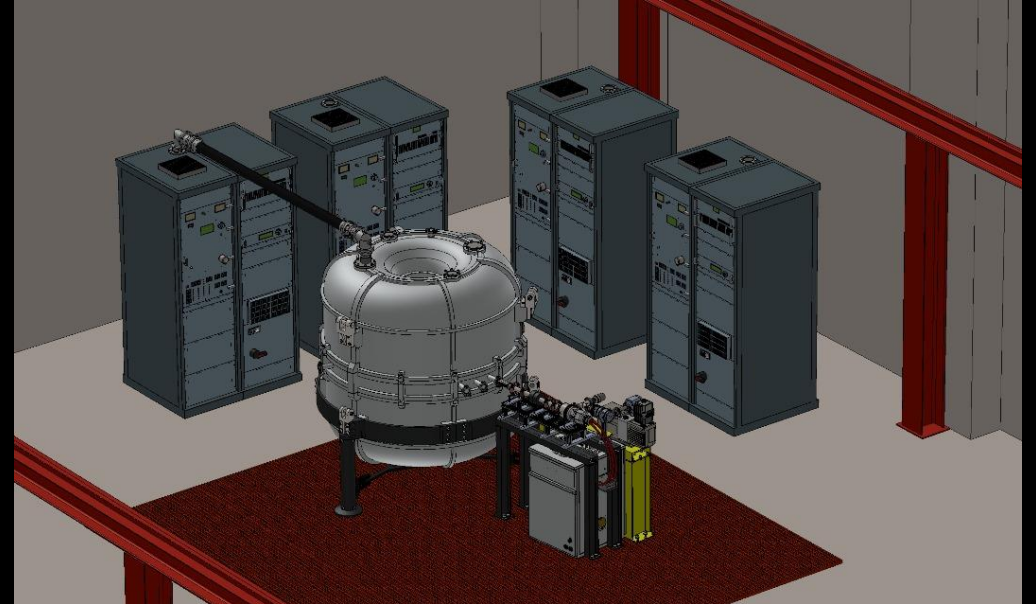
Rhodotron – FM Güç Kaynakları

- Daha önce radyo vericilerinde kullanılmış olan 107.5 MHz’de ihtiyacımız olacak gücü sağlayacak tetrod temelli FM güç kaynakları ETAŞ firmasından ödünç alınmıştır.
- Laboratuvara gelen güç kaynaklarının öncelikle temizlik, bakım ve işletme çalışmaları ile işe başlanmıştır.



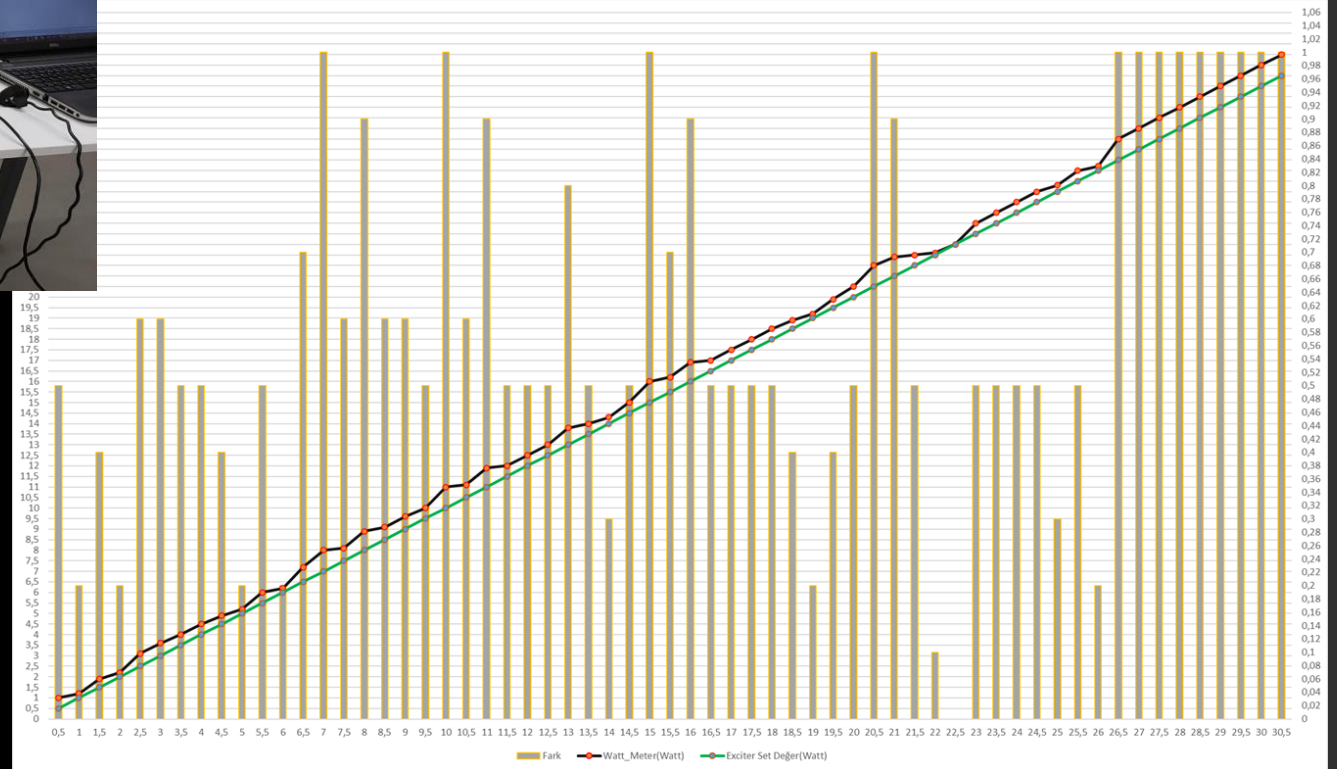
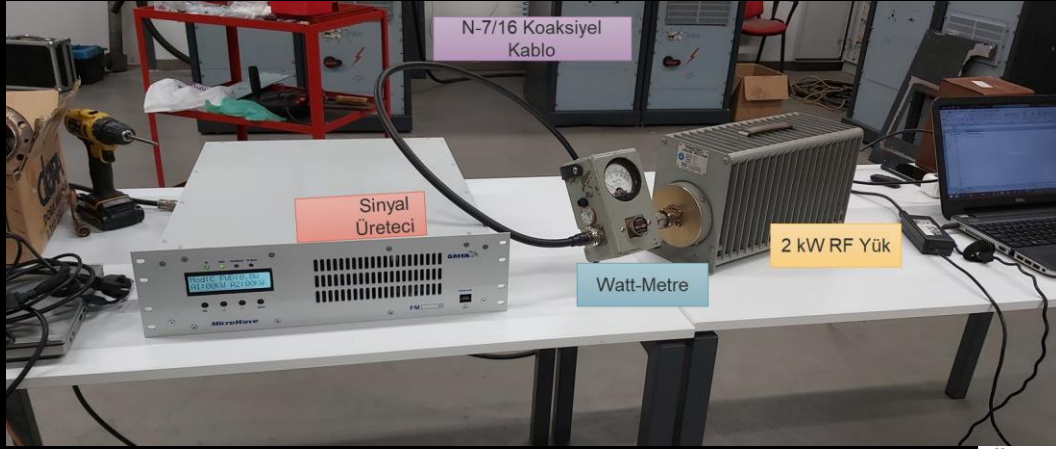
Rhodotron – FM Vericiler

- Çalıştırılıp sürekli güçte test edilen ve havalandırma sistemine bağlanan 4 adet FM güç kaynaklarının son hali aşağıda görülebilir.



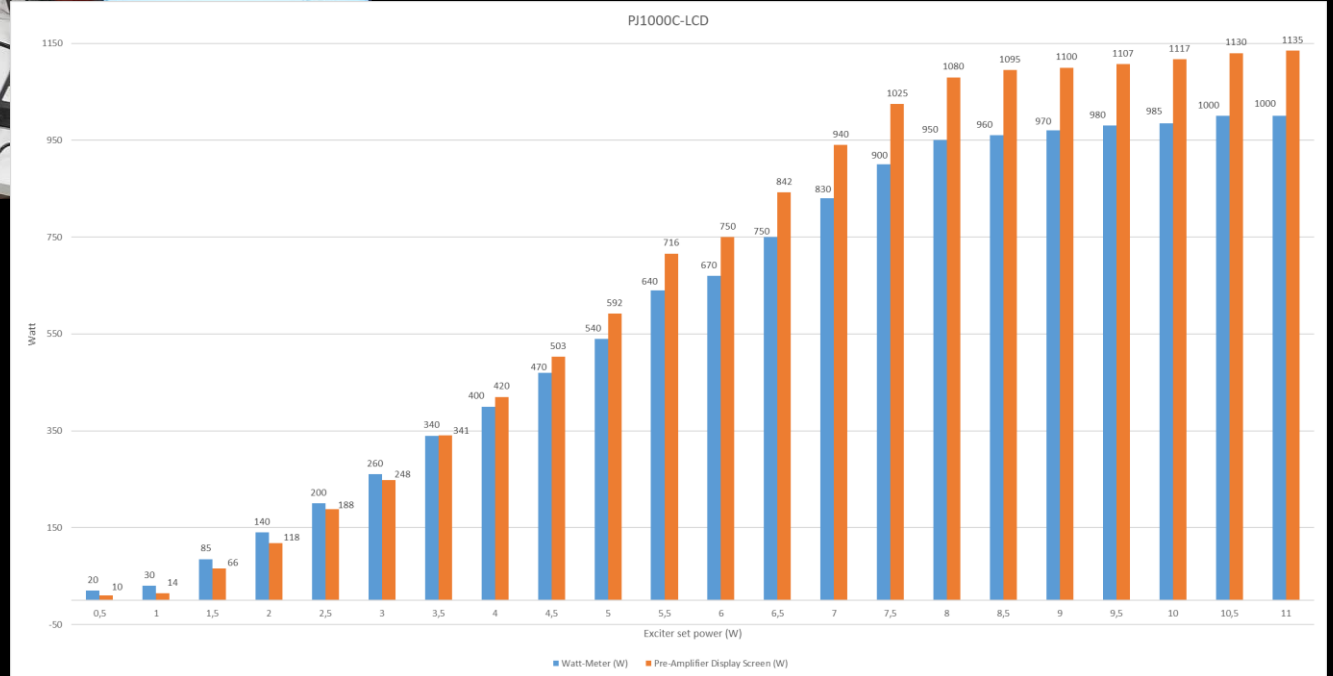
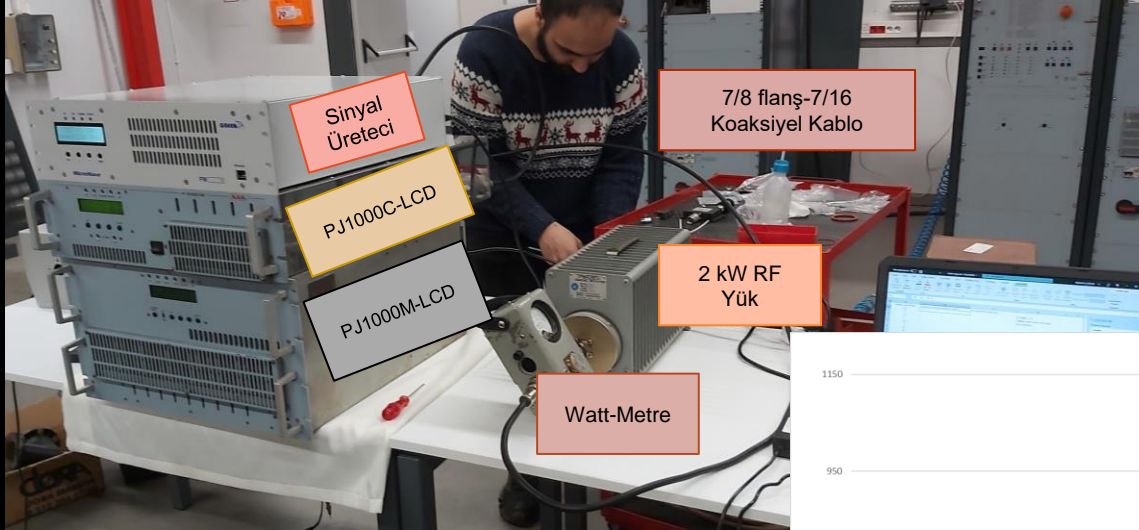
Rhodotron – Sinyal Üretici

- Maksimum çıkış değeri 30 W'tır.
- Watt-Metre üzerinde 50 W'luk ölçüm elemanı bulunmaktadır.



Rhodotron – Katı Hal Yükselteçler

- İki farklı ön yükseltecin güç seviyeleri, sinyal üreticinin farklı çıkış güçlerinde uygun RF yükü ve watt-metre kullanılarak ölçüldü.



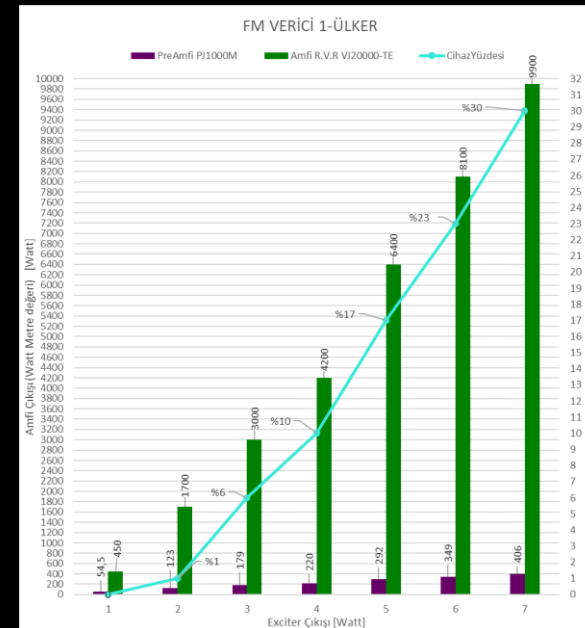
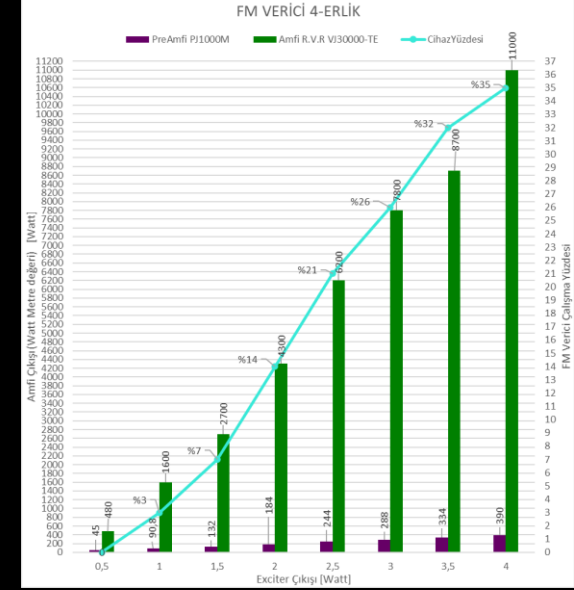
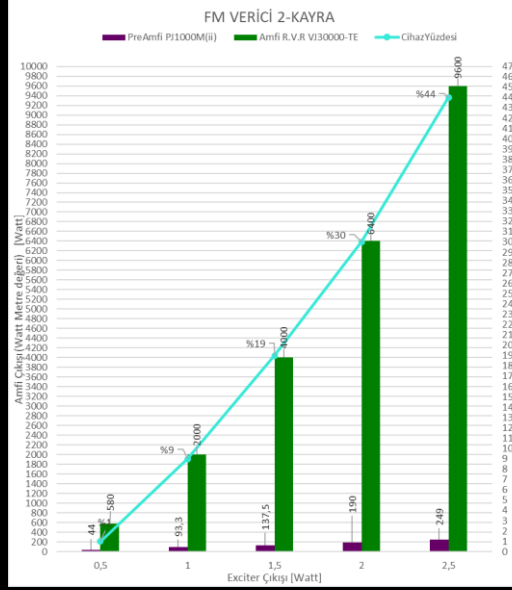
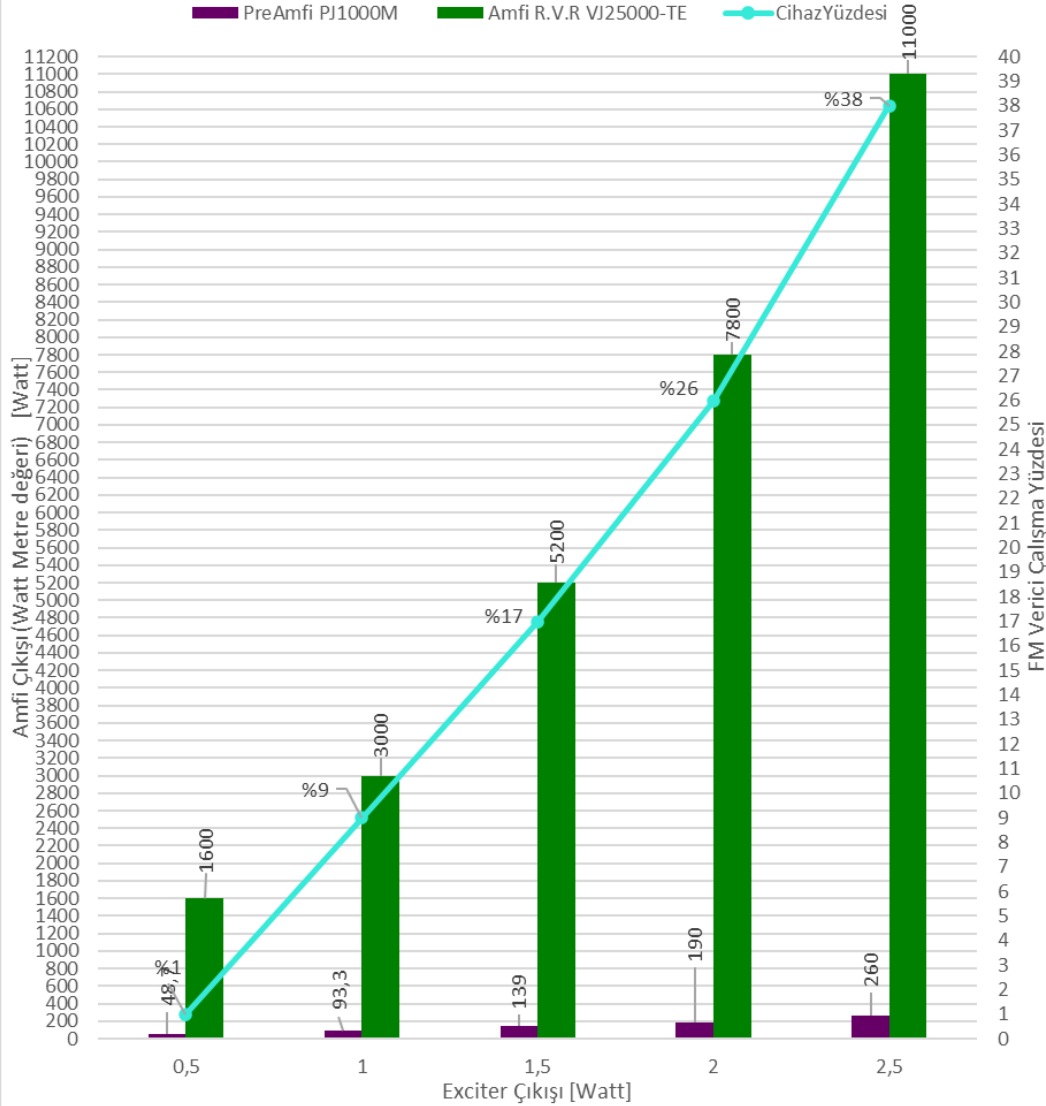
Rhodotron – Verici Güç Testi

- Tetrod tüplerinin performansları ilk olarak sürekli (CW) modda ölçüldü. Farklı exciter çıkış güçlerinde tüplerden elde edilen RF gücü ölçüldü. Eldeki RF kör yük 15kW'a dayanabildiği için giriş gücü maksimum 10kW çıkış gücü verebilecek şekilde ayarlanmıştır.



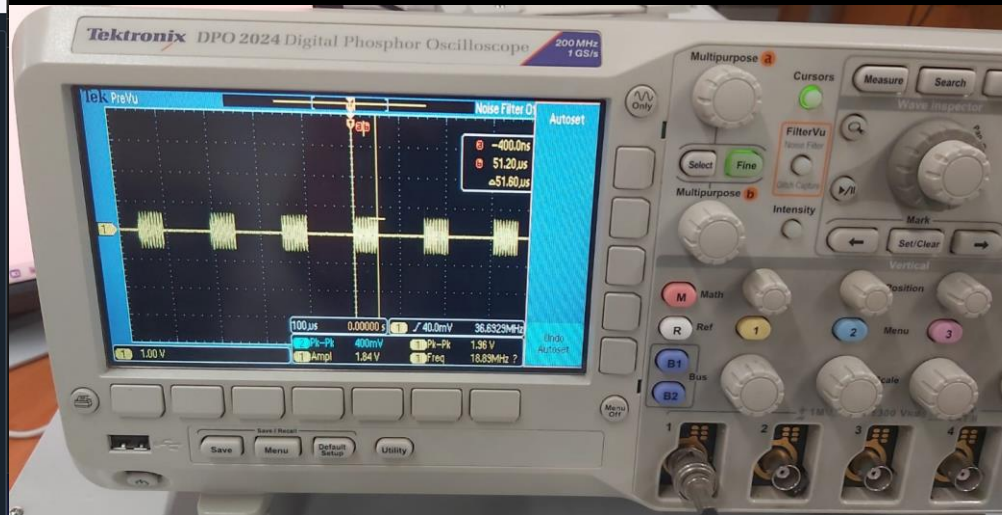
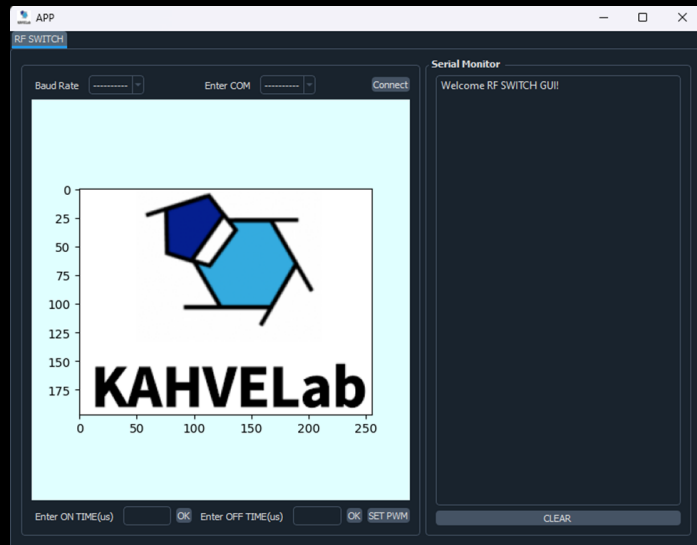
Rhodotron – Dört Verici Güç Testi

FM VERİCİ 3-ÇOLPAN



Rhodotron – RF Anahtarlama

- Sürekli çalışmada yaklaşık 30kW performans gösteren vericinin atmalı olarak çalıştırıldığında da anlık daha yüksek güç çıkışı elde edileceği beklenmektedir. Bundan dolayı sinyal üreticinin elden geçirilerek uzaktan kontrol ile hem atmalı hem de sürekli güç çıkışı vermesi için bir RF anahtarlama modülü (HMC544-39dBm) kullanılmıştır.
- Sistemin uzaktan (USB ile) sürekli ve atmalı) çalışmasını sağlamak amacıyla STM32F103C8T6 (piyasa ismiyle Bluepill) geliştirme kartı kullanıldı.
- Ayrıca bilgisayardan kolay kontrol edilmesi için bir kullanıcı arayüzü tasarlandı.
- Atmalı sinyale bir örnek de osiloskop ekran görüntüsü olarak verilmiştir. (Sinyalin açık kalma süresi 50 us kapalı kalma süresi 100 μ s'dir)

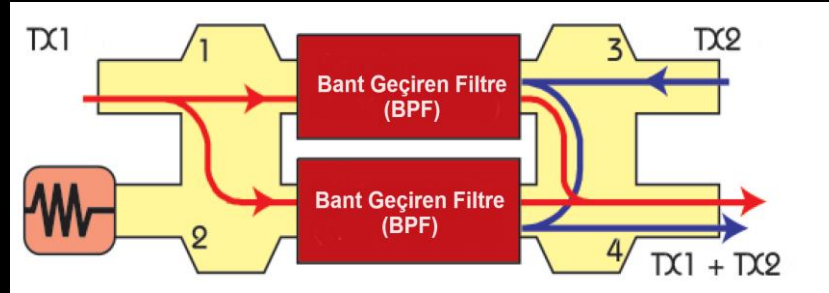
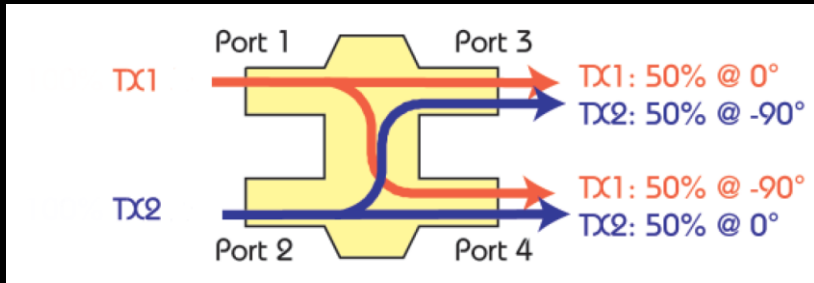


Rhodotron – Güç Birleştirici

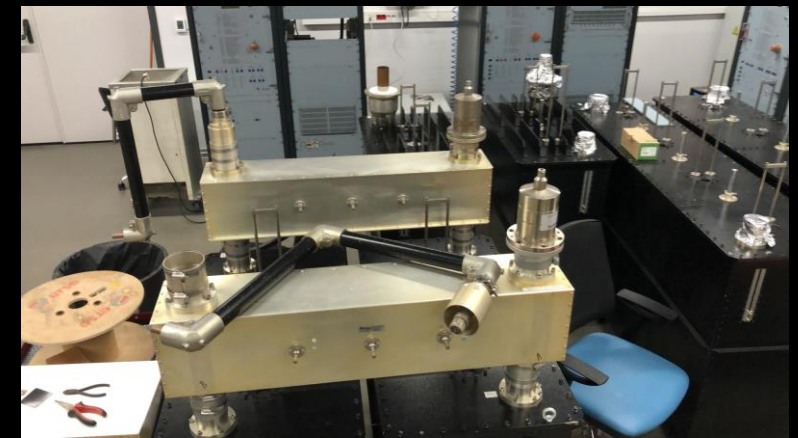
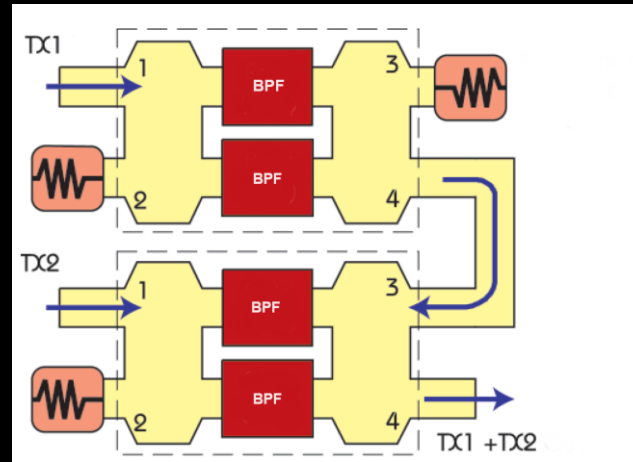
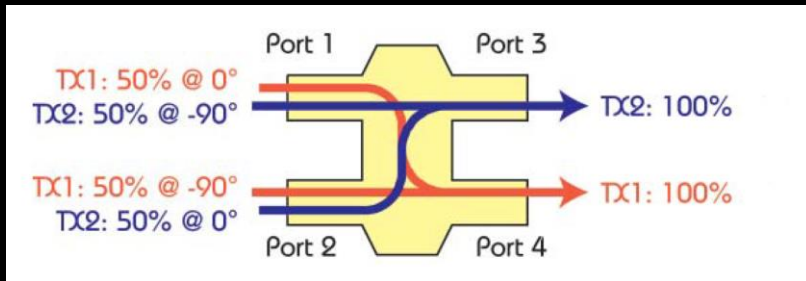
- FM vericilerden gelen gücün toplanabilmesi için daha önce radyo yayıncılığında kullanılmış olan 120 kW'lık gücü minimum kayıp ve maksimum izolasyon ile toplayabilen, aşağıdaki sistem ETAş firmasından ödünç alınmıştır.



Rhodotron – Güç Birleştirici



$$[S] = \frac{-1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 & 0 & j & 1 \\ 0 & 0 & 1 & j \\ j & 1 & 0 & 0 \\ 1 & j & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

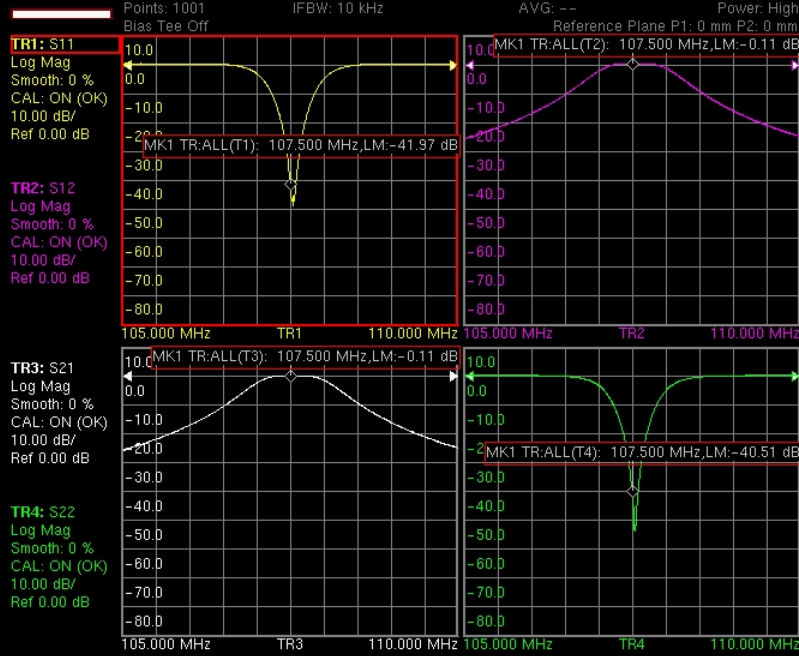


Rhodotron – Güç Birleştirici

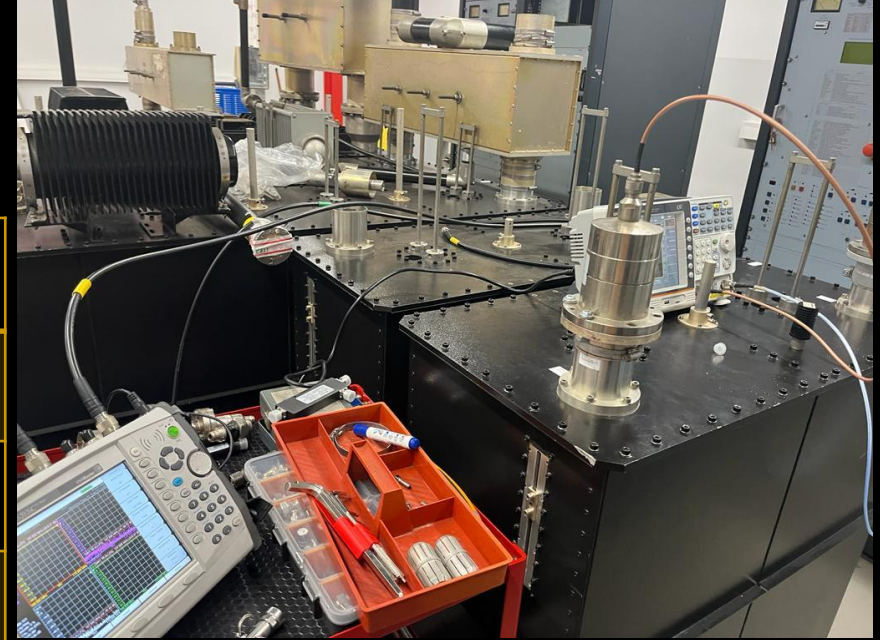
- Bant geçiren filtrelerin ve 3 dB hibrid kuplörlerin uzun süre aynı frekans aralığında kullanılmasından kaynaklanan ısınma, üzerlerindeki tunerları etkilemiştir. Bu nedenle, cihazların başarılı bir şekilde çalışabilmesi için öncelikle bakım ve temizlik işlemleri gerçekleştirilmiştir. Ardından, sistemin işleme alma çalışmalarına başlanmıştır.



Rhodotron - Bant Geçiren Filtre Ölçümleri

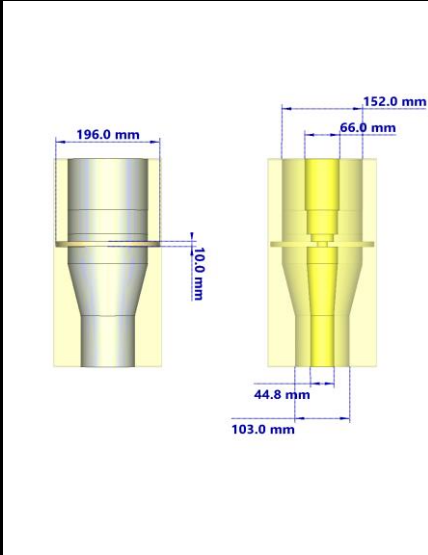


S11	-41.97 dB	% 0.006
S12	-0.11 dB	% 97.5
S21	-0.11 dB	% 97.5
S22	-40.51 dB	% 0.009



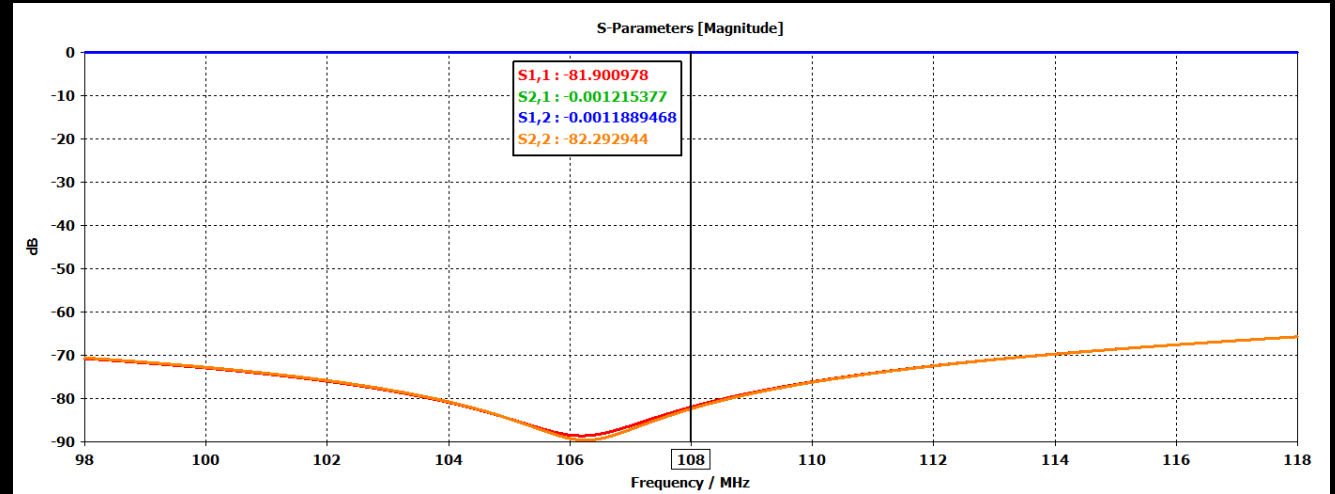
Rhodotron - Kuplör

- Güç kaynağından iletim hattı ile taşınan gücün kovuğun içine aktarılması için giriş güç bağdaştırıcısı kullanılır.
- Benzetimdeki S-parametre sonuçlarına göre tasarlanan bağdaştırıcı için 107.5 MHz'de maksimum güç iletimi ve minimum güç kaybı elde edilmiştir. Sonuçlar aşağıdaki şekilde verilmiştir.



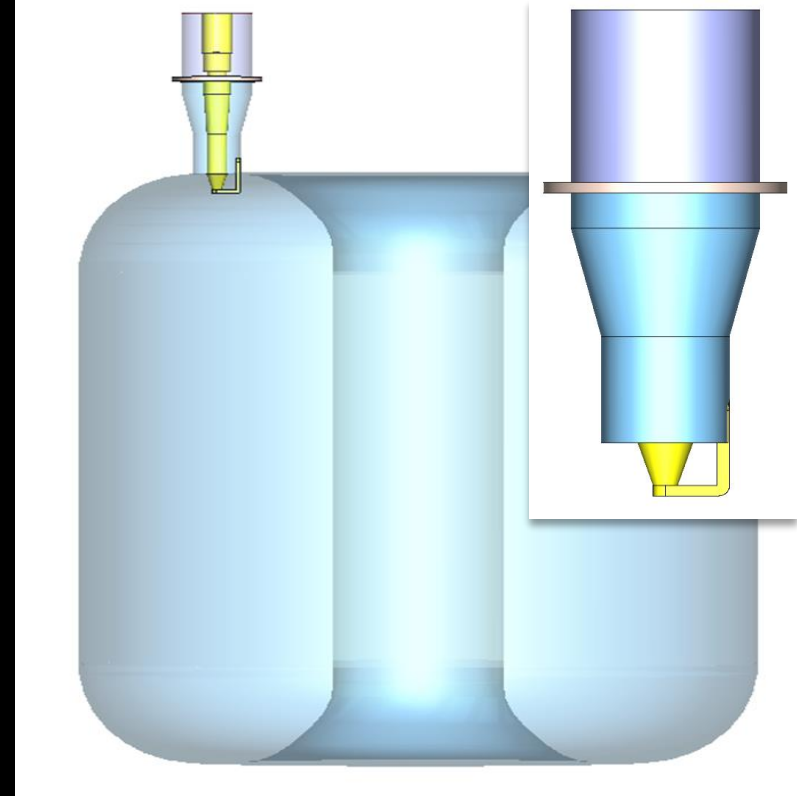
%96 Alumina, $\epsilon=9.4$

- Giriş: 6 1/8"
- Çıkış: 4 1/2"
- Dış Çap: 196 mm
- İç Çap: 20 mm
- Kalınlık: 10 mm



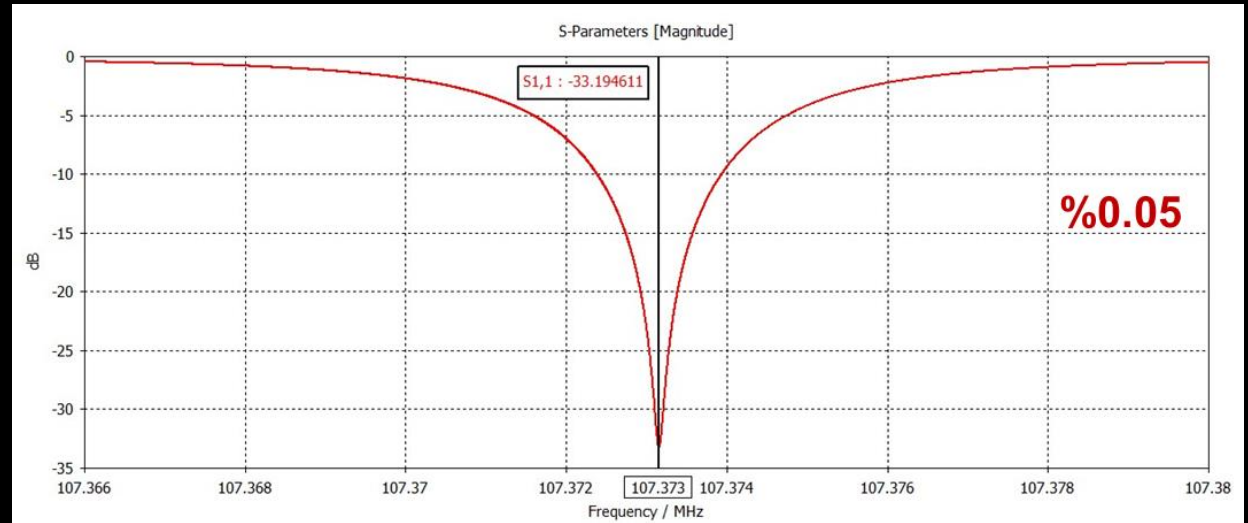
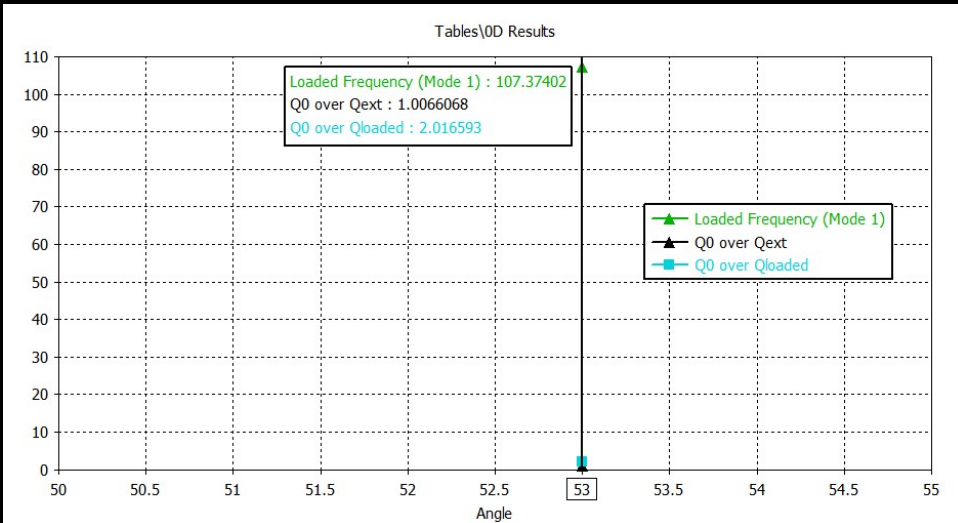
Rhodotron-Kuplör

- Eşmerkezli bağdaştırıcıdan Rhodotrona güç aktarmak için döngü anten kullanılmıştır. Döngü anten manyetik bir eşleşme sağladığından, konum olarak manyetik alanın kısmen yoğun olduğu kovuğun üst düz duvar kısmı seçilmiştir.
- Antenin yüzeyinde akan akım bir manyetik alan oluşturur. Bu alan, döngü düzlemine dik olan yani istenen modun manyetik alanıyla eşleşerek kovuk içerisindeki alanları uyarır.



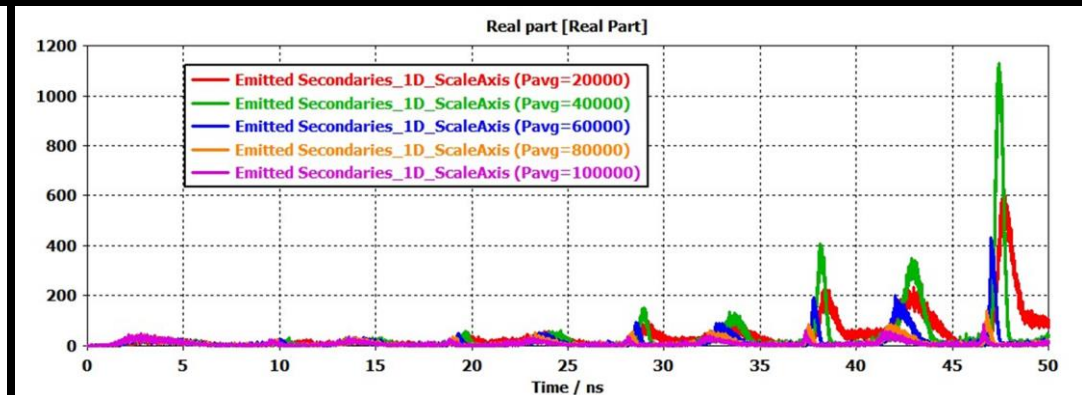
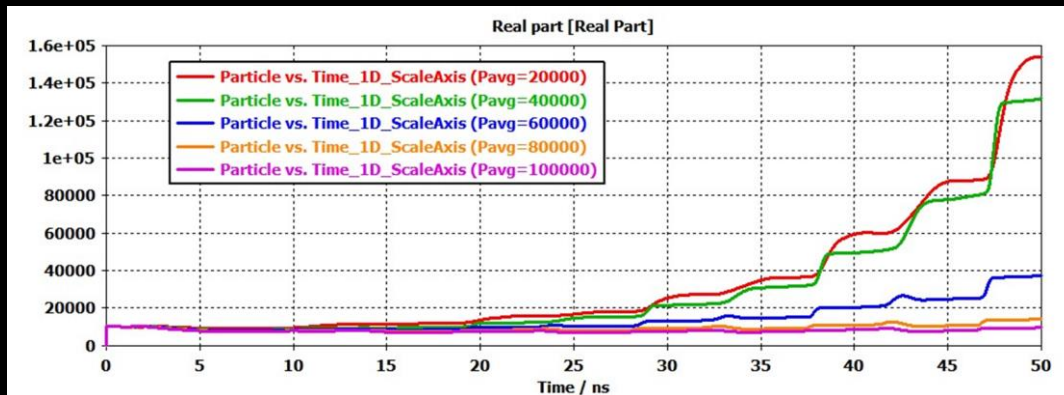
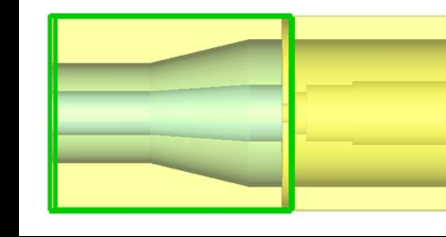
Rhodotron - Kuplör

- RF gücünü bir kovuğa herhangi bir kayıp olmadan iletmek için bağdaştırıcı ve kovuk sisteminin birlikte düzgün çalışması gerekir ve bu bağlantı katsayısı olarak adlandırılan beta (β) değeri ile belirlenir. bağlantı katsayısı, anteni döndürerek veya anten boyutlarını değiştirerek değiştirilebilir.
- Bağlantı katsayısı 1'e eşitse ($\beta = Q_0/Q_{ext} = 1$, burada Q_0 yüksüz kalite faktörü ve Q_{ext} dış kalite faktörüdür) bu duruma kritik eşleşme denir ve maksimum gücün aktarıldığı durumdur. Eigenmode çözücünde elde edilen sonuçlar yandaki şekilde verilmiştir.
- Kritik bağlanma koşulunda ($\beta = 1$), bağdaştırıcı tarafından yaklaşık olarak tüm gücün transferi üstteki şekilde gösterilmiştir. 107.373 MHz'de bu sistem, yandaki şekilde yaklaşık olarak tüm giriş gücünün kovuğa iletiildiği göstermektedir. Bu iki sonuca göre maksimum güç iletimi hem eigen çözücü hem de frekans çözücü ile doğrulanmıştır.



Rhodotron-Kuplör

- Sistem yüksek güç ve vakum altında çalışılacağından elektron çığ oluşumu açısından bağdaştırıcı tasarımı daha önemli hale gelmektedir.
- RF alanları tarafından hızlandırılan elektronlar, belirli bir güç seviyesinde metal veya dielektrik malzemelerin yüzeylerine çarptıklarında ikincil elektron yayılımına neden olur ve bu ikincil elektronların kısa bir süre içerisinde sayılarını en az 10^5 kat artırarak çok yüksek değerlere ulaşması durumunda çığ etkisi ortaya çıkar.
- Bu olay, iletilmek istenilen elektromanyetik dalgaların kaybolmasına, bozulmasına ve RF bileşenlerinin hasarına yol açabilir.



Durum ve Planlar

Proton Hızlandırıcısı

- İletim hattının düşük güç testleri tamamlandı.
- İletim hattının yüksek güç testlerinin yapılması planlanıyor.
- Güç ünitelerin testlerinin tamamlanması planlanıyor.
- Vericilerin ns seviyelerinde atmalı çalıştırılacak sistemin kurulması.
- Giriş güç kuplörünün üretilmesi.

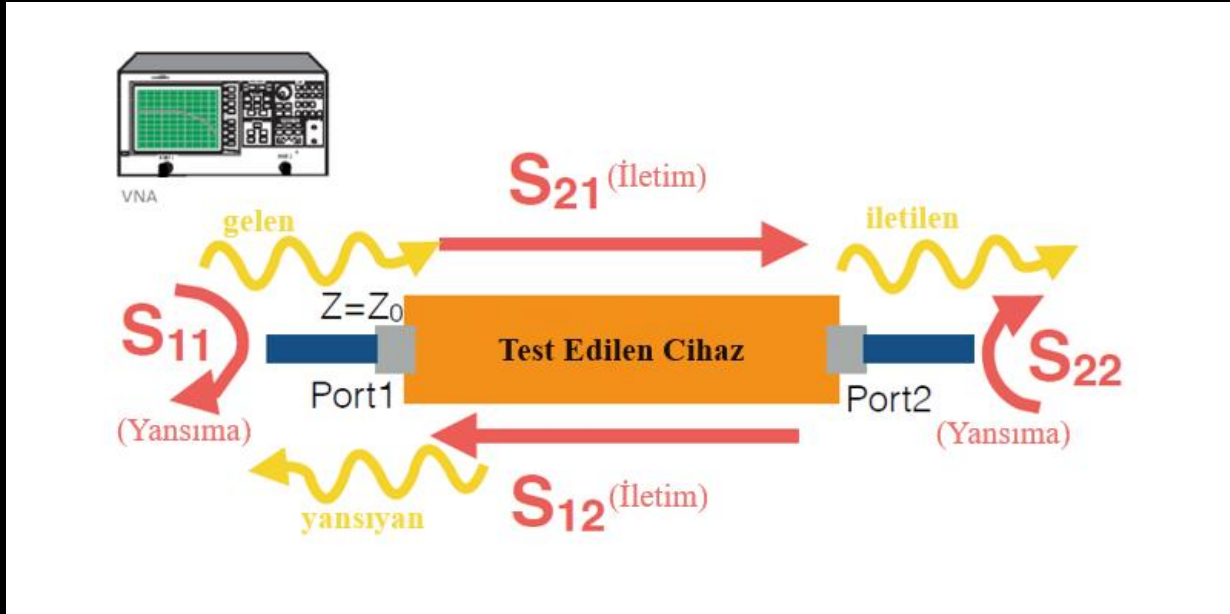
Elektron Hızlandırıcısı

- Kaba üretim üzerinden ilk vakum testleri tamamlandı. (10^{-5} mbar)
- Rhodotronun üretimi devam ediyor.
- Giriş güç kuplörünün üretilmesi.
- FM vericilerin atmalı güçte verilerinin elde edilmesi.
- Güç toplamak için kullanılacak 3dB kuplör ve bant geçiren sistemin kurulumunun tamamlanması ve hem düşük hem de yüksek güç ölçümlerinin alınması.

Teşekkürler...

Ek1: Saçılma Matrisi

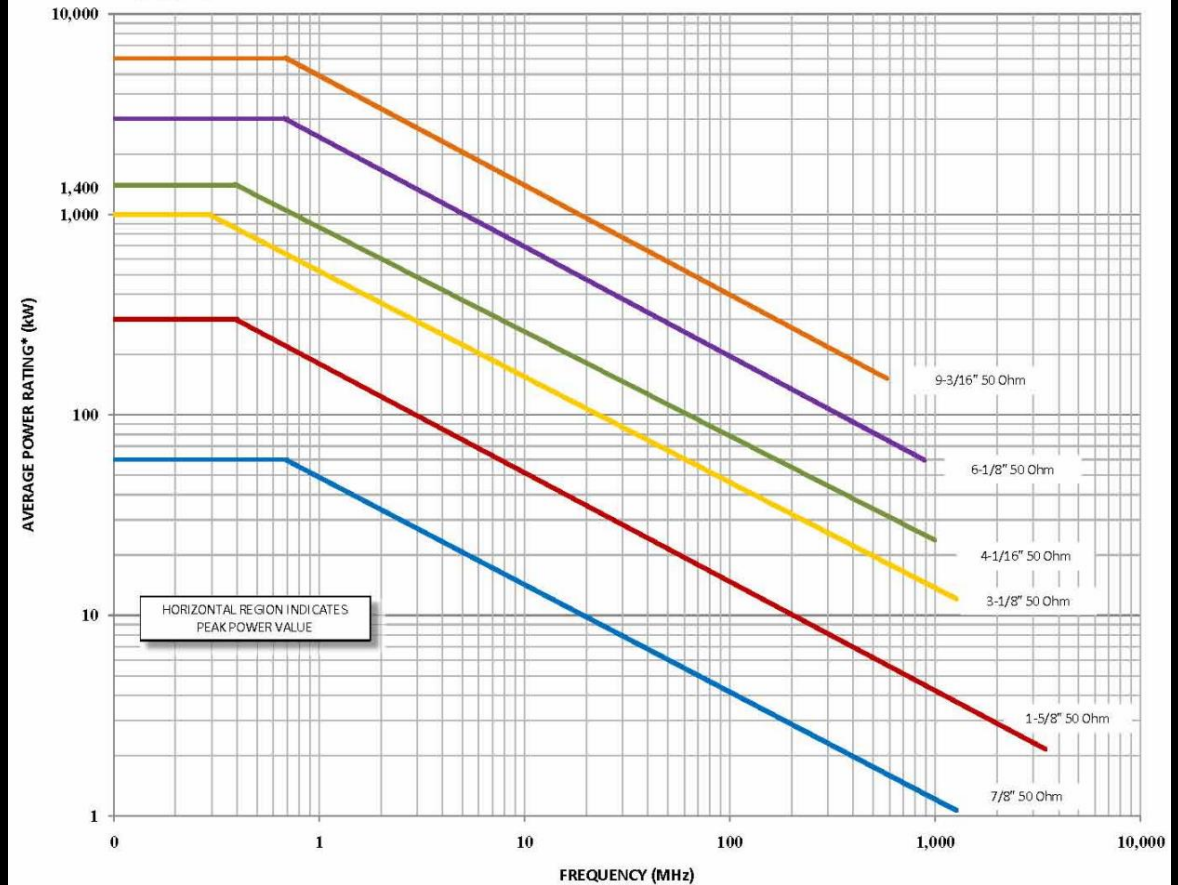
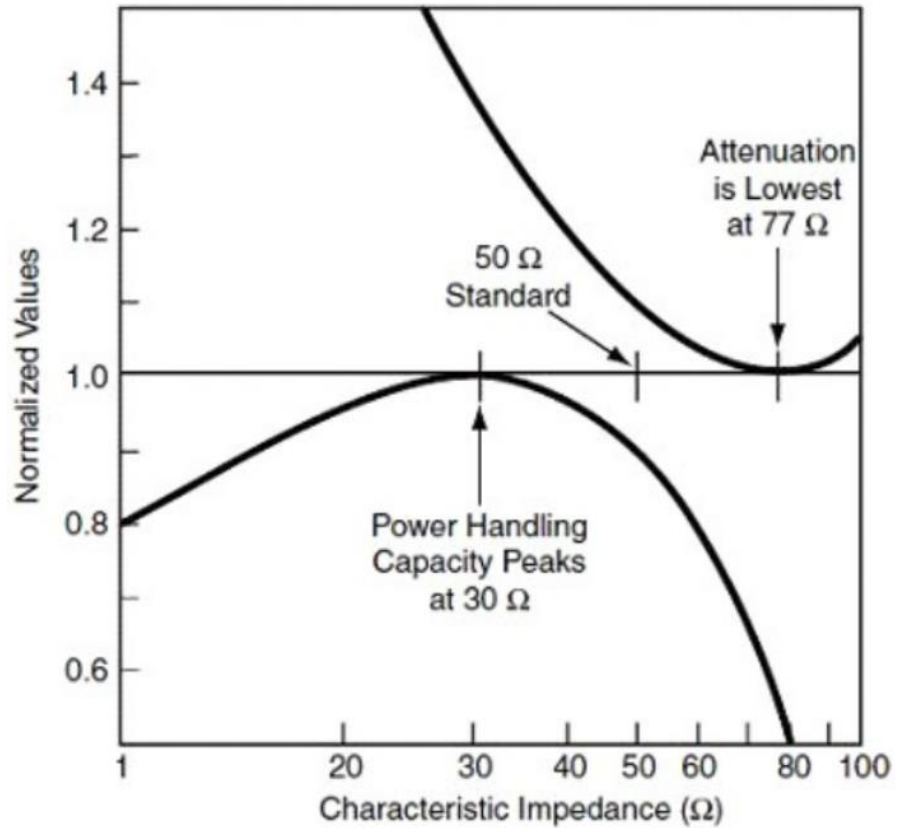
- N adet portun giriş-çıkış ilişkilerini gelen ve yansıyan güç dalgaları açısından tanımlanmasıdır.



$$RL(\text{Return Loss}) = -20 \log_{10} |\Gamma|$$

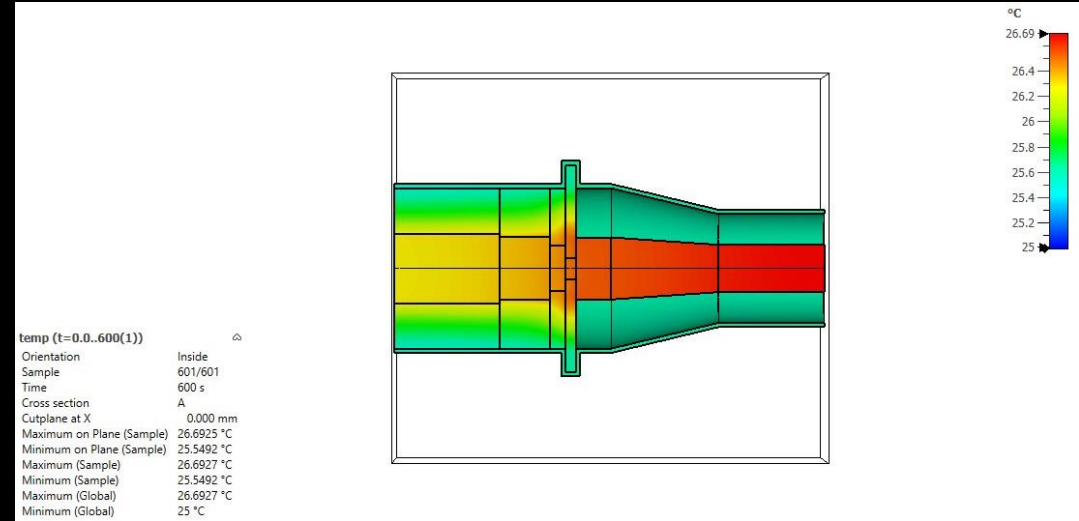
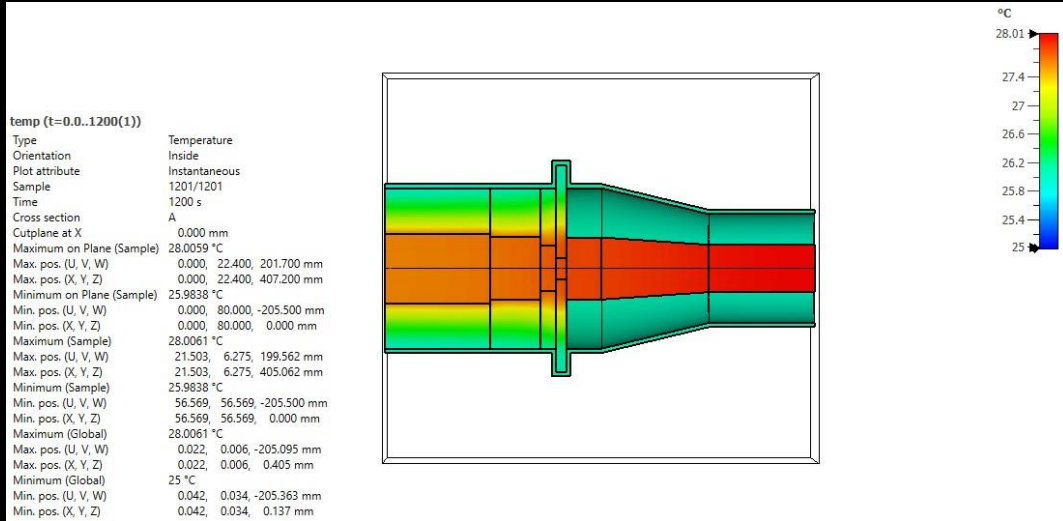
$$IL(\text{Insertion Loss}) = -20 \log_{10} |\tau|$$

Ek2: Koaksiyel Güç İşleme Kapasitesi

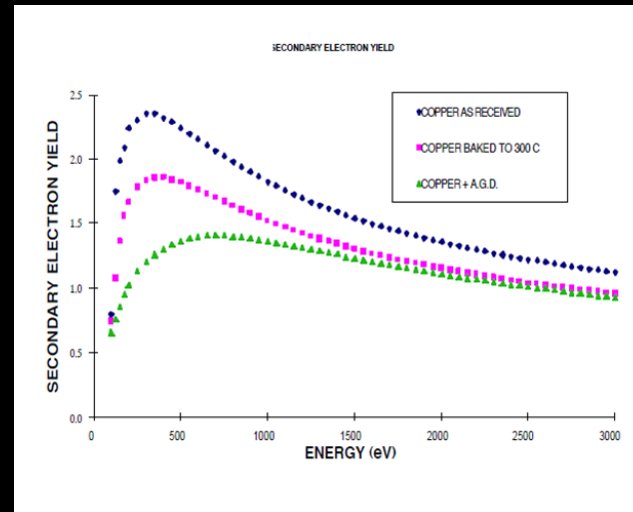
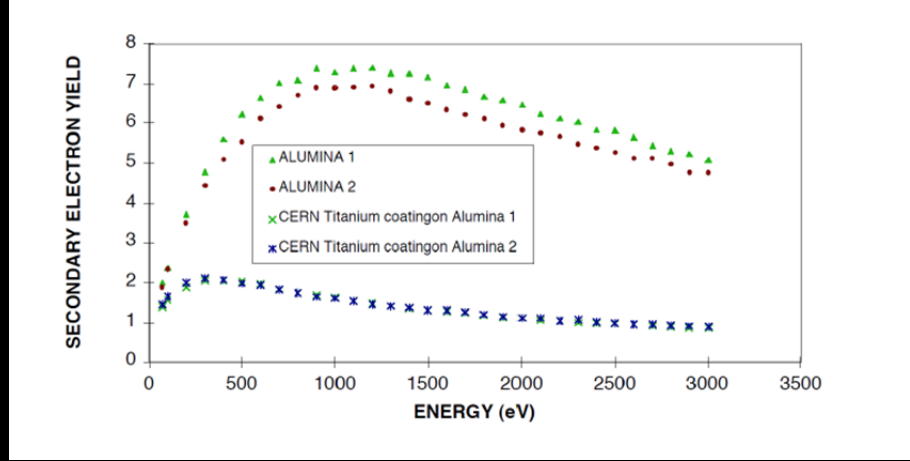
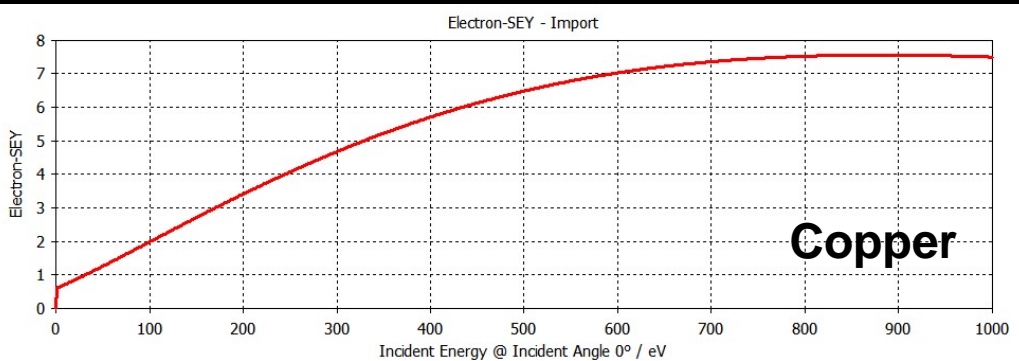
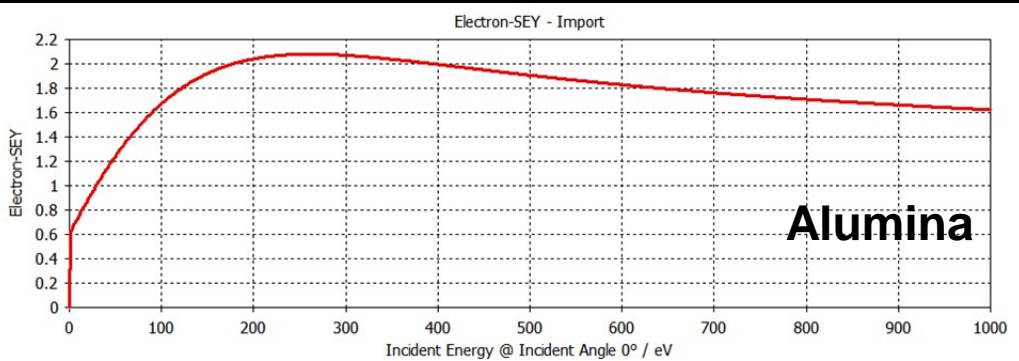


Ek4: Rhodotron - Kuplör

- 107.5 MHz Rhodotronun 2MeV'lık enerji için gereken RF gücü 100kW'tur. Bu güç doğrultusunda tasarlanan bağdaştırıcının ısı simülasyonları 10 dk ve 20 dk süresince yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir.



Ek3: SEY Grafikleri



Titanyum için
3.13µm'den
daha az
kalınlıkta
kaplanmalı.
(@108 MHz)

► N.Hilleret, Surface Properties of Technological Materials and Their Influence on the Operation and Conditioning of R.F. Coupler.

Ek5: SPARK vs PIC

