

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**İÇE GİRİNTİLİ VE DAR ARALIKLI KLAYSTRON KAVİTESİNİN EŞDEĞER
DEVRE ÖZELLİKLERİ VE KALİTE FAKTÖRÜ**

Nihan SİPAHİ

FİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ANKARA
2013**

Her hakkı saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

İÇE GİRİNTİLİ VE DAR ARALIKLI KLAYSTRON KAVİTESİNİN EŞDEĞER DEVRE ÖZELLİKLERİ VE KALİTE FAKTÖRÜ

Nihan SİPAHİ

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Basri ÜNAL

1930'lu yıllardan başlayarak günümüze kadar gelen mikrodalga üreteçlerindeki gelişmeler doğrultusunda yenilenen kavite geometrileri, kavite yapımında kullanılan malzemeler, bu malzemelerin iletkenlik özellikleri ve mikrodalgaların yüksek frekanslara ulaşılabilirliği sorun yaratabilecek unsurlardır. Frekans ve kayıp değerlerini hesaplamada, kullanılan malzemelerin çeşitliliğini belirlemede ve tüm bu parametrelerin etkilediği kavite kalite faktörünü hesaplamada zorluklarla karşılaşmaktadır. Ayrıca, bu tür üreteçlerde soğutma probleminden dolayı rezonatörün Q kalite faktörünü istenilen değerde tutmak da zorluk yaratmaktadır. Bu nedenle, modern hızlandırıcılarda, Q değerinin önceden bilinmesi alet tasarımına yardımcı olan ve istenen bir özelliktir. Bu zorluğu ortadan kaldırarak daha etkili bir kullanım için rezonans eğrisinin belirli bir genişlikte olması ve buradan sapmaların önlenmesi istenmektedir. Tüm bu sorunların çözümünü kolaylaştırmak adına 1970'li yıllardan başlayarak çeşitli bilgisayar programlama kodları geliştirilmiştir. Bu kodlar sayesinde analitik hesaplamalar ile simülasyon sonuçları karşılaştırılarak kavitenin yapım ve işletim aşamasında daha az sorunla karşılaşmak amaçlanmıştır. Bu kodlardan en temeli olarak SUPERFISH programı geliştirilmiştir. Bu bilgisayar kodu sayesinde en basit geometri bir klaystron kavitesinden günümüzde araştırma, savunma, medikal, uydu ve radar alanları gibi çeşitli amaçlar için kullanılan bir çok farklı kavitenin frekans ve geometrik şekil belirlenmesi ve bu parametrelere bağlı olan kalite faktörü (Q) değerinin hesaplanması ve optimizasyonu oldukça kolaylaşmış ve elde edilen sonuçlar daha güvenilir hale gelmiştir. Bu doğrultuda, bu tezde kavitelerdeki gelişmelerin anlaşılması için en temel kavite çeşiti olan klaystron kavite geometrisi ele alınmış, kalite faktörü hesaplamaları yapılmış ve elde edilen bu analitik sonuçlar SUPERFISH programlama kodu ile yapılan sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada, ele alınan geometrik şeklin, ω rezonans frekansını bulmamıza izin verdiği görülürken, duvar malzemesinin iletkenlik özelliklerinin de Q'nun en temel belirleyicisi olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Mayıs 2013, 44 sayfa

Anahtar Kelimeler: Klaystron, RF kavite, RLC devresi, Kalite Faktörü

ABSTRACT

Master Thesis

EQUIVALENT CIRCUIT PROPERTIES AND QUALITY FACTOR OF A NARROW GAP REENTRANT KLYSTRON CAVITY

Nihan SİPAHİ

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

Supervisor: Prof. Dr. Basri ÜNAL

Along the progress made in microwave generators starting from 1930s till today, renewed cavity geometries, their materials, their conductivity properties and carrying the microwaves to higher frequencies can cause to problems. Difficulties may arise in calculating the frequency and loss values, in choice of materials and in the calculation of quality factor which is affected by all these parameters. On the other hand, in such generators because of cooling problems, it is difficult to keep the quality factor Q at a certain value. Therefore, in modern accelerators, knowledge of Q value is desirable since it helps the accelerator design. To remove these difficulties and get a better performance, it is wanted that the resonance curve have a certain width and have no deflections from it. In order to ease the problems, various computer-programming codes have been developed since 1970s. It is aimed to have fewer problems during the cavity manufacture and operation of the cavity by comparing analytical calculations and simulation results of these codes. SUPERFISH is the most basic code in this area. With this code, starting from a klystron cavity of simplest geometry to many different cavities which are used today for various purposes such as research, defense, medical, satellite and radar applications, determining their frequency and shape, their quality factor Q calculation and their geometrical shape optimization have become rather easy and the obtained results have become more reliable. Along this direction in this thesis with the purpose of understanding the progress made in cavities, the basic klystron cavity geometry has been chosen, its quality factor has been calculated and the results of analytical calculations have been compared with those obtained from SUPERFISH code. It is found that while the geometric shape allows the calculation of resonance frequency ω , the conductivity properties of the wall materials plays the major role in determining the Q .

May 2013, 44 pages

Key Words: Klystron, RF cavity, RLC circuit, Quality factor

TEŞEKKÜR

Başta Danışmanım sayın Prof. Dr. Basri ÜNAL'a (Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı) tezim süresince geçen tüm emeklerinden ve desteklerinden dolayı teşekkürü bir borç biliyorum. Ayrıca, tezim süresince yaptığım hesaplamalarda büyük yardımı olan ve yüksek lisans eğitim sürem boyunca desteğini esirgemeyen sayın Prof. Dr. Mehmet KABAK'a (Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı) teşekkürlerimi sunuyorum.

Yüksek lisans eğitimim boyunca, katıldığım tüm yurtdışı etkinliklerde (SLAC, CERN, MAX-lab, İsveç ve İtalya) referansı olan ve ayrıca bu süreçte manevi desteğini de hiç eksik etmeyen Prof. Dr. Herman WINICK'e (SLAC) sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Yüksek lisans stajım boyunca çok değerli tecrübesini ve sonsuz bilgisini benimle paylaşan, beni çalışma konumda daha başarılı hale getiren ve güler yüzlülüğüyle bana hep destek olan Prof. Dr. Ake ANDERSSON'a en içten teşekkürlerimi sunuyorum.

Canım aileme, bu süreçteki her anda yanımda olup bir an bile eksik etmedikleri desteklerinden dolayı ve bana karşı olan sonsuz güvenlerinden dolayı tüm içtenliğimle teşekkür ediyorum. Canım kardeşim Mehmet KANDEMİR'e manevi desteğinden ve harikalar yaratarak yaptığı tüm yardımlarından dolayı ayrıca teşekkür etmek istiyorum.

Ve canım eşim Taylan SİPAHİ'ye, bu süreçte her daim yardımını, desteğini eksik etmediği ve güzel yüreğini hep hissettirdiği için sonsuz teşekkürler sunuyorum.

*Bu tez kapsamında tamamlamış olduğum yüksek lisans stajım Avrupa Birliği Erasmus Staj Programı tarafından desteklemiştir.

Nihan SİPAHİ
Ankara, Mayıs 2013

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	viii
1.GİRİŞ.....	1
1.1 Klaystron ve Temel Çalışma Prensipleri.....	1
1.2 Klaystronun Gelişim Süreci.....	2
2. KURAMSAL TEMELLER.....	3
2.1 Silindirik Kavite için Maxwell Denklemlerinin Çözümleri	3
2.2 İç Girintili Klaystron Kavitesinin Genel Teorisi.....	6
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	9
3.1 Silindirik Kavite için Hesaplanabilir Nicelikler.....	9
3.1.1 Silindirik Kavite için Toplam Depolanan Enerji (U) ve R/Q Değeri.....	9
3.1.2 Silindirik Kavite için Harcanan Güç P_{kav} ve Kalite Faktörü Hesabı.....	10
3.1.3 Silindirik Kavite için Paralel RLC Eş Değer Devresi.....	13
3.2 İç Girintili Dar Aralıklı Klaystron Kavitesi için Kalite Faktörü ve Eş Değer Devre Değerleri.....	14
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	18
4.1 Silindirik Kavite için Hesaplanabilir Değerler.....	18
4.2 Silindirik Kavite için Hesaplanan Analitik Değerlerin SUPERFISH Programıyla Kıyaslanması.....	21
4.3 İç Girintili Klaystron Kavitesi için Bulunan Analitik Q Değerinin SUPERFISH Koduyla Kıyaslanması	24
5. SONUÇ.....	39
KAYNAKLAR.....	33
EKLER.....	35
EK 1. SUPERFISH Programı Hakkında Genel Bilgi.....	36
EK 2. SUPERFISH Programı ile 459 MHz ve 650 MHz'lik Silindirik Kavite için Örnek Komut Giriş Dosyası ve Çıktı Değerleri.....	39

EK 3. SUPERFISH Programı ile İe girintili Klaystron Kavitesi için rnek	
Komut Giriş Dosyası ve Çıktı Değerleri.....	42
ÖZGEÇMİŞ.....	44

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

B	Manyetik Akı Yoğunluğu
c	Işık Hızı
C	Kapasitans
C₀	Dar Aralık Kapasitansı
C₁	Genis Bölge Kapasitansı
E	Elektrik Alan
D	Elektriksel Yer Değişirme
D(k²)	Dalga Sayısı Fonksiyonu
f₀	Rezonans Frekansı
H	Manyetik Alan
k	Dalga Sayısı
L	İndüktans
P_{kav}	Kavitede Harcanan Toplam Güç
P_{tab}	Kavite Tabanındaki Güç Kaybı
P_{yan}	Kavitenin Yan Yüzeyindeki Güç Kaybı
R_{şönt}	Şönt empedansı
R_s	Malzemenin Yüzey Direnci
U	Enerji Yoğunluğu
J_n(x)	n indisli 1. Tip Bessel Fonksiyonu
λ₀	Dalga Boyu
ρ	Öz direnç
σ	İletkenlik
δ	Deri Kalınlığı
Z	Boş Uzayın Empedansı
ε	Madde İçerisindeki Elektriksel Geçirgenlik
ε₀	Boş Uzayın Elektriksel Geçirgenliği
ε_r	Bağlı Elektriksel Geçirgenlik
\mathcal{E}	Konuma ve Zamana Bağlı Elektrik Alan
\mathcal{H}	Konuma ve Zamana Bağlı Manyetik Alan
μ	Madde İçerisindeki Manyetik Geçirgenlik
μ₀	Bos Uzayın Manyetik Geçirgenliği
μ_r	Bağlı Manyetik Geçirgenlik
ω	Açısal Frekans
π	Pi Sayısı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 Bir klaystronun işleyişi ve mikrodalgaların kılavuzlanması.....	1
Şekil 2.1 z ekseninde döneel simetrik kontrol kavitesi.....	5
Şekil 2.2 İçe girintili klaystron kavitesinin şematik gösterimi.....	7
Şekil 3.1 Eş değeri paralel RLC devresi.....	13
Şekil 3.2. İçe girintili klaystron kavitesinin eş değeri devresi.....	16
Şekil 4.1 İçe girintili ve dar aralıklı klaystron kavitesi.....	24

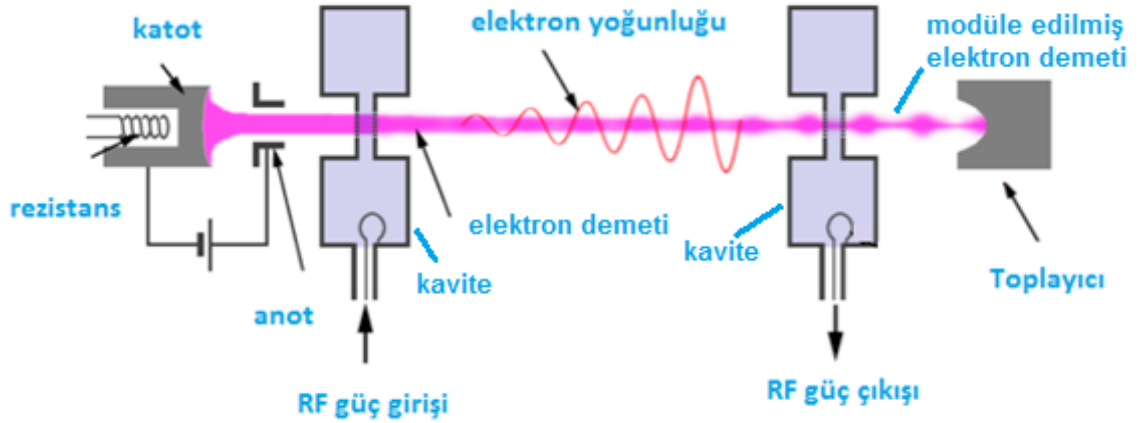
ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1 459 MHz' lik silindirik kavite için analitik olarak hesaplanan kavite değerleri ile SUPERFISH programından elde edilen sonuçların karşılaştırılması.....	22
Çizelge 4.2 650 MHz' lik silindirik kavite için analitik olarak hesaplanan kavite değerleri ile SUPERFISH programından elde edilen sonuçların karşılaştırılması.....	23
Çizelge 4.3 İçe girintili ve dar aralıklı klaystron kavitesi için analitik olarak hesaplanan değerlerin SUPERFISH'den elde edilen değerlerle karşılaştırılması.....	28
Çizelge 5.1 459 MHz'lik silindirik kavitede Q ve eş değer devre için yapılan analitik hesaplamaların SUPERFISH programı numerik sonuçlarıyla kıyaslanması.....	29
Çizelge 5.2 650 MHz'lik silindirik kavitede Q ve eş değer devre için yapılan analitik hesaplamaların SUPERFISH programı nümerik sonuçlarıyla kıyaslanması.....	30
Çizelge 5.3 İçe girintili ve dar aralıklı klaystron kavitesinde Q ve eş değer devre için yapılan analitik hesaplamaların SUPERFISH programı nümerik sonuçlarıyla kıyaslanması.....	31

1. GİRİŞ

1.1 Klaystron ve Temel Çalışma Prensibi

Klaystronlar elektron tabancasından termoiyonik olarak sökülerek elde edilen elektronların paketçikli yapıya sahip olmalarına olanak tanıyan yüksek güç üreteçleridir. Klaystronda ilk aşamada elektron tabancasında katottan sökülerek oluşturulan elektron demeti klaystronun içerisinde bulunan rezonatör kavitelere (RF güç girişlerinin yapıldığı) yollanır (Şekil 1.1). Burada düşük enerjili mikrodalga sinyali bu elektron demeti ile kesiştirilerek, elektron demeti paketçikli hale getirilir (modülasyon yapılır). Demet artık elektronların çok bulunduğu şişkin kısımlarla elektronların az bulunduğu ince kısımlardan oluşur. Daha sonra kesikli hale getirilmiş olan elektronlar frekansları uygun olarak belirlenmiş rezonatör kavite yapılarına gönderilirler. Bu kavite içinde belirli bir frekansta titreşen elektrik alanı bulunur, titreşimin evresi topak elektronlar geçiş sırasında yavaşlatılarak enerji kaybedecek, ince demet kısmındaki elektronsa zorunlu olarak hızlandırılacak şekilde ayarlanır. Sonuçta demet titreşimli alana net bir enerji verir, bu enerji alanın genliğini kuvvetlendirmeye ve sonlu kalite faktöründen dolayı var olan kayıpları karşılamaya yarar (Hansen 1938, Pozar 1998).



Şekil 1.1 Bir klaystronun işleyişi ve mikrodalgaların kılavuzlanması

1.2 Klaystronun Gelişim Süreci

Klaystronun ilk üretiminde çok büyük etkisi olan fizikçi W. Hansen'in rezonatör analizi çalışmalarında bir hedefe doğru hızlandırılan elektronların yine aynı şekilde yavaşlatılabileceğini ortaya koymuştur. Klaystronların temel çalışma prensibini oluşturan yüklü parçacıkların kinetik enerjilerinin (rezonatör kaviteler içerisinde) ayarlanarak Radyo Frekansına (RF) bindirildiği ortaya konulmuştur.

Varian kardeşler tarafından 1930'lu yılların sonunda klaystronların ilk örnek çalışmaları yapılmıştır. 1940'lı yılların başlarında ilk kez seri üretimleri yapılan klaystronlar İkinci Dünya Savaşı süresince radar sistemleri için gereken mikrodalga üretimi esnasında kullanılmışlardır (Varian 1939). Önceleri birkaç Watt mertebesinde güç değerlerine sahip olan klaystronlar giderek artan güç ve frekansları sayesinde günümüzde televizyon ve radyo istasyonlarında, radar ve uydu görüntüleme sistemlerinde kendilerine geniş yer bulmaktadır. Artan bu yüksek güç değerlerinden ötürü verimliliklerinin yüksek olması beklentisi de aranan özelliklerinden biri olmuştur.

2. KURAMSAL TEMELLER

Günümüzde bilgisayar programlı hesaplamalar yapılarak klaytrolların belirleyici özelliklerinin tam olarak üretimlerinden önce bilinmesi önemli bir yer tutmaktadır. Klaystronların bu ön çalışmaları için çeşitli bilgisayar programları geliştirilmiştir. Bu yazılımlardan birisi de 1970'li yıllardan bu yana kullanılan ve halen geliştirilmekte olan SUPERFISH tir.

Bu tez çalışmasında SUPERFISH yazılımı ile radyo frekansına bağlı olarak kavitelelerin eşdeğer devre özelliklerinin ve kalite faktörlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. İçe girintili klaystron kavitesi için öncelikli parametreler hesaplanarak analitik değerlerle kıyaslaması yapılmıştır.

Klaystrondaki rezonatörün kalite faktörü, yüzey direnci, toplam depolanan enerji, harcanan güç ve eş değer devre elemanları (indüktans, kapasitans ve empedans nicelikleri) için Maxwell denklemlerinden yararlanılmıştır. Silindirik kavite için hesaplamalar yapılmış, elde edilen sonuçlar uygun kabul edilip içe girintili klaystron kavitesi için hesaplamalara geçilmiştir.

2.1 Silindirik Kavite için Maxwell Denklemlerinin Çözümleri

Zamana bağlı Maxwell denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\nabla \times \mathcal{E} = -\frac{\partial \mathcal{B}}{\partial t} \quad (2.1)$$

$$\nabla \times \mathcal{H} = \frac{\partial \mathcal{D}}{\partial t} + \mathbf{J} \quad (2.2)$$

$$\nabla \cdot \mathcal{D} = \rho \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot \mathcal{B} = 0 \quad (2.4)$$

Denklemlerdeki $\nabla \times, \nabla \cdot, \mathcal{E}, \mathcal{H}, \mathcal{D}, \mathcal{B}, \mathbf{J}, \rho$ simgeleri sırasıyla rotasyonel, diverjans, elektrik alan şiddeti, manyetik alan şiddeti, elektriksel yer değiştirme, manyetik akı yoğunluğu, elektrik akım yoğunluğu ve yük yoğunluğudur. Elektrik alan şiddeti ve manyetik alan şiddeti silindirik koordinat parametrelerine (r, φ, z) ve zamana (t) bağlı olarak aşağıdaki denklemlerdeki gibi yazılabilir:

$$\mathcal{E}(r, \varphi, z; t) = \mathbf{E}(r, \varphi, z)e^{-j\omega t} = [E_r(r, \varphi, z)\hat{r} + E_\varphi(r, \varphi, z)\hat{\varphi} + E_z(r, \varphi, z)\hat{z}]e^{-j\omega t} \quad (2.5)$$

$$\mathcal{H}(r, \varphi, z; t) = \mathbf{H}(r, \varphi, z)e^{-j\omega t} = [H_r(r, \varphi, z)\hat{r} + H_\varphi(r, \varphi, z)\hat{\varphi} + H_z(r, \varphi, z)\hat{z}]e^{-j\omega t} \quad (2.6)$$

Yukarıdaki çözüm fonksiyonlarına rotasyoneller uygulanırsa

$$\nabla^2 \mathcal{E} - \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \mathcal{E}}{\partial t^2} = 0 = \nabla^2 \mathbf{E}(r, \varphi, z) + \omega^2 \mu_0 \epsilon_0 \mathbf{E}(r, \varphi, z) = 0 \quad (2.7)$$

$$\nabla^2 \mathcal{H} - \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \mathcal{H}}{\partial t^2} = 0 = \nabla^2 \mathbf{H}(r, \varphi, z) + \omega^2 \mu_0 \epsilon_0 \mathbf{H}(r, \varphi, z) = 0 \quad (2.8)$$

denklemleri elde edilir. Bu denklemlerin çözümleri kartezyen koordinatlarda yapılabilir. Burada $\omega^2 \epsilon_0 \mu_0 = k_0^2$, boşlukta $\epsilon_r = 1$ ve $\mu_r = 1$ alınırsa $\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E}$, $\mathbf{H} = \frac{\mathbf{B}}{\mu_0}$ eşitlikleri kullanılabilir. Genelde ise,

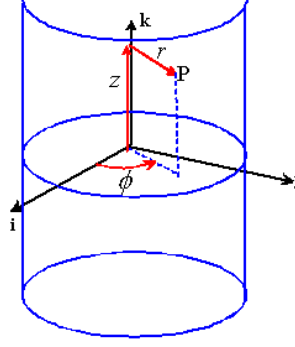
$$\nabla \times \nabla \times \mathcal{H} + \mu \epsilon \frac{\partial^2 \mathcal{H}}{\partial t^2} = 0 \quad (2.9.a)$$

$$\nabla \times \nabla \times \mathcal{E} + \mu \epsilon \frac{\partial^2 \mathcal{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (2.9.b)$$

denklemlerinin kullanılması gerekir. Silindirik koordinatların z bileşeni için, E_z 'nin z 'ye bağlı olmadığı en alçak kip durumunda bu denklemler,

$$\nabla_t^2 E_z + k_0^2 E_z = 0 \quad (2.10)$$

şeklini alır. Genel şekilli bu tür kavitelere, gerek **H** gerekse **E** denklemi analitik yolla çözülemez. Bu nedenle, çözümler için sayısal teknik yöntemlerin kullanılması gerekir. Sayısal tekniklerin henüz gelişmediği 1950'li yıllarda ise, elle yaklaşık çözümler için çalışmalar yapılmıştır (Fujisawa 1958).



Şekil 2.1 z eksenini etrafında dönele simetrik kontrol kavitesi

Şekil 2.1'deki kontrol kavitesi, z eksenini etrafında dönele simetriye sahiptir. Bu nedenle en alçak mod φ den de bağımsızdır. Bu kavite için **E** veya **H** denklemi analitik çözülebilir. Bu durumda elektrik alan, Maxwell denklemlerinden yararlanılarak,

$$\nabla_t^2 \mathbf{E}_z + k_0^2 \mathbf{E}_z = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \mathbf{E}_z}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \mathbf{E}_z}{\partial z^2} + k_0^2 \mathbf{E}_z = 0 \quad (2.11)$$

şeklinde yazılır (Wiedemann, 1995). Bu denklemin çözümü ise denklem (2.12)'deki gibidir.

$$E_z(r, z) = R(r)Z(z) \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial^2 R}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \left(\frac{\partial R}{\partial r} \right) + k_0^2 R = 0 \quad (2.13)$$

$n = 0$ indisli Bessel diferansiyel denklemini elde edilir. Bu denklemin çözümü ise

$$R(r) = A J_0(k_0 r) \quad (2.14)$$

şeklinde olmaktadır.

z 'den bağımsız modlar için; $Z(z) = Az + B$ eşitliğinde $A = 0$ ve $Z(z) = B$ olmaktadır. B değeri keyfi bir değer olarak 1 alınır. Böylece denklem (2.12),

$$\mathbf{E}_z(r, z) = E_z(r)\hat{z} = AJ_0(k_0r)\hat{z} \quad (2.15)$$

halini alır. Silindirik kavitenin duvarlarında ($r = a$ sınır koşulunda) $\mathbf{E}_z = 0$ olması nedeniyle

$$J_0(k_0a) = J_0(\chi_1) = 0 \quad (2.16)$$

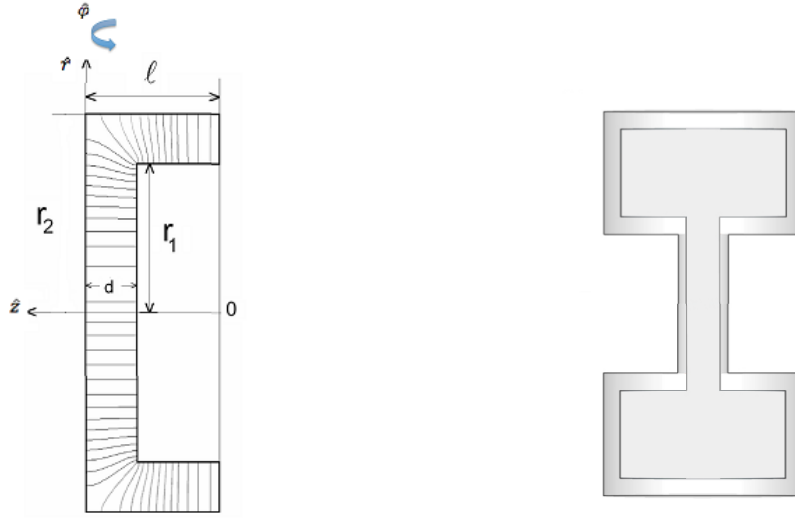
yazılır. Bessel fonksiyonunun ilk kökü ise

$$\chi_1 = k_0a = \frac{\omega}{c}a = 2.405 \quad (2.17)$$

olarak bulunur (Pozar 1998, Jackson 1999, Collin 2001). Bu değer, hızlandırma işleminin yapıldığı TM_{010} modunun frekansına eşittir ve denklem (2.17)'de görüldüğü gibi; yalnızca kavitenin yarıçapına bağlı olup, kavite yüksekliğinden bağımsızdır. Bu sonuç, kavite tasarımındaki yüzey direnci, kalite faktörü, depolanan enerji ve harcanan güç gibi hassas değerlerin hesaplanmasında, daha sonrasında ise bunlardan yola çıkarak hesaplanabilecek olan eş değer devre elemanlarının bulunmasında da büyük önem taşımaktadır.

2.2 İç Girintili Klaystron Kavitesinin Genel Teorisi

Silindirik kavitelere olduğu kadar iç girintili ve dar aralıklı kaviteler (Şekil 2.2) için de kalite faktörü, harcanan güç ve toplam depo edilen enerji ve bunlara bağlı olan eş değer devre elemanları olan indüktans, kapasitans ve empedans gibi değerleri elde etmek analitik yollarla çok kolay değildir (Barroso ve Leite Neto 2006).



Şekil 2.2 İçe girintili klaystron kavitesinin şematik gösterimi (Barroso vd. 2003)

Bu hassas değerler, silindirik kavitelere göre içe girintili ve dar aralıklı kavitelelerin şekillerindeki bölgesel farklılaşmalardan dolayı kolaylıkla değişebildiği için analitik hesaplamalar sonucunda belirli bir hata payı ile bulunabilmektedir. Bunun için literatürde yapılan analitik hesaplamalar çok değişik yaklaşım yöntemlerini içerir. Alan denklemlerinin çözümü yanında uygulama kolaylığı sağlayan iletim hattı ve empedans kavramını kullanan mühendislik yaklaşımları da vardır (Fujisawa 1958, Barroso vd. 2003, Barroso vd. 2005).

Bazı varsayımlar göz önünde tutularak içe girintili kaviteleler için analitik olarak yapılan alan denklemlerinin çözümleri nümerik sonuçlara yaklaşırsa bile, kavite geometrisine göre %22'lerden %40'lara kadar görülebilen hata payları mevcuttur (Barroso vd. 2005). Bunun temel nedenlerinden biri, kavite yüksekliğinin (h) dış ve iç silindirin yarıçapları farkından ($r_2 - r_1$) büyük ya da küçük olmasıdır. $l > (r_2 - r_1)$ koşulunda, yani uzun kavite yapısı için, kavitenin parametrelerinin ayarlanması artık dar aralığa bağlı olmaksızın koaksiyel kısımda güçlü elektromanyetik alanların oluşmasına neden olur.

Yaklaşık olarak koaksiyel kısımdaki radyal elektrik alan ifade edilmek istendiğinde

$$E_r = \left(\frac{E_0}{r}\right) \sin\left(\frac{2\pi z}{\lambda_0}\right) \quad (2.18)$$

şeklinde yazmak mümkün olacaktır. Burada küçük argümanlar için sinüs değeri argümanı ile değiştirilerek yeniden yazılacak olursa koaksiyel kısımda ($0 \leq z \leq l - d$) depolanan enerji yaklaşık olarak

$$U_{koaksiyel} = \frac{\epsilon_0}{2} \int_{koaksiyel} E_r^2 dv = \frac{2\pi\epsilon}{6} \left(\frac{2\pi z}{\lambda_0}\right)^2 E_0^2 (l - d)^3 \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad (2.19)$$

olarak ifade edilir.

Dar aralıktaki voltajın $E_1 d = E_0 \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) (l - d) \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)$ olduğu bilinerek benzer şekilde dar aralık kısmında depolanan enerji için de

$$U_{dar\ aralık} = \epsilon_0 E_1^2 \pi r_1 \frac{d}{2} \quad (2.20)$$

ifadesini yaklaşık olarak yazmak mümkündür. Daha sonra bu iki depolanan enerji ifadesini oranlayarak ve gelecek kesimdeki denklem (3.30)'dan faydalanıp $r_1^2 \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) = \frac{2d\lambda_0^2}{4\pi^2 h}$ yazarak

$$\frac{U_{koaksiyel}}{U_{dar\ aralık}} = \frac{4\pi^2 h(h-d)}{3 \lambda_0^2} \quad (2.21)$$

ifadesi elde edilebilir.

Bu iki enerji oranısının koaksiyel ve dar aralık kısımlarda nasıl paylaşıldığı, dar aralığın kavite parametreleri üzerindeki etkilerini gösterir. İç girintili kavitelerdeki dar aralık (gap) kontrolü sayesinde enerjinin neredeyse tamamı bu dar kısımda toplanarak tıpkı bir kapasitör gibi davranır (Barroso vd. 2005). Böylece bu kaviteyi artık bir RLC devresine benzetmek mümkün olacaktır. Bu sayede de silindirik kavite için yazılan eş değer devre elemanlarına benzer bir şekilde şönt empedansı, indüktans ve kapasitans değerlerini belirli bir yaklaşıklıkla yazmak mümkün hale gelecektir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Silindirik Kavite için Hesaplanabilir Nicelikler

3.1.1 Silindirik kavite için toplam depolanan enerji (U) ve R/Q değeri

Enerji yoğunluğu (U),

$$U = \frac{1}{2} (\mathcal{E} \cdot \mathcal{D}^* + \mathcal{B} \cdot \mathcal{H}^*) \quad (3.1)$$

olup, TM₀₁₀ modu için, yalnızca E_z ve H_φ var olduğundan,

$$\mathcal{E} \cdot \mathcal{D}^* = \varepsilon_0 [E_0 J_0(k_{01}r)]^2 \cos^2 \omega t \quad (3.2.a)$$

$$\mathcal{B} \cdot \mathcal{H}^* = \mu_0 \left[\frac{\omega \varepsilon_0 E_0}{k_{01}} J'_0(k_{01}r) \right]^2 \sin^2 \omega t \quad (3.2.b)$$

denklemleri yazılır. Eğer t = 0 seçilirse, denklem (3.2.a)'ya göre manyetik enerji yoğunluğu, kavitenin başından sonuna kadar sifıra eşit olmalıdır ve toplam depo edilen enerji hesabı yalnızca elektrik alan bileşenleri kullanılarak yapılmalıdır. Toplam enerji korunduğu için ve denklem (3.1)'deki \mathcal{E} ve \mathcal{H} bileşenleri bir diğeriyle faz dışında olduğu için depolanan enerjinin elektrik ve manyetik bileşenler arasında geri salınır. Bundan dolayı, ortalama zamanda seçilen elektrik veya manyetik bileşenler tarafından depolanan enerji bulunabilir. Toplam depolanan enerji,

$$U = \frac{\varepsilon}{2} E_0^2 \int_0^a dr \int_0^d dz \int_0^{2\pi} rd\varphi J_0^2(k_{01}r) \quad (3.3)$$

$$U = \pi \varepsilon_0 E_0^2 d \int_0^a r dr J_0^2(k_{01}r) \quad (3.4)$$

şeklindedir. Enerji yoğunluğu, $R \equiv r/a$ değişkeni kullanılarak denklem (3.5)'teki gibi daha sade bir şekilde yazılabilir. $J_0(x)$ in 1. kökü $z_{01} = ak_{01} = a\omega_{01}\sqrt{\mu_0\epsilon_0}$ olmak üzere;

$$U = \pi\epsilon_0 E_0^2 a^2 d \int_0^1 R dR J_0^2(z_{01}R) \quad (3.5)$$

Sonuç olarak, $\int_0^1 R dR J_0^2(z_{01}R) = J_1^2(z_{01})/2$ eşitliği kullanılarak,

$$U = \frac{\pi}{2} \epsilon_0 E_0^2 a^2 d J_1^2(z_{01}) \quad (3.6)$$

denklemini elde edilir. $U \propto E_0^2$ olduğundan dolayı, efektif hızlandırma voltajının karesi ($V^2 = (E_0 d)^2$), kavitenin uygun iki noktası arasında alınmış elektrik alanın çizgi integrali yardımıyla tanımlanarak aşağıdaki gibi bir oran elde edilir (Tenenbaum 2003, Talman 2006).

$$\frac{V^2}{U} = \frac{2(E_0 d)^2}{\pi\epsilon_0 a^2 d J_1^2(z_{01})} = \frac{2}{\pi\epsilon_0 J_1^2(z_{01})} \frac{d}{a^2} \quad (3.7)$$

Burada V gerilimi tanımında sözü edilen silindirin z eksenindeki iki noktası arasında tanımlanmıştır.

$$\frac{V^2}{\omega U} = \frac{2}{\pi z_{01} J_1^2(z_{01})} \frac{d}{a} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = \frac{R}{Q} \quad (3.8)$$

$\sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$ niceliği ortamın empedansını tanımlamaktadır ve genellikle Z şeklinde kısaltılır. Ayrıca denklem (3.8)'in $2/[\pi z_{01} J_1^2(z_{01})]$ kısmı yaklaşık 0.982'ye eşittir.

3.1.2 Silindirik kavite için harcanan güç (P_{kav}) ve kalite faktörü hesabı

Kavitedeki toplam gücün yüzeylerde kaybolan miktarı, deri kalınlığı içinde birim hacimdeki omik kayıpların hesaplanmasıyla elde edilebilir.

Yüzeyin deri kalınlığı çok küçükse Z_s yüzey empedansı cinsinden

$$\frac{dP}{dA} = \frac{1}{2} \text{Re}\{Z_s |\mathbf{H}_s|^2\} \quad (3.9)$$

şeklinindedir. Burada \mathbf{H}_s iletkenin yüzeyindeki manyetik alandır. Bu denklemde $R_s = \omega\mu_c/\sqrt{2\mu_c\omega\sigma}$ malzemenin yüzey direnci olarak tanımlanırsa denklem (3.9)

$$\frac{dP}{dA} = \frac{1}{2} R_s |\mathbf{H}_s|^2 \quad (3.10)$$

halinde tekrar yazılabilir. R_s , klasik bir iletken için frekansın kareköküyle orantılı olarak artar ve σ öz iletkenliği ve δ deri kalınlığıyla arasında $R_s = 1/\sigma\delta$ ilişkisi vardır (Jackson 1999, Wangler 2008).

İçe girintili klaystron kavitesinin geometrik şeklinin belirlenmesi, kavitenin ω rezonans frekansının bulunmasını sağlamaktadır. Bunun rezonans frekansı ve kavite yapımında kullanılan duvar malzemesinin iletkenlik özellikleri, kavitenin kalite faktörü olarak nitelendirilen Q 'nun belirleyicileridir.

Bununla ilgili olarak, TM_{010} modunda çalışan bir kavite için güç dağılımı hesaplanmalıdır. Bunun için gerekli olan, bütün yüzey boyunca H_φ^2 'nin integralinin alınmasıdır. Eğer H_φ 'nin maksimum olduğu an seçilirse,

$$|H_\varphi| = E_0 \frac{\varepsilon\omega_{010}}{k_{01}} J_0'(k_{01}r) \quad (3.11)$$

denklemi elde edilir. E_0 eksen üzerindeki elektrik alanın pik değeri, TM_{010} modunda $\omega = k_{01}/\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}$ 'dir. Böylece denklem (3.11)'deki $\varepsilon\omega/k_{01}$ yerine $1/Z$ yazılabilir. Toplam güç kaybı ise, biri yanal sınırlar için olan, diğeri de tabanlardaki kısımlar için olan iki integral ile hesaplanabilir.

$$P_{\text{yan}} = R_s \frac{E_0^2}{Z^2} \int_0^d dz \int_0^{2\pi} a d\varphi [J_0'(k_{01}a)]^2 = \frac{2\pi R_s E_0^2 da}{Z^2} [J_0'(z_{01})]^2 = \frac{2\pi R_s E_0^2 da}{Z^2} J_1^2(z_{01}) \quad (3.12)$$

Burada, $J_0'(R) = -J_1(R)$ eşitliği kullanılmıştır.

$$P_{\text{tab}} = R_s \frac{E_0^2}{Z^2} \int_0^a r dr \int_0^{2\pi} d\phi [J_0'(k_{01}r)]^2 \quad (3.13)$$

Denklem (3.14)'de ise Bessel fonksiyonunun üç özelliği

$$\int_0^1 R dR [J_n(QR)]^2 = \frac{1}{2} \left\{ [J_n'(Q)]^2 + \left(1 - \frac{n^2}{Q^2}\right) [J_n(Q)]^2 \right\} \quad (3.14.a)$$

$$J_n'(Q) = \frac{1}{2} [J_{n-1}(Q) - J_{n+1}(Q)] \quad (3.14.b)$$

$$J_{n+1}(Q) - J_{n-1}(Q) = \frac{2n}{Q} J_n(Q) \quad (3.14.c)$$

verilmiştir. $J_0' = -J_1$ eşitliği kullanıldığında

$$\int_0^a r dr [J_0'(z_{01}r/a)]^2 = \frac{a^2}{2} J_1^2(z_{01}) \quad (3.15)$$

denklemini elde edilir. Böylece denklem (3.15)'deki integralin çözümü

$$P_{\text{tab}} = \frac{\pi R_s E_0^2 a^2}{Z^2} J_1^2(z_{01}) \quad (3.16)$$

şeklinde elde edilir. İki taban olduğu ve zaman ortalamalı güç kaybının manyetik alanın pik noktasında hesaplanan kaybın yarısı olduğu hatırlanarak tüm denklemler bir araya getirilirse,

$$P_{\text{kav}} = \frac{\pi R_s E_0^2}{Z^2} J_1^2(z_{01}) a(d + a) \quad (3.17)$$

denklemini elde edilir. Denklem (3.6) ile (3.17) karşılaştırıldığında, kavitede depolanan enerji ve birim zamandaki kayıp E_0^2 ile orantılıdır. Böylece, kavitede depolanan enerji, kaynak tarafından aktarılan enerji kadar yükselecektir ve duvarlardaki güç kaybı (depolanan enerji ile orantılı) kadar da düşecektir. Bazı durumlarda depolanan enerji, duvarlardaki güç kaybının kaynaktan gelen güce eşit olduğu duruma kadar büyüyecektir.

Bir RF periyodu boyunca, depolanan enerjinin güç kaybına oranı boyutsuz bir nicelik olan kalite faktörü (Q) değerini vermektedir.

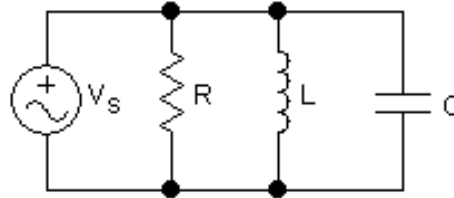
$$\frac{\omega U}{P_{kav}} = \frac{z_{01} Z d}{R_s(d+a)} \equiv z_{01} \frac{Z}{2R_s} \frac{d}{a} \frac{1}{(1+d/a)} = Q \quad (3.18)$$

Bu denklemde $P_{kav} \equiv dU/dt$ şeklindedir ve bu denklem dıştan güç kaynağı olmadığı zamanki depolanan enerjiyi tanımlar.

$$U = U_{t=0} e^{-\omega t/Q} \quad (3.19)$$

3.1.3 Silindirik kavite için paralel RLC eş değer devresi

Bir RF kavitenin eş değer devresi için gerekli olan parametreler kavitenin direnci (R), indüktansı (L) ve kapasitansı (C)'dir. Bu üç devre elemanı paralel olarak bağlandığı zaman kavitenin eş değer devresi şekil 3.1'deki gibi oluşturulur.



Şekil 3.1 Eş değer Paralel RLC devresi

Bölüm 3.1'de bulunan kavitenin kalite faktörü (Q), $\frac{R}{Q}$ değeri ve kavitenin açısal rezonans frekans değerini (ω) kullanarak paralel devre elemanlarını ifade etmek mümkün olacaktır (Wille 2000).

Buna göre paralel RLC devresinde şönt empedansı tanım olarak

$$R_{kav} = R_{şönt} = Q \left(\frac{L}{C} \right)^{1/2} = Q \frac{R}{Q} = \frac{V^2}{P_{kav}} = \frac{Z^2 d^2}{\pi R_s I_1^2(z_{01}) a(d+a)} \quad (3.20)$$

şeklinde verilir (Hansen 1938, Tenenbaum 2003).

Ayrıca, devrenin indüktans (L) değeri

$$L = \frac{1}{\omega} \frac{R}{Q} \quad (3.21)$$

ve kapasitans (C) değeri

$$C = \frac{1}{\omega} \left(\frac{R}{Q} \right)^{-1} \quad (3.22)$$

eşitlikleriyle tanımlanır (Hansen 1938, Pozar 1998, Caspers 2012). Bu eş değer RLC devre elemanları için yapılan analitik hesaplamalar ve SUPERFISH programından alınan nümerik sonuçlar Bölüm 4'te detaylı olarak incelenecektir.

3.2 İçe Girintili Dar Aralıklı Klaystron Kavitesi İçin Kalite Faktörü ve Eş Değer Devre Değerleri

Bölüm 2.3'de belirtildiği üzere içe girintili ve dar aralıklı rezonatör kavitesi için kalite faktörü ve eş değer devre elemanları belirli bir hata payı ile analitik olarak bulunabilmektedir.

Bunun için öncelikle rezonans frekans değerini içe girintili ve dar aralıklı kavite için bazı varsayımlar ve yaklaşımlar kullanılarak belirli bir hata payı ile elde edilmesini sağlayan eşitlik, denklem (3.23) ile ifade edilir (Slater 1969, Rivier ve Verge-Lapisardi 1971, Barosso vd. 2005, Barroso ve Leite Neto 2006, Barroso ve Leite Neto 2008).

$$f_o(d) = \frac{z_{01}}{2\pi} \frac{c}{r_2} \frac{1-e^{-v\sqrt{d/l}}}{1-e^{-v}} \quad (3.23)$$

Bu denklemde içe girintili ve dar aralıklı bir klaystron kavitesinde d/l 'nin belirli bir değeri için v değeri denklem (3.24) yardımıyla yaklaşık olarak hesaplanabilir (Tiwari ve Hannurkar 2010).

$$v \cong 2 \ln \left(\frac{\sqrt{2}}{z_{01}} \frac{(r_2/r_1)}{\ln\sqrt{(r_2/r_1)}} \right) \quad (3.24)$$

Daha sonra içe girintili ve dar aralıklı klaystron kavitesinin indüktans (L) değeri ve deri kalınlığı (δ) aşağıda verilen denklem (3.25) ve (3.26) ile bulunur (Rosenzweig 2003, Barroso vd. 2005).

$$L = \mu_0 \left(\frac{l}{2\pi} \right) \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right) \quad (3.25)$$

$$\delta = \frac{2}{\sqrt{2\pi f(l)\mu_0\sigma}} \quad (3.26)$$

Kavitenin geometri değerlerini ve kavite için yukarıda bulunan deri kalınlığı (denklem 3.26) değerlerini kullanarak içe girintili ve dar aralıklı klaystron kavitesi için belirli bir yaklaşıklıkla kalite faktörünü hesaplamak da mümkündür. (Barroso vd. 2005, Barroso ve Leite Neto 2008).

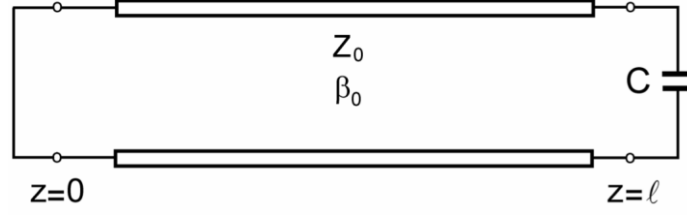
$$\frac{1}{Q} = \delta \left(\frac{1}{l} + \frac{\frac{l-d}{r_1} + \frac{1}{r_2}}{2 \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)} \right) \quad (3.27)$$

$$Q = \frac{1}{\delta} \left(\frac{2l \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)}{\frac{l-d}{r_1} + \frac{1}{r_2} + 2 \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)} \right) \quad (3.28)$$

İletim hattı ve empedans kavramlarını kullanarak uygulama kolaylığı sağlayan mühendislik yaklaşımları da RLC eş değer devre elemanlarını bulmakta kullanılan diğer yöntemler arasında yer almaktadır. Bu yöntemi kullanarak kapasitans değerlerini biraz daha gerçeğe yakın olarak bulmak mümkün olacaktır (Barroso vd. 2003). Bu yaklaşımın da ayrıntısı şu şekilde açıklanabilir.

Şekil 2.2'deki kavitenin dar d (gap) aralıklı kısmı bir C kapasitörü gibi, diğer kısımlar ise sonlandırılmalı (terminated) eş eksenli bir iletim hattı gibi düşünülebilir (Barroso vd. 2003). d'nin, rezonans dalga boyundan (λ) çok daha küçük olması halinde toplanmış

(lumped) devre elemanı kavramı geçerlidir, bu nedenle kavite kapasitörle sonlandırılmış bir eş eksenli hat gibi işleme sokulabilir (Şekil 3.2).



Şekil 3.2 İçe girintili klaystron kavitesinin eş değer devresi (Barroso vd. 2003)

Bu durumda, l uzunluklu, r_2 dış yarıçaplı, r_1 iç yarıçaplı ve C sonlandırma kapasitanslı bir hat için rezonans koşulu sistemin toplam empedansının sıfır olmasını gerektirir. Böylece

$$jZ_0 \tan \beta_0 l + \frac{1}{j\omega_0 C} = 0 \quad (3.29)$$

$$\lambda_0 = r_1 \sqrt{2\pi^2 \frac{l}{d} \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (3.30)$$

denklemleri yazılır. Denklem (3.29)'da, $\beta_0 = 2\pi/\lambda_0 = \omega_0 \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$, $Z_0 = \left(\frac{1}{2}\right) \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} \ln(r_2/r_1)$ ve dar aralık kapasitans $C_0 = \epsilon_0(\pi r_1^2/d)$ şeklinde tanımlanmıştır. Denklem (3.29), basit hali ile rezonans frekansının doğru belirlenmesine yeterli değildir, bazen frekansta %40'lara varan hatalara neden olabilir, çünkü bu denklemin çıkarımında, eş eksen kısım ile dar aralıklı kısım arasındaki geçiş bölgesine yanlış saçaklanmış alanlardan ileri gelen kapasitansı hesaba katmamıştır. Bu ek kapasitans değeri

$$C_1 = 4\epsilon_0 r_1 \ln \frac{e^{\sqrt{(r_2^2 - r_1^2) + l^2}}}{2d} \quad (3.31)$$

şeklinde yaklaşık hesaplanıp C_0 'a eklendiğinde, eş değer devresi doğruluğunu iyileştirir (Barroso vd. 2003).

$$C = C_0 + C_1 \quad (3.32)$$

Son olarak bulunan kalite faktörü, açısal frekans ve kapasitans değerleri kullanılarak şönt empedans değerini de denklem (3.34) ile yaklaşık olarak bulmak mümkün olacaktır.

$$Q = \omega C R_{\text{şönt}} \quad (3.33)$$

$$R_{\text{şönt}} = \frac{Q}{\omega C} \quad (3.34)$$

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 Silindirik Kavite için Hesaplanabilir Değerler

Bu bölümde, Bölüm 3.1’de genel hesaplamaları verilen silindirik kontrol kavitesinin hesaplanabilir değerleri olan kalite faktörü (Q), R/Q, voltaj (V), depolanan toplam enerji (U), harcanan güç (P_{kav}) değerleri analitik olarak hesaplanmıştır. Daha sonra açılmal frekans (ω), kalite faktörü ve R/Q değerleri kullanılarak kavitenin eş değer devre elemanlarını ifade eden şönt empedansı (R_{kav}), indüktans (L) ve kapasitans (C) değerleri de hesaplanmıştır.

Silindirik bir kavite için kalite faktörü hesabına denklem (3.18) ve denklem (3.20)’den yararlanılarak başlanmıştır. Denklem (3.18)’de, 459 MHz’lik rezonans frekansının elde edilebilmesi için yarıçap değeri $a = 25$ cm alınarak; bakır malzemeden yapılmış silindirik bir kavite için kalite faktörü Q değerinin hesabı yapılmıştır.

Bunun için öncelikle 459 MHz’lik silindirik bakır bir kavitenin yüzey direnci (R_s) değeri bulunup kalite faktörünün hesabında uygun geometri boyutları ile kullanılarak aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir. Daha sonra bu kalite faktörü hesabı sonuçları, depolanan toplam enerji ve harcanan enerji hesabı için kullanılmıştır. Son olarak R/Q ve şönt empedansı değerleri hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamaların detayları aşağıda sırasıyla gösterilmektedir.

Kalite Faktörü (Q) Hesabı

Silindirik bir kavitenin kalite faktörü (Q) değeri, denklem (3.18) kullanılarak hesaplanır. Bunun için, öncelikle boş uzayın empedans değeri (Z), $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Vs/Am ve $\epsilon_0 = 8.8854 \times 10^{-12}$ F/m ve alınarak hesaplanmıştır.

$$Z = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = \sqrt{\frac{1.25664 \times 10^{-6}}{8.8854 \times 10^{-12}}} \cong 377 \Omega$$

Daha sonra malzemenin deri kalınlığı (δ) değeri, manyetik sabit (μ_0), açısal frekans değeri ω_{01} ve bakırın öz iletkenlik katsayısı kullanılarak bulunur.

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu_0 \omega_{01} \sigma_{Cu}}} = \sqrt{\frac{2}{(4\pi \times 10^{-7} \frac{A}{N})(2.88 \times 10^9 \text{ Hz})(5.8 \times 10^7 \frac{S}{m})}} = 3.08 \times 10^{-6} \text{ m} = 3.08 \mu\text{m}$$

Sonrasında 3. Bölüm'de bahsedilen $R_s = 1/\sigma\delta$ eşitliğinden yararlanılarak yüzey direnci (R_s) değeri

$$R_s = \frac{1}{(5.8 \times 10^7 \frac{\Omega}{m})(3.08 \times 10^{-6} \text{ m})} = 5.59 \times 10^{-3} \Omega = 5.59 \text{ m}\Omega$$

olarak hesaplanır. Denklem (3.20)'den yararlanılarak ve şönt empedans değeri $5.59 \text{ m}\Omega$ alınarak kalite faktörü değeri (Q)

$$Q = 2.405 \frac{377 \Omega}{5.59 \times 10^{-3} \text{ m}} \frac{0.285 \text{ m}}{0.25 \text{ m}} \frac{1}{2(1 + \frac{0.285 \text{ m}}{0.25 \text{ m}})} = 43099.3$$

olarak bulunur.

Depolanan Toplam Enerjinin (U) Hesabı

Silindirik kavitede depolanan toplam enerji (U) ifadesi denklem (3.6)'da $\epsilon_0 = 8.8854 \times 10^{-12} \frac{F}{m}$, $E_0 = 1 \text{ MeV} = 1 \times 10^6 \text{ eV}$, $a = 25 \text{ cm} = 0.25 \text{ m}$, $d = 28.5 \text{ cm} = 0.285 \text{ m}$, $J_1(z_{01}) = 0.519$ alınarak,

$$U = \frac{\pi}{2} \left(8.8854 \times 10^{-12} \frac{F}{m} \right) (1 \times 10^6 \text{ eV})^2 (0.25 \text{ m})^2 (0.285 \text{ m}) (0.519)^2$$

$$= 0.067005816 \text{ Joule}$$

elde edilir.

Harcanan Gücün (P_{kav}) Hesabı

Silindirik kavitenin yan yüzeyi ile birlikte alt ve üst tabanlardaki toplam yüzeyinde harcanan gücün (P_{kav}) hesabı denklem (3.17) ile ifade edilir. Bu denklemde $R_s = 5.59 \text{ m } \Omega$, $E_0 = 1 \text{ MeV} = 1 \times 10^6 \text{ eV}$, $Z = 377 \text{ } \Omega$, $J_1(z_{01}) = 0.519$, $a = 25 \text{ cm} = 0.25 \text{ m}$ ve $d = 28.5 \text{ cm} = 0.285 \text{ m}$ alınarak yapılan hesaplama sonucunda aşağıdaki değer elde edilir.

$$P_{kav} = \frac{\pi(5.59 \times 10^{-3} \text{ m})(1 \times 10^6 \text{ eV})^2}{(377 \text{ } \Omega)^2} (0.519)^2 (0.25 \text{ m})(0.285 \text{ m} + 0.25 \text{ m})$$
$$= 4475.83 \text{ Watt}$$

R/Q Değerinin Hesabı

Silindirik bir kavitede R/Q değerinin hesaplanması için açılal frekans değerinin bilinmesi gerekmektedir. Bunun için denklem (2.17)'den yararlanılıp bulmak için gerekli düzenleme yapıldıktan sonra açılal rezonans frekans değeri,

$$\omega = \frac{(2.405)(2.99792 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}})}{0.25 \text{ m}} = 2.88 \times 10^9 \text{ Hz}$$

olarak bulunur.

Daha sonra denklem (3.8)'den yararlanılarak R/Q değeri,

$$\frac{R}{Q} = \frac{2}{\pi(2.405)(0.519)^2} \frac{0.285 \text{ m}}{0.25 \text{ m}} \sqrt{(1.25664 \times 10^{-6}) / (8.8854 \times 10^{-12})}$$

$$= 421.0651$$

olarak hesaplanır.

4.2 Silindirik Kavite için Hesaplanan Analitik Değerlerin SUPERFISH Programıyla Kıyaslanması

Silindirik bir kavite için eş değer devre elemanları yazılmak istenirse; şönt empedans değeri ($R_{\text{şönt}}$), denklem (3.17)'de $E_0 = 1 \text{ MeV} = 1 \times 10^6 \text{ eV}$, $d = 28.5 \text{ cm} = 0.285 \text{ m}$ ve $P_{\text{kav}} = 4475.83 \text{ Watt}$ olarak alınıp

$$R_{\text{şönt}} = \frac{(377 \Omega)^2 (0.285 \text{ m})^2}{\pi (5.59 \times 10^{-3} \text{ m}) (0.25 \text{ m}) (0.285 \text{ m} + 0.25 \text{ m})} = 18.1475 \times 10^6 = 18.1475 \text{ M}\Omega$$

olarak elde edilir.

Eş değer paralel RLC devresinde, indüktans (L) değeri denklem (3.21)'den yararlanılarak ve $\omega = 2.88 \times 10^9 \text{ Hz}$, $\frac{R}{Q} = 421.0615$ alınarak

$$L = \frac{1}{2.88 \times 10^9 \text{ Hz}} \times 421.0615 = 1.46 \times 10^{-7} = 146 \text{ nH}$$

olarak bulunur.

Aynı eş değer devre için kapasitans (C) değeri ise denklem (3.22)'den yararlanılarak ve $\omega = 2.88 \times 10^9 \text{ Hz}$, $\left(\frac{R}{Q}\right)^{-1} = 2.3749 \times 10^{-3}$ alınarak

$$C = \frac{1}{2.88 \times 10^9 \text{ Hz}} \cdot \left(\frac{1}{421.0615}\right)^{-1} = 8.23496718 \times 10^{-13} = 0.82 \text{ pF}$$

olarak elde edilir.

459 MHz'lik rezonans frekansına sahip bakır malzemedeki yapılmış silindirik bir kavite için analitik olarak hesaplanan bu değerler ve SUPERFISH programı sonuçlarının karşılaştırılması çizelge 4.1'de verilmektedir.

Çizelge 4.1 459 MHz' lik silindirik kavite için analitik olarak hesaplanan kavite değerleri ile SUPERFISH programından elde edilen sonuçların karşılaştırılması

Parametre	Sembol	Birim	Analitik Değer	SUPERFISH
Frekans	f	[Hz]	459×10^6	458.96×10^6
Açısal frekans	ω_{01}	[Hz]	288.40×10^7	288.37×10^7
Işık hızı	c	[m/s]	2.99792458×10^8	2.99792458×10^8
Dalga boyu	λ	[m]	0.65314	0.65319
Yarıçap	a	[m]	0.25	0.25
Kavitenin uzunluğu	d	[m]	0.285	0.285
Dalga sayısı	k	[Radyan/cm]	$9.61992865 \times 10^{-2}$	9.6192300×10^{-2}
Bessel fonksiyonun 1. Kökü	z_{01}		2.405	2.405
1. indisli 1.tip Bessel fonksiyonu	$J_1(z_{01})$		0.519153015	0.519153015
Boşluğun dielektrik sabiti	ϵ_0	[F/m]	8.8854×10^{-12}	8.8854×10^{-12}
Manyetik geçirgenlik	μ_0	[H/m]	1.25664×10^{-6}	1.25664×10^{-6}
Boş uzayın empedansı	Z	[Ω]	376.0680518	376.0680518
Elektrik alan	E_0	[V/m]	1000000	1000000
Voltaj	V	[V]	2.5×10^5	2.5×10^5
Bakırın öz iletkenlik katsayısı	σ	[S/m]	5.8×10^7	5.8×10^7
Bakırın direnci	ρ	[Ω -m]	1.7241×10^{-8}	1.7241×10^{-8}
Metal yüzeyin deri kalınlığı	δ	[m]	3.08×10^{-6}	3.08×10^{-6}
Yüzey direnci	R_s	[Ω]	5.59×10^{-3}	5.58925×10^{-3}
Kalite faktörü	Q		43099.3	43164.0
Harcanan güç	P_{kavite}	[W]	4475.831	4446.2166
Toplam depolanan enerji	U	[J]	0.067005816	0.0665505
Geometrik faktör	R/Q		4.210615×10^2	4.23×10^2
Birim uzunluk başına geometrik faktör	r/Q		8.48	8.54
Geçiş açısı (transit angle)	ψ	[Derece]	2.76910	2.76890
Transit geçiş zaman faktörü	T		0.177	0.142079
Şönt empedansı	$R_{şönt}$	[Ω]	1.81475×10^7	1.82265×10^7
İndüktans	L	[H]	1.46000×10^{-7}	$1.46771063 \times 10^{-7}$
Kapasitans	C	[F]	$8.23466718 \times 10^{-13}$	$8.1928759 \times 10^{-13}$

SUPERFISH programından elde edilen sonuçların yapılan analitik hesaplamalarla tutarlılık içinde olduğunu bir defa daha farklı bir geometriye ve rezonans frekansı

değerine sahip ikinci bir silindirik kavite için yapıldığında yine birbirine çok yakın sonuçlar elde edilmiştir (Çizelge 4.2).

Çizelge 4.2 650 MHz' lik silindirik kavite için analitik olarak hesaplanan kavite değerleri ile SUPERFISH programından elde edilen sonuçların karşılaştırılması

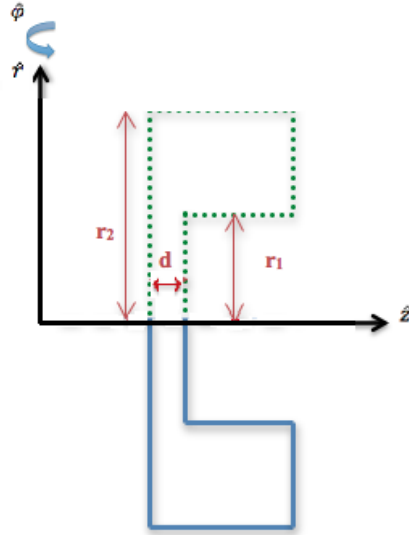
Parametre	Sembol	Birim	Analitik Değer	SUPERFISH
Frekans	f	[Hz]	650×10^6	650.089×10^6
Açısal frekans	ω_{01}	[Hz]	408.41×10^7	408.46×10^7
Işık hızı	c	[m/s]	2.99792458×10^8	2.99792458×10^8
Dalga boyu	λ	[m]	0.46122	0.46116
Yarıçap	a	[m]	0.1765	0.176500
Kavitenin uzunluğu	d	[m]	0.20	0.20
Dalga sayısı	k	[Radyan/cm]	0.1362299	0.1362502
Bessel fonksiyonun 1. kökü	z_{01}		2.405	2.405
1. indisli 1.tip Bessel fonksiyonu	$J_1(z_{01})$		0.519153015	0.519153015
Boşluğun dielektrik sabiti	ϵ_0	[F/m]	8.8854×10^{-12}	8.8854×10^{-12}
Manyetik geçirgenlik	μ_0	[H/m]	1.25664×10^{-6}	1.25664×10^{-6}
Boş uzayın empedansı	Z	[Ω]	376.0680518	376.0680518
Elektrik alan	E_0	[V/m]	1000000	1000000
Voltaj	V	[V]	2.0×10^5	2.0×10^5
Bakırın iletkenlik katsayısı	σ	[S/m]	5.8×10^7	5.8×10^7
Bakırın direnci	ρ	[Ω -m]	1.7241×10^{-8}	1.7241×10^{-8}
Metal yüzeyin deri kalınlığı	δ	[m]	2.5921×10^{-6}	2.5919×10^{-6}
Yüzey direnci	R_s	[Ω]	6.65×10^{-3}	6.65×10^{-3}
Kalite faktörü	Q		36115.5	36157.7
Harcanan güç	P_{kav}	[W]	2646.3056	2620.7381
Toplam depolanan enerji	U	[J]	0.023437271	0.0231991
Geometrik faktör	R/Q		418.38	422.12
Birim uzunluk başına geometrik faktör	r/Q		9.21	9.31
Geçiş açısı (transit angle)	Ψ	[Derece]	2.7518	2.7522
Transit geçiş zaman faktörü	T		0.178	0.1485
Şönt empedansı	$R_{sönt}$	[Ω]	1.51098×10^7	1.51690×10^7
İndüktans	L	[H]	$1.02440606 \times 10^{-7}$	$1.03342282 \times 10^{-7}$
Kapasitans	C	[F]	$5.85249983 \times 10^{-13}$	$5.79984155 \times 10^{-13}$

SUPERFISH programının silindirik kaviteleer için analitik hesaplamalarla son derece tutarlı sonuçlar verdiğini göstermek için farklı geometrilere sahip ve farklı rezonans frekans değerlerine sahip iki farklı kavite kullanılarak izelge 4.1 - 4.2' de hesaplamaların sonuçları gösterilmiştir.

Görüldüğü gibi SUPERFISH programıyla bulunan kalite faktörü, şönt empedansı, indüktans, kapasitans değerleri ile silindirik kavitenin analitik olarak hesaplanan kalite faktörü, şönt empedansı, indüktans, kapasitans değerleri çok yakın bir şekilde uyulmaktadır. Böylece SUPERFISH programının rastgele şekilli bir kavite için de doğru değerler vereceği gösterilmiş olmaktadır. Bu sonucu gözönüne alarak ie girintili ve dar aralıklı bir klaystron kavite geometrisi için de benzer hesaplamaları yapmak artık mümkün olacaktır.

4.3 İe Girintili Klaystron Kavitesi için Bulunan Analitik Q Değerinin SUPERFISH Koduyla Kıyaslanması

şekil 4.1'de gösterilen ve boyutları $r_1 = 20\text{mm}$, $r_2 = 40\text{mm}$, $l = 22\text{mm}$ ve $d = 2\text{mm}$ (Barroso ve Leite Neto 2008) olan ve rezonans frekansı 1 GHz civarındaki bir ie girintili ve dar aralıklı klaystron kavitesi gösterilmektedir.



şekil 4.1 İe girintili ve dar aralıklı klaystron kavitesi (Barroso ve Leite Neto 2008)

Bunun için öncelikli olarak bu kavite için rezonans frekans değerini bazı varsayımlar ve yaklaşımlar kullanılarak belirli bir hata payı ile elde etmemizi sağlayan denklem (3.23) kullanılır (Barroso ve Leite Neto 2008). Bu denklemde öncelikle yukarıda verilen içe girintili ve dar aralıklı klaystron kavitesi için denklem (3.23)'deki v değeri $r_2 = 40 \text{ mm} = 0.04 \text{ m}$, $r_1 = 20 \text{ mm} = 0.02 \text{ m}$, $d = 2 \text{ mm} = 0.002 \text{ m}$ ve $l = 22 \text{ cm} = 0.022 \text{ m}$ için denklem (3.24)'ten

$$v \cong 2 \ln \left(\frac{\sqrt{2}}{2.4048} \frac{\left(\frac{0.04 \text{ m}}{0.02 \text{ m}} \right)}{\ln \sqrt{\frac{0.04 \text{ m}}{0.02 \text{ m}}}} \right) \cong 0.691$$

olarak bulunur.

Daha sonra denklem (3.23)'de $z_{01} = 2.405$, $c = 2.99792458 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, $r_2 = 0.04 \text{ m}$, $v \cong 0.691$ ve $\sqrt{d/l} = \sqrt{0.002 \text{ m}/0.022 \text{ m}} = 0.30151134$ değerleri yerine konarak

$$f_o(d) = \frac{2.4048}{2\pi} \frac{2.99792458 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{0.04 \text{ m}} \frac{1 - e^{-(0.691)(0.30151134)}}{1 - e^{-0.691}} \cong 1.1285 \times 10^9 \text{ s}^{-1} \cong 1.1285 \text{ GHz}$$

olarak hesaplanır. Buradan açılmal rezonans frekansı değeri

$$\omega = 2\pi f_o(d) = 7.09 \times 10^9 \text{ Hz} = 7.09 \text{ GHz}$$

olarak bulunur.

Daha sonra indüktans (L) değeri denklem (3.25)'te $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} = 1.25664 \frac{\text{H}}{\text{m}}$ alınarak

$$L = \left(1.25664 \frac{\text{H}}{\text{m}} \right) \left(\frac{0.022 \text{ m}}{2\pi} \right) \ln \left(\frac{0.04 \text{ m}}{0.02 \text{ m}} \right) = 3.0498 \times 10^{-9} \text{ H} = 3.0498 \text{ nH}$$

olarak bulunur.

Kavitenin deri kalınlığı (δ) değeri denklem (3.26)'da açısız rezonans frekansı değeri $\omega = 7.09$ GHz, bakır için manyetik sabit $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \frac{Vs}{Am}$, öz iletkenlik katsayısı $\sigma_{Cu} = 5.8 \times 10^7$ S/m, olarak alınarak şu şekilde bulunur (Slater 1969, Rivier ve Verge-Lapisardi 1971, Barosso vd. 2005).

$$\delta = \frac{2}{\sqrt{2\pi(1.1285 \times 10^9 \text{ s}^{-1})(1.256664 \times 10^{-6} \frac{Vs}{Am})(5.8 \times 10^7 \frac{S}{m})}} = 2.78 \times 10^{-6} \text{ m}$$

olarak hesaplanır.

Daha sonra kavitenin geometri değerlerini ve yukarıda denklem (3.26)'dan yararlanılarak bulunan deri kalınlığı değerini kullanarak içe girintili ve dar aralıklı klaystron kavitesi için belirli bir yaklaşıklıkla kalite faktörünü hesaplamak mümkün olacaktır (Barroso vd. 2005, Barroso ve Leite Neto 2008).

Denklem (3.27)'de deri kalınlığı ve kavitenin geometrik değerleri kullanılarak kalite faktörü şu şekilde hesaplanır.

$$\frac{1}{Q} = 2.81 \times 10^{-6} \text{ m} \left(\frac{1}{0.022 \text{ m}} + \frac{(0.022 \text{ m} - 0.002 \text{ m})/0.02 \text{ m} \cdot 0.022 \text{ m} + \frac{1}{0.04 \text{ m}}}{2 \ln\left(\frac{0.04 \text{ m}}{0.02 \text{ m}}\right)} \right)$$

$$Q = 5660.26$$

olarak bulunur.

Kapasitans değeri Bölüm 3'te bahsedilen mühendislik yöntemleri ile bulunmak istenirse

$$C_0 = \epsilon_0(\pi r_1^2/d) = 5.583 \times 10^{-12} \text{ F} \cong 5.583 \text{ pF}$$

$$C_1 = 4\epsilon_0 r_1 \ln \frac{e\sqrt{(r_2^2 - r_1^2) + l^2}}{2d} \cong 2.2546 \times 10^{-12} \text{ F} \cong 2.255 \text{ pF}$$

$$C_{\text{düzeltmiş}} = C_0 + C_1 = 7.837 \times 10^{-12} \text{ F} \cong 7.837 \text{ pF}$$

olarak elde edilir (Barroso vd. 2003).

Daha sonra denklem (3.34)'ü kullanarak, kalite faktörü, açılmal frekans ve kapasitans değerleri ile şönt empedans değerini de yaklaşık olarak bulmak mümkün olacaktır.

$$R_{\text{şönt}} = \frac{Q}{\omega C} = \frac{5660.26}{(7.09 \times 10^9 \text{ Hz})(7.837 \times 10^{-12} \text{ F})} = 1.01849 \times 10^5 \Omega$$

Yukarıda içe girintili ve dar aralıklı klaystron kavitesi için analitik olarak hesaplanan (Rivier ve Verge-Lapisardi 1971, Barroso vd. 2003, Barroso ve Leite Neto 2008, Tiwari ve Hannurkar 2010) ve SUPERFISH ile elde edilen değerler çizelge 4.3'te karşılaştırılmıştır.

Barroso ve Leite Neto (2008)'deki analitik hesaplamalar sonucu elde edilen grafiksel değerler ile SUPERFISH programında elde edilen nümerik sonuçlar (EK.3) ile karşılaştırıldığında içe girintili klaystron kavitesi için kalite faktörü yaklaşık %6'lık bir hata payı ile birbiriyle eşleşmektedir. Bu hataların kaynağı kavitenin içe girintili kısımlarında meydana gelen güç kayıplarının hesaplanma zorluğudur. Görülen hata payı istenilen küçüklükte olmadığı için içe girintili klaystron kavitelesinin kalite faktörü hesabında analitik yöntemler kullanmak yerine SUPERFISH programı kullanılarak gerçeğe daha yakın sonuçlar elde edilebilmektedir.

İçe girintili ve dar aralıklı klaystron kavitesinin eş değer RLC devresi için yapılan hesaplamalarda yine kalite faktörüne bağlı olarak yapıldığından bu devrenin kapasitans, indüktans ve şönt empedansı değerleri de çizelge 4.3'teki hata payları ile bulunmuştur. Kapasitans değerini biraz daha düzeltmek için mühendislik yöntemler kullanılsa dahi bu değerlerin SUPERFISH programından elde edilen değere sadece biraz daha yaklaşarak iyileşme gösterdiği görülmektedir.

Çizelge 4.3 İçe Girintili ve dar aralıklı klaystron kavitesi için analitik olarak hesaplanan değerlerin SUPERFISH'den elde edilen değerlerle karşılaştırılması (Rivier ve Verge-Lapisardi 1971, Barroso vd. 2003, Barroso ve Leite Neto 2008, Tiwari ve Hannurkar 2010)

Parametre	Sembol	Birim	Analitik Değer	SUPERFISH	Hata Payı (%)
Frekans	f	[Hz]	1.1285×10^9	1.04236000×10^9	8.27
Açısal frekans	ω_{01}	[Hz]	7.09×10^9	6.55×10^9	8.27
Işık hızı	c	[m/s]	2.997924580×10^8	2.99792458×10^8	
Bessel fonksiyonun 1. Kökü	z_{01}		2.4048	2.405	
1. indisli 1.tip Bessel fonksiyonu	$J_1(z_{01})$		0.519153015	0.519153015	
Geometrik orantı faktörü	v		0.69102		
Karekök v	$\sqrt{(d/l)}$		0.301511345		
Silindirin dış yarıçapı	r_1	[m]	0.02	0.02	
Silindirin iç yarıçapı	r_2	[m]	0.04	0.04	
Dar aralık	d	[m]	0.002	0.002	
Kavite yüksekliği	l	[m]	0.022	0.022	
Dalga boyu	λ	[m]	0.26564	1.0000×10^{-1}	
Dalga sayısı	k	Radyan/cm	0.236533914	0.2185906	8.21
Boşluğun dielektrik sabiti	ϵ_0	[F/m]	8.8854×10^{-12}	8.8854×10^{-12}	
Manyetik geçirgenlik	μ_0	[A/N]	1.25664×10^{-6}	1.25664×10^{-6}	
Metal yüzeyin deri kalınlığı	δ	[m]	2.78×10^{-6}	2.92×10^{-6}	3.90
Bakırın öz iletkenlik katsayısı	σ	[S/m]	5.8×10^7	5.8×10^7	
Elektrik alan	E_0	[V/m]	1000000	1000000	
Voltaj	V	[V]	2000	2000	
Toplam depolanan enerji	U	[J]		1.42×10^{-5}	
Harcanan güç	P_{kavite}	[W]		10.4279	
Transit geçiş zaman faktörü	T			0.9997	
Geometrik faktör	R/Q			21.6	
Kalite faktörü	Q		5660.36	5313.47	6.13
Şönt empedansı	$R_{\text{şönt}}$	[Ω]	1.01848×10^5	1.14×10^5	12.43
İndüktans	L	[H]	3.0498×10^{-9}	2.67313×10^{-9}	7.89
Dar aralıktaki kapasitans	C_0	[F]	5.58286×10^{-12}		
Ek kapasitans	C_1	[F]	2.2546×10^{-12}		
Düzeltilmiş kapasitans	$C_{\text{düzelt}}$	[F]	7.83742×10^{-12}	7.085×10^{-12}	10.62

5. SONUÇ

Yapılan bu yüksek lisans tezi doğrultusunda en basit geometrilili rezonans kavite biçimi olan silindirik kaviteden başlayarak kalite faktörü ve aynı kavite için eş değer devre elemanları olan şönt empedansı, indüktans ve kapasitans değerleri öncelikle analitik olarak detaylı bir biçimde 459 MHz ve 650 MHz'lik bakırdan yapılmış kavite için hesaplanarak bulunan değerler çizelge 4.1 - 4.2'de gösterilmiştir. Daha sonra bu aynı iki kavite geometrisi için yine kalite faktörü ve eş değer devre elemanlarının değerleri SUPERFISH programı ile elde edilmiştir. Analitik olarak hesaplanan ve SUPERFISH programı ile nümerik olarak bulunan değerler bir kez daha 459 MHz ve 650 MHz'lik bu iki kavite için çizelge 5.1 - 5.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.1 459 MHz'lik silindirik kavitede Q ve eş değer devre için yapılan analitik hesaplamaların SUPERFISH programı nümerik sonuçlarıyla kıyaslanması

Parametre	Sembol	Birim	Analitik Değer	SUPERFISH
Metal yüzeyin deri kalınlığı	δ	[m]	3.08×10^{-6}	3.08×10^{-6}
Yüzey direnci	R_s	[Ω]	5.59×10^{-3}	5.58925×10^{-3}
Kalite faktörü	Q		43099.32	43164
Harcanan güç	P_{kavite}	[W]	4475.83	4446.21
Toplam depolanan enerji	U	[J]	0.067005816	0.0665505
Geometrik faktör	R/Q		4.21×10^2	4.23×10^2
Şönt empedansı	$R_{şönt}$	[Ω]	1.81475×10^7	1.82265×10^7
İndüktans	L	[H]	1.4597×10^{-7}	1.4677×10^{-7}
Kapasitans	C	[F]	8.236×10^{-13}	8.193×10^{-13}

Çizelge 5.2 650 MHz'lik silindirik kavitede Q ve eş değer devre için yapılan analitik hesaplamaların SUPERFISH programı nümerik sonuçlarıyla kıyaslanması

Parametre	Sembol	Birim	Analitik Değer	SUPERFISH
Metal yüzeyin deri kalınlığı	δ	[m]	2.592×10^{-6}	2.591×10^{-6}
Yüzey direnci	R_s	[Ω]	6.65×10^{-3}	6.65×10^{-3}
Kalite faktörü	Q		36115.5	36157.7
Harcanan güç	P_{kav}	[W]	2646.3	2620.7
Toplam depolanan enerji	U	[J]	0.02343	0.02319
Geometrik faktör	R/Q		418.37	422.12
Şönt empedansı	$R_{\text{şönt}}$	[Ω]	1.51098×10^7	1.51690×10^7
İndüktans	L	[H]	$1.02440606 \times 10^{-7}$	1.033423×10^{-7}
Kapasitans	C	[F]	$5.8524998 \times 10^{-13}$	5.79984×10^{-13}

Hesaplamanın doğruluk derecesi incelenmek istenirse silindirik kavite için yapılan analitik hesaplamalar ile SUPERFISH programından elde sonuçlarının birbirine çok yakın değerler olduğu görülmektedir. Analitik ve nümerik değerler arasındaki küçük farkların nedeni olarak ızgara noktalarının sayısının sonlu olması ve program içinde kullanılan yaklaşık değerler gösterilebilir.

Tez çalışmasının, ikinci kısmını oluşturan içe girintili ve dar aralıklı klaystron kavitesinin kalite faktörü ve eş değer devre elemanlarının hesabı için yine öncelikle yaklaşık 1 GHz'lik rezonans frekansına sahip ve boyutları $r_1 = 20$ mm, $r_2 = 40$ mm, $l = 22$ mm ve $d = 2$ mm olan bir klaystron kavitesi için analitik hesaplamalar yapılarak çalışmaya başlanmıştır. Bunu takiben aynı geometriye sahip içe girintili ve dar aralıklı bir klaystron kavitesi için SUPERFISH programı çalıştırılmış ve kalite faktörü basta olmak üzere eş değer devre elemanı değerleri ile kıyaslanmıştır.

Ancak bu sefer içe girintili ve dar aralıklı klaystron kavitesi için silindirik kontrol kavitesi değerlerinin aksine analitik hesaplar ve SUPERFISH programından elde edilen nümerik değerler arasında göz ardı edilemeyecek kadar büyük farklılıklar olduğu görülmektedir. Bu hata payının meydana gelmesinin nedeni, içe girintili klaystron kavite geometrisinin, silindirik kavitenin aksine, daha karmaşık bir yapıya sahip olması ve bu yapının analitik yolla kesin sonuçlarının elde edilememesidir. Her ne kadar bazı

varsayımlar ve yaklaşımlar kullanılmış olsa da içe girintilerdeki bu dar kısımlarda güç kaybı, kalite faktörü değerini doğrudan etkilediği için içe girintili ve dar aralıklı klaystron kalitesinin kalite faktörü değerinin nümerik programlar ile daha doğru olarak hesaplanabildiği görülmüştür. Kullanılan varsayımlar, gerçek değerler ile biraz daha yakın değerler elde edilmesine olanak sağlasa da yine elde edilen hata payı değerleri oldukça yüksektir (çizelge 4.3).

Ayrıca, elde edilen kalite faktörü değerinin daha önceden yapılmış olan teorik ve deneysel çalışmalarda elde edilen değerler ile uyumluluk içerisinde olduğu görülmüştür. (Rivier ve Verge-Lapisardi 1971, Barroso vd. 2003, Barroso vd. 2005, Barroso ve Leite Neto 2008, Tiwari ve Hannurkar 2010). Çizelge 4.3'te içe girintili ve dar aralıklı bu klaystron kavitesi için detaylı olarak gösterilmiş olan analitik hesaplamalar ve SUPERFISH programından elde edilen nümerik değerler bir kez daha çizelge 5.3'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.3 İçe girintili ve dar aralıklı klaystron kavitesinde Q ve eş değer devre için yapılan analitik hesaplamaların SUPERFISH programı nümerik sonuçlarıyla kıyaslanması

Parametre	Sembol	Birim	Analitik Değer	SUPERFISH	Hata Payı (%)
Kalite faktörü	Q		5660.36	5313.47	6.13
Şönt empedansı	R _{şönt}	[Ω]	1.01848×10^5	1.14×10^5	12.43
İndüktans	L	[H]	3.049×10^{-9}	3.29×10^{-9}	7.89
Dar aralıktaki kapasitans	C ₀	[F]	5.58286×10^{-12}		
Ek kapasitans	C ₁	[F]	2.2545×10^{-12}		
Düzeltilmiş kapasitans	C _{duzelt}	[F]	7.837×10^{-12}	7.085×10^{-12}	10.62

Genel olarak bu tez süresince yapılan çalışmalar sonucunda görülmektedir ki; SUPERFISH programından elde edilen değerler ile silindirik kavite için hesaplanan analitik değerler son derece yakın sonuçlar vermektedir. İçe girintili ve dar aralıklı klaystron kavitelelerinde ise analitik hesaplamalar ile SUPERFISH programının verdiği

değerler arasında belirli bir hata payı bulunmaktadır. Bazı varsayım, yaklaşım ve iyileştirmelerin kullanılması bu hata paylarını belli derecede düşürse de yine de nümerik sonuçlara belirli bir yakınlıkta değerler bulunmaktadır.

Böylece silindirik kaviteler için yapılan analitik hesaplamaların nümerik olan sonuçlarla çok yakın bir şekilde uyduğu, fakat klaystron kaviteleri için bu değerlerin birbirinden farklı olduğu sonucuna dayanarak, içe girintili ve dar aralıklı kavitelerinde kalite faktörü ve eş değer devre elemanları hesaplamaları yapılırken SUPERFISH gibi nümerik metotlar kullanan programların kullanılması gerektiği gösterilmiş olmaktadır.

Ayrıca, bu tez süresince gerek yurt dışı deneyimleri (staj) gerekse yapılan araştırmalar sonucu klaystron kavitelerinin temel bilimleri konu alan araştırmaların büyük bir kısmında önemli bir yere sahip olduğu, özellikle fizik ve mühendislik alanları başta olmak üzere tıp ve savunma sanayi alanları gibi dünyada büyük bir yer tutan araştırma alt yapısının temelinde yer aldığı görülmüştür.

Yapılan araştırmalar sırasında, kullanılan kaynaklardan ve elde edilen deneyimlerden yola çıkarak, klaystron kavitelerinin kullanım alanlarına göre tüm dünyada çeşitlilik gösterdiği, amaca uygun bir kavite yapmak için kalite faktörü gibi kavite için en temel özelliklerin fiziksel ve mühendislik açıdan bilinmesinin ve önceden tespit edilebilir olmasının araştırmacılar ve mühendisler için büyük önem taşıdığını söylemek mümkündür.

Bunun nedenle içe girintili ve dar aralıklı klaystron kaviteleri için nümerik olarak elde edilen doğru ve gerçek değerlerin klaystronların tasarım ve üretim aşamasında büyük kolaylık sağlayacağı bir gerçektir.

KAYNAKLAR

- Barroso, J. J., Castro, P. J., Carneiro, L. A., Leite Neto J. P. and Aguiar, O.D. 2003, Reentrant Klystron Cavity as an Electromechanical Transducer, IMOC Proceedings Vol. 2; PP.1081-1084
- Barroso, J. J., Castro, P. J., Leite Neto, J. P. and Aguiar, O.D. 2005, Analysis and Simulation of Reentrant Cylindrical Cavities, International Journal of Infrared and Millimeter Waves, Vol. 26, No. 8; PP.1071-1083
- Barroso J. J., Leite Neto, J. P. 2006, Tuning Characteristics of Reentrant Klystron Cavities, P1.24, IEEE; PP.229-230
- Barroso J. J. and Leite Neto, J. P. 2008, Resonance Frequency and Ohmic Q Factor in Klystron Cavities, P1.24, IEEE; PP.140-141
- Caspers, F. 2012, JUAS RF Engineering 1-2, Archamps, France
- Collin, R. E. 2001, Foundations for Microwave Engineering's, Second Edition, IEEE Press; PP.500-504
- Fujisawa, K. 1958, General Treatment of Klystron Resonance Cavities, IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques; PP.344-358
- Halbach, K., and Holsinger, R. F. 1976, SUPERFISH-A Computer Program for Evaluations of RF Cavities with Cylindrical Symmetry, Particle Accelerator Vol.7; PP.213-222.
- Halbach, K. and Holsinger, R. F. 1987. SUPERFISH Reference Manuel
- Hansen, W. 1938, A Type of Electrical Resonator, Journal of Applied Physics, Vol. 9; PP.654-663

- Jackson, D. 1999. Classical Electrodynamics, Third Edition, Wiley, 24-356
- Pozar, D. M. 1998. Microwave Engineering, Second Edition, John Wiley & Sons; PP. 1-16
- Rivier, E., Verge-Lapisardi, M. 1971, IEEE transactions on Microwave Theory and Techniques Vol. MTT-19, No 3; PP.309-314
- Rosenzweig, J. B. 2003. Fundamentals of Beam Physics, Oxford Press; PP.167-203
- Talman, R. 2006. Accelerator X-Ray Sources, Wiley-VCH; PP.141-164
- Tenanbaum, P. 2003. Fields in Waveguides - a Guide for Pedestrians, Draft; PP.6-19
- Tiwari, A. K., Hannurkar, P. R. 2010. Electromagnetic Analysis of Reentrant Klystron Cavity, Journal of Infrared Milli Terahz Waves, Volume 31;PP.1221–1224
- Varian, R. 1939, A High Frequency Amplifier and Oscillator, Journal of Applied Physics vol. 10; PP.140-143
- Wangler, T. P. 2008. RF Linear Accelerators, Second Completely Revised and Enlarged Edition, Wiley-VCH; PP.1-173
- Wiedemann, H. 1995. Particle Accelerator Physics II, Springer; PP.170-179
- Wille, K. 2000. The Physics of Particle Accelerators an introduction, Oxford Press; PP.137-141
- Winslow, A. 1997. Numerical Solution of the Quasi-linear Poisson Equation in a Non-uniform Triangle Mesh, Journal of Computational Physics 135; PP.128-138

EKLER

EK 1 SUPERFISH Programı Hakkında Genel Bilgi.....	36
EK 2 SUPERFISH Programı ile 459 MHz ve 650 MHz'lik Silindirik Kavite için Örnek Komut Giriş Dosyası ve Çıktı Değerleri.....	39
EK 3 SUPERFISH Programı ile İç girintili Klaystron Kavitesi için Örnek Komut Giriş Dosyası ve Çıktı Değerleri.....	42

EK 1 SUPERFISH Programı Hakkında Genel Bilgi

SUPERFISH, 2 boyutta Kartezyen koordinatlarda ve eksensel simetrik silindirik koordinatlarda; radyo frekanslı elektromanyetik alanların hesaplanmasını olanak sağlayan bir programdır.

Programda belirlenen geometriler için üçgenlerden oluşan bir ızgara (triangle mesh) meydana getirildikten sonra çizim (plotting) ve son işlemci (post processor) programları ile yapılan hesaplama ve çözümler çeşitli yollarla sunulmaktadır.

SUPERFISH ilk olarak Lawrence Livermore Ulusal Laboratuvarı'nda A. Winslow tarafından difüzyon hesaplamaları için kullanılan bir koddan türetilmiştir. Programın iki ana unsurunda biri olan MESH, belirlenen geometri için ağ ve düğüm noktalarının oluşturulmasını, diğeri olan FIELD ise belirlenen ağ üzerinden Poisson Denklemi'nin çözülmesini sağlamaktadır (Winslow 1997).

Ronald F. Holsinger tarafından geliştirilen kuramsal kısım Klaus Halbach' ın katkılarıyla derlenerek orijinal SUPERFISH kodu oluşturulmuştur (Halbach ve Holsinger 1976). Kod sonradan geliştirilerek ilave edilen grafik çizim programı TEK PLOT ile sonuçların grafiksel olarak ifade edilmesine olanak sağlamaktadır.

1. Los Alamos Hızlandırıcı Kod Grubu (LAACG) Altında Kodun Gelişim Süreçleri

Los Alamos Hızlandırıcı Kodu Grubu (LAACG) tarafından geliştirilen bu program 1992 yılında bu yana çeşitli işletim sistemlerini kullanan sürümlerle kullanıcılara sunulmuştur. SUPERFISH kodlarının bir standart sürümünü korumak ve belgelemek için Amerika Birleşik Devletleri Enerji Bakanlığı (DOE) tarafından desteklenmektedir. FORTRAN bilgisayar yazım dilini kullanan bu programının kullanımını kolaylaştırmak için çok önemli olan iki ciltlik Başvuru ve Kullanım Kılavuzları gelişim süreci boyunca bu grup tarafından derlenerek kullanıcılara sunulmuştur.

1990'ların başında Brookhaven Ulusal Laboratuvarı son LAACG standart sürümüne dayalı kodlarından oluşan bir dizi sürümü yayınlamıştır. Ayrıca LAACG'nin 3. sürümünün en az ticari amaçlı SUPERFISH sürümü olduğu da bilinmektedir.

SUPERFISH 4.12 sürümü UNIX ve VAX VMS işletim sistemlerini kullanan son sürüm olarak hala mevcuttur; fakat aktif geliştirme desteği 1993 yılının sonlarına doğru durdurulmuştur.

1992 ve 1999 yılları arasında aktif olarak desteklenen 5. Sürüm DOS işletim sistemini kullanarak çalışmaktaydı. Lloyd Young, M. S. de Jong ve F. P. Adams tarafından açıklanan yöntemle RF alan çözümleri ve bu alan haritalarının gösterim için kullanılan Los Alamos CFish kodu da yazılarak pakete bu sürümde eklenmiştir. 6. sürüm, Ocak 1999'da yayınlanmaya başlanmış; yaklaşık dört yıl devam ettikten sonra Nisan 2003'de durdurulmuştur. Aralık 2002 tarihinde öncelikle 7. Sürüm' ün beta test sürümü; Nisan 2003 tarihinde ise, Lahey/Fujitsu LF95 derleyici ve Winteracter paketini kullanılan 7. Sürüm kullanıcılara sunulmuştur.

Geliştirilen son sürüm olan SUPERFISH 7.19, bu tez içeriğinde bulunan kavite geometri çizimlerinin yapılmasını; bununla birlikte kavitelerinin belirleyici ve çok önemli olan eş değer devre özellikleri ve kalite faktörü hesaplamalarının nümerik olarak yapılmasına olanak sağlamıştır.

2. Kalite Faktörü, yüzey Direnci, R/Q değeri ve Şönt Empedans Değerlerini Hesaplamak için SUPERFISH Programında Kullanılan Komutlar

SUPERFISH kodu, Çizelge 1'de verilen komutları kullanarak silindirik kavite ve içe girintili dar aralıklı klaystron kavitesinin belirtilen değerlerinin hesaplanmasını sağlamaktadır (Halbach ve Holsingerc1987).

Çizelge 1 SUPERFISH Programında Kullanılan Komutlar

reg kprob=1	SUPERFISH problemi olduğunu gösterir. Yani; sonlu farklar yöntemi kullanılarak problemin çözümün yapılacağını belirtir.
icylin=1	Silindirik koordinatlarda TM_{010} moda göre hesaplama yapılacağını gösterir.
Dx	Yatay doğrultudaki ızgara aralıklarının boyutunu gösterir.
Dy	Dikey doğrultudaki ızgara aralıklarının boyutunu gösterir.
freq	Rezonans frekansının değerini MHz mertebesinde gösterir.
Xdri	Sürücü noktanın yatay eksenindeki koordinatını gösterir.
ydri	Sürücü noktanın dikey eksenindeki koordinatını gösterir.
conv=0.10	Hesaplamaların metrik sistem kullanılarak mm mertebesinde yapılacağını gösterir.
Rho	Malzemenin direnç değerini belirler.
Tempc	Kullanılan malzeme için çalışma sıcaklığıdır.
po x	Problemin geometrisini tanımlamak için yatay yöndeki koordinat değerinin girilerek istenilen şeklin oluşturulmasını sağlar.
po y	Problemin geometrisini tanımlamak için dikey yöndeki koordinat değerinin girilerek istenilen şeklin oluşturulmasını sağlar.

EK 2 SUPERFISH Programı ile 459 MHz ve 650 MHz'lik Silindirik Kavite için Örnek Komut Giriş Dosyası ve Çıktı Değerleri

1. SUPERFISH Programı ile 459 MHz'lik Silindirik Kavite için Örnek Komut Giriş Dosyası ve Çıktı Değerleri

SUPERFISH programı kullanılarak 459 MHz'lik bakır malzemeden yapılmış silindirik bir kavite için giriş komutları aşağıda değerleri ve açıklamaları ile birlikte şu şekilde verilmiştir.

```
&reg kprob=1,           ! Superfish problemi

icylin=1               ! Silindirik simetri kullanılsın

dx=0.005, dy=0.005    ! Izgara boyutları

freq=459.,            ! Başlangıç frekansı

xdri=0.285,ydri=0.25, ! Sürücü nokta koordinatları

ezero=1000000         ! Elektrik alan değeri

rmas=0.511            ! Parçacığın (elektronun) durgun kütlesi

rho=1.724100000E-06   ! Malzemenin (Bakırın) direnci (Ohm-m)

rhor=1.724100000E-06  ! Malzeme için Referans direnci (Ohm-cm)

tempc=20.0000000     ! Normal iletkenler için çalışma sıcaklığı (C)

conv=100 &           ! Boyutlar metre olarak alınsın

$po x=0.0,y=0.0 $     !Geometri başlangıcı

$po x=0.0,y=0.25 $

$po x=0.285,y=0.25 $

$po x=0.285,y=0.0 $

$po x=0.0,y=0.0 $     !Geometri sonu
```

Aynı kavite için SUPERFISH programının vermiş olduğu yüzey direnci, kalite faktörü, r/Q , şönt empedans, toplam depolanan güç ve harcanan enerji değerleri aşağıda verilmektedir.

Frequency	= 458.96667 MHz
Particle rest mass energy	= 0.511000 MeV
Transit-time factor	= 0.1420790
Stored energy	= 0.0665505 Joules
Surface resistance	= 5.58923 milliOhm
Normal-conductor resistivity	= 1.72410 microOhm-cm
Operating temperature	= 20.0000 C
Power dissipation	= 4446.2166 W
Q	= 43164.0
r/Q	= 8.544
Shunt Impedance	= 18.2265 MOhm

2. SUPERFISH Programı ile 650 MHz'lik Silindirik Kavite için Örnek Komut Giriş Dosyası ve Çıktı Değerleri

SUPERFISH programı kullanılarak 650 MHz'lik bakır malzemeden yapılmış silindirik bir kavite için giriş komutları aşağıda değerleri ve açıklamaları ile birlikte şu şekilde verilmiştir.

```

&reg kprob=1,          ! Superfish problemi
icylin=1              ! Silindirik simetri kullanılsın
dx=0.005, dy=0.005   ! Izgara boyutları
freq=650.,           ! Başlangıç frekansı
xdri=0.20,ydri=0.1765, ! Sürücü nokta koordinatları
ezero=1000000,       ! Elektrik alan değeri
rmass=0.511,         ! Parçacığın (elektronun) durgun kütlesi
rho=1.724100000E-06, ! Malzemenin (Bakırın) direnci (Ohm-m)
rhor=1.724100000E-06, ! Malzeme için Referans direnci (Ohm-cm)
mat=1,               ! Epsilon_r=1, Mu_r=1
tempc=20.0000000     ! Normal iletkenler için çalışma sıcaklığı (C)

```

```
conv=100 & ! Boyutlar cm olarak alınsın
$po x=0.0,y=0.0 $ !Geometri başlangıcı
$po x=0.0,y=0.1765 $
$po x=0.20,y=0.1765 $
$po x=0.20,y=0.0 $
$po x=0.0,y=0.0 $ !Geometri sonu
```

Bu kavite için SUPERFISH programının vermiş olduğu yüzey direnci, kalite faktörü, r/Q , şönt empedansı, toplam depolanan güç ve harcanan enerji değerleri aşağıda verilmektedir.

Frequency	= 650.08934 MHz
Stored energy	= 0.0231991 Joules
Surface resistance	= 6.65193 milliOhm
Normal-conductor resistivity	= 1.72410 microOhm-cm
Operating temperature	= 20.0000 C
Power dissipation	= 2620.7381 W
Q	= 36157.7
r/Q	= 9.308
Shunt Impedance	= 15.1690 MOhm

EK 3 SUPERFISH Programı ile İç girintili Klaystron Kavitesi için Örnek Komut Giriş Dosyası ve Çıktı Değerleri

SUPERFISH programı kullanılarak 1000 MHZ'lik bakır malzemeden yapılmış iç girintili ve dar aralıklı bir kavite için giriş komutları aşağıda değerleri ve açıklamaları ile birlikte verilmektedir. Burada silindirik kaviteden farklı olarak, kavitenin orta kısmındaki yarıçap küçültülmüştür.

```
&reg kprob=1,          ! Superfish problemi

icylin=1              ! Silindirik simetri kullanılsın

dx=0.0001, dy=0.0001 ! Izgara boyutları

freq=1000.,          ! Başlangıç frekansı

xdri=0.002,ydri=0.02, ! Sürücü nokta koordinatları

ezero=1000000,       ! Elektrik alan değeri

kmethod=1 ,          ! Betayı dalga sayısı olarak kullan

rmas=0.511,          ! Parçacığın (elektronun) durgun kütlesi

rho=1.724100000E-06, ! Malzemenin (Bakırın) direnci (Ohm-m)

rhor=1.724100000E-08, ! Malzeme için Referans direnci (Ohm-cm)

mat=1,               ! Epsilon_r=1, Mu_r=1

tempc=20.0000000,    ! Normal iletkenler için çalışma sıcaklığı (C)

conv=100 &          ! Boyutlar metre olarak alınsın

$po x=0.0,y=0.0 $    ! Geometri başlangıcı

$po x=0.0,y=0.04 $

$po x=0.022.0,y=0.04 $

$po x=0.022,y=0.02 $ ! Dar yarıçapın başlangıcı

$po x=0.002,y=0.02 $

$po x=0.002,y=0.0 $

$po x=0.0,y=0.0 $    ! Geometri sonu
```

Son olarak aynı kavite için SUPERFISH programının vermiş olduğu yüzey direnci, kalite faktörü, r/Q , şönt empedans, toplam depolanan güç ve harcanan enerji değerleri aşağıda verilmektedir.

Stored energy	= 1.41737E-05 Joules
Surface resistance	= 8.4224 milliOhm
Normal-conductor resistivity	= 1.72410 microOhm-cm
Operating temperature	= 20.0000 C
Power dissipation	= 17.46 W
Q	= 5313,47
r/Q	= 43.077
Shunt Impedance	= 0.114444 Ohm

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Nihan SİPAHİ
Doğum Yeri : Ankara
Doğum Tarihi : 6 Eylül 1986
Medeni Hali : Evli
Yabancı Dili : İngilizce, İsveççe, Almanca

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Nermin Mehmet Çekiç Anadolu Lisesi, (2004)
Lisans : Ankara Üniversitesi, (2010)
Yüksek Lisans :Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı (Şubat 2010 – Haziran 2013)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl

Ankara Üniversitesi Bilimsel Araştırma ve Projelendirme Bölümü, Proje
Mühendisi (2010-2011)

Yayımları (SCI ve diğer)

- **Sipahi, N.** , Sipahi, T. , Biedron, S. , Milton, S. 2012 (baskıda) The CSU Accelerator Facility and FEL Facility, Free Electron Laser (FEL) Conference Proceedings
- **Sipahi, N.** , Biedron, S. , Milton, S. 2012, ‘Power Calculation of Linear Accelerators’, 15th Annual Directed Energy Symposium (DEPS), Albuquerque, New Mexico