

ANKARA ÜNİVERSİTESİ
HIZLANDIRICI TEKNOLOJİLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YAKIT HÜCREŞİ TEKNOLOJİSİ İLE
DEMET HIZLANDIRICI ENJEKTÖR SİSTEMLERİNİN
TASARIM ÇALIŞMASI

HÜSEYİN SERTAÇ SÜMER

HIZLANDIRICI TEKNOLOJİLERİ ANABİLİM DALI

ANKARA

2024

Her hakkı saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

YAKIT HÜCRESİ TEKNOLOJİSİ İLE DEMET HIZLANDIRICI ENJEKTÖR SİSTEMLERİNİN TASARIM ÇALIŞMASI

Hüseyin Sertaç SÜMER

Ankara Üniversitesi

Hızlandırıcı Teknolojileri Enstitüsü

Hızlandırıcı ve Dedektör Teknolojileri Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Hatice YILDIZ

Yapılan tez çalışmasında, hızlandırıcı sistemlerde kaynak olarak SRF kavitelerin içerisine monte edilen PEM yakıt hücresi kullanılması durumu çalışılmış ve değerlendirilmiştir. PEM yakıt hücreleri günümüz gereksinimlerine göre yaygın ve verimli bir şekilde birçok alanda kullanılmaktadır. Süperiletken kavite içerisine PEM yakıt hücresi dâhil edilmesi durumu için modelleme çalışmaları yapılmıştır. Farklı kombinasyonlarda, farklı sayıda SRF kavite hücrelerine göre farklı PEM hücresi yerleşimleri için modelleme çalışmaları yapılmış olup elde edilen elektrik ve manyetik alan dağılımlarına göre sonuçlar yorumlanmıştır. İlave olarak sisteme magnet eklenmesi sayesinde demet dinamiği çalışması da yapılmış olup protonların hızlandırma eksenindeki hareketi incelenmiştir. Ayrıca bir diğer çalışma olarak 20-40 MeV enerjili elektron demeti hızlandırıcıları için alternatif güç kaynağı çalışması da yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda CST programında, dalga ve parçacık alt bölümleri kullanılmıştır.

Ocak 2024, 76 sayfa

Anahtar Kelimeler: PEM yakıt hücresi, parçacık hızlandırıcı, enjektör sistemi, demet hattı, polimer elektrolit membran

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

DESIGN OF A BEAM LINE INJECTOR SYSTEMS WITH FUEL CELL TECHNOLOGY

Hüseyin Sertaç SÜMER

Ankara University
Accelerator Technologies Institute

Supervisor: Prof. Dr. Hatice YILDIZ

The usage of PEM fuel cells installed in SRF cavities as a particle source in accelerator systems was studied and evaluated in the thesis study. According to today's needs, PEM fuel cells are utilized extensively and effectively in a variety of contexts. Studies on modeling have been done in order to include a PEM fuel cell into the superconducting cavity. The findings of modeling studies were interpreted based on the obtained electric and magnetic field distributions and the studies were conducted for various PEM cell placements according to various numbers of SRF cavity cells in various combinations. Furthermore, beam dynamics and the motion of protons in the acceleration axis were investigated, made by addition of magnet(s) to the system. In addition, another study on alternate power source was done for electron beam accelerators with energies between 20 and 40 MeV. During studies, CST wave and particle sub modules were used.

January 2024, 76 pages

Key Words: PEM fuel cell, particle accelerator, beam acceleration, injector system, beamline, polymer electrolyte membrane

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın ve çalışmanın konusu, yapılan çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçlandırılması ve sonuçların değerlendirilmesi, yazımı aşamalarında yapmış olduğu büyük ve önemli katkılarından dolayı danışmanım Prof. Dr. Hatice YILDIZ başta olmak üzere manevi destekleri için sevgili eşim Dicle ve ailem ile akademik çalışmalarımı sürdürebilmek için destek olan ROKETSAN' a teşekkür ederim.

Hüseyin Sertaç SÜMER

Ankara, Ocak 2024

İÇİNDEKİLER

ETİK.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	iv
İÇİNDEKİLER	v
SİMGE ve KISALTMALAR	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	2
2.1 Yakıt Hücresi Nedir?	2
2.1.1 Yakıt hücresinin çalışması.....	3
2.1.2 Günümüzdeki farklı yakıt hücreleri	6
2.1.3 PEM yakıt hücresi nedir?.....	9
2.1.4 PEM yakıt hücresi uygulama alanları	11
2.2 Hızlandırıcı Sistemler	13
2.2.1 Hızlandırıcı çeşitleri ve özellikleri	15
2.2.2 Hızlandırıcılarda süperiletken yapılar	16
2.2.3 Demet dinamiği ve demet parametreleri	17
2.2.4 Hızlandırıcı sistemlerinin tasarımında kullanılan programlar	18
2.2.5 Hızlandırıcılarda kullanılan kaynak sistemleri.....	19
3. KONSEPT TASARIM İÇİN MODELLEME	22
3.1 CST ile Süperiletken Kavite Hücrelerinin ve RF Alanlarının PEM Adaptasyonu ile Modellenmesi.....	22
3.1.1 Süperiletken kavite modellenmesi	23
3.1.1.1 Ön ayarlar.....	28
3.1.1.2 Kavite dizaynı.....	29
3.1.2 Oluşturulan SRF kavitelere kaynak olarak PEM yakıt hücresinin eklenmesi	37
3.2 Elektrik ve Manyetik Alan Çözümleri	40
4. PEM YAKIT HÜCRESİ KULLANILARAK KAYNAK TASARIMI VE KAVİTE İÇİ DEMET DİNAMİĞİ	43
4.1 PEM Yerleşim Modelleri.....	43

4.1.1 Model-1 (2-1).....	43
4.1.2 Model-2 (2-2).....	46
4.1.3 Model-3 (3-3).....	48
4.1.4 Model-4 (3-1).....	50
4.1.5 Model-5 (3-2).....	55
4.1.6 Model-6 (3-0.5).....	57
4.1.7 Model-7 (4-1).....	58
4.1.8 Model-8 (5-1).....	60
4.1.9 Model-9 (3-1) 5 mod.....	61
4.2 Kavite İçerisinde Parçacık Demeti Elde Edilmesi.....	65
4.2.1 Dizayn-1	65
4.2.2 Dizayn-2	66
4.2.3 Dizayn-3	67
4.2.4 Dizayn-4	68
4.3 PEM Yakıt Hücresinin 20-40 MeV' lik Lineer Elektron Hızlandırıcılarda Alternatif Güç Kaynağı Olarak Kullanımı	69
5. TARTIŞMA ve SONUÇ.....	72
KAYNAKÇA	74
ÖZGEÇMİŞ.....	76

SİMGE ve KISALTMALAR

Simgeler

°	Derece
%	Yüzde
μ	Mikro
W _{el}	Elektriksel İş
q	Elektriksel Yük
E	Potansiyel
N _{avg}	Avogadro Sayısı
<	Küçüktür
>	Büyüktür
V	Volt
A	Amper
W	Watt
α	Alpha
λ	Dalga Boyu
π	Pi
β	Beta
Pt	Platin
®	Tescilli Ticari Marka (Registered Trademark)
He	Helyum
Nb	Niyobyum
Pb	Kurşun
Q	Kalite Faktörü
°C	Celsius
°F	Fahrenheit
K	Kelvin
kJ	Kilo Joule
μm	Mikro Metre
kg	Kilo Gram
GPa	Giga Pascal
Kr	Kripton
R _{eq}	Ekvator Yarıçapı
L _{cell}	Hücre Uzunluğu
~	Yaklaşık
Ω	Ohm
Oe	Oersted
mT	Mili Tesla

Kısaltmalar

AC	Alternatif Akım (Alternating Current)
AFC	Alkali (Bazik) Yakıt Hücresi
ASTRA	A Space Charge Tracking Algorithm
BPM	Beam Position Monitor
CERN	Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi
CPB	Centrifugal Barrel Polishing
CST	Computer Simulation Technology
CW	Sürekli Dalga (Continuous Wave)
DBFC	Doğrudan Bor Hidrür Yakıt Hücresi

DC	Doğru Akım (Direct Current)
DCFC	Doğrudan Kömür Yakıt Hücresi
DEFC	Doğrudan Etanol Yakıt Hücresi
DFAFC	Doğrudan Formik Asit Yakıt Hücresi
DGFC	Doğrudan Glikoz Yakıt Hücresi
DMFC	Doğrudan Metanol Yakıt Hücresi
eV	Elektronvolt
FC	Yakıt Hücresi (Fuel Cell)
FEL	Free Electron Laser (Serbest Elektron Lazeri)
FEM	Finite Element Method
GHz	Gigahertz
HF	Hidroflorik Asit
HOM	Yüksek Mertebeli Modlar (Higher Order Modes)
keV	Kiloelektronvolt
kHz	Kilohertz
kW	Kilowatt
L	Litre
MCFC	Eriyik Karbonat Yakıt Hücresi
MeV	Megaelektronvolt
MHz	Megahertz
mm	Milimetre
ms	Milisaniye
MW	Megawatt
ns	Nanosaniye
OTR	Optical Transition Radiation
PAFC	Fosforik Asit Yakıt Hücresi
PEC	Mükemmel Elektrik İletkeni (Perfect Electric Conductor)
PEM	Proton Değişimli Membran (Proton Exchange Membrane)
PW	Pulsed Wave
RF	Radyo Frekansı (Radio Frequency)
R _{iris}	İris Yarıçapı
RMS	Root Mean Square
SOFC	Katı Oksit Yakıt Hücresi
SPE	Katı Polimer Elektrolit (Solid Polymer Electrolyte)
SRF	Süperiletken Radyo Frekansı (Superconducting Radio Frequency)
SRF	Superconducting Radio Frequency
TL	Türk Lirası
W	Watt

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Yakıt hücresinin tek aşamada enerji dönüşümü [4].....	3
Şekil 2.2 Yakıt hücresi elektrot ve elektrolit gösterimi [4].....	4
Şekil 2.3 Yakıt hücresi tarihsel gelişimi [4].....	5
Şekil 2.4 Apollo programı kapsamındaki yakıt hücreleri [5].....	5
Şekil 2.5 PC1401 [6].....	6
Şekil 2.6 PEM yakıt hücresi çalışma prensibi.....	9
Şekil 2.7 Cockroft ve Walton Hızlandırıcısı [8]	15
Şekil 2.8 Van de Graaff Jeneratörü [10]	15
Şekil 3.1 SRF Kavite Kesiti [18]	24
Şekil 3.2 Yarım hücre eliptik kavite	25
Şekil 3.3 Model tasarımı için seçilen birimler	28
Şekil 3.4 Yarım hücre eliptik kavite parametreleri (kenar hücre-1) [25].....	29
Şekil 3.5 Yarım hücre eliptik kavite katı modeli (kenar hücre-1).....	29
Şekil 3.6 Yarım hücre eliptik kavite parametreleri (kenar hücre-2) [25].....	30
Şekil 3.7 Yarım hücre eliptik kavite katı modeli kesit görünüm (kenar hücre-1 ve kenar hücre-2)	30
Şekil 3.8 Bir hücrelik kavite elde edilmesi	31
Şekil 3.9 Bir hücrelik kavite (a) katı model (b) kesit görünüm	31
Şekil 3.10 Dört-yüzlü ağ örme parametreleri.....	32
Şekil 3.11 Dört-yüzlü ağ örme görüntüsü (a) normal görünüm (b) kesit görünüm	32
Şekil 3.12 Altı-yüzlü ağ örme parametreleri.....	33
Şekil 3.13 Altı-yüzlü ağ örme görüntüsü (a) normal görünüm (b) kesit görünüm	33
Şekil 3.14 Kenar hücre-2 kavitenin +x ekseninde taşınması	34
Şekil 3.15 Kenar hücre-2 kavitenin +x ekseninde taşınması (kesit görünüm).....	34
Şekil 3.16 Orta hücre kavite parametreleri [25].....	35
Şekil 3.17 Orta hücre elde edilmesi	35

Şekil 3.18 Orta hücre yerleşimi.....	36
Şekil 3.19 Orta hücre yerleşimi (devamı)	36
Şekil 3.20 İki hücreli kavite (a) katı modeli (b) kesit görünümü	36
Şekil 3.21 Demet tüpü (-x yönünde) eklenmiş iki hücrelik kavite	37
Şekil 3.22 Demet tüpü eklenmiş iki hücrelik kavite (a) katı modeli (b) kesit görünümü	37
Şekil 3.23 Silindirik PEM Yakıt Hücresi (temsili)	38
Şekil 3.24 Anot modellemesi parametreleri.....	39
Şekil 3.25 Anot eklenmiş kavite (a) katı model görünümü (b) kesit görünümü.....	39
Şekil 3.26 Katot modellemesi parametreleri.....	40
Şekil 3.27 Katot eklenmiş kavite (a) katı model görünümü (b) kesit görünümü.....	40
Şekil 3.28 Analiz için zorunlu olan koşullar.....	41
Şekil 3.29 Sınır koşullarının tanımlanması	41
Şekil 3.30 Çözücü seçimi.....	41
Şekil 3.31 Normal mod çözücü parametreleri.....	42
Şekil 4.1 Elektrik alan dağılımı (faz 0°)	43
Şekil 4.2 Elektrik alan dağılımı (faz 0°) (kontur görünümü).....	43
Şekil 4.3 Elektrik alan dağılımı (faz 0°)	44
Şekil 4.4 Elektrik alan dağılımı (faz 0°) (kesit görünümü).....	44
Şekil 4.5 Elektrik alan dağılımı (faz 180°)	45
Şekil 4.6 Manyetik alan dağılımı (faz 90°) (kontur görünümü)	45
Şekil 4.7 Manyetik alan dağılımı (faz 90°) (kesit görünümü)	46
Şekil 4.8 Model-2 için anot parametre güncellemesi.....	46
Şekil 4.9 Model-2 için katot parametre güncellemesi.....	47
Şekil 4.10 Model-2 (a) katı model (b) kesit görünümü.....	47
Şekil 4.11 Model-2 elektrik alan dağılımı (faz 180°)	47
Şekil 4.12 Model-2 manyetik alan dağılımı (faz 90°).....	48
Şekil 4.13 Model-3 elektrik alan dağılımı (faz 0°)	49
Şekil 4.14 Model-3 manyetik alan dağılımı (faz 90°).....	49

Şekil 4.15 Model-4 (a) katı model (b) kesit görünüm.....	50
Şekil 4.16 Model-4 elektrik alan dağılımı (faz 0°)	50
Şekil 4.17 Model-4 elektrik alan dağılımı (faz 0°) (kontur-kesit görünüm).....	51
Şekil 4.18 Model-4 elektrik alan dağılımı (faz 0°) (kontur görünüm).....	51
Şekil 4.19 Model-4 manyetik alan dağılımı (faz 90°).....	51
Şekil 4.20 Model-4 manyetik alan dağılımı (faz 90°) (kontur-kesit görünüm)	52
Şekil 4.21 Model-4 manyetik alan dağılımı (faz 90°) (kontur görünüm)	52
Şekil 4.22 CST özdeğer çözümleri tablosu	53
Şekil 4.23 Çalışma frekansına karşı modlar.....	54
Şekil 4.24 Kalite farkı hesabı için göz önüne alınan hücreler.....	54
Şekil 4.25 Kalite faktörü hesabı CST işlemleri.....	54
Şekil 4.26 Model 4 için anot parametre güncellemesi	55
Şekil 4.27 Model 4 için katot parametre güncellemesi	55
Şekil 4.28 Model-5 elektrik alan dağılımı (faz 0°)	56
Şekil 4.29 Model-5 elektrik alan dağılımı (faz 0°) (kontur görünüm).....	56
Şekil 4.30 Model-5 manyetik alan dağılımı (faz 90°).....	56
Şekil 4.31 Model-5 manyetik alan dağılımı (faz 90°) (kontur görünüm)	57
Şekil 4.32 Model-5 Lorentz kuvvet yoğunluğu	57
Şekil 4.33 Model-6 elektrik alan dağılımı (faz 0°)	58
Şekil 4.34 Model-6 manyetik alan dağılımı (faz 90°).....	58
Şekil 4.35 Model-7 kesit görünüm.....	59
Şekil 4.36 Model-7 elektrik alan dağılımı (faz 0°)	59
Şekil 4.37 Model-7 manyetik alan dağılımı (faz 90°).....	59
Şekil 4.38 Model-8 (kesit görünüm)	60
Şekil 4.39 Model-8 elektrik alan dağılımı (faz 0°)	60
Şekil 4.40 Model-8 manyetik alan dağılımı (faz 90°).....	61
Şekil 4.41 Model-9 elektrik alan dağılımı (faz 0°) (Mod-1).....	61
Şekil 4.42 Model-9 manyetik alan dağılımı (faz 90°) (Mod-1)	62

Şekil 4.43 Model-9 elektrik alan dağılımı (faz 0°) (Mod-2).....	62
Şekil 4.44 Model-9 manyetik alan dağılımı (faz 90°) (Mod-2)	62
Şekil 4.45 Model-9 elektrik alan dağılımı (faz 0°) (Mod-3).....	63
Şekil 4.46 Model-9 manyetik alan dağılımı (faz 90°) (Mod-3)	63
Şekil 4.47 Model-9 elektrik alan dağılımı (faz 0°) (Mod-4).....	63
Şekil 4.48 Model-9 manyetik alan dağılımı (faz 90°) (Mod-4)	63
Şekil 4.49 Model-9 elektrik alan dağılımı (faz 0°) (Mod-5).....	64
Şekil 4.50 Model-10 manyetik alan dağılımı (faz 90°) (Mod-5)	64
Şekil 4.51 Model-9 farklı modlara göre frekans dağılımı.....	64
Şekil 4.52 Dizayn-1 katı modeli	65
Şekil 4.53 Dizayn-1 katı modeli (kesit görünümü).....	66
Şekil 4.54 Dizayn-2 katı modeli (kesit görünümü).....	66
Şekil 4.55 Dizayn-2 parçacık dağılımı görünümü	67
Şekil 4.56 Dizayn-3 katı modeli (kesit görünümü).....	67
Şekil 4.57 Dizayn-3 parçacık dağılımı görünümü	68
Şekil 4.58 Dizayn-4 katı modeli	68
Şekil 4.59 Dizayn-4 katı modeli (kesit görünümü).....	69
Şekil 4.60 Dizayn-4 parçacık dağılımı görünümü	69
Şekil 4.61 Örnek sistem mimarisi [27]	70
Şekil 4.62 SRF kaviterler için alternatif güç kaynağı tasarımı.....	71

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 Yakıt hücresi çeşitleri	7
Çizelge 2.2 Yakıt hücresi çeşitlerinin avantajları ve dezavantajları	8
Çizelge 2.3 Hızlandırıcı alanında sıklıkla kullanılan programlar [14].....	18
Çizelge 2.4 Termoiyonik emisyon parametreleri [16]	21
Çizelge 3.1 Model tablosu özeti.....	22
Çizelge 3.2 Niyobyum özellikleri [17].....	23
Çizelge 3.3 Eliptik Tesla kavite boyutları [19]	24
Çizelge 3.4 PEC malzeme özellikleri.....	28
Çizelge 4.1 Kavite özellikleri ve değerleri.....	53

1. GİRİŞ

Günümüz dünyasında artan enerji tüketim ihtiyaçları doğrultusunda alternatif enerji kaynaklarının devreye alınması, var olan kaynaklara ilişkin enerji üretim sistemlerinin verimliliklerinin arttırılmasına yönelik çalışmalar hız kazanmaktadır. Bu kapsamda hidrojen teknolojileri de önemli düzeyde ilgiye sahiptir. Öncelikle temiz enerji kaynağı olması sebebiyle daha önemle tercih edilen hidrojen teknolojisine 2030 yılına kadar geçiş süreci ile ülkemizde 2030 yılına kadar 250 Milyar TL gelir beklenmektedir [1].

Enerjinin üretimi ve kontrolünün ülkeler arasında stratejik bir silah haline gelebileceği açıkça görülmektedir. Bu nedenle yakıt hücresi teknolojisi konusunda çalışmalar yapmak son yıllarda büyük önem kazanmıştır. Günümüze kadar dünyada alkali, eriyik karbonat, katı oksit ve Proton Değişimli Membran (Proton Exchange Membrane - PEM) yakıt hücreleri yaygın olarak kullanılmıştır. Yakıt hücrelerinin, enerji üreten alternatif sistemlere göre bulunan avantajlarının yanı sıra son kullanıcı tarafından da sürekli çalışabilme, sistem çıkışında sağladığı güç ve soğutma sistemi tipine (hava soğutmalı ya da su/sıvı soğutmalı) göre sessiz çalışabilme özellikleri nedeniyle tercih edilebilmektedir.

Yüksek teknoloji üretebilmek ve geliştirebilmek amacıyla parçacık hızlandırıcı sistemlerin çalışma prensiplerinin anlaşılması, alt sistem seviyesinde ürünlerin üretilmesi, kontrol algoritmalarının oluşturulması, soğutma ve diyagnostik sistemlerinin devreye alınması gibi çok sayıda ve sonsuz emek gerektirecek konularda detaylı çalışmak gerekmektedir.

Bu tez kapsamında hem parçacık hızlandırıcı sistemler hem de PEM Yakıt Hücresi başlıkları ele alınmış, iki teknolojinin ortak kesişim kümesinde yer alabileceği düşünülen konularda orijinal çalışmalar yürütülmüştür.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1 Yakıt Hücresi Nedir?

Yakıt hücresi, kimyasal enerjinin elektrik enerjisine dönüşümünü sağlayan ve çıkışında DC güç çıkışı elde edilen bir sistemdir. Elektrolizin tam tersi şeklinde işlemektedir. Elektroliz sırasında suya elektrik verilmesi suretiyle hidrojen ve oksijen ayrışımı yapılmaktadır. Yakıt hücresinde ise yakıt olarak hidrojen ile oksitleyici olarak oksijenin sistemi beslemesi sayesinde oluşan tepkime ile su, ısı ve enerji elde edilmektedir. Yakıt hücresi çıkışında elde edilen DC güç, olduğu gibi kullanılabileceği gibi güç elektroniği devreleri sayesinde daha yüksek ya da düşük DC gerilimlere de dönüştürülebilir. Ayrıca, kullanım ihtiyacına göre AC gerilim de elde edilebilir.

Özellikle son yüzyıl içerisinde devletlerin politikalarını belirleme gücüne sahip kömür, petrol ve doğalgaz gibi fosil yakıtlar uzun yıllar boyunca global yaşamın vazgeçilmez bir parçası olmuştur. Fosil yakıtların elde edilmesi, taşınması, dağıtılması ve kullanımı gibi temel parametreler, uzun yıllar boyunca onlarca ülkenin ve yüzlerce firmanın yaptığı üretim dağıtım altyapısının eksiksiz oluşturulmasıyla tüm dünyada yaygın olarak kullanılmaktadır. Fosil yakıtların kullanılması ile ortaya çıkan sera gazlarının emisyon azaltımı amacıyla, 05 Ekim 2016 tarihinde global düzeydeki sera gazlarının toplam emisyon değerinin yarısından fazlasını oluşturan en az 55 ülke Paris İklim Anlaşması' nı imzalanmış ve bu anlaşma 04 Kasım 2016 tarihinde yürürlüğe girmiştir [2].

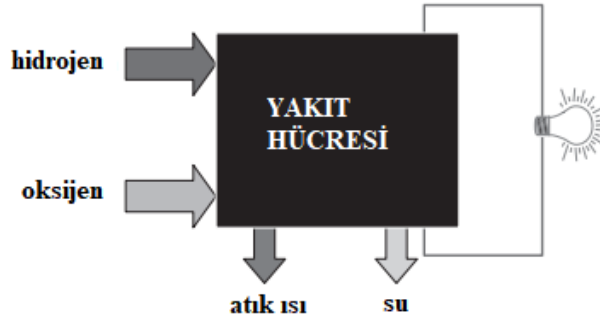
Yakıt hücrelerinin günümüzde yaygın olmasının başlıca sebeplerinden ilki, sistem çalışırken reaksiyon sonucu oluşan saf su, ısı ve enerji haricinde başka çıktı bulunmamasıdır. Bu da sistemin sıfır emisyonlu sistem olarak adlandırılmasına sebep olur. Ayrıca, yakıt hücrelerinin içten yanmalı motorlara göre daha verimli olması yaygınlaşma sebeplerinin temel nedenlerinden ikincisi olarak ele alınabilir.

Tipik olarak, yakıtlardan elektrik üretimi süreci birkaç enerji dönüştürme adımını içerir. Bu adımlar; yakıtın kimyasal enerjisinin önce ısıya sonra ise mekanik enerjiye dönüştürülmesi ve son olarak mekanik enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülmesi şeklinde özetlenebilir. Yakıt hücrelerinde, bu süreçler yerine ve hareketli parçalar

kullanılmadan tek adımda elektrik enerjisi üretilmektedir. Bu nedenle de yakıt hücreleri konvansiyonel güç kaynaklarına göre basit ve oldukça verimli sistemlerdir.

2.1.1 Yakıt hücresinin çalışması

Bir yakıt hücresi en temel yapısıyla bir katot, anot ve elektrolitten oluşmaktadır. Katot ve anotta ortaya çıkan etkileşimler (reaksiyonlar) sonucu bu kısımlarda potansiyel meydana gelir. Buradaki etkileşimler sonucunda diğer yandan hem anot hem de katotta iyon ve elektronlar da oluşmaktadır. Burada oluşan elektron iletken bir hattan aşağıda şekilde görüldüğü gibi iyonsa iyon geçirgen bir elektrolitten başka diğer elektrota doğru hareket eder (Şekil 2.1). Elektron parçacıklarının hareketi yük akışını yani akımı meydana getirir. Elektrotların arasında oluşan potansiyel ve akım değeri sistemin ortaya çıkaracağı gücü oluşturmaktadır. Bir yakıt hücresinde etkileşimlerin sürekliliğinin sağlanması için yakıt hücresine kesintisiz olarak etkileşime giren maddeler gönderilmelidir ve ayrıca etkileşim ürünleri de ortamdan uzaklaştırılmalıdır [3].

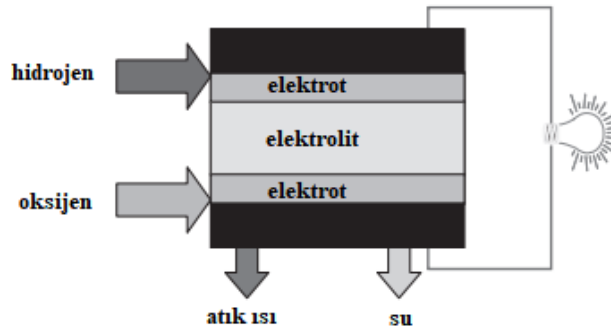


Şekil 2.1 Yakıt hücresinin tek aşamada enerji dönüşümü [4]

Yakıt hücreleri bazı açılardan bataryalara benzemektedir. Yakıt hücresi içerisinde negatif ve pozitif olarak adlandırılan elektrotlar bulunmaktadır. Ayrıca, elektrokimyasal reaksiyonlar neticesinde DC elektrik üretilmektedir. Pilden farklı olarak yakıt hücreleri enerji depolamaz ve anlık olarak enerji üretmektedir. Gücün kesintisiz olabilmesi için yakıt ve oksitleyicinin devamlılığı esastır. Pilden diğer bir farkı da, yakıt hücresi içerisindeki elektrotların kimyasal değişime uğramamasıdır. Yakıt hücresi içerisinde gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyonlar neticesinde atık ısı, su ve enerji açığa çıkmaktadır. Yakıt hücresi sistemi bu reaksiyonların gerçekleşmesi için ihtiyaç duyulan

parametrelerin sağlanmasını da kontrol etmektedir.

Pilin güç üretmesi için ihtiyaç duyduğu elektrokimyasal reaksiyon pil içerisinde mevcut durumda olup, kullanıldıkça pilin ömrü azalmaktadır. Bazı piller ise şarj edilebilir özellikte tasarlanıp defalarca kullanılırlar. Şarj işlemi ise dışarıdan harici bir elektrik uygulandığında pil içerisindeki elektrokimyasal reaksiyon ters yönde gerçekleşmektedir. Yakıt hücresinin en büyük avantajı ise, reaksiyona giren maddelerin (hidrojen ve oksijen/hava) sağlandığı sürece çalışmaya yani enerji üretmeye devam etmektedir.



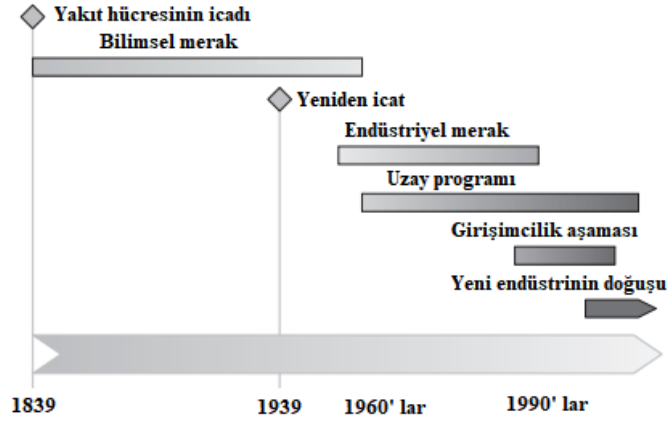
Şekil 2.2 Yakıt hücresi elektrot ve elektrolit gösterimi [4]

1842 yılında İrlanda kökenli Sir William Grove ilk yakıt pili olarak tanımlanabilecek gazlı elektrik pili (Gaseous Voltaic Battery) olarak tanımladığı sistem ile hidrojen ve oksijenin reaksiyona girmesi sayesinde elektrik üretebilmiştir. Günümüzdeki yakıt hücresinin temelleri ise Almanya-İsviçre kökenli bilim-insanı Christian F. Shoenbein tarafından 1938 yılında atılmıştır [4].

Bu dönemde, 1909’ da Nobel Ödülü sahibi ve fiziksel kimya alanının kurucusu W. F. Ostwald, yakıt hücrelerinin nasıl çalıştığına dair teorik anlayışı ortaya koymuştur. İçten yanmalı motorlardaki enerji dönüşümünün Carnot verimliliği ile sınırlı olduğunu ve kabul edilemez seviyelerde atmosfer kirliliğine neden olduğunu, doğrudan elektrik üreten yakıt hücrelerinin oldukça verimli, sessiz olduğunu ve kirlilik yaratmadığını fark etmiştir [4]. Yakıt hücrelerinin tarihsel gelişimi Şekil 2.3’ te gösterilmiştir.

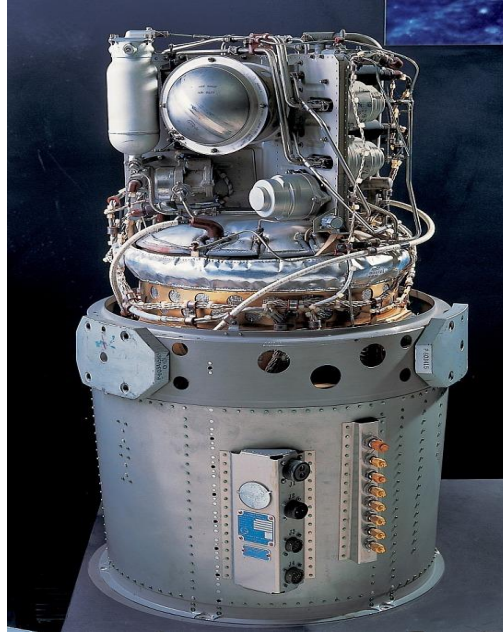
Yakıt hücrelerindeki pratik uygulamalı cihazların yapılması Grove’ un yaptığı çalışmalardan uzun yıllar sonra gerçekleştirilmiştir. 1932 yılında İngiliz mühendis

Francis T. Bacon pratik yakıt hücresi uygulamaları üzerinde çalışmıştır. 1952 yılında bu çalışmalar neticesinde 5 kW güç mertebesine erişebilen yakıt hücresi yığını yapılmıştır. 1960' lı yıllarda "General Electric" şirketi "Gemini" uzay çalışmaları programında kullanılan ilk polimer membranlı yakıt hücresini ortaya koymuştur.



Şekil 2.3 Yakıt hücresi tarihsel gelişimi [4]

Daha gelişmiş yakıt hücresi Şekil 2.4' te görüldüğü gibi Apollo uzay programında yaşam desteği ve iletişim ihtiyaçları kapsamında güç üretecek şekilde tasarlanmıştır.



Şekil 2.4 Apollo programı kapsamındaki yakıt hücreleri [5]

Bu yakıt hücreleri, Pratt ve Whitney tarafından Bacon' ın patentlerinden alınan lisansa dayalı olarak yapılmıştır. 1960'ların ortalarında General Motors, Union Carbide tarafından geliştirilen yakıt hücreleriyle çalışan bir minibüsle deneyler yapmıştır. Şekil 2.5' te görüldüğü gibi 1989' da Perry Technologies'in bir bölümü ve geliştirmekte olan bir Kanada şirketi, Ballard ile çalışan Perry Energy Systems, polimer elektrolit membran yakıt hücresi ile çalışan bir denizaltıyı başarıyla göstermiştir. 1993 yılında ise Ballard Power Systems firması yakıt hücresi ile çalışan otobüsleri tanıtmıştır [4].



Şekil 2.5 PC1401 [6]

2.1.2 Günümüzdeki farklı yakıt hücreleri

Günümüzde birçok farklı yakıt hücresi vardır. Bunların farklı çalışma prensip ve kullanım alanları ve kullandıkları farklı yakıtları bulunmaktadır. Yakıt hücreleri daha çok elektrolit veya da kullanılan yakıt türüne göre adlandırılırlar. Yaygın olarak kullanılan hücreler:

- Proton Geçirgen Membranlı Yakıt Hücreleri (PEM)
- Alkali (Bazik) (AFC)
- Fosforik Asit (PAFC)
- Eriyik Karbonat (MCFC)
- Katı Oksit (SOFC)
- Doğrudan Alkol (Metanol, Etanol, Formik Asit) Yakıt Hücreleri (DMFC, DEFC, DFAFC)

Ayrıca

- Doğrudan Bor Hidrür (DBFC)

- Doğrudan Kömür (DCFC)
- Doğrudan Glikoz (DGFC)

şeklinde.

Yukarıdaki hücrelerden başka günümüzde deneme aşamasında olan çok fazla kullanılan yakıt hücreleri de mevcuttur. Bunların bir kısmı düşük ısıda dahi çalışmaktadır. Hidrojenle çalışan yakıt hücreleri dışında alkol, karbon monoksitle ve glikozla çalışan çeşitleri de bulunmaktadır. Bunlar Çizelge 2.1’ de gösterilmektedir [4].

Çizelge 2.1 Yakıt hücresi çeşitleri

Yakıt Hücresi Çeşidi	Elektrolit	Mobil İyon	Çalışma Sıcaklığı (°C)	Güç Aralığı (W)	Yakıt Türü	Verim (%)
PEM	Nafion	H ⁺	20-100	1 - 2·10 ⁵	H ₂	35-50
AFC	Bazik Solüsyon (NaOH, KOH)	OH ⁻	50-100	1 – 2,5·10 ⁵	H ₂	35-50
PAFC	Fosforik Asit (H ₃ PO ₄)	H ⁺	190-220	10 - 1·10 ⁶	H ₂	35-50
MCFC	Eriyik Alkali Karbonat (Li ₂ CO ₃ , K ₂ CO ₃)	CO ₃ ⁻²	600-650	2·10 ⁵ - 10 ⁷	H ₂ , CO	45-60
SOFC	Seramik (YSZ, CeO ₂)	O ⁻²	500-1000	1 - 2,5·10 ⁵	H ₂ , CO, CH ₄	45-60
DMFC, DEFC, DAFC	Nafion	H ⁺	50-100	< 1 - 250	CH ₃ OH, C ₂ H ₅ OH, HCOOH	25-40
DBFC	Bazik Solüsyon, Katyon veya Anyon Geçirgen Zar	OH ⁻	20-100	1 - 200	BH ⁻	35-50
AEMFC	PFSA	OH ⁻	20-100	1 - 10 ³	H ₂	25-40
DCFC	Eriyik hidroksitler, Eriyik karbonat, YSZ tabanlı elektrolitler	O ⁻²	400-800	> 1·10 ⁶	C	80
DGFC	Hidrojel	H ⁺	10-50	1-20·10 ⁻⁶	C ₆ H ₁₂ O ₆	Düşük

Farklı yakıt hücrelerinin birbirlerine göre avantajları, dezavantajları ve ayrıca uygulama alanları Çizelge 2.2’ de verilmektedir.

Çizelge 2.2 Yakıt hücresi çeşitlerinin avantajları ve dezavantajları

Yakıt Hücresi Çeşitleri	Avantajları	Dezavantajları	Uygulama Alanları
PEM	Düşük sıcaklık	Çok saf H ₂ (%99,99)	Portatif Sistemler
	Yüksek enerji yoğunluğu, hafif	Pahalı katalizör	Jeneratör
	Hızlı çalışma	-	Askeri Sistemler
	Katı Elektrolit	-	
AFC	Katottaki aktivasyon kaybı düşük	Çok saf H ₂	Uzay Araçları
	Sıvı elektrolit, yüksek temas	Pahalı katalizör	
PAFC	Saflığı düşük hidrojen kullanılır	Pahalı katalizör	Elektrik Santralleri
	Sıvı elektrolit, yüksek temas	Düşük Enerji yoğunluğu	Orta Ölçekli firmalar için Elektrik ve Isı
MCFC	Yüksek verim	Yüksek sıcaklık	Elektrik Santralleri
	Yakıt çeşitliliği	Korozyon	
	Ucuz katalizör	-	
	Sıvı elektrolit, yüksek temas	-	
SOFC	Yüksek verim	Yüksek sıcaklık	Elektrik Santralleri
	Yakıt çeşitliliği	Korozyon	Orta Ölçekli İşletmeler için Isı ve elektrik
	Ucuz katalizör	Hücre üretimi zor ve pahalı	Portatif Sistemler
	Katı Elektrolit	Uzun ilk çalışma süresi	-
DMFC, DEFC, DAFC	Ucuz yakıt	Düşük verim	Portatif Sistemler
	Kolay depolanan sıvı yakıt	Metanol zehirli bir yakıttır	
DBFC	Alternatif yakıt	Yakıtın elde edilmesi zor	Deneme aşamasında
	Yüksek açık uç gerilimi		
AEMFC	Yüksek katalitik aktivite	Düşük iyonik iletkenlik	Deneysel aşamada
	Ucuz katalizör		
	pH nötr'e yakın yani korozyona dayanıklı		
DCFC	Ucuz yakıt	Yüksek Sıcaklık	Elektrik Santralleri
	Yüksek Verim	Korozyon	
	Düşük CO ₂ emisyonu	Küçük boyutta üretim	
	Geniş yakıt kaynakları	Kullanılan yakıtı bağı olarak egzoz gazı filtrelenmesi	
DGFC	Yakıt vücutta bol miktarda bulunmakta	Düşük güç yoğunluğu	Kalp pili, İlaç Pompası, Sensör
	Glikozdan bakterisiz olarak akım üretimi		

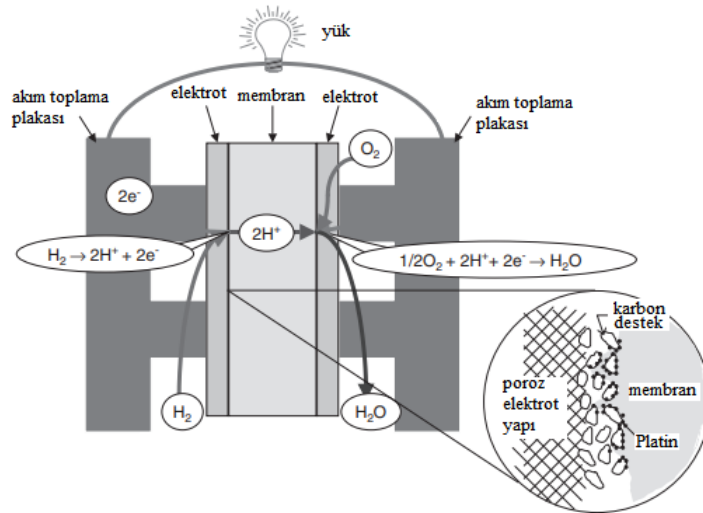
Düşük ortam sıcaklıklarında çalışabilme, içten yanmalı motorlara göre yüksek enerji yoğunluğuna sahip olma ve hızlı ilk çalışma/ devreye alma (quick start-up) avantajları nedeniyle PEM yakıt hücresi tercih edilmektedir.

2.1.3 PEM yakıt hücresi nedir?

PEM, polimer elektrolit membran veya proton değişimli membranı anlamına gelen kısaltma olarak kullanılmaktadır. Bazen polimer membranlı yakıt hücreleri veya basitçe membranlı yakıt hücreleri olarak da adlandırılmaktadır. 1960' larda SPE yakıt hücresi ifadesi kullanılmıştır. Bu teknoloji, kompakt yapısı, çalışma koşulları, kullandığı temiz yakıt ve yüksek güç yoğunluğu bakımlarından en umut verici yakıt hücresi şeklinde kabul edilmektedir [7].

PEM yakıt hücresinin kalbinde en önemli bileşen olarak polimer bir membran bulunmasıdır. Gazlara karşı geçirimsiz olup protonları iletmektedir. Dolayısıyla proton değişimli membran ifadesi bu özelliğinden dolayı kullanılmaktadır. Elektrolit görevi gören membran, elektriği ileten iki gözenekli elektrot arasında sıkıştırılmaktadır. Bu elektrotlar genel olarak karbon kumaştan veya karbon fiber kâğıttan yapılmaktadır. Ticari olarak kullanılan en yaygın polimer olan Nafion® membran kullanılmaktadır [7].

Hücre konfigürasyonunun ve temel çalışma ilkelerinin şematik diyagramı Şekil 2.6' da gösterilmektedir.



Şekil 2.6 PEM yakıt hücresi çalışma prensibi

Elektrokimyasal reaksiyonlar katalizörün yüzeyinde gerçekleşmektedir. Membranın bir tarafından beslenen hidrojen, birincil bileşenlerine, yani protonlara ve elektronlara ayrılır. Her hidrojen atomu bir elektron ve bir protondan oluşmaktadır. Protonlar membranın içinden geçerken, elektronlar elektriği ileten elektrotlardan yani akım toplayıcı plakalardan toplanır ve faydalı işler yaptıkları dış devreden geçerek membranın diğer tarafına iletilir. Membran ile diğer elektrot arasındaki katalizör noktalarında, membrandan geçen protonlar ve membranın katot tarafından beslenen oksijen ile karşılaşılır. Elektrokimyasal reaksiyon gerçekleşir, su oluşur ve daha sonra aşırı oksijen akışıyla hücrenin dışına itilir. Bu eşzamanlı reaksiyonların net sonucu olarak dış devreden elektron akımı gerçekleşir.

Hidrojen tarafı negatiftir ve anot olarak adlandırılırken, yakıt hücresinin oksijen tarafı pozitifdir ve katot olarak adlandırılır. Her bir hücre yaklaşık 1V ürettiğinden, kısaca gösterileceği gibi, bazı pratik voltajlar üretmek için seri olarak daha fazla hücreye ihtiyaç duyulur. Uygulamaya bağlı olarak tasarlanacak olan yığın sayesinde farklı çıkış voltajı seviyeleri elde edilmektedir.

PEM yakıt hücresinin birleşimlerinden yığınlar meydana gelmektedir. Bu sayede istenilen voltaj seviyesinde çalışabilecek yakıt hücresi elde edilmektedir. Yakıt hücresi yığınının aşağıdakileri gerçekleştirmek için bir destek sistemine ihtiyacı vardır:

- Yığında gerçekleşecek olan reaksiyon için gerekli olan hidrojenin (yakıtın) ve oksijenin/havanın (oksitleyicinin) sağlanması (yakıt besleme sistemi),
- Atık ısıya dikkat edilmesi ve yığın sıcaklığının korunması (yığın kontrol sistemi)
- Güç çıkışının düzenlenmesi, kontrol edilmesi ve koşullandırılması (yığın kontrol sistemi ya da güç kontrol sistemi),
- Yığın özelinde kritik parametrelerin (yığın sıcaklığı, yığın çıkış voltajı/akımı, hücre gerilim değerleri vb) izlenmesi (yığın kontrol sistemi),
- Yığın ve sistem bileşenlerinin başlatılmasının, çalışmasının ve kapatılmasının kontrol edilmesi (yığın kontrol sistemi).

Yakıt hücrelerindeki elektrokimyasal reaksiyonlar, membranın her iki tarafında- anot ve katot tarafında- aynı anda gerçekleşmektedir. Temel yakıt hücresi reaksiyonları:



Genel reaksiyon, hidrojen yanma reaksiyonu ile aynıdır. Yanma ekzotermik bir süreç olup açığa enerji çıkartmaktadır.

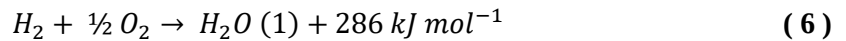
Bir kimyasal reaksiyonun ısısı (veya entalpisi), reaksiyon sonucu oluşan madde ile reaksiyona giren maddelerin oluşum ısıları arasındaki farktır. Denklem (4) için bu şu anlama gelir:

$$\Delta H = (h_f)_{H_2O} - (h_f)_{H_2} - \frac{1}{2} (h_f)_{O_2} \quad (4)$$

Sıvı suyun oluşum ısısı 25°C' de -286 kJ mol⁻¹ dir ve elementlerin oluşum ısısı tanım gereği sıfıra eşittir. Bu durumda aşağıdaki ifade geçerli olmaktadır:

$$\Delta H = (h_f)_{H_2O} - (h_f)_{H_2} - \frac{1}{2} (h_f)_{O_2} = -286 \text{ kJ mol}^{-1} - 0 - 0 = -286 \text{ kJ mol}^{-1} \quad (5)$$

Bir kimyasal reaksiyonun entalpisinin negatif işaretinin, geleneksel olarak, reaksiyonda ısının salındığı anlamına gelmektedir. Yani ekzotermik bir reaksiyondur. Denklem (4) şimdi şu şekilde yeniden yazılabilir:



Entalpi reaksiyonun sağ tarafına yerleştirildiği için burada pozitif bir işaret kullanılmaktadır ve bu açıkça ısının reaksiyonun bir ürünü olduğu anlamına gelmektedir. Bu denklem sadece 25°C' de geçerlidir, yani hem reaksiyona giren gazlar hem de reaksiyon sonucu oluşan su atmosferik basınç altında ve 25°C' de sıvı haldedir.

2.1.4 PEM yakıt hücresi uygulama alanları

PEM yakıt hücresi uygulama alanları oldukça geniştir ve en önemlileri şunlardır:

Taşıtlar ve Ulaşım Araçları: PEM yakıt hücreleri, otomobiller, otobüsler, kamyonlar,

trenler ve hatta gemiler gibi farklı ulaşım araçlarında kullanılabilecek çevre dostu bir enerji kaynağıdır. Hidrojen depolama ve yakıt hücresi teknolojisinin gelişmesiyle, taşıtların sıfır emisyonlu (zararlı gazların atmosfere salınımı bulunmamaktadır) hareket etmesi mümkün hale gelmektedir.

Enerji Üretimi: PEM yakıt hücreleri, küçük ölçekte enerji üretimi için kullanılabilmektedir. Evler ve işyerlerin ihtiyaç duyacağı elektriğin üretilmesi amacıyla da kullanılabilmektedir. Ayrıca, enerji şebekelerine destek sağlamak veya acil durum güç kaynağı olarak da kullanılabilmektedir.

Askeri Uygulamalar: Hareketli askeri üsler, kamplar ve keşif araçları gibi askeri uygulamalarda da PEM yakıt hücreleri güç üretmesi açısından tercih edilebilmektedir. Ayrıca, savaş gemisi, denizaltı gibi büyük sistemlerde de uzun yıllardır kullanılmaktadır. Geleneksel yakıtlardan güç elde edilirken, PEM daha sessiz ve temiz bir enerji kaynağı olarak kabul edilmekte ve kullanımı gün geçtikçe daha fazla tercih edilmektedir.

Uzay Araçları: Uzay araştırmalarında, uzay istasyonları, roketler ve uzay araçları için enerji üretiminde PEM yakıt hücreleri kullanılabilir. Uzay teknolojileri geliştirilmesi safhasında hidrojen ve oksijen kullanımı ve depolanması konusunda da alt teknolojiler geliştirilmektedir. Bu kapsamda uzay araçları içerisinde de PEM yakıt hücreleri kullanılmaktadır.

Taşınabilir Cihazlar: Taşınabilir elektronik cihazlar, dizüstü bilgisayarlar, cep telefonları ve kameralar gibi cihazlar için de PEM yakıt hücreleri güç kaynağı olarak kullanılabilmektedir. Bu sayede uzun pil ömrü ve hızlı şarj imkânı sunabilmektedir.

Yenilenebilir Enerji için Depolama: PEM yakıt hücreleri yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen enerjinin depolanması veya dengelenmesi amacıyla kullanılabilmektedir. Enerji talebinin dalgalı olduğu durumlarda enerji depolamak ve gerektiğinde geri vermek için kullanılabilmektedir.

Tıbbi Cihazlar: Acil durum tıbbi ekipmanlar veya yerleşim yerinden uzak bölgelerdeki

sağlık hizmetlerinin desteklenmesi için PEM yakıt hücreleri kullanılabilir. Tıbbi cihazlar için kesintisiz güç kaynağı olarak kullanılabilir.

Endüstriyel Uygulamalar: Endüstriyel tesislerde enerji gereksinimlerini karşılamak, proses ısıtma veya kimyasal üretim gibi alanlarda PEM yakıt hücreleri kullanılabilir.

Bu uygulamalar, PEM yakıt hücrelerinin çeşitli alanlarda potansiyelini göstermektedir. Ancak, maliyet, hidrojen depolama ve dağıtım gibi zorluklar hala aşılması gereken engellerdir. İleriki yıllarda teknolojinin ilerlemesiyle bu zorlukların üstesinden gelinmesi ve PEM yakıt hücrelerinin daha geniş çapta kullanılması beklenmektedir [4].

2.2 Hızlandırıcı Sistemler

Hızlandırıcı teknolojisi yüklü parçacıkları alan içerisinde hızlandırma prensibine dayanmaktadır [8]. Bu sayede daha küçük boyutlarda ($E \sim 1/\lambda$, küçük dalga boyu veya diğer bir deyişle küçük mesafeleri incelemek için yüksek enerji gereklidir) atomaltı detaylı fizik çalışmaları, araştırmaları yapılabilir.

20. yüzyılın başlarında Ernest Rutherford ve ortalarında ise Robert Hofstadter hızlandırıcı konusunda önemli çalışmalara imza atmıştır. Hızlandırıcı teknolojisindeki yolculuk CERN gibi, bilinen atom altı dünyanın yapı taşlarının keşfini sağlayan, devasa komplekslere yönelmesini sağlamıştır. Yapılan araştırmalar hızlandırıcı fiziğinde sınırları zorlamakla kalmayıp, gelecekte yapılması planlanan faaliyetlerin ön hazırlık çalışmaları da sınırların ötesine geçmek istediğimizin bir kanıtı olarak düşünülebilir.

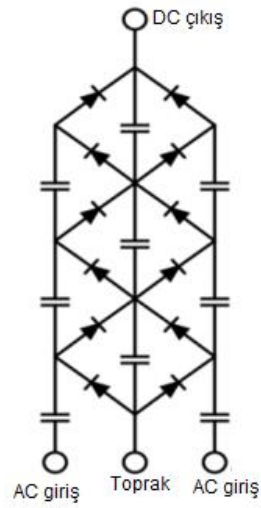
1911 yılında, Ernest Rutherford, ince altın film tabakasına α parçacıklarını yönlendirmesi sonucunda parçacıkların izledikleri yolları incelemiştir. Bu deney çalışması sonucunda; atomun yapısının genelde boşluklu bir yapıda olduğu, atomun kütlesinin çoğunun çekirdek olarak adlandırılan merkezdeki yapı içerisinde barındığını, çekirdeğin pozitif (+) yüklü olduğunu, negatif (-) yüklü parçacıkların çekirdek etrafında bulunduğu gibi sonuçlar elde edilmiştir. Günümüzde bildiğimiz nötron parçacığı ve elektronların yerleri

ile hareketlerine ilişkin bilgilere o tarihlerde ulaşamamıştır [9]. Ancak, atomun anlaşılabilmesi için oldukça önemli bir çalışma olarak tüm dünyada benimsenmiştir.

Yaklaşık 10 yıl sonra α parçacıkları elektrostatik hızlandırıcılar kullanılarak 5 MeV enerji mertebesine kadar hızlandırılabilmiştir. Elektrostatik hızlandırıcılar, yüklü parçacıkların uygulanan potansiyel farkına maruz kalarak hızlandırılması prensibine dayanmaktadır. DC gerilim üretebilen iki kutuplu paralel levhalar ile basit anlamda hızlandırma sağlanabilmektedir. Elektrik alan $\vec{E} = -\vec{\nabla} V$ olarak hesaplanmakta ve ölçülmektedir [8].

İngiltere'deki Cavendish Laboratuvarında 1932 yılında Rutherford' un öğrencileri Cockroft ve Walton protonu 400 keV'lik enerjiye kadar hızlandırabilmiş ve lityum elementi tabakasına çarptırmışlardır. Böylelikle lityum atomunun çekirdeği protonlar sayesinde parçalanmış ve He atomu elde edilmiştir [8]. Cockroft ve Walton hızlandırıcısına ait şema ve görüntü Şekil 2.7' de sunulmuştur.

Benzer yıllarda Amerika Birleşik Devletleri' nde yüksek potansiyele ulaşan sistemler tasarlanmıştır. Sistem, elektrik motoru kullanmak suretiyle elektrik yüklerini toplama prensibine dayanmaktadır. Sistemde; elektrik yüklerinin biriktirildiği küre, fırça ve kayış bulunmaktadır. Toplayıcı fırça sayesinde yükler iletken küre üzerine aktarılmaktadır. Küre üzerinde biriken yük miktarı arttıkça kürenin potansiyeli de doğru oranda artmaktadır. Van de Graaff jeneratörü olarak da bilinen sistem ile 20 MeV enerji seviyesine çıkılabilmiştir. Şekil 2.8' de Van de Graaff Jeneratörü görseli gösterilmiştir.



Şekil 2.7 Cockcroft ve Walton Hızlandırıcısı [8]



Şekil 2.8 Van de Graaff Jeneratörü [10]

2.2.1 Hızlandırıcı çeşitleri ve özellikleri

Üretecın potansiyeline bağlı olarak, elektrostatik hızlandırıcılar da parçacıkların sahip olabileceği en büyük enerji değerleri, değişiklik göstermektedir. Ancak AC gerilim kullanılan hızlandırıcılarda, parçacıkların en yüksek enerji değerleri kullanılan AC

kaynağın potansiyel seviyesi yerine hızlandırıcının boyutlarına bağlı olarak değişmektedir [8].

Radyo Frekansı (RF), tipik olarak 3 kHz ile 300 GHz spektrumuna giren salınım hızını ifade eder. Bu frekans aralığında çalışan ve bir AC voltaj jeneratörü kullanan hızlandırıcılara RF hızlandırıcılar adı verilmektedir [8].

İsveçli fizikçi Gustave Ising, 1924 yılında parçacık hızlandırıcılarında AC gerilim kullanıma yönelik fikri ortaya atmıştır. 1928 yılında Rolf Wideroe bu prensibe dayalı hızlandırıcı sistemini geliştirmiştir. 25 kV güce sahip güç kaynağı ile pozitif (+) yüklü iyonlar 50 keV enerji seviyesine kadar hızlandırılabilmiştir.

RF hızlandırıcıları iki ayrı başlık altında ele alınmaktadır.

- Doğrusal hızlandırıcılar; parçacıklar doğrusal yol boyunca hızlandırıcı sisteminden bir kez geçerek enerji kazanırlar ve hızlanırlar. Yapılacak deneye göre çarpıştırmanın olacağı bölüme ya da deney bölümüne doğru iletilirler.
- Dairesel hızlandırıcılar; parçacıklar hızlandırıcı sisteminden defalarca geçmek suretiyle enerji kazanırlar ve bu sayede hızlanırlar. Daire şeklinde tasarlanmış olan hızlandırıcı sisteminde yeri sabit olan hızlandırma elemanlarından geçtikleri her tur enerji kazanırlar. Böylelikle; parçacıkların tur içerisinde kaybettikleri enerjiyi geri kazanması sağlanır, ya da benzer şekilde hızlandırma süreci istenilen seviyeye gelene kadar devam ettirilir.

2.2.2 Hızlandırıcılarda süperiletken yapılar

Elektriksel yüklü parçacıkların RF ile hızlandırılmasında konusunda önemli rol oynayan süperiletkenlik ile ilgili olarak; 1908 yılında He gazının sıvılaştırıcı Heike Kamerlingh Onnes tarafından süperiletkenlik 1911 yılında keşfedilmiştir. İlerleyen dönemde (1928-1934 yılları arasında) Nb ve Pb gibi elementlerin süperiletkenlik özellikleri Walther Meissner tarafından keşfedilmiştir [11].

Benzer şekilde 1924 yılında Gustaf Ising tarafından öncülüğü yapılan RF hızlandırma konusundaki gelişmeler 1927-1928 yıllarında Rolf Wideröe tarafından inşa edilen ilk RF hızlandırıcı ile süperiletkenlik konusundaki çalışmaların başında gelmektedir [11].

1961 yılında Stanford Üniversitesi Yüksek Enerji Fiziği Laboratuvarı çalışanı William Fairbank süperiletken bir hızlandırıcı için öneri sunmuştur. Üç yıl sonra William Fairbank, Allan Schwettman ve Perry Wilson tarafından ilk kez kurşun kaplı bir yapı içerisinde elektronlar hızlandırılmıştır [11]. 1970 yılında John Turneaure ve Nguen Viet, aynı laboratuvarda 1,25 K sıcaklıkta, 8,5 GHz frekansta ve TM_{010} modunda çalışan süperiletken Nb kavite ile testler gerçekleştirilmiştir [12].

Son yıllarda ise RF süper iletkenlik teknolojisindeki olumlu gelişmeler neticesinde, hızlandırıcı tesislerinde normal iletken yapılara kıyasla süper iletken hızlandırıcı yapıların kullanımının arttığı gözlemlenmektedir [13]. Sürekli dalga (CW) ve uzun darbe çalışma modlarında yüksek hızlandırma alanı, E_{acc} ve boşlukta depolanan enerjinin bir RF periyodunda kaybedilen enerjiye oranını karakterize eden yüksek kalite faktörü, Q, başlıca sebeplerinden gösterilebilir [13].

2.2.3 Demet dinamiği ve demet parametreleri

Hızlandırıcı sistemin içerisinden geçirilerek enerjisi yükselen demetler için demetin faz uzayın yayınımlı (transverse boyutta (y-z eksen), boylamsal boyutta (x eksen)), demetin boyutu (RMS beam size), demetlenme uzunluğu (RMS bunch length), enerji dağılımı (energy spread), demetin hızı, ortalama parçacık enerjisi, uzay yükü (space charge field) [boylamsal] ile kavite ve solenoid alanları içerisindeki slice emittance, parlaklık gibi parametreler önem arz etmektedir.

Demet parametrelerinin hızlandırıcı sistem boyunca bilinmesi ve takip edilmesi gerekmektedir. Demet parametrelerinin takibi ASTRA koduyla yapılmaktadır. Gerçekte demet parametreleri diyagnostik sistemleri olan BPM, faraday kabı (faraday cup), OTR (yük ölçümü) gibi enstrümanlar ile yapılmaktadır.

2.2.4 Hızlandırıcı sistemlerinin tasarımında kullanılan programlar

Hızlandırıcı sistemlerin tasarımı sırasında ya da sistem içerisindeki demetin davranışlarının anlaşılabilmesi amacıyla deneyden önce bilgisayar programları ya da araçları yaygın olarak kullanılarak modellemeler yapılmaktadır. Hızlandırıcı alanında çalışmakta olan araştırmacılar, hızlı ve tekrarlanabilir hesaplamalar için üçüncü parti programlara başvururlar. İstenilen hesaplamaları yapabilen programlar piyasada mevcut değilse, araştırmacıların ekipleri içerisindeki yazılımcılarla gerçekleştirmektedirler. Bu nedenle, internette hızlandırıcı alanında araştırma laboratuvarlarının ya da enstitülerinin hazırlamış oldukları yazılımlara ya da bilgisayar programlarına rastlanılabilir. Çizelge 2.3’ te hızlandırıcı alanında yaygın olarak kullanılan bilgisayar programları ile yazılımlar listelenmiştir. Liste içerisinde mevcut yetenekleri belirtilmiş ve bu sayede karşılaştırma yapılabilir hale gelmişlerdir.

Çizelge 2.3 Hızlandırıcı alanında sıklıkla kullanılan programlar [14]

Program / Yazılım	Açıklama
ANSYS / HFSS	S-parametreleri ve normal mod (eigenmode) hesaplamalarında oldukça iyi sonuçlar alınabilmektedir. Parçacıklara ilişkin simülasyon yeteneği bulunmamaktadır.
COMSOL	Çoklu fizik ve tek fizik modelleme yetenekleri sağlayan bir simülasyon platformudur. Hesaplamalar yapmak ve sonuçları değerlendirmek için geometrileri, malzeme özelliklerini ve belirli olayları tanımlayan araçları kullanmaktadır.
CST	Zamana ve frekansa bağlı hesaplamalarda kullanılmaktadır. Üç boyutlu modelleme ve farklı fiziksel yaklaşımlar ile hesaplamalarda kullanılmaktadır. Kullanıcıya farklı analiz paketleri (mikrodalga, parçacık takibi vb) sunulmaktadır.
CSR TRACK	Sinkrotron radyasyonu etkilerinin doğrusal hızlandırıcıların ışın dinamiği üzerindeki simülasyonuna yönelik kullanılmaktadır. Faz uzayı girişi ve izlenen parçacık dağılımının analizi MATLAB arayüz programları ile yapılmaktadır.
ASTRA	Uzay yükü etkilerinin değerlendirilmesinde kullanılmaktadır.
ELEGANT	Tek parçacık dinamiği ve elektro-manyetik alan takibinde kullanılmaktadır.

Çizelge 2.3 Hızlandırıcı Alanında Sıklıkla Kullanılan Programlar [14] (devam)

Program / Yazılım	Açıklama
GENESIS	Genellikle FEL simülasyonlarında kullanılmaktadır.
SUPERFISH / POISSON	2B düzlemsel veya silindirik simetride statik ve RF elektromanyetik alanlar için FEM ile alan çözümü için kullanılmaktadır.
MAD-X	Tek parçacık dinamiği, Taylor haritalarında, zayıf-güçlü ışın-ışın etkileşimi ve sinkrotron radyasyon takibi konularında kullanılmaktadır.
OPAL	Tek parçacık dinamiği, Taylor haritalarında ve elektro-manyetik alan takibinde kullanılmaktadır.
PLACET	Tek parçacık dinamiği ve sinkrotron radyasyon takibi konularında kullanılmaktadır.

Tez çalışması kapsamında üç boyutlu modelleme ve parçacık/elektromanyetik analizler için CST Studio Suite kullanılmıştır.

CST Studio Suite; bünyesinde farklı alt-paketler barındırmaktadır. Örneğin, “Particle Studio”, parçacıkların hareketlerinin analizi için yaygın olarak kullanırken “Microwave Studio”, üç boyutlu modellerin elektromanyetik ve RF alanlar içerisindeki analizlerinin yapılabilmesi için yaygın olarak kullanılmaktadır.

CST Studio Suite; hızlandırıcı sistemleri bileşenleri tasarımında, güç elektroniği hesaplamalarında, elektromanyetik uyumluluk analizlerinde, uzay çalışmaları için ihtiyaç duyulan uygulamalarda, magnet tasarımında yüksek gerilim ve akım gerektiren alanlarda kullanılabilmektedir.

2.2.5 Hızlandırıcılarda kullanılan kaynak sistemleri

Hızlandırıcı sistemlerinde kaynak ve enjektör sistemleri, hızlandırıcı tesisine ve yapılacak olan hızlandırma çalışmalarına göre farklılık göstermektedir. Yapılacak olan deneye ya da çalışmaya ilişkin parçacık türü belirlenir ve hangi amaçla kullanılacağına göre enerji mertebesi de tespit edilir. Böylelikle sistem tasarımı için başlangıç noktası belirlenmiş olur. Devamında ihtiyaç duyulan parçacığın türüne göre parçacıkların elde edilme

yöntemleri değerlendirilmektedir. Elektron, proton, pozitron gibi yaygın olarak kullanılan yüklü parçacıklar için farklı kaynak ve enjektör sistemleri geliştirilmiştir. Kaynak olarak adlandırılan sistem parçacıkların üretimini gerçekleştirirken, enjektör olarak adlandırılan sistem ise genellikle içerisinde katot bulunduran ve parçacıkların demet haline getirildiği, sıkıştırılarak kompakt bir halde ilk hızlandırıldığı bölüm için kullanılmaktadır [8].

Hızlandırıcılarda parçacık kaynakları için farklı sınıflandırmalar yapılabilir ancak bu çalışma kapsamında elektron ve iyon kaynakları olarak sınıflandırma yapılmıştır.

Elektron kaynakları, hızlandırıcı sistemleri için elektron demetinin üretilmesi için gerekli olan elektronların üretilmesi için gereklidir. Elektronların üretilmesi için elektron tabancası olarak adlandırılan bir yapıya ihtiyaç duyulmaktadır. Alternatif olarak plazma içerisindeki elektronlar da kullanılabilir ancak başta demet kararlılığı gibi parametrelerinin sağlanması hususunda yetersiz olabilmektedir. Kaliteli demet elde edilebilmesi için elektronların tanımlı bir yüzeyden yayınlanması gerekmektedir [15].

Elektron demeti; termoiyonik, fotokatot ve yüksek alan yöntemleri ile bu yöntemlere uygun tasarlanmış sistemler tarafından üretilmektedir.

Termoiyonik Emisyon; bir yüzeyin ısınması sonucunda yüzeyden elektronların sökülmesidir. Isıtma yöntemiyle, özellikle metal yüzeylerden elektronlar etkin bir şekilde koparılabilmektedir. Elektronların hız bileşenlerinin yüzey ile dik açı oluşturacak şekilde olması gerekmektedir. Bu hız bileşenlerindeki kinetik enerji, yüzeyden koparılması için ihtiyaç duyulan iş fonksiyonuna karşılık gelmesi gerekmektedir. Isıtılan katot yüzeyindeki uygulanan sıcaklık ve maksimum akım yoğunluğu Richardson-Dushman denklemleri ile hesaplanmaktadır [15].

$$J = AT^2 e^{(-11600 \frac{\phi}{T})} \quad (7)$$

Termiyonik emisyon için en önemli parametre iş fonksiyonudur. Yaygın olarak kullanılan katot malzemelerine ilişkin parametreler karşılaştırmalı olarak Çizelge 2.4' te sunulmuştur.

Çizelge 2.4 Termioyonik emisyon parametreleri [16]

Malzeme	A (A cm ⁻² K ⁻²)	φ (eV)
Tungsten	60	4.54
Tantalum	60	4.12
Sezyum	160	1.81
Cs/O/W	0.003	0.72
LaB₆	29	2.66

Fotokatot; bir malzeme yüzeyi için tanımlı olan iş fonksiyonundan daha yüksek enerjiye sahip bir fotonun elektron sökülecek olan yüzeye çarpması sonucu elektron yayınlanır.

Emisyon için gerekli olan en kısa dalga boyu $\lambda = 1200/\phi$ ile hesaplanabilmektedir. Dalga boyunun birimi nanometre olup, ϕ ise iş fonksiyonunu ifade etmektedir. Kaynaklarda kullanılan katot materyali tercihi önemlidir. Uygulanan daha az enerjiyle daha fazla parçacık sökülmesi beklenmektedir. Seçilecek olan katot materyali için;

Kuantum verimliliği (QE), yayılım, yaşam süresi ve dayanıklılık, sürücü lazer, yüzeyin cilalanması, termal stabilite gibi özelliklere göre seçimler yapılmaktadır. Kuantum verimliliği (QE) katoda gelen lazerdeki fotonlar ve bu fotonların kopardığı elektronların oranıyla ölçülür.

$$QE = \text{Sökülen elektronların sayısı} / \text{Materyal yüzeyine gönderilen foton sayısı} \quad (8)$$

Kullanılacak katotta kuantum verimliliği değerinin yüksek olması istenir. Fakat yüksek verimlilikte ise elektronların yayılımı daha çok olmaktadır. Bu nedende verimliliğin belirli bir aralıkta tutulması önemlidir [8].

3. KONSEPT TASARIM İÇİN MODELLEME

3.1 CST ile Süperiletken Kavite Hücrelerinin ve RF Alanlarının PEM Adaptasyonu ile Modellenmesi

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalarda öncelikle PEM yakıt hücreleri kullanılarak CST Studio Suite 2020 ile modellenen süperiletken SRF kavitelerin içerisinde PEM yakıt hücresinden gelen elektron veya protonların hızlandırılmasının sağlanabilmesi üzerine çalışmalar yapılmıştır.

CST ile SRF kavitenin içerisine PEM yakıt hücresi farklı geometrilerde yerleştirilerek RF alanı davranışları üzerine modellemeler yapılmıştır. Çalışmalar aşağıdaki başlıklarda detaylandırılmış ve Çizelge 3.1’ de özetlemiştir.

Çizelge 3.1 Model tablosu özeti

Modeller	SRF Kavite Hücresi Sayısı	PEM Yakıt Hücresi Sayısı
Model-1	2	1
Model-2	2	2
Model-3	3	3
Model-4	3	1
Model-5	3	2
Model-6	3	0.5
Model-7	4	1
Model-8	5	1
Model-9	3	1

Örneğin, birinci çalışmada (Model-1) iki hücreli SRF kavitenin tek hücresi içerisine PEM yakıt hücresi yerleştirilerek modelleme gerçekleştirilmiştir.

Silindir şeklinde tasarlanan PEM Yakıt Hücresi, demet hattı ile eş merkezli şekilde aksenal olarak modellemeye yerleştirilmiştir. Diğer bir çalışma da kaynak olarak PEM yakıt hücresinden gelen protonların SRF kaviteler içerisinde hızlandırılması ve hızlandırılan demetin parametrelerinin elde edilmesidir.

Çalışmalarda CST’ nin içerisinde yer alan “Particle Dynamics” iş akışı (Workflow) altında bulunan “Particle” ve “High Frequency” modülleri kullanılarak tasarımlar yapılmıştır.

3.1.1 Süperiletken kavite modellenmesi

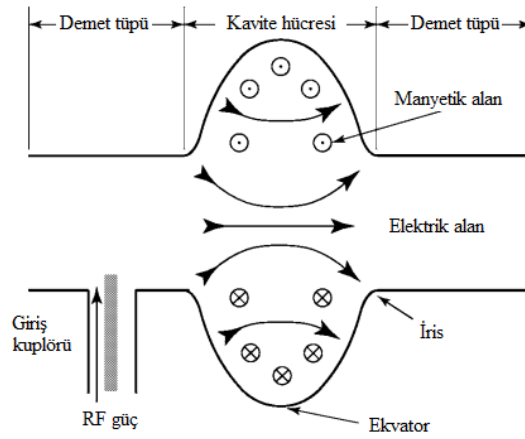
Süperiletken kaviteler günümüzdeki bilgiler ışığında, içlerinden geçen demeti çok yüksek hızlara ulaştırabilmesi ($\sim \text{TeV}$), yüksek kalite faktörü (depo edilen enerjinin yüzeyde dağılan güce oranı, $\sim 10^{11}$), kullanım alanlarının çeşitliliği ve ileri düzey teknolojileri içermesinden dolayı yüksek oranda tercih edilmektedir.

Süperiletken kavitelerde niyobyum (Nb) materyali kullanılmaktadır. Bu materyalin özellikleri Çizelge 3.2’ de detaylı olarak sunulmuştur.

Çizelge 3.2 Niyobyum özellikleri [17]

Özellikler	Parametre	Değer
Genel	Sembolü	Nb
	Atom Numarası / Ağırlığı	41 / 92,9063
	Element Kategorisi	Geçiş metali
	Grup/Periyot/Blok	5 – 5 – d
	Rengi	Gümüş gri/ Gri metalik
Fiziksel	Erime Noktası	2477 °C, 4491 °F, 2750 K
	Kaynama Noktası	4744 °C, 8571 °F, 5017 K
	Yoğunluk	8,57 g·cm ³
	Özısı	0,27 (kJ/kg·K)
	Süperiletkenlik Sıcaklığı	-263.9 °C, -443 °F, 9.25 K
	Termal İletkenlik	53.7 W·m ⁻¹ ·K ⁻¹
	Termal Genleşme	7.3 µm/(m·K)
	Elektriksel Direnç	(0 °C) 152 nΩ·m
	Young Modülü	105 GPa
	Kayma Modülü	38 GPa
Kimyasal	Elektronlar	41
	Protonlar	41
	Nötronlar	52
	Elektron düzenlenişi	[Kr] 4d ⁴ 5s ¹
	Oksidasyon Durumları	5, 4, 3, 2, -1 (hafif asidik oksit)
	Faz	Sağlam
	Kristal yapı	Kübik vücut merkezli
	Manyetik Sıralama	Paramanyetik
	Elektron İlgisi (kJ·mol ⁻¹)	88,381

SRF kaviteler, kavite hücresi, demet tüpü, RF alanlarının kavite içerisine girdirildiği ve demet tüpüne monte edilen RF bağlaşımı (RF coupler), yine demet tüpü monte edilen HOM bağlaşımı (HOM coupler) ana yapılarından oluşmaktadır. HOM bağlaşimleri kavite içi istenmeyen modların sistemin dışına çıkarılabilmesini sağlayan yapılardır. Bu çalışma kapsamında RF bağlaşımı ve HOM bağlaşımı ideal durumlarda olacağı varsayıldığı için modellere dahil edilmemiştir. SRF kavite kesiti Şekil 3.1’ de gösterilmiştir.



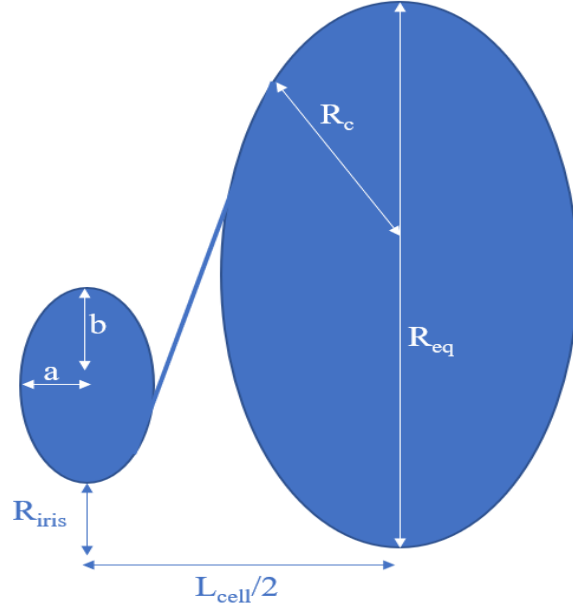
Şekil 3.1 SRF Kavite Kesiti [18]

Bu çalışmada, SRF kaviteler modellenirken Tesla eliptik geometri parametreleri esas alınmıştır. Tesla eliptik kaviteler tüm dünyada yaygın olarak kullanılmaktadır. Günümüzde ana hızlandırıcılarda kriyojenik modüller kullanılmaktadır. Bu modüllerdeki optimum hücre sayısı dokuz olarak belirlenmiştir ve çok yüksek enerjilere bu dokuz hücrelik kaviteler ve demeti sıkıştıran manyetik yapıların yardımıyla ulaşabilmektedir. Çalışmada kullanılan eliptik kavite geometri parametreleri Çizelge 3.3’ te verilmiştir.

Çizelge 3.3 Eliptik Tesla kavite boyutları [19]

Parametre	Orta Hücre (mm)	Kenar Hücre-1 (mm)	Kenar Hücre-2 (mm)
R_{equator}	103.3	103.3	103.3
R_{iris}	35	39	39
R_c	42.0	40.34	42
a	12	10	9
b	19	13.5	12.8
$L_{\text{cell}}/2$	57.692	56.0	57.0

Tabloda belirtilen parametreler optimum kavite geometrisinin oluşturulması için ihtiyaç duyulan boyutları içermektedir.



Şekil 3.2 Yarım hücre eliptik kavite

Şekil 3.2’ de gösterilen parametreler (*home/macros/construct/parts/superconducting cavity*) şeklinde CST’ deki hazır makro içerisinde yer almaktadır. R_{iris} , R_{eq} ve $L_{cell}/2$ parametrelerinin açıklamaları aşağıda sunulmuştur.

- SRF Kavite hücresinin uzunluğu $L_{cell}/2$, boylamsal eksen boyunca yatay kavite uzunluğunun yarısını ifade eder. L , hızlandırılan demetin hızına ve SRF kavite içerisindeki RF alanın dalga boyu ile orantılı ($L = \beta \lambda/2$) hesaplanmaktadır.
- R_{iris} , birden fazla hücreden oluşan kavitelere hücresinin bağlaşım çapını ifade eder. Demet tüplerinin de tasarımını belirler.
- R_{eq} , kavite içerisindeki EM alan ve mekanik herhangi bir değeri değiştirmeden kavitede frekans değeri ayarı yapılmasını sağlar [8].

Tesla kaviteelerde, mekanik, radyasyon (özellikle x-ışınımı yayınımları), termal, alan yayınımları, hidrojen “Q problemi”, yüzeydeki magnetik kirlilikler, termal çökme, söndürme, Lorentz force detuning, London nüfuz derinliği, ponderomotif etkiler, çoklu etkileşim, HOM vb durumlar sistemin çalışmasını etkileyen kavite ve alan problemleridir. Manyetik alan yüzünden meydana gelen problemlerde kavite yüzeyi yüksek sıcaklıklara

ulaşabilir ve böylece kavite materyali deforme olabilir. Elektrik alandan kaynaklı problemlerde ise x-ışını yayınımlı ve elektriksel kontak bağlantı bozunumları yaşanabilir.

Mekanik sistem hataları; kavite yüzey kusurları, hızlandırıcı kavitelere çalışmayı engelleyen en baş parametrelerden biridir. Kavite fabrikasyonu ve üretimi sırasında, kavite yüzeyinde ve geometrik yapısında ortaya çıkabilen kusurlardır. Kavite malzemesindeki olası pürüzler alanların i kavite temasını yükselterek HOM'ların oluşmasını sağlar ve alan kayıplarına neden olmaktadır. Bunların zm için elektro-cilalama (*polishing*) ve kimyasal cilalama işlemleri uygulanmaktadır.

İlk olarak 1990 yılında geliştirilen CBP tekniği ile SRF kaviteler ana eksen etrafında bir tank içerisinde döndürülerek temizlenmektedir. Bu işlemde yüksek saflıkta su, sabun, alümina mesh ve silika kullanılmaktadır.

Hidroflorik asit (HF) elektro ve kimyasal cilalamada kullanılmakta olup, kavite malzemesine hasar verdiğinden son yıllarda CBP yöntemi tercih edilmektedir [20].

Mikrofonik gürültü (*microphonics*); parçacık hızlandırıcı sistemlerde kriyojenik sistem içerisinde bulunan vakum pompaları, solenoid vb mekanizmalar çalışmaları sırasında mekanik titreşimlere sebep olmaktadır. Titreşimler kavitenin çalışma frekansını etkiler. Bu durum frekansta 0.1 Hz ile birkaç yüz Hz yükselten değişime sebep olur.

Söndürme (*quench*); genellikle kavite performansını sınırlayan faktörlerden bir tanesidir. Sndrmenin bazı anormalliklerden kaynaklandığı yaygın olarak kabul edilmektedir. Bu anormallikler ya bir yüzeyde bulunan kusur ya da kavitenin RF yüzeyi yakınında lokalize bir malzeme kirlenmesi olabilmektedir. evreleyen alanın direnci süperiletken niyobyumun direncinden önemli ölçüde daha yüksektir. Sonuç olarak bu alan, niyobyumun kritik sıcaklığından daha düşük sıcaklıkta normal iletken haline gelmekte ve RF enerjisini dağıtırken ısınmaya başlamaktadır. Kritik sıcaklığa kadar ısıtılan çevredeki niyobyum da normal iletken haline gelmektedir. Böylece normal bölge genişlemeye devam etmektedir. Normal iletken niyobyumun Joule ısınmasının neden olduğu depolanmış enerji dağılımını ve hem süper hem de normal iletken niyobyumdaki ısı

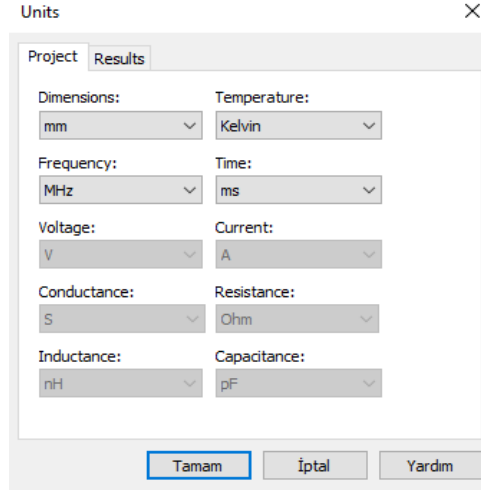
transferini tanımlayan doğrusal olmayan denklem sisteminin çözülmesi gerekir [21].

Kavite içerisindeki ponderomotif etkiler; elektromanyetik alanın (radyasyon basıncı) neden olduğu frekans değişiklikleri olarak ortaya çıkar [22]. Süperiletkenlerde London nüfuz derinliği (*penetration depth*); bir manyetik alanın bir süperiletkene nüfuz ettiği ve süperiletkenin yüzeyindeki manyetik alanının e^{-1} katı olduğu uzunluğu ifade etmektedir. λ_L simgesiyle gösterilen bu uzunluğun değeri 50 ila 500 nm arasında değişmektedir [23].

Tesla kavitelerde karşılaşılan hidrojen “Q-problemi” kavramı; süperiletken niyobyum kaviteler, geleneksel bakır kavitelerden altı kat daha yüksek olan 10^{10} - 10^{11} kalite faktörlerine ulaşabilmektedir. Ancak bu performansı yüksek hızlanma eğiminde (20 MV/m) korumak için radyo frekansı (RF) yüzeyinin hasarlı ve tozdan arındırılmış olması gerekmektedir. Bu nedenle kavite hazırlama teknikleri rutin olarak kimyasal aşındırma veya elektro-parlatmayı içerir. Belirli koşullar altında yapılan bu işlemler, niyobyumu hidrojenle kirlitebilmektedir. Kavite, 150 K’ ye kadar soğutulduğunda, yalnızca birkaç atomik yüzde hidrojen mevcut olsa bile hidritler oluşabilir. Hidritler oluşursa kavite kalitesi önemli ölçüde bozulabilir (Q-problemi). Hızlı bir soğuma genellikle hidrit oluşumunu engellemektedir. Diğer iyileştirici yöntemler ise hidrojeni ortadan kaldırmak için 900 °C’ de boşlukların gazdan arındırılmasını içermektedir [18]. Elektromanyetik alanın Lorentz kuvveti ve yüzey akımları; boşluk duvarını deforme etmektedir. Böylelikle rezonans frekansını değiştirebilmektedir. İris duvarı içe doğru, ekvator ise dışa doğru bükülmüş durumdadır. Bu durumlar rezonans frekansının düşmesine neden olur [19]. Çoklu etkileşim (*multipacting*); genellikle kozmik ışınlar, alan emisyonu, ikincil emisyon veya ışının kendisi nedeniyle kavite içinde zaten mevcut olan elektron tarafından tetiklenir. Elektronlar, kavite içindeki RF alanı tarafından enerjilendirilir ve kavite duvarına çarpmaktadır. Çarpışan elektronların belirli bir aralıkta kinetik enerjisi varsa, çarpışma sırasında ikincil elektronlar kavite yüzeyinden dışarı fırlayabilir. İkincil elektronların hareketi RF alanıyla senkronize haldeyse ve ikincil emisyon verimi eşitse, çoklu etkileşen elektronların birikmesi söz konusu olabilmektedir [24].

3.1.1.1 Ön ayarlar

CST içerisinde “*High Frequency*” modülü altında oluşturulan projenin öncelikle birimleri belirlenmiştir. SRF kavite için parametrelerin milimetre cinsinden olması nedeniyle boyutlar *mm* olarak seçilmiştir. Frekans ise model içerisinde öngörülen kavitenin süperiletken olması nedeniyle MHz olarak seçilmiştir. Sıcaklık değeri K ve zaman çözünürlüğü ise ms cinsinden seçilmiştir (Şekil 3.3).



Şekil 3.3 Model tasarımı için seçilen birimler

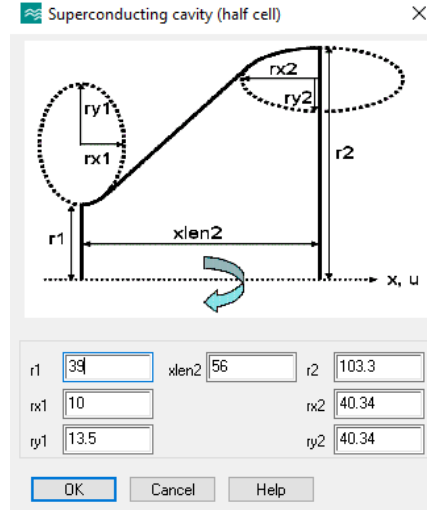
Çalışmada frekans aralığı SRF kavite modelleneceği için 1290 – 1310 *Mhz* aralığında seçilmiştir. Arka plan özelliklerinin ayarlanması için malzeme tipi PEC olarak seçilmiştir. Çünkü sisteme verilen RF alanı bütün özellikleriyle (termal, basınç, empedans vb) korunarak sistemden geri alınabilmektedir. Bu sayede hesaplamalar ve analizler yapılabilmektedir. PEC olarak tanımlanan malzemenin özellikleri ise Çizelge 3.4’ de belirtilmiştir.

Çizelge 3.4 PEC malzeme özellikleri

Termal özellikleri	
Termal İletkenlik	0 W/k/m
Özgül Isı	0 J/K/kg
Malzeme Yoğunluğu	0 kg/m ³
Mekanik özellikleri	
Young Modülü	0 GPa
Poisson Oranı	0
Isıl Genleşme Katsayısı	0 1e ⁻⁶ /K

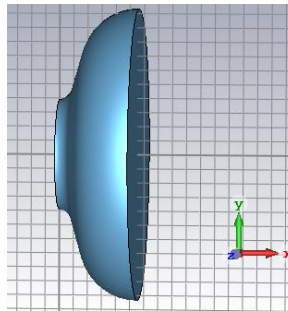
3.1.1.2 Kavite dizaynı

Yapılan çalışmada birinci model oluşturulurken Çizelge 3.3' te sunulan kavite geometri parametreleri CST içerisinde yer alan makroya girilmiştir. Öncelikle yarım hücre eliptik kavite oluşturulmuştur. Sistemin girişinde bulunacak olan bu kavite içi kenar hücre-1 parametreleri makroya işlenmiştir (Şekil 3.4).



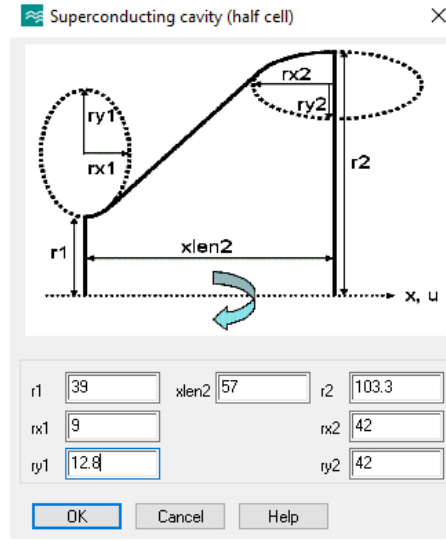
Şekil 3.4 Yarım hücre eliptik kavite parametreleri (kenar hücre-1) [25]

CST Makro ile oluşturulan yarım hücrelik kavitenin katı modeli Şekil 3.5' te gösterilmektedir.



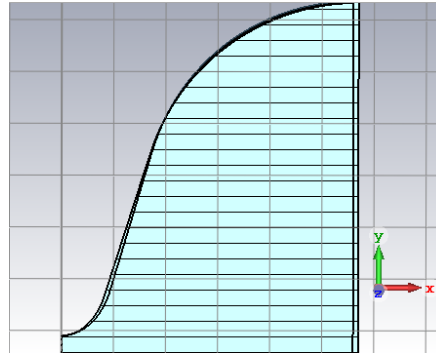
Şekil 3.5 Yarım hücre eliptik kavite katı modeli (kenar hücre-1)

Tam sayıda kavite elde edilebilmek için ilgili makro ile kenar hücre-2 parametreleri girilmiştir (Şekil 3.6).



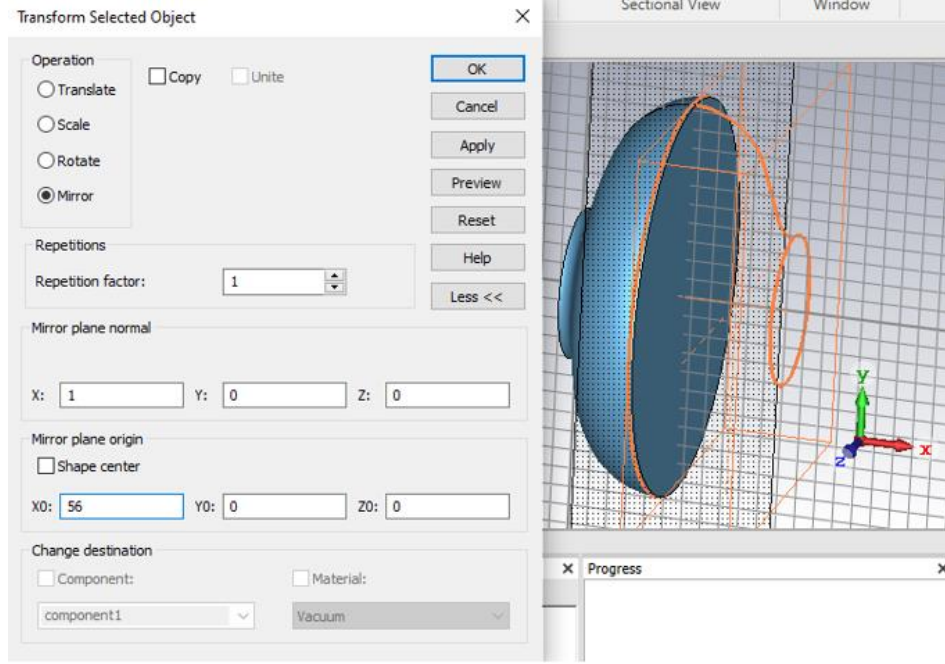
Şekil 3.6 Yarım hücre eliptik kavite parametreleri (kenar hücre-2) [25]

Makro ile oluşturulan ikinci yarım hücrelik kavite ile birinci yarım hücrelik kavitenin katı modelleri Şekil 3.7’ de gösterilmektedir. R_{iris} ve R_{eq} değerleri aynı olduğu ancak $L_{cell}/2$, a , b ve R_c değerleri farklı olduğu için üst üste çizilmiş olan modeller arasında geometrik farklılıklar gözükmemektedir.



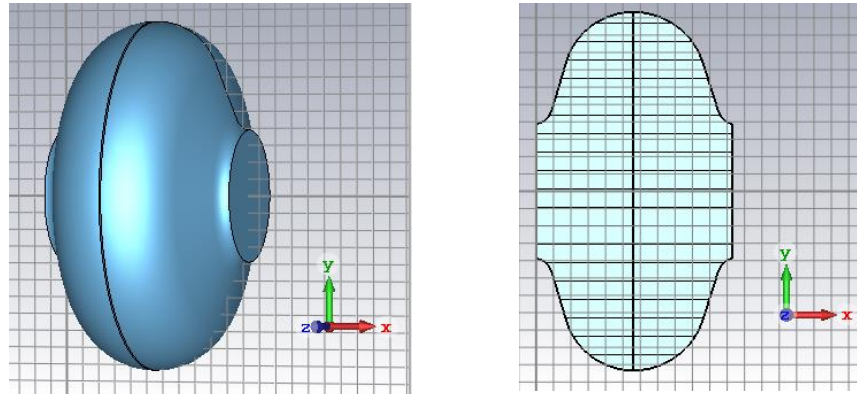
Şekil 3.7 Yarım hücre eliptik kavite katı modeli kesit görünüm (kenar hücre-1 ve kenar hücre-2)

Elde edilen ikinci yarım hücre eliptik kavitenin $x = 0$ eksenine göre simetrik kopyası oluşturulup kenar hücre-1’e ait $L_{cell}/2$ değeri kadar $+x$ eksenine taşınmıştır (Şekil 3.8).



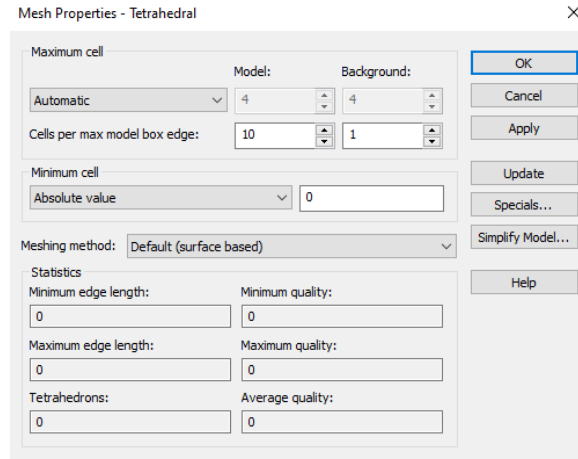
Şekil 3.8 Bir hücrelik kavite elde edilmesi

Bir hücrelik kavite ait katı model ve kesit görünümü Şekil 3.9’ da sunulmuştur.

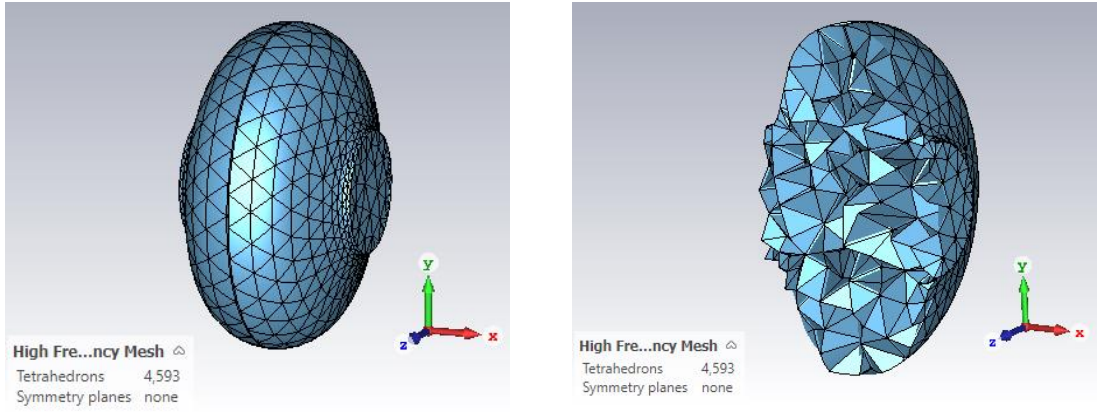


Şekil 3.9 Bir hücrelik kavite (a) katı model (b) kesit görünüm

Oluşturulan bir hücrelik eliptik kavitenin dört-yüzlü (*tetrahedral*) ağ örme (*mesh*) parametreleri Şekil 3.10’ da, ağ örme sonrası görüntüsü ise Şekil 3.11’ de gösterilmiştir.

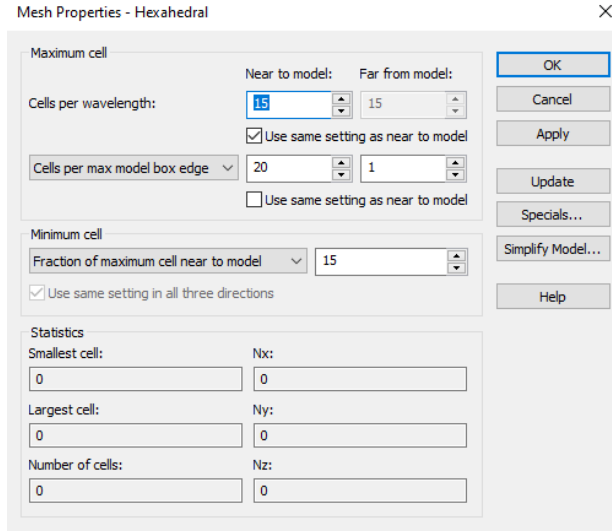


Şekil 3.10 Dört-yüzlü ağ örme parametreleri

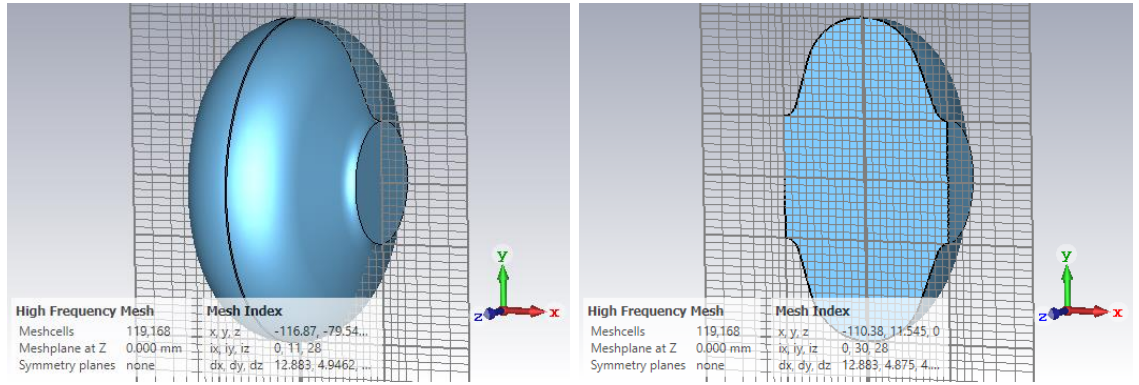


Şekil 3.11 Dört-yüzlü ağ örme görüntüsü (a) normal görünüm (b) kesit görünüm

Oluşturulan bir hücrelik eliptik kavitenin altı-yüzlü (*hexahedral*) ağ örme parametreleri Şekil 3.12’ de, ağ örme sonrası görüntüsü ise Şekil 3.13’ de gösterilmiştir.



Şekil 3.12 Altı-yüzlü ağ örme parametreleri

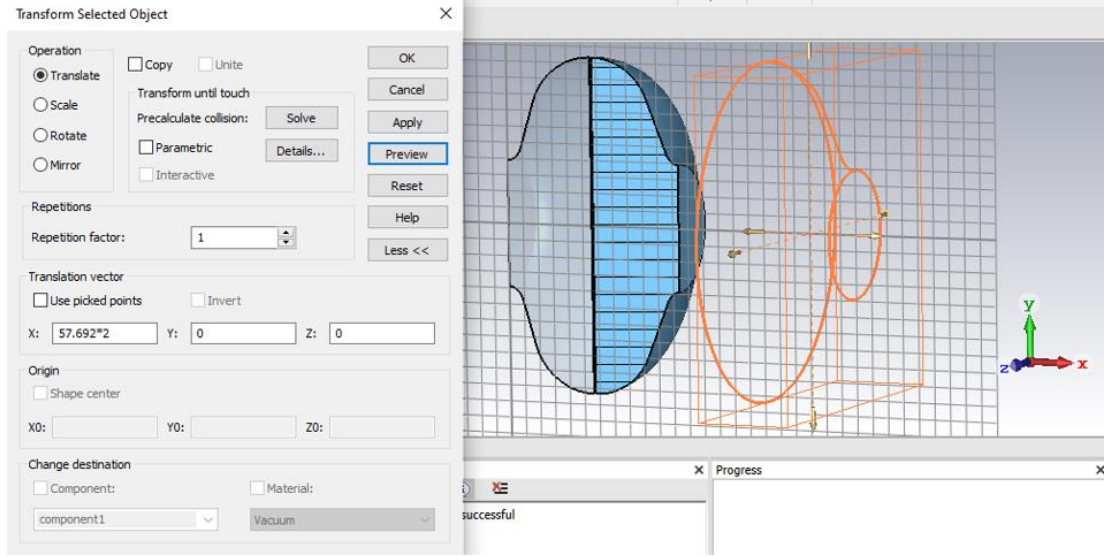


Şekil 3.13 Altı-yüzlü ağ örme görüntüsü (a) normal görünüm (b) kesit görünüm

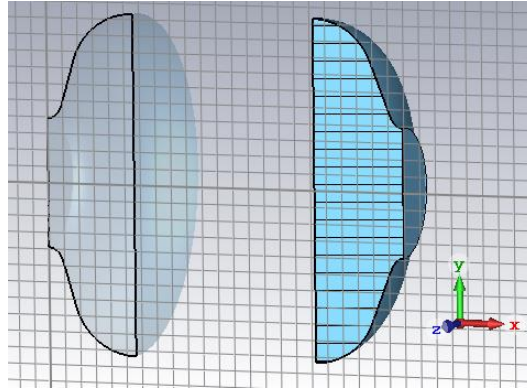
Dört yüzlü elemanlar karmaşık geometriye daha iyi uyum sağlamaktadır [26]. Bu nedenle çalışmada dört-yüzlü ağ örgüsü kullanılmıştır. Ayrıca, aynı katı model için 4.593 adet dört-yüzlü ağ örgüsü önerilirken altı-yüzlü ağ örülmesi durumunda bu sayının 119.168'e yükseldiği gözlemlenmiştir. Bu farklılık, yapılacak olan analizlere olağanüstü katkı sağlamadığı için analizlerin daha kısa sürebilmesi adına dört-yüzlü ağ örgüsü kullanımı seçilmiştir.

Yarım hücrelik kavite hücresi ilk oluşturulan yarım hücreye geniş kısımları karşılıklı gelecek şekilde yapıştırılarak tam hücre elde edilmiş, diğer hücreler de yarım-yarım ekleme usulüyle kavite hücre sayısı arttırılmıştır (Şekil 3.14). Kenar hücre-2 kavitesi $+x$

ekseninde iki orta hücre kavite uzunluğu ($2 * L_{cell}/2$) kadar taşındıktan sonra elde edilen kesit görünüm Şekil 3.15' te gösterilmiştir.

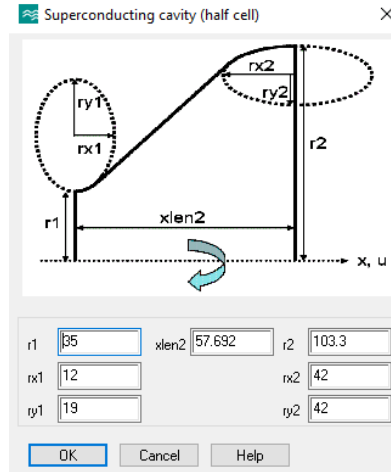


Şekil 3.14 Kenar hücre-2 kavitenin +x ekseninde taşınması



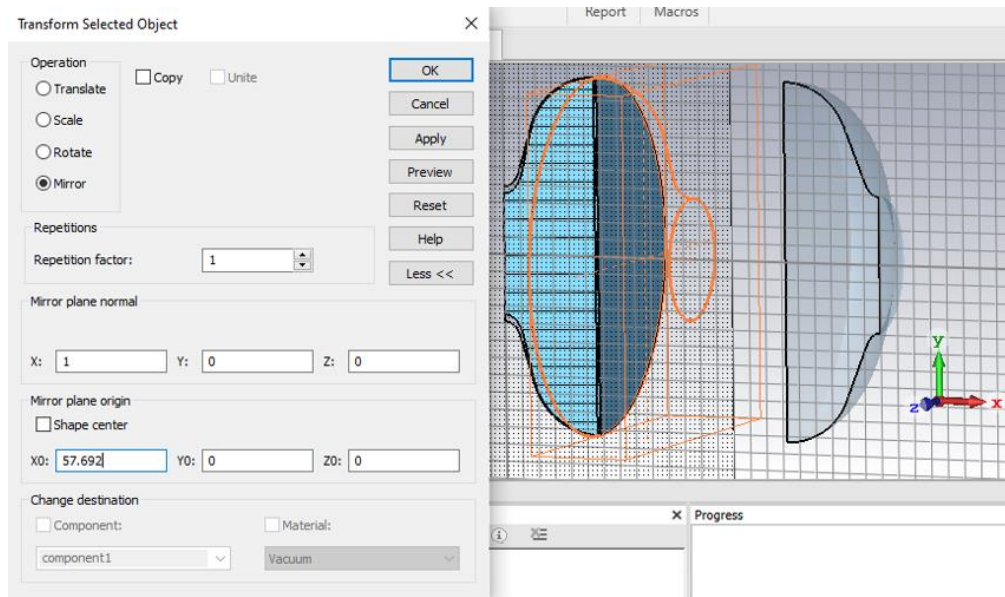
Şekil 3.15 Kenar hücre-2 kavitenin +x ekseninde taşınması (kesit görünüm)

Çizelge 3.3' te belirtilen orta hücre kavite parametreler ile iki orta-hücre elde edilmiştir.

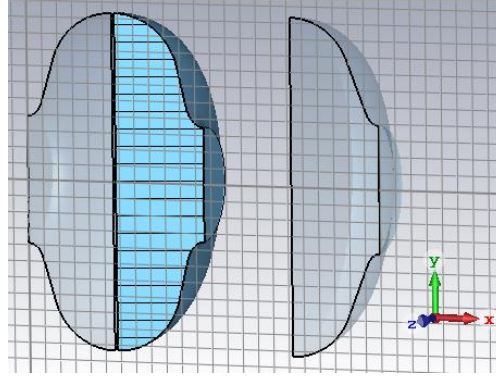


Şekil 3.16 Orta hücre kavite parametreleri [25]

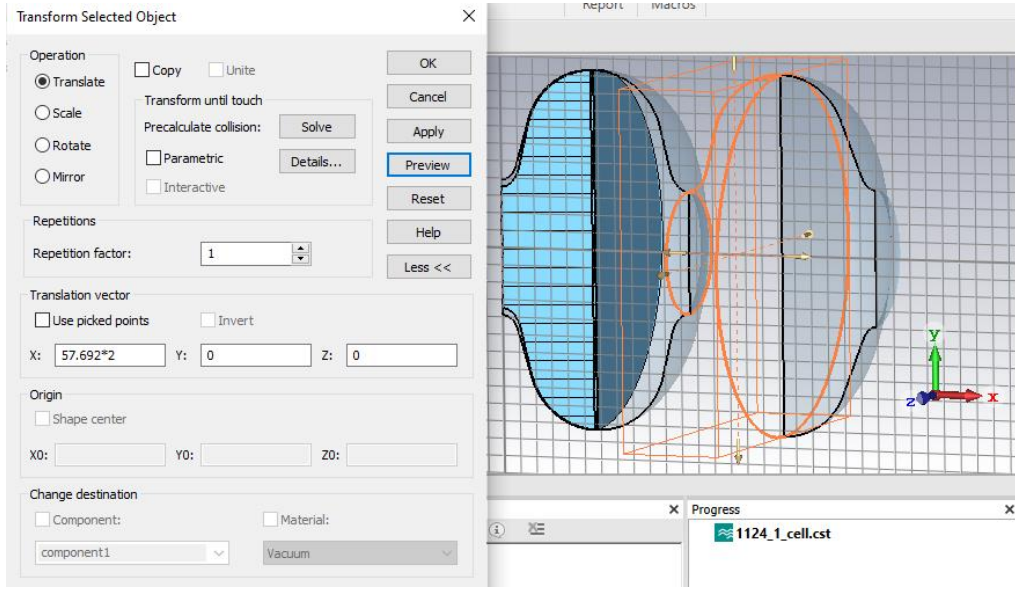
Elde edilen orta hücre kaviteler iki tam hücre elde edilebilmesi amacıyla kenar hücre-1 ve kenar hücre-2 arasına yerleştirilmiştir (Şekil 3.17, Şekil 3.18, Şekil 3.19 ve Şekil 3.20).



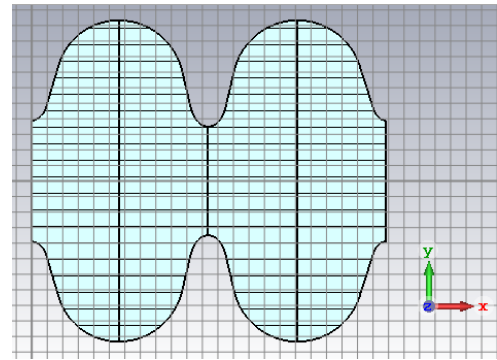
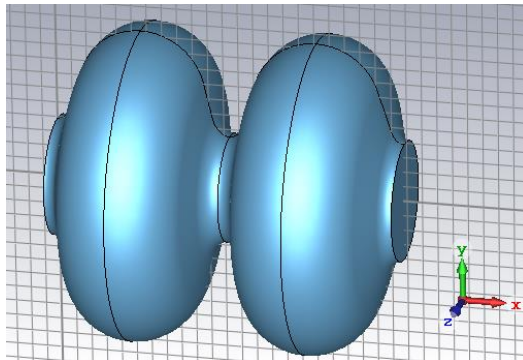
Şekil 3.17 Orta hücre elde edilmesi



Şekil 3.18 Orta hücre yerleşimi



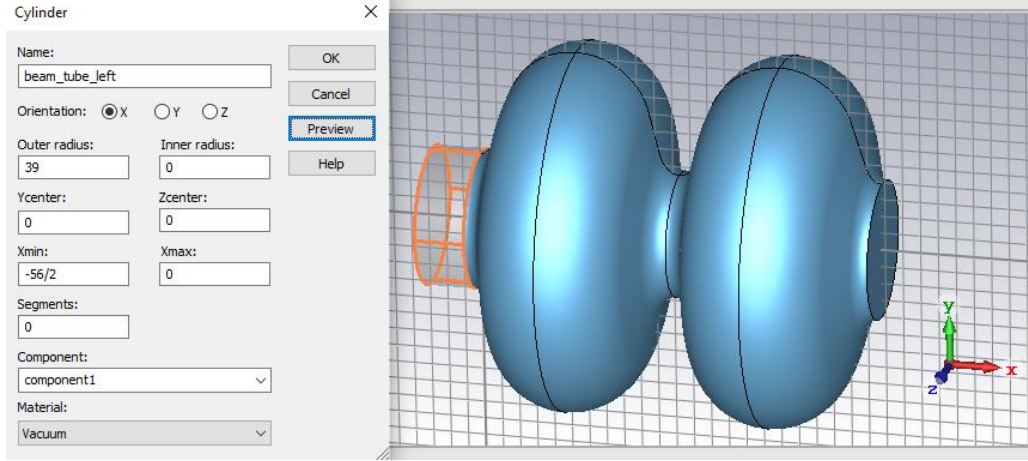
Şekil 3.19 Orta hücre yerleşimi (devamı)



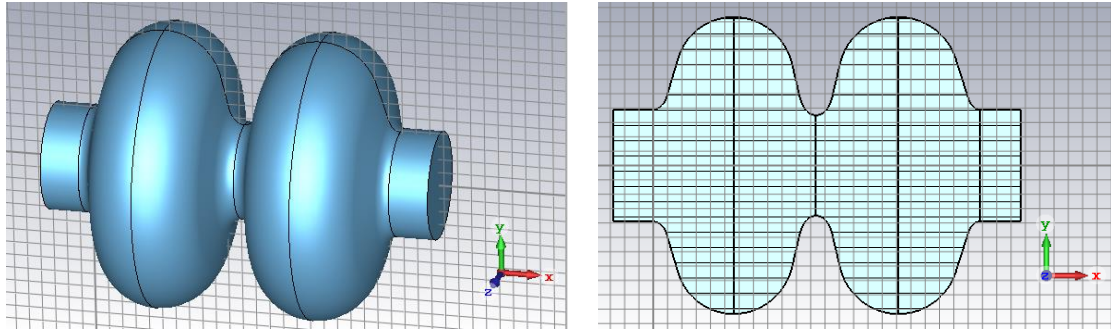
Şekil 3.20 İki hücreli kavite (a) katı modeli (b) kesit görünümü

Yarım hücrelerden oluşturulan kavite hücreleri birleştirildikten sonra demetin başka

birimlere iletiildiği demet tüpü tasarımı yapılmıştır (Şekil 3.21). Demet tüpünün tasarımı yapılırken kavite hücreleri içerisindeki elektrik alan dağılımını, simetrikliğini bozmayacak şekilde olmasına özen gösterilmiştir. Demet tüpleri eklenmiş kavite hücrelerinin nihai hali Şekil 3.22’ de gösterilmiştir.



Şekil 3.21 Demet tüpü (-x yönünde) eklenmiş iki hücrelik kavite



Şekil 3.22 Demet tüpü eklenmiş iki hücrelik kavite (a) katı modeli (b) kesit görünümü

3.1.2 Oluşturulan SRF kavitelere kaynak olarak PEM yakıt hücresinin eklenmesi

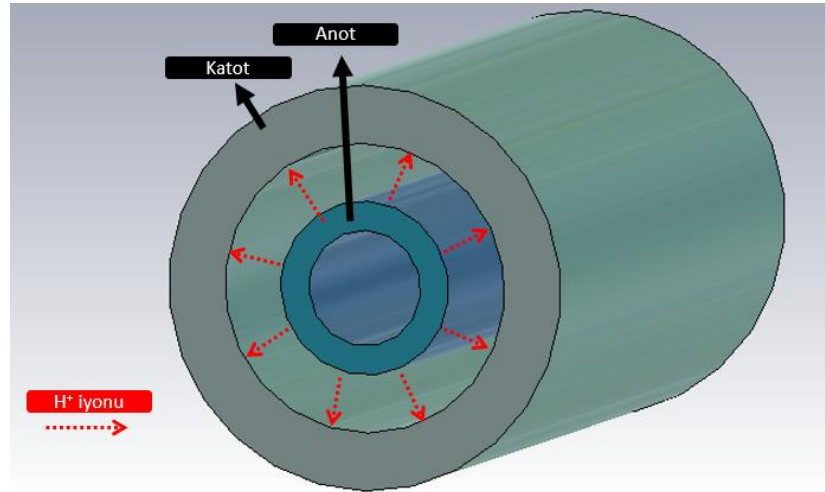
Başlık “2.2.5 Hızlandırıcılarda kullanılan kaynak sistemleri” bölümünde belirtildiği üzere, hızlandırıcılarda parçacık kaynakları fotokatot veya termoiyonik şeklindedir. Bunlardan her ikisinin birbirine göre farklı avantajları bulunmasına rağmen, son yıllarda fotokatot tabanca, parçacıkların daha yüksek enerjilere çıkarılabilmesine imkân sağlaması açısından avantajlı görünmekte olup, daha çok tercih edilmektedir. Bu tez kapsamında parçacık kaynaklarının kavite dışı bir oluşumdan değil de kavite içerisinde; sürekli çalışabilen (elektron ve proton üretebilen) PEM yakıt hücresinin parçacık kaynağı

olarak kullanılabilmesi çalışması yapılmıştır.

Burada, PEM yakıt hücresinin çalışmasını sağlayan kontrol sisteminin besleme hattında bulunan bileşenleri kontrol etmesi sayesinde (valflerin belirli süreyle açık kalması ya da kapatılması gibi) parçacık kaynağı atmalı dalgalı (ns mertebesinde PW) veya CW şeklinde üretimi sağlanabileceği şekilde modelleme yapılmıştır.

Geleneksel PEM yakıt hücreleri dikdörtgen ya da kare şeklinde üretilmekte olup, bu tez çalışması kapsamında SRF kaviteler için bu geometrinin kavite içerisinde verimini arttırabilmek için demet yolu çevresine konumlandırılan silindir şeklinde öngörülmüştür.

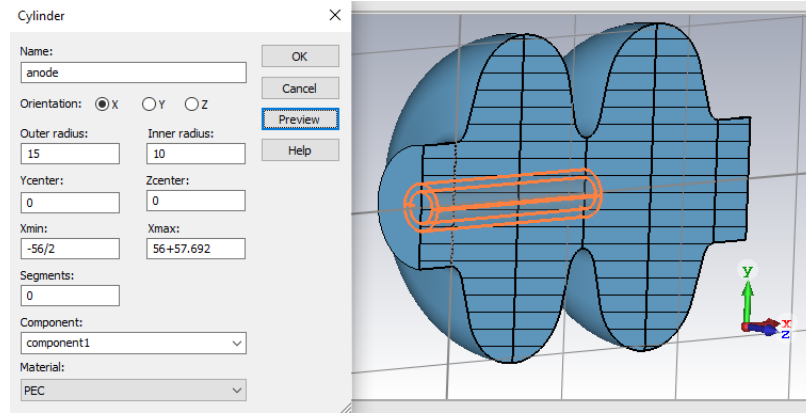
PEM yakıt hücresinin katmanlı olan yapısını bozmayacak şekilde silindir haline getirilmesi sayesinde iç içe geçmiş iki silindir şeklinde anot ve katot elde edilmektedir. Yapının merkezinde bulunan iç silindir, hidrojenin sisteme beslendiği ve hidrojenin yükseltgenme tepkimesinin gerçekleştiği anodu temsil etmektedir. Yapının dışında bulunan dış silindir, oksijen indirgenme tepkimesinin gerçekleştiği katodu temsil eder. Varsayılan silindirik PEM yakıt hücresinin temsili Şekil 3.23’ de gösterilmiştir.



Şekil 3.23 Silindirik PEM Yakıt Hücresi (temsili)

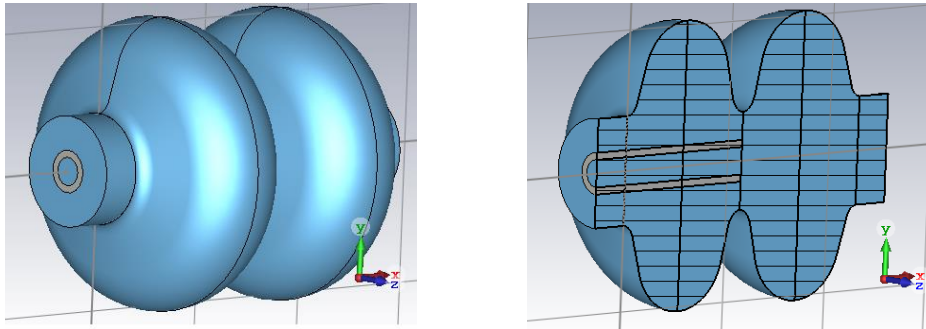
Elde edilen kavite hücresi modeli içerisinde silindirik PEM yakıt hücresinin modellenmesinin yapılması üzere yerleştirilmesi için önce anot daha sonra ise katot geometrisi tanımlanmıştır. Silindir şeklinde öngörülen PEM yakıt hücresinin anot

kısımının dış çapı $15mm$, iç çapı ise $10mm$ şeklindedir. PEM yakıt hücresinin uzunluğu ise $-x$ yönündeki demet tüpü uzunluğunu da kapsaması gerektiğinden $-\frac{56}{2}mm$ ile $+(56 + 57.692)mm$ arasında olacak şekilde parametre girişi yapılmıştır. Malzeme olarak PEC seçilmiştir. PEM yakıt hücresinin parametreleri Şekil 3.24’ de gösterilmiştir.



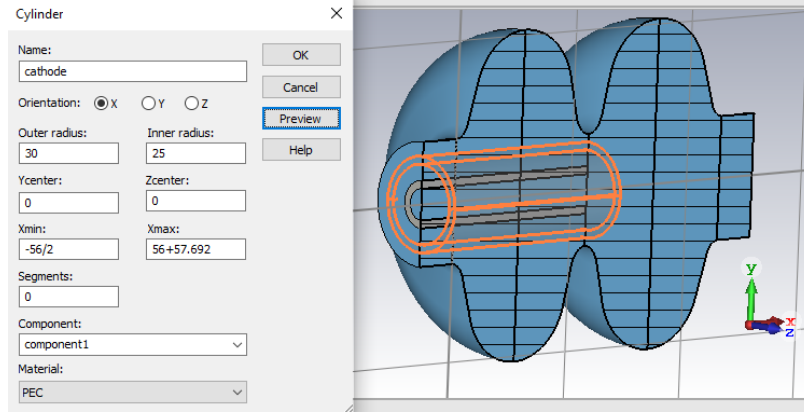
Şekil 3.24 Anot modellemesi parametreleri

Modele yapılan ekleme sonrasında kavitenin görüntüsü Şekil 3.25’ te sunulmuştur.



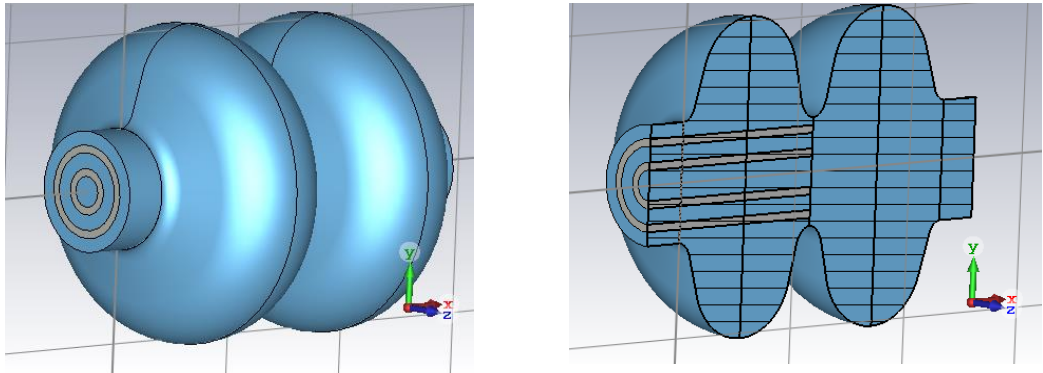
Şekil 3.25 Anot eklenmiş kavite (a) katı model görünümü (b) kesit görünümü

PEM yakıt hücresinin katot kısmının dış çapı $30mm$, iç çapı ise $25mm$ şeklinde ele alınmıştır. Uzunluğu ise anot ile aynı olması açısından anot uzunluk değerleri kullanılmıştır. Malzeme anot ile uyumlu olması açısından PEC olarak seçilmiştir. İlgili parametreler Şekil 3.26’ da gösterilmiştir.



Şekil 3.26 Katot modellemesi parametreleri

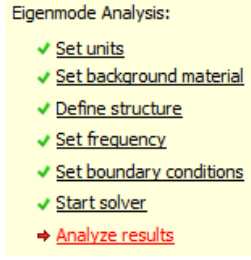
Modele yapılan PEM yakıt hücresine ait anot ve katot eklemesi sonrasında kavite hücrenin görüntüsü Şekil 3.27’ te sunulmuştur.



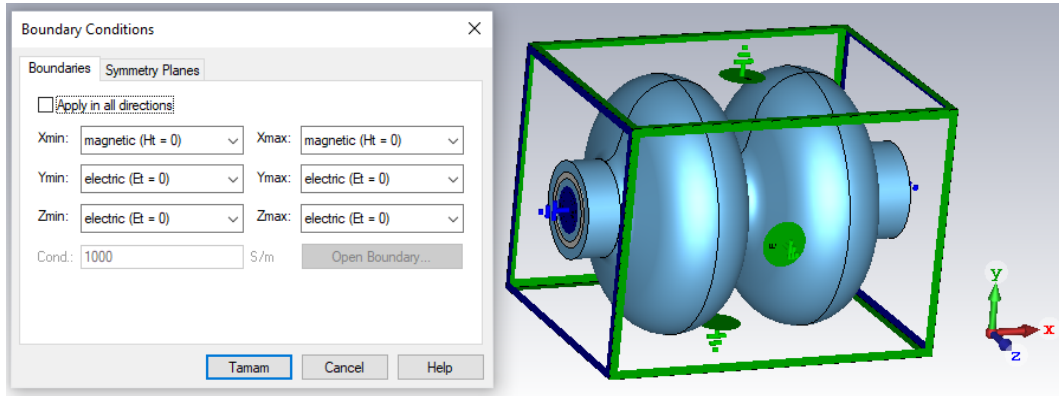
Şekil 3.27 Katot eklenmiş kavite (a) katı model görünümü (b) kesit görünümü

3.2 Elektrik ve Manyetik Alan Çözümleri

Hızlandırıcı sistemin elektrik ve manyetik alan çözümlerinin yapılabilmesi, dağılımların elde edilebilmesi için sınır koşullarının tanımlanması gerekmektedir (Şekil 3.28). Belirlenen sınır koşulları hızlandırma x eksenini boyunca olacağından, x ekseninde manyetik alan bileşenleri ($H_t = 0$), y ve z eksenlerinde ise elektrik alan bileşenlerinin ($E_t = 0$) olmadığı durum ele alınmıştır. İlgili parametreler Şekil 3.29’ da gösterilmiştir.

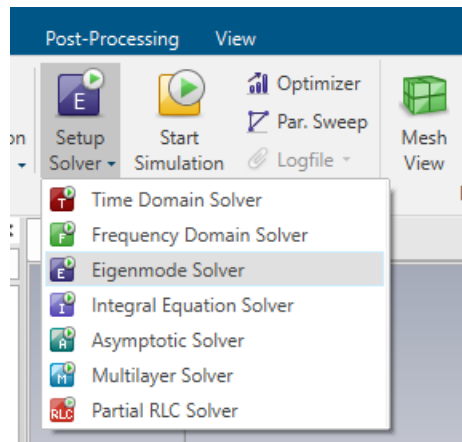


Şekil 3.28 Analiz için zorunlu olan koşullar



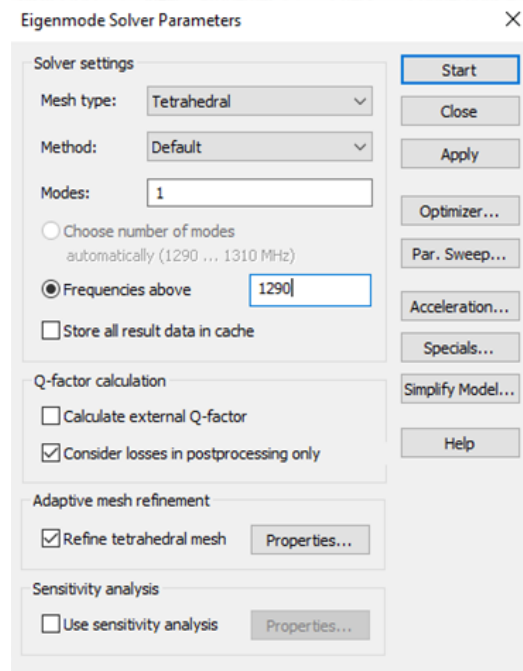
Şekil 3.29 Sınır koşullarının tanımlanması

Sınır şartları sağlandıktan sonra CST içerisinde yer alan “*Eigenmode Solver (ES)*” kullanılarak kavite içi RF alanlarının hızlandırma ve diğer modlarının (yüksek mertebe modlar - HOM) ortaya çıkarılması sağlanmıştır (Şekil 3.30). Ancak modelin süperiletkenlik özelliği kapsamındaki hesaplamalar için ~1300 MHz çalışma frekansında çalışabileceği mod ile çalışmalara devam edilmiştir.



Şekil 3.30 Çözücü seçimi

Normal mod çözücü (eigenmode solver) parametreleri 1290 *Mhz* üzerinde ve ağ örme tipi dört-yüzlü olacak şekilde ve tek mod (daha sonra mod sayısı artırılmıştır) için analiz yapılmıştır. Normal mod çözücü parametreleri Şekil 3.31’ de gösterilmiştir.



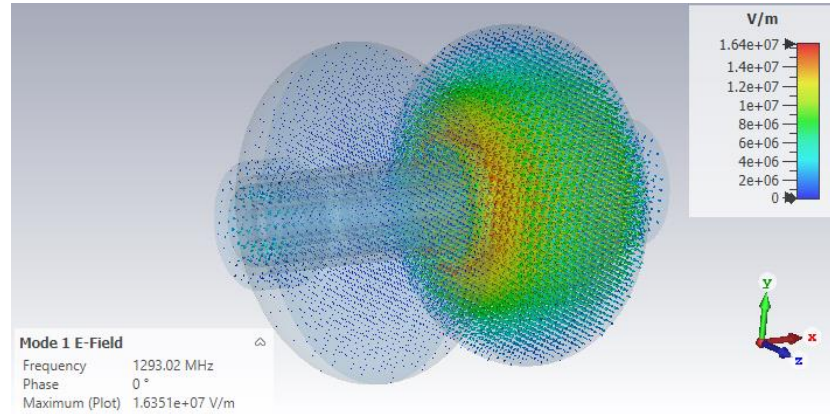
Şekil 3.31 Normal mod çözücü parametreleri

4. PEM YAKIT HÜCRESİ KULLANILARAK KAYNAK TASARIMI VE KAVİTE İÇİ DEMET DİNAMİĞİ

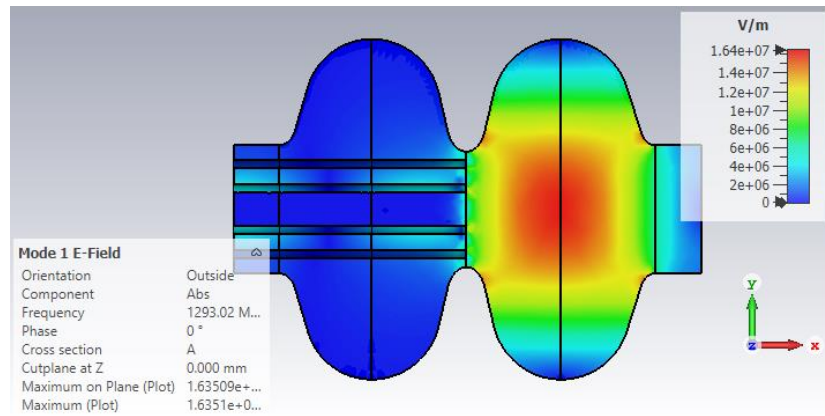
4.1 PEM Yerleşim Modelleri

4.1.1 Model-1 (2-1)

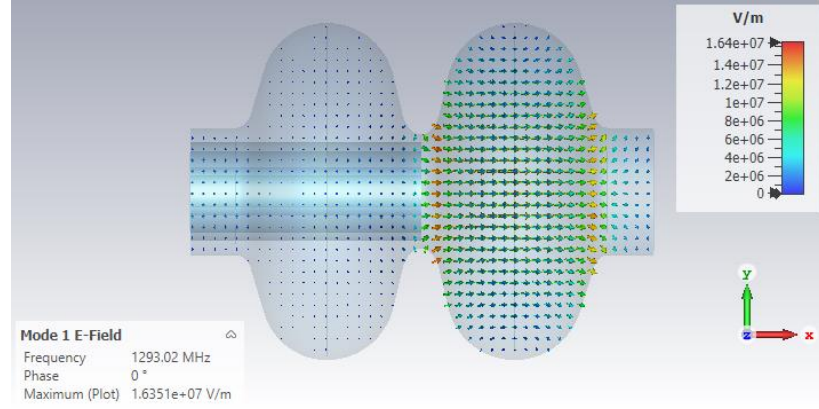
Şekil 3.31’ de gösterilen parametreler ile gerçekleştirilen analiz sonucunda fazın 0° olduğu anda elektrik alanın dağılımı simetrik şekilde elde edilmiş olup, demet yolu boyunca daha yoğun elektrik alan dağılımı, beklenildiği gibi iris bölgesi çevresinde de maksimum alan dağılımı olacak şekilde elde edilmiştir (Şekil 4.1, Şekil 4.2, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4).



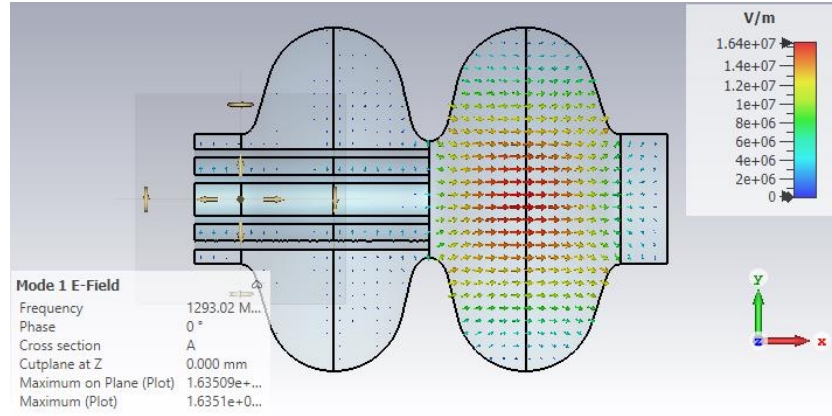
Şekil 4.1 Elektrik alan dağılımı (faz 0°)



Şekil 4.2 Elektrik alan dağılımı (faz 0°) (kontur görünümü)

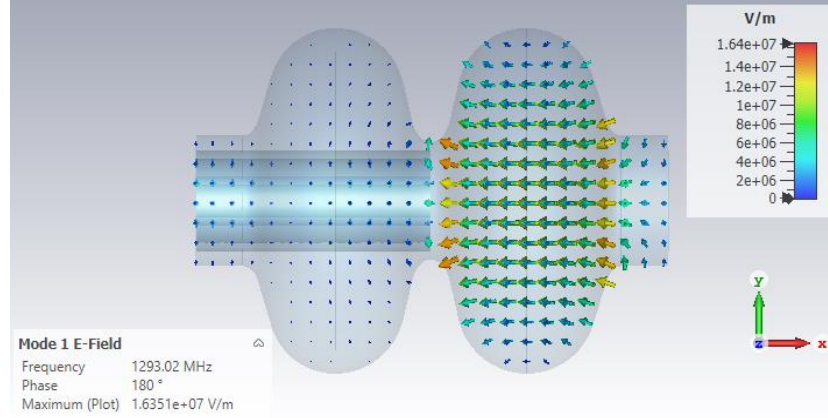


Şekil 4.3 Elektrik alan dağılımı (faz 0°)



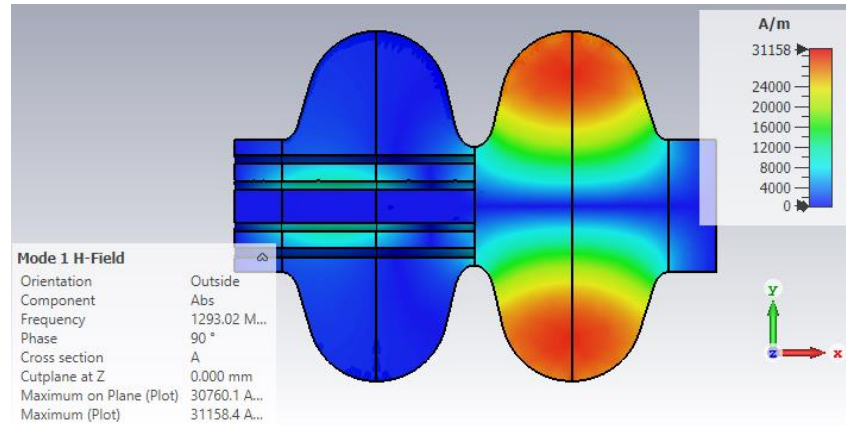
Şekil 4.4 Elektrik alan dağılımı (faz 0°) (kesit görünüm)

Üretilen parçacıklarla RF alanı arasındaki fazın farklı durumları için (0° ve 180°) kavite içi hızlandırma desenine bakılmıştır. Buna göre 0° açısında çalışma frekansın 1300 MHz' e en yakın ve demet hızlandırmasının da maksimum olduğu durum elde edilmiştir. Demet yolunda PEM yakıt hücresi ile elde edilen parçacıklar 0°' lik faz farkından $\sim 1.6 \cdot 10^7 V/m$ değerinde bir itme gradyanına altında itilmektedir ve hızlandırılmaktadır.

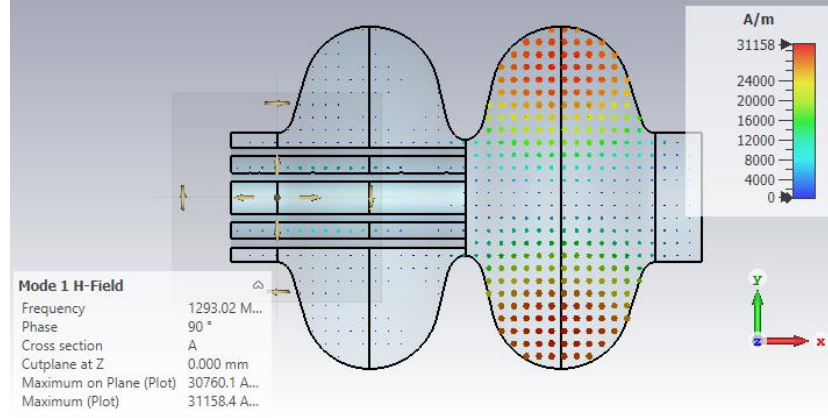


Şekil 4.5 Elektrik alan dağılımı (faz 180°)

PEM hücresinin varlığı kavite içerisinde herhangi bir bozulmaya sebebiyet vermemekte olup, bu durum kavite hücresi için elde edilen manyetik alan dağılımının R_{eq} uç kısımlarında en yoğun manyetik alan değerlerinin ($\sim 30,000$ A/m) elde edilmesiyle teyit edilmiştir. Kavite hücresi içerisindeki elektrik alanın en yüksek olduğu faz farkı değeri $E \perp B$ olduğundan, manyetik alanın da en yüksek olduğu faz 90° de elde edilmiştir (Şekil 4.6 ve Şekil 4.7).



Şekil 4.6 Manyetik alan dağılımı (faz 90°) (kontur görünümü)

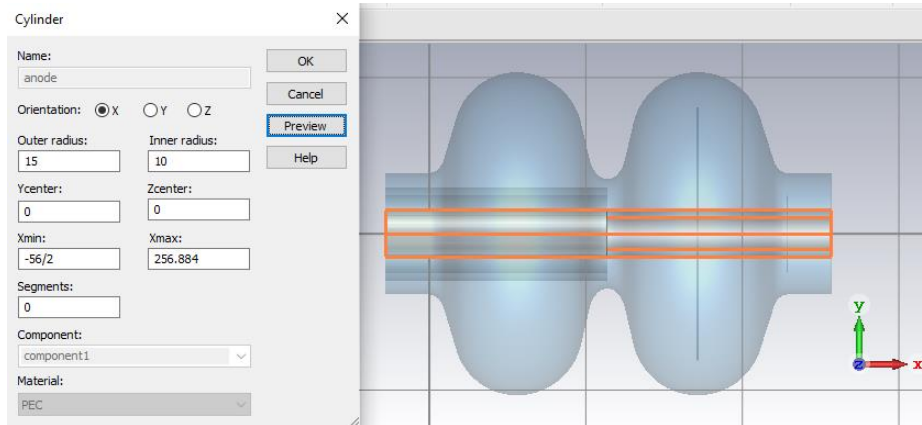


Şekil 4.7 Manyetik alan dağılımı (faz 90°) (kesit görünüm)

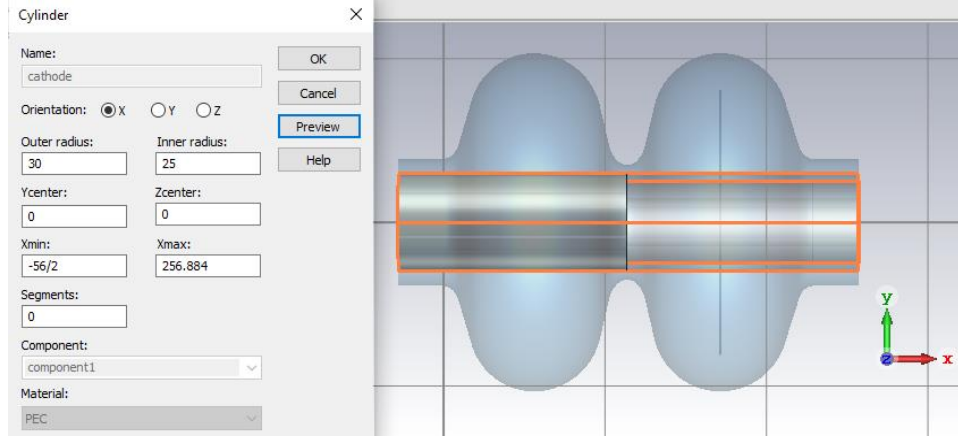
Parçacığın Model-1 kapsamındaki elektrik alan içerisindeki davranışı, hızlandırma eksenı boyunca (bu çalışmada +x eksenı olarak tanımlanmıştır) itilmekte ve hızlandırılmaktadır.

4.1.2 Model-2 (2-2)

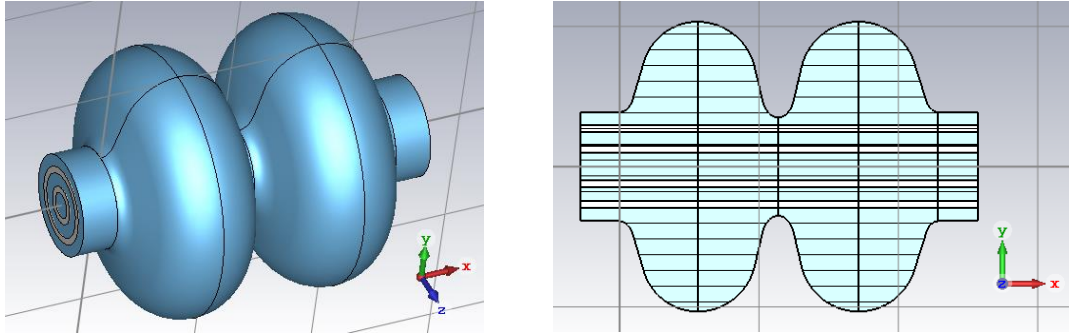
Model-2 kapsamında; PEM hücresinin kavite hücresi içerisinde farklı hücreleri kapsayacak şekilde modelleme ve analizleri çalışılmıştır. Bu kısımda iki SRF hücresi içerisinde tamamen kapsayan silindirik PEM yakıt hücresi varken elektrik ve manyetik alan dağılımlarına yönelik analizler yapılmıştır. Model-1 kapsamındaki anot ve katot kavite hücresinin tamamını kapsayacak şekilde güncellenmiştir (Şekil 4.8, Şekil 4.9 ve Şekil 4.10).



Şekil 4.8 Model-2 için anot parametre güncellemesi

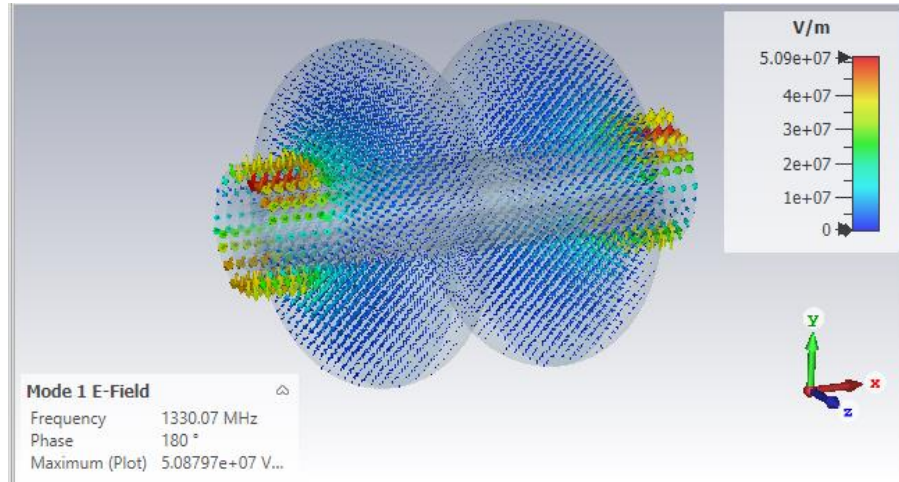


Şekil 4.9 Model-2 için katot parametre güncellemesi

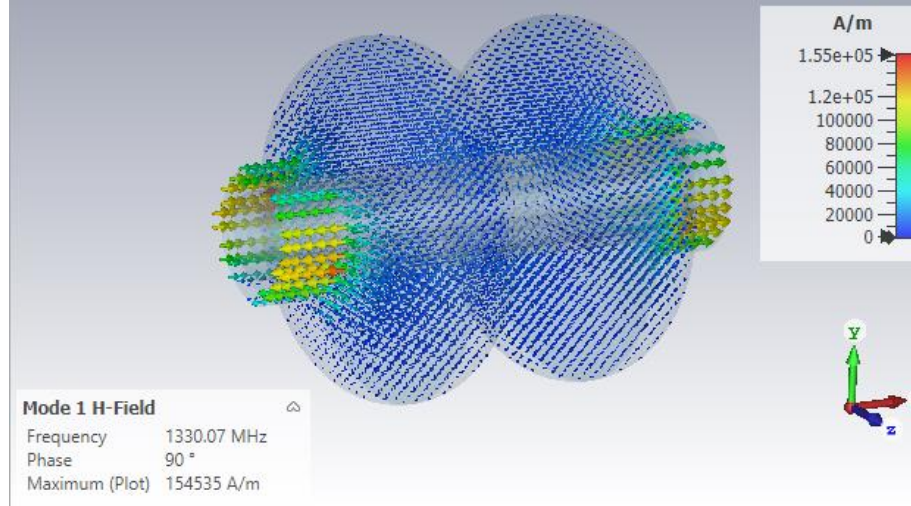


Şekil 4.10 Model-2 (a) katı model (b) kesit görünümü

Elde edilen Model-2 ile EM alan çözümleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.11 ve Şekil 4.12).



Şekil 4.11 Model-2 elektrik alan dağılımı (faz 180°)

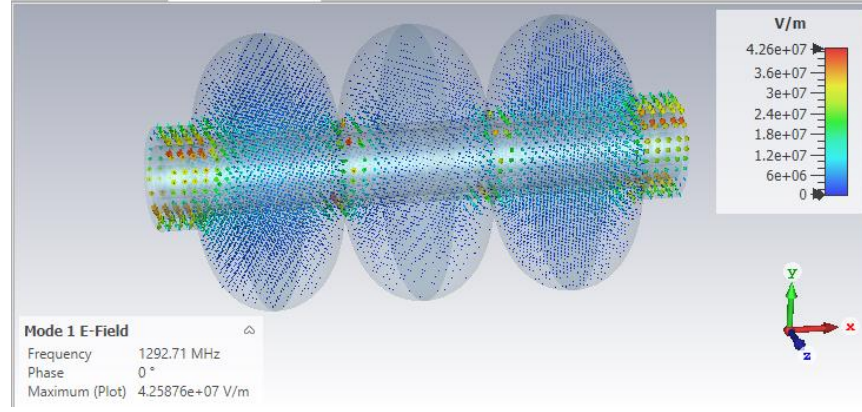


Şekil 4.12 Model-2 manyetik alan dağılımı (faz 90°)

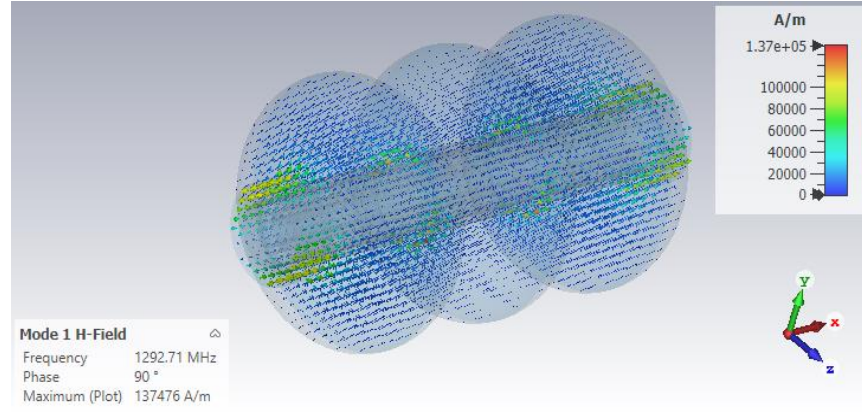
Model-2 kapsamındaki elektrik ve manyetik alan çözümleri incelendiğinde, PEM yakıt hücresinin iki hücrelik SRF kavitenin tamamını kapsayacak şekilde yerleştirilmesi durumunda, üretilen parçacıkların kavitenin hızlandırma özelliğinden yararlanamadığını göstermektedir. Çünkü üretilen parçacıklar, kavite içerisinde kendilerini ileri doğru itecek elektrik alan değerlerine maruz kalamamaktadırlar. Manyetik alan da kavite yüzeyinin içerisini tamamen kapladığından demeti kompakt halde demet yolundan tutmaktan uzaktır. SRF kavite içerisindeki RF alan dağılımı bu yapıda bozulmuş görünmektedir.

4.1.3 Model-3 (3-3)

PEM yakıt hücresinin kavite hücrelerinin tamamına yerleşme durumunu iki kavite yerine üç kavite ile ele alınmıştır. İki hücrelik kaviteye orta hücre eklenmiş, anot ve katot parametreleri de güncellenmiştir. Elde edilen model ile elektrik ve manyetik alan çözümleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.13 ve Şekil 4.14).



Şekil 4.13 Model-3 elektrik alan dağılımı (faz 0°)

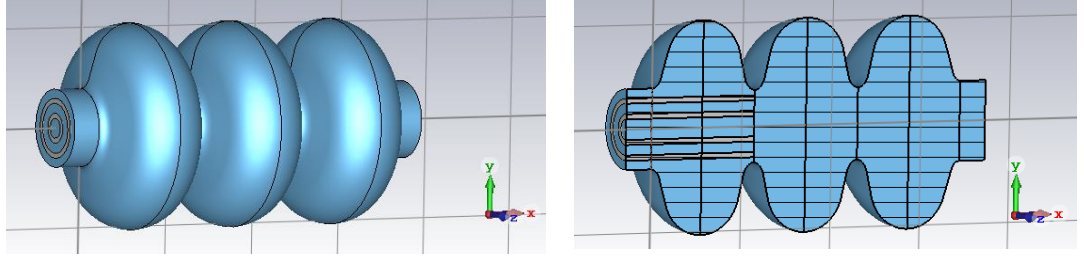


Şekil 4.14 Model-3 manyetik alan dağılımı (faz 90°)

Model-2 kapsamındaki benzer bir çalışmayı analiz edebilmek için hazırlanan Model-3 çözümleri ile ilgili olarak; Model-2 çözümlerinde karşılaşılan durum tekrarlanmıştır. Kavite hücrelerinin tamamını kapsayacak şekilde yerleştirilen PEM yakıt hücresi nedeniyle, üretilen parçacıkların kavitenin hızlandırma özelliğinden yararlanamadığını açıkça gözükmemektedir. Çünkü üretilen parçacıklar, kavite içerisinde kendilerini ileri doğru itecek elektrik alan değerlerine maruz kalamamaktadırlar. Manyetik alan da kavite yüzeyinin içersini tamamen kapladığından demeti kompakt halde demet yolundan tutmaktan uzaktır. SRF kavite içerisindeki RF alan dağılımı bu yapıda bozulmuş görünmektedir. Bu nedenle Model-3' te parçacığın hızlandırılması için uygun şartların oluşmadığı sonucuna ulaşılmıştır.

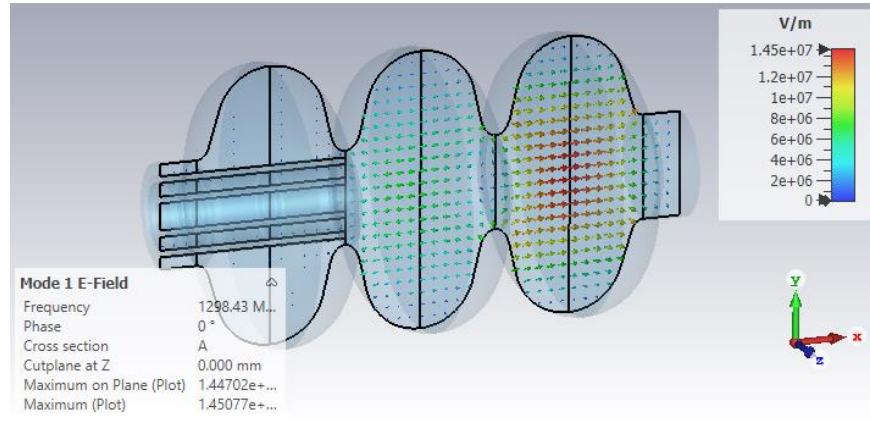
4.1.4 Model-4 (3-1)

Model-4 kapsamında; üç SRF kavite hücresi içerisinde sadece ilk hücreyi kapsayan silindirik PEM yakıt hücresi varken elektrik ve manyetik alan dağılımlarına yönelik analizler gerçekleştirilmiştir. Model-3 içerisindeki anot ve katot parametreleri güncellenmiştir. Elde edilen model Şekil 4.15’ te gösterilmiştir.

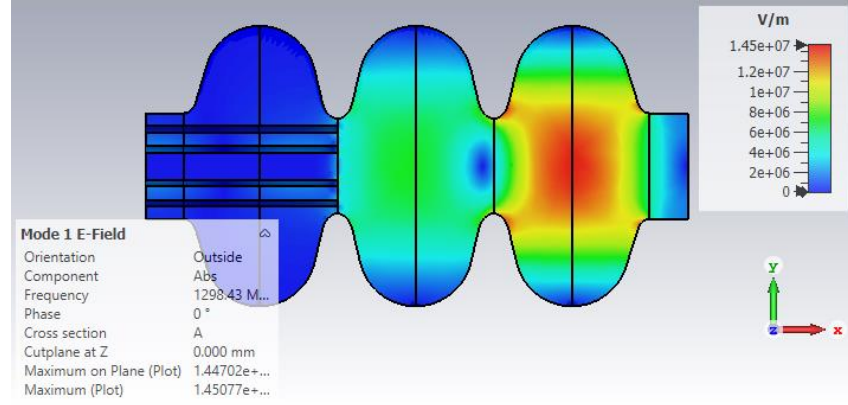


Şekil 4.15 Model-4 (a) katı model (b) kesit görünüm

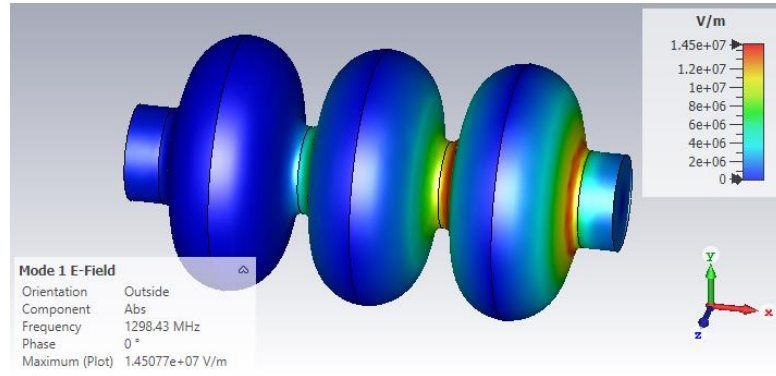
Elde edilen model ile elektrik ve manyetik alan çözümleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.16, Şekil 4.17, Şekil 4.18, Şekil 4.19, Şekil 4.20 ve Şekil 4.21).



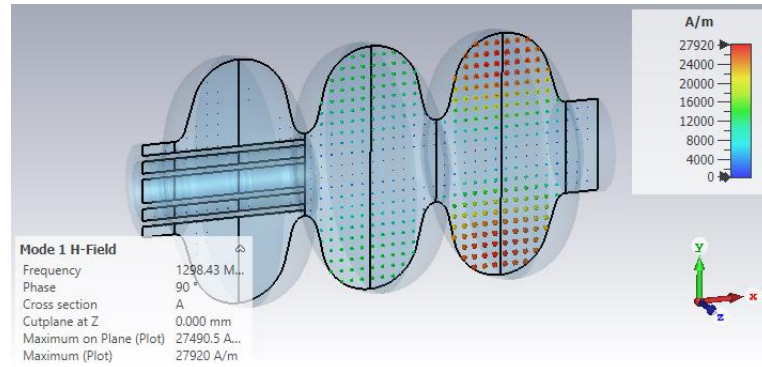
Şekil 4.16 Model-4 elektrik alan dağılımı (faz 0°)



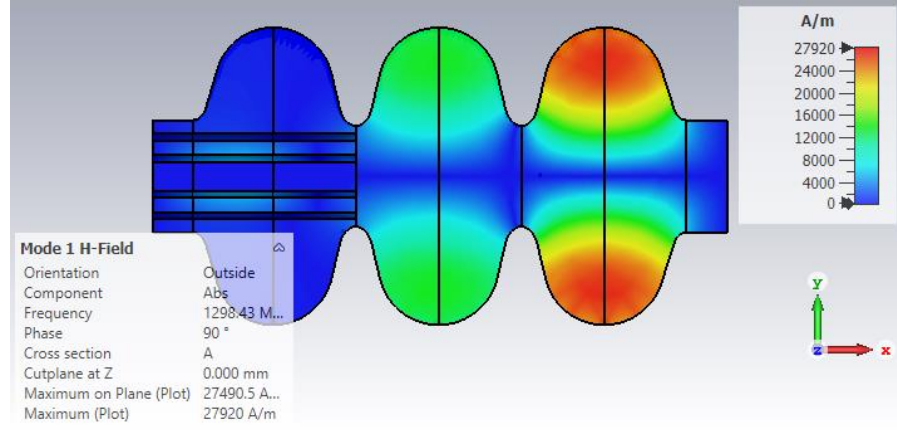
Şekil 4.17 Model-4 elektrik alan dağılımı (faz 0°) (kontur-kesit görünüm)



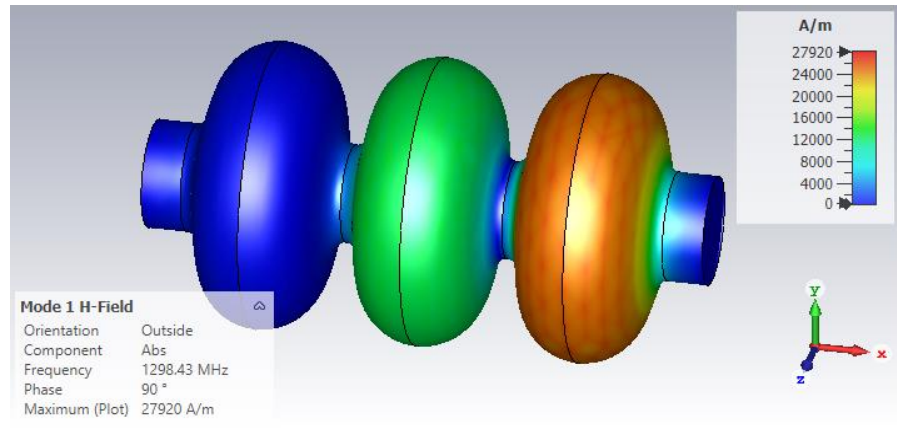
Şekil 4.18 Model-4 elektrik alan dağılımı (faz 0°) (kontur görünüm)



Şekil 4.19 Model-4 manyetik alan dağılımı (faz 90°)



Şekil 4.20 Model-4 manyetik alan dağılımı (faz 90°) (kontur-kesit görünüm)



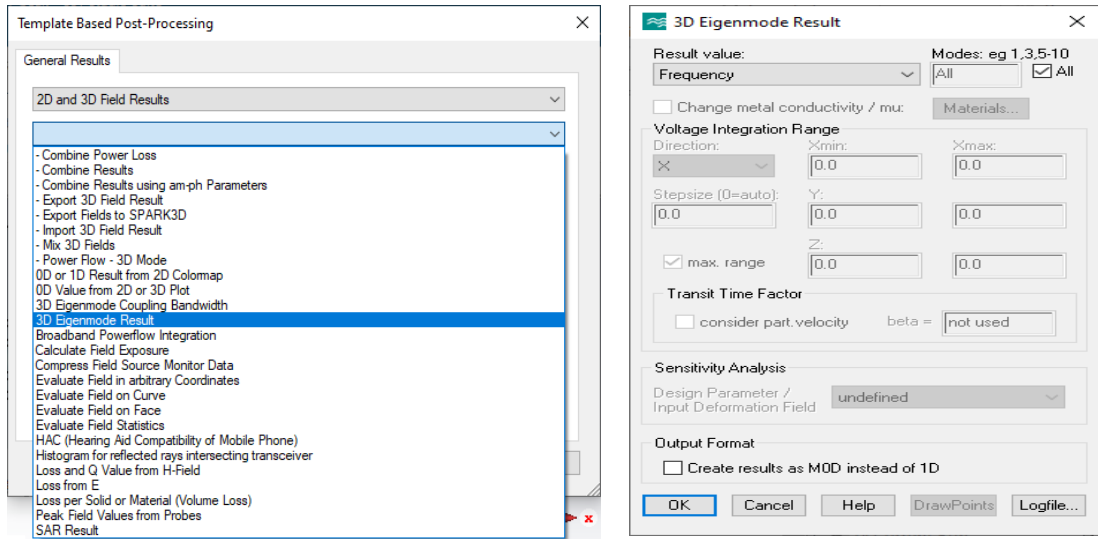
Şekil 4.21 Model-4 manyetik alan dağılımı (faz 90°) (kontur görünüm)

Üç hücrelik SRF kavitenin ilk hücresine PEM yakıt hücresini kaynak olarak koyduğumuzda sonraki hücrelerde oluşan alan dağılımı ve değerleri ilk hücrede oluşan parçacıkların hızlandırılması için tüm şartları taşıdığı sonucuna varılmıştır. Bu şartlar π modunda hızlanma, elektrik ve manyetik alan dağılımlarının hücre içinde simetrikliği ve davranışları, çalışma frekansının uygunluğu, $E_{\text{peak}}/E_{\text{acc}}$, $H_{\text{peak}}/E_{\text{acc}}$ değerlerinin optimize değerler arasında elde edilmesi, kavite hücresinin yüzeyinde kaybolan güç, kavite içerisinde depolanan enerji, shunt empedansı gibi değerler optimize şekilde elde edilmiştir. Belirtilen değerler Çizelge 4.1’ de sunulmuştur.

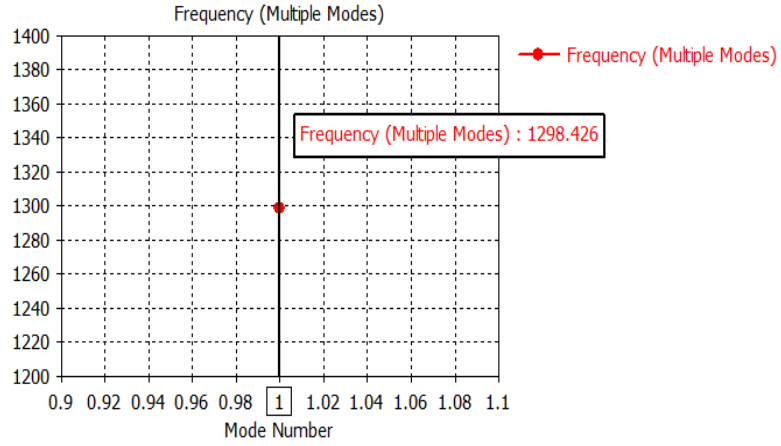
Çizelge 4.1 Kavite özellikleri ve değerleri

Özellik	Birim	Değer
Çalışma Frekansı	MHz	1298.426
Toplam Enerji	Joule	0.98448969
R/Q	Ω	223.52439
E_{pk}	MV/m	144.99
H_{pk}	Oe	26206.61
B_{pk}	mT	0.033
V_{acc}	MV	1339.88
E_{acc}	MV/m	38.97
E_{pk}/E_{acc}	-	3.7199861
B_{pk}/E_{acc}	$10^{-9} s/m$	8.4492769
Shunt empedansı	Ω/m	2072104.903

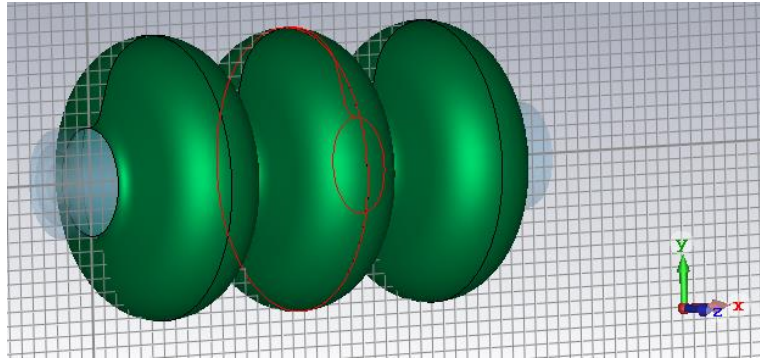
Çizelge 4.1 kapsamında ele alınan parametreler Şekil 4.22 ile Şekil 4.25 arasında gösterilen çalışma ile hesaplanmıştır.



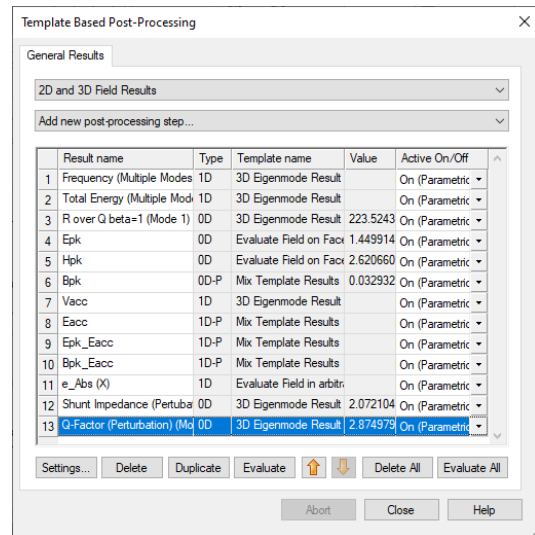
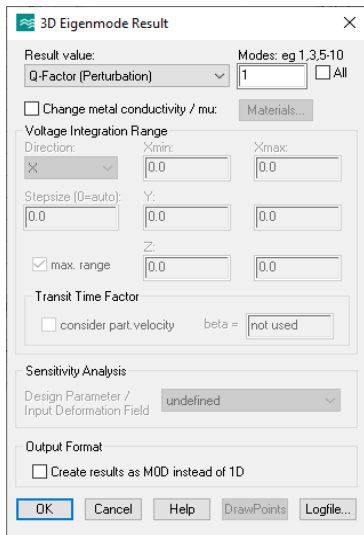
Şekil 4.22 CST özdeğer çözümleri tablosu



Şekil 4.23 Çalışma frekansına karşı modlar



Şekil 4.24 Kalite farkı hesabı için göz önüne alınan hücreler

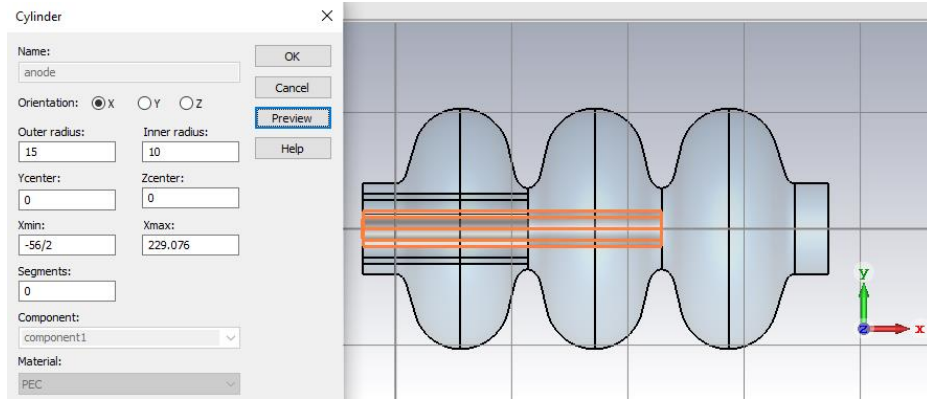


Şekil 4.25 Kalite faktörü hesabı CST işlemleri

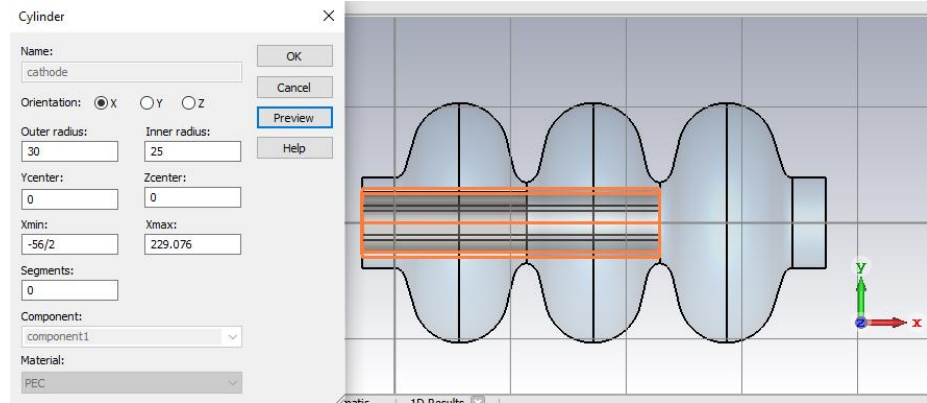
4.1.5 Model-5 (3-2)

Model-5’ te üç SRF kavite hücresi içerisinde ilk iki hücreyi kapsayan silindirik PEM yakıt hücresi varken elektrik ve manyetik alan dağılımlarına için analizler gerçekleştirilmiştir.

Model-4 içerisindeki anot ve katot parametreleri güncellenmiştir (Şekil 4.26 ve Şekil 4.27).

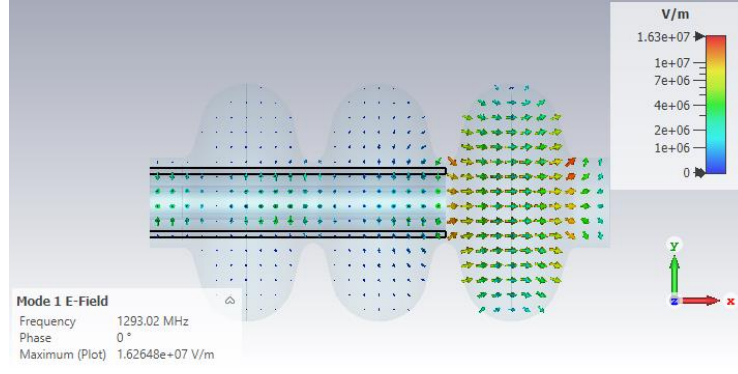


Şekil 4.26 Model 4 için anot parametre güncellemesi

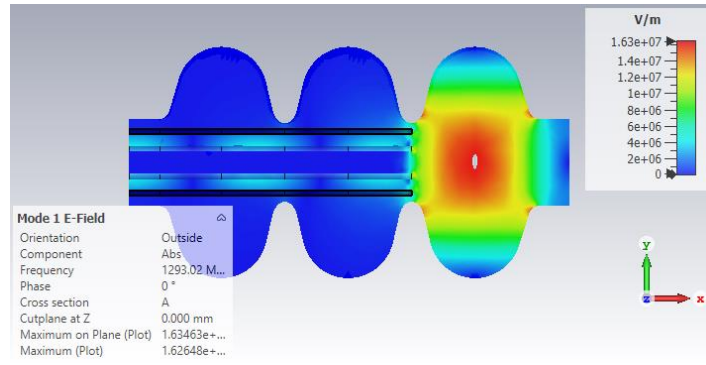


Şekil 4.27 Model 4 için katot parametre güncellemesi

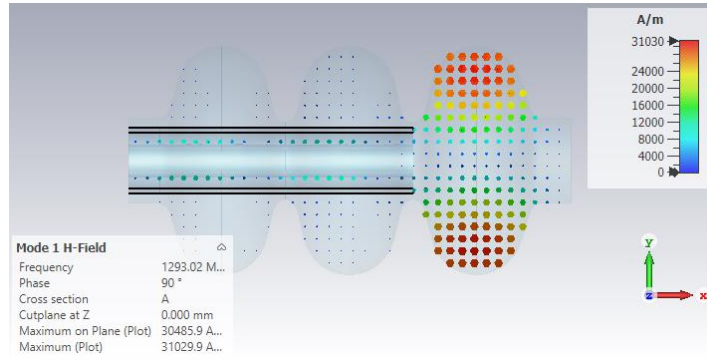
Elde edilen model ile elektrik ve manyetik alan çözümleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.28 - Şekil 4.32).



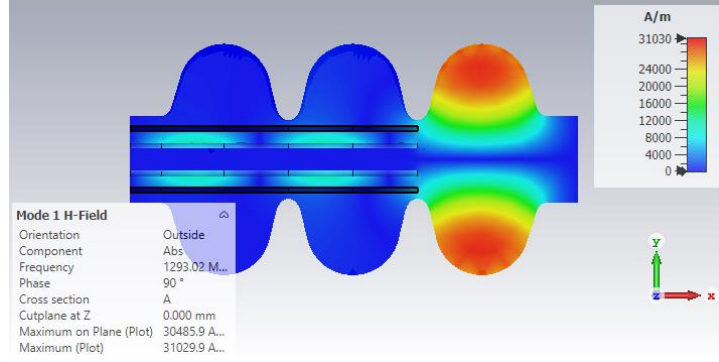
Şekil 4.28 Model-5 elektrik alan dağılımı (faz 0°)



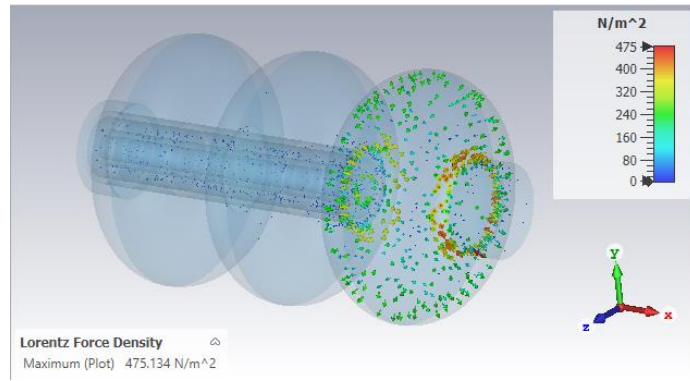
Şekil 4.29 Model-5 elektrik alan dağılımı (faz 0°) (kontur görünüm)



Şekil 4.30 Model-5 manyetik alan dağılımı (faz 90°)



Şekil 4.31 Model-5 manyetik alan dağılımı (faz 90°) (kontur görünüm)



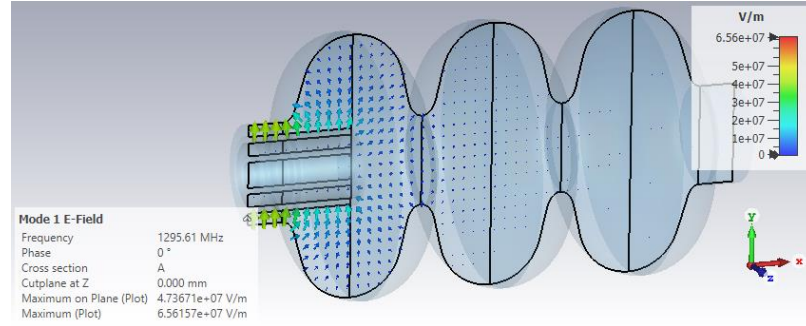
Şekil 4.32 Model-5 Lorentz kuvvet yoğunluğu

Model-4 kapsamındaki elektrik ve manyetik alan çözümleri incelendiğinde son hücrede parçacıkların hızlandırmasını ve odaklanmasını sağlayacak olan yoğun elektrik ve manyetik alanların kavite hücrelerinin içerisini doldurduğu gözükmemektedir. Elektrik alan demet yolu boyunca, manyetik alan da hücrenin kubbe kısımlarında daha yüksektir. Burada üç hücrelik enjektör kavitesi tasarımı durumu için PEM yakıt hücresinin üç hücrede bir hücreye ve üç hücrede iki hücreye yerleştirilme durumlarının elektrik alan (dolayısıyla kavite içi hızlandırma gradyenti) oranı 1.1241 olarak hesaplanmıştır. Buradan PEM yakıt hücresinin daha fazla kavite hücresi içerisine yerleştirilmesi durumunda parçacıkların daha fazla hızlandırılabilceği açıkça görülmektedir.

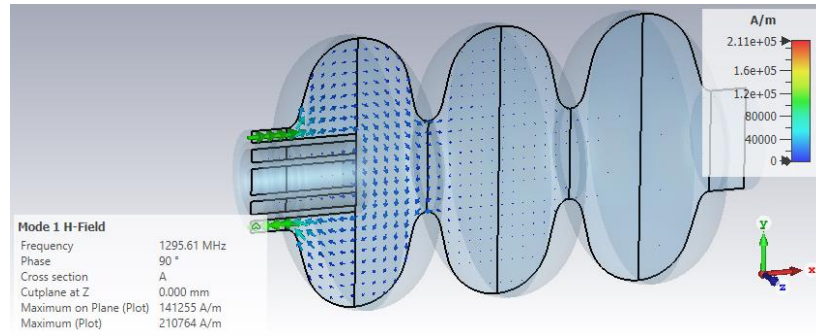
4.1.6 Model-6 (3-0.5)

Model-6 kapsamında; üç SRF kavite hücresi içerisinde ilk hücrenin yarısını kapsayan silindirik PEM yakıt hücresi varken elektrik ve manyetik alan dağılımlarına yönelik

analizler gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.33 ve Şekil 4.34).



Şekil 4.33 Model-6 elektrik alan dağılımı (faz 0°)



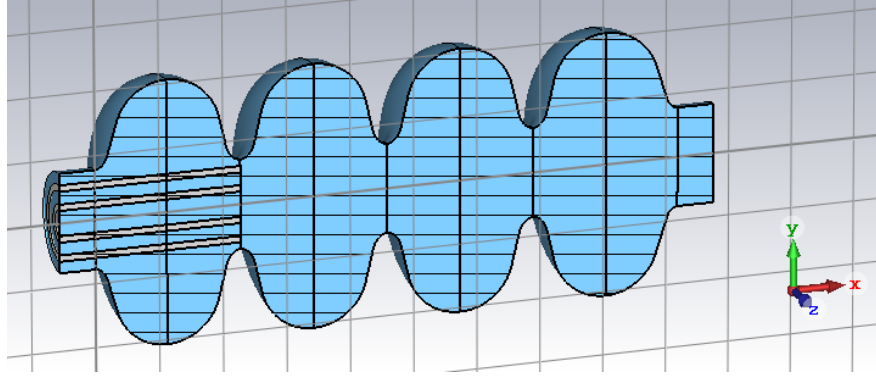
Şekil 4.34 Model-6 manyetik alan dağılımı (faz 90°)

Model-4 kapsamında sağlanan hızlandırmanın, kavite sayısı sabit tutulurken PEM yakıt hücresinin küçültülmesi ve ilk hücresinin yarısı kadar olması durumunda nasıl tepki vereceği Model-6 ile çalışılmıştır. Kavite içerisinde simetri sağlanamaması nedeniyle SRF kavite içerisindeki RF alan dağılımının bu yapıda bozulmuş olduğu görülmektedir. Ayrıca, PEM yakıt hücresinin yerleştirildiği hücrede elektrik alan dağılımı, yoğunluğu fazla olduğundan parçacıklar için uygundur. Halbuki PEM yakıt hücresinin yerleştirilmediği hücrelerde parçacıkların daha fazla hızlandırılması beklendiğinden (şekle göre tam tersi görüldüğünden) gibi nedenlerle Model-6'da parçacığın hızlandırılması için uygun şartların oluşmadığı sonucuna ulaşılmıştır.

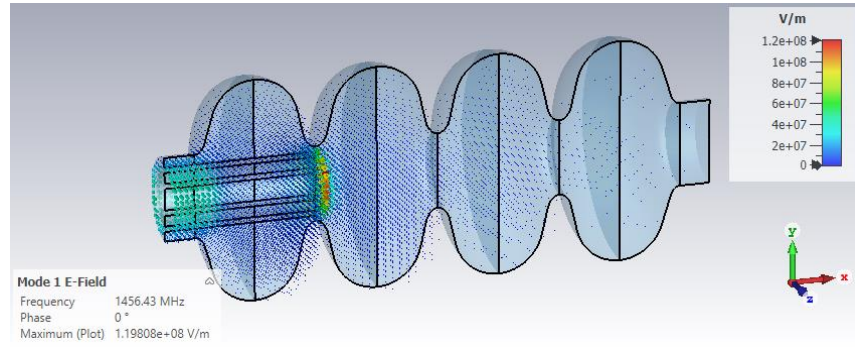
4.1.7 Model-7 (4-1)

Model-7 kapsamında; dört SRF kavite hücresi içerisinde ilk hücreyi kapsayan silindirik

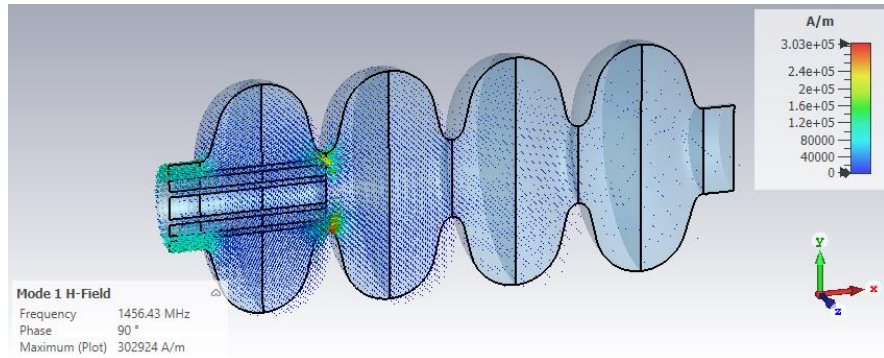
PEM yakıt hücresi varken (Şekil 4.35) elektrik ve manyetik alan dağılımlarına yönelik analizler gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.36 ve Şekil 4.37).



Şekil 4.35 Model-7 kesit görünüm



Şekil 4.36 Model-7 elektrik alan dağılımı (faz 0°)



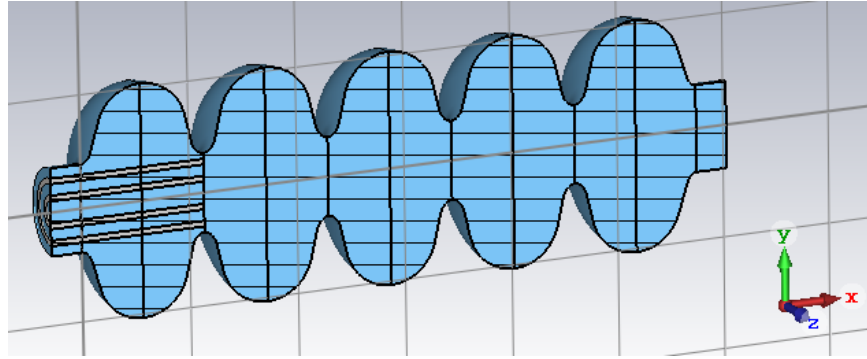
Şekil 4.37 Model-7 manyetik alan dağılımı (faz 90°)

Model-4 kapsamında sağlanan hızlandırmanın, kavite sayısının artması ile nasıl tepki vereceği Model-7 ile anlaşılmaya çalışılmıştır. Kavite içerisinde simetri sağlanamaması

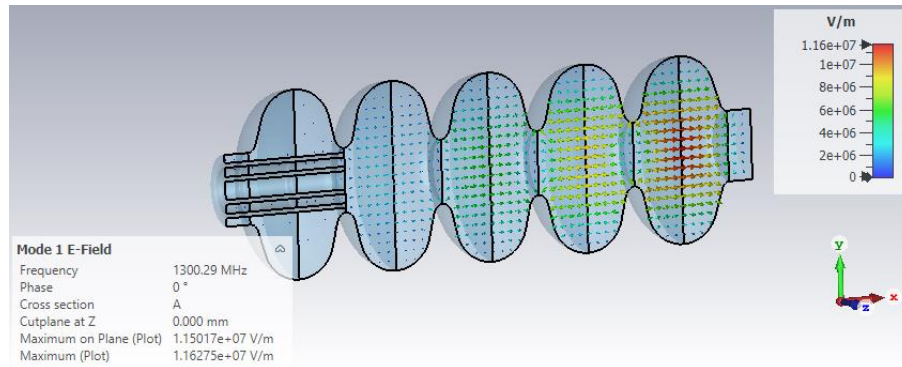
nedeniyle SRF kavite içerisindeki RF alan dağılımı bu yapıda bozulmuş görünmektedir. Model-6’ da bahsedilen sebeplerden dolayı Model-7’ de parçacığın hızlandırılması için uygun şartların oluşmadığı sonucuna ulaşılmıştır.

4.1.8 Model-8 (5-1)

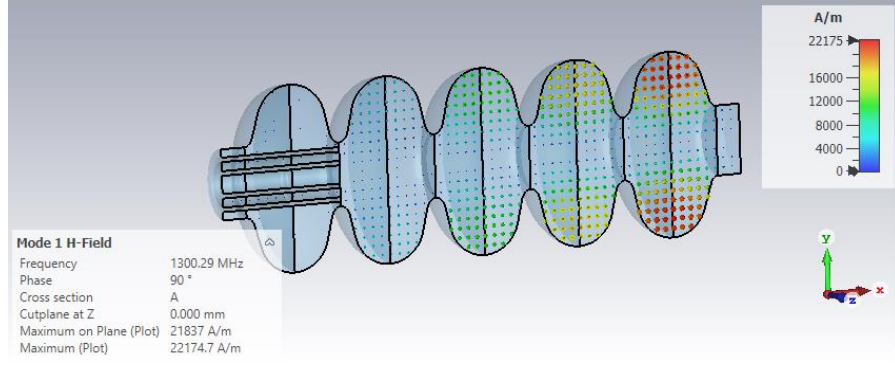
Model-8 kapsamında; beş SRF kavite hücresi içerisinde ilk hücreyi kapsayan silindirik PEM yakıt hücresi varken (Şekil 4.38) elektrik ve manyetik alan dağılımlarına yönelik analizler gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.39 ve Şekil 4.40).



Şekil 4.38 Model-8 (kesit görünüm)



Şekil 4.39 Model-8 elektrik alan dağılımı (faz 0°)

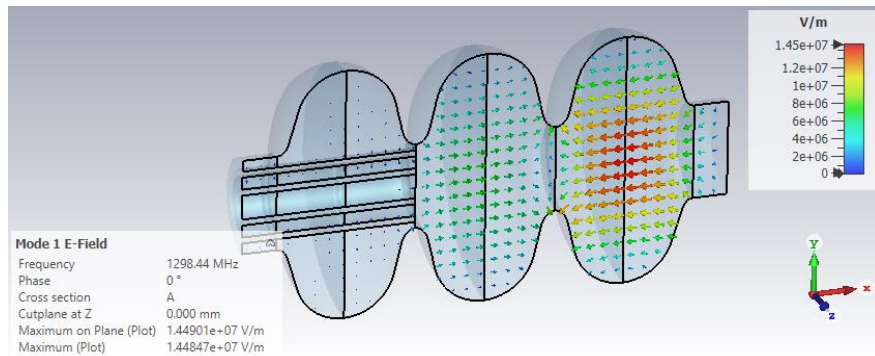


Şekil 4.40 Model-8 manyetik alan dağılımı (faz 90°)

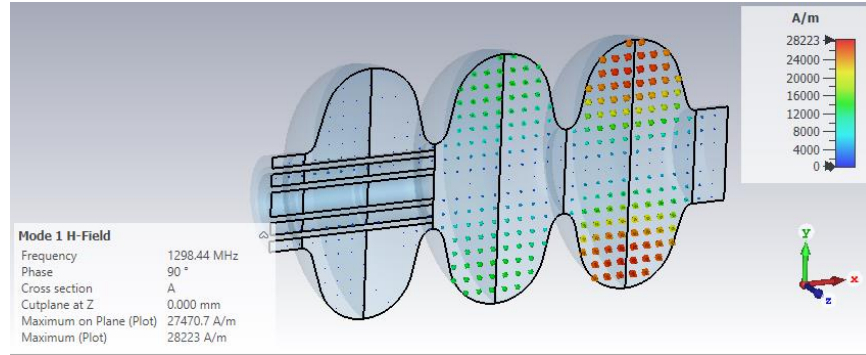
Model-4 kapsamında sağlanan hızlandırmanın, kavite sayısının artması ile nasıl tepki vereceği Model-8 ile anlaşılmaya çalışılmıştır. Model-7 kapsamında elde edilemeyen hızlandırma etkisinin Model-8 kapsamında tam tersi olduğu açıkça gözükmemektedir. Kavite sayısının simetri oluşturabilecek şekilde olması nedeniyle Model-8 kapsamında hızlandırma elde edilebilmiştir. Kavite tasarımı ve üretimi günümüzde parçacık ve alanların simetrik yapılarda uyumunun ve faz farkı eşleşmesinin uygunluk vermesi sebebiyle parçacık hızlanmasını daha ileri taşımasından dolayı önemlidir.

4.1.9 Model-9 (3-1) 5 mod

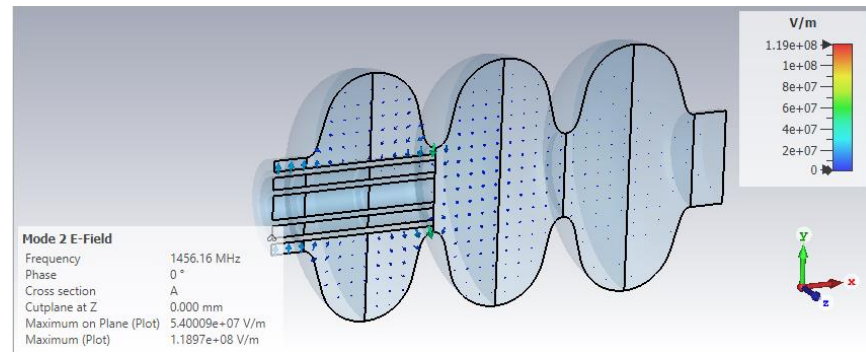
Model-9 kapsamında; Model-4 kapsamındaki tek modda yapılan RF alan dağılımı çözümü, bu modelde beş farklı mod (hızlandırıcı modu ve diğer yüksek mertebe modların davranışlarını incelemek için) olacak şekilde tekrarlanmıştır. Elektrik ve manyetik alan dağılımlarının nasıl değiştiği gözlemlenmiştir. Çalışma kapsamındaki sonuçlar Şekil 4.41 ile Şekil 4.50 arasında gösterilmiştir.



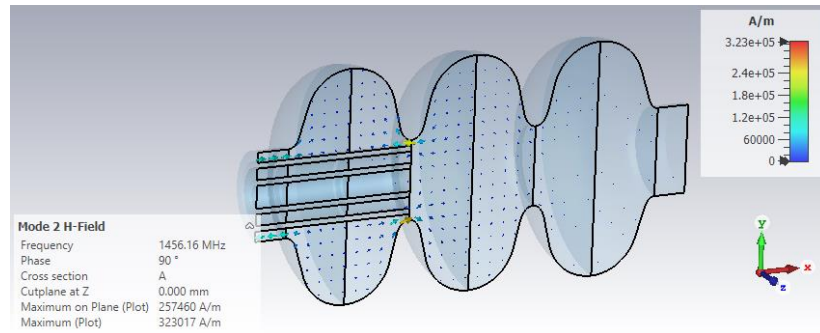
Şekil 4.41 Model-9 elektrik alan dağılımı (faz 0°) (Mod-1)



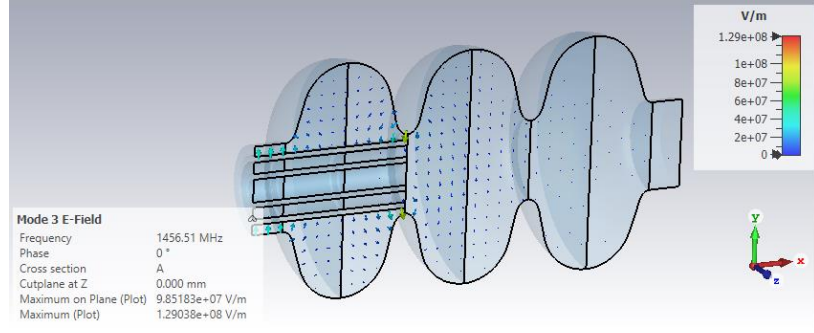
Şekil 4.42 Model-9 manyetik alan dağılımı (faz 90°) (Mod-1)



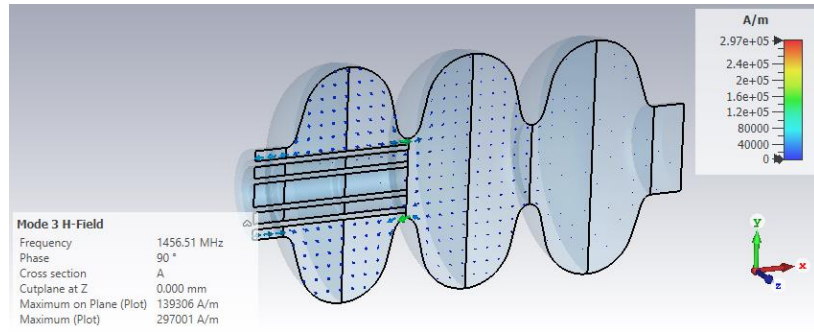
Şekil 4.43 Model-9 elektrik alan dağılımı (faz 0°) (Mod-2)



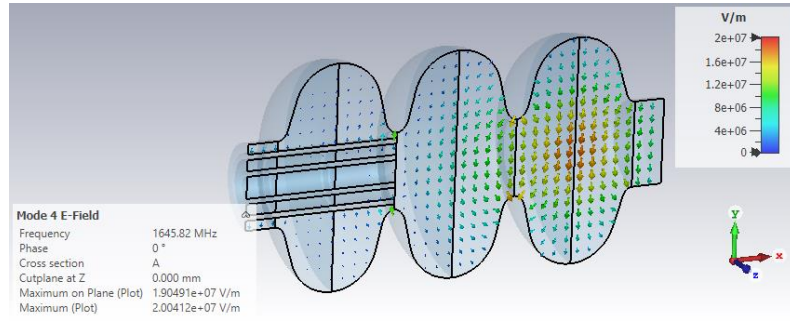
Şekil 4.44 Model-9 manyetik alan dağılımı (faz 90°) (Mod-2)



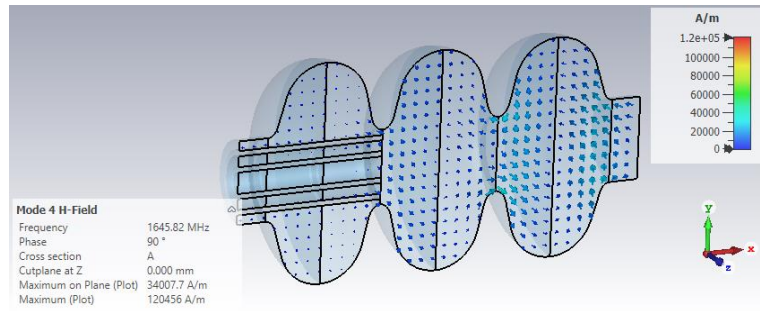
Şekil 4.45 Model-9 elektrik alan dağılımı (faz 0°) (Mod-3)



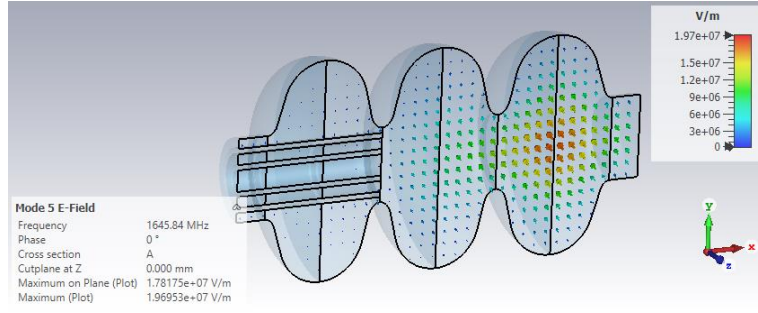
Şekil 4.46 Model-9 manyetik alan dağılımı (faz 90°) (Mod-3)



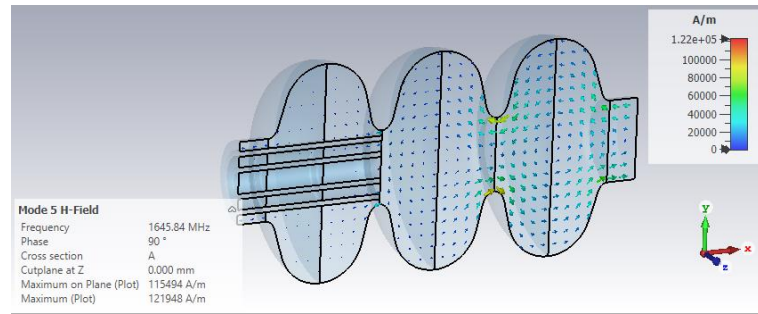
Şekil 4.47 Model-9 elektrik alan dağılımı (faz 0°) (Mod-4)



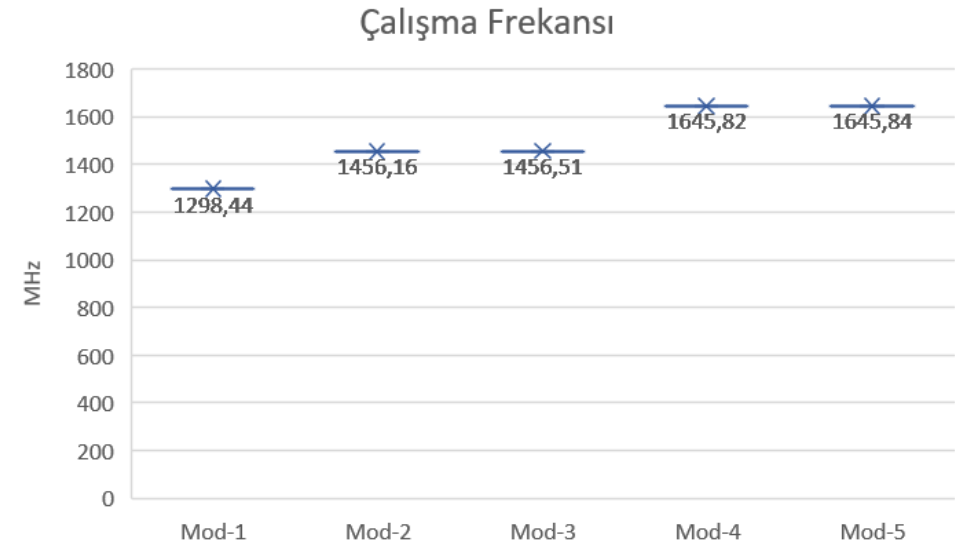
Şekil 4.48 Model-9 manyetik alan dağılımı (faz 90°) (Mod-4)



Şekil 4.49 Model-9 elektrik alan dağılımı (faz 0°) (Mod-5)



Şekil 4.50 Model-10 manyetik alan dağılımı (faz 90°) (Mod-5)



Şekil 4.51 Model-9 farklı modlara göre frekans dağılımı

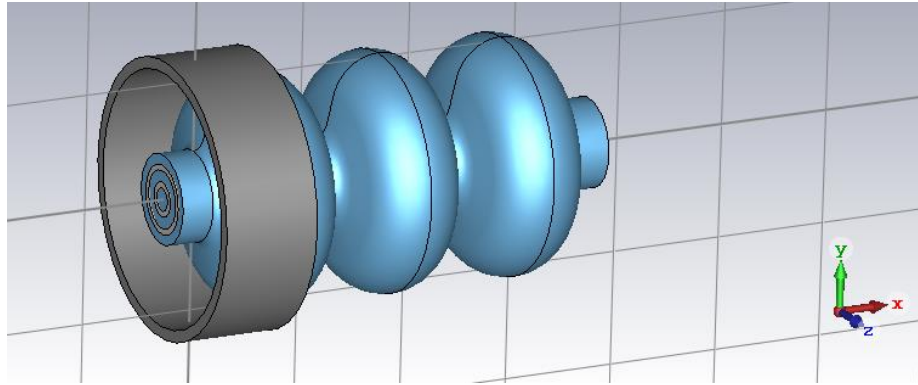
Farklı modlara göre yapılan çözümler incelendiğinde hızlandırıcı modunun (π modu)

Mod-1 ile ilişkilendirilmesi uygun gözükmemektedir. Diğer dört mod çözümünde, SRF kavite içerisindeki RF alan dağılımı bu yapılarda bozulmuş görünmektedir. Bu nedenle Mod-1 haricindeki modların parçacığın hızlandırılması için uygun şartların oluşmadığı sonucuna ulaşılmıştır.

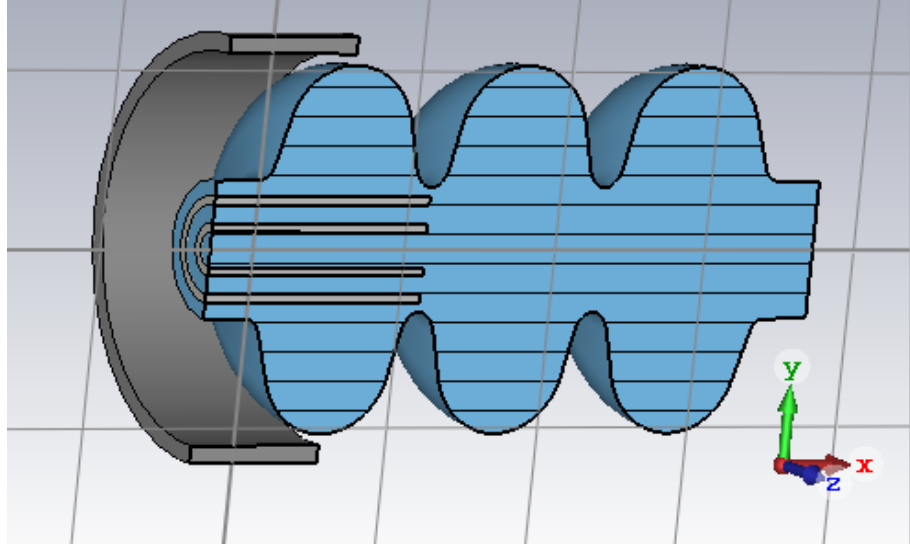
4.2 Kavite İçerisinde Parçacık Demeti Elde Edilmesi

4.2.1 Dizayn-1

Kavite geometrisi ve anot/katot ölçüleri için “yüksek frekans” çalışmasındaki değerler kullanılmıştır. Proton tüpünden çıkan parçacıkların kavitenin diğer hücrelerine erişebilmesi amacıyla katodun potansiyel gerilimini anlık olarak negatife çekilmesi durumunda protonların kavite içerisine dağıldığı gözlenmiştir. Bu durumda PEM yakıt hücresinin katot tarafında gerçekleşen reaksiyonlar tersine dönmüş ve PEM yakıt hücresi elektrolizör gibi çalışmıştır. Az olsa karşılaşılabilen bu durum yakıt hücresinin ömrünü azaltır. Kontrol kartı ile gerçekleştirilebilecek bu durum anlık olarak protonları elde edebilmekte ve çalışmanın önceki kısımlarında belirtildiği şekilde hızlanma eksenı boyunca maruz kaldığı elektrik alan (π -modu) sayesinde hızlanabilmekte; üretilen protonların daha fazla sayıda demet içerisine dahil edilebilmesi amacıyla birinci kavitenin girişine güçlü manyetik yapılar konularak demet elde edilebileceği görülmüştür.



Şekil 4.52 Dizayn-1 katı modeli

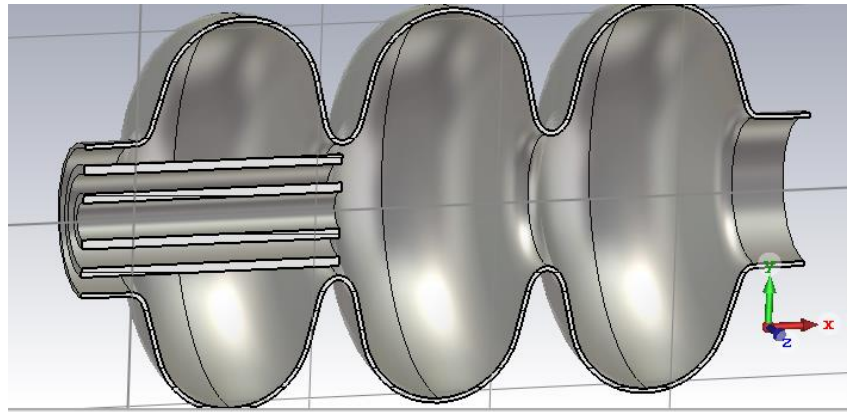


Şekil 4.53 Dizayn-1 katı modeli (kesit görünümü)

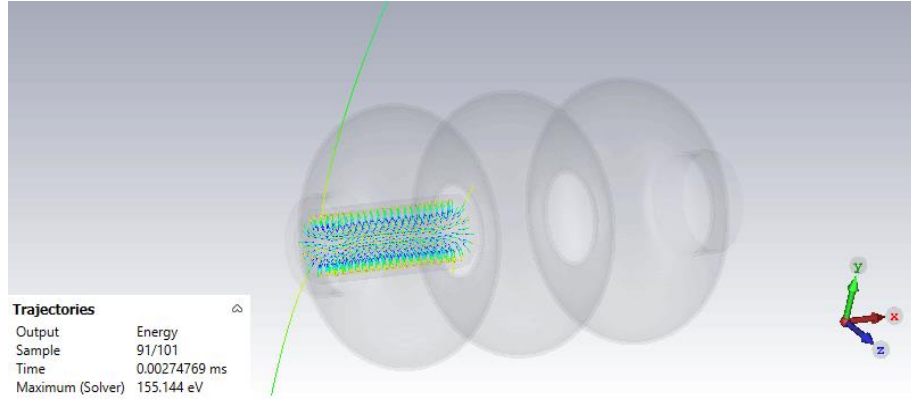
Dizayn-1 kapsamında yukarıda bahsedilen problemler geçici çözüm ortaya koyduğundan demet dinamiği uygulanmamıştır.

4.2.2 Dizayn-2

Kavite geometrisi ve anot/katot ölçüleri için “high frequency” çalışmasındaki değerler kullanılmıştır. İlave olarak, kaviteyi oluşturan hacmin dış yüzeyine metal (kalınlık 5mm) malzeme kaplanmıştır. Böylelikle kabuk olarak adlandırılan ince metal malzeme istenilen gerilim seviyesine getirilebilmektedir. Bu sayede oluşan gradyan ile kavite içerisine dağılan protonlar, kavitenin içerisindeki elektrik alan sayesinde hızlandırılabilceği öngörülmüştür.



Şekil 4.54 Dizayn-2 katı modeli (kesit görünümü)

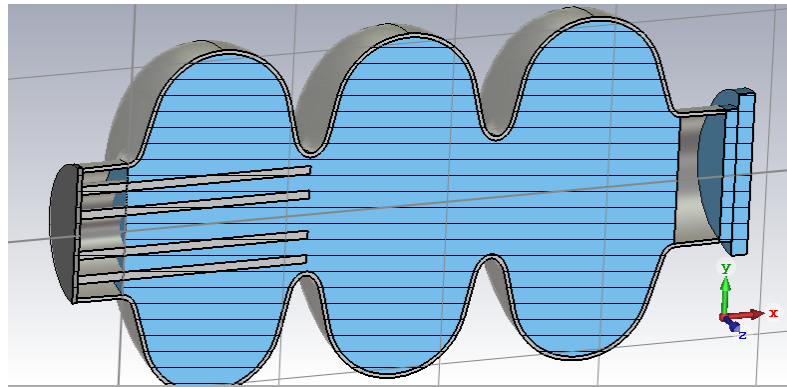


Şekil 4.55 Dizayn-2 parçacık dağılımı görünümü

4.2.3 Dizayn-3

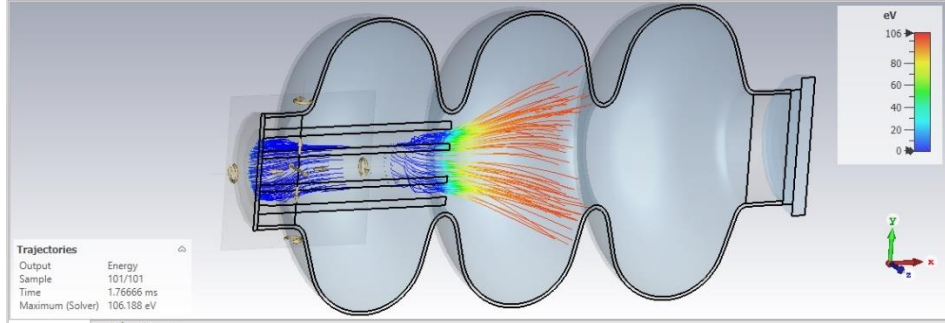
Dizayn-2’ deki kullanılan modelde gözükten problemlerin giderilebilmesi amacıyla aşağıda sunulan iyileştirmeler yapılmıştır:

- SRF kavitenin ilk hücresinin girişi R_{iris} çapını ve kavitenin kabuk kalınlığını kapsayacak boyutta metal kapak ile kapatılmıştır. Bu sayede $-x$ ekseninde dağılımı olan parçacıkların kavite dışına çıkması engellenmiştir.
- Kavite içerisini tamamen dolduracak vakum malzemesi eklenmiştir. Parçacıkların hareketlerinin analizlerinin daha iyi yapılması sağlanmıştır.
- Kavitenin içerisindeki parçacığın demet haline getirilebilmesi amacıyla kavitelerin çıkışına magnet (5 T, R_{iris} çapını ve kavitenin kabuk kalınlığını kapsayacak boyutta) yerleştirilmiştir. Bu sayede manyetik alan $+x$ yönünde olacak şekilde uygulanmıştır.



Şekil 4.56 Dizayn-3 katı modeli (kesit görünümü)

Yapılan bu değişiklikler sonrası elde edilen parçacık hareketi aşağıda sunulmuştur.



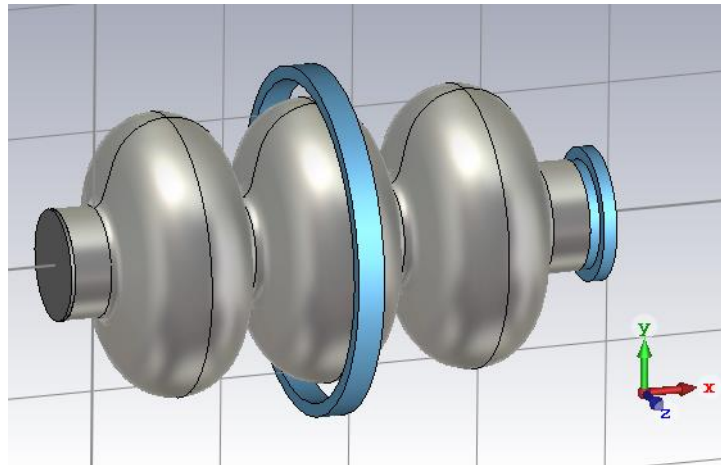
şekil 4.57 Dizayn-3 parçacık dağılımı görünümü

Parçacıkların dağılımı $+x$ ekseni yönünde olduğu gözlemlenmiştir. Ancak dağılımın odaklanması gerekliliği nedeniyle modelde iyileştirme yapılmıştır.

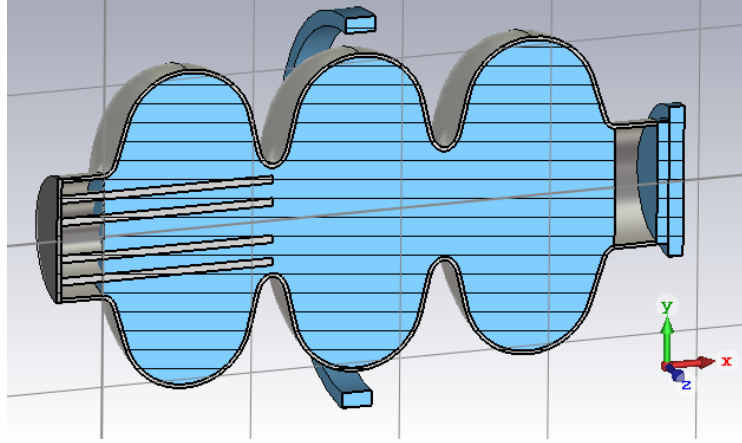
4.2.4 Dizayn-4

Dizayn-3’ deki kullanılan modelde gözüken parçacıkların saçılım probleminin giderilebilmesi amacıyla aşağıda sunulan ilave iyileştirme yapılmıştır:

- SRF kavitenin ortasına (ikinci hücrenin merkezine) ilave magnet (5 T) yerleştirilmiştir. Bu sayede manyetik alan $+x$ yönünde ve daha yoğun olacak şekilde uygulanmıştır.

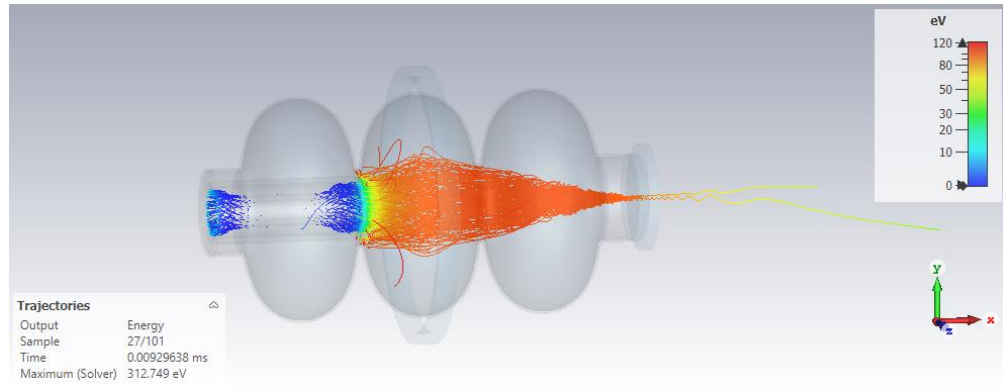


şekil 4.58 Dizayn-4 katı modeli



Şekil 4.59 Dizayn-4 katı modeli (kesit görünümü)

Yapılan bu değişiklikler sonrası elde edilen parçacık hareketi aşağıda sunulmuştur.



Şekil 4.60 Dizayn-4 parçacık dağılımı görünümü

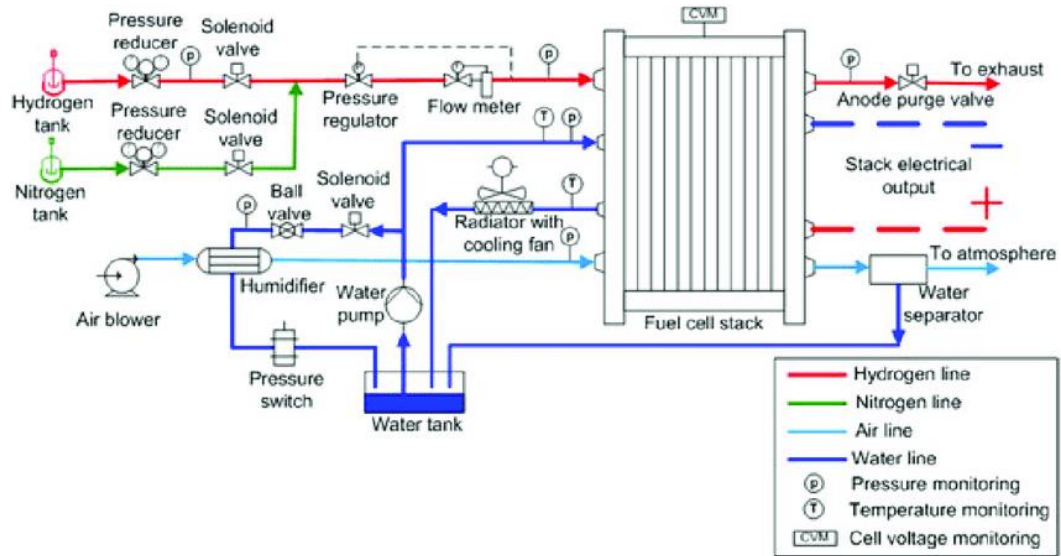
Magnetlerin yerleştirilmesinden sonra demetin yayınının kontrol altına alındığı ve hızlanarak kavite içerisinde ilerlediği ve ortalama $\sim 120\text{eV}$ (maksimum 312eV) enerjiye sahip olduğu görülmektedir.

4.3 PEM Yakıt Hücresinin 20-40 MeV' lik Lineer Elektron Hızlandırıcılarda Alternatif Güç Kaynağı Olarak Kullanımı

Lineer elektron hızlandırıcılarında elektron kaynağı olarak kullanılan sistemler genellikle temeli Cockroft-Walton ya da Van de Graaff çalışmalarında ele alınan, kademeli olarak enerjinin artmasını sağlayan ve yüksek gerilim altında çalışan sistemlerden elde edilmektedir. 1930' lu yıllardaki çalışmalarda, Şekil 2.8' de görseli gösterilen Van de

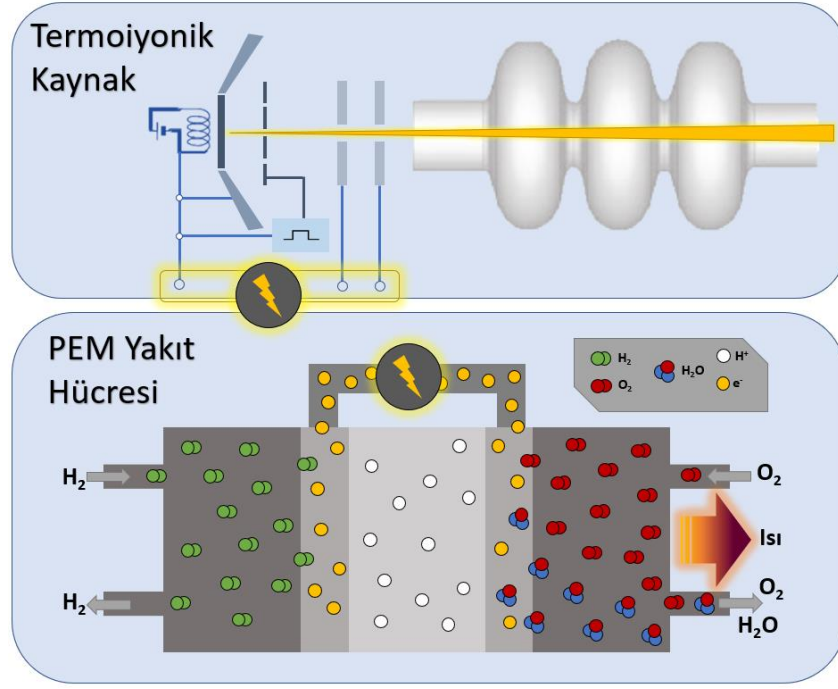
Graaff jeneratöründe olduğu gibi, 20 MeV enerji seviyesine çıkmış olup hızlandırıcı hattının hizmet edeceği deney ya da kullanım alanı doğrultusunda daha yüksek enerji seviyelerine de çıkılabilmektedir.

2.1.4 PEM yakıt hücresi uygulama alanları başlığı altında ele alınan uygulamalarda PEM yakıt hücresi sistemi ile kullanım alanı ve amacına uygun olarak DC güç kaynakları elde edilmektedir. Sistemin sağlıklı çalışabilmesi için ihtiyaç duyulan yardımcı eleman ve alt-sistemler ile yakıt (hidrojen) ve oksitleyici (oksijen ya da hava) sağlandığı süre boyunca sistem aralıksız güç üretimi yapabilmektedir. 500W güç mertebesinde güç üretimi yapabilecek bir sistem yaklaşık 25 L hacme ihtiyaç duymaktadır. İhtiyaç duyulan güç mertebesi 1 kW ya da 2 kW olması durumunda sırasıyla 40 L ve 100 L hacimlere ihtiyaç duyabilmektedir. Kullanılan bileşenlerin ve alt-sistemlerin seçimi sayesinde kaplanan hacim değişmektedir. Örnek sistem mimarisi Şekil 4.61’ de görülmektedir.



Şekil 4.61 Örnek sistem mimarisi [27]

Ayrıca, bu tez çalışması kapsamında PEM yakıt hücrelerini hızlandırılacak demetlerin söküleceği çeşitli parçacık kaynaklarının çalışması için gerekli güç kaynağı olarak da kullanılması çalışılmıştır.



Şekil 4.62 SRF kaviteler için alternatif güç kaynağı tasarımı

Şekil 4.62’ de bu şekilde kullanıldığında PEM yakıt hücresi diğer güç kaynaklarına göre avantajları bulunmaktadır. PEM yakıt hücresi ile elektrik dalgalanmalarının ve kesintilerinin fazla ve uzun olduğu ortamlarda daha stabil güç sağlamaktadır. Uzun süreli elektrik kesintisinin olduğu hızlandırıcı tesislerinde ($\sim$ GeV enerjili) kesintisiz güç kaynağının çalışma ömrünün az olması nedeniyle şarj edilme ve alternatif olarak jeneratör kullanılması durumunda ise gürültü ve titreşim problemlerinden kaçınmak için oksitleyici olarak oksijen kullanan PEM yakıt hücresi sessiz ve titreşimsiz çalışma imkânı sunar.

Diğer yandan, PEM yakıt hücrelerinin modüler yapısı sayesinde farklı güç mertebelerinde kullanımı mümkün olmaktadır. Yukarıda da bahsedildiği üzere PEM yakıt hücresine yakıt ve oksitleyici sağlandığı sürece DC güç üretimi kesintisiz olarak yapılabilir. Böylelikle hızlandırıcı sistemin batarya ile çalıştırılması durumunda, bataryanın şarj edilmesine ihtiyaç duyulmayacaktır. Bahsedilen avantajlar, hızlandırıcı sistemlerde ($\sim$ GeV enerjili) PEM yakıt hücresinin alternatif güç kaynağı olarak kullanılmasının önemini ortaya koymaktadır.

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Tez çalışması kapsamında PEM yakıt hücrelerinin hızlandırıcı kaynağı olarak hızlandırıcı hücreler içerisine monte edilme durumunda kavite hücreleri içerisindeki alan dağılımları çalışılmış ve parçacıkların hızlandırılmalarının oluşup oluşmadığı araştırılmış olup bunun için farklı hücreler (1, 3, 4 ve 5 hücreler) çalışılmıştır. Ayrıca, PEM yakıt hücrelerinin 20-40 MeV elektron hızlandırıcıları için olası güç kaynağı oluşturulabilmesi üzere gereksinimler ve diğer hızlandırıcı sistemlerde ($\sim$ GeV enerjili) PEM yakıt hücresinin alternatif güç kaynağı olarak kullanılması çalışmaları da bu tez kapsamında çalışılmıştır. Yapılan çalışmalarda kavite hücreleri içerisine yerleştirilen PEM yakıt hücrelerinin kavite hücrelerinin içerisini kapsayacak şekilde olduğunda PEM yakıt hücrelerinden elde edilen parçacıkların hızlanma davranışlarının daha verimli olduğu görülmüştür. Bu sonuç Model-4 altında yapılan çalışmalarda açıkça gözükmemektedir. Kavite içerisindeki RF alanı π -modunda ve PEM yakıt hücresinden elde edilen demetleri hızlandırmak üzere kullanılmaktadır. Yakıt hücresi kavite hücresi boyunca olduğunda CST programına verilen çalışma frekansına (1300 MHz) yakın değerler elde edilmiştir. Buna karşın kavite hücresinin tamamını kapsamayan PEM yakıt hücresi yerleşimi durumlarında ise çalışma frekansının çok yüksek değerlere çıkması da bulgular arasındadır. Bu durum asimetric kavite içerisinde daha büyük geometride kavite hücresinin tasarlanmasının gerekliliğini ortaya koymaktadır. Model-4' den görüleceği üzere hücre içerisine yerleştirilen PEM yakıt hücresinin ikinci ve üçüncü kavite hücresi varlığında, ikinci ve üçüncü hücreler içerisinde RF alanlarının yüksek yoğunlukla ve etkin olduğu elde edilmiştir. Bu durum PEM hücresi yerleştirilen hücrelerden sonra en fazla iki SRF kavite hücresi daha konulabilmesinin hızlandırıcı sistemler için gerekliliğini öngörür. Kavite hücrelerine ilave magnet konulması durumunda PEM yakıt hücresinden kaynak olarak elde edilen protonların demet haline getirilmesinin kolaylaştığı, yayınının azaldığı sonucu elde edilmiştir. Farklı analizlerde kavite dış yüzeyini eksi yüklü potansiyel olarak tanımlanması durumunda, potansiyel farkının oluşturduğu gradyan ile birlikte kavite sonuna konulan magnet sayesinde parçacık dağılımının demet haline benzer yapıda olduğu sonucuna varılmıştır. İlave olarak kavitelerin ortasına konulabilecek magnet sayesinde hızlandırmanın kolaylaştırıldığı ve odaklanmanın kontrol altında olabildiği durumlar elde edilmiştir.

Sonuç olarak hızlandırıcı sistemlerinde proton kaynağı olarak kullanılan sistemlere alternatif olabileceği değerlendirilen bu model sayesinde PEM yakıt hücresi teknolojisi ile birlikte hibrit bir sistem geliştirilebileceği olasılığı öngörülmektedir. Geliştirilecek olan sisteme ilişkin detaylı çalışma tez kapsamı dışında ayrıca yapılabilecektir. Sistemin üretilebilir olması ve hızlandırıcı sistemlere entegrasyonu gibi farklı gereksinimlere göre tasarlanması gerekecektir. PEM yakıt hücresinin SRF kavite içerisindeki konumunun ve magnetlerin yerleşiminin optimize edilmesi ihtiyacı olabilecektir. Oluşturulan parçacıkların kolektif etkilerinin de hesaplamalara dahil edilmesi ile sistem seviyesinde dizayn edilebilecektir. Ayrıca, hızlandırıcı tesislerinde güç kaynağı olarak kullanılabilecek olan PEM yakıt hücrelerinin sistem seviyesi ihtiyaçlarının çıkartılması ve üretilmesi konusu multidisipliner bakış açısı ile ele alınması gerekecektir.

KAYNAKÇA

- [1] P. D. İ. Dinçer, P. D. İ. Eroğlu ve M. Öztürk, “Türkiye İçin Hidrojen Yol Haritası,” Hidrojen Teknolojileri Derneği, İstanbul, 2021.
- [2] “Paris Anlaşması,” 2022. [Çevrimiçi]. Available: <https://www.mfa.gov.tr/paris-anlasmasi.tr.mfa>.
- [3] “BilveTek,” 2023. [Çevrimiçi]. Available: <https://bilvetek.com/yakit-hucreleri/>.
- [4] F. Barbir, PEM Fuel Cells Theory and Practice, Elsevier Inc, 2013.
- [5] “National Air and Space Museum,” 2023. [Çevrimiçi]. Available: https://airandspace.si.edu/collection-media/NASM-A19780288000_DSH01.
- [6] Perry Group, “PC1401,” 1989.
- [7] B. Yazar Kaplan, “POLİMER ELEKTROLİT MEMBRANLI (PEM) YAKIT PİLLERİ İÇİN İNDİRGENMİŞ GRAFEN OKSİT - KARBON NANOFİBER HİBRİT DESTEKLİ PLATİN ELEKTROKATALİZÖRLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ,” Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi (Cilt 26, Sayı 2), pp. 365-378, 2021.
- [8] P. D. H. Yıldız, “Doğrusal ve Dairesel Hızlandırıcılar,” %1 içinde UPHDYO – XI, 2016.
- [9] “Rutherford Atom Modeli,” Ağustos 2023. [Çevrimiçi]. Available: https://tr.wikipedia.org/wiki/Rutherford_atom_modeli. [Erişildi: Ağustos 2023].
- [10] E. J. N. Wilson, “Accelerato Physics,” 2011.
- [11] J. Sekutowicz, “Superconducting Elliptical Cavities,” DESY, Hamburg, Germany, 2012.
- [12] J. P. Turneaure ve N. T. Viet, “Superconducting Nb TM010 Mode Electronbeam Welded Cavities,” Applied Physics Letters, pp. 333-335, 1970.
- [13] S. Belomestnykh ve V. Shemelin, “HIGH- β CAVITY DESIGN – A TUTORIAL,” %1 içinde 12th International Workshop on RF Superconductivity (SRF2005), Ithaca, NY, Temmuz 2005.
- [14] A. P. Codes, “Wikipedia,” 08 09 2023. [Çevrimiçi]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Accelerator_physics_codes. [Erişildi: 08 09 2023].
- [15] L. Şahin, “Hızlandırıcılarda Parçacık Kaynakları,” %1 içinde Türk Fizik Derneği VII. Uluslararası Katılımlı Parçacık Hızlandırıcıları ve Dedektörleri (UPHDYO7) Yaz Okulu, Bodrum/Muğla, 2011.
- [16] C. Hill, “Ion and Electron Sources,” Geneva, Switzerland, 1994.
- [17] “American Elements,” 2023. [Çevrimiçi]. Available: <https://www.americanelements.com/nb.html>. [Erişildi: 17 09 2023].
- [18] J. Knobloch, “The “Q disease” in Superconducting Niobium RF Cavities,” Berlin, 2003.

- [19] D. Proch, “The Tesla Cavity: Design Considerations and RF Properties,” %1 içinde 6th Workshop on RF Superconductivity, Virginia, USA, 1993.
- [20] D. Bazyl, “SRF cavity surface inspection methods,” FLA, DESY, Hamburg, 11 September 2014.
- [21] Y. Maximenko ve D. A. Sergatskov, “QUENCH DYNAMICS IN SRF CAVITIES,” %1 içinde Proceedings of SRF2011, Chicago, 2011.
- [22] J. Delaysen, “PONDEROMOTIVE INSTABILITIES, MICROPHONICS and RF CONTROL,” USPAS, Maryland, 2008.
- [23] Anonymous, “https://en.wikipedia.org/wiki/London_penetration_depth,” 2023. [Çevrimiçi]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/London_penetration_depth. [Erişildi: 2023].
- [24] R. Prakash, A. R. Jana ve V. Kumar, “Multipacting studies in elliptic SRF cavities,” %1 içinde Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2017.
- [25] C. S. Suite®, “Superconducting Cavity (half cell) Macro”.
- [26] E. G. Macías, “Research Gate,” 02 November 2017. [Çevrimiçi]. Available: https://www.researchgate.net/post/What_is_the_advantage_of_hexahedral_mesh_over_tetrahedral_elements_in_finite_element_analysis_using_structural_analysis. [Erişildi: 24 12 2023].
- [27] P. Bujlo ve C. J. Xie, “Hybrid polymer electrolyte membrane fuel cell–lithium ion battery powertrain testing platform – hybrid fuel cell electric vehicle emulator,” INTERNATIONAL JOURNAL OF ENERGY RESEARCH, 2017.
- [28] [Çevrimiçi]. Available: <https://bilvetek.com/yakit-hucreleri/>.
- [29] D. Niepce, Superinductance and fluctuating two-level systems, Göteborg, Sweden 2020, 2020.
- [30] A. Grudiev, “Simulation packages and Review of Codes,” CERN, 2012.
- [31] M. Okutan, A. Çakır, B. Demir, H. Bilge ve B. Akkuş, “Bir Medikal Lineer Hızlandırıcıda Sanal Elektronik Enerjilerinin Dozimetrisi,” Türk Onkoloji Dergisi, cilt 3, no. 28, p. 105, 2013.