



YENİ BİR MAGNETRON TASARIMI VE UYGULAMASI

Yunus YILDIZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

EYLÜL 2021

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

.....
Yunus YILDIZ

07/09/2021

YENİ BİR MAGNETRON TASARIMI VE UYGULAMASI

(Yüksek Lisans Tezi)

Yunus YILDIZ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Eylül 2021

ÖZET

Magnetronlar, geniş bir uygulama alanına sahip, genellikle silindirik bir anot ve katottan oluşan çapraz alanlı mikrodalga vakum tüpleridir. Başlıca kullanım alanları mikrodalga fırınlar, tıbbi aletler, haberleşme ve gözlem uyduları ile radarlardır. Diğer bir önemli uygulama alanı da füzyon plazmalardır. Bu tez çalışmasında yeni bir katot yapısı sunulmuş olup, oyuksuz (D3) ve oyuklu (D4) katot yapısına sahip magnetronların çalışma frekansları, elektrik alan değerleri ve elektron hareketleri gibi parametreleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bunun içinde öncelikle tasarlanan magnetronun matematiksel modellemesi yapılmış daha sonra benzetim çalışmalarına geçilmiştir. Benzetim çalışmalarında sırasıyla öz-frekans analizi, parçacık izleme analizi ve hücre içi parçacık (PIC) analizi gerçekleştirilmiştir. Benzetim çalışmalarından elde edilen sonuçlara göre tasarlanan oyuklu magnetronun üretimine geçilmiş, hem atmosfer ortamında hem de vakum ortamında deneysel çalışmalar yapılmıştır. Atmosfer ortamında magnetronun elektrik alan ve güç yoğunluğu parametreleri incelenirken, vakum ortamında magnetronun uygulama alanlarından biri olan manyetik plazmaların parametrelerini incelemek için bir Langmuir sondası tasarlanmış ve manyetik plazmada içerisindeki elektron sıcaklığı ve yoğunluğu araştırılmıştır. Öz-frekans analizlerinden elde edilen sonuçlara göre oyuksuz katot yapısına sahip magnetronun π modu frekansı 9,115 GHz, oyuklu katot yapısına sahip magnetronun π modu frekansı 9,112 GHz olarak bulunmuştur. Ayrıca belirtilen bu frekanslarda magnetronların sahip oldukları maksimum elektrik alan değerleri sırasıyla $4,883 \times 10^8$ V/m ve $4,994 \times 10^8$ V/m olarak elde edilmiştir. Gerçekleştirilen hücre içi parçacık (PIC) analizlerinde 50 kV gerilim ve 0,075 T manyetik alan değerinde D3 magnetronunun çalışma frekansı 10,264 GHz olarak bulunurken, 50 kV gerilim ve 0,074 T manyetik alan değerinde D4 magnetronunun çalışma frekansı 9,1 GHz olarak bulunmuştur. Ayrıca 60 kV gerilim ve 0,07 T manyetik alan değerinde D4 magnetronunun 9,108 GHz ve 11,656 GHz frekanslarında çift bantta çalıştığı görülmüştür. Deneysel çalışmalarda atmosfer ortamında gerçekleştirilen ölçümlerde tasarlanan antende radyal yönde maksimum elektrik alan değeri 129 V/m ve maksimum güç yoğunluğu değeri $108,3 \text{ W/m}^2$ olarak bulunurken yatay yönde antenden 10 cm uzaklıkta maksimum elektrik alan değeri 96,01 V/m olarak bulunmuştur. Vakum ortamında gerçekleştirilen çalışmalarda ise manyetik plazma içerisindeki elektron sıcaklığı 307923 K (26,55 eV) olarak bulunurken elektron yoğunluğu $7,6 \times 10^{10} \text{ m}^{-3}$ olarak bulunmuştur.

Bilim Kodu : 90516

Anahtar Kelimeler : Magnetron, mikrodalga, yüksek gerilim, Langmuir sondası

Sayfa Adedi : 143

Danışman : Prof. Dr. Erol KURT

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A NEW MAGNETRON

(M. Sc. Thesis)

Yunus YILDIZ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

September 2021

ABSTRACT

Magnetrons are cross-field microwave vacuum tubes with a wide range of applications, usually consisting of a cylindrical anode and cathode. The main areas of use are microwave ovens, medical devices, communication and observation satellites and radars. Another important application area is fusion plasmas. In this thesis, two magnetron designs have been presented. One of these designs has 8 cavities in both anode and cathode (D4), whereas other design does not have a cathode cavity (D3). Parameters such as operating frequencies, electric field values and electron trajectories of D3 and D4 magnetrons have been examined. First of all, mathematical modeling of the designed magnetron was made and then simulation studies were started. In the simulation studies, eigen-frequency, particle tracking and particle in cell (PIC) analyzes were performed, respectively. The production of the D4 magnetron, which was designed according to the results obtained from the simulations, was started, and experimental studies were carried out both in the atmosphere and the vacuum conditions. The electric field and power density parameters of the magnetron under atmospheric conditions were investigated. Then, a Langmuir probe was designed to examine the parameters of magnetic plasmas, which is one of the application areas of the magnetron, and under the vacuum conditions the electron temperature and density in the magnetic plasma were investigated. According to the eigen-frequency analysis, the π mode frequency of the D3 magnetron was found to be 9.115 GHz, and the π mode frequency of the D4 magnetron was 9.112 GHz. In addition, the maximum electric field values of the magnetrons at these frequencies were obtained as 4.883×10^8 V/m and 4.994×10^8 V/m, respectively. In the particle in cell (PIC) analyzes, the operating frequency of the D3 magnetron at 50 kV voltage and 0.075 T magnetic field value was found to be 10.264 GHz. The operating frequency of the D4 magnetron at 50 kV voltage and 0.074 T magnetic field value was found to be 9.1 GHz. In addition, it has been observed that the D4 magnetron at 60 kV voltage and 0.07 T magnetic field operates in dual band at frequencies of 9.108 GHz and 11.656 GHz. In the experimental studies under the atmospheric conditions, the maximum electric field value in the designed antenna was found as 129 V/m and the maximum power density value as 108.3 W/m² in the radial direction. The maximum electric field value was found to be 96.01 V/m at a distance of 10 cm from the antenna in the horizontal direction. In the studies carried out under vacuum conditions, the electron temperature in the magnetic plasma was found to be 307923 K (26.55 eV), while the electron density was found to be 7.6×10^{10} m⁻³.

Science Code : 90516

Key Words : Magnetron, microwave, high voltage, Langmuir probe

Page Number : 143

Supervisor : Prof. Dr. Erol KURT

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmam boyunca, öğrencisi olduğum andan itibaren desteklerini esirgemeyen değerli hocam sayın Prof. Dr. Erol KURT'a en içten dileklerle teşekkürlerimi sunarım. Yüksek lisansa başlamam hususunda beni teşvik eden değerli hocam Prof. Dr. Metin U. SALAMCI'ya ve değerli büyüğüm Mehmet ARSLAN'a teşekkürü bir borç bilirim. Gazi Üniversitesi Rektörlüğü Eklemeli İmalat Teknolojileri Uygulama ve Araştırma Merkezi (EKTAM)'nde görev yapmakta olan tüm mesai arkadaşlarıma ve deneysel çalışmalar sırasında yardımlarını esirgemeyen Öğr. Gör. Bekir DURSUN'a teşekkür ederim. Bu tez çalışmasının oluşması için yürütülen 07/2019-31 kodlu projeyi destekleyen Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca eşime, eğitim hayatım boyunca beni maddi ve manevi olarak destekleyen anneme, babama ve kardeşlerime en samimi duygularıyla teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xviii
1. GİRİŞ.....	1
2. MAGNETRONUN YAPISI VE MAGNETRON TEORİSİ.....	11
2.1. Magnetronun Yapısı.....	11
2.2. Magnetronun Çalışma Prensibi	13
2.2.1. Elektronlar üzerinde farklı alanların etkileri	13
2.2.2. Hull ve Buneman-Hartree koşulları	24
2.3. Magnetron Rezonans Sistemi	26
2.4. Magnetronun Çıkış Gücü ve Verimi	29
2.5. Magnetronun Tasarım İlkeleri	31
2.5.1. Rezonans sistemini etkileyen koşullar	32
2.5.2. Katotu etkileyen koşullar	34
2.5.3. Manyetik devreyi etkileyen koşullar	34
2.5.4. İkincil tasarım parametreleri	34
3. MATERYAL VE YÖNTEM (METODOLOJİ)	39
4. BENZETİM ÇALIŞMALARI	41

	Sayfa
4.1. Comsol'da Öz-Frekans Analizi.....	45
4.2. Elektron Hareket Analizi.....	50
4.3. Cst'de Öz-Frekans Analizi	58
4.4. Parçacık İzleme Analizi	91
4.5. PIC Analizi.....	104
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	115
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	135
KAYNAKLAR	139
ÖZGEÇMİŞ	143

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 1.1. Geleneksel ve göreceli (relativistic) magnetronların genel çalışma parametreleri	4
Çizelge 4.1. D1 magnetronunun tasarım parametreleri	42
Çizelge 4.2. D1 ve D2 magnetronlarının öz frekans değerleri.....	50
Çizelge 4.3. D1 ve D2 magnetronlarının maksimum elektrik alan değerleri	50
Çizelge 4.4. D3 ve D4 magnetronlarının tasarım parametreleri	73
Çizelge 5.1. D4 magnetronunun deneysel tasarım parametreleri	115
Çizelge 5.2. Radyal yönde elektrik alan değerleri	121
Çizelge 5.3. Radyal yönde güç yoğunluğu değerleri	122
Çizelge 5.4. Yatay yönde elektrik alan değerleri	122
Çizelge 5.5. Direnç, gerilim ve akım değerleri	131

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Randall ve Boot tarafından geliştirilen ilk deneysel magnetron.....	2
Şekil 1.2. 8 oyuklu magnetron tasarımı	3
Şekil 1.3. Magnetronun tarihsel gelişimi	5
Şekil 2.1. Magnetronun yapısını oluşturan kısımlar	11
Şekil 2.2. Dört farklı oyuk tipi; a. yarık tipi, b. daire sektörü tipi, c. doğan güneş tipi, d. delik tipi	12
Şekil 2.3. Anot bloğundaki bir çınlayıcının devre şeması gösterimi	13
Şekil 2.4. Silindirik koordinat düzlemi	15
Şekil 2.5. Manyetik alana maruz kalan elektronun dairesel hareketi	18
Şekil 2.6. Farklı manyetik alan altındaki elektron yörüngeleri.....	23
Şekil 2.7. Hull kesim ve Buneman-Hartree eğrileriyle magnetronun çalışma bölgesi...	26
Şekil 2.8. a. maksimum yük yoğunluğunda elektrik alan çizgileri, b. oyuklardaki akım ve manyetik alanlar, c. çeyrek periyot sonra oluşan elektrik alan çizgileri	27
Şekil 2.9. Sekiz oyuklu magnetronda dört ana mod için yük ve elektrik alan dağılımları	28
Şekil 2.10. Magnetrondaki rezonans yapıya ait eş değer devre	29
Şekil 2.11. Rezonans sistemini etkileyen koşullar	32
Şekil 2.12. Magnetronun genel tasarım şeması	37
Şekil 4.1. Tasarlanan D1 magnetronun üst kesit görüntüsü.....	42
Şekil 4.2. Tasarlanan D1 magnetronun üç boyutlu görüntüsü.....	43
Şekil 4.3. Tasarlanan D1 magnetronun ağ örgülü (mesh) yapı görüntüsü.....	43
Şekil 4.4. D2 magnetronunun üst kesit görüntüsü	44
Şekil 4.5. D2 magnetronunun üç boyutlu görüntüsü	44
Şekil 4.6. D2 magnetronunun ağ örgülü (mesh) yapı görüntüsü	45

Şekil	Sayfa
Şekil 4.7. D1 magnetronunun 8,7228 GHz frekansta elektrik alan değeri ve dağılımı ..	46
Şekil 4.8. D1 magnetronunun 9,2651 GHz frekansta elektrik alan değeri ve dağılımı ..	46
Şekil 4.9. D1 magnetronunun 9,2729 GHz frekansta elektrik alan değeri ve dağılımı ..	47
Şekil 4.10. D1 magnetronunun 10,232 GHz frekansta elektrik alan değeri ve dağılımı	47
Şekil 4.11. D2 magnetronunun 8,6944 GHz frekansta elektrik alan değeri ve dağılımı	48
Şekil 4.12. D2 magnetronunun 9,1649 GHz frekansta elektrik alan değeri ve dağılımı	48
Şekil 4.13. D2 magnetronunun 9,1731 GHz frekansta elektrik alan değeri ve dağılımı	49
Şekil 4.14. D2 magnetronunun 10,209 GHz frekansta elektrik alan değeri ve dağılımı	49
Şekil 4.15. D1 magnetronunun 0,774 ns'deki elektron hareketi ve hız büyüklüğü.....	51
Şekil 4.16. D1 magnetronunun 0,882 ns'deki elektron hareketi ve hız büyüklüğü.....	52
Şekil 4.17. D1 magnetronunun 0,9 ns'deki elektron hareketi ve hız büyüklüğü.....	52
Şekil 4.18. D1 magnetronunun 1,008 ns'deki elektron hareketi ve hız büyüklüğü.....	53
Şekil 4.19. D1 magnetronunun 1,71 ns'deki elektron hareketi ve hız büyüklüğü.....	53
Şekil 4.20. D1 magnetronunun 2,052 ns'deki elektron hareketi ve hız büyüklüğü.....	54
Şekil 4.21. D2 magnetronunun 0,774 ns'deki elektron hareketi ve hız büyüklüğü.....	55
Şekil 4.22. D2 magnetronunun 0,882 ns'deki elektron hareketi ve hız büyüklüğü.....	55
Şekil 4.23. D2 magnetronunun 0,9 ns'deki elektron hareketi ve hız büyüklüğü.....	56
Şekil 4.24. D2 magnetronunun 1,008 ns'deki elektron hareketi ve hız büyüklüğü.....	56
Şekil 4.25. D2 magnetronunun 1,71 ns'deki elektron hareketi ve hız büyüklüğü.....	57
Şekil 4.26. D2 magnetronunun 2,052 ns'deki elektron hareketi ve hız büyüklüğü.....	57
Şekil 4.27. D1 magnetronunun 8,512 GHz'deki (mod 1) elektrik alan dağılımı.....	59
Şekil 4.28. D1 magnetronunun 8,512 GHz'deki (mod 1) manyetik alan dağılımı.....	59
Şekil 4.29. D1 magnetronunun 8,512 GHz'deki (mod 1) yüzey akımı	60
Şekil 4.30. D1 magnetronunun 9,368 GHz'deki (mod 2) elektrik alan dağılımı.....	60

Şekil	Sayfa
Şekil 4.31. D1 magnetronunun 9,368 GHz'deki (mod 2) manyetik alan dağılımı.....	61
Şekil 4.32. D1 magnetronunun 9,368 GHz'deki (mod 2) yüzey akımı	61
Şekil 4.33. D1 magnetronunun 10,214 GHz'deki (mod 3) elektrik alan dağılımı.....	62
Şekil 4.34. D1 magnetronunun 10,214 GHz'deki (mod 3) manyetik alan dağılımı.....	62
Şekil 4.35. D1 magnetronunun 10,214 GHz'deki (mod 3) yüzey akımı	63
Şekil 4.36. D1 magnetronunun 10,597 GHz'deki (mod 4) elektrik alan dağılımı.....	63
Şekil 4.37. D1 magnetronunun 10,597 GHz'deki (mod 4) manyetik alan dağılımı.....	64
Şekil 4.38. D1 magnetronunun 10,597 GHz'deki (mod 4) yüzey akımı	64
Şekil 4.39. D1 magnetronunun 11,197 GHz'deki (mod 5) elektrik alan dağılımı.....	65
Şekil 4.40. D1 magnetronunun 11,197 GHz'deki (mod 5) manyetik alan dağılımı.....	65
Şekil 4.41. D1 magnetronunun 11,197 GHz'deki (mod 5) yüzey akımı	66
Şekil 4.42. D2 magnetronunun 9,169 GHz'deki (mod 1) elektrik alan dağılımı.....	66
Şekil 4.43. D2 magnetronunun 9,169 GHz'deki (mod 1) manyetik alan dağılımı.....	67
Şekil 4.44. D2 magnetronunun 9,169 GHz'deki (mod 1) yüzey akımı	67
Şekil 4.45. D2 magnetronunun 9,459 GHz'deki (mod 2) elektrik alan dağılımı.....	68
Şekil 4.46. D2 magnetronunun 9,459 GHz'deki (mod 2) manyetik alan dağılımı.....	68
Şekil 4.47. D2 magnetronunun 9,459 GHz'deki (mod 2) yüzey akımı	69
Şekil 4.48. D2 magnetronunun 10,046 GHz'deki (mod 3) elektrik alan dağılımı.....	69
Şekil 4.49. D2 magnetronunun 10,046 GHz'deki (mod 3) manyetik alan dağılımı.....	70
Şekil 4.50. D2 magnetronunun 10,046 GHz'deki (mod 3) yüzey akımı	70
Şekil 4.51. D2 magnetronunun 10,428 GHz'deki (mod 4) elektrik alan dağılımı.....	71
Şekil 4.52. D2 magnetronunun 10,428 GHz'deki (mod 4) manyetik alan dağılımı.....	71
Şekil 4.53. D2 magnetronunun 10,428 GHz'deki (mod 4) yüzey akımı	72
Şekil 4.54. D3 magnetronunun 8,72208 GHz'deki (mod 1) elektrik alan dağılımı.....	74

Şekil	Sayfa
Şekil 4.55. D3 magnetronunun 8,72208 GHz'deki (mod 1) manyetik alan dağılımı.....	74
Şekil 4.56. D3 magnetronunun 8,72208 GHz'deki (mod 1) yüzey akımı	75
Şekil 4.57. D3 magnetronunun 8,72246 GHz'deki (mod 2) elektrik alan dağılımı.....	75
Şekil 4.58. D3 magnetronunun 8,72246 GHz'deki (mod 2) manyetik alan dağılımı.....	76
Şekil 4.59. D3 magnetronunun 8,72246 GHz'deki (mod 2) yüzey akımı	76
Şekil 4.60. D3 magnetronunun 9,04332 GHz'deki (mod 3) elektrik alan dağılımı.....	77
Şekil 4.61. D3 magnetronunun 9,04332 GHz'deki (mod 3) manyetik alan dağılımı.....	77
Şekil 4.62. D3 magnetronunun 9,04332 GHz'deki (mod 3) yüzey akımı	78
Şekil 4.63. D3 magnetronunun 9,04334 GHz'deki (mod 4) elektrik alan dağılımı.....	78
Şekil 4.64. D3 magnetronunun 9,04334 GHz'deki (mod 4) manyetik alan dağılımı.....	79
Şekil 4.65. D3 magnetronunun 9,04334 GHz'deki (mod 4) yüzey akımı	79
Şekil 4.66. D4 magnetronunun 8,716 GHz'deki (mod 1) elektrik alan dağılımı.....	80
Şekil 4.67. D4 magnetronunun 8,716 GHz'deki (mod 1) manyetik alan dağılımı.....	80
Şekil 4.68. D4 magnetronunun 8,716 GHz'deki (mod 1) yüzey akımı	81
Şekil 4.69. D4 magnetronunun 8,717 GHz'deki (mod 2) elektrik alan dağılımı.....	81
Şekil 4.70. D4 magnetronunun 8,717 GHz'deki (mod 2) manyetik alan dağılımı.....	82
Şekil 4.71. D4 magnetronunun 8,717 GHz'deki (mod 2) yüzey akımı	82
Şekil 4.72. D4 magnetronunun 9,04021 GHz'deki (mod 3) elektrik alan dağılımı.....	83
Şekil 4.73. D4 magnetronunun 9,04021 GHz'deki (mod 3) manyetik alan dağılımı.....	83
Şekil 4.74. D4 magnetronunun 9,04021 GHz'deki (mod 3) yüzey akımı	84
Şekil 4.75. D4 magnetronunun 9,04022 GHz'deki (mod 4) elektrik alan dağılımı.....	84
Şekil 4.76. D4 magnetronunun 9,04022 GHz'deki (mod 4) manyetik alan dağılımı.....	85
Şekil 4.77. D4 magnetronunun 9,04022 GHz'deki (mod 4) yüzey akımı	85
Şekil 4.78. D3 magnetronunun 9,115 GHz'deki (mod 5- π modu) elektrik alan dağılımı	86

Şekil	Sayfa
Şekil 4.79. D3 magnetronunun 9,115 GHz'deki (mod 5- π modu) manyetik alan dağılımı	87
Şekil 4.80. D3 magnetronunun 9,115 GHz'deki (mod 5- π modu) elektrik enerji yoğunluğu	87
Şekil 4.81. D3 magnetronunun 9,115 GHz'deki (mod 5- π modu) manyetik enerji yoğunluğu	88
Şekil 4.82. D3 magnetronunun 9,115 GHz'deki (mod 5- π modu) yüzey akımı.....	88
Şekil 4.83. D4 magnetronunun 9,112 GHz'deki (mod 5- π modu) elektrik alan dağılımı	89
Şekil 4.84. D4 magnetronunun 9,112 GHz'deki (mod 5- π modu) manyetik alan dağılımı	89
Şekil 4.85. D4 magnetronunun 9,112 GHz'deki (mod 5- π modu) elektrik enerji yoğunluğu	90
Şekil 4.86. D4 magnetronunun 9,112 GHz'deki (mod 5- π modu) manyetik enerji yoğunluğu	90
Şekil 4.87. D4 magnetronunun 9,112 GHz'deki (mod 5- π modu) yüzey akımı.....	91
Şekil 4.88. D3 magnetronunun ağ örgülü yapı görüntüsü	92
Şekil 4.89. D4 magnetronunun ağ örgülü yapı görüntüsü	92
Şekil 4.90. 50 kV gerilim ve 0,07 T manyetik alanın etkisi altında bir elektronun hareketi.....	93
Şekil 4.91. 50 kV gerilim ve 0,08 T manyetik alanın etkisi altında bir elektronun bir turdaki hareketi.....	94
Şekil 4.92. 50 kV gerilim ve 0,075 T manyetik alanın etkisi altında bir elektronun hareketi.....	95
Şekil 4.93. 50 kV gerilim ve 0,074 T manyetik alanın etkisi altında bir elektronun hareketi.....	95
Şekil 4.94. 50 kV gerilim ve 0,073 T manyetik alanın etkisi altında bir elektronun hareketi.....	96
Şekil 4.95. 50 kV gerilim ve 0,072 T manyetik alanın etkisi altında bir elektronun hareketi.....	96

Şekil	Sayfa
Şekil 4.96. 50 kV gerilim ve 0,0725 T manyetik alanın etkisi altında bir elektronun hareketi.....	97
Şekil 4.97. 50 kV gerilim ve 0,0725 T manyetik alanın etkisi altında bütün elektronların hareketinin üst kesit görüntüsü.....	98
Şekil 4.98. 50 kV gerilim ve 0,0725 T manyetik alanın etkisi altında bütün elektronların hareketinin üç boyutlu görüntüsü.....	98
Şekil 4.99. 50 kV gerilim ve 0,07 T manyetik alanın etkisi altında bir elektronun bir turdaki hareketi.....	99
Şekil 4.100. 50 kV gerilim ve 0,072 T manyetik alanın etkisi altında elektronların hareketi.....	100
Şekil 4.101. 50 kV gerilim ve 0,073 T manyetik alanın etkisi altında bir elektronun bir turdaki hareketi.....	101
Şekil 4.102. 50 kV gerilim ve 0,073 T manyetik alanın etkisi altında farklı bir elektronun bir turdaki hareketi	101
Şekil 4.103. 50 kV gerilim ve 0,073 T manyetik alanın etkisi altında farklı ikinci bir elektronun hareketi	102
Şekil 4.104. 50 kV gerilim ve 0,073 T manyetik alanın etkisi altında bütün elektronların hareketinin üst kesit görüntüsü.....	103
Şekil 4.105. 50 kV gerilim ve 0,073 T manyetik alanın etkisi altında bütün elektronların hareketinin üç boyutlu görüntüsü.....	103
Şekil 4.106. D3 magnetronunun ağ örgülü yapı görüntüsü	105
Şekil 4.107. D4 magnetronunun ağ örgülü yapı görüntüsü	105
Şekil 4.108. D3 magnetronuna ait alan probu.....	106
Şekil 4.109. D4 magnetronuna ait alan probu.....	106
Şekil 4.110. D3 magnetronunun 50 kV 0,0725 T manyetik alan değerindeki elektrik alanın frekansa karşı grafiği.....	107
Şekil 4.111. D3 magnetronunun 50 kV 0,073 T manyetik alan değerindeki elektrik alanın frekansa karşı grafiği.....	107
Şekil 4.112. D3 magnetronunun 50 kV 0,074 T manyetik alan değerindeki elektrik alanın frekansa karşı grafiği.....	108

Şekil	Sayfa
Şekil 4.113. D3 magnetronunun 50 kV 0,075 T manyetik alan değerindeki elektrik alanın frekansa karşı grafiği.....	108
Şekil 4.114. D4 magnetronunun 50 kV 0,073 T manyetik alan değerindeki elektrik alanın frekansa karşı grafiği.....	109
Şekil 4.115. D4 magnetronunun 50 kV 0,074 T manyetik alan değerindeki elektrik alanın frekansa karşı grafiği.....	109
Şekil 4.116. D4 magnetronunun 50 kV 0,075 T manyetik alan değerindeki elektrik alanın frekansa karşı grafiği.....	110
Şekil 4.117. D3 magnetronunun elektrik alan zaman grafiği	111
Şekil 4.118. D4 magnetronunun elektrik alan zaman grafiği	111
Şekil 4.119. D3 magnetronunun elektron hareketi	112
Şekil 4.120. D4 magnetronunun elektron hareketi	112
Şekil 4.121. D4 magnetronunun 60 kV 0,07 T manyetik alan değerindeki elektrik alanın frekansa karşı grafiği.....	113
Şekil 5.1. Radyal yönde $\theta = 0$ (antende) derecede elektrik alan değeri.....	123
Şekil 5.2. Radyal yönde $\theta = 0$ derecede (antende) maksimum güç yoğunluğu değeri...	123
Şekil 5.3. Yatay yönde antenden 10 cm uzaklıkta maksimum elektrik alan değeri	124
Şekil 5.4. Akım-gerilim grafiği ve önemli bölgeler.....	130
Şekil 5.5. Deneysel çalışmalardan elde edilen I-V grafiği.....	132
Şekil 5.6. Belirtilen noktaların eğimi ve denklemi	132
Şekil 5.7. Elektron doyum bölgesindeki noktaların eğimi ve denklemi	133

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 5.1. Üretilen D4 magnetronu	115
Resim 5.2. Magnetron tarafından 16,25 kV'da üretilen elektron hareketi.....	116
Resim 5.3. Magnetron tarafından 16,25 kV'da üretilen elektronun farklı bir görüntüsü.....	117
Resim 5.4. Magnetrona eklenen kısa devre halkaları ve anten	117
Resim 5.5. Deneysel çalışmalarda kullanılan güç kaynağı	118
Resim 5.6. Deneylerde kullanılan osiloskop görüntüsü	118
Resim 5.7. Manyetik alan ölçümünde kullanılan Gauss/Tesla metre.....	119
Resim 5.8. Elektrik alan ve güç yoğunluğu ölçüm cihazı	120
Resim 5.9. Çevresi alüminyum folyö ile kapatılmış magnetron.....	120
Resim 5.10. Ölçüm görseli	121
Resim 5.11. Osiloskobun ikinci kanalında sinyal görüntüsü	125
Resim 5.12. Lambada herhangi bir aydınlanmanın meydana gelmemesi.....	125
Resim 5.13. Lambada meydana gelen aydınlanma	126
Resim 5.14. Deneysel çalışmalarda kullanılan vakum hücresi.....	127
Resim 5.15. Turbomoleküler vakum pompası	127
Resim 5.16. Yüksek gerilim güç kaynağı	128
Resim 5.17. Sayısal multimetre	128
Resim 5.18. Ayarlanabilir doğru akım güç kaynağı.....	128
Resim 5.19. Deney düzeneği.....	129
Resim 5.20. Vakum ortamında oluşan plazma ve Langmuir sonda görüntüsü	129

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
m²	Metrekare
GHz	Gigahertz
cm	Santimetre
mm	Milimetre
kW	Kilowatt
kHz	Kilohertz
W	Watt
MW	Megawatt
V	Volt
kV	Kilovolt
A	Amper
kA	Kiloamper
ms	Milisaniye
ns	Nanosaniye
GW	Gigawatt
kG	Kilogauss
T	Tesla
MHz	Megahertz
C	Coulomb
kg	Kilogram
eV	Elektronvolt
Wb	Weber
m	Metre
MV	Megavolt
mbar	Milibar
s	Saniye
K	Kelvin

Kısaltmalar**Açıklamalar**

3B	Üç boyutlu
AKS	Advanced Krylow Subspace
BARITT	Barrier injection transit time diode
BWO	Backward wave oscillator
CFA	Cross field amplifier
CST	Computer simulation technology
CW	Continuous wave
DC	Direct current
EIO	Extended interaction oscillator
FEA	Finite element analysis
HFSS	High frequency structural simulator
IMPATT	Impact ionization avalanche transit time diode
JDM	Jacoby Davidson Method
LINAC	Linear accelerator
MWS	Microwave studio
PEC	Perfect electric conductor
PIC	Particle in cell
RF	Radio frequency
TWT	Traveling wave tube

1. GİRİŞ

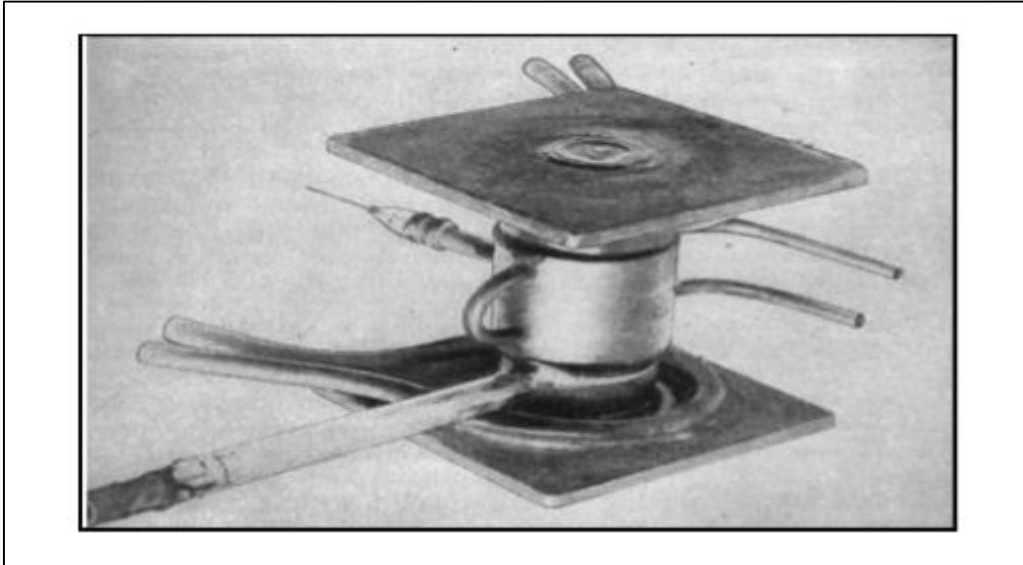
Mikrodalga Mühendisliği 3-300 GHz frekansa ve 10 cm ile 1 mm arası dalga boyuna sahip dalgaları inceleyen bilim dalıdır. Mikrodalgayla çalışan alet ve sistemlerin hem tasarımı hem de analizinin zorluğu dalganın frekansının yüksek ve boyunun kısa olmasıyla doğru orantılıdır. Öte yandan böyle özelliklere sahip dalgalar pratikte avantajlar da sağlamaktadır [1]. Mikrodalga Mühendisliği' nin uygulama alanları olarak radarlar, haberleşme sistemleri, tıbbi aletler, gıda, uzay, navigasyon, radyo astronomi vb. sayabiliriz. Burada bahsi geçen ve geçmeyen bütün uygulamalarda mikrodalga güç kaynaklarına ihtiyaç duyulmaktadır.

Mikrodalga güç kaynaklarını katı hal yarı iletken cihazlar ve elektron (mikrodalga) tüpleri olarak iki gruba ayırabiliriz. Schottky diyotlar, PIN diyotlar, Varaktör diyotlar, Gunn diyotlar, Çığ etkisi ve geçiş zaman diyotlar (IMPATT), Tünel diyotlar ve Bariyer enjeksiyon geçiş zamanı diyotlar (BARITT) katı hal yarı iletken cihazlar grubunda yer almaktadır. Elektron (mikrodalga) tüpleri ise "O" (doğrusal hüzmeye) tipi ve "M" (çapraz alan) tipi olmak üzere iki sınıfta incelenir. "O" tipi sınıfında Klistron, TWT (ilerleyen dalga tüpleri), BWO (geri dalga osilatörü) ve EIO (uzatılmış etkileşim osilatörü) yer alırken "M" tipi sınıfında Jiratron, Dematron, Amplitron, CFA (çapraz alan yükselteç) ve bu çalışmada incelenecek olan Magnetron yer almaktadır [1].

Magnetron, kısaca tanımlamak gerekirse silindirik bir katot ve oyuklara sahip bir anottan oluşan yüksek frekanslı salınımlar üreten çapraz alanlı mikrodalga vakum tüptür. Magnetronlar çeşitli endüstriyel, bilimsel ve tıbbi uygulamalar ile havacılık, gıda, haberleşme ve savunma sanayi sektörlerinde kullanılmaktadır ve yüksek frekans ve güç gerektiren uygulamalarda önemi gün geçtikçe artmaktadır. Magnetronla alakalı çalışmalar İkinci Dünya Savaşı' ndan öncesine dayansa da etkin kullanımı savaş sırasında ve sonrasında olmuştur ve o zamandan beri üzerinde birçok araştırma ve çalışma yapılmıştır.

Magnetronla ilgili çalışmaların temeli Arthur Hull' ın 1913 yılında teorik olarak yürüttüğü araştırmalara kadar gitmektedir. 1921 yılına gelindiğinde ise Hull tarafından ilk magnetron üretilmiş ve radyo frekans salınımları ürettiği gösterilmiştir. 1925 yılına geldiğimizde ise General Electric (G.E.) şirketindeki Elder tarafından 8 kW çıkış gücüne, 30 kHz frekansa ve %69 verimliliğe sahip bir magnetron üretilmiştir. 1935 yılında Posthumus radyo frekans

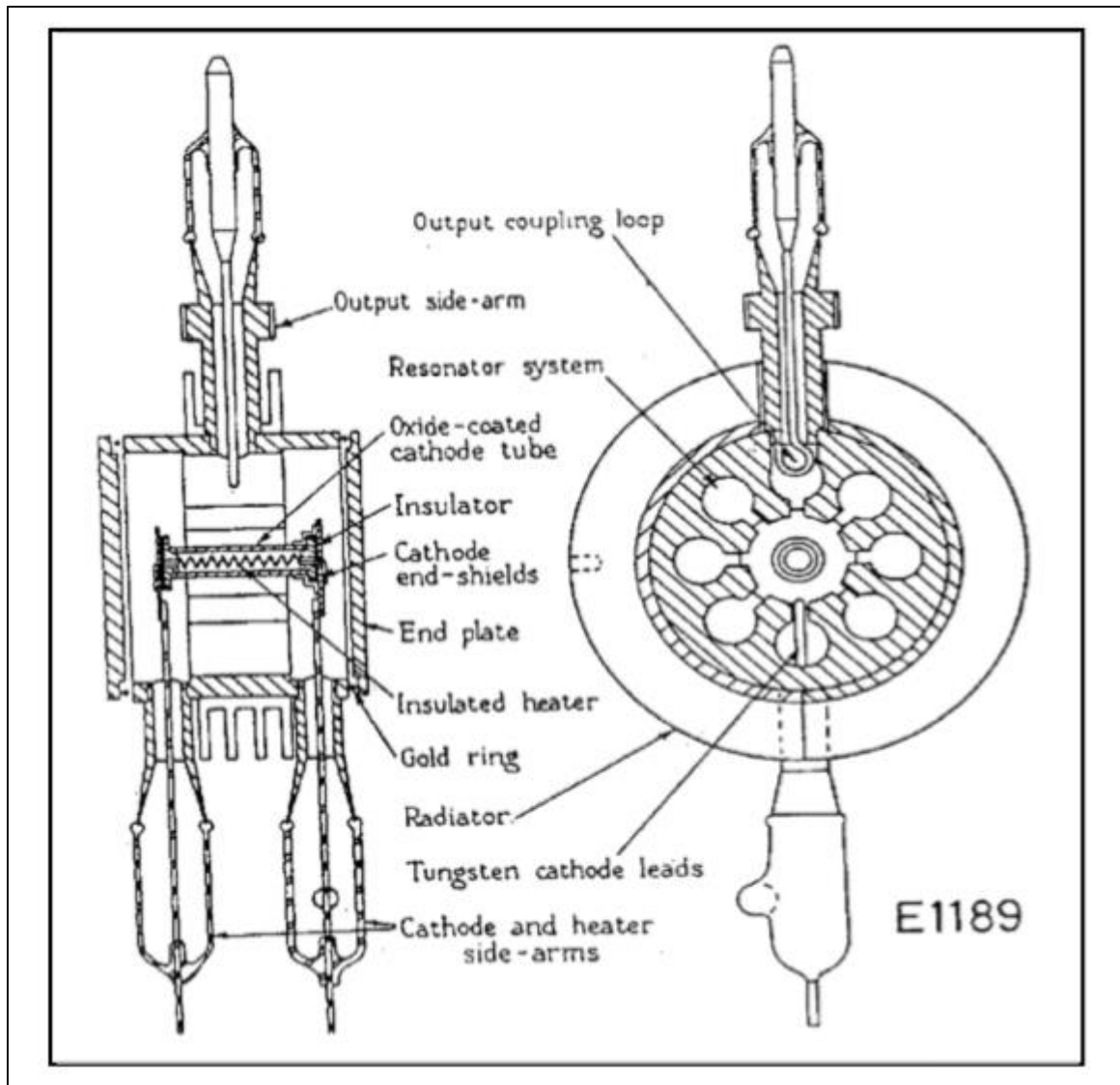
dalgaları ile senkronizasyon halinde katot etrafında dönen elektron bulutu anlamına gelen hareketli dalga koşullarının yerine getirilmesi durumunda verimin artacağını göstermiştir ve bu çalışmasıyla magnetronun işleyişi hakkında daha açık bir teorik anlayışa öncülük etmiştir. A. L. Samuel 1934 yılında bir patent başvurusunda bulunmuş ve Bell Telephone Laboratuvarlarında dört oyuklu magnetronu geliştirmiştir. İlk başarılı çok oyuklu magnetron tasarımı 1936-1937 yılları arasında Rusya’ da Aleksereff ve Malearoff tarafından gerçekleştirilmiş ve bu tasarımın sonuçları ilk olarak 1940 yılında yayımlanmıştır. Bu magnetron 10 cm dalga boyunda yaklaşık %20 verimlilikle 300 W sürekli mikrodalga gücüne sahipti. 1939’ un sonlarında Randall ve Boot tarafından önceki tasarımların aksine anodu bir cam zarfın içinde değil harici bir anoda sahip çok oyuklu bir magnetron tasarlanmıştır. Harici bir anoda sahip çok oyuklu magnetron modeliyle hem mıknatıs boşlukları azaltılabilmiş hem de anodun soğutulması daha kolay hale gelmiştir. 1940 yılında ise yine Randall ve Boot tarafından 6 oyuklu sahip ilk deneysel magnetron tasarlanmıştır. Bu magnetrondaki katod tungsten filamentten yapılmış olup 9,8 cm dalga boyuna ve 400 W sürekli güce sahipti [2]. Randall ve Boot tarafından geliştirilen ilk deneysel magnetron Şekil 1.1. de verilmiştir.



Şekil 1.1. Randall ve Boot tarafından geliştirilen ilk deneysel magnetron [3]

Bu gelişmelerle beraber magnetronla alakalı çalışmalar Amerika Birleşik Devletleri (ABD), Rusya, Japonya ve Almanya gibi devletlerde de bir yandan devam etmekteydi. Örneğin Japon Radyo Şirketi (Japan Radio Company) 8 oyuklu 10 cm dalga boyuna sahip bir magnetron geliştirmişti. Geliştirilen bu magnetron 500 W sürekli çıkış gücüne sahipti.

Ayrıca 27 Temmuz 1940' ta Birmingham' daki bir grup 5 cm dalga boyuna sahip önemli çıkış gücü veren bir magnetron geliştirmiştir. Nisan 1940' ta General Electric şirketinin araştırma laboratuvarlarında Randall ve Boot' a ait magnetronların mühürlü versiyonları tasarlanıp üretilmeye başlanmış 1940 Haziran ayına kadar bu mühürlü versiyonlardan iki adet başarılı bir şekilde üretilmiştir. Burada üretilen ilk magnetron su soğutmalı iken daha sonra üretilen magnetronlar hava soğutmalı sisteme sahipti [2]. Bundan kısa bir süre sonra 6 oyuklu tasarım yerine 8 oyuklu tasarım geliştirilmiş olup yaklaşık olarak 10 kW güç üretililebilmişti. Bu tasarım Şekil 1.2. de verilmiştir.



Şekil 1.2. 8 oyuklu magnetron tasarımı [2]

Eylül 1941' de John Sayers adlı kişi 8 oyuklu magnetronun salınım modlarının frekans dağılımını ölçmüş ve alternatif bölümleri birbirine bağlayarak daha fazla frekans ayırımının

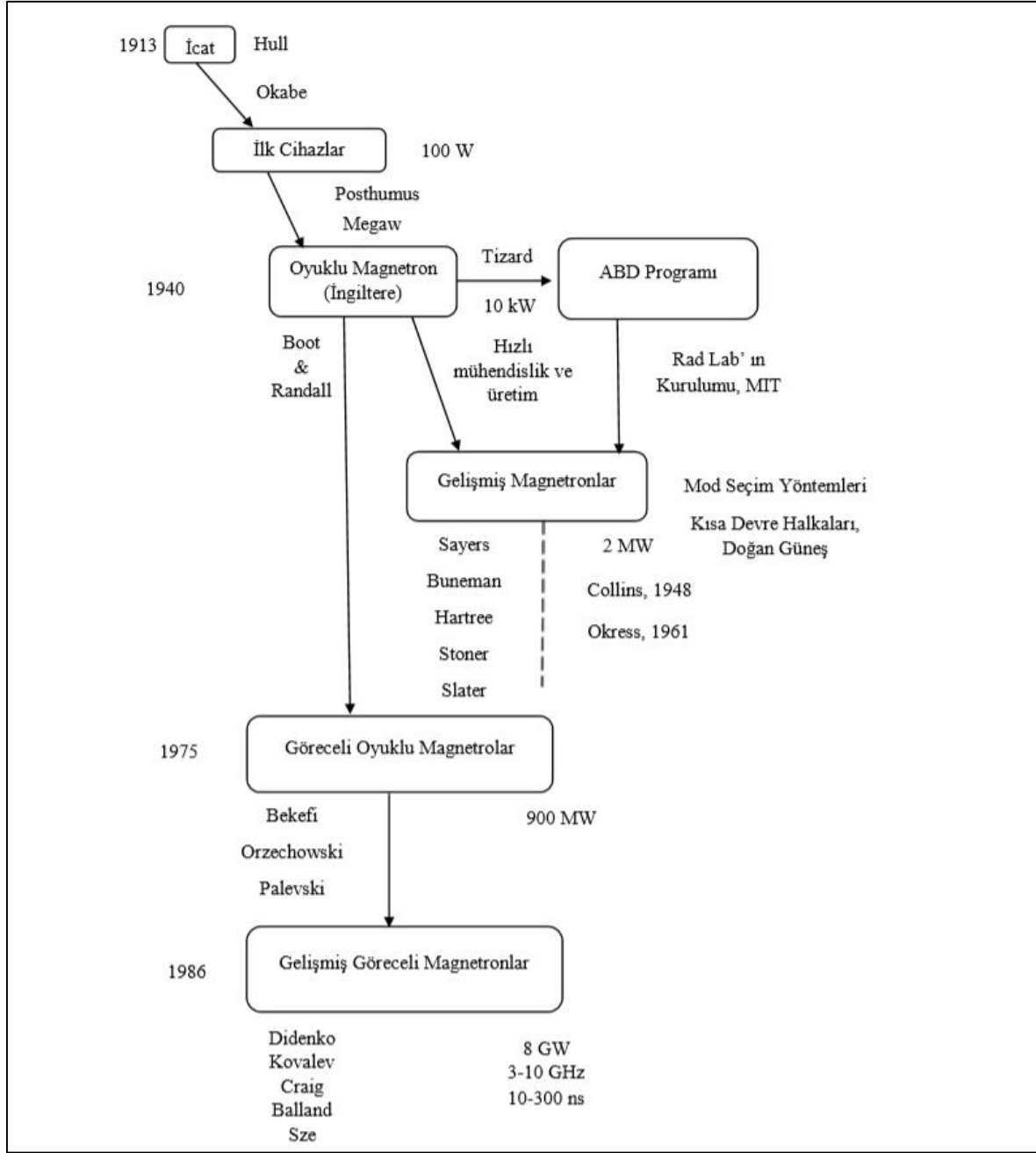
elde edileceğini bulmuştur. Eylül 1941’ de bu kısa devre halkaları eklenmiş (strapped) magnetronlardan 6 adet üretilmiş ve hem verimde hem de kararlılıkta önemli bir artış olduğu gözlemlenmiştir (kısa devre halkaları eklenmemiş magnetronun verimi %12 iken kısa devre halkası eklenmiş haliyle %55 verim elde edilmiştir). İkinci Dünya Savaşı’ nın sonunda 2 MW kadar yüksek güce ve 8,7 mm kadar kısa dalga boyuna sahip çok sayıda farklı tipte oyuklu magnetron geliştirilmiştir [2].

Gelişen teknolojiyle beraber geleneksel magnetronlardaki çıkış gücü ihtiyacı karşılayamadığından bilim insanları göreceli (relativistic) magnetronlarla alakalı çalışmalara yönelmişlerdir. Geleneksel magnetronlarla göreceli magnetronların karşılaştırılması Çizelge 1.1’de verilmiştir.

Çizelge 1.1. Geleneksel ve göreceli (relativistic) magnetronların genel çalışma parametreleri [4]

Parametre	Geleneksel Magnetronlar	Göreceli Magnetronlar
Gerilim	≤ 100 kV	≥ 500 kV
Akım	~ 100 A	$\geq 5-10$ kA
Katot İşlemi	Birincil ve ikincil emisyon	Patlayıcı Emisyon
Darbe Süresi	~ 1 ms	~ 100 ns
Yükselme Zamanı	≤ 200 kV/ms	~ 100 kV/ns
Güç	≤ 100 MW	~ 1 GW
Verimlilik	$\sim \%50$	$\sim \%20-40$
Ayarlama Aralığı	$\sim \%5$	$\sim \%30$

Göreceli magnetronlara ait ilk cihaz 1976 yılında Orzechowski ve Bekefi tarafından geliştirilmiştir. Geleneksel oyuklu magnetronlar 10 MW’ a kadar güç üretebilirken ilk göreceli (relativistic) cihaz 900 MW güç üretmiştir [4]. 1980’li yıllarda magnetronların özelliklerinde önemli gelişmeler olmuş ve magnetronların güçlerini artırmak için faz kilitleme sistemi geliştirilmiştir. Göreceli magnetronlarda faz kilitleme sistemiyle ilk yüksek güçlü mikrodalga 1988 yılında gerçekleştirilmiş olup bu sistemle 100 MW’ tan daha fazla güç elde edilmişti [5]. Bu gelişmeden sonra 1991 yılında 7 magnetronlu bir dizi oluşturularak 3 GW çıkış gücü elde edilmiştir [6]. Magnetronların tarihsel gelişimi Şekil 1.3’te verilmiştir.



Şekil 1.3. Magnetronun tarihsel gelişimi [4]

Magnetronların performansını çıkış gücü, verim, kalite faktörü ve çalışma frekansı gibi faktörler belirlemektedir. Geçmişten günümüze hem bu faktörleri hem de bunları etkileyen parametreleri geliştirmek için birçok çalışma yapılmıştır. Magnetronlarda dikkat edilmesi gereken diğer bir hususta hangi modda çalıştığıdır. Modlar temel olarak bir rezonatör bölgesindeki elektrik alanının özel bir dağılımı olarak ifade edilebilir [7]. Magnetronun çalışabileceği birden fazla mod bulunmasına rağmen en verimli π modunda çalışmaktadır. π modu ile komşu modun çalışma frekansı arasındaki ayrımın elde edilmesi için magnetronun

rezonans sistemi tasarımı önemli bir parametredir. π modu ile komşu mod arasındaki mod ayrımının değerinin en az %5 olması memnuniyet verici bir değerdir [8]. Bununla birlikte muhtemel mod sayısı rezonans oyuklarının sayısına bağlıdır. İstenmeyen olası modların ortaya çıkması etkileşim alanında istenen modun RF alan düzenini olumsuz etkileyerek magnetronun enerji aktarımının, çıkış gücünün ve verimliliğinin azalmasına neden olur. Bu gibi istenmeyen modlarının bastırılması için kısa devre halkaları ekleme (strapping) işlemi geliştirilmiş olup magnetronun mod kontrolü iyileştirilmiştir.

2013 yılında İsenlik ve Yeğin tarafından gerçekleştirilen çalışmada yarıklı tip oyuklu magnetron için tasarım yöntemi sunulmuş olup ilk olarak deneysel (ampirik) formüller kullanılarak magnetronun yapısal (anot, katot yarıçapı vb.), elektriksel (çalışma gerilimi vb.) ve manyetik parametreleri (manyetik alan değeri vb.) bulunmuştur. Daha sonra deneysel formüllerden elde edilen değerleri magnetronun başlangıç parametreleri olarak kullanarak CST Particle Studio' da X bandında çalışan 8 oyuklu yarıklı tip magnetronun üç boyutlu modellemesi tasarlanarak benzetim çalışması yapılmış ve belirlenen parametrelerin magnetronun performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir [9].

Fuks ve Schamiloglu aracılığıyla magnetronların açılışını hızlandırmak için bir geçirgen katot önerilmiştir [10]. Ayrıca bu çalışmadaki sonuçlar deneylerle doğrulanmıştır [11]. Bu çalışmalar daha da ileriye götürülerek magnetronun verimini artırmak için bir sanal katot geliştirilmiştir [12]. Yang ve arkadaşları tarafından magnetronların açılış süresini kısaltmak için yarı geçirgen bir katot önerilmiştir. Ayrıca kaçak akımın bastırılması için katot uçlarına iki adet kenar levhası yerleştirilmiştir. Gerçekleştirilen benzetim çalışmaları sonucunda önerilen tasarımın magnetronun açılış süresini kısalttığı ayrıca katot yapısına ait derinlik ve genişliğin göreceli (rölativistik) magnetronun çıkış özelliklerini etkilemediği görülmüştür [13].

2015 yılında Vyas ve arkadaşları 2,45 GHz frekansta çalışan 10 kW güce sahip sürekli dalga (CW) magnetronun sentezini ve benzetim çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada ilk olarak genel tasarım denklemlerini kullanarak kısa devre halkalı (strapped) ve kanatlı tip magnetronun başlangıç parametreleri belirlenmiştir. Daha sonra CST-MWS programı kullanılarak boyutsal parametreleri tamamlamak için soğuk test modelinin geliştirilmesinden önce rezonant yapının başlangıç parametreleriyle elektromanyetik benzetim çalışması gerçekleştirilmiştir. Elektromanyetik çalışmadan sonra rezonatör

sisteminin bütün parçaları üretilip deneysel soğuk test uygulamaları yapılmıştır. Benzetim ve deneysel çalışmanın sonuçlarına göre π modunun frekansında çok az farkla tutarlılık görülürken kalite faktörlerinde (Q) %20 ye varan hatalar bulunmaktadır. Bu aşamadan sonra PIC benzetim çalışması gerçekleştirilerek elektron ışıınıyla RF devresinin etkileşim davranışı simüle edilmiş olup magnetronun çıkış performansı incelenmiştir. PIC çalışmasının sonuçlarına göre %71,45 verimlilikle 10,98 kW çıkış gücü elde edilmiştir [14]. Bu çalışmadan sonra Vyas ve arkadaşları tarafından yukarıda bahsi geçen magnetronun yarıkları ferrit malzemeyle kısmen doldurularak magnetronun çıkış performansını artırma çalışması sunulmuştur [15]. Ayrıca Wang ve arkadaşları tarafından göreceli magnetronun veriminin artırılması için yarıkların dielektrik malzemeyle (polietilen ve cam gibi) doldurulma çalışması sunulmuş olup gerçekleştirilen benzetim çalışmalarından elde edilen sonuçlara göre burada incelenen magnetronun verimi %12' lik bir artışla %50' den %56' ya çıkmıştır [16].

2016 yılında Ding ve arkadaşları 5,8 GHz frekans ta çalışan 18 kanatlı magnetronun çıkış gücü ve verimliliği üzerinde ideal ve gerçek durumlar için manyetik alan dağılımının etkilerini öncelikle benzetim çalışmasıyla incelemişlerdir. Daha sonra elde edilen benzetim çalışmasının sonuçlarını deneylerle doğrulamışlardır. Benzetim ve deneysel çalışmaların sonuçlarına göre düzgün olmayan manyetik alan dağılımının ideal duruma göre magnetronun çıkış gücünü azalttığını verimini ise düşürdüğünü belirtmişlerdir [17].

Choi ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada 5,79 GHz' de çalışan 14 kanata sahip çift kısa devre halkalı bir magnetron tasarlanmıştır. Bu magnetronun ilk tasarım parametrelerini belirlemek için temel bir analitik denklem olan Buneman-Hartree rezonans koşulu kullanılmıştır. Daha sonra üç boyutlu benzetim çalışması programı olan HFSS kullanılarak magnetrona ait bir oyuğun rezonans frekansı 5,71 GHz ve kalite faktörü (Q) 266 olarak bulunmuştur. Ayrıca en uygun performans alanını tahmin etmek için doğrusal olmayan bir PIC kodu kullanılıp kapsamlı çalışmalar yapılmıştır. Bu benzetim çalışmalarından elde edilen verilere göre magnetronun üretimi gerçekleştirilip deneysel çalışmalar yapılmıştır. Gerçekleştirilen bir deneyde katot gerilimi 9,2 kV, anot akımı 1 A ve harici (dış) manyetik alan 7,5 kG olup, deneyden elde edilen sonuca göre magnetronun 5,79 GHz frekansta 5,3 kW RF salınım gücüne ve %57 DC-RF güç dönüşüm verimine sahip olduğu belirtilmiştir [18].

Khatoon ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada elektromanyetik CST yazılımı kullanılarak 8 oyuğa sahip yarıklı tip magnetronun benzetim çalışması sunulmuştur. Burada ilk olarak çalışma frekansı 10 GHz belirlenmiş ve matematiksel denklemler kullanılarak katot yarıçapı, anot iç yarıçapı, anot (katot) yüksekliği, oyuk yarıçapı, yarık genişliği ve uzunluğu, anot ve katot blokları arasına uygulanan gerilim ve gerekli manyetik alan gibi yapısal ve elektriksel parametrelerin başlangıç değerleri belirlenmiştir. Daha sonra matematiksel denklemlerden elde edilen parametrelerin başlangıç değerleriyle CST Particle Studio yazılımı kullanılarak benzetim ortamında magnetronun üç boyutlu yapısı tasarlanmış ve elde edilen verilerle matematiksel denklemlerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. CST Particle Studio' nun eigen mode (öz mod) çözücüsü kullanılıp denklemlerden elde edilen 0,22 T (Tesla) manyetik alan ve 51 kV gerilim uygulandığında π modu için gerekli rezonans frekansı 10,146 GHz olarak bulunmuştur. Ayrıca PIC çözücüsü kullanılarak elektrik alanın tepe değerinin matematiksel ifadede belirtilenle aynı olan 10 GHz frekans değerinde elde edildiği gösterilmiştir [19].

Joshi ve arkadaşları tarafından yüksek enerji depolayabilmek amacıyla TE_{011} modunda eşeksenli (koaksiyel) oyuk tasarımı çalışması gerçekleştirilmiştir. Burada öncelikli olarak aşkın denklemler kullanılarak oyuğun başlangıç boyutları belirlenmiştir. Buradan elde edilen boyutlar referans alınarak CST MWS yazılımı kullanılıp oyuğun eigen mode (öz mod) benzetim çalışması yapılmıştır. Benzetim çalışmasının sonuçlarına göre 9,3011 GHz de istenen TE_{011} modunda elektrik alan vektör çizgilerinin eşeksenli oyuğun ortasında maksimum olduğu, iç ve dış yüzeylerinde gözden kaybolduğu gözlemlenmiştir. Daha sonra magnetronun anot rezonatörlerinde üretilen RF gücünü eşeksenli dikdörtgen oyuktan dikdörtgen WR112 dalga kılavuzuna aktarabilmek amacıyla bir çıkış bağlantı elemanı tasarımı yapılmıştır. Tasarım parametreleriyle kalite faktörleri (Q), devre verimliliği ve eşleşme (kuplaj) katsayısı üzerinden performans analizi gerçekleştirilmiştir. %93 devre verimliliği için yüksüz (Q_0), yüklü (Q_1) ve harici (Q_{ext}) kalite faktörlerinin optimize edilmiş değerleri sırasıyla 13108, 918 ve 987 olarak bulunmuştur [20].

Vyas ve Tiwari tarafından CST Microwave Studio yazılımı kullanılarak $2,998 \pm 0,005$ GHz çalışma frekansında 3,25 MW çıkış gücü sağlayabilen yüksek güçlü darbeli bir magnetronun elektromanyetik tasarımı gerçekleştirilmiştir. Eigen mode (öz mod) çözücü kullanılarak magnetronun π modundaki çalışma frekansı incelenmiş ve anot yapısına kısa devre halkası eklenmediğinde (unstrapped) π modunun rezonans frekansının 4,370 GHz, iki adet kısa

devre halkası eklendiğinde (double strapped) ise 3,073 GHz (bu değer istenen çalışma frekans değerinden 73 MHz daha büyüktür) olduğu bulunmuştur. Ayrıca kısa devre halkası ekleme (strapping) işleminin mod ayrımını artırdığı da gözlemlenmiştir. Frekans ayarlama aralığını incelemek için magnetron benzetim modeline kapasitif tipte bir ayarlama mekanizması eklenmiştir. Bu mekanizmayla beraber π modu çalışma frekansının 3,002 GHz olduğu gözlemlenmiştir. Bu aşamadan sonra magnetronun soğuk testine geçilmiş olup burada magnetronun π modu çalışma frekansı 3,002 GHz, bant genişliği (Δf) 25 MHz, yüklü kalite faktörü (Q_l) 120, yüksüz kalite faktörü (Q_0) 1920, harici kalite faktörü (Q_{ext}) 128 ve devre verimi (η_c) %93 olarak bulunmuştur. Magnetronun çıkış gücü, anot akımı, frekansı ve genel verimini hesaplamak için PIC çalışması yapılmış olup 50 kV çalışma gerilimi ve 1630 Gauss (G) manyetik alan değerlerinde magnetronun 3,25 MW çıkış gücüne, 117 A anot akımına, %56 verime ve 2,997 GHz sıcak π modu çalışma frekansına sahip olduğu görülmüştür [21].

Kayan tarafından gerçekleştirilen tez çalışmasında magnetronun ürettiği gücü olumlu ya da olumsuz etkileyen değişkenler incelenmiştir. İncelenen oyuk sayısına göre 4 oyuk için $12,5 \times 10^{-3}$ W ve 12 oyuk için $37,4 \times 10^{-3}$ W değerinde çıkış gücü elde edilmiştir. Ayrıca diğer önemli bir değişken (parametre) olan katod yarıçapına göre sonuçlara baktığımızda 1 cm katod yarıçapı için $19,9 \times 10^{-3}$ W ve 2,2 cm katod yarıçapı için $61,2 \times 10^{-3}$ W çıkış gücü elde edilmiştir [22].

Doğru tarafından yapılan tez çalışmasında göreceli (relativistic) magnetronların açılışını hızlandıran bazı yöntemler rölativistik A6 magnetronuna uygulanan benzetimler üzerinden karşılaştırılmıştır. Ayrıca benzetim çalışmasının sonuçlarından elde edilen verilerle magnetronların girişi için bir toplu ögeli devre modeli önerilmiş ve bu modelin muhtemel fiziksel anlamları açıklanmıştır [23].

Salur tarafından yapılan tez çalışmasında Adler' in enjeksiyon kilitleme teorisi, ana bağımlı, eşler arası ve kendinden kilitleme düzenekleriyle 300 MHz' lik bir katı hal osilatör devresi kullanılarak doğrulanmıştır. Bahsi geçen üç durum içinde faz ve frekans kilitleme olayı sağlanmıştır. Ayrıca teorik ve deneysel çalışmaların birbiriyle uyumlu olabilmesi için iki endüstriyel magnetron kullanılarak ana bağımlı kilitleme doğrultusunda bir deney düzeneği önerilmiştir [24].

Leggieri ve arkadaşları tarafından Comsol Multiphysics paket programı kullanılarak 8 oyuklu X bandında ve π modunda çalışan bir magnetron tasarımı yapılmıştır. Tasarlanan magnetronun frekansı 9 GHz olup, 60 kV çalışma gerilimi ve 1330 Gauss manyetik alan değerinde %40 verim ve 2,64 MW güç değerleri elde edilmiştir [25]. Bu çalışmadan sonra Leggieri ve arkadaşları tarafından aynı magnetron tasarımı kullanılarak magnetrondan lineer hızlandırıcıya (LINAC) yüksek güçlü iletim sistemi bir yalıtkan pencere tasarlanarak sunulmuş böylece ısı kayıplardan meydana gelen ve cihazın performansını olumsuz yönde etkileyen durumların nasıl azaltılabileceği gösterilmiştir [26].

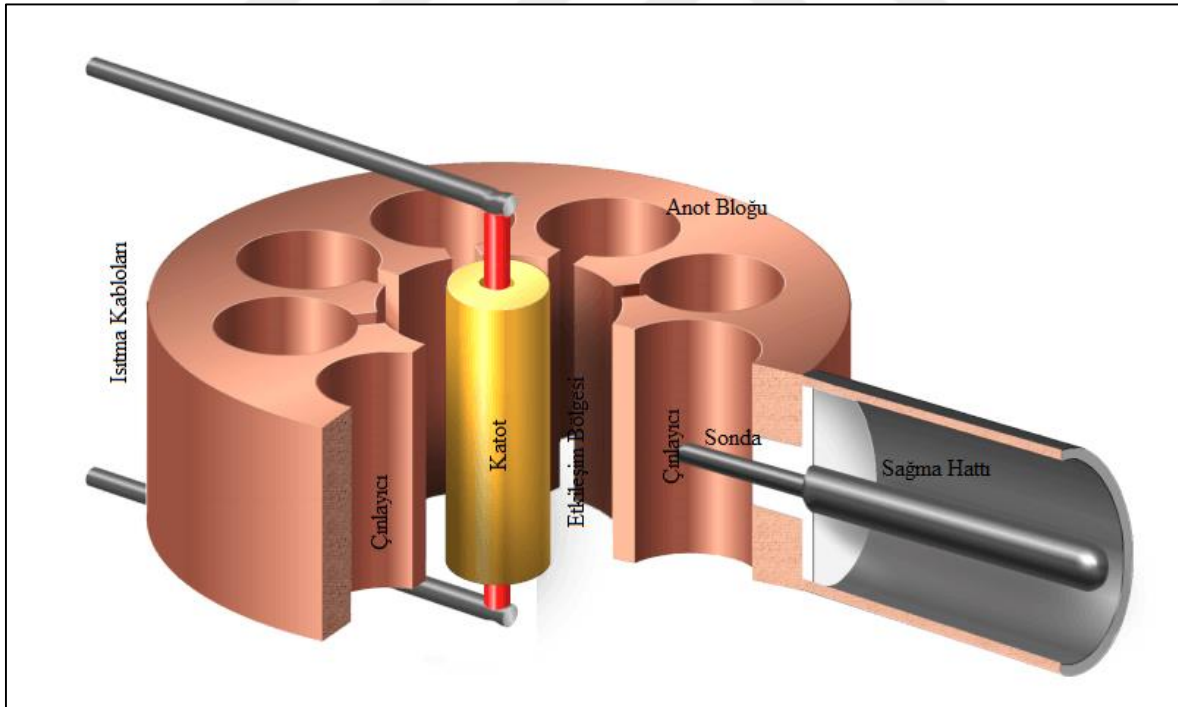
Magnetronların tasarımı ve üretimi noktasında hem yurt dışındaki hem de yurt içindeki çalışmalar değerlendirildiğinde yurt dışındaki çalışmaların bazıları benzetim ve analiz boyutunda kalırken bazıları hem benzetim ve analiz hem de parçanın üretilip deneysel sonuçlarının incelenmesi ve benzetim çalışmalarıyla kıyaslanması şeklindedir. Yurt içindeki çalışmalar ise teorik ve benzetim çalışmalarından öteye geçememiştir. Bu tez çalışmasıyla magnetronun teorik ve benzetim çalışmasının yanı sıra deneysel olarak da incelenmesi amaçlanmıştır. Böylece yurt içindeki bu boşluk doldurulacak olup yerli bir cihazın ilk özgün tasarım ve üretimi sağlanmış olacaktır. Ayrıca literatürde oyuklu yapı sadece anotta görülürken bu çalışmada tasarlanan yapıda hem anotta hem de katotta oyuklu bir yapı olacaktır. Bunun sonucunda da magnetronun çift bantta çalışmasıyla hibrit bir yapı elde edilecektir.

2. MAGNETRONUN YAPISI VE MAGNETRON TEORİSİ

Bu bölümde ilk olarak magnetronun yapısından bahsedilmiştir. Daha sonra magnetronun çalışma prensibi ve çalışmasını etkileyen elektrik ve manyetik alanların teorik olarak incelenmesine geçilmiştir. Ardından sırasıyla magnetron rezonans sistemi, magnetronun çıkış gücü ve verimi ve magnetronun tasarım ilkeleri anlatılmıştır.

2.1. Magnetronun Yapısı

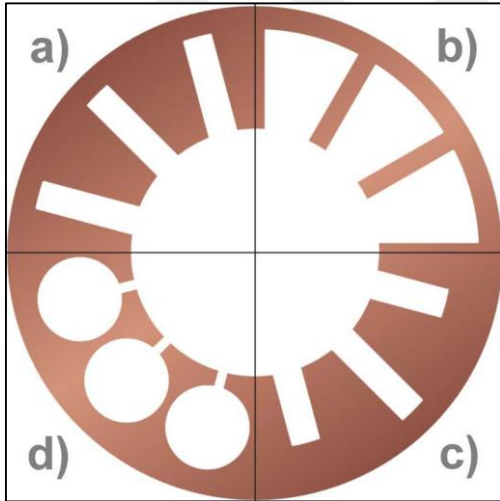
Magnetron daha öncede tanımlandığı gibi genellikle silindirik bir anot ve katottan oluşan eksenine paralel bir manyetik alana sahip yüksek frekanslı salınımlar üreten çapraz alanlı mikrodalga vakum tüptür. Genel olarak bir magnetron anot, katot, etkileşim bölgesi (anot ve katot arası bölge), oyuklar (çınlayıcılar), sağma hattı gibi yapılardan oluşur. Şekil 2.1 de magnetronun yapısını oluşturan kısımlar gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Magnetronun yapısını oluşturan kısımlar [27]

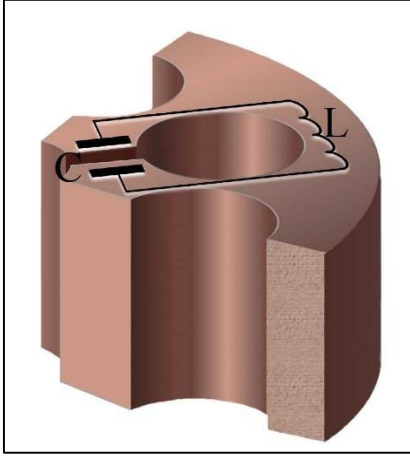
Magnetronun anot kısmı bakırdan yapılarak genellikle topraklanan kısımdır. Ayrıca mikrodalga salınımların gerçekleştiği birimdir. Katot kısmı ise elektronların kaynağı olup bakır, tungsten gibi metallerden yapılarak anot bloğunun topraklanması nedeniyle negatif

gerilim değerine sahiptir. Katotun ısıtılıp elektronların yayılımı ısıtma kabloları sayesinde gerçekleşir. Anot ve katot arasında kalan bölge etkileşim bölgesi olarak adlandırılmaktadır ve bu bölgede elektronların enerjilerini RF veya mikrodalga salınımlarına aktarmasıyla RF ya da mikrodalga üretimi gerçekleşmektedir. Magnetronda gerekli manyetik alan şekilde gösterilmeyen ve katota paralel olarak yerleştirilen sabit mıknatıs tarafından gerçekleştirilir. Manyetik alan sayesinde elektronlar etkileşim bölgesinde istenen istikamette yönlendirilir. Magnetrondan elde edilen güç sonda (RF probu) vasıtasıyla sağma hattından yapının dışına aktarılır. Anot bloğu yapısında çift sayıda bulunan ve magnetronun çalışma frekansını belirleyen çınlayıcı olarak adlandırılan yapılar bulunmaktadır. Bu çınlayıcılar yarık tipi, daire sektörü tipi, doğan güneş tipi ve delik tipi olmak üzere gruplandırılır. Şekil 2.2 de bahsedilen çınlayıcı tipleri sunulmuştur.



Şekil 2.2. Dört farklı oyuk tipi; a. yarık tipi, b. daire sektörü tipi, c. doğan güneş tipi, d. delik tipi [27]

Yukarıda çeşitlerinden bahsedilen bu çınlayıcılar Şekil 2.3 de gösterildiği gibi paralel rezonant devre gibi çalışmaktadır. Oyuğun arka kısmı tek sarımlı bobin gibi endüktif bir görev üstlenirken yarık kısmı ise kapasitör görevi görmektedir.



Şekil 2.3. Anot bloğundaki bir çınlayıcının devre şeması gösterimi [27]

2.2. Magnetronun Çalışma Prensibi

Magnetronun çalışma prensibi kabaca şu aşamalardan oluşur. Öncelikle magnetrona gerilim verilir. Böylece ısıtıcı kablolar sayesinde katotta sıcaklık artışı olur ve elektron yayılımı başlar. Daha sonra DC elektrik ve manyetik alanların etkisi altında bulunan katot etrafında elektron bulutu oluşur. Bu aşamadan sonra yüksek hıza sahip elektronlar daha yavaş elektronları yakalar ve jant telli bisiklet tekerinin dönmesiyle oluşan görüntüye benzer bir görüntü ortaya çıkar. Son olarak bu görüntüye ulaşan elektronlar ve oyuklardaki RF alanları arasında enerji transferi gerçekleşir. Böylece magnetronda RF salınımı elde edilmiş olur.

2.2.1. Elektronlar üzerinde farklı alanların etkileri

Magnetron bir mikrodalga vakum tüpü olduğu için çalışması elektronların hareketi sonucu gerçekleşir. Katotun ısınması sonucu elektron yayılımı gerçekleşir ve bu elektronlar anota varmak üzere harekete geçerler. Etkileşim bölgesindeki elektronlar elektrik alanının etkisiyle ivme kazanıp manyetik alanın etkisiyle sapmaya uğrarlar. Bir başka ifadeyle elektronlar Lorentz kuvvetinin etkisiyle yol almaktadırlar. Eğer bir elektrona sadece elektrik alan etki ederse bu alandan dolayı bir kuvvet oluşur ve bu kuvvet aşağıdaki eşitle ifade edilir:

$$\vec{F} = q\vec{E} \quad (2.1)$$

Bu eşitlikte q elektronların yükü, $\vec{F}$ kuvvet ve $\vec{E}$ elektrik alan olup q yerine $-e$ yazılırsa eşitlik aşağıdaki gibi yeniden yazılır:

$$\vec{F} = -e\vec{E} \quad (2.2)$$

Bir elektrik alandaki bir elektronun yolunu belirlemek için gerekli kuvvet Newton' un ikinci hareket yasasıyla doğrudan ilişkilidir. Yani gerekli kuvvet değeri hızın zamana göre değişimi ve elektronun kütesinin çarpımına eşittir.

$$\vec{F} = -e\vec{E} = m\vec{a} = m \frac{d\vec{\vartheta}}{dt} \quad (2.3)$$

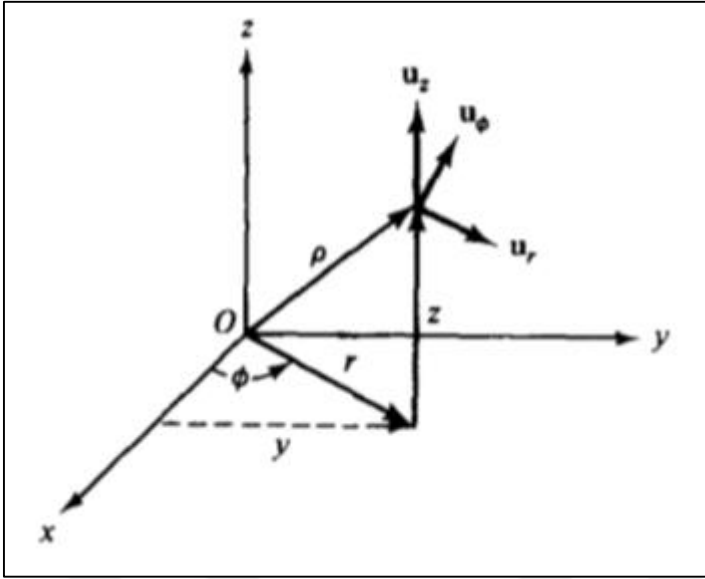
Eş. 2.3 de “m” elektronun kütlesi, e elektron yükü olup sırasıyla $9,109 \times 10^{-31}$ kg ve $1,602 \times 10^{-19}$ C değerlerine sahiptirler. $\vec{a}$ saniyede metrekaare hızlanma (ivme), $\vec{\vartheta}$ ise elektronun hızıdır. Ayrıca elektron negatif bir yüke sahip olduğu için kuvvetin elektrik alana zıt yönde olduğu anlaşılmaktadır. Bir elektrik alana maruz kalan bir elektronun dik koordinat sistemindeki diferansiyel eşitlikleri aşağıdaki gibidir:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = -eE_x = m \frac{d\vartheta_x}{dt} \quad (2.4)$$

$$m \frac{d^2y}{dt^2} = -eE_y = m \frac{d\vartheta_y}{dt} \quad (2.5)$$

$$m \frac{d^2z}{dt^2} = -eE_z = m \frac{d\vartheta_z}{dt} \quad (2.6)$$

Burada x,y ve z konum vektörünün bileşenleri olup E_x, E_y, E_z dikdörtgen koordinatlarda $\vec{E}$ nin bileşenleridir. ϑ_x, ϑ_y ve ϑ_z ise elektronun hızı $\vec{\vartheta}$ nin bileşenleridir. Bir elektrik alandaki elektronların hareketleri silindirik koordinatlarda da gösterebilir.



Şekil 2.4. Silindirik koordinat düzlemi [28]

$$x = r \cos \phi \quad (2.7)$$

$$y = r \sin \phi \quad (2.8)$$

$$z = z \quad (2.9)$$

Yukarıdaki eşitliklerin tersi alınarak r , ϕ ve z değerleri bulunur.

$$r = (x^2 + y^2)^{1/2} \quad (2.10)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{y}{x} \right) = \sin^{-1} \frac{y}{(x^2 + y^2)^{1/2}} = \cos^{-1} \frac{x}{(x^2 + y^2)^{1/2}} \quad (2.11)$$

$$z = z \quad (2.12)$$

Bir elektrik alana maruz kalan elektronların hareketleri silindirik koordinatlarda aşağıdaki gibi yazılır:

$$\frac{d^2 r}{dt^2} - r \left(\frac{d\phi}{dt} \right)^2 = -\frac{e}{m} E_r \quad (2.13)$$

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dt} \left(r^2 \frac{d\vartheta}{dt} \right) = -\frac{e}{m} E_{\vartheta} \quad (2.14)$$

$$\frac{d^2 z}{dt^2} = -\frac{e}{m} E_z \quad (2.15)$$

Burada E_r , E_{ϑ} ve E_z , $\vec{E}$ nin silindirik koordinatlardaki bileşenleridir. Eğer bir manyetik alana maruz kalan bir elektron varsa oluşacak olan kuvvet aşağıdaki eşitlikteki gibi ifade edilir:

$$\vec{F} = -e(\vec{\vartheta} \times \vec{B}) = \frac{d}{dt}(m\vec{\vartheta}) = m \frac{d\vec{\vartheta}}{dt} \quad (2.16)$$

Burada $\vec{B}$ manyetik akı yoğunluğudur ve kuvvetin yönü hem $\vec{\vartheta}$ hem de $\vec{B}$ düzlemine diktir. Ayrıca hız ve manyetik akı yoğunluğu ifadeleri bileşenleriyle birlikte aşağıdaki eşitliklerdeki gibi ifade edilir:

$$\vec{\vartheta} = \vartheta_x \hat{a}_x + \vartheta_y \hat{a}_y + \vartheta_z \hat{a}_z \quad (2.17)$$

$$\vec{B} = B_x \hat{a}_x + B_y \hat{a}_y + B_z \hat{a}_z \quad (2.18)$$

Eş. 2.16 dan yola çıkarak dik koordinat sistemindeki eşitlikler aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = -\frac{e}{m} \left(B_z \frac{dy}{dt} - B_y \frac{dz}{dt} \right) \quad (2.19)$$

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = -\frac{e}{m} \left(B_x \frac{dz}{dt} - B_z \frac{dx}{dt} \right) \quad (2.20)$$

$$\frac{d^2 z}{dt^2} = -\frac{e}{m} \left(B_y \frac{dx}{dt} - B_x \frac{dy}{dt} \right) \quad (2.21)$$

Konum vektörünün birinci türevi hız vektörü olduğu için yukarıdaki eşitlikler hız vektörü cinsinden şu şekilde yazılır:

$$\frac{d\vartheta_x}{dt} = -\frac{e}{m} (\vartheta_y B_z - \vartheta_z B_y) \quad (2.22)$$

$$\frac{d\vartheta_y}{dt} = -\frac{e}{m} (\vartheta_z B_x - \vartheta_x B_z) \quad (2.23)$$

$$\frac{d\vartheta_z}{dt} = -\frac{e}{m} (\vartheta_x B_y - \vartheta_y B_x) \quad (2.24)$$

Hız ve manyetik akı yoğunluğu bileşenleriyle beraber silindirik koordinatlarda aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\vec{\vartheta} = \vartheta_r \widehat{a}_r + \vartheta_\phi \widehat{a}_\phi + \vartheta_z \widehat{a}_z \quad (2.25)$$

$$\vec{B} = B_r \widehat{a}_r + B_\phi \widehat{a}_\phi + B_z \widehat{a}_z \quad (2.26)$$

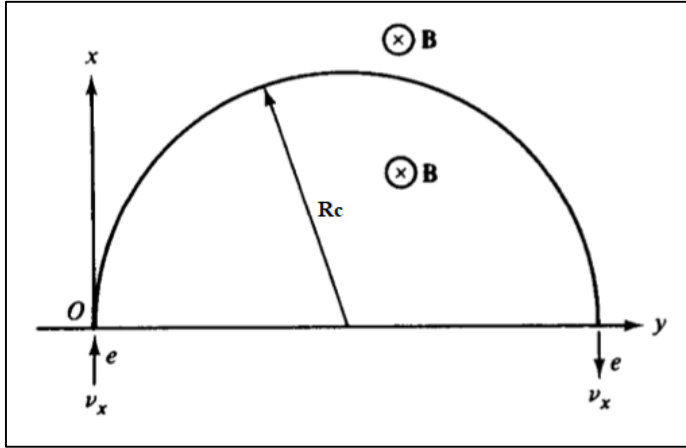
Burada $\widehat{a}_r$, $\widehat{a}_\phi$ ve $\widehat{a}_z$ silindirik koordinatlarda birim vektörleridir. Eş. 2.16 temel alınarak manyetik alana maruz kalan bir elektronun hareket denklemleri silindirik koordinatlarda şu şekilde ifade edilir:

$$\frac{d^2 r}{dt^2} - r \left(\frac{d\phi}{dt} \right)^2 = -\frac{e}{m} \left(B_z r \frac{d\phi}{dt} - B_\phi \frac{dz}{dt} \right) \quad (2.27)$$

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dt} \left(r^2 \frac{d\phi}{dt} \right) = -\frac{e}{m} \left(B_r \frac{dz}{dt} - B_z \frac{dr}{dt} \right) \quad (2.28)$$

$$\frac{d^2 z}{dt^2} = -\frac{e}{m} \left(B_\phi \frac{dr}{dt} - B_r r \frac{d\phi}{dt} \right) \quad (2.29)$$

Düzgün bir manyetik alanda ve x yönünde ϑ hızıyla hareket eden bir elektronun gösterimi Şekil 2.5 de sunulmuştur. Burada manyetik alan ϑ_x ' e dik yönde ve sayfa düzleminden içeriye doğrudur.



Şekil 2.5. Manyetik alana maruz kalan elektronun dairesel hareketi [28]

Elektronun hızı aşağıdaki eşitlikte olduğu gibi ifade edilir:

$$\vec{v} = v_x \vec{u}_x \quad (2.30)$$

Burada $\vec{u}_x$, x yönündeki birim vektör olarak ifade edilmektedir. Elektronu manyetik alan tarafından uygulanan kuvvet elektronunun hareketine göre sürekli dik olduğundan elektron üzerinde hiçbir iş yapılmaz ve elektronun hızı sabit kalır. Manyetik alan şu şekilde ifade edilebilir:

$$\vec{B} = B_z \vec{u}_z \quad (2.31)$$

Elektron manyetik alana maruz kaldığında oluşacak olan kuvvetin büyüklüğünde herhangi bir değişiklik olmazken elektron uygulanan kuvvetin etkisiyle yönünü değiştirerek dairesel bir yol izler. Eş. 2.16 temel alınarak oluşacak olan kuvvet şu şekilde yazılır:

$$\vec{F} = -e(\vec{v} \times \vec{B}) = e v_x B_z \vec{u}_y \quad (2.32)$$

Manyetik kuvvetin etkisiyle dairesel bir yol izleyen elektron, herhangi bir ipin ucuna bağlanan cismin ipin döndürülmesiyle elde edilecek kuvvet eşitliğine benzer bir yapıya sahiptir.

$$\frac{m v_x^2}{R_c} = e v_x B \quad (2.33)$$

Bu denklemde R_c elektronun izlediği dairesel yolun yarıçapıdır ve Eş. 2.33 düzenlenerek şu şekilde ifade edilir:

$$R_c = \frac{m\vartheta^2}{e\vartheta B} \quad (2.34)$$

$$R_c = \frac{m\vartheta}{eB} \quad (2.35)$$

Elektronun dairesel hareketinin siklotron açısal frekansı aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\omega_c = \frac{\vartheta}{R_c} = \frac{eB}{m} \quad (2.36)$$

Elektronun dairesel hareketini tamamladığında geçen süre şu şekilde ifade edilir:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_c} = \frac{2\pi}{\frac{eB}{m}} = \frac{2\pi m}{eB} \quad (2.37)$$

Yukarıdaki eşitliklere göre elektronun hızı ile izlediği dairesel yolun yarıçapının birbiriyle doğru orantılı olduğu ayrıca elektronun hızının ve dairesel yarıçapın siklotron açısal frekansı ve hareketini tamamladığı süre (periyot) üzerinde herhangi bir etkisinin olmadığı anlaşılmaktadır.

Herhangi bir elektrona hem elektrik alan hem de manyetik alan etki ettiğinde elektronların hareketi bu alanların yönlerine bağlı olarak değişir. Elektrik alan ve manyetik alan birbirlerine göre aynı veya zıt yönlerde uygulanmış ise manyetik alanın elektron üzerindeki kuvvette herhangi bir etkisi olmaz. Elektrik alan ve manyetik alan birbirlerine göre dik açıda uygulandığında bu alana çapraz alan denir ve manyetik alanın elektron üzerinde bir etkisi görülür. Magnetron gibi çapraz alanlı tüplerde katot tarafından yayılan elektronlar uygulanan elektrik alan tarafından hızlandırılır ve zamanla elektronların hızları artmaya devam eder ancak elektronların hızları arttıkça manyetik alan tarafından daha fazla sapmaya uğrarlar. Elektrik alan ve manyetik alan birlikte uygulandığında elektron üzerinde etki eden kuvvete Lorentz kuvveti denir ve şöyle ifade edilir:

$$\vec{F} = -e[\vec{E} + (\vec{v} \times \vec{B})] = m \frac{d\vec{v}}{dt} \quad (2.38)$$

Elektron üzerinde elektrik alan ve manyetik alanın birlikte etki ettiği hareket eşitlikleri dikdörtgen koordinat düzleminde aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{e}{m} \left(E_x + B_z \frac{dy}{dt} - B_y \frac{dz}{dt} \right) \quad (2.39)$$

$$\frac{d^2y}{dt^2} = -\frac{e}{m} \left(E_y + B_x \frac{dz}{dt} - B_z \frac{dx}{dt} \right) \quad (2.40)$$

$$\frac{d^2z}{dt^2} = -\frac{e}{m} \left(E_z + B_y \frac{dx}{dt} - B_x \frac{dy}{dt} \right) \quad (2.41)$$

Yukarıda verilen eşitlikler silindirik koordinatlarda şu şekilde ifade edilir:

$$\frac{d^2r}{dt^2} - r \left(\frac{d\phi}{dt} \right)^2 = -\frac{e}{m} \left(E_r + B_z r \frac{d\phi}{dt} - B_\phi \frac{dz}{dt} \right) \quad (2.42)$$

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dt} \left(r^2 \frac{d\phi}{dt} \right) = -\frac{e}{m} \left(E_\phi + B_r \frac{dz}{dt} - B_z \frac{dr}{dt} \right) \quad (2.43)$$

$$\frac{d^2z}{dt^2} = -\frac{e}{m} \left(E_z + B_\phi \frac{dr}{dt} - B_r r \frac{d\phi}{dt} \right) \quad (2.44)$$

Yukarıda verilen eşitlikler katot yarıçapı a , anot yarıçapı b ve manyetik alan değeri pozitif z yönünde B_0 olan silindirik bir magnetrona uygulanıp elektron hareketleri iki boyutta (r, ϕ) sınır koşulları için incelenmiştir.

Eş. 2.42 ve Eş. 2.43, yukarıdaki açıklamaya göre $dz/dt = 0$ yazılıp yeniden düzenlenir ve aşağıdaki eşitlikler elde edilir:

$$\frac{d^2r}{dt^2} - r \left(\frac{d\phi}{dt} \right)^2 = \frac{e}{m} E_r - \frac{e}{m} r B_z \frac{d\phi}{dt} \quad (2.45)$$

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dt} \left(r^2 \frac{d\phi}{dt} \right) = \frac{e}{m} B_z \frac{dr}{dt} \quad (2.46)$$

Burada $e/m = 1,759 \times 10^{11} \text{ C/kg}$ olup elektron yükünün kütlesine oranıdır. Eş. 2.46 yeniden düzenlenirse aşağıdaki eşitlik elde edilir:

$$\frac{d}{dt} \left(r^2 \frac{d\phi}{dt} \right) = \frac{e}{m} r B_z \frac{dr}{dt} = \frac{1}{2} \omega_c \frac{d}{dt} (r^2) \quad (2.47)$$

Eş. 2.47 integrasyon işlemi gerçekleştirilerek şu şekilde yeniden düzenlenir:

$$r^2 \frac{d\phi}{dt} = \frac{1}{2} \omega_c r^2 + y \quad (2.48)$$

Burada y herhangi bir sabit değerdir ve yukarıdaki eşitliğin silindirik magnetronun sınır koşullarına uygulanmasıyla elde edilir. Yukarıdaki eşitlikte r yerine a ve $d\phi/dt$ yerine sıfır yazılarak yeniden düzenlenirse y sabit değeri elde edilir.

$$a^2 \times 0 = \frac{1}{2} \omega_c a^2 + y \quad (2.49)$$

$$y = -\frac{1}{2} \omega_c a^2 \quad (2.50)$$

Eş. 2.48'de sabit değer yerine yukarıda bulunan eşitlik ifadesi yazılarak açısal hız ifadesi şu şekilde yazılır:

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{1}{2} \omega_c \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) \quad (2.51)$$

Manyetik alanın elektronlar üzerinde herhangi bir etkisi olmadığı için elektronların kinetik enerjisi şu şekilde ifade edilir:

$$\frac{1}{2} m \vec{v}^2 = eV \quad (2.52)$$

Eş. 2.52 düzenlenerek elektronun hızı r ve ϕ bileşenleri cinsinden şu şekilde ifade edilir:

$$\vec{v}^2 = \frac{2e}{m} V = v_r^2 + v_\phi^2 = \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 + \left(r \frac{d\phi}{dt} \right)^2 \quad (2.53)$$

Yukarıdaki eşitlikte r yerine b (anot yarıçapı), V yerine V_0 ve dr/dt yerine sıfır yazılarak eşitlik yeniden düzenlenirse aşağıdaki eşitlikler elde edilir:

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{1}{2} \omega_c \left(1 - \frac{a^2}{b^2}\right) \quad (2.54)$$

$$b^2 \left(\frac{d\phi}{dt}\right)^2 = \frac{2e}{m} V_0 \quad (2.55)$$

Eş. 2.55 aşağıdaki gibi yeniden düzenlenir:

$$b^2 \left[\frac{1}{2} \omega_c \left(1 - \frac{a^2}{b^2}\right)\right]^2 = \frac{2e}{m} V_0 \quad (2.56)$$

Belirli bir manyetik alan değerinde magnetrona uygulanan gerilimin bir sınır değeri vardır. Buna kesme gerilimi denir. Yani magnetrona uygulanan gerilim değeri bu kesme geriliminden küçük seçilerek elektronların anota çarpması engellenir. Magnetrona uygulanan gerilimin kritik bir değeri olduğu gibi manyetik alan değerinde de bir sınırlama vardır. Manyetik alan değeri bu kritik değerden büyük seçilirse elektronlar anota ulaşamazlar. Her iki durum içinde ifadeler Eş. 2.56'dan yola çıkılarak elde edilir.

Eş. 2.56'da ω_c yerine Eş. 2.36'da verilen ifade yazıldığında aşağıdaki eşitlik elde edilir:

$$b^2 \left[\frac{1}{2} \frac{eB}{m} \left(1 - \frac{a^2}{b^2}\right)\right]^2 = \frac{2e}{m} V_0 \quad (2.57)$$

$$b^2 \left(\frac{1}{4} \frac{e^2 B^2}{m^2}\right) \left(1 - \frac{a^2}{b^2}\right)^2 = \frac{2e}{m} V_0 \quad (2.58)$$

$$V_0 = \frac{e}{8m} B^2 b^2 \left(1 - \frac{a^2}{b^2}\right)^2 \quad (2.59)$$

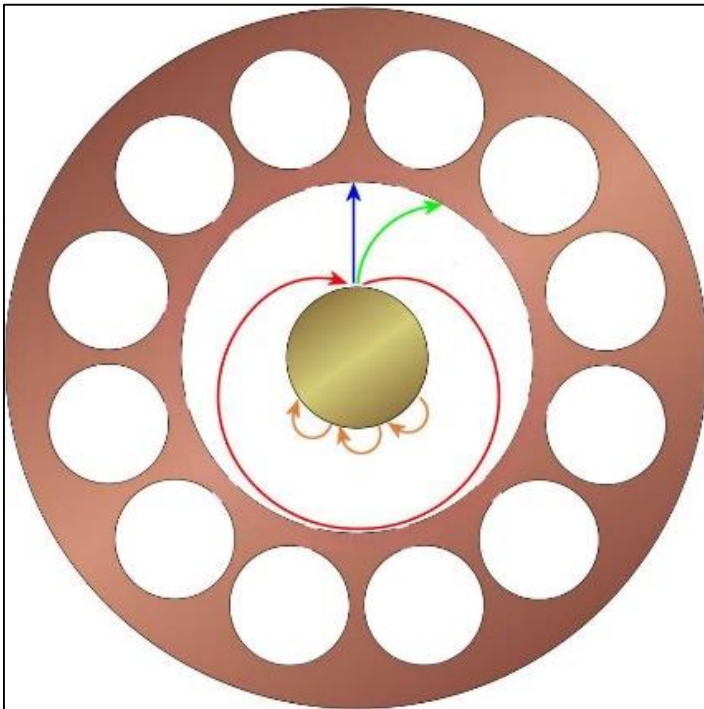
Eş. 2.59'da V_0 yerine V_c , B yerine B_0 yazılarak istenen kritik gerilim değeri elde edilir.

$$V_c = \frac{e}{8m} B_0^2 b^2 \left(1 - \frac{a^2}{b^2}\right)^2 \quad (2.60)$$

Eş. 2.58 temel alınıp B yerine B_c yazılarak istenen kritik manyetik alan eşitliği aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$B_c = \frac{(8V_0 m/e)^{1/2}}{b(1-a^2/b^2)} \quad (2.61)$$

Yukarıdaki eşitliklerde a katot yarıçapı, b anot yarıçapı, V_0 anot ve katot arasına uygulanan gerilim, B_0 manyetik alan değeri olup, V_c kritik gerilim değerini B_c ise kritik manyetik alan değerini ifade etmektedir. Daha öncede belirtildiği gibi elektrik alana maruz kalan elektronlar bu alanın etkisiyle hız kazanırken manyetik alanın etkisiyle sapmaya uğrarlar. Bununla birlikte manyetik alan değerine göre de elektronların sapma miktarı değişiklik gösterir. Şekil 2.6 da farklı manyetik alan değerlerine maruz kalan elektronların yörüngeleri görülmektedir. Mavi renkle belirtilen yörüngede elektronlar üzerinde manyetik alanın herhangi bir etkisi yoktur ve elektronlar anota çarpar. Yeşil renkli yörüngede ise elektronlar manyetik alana maruz kalmış ve biraz sapmaya uğramıştır ancak buradaki manyetik alan değeri kritik manyetik alan değerinden küçüktür. Kırmızı renkle gösterilen yörüngede ise uygulanan manyetik alan değeri kritik manyetik alan değerine eşittir ve elektronlar anot yüzeyine teğet geçip tekrar katota ulaşırlar. Eğer kritik manyetik alan değerinden daha büyük bir değer uygulanırsa elektronlar turuncu renkle gösterilen yörüngede bir yol izlerler.



Şekil 2.6. Farklı manyetik alan altındaki elektron yörüngeleri [29]

2.2.2. Hull ve Buneman-Hartree koşulları

Magnetron gibi çapraz alanlı cihazlar, mikrodalga enerji üretmek için gerekli elektronların harici ışın üreten etmenlere gerek duymadan doğrudan katottan yayılması ve etkileşim bölgesindeki elektronların birbirine dik açılarda uygulanan elektrik ve manyetik alanlarda bir sürüklenmeye sahip olması gibi ayırt edici iki özelliğe sahiptir [30]. Elektronların sürüklenme hızı aşağıdaki eşitlikte olduğu gibi ifade edilir:

$$\vec{v}_d = \frac{\vec{E} \times \vec{B}}{B^2} \quad (2.62)$$

Yukarıdaki eşitlikte $\vec{v}_d$ elektronların hızını ifade etmektedir. Magnetronun en yüksek verime sahip mikrodalga elektron vakum cihazı olmasının başlıca nedeni elektron akışının sürekli olarak devam etmesidir. Elektrik alan ve manyetik alanın katottan uzaklaştıkça değişmesine neden olan şey elektronların uzay yükü ve diyamanyetik etkileridir. Ayrıca elektrik alan ve manyetik alandaki değişim Eş. 2.62’de de görüldüğü gibi elektronların sürüklenme hızında ($\vec{v}_d$) bir değişime neden olmaktadır [30].

Magnetronun çalışma bölgesini belirleyen ve kendilerine özgü eşitliklere sahip olan iki önemli kavram vardır. Bunlar Hull kesimi ve Buneman-Hartree koşullarıdır. Daha öncede ifade edildiği gibi belirli bir gerilim değerinde uygulanan manyetik alan değeri etkileşim bölgesinde katottan yayılan elektronların düzgün bir şekilde üretilebilmesi için yeterli bir değere sahip olmalıdır. Bununla birlikte Eş. 2.62 temel alındığında elektron hızını düşürecek kadar da büyük bir değere sahip olmamalıdır. Burada belirtilen kritik manyetik alan değerine Hull manyetik alan kesim değeri denmektedir ve Eş. 2.61’in bir alternatifi olarak aşağıdaki gibi ifade edilir [30]:

$$B_c = \frac{mc}{ed_e} (\gamma^2 - 1)^{1/2} = \frac{mc}{ed_e} \left[\left(\frac{2eV}{mc^2} \right) + \left(\frac{eV}{mc^2} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.63)$$

$$B_c(kG) \approx \frac{0,17}{d_e(cm)} \left[\frac{2V(MV)}{0,511} + \left(\frac{V(MV)}{0,511} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.64)$$

Yukarıdaki eşitliklerde m elektronun kütlesini, e elektronun yükünü ve c ışık hızını belirtip

değeri yaklaşık olarak 300 000 kilometre/saniye dir. Ayrıca γ bağıl faktör, d_e ise silindirik geometrinin etkin boşluğu anlamına gelip aşağıdaki eşitliklerdeki gibi ifade edilmektedir.

$$\gamma = 1 + \frac{eV}{mc^2} = 1 + \frac{V(MV)}{0,511} \quad (2.65)$$

$$d_e = \frac{r_a^2 - r_c^2}{2r_a} \quad (2.66)$$

Eş. 2.65'te V , anot ve katot arasına uygulanan gerilimi ifade ederken, Eş. 2.66'da r_a anot yarıçapını r_c ise katot yarıçapını ifade etmektedir.

Eş. 2.62'de verilen elektronların sürüklenme hızı dikkate alındığında belirli bir gerilim değerinde elektronların, elektromanyetik dalganın faz hızı ile birlikte rezonans oluşturabilmek için yavaşlamasına neden olan maksimum bir manyetik alan değeri vardır. Hull kesim koşuluyla da bağlantısı olan elektrik alan ve manyetik alan arasındaki bu ilişkiye Buneman-Hartree koşulu denir ve şu şekilde ifade edilir [30]:

$$\frac{eV}{mc^2} = \frac{eB_z\omega_n}{mc^2n} r_a d_e - 1 + \sqrt{1 - \left(\frac{r_a\omega_n}{cn}\right)^2} \quad (2.67)$$

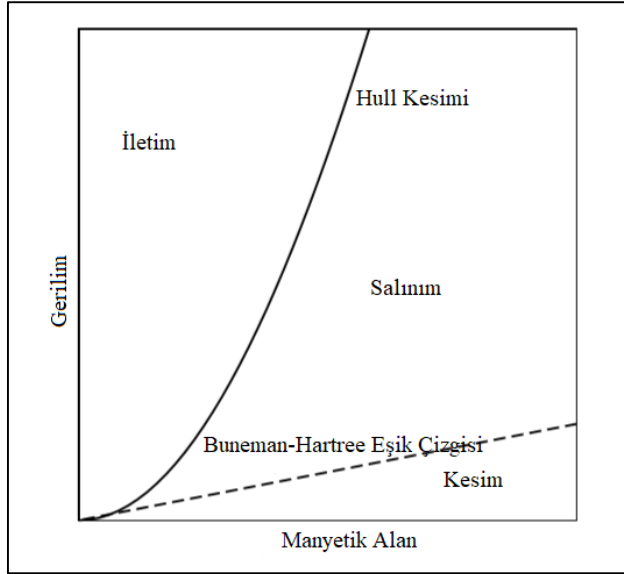
Yukarıdaki eşitlikte ω_n radyan cinsinden çalışma frekansı, B_z ise eksenel yönde uygulanan manyetik alan değeridir. Eksenel akım I_z tarafından gelen alan önemli olduğunda uzun katoda sahip magnetronlar için Buneman-Hartree koşulu aşağıdaki gibi ifade edilir [30].

$$\frac{eV}{mc^2} = \frac{eB_z\omega_n}{mc^2n} r_a d_e - 1 + \sqrt{(1 + b_\varphi^2) \left[1 - \left(\frac{r_a\omega_n}{cn}\right)^2\right]} \quad (2.68)$$

$$b_\varphi = \frac{I_z(kA)}{8,5} \ln\left(\frac{r_a}{r_c}\right) \quad (2.69)$$

Şekil 2.7'de Hull kesimi ile Buneman-Hartree koşullarının eğrileriyle birlikte bir magnetronun çalışma bölgesi gösterilmektedir. Şekilde kesikli çizgiyle gösterilen yer Buneman-Hartree eşik değeri iken parabolik eğriyle belirtilen yer Hull kesimidir. Şekilden de görüleceği gibi belirli bir gerilim değerinde magnetron salınımına geçebilmek için hem Hull kesim koşulunu hem de Buneman-Hartree eşik değerini karşılayan bir manyetik alan

değerine sahip olmalıdır.

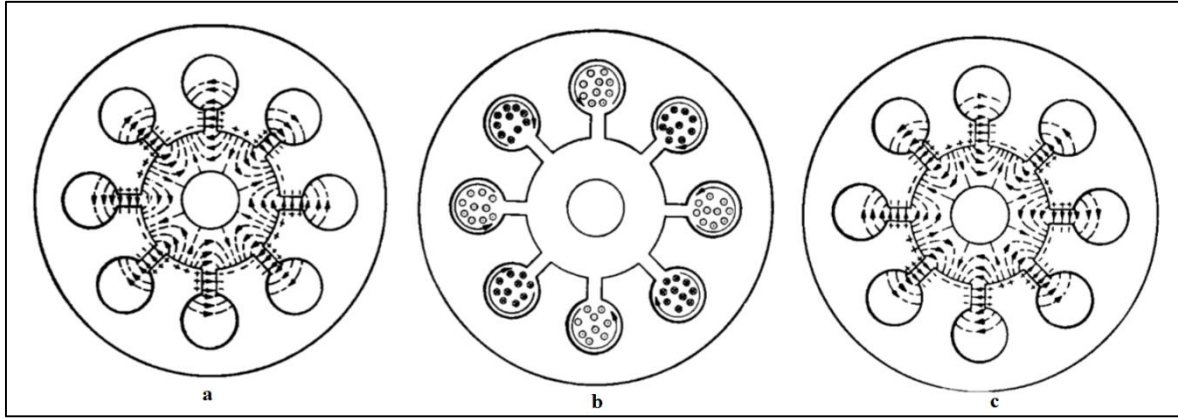


Şekil 2.7. Hull kesim ve Buneman-Hartree eğrileriyle magnetronun çalışma bölgesi [30]

2.3. Magnetron Rezonans Sistemi

Magnetronda anot bloğu, çıkış devresi, oyuklar ve mikrodalga tüpün RF özelliklerine katkıda bulunan bütün parçaların oluşturduğu yapıya rezonans sistemi denir [3]. Rezonans sistemi magnetronun çalışma frekansını belirleme ve diğer gerçekleşen elektronik olaylarda rol alma gibi etkenlerden dolayı magnetronun en önemli parçalarından biridir. Rezonans sistemini bir bütün olarak tasarlamak magnetron tasarımının zorluklarından biridir. Bu yüzden rezonans sistemi tasarımında bazı varsayımlardan yola çıkılarak çoğu zaman anot bloğu ve çıkış devresinin magnetronun performansını etkilediği düşünülür.

Magnetron düzgün bir şekilde çalıştırıldığında oyuklarda düzgün bir elektrik alan dağılımı ortaya çıkar. Çeyrek periyot sonra yükler ve elektrik alan ortadan kaybolur ve oyuklarda akım akmaya başlar bunun sonucunda da birbirine komşu oyuklarda zıt yönlerde manyetik alan oluşur. Manyetik alan oluşumundan sonra ilk oluşan yük dağılımı ve elektrik alana göre zıt yönde yeni bir elektrik alan ve yük dağılımı oluşur. Bahsedilen bu durum Şekil 2.8’de gösterilmiştir.



Şekil 2.8. a. maksimum yük yoğunluğunda elektrik alan çizgileri, b. oyuklardaki akım ve manyetik alanlar, c. çeyrek periyot sonra oluşan elektrik alan çizgileri [3]

Yukarıdaki şekilde komşu oyuklar arasındaki faz farkının π olmasından dolayı gerçekleşen salınımlar π modu olarak adlandırılmaktadır. Ayrıca magnetron en kararlı bu modda çalışmaktadır. Bir magnetronda birden fazla mod salınımı görülebilir. Magnetronun verimli çalışmasının gerekliliklerinden biri de istenmeyen bu modların ortadan kaldırılmasıdır. Magnetrondaki oyuk sistemi kapalı bir yapıya sahip olduğundan her iki komşu oyuk arasındaki faz farkı şu şekilde ifade edilir:

$$\phi_n = \frac{2\pi n}{N} \quad (2.70)$$

Burada N oyuk sayısını, n tam sayı olup salınımın mod sayısını ve ϕ_n her iki komşu oyuk arasındaki faz farkını ifade etmektedir. 8 oyuklu bir magnetronda ana modlar ve bu modlara karşı gelen komşu oyuklar arasındaki faz farkları şöyledir:

$n=1$ için;

$$\phi_1 = \frac{2\pi 1}{8} = \frac{\pi}{4} \quad (2.71)$$

$n=2$ için;

$$\phi_2 = \frac{2\pi 2}{8} = \frac{\pi}{2} \quad (2.72)$$

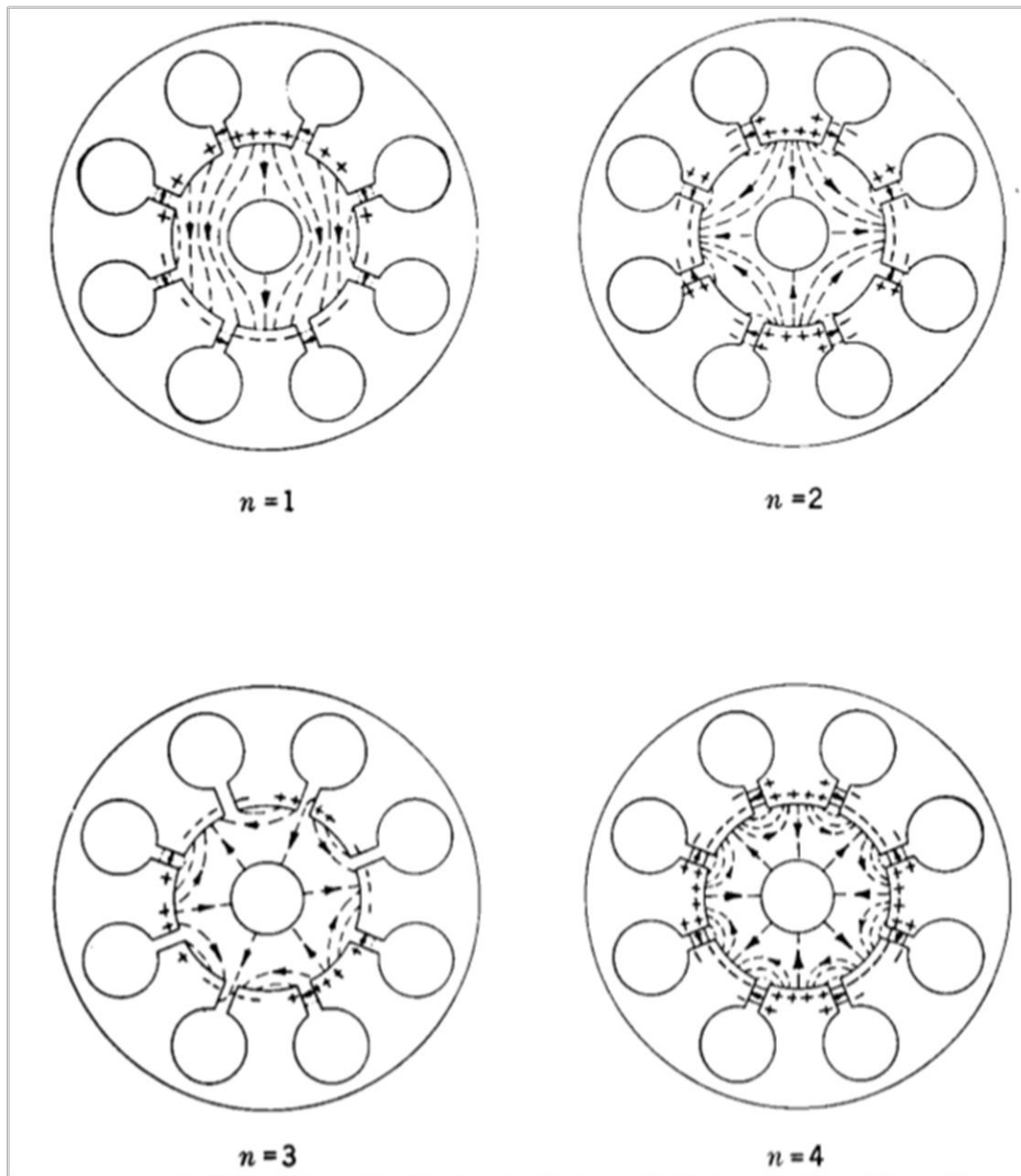
$n=3$ için;

$$\phi_3 = \frac{2\pi 3}{8} = \frac{3\pi}{4} \quad (2.73)$$

n=4 için;

$$\phi_4 = \frac{2\pi 4}{8} = \pi \quad (2.74)$$

Yukarıda bahsedilen bu dört ana mod için elektrik alan ve yük dağılımları aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.

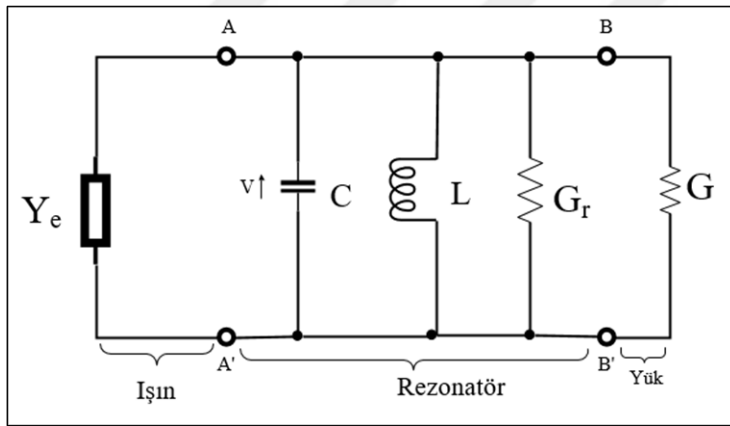


Şekil 2.9. Sekiz oyuklu magnetronda dört ana mod için yük ve elektrik alan dağılımları [3]

Magnetronda ana modların dışında başka modlar da görülebilir (N adet oyuğa sahip bir magnetronda yine aynı sayıda mod oluşur) ve ortaya çıkan modların her biri farklı salınım frekans değerlerine sahiptir. Bu istenmeyen modlar magnetronun çıkış gücü ve verimliliği üzerinde bir azalmaya neden olur. Ortaya çıkan bu olumsuz durumu yok etmek için kısa devre halkası (strapping) ve doğan güneş tipi anot yapısı kullanma gibi yöntemler geliştirilmiştir.

2.4. Magnetronun Çıkış Gücü ve Verimi

Magnetronlar yüksek güç gerektiren mikrodalga uygulamalarda sıklıkla kullanılan bir vakum tüptür. Daha önce de ifade edildiği gibi herhangi bir magnetronun performansını belirleyen parametrelerden ikisi çıkış gücü ve verimdir. Günümüzde halen bu parametreleri geliştirmeye yönelik çalışmalar devam etmektedir [31-32]. Magnetronlarda çıkış gücü ve verime rezonans yapı ve doğru akım (dc) güç kaynağı etki etmektedir [28]. Şekil 2.10'da herhangi bir magnetrondaki rezonans yapıya ait eş değer devre şeması gösterilmiştir.



Şekil 2.10. Magnetrondaki rezonans yapıya ait eş değer devre [28]

Yukarıdaki şekilde Y_e elektronik admitansı, V kanat uçları boyunca RF gerilimini, C kanat uçlarındaki kapasitansı, L rezonans yapının endüktansını, G_r rezonans yapının kondüktansını ve G rezonatör başına yük iletkenliğini (kondüktans) ifade etmektedir [28]. Ayrıca rezonans devresi için önemli bir parametre de Q kalite faktörüdür ve magnetronun performansı üzerinde doğrudan etkisi vardır. Kalite faktörü devrenin kaybını belirlemede önemli bir ölçüt olup yüksek kalite faktörüne sahip devrelerdeki kayıplar daha az olmaktadır [1]. Kalite faktörü yüksüz kalite faktörü, yüklü kalite faktörü ve dış (harici) kalite faktörü olarak üçe ayrılıp sırasıyla aşağıdaki eşitliklerde verilmiştir [28].

$$Q_{un} = \frac{\omega_0 C}{G_r} \quad (2.75)$$

$$Q_L = \frac{\omega_0 C}{G_r + G} \quad (2.76)$$

$$Q_{ext} = \frac{\omega_0 C}{G} \quad (2.77)$$

Yukarıdaki eşitliklerde ω_0 açısal rezonans frekansı olup $2\pi f_0$ 'a eşittir. Magnetronlarda verim devre verimliliği ve elektronik verimlilik olarak ikiye ayrılır ve sırasıyla aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\eta_c = \frac{G}{G + G_r} = \frac{G}{G_{ext}} = \frac{1}{\left(1 + \frac{Q_{ext}}{Q_{un}}\right)} \quad (2.78)$$

$$\eta_e = \frac{P_{gen}}{P_{dc}} = \frac{V_0 I_0 - P_{loss}}{V_0 I_0} \quad (2.79)$$

Eş. 2.78'den $G \gg G_r$ olduğunda yani magnetron aşırı yüklendiğinde maksimum devre verimliliğin elde edildiği görülmektedir. Magnetronda aşırı yüklenme tüpü daha da hassas hale getireceğinden bazı durumlarda istenmeyen bir olaydır [28].

Eş. 2.79'da P_{gen} indüklenen RF gücünü, P_{dc} doğru akım (dc) güç kaynağından elde edilen $V_0 I_0$ gücünü, V_0 anot gerilimini, I_0 anot akımını ve P_{loss} anot devresindeki güç kaybını ifade etmektedir. Elektronlar tarafından üretilen RF gücü aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$P_{gen} = V_0 I_0 - P_{loss} = V_0 I_0 - I_0 \frac{m}{2e} \frac{\omega_0^2}{\beta^2} + \frac{E_{max}^2}{B_z^2} = \frac{1}{2} N |V|^2 \frac{\omega_0 C}{Q_L} \quad (2.80)$$

Eş. 2.80'de N rezonatör sayısını, V rezonatör oyuklarındaki gerilimi, E_{max} maksimum elektrik alanı, β faz sabitini, B_z z yönündeki manyetik akı yoğunluğunu, L kanatçık uçları arasındaki mesafeyi ifade etmektedir. Ayrıca maksimum elektrik alan E_{max} aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$E_{max} = M_1 |V| / L \quad (2.81)$$

Eş. 2.81'de M_1 , π modu için boşluk faktörüdür ve aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$M_1 = \sin\left(\beta_n \frac{\delta}{2}\right) / \left(\beta_n \frac{\delta}{2}\right) \quad (2.82)$$

Yukarıdaki eşitlikte δ 'nın küçük değerleri için M_1 bire eşittir. Eş. 2.80 düzenlenerek daha da basit haliyle aşağıdaki gibi yeniden ifade edilebilir.

$$P_{gen} = \frac{NL^2 \omega_0 C}{2M_1^2 Q_L} E_{max}^2 \quad (2.83)$$

Elektronik verimlilik η_e , Eş. 2.83 kullanılarak yeniden aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\eta_e = \frac{P_{gen}}{P_{dc}} = \frac{1 - \frac{m\omega_0^2}{2eV_0\beta^2}}{1 + \frac{I_0 m M_1^2 Q_L}{B_z e N L^2 \omega_0 C}} \quad (2.84)$$

2.5. Magnetronun Tasarım İlkeleri

Magnetron tasarımında katot, etkileşim bölgesi, rezonans sistemi ve manyetik alandan oluşan dört ana bileşen dikkatli bir şekilde ele alınmalıdır. Bu dört bileşen birbirine o kadar bağımlıdır ki bunlardan herhangi birini tasarlarken diğerlerinin etkileri göz ardı edilemez. Başka bir ifadeyle bahsedilen dört kısımdan herhangi biri diğerlerinden bağımsız olarak tasarlanamaz.

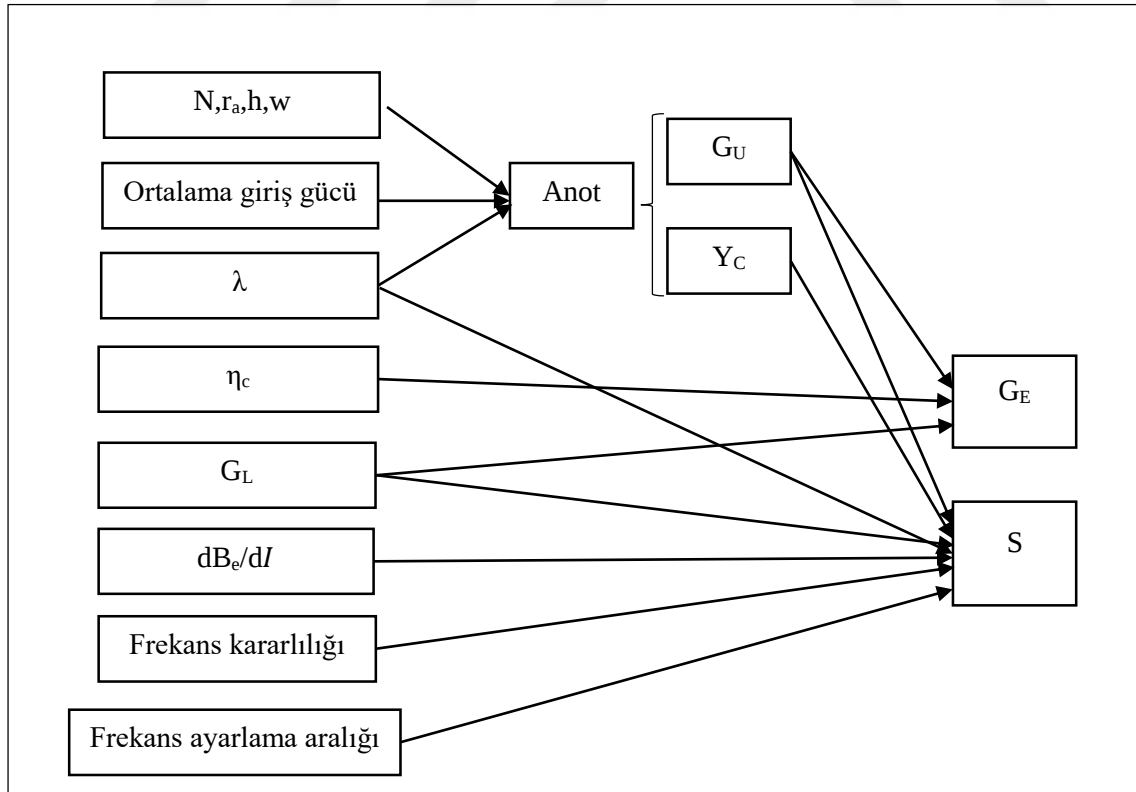
Magnetronun kullanım alanına göre yeni bir magnetron tasarımına ihtiyaç duyulduğunda cihaz için belirlenen gereksinimleri ifade eden parametrelere birincil tasarım parametreleri denir. Bu parametreler frekans, çıkış gücü, gerilim, verim, darbe süresi ve ortalama giriş gücü, ısıtıcı gücü, ayar gereksinimleri, frekans kararlılığı ve ağırlıktır. Birincil tasarım parametreleri ile ilgili gerekli açıklamalar Collins tarafından yapılmıştır [3].

Magnetronun dört ana bileşeninden herhangi biri tasarlanırken hem birincil parametrelerin etkisi hem de diğer üç bileşenin etkisi birlikte ele alınmalıdır. Bunun için de öncelikli olarak etkileşim bölgesinin tasarımıyla işe başlanılmalıdır. Böylece diğer bileşenler için önemli bir veri seti oluşturularak her bir bileşenin bu değerleri sağlayıp sağlayamadığına daha kolay bir şekilde karar verilir [3]. Etkileşim bölgesinin tasarımı için gereklilikler gerilim, akım, dalga

boyu (frekans), şekil faktörleri (N, σ, μ) ve görelî çalışma noktası (b, i, g)'dır. Burada N rezonatör sayısını, σ katot yarıçapının anot yarıçapına oranını (r_c/r_a) ve μ ise kanatçıklar arasındaki boşluğun kanat kalınlığı ve boşluk kalınlığının toplam uzunluğuna oranını (w/d) ifade etmektedir. Şekil faktörleri etkileşim bölgesinin kesitsel şeklini belirlerken, görelî çalışma noktası elektronik yörüngeleri belirlemektedir. Görelî çalışma noktaları için eşitlikler çalışmanın ilerleyen kısımlarında sunulacaktır.

2.5.1. Rezonans sistemini etkileyen koşullar

Etkileşim bölgesinin analizi sonucu ikincil tasarım parametreleri adı verilen 10 adet koşuldan oluşan bir veri seti elde edilmektedir. Rezonans sisteminin tasarımı ulaşılan bu koşullardan bazılarıyla birlikte eş zamanlı olarak 11 adet koşula bağımlı hale gelir. Bunlar frekans ayar aralığı, frekans kararlılığı, N (osilatör sayısı), anot yarıçapı (r_a), anot yüksekliği (h), yarık genişliği (w), dalga boyu (λ), devre verimi (η_c), yarık iletkenliği (G_L), ortalama giriş gücü ve akıma göre elektronik süseptansdaki değişim (dB_e/dI)'dir. Rezonans sistemini etkileyen koşullar kapsamlı olarak aşağıdaki şekilde verilmiştir.



Şekil 2.11. Rezonans sistemini etkileyen koşullar [3]

Yukarıdaki şekilde Y_C karakteristik admitans, G_U ise karakteristik kondüktans olup rezonans sisteminin bağımsız bileşenlerinden biri olan anot bloğunu nitelemek için kullanılır. Rezonans sistemin diğer iki bağımsız bileşeni ise stabilizasyon devresi ve yüküdür. Bu iki bileşen ise yukarıdaki şekilde sırasıyla stabilizasyon faktörü S ve kondüktans G_E ile ifade edilmiştir. Yarığın kondüktansı G_L ile devre verimi (η_c)'nin G_U ve G_E ile yakından bir ilişkisi vardır ve bunlarda aşağıdaki eşitliklerde verilmiştir.

$$G_L = G_E + G_U \quad (2.85)$$

$$\eta_c = \frac{G_E}{G_E + G_U} \quad (2.86)$$

Rezonans sistemini etkileyen önemli parametrelerden biri de dalga boyudur. Dalga boyundaki değişimin ($\Delta\lambda$) bazı parametrelerdeki değişimlerle olan ilişkisi ise şöyledir [3].

$$\Delta\lambda = \frac{1}{SY_C} \frac{\lambda}{2} \left(\frac{dB_e}{dI} \right) \Delta I \quad (2.87)$$

$$\Delta\lambda = \frac{1}{S} \lambda \alpha \Delta T \quad (2.88)$$

$$\Delta\lambda = \frac{G_E}{SY_C} \frac{\lambda}{2} \Delta b \quad (2.89)$$

$$\Delta\lambda = (\pi c) \frac{1}{SY_C} \Delta C \quad (2.90)$$

$$\Delta\lambda = (\pi c) \frac{Y_C}{S} \Delta L \quad (2.91)$$

$$\Delta\lambda = \frac{S-1}{S} \Delta\lambda_s \quad (2.92)$$

Yukarıda ΔI akımdaki değişimi, ΔT sıcaklıktaki değişimi, Δb normalize edilmiş yük reaktansındaki değişimi, ΔC anot bloğundaki kapasitans değişimini, ΔL anottaki endüktans değişimini, $\Delta\lambda_s$ stabilizatörün dalga boyundaki değişimi, α doğrusal termal genleşme katsayısını ifade etmektedir. Ayrıca G_E ve S parametreleri için belirli bir alt ve üst sınır değerleri vardır [3]. Tasarımda bu sınır değerlerinde bir tutarsızlık meydana gelirse anot

bloğunda (yani Y_c ve G_U), etkileşim bölgesinde (ikincil tasarım parametrelerinde) ya da birincil tasarım parametrelerinde değişiklik yapılmalıdır.

2.5.2. Katotu etkileyen koşullar

Magnetron tasarımında katotu etkileyen koşulların bir kısmı birincil tasarım parametreleri ve bir kısmı da rezonans sisteminde olduğu gibi etkileşim bölgesinin analizi sonucu elde edilen ikincil tasarım parametrelerinden olmak üzere 8 adet parametreden oluşmaktadır. Bunlar anot yüksekliği (h), anot yarıçapı (r_a), katot yarıçapı (r_c), gerilim (V), katot akım yoğunluğu (J_c), ortalama giriş gücü, ısıtıcı gücü ve darbe süresidir.

2.5.3. Manyetik devreyi etkileyen koşullar

Magnetron tasarımında manyetik devrenin görevi etkileşim bölgesinde olabildiğince düzgün bir manyetik alan meydana getirmektir. Manyetik devreyi oluşturan koşullar anot yüksekliği (h), anot yarıçapı (r_a), katot yarıçapı (r_c), manyetik alan (B) ve kullanılan mıknatısın ağırlığıdır.

2.5.4. İkincil tasarım parametreleri

Magnetronun etkileşim bölgesinin tasarımında daha öncede ifade edildiği gibi bazı birincil tasarım parametrelerine, şekil faktörlerine ve görelî çalışma noktasına ihtiyaç duyulmaktadır. Etkileşim bölgesinin tasarımından elde edilen verilerle de ikincil tasarım parametreleri oluşturulur. Bu parametreler anot yarıçapı (r_a), katot yarıçapı (r_c), anot yüksekliği (h), yarık genişliği (w), elektronik verim (η_e), yarık kondüktansı (G_L), katot akım yoğunluğu (J_c) ve B manyetik alan değeridir. İkincil tasarım parametrelerinin belirlenmesinde öncelikli olarak değerleri bazı performans eğrilerinden belirlenen görelî çalışma noktasıyla (b , i , g) beraber bazı boyutsuz değişkenlere ait eşitlikler aşağıda sunulmuştur [3].

$$b = \frac{B}{B_k} \quad (2.93)$$

$$i = \frac{I}{i_k} \quad (2.94)$$

$$g = \frac{G_L}{G_k} \quad (2.95)$$

$$v = \frac{V}{V_k} \quad (2.96)$$

$$p = \frac{P}{P_k} \quad (2.97)$$

Yukarıdaki eşitliklerde B manyetik alan değerini, I akımı, G_L yarık kondüktansını, V gerilimi ve P gücü ifade ederken B_k , i_k , G_k , V_k , P_k ise karakteristik ölçek faktörleri olup sırasıyla karakteristik manyetik alan, karakteristik akım, karakteristik kondüktans, karakteristik gerilim ve karakteristik güç olarak adlandırılıp aşağıdaki eşitliklerle ifade edilirler:

$$B_k = 2 \left(\frac{m}{e} \right) \left(\frac{2\pi c}{n\lambda} \right) \frac{1}{\left[1 - \left(\frac{r_c}{r_a} \right)^2 \right]} = \frac{2,12}{(n\lambda) \left[1 - \left(\frac{r_c}{r_a} \right)^2 \right]} \text{ Wb/m}^2 \quad (2.98)$$

$$V_k = \frac{1}{2} \left(\frac{m}{e} \right) \left(\frac{2\pi c}{n\lambda} \right)^2 r_a^2 = 253 \left(\frac{2\pi r_a}{n\lambda} \right)^2 \text{ kV} \quad (2.99)$$

$$i_k = \frac{8440a_1}{\left[1 - \left(\frac{r_c}{r_a} \right)^2 \right]^2 \left(\frac{r_a}{r_c} + 1 \right)} \left(\frac{2\pi r_a}{n\lambda} \right)^3 \frac{h}{r_a} \text{ Amper (A)} \quad (2.100)$$

$$P_k = i_k \times V_k = \frac{2135,32}{\left[1 - \left(\frac{r_c}{r_a} \right)^2 \right]^2 \left(\frac{r_a}{r_c} + 1 \right)} \left(\frac{2\pi r_a}{n\lambda} \right)^5 \frac{h}{r_a} \text{ MW} \quad (2.101)$$

$$G_k = \frac{i_k}{V_k} \approx \frac{0,21a_1h}{\left[1 - \left(\frac{r_c}{r_a} \right)^2 \right]^2 \left(\frac{r_a}{r_c} + 1 \right) n\lambda} \text{ mho} \quad (2.102)$$

Yukarıdaki eşitliklerde a_1 , r_a/r_c 'nin bir fonksiyonu olup belirli bir orana kadar parabolik olarak azalma gösterirken r_a/r_c değeri yaklaşık olarak ikiye eşit olduktan sonra bu değer tekrar artışa geçmektedir. Ayrıca n oyuk sayısının (N) yarısı anlamına gelmektedir. Boyutsuz değişkenlerle birlikte karakteristik ölçek faktörlerine ait eşitlikler elde edildikten sonra bu eşitliklerden yola çıkılarak ikincil tasarım parametreleri bulunur [3].

$$B = b \times B_k = b \frac{42400}{\lambda N(1-\sigma^2)} \quad (2.103)$$

$$r_a = \lambda \frac{N}{6320} \left(\frac{V}{v} \right)^{1/2} \quad (2.104)$$

$$r_c = \frac{\lambda N \sigma \left(\frac{V}{v} \right)^{1/2}}{6320} \quad (2.105)$$

$$h = 2,39\lambda \left(\frac{v}{V} \right) \left(\frac{I}{i} \right) N \frac{(1-\sigma^2)^2 \left(1 + \frac{1}{\sigma} \right)}{a_1} \quad (2.106)$$

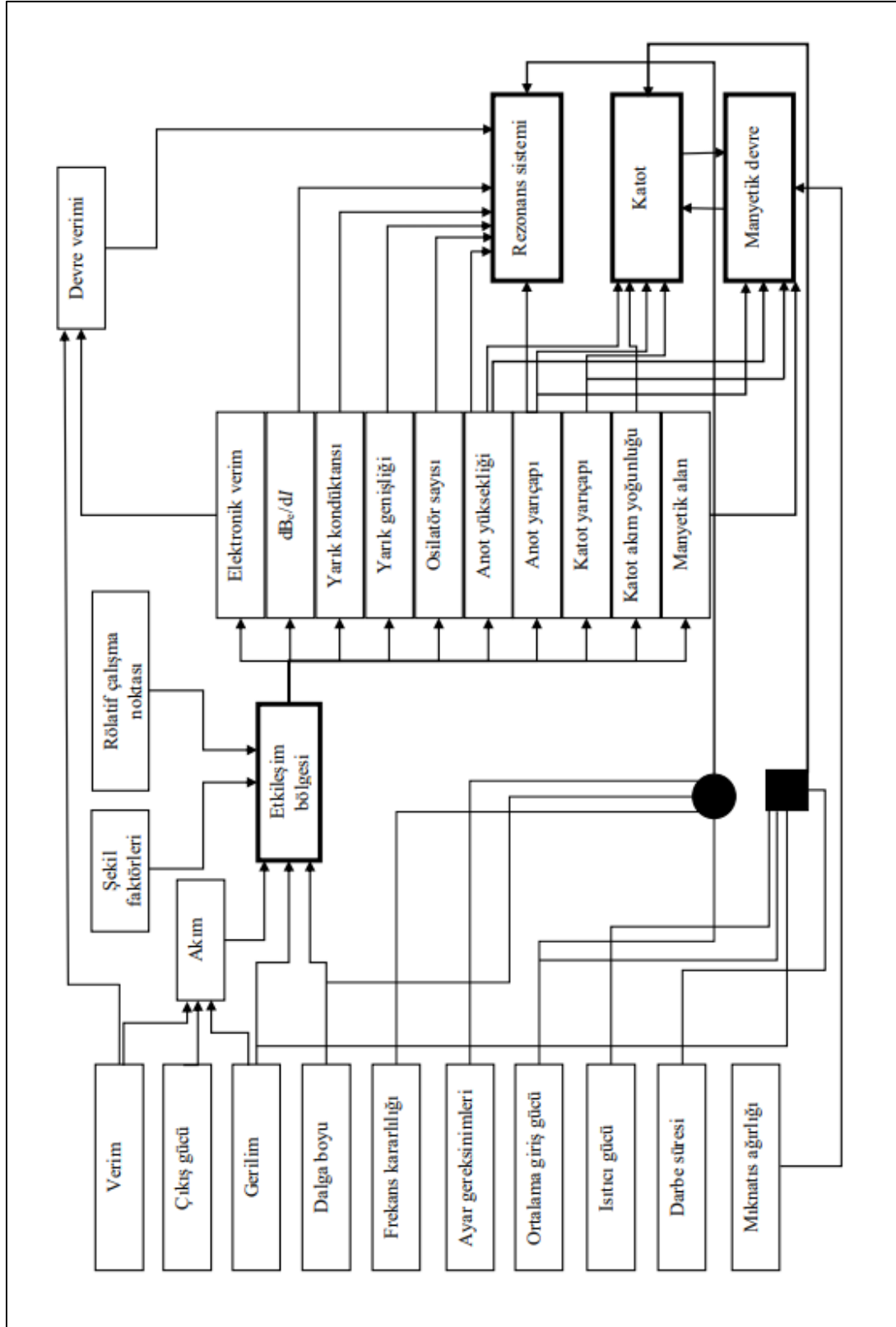
$$w = \frac{\mu\lambda}{1010} \sqrt{\frac{V}{v}} \quad (2.107)$$

$$G_L = g \left(\frac{v}{V} \right) \left(\frac{I}{i} \right) \quad (2.108)$$

$$J = 420 \frac{i}{\lambda^2} \sqrt{\frac{V}{v}} \frac{1}{N^2 \sigma} \frac{a_1}{(1-\sigma^2)^2 \left(1 + \frac{1}{\sigma} \right)} \quad (2.109)$$

$$\eta_e = \frac{p}{vi} \quad (2.110)$$

Buraya kadar anlatılan kısmı özetler mahiyette magnetron tasarımında dikkat edilmesi gereken bileşenlerle (etkileşim bölgesi, rezonans sistemi, katot ve manyetik devre) beraber bunları etkileyen parametrelerin genel bir analizi Şekil 2.12’de gösterilmiştir.



Şekil 2.12. Magnetronun genel tasarım şeması [3]



3. MATERYAL VE YÖNTEM (METODOLOJİ)

Bu tez çalışmasında hem teorik ve benzetim hem de deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan magnetronun boyutlarını belirlemek için ilk olarak çalışma frekansı belirlenmiştir. Daha sonra katot yarıçapı (r_c), anot iç yarıçapı (r_{ai}), anot yüksekliği (h), anot ve katot arasına uygulanan gerilim (V_{app}), oyuk (rezonatör) sayısı (N), anot ve katot arasındaki etkileşim bölgesine uygulanan manyetik alan (B_{app}) gibi parametreleri bulmak için bazı deneylerden elde edilen formüller kullanılmıştır [9].

$$\frac{r_c}{r_{ai}} \leq 0,5 \quad (3.1)$$

$$\frac{r_c}{r_{ai}} \approx \frac{N-4}{N+4} \quad (3.2)$$

Çalışma frekansı belirlendikten sonra Eş. 3.1'den faydalanarak uygun bir katot yarıçapı seçildikten sonra yine bu eşitliğe göre anot iç yarıçapı elde edilmiştir. Daha sonra Eş. 3.2'den bir önceki eşitlikteki oranı bozmayacak şekilde oyuk (rezonatör) sayısı belirlenmiştir. Bir sonraki adım olarak kritik manyetik alan değeri, kritik gerilim değeri, Hartree gerilim değeri ve anot ve katot arasına uygulanan gerilim değerini bulmak için aşağıdaki eşitlikler kullanılmıştır [9].

$$B_c = \frac{4\pi fm}{ne} \frac{1}{\left(1 - \frac{r_c^2}{r_{ai}^2}\right)} \quad (3.3)$$

$$V_c = \frac{e}{8m} r_{ai}^2 \left(1 - \frac{r_c^2}{r_{ai}^2}\right) B_c^2 \quad (3.4)$$

$$V_t = \left(2 \frac{B_{app}}{B_c} - 1\right) V_c \quad (3.5)$$

$$V_t < V_{app} < V_c \quad (3.6)$$

Yukarıdaki eşitliklerde ilk olarak Eş. 3.3 uygulanarak kritik manyetik alan değeri (manyetik alan kesim değeri) bulunmuştur. Daha sonra kritik gerilim değerini (Hull kesim gerilim değeri) bulmak için Eş. 3.4 kullanılmıştır. Hartree gerilim değerini bulmak içinse uygulanan

manyetik alan değeri (B_{app}) kritik manyetik alan değerinden (B_c) küçük seçilerek Eş. 3.5'den faydalanılmıştır. Kritik gerilim değeri ve Hartree gerilim değeri belirlendikten sonra uygulanan gerilim (V_{app}) bu iki değer arasında Eş. 3.6 kullanılarak seçilmiştir. Magnetronun boyutları belirlendikten sonra sonlu elemanlar metodu kullanılarak benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Benzetim çalışmalarında tasarlanan parça üzerinde öz frekans değerleri, elektrik alan ve elektron hareketi gibi parametreler incelenmiştir. Bir sonraki aşama olarak benzetim çalışmalarından elde edilen verilerle tasarlanan magnetronun üretimi gerçekleştirilip deneysel çalışmalar yapılmıştır. Deneysel çalışmalar iki aşamada gerçekleştirilmiş olup; birinci aşamada magnetronun atmosfer ortamında ürettiği elektrik alan ve güç yoğunluğu değerleri incelenmiştir. Bu değerleri ölçebilmek içinse bir elektrik alan ve güç yoğunluğu ölçüm cihazı kullanılmıştır. İkinci aşama ise vakum ortamında gerçekleştirilmiş olup vakum ortamını oluşturabilmek için bir vakum hücre tasarlanıp ürettirilmiş ve bir turbomoleküler vakum pompası yardımıyla vakum şartları sağlanmıştır. Aynı zamanda bir Langmuir sondası tasarlanarak magnetron tarafından oluşturulan plazma içerisindeki elektronların sıcaklığı ve yoğunluğu hesaplanmıştır. Deneysel çalışmalar için Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümün'de yer alan "Mikrodalga ve Elektromanyetik Dalga Laboratuvarı" kullanılmıştır.

4. BENZETİM ÇALIŞMALARI

Çalışmanın bu kısmında toplamda dört ayrı magnetron tasarımı sunulmuş ve sonuçları karşılaştırılmıştır. Öncelikli olarak magnetronların tasarım parametreleri hakkında bilgi verilmiş daha sonra benzetim çalışmalarında magnetronların öz frekans değerleri, elektrik alan, parçacık hızı ve elektron hareketleri gibi parametreleri incelenmiştir.

Magnetronun çalışma parametreleri belirlenirken ilk olarak çalışma frekansı 9 GHz, katot yarıçapı 1,5 cm olarak seçilmiştir. Çalışma frekansı ve katot yarıçapı seçildikten sonra materyal ve yöntem bölümünde verilen Eş. 3.1'den faydalanarak magnetronun anot iç yarıçapı 4,5 cm olarak belirlenmiştir. Bu aşamadan sonra Eş. 3.2 kullanılarak magnetronun oyuk sayısı 8 olarak hesaplanmıştır. Daha sonra Eş. 3.3 kullanılarak kritik manyetik alan değeri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

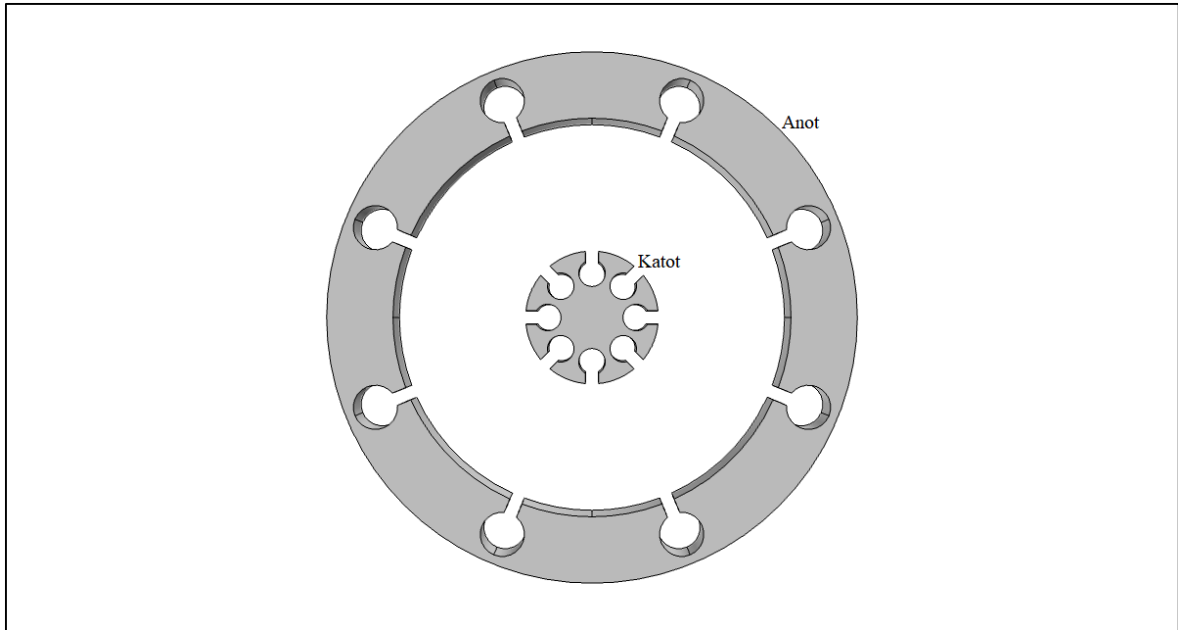
$$B_c = \frac{4\pi fm}{ne} \frac{1}{\left(1 - \frac{r_c^2}{r_{ai}^2}\right)} = \frac{4\pi \times 9 \times 10^9 \text{ Hz} \times 9,109 \times 10^{-31} \text{ kg}}{4 \times 1,602 \times 10^{-19} \text{ C}} \frac{1}{\left(1 - \frac{2,25 \times 10^{-4}}{2,025 \times 10^{-3}}\right)} \approx 0,18 T$$

Kritik manyetik alan değeri hesaplandıktan sonra Eş. 3.4 kullanılarak Hull kesim gerilim değeri (kritik gerilim değeri) yaklaşık olarak 1,28 MV olarak bulunmuştur. Hartree gerilim değeri, uygulanan manyetik alan değeri kritik manyetik alan değerinden küçük seçilerek yaklaşık olarak 1,14 MV bulunmuştur. Eş. 3.6 dikkate alınarak anot ve katot arasına uygulanan gerilim değeri Hull kesim gerilim değeri ve Hartree gerilim değeri arasında bir değer olarak seçilmiştir. Magnetronun anot ve katot yüksekliği, anot oyuk yarıçapı, anot yarı genişliği sırasıyla 3 cm, 0,5 cm ve 0,3 cm olarak seçilmiştir. Tasarlanan magnetrona ait parametreler özet olarak Çizelge 4.1'de sunulmuştur.

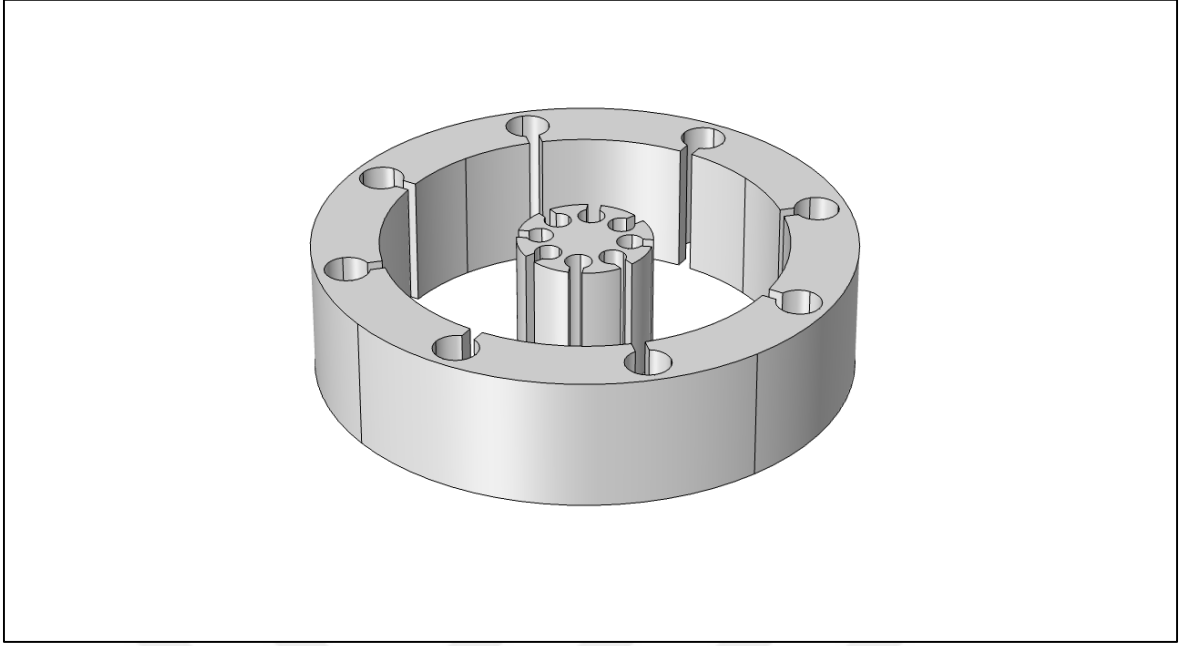
Çizelge 4.1. D1 magnetronunun tasarım parametreleri

Parametre	Değeri	Parametre	Değeri
Çalışma frekansı (f)	9 GHz	Anot oyuk yarıçapı (r_{ha})	0,5 cm
Kritik manyetik alan değeri (B_c)	0,18 Tesla	Anot yarık genişliği ($slot_{wa}$)	0,3 cm
Anot-katot arasına uygulanan gerilim (V_{app})	1,2 MV	Anot yarık uzunluğu ($slot_{la}$)	0,326 cm
Anot iç yarıçapı (r_{ai})	4,5 cm	Katot oyuk yarıçapı (r_{hc})	0,3 cm
Anot yarıçapı (r_a)	6 cm	Katot yarık genişliği ($slot_{wc}$)	0,3 cm
Katot yarıçapı (r_c)	1,5 cm	Katot yarık uzunluğu ($slot_{lc}$)	0.233 cm
Anot- katot yüksekliği	3 cm		

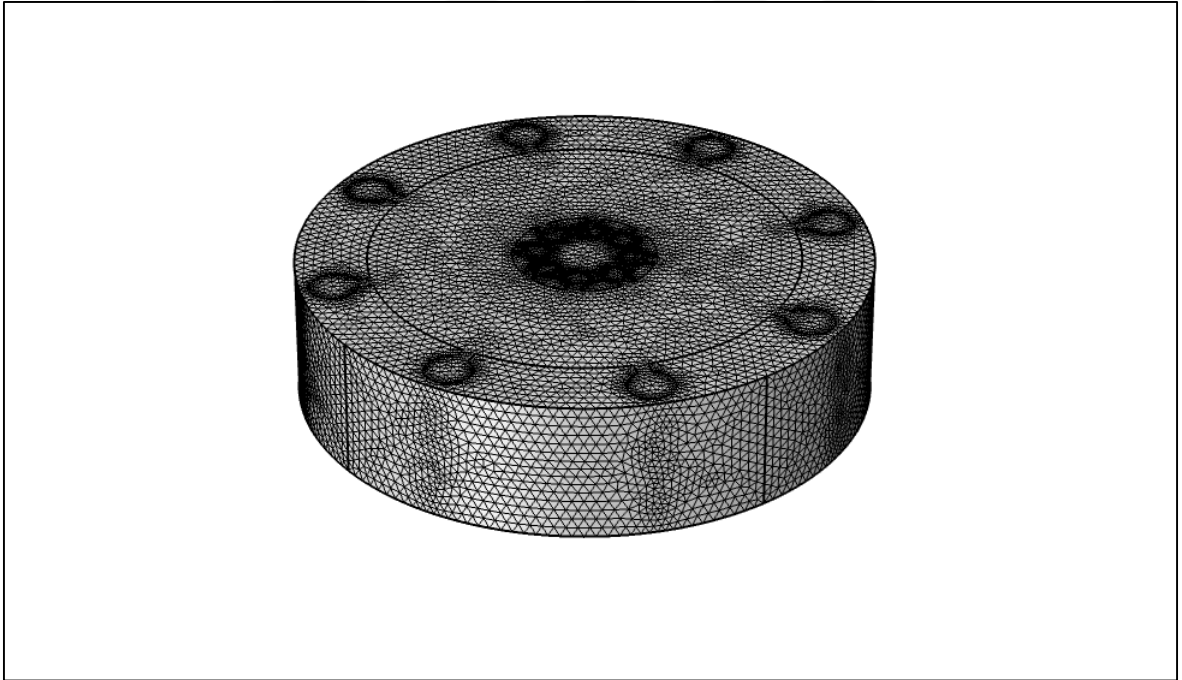
Ayrıca bu çalışmada normal katot yapısından farklı olarak silindirik katot bloğunda da anottaki gibi 8 adet oyuk kullanılmış (D1) ve katottaki oyukların yarıçapı ile yarık genişliği 0,3 cm olarak belirlenmiştir. Anot bloğundaki her bir oyuk katottaki oyukların tam ortasına gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Oyuklu katota sahip magnetrona ait tasarımının üst kesit, üç boyut ve ağ örgülü yapı (mesh) görüntüsü sırasıyla Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.1. Tasarlanan D1 magnetronun üst kesit görüntüsü

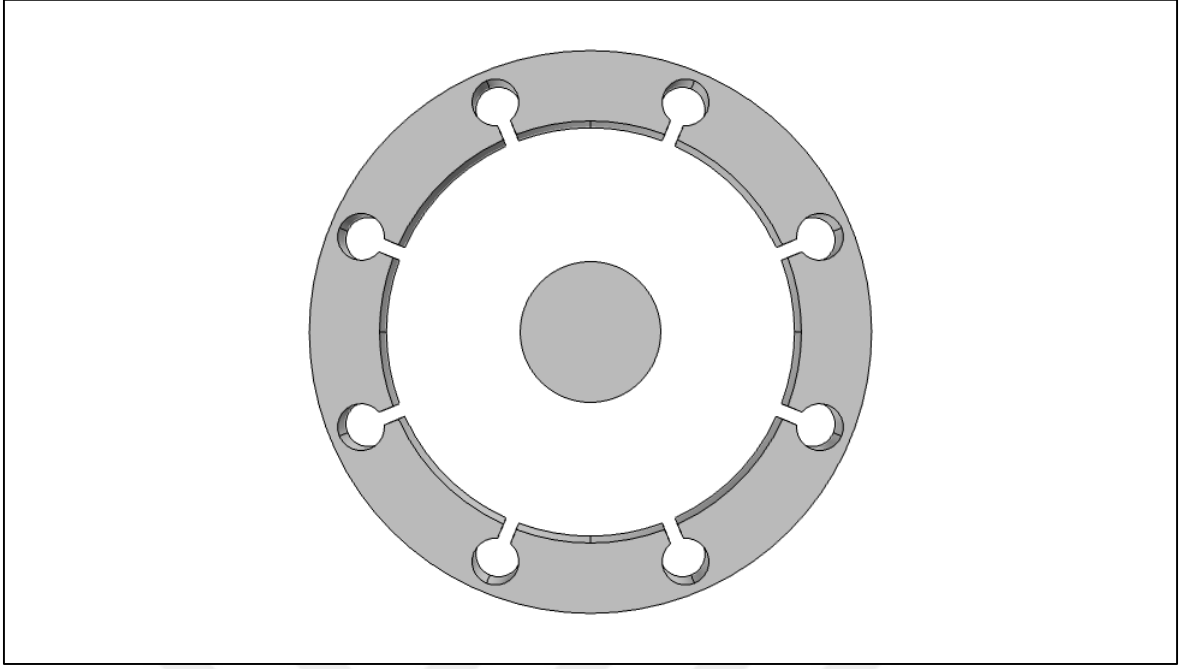


Şekil 4.2. Tasarlanan D1 magnetronun üç boyutlu görüntüsü

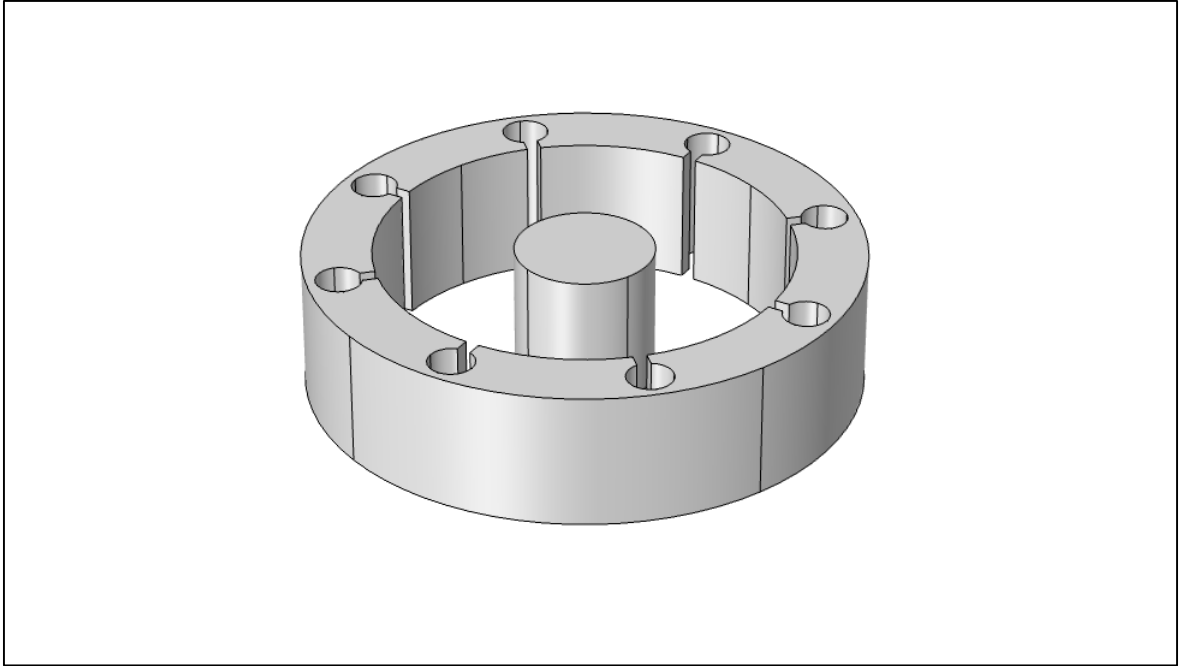


Şekil 4.3. Tasarlanan D1 magnetronun ağ örgülü (mesh) yapı görüntüsü

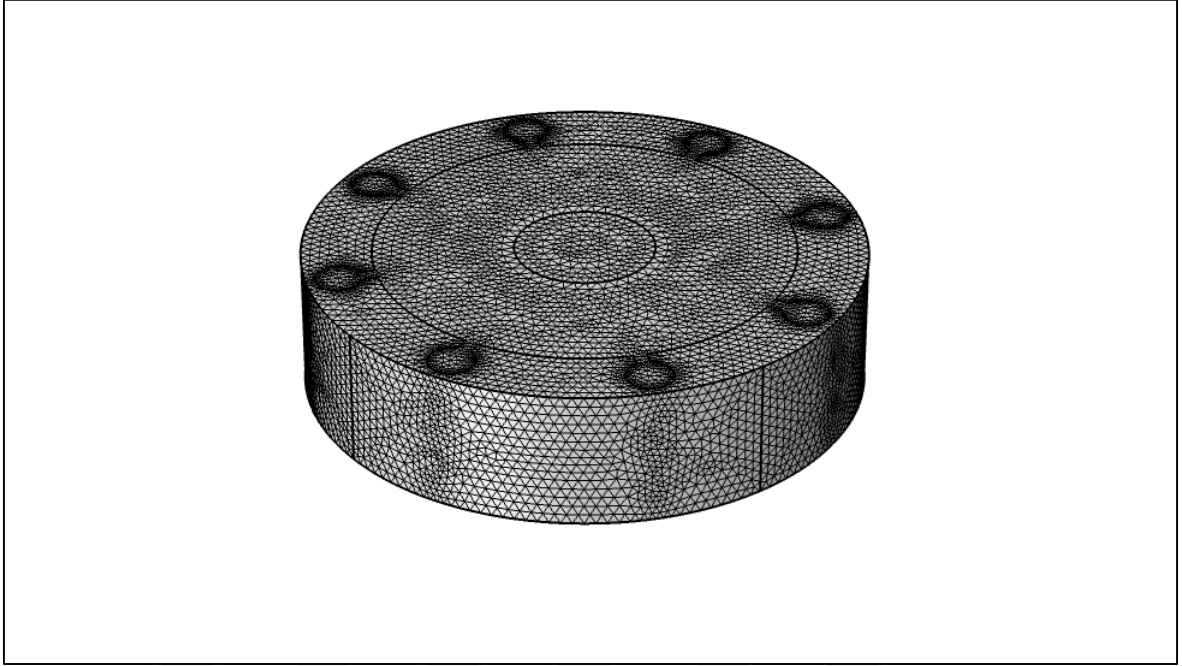
Bu çalışmada oyuklu katot yapısına sahip magnetron D1 olarak adlandırılırken katotunda oyuk bulunmayan magnetron D2 olarak adlandırılmıştır. D1 ve D2 magnetronlarına ait bütün tasarım parametreleri aynı olmakla birlikte aralarındaki fark sadece katotta oyuk bulunup bulunmamasıdır. D2 magnetronuna ait tasarımın üst kesit, üç boyut ve ağ örgülü yapı (mesh) görüntüsü sırasıyla Şekil 4.4, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6’da sunulmuştur.



Şekil 4.4. D2 magnetronunun üst kesit görüntüsü



Şekil 4.5. D2 magnetronunun üç boyutlu görüntüsü



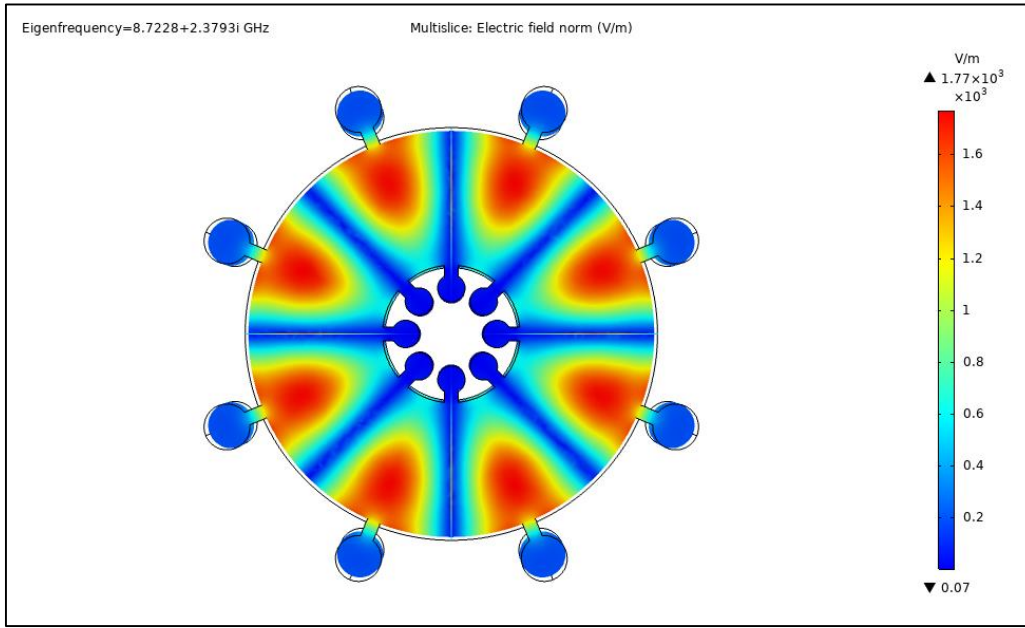
Şekil 4.6. D2 magnetronunun ağ örgülü (mesh) yapı görüntüsü

Magnetronun tasarım parametreleri hakkında bilgi verildikten sonra çalışmanın bu aşamasında benzetim çalışmalarına geçilmiştir. Benzetim çalışmalarında ilk olarak her iki tasarım için (D1 ve D2) magnetronların öz frekans değerleri, elektrik alan dağılımı ve elektrik alan değerleri öz frekans bulucu analiz (eigen-frequency analysis) gerçekleştirilerek bulunmuştur. Daha sonra ise parçacık hızı ve elektron hareketleri, elektron hareket analizi yapılarak elde edilmiştir.

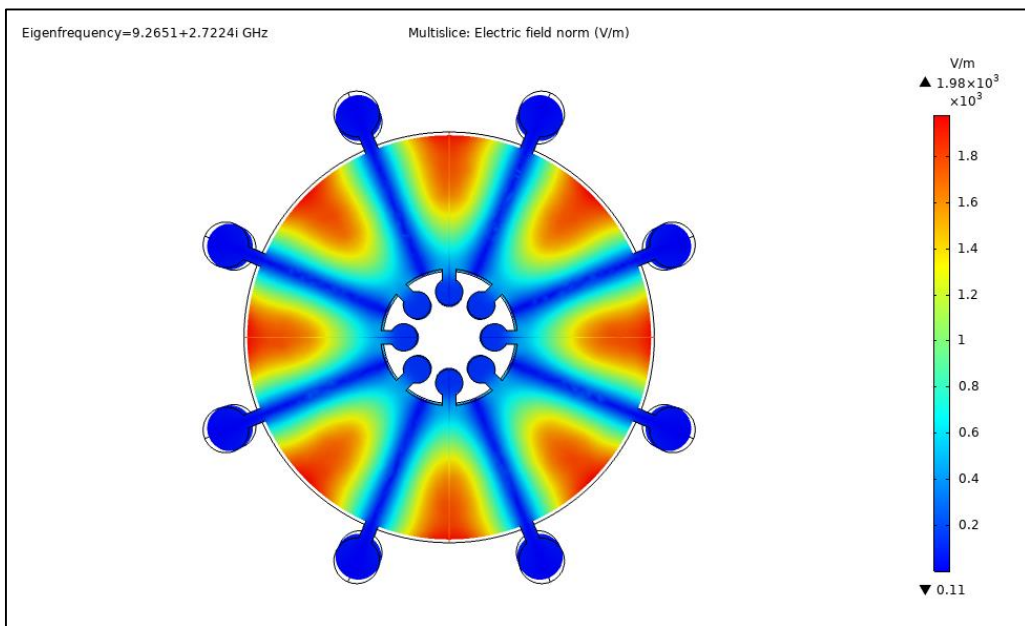
4.1. Comsol'da Öz-Frekans Analizi

Bu bölümde elektromanyetik denklemlerin 3B (üç boyutlu) sonlu elemanlar analizinden (FEA) elde edilen öz frekans değerleri sunulmuştur. Bunun için ilk önce magnetronun tüm bileşenleri ile 3B geometrisini çizmek ve tasarlamak için FEA programı kullanılmıştır. Önerilen ağ örgülü yapı (mesh) sayıları, modlar için daha iyi teorik sonuçlar elde etmek için ince bir örgü prosedürü ile artırılmıştır. D1 ve D2 yapıları ayrı ayrı analiz edilmiştir. Geometride, ilgili silindirik koordinatlar ρ , ϕ ve z değişkenleriyle ayarlanmıştır. Bu değişkenler düzlemde sırasıyla radyal, açısal ve yükseklik bileşenlerini ifade etmektedir. Malzeme kısmında bakır anot ve katot kullanılmıştır. Anot ve katot arasındaki etkileşim bölgesinde malzeme olarak 10^{-6} mbar basınç değerine sahip yüksek vakum kullanılmıştır. Ayrıca öz frekans değerleri 9 GHz civarında araştırılmıştır. Oyuklu ve oyuksuz katot

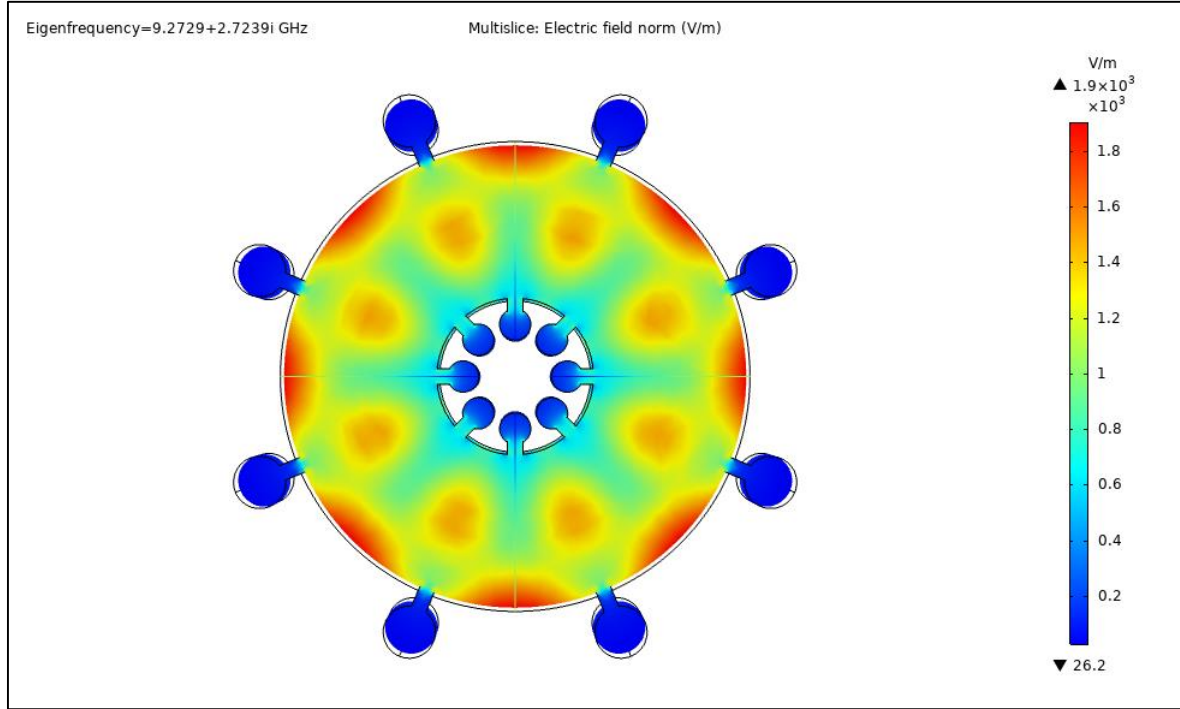
yapısına sahip magnetronların örgü (mesh) sayıları sırasıyla 152702 ve 63437'dir. Yeterli doğruluk için maksimum ve minimum eleman boyutları sırasıyla 0,42 cm ve 0,018 cm olarak ölçülmüştür. Gerçekleştirilen benzetim çalışmalarının sonuçlarına göre oyuklu katot yapısının magnetronun rezonans frekanslarını etkilediği görülmüştür. Her iki katot yapısına sahip (oyuklu ve oyuksuz) magnetronların öz frekans değerleri benzer elektrik alan modellerinde olmak üzere aşağıdaki şekillerde sunulmuştur.



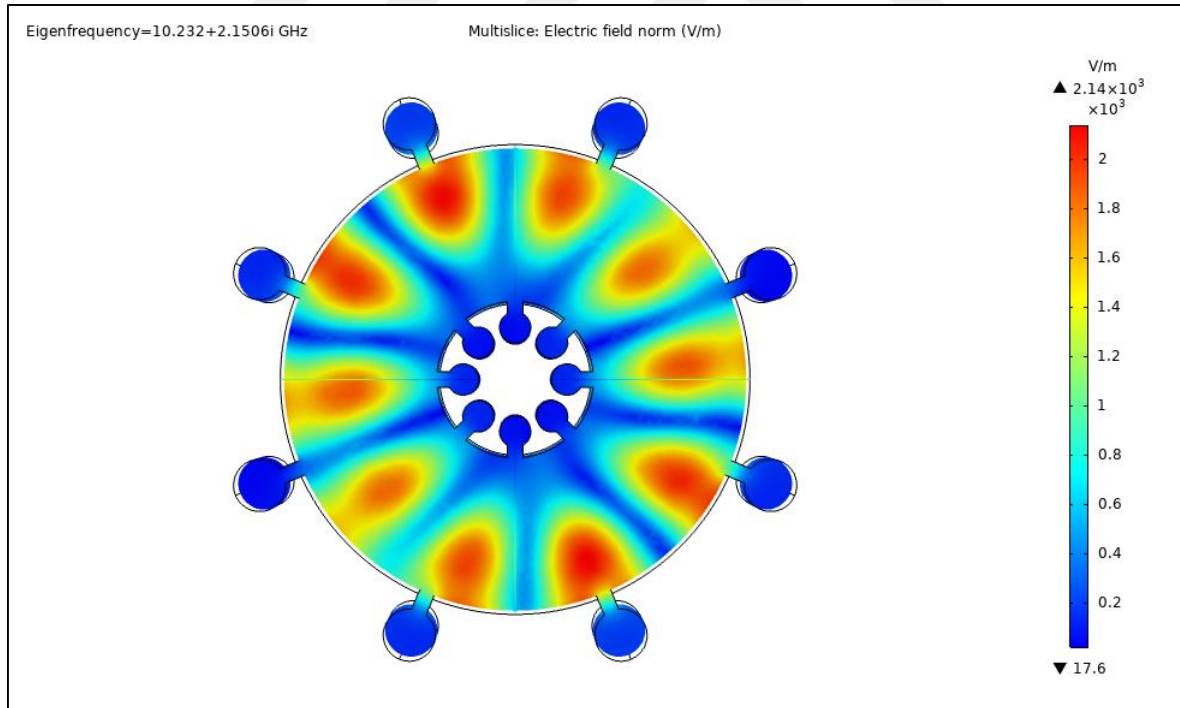
Şekil 4.7. D1 magnetronunun 8,7228 GHz frekansta elektrik alan değeri ve dağılımı



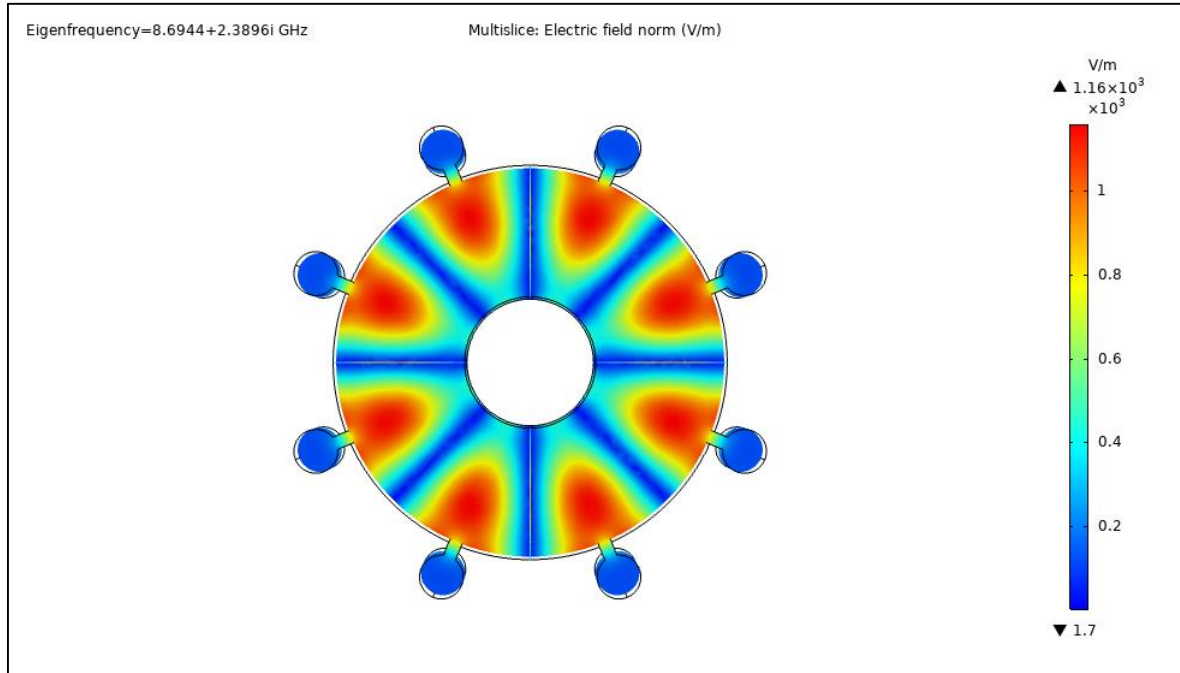
Şekil 4.8. D1 magnetronunun 9,2651 GHz frekansta elektrik alan değeri ve dağılımı



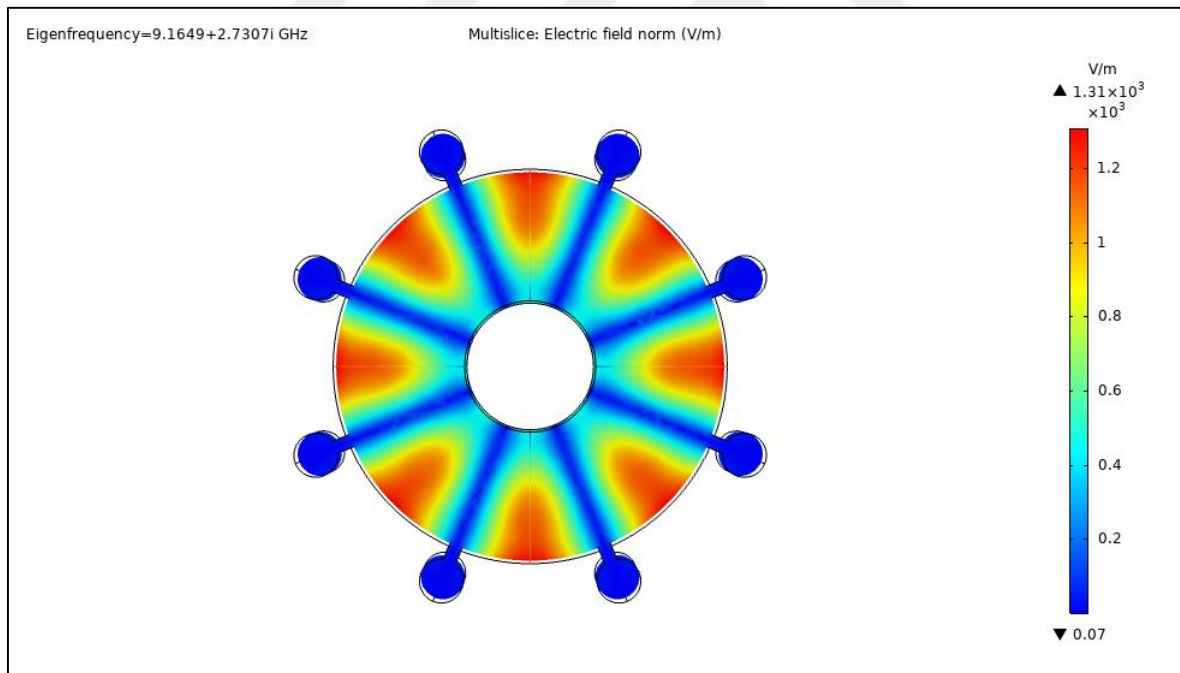
Şekil 4.9. D1 magnetronunun 9,2729 GHz frekansta elektrik alan değeri ve dağılımı



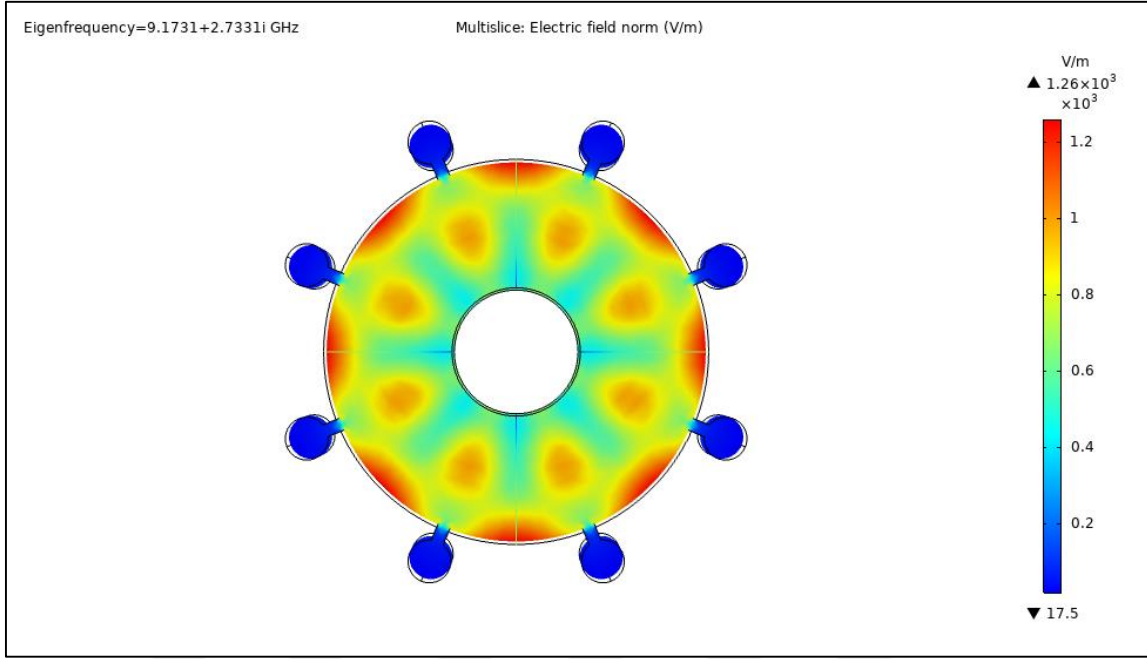
Şekil 4.10. D1 magnetronunun 10,232 GHz frekansta elektrik alan değeri ve dağılımı



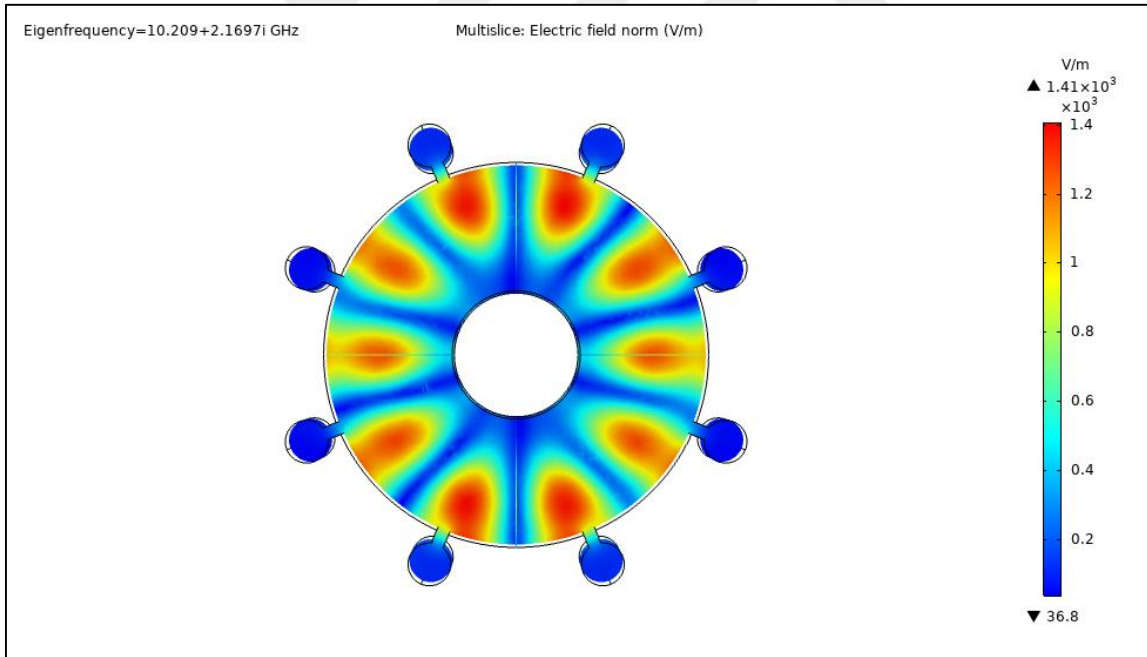
Şekil 4.11. D2 magnetronunun 8,6944 GHz frekansta elektrik alan değeri ve dağılımı



Şekil 4.12. D2 magnetronunun 9,1649 GHz frekansta elektrik alan değeri ve dağılımı



Şekil 4.13. D2 magnetronunun 9,1731 GHz frekansta elektrik alan değeri ve dağılımı



Şekil 4.14. D2 magnetronunun 10,209 GHz frekansta elektrik alan değeri ve dağılımı

Şekil 4.7 incelendiğinde minimum elektrik alan kuvveti D1 magnetronu için katot oyuklarında meydana gelmektedir ve radyal yönde magnetronun yan yüzeylerine doğru uzanmaktadır. Şekil 4.11'den aynı davranış D2 magnetronunun katot yüzeyinde de meydana gelmektedir. Katottan koparılan elektronlar, manyetik alan nedeniyle açısall yönde ve negatif potansiyel nedeniyle de topraklanan anotun iç yüzeyine doğru yönlendirilmektedir. Daha

büyük frekanslardaki elektrik alan çözümleri açısal yönde 22.5 derece dönmektedir bu nedenle minimum ve maksimum alan değerleri Şekil 4.8 ve Şekil 4.12’de görüldüğü gibi değişmektedir. Şekil 4.7 ve Şekil 4.14 arasındaki bütün sonuçlar incelendiğinde katota oyuk eklemek desen yönlerinde herhangi bir değişikliğe yol açmazken Çizelge 4.2’den de görüldüğü gibi frekans değerlerini etkilemektedir.

Çizelge 4.2. D1 ve D2 magnetronlarının öz frekans değerleri

Desen Numarası	Magnetron D1	Magnetron D2
1	8,7228 GHz	8,6944 GHz
2	9,2651 GHz	9,1649 GHz
3	9,2729 GHz	9,1731 GHz
4	10,232 GHz	10,209 GHz

D1 ve D2 magnetronlarının sahip olduğu elektrik alan değerleri incelendiğinde, D1 magnetronu için Şekil 4.7, Şekil 4.8, Şekil 4.9 ve Şekil 4.10 sırasıyla $1,77 \times 10^3$ V/m, $1,98 \times 10^3$ V/m, $1,90 \times 10^3$ V/m ve $2,14 \times 10^3$ V/m maksimum elektrik alan değerlerine sahiptir. D2 magnetronu için Şekil 4.11, Şekil 4.12, Şekil 4.13 ve Şekil 4.14 sırasıyla $1,16 \times 10^3$ V/m, $1,31 \times 10^3$ V/m, $1,26 \times 10^3$ V/m ve $1,41 \times 10^3$ V/m maksimum elektrik alan değerine sahiptir. Bu değerlerden de anlaşılacağı üzere aynı desen numaraları için oyuklu katot yapısına sahip magnetronun maksimum elektrik alan değerleri daha büyüktür. Başka bir ifadeyle katota oyuk eklemek magnetronun elektrik alan değerinin artmasına neden olmuştur. Bu da yüklerin (elektronların) hızının artmasına neden olacaktır. Her iki magnetrona ait farklı frekans değerlerindeki (modlardaki) elektrik alan değerleri Çizelge 4.3’te özet olarak sunulmuştur.

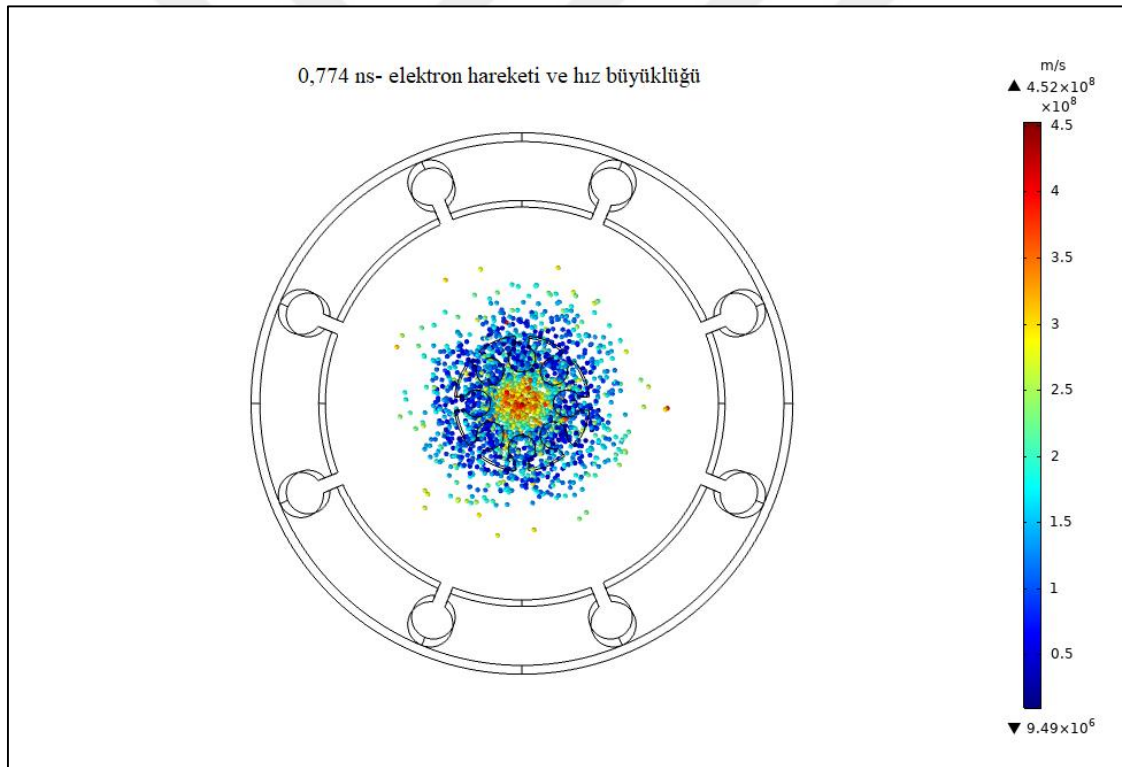
Çizelge 4.3. D1 ve D2 magnetronlarının maksimum elektrik alan değerleri

Desen Numarası	Magnetron D1	Magnetron D2
1	1,77 kV/m	1,16 kV/m
2	1,98 kV/m	1,31 kV/m
3	1,90 kV/m	1,26 kV/m
4	2,14 kV/m	1,41 kV/m

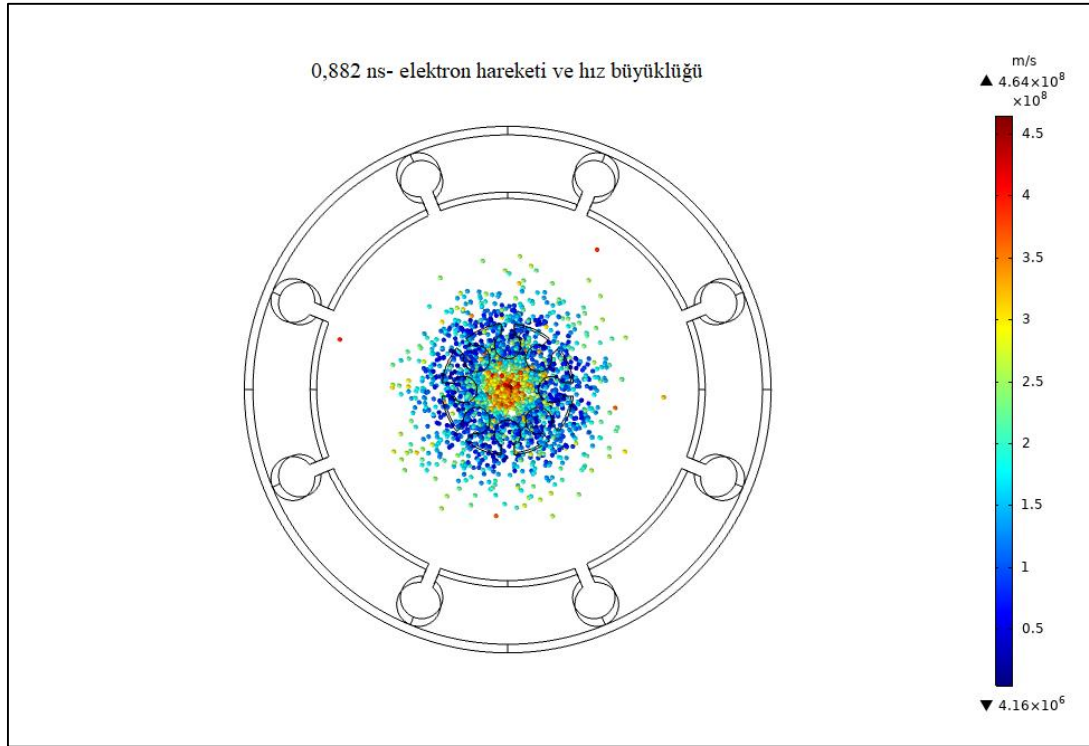
4.2. Elektron Hareket Analizi

Bu bölümde elektron hareketlerini gözlemlemek için yüklü tanecik hareketi çalışması gerçekleştirilmiştir. Bunun içinde başlangıç ve bitiş zamanı 0 ve 2,16 ns ($t=0$, $t=2,16$ ns)

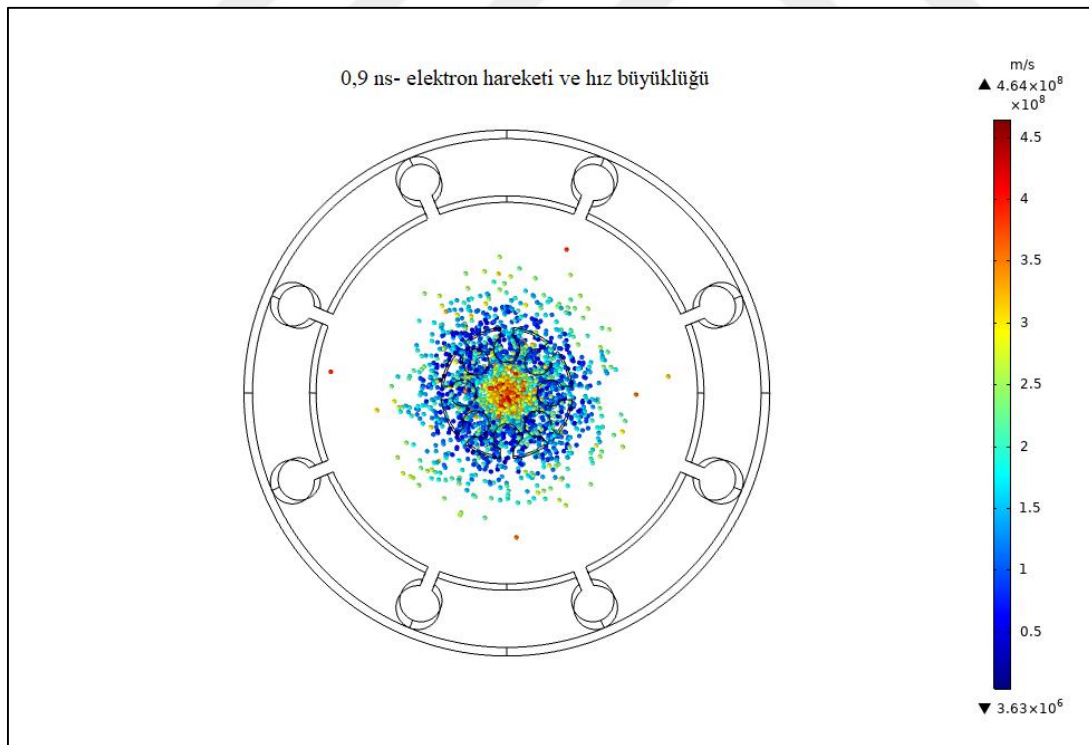
olmak üzere zamana bağımlı analiz yürütülmüştür. Daha öncede belirtildiği gibi elektronlar elektrik alan tarafından hızlandırılırken manyetik alan etkisiyle sapmaya uğramaktadır. Anot ve katot arasındaki gerilim 1,2 MV olarak belirlenmiş ve elektrik alan 40 MV/m olarak ayarlanmıştır. Ayrıca uygulanan manyetik alan değeri z yönünde 0,099 Tesla olarak seçilmiştir. Bu analiz için yüksek ağ örgülü yapı kullanılmıştır. D1 ve D2 magnetronları için toplam örgü (mesh) sayısı sırasıyla 1103411 ve 651821'dir. Maksimum ve minimum eleman boyutları sırasıyla 0,24 cm ve 0,0024 cm olarak ayarlanmıştır. Benzetim çalışmalarının sonuçlarına göre D1 magnetronunun maksimum elektron hızı $5,36 \times 10^8$ m/s, D2 magnetronunun maksimum elektron hızı $4,58 \times 10^8$ m/s olarak bulunmuştur. D1 magnetronuna ait farklı zamanlardaki elektron hareketleri ve hız büyüklükleri aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir.



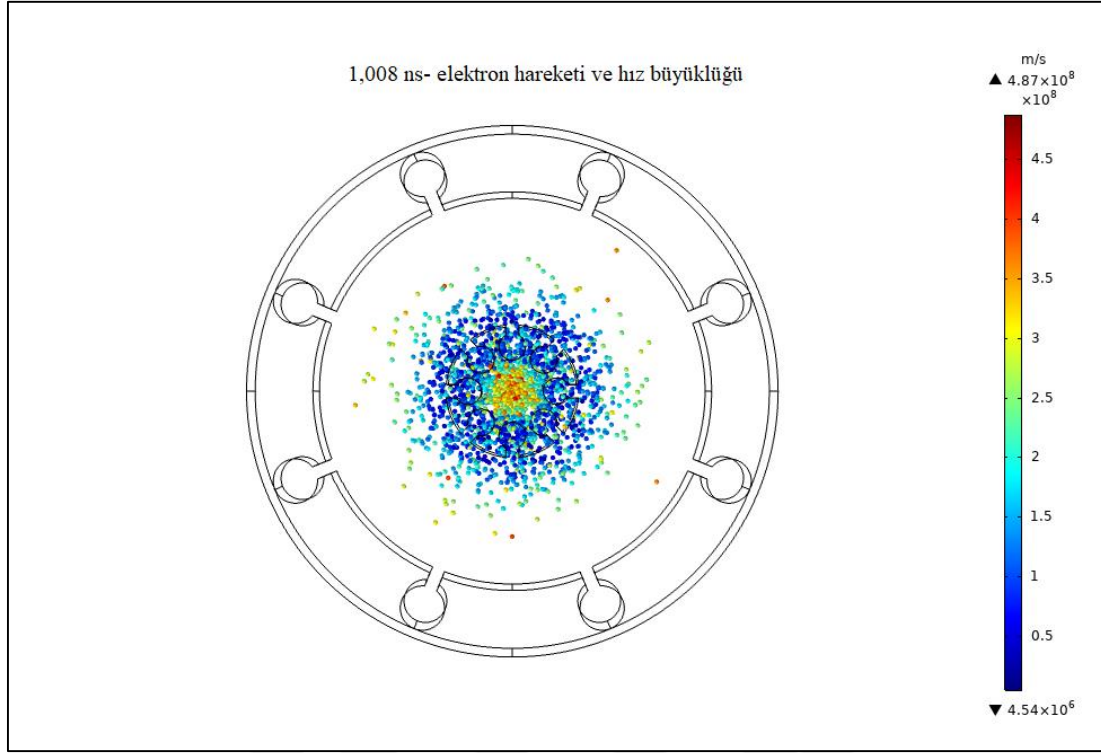
Şekil 4.15. D1 magnetronunun 0,774 ns'deki elektron hareketi ve hız büyüklüğü



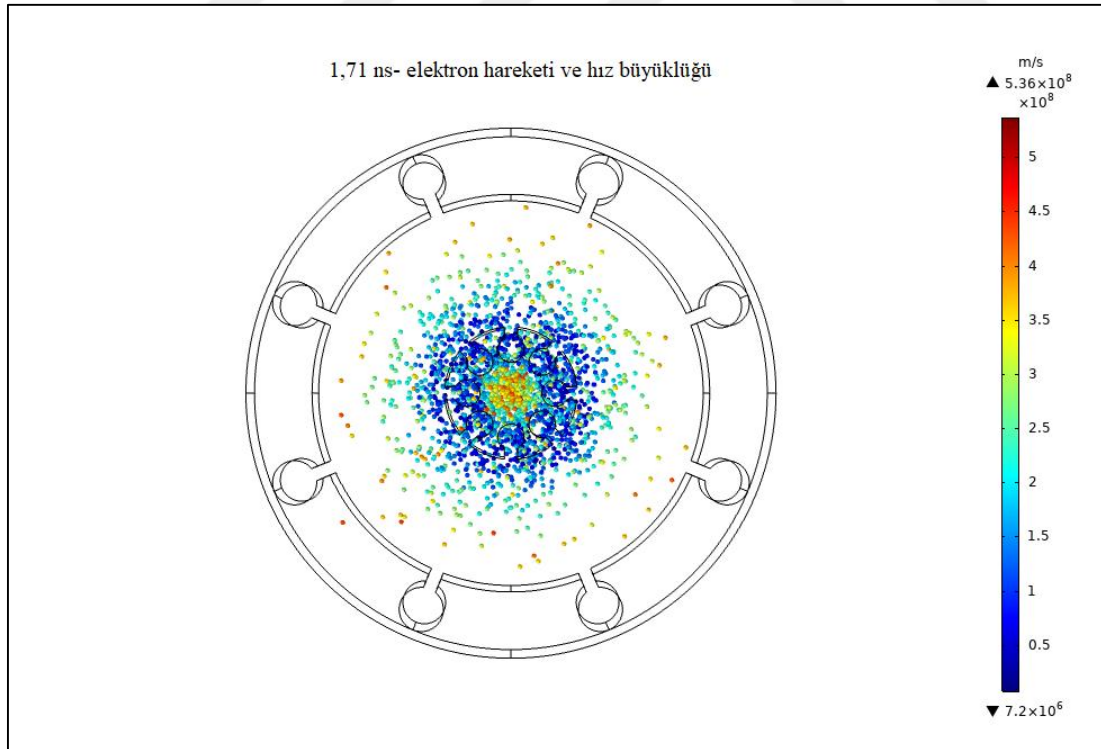
Şekil 4.16. D1 magnetronunun 0,882 ns'deki elektron hareketi ve hız büyüklüğü



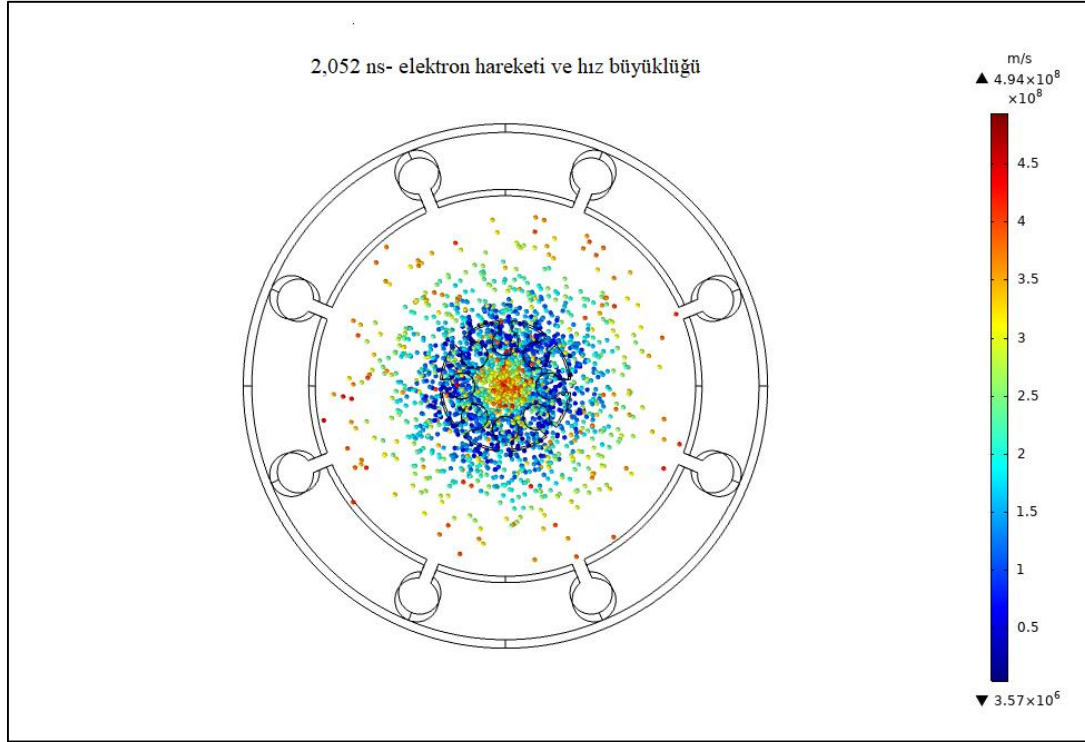
Şekil 4.17. D1 magnetronunun 0,9 ns'deki elektron hareketi ve hız büyüklüğü



Şekil 4.18. D1 magnetronunun 1,008 ns'deki elektron hareketi ve hız büyüklüğü

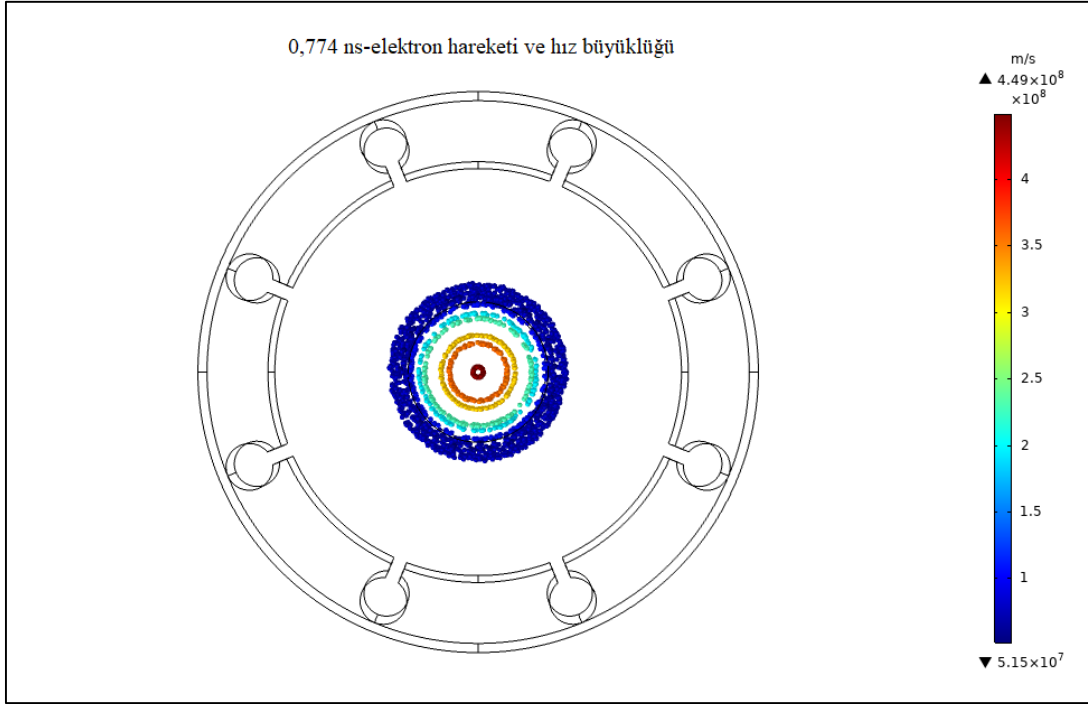


Şekil 4.19. D1 magnetronunun 1,71 ns'deki elektron hareketi ve hız büyüklüğü

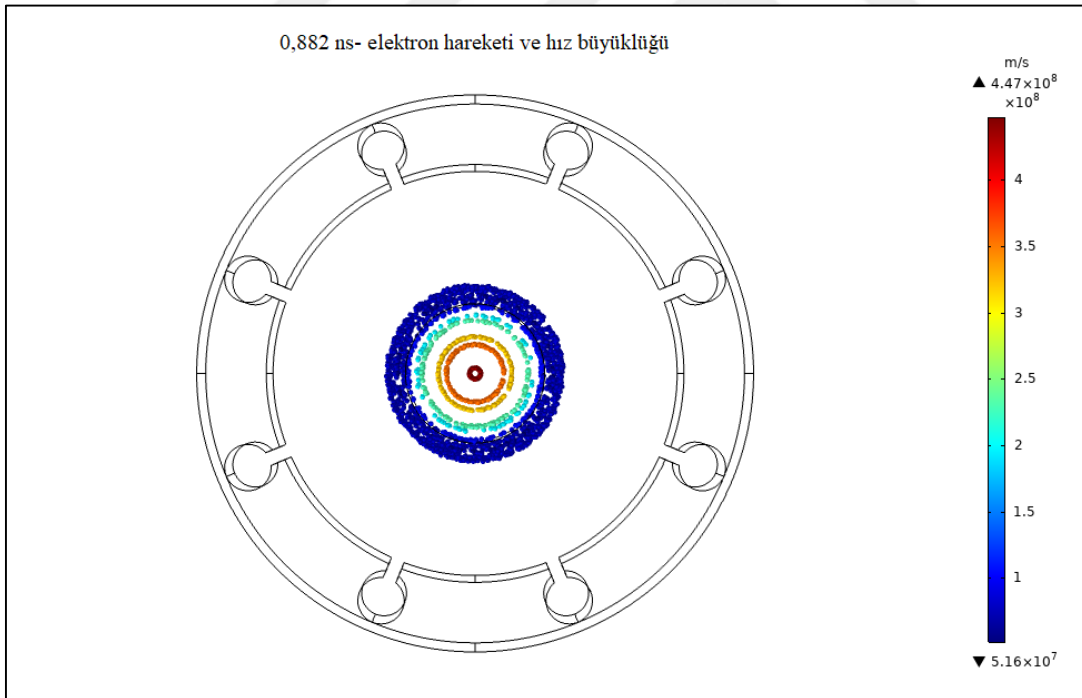


Şekil 4.20. D1 magnetronunun 2,052 ns'deki elektron hareketi ve hız büyüklüğü

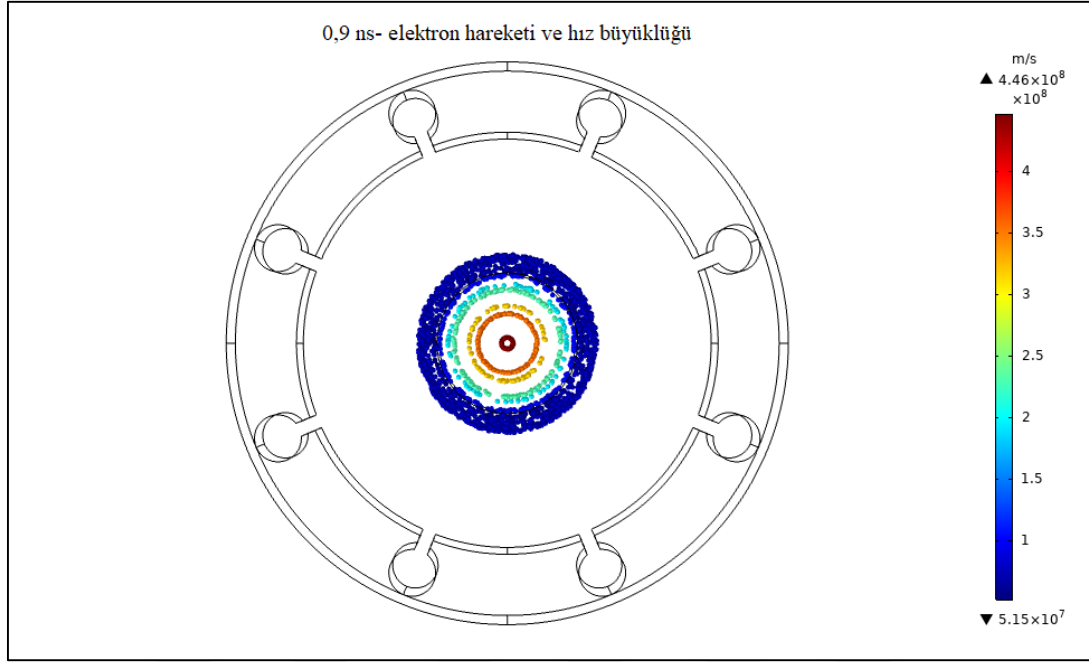
Benzetim çalışmalarının sonuçlarına göre oyuklu katot yapısına sahip D1 magnetronunun daha büyük elektrik alan değerlerinden dolayı elektronların hızının artmasına neden olduğu gözlemlenmiştir. D2 magnetronunda ise daha düşük elektrik alan değerlerinden dolayı elektronlar daha kompakt davranmaktadır ve çoğunlukla belirli bir rotasyonla katot etrafında birikmektedir. D1 magnetronunda ise elektronlar hem eksen etrafında dönerken hem de magnetronun yan yüzeylerine doğru hareket etmektedir. D2 magnetronuna ait farklı zamanlardaki elektron hareketleri ve hız büyüklükleri aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir.



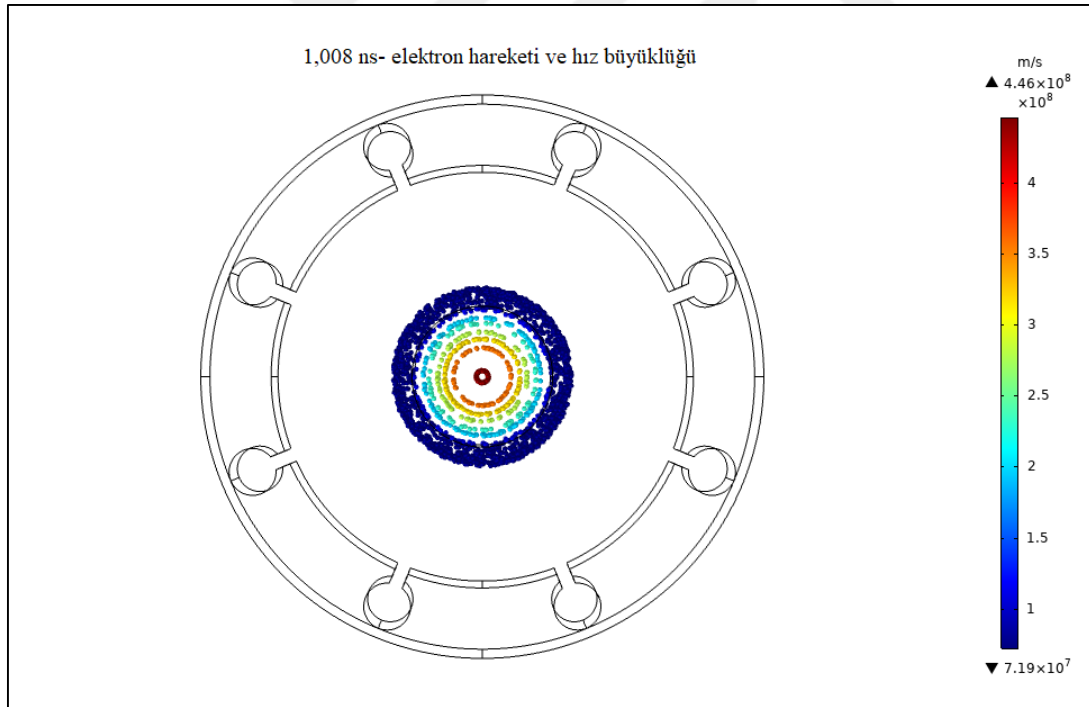
Şekil 4.21. D2 magnetronunun 0,774 ns'deki elektron hareketi ve hız büyüklüğü



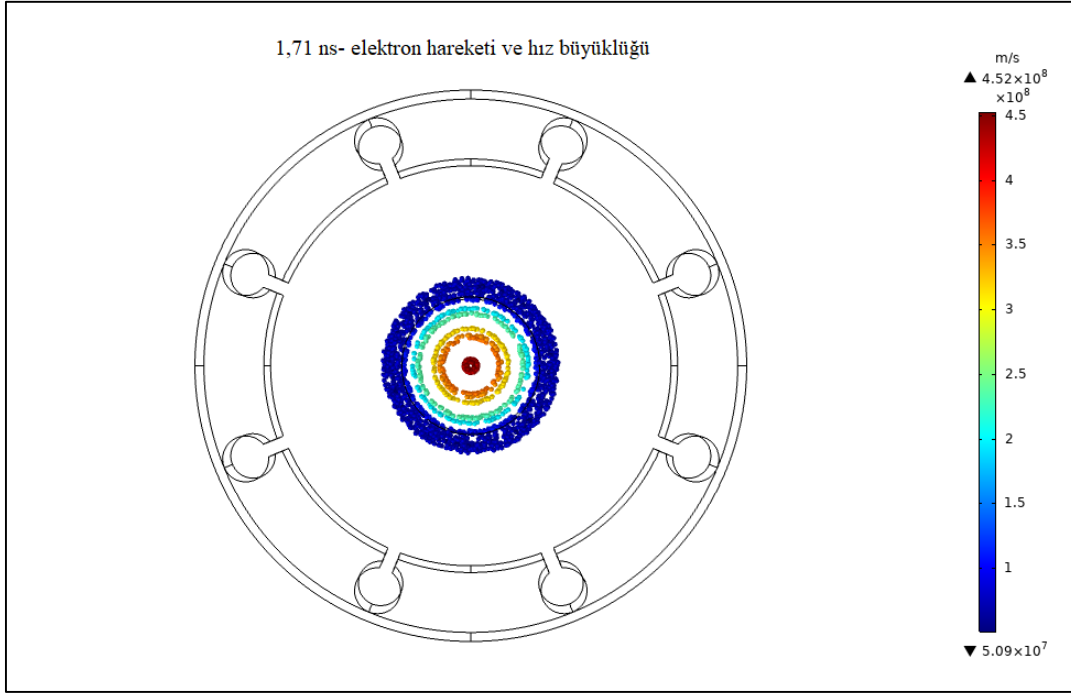
Şekil 4.22. D2 magnetronunun 0,882 ns'deki elektron hareketi ve hız büyüklüğü



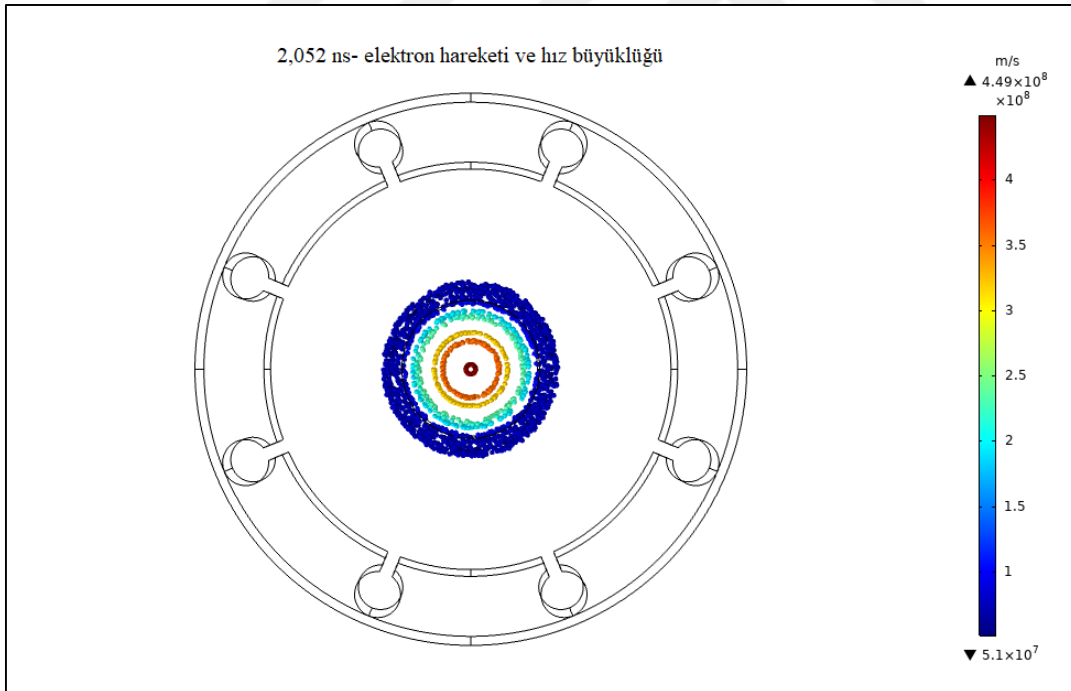
Şekil 4.23. D2 magnetronunun 0,9 ns'deki elektron hareketi ve hız büyüklüğü



Şekil 4.24. D2 magnetronunun 1,008 ns'deki elektron hareketi ve hız büyüklüğü



Şekil 4.25. D2 magnetronunun 1,71 ns'deki elektron hareketi ve hız büyüklüğü



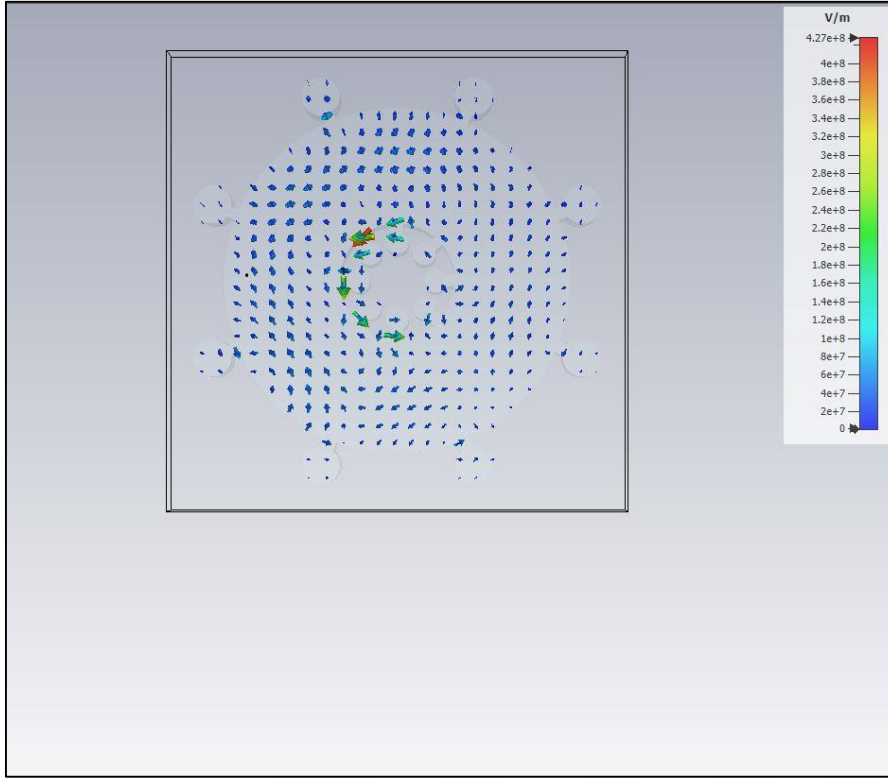
Şekil 4.26. D2 magnetronunun 2,052 ns'deki elektron hareketi ve hız büyüklüğü

Magnetronların benzetim çalışmaları için birden fazla benzetim programından faydalanılabilmektedir. Çalışmanın bundan sonraki kısmında kendi içerisinde doğrudan magnetron seçeneği barındırdığı için ikinci bir benzetim programıyla devam edilecektir. Böylelikle daha güvenilir sonuçların elde edileceği düşünülmektedir.

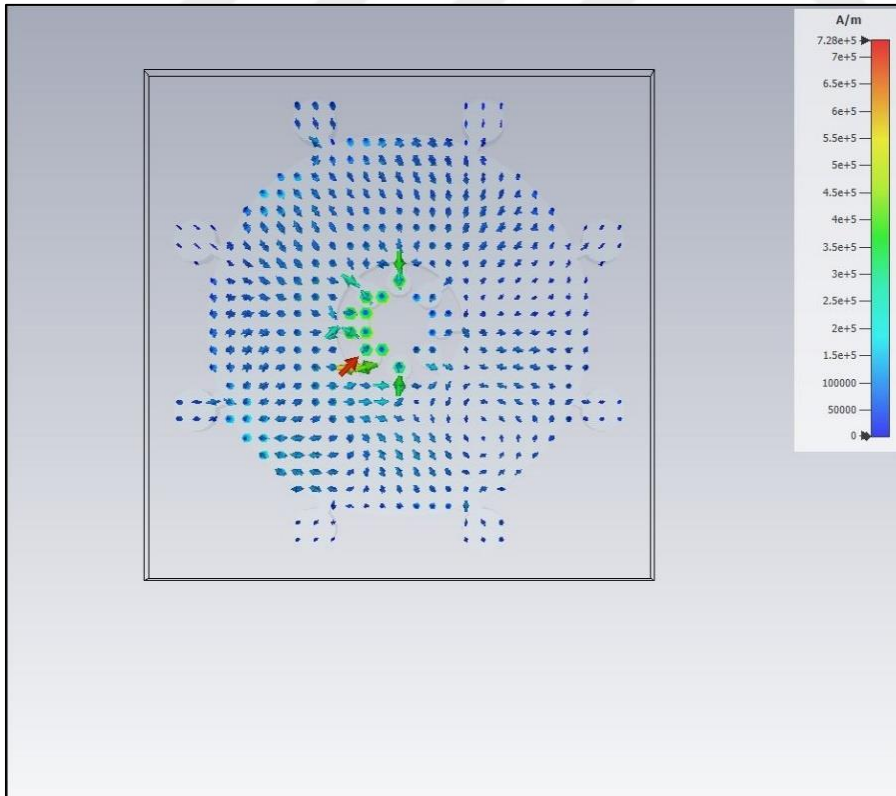
Birinci benzetim programında olduğu gibi ikinci benzetim programında da öz frekans (öz-mod) analizi ve parçacık izleme analizi yapılmıştır. Ayrıca alan probu yardımıyla magnetron içerisindeki zamana ve frekansa bağlı olarak elektrik alan değerleri incelenmiştir.

4.3. Cst'de Öz-Frekans Analizi

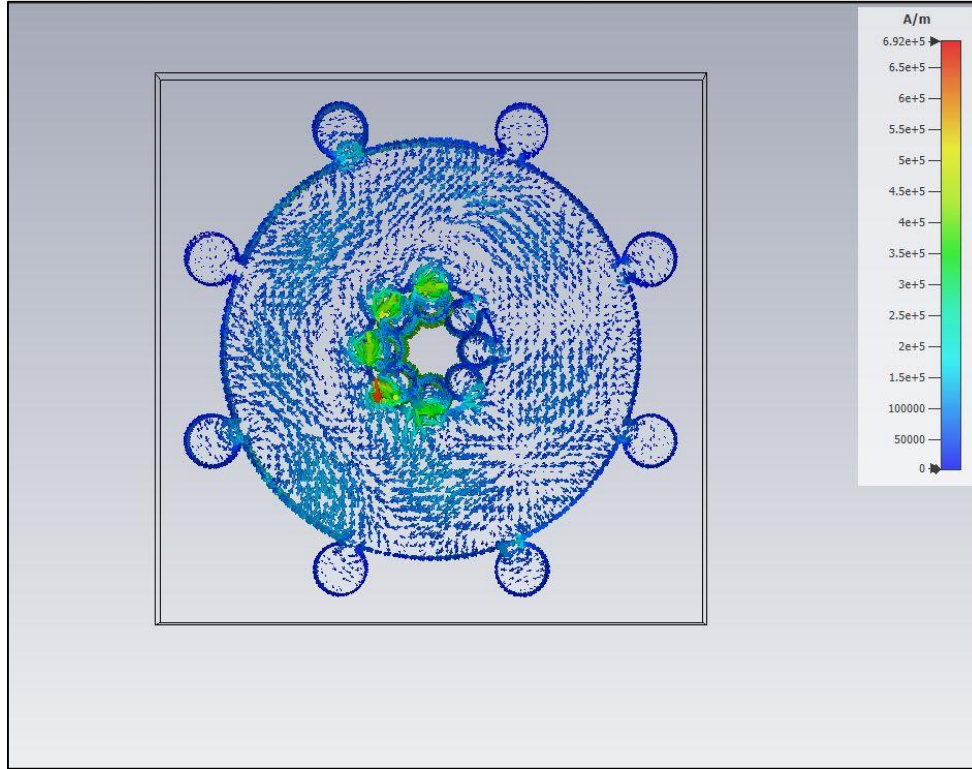
Birinci benzetim programında olduğu gibi ikinci benzetim programının bu kısmında magnetronun rezonans (tınlaşım) frekansları ve bu frekanslara ait modlarla birlikte elektromanyetik alan desenleri incelenmiştir. Öncelikli olarak D1 ve D2 magnetronlarına ait boyut verileri kullanılarak magnetronların 3B çizimleri gerçekleştirilmiştir. Birinci benzetim programından farklı olarak anot ve katot için kullanılan malzeme bakır yerine PEC (süper elektriksel iletkenliğe sahip malzeme) olarak seçilmiştir. Arka plan malzeme olarak ta PEC malzeme seçilmiş ve anot-katot arası vakum ile doldurulmuştur. Sınır koşul olarak bütün yönlerde (x, y, z) teğetsel elektriksel alan $E_t=0$ olarak ayarlanmıştır. Çalışma frekansı daha önce 9 GHz olarak belirlendiği için frekans aralığı 8-12 GHz olarak düzenlenmiştir. Ağ örgülü yapı olarak düzgün altı yüzlü yapı kullanılmış olup dalga boyu başına hücre sayısı 15 olarak ayarlanmıştır. D1 ve D2 magnetronlarının sahip olduğu toplam ağ örgü (mesh) sayısı sırasıyla 760000 ve 575244'tür. Ayrıca D1 magnetronunun sahip olduğu en küçük ve en büyük hücre boyutları 0,0071 cm ve 0,15 cm iken D2 magnetronunun sahip olduğu en küçük ve en büyük hücre boyutları 0,0100 cm ve 0,15 cm'dir. Öz-mod analizini başlatmak için çözücü tipi olarak AKS seçilmiştir (diğer çözücü tipi JDM'dir). Belirlenen frekans aralığında bulunan D1 ve D2 magnetronlarına ait mod sayısı sırasıyla 5 ve 4'tür. Bu modlara ait elektrik alan, manyetik alan dağılımları ve yüzey akımlarına ait veriler aşağıdaki şekillerde sunulmuştur.



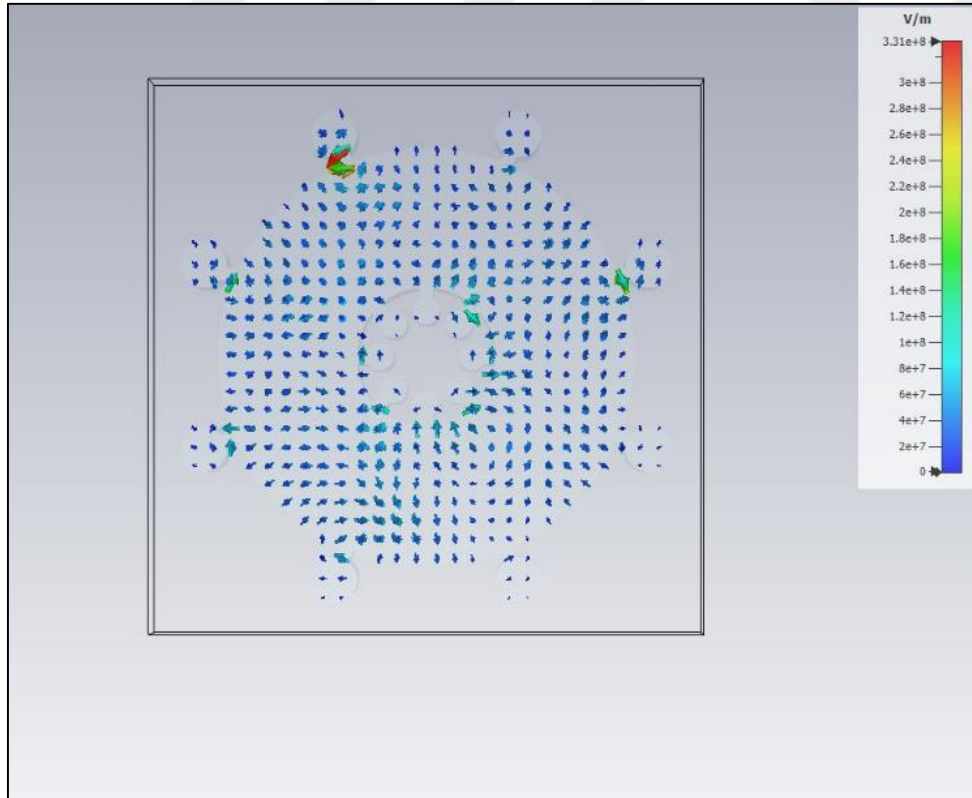
Şekil 4.27. D1 magnetronunun 8,512 GHz’deki (mod 1) elektrik alan dağılımı



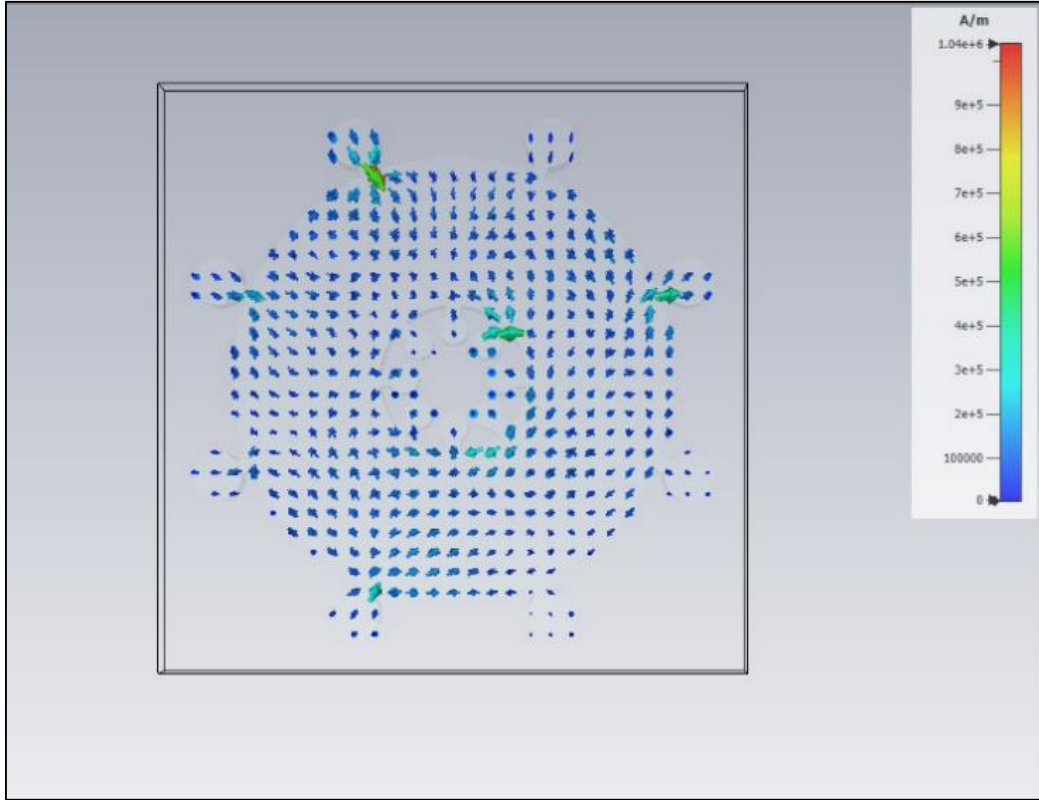
Şekil 4.28. D1 magnetronunun 8,512 GHz’deki (mod 1) manyetik alan dağılımı



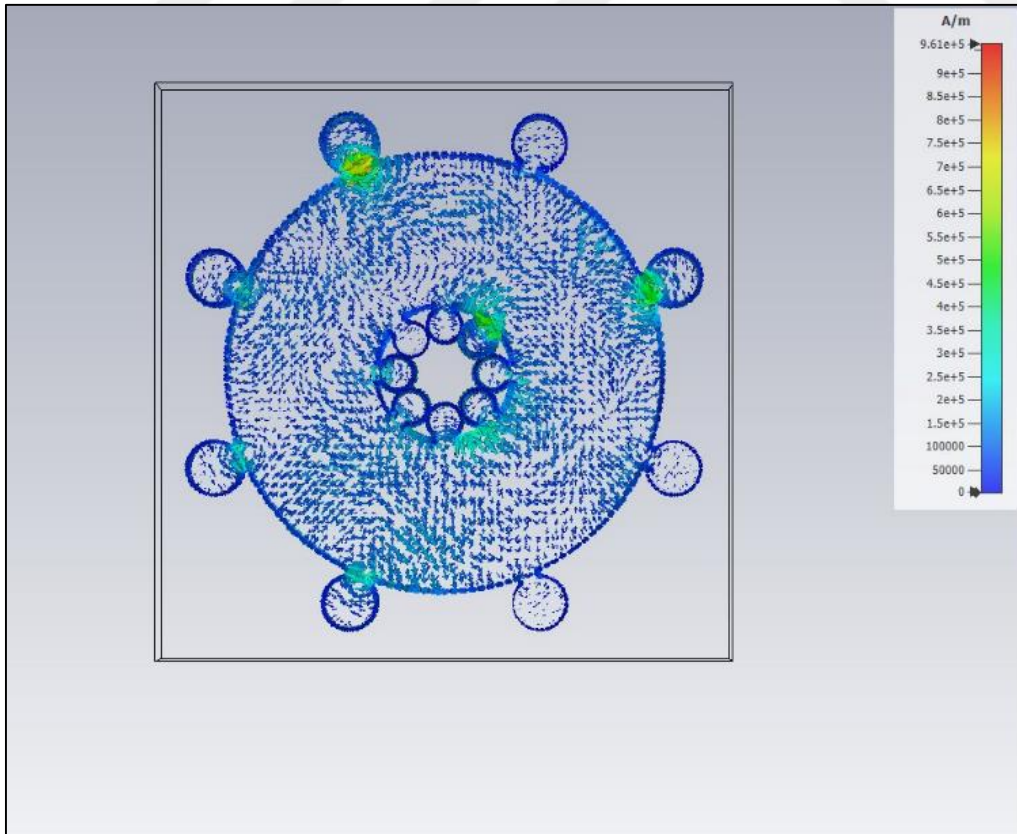
Şekil 4.29. D1 magnetronunun 8,512 GHz'deki (mod 1) yüzey akımı



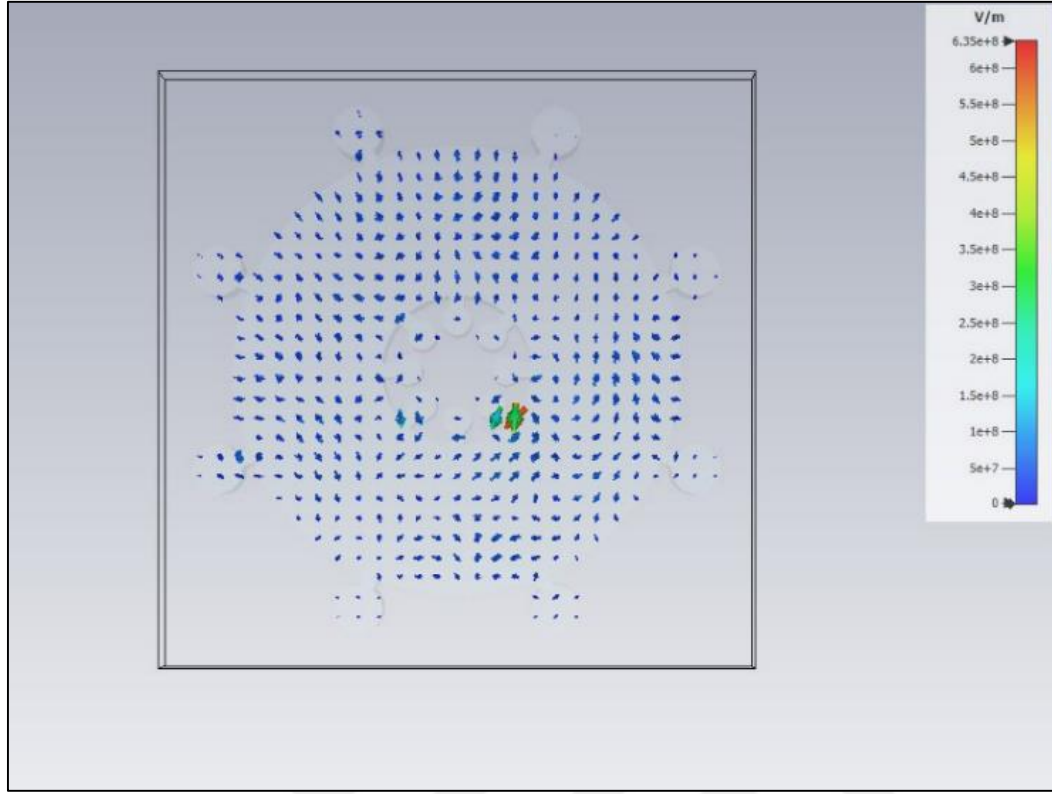
Şekil 4.30. D1 magnetronunun 9,368 GHz'deki (mod 2) elektrik alan dağılımı



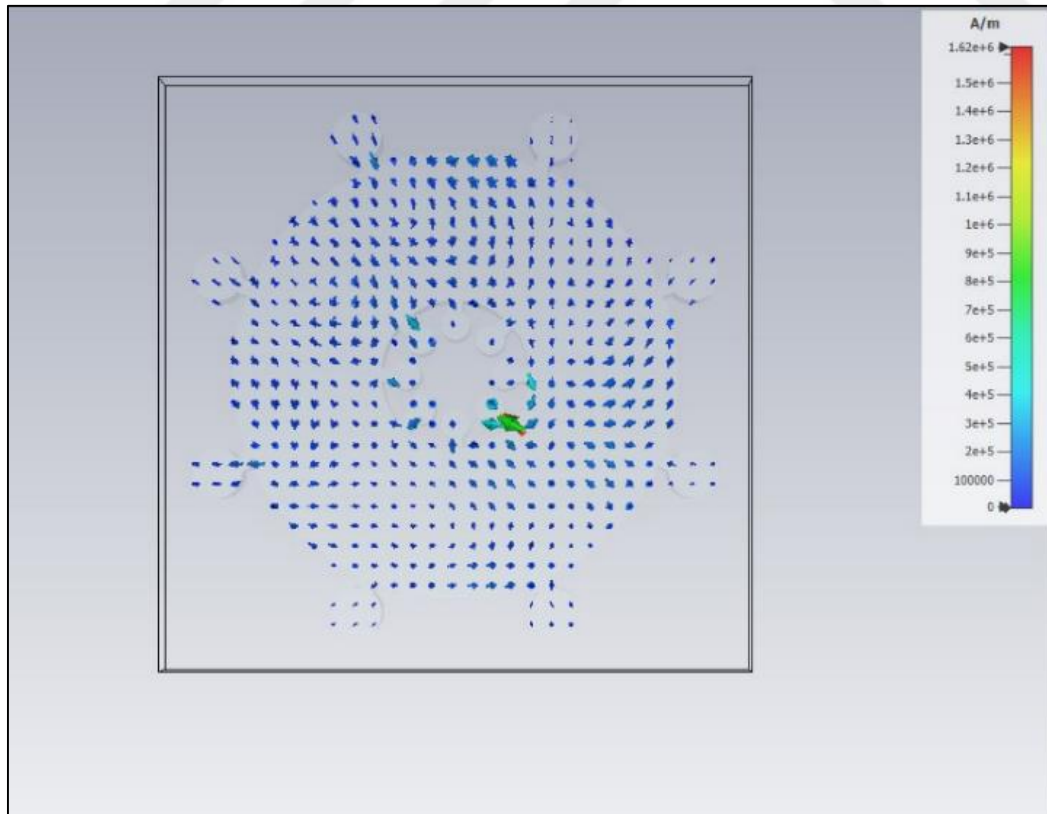
Şekil 4.31. D1 magnetronunun 9,368 GHz'deki (mod 2) manyetik alan dağılımı



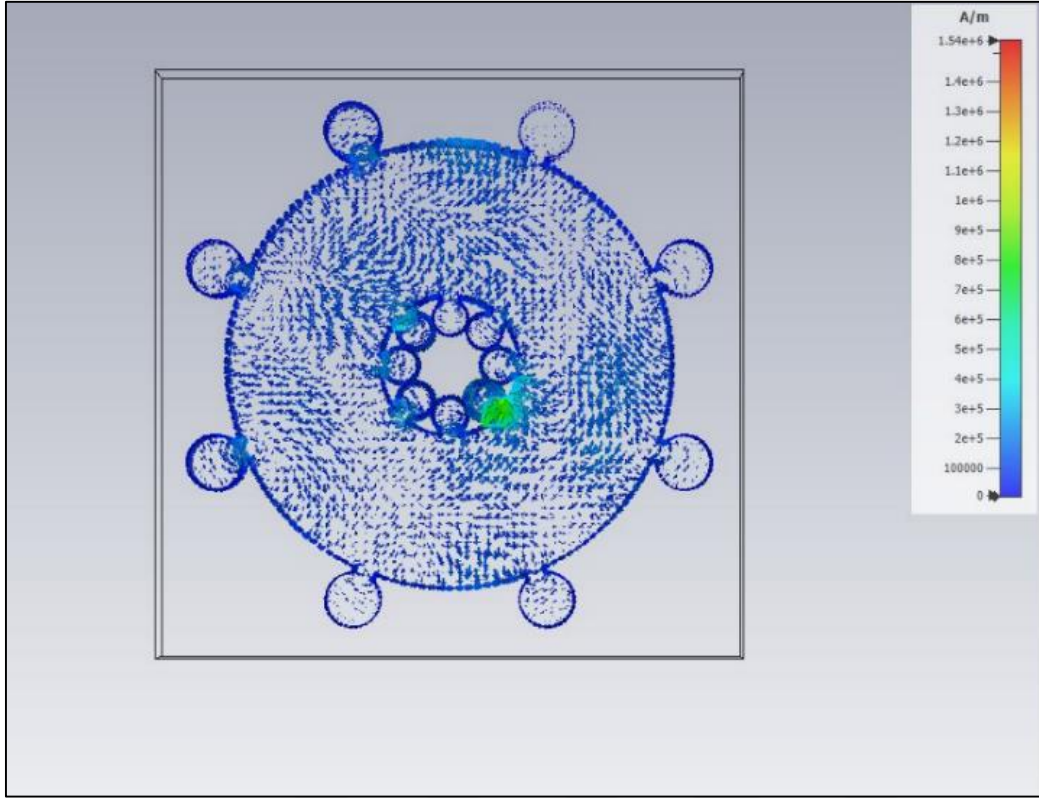
Şekil 4.32. D1 magnetronunun 9,368 GHz'deki (mod 2) yüzey akımı



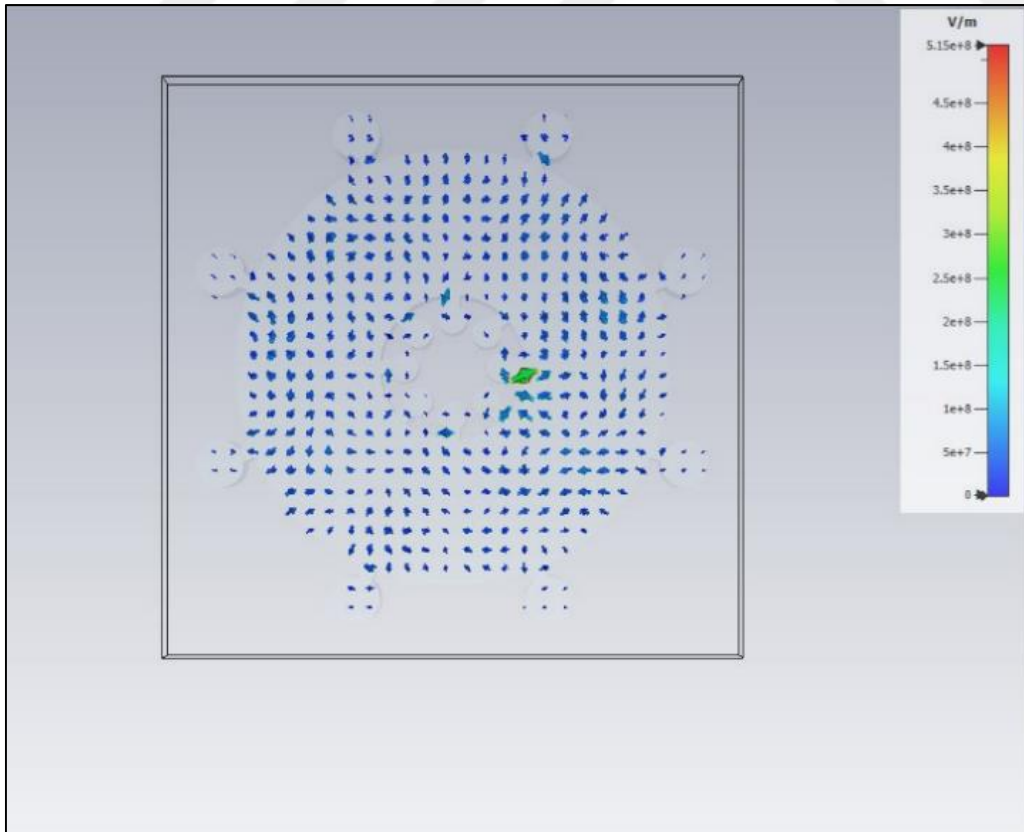
Şekil 4.33. D1 magnetronunun 10,214 GHz'deki (mod 3) elektrik alan dağılımı



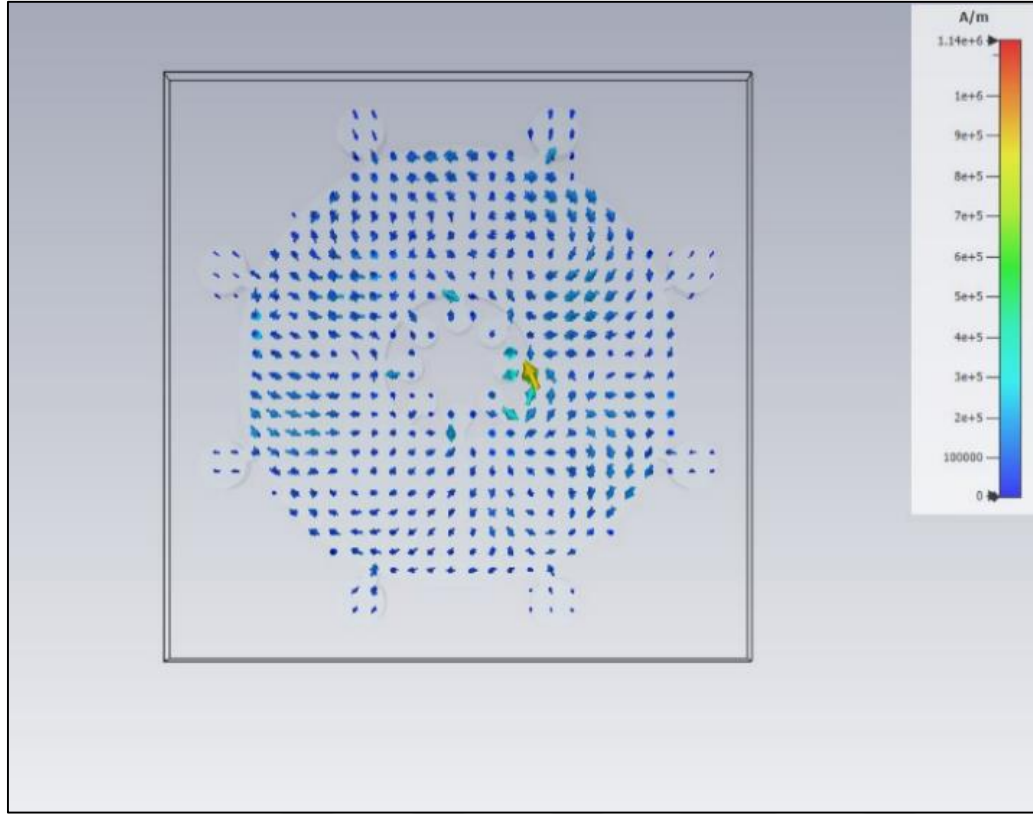
Şekil 4.34. D1 magnetronunun 10,214 GHz'deki (mod 3) manyetik alan dağılımı



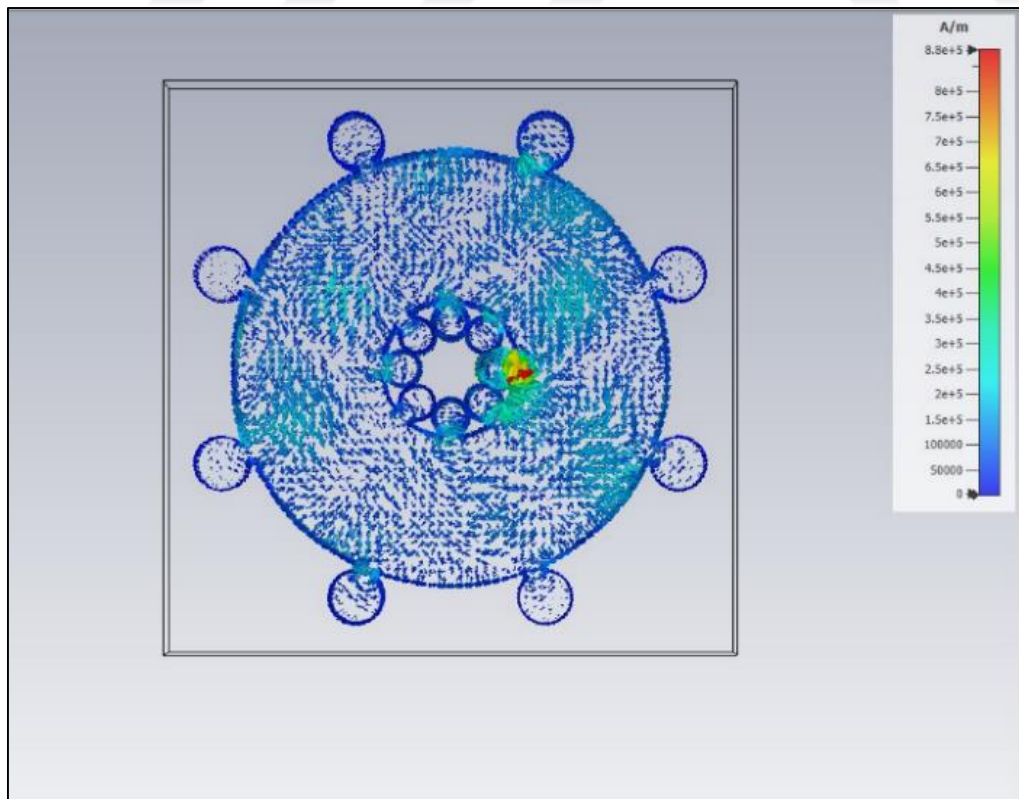
Şekil 4.35. D1 magnetronunun 10,214 GHz'deki (mod 3) yüzey akımı



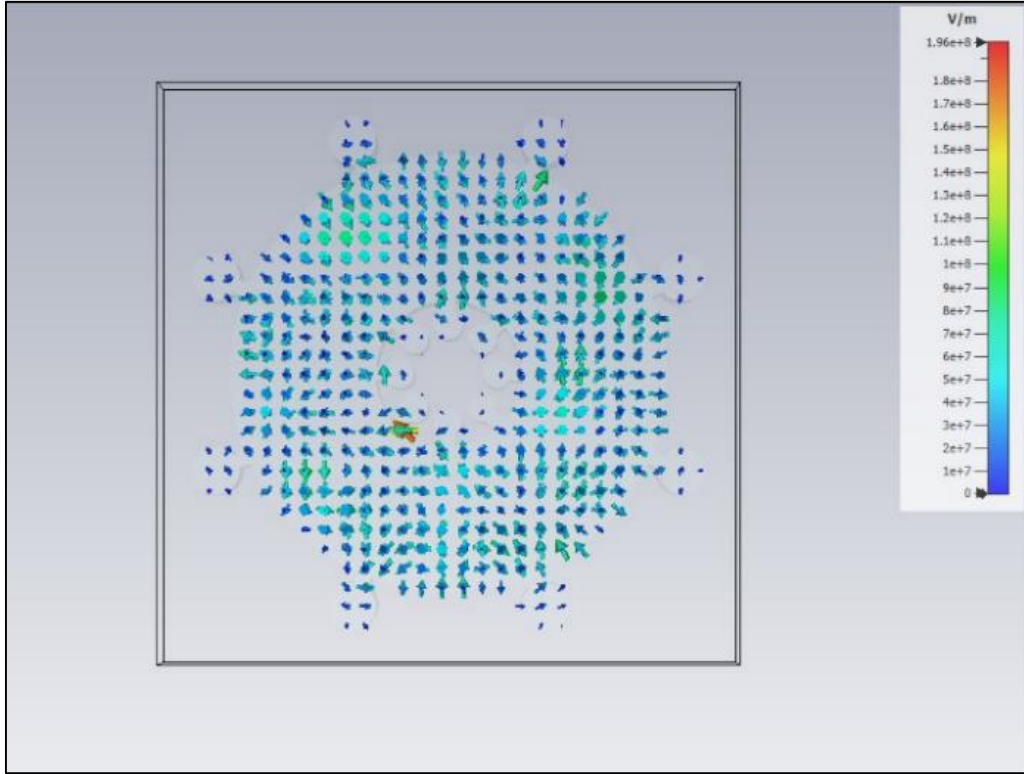
Şekil 4.36. D1 magnetronunun 10,597 GHz'deki (mod 4) elektrik alan dağılımı



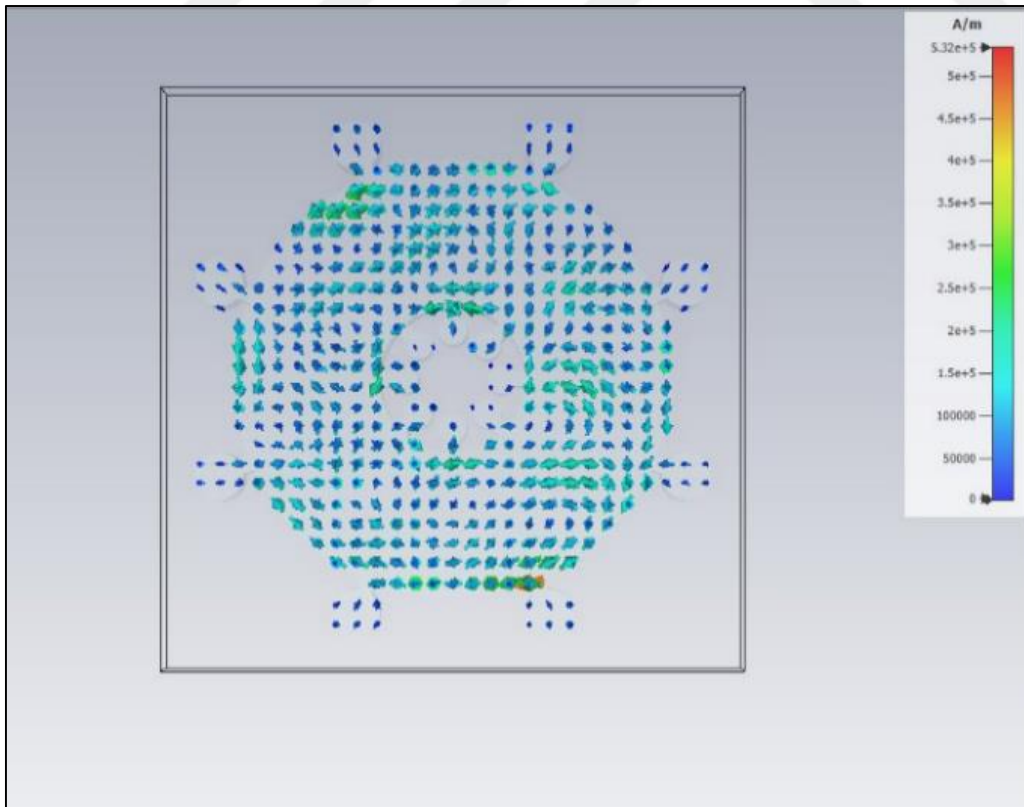
Şekil 4.37. D1 magnetronunun 10,597 GHz'deki (mod 4) manyetik alan dağılımı



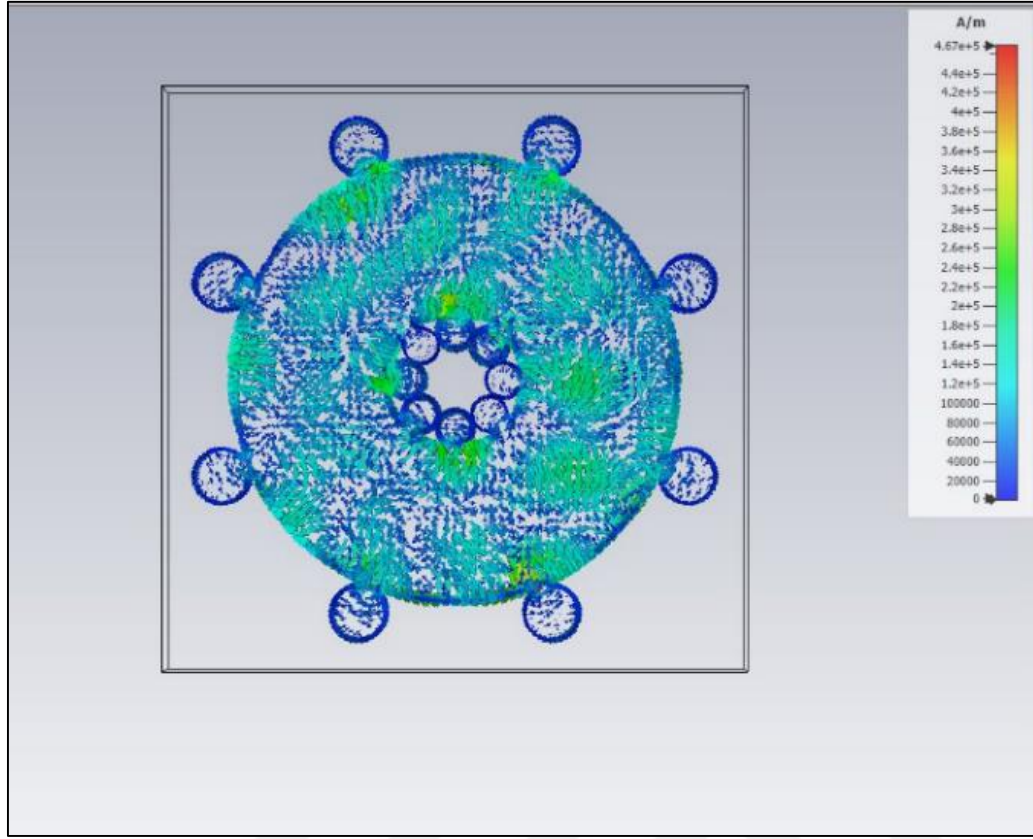
Şekil 4.38. D1 magnetronunun 10,597 GHz'deki (mod 4) yüzey akımı



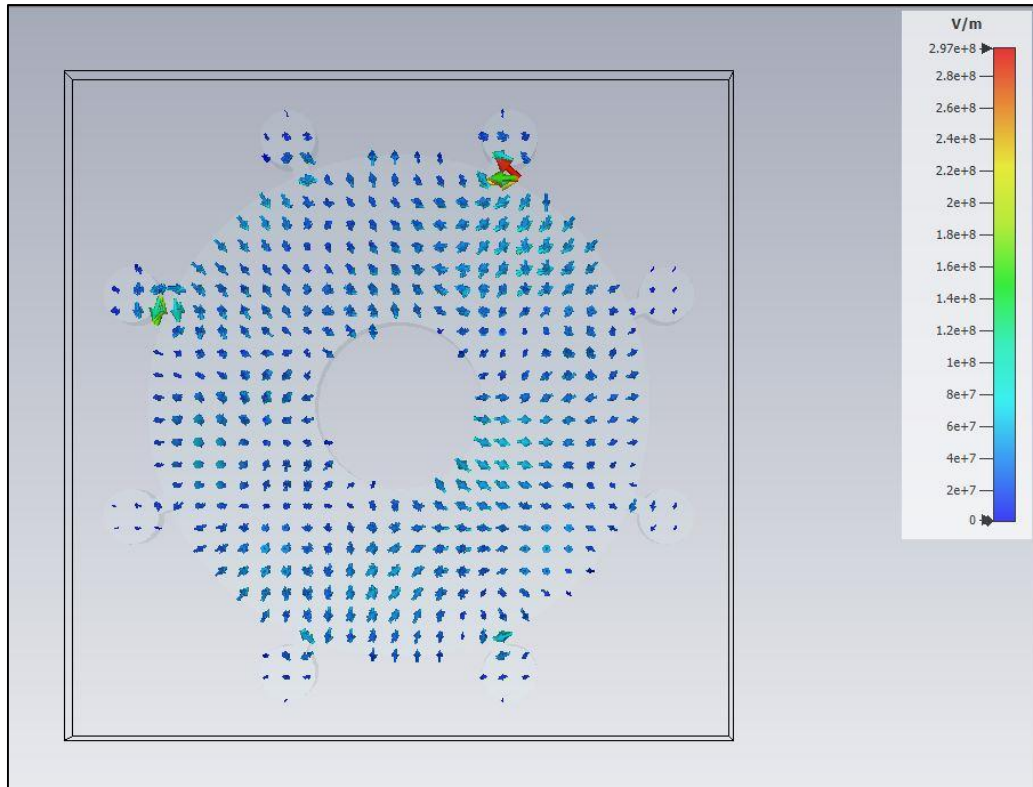
Şekil 4.39. D1 magnetronunun 11,197 GHz'deki (mod 5) elektrik alan dağılımı



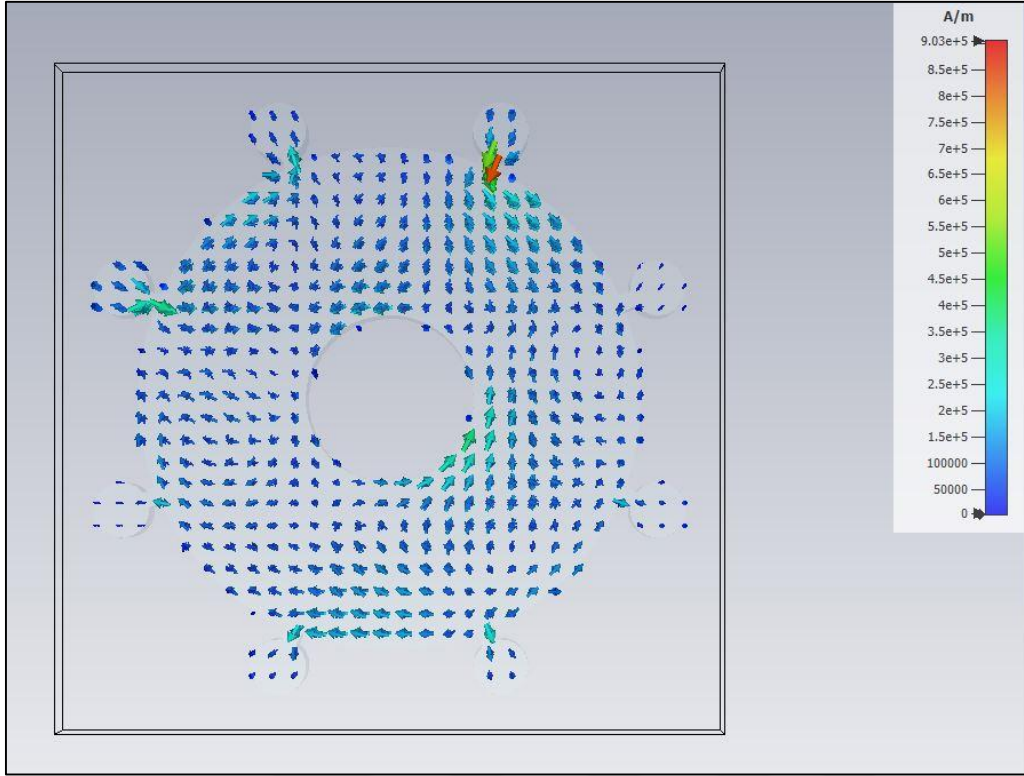
Şekil 4.40. D1 magnetronunun 11,197 GHz'deki (mod 5) manyetik alan dağılımı



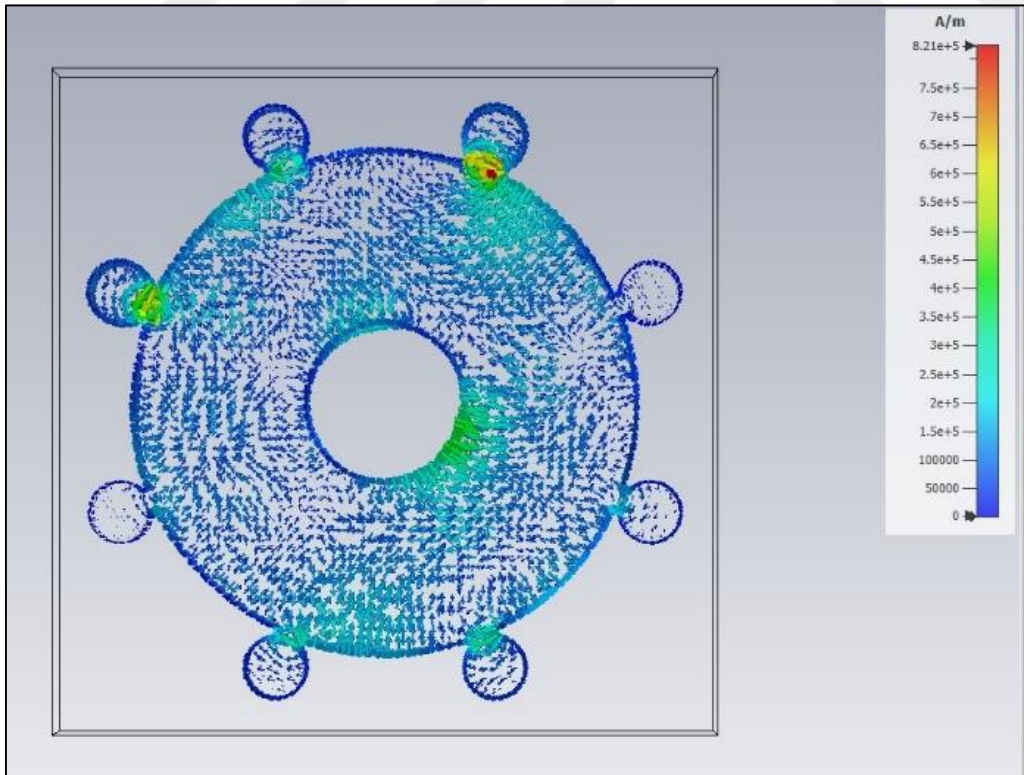
Şekil 4.41. D1 magnetronunun 11,197 GHz'deki (mod 5) yüzey akımı



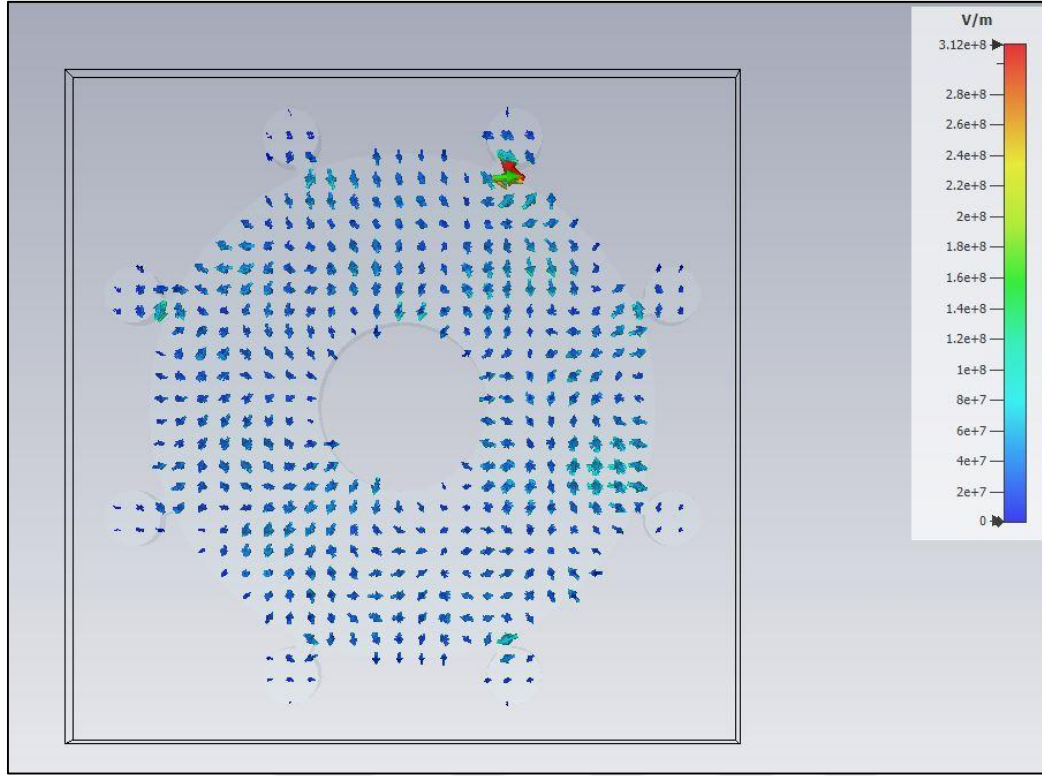
Şekil 4.42. D2 magnetronunun 9,169 GHz'deki (mod 1) elektrik alan dağılımı



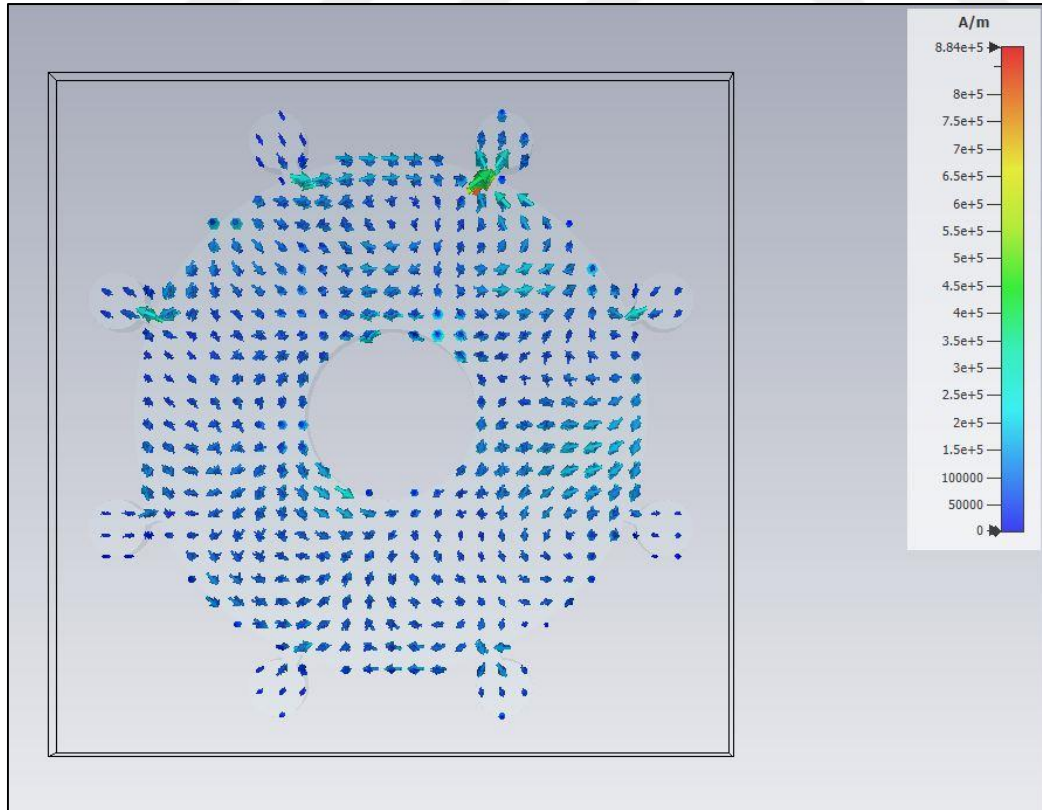
Şekil 4.43. D2 magnetronunun 9,169 GHz'deki (mod 1) manyetik alan dağılımı



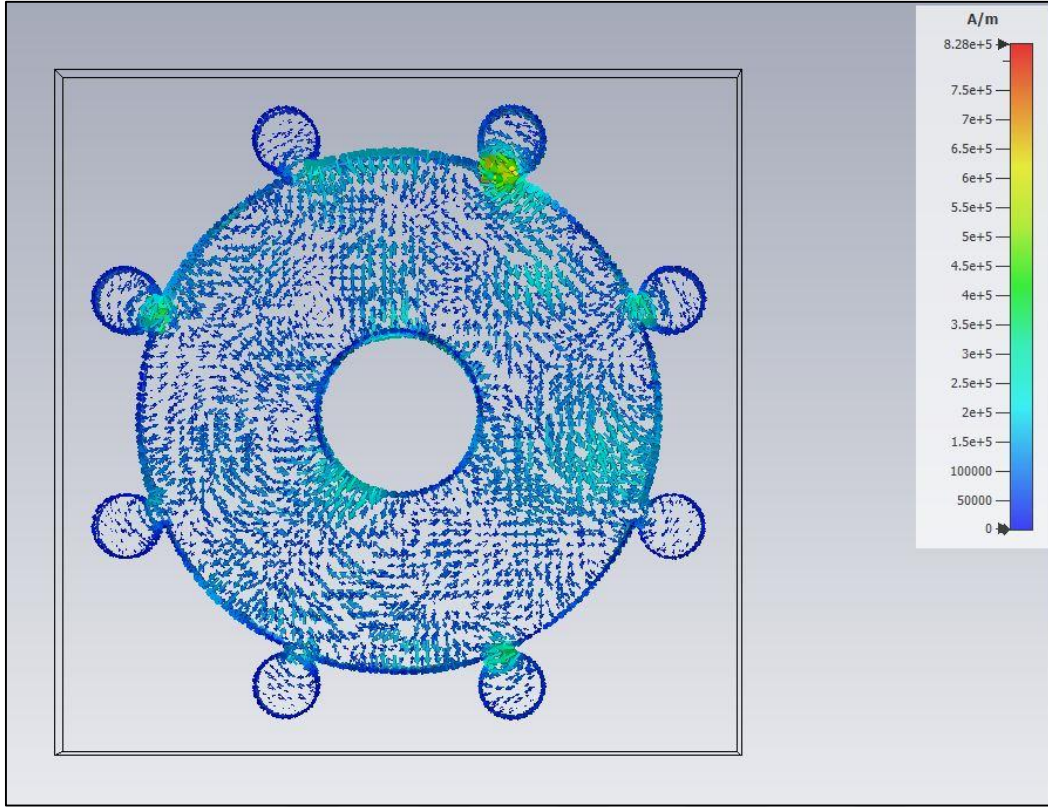
Şekil 4.44. D2 magnetronunun 9,169 GHz'deki (mod 1) yüzey akımı



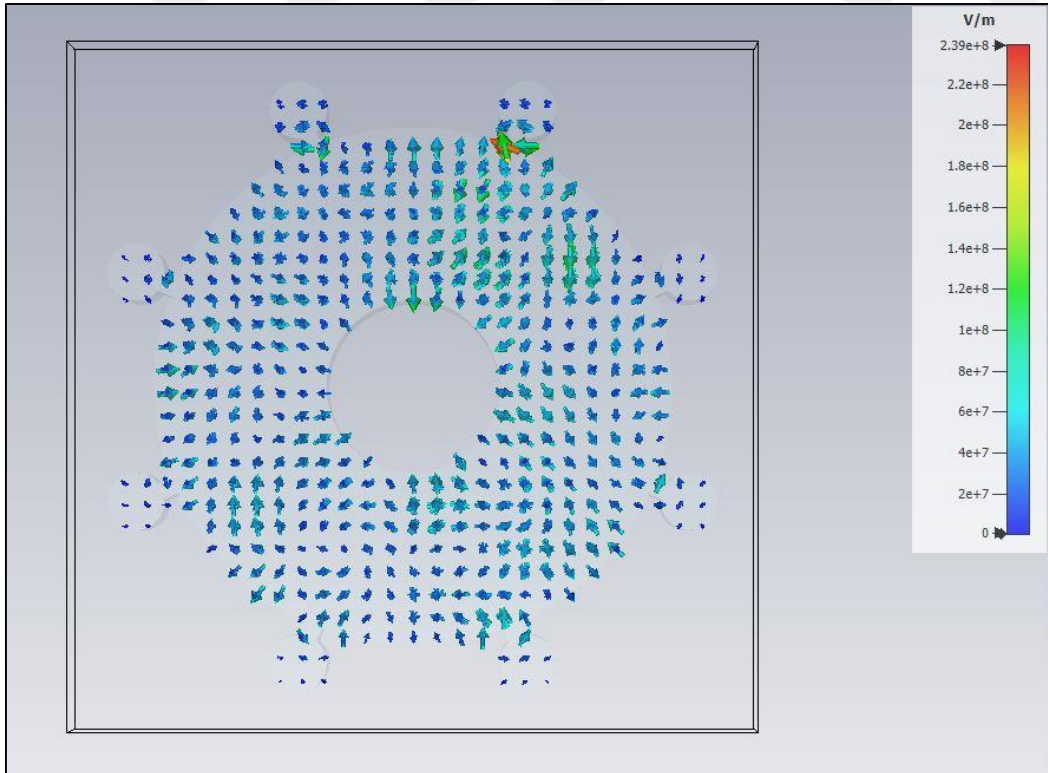
Şekil 4.45. D2 magnetronunun 9,459 GHz'deki (mod 2) elektrik alan dağılımı



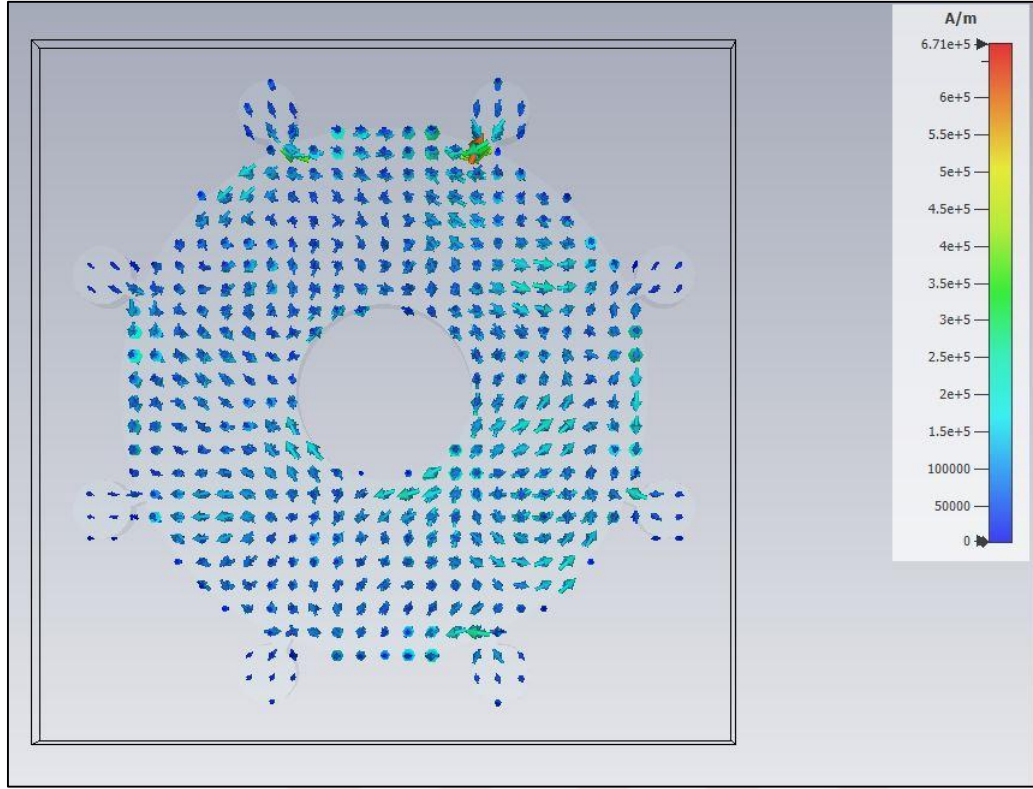
Şekil 4.46. D2 magnetronunun 9,459 GHz'deki (mod 2) manyetik alan dağılımı



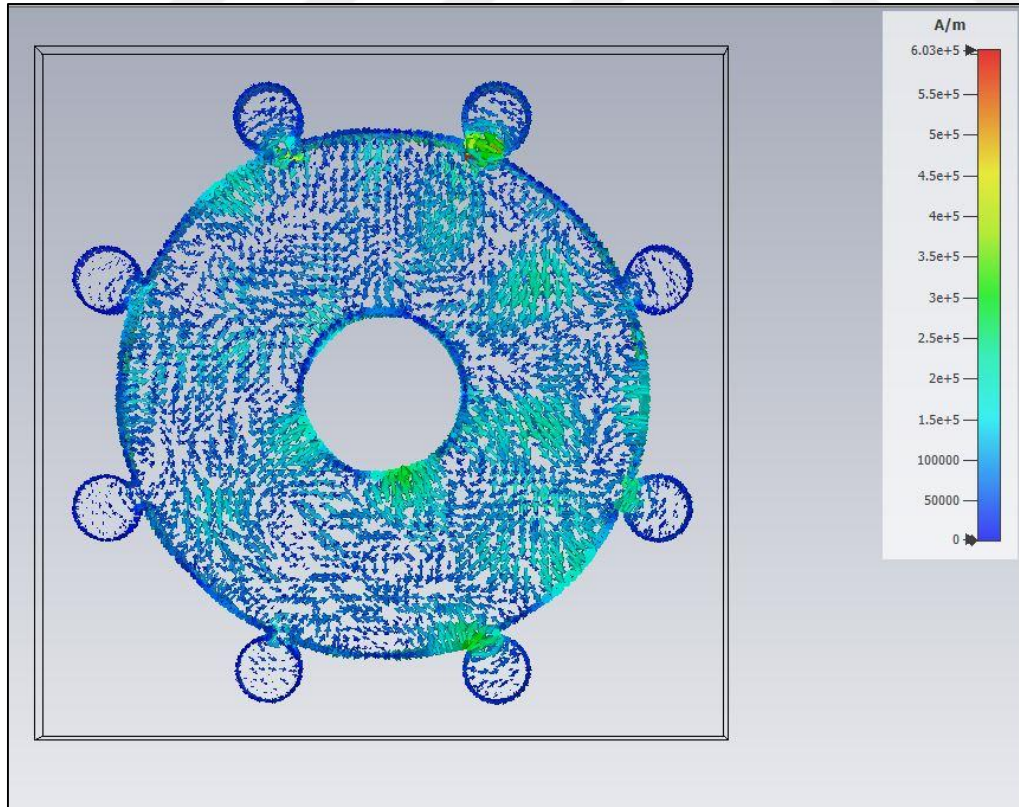
Şekil 4.47. D2 magnetronunun 9,459 GHz'deki (mod 2) yüzey akımı



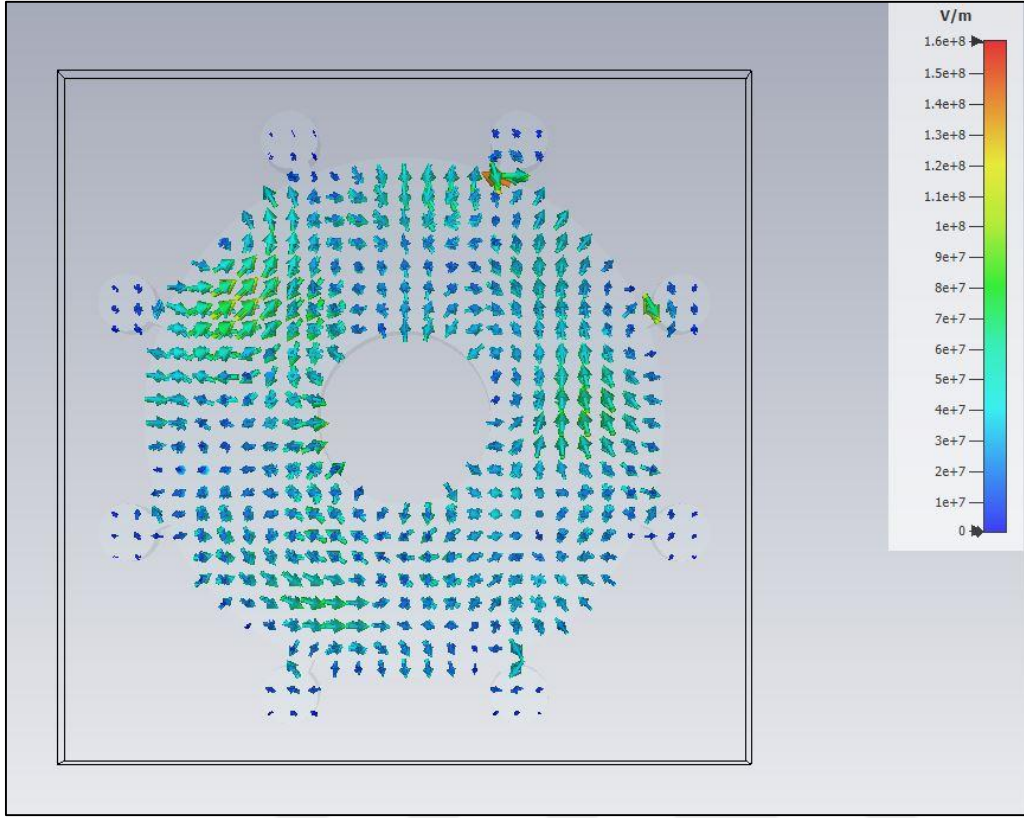
Şekil 4.48. D2 magnetronunun 10,046 GHz'deki (mod 3) elektrik alan dağılımı



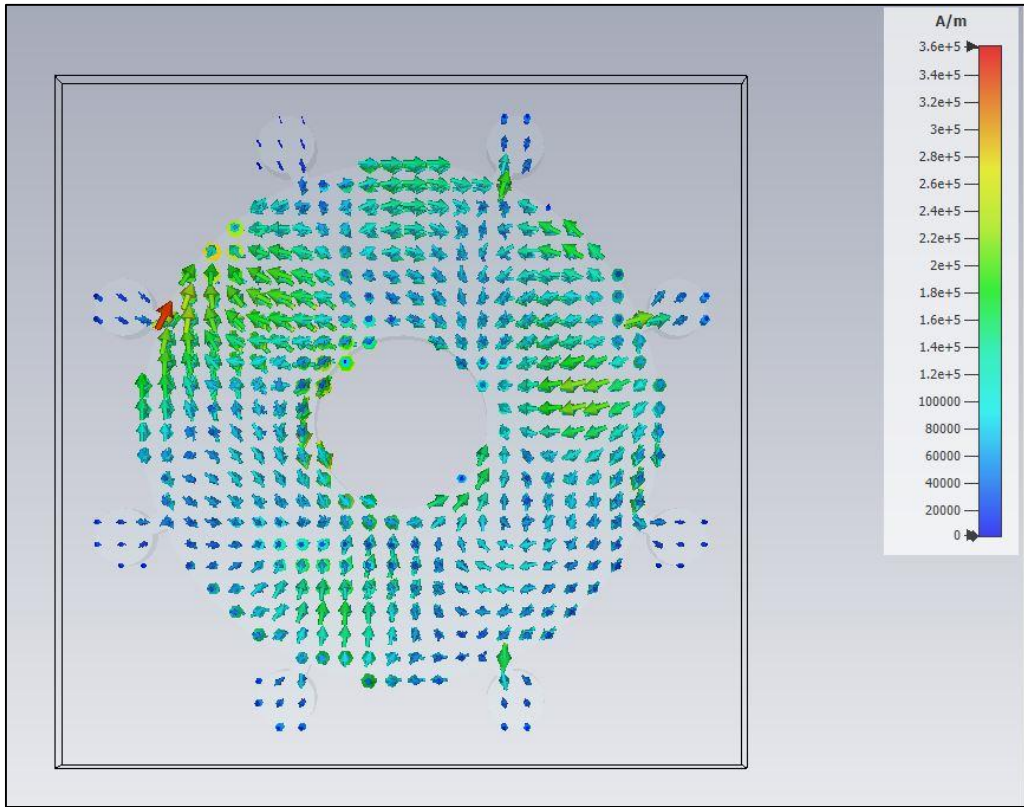
Şekil 4.49. D2 magnetronunun 10,046 GHz'deki (mod 3) manyetik alan dağılımı



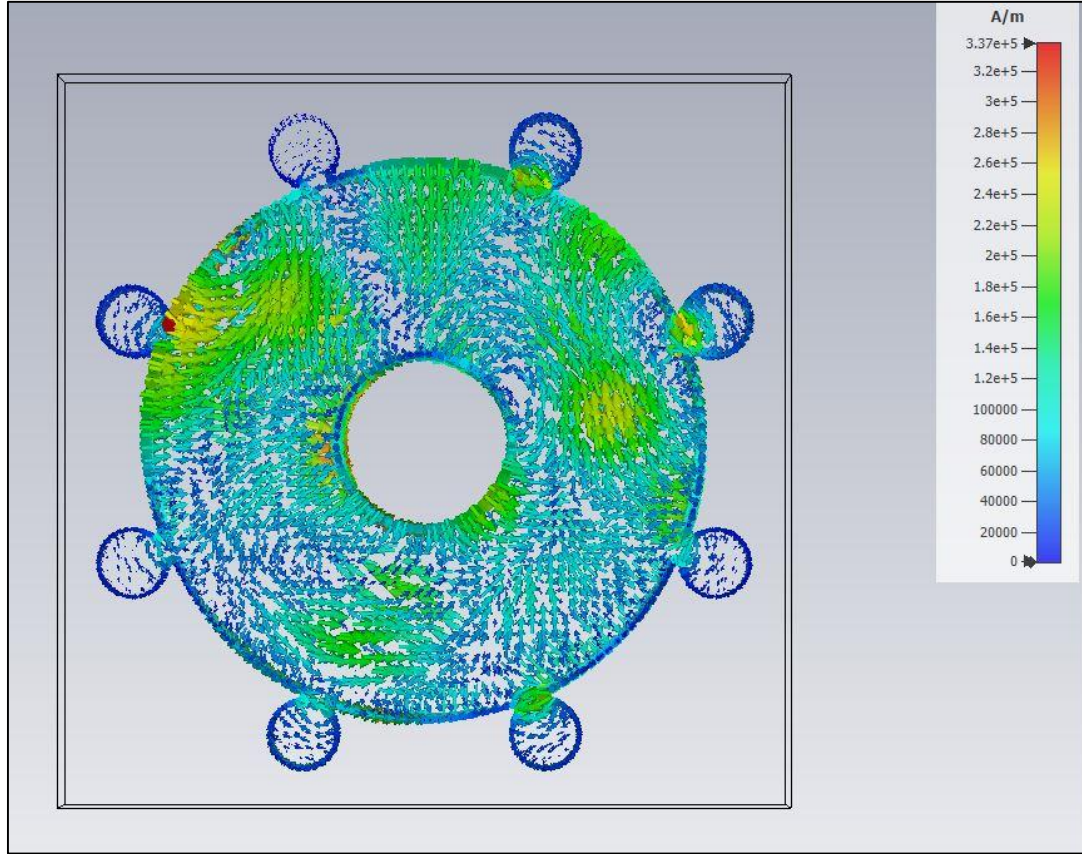
Şekil 4.50. D2 magnetronunun 10,046 GHz'deki (mod 3) yüzey akımı



Şekil 4.51. D2 magnetronunun 10,428 GHz'deki (mod 4) elektrik alan dağılımı



Şekil 4.52. D2 magnetronunun 10,428 GHz'deki (mod 4) manyetik alan dağılımı



Şekil 4.53. D2 magnetronunun 10,428 GHz'deki (mod 4) yüzey akımı

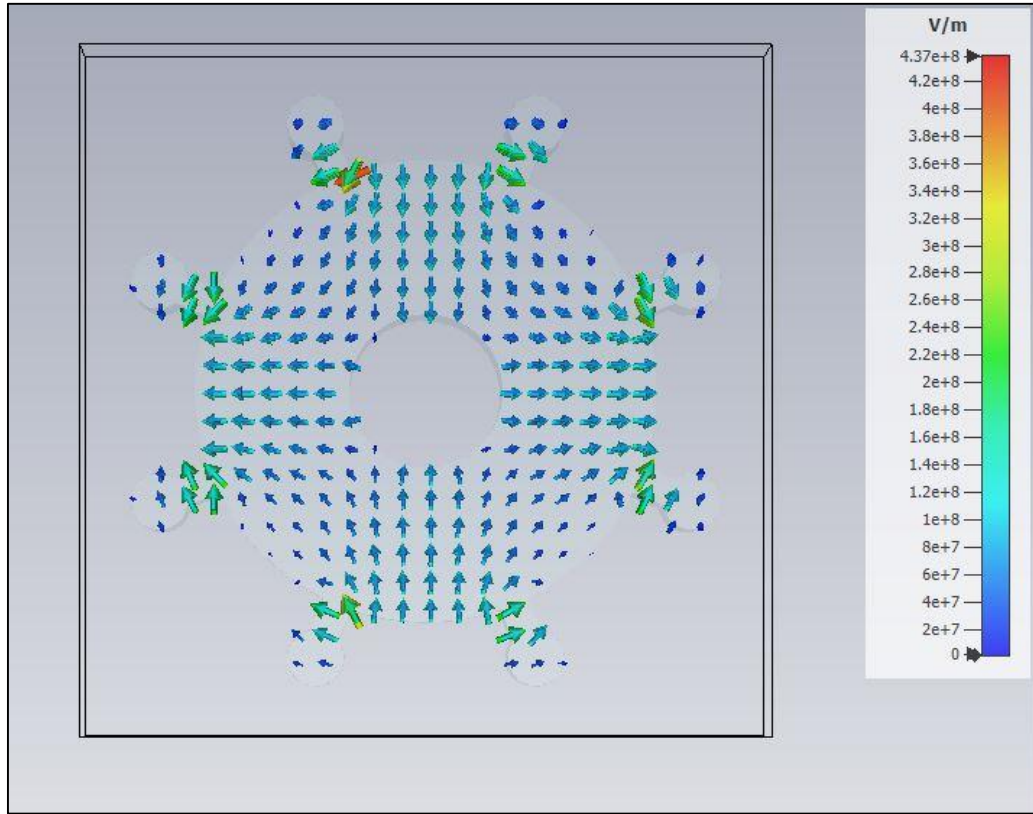
Magnetronların en kararlı ve en verimli çalışma modunun π modu olduğu bilinmektedir. Tasarlanan D1 ve D2 magnetronlarıyla yapılan öz-mod (frekans) analiz sonuçlarından bu mod elde edilememiştir. Bu yüzden tasarım parametrelerinde değişikliğe gidilmiş ve yeni boyutlara sahip bir magnetron tasarımı önerilmiştir (D3 ve D4 magnetronları). Tasarlanan magnetronun çalışma frekansı olarak yine 9 GHz belirlenmiş ve katot yarıçapı 0,8 cm olarak seçilmiştir. Çalışma frekansı ve katot yarıçapı seçildikten sonra materyal ve yöntem bölümünde verilen Eş. 3.1'den faydalanarak magnetronun anot iç yarıçapı 2,4 cm olarak belirlenmiştir. Bu aşamadan sonra Eş. 3.2 kullanılarak magnetronun oyuk sayısı 8 olarak hesaplanmıştır. Daha sonra Eş. 3.3 kullanılarak kritik manyetik alan değeri 0,18 T olarak bulunmuş ve kritik manyetik alan değeri hesaplandıktan sonra Eş. 3.4 kullanılarak Hull kesim gerilim değeri (kritik gerilim değeri) yaklaşık olarak 325 kV olarak bulunmuştur. Hartree gerilim değeri, uygulanan manyetik alan değeri kritik manyetik alan değerinden küçük seçilerek yaklaşık olarak 36,1 kV bulunmuştur. Daha önceki magnetronda olduğu gibi bu magnetronda da Eş. 3.6 dikkate alınarak anot ve katot arasına uygulanan gerilim değeri Hull kesim gerilim değeri ve Hartree gerilim değeri arasında bir değer olarak seçilmiştir. Magnetronun anot ve katot yüksekliği, anot oyuk yarıçapı, anot yarık genişliği sırasıyla 2

cm, 0,3 cm ve 0.3 cm olarak seçilmiştir. Tasarlanan D3 ve D4 magnetronlarına ait parametreler özet olarak Çizelge 4.4'te sunulmuştur.

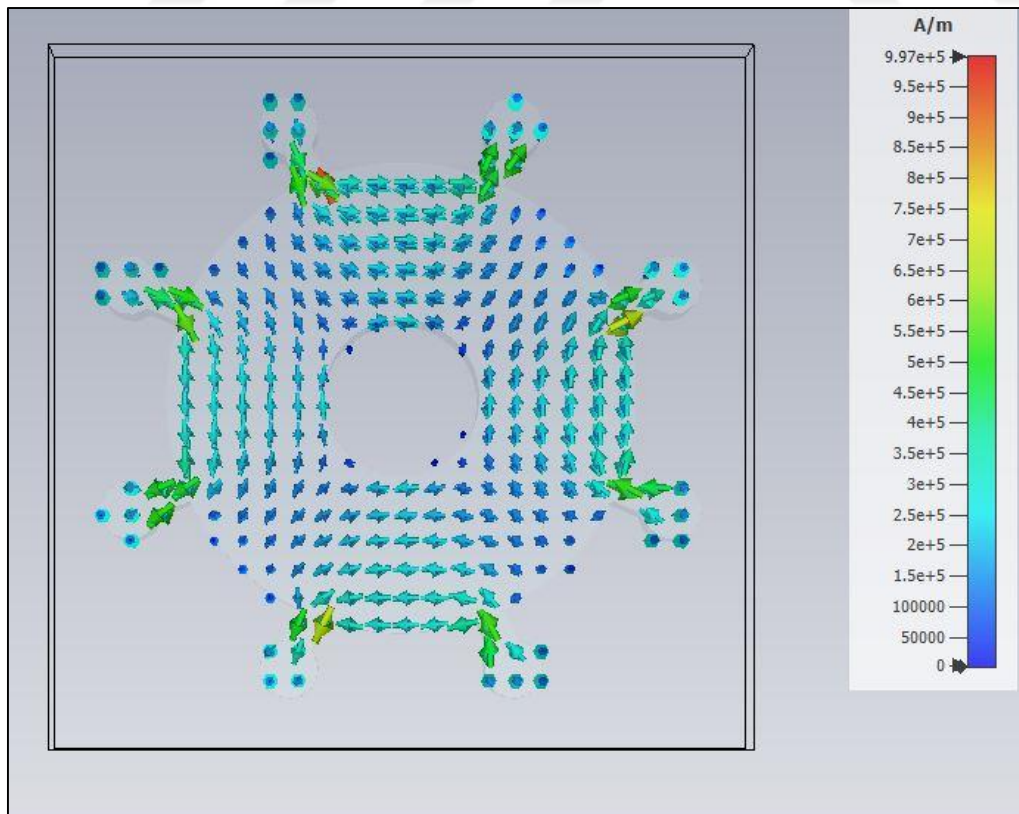
Çizelge 4.4. D3 ve D4 magnetronlarının tasarım parametreleri

Parametre	Değeri	Parametre	Değeri
Çalışma frekansı (f)	9 GHz	Anot oyuk yarıçapı (r_{ha})	0,3 cm
Kritik manyetik alan değeri (B_c)	0,18 Tesla	Anot yarık genişliği ($slot_{wa}$)	0,3 cm
Anot-katot arasına uygulanan gerilim (V_{app})	50 kV	Anot yarık uzunluğu ($slot_{la}$)	0,34 cm
Anot iç yarıçapı (r_{ai})	2,4 cm	Katot oyuk yarıçapı (r_{hc}) (D4)	0,15 cm
Anot yarıçapı (r_a)	3,6 cm	Katot yarık genişliği ($slot_{wc}$) (D4)	0,2 cm
Katot yarıçapı (r_c)	0,8 cm	Katot yarık uzunluğu ($slot_{lc}$) (D4)	0.18 cm
Anot- katot yükseliği	2 cm		

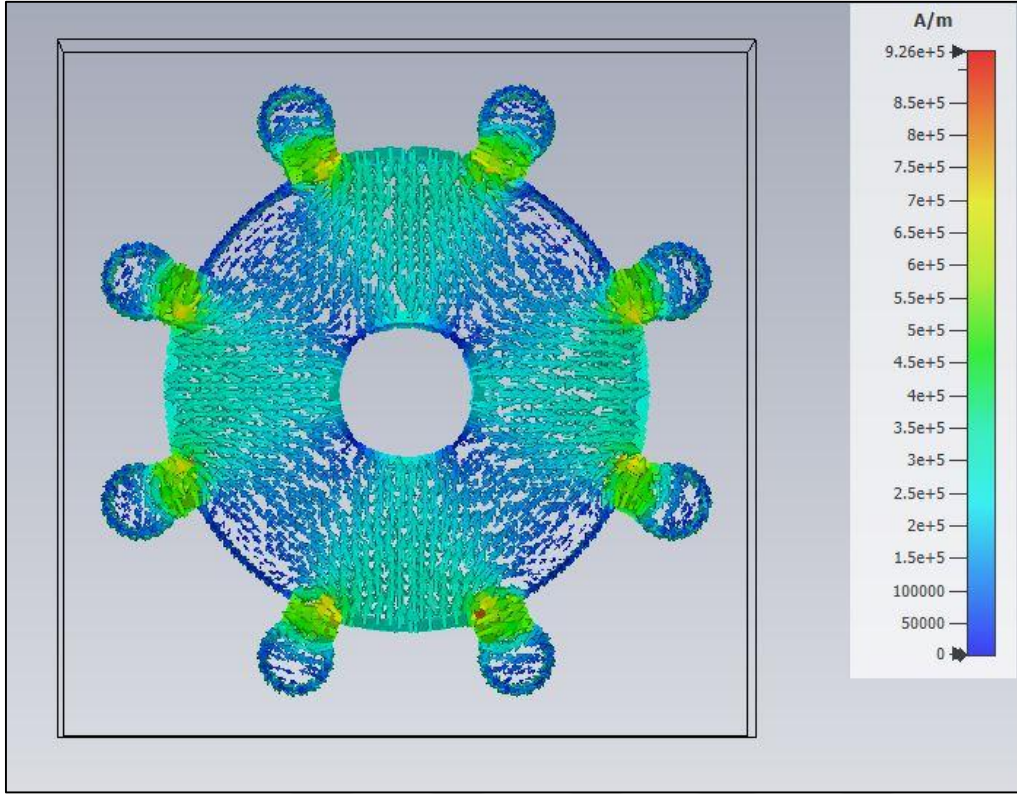
Yeni tasarım parametreleri belirlendikten sonra ilk olarak öz-frekans analizi yapılmış ve π modu elde edilmeye çalışılmıştır. Bunun için de D1 ve D2 magnetronlarında olduğu gibi analiz programında bütün ayarlamalar yapıldıktan sonra dalga boyu başına çizgi sayısı 20 olarak belirlenmiştir. Oyuksuz katot yapısına sahip D3 ve oyuklu katot yapısına sahip D4 magnetronlarına ait toplam ağ örgü (mesh) sayısı sırasıyla 314432 ve 575552'dir. Ayrıca D3 magnetronunun sahip olduğu en küçük ve en büyük hücre boyutları 0,021 cm ve 0,117 cm iken D4 magnetronunun sahip olduğu en küçük ve en büyük hücre boyutları 0,003 cm ve 0,117 cm'dir. Belirlenen frekans aralığında bulunan D3 ve D4 magnetronlarına ait mod sayısı 5'tir. Bu modlara ait elektrik alan, manyetik alan dağılımları ve yüzey akımlarına ait veriler aşağıdaki şekillerde sunulmuştur.



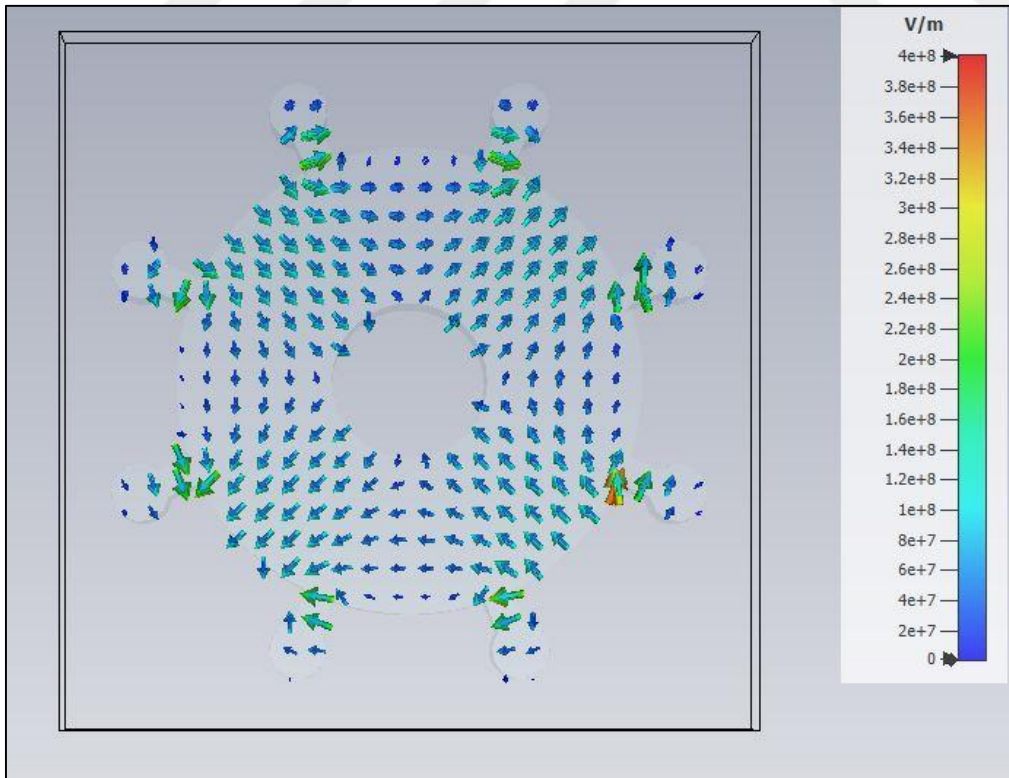
Şekil 4.54. D3 magnetronunun 8,72208 GHz'deki (mod 1) elektrik alan dağılımı



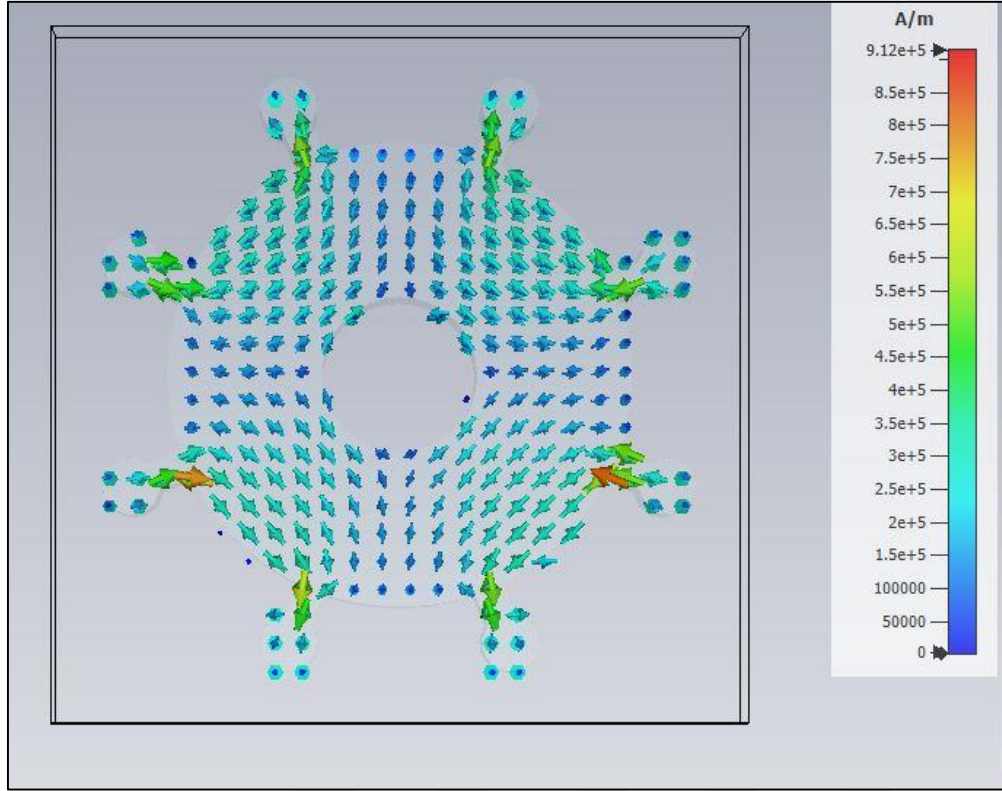
Şekil 4.55. D3 magnetronunun 8,72208 GHz'deki (mod 1) manyetik alan dağılımı



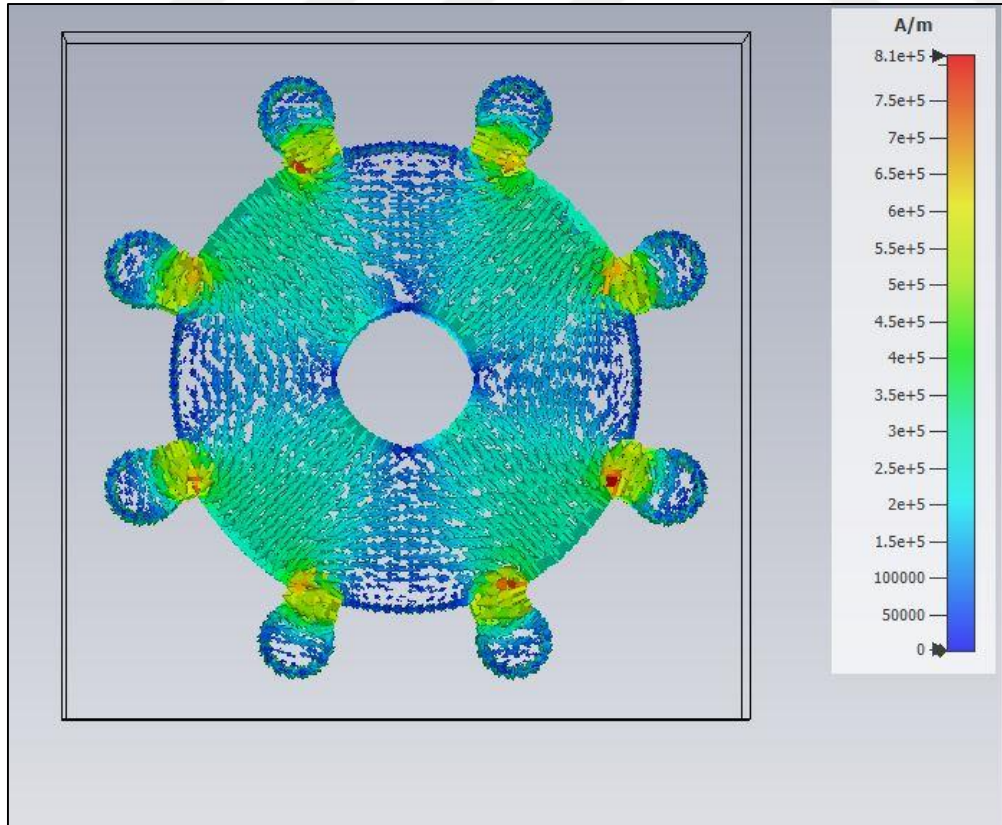
Şekil 4.56. D3 magnetronunun 8,72208 GHz'deki (mod 1) yüzey akımı



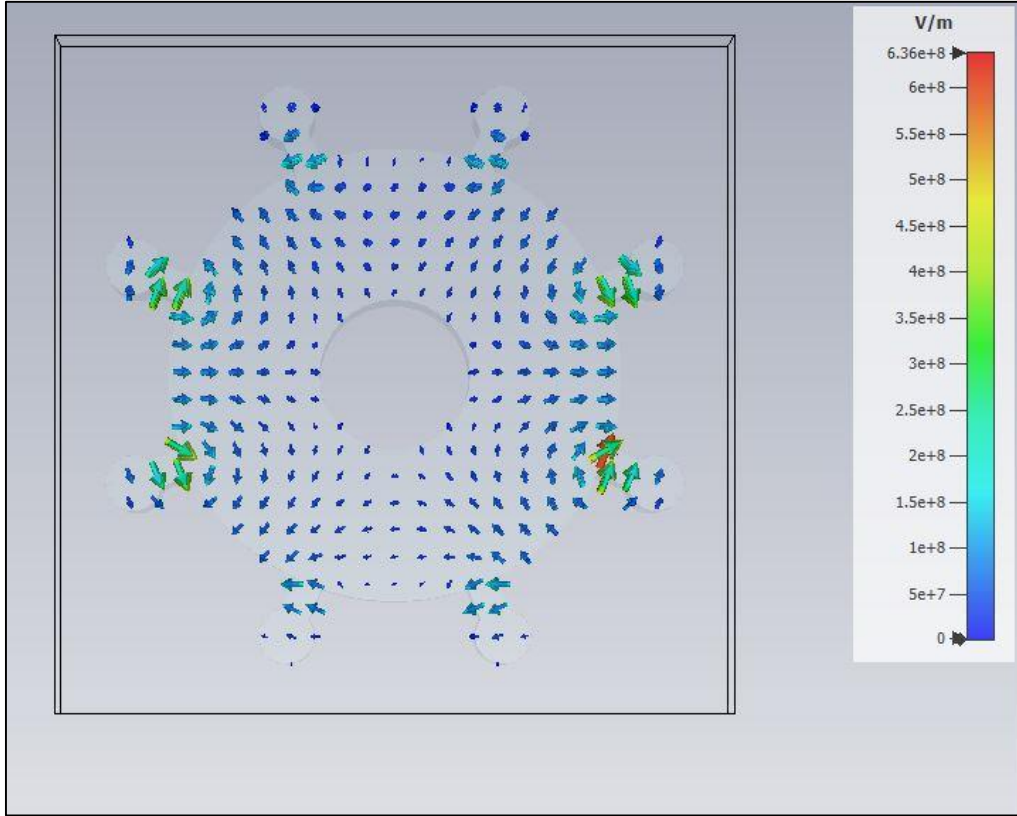
Şekil 4.57. D3 magnetronunun 8,72246 GHz'deki (mod 2) elektrik alan dağılımı



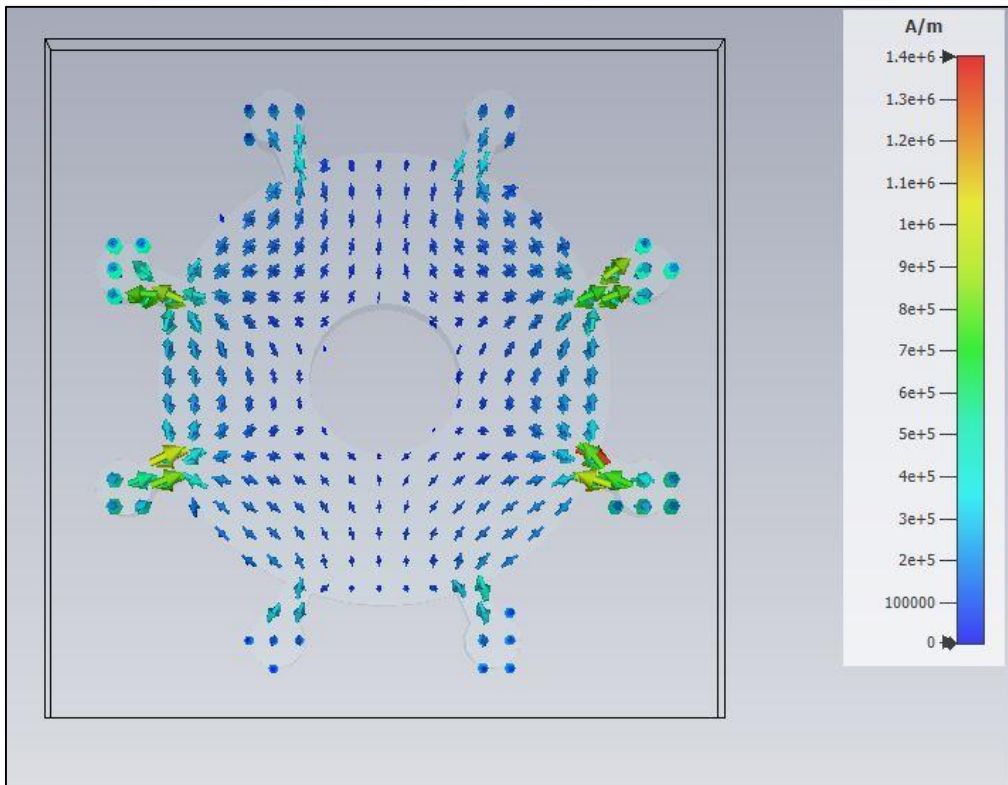
Şekil 4.58. D3 magnetronunun 8,72246 GHz'deki (mod 2) manyetik alan dağılımı



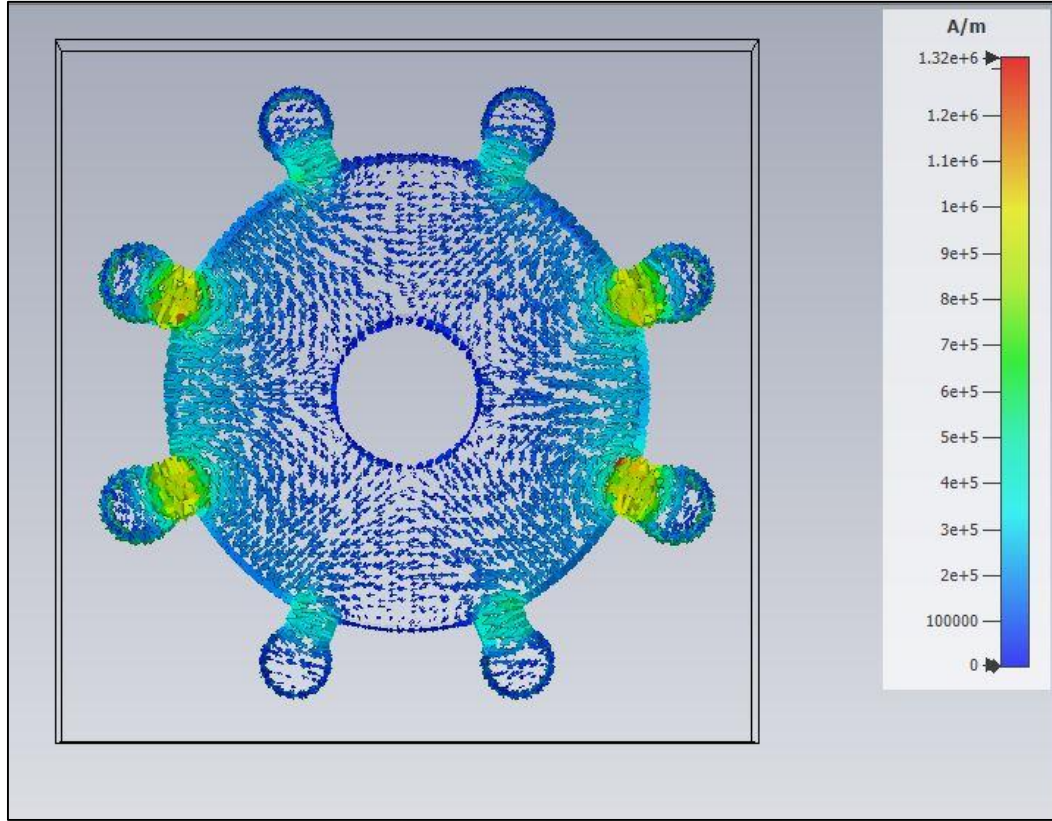
Şekil 4.59. D3 magnetronunun 8,72246 GHz'deki (mod 2) yüzey akımı



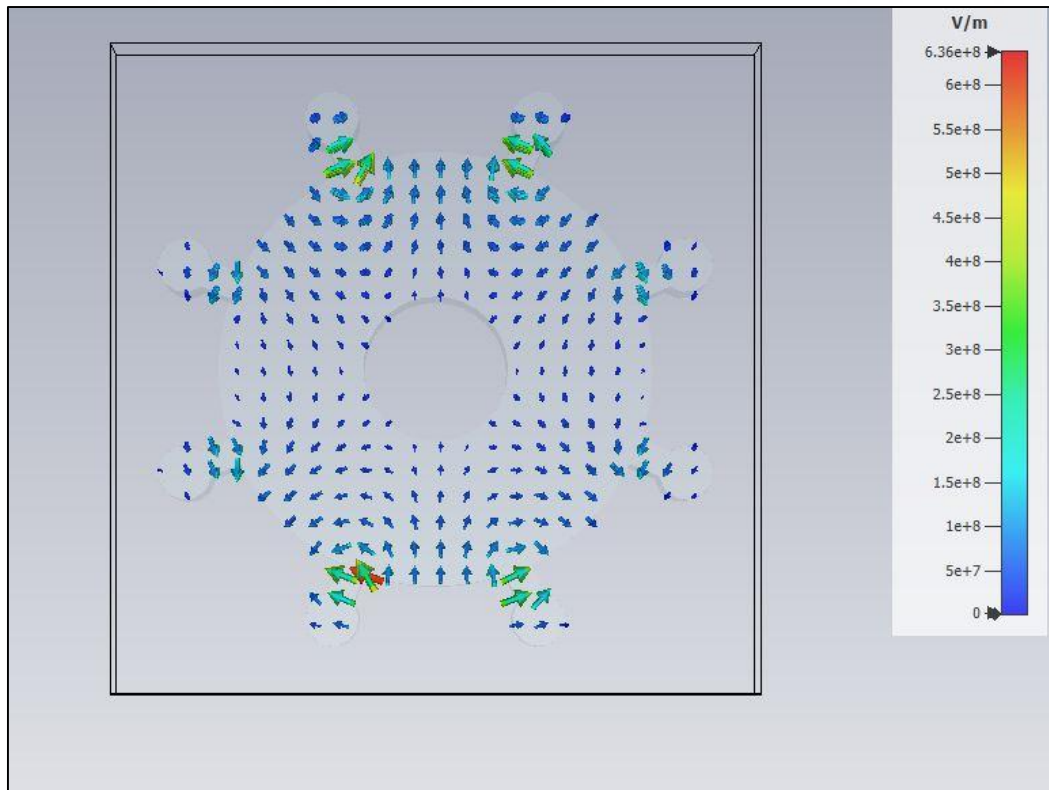
Şekil 4.60. D3 magnetronunun 9,04332 GHz'deki (mod 3) elektrik alan dağılımı



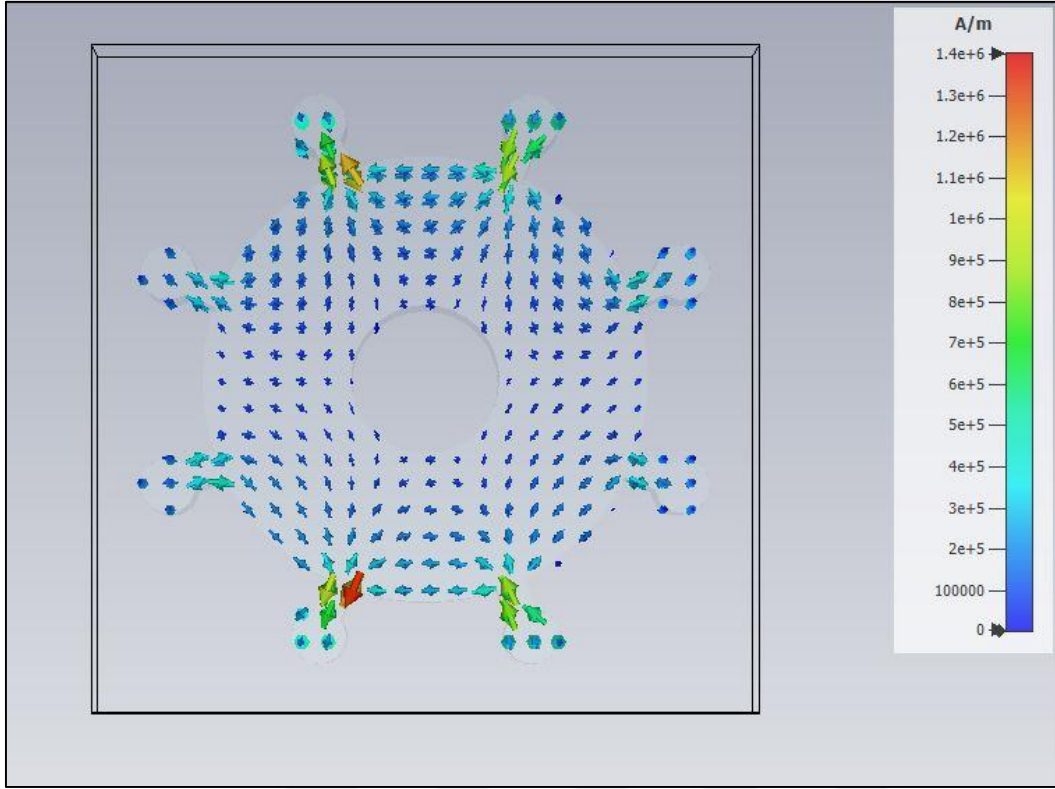
Şekil 4.61. D3 magnetronunun 9,04332 GHz'deki (mod 3) manyetik alan dağılımı



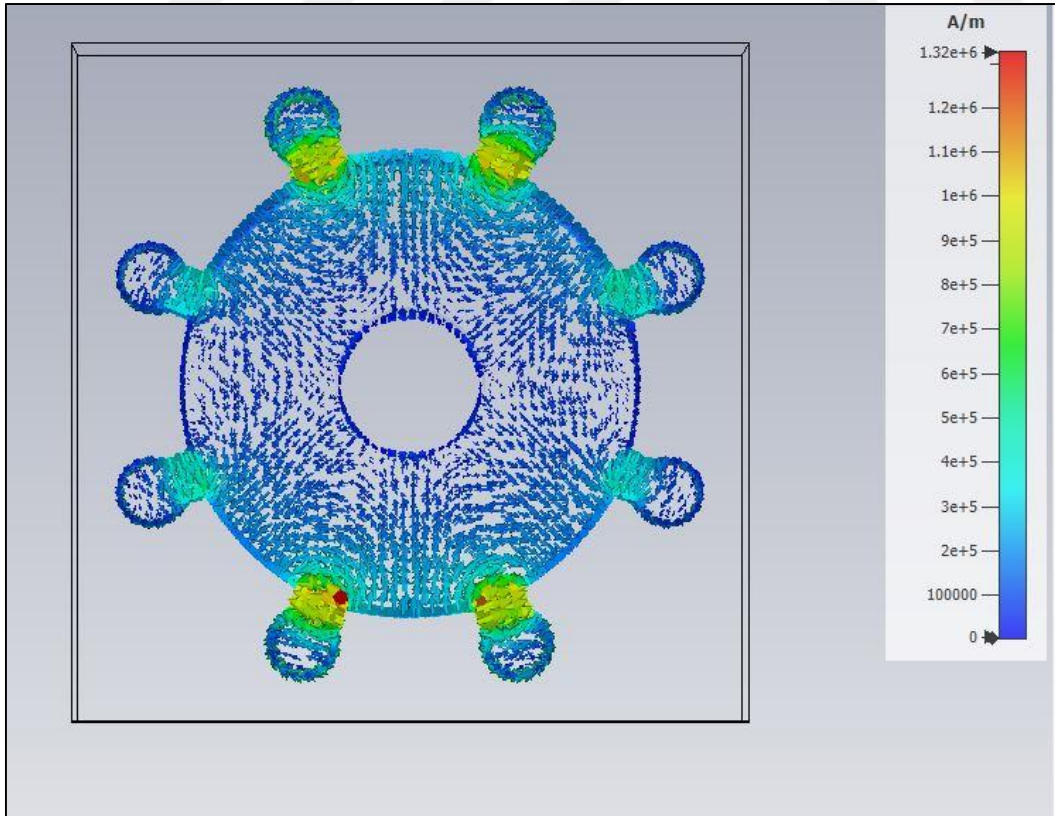
Şekil 4.62. D3 magnetronunun 9,04332 GHz'deki (mod 3) yüzey akımı



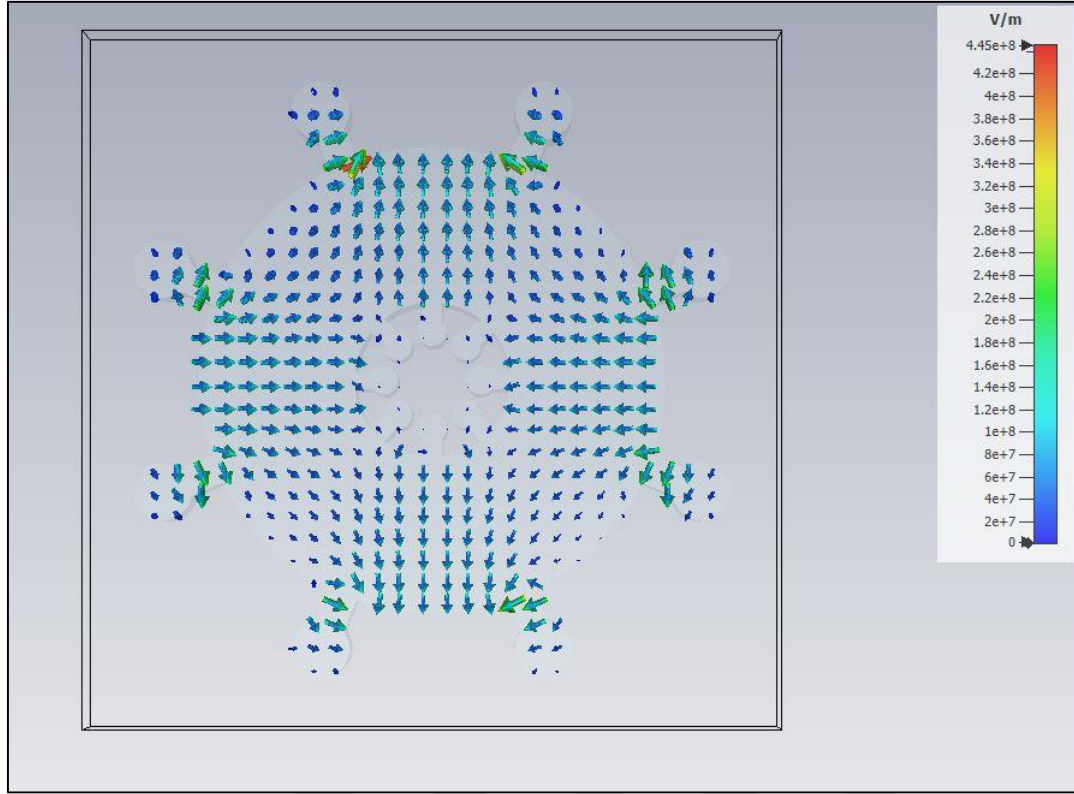
Şekil 4.63. D3 magnetronunun 9,04334 GHz'deki (mod 4) elektrik alan dağılımı



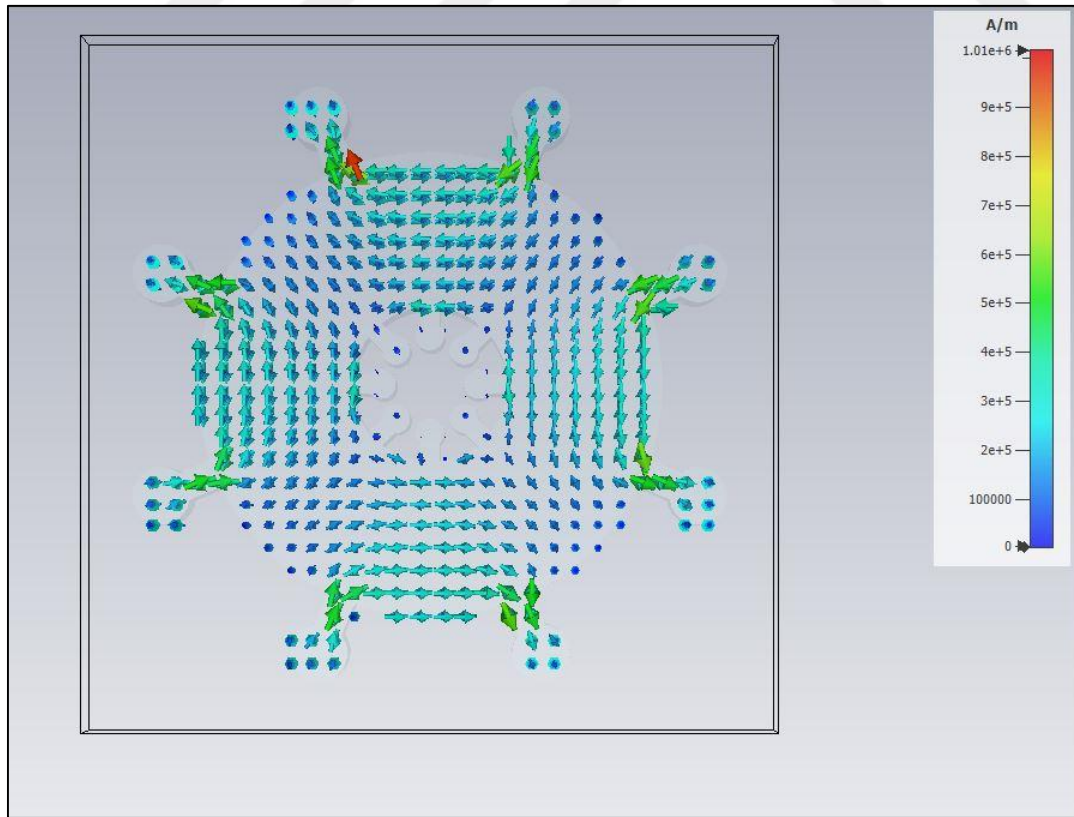
Şekil 4.64. D3 magnetronunun 9,04334 GHz'deki (mod 4) manyetik alan dağılımı



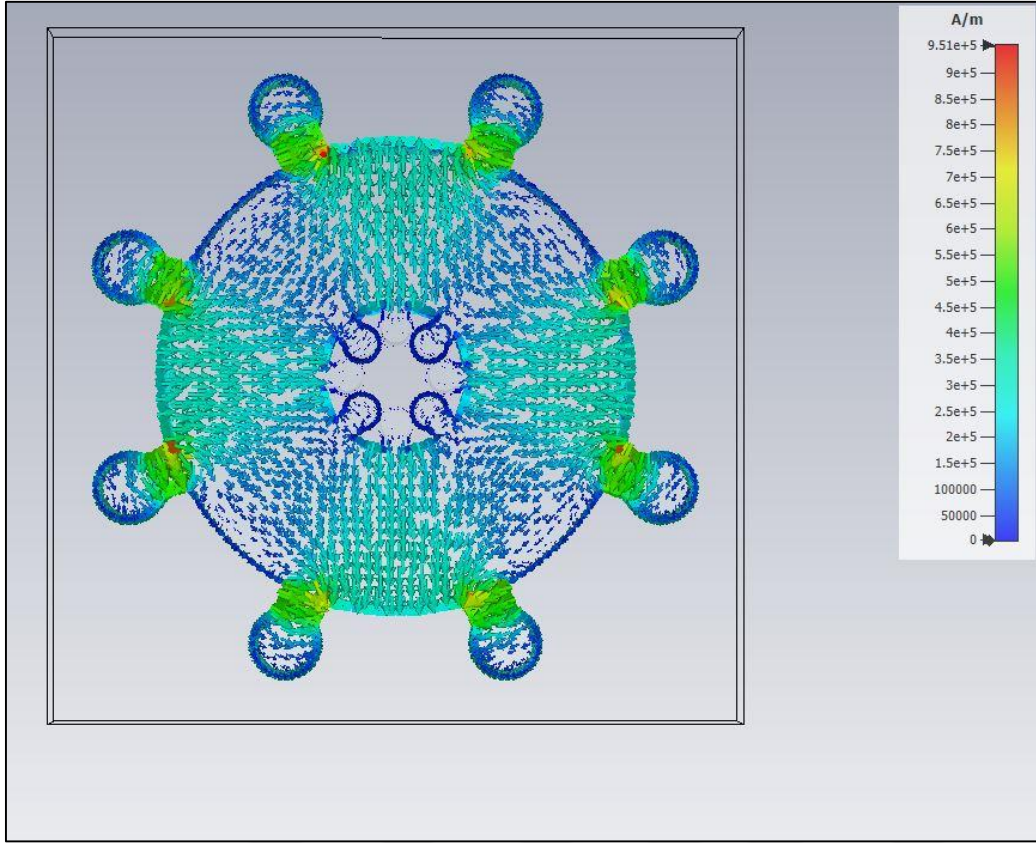
Şekil 4.65. D3 magnetronunun 9,04334 GHz'deki (mod 4) yüzey akımı



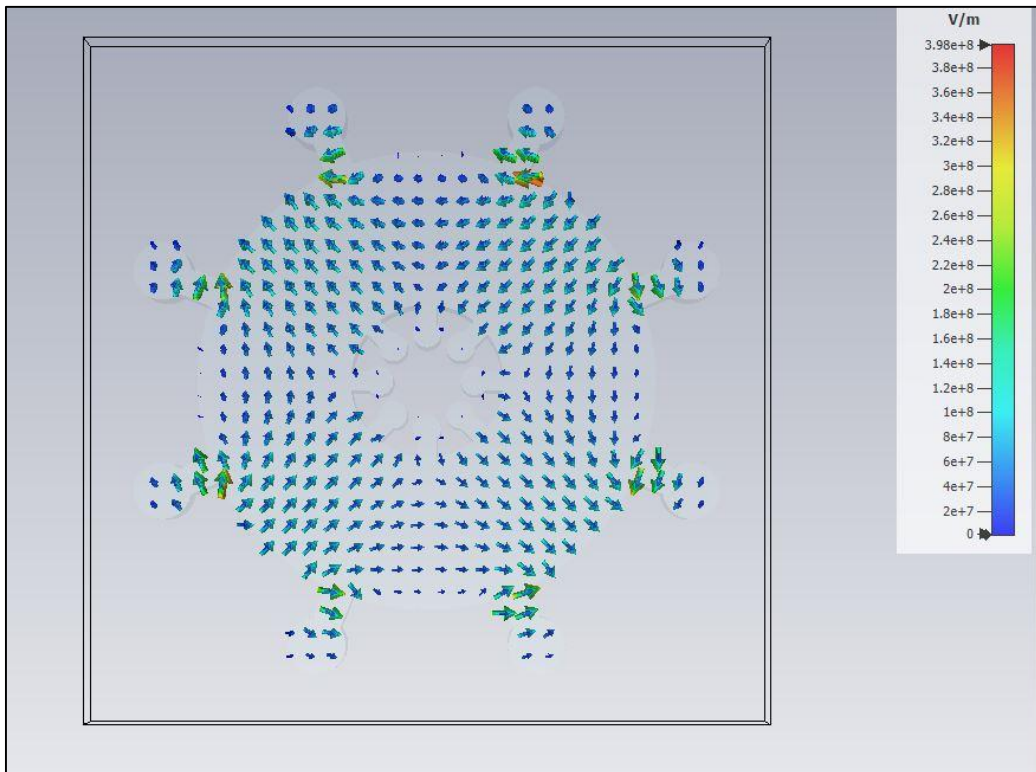
Şekil 4.66. D4 magnetronunun 8,716 GHz'deki (mod 1) elektrik alan dağılımı



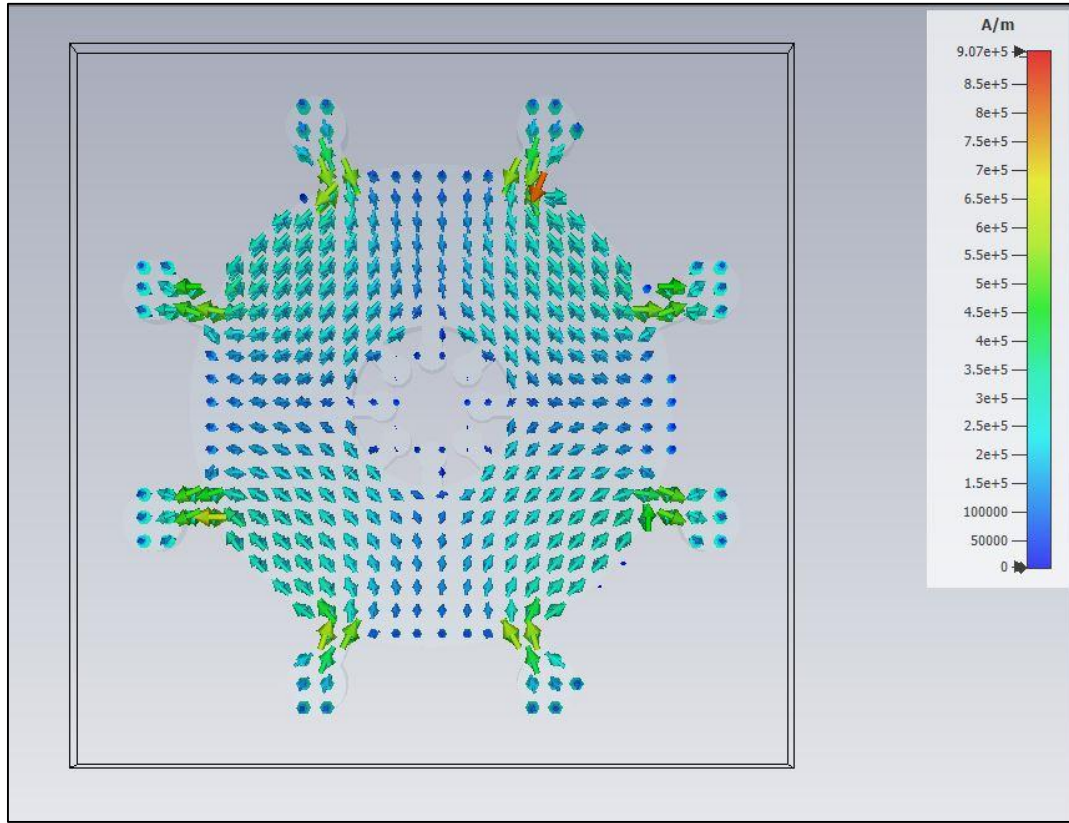
Şekil 4.67. D4 magnetronunun 8,716 GHz'deki (mod 1) manyetik alan dağılımı



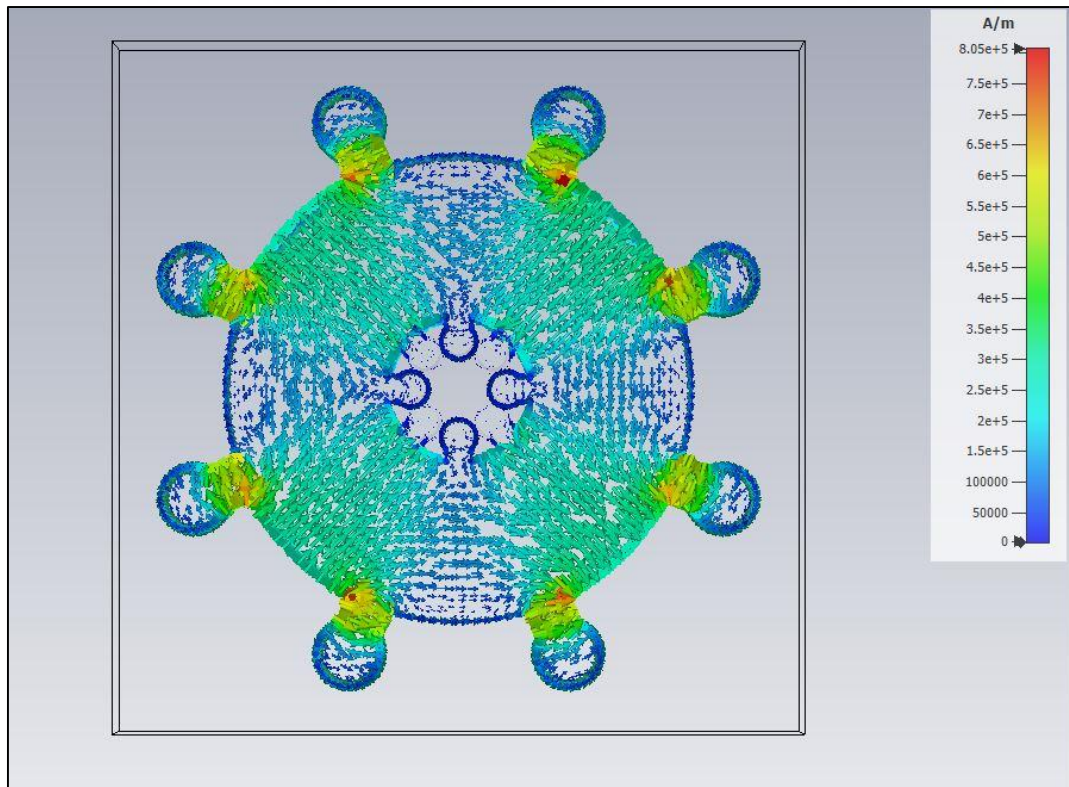
Şekil 4.68. D4 magnetronunun 8,716 GHz'deki (mod 1) yüzey akımı



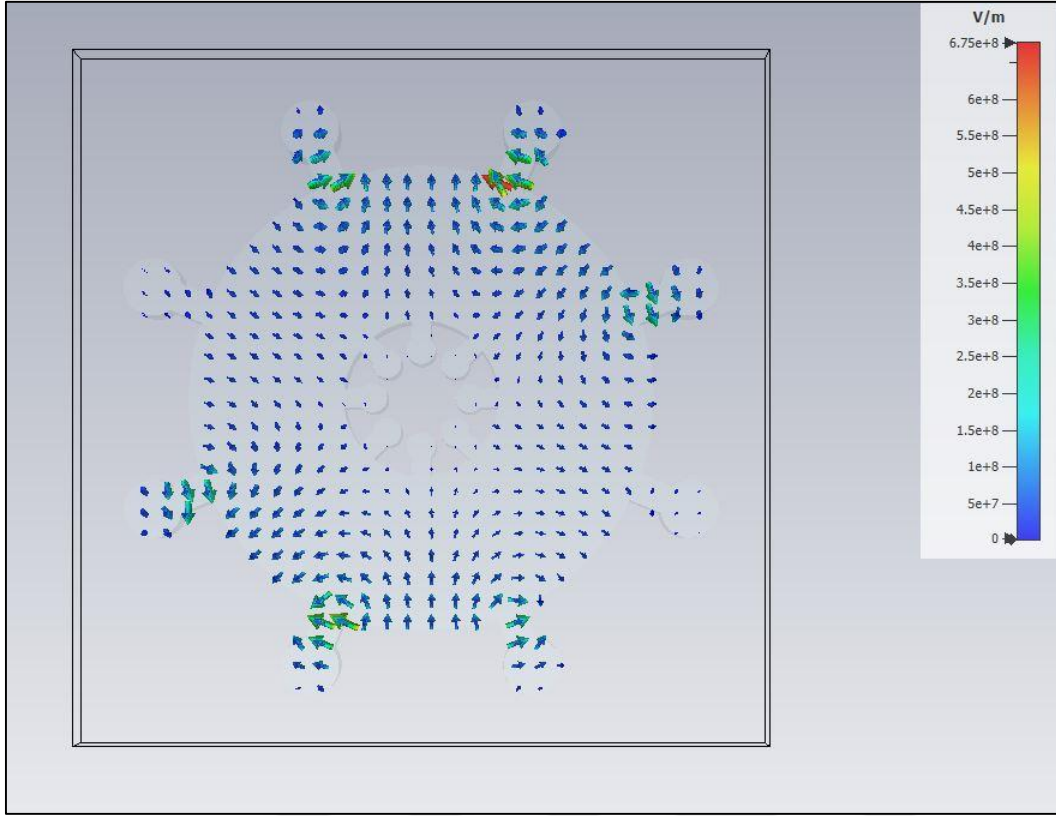
Şekil 4.69. D4 magnetronunun 8,717 GHz'deki (mod 2) elektrik alan dağılımı



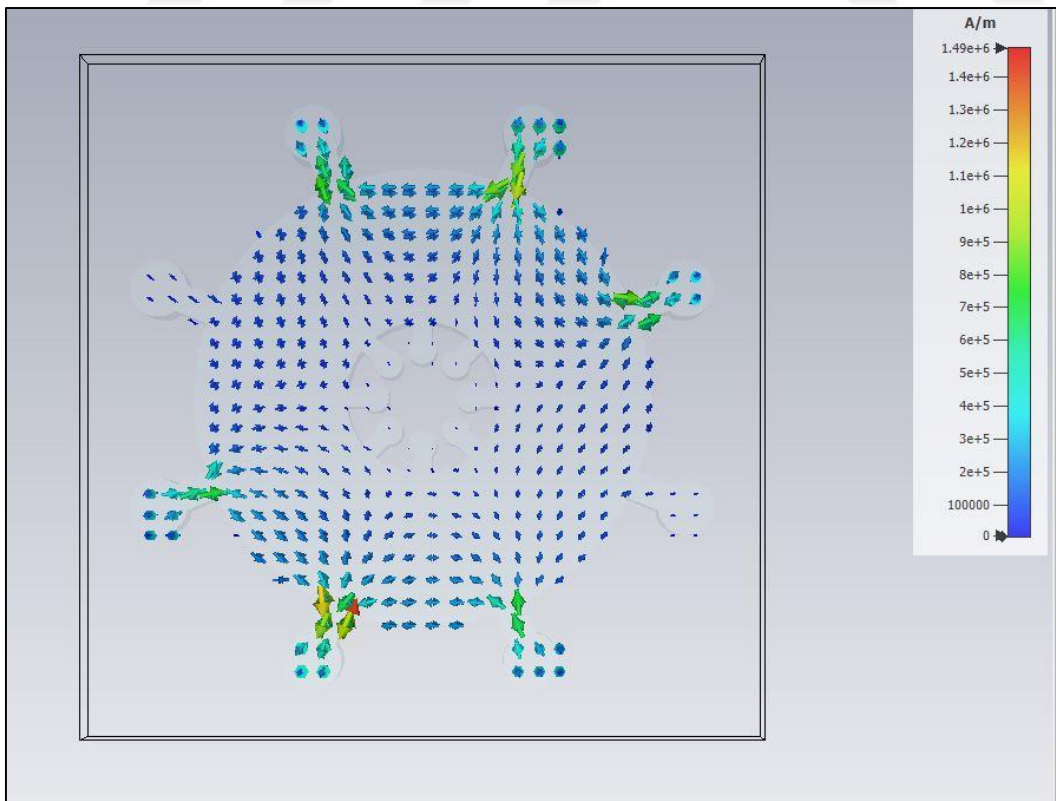
Şekil 4.70. D4 magnetronunun 8,717 GHz'deki (mod 2) manyetik alan dağılımı



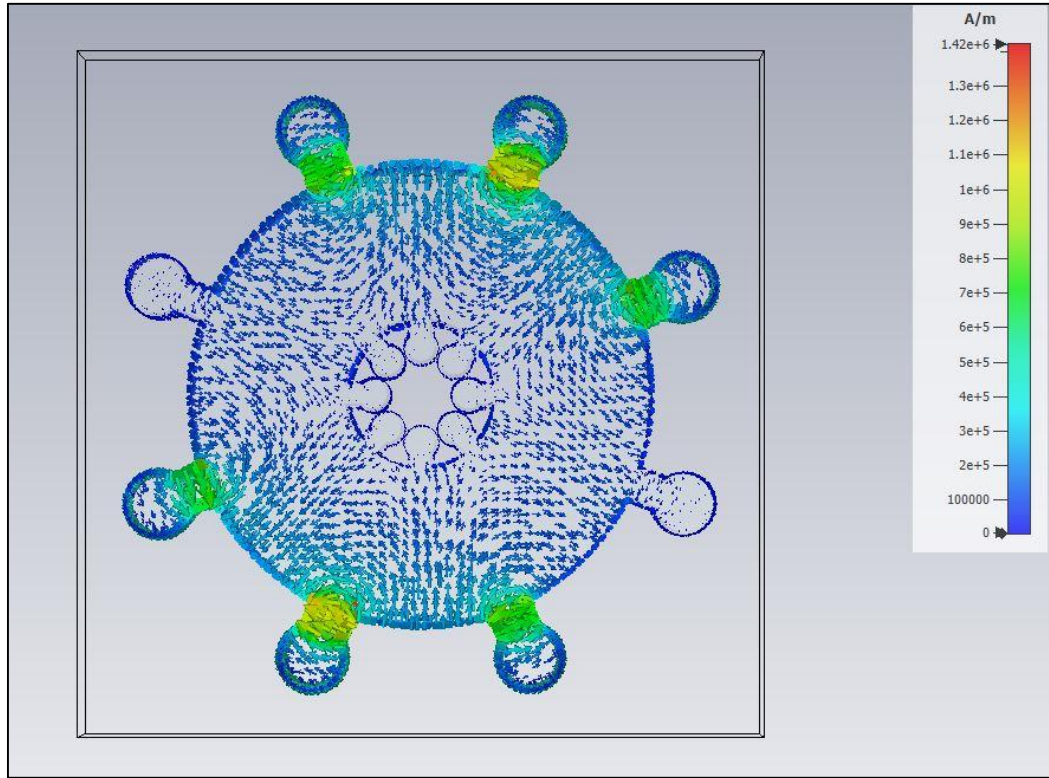
Şekil 4.71. D4 magnetronunun 8,717 GHz'deki (mod 2) yüzey akımı



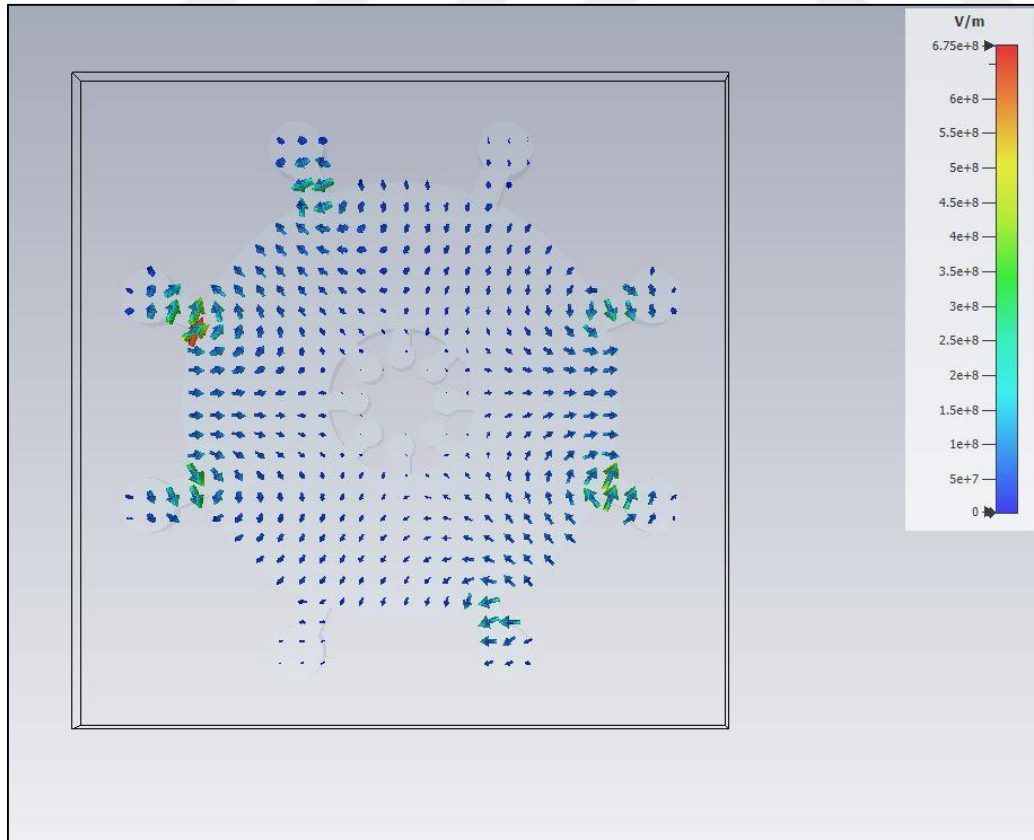
Şekil 4.72. D4 magnetronunun 9,04021 GHz’deki (mod 3) elektrik alan dağılımı



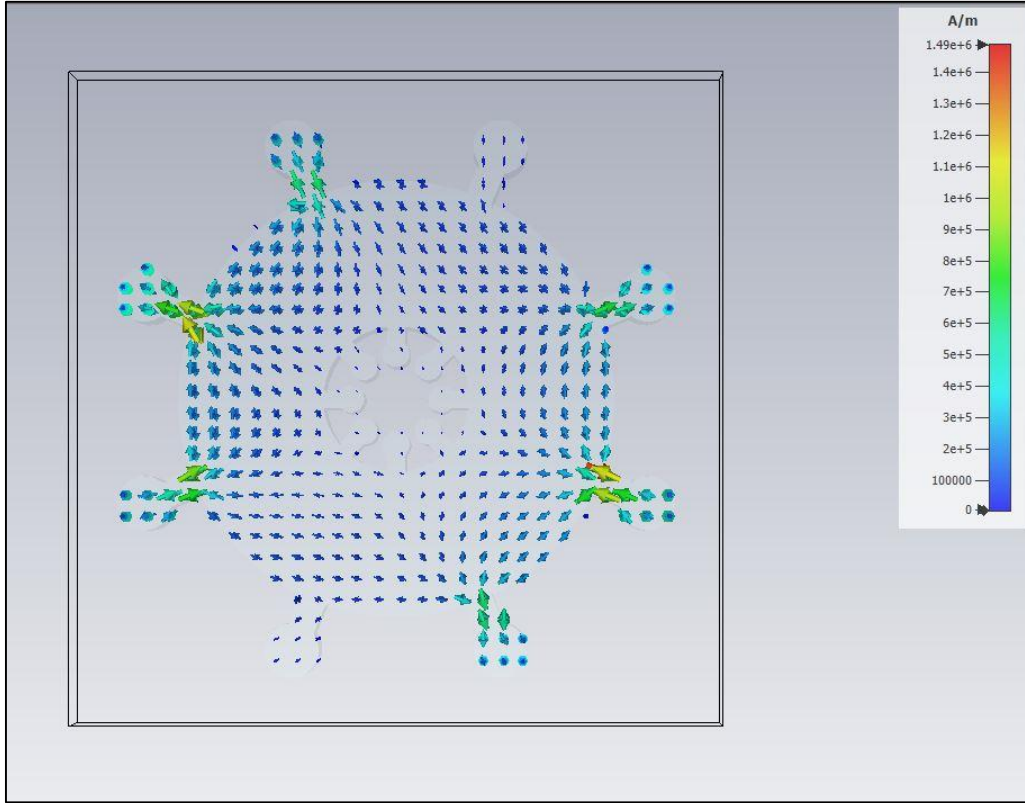
Şekil 4.73. D4 magnetronunun 9,04021 GHz’deki (mod 3) manyetik alan dağılımı



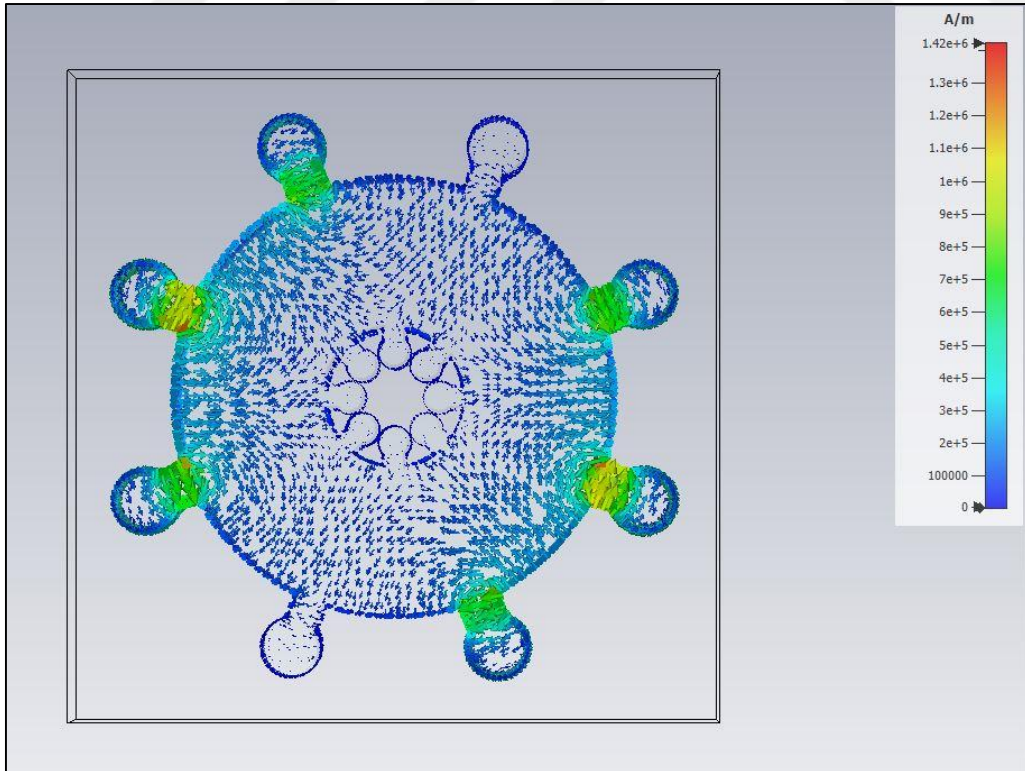
Şekil 4.74. D4 magnetronunun 9,04021 GHz'deki (mod 3) yüzey akımı



Şekil 4.75. D4 magnetronunun 9,04022 GHz'deki (mod 4) elektrik alan dağılımı

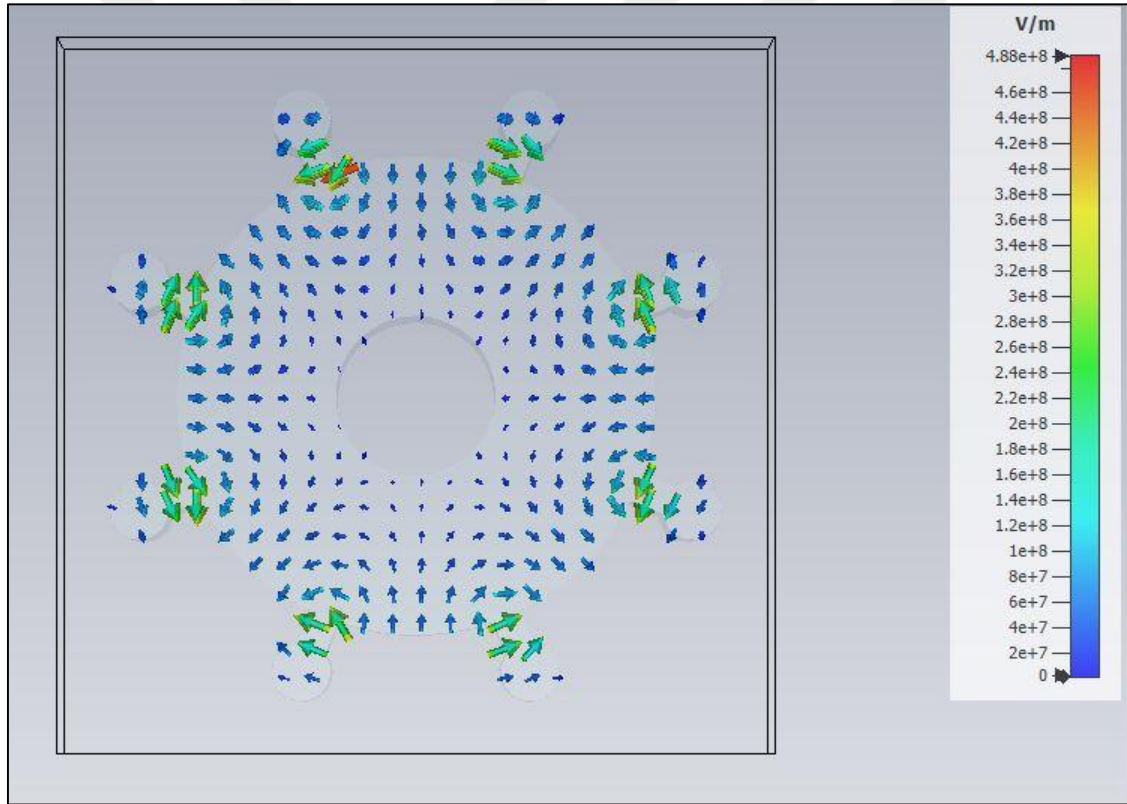


Şekil 4.76. D4 magnetronunun 9,04022 GHz'deki (mod 4) manyetik alan dağılımı

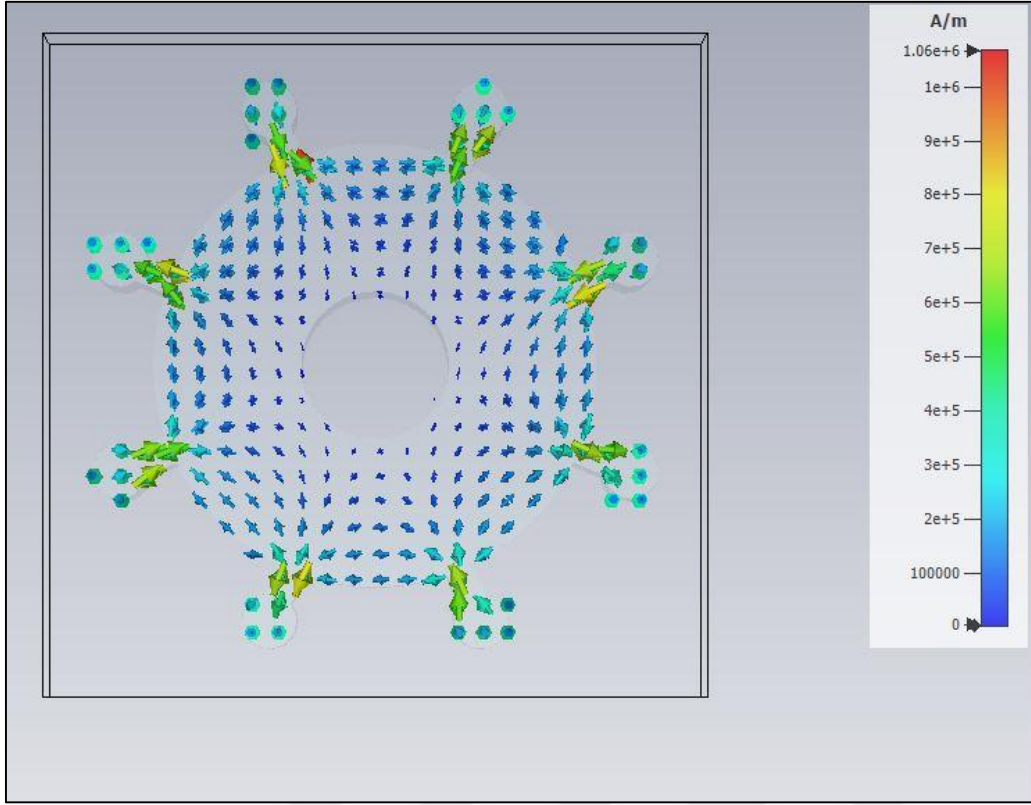


Şekil 4.77. D4 magnetronunun 9,04022 GHz'deki (mod 4) yüzey akımı

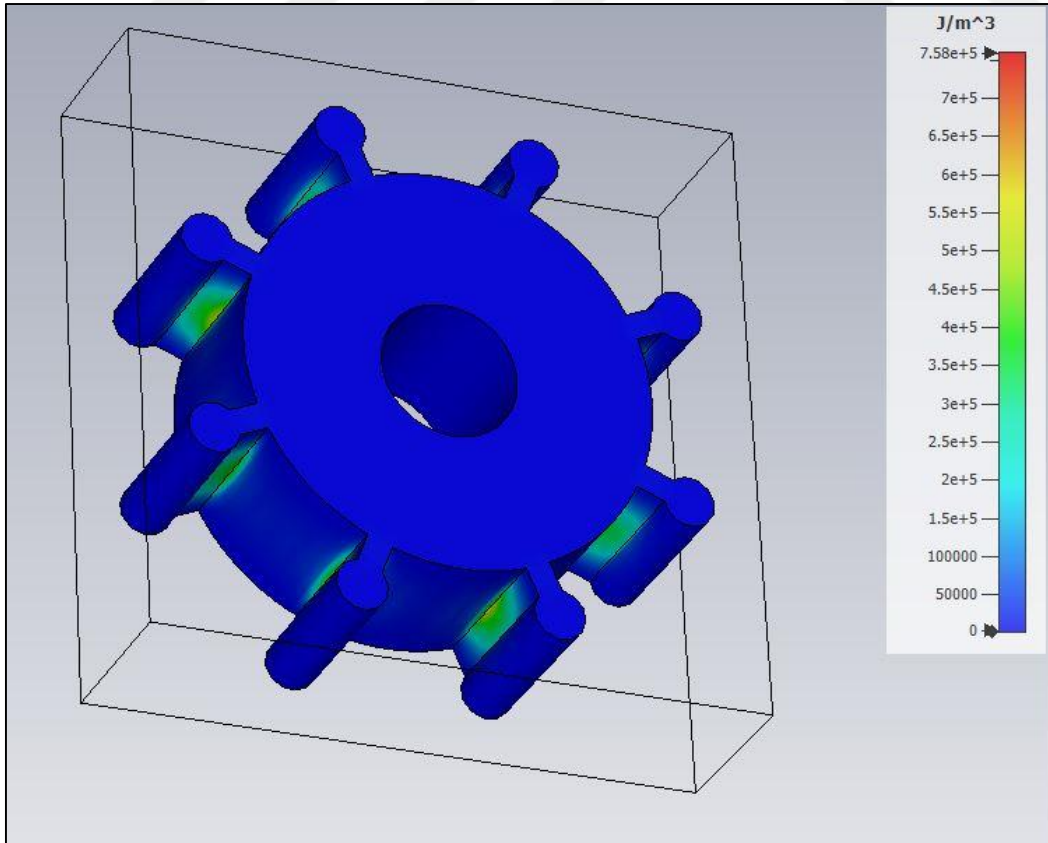
Daha öncede ifade edildiği gibi bu aşamada öz-frekans analizi yapılarak hem D3 hem de D4 magnetronları için komşu oyuklar arasında 180 derece fark bulunan π modu D3 magnetronu için 9,115 GHz de, D4 magnetronu için 9,112 GHz de Şekil 2.8'deki gibi elde edilmiştir. Böylece katot yapısına oyuk eklenerek çalışma frekansı 9 GHz'e daha yakın bir değere ulaşmıştır. Ayrıca π modunda D3 magnetronuna ait elektrik alanın maksimum değeri $4,883 \times 10^8$ V/m iken D4 magnetronunun maksimum elektrik alan değeri $4,994 \times 10^8$ V/m'dir. Buradan çıkarılacak sonuç oyuklu katot yapısıyla elektrik alanın maksimum değerinde bir artma meydana gelmektedir. D3 ve D4 magnetronlarına ait π modlarının elektromanyetik alan dağılımları, elektromanyetik enerji yoğunlukları ve yüzey akımları aşağıda sunulmuştur.



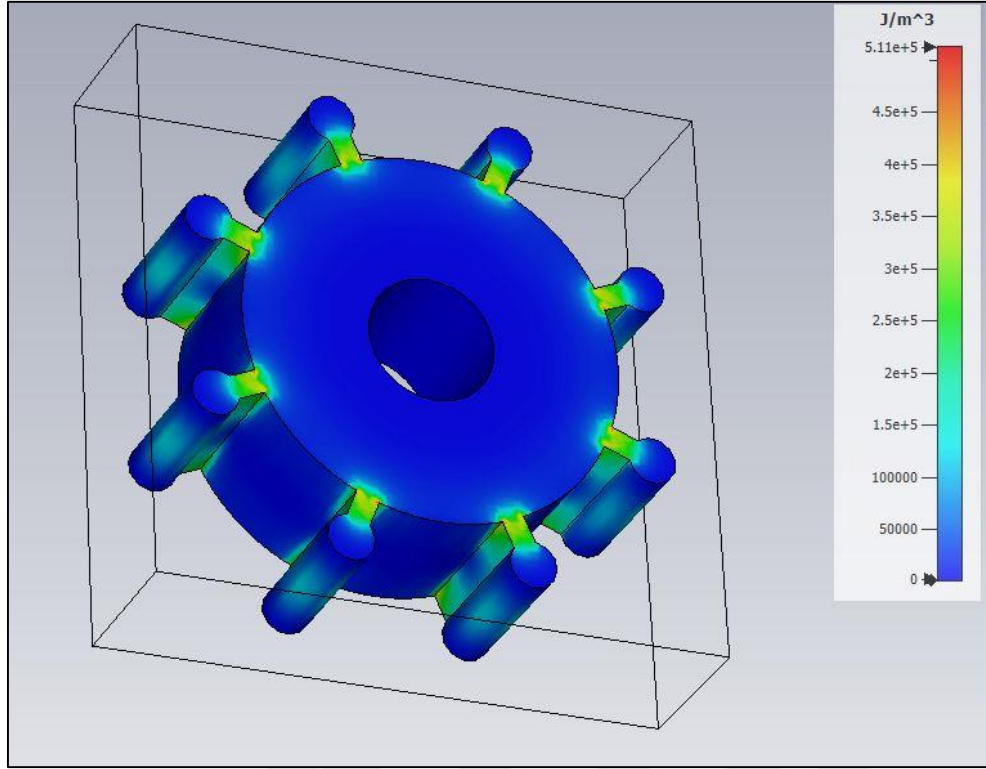
Şekil 4.78. D3 magnetronunun 9,115 GHz'deki (mod 5- π modu) elektrik alan dağılımı



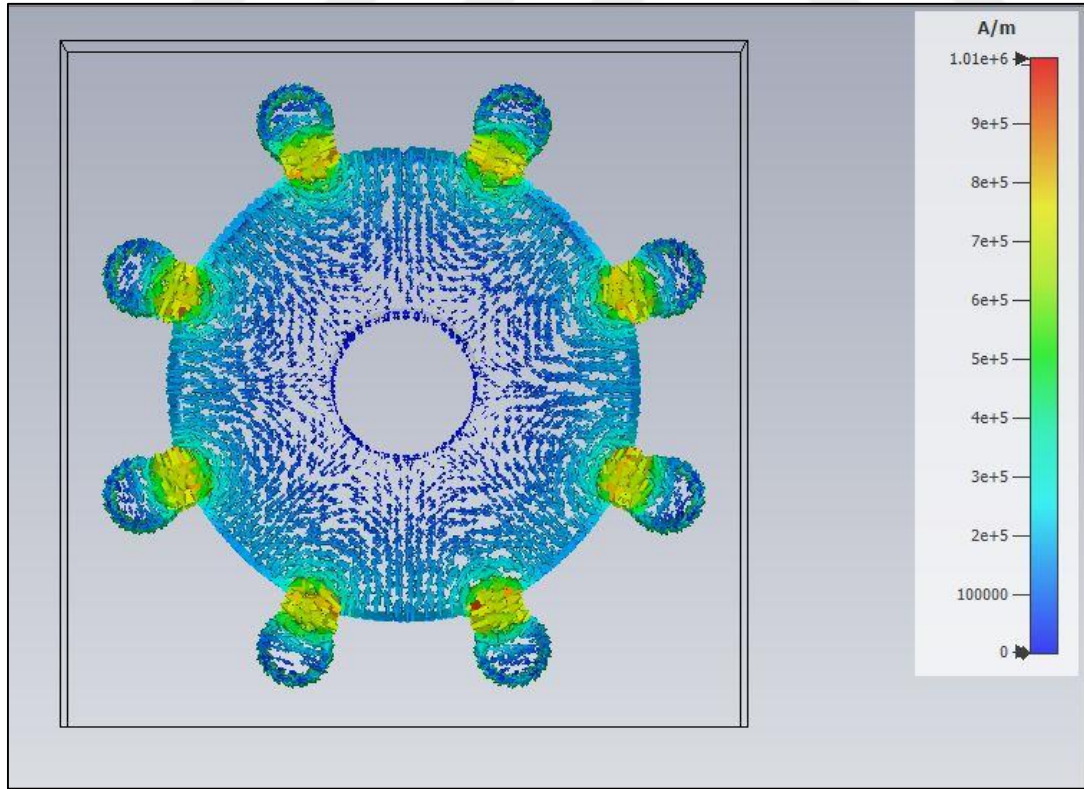
Şekil 4.79. D3 magnetronunun 9,115 GHz'deki (mod 5- π modu) manyetik alan dağılımı



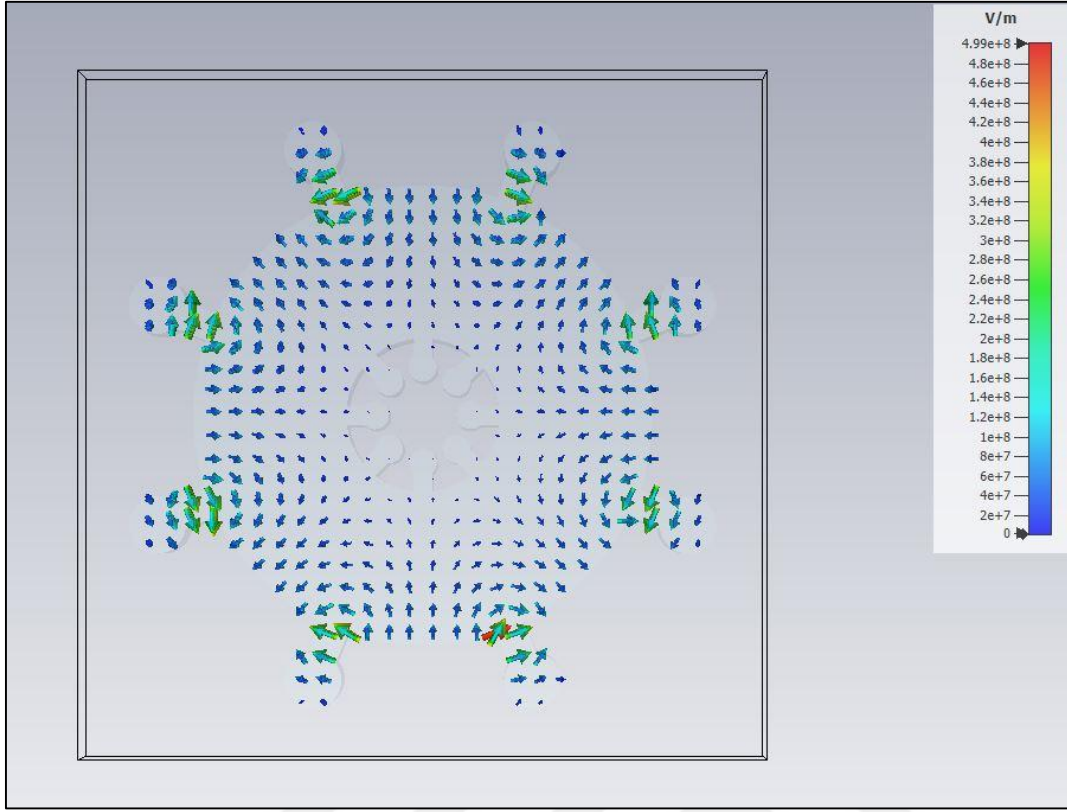
Şekil 4.80. D3 magnetronunun 9,115 GHz'deki (mod 5- π modu) elektrik enerji yoğunluğu



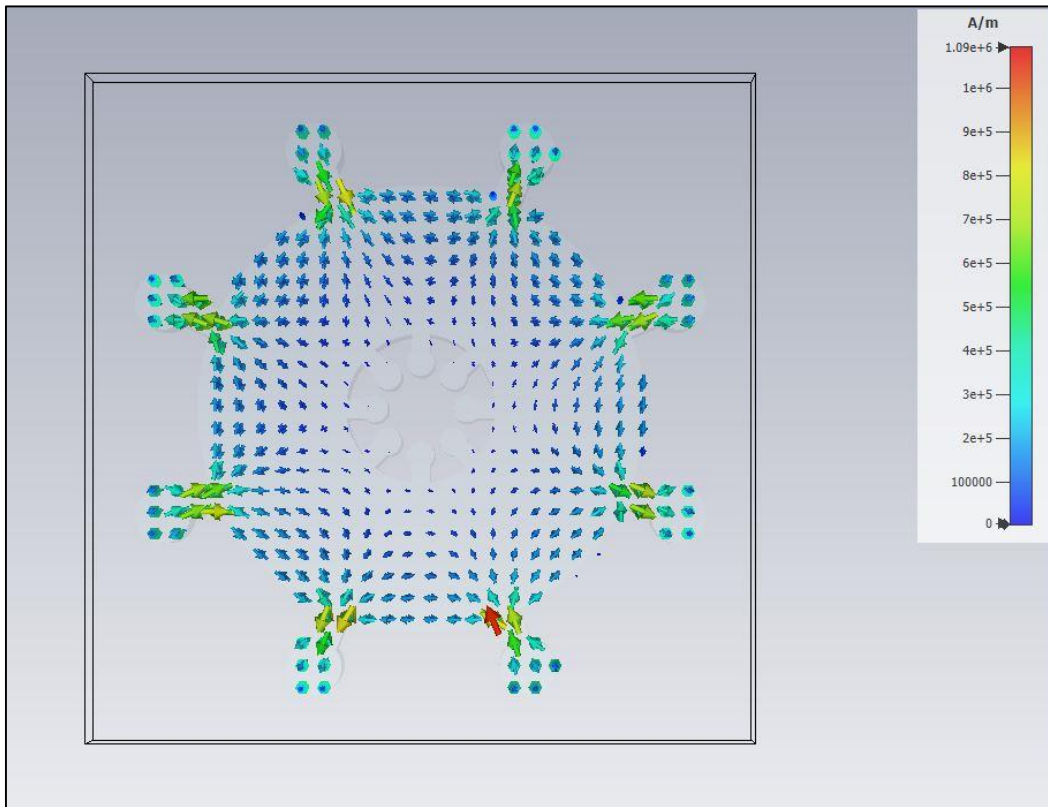
Şekil 4.81. D3 magnetronunun 9,115 GHz'deki (mod 5- π modu) manyetik enerji yoğunluğu



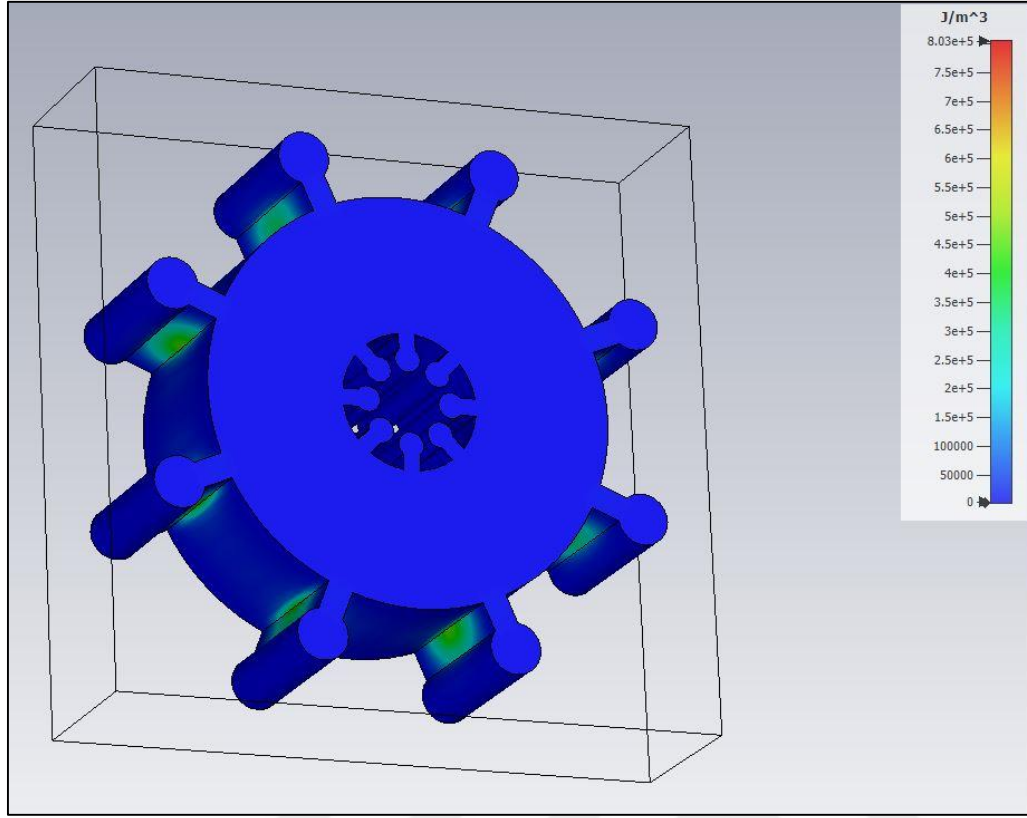
Şekil 4.82. D3 magnetronunun 9,115 GHz'deki (mod 5- π modu) yüzey akımı



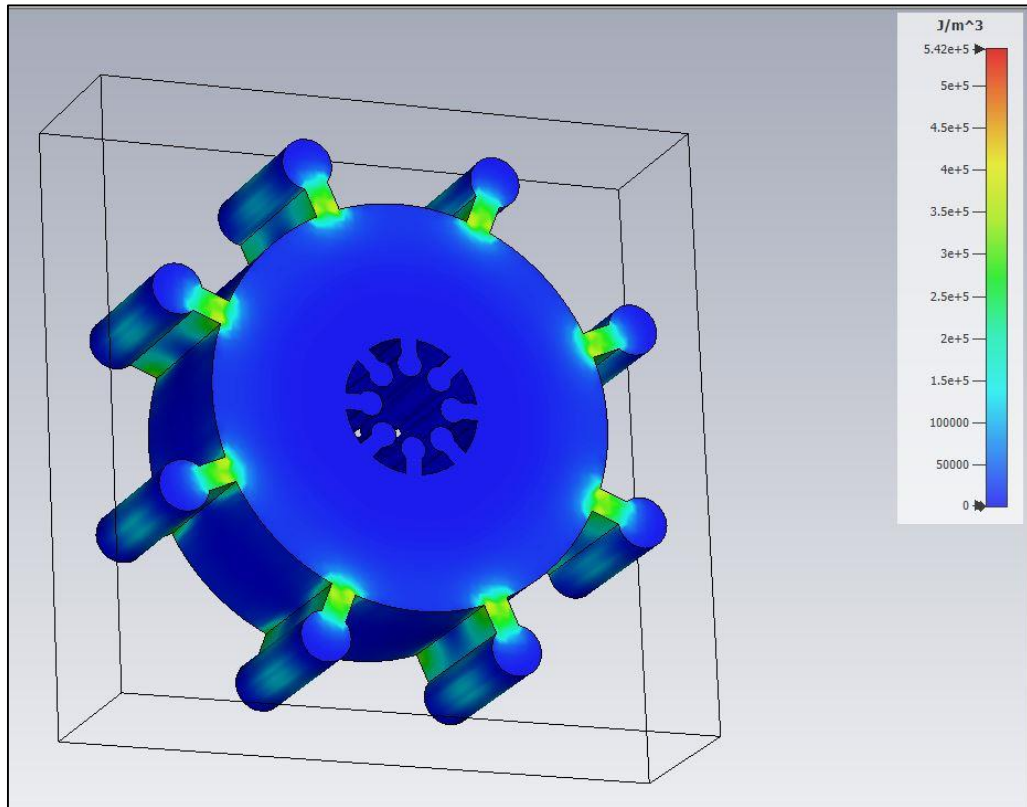
Şekil 4.83. D4 magnetronunun 9,112 GHz'deki (mod 5- π modu) elektrik alan dağılımı



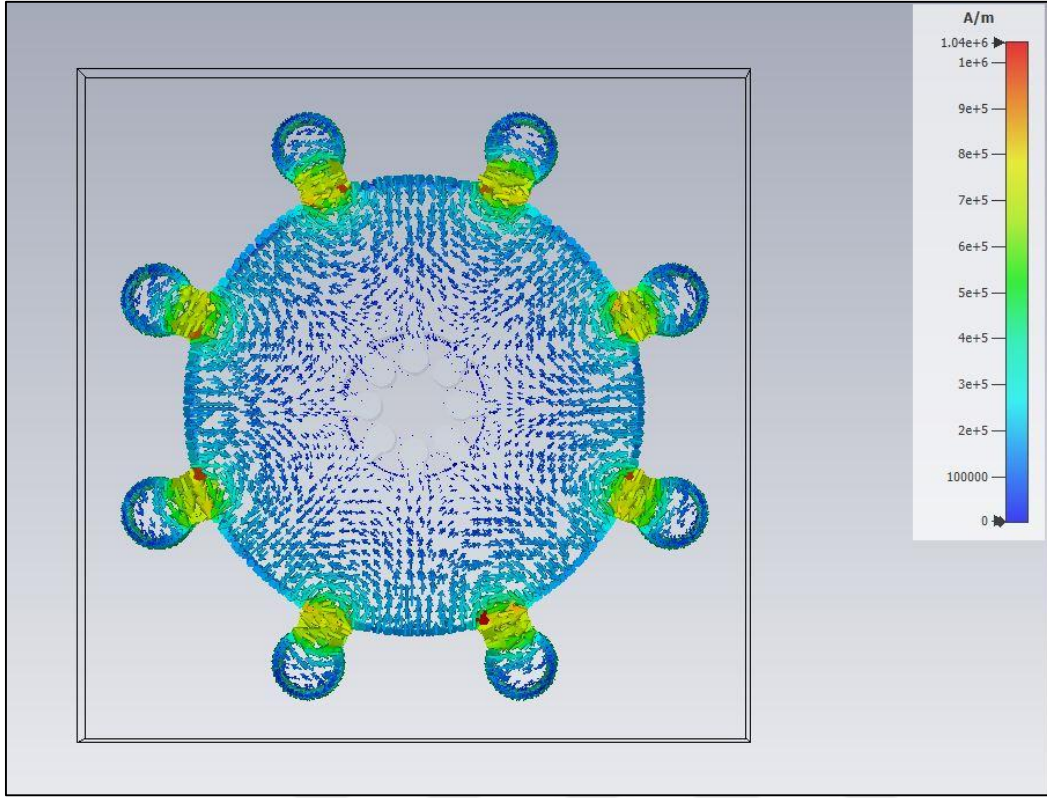
Şekil 4.84. D4 magnetronunun 9,112 GHz'deki (mod 5- π modu) manyetik alan dağılımı



Şekil 4.85. D4 magnetronunun 9,112 GHz'deki (mod 5- π modu) elektrik enerji yoğunluğu



Şekil 4.86. D4 magnetronunun 9,112 GHz'deki (mod 5- π modu) manyetik enerji yoğunluğu



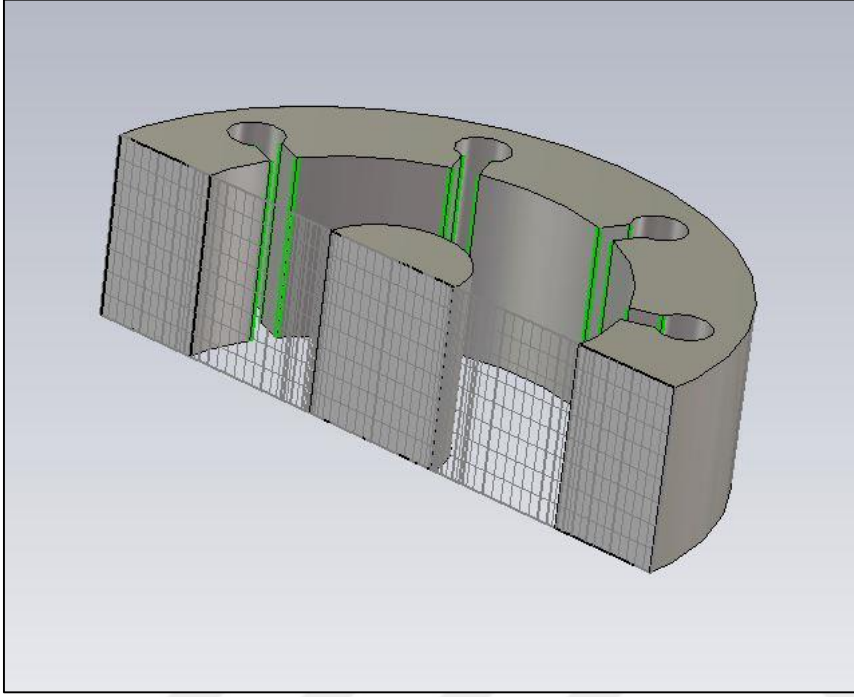
Şekil 4.87. D4 magnetronunun 9,112 GHz'deki (mod 5- π modu) yüzey akımı

Magnetronun boyutlarında değişiklik yapılarak π modunda istenen çalışma frekansına yakın bir değerde elektromanyetik alanlar elde edildiği için çalışmanın öz-frekans (mod) analizi böylece tamamlanmıştır.

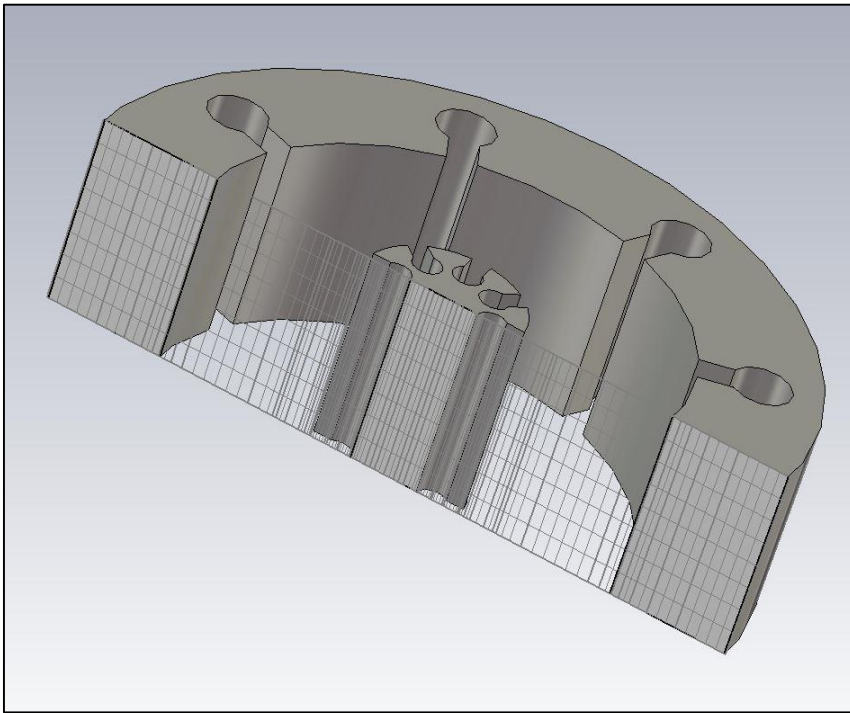
4.4. Parçacık İzleme Analizi

Magnetronun 3B modellemesi ve benzetim çalışmaları için bir sonraki aşama parçacık izleme analizidir. Bu kısmın gerçekleştirilmesinin amacı anot ve katot blokları arasına uygulanan gerekli potansiyel farkın ve manyetik alan değerlerinin her iki magnetron için (D3 ve D4) belirlenmesidir. Bunun içinde ilk olarak anot ve katot blokları ilk analizde olduğu gibi süper elektriksel iletkenliğe sahip (PEC) malzeme olarak tanımlanmış ve arka plan malzemesi vakum olarak belirlenmiştir. Böylece PEC malzeme dışındaki her yer vakumla doldurulmuştur. Sınır koşul olarak bütün yönlerde (x, y, z) teğetsel manyetik alan $H_t=0$ olarak ayarlanmıştır. Ağ örgülü yapı olarak düzgün altı yüzlü yapı kullanılmış olup dalga boyu başına hücre sayısı her iki magnetron için de 10 olarak ayarlanmıştır. D3 ve D4 magnetronlarının sahip olduğu toplam ağ örgü (mesh) sayısı sırasıyla 61952 ve 123008'dir. Ayrıca D3 magnetronunun sahip olduğu en küçük ve en büyük hücre boyutları 0,0219 cm

ve 0,25 cm iken D4 magnetronunun sahip olduğu en küçük ve en büyük hücre boyutları 0,0083 cm ve 0,25 cm'dir. Her iki magnetrona ait ağ örgülü yapının görüntüsü şğıdaki şekillerde verilmiştir.

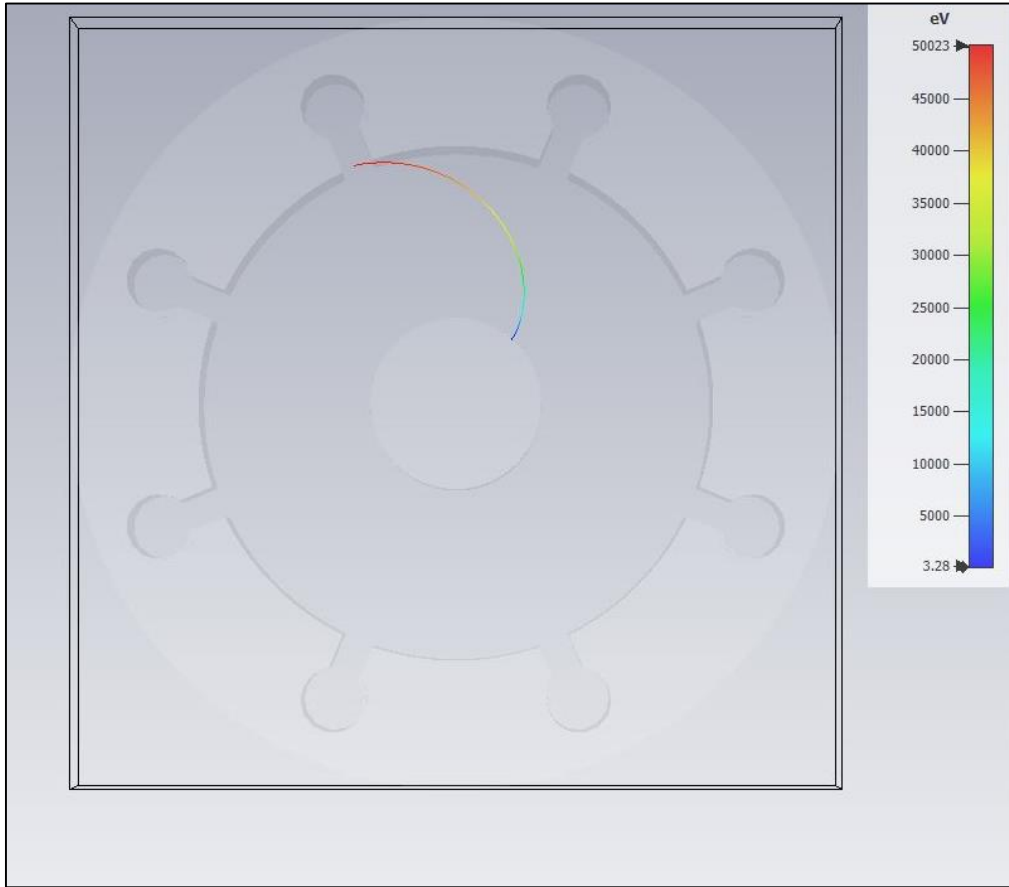


Şekil 4.88. D3 magnetronunun ağ örgülü yapı görüntüsü



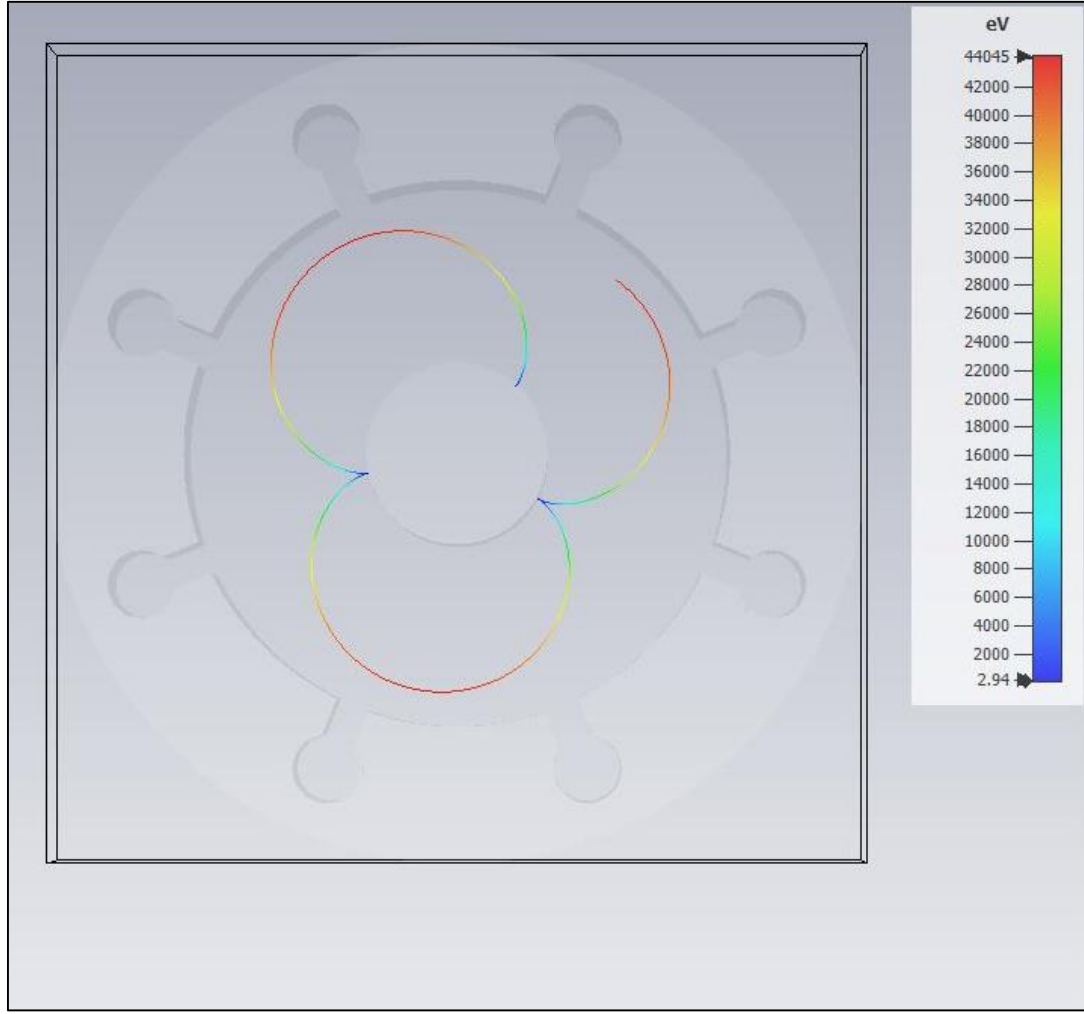
Şekil 4.89. D4 magnetronunun ağ örgülü yapı görüntüsü

Her iki magnetron için de parçacık kaynağı olarak katot belirlenmiş ve katottan elektron yayılımı (emisyonu) için sabit (fixed) yayılım modeli seçilmiştir. Ayrıca elektron yayılım akımı 10 A (Amper), kinetik enerji değeri 5 eV olarak seçilmiştir. D3 ve D4 magnetronları için uygulanması gereken manyetik alan değerleri birden fazla benzetim çalışması yapılarak deneme yanılma yoluyla bulunmaya çalışılmıştır. Bunun için D3 magnetronuna ilk olarak 0,07 T manyetik alan uygulanmıştır. Gerçekleştirilen bu benzetim çalışmasından elde edilen sonuca ait bir tane elektronun bir turda izlediği yol aşağıdaki gibidir.



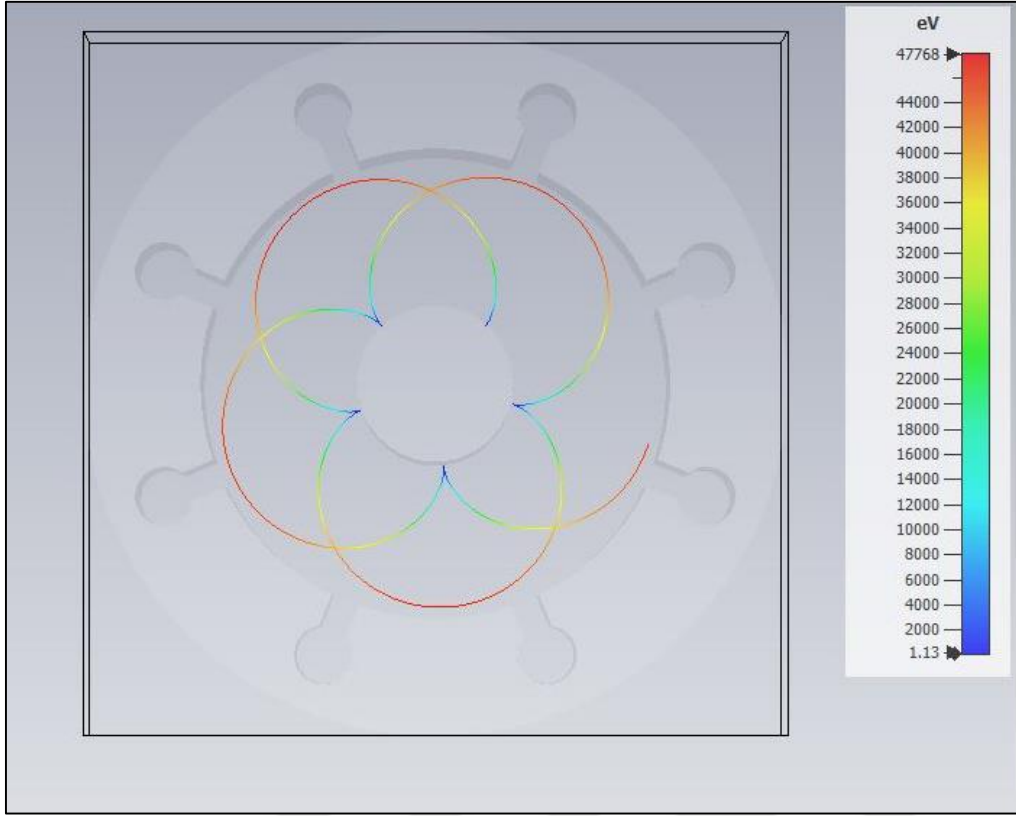
Şekil 4.90. 50 kV gerilim ve 0,07 T manyetik alanın etkisi altında bir elektronun hareketi

Elde edilen sonuca göre elektronun anota çarptığı gözlemlenmiş ve manyetik alan değeri biraz artırılarak 0,08 T olarak uygulanmıştır. Böylece elektronların anota çarpmadan (elektron anota çarptığında kesime uğramaktadır) katot etrafında düzgün bir şekilde hareket etmesi amaçlanmıştır. Bu manyetik alan değerinden elde edilen sonuç aşağıda sunulmuştur.

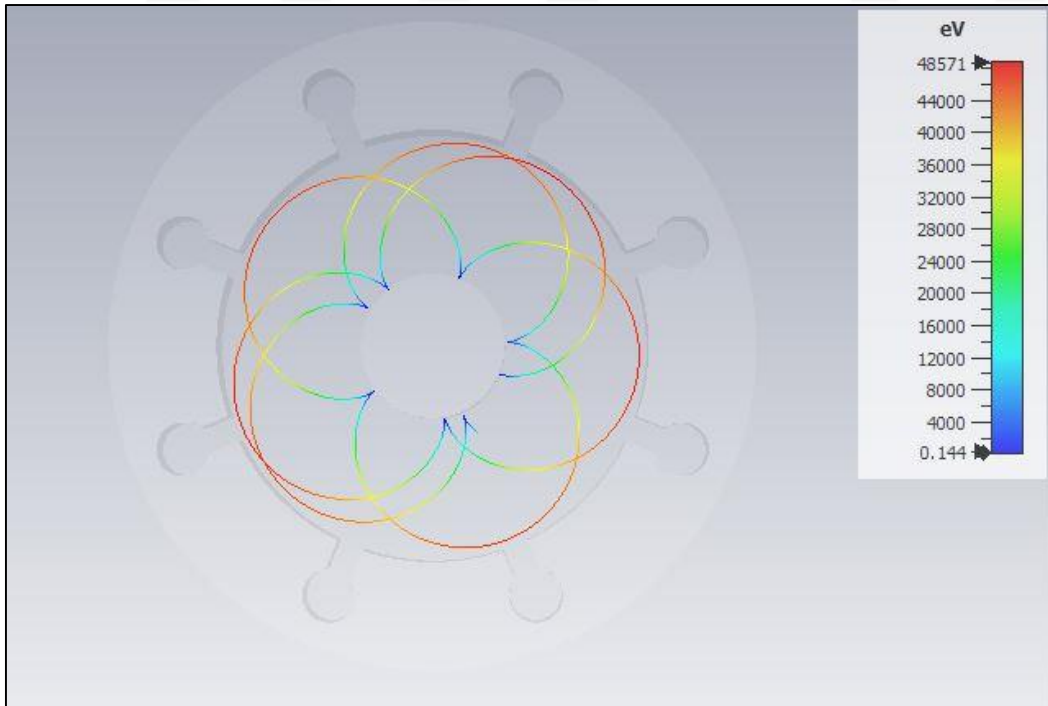


Şekil 4.91. 50 kV gerilim ve 0,08 T manyetik alanın etkisi altında bir elektronun bir turdaki hareketi

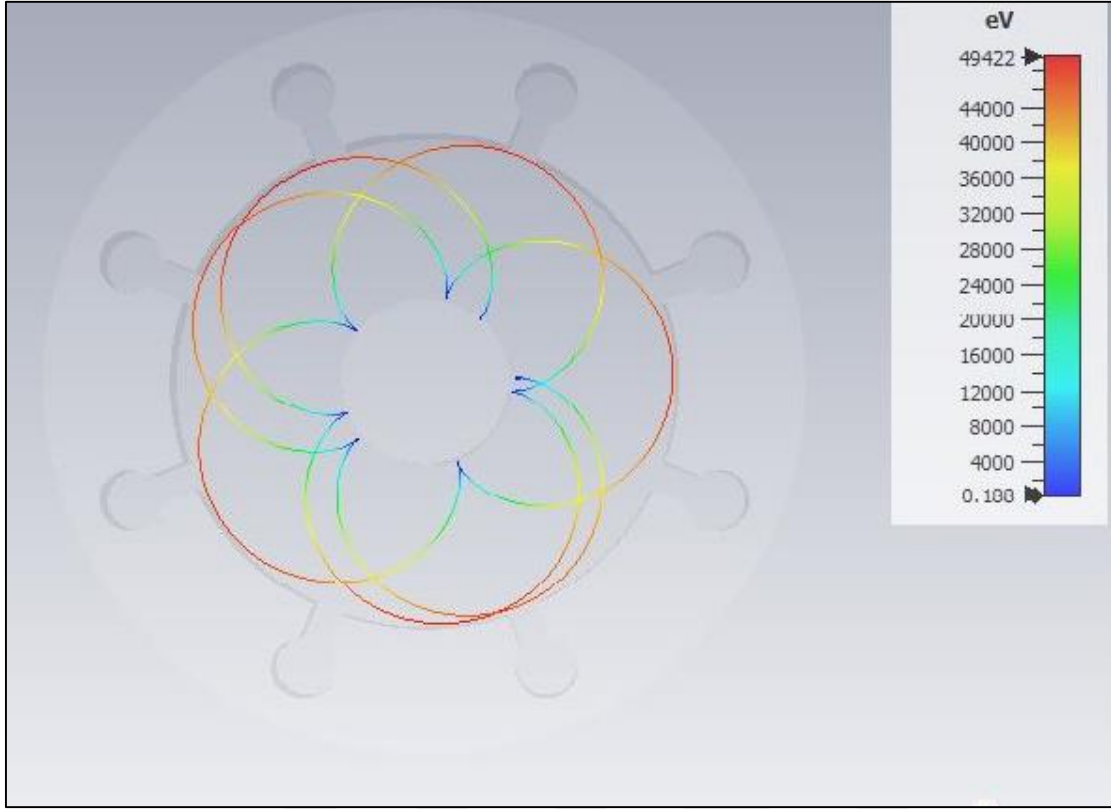
Uygulanan manyetik alan değerinin artırılmasıyla istenilen sonuca biraz daha yaklaşılmış olup elektronların anota tam olarak teğet geçmesi için manyetik alan değeri belirli aralıklarla biraz daha azaltılarak sırasıyla 0,075 T, 0,074 T, 0,073 T ve 0,072 T olarak uygulanmıştır. Gerçekleştirilen benzetim çalışmalarının sonuçlarına göre ilk üç manyetik alan değerinde elektronların anota doğru teğet yapma eğiliminde olduğu; 0,072 T manyetik alan değerinde ise anota çarptığı gözlemlenmiştir. Burada bahsi geçen manyetik alan değerlerine ait sonuçlar aşağıdaki gibidir.



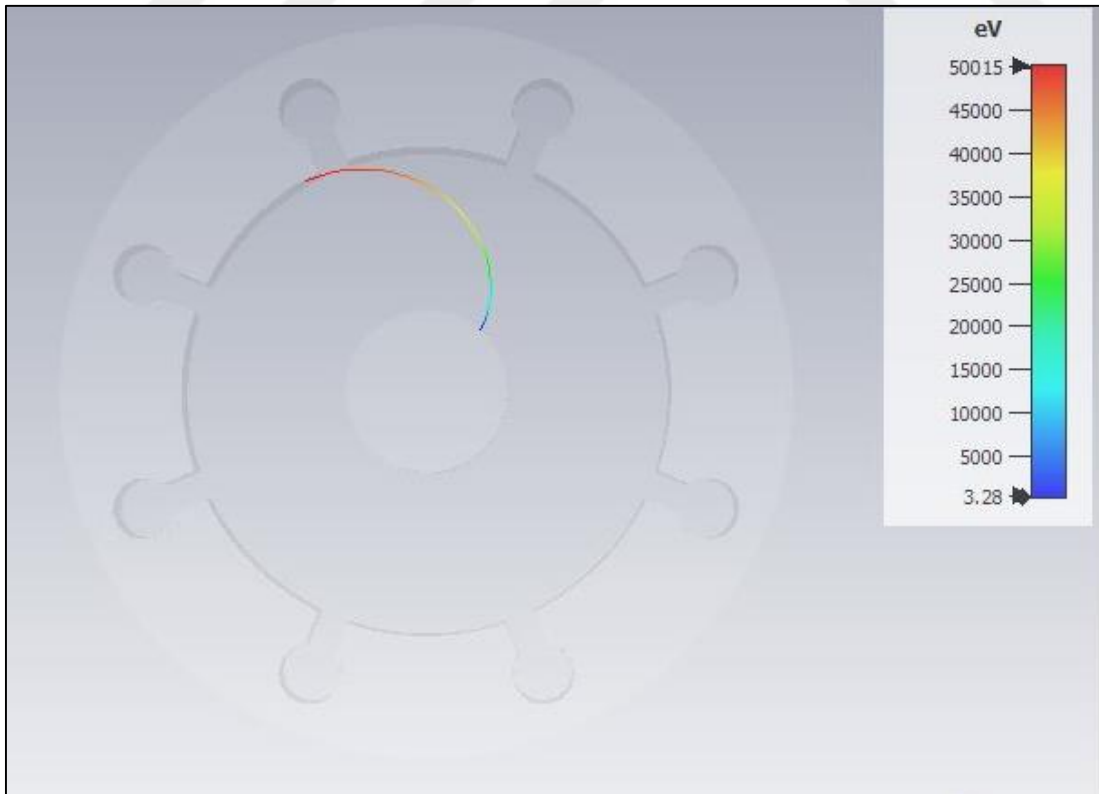
Şekil 4.92. 50 kV gerilim ve 0,075 T manyetik alanın etkisi altında bir elektronun hareketi



Şekil 4.93. 50 kV gerilim ve 0,074 T manyetik alanın etkisi altında bir elektronun hareketi

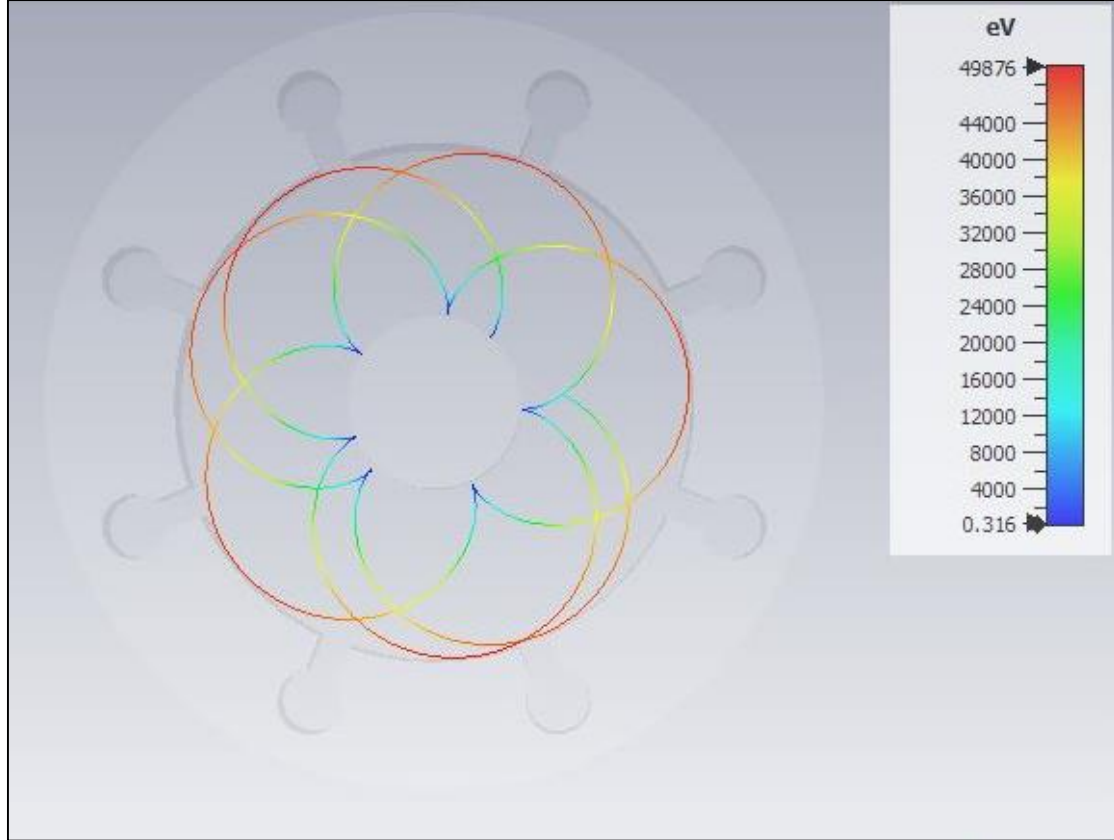


Şekil 4.94. 50 kV gerilim ve 0,073 T manyetik alanın etkisi altında bir elektronun hareketi

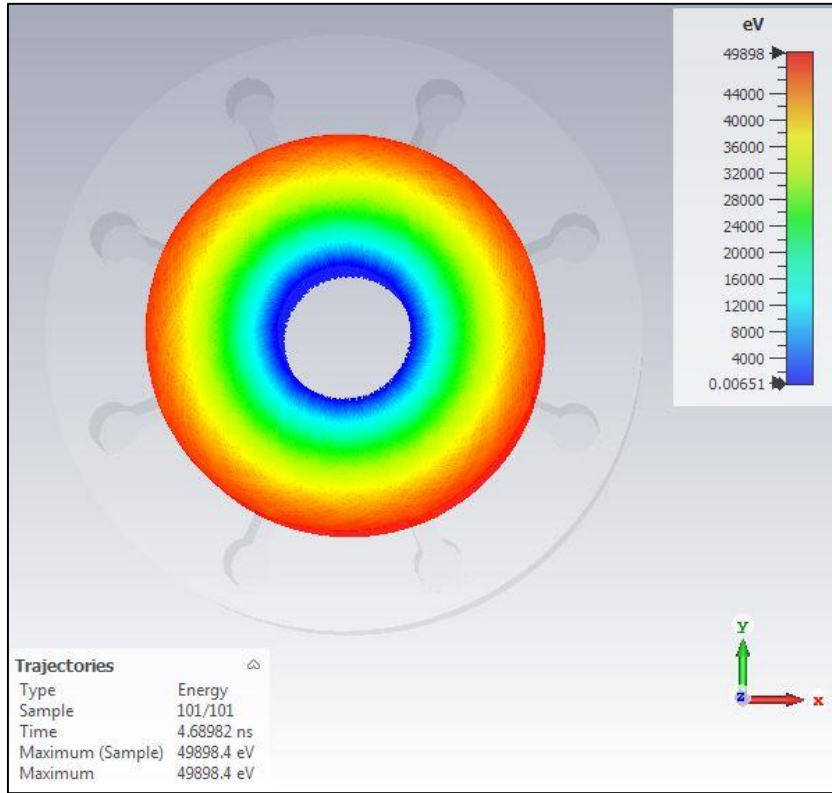


Şekil 4.95. 50 kV gerilim ve 0,072 T manyetik alanın etkisi altında bir elektronun hareketi

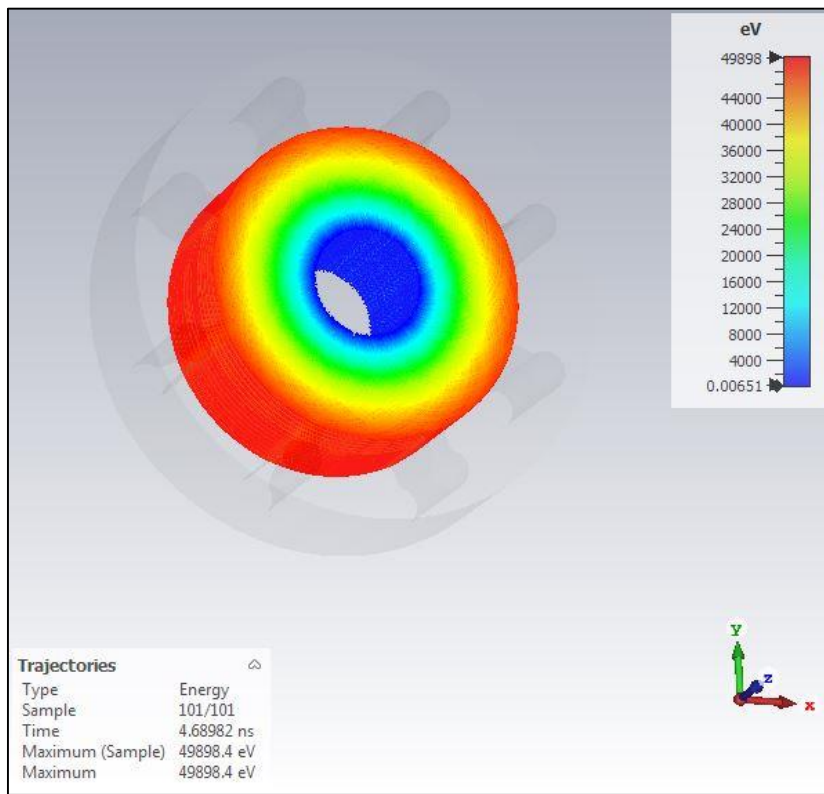
D3 magnetronu için son aşama olarak 0,0725 T manyetik alan değeri uygulanmış ve elektronların istenildiği gibi anoda tam olarak teğet geçtiği görülmüştür. Ayrıca bu manyetik alan değerindeki bütün elektronların hareketini gözlemlemek için 1904 tane yayılım noktası belirlenmiş olup hem bir elektrona ait hem de bütün elektronlara ait hareketlerin incelendiği sonuçlar aşağıda sunulmuştur.



Şekil 4.96. 50 kV gerilim ve 0,0725 T manyetik alanın etkisi altında bir elektronun hareketi



Şekil 4.97. 50 kV gerilim ve 0,0725 T manyetik alanın etkisi altında bütün elektronların hareketinin üst kesit görüntüsü



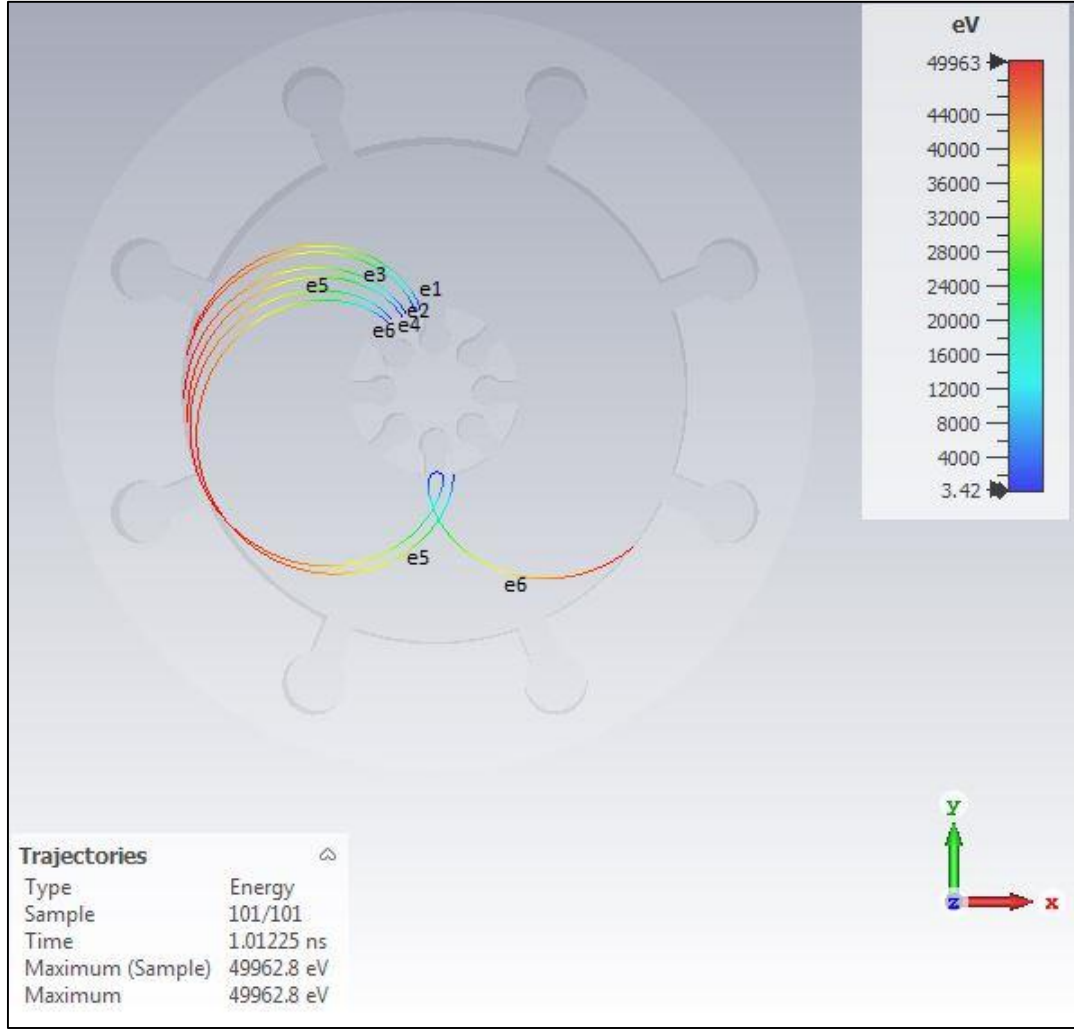
Şekil 4.98. 50 kV gerilim ve 0,0725 T manyetik alanın etkisi altında bütün elektronların hareketinin üç boyutlu görüntüsü

D3 magnetronuyla alakalı çalışmayı bu kısımda bitirip D4 magnetronunu incelediğimizde, D3 magnetronunda olduğu gibi bu magnetrona da ilk olarak 0,07 T manyetik alan değeri uygulanmış ve bir tane elektronun hareketi incelenmiştir. Elde edilen sonuca göre bu elektronun anota çarptığı görülmüştür. Gerçekleştirilen bu çalışmaya ait sonuç aşağıda sunulmuştur.



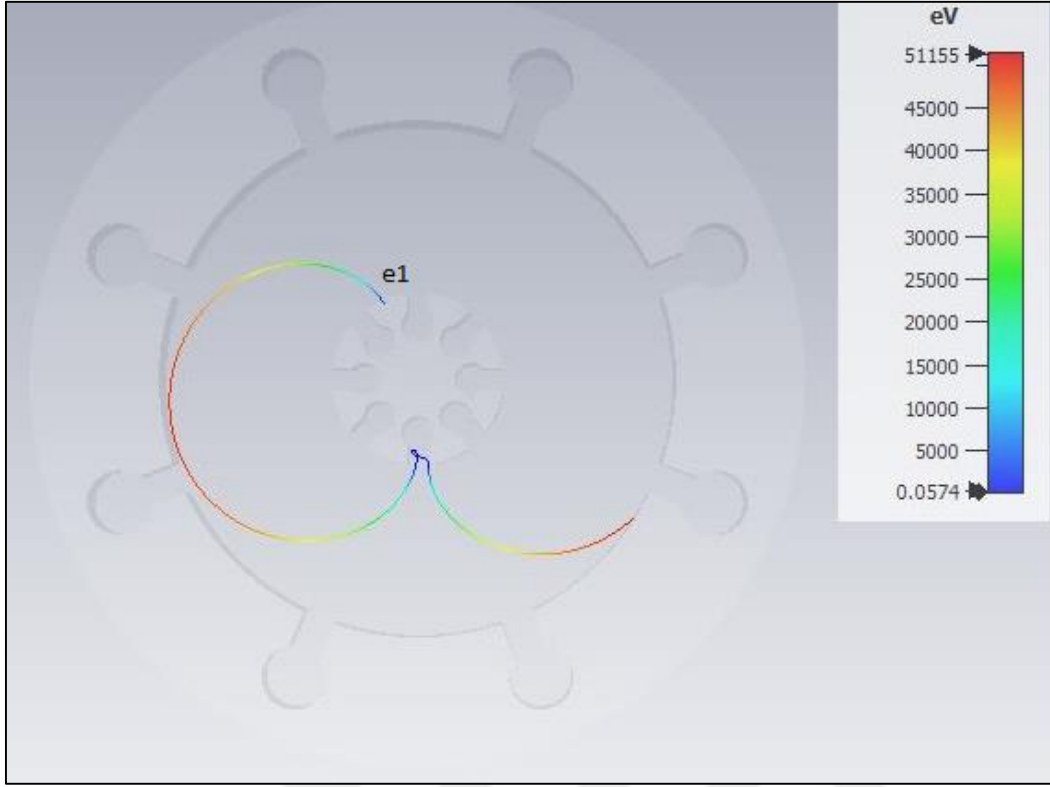
Şekil 4.99. 50 kV gerilim ve 0,07 T manyetik alanın etkisi altında bir elektronun bir turdaki hareketi

Daha sonra D4 magnetronuna uygulanan manyetik alan değeri elektronların daha fazla sapmaya uğraması için biraz daha artırılarak 0,072 T olarak uygulanmış ve birden fazla elektronun hareketi incelenmiştir. Bu manyetik alan değerine ait sonuç aşağıdaki gibidir.

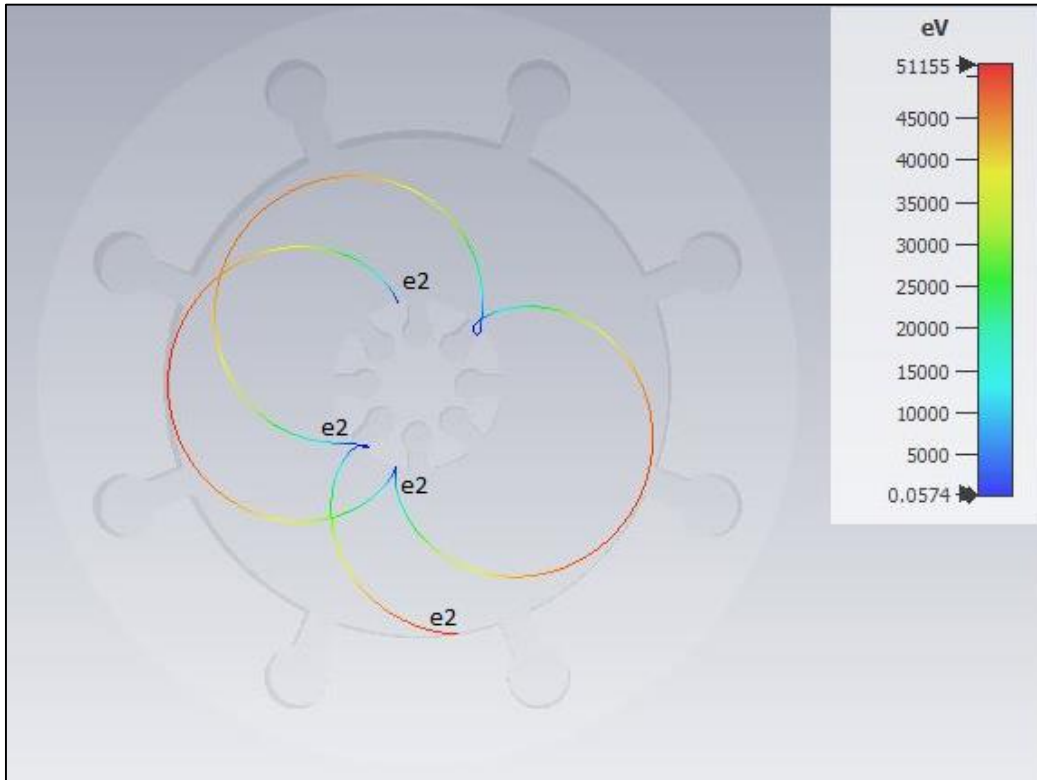


Şekil 4.100. 50 kV gerilim ve 0,072 T manyetik alanın etkisi altında elektronların hareketi

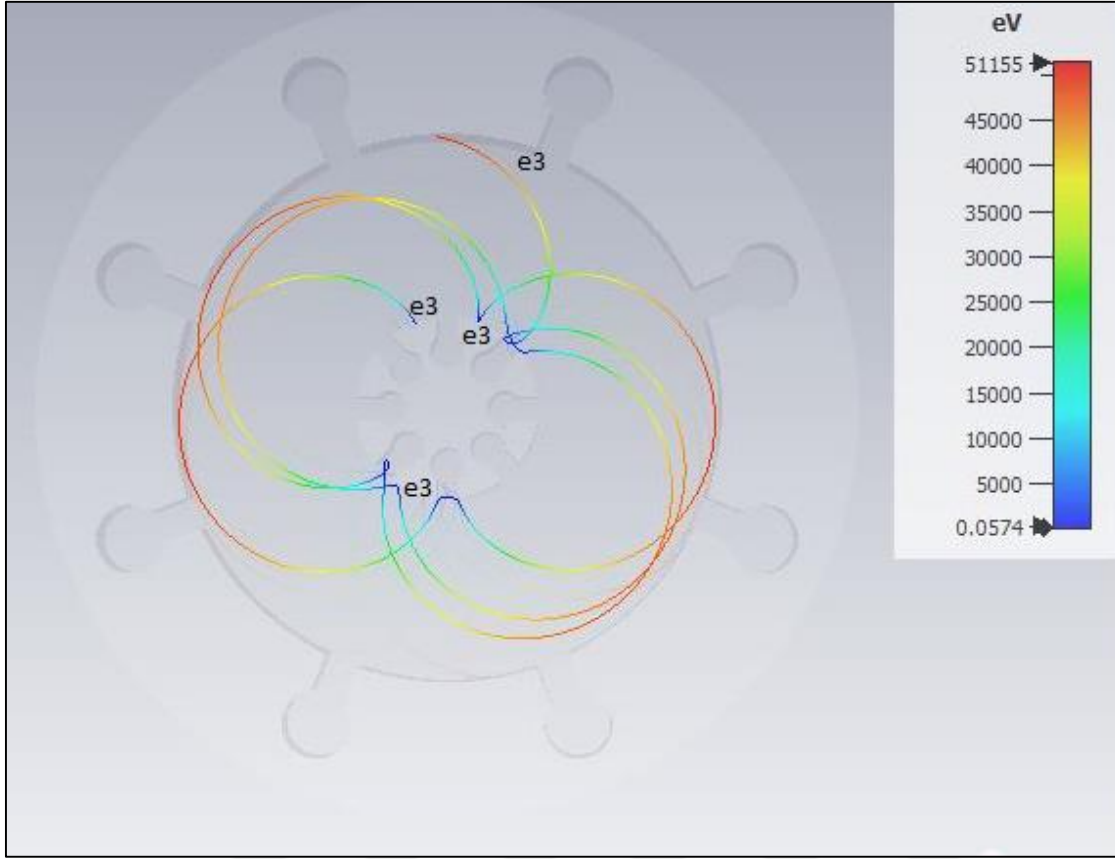
Yukarıdaki şekilden de anlaşılacağı üzere 0,072 T manyetik alan değerinde elektronların çoğu doğrudan anota çarpmış ve manyetik alan değerinin biraz daha artırılmasının gerektiği anlaşılmış ve 0,073 T manyetik alan değerinde farklı elektronların hareketi incelenmiştir. Bu manyetik alan değerinde elektronların istenildiği gibi anota teğet geçtiği görülmüştür. Farklı elektronlara ait veriler aşağıda sunulmuştur.



Şekil 4.101. 50 kV gerilim ve 0,073 T manyetik alanın etkisi altında bir elektronun bir turdaki hareketi

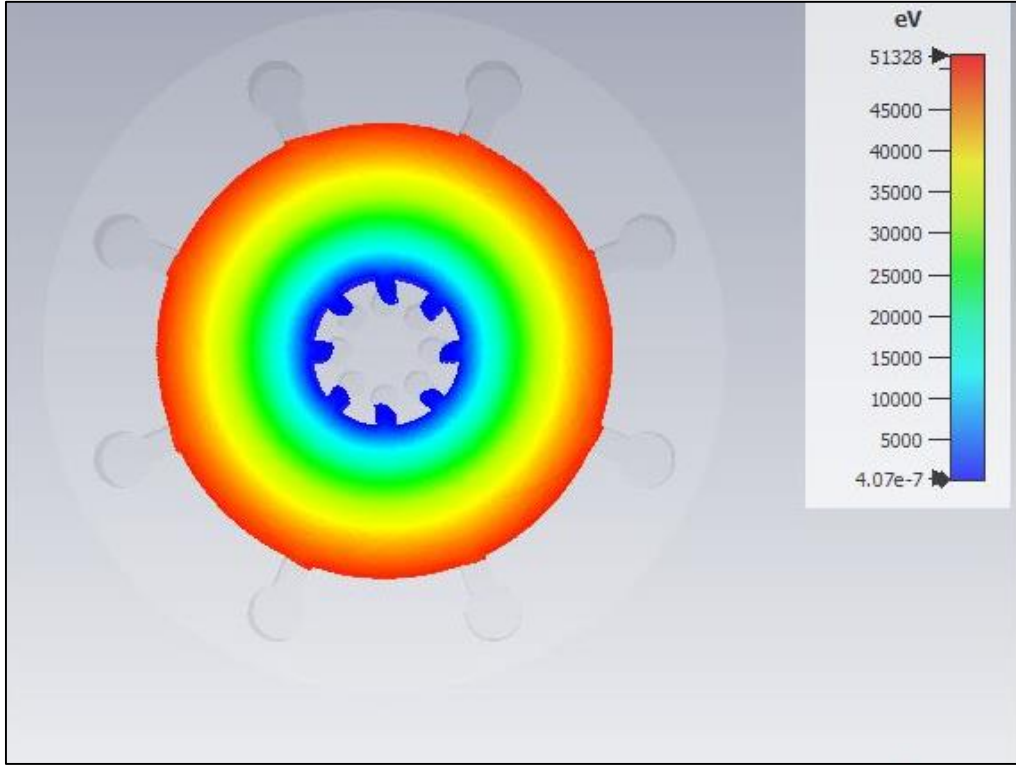


Şekil 4.102. 50 kV gerilim ve 0,073 T manyetik alanın etkisi altında farklı bir elektronun bir turdaki hareketi

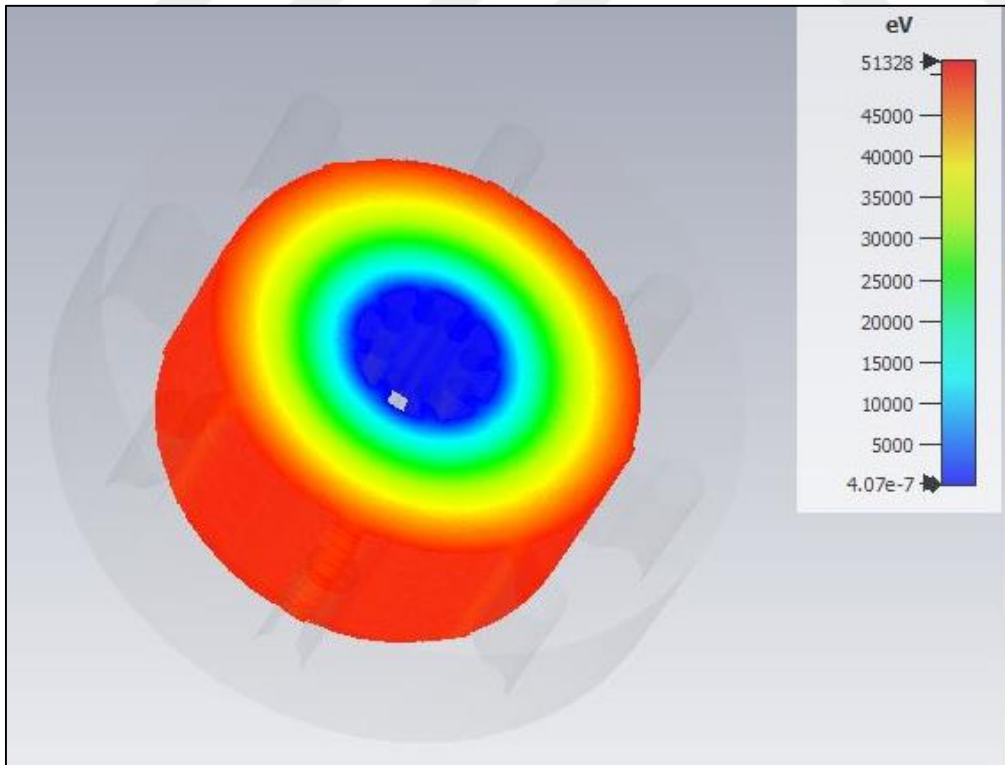


Şekil 4.103. 50 kV gerilim ve 0,073 T manyetik alanın etkisi altında farklı ikinci bir elektronun hareketi

Son aşama olarak D4 magnetronunun 0,073 T manyetik alan değerindeki bütün elektronların hareketi gözlemlenmiştir. Bunun içinde 49624 tane yayılım noktası belirlenmiştir. D4 magnetronundaki yayılım noktasının D3 magnetronundaki yayılım noktasından fazla olmasının sebebi oyukların ağ örgü (mesh) sayısını artırmasıdır. Gerçekleştirilen benzetim çalışmasına ait sonuçlar aşağıdaki şekillerde sunulmuştur.



Şekil 4.104. 50 kV gerilim ve 0,073 T manyetik alanın etkisi altında bütün elektronların hareketinin üst kesit görüntüsü

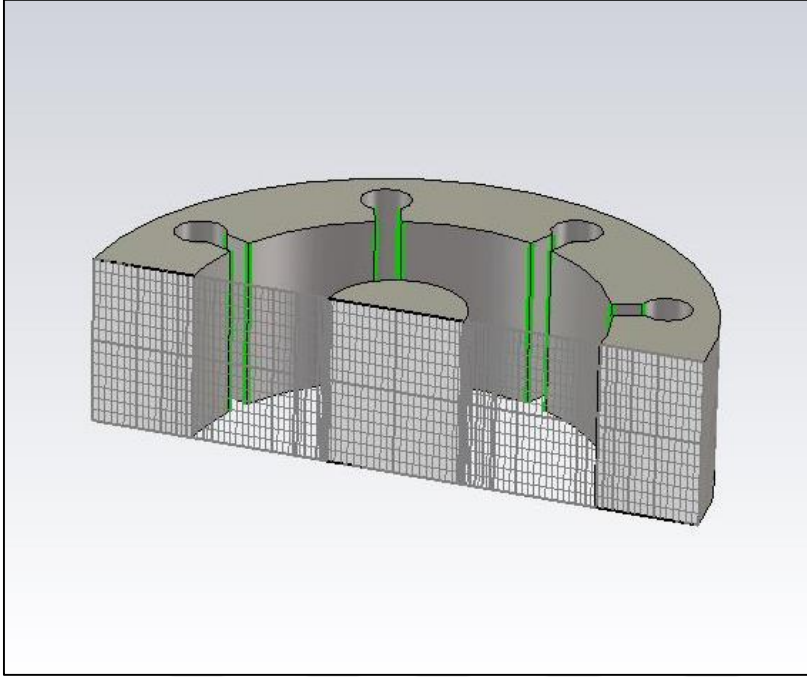


Şekil 4.105. 50 kV gerilim ve 0,073 T manyetik alanın etkisi altında bütün elektronların hareketinin üç boyutlu görüntüsü

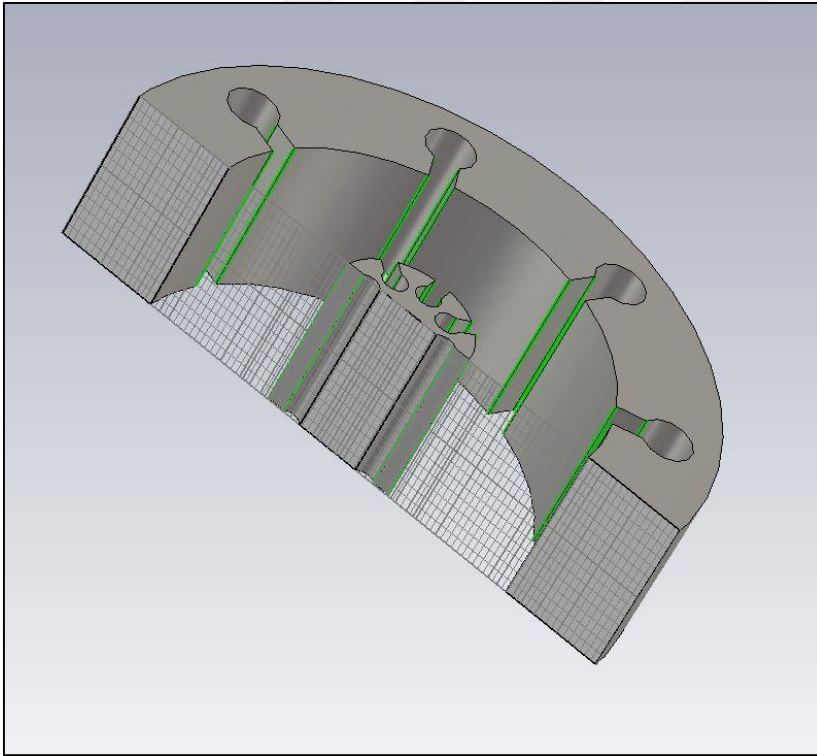
D3 ve D4 magnetronları için farklı manyetik alan değerlerinde gerçekleştirilen benzetim çalışmalarından elde edilen sonuçlara göre elektronların yayılım yerlerine göre katot etrafında düzgün bir şekilde hareket ettiği gözlemlenmiştir. Ayrıca katot yapısındaki oyukların elektronların yörüngesini etkilediği sonucuna varılmıştır. D3 magnetronu için en uygun manyetik alan değerinin 0,0725 T, D4 magnetronu içinse 0,073 T olduğu bulunmuştur. Ancak bu değerler benzetim çalışmaları tamamlanmadığı için kesin değerler olmayıp bir sonraki benzetim çalışması PIC analizinde başlangıç değerler olarak kullanılacaktır.

4.5. PIC Analizi

Bu analizde elektromanyetik alanların etkisi altında katot yüzeyinden yayılan yüklü taneciklerin (elektron) hareketi incelenmiştir. Burada anot ve katot blokları süper elektriksel iletkenliğe sahip (PEC) malzeme olarak tanımlanmış ve arka plan malzemesi vakum olarak belirlenmiştir. Böylece PEC malzeme dışındaki her yer vakumla doldurulmuştur. Sınır koşul olarak bütün yönlerde (x, y, z) teğetsel manyetik alan $H_t=0$ olarak ayarlanmıştır. Ağ örgülü yapı olarak düzgün altı yüzlü yapı kullanılmış olup dalga boyu başına hücre sayısı her iki magnetron için de daha iyi sonuç elde etmek amacıyla 16 olarak ayarlanmıştır. D3 ve D4 magnetronlarının sahip olduğu toplam ağ örgü (mesh) sayısı sırasıyla 177184 ve 217000'dir. Ayrıca D3 magnetronunun sahip olduğu en küçük ve en büyük hücre boyutları 0,0219 cm ve 0,1428 cm iken D4 magnetronunun sahip olduğu en küçük ve en büyük hücre boyutları 0,0156 cm ve 0,1428 cm'dir. Her iki magnetrona ait ağ örgülü yapının görüntüsü aşağıdaki şekillerde verilmiştir.



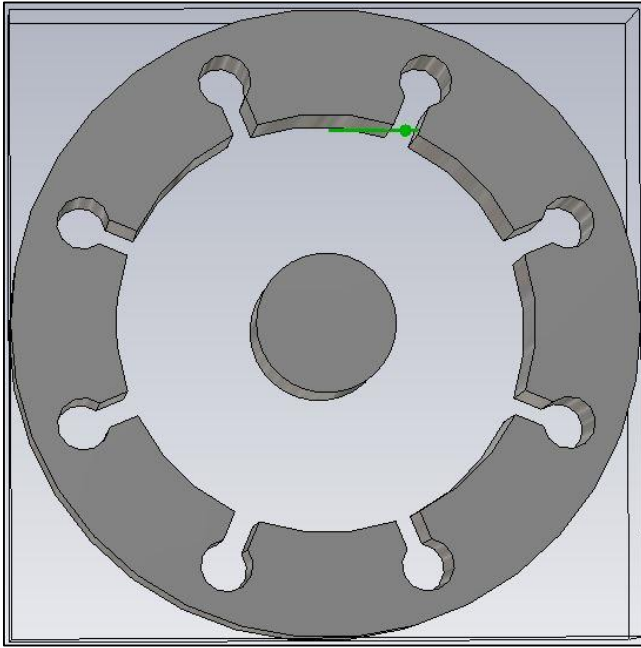
Şekil 4.106. D3 magnetronunun ağ örgülü yapı görüntüsü



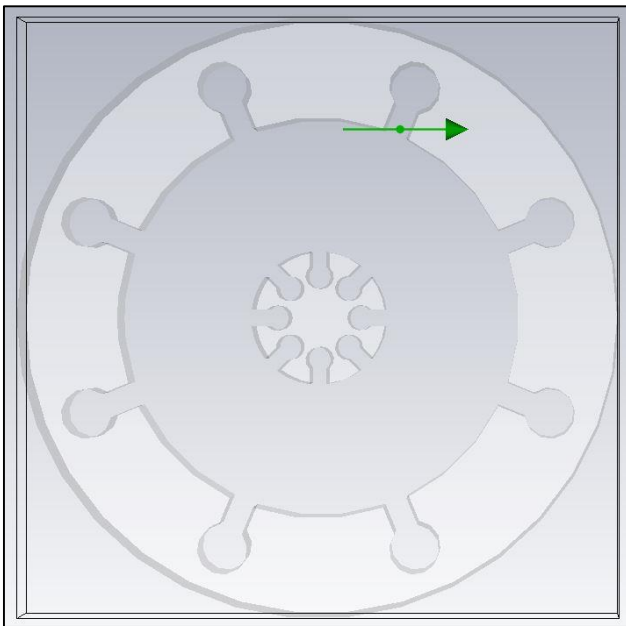
Şekil 4.107. D4 magnetronunun ağ örgülü yapı görüntüsü

Her iki magnetron için de bir önceki benzetim çalışmasında olduğu gibi parçacık kaynağı olarak katot belirlenmiş ve katottan elektron yayılımı (emisyonu) için patlayıcı (explosive) yayılım (emission) modeli seçilmiştir. D3 magnetronu için yayılım noktası sayısı 1742, D4

magnetronu için ise 2560 olarak ayarlanmıştır. Ayrıca her iki magnetron için yükselme zamanı ve kinetik enerji değerleri sırasıyla 1 ns ve 5 eV olarak düzenlenmiştir. Belirlenen bu şartlarda her iki model içinde benzetim çalışması yaklaşık olarak 3 saat sürmüştür. Elektrik alanın zamana ve frekansa bağlı sonuçlarını elde edebilmek için anottaki yarığın hemen hemen ortasına gelecek şekilde bir alan probu kullanılmıştır. Alan probunun görseli aşağıda verilmiştir.

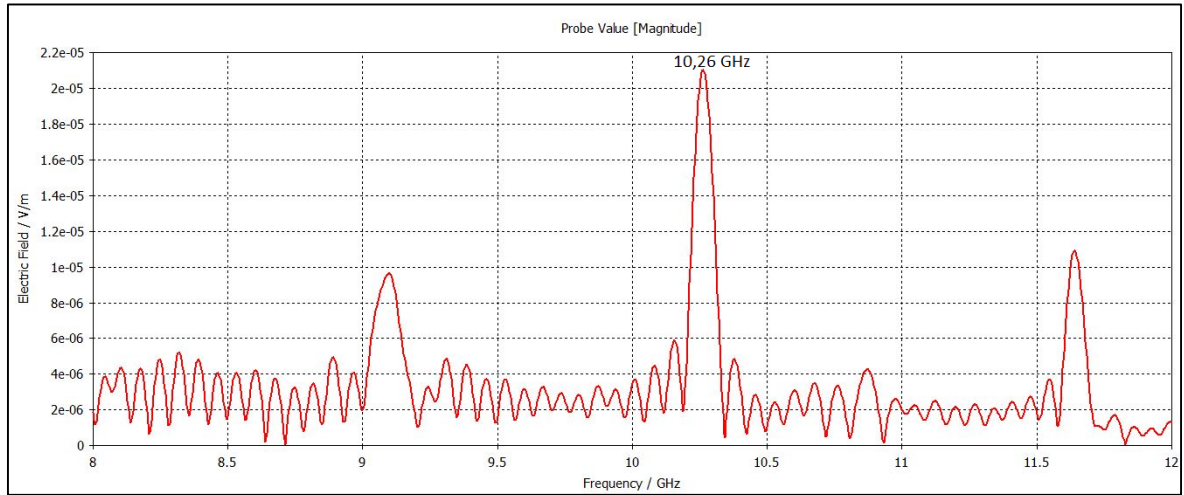


Şekil 4.108. D3 magnetronuna ait alan probu

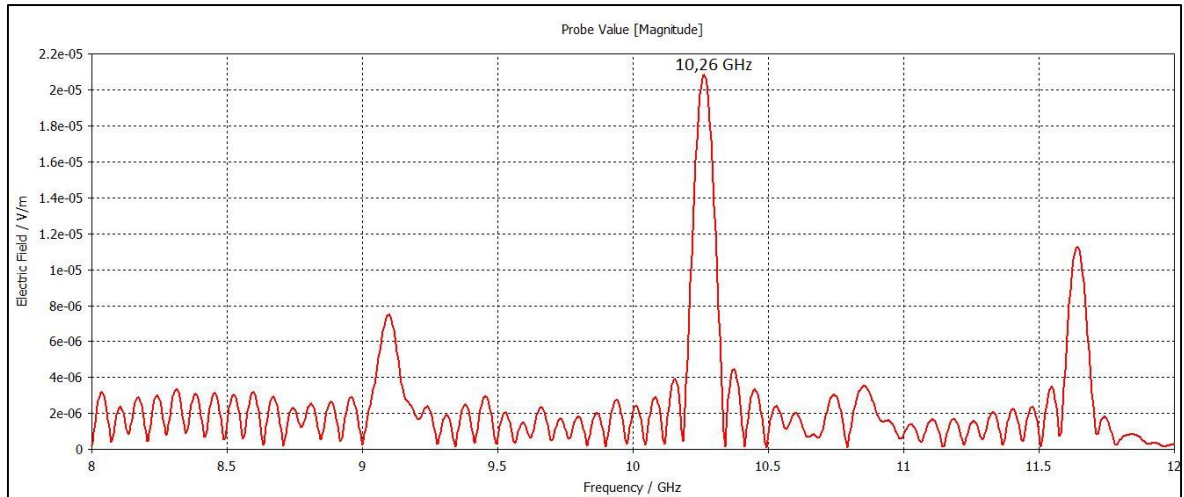


Şekil 4.109. D4 magnetronuna ait alan probu

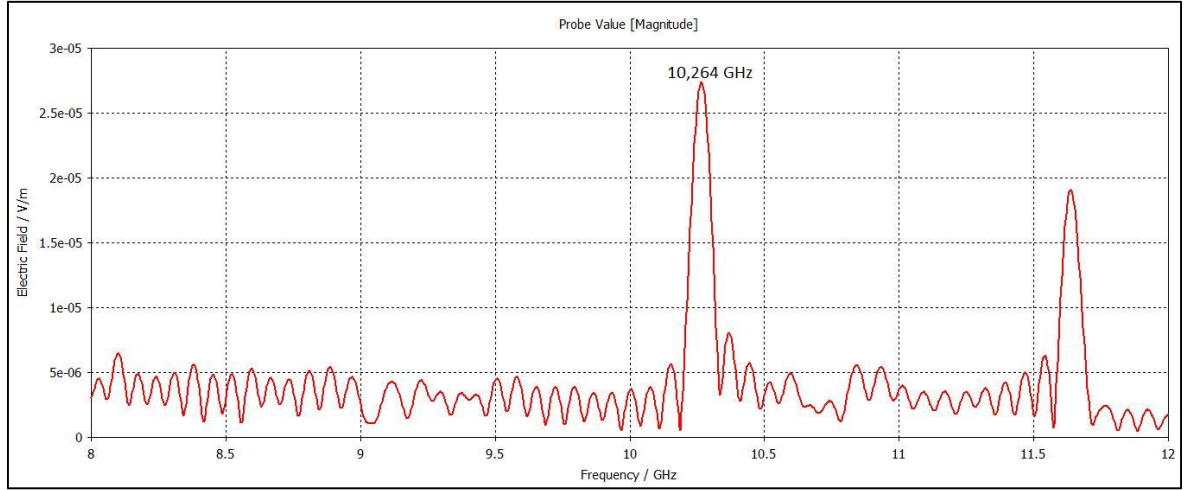
Bir önceki benzetim çalışmasında D3 magnetronu için en iyi manyetik alan değeri 0,0725 T bulunduğu için bu aşamada ilk olarak bu değer ele alınmıştır. Ardından sırasıyla gerilim sabit tutularak 0,073 T, 0,074 T ve 0,075 T manyetik alan değerleri için sonuçlar incelenmiştir. D3 magnetronunun salınım frekansı 0,0725 T ve 0,073 T manyetik alan değerleri için 10,26 GHz; 0,074 T ve 0,075 T manyetik alan değerleri içinse 10,264 GHz olarak bulunmuştur. Belirtilen manyetik alan değerlerine ait sonuçlar aşağıda sunulmuştur.



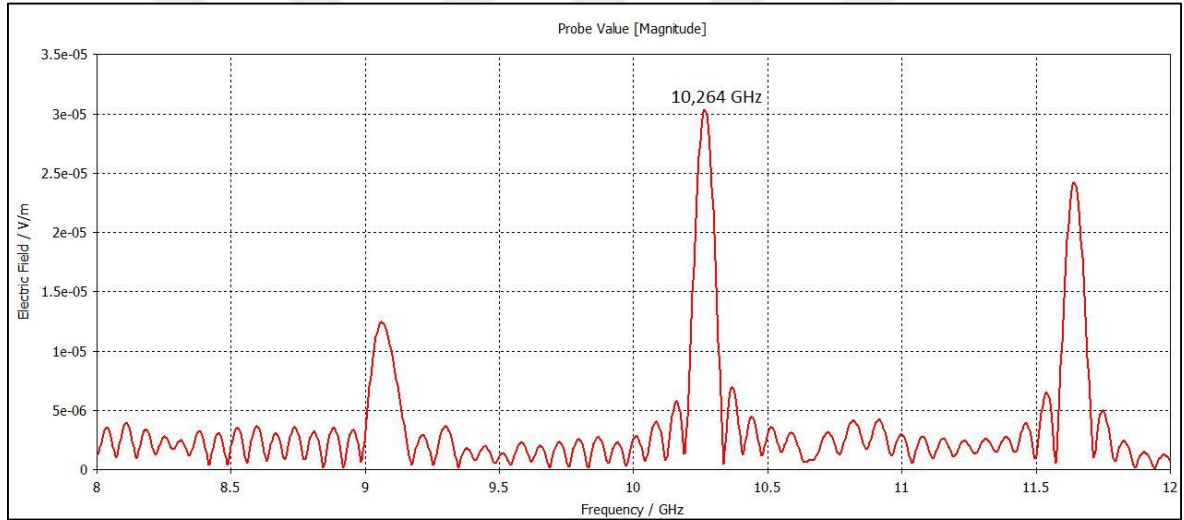
Şekil 4.110. D3 magnetronunun 50 kV 0,0725 T manyetik alan değerindeki elektrik alanın frekansa karşı grafiği



Şekil 4.111. D3 magnetronunun 50 kV 0,073 T manyetik alan değerindeki elektrik alanın frekansa karşı grafiği



Şekil 4.112. D3 magnetronunun 50 kV 0,074 T manyetik alan değerindeki elektrik alanın frekansa karşı grafiği

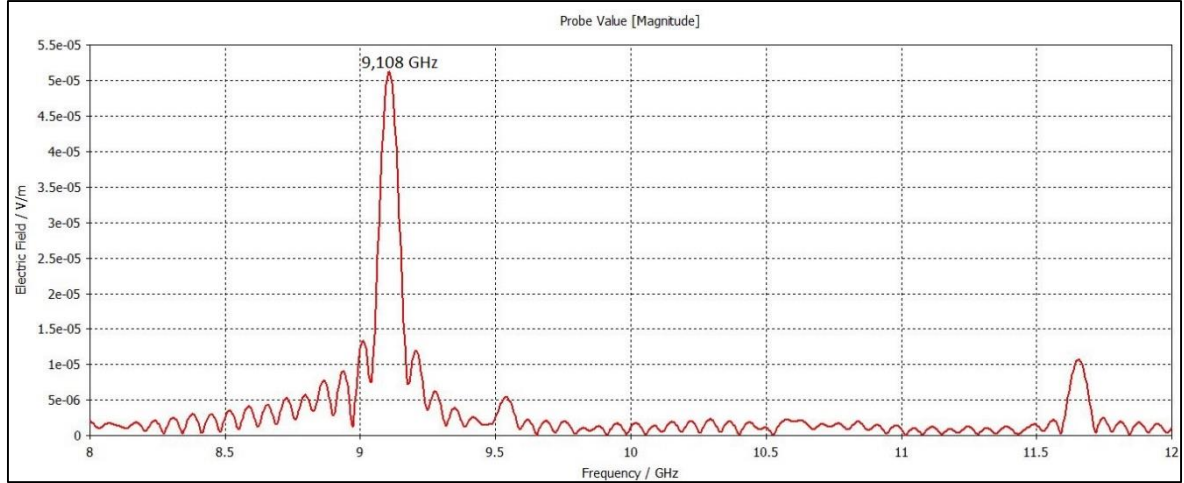


Şekil 4.113. D3 magnetronunun 50 kV 0,075 T manyetik alan değerindeki elektrik alanın frekansa karşı grafiği

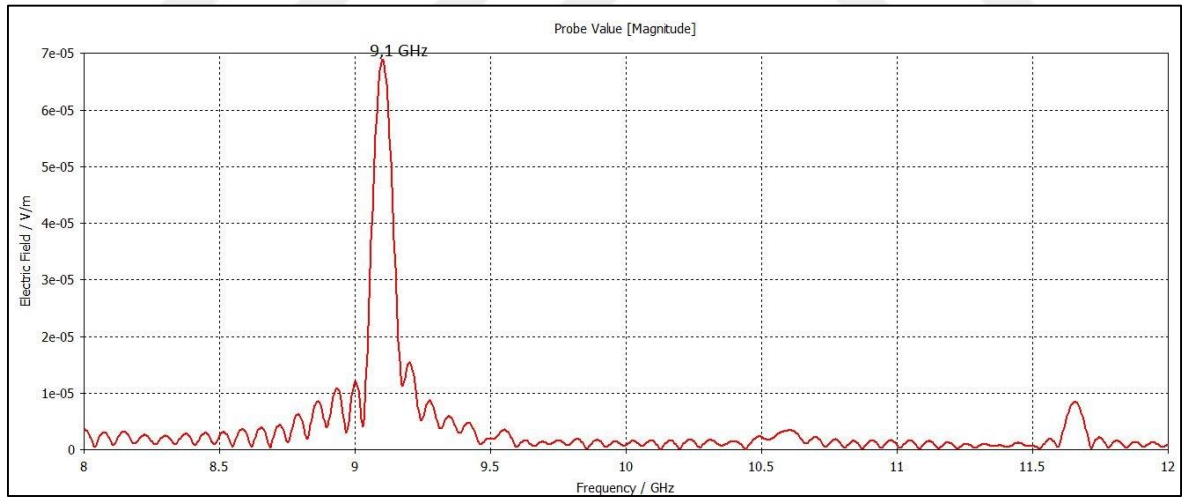
Yukarıdaki sonuçlar incelendiğinde farklı manyetik alan değerleri için magnetronun salınım frekans değerlerinin birbirine çok yakın olduğu gözükmemektedir. Ayrıca manyetik alan değerinin salınım frekansının genliğini ve mod rekabetini de etkilediği gözden kaçırılmamalıdır. Bu hususlar göz önüne alındığında D3 magnetronu için en uygun sonucu veren manyetik alan değerinin 0,074 T olduğu düşünülmektedir. Bundan sonraki süreçte D3 magnetronu için bu değer referans olarak alınacaktır.

Manyetik alanın çalışma frekansını nasıl etkilediği konusunda D4 magnetronuna baktığımızda parçacık izleme analizinde en uygun sonuç olarak 0,073 T bulunmuş ve bu

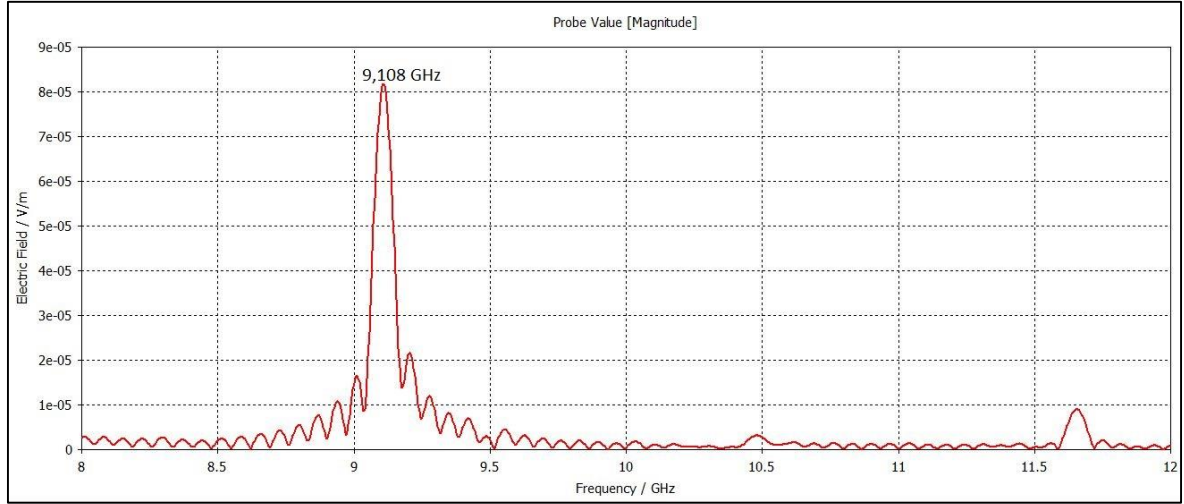
aşamada başlangıç değeri olarak kabul edilmiştir. Uygulanan diğer manyetik alan değerleri D3 magnetronunda olduğu gibi 0,074 T ve 0,075 T'dir. D4 magnetronunun salınım frekansı 0,073 T ve 0,075 T için 9,108 GHz; 0,074 T içinse 9,1 GHz olarak bulunmuştur. Belirtilen manyetik alan değerlerine ait sonuçlar aşağıda verilmiştir.



Şekil 4.114. D4 magnetronunun 50 kV 0,073 T manyetik alan değerindeki elektrik alanın frekansa karşı grafiği



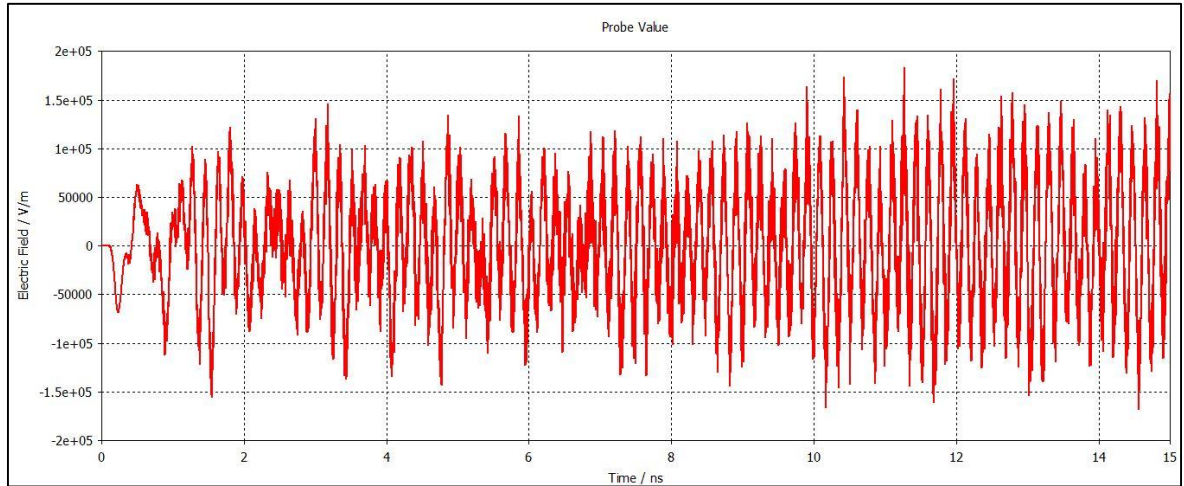
Şekil 4.115. D4 magnetronunun 50 kV 0,074 T manyetik alan değerindeki elektrik alanın frekansa karşı grafiği



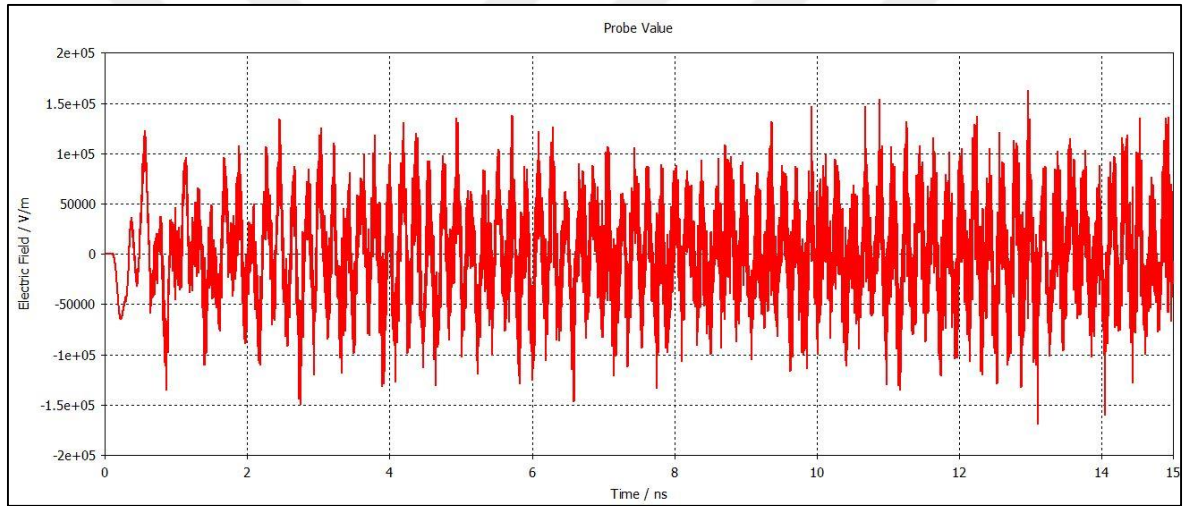
Şekil 4.116. D4 magnetronunun 50 kV 0,075 T manyetik alan değerindeki elektrik alanın frekansa karşı grafiği

D3 magnetronunda olduğu gibi D4 magnetronunda da manyetik alan değerine bağlı olarak çalışma frekansının genliğinde bir değişim meydana gelmektedir. Bu parametre (frekans genliği) dikkate alındığında D4 magnetronu için en uygun manyetik alan değerinin 0,075 T olduğu görülmektedir. Diğer yandan D3 ve D4 magnetronları birbirleriyle kıyaslandığında oyuklu katot yapısına sahip D4 magnetronunun frekansının çalışma frekansı olan 9 GHz'e çok yakın bir değer olduğu görülmektedir. Ayrıca katot yapısına oyuk ekleyerek mod rekabetinin de ortadan kalktığı söylenebilir.

D3 ve D4 magnetronlarına ait incelenmesi gereken diğer bir hususta elektrik alan değerinin zamana karşı sonucudur. Her iki magnetron için de en uygun manyetik alan değerinde çıkan sonuca göre elektrik alanının genliğinde hem biraz değişim meydana gelmiş (D4 magnetronunda daha iyi) hem de D4 magnetronunda elektrik alanının daha sık titreştiği görülmüştür. D3 ve D4 magnetronunun katot yapısındaki oyuklar hariç bütün yapısal ve boyutsal özellikleri aynı olduğu için bu sonuca katottaki oyuklar yol açmıştır. Her iki magnetrona ait elektrik alanının zamana karşı görselleri aşağıda sunulmuştur.

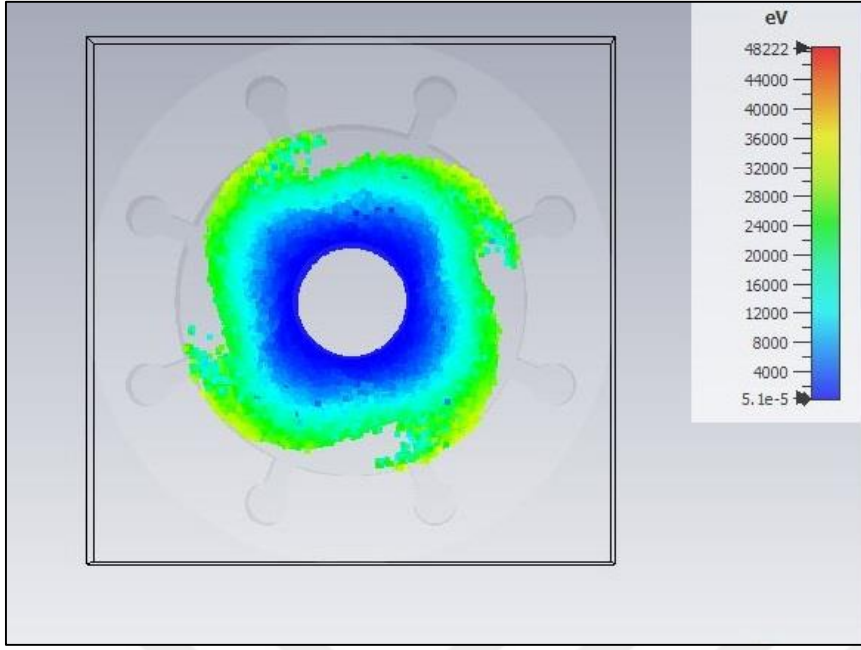


Şekil 4.117. D3 magnetronunun elektrik alan zaman grafiği

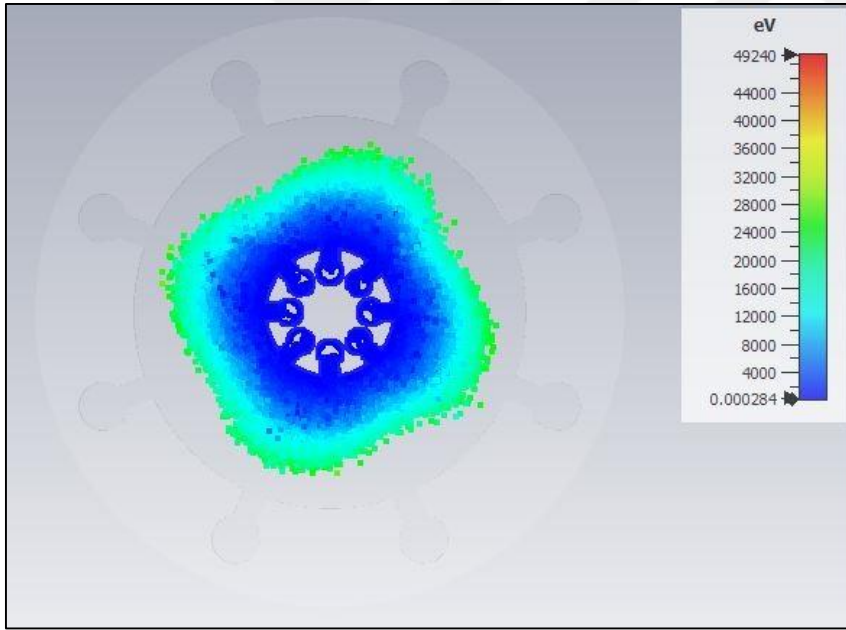


Şekil 4.118. D4 magnetronunun elektrik alan zaman grafiği

Magnetronlara ait zamana karşı elektron hareketine bakıldığında her iki magnetron içinde Şekil 4.119 ve Şekil 4.120’de görüldüğü üzere elektronlar demetleşerek oyuk sayısının yarısına denk gelecek şekilde jant telli bisiklet tekerinin görünümüne benzer bir görüntü elde edilmiştir.

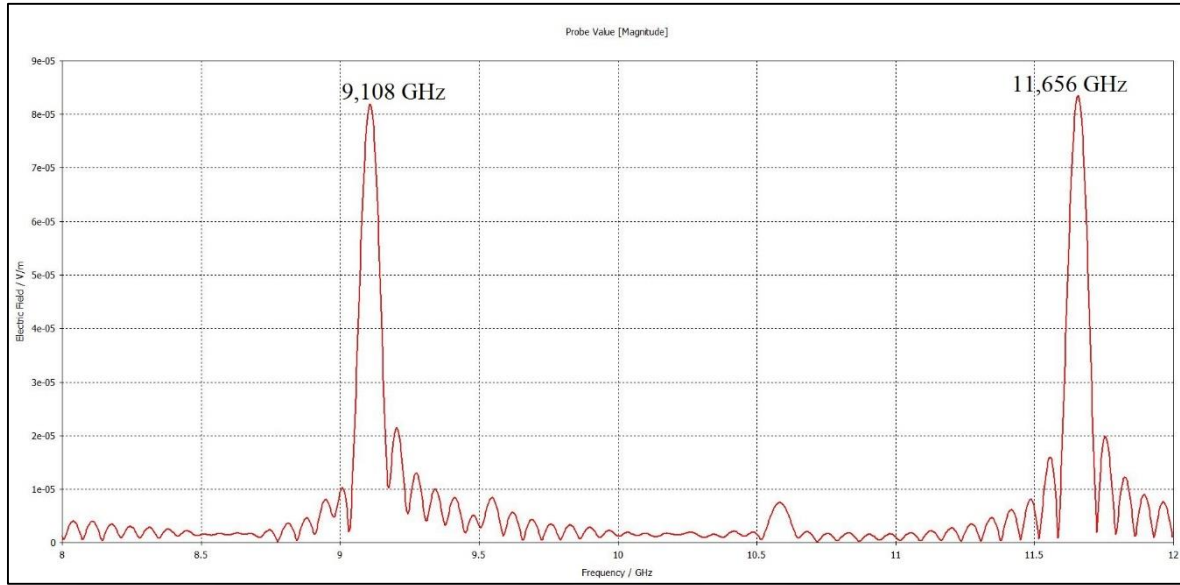


Şekil 4.119. D3 magnetronunun elektron hareketi



Şekil 4.120. D4 magnetronunun elektron hareketi

Şimdiye kadar ki yapılan çalışmalarda gerilim değeri sabit tutularak farklı manyetik alan değerlerinde magnetronların durumları incelenmiştir. Bu aşamada yapılan diğer bir çalışma da D4 magnetronunda gerilim ve manyetik alan değeri değiştirilerek magnetronun çift bantta çalışmasıdır. Bunun için katot gerilimi 60 kV, manyetik alan değeri 0,07 T olarak uygulanmış ve istenen sonuca ulaşılmıştır. Magnetronun çalışma frekansları 9,108 GHz ve 11,656 GHz olarak bulunmuştur. Bu değerlere ait sonuç aşağıda verilmiştir.



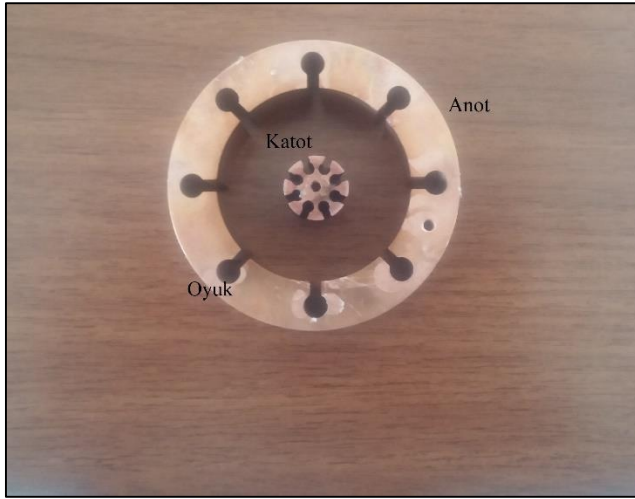
Şekil 4.121. D4 magnetronunun 60 kV 0,07 T manyetik alan değerindeki elektrik alanın frekansa karşı grafiği

Benzetim çalışmalarıyla alakalı çalışmalar burada sonlandırılmış olup oyuklu katot yapısına sahip magnetronun 50 kV gerilim ve 0,074 T manyetik alan değerinde istenildiği gibi seçilen çalışma frekansına çok yakın sonuç verdiği; 60 kV gerilim ve 0,07 T manyetik alan değerinde ise çift bantta çalıştığı özetlenebilir.



5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Benzetim çalışmalarından elde edilen sonuçlara göre D4 magnetronunun üretimi aşamasına geçilmiş ve bu magnetronun hem atmosfer koşullarında hem de vakum ortamında test ve ölçümleri yapılmıştır. Atmosfer koşullarında magnetronun elektrik alan ve güç yoğunluğu değerleri ölçülmüş vakum ortamında ise magnetron tarafından plazma oluşturularak plazma akımı elde edilmiş daha sonra da elektron sıcaklığı ve yoğunluğu hesaplanmıştır. Üretimi gerçekleştirilen D4 magnetronunun görseli aşağıda sunulurken sahip olduğu özellikler ve çalışma parametreleri Çizelge 5.1’de verilmiştir.



Resim 5.1. Üretilen D4 magnetronu

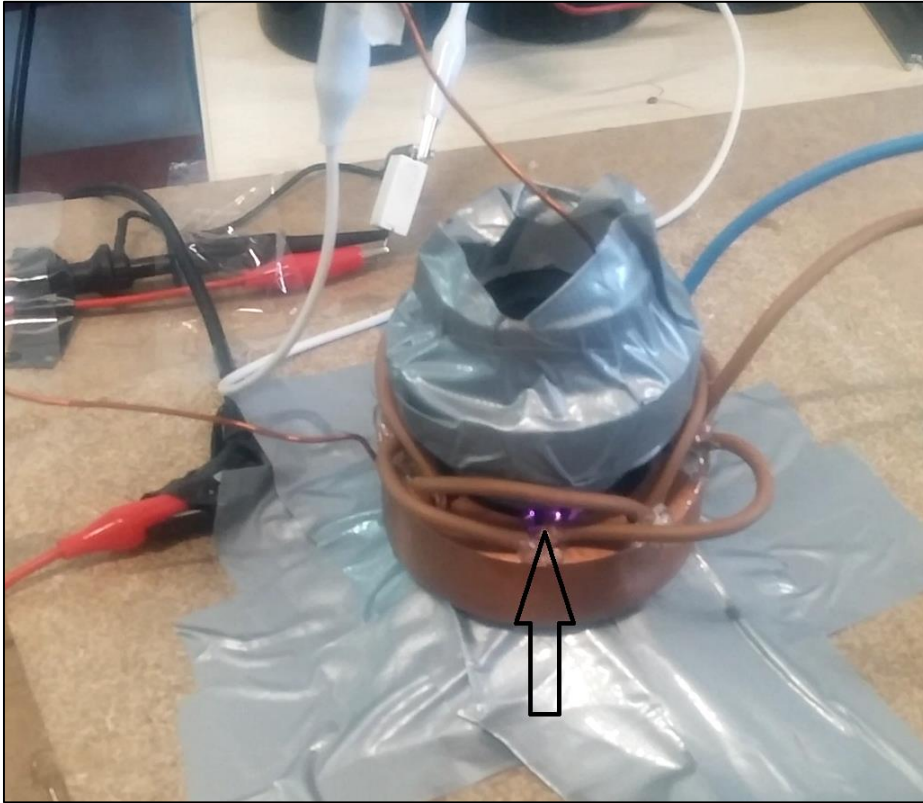
Çizelge 5.1. D4 magnetronunun deneysel tasarım parametreleri

Parametre	Değeri	Parametre	Değeri
Anot-katot malzeme	Bakır	Katot oyuk yarıçapı (r_{hc})	0,15 cm
Anot iç yarıçapı (r_{ai})	2,4 cm	Katot yarık genişliği ($slot_{wc}$)	0,2 cm
Anot yarıçapı (r_a)	3,6 cm	Katot yarık uzunluğu ($slot_{lc}$)	0.18 cm
Katot yarıçapı (r_c)	0,8 cm	Atmosfer ortamında katot gerilimi	16,25 kV
Anot- katot yükseliği	2 cm	Vakum ortamında katot gerilimi	1,3 kV
Anot oyuk yarıçapı (r_{ha})	0,3 cm	Düşeyde manyetik alan değeri	0,11 T
Anot yarık genişliği ($slot_{wa}$)	0,3 cm	Yatayda manyetik alan değeri	0,008 T
Anot yarık uzunluğu ($slot_{la}$)	0,34 cm	Vakum ortamı basınç değeri	$7,9 \times 10^{-3}$ mbar

Benzetim çalışmalarında katot gerilimi olarak 50 kV uygulanmış ancak mevcutta maksimum 30 kV'luk bir Doğru Akım (DC) güç kaynağı olduğu için ve elektronların katottan anota daha alçak gerilimlerde atlamalar yapabilmesi için anottaki oyuklara kısa devre halkaları eklenmiştir. Böylece 16,25 kV gerilimde katottan anota yayılım gerçekleşmiştir. Aşağıdaki resimlerde üretilen elektron hareketleri okla işaretlenerek gösterilmiştir. Ayrıca ardışık anot oyuklarına yerleştirilen iki adet kablo vasıtasıyla (kahverengi ve mavi) bir anten yapılmış ve buradan elektrik alan ve güç yoğunluğu ölçülmüştür.



Resim 5.2. Magnetron tarafından 16,25 kV'da üretilen elektron hareketi



Resim 5.3. Magnetron tarafından 16,25 kV’da üretilen elektronun farklı bir görüntüsü

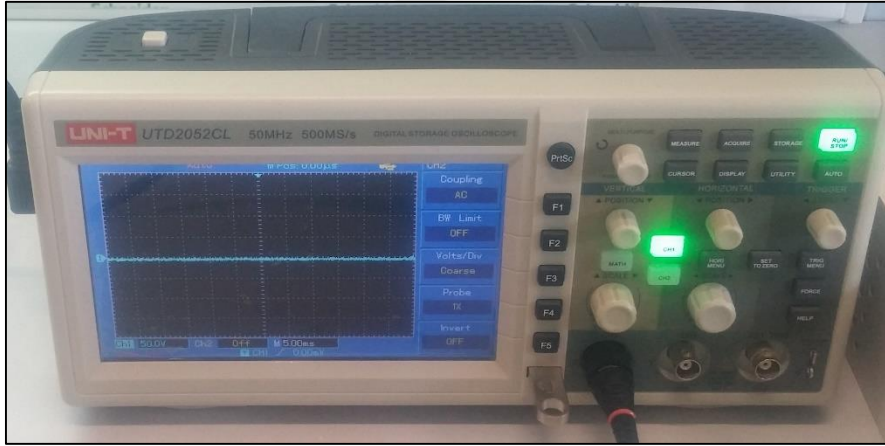


Resim 5.4. Magnetrona eklenen kısa devre halkaları ve anten

Deneysel çalışmalarda elektronların yayılımı için katoda gerilimi sağlamak üzere RoHS CX-300 B marka doğru akım güç kaynağı kullanılmıştır. Ayrıca üretilen sinyalleri gözlemlemek amacıyla UNI-T UTD2052CL marka ve modele sahip sayısal osiloskop kullanılmıştır. İlgili görseller aşağıda sunulmuştur.



Resim 5.5. Deneysel çalışmalarda kullanılan güç kaynağı



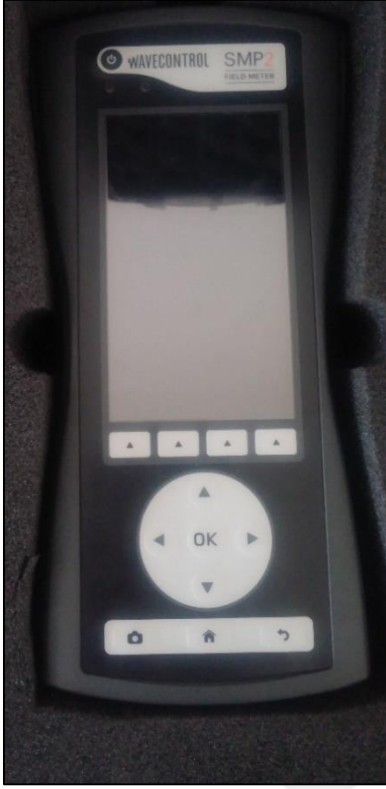
Resim 5.6. Deneylerde kullanılan osiloskop görüntüsü

Magnetronda elektronlar manyetik alan tarafından sapmaya uğramaktadır. Deneysel çalışmalarda manyetik alan oluşturmak için iki adet grafit mıknatıs kullanılmış olup mıknatısların manyetik alan değerlerini ölçmek için F.W. Bell 5170 marka ve modele sahip Gauss/Tesla metre kullanılmıştır. Kullanılan mıknatısların manyetik alan değeri hem yatay hem de düşey ortamda ölçülmüş düşeyde mıknatısın kenarında 1,1 kG, ortada 0,83 kG olarak ölçülürken; yatay ortamda mıknatısın tam üzerinde 0,08 kG, ortada 0,02 kG olarak ölçülmüştür.



Resim 5.7. Manyetik alan ölçümünde kullanılan Gauss/Tesla metre

Magnetron tarafından oluşturulan elektrik alan ve güç yoğunluğu değerleri Wavecontrol SMP2 marka ve modele sahip alan metre kullanılarak ölçülmüştür. Ölçümler sırasında magnetronda kullanılan anten başlangıç noktası olarak kabul edilmiş ve hem radyal yönde hem de yatay yönde belirli aralıklarla ölçümler alınmıştır. Ayrıca magnetron tarafından oluşturulan enerjinin içeriye hapsedilebilmesi için magnetronun çevresi alüminyum bir folyö tarafından tamamen kapatılmıştır.



Resim 5.8. Elektrik alan ve güç yoğunluğu ölçüm cihazı



Resim 5.9. Çevresi alüminyum folyö ile kapatılmış magnetron

Elektrik alan ve güç yoğunluğu ölçümlerinde tasarlanan antenin uç noktası magnetrondan 12 cm uzaklıkta olacak şekilde başlangıç noktası olarak kabul edilmiş ve radyal yönde otuzar derece açı farkıyla, yatay yönde ise 10'ar cm aralıklarla ölçümler alınmıştır. Elde edilen sonuçlara göre hem radyal yönde hem de yatay doğrultuda maksimum değerlere anten noktasında ulaşılmıştır. Sadece radyal yönde ölçüm alınırken $\theta = 330$ derecede elde edilen elektrik alan değerinin başlangıç noktasından yüksek çıktığı görülmüştür. Bunun nedeninin

ise magnetronun etrafınının alüminyum folyö ile kapatılırken $\theta = 330$ dereceye denk gelen yerde daha zayıf korumaya alınması olduğu düşünülmektedir. Çalışmalar sırasında alınan bir ölçümün görseli Resim 5.10'da sunulurken elde edilen sonuçlar aşağıdaki çizelgelerde sunulmuştur.



Resim 5.10. Ölçüm görseli

Çizelge 5.2. Radyal yönde elektrik alan değerleri

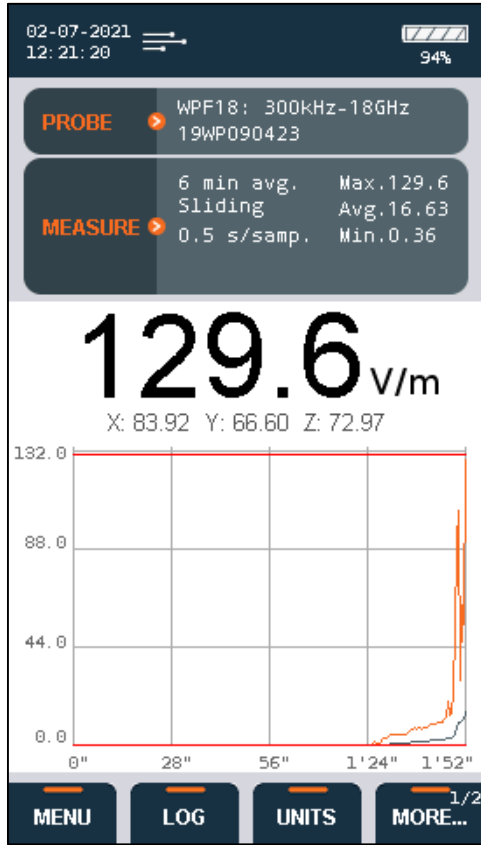
Sıra	Katot Gerilimi (kV)	Açı	Elektrik Alan (V/m)
1	16,25	$\theta = 0$	129,6
2	16,25	$\theta = 30$	91,06
3	16,25	$\theta = 60$	61,08
4	16,25	$\theta = 90$	48
5	16,25	$\theta = 120$	76,41
6	16,25	$\theta = 150$	53,90
7	16,25	$\theta = 180$	44,28
8	16,25	$\theta = 210$	82,95
9	16,25	$\theta = 240$	88,37
10	16,25	$\theta = 270$	60,89
11	16,25	$\theta = 300$	121
12	16,25	$\theta = 330$	146,3

Çizelge 5.3. Radyal yönde güç yoğunluğu değerleri

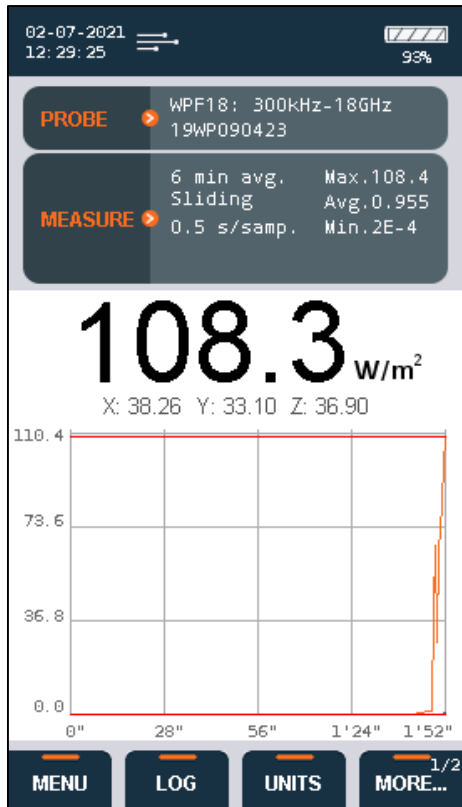
Sıra	Katot Gerilimi (kV)	Açı	Güç Yoğunluğu (W/m ²)
1	16,25	$\theta = 0$	108,3
2	16,25	$\theta = 30$	32,14
3	16,25	$\theta = 60$	16,60
4	16,25	$\theta = 90$	11,54
5	16,25	$\theta = 120$	8,813
6	16,25	$\theta = 150$	10,45
7	16,25	$\theta = 180$	12,94
8	16,25	$\theta = 210$	14,38
9	16,25	$\theta = 240$	27,59
10	16,25	$\theta = 270$	32,42
11	16,25	$\theta = 300$	66,02
12	16,25	$\theta = 330$	49,33

Çizelge 5.4. Yatay yönde elektrik alan değerleri

Sıra	Katot Gerilimi (kV)	Uzaklık (cm)	Elektrik Alan (V/m)
1	16,25	10	96,01
2	16,25	20	64,57
3	16,25	30	35,73
4	16,25	40	20,22
5	16,25	50	12,76
6	16,25	60	7,81
7	16,25	70	5,72
8	16,25	80	4,43
9	16,25	90	3,34
10	16,25	100	2,52



Şekil 5.1. Radyal yönde $\theta = 0$ (antende) derecede elektrik alan değeri

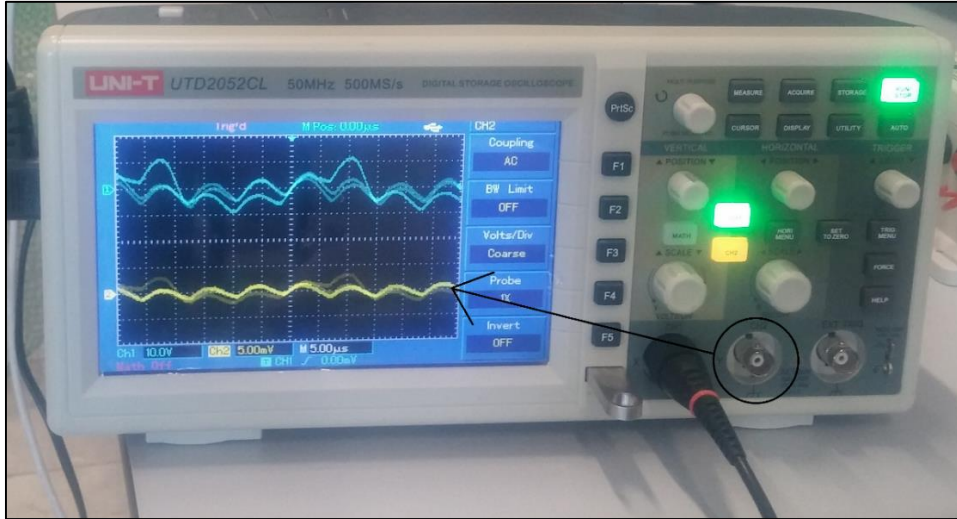


Şekil 5.2. Radyal yönde $\theta = 0$ derecede (antende) maksimum güç yoğunluğu değeri



Şekil 5.3. Yatay yönde antenden 10 cm uzaklıkta maksimum elektrik alan değeri

Deneysel çalışmalar sırasında çok ilginç bir şekilde osiloskobun ikinci kanalına herhangi bir prob bağlı olmadığı halde osiloskop ekranının ikinci kanalında bir sinyal elde edilmiştir. Bu da tasarlanan magnetronun bir mikrodalga ürettiğinin kanıtı olarak gösterilebilir. Ayrıca anten çıkışından elde edilen elektromanyetik enerji ile bir lamba aydınlatılmaya çalışılmış ve lambanın bazı bölgelerinde aydınlanmalar meydana gelmiştir. Gerçekleşen bu olaylar aşağıdaki görsellerde sırasıyla sunulmuştur.



Resim 5.11. Osiloskobun ikinci kanalında sinyal görüntüsü



Resim 5.12. Lambada herhangi bir aydınlanmanın meydana gelmemesi



Resim 5.13. Lambada meydana gelen aydınlanma

Atmosfer ortamında gerçekleştirilen çalışmaların ardından vakum ortamındaki çalışmaların yürütülebilmesi için bir vakum hücresine ihtiyaç duyulmuştur. Bu vakum hücre Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından desteklenen 07/2019-31 proje numaralı BAP projesi kapsamında Anadolu Talaşlı İmalat Otomat Sanayi ve Tic. Ltd. Şti.'ne ürettirilmiştir. Ayrıca deneysel çalışmalar boyunca cihazın vakum tutucu özelliğinin büyük bir öneme sahip olmasıyla birlikte üretimi gerçekleştiren firma tarafından sunulan sızıntı test raporunda cihazın çalışma basıncının 10^{-3} mbar seviyelerinde olduğu bildirilmiştir. Bu seviyedeki basınca düşüş Edwards T-Station 75 marka ve modele sahip turbomoleküler bir vakum pompasıyla sağlanmıştır. Vakum hücresine ve pompasına ait görseller aşağıdaki resimlerde sunulmuştur.



Resim 5.14. Deneysel çalışmalarda kullanılan vakum hücresi



Resim 5.15. Turbomoleküler vakum pompası

Dış ortamdan katoda gerilim sağlamak için Pasco SF-9586 marka ve modele sahip yüksek gerilim güç kaynağı kullanılmıştır. Ayrıca vakum ortamında oluşan plazmadaki elektronun gerilimini ölçebilmek için bir Langmuir sondası tasarlanmış ve Keysight 34461A marka ve modele sahip sayısal bir multimetrede bu değerler okunmuştur. Sonda üzerinden ölçüm alınabilmesi için besleme gerilimi AA Tech ATP-3303D marka ve modele sahip ayarlanabilir doğru akım güç kaynağı tarafından sağlanmıştır. Tasarlanan Langmuir sondası Resim 5.14'te gösterilmiştir. Kullanılan yüksek gerilim güç kaynağı, sayısal multimetre ve ayarlanabilir doğru akım güç kaynağına ait görseller aşağıda sunulmuştur.



Resim 5.16. Yüksek gerilim güç kaynağı

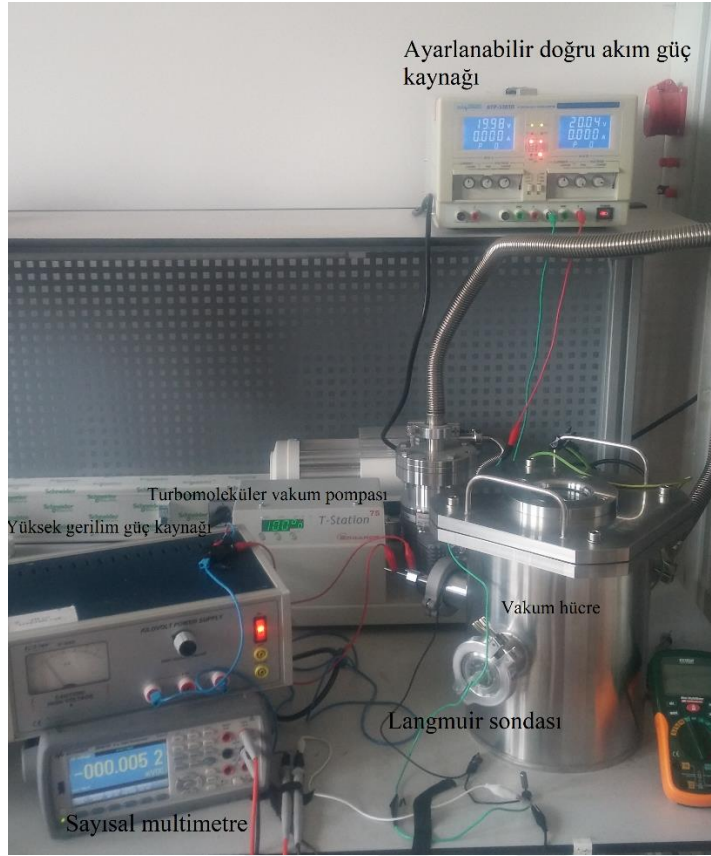


Resim 5.17. Sayısal multimetre

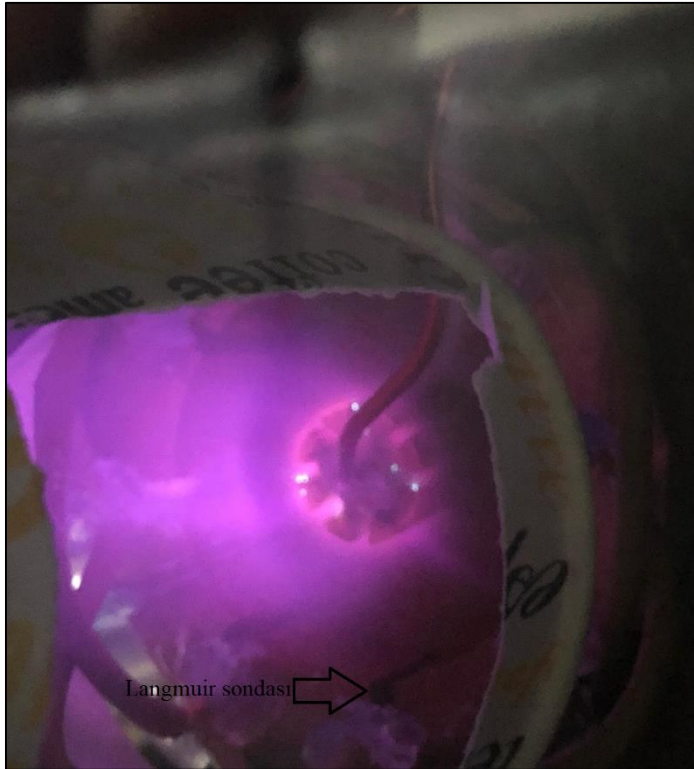


Resim 5.18. Ayarlanabilir doğru akım güç kaynağı

Langmuir sonda üzerinden farklı gerilim değerlerine ait veri okuyabilmek için devrede 4,5 K'lık bir potansiyometre kullanılmıştır. Elde edilen gerilim değerleri direnç değerlerine bölünerek akımlar elde edilmiştir. Böylece plazmanın karakteristik özelliklerini belirleyen akım gerilim grafiği elde edilmeye çalışılmıştır. Kurulan tüm sisteme ve vakum hücre içerisinde oluşan plazmaya ait görseller aşağıda sunulmuştur.

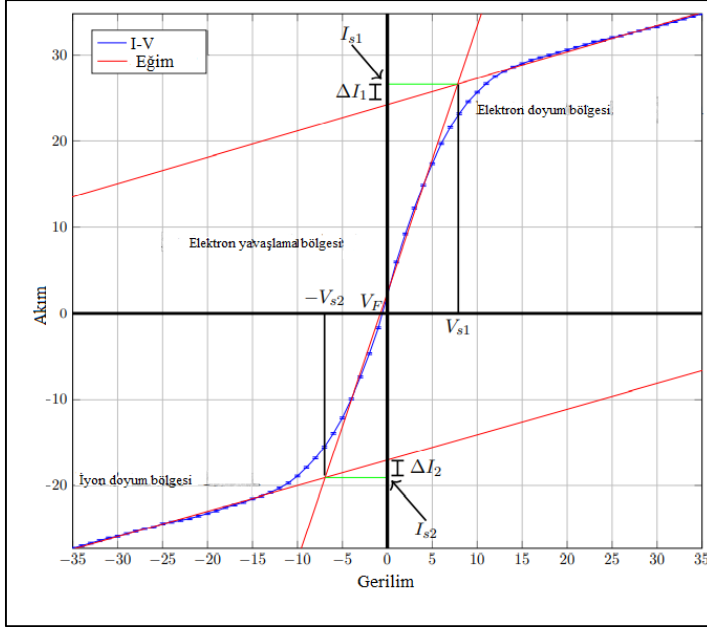


Resim 5.19. Deney düzeneği



Resim 5.20. Vakum ortamında oluşan plazma ve Langmuir sonda görüntüsü

Daha önce de ifade edildiği gibi plazmaların karakteristiklerini belirlemek için akım gerilim grafiğinden faydalanılmaktadır. Elde edilen gerilime karşı akım sonuçlarına göre bu grafik üç bölüme ayrılmaktadır. Bunlar iyon doyum bölgesi, elektron yavaşlatma bölgesi ve elektron doyum bölgesidir [33]. Aşağıdaki şekilde akım-gerilim grafiği ve önemli bölgeler sunulmuştur.



Şekil 5.4. Akım-gerilim grafiği ve önemli bölgeler [33]

Deneysel çalışmalar sırasında yukarıda verilen grafiğin benzeri elde edilmeye çalışılmış ve bu grafikten elde edilen bazı verilerle elektron sıcaklığı hesaplanmıştır. Elektron sıcaklığını hesaplamak için kullanılan en genel formül aşağıda verilmiştir [33].

$$i_x = i_0 \left(e^{\frac{q(V_x - V_F)}{kT_e}} - 1 \right) \quad (5.1)$$

Eş. 5.1'de i_0 herhangi bir noktadaki akım, V_F akımın sıfıra eşit olduğu andaki gerilim, q elektron yükü, k Boltzman sabiti ve T_e elektron sıcaklığını göstermektedir. Ayrıca yukarıdaki eşitlikte -1 değeri grafiğin eğimini değiştirmeyeceğinden ihmal edildiğinde ve $(V_x - V_F)$ ifadesi probun uçları arasına uygulanan gerilim olarak düşünüldüğünde (bundan sonra ΔV olarak ifade edilecektir) Eş. 5.1 yeniden düzenlenip aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\frac{i_x}{i_0} = \left(e^{\frac{q\Delta V}{kT_e}} \right) \quad (5.2)$$

Daha sonra her iki tarafın logaritması alınıp T_e değeri yalnız bırakılırsa elektron sıcaklığı denklemi elde edilmiş olur.

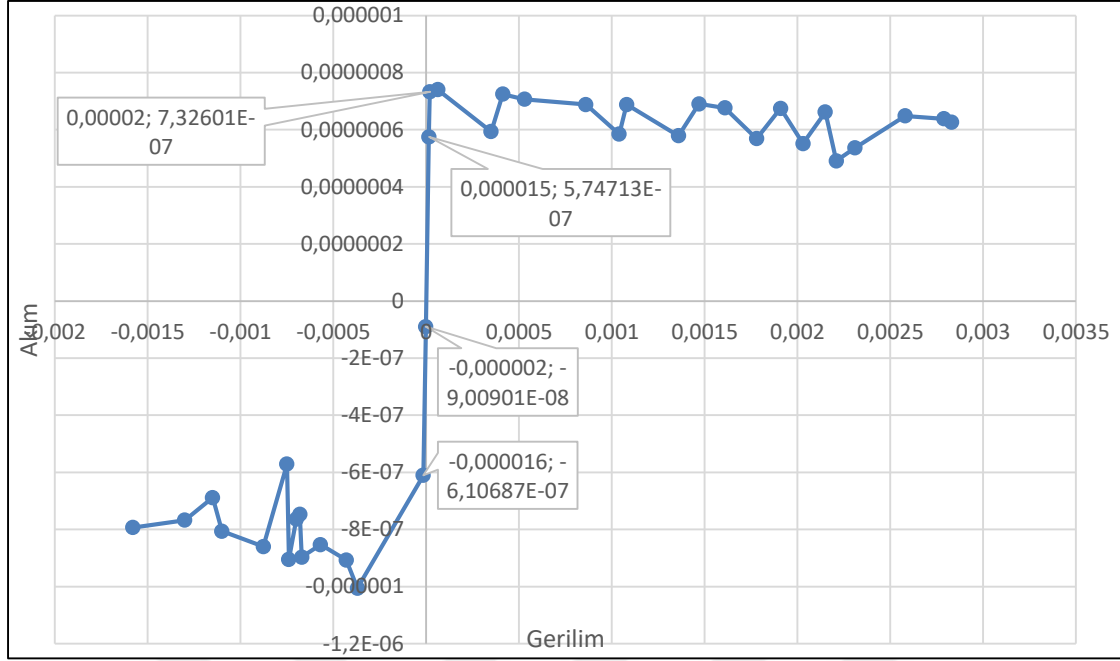
$$T_e = \frac{q\Delta V}{k \log \frac{i_x}{i_0}} \quad (5.3)$$

Deneysel çalışmalarda akım-gerilim grafiğine ulaşmak için farklı direnç değerlerindeki gerilim değerleri sayısal multimetreden okunmuş ve bu değerler birbirlerine bölünerek akım değerleri elde edilmiştir. Elde edilen veriler aşağıdaki çizelgede sunulmuştur.

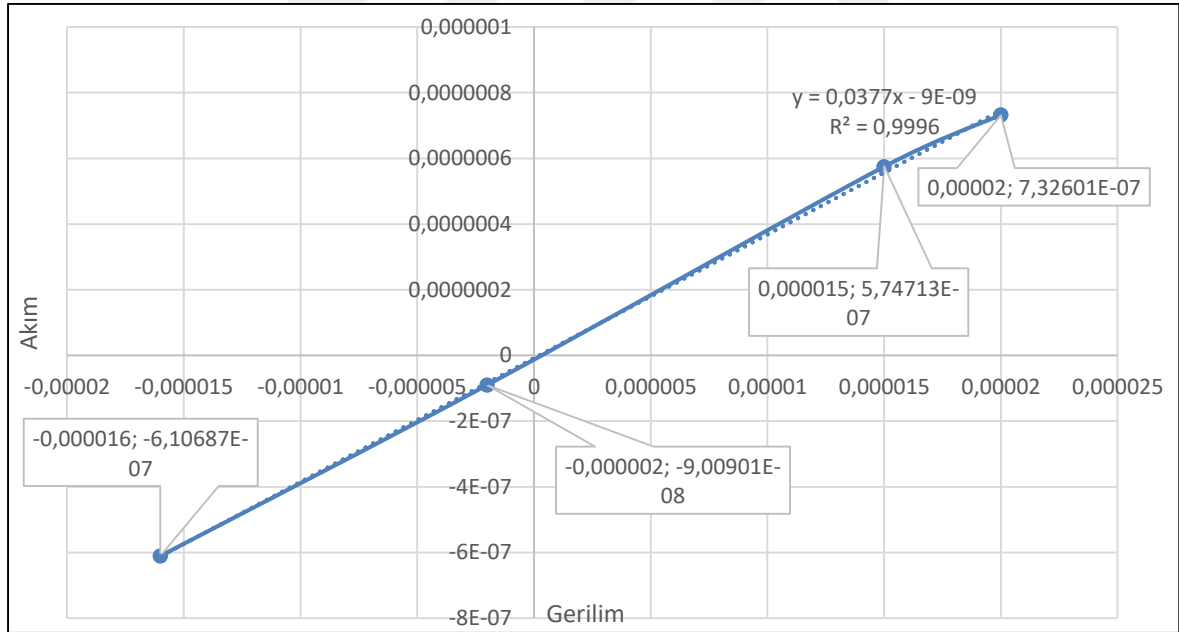
Çizelge 5.5. Direnç, gerilim ve akım değerleri

Sıra	Direnç (ohm)	Gerilim (V)	Akım (μA)	Sıra	Direnç (ohm)	Gerilim (V)	Akım (μA)
1	1992	-0,00158	-0,793173	19	590	0,00035	0,59322
2	1694	-0,0013	-0,767414	20	570	0,000413	0,724561
3	1670	-0,00115	-0,688623	21	750	0,00053	0,706667
4	1365	-0,0011	-0,805861	22	1250	0,00086	0,688
5	1020	-0,000877	-0,859804	23	1780	0,00104	0,58427
6	1313	-0,00075	-0,571211	24	1570	0,00108	0,687898
7	818	-0,00074	-0,904645	25	2350	0,00136	0,578723
8	915	-0,000699	-0,763934	26	2130	0,00147	0,690141
9	910	-0,00068	-0,747253	27	2380	0,00161	0,676471
10	747	-0,00067	-0,896921	28	3130	0,00178	0,56869
11	667	-0,000569	-0,853073	29	2830	0,00191	0,674912
12	474	-0,00043	-0,907173	30	3680	0,00203	0,55163
13	368	-0,00037	-1,00543	31	3250	0,00215	0,661538
14	26,2	-0,000016	-0,610687	32	4500	0,00221	0,491111
15	22,2	-0,000002	-0,0900901	33	4310	0,00231	0,535963
16	26,1	0,000015	0,574713	34	3980	0,00258	0,648241
17	27,3	0,00002	0,732601	35	4370	0,00279	0,638444
18	85,1	0,000063	0,740306	36	4520	0,00283	0,626106

Yukarıdaki çizelgede verilen değerler kullanılarak akım-gerilim grafiği elde edilmiş daha sonra da Şekil 5.5'te sunulan grafikte değerleri işaretlenen noktaların eğimi ve denklemi bulunmuş, en son aşama olarak ta Eş. 5.3'den elektron sıcaklığına ulaşılmıştır.



Şekil 5.5. Deneysel çalışmalardan elde edilen I-V grafiği



Şekil 5.6. Belirtilen noktaların eğimi ve denklemleri

Şekil 5.6'da verilen grafiğin denkleminde eğimin 0,0377 olduğu görülmektedir. Ayrıca $\log \frac{i_x}{i_0} / \Delta V$ değeri eğime eşit olduğundan Eş. 5.3 yeniden düzenlenerek aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$T_e = \frac{q}{k (\log \frac{i_x}{i_0} / \Delta V)} \quad (5.4)$$

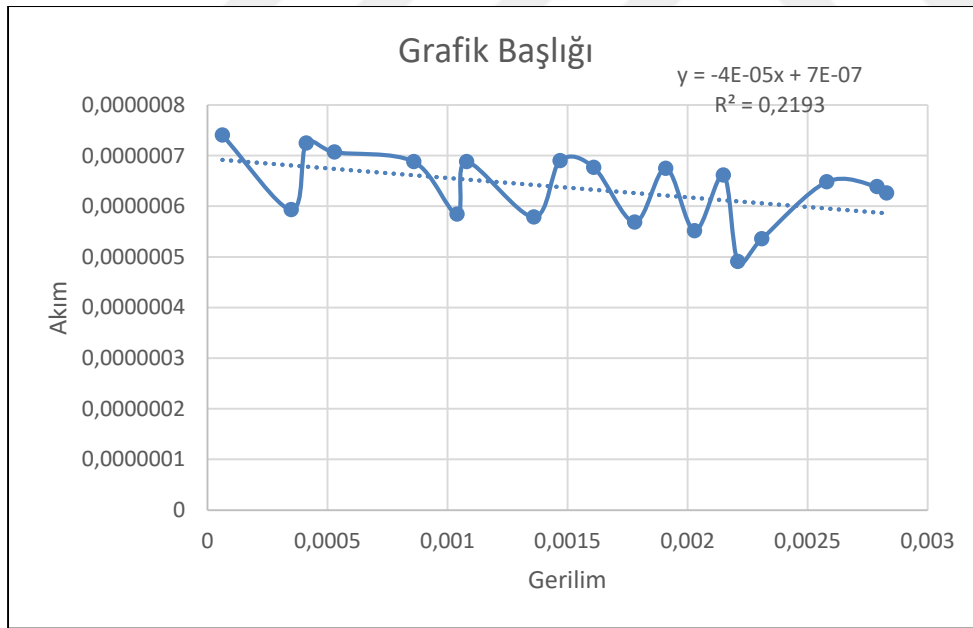
$$T_e = \frac{q}{k \times 0,0377} \quad (5.5)$$

Eş. 5.5'te verilen sabitler yerine yazılarak plazma içerisindeki elektron sıcaklığının değeri aşağıdaki gibi elde edilir.

$$T_e = \frac{1,602 \times 10^{-19} C}{1,38 \times 10^{-23} JK^{-1} \times 0,0377/V} \quad (5.6)$$

Eş. 5.6 çözüldüğünde T_e elektron sıcaklığı değeri yaklaşık olarak 307923 K (Kelvin) olarak bulunur. Başka bir deyişle 1 eV (elektronvolt) 11600 K'ye eşit olduğundan bulunan elektron sıcaklığı değeri yaklaşık olarak 26,55 eV'ye eşittir.

Deneysel çalışmalarda ve bu tez çalışmasında son aşama olarak plazma içerisindeki elektron yoğunluğu hesaplanmıştır. Bunun için de ilk olarak yine Şekil 5.5'teki grafikten faydalanılmış ve elektron doyum bölgesindeki değerlerin eğimi ve denklemini bulunmuştur.



Şekil 5.7. Elektron doyum bölgesindeki noktaların eğimi ve denklemini

Bir sonraki aşama olarak her iki denklemin kesişim noktası olan ve Şekil 5.4'te gösterilen V_s gerilim değeri $1,87864 \times 10^{-5}$ V ve bu gerilim değerine karşılık gelen (I_s) akımı $6,992 \times 10^{-7}$ A olarak bulunmuştur. En son aşama da ise elektron yoğunluğunu hesaplamak için aşağıdaki eşitlikten faydalanılmıştır [33].

$$n_e = \frac{2}{0,61A_p q} i_s \frac{i_s - \Delta_i}{2i_s - \Delta_i} \sqrt{\frac{m_e}{kT_e}} \quad (5.7)$$

Eş. 5.7’de A_p kullanılan probun yüzey alanı olup değeri $0,434 \text{ cm}^2$, m_e elektronun kütlesi olup değeri $9,109 \times 10^{-31} \text{ kg}$ ’dır. Diğer parametrelere ait değerler adım adım yerlerine yazılarak plazma içerisindeki elektron yoğunluğu değeri aşağıdaki gibi $7,6 \times 10^{10} \text{ m}^{-3}$ olarak bulunmuştur.

$$i_s \times \frac{i_s - \Delta_i}{2i_s - \Delta_i} = 6,992 \times 10^{-7} \text{ A} \times \frac{6,984 \times 10^{-7} \text{ A}}{13,976 \times 10^{-7} \text{ A}} = 3,494 \times 10^{-7} \text{ A} \quad (5.8)$$

$$\sqrt{\frac{m_e}{kT_e}} = \sqrt{\frac{9,109 \times 10^{-31} \text{ kg}}{1,38 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1} \times 307923 \text{ K}}} = \sqrt{\frac{9,109 \times 10^{-8} \text{ kg}}{1,38 \times 307923 \text{ kgm}^2/\text{s}^2}} = 46,26 \times 10^{-8} \text{ s/m} \quad (5.9)$$

$$n_e = \frac{2}{0,61 \times 434 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \times 1,602 \times 10^{-19} \text{ As}} \times 3,494 \times 10^{-7} \text{ A} \times 46,26 \times 10^{-8} \text{ sm}^{-1} \quad (5.10)$$

$$n_e = 7,6 \times 10^{10} \text{ m}^{-3} \quad (5.11)$$

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında magnetronun anotunda bulunan oyukların aynısı katota da eklenerek yeni bir magnetron modeli önerilmiş ve katottaki oyukların etkisini incelemek için benzetim çalışmalarıyla birlikte tasarlanan magnetronun bir uygulaması olarak plazma ortamı oluşturulmuş ve deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Benzetim çalışmalarında sonlu elemanlar metoduna dayalı iki ayrı yazılım programı kullanılmış ve ilk olarak oyuklu ve oyuksuz katota sahip magnetronların öz frekans analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre katot yapısına oyuk ekleyerek seçilen çalışma frekansına daha da yaklaşıldığı görülmüştür. Ayrıca magnetronların en verimli çalışma modu olan ve literatürdeki çalışmalarda da elde edilen π modunu elde edebilmek için tasarlanan magnetronun boyutlarında değişikliğe gidilmiş ve bu moda Şekil 4.78 ve Şekil 4.83'te görüldüğü gibi oyuksuz katota sahip magnetron (D3) için 9,115 GHz'de, oyuklu katota sahip magnetron (D4) için 9,112 GHz'de ulaşılmıştır. Diğer bir önemli sonuçta katot yapısına oyuk eklemenin belirtilen bu frekanslarda maksimum elektrik alan değerini artırdığıdır. Oyuksuz katot yapısına sahip magnetronun 9,115 GHz'de maksimum elektrik alan değeri $4,883 \times 10^8$ V/m iken oyuklu katot yapısına sahip magnetronunun 9,112 GHz'de maksimum elektrik alan değeri $4,994 \times 10^8$ V/m'dir.

Benzetim çalışmalarının ikinci aşaması olarak anot ve katot blokları arasına uygulanan gerekli potansiyel farkın ve manyetik alan değerlerinin her iki magnetron için belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen parçacık izleme analizidir. Elde edilen sonuçlara göre 50 kV gerilimde D3 magnetronu için en uygun manyetik alan değerinin 0,0725 T, D4 magnetronu içinse 0,073 T olduğu bulunmuştur. Ayrıca katot yapısındaki oyukların elektronların yörüngesini etkilediği sonucuna varılmıştır.

Benzetim çalışmalarının son aşaması olarak hücre içi parçacık analizi yapılmış ve burada elektromanyetik alanların etkisi altında katot yüzeyinden yayılan yüklü taneciklerin (elektron) hareketi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre D3 magnetronunda farklı manyetik alan değerleri için magnetronun salınım frekans değerlerinin birbirine çok yakın olduğu gözükmemektedir. Ayrıca manyetik alan değerinin salınım frekansının genliğini ve mod rekabetini de etkilediği bulunmuştur. Ayrıca D3 magnetronu için en uygun sonucu veren manyetik alan değerinin 0,074 T olduğu sonucuna varılmıştır. D3 magnetronunda olduğu

gibi D4 magnetronunda da manyetik alan değerine bağlı olarak çalışma frekansının genliğinde bir değişim meydana gelmiştir. D4 magnetronu için en uygun manyetik alan değerinin 0,075 T olduğu bulunmuştur. Diğer yandan D3 ve D4 magnetronları birbirleriyle kıyaslandığında Şekil 4.112 ve Şekil 4.116'e bakılarak D3 ve D4 magnetronlarının frekansları sırasıyla 10,264 GHz ve 9,108 GHz olarak bulunmuştur. Buradan oyuklu katot yapısına sahip D4 magnetronunun frekansının çalışma frekansı olan 9 GHz'e çok yakın bir değer olduğu sonucuna ulaşılmaktadır. Ayrıca katot yapısına oyuk eklenerek literatürde yer alan mod rekabetinin de ortadan kalktığı görülmüştür. Bu aşamada araştırılan elektrik alanın zamana göre grafikleri Şekil 4.117 ve Şekil 4.118'de incelendiğinde katot yapısına oyuk ekleyerek elektronların daha fazla titreşmesinin bir sonucu olarak elektrik alanın genliğinde biraz değişim meydana gelerek iyileştiği sonucuna varılmıştır. Ayrıca her iki magnetron içinde elektronlar demetleşerek oyuk sayısının yarısına denk gelecek şekilde π modu anlamına da gelen ve literatürdeki çalışmalarda elde edilmeye çalışılan jant telli bisiklet tekerinin görünümüne benzer bir görüntü elde edilmiştir. Hücre içi parçacık analizinde en son aşama olarak D4 magnetronunda gerilim ve manyetik alan değerinde değişiklik yapılarak 60 kV gerilim ve 0,07 T manyetik alan değerinde 9,108 GHz ve 11,656 GHz frekansta magnetronun çift bantta çalıştığı sonucuna varılmıştır.

Benzetim çalışmalarından sonra deneysel çalışmalara geçilmiş ve üretimi gerçekleştirilen D4 magnetronu atmosfer ve vakum ortamında incelenmiştir. Atmosfer ortamında gerçekleştirilen çalışmalarda magnetronun elektrik alan ve güç yoğunluğu değerleri ölçülürken vakum ortamında ise plazmadaki elektron sıcaklığı ve yoğunluğu incelenmiştir. Atmosfer ortamında elektrik alan ve güç yoğunluğu değerlerini ölçmek için bir anten tasarlanmış ve antenin uç noktası magnetrondan 12 cm uzaklıkta olacak şekilde başlangıç noktası olarak kabul edilmiş ve radyal yönde otuzar derece açı farkıyla, yatay yönde ise 10'ar cm aralıklarla ölçümler alınmıştır. Elde edilen sonuçlara göre hem radyal yönde hem de yatay doğrultuda maksimum değerlere anten noktasında ulaşılmıştır. Radyal yönde magnetronun anten çıkışından elde edilen elektrik alan değeri 129 V/m, güç yoğunluğu değeri 108,3 W/m² olarak bulunurken, yatay yönde magnetronun anten çıkışından 10 cm uzaklıkta elde edilen elektrik alan değeri 96,01 V/m olarak bulunmuştur. Ayrıca ölçümler sırasında hem osiloskobun ikinci kanalına herhangi bir prop bağlı olmadığı halde osiloskop ekranında sinyal gözlemlenmiş hem de antene yaklaştırılan bir lambada üretilen elektromanyetik enerjiyle aydınlanma meydana gelmiştir. Buradan yola çıkılarak mikrodalga üretildiği sonucuna ulaşılmıştır.

Deneysel çalışmaların ikinci aşaması olan vakum ortamında bir Langmuir sonda tasarlanarak plazma içerisindeki elektron sıcaklığı ve yoğunluğu ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre elektron sıcaklığı 307923 K diğer bir deyişle 26,55 eV, elektron yoğunluğu ise $7,6 \times 10^{10} \text{ m}^{-3}$ olarak bulunmuştur.

Tasarlanan magnetronun güvenilirliği açısından magnetronun verimi, kalite faktörü gibi parametrelerin ölçülmesi önerilmektedir. Ayrıca vektör network analizörü kullanılarak magnetronun çalışma frekansının benzetim çalışmalarındaki sonuçla kıyaslanması da önerilen diğer bir husustur. Daha sonraki çalışmalara ışık tutması açısından tasarlanan magnetrona uygun bir dalga kılavuzu ve soğutma sisteminin geliştirilmesiyle birlikte daha yüksek güçte elektromanyetik dalga elde edebilmek için empedans eşleştirme yapılması önerilmektedir.



KAYNAKLAR

1. Pozar, D. M. (2014). *Mikrodalga Mühendisliği* (Dördüncü Baskıdan Çeviri). (Çev. A. Köksal, M. Bulut, I. Sayın, H. Aşkar, S. Özdemir ve A. Ünal). Ankara: Palme Yayıncılık, 1-3, 274, 525-539, 552-555.
2. Redhead, P. A. (2001). The Invention of the Cavity Magnetron and Its Introduction into Canada and the U.S.A. *Article De Fond, Physics in Canada*, 57(6), 321-328.
3. Collins, G.B. (1948). *Microwave Magnetrons* (First Edition). New York, USA: McGrawHill Book Company, 1-46, 401-459.
4. Benford, J. (2010). *History and Future of the Relativistic Magnetron*. 2010 International Conference on the Origins and Evolution of the Cavity Magnetron, 40-45, Bournemouth, UK.
5. Benford, J., Sze, H., Woo, W., Smith, R. R. and Harteneck, B. (1989). Phase Locking of Relativistic Magnetrons. *Physical Review Letters*, 62(8), 969-971.
6. Levine, J., Aiello, N. and Harteneck, B. (1991). Design and Operation of a Module of Phase-Locked Relativistic Magnetrons. *Journal of Applied Physics*, 70(5), 2838-2848.
7. Verma, R. K., Maurya, S. and Singh, V. V. P. (2014). Study of Mode Control in Long-Anode High-Power Pulse Magnetron. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 42(12), 4010-4014.
8. Maurya, S., Singh, V.V.P. and Prasad, S. (2008). *Study of Mode Control in a S-Band Pulsed Tunable Magnetron*. 2008 International Conference on Recent Advances in Microwave Theory and Applications, 38-41, Jaipur, India.
9. İsenlik, T. and Yeğin, K. (2013). Tutorial on the Design of Hole-Slot-Type Cavity Magnetron Using CST Particle Studio. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 41(2), 296-304.
10. Fuks, M. and Schamiloglu, E. (2005). Rapid Start of Oscillations in a Magnetron with a "Transparent" Cathode. *Physical Review Letters*, 95(20), 205101-1 – 205101-4.
11. Prasad, S., Roybal, M., Buchenauer, C. J., Prestwich, K., Fuks, M. and Schamiloglu, E. (2009). *Experimental Verification of the Advantages of the Transparent Cathode in a Short-Pulse Magnetron*. 2009 IEEE Pulsed Power Conference, 81-85, Washington, DC, USA.
12. Fuks, M. I., Prasad, S. and Schamiloglu, E. (2016). Efficient Magnetron With a Virtual Cathode. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 44(8), 1298-1302.
13. Yang, W., Dong, Z., Yang, Y. and Dong, Y. (2014). Numerical Investigation of the Relativistic Magnetron Using a Novel Semitransparent Cathode. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 42(11), 3458-3464.

14. Vyas, S. K., Maurya, S., Verma, R. K. and Singh, V. P. (2015). Synthesis and Simulation Studies of a 10-kW 2,45-GHz CW Magnetron. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 43(10), 3615-3619.
15. Vyas, S. K., Maurya, S. and Singh, V. P. (2016). Efficiency Enhancement of CW Magnetron by Ferrite Material Filling. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 44(12), 3262-3267.
16. Wang, X., Fan, Y., Shi, D. and Shu, T. (2016). A High-Efficiency Relativistic Magnetron with the Filled Dielectric. *Physics of Plasmas*, 23(7), 073103.
17. Ding, S., Zang, R., Zhou, H. and Wang, B. (2016). Impact of Magnetic Field Distribution on Performance of 18-vane 5,8 GHz Magnetron. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 30(7), 880-888.
18. Choi, J. J., Lee, H. S., Jang, K. H., Sim, S. H. and Choi, H. S. (2016). Development of a 14-Vane, Double-Strapped, 5,8-GHz Magnetron Oscillator. *Journal of the Korean Physical Society*, 69(4), 632-639.
19. Khatoon, S., Yadav, R. P. and Jain, A. (2018). *Design and Simulation of 8-Cavity Hole-Slot Type Magnetron in CST*. 2018 2nd International Conference on Electronics, Materials Engineering & Nano-Technology, 1-5, Kolkata, India.
20. Joshi, M. K., Vyas, S. K., Tiwari, T. and Bhattacharjee, R. (2017). *Design of Coaxial Cavity for High Power Magnetron*. 2017 Conference on Microwave Techniques, 1-5, Brno, Czech Republic.
21. Vyas, S. K. and Tiwari, T. (2017). Study of Hole and Slot Type S-Band Pulsed Power Magnetron. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 32(8), 1008-1017.
22. Kayan, M. (2018). *An Optimization Study on Cavity Magnetron*. Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
23. Doğru, M. C. (2018). *High Power Magnetron Design and Electron Emission Characteristics*. Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
24. Salur, I. (2018). *Frequency and Phase Locking of Oscillators and Magnetrons*. Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
25. Leggieri, A., Passi, D. and Di Paolo, F. (2013). *Multiphysi Modeling Based Design of a Key-Holes Magnetron*. 2014 International Conference on Numerical Electromagnetic Modeling and Optimization for RF, Microwave, and Terahertz Applications, 1-4, Pavia, Italy.
26. Leggieri, A., Passi, D., Felici, G. and Di Paolo, F. (2014). *Multiphysics Design of a Magnetron High Power Transfer System*. 2014 European Modelling Symposium, 466-472, Pisa, Italy.
27. URL-1: *Magnetronun Yapısı*. <https://www.radartutorial.eu/08.transmitters/Magnetron>, Son Erişim Tarihi: 17.01.2020.

28. Liao, S. Y. (1990). *Microwave Devices and Circuits* (Third Edition). Englewood Cliffs, New Jersey, USA: Prentice Hall, 8-14, 432-434.
29. URL-2: *Magnetronun Çalışma Şekli.*
<https://www.radartutorial.eu/08.transmitters/Magnetron>, Son Erişim Tarihi: 28.01.2020.
30. Benford, J., Swegle, J. A. and Schamiloglu, E. (2016). *High Power Microwaves*. (Third Edition). Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, 233, 241, 242.
31. Li, L., Aranganadin, K. Hsu, H. Y. and Lin, M. C. (2020). Design and Development of Field Emission Based Magnetron for Industrial Applications Using Conformal Finite-Difference Time-Domain Particle-in-Cell Simulations. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 38(2), 023205-1 – 023205-5.
32. Liu, Z., Fan, Y., Wang, X., Shi, D., Li, A. and Yu, Y. (2020). A High-Efficiency Relativistic Magnetron With a Novel All-Cavity Extraction Structure. *AIP Advances*, 10(3), 035104-1 – 035104-4.
33. URL-3: *Design and Implementation of a Double Langmuir Probe for an RF Plasma.*
<https://w3.pppl.gov/ppst/docs/brown.pdf>, Son Erişim Tarihi: 25.08.2021.





GAZİ GELECEKTİR..