



**T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



Yüksek Lisans Tezi

**20 KeV Mikrodalga Deşarj İyon Kaynağında Benzetim Çalışmaları ve
Düşük Enerjili Demet Aktarım (DEDA) Hattı Ölçümleri**

Alis Hamparsunoğlu

Fizik Anabilim Dalı

Yüksek Enerji ve Plazma Fiziği Programı

**DANIŞMAN
Doç. Dr. Aytül ADIGÜZEL**

**II. DANIŞMAN
Dr. Hakan ÇETİNKAYA**

Haziran 2022

İSTANBUL

Bu çalışma, 22.06.2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Fizik Anabilim Dalı, Yüksek Enerji ve Plazma Fiziği Programında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Doç. Dr. Aytül ADIGÜZEL(Danışman)
İstanbul Üniversitesi
Fen Fakültesi

Prof. Dr. Sertaç ÖZTÜRK
İstinye Üniversitesi
Temel Bilimler Bölümü

Doç. Dr. Ayberk YILMAZ
İstanbul Üniversitesi
Fen Fakültesi

İntihal Programı Beyanı

20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi’nin aboneli olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü’nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

Proje Destekleri

Bu tez, 119M774 nolu TÜBİTAK Projesi ve İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri birimi 33250 nolu projesi tarafından desteklenmiştir.

Tezden Üretilmiş Yayınların Künye Bilgileri

--

ÖNSÖZ

Lisans yıllarımdan başlayarak öğrenme isteğime ve bu alana duyduğum sevgiye her zaman destek olan, tez sürecim boyunca bilgi ve tecrübesiyle yol gösteren danışmanım Doç. Dr. Aytül ADIGÜZEL'e teşekkür ederim.

Deneysel ölçümler ve benzetim programları başta olmak üzere deneysel fizik konusunda kendisinden çok şey öğrendiğim bilgisini ve tecrübesini büyük bir sabırla paylaşan ve tezimin şekillenmesinde çok emeği olan ikinci danışmanım Dr. Hakan ÇETİNKAYA'ya teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalarımızı gerçekleştirmemiz için gereken alt yapıyı sağlayan bilgi ve tecrübeleriyle her zaman destek olan başta Prof. Dr. Erkan ÖZCAN ve Doç. Dr. N. Gökhan ÜNEL olmak üzere tüm KAHVELab ekibine teşekkür ederim.

Hızlandırıcı fiziği konusunda bilgilerini paylaşarak destek olan Dr. Salim OĞUR'a teşekkür ederim.

Lisans yıllarımda kendisinden Python konusunda dersler aldığım, tez aşamamda yaptığım çalışmalarda desteğini esirgemeyen Doç. Dr. Ayberk YILMAZ'a teşekkür ederim.

Tez jürimde olmayı kabul edip değerli vaktini ayıran Prof. Dr. Sertaç ÖZTÜRK'e teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimim boyunca tecrübeleriyle her zaman yanımda olup destek olan Oğuz KOÇER'e, Aslıhan ÇAĞLAR'a ve Atacan KILIÇGEDİK'e teşekkür ederim.

Her zaman yanımda olan ve beni destekleyen aileme ve dostlarım Ercan GÜLEŞ'e, Eyüp BAYDAR'a ve Berk DÜZEN'e teşekkür ederim.

Tez kapsamında yaptığım çalışmaları 119M774 nolu proje ile destekleyen TÜBİTAK'a ve 33250 nolu projesi ile destekleyen İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri birimine teşekkür ederim.

Haziran,2022

Alis Hamparsunoğlu

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
ŞEKİL LİSTESİ	viii
TABLO LİSTESİ.....	viii
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ.....	xxviii
ÖZET	xxx
SUMMARY	xxx
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL KISIMLAR.....	2
2.1. Teori.....	2
2.1.1. Parçacık Hızlandırıcıları.....	2
2.1.1.1. Hızlandırıcı Çeşitleri.....	3
2.1.1.2. Kullanım Alanları.....	4
2.1.2. Manyetik Alan Etkileri.....	6
2.1.2.1. Manyetizma.....	6
2.1.2.2. Manyetik Alan.....	7
2.1.2.3. İçinden Akım Geçen Telin Manyetik Alanı.....	8
2.1.2.4. Solenoid Magnet.....	9
2.1.2.5. Solenoidin Manyetik Alanı Nasıl Hesaplanır?.....	10
2.1.2.6. Solenoid Demeti Nasıl Odaklar?.....	12
2.1.3. Plazma Fiziği.....	16
2.1.4. İyon Kaynakları.....	17
2.1.4.1.1. Plazma Kaynağı.....	19
2.1.4.1.2. İyon Sökme Sistemi.....	19
2.1.4.2. İyon Kaynağı Türleri.....	19

2.1.4.3. İyon Kaynağı Bileşenleri.....	20
2.1.4.4 İyon Kaynağı Çalışma Prensipleri.....	21
2.1.5. İyon Sökme Sistemi.....	21
2.1.6. Düşük Enerji Demet Aktarım (Low Energy Beam Transport) Hattı.....	21
2.1.6.1. Bileşenleri.....	22
3. MALZEME VE YÖNTEM.....	23
3.1. Kandilli Algiç, Hızlandırıcı ve Enstrümantasyon Laboratuvarı İyon Kaynağı ve DEDA Hattı.....	23
3.1.1. İyon Kaynağı Bileşenleri.....	24
3.1.2. Düşük Enerji Demet Aktarım Hattı.....	26
3.2. KAHVELab Deneysel Çalışmalar.....	26
3.2.1. DEDA Hattı Solenoidlerinin (Elektromıknatıs) Manyetik Alan Ölçümü.....	27
3.2.2. Deneysel ve Teorik Sonuçların Karşılaştırılması.....	32
3.2.3. Sistemin Kurulumu.....	54
3.3. İyon Sökme Sistemi Tasarımı.....	55
3.3.1. IBSimu ile İyon Demeti Benzetimi.....	55
3.3.1.1. IBSimu.....	55
3.3.1.2. Yayınım (Emittance).....	57
3.3.1.3. Uzay Yüğü.....	58
3.3.1.4. Pierce Geometrisi.....	58
3.3.1.5. İyon Demeti Benzetimi.....	59
3.3.1.5.1. 3 Elektrotlu Elektrot Sistemi.....	105
4. BULGULAR.....	108
4.1. Manyetik Alan Ölçümleri Hata Oranı.....	108
4.2. IBSimu Programı ile Gerçekleştirilen Benzetim Çalışması Sonucu Elde Edilen Sonuçlar.....	122
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	131
KAYNAKLAR.....	132

EKLER	135
ÖZGEÇMİŞ	137



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: Rutherford α Parçacığı Deney Düzeneği	2
Şekil 2.2: İki Paralel Levha ile Oluşturulmuş Basit Bir Parçacık Hızlandırıcı.....	3
Şekil 2.3: Cockcroft Walton Jeneratörü (sol), Van de Graaff Jeneratörü (sağ)	4
Şekil 2.4: Manyetik Alan Çizgilerinin Gösterimi.....	8
Şekil 2.5: Sağ El Kuralı.....	9
Şekil 2.6: Solenoid Magnet.....	9
Şekil 2.7: Üzerinden Akım Geçen Tel.....	10
Şekil 2.8: Telin manyetik alanının toplam katkısı hesaplanırken incelenen kesit.....	11
Şekil 2.9: Bir Solenoiddeki Demetin Odaklanması.....	13
Şekil 2.10: Larmour Frekansı ile Siklotron Frekansı Arasındaki İlişkinin Gösterimi.....	15
Şekil 2.11: İyon Kaynağı Şeması.....	18
Şekil 2.12: İyon Kaynağı Gösterimi.....	20
Şekil 3.1: Mikrodalga Deşarj İyon Kaynağı.....	24
Şekil 3.2: İyon Kaynağı Solenoidi.....	25
Şekil 3.3: Plazma Odası ve İyon Sökme Sistemi.....	25
Şekil 3.4: İyon Kaynağı Görüntüsü.....	26
Şekil 3.5: İyon Kaynağı ve DEDA Hattı Şematik Gösterimi.....	27

Şekil 3.6: 1682 Sarımlı Solenoidin Poisson Superfish Programı ile Gerçekleştirilen Manyetik Alan Tasarımı.....	27
Şekil 3.7: 1682 Sarımlı Solenoidin Manyetik Alan Profili.....	28
Şekil 3.8: 4000 Sarımlı Solenoidin Poisson Superfish Programı ile Gerçekleştirilen Manyetik Alan Tasarımı.....	28
Şekil 3.9: 4000 Sarımlı Solenoidin Manyetik Alan Profili.....	29
Şekil 3.10: Üretilen DEDA Hattı Solenoidi.....	29
Şekil 3.11: Solenoidin Birleştirilip Yapıştırılması.....	30
Şekil 3.12: Solenoidin Su Sızdırmazlık Testi.....	30
Şekil 3.13: Manyetik Alan Ölçüm Düzeneği.....	31
Şekil 3.14: Solenoidin Merkezden Manyetik Alan Ölçümü Hizalama Yöntemi.....	32
Şekil 3.15: Solenoidin Merkezden 5 mm-10 mm-15 mm-20 mm Yukarıdan, Sağdan, Soldan ve Aşağıdan Ölçümleri için Hizalama Yöntemi.....	32
Şekil 3.16: İyon Kaynağı ve DEDA Hattı.....	33
Şekil 3.17: 4000 Sarımlı Solenoidin Merkezden 5 mm Yukarıdan Radyal Prob ile Ölçümü (sol), 4000 Sarımlı Solenoidin Merkezden 5 mm Yukarıdan Radyal Prob ile Ölçüm Hata Oranı (%) (sağ).....	33
Şekil 3.18: 4000 Sarımlı Solenoidin Merkezden 5 mm Yukarıdan Eksenel Prob ile Ölçümü (sol), 4000 Sarımlı Solenoidin Merkezden 5 mm Yukarıdan Eksenel Prob ile Ölçüm Hata Oranı (%) (sağ).....	34
Şekil 3.19: 4000 Sarımlı Solenoidin Merkezden 5 mm Sağdan Radyal Prob ile Ölçümü (sol), 4000 Sarımlı Solenoidin Merkezden 5 mm Sağdan Radyal Prob ile Ölçüm Hata Oranı (%) (sağ).....	34

Şekil 3.20: 4000 Sarımlı Solenoidin Merkezden 5 mm Sağdan Eksenel Prob ile Ölçümü (sol), 4000 Sarımlı Solenoidin Merkezden 5 mm Sağdan Eksenel Prob ile Ölçüm Hata Oranı (%) (sağ).....	34
Şekil 3.21: 4000 Sarımlı Solenoidin Merkezden 5 mm Soldan Radyal Prob ile Ölçümü (sol), 4000 Sarımlı Solenoidin Merkezden 5 mm Soldan Radyal Prob ile Ölçüm Hata Oranı (%) (sağ).....	35
Şekil 3.22: 4000 Sarımlı Solenoidin Merkezden 5 mm Soldan Eksenel Prob ile Ölçümü (sol), 4000 Sarımlı Solenoidin Merkezden 5 mm Soldan Eksenel Prob ile Ölçüm Hata Oranı (%) (sağ).....	35
Şekil 3.23: 4000 Sarımlı Solenoidin Merkezden 5 mm Aşağıdan Radyal Prob ile Ölçümü (sol), 4000 Sarımlı Solenoidin Merkezden 5 mm Aşağıdan Radyal Prob ile Ölçüm Hata Oranı (%) (sağ).....	35
Şekil 3.24: 4000 Sarımlı Solenoidin Merkezden 5 mm Aşağıdan Eksenel Prob ile Ölçümü (sol), 4000 Sarımlı Solenoidin Merkezden 5 mm Aşağıdan Eksenel Prob ile Ölçüm Hata Oranı (%) (sağ).....	36
Şekil 3.25: 4000 Sarımlı Solenoidin Merkezden 10 mm Yukarıdan Radyal Prob ile Ölçümü (sol), 4000 Sarımlı Solenoidin Merkezden 10 mm Yukarıdan Radyal Prob ile Ölçüm Hata Oranı (%) (sağ).....	36
Şekil 3.26: 4000 Sarımlı Solenoidin Merkezden 10 mm Yukarıdan Eksenel Prob ile Ölçümü (sol), 4000 Sarımlı Solenoidin Merkezden 10 mm Yukarıdan Eksenel Prob ile Ölçüm Hata Oranı (%) (sağ).....	36
Şekil 3.27: 4000 Sarımlı Solenoidin Merkezden 10 mm Sağdan Radyal Prob ile Ölçümü (sol), 4000 Sarımlı Solenoidin Merkezden 10 mm Sağdan Radyal Prob ile Ölçüm Hata Oranı (%) (sağ).....	37
Şekil 3.28: 4000 Sarımlı Solenoidin Merkezden 10 mm Sağdan Eksenel Prob ile Ölçümü (sol), 4000 Sarımlı Solenoidin Merkezden 10 mm Sağdan Eksenel Prob ile Ölçüm Hata Oranı (%) (sağ).....	37

Şekil 3.29: 4000 Sarımlı Solenoidin Merkezden 10 mm Soldan Radyal Prob ile Ölçümü (sol), 4000 Sarımlı Solenoidin Merkezden 10 mm Soldan Radyal Prob ile Ölçüm Hata Oranı (%) (sağ).....	37
Şekil 3.30: 4000 Sarımlı Solenoidin Merkezden 10 mm Soldan Eksenel Prob ile Ölçümü (sol), 4000 Sarımlı Solenoidin Merkezden 10 mm Soldan Eksenel Prob ile Ölçüm Hata Oranı (%) (sağ).....	38
Şekil 3.31: 4000 Sarımlı Solenoidin Merkezden 10 mm Aşağıdan Radyal Prob ile Ölçümü (sol), 4000 Sarımlı Solenoidin Merkezden 10 mm Aşağıdan Radyal Prob ile Ölçüm Hata Oranı (%) (sağ).....	38
Şekil 3.32: 4000 Sarımlı Solenoidin Merkezden 10 mm Aşağıdan Eksenel Prob ile Ölçümü (sol), 4000 Sarımlı Solenoidin Merkezden 10 mm Aşağıdan Eksenel Prob ile Ölçüm Hata Oranı (%) (sağ).....	38
Şekil 3.33: 4000 Sarımlı Solenoidin Merkezden 15 mm Yukarıdan Radyal Prob ile Ölçümü (sol), 4000 Sarımlı Solenoidin Merkezden 15 mm Yukarıdan Radyal Prob ile Ölçüm Hata Oranı (%) (sağ).....	39
Şekil 3.34: 4000 Sarımlı Solenoidin Merkezden 15 mm Yukarıdan Eksenel Prob ile Ölçümü (sol), 4000 Sarımlı Solenoidin Merkezden 15 mm Yukarıdan Eksenel Prob ile Ölçüm Hata Oranı (%) (sağ).....	39
Şekil 3.35: 4000 Sarımlı Solenoidin Merkezden 15 mm Sağdan Radyal Prob ile Ölçümü (sol), 4000 Sarımlı Solenoidin Merkezden 15 mm Sağdan Radyal Prob ile Ölçüm Hata Oranı (%) (sağ).....	39
Şekil 3.36: 4000 Sarımlı Solenoidin Merkezden 15 mm Sağdan Eksenel Prob ile Ölçümü (sol), 4000 Sarımlı Solenoidin Merkezden 15 mm Sağdan Eksenel Prob ile Ölçüm Hata Oranı (%) (sağ).....	40
Şekil 3.37: 4000 Sarımlı Solenoidin Merkezden 15 mm Soldan Radyal Prob ile Ölçümü (sol), 4000 Sarımlı Solenoidin Merkezden 15 mm Soldan Radyal Prob ile Ölçüm Hata Oranı (%) (sağ).....	40

Şekil 3.38: 4000 Sarımlı Solenoidin Merkezden 15 mm Soldan Eksenel Prob ile Ölçümü (sol), 4000 Sarımlı Solenoidin Merkezden 15 mm Soldan Eksenel Prob ile Ölçüm Hata Oranı (%) (sağ).....	40
Şekil 3.39: 4000 Sarımlı Solenoidin Merkezden 15 mm Aşağıdan Radyal Prob ile Ölçümü (sol), 4000 Sarımlı Solenoidin Merkezden 15 mm Aşağıdan Radyal Prob ile Ölçüm Hata Oranı (%) (sağ).....	41
Şekil 3.40: 4000 Sarımlı Solenoidin Merkezden 15 mm Aşağıdan Eksenel Prob ile Ölçümü (sol), 4000 Sarımlı Solenoidin Merkezden 15 mm Aşağıdan Eksenel Prob ile Ölçüm Hata Oranı (%) (sağ).....	41
Şekil 3.41: 4000 Sarımlı Solenoidin Merkezden 20 mm Yukarıdan Radyal Prob ile Ölçümü (sol), 4000 Sarımlı Solenoidin Merkezden 20 mm Yukarıdan Radyal Prob ile Ölçüm Hata Oranı (%) (sağ).....	41
Şekil 3.42: 4000 Sarımlı Solenoidin Merkezden 20 mm Yukarıdan Eksenel Prob ile Ölçümü (sol), 4000 Sarımlı Solenoidin Merkezden 20 mm Yukarıdan Eksenel Prob ile Ölçüm Hata Oranı (%) (sağ).....	42
Şekil 3.43: 4000 Sarımlı Solenoidin Merkezden 20 mm Sağdan Radyal Prob ile Ölçümü (sol), 4000 Sarımlı Solenoidin Merkezden 20 mm Sağdan Radyal Prob ile Ölçüm Hata Oranı (%) (sağ).....	42
Şekil 3.44: 4000 Sarımlı Solenoidin Merkezden 20 mm Sağdan Eksenel Prob ile Ölçümü (sol), 4000 Sarımlı Solenoidin Merkezden 20 mm Sağdan Eksenel Prob ile Ölçüm Hata Oranı (%) (sağ).....	42
Şekil 3.45: 4000 Sarımlı Solenoidin Merkezden 20 mm Soldan Radyal Prob ile Ölçümü (sol), 4000 Sarımlı Solenoidin Merkezden 20 mm Soldan Radyal Prob ile Ölçüm Hata Oranı (%) (sağ).....	43
Şekil 3.46: 4000 Sarımlı Solenoidin Merkezden 20 mm Soldan Eksenel Prob ile Ölçümü (sol), 4000 Sarımlı Solenoidin Merkezden 20 mm Soldan Eksenel Prob ile Ölçüm Hata Oranı (%) (sağ).....	43

Şekil 3.47: 4000 Sarımlı Solenoidin Merkezden 20 mm Aşağıdan Radyal Prob ile Ölçümü (sol), 4000 Sarımlı Solenoidin Merkezden 20 mm Aşağıdan Radyal Prob ile Ölçüm Hata Oranı (%) (sağ).....	43
Şekil 3.48: 4000 Sarımlı Solenoidin Merkezden 20 mm Aşağıdan Eksenel Prob ile Ölçümü (sol), 4000 Sarımlı Solenoidin Merkezden 20 mm Aşağıdan Eksenel Prob ile Ölçüm Hata Oranı (%) (sağ).....	44
Şekil 3.49: 1682 Sarımlı Solenoidin Merkezden 5 mm Yukarıdan Radyal Prob ile Ölçümü (sol), 1682 Sarımlı Solenoidin Merkezden 5 mm Yukarıdan Radyal Prob ile Ölçüm Hata Oranı (%) (sağ).....	44
Şekil 3.50: 1682 Sarımlı Solenoidin Merkezden 5 mm Yukarıdan Eksenel Prob ile Ölçümü (sol), 1682 Sarımlı Solenoidin Merkezden 5 mm Yukarıdan Eksenel Prob ile Ölçüm Hata Oranı (%) (sağ).....	44
Şekil 3.51: 1682 Sarımlı Solenoidin Merkezden 5 mm Sağdan Radyal Prob ile Ölçümü (sol), 1682 Sarımlı Solenoidin Merkezden 5 mm Sağdan Radyal Prob ile Ölçüm Hata Oranı (%) (sağ).....	45
Şekil 3.52: 1682 Sarımlı Solenoidin Merkezden 5 mm Sağdan Eksenel Prob ile Ölçümü (sol), 1682 Sarımlı Solenoidin Merkezden 5 mm Sağdan Eksenel Prob ile Ölçüm Hata Oranı (%) (sağ).....	45
Şekil 3.53: 1682 Sarımlı Solenoidin Merkezden 5 mm Soldan Radyal Prob ile Ölçümü (sol), 1682 Sarımlı Solenoidin Merkezden 5 mm Soldan Radyal Prob ile Ölçüm Hata Oranı (%) (sağ).....	45
Şekil 3.54: 1682 Sarımlı Solenoidin Merkezden 5 mm Soldan Eksenel Prob ile Ölçümü (sol), 1682 Sarımlı Solenoidin Merkezden 5 mm Soldan Eksenel Prob ile Ölçüm Hata Oranı (%) (sağ).....	46
Şekil 3.55: 1682 Sarımlı Solenoidin Merkezden 5 mm Aşağıdan Radyal Prob ile Ölçümü (sol), 1682 Sarımlı Solenoidin Merkezden 5 mm Aşağıdan Radyal Prob ile Ölçüm Hata Oranı (%) (sağ).....	46

Şekil 3.56: 1682 Sarımlı Solenoidin Merkezden 5 mm Aşağıdan Eksenel Prob ile Ölçümü (sol), 1682 Sarımlı Solenoidin Merkezden 5 mm Aşağıdan Eksenel Prob ile Ölçüm Hata Oranı (%) (sağ).....	46
Şekil 3.57: 1682 Sarımlı Solenoidin Merkezden 10 mm Yukarıdan Radyal Prob ile Ölçümü (sol), 1682 Sarımlı Solenoidin Merkezden 10 mm Yukarıdan Radyal Prob ile Ölçüm Hata Oranı (%) (sağ).....	47
Şekil 3.58: 1682 Sarımlı Solenoidin Merkezden 10 mm Yukarıdan Eksenel Prob ile Ölçümü (sol), 1682 Sarımlı Solenoidin Merkezden 10 mm Yukarıdan Eksenel Prob ile Ölçüm Hata Oranı (%) (sağ).....	47
Şekil 3.59: 1682 Sarımlı Solenoidin Merkezden 10 mm Sağdan Radyal Prob ile Ölçümü (sol), 1682 Sarımlı Solenoidin Merkezden 10 mm Sağdan Radyal Prob ile Ölçüm Hata Oranı (%) (sağ).....	47
Şekil 3.60: 1682 Sarımlı Solenoidin Merkezden 10 mm Sağdan Eksenel Prob ile Ölçümü (sol), 1682 Sarımlı Solenoidin Merkezden 10 mm Sağdan Eksenel Prob ile Ölçüm Hata Oranı (%) (sağ).....	48
Şekil 3.61: 1682 Sarımlı Solenoidin Merkezden 10 mm Soldan Radyal Prob ile Ölçümü (sol), 1682 Sarımlı Solenoidin Merkezden 10 mm Soldan Radyal Prob ile Ölçüm Hata Oranı (%) (sağ).....	48
Şekil 3.62: 1682 Sarımlı Solenoidin Merkezden 10 mm Soldan Eksenel Prob ile Ölçümü (sol), 1682 Sarımlı Solenoidin Merkezden 10 mm Soldan Eksenel Prob ile Ölçüm Hata Oranı (%) (sağ).....	48
Şekil 3.63: 1682 Sarımlı Solenoidin Merkezden 10 mm Aşağıdan Radyal Prob ile Ölçümü (sol), 1682 Sarımlı Solenoidin Merkezden 10 mm Aşağıdan Radyal Prob ile Ölçüm Hata Oranı (%) (sağ).....	49
Şekil 3.64: 1682 Sarımlı Solenoidin Merkezden 10 mm Aşağıdan Eksenel Prob ile Ölçümü (sol), 1682 Sarımlı Solenoidin Merkezden 10 mm Aşağıdan Eksenel Prob ile Ölçüm Hata Oranı (%) (sağ).....	49

Şekil 3.65: 1682 Sarımlı Solenoidin Merkezden 15 mm Yukarıdan Radyal Prob ile Ölçümü (sol), 1682 Sarımlı Solenoidin Merkezden 15 mm Yukarıdan Radyal Prob ile Ölçüm Hata Oranı (%) (sağ).....	49
Şekil 3.66: 1682 Sarımlı Solenoidin Merkezden 15 mm Yukarıdan Eksenel Prob ile Ölçümü (sol), 1682 Sarımlı Solenoidin Merkezden 15 mm Yukarıdan Eksenel Prob ile Ölçüm Hata Oranı (%) (sağ).....	50
Şekil 3.67: 1682 Sarımlı Solenoidin Merkezden 15 mm Sağdan Radyal Prob ile Ölçümü (sol), 1682 Sarımlı Solenoidin Merkezden 15 mm Sağdan Radyal Prob ile Ölçüm Hata Oranı (%) (sağ).....	50
Şekil 3.68: 1682 Sarımlı Solenoidin Merkezden 15 mm Sağdan Eksenel Prob ile Ölçümü (sol), 1682 Sarımlı Solenoidin Merkezden 15 mm Sağdan Eksenel Prob ile Ölçüm Hata Oranı (%) (sağ).....	50
Şekil 3.69: 1682 Sarımlı Solenoidin Merkezden 15 mm Soldan Radyal Prob ile Ölçümü (sol), 1682 Sarımlı Solenoidin Merkezden 15 mm Soldan Radyal Prob ile Ölçüm Hata Oranı (%) (sağ).....	51
Şekil 3.70: 1682 Sarımlı Solenoidin Merkezden 15 mm Soldan Eksenel Prob ile Ölçümü (sol), 1682 Sarımlı Solenoidin Merkezden 15 mm Soldan Eksenel Prob ile Ölçüm Hata Oranı (%) (sağ).....	51
Şekil 3.71: 1682 Sarımlı Solenoidin Merkezden 15 mm Aşağıdan Radyal Prob ile Ölçümü (sol), 1682 Sarımlı Solenoidin Merkezden 15 mm Aşağıdan Radyal Prob ile Ölçüm Hata Oranı (%) (sağ).....	51
Şekil 3.72: 1682 Sarımlı Solenoidin Merkezden 15 mm Aşağıdan Eksenel Prob ile Ölçümü (sol), 1682 Sarımlı Solenoidin Merkezden 15 mm Aşağıdan Eksenel Prob ile Ölçüm Hata Oranı (%) (sağ).....	52
Şekil 3.73: 1682 Sarımlı Solenoidin Merkezden 20 mm Yukarıdan Radyal Prob ile Ölçümü (sol), 1682 Sarımlı Solenoidin Merkezden 20 mm Yukarıdan Radyal Prob ile Ölçüm Hata Oranı (%) (sağ).....	52

Şekil 3.74: 1682 Sarımlı Solenoidin Merkezden 20 mm Yukarıdan Eksenel Prob ile Ölçümü (sol), 1682 Sarımlı Solenoidin Merkezden 20 mm Yukarıdan Eksenel Prob ile Ölçüm Hata Oranı (%) (sağ).....	52
Şekil 3.75: 1682 Sarımlı Solenoidin Merkezden 20 mm Sağdan Radyal Prob ile Ölçümü (sol), 1682 Sarımlı Solenoidin Merkezden 20 mm Sağdan Radyal Prob ile Ölçüm Hata Oranı (%) (sağ).....	53
Şekil 3.76: 1682 Sarımlı Solenoidin Merkezden 20 mm Sağdan Eksenel Prob ile Ölçümü (sol), 1682 Sarımlı Solenoidin Merkezden 20 mm Sağdan Eksenel Prob ile Ölçüm Hata Oranı (%) (sağ).....	53
Şekil 3.77: 1682 Sarımlı Solenoidin Merkezden 20mm Soldan Radyal Prob ile Ölçümü (sol), 1682 Sarımlı Solenoidin Merkezden 20mm Soldan Radyal Prob ile Ölçüm Hata Oranı (%) (sağ).....	53
Şekil 3.78: 1682 Sarımlı Solenoidin Merkezden 20 mm Soldan Eksenel Prob ile Ölçümü (sol), 1682 Sarımlı Solenoidin Merkezden 20 mm Soldan Eksenel Prob ile Ölçüm Hata Oranı (%) (sağ).....	54
Şekil 3.79: 1682 Sarımlı Solenoidin Merkezden 20 mm Aşağıdan Radyal Prob ile Ölçümü (sol), 1682 Sarımlı Solenoidin Merkezden 20 mm Aşağıdan Radyal Prob ile Ölçüm Hata Oranı (%) (sağ).....	54
Şekil 3.80: 1682 Sarımlı Solenoidin Merkezden 20 mm Aşağıdan Eksenel Prob ile Ölçümü (sol), 1682 Sarımlı Solenoidin Merkezden 20 mm Aşağıdan Eksenel Prob ile Ölçüm Hata Oranı (%) (sağ).....	55
Şekil 3.81: IBSimu Üç Elektrotlu Sistem Örneği ve İsimlendirilmesi.....	57
Şekil 3.82: Faz uzayında demeti tanımlayan elips.....	58
Şekil 3.83: 7 no'lu Plazma Elektrotu ve Değişkenleri	59
Şekil 3.84: 7 no'lu Elektrotun Uzunlukları.....	60
Şekil 3.85: 7 no'lu Elektrot için $a = 3 \text{ mm}$ ve $J = 100 \text{ A/m}^2$ Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	60

Şekil 3.86: 7 no'lu Elektrot için $a = 3$ mm ve $J = 200$ A/m ² Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	61
Şekil 3.87: 7 no'lu Elektrot için $a = 3$ mm ve $J = 300$ A/m ² Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	61
Şekil 3.88: 7 no'lu Elektrot için $a = 1$ mm ve $J = 100$ A/m ² Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	62
Şekil 3.89: 7 no'lu Elektrot için $a = 1$ mm ve $J = 200$ A/m ² Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	63
Şekil 3.90: 7 no'lu Elektrot için $a = 1$ mm ve $J = 300$ A/m ² Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	63
Şekil 3.91: 7 no'lu Elektrot için $b = 1$ mm Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	64
Şekil 3.92: 7 no'lu Elektrot için $b = 2$ mm Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	64
Şekil 3.93: 7 no'lu Elektrot için $b = 3$ mm Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	65
Şekil 3.94: 7 no'lu Elektrot için $b = 4$ mm Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	65
Şekil 3.95: 7 no'lu Elektrot için $b = 5$ mm Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	66
Şekil 3.96: 7 no'lu Elektrot için $c = 0,6$ mm Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	66
Şekil 3.97: 7 no'lu Elektrot için $c = 1,6$ mm Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	67
Şekil 3.98: 7 no'lu Elektrot için $c = 2,6$ mm Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	67

Şekil 3.99: 7 no'lu Elektrot için $c = 3,6$ mm Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	68
Şekil 3.100: 7 no'lu Elektrot için $c = 4,6$ mm Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	68
Şekil 3.101: 7 no'lu Elektrot için $c = 5,6$ mm Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	69
Şekil 3.102: 7 no'lu Elektrot için $m = 1,2$ Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	69
Şekil 3.103: 7 no'lu Elektrot için $m = 1,3$ Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	70
Şekil 3.104: 7 no'lu Elektrot için $m = 1,4$ Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	70
Şekil 3.105: 7 no'lu Elektrot için $m = 1,5$ Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	71
Şekil 3.106: 7 no'lu Elektrot için $m = 1,6$ Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	71
Şekil 3.107: 7 no'lu Elektrot için $m = 1,7$ Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	72
Şekil 3.108: 7 no'lu Elektrot için $m = 1,8$ Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	72
Şekil 3.109: 7 no'lu Elektrot için $m = 1,9$ Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	73
Şekil 3.110: 7 no'lu Elektrot için $m = 2,0$ Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	73
Şekil 3.111: 7 no'lu Elektrot için $m = 2,1$ Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	74

Şekil 3.112: 7 no'lu Elektrot için $m = 2,2$ Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	74
Şekil 3.113: 7 no'lu Elektrot için $m = 2,3$ Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	75
Şekil 3.114: 7 no'lu Elektrot için $m = 2,4$ Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	75
Şekil 3.115: 7 no'lu Elektrot için $m = 2,5$ Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	76
Şekil 3.116: 7 no'lu Elektrot için $d = 2,4$ mm ve $e = 5,28$ mm Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	76
Şekil 3.117: 7 no'lu Elektrot için $d = 2,5$ mm ve $e = 5,5$ mm Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	77
Şekil 3.118: 7 no'lu Elektrot için $d = 2,6$ mm ve $e = 5,72$ mm Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	78
Şekil 3.119: 7 no'lu Elektrot için $d = 2,7$ mm ve $e = 5,94$ mm Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	78
Şekil 3.120: 7 no'lu Elektrot için $d = 2,8$ mm ve $e = 6,16$ mm Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	78
Şekil 3.121: 7 no'lu Elektrot için $d = 2,9$ mm ve $e = 6,38$ mm Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	79
Şekil 3.122: 7 no'lu Elektrot için $d = 3,0$ mm ve $e = 6,6$ mm Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	79
Şekil 3.123: 7 no'lu Elektrot için $d = 3,1$ mm ve $e = 6,82$ mm Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	80
Şekil 3.124: 7 no'lu Elektrot için $d = 3,2$ mm ve $e = 7,04$ mm Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	80

Şekil 3.125: 7 no'lu Elektrot için $d = 3,3$ mm ve $e = 7,26$ mm Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	81
Şekil 3.126: 7 no'lu Elektrot için $d = 3,4$ mm ve $e = 7,48$ mm Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	81
Şekil 3.127: 7 no'lu Elektrot için $d = 3,5$ mm ve $e = 7,7$ mm Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	82
Şekil 3.128: 7 no'lu Elektrot için $d = 3,6$ mm ve $e = 7,92$ mm Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	82
Şekil 3.129: 7 no'lu Elektrot için $d = 3,7$ mm ve $e = 8,14$ mm Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	83
Şekil 3.130: 7 no'lu Elektrot için $d = 3,8$ mm ve $e = 8,36$ mm Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	83
Şekil 3.131: 7 no'lu Elektrot için $d = 3,9$ mm ve $e = 8,58$ mm Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	84
Şekil 3.132: 7 no'lu Elektrot için $d = 4,0$ mm ve $e = 8,8$ mm Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	84
Şekil 3.133: 7 no'lu Elektrot için $d = 4,1$ mm ve $e = 9,02$ mm Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	85
Şekil 3.134: 7 no'lu Elektrot için $d = 4,2$ mm ve $e = 9,24$ mm Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	85
Şekil 3.135: 7 no'lu Elektrot için $d = 4,3$ mm ve $e = 9,46$ mm Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	86
Şekil 3.136: 7 no'lu Elektrot için $d = 4,4$ mm ve $e = 9,68$ mm Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	86
Şekil 3.137: 7 no'lu Elektrot için $d = 4,5$ mm ve $e = 9,9$ mm Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	87

Şekil 3.138: 7 no'lu Elektrot için $d = 4,6$ mm ve $e = 10,12$ mm Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	87
Şekil 3.139: 7 no'lu Elektrot için $d = 4,7$ mm ve $e = 10,34$ mm Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	88
Şekil 3.140: Benzetim Alanının Genişletilmesi.....	88
Şekil 3.141: 8 no'lu Elektrotun Boyu 0,025 m Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	89
Şekil 3.142: 8 no'lu Elektrotun Boyu 0,02 m Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	89
Şekil 3.143: 8 no'lu Elektrotun Boyu 0,015 m Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	89
Şekil 3.144: 8 no'lu Elektrotun Boyu 0,01 m Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	90
Şekil 3.145: 8 no'lu Elektrotun Yarıçapının 5 mm Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	90
Şekil 3.146: 9 no'lu Elektrot Benzetimden Kaldırıldığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	90
Şekil 3.147: 8 no'lu Elektrotun Konumunun 0,1 m Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	91
Şekil 3.148: 8 no'lu Elektrotun Konumunun 0,095 m Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	91
Şekil 3.149: 8 no'lu Elektrotun Konumunun 0,09 m Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	91
Şekil 3.150: 8 no'lu Elektrotun Konumunun 0,085 m Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	92

Şekil 3.151: 8 no'lu Elektrotun Konumunun 0,08 m Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	92
Şekil 3.152: 8 no'lu Elektrotun Konumunun 0,075 m Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	92
Şekil 3.153: 8 no'lu Elektrotun Konumunun 0,07 m Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	93
Şekil 3.154: 8 no'lu Elektrotun Konumunun 0,065 m Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	93
Şekil 3.155: 8 no'lu Elektrotun Konumunun 0,06 m Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	93
Şekil 3.156: 8 no'lu Elektrotun Konumunun 0,055 m Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	93
Şekil 3.157: 8 no'lu Elektrotun Konumunun 0,05 m Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	94
Şekil 3.158: 8 no'lu Elektrotun Konumunun 0,045 m Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	94
Şekil 3.159: 8 no'lu Elektrotun Konumunun 0,04 m Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	94
Şekil 3.160: 8 no'lu Elektrotun Konumunun 0,035 m Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	95
Şekil 3.161: 8 no'lu Elektrotun Konumunun 0,03 m Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	95
Şekil 3.162: 8 no'lu Elektrotun Konumunun 0,025 m Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	95
Şekil 3.163: 8 no'lu Elektrotun Konumunun 0,02 m Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	96

Şekil 3.164: 8 no'lu Elektrotun Konumunun 0,015 m Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	96
Şekil 3.165: 8 no'lu Elektrotun Konumunun 0,01 m Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	96
Şekil 3.166: 8 no'lu Elektrotun Konumu 0,05 m Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	97
Şekil 3.167: 8 no'lu Elektrotun Konumu 0,049 m Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	97
Şekil 3.168: 8 no'lu Elektrotun Konumu 0,048 m Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	97
Şekil 3.169: 8 no'lu Elektrotun Konumu 0,047 m Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	97
Şekil 3.170: 8 no'lu Elektrotun Konumu 0,046 m Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	98
Şekil 3.171: 8 no'lu Elektrotun Konumu 0,045 m Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	98
Şekil 3.172: 8 no'lu Elektrotun Konumu 0,044 m Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	98
Şekil 3.173: 8 no'lu Elektrotun Konumu 0,043 m Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	98
Şekil 3.174: 8 no'lu Elektrotun Konumu 0,042 m Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	98
Şekil 3.175: 8 no'lu Elektrotun Konumu 0,041 m Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	99
Şekil 3.176: 8 no'lu Elektrotun Konumu 0,04 m Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	99

Şekil 3.177: 8 no'lu Elektrotun Konumu 0,039 m Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	99
Şekil 3.178: 8 no'lu Elektrotun Konumu 0,038 m Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	99
Şekil 3.179: 8 no'lu Elektrotun Konumu 0,037 m Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	100
Şekil 3.180: 8 no'lu Elektrotun Konumu 0,036 m Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	100
Şekil 3.181: 8 no'lu Elektrotun Konumu 0,035 m Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	100
Şekil 3.182: 8 no'lu Elektrotun Konumu 0,034 m Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	100
Şekil 3.183: 8 no'lu Elektrotun Konumu 0,033 m Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	101
Şekil 3.184: 8 no'lu Elektrotun Konumu 0,032 m Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	101
Şekil 3.185: 8 no'lu Elektrotun Konumu 0,031 m Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	101
Şekil 3.186: 8 no'lu Elektrotun Konumu 0,03 m Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	101
Şekil 3.187: 8 no'lu Elektrotun Boyu 0,005 m Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	102
Şekil 3.188: 8 no'lu Elektrotun Boyu 0,006 m Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	102
Şekil 3.189: 8 no'lu Elektrotun Boyu 0,007 m Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	102

Şekil 3.190: 8 no'lu Elektrotun Boyu 0,008 m Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	103
Şekil 3.191: 8 no'lu Elektrotun Boyu 0,009 m Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	103
Şekil 3.192: 8 no'lu Elektrotun Boyu 0,01 m Olarak Alındığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	103
Şekil 3.193: Sadece Protondan Oluşan Sistem.....	103
Şekil 3.194: Elektron ve Protondan Oluşan Sistem.....	104
Şekil 3.195: Elektron ve Protondan Oluşan Sistem İçin Elektron Sıcaklığı 10, Proton Sıcaklığı 5 Olarak Ayarlandığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	104
Şekil 3.196: Elektron ve Protondan Oluşan Sistem İçin Elektron Sıcaklığı 20, Proton Sıcaklığı 5 Olarak Ayarlandığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	104
Şekil 3.197: 9 no'lu Elektrotun Sisteme Eklendiğinde Elde Edilen Demet Davranışı.....	105
Şekil 3.198: 8 no'lu Elektrotun Potansiyeli 0 V Olarak Ayarlandığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	105
Şekil 3.199: 8 no'lu Elektrotun Potansiyeli -1×10^3 V Olarak Ayarlandığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	105
Şekil 3.200: 8 no'lu Elektrotun Potansiyeli -2×10^3 V Olarak Ayarlandığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	106
Şekil 3.201: 8 no'lu Elektrotun Potansiyeli -3×10^3 V Olarak Ayarlandığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	106
Şekil 3.202: 8 no'lu Elektrotun Potansiyeli -4×10^3 V Olarak Ayarlandığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	106

Şekil 3.203: 8 no'lu Elektrotun Potansiyeli -5×10^3 V Olarak Ayarlandığında Elde Edilen Demet Davranışı.....	107
Şekil 3.204: 7 no'lu Elektrotun Yakınlaştırılmış Görüntüleri.....	108



TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 4.1: 4000 Sarımlı Solenoidin Farklı Noktalardan Radyal Prob ile Ölçümündeki En Düşük ve En Yüksek Hata Miktarları.....	109
Tablo 4.2: 4000 Sarımlı Solenoidin Farklı Noktalardan Eksenel Prob ile Ölçümündeki En Düşük ve En Yüksek Hata Miktarları.....	112
Tablo 4.3: 1682 Sarımlı Solenoidin Farklı Noktalardan Radyal Prob ile Ölçümündeki En Düşük ve En Yüksek Hata Miktarları.....	116
Tablo 4.4: 1682 Sarımlı Solenoidin Farklı Noktalardan Eksenel Prob ile Ölçümündeki En Düşük ve En Yüksek Hata Miktarları.....	119
Tablo 4.5: 7 no'lu Elektrotun a Parametresinde Yapılan Değişikliklerin Etkileri....	122
Tablo 4.6: 7 no'lu Elektrotta a = 1 mm için b Parametresinin Değişimi.....	123
Tablo 4.7: a = 1 mm ve b = 3 mm için c Parametresindeki Değişimin Etkileri.....	123
Tablo 4.8: 7 no'lu Elektrotun Eğimindeki Değişimin Etkileri.....	124
Tablo 4.9: 7 no'lu Elektrot için Eğim Sabitken d ve e Parametrelerinin Değişiminin Etkileri.....	125
Tablo 4.10: 8 no'lu Elektrotun Konumundaki Değişimin Etkileri.....	127
Tablo 4.11: 8 no'lu Elektrotun Konumunun 0,05 m-0,03 m Arasındaki Değişimi....	128
Tablo 4.12: 8 no'lu Elektrotun Boyundaki Değişimin Etkileri.....	129
Tablo 4.13: Elektron Sıcaklığındaki Değişimin Etkileri.....	129
Tablo 4.14: 8 no'lu Elektrotun Eksi Potansiyelde Tutulmasının Etkileri.....	130

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
B	: Manyetik Alan
c	: Işık Hızı
d	: İki Elektrot Arasındaki Mesafe
E	: Elektrik Alan
H⁺	: Hidrojen İyonu
keV	: Kilo Elektron Volt
kV	: Kilo Volt
q	: Yük
μ_0	: Manyetik Geçirgenlik Katsayısı
e	: Elektron yükü
p	: Proton yükü
i	: Akım
N	: Sarım Sayısı
K	: Manyetik Alan Katsayısı
z	: Solenoidin ekseni boyunca mesafe
r	: Solenoidin ekseni boyunca radyal mesafe
F	: Lorentz Kuvveti
v	: Parçacığın Hız Vektörü
G	: Gauss
T	: Tesla
mT	: Mili Tesla

Kısaltmalar	Açıklama
CERN	: European Organization for Nuclear Reaserch
DEDA	: Düşük Enerjili Demet Aktarımı
ECR	: Elektron Siklotron Rezonans
IBSIMU	: Ion Beam Simulator
LEBT	: Low Energy Beam Transport
MDIS	: Mikrodalga Deşarj İyon Kaynağı
RF	: Radyo Frekans
RFQ	: Radyo Frekans Dört Kutuplusu
RBS	: Rutherford Backscattering
PIXE	: Proton Induced X-ray Emission
CPAA	: Charged Particle Activation Analysis
NRA	: Nuclear Reaction Analysis
SIMS	: Secondary Ionisation Mass Spectrometry
PDMS	: Particle Desorption Mass Spectrometry
LBNL	: Lawrence Berkeley National Laboratory
HCEI	: High Current Electronics Institute
NPI	: Nuclear Physics Institute
GSI	: Gemological Science International

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

20 KeV MİKRODALGA DEŞARJ İYON KAYNAĞINDA BENZETİM ÇALIŞMALARI VE DÜŞÜK ENERJİLİ DEMET AKTARIM (DEDA) HATTI ÖLÇÜMLERİ

Alis HAMPARSUNOĞLU

İstanbul Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

Danışman : Doç. Dr. Aytül ADIGÜZEL

II. Danışman : Dr. Hakan ÇETİNKAYA

İyon kaynakları ihtiyaç duyulan özellikte proton demeti üretimini sağlayan sistemlerdir. İyon kaynaklarının iyon sökme sistemi en uygun demet akımı ve yayınımlı sağlayan elektrotlardan oluşur. Proton demetini istenen özelliklerde Radyo Frekans Dört Kutuplusuna (RFQ) en az kayıp ile taşıyan sistem Düşük Enerjili Demet Aktarım (DEDA) hattı olarak isimlendirilir. Kandilli Algıç, Hızlandırıcı ve Enstrümantasyon (KAHVE) Laboratuvarı'nda 20 keV enerjili Mikrodalga Deşarj İyon Kaynağı ve buna uygun 2 adet solenoid içeren DEDA hattı bulunmaktadır. Bu tez iki kısımdan oluşmaktadır. İlk kısım DEDA hattının solenoidlerinin manyetik alanlarının deneysel ölçümleri ile Poisson Superfish programıyla elde edilen manyetik alan benzetim sonuçlarının karşılaştırmasını içermektedir. İkinci kısım, KAHVE Laboratuvarı'nda bulunan iki elektrotlu sisteme yeni bir negatif voltaj elektrotu eklenerek, iyon kaynağından yayılan elektronların IBSimu programı kullanılarak bastırılmasının amaçlandığı üç elektrotlu ekstraksiyon sisteminin tasarımını içermektedir.

Haziran, 2022, 168 sayfa.

Anahtar kelimeler: İyon kaynağı, Düşük Enerji Demet Aktarım hattı, Manyetik Alan Ölçümleri, Ekstraksiyon Sistemi

SUMMARY

M.Sc. THESIS

THE SIMULATION STUDIES AND LOW ENERGY BEAM TRANSPORT LINE (LEBT) MEASUREMENTS AT 20 KEV MICROWAVE DISCHARGE ION SOURCE

Alis HAMPARSUNOĞLU

İstanbul University

Institute of Graduate Studies in Sciences

Department of Physics

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Aytül ADIGÜZEL

Co-Supervisor : Dr. Hakan ÇETİNKAYA

Ion sources produces proton beam with required properties. The extraction system of ion sources consists of electrodes achieve optimum beam shape and emittance. The system used to transport the proton beam with required properties to the Radio Frequency Quadruple (RFQ) is called as the Low Energy Beam Transport (LEBT) system. Transport of the proton beam with minimum loss is one of the mission of LEBT. There are a Microwave Discharge Ion source with 20 keV energy and LEBT line with 2 solenoid magnets at KAHVE Laboratory. This study consists of two parts. First part includes the experimental measurement of solenoids magnetic fields which are the part of the LEBT line of 20 keV Microwave Discharge Ion Source and also compare this magnetic fields with the one simulated with Poisson Superfish program. The second part includes the design of the three electrode extraction system by adding a new negative voltage electrode to the MDIS electrode system in the KAHVE Laboratory, aiming to suppress the electrons emitted from the ion source.

June 2022, 168 pages.

Keywords: Ion Source, LEBT line, Magnetic Field Measurements, Extraction System

1. GİRİŞ

1900'lü yıllarda en basit haliyle üretilen ve hızlandırıcıların temellerini oluşturan yapılardan günümüze parçacık hızlandırıcıları büyük ilerleme kaydetmiş, bilimden sanata, tıptan arkeolojiye pek çok konuda kullanım alanı bulmuştur. En yaygın olarak bilinen kullanım alanlarından birinin sağlık olduğu düşünüldüğünde hızlandırıcıların önemi daha iyi anlaşılmaktadır. Bu nedenle hızlandırıcı teknolojileri konusunda tecrübe kazanmak ve kazanılan tecrübeyi var olan teknolojiyi daha iyi seviyelere taşıyabilmek adına geliştirebilmek önem taşımaktadır.

Parçacık hızlandırıcılarında hızlandırılacak olan parçacıkların üretimi iyon kaynağı adı verilen sistemde gerçekleşmektedir. İyon kaynaklarında üretilen bu parçacıkların hızlandırılmaya hazır hale gelmeden önce demetin en az kayıpla odaklanması gerekmektedir ve bu aşamada kullanılan yapı Düşük Enerjili Demet Aktarım (DEDA) Hattı olarak adlandırılmaktadır.

Bu tezde ülkemizde parçacık hızlandırıcılarını geliştirmek amacıyla çıkılan bu yolda, ilk adımını oluşturan ve hızlandırılacak olan parçacıkların üretiminin gerçekleştiği iyon kaynağı sistemi ile çalışılmıştır. KAHVELab'da bulunan Mikrodalga İyon Kaynağı'nın (MDIS) enerjisi 8 keV'den 20 keV'e çıkartılmış, iyon kaynağına Düşük Enerjili Demet Aktarım (DEDA) hattı eklenmiştir. Burada yer alan solenoid magnetlerin manyetik alan ölçümleri gerçekleştirilmiş, ölçüm sonuçlarının benzetim sonuçlarıyla karşılaştırılması yapılarak sistemde kullanıma uygunluğu incelenmiştir. İyon kaynağı mevcut durumda iki elektrot içeren bir proton çekme (ekstraksiyon) sisteminden oluşmaktadır. İyon kaynaklarında protonların yanında demet hattına elektronlar da aktarılmaktadır. Bu çalışma kapsamında, var olan iki elektrot sistemine bir alternatif olarak, iyon kaynağından çıkan elektronların baskılanmasını gerçekleştirecek şekilde 3 elektrotlu yeni bir elektrot sistemi önerisi tasarımı önerilmiştir.

2. GENEL KISIMLAR

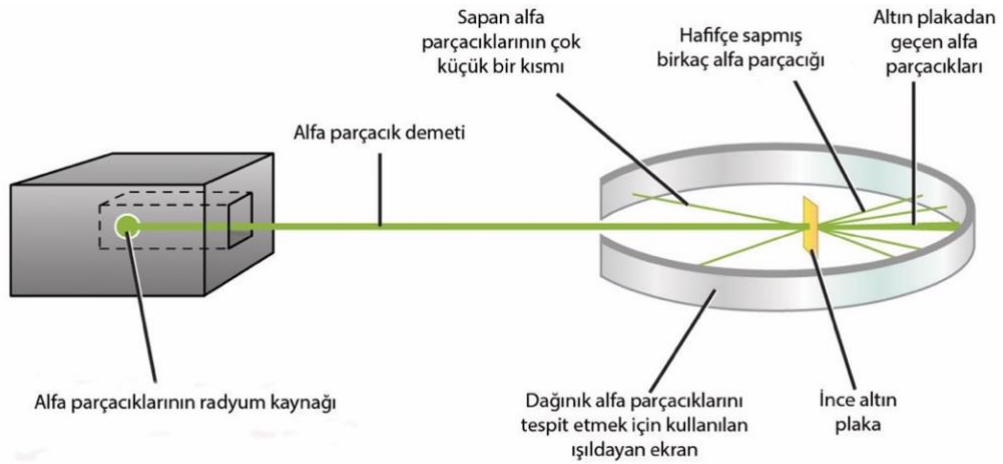
2.1. TEORİ

2.1.1. Parçacık Hızlandırıcıları

Parçacık hızlandırıcıları yüklü temel parçacık demetlerini, istenen kalitede ve hedeflenen enerjilere hızlandıran donanımlardır [1].

Atom, çekirdek, proton gibi temel parçacık sandığımız yapıların temel parçacıklar olmadıklarını öğrenmemizi sağlayan parçacık hızlandırıcıları sayesinde, bir parçacığın kendisini meydana getiren daha küçük parçacıklardan meydana gelip gelmediği öğrenilebilir ve temel parçacıklar hakkında bilgi sahibi olunabilir.

Parçacık hızlandırıcıların temelleri ilk olarak Ernest Rutherford'un 1911 yılında gerçekleştirdiği deneyle atılmıştır. Bu deneyde atomun çekirdeğini keşfederek, hızlandırılan parçacıklar yardımıyla çekirdeğin parçalanabileceği fikrini ortaya atmıştır [2]. Bu düşüncesini öğrencileri Ernest Walton ve John Cockroft yardımıyla hayata geçirmiştir. Daha sonra Ernest Walton ve John Cockroft yüksek voltajlı bir hızlandırıcı tasarlayıp, tasarladıkları bu hızlandırıcıyla Lityum atomunun çekirdeğini parçalayarak bu fikri geliştirmiştir [3].

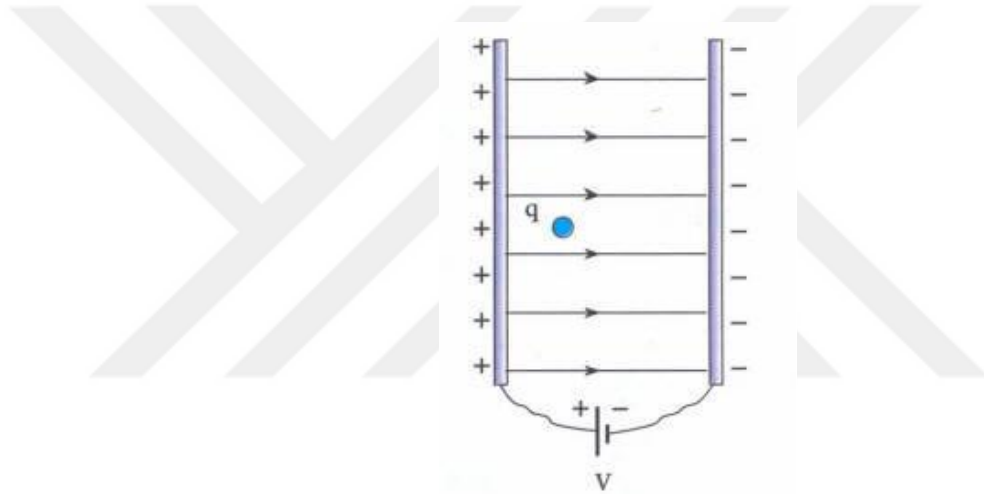


Şekil 2.1: Rutherford α Parçacığı Deney Düzeneği [4].

Rutherford'un α parçacığı deney düzeneği Şekil 2.1'de görülmektedir. Burada radyum kaynağı kullanılarak hızlandırılan α parçacıkları çok ince saf altın bir levhaya çarptırılmıştır. Parçacıkların levha üzerinden geçip gitmesi beklenirken, bir kısmının 90 derecelik sapmaya uğradığı gözlemlenmiştir. Bundan yola çıkarak Rutherford, Thomson Atom Modelini

reddederek, merkezde tüm pozitif yükü içeren çekirdeğin bulunduğu, çekirdeğin etrafında da bir elektron bulutunun olduğu ve büyük bir çoğunluğu boşluktan oluşan bir atom modeli önermiştir. Böylece hızlandırıcıların temelleri atılmış oldu.

Parçacık hızlandırıcılarının çalışma prensibini daha iyi anlamak için en temel halini inceleyelim. Bilinen en basit parçacık hızlandırıcısı iki paralel levha arasındaki yüklü parçacığın hareketini sağlamak amacıyla basit bir pil yardımıyla levhaların elektrik yüküyle yüklendirilmesiyle oluşturulur (Şekil 2.2). Söz konusu olan yüklü parçacıkları hızlandırmak (elektrik alan) ve yönlendirmek (manyetik alan) için elektrik ve manyetik kuvvetlerden yararlanılmaktadır [13].



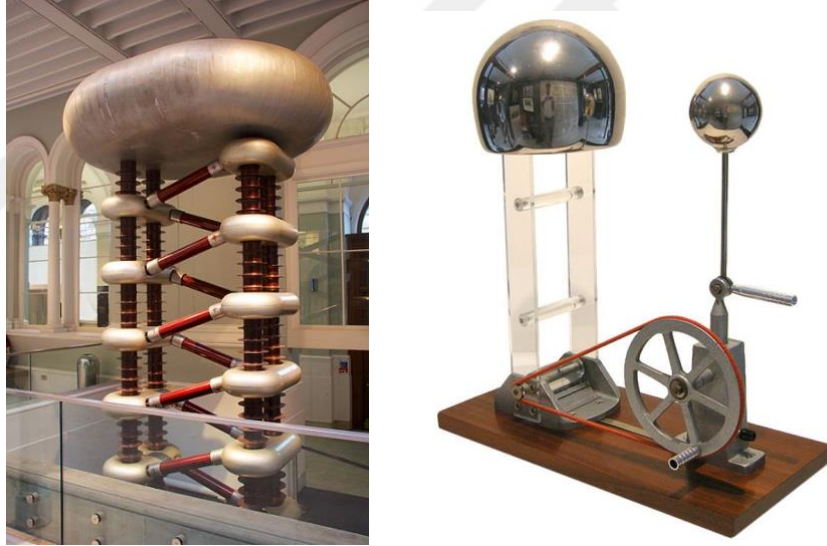
Şekil 2.2: İki paralel levha ile oluşturulmuş basit bir parçacık hızlandırıcısı.

2.1.1.1. Hızlandırıcı Çeşitleri

Temelde hızlandırıcılar elektrostatik ve radyo frekans hızlandırıcılar olmak üzere iki sınıfa ayrılır [5]. Elektrostatik hızlandırıcılar parçacıkları hızlandırmak için statik elektrik alan kullanırlar. En yaygın kullanılan tipi Cockroft- Walton jeneratörü (Şekil 2.3) ve Van de Graaff (Şekil 2.3) jeneratörüdür. Elektrostatik hızlandırıcılarda parçacığın çıkabileceği hız, üreticinin gücüne bağlıdır. Bu nedenle çok fazla tercih edilmemektedir.

Elektrostatik hızlandırıcıların parçacıkları yüksek enerjilere çıkaramaması, hızlandırıcılarda alternatif akım kullanma fikrinin ortaya atılmasına yol açmıştır. Bunun sonucunda da elektrodinamik veya elektromanyetik hızlandırıcılar olarak adlandırılan ikinci sınıf ortaya çıkmıştır. Elektromanyetik hızlandırıcılar parçacıkları hızlandırmak için değişen

elektromanyetik alanlar (manyetik indüksiyon veya salınımlı radyo frekanslı alanlar) kullanılır. Bu hızlandırıcı sınıfı modern büyük ölçekli hızlandırıcıların çoğunun temelini oluşturur ve ilk olarak 1920 yılında geliştirilmiştir. İlk operasyonel doğrusal hızlandırıcı Betatron ve Siklotronu tasarlayan ve üreten Rolf Wideroe, Gustav Ising, Leo Szilard, Max Steenbeck ve Ernest Lawrence bu alanın öncüleri kabul edilir. Radyo frekans hızlandırıcılar parçacıkların izlediği yörüngeye bağlı olarak doğrusal ve dairesel hızlandırıcılar olmak üzere iki türdür [6]. Doğrusal hızlandırıcılar (Linear Accelerator (LINAC)) parçacıkların düz bir yörüngede ve yolu yalnız bir kez kat ederek hızlandırılması prensibiyle çalışırken, dairesel hızlandırıcılarda parçacıklar dairesel bir yörünge boyunca, istenilen enerjiyi kazanana kadar birden fazla kez yörüngeyi kat ederek yollarına devam ederler. Radyo frekans hızlandırıcıların iki türü için de çok büyük avantajlar veya dezavantajlardan bahsedilemez. Hedeflenen kullanım alanı veya kullanılacak olan teknolojiye göre aralarında seçim yapılmaktadır.



Şekil 2.3: Cockcroft Walton Jeneratörü (sol) [7], Van de Graaf Jeneratörü (sağ) [8].

2.1.1.2. Kullanım Alanları

Parçacık hızlandırıcılarının çok geniş kullanım alanları mevcuttur. En bilinen kullanım alanlarından biri parçacık fiziğidir. Parçacık fiziğinde yeni parçacıkların keşfi, parçacıkların temel parçacık olup olmadığının araştırılması gibi konularda bilgi sahibi olabilmek için parçacıklar, hızlandırıcılar yardımıyla yüksek enerjilere çıkartılarak çarpıştırılırlar. Nükleer

fizikçiler için ise hızlandırıcılar çekirdeği araştırabildikleri ve çekirdeğin yapısını inceleyebildikleri temel araçlardır.

Hızlandırıcıların en önemli kullanım alanlarından biri tıptır. Tıpta hastalıkların tanısında kullanılan pek çok cihaz birer parçacık hızlandırıcıdır. Pozitron Emisyon Tomografi (PET) cihazı ile insan vücudundaki organ ve dokuların aktivitesi ölçülebilmektedir. Detaylı anatomik görüntüleme sağlayan Bilgisayarlı Tomografi (BT) adı verilen tomografi cihazı ile birleştirildiğinde ise akciğer hastalıkları, kalp hastalıkları gibi birçok hastalığın belirlenmesinde, alzheimer-demans ayrımının yapılmasında kullanılmaktadır. Buna rağmen bilinen en yaygın kullanım alanı kanserdir. Kanser hücrelerinin en çok barındırdığı glikoz radyoaktif olarak işaretlenerek kontrollü olarak vücuda verildikten sonra PET-CT cihazı yardımıyla kanserli dokunun yeri saptanabilmekte ve doğru yerden biopsi alınması, kanserin yaygınlığının belirlenmesi ve tedavinin planlanıp tedaviye yanıtın değerlendirilmesinde sıklıkla kullanılan bir cihazdır. Tıpta kullanılan bir diğer önemli hızlandırıcı ise Nükleer Manyetik Rezonans (NMR) organik moleküllerin yapıları ve kimyasal özellikleri hakkında bilgi veren, atom çekirdeğinin manyetik özelliklerini kullanan bir araştırma tekniğidir. Tanı ve tedavi amacıyla kullanılan bir görüntüleme yöntemidir [9].

Hızlandırıcıların başka bir kullanım alanı olan kozmoloji ve astrofizik, hızlandırıcılar yardımıyla yapılan keşifler sonucu daha geniş çalışma alanlarına sahip oldular. 2012 yılında Higgs Bozonunun keşfedilmesi, Büyük Patlama Teorisinin (Big Bang Theory) doğruluğuna dair bir kanıt niteliğindedir. Zamanla düşen sıcaklık ve hızlandırıcıların artan enerjisi, fizikçilerin deneysel olarak evreni incelemesine izin verir. Hızlandırıcılarla elde edilen sonuçlar hidrojen/helyum oranı gibi kozmik gözlemleri açıklamayı ve nötrino ailelerinin sayısını belirlemeyi mümkün kılmıştır [9].

Hızlandırıcılar ayrıca atom fiziğinde atomları ve iyonları oluşturan karmaşık çok parçacıklı sistemlerin ayrıntılı davranışlarının anlaşılması ve hesaplanması gibi konularda da yarar sağlamaktadır. Atomik çarpışma mekanizmaları ve iyonlaşma süreçleri, atomik çarpışmalarda korelasyon etkileri, yüksek hızlı ve hatta göreceli iyonların yük değişim kesitleri, göreceli iyon çarpışmalarının ürettiği X ışınları, iyon atom çarpışmalarında rezonans transferi ve uyarma, moleküler iyonların incelenmesi gibi konuların araştırılmasında hızlandırıcılardan yararlanılmaktadır. Katı haldeki maddenin yapısının incelenmesi ve özelliklerinin araştırılmasında kullanılan temel araçlar, geleneksel kaynaklar tarafından üretilen X ışınları ve

nükleer reaktörler tarafından üretilen nötronlar olmuştur. İyon demeti, kullanılan materyallerin temel bileşenlerini belirlemekte kullanılır. Bunun için kullanılan temel yöntemler ise Rutherford Geri Saçılımı (Rutherford Backscattering - RBS), Proton kaynaklı X ışını emisyonu (Proton Induced X-ray Emission - PIXE), yüklü parçacık aktivasyon analizi (Charged Particle Activation Analysis - CPAA) veya nükleer reaksiyon analizi (Nuclear Reaction Analysis - NRA), ikincil iyonizasyon kütle spektrometresi (Secondary Ionisation Mass Spectrometry - SIMS) ve parçacık desorpsiyonlu kütle spektrometresi (Particle Desorption Mass Spectrometry - PDMS)'dir [9].

Hızlandırıcılar birer radyasyon kaynağıdır. Özellikle sinkrotron ışınımı, elde edilecek kimyasal durum hakkında bilgi sağlar. Örneğin; moleküllerin oksidasyonu, karmaşık moleküllerin yapısı ve kalıp dinamikleri, kimyasal reaksiyonların kinetiği gibi. Radyasyon biyolojisi çalışmaları ile de, esas olarak radyasyon hasarının moleküler yolları ve ilgili kanser tedavisini anlamak amaçlanmaktadır [10].

Ayrıca bulunan arkeolojik nesnenin veya iskeletin yaşının belirlenmesinde hızlandırıcılardan yararlanır. Hızlandırıcılar kullanılarak antikaların ve tabloların içerdikleri element ve mineraller belirlenerek eserin daha uzun süre ve daha doğru şekilde saklanması sağlanır. Ayrıca hızlandırıcılar yardımıyla eserin sahte olup olmadığı anlaşılmaktadır [10].

2.1.2. Manyetik Alan Etkileri

2.1.2.1. Manyetizma

Manyetizma üzerine ilk bilimsel çalışmalar 1600'lü yıllarda William Gilbert tarafından gerçekleştirildi. Bu çalışmalarında pusula iğnesinin daima bir yönü göstermesine dayanarak dünyanın büyük sürekli bir mıknatıs olduğu fikrini önerdi [13].

Elektrik ve manyetizma arasındaki ilişki 1819 yılında Hans Christian Oersted'in yaptığı bir deney sırasında tesadüfen keşfedildi. Oersted, üzerinden elektrik akımı geçen bir telin yakınında duran pusulanın iğnesini saptırdığını gözlemledi. Bundan kısa bir süre sonra André Amperé aradaki bu ilişkiyi formüle etti. Ayrıca tüm manyetik olayların molekül büyüklüğündeki akım ilmeklerinden kaynaklandığı fikrini önerdi [13].

1820'lerde Faraday ve Henry birbirlerinden bağımsız olarak elektrik akımı ve manyetizma arasındaki başka ilişkileri gösterdiler.

James Clerk Maxwell ise elektromanyetizma kuramını oluşturdu. Maxwell Yasaları olarak anılan bu kuram 4 temel denklemden oluşmaktadır:

$$\text{I. } \oint_{\partial\Omega} \vec{E} \cdot d\vec{s} = \frac{1}{\epsilon_0} \iiint_{\Omega} \rho dV \quad (2.1)$$

$$\text{II. } \oint_{\partial\Omega} \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0 \quad (2.2)$$

$$\text{III. } \oint_{\delta\Sigma} \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \iint_{\Sigma} \vec{B} \cdot d\vec{s} \quad (2.3)$$

$$\text{IV. } \oint_{\partial\Sigma} \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \iint_{\Sigma} (\vec{J} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}) \cdot d\vec{s} \quad (2.4)$$

Burada Ω , $\partial\Omega$ limit yüzeyli herhangi bir sabit hacim; Σ , $\delta\Sigma$ limit yüzeyli herhangi bir sabit hacim; E , elektriksel alan; B , manyetik akı yoğunluğu; ds , sonsuz küçük s yüzeyinin diferansiyel vektör elemanı; dl , s yüzeyinin dışından teğetsel diferansiyel vektör elemanı; t , zaman; ϵ_0 , boş uzayın elektrik geçirgenliği; μ_0 , boş uzayın manyetik geçirgenliğidir [15]. Bu denklemler, fizik tarihindeki en önemli gelişmelerden biridir. Bu denklemler beş ampirik olgunun matematiksel olarak ifade edilmesinden çıkartılmaktadır. Bunlar, Coulomb kanunu (elektrik yükleri arasındaki kuvveti verir), yük korunumu yasası, Faraday'ın elektromanyetik indüksiyon yasası, Biot-Savart yasası (manyetik olayların yalnızca elektrik akımlarından doğduğunu ifade eden yasa) ve Ampere yasasıdır. Ayrıca bu denklemler ifade edilirken Lorentz kuvveti de göz önünde tutulmalıdır [16].

2.1.2.2. Manyetik Alan

Manyetik alan hareket eden elektrik yükleri tarafından, zamanla değişen elektrik alanlardan veya temel parçacıklar tarafından içsel olarak üretilir. Manyetik alanda hareket eden yüklü parçacığa etki eden Lorentz kuvveti olarak tanımlanır. Sadece manyetik alan varlığında eşitlik 2.5, sadece elektrik alan varlığında eşitlik 2.6 ve hem elektrik alan hem de manyetik alan varlığında eşitlik 2.7 kullanılmaktadır:

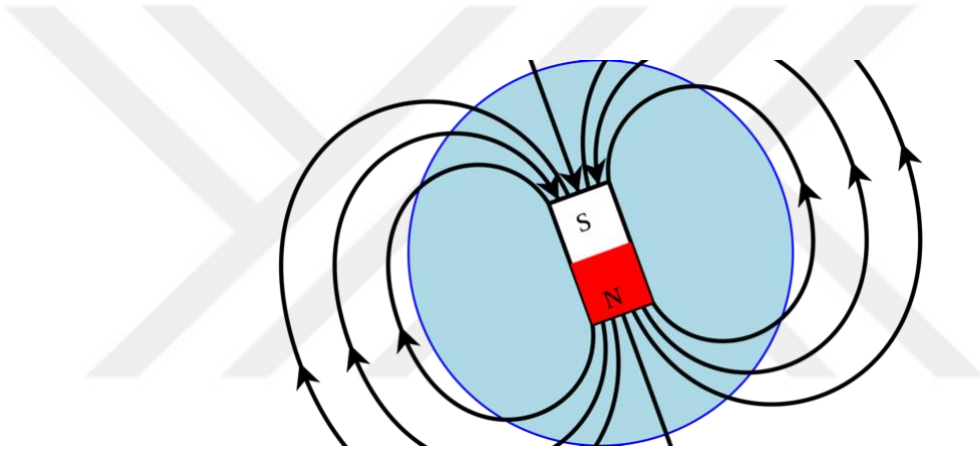
$$\vec{F}_B = q(\vec{v} \times \vec{B}) \quad (2.5)$$

$$\vec{F}_E = q\vec{E} \quad (2.6)$$

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (2.7)$$

Burada F, Lorentz kuvveti; E, elektrik alan; B, manyetik alan; c, ışık hızı; v, parçacığın hız vektörü ve q, yüküdür.

Bir mıknatısın manyetik alan çizgilerinin gösterimi Şekil 2.4'te verilmektedir. Bir mıknatısın iki kutbu vardır. Mıknatısı ne kadar küçültürsek küçültelim tekrar iki kutup oluşmaya devam edecektir. Bu kutuplar N (North - kuzey) ve S (South - güney) yönleridir ve manyetik alan çizgileri N kutbundan çıkar, ortamda yayılır ve manyetik S kutbuna geri döner [17].



Şekil 2.4: Manyetik alan çizgilerinin gösterimi.

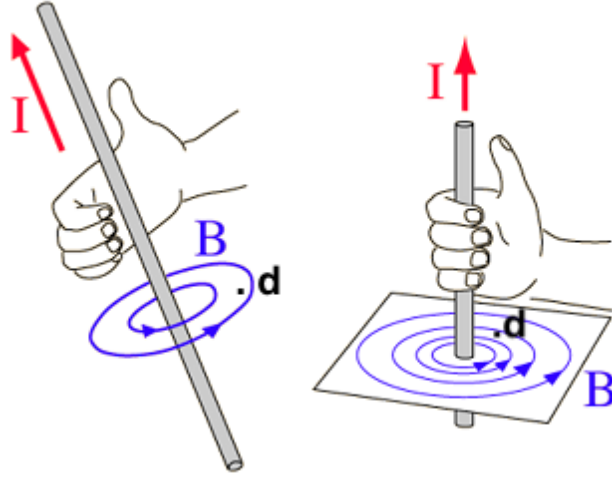
2.1.2.3. İçinden Akım Geçen Telin Manyetik Alanı

Bir telin içinden akım geçirildiğinde, telin etrafında bir manyetik alan oluşur. İçinden i kadar akım geçen telin, telden d kadar uzaklıkta oluşturduğu manyetik alan:

$$B = \frac{2ki}{d} \quad (2.8)$$

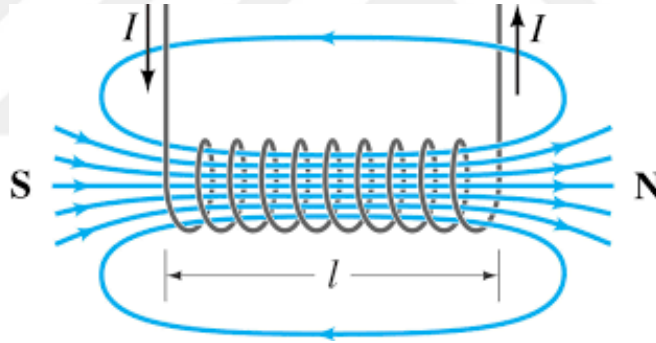
Burada B, manyetik alan; i, akım; d, uzaklık ve k, manyetik alan katsayısı ($k = \mu_0 / (4\pi) = 10^{-7} \text{ N/A}^2$)'dir [35].

Manyetik alanın yönünü bulmak için sağ el kuralından yararlanılır. Baş parmak akımın yönünü gösterecek şekilde teli kavrayan diğer parmakların yönü manyetik alanın yönünü gösterir (Şekil 2.5).



Şekil 2.5: Sağ el kuralı.

2.1.2.4. Solenoid Magnet



Şekil 2.6: Solenoid magnet.

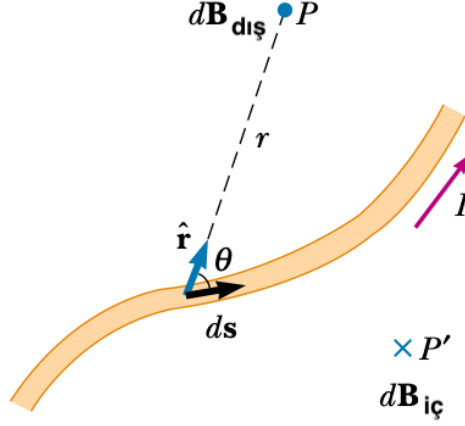
Solenoid (şekil 2.6) terimi Fransız fizikçi Andre-Marie Ampere tarafından sarmal bir bobin belirtmek için oluşturulmuştur. Solenoid kontrollü bir manyetik alan yaratmak amacıyla kullanılan bir elektromıknatıs türüdür [18].

Manyetik alan hesaplamak için kullanılan ifade ise şu şekildedir:

$$Bl = \mu_0 NI \quad (2.9)$$

Burada μ_0 , manyetik geçirgenlik katsayısı; B, manyetik alan; I, akım; N, sarım sayısı; l, solenoidin uzunluğudur.

2.1.2.5. Solenoidin Manyetik Alanı Nasıl Hesaplanır?

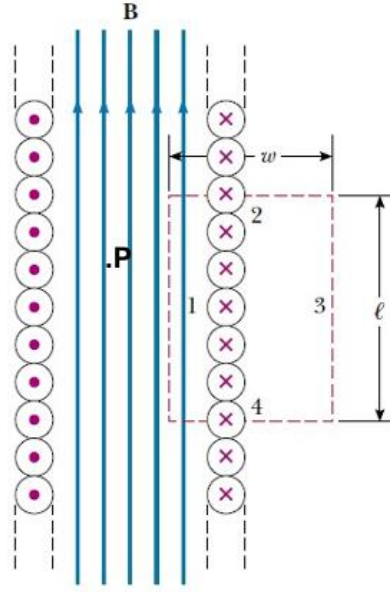


Şekil 2.7: Üzerinden akım geçen tel [13].

Üzerinden I akımı geçen bir telin (Şekil 2.7) sonsuz küçük bir ds elemanının bir P noktasında oluşturacağı manyetik alanın yönü ve büyüklüğü Biot-Savart Kanunu'ndan yararlanılarak bulunur. Biot-Savart Kanunu bir elektrik alan tarafından üretilmiş olan manyetik alanı tanımlamaktadır. 1820 yılında elektrik akımı ile manyetik alan arasında bir ilişki olduğunu keşfeden Jean-Baptiste Biot ve Felix Savart tarafından geliştirilmiş bu denklem, adını kaşiflerinden almaktadır [13].

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi r^2} d\vec{s} \times \hat{r} \quad (2.10)$$

Burada μ_0 , boşluğun manyetik geçirgenliğidir ve değeri $\mu_0 = 4 \pi \times 10^{-7} \text{ T.m/A}$ 'dır.



Şekil 2.8: Telin manyetik alanının toplam katkısı hesaplanırken incelenen kesit [13].

Şekil 2.8’de ideal bir solenoidin kesit görünümü verilmektedir, burada manyetik alan iç bölgede düzgün ve dış bölgelerde sıfıra yakındır. İç bölgede aynı zamanda B , eksene paraleldir. Amper yasasını kullanarak solenoidin iç bölgesinde yer alan P noktasındaki manyetik alan hesaplanabilir. Manyetik alanın toplam katkısını bulmak için tüm iletken üzerinden integral alınır.

$$\vec{B}(P) = \int d\vec{B} \quad (2.11)$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \vec{B} \oint d\vec{s} = Bl \quad (2.12)$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 \cdot N \cdot I_{iç} \quad (2.13)$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 \cdot N \cdot I_{iç} = \oint_1 \vec{B} \cdot d\vec{s} + \oint_2 \vec{B} \cdot d\vec{s} + \oint_3 \vec{B} \cdot d\vec{s} + \oint_4 \vec{B} \cdot d\vec{s} \quad (2.14)$$

2 ve 4 nolu yol için $\vec{B} \perp d\vec{s}$ olduğundan ve 3 nolu yol için $\vec{B} = 0$ olduğundan eşitlik 2.15 şeklini alır.

$$\oint_1 \vec{B} \cdot d\vec{s} = \vec{B} \oint_1 d\vec{s} \quad (2.15)$$

$$B = \mu_0 \cdot \frac{N}{l} \cdot I = \mu_0 \cdot n \cdot I \quad (2.16)$$

$$\oint_1 \vec{B} \cdot d\vec{s} = B \oint_1 d\vec{s} = \mu_0 \cdot n \cdot I \quad (2.17)$$

Burada l , seçilen yolun uzunluğu; I , sarımdan geçen akım; N , l uzunluğunda bulunan sarım sayısı; n , birim uzunluğun sarım sayısıdır [19].

2.1.2.6. Solenoid Demeti Nasıl Odaklar?

Bir solenoid içindeki yüklü bir parçacık demetinin odaklanması tipik olarak bir Larmour çerçeve konseptinin çağrılması ve Busch teoreminin [20] kullanılmasıyla açıklanmaktadır. 1926 yılında H. Busch uzunlamasına bir manyetik alana sahip bir bölge boyunca hareket eden tek bir yüklü parçacığın hareketi için bir matematiksel anlatım (formül) oluşturdu. Bu teorem, parçacığın açısal momentumunu, parçacık siklotron hareketi tarafından kaplanan alan çizgileri miktarıyla ilişkilendirir. Yüklü bir parçacık bir solenoiddeki manyetik alan bölgesine girdiğinde, düzgün manyetik alandaki siklotron frekansının yarısına eşit olan Larmour frekansı ile dönmeye başlar. Larmour çerçevesinde merkezci kuvvet Lorentz kuvvetinin yarısıdır ve solenoidin eksenine doğru net bir odaklanma kuvveti vardır (Şekil 2.9). Genellikle uzun bir solenoidin homojen bir manyetik alanının elektron demetine nasıl odaklandığı ile ilgili bazı karışıklıklar vardır, çünkü genel olarak homojen bir manyetik alanın yalnızca yüklü parçacıkları yönlendirebileceği anlaşılmaktadır.

Şekil 2.9 (sağ)'da gösterilen solenoidi ele alalım, buradaki solenoidde, z eksenini doğrultusunda $0 < z < L$ aralığında eksenel manyetik alanın değeri solenoidin merkezinde en yüksek değere çıkar, eksenel manyetik alan 0 ve L konumlarında azalır ve solenoidden uzaklaştıkça sıfıra yaklaşır. Buna karşın radyal manyetik alan, 0 ve L konumları yakınlarında en yüksek değere ulaşır.

Yüklü bir parçacık manyetik alanın olmadığı bölgeden (şekil 2.9 sağ) solenoid içerisindeki düzgün (uniform) manyetik alanın olduğu bölgeye girdiğinde, düzgün manyetik alandaki siklotron frekansının yarısına eşit olan Larmour frekansıyla dönmeye başlar. Bir elektron manyetik alana yerleştirilirse, manyetik alana hizalanma eğiliminde olur. Bir elektronun kendisini yerleştirildiği manyetik alana hizalama eğilimine “Larmour frekansı” denir ve aşağıdaki eşitlik (eşitlik 2.16) ile ifade edilir. Adını İrlandalı fizikçi Joseph Larmor'dan almıştır [21]. Burada w , Larmour frekansı; γ , jromanyetik oran; B , manyetik alanı ifade etmektedir

$$w = \frac{\gamma B}{2\pi} \quad (2.16)$$

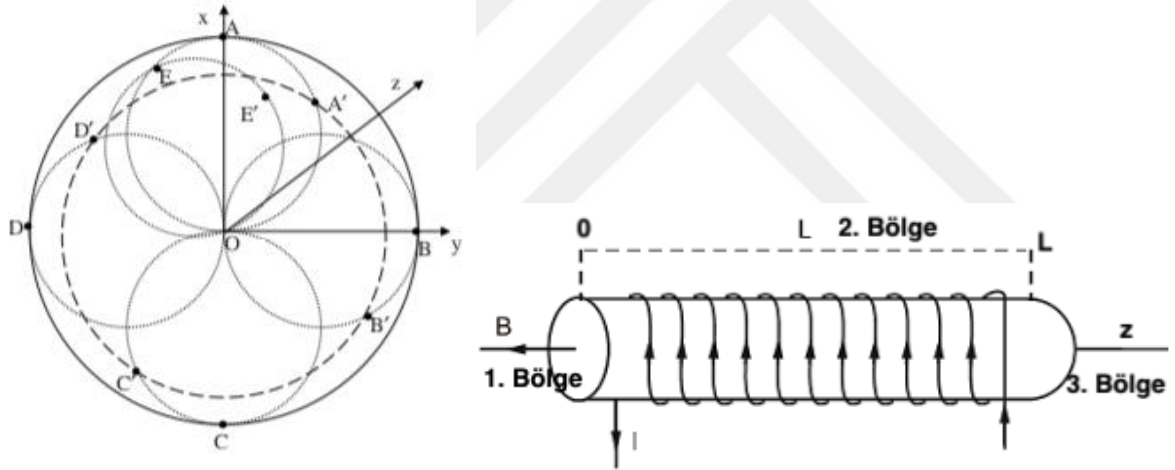
Şekil 2.9 (sol)'da bir solenoidin elektron demetini odaklaması gösterilmiştir. Buna göre x eksenini merkezinden yukarı yönde A noktasına doğru, y eksenini O noktasından sağa B noktasına doğru, z eksenini O noktasından bize doğru çizilmiştir. Yüklü bir parçacığın tek tip bir manyetik

alandaki olduğu gibi solenoid içindeki siklotron frekansı ile neden dönmediği basitçe şöyle açıklanabilir. Demetin düzgün bir parçacık dağılımı ile silindirik olduğu varsayılmaktadır, buna göre r eksen ve z eksen basitçe ayrılabilir. Tüm parçacıkların z eksen boyunca bir v_z başlangıç hızına sahip olduğu kabul edilir. z , solenoid eksen boyunca mesafe; r , solenoid ekseninin radyal mesafesi olmak üzere bir solenoidin aksenal ve radyal manyetik alan bileşenleri;

$$B_z(r, z) = B(z) - \frac{r^2}{4} B''(z) + \dots \quad (2.17)$$

$$B_r(r, z) = -\frac{r}{2} B'(z) + \frac{r^3}{16} B'''(z) + \dots \quad (2.18)$$

ile verilir.



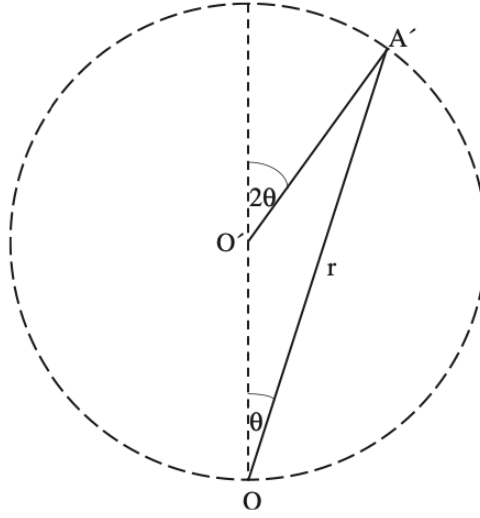
Şekil 2.9: Bir solenoiddeki demetin odaklanması resmedilmiştir. En dıştaki daire demetin solenoidde girdiği andaki çevresini gösterir. Kesikli çizgilerle gösteriler daire demetin, solenoidin içinde bir süre hareket ettikten sonraki çevresini gösterir. Noktalarla gösterilen daireler ise elektronların yörüngelerini gösterir [21] (sol), solenoidin yandan görüntüsü (sağ).

Paraksiyel yaklaşım (sadece eksenle çok küçük açılar yapan ışınlar için geçerli olan optiktir ve böyle durumlarda açının sinüsü yaklaşık olarak kendine eşit kabul edilir.) altında $B(z)=B_0$, $0 < z < L$ aralığında, diğer durumlarda ise $B(z)=0$ olduğu varsayılmaktadır (şekil 2.9 (sağ)).

$$B_z = B_0[u(z) - u(z - L)] \quad (2.19)$$

$$B_r = -\frac{r}{2} B_0[\delta(z) - \delta(z - L)] \quad (2.20)$$

Burada (Şekil 2.9 (sağ)) $z < 0$ (1. Bölge), $0 < z < L$ (2. Bölge) ve $z > L$ (3. Bölge) olmak üzere üç bölge tanımlanmaktadır. Yüklü parçacığın yörüngesi 1. ve 3. bölgelerde düz bir çizgi şeklinde olacaktır, çünkü bu bölgelerde manyetik alan yoktur. 2. bölgede ise yörünge sarmal şeklinde olacaktır, çünkü burası düzgün manyetik alan bölgesidir. Parçacık 1. bölgeden 2. bölgeye geçtiğinde hızın radyal bileşeni sürekli kalacaktır. 1. bölgede $v_r = 0$ olduğunu varsayıyoruz. Dolayısıyla 2. bölgede $z = 0$ 'da $v_r = 0$ olur. Parçacık 2. bölgeye geçtiğinde hızın boyuna bileşeninin de değişeceği unutulmamalıdır, çünkü enine bileşen değişir ve toplam kinetik enerji korunur. Her parçacığın solenoid eksenine dokunacağı ve şekildeki gibi geri döneceği açıktır. Şekil 2.9 (sol)'da demet 2. bölgeye girdiğinde ve çevresinde A, B, C, D noktalarında 4 parçacık bulunduğu kesit görülmektedir. Demet 2. bölgede belirli bir mesafe kat ettikten sonra bu parçacıklar Şekil 2.9 (sol)'da da gösterildiği gibi A, B, C, D noktalarından A', B', C', D' konumlarına hareket ederler. Şekilden, elektron demetinin OA olan yarıçapının OA' ifadesine küçüldüğü ve demetin çevresinin de A', B', C', D' 'ne küçüldüğü görülür. Bu şekilde demet, solenoiddeki düzgün manyetik alan bölgesinde periyodik odaklanmaya maruz kalır.



Şekil 2.10: Larmour frekansı ile siklotron frekansı arasındaki ilişkinin gösterimi. O noktası solenoidin ve yörüngenin merkezidir.

Beklendiği üzere parçacıklar kendilerine ait dairesel yörüngelerin merkezinden geçen bir eksen etrafında siklotron frekansı ile dönerler. Solenoidin eksen etrafındaki açısal hız siklotron frekansının yarısı kadar verilir, çünkü solenoidin ekseninde oluşturdukları açı, kendi dairesel yörüngelerinin merkezinde aldıkları açının yarısıdır. Şekil 2.10'daki basit geometriyi kullanarak Larmour frekansı ile siklotron frekansı arasındaki karışıklık netleştirilebilir: parçacıklar kendi yörüngelerinin merkezi etrafında siklotron frekansı ile dönerler ancak solenoid eksen etrafında Larmour frekansı ile dönerler.

Parçacık 2. bölgeden çıkıp 3. bölgeye geldiğinde (Şekil 2.9 (sağ)) bir Dirac Delta fonksiyonu olan B_r ve v_z arasındaki bağlantıdan kaynaklanan Lorentz kuvveti azimutal yönde parçacığa bir itme verir. Sonuç olarak;

$$v_\theta = r\omega_L \quad (2.21)$$

$$\Delta v_\theta = -r_1\omega_L \quad (2.22)$$

ile verilen bu sınırdaki parçacık ani bir değişikliğe uğrar. Burada r_1 ; 2. bölgenin çıkışında parçacığın radyal koordinatıdır. Eşitlik 2.20 ve 2.21 kullanılarak, 3. bölgenin girişinde $v_\theta = 0$ bulunur. Radyal hız sınırda değişmeden kalır ve şu şekilde verilir:

$$v_r = -r_1 \omega_L \tan\left(\frac{\omega_L L}{v_z}\right) \quad (2.23)$$

Paraksial yaklaşım nedeniyle v_z 'nin 3. bölge girişinde herhangi bir değişikliğe uğramadığı varsayılmaktadır. 3. bölgede parçacık eşitlik 2.23 ile verilen sabit v_r ile düz bir çizgide hareket eder. Demet 2. bölgede periyodik ışınlanmaya maruz kaldıktan sonra parçacıklar solenoid eksenine doğru radyal bir hıza ulaşırlar. Eşitlik 2.23'teki tanjant ifadesi pozitif ve bu sonuç 2. bölgenin çıkışında solenoid ekseninden radyal yer değiştirmeler ile orantılıdır yani $v_r = -kr_1$ (k :sabit)'dir. Bu durumda demetin ideal olarak 3. bölgede $z = \frac{v_z}{k}$ mesafesine gittikten sonra bir noktaya odaklanacağı kolayca gösterilebilir. Böylece yüklü parçacık, solenoidi geçtikten sonra 3. bölgede odaklanır.

2.1.3. Plazma Fiziği

Plazma maddenin dördüncü halidir. Madde katı, sıvı, gaz ve plazma olmak üzere dört farklı durumda bulunabilir. Bir maddeye gerekli olan ısı verildiğinde madde hal değişimine başlar. Katı bir madde sıvıya, sıvı gaza, gaz da plazmaya dönüşür [11].

Plazma içerisinde plazmayı oluşturan üç tür parçacık vardır: iyonlar, elektronlar ve nötr parçacıklar. Herhangi bir iyonlaştırılmış gaz plazma olarak isimlendirilememektedir. Bu isimlendirmenin gerçekleştirilebilmesi için Debye küresinin içindeki parçacıkların sayısının

birden büyük olması, Debye uzunluğunun plazma boyutundan küçük olması ve plazma frekansının ortalama elektron nötron çarpışmasından büyük olması koşullarını sağlaması gerekmektedir [12].

Plazma oluşturmak için belirli bir miktar gazın üzerinden elektrik akımı geçirmek veya üzerine elektromanyetik dalgalar göndermek gibi yöntemler kullanarak ısıtmak ve böylece iyonlaştırmak gerekmektedir [13].

Parçacık yoğunluğu plazmayı oluşturan bileşenlerin yoğunluğunu ifade eden bir parametredir. İyonlaşma derecesi ise plazmanın içinde nötr halde bulunan parçacıkların kaç kez iyonlaştığını ifade etmektedir. Atomdan bir kez elektron koparılması, bu parçacığın bir defa iyonlaştığı anlamına gelmektedir ve yükü $q=+1$ 'dir [14].

Tipik bir düşük güçlü iyon kaynağı plazmasında, iyon sıcaklığı (T_i) 500 K ile 1000 K arasında değişmektedir. Elektronun sıcaklığı (T_e) ise 30000 K ile 40000 K mertebesinde ve elektron yoğunluğu 10^{10} cm^{-3} ve üzerindedir [14].

2.1.4. İyon Kaynakları

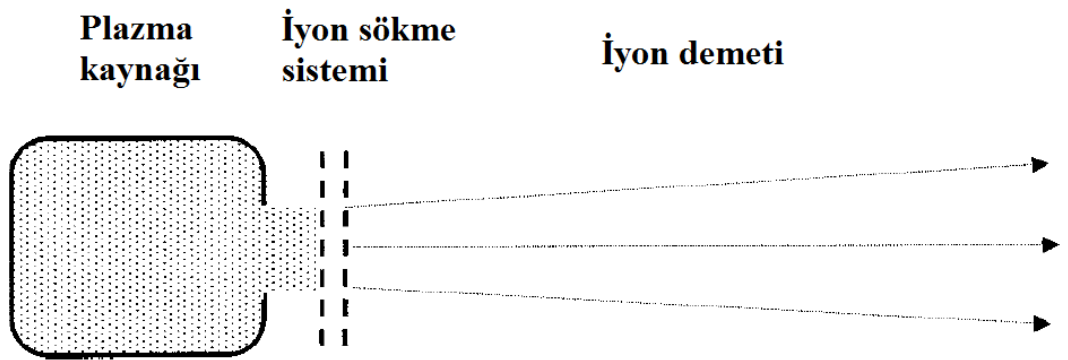
İyon kaynaklarının başlangıcı 1886 yılında Goldstein'in kanal ışını iyon kaynağını icat etmesiyle gerçekleşmiştir. 2.45 GHz Mikrodalga iyon kaynaklarının başlangıcı ise 1977'de Sakudo ve 1984'te Ishikawa'nın endüstri uygulamalarında kullanılması amacıyla ortaya koydukları farklı tasarımları ile ortaya çıkmıştır. Ishikawa kompakt bir yapı oluşturmak için ilk kez kalıcı mıknatısları kullandı. İyonları sökmek için kullanılan yöntemlerden üç aşamalı elektrot sistemi, 4.5 kV voltajda 380 mA hidrojen akımının ölçüldüğü ve 5 kV sökme sisteminde 200 mA argon akımı ölçülen bu çalışma sonucunda mikrodalga iyon kaynaklarının hızlandırıcı uygulamaları için de kullanışlı olduğu görülmüştür [14, 21].

Elektron bombardıman iyon kaynağı 1916 yılında tasarlanmış olan ilk gerçek pozitif iyon kaynağı olma özelliği taşımaktadır. 1930'lu yıllarda daha yüksek iyon akımlarına ise ark deşarj iyon kaynakları üzerine yapılan çalışmalarla ulaşılmıştır. Plazmatron iyon kaynakları 1940'lı yıllarda kullanılmış sonrasında 1956 yılında ilk olarak Manfred von Ardenne tarafından geliştirilerek duoplazmatron iyon kaynağı kullanılmaya başlanmıştır. Bilinen ilk negatif iyon kaynakları 1960'ların sonlarında üretilmiştir. 1970'li yılların başlarında ise lazer iyon

kaynakları, penning ve magnetron iyon kaynakları ortaya çıkmıştır. Magnetron iyon kaynağı 1916 yılında Albert Hull tarafından bir iyon kaynağı olarak değil bir elektron tüpü olarak icat edilmişti. 1921’de ise 20 kV voltaja sahip 1000 kW su soğutmalı magnetron geliştirildi. Penning iyon kaynağı ilk olarak 1930’lu yıllarda Louis Maxwell tarafından pozitif iyon kaynağı olarak rapor edilmiş olmasına rağmen ismini Hollandalı fizikçi Frans Penning’den almaktadır. 1937 yılında elektrot geometrisindeki deşarj akımını ölçerek geliştirdiği iyonizasyon ölçeri ile gazlardaki çok düşük basınçları dahi doğru ve güvenilir bir şekilde ölçmeyi başardı [31]. Bu teknik günümüzde hala yaygın bir biçimde kullanılmaktadır. Mikrodalga deşarj iyon kaynakları 1970’lerin sonları, 1980’lerin başlarında kullanılmaya başlanmıştır. 1990’lı yılların başlarında RF kaynakları ile günümüzde bilinen ilk mikrodalga deşarj iyon kaynakları icat edilmiştir [24].

1991 yılında Taylor ve Wills tarafından gerçekleştirilmiş olan yüksek akımlı ECR iyon kaynağı çalışmasında 2.45 GHz ve 1kW güce sahip magnetron, güç kaynağı olarak kullanılmıştır. 1993 yılında Taylor ve Mouris tarafından geliştirilerek üretilen DC Mikrodalga Deşarj İyon kaynakları, Mikrodalga Deşarj İyon Kaynaklarının temeli olarak kabul edilmektedirler [25].

İyon kaynağı parçacık hızlandırıcıları için gerekli iyonları üretmekte kullanılan elektromanyetik cihazlardır. Proton hızlandırıcılarının en önemli kısmını oluşturan bu cihaz, hızlandırıcı için gerekli olan iyonları üretir. İyon kaynakları (şekil 2.11) temelde plazma üreticisi ve iyon sökme sistemi olmak üzere iki kısımdan oluşur [22].



Şekil 2.11: İyon kaynağı şeması [22].

2.1.4.1.1. Plazma Kaynağı

Plazma kaynağı, plazmanın üretildiği kısım olarak tanımlanabilir. Sisteme verilen katı, sıvı veya gaz temelli iyonize edilebilecek malzemeler bu bölgeye aktararak üzerine uygulanan güç yardımıyla plazmaya dönüştürülür.

2.1.4.1.2. İyon Sökme Sistemi

Plazma kaynağında oluşturulan plazma, negatif ve pozitif iyonları aynı anda içermektedir. İyon sökme sisteminde bu plazma denizinin içerisinde istenilen yapıdaki (pozitif veya negatif) iyonların çekilmesi ve elektrot sistemine aktarılması amaçlanmaktadır.

2.1.4.2. İyon Kaynağı Türleri

İyon kaynaklarının çeşitlerinden bahsederken yedi başlık altında sınıflandırmak mümkündür. Bunlar; yüksek akımlı gazlı iyon kaynakları, radyo frekanslı iyon kaynakları, Freeman ve Bernas iyon kaynakları, mikrodalga iyon kaynakları, lazer iyon kaynakları, vakum ark iyon kaynakları ve negatif iyon kaynaklarıdır.

Yüksek akımlı gazlı iyon kaynakları 1960-1980 yılları arasında kullanılmıştır. Bu türün ortaya çıkmasıyla birlikte yüksek akışlı iyon ışınlamaya dayalı malzeme bilimi gelişmiştir. Kullanılan düşük basınçlı gaz deşarjının türüne göre sıcak filamente dayalı katot kaynaklar, yüksek frekanslı plazma kaynakları ve soğuk katot kaynakları alt başlıklarına ayrılmaktadır [21].

Radyo Frekansa dayalı iyon kaynaklarının kullanıma başlanması 1940'lı yıllara dayanmaktadır. RF kaynakları her tür besleme gazıyla çalışabilme avantajı sağlamaktadır. Harici antenli RF kaynakları ve dahili antenli RF kaynakları olmak üzere iki başlık altında incelenmektedir [32].

1950-1960 yılları arasında yüksek derecede saflaştırılmış izotopların üretimi büyük önceliğe sahipken bu amaçla pek çok farklı kaynak geliştirildi. Bu sebeple geliştirilen iyon kaynaklarından en yaygın kullanılanları Freeman ve Bernas iyon kaynaklarıdır [21].

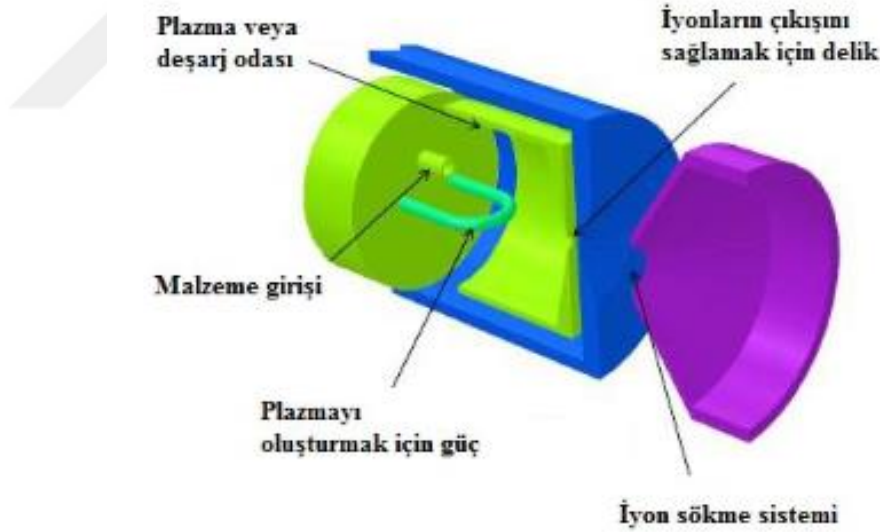
Mikrodalga iyon kaynakları çeşitli iyon türleri için uzun ömürlü ve kararlı iyon demetleri sağlayabilmeleri göz önüne alındığında çok faydalı iyon kaynağı türü oldukları söylenmektedir. Uygulama amacı ve çalışma koşullarına göre iki tür olarak sınıflandırılabilirler. Bunlardan birincisi çok yüklü iyonlar elde etmek için kullanılan elektron siklotron rezonans (ECR) olarak

isimlendirilen ve pek çok kullanım alanına sahip bir türdür. İkinci tür ise mikrodalga deşarj iyon kaynakları olarak isimlendirilmektedir. Ishikawa tarafından geliştirilen bu tür 2 mm çapındaki bir delikten birkaç mA mertebesinde iyon demetini çeken kompakt bir yapıdır [33].

Bir diğer iyon kaynağı çeşidi olan vakum ark iyon kaynaklarının ayırt edici özelliği yüksek akımlı metal iyon demetleri oluşturabilmesidir. LBNL Mevva iyon kaynakları, HCEI Titan iyon kaynakları, NPI Raduga iyon kaynakları ve GSI Varis iyon kaynakları olmak üzere 4 ayrı sınıftan meydana gelmektedir [34].

Negatif iyon kaynakları hem hafif hem de ağır negatif iyon üretimi için kullanılmaktadır. Yüzey etkili negatif iyon kaynakları, yüzey etkili hafif negatif iyon kaynakları, yüzey etkili ağır negatif iyon kaynakları, hacim üreten negatif iyon kaynakları, son hacim üreten negatif iyon kaynakları, yüklü transfer negatif iyon kaynakları olarak sınıflandırılabilir [21].

2.1.4.3. İyon Kaynağı Bileşenleri



Şekil 2.12: İyon kaynağı gösterimi [24].

Şekil 2.12’de iyon kaynağının plazma odası ve iyon sökme sisteminden oluşan yapısı gösterilmektedir. Şekil üzerinde gösterilmekte olan malzeme girişinden sisteme, iyonlaştırılacak olan gaz verilmektedir. Bu gaz uygulanan güç yardımıyla plazma odası içerisinde plazma haline getirilir. Oluşan bu plazmada negatif ve pozitif iyonlar aynı anda yer almaktadır. İyon sökme sistemini oluşturan elektrot yapısı yardımıyla plazma içerisinden istenilen iyonlar çekilir (negatif veya pozitif iyonlar).

2.1.4.4. İyon Kaynağı Çalışma Prensibi

İyon kaynakları plazma üretimi için kullanılan bir plazma odası, plazma oluşturmak için gerekli bileşen (gaz) ve vakum sistemi, iyon sökme sisteminden oluşur. Plazma odası vakumlandıktan sonra sisteme gaz verilerek iyon üretimi gerçekleştirilir. İyonlaşma işleminin gerçekleşebilmesi için plazma odası içindeki malzemeye enerji aktarımı yapılmalıdır. Üretilen iyon demetlerinin istenilen şekilde yönlendirilebilmesini sağlayan kısım ise iyon sökme sistemidir. Elektrotlardan oluşan sistem bu şekilde adlandırılır [23].

2.1.5. İyon Sökme Sistemi

İyon sökme sistemi plazma elektrotu ile toprak elektrotundan oluşan bir sistemdir. Kullanım amacına veya tasarıma göre elektrot sayısı değişebilmektedir. Bu sistem ile plazma odasında üretilen plazmadan kullanılan iyon kaynağı çeşidine göre istenilen pozitif veya negatif iyonlar çekilebilmektedir.

2.1.6. Düşük Enerji Demet Aktarım (Low Energy Beam Transport) Hattı

Düşük Enerji Demet Aktarım (DEDA) Hattı, iyon kaynağı ile Radyo Frekans Dört Kutuplusu (Radio Frequency Quadrupole - RFQ) arasına eklenen bir yapıdır. Burada iyon kaynağında oluşturulan iyon demetinin en az kayıpla RFQ'nun başlangıcına kadar ulaştırılması hedeflenmektedir. İyon kaynağından çıkan demeti daha odaklı bir hale getirme işlemi bu kısımda gerçekleştirilir. Ayrıca demetin istenilen çapta olması da yine bu bölümde gerçekleştirilmektedir. DEDA hattında demet özelliklerini (demet akımı, demet çapı, yayılım (emittans)) belirlemek mümkündür. Burada solenoid mıknatıs kullanılması ise demetin simetrik olarak odaklanmasını sağladığından önem taşımaktadır.

Elektrostatik ve manyetik olmak üzere iki tip DEDA hattı vardır ve parçacık optiği açısından bakıldığında iki tip arasında herhangi bir fark yoktur. Elektrostatik DEDA hattında bulunan elektrot tasarımları IBSimu programı kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir. Manyetik DEDA hattı tasarımı ise TRAVEL programı ve GUI tabanlı ROOT arayüzlü bir yazılım olan DemirciPro programı kullanılarak gerçekleştirilmektedir [30].

2.1.6.1. Bileşenleri

Elektrostatik DEDA hatları farklı voltajlarda tutulan elektrotlardan oluşur. Çok fazla örneği yoktur [37]. Manyetik DEDA hatları ihtiyaca göre solenoid, dört kutuplu ve yönlendirici mıknatıslardan oluşabilmektedir [30]. Bu tezde çalışılan DEDA hattının bileşenlerine ilerleyen bölümde ayrıntılı olarak yer verilecektir.



3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1. Kandilli Algıç, Hızlandırıcı ve Enstrümantasyon Laboratuvarı İyon Kaynağı ve DEDA Hattı

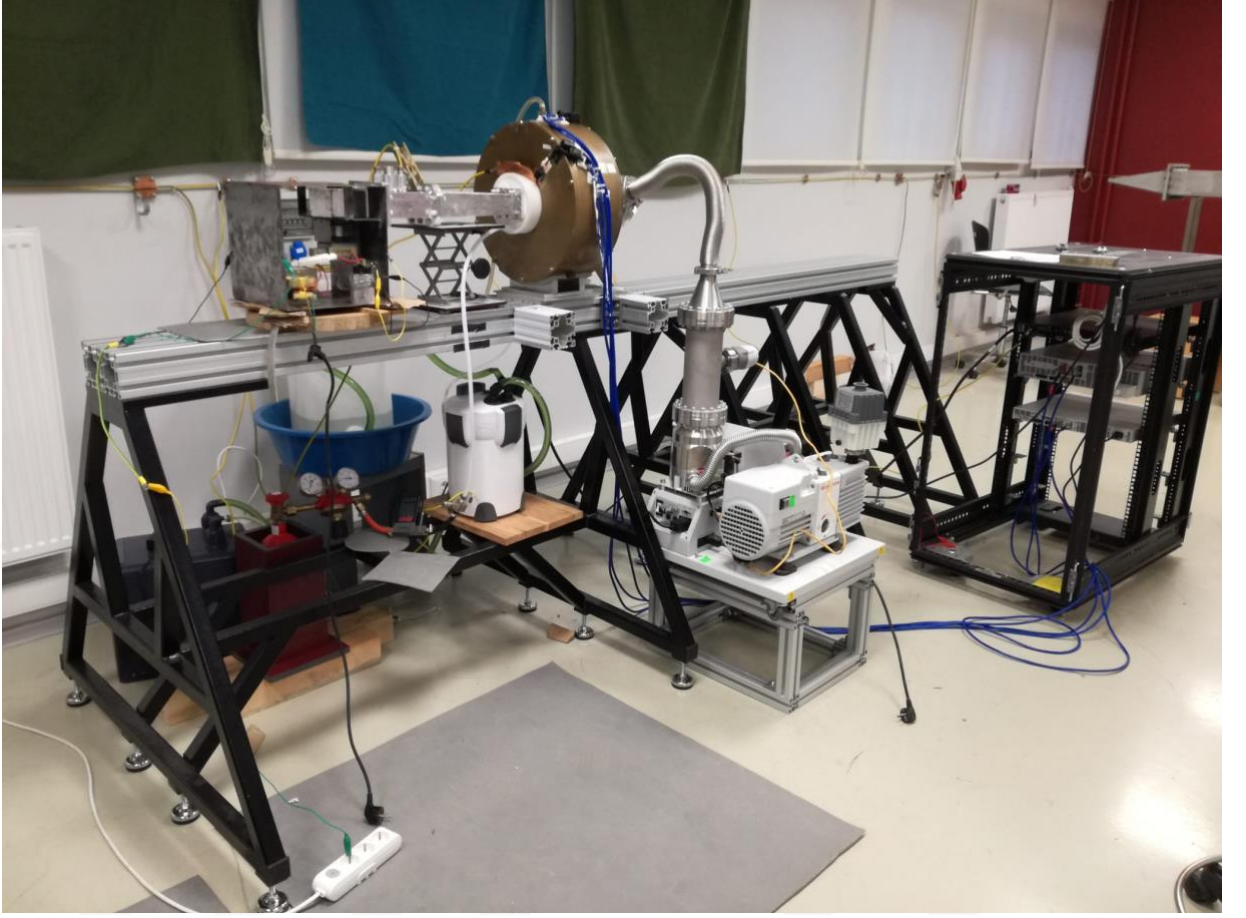
İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (BAP) tarafından desteklenen Mikrodalga İyon Kaynağı ile Proton Demeti Üretimi ve Ölçümleri başlıklı proje kapsamında Kandilli, Algıç, Hızlandırıcı ve Enstrümantasyon Laboratuvarında (KAHVELab) bulunan 8 keV Mikrodalga Deşarj İyon Kaynağı geliştirilerek enerjisi 20 keV'e çıkarılmıştır. İyon kaynağının enerjisini 20 keV'e çıkarmak amacıyla öncelikle elektrot sistemi tasarlanıp, benzetim çalışmaları yapılmış ve ardından üretimi gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışma kapsamında öncelikle plazma odası ve iyon sökme sisteminden oluşan yapının vakum testleri yapılmıştır. Vakum testleri başarıyla tamamlandıktan sonra yüksek voltaj testleri gerçekleştirilmiştir.

Vakum ve yüksek voltaj testleri başarıyla tamamlandıktan sonra (Şekil 3.1) sistem iyon kaynağı solenoidinin içine yerleştirilip magnetron ve dalga kılavuzları ile sisteme mikrodalga güç uygulayarak plazma elde etme çalışmalarına başlanmıştır.

Plazma oluştururken sisteme verilen gazın kontrolü çok önemlidir. Bu sebeple sisteme verilen gazın kontrolü için akış ölçer (flow meter) kullanılmıştır. Sistemde kullanılan gaz hidrojen gazıdır ve 0,10 sccm (standard cubic centimeters per minute) akış değeri ile sisteme verilmiştir.

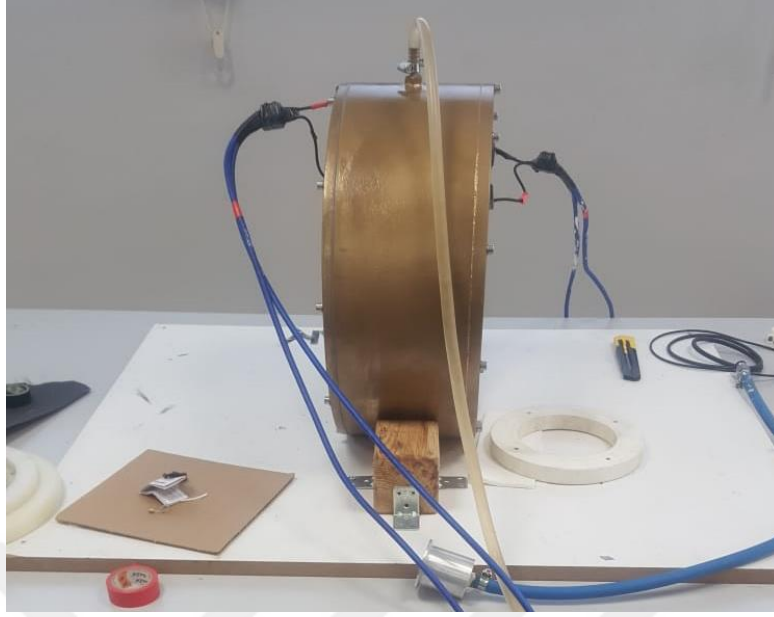
Plazma başarılı bir şekilde oluşturulup demet elde edilerek sistem DEDA hattının eklenmesine hazır hale getirilmiştir.



Şekil 3.1: Mikrodalga Deşarj İyon Kaynağı.

3.1.1. İyon Kaynağı Bileşenleri

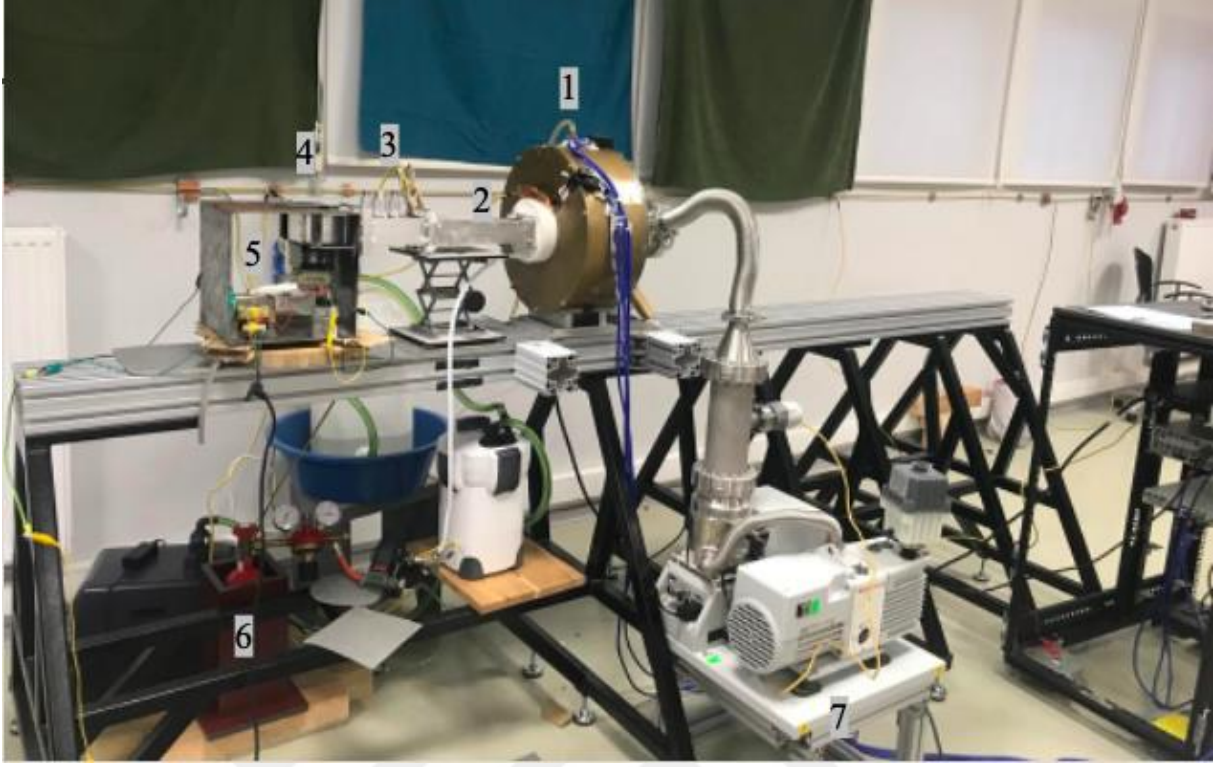
KAHVE Laboratuvarı'nda yer alan mikrodalga deşarj iyon kaynağı bileşenleri şunlardır: iki adet 525 sarımlı solenoidin (Şekil 3.2) bulunduğu bir adet büyük elektromıknatıs, plazma odası ve iyon sökme sistemi (Şekil 3.3), dalga kılavuzları, magnetron ve gaz tüpü (Şekil 3.4). Elektromıknatısın magnetron kısmına doğru olan solenoidine 12,8 A büyüklüğünde akım uygulanırken, elektrotların bulunduğu kısmına yakın olan solenoidine 14,8 A büyüklüğünde akım uygulanmaktadır [23].



Şekil 3.2: İyon kaynağı elektromıknatısı.



Şekil 3.3: Plazma odası ve iyon sökme sistemi.



Şekil 3.4: Mikrodalga deşarj iyon kaynağı görüntüsü. 1: iyon kaynağını; 2: WR340'tan WR284'e geçiş dalga kılavuzunu; 3: saplamalı ayarlayıcıyı; 4: magnetron kafasını; 5: magnetronu; 6: hidrojen tüpünü; 7: vakum pompasını göstermektedir.

3.1.2. Düşük Enerji Demet Aktarım Hattı

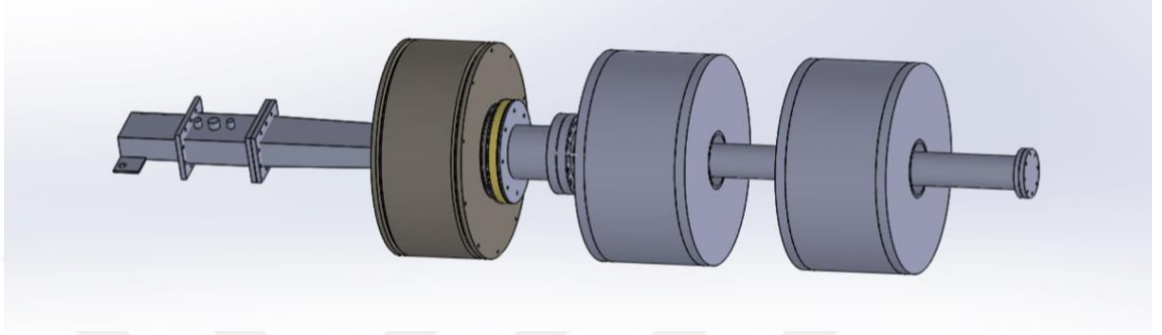
DEDA hattı 4000 sarımlı, 1,9 mm tel kalınlığında 6,4 A büyüklüğünde akım uygulanan ve 1682 sarımlı, 2,8 mm tel kalınlığında 15 A büyüklüğünde akım uygulanan iki adet su soğutmalı solenoidten ve DEDA borusundan oluşmaktadır. DEDA hattı solenoidleri merkezde 1800 G manyetik alana sahip olacak şekilde tasarlanıp üretilmiştir.

3.2. KAHVELab Deneysel Çalışmalar

Tez kapsamındaki bu ilk çalışmada DEDA hattı için tasarlanan ve üretilen iki elektromıknatısın (solenoid) manyetik alan ölçümleri gerçekleştirilmiş, benzetimden elde edilen sonuçlar ile deneysel ölçümler karşılaştırılmış ve bu solenoidlerin DEDA hattında kullanılabilirliği araştırılmıştır.

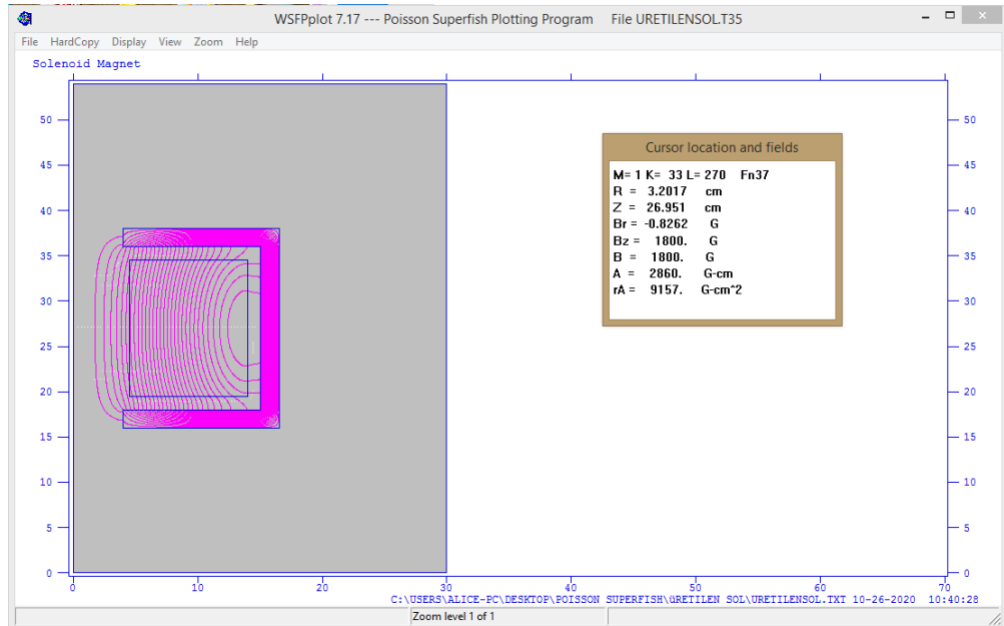
3.2.1. DEDA Hattı Solenoidlerinin (Elektromıknatıs) Manyetik Alan Ölçümü

DEDA Hattında kullanılan solenoidlerin manyetik alan tasarımları Poisson Superfish [38] programıyla gerçekleştirilmiştir. DEDA hattının tasarımı ise TRAVEL [39] (Şekil 3.5) ve DemirciPro [30] programları kullanılarak yapılmıştır.

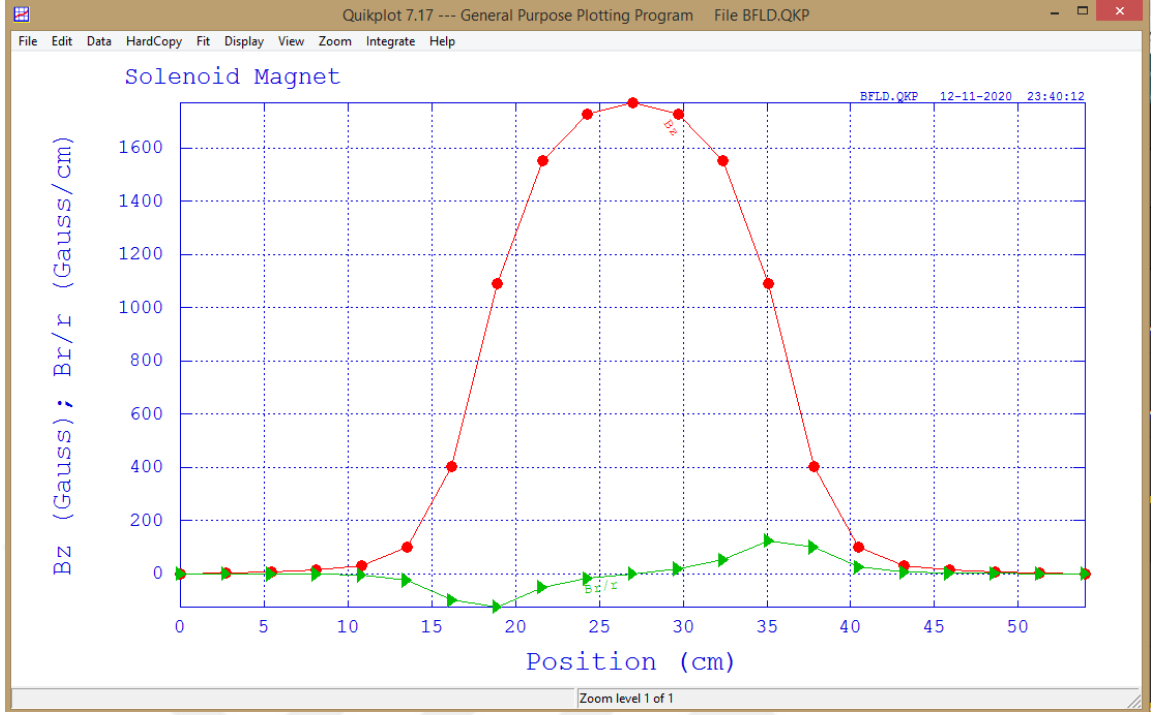


Şekil 3.5: İyon kaynağı ve DEDA Hattı şematik gösterimi.

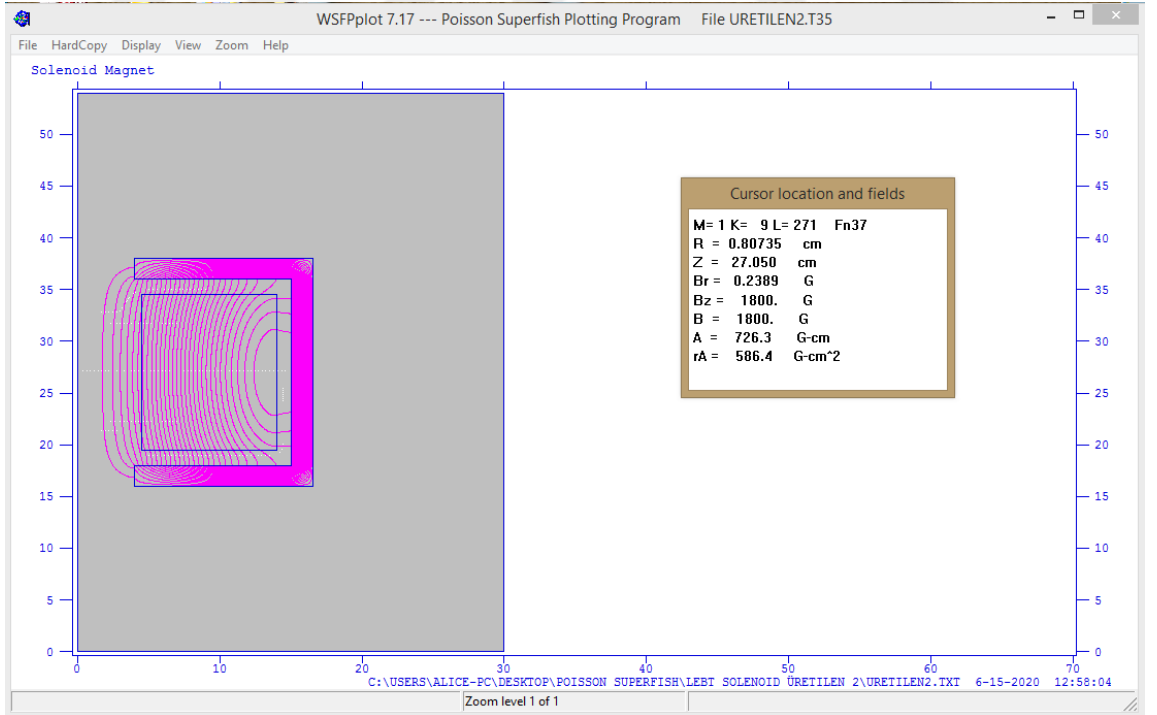
Solenoidlerin manyetik alan tasarımı, Poisson Superfish programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Solenoidlerin fiziksel uzunlukları ve iç çapları aynı, sadece sarım sayıları farklıdır. Poisson Superfish programı sonucu elde edilen manyetik alan çizgileri ve manyetik alan profili 1682 sarımlı solenoid için sırasıyla Şekil 3.6 ve 3.7’de, 4000 sarımlı solenoid için Şekil 3.8 ve 3.9’da verilmektedir.



Şekil 3.6: 1682 sarımlı solenoidin Poisson Superfish programı ile gerçekleştirilen manyetik alan tasarımı.



Şekil 3.7: 1682 sarımlı solenoidin manyetik alan profili.



Şekil 3.8: 4000 sarımlı solenoidin Poisson Superfish programı ile gerçekleştirilen manyetik alan tasarımı.



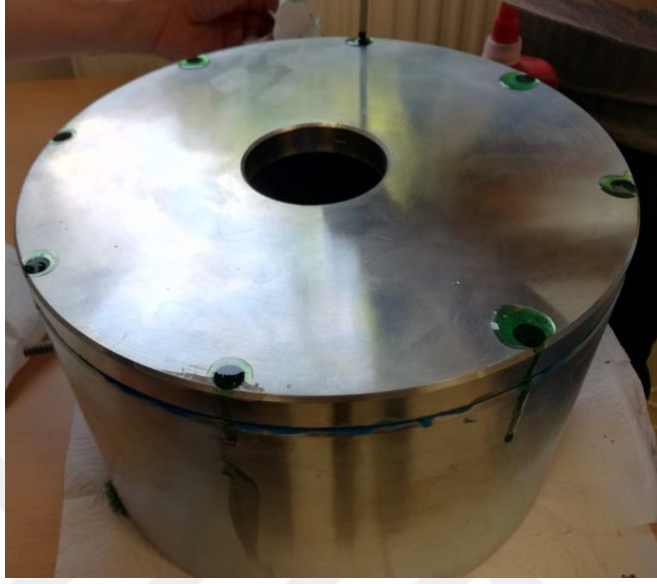
Şekil 3.9: 4000 sarımlı solenoidin manyetik alan profili.



Şekil 3.10: Üretilen DEDA hattı solenoidlerinden biri.

Tasarımı gerçekleştirip üretilen (Şekil 3.10) solenoidler su sızdırmaz bir şekilde yapıştırılıp (Şekil 3.11) kaçak testleri yapılmış ve sonra soğutma sistemine bağlanarak manyetik alan

ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Solenoidlerin su sızdırmazlık testinden alınan bir görüntü Şekil 3.12’de verilmektedir.

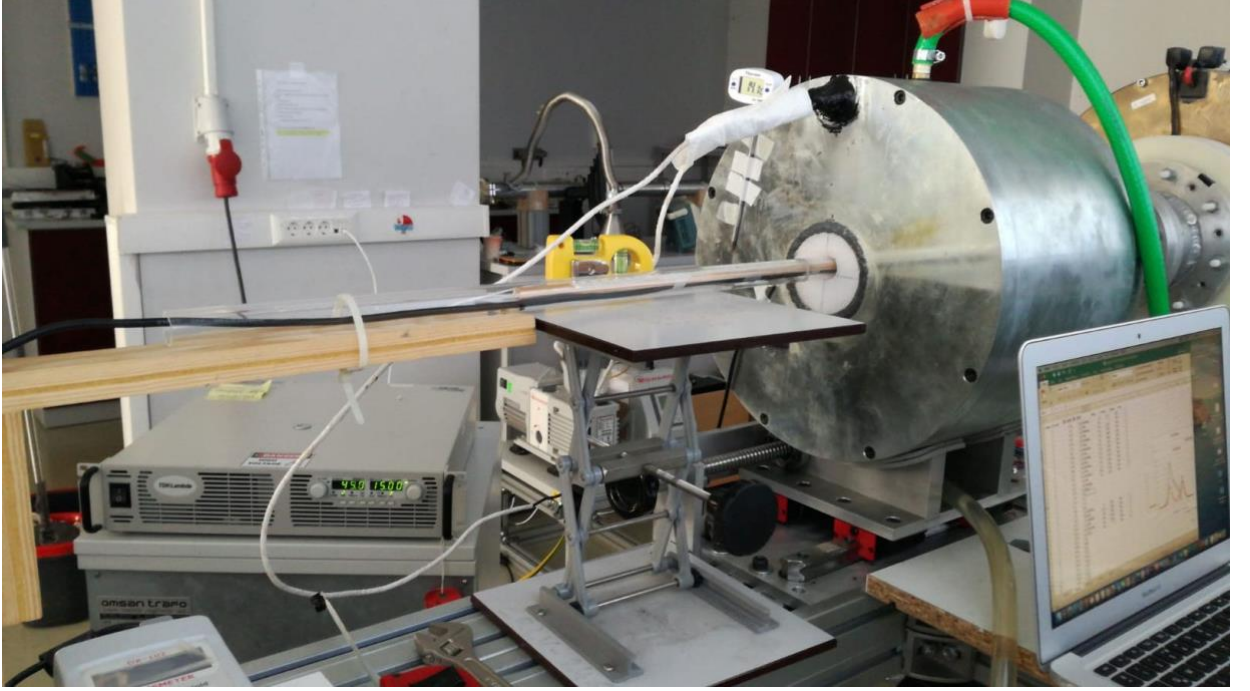


Şekil 3.11: Solenoidin birleştirilip yapıştırılması.



Şekil 3.12: Solenoidin su sızdırmazlık testi.

Solenoidlerin manyetik alan ölçümleri gaussmetre yardımıyla gerçekleştirilerek manyetik alan dağılımları incelenmiş ve benzetim sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda manyetik alan ölçümleri r ve z yönlerinde radyal ve eksenel olmak üzere iki farklı manyetik alan probu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Manyetik alan ölçümü için kullanılan sistem (Şekil 3.13) gösterilmektedir.

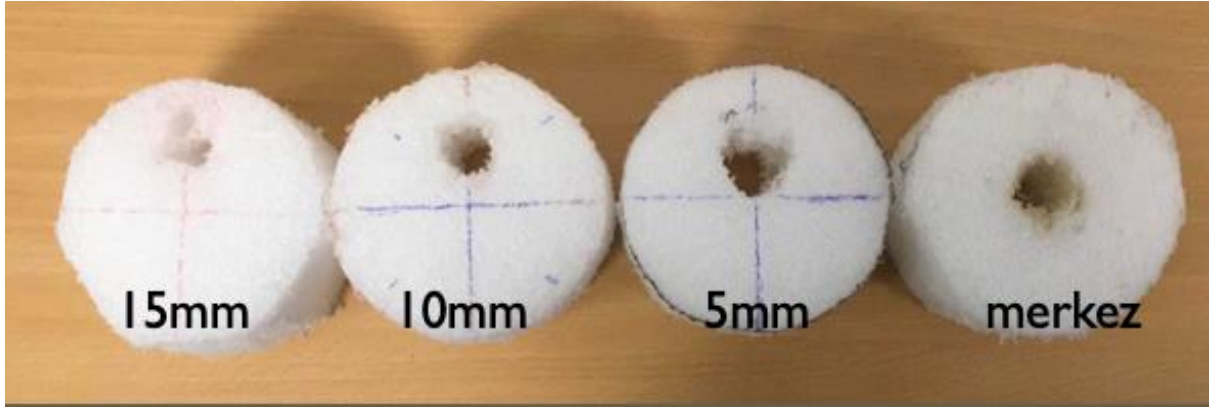


Şekil 3.13: Manyetik alan ölçüm düzeneği.

Manyetik alan ölçümleri merkezden (Şekil 3.14) 5 mm-10 mm-15 mm-20 mm uzaklıklardan ve yukarıdan, sağdan, soldan ve aşağıdan (Şekil 3.15) gerçekleştirilmiştir. Burada amaç solenoidin sarımlarının düzgünlüğünden emin olmaktır. Ayrıca solenoidin demeti simetrik olarak odakladığından emin olmak için ölçümler farklı yönlerden gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.14: Solenoidin merkezinden manyetik alan ölçümü hizalama yöntemi.



Şekil 3.15: Solenoidin merkezinden 5 mm,10 mm,15 mm,20 mm yukarıdan, sağdan, soldan ve aşağıdan hizalamak için kullanılan yapılar.

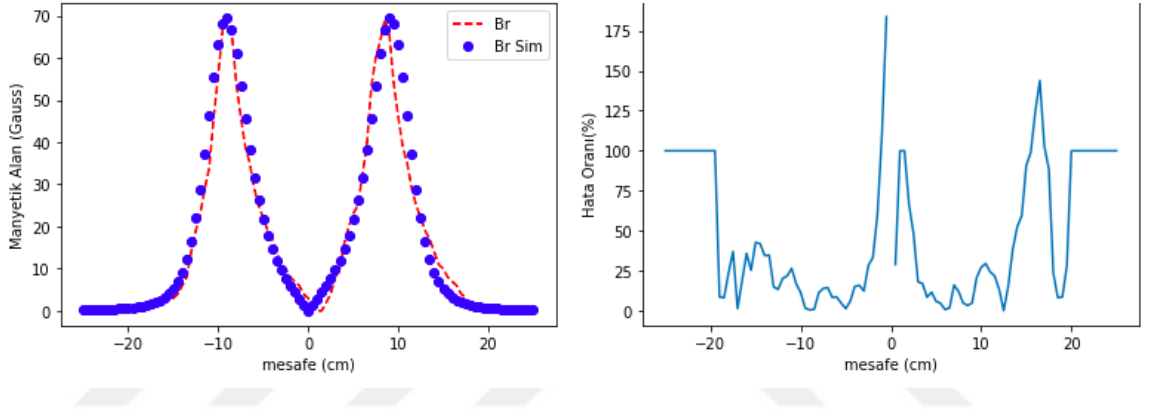
3.2.2. Deneysel ve Teorik Sonuçların Karşılaştırılması

Bu çalışmada 4000 sarımlı ve 1682 sarımlı solenoidlerin radyal ve eksenel manyetik alan ölçümleri gerçekleştirilmiştir, benzetimden elde edilen sonuçlar ile deneysel ölçümler karşılaştırılmıştır. Şimdi sırayla alınan ölçümler ve bu ölçümlerdeki hata oranı verilecektir. Hata oranı şu şekilde hesaplanmıştır:

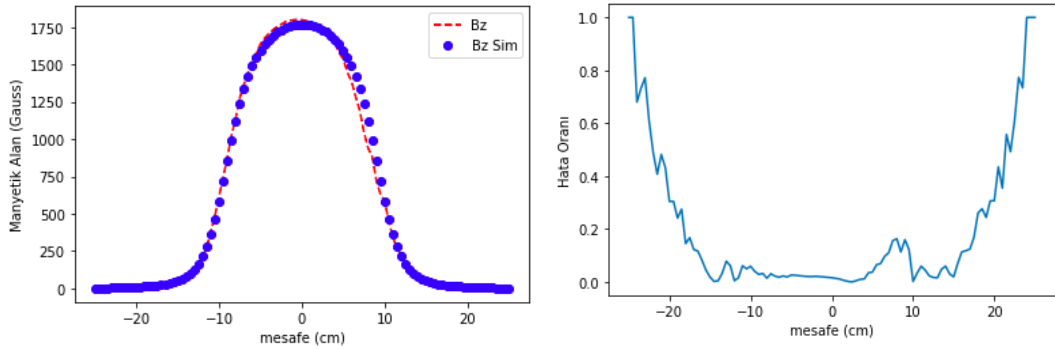
$$Hata (\%) = \frac{|B_{deneyset} - B_{simülasyon}|}{B_{simülasyon}} \times 100 \quad (3.1)$$

Burada $B_{deneysel}$, manyetik alanın deneysel ölçümlerini ifade ederken $B_{simülasyon}$, manyetik alanın benzetim sonuçlarını ifade etmektedir.

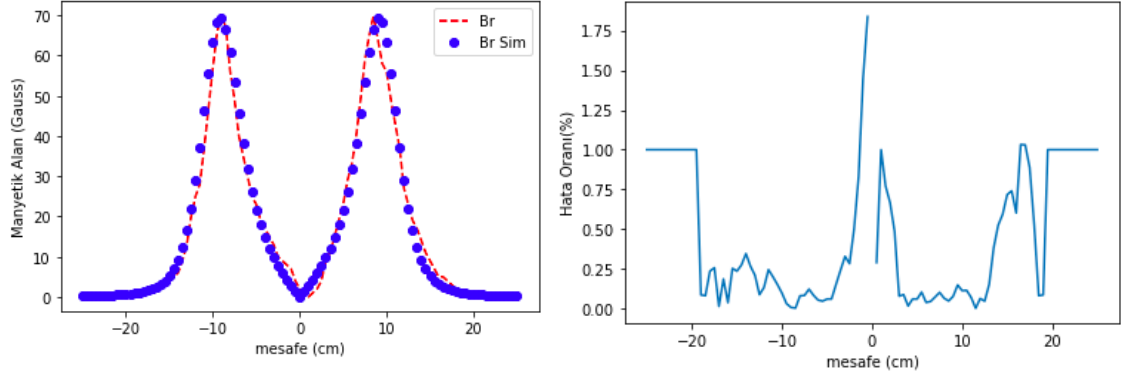
Buna göre Şekil 3.16'dan 3.79'a kadar olan şekillerde sırasıyla 4000 sarımlı ve 1682 sarımlı solenoidlerin r ve z yönlerindeki manyetik alan bileşenleri B_r (radyal manyetik alan) ve B_z (eksenel manyetik alan), radyal ve eksenel manyetik alan kullanılarak merkezden 5 mm, 10 mm, 15 mm, 20 mm yukarıdan, sağdan soldan ve aşağıdan ölçülmüş, ölçüm sonuçları benzetim sonuçları ile karşılaştırılmış (sol) ve hata oranı (%) (sağ) verilmiştir. Bu şekillerde mavi daire işaretleri benzetim sonuçlarını temsil etmektedir.



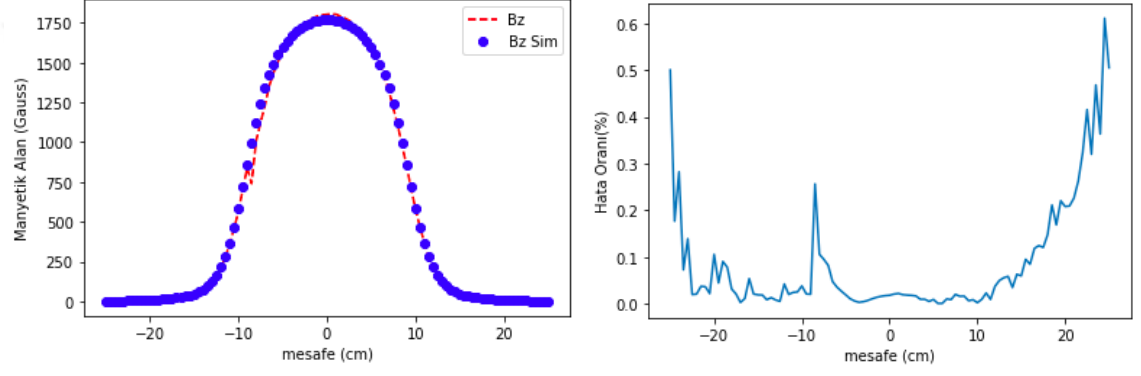
Şekil 3.16: 4000 sarımlı solenoidin merkezden 5 mm yukarıdan radyal prob ile ölçümü (sol), 4000 sarımlı solenoidin merkezden 5 mm yukarıdan radyal prob ile ölçüm hata oranı (%) (sağ).



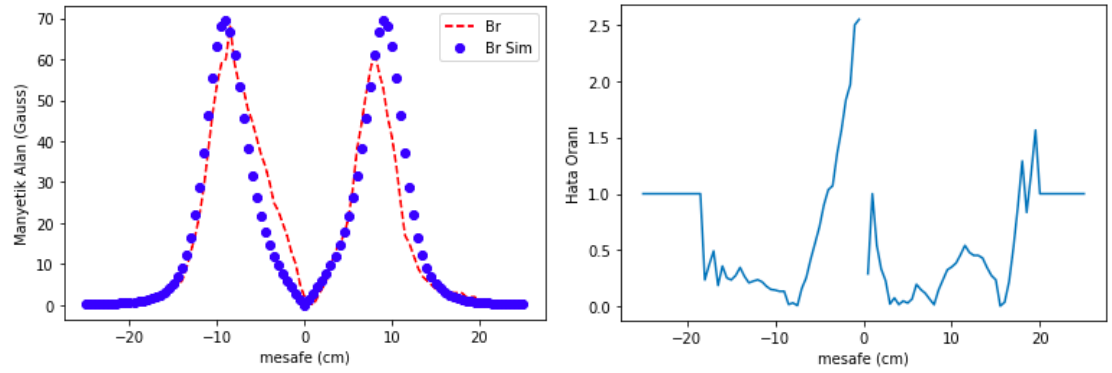
Şekil 3.17: 4000 sarımlı solenoidin merkezden 5 mm yukarıdan eksenel prob ile ölçümü (sol), 4000 sarımlı solenoidin merkezden 5 mm yukarıdan eksenel prob ile ölçüm hata oranı (%) (sağ).



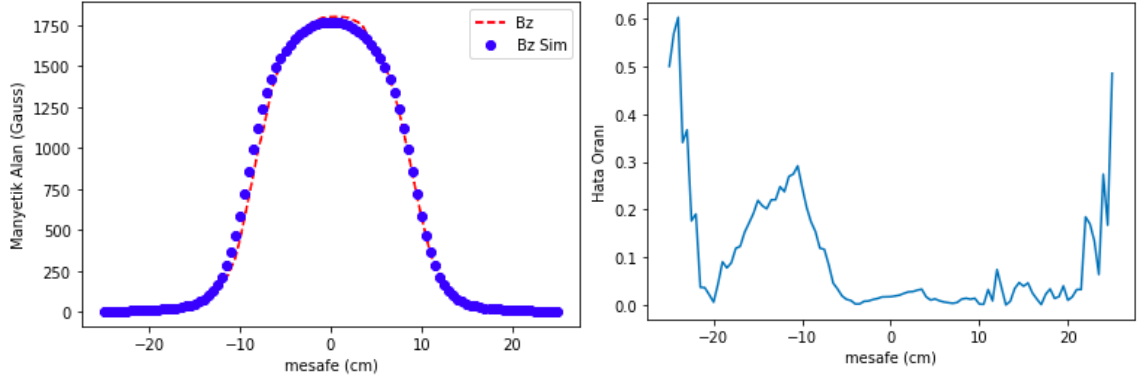
Şekil 3.18: 4000 sarımlı solenoidin merkezden 5 mm sağdan radyal prob ile ölçümü (sol), 4000 sarımlı solenoidin merkezden 5 mm sağdan radyal prob ile ölçüm hata oranı (%) (sağ).



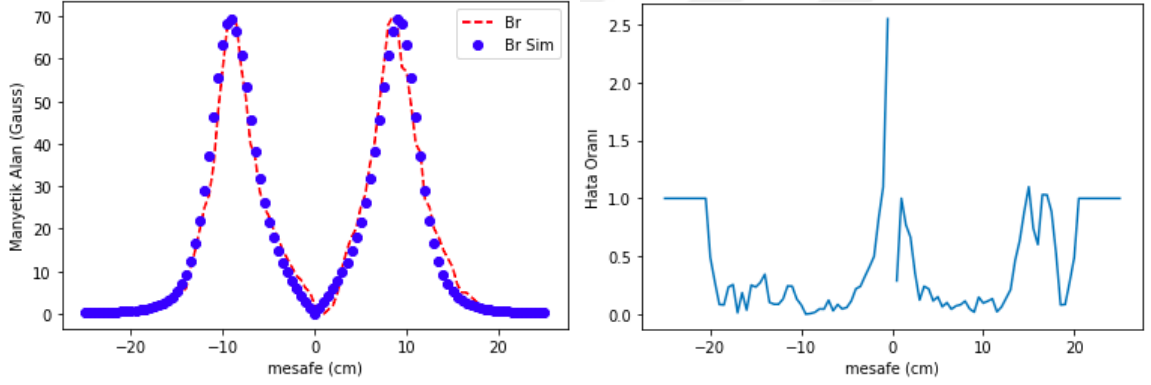
Şekil 3.19: 4000 sarımlı solenoidin merkezden 5 mm sağdan eksenel prob ile ölçümü (sol), 4000 sarımlı solenoidin merkezden 5 mm sağdan eksenel prob ile ölçüm hata oranı (%) (sağ).



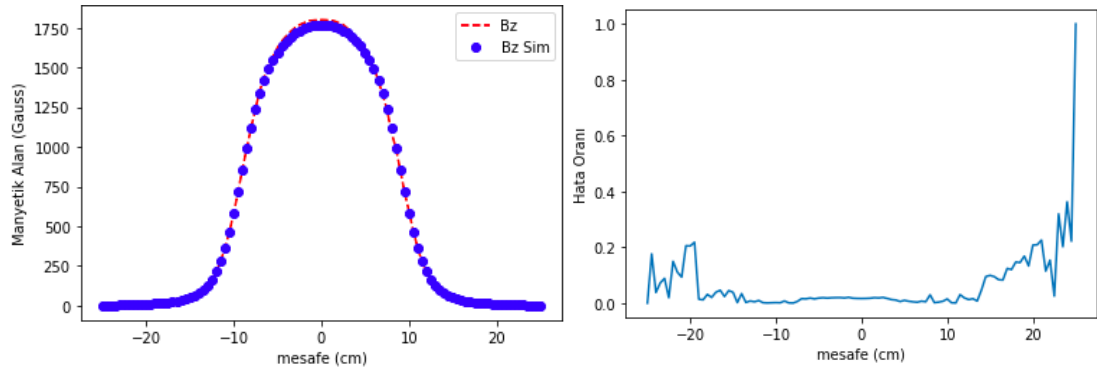
Şekil 3.20: 4000 sarımlı solenoidin merkezden 5 mm soldan radyal prob ile ölçümü (sol), 4000 sarımlı solenoidin merkezden 5 mm soldan radyal prob ile ölçüm hata oranı (%) (sağ).



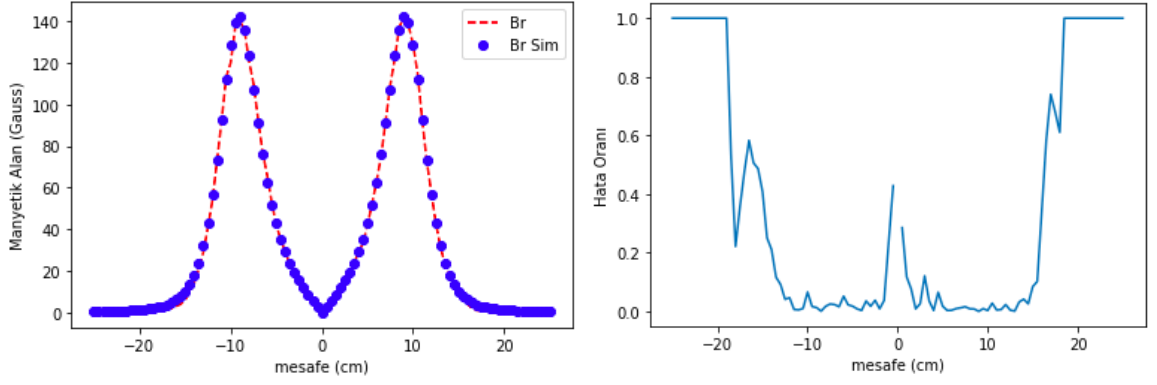
Şekil 3.21: 4000 sarımlı solenoidin merkezden 5 mm soldan eksenel prob ile ölçümü (sol), 4000 sarımlı solenoidin merkezden 5 mm sağdan eksenel prob ile ölçüm hata oranı (%) (sağ).



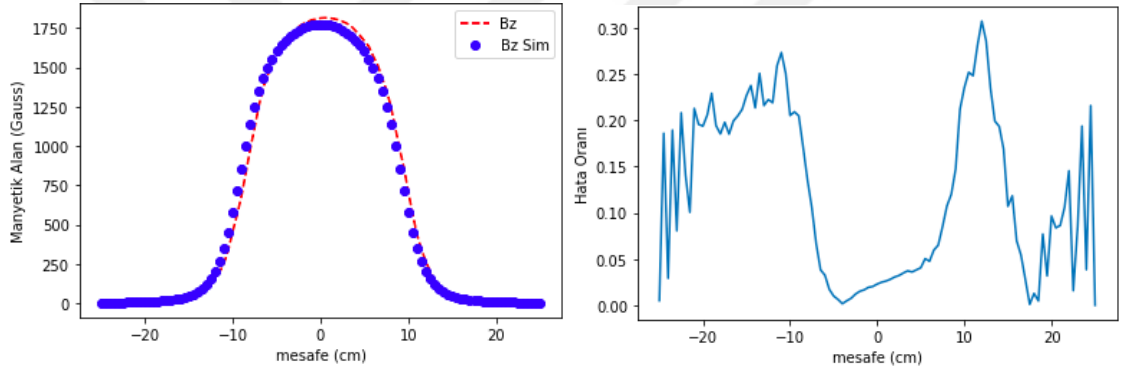
Şekil 3.22: 4000 sarımlı solenoidin merkezden 5 mm aşağıdan radyal prob ile ölçümü (sol), 4000 sarımlı solenoidin merkezden 5 mm aşağıdan radyal prob ile ölçüm hata oranı (%) (sağ).



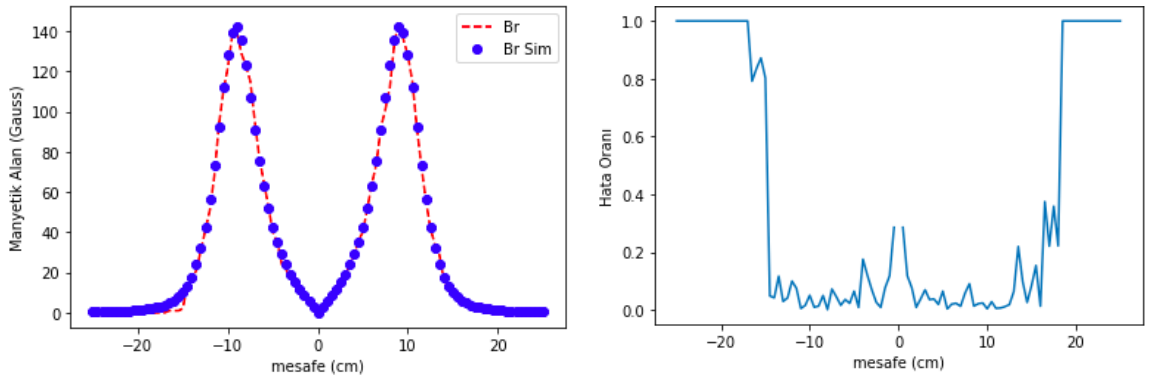
Şekil 3.23: 4000 sarımlı solenoidin merkezden 5 mm aşağıdan eksenel prob ile ölçümü (sol), 4000 sarımlı solenoidin merkezden 5 mm aşağıdan eksenel prob ile ölçüm hata oranı (%) (sağ).



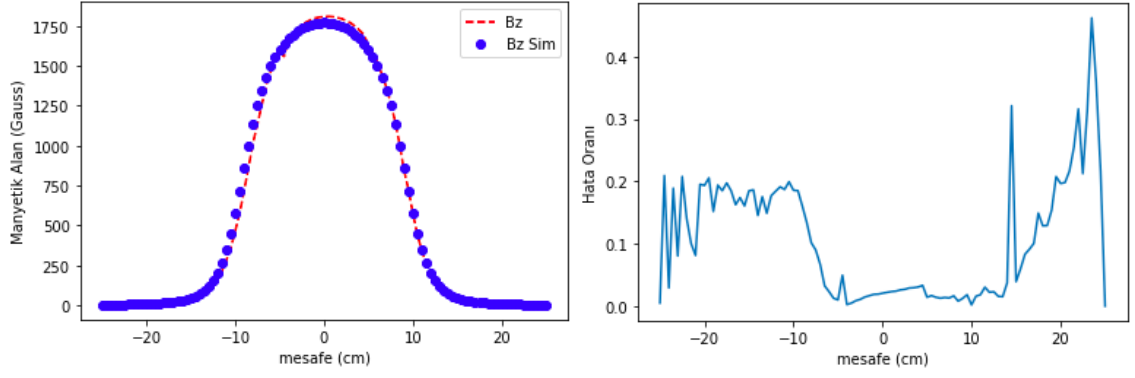
Şekil 3.24: 4000 sarımlı solenoidin merkezden 10 mm yukarıdan radyal prob ile ölçümü (sol), 4000 sarımlı solenoidin merkezden 10 mm yukarıdan radyal prob ile ölçüm hata oranı (%) (sağ).



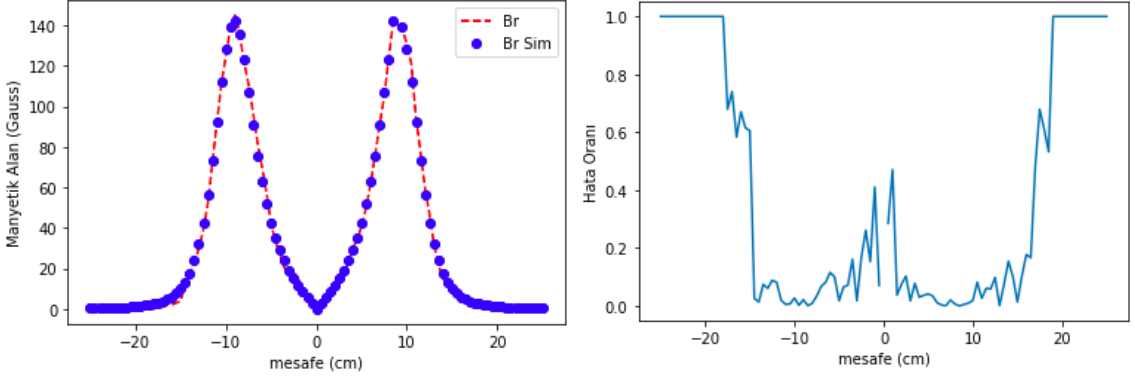
Şekil 3.25: 4000 sarımlı solenoidin merkezden 10 mm yukarıdan eksenel prob ile ölçümü (sol), 4000 sarımlı solenoidin merkezden 10 mm yukarıdan eksenel prob ile ölçüm hata oranı (%) (sağ).



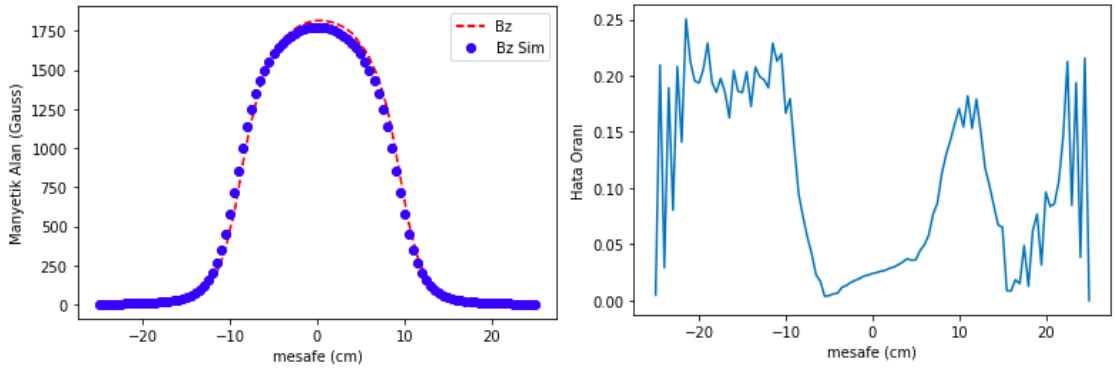
Şekil 3.26: 4000 sarımlı solenoidin merkezden 10 mm sağdan radyal prob ile ölçümü (sol), 4000 sarımlı solenoidin merkezden 10 mm sağdan radyal prob ile ölçüm hata oranı (%) (sağ).



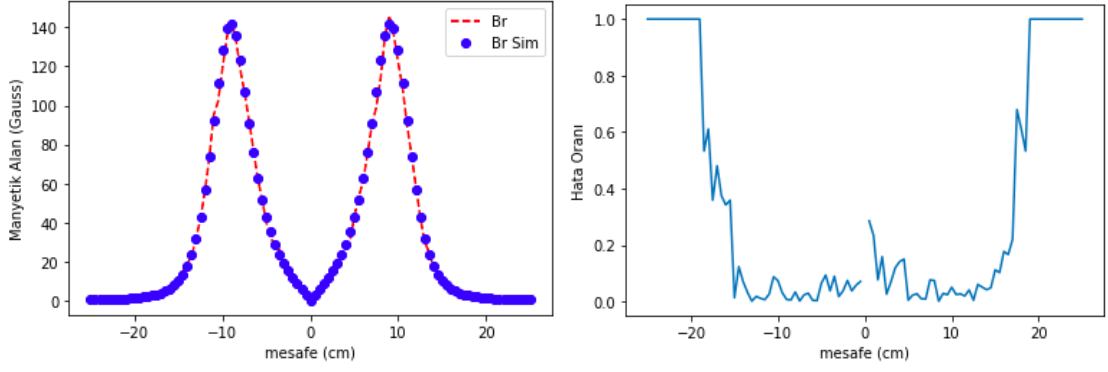
Şekil 3.27: 4000 sarımlı solenoidin merkezden 10 mm sağdan eksenel prob ile ölçümü (sol), 4000 sarımlı solenoidin merkezden 10 mm sağdan eksenel prob ile ölçüm hata oranı (%) (sağ).



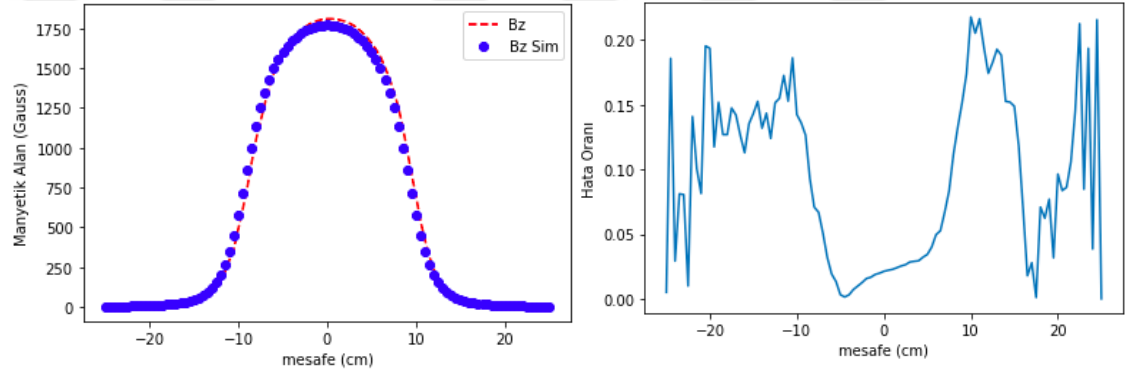
Şekil 3.28: 4000 sarımlı solenoidin merkezden 10 mm soldan radyal prob ile ölçümü (sol), 4000 sarımlı solenoidin merkezden 10 mm soldan radyal prob ile ölçüm hata oranı (%) (sağ).



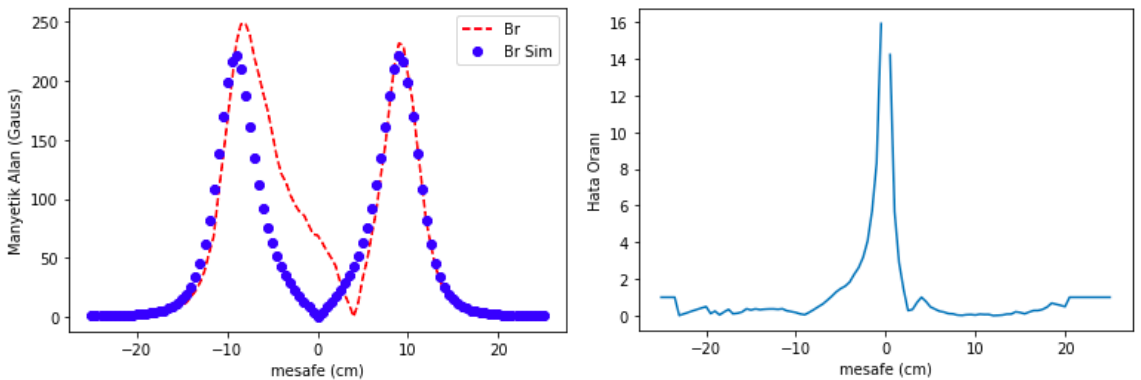
Şekil 3.29: 4000 sarımlı solenoidin merkezden 10 mm soldan eksenel prob ile ölçümü (sol), 4000 sarımlı solenoidin merkezden 10 mm soldan eksenel prob ile ölçüm hata oranı (%) (sağ).



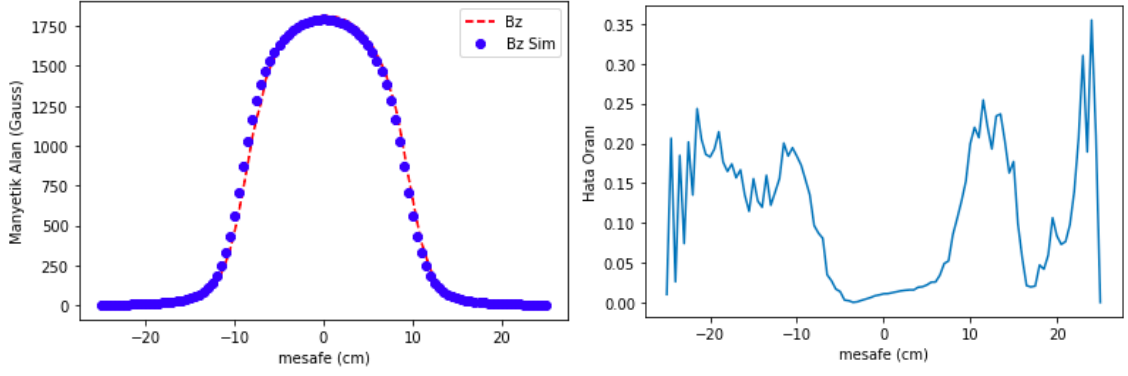
Şekil 3.30: 4000 sarımlı solenoidin merkezden 10 mm aşağıdan radyal prob ile ölçümü (sol), 4000 sarımlı solenoidin merkezden 10 mm aşağıdan radyal prob ile ölçüm hata oranı (%) (sağ).



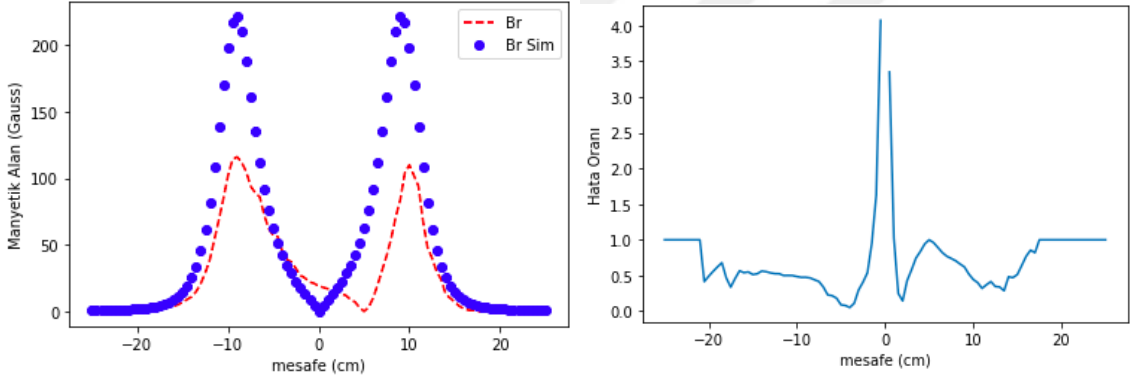
Şekil 3.31: 4000 sarımlı solenoidin merkezden 10 mm aşağıdan eksenel prob ile ölçümü (sol), 4000 sarımlı solenoidin merkezden 10 mm aşağıdan eksenel prob ile ölçüm hata oranı (%) (sağ).



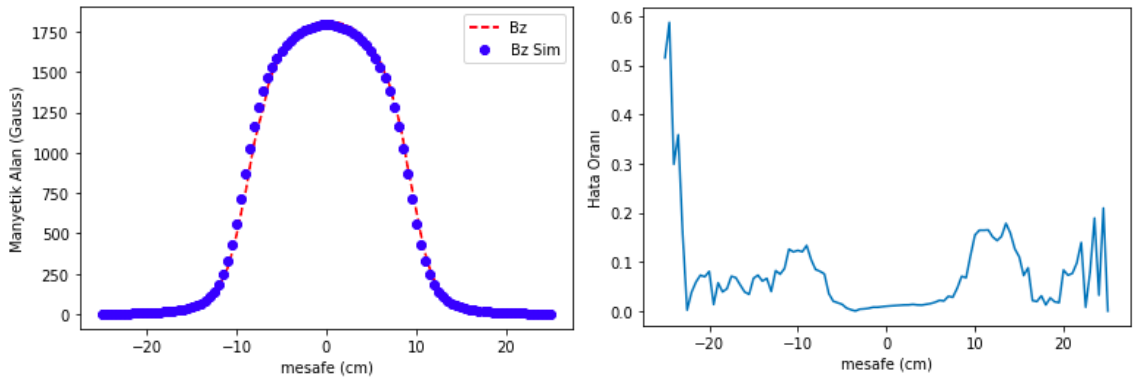
Şekil 3.32: 4000 sarımlı solenoidin merkezden 15 mm yukarıdan radyal prob ile ölçümü (sol), 4000 sarımlı solenoidin merkezden 15 mm yukarıdan radyal prob ile ölçüm hata oranı (%) (sağ).



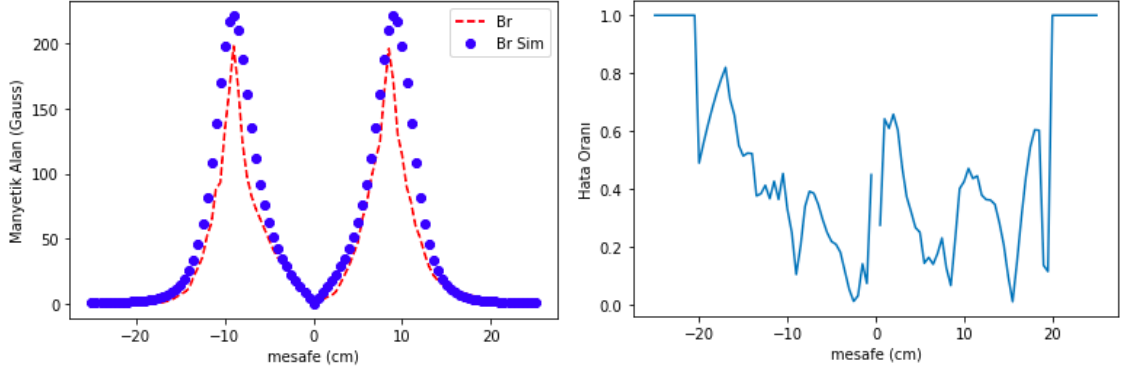
Şekil 3.33: 4000 sarımlı solenoidin merkezden 15 mm yukarıdan eksenel prob ile ölçümü (sol), 4000 sarımlı solenoidin merkezden 15 mm yukarıdan eksenel prob ile ölçüm hata oranı (%) (sağ).



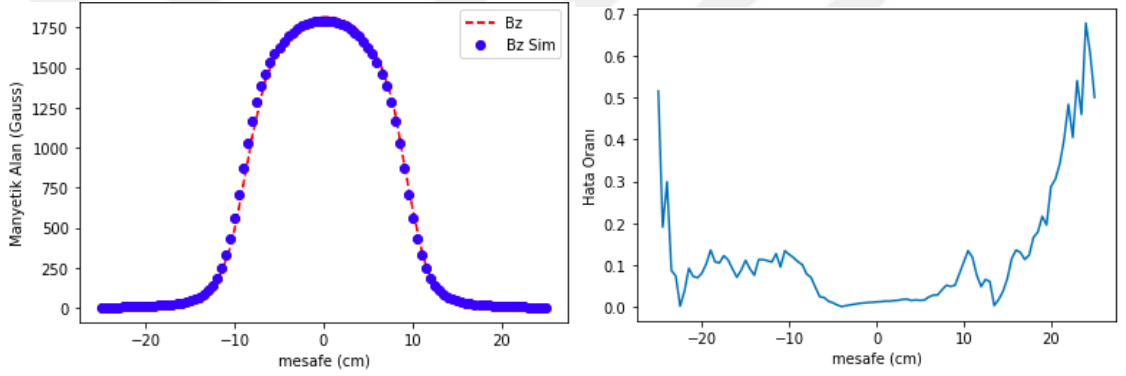
Şekil 3.34: 4000 sarımlı solenoidin merkezden 15 mm sağdan radyal prob ile ölçümü (sol), 4000 sarımlı solenoidin merkezden 15 mm sağdan radyal prob ile ölçüm hata oranı (%) (sağ).



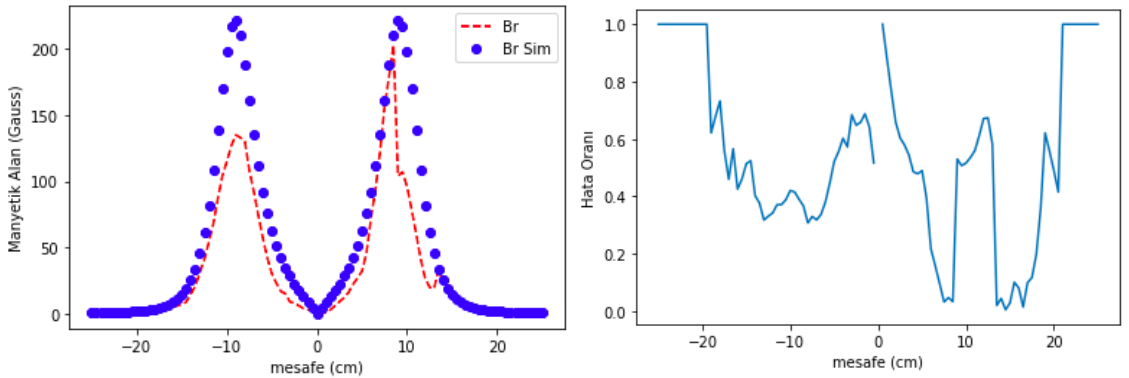
Şekil 3.35: 4000 sarımlı solenoidin merkezden 15 mm sağdan eksenel prob ile ölçümü (sol), 4000 sarımlı solenoidin merkezden 15 mm sağdan eksenel prob ile ölçüm hata oranı (%) (sağ).



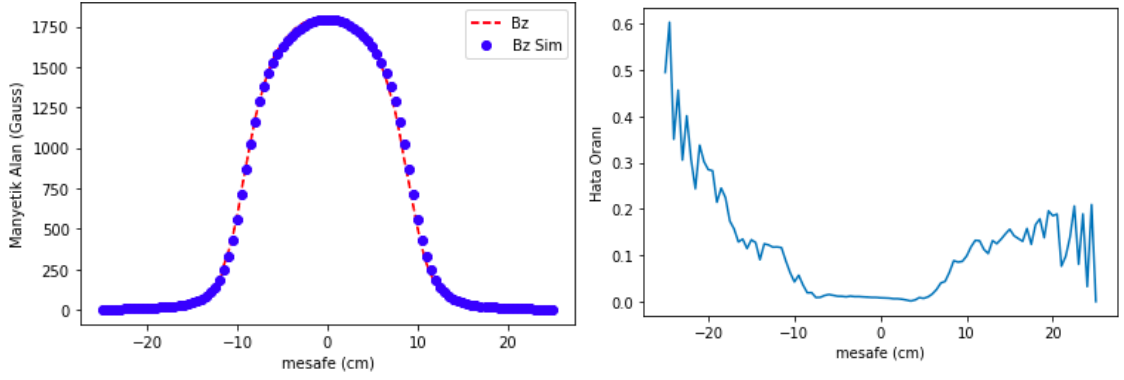
Şekil 3.36: 4000 sarımlı solenoidin merkezden 15 mm soldan radyal prob ile ölçümü (sol), 4000 sarımlı solenoidin merkezden 15 mm soldan radyal prob ile ölçüm hata oranı (%) (sağ).



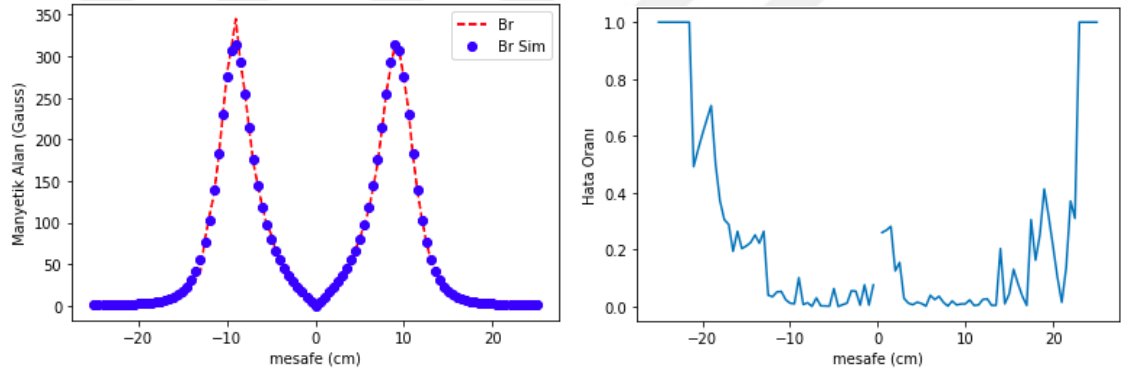
Şekil 3.37: 4000 sarımlı solenoidin merkezden 15 mm soldan eksenel prob ile ölçümü (sol), 4000 sarımlı solenoidin merkezden 15 mm soldan eksenel prob ile ölçüm hata oranı (%) (sağ).



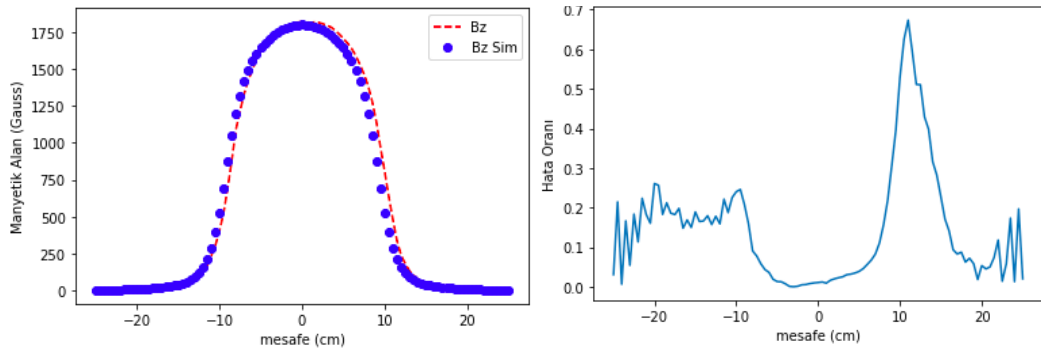
Şekil 3.38: 4000 sarımlı solenoidin merkezden 15 mm aşağıdan radyal prob ile ölçümü (sol), 4000 sarımlı solenoidin merkezden 15 mm aşağıdan radyal prob ile ölçüm hata oranı (%) (sağ).



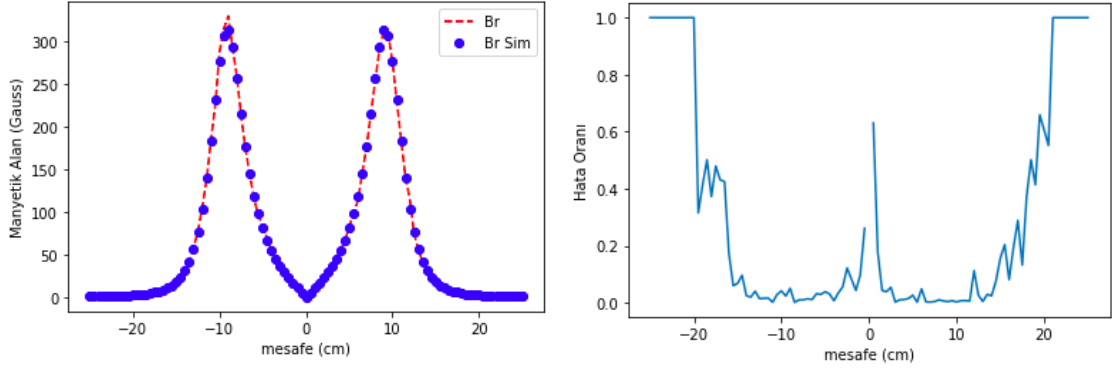
Şekil 3.39: 4000 sarımlı solenoidin merkezden 15 mm aşağıdan eksenel prob ile ölçümü (sol), 4000 sarımlı solenoidin merkezden 15 mm aşağıdan eksenel prob ile ölçüm hata oranı (%) (sağ).



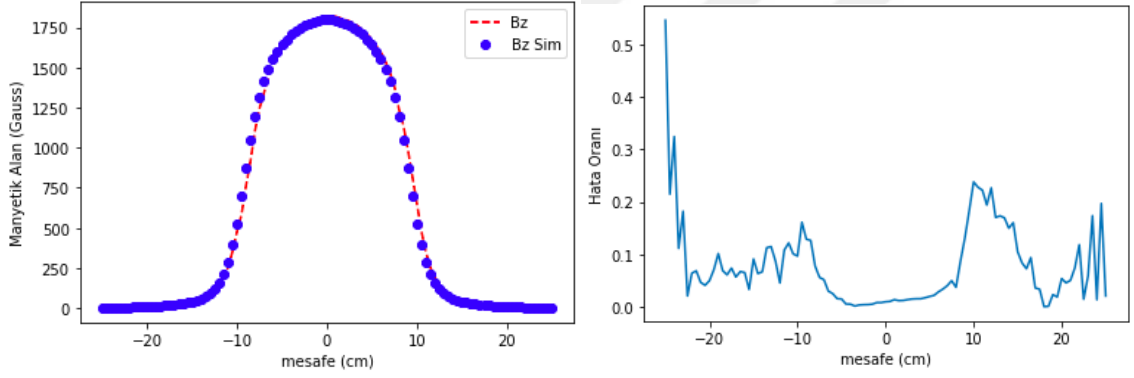
Şekil 3.40: 4000 sarımlı solenoidin merkezden 20 mm yukarıdan radyal prob ile ölçümü (sol), 4000 sarımlı solenoidin merkezden 20 mm yukarıdan radyal prob ile ölçüm hata oranı (%) (sağ).



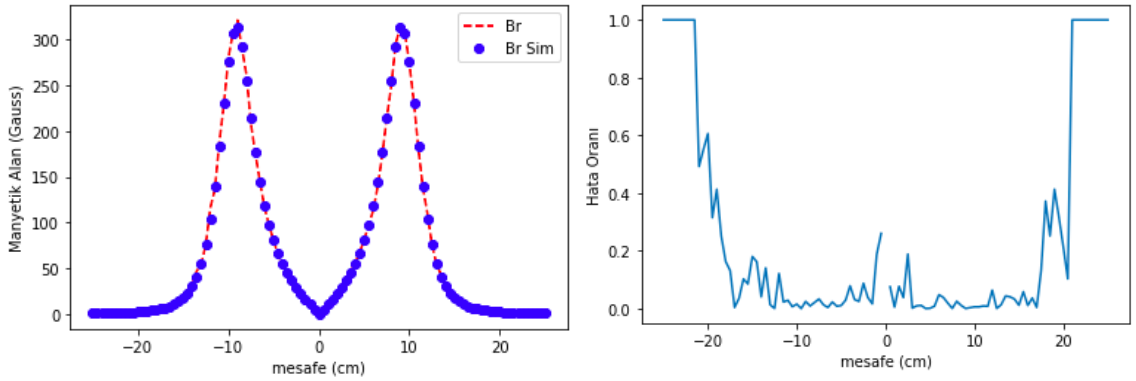
Şekil 3.41: 4000 sarımlı solenoidin merkezden 20 mm yukarıdan eksenel prob ile ölçümü (sol), 4000 sarımlı solenoidin merkezden 20 mm yukarıdan eksenel prob ile ölçüm hata oranı (%) (sağ).



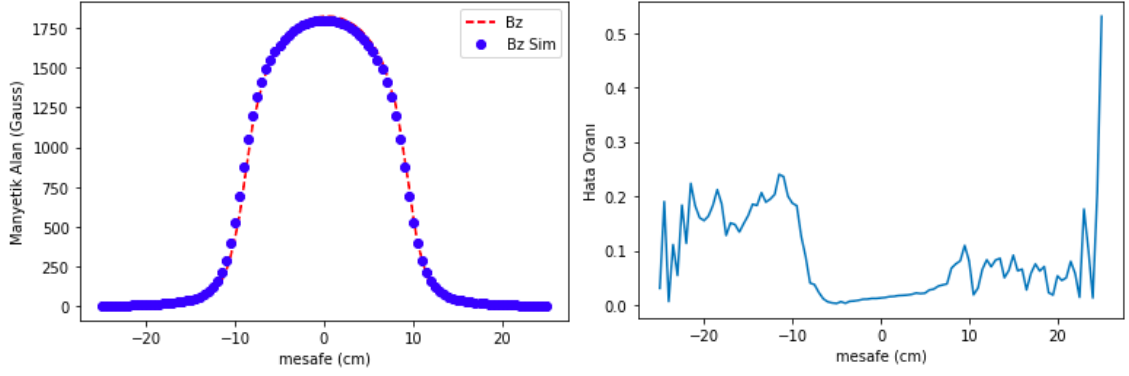
Şekil 3.42: 4000 sarımlı solenoidin merkezden 20 mm sağdan radyal prob ile ölçümü (sol), 4000 sarımlı solenoidin merkezden 20 mm sağdan radyal prob ile ölçüm hata oranı (%) (sağ).



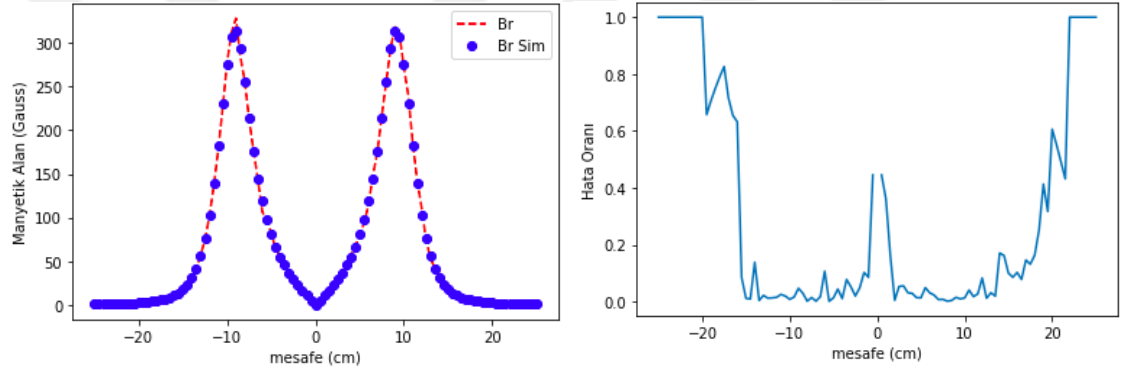
Şekil 3.43: 4000 sarımlı solenoidin merkezden 20 mm sağdan eksenel prob ile ölçümü (sol), 4000 sarımlı solenoidin merkezden 20 mm sağdan eksenel prob ile ölçüm hata oranı (%) (sağ).



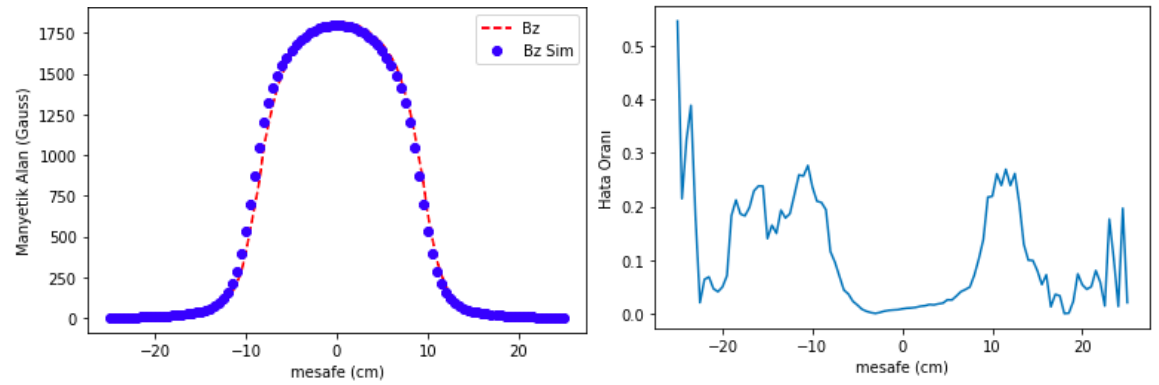
Şekil 3.44: 4000 sarımlı solenoidin merkezden 20 mm soldan radyal prob ile ölçümü (sol), 4000 sarımlı solenoidin merkezden 20 mm soldan radyal prob ile ölçüm hata oranı (%) (sağ).



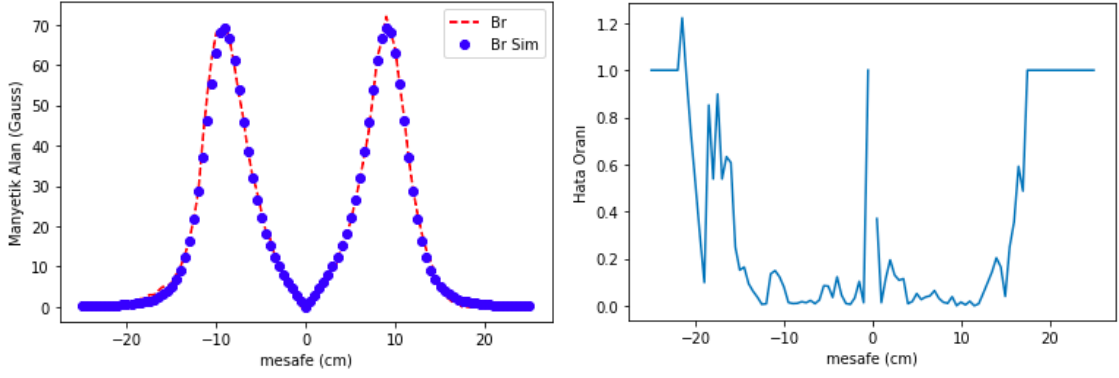
Şekil 3.45: 4000 sarımlı solenoidin merkezden 20 mm soldan eksenel prob ile ölçümü (sol), 4000 sarımlı solenoidin merkezden 20 mm soldan eksenel prob ile ölçüm hata oranı (%) (sağ).



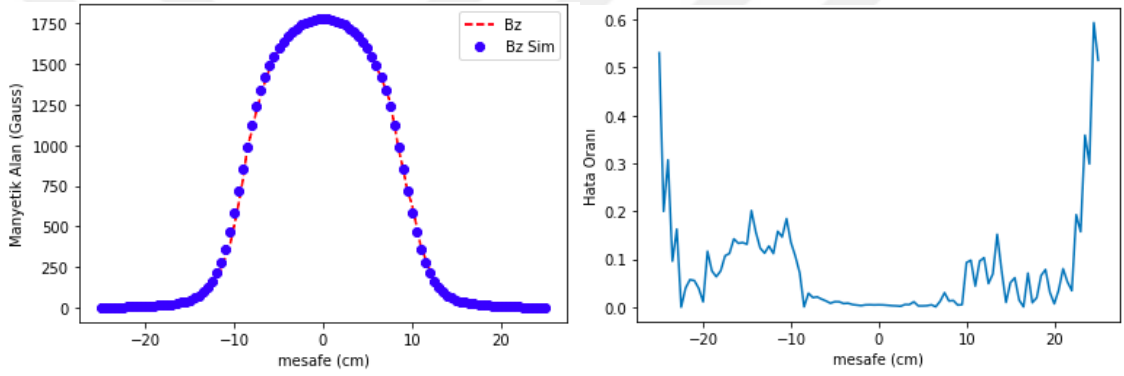
Şekil 3.46: 4000 sarımlı solenoidin merkezden 20 mm aşağıdan radyal prob ile ölçümü (sol), 4000 sarımlı solenoidin merkezden 20 mm aşağıdan radyal prob ile ölçüm hata oranı (%) (sağ).



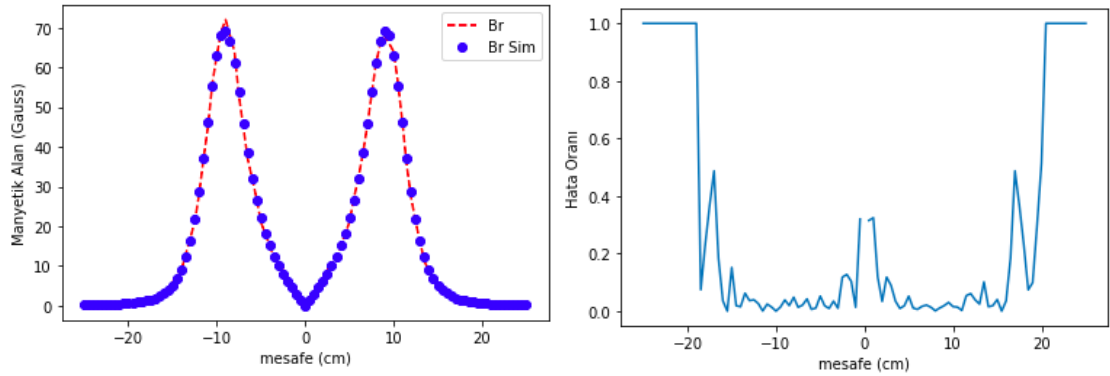
Şekil 3.47: 4000 sarımlı solenoidin merkezden 20 mm aşağıdan eksenel prob ile ölçümü (sol), 4000 sarımlı solenoidin merkezden 20 mm aşağıdan eksenel prob ile ölçüm hata oranı (%) (sağ).



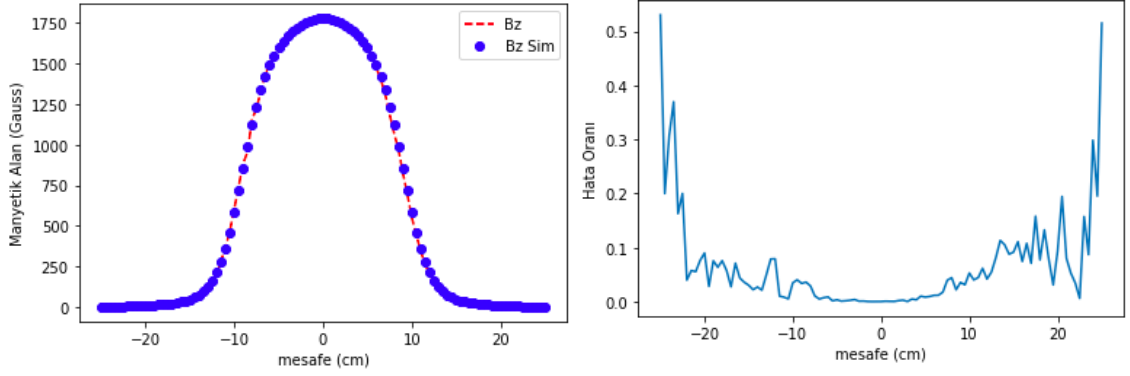
Şekil 3.48: 1682 sarımlı solenoidin merkezden 5 mm yukarıdan radyal prob ile ölçümü (sol), 1682 sarımlı solenoidin merkezden 5 mm yukarıdan radyal prob ile ölçüm hata oranı (%) (sağ).



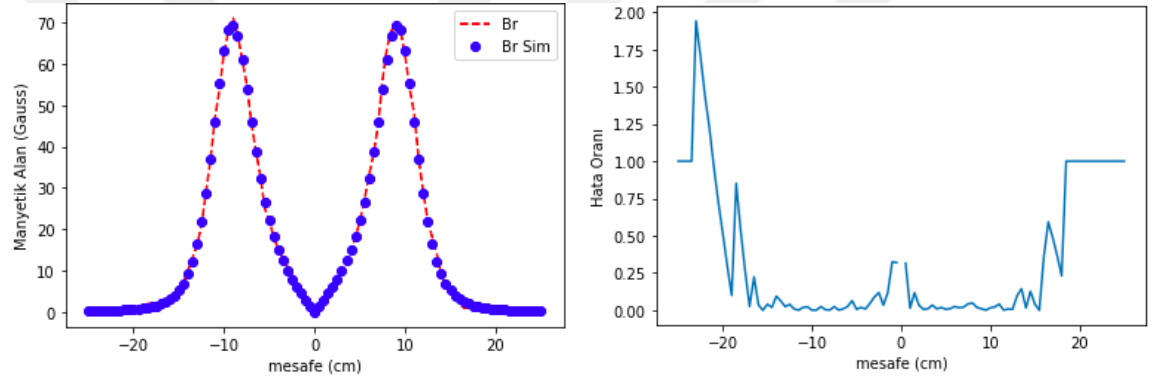
Şekil 3.49: 1682 sarımlı solenoidin merkezden 5 mm yukarıdan eksenel prob ile ölçümü (sol), 1682 sarımlı solenoidin merkezden 5 mm yukarıdan eksenel prob ile ölçüm hata analizi (sağ).



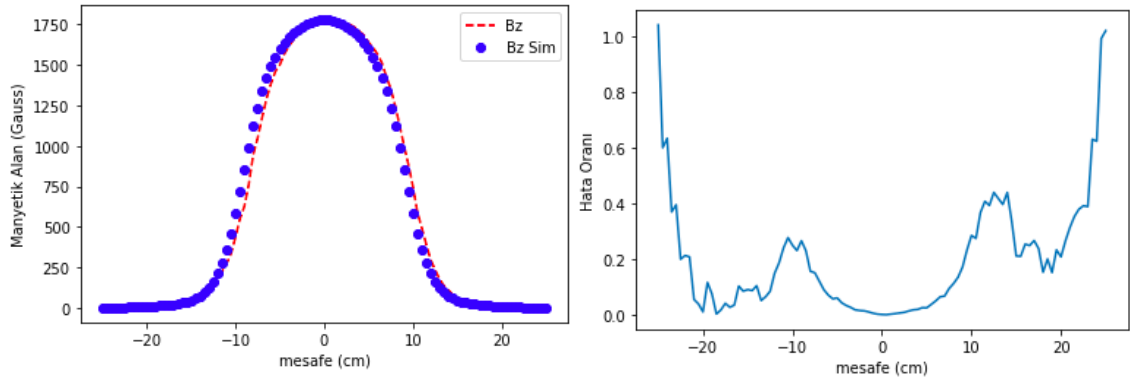
Şekil 3.50: 1682 sarımlı solenoidin merkezden 5 mm sağdan radyal prob ile ölçümü (sol), 1682 sarımlı solenoidin merkezden 5 mm sağdan radyal prob ile ölçüm hata oranı (%) (sağ).



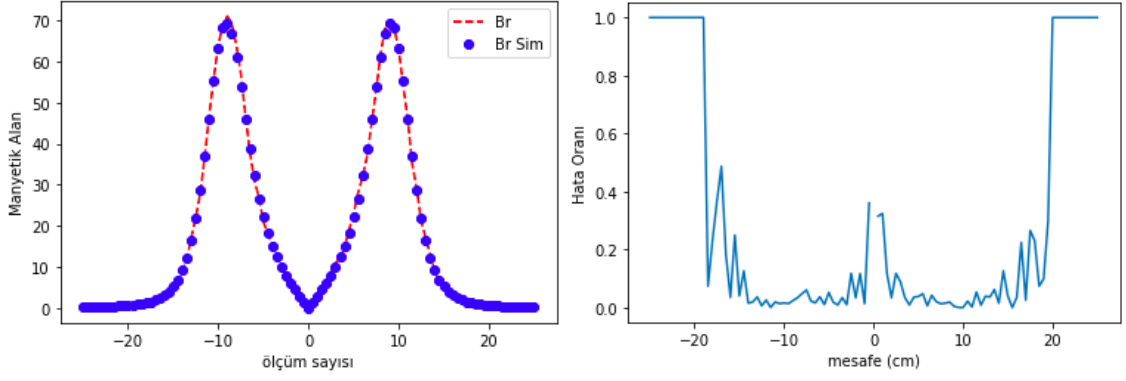
Şekil 3.51: 1682 sarımlı solenoidin merkezden 5 mm sağdan eksenel prob ile ölçümü (sol), 1682 sarımlı solenoidin merkezden 5 mm sağdan eksenel prob ile ölçüm hata oranı (%) (sağ).



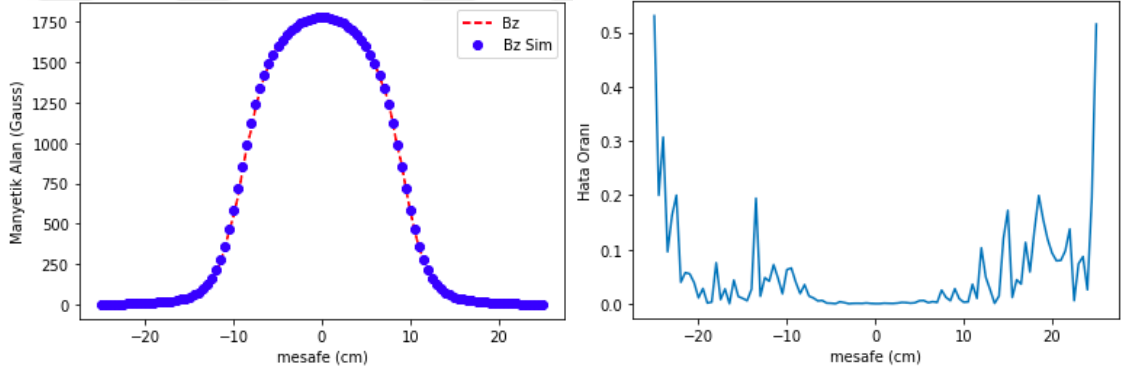
Şekil 3.52: 1682 sarımlı solenoidin merkezden 5 mm soldan radyal prob ile ölçümü (sol), 1682 sarımlı solenoidin merkezden 5 mm soldan radyal prob ile ölçüm hata oranı (%) (sağ).



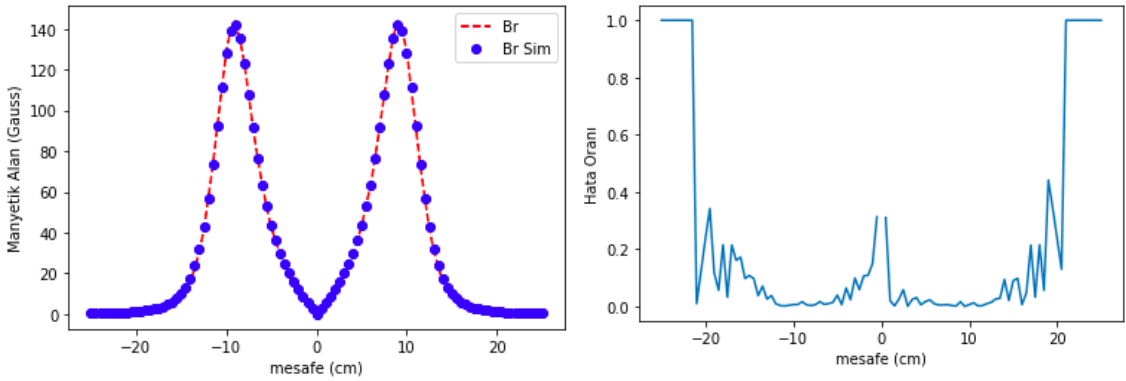
Şekil 3.53: 1682 sarımlı solenoidin merkezden 5 mm soldan eksenel prob ile ölçümü (sol), 1682 sarımlı solenoidin merkezden 5 mm soldan eksenel prob ile ölçüm hata oranı (%) (sağ).



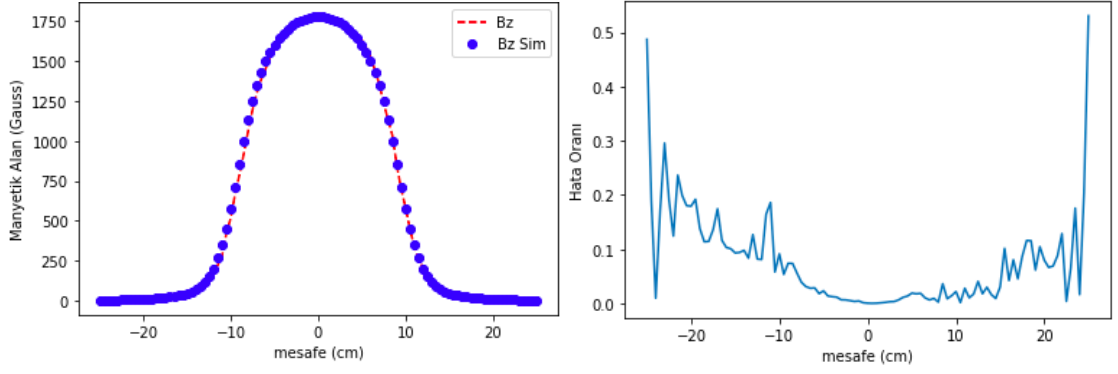
Şekil 3.54: 1682 sarımlı solenoidin merkezden 5 mm aşağıdan radyal prob ile ölçümü (sol), 1682 sarımlı solenoidin merkezden 5 mm aşağıdan radyal prob ile ölçüm hata oranı (%) (sağ).



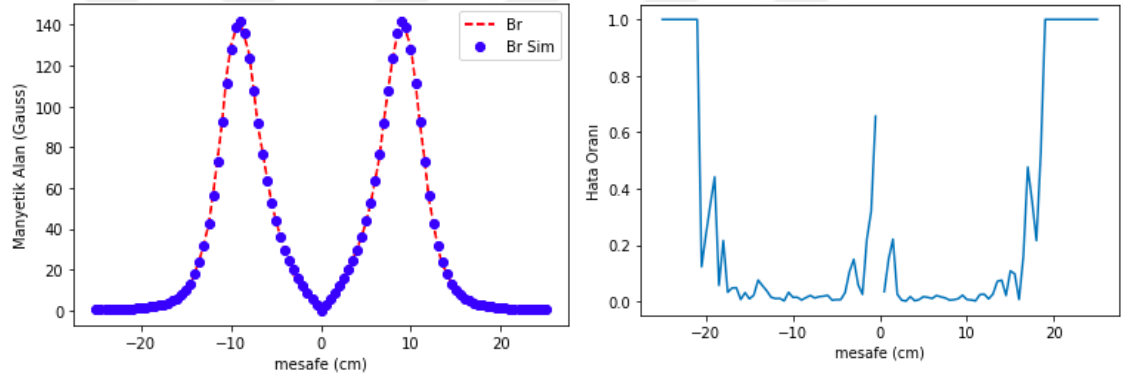
Şekil 3.55: 1682 sarımlı solenoidin merkezden 5 mm aşağıdan eksenel prob ile ölçümü (sol), 1682 sarımlı solenoidin merkezden 5 mm aşağıdan eksenel prob ile ölçüm hata oranı (%) (sağ).



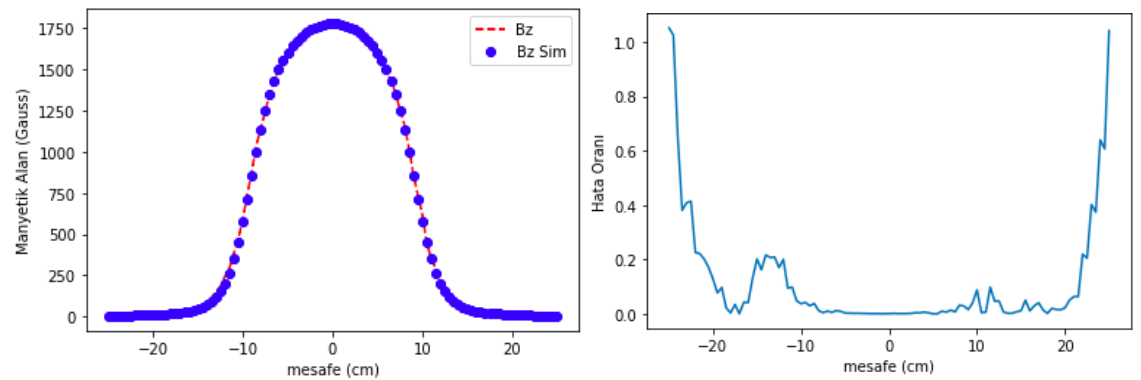
Şekil 3.56: 1682 sarımlı solenoidin merkezden 10 mm yukarıdan radyal prob ile ölçümü (sol), 1682 sarımlı solenoidin merkezden 10 mm yukarıdan radyal prob ile ölçüm hata oranı (%) (sağ).



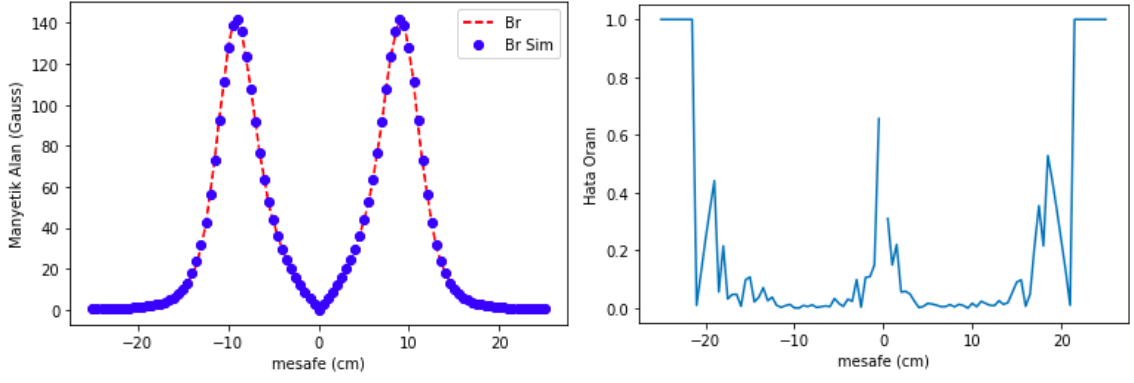
Şekil 3.57: 1682 sarımlı solenoidin merkezden 10 mm yukarıdan aksel prob ile ölçümü (sol), 1682 sarımlı solenoidin merkezden 10 mm yukarıdan aksel prob ile ölçüm hata oranı (%) (sağ).



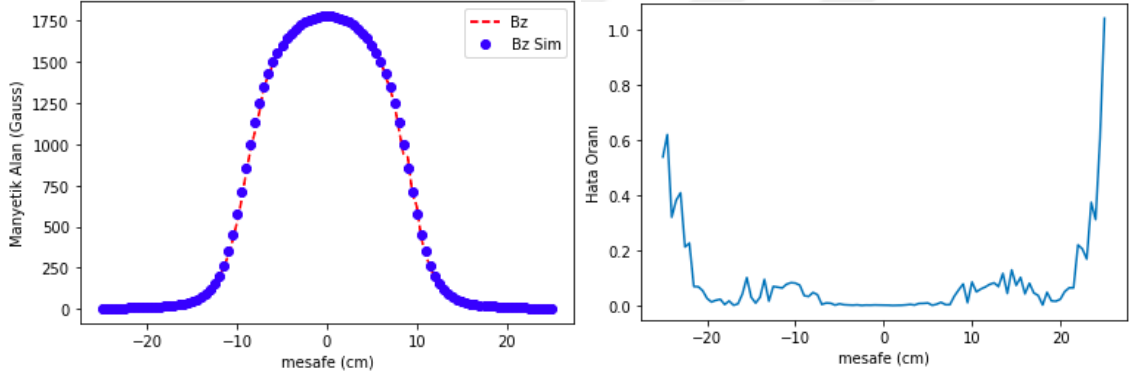
Şekil 3.58: 1682 sarımlı solenoidin merkezden 10 mm sağdan radyal prob ile ölçümü (sol), 1682 sarımlı solenoidin merkezden 10 mm sağdan radyal prob ile ölçüm hata oranı (%) (sağ).



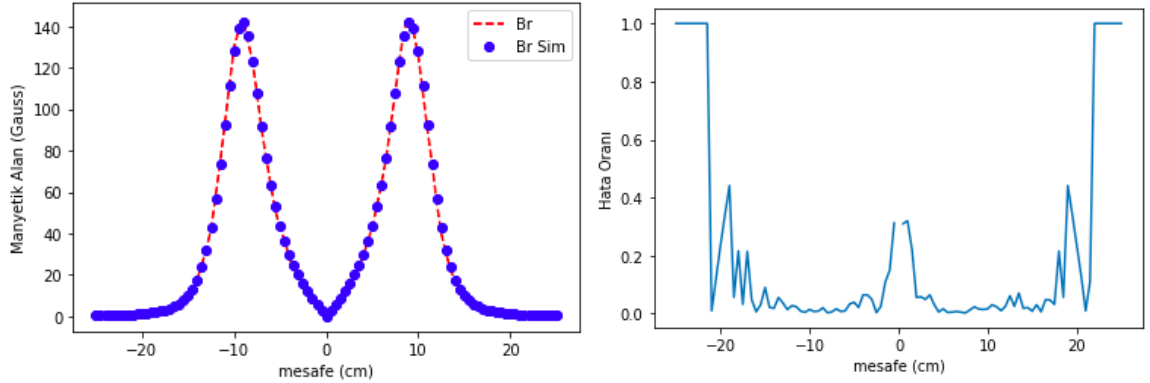
Şekil 3.59: 1682 sarımlı solenoidin merkezden 10 mm sağdan aksel prob ile ölçümü (sol), 1682 sarımlı solenoidin merkezden 10 mm sağdan aksel prob ile ölçüm hata oranı (%) (sağ).



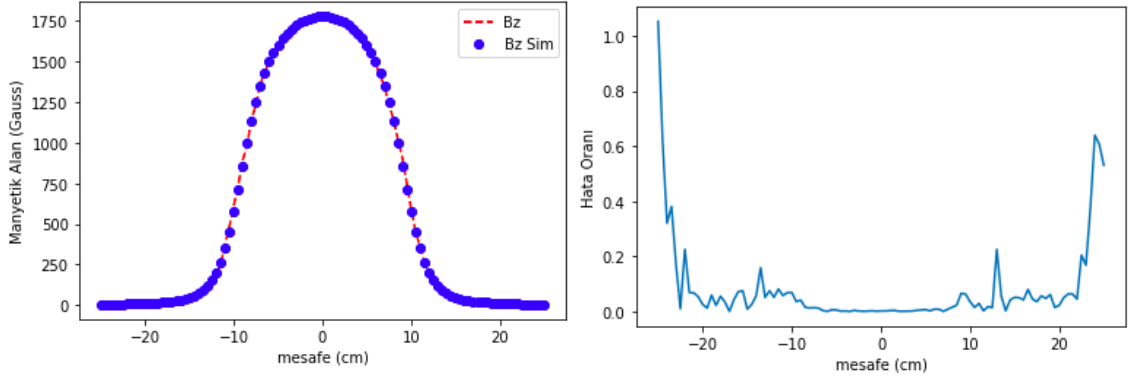
Şekil 3.60: 1682 sarımlı solenoidin merkezden 10 mm soldan radyal prob ile ölçümü (sol), 1682 sarımlı solenoidin merkezden 10 mm soldan radyal prob ile ölçüm hata oranı (%) (sağ).



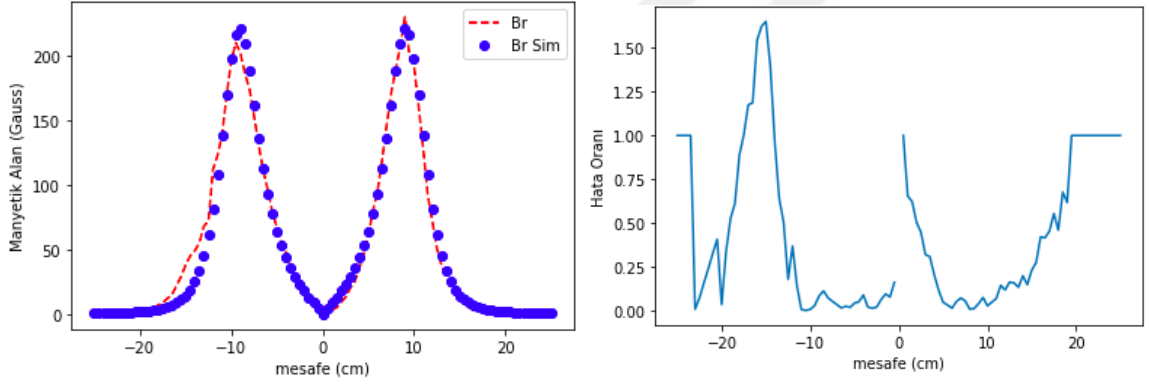
Şekil 3.61: 1682 sarımlı solenoidin merkezden 10 mm soldan eksenel prob ile ölçümü (sol), 1682 sarımlı solenoidin merkezden 10 mm soldan eksenel prob ile ölçüm hata oranı (%) (sağ).



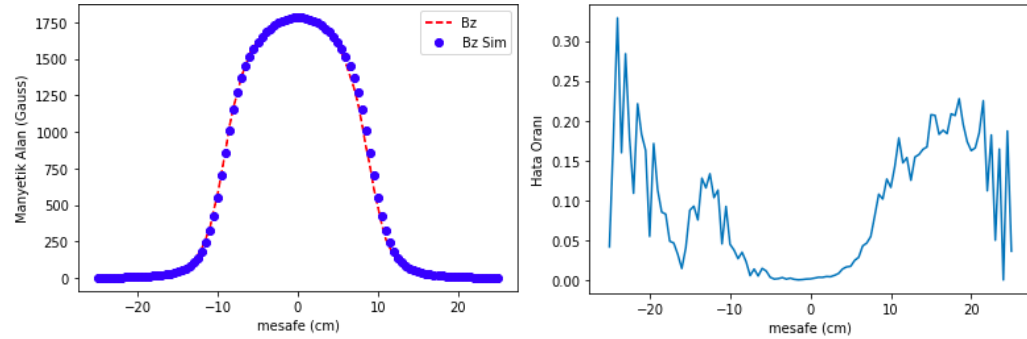
Şekil 3.62: 1682 sarımlı solenoidin merkezden 10 mm aşağıdan radyal prob ile ölçümü (sol), 1682 sarımlı solenoidin merkezden 10 mm aşağıdan radyal prob ile ölçüm hata oranı (%) (sağ).



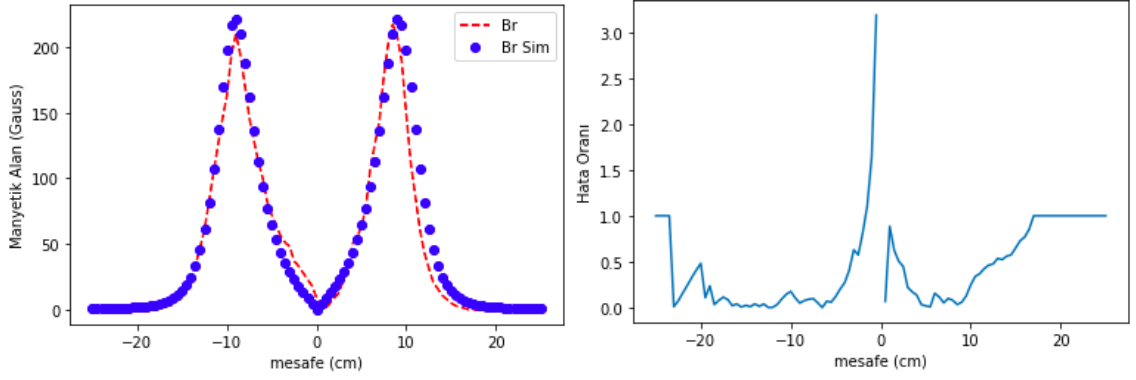
Şekil 3.63: 1682 sarımlı solenoidin merkezden 10 mm aşağıdan eksenel prob ile ölçümü (sol), 1682 sarımlı solenoidin merkezden 10 mm aşağıdan eksenel prob ile ölçüm hata oranı (%) (sağ).



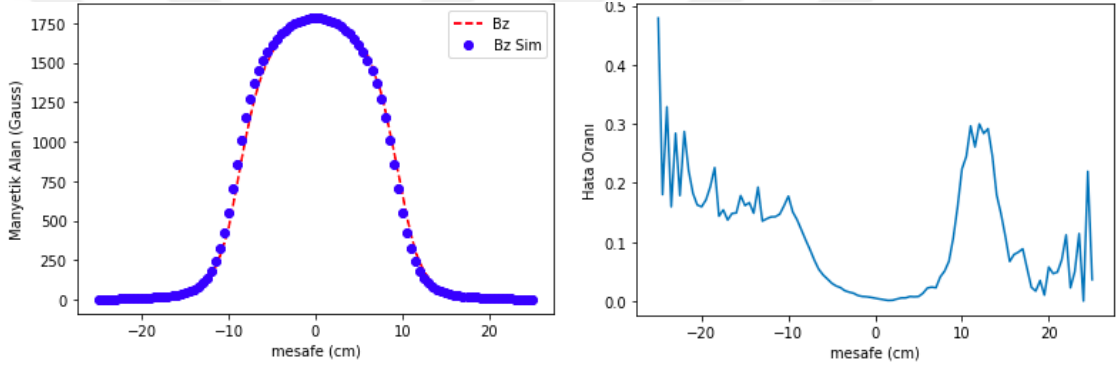
Şekil 3.64: 1682 sarımlı solenoidin merkezden 15 mm yukarıdan radyal prob ile ölçümü (sol), 1682 sarımlı solenoidin merkezden 15 mm yukarıdan radyal prob ile ölçüm hata oranı (%) (sağ).



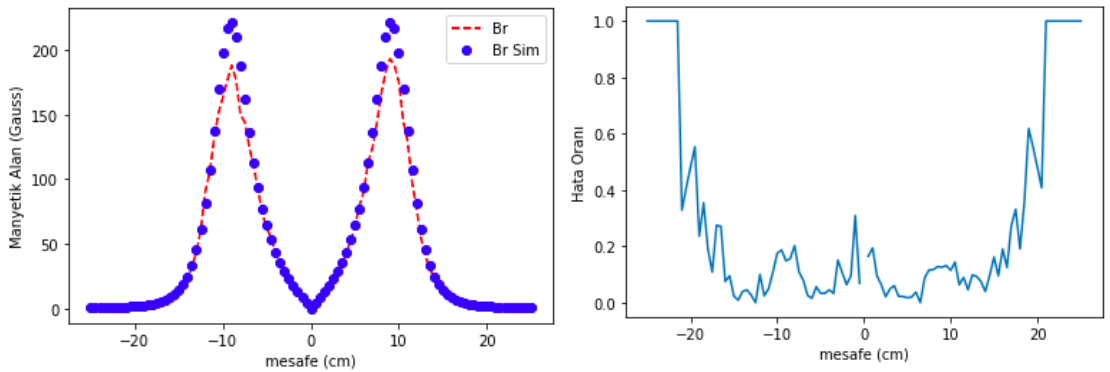
Şekil 3.65: 1682 sarımlı solenoidin merkezden 15 mm yukarıdan eksenel prob ile ölçümü (sol), 1682 sarımlı solenoidin merkezden 15 mm yukarıdan eksenel prob ile ölçüm hata oranı (%) (sağ).



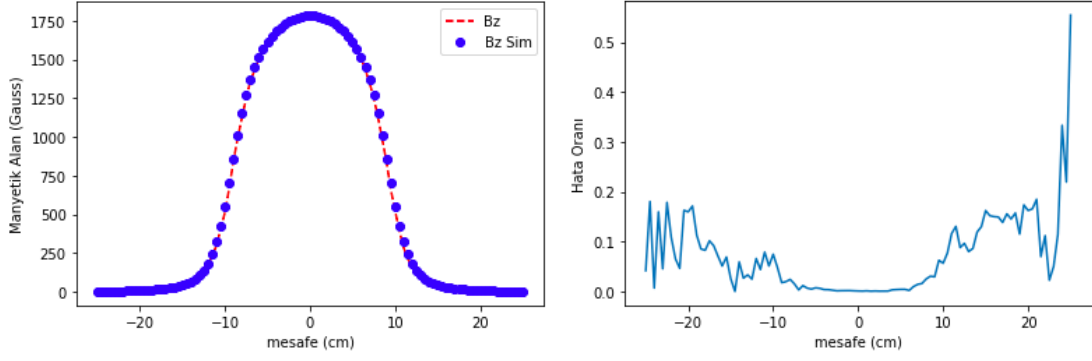
Şekil 3.66: 1682 sarımlı solenoidin merkezden 15 mm sağdan radyal prob ile ölçümü (sol), 1682 sarımlı solenoidin merkezden 15 mm sağdan radyal prob ile ölçüm hata oranı (%) (sağ).



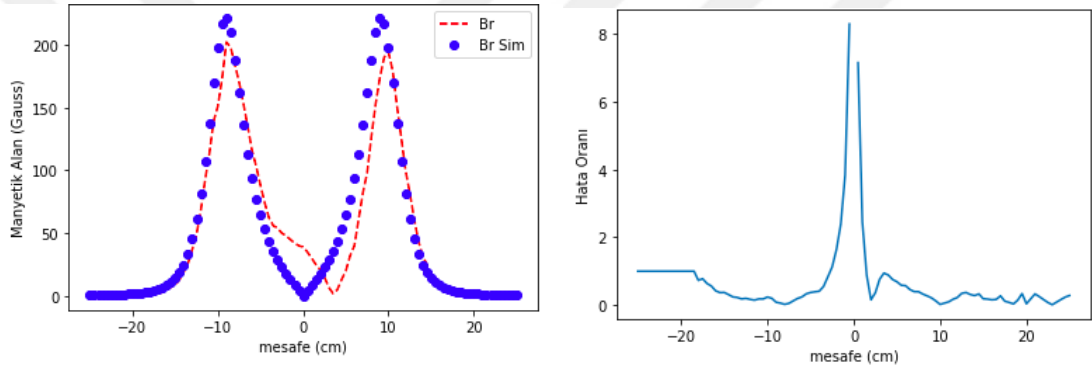
Şekil 3.67: 1682 sarımlı solenoidin merkezden 15 mm sağdan eksenel prob ile ölçümü (sol), 1682 sarımlı solenoidin merkezden 15 mm sağdan eksenel prob ile ölçüm hata oranı (%) (sağ).



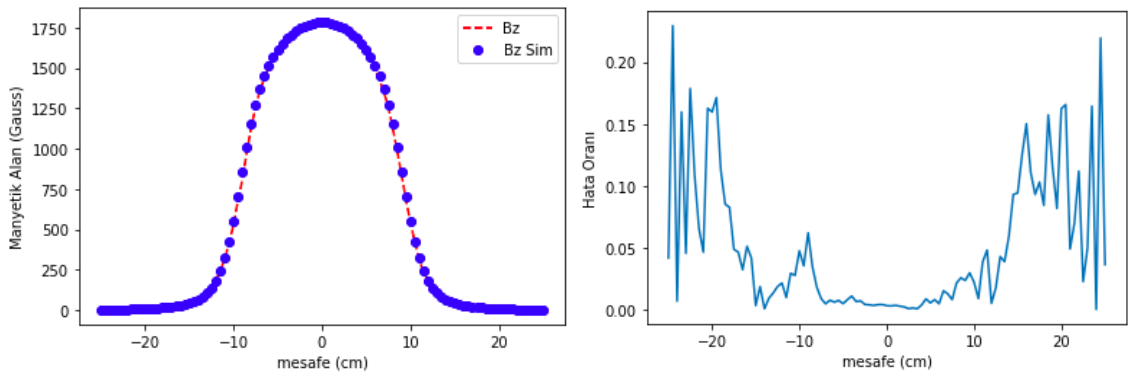
Şekil 3.68: 1682 sarımlı solenoidin merkezden 15 mm soldan radyal prob ile ölçümü (sol), 1682 sarımlı solenoidin merkezden 15 mm soldan radyal prob ile ölçüm hata oranı (%) (sağ).



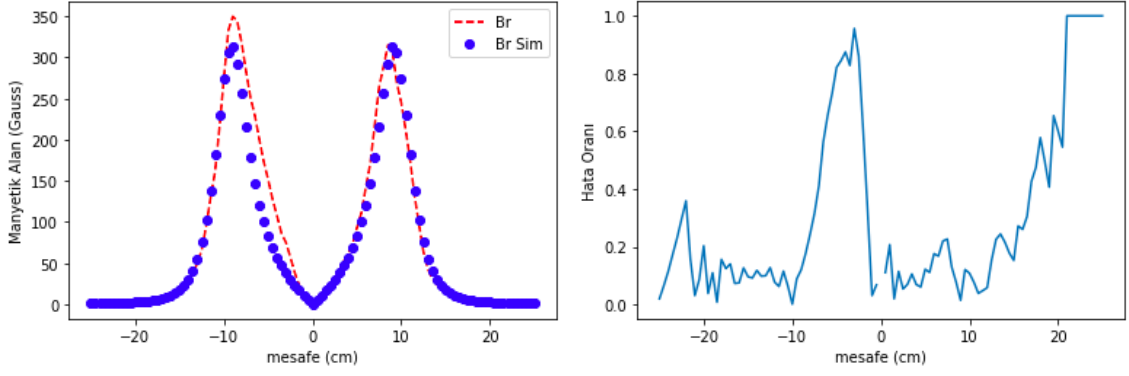
Şekil 3.69: 1682 sarımlı solenoidin merkezden 15 mm soldan eksenel prob ile ölçümü (sol), 1682 sarımlı solenoidin merkezden 15 mm soldan eksenel prob ile ölçüm hata oranı (%) (sağ).



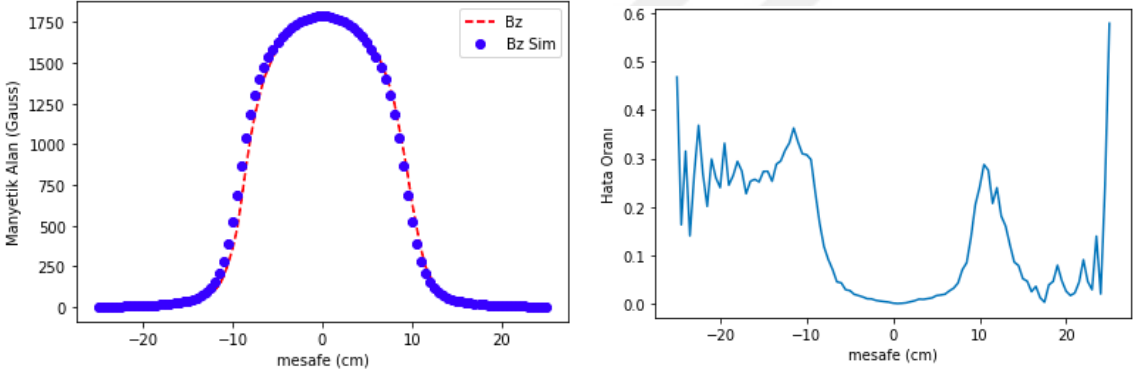
Şekil 3.70: 1682 sarımlı solenoidin merkezden 15 mm aşağıdan radyal prob ile ölçümü (sol), 1682 sarımlı solenoidin merkezden 15 mm aşağıdan radyal prob ile ölçüm hata oranı (%) (sağ).



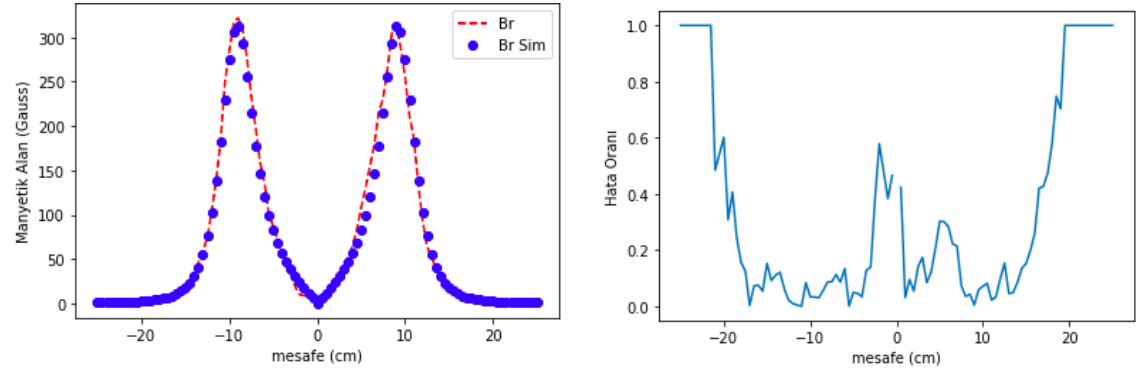
Şekil 3.71: 1682 sarımlı solenoidin merkezden 15 mm aşağıdan eksenel prob ile ölçümü (sol), 1682 sarımlı solenoidin merkezden 15 mm aşağıdan eksenel prob ile ölçüm hata oranı (%) (sağ).



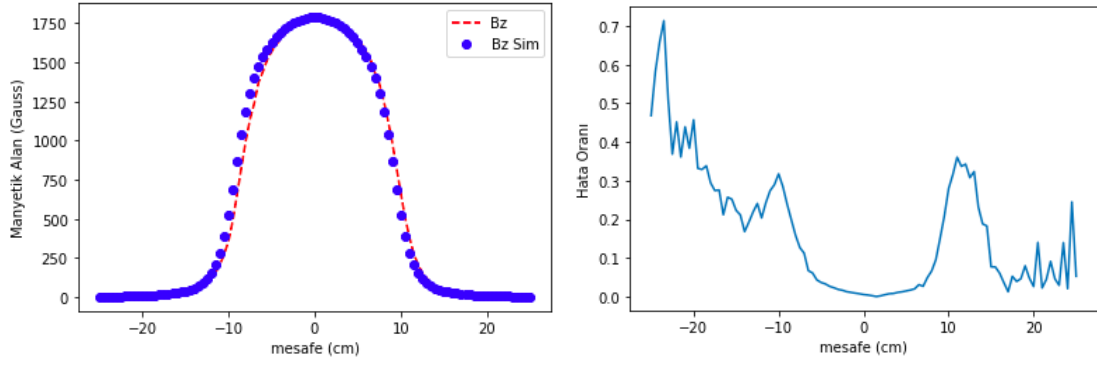
Şekil 3.72: 1682 sarımlı solenoidin merkezden 20 mm yukarıdan radyal prob ile ölçümü (sol), 1682 sarımlı solenoidin merkezden 20 mm yukarıdan radyal prob ile ölçüm hata oranı (%) (sağ).



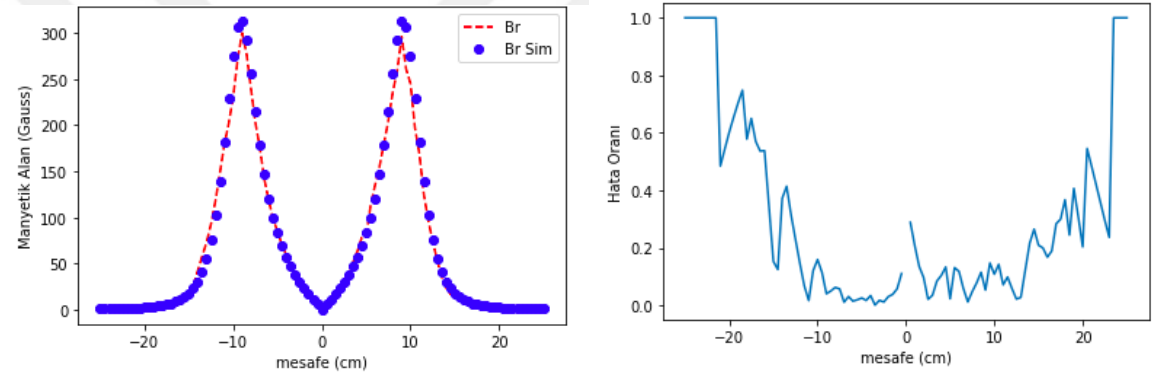
Şekil 3.73: 1682 sarımlı solenoidin merkezden 20 mm yukarıdan eksenel prob ile ölçümü (sol), 1682 sarımlı solenoidin merkezden 20 mm yukarıdan eksenel prob ile ölçüm hata oranı (%) (sağ).



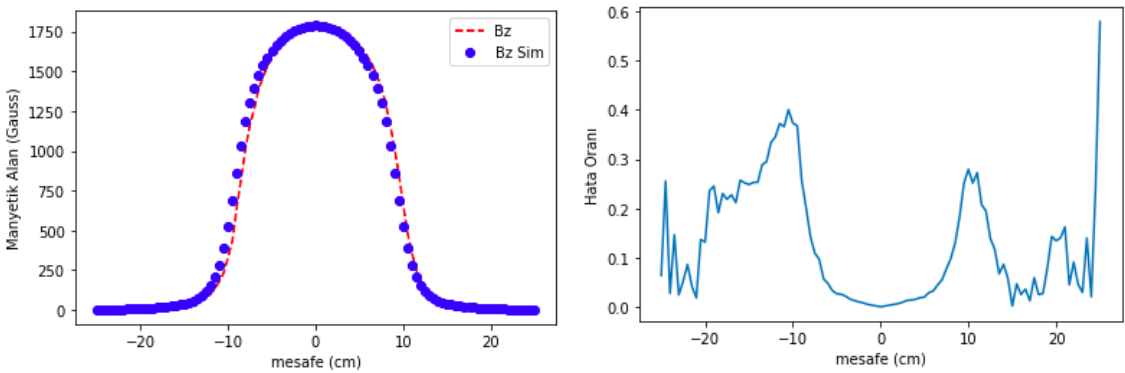
Şekil 3.74: 1682 sarımlı solenoidin merkezden 20 mm sağdan radyal prob ile ölçümü (sol), 1682 sarımlı solenoidin merkezden 20 mm sağdan radyal prob ile ölçüm hata oranı (%) (sağ).



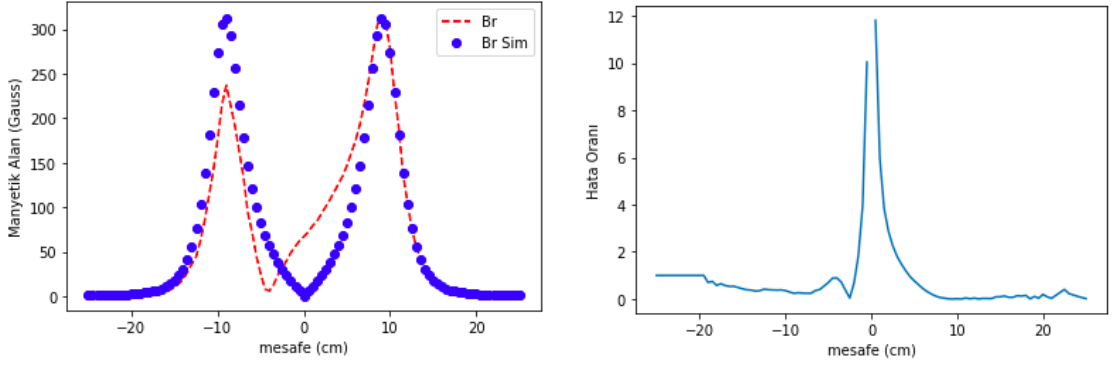
Şekil 3.75: 1682 sarımlı solenoidin merkezden 20 mm sağdan eksenel prob ile ölçümü (sol), 1682 sarımlı solenoidin merkezden 20 mm sağdan eksenel prob ile ölçüm hata oranı (%) (sağ).



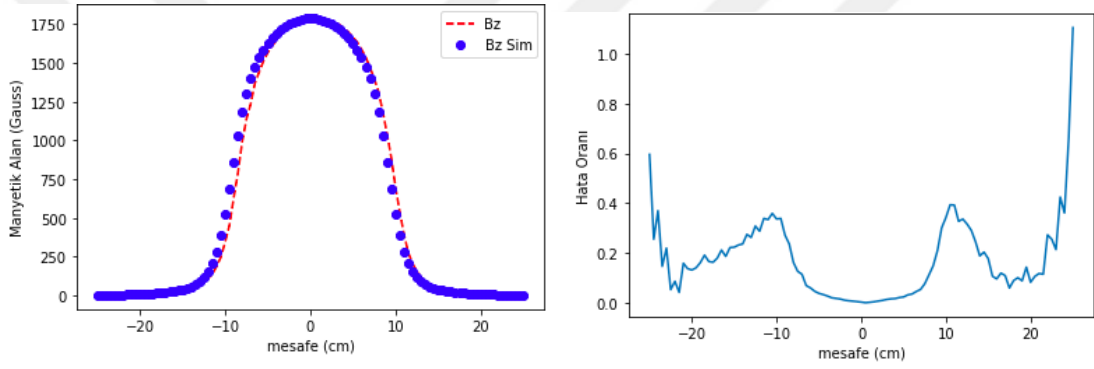
Şekil 3.76: 1682 sarımlı solenoidin merkezden 20 mm soldan radyal prob ile ölçümü (sol), 1682 sarımlı solenoidin merkezden 20 mm soldan radyal prob ile ölçüm hata oranı (%) (sağ).



Şekil 3.77: 1682 sarımlı solenoidin merkezden 20 mm soldan eksenel prob ile ölçümü (sol), 1682 sarımlı solenoidin merkezden 20 mm soldan eksenel prob ile ölçüm hata oranı (%) (sağ).



Şekil 3.78: 1682 sarımlı solenoidin merkezden 20 mm aşağıdan radyal prob ile ölçümü (sol), 1682 sarımlı solenoidin merkezden 20 mm aşağıdan radyal prob ile ölçüm hata oranı (%) (sağ).

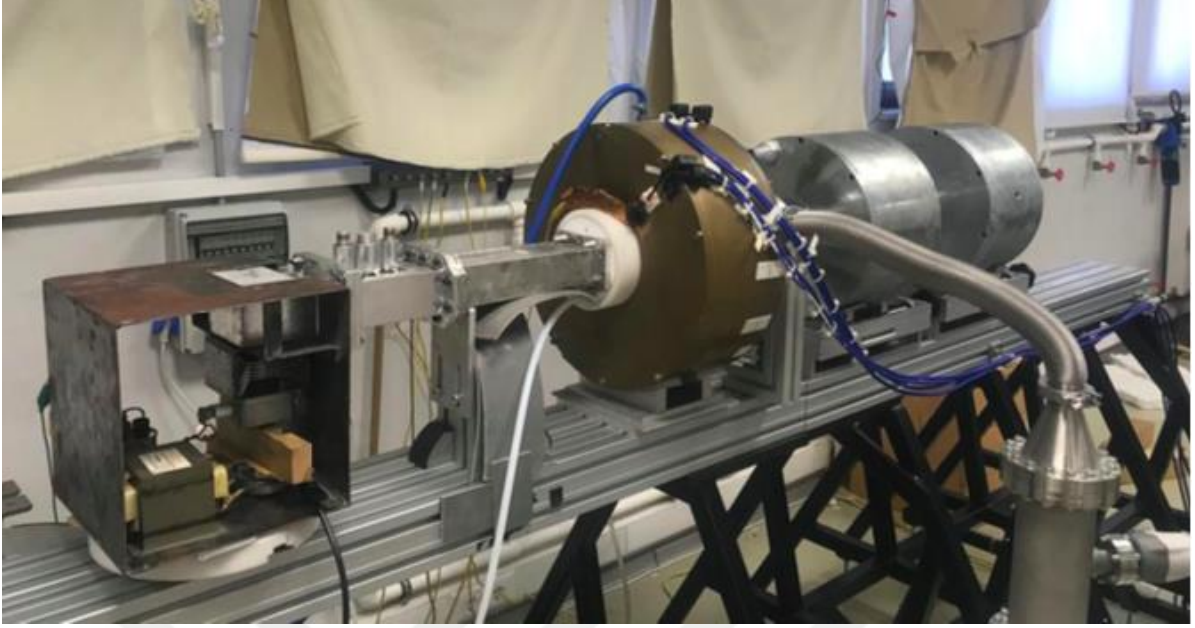


Şekil 3.79: 1682 sarımlı solenoidin merkezden 20 mm aşağıdan eksenel prob ile ölçümü (sol), 1682 sarımlı solenoidin merkezden 20 mm aşağıdan eksenel prob ile ölçüm hata oranı (%) (sağ).

3.2.3. Sistemin Kurulumu

Solenoidlerin manyetik alan profil testleri gerçekleştirildikten sonra DEDA borusunun vakum testlerine başlanmıştır. İstenilen vakum seviyesine ulaşıldıktan sonra DEDA sistemi iyon kaynağı sistemine eklenmeye hazır hale getirilmiştir.

Sisteme öncelikle DEDA hattının ilk solenoidi eklenerek vakum ve yüksek voltaj testleri gerçekleştirilmiştir. Sonrasında ikinci solenoid de sisteme eklenerek vakum ve yüksek voltaj testleri tekrarlanmıştır (Şekil 3.80).



Şekil 3.80: Mikrodalga deşarj iyon kaynağı ve DEDA hattı.

3.3. İyon Sökme Sistemi Tasarımı

İyon kaynağında var olan elektrot yapısı plazma elektrotu ve toprak elektrotu olmak üzere 2 elektrotlu sistemden oluşmaktadır. Plazmadan artı yüklü protonların yanında eksi yüklü elektronlar da çıkmaktadır. Bu çalışma kapsamında, plazmadan çıkan elektronları baskılamak amacıyla bir elektrot daha eklenmiş ve bunun tasarımı IBSimu programında yapılmıştır. Bu bölümde bu çalışmanın detaylarına yer verilecektir.

3.3.1. IBSimu ile İyon Demeti Benzetimi

3.3.1.1. IBSimu

IBSimu (Ion Beam Simulator, İyon Demeti Benzetimcisi), Taneli Kalvas tarafından Lawrence Berkeley Ulusal Laboratuvarı'nda (Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL)) geliştirilen iyon optik bilgisayar benzetim programıdır. 2004 yılında benzer benzetimler yapan bilgisayar programlarının ücretli ve temininin zor olması sonucu bir proje olarak geliştirilmeye başlanan bu program 2009 yılında tamamlanmış şekilde kullanıma sunulmuştur. Bu programla elektrot tasarımı ve elektrik alan hesaplamaları tek boyutlu, iki boyutlu, üç boyutlu ve silindirik simetri geometri kullanarak yapılabilmektedir. Ayrıca hem pozitif hem de negatif iyon sökme sistemi tasarımı yapabilmekte, iyon demetinin yayınımlı hesaplanabilmekte, aynı zamanda

benzetimlerde uzay yükü hesaplamalarını da dahil etmektedir. Bu programda C++ dili kullanılmaktadır [26].

Burada uygun özellikte demetin mikrodalga deşarj iyon kaynağı plazma odasından çekilerek demet hattına aktarılması hedeflenmektedir. Hedeflenen uygun özellikte demet, RFQ girişinde $0,2\pi$ mm.mrad'dan düşük yayınıma sahip bir demettir. Bu tezde en uygun çapta, dağılmadan ilerleyen ve herhangi bir kayıp olmadan elde edeceğimiz demet için bir tasarım geliştirilmiştir [27].

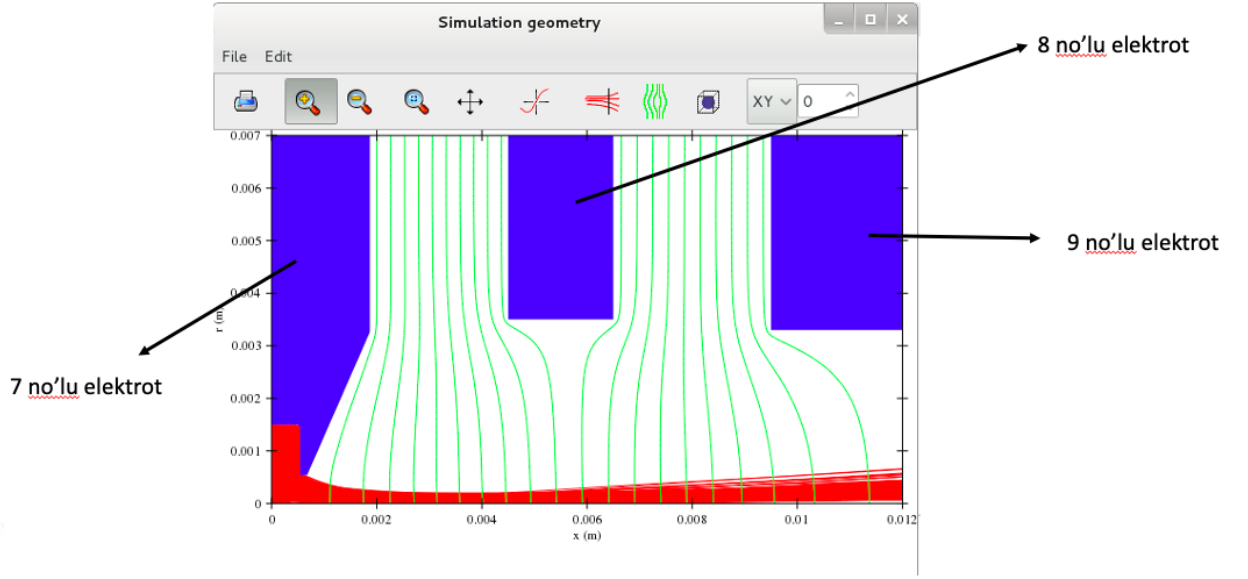
IBSimu ile yapılacak bir tasarımda tasarımın çalıştırılması için önce MakeFile ve cpp uzantılı dosyaların bilgisayarda kullanılabilir hale getirilmesi gerekir. Bu dosyalar hazır hale geldikten sonra Terminal açılır.

```
$export LD_LIBRARY_PATH= / home / archuser /lib
```

```
$LD_LIBRARY_PATH= / home / archuser /lib
```

```
$echo LD_LIBRARY_PATH
```

Bu üç komut terminalde girildikten sonra, Makefile ve cpp uzantılı dosyaların olduğu klasöre girilir. Eğer daha önce çalıştırılmış bir program yeniden çalıştırılıyorsa önce “make clean”, sonrasında “make” komutu , dosya ilk defa çalıştırılıyorsa ise yalnızca “make” komutu girilir. Sonrasında ise “./dosyaadi” girilir.



Şekil 3.81: IBSimu üç elektrotlu sistem örneği ve isimlendirilmesi.

Şekil 3.81’de mavi renkle gösterilmekte olan büyük dikdörtgensel şekiller elektrotları gösterir. 7 no’lu elektrot plazma elektrotu, 8 ve 9 no’lu elektrotlar ise toprak elektrotları olarak isimlendirilmektedir. X ekseninde yer alan ve kırmızı renkle ifade edilen kısım akım yoğunluğunu ve elektrotlar arasında bulunan yeşil çizgiler ise elektrik alan çizgilerini göstermektedir. Burada 7 nolu elektrotun potansiyeli 20×10^3 V, 8 nolu elektrotun potansiyeli 12×10^3 V ve 9 nolu elektrotun potansiyeli 20×10^3 V’tur.

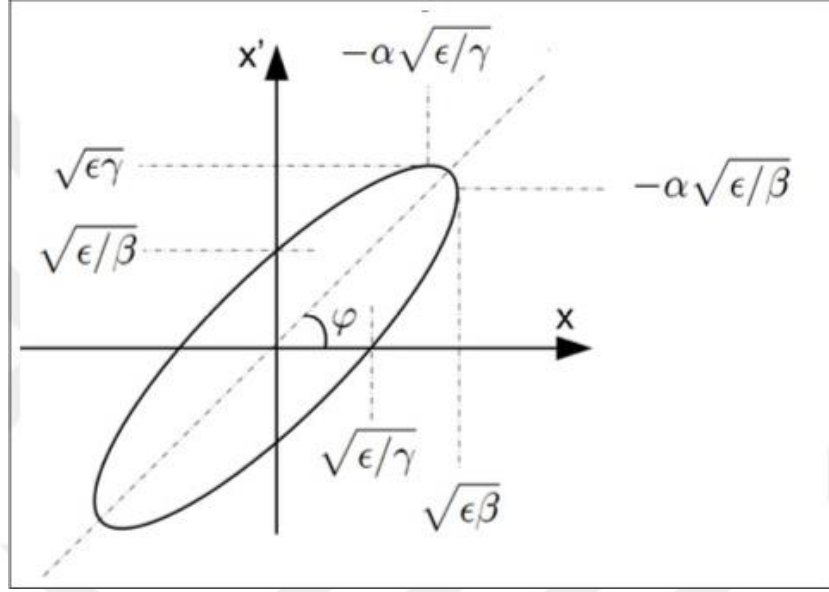
3.3.1.2. Yayınım (Emittance)

Bir doğrusal parçacık hızlandırıcısında demeti oluşturan parçacıkların, hızlandırıcı boyunca demetin etkisi altında kalmış olduğu odaklayıcı kuvvetler sebebiyle konum ve momentum değerlerinin faz alanında eliptik bir alan oluşturmaktadır. Buradan hareketle faz uzayında demeti ifade edecek bir elips tanımlanır (Şekil 3.82) ve bu elips demetin yayılımı (emittance) olarak adlandırılır [22].

Yayınım hesabı şu şekilde gerçekleşmektedir:

$$\frac{A}{\pi} = \beta x'^2 + 2\alpha x x' + \gamma x^2 = \varepsilon \dots \dots \dots (3.2)$$

Burada x, konum; x' , açı; A, alan; ε , yayılımı ifade etmektedir.



Şekil 3.82: Faz uzayında demeti tanımlayan elips.

3.3.1.3. Uzak Yükü

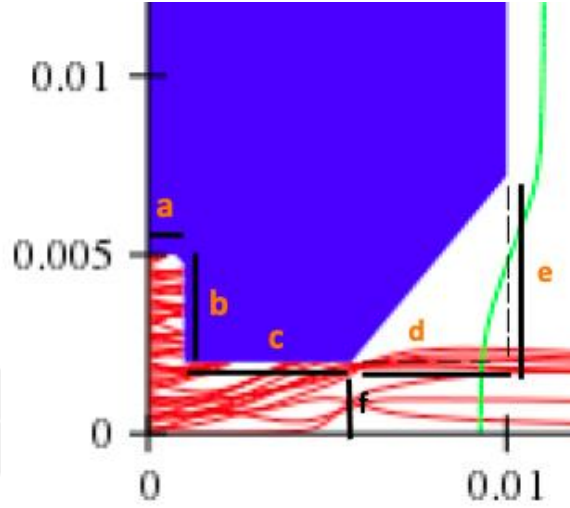
Uzak yükü, çok parçacıklı bir sistemdeki Coulomb etkileşiminin özel bir durumudur. Böyle bir sistemde Coulomb etkileşiminin net etkisi iki şekilde sınıflandırılabilir: yakın parçacık karşılaşmalarının neden olduğu tek parçacık saçılması ve parçacık dağılımının ürettiği parçacıkların yalnızca büyük mesafelerde önemli ölçüde değişen, kendi kendine alanın hakim olduğu uzak yükü etkisi [29].

3.3.1.4. Pierce Geometrisi

İyon kaynaklarının iyon sökme sisteminde yer alan elektrot yapısından eğimli yapıda olan elektrot odaklama elektrotu olarak bilinmektedir. Bu elektrotun demeti fazla odaklaması veya yeterince odaklayamaması istenmeyen bir durumdur. Bu nedenle elektrotun eğiminin kaç derecede olması gerektiği önemli bir konudur ve bu açı, Pierce geometrisi kullanılarak hesaplanmaktadır. Bu hesaplama yapılırken Laplace denkleminin çözümü kullanılmaktadır ve elektronlar sabit yüzeylerden yayılabilirken iyonlar sabit yüzeyden yayılamadığından bu çözüm yalnızca elektronlar için kullanılmaktadır, iyonlar için çözümü bulunmamaktadır. İyonlarla yapılan çalışmalarda elektronlar için yapılan hesaplamalar baz alınmaktadır. [28]. Buradan yola çıkarak yüzeyden yayılan elektronlar göz önünde bulundurulduğunda plazma elektrotunun yapacağı en iyi açı $67,5^\circ$ olarak hesaplanmıştır.

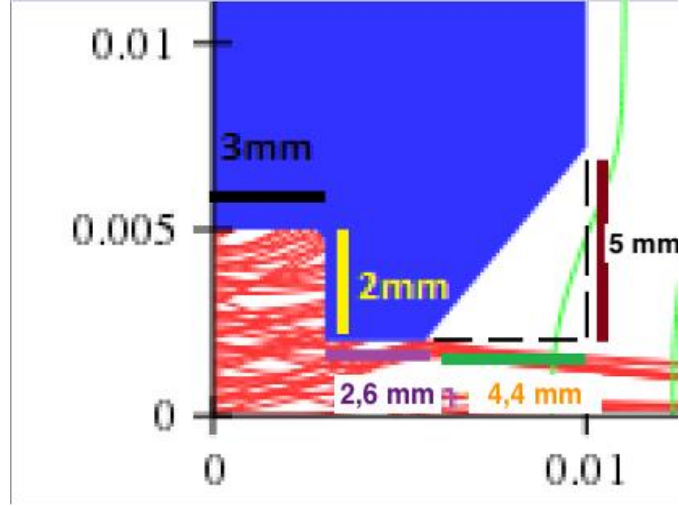
3.3.1.5. İyon Demeti Benzetimi

İyon demeti tasarımı için yapılan çalışmalara ilk olarak 7 no'lu plazma elektrotunun parametrelerini değiştirerek demet hareketinin, demet çapının, demet akımının ve yayınının tasarım içerisinde en iyi olduğu konumu bulmak amacıyla denemeler yapılarak başlandı.



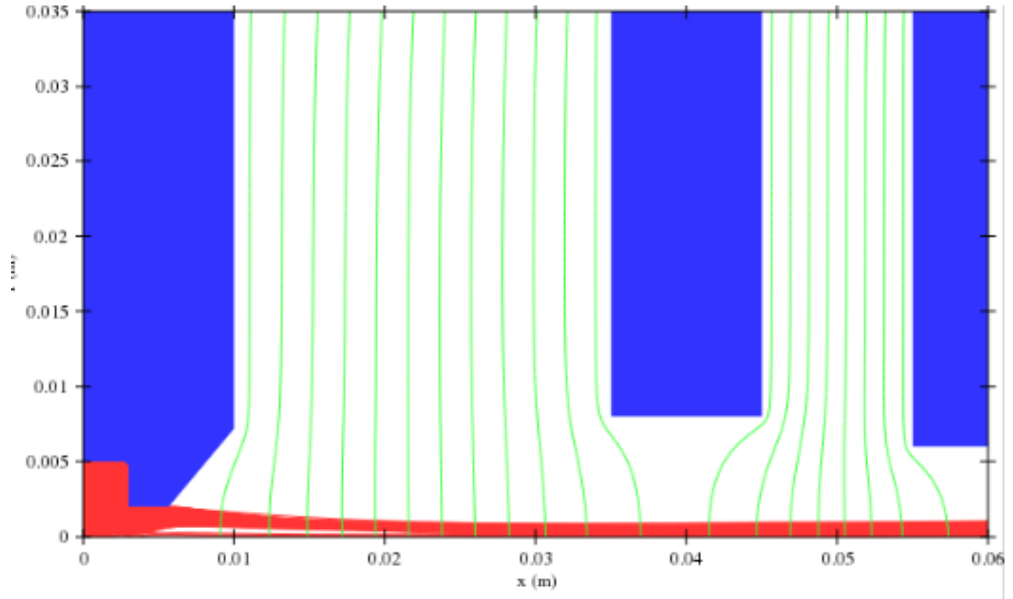
Şekil 3.83: 7 no'lu plazma elektrotu ve değişkenleri.

Bu çalışmada öncelikle 7 no'lu plazma elektrotunun her bir parametresi tek tek değiştirilerek alınan sonuçlar incelenmektedir. Şekilde bu parametreler harflendirilmiştir: a harfi ile gösterilen değişken elektrot başlangıcının genişliğini belirler. Burada demetin nereden başlayacağı belirlenir. b harfi ile gösterilen değişken elektrotun uç kısmının başlangıç ve bitiş noktalarının arasını ifade etmektedir. c harfi ile gösterilmekte olan değişken demetin başlangıcı ile eğimin başlangıcı arasındaki bölgeyi oluşturan kalınlığı ifade etmektedir. d ve e değişkenleri elektrotun eğimi üzerinde belirleyicidir. f değişkeni ise elektrot ile x eksenindeki mesafeyi göstermektedir (Şekil 3.83).



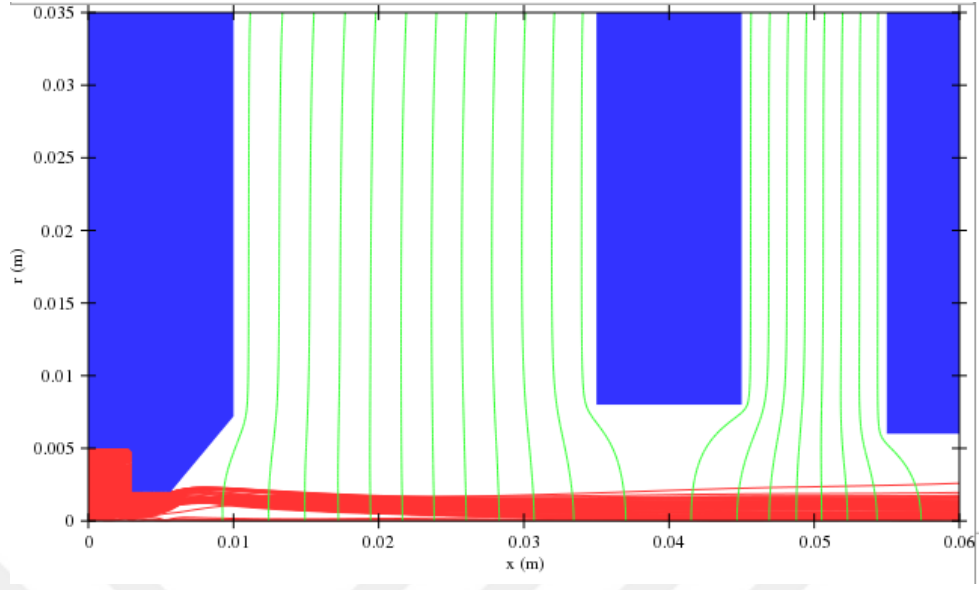
Şekil 3.84: 7 no'lu elektrotun uzunlukları.

Şekil 3.84'te 7 no'lu elektrot üzerinde harflerle isimlendirilmiş olan parametrelerin başlangıç değerleri görülmektedir. Başlangıç durumunda $a = 3 \text{ mm}$, $b = 2 \text{ mm}$, $c = 2,6 \text{ mm}$, $d = 4,4 \text{ mm}$, $e = 5 \text{ mm}$ ve $f = 2 \text{ mm}$ olarak belirlenmiştir.



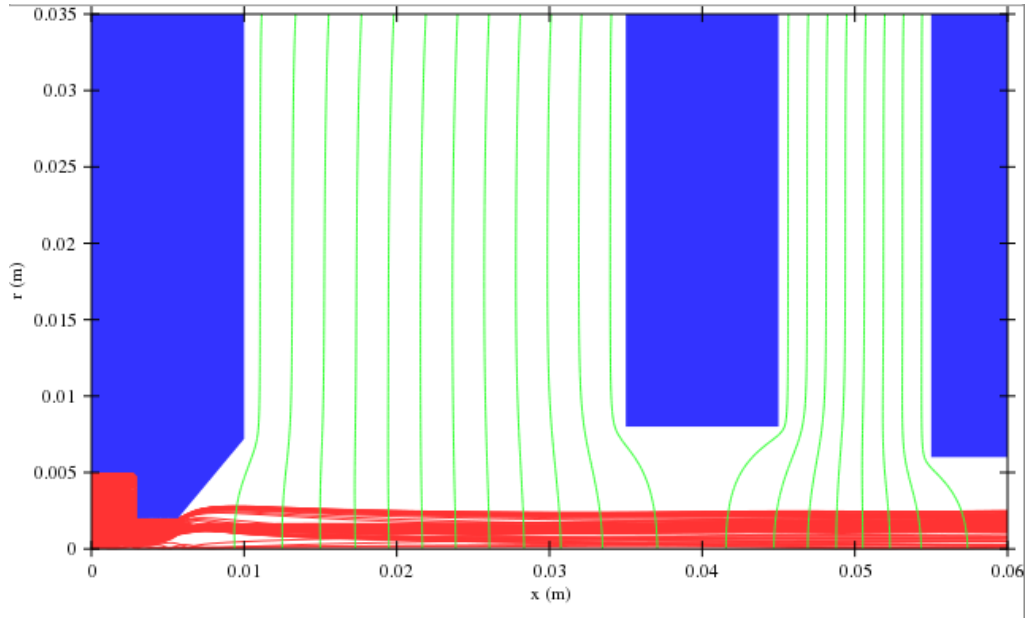
Şekil 3.85: 7 no'lu elektrot için $a = 3 \text{ mm}$ ve $J = 100 \text{ A/m}^2$ olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

Şekil 3.85'ten görüleceği üzere başlangıçta $a = 3 \text{ mm}$, $J = 100 \text{ A/m}^2$ olacak şekilde demet parametreleri ayarlanmış buna göre tasarım optimize edilmeye başlanmıştır. Burada J akım yoğunluğunu ifade etmektedir.



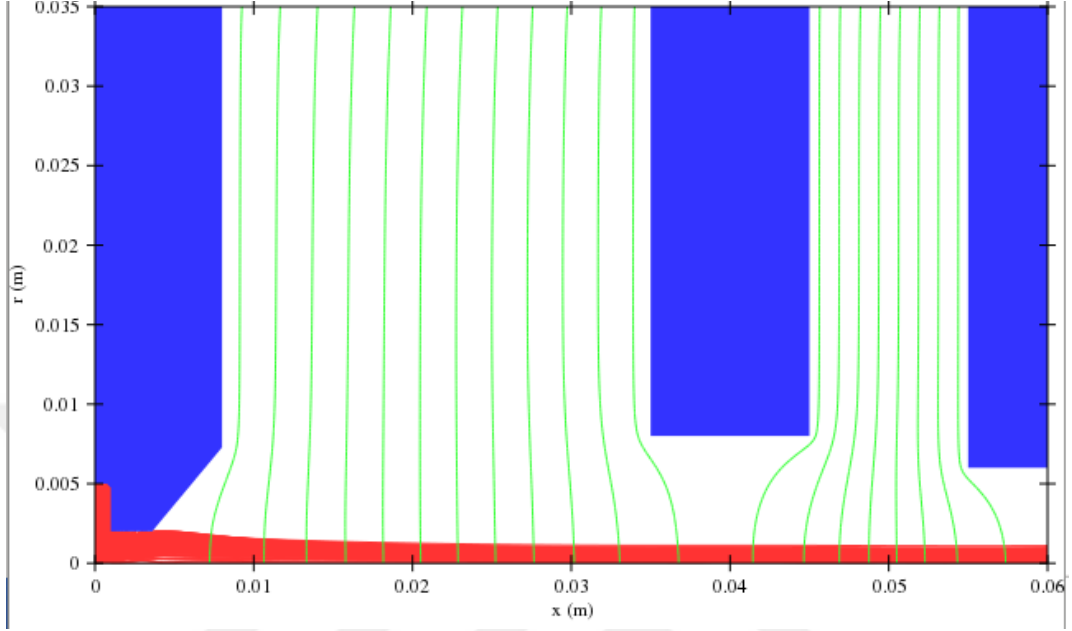
Şekil 3.86: 7 no'lu elektrot için $a = 3 \text{ mm}$ ve $J = 200 \text{ A/m}^2$ olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

Şekil 3.86'da de görüleceği üzere değişiklikler sırasında yalnızca parametrenin boyu değil, akım yoğunluğunun demet davranışı üzerindeki etkileri de incelenmektedir. a parametresi 3mm 'de tutularak akım yoğunluğu 200 A/m^2 'ye çıkarılmıştır.



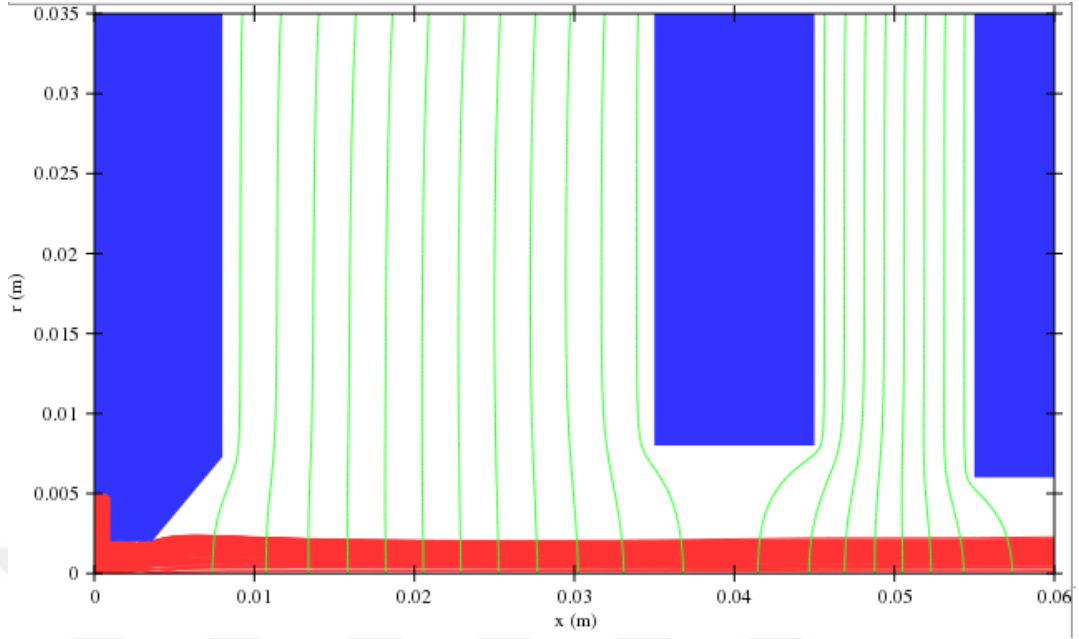
Şekil 3.87: 7 no'lu elektrot için $a = 3 \text{ mm}$ ve $J = 300 \text{ A/m}^2$ olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

Şekil 3.87’de a parametresi 3 mm’de tutularak, akım yoğunluğu 300 A/m^2 ’ye çıkarıldığında demetin davranışı incelenmektedir.



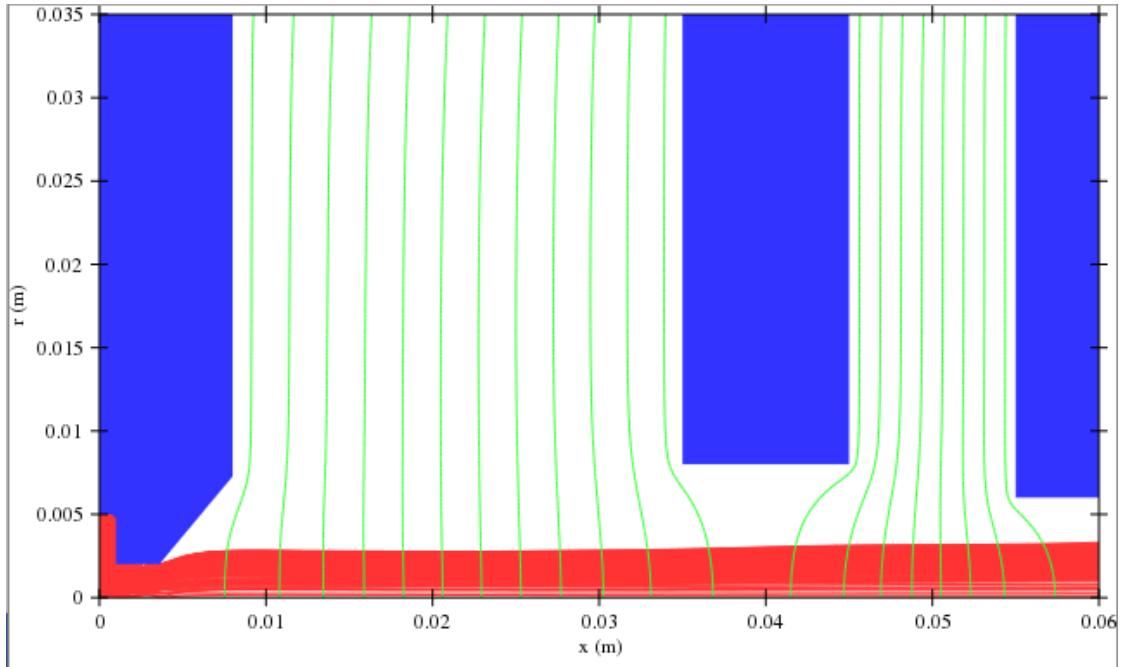
Şekil 3.88: 7 no’lu elektrot için $a = 1 \text{ mm}$ ve $J = 100 \text{ A/m}^2$ olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

Şekil 3.88’de a parametresi 1mm olarak değiştirilmiş ve akım yoğunluğu 100 A/m^2 olarak ayarlanmıştır. Bu çalışmada $a = 3 \text{ mm}$ ’de farklı akım yoğunlukları için gerçekleştirilen tasarımlar, farklı akım yoğunlukları için $a = 1 \text{ mm}$ ’de gerçekleştirilmiş ve bu farklı tasarımların karşılaştırılmaları yapılmış ve en iyi değerin belirlenmesi hedeflenmiştir.



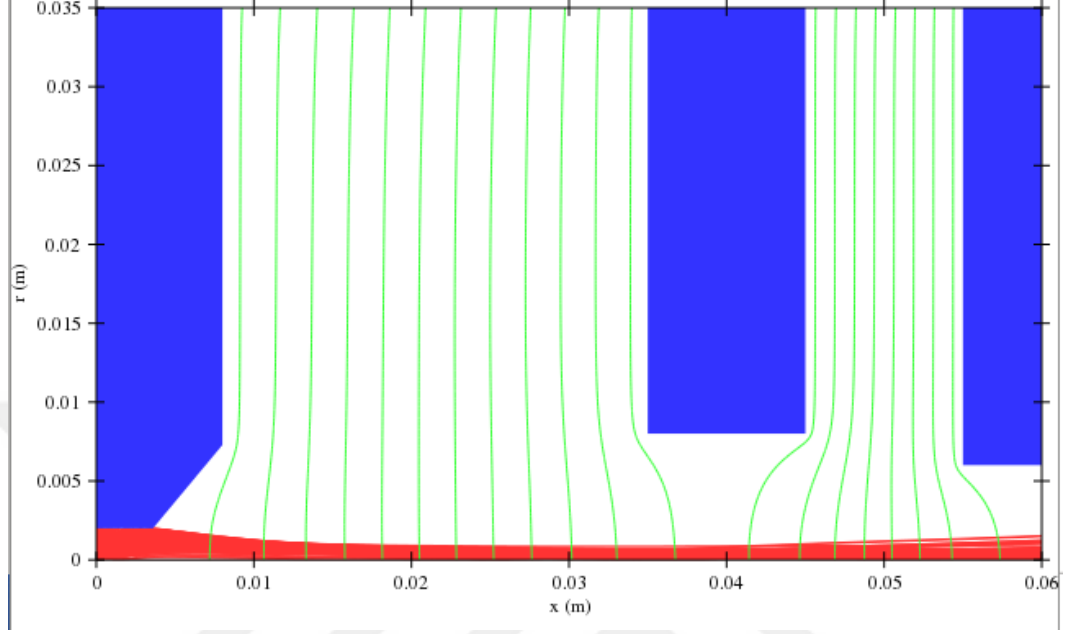
Şekil 3.89: 7 no'lu elektrot için $a = 1$ mm ve $J = 200$ A/m² olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

Şekil 3.89'da a parametresi 1 mm'de tutularak ve akım yoğunluğu 200 A/m²'ye çıkarılarak demetin davranışı incelenmektedir.



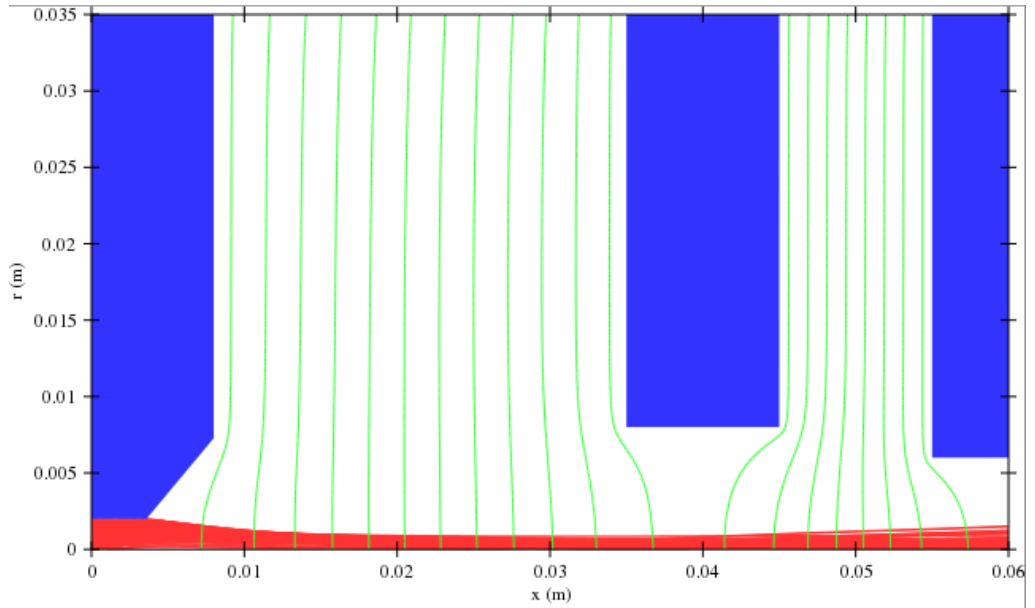
Şekil 3.90: 7 no'lu elektrot için $a = 1$ mm ve $J = 300$ A/m² olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

Şekil 3.90’da a parametresi 1 mm’de tutularak ve akım yoğunluğu 300 A/m^2 ’ye çıkarıldığında demet davranışı üzerindeki etkiler görülmektedir.



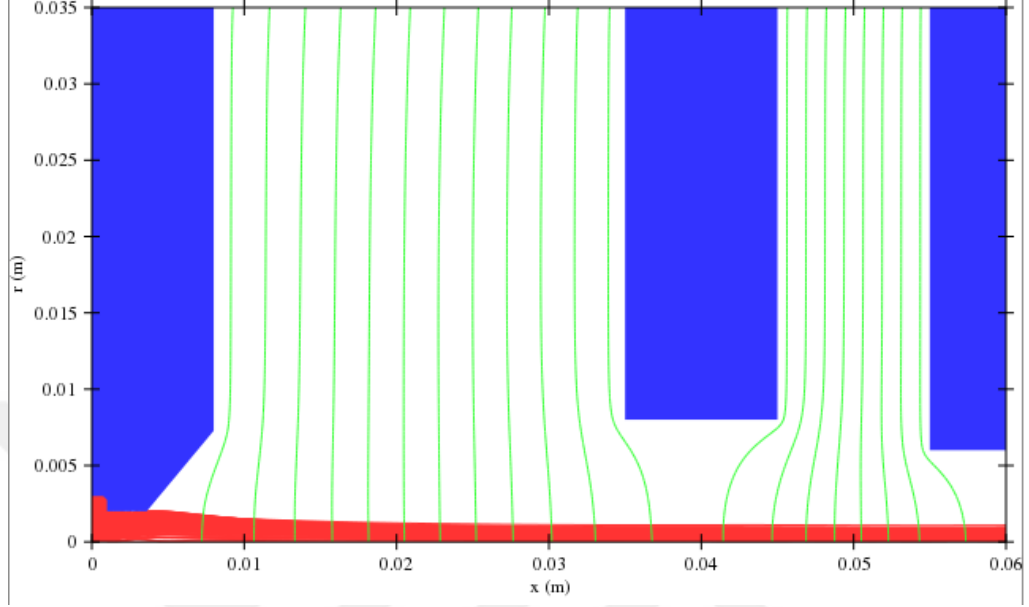
Şekil 3.91: 7 no’lu elektrot için $b = 1 \text{ mm}$ olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

a parametresi için en iyi değer seçildikten sonra b parametresini en iyi hale getirmek için benzetimlere devam edilmiştir. Şekil 3.91’de $a = 1 \text{ mm}$ ’de sabit tutulurken $b = 1 \text{ mm}$ alınıp demetin davranışı incelenmiştir.



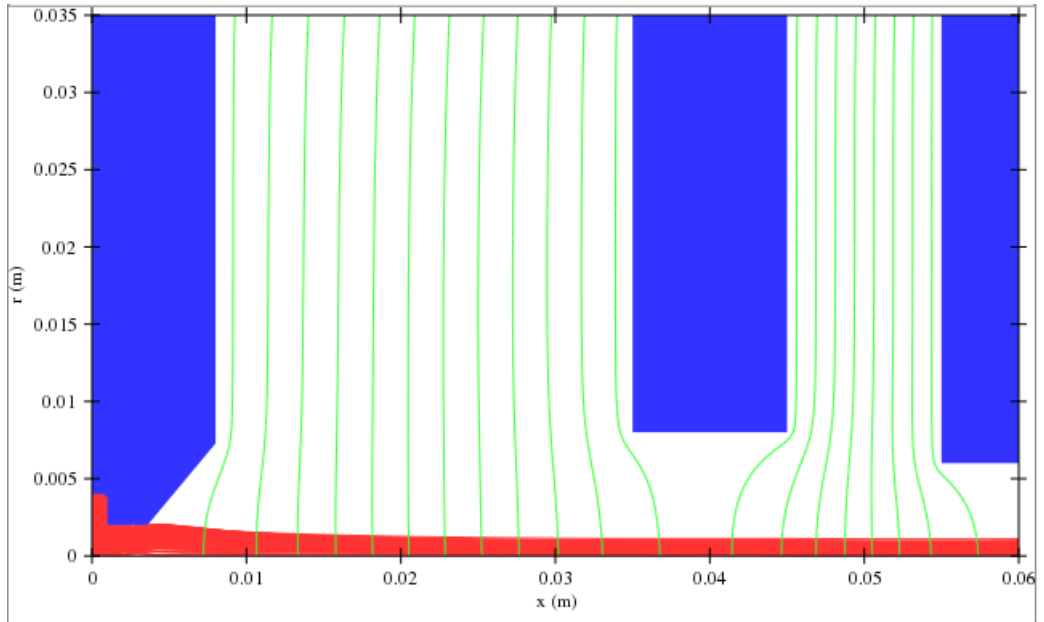
Şekil 3.92: 7 no’lu elektrot için $b = 2 \text{ mm}$ olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

Şekil 3.92’de görüldüğü üzere $a = 1 \text{ mm}$ ’de sabit tutulurken $b = 2 \text{ mm}$ olarak değiştirilerek demetin davranışı incelenmiştir.



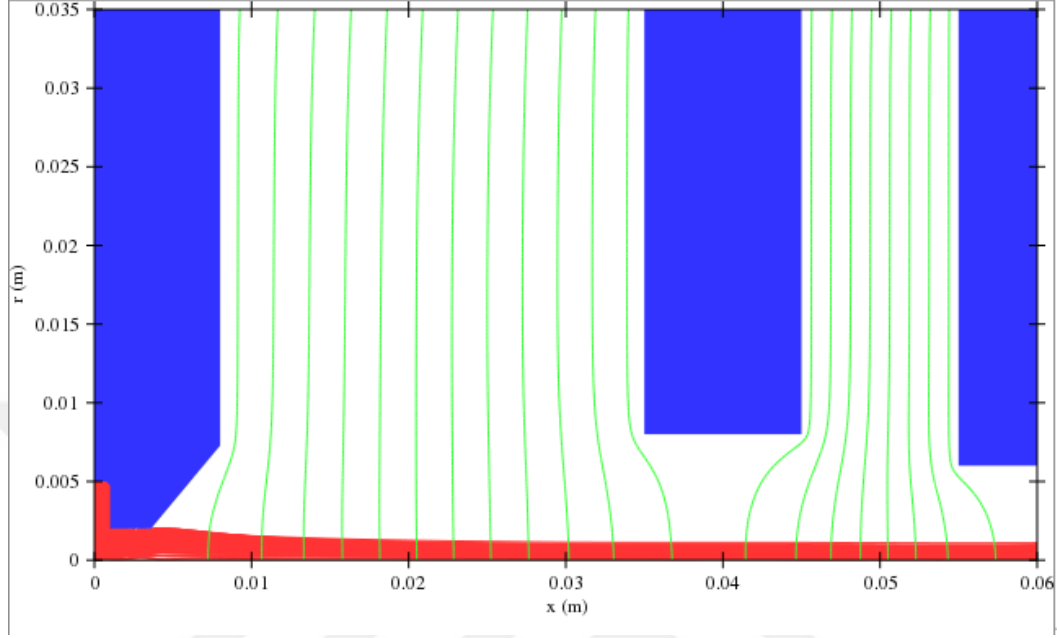
Şekil 3.93: 7 no’lu elektrot için $b = 3 \text{ mm}$ olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

Şekil 3.93’te $a = 1 \text{ mm}$ ’de sabit tutulurken $b = 3 \text{ mm}$ olarak ayarlanıp demetin davranışı incelenmiştir.



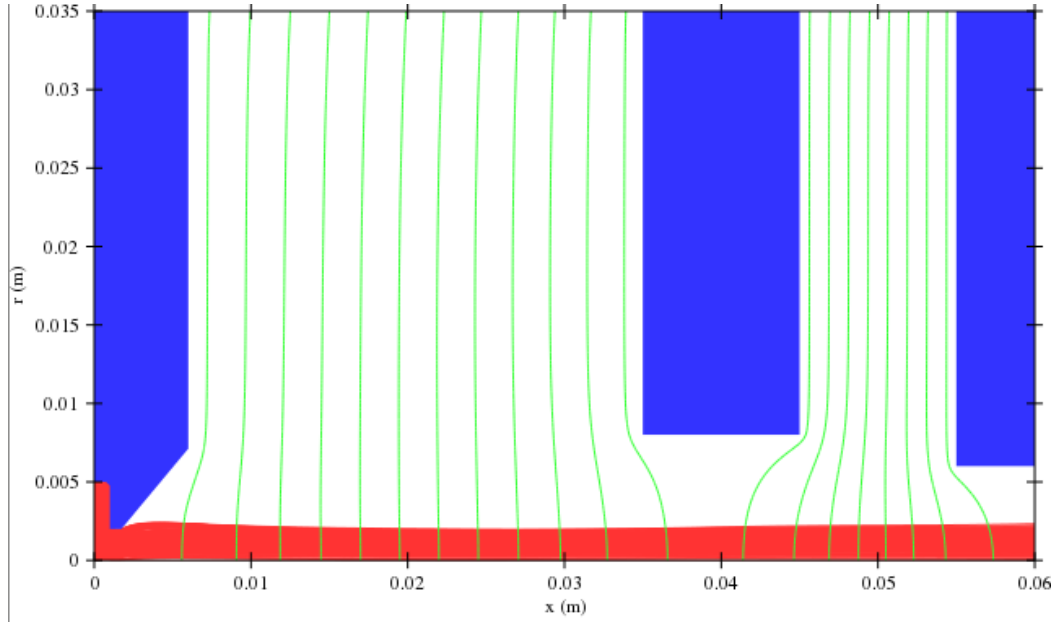
Şekil 3.94: 7 no’lu elektrot için $b = 4 \text{ mm}$ olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

Şekil 3.94'te $a = 1 \text{ mm}$ 'de sabit tutulurken $b = 4 \text{ mm}$ olarak ayarlanıp demetin davranışı incelenmiştir.



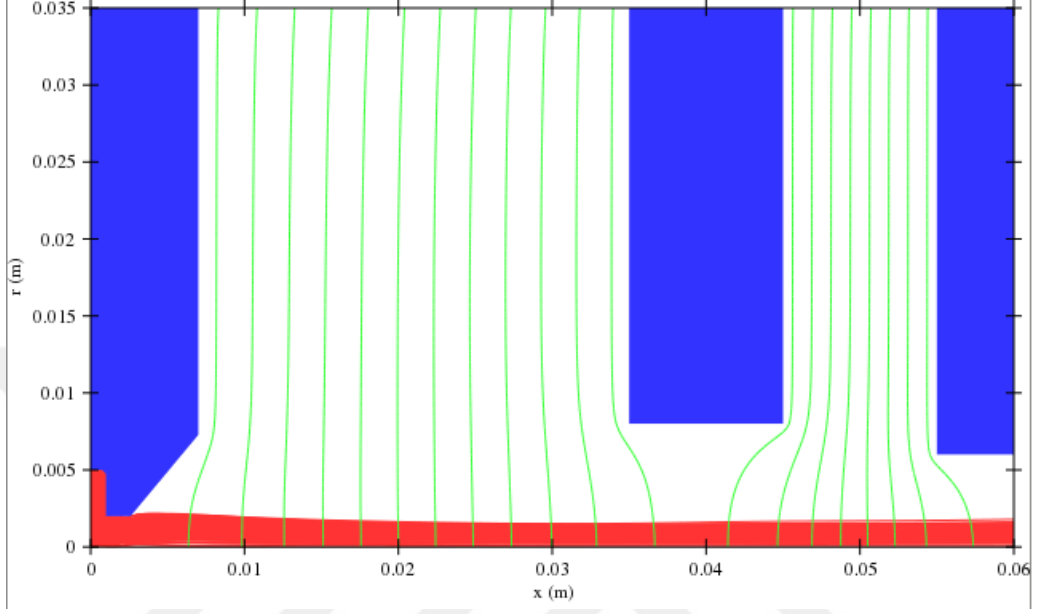
Şekil 3.95: 7 no'lu elektrot için $b = 5 \text{ mm}$ olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

Şekil 3.95'te $a = 1 \text{ mm}$ 'de sabit tutulurken $b = 5 \text{ mm}$ olarak ayarlanıp demetin davranışı incelenmiştir.



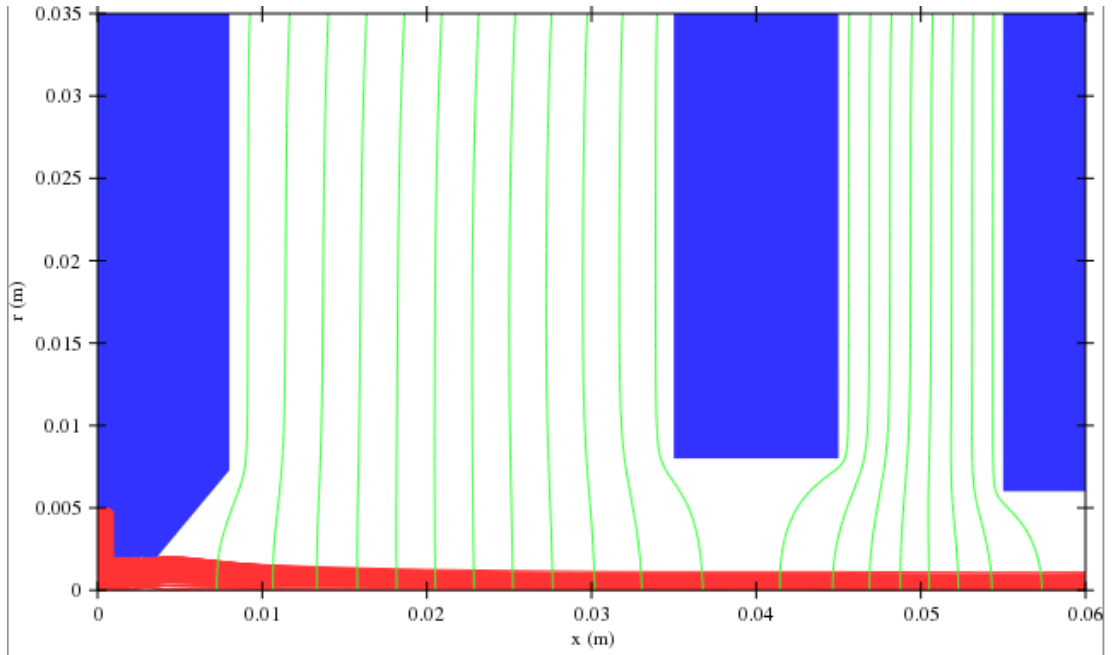
Şekil 3.96: 7 no'lu elektrot için $c = 0,6 \text{ mm}$ olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

a parametresi 1 mm ve b parametresi 3mm olarak belirlendikten sonra c parametresinde değişiklikler yapılarak etkileri incelenmeye başlanmıştır. Şekil 3.96’da ilk aşamada c parametresi 0,6 mm olarak ayarlanmıştır.



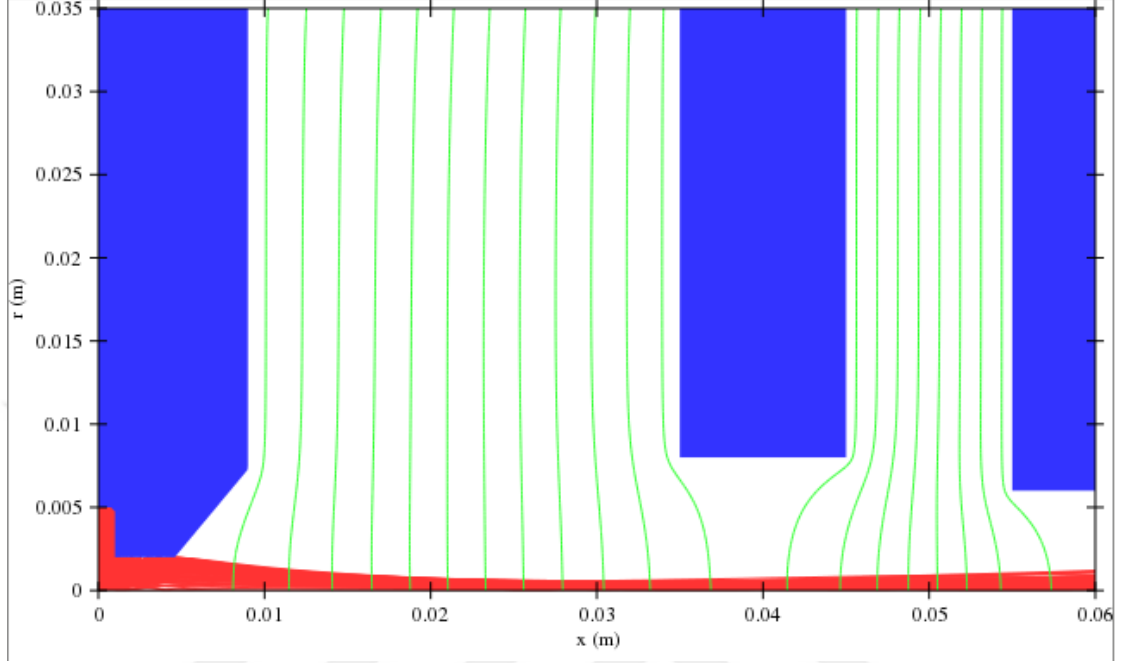
Şekil 3.97: 7 no’lu elektrot için $c = 1,6$ mm olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

Şekil 3.97’de $a = 1$ mm ve $b = 3$ mm’de sabit tutularak $c = 1,6$ mm olarak ayarlandığında demet davranışı üzerindeki etkiler görülmektedir.



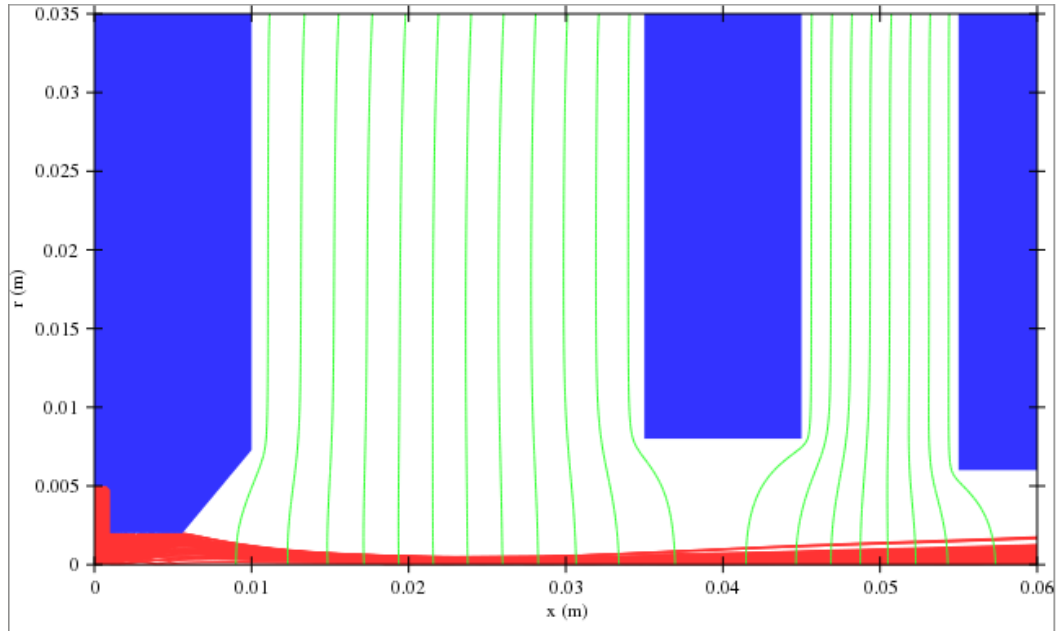
Şekil 3.98: 7 no’lu elektrot için $c = 2,6$ mm olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

Şekil 3.98’de $a = 1$ mm ve $b = 3$ mm’de sabit tutularak $c = 2,6$ mm olarak ayarlandığında demet davranışı üzerindeki etkiler görülmektedir.



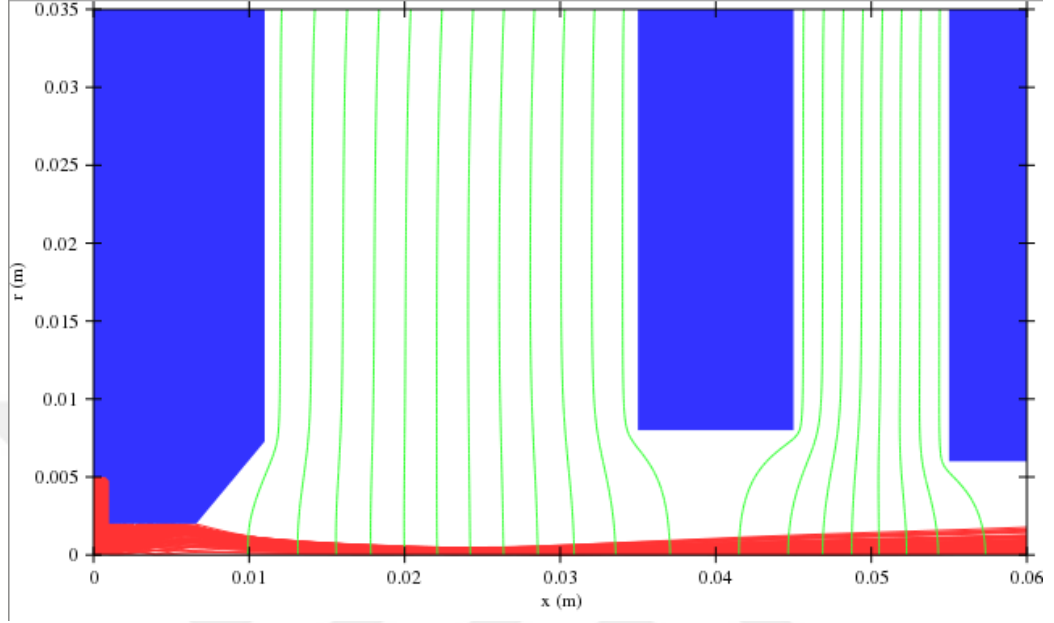
Şekil 3.99: 7 no’lu elektrot için $c = 3,6$ mm olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

Şekil 3.99’da $a = 1$ mm ve $b = 3$ mm’de sabit tutularak $c = 3,6$ mm olarak ayarlandığında demet davranışı üzerindeki etkiler görülmektedir.



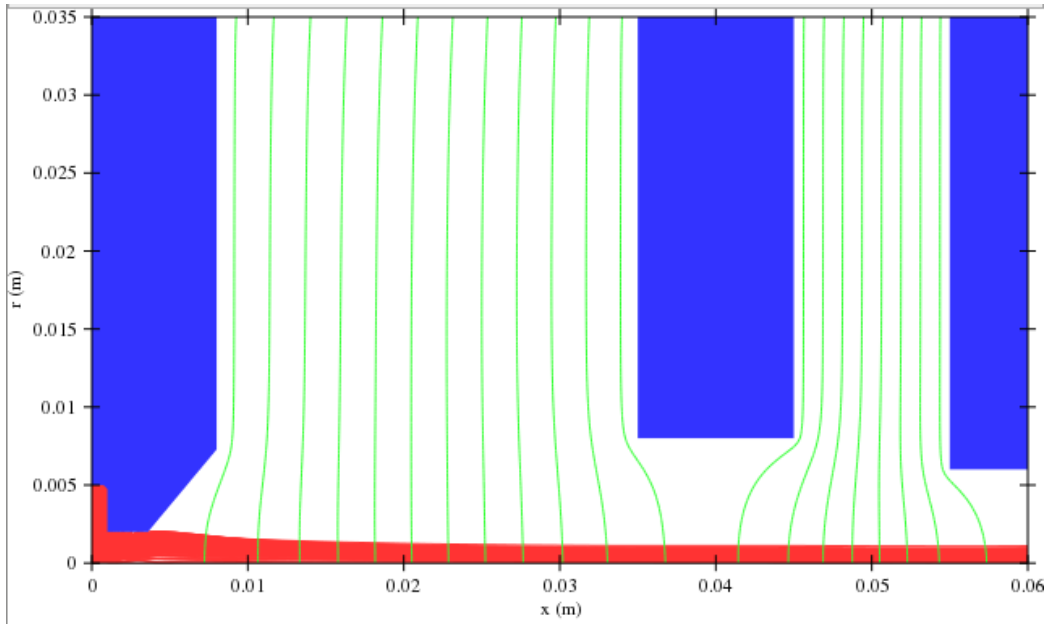
Şekil 3.100: 7 no’lu elektrot için $c = 4,6$ mm olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

Şekil 3.100'de $a = 1$ mm ve $b = 3$ mm'de sabit tutularak $c = 4,6$ mm olarak ayarlandığında demet davranışı üzerindeki etkiler görülmektedir.



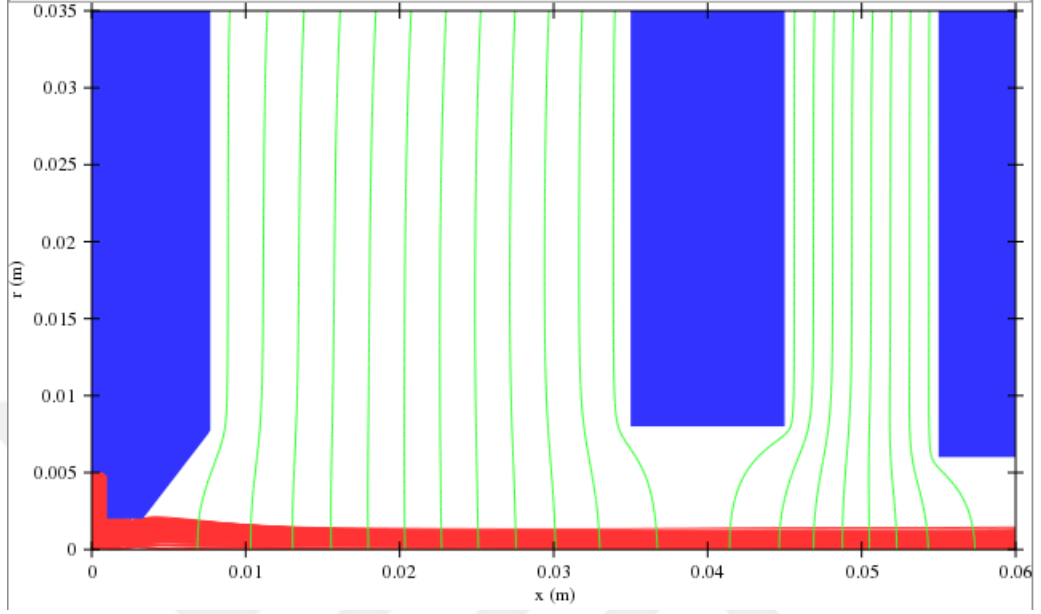
Şekil 3.101: 7 no'lu elektrot için $c = 5,6$ mm olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

Şekil 3.101'de $a = 1$ mm ve $b = 3$ mm'de sabit tutularak $c = 5,6$ mm olarak ayarlandığında demet üzerindeki etkiler görülmektedir.



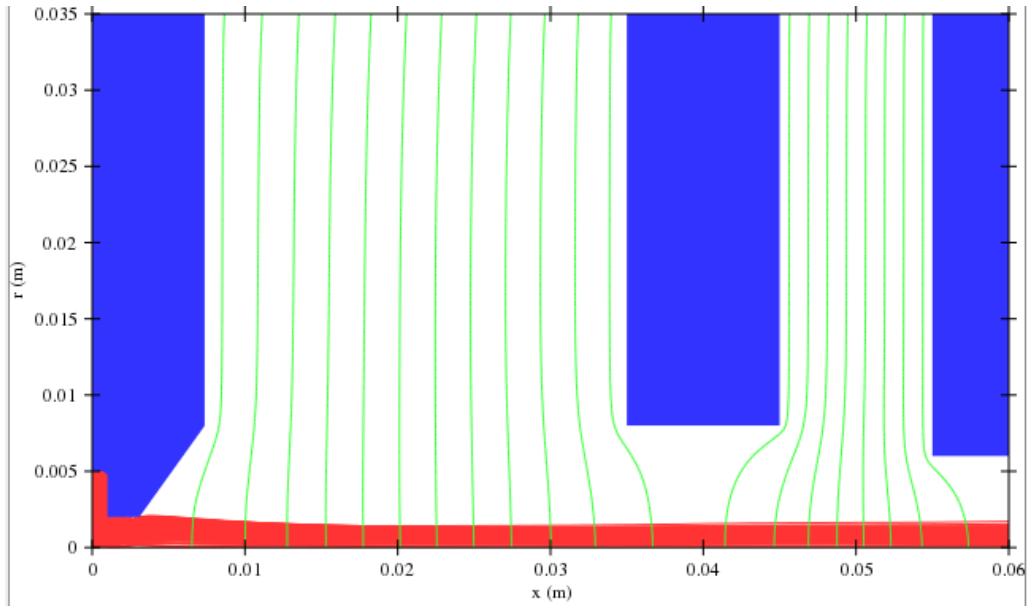
Şekil 3.102: 7 no'lu elektrot için $m = 1,2$ olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

Şekil 3.102’de $a = 1$ mm, $b = 3$ mm ve $c = 2,6$ mm’de sabit tutularak 7 no’lu elektrotun eğiminde değişiklikler yapılmıştır. İlk olarak eğim $m = 1,2$ olarak ayarlanmıştır.



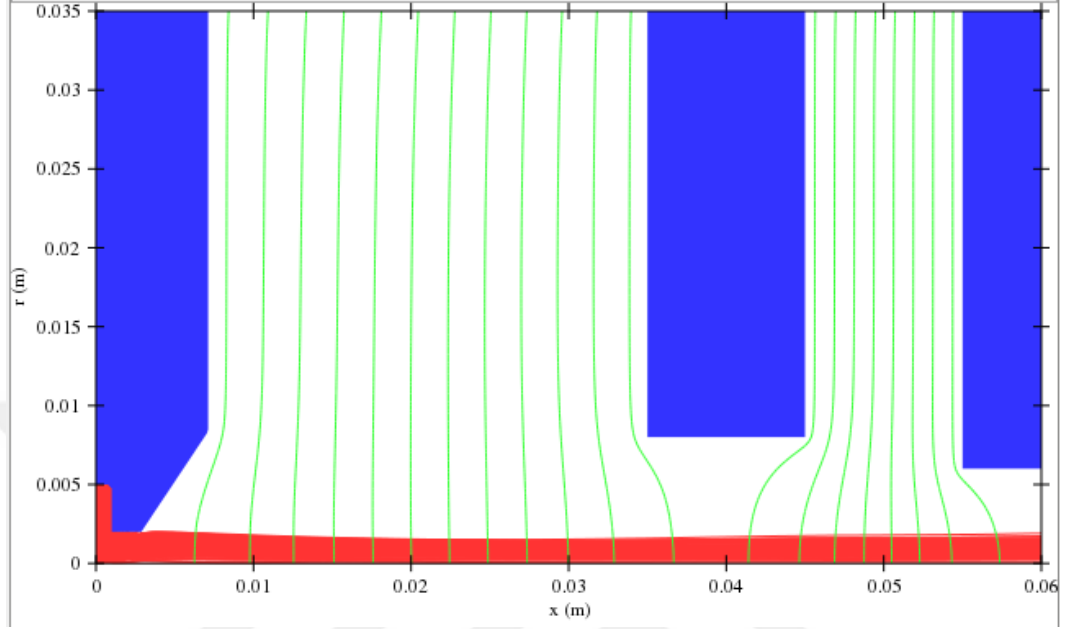
Şekil 3.103: 7 no’lu elektrot için $m = 1,3$ olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

Şekil 3.103’te $a = 1$ mm, $b = 3$ mm ve $c = 2,6$ mm’de sabit tutularak $m = 1,3$ olarak ayarlandığında demet davranışı üzerindeki etkiler görülmektedir.



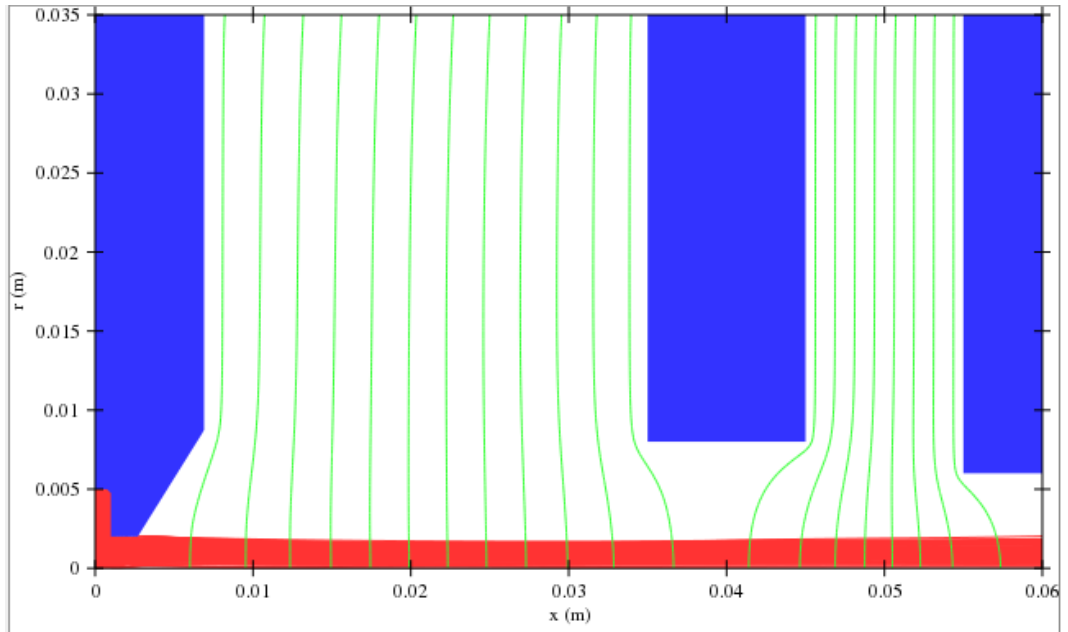
Şekil 3.104: 7 no’lu elektrot için $m = 1,4$ olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

Şekil 3.104'te $a = 1$ mm, $b = 3$ mm ve $c = 2,6$ mm'de sabit tutularak $m = 1,4$ olarak ayarlandığında demet davranışı üzerindeki etkiler görülmektedir.



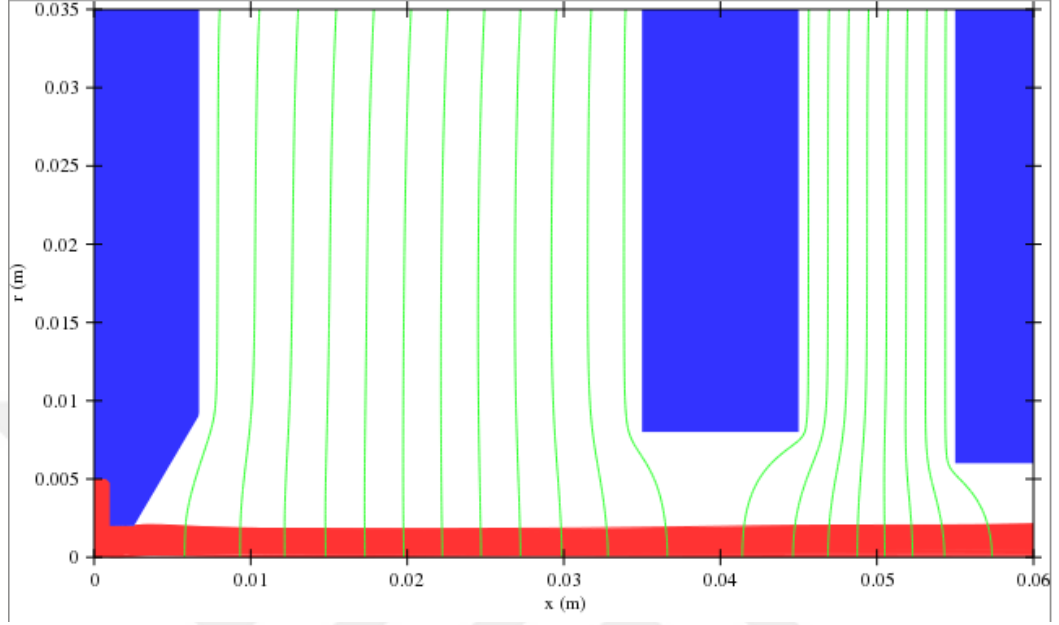
Şekil 3.105: 7 no'lu elektrot için $m = 1,5$ olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

Şekil 3.105'te $a = 1$ mm, $b = 3$ mm ve $c = 2,6$ mm'de sabit tutularak $m = 1,5$ olarak ayarlandığında demet davranışı üzerindeki etkiler görülmektedir.



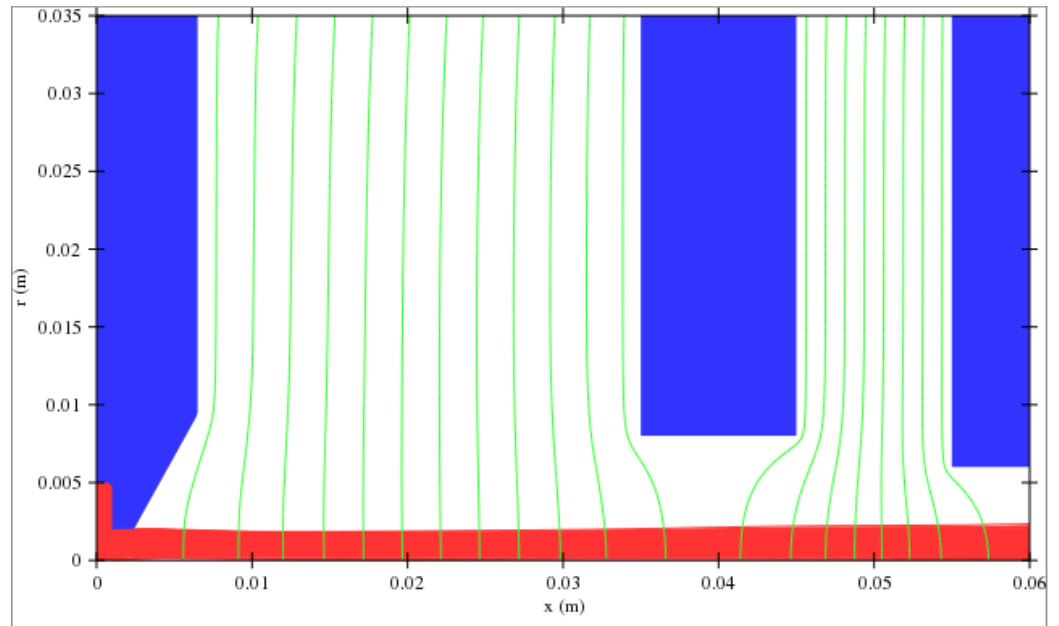
Şekil 3.106: 7 no'lu elektrot için $m = 1,6$ olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

Şekil 3.106'da $a = 1$ mm, $b = 3$ mm ve $c = 2,6$ mm'de sabit tutularak $m=1,6$ olarak ayarlandığında demet üzerindeki etkiler görülmektedir.



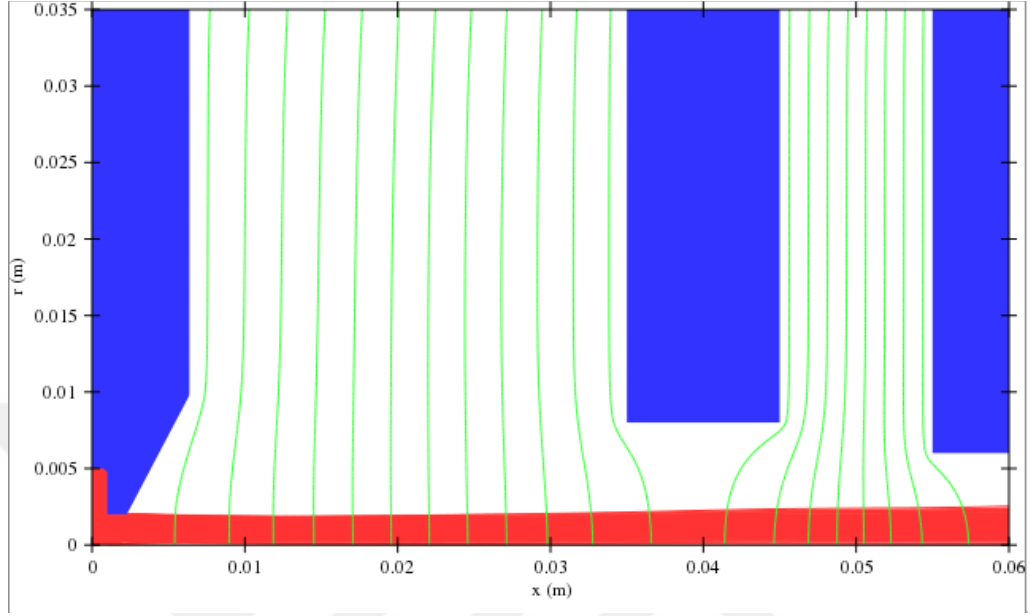
Şekil 3.107: 7 no'lu elektrot için $m = 1,7$ olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

Şekil 3.107'de $a = 1$ mm, $b = 3$ mm ve $c = 2,6$ mm'de sabit tutularak $m = 1,7$ olarak ayarlandığında demet davranışı üzerindeki etkiler görülmektedir.



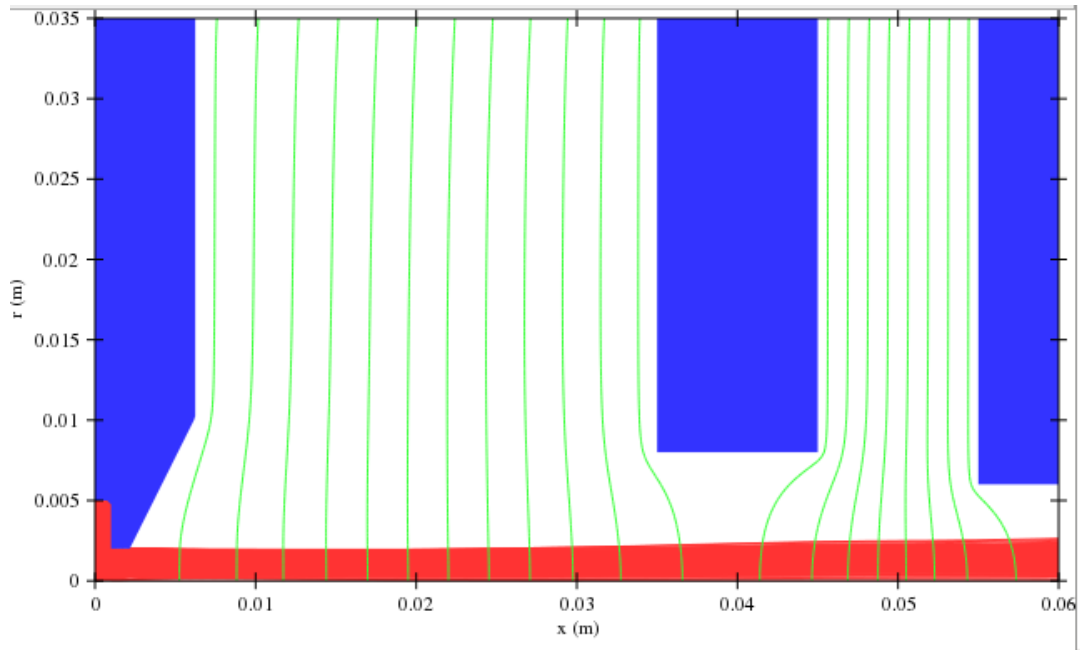
Şekil 3.108: 7 no'lu elektrot için $m = 1,8$ olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

Şekil 3.108’de $a = 1$ mm, $b = 3$ mm ve $c = 2,6$ mm’de sabit tutularak $m = 1,8$ olarak ayarlandığında demet davranışı üzerindeki etkiler görülmektedir.



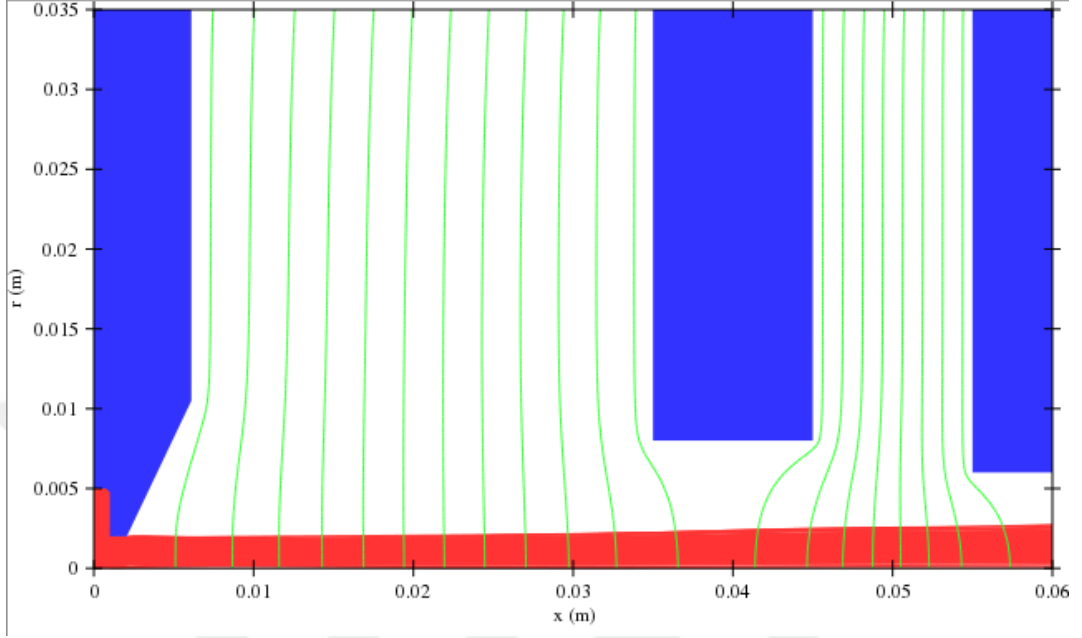
Şekil 3.109: 7 no’lu elektrot için $m = 1,9$ olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

Şekil 3.109’da $a = 1$ mm, $b = 3$ mm ve $c = 2,6$ mm’de sabit tutularak $m = 1,9$ olarak ayarlandığında demet davranışı üzerindeki etkiler görülmektedir.



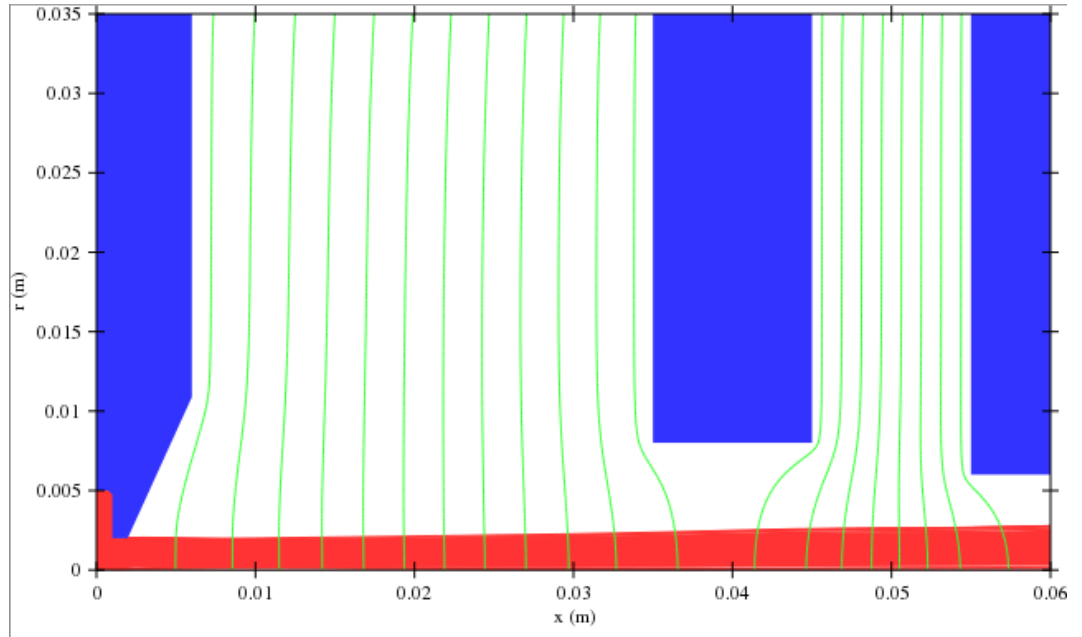
Şekil 3.110: 7 no’lu elektrot için $m = 2,0$ olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

Şekil 3.110'da $a = 1$ mm, $b = 3$ mm ve $c = 2,6$ mm'de sabit tutularak $m = 2,0$ olarak ayarlandığında demet davranışı üzerindeki etkiler görülmektedir.



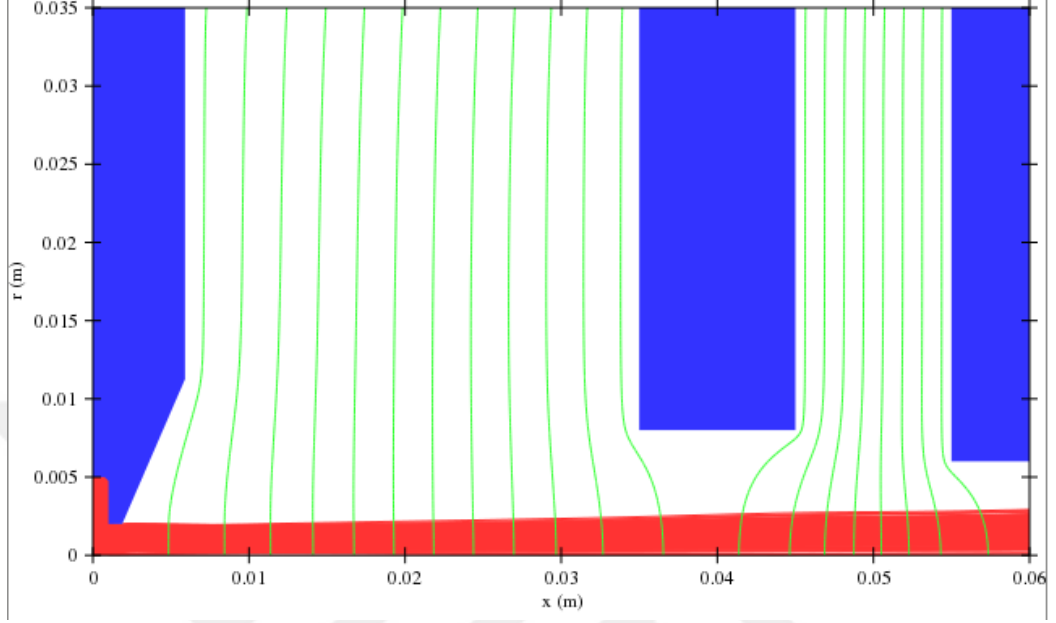
Şekil 3.111: 7 no'lu elektrot için $m = 2,1$ olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

Şekil 3.111'de $a = 1$ mm, $b = 3$ mm ve $c = 2,6$ mm'de sabit tutularak $m = 2,1$ olarak ayarlandığında demet davranışı üzerindeki etkiler görülmektedir.



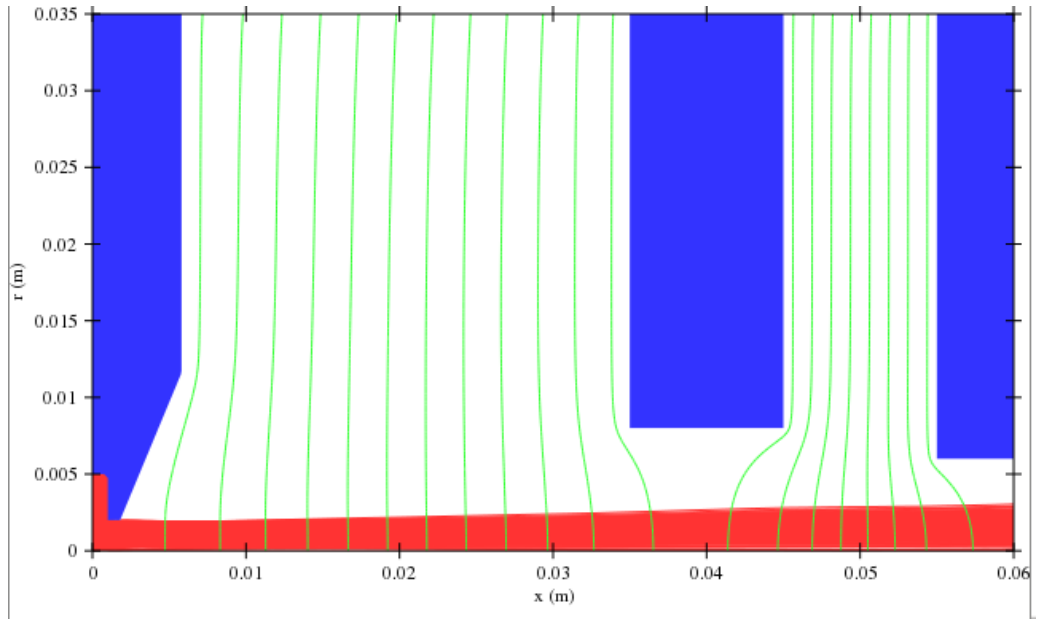
Şekil 3.112: 7 no'lu elektrot için $m = 2,2$ olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

Şekil 3.112’de $a = 1$ mm, $b = 3$ mm ve $c = 2,6$ mm’de sabit tutularak $m = 2,2$ olarak ayarlandığında demet davranışı üzerindeki etkiler görülmektedir.



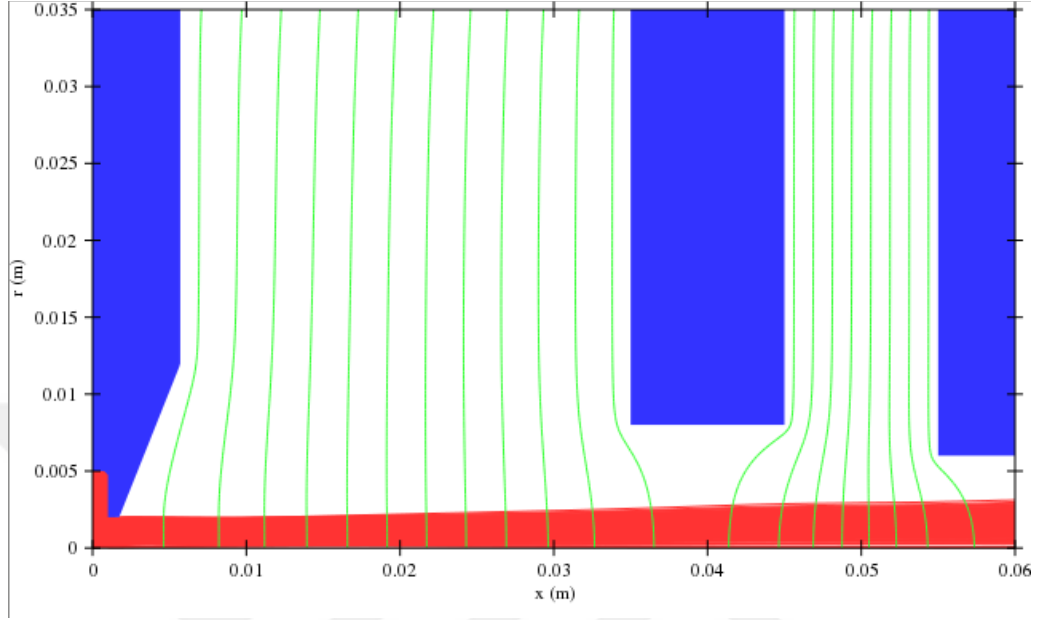
Şekil 3.113: 7 no’lu elektrot için $m = 2,3$ olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

Şekil 3.113’te $a = 1$ mm, $b = 3$ mm ve $c = 2,6$ mm’de sabit tutularak $m = 2,3$ olarak ayarlandığında demet davranışı üzerindeki etkiler görülmektedir.



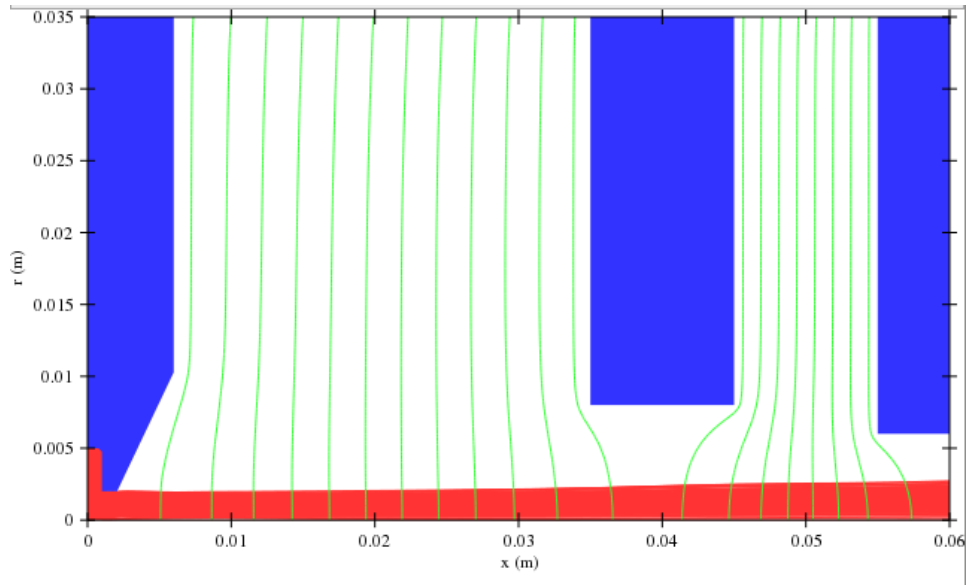
Şekil 3.114: 7 no’lu elektrot için $m = 2,4$ olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

Şekil 3.114'te $a = 1$ mm, $b = 3$ mm ve $c = 2,6$ mm'de sabit tutularak $m = 2,4$ olarak ayarlandığında demet davranışı üzerindeki etkiler görülmektedir.



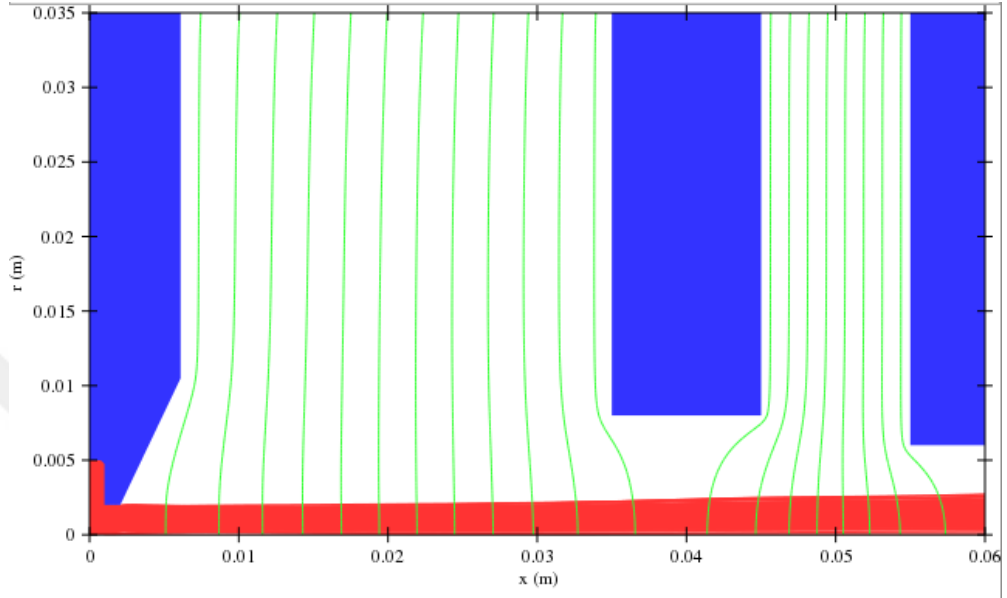
Şekil 3.115: 7 no'lu elektrot için $m = 2,5$ olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

Şekil 3.115'te $a = 1$ mm, $b = 3$ mm ve $c = 2,6$ mm'de sabit tutularak $m = 2,5$ olarak ayarlandığında demet davranışı üzerindeki etkiler görülmektedir.



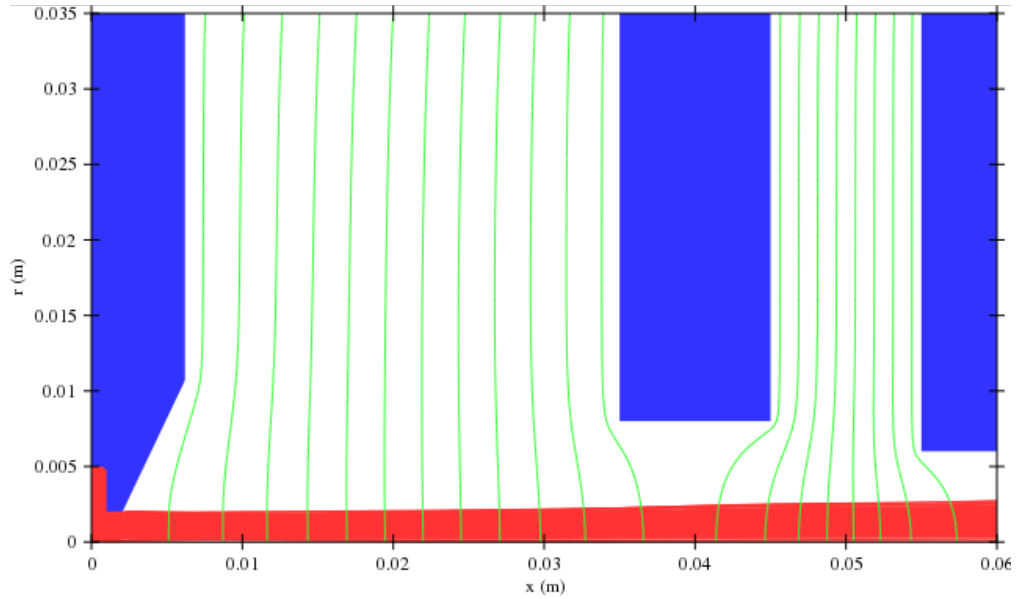
Şekil 3.116: 7 no'lu elektrot için $d=2,4$ mm ve $e=5,28$ mm olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

Şekil 3.116'da eğimi $m = 2,2$ değerinde sabit tutacak şekilde d ve e parametreleri birlikte değiştirilerek demete etkisi incelenmektedir. Burada $d = 2,4$ mm ve $e = 5,28$ mm olarak ayarlanmıştır.



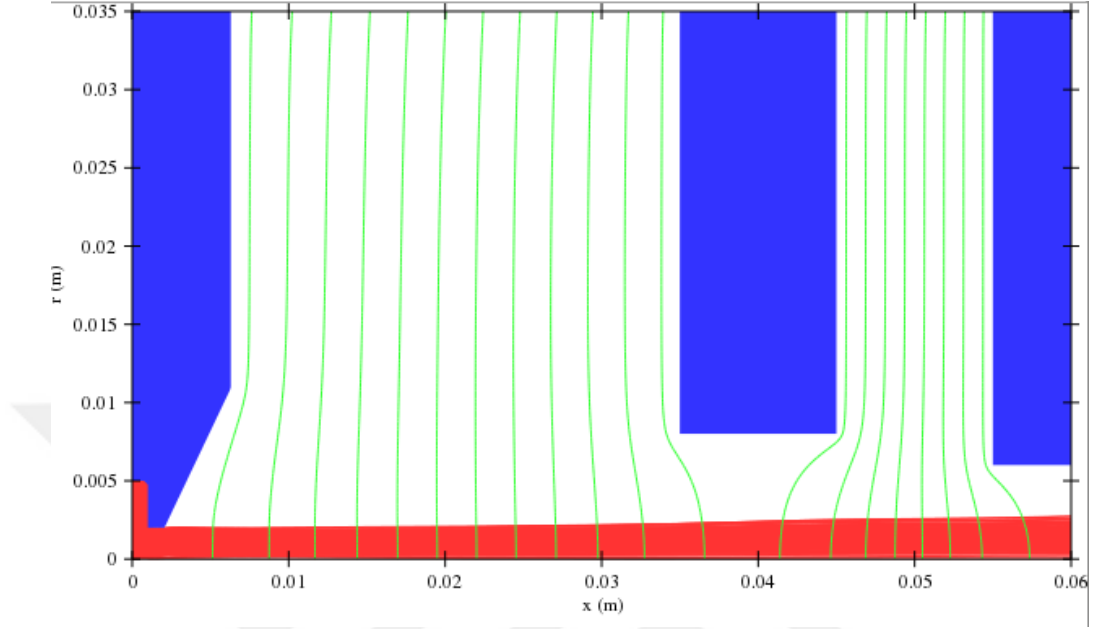
Şekil 3.117: 7 no'lu elektrot için $d = 2,5$ mm ve $e = 5,5$ mm olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

Şekil 3.117'de eğim $m = 2,2$ olacak şekilde $d = 2,5$ mm ve $e = 5,5$ mm olarak ayarlandığında demet davranışı üzerindeki etkiler görülmektedir.



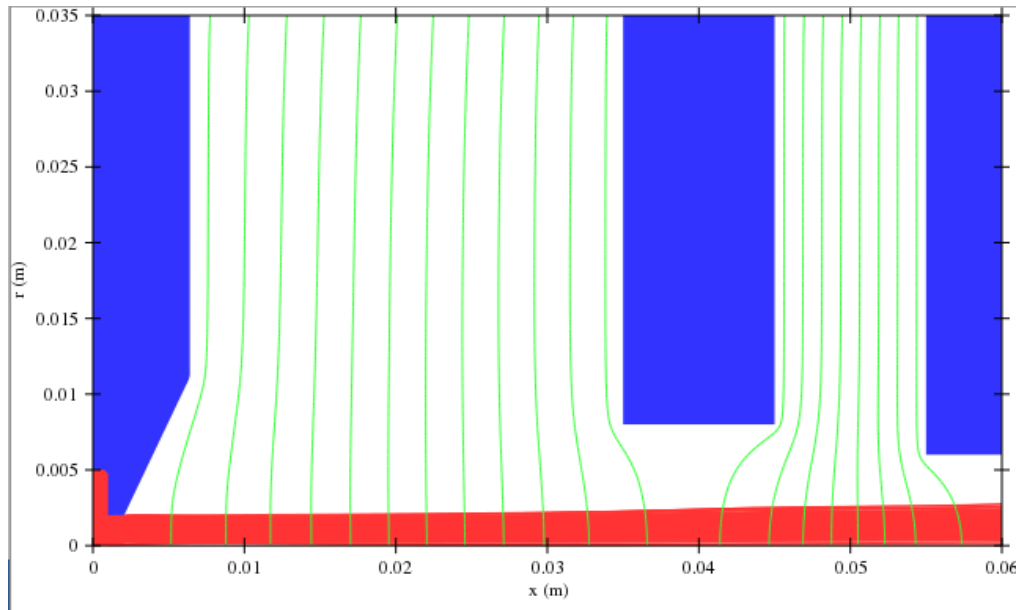
Şekil 3.118: 7 no'lu elektrot için $d = 2,6$ mm ve $e = 5,72$ mm olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

Şekil 3.118’de eğim $m = 2,2$ olacak şekilde $d = 2,6$ mm ve $e = 5,72$ mm olarak ayarlandığında demet davranışı üzerindeki etkiler görülmektedir.



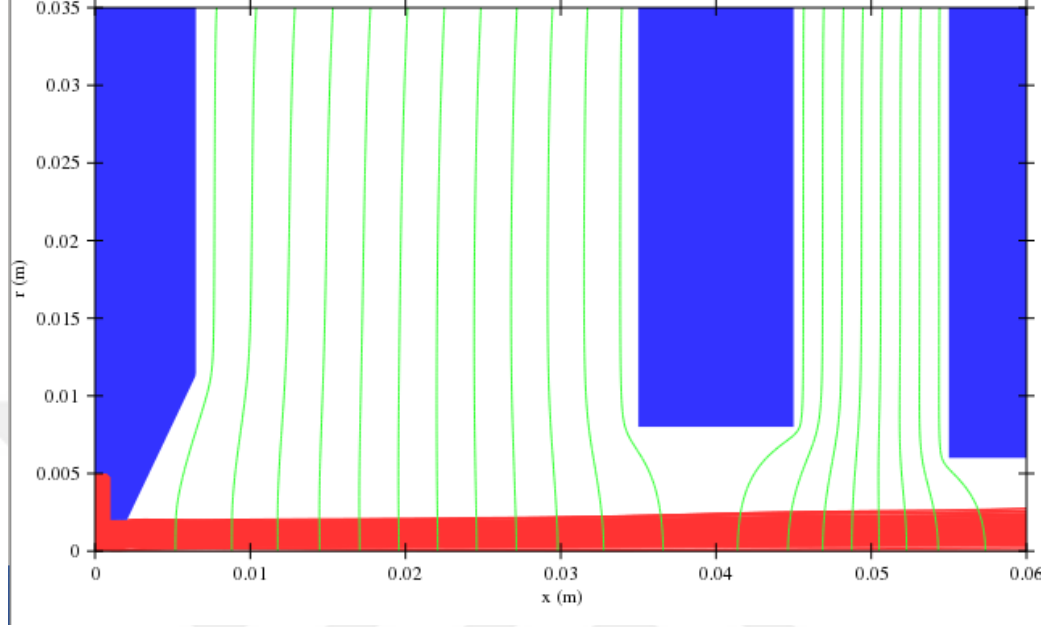
Şekil 3.119: 7 no’lu elektrot için $d = 2,7$ mm ve $e = 5,94$ mm olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

Şekil 3.119’da eğim $m = 2,2$ olacak şekilde $d = 2,7$ mm ve $e = 5,94$ mm olarak ayarlandığında demet davranışı üzerindeki etkiler görülmektedir.



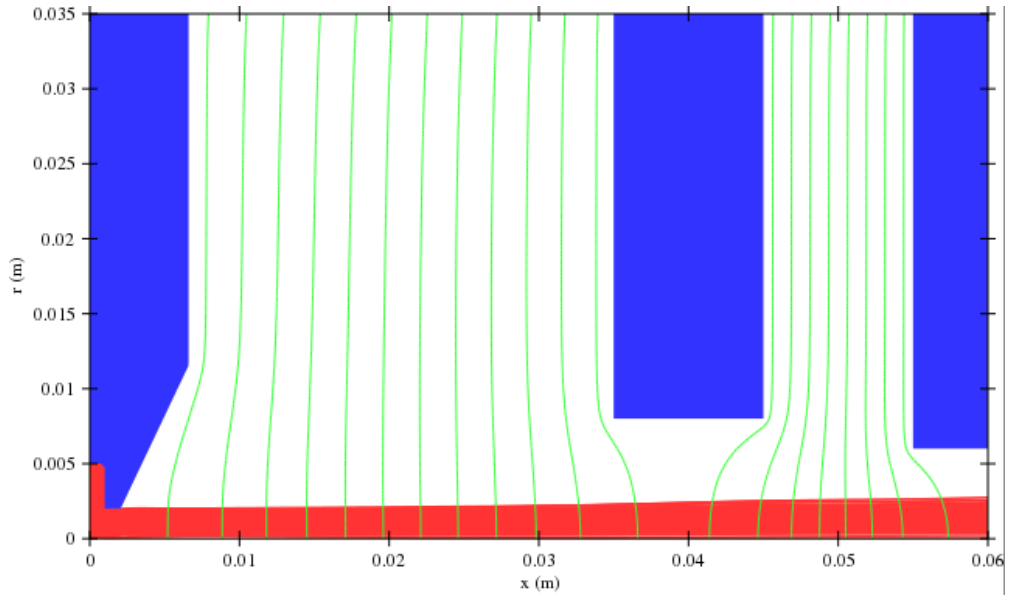
Şekil 3.120: 7 no’lu elektrot için $d = 2,8$ mm ve $e = 6,16$ mm olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

Şekil 3.120’de eğim $m = 2,2$ olacak şekilde $d = 2,8$ ve $e = 6,16$ mm olarak ayarlandığında demet davranışı üzerindeki etkiler görülmektedir.



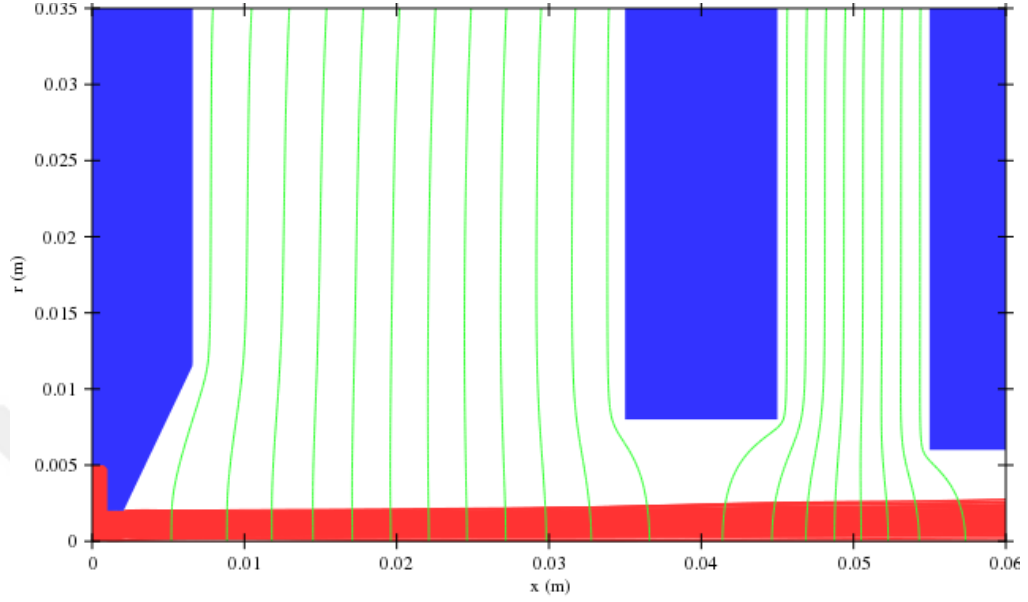
Şekil 3.121: 7 no’lu elektrot için $d = 2,9$ mm ve $e = 6,38$ mm olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

Şekil 3.121’de eğim $m = 2,2$ olacak şekilde $d = 2,9$ mm ve $e = 6,38$ mm olarak ayarlandığında demet davranışı üzerindeki etkiler görülmektedir.



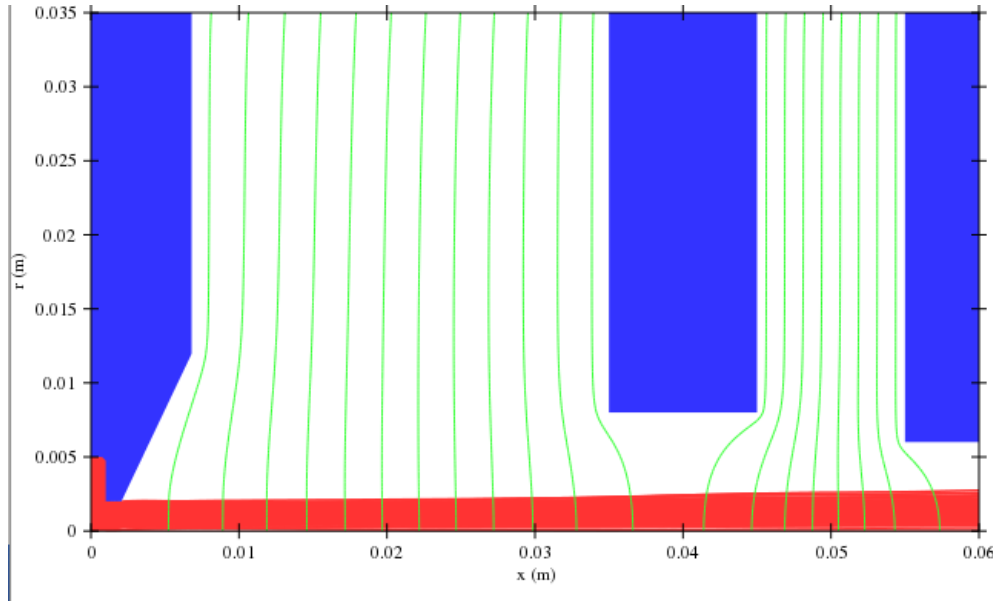
Şekil 3.122: 7 no’lu elektrot için $d = 3,0$ mm ve $e = 6,6$ mm olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

Şekil 3.122’de eğim $m = 2,2$ olacak şekilde $d = 3,0$ mm ve $e = 6,6$ mm olarak ayarlandığında demet davranışı üzerindeki etkiler görülmektedir.



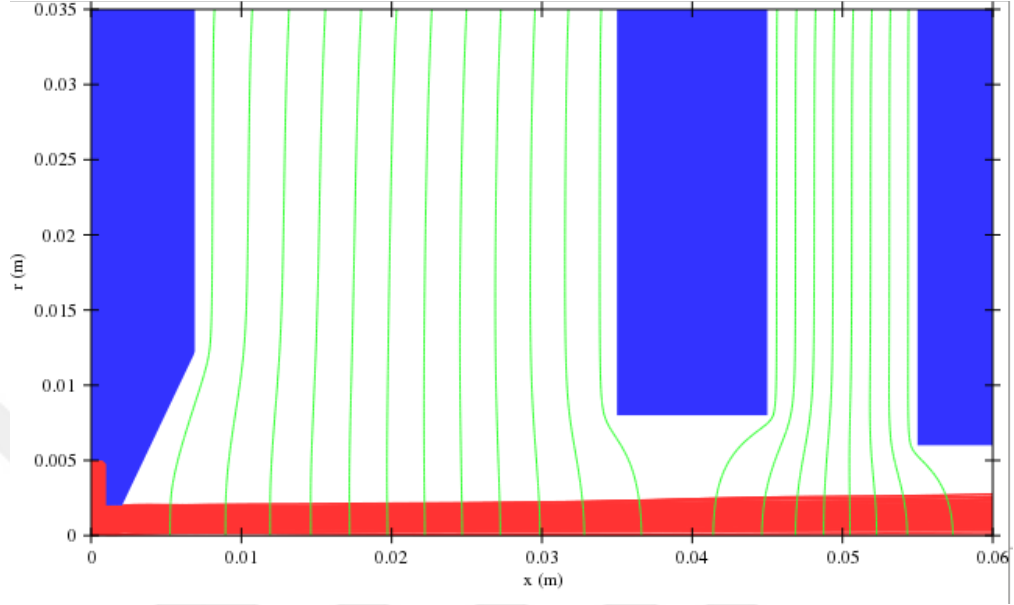
Şekil 3.123: 7 no’lu elektrot için $d = 3,1$ mm ve $e = 6,82$ mm olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

Şekil 3.123’te eğim $m = 2,2$ olacak şekilde $d = 3,1$ mm ve $e = 6,82$ mm olarak ayarlandığında demet davranışı üzerindeki etkiler görülmektedir.



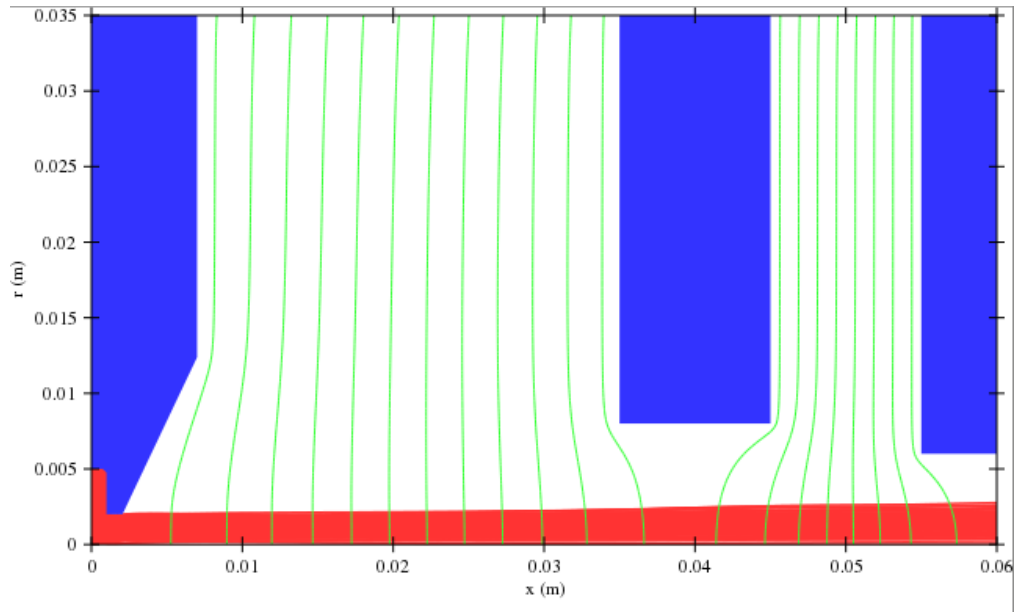
Şekil 3.124: 7 no’lu elektrot için $d = 3,2$ mm ve $e = 7,04$ mm olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

Şekil 3.124'te eğim $m = 2,2$ olacak şekilde $d = 3,2$ mm ve $e = 7,04$ mm olarak ayarlandığında demet davranışı üzerindeki etkiler görülmektedir.



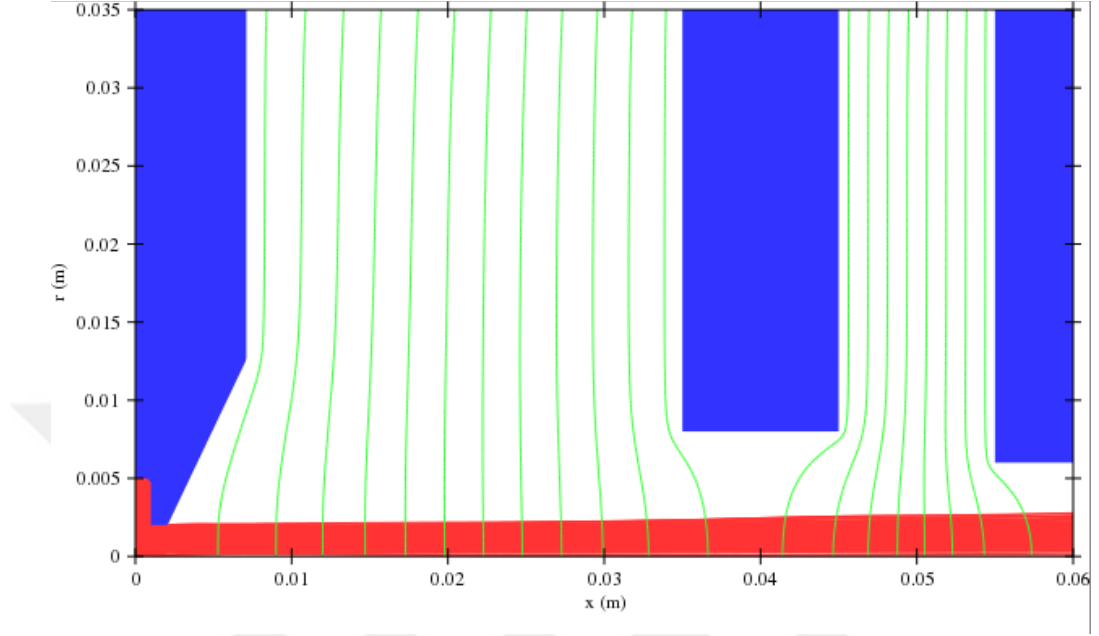
Şekil 3.125: 7 no'lu elektrot için $d = 3,3$ mm ve $e = 7,26$ mm olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

Şekil 3.125'te eğim $m = 2,2$ olacak şekilde $d = 3,3$ mm ve $e = 7,26$ mm olarak ayarlandığında demet davranışı üzerindeki etkiler görülmektedir.



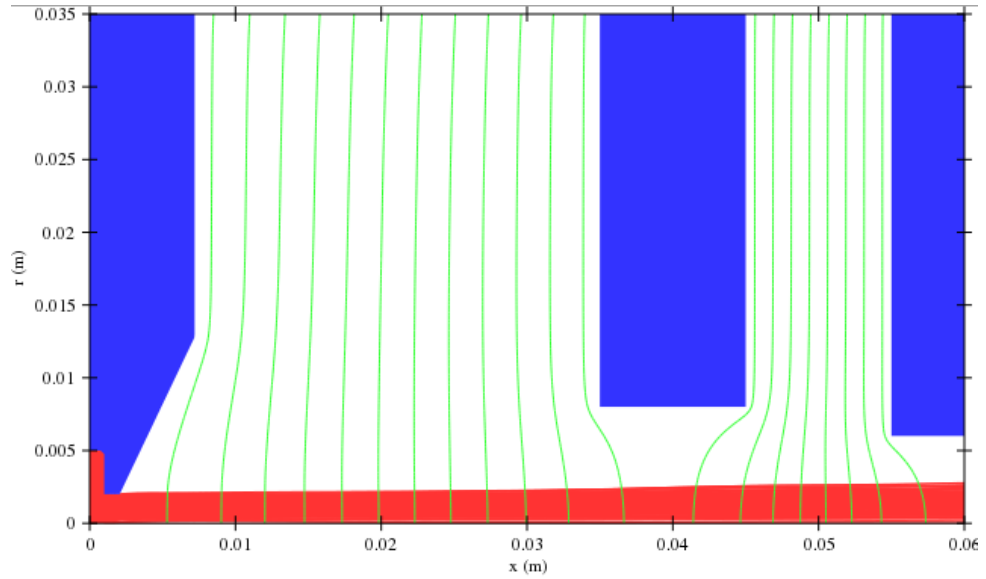
Şekil 3.126: 7 no'lu elektrot için $d = 3,4$ mm ve $e = 7,48$ mm olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

Şekil 3.126'da eğim $m = 2,2$ olacak şekilde $d = 3,4$ mm ve $e = 7,48$ mm olarak ayarlandığında demet davranışı üzerindeki etkiler görülmektedir.



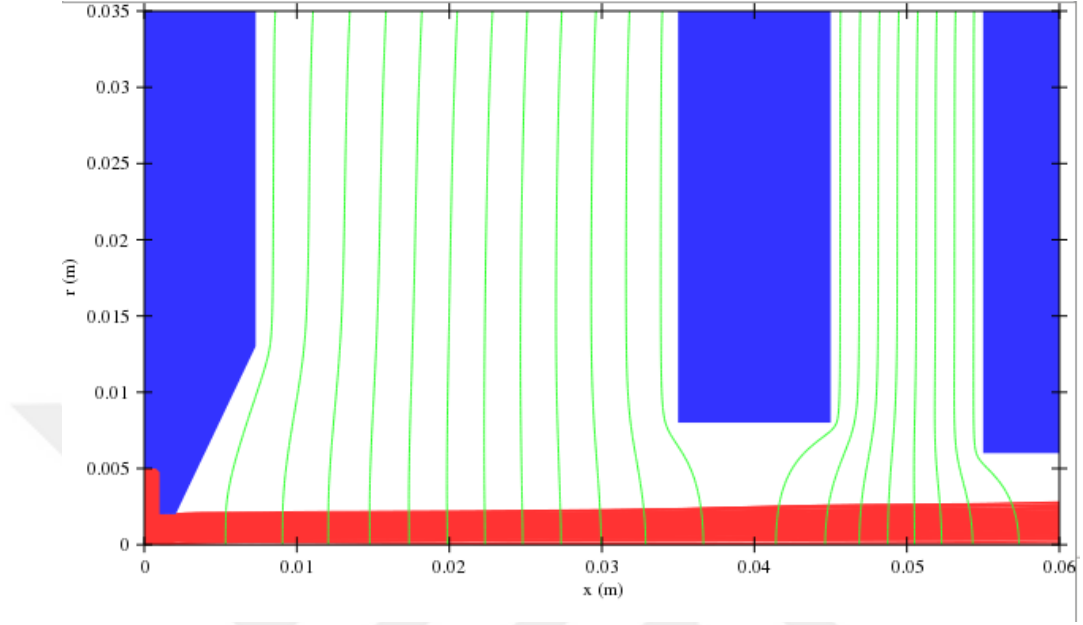
Şekil 3.127: 7 no'lu elektrot için $d = 3,5$ mm ve $e = 7,7$ mm olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

Şekil 3.127'de eğim $m = 2,2$ olacak şekilde $d = 3,5$ mm ve $e = 7,7$ mm olarak ayarlandığında demet davranışı üzerindeki etkiler görülmektedir.



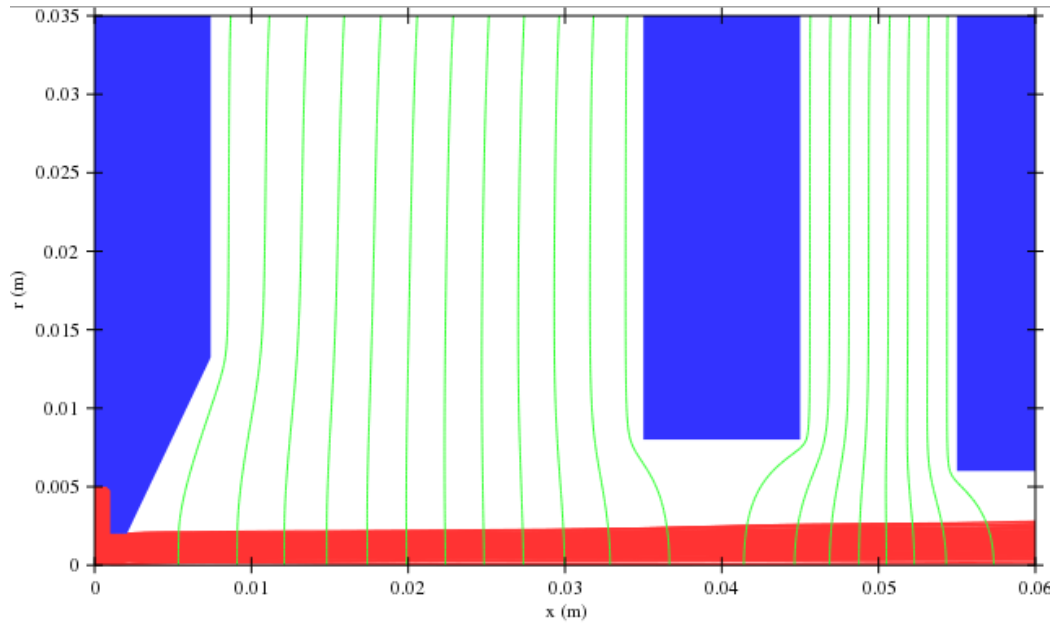
Şekil 3.128: 7 no'lu elektrot için $d = 3,6$ mm ve $e = 7,92$ mm olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

Şekil 3.128’de eğim $m = 2,2$ olacak şekilde $d = 3,6$ mm ve $e = 7,92$ mm olarak ayarlandığında demet davranışı üzerindeki etkiler görülmektedir.



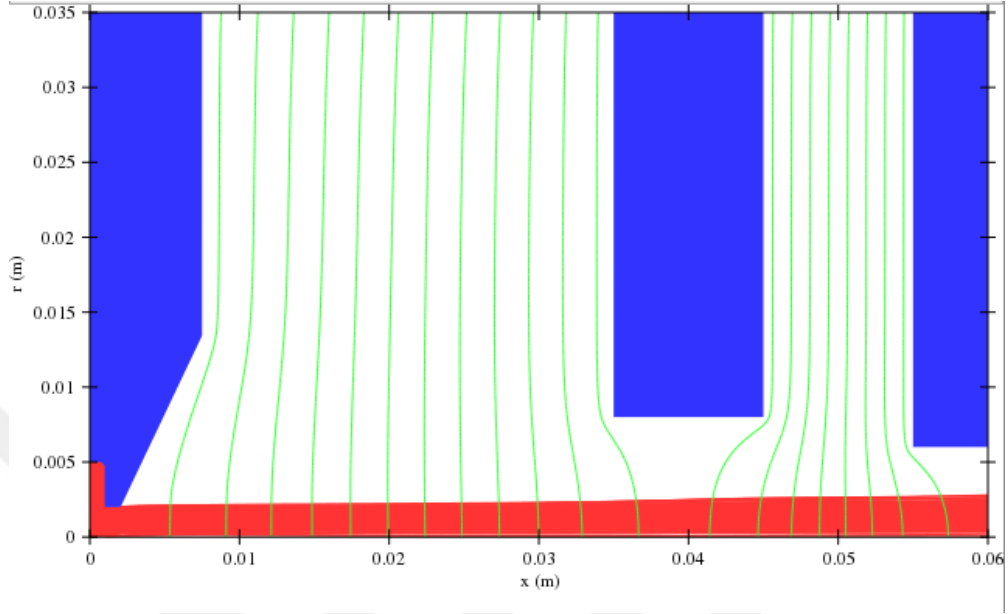
Şekil 3.129: 7 no’lu elektrot için $d = 3,7$ mm ve $e = 8,14$ mm olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

Şekil 3.129’da eğim $m = 2,2$ olacak şekilde $d = 3,7$ mm ve $e = 8,14$ mm olarak ayarlandığında demet davranışı üzerindeki etkiler görülmektedir.



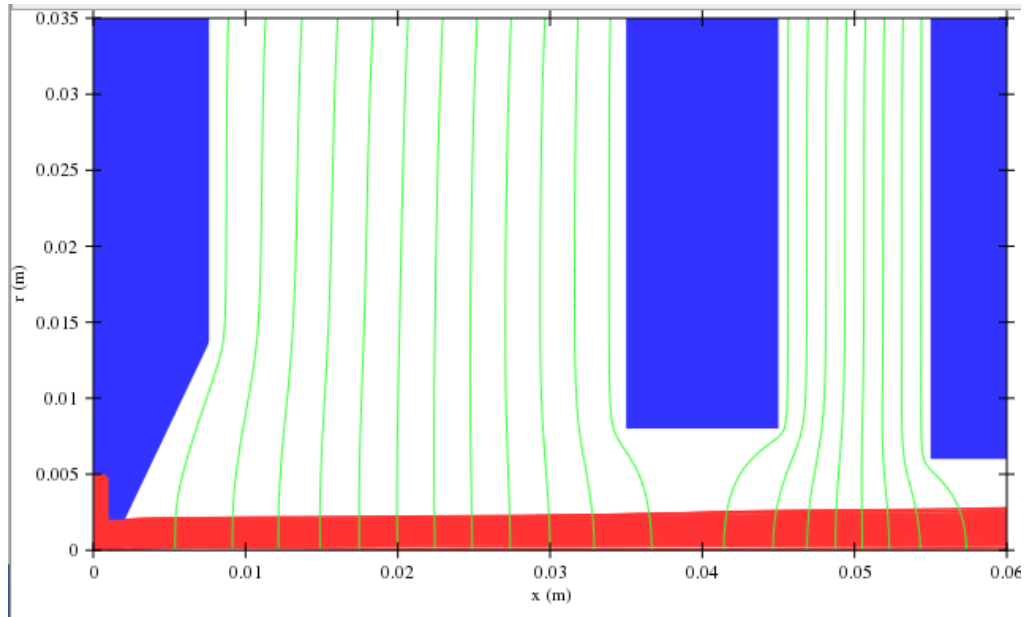
Şekil 3.130: 7 no’lu elektrot için $d = 3,8$ mm ve $e = 8,36$ mm olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

Şekil 3.130’da eğim $m = 2,2$ olacak şekilde $d = 3,8$ mm ve $e = 8,36$ mm olarak ayarlandığında demet davranışı üzerindeki etkiler görülmektedir.



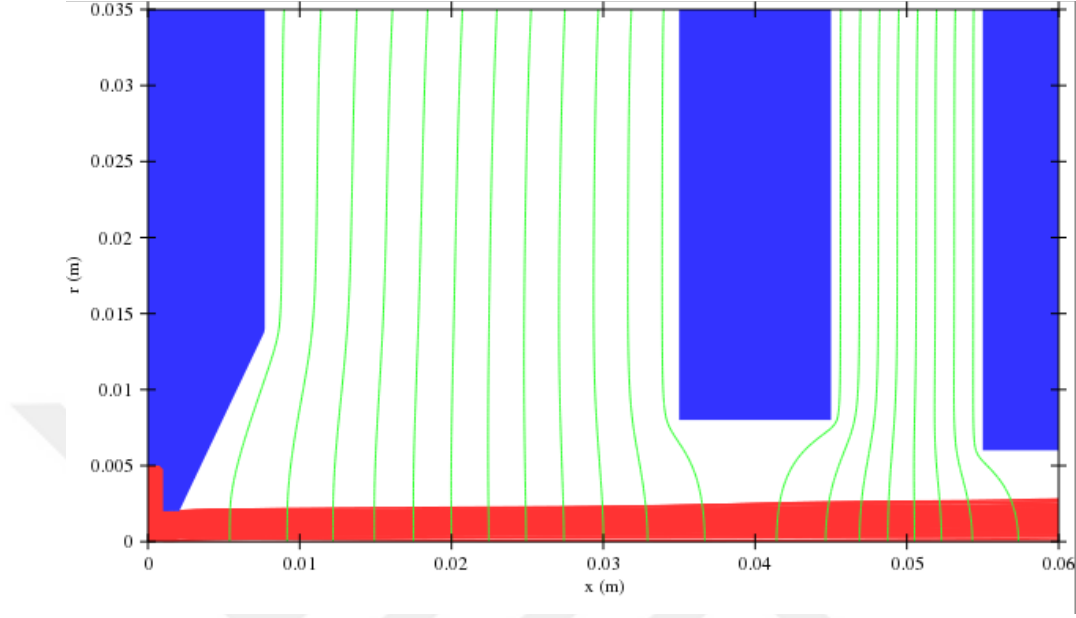
Şekil 3.131: 7 no’lu elektrot için $d = 3,9$ mm ve $e = 8,58$ mm olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

Şekil 3.131’de eğim $m = 2,2$ olacak şekilde $d = 3,9$ mm ve $e = 8,58$ mm olarak ayarlandığında demet davranışı üzerindeki etkiler görülmektedir.



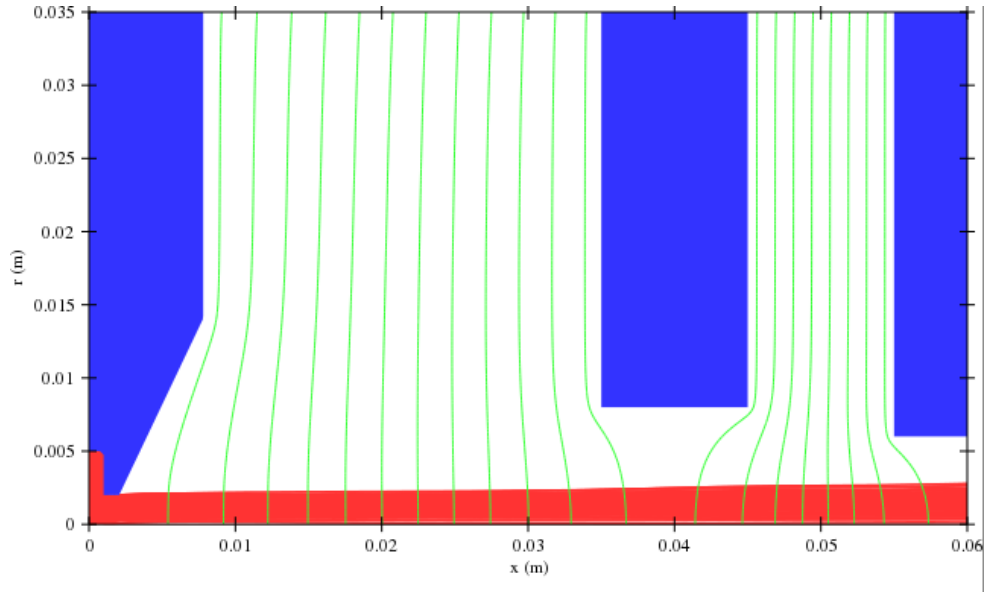
Şekil 3.132: 7 no’lu elektrot için $d = 4,0$ mm ve $e = 8,8$ mm olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

Şekil 3.132’de eğim $m = 2,2$ olacak şekilde $d = 4,0$ mm ve $e = 8,8$ mm olarak ayarlandığında demet davranışı üzerindeki etkiler görülmektedir.



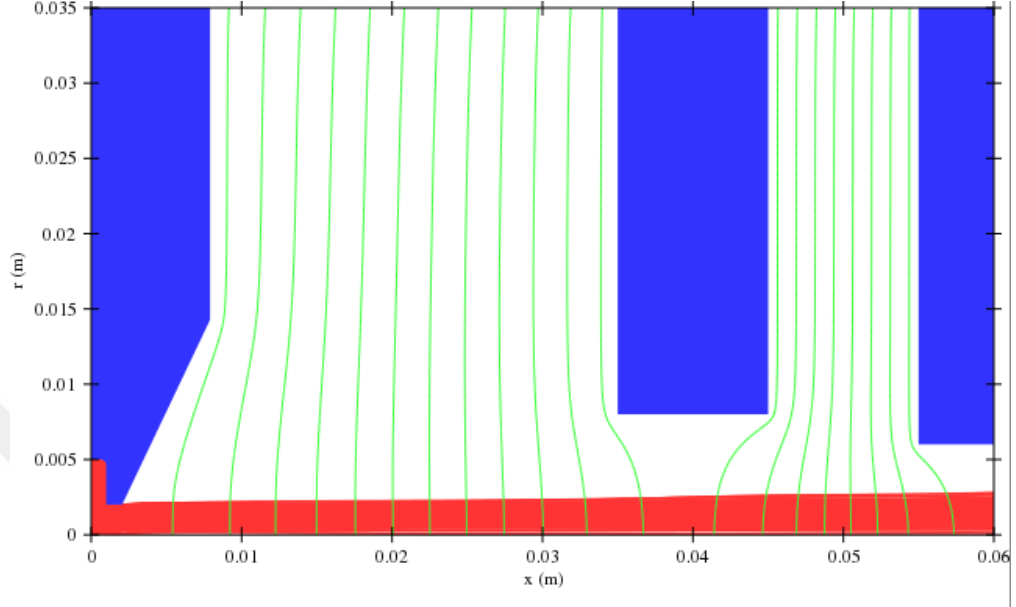
Şekil 3.133: 7 no’lu elektrot için $d = 4,1$ mm ve $e = 9,02$ mm olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

Şekil 3.133’te eğim $m = 2,2$ olacak şekilde $d = 4,1$ mm ve $e = 9,02$ mm olarak ayarlandığında demet davranışı üzerindeki etkiler görülmektedir.



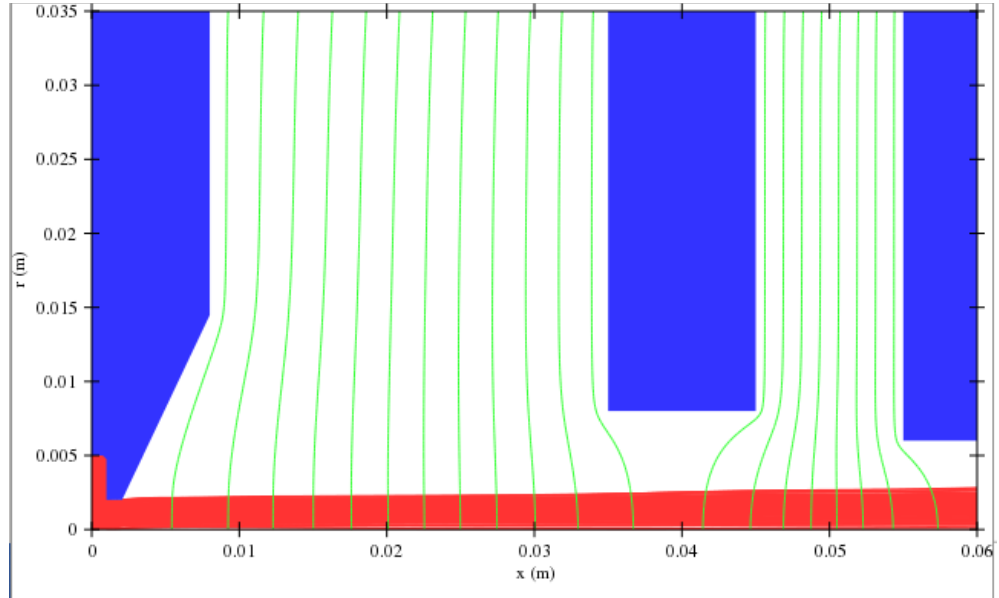
Şekil 3.134: 7 no’lu elektrot için $d = 4,2$ mm ve $e = 9,24$ mm olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

Şekil 3.134'te eğim $m = 2,2$ olacak şekilde $d = 4,2$ mm ve $e = 9,24$ mm olarak ayarlandığında demet davranışı üzerindeki etkiler görülmektedir.



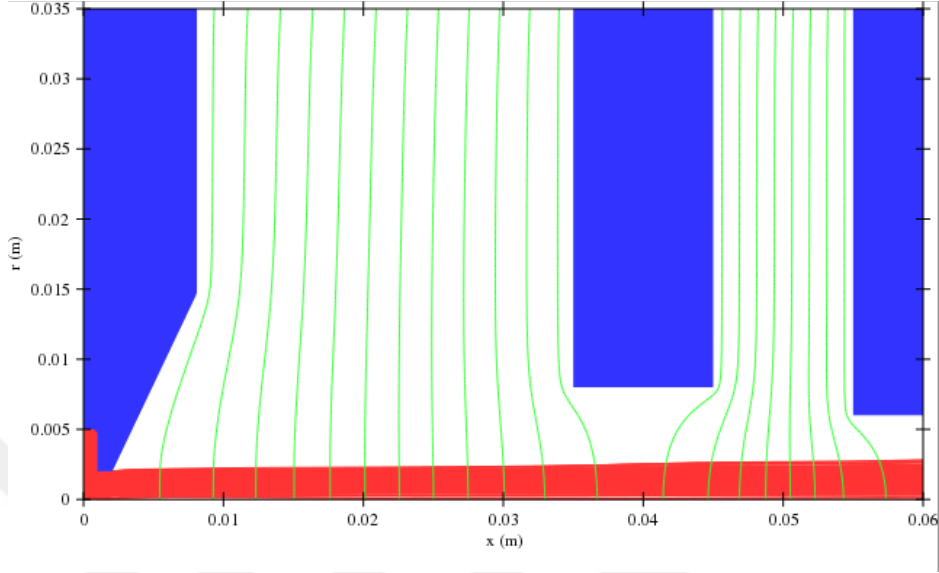
Şekil 3.135: 7 no'lu elektrot için $d = 4,3$ mm ve $e = 9,46$ mm olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

Şekil 3.135'te eğim $m = 2,2$ olacak şekilde $d = 4,3$ mm ve $e = 9,46$ mm olarak ayarlandığında demet davranışı üzerindeki etkiler görülmektedir.



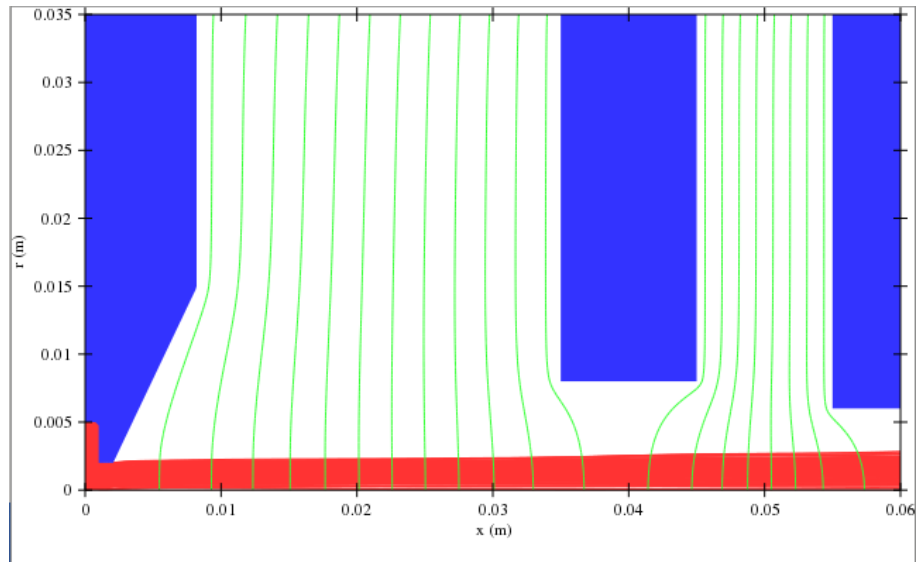
Şekil 3.136: 7 no'lu elektrot için $d = 4,4$ mm ve $e = 9,68$ mm olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

Şekil 3.136'da eğim $m = 2,2$ olacak şekilde $d = 4,4$ mm ve $e = 9,68$ mm olarak ayarlandığında demet davranışı üzerindeki etkiler görülmektedir.



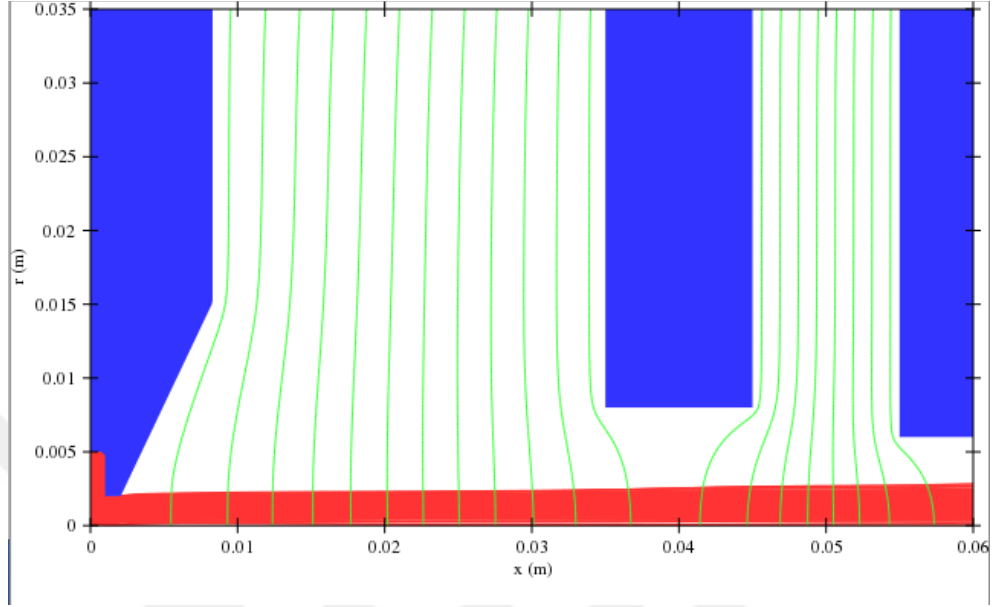
Şekil 3.137: 7 no'lu elektrot için $d = 4,5$ mm ve $e = 9,9$ mm olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

Şekil 3.137'de eğim $m = 2,2$ olacak şekilde $d = 4,5$ mm ve $e = 9,9$ mm olarak ayarlandığında demet davranışı üzerindeki etkiler görülmektedir.



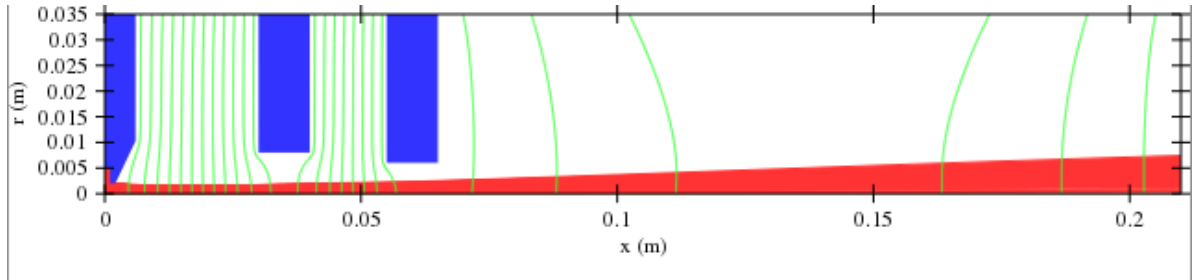
Şekil 3.138: 7 no'lu elektrot için $d = 4,6$ mm ve $e = 10,12$ mm olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

Şekil 3.138’de eğim $m = 2,2$ olacak şekilde $d = 4,6$ mm ve $e = 10,12$ mm olarak ayarlandığında demet davranışı üzerindeki etkiler görülmektedir.



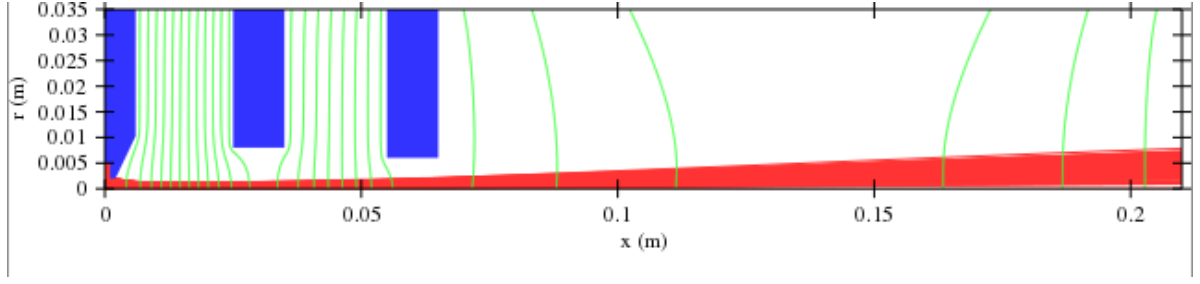
Şekil 3.139: 7 no’lu elektrot için $d = 4,7$ mm ve $e = 10,34$ mm olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

Şekil 3.139’da eğim $m = 2,2$ olacak şekilde $d = 4,7$ mm ve $e = 10,34$ mm olarak ayarlandığında demet davranışı üzerindeki etkiler görülmektedir.



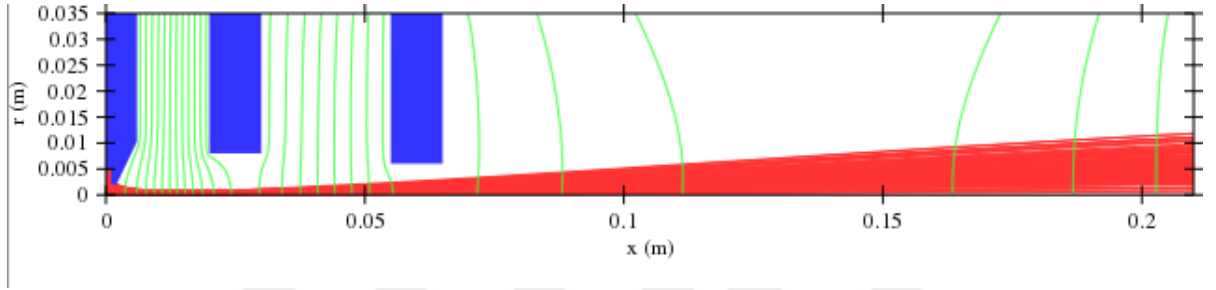
Şekil 3.140: Benzetim alanının genişletilmesi durumunda demetin davranışı.

Şekil 3.140’ta görüldüğü üzere demetin davranışını daha net görebilmek adına benzetim alanı genişletildi, daha sonra 8 no’lu elektrotun konumunda değişiklikler yapılarak bu değişikliklerin etkileri incelendi. 8 no’lu elektrotun konumu $0,03$ m’ye getirilmiştir. Bu durumda demet yayılımı $= 6,644264$ mm.mrad ve demet akımı $= 1,12841$ mA olarak ölçülmüştür.



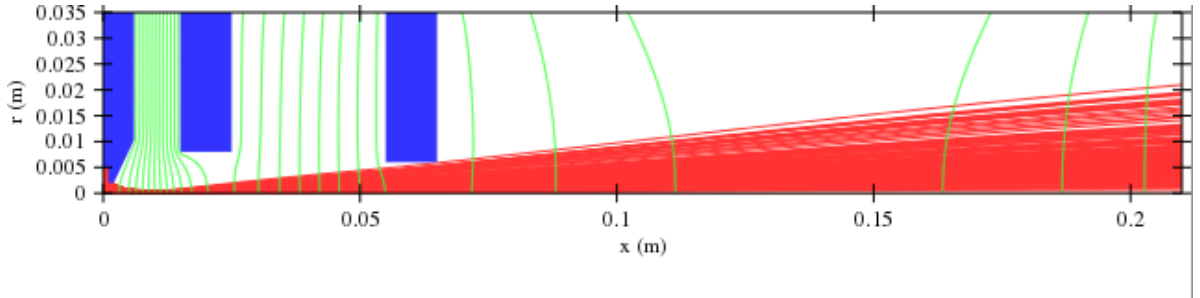
Şekil 3.141: 8 no'lu elektrotun boyu 0,025 m olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

Şekil 3.141'de 8 no'lu elektrotun boyu 0,025 m'ye getirilmiştir. Burada demet yayını=8,99421 mm.mrad ve demet akımı=1,17825 mA olarak ölçülmüştür.



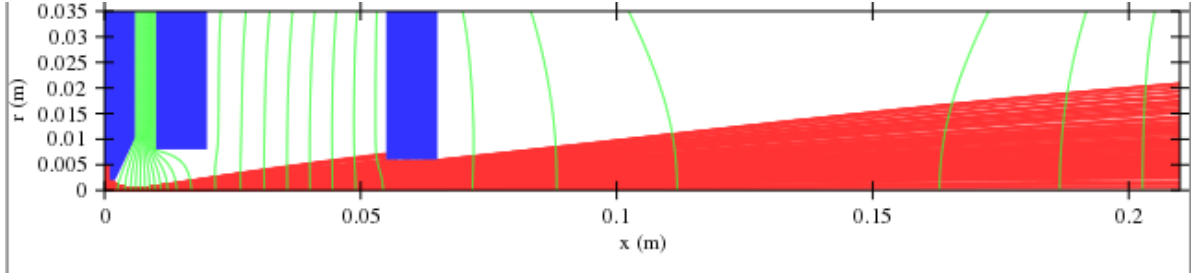
Şekil 3.142: 8 no'lu elektrotun boyu 0,02 m olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

Şekil 3.142'de 8 no'lu elektrotun boyu 0,02 m'ye getirilmiştir. Burada demet yayını=12,6619 mm.mrad ve demet akımı= 1,2328 mA olarak ölçülmüştür.



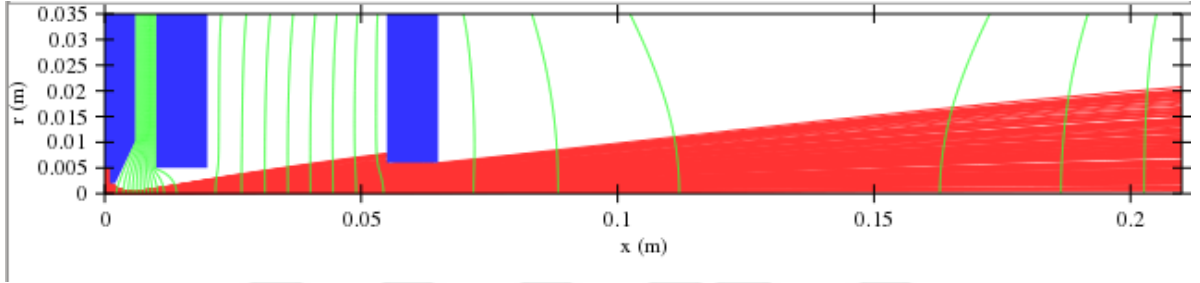
Şekil 3.143: 8 no'lu elektrotun boyu 0,015 m olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

Şekil 3.143'te 8 no'lu elektrotun konumu 0,015 m'ye getirilmiştir. Burada demet yayını=7,79189 mm.mrad ve demet akımı=1,00157 mA olarak ölçülmüştür.



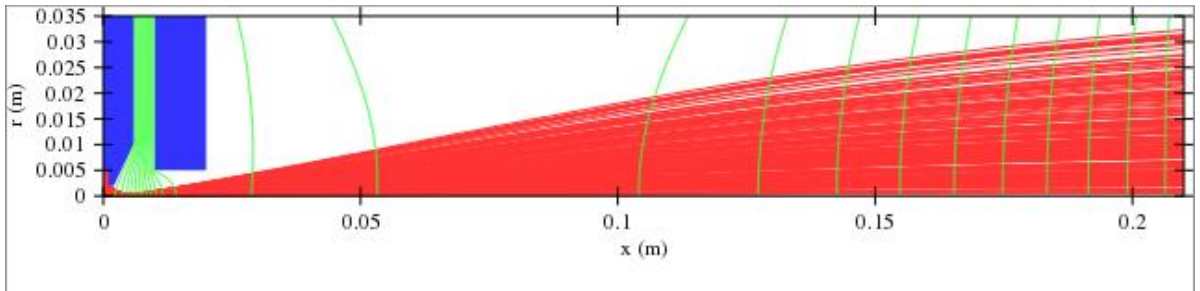
Şekil 3.144: 8 no'lu elektrotun boyu 0,01 m olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

Şekil 3.144'te 8 no'lu elektrotun konumu 0,01 m'ye getirilmiştir. Burada demet yayınımlı=4,58553 mm.mrad ve demet akımı=0,716397 mA olarak ölçülmüştür.



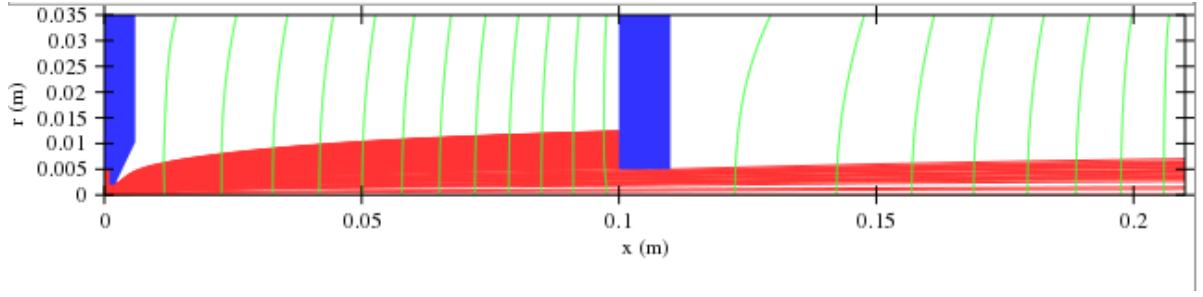
Şekil 3.145: 8 no'lu elektrotun yarıçapının 5 mm olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

Şekil 3.145'te 8 no'lu elektrotun konumu 0,01 m seçilerek elektrotun yarıçapı 5mm olarak ayarlandı. Burada demet yayınımlı=3,5148 mm.mrad ve demet akımı=0,638355 mA olarak ölçülmüştür.



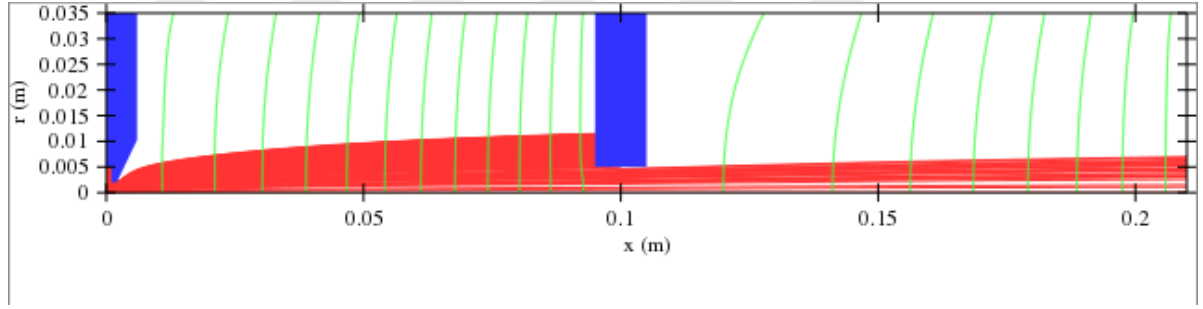
Şekil 3.146: 9 no'lu elektrotun benzetimden kaldırıldığında elde edilen demet davranışı.

Şekil 3.146'da 9 no'lu elektrot benzetimden kaldırıldı. Burada demet yayınımlı= 40,4222 mm.mrad ve demet akımı= 1,52904 mA olarak ölçülmüştür.



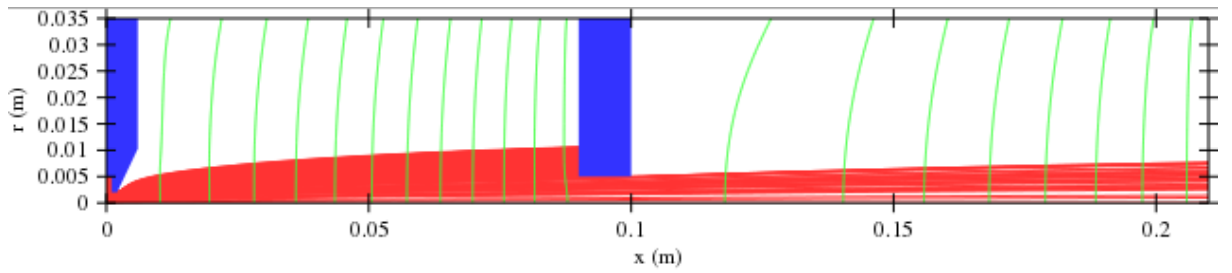
Şekil 3.147: 8 no'lu elektrotun konumunun 0,1 m olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

Şekil 3.147'de 9 no'lu elektrot benzetimden kaldırılarak 8 no'lu elektrotun optimizasyonu yapılmaya başlanmıştır. İlk olarak 8 no'lu elektrotun konumu değiştirilerek demete etkileri incelenmiştir. Burada 8 no'lu elektrotun konumu 0,1 m olarak ayarlanmıştır.



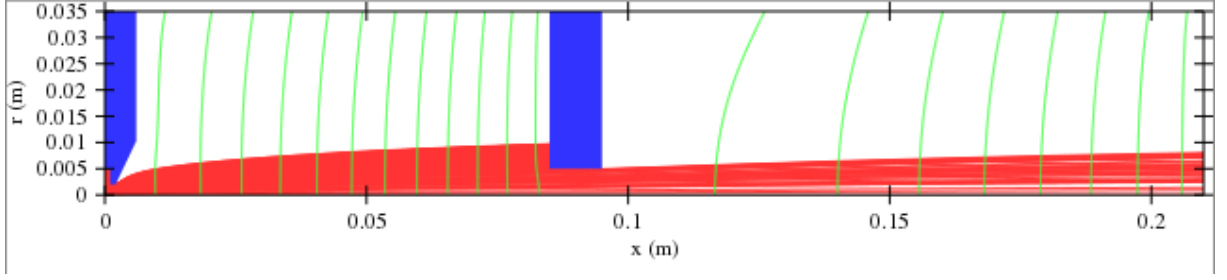
Şekil 3.148: 8 no'lu elektrotun konumu 0,095 m olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

Şekil 3.148'de 8 no'lu elektrot 0,0095 m konumuna getirilerek demetin davranışı incelenmektedir.



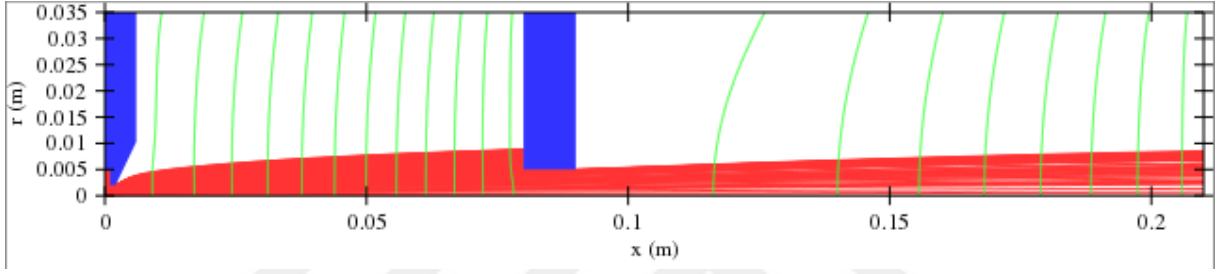
Şekil 3.149: 8 no'lu elektrotun konumu 0,09 m olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

Şekil 3.149'da 8 no'lu elektrot 0,09 m konumuna getirilerek demetin davranışı incelenmiştir.



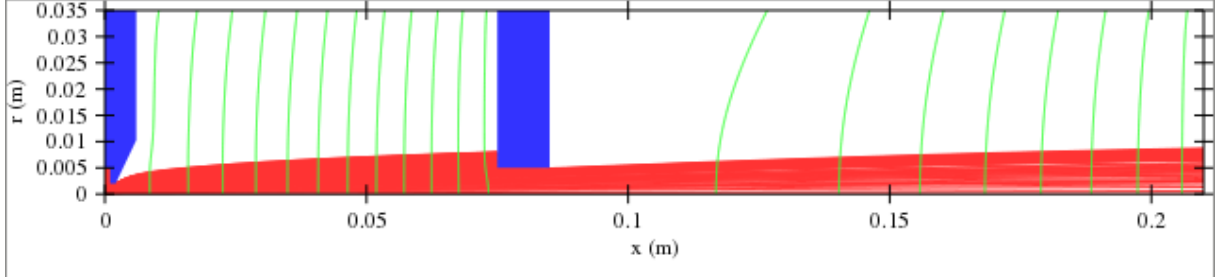
Şekil 3.150: 8 no'lu elektrotun konumu 0,085 m olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

Şekil 3.150'de 8 no'lu elektrot 0,085 m konumuna getirilerek demetin davranışı incelenmektedir.



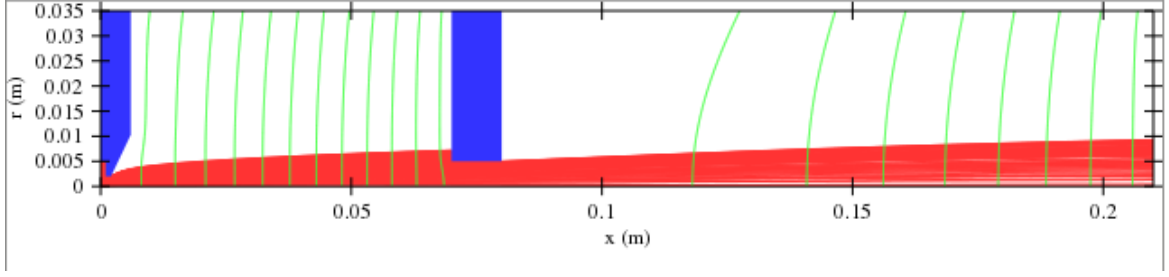
Şekil 3.151: 8 no'lu elektrotun konumu 0,08 m olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

Şekil 3.151'de 8 no'lu elektrot 0,08 m konumuna getirilerek demetin davranışı incelenmektedir.



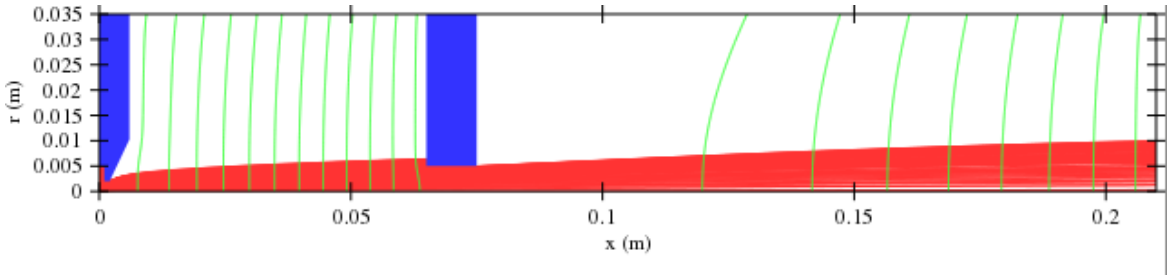
Şekil 3.152: 8 no'lu elektrotun konumu 0,075 m olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

Şekil 3.152'de 8 no'lu elektrot 0,075 m konumuna getirilerek demetin davranışı incelenmektedir.



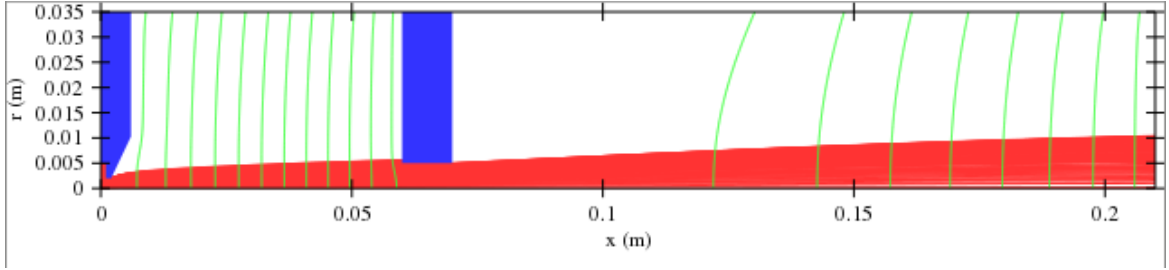
Şekil 3.153: 8 no'lu elektrotun konumu 0,07 m olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

Şekil 3.153'te 8 no'lu elektrot 0,07 m konumuna getirilerek demetin davranışı incelenmektedir.



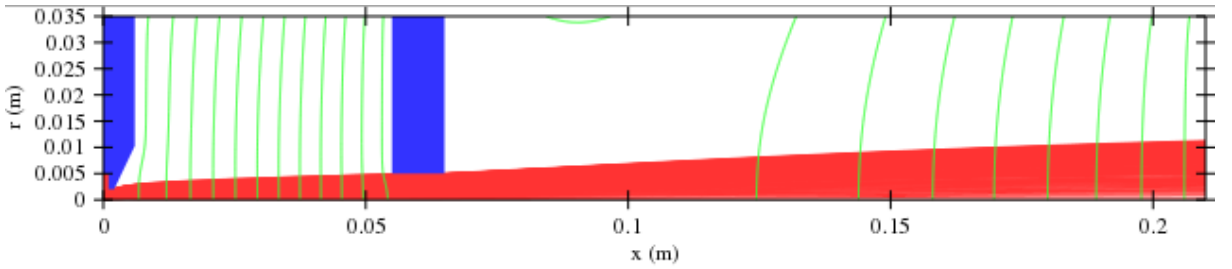
Şekil 3.154: 8 no'lu elektrotun konumu 0,065 m olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

Şekil 3.154'te 8 no'lu elektrot 0,065 m konumuna getirilerek demetin davranışı incelenmektedir.



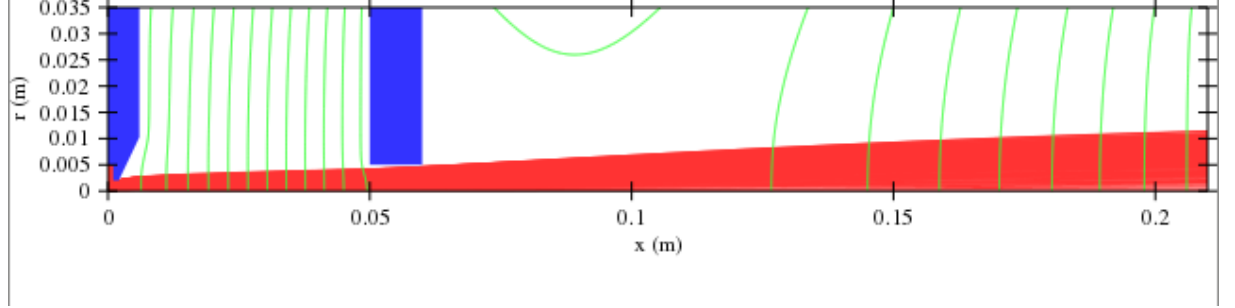
Şekil 3.155: 8 no'lu elektrotun konumu 0,06 m olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

Şekil 3.155'te 8 no'lu elektrot 0,06 m konumuna getirilerek demetin davranışı incelenmektedir.



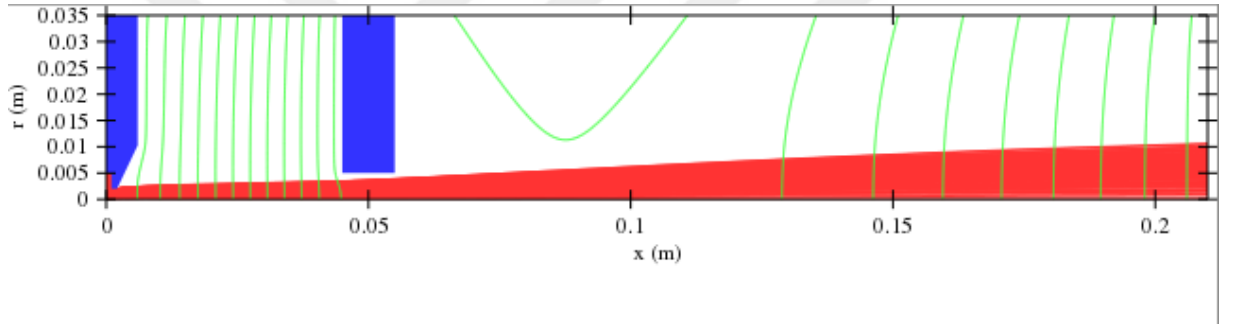
Şekil 3.156: 8 no'lu elektrotun konumu 0,055 m olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

Şekil 3.156'da 8 no'lu elektrot 0,055 m konumuna getirilerek demetin davranışı incelenmektedir.



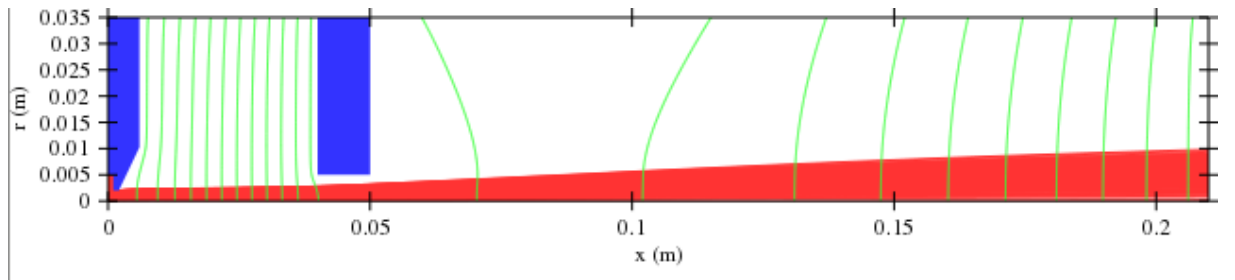
Şekil 3.157: 8 no'lu elektrotun konumu 0,05 m olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

Şekil 3.157'de 8 no'lu elektrot 0,05 m konumuna getirilerek demetin davranışı incelenmektedir.



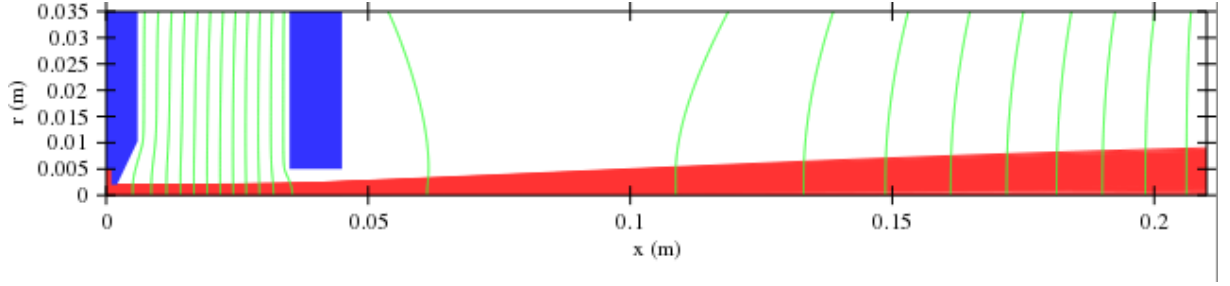
Şekil 3.158: 8 no'lu elektrotun konumu 0,045 m olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

Şekil 3.158'de 8 no'lu elektrot 0,045 m konumuna getirilerek demetin davranışı incelenmektedir.



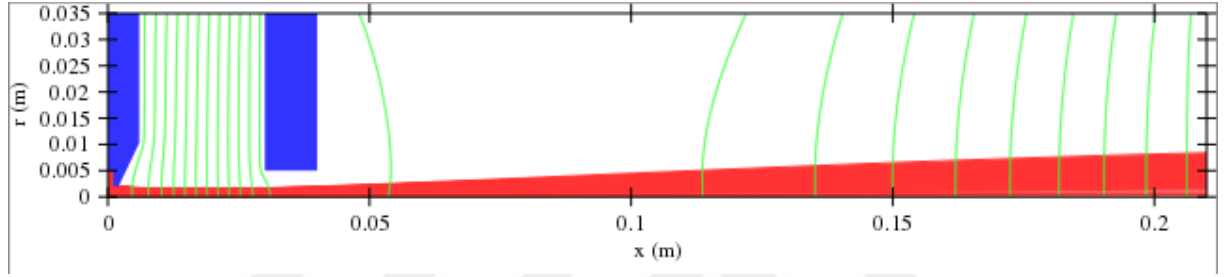
Şekil 3.159: 8 no'lu elektrotun konumu 0,04 m olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

Şekil 3.159'da 8 no'lu elektrot 0,04 m konumuna getirilerek demetin davranışı incelenmektedir.



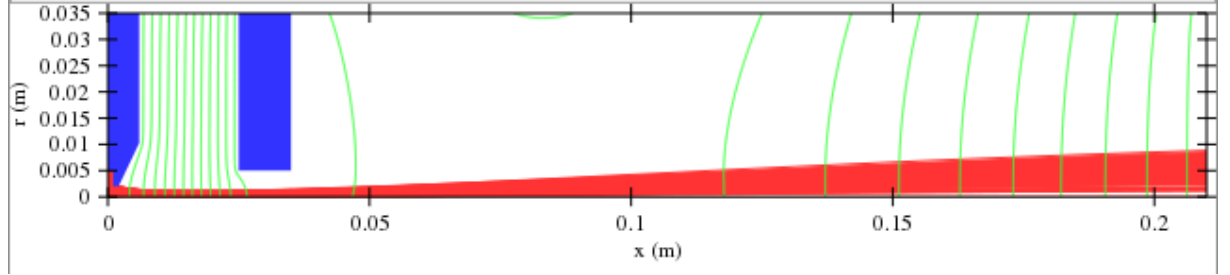
Şekil 3.160: 8 no'lu elektrotun konumu 0,035 m olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

Şekil 3.160'ta 8 no'lu elektrot 0,035 m konumuna getirilerek demetin davranışı incelenmektedir.



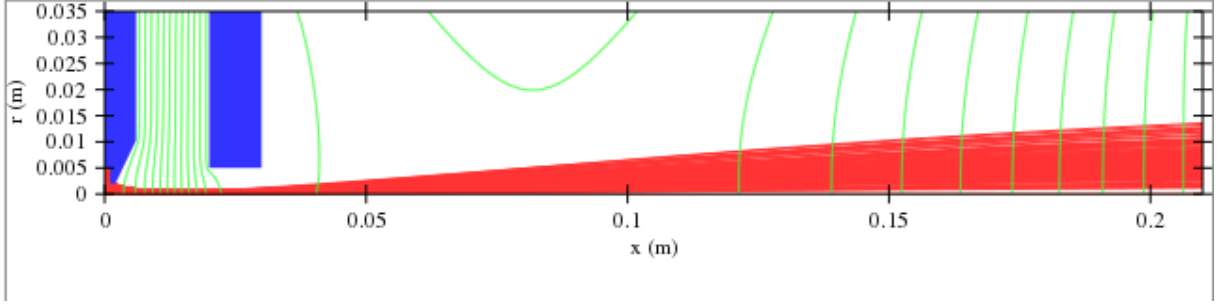
Şekil 3.161: 8 no'lu elektrotun konumu 0,03 m olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

Şekil 3.161'de 8 no'lu elektrot 0,03 m konumuna getirilerek demetin davranışı incelenmektedir.



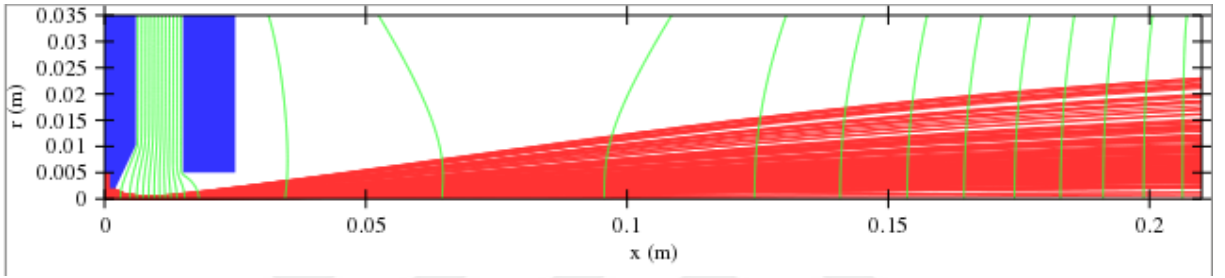
Şekil 3.162: 8 no'lu elektrotun konumu 0,025 m olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

Şekil 3.162'de 8 no'lu elektrot 0,025 m konumuna getirilerek demetin davranışı incelenmektedir.



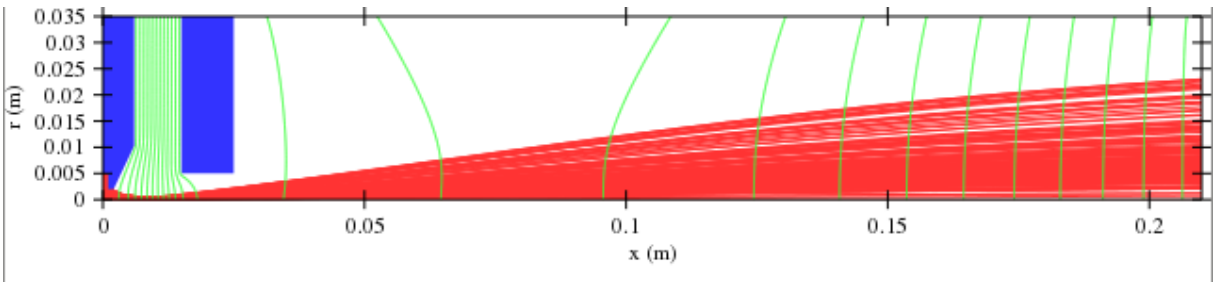
Şekil 3.163: 8 no'lu elektrotun konumu 0,02 m olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

Şekil 3.163'te 8 no'lu elektrot 0,02 m konumuna getirilerek demetin davranışı incelenmektedir.



Şekil 3.164: 8 no'lu elektrotun konumu 0,015 m olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

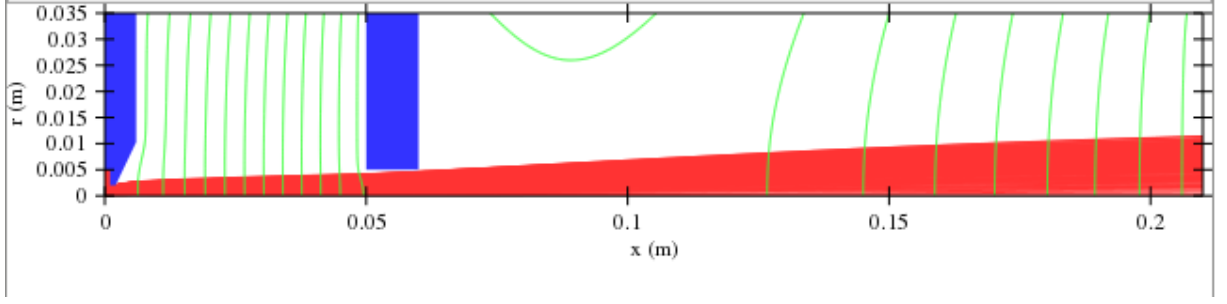
Şekil 3.164'te 8 no'lu elektrot 0,015 m konumuna getirilerek demetin davranışı incelenmektedir.



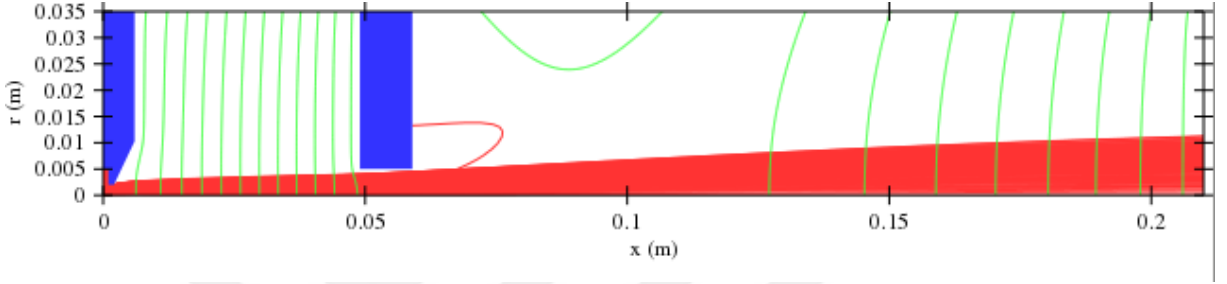
Şekil 3.165: 8 no'lu elektrotun konumu 0,01 m olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

Şekil 3.165'te 8 no'lu elektrot 0,01 m konumuna getirilerek demetin davranışı incelenmektedir.

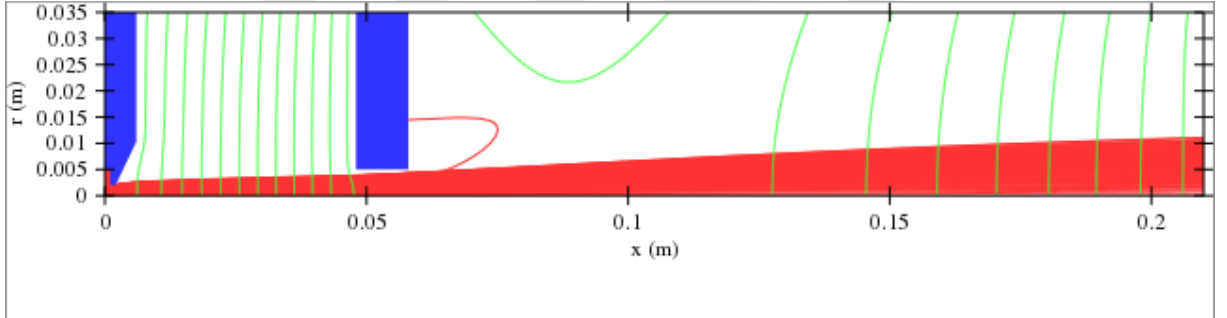
Şekil 3.166'dan Şekil 3.197'ye kadar olan benzetimlerde 8 nolu elektrotun konumu değiştirilerek elde edilen demetin davranışları gösterilmektedir.



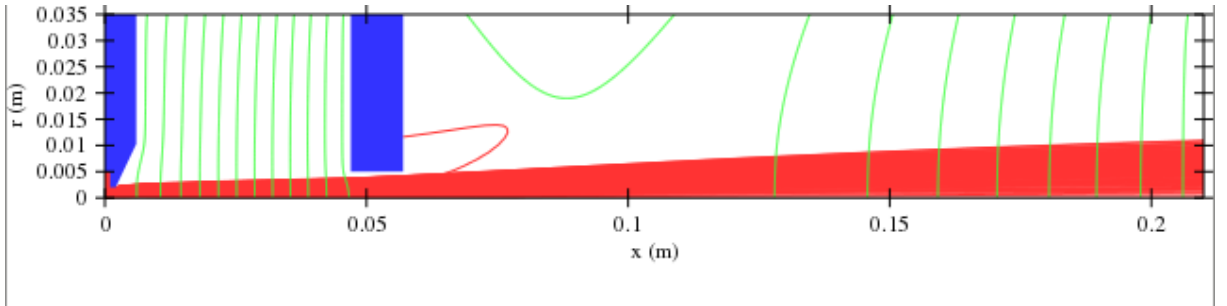
Şekil 3.166: 8 no'lu elektrotun konumu 0,05 m olarak alındığında elde edilen demet davranışı.



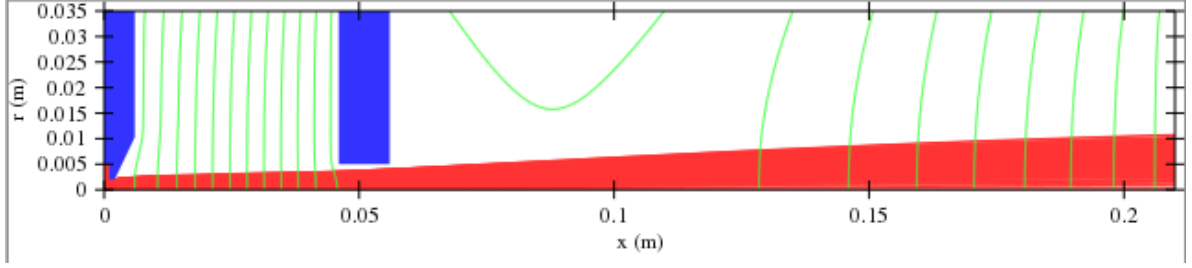
Şekil 3.167: 8 no'lu elektrotun konumu 0,049 m olarak alındığında elde edilen demet davranışı.



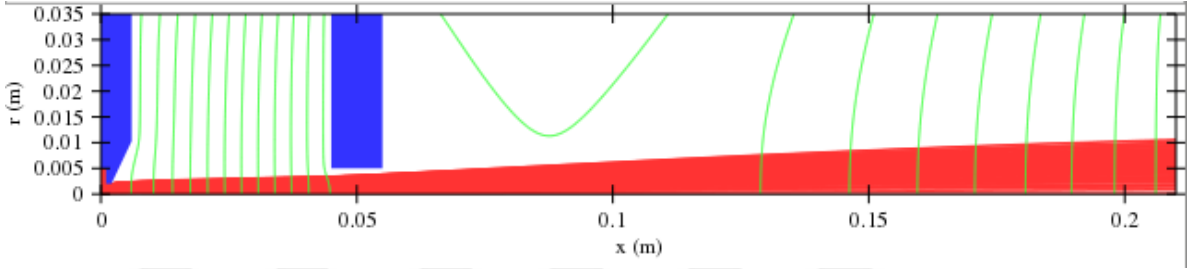
Şekil 3.168: 8 no'lu elektrotun konumu 0,048 m olarak alındığında elde edilen demet davranışı.



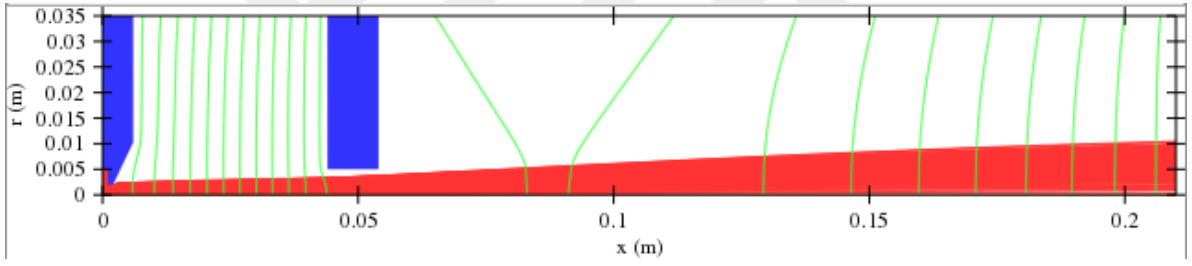
Şekil 3.169: 8 no'lu elektrotun konumu 0,047 m olarak alındığında elde edilen demet davranışı.



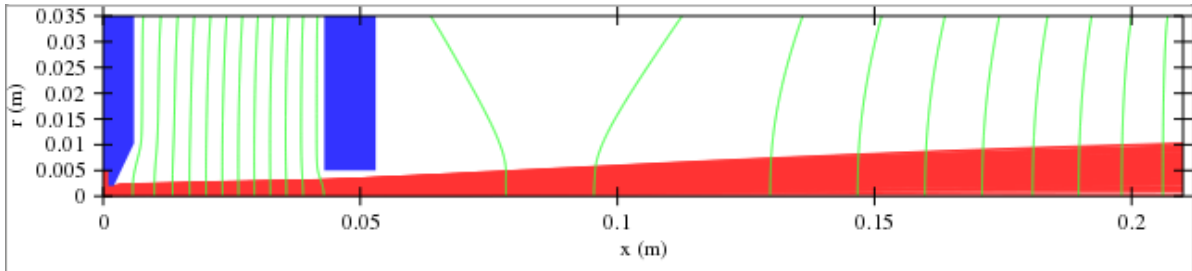
Şekil 3.170: 8 no'lu elektrotun konumu 0,046 m olarak alındığında elde edilen demet davranışı.



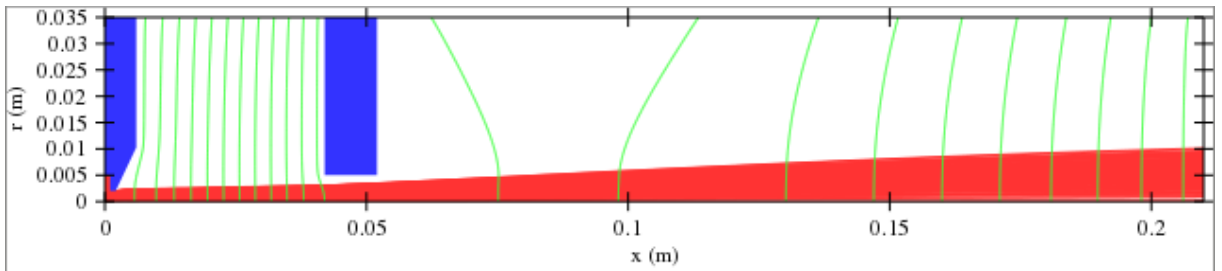
Şekil 3.171: 8 no'lu elektrotun konumu 0,045 m olarak alındığında elde edilen demet davranışı.



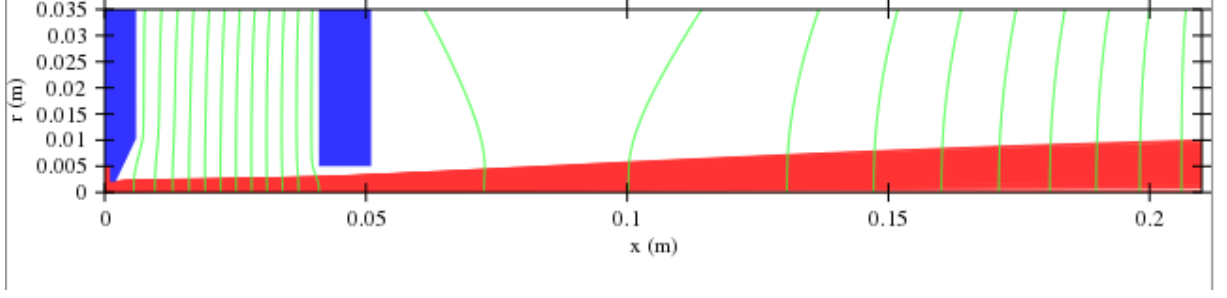
Şekil 3.172: 8 no'lu elektrotun konumu 0,044 m olarak alındığında elde edilen demet davranışı.



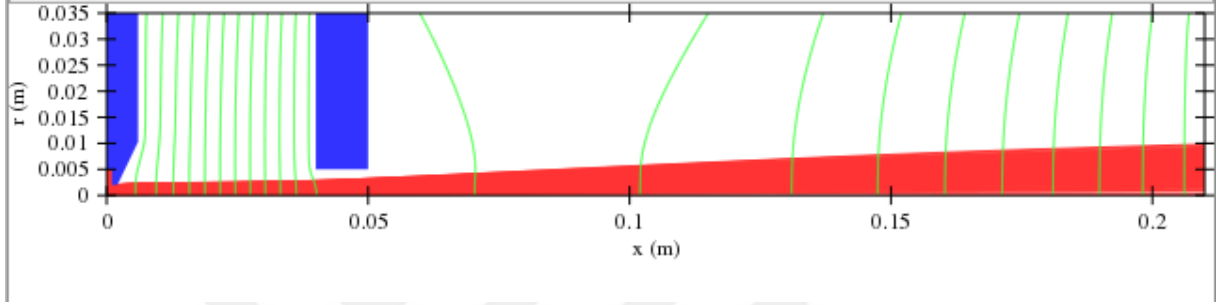
Şekil 3.173: 8 no'lu elektrotun konumu 0,043 m olarak alındığında elde edilen demet davranışı.



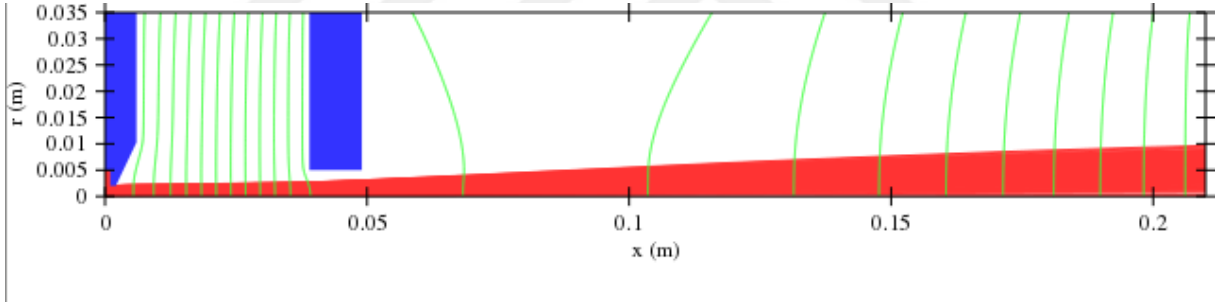
Şekil 3.174: 8 no'lu elektrotun konumu 0,042 m olarak alındığında elde edilen demet davranışı.



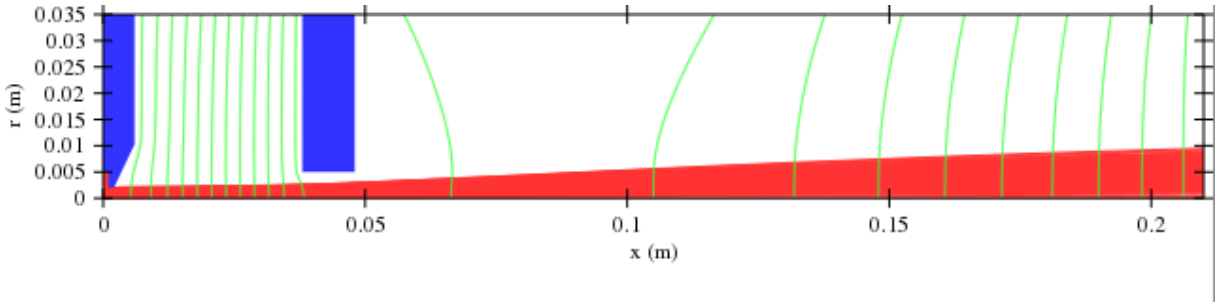
Şekil 3.175: 8 no'lu elektrotun konumu 0,041 m olarak alındığında elde edilen demet davranışı.



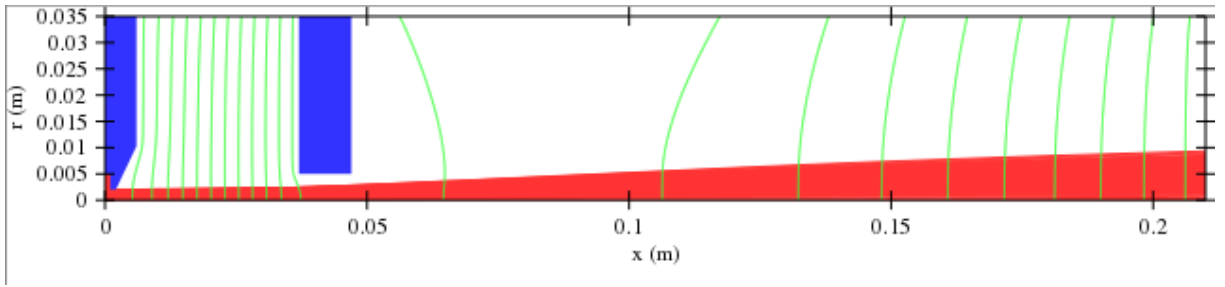
Şekil 3.176: 8 no'lu elektrotun konumu 0,04 m olarak alındığında elde edilen demet davranışı.



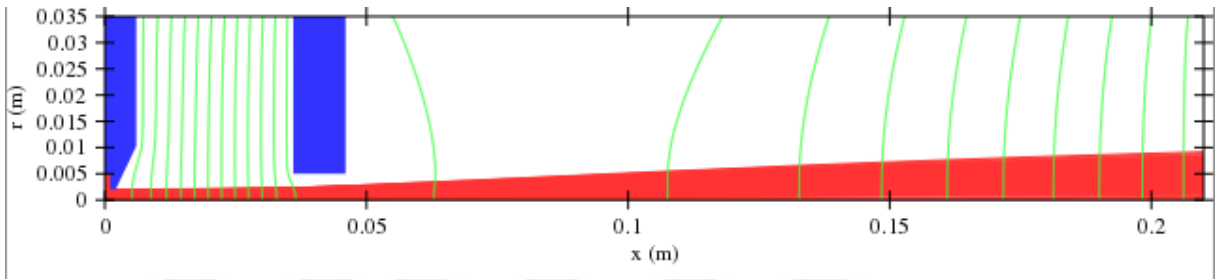
Şekil 3.177: 8 no'lu elektrotun konumu 0,039 m olarak alındığında elde edilen demet davranışı.



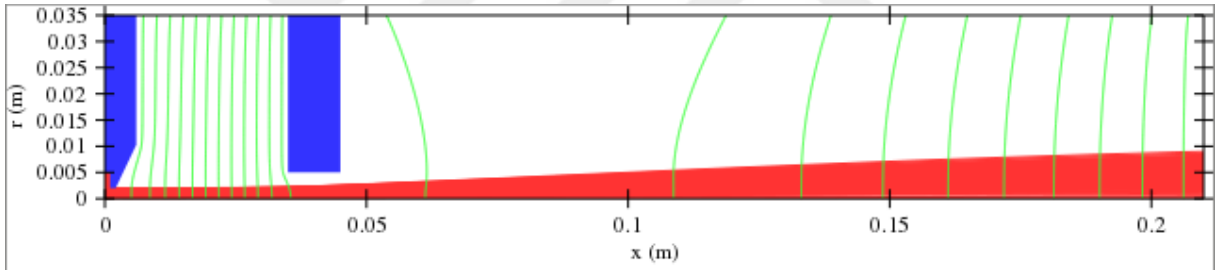
Şekil 3.178: 8 no'lu elektrotun konumu 0,038 m olarak alındığında elde edilen demet davranışı.



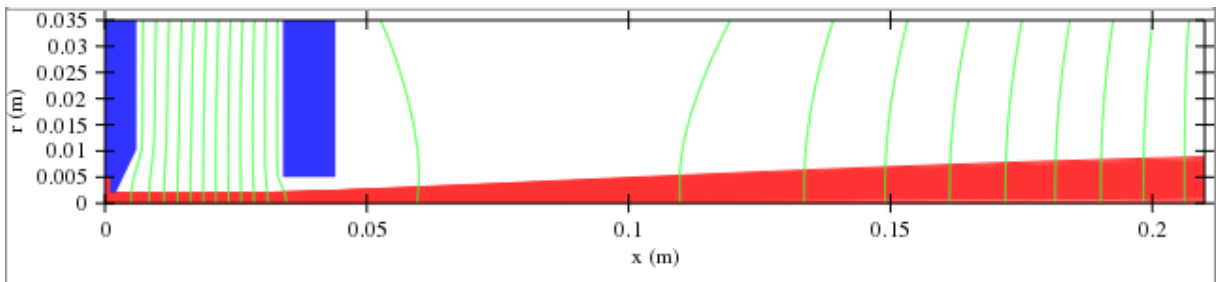
Şekil 3.179: 8 no'lu elektrotun konumu 0,037 m olarak alındığında elde edilen demet davranışı.



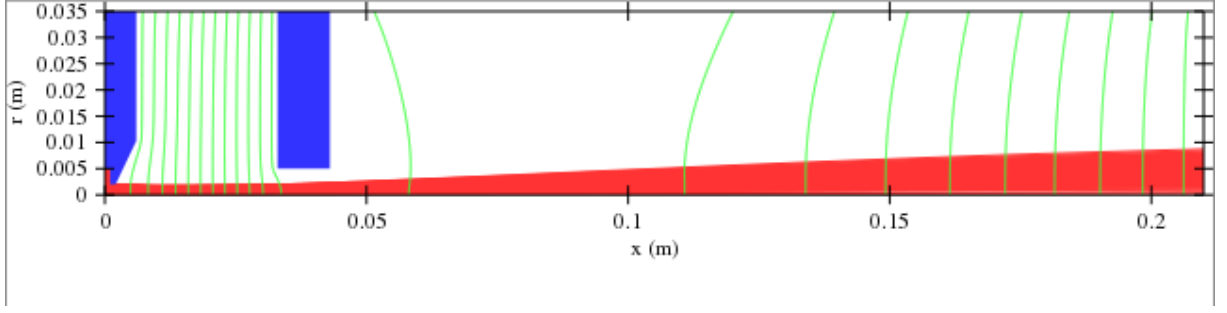
Şekil 3.180: 8 no'lu elektrotun konumu 0,036 m olarak alındığında elde edilen demet davranışı.



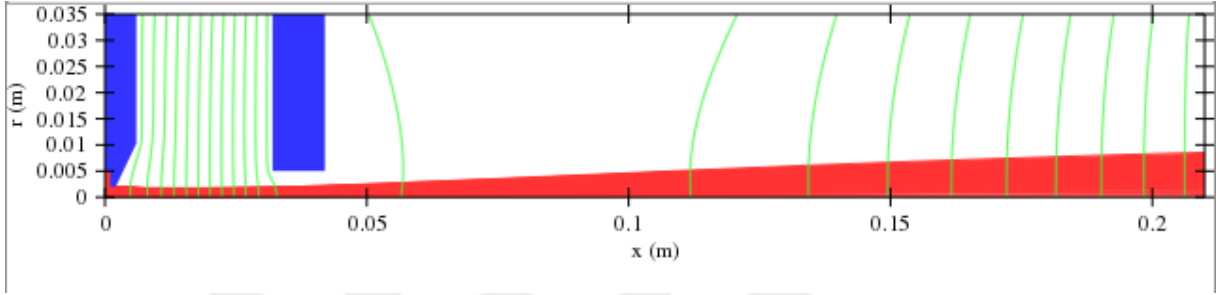
Şekil 3.181: 8 no'lu elektrotun konumu 0,035 m olarak alındığında elde edilen demet davranışı.



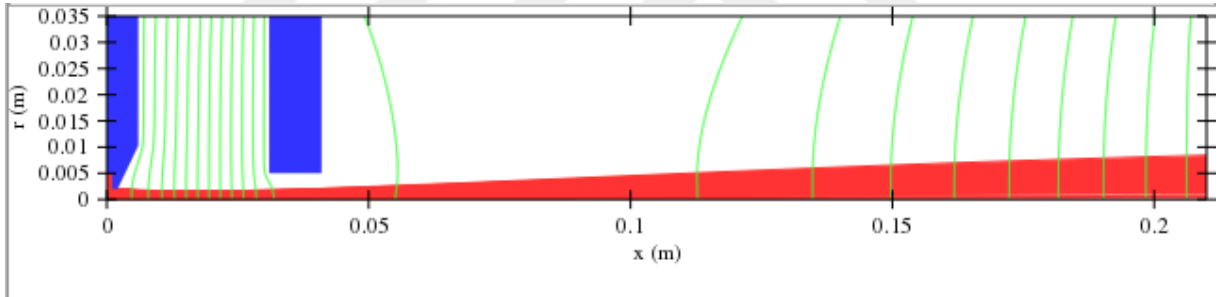
Şekil 3.182: 8 no'lu elektrotun konumu 0,034 m olarak alındığında elde edilen demet davranışı.



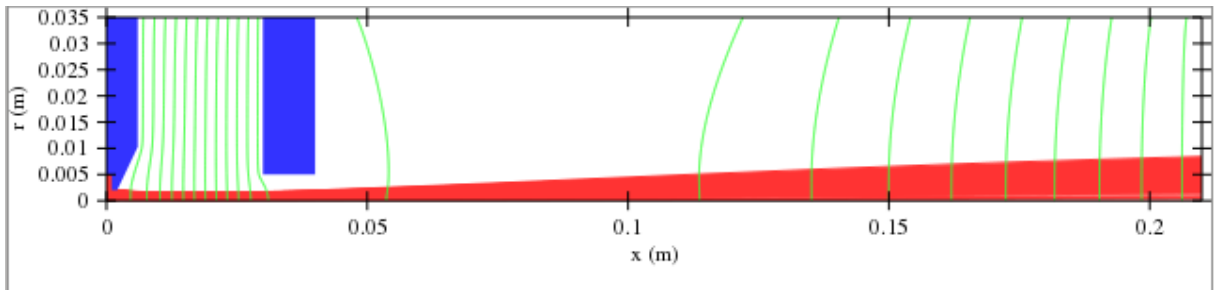
Şekil 3.183: 8 no'lu elektrotun konumu 0,033 m olarak alındığında elde edilen demet davranışı.



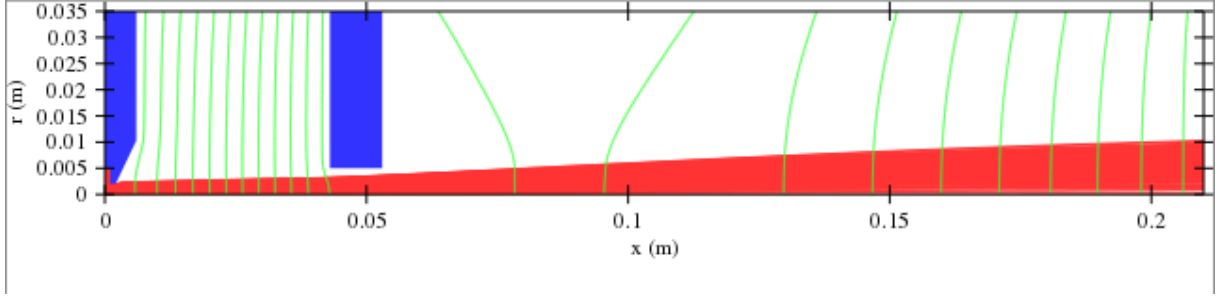
Şekil 3.184: 8 no'lu elektrotun konumu 0,032 m olarak alındığında elde edilen demet davranışı.



Şekil 3.185: 8 no'lu elektrotun konumu 0,031 m olarak alındığında elde edilen demet davranışı.



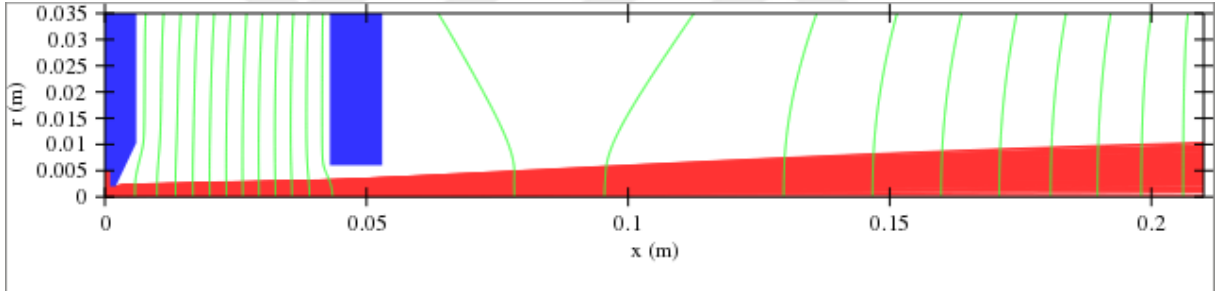
Şekil 3.186: 8 no'lu elektrotun konumu 0,03 m olarak alındığında elde edilen demet davranışı.



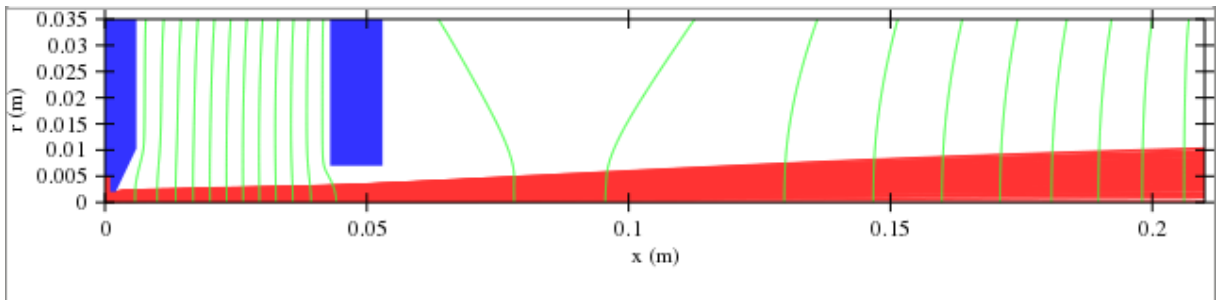
Şekil 3.187: 8 no'lu elektrotun boyu 0,005 m olarak alındığında elde edilen demet davranışı.

Şekil 3.187'de 8 no'lu elektrotun en iyi sonucu veren konumu belirlendikten sonra elektrotun boyu üzerinde değişiklikler yapılarak en iyi değer belirlenmeye çalışılmıştır. 8 no'lu elektrotun boyu 0,005 m olarak ayarlanmıştır.

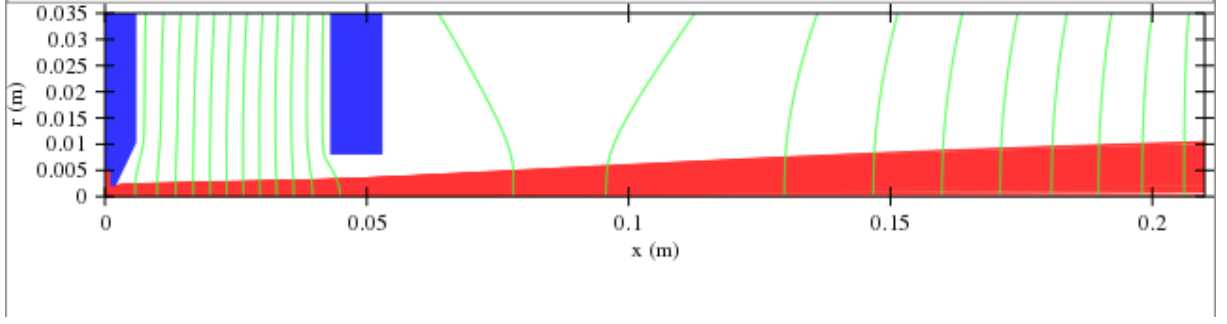
Şekil 3.188'den şekil. 3.192'ye kadar olan benzetimlerde 8 nolu elektrotun boyu 0,006 m ile 0,01 m arasında değiştirilerek sonuçların demet davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir.



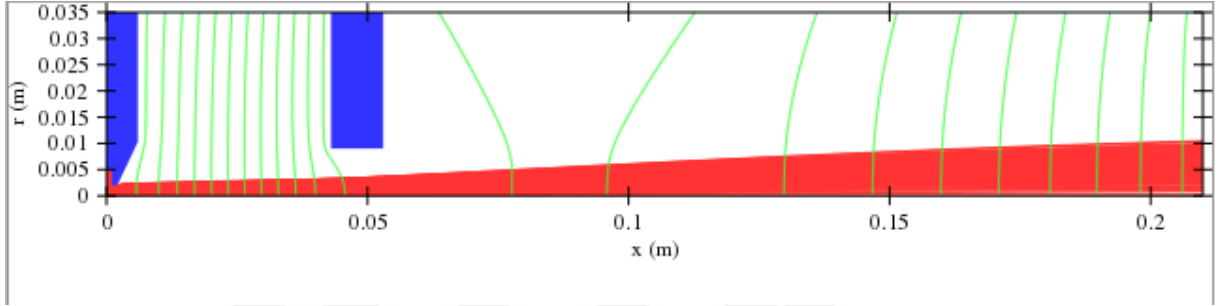
Şekil 3.188: 8 no'lu elektrotun boyu 0,006 m olarak alındığında elde edilen demet davranışı.



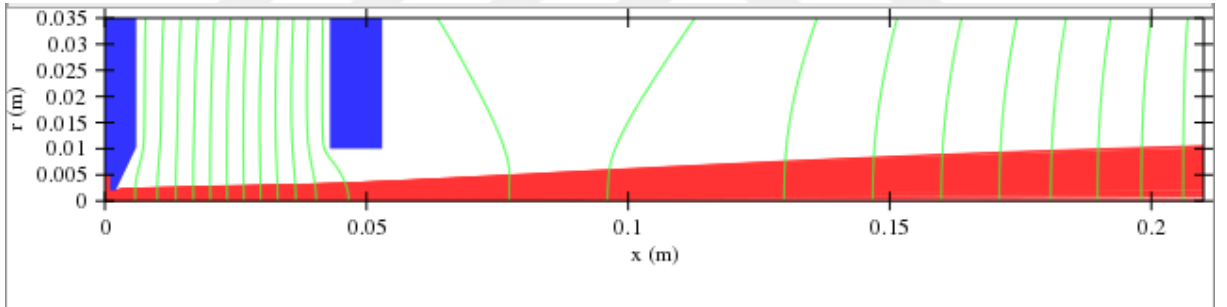
Şekil 3.189: 8 no'lu elektrotun boyu 0,007 m olarak alındığında elde edilen demet davranışı.



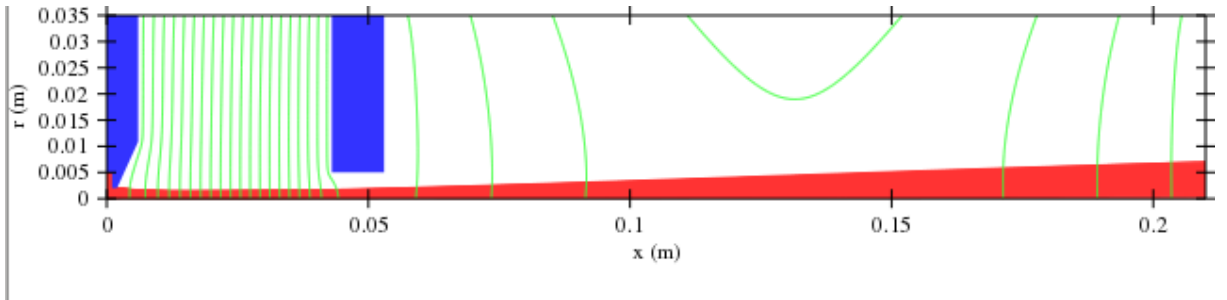
Şekil 3.190: 8 no'lu elektrotun boyu 0,008 m olarak alındığında elde edilen demet davranışı.



Şekil 3.191: 8 no'lu elektrotun boyu 0,009 m olarak alındığında elde edilen demet davranışı.



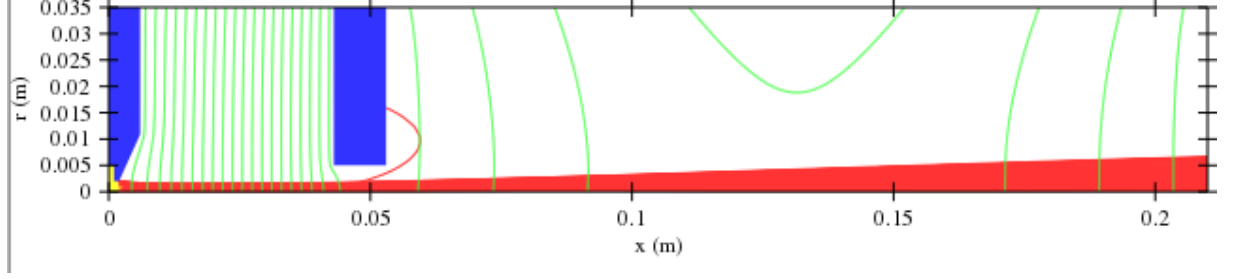
Şekil 3.192: 8 no'lu elektrotun boyu 0,01 m olarak alındığında elde edilen demet davranışı.



Şekil 3.193: Sadece protondan oluşan sistem.

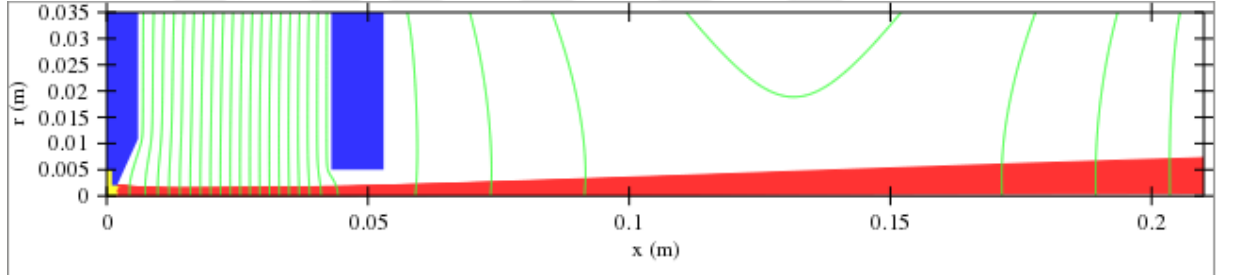
IBSimu programında plazma sıcaklığı eV biriminde verilmektedir ve 11600 K değerine eşittir. Bundan sonra iyon sıcaklığı ve elektron sıcaklığı olarak verilecek değerlerde bu birim dikkate

alınmalıdır [21,26]. Şekil 3.193'te sadece protondan oluşan sistem için en iyi durum görülmektedir. Burada proton sıcaklığı 5, elektron sıcaklığı 5 olarak ayarlanmıştır.

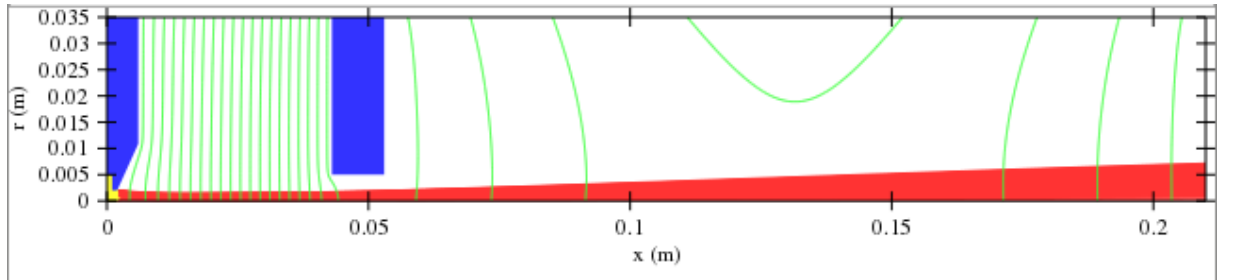


Şekil 3.194: Elektron ve protondan oluşan sistem.

Şekil 3.194'te elektron ve protondan oluşan sistem için elektron sıcaklığı 5, proton sıcaklığı 5 olarak ayarlanmıştır.

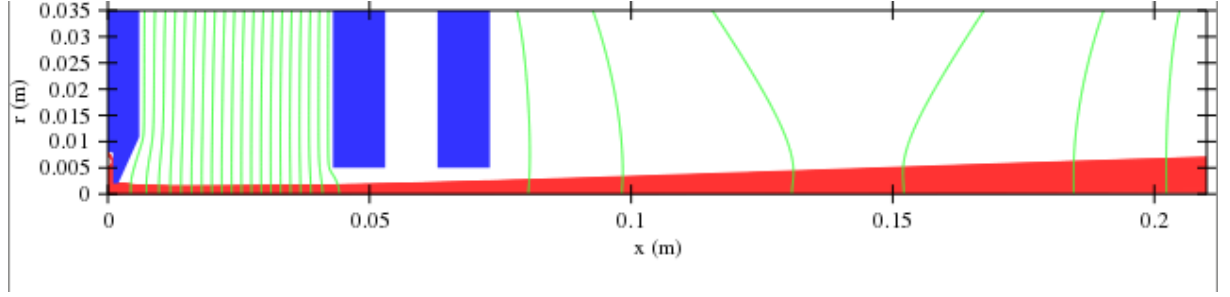


Şekil 3.195: Elektron ve protondan oluşan sistem için elektron sıcaklığı 10, proton sıcaklığı 5 olarak ayarlandığında elde edilen demet davranışı.



Şekil 3.196: Elektron ve protondan oluşan sistem için elektron sıcaklığı 20, proton sıcaklığı 5 olarak ayarlandığında elde edilen demet davranışı.

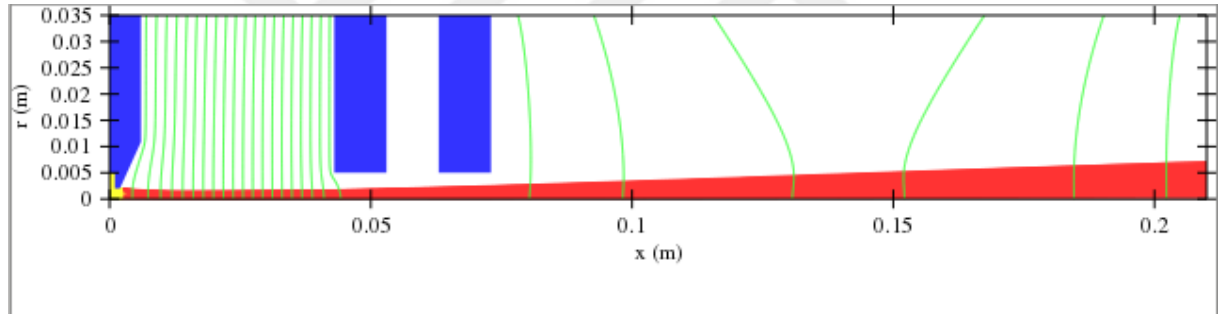
3.3.1.5.1. 3 Elektrodlü Elektrot Sistemi



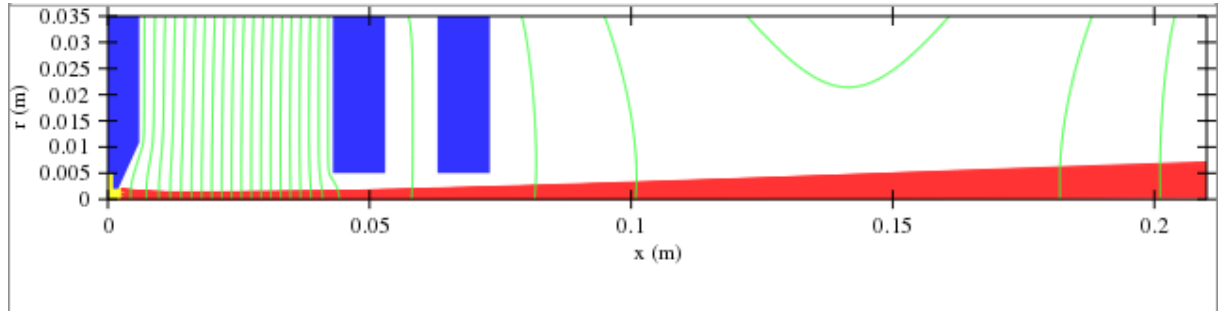
Şekil 3.197: 9 no'lu elektrot sisteme eklendiğinde elde edilen demet davranışı.

Şekil 3.197'de 9 no'lu elektrot sisteme eklenmiştir. Burada demet yayını $= 5,50229$ mm.mrad, demet akımı $= 1,02555$ mA ve demet çapı $= 7,1$ mm olarak ölçülmüştür.

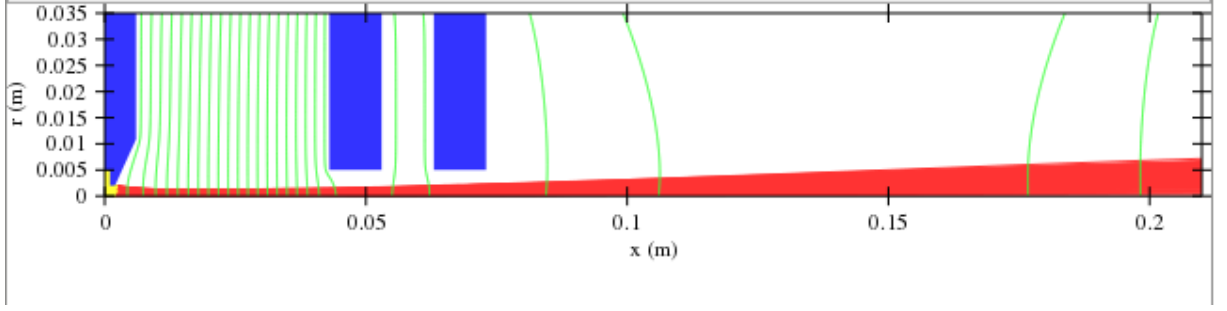
Şekil 3.198'den şekil 3.204'e kadar olan benzetimlerde 8 nolu elektrotun negatif potansiyelde tutulmasının demet davranışları üzerine etkileri görülmektedir.



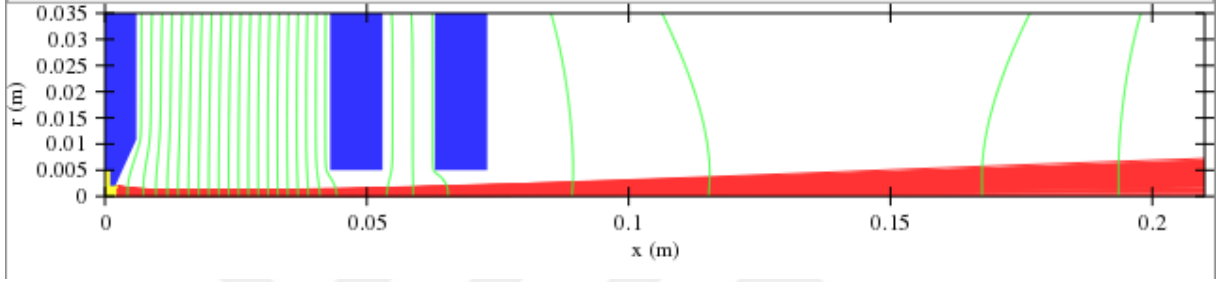
Şekil 3.198: 8 no'lu elektrotun potansiyeli 0 V olarak ayarlandığında elde edilen demet davranışı.



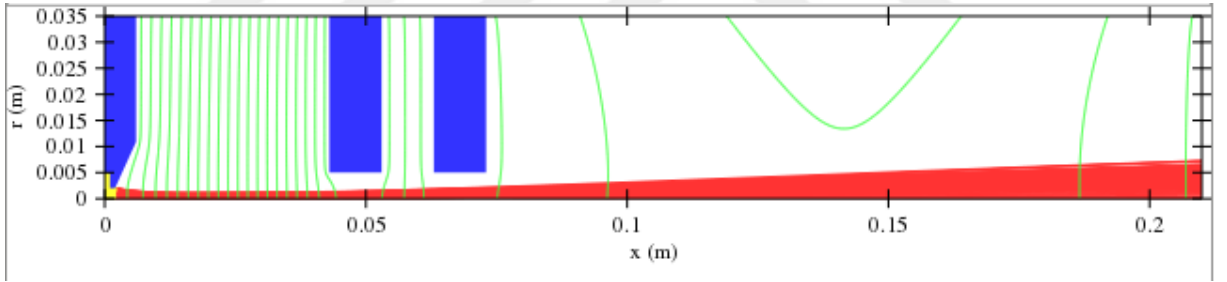
Şekil 3.199: 8 no'lu elektrotun potansiyeli -1×10^3 V olarak ayarlandığında elde edilen demet davranışı.



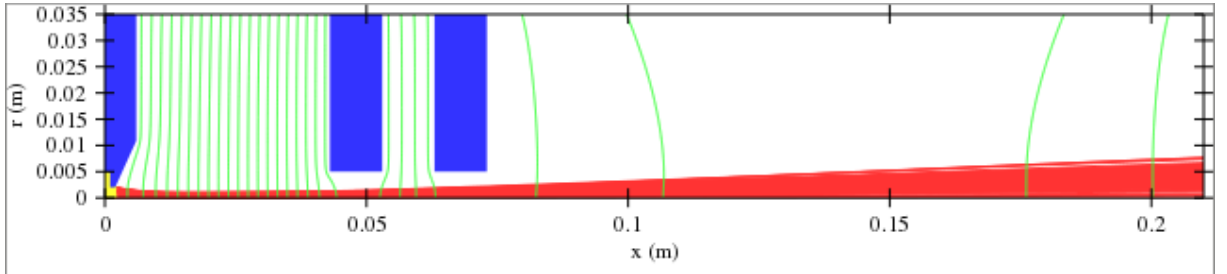
Şekil 3.200: 8 no'lu elektrotun potansiyeli -2×10^3 V olarak ayarlandığında elde edilen demet davranışı.



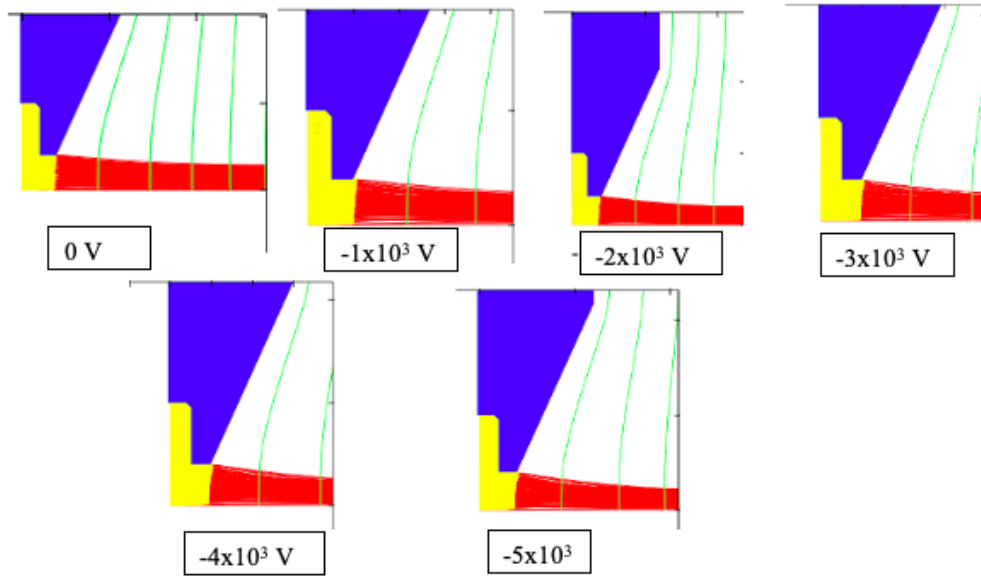
Şekil 3.201: 8 no'lu elektrotun potansiyeli -3×10^3 V olarak ayarlandığında elde edilen demet davranışı.



Şekil 3.202: 8 no'lu elektrotun potansiyeli -4×10^3 V olarak ayarlandığında elde edilen demet davranışı.



Şekil 3.203: 8 no'lu elektrotun potansiyeli -5×10^3 V olarak ayarlandığında elde edilen demet davranışı.



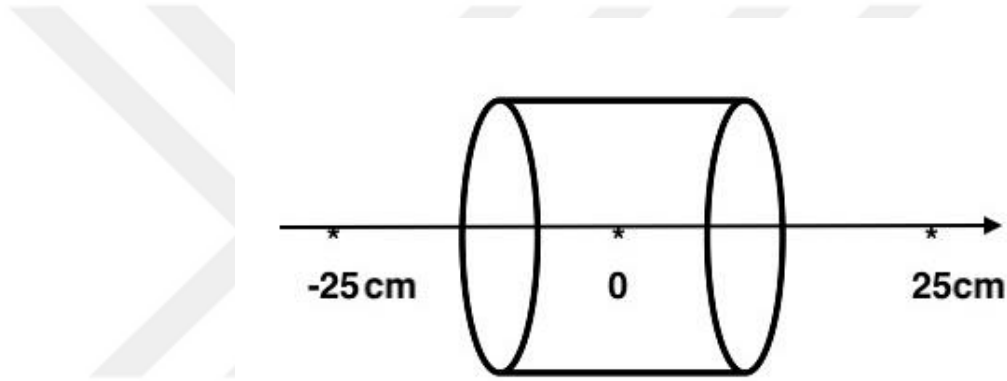
Şekil 3.204: 7 no'lu elektrota yakından bakıldığında elde edilen demet görüntüleri.

Şekil 3.204'te 8 no'lu elektrotun potansiyelinin negatif değerde tutularak değişimi incelendiğinde elektronların davranışını değerlendirmek için 7 no'lu elektrota daha yakından bakılmıştır.

4. BULGULAR

4.1. Manyetik Alan Ölçümleri Hata Oranı

DEDA Hattı solenoidlerinin manyetik alan ölçümleri benzetim sonuçları ile karşılaştırıldığında gözlenen en yüksek ve en düşük hata oranları, her iki solenoidin radyal ve eksenel proba ölçümleri için ayrı ayrı tablolar halinde verilmiştir. Ölçümler gerçekleştirilirken solenoidin merkezinden 25 cm dışarıdan başlayıp merkezden 25 cm dışarıda bitirip her 0,5 cm’de bir ölçüm tekrarlanarak sonuçlar kaydedilmiştir. Solenoidin ölçüm noktaları -25 cm ile 25 cm noktaları arasında gösterilmektedir (Şekil 4.1).



Şekil 4.1: Manyetik alan ölçümlerinin başlangıç ve bitiş noktalarının gösterimi.

Tablo 4.1’de merkezden 5 mm yukarıda en düşük ve en yüksek hatanın 0,05 G ve 17,20 G olduğu hesaplanmıştır. En düşük hata olan 0,05 G, Şekil 3.16’dan da görüleceği üzere z eksenı boyunca 12,5 cm konumunda belirlenmiştir. Burada hata oranı %56,9’dur. En yüksek hata, z eksenı boyunca Şekil 3.16’dan da görüleceği üzere 10 cm konumunda belirlenmiştir. Burada hata oranı %27,2’dir.

Merkezden 5 mm sağda en düşük ve en yüksek hatanın 0,03 G ve 10,20 G olduğu hesaplanmıştır. En düşük hata olan 0,03 G, Şekil 3.17’den de görüleceği üzere z eksenı boyunca şu -17 cm konumunda belirlenmiştir. Burada hata oranı %1,5’tir. En yüksek hata, z eksenı boyunca Şekil 3.17’den de görüleceği üzere 9,5 cm konumunda belirlenmiştir. Burada hata oranı %14,95’tir.

Merkezden 5 mm solda en düşük ve en yüksek hatanın 0,02 G ve 22,20 G olduğu hesaplanmıştır. En düşük hata olan 0,02 G, Şekil 3.18'den de görüleceği üzere z eksenini boyunca 15,5 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %0,49'dur. En yüksek hata, z eksenini boyunca Şekil 3.18'den de görüleceği üzere 10 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %35'tir.

Tablo 4.1: 4000 sarımlı solenoidin farklı noktalardan radyal prob ile ölçümündeki en düşük ve en yüksek hata miktarları.

Ölçüm Yeri	En Düşük Hata (Gauss)	En Yüksek Hata (Gauss)
Merkezden 5 mm yukarıdan	0,05	17,20
Merkezden 5 mm sağdan	0,03	10,20
Merkezden 5 mm soldan	0,02	22,20
Merkezden 5 mm aşağıdan	0,03	11,28
Merkezden 10 mm yukarıdan	0	8,54
Merkezden 10 mm sağdan	0	11,18
Merkezden 10 mm soldan	0,05	9,18
Merkezden 10 mm aşağıdan	0	9,82
Merkezden 15 mm yukarıdan	0,01	98,08
Merkezden 15 mm sağdan	0,71	138,99
Merkezden 15 mm soldan	0,12	87,17
Merkezden 15 mm aşağıdan	0,09	117,25
Merkezden 20 mm yukarıdan	0	31,81
Merkezden 20 mm sağdan	0,16	11,61
Merkezden 20 mm soldan	0	7,81
Merkezden 20mm aşağıdan	0,12	14,81

Merkezden 5 mm aşağıda en düşük ve en yüksek hatanın 0,03 G ve 11,28 G olduğu hesaplanmıştır. En düşük hata olan 0,03 G, Şekil 3.19'dan da görüleceği üzere z eksenini boyunca

-17 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %1,5'tir. En yüksek hata, z eksenı boyunca Şekil 3.19'dan da görüleceği üzere -11 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %24,4'tür.

Merkezden 10 mm yukarıda en düşük ve en yüksek hatanın 0 G ve 8,54 G olduğu hesaplanmıştır. En düşük hata olan 0 G, Şekil 3.20'den de görüleceği üzere z eksenı boyunca 0 konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %0'dır. En yüksek hata, z eksenı boyunca Şekil 3.20'den de görüleceği üzere -10 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %6,64'tür.

Merkezden 10 mm sağda en düşük ve en yüksek hatanın 0 G ve 11,18 G olduğu hesaplanmıştır. En düşük hata olan 0 G, Şekil 3.21'den de görüleceği üzere z eksenı boyunca 0 konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %0'dır. En yüksek hata, z eksenı boyunca Şekil 3.21'den de görüleceği üzere 8 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %9,1'dir.

Merkezden 10 mm solda en düşük ve en yüksek hatanın 0,05 G ve 9,18 G olduğu hesaplanmıştır. En düşük hata olan 0,05 G, Şekil 3.22'den de görüleceği üzere z eksenı boyunca 13 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %0,15'tir. En yüksek hata, z eksenı boyunca Şekil 3.22'den de görüleceği üzere 10,5 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %8,2'dir.

Merkezden 10 mm aşağıda en düşük ve en yüksek hatanın 0 G ve 9,82 G olduğu hesaplanmıştır. En düşük hata olan 0 G, Şekil 3.23'ten de görüleceği üzere z eksenı boyunca 0 konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %0'dır. En yüksek hata, z eksenı boyunca Şekil 3.23'ten de görüleceği üzere -10,5 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %8,78'dir.

Merkezden 15 mm yukarıda en düşük ve en yüksek hatanın 0,01 G ve 98,08 G olduğu hesaplanmıştır. En düşük hata olan 0,01 G, Şekil 3.24'ten de görüleceği üzere z eksenı boyunca -23 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %1'dir. En yüksek hata, z eksenı boyunca Şekil 3.24'ten de görüleceği üzere -5,5 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %129'dur.

Merkezden 15 mm sağda en düşük ve en yüksek hatanın 0,071 G ve 138,99 G olduğu hesaplanmıştır. En düşük hata olan 0,071 G, Şekil 3.25'ten de görüleceği üzere z eksenı boyunca -20,5 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %41,5'tir. En yüksek hata, z

ekseni boyunca Şekil 3.25'ten de görüleceği üzere 8,5 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %66,2'dir.

Merkezden 15 mm solda en düşük ve en yüksek hatanın 0,12 G ve 87,17 G olduğu hesaplanmıştır. En düşük hata olan 0,12 G, Şekil 3.26'dan da görüleceği üzere z eksenini boyunca 15,5 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %1,1'dir. En yüksek hata, z eksenini boyunca Şekil 3.26'dan da görüleceği üzere 9,5 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %40,1'dir.

Merkezden 15 mm aşağıda en düşük ve en yüksek hatanın 0,09 G ve 117,25 G olduğu hesaplanmıştır. En düşük hata olan 0,09 G, Şekil 3.27'den de görüleceği üzere z eksenini boyunca 14,5 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %0,48'dir. En yüksek hata, z eksenini boyunca Şekil 27'den de görüleceği üzere 9 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %53'tür.

Merkezden 20 mm yukarıda en düşük ve en yüksek hatanın 0 G ve 31,81 G olduğu hesaplanmıştır. En düşük hata olan 0 G, Şekil 3.28'den de görüleceği üzere z eksenini boyunca 0 konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %0'dır. En yüksek hata, z eksenini boyunca Şekil 3.28'den de görüleceği üzere -9 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %10,2'dir.

Merkezden 20 mm sağda en düşük ve en yüksek hatanın 0,016 G ve 11,61 G olduğu hesaplanmıştır. En düşük hata olan 0,16 G, Şekil 3.29'dan da görüleceği üzere z eksenini boyunca 5,5 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %0,16'dır. En yüksek hata, z eksenini boyunca Şekil 3.29'dan da görüleceği üzere 12 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %11,2'dir.

Merkezden 20 mm solda en düşük ve en yüksek hatanın 0 G ve 7,81 G olduğu hesaplanmıştır. En düşük hata olan 0 G, Şekil 3.30'dan da görüleceği üzere z eksenini boyunca 0 konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %0'dır. En yüksek hata, z eksenini boyunca Şekil 3.30'dan da görüleceği üzere -9 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %2,5'tir.

Merkezden 20 mm aşağıda en düşük ve en yüksek hatanın 0,12 G ve 14,81 G olduğu hesaplanmıştır. En düşük hata olan 0,12 G, Şekil 3.31'den de görüleceği üzere z eksenini boyunca 2 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %0,5'tir. En yüksek hata, z eksenini boyunca Şekil 3.31'den de görüleceği üzere -9 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %4,7'dir.

Tablo 4.2: 4000 sarımlı solenoidin farklı noktalardan eksenel prob ile ölçümündeki en düşük ve en yüksek hata miktarları.

Ölçüm Yeri	En Düşük Hata (Gauss)	En Yüksek Hata (Gauss)
Merkezden 5 mm yukarıdan	0,14	193,49
Merkezden 5 mm sağdan	0,06	254,91
Merkezden 5 mm soldan	0,02	152,91
Merkezden 5 mm aşağıdan	0	36,62
Merkezden 10 mm yukarıdan	0	175,61
Merkezden 10 mm sağdan	0	137,61
Merkezden 10 mm soldan	0	130,06
Merkezden 10 mm aşağıdan	0	133,06
Merkezden 15 mm yukarıdan	0	138,56
Merkezden 15 mm sağdan	0	116,05
Merkezden 15 mm soldan	0,01	103,56
Merkezden 15 mm aşağıdan	0	90,58
Merkezden 20 mm yukarıdan	0,02	279,9
Merkezden 20 mm sağdan	0	132,58
Merkezden 20 mm soldan	0,02	126,84
Merkezden 20 mm aşağıdan	0	151,15

Tablo 4.2’de merkezden 5 mm yukarıda en düşük ve en yüksek hatanın 0,14 G ve 193,49 G olduğu hesaplanmıştır. En düşük hata olan 0,14 G, Şekil 3.32’den de görüleceği üzere z eksenı boyunca -14,5 cm konumunda belirlenmiştir. Burada hata oranı %0,2’dir. En yüksek hata, z eksenı boyunca Şekil 3.32’den de görüleceği üzere 7,5 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %15,6’dır.

Merkezden 5 mm sağda en düşük ve en yüksek hatanın 0,06 G ve 254,91 G olduğu hesaplanmıştır. En düşük hata olan 0,06 G, Şekil 3.33’ten de görüleceği üzere z eksenı boyunca

-17 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %0,25'tir. En yüksek hata, z eksen boyunc Şekil 3.33'ten de görüleceği üzere -8,5 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %25,6'dır.

Merkezden 5 mm solda en düşük ve en yüksek hatanın 0,02 G ve 152,91 G olduğu hesaplanmıştır. En düşük hata olan 0,02 G, Şekil 3.34'ten de görüleceği üzere z eksen boyunc 17 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %0,08'dir. En yüksek hata, z eksen boyunc Şekil 3.34'ten de görüleceği üzere -8,5 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %15,36'dır.

Merkezden 5 mm aşağıda en düşük ve en yüksek hatanın 0 G ve 36,62 G olduğu hesaplanmıştır. En düşük hata olan 0 G, Şekil 3.35'ten de görüleceği üzere z eksen boyunc -25 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %0'dır. En yüksek hata, z eksen boyunc Şekil 3.35'ten de görüleceği üzere -1,5 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %2'dir.

Merkezden 10 mm yukarıda en düşük ve en yüksek hatanın 0 G ve 175,61 G olduğu hesaplanmıştır. En düşük hata olan 0 G, Şekil 3.36'dan da görüleceği üzere z eksen boyunc 25 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %0'dır. En yüksek hata, z eksen boyunc Şekil 3.36'dan da görüleceği üzere -9 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %20,5'tir.

Merkezden 10 mm sağda en düşük ve en yüksek hatanın 0 G ve 137,61 G olduğu hesaplanmıştır. En düşük hata olan 0 G, Şekil 3.37'den de görüleceği üzere z eksen boyunc 25 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %0'dır. En yüksek hata, z eksen boyunc Şekil 3.37'den de görüleceği üzere -9 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %16'dır.

Merkezden 10 mm solda en düşük ve en yüksek hatanın 0 G ve 130,06 G olduğu hesaplanmıştır. En düşük hata olan 0 G, Şekil 3.38'den de görüleceği üzere z eksen boyunc 25 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %0'dır. En yüksek hata, z eksen boyunc Şekil 3.38'den de görüleceği üzere -8,5 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %12,98'dir.

Merkezden 10 mm aşağıda en düşük ve en yüksek hatanın 0 G ve 133,06 G olduğu hesaplanmıştır. En düşük hata olan 0 G, Şekil 3.39'dan da görüleceği üzere z eksen boyunc 25 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %0'dır. En yüksek hata, z eksen boyunc Şekil 3.39'dan da görüleceği üzere -8,5 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %13,3'tür.

Merkezden 15 mm yukarıda en düşük ve en yüksek hatanın 0 G ve 138,56 G olduğu hesaplanmıştır. En düşük hata olan 0 G, Şekil 3.40'tan da görüleceği üzere z ekseni boyunca 25 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %0'dır. En yüksek hata, z ekseni boyunca Şekil 3.40'tan da görüleceği üzere -8,5 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %13,5'dir.

Merkezden 15 mm sağda en düşük ve en yüksek hatanın 0 G ve 116,05 G olduğu hesaplanmıştır. En düşük hata olan 0 G, Şekil 3.41'den de görüleceği üzere z ekseni boyunca 25 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %0'dır. En yüksek hata, z ekseni boyunca Şekil 3.41'den de görüleceği üzere -8,5 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %13,3'tür.

Merkezden 15 mm solda en düşük ve en yüksek hatanın 0,01 G ve 103,56 G olduğu hesaplanmıştır. En düşük hata olan 0,01 G, Şekil 3.42'den de görüleceği üzere z ekseni boyunca -22,5 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %0,2'dir. En yüksek hata, z ekseni boyunca Şekil 3.42'den de görüleceği üzere -8,5 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %10'dur.

Merkezden 15 mm aşağıda en düşük ve en yüksek hatanın 0 G ve 90,58 G olduğu hesaplanmıştır. En düşük hata olan 0 G, Şekil 3.43'ten de görüleceği üzere z ekseni boyunca 25 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %0'dır. En yüksek hata, z ekseni boyunca Şekil 3.43'ten de görüleceği üzere -8,5 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %8,8'dir.

Merkezden 20 mm yukarıda en düşük ve en yüksek hatanın 0,02 G ve 279,9 G olduğu hesaplanmıştır. En düşük hata olan 0,02 G, Şekil 3.44'ten de görüleceği üzere z ekseni boyunca -24 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %0,66'dır. En yüksek hata, z ekseni boyunca Şekil 3.44'ten de görüleceği üzere 10 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %52,9'dur.

Merkezden 20 mm sağda en düşük ve en yüksek hatanın 0 G ve 132,58 G olduğu hesaplanmıştır. En düşük hata olan 0 G, Şekil 3.45'ten de görüleceği üzere z ekseni boyunca 18 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %0'dır. En yüksek hata, z ekseni boyunca Şekil 3.45'ten de görüleceği üzere -8,5 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %12,6'dır.

Merkezden 20 mm solda en düşük ve en yüksek hatanın 0,02 G ve 126,84 G olduğu hesaplanmıştır. En düşük hata olan 0,02 G, Şekil 3.46'dan da görüleceği üzere z eksenini boyunca -24 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %0,66'dır. En yüksek hata, z eksenini boyunca Şekil 3.46'dan da görüleceği üzere -9,5 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %18,3'tür.

Merkezden 20 mm aşağıda en düşük ve en yüksek hatanın 0 G ve 151,15 G olduğu hesaplanmıştır. En düşük hata olan 0 G, Şekil 3.47'den de görüleceği üzere z eksenini boyunca 18 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %0'dır. En yüksek hata, z eksenini boyunca Şekil 3.47'den de görüleceği üzere -9,5 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %21,75'tir.

Tablo 4.3'te merkezden 5 mm yukarıda en düşük ve en yüksek hatanın 0 G ve 6,88 G olduğu hesaplanmıştır. En düşük hata olan 0 G, Şekil 3.48'den de görüleceği üzere z eksenini boyunca 0cm konumunda belirlenmiştir. Burada hata oranı %0'dır. En yüksek hata, z eksenini boyunca Şekil 3.48'den de görüleceği üzere -11 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %15'tir.

Merkezden 5 mm sağda en düşük ve en yüksek hatanın 0 G ve 2,93 G olduğu hesaplanmıştır. En düşük hata olan 0 G, Şekil 3.49'dan da görüleceği üzere z eksenini boyunca -15,5 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %0'dır. En yüksek hata, z eksenini boyunca Şekil 3.49'dan da görüleceği üzere -8,5 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %4,8'dir.

Merkezden 5mm solda en düşük ve en yüksek hatanın 0 G ve 2,93 G olduğu hesaplanmıştır. En düşük hata olan 0 G, Şekil 3.50'den de görüleceği üzere z eksenini boyunca -15,5 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %0'dır. En yüksek hata, z eksenini boyunca Şekil 3.50'den de görüleceği üzere 8 cm konumunda belirlenmiştir. Burada hata %4,8'dir.

Merkezden 5 mm aşağıda en düşük ve en yüksek hatanın 0 G ve 2,93 G olduğu hesaplanmıştır. En düşük hata olan 0 G, Şekil 3.51'den de görüleceği üzere z eksenini boyunca -15,5 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %0'dır. En yüksek hata, z eksenini boyunca Şekil 3.51'den de görüleceği üzere -8 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %4,8'dir.

Merkezden 10 mm yukarıda en düşük ve en yüksek hatanın 0 G ve 2,31 G olduğu hesaplanmıştır. En düşük hata olan 0 G, Şekil 3.52'den de görüleceği üzere z eksenini boyunca 0

cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %0'dır. En yüksek hata, z eksenı boyunca Şekil 3.52'den de görüleceği üzere 9 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %1,6'dır.

Tablo 4.3: 1682 sarımlı solenoidin farklı noktalardan radyal prob ile ölçümündeki en düşük ve en yüksek hata miktarları.

Ölçüm Yeri	En Düşük Hata (Gauss)	En Yüksek Hata (Gauss)
Merkezden 5 mm yukarıdan	0	6,88
Merkezden 5 mm sağdan	0	2,93
Merkezden 5 mm soldan	0	2,93
Merkezden 5 mm aşağıdan	0	2,93
Merkezden 10 mm yukarıdan	0	2,31
Merkezden 10 mm sağdan	0,02	3,56
Merkezden 10 mm soldan	0	2,18
Merkezden 10 mm aşağıdan	0,01	3,44
Merkezden 15 mm yukarıdan	0,01	30,22
Merkezden 15 mm sağdan	0,01	57,47
Merkezden 15 mm soldan	0	40,59
Merkezden 15 mm aşağıdan	0,01	63,86
Merkezden 20 mm yukarıdan	0	82,54
Merkezden 20 mm sağdan	0,02	38,09
Merkezden 20 mm soldan	0,04	44,97
Merkezden 20 mm aşağıdan	0,02	98,71

Merkezden 10 mm sağda en düşük ve en yüksek hatanın 0,02 G ve 3,56 G olduğu hesaplanmıştır. En düşük hata olan 0,02 G, Şekil 3.53'ten de görüleceği üzere z eksenini boyunca 3 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %0,1'dir. En yüksek hata, z eksenini boyunca Şekil 3.53'ten de görüleceği üzere -10,5 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %3,2'dir.

Merkezden 10 mm solda en düşük ve en yüksek hatanın 0 G ve 2,18 G olduğu hesaplanmıştır. En düşük hata olan 0 G, Şekil 3.54'ten de görüleceği üzere z eksenini boyunca 0 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %0'dır. En yüksek hata, z eksenini boyunca Şekil 3.54'ten de görüleceği üzere 11 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %2,4'tür.

Merkezden 10 mm aşağıda en düşük ve en yüksek hatanın 0,01 G ve 3,44 G olduğu hesaplanmıştır. En düşük hata olan 0,01 G, Şekil 3.55'ten de görüleceği üzere z eksenini boyunca -21 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %0,99'dur. En yüksek hata, z eksenini boyunca Şekil 3.55'ten de görüleceği üzere 10,5 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %3'tür.

Merkezden 15 mm yukarıda en düşük ve en yüksek hatanın 0,01 G ve 30,22 G olduğu hesaplanmıştır. En düşük hata olan 0,01 G, Şekil 3.56'dan da görüleceği üzere z eksenini boyunca -23 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %1'dir. En yüksek hata, z eksenini boyunca Şekil 3.56'dan da görüleceği üzere -12 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %37'dir.

Merkezden 15 mm sağda en düşük ve en yüksek hatanın 0,01 G ve 57,47 G olduğu hesaplanmıştır. En düşük hata olan 0,01 G, Şekil 3.57'den de görüleceği üzere z eksenini boyunca -23 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %1'dir. En yüksek hata, z eksenini boyunca Şekil 3.57'den de görüleceği üzere 10,5 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %34'tür.

Merkezden 15 mm solda en düşük ve en yüksek hatanın 0 G ve 40,59 G olduğu hesaplanmıştır. En düşük hata olan 0 G, Şekil 3.58'den de görüleceği üzere z eksenini boyunca 0 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %0'dır. En yüksek hata, z eksenini boyunca Şekil 3.58'den de görüleceği üzere -9,5 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %18,7'dir.

Merkezden 15 mm aşağıda en düşük ve en yüksek hatanın 0,01 G ve 63,86 G olduğu hesaplanmıştır. En düşük hata olan 0,01 G, Şekil 3.59'dan da görüleceği üzere z eksenini boyunca

23 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %1'dir. En yüksek hata, z eksenı boyunca Şekil 3.59'dan da görüleceği üzere 7,5 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %39,5'tir.

Merkezden 20 mm yukarıda en düşük ve en yüksek hatanın 0 G ve 82,54 G olduğu hesaplanmıştır. En düşük hata olan 0 G, Şekil 3.60'dan da görüleceği üzere z eksenı boyunca 0 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %0'dır. En yüksek hata, z eksenı boyunca Şekil 3.60'dan da görüleceği üzere -6,5 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %56'dır.

Merkezden 20 mm sağda en düşük ve en yüksek hatanın 0,02 G ve 38,09 G olduğu hesaplanmıştır. En düşük hata olan 0,02 G, Şekil 3.61'den de görüleceği üzere z eksenı boyunca -17 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %0,29'dur. En yüksek hata, z eksenı boyunca Şekil 3.61'den de görüleceği üzere 7 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %21,4'tür.

Merkezden 20 mm solda en düşük ve en yüksek hatanın 0,04 G ve 44,97 G olduğu hesaplanmıştır. En düşük hata olan 0,04 G, Şekil 3.62'den de görüleceği üzere z eksenı boyunca -3,5 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %0,09'dir. En yüksek hata, z eksenı boyunca Şekil 3.62'den de görüleceği üzere 9,5 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %14,7'dir.

Merkezden 20 mm aşığda en düşük ve en yüksek hatanın 0,02 G ve 98,71 G olduğu hesaplanmıştır. En düşük hata olan 0,02 G, Şekil 3.63'ten de görüleceği üzere z eksenı boyunca 25 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %1,96'dır. En yüksek hata, z eksenı boyunca Şekil 3.63'den de görüleceği üzere -10 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %35,9'dur.

Tablo 4.4'te merkezden 5 mm yukarıda en düşük ve en yüksek hatanın 0 G ve 85,65 G olduğu hesaplanmıştır. En düşük hata olan 0 G, Şekil 3.64'ten de görüleceği üzere z eksenı boyunca -22,5 cm konumunda belirlenmiştir. Burada hata oranı %0'dır. En yüksek hata, z eksenı boyunca Şekil 3.64'ten de görüleceği üzere -10,5 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %18,47'dir.

Merkezden 5 mm sağda en düşük ve en yüksek hatanın 0,03 G ve 49,59 G olduğu hesaplanmıştır. En düşük hata olan 0,03 G, Şekil 3.65'ten de görüleceği üzere z eksenı boyunca

22,5 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %0,6'dır. En yüksek hata, z eksenı boyunca Şekil 3.65'ten de görüleceği üzere 8 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %4,4'tür.

Tablo 4.4: 1682 sarımlı solenoidin farklı noktalardan eksenel prob ile ölçümündeki en düşük ve en yüksek hata miktarları.

Ölçüm Yeri	En Düşük Hata (Gauss)	En Yüksek Hata (Gauss)
Merkezden 5 mm yukarıdan	0	85,65
Merkezden 5 mm sağdan	0,03	49,59
Merkezden 5 mm soldan	0,05	228,78
Merkezden 5 mm aşağıdan	0,01	47,22
Merkezden 10 mm yukarıdan	0,02	73,64
Merkezden 10 mm sağdan	0,02	40,55
Merkezden 10 mm soldan	0,02	66,52
Merkezden 10 mm aşağıdan	0,02	56,52
Merkezden 15 mm yukarıdan	0	108,87
Merkezden 15 mm sağdan	0	123,75
Merkezden 15 mm soldan	0	43,74
Merkezden 15 mm aşağıdan	0	53,11
Merkezden 20 mm yukarıdan	0,06	203,91
Merkezden 20 mm sağdan	0,06	206,48
Merkezden 20 mm soldan	0,06	251,91
Merkezden 20 mm aşağıdan	0,11	244,16

Merkezden 5 mm solda en düşük ve en yüksek hatanın 0,05 G ve 6,88 G olduğu hesaplanmıştır. En düşük hata olan 0,05 G, Şekil 3.66'dan da görüleceği üzere z eksenı boyunca 6,5 cm konumunda belirlenmiştir. Burada hata oranı %0,33'dür. En yüksek hata, z eksenı boyunca Şekil 3.66'dan da görüleceği üzere -11 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %15'tir.

Merkezden 5 mm sağda en düşük ve en yüksek hatanın 0 G ve 228,78 G olduğu hesaplanmıştır. En düşük hata olan 0 G, Şekil 3.67'den de görüleceği üzere z eksenini boyunca -18,5 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %0'dır. En yüksek hata, z eksenini boyunca Şekil 3.67'den de görüleceği üzere -8,5 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %23,6'dır.

Merkezden 5 mm aşağıda en düşük ve en yüksek hatanın 0,01 G ve 47,22 G olduğu hesaplanmıştır. En düşük hata olan 0,01 G, Şekil 3.68'den de görüleceği üzere z eksenini boyunca -16,5 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %0,04'dir. En yüksek hata, z eksenini boyunca Şekil 3.68'den de görüleceği üzere -9,5 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %6,6'dır.

Merkezden 10 mm yukarıda en düşük ve en yüksek hatanın 0,02 G ve 73,64 G olduğu hesaplanmıştır. En düşük hata olan 0,02 G, Şekil 3.69'dan da görüleceği üzere z eksenini boyunca 22,5 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %0,4'tür. En yüksek hata, z eksenini boyunca Şekil 3.69'dan da görüleceği üzere -8,5 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %7,37'dir.

Merkezden 10 mm sağda en düşük ve en yüksek hatanın 0,02 G ve 40,55 G olduğu hesaplanmıştır. En düşük hata olan 0,02 G, Şekil 3.70'ten de görüleceği üzere z eksenini boyunca -17 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %0,08'dir. En yüksek hata, z eksenini boyunca Şekil 3.70'ten de görüleceği üzere -12 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %19,9'dur.

Merkezden 10 mm solda en düşük ve en yüksek hatanın 0,02 G ve 66,52 G olduğu hesaplanmıştır. En düşük hata olan 0,02 G, Şekil 3.71'den de görüleceği üzere z eksenini boyunca -17 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %0,9'dir. En yüksek hata, z eksenini boyunca Şekil 3.71'den de görüleceği üzere 9 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %7,77'dir.

Merkezden 10 mm solda en düşük ve en yüksek hatanın 0,02 G ve 56,52 G olduğu hesaplanmıştır. En düşük hata olan 0,02 G, Şekil 3.72'den de görüleceği üzere z eksenini boyunca -17 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %0,09'dur. En yüksek hata, z eksenini boyunca Şekil 3.72'den de görüleceği üzere 9 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %6,6'dır.

Merkezden 15 mm yukarıda en düşük ve en yüksek hatanın 0 G ve 108,87 G olduğu hesaplanmıştır. En düşük hata olan 0 G, Şekil 3.73'ten de görüleceği üzere z ekseni boyunca 24 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %0'dır. En yüksek hata, z ekseni boyunca Şekil 3.73'ten de görüleceği üzere 8,5 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %10,76'dır.

Merkezden 15 mm sağda en düşük ve en yüksek hatanın 0 G ve 123,75 G olduğu hesaplanmıştır. En düşük hata olan 0 G, Şekil 3.74'ten de görüleceği üzere z ekseni boyunca 24 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %0'dır. En yüksek hata, z ekseni boyunca Şekil 3.74'ten de görüleceği üzere 10cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %22,36'dır.

Merkezden 15 mm solda en düşük ve en yüksek hatanın 0 G ve 43,74 G olduğu hesaplanmıştır. En düşük hata olan 0 G, Şekil 3.74'ten de görüleceği üzere z ekseni boyunca -14,5 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %0'dır. En yüksek hata, z ekseni boyunca Şekil 3.74'ten de görüleceği üzere 9,5 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %6,24'tür.

Merkezden 15 mm aşağıda en düşük ve en yüksek hatanın 0 G ve 53,11 G olduğu hesaplanmıştır. En düşük hata olan 0 G, Şekil 3.75'ten de görüleceği üzere z ekseni boyunca 24 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %0'dır. En yüksek hata, z ekseni boyunca Şekil 3.75'ten de görüleceği üzere -9 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %6,2'dir.

Merkezden 20 mm yukarıda en düşük ve en yüksek hatanın 0,06 G ve 203,91 G olduğu hesaplanmıştır. En düşük hata olan 0,06 G, Şekil 3.76'dan görüleceği üzere z ekseni boyunca 17,5 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %0,33'tür. En yüksek hata, z ekseni boyunca Şekil 3.76'da görüleceği üzere -9,5 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %29,77'dir.

Merkezden 20 mm sağda en düşük ve en yüksek hatanın 0,06 G ve 206,48 G olduğu hesaplanmıştır. En düşük hata olan 0,06 G, Şekil 3.77'den de görüleceği üzere z ekseni boyunca 24 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %02,04'tür. En yüksek hata, z ekseni boyunca Şekil 3.77'den de görüleceği üzere -9 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %24'tür.

Merkezden 20 mm solda en düşük ve en yüksek hatanın 0,06 G ve 251,91 G olduğu hesaplanmıştır. En düşük hata olan 0,06 G, Şekil 3.78'den de görüleceği üzere z ekseni boyunca

24 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %2,04'tür. En yüksek hata, z eksen boyunca Şekil 3.78'den de görüleceği üzere -9,5 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %36,8'dır.

Merkezden 20 mm aşağıda en düşük ve en yüksek hatanın 0,11 G ve 244,16 G olduğu hesaplanmıştır. En düşük hata olan 0,11 G, Şekil 3.79'dan da görüleceği üzere z eksen boyunca 0,5 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %0,006'dır. En yüksek hata, z eksen boyunca Şekil 3.79'dan da görüleceği üzere -8,5 cm konumda belirlenmiştir. Burada hata oranı %23,59'dur.

4.2. IBSimu Programı ile Gerçekleştirilen Benzetim Çalışması Sonucu Elde Edilen Sonuçlar

Elektrot tasarımı için IBSimu programı kullanılarak yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen yayınım, demet akımı ve demet çapı değerleri her aşama için ayrı ayrı tablolar halinde verilmiştir.

Tablo 4.5: 7 no'lu elektrotun a parametresinde yapılan değişikliklerin yayınım ve demet akımı üzerindeki etkileri.

a (mm)	b (mm)	c (mm)	d (mm)	e (mm)	f (mm)	J (A/m ²)	ϵ (mm.mrad)	I (mA)
3	3	2,6	4,4	5,28	2	100	4,354	0,568
3	3	2,6	4,4	5,28	2	200	9,789	1,061
3	3	2,6	4,4	5,28	2	300	10,502	1,573
1	3	2,6	4,4	5,28	2	100	3,778	0,587
1	3	2,6	4,4	5,28	2	200	3,487	1,156
1	3	2,6	4,4	5,28	2	300	3,703	1,729

Tablo 4.5'te 7 no'lu elektrotun a parametresi üzerinde yapılan a=3 mm ve a=1 mm değişiklikleri için farklı akım yoğunlukları ile yapılan benzetim çalışmalarında demetin akım yoğunluğu, yayınımlı ve demet akımı üzerindeki değişim incelenmektedir. Bu çalışmada diğer parametreler sabit tutularak yalnızca a parametresi ve akım yoğunluğu değiştirilmektedir. a=3 mm'de demetin plazma elektrotunun hemen bitiminde dağılmaya başladığı, a=1 mm'de ise bu

dağılımın daha az olduğu gözlenmektedir. Bu nedenle $a=1$ mm değeri en iyi değer olarak belirlenmiştir. Akım yoğunluğu değeri değiştirildiğinde yoğunluk artırıldıkça demetin yoğunluğunun da arttığı gözlenmektedir. Ancak elektrot şeklini optimize etmeye çalışırken 100 A/m^2 akım yoğunluğu yeterlidir. Bu nedenle çalışmaya akım yoğunluğu 100 A/m^2 alınarak devam edilmiştir.

Tablo 4.6: 7 no'lu elektrotta $a = 1$ mm için b parametresi değiştirilerek elde edilen emittance (ϵ) ve akım (I) değerleri.

a (mm)	b (mm)	c (mm)	d (mm)	e (mm)	f (mm)	J (A/m ²)	ϵ (mm.mrad)	I (mA)
1	1	2,6	4,4	5,28	2	100	3,572	0,47
1	2	2,6	4,4	5,28	2	100	3,571	0,47
1	3	2,6	4,4	5,28	2	100	3,867	0,581
1	4	2,6	4,4	5,28	2	100	3,782	0,587
1	5	2,6	4,4	5,28	2	100	3,778	0,587

Tablo 4.6'da $a = 1$ mm için b parametresindeki değişimin demetin yayını ve demet akımı üzerindeki etkileri görülmektedir. Demet davranışı ve yayını ile demet akımı incelendiğinde en iyi sonucu veren değer $b = 3$ mm olarak belirlenmiştir.

Tablo 4.7: $a = 1$ mm ve $b = 3$ mm için c parametresinde yapılan değişikliklerin etkileri.

a (mm)	b (mm)	c (mm)	d (mm)	e (mm)	f (mm)	J (A/m ²)	ϵ (mm.mrad)	I (mA)
1	3	0,6	4,4	5,28	2	100	5,657	0,986
1	3	1,6	4,4	5,28	2	100	4,289	0,752
1	3	2,6	4,4	5,28	2	100	3,778	0,587
1	3	3,6	4,4	5,28	2	100	3,511	0,483
1	3	4,6	4,4	5,28	2	100	3,816	0,437
1	3	5,6	4,4	5,28	2	100	4,163	0,422

Tablo 4.7’de $a = 1 \text{ mm}$ ve $b = 3 \text{ mm}$ ’de sabit tutularak c parametresinde yapılan değişimin demet yayını ve demet akımı üzerindeki etkileri gözlenmektedir. Demetin davranışı incelendiğinde, $c = 3,6 \text{ mm}$ değerinden itibaren demetin x ekseninde $0,01\text{-}0,04 \text{ m}$ aralığında eksene daha fazla yaklaşarak çok fazla odaklandığı gözlenmektedir. Bu sebeple burada seçilebilecek en iyi değer $c = 0,6\text{-}2,6 \text{ mm}$ aralığında olmalıdır. Bu noktada demet yayını ve demet akımı incelendiğinde en iyi sonucun $c = 2,6 \text{ mm}$ değerinde olduğu saptanmıştır.

Tablo 4.8: 7 no’lu elektrotun eğimindeki değişimin yayını ve akım değeri üzerine etkileri.

a (mm)	b (mm)	c (mm)	d (mm)	e (mm)	f (mm)	Eğim	Açı	J (A/m ²)	ε (mm.mrad)	I (mA)
1	3	2,6	4,40	5,28	2	1,2	50,2	100	3,778	0,587
1	3	2,6	4,10	5,28	2	1,3	52,4	100	3,4	0,623
1	3	2,6	3,77	5,28	2	1,4	54,5	100	3,517	0,668
1	3	2,6	3,52	5,28	2	1,5	56,3	100	4,06	0,716
1	3	2,6	3,30	5,28	2	1,6	58,0	100	4,273	0,758
1	3	2,6	3,10	5,28	2	1,7	59,5	100	4,418	0,782
1	3	2,6	2,90	5,28	2	1,8	60,9	100	4,565	0,825
1	3	2,6	2,77	5,28	2	1,9	62,2	100	4,683	0,86
1	3	2,6	2,64	5,28	2	2,0	63,4	100	4,723	0,901
1	3	2,6	2,50	5,28	2	2,1	64,5	100	4,788	0,928
1	3	2,6	2,40	5,28	2	2,2	65,6	100	4,772	0,975
1	3	2,6	2,30	5,28	2	2,3	66,5	100	4,797	1,005
1	3	2,6	2,20	5,28	2	2,4	67,4	100	4,8	1,028
1	3	2,6	2,10	5,28	2	2,5	68,2	100	4,773	1,079

Tablo 4.8’de a, b ve c parametreleri sabit tutularak d parametresi ve eğim üzerinde yapılan değişikliklerin demetin yayını ve demet akımı üzerine etkileri gözlenmektedir. Burada demet davranışı ve Pierce geometrisine göre literatürde tavsiye edilen [28], elektrotun sahip olması gereken açı ($67,5^\circ$ olarak belirtilmiş) da göz önünde bulundurularak ve demetin yayını ve demet akımı da incelendiğinde en iyi sonuç $m = 2,2$ olarak belirlenmiştir.

Tablo 4.9’da eğim(m) sabitken d ve e parametrelerindeki değişimin demet davranışına, yayını ve demet akımına etkileri gözlenmektedir. Burada demet yayını ve demet akımı açısından çok büyük bir farklılık gözlenmediğinden demetin davranışı incelenerek en iyi sonuç $a = 1$ mm, $b = 3$ mm, $c = 2,6$ mm, $d = 2,4$ mm, $e = 5,28$ mm ve $f = 2$ mm (ilk ölçüm) olarak belirlenmiştir.

Tablo 4.9: 7 no’lu elektrot için eğim sabitken d ve e parametrelerinin değişiminin yayını ve akım değeri üzerindeki etkileri.

a (mm)	b (mm)	c (mm)	d (mm)	e (mm)	f (mm)	Eğim	Açı ($^\circ$)	J (A/m ²)	ε (mm.mrad)	I (mA)
1	3	2,6	2,4	5,28	2	2,2	65,6	100	4,785	0,929
1	3	2,6	2,5	5,50	2	2,2	65,6	100	4,788	0,928
1	3	2,6	2,6	5,72	2	2,2	65,6	100	4,792	0,928
1	3	2,6	2,7	5,94	2	2,2	65,6	100	4,794	0,927
1	3	2,6	2,8	6,16	2	2,2	65,6	100	4,799	0,927
1	3	2,6	2,9	6,38	2	2,2	65,6	100	4,801	0,926
1	3	2,6	3,0	6,60	2	2,2	65,6	100	4,805	0,926
1	3	2,6	3,1	6,82	2	2,2	65,6	100	4,805	0,926
1	3	2,6	3,2	7,04	2	2,2	65,6	100	4,804	0,922
1	3	2,6	3,3	7,26	2	2,2	65,6	100	4,804	0,921
1	3	2,6	3,4	7,48	2	2,2	65,6	100	4,801	0,920
1	3	2,6	3,5	7,70	2	2,2	65,6	100	4,805	0,920
1	3	2,6	3,6	7,92	2	2,2	65,6	100	4,803	0,919

Tablo 4.9 (devamı): 7 no'lu elektrot için eğim sabitken d ve e parametrelerinin değişiminin yayılım ve akım değeri üzerindeki etkileri.

a (mm)	b (mm)	c (mm)	d (mm)	e (mm)	f (mm)	Eğim	Açı (°)	J (A/m ²)	ε (mm.mrad)	I (mA)
1	3	2,6	3,7	8,14	2	2,2	65,6	100	4,808	0,919
1	3	2,6	3,8	8,36	2	2,2	65,6	100	4,801	0,916
1	3	2,6	3,9	8,58	2	2,2	65,6	100	4,806	0,916
1	3	2,6	4,0	8,80	2	2,2	65,6	100	4,811	0,916
1	3	2,6	4,1	9,02	2	2,2	65,6	100	4,815	0,916
1	3	2,6	4,2	9,24	2	2,2	65,6	100	4,813	0,915
1	3	2,6	4,3	9,46	2	2,2	65,6	100	4,817	0,915
1	3	2,6	4,4	9,68	2	2,2	65,6	100	4,812	0,914
1	3	2,6	4,5	9,90	2	2,2	65,6	100	4,814	0,913
1	3	2,6	4,6	10,12	2	2,2	65,6	100	4,803	0,912
1	3	2,6	4,7	10,34	2	2,2	65,6	100	4,802	0,912

Tablo 4.10'da 8 no'lu elektrotun konumundaki değişimin demet yayılımı, demet akımı ve demet çapı üzerine etkileri gözlenmektedir. Demetin davranışı incelendiğinde 0,055 m'ye kadar olan benzetimlerde demetin 8 no'lu elektrotta çarptığı gözlenmektedir. Bu istenilen bir sonuç değildir. Bu nedenle 0,55 m'ye kadar olan sonuçlardan herhangi biri en iyi sonuç olarak seçilememektedir. 0,025 m'den sonrasındaki benzetimlerde ise demetin iki elektrot arasında fazla odaklandığını ve x eksenine yakınlığı gözlenmektedir. Bu nedenle bu aralık da en iyi sonuçlardan birini barındırmamaktadır. Burada en iyi sonuçlar 0,045 ve 0,04 m olduğundan ve en iyi değeri daha iyi görebilmek adına 0,05-0,03 m aralığı 1'er mm aralıklarla taranmıştır.

Tablo 4.10: 8 no'lu elektrotun konumundaki değişimin demet akımı ve demet çapına etkileri.

Konum (m)	Yayınım (mm.mrad)	Demet Akımı (mA)	Demet apı (mm)
0,1	1,542	0,107	7
0,095	1,648	0,121	6,9
0,09	1,789	0,142	7,5
0,085	1,937	0,168	8
0,08	2,148	0,206	8
0,075	2,316	0,25	8,5
0,07	2,79	0,325	9,2
0,065	3,268	0,414	9,7
0,06	4,036	0,585	10
0,055	4,735	0,836	11
0,05	4,842	0,888	11
0,045	4,912	0,897	10
0,04	4,97	0,912	9,6
0,035	4,681	0,929	8,8
0,03	5,564	0,965	8
0,025	7,607	1,014	8,6
0,02	11,121	1,101	13
0,015	25,817	1,196	22
0,01	32,641	1,31	30

Tablo 4.11: 8 no'lu elektrotun konumunun 0,05 m-0,03 m arasındaki değişiminin demet akımı ve demet çapına etkileri.

Konum (m)	Yayınım (mm.mrad)	Demet Akımı (mA)	Demet Çapı (mm)
0,05	4,845	0,888	10
0,049	4,851	0,890	11
0,048	4,857	0,890	10
0,047	4,891	0,894	10
0,046	4,908	0,896	10
0,045	4,909	0,897	10
0,044	4,920	0,899	10
0,043	4,914	0,899	10
0,042	4,929	0,902	9,9
0,041	4,948	0,905	9,7
0,04	4,971	0,912	9,6
0,039	4,943	0,915	9,4
0,038	4,873	0,919	9,3
0,037	4,790	0,922	9,1
0,036	4,696	0,927	8,9
0,035	4,580	0,929	8,7
0,034	4,568	0,935	8,7
0,033	4,551	0,938	8,5
0,032	4,649	0,942	8,3
0,031	4,945	0,953	8,2
0,03	5,564	0,965	8,2

Tablo 4.11'de 8 no'lu elektrotun konumunun 0,05 m-0,03 m arasındaki değişiminin demetin yayınımı, demet akımı ve demet çapı üzerine etkileri görülmektedir. Veriler detaylı olarak incelendiğinde en iyi sonuçların 0,044 ve 0,043 değerlerinde olduğu gözlenmektedir. Burada seçilen değer 0,043 m'dir.

Tablo 4.12: 8 no'lu elektrotun boyundaki değişimin demet akımı ve demet çapına etkileri.

Boy (m)	Yayınım (mm.mrad)	Demet Akımı (mA)	Demet apı (mm)
0,005	4,914	0,899	10
0,006	4,915	0,899	10
0,007	4,917	0,899	10
0,008	4,918	0,899	10
0,009	4,921	0,899	10
0,01	4,92	0,899	10

Tablo 4.12’de 8 no’lu elektrotun boyundaki değişimin demetin yayınımı, demet akımı ve demet çapı üzerine etkileri görülmektedir. Burada demetin yayınımı açısından çok fark olmadığından, demet akımı ve demet çapında ise değişim gözlenmediğinden elektrotun boyu üzerindeki değişimin etkilerinin fazla olmadığı gözlemlenerek en iyi sonucun 0,05 m değerinde olduğu belirlenmiştir.

Tablo 4.13: Elektron sıcaklığındaki değişimin yayınım, demet akımı ve demet çapına etkileri.

Parçacık Türü	Elektron Sıcaklığı (eV)	Yayınım (mm.mrad)	Demet Akımı (mA)	Demet apı (mm)
Proton	5	5,629	1,026	7,1
Hem Proton Hem Elektron	5	4,680	1,067	6,8
Hem Proton Hem Elektron	10	6,375	1,05	7,5
Hem Proton Hem Elektron	20	5,987	1,044	7,1

Tablo 4.13’te elektron sıcaklığındaki değişimin demetin yayınımı, demet akımı ve demet çapı üzerine etkileri görülmektedir. Bu veriler incelendiğinde protonun başlangıç enerjisi 5 eV’ta ve elektronun başlangıç enerjisi 40 eV’ta tutularak benzetimlere devam edilmiştir.

Tablo 4.14: 8 no'lu elektrotun negatif potansiyelde tutulmasının demet yayılımı, akımı ve çapı üzerindeki etkileri.

Parçacık Türü	Proton Başlangıç Enerjisi (eV)	Elektron Başlangıç Enerjisi (eV)	Potansiyel (V)	Yayınım (mm.mrad)	Demet Akımı (mA)	Demet Çapı (mm)
Hem Proton Hem Elektron	5	40	0	5,628	1,034	6,9
Hem Proton Hem Elektron	5	40	-1×10^3	6,398	1,046	6,9
Hem Proton Hem Elektron	5	40	-2×10^3	6,709	1,054	6,9
Hem Proton Hem Elektron	5	40	-3×10^3	6,812	1,071	7
Hem Proton Hem Elektron	5	40	-4×10^3	6,644	1,082	7
Hem Proton Hem Elektron	5	40	-5×10^3	6,528	1,098	7,4

Tablo 4.14'te 8 no'lu elektroda uygulanan eksi potansiyelin demetin yayılımı, demet akımı ve demet çapı üzerine etkileri görülmektedir.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada KAHVELab’da bulunan 20 keV enerjili proton hattının DEDA solenoidlerinin manyetik alan ölçümleri gerçekleştirilmiş ve bu ölçümlerin benzetim sonuçları ile karşılaştırılması sonucunda, ölçümlerin benzetim ile uyumlu olduğu gözlenmiştir. Yapılan ölçüm ve benzetim sonucu karşılaştırılmalarına göre, sistemin hassasiyetinin istenilen düzeyde olduğu belirlenmiştir. Hataların temel sebepleri manyetik alan probunun istenilen hassasiyette merkezlenememesi, istenilen hassasiyette konumlandırılmaması, sistemin uzun çalışma süreleri sonunda ısınması ve verimin düşmesi veya manyetik alan ölçüm cihazının kendisinden kaynaklanan ölçüm hataları olarak sıralanabilir. Manyetik alan ölçüm cihazının bizim ölçüm yaptığımız aralıktaki ölçüm hatasının %1 mertebesinde olduğu üretici tarafından belirtilmiştir. Bu göz önüne alındığında, hatanın 0 G (%0) çıktığı durumlarda da konum ve merkezleme kaynaklı hatanın olduğu görülmektedir [36].

IBSimu programıyla yapılan üç elektrotlu tasarım sonuçları şekil 3.197-3.204’te verilmektedir. Proton başlangıç enerjisinin 5 eV olması durumunda plazma elektrotu (7 no’lu elektrot) potansiyeli 20×10^3 V, 9 no’lu elektrotun potansiyeli 0 V’da tutularak, 8 no’lu elektrotun potansiyeli 0 ile -5×10^3 V aralığında değiştirildiğinde, 8 no’lu elektrot potansiyelinin -3×10^3 V üzerine çıktığı durumda demetin dağılmaya başladığı gözlenmiştir. Buna göre 8 no’lu elektrot potansiyelinin -3×10^3 V’a kadar olan durumda ve $z = 0,2$ m konumunda demet akımı 1,046 mA, demet yayını 6,398 mm.mrad ve demet çapı 6,9 mm olarak belirlenmiştir. Önerilen bu tasarımın üretilmesine karar verildiğinde, öncelikle mühendislik çizim yapılacak ve bu çizime göre elektrot yapısı optimize edilecektir. Daha sonra üreticiden gelecek öneriler değerlendirilecek, son olarak vakum ve yüksek voltaj testlerine göre sistemin tasarımı gerekirse iyileştirilecektir. Tez kapsamında gerçekleştirilmiş olan IBSimu ile yapılan yeni elektrot tasarımı, sistemde kullanılmakta olan iki elektrotlu iyon sökme sistemine alternatif bir kullanım önerisidir. Burada iki elektrotlu sistem yerine kullanılabilecek üç elektrotlu bir sistem tasarlanmıştır. Yapılan benzetim çalışmalarında KAHVELAB Mikrodalga Deşarj İyon Kaynağı için kullanılabilecek en iyi üç elektrotlu elektrot tasarımı yapılması hedeflenmiş ve tasarlanmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] Livingston, M. S.; Blewett J. (1969). Particle Accelerators. New York: McGraw-Hill. ISBN 978-1-114-44384-6
- [2] Longair, M. S. (2003). *Theoretical concepts in physics: an alternative view of theoretical reasoning in physics*. Cambridge University Press. pp. 377–378. ISBN 978-0-521-52878-8
- [3] Rutherford, E. (1919). "Collision of α particles with light atoms. IV. An anomalous effect in nitrogen". *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*. Series 6. **37** (222): 581–587. doi:10.1080/14786440608635919.
- [4] Ernest Rutherford, "The Development of the Theory of Atomic Structure," ed. J. A. Ratcliffe, in *Background to Modern Science*, eds. Joseph Needham and Walter Pagel, (Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1938), 61–74. Accessed September 22, 2014
- [5] Humphries, Stanley (1986). *Principles of Charged Particle Acceleration*. Wiley-Interscience. p. 4. ISBN 978-0471878780.
- [6] Pedro Waloschek (ed.): *The Infancy of Particle Accelerators: Life and Work of Rolf Wideröe*, Vieweg, 1994
- [7] Cockroft Walton Accelerator, National Museum of Scotland
- [8] Van de Graaff Generator by Phillip Harris, 1960, England
- [9] Applications of Particle Accelerators, O. Barbalat
- [10] Bora Akgün, Gökhan Ünel, Samim Erhan, Sezen Sekmen, Umut Köse, Veli Yıldız, 06.03.2014, Meraklısına Parçacık ve Hızlandırıcı Fiziği
- [11] Bernhard Wolf, Handbook of ion sources
- [12] Francis F. Chen, Springer, 1984, Introduction to plasma physics and controlled fusion Volume 1
- [13] PALME YAYINEVİ Fizik (SERWAY) 2. CİLT, Yazarlar: Raymond A. Serway, Robert J. Beichner
- [14] R. Bailey, 16.12.2013, The CERN Accelerator School CERN-2013-007
- [15] Feynman- Leighton- Sands, Feynman Fizik Dersleri Cilt 2: Elektromanyetizma ve Madde, Alfa Yayınları, 2. Baskı
- [16] Prof. Dr. Ahmet Yüksel Özemre, 1983, Klasik Elektrodinamiğe Giriş, Teorik Fizik Dersleri Cilt 4, İstanbul Üniversitesi Yayınlarından Sayı: 3081, Fen Fakültesi Sayı: 180, Teorik Fizik Sayı: 15

- [17] Fishbane&Gasiorowicz&Thornton, Temel Fizik, Cilt-2, Arkadaş Yayınları
- [18] H. Busch, 1926, “Berechnung der bahn von kathodenstrahlen im axialsymmetrischen electromagnetischen felde,” Z. Phys. **8**, 974–993
- [19] L. Groening and C. Xiao, 2017 Extension of Busch’s Theorem to Particle Beams, Physical Review Accelerators and Beams **21**, 014201
- [20] Vinit Kumar, August 2009, Understanding the focusing of charged particle beams in a solenoid magnetic field, American Journal Physics, Vol 77, No:8
- [21] Ian G. Brown, The Physics and Technology of Ion Sources, Second Revised and Extended Edition
- [22] R. Bailey, 16.12.2013, The CERN Accelerator School CERN-2013-007, sayfa 12
- [23] Hakan Çetinkaya, Mayıs 2006, Türk Hızlandırıcı Merkezi Proton Hızlandırıcı Tesisi’ne Yönelik Prototip İyon Kaynağı Tasarımı,
- [24] Zhang, H., China, Ion Sources, Science Press Beijing and Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- [25] Taylor, T. Mouris, J. F., 1993, An Advanced High-Current Low-Emittance de Microwave Proton Source, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, **336**,1-5
- [26] T. Kalvas, O. Tarvainen, T. Ropponen, O. Steczkiewicz, J. Arje, H. Clark, 2010 ,IBSimu: A three-dimensional simulation software for charges particle optics
- [27] P. N. Ostroumov, K.W. Shepard, Heavy-Ion Beam Acceleration of Two-Charge States From an ECR Ion Source, XX. International Linac Conference, Monterey, California
- [28] Filiz Ece Sağcan, May 2014, Simlation and Design of Electron Gun for Travelling Wave Tube With Particle in Cell Code, Middle East Technical University, Turkey
- [29] M. Ferrario, M. Migliorati and Palumbo, Space Charge Effects, INFN-LNF and University of Rome ‘La Sapienza’
- [30] Orhan Cakir, Emre Celebi, Hakan Cetinkaya, Hilal Kolenoglu, Gorkem Turemen, Zekeriya Uysal and Gokhan Unel, 9 August 2021, DemirciPro’s tools for completing the Linac: Ion source LEBT line
- [31] D.C. Faircloth, Negative Ion Source: Magnetron and Penning, Rutherford Appleton Laboratory, Chilton, Oxfordshire, UK
- [32] Qian Y. Jin, Yu G. Liu, Yang Zhou, Qi Wu, Yao J. Zhai and Liang T. Sun, RF and Microwave Ion Sources Study at Institute of Modern Physics,
- [33] Kamil Çınar, February 2011, Design and Construction of a Microwave Plazma Ion Source
- [34] I. Brown, Vacuum Arc Ion Sources, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA 94720, USA

- [35] The NIST Reference on Fundamental Physical Constants, [Ziyaret Tarihi 25 Nisan 2017]
- [36] <https://www.magnetic-instrument.com/teslameter-10.htm>
- [37] V. Toivanen, T. Kalvas, H. Koivisto, J. Komppula and O. Tarvainen, Double Einzel Lens Extraction for the JYFL 14 GHz ECR Ion Source Designed, Finland
- [38] Poisson Supperfish, Los Alamos National Laboratory (LANL), Los Alamos Accelerator Code Group (LAACG)
- [39] Perrin A et al. 2007 TRAVEL v4.07 User Manual CERN



EKLER

```

1 #include "epot_bicgstabsolver.hpp"
2 #include "particledatabase.hpp"
3 #include "geometry.hpp"
4 #include "func_solid.hpp"
5 #include "epot_efield.hpp"
6 #include "meshvectorfield.hpp"
7 #include "ibsimu.hpp"
8 #include "error.hpp"
9 #include "particlediagplotter.hpp"
10 #include "geomplotter.hpp"
11 #include "config.h"
12
13 #ifdef GTK3
14 #include "gtkplotter.hpp"
15 #endif
16
17
18 const double Te = 5.0;
19 const double Up = 5.0;
20
21
22 bool solid1( double x, double y, double z )
23 {
24     return( x <= 0.006 && y >= 0.002 && y >= 2.2*x - 0.00232 &&
25            (x >= 0.001 || y >= 0.005) );
26 }
27

```

Şekil 1.1: IBSimu kodu birinci kısım.

```

27
28 bool solid2( double x, double y, double z)
29 {
30     return( x >= 0.043 && x <= 0.053 && y >= 0.005 );
31 }
32
33
34 bool solid3( double x, double y, double z)
35 {
36     return( x >= 0.063 && x <= 0.073 && y >= 0.005 );
37 }
38
39
40 void simu( int *argc, char ***argv )
41 {
42     Geometry geom( MODE_CYL, Int3D(841,141,1), Vec3D(0,0,0), 0.00025 );
43     Solid *s1 = new FuncSolid( solid1 );
44     geom.set_solid( 7, s1 );
45     Solid *s2 = new FuncSolid( solid2 );
46     geom.set_solid( 8, s2 );
47     Solid *s3 = new FuncSolid( solid3 );
48     geom.set_solid( 9, s3 );
49     geom.set_boundary( 1, Bound(BOUND_NEUMANN, 0.0 ) );
50     geom.set_boundary( 2, Bound(BOUND_DIRICHLET, -20.0e3) );
51     geom.set_boundary( 3, Bound(BOUND_NEUMANN, 0.0 ) );
52     geom.set_boundary( 4, Bound(BOUND_NEUMANN, 0.0 ) );
53     geom.set_boundary( 7, Bound(BOUND_DIRICHLET, 0.0 ) );
54     geom.set_boundary( 8, Bound(BOUND_DIRICHLET, -21.0e3) );
55     geom.set_boundary( 9, Bound(BOUND_DIRICHLET, -20.0e3) );
56     geom.build_mesh();
57

```

Şekil 1.2: IBSimu kodu ikinci kısım.

```

58 EpotBiCGSTABSolver solver( geom );
59 InitialPlasma initp( AXIS_X, 0.55e-3 );
60 solver.set_initial_plasma( 5.0, &initp );
61
62 EpotField epot( geom );
63 MeshScalarField scharge( geom );
64 MeshVectorField bfield;
65 EpotEfield efield( epot );
66 field_extrpl_e efldextrpl[6] = { FIELD_EXTRAPOLATE, FIELD_EXTRAPOLATE,
67                                   FIELD_SYMMETRIC_POTENTIAL, FIELD_EXTRAPOLATE,
68                                   FIELD_EXTRAPOLATE, FIELD_EXTRAPOLATE };
69 efield.set_extrapolation( efldextrpl );
70
71 ParticleDataBaseCyl pdb( geom );
72 bool pmirror[6] = { false, false, true, false, false, false };
73 pdb.set_mirror( pmirror );
74
75 for( size_t i = 0; i < 15; i++ ) {
76
77     if( i == 1 ) {
78         double rhoe = pdb.get_rhosum();
79         solver.set_pexp_plasma( -rhoe, Te, Up );
80     }
81
82     solver.solve( epot, scharge );
83     efield.recalculate();
84
85     pdb.clear();
86     pdb.add_2d_beam_with_energy( 5000, 100.0, 1.0, 1.0,
87                                 5.0, 0.0, 0.5,
88                                 0.0, 0.0,
89                                 0.0, 0.005 );

```

Şekil 1.3: IBSimu kodu üçüncü kısım.

```

90     pdb.add_2d_beam_with_energy( 5000, 100.0, -1.0, 1.0/1836.15,
91                                 40.0, 0.0, 0.5,
92                                 0.0, 0.0,
93                                 0.0, 0.005 );
94     pdb.iterate_trajectories( scharge, efield, bfield );
95 }
96
97 #ifdef GTK3
98     GTKPlotter plotter( argc, argv );
99     plotter.set_geometry( &geom );
100    plotter.set_epot( &epot );
101    plotter.set_scharge( &scharge );
102    plotter.set_particledatabase( &pdb );
103    plotter.new_geometry_plot_window();
104    plotter.run();
105 #endif
106 }
107
108
109 int main( int argc, char **argv )
110 {
111     try {
112         ibsimu.set_message_threshold( MSG_VERBOSE, 1 );
113         ibsimu.set_thread_count( 4 );
114         simu( &argc, &argv );
115     } catch ( Error e ) {
116         e.print_error_message( ibsimu.message( 0 ) );
117         exit( 1 );
118     }
119
120     return( 0 );
121 }

```

Şekil 1.4: IBSimu kodu dördüncü kısım.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Alis Hamparsunoğlu
Doğum Yeri	
Doğum Tarihi	Tarih girmek için tıklayın veya dokununuz.
Uyruğu	☒ T.C. ☐ Diğer:
Telefon	
E-Posta Adresi	
Web Adresi	

Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Fakülte	Fen Fakültesi
Bölümü	Fizik
Mezuniyet Yılı	Tarih girmek için tıklayın veya dokununuz.

Yüksek Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Enstitü Adı	Fen Bilimleri Enstitüsü
Anabilim Dalı	Fizik
Programı	Yüksek Enerji ve Plazma Fiziği

Makale ve Bildiriler	
Solenoid Design And Magnetic Field Measurement for LEBT AT KAHVELab, D. Halis Taşdemir, A. Hamparsunoğlu, A. Adıgüzel, H. Çetinkaya, S. Öz, V. E. Özcan, A. Özbey, G. Ünel, pp. 361, Turkish Physical Society 35th International Physics Congress, September 4-8, 2019, Bodrum/Turkey, Poster Sunum.	