

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**20 keV ENERJİLİ PROTON DEMETİNDE YÜK,
DEMET PROFİLİ VE YAYINIM ÖLÇÜMLERİ**

Duygu HALİS

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Fizik Anabilim Dalı
Fizik Programı

Danışman
Prof. Dr. Merih SERİN

Eş-Danışman
Doç. Dr. N. Gökhan ÜNEL

Mart, 2024

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**20 keV ENERJİLİ PROTON DEMETİNDE YÜK, DEMET
PROFİLİ VE YAYINIM ÖLÇÜMLERİ**

Duygu HALİS tarafından hazırlanan tez çalışması 14.03.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı Fizik Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Merih SERİN
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Doç. Dr. N. Gökhan ÜNEL
Kaliforniya Üniversitesi , Irvine
Eş-Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Merih SERİN, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Murat ÇALIŞKAN, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. V. Erkan ÖZCAN, Üye
Boğaziçi Üniversitesi

Danışmanım Prof. Dr. Merih SERİN sorumluluğunda tarafımca hazırlanan 20 keV ENERJİLİ PROTON DEMETİNDE YÜK, DEMET PROFİLİ VE YAYINIM ÖLÇÜMLERİ başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Duygu HALİS

İmza



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

*Bu tezi, her zaman yanımda hissettiğim babam Adil HALİS
ve canım annem Gülsevîm HALİS'e ithaf ediyorum.*



TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca pozitif yaklaşımı, ilgisi, her daim çözüm bulması ve değerli yönlendirmeleriyle desteğini hiç esirgemeyen güler yüzlü danışmanım Prof. Dr. Merih SERİN'e teşekkürlerimi sunarım. Bu yüksek lisans eğitim sürecinde onun yol göstericiliğinde bulunmak benim adıma büyük bir ayrıcalık olmuştur.

Hızlandırıcı fiziği ile beni tanıştıran ve bu alana yönelmemi sağlayan, deneysel ve teorik bilgi birikimini aktaran, eş danışmanım olan değerli Doç. Dr. N. Gökhan ÜNEL'e teşekkürlerimi sunarım. Hızlandırıcı fiziğinde yetişmemde büyük pay sahibi olması, deneysel çalışmalarımda destek olması ve akademik alanda yaşayabileceğim tüm zorluklarla baş edebilmeyi öğretmesi benim için paha biçilemez olmuştur.

Deneysel fizikçi olabilmeyi, deney sırasında sakince düşünüp sorgulamayı, yaşanan aksiliklerde çözüm bulabilmeyi ve hızlandırıcı fizikçisi olmayı sevdiren, gece gündüz demeden sorularıma cevap verip öğretmekten çekinmeyen değerli Dr. Hakan ÇETİNKAYA'ya teşekkür ederim.

Demet dinamiği ve benzetim çalışmalarımın ilk adımından itibaren beni yetiştirip gelişmeye olanak sağlayan, her an ulaşılabilir bir şekilde desteğini esirgemeyen ve emeği için minnettar olduğum Dr. Salim OĞUR'a teşekkür ederim.

Proje süresince her türlü imkanı paylaşan ve çalışmalarda destek olup emeği geçen KAHVELab ekibine ve KAHVELab'la tanışmama vesile olan, projelerinde yer aldığım bu süreçte gösterdiği destek ve ilgisi için proje yürütücüsü Doç. Dr. Aytül ADIGÜZEL'e teşekkürlerimi borç bilirim.

Tez çalışmalarım kapsamında deneysel ve sosyal alanlarda kendimi geliştirmemi sağlayan, herhangi bir sohbetinde bile mutlaka bir bilgi öğrendiğim, 2018 yılından beri öğrenci ilişkilerinde inanılmaz derecede ilgili ve naif olduğuna tanık olduğum, olaylara farklı bakış açısı kazandıran bir yol gösterici olan, çalışmalarım sırasında iyi bir hakem görevinde olmuş olan ve tez jürimde de olmayı kabul eden çok kıymetli Prof. Dr. V. Erkan ÖZCAN'a teşekkür ederim.

Sistemi çalıştırıp lmler aldığımda yanımda olan, her yeni sorunda yeni bir bilgi ediniyoruz diyip yılmadan çalışan, hem bilimsel katkılarını hem de arkadaşlıklarını esirgemeyen, özellikle demet ölçümü çalışmalarında yaptıkları çok değerli katkılarla ve beni sürekli yreklendirerek pes etmemi engelledikleri için değerli arkadaşlarım şeyma ESEN ve Taha Batuhan İLHAN'a sonsuz teşekkür ederim.

Bu alışma 119M774 nolu TÜBİTAK ve 33250 nolu İstanbül Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri kapsamında gerçekleşmiştir. Böyle bir çalışmanın hayata geçmesini sağlayan bu iki kuruma teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca benden sabır ve desteklerini esirgemeyen her koşulda yanımda olan değerli aileme sonsuz teşekkür ederim.

Duygu HALİS

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	ix
KISALTMA LİSTESİ	xi
ŞEKİL LİSTESİ	xiii
TABLO LİSTESİ	xvii
ÖZET	xviii
ABSTRACT	xx
1 GİRİŞ	1
2 HIZLANDIRICI FİZİĞİ	3
2.1 Doğrusal Hızlandırıcılar	4
2.2 Radyo Frekans Dört Kutuplusu	6
2.3 İyon Kaynakları	10
2.3.1 Mikrodalga İyon Kaynakları	10
2.3.2 Elektron Siklotron Rezonansı İyon Kaynakları	12
2.3.3 Mikrodalga Deşarj İyon Kaynakları	12
2.4 İyon Kaynağı Tasarımı	14
2.4.1 İyon Sökme Sistemi	14
2.5 Demet Dinamiği	15
2.5.1 Hill Denklemi ve Yayınım	17
2.6 İletim Matrisleri	21
2.6.1 Sürüklenme Matrisi	22
2.6.2 Odaklayıcı Matrisleri	22
2.7 Yayınım Ölçüm Yöntemleri	23
2.7.1 Grid Method-Izgara Yöntemi	23
2.7.2 Pepper Pot Method-Tuzluk Yöntemi	24
2.7.3 Dört Kutuplu Tarama Yöntemi	24
2.7.4 Üç Ekran Yöntemi	26
2.8 Faraday Kupası	27

3	MATERYAL VE YÖNTEM	29
3.1	KAHVELab Proton Demet Hattı	29
3.2	İyon Kaynağı	30
3.2.1	Elektrot Tasarımı ve Üretimi	31
3.2.2	Vakum ve Yüksek Voltaj Testleri	34
3.2.3	İyon Sökme Sistemi ve Plazma Oluşumu	36
3.3	Düşük Enerjili Demet Aktarım (DEDA) Hattı	36
3.3.1	DEDA Hattı Tasarımı	36
3.3.2	DEDA Hattı Odaklayıcı Mıknatıslarının Üretimi, Birleştirilmesi ve Testleri	38
3.3.3	DEDA Hattı Yönlendirici Mıknatıslarının Üretimi, Birleştirilmesi ve Testleri	40
3.3.4	DEDA Hattı Ölçüm Kutusu Üretimi ve Testleri	42
3.3.5	Tuzluk Plakası Tasarımı, Üretimi ve Testleri	44
3.3.6	Parıldak Ekran Üretimi ve Testleri	47
3.3.7	Faraday Kupası (FK) Tasarımı, Üretimi ve Testleri	49
3.4	Radio Frekans Dört Kutuplusu (RFQ)	52
4	Benzetim ve Ölçümler	54
4.1	Demet Dinamiği	55
4.1.1	Faz Uzayı	59
4.1.2	Demet Profili Benzetim ve Ölçümler	59
4.1.3	Yayınım Hesabı Benzetim ve Ölçümler	62
4.2	Fotoğraf Analizi	67
4.3	Demet Akımı Benzetim ve Ölçümler	69
5	SONUÇ VE ÖNERİLER	73
	KAYNAKÇA	75
A	EKLER	78
A.1	Python programı kullanılarak yazılan algoritma	78
A.2	DEMİRCİPro ile yapılan benzetim çalışmaları	78
A.3	Python tabanlı geliştirilen c3pA algoritması ile fotoğraf analizi	78
	TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	87

SİMGE LİSTESİ

I	Akım
r	Delik Çapı
N	Delik Sayısı
L	Delikli Plaka ile Floresan Ekran Arası Mesafe
ds	Delikler Arası Mesafe
E	Elektrik Alan
eV	Elektronvolt
d	Elektrotlar Arası Mesafe
ϵ	Enine Demet Yayınımı
ϵ_{norm}	Enine Normalize Demet Yayınımı
ϵ_{geo}	Enine Geometrik Demet Yayınımı
k	Gradyan Değer
β	Görelî Hız Parametresi
γ	Görelî γ Parametresi
Hz	Hertz
c	Işık Hızı
keV	Kilo-Elektronvolt
B	Manyetik Alan
mA	Miliamper
MeV	Mega-Elektronvolt
m	Metre
mm	Milimetre
v	Parçacık Hızı

q	Parçacık Yüğü
σ	Parçacık Yüzdesi
V	Potansiyel Fark
ϵ_{rms}	RMS Yayınım
cm	Santimetre
Q	Toplam Yüğü Sayısı
β_t	Twiss Parametresi
α_t	Twiss Parametresi
γ_t	Twiss Parametresi



KISALTMA LİSTESİ

AC	Alternatif Akım
CERN	Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi
c3pA	Computerized Pepper Pot Plate Analysis
CRNL	Chalk River National Laboratory
WG	Dalga Kılavuzu
ds	Delikler Arası Mesafe
DTK	Demet Tanı Kutusu
DC	Doğru Akım
DTL	Drift Tube Linac
DEDA	Düşük Enerjili Demet Aktarım
ECR	Elektron Siklotron Rezonans
FK	Faraday Kupası
IBSimu	İyon Demeti Simulatörü
IS	İyon Kaynağı
KAHVELab	Kandilli Algiç Hızlandırıcı ve Enstrümantasyon Laboratuvarı
LANL	Los Alamos National Laboratory
LEBT	Low Energy Beam Transfer
LINAC	Linear Accelerator
LINAC2	Linear Accelerator 2
LINAC4	Linear Accelerator 4
MDIS	Mikrodalga Deşarj İyon Kaynağı
MBOX	Ölçüm Kutusu
RF	Radyo Frekans

RFQ	Radyo Frekans Dört Kutuplusu
PP	Tuzluk Plakası
PPP	Tuzluk Plaka Maskesi
TÜBİTAK	Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
TENMAK	Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu
SOL1	1 numaralı Solenoid
SOL2	2 numaralı Solenoid



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	Paralel levhalardan oluşturulmuş basit elektrostatik hızlandırıcı [8]	4
Şekil 2.2	Wideröe doğrusal hızlandırıcısının şematik gösterimi	5
Şekil 2.3	Luis Alvarez'in doğrusal hızlandırıcı örneği- LINAC2	6
Şekil 2.4	Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi LINAC2 ve LINAC4 tank yapısı [9]	7
Şekil 2.5	Sol: RFQ kovuğunun kanat yapısı. Sağ:RFQ içi elektrik alan vektörlerinin gösterimi [13].	8
Şekil 2.6	LANL'de geliştirilen RFQ kovuğu ve kanat yapısının tasarımı [12].	9
Şekil 2.7	CRNL tarafından geliştirilen mikrodalga kaynağı şematığı [16].	11
Şekil 2.8	Mikrodalga deşaj iyon kaynağı şematığı [24].	13
Şekil 2.9	İyon kaynağının iyon sökme sistemi şematığı [26]	15
Şekil 2.10	Hızlandırıcılarda parçacık hareketi [28]	15
Şekil 2.11	Demet faz uzayı grafiği	19
Şekil 2.12	Korunumlu faz uzayı grafiği	21
Şekil 2.13	Grid-Izgara yayılım ölçüm yönteminin şematik gösterimi [32] . .	24
Şekil 2.14	Pepperpot-Tuzluk yöntemi ile enine yayılım ölçüm şematik gösterimi	25
Şekil 2.15	Dört kutuplu tarama yöntemi ile enine yayılım ölçüm şematik gösterimi [32]	25
Şekil 2.16	Üç ekran yöntemi ile enine yayılım ölçüm şematik gösterimi [32]	27
Şekil 2.17	Faraday Kupası Ölçüm Düzeneği	28
Şekil 3.1	KAHVELab Proton Hattı	29
Şekil 3.2	Proton hızlandırıcısı Rf hattı ve İyon kaynağı kısmı	31
Şekil 3.3	IBSimu elektrot tasarımı	32
Şekil 3.4	İyon kaynağı tasarımının kesidi	32
Şekil 3.5	İyon kaynağı çıkışında demet profili	33
Şekil 3.6	Plazma ve toprak elektrotları	33
Şekil 3.7	Plazma odası montaj ve vakum tesisi	34
Şekil 3.8	İyon kaynağı vakum pencere çerçeve yalıtımı	35
Şekil 3.9	DEDA Hattı bileşenleri ve konumları,uzunluk birimi mm konum birimleri ise cm'dir	37

Şekil 3.10	DEDA Hattı TRAVEL[38] ve DemirciPro	
	[cakir2021DemirciPro] yazılım programlarıyla tasarlandı.	
	Grafik DemirciPro programından alınmıştır	37
Şekil 3.11	Odaklayıcı mıknatısın iki boyutlu tasarımı ve manyetik alan	
	ölçüm düzeneği	38
Şekil 3.12	Solenoidlerin merkezde manyetik alan profili ölçüm ve benzetim	
	sonuçları	39
Şekil 3.13	Odaklayıcı Mıknatıs Manyetik Alan - Akım Grafiği	40
Şekil 3.14	Yönlendirici mıknatısın manyetik alan benzetimi	41
Şekil 3.15	Üretimi yapılmış yönlendirici mıknatıslar	41
Şekil 3.16	Yönlendirici mıknatısın x,y ekseninde ve z ekseninde alınan	
	manyetik alan ölçüm sonuçları ile benzetim sonuçlarının	
	karşılaştırılması	42
Şekil 3.17	DEDA hattında yönlendirici mıknatısların proton demetine etkisi	42
Şekil 3.18	Solda MBOX fiziksel uzunlukları gösterilen tasarım resmi, sağda	
	ise MBOX algıçlarının dışarıdan görünür hali ile tasarım resmi . .	43
Şekil 3.19	KF25 tipi kör kapaktan el yapımı konnektör	45
Şekil 3.20	Ölçüm kutusu vakum test düzeneği	45
Şekil 3.21	Solda: Üretilen delikli plaka. Sağda: 3 numune için yapılan delik	
	çapı ölçümlerinin yer aldığı grafik	46
Şekil 3.22	Delik çapı büyük olan tuzluk deneme plakası	46
Şekil 3.23	Tuzluk plakası delik çapı:100 μm	47
Şekil 3.24	DEDA hattında alınan demet profillerinin konumları	48
Şekil 3.25	Ölçüm kutusu fosfor ekranı	49
Şekil 3.26	İyon kaynağı çıkışında demet akımı ölçüm testleri	50
Şekil 3.27	Solda FK tasarımı, sağda üretimi yapılan ölçüm kutusu için FK . .	51
Şekil 3.28	Demet akımı ölçme sistemi	51
Şekil 3.29	Ölçüm kutusu elemanları	52
Şekil 3.30	KAHVELab proton test demeti hattında kullanılacak RFQ tasarımı	53
Şekil 3.31	İK bileşenleri ve DEDA hattının oluşturduğu KAHVELab	
	proton test demeti hattı tasarımı	53
Şekil 4.1	KAHVELab proton hızlandırıcısının iyon kaynağı ve DEDA hattı	55
Şekil 4.2	üst: IBSimu çıktı dosyası örneği, alt: IBSimu demet grafiği	56
Şekil 4.3	KAHVELab proton hattı bileşenleri sürüklenme ve odaklama	
	uzunlukları	57
Şekil 4.4	Soldaki grafik IK çıkışında, ortadaki grafik L1 sürüklenme	
	sonrası, sağdaki grafik ise SOL1 sonrasında	59
Şekil 4.5	İyon kaynağı çıkışında demetin üç farklı program çıktısı ile demet	
	profili	60

Şekil 4.6	MBOX içerisinden demet profili, sağda ise x,y izdüşümleri	61
Şekil 4.7	SOL2 sonrasında alınan demet profili, sağda ise x,y izdüşümleri .	62
Şekil 4.8	PP yöntemi ile yayılım hesabının şeması	63
Şekil 4.9	PP plakasından geçmeden direkt ekranda olması gereken demetin profili solda, PP plaka deliklerinden geçen parçacıkların grafiği ortada, PP deliklerinden geçtikten sonra ekranda beklenen görüntü sağdaki grafikte gösterilmiştir.	63
Şekil 4.10	PP yöntemi ile ekrandan alınan demet fotoğrafı	64
Şekil 4.11	Benzetim ve yeniden hesaplama ile elde edilen faz uzayı grafiği .	66
Şekil 4.12	SS'den alınan gerçek proton demeti fotoğrafı	67
Şekil 4.13	Çekilen fotoğrafın python algoritmasında elde edilen ilk dağılım ve belirlenen tepe noktaları	68
Şekil 4.14	c3pA algoritması ile analiz edilen fotoğrafın konum,yoğunluk histogramı. Sağda ise faz uzayı grafiği bulunmaktadır.	68
Şekil 4.15	FK ile yapılan demet akımı ölçümü osiloskop görüntüsü	70
Şekil 4.16	FK ile yapılan demet akımı ölçümü, üstte bias voltaj uygulanmamış, altta bias voltaj uygulanmış halleri.	71
Şekil 4.17	SOL sonrası alınan demet görüntüsü ve benzetim sonucu	71
Şekil 5.1	KAHVELab proton hızlandırıcısı ile 2 MeV enerjili demet kullanılarak nötron eldesi için planlanan hattın tasarımı	74
Şekil A.1	IBSimu programından elde edilen demet verisinin Python'da yazılan algoritmaya yüklenmesi ve iyon kaynağı çıkışında faz uzayı grafiği elde edilmesi	79
Şekil A.2	İyon kaynağı çıkışında demetin yayılım hesabı kısmı	80
Şekil A.3	1 milyon parçacık sayılı demet dosyasına uygulanan sürüklenme matrisi algoritması	80
Şekil A.4	1 milyon parçacık sayılı demet dosyasına uygulanan SOL1 matrisi ve k hesabı algoritması	81
Şekil A.5	1 milyon parçacık sayılı demet dosyasının delikli plakasından geçen parçacıkların hesabının algoritması	81
Şekil A.6	Delikli plakadan geçen demetçiklerin yayılım hesabı ve faz uzayı grafiği çizdirilme kısmı	82
Şekil A.7	Proton demetinin DEDA hattı boyunca DEMİRCİPro programı ile yapılan benzetiminden elde edilen arayüz görüntüsü	83
Şekil A.8	DEMİRCİPro programı ile yapılan yayılım hesabı benzetim çalışması	83
Şekil A.9	Çekilen fotoğrafın yüklenmesi ve okunması kısmı	84
Şekil A.10	Okunan fotoğrafın arka plan gürültüsünden arındırılması kısmı . .	85

Şekil A.11 Fotoğraftan alınan veriler ile parçaların konum-açı hesabının yapılması	86
---	----



TABLO LİSTESİ

Tablo 4.1	Farklı SOL1 manyetik alan değerlerinin demet çapına etkisi . . .	58
Tablo 4.2	İyon kaynağı çıkışında demetin üç farklı program ile benzetim sonuçlarının karşılaştırması.	60
Tablo 4.3	MBOX içerisi floresan ekran konumundan yayılım ve twiss parametreleri	62
Tablo 4.4	PP plakası ile ekran arasındaki farklı mesafeler için hesaplanan yayılım ve twiss parametreleri	65
Tablo 4.5	Fotoğraf analizi benzetim ve ölçüm sonuçları karşılaştırılması. . .	69
Tablo 4.6	Farklı Sol-1 akım değerlerinde benzetimi yapılan ve hesaplanan yayılım değerleri.	69
Tablo 4.7	Demet hattı sonunda RFQ girdi parametreleri	72

20 keV ENERJİLİ PROTON DEMETİNDE YÜK, DEMET PROFİLİ VE YAYINIM ÖLÇÜMLERİ

Duygu HALİS

Fizik Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Merih SERİN
Eş-Danışman: Doç. Dr. N. Gökhan ÜNEL

İstanbul'daki Kandilli Algıç, Hızlandırıcı Ve Enstrümantasyon Laboratuvarı (KAHVELab), 20 keV protonları 2 MeV'ye hızlandırmak için 800 MHz'de çalışan dört kanatlı bir Radyo Frekansı Dört Kutuplusu (RFQ) kuracaktır. RFQ'ya düzgün bir giriş sağlamak için, mikrodalga deşarj iyon kaynağından (IS) gelen demetin, MBOX adı verilen entegre bir ölçüm istasyonunu da içeren optimize edilmiş Düşük Enerjili Demet Aktarım (DEDA-LEBT) hattı aracılığıyla RFQ ile eşleştirilmesi gerekir. MBOX, IS ve RFQ arasında doğru bir eşleşme sağlamak amacıyla demet akımını ve profilinin yanı sıra demet yayınımlarını da ölçmek üzere tasarlanmıştır. Bir dizi teşhis aracı içerir: bir Faraday Kupası, bir sintilatör ekran ve bir tuzluk plakası (PP). Devreye alma sırasında demet hattı üzerinde farklı noktalarda demet görüntüleri alınmıştır. Demet yayınımlarını hesaplamak için analiz kodu geliştirilmiştir. Python tabanlı geliştirilen Computerized Pepper Pot Plate Analysis(c3pA) kodu fotoğraf analizi için geliştirilmiş ve test edilmiştir. Bu tezde proton RFQ kovuğuna aktarılacak olan demetin iyon kaynağından sonra DEDA hattında yer alan ölçüm kutusunda yapılan demet yükü, profili, yayılım ölçümlerinin ve benzetim çalışmalarının neden ve nasıl yapıldığı anlatılacaktır.

Anahtar Kelimeler: Parçacık Hızlandırıcıları, doğrusal proton hızlandırıcısı, demet tanısı, demet dinamiği, yayılım, demet akımı.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



ABSTRACT

Measurements of Charge, Beam Profile, and Emittance in a 20 keV Proton Beam

Duygu HALİS

Department of Physics
Master of Science Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Merih SERİN

Co-supervisor: Assoc. Prof. Dr. N. Gökhan ÜNEL

The Kandilli Detector, Accelerator, and Instrumentation Laboratory (KAHVELab) in Istanbul will install a Radio Frequency Quadrupole (RFQ) operating at 800 MHz, designed to accelerate protons from 20 keV to 2 MeV. To ensure a proper entry into the RFQ, the beam from the microwave discharge ion source (IS) must be aligned using an optimized Low Energy Beam Transport (LEBT) line, which includes an integrated measurement station named MBOX. MBOX is designed to measure beam current, profile, and emittance to ensure correct matching between IS and RFQ. It contains various diagnostic tools including a Faraday Cup, a scintillator screen, and a pepper-pot plate (PPP). During commissioning, beam images were taken at different points along the beam line. An analysis code has been developed to calculate the beam emittance. The code, named Computerized Pepper Pot Plate Analysis (c3pA), is Python-based and has been developed and tested for photo analysis. This thesis will describe the process and reasons for conducting beam current, profile, emittance measurements, and simulation studies in the measurement box located in the LEBT line after the ion source and before the proton RFQ cavity.

Keywords: Particle accelerator, linear proton accelerator , beam diagnostic, beam dynamics, emittance, beam current

YILDIZ TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF SCIENCE AND ENGINEERING



1 GİRİŞ

Parçacık hızlandırıcıları, yüklü parçacıkların enerjilerini artırmak amacıyla elektromanyetik alanlar kullanarak bu parçacıkları yüksek hızlara ulaştıran cihazlardır. Bu cihazlar, parçacık fiziği alanındaki temel araştırmalarda kullanılır. Büyük ölçekli hızlandırıcılar atomaltı parçacıkları incelemeye yararken, daha küçük ölçekli hızlandırıcılar ise malzeme bilimi ve biyolojik araştırmalar gibi farklı alanlarda kullanılmaktadır. Küçük hızlandırıcılar, tıbbi teşhislerde, yarı iletken üretiminde, kanser tedavisinde ve hızlandırıcı kütle spektrometrisinde de yaygın olarak kullanılmaktadır. Hızlandırıcıların temel bileşenlerinden biri olan iyon kaynakları, elektrik yüküne sahip iyonlar üretmek için kullanılan cihazlardır. Bu kaynaklar, hızlandırıcıların ilk aşamasını oluşturur ve yüklü parçacıkların hızlanmasında temel bir rol oynarlar.

İyon kaynaklarının çeşitleri, kullanım amaçlarına ve hızlandırılacak parçacık türlerine göre farklılık gösterir. Hızlandırılacak parçacıkların demet akımı ise hızlandırıcının kullanılacağı uygulama alanlarına göre belirlenir. Parçacık demetinin kalitesi, iyon kaynağının özelliklerine bağlıdır. Bu nedenle, demet tanısı yapabilmek için iyon kaynağının özelliklerini tanımak önemlidir.

Demet tanısı, demetin boyutu, yoğunluğu, enerjisi ve profilinin yanı sıra emittansının ölçümünü içerir. Yayınım, demetin faz uzayındaki dağılımını tanımlayan bir terimdir. Enine yayınım, demetin ilerleme yönüne dik olan düzlemdeki dağılımını ifade eder ve genişlik ile momentum dağılımı ile ilgilidir. Boyuna yayınım ise, demetin enerji dağılımı ve uzunluğu arasındaki ilişkiyi ifade eder ve demetin ilerleme yönündeki zamanlama ve enerji dağılımıyla ilgilidir. Bu tez kapsamında, demetin enine dinamik hesaplamaları ele alınacaktır. Demet tanısında kullanılan çeşitli algıçlar aracılığıyla demetin profilini, yayınımını, akımını ve diğer parametrelerini ölçmek mümkündür. Algıçların tasarımı ve demet iletim hattındaki benzetimleri, demet tanısı için önemlidir. Benzetimler, parçacığın konumu, açısı, momentumu ve enerjisi gibi bilgileri içeren demet dosyaları kullanılarak gerçekleştirilir.

Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Algıç, Hızlandırıcı ve Enstrümantasyon Laboratuvarı'nda (KAHVELab) yürütülen mikrodalga deşarj iyon kaynaklı proton hızlandırıcısı projesi, 800 MHz frekansında çalışan bir Radyo Frekans Dört Kutulusu (RFQ) ile 2 MeV'lik enerjiye sahip bir proton demeti elde etmek üzere kurulmuştur. Bu sistem, daha önce tasarlanan ve 8 keV enerjiye sahip bir iyon kaynağını kullanmaktadır. Bu kaynak ile ilgili detaylı bilgilere referanslarda ulaşılabilir [1]. Mevcut sistemin iyon sökme sistemi değiştirilerek 20 keV enerjiye sahip proton demeti elde etme çalışmaları yürütülmüştür. Enerji seviyesinin yükseltilip demet akımının düşürülmesi ile dünyanın en yüksek frekansına (800 MHz) sahip RFQ'su kullanılması, 2 MeV enerjili proton demeti elde edilmesi hedeflenmiştir.

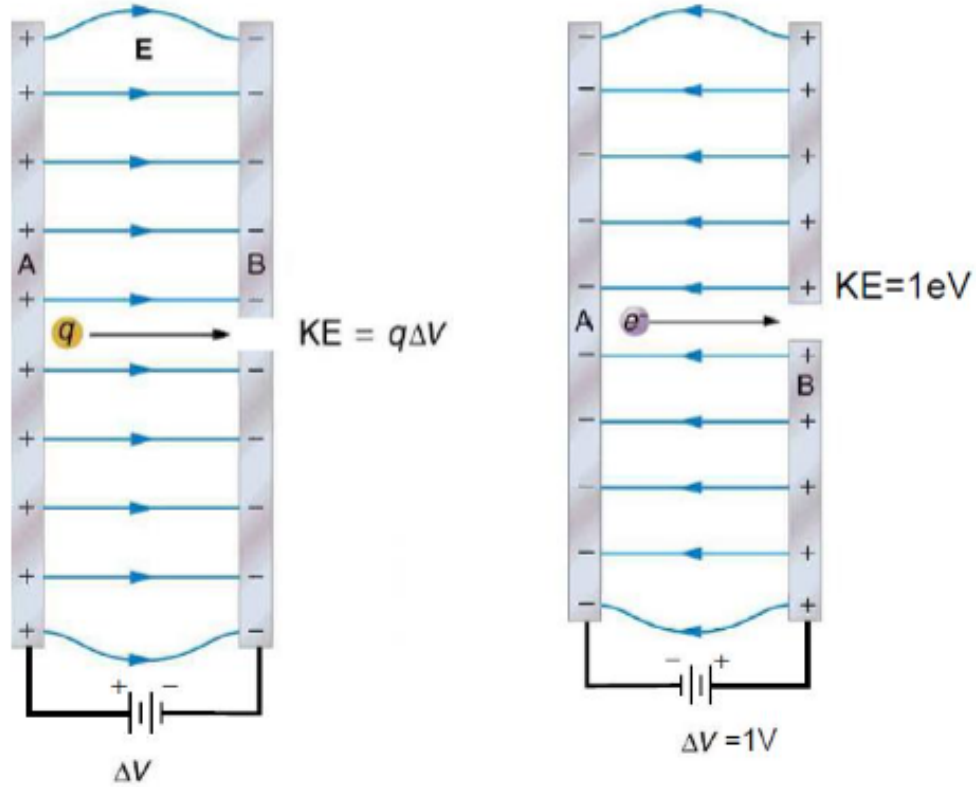
Bu tez çalışması, iyon kaynağı elektrot yapısının değiştirilmesi ve enerjisinin 20 keV'a çıkarılması ile elde edilen yeni proton demet hattını tanıtmaktadır. Demet hattı üzerindeki ölçüm kutusundan (MBOX) alınan ölçümlerle yapılan benzetim çalışmaları, DemirciPro [2] programı ve geliştirilen Python3 [3] tabanlı algoritma kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma, iyon kaynağının ve demet iletim hattı bileşenlerinin entegrasyonu, testleri ve proton demetinin elde edilmesi süreçlerini kapsamaktadır. Proton demetinin RFQ giriş parametrelerinin belirlenmesi ve tasarım koşulları, bu tezde ele alınmıştır. Ayrıca, KAHVELab'daki proton test demetinin detaylı incelemesi, demetin yayılım ölçümlerine özel bir odaklanma ile sunulmuştur.

2 HIZLANDIRICI FİZİĞİ

Parçacık hızlandırıcıları, modern fiziğin en önemli araçlarından biridir ve temel parçacıkların özelliklerinin incelenmesinden, kanser tedavisine kadar geniş bir uygulama yelpazesi sunar. Bu cihazlar, elektrik yüküne sahip parçacıkları, elektromanyetik alanlar yardımıyla yüksek enerjilere ulaştırır. Parçacık hızlandırıcıları, 20. yüzyılın başlarında, atomaltı parçacıkların yapısını ve etkileşimlerini anlamak amacıyla geliştirilmeye başlanmıştır [4]. Hızlandırıcı fiziği, yüklü parçacıkların hareketlerinin ve etkileşimlerinin incelendiği bir bilim dalıdır. Parçacık hızlandırıcılarının tasarımı, bu fiziksel prensiplere dayanır ve parçacıkların enerji kazanması, hızlanması ve istenen yörüngede tutulması için gerekli koşulları sağlar [5]. Hızlandırıcıların ilk örnekleri, basit elektrostatik hızlandırıcılar olup, yüksek voltajlar kullanılarak parçacıklara enerji kazandırılmıştır. Ancak, elektrostatik yöntemlerle elde edilebilecek enerji sınırlı olduğundan, daha yüksek enerjilere ulaşmak için alternatif yöntemler araştırılmıştır. Bu çerçevede, Radyo Frekansı (RF) teknolojisinin kullanıldığı doğrusal ve dairesel hızlandırıcılar geliştirilmiştir [6]. 20. yüzyılın ortalarından itibaren, parçacık hızlandırıcıları giderek daha karmaşık hale gelmiş ve çeşitli bilimsel araştırmaların yanı sıra endüstriyel ve tıbbi uygulamalarda da kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle, Büyük Hadron Çarpıştırıcısı (LHC) gibi büyük ölçekli hızlandırıcılar, Higgs bozonu gibi temel parçacıkların keşfinde önemli roller oynamıştır. Bu tür hızlandırıcılar, parçacıkları neredeyse ışık hızına kadar hızlandırabilir ve bu sayede parçacıkların çok yüksek enerji seviyelerindeki çarpışmalarını inceleyebilir [6]. Parçacık hızlandırıcıları, bugün fizik araştırmalarının yanı sıra, malzeme bilimi, biyoloji ve tıp gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Özellikle kanser tedavisinde proton terapisi ve radyasyon tedavisi gibi uygulamalarda, hızlandırıcılar hayati bir rol oynamaktadır [7].

2.1 Doğrusal Hızlandırıcılar

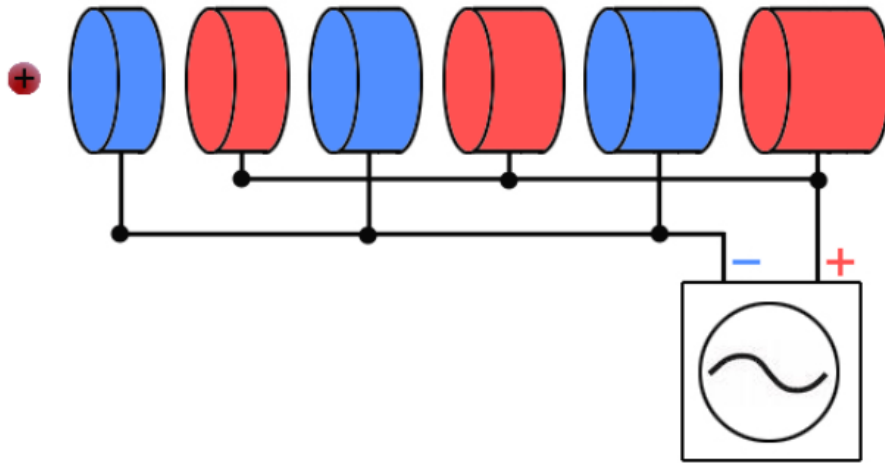
Doğrusal hızlandırıcı fikri ilk olarak 1924 yılında ortaya atılmıştır. Şekil 2.1'de elektrostatik hızlandırıcı örneği gösterilmiştir. Bu dönemdeki elektrostatik hızlandırıcılar, sınırlı hızlandırma kapasiteleri nedeniyle fiziksel ve teknik zorluklarla karşı karşıya kalmıştır. Elektrostatik hızlandırıcılar, yüksek gerilim kullanarak parçacıkların potansiyel enerji kazanmasını sağlayarak onları ivmelenmiştir. Ancak bu yöntemde, parçacığın kazanabileceği maksimum enerji, uygulanan elektrik potansiyel farkıyla sınırlıdır ve yüksek gerilimlerde elektriksel bozulmalar yaşanmaktadır [8]. Bu sorunların üstesinden gelmek için, Radyo Frekansı (RF) elektromanyetik alanlar kullanılarak hızlandırıcılar geliştirilmiştir. RF hızlandırıcılar, parçacıkların maksimum enerji sınırlamasını aşmasına ve daha yüksek enerjilere ulaşmasına olanak tanımıştır. 1928 yılında



Şekil 2.1 Paralel levhalardan oluşturulmuş basit elektrostatik hızlandırıcı [8]

Norveçli mühendis Rolf Wideröe, doğrusal hızlandırıcıların teorik temellerini atmış ve düşük enerji seviyelerinde ilk başarılı deneylerini gerçekleştirmiştir. Wideröe'nin çalışmaları, doğrusal hızlandırıcıların gelişiminde dönüm noktası olmuştur [9]. Şekil 2.2'de Wideröe'nin geliştirdiği doğrusal hızlandırıcı tasarımı bulunmaktadır. Hızlandırıcı RF güç kaynağı ve sürüklenme tüplerini içermektedir. Bu tüpler, parçacık demetinin enerjisi arttıkça uzunlukları artırılan yapılar olarak

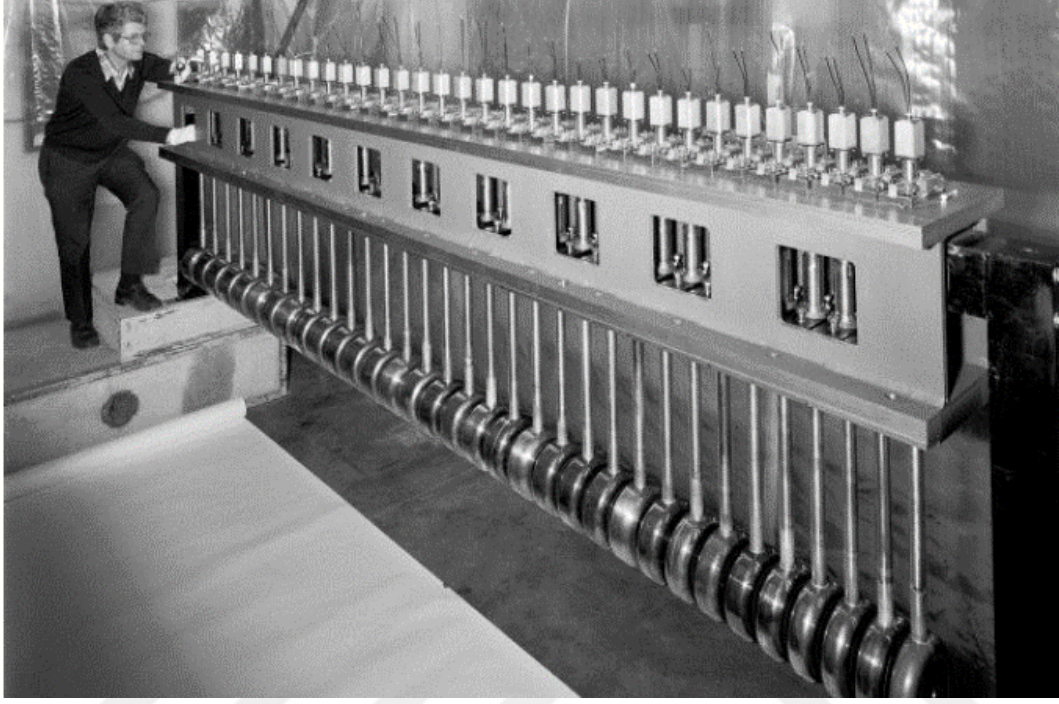
tasarlanmıştır. Bu tasarım, demetin RF dalgasıyla senkronize olmasını sağlar. Hızlandırma, sürüklenme tüpleri arasındaki boşluklarda gerçekleşir. Wideröe'nin tasarımında, iyon kaynağından çıkan demet başlangıçta sürekli formdadır ve paketçikli yapıya dönüştürülmesi gerekir. Paketçikli yapı, demetin enerjisini artırarak daha yüksek enerji seviyelerine ulaşmasını sağlar. Wideröe yaptığı deneylerde, 1 MHz frekanslı 25 kV'luk RF güç kaynağını tek sürüklenme tüpünden oluşan doğrusal hızlandırıcısına uygulamıştır. Sürüklenme tüpünün her iki ucuna zıt yüklü plakalar ekleyerek de sistemi tamamlamıştır. Bu deneyde kullanılan ağır iyonlar iki kat enerji kazanacaktır. Wideröe Potasyum iyonu kullanmış ve iyonun çıkış enerjisi 50 keV olarak ölçülmüştür. Buna göre Wideröe yaptığı hızlandırıcıda parçacık, RF alanı kullanılarak, uygulanan gerilimden daha fazla enerji kazanmıştır, bu da RF alanının elektrostatik alana göre üstünlüğünü göstermektedir. Bu teknoloji, özellikle parçacık fiziği deneyleri için önemlidir, ancak proton veya elektron gibi hafif parçacıklar için bu yöntem verimli olmayacaktır, çünkü RF dalgası ile senkronizasyonun sürdürülebilmesi için parçacıkların enerjisi arttıkça sürüklenme tüplerinin boyunu da artırmak gerekmektedir. Bu nedenle, doğrusal hızlandırıcılarda yüksek enerjilere ulaşmak için yüksek güçlü mikrodalga üreteçlerine ihtiyaç vardır [8]. II. Dünya Savaşı sonrasında, RF teknolojisi,



Şekil 2.2 Wideröe doğrusal hızlandırıcısının şematik gösterimi

doğrusal hızlandırıcıların gelişiminde önemli bir rol oynamaya başlamıştır. Yüksek frekanslı RF dalgaları, parçacıkları daha yüksek enerjilere hızlandırmak ve radar teknolojileri için geliştirilmiştir. 1948 yılında Amerikalı bilim insanı Luis Alvarez, güç kayıplarını azaltmak için Wideröe'nun kullandığı sürüklenme tüplerini(DTL) silindirik bir kavite içerisinde tutmuştur. Sürüklenme tüplerinde ilerleyen demet, RF dalgasının hızlandırıcı olduğu zaman aralığında sürüklenme tüplerinin arasındaki

boşlukta, yavaşlatıcı olduğu zaman aralığında ise sürüklenme tüpleri içerisinde olacak şekilde senkronize olmuştur. Alvarez yaptığı bu doğrusal hızlandırıcı ile proton ve H^- iyonlarını, 3 MeV enerjiden 100 MeV enerjiye kadar hızlandırmıştır. Şekil 2.3'de Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi (CERN)'nde Alvarez tipi LINAC2 doğrusal hızlandırıcısı gösterilmiştir [8]. CERN'de bulunan sürüklenme tüpleri



Şekil 2.3 Luis Alvarez'in doğrusal hızlandırıcı örneği- LINAC2

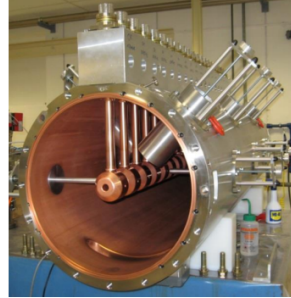
yapısına sahip olan LINAC2 ve LINAC4 hızlandırıcılarıdır. Şekil 2.4'de gösterildiği üzere LINAC2, 200 MHz frekansa sahip çapları 1 metre, her biri 7 metre uzunluğunda 3 adet tanktan oluşmaktadır. LINAC4 ise, 352 MHz frekansa sahip çapı 500 mm, 19 metre uzunluğunda, 120 adet sürüklenme tübünden oluşmaktadır. Son enerji her iki hızlandırıcı için de 50 MeV olarak belirlenmiştir. LINAC4 daha yüksek frekansta çalışır, daha küçük çaplı tanklara sahip olup, sürüklenme tüpü sayısı daha fazladır ve hücre uzunluğu değişkenliği ile geniş bir beta aralığını kapsamaktadır [9].

2.2 Radyo Frekans Dört Kutuplusu

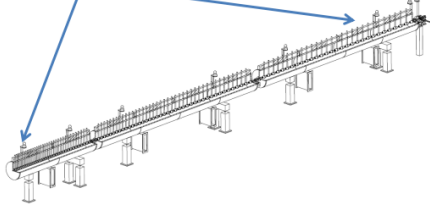
İyon hızlandırıcılarında, iyon kaynağından elde edilen parçacıkların enerjileri, etkili bir hızlandırma süreci için Drift Tube Linac (DTL) kovuğunun çalışma aralığının en alt limitine kadar yükseltilmelidir. Bu enerji seviyesi genellikle 20-50 keV arasındadır. DTL, bu başlangıç enerjisini 2-3 MeV gibi daha yüksek enerjilere çıkarma prensibine dayanmaktadır. Ancak, düşük hızlarda, DTL tüplerine yerleştirilecek dört kutuplu mıknatısların boyutları, kısa kovuk



CERN LINAC 2 tank 1:
200 MHz 7 m x 3 tanks, 1 m
diameter, final energy 50 MeV.



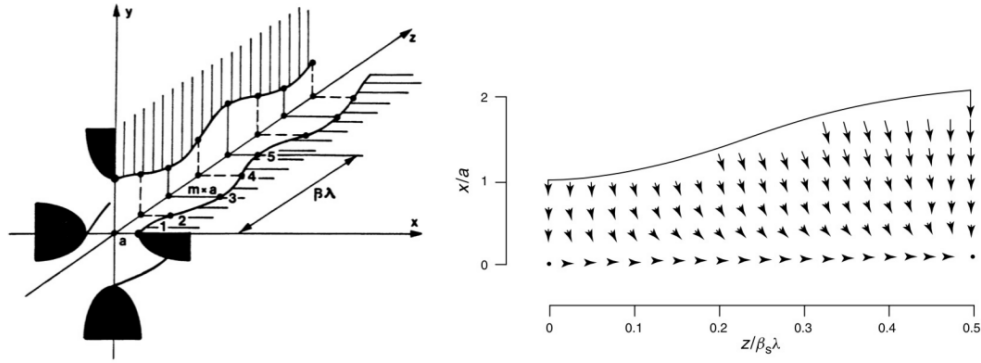
CERN LINAC 4: 352 MHz frequency, Tank diameter 500
mm, 3 resonators (tanks), Length 19 m, 120 Drift Tubes,
Energy: 3 MeV to 50 MeV, $\beta=0.08$ to $0.31 \rightarrow$ cell length
from 68mm to 264mm.



Şekil 2.4 Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi LINAC2 ve LINAC4 tank yapısı [9]

uzunlukları nedeniyle kısıtlanmaktadır. Düşük hızlarda, parçacıklar arasındaki uzay-yük etkisi güçlü olduğundan, bu hız aralığında DTL içerisinde demet kayıpları kaçınılmazdır. Ayrıca, DTL kovuğu içerisinde parçacıkların hızlandırılabilmesi için gelen demetin paketli yapıda olması gerekmektedir. Bu amaçla kullanılan paketleyici kovuklarda meydana gelecek boyuna demet kaybı, hızlandırıcıda yüksek akımlara ulaşılmasını engellemektedir [10]. Radyo Frekans Dört Kutuplusu (RFQ), özellikle düşük enerjili ağır iyonların hızlandırılmasında kritik bir rol oynar ve modern doğrusal hızlandırıcıların vazgeçilmez bir parçasıdır. RFQ, parçacıkları ışık hızının yüzde biri ile yüzde onu arasındaki hızlarda hızlandırmak için ideal bir yapı sunar. Bu, özellikle ağır iyon hızlandırıcılarının ilk aşamasında önemli bir avantaj sağlar. RFQ'nun bir başka önemli özelliği ise, demeti paketleyebilme kabiliyetidir. Bu sayede, iyon kaynağından sonra ek bir paketleyici bileşenin kullanılmasına gerek kalmamaktadır. RFQ, iyon kaynağı çıkış enerjileri ile diğer RF kovuklarının giriş enerjileri (birkaç MeV) arasındaki bölgeyi kapsayabildiğinden, yüksek gerilimli DC hızlandırıcılara olan ihtiyacı ortadan kaldırmaktadır. RFQ, elektrik alanlar aracılığıyla güçlü bir odaklama yeteneğine sahip olduğundan, yüksek akımlı demetler için son derece verimlidir. Bu özellikler, RFQ'nun günümüz doğrusal ve dairesel iyon hızlandırıcı sistemlerinin ilk hızlandırma bileşeni olarak önemini vurgular ve hızlandırıcı teknolojisinde önemli bir yenilik olarak kabul edilir [11]. Doğrusal hızlandırıcıların geliştirilmesi, düşük hızlardaki demetin radyal ve boyuna yönlerdeki stabilitesi arasındaki uyumsuzluğu çözme amacı taşır. Elektrik alanların, demeti hızlandırırken aynı zamanda radyal odaklama kuvveti olarak kullanılabilmesi, hız değişikliklerinin fazla olduğu RF kovuk yapısında büyük bir avantaj sağlamaktadır. Bu yöntem sayesinde, hız değişimlerinin odaklama kuvvetini değiştirmemesi sağlanarak,

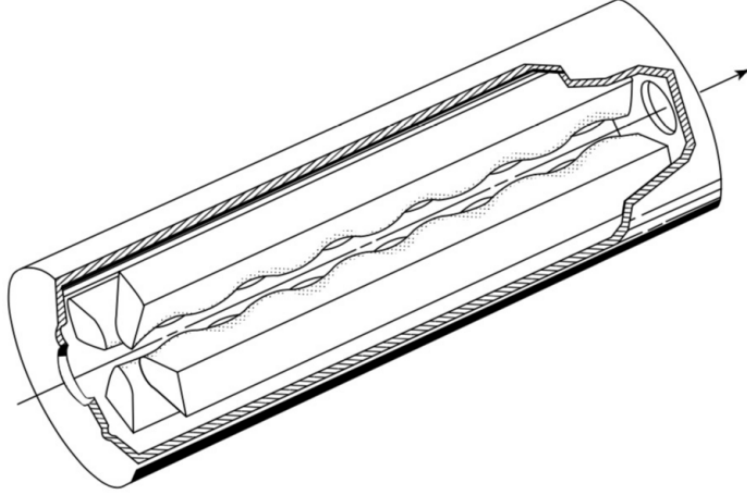
hıza bağılı manyetik kuvvetlerle yapılan odaklamadan daha güçlü bir odaklama kuvveti elde edilebilmiştir [12]. RFQ'nun temel çalışma ilkesinde, yatay elektrotlarda oluşan elektrik alan çizgilerinin dağılımı kritik bir faktördür. Şekil 2.5 incelendiğinde, elektrot geometrisi ve zaman içinde değişen RF gerilimi arasındaki etkileşimin nasıl gerçekleştiği görülür. Elektrotun eksen yakınında potansiyel en yüksek değerlere ulaşırken, uzaklaştıkça potansiyel düşüş gösterir. RFQ'nun dört elektrot yapısının sinüsoidal geometrisi, bu etkileşimin optimizasyonunu amaçlar, Şekil 2.5'te belirtildiği gibi zamanla modüle edilen RF gerilimi, elektrot potansiyelinde de zamanla değişim yaratır. Sabit bir gerilim uygulaması, RFQ'nun bir bölümünde demet üzerine etki eden elektrik alanının değişmez kalmasına, dolayısıyla demet parçacıklarının aynı oranda hızlandırılmasına ya da yavaşlatılmasına sebep olur. Bu, RFQ'nun etkin bir biçimde çalışmasına engel teşkil eder ve demet paketlenmesini zorlaştırır. Elektrotlara zamanla değişen potansiyel uygulanmasıyla, demet eksenini boyunca eksensel hızlandırıcı elektrik alanı oluşturulur ve demetin bu alana uyum sağlaması mümkün kılınır. Bu süreç, elektrotlarda oluşturulan modülasyon sayesinde demetin etkin bir şekilde hızlandırılması veya yavaşlatılması demektir. 1970 yılında, Kapchinsky ve



Şekil 2.5 Sol: RFQ kovuğunun kanat yapısı. Sağ:RFQ içi elektrik alan vektörlerinin gösterimi [13].

Tepliakov'un çalışmaları, RF dört kutuplu yapıda, elektrotların geometrisinin uygun şekilde değiştirilerek, elektrik alanlarla hem radyal yönde odaklama hem de boyuna yönde hızlandırma sağlanabileceğini ortaya koymuştur. Bu elektrotların şekillendirilmesi, bir potansiyel fonksiyonu kullanılarak belirlenmiştir [14]. Aynı yıl içinde, Kapchinsky ve Tepliakov, RFQ'nun parametrelerini değiştirerek demetin RF dört kutuplu kuvvetleri altında nasıl paketlenildiğini ve bu şekilde kovuğa verimli bir şekilde nasıl hızlandırılabilirliğini göstermişlerdir [13]. Bu çalışmaların ardından yapılan ilk deneysel RFQ çalışmaları ve Los Alamos Ulusal Laboratuvarı'nın (LANL) 1979'da geliştirdiği kovuk, RFQ'nun etkinliğini artırmak için önemli demet dinamikleri çalışmalarına zemin hazırlamıştır. Bu çalışmalar, RFQ'nun kanat ucu tasarımı için önemli bir yöntem olan LANL

dört bölge yöntemini (four-section procedure) geliştirmiştir [12]. 1980’de LANL tarafından üretilen ve başarıyla çalıştırılan RFQ, yüksek akımlı iyon hızlandırıcılarının vazgeçilmez bir bileşeni haline gelmiştir, bu da RFQ’nun modern hızlandırıcı sistemlerindeki etkinliğini ve önemini kanıtlamıştır [10]. Şekil 2.6’de verilen tasarım en yaygın kullanılan kanat yapısı olmuştur. KAHVELab proton hızlandırıcısında kullanılacak RFQ tasarımı için de bu çalışmalar baz alınmış ve özgün bir tasarım yapılmıştır. Hızlandırıcı alanında gerçekleşen gelişmeler,



Şekil 2.6 LANL’de geliştirilen RFQ kovuğu ve kanat yapısının tasarımı [12].

RFQ’nun hem teorik hem de pratik olarak parçacık hızlandırıcı teknolojisinde önemli bir yer tuttuğunu göstermektedir. RFQ, düşük enerjili ağır iyonları verimli bir şekilde hızlandırma ve paketlenme yeteneği ile, hızlandırıcı sistemlerin ilk aşamalarında kritik bir role sahiptir. Parçacık hızlandırıcı sistemlerinde, ilk adım olarak yüklü parçacıklar üreten İyon Kaynağı (IS) bulunur. Bunu, demeti hızlandırıcıya uygun şekilde taşıyan ve kararlılığını sağlayan Düşük Enerjili Demet iletimi (DEDA) hattı izler. Demetin ilk hızlandırılması Radyo-Frekanslı Dört Kutuplusu (RFQ) ile yapılır ve bu aşamada demet paketçikli yapıya dönüştürülür. Ardından, Orta Enerjili Demet İletim Hattı (MEBT) üzerinden proton demeti, daha sonraki hızlandırma aşamalarına taşınır. MEBT, demetin Sürüklenme Tüpü Linakı (DTL) ve diğer hızlandırıcı modüllere yönlendirildiği bir geçiş aşamasıdır. DTL, parçacıkları daha yüksek enerjilere taşıyan bir hızlandırma bölümüdür. DTL’nin ardından, daha yüksek enerji seviyelerine ulaşmak için Hücre Çiftlenimli Sürüklenme Tüpü Linakı (CCDTL) ve Çiftlenimli Kavite Linakı (CCL) gibi yapılar devreye girer. Bazı durumlarda, daha verimli enerji aktarımı için ve güç kayıplarını asgariye indirmek amacıyla Süperiletken Linak (SC-Linac) gibi süperiletken yapılar da kullanılır. Süperiletken linaklar, normal iletken malzemelerin aksine, çok düşük sıcaklıklarda çalışır ve bu sayede elektrik direncini azaltarak enerji kayıplarını

önemli ölçüde düşürürler. Bu süreç boyunca, hızlandırılan parçacık demeti, çeşitli hızlandırma yapılarından geçerek enerji seviyesini artırır ve sonuçta yüksek enerjili parçacık demetleri elde edilir.

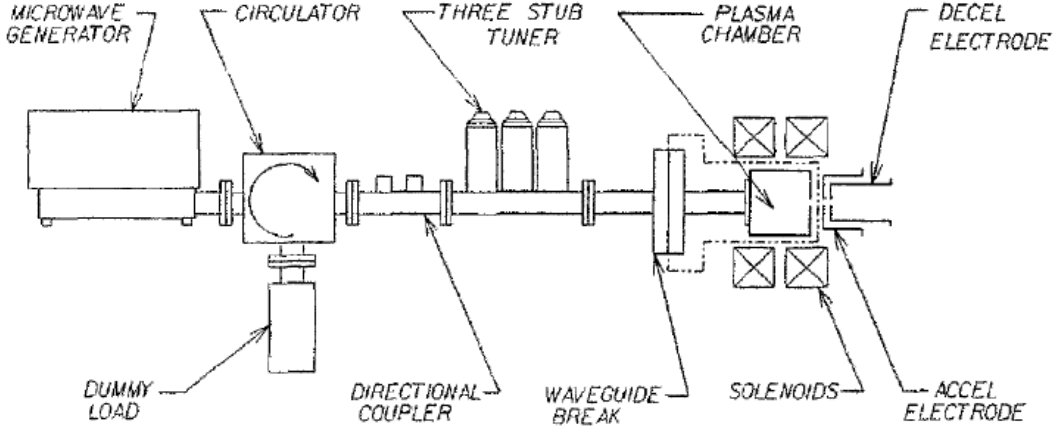
2.3 İyon Kaynakları

İyon kaynakları, parçacık hızlandırıcılarının ana bileşenlerinden biridir ve sadece hızlandırıcılarda değil, malzeme bilimi, egzotik iyon üretimi ve füzyon plazma ısıtımı gibi çeşitli alanlarda da kullanılırlar. İyon kaynağı, plazma içinden iyonların ayrıştırılıp hızlandırılmasını sağlayan bir sistemdir. Plazma, yüklü iyonlar ve nötr atomların bir arada bulunduğu kapalı sistemlerdir ve plazma içinden iyonları ayrıştırmak için genellikle elektron bombardımanı yöntemi kullanılır. İyon kaynaklarının tasarımı ve işlevi, bu uygulamaların başarısı için hayati önem taşır ve sürekli gelişmekte olan teknolojilerle bu alanın ilerlemesi devam etmektedir [15]. İyon kaynaklarının tasarımı, spesifik uygulama gereksinimlerine göre değişir. Parçacık fiziği deneyleri için iyon kaynakları, genellikle yüksek enerji ve istikrarlı bir iyon akışı sağlayacak şekilde tasarlanır. Örneğin, hızlandırıcılar için kullanılan iyon kaynakları, parçacıkları hızlandırmak için gereken başlangıç enerji seviyelerine ulaşabilmelidir. Tasarım, aynı zamanda iyon kaynağının verimliliği, güvenilirliği ve bakım kolaylığı gibi faktörleri de göz önünde bulundurur.

2.3.1 Mikrodalga İyon Kaynakları

Mikrodalga iyon kaynakları, plazma odasında elektrot bulundurmadıkları için diğer iyon kaynaklarına göre daha az bakıma ihtiyaç duyarlar ve daha uzun ömürlü olabilirler. Bu özellikler, mikrodalga iyon kaynaklarının tercih edilmesinde önemli bir rol oynar. Mikrodalga iyon kaynakları, genellikle daha yüksek vakum seviyelerinde çalışabilirler ve bu, sistemin içindeki gaz varlığına bağlıdır. Mikrodalga iyon kaynaklarının yapıları birbirlerine benzer, ancak manyetik alan profiline göre farklı isimlerle anılabilirler ve farklı amaçlar için kullanılabilirler. Bu tür iyon kaynaklarının temel bileşenleri arasında magnetron, dalga kılavuzları, plazma odası, mıknatıslar ve elektrotlar bulunur [1]. Magnetron, uygun frekansta mikrodalga üretmek için kullanılır. Dalga Kılavuzları, mikrodalga enerjisini magnetrondan plazma odasına aktarmak için kullanılır. İyonların üretildiği ve toplandığı alan plazma odasıdır. Kaynağın türüne göre manyetik alan oluşturmak için mıknatıslar kullanılır. İyonları plazma odasından demet odasına aktarmak için kullanılan uygun geometri ve yapıdaki bileşenler ise elektrot sistemi olarak adlandırılır. Sistem vakum altında olmalıdır ve yüksek voltaj ile beslenmelidir. Bileşenlerin tasarımı, kaynağın verimliliğini ve kullanım alanını belirleyici faktörler

arasında yer alır. Şekil 2.7'de verilen Taylor ve Mouris tarafından üretilen mikrodalga iyon kaynağında kullanılan bileşenler, bu kaynağın özel ihtiyaçlarına göre tasarlanmıştır. Bu tür kaynaklar, yüksek verimlilik ve düşük bakım gereksinimleri nedeniyle çeşitli uygulamalarda tercih edilebilir [16].



Şekil 2.7 CRNL tarafından geliştirilen mikrodalga kaynağı şematiği [16].

İyon kaynağından sökülen demetin akımı, oluşturulan plazma yoğunluğu ile orantılıdır. Demet akımını artırmak için, plazmadaki elektron yoğunluğunu arttırmak gereklidir. Mikrodalga enerjisi, dalga kılavuzu aracılığıyla plazma odasına aktarılır ve serbest elektronlara enerji transfer eder. Bu enerji kazanmış elektronlar, gazı iyonlaştırır. Yüksek akımlı iyon kaynaklarında plazma yoğunluğu yetersiz kalmaktadır. Plazma odasına uygulanan manyetik alan, plazma yoğunluğunu arttırmak ve farklı eşleşme mekanizmalarını etkinleştirmek amacıyla kullanılır. Mikrodalga iyon kaynaklarında, manyetik alan profili değiştiğinde, plazma ısıtma mekanizmaları değişir ve bu kaynaklar, manyetik alan profiline göre adlandırılır [1]. Elektron siklotron rezonans (ECR) iyon kaynakları, uygulanan manyetik alanın elektron siklotron frekansı ile rezonansa olduğu durumlarda kullanılır. ECR iyon kaynakları, yüksek yük durumlu iyon üretiminde ve tek yüklü iyon üretiminde kullanılabilir. Mikrodalga deşarj iyon kaynakları (MDIS) ise, uygulanan manyetik alan ECR frekansının üzerinde olduğunda kullanılır ve genellikle tek yüklü iyon üretiminde kullanılır. Rezonansa olmayan MDIS ve ECR frekansının altındaki mikrodalga iyon kaynakları, farklı uygulama alanlarına sahip olabilir [17]. Yüksek iyonizasyon verimliliği ve çeşitli gazlardan iyon üretme esnekliği, mikrodalga iyon kaynaklarının sunduğu iki avantajdır. Yüksek yük durumlarına sahip iyonlar ürettikleri bilindiğinden bazı uygulamalar için özellikle faydalıdır. Mikrodalga iyon kaynaklarının performansını iyon verimi, kontrol ve birçok bilimsel ve analitik alanda uygulama açısından iyileştirmek amacıyla, devam eden araştırma ve geliştirme faaliyetleri bunların optimizasyonuna odaklanmaktadır [18].

2.3.2 Elektron Siklotron Rezonansı İyon Kaynakları

Gelen radyasyonun frekansı, manyetik alanlardaki elektronların doğal dönüş frekansı ile aynı hızda olduğunda Elektron siklotron rezonansı (ECR) meydana gelir. ECR iyon kaynağı, bir manyetik alan B içerisine yerleştirilen plazma odasında elektronların dairesel hareketi sayesinde yüksüz atomlardan elektron kopararak artı yüklü iyonlar üretir. Bu yapılandırma, yüksek enerjilere kadar ısıtılan elektronlar sayesinde yüksek yüklü iyonlar üretilebilir [19]. Belirli bir manyetik alan şiddeti B için bu siklotron hareketinin açısal frekansı ($\omega = 2\pi f$) şu şekilde verilir [20].

$$\omega_{ce} = \frac{eB}{m_e} \quad (2.1)$$

Burada e temel yük ve m elektronun kütlesidir. Yaygın olarak kullanılan mikrodalga frekansı 2,45 GHz ve çıplak elektron yükü ve kütlesi için, rezonans koşulu $B = 875 \text{ G} = 0,0875 \text{ T}$ olduğunda karşılanır [21]. q yüklü parçacıklar ve elektronun durgun kütlesi $m_{0,e}$ göreli hızlarda v hareket eden formül için, formülün özel görelilik teorisine göre aşağıdaki şekilde ayarlanması gerekir: [22].

$$\omega_{ce} = \frac{eB}{\gamma m_{0,e}} \quad (2.2)$$

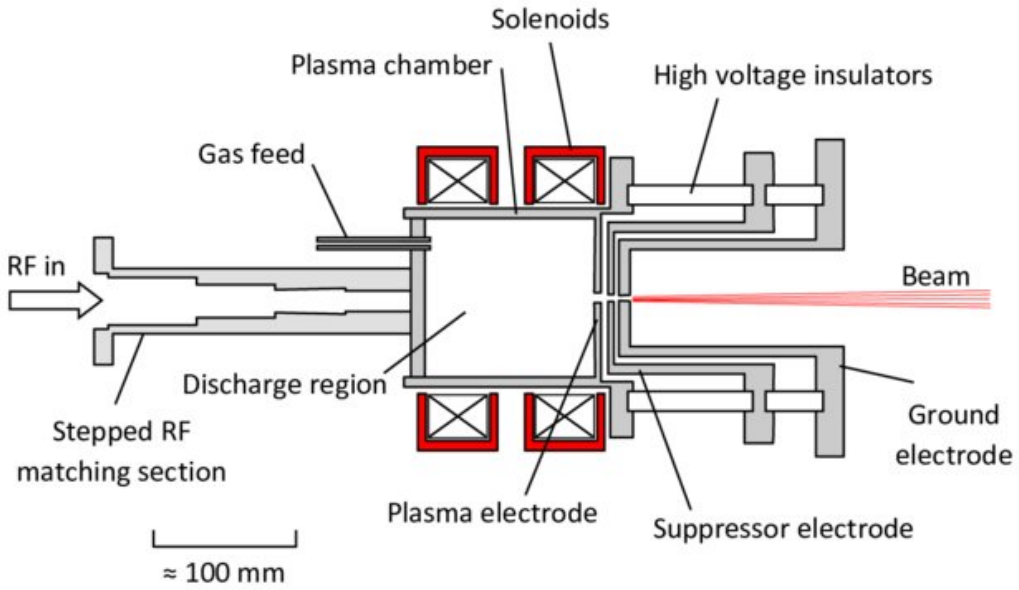
$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}. \quad (2.3)$$

ECR iyon kaynakları, yüksek verimli plazma üretimi için kullanılır ve bu teknoloji, özellikle yüksek yük durumlarına sahip çok sayıda iyon üretimi açısından önemlidir. ECR kaynakları, çeşitli teknolojik ve bilimsel uygulamaların, özellikle kanser tedavisi, yarı iletken üretimi, uzay aracı tahrik sistemleri, parçacık hızlandırıcılar ve radyoaktif iyon yükü yetiştirme gibi alanların ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir. Ayrıca, ECR iyon kaynakları, 2,45 GHz'de çalışarak, DC modunda 100 mA akımı aşan H^+ ve D^+ gibi yüksek yoğunluklu tek yüklü iyonlar üretebilme kapasitesine sahiptir. Bu kaynakların yüksek verimliliği ve çoklu yüklü iyonlar üretme yetenekleri, modern dünyadaki ilerlemelerde önemli bir rol oynamıştır [22].

2.3.3 Mikrodalga Deşarj İyon Kaynakları

Yüksek akımlı demet üretiminin garanti altına alınması birçok uygulama için zorunludur ve bu ihtiyacın hem endüstriyel uygulamalar hem de araştırma projeleri için önümüzdeki yıllarda artması beklenmektedir. Mikrodalga deşarjlı iyon kaynakları (MDIS'ler), yüksek akım, yüksek parlaklıkta H^+ demetleri üretmek için gereklidir. MDIS'lerin düşük bakım gereksinimleri, yüksek güvenilirlik, darbeli veya sürekli dalga modunda çalışma esnekliği, kompaktlık ve tekrarlanabilirlik gibi

pek çok avantajı vardır. Yoğun proton demetlerinin radyasyon işleme, nükleer atık dönüşümü ve enerji üretimi için hızlandırıcıyla çalıştırılan sistemler gibi çeşitli uygulamaları vardır [23]. MDIS, düşük emitanslı çok yüksek akımlı tek yüklü iyonlar üretebilmektedir. Bu tür kaynaklar ilk olarak 1970'lerin sonunda ve 1980'lerin başında Noriyuki Sakudo'nun Hitachi'deki ekibi ve Junzo Ishikawa'nın Kyoto Üniversitesi'ndeki ekibi tarafından geliştirilmiştir. Tüm modern mikrodalga deşarj iyon kaynaklarının temel tasarımı, 1990'ların başında Terence Taylor ve Jozef Mouris tarafından Chalk River Ulusal Laboratuvarı'nda geliştirilen proton kaynağına dayanmaktadır [24]. Şekil 3.4'de mikrodalga deşarj iyon kaynağı şeması verilmiştir.



Şekil 2.8 Mikrodalga deşarj iyon kaynağı şematiği [24].

Sakudo ve ekibinin geliştirdiği mikrodalga iyon kaynağı, yüksek verimlilikte iyon demetleri üretme özelliğine sahiptir. Bu kaynak, plazma odasında mikrodalga enerjisinin etkili bir şekilde dağıtılmasını sağlayan özel bir dalga kılavuzu tasarımı kullanır. Dalga kılavuzunun yapısında bulunan konik çıkıntılar, yüksek yoğunlukta ve dengeli bir plazma oluşumuna yardımcı olur. Bu yapı, mikrodalga enerjisinin 2,45 GHz frekansında dielektrik bir pencere aracılığıyla etkin bir şekilde iletilmesini ve böylece iyon kaynağının verimli çalışmasını sağlar. Bu tasarım, plazma yoğunluğunun istikrarını korurken, mikrodalga iyon kaynağının güvenilir ve tutarlı iyon üretimini garanti altına alır [25].

2.4 İyon Kaynağı Tasarımı

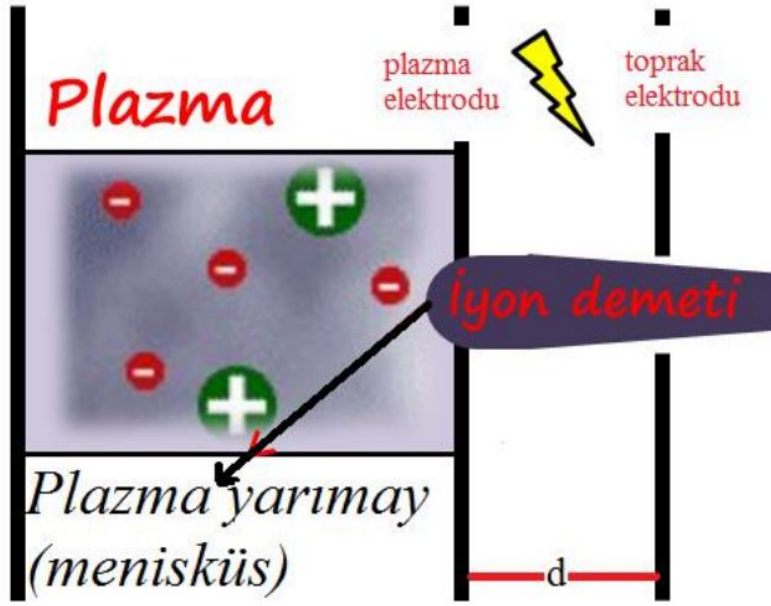
İyon kaynaklarının tasarımı ve işleyişinde, iyon üretimi ve sökme sistemi esastır. İyon üretimi genellikle bir plazma içinde gerçekleşir, ancak bazı kaynak türlerinde yüzeyden sıçratma veya desorbsiyon yoluyla da iyonlar üretilebilir. Plazma koşulları ve sonuçta ortaya çıkan iyon üretimi, elektron ısıtma, plazma sınırlaması (elektiriksel ve manyetik), çarpışmalar, atomik süreçler ve yüzey fizikleri gibi çeşitli süreçlerden etkilenir [19]. İyon kaynaklarının ana bölümleri, plazma oluşturunu ve iyon sökme (ekstraksiyon) mekanizmasıdır. Plazma oluşturunu, iyon sökme sistemi için gerekli iyonları sağlar. İyon sökme sistemi ise, bu iyonları plazmadan alıp hızlandırıcının bir sonraki aşamasına verimli bir şekilde yönlendirir. Bu iki bölümün uyumlu çalışması, iyon kaynağının etkinliğini ve sonrasında bağlı olan hızlandırıcı sistemlerin performansını belirler.

2.4.1 İyon Sökme Sistemi

İyon sökme sistemi, hızlandırıcılarda iyon kaynağından üretilen iyonları demet hattına aktarmak için kullanılan bir dizi elektrottan oluşan sistemdir. Bu sistem ile, plazma içerisinde üretilen iyonların bir kısmı elektrotlar aracılığıyla demet hattına aktarılır. Bu sistem, iyonların demet hattına aktarılmasını ve iyon demeti oluşumunu sağlar. İyon sökme sisteminin en basit hali, iki elektrotlu bir sistemdir. Plazma elektrodu iyonların oluşturulduğu plazma kaynağının bir parçasıdır ve genellikle plazma ile aynı potansiyelde bulunur. Demet hattı elektrodu, iyon demetinin demet hattına iletilmesini sağlar. Genellikle 0 V potansiyelde (topraklanmış) olarak ayarlanır. Bu nedenle ikinci elektrot toprak elektrodu olarak isimlendirilir [1]. İyon sökme işlemi, plazma elektrodu ile toprak elektrodu arasında oluşturulan potansiyel farkı kullanılarak gerçekleştirilir. Bu potansiyel fark, iyonların hızlanmasını ve demet hattına yönelmesini sağlar. Şekil 2.9'de gösterilen sistemde, plazma elektroduna göre sabit bir V_{plazma} potansiyeli ve toprak elektrodunda 0 V potansiyeli vardır. Bu durumda demet, aşağıdaki başlangıç enerjisine sahiptir:

$$E = q(V_{\text{plazma}} - V_{\text{toprak}})$$

Burada E demet enerjisi, q ise parçacık yüküdür. Plazma menisküsü, iyon oluşum alanı ile iyon demetinin aktarıldığı yol arasındaki geçiş noktasıdır ve bu menisküsün şekli, plazmadan çıkış noktasındaki elektrik alanının ve plazma yoğunluğunun bir sonucudur. Menisküsün formu, parçacıkların yörüngelerini etkileyebilir. Bu nedenle iyon kaynağını en verimli menisküs şeklini verecek biçimde çalıştırmak önemlidir. Bu durum, "eşleşmiş durum" olarak adlandırılır ve iyonların etkin bir şekilde transfer edilmesi için plazma yoğunluğu ve iyon çıkarma potansiyeli gibi



Şekil 2.9 İyon kaynağının iyon sökme sistemi şematigi [26]

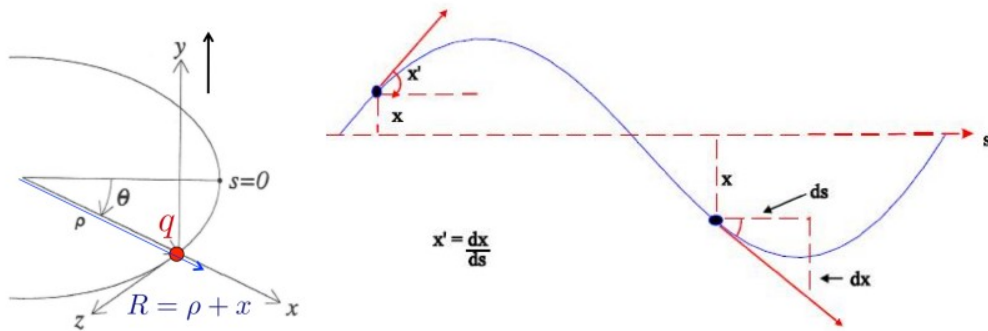
faktörlerin dikkate alınması gerekir [17].

2.5 Demet Dinamiği

Dairesel bir hızlandırıcıda, yüklü bir parçacığın hareketi, manyetik alan tarafından yönlendirilir. Parçacığa etki eden kuvvet, Lorentz kuvveti aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (2.4)$$

burada: v yüklü parçacığın hız vektörü ve $\mathbf{B}$ manyetik alan vektörüdür. Lorentz kuvveti, hız ve manyetik alan vektörlerine dik bir yönde etki eder. Bu kuvvet, parçacığın dairesel hızlandırıcı içinde kavisli bir yörünge izlemesini sağlar [27].



Şekil 2.10 Hızlandırıcılarda parçacık hareketi [28]

Bir çift kutuplu mıknatıs içinde, kılavuz alanı tekdüzedir ve $\rho(s)$ olarak gösterilen yerel eğrilik yarıçapına sahip bir daire oluşturan parçacığın ideal hareketine yol açar. Tasarlanan ideal yörünge, parçacığın enerjisine ve mıknatısların düzenlenmesine bağlı olarak belirlenir. Gerçek parçacıklar bu ideal yörüngeden sapabilir [28]. Bu yörünge, ideal tasarım yörüngesine yakın olarak konumlandırılır. Parçacığın hareketini tanımlamak için Frenet-Serret çerçevesi olarak adlandırılan, ideal parçacıkla birlikte hareket eden yerel bir koordinat sistemi (x, y, s) kullanılır. Şekil 2.10'den yola çıkarak;

$$R = \rho + x \quad (2.5)$$

$$\theta = \frac{s}{R} = \frac{(\beta_r c)t}{R} \quad (2.6)$$

burada s yay uzunluğu, R dairesel yolun yarıçapı, β_r relativistik hız faktörü, c ışık hızı ve t zamanı ifade eder. Yerel yörünge eğimi x_0 şu şekilde tanımlanır:

$$x_0 \equiv \frac{dx}{ds} = \frac{1}{R} \frac{dx}{d\theta} \quad (2.7)$$

Bu durumu ideal parçacık ve tasarım yörüngesini göz önünde bulundurarak ele alırsak: bir parçacığın dikey yer değiştirmesini tanımlayan y ile yatay yer değiştirmesini tanımlayan x ve yörünge boyunca parçacıklarla birlikte dönen ve boyuna hareketin yönünü gösteren koordinat s olarak adlandırılır. Her bir koordinat, parçacığın ideal yörüngeye göre konumunu ve hareket yönünü belirlemekte kullanılır. İdeal koşullar ve homojen bir dipol alanın eğilme kuvvetini sağladığı varsayıldığında, dairesel bir yörünge için koşul, Lorentz kuvveti ile merkezcil kuvvet arasındaki eşitlikle verilir. Herhangi bir elektrostatik alanı göz ardı edersek,

$$\text{Kinetik Enerji} \quad K = E - m_0 c^2 \quad (2.8)$$

$$\text{Toplam Enerji} \quad E = \gamma m_0 c^2 \quad (2.9)$$

$$\text{Momentum} \quad p = \gamma m_0 v \quad (2.10)$$

Burada, E toplam enerjiyi, m_0 parçacığın durgun kütesini, c ışık hızını, v hızı ve γ Lorentz faktörünü temsil eder [29]. Yüklü bir parçacık manyetik alanda hareket ederken, aşağıdaki gibi Lorentz kuvvetine maruz kalır:

$$\text{Lorentz Kuvveti} \quad F_L = qvB \quad (2.11)$$

$$\text{Merkezcil Kuvvet} \quad F_{\text{centr}} = \frac{\gamma m_0 v^2}{\rho} \quad (2.12)$$

$$\frac{m_0 v^2}{\rho} = qvB \quad (2.13)$$

Burada, q parçacığın yükünü temsil eder. Sabit bir enine manyetik alanda, p momentumlu parçacığın yörünge yarıçapı ρ şu şekilde hesaplanabilir:

$$B\rho = \frac{p}{q} \quad (2.14)$$

Dipol mıknatıs içindeki bükülme açısı α :

$$\alpha = \frac{B \cdot ds}{\rho} \quad (2.15)$$

Şekil 2.10'den yerel yörünge eğimi, yatay hız ve uzunlamasına hız arasındaki ilişki şu şekilde ifade edilebilir:

$$x = \frac{v_x}{v_z} = \frac{p_x}{p_s} \approx \frac{p_y}{p} \quad (2.16)$$

burada v_x ve v_z enine ve boyuna hız bileşenleri, p_x , p_s (veya yaklaşımda p_y , p) ilgili momentum bileşenleridir [28]. Bir parçacık hızlandırıcısında, demet, ideal yörünge etrafında dağılmış çeşitli yörüngelerden oluşur. Parçacık, belirli bir anda ideal yörüngeden yatay ve dikey yer değiştirmeler (x ve y) ile sapabilir. Bu sapmalar, parçacığın ideal yörüngeden olan uzaklığını ve parçacığın hızlandırıcı içindeki hareket yolu üzerindeki konumunu belirler. Parçacık ayrıca, ideal yörünge hızından da sapabilir ve bu da enerji sapması olarak ifade edilir. Bir dairesel parçacık hızlandırıcısında, parçacığın hareketi açısal pozisyonu ve yerel yörünge eğimi ile karakterize edilir.

$$x' = \frac{dx}{ds} = \frac{dx}{dt} \frac{dt}{ds} \quad y' = \frac{dy}{ds} = \frac{dy}{dt} \frac{dt}{ds} \quad (2.17)$$

2.5.1 Hill Denklemleri ve Yayınım

Hızlandırıcılarda, bir parçacığın enine düzlemdeki salınım hareketini incelemek için Hill denklemini kullanılır. Bu denklem demet dinamiklerini tanımlayan ikinci dereceden doğrusal diferansiyel denklemdir [28]. Hill denklemleri, parçacığın x-ekseni üzerindeki hareketini aşağıdaki gibi tanımlar:

$$\frac{d^2x}{ds^2} + K(s)x = 0 \quad (2.18)$$

Bu denklemde $K(s)$ odaklama kuvveti fonksiyonudur ve parçacığın hızlandırıcı içindeki konumuna bağlı olarak değişebilir.

$$K(s) = -k + \frac{1}{\rho^2} \quad (2.19)$$

k dört kutuplu mıknatısın gradientini (alan şiddetinin değişim oranını) ifade etmektedir. Yatay düzlemde ise dört kutuplu mıknatısın gradienti $-k$ ve yörünge eğriliği $\frac{1}{\rho^2}$ terimleri odaklama kuvvetini belirler. Ancak dikey düzlemde, genellikle yörünge yatay düzlemde olduğundan ve dikey bükülme gücü sıfır olduğundan yörünge eğriliği ihmal edilir. Ayrıca dört kutuplu mıknatısın alan çizgilerinin geometrisi nedeniyle k 'nın işareti değişir ve dikey düzlemde odaklama kuvveti aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$K = k \quad (2.20)$$

Eğer K sabitse, harmonik salınım yapan bir osilatörün diferansiyel denklemini elde ederiz. Parçacığın hareketini de harmonik osilatör yardımıyla tanımlayabiliriz. Örneğin bir sarkaçtaki kütle, faz uzayındaki yolun eliptik bir yörüngesidir. Bu yol, sistemin osilasyon yapısını gösterir; burada parçacığın konumu x ve momentumu x' periyodik olarak değişir. Parçacık hızlandırıcılarındaki referans yörüngesi boyunca mesafe, genellikle zaman koordinatı s olarak düşünülür ve parçacığın yoldaki ilerleyişini temsil eder. Denklem 2.18'e göre bir parçacığın odaklama parametreleri sabittir, osilasyon yapısında s eksenine göre periyodik hareket ettiklerini bir tam turdan sonra birbirlerini tekrarlamaları Hill denklemleri ile açıklanır. Hill denkleminin genel çözümü olarak parçacığın s konumundaki yer değiştirme ifadesi aşağıdaki gibi verilir [28].

$$x(s) = \sqrt{\epsilon} \sqrt{\beta(s)} \cos(\psi(s) + \phi) \quad (2.21)$$

Parçacığın konumu x 'in s 'ye göre türevi alındığında;

$$x'(s) = -\sqrt{\epsilon/\beta(s)} [\alpha(s) \cos(\psi(s) + \phi) + \sin(\psi(s) + \phi)] \quad (2.22)$$

Parçacığın bir noktadaki yatay salınımının konumu ve açısı o noktadaki β fonksiyonunun değeri tarafından belirlenir. İki denklemde düzenlemeler yaparak aşağıdaki eşitlikler bulunur;

$$\cos(\psi(s) + \phi) = \frac{x(s)}{\sqrt{\epsilon/\beta(s)}} \quad (2.23)$$

$$\sin(\psi(s) + \phi) = \frac{x'(s)}{\sqrt{\epsilon/\beta(s)}} \quad (2.24)$$

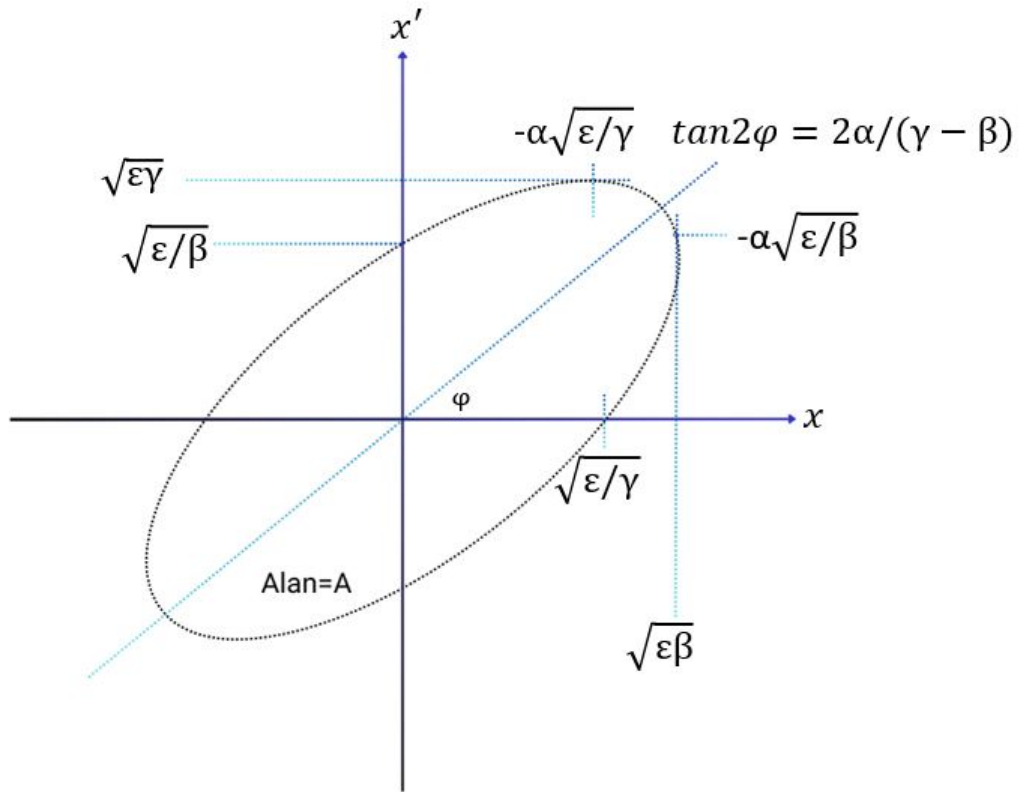
denkem 2.23 ve denklem 2.24 ayrı ayrı kareleri alınarak trigonometrik dönüşümden yararlanılır.

$$\cos^2(\psi(s) + \phi) + \sin^2(\psi(s) + \phi) = 1$$

olduğundan denklem 2.25'e ulaşılır.

$$\epsilon = \gamma(s)x(s)^2 + 2\alpha(s)x(s)x'(s) + \beta(s)x'(s)^2 \quad (2.25)$$

Yayınım ϵ , parçacığın faz uzayında kapladığı alanı temsil eder ve parçacığın demet içindeki hareketinin ölçütü olarak kullanılır. Şekil 2.11'de gösterildiği gibi yayınım, faz uzayındaki dağılımın alanı genellikle bir elips şeklinde gösterilir. Denklem 2.25'te görüldüğü gibi yayınım, α, β, γ Twiss parametreleri ile tanımlanan x, x' faz uzayında bir elipsin parametrik temsidir. Depolama halkasındaki parçacıkların yörüngeleri, ideal bir elips şeklinde faz uzayında hareket eder ve bu elips, sistemdeki herhangi bir lineer olmayan etki olmadığı sürece sabit kalmalıdır. Faz uzayındaki bu sabit alan, Liouville'in Teoremi ile korunur ve parçacık hızlandırıcı tasarımı ve optimizasyonu için temel bir prensiptir. Faz uzayı alanı denklem 2.26'da verilmiştir.



Şekil 2.11 Demet faz uzayı grafiği

$$A = \pi\epsilon \quad (2.26)$$

$$\epsilon_{\text{rms}} = \beta x^2 + 2\alpha x x' + \gamma x'^2 \quad (2.27)$$

Burada, $\langle x^2 \rangle$ ve $\langle x'^2 \rangle$, sırasıyla, konumun karesi ve açının karesinin ortalamalarıdır. $\langle x x' \rangle$ ise konum ve açı çarpımlarının ortalamasıdır. Yayınımı daha detaylı

incelemek için Twiss parametreleri kullanılır.

$$\alpha = -\frac{\langle xx' \rangle}{\epsilon_{\text{rms}}} \quad (2.28)$$

$$\beta = \frac{\langle x^2 \rangle}{\epsilon_{\text{rms}}} \quad (2.29)$$

$$\gamma = \frac{\langle x'^2 \rangle}{\epsilon_{\text{rms}}} \quad (2.30)$$

Bu parametreler, yayının elipsinin boyutunu ve şeklini tanımlar. α elipsin eğimini, β genişliğini ve γ yüksekliğini tanımlar [28]. Konum ve açı bilgilerine bağlı olarak yayının, Twiss parametreleri cinsinden şu şekilde ifade edilir:

$$\epsilon_{\text{rms}} = \sqrt{\langle x^2 \rangle \langle x'^2 \rangle - \langle xx' \rangle^2} \quad (2.31)$$

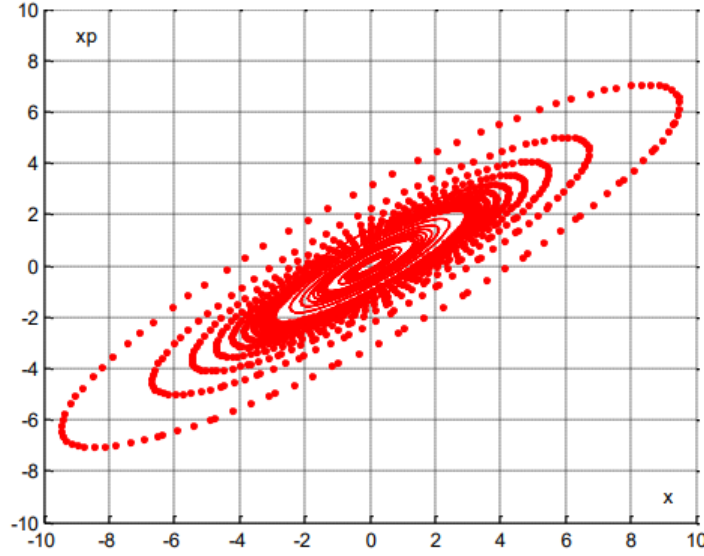
Hızlandırıcılardaki parçacıkların hızlanması ile relativistik faktörler β ve γ değerlerinde değişikliğe neden olur. Bu durumda hızlandırıcılarda (ϵ_{rms})'in normalize edilmiş hali kullanılır. Yayının, parçacığın enerjisi ile ölçeklendirilmiş haline normalize yayının denir. ϵ_{norm} ile gösterilir.

$$\epsilon_{\text{norm}} = \beta\gamma\epsilon \quad (2.32)$$

Parçacık hızlandırıcılarındaki yayının teorisi, parçacıkların Hamiltonyen mekaniği ve Liouville Teoremi'nin sonuçları üzerine kurulmuştur. Liouville Teoremi, Hamilton denklemlerinin bir sonucu olarak, faz uzayındaki parçacık yoğunluğunun sabit kaldığını ifade eder [30]. Bu teorem, parçacık grubunun faz uzayı hacminin, sistem dinamiklerine tabi olduğu sürece sabit kalacağını belirtir. Liouville teoremine göre ρ faz uzayı yoğunluğudur.

$$\frac{d\rho}{dt} = 0 \quad (2.33)$$

Korunumlu kuvvetler altında, faz uzayındaki parçacık yoğunluğu sabit kalır ve dörtlü ile dipol mıknatısların manyetik alanları korunumlu kuvvetler olarak kabul edilir. Demet boyutu ve eğimi, bu korunumlu özelliklerle ilişkilendirilir. Demet boyutu, $x_{\text{max}} = \sqrt{\epsilon}\beta$ ve eğimi $x'_{\text{max}} = \sqrt{\epsilon}\gamma$ şeklinde ifade edilir. Liouville Teoremi, doğrusal olmayan kuvvetlerin olmadığı ve farklı eksenler arası etkileşimin bulunmadığı sistemlerde, normalize edilmiş yayının (ϵ_{norm}) sabit kalacaktır. Bu, sistemin enerji kazanması veya kaybetmesi durumlarında bile, faz uzayı hacminin ve dolayısıyla parçacık dağılımının korunacağı anlamına gelir [29].



Şekil 2.12 Korunumlu faz uzayı grafiği

2.6 İletim Matrisleri

Hızlandırıcılarda iletim matrisleri, parçacık demetlerinin hızlandırıcı boyunca nasıl ilerlediğini tanımlayan önemli araçlardır. Bu matrisler, parçacık demetinin bir noktadaki durumunu, hızlandırıcının başka bir noktasındaki durumuna dönüştürmek için kullanılır. İletim matrisleri yazılırken parçacığın hareket denklemlerinden yararlanır [31]. Hareket denklemi 2.18'in çözümünden (x) ve (x') değerleri bulunur ve M_{ij} oluşturulur. Bir iletim matrisi, genellikle aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$\begin{bmatrix} x \\ x' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ x'_0 \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

Burada, $\begin{bmatrix} x_0 \\ x'_0 \end{bmatrix}$ parçacığın başlangıçtaki konum ve açı vektörünü, $\begin{bmatrix} x \\ x' \end{bmatrix}$ ise sonraki konum ve açı vektörünü temsil eder. M_{ij} matris elemanları, hızlandırıcının ilgili bölümünün özelliklerini yansıtır.

İletim matrisleri, hızlandırıcının çeşitli bölümlerinde parçacık demetlerinin davranışını analiz etmek için kullanılır. Bunlar, demetin odaklanması, dağılması ve hızlandırılması gibi süreçlerin hesaplanmasında kritik öneme sahiptir.

Hızlandırıcılarda, sürüklenme bölgeleri ve solenoidler, parçacık demetinin davranışlarını etkileyen önemli bileşenlerdir. Her birinin iletim matrisi, bu bileşenlerin parçacık demetlerine etkisini tanımlar.

2.6.1 Sürüklenme Matrisi

Sürüklenme bölgesi, parçacıkların harici kuvvet etkisi olmaksızın hareket ettiği bir hızlandırıcı bileşenidir. $K = 0$ olduğu için L uzunluğundaki bir sürüklenme bölgesi için iletim matrisi şöyledir:

$$M_{\text{sürüklenme}} = \begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

Bu matris, parçacığın sürüklenme bölgesi boyunca konum(x) ve momentum (x') değişimini gösterir.

2.6.2 Odaklayıcı Matrisleri

Odaklayıcı mıknatıslar, ince kenarlı bir mercek gibi tasvir edilebilirler. Bu mıknatıslar, demeti odak noktasında sıkıştırarak, demetin hat üzerinde en sıkışık olduğu 'demet beli' olarak adlandırılan durumu oluşturabilirler. Güçlü veya alternatif gradyan odaklamanın temel prensibi, FODO (Focus, Drift, Defocus, Drift) düzenlemesi ile ifade edilir." Bu düzenlemede, "Focus" (Odaklama) ve "Defocus" (Odaktan Uzaklaştırma) kısımları, parçacık demetinin odaklanması ve odaktan uzaklaştırılması işlemlerini temsil eder. Bu düzenleme, parçacık demetlerinin kontrolünü ve yönlendirilmesini sağlar [31]. Solenoidlerin odaklama gücü, manyetik alanın şiddeti ile parçacık momentumunun oranının karesi olarak ölçeklenir. Bu, solenoidlerin kuadropollere kıyasla daha zayıf odaklama elemanları olduğu anlamına gelir. Ancak solenoidlerin büyük bir avantajı, aynı anda her iki ekseninde odaklama yapabilmesidir. Kuadropoller sadece tek yönde odaklama yaparken diğer yönde defocusing(odaktan uzaklaştırma) etkisi göstermektedir. Bu nedenle her iki yönde odaklama yapabilmek için kuadropoller FODO örgüsü içerisinde kullanılır. Solenoidler bu özelliklerinden dolayı simetrik demetler için daha kullanışlıdır. Demetin her iki ekseninde kontrol altında tutulması demet çapının kontrolünü sağlar. Bu nedenle KAHVELab proton hattında odaklayıcı olarak Solenoid kullanılmıştır. Bir solenoidin iletim matrisi, solenoid içinden geçen bir parçacığın konum ve momentumundaki değişimi tanımlar. Bu matris, solenoidin manyetik alan şiddeti ve parçacığın özelliklerine bağlıdır. Parçacığın hareket denklemlerinden ve denklem 4.2'ün çözümünden Solenoidin odaklama kuvveti k değeri aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$k = \frac{qB_z}{2p_z} = \frac{B_z}{2B\rho} \quad (2.36)$$

Burada B_z solenoidin manyetik alan şiddeti ve $B\rho$ ise manyetik bükülmezlik değerini ifade etmektedir. Solenoidin etkin uzunluğunu l olarak aldığımızda,

$$\varphi = k \cdot l \quad (2.37)$$

Denklem 2.37 deki eşitliği kullanılarak solenoidin iletim matrisi şu şekilde yazılabilir:

$$M_{\text{solenoid}} = \begin{bmatrix} \cos^2 \varphi & \frac{\sin \varphi \cos \varphi}{k} & \sin \varphi \cos \varphi & \frac{\sin^2 \varphi}{k} \\ -k \sin \varphi \cos \varphi & \cos^2 \varphi & -k \sin^2 \varphi & \sin \varphi \cos \varphi \\ -\sin \varphi \cos \varphi & -\frac{\sin^2 \varphi}{k} & \cos^2 \varphi & \frac{\sin \varphi \cos \varphi}{k} \\ -k \sin^2 \varphi & -\sin \varphi \cos \varphi & -k \cos \varphi \sin \varphi & \cos^2 \varphi \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

Bu matris, solenoidin x ve y boyutlarındaki parçacık demetleri üzerindeki odaklama ve dağıtma etkilerini temsil eder. Ayrıca z boyutunda doğrusal ilerleme de gösterir.

İletim matrisleri, özellikle hızlandırıcı tasarımı ve demet dinamiklerinin optimizasyonunda kullanılır. Ayrıca, hızlandırıcıların performansının analizi ve iyileştirilmesi için de temel bir araçtır [29].

2.7 Yayınım Ölçüm Yöntemleri

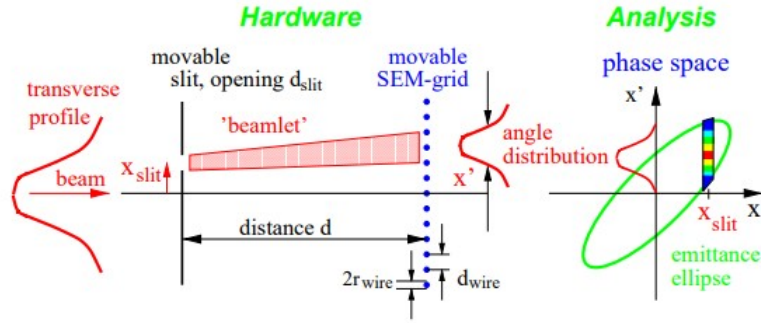
2.7.1 Grid Method-Izgara Yöntemi

Proton ve ağır iyon doğrusal hızlandırıcılarında (LINAC) çok sık kullanılan bir enine yayınım ölçüm yöntemi olan ızgara yöntemi, parçacık demetlerinin faz uzayı dağılımını analiz etmek için kullanılır.

Algiç, genellikle 0.1 ile 0.5 mm arasında açıklığa sahip ince bir yarıktan (slit) oluşur. Yarığın bir yönünde konum x sabitlenirken, diğer yönde demet iletilir. Açı x' (momentum koordinatı), yarıktan 10 cm ile 1 m arasında değişen bir mesafede bulunan bir SEM ızgarası ile belirlenir. Parçacıkların yörüngeleri, sürüklenme alanında düz çizgiler olarak kabul edilir. Yarıktaki açı dağılımı, faz uzayındaki yayınım grafiğine katkı sağlar [32].

Yarık, tüm konumları elde etmek için demet boyunca taranır. Veriler, yarığa çarpan demet yükleri gibi sabit bir demet akımı ölçümüne göre normalize edilmelidir. Tam taramadan sonra, yayınım grafiği çizilir ve rms-değeri hesaplanır. Verilere eliptik bir şekil uygulanır ve Twiss parametreleri bu uyumdan hesaplanabilir.

Şekil 2.13'de ölçüm yönteminin şematik hali gösterilmektedir. Konum koordinatı için çözünürlük, yarığın genişliği ile sınırlıdır ($\Delta x = d_{\text{slit}}$). Açı çözünürlüğü, ızgara



Şekil 2.13 Grid-İzgara yayılım ölçüm yönteminin şematik gösterimi [32]

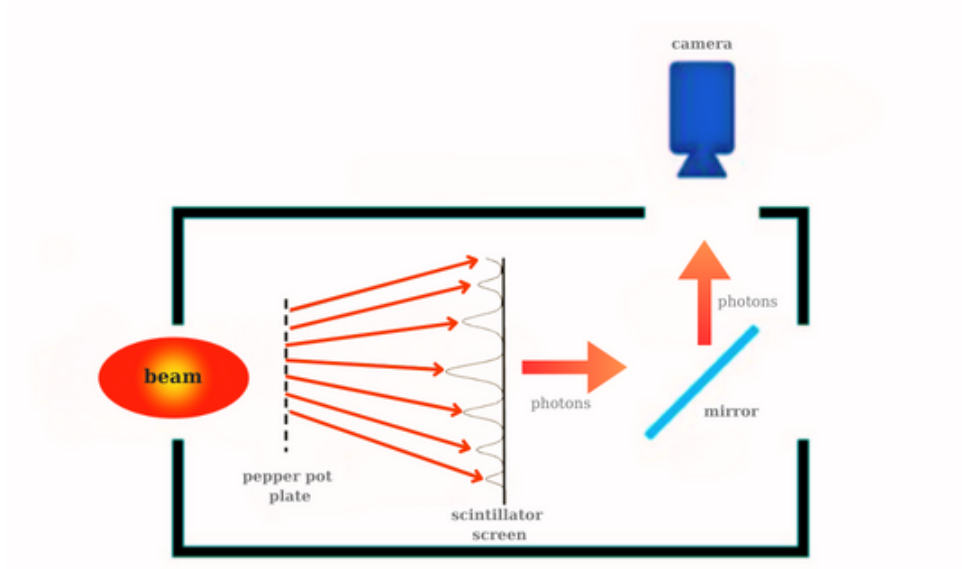
telinin yarıçapı ve yarığın genişliği ile belirlenir. Faz uzayındaki ayırık elemanların boyutu $\Delta x \cdot \Delta x'$ ile verilir. SEM ızgarasının ve yarığın daha küçük adımlarla taranması, faz uzayı analizindeki ayırık elemanların yoğunluğunu artırır.

2.7.2 Pepper Pot Method-Tuzluk Yöntemi

Pepper-Pot Yöntemi, parçacık hızlandırıcılarında enine yayılım ölçümü için kullanılan etkili bir tekniktir. Bu yöntem, özellikle darbeli doğrusal iyon hızlandırıcıları için uygundur. Pepper-Pot Yöntemi, bir plakada matris şeklinde düzenlenmiş delikler kullanır. Bu deliklerden geçen demet, her bir delikten geçen parçacıkların oluşturduğu demetçikler (beamlets) tarafından oluşturulan izleri bir ekranda bırakır [32]. Şekil 2.14'de ölçüm düzeneği verilmiştir. Tuzluk plakası ile görüntüleme ekranı arasındaki mesafe tipik olarak 10-15 cm'dir. Yüksek enerjili parçacık demetlerinin etkileşime girdiği ve izlerini bıraktığı ekranların seçimi önemlidir. Genellikle, bu tür ölçümlerde görüntüleme için floresan, fosfor, Alüminyum Oksit ve CCD kameralarına özel dijital görüntüleme ekranları kullanılmaktadır. Yayılım grafiği, her bir demetçiğin oluşturduğu lekelerin açı dağılımlarının değerlendirilmesi ile elde edilir. Bu analiz, iki enine düzlemin kesişimini tespit etmekte de kullanılabilir. Noktasal çözünürlük, delikler arası mesafenin küçük olması sayesinde sağlanır. Ancak, ekran üzerindeki demetçiklerin birbirine karışmaması önemlidir. Karıştığı takdirde dağılımda gürültüye sebebiyet vererek yayılım değerini hatalı ölçmeye neden olacaktır. Deliklerin çapı küçük tutulmalıdır, ancak bu durumda sinyal gücü azalır.

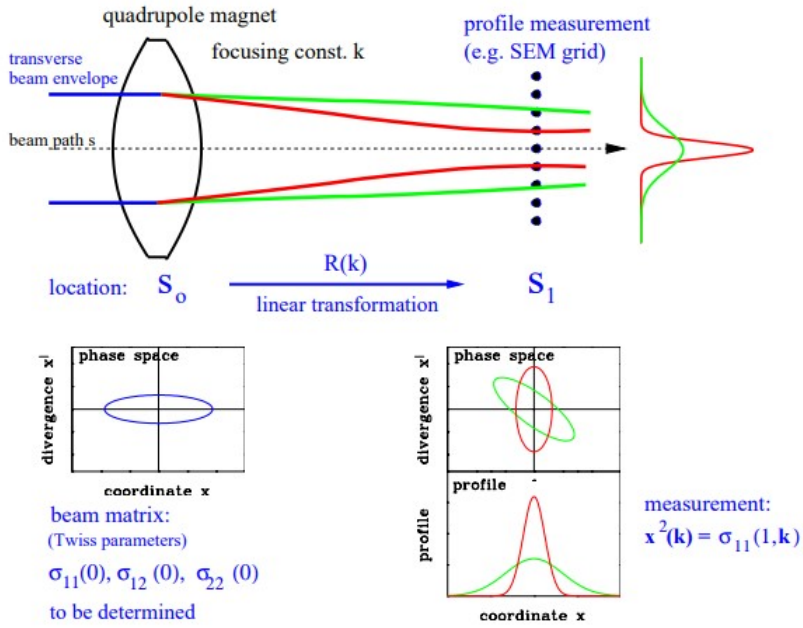
2.7.3 Dört Kutuplu Tarama Yöntemi

Dört kutuplu tarama yöntemi, parçacık hızlandırıcılarında demet yayılımının detaylı ölçümü için kullanılır. Bu yöntem, dört kutuplu mıknatısların odaklama gücünü değiştirerek demetin tepkisini analiz eder. Dört kutuplu mıknatısların odaklama gücü değiştirildiğinde, demetin genişliği ve şekli değişir. Bu değişiklikler,



Şekil 2.14 Pepperpot-Tuzluk yöntemi ile enine yayılım ölçüm şematik gösterimi

iletim matrisleri kullanılarak tanımlanabilir. Şekil 2.15'de ölçüm düzeneği verilmiştir. Drift uzunluğu L ile sürüklenme matrisi:



Şekil 2.15 Dört kutuplu tarama yöntemi ile enine yayılım ölçüm şematik gösterimi [32]

$$R_{\text{drift}} = \begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.39)$$

Dört kutuplu sabiti k ve etkin uzunluğu l olan yatay odaklayıcı dört kutuplu için:

$$R_{\text{focus}} = \begin{pmatrix} \cos(\sqrt{k}l) & \frac{1}{\sqrt{k}} \sin(\sqrt{k}l) \\ -\sqrt{k} \sin(\sqrt{k}l) & \cos(\sqrt{k}l) \end{pmatrix} \quad (2.40)$$

Dört kutuplu sabiti k ve etkin uzunluğu l olan yatay dağıtıcı dört kutuplu için:

$$R_{\text{defocus}} = \begin{pmatrix} \cosh(\sqrt{k}l) & \frac{1}{\sqrt{k}} \sinh(\sqrt{k}l) \\ \sqrt{k} \sinh(\sqrt{k}l) & \cosh(\sqrt{k}l) \end{pmatrix} \quad (2.41)$$

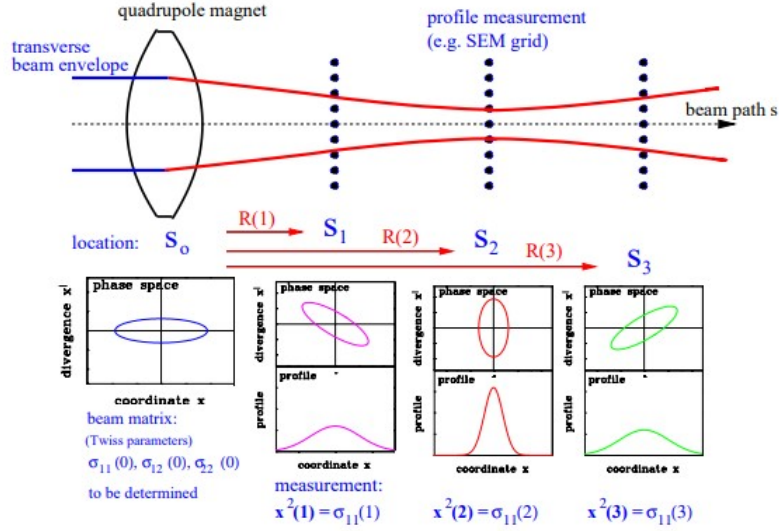
Bir dört kutuplu mıknatısın alanı, demetin yatay ve dikey boyutlarını farklı şekillerde etkilediği; bir boyutta odaklarken diğer boyutta dağıttığı gözlenir. Farklı odaklama ayarlarında demetin genişliği ve şekli ölçülür. Bu ölçümler, demetin farklı konumlardaki profil monitörleriyle yapılır. Elde edilen profil verileri demetin yayınımlarını hesaplamak için kullanılır.

$$\varepsilon = \sqrt{\sigma_{11}\sigma_{22} - \sigma_{12}^2} \quad (2.42)$$

Burada, σ_{ij} demet matris elemanlarıdır. Farklı dört kutuplu ayarları ile elde edilen profil verileri, iletim matrisleri kullanılarak analiz edilir. Bu veriler, demetin başlangıçtaki yayınımlarını ve demet hattı boyunca nasıl evrildiğini anlamak için kullanılır [32].

2.7.4 Üç Ekran Yöntemi

Üç ekran yöntemi, iletim hattı boyunca farklı konumlarda demet profil ölçümleri için kullanılan bir tekniktir. Bu yöntem, özellikle uzun iletim hatlarında kullanım için uygundur. Demetin profilinin üç veya daha fazla noktada ölçülmesi gerekmektedir. En iyi doğruluk için, profil monitörlerinden birinin demetin bel kısmına yakın olması tercih edilir. Şekil 2.16'de ölçüm düzeneği verilmiştir [32]. Her bir profil genişliği için doğrusal denklemler seti oluşturulur. Bu denklemler, iletim hattının başlangıcından ölçüm noktalarına kadar olan demet iletimini tanımlayan iletim matrisi $R(i)$ ile ifade edilir. Yayınım hesaplama algoritması, dört kutuplu tarama için kullanılanlarla aynıdır. Eğer iletim hattında dipol mıknatıs bulunuyorsa, demet üzerindeki etkisi de hesaba katılmalıdır. Bu, momentum dağılımı ile enine demet boyutu arasında bir bağlantı yaratan dispersiyona yol açar. İletim matrisi için ek bir matris elemanı R_{13} eklenmelidir. Dağılım etkileri, simetrik demet matrisi σ içine üç yeni eleman olarak dahil edilmelidir: σ_{13} , σ_{23} ve σ_{33} . Bu demet matris elemanlarını belirlemek için en az altı profil ölçümü yapılmalıdır [32].



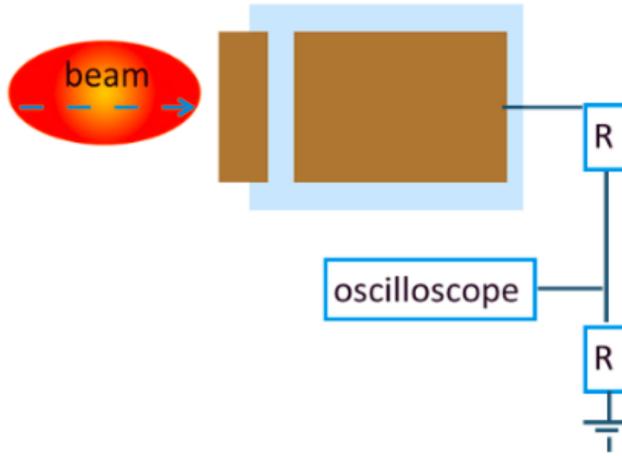
Şekil 2.16 Üç ekran yöntemi ile enine yayılım ölçüm şematik gösterimi [32]

2.8 Faraday Kupası

Faraday Kupaları, yüksek demet akımlarını ölçmek için kullanılır ve bu durumlarda, elektronikleri daha basit olduğu için, AC-dönüştürücülerle de ölçüm yapılabilir. Ayrıca, Faraday Kupaları demet boşaltma (dump) olarak da hizmet verir. Faraday Kupası, yeterli enerjiye sahip yüklü parçacıkların metal bir kupa içine çarpması ve elektronlar bırakması prensibi üzerine çalışır. Bu elektronlar, gelen demetin yoğunluğuna orantılı olarak metalde depolanır. Faraday Kupasının iç yüzeyi, serbest bırakılan elektronların dışarı kaçmasını engelleyecek şekilde tasarlanmıştır ve bir nevi potansiyel bariyer görevi görmektedir. Bu tasarım sayesinde, serbest bırakılan elektronlar geri metal yüzeye yönlendirilir ve dolayısıyla ölçülen akım, yalnızca gelen parçacıklardan kaynaklanan akımı temsil eder.

Parçacıkların FK iç yüzeyine çarpması sonucu oluşan elektrik akımı, parçacık demetinin yoğunluğunun ve hızının belirlenmesinde kullanılır. İyon veya elektronların belirli bir zaman aralığında FK'ya çarpmasıyla oluşan akım miktarı, demetin ölçümü için esas alınır.

FK düzeneğinin ek parçaları, sinyal işleme için dirençler ve sinyal görüntüleme için bir osiloskop cihazı. Elektriksel izolasyon sağlamak için topraklanmış bir kılıf ve istenmeyen ikincil elektronları durdurmak için yalıtkan bir bölücü (Teflon veya seramik gibi) içerebilir. FK yöntemi, yüksek demet akımlarının ölçümünde oldukça etkilidir; ancak bu yöntem kullanılırken, özellikle demetin enerji kaybı sonucu oluşan ısınma problemine dikkat etmek önemlidir. Yüksek enerjili parçacıkların metal kupaya çarpması sonucu ortaya çıkan ısınma, kupanın ve çevresindeki malzemelerin zarar görmesine neden olabilir. Bu nedenle, Faraday



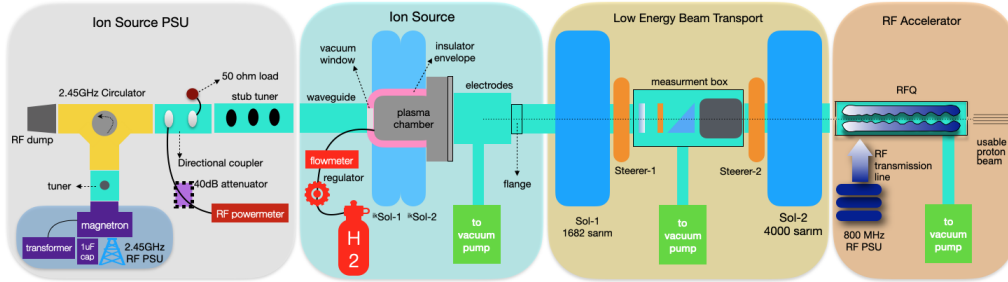
Şekil 2.17 Faraday Kupası Ölçüm Düzeneği

Kupaları genellikle yüksek ısı iletkenliğine sahip malzemelerden yapılmaktadır; bu malzemeler arasında bakır, ısıyı etkili bir şekilde dağıtabilme özelliği sayesinde sıkça tercih edilen bir seçenektir. FK, demet içerisindeki toplam yükü toplayarak demet yoğunluğunu ölçer. Bu yöntem yıkıcıdır, yani ölçüm sırasında demet kullanılamaz hale gelir. FK, demet yoğunluğunun ölçümünde basit, doğrudan ve etkili bir yöntem sağlar. Ancak, gerçek zamanlı ölçümler için uygun olmayan yıkıcı bir karaktere sahiptir [30].

3 MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 KAHVELab Proton Demet Hattı

KAHVELab'daki proton demeti hattı; iyon kaynağı(IK), düşük enerjili demet aktarım hattı(DED) bölümü ve radyo frekans dört kutuplusu(RFQ) içerir. İyon kaynağı, 2,45 GHz mikrodalgaları magnetrondan plazma odasına ileten bir iletim hattı, iyonların üretildiği plazma odası ve iyonları plazma odasından demet hattına aktaran bir iyon sökme sisteminden oluşur. Şekil 3.1 de KAHVELab proton hattının şematik hali gösterilmektedir. Proton demeti üretimi için kullanılan



Şekil 3.1 KAHVELab Proton Hattı

hidrojen gazı, bir tüpten regülatör yardımıyla plazma odasına taşınan bir hortum sistemi üzerinden aktarılır. Bu sistemde gaz akışını düzenleyen bir debimetre de bulunur, böylece gaz akış hızı hassas bir şekilde kontrol edilebilir.

160 cm uzunluğundaki Düşük Enerjili Demet Aktarım hattı (DEDA) içerisinde, aynı fiziksel boyutlara ve tasarıma sahip ancak farklı sarım sayılarına sahip iki adet su soğutmalı odaklayıcı mıknatıs, iki adet yönlendirici mıknatıs ve bir ölçüm kutusu yer alır. Ölçüm kutusunda bulunan üç farklı algıç, demetin tanısını yapabilmek amacıyla kullanılır. Solenoidler, demeti, Radyo Frekansı Dört Kutuplu (RFQ) hızlandırıcısının giriş parametrelerine uyacak şekilde uygun demet profili boyutlarına odaklar. Yönlendirici mıknatıslar, demeti RFQ'nun referans hattına yönlendirir. Solenoidlerin ve yönlendirici mıknatısların optimal konumlandırılması ve manyetik alanlarının ayarlanması için DemirciPro ve Python3 tabanlı yazılımlar

kullanılarak benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Ölçüm kutusu, demetin profilini, yayınımlarını ve akımını ölçmek için kullanılır, bu amaçla yayınımlar hesaplamak için delikli plaka yöntemi tercih edilir.

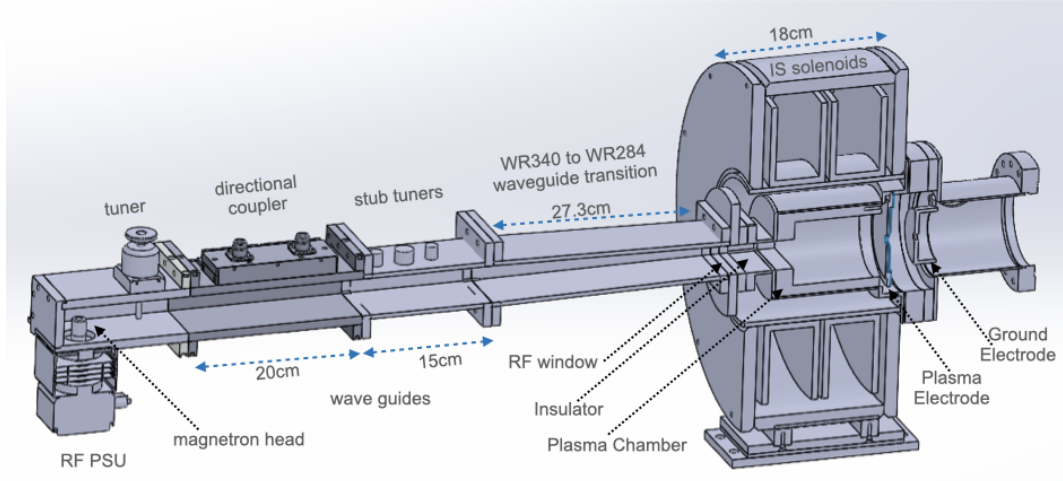
Hızlandırıcı sistemlerinde, her bileşenin yerleşimi, uygulanacak akım veya voltaj değerlerinin ve plazma yoğunluğunun doğru bir şekilde belirlenmesi büyük öneme sahiptir. Bu, sistem aktif hale geldiğinde müdahale edilemeyecek olduğu için kritiktir. Sistemden verimli sonuçlar alabilmek için, başlangıçtan son aşamaya kadar tüm sistem için benzetimlerin yapılması şarttır. KAHVELab'da kullanılan proton demeti hattının benzetimleri, IBSimu yazılımı kullanılarak elde edilen proton demet verisi üzerinden gerçekleştirilmiştir. Bu yaklaşım, sistem tasarımının ve işleyişinin optimize edilmesine olanak tanır, böylece hızlandırıcıdan maksimum verim alınabilir.

3.2 İyon Kaynağı

İyon kaynağı, atom çekirdeklerinden yüksek enerjili parçacık demeti üreten bir elektromanyetik cihazdır. Bu kaynaklar, hidrojen'den kurşun gibi ağır iyonlara kadar farklı iyonlar kullanılarak hızlandırabilen hızlandırıcıların temel bileşenidir. KAHVELab proton hızlandırıcısının ilk basamağı bir mikrodalga deşarj iyon kaynağıdır(MDIS). KAHVELab'da bulunan mevcut MDIS tasarımı, daha önce yayınlanan çalışmanın devamı niteliğindedir ve bu çalışmanın genişletilmiş bir versiyonunu temsil eder. İyon sökme voltajını 8 keV'tan 20 keV'a çıkarırken sistemi basit, güvenilir, düşük maliyetli ve otomasyona daha uygun olan, kolay kullanımlı bir cihaz olması hedeflenmiştir. Proton hattı için yapılan kontrol otomasyon çalışma detaylarına [33]'den ulaşabilirsiniz. İyon kaynağını basitleştirmek için iki elektrotlu iyon sökme sisteminde tasarlanmıştır. Önceki iyon sökme sistemi plazma elektrodu, toprak elektrodu ve Einzel lenslerinden oluşan 5 elektrotlu bir sistemden, plazma ve toprak elektrodundan oluşan sisteme geçilmiştir. IBSimu programıyla yapılan yeni elektrodlar tasarlanmıştır. MDIS'in güvenilirliğini artırmak için, plazma odası etrafındaki bağlantılar mekanik olarak düzeltilmiş. Ayrıca termal olarak dirençli viton oringler kullanılarak daha iyi bir vakum seviyesine ulaşılmıştır. Bu gelişme ile, vakum seviyesini 10^{-5} mbar'dan 10^{-7} mbar mertebesine ulaşılmıştır. RF bölümünde güç kaynağı olarak, saniyede 50 kez tekrarlayan ve yaklaşık 800 watt anlık güç üretebilen, 2,45 GHz frekansında çalışan JENS markasına ait JM002 modeli ev tipi mikrodalga fırınlardan alınan magnetronlar kullanılmaktadır. Bu magnetron, yüksek voltajlı filament transformatörü ve dalga kılavuzuna bağlanan kısmı, RF dalga kaçaklarını engellemek amacıyla metal bir kafes içerisinde güvenli bir şekilde sabitlenmiştir ve

sistem içerisinde kolaylıkla değiştirilebilir bir konumda yer almaktadır.

Ayrıca, RF iletim hattının daha hassas bir şekilde ayarlanabilmesi için mikrodalga kafasına bir güç düzenleyici eklenmiştir. WR340 ve WR284 gibi dalga kılavuzları, önceki tasarımlara kıyasla kenarları geçmeli şekilde yeniden tasarlanarak üretilmiştir. Bu yapı, proton hızlandırıcısının ilk bileşenlerinden birini oluşturur ve hızlandırıcı sistemdeki diğer elemanlarla uyumlu çalışır şekilde entegre edilmiştir. Şekil 3.2 proton hızlandırıcısının ilk bileşenini göstermektedir. RF

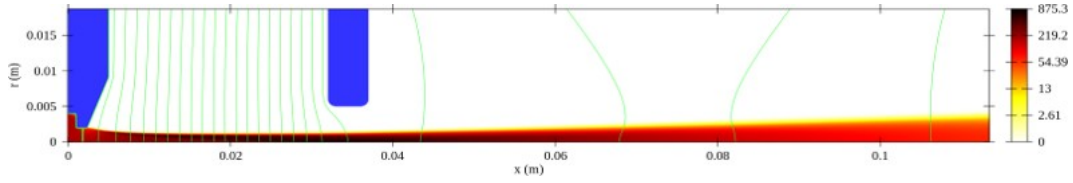


Şekil 3.2 Proton hızlandırıcısı Rf hattı ve İyon kaynağı kısmı

iletim hattı, bir magnetron, magnetron anteni için özel olarak tasarlanmış bir magnetron kafa adaptörü, üç adet vida ile ayarlanabilen bir tuner, WR340 ve WR284 tipi dalga kılavuzları, yüksek voltaj kesici teflon kılıf ve kuvars camdan yapılmış, RF sinyalinin vakum ortamından geçişini sağlayan bir RF penceresi içerir [34]. İletilen ve yansıyan güç miktarlarını ölçmek için, tuner ile magnetron kafası arasına yerleştirilen RF iletim hattına, bir yönlü kuplör ve bu kuplöre bağlı bir güç ölçüm sensörü eklenmiştir. RF güç kaynağını korumak ve yansıyan gücü minimize etmek amacıyla, merkez frekansı 2,45 GHz olan ve geniş bir bant genişliğine sahip bir sirkülatör tasarlanmış ve üretilmiştir. Sistem, gerekli testler yapıldıktan sonra tam olarak entegre edilecektir.

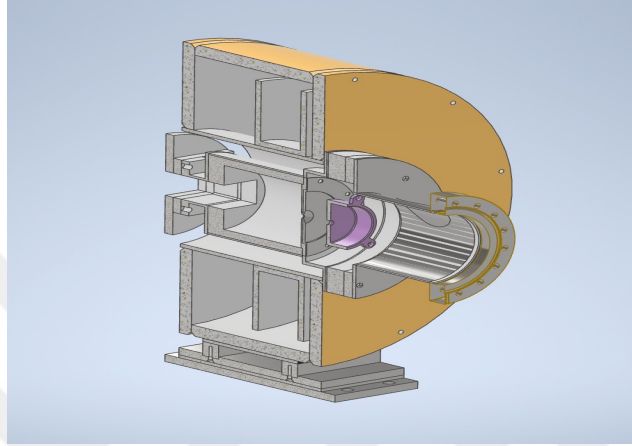
3.2.1 Elektrot Tasarımı ve Üretimi

Plazma elektrodunun açıklığı 4 mm'dir, toprak elektrotunun açıklığı ise 10 mm'dir. Şekil 3.3 de IBSimu programı kullanılarak gerçekleştirilen benzetim ile elde edilen iyon sökme sistemi grafiği gösterilmektedir [35]. Ortaya çıkan iyon sökme sistemi, Şekil 3.4'de plazma odası, iyon sökme sistemi kesit görünümü olarak gösterilmektedir. Plazma odasının sağında gri renkli plazma elektrodu, yaklaşık 22mm sağında mor renk ile gösterilen toprak elektrodu iyon sökme sistemini



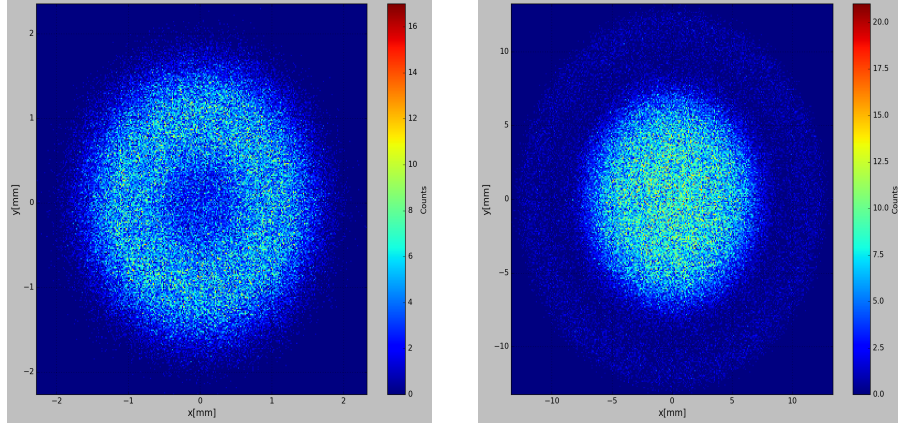
Şekil 3.3 IBSimu elektrot tasarımı

göstermektedir. Plazma menisküsü ile elektrik potansiyeli arasındaki eşleşme,



Şekil 3.4 İyon kaynağı tasarımının kesidi

plazma ve toprak elektrotları arasındaki mesafe ayarlanarak optimize edilebilir. Farklı plazma-toprak elektrot mesafeleri ve farklı H^+ iyon akım yoğunlukları için yayılımdaki değişim de IBSimu programıyla incelenmiştir. Yapılan bu benzetim çalışmaları ile elektrodlar arası mesafe belirlenmiştir. 20 keV enerjili proton demeti için elektrotların et kalınlıkları hesaba katılarak plazma ve toprak elektrodu arası mesafe yaklaşık 22 mm olarak belirlenmiştir. Elektrotlar arası mesafe önemli bir parametredir. İyon kaynağında elektron atlamasının gerçekleşebileceği tek bir bölge vardır plazma elektrodu-toprak elektrodu arası. Bunu engellemek için mesafenin yeterli olması gerekmektedir. Elektrotlar arası mesafe azalırsa yüksek voltaj altında elektron atlamaları meydana gelebilir. Elektrotlar arası mesafe fazla olursa iyon kaynağından çekilen demetin dağılımı beklenildiği gibi merkezde yoğun bir şekilde normal (Gaussyen) dağılım göstermez. İçi boş bir halka görünümü olan demetin yoğunluk dağılımı daha çok kenarlardadır. Şekil 3.5'te iyon kaynağı çıkışından alınan demet profili örneğinde elektrotlar arası mesafenin neden olduğu demet profil dağılım farkı gösterilmektedir. Benzetim sonuçları, 1,3 mA'lık bir proton demet akımı için geometrik yayılım ϵ_{rms} 0,0254 (π mm.mrad) olduğunu göstermektedir. İyon sökme sistemi elektrotları, 5 mA demet akımının üzerinde, özellikle elektrotların ince kesitlerinde bir miktar şekil değişikliği gösteren alüminyumdan yapılmıştır. Şekil 3.6'de iyon sökme sisteminde kullanılacak elektrotlar görülmektedir.



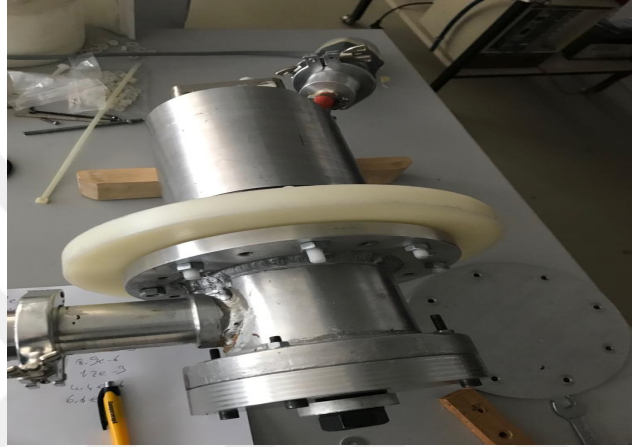
Şekil 3.5 İyon kaynağı çıkışında demet profili



Şekil 3.6 Plazma ve toprak elektrotları

3.2.2 Vakum ve Yüksek Voltaj Testleri

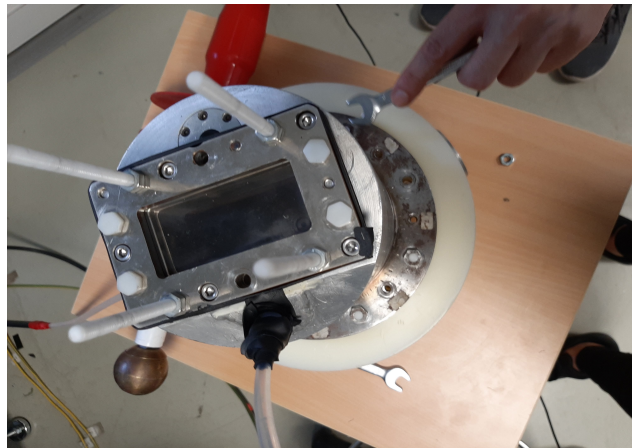
İyon kaynağını demet hattına yerleştirilmeden önce ve sonra vakum testlerine tabii tutulmuştur. Vakum kaçaklarının önceden tespit edilmesi ve gerekli önlemlerin alınması sisteme alındıktan sonraki süreci pozitif yönde etkilemektedir. İyon kaynağının dışarıda yapılan testleri sırasında alınan görüntü şekil 3.7'de verilmektedir. Plazma odası, gaz bağlantısı gerçekleştirilmeden önce elektrot sistemi ile birleştirilmiş ve vakum sızdırmazlık testi için kör kapak kullanılarak test edilmiştir. Bağlantı noktalarındaki viton o-ringler ve bağlantı vidaları yenileriyle değiştirilerek montajı sağlanmıştır. İlk vakum testlerinden sonra elde



Şekil 3.7 Plazma odası montaj ve vakum testi

edilen 10^{-4} mbar seviyesi, vakum sızıntı noktalarının tespit edilip giderilmesiyle iyileştirilmiştir. Plazma odası ile iyon sökme bölümü arasında konumlanan demir ve delrin flanşların yanlış yönlendirildiği anlaşılmıştır. Doğru yönlendirme sağlandıktan sonra, vida delikleri numaralandırılarak doğru bağlantılar yapılmıştır. Yapılan düzenlemelerin ardından tekrarlanan vakum testlerinde 10^{-6} mbar değerine ulaşılmıştır. Sistem, yüksek voltaj testlerine hazır hale getirilmek üzere solenoid ve RF iletim bölümleriyle entegre edilmiştir. Plazma odasının çevresinde, solenoidin iç yüzeyi ile arasında izolasyon sağlamak amacıyla alümina ve delrin malzemelerden yapılmış bir yalıtım kılıfı kullanılmıştır. Bu yalıtım kılıfı, şu anda üç ayrı parçadan meydana gelmektedir: RF vakum penceresinin çerçevesini örtecek şekilde ön kısımda(delrin), plazma odasının etrafında ve solenoid ile iyon odası bağlantı elemanının arasında yer alır. Yüksek voltaj test prosedür süreci basit olmakla birlikte sabır gerektirir. Voltaj, ilk deşarj belirtisi görünene kadar çok yavaş bir şekilde artırılır. Ardından voltaj sabit tutulur veya bir miktar azaltılır. Deşarj aktivitesi azaldığında, voltaj yine çok yavaşça artırılır, deşarj tekrar belirene kadar bu süreç devam eder. Bu işlem, istenen voltaja ulaşılan veya deşarj aktivitesinin azalmadığı bir voltaja ulaşılan kadar tekrarlanır [36]. Yüksek voltaj test prosedürüne uygun olarak testler, 0kV'dan 20kV'a adım adım arttırılarak

yapılmıştır. Yüksek voltaj testleri öncelikle hidrojen gazı olmadan daha sonra plazma odası hidrojen gazı beslemesi varken yapılmıştır. Bu durumda testlerde yüksek voltaj kaçaqlarının neden olduğu sparklar gözlemlenmiştir. Testlerde, plazma odası ile mikrodalga girişi, hidrojen gazı iletim borusu ve iyon sökme bölgesindeki toprak bağlantıları arasındaki sparklar tespit edilmiştir. Bu sparklar hem büyük bir güvenlik sorunu hem de istenilen çalışma voltajına engeldir. Bu durum, mevcut alümina yalıtım disklerinin kalınlığının 20kV'luk yeni potansiyel farkı için yetersiz kalmasından kaynaklanmıştır. Alümina için uygun fiyatlı ve yüksek saflıkta bir alternatif bulunamamıştır. Alüminaya ekonomik bir alternatif olarak Delrin ve Teflon malzemeleri değerlendirilmiştir. Bu malzemelerle yapılan testlerde, Teflon'un özellikle dokunma ile bulaşan yağ, kir tutma eğilimi olduğu ancak bu sorunu bulaşık deterjanı ve su ile yıkayarak temizleme yöntemiyle çözülebileceği belirlenmiştir. Teflon; düşük maliyetli olması, elektriksel olarak yüksek gerilme dayanıklılığının delrine göre daha iyi olması ve işleme kolaylığı nedeniyle tercih edilmiştir. İyon kaynağının yüksek voltaj bölümünü izole etmek için 20mm kalınlığında teflon halka kullanılmıştır. Plazma odası ile iyon kaynağı solenoidi arasında tek parçadan oluşan bir kılıf kullanılmıştır. Mikrodalga giriş penceresi(plazma penceresi) olarak isimlendirilen kuvars cam çerçevesi delrin parçaya çok yakın olduğu için yüksek voltaj atlamaları bu kısımda da gözlemlenmiştir. Buna çözüm olarak çerçeve etrafı termal bant olarak piyasada satılan yüksek voltaja dayanıklı bant ile sarılmıştır. Ön kapak boşluk kalmayacak şekilde saplama vida ile dalga kılavuzuna monte edilmiştir. Hidrojen iletimi sağlayan gaz borusundaki spark sorunu ise piyasada bulunan



Şekil 3.8 İyon kaynağı vakum pencere çerçeve yalıtımı

çeşitli borular ile yapılan testler sonucunda çözülmüştür. Yüksek basınçlı gaz hortumları ve iç yapısı tekstil örgülü olan hortumların yüksek voltaja dayanıklı olmadığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle hidrojen gazı normal teflon hortum kullanılarak aktarılmıştır. Teflon hortumla yapılan uzun vadeli testlerde teflon hortumda yüksek

voltaj kaçağı gözlemlenmiştir. Bu kaçağın hortumda plazma oluşumuna neden olduğu farkedilmiştir. Sonuçta, 25 kV yüksek voltaja, yaklaşık 260 santigrat dereceye kadar dayanıklı olan ve iç yarıçapı 4 mm, dış yarıçapı 6 mm olan Teflon-PFA (Perfloroalkoksi alkan) borular tercih edilmiştir. Yalıtımlı vakum penceresi ve teflon Hidrojen borusu eklenmiş iyon kaynağı sisteme eklenmeden önceki görüntüsü şekil 3.8'de verilmiştir.

3.2.3 İyon Sökme Sistemi ve Plazma Oluşumu

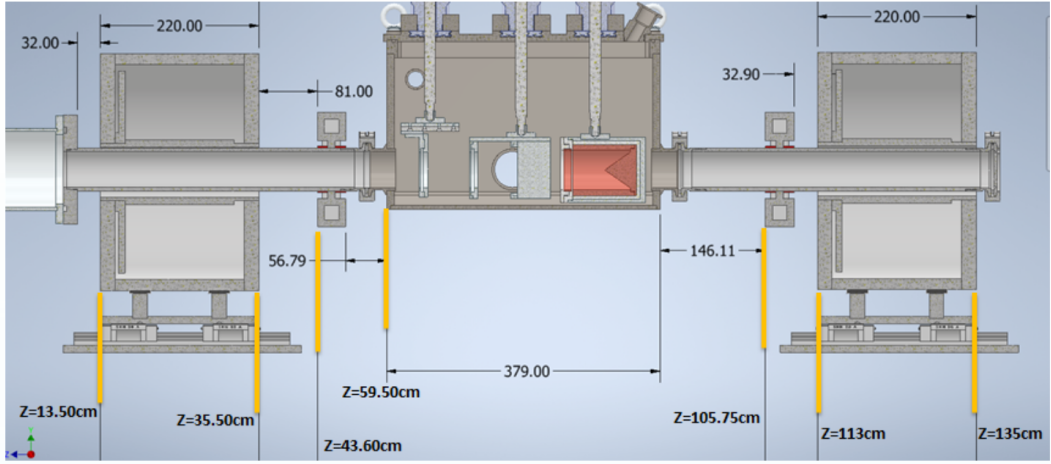
Plazma odası 90 mm çapında ve 100 mm uzunluğundadır. Hidrojen tüpü MDIS düzeneğinin altında yer almaktadır ve gaz akışı, normal çalışma için 0,01 sccm (dakikada standart santimetre küp) gibi düşük bir değere ayarlanmış uzaktan kumandalı bir kütle akış kontrol cihazı tarafından kontrol edilmiştir. Plazma genellikle elektronların verimli bir şekilde ısıtılması için ECR koşulunu da sağlayan elektromıknatıslar kullanılarak sınırlandırılır. Ancak yüksek elektrik akımları ve dolayısıyla solenoidler için soğutma suyu gereksinimleri, böyle bir kurulumu hantal hale getirmektedir. Bu sorunların üstesinden gelmek için iyon kaynağının kalıcı mıknatıslarla daha da geliştirilmesi tasarlanmış ve daha sonra kurulmuştur. Bu çalışmanın ayrıntıları için [37].

3.3 Düşük Enerjili Demet Aktarım (DEDA) Hattı

Proton demet hattı, iyon kaynağının iyon sökme kısmından sonra, Düşük Enerjili Demet Aktarım (DEDA) hattı ile devam eder. DEDA hattının çoğu durumda amacı, iyon kaynağından RF kovuğuna proton demetini kayıp olmaksızın verimli bir şekilde iletmektir. DEDA hattı demet tanılama kutusu, demet düzeltme araçları(dört kutuplu, odaklayıcı, yönlendirici mıknatıslar ve ön-kesici) ve demet eşleme bileşenlerini içerir.

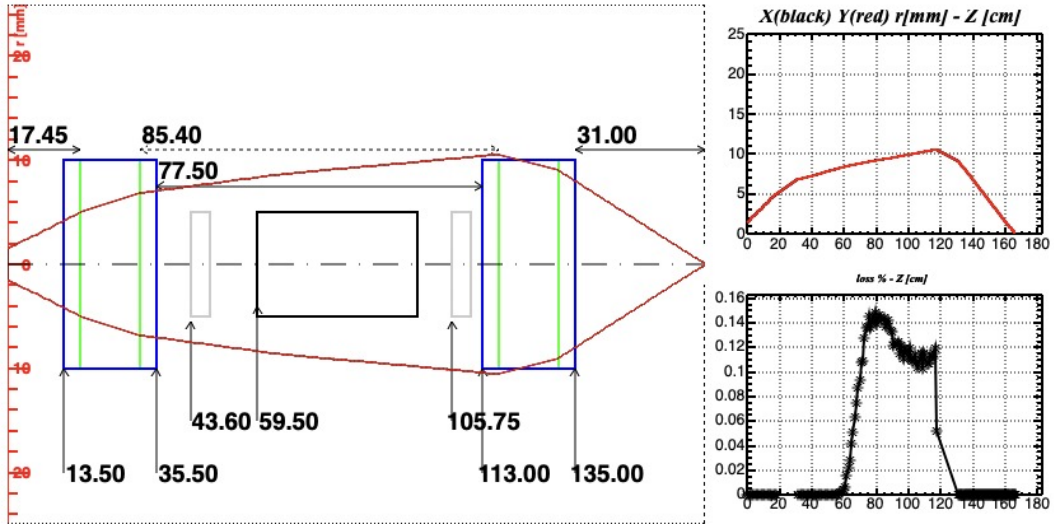
3.3.1 DEDA Hattı Tasarımı

KAHVELab proton hattının sahip olduğu DEDA hattı, RF kovuğunun kabul ettiği demet özelliklerini sağlamak için araçlara sahiptir. Bunlar, demet odaklama için iki ekseninde de eş fazlı olmasına engel olmayacak şekilde z ekseninde hareketli iki adet solenoid ile demeti hizalarken oluşabilecek hatalardan kaynaklı demet kaymalarını düzeltebilen iki adet yönlendirici mıknatıs bulunur. İyon kaynağından çıkan demeti hızlandırmadan önce nasıl bir özellikte olduğunu öğrenebilmek için demet tanılama kutusu bulunmaktadır. Şekil 3.20'de DEDA hattı bileşenlerinin konum ve uzunluklarının cm cinsinden değerleri ile birlikte tasarımının kesit hali verilmiştir.



Şekil 3.9 DEDA Hattı bileşenleri ve konumları,uzunluk birimi mm konum birimleri ise cm'dir

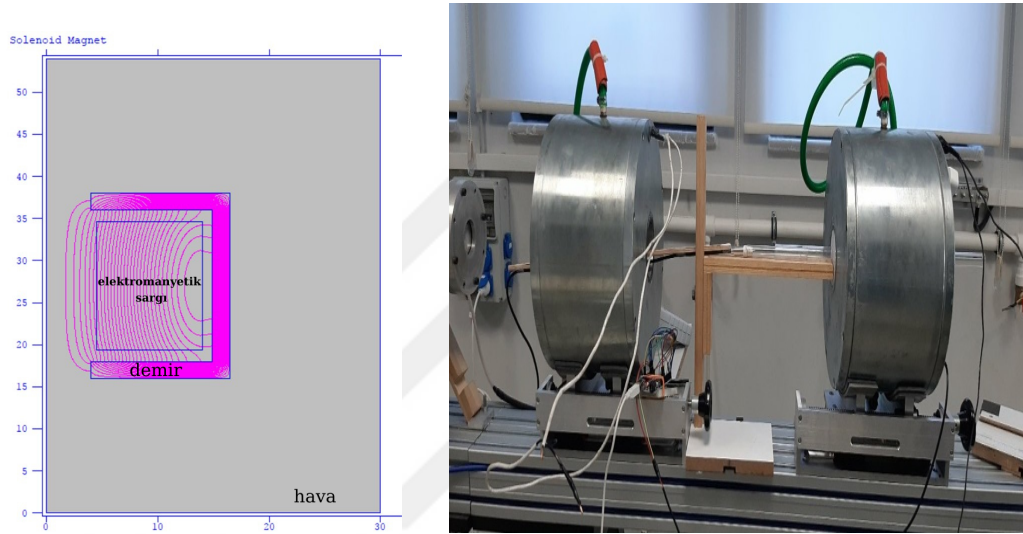
Şekil 3.10'de iyon kaynağından çıkan proton demetinin DEDA Hattından RFQ



Şekil 3.10 DEDA Hattı TRAVEL[38] ve DemirciPro [cakir2021DemirciPro] yazılım programlarıyla tasarlandı. Grafik DemirciPro programından alınmıştır

girişine kadar ilerlemesinin DemirciPro programıyla yapılan benzetim çizimi, sağ üstteki grafikte kırmızı ile gösterilen RMS demet zarfını içerir. RMS demet zarfı, demetin enine boyutlarının istatistiksel bir ölçümünü ifade eder ve demetin belirli bir noktadaki dağılımının genişlediğini gösterir. Bu grafik demetin yayılımını ve parçacıkların kaybolduğu veya dağıldığı alanları detaylı bir şekilde gösterir. Sağ alttaki grafik parçacık kayıplarını göstermektedir. Grafığe göre DEDA hattı $z=80$ cm'de iletilen demetin yüzde 15'i kadardır. Mesafeler cm cinsindendir. Demet soldan sağa doğru hareket etmektedir. $Z=0$ cm'de iyon kaynağından gelen demet ilk odaklayıcıya maruz kalmadan önce 17,45 cm sürüklenir. Mavi dikdörtgen kutu ile gösterilen odaklayıcı mıknatısların fiziksel uzunluğunu, yeşil

kutular ise odaklayıcıların etkin uzunluğunu temsil etmektedir. Demet yönlendirici mıknatıslar gri kutular ile temsil edilirken bu mıknatıslar arasında yer alan siyah renkli dikdörtgen demet tanı kutusunu (MBOX) ifade etmektedir. Kırmızı çizgi, RF kovuğu girişindeki RMS demet zarfının küçültülmüş halini temsil eder. Bu bileşenler, demetin etkili bir şekilde taşınmasını ve tanımlanmasını sağlar. Hattın toplam uzunluğu yaklaşık 160 cm'dir. Odaklayıcı ve yönlendirici mıknatıslar iki boyutta POISSON Superfish [39] programı ile tasarlanmıştır. Şekil 3.11 de solda odaklayıcı mıknatısların iki boyutlu tasarımı, sağda ise üretilen mıknatısların manyetik alan testlerinin yapıldığı düzenek gösterilmektedir.

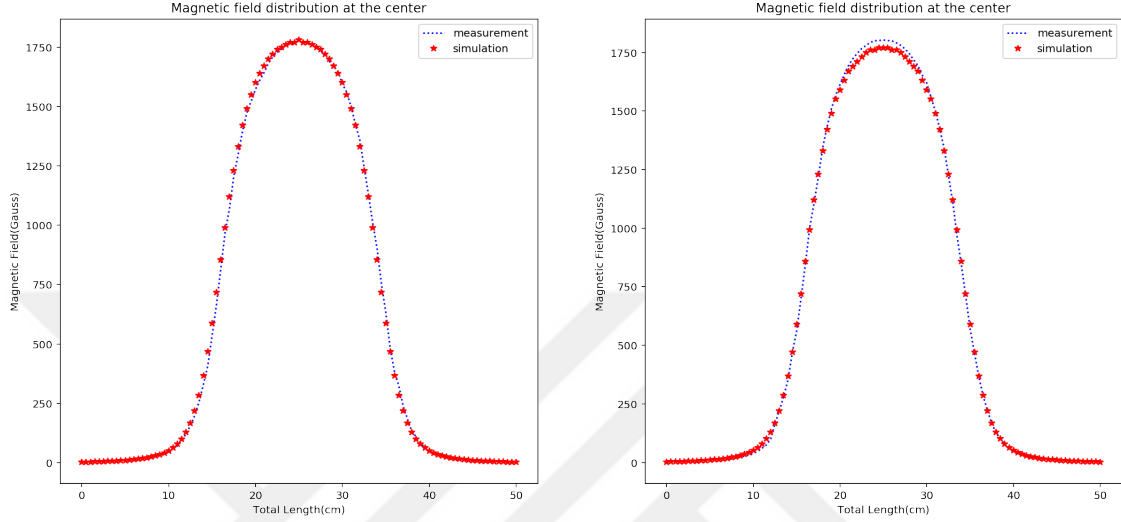


Şekil 3.11 Odaklayıcı mıknatısın iki boyutlu tasarımı ve manyetik alan ölçüm düzeneği

3.3.2 DEDA Hattı Odaklayıcı Mıknatıslarının Üretimi, Birleştirilmesi ve Testleri

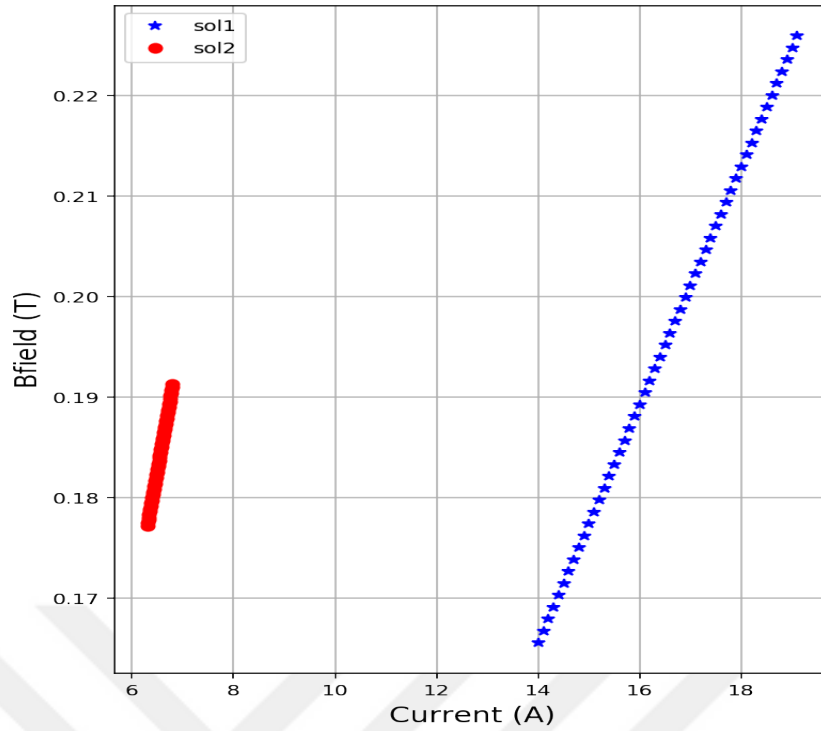
DEDA hattı solenoidlerin her biri 22 cm fiziksel uzunluğunda, su soğutmalı olarak tasarlanıp yerli üretici de ürettirilmiştir. Üretimi tamamlanan solenoidlerin bobin kısmı biri 1682, diğeri 4000 sarım olacak şekilde bobinajcıda sardırılmıştır. Demir kapaklar ile sarımlı bobin birleştirilmeden iç yüzeyi pas önleyici antipas ve vernik ile boyanmıştır. Solenoidler bobin ve demir dış kılıflar ile birleştirilirken su kaçağını önlemek için metal-metal yapıştırıcı, vidalar için ise loctite sıvı yapıştırıcı kullanılmıştır. Soğutma suyu saf su olduğundan bağlantı noktalarında yapıştırıcılarda zamanla aşınmaya neden olduğu için farklı tip yapıştırıcılar ile denemeler yapılmıştır. Metal-metal yapıştırıcı reçine ve katalizör oranı ile hazırlama şekli test edilmiştir. Saf su testinde aşınma olmadan özelliğini koruyan yapıştırıcı hazırlama prosedürü belirlenmiştir. Bu prosedür, 2 birim katalizör ve 1 birim reçine 100 santigrat sıcaklıkta 60 sn karıştırılarak hazırlanan yapıştırıcıların

uzun süre aşınmadan özelliğini koruduğu gözlenmiştir. Su kaçak testi yapıldıktan sonra, solenoidlerin etkin uzunluğu dikkate alınarak Z ekseninde manyetik alan ölçümü yapılmıştır. Manyetik alan profil ölçümleri aksenal ve radyal eksenler boyunca gerçekleştirilmiştir. Solenoidlerin manyetik alanlarının Z ekseninde boyunca benzetim ve ölçüm sonuçları Şekil 3.12'de her iki solenoid için gösterilmektedir. Odaklama mıknatısları üzerinde yapılan akım taraması sonuçları, iyon kaynağından



Şekil 3.12 Solenoidlerin merkezde manyetik alan profili ölçüm ve benzetim sonuçları

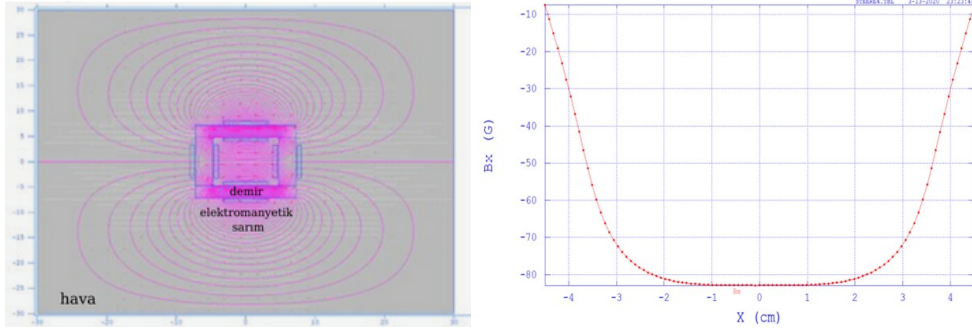
çıkan demetin RFQ girişine uygun şekilde yönlendirilmesinde kritik rol oynar. Solenoidlerin merkez konumları sırasıyla $z = 24,5$ cm ve $z = 124$ cm'dir. Her iki solenoid için manyetik alanların düz tepe değeri, benzetim ve ölçüm karşılaştırması için yaklaşık 1800G olarak belirlenmiştir. DEDA hattında iyon kaynağından sonra yerleştirilen ilk mıknatıs, SOL1 1682 sarımlı, sarım direnci 3,8 ohm ve akım 15 A'dir. İkinci mıknatıs, SOL2 4000 sarımlı, sarım direnci 16,8 ohm ve akım 6,4 A'dir. Mevcut akım kaynağını kullanarak hedeflenen manyetik alana ulaşabilmek için mıknatıslar farklı sarım sayısı ile tasarlanıp ürettirilmiştir. Odaklama mıknatıslarının manyetik alan-akım taramasının ölçüm sonuçları Şekil 3.13'de gösterilmektedir. Beklendiği gibi, SOL1 iyon kaynağı iyon sökme sistemindeki herhangi bir kusuru kapatmak için çok daha geniş bir manyetik alan aralığına sahiptir; SOL2 ise iyon kaynağı iyon sökme sistemi üzerinde daha hassas bir kontrol sağlayabilmektedir. RFQ demet kabulüne uygun parametrelere eşleştirmek için çok daha küçük bir akım aralığına sahiptir. Solenoidlerin etkin uzunluğu, demetin soldan sağa doğru hareket ettiği yönde hesaplanır. Bu tasarım ve hesaplamalar, DEDA hattının beklentiyi karşılamasını sağlamak için önemli rol oynamaktadır.



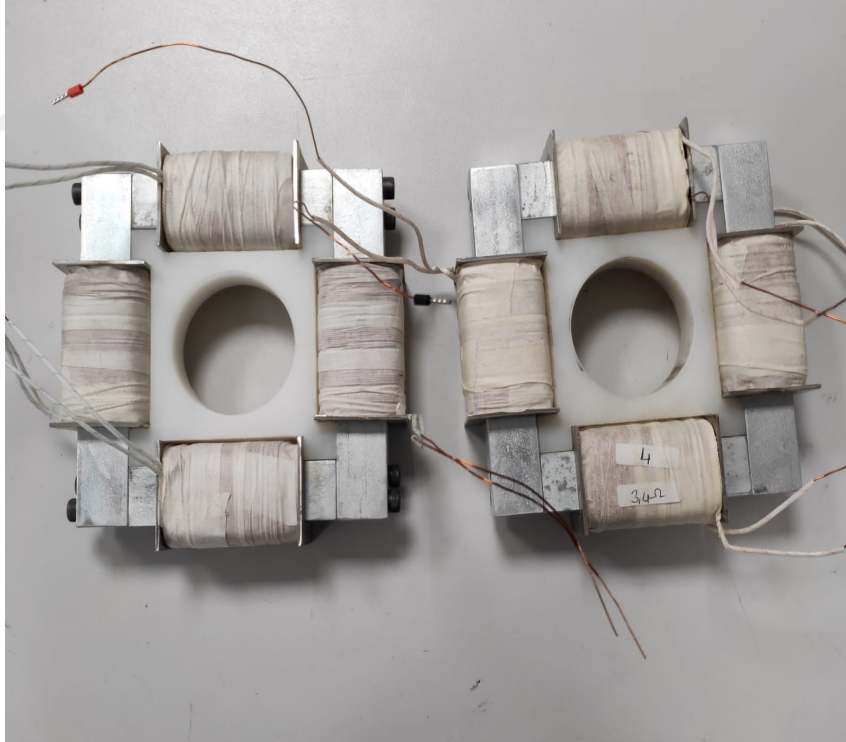
Şekil 3.13 Odaklayıcı Mıknatıs Manyetik Alan - Akım Grafiği

3.3.3 DEDA Hattı Yönlendirici Mıknatıslarının Üretimi, Birleştirilmesi ve Testleri

Yönlendirici mıknatıslar, demeti demet borusu içinde yönlendirmek için kullanılır. DEDA hattında biri ölçüm kutusundan önce diğeri ise ölçüm kutusundan hemen sonra olmak üzere tasarlanıp benzetim çalışmaları yapılmıştır. Yönlendirici mıknatısın tasarımı ve benzetim çalışmaları, yönlendirici mıknatısın demeti nasıl etkilediğini anlamak için kullanılan özel yazılımlar aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, mıknatıs bobinlerinin tasarımı için Poisson Superfish yazılımından, proton demetinin mıknatıslar altındaki davranışının benzetimi için ise CST (Computer Simulation Technology) [40] programından yararlanılmıştır. Bu yazılımlar, yönlendirici mıknatısın tasarım aşamasında manyetik alan profillerinin ve demetin bu alanlar altındaki yörüngesinin detaylı bir şekilde analiz edilmesine imkan tanır. Şekil 3.14'de verilmiştir. Tasarıma göre alüminyum bobin boyutları 64,60 mm uzunluk, 29 mm iç çap, 39,60 mm dış çap, iki silindir arası mesafe 75,60 mm ve paslanmaz demirin boyutları uzunluk 114,60 mm, genişlik 25 mm olarak belirlenmiştir. Üretilen ve montajı yapılan yönlendirici mıknatıslar Şekil 3.15'de görülebilir. Yerli üretici tarafından, 0,76 mm kalınlığındaki telleri yaklaşık 584 sarım yapılarak her mıknatıs için dört benzer bobin elde edilmiştir. Bu nedenle 1 A akımla manyetik alan beklendiği gibi yaklaşık 63 G mertebesine ulaşır. Şekil 3.16'de gösterildiği gibi birbirine bakan bobinlere akım uygulanarak x, y ve z eksenlerinde manyetik alan ölçümleri alınmıştır. Alınan ölçümlerin ortalaması

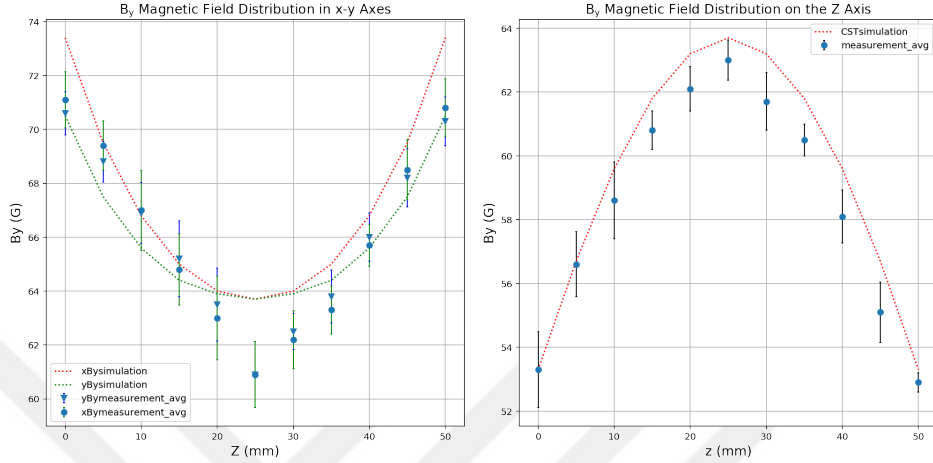


Şekil 3.14 Yönlendirici mıknatısın manyetik alan benzetimi



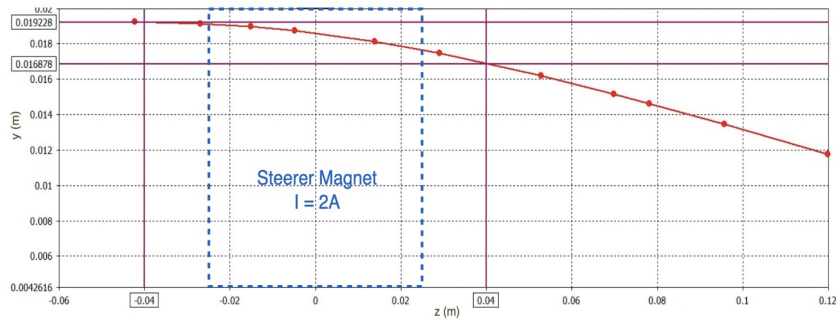
Şekil 3.15 Üretimi yapılmış yönlendirici mıknatıslar

CST programıyla elde edilen manyetik alan sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Ölçüm sonuçları ve benzetim sonuçları ile tutarlıdır. Gözlenen farkların nedeni, test sırasında bobinlere akım uyguladığımızda bobinlerin ısınması voltaj değişikliğine bu da ölçüm alınan noktada manyetik alan değerinin değişmesine neden olmaktadır. Sisteme eklenecek soğutucu fanlar ile bu sorun çözülebilir. Bu yönlendirici



Şekil 3.16 Yönlendirici mıknatısın x,y ekseninde ve z ekseninde alınan manyetik alan ölçüm sonuçları ile benzetim sonuçlarının karşılaştırılması

mıknatıslar kullanılarak, 20 keV enerjili proton demeti, şekil 3.17 görüldüğü gibi mıknatıs merkezinden 40 mm mesafede yatay veya dikey olarak 2,35 mm'ye kadar yönlendirilebilir. Bu grafikte mavi kesikli çizgi dikdörtgen ile gösterilen yönlendirici mıknatısın $z=0$ noktasında merkezi bulunmaktadır. Demetin sapması da y ekseninde işaretlenmiştir ve 2,35 mm olarak hesaplanabilir.

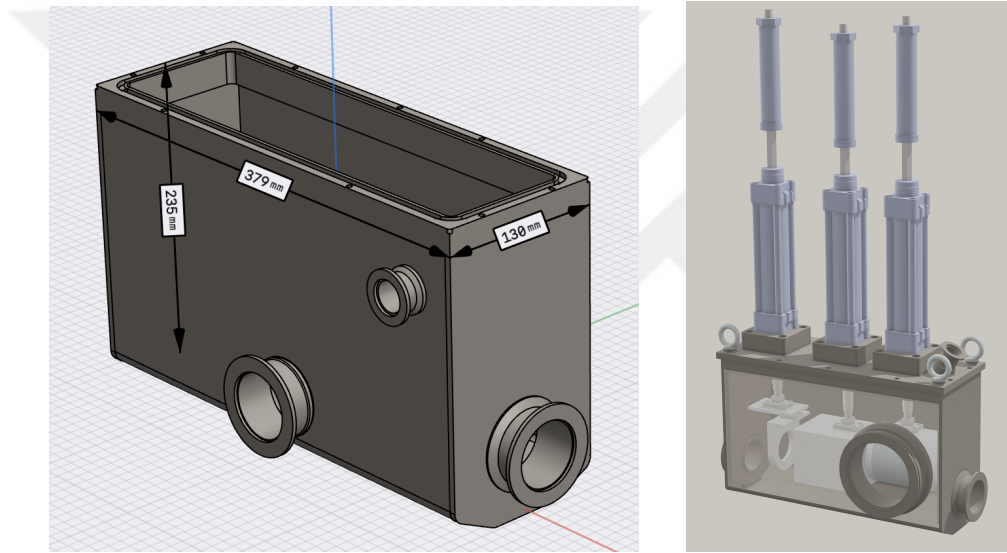


Şekil 3.17 DEDA hattında yönlendirici mıknatısların proton demetine etkisi

3.3.4 DEDA Hattı Ölçüm Kutusu Üretimi ve Testleri

Hızlandırıcılarda demet teşhisinin kalitesi, sistemin optimizasyonu ve iyon kaynağından elde edilen demetin tanımlaması açısından oldukça önemlidir. Demet karakterizasyonu ve teşhisi, şekil 3.10'de gösterildiği gibi DEDA hattındaki

iki odaklayıcı mıknatıs arasına yerleştirilen "ölçüm kutusu" (MBOX) adı verilen bileşen ile gerçekleştirilir. Bu bileşen sayesinde demet RF kovuğuna girmeden önce hangi özelliklere sahip olduğu anlaşılabilmektedir. Ölçüm kutusu içerisinde, demetin enine yayılımını belirleyebilmek için tuzluk (pepper-pot) plaka düzeneği, demetin boyut ve profilinin belirlenebilmesi için sintilasyon ekran (SS) ve demet akımının ölçülebilmesi için faraday kupası (FK) bulunmaktadır. Ayrıca, FK içerisinde üretilen sinyalin darbe süresi hakkında bilgi toplamak için kullanılır. Bu özellik, demetin zamanlama özelliklerini ve parçacıkların iletimi sırasında oluşan sinyalleri anlamada kritik bir rol oynar. Şekil 3.18'nin sağında gösterilmektedir. Bu ölçüm kutusu elemanları ile elde edilen bilgiler parçacık hızlandırıcısının performansının doğru bir şekilde kontrol edilmesi ve optimize edilmesi için önemlidir. Ölçüm kutusunun (MBOX) tasarımı ve imalatı kompakt bir yapı



Şekil 3.18 Solda MBOX fiziksel uzunlukları gösterilen tasarım resmi, sağda ise MBOX algıçlarının dışarıdan görünür hali ile tasarım resmi

sağlamak için iki temel gerekliliğe göre yapılmıştır. İlk olarak kutu boyutları, vakum altındaki hacmin mümkün olduğunca küçük bunun yanı sıra demet tanı algıçlarını da barındıracak kadar büyüklükte olmalıdır. Diğer etken ise toplam ağırlığı en aza indirmek için duvar kalınlığının mümkün olduğunca azaltılmasıdır. Ancak vakum ters basıncına dayanacak kadar da sağlam olmalıdır. Bu ön şartlar göz önünde tutularak, 5 mm kalınlıklı $379 \times 130 \times 235$ mm boyutlarında paslanmaz çelik malzemeden çokgen bir kutu şeklinde tasarlanmıştır. Şekil 3.18 solda kutu tasarım çizimi görülmektedir. Kutunun sağ sol alt kısımlarında bulunan KF50 tipi konnektörler demet vakum borularına bağlantıyı sağlar böylelikle DEDA hattı z eksenine boyunca doğrudan bağlantı sağlanır. Solda bulunan resimde görüldüğü üzere yan yüzeyde bulunan KF50 tip konnektör cam kör kapak kullanılarak görüntüleme portu görevi görmektedir. Fotoğraflama işlemi bu port sayesinde bir kamera

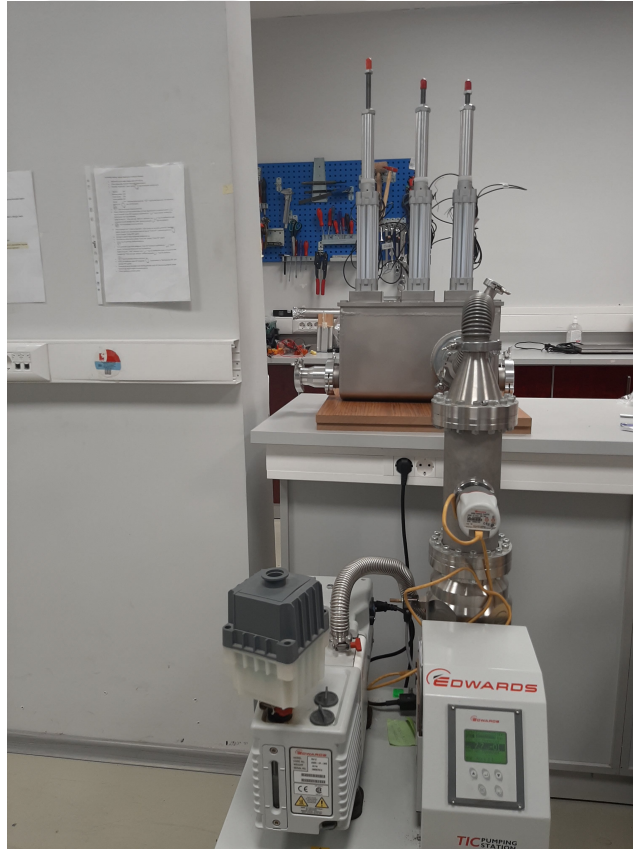
aracılığıyla yapılmaktadır. Yine aynı yüzeyde sağ üstte görülen KF25 tip konnektör ile vakum kutusuna vakum ölçer cihazı bağlanabilmektedir. Şekil 3.18 sağ tarafında bulunan görselde ise vakum kutusunun diğer yüzeyi gösterilmektedir. ISO100 tipi konnektör kullanılarak turbo moleküler vakum pompası direkt bağlanabilmektedir. Herhangi bir dönüştürücü olmadan bağlantı sağlanması daha kısa sürede istenilen vakum mertebesine ulaşılmasını sağlamaktadır. Üst kapakta algıçların vakum kutusu içine ve dışına hareket edebilmesini sağlayan üç adet pnömatik piston bulunmaktadır. Bu pistonlar, algıçların en az sarsıntı ile vakum altında hareketini sağlayan hassas ve uzaktan kontrollü bir sistemdir. Soldan sağa, ilk piston tuzluk plakasına, ikinci piston ekran ayna sistemine ve son olarak üçüncü piston faraday bardağına bağlanmaktadır. Yine üst kapak sol kenarda yer alan KF25 tipi konnektör girişi ilgili algıç için sistem dışından sağlanacak sinyal, gerilim, akım, sensör gibi kaynak bağlantılarını kurmak için kullanılır. Bu bağlantıyı sağlayabilmek için, vakum kaçağına neden olmayacak hermetik tip konnektöre ihtiyaç vardır. Laboratuvarında bulunan mevcut kablolar ve konnektörler test edilerek el yapımı bir hermetik konnektör yapılmıştır. Şekil 3.19 de gösterilmektedir. Kullanılan kabloların vakum altında vakum kaçağına neden olmadan çalışıyor olması önemli bir noktadır. Bu nedenle kapalı kutu içerisinde vakuma tabi tutulmuştur. KF25 kör kapak gerekli mekaniksel işlemelerden sonra merkezine delik açılarak dört pinli konnektör epoksi yapıştırıcı ile yapıştırılmıştır. Vakum testlerinde herhangi bir kaçak gözlenmediğinde sisteme monte edilmiştir. Faraday kupasından sinyal almak ve faraday kupa koruma halkasına negatif gerilim uygulamak için bu kablolar kullanılmaktadır. Demet hattına minimum düzeyde müdahale hedeflediği için bu bağlantılar ve pistonların bilgisayar kontrollü olması çok önemlidir. Üst kapak kutuya viton o-ring ve on tane eş vida ile bağlanarak sızdırmazlık sağlanmıştır. Ölçüm kutusu sisteme eklenmeden önce temizlikleri yapılarak vakum testine tabi tutulmuştur. Tek bir turbo moleküler vakum pompasıyla, şekil 3.20 de gösterildiği gibi bağımsız bir kurulum kullanılarak 10^{-6} mbar mertebesine yapılan testler ve iyileştirmeler ile ulaşılmıştır.

3.3.5 Tuzluk Plakası Tasarımı, Üretimi ve Testleri

KAHVELab proton hızlandırıcısında yer alan DEDA hattında enine demet yayını delikli plaka (*Pepper – Pot*) yöntemi ile ölçülmüştür. Bu yöntemin kullanılma motivasyonu tek bir ölçümle x ve y izdüşümleri alınarak her iki eksen için yayının hesaplanabilmesidir. Ayrıca gerçek zamanlı olarak demet yayını ve demet profili ölçülebilmesidir. Son etken ise diğer yöntemlere göre daha az maliyetli olmasıdır. Bu yöntemin ana bileşenlerinden biri delikli plakadır. Plaka elek, tuzluk gibi delikli bir yüzeye sahip olduğu için genelde tuzluk olarak isimlendirilmektedir. İdeal

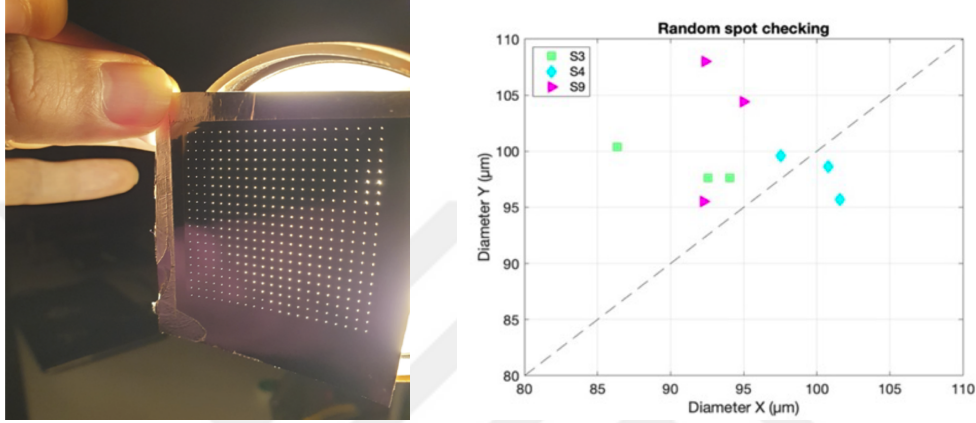


Şekil 3.19 KF25 tipi kör kapaktan el yapımı konnektör

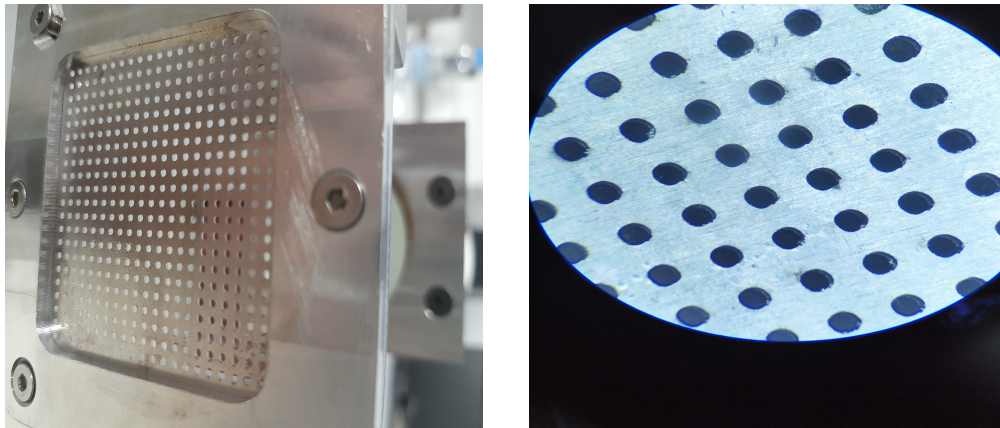


Şekil 3.20 Ölçüm kutusu vakum test düzeneği

ölçümlerde tuzluk plakası malzemesi tungsten olmasına rağmen, piyasada istenilen kalınlıklarda (100-200 μm) tungsten bulunamaması ve yüksek maliyeti nedeniyle tercih edilmemiştir. Düşük maliyeti nedeniyle 250 μm kalınlığında, 50×50 mm boyutlarında paslanmaz çelik seçilmiştir. Yapılan benzetim çalışmalarına göre, Delik sayısı 21x21, delikler arası mesafe 2 mm, delik çapı yaklaşık 100 μm olarak belirlenmiştir. Bilkent Üniversitesi, Ankara’da bulunan UFO Lab tarafından fiber lazer kullanılarak üretilen 3 farklı numune için deliklerin kontrol ölçümleri yapılmıştır. Bu kontrol ölçümleri şekil 3.21 grafikte gösterilmektedir.

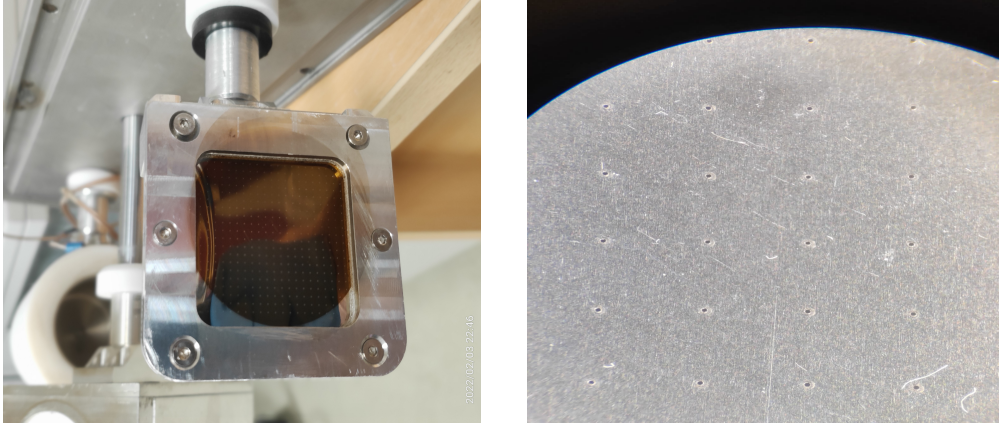


Şekil 3.21 Solda: Üretilen delikli plaka. Sağda: 3 numune için yapılan delik çapı ölçümlerinin yer aldığı grafik



Şekil 3.22 Delik çapı büyük olan tuzluk deneme plakası

Üretilen plakaları teslim alana kadar İstanbul’da sanayide farklı tuzluk plakaları ürettirilip deneme ölçümleri yapılmıştır. Ürettirilen deneme plakası kalınlığı 500 μm ve Delik sayısı 21x21, delikler arası mesafe 2mm, delik çapı yaklaşık 1000 μm ’dir. Delik çapının ve plaka kalınlığının etkisinden kaynaklı hesaplanan yayınının hata oranı çok yüksek çıkmıştır. Bu örnek de kıstas alınarak plaka kalınlığı ve delik çapına göre benzetim optimizasyonu yapıp hata oranı hesaplanmıştır. şekil 3.22’de ürettirilen deneme plakası, şekil 3.23’te ise UFOLab tarafından üretilen



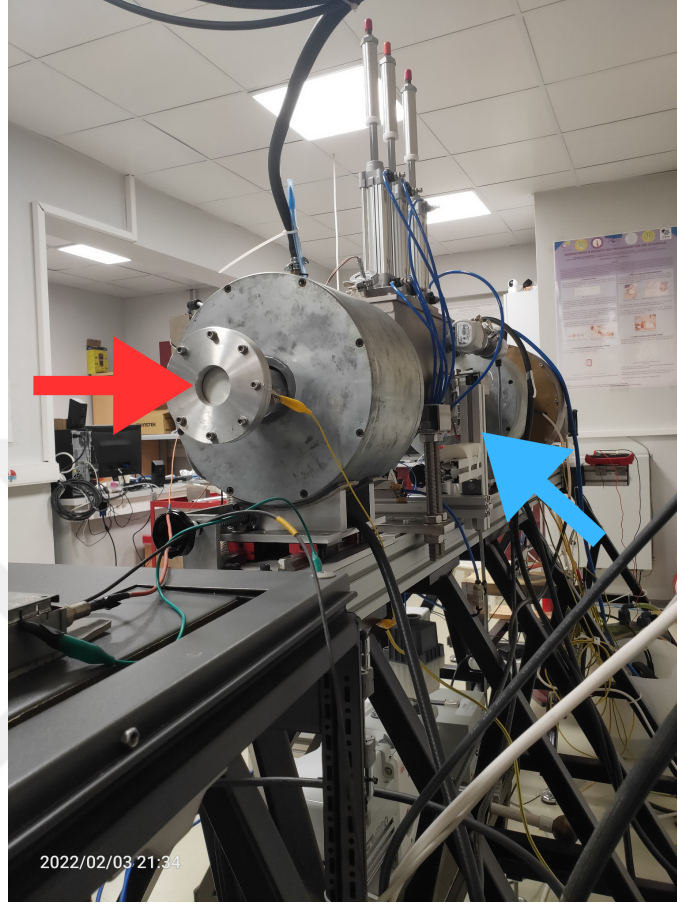
Şekil 3.23 Tuzluk plakası delik çapı:100 μm

ölçümlerde kullanılacak tuzluk plakasının görselleri bulunmaktadır. Ölçümlerde üretimde en düzgün çap dağılımına sahip olduğundan “numune-4” adı verilen tuzluk plakası kullanılmıştır. Plakanın termal deformasyonunu önlemek için her biri 500 μm kalınlığında iki alüminyum çerçeve arasına sıkıştırılmıştır. Bu destek çerçeveleri delikli plakanın yüzeyinde oluşabilecek deformasyonları önlemek için kullanılır. Tuzluk plakasının çerçevesinin ölçüm kutusu bağlantısı kayar şekilde ray üzerine yapıldığı için ekran tuzluk arası mesafe değiştirilebilir durumdadır. Yapılan benzetimlerle ıraksak demetler için daha az veya daha fazla olacak şekilde plaka ve ekran arasındaki mesafe ayarlanabilmektedir.

3.3.6 Parıldak Ekran Üretimi ve Testleri

Parıldak veya fosfor ekranları, hızlandırıcı eksenini boyunca demetin enine profillerini gözlemlemek ve kaydetmek için doğrudan bir yöntem sağlar. Bu gibi ekranlarda yakalanan tek görüntü hem X hem de Y profil bilgilerini sağlar. Ekran tuzluk plakasıyla birlikte kullanıldığında demet yayını ölçmeyi sağlayabilmektedir. Görüntü yoğunlaştırıcılar için yaygın olarak kullanılan iki fosfor ekran türü P43 ve P46'dır. Yüzey kaplamalı fosfor ekranlar, plastik sintilatör ekranlara kıyasla daha az hassas olup, tekrarlanan luminesans maruziyetlerine dayanıklıdır ve yeniden kullanılabilirler. Maliyet açısından da fosfor ekranlar tercih edilir. KAHVELab proton hattında birbirinden farklı ekranlar kullanılmıştır. Plastik sintilatör, alümina ve farklı içerikli fosfor ekranlar. Benzetim ve ölçüm bölümünde aktarılan ölçümler aşağıda yazılı prosedürlerle yapılan fosfor ekran ile alınmıştır. Bu ekranlar, görüntü yoğunlaştırıcı cihazların performansını artırmakta ve daha dayanıklı bir kullanım sunmaktadır. Bu nedenlerden dolayı özellikle optimizasyon testlerini yaparken kullanmak üzere çeşitli fosfor ekranlar yapılmıştır. Demet hattı boyunca çeşitli konumlarda kullanılmak üzere farklı boyutlarda ekranlarımız bulunmaktadır. Şekil 3.24'de gösterildiği üzere DEDA

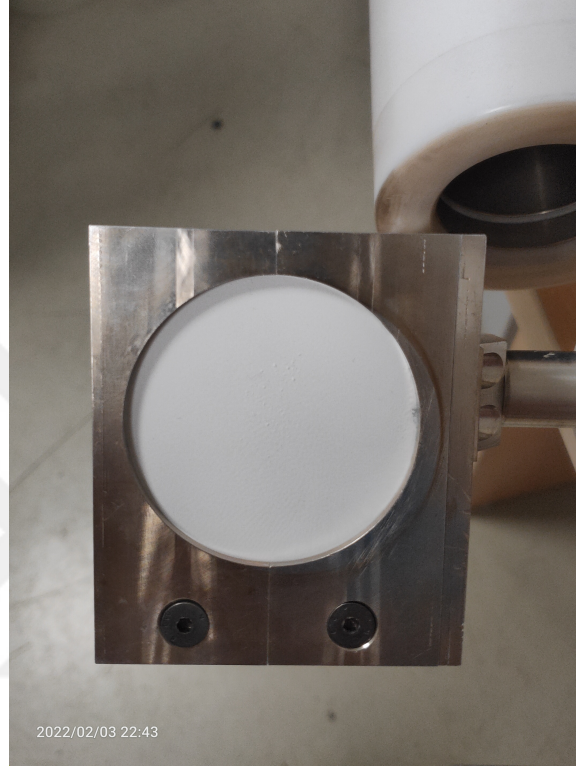
hattı sonunda vakum borusuna bağı ekran (kırmızı ok ile gösterilmektedir), hemen mavi ok ile gösterilen noktada ise ölçüm kutusu içerisinde olan ekran bulunmaktadır. Her iki noktada alınan demet profilleri 4.1.2 gösterilmektedir.



Şekil 3.24 DEDA hattında alınan demet profillerinin konumları

Fosfor ekran yapımı için gereken malzeme listesi nispeten kolay elde edilebilir. Bir cam taban, floresan tozu ve izopropil alkol(99.9% saflıkta). Floresan tozu, Philips Master TL-D840 ve TL-D830 gibi hazır floresan lambalardan elde edilebilir. Bu lambalar, yüzeylerinde kullanılan fosfor kaplama tipi nedeniyle tercih edilir. Sıcak beyaz ve soğuk beyaz fosfor renkleri, 3000-4000 K renk sıcaklık aralığına sahiptir. Spektral ışımaya değerleri, 530-630 nm civarında merkezlenmiş standart bir Bell eğrisi ile uyumludur. Bu dalga boyları aralıkları, proton demet hattında ihtiyaç duyulan aralıklarla uyumludur. Fosfor ekran yapımında kullanılan 3 mm kalınlığındaki camın boyutları 60 × 60 mm'dir. Cam, alkol ile temizlenip kurutulur ve yüzeyinde toz kalmaması için cam bezi ve sıcak hava tabancası kullanılır. Floresan tozu, kirliliklerinden ayırmak için birkaç kez farklı boyutlu filtreler yardımı ile elenir. Kirleticilerden arındırılmış 3 gram toz, cam bir karıştırma kabına alınır ve 8 gram izopropil alkol eklenir. Karışım iyice homojenleştikten sonra

temizlenmiş camın üzerine hava kabarcıkları olmadan dökülür ve camın üzerine eşit bir şekilde yayılması sağlanır. Isıtıcı 50°C'ye ayarlanır ve tüm yüzeye eşit temas etmesi için 60 saniye ısıtılır. Isıtılmış ekran, düz bir yüzey üzerinde 30-35 dakika kurumaya bırakılır. Kuruduktan sonra kullanıma hazırdır. Fakat ekranı bir yerden bir yere taşıırken veya saklarken kaplama yapılan yüzeye dokunmamaya dikkat edilmelidir.

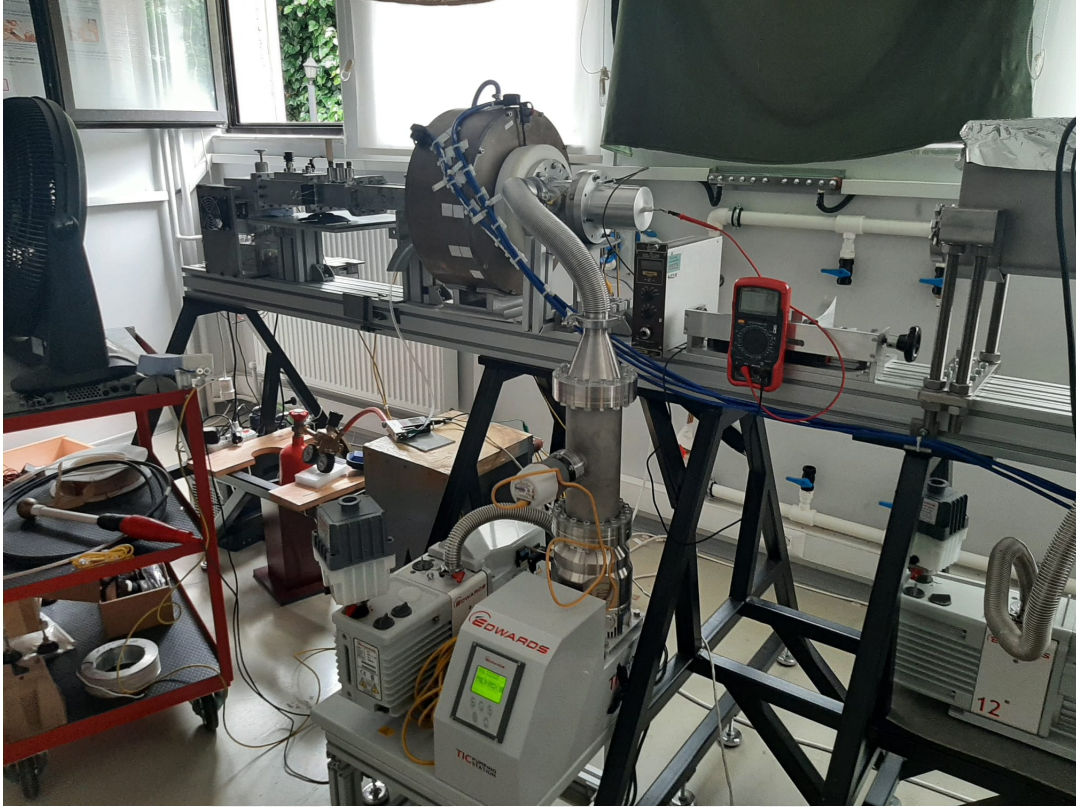


Şekil 3.25 Ölçüm kutusu fosfor ekranı

Böyle bir fosfor ekranın ölçüm kutusuna monte edilmeden önceki hali Şekil 3.25'te görülebilir. Fosfor ekranın arkasına 45 derecelik bir açıyla monte edilen bir ayna, demetin görüntüsünü vakum penceresinden kameraya yansıtır. Deneyler sırasında kameraya gelen arka plan gürültüsünü ortadan kaldırmak için harici ışıklardan izole bir şekilde görüntü alınmalıdır.

3.3.7 Faraday Kupası (FK) Tasarımı, Üretimi ve Testleri

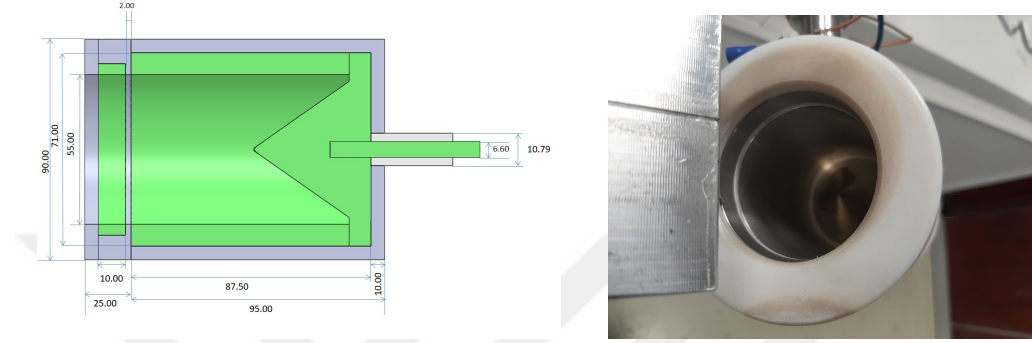
Literatürde Faraday kupaları iki ana gruba ayrılabilir; elektriksel olarak öngerilimli veya manyetik olarak flitrelendirilmiş. Elektriksel olarak öngerilimli FK demet hattındaki manyetik elemanların neden olabileceği okuma hatalarını önlemek amacıyla kullanılır. Manyetik olarak flitrelenmiş FK ise demetin manyetik saflığını arttırmak için tasarlanmıştır. Her iki tür de, demet akımı ölçümlerinde önemli rol oynar ve uygulamaya göre tercih edilir. Şekil 3.28'de gösterilen düzeneğe ve KAHVELab proton demet hattı manyetik elemanlarından kaynaklanabilecek



Şekil 3.26 İyon kaynağı çıkışında demet akımı ölçüm testleri

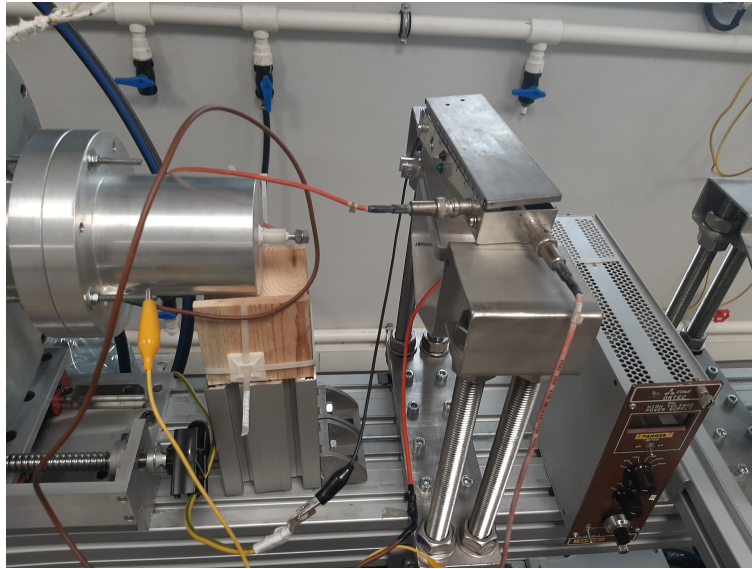
okuma hatalarını önlemek amacıyla elektriksel olarak öngerilimli bir faraday kupası tercih edilmiştir. Faraday kupasından ikincil elektron ve iyonların kaçışını engellemek önemlidir. Çünkü bu durum hem pozitif hem de negatif demet okumalarını etkileyebilir [41]. 20 keV'luk proton demetinin Coulomb Çarpışması sonucu ikincil elektronlara aktardığı enerji, ikincil elektronları Faraday kupası içinde tutmak için -43.59 V'luk bir kutuplandırma gerilimiyle eşdeğer olan 43.59 eV olarak hesaplanır [42]. FK soğurucu malzemesi olarak bakır seçilmiştir. FK'nın minimum gerekli kalınlığı, absorber içindeki proton ve elektron menzillerinin hesaplanmasıyla tahmin edilebilir. Bu, protonları ve ikincil elektronları bardağın etkili bir şekilde tutulabilmesi için gereklidir, böylece doğru demet akımı ölçümleri yapılabilir. İkincil elektron yayılımları, IBSimu ve CST yazılımları kullanılarak benzetim çalışması gerçekleştirilmiştir. IBSimu, malzeme türünden bağımsız benzetimler yapabilme özelliğine sahipken, CST, absorbe edici materyalin türüne göre farklı ikincil elektron yayılım modelleri sağlamaktadır. Bakır için ikincil elektron verileri, 5 ile 20 keV arası enerjiye sahip proton demetleri için literatürden temin edilip, CST simülasyonları için entegre edilmiştir [43]. Aynı FK, iyon kaynağının çıkışı, ölçüm kutusu ve DEDA hattının sonu da dahil olmak üzere proton demet hattının çeşitli bölümlerinde kullanılması planlandığı için, proton demet hattının farklı bölgelerinde demet çaplarının değişebileceği varsayımını göz önünde bulundurulmaktadır. Bu bağlamda, çapı

10 ile 40 mm arasında değişen ve her 5 mm'de bir artış gösteren çeşitli demet çapları ile benzetim çalışmaları yürütülmüştür. FK tasarımı yapılırken geri saçılan protonların maksimum yüzdesinin sınırlandırılması önemlidir, çünkü bu durum hata kaynağı oluşturmaktadır. Faraday kupasında bu geri saçılan protonların çoğunu tutabilmek için IBSimu ve CST benzetim çalışmaları kullanılarak çeşitli senaryolar değerlendirilmiş ve tasarım buna göre optimize edilmiştir. Bu çalışmanın daha detaylı bilgisine buradan ulaşılabilir [44]. FK, iyon kaynağından gelen proton



Şekil 3.27 Solda FK tasarımı, sağda üretimi yapılan ölçüm kutusu için FK

demetinin tamamını içeri alacak şekilde 27,5 mm iç yarıçapa ve öngerilim halkası dahil 120 mm uzunluğa sahip, 8 mm kalınlığında bakır kullanılarak yapılmıştır. Şekil 3.28'de tasarım ve üretim resimleri gösterilmektedir. FK ve öngerilim halkası, 2 mm kalınlığında bir Teflon disk kullanılarak elektriksel olarak yalıtım sağlanır. Son kurulumda FK toprak hattı bağlantılı ve öngerilim halkası voltajı -50 V ile -200 V arasında değişebilir olarak montajı sağlanmıştır.



Şekil 3.28 Demet akımı ölçme sistemi

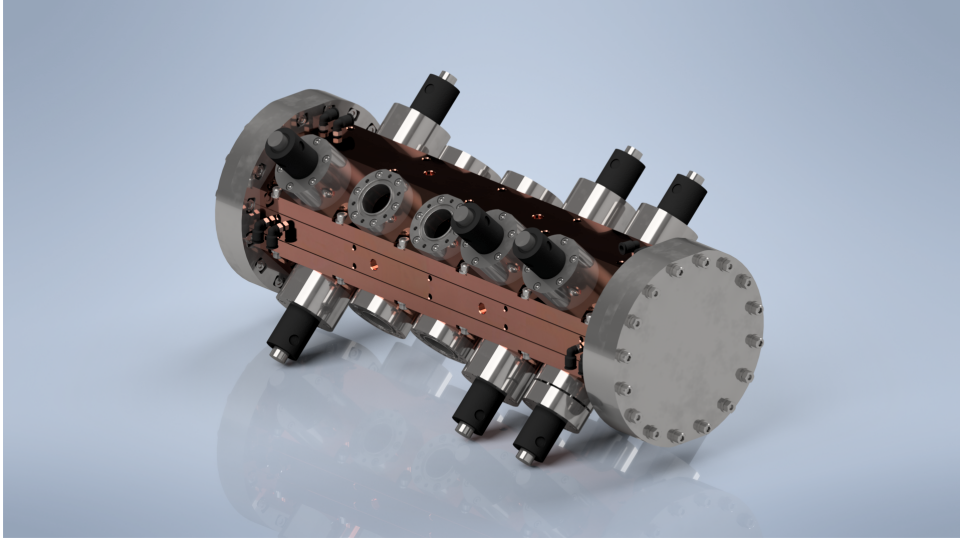
Ayrıca faraday kupasının ölçüm kutusunun dışında proton hattında farklı konumlarda kullanmak için bir vakum kılıfı ve buna uygun bağlantı elemanı tasarlanıp ürettirilmiştir. FK bakır gövdesi, ölçüm kutusu metal yüzeyleriyle ve ayrıca vakum kapağıyla teması önlemek için teflon ile kaplanmıştır. İyon kaynağının çıkışından DEDA hattı öncesi demet tanısı yapılmak üzere demet akım ölçümü de yapılmıştır. Ölçüm sırasında alınan fotoğraf, şekil 3.26'de verilmiştir. Şekil 3.28'de verilen fotoğrafta veri alımı sırasında demet sonundaki Faraday kupasının sinyal çıkışı, demet akımı ölçümleri için 10 kOhm'luk bir direnç üzerinden bir osiloskopa bağlanmıştır. Şekil 3.29'de bu tez çalışması için alınan demet verilerinin ölçüm elemanları gösterilmektedir. Ölçüm sonuçları 4 bölümünde paylaşılmıştır.



Şekil 3.29 Ölçüm kutusu elemanları

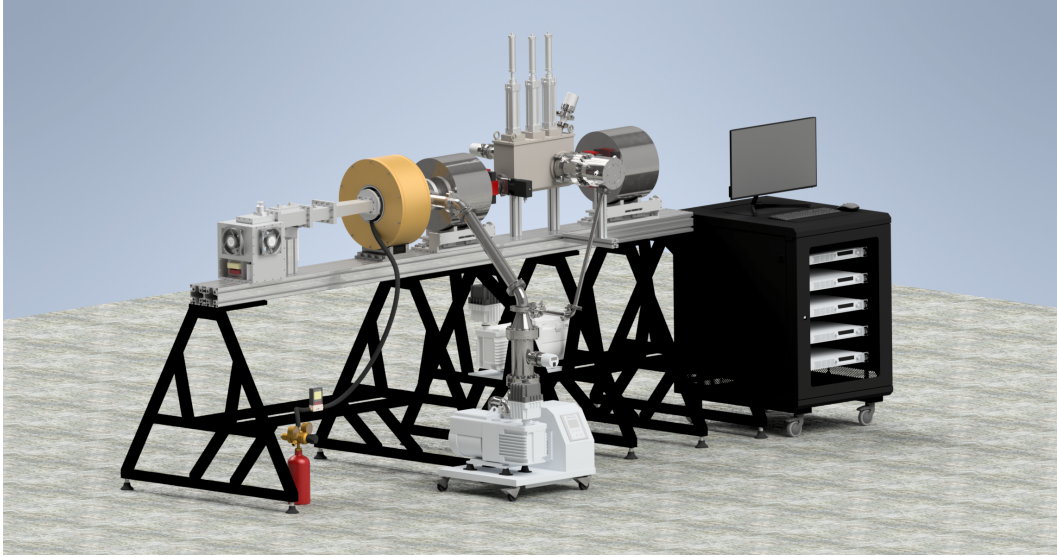
3.4 Radyo Frekans Dört Kutuplusu (RFQ)

Radyo Frekanslı Dört Kutuplusu kendi iç tasarımıyla dayanarak yerel olarak üretilip sisteme eklenmesi planlanan, proton demet hattının son parçasıdır. İyon kaynağından çıkan demetin DEDA hattı ile kovuğa iletilen proton demetinin en az parçacık kaybıyla hızlandırılabilmesi en temel hedeftir. KAHVELab proton hızlandırıcı RFQ, plazma iyon kaynağından çıkarılan 20 keV H^+ demetini 2 MeV enerjiye hızlandırmak için 4 kanatlı bir kovuk kullanır. Bu 4 kanatlı kovuk içerisindeki elektromanyetik alan dağılımının simetrik olması parçacıkları hızlandırırken kaybı en aza indirmektedir. RFQ, hedef enerjiye ulaşmak için 800 MHz frekansta çalışır. RFQ tasarımı, 1 mA proton demetini etkin bir şekilde hızlandırabilmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.30'da KAHVELab



Şekil 3.30 KAHVELab proton test demeti hattında kullanılacak RFQ tasarımı

proton hattında kullanılacak olan RFQ tasarımı görseli verilmiştir. Bu tasarımla yaklaşık %30 hızlandırma verimliliği ve en düşük Radyo Frekans gücüyle, 98 cm uzunluğundaki bir boşlukta proton demetini hızlandırmak üzere optimize edilmiştir. RFQ ile ilgili daha detaylı çalışmaya ulaşabilirsiniz [45]. Şekil 3.31'ün sağ tarafında bulunan DEDA hattı sonuna eklenecek olan RFQ ile proton demeti 2 MeV enerjiye ulaşılacaktır.



Şekil 3.31 IK bileşenleri ve DEDA hattının oluşturduğu KAHVELab proton test demeti hattı tasarımı

4 Benzetim ve Ölçümler

İyon kaynağı vakum ve yüksek voltaj testleri bittikten sonra ilk olarak stabil Hidrojen plazması yapılması için testler başlamıştır. Plazmanın stabil olması yüksek voltaj için önemlidir. Bu nedenle ayarlayıcı magnetrondan sonra dalga kılavuzu üzerinde yer alan ayarlayıcı saplamaları plazmanın stabil olduğu duruma göre konumlandırılmıştır. IS iyon sökme sistemindeki plazma elektroduna 20kV uygulanarak iyon odasında proton demeti oluşturulmuştur. Sonraki aşamada ise elde edilen proton demetinin DEDA hattı ile RFQ girişine minimum kayıpla iletilmesini sağlamak planlanmıştır. Bunun için benzetim çalışmaları yapılmıştır. Bu bölümde proton hızlandırıcısı ilk bileşeninden başlayarak proton hattı bileşenlerinin optimizasyonları, 20 keV enerjili proton demetinin profili, demet yayını ve demet akım değerlerinin benzetim çalışmalarına yer verilmiştir. Proton hattı üzerinde alınan ölçüm sonuçları da bu bölümde aktarılacaktır. Alınan ölçüm sonuçları ile benzetim sonuçları karşılaştırılmıştır. İyon sökme sisteminde iyon kaynağı çıkışından demet profili ve demet akımı ölçümleri yapılmıştır. Paralel olarak IBsimu programı kullanılarak üretilen demet dosyası kullanılarak benzetim çalışmaları yapılmıştır. Benzetimler için Python dilinde geliştirilen algoritma ve DemirciPro kullanılmıştır. Bu programlardan elde edilen sonuçlar PlotWin ve TRAVEL sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Benzetimlere göre iyon kaynağı çıkışından proton demetinin, normalize yayını $\epsilon_{norm} = 0.0299$ (π mm.mrad), akımı yaklaşık 1,5mA ve çapı yaklaşık 8 mm olarak beklenmektedir. Elektrotlar arası mesafe, plazma odasının ne kadar miktarda hidrojen gazı ile besleneceği, dalga kılavuzu üzerinde bulunan ayarlayıcıların konumları optimize edilerek en uygun koşullarda proton test demeti alınmıştır. İyon kaynağının sonundan alınan ölçüm sonuçları ile benzetim sonuçları karşılaştırıldığında elde edilen sonuçlar tutarlı olduğu için DEDA hattı bileşenleri sisteme eklenmiştir. Demet tanı benzetimleri her bileşene göre yapılarak bileşenlerin konumları belirlenmiştir. Benzetimlerle odaklayıcı ve yönlendirici mıknatıslara uygulanacak olan akım değerleri belirlenerek ölçüm alınacak sistem elde edilmiştir. Şekil 4.1'de ölçümlerin yapıldığı sistemin son hali görülmektedir. Demet profili ve yayını

hesaplamak için çekilen demet fotoğraflarını Python dilinde geliştirilen algoritma ile analiz edilmiştir. Geliştirilen görsel analiz kodu Computerized Pepper Pot Plate Analysis(c3pA) olarak isimlendirilmiştir. Demet tanımlama işlemi demeti RF kovuğu girdi parametrelerine uygun hale getirebilmek için önemlidir. Bu çalışma ile eklenecek RFQ kovuğunun girdi parametreleri belirlenmiştir.

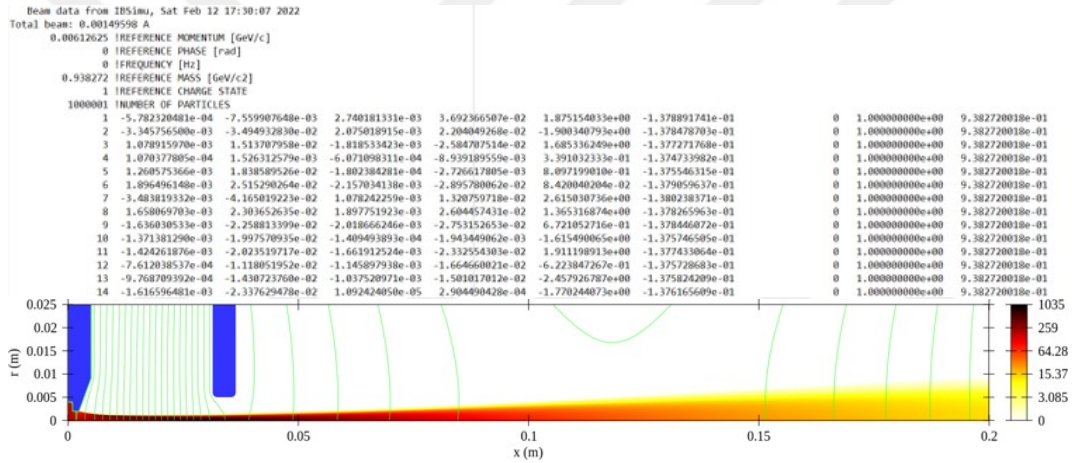


Şekil 4.1 KAHVELab proton hızlandırıcısının iyon kaynağı ve DEDA hattı

4.1 Demet Dinamiği

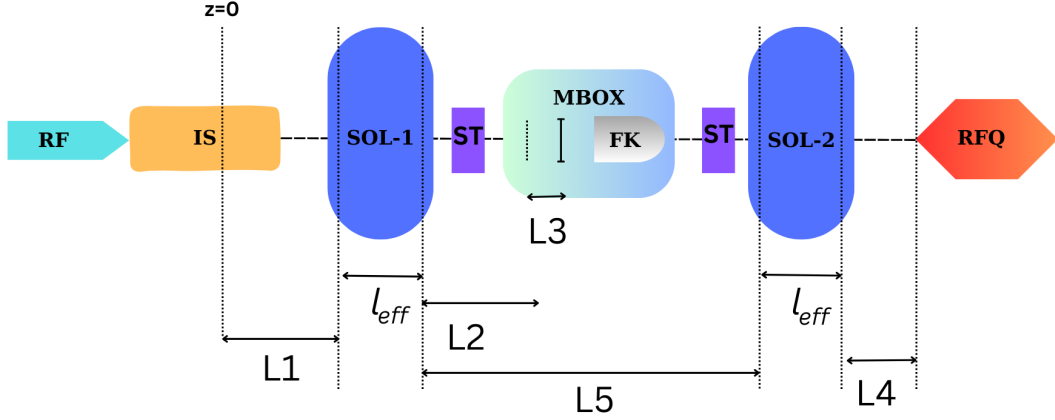
Demet tanısı iyon kaynağından çıkan demetin DEDA hattı aracılığıyla RF kovuğuna aktarılardan özelliklerinin belirlenmesi ve hattın bileşenlerinin demet yapısına göre belirlenmesini hedeflemektedir. Demetin profili, x ve y eksenlerinde faz uzayı, yayını ve akımı hesaplanacaktır. Demet tanısı yapabilmek için öncelikle DEDA hattı tasarımına girdi olacak demet verisi IBSimu programına yazılan algoritma ile elde edilmiştir. Program, elektron veya proton gibi parçacıkları iki boyutlu, üç boyutlu ve silindirik koordinatlarda takip edebilir. Sonlu farklar methodu kullanarak ve uzay yükü etkisini dahil ederek Poisson Denklemini çözer. IBSimu için gereken bazı giriş parametreleri, parçacık durgun kütlesi, demet akım yoğunluğu, demet boyutları, demet sapması, demet geometrisi, parçacıkların başlangıç enerjisi, elektrik potansiyelleri ve varsa manyetik alanıdır. Elektrod tasarımları kullanılarak verilen parametrelere uygun yüksek parçacık sayısına

sahip demet dosyası üretilerek benzetimlerde girdi olarak kullanılmıştır. Bu demet dosyası demetin x ve y eksenlerinde konum, açı bilgilerinin yanı sıra parçacıkların momentum değişimi, hız değişim vs. bilgilerini içeren veri dizisidir. Şekil 4.2'de örnek olarak bu dosyalardan birinin ilk satırları verilmiştir. Bu çalışma kapsamında benzetimler farklı parçacık sayıları ile yapılmıştır. Yüksek parçacıklı sayılı demet dosyaları ile elde edilen sonuçlarla en gerçekçi değerlere ulaşılabilmektedir. Demet verisi oluştururken, farklı demetler oluşturularak iyon kaynağı çıkışında beklenen demeti tanımlamaya çalışılmıştır. Farklı demet akımı olan dosyalar, elektrotlar arası mesafenin değiştirilerek elde edilmiş dosyalar ve farklı enerjiye sahip demet dosyaları iyon kaynağından iletim matrislerine maruz bırakılarak RFQ kovuğunun girişine uygun demet verisi elde edilmeye çalışılmıştır. 1 milyon parçacıklı 1,5 mA akımlı demetin iyon kaynağı çıkışını ve 2 metrelik demet hattı ilerleyişini gösteren verilere aşağıda yer verilecektir. DEDA hattı



Şekil 4.2 üst: IBSimu çıktı dosyası örneği, alt: IBSimu demet grafiği

bileşenlerinin demete etkilerini görebilmek için yapılan benzetimle proton hattında ilerleyen demet benzetimleri yapılmıştır. Demetin davranışını yorumlayıp yayılım hesapları yapabilmek için parçacıkların hızlandırıcı içerisindeki davranışlarına bakılmalı ve benzetimlerin buna göre yapılması gerekmektedir. Parçacıkların maruz kaldığı kuvvetlerin etkisiyle RFQ kovuğuna kılavuzlanması hedeflenmektedir. Bölüm 2.5'de detaylandırılan denklemler kullanılarak sürüklenme ve odaklayıcı matris parametreleri Python programı kullanılarak hesaplanmıştır. Python dilinde geliştirilen algoritma ile parçacıkların konum ve momentumlarındaki değişikliklere doğrusal optik yaklaşımla modelleme yapılabilir. Bunun için konumların matris dönüşümleri yapılır. 2.6 bölümünde verilen bilgilere göre parçacığın hareketi üzerine herhangi bir etki etmeksizin (yani elektrik alan ve manyetik alan olmayan bir alanda) vakum borusu içerisinde doğrusal bir yol izlerler. Sürüklenme matrisi bu doğrusal hareketi tanımlar ve demetin geometrik özelliklerini hesaplamak için kullanılır. Sürüklenme boyunca hareket ederken, parçacığın konumu doğrusal



Şekil 4.3 KAHVELab proton hattı bileşenleri sürüklenme ve odaklama uzunlukları

olarak değişir, ancak açısal dağılımı sabit kalır. [2.6](#) bölümünde denklem [4.1](#)'de verilen sürüklenme matrisini IBSimu ile elde edilen demet bilgisine (x_0, x'_0, y_0, y'_0) uyguladığımızda parçacıklarımızın yeni konum ve açı bilgisini (x, x', y, y') elde etmiş bulunuruz.

$$\begin{bmatrix} x \\ x' \\ y \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & L & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_0 \\ x'_0 \\ y_0 \\ y'_0 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

KAHVELab proton hattında IS'nın toprak elektrodunun dış yüzeyinden ($z=0$ noktası) SOL1'in etkin uzunluğunun başlangıcına kadar olan mesafe ($L1 = 0,1745$ m) uygulanacak ilk sürüklenme matrisinin parametresidir. SOL1 etkin uzunluğunun bitiminden PPP'a kadar ($L2 = 0,305$ m), Eğer MBOX elemanları kullanılmayacak ise parçacıkların ilerleyeceği uzunluk ($L5 = 0,854$ m), ölçüm alınacak ise yayılım hesabında kullanılacak olan ($L3 = 0,1235$ m) SS ile PPP arası uzunluktur. SOL2'den RFQ girişine kadar olan uzunluk ise ($L4 = 0,31$ m) demete DEDA hattı boyunca uygulanacak son sürüklenme bölgesidir. Şekil [4.3](#)'de bu sürüklenme bölgeleri gösterilmektedir. DEDA hattı üzerinde odaklayıcı olarak kullanılan solenoidlere uygulanacak akımın demete etkisi de benzetim çalışmaları ile gözlenmiştir. SOL1 e uygulanan manyetik alanın demet çapına etkisi tablo

4.1’de verilmiştir. Demet yayılımı hesabı yapılırken SOL1’in manyetik alan etkisi de göz önünde bulundurulacaktır. Yayılımı hesabı için kullanılan delikli plaka yönteminde demetin ekran üzerinde kalacak şekilde ıraksak olması, demet borusuna çarpıp kayıp olmayacak şekilde de odaklı olması gerekmektedir. Bu nedenle hem deneysel hem de benzetim çalışması sonuçlarına göre SOL1 odaklayıcısına uygulanacak manyetik alan için gereken akım değeri 18,30A olarak belirlenmiştir. DEDA hattında bulunan SOL1 ve SOL2 odaklama gradyan değeri k, Python

Benzetim no	SOL1 I[A]	Demet çapı[mm]
1	17	26
2	17,30	22
3	18	20
4	18,10	17,6
5	18,20	16,4
3	18,30	14
4	18,50	12
5	19	12
5	19,30	8

Tablo 4.1 Farklı SOL1 manyetik alan değerlerinin demet çapına etkisi

kodu aracılığıyla bölüm 2.5’de verilen Lorentz kuvveti çıkarımları kullanılarak hesaplanır. 4.2 denklemini tekrar düzenleyip yazarız:

$$B\rho = \frac{pc}{q} = \frac{\beta_{rel.} E_T}{q} \quad (4.2)$$

Gerekli düzenlemeler yapıldığında;

$$B\rho[T.m] = \frac{10}{2.998} \beta_{rel.} E_T[GeV] \quad (4.3)$$

Burada $E = 20 \cdot 10^{-6}$ [GeV], $E_T = 938 \cdot 10^{-3}$ [GeV] olduğundan $B\rho = 3,3356$ bulunur. SOL1 için $B = 0,183$ [T] ve SOL2 için $B = 0,19$ [T] manyetik alan değerleri için k değerleri hesaplandı.

$$k = \frac{B}{2B\rho E_T \beta_{rel.}} \quad (4.4)$$

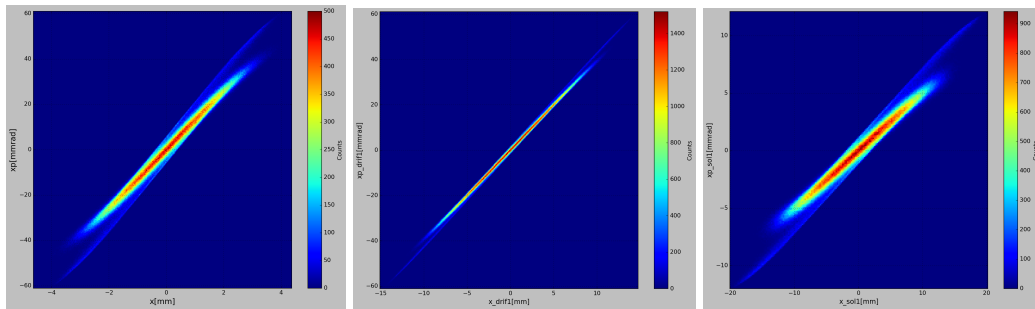
Denklemin 4.4’de değerler yerine yazılarak hesaplandığında, $k_{SOL1} = 4,49$ $k_{SOL2} = 4,89$ olarak bulunmuştur. Solenoidlerin etkin uzunları $l_{eff} = 0,14$ [m]’dir. $\varphi = k_{SOL1} \cdot l_{eff}$ eşitliği yapılarak python algoritmasında ilk sürüklenme matrisinden sonra demete SOL1 odaklayıcı matrisi uygulanır. RFQ girişine kadar diğer sürüklenme ve SOL2

matrisleri demete uygulanarak demetin kılavuzlanması sağlanır.

$$\begin{bmatrix} x_{sol} \\ x'_{sol} \\ y_{sol} \\ y'_{sol} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2 \varphi & \frac{\sin \varphi \cos \varphi}{k} & \sin \varphi \cos \varphi & \frac{\sin^2 \varphi}{k} \\ -k \sin \varphi \cos \varphi & \cos^2 \varphi & -k \sin^2 \varphi & \sin \varphi \cos \varphi \\ -\sin \varphi \cos \varphi & -\frac{\sin^2 \varphi}{k} & \cos^2 \varphi & \frac{\sin \varphi \cos \varphi}{k} \\ -k \sin^2 \varphi & -\sin \varphi \cos \varphi & -k \cos \varphi \sin \varphi & \cos^2 \varphi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ x' \\ y \\ y' \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

4.1.1 Faz Uzaı

Yayınım, parçacık demetinin faz uzayındaki "dağılımını" veya "yayılımını" ölçen bir parametre olduğunu buraya kadar detaylıca bahsettik. Bu bölümde ise demet bilgilerinin kullanılarak elde edilen faz uzayı grafiklerine yer verilecektir. İletim matrislerin etkisinin de net bir şekilde gözlemlenebileceği bu grafikler DEDA hattı bileşenlerinin hemen sonrasında şekil 4.3 de yer alan konumlar baz alarak yapılan benzetim sonuçları ile elde edilmiştir. Düşük yayınım, demetin faz uzayında daha sıkı bir şekilde toplandığını, yani parçacıkların konum ve momentum (veya hız) açısından daha az dağıldığını göstermiştir. Bu, demetin yüksek kalitede olduğunu ve demet odaklama veya yönlendirme işlemleri sırasında daha az bozulma yaşayacağını belirtir. İK çıkışından itibaren Python c3pA kodu ile yapılan benzetim çalışmalarında iyon kaynağı çıkışından alınan veriler ile faz uzayı grafiği şekil 4.3 solda, L1 sürüklenme matrisi uygulanarak elde edilen faz uzayı grafiği ise ortada bulunmaktadır. Sağda bulunan grafikte ise SOL1 matrisi (l_{eff}) uzunluğu kadar uygulanarak elde edilen faz uzayı görüntüsü verilmektedir.

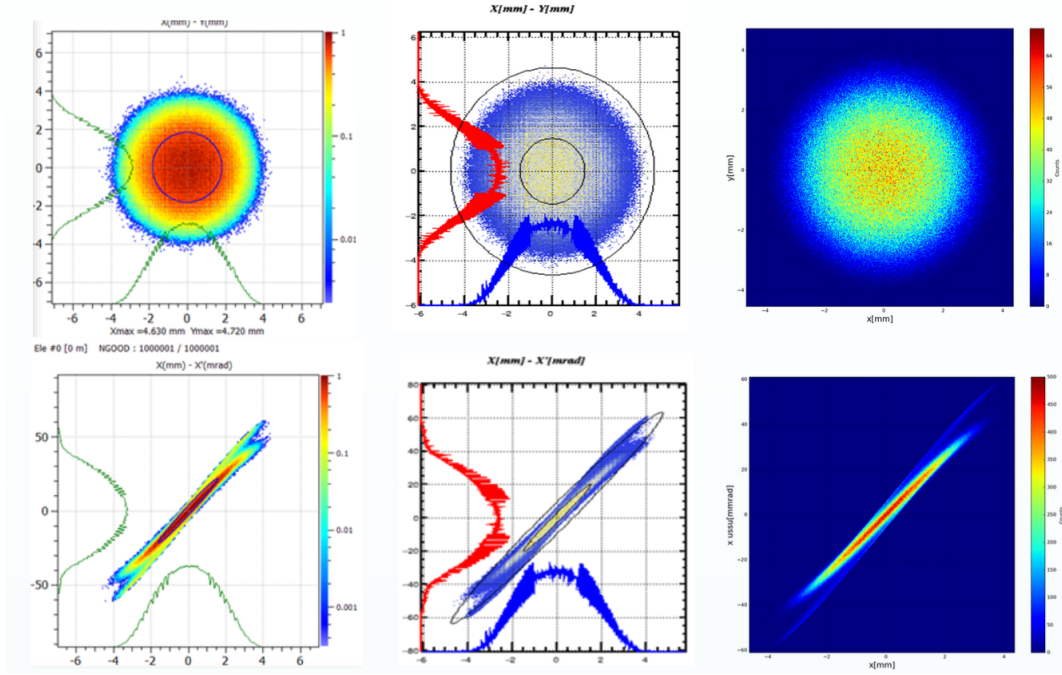


Şekil 4.4 Soldaki grafik İK çıkışında, ortadaki grafik L1 sürüklenme sonrası, sağdaki grafik ise SOL1 sonrasında

4.1.2 Demet Profili Benzetim ve Ölçümler

DEDA hattı üzerinde demet çapı ve profilinin ölçülebilmesi için çeşitli konumlara eklenen floresan ekranlara proton demeti düşürülmüştür. Bunun nedeni iyon kaynağından çıkan demetin beklenen demet olup olmadığı, DEDA hattı ile

RFQ'ya iletilecek demetin kayıplarının olup olmadığını tespit edebilmektir. Bu ölçüm ve benzetimler için 20 keV enerjili, yaklaşık 1,2 mA'lık akıma sahip demet kullanılmaktadır. IK çıkışından demet verisinin farklı programlar ile benzetimlerinin yapılması ve bu benzetimlerden elde edilen demet profili görüntüleri şekil 4.5'de gösterilmektedir. IK çıkışındaki demet için yapılan benzetim sonuçlarına göre hesaplanan yayılım ve twiss parametreleri tablo 4.2'de verilmiştir. DEDA hattı üzerinde MBOX içerisinden ölçüm yapabilmek



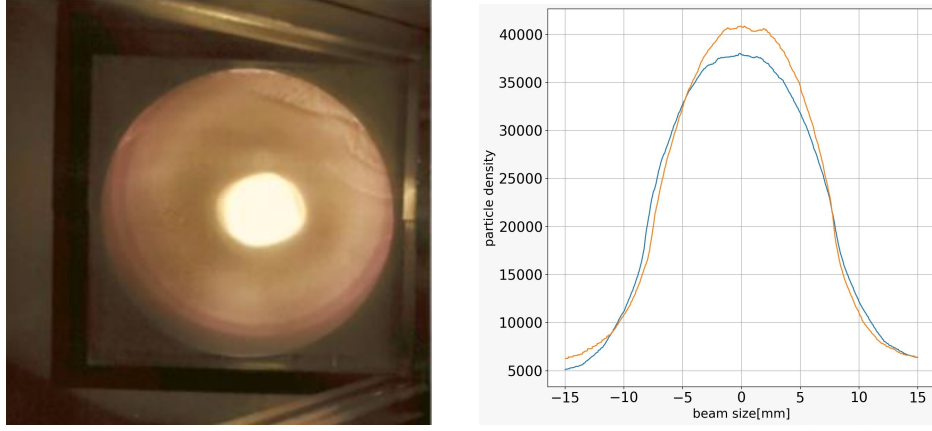
Şekil 4.5 İyon kaynağı çıkışında demetin üç farklı program çıktısı ile demet profili

	PlotWin	DemirciPro	Python
ϵ_{norm} (π mm.mrad)	0,0299	0,0297	0,0298
α	-6,41	-6,41	-6,41
β (mm/ π .mrad)	0,47	0,47	0,47

Tablo 4.2 İyon kaynağı çıkışında demetin üç farklı program ile benzetim sonuçlarının karşılaştırması.

için şekil 2.14'de gösterilen ölçüm şemasından sadece bir algıcın kullanılması gerekmektedir. Floresan ekran ve ekrana 45 derece açılı konumlanan ayna düzeneğin bağlı olduğu piston, demetin hizasına demete dik olacak şekilde kutu içerisine indirilmiştir. Proton demeti ekrana düşer ve aynaya yansır. Gözlenen demet ışıma görüntüsü, bir dijital kamera ile kaydedilmiştir. RAW formatında kaydedilen fotoğraf görüntüsü c3pA kodu ile analiz edilmiştir. JPEG veri sıkıştırma algoritmaları nedeniyle oluşabilecek herhangi bir veri kaybını önlemek için ham kayıt formatı tercih edilmiştir. Şekil 4.6'da sol tarafında MBOX ekranından alınan

bir görüntü verilmektedir. Bu görüntü, Python OpenCV kütüphanesi kullanılarak okunmuştur. X ve Y izdüşümlerini elde etmek için iki boyutlu bir yoğunluk histogramına çevrilmiş grafik ise sağ tarafta gösterilmektedir. Fotoğraf analizi

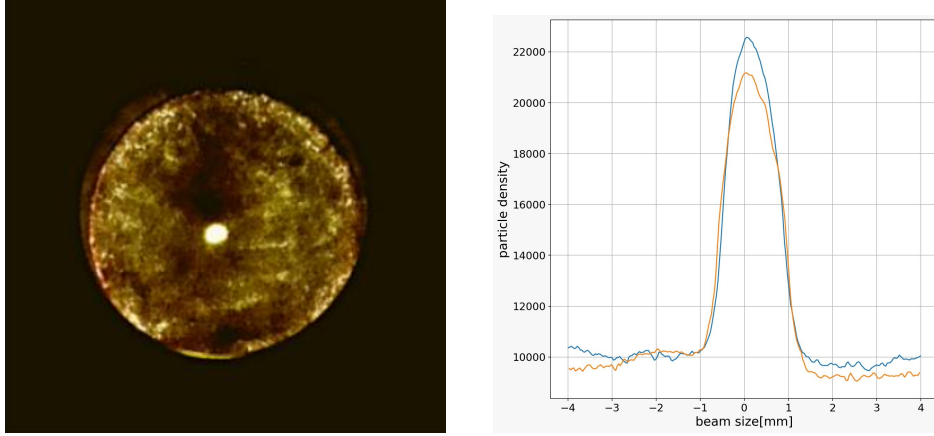


Şekil 4.6 MBOX içerisinde demet profili, sağda ise x,y izdüşümleri

için kalibrasyon yapmak gereklidir. Bu piksel boyutlarının milimetre cinsinden uzunluğa dönüşümü ile yapılır. Ayna çerçevesinin bilinen kenar uzunlukları kullanılarak bu dönüşüm yapılır. Dağılımların hafifçe eksenden sapmış olduğu ve X'in daha geniş bir demet genişliğine sahip olduğu gözlemlenir. Demet çapını tahmin etmek için, Tam Genişlikte Yarı Maksimum (FWHM) hesaplaması kullanılır.

$$FWHM = 2\sqrt{2 \ln 2} \cdot \sigma$$

X ve Y eksenleri için sırasıyla 14 ve 13 mm elde edilir. σ değeri, demetin genişliğini ifade eder. Bu histogramı, Gauss ve hiperbolik sekant fonksiyonları ile inceleyebiliriz. Böylelikle veri noktalarını veriye uygun şekilde tahmin edebiliriz. Gauss fonksiyonu verilerin altını, hiperbolik sekant fonksiyonu ise üstünü tahmin etmektedir. Bu durumda, demet genişliğini (σ) daha doğru bir şekilde tahmin etmek için Yarı Maksimumda Tam Genişlik (FWHM) ile σ arasındaki lineer ilişki kullanılır. Bu ilişki için Gauss fonksiyonu için 2,355 ve hiperbolik sekant fonksiyonu için 2,634 olmak üzere ortalama korelasyon sabitleri alınır. Bu sabitler, FWHM ile σ arasındaki dönüşümü sağlar. X ve Y eksenleri için demet boyutu tahmini sırasıyla 5,6 mm ve 5,2 mm olarak hesaplanmıştır. DemirciPro'da yapılan proton demetinin simülasyonu, ekran konumunda beklenen RMS demet zarfını her iki ekseninde de 5,1 mm olarak verir. Uzay yükü etkisi ile demet daha geniş bir görünümde olacaktır. DemirciPro'nun uzay yükü etkilerini ihmal ettiği için böyle bir fark oluşması beklenmektedir. Bu durumda deneysel sonuçlar ve benzetimler arasındaki tutarlılık, kullanılan metodolojinin geçerliliğini gösterir. SOL2 sonrası vakum borusuna eklenen 50mm çaplı dairesel floresan ekran demet yönünün tam karşısına konumlandırılmıştır. DEDA hattı sonunda odaklanmış demetin demet



Şekil 4.7 SOL2 sonrasında alınan demet profili, sağda ise x,y izdüşümleri

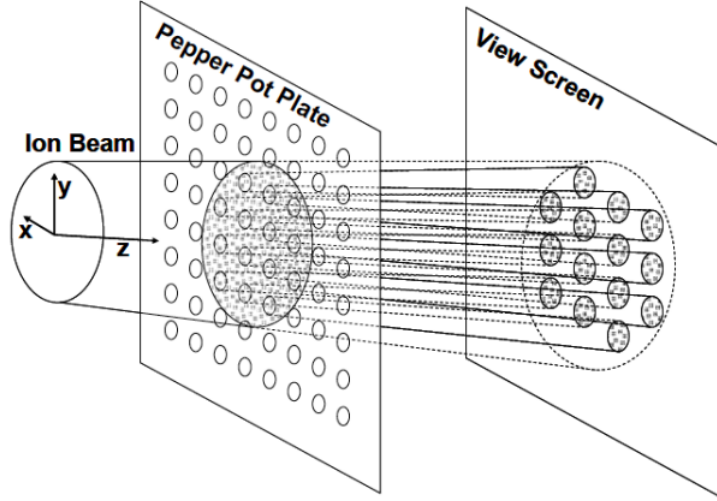
profili elde etmek için ölçüm düzeneği hazırlanmıştır. Ölçüm alınan bu konum RFQ giriş noktasına yakın olduğu için beklenen RFQ giriş parametrelerine uygun sonuçlar elde etmek olacaktır. DEDA sonundan ekranın tam karşısından alınan fotoğrafik görüntü c3pA kodu ile analiz edilmiştir. Şekil 4.7'nin sol tarafında çekilen fotoğraf, sağ tarafında ise x, y izdüşümlerin histogramları gösterilmiştir. MBOX içerisinde ve SOL2 sonrasında kullanılan ekranların yapımda prosedür farkı olduğu için homojenlikleri farklıdır. SOL2 sonrasında kullanılan ekranda floresan tozu yapıştırıcısı olarak şeker kullanılmıştır. Floresan ekranda yabancı maddelerden kaynaklanan arka plan gürültüsü olmasına rağmen demet sinyalin maksimum yüksekliğinin merkezi konumda olduğu görülmektedir. Demetin FWHM'si, hem X hem de Y yönleri için yaklaşık 1,5 mm olarak ölçülmüştür. SOL2 odaklayıcısına farklı manyetik alan uygulayarak demeti daha fazla odaklamaya çalışılmıştır.

	Benzetim	Ölçüm
ϵ_{norm} (π mm.mrad)	0,030	0,029
α	-5,17	-18,9
β (mm / π .mrad)	1,33	2,13

Tablo 4.3 MBOX içerisi floresan ekran konumundan yayınım ve twiss parametreleri

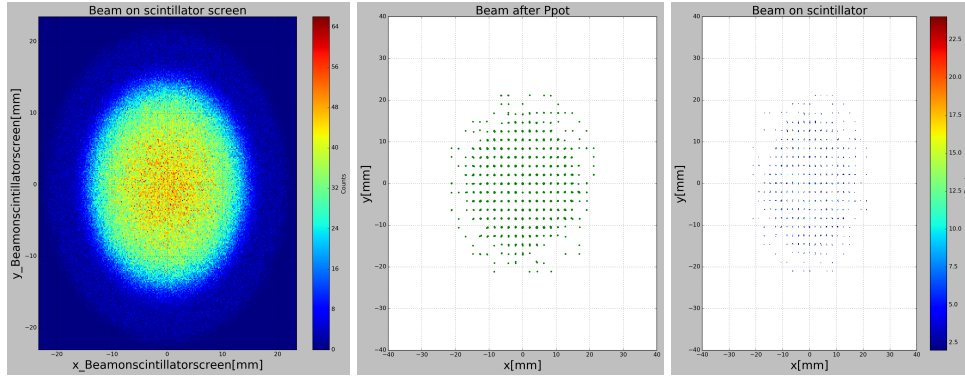
4.1.3 Yayınım Hesabı Benzetim ve Ölçümler

Pepper Pot (PP) yayınım ölçüm yöntemi, hem yatay hem de dikey yayınımları aynı anda ölçmenin bir yoludur. PP, demeti iki boyutlu bir delikli plaka aracılığıyla örnekleyen ve fotoğrafik görüntülerden demet parametrelerinin ölçülmesine izin veren bir cihazdır. Yazılan c3pA algoritması ile yayınım hesabı benzetim ve ölçüm sonuçları için kullanılabilir. SOL1 den sonra sürüklenme matrisi uygulanan proton demeti MBOX içerisinde ilerlerken önce delikli plaka ile karşılaşır. Proton



Şekil 4.8 PP yöntemi ile yayılım hesabının şeması

demetinin plaka ile karşılaşması parçacıkların bir kısmının ise delikler arasına denk geldiği için yok olmasıyla, bir kısmının ise deliklerden geçerek hatta ilerlemeye devam etmesiyle sonuçlanır. PP aracılığıyla hem yatay hem de dikey olarak deliklerden geçerek hayatta kalan parçacıklar, şekil 4.9'un ortasındaki grafikte gösterilmektedir. Parçacıklar demet hızlanma doğrultusunda ilerleyerek ikinci algıç olan floresan ekrana vuracak şekilde sürüklenir. Ekranda olması beklenen görüntü şekil 4.9'un sağındaki grafikte gösterilmiştir. Benzetimi yapılan makro



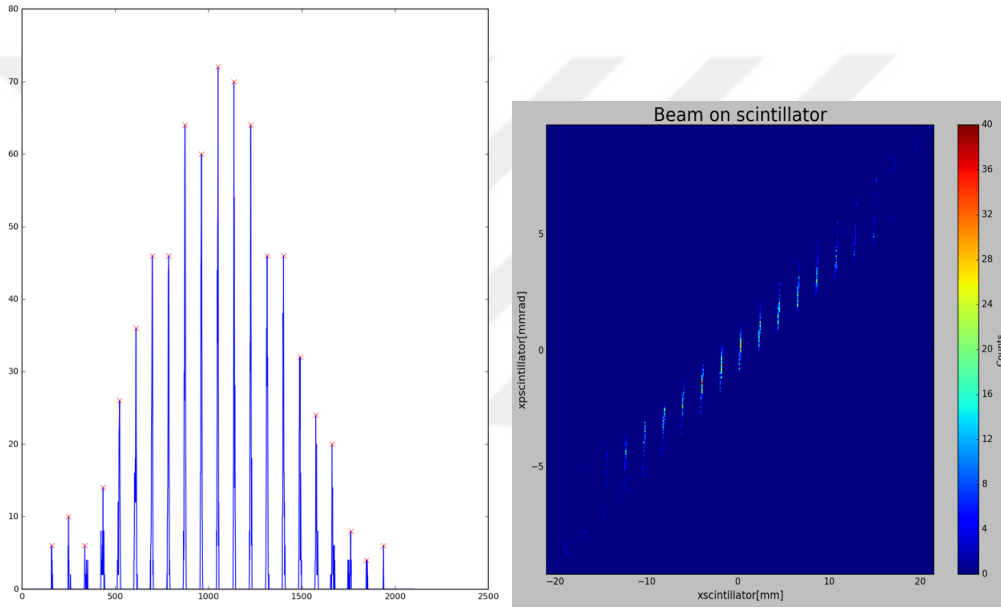
Şekil 4.9 PP plakasından geçmeden direkt ekranda olması gereken demetin profili solda, PP plaka deliklerinden geçen parçacıkların grafiği ortada, PP deliklerinden geçtikten sonra ekranda beklenen görüntü sağdaki grafikte gösterilmiştir.

parçacıkların (x_i, y_i) koordinatları için, eğer her makro parçacık aşağıdaki koşulu sağlarsa, her bir deliklerin bulunduğu (x_{ph_j}, y_{ph_k}) konumundaki PP plakasından geçecektir:

$$(x_i - x_{ph_j})^2 + (y_i - y_{ph_k})^2 < r^2.$$

Elde edilen demetçik görüntüsünden faz uzayının yeniden yapılandırılması gerekmektedir. Bu aşama için parçacıkların konum, açı ve yoğunluk bilgisi

gerekmektedir. Bundan önceki tüm çalışmalar IBSimu programıyla elde edilen demet bilgileri ile yapılmaktaydı. Yeniden yapılandırma işleminde konum açısı ve yoğunluk bilgisini bilinen parametreler ile bağdaştırarak belirleyebiliriz. Parçacıkların konumları, PP plakası üzerinde bulunan deliklerin merkezleri olarak kabul edilir. Bir diğer açı bilgisi için, demetçikler floresan ekran üzerinde dairesel lekeler oluşturur. Her daireye karşılık gelen delik konumları lekeler ile eşleştirilerek açı bilgisi belirlenebilir. Son olarak ihtiyaç duyulan bilgi ise yoğunluktur. Ekrandan yansıyan ışılda görselleştirilerek 2 boyutlu x ve y izdüşümlerinde histograma çevrilir. Histogram, her bir delikten geçen parçacıkların o konumdaki yoğunluklarını veren grafiklerdir. Şekil 4.10'da sağda verilen ekrandaki demetçiklerin oluşturduğu histogram, solda ise faz uzayı grafiği verilmektedir. Bu



Şekil 4.10 PP yöntemi ile ekrandan alınan demet fotoğrafı

durumda, (x_i, y_i) koordinatına sahip benzetimi yapılan makro parçacığın varsayımı, delik merkezinin (x_{ph_j}, y_{ph_k}) koordinatına sahip olacaktır. O zaman, bu makro parçacıkla ilişkili açı şu şekilde hesaplanacaktır:

$$x'_{i,new} = \arctan \left(\frac{x_i + x'_i \cdot L}{L} \right),$$

Bu hesaplar y eksenini için de geçerlidir. PP ile SS arasındaki mesafe bilindiği için, yani L olduğunda, işaretlenen ışıncıklar sapma açıları verir. Açılar $(x'_{i,new})$ ve konumlar (x_{ph_j}) kullanılarak, geometrik yayılım ve Twiss parametreleri RMS yayılım formülüne dahil edilir:

$$\epsilon_{x,g}^2 = \langle (x_{ph_j})^2 \rangle \langle (x'_{i,new})^2 \rangle - \langle (x_{ph_j}) \cdot (x'_{i,new}) \rangle^2.$$

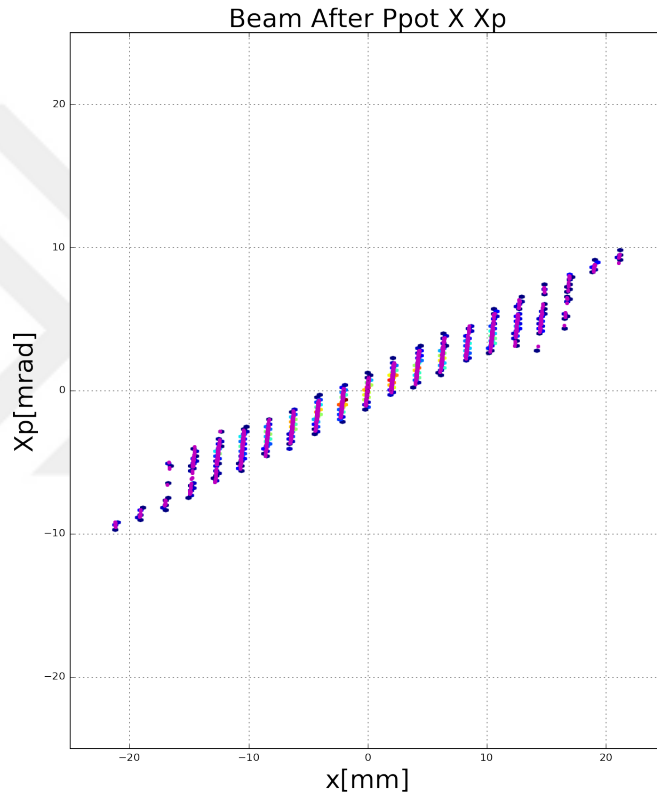
Yapılan benzetimler ile tuzluk parametreleri belirlenmiştir. Bu parametreler belli koşulları sağlayıp sağlamaması açısından önemlidir. Yöntemin doğru hesap yapması için istenen koşullar ve plaka gereksinimleri şu şekildedir; Her bir deliğin diğer deliğe olan mesafesi, sistemin mekansal çözünürlüğünü belirler. Mekansal çözünürlük ne kadar yüksekse, ona orantılı olarak o kadar küçük detay bilgisine ulaşılabilmektedir. Bu nedenle, daha yüksek çözünürlük elde etmek için delikler arası mesafenin az olması hem de mümkün olduğunca çok sayıda olması tercih edilmektedir. Daha küçük çaplı delikler, daha az parçacığın geçmesine izin verir. Bu da demetçiklerin merkezinde beklenen yoğunluklarının düşebileceği anlamına gelir. Bu durum, demetçiklerin (demetten alınan küçük demet parçaları) birbirleri üzerine binme (overlap) olasılığını da artırır, ki bu da PP yönteminin en büyük sorunlarından biridir. Delik konumlarının yakınlığı, floresan ekranındaki lekelerin üst üste gelme olasılığını artırır. Bu, ölçümlerin doğruluğunu azaltır ve hatalı sonuçlara yol açabilir. PP ile floresan ekran arasındaki mesafenin (L) ayarlanması ve hatta tasarımın ayarlanabilir olarak yapılması hem demetçik üst üste gelmesini önlemek hem de yoğunluk kaybını önlemek için önemlidir. Bu, demetin daha iyi yayılımını ve dolayısıyla daha iyi açısal çözünürlüğe sahip olmasını sağlamaktadır. L değerini belirleyebilmek için, farklı mesafe değerleri ile makroparçacıklı demet dosyası kullanılarak benzetim çalışmaları yapılmıştır. Yapılan benzetim çalışmalarının bir kısmı 4.4'te verilmiştir. Mesafe arttıkça, her delikten çıkan demetçikler ekran üzerinde daha geniş bir alana yayılır, bu da ölçümün çözünürlüğünü artırır. Bu, özellikle düşük yayınıma sahip demetler için önemlidir, çünkü daha büyük bir mesafe, daha hassas ölçümler yapılmasını sağlar. Eğer mesafe çok kısa ise, deliklerden çıkan demetçikler ekran üzerinde yeterince yayılmayabilir ve bu da parçacıkların açısal dağılımını doğru bir şekilde ölçmeyi zorlaştırabilir. Tersine, çok uzun bir mesafe, özellikle yüksek yayınıma sahip demetler için deliklerden geçen demet deseninin ekranın dışına taşmasına sebebiyet verebilir. PP plakasının delik çapları ve L mesafenin hassasiyetinin ölçüm sonuçları üzerinde önemli etkilere sahip olabileceği gözlenmiştir. L mesafesi arttıkça gerçek yayınım değeri yaklaşık olarak elde edilmiştir. PP plakasının etkin

L3[cm]	L=5	L=7.5	L=10	L=12	L=12,25	L=12.35
$\epsilon_{rms} (\pi \text{ mm.mrad})$	5,71	5,05	4,80	4,60	4,58	4,55
$\epsilon_{norm} (\pi \text{ mm.mrad})$	0,037	0,033	0,031	0,030	0,030	0,029
α	-3,77	-4,36	-4,65	-4,77	-4,77	-4,78
$\beta (\text{mm} / \pi . \text{mrad})$	0,94	1,09	1,16	1,19	1,2	1,28
$x_{rms} (\text{mm})$	7,34	7,42	7,46	7,40	7,39	7,35

Tablo 4.4 PP plakası ile ekran arasındaki farklı mesafeler için hesaplanan yayınım ve twiss parametreleri

bir şekilde çalışabilmesi için, delik boyutu ve mesafesi, demetçik yoğunlukları ve

görüntüleme ekranının konumu gibi faktörlerin optimal bir şekilde ayarlanması gerekir. Bu nedenle yapılan benzetim çalışmaları önem arz etmektedir. Benzetim çalışmalarından sonra, 21x21 delik sayılı, delik çapı $100\ \mu m$, plaka kalınlığı $250\ \mu m$ ve delikler arası mesafe 2 mm olacak şekilde üretmeye karar verilmiştir. PP plakası ile floresan ekranı arasındaki mesafe (L), iyon kaynağından gelen proton demetinin ıraksak olduğu ve demet çapı beklentisi için 5 cm ile 20 cm arasındaki değerlerde benzetimler yapılmıştır. 10 cm üzerinde benzetim verilerinin daha kabul edilebilir olduğu, mesafenin artması gerektiği görülmüştür. MBOX iç uzunluğu ve FK uzunluğu dikkate alınarak L için maksimum verilecek değer 12,35 cm'dir. Yapılan benzetim çalışmalarında demetin delikli plakadan geçtikten sonra

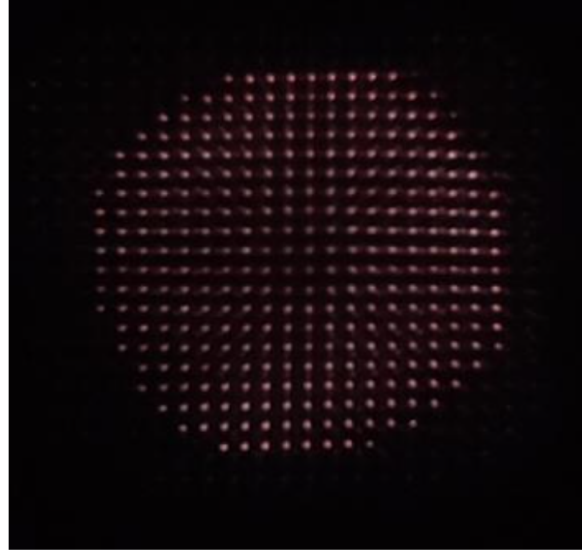


Şekil 4.11 Benzetim ve yeniden hesaplama ile elde edilen faz uzayı grafiği

oluşturulan faz uzayı grafiğine ek olarak deliklerden geçen parçacıkların verileri kullanılarak yeniden hesaplama yöntemi ile tekrar oluşturulmuştur ve yayılım hesabı yapılmıştır. Fotoğraf analizinde yapılan yayılım hesabı bu algoritma kullanılarak oluşturulmuştur. Şekil 4.11'de verilen grafikte renkli noktalar ile gösterilen benzetim çıktısı, pembe noktalar ile gösterilen yeniden hesaplama yöntemi ile elde edilen veri serisidir.

4.2 Fotoğraf Analizi

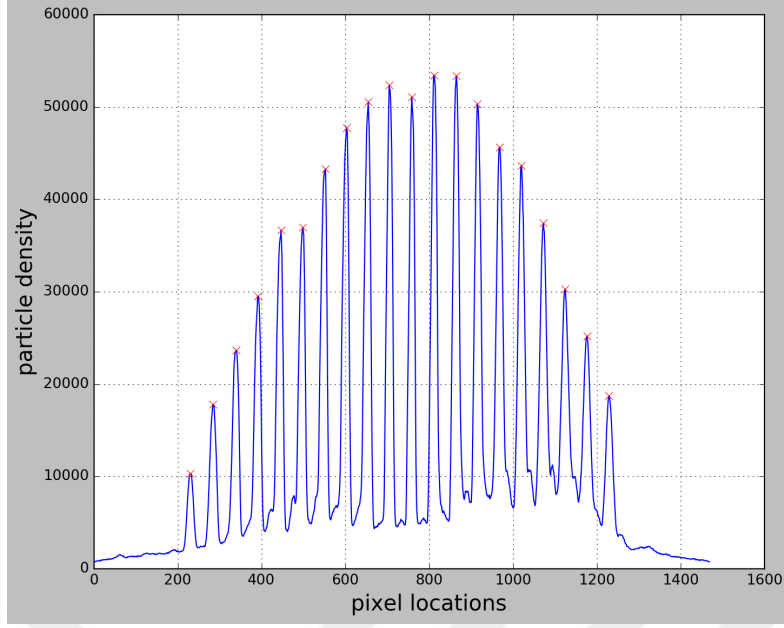
Benzetim çalışmasına ek olarak Python'da yazılan c3pA içerisine veri okuma algoritması eklenerek çekilen fotoğrafların analizi yapılmıştır. Benzetimde kullanılan benzer kod analizde de kullanılmıştır. Bu ölçüm sırasında demet görüntüsü, dijital kamera ile alınmıştır. Şekil 4.12'de çekilen bir demet fotoğrafı verilmektedir.



Şekil 4.12 SS'den alınan gerçek proton demeti fotoğrafı

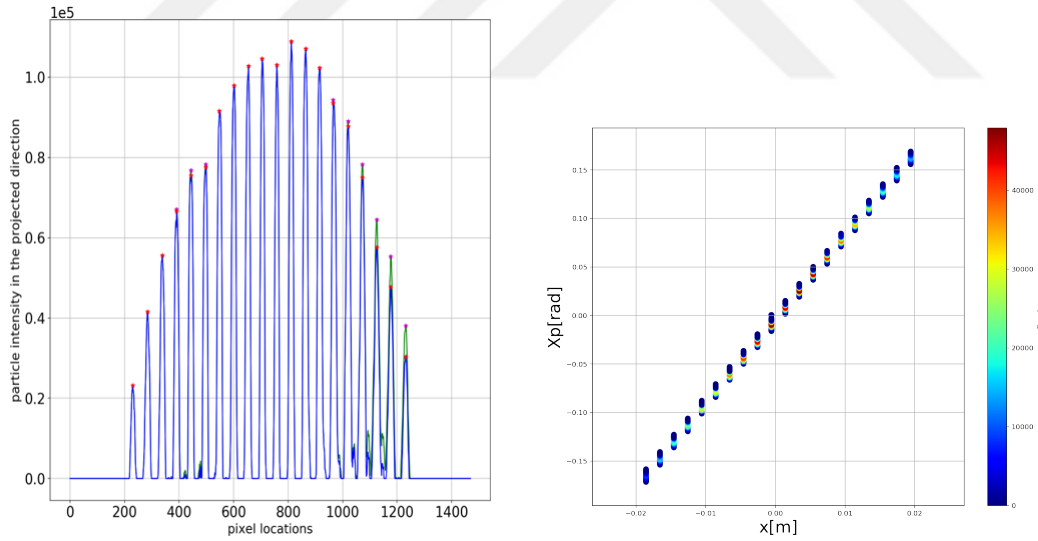
Ölçüm yapıp kamera ile çekilen fotoğraf bilgisayara yüklendikten sonra görüntü dosyası Python OpenCV kütüphanesi kullanılarak okunur ve iki boyutlu yoğunluk histogramına dönüştürülür. Yoğunluk histogramının X ve Y izdüşümleri, aynı zamanda bir miktar arka plan gürültüsünü de içeren dağılımlar şeklinde verilir. Bu dağılımlar, şekil 4.12'de görüldüğü gibi her bir delikten geçen demetçikler ekranda dairelerden elde edilir.

Normal dağılıma sahip bu veri setinin piklerini(tepe noktalarını) bulmak ve bu tepe noktalarını görselleştirmek için python algoritmasında *find – peaks* fonksiyonu kullanılır. Şekil 4.13'de tepe noktaları kırmızı yıldızla belirtilmiştir. Yazılan algoritma ile tepe noktaları arasındaki ortalama piksel aralığını hesaplayabilmekteyiz. Dağılımda bulunan arka planı tahmin etmek ve çıkarmak için birden fazla yöntem vardır. Bu analizde kullanacağımız yöntem; İki ardışık pik arasındaki bu minimum noktaları(vadileri) birleştiren düz çizgi segmentidir. Bu çizgi, pikler arasındaki arka planın yaklaşık seviyesini temsil eder ve bu seviye, sinyal dağılımından çıkarılarak gerçek sinyal dağılımını daha net bir şekilde elde etmek için kullanılır. Grafiğin analizi sırasında, bu çizgi parçaları sayesinde her pikin altında kalan gerçek sinyal miktarı daha net bir şekilde belirlenebilir. Yani, her bir pikin altındaki arka plan sinyali, ilgili çizgi parçası



Şekil 4.13 Çekilen fotoğrafın python algoritmasında elde edilen ilk dağılım ve belirlenen tepe noktaları

kullanılarak hesaplanır ve toplam sinyalden çıkarılır. Böylelikle, dağılımlardan arka plan gürültüsü temizlenir. Çekilen fotoğrafın, histogramı şekil 4.14’de verilmiştir.



Şekil 4.14 c3pA algoritması ile analiz edilen fotoğrafın konum,yoğunluk histogramı. Sağda ise faz uzayı grafiği bulunmaktadır.

Histogramda gürültüyü çıkartmak için uygulanan fit sonrası arka planın çıkmış hali için mavi çizgiler, pikler ise kırmızı yıldız ile belirtilmiştir. Arka planlı hali ise yeşil çizgi ve pikler mor yıldız ile belirtilmiştir. Birden fazla gerçek demetçik adayı olmasına rağmen, PP’de eksen başına 21 delik olduğundan bunlardan yalnızca 21’i dikkate alınmalıdır. Prosedür, aynı görüntüde kırmızı yıldızla işaretlenmiş merkezi ve en parlak tepe noktalarını dikkate almaktır. Bu nedenle protonların geçtiği

deliğin orta konumu ilgili demetçik konumu olarak kabul edilir. Fotoğraf analizi ile elde edilen konum yoğunluk ve açı parametreleri kullanılarak çizdirilen faz uzayı grafiği sağda verilmiştir. Yayınım hesabı benzetim çalışmalarında yapıldığı gibi yapılmaktadır. Tablo 4.5'de fotoğraf analizi benzetim ve ölçüm sonuçlarına göre yapılan yayınım değeri, twiss parametreleri verilmiştir. Yine aynı yöntemle c3PA

	Benzetim Sonuçları		Ölçüm Sonuçları	
	X - Y		X - Y	
ϵ_{norm} (π mm.mrad)	0,029	0,029	0,0288	0,029
α	-5,11	-5,50	-5,88	-5,92
β (mm / π .mrad)	1,28	1,29	2,13	2,03

Tablo 4.5 Fotoğraf analizi benzetim ve ölçüm sonuçları karşılaştırılması.

algoritması ile analiz edilen farklı Sol-1 akım değerlerinde çekilen birden fazla fotoğrafın sonuçları, Python algoritması ve DemirciPro benzetim çalışmalarından elde edilen beklentilerle birlikte tablo 4.6'da verilmiştir. Gösterildiği gibi, SOL1'e uygulanan akım, 0,01 T alan değişikliğine karşılık gelen 17,3 ile 18,3 Amper arasında taranmıştır. Daha düşük ve daha yüksek akımlar için yapılan ölçümlerde, pepper pot yönteminin uygulanabilirliğinin kaybettiği gözlenmiştir. Daha yüksek akımlar için demet aşırı odaklanırken, daha düşük akımlar için demet ekran dışına taşacak hale gelir. Bu durumda demet, vakum boru duvar iç kenarlarına çarparak demet kayıpları meydana gelmiştir. Hem X hem de Y yönlerinde normalize edilmiş yayınımın ortalama değerleri, ilgili standart sapmalarla birlikte aynı tabloda sunulmuştur. SOL1'e 18,30A akım uygulanarak yapılan demet yayınım ölçümünde fark edebilir ki yayınım değeri X ve Y yönünde benzetim sonuçlarıyla uyumludur.

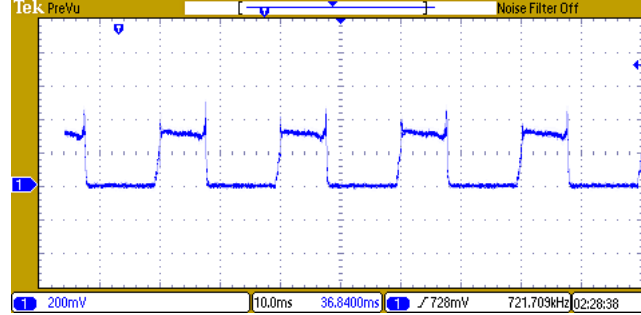
I_{Sol-1} (A)	ϵ_X (π mm.mrad)	ϵ_Y (π mm.mrad)
17,3	0,039	0,061
17,5	0,038	0,041
18,0	0,036	0,041
18,2	0,030	0,035
18,3	0,0288	0,029
Ortalama	0,0343	0,0414
Std.Dev.	0,0042	0,0108
Beklenen	0,0297	0,0297

Tablo 4.6 Farklı Sol-1 akım değerlerinde benzetimi yapılan ve hesaplanan yayınım değerleri.

4.3 Demet Akımı Benzetim ve Ölçümler

Demet akımı ölçümü, demet hattı eksenine indirilen ve yıkıcı bir ölçüm yöntemi olan Faraday Kabı (FK) kullanılarak gerçekleştirilir. Ölçümler, $z = 87$ cm

noktasında bulunan FK'dan alınan sinyali okuyan bir osiloskop aracılığıyla, bir voltaj bölücü devresi kullanılarak elde edilmiştir. Ölçüm sonuçları, 8 ms'lik bir sinyal genişliği ve 20 ms'lik bir sinyal periyodu ortaya koymaktadır. Bu veriler şekil 4.15'de bulunan sinyal görüntüsünden hesaplanmıştır.



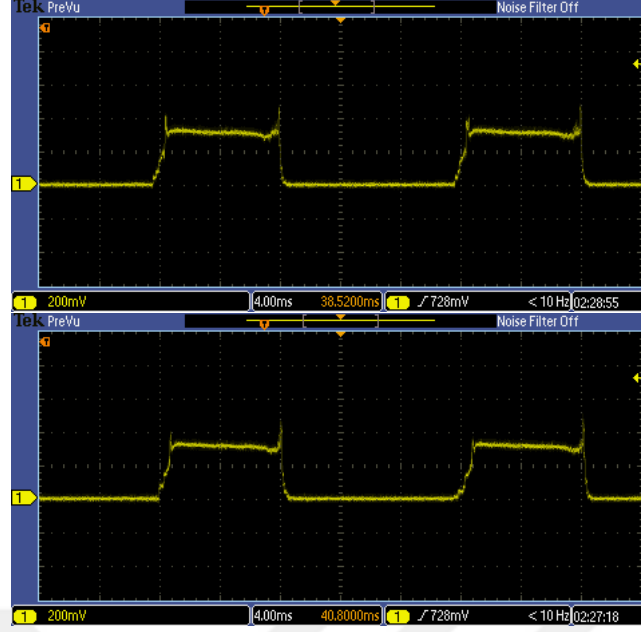
Şekil 4.15 FK ile yapılan demet akımı ölçümü osiloskop görüntüsü

$$d_f = \frac{8}{20} = 4 \quad (4.6)$$

Duty factor (görev faktörü), parçacık hızlandırıcılarında hızlandırıcıların ne kadar süreyle parçacık demetini hızlandırdığını ve ne kadar süreyle bekleme modunda olduğunu gösterir. Bu değer, periyodik sinyale sahip bir sistemin aktif olduğu sürenin toplam süreye oranı olarak hesaplanabilir. Denklem 4.6'da bu hesaplama verilmiştir. Benzer şekilde, voltaj bölücü devredeki ilgili direnç 10 kΩ olduğundan, anlık akım 0,03 mA olarak hesaplanmıştır. Ortalama akım, yüksek voltajlı güç kaynağı tarafından bildirilen değer altında, 0,012 mA olarak hesaplanır. Tasarım değeri olan 1 mA'ye kıyasla daha düşük bu pilot demet, aşağıdaki üç parametrenin aynı anda ayarlanmasıyla elde edilmektedir.

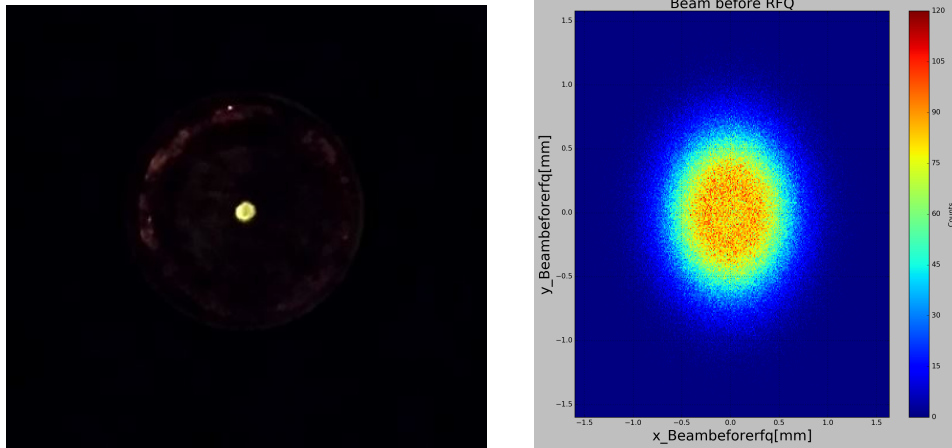
- 1) Manuel olarak kontrol edilen bir ayarlayıcı kullanılarak magnetron giriş voltajının azaltılmasıyla.
- 2) Magnetrondan sonra iletim hattında yer alan ilk saplamalı ayarlayıcının ayarlanmasıyla.
- 3) Hidrojen gazı akış hızının minimum 0,01 sccm'ye düşürülmesiyle.

Demet akımı ölçümü sırasında ikincil elektronlarından kurtulmak için ön gerilim halkasına voltaj uygulanması gerekmektedir. Bu ölçümler sırasında osiloskop sinyalleri gözlenerek ön gerilim halkası 0V iken ve -100V'dan -200V'a kadar değişen gerilimler uygulanmıştır. Şekil 4.16 üstte ön gerilim halkası 0V, alttaki görüntüde ise -200V uygulanmıştır. Bu pilot demetinin ardındaki mantık, tüm sistemi küçük bir güç kullanarak test etmek ve doğrulandıktan sonra akımı kademeli olarak artırmaktır. Bu artışla ilgili ölçümlerin, RFQ kurulumunun



Şekil 4.16 FK ile yapılan demet akımı ölçümü, üstte bias voltaj uygulanmamış, altta bias voltaj uygulanmış halleri.

tamamlanmasından sonra yapılması planlanmaktadır. Ancak, PIXE (Parçacık İndirgenmiş X-ışını Emisyonu) uygulamaları, az sayıda nA düzeylerinde bir demet akımı gerektirdiğinden, bu pilot demet bile bu amaca ulaşmak için yeterli olacaktır. Demet yükü ve görev faktörünü ölçmek için, biri tanı istasyonunda ve diğeri LEBT hattının sonunda olmak üzere, iki Faraday kabı kullanılmıştır. Her FK için, sinyali Faraday kabından toprağa bağlamak ve sinyal yüksekliğini azaltmak için seri olarak bağlanmış iki adet $10\text{ k}\Omega$ dirençten oluşan basit bir okuma devresi kullanılmıştır. Osiloskop, sinyal yüksekliğini korumak için dirençlerden biri üzerinden sinyali okumaktadır.



Şekil 4.17 SOL sonrası alınan demet görüntüsü ve benzetim sonucu

MBOX içerisinde ölçüm yapıldıktan sonra SOL2'den sonra RFQ giriş noktasına eklenen ekran ile demet tekrar görüntülenerek çapının RFQ girdisine uygun olduğu

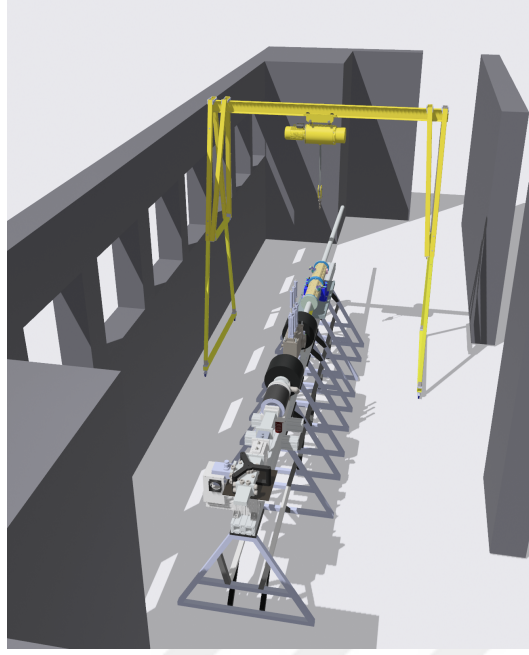
gözlendi. Şekil 4.17 sağda alınan bu demet görüntüsü verilmiştir. Python'da yapılan benzetim çalışmaları ile SOL2'den sonra alınan demet profili şekil 4.17 solda verilmiştir. Bu tez çalışması kapsamında KAHVELab bünyesinde, su soğutmalı MDIS tip iyon kaynağı kullanılarak elde edilen proton demetinin ilk basamak hızlandırıcısının kabul parametreleri belirlenmiştir. Benzetim ve ölçüm sonuçları ile sistem optimize edilerek uygun demet bilgilerinden yola çıkılmış ve DEMİRCİPro programı ile RFQ benzetimlerine başlanmıştır. Bu demet RFQ kabul parametreleri tablo 4.7'de verilmiştir.

Değişken	Değer
Giriş enerjisi (keV)	20.0
Çıkış enerjisi (MeV)	2.0
Salınım frekansı (MHz)	850.0
Değişken	Benzetim
Demet çapı (mm)	1,50
ϵ_{norm} (π mm.mrad)	0,029
α	1,08
β (mm / π .mrad)	1,28

Tablo 4.7 Demet hattı sonunda RFQ girdi parametreleri

5 SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, iyon demetleri için tasarlanmış kompakt ve maliyet-etkin bir demet tanı istasyonu tanıttık. İstasyon, demet akımı, profil ve emisyon ölçümleri için dedektörler içermektedir; bunların hepsi yerel olarak tasarlanmış ve üretilmiştir. Ayrıca, kendi kontrol ve veri analiz yazılım programlarımızı da geliştirdik. Proton hızlandırıcı bileşenlerinin kurulumu, testleri başarı ile gerçekleştirilmiş olup eklenen ölçüm kutusu ile düşük enerjili proton demet hattı kullanılarak başarılı bir şekilde test edilmiştir. Proton demetinin akımı, profili ve yayılımı için elde edilen değerler, benzetimler ve dijital görüntüleme cihazlardan alınan ham okumalar ile uyumlu bulunmuştur. Pepper Pot ile yayılım hesaplama yöntemi hem yatay hem de dikey yayımların belirlenmesi için daha kısa süre gerektirdiği için öne çıkmıştır. PP plakası ile floresan ekran arasındaki mesafeyi değiştirerek, ölçüm sistemindeki hata oranını bir noktaya kadar önlenebilir. Isınma bir sorundur ve bu nedenle, plakayı alüminyum çerçeve ile sıkıştırma belli bir sıcaklığa kadar ise yaramıştır. Fakat uzun süren ölçümlerde plaka ısınarak genleşebilmektedir. Bu da açı konum bilgisinde düşük de olsa hataya sebebiyet vermektedir. Demet görev faktörü ile belirlenen bir pulsta gönderilmelidir. Ölçümler dijital fotoğraf makineleri ile yapılmıştır. Profesyonel kamera temin edilerek daha stabil bir şekilde görüntüleme yapılması, pozlama süresinin belirlenebilmesi ölçümlerin hata oranını düşürecektir. Kullanılan ekran el yapımı floresan ekran olduğu için homojenlikte olan sıkıntıları zamanla aşıp daha tek düze daha homojen ekranlar yapabilme kabiliyetimiz gelişmiştir. Fakat yine de ticari bir ekran alınması önerilmiştir. Bu yükseltme yapıldığında arka plan gürültü sorununa da çözüm bulmak hedeflenmiştir. Bu süreçte CsI(Tl) ekran temin edilerek ölçümler yapılması hedeflenmiştir. Bu tezde sunulan ölçümler, RFQ olmadan ve elektromıknatıs kullanılan MDIS ile demet hattında yapılmıştır. RFQ üretilirken, MDIS kalıcı mıknatıslar kullanacak şekilde yükseltilmiştir. Bu yükseltme ile, soğutma ve EM solenoid gereksinimlerini ortadan kaldırmış ve kurulumu basitleştirmiştir. Su soğutma olmaksızın oluşturulan bu yeni sistem ile ilk proton demeti alınıp testlere başlanmıştır. İki farklı RFQ modülünün üretimi de tamamlanmış ve



Şekil 5.1 KAHVELab proton hızlandırıcısı ile 2 MeV enerjili demet kullanılarak nötron eldesi için planlanan hattın tasarımı

RFQ monte edilmiştir. Vakum ve elektromanyetik testleri devam etmektedir. Proton demet hattının, RFQ dahil ilk çalıştırılması 2024'ün dördüncü çeyreği için planlanmıştır. Gelecek yıllarda, KAHVELab proton demet hattında daha yüksek demet akımları ile ve veri alımının daha da otomatikleştirilmesi gibi olası küçük yükseltmelerle MBOX'u kullanmayı planlıyoruz. TENMAK Araştırma geliştirme projesi için verilen yeni bir proje ile KAHVELab proton hızlandırıcısından elde edilecek 2 MeV enerjili proton demeti Lityum hedefe vurdurularak nötron elde edilmesi planlanmaktadır. Planlanan bu proje çerçevesinde tekrar yükseltme ve geliştirilmeye giden proton hattının yeni tasarımı şekil 5.1'de gösterilmektedir. Bu yaklaşım sadece yerel sanayiye desteklemekle kalmaz, aynı zamanda fizik ve mühendislik öğrencileri için değerli olan uygulama deneyimi sağlar. Bu yaklaşımın önemli bir avantajı düşük maliyetidir. Ancak, hazır bileşenler edinmek yerine bir ölçüm istasyonunu sıfırdan inşa etmenin zaman ve çaba gerektirdiğini belirtmek gerekir. Yine de, yerel üretici geliştirme ve öğrenci katılımının sağladığı faydalar, bunu değerli bir çaba haline getirir.

- [1] H.Cetinkaya, *Türk hızlandırıcı merkezi proton hızlandırıcısı tesisi' ne yönelik prototip iyon kaynağı tasarımı*, Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mayıs, 2016.
- [2] O. Cakir *et al.*, “Demircipro’s tools for completing the linac: Ion source and lebt line,” *arXiv preprint arXiv:2103.11829*, 2021.
- [3] G. Van Rossum, F. L. Drake, *Python 3 Reference Manual*. Scotts Valley, CA: CreateSpace, 2009, isbn: 1441412697.
- [4] M. S. Livingston, J. P. Blewett, E. Stickley, “Particle accelerators,” *American journal of physics*, vol. 30, no. 12, pp. 940–941, 1962.
- [5] J. D. Jackson, *Classical electrodynamics*, 1999.
- [6] K. Wille, *The physics of particle accelerators: an introduction*. Clarendon Press, 2000.
- [7] U. Amaldi, G. Kraft, “Recent applications of synchrotrons in cancer therapy with carbon ions,” *europhysics news*, vol. 36, no. 4, pp. 114–118, 2005.
- [8] B. Akgün, G. Ünel, S. Erhan, S. Sekmen, U. Köse, V. Yıldız, *Meraklısına parçacık ve hızlandırıcı fiziği*, 2014.
- [9] D. Alesini, “Linac,” *arXiv preprint arXiv:2103.16500*, 2021.
- [10] C. Zhang, *Radio-Frequency Quadrupole Accelerators: From Protons to Uranium Ions*. Springer Nature, 2023.
- [11] T. P. Wangler, *RF Linear accelerators*. John Wiley & Sons, 2008.
- [12] K. Crandall, R. Stokes, T. Wangler, “Rf quadrupole beam dynamics design studies,” *LINAC79, BNL*, vol. 51134, p. 205, 1979.
- [13] G. N. Kropachev, A. L. Sitnikov, T. V. Kulevoy, “The parameters of radio frequency quadrupole linear accelerator for daria project,”
- [14] I. Kapchinskii, V. Teplyakov, “Linear ion accelerator with spatially homogeneous strong focusing,” *Inst. of Theoretical and Experimental Physics, Moscow. Inst. of High Energy, Tech. Rep.*, 1970.
- [15] B. Wolf, *Handbook of ion sources*. CRC press, 1995.
- [16] T. Taylor, J. F. Mouris, “An advanced high-current low-emittance dc microwave proton source,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 336, no. 1-2, pp. 1–5, 1993.
- [17] R. Bailey, “Proceedings of cas-cern accelerator school, ion sources,” 2013.

- [18] J. Sherman *et al.*, “Status report on a dc 130 ma, 75 kev proton injector,” *Review of scientific instruments*, vol. 69, no. 2, pp. 1003–1008, 1998.
- [19] R. Scrivens, “Electron and ion sources for particle accelerators,” 2006.
- [20] H. Postma, “Multiply charged heavy ions produced by energetic plasmas,” *Physics Letters A*, vol. 31, no. 4, pp. 196–197, 1970.
- [21] D. Leitner, “Venus reveals the futur,” *CERN Courier*, p. 29, 2005.
- [22] V. Sahni, “Ya b zeldovich—personal reminiscences of a pupil,” *Resonance*, vol. 16, no. 5, pp. 463–467, 2011.
- [23] S. Gammino, L. Celona, G. Ciavola, F. Maimone, D. Mascali, “Review on high current 2.45 ghz electron cyclotron resonance sources,” *Review of Scientific Instruments*, vol. 81, no. 2, 2010.
- [24] M. Bakermans, W. San Martín, L. Hanly, “Current challenges in biodiversity and conservation, volume,”
- [25] L. Celona *et al.*, “Status of the trasco intense proton source and emittance measurements,” *Review of scientific instruments*, vol. 75, no. 5, pp. 1423–1426, 2004.
- [26] G. Turemen *et al.*, “Project prometheus: Design and construction of a radio frequency quadrupole at taek,” *arXiv preprint arXiv:1310.0790*, 2013.
- [27] E. D. Courant, H. S. Snyder, “Theory of the alternating-gradient synchrotron,” *Annals of physics*, vol. 3, no. 1, pp. 1–48, 1958.
- [28] B. Holzer, “Introduction to transverse beam dynamics,” *arXiv preprint arXiv:1404.0923*, 2014.
- [29] C. Biscari, “Transverse beam dynamics,” *Accelerator Physics UAB-2014/2015*, vol. 2015, 2014.
- [30] S. Ogur, “Emittance measurements for low energy proton beams,” Ph.D. dissertation, Master Thesis, 2015.
- [31] J. Holmes, S. Henderson, Y. Zhang, USPAS, “Magnetic fields and magnet design,” *USPAS, Vanderbilt*, 2009.
- [32] P. Forck, “Beam instrumentation and diagnostics,” *arXiv preprint arXiv:2009.10411*, 2020.
- [33] T. Ilhan *et al.*, “Control Systems of DC Accelerators at KAHVELab,” in *Proc. 11th Int. Beam Instrum. Conf. (IBIC’22)*, (Kraków, Poland), ser. International Beam Instrumentation Conference, JACoW Publishing, Geneva, Switzerland, WEP43, pp. 512–514.
- [34] U. Raich, “Emittance measurement,” *Accelerator Beam Diagnostics USPAS*, vol. 9, pp. 23–26, 2009.
- [35] T. Kalvas, O. Tarvainen, T. Ropponen, O. Steczkiewicz, J. Ärje, H. Clark, “Ibsimu: A three-dimensional simulation software for charged particle optics,” *Review of Scientific Instruments*, vol. 81, no. 2, 2010.
- [36] D. Faircloth, “Technological aspects: High voltage,” *arXiv preprint arXiv:1404.0952*, 2014.

- [37] S. Açiksöz, “A permanent-magnet microwave discharge ion source at kahvelab,” 2022.
- [38] S. V. Kutsaev, Y. Eidelman, D. Bruhwiler, “Generalized 3d beam dynamics model for industrial traveling wave linacs design and simulations,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 906, pp. 127–140, 2018.
- [39] J. H. Billen, L. M. Young, “Poisson/superfish on pc compatibles,” in *Proceedings of International Conference on Particle Accelerators*, IEEE, 1993, pp. 790–792.
- [40] C. M. Studio, “Cst microwave studio,” *CST Studio Suite*, 2008.
- [41] A. K. Naieni, F. Bahrami, N. Yasrebi, B. Rashidian, “Design and study of an enhanced faraday cup detector,” *Vacuum*, vol. 83, no. 8, pp. 1095–1099, 2009.
- [42] E. Ebrahimibasabi, S. Fegghi, “Design and construction of a secondary electron suppressed faraday cup for measurement of beam current in an electrostatics proton accelerator,” *International Journal of Mass Spectrometry*, vol. 386, pp. 1–5, 2015.
- [43] P. Zalm, L. Beckers, “Ion-induced secondary electron emission from copper and zinc,” *Surface Science*, vol. 152, pp. 135–141, 1985.
- [44] A. Adigüzel *et al.*, “Low-energy ion beam diagnostics: An integrated solution,” *arXiv preprint arXiv:2307.02262*, 2023.
- [45] A. Adiguzel *et al.*, “Design and construction of a proton testbeam at kahvelab,” in *In Preparation*, 2022.

A.1 Python programı kullanılarak yazılan algoritma

IBSimu programı ile oluşturulan demet veri dosyası kullanılarak benzetim çalışmaları yapılmıştır. Bu yazılan algoritma ile demet verisinin Python'a yüklenmesi ve iyon kaynağı çıkışında parçacıkların konum-açı değerleri ile faz uzayı grafiği oluşturulması yapılmıştır. DEDA hattı boyunca demete uygulanan odaklama ve iletim matrislerinin benzetimleri yapılmıştır. Bu kısımda bu algoritmanın görselleri verilecektir.

A.2 DEMİRCİPro ile yapılan benzetim çalışmaları

Şekil [A.7](#) ve Şekil [A.8](#)'de DEMİRCİPro programı ile yapılan benzetim çalışması sırasında alınan ekran görüntüleri bulunmaktadır.

A.3 Python tabanlı geliştirilen c3pA algoritması ile fotoğraf analizi

Şekil [A.9](#)'dan Şekil [A.11](#)'e kadar olan görsellerde Python programı kullanılarak geliştirilen c3pA fotoğraf analiz kodunun fotoğraf okuma, arka plan çıkarımı ve yayılım hesabı algoritmaları bulunmaktadır.

Withdraw Data

```
In [2]: with open ("/Users/Duygu/Desktop/piton/1.5mA.txt") as f:

    mtr= [line.split() for line in f.readlines() [8:]]
    X=list(map(float, [row[1] for row in mtr])) #m biriminde aliyorum veriyi
    x=np.array(X)
    X_ussu=list(map(float, [row[2] for row in mtr]))
    x_ussu=np.array(X_ussu)

    Y=list(map(float, [row[3] for row in mtr]))
    y=np.array(Y)
    Y_ussu=list(map(float, [row[4] for row in mtr]))
    y_ussu=np.array(Y_ussu)

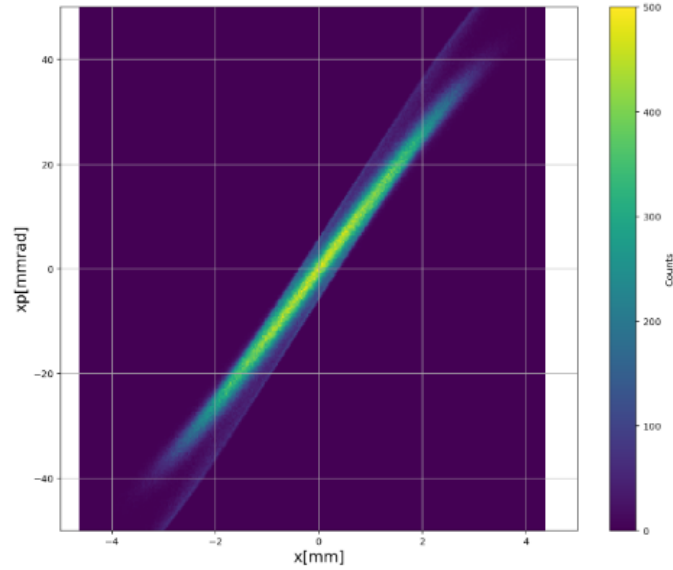
    f.close()
```

Centering the beam

```
In [3]: xnew=(x-(sum(x)/len(x)))
        ynew=(y-(sum(y)/len(y)))
        xussunew=(x_ussu-(sum(x_ussu)/len(x_ussu)))
        yussunew=(y_ussu-(sum(y_ussu)/len(y_ussu)))

In [4]: nbins = 300
        plt.figure()
        figure = plt.figure(figsize=(12,10))
        plt.hist2d(xnew*1000, xussunew*1000, bins=300)
        plt.xlabel(u'x[mm]',size=16)
        plt.ylabel(u'xp[mrad]',size=16)
        xlim([-5,5])
        ylim([-50,50])
        cbar = plt.colorbar()
        cbar.ax.set_ylabel('Counts')
        grid()
        plt.style.use('classic')
```

<Figure size 432x288 with 0 Axes>



Şekil A.1 IBSimu programından elde edilen demet verisinin Python’da yazılan algoritmaya yüklenmesi ve iyon kaynağı çıkışında faz uzayı grafiği elde edilmesi

Emittance calculation of the beam coming out of the Ion Source

```
In [7]: xx=xnew*xnew
xpxp=xussunew*xussunew
xx_avg=sum(xx)/len(xx)
xpxp_avg=sum(xpxp)/len(xpxp)
xpxp=xnew*xussunew
xpxp_avg=sum(xpxp)/len(xpxp)
xpxp2=xpxp_avg*xpxp_avg
eps_rms=(sqrt(xx_avg*xpxp_avg-xpxp2))*10**6
print("geometric emittance [mm.mrad]", eps_rms)

geometric emittance [mm.mrad] 4.552436509590264

In [8]: #emass = 0.511
#ekinetik=0.02
#etotal= ekinetik + emass
#gama = etotal / emass
Eo=0.938E9 # protonun eV cinsinden durgun enerjisi
Ek=20E3 #proton için ev cinsinden kinetik enerjisi
Et=Ek+Eo #ev cinsinden toplam enerji
pgamma_relativistic=Et/Eo
pbeta_relativistic=sqrt(1-1/pgamma_relativistic**2)
print("beta_relativistic[mm.mrad]", pbeta_relativistic)
enormalize= pgamma_relativistic*pbeta_relativistic*eps_rms
print("enormalize[mm.mrad]", enormalize)

beta_relativistic[mm.mrad] 0.0065301270586248395
enormalize[mm.mrad] 0.02972862269298398

In [9]: tbeta = xx_avg/eps_rms
talfa = -xpxp_avg/eps_rms
tgama = xpxp_avg/eps_rms
```

Şekil A.2 İyon kaynağı çıkışında demetin yayılımı hesabı kısmı

Drift applied before the Solenoid-1 to the beam coming out of the Ion Source

```
In [13]: import math
l= 0.1745 #metre cinsinden

#print("Drift matrix:")
Parcacik=np.array([[x,x_ussu,y,y_ussu]])

d=np.array([[1,1,0,0],[0,1,0,0],[0,0,1,1],[0,0,0,1]])
Parcacik_drifted=dot(d,Parcacik)
#print(Parcacik_drifted)
x_drifted1=np.array(Parcacik_drifted[0][0])
xp_drifted1=np.array(Parcacik_drifted[1][0])
y_drifted1=np.array(Parcacik_drifted[2][0])
yp_drifted1=np.array(Parcacik_drifted[3][0])
plt.figure(figsize=(9,6))
#plot(x_drifted1*1000,y_drifted1*1000, '.')

Parcacik_drifted1=zeros((4,len(Parcacik_drifted[0][0])))

Parcacik_drifted1[0],Parcacik_drifted1[1],Parcacik_drifted1[2],Parcacik_drifted1[3]=Parcacik_drifted[0][0],Parcacik_drifted[1][0],Parcacik_drifted[2][0],Parcacik_drifted[3][0]
plt.style.use('classic')

<Figure size 720x480 with 0 Axes>

In [14]: len(x_drifted1)

Out[14]: 1000001

In [15]: x_drift1=(x_drifted1-(sum(x_drifted1)/len(x_drifted1)))
xp_drift1=(xp_drifted1-(sum(xp_drifted1)/len(xp_drifted1)))
y_drift1=(y_drifted1-(sum(y_drifted1)/len(y_drifted1)))
yp_drift1=(yp_drifted1-(sum(yp_drifted1)/len(yp_drifted1)))
nbins = 300
H1, xedges, yedges = np.histogram2d(y_drift1,yp_drift1,bins=nbins)
plt.figure()
figure = plt.figure(figsize=(12,10))
plt.hist2d(x_drift1*1000, xp_drift1*1000, bins=300)
plt.xlabel(u'x_drift1[mm]',size=14)
plt.ylabel(u'xp_drift1[mmrad]',size=14)
#xlim([-15,15])
#ylim([-50,50])
cbar = plt.colorbar()
cbar.ax.set_ylabel('Counts')
grid()
plt.style.use('classic')
figure2 = plt.figure(figsize=(12,10))
plt.hist2d(y_drift1*1000, yp_drift1*1000, bins=300)
plt.xlabel(u'y_drift1[mm]',size=14)
plt.ylabel(u'yp_drift1[mmrad]',size=14)
#xlim([-15,15])
#ylim([-50,50])
cbar = plt.colorbar()
cbar.ax.set_ylabel('Counts')
grid()
plt.style.use('classic')

<Figure size 640x480 with 0 Axes>
```

Şekil A.3 1 milyon parçacık sayılı demet dosyasına uygulanan sürüklenme matrisi algoritması


```
In [19]: import math
B=0.1834 #manyetik alan (tesla)
E=20e-6 #enerji (gev)
E0=938e-3 #durgun enerji (gev)
p=(E+E0)
k=B/(2*3.3356*p*pbeta_relativistic) #3.3356=Brho degeri
print("k degeri",k)

l=0.141 #m biriminde solenoid uzunlugu
A=k*l
#c=math.cos(A)
#s=math.sin(A)
#cs=math.cos(A)*math.sin(A)

print(" matrix of solenoid :")
SOL1=np.array([[math.cos(A)**2,math.sin(A)*math.cos(A)/k,math.sin(A)*math.cos(A),math.sin(A)**2/k],
[-k*math.sin(A)*math.cos(A),math.cos(A)**2,-k*math.sin(A)**2,math.sin(A)*math.cos(A)],
[-math.sin(A)*math.cos(A),-math.sin(A)**2/k,math.cos(A)**2,math.sin(A)*math.cos(A)/k],
[k*math.sin(A)**2,-math.sin(A)*math.cos(A),-k*math.sin(A)*math.cos(A),math.cos(A)**2]])

print(SOL1)
Parcacik_Solenoid=dot(SOL1,Parcacik_drifted1)

x_solenoid1=np.array(Parcacik_Solenoid[0])
xp_solenoid1=np.array(Parcacik_Solenoid[1])
y_solenoid1=np.array(Parcacik_Solenoid[2])
yp_solenoid1=np.array(Parcacik_Solenoid[3])

#plt.figure(figsize=(9,6))
#plot(x_solenoid1*1000,y_solenoid1*1000, '.')
det(SOL1)
plt.style.use('classic')

k degeri 4.488090861726547
matrix of solenoid :
[[ 0.65022037  0.10625904  0.47690024  0.07793506]
 [-2.14037162  0.65022037 -1.56984277  0.47690024]
 [-0.47690024 -0.07793506  0.65022037  0.10625904]
 [ 1.56984277 -0.47690024 -2.14037162  0.65022037]]
```

Şekil A.4 1 milyon parçacık sayılı demet dosyasına uygulanan SOL1 matrisi ve k hesabı algoritması

Selection of Particles Passing Through Ppot Mask

```
In [33]: %%time
# import the required libraries
import random

p = []

mu = 0.050E-3 #45mikron
sigma = 0.0041E-3#(1,2,3,...,10-12,15)
temp = 0

delik_sayisi=21
dd_mesafesi= 2E-3 # delik-delik mesafesi metre cinsinden
dd_bas= floor(delik_sayisi/2)*dd_mesafesi # deliklerin basladigi konum

xph = linspace(-dd_bas, dd_bas, delik_sayisi)
yph = linspace(-dd_bas, dd_bas, delik_sayisi)

rmatris =np.random.normal(mu, sigma, (delik_sayisi,delik_sayisi))

for j in range (0,delik_sayisi):
    for k in range (0,delik_sayisi):
        tempxph=xph[j]
        tempyph=yph[k]
        tempr=rmatris[j][k]
        for i in range(len(x_mask)):
            temp = (x_mask[i]-tempxph)**2+(y_mask[i]-tempyph)**2
            if temp < tempr**2:
                p.append(i)

        p.append(i)

Wall time: 12min 39s
```

Şekil A.5 1 milyon parçacık sayılı demet dosyasının delikli plakasından geçen parçacıkların hesabının algoritması

```
In [385]: L=l_maske_ekran*1000 # mm ye çevirmek için (Lye 250mu den 0.5mm-1mm-1.5mm-2mm)
acı=zeros(piksel) #radyan biriminde açı
konum=zeros(piksel)
peak_pixel_gen = round(piksel/delik_sayisi/4.2) # peak in etrafında kaç piksele aynı demet gelmiştir
xpinhole_konum=zeros(len(peaks))
for i in range(len(peaks)):
    xpinhole_konum[i]=-floor(len(peaks)/2)*2+i*dd_mesafesi*1000
    aci[peaks[i]-peak_pixel_gen:peaks[i]+peak_pixel_gen]=arctan((xsc_konum[peaks[i]-peak_pixel_gen:peaks[i]+peak_pixel_gen]-konum[peaks[i]-peak_pixel_gen:peaks[i]+peak_pixel_gen])/-floor(len(peaks)/2)*2+i*dd_mesafesi*1000
```

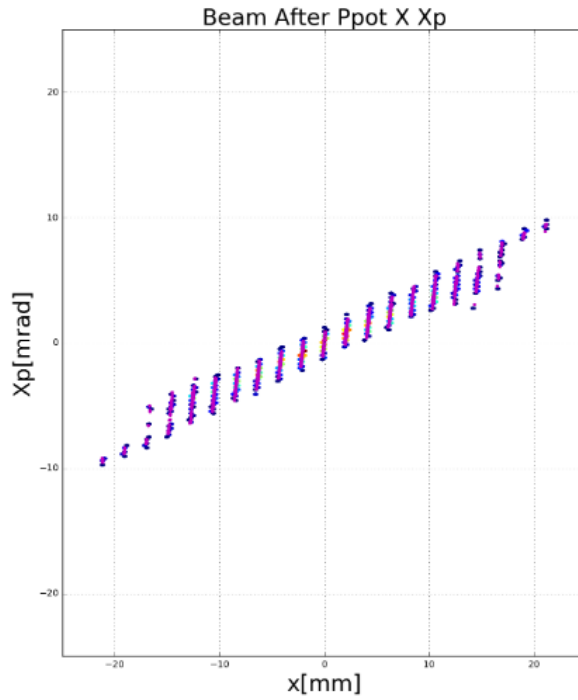
```
In [386]: plt.figure(figsize=(10,12))

sec=n2>0
plt.hexbin(xsc_konum[sec],aci[sec]*1000,n2[sec])

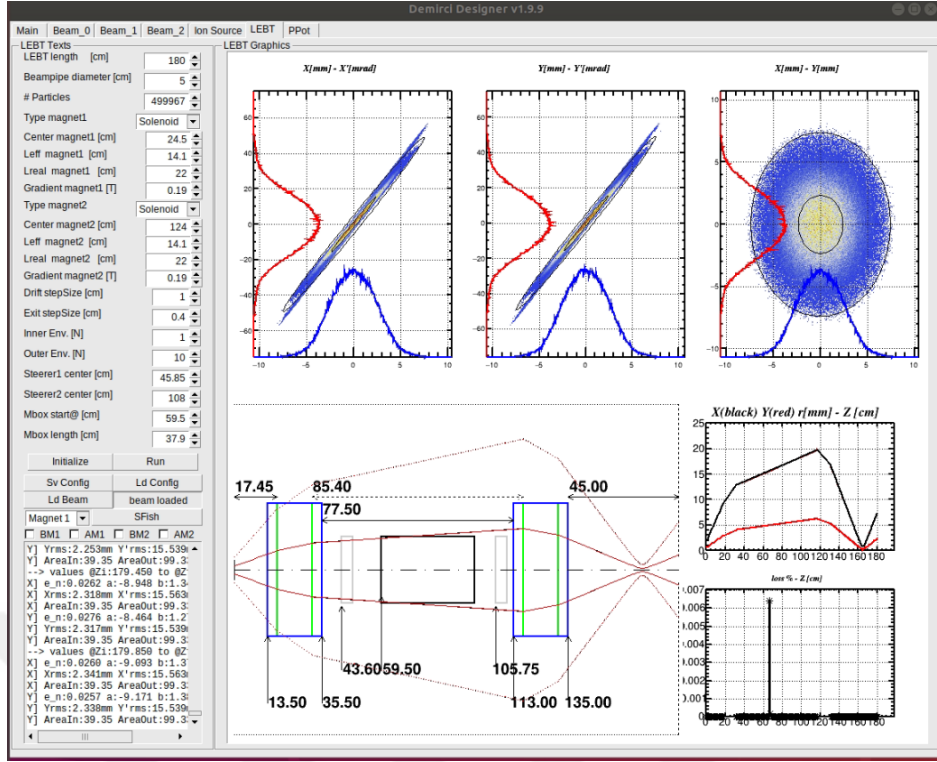
#plt.plot(xscintillator*1000, xpscintillator*1000, '.m', alpha=0.3, label="beam on scintillator")

plt.plot(xscintillator*1000, xpscintillator*1000, '.m')
#plt.legend()
xlim([-25,25])
ylim([-25,25])
plt.xlabel(u"x[mm]",size=24)
plt.ylabel(u"Xp[mrad]",size=24)

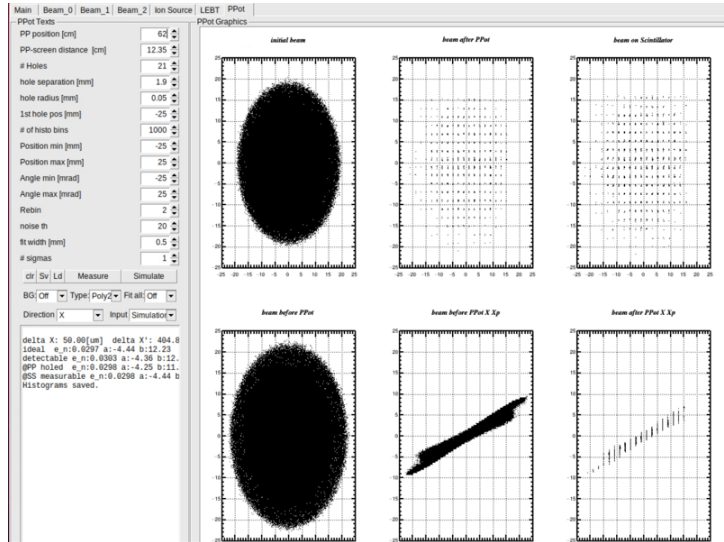
title(u"Beam After Ppot X Xp",size=24)
#cbar = plt.colorbar()
#cbar.ax.set_ylabel('Counts')
grid()
```



Şekil A.6 Delikli plakadan geçen demetçiklerin yayılım hesabı ve faz uzayı grafiği çizdirilme kısmı



Şekil A.7 Proton demetinin DEDA hattı boyunca DEMİRCİPro programı ile yapılan benzetiminden elde edilen arayüz görüntüsü



Şekil A.8 DEMİRCİPro programı ile yapılan yayılım hesabı benzetim çalışması

```
In [4]: # Öncelikle görüntü işleme için gerekli kütüphaneleri içe aktaralım.
import cv2
import numpy as np
from scipy.signal import find_peaks
import matplotlib.pyplot as plt

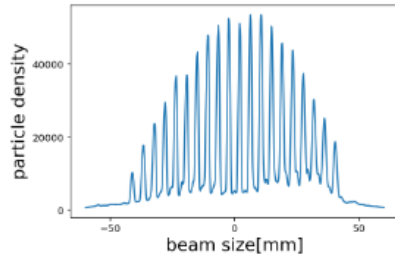
# Fotoğrafı yükleyelim.
image_path = '23.05sol118.30A.jpg'
img = cv2.imread(image_path, cv2.IMREAD_GRAYSCALE)

# Eğer fotoğraf yüklenemediyse hata versin.
if img is None:
    raise ValueError("Fotoğraf yüklenemedi. Dosya yolu doğru mu emin olun.")

# Fotoğraftan gerekli verileri çıkaralım: x eksenindeki piksel toplamlarını hesaplayalım.
foto = np.sum(img, axis=0)
x=linspace(-60,60,len(foto))
plot(x,foto,'-')
mpl.rcParams['font.size'] = 20
mpl.rcParams['legend.fontsize'] = 'large'
mpl.rcParams['figure.titlesize'] = 'medium'
plt.ylabel(u"particle density",size=18)
plt.xlabel(u"beam size[mm]",size=18)

show()

#foto
```



Şekil A.9 Çekilen fotoğrafın yüklenmesi ve okunması kısmı

```

In [5]: valley=[]
        fvalley=[]
        #valley.append(0)
        #fvalley.append(0)
        for i in range(len(peaks)-2):
            ##peaklerin her iki peak arası orta noktasının lokasyonunu bulmak için
            avgvalley=int((peaks[i+1]+peaks[i])/2)+2
            avgfvalley=foto[avgvalley] ##orta noktaların y değerlerini bulmak için
            valley.append(avgvalley)
            fvalley.append(avgfvalley)

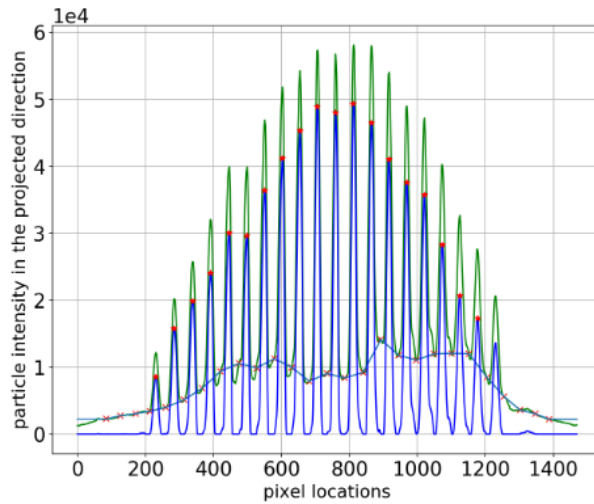
In [6]: fig = plt.figure(figsize=(12,12))
        delik_sayisi=21
        peaks, _ = find_peaks(foto, distance=len(foto)/delik_sayisi/2)
        peak_sayisi=len(peaks)
        peaks=peaks[1:peak_sayisi] #istenen pik değerlerinin alınmaması için.
        peak_sayisi=len(peaks)
        #peakleri birleştirmek ve her piksel için y değerini hesaplıyorm(kırmızı)
        interf=np.interp(range(0,len(foto)), valley, fvalley)

        plt.figure(figsize=(10,8))
        plt.plot(foto,"g")
        #plt.plot(peaks,foto[peaks],"m*")
        plt.plot(valley, fvalley, "rx")
        plt.plot(interf)
        #fotoğraftan alınan toplam veriden birleştirdiğim y değerlerini çıkartmak için
        arkaplansz=foto-interf
        for i in range(len(arkaplansz)):
            if arkaplansz[i]<0:
                arkaplansz[i]=0

        peaks2, _ = find_peaks(arkaplansz, distance=len(arkaplansz)/delik_sayisi/2)
        peak_sayisi2=len(peaks2)
        peaks2=peaks2[3:peak_sayisi2-2] #ilk iki peak ve son iki peak alınmıyor.
        plt.ticklabel_format(axis="y", style="sci", scilimits=(0,0))
        plt.plot(arkaplansz,"b")
        plt.plot(peaks2,arkaplansz[peaks2],"r*")
        grid()
        mpl.rcParams['font.size'] = 20
        mpl.rcParams['legend.fontsize'] = 'large'
        mpl.rcParams['figure.titlesize'] = 'medium'
        plt.ylabel(u"particle intensity in the projected direction", size=18)
        plt.xlabel(u"pixel locations",size=18)
        piksel=int(round((peaks[-1]-peaks[0])/peak_sayisi))

```

<Figure size 864x864 with 0 Axes>



Şekil A.10 Okunan fotoğrafın arka plan gürültüsünden arındırılması kısmı

```

In [152]: H konum -= mean(konum)
          a1 -= mean(a1)
          k=konum*sinyal
          a=a1*sinyal
          p=konum*konum*sinyal
          m=a1*a1*sinyal
          q=konum*a1*sinyal
          Sn=sum(sinyal)
          xavg=sum(k)/Sn
          yavg=sum(a)/Sn
          xyavg=sum(q)/Sn
          yyavg=sum(m)/Sn
          xxavg=sum(p)/Sn

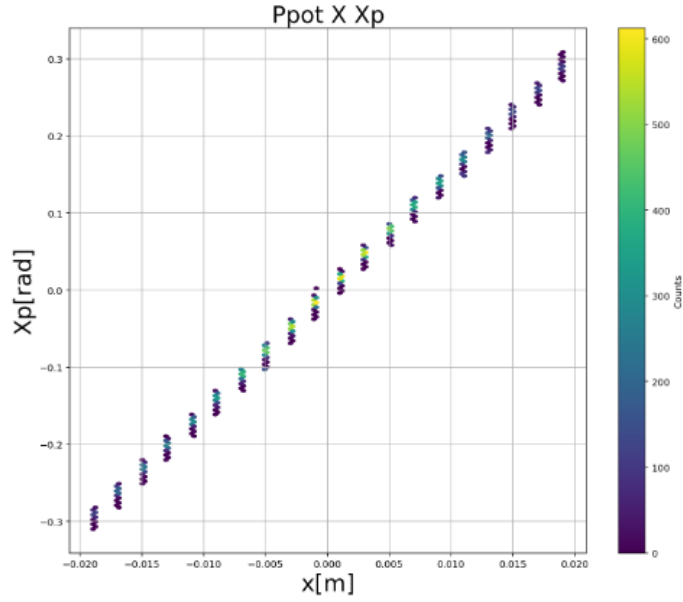
In [153]: H xxavg
Out[153]: 8.262157498050152e-05

In [198]: H seç=sinyal>0
import seaborn as sns
plt.figure(figsize=(12,10))
plt.hexbin(xpinhole_konum,a1,sinyal, gridsize=(100,100))
#sns.stripplot( arkaplansz,xpinhole_konum, a1*0.10, jitter=0.2, size=2)
#plt.scatter(xpinhole_konum, a1, c=arkaplansz, cmap="RdYlGn", s=50, edgecolors="black")
plt.xlabel(u'x[m]',size=24)
plt.ylabel(u'Xp[rad]',size=24)

title(u"Ppot X Xp",size=24)
cbar = plt.colorbar()
cbar.ax.set_ylabel('Counts')

grid()

```



Şekil A.11 Fotoğraftan alınan veriler ile parçacıkların konum-açı hesabının yapılması

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

İletişim Bilgileri: duyguhalis@hotmail.com.tr

Makale

1. Adıgüzel, A., Açıksöz, S., Çağlar, A., Çetinkaya, H., Esen, Ş., Halis, D., İlhan, T. B., Ünel, N. G. (2023), “Ion source and LEBT of KAHVELab proton beamline. Journal of Instrumentation”, 18(01), T01002.
2. Adıgüzel, A., Çetinkaya, H., Esen, Ş., Halis, D., İlhan, T. B., Kılıçgedik, A., Ünel, N. G. (2023), “Low-energy Ion Beam Diagnostics: An Integrated Solution”, arXiv preprint arXiv:2307.02262

Konferans Bildirisi

1. “Turkish Physical Society 37th International Physics Congress TPS-37, Bodrum, Turkey ” “LEBT Line Design, Construction and results from Measurement Box at KAHVELab”
2. 31st Int. Linear Accel. Conf. LINAC2022, Liverpool, UK “Emittance Measurement From the Proton Testbeam at KAHVELab”
3. “International Dumlupınar Science and Mathematics Congress, IDUSMAC 2022,Turkey” “Profiling the Proton Beam at KAHVELab”

Proje

1. TÜBİTAK 119M774 nolu proje
2. İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Projeleri Birimi 33250 nolu proje