



T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



YÜKSEK LİSANS TEZİ

DÜŞÜK BETALI PROTON HIZLANDIRICISI İÇİN UZAY YÜKÜ
HESABI VE ELEKTROMANYETİK ALAN ÖLÇÜMLERİ

Şeyma ESEN

Fen Bilimleri

Yüksek Enerji ve Plazma Fiziği

DANIŞMAN

Doç. Dr. Aytül ADIGÜZEL

II. DANIŞMAN

Dr. Salim OĞUR

Temmuz, 2021

İSTANBUL

Bu çalışma 06.07.2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Fen Bilimleri Yüksek Enerji ve Plazma Fiziğinde Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

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

Prof. Dr. V. Erkcan ÖZCAN
Boğaziçi Üniversitesi
Fen-Edebiyat Fakültesi

Doç. Dr. Ayberk YILMAZ
İstanbul Üniversitesi
Fen Fakültesi



- **İntihal Programı Beyanı**

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

- **Proje Destekleri**

Bu tez 119M774 ve 118E838 numaralı TÜBİTAK projeleri ve İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri birimi 33250 nolu projesi tarafından desteklenmiştir.

- **Tezden Üretilmiş Yayınların Künye Bilgileri**

□

ÖNSÖZ

Yüksek lisans çalışmalarım boyunca profesyonel yaklaşımı, ilgisi, her an ulaşılabilir olması ve değerli yönlendirmeleriyle desteğini esirgemeyen kıymetli danışmanım Doç. Dr. Aytül ADIGÜZEL'e teşekkürlerimi sunarım. Bu süreçte onun rehberliğinde olmak benim için büyük bir şans olmuştur.

Hızlandırıcı fiziğine giriş yapmamı sağlayarak, uzay yükü çalışmaları süresince beni yüreklendirerek ve gece gündüz demeden zamanını ayırarak destekleyen ikinci danışmanım Dr. Salim OĞUR'a teşekkür ederim.

Tez süresince her türlü imkanı paylaşan ve ölçümler sırasında destek olan KAHVELab ekibine ve KAHVELab'la tanışmama vesile olan, ülkemizdeki her gencin bilim tutkusunu yeşerten saygıdeğer Prof. Dr. V. Erkcan ÖZCAN'a teşekkür ederim.

Birlikte çalışmaktan onur duyduğum, bilimsel bilgi ve birikimlerini aktarımı ve zengin dersleriyle hızlandırıcı fiziğinde yetişmemde büyük emeği olan değerli Doç. Dr. N. Gökhan ÜNEL'e teşekkürlerimi sunarım.

Programlama ve donanımsal problemlere çözüm üretmek noktasında desteğini ve arkadaşlığımı esirgemeyen Emre ÇELEBİ'ye, bilgi paylaşımı ve yol arkadaşlığı için Aslıhan ÇAĞLAR'a teşekkürlerimi sunarım.

Benzetim ve programlama konusunda deneyimlerini paylaşarak öğretmekten çekinmeyen Dr. Hakan ÇETİNKAYA ve Dr. Veli YILDIZ'a teşekkürlerimi sunarım.

Gece gündüz demeden, deneysel çalışmalarım da deneyimlerini, bilgilerini ve düşüncelerini paylaşarak öğrettikleri için Dr. Görkem TÜREMEN ve Dr. Ümit KAYA'ya teşekkürlerimi sunarım.

Derslerindeki özverili paylaşımları, anlayışıyla tez jürimde olmayı kabul eden kıymetli Doç. Dr. Ayberk Yılmaz'a teşekkür ederim.

Yüksek lisans sürecim boyunca 119M774 ve 118E838 nolu projeler ile maddi desteklerinden dolayı TÜBİTAK'a ve 33250 nolu proje kapsamında İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri birimine teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca her zaman desteklerini esirgemediğim yanımda oldukları için hayat arkadaşım Dr. Ensar ESEN'e ve aileme teşekkür ederim.

Temmuz, 2021

Şeyma ESEN

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
ÖNSÖZ	iv
İÇİNDEKİLER	vi
ŞEKİL LİSTESİ	xi
TABLO LİSTESİ	xii
SİMGE VE KISALTIMA LİSTESİ	xiv
ÖZET	xv
SUMMARY	xvi
1. GİRİŞ	1
2. HIZLANDIRICI KURAMI	3
2.1. MAXWELL DENKLEMLERİ	3
2.1.1. Elektrik Alan	3
2.1.2. Elektriksel Kuvvet	4
2.2. HIZLANDIRICILAR	5
2.2.1. Rutherford Deneyi	6
2.2.2. Cockroft - Walton Üretici	7
2.2.3. Doğrusal Hızlandırıcılar	8
2.2.4. Sürüklenme Tüpleri	8
2.3. RADYO FREKANS DÖRTKUTUPLUSU (RFQ)	9
2.3.1. TEM Modları	11
2.3.2. Kanat Yapısı	13
2.3.3. Rezonans Frekans	18
2.4. DEMET DİNAMİĞİ	20
2.4.1. Yayınım	20
2.4.2. Twiss Parametreleri	23
2.5. UZAY YÜKÜ	25
2.5.1. Noktasal Parçacığın Elektrik Alanı ve Görelî Alan Dönüşümleri	27
3. MALZEME VE YÖNTEM	33

3.1. UZAY YÜKÜ HESAPLARI	33
3.1.1. Faz Uzayı	34
3.1.2. Boyuna Eksende Faz Uzayı	38
3.1.3. Debye Uzunluğu	38
3.2. TRANSFER MATRİSLERİ	39
3.2.1. Sürüklenme Matrisleri	39
3.2.2. Solenoid Matrisleri	41
3.3. UZAY YÜKÜ HESAPLARI	45
3.3.1. Enerji Hesabı	45
3.3.2. Demetin Kuvvet ve Hareket Denklemleri	46
3.3.3. Yük Sıkışıklığı	47
3.3.4. Eliptik Demet	52
3.3.5. Yayınım Büyümesi	60
3.4. HIZLANDIRICI KOVUKTA ELEKTROMANYETİK ALAN ÖLÇÜMLERİ	64
3.4.1. Slater Pertürbasyon Kuramı	65
3.4.2. Davul Kovuk İçin Elektromanyetik Alan Test Düzenegi ve Elemanları	69
3.4.3. Adım Motoru, Sürücü Devresi ve Arduino Devresi	69
3.4.4. Boncuk	71
3.4.5. Sıcaklık	71
3.4.6. Vektör Ağ Analizörü	74
3.4.7. LabVIEW	76
3.4.8. RFQ Boncuk-Çekim Deneyi	79
3.4.9. Ayarlayıcılar	83
4. BULGULAR	87
4.1. UZAY YÜKÜ BENZETİMİ BULGULARI	87
4.2. BONCUK-ÇEKİM DENEYİ BULGULARI	91
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	97
KAYNAKLAR	99
EKLER	104
EK 1. DEDA Hattı Boyunca PyDEDA'da Alınan Faz Uzayı Grafikleri	104
EK 2. Plotwin Programından Alınan Demet Verileri.....	104
EK 3. Python'da Geliştirilen Uzay Yükü Hesaplamaları Kodu (PyDEDA)	104
ÖZGEÇMİŞ	115

ŞEKİL LİSTESİ

	Page No
Şekil 1.1: KAHVELab proton hızlandırıcısı sistemi deney düzeneği, Şema Doç. Dr. N. Gökhan Ünel tarafından oluşturulmuştur.	1
Şekil 2.1: Rutherford deney düzeneği [7]	7
Şekil 2.2: Cockroft-Walton eş devresi diyagramı [9]	8
Şekil 2.3: Sürüklenme tüpü modeli-a.....	9
Şekil 2.4: Sürüklenme tüpü modeli-b	9
Şekil 2.5: 800 MHz deneme üretimi RFQ, KAHVELab.....	10
Şekil 2.6: Boş uzayda z yönünde ilerleyen dalga için elektromanyetik dalganın elektrik alanı ve manyetik alanı [14].	11
Şekil 2.7: Farklı modların gösterimi [15].....	13
Şekil 2.8: Kanat profili [15]	14
Şekil 2.9: Odacık ve kipler [15]	14
Şekil 2.10: Demetin değişen elektrik alanla hızlanması çizimi (Dr. Veli Yıldız tarafından oluşturulmuştur).....	15
Şekil 2.11: Demeti bohçalama [15].....	15
Şekil 2.12: Toutatis programıyla demet RFQ'ya girmeden önce elde edilen konum grafikleri.....	16
Şekil 2.13: Toutatis programıyla RFQ'ya yeni girmiş bir demet için elde edilen konum grafikleri	17
Şekil 2.14: Toutatis programıyla RFQ'nun tam ortasında elde edilen demetin konum grafikleri...	18
Şekil 2.15: Kanat gerilim şeması ve kanatlar arası eşdevresi.....	18
Şekil 2.16: Toutatis programıyla elde edilen RFQ'nun ortasındaki demetin KP, kinetik enerji, kipleme ve açıklık grafikleri [17].....	19
Şekil 2.17: Plotwin'de benzetimi yapılan bir demetin faz uzayı [23]	22
Şekil 2.18: Twiss parametreleriyle demet faz uzayı [21]	24
Şekil 2.19: Noktasal parçacığın koordinat sistemleri	27
Şekil 2.20: Koordinat sistemi [28]	29
Şekil 2.21: γ 'ya göre değişen elektrik alanlar [28]	31

Şekil 3.1: Proton hızlandırıcı sistemi şeması [15]	34
Şekil 3.2: KAHVELab iyon kaynağı ve DEDA sistemi.....	34
Şekil 3.3: Parçacıkların konum ve açı eksenleri [30]	35
Şekil 3.4: Demetin tasarım ekseni [30]	36
Şekil 3.5: Parçacıkların sürüklenme uzunluğu hesabı	40
Şekil 3.6: Demet zarfı [34]	42
Şekil 3.7: DEMİRCİ programında iyon kaynağından çıkan demetin RFQ'ya kadar izlediği yolun çizimi [3].....	44
Şekil 3.8: Farklı akım değerleri için elde edilen K_{genel} ve K değeri karşılaştırmaları	48
Şekil 3.9: Farklı deneyler için demet enerjisine göre değişen yük sıklığı grafiği [42].....	50
Şekil 3.10: ProjectX deneyinden ve geliştirilen PyDEDA'dan elde edilen enerji - yük sıklığı verilerinin karşılaştırılması.....	51
Şekil 3.11: 3939 parçacıklı demet için PyDEDA kullanılarak elde edilen demetin $x - x'$ faz uzayı ve yoğunluğu	53
Şekil 3.12: Farklı akım değerleri için $\langle xE_x \rangle$ ile hesaplanan uzay yükünün x_{rms} 'e etkisi. Kırmızı çizgi PyDEDA'dan elde edilen verileri, mavi TRAVEL programından alınan verileri temsil etmektedir.	56
Şekil 3.13: Farklı akım değerleri için uzay yükünün x_{rms} 'e etkisi, Kırmızı çizgi PyDEDA'dan elde edilen verileri, mavi TRAVEL programından alınan verileri temsil etmektedir.	59
Şekil 3.14: Demetin x_{rms} değerinin uzay yükü etkisiyle büyüme yüzdesi. Kırmızı çizgi PyDEDA'dan elde edilen verileri, mavi TRAVEL programından alınan verileri temsil etmektedir.	60
Şekil 3.15: Hale etkisi	62
Şekil 3.16: Farklı enerji ve akımlarda yayılım büyümesi oranı [49]	63
Şekil 3.17: 750 MHz RFQ frekans (sol) ve faz (sağ) grafikleri [53]	65
Şekil 3.18: Kovuk içi alan dağılımları - sol üst: elektrik alan dağılımı, sol alt: elektrik alan dağılımı, sağ alt: manyetik alan dağılımı [15]	67
Şekil 3.19: Davul kovuk ve boncuk-çekim deney düzeneği	69
Şekil 3.20: Adım motor, vidalı mil ve rulman	70
Şekil 3.21: Motor, Arduino, sürücü devresi ve güç kaynağı	71
Şekil 3.22: Motor TB6560 sürücü devresi ve güç kaynağı bağlantı şeması [58]	71
Şekil 3.23: Davul kovukta boncuk-çekim deneylerinde kullanılan teflon boncuk	72
Şekil 3.24: Capstone sıcaklık ölçer cihaz, algılayıcı uç ve dijital termometre	73

Şekil 3.25: Faz ve sıcaklık - zaman (sol), faz ve $1/T$ - zaman (sağ) grafikleri (Sıcaklık grafiğinin değerleri grafik üzerinde paylaşılammıştır ancak grafiğin başlangıç ve bitiş noktası arasındaki toplam sıcaklık değişimi $1.95\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'dir)	73
Şekil 3.26: VNA-UHF 636A ve ölçüm düzeneği	74
Şekil 3.27: LabVIEW Anritsu VNA kontrol kodu blok diyagramı	75
Şekil 3.28: Farklı VNA'lardan alınan ölçümlerle S_{21} ve faz değeri karşılaştırması	75
Şekil 3.29: Boncuğun kovuk içinde olduğu sırada alınan E^2 değerleri	76
Şekil 3.30: Anahtar	77
Şekil 3.31: VNA-UHF ile boncuğun davul kovuğa girişinde alınan ölçüm grafikleri	78
Şekil 3.32: Anritsu ile alınan ölçüm grafikleri	79
Şekil 3.33: RFQ deneme modülünün kanatları, DORA Makina, OSTİM, Ankara	79
Şekil 3.34: Sol: RFQ deneme modülünün CMM ölçümüyle montajı ve hizalanması, sağ: RFQ deneme modülünün boncuk-çekim düzeneğine yerleştirilmesi	80
Şekil 3.35: RFQ deneme modülünün kapak delikleri	81
Şekil 3.36: RFQ deneme modülü sisteminde kullanılan alüminyum boncuk ve ip	82
Şekil 3.37: Boncuğun geçirileceği deliğin merkeze göre ayarlanması	82
Şekil 3.38: RFQ deneme modülü sistemindeki ayarlayıcılar	83
Şekil 3.39: RFQ deneme modülü sistemindeki ayarlayıcılar	83
Şekil 3.40: RFQ deneme modülü ve RF kapaklar yerine manyetik alan ölçümleri sırasında kullanılan lehim teli	85
Şekil 3.41: 3 dB yöntemiyle kalite faktörü hesabı [68]	86
Şekil 3.42: RFQ deneme modülünden alınan ölçümleri kontrol eden LabVIEW programı	86
Şekil 4.1: Farklı frekans değerleri için akıma bağlı x_{rms} değerlerinin TRAVEL-PyDEDA kodu karşılaştırması	87
Şekil 4.2: Farklı frekans değerleri için akıma bağlı büyüme yüzdeleri TRAVEL-PyDEDA karşılaştırması	88
Şekil 4.3: Uzay yükünün dahil edildiği ve edilmediği durumlarda farklı akım değerleri için x_{rms} değişimleri	89
Şekil 4.4: Boncuk-çekim deney düzeneği şeması, Doç. Dr. N. Gökhan Ünel tarafından oluşturulmuştur	91
Şekil 4.5: Kalite faktörü ölçümleri	92
Şekil 4.6: Boncuk-çekim deney düzeneği	93
Şekil 4.7: 1. ve 2. Çeyrekten alınan ölçüm	94

Şekil 4.8: 3. ve 4. Çeyrekten alınan ölçüm.....	94
Şekil 4.9: z eksen konumu - manyetik alan değişim %'si.....	95
Şekil 4.10: Birleştirme hataları.....	95
Şekil 1.1: 3000 parçacıklı demetin iyon kaynağı çıkışı faz uzayı görüntüsü PyDEDA'da çizdirilmiştir.	104
Şekil 1.2: 3000 parçacıklı demetin 1.sürüklenmeden sonraki faz uzayı görüntüsü PyDEDA'da çizdirilmiştir.	105
Şekil 1.3: 3000 parçacıklı demetin SOL1 çıkışındaki faz uzayı görüntüsü PyDEDA'da çizdirilmiştir.	105
Şekil 1.4: 3000 parçacıklı demetin 2.sürüklenmeden sonraki faz uzayı görüntüsü PyDEDA'da çizdirilmiştir.	106
Şekil 1.5: 3000 parçacıklı demetin SOL2 çıkışındaki görüntüsü PyDEDA'da çizdirilmiştir.	106
Şekil 1.6: 5000 parçacıklı demetin iyon kaynağı çıkışı faz uzayı görüntüsü PyDEDA'da çizdirilmiştir.	107
Şekil 1.7: 5000 parçacıklı demetin 1.sürüklenmeden sonraki faz uzayı görüntüsü PyDEDA'da çizdirilmiştir.	107
Şekil 1.8: 5000 parçacıklı demetin SOL1 çıkışı faz uzayı görüntüsü PyDEDA'da çizdirilmiştir.	108
Şekil 1.9: 5000 parçacıklı demetin 2.sürüklenmeden sonraki faz uzayı görüntüsü PyDEDA'da çizdirilmiştir.	108
Şekil 1.10: 5000 parçacıklı demetin SOL2 çıkışındaki görüntüsü PyDEDA'da çizdirilmiştir.	109
Şekil 2.1: 3000 parçacıklı demetin RFQ öncesindeki sürüklenmede uzay yükü etkisi dahil edilmeden elde edilen $x_{rms}, x'_{rms}, y, y'_{rms}$ değerleri	109
Şekil 2.2: 3000 parçacıklı demetin RFQ öncesindeki sürüklenmede uzay yükü etkisi dahil edilmeden elde edilen Twiss parametreleri	110
Şekil 2.3: 3000 parçacıklı demetin RFQ öncesindeki sürüklenmede uzay yükü etkisi dahil edilerek elde edilen $x_{rms}, x'_{rms}, y, y'_{rms}$ değerleri	110
Şekil 2.4: 3000 parçacıklı demetin RFQ öncesindeki sürüklenmede uzay yükü etkisi dahil edilerek elde edilen Twiss parametreleri	111
Şekil 2.5: 5000 parçacıklı demetin RFQ öncesindeki sürüklenmede uzay yükü etkisi dahil edilerek elde edilen demet matrisi ve ϵ_{rms} değerleri	111
Şekil 2.6: 5000 parçacıklı demetin RFQ öncesindeki sürüklenmede uzay yükü etkisi dahil edilerek elde edilen $x_{rms}, x'_{rms}, y, y'_{rms}$ değerleri	112
Şekil 2.7: 5000 parçacıklı demetin RFQ öncesindeki sürüklenmede uzay yükü etkisi dahil edilerek elde edilen Twiss parametreleri	112
Şekil 3.1: PyDEDA'da uzay yükü hesabı yapılan kısım-1	113

Şekil 3.2: PyDEDA'da uzay yükü hesabı yapılan kısım-2.....113

Şekil 3.3: PyDEDA'da solenoid matrisleri ve K değeri hesabı.....114



TABLO LİSTESİ

	Page No
Tablo 3.1: İyon kaynağı çıkışında elde edilen demet parametreleri	38
Tablo 3.2: Demet parametreleri	49
Tablo 3.3: 3939 Parçacıklı Demetin parametreleri	58
Tablo 3.4: 800 MHz frekansta farklı akım değerleri için farklı programlardan elde edilen x_{rms} ve y_{rms} değerleri.	59
Tablo 4.1: 3000 parçacıklı demet için PyDEDA ve TRAVEL programlarından elde edilen değerler. Burada +UY ifadesi uzay yükü etkisinin dahil edildiği ve -UY ifadesi de uzay yükü etkisinin dahil edilmediği durumlara karşılık gelmektedir.	90
Tablo 4.2: 5000 parçacıklı demet için PyDEDA ve TRAVEL programlarından elde edilen değerler. Burada +UY ifadesi uzay yükü etkisinin dahil edildiği ve -UY ifadesi de uzay yükü etkisinin dahil edilmediği durumlara karşılık gelmektedir.	90
Tablo 4.3: Farklı sayıda parçacıklı demetler için uzay yükü hesap süresi karşılaştırma tablosu ...	91
Tablo 4.4: 4 Çeyrekten alınan ölçümler	93

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
a	: Demetin RFQ Kanat Ucuna Mesafesi
B	: Manyetik Alan
c	: Işık Hızı
dB	: Desibel
\vec{E}	: Elektrik Alan
e	: Bir Elektronun/Protonun Yüğü
\vec{F}	: Lorentz Kuvveti
f	: RF Salınım Frekansı
K	: Yüğü Sıkışıklığı (Perveance)
KP	: Cesaret Katsayısı (Kilpatrick Değeri)
k	: Gradyan Değer, Faz İlerlemesi
k_1	: 1. Solenoidin Gradyan Değeri
k_2	: 2. Solenoidin Gradyan Değeri
I	: Akım
m	: Kipleme
N	: Toplam Parçacık Sayısı
Q	: Toplam Yüğü Sayısı
V	: Potansiyel Fark
Z	: Yol Özdirenci
α_t	: Twiss Parametresi
β	: Göreli Hız
β_t	: Twiss Parametresi
γ	: Göreli γ Parametresi
γ_t	: Twiss Parametresi
δ	: Deri Kalınlığı
Δs	: Adım Büyüklüğü
ϵ	: Yayınım
ϵ_{norm}	: Normalize Yayınım
ϵ_{rms}	: RMS Yayınım

ϵ_0	: Boşluktaki İletkenlik
κ	: Dışsal Odaklanma Doğrusal Oran Sabiti
λ	: RF Dalga Boyu
μ_0	: Boşluktaki Geçirgenlik
v	: Hız
π	: Pi Sayısı
ρ	: Özdirenc
σ	: İletkenlik, Parçacık Yüzdesi

Kısaltmalar	Açıklama
<i>AC</i>	: Alternatif Akım
<i>BHÇ</i>	: Büyük Hadron Çarpıştırıcısı
<i>CERN</i>	: Avrupa Nükleer Araştırmalar Merkezi
<i>CW</i>	: Cockroft-Walton Üretici
<i>DEDA</i>	: Düşün Enerjili Demet Aktarım Hattı
<i>DC</i>	: Doğrusal Akım
<i>DTL</i>	: Drift Tube Linac
<i>LANL</i>	: Los Alamos National Laboratory
<i>LEBT</i>	: Low Energy Beam Transfer
<i>LHC</i>	: Large Hadron Collider
<i>LINAC</i>	: Linear Accelerator
<i>OSTİM</i>	: Ankara Organize Sanayi ve Ticaret Merkezi
<i>PyDEDA</i>	: Python Diliyle Yazılan Program/Kod
<i>RFQ</i>	: Radyo Frekans Dörtkutuplusu
<i>RF</i>	: Radyo Frekans
<i>RMS</i>	: Karekök Ortalaması
<i>SOL1</i>	: 1. Solenoid
<i>SOL2</i>	: 2. Solenoid
<i>TE</i>	: Enine Elektrik Alan
<i>TEM</i>	: Enine Elektromanyetik Alan
<i>VNA</i>	: Vector Network Analyzer

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DÜŞÜK BETALİ PROTON HIZLANDIRICISI İÇİN UZAY YÜKÜ HESABI VE ELEKTROMANYETİK ALAN ÖLÇÜMLERİ

Şeyma ESEN

İstanbul Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fen Bilimleri

Danışman: Doç. Dr. Aytül ADIGÜZEL

II. Danışman: Dr. Salim OĞUR

Düşük β 'lı proton hızlandırıcısı sistemlerinde demetin yoğunluğunu kaybetmeden hızlandırıcı kovuğa aktarmak ve hızlandırıcı kovuk içinde elektromanyetik alanın düzgün oluşturulması en önemli hedeflerdendir. Bu tezde Kandilli Algiç, Hızlandırıcı ve Enstrümantasyon Laboratuvarı'nda (KAHVELab) 800 MHz'de çalışacak hızlandırıcı kovuğa aktarılması amaçlanan 1.4 mA akım değerine sahip hızlandırıcı demetin iç etkileşimlerinden kaynaklanan uzay yükü etkisinin, demetin yatay ve düşey eksenlerdeki genişliklerinde büyüme miktarı çalışılarak uzay yükünün yayılım büyümesine etkisi araştırılmıştır. Aktarılan demetin hızlandırılacağı Radyo Frekans Dörtkutuplusunun (RFQ) deneme modülü için boncuk-çekim yöntemi kullanılarak elektromanyetik alan testleri ve ölçümleri de gerçekleştirilmiştir.

Temmuz 2021, 132 sayfa.

Anahtar kelimeler: Doğrusal Proton Hızlandırıcısı, Demet Dinamiği, Radyo Frekans Dörtkutuplusu, Uzay Yükü, Kovuk İçin Elektromanyetik Alan Testleri

SUMMARY

M.Sc. THESIS

SPACE CHARGE CALCULATION AND ELECTROMAGNETIC FIELD MEASUREMENTS FOR LOW BETA PROTON ACCELERATOR

Şeyma ESEN

İstanbul University

Institute of Graduate Studies in Sciences

Department of Physics

Supervisor: Ass. Prof. Aytül ADIGÜZEL

Co-Supervisor: Dr. Salim OĞUR

In proton accelerator systems with low β , transferring the beam to the accelerator cavity without losing its intensity and forming the electromagnetic field properly in the accelerator cavity are among the most important goals. In this thesis, the effect of space charge on the emittance growth has been investigated by studying the space charge effect caused by the internal interactions of the accelerator beam with a current value of 1.4 mA, which is intended to be transferred to the accelerator cavity that will operate at 800 MHz in the Kandilli Detector, Accelerator and Instrumentation Laboratory (KAHVELab), by studying the growth of the beam size along the horizontal and vertical axes. Electromagnetic field tests and measurements have also been carried out using the bead-pull method for the trial module of the Radio Frequency Quadrupole (RFQ) where the transmitted beam will be accelerated.

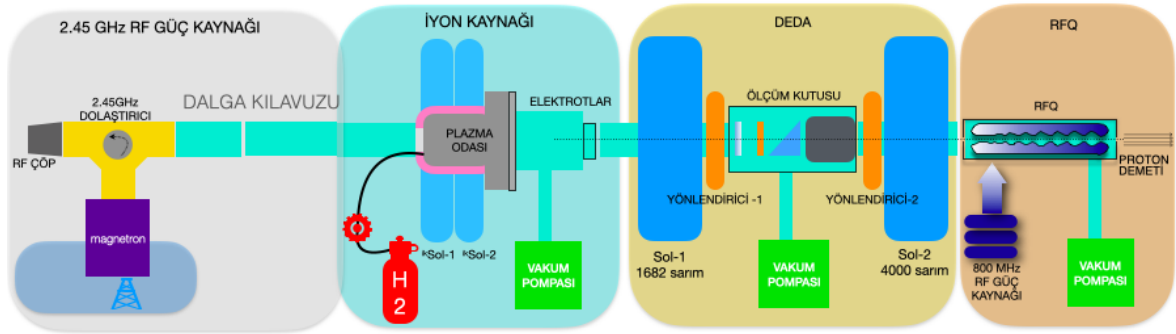
July 2021, 132 pages.

Keywords: Linear Proton Accelerator, Beam Dynamics, Radio Frequency Quadrupole, Space Charge, Electromagnetic Field Tests for Cavity

1. GİRİŞ

Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Algıç, Hızlandırıcı ve Enstrümantasyon Laboratuvarı (KAHVELab)'nda 800 MHz'de çalışacak bir proton hızlandırıcısı sistemi üretilmesi amaçlanmaktadır. 800 MHz günümüzde bilinen en yüksek frekanslı hızlandırıcı olacağı için KAHVELab'ın hedefi dünya ölçeğinde önemli bir yerdedir.

Hızlandırıcı sisteminde bulunan Mikrodalga Deşarj İyon Kaynağı aracılığıyla, H_2 gazının plazma odasında iyonize edilmesinin ardından elektrotlarla hızlandırılarak 20 keV enerjili proton demeti üretilir. Üretilen demeti odaklamak üzere 2 adet solenoid kullanılmaktadır. Odaklanarak iletilen demetin, hızlandırmak amacıyla üretilen Radyo Frekans Dörtkutplusuna diğer adıyla RFQ'ya (Radio Frequency Quadrupole; RFQ) aktarılması hedeflenmektedir. Hızlandırıcı sisteminde yer alan bütün elemanların yerel kaynaklar kullanılarak üretilmiş olması ülkemizde bilimsel bilginin gelişerek teknolojiye transferine ve bu alanda deneyimli insan sayısının artmasına olanak sağlamıştır.



Şekil 1.1: KAHVELab proton hızlandırıcısı sistemi deney düzeneği, Şema Doç. Dr. N. Gökhan Ünel tarafından oluşturulmuştur.

Bir demeti oluşturup onu hızlandırmak ve hızlandırılmak istenen demetin dinamiğini yönetebilmek için içsel ve dışsal etkileri belirleyerek hesaplamak gerekir. Bu hesaplar dahilinde demeti odaklamak, ıraksatmak ya da yönlendirmek mümkün olur. Demetin boyuna eksenindeki kesit alanını değiştiren en önemli etken yüklü parçacıkların birbirine uyguladığı Coulomb etkileşmesidir, diğer bir adıyla uzay yükü (space charge) etkisidir. Bu tezde, demetin RFQ'ya iletiminden önce faz uzayının büyümesine sebep olan etkilerden biri olan uzay yükü, matris formalizmiyle Python dilinde bir program yazılıp hesaplanmış,

Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi (CERN) tarafından geliştirilen TRAVEL programının çıktıları ile karşılaştırması yapılmıştır [1, 2]. Karşılaştırmaların uyumlu olması halinde bu program geliştirilmesine KAHVELab ekibinin de katkı sağladığı DEMİRCİ programına yerleştirilecektir [3]. TÜBİTAK tarafından destelenen ve tamamlanan DEMİRCİ projesinin amacı hafif iyonlar için radyo frekans dörtkutuplusu tabanlı doğrusal hızlandırıcı tasarımı ve benzetimi yapmaktır.

Ayrıca bu tezde, 800 MHz'de 20 keV enerjili demeti 2 MeV enerjiye çıkarmayı hedefleyen deneme üretimi bir RFQ kovuğunun elektromanyetik alan testleri gerçekleştirilmiştir. Hızlandırıcı fiziğinde demeti RFQ'nun kabul edeceği ölçülerde RFQ'ya iletmek, demeti parçacık kaybetmeden hızlandırmada en önemli şartlardan biridir. Aksi takdirde oluşturulan odaklanmış demeti kaybetmek kaçınılmazdır. İstenen boyutlarda aktarılan demetin hızlanmasını sağlayacak elektromanyetik alanın düzgünlüğü demetin hedeflenen enerjilere çıkarılmasında önem taşımaktadır. Bu nedenle deneme üretimi gerçekleştirilen RFQ modülü için boncuk-çekim yöntemi kullanılarak manyetik alan pertürbe edilmiş ve gerekli hesaplamalar yapılarak hızlandırıcı kovuğun içinde oluşan elektrik alanın düzleştirilmesi için gereken ayarlayıcı (tuner) konumlarının anlaşılması sağlanmıştır.

2. HIZLANDIRICI KURAMI

2.1. MAXWELL DENKLEMLERİ

Maxwell denklemleri hem elektrik alan hem de manyetik alanın ayrı ayrı ve birbirlerine olan etkilerini tanımlayan denklemler dizisidir. Bu denklemler boş uzayda elektriksel yüklerin elektrik alanlarla ilişkisini, hangi geometride manyetik alanın olmadığını, değişen manyetik alanların elektrik alanları nasıl etkilediğini, değişen elektrik alan ve yük yoğunluğunun manyetik alanla ilişkisini ifade eder:

$$\begin{aligned}
 \vec{\nabla} \cdot \vec{E} &= \frac{\rho}{\epsilon_0} \\
 \vec{\nabla} \cdot \vec{B} &= 0 \\
 \vec{\nabla} \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\
 \vec{\nabla} \times \vec{B} &= \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

2.1’de yer alan Maxwell denklemlerinde \vec{E} , elektrik alanı; \vec{B} , manyetik alanı; μ_0 , boşluktaki manyetik geçirgenliği; ϵ_0 , boşluktaki elektriksel geçirgenliği; ρ , yük yoğunluğunu; \vec{J} ise akım yoğunluğunu ifade eder. \vec{E} ve \vec{B} , mıknatıslar ve radyo frekans (RF) sistemleri gibi sisteme dışarıdan entegre edilen kaynakların oluşturduğu alanlar olabileceği gibi yüklü parçacıklardan oluşan bir demetin kendi içinde etkileşmesi vasıtasıyla da oluşabilir.

2.1.1. Elektrik Alan

Elektrik alan, yüklü bir parçacığın çevresinde oluşan, etki altında kalan parçacığın karakteristiğine göre çekme veya itme etkisi oluşturan, yüklü parçacığa olan mesafenin karesiyle ters orantılı bir vektör alanıdır. Durağan yükün yarattığı elektrik alan Denklem 2.2 ile gösterilmiştir. Bu vektör alanı, elektriksel kuvvet vektörlerinden oluşur. Bu alana giren bir yüklü parçacık alan içindeki elektriksel kuvvetlere maruz kalarak hareketlenir, yön

değiştirebilir, hızlanabilir veya yavaşlayabilir.

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{|\vec{r}|^2} \hat{r} \quad (2.2)$$

2.1.2. Elektriksel Kuvvet

Yük, parçacıkların taşıdıkları özelliklerden biridir. Bu özelliğin pozitif, negatif ve yüksüz olmak üzere üç karakteristiği olduğu tespit edilmiştir. Noktasal bir yükün bir diğer noktasal parçacığa etki ettiği vektörel niceliğe elektriksel kuvvet denir. Elektriksel kuvvet, aralarındaki uzaklığın karesiyle ters orantılı olacak şekilde, yüklü bir parçacığın kendisiyle aynı yüklü olan parçacıkları itmesi veya zıt yüklü olanı çekmesiyle oluşur. Durağan iki yükün birbirine uyguladığı kuvvet Denklem 2.3 gibi ifade edilir ve buna "Coulomb Kanunu" denir. Denklem 2.4'te elektrik alanının elektriksel kuvvetle ilişkisi verilmiştir. Elektrik alan birim yüke etki eden elektriksel kuvvettir.

$$\vec{F} = k \frac{q_1 q_2}{|\vec{r}|^2} \hat{r} \quad (2.3)$$

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \quad (2.4)$$

Coulomb kanunu, bu tezin ana kapsamındaki hem uzay yükünün hem de boncuk çekim deneyinin mantığını anlamada mihenk taşı görevini görmektedir. Konunun detaylarına ilerleyen bölümlerde değinilecektir.

Yüklerin hareket halinde olduğu durumlarda ise bu kanun tam olarak doğru sonuçlar vermez. Tıpkı Newton yasalarının ışık hızına yaklaşılacak hızlarda geçerliliğini yitirmesi gibi burada da yükün hareket halinde olması etki eden elektriksel kuvvetleri etkiler. R. Feynmann manyetik kuvveti, hareketli yükler arasında oluşan kuvvetlerden biri olarak tanımlamış ve elektriksel etkinin bir boyutu olduğunu ifade etmiştir [12]. Bu iki kuvvetin oluşturduğu toplam kuvvete

Lorentz kuvveti denir ve Őu Şekilde ifade edilir:

$$\vec{F} = e(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}), \quad (2.5)$$

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = e\vec{E} + e(\vec{v} \times \vec{B}). \quad (2.6)$$

Denklem 2.5'te gösterilen e , parçacığın yükünü; \vec{E} , elektrik alan vektörünü; \vec{B} , manyetik alan vektörünü ve \vec{v} , hareketli parçacığın hız vektörünü ifade eder. Denklem 2.6'da \vec{F} kuvvet vektörünün zamana bağlı değişen \vec{p} momentum vektörü cinsinden ifadesine yer verilmiştir.

2.2. HIZLANDIRICILAR

Bilim insanları, proton ölçeğindeki (femtometre) mekanizmaların nasıl iŐlediėini çözmek ve analiz etmek için parçacıkları önce hızlandırmıŐlar ardından hızlandırdıkları parçacık demetlerini çarpıŐtırarak parçacıkların iç yapısı hakkında bilgi sahibi olmuŐlardır. Bir hızlandırıcıyı tanımlayan zellikler Şunlardır: parçacığın türü, ulaşılan enerji ve parçacık demetinin birim hacimdeki yoğunluğu. Hızlandırıcı sistemler ve bu sistemleri geliŐtirirken geliŐen teknoloji günümüzde bir çok alanda kullanılmaktadır. Parçacık fiziği araŐtırmaları baŐta olmak üzere, hadron terapi ile kanser hücrelerinin DNA yapılarını bozan demetler üretmek, gıdaların üzerinde yaŐayan bakterilerden gıdayı arındırmak, oluŐturulma dönemi bilinmeyen bir resmin hangi yıllara ait olabileceği bilgisini vermek gibi bir çok alanda insanlığa faydalı bir biçimde hizmet eder. Hızlandırıcılar doğrusal ve dairesel olmak üzere ikiye ayrılır [4]. Dairesel hızlandırıcılar dairesel bir yörünge üzerinde bir veya birden fazla turda parçacık demetlerini hızlandırmayı hedefler. Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi'nde (CERN) dünyanın en büyük dairesel hızlandırıcı ve arpıŐtırıcı sistemi kurulmuŐtur. İŐvire'nin Cenevre Őehri yakınlarında kurulan CERN'deki Büyük Hadron arpıŐtırıcısı (BH), 27 kilometre uzunluğunda dairesel bir yörüngede iki proton demetinin enerjisini 7 TeV'e çıkardıktan sonra hızlanan demetleri kafa kafaya çarpıŐtırarak demetlerin kütle merkezinin sahip olduğu enerjiyi 14 TeV'e çıkarmayı hedefler. 1 eV, yükü e olan bir

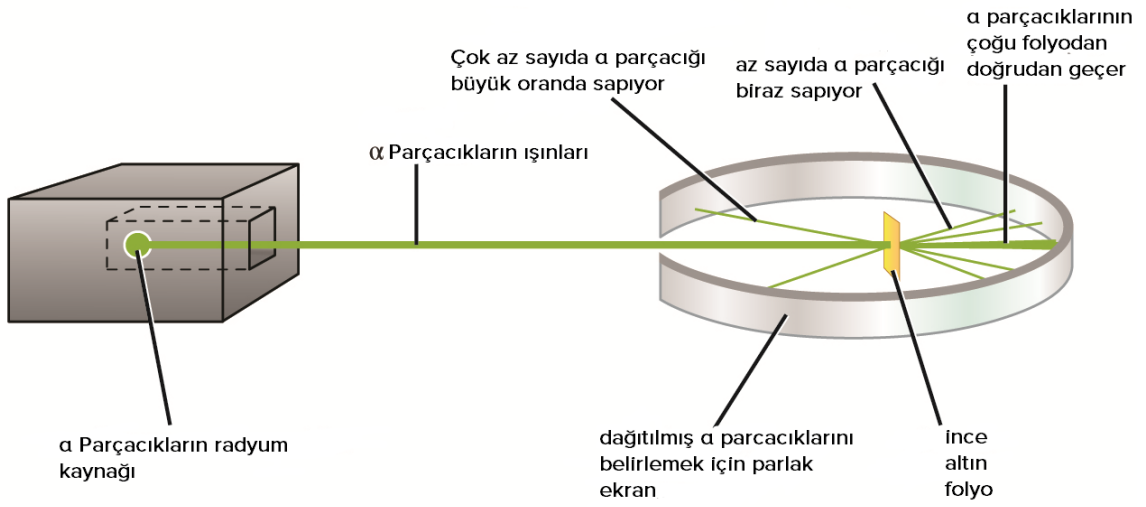
parçacığın, örneğin protonun 1 voltluk potansiyel farkla hızlandırıldığında kazandığı kinetik enerjidir. Bu verileri paylaşırken hızlandırılan demetlerin hızının değil doğrudan enerjisinin referans alınmasının sebebi, Einstein'ın cismin toplam enerjisi tanımı olan $E = \gamma mc^2$ formülasyonundan kaynaklıdır. Bu formüldeki E cismin enerjisini, m kütleyi, c ışık hızını, γ ise Lorentz faktörünü sembolize eder. Aynı zamanda voltaj ölçümü yaparak e ile çarpmak diğer enerji hesap yöntemlerinden daha kolay olduğu için hızlandırıcı sistemlerin enerji hedefleri elektronvolt (eV) cinsinden belirtilir.

7 TeV mertebesindeki enerjilere çıkarken enerjinin başka bir forma dönüşme ihtimalini en aza indirmeniz gerekir. Bu enerji seviyesine çıkarken demeti hızlandırmak ve yönlendirmek için kullanılan elektrik gücünün verimli aktarımı için süper iletkenler kullanılır. CERN'de deney sırasında elektriksel iletimde dirençten kaynaklı oluşabilecek kaybı en az düzeye indirmek için deneyin yapıldığı bölge kriyojenik sıcaklıklara, -271.3°C , düşürülür. Uzayın -270.5°C olduğu düşünüldüğünde BHÇ bilinen en soğuk yerlerden biridir [4]. Aynı zamanda femtometreler mertebesindeki parçacıklardan oluşan proton kümelerinin merkezleri (centroid) çarpışma noktalarında (interaction point) mikrometre mertebesinde hizalanabilmektedir. Mikrometre seviyesinde pozisyon hassasiyetine göre çarpıştırılması planlanan demetlerin buldukları yörüngeden sapmayacak şekilde odaklanması gerekir. Bu sebeple enerji arttırıldıkça demeti odaklamak için daha güçlü mıknatıslar kullanılmaktadır [5]. Aynı zamanda demeti oluşturan parçacıkların başka herhangi bir parçacıkla etkileşimi sonucu enerji kaybını önlemek için tüm sistem düşük vakum altında çalıştırılmaktadır (10^{-11} mbar) [6].

2.2.1. Rutherford Deneyi

Hızlandırma fikrinin ortaya çıkması Ernest Rutherford'a dayandırılır. 1911'de Rutherford, radyum kaynağından elde edilen $\frac{4}{2}\alpha$ parçacıklarının ince altın folyodan geçtiği bir deney yapmıştır. Bu deney düzenine oluştururken altın folyodan parçacıkların açılarının değişmeden karşıya geçmesini beklemiştir. Ancak levhanın arkasındaki algıçta alfa parçacıklarından bazılarının açılarının çok ufak değiştiğini gözlemledikten sonra algıç ekranı deney düzenine etrafını saracak şekilde değiştirmiştir. Şekil 2.1'de Rutherford'un çalıştığı deney düzeninin şeması verilmiştir. Bu şekilde deneyi tekrarladığında altın levhanın ön tarafında kalan levhaya dönüp çarpan alfa ışınları gözlemlemiştir. Rutherford, deney düzenindeki bulguların şaşırtıcılığını şöyle ifade etmiştir: "Tıpkı bir parça kağıt

mendile 40 cm kalınlığında bir mermiyle ateş etmişsiniz ve mermi geri dönüp size çarpmış gibi inanılmazdı." Bu keşifle birlikte J. J. Thompson atom modelinin yerini Rutherford modeli almıştır [7]. Parçacıkların bir yere veya birbirlerine çarpması sonucu değişen yönlerinin bir algıyla tespit edilmesi tüm dünyada kabul gören atom modelini değiştirmiştir. 1911'de atomun, bugün ise atom altı parçacıkların karakterlerini anlamak için hızlandırma, çarpıştırma ve algıta tespit edilen izlerin analizi parçacıklar hakkında sahip olunan bilgiyi arttırmaktadır.



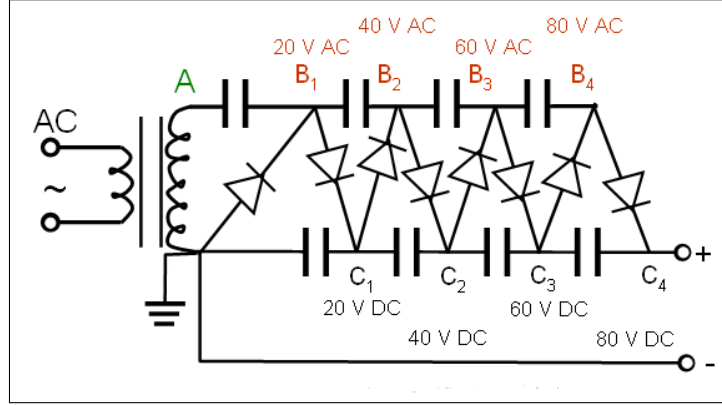
Şekil 2.1: Rutherford deney düzeneği [7]

2.2.2. Cockroft - Walton Üretici

Atomları ve atom altı parçacıkları araştırmak amacıyla yapılan deneyler ve denemelerde ihtiyaç duyulan yüksek gerilimleri üretmek için farklı yöntemler geliştirilmiştir. Cockroft-Walton üretici bu yöntemlerden biridir. 1929'da Van de Graff Makinası ve ardından 1932'de Ernest Rutherford'un destekleri ile John Cockroft ve Ernest Walton diyot ve kapasitörlerden oluşan bir devre aracılığıyla, düşük voltajlı alternatif akımdan, yüksek voltajlı doğrusal akım üreten bir voltaj üretici geliştirmeye başladılar. Bu cihaz ile J. Cockroft ve E. Walton ilk insan yapısı nükleer tepkimeleri gerçekleştirdikleri için 1951 Nobel Fizik Ödülü almışlardır.

Cockroft-Walton devresi, adeta merdiven gibi bir yapıyla ekleye ekleye gerilimi arttırmaktadır. Hedeflenen gerilim arttıkça bu üreticinin boyutlarının da ciddi anlamda büyümesi gerekir ve 1 MeV civarında bir maksimum limiti vardır [8]. Şekil 2.2'de bir CW üretici örneğinin eş devresi verilmiştir. Bu devre incelendiğinde, görüldüğü üzere üretilen

voltaj her adımda eklenerek artmaktadır. Bu devrenin ufak bir versiyonu eski tip katot ışın tüplü televizyonlarda bulunur.



Şekil 2.2: Cockcroft-Walton eş devresi diyagramı [9]

Günümüzde, Cockcroft-Walton üreticinin yerini ışınım sıklığı dörktuplusu diğer adıyla radyo frekans dörktuplusu (Radio Frequency Quadrupole, RFQ) sistemleri aldı. RFQ'ları tercih etmedeki etkenlerden biri boyut olarak çok daha ufak olmaları ve çoğu parçasının ömrünün uzun olmasıdır. Tezin gelecek kısımlarında (2.3) RFQ'nun temel prensiplerine değinilecektir.

2.2.3. Doğrusal Hızlandırıcılar

Doğrusal hızlandırıcılar yüklü parçacık demetini tek seferde bir doğrusal hat üzerinde hızlandırmayı hedefler. Hızlandırıcı mantığının en temel fikriyle ilk tanışma, çoğu insan için lise döneminde kondansatörlerle olmuştur. Belirli bir potansiyel farkla yüklenen iki paralel levha arasındaki parçacık, kendi yükünün zıt işaretlisiyle yüklü olan levhaya doğru elektrik alan vasıtasıyla ivmelenir. Bu temel prensipten yola çıkılarak, yıllar içinde doğrusal parçacık hızlandırıcı türleri artmış ve geliştirilmiştir. Doğrusal hızlandırıcılar alternatif akımla (AC) veya doğrusal akımla (DC) çalışır.

2.2.4. Sürüklenme Tüpleri

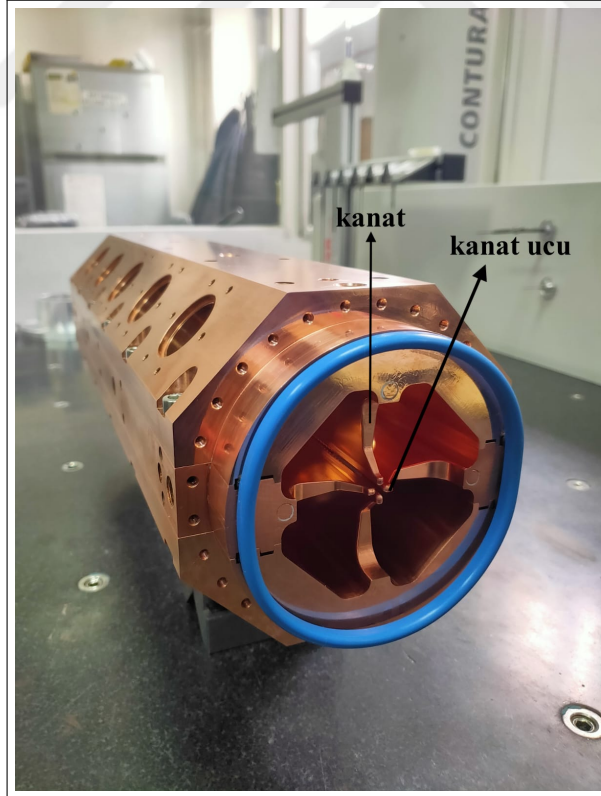
Sürüklenme tüpüyle doğrusal hızlandırıcı (Drift Tube Linac: DTL) ilk olarak R. Wideröe tarafından geliştirilmiştir ve alternatif akımın hızlandırma işleminde kullanılmasında güzel örneklerden biridir. Şekil 2.3'te görüldüğü üzere iyon kaynağından çıkan + yüklü iyonlar – yüklü tüp tarafından çekilir. AC akım kaynağının belirli radyo frekansta akımın yönünü

mertebesinde olan bir demeti MeV mertebesine çıkaracak kadar hızlandırabilir. Bir RFQ'dan beklenen 3 temel amaç vardır: sürekli bir demeti bohçalaması, demeti odaklaması ve yayını artırılmadan demeti hızlandırmasıdır. Hızlandırıcı fiziğinde hız yerine görelî hız parametresi olan βc kullanılır:

$$\beta = \frac{v}{c}. \quad (2.7)$$

Görelî parametre γ ise Denklem 2.8'de gösterilmiştir.

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}. \quad (2.8)$$



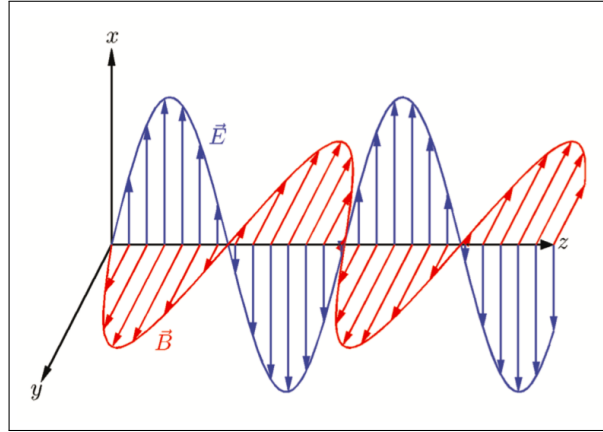
Şekil 2.5: 800 MHz deneme üretimi RFQ, KAHVELab

RFQ, düşük β 'lı sistemleri hızlandırmada etkili bir yöntemdir. RFQ'yu etkili olduğu kadar ilginç kılan bir diğer özellik hedeflenen çıkış enerjisi arttıkça giriş enerjisinin daha

yüksek tercih edilmemesidir. Örneğin 3 MeV'e ulaşılacak istenen bir sistemde demetin RFQ'ya giriş enerjisi 100 keV yerine 20 keV tercih edilebilir. Bunun en temel sebebi protonların hızlandırılmaya başlanmadan önce bohçalanmasının gerekliliğidir. Düşük β 'lı proton demetini bohçalamak, odaklamak ve kontrol etmek, yüksek β 'lı protonları istenilen şekilde bohçalayıp hızlandırmaktan ve onları kontrol etmekten daha kolaydır. Ancak, mevcut demetin akımı artırılmak istendiğinde demetin çıkış gerilimi 20 keV yerine 50 keV tercih edilebilir. Sonuç olarak, RFQ tasarımı sırasında yapılan simülasyon çalışmalarında tüm bu parametreler ve hedeflenen çıkış enerjisi göz önünde bulundurulmalıdır. RFQ'lar kullanılacak RF güç sağlayıcılara göre tasarlanır ve rezonans frekansı belirlenir [13].

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) \vec{E} = 0 \quad (2.9)$$

Maxwell denklemlerinin (Denklem 2.1) boş uzaydaki çözümlerinden biri elektromanyetik dalgaların enine elektromanyetik alanlar olduğunu gösterir. Enine elektromanyetik alanlar (Transverse Electromagnetic Mode) TEM modu olarak kısaltılır [11]. Denklem 2.9 kartezyen koordinatlarda elektrik alan için dalga denklemdir. Şekil 2.6'da alanların yönleri ve elektromanyetik dalganın dağılım yönü ve alanların birbirlerine dik olduğu görülmektedir.



Şekil 2.6: Boş uzayda z yönünde ilerleyen dalga için elektromanyetik dalganın elektrik alanı ve manyetik alanı [14].

2.3.1. TEM Modları

Belirli sınırları olan dalga kılavuzları için hesap yapıldığında geometri sayesinde TE (Enine Elektrik) veya TM (Enine Manyetik) modlarının da mümkün olduğu görülür. Denklem 2.10

ve 2.11 metal bir hızlandırıcı kovuğun sınır koşullarıdır. RFQ için sınır koşullarına göre Denklem 2.9 çözülür ve RFQ'nun kanatlı yapısı elektromanyetik alan modunda (TEM) rezonans yapacak şekilde ayarlanır [11].

$$\vec{E}_{\parallel} = 0 \quad (2.10)$$

$$\vec{B}_{\perp} = 0 \quad (2.11)$$

Geçirgenliği (permeability; μ_0) sabit olan maddelerin oluşturduğu sistemlerde elektrik ve manyetik alan denklemleri doğrusaldır. Bu doğrusallığın avantajı, denklemlerin üst üste binme özelliğinin (superposition principle) uygulanabilir olmasıdır. Aynı zamanda Maxwell denklemlerinin belirli bir sınır şartındaki çözümlerinin \vec{E}_1, \vec{B}_1 ve \vec{E}_2, \vec{B}_2 olduğu görülür [14]. Bu durumda doğrusallık yeni bir ifade şeklini mümkün kılar;

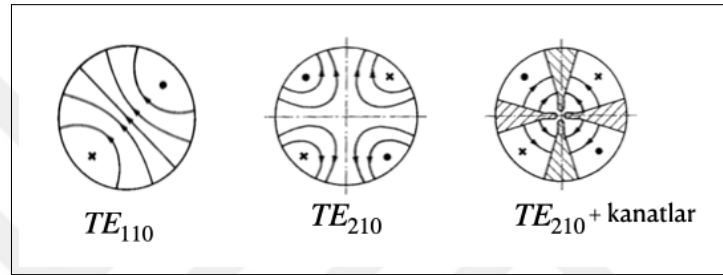
$$\begin{aligned} \vec{E}_T &= \vec{E}_1 + \vec{E}_2 \\ \vec{B}_T &= \vec{B}_1 + \vec{B}_2 \end{aligned} \quad (2.12)$$

Denklem 2.12 aynı sınır koşullarına bağlı çözümleri ifade eder. Bu özellik tıpkı iki boyutta hareket eden bir cismin hareketinin iki ayrı eksendeki hareketin toplamı olarak yazılması gibi, çözümü daha karışık alan denklemlerini daha basit alan denklemlerinin üst üste binmesi şeklinde, diğer deyişle alan denklemlerinin toplamı olarak yazılabilir [14].

RF boşlukları ve dalga kılavuzları gibi elektromanyetik sistemler için önemli ve yaygın olarak kullanılan Maxwell denklemlerine daha eksiksiz ve karmaşık çözümler kümesi bulmak hesapları pratik hale getirir. Bu çözümlerin değişkenleri modlar olarak bilinir; modlar genellikle mod indeksleri kullanılarak ifade edilir. Örneğin, boş uzaydaki elektromanyetik dalgalar, dalganın yönünü ve dalga boyunu tanımlayan dalga vektörünün üç bileşeni kullanılarak gösterilebilir. Salınım frekansı gibi elektromanyetik alanların önemli özellikleri,

genellikle mod indeksleri cinsinden ifade edilebilir. Örneğin silindirik bir kovukta $TE_{n,m,l}$ şeklinde bir ifadede; n yönsel, m çapsal, l ise boysal TE modlarını ifade eder. Şekil 2.7 incelendiğinde; $n = 1$ iki kutuplu (dipole), $n = 2$ ise dört kutuplu (quadrupole) bir sistemi, $m = 1$ çapsal olarak merkezden uzaklaştıkça alanın yönünün değişmediğini, son olarak $l = 0$ ise boyuna ekseninde alan oluşmadığını ifade eder. Dört kutuplu ve kanatlı (elektrotlu) hızlandırıcı bir kovuk için uygun enine elektrik alan modu TE_{210} 'dur [11].

Hızlandırıcı sistemde kullanılan RFQ kovuk TE_{210} modunda rezonans yapacak şekilde ayarlanır [11].

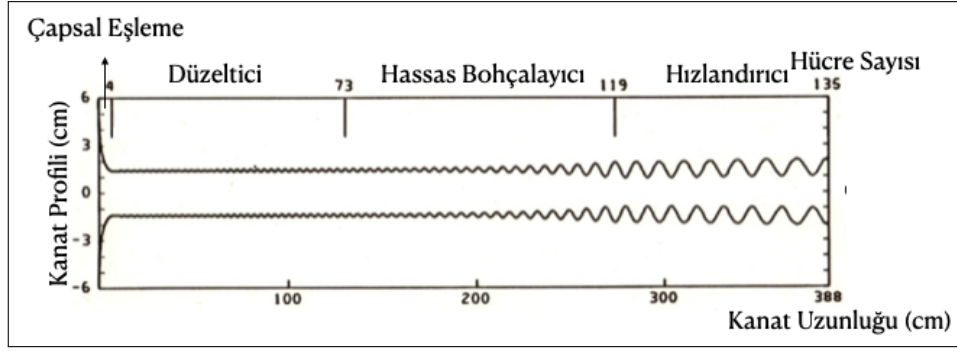


Şekil 2.7: Farklı modların gösterimi [15]

2.3.2. Kanat Yapısı

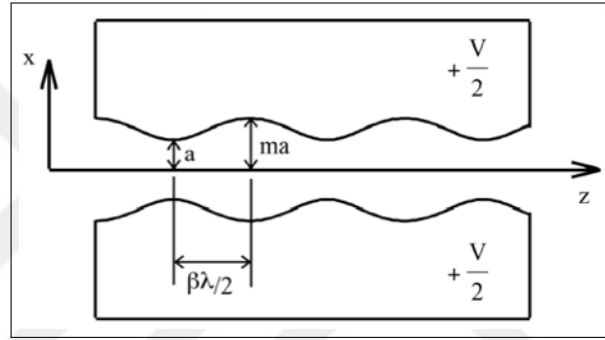
RFQ'nun kanat uçları kipli (modulation) bir yapıdan oluşur. Bu kiplemelerin genliği ve geometrisi uygulanacak RF alanın frekansına göre benzetim çalışmalarıyla belirlenir. Benzetim çalışmaları için ParmTeq, Toutatis, Lidos tasarım programları kullanılmıştır [16–18]. Şekil 2.8'de RFQ'nun bir kanadının yandan görünüşü verilmiştir, diğer deyişle y ekseninden bakıldığında görülen görüntüdür. Kanat profili; çapsal eşleme, düzeltici, hassas bohçalayıcı ve hızlandırıcı kısım olmak üzere sırasıyla dört kısma ayrılmıştır. RFQ'ya giren demet ilk iki kısımda önce odaklanır, üçüncü kısımda bohçalanır ve bohçalanan demet son kısımda hızlandırılır.

Karşılıklı kanat uçlarının oluşturduğu bölmelere odacık denir. Odacıklara yaklaşıldığında kanadın yandan görüntüsü Şekil 2.9'daki gibi olur. Şekilde gösterilen m kip faktörüdür, kanat ucunun z eksenine maksimum uzaklığı ile ilgilidir. a ise demetin odaklandığı eksenin RFQ'nun kanat ucundaki tepelere mesafesini, diğer bir deyişle kanatların z eksenine minimum mesafesini sembolize eder. Gittikçe artan görelî β , gittikçe büyüyen kipleme genliği gerektirir. RFQ'nun üretimindeki zorluklardan biri bu kiplemelerin yüksek hassasiyetle üretilmesidir. Daha küçük bir yüzeyde daha hassas üretim, malzemenin işçilik



Şekil 2.8: Kanat profili [15]

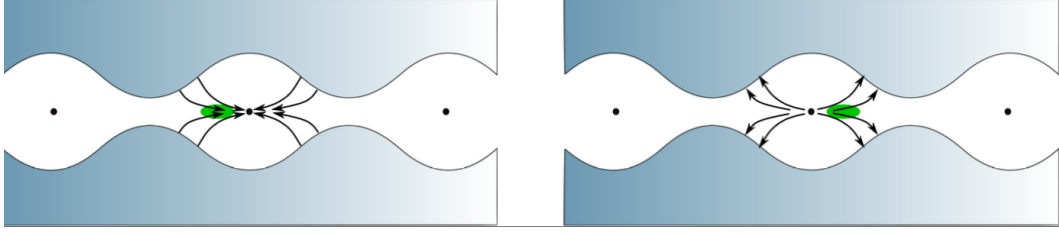
maliyetini arttırmaktadır [15].



Şekil 2.9: Odacık ve kipler [15]

Çapsal eşleme ve düzeltici kısmında RFQ'nun kabul ettiği demet odaklanır ve merkeze oturması sağlanır. Ardından demet hassas bohçalayıcı kısma girer ve $z - z'$ ekseninde demet ayraç (separatrix) hareketi yaparak bohçalanmaya başlar. Bohçalama kısmında demete erken gelen parçacıklara daha az elektrik alan, daha geç parçacıklara daha fazla elektrik alan verilerek parçacıklar birbirlerine yaklaştırılır ve adeta paketlenir; bohçalanırlar. Şekil 2.10'da bir demet bohçasının belirlenen RF frekansında salınım yapan güç kaynağının oluşturduğu potansiyel fark altında aynı frekansta salınım yaparak yön değiştirdiği görülmektedir. Şekil 2.11'de parçacıkların doğru faza oturtularak bohçalanması elektrik alana ve zamana bağlı şekilde görsellenmiştir. Bu görselde, ayrıca belirli bir anda parçacıklarda oluşan etki de gösterilmektedir. Zamanla hızlanan parçacık yavaşlayacak, diğer bir deyişle geride kalacak sonra tekrar hızlanacak ve tekrar yavaşlayarak bu şekilde bir döngüyle bohçalanacaklardır. Bu dönme hareketi sırasında demet ayraç (separatrix) çizer.

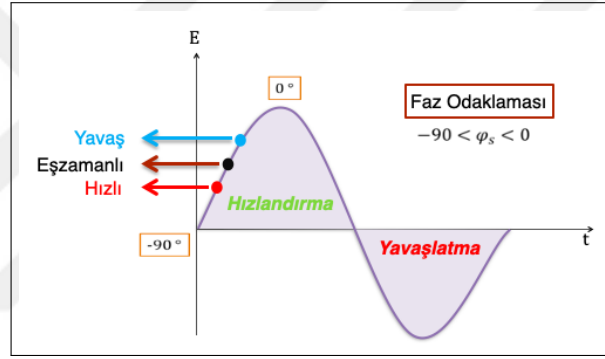
Denklem 2.13 her bir salınımda değişen voltaj değerini vermektedir. Son kısımda ise bohçalanmış demet kiplere doğru fazda bindirilerek elektrik alan vasıtasıyla hızlanır.



Şekil 2.10: Demetin değişen elektrik alanla hızlanması çizimi (Dr. Veli Yıldız tarafından oluşturulmuştur)

$$V_t = V_0 \sin(\omega t).$$

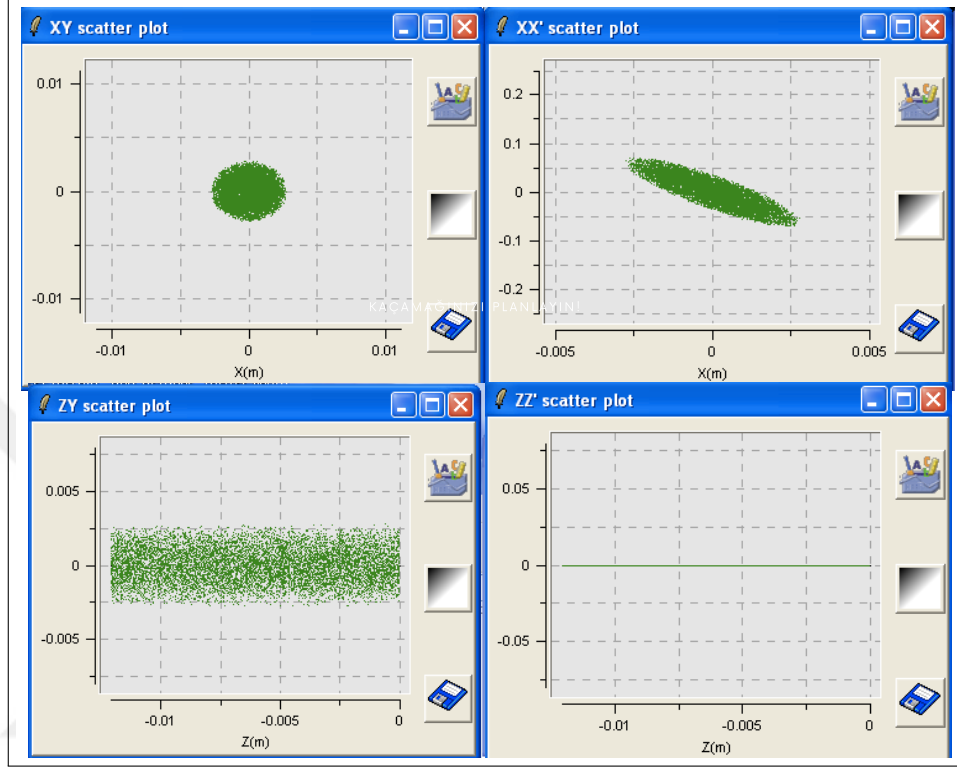
(2.13)



Şekil 2.11: Demeti bohçalama [15]

Şekil 2.12, Şekil 2.13 ve Şekil 2.14'teki grafikler Toutatis adlı demet benzetim programı çalıştırıldığında elde edilen çıktılardır [17]. Bu grafiklerde demetin RFQ'nun içindeki konumuna göre parçacıkların konum ve faz uzayı çıktıları gösterilmektedir. Şekil 2.12'de demetin henüz RFQ'ya girmeden önceki $x-x'$ faz uzayını, $z-y$ ve $x-y$ konumunu göstermektedir [17]. Benzetimi yapılan RFQ 8 metre uzunluğundadır ve RFQ'ya giriş enerjisi 100 keV olan demetin enerjisini 5 MeV'e yükseltmeyi amaçlamaktadır. Şekil 2.13'te demetin $z-y$ düzleminde hassas bohçalaması henüz başlamıştır. Demet $z-z'$ (sağ alt) düzleminde hafifçe dönmeye diğer bir deyişle ayraç (separatrix) çizmeye başlamıştır. Görselin tam ortasındaki kontrol panelinde demet RFQ'ya giriş yaptıktan sonra geçen süre nanosaniye biriminde verilmiştir. Kontrol paneli üzerinde altta yer alan çubuk, demetin RFQ'nun yüzde kaçından geçtiğini göstermektedir. Şekil 2.14'te sol altta yer alan $z-y$ grafiği Şekil 2.13 ile karşılaştırıldığında demetin bohçalandığı gruplara ayrıldığı görülmektedir. Aynı zamanda hemen sağındaki $z-z'$ grafiğinde demetin çizdiği ayraç (separatrix) görüntülenmiştir. $x-y$ grafiğindeyse sarı uçlar RFQ'nun dört kanadının

görselidir [17]. Demet, x - y ekseninde elektrik alan vasıtasıyla RFQ'nun merkezine doğru odaklanır. Hemen sağındaki x - x' grafiği ileride Kısım 3.1'de bahsedilecek olan faz uzayının görüntüsüdür.

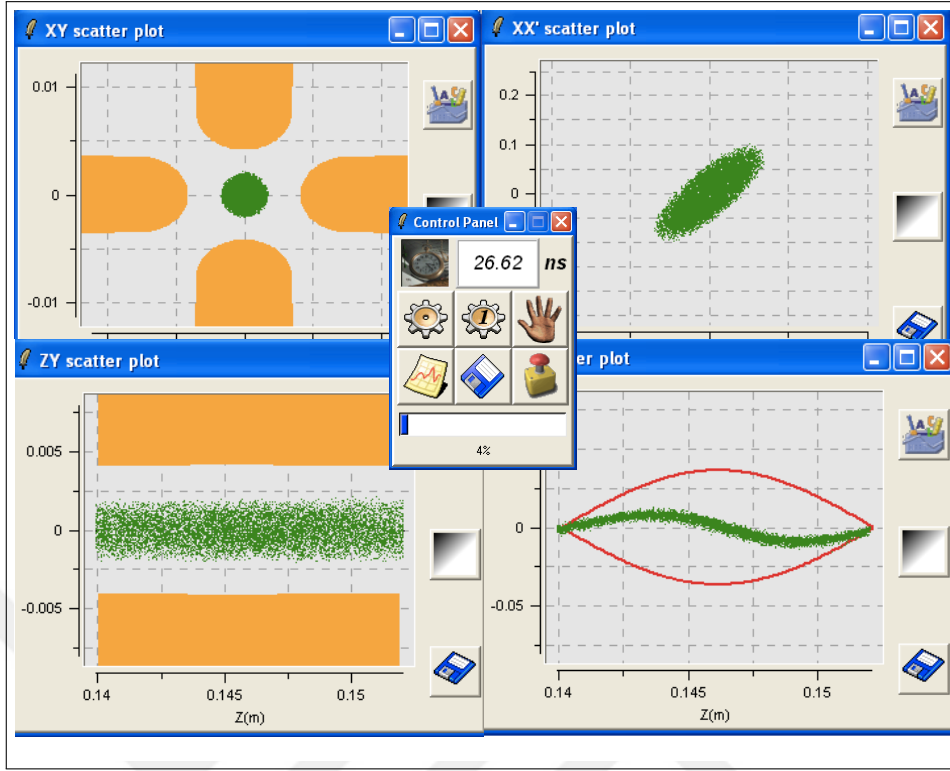


Şekil 2.12: Toutatis programıyla demet RFQ'ya girmeden önce elde edilen konum grafikleri

RFQ'nun kanatları uygulanan gerilimlerle yüklü elektrotlar gibi düşünülmelidir. Bu kanat uçları yüklü ve birbirine yakın duran iyi iletkenlerden oluşan bir yapı olduğu için kapasitör (C) gibi davranır. Kanat dipleri ise indüktör (L) gibi davranırlar. Böylece RFQ'nun iki kanadının arasında bir RLC devresi oluşur. RFQ'nun eş devresi Şekil 2.15'teki gibi olur [15]. 4 adet LC rezonansı elde edilmiş olur ve rezonans RF frekansı Denklem 2.14 ile hesaplanır [15]. Burada frekans f , indüktans L ve kapasitör C ilişkisi verilmiştir.

$$f^2 = \frac{1}{LC} \quad (2.14)$$

RFQ'nun kanat tasarımı yapılırken dikkat edilmesi gereken bir özellik de cesaret katsayısı (Kilpatrick; KP) adı verilen değerdir. Bu değer, doğrusal akım (DC) veya alternatif akımla (AC) çalışan sistemlerde RF güç yüklemesi altındaki kanat uçları arasında bir atlama

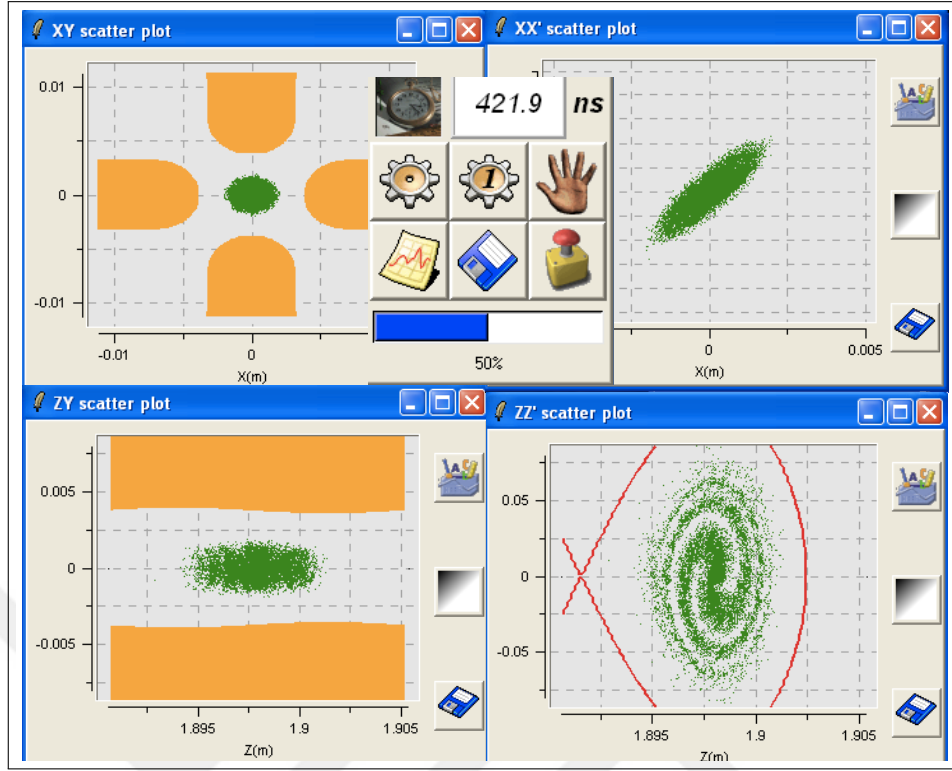


Şekil 2.13: Toutatis programıyla RFQ'ya yeni girmiş bir demet için elde edilen konum grafikleri

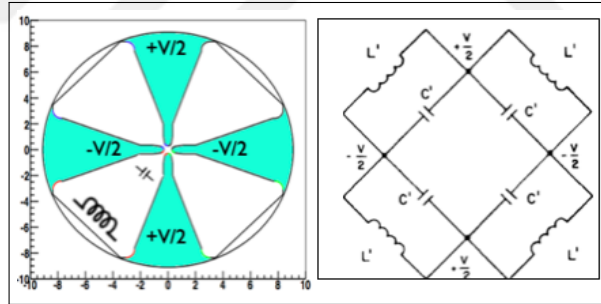
olmadan kanatlarda ulaşabilecek en yüksek elektrik alan limitini verir. İlk olarak 1950'lerde tamamen deneysel sonuçlardan oluşturulan formülasyon T.J. Boyd tarafından 1982'de derlenmiş ve Denklem 2.15'teki halini almıştır [19]. Günümüz teknolojisiyle Denklem 2.15'te verilen KP değerinin 1.8 katına ulaşılacak mümkün hale gelmiştir. Teknoloji geliştikçe cesaret katsayısı da artmıştır [15, 20].

$$f = 1.64 \times E(MV/m)^2 \times e^{-8.5/E(MV/m)} MHz \quad (2.15)$$

Şekil 2.16'daki grafiklerden *Kilpatrick* isimli grafikte RFQ'nun KP değerinin 1.7 civarına ulaştığı görülmektedir. RFQ'nun kinetik enerjisinin nasıl değiştiği "*Kinetic Energy*" isimli grafikte MeV mertebesinde gösterilmiştir (kırmızı çizgi gerçek değeri, mavi çizgi beklenen değeri ifade eder). "*Modulation*" isimli grafikte kiplemenin (m) nasıl değiştiğinin benzetimi yapılmıştır. Bu benzetim programının örnek dosyasındaki çıktılar kullanılarak RFQ'nun demette meydana getirdiği değişiklikler görsellerle ifade edilmiştir [17].



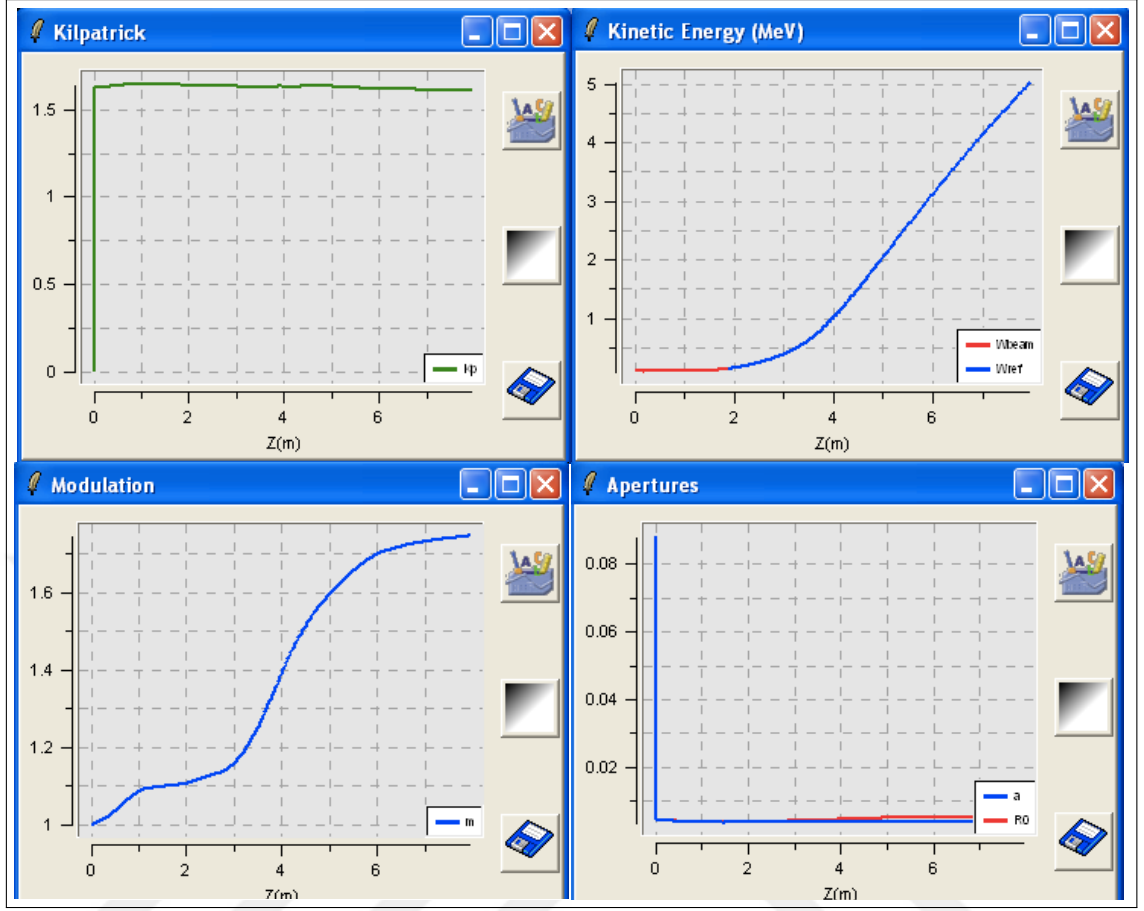
Şekil 2.14: Toutatis programıyla RFQ'nun tam ortasında elde edilen demetin konum grafikleri



Şekil 2.15: Kanat gerilim şeması ve kanatlar arası eşdevresi

2.3.3. Rezonans Frekans

Üretilecek RFQ'nun çalışacağı frekansı seçmek önemlidir. Seçilen frekans, kanatlar arasında oluşan RLC devresinin direnç faktörünü doğrudan etkiler. AC sistemlerde güç iletimi ve DC sistemlerde güç iletiminin birbirinden farkı, DC'de elektriğin sürekli olarak bir yoldan, örneğin bir kablunun içinden geçerek iletilmesidir. Bu iletim esnasında sürekli elektriğin kabloyla teması güç kaybına neden olur. DC sistemlerde oluşan direnç Denklem 2.16'da verilmiştir:



Şekil 2.16: Toutatis programıyla elde edilen RFQ'nun ortasındaki demetin KP, kinetik enerji, kipleme ve açıklık grafikleri [17]

$$R_{DC} = \rho \frac{L}{A}. \quad (2.16)$$

Bu denklem DC sistemlerde oluşan direncin, ρ öz direnç, kablunun uzunluğu L ve kesit alanı A ile ilişkisini gösterir. AC güç iletimlerinde, belirli bir frekansta salınım yapan bir alan oluşur. AC güç kaynağı ile üretilen elektromanyetik alanın sürekli olmayışı, dağıldığı yüzeye nüfuzunu kısıtlar. Bu etkiye yüzey katmanı etkisi denir. Bir AC kaynakla üretilen alanın nüfuz edebildiği ve akımın $1/e$ değerine indiği derinliğe deri kalınlığı (skin depth) denir ve δ ile gösterilir:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\sigma \mu_0 \omega}}. \quad (2.17)$$

Bu değer kullanılan materyalin iletkenliği (σ), boş uzay geğirgenliği (μ_0) ve frekansla (f) doğrudan ilişkilidir. Bu hesaplar yapılarak üretilecek iletken kovukların maliyeti düşürülebilir. Örneğin, bakırdan üretilen ve 100 MHz'de çalışan bir kovuğun deri kalınlığı " μm " mertebesinde olacaktır. İçerideki alan yalnızca δ kadar yüzeyi "hissedebileceği" için kovuğun geri kalan kısmı daha kötü bir iletkenle üretilebilir. Bir kaç δ 'ya kadar yüksek iletkenlikli materyal kullanmamak, güç iletiminde önemli bir parametre olan kalite faktörünü kötü etkiler. Kalite faktörüne Kısım 3.4'te değinilecektir. δ 'yla ilişkili olarak direnç tanımlanabilir. AC güç iletiminde oluşan yüzey direnci $R_{\text{yüzey}}$ ile verilmiştir. Deri kalınlığı (δ) bu denklemde yerine yazılırsa:

$$R_{\text{yüzey}} = \frac{1}{\sigma\delta} = \sqrt{\frac{\mu_0\omega}{2\sigma}} \quad (2.18)$$

Denklem 2.18 elde edilir. Böylelikle, yüzey direnci ve frekans arasındaki ilişki doğrudan görülebilir. AC güç iletiminde, frekansın doğrudan aktarılacak güç miktarına etkisi, hızlandırıcı sistemlerde çalışılacak rezonans frekansın belirlenmesinde etkili olur.

Aynı zamanda frekans, yol özdirenci (shunt impedance) Z , \sqrt{f} ile orantılıyken, kalite faktörü Q ve kovuk üzerinde kaybedilen güç $P_{\text{kayıp}}$, $\sqrt{\frac{1}{f}}$ ile orantılıdır. Tüm bu parametrelere ek olarak rezonans frekans, üretilecek hızlandırıcı kovuğun uzunluğunu belirlemede rol oynar. Yüksek frekanslara çıkılmak istendike elektromanyetik dalganın boyu kısalır, dalganın boyu kısalırsa kovuğun boyu da kısalır. Bu kısalma kovuğun aynı hassasiyetlerle üretilmesini zorlaştırır [13].

2.4. DEMET DİNAMIğI

2.4.1. Yayınım

Hızlandırıcı sistemlerinde proton/elektron demetinin veya bohçasının dinamiği üzerinde çalışılırken karşılaşılan ilk niceliklerden biri "*yayınım*" (emittance)'dır. Hızlandırıcı fiziğinde, bohalanmış veya bohalanmamış bütün demetlerde, birim hacimdeki demet yoğunluğunun belirlemesi açısından yayınım, en önemli 'demet kalitesi' parametrelerindedir. Hızlandırıcı fiziğinde hızlandırıcı kovuk benzetimleri yapılırken demetin bir bütün halinde, kayıpsız ve faz uzayında yoğunluğu azalmadan hızlandırılması ve

aktarımı hedeflenir. Demetteki her bir parçacık üç konum ve üç momentum koordinatlarıyla tanımlanır.

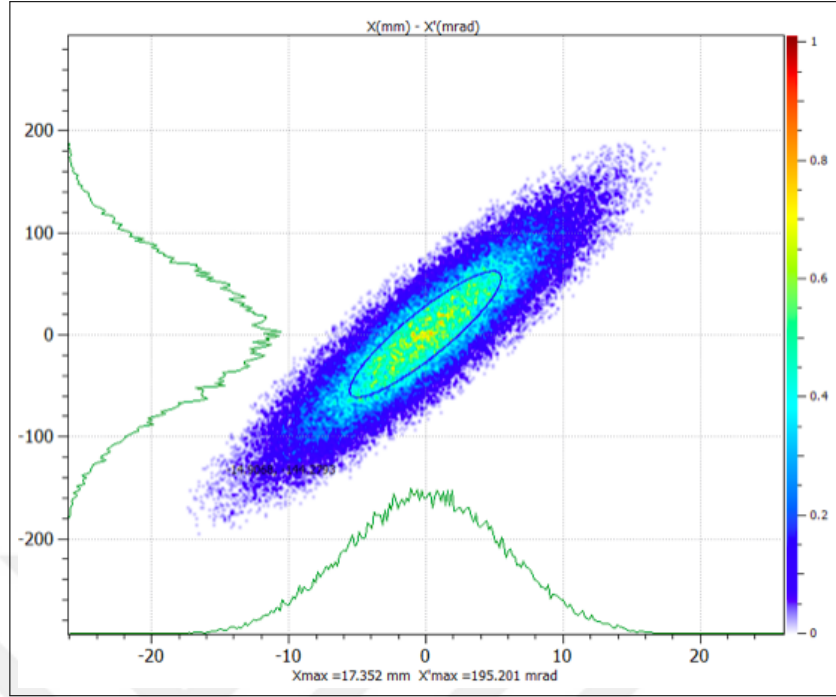
1 A'lik akımın geçtiği bir kablodan saniyede 6.24×10^{18} tane elektron geçtiği düşünüldüğünde, vakum ortamında 1 mA'lik bir proton demetindeki parçacık sayısı 6.24×10^{15} olur. Bu kadar büyük ölçekte bir parçacık demetinde, her parçacığın üç boyutlu uzaydaki konum (x, y, z) ve momentum (x', y', z') bilgisi de düşünüldüğünde demeti tanımlamak için gereken büyüklük sayısı 6 katına, yani 3.74×10^{16} 'ya çıkar [21]. Her bir parçacık, demetin 6 boyutlu faz uzayı projeksiyonu üzerinde bir noktaya sahip olur. Demetin faz uzayı; demetin konum, açı ve yoğunluk bilgisinden oluşur. Parçacıkların konumlarının demetin hareket ettiği z eksenine göre türevi parçacığın o konumdaki açı bilgisini verir:

$$x' = \frac{dx}{dz} = \tan \theta \approx \theta. \quad (2.19)$$

Küçük açı yaklaşımıyla $\tan \theta \approx \theta$ olur. Demet dinamiğinde demetin konumu için "mm", açısı için "mrad" birimi tercih edilir. Aynı konum ve aynı açıda kaç tane parçacık olduğu ise yoğunluk kavramı ile tanımlanır. Şekil 2.17'de sağdaki dikey renk sütunu yoğunluk bilgisini vermektedir.

Korunumlu kuvvetler altında üretilen demetlerin faz uzaylarının eliptik olması beklenir. Bu eliptik şeklin temel nedenlerinden biri hızlandırıcılardaki doğrusal odaklayıcı kuvvetlerin baskınlığıdır ve her bir parçacığın yörüngesi bir elips üzerindedir. Faz uzayında demetler eş yoğunluklu, eş merkezli ve yörünge geometrisinin benzerlik göstermesine göre eşleşen demetler (matched beams) olarak sınıflandırılırlar [13]. Şekil 2.17'de, IBSimu (Ion Beam Simulator) programında üretilen 50.000 parçacıklı bir demetin, Plotwin benzetim programındaki $x-x'$ faz uzayındaki çıktısı gösterilmektedir [22, 23].

Demet dinamiği benzetimleri yapan programların demette bulunan her parçacığın izlediği yolu takip etmesi program için ciddi bir hesap yükü oluşturur ve bu sebeple de pratik değildir. Her bir parçacık için hesap yapmak yerine programlar tanımlanan makro parçacıklar için bu hesapları gerçekleştirir. Makro parçacıklar, demette yer alan parçacıklarla aynı yük ve kütle oranına sahiptirler [24].



Şekil 2.17: Plotwin’de benzetimi yapılan bir demetin faz uzayı [23]

Demet dinamiğinde iki boyutlu faz uzayı projeksiyonu için oluşturulan elipsin alanıyla orantılı bir nicelik tanımlanmıştır. Bu elipsin uzun kenarı a , kısa kenarı b olmak üzere Denklem 2.20 elipsin alanını vermektedir. Alan hesabının sonucu olan bu nicelik yayınım olarak isimlendirilmiştir ve demet profilini belirlemede kritik bir büyüklüktür [13]. Yayınım, ε ile gösterilir:

$$A = \pi ab, \quad (2.20)$$

$$\varepsilon = \frac{A}{\pi}.$$

Demetin yayınımini ölçmenin bir kaç yolu vardır. Bunlar; düşük enerjilerde tuzluk yöntemi, çoklu yarık yöntemi veya yüksek enerjilerde dört kutuplu tarama yöntemleridir [25]. Dairesel hızlandırıcı sistemlerin aksine doğrusal parçacık hızlandırıcısı sistemlerinde, demet hızlandırıcı sistemin içinden bir kez geçer. Bu tek seferlik geçişte yayınımin ve demet profilinin diğer özelliklerinin ölçülmesi gerekir. Doğrusal hızlandırıcı sistemlerinde demet sisteme giriş yaptıktan kısa bir süre sonra (RFQ’ya girişinden önce) belirlenen bir metotla yayınım ölçümü yapılır. Ölçülen geometrik yayınıminin görelî şekli olan normalize yayınıminin içsel dışsal etkilerin olmadığı bir sistemde Liouville teoreminden ötürü korunması beklenir

[26]. Değişmeyen bir özellik olan yayınım hızlandırıcı sistemlerde bir referans olarak kullanılır. Uzay yükü etkisinin baskın olduğu düşük enerjili demetlerde uzay yükü etkisi yayınımları arttırabilir. Bu durum demetin faz uzayı büyüdükçe parçacık yoğunluğu azalacağı ve demetin kontrol edilmesi zorlaşacağı için istenmeyen bir durumdur [13]. RFQ'nun demeti kabul ettiği bir yayınım değeri vardır ve hızlandırılma boyunca parçacık kaybı en az düzeyde olacak şekilde hızlandırılma işlemi yapılırken yayınımların belli bir sınır dışında artmaması gerekir. Bu nedenle yayınım ölçümü demet RFQ'ya girmeden önce kurulan ölçüm düzeneklerle yapılmaktadır.

2.4.2. Twiss Parametreleri

Bir elipsi çizebilmek için en az üç parametreye ihtiyaç vardır. Bunlar; kısa çap, uzun çap ve elipsin x eksenine yaptığı açıdır. Demetin faz uzayı elipsini çizerken yayınım bilgisi dışında gerekli olan diğer iki parametre demetin hareket denkleminin çözülmesiyle türetilir. Bu parametrelere Twiss (Courant-Synder) parametreleri denir ve $\alpha_t, \beta_t, \gamma_t$ ile gösterilir. Geometrik yayınım Twiss parametreleri cinsinden aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\frac{A}{\pi} = \beta_t x'^2 + 2\alpha_t x x' + \gamma_t x^2 = \epsilon_{rms}. \quad (2.21)$$

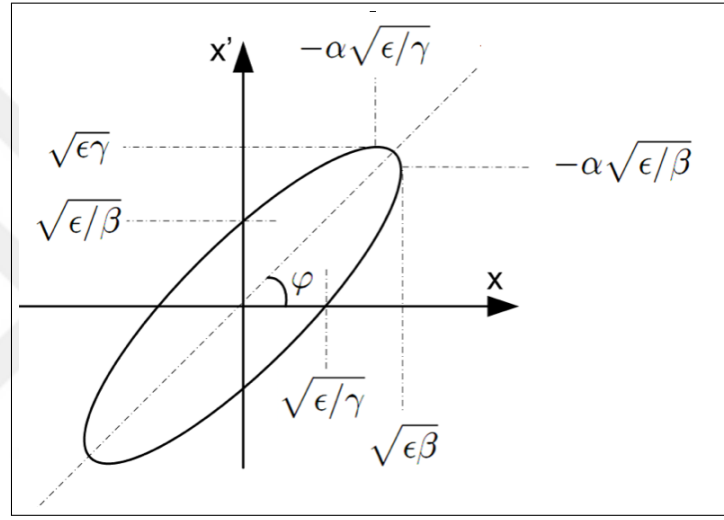
Faz uzayı elipsindeki belirli bir bölgede, parçacıkların büyük çoğunluğunu kapsayan bir alan üzerinden de yayınım yaklaşımı yapılabilir. Geometrik yayınımların karekök ortalaması (rms; root mean square) ile ifade edilen ϵ_{rms} ; demetin %39'una yani 1σ 'ya, 4 rms ise demetin %87'sine yani 2σ 'ya karşılık gelir. Hızlandırıcı fiziğinde genel olarak 6 ve üzeri rms ile yaklaşımlar yapılır, bu da demetin %95'inden fazlasına karşılık gelir. İstatistiksel olarak %95 oran yaklaşım yapabilmek için kabul edilebilirdir.

ϵ_{rms} 'i doğrudan Twiss parametreleriyle ifade etmek de mümkündür [21]:

$$\alpha_t = -\frac{\langle x x' \rangle}{\epsilon_{rms}}, \quad (2.22)$$

$$\beta_t = \frac{\langle x^2 \rangle}{\epsilon_{rms}} = \frac{\sigma_x^2}{\epsilon_{rms}}, \quad (2.23)$$

$$\gamma_t = \frac{\langle x'^2 \rangle}{\epsilon_{rms}} = \frac{\sigma_{x'}^2}{\epsilon_{rms}}. \quad (2.24)$$



Şekil 2.18: Twiss parametreleriyle demet faz uzayı [21]

Demetin hareket denkleminin çözümünde x ve x' yerine demet dosyasından alınan değerler yazılarak Twiss parametreleri cinsinden elde edilen faz uzayındaki maksimum, minimum ve merkez gibi önemli noktalar Şekil 2.18'de gösterilmiştir.

Yayınımı, konum ve açıların karekök ortalaması üzerinden ifade etmek de mümkündür. Gerekli dönüşümler yapıldığında:

$$\epsilon_{rms} = \sqrt{\langle x^2 \rangle \langle x'^2 \rangle - \langle xx' \rangle^2}. \quad (2.25)$$

denklemini elde edilir. ϵ_{rms} içsel etkileşimlerle, örneğin uzay yükü etkisiyle büyüyebilir veya adyabatik sönümlenme ile küçülebilir, değişebilir. Hızlanmayla göreceli β ve γ değerleri değişir. Bu noktada ϵ değerinin normalize (normalized) hali aşağıdaki gibi tanımlanabilir, buna normalize yayılımı denir ve ϵ_{norm} ile gösterilir. ϵ_{norm} parçacıkların göreceli koordinat

sisteminden ölçülen faz uzayıdır. Normalize edilmiş yayılım:

$$\varepsilon_{norm} = \beta \gamma \varepsilon_{rms} \quad (2.26)$$

denklemini kullanılarak bulunabilir.

2.5. UZAY YÜKÜ

Parçacıkları hızlandıran sistemler, iyon kaynağında üretilen demetin enerjisini belirlenen düzeye ulaştırmayı hedefler. Bu enerji artırma sırasında demetin dış veya iç etkenlerle enerjisinin farklı bir forma dönüşmesi istenen durumlardan biri değildir. Hızlandırılan elektron veya proton gibi atom altı parçacıkların hızlandırıcının içinde bulunabilecek herhangi bir elementle veya iyonla etkileşmesi sonucu demetin enerjisi değişir, bu sebeple hızlandırılacak demetlerin mıknatıslar yardımıyla hızlandırıcı hattın merkezine odaklanması sağlanır. Demetin enerjisinde değişime sebep olan fenomenlerden biri olan yayılım büyümesi (emittance growth) ve parçacık kaybını en az düzeyde tutmak için demet içi etkileşim türlerinden biri olan uzay yükü etkisinin benzetim çalışmaları yapılmalıdır.

Hızlandırıcı sistemlerin kabul ettiği demetler tasarlanırken dikkate alınması gereken parametrelerden biri de bu odaklanmanın bir sonucu olarak ortaya çıkan uzay yükü etkisidir. Aynı yüklü ve farklı yüklü iyonların birbirine uyguladıkları kuvvet "Coulomb kuvveti" olarak adlandırılır (Denklemler 2.3). Demet içinde oluşan net Coulomb etkileşimleri ikiye ayrılır:

- Çarpışma Rejimi (collisional regime),
- Toplu Rejim (collective regime) veya Uzay Yükü.

Çarpışma rejimi, birbirine yakın parçacıkların ikili çarpışmalarının baskın olduğu sistemlerde dikkate alınması gereken bir etkileşimdir. Toplu rejim ise parçacıkların dağılımı sonucu oluşan içsel kuvvetlerin yarattığı iç etkileşimlerin baskın olması durumunda dikkate alınmalıdır [27]. Uzay yükü, üretilen demet içerisindeki aynı yüklü parçacıkların birbirine

uyguladığı Coulomb kuvvetinin ortalamasına denir. Coulomb kuvvetinin yani her bir yükün diğer tüm yüklerde oluşturduğu birebir etkisinin hesaplanması, n parçacıklı bir demette her bir parçacığın n-1 tane parçacık üzerinde etkiye sebep olması demektir. Bunu uygulamak için, 5 milyon parçacıklı bir demetin içerdiği her bir parçacığın, kendi başına diğer parçacıklar üzerinde yarattığı $5 \times 10^6 \times 4\,999\,999$ tane etki hesabının benzetim programına yaptırılması gerekir. Bu kadar fazla hesabı bir benzetim programına yaptırmak zaman açısından verimli değildir. Bu sebeple tıpkı 6 boyutlu faz uzayının 2 boyutlu projeksiyonu üzerinden hesapların yapılabilmesi gibi, buradaki etkileşimin de ortalaması alınarak Coulomb etkisine istatistiksel bir yaklaşımı yapılmıştır. Bu etkiye uzay yükü denmesinin ve doğrudan Coulomb etkisi denmemesinin sebebi oluşan kuvvetlerin ortalamasının değerlendirilmesidir.

Yüksek yoğunluklu demetin odaklanma miktarı arttıkça uzay yükü etkisiyle oluşan odaksızlaştırma eğilimindeki kuvvet artar ve kontrol edilmediği takdirde odaklanmaya çalışılan demet hızlanmaya başlamadan dağılır. Uzay yükü etkisinin teorik hesabı ve hangi seviyede kritik olduğu Kısım 3.1.'de anlatılacaktır.

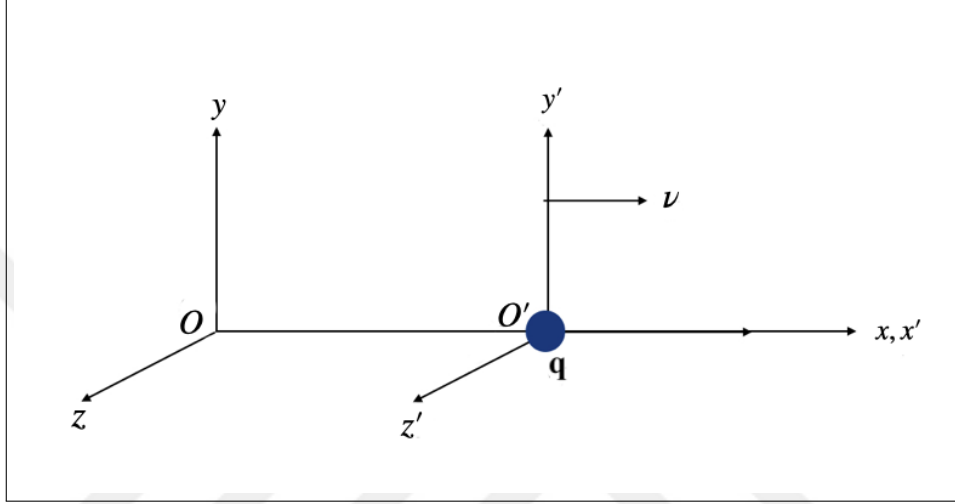
Lorentz kuvvetini oluşturan elektriksel ve manyetik alanlar dışsal veya içsel etkilerle oluşmuş olabilir. Bir proton demeti için Denklem 2.5'te verilen Lorentz kuvveti aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = e\vec{E}_{RF} + e(\vec{v} \times \vec{B}_{Man}) + e\vec{E}_{demet} + e(\vec{v} \times \vec{B}_{demet}). \quad (2.27)$$

Bu denklemde laboratuvar bakış açısından \vec{E}_{RF} , dışardan kovuğu besleyen RF gücüyle oluşan elektrik alanı; \vec{B}_{Man} mıknatıs veya solenoidler yardımı ile oluşturulan manyetik alanı, \vec{E}_{demet} ve \vec{B}_{demet} ise demet içinde oluşan içsel elektrik ve içsel manyetik alanı (*internal electric and internal magnetic field*) ifade eder. Bu şekilde oluşan kuvvetlere sebep olan kaynaklar ayrıştırılarak demetin hareket denklemleri yazılabilir [28].

2.5.1. Noktasal Parçacığın Elektrik Alanı ve Görelî Alan Dönüşümleri

Şekil 2.19’da görülen noktasal q parçacığı O' merkezli koordinat sistemine göre durağandır. Oluşturduğu elektrik alan yine O' ’a göre çapsal olarak simetriktir ve bu koordinat sistemine göre hareketsiz olduğu için manyetik alan oluşturmaz [28].



Şekil 2.19: Noktasal parçacığın koordinat sistemleri

O' sistemine göre parçacıkların x, y, z eksenlerinde elektrik alan denklemleri Denklem 2.28, 2.29 ve 2.30’da ifade edilmiştir:

$$E'_x = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{x'}{|\vec{r}'|^3}, \quad (2.28)$$

$$E'_y = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{y'}{|\vec{r}'|^3}, \quad (2.29)$$

$$E'_z = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{z'}{|\vec{r}'|^3}. \quad (2.30)$$

Bu noktasal parçacığın O koordinat sistemine göre görelî alan denklemleri ise farklılık

gösterir. İki koordinat düzlemi arasında konum dönüşümleri yapıldığında;

$$\begin{aligned}
 x' &= \gamma(x - vt) \\
 y' &= y \\
 z' &= z \\
 ct' &= \gamma\left(ct - \frac{v}{c}x\right)
 \end{aligned} \tag{2.31}$$

$$\begin{aligned}
 r' &= \sqrt{(x'^2 + y'^2 + z'^2)} \\
 r' &= \sqrt{\gamma^2(x - vt)^2 + y^2 + z^2}
 \end{aligned} \tag{2.32}$$

görelî elektrik alan dönüşümleri yapıldığında;

$$\begin{aligned}
 E_x &= E'_x \\
 E_y &= \gamma(E'_y + vB'_z) \\
 E_z &= \gamma(E'_z - vB'_y)
 \end{aligned} \tag{2.33}$$

denklemleri elde edilir. Görelî manyetik alan dönüşümleri yapıldığında ise;

$$\begin{aligned}
 B_x &= B'_x \\
 B_y &= \gamma\left(B'_y - v\frac{E'_z}{c^2}\right) \\
 B_z &= \gamma\left(B'_z + v\frac{E'_y}{c^2}\right)
 \end{aligned} \tag{2.34}$$

denklemleri elde edilir. O koordinat düzlemine göre alanlar incelendiğinde, noktasal parçacık payda kısmına gelen yeni görelî parametreler nedeniyle küresel simetrisini kaybetmiştir. Simetrinin kaybolmasıyla parçacığın oluşturduğu alan ve dolayısıyla kuvvet vektörlerinin geometrisi değişmiştir [28].

Küresel simetri aşağıda ifade edilen denklemlerin payda kısmına γ^2 faktörünün eklenmesiyle

kaybolmuştur:

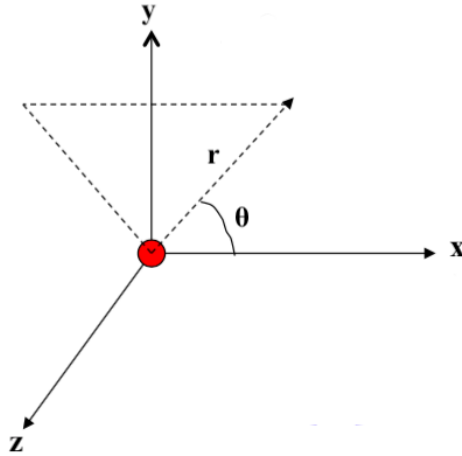
$$E_x = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{\gamma(x - vt)}{[\gamma^2(x - vt)^2 + y^2 + z^2]^{3/2}}, \quad (2.35)$$

$$E_y = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{\gamma y}{[\gamma^2(x - vt)^2 + y^2 + z^2]^{3/2}}, \quad (2.36)$$

$$E_z = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{\gamma z}{[\gamma^2(x - vt)^2 + y^2 + z^2]^{3/2}}. \quad (2.37)$$

Denklem 2.35, Denklem 2.36 ve Denklem 2.37 düzenlenerek x yönünde hızlandırılan bir demetin $t = 0$ anındaki görelî elektrik alan denklemi Denklem 2.38'de verilmiştir.

$$\vec{E} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{\gamma \vec{r}}{[\gamma^2 x^2 + y^2 + z^2]^{3/2}} \quad (2.38)$$



Şekil 2.20: Koordinat sistemi [28]

Konum (x, y, z) ve zaman t nicelikleri için değişken dönüşümleri yapıldığında,

$$\begin{aligned} x &= r \cos \theta \\ y^2 + z^2 &= r^2 \sin^2 \theta \end{aligned} \quad (2.39)$$

denklemleri elde edilir. θ , noktasal parçacığın x eksenine yaptığı açıdır, Denklem 2.39'daki değerler yeni koordinat sistemine göre düzenlenip yerine yazıldığında,

$$\vec{E} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{1 - \beta^2}{r^2 [1 - \beta^2 \sin^2 \theta]^{3/2}} \frac{\vec{r}}{r} \quad (2.40)$$

elde edilir. Değişen β 'ya göre parçacığın elektrik alanının nasıl değiştiği Şekil 2.21'de gösterilmektedir. Bu etki matematiksel olarak Denklem 2.40'tan görülebilir.

Denklem 2.39'da verilen dönüşümler ve Şekil 2.20'deki koordinat düzlemi kullanılarak, Denklem 2.40'ta verilen θ 'nın ve görelî parametre olan β 'nin değiştiği durumlarda, demete dik ve paralel yönlü elektrik alanların hesabı yapılmıştır. Denklem 2.41 görelî β değerinin 0 olması durumunda; yani durgun olduğu durumdaki elektrik alan formülasyonudur. Denklem 2.42 $\gamma \rightarrow \infty$ yaklaştıkça paralel yöndeki elektrik alanın 0'a yaklaştığını gösterir. Denklem 2.43 dik yöndeki elektrik alanın $\gamma \rightarrow \infty$ yaklaştıkça ∞ 'a yaklaştığını gösterir.

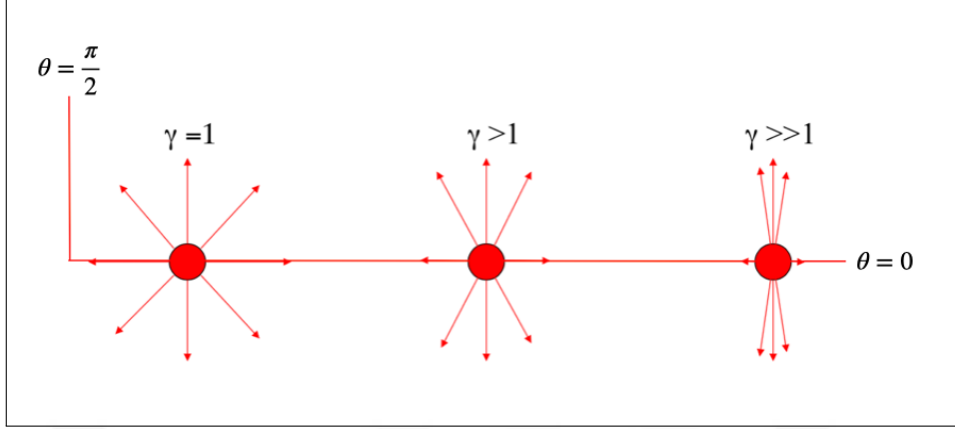
$$\beta = 0 \implies \vec{E} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{r^2} \frac{\vec{r}}{r} \quad (2.41)$$

$$\theta = 0 \implies \gamma \rightarrow \infty \implies E_{\parallel} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{\gamma^2 r^2} \frac{\vec{r}}{r} \rightarrow 0 \quad (2.42)$$

$$\theta = \frac{\pi}{2} \implies \gamma \rightarrow \infty \implies E_{\perp} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{\gamma}{r^2} \frac{\vec{r}}{r} \rightarrow \infty \quad (2.43)$$

Işık hızına yaklaşan demetin parçacıklar arası etkileşiminin görelî elektrik alanın

değişmesiyle değiştiği Şekil 2.21'den görülebilir. Buna Lorentz itelemesi (Lorentz Boost) de denir.



Şekil 2.21: γ 'ya göre değişen elektrik alanlar [28]

Işık hızına yaklaşan demetlerde Lorentz kuvvetinin yalnızca çapsal bileşeni vardır ve enine ekseninde doğrusal bir fonksiyon olarak ifade edilir. Yüksek hızlı demetlerde manyetik alan dikkate değer düzeyde çekici etki, elektrik alan ise itici etki oluşturur. Böylece manyetik alan uzay yükü etkisiyle oluşan itme etkisini demetlerde azaltır [28]. Bu sebeple uzay yükü etkisiyle oluşan odaksızlaştırma etkisi göreceli bir etki değildir. Işık hızına yakın hızla hareket eden noktasal bir parçacık için oluşan manyetik alan denklemleri aşağıdaki gibidir:

Işık hızına yakın hızlara çıkan noktasal bir parçacık için oluşan Lorentz kuvvetinin manyetik alanı enine yöndedir.

$$B_x = 0 \quad (2.44)$$

$$B_y = -\frac{vE_z}{c^2} \quad (2.45)$$

$$B_z = \frac{vE_y}{c^2} \quad (2.46)$$

Elektrik alan dönüşümlerinin ardından, Lorentz kuvvetinin içinde yer alan elektrik alan ifadesi de değişmiştir. Yeni Lorentz kuvvetinin yalnız çapsal bileşeni vardır ve enine koordinatta oluşan doğrusal bir fonksiyondur [28].

$$\vec{F}_{demet} = e(\vec{E}_{demet} + \beta\vec{c} \times \vec{B}_{demet}) = \frac{e\vec{E}_{demet}}{\gamma^2} \quad (2.47)$$

Duran yüklerin oluşturduğu elektrik alan formülasyonundan, diğer adıyla Coulomb kuvvetinden hareketle dışsal ve içsel etkilerle oluşan Lorentz kuvvetlerinin ayrı ayrı hesapları yapılmıştır. Enine ekseninde demetin iç etkileşimler sonucu oluşturduğu Lorentz kuvveti \vec{F}_{demet} olarak verilmiştir. Denklem 2.47’de verilen içsel kuvvet dışsal kuvvetten farklı olarak $\frac{1}{\gamma^2}$ faktörüyle değişmektedir. Bu durum demetin kinetik enerjisi arttıkça enine ekseninde içsel etkinin zayıfladığını gösterir [28, 29]. Hızlanan iyonlar eşzamanlı ışımaya (synchrotron radiation) yaparlar. Bu tezde, düşük enerjili proton demetlerinde eşzamanlı ışımaya çok zayıf olduğundan hesaplara dahil edilmemiştir. Tezin 3.1. kısmında parçacıklar arası uzay yükü etkileşimlerinin Python programı ile hesaplamaları yapılacaktır.

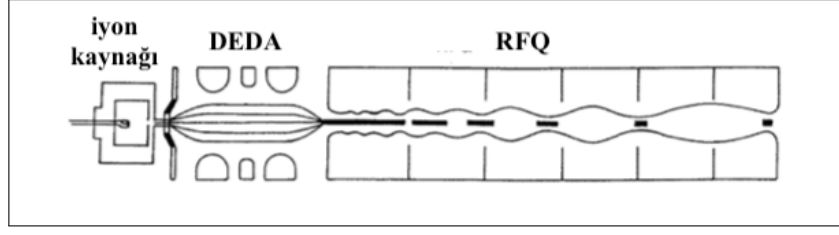
3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1. UZAY YÜKÜ HESAPLARI

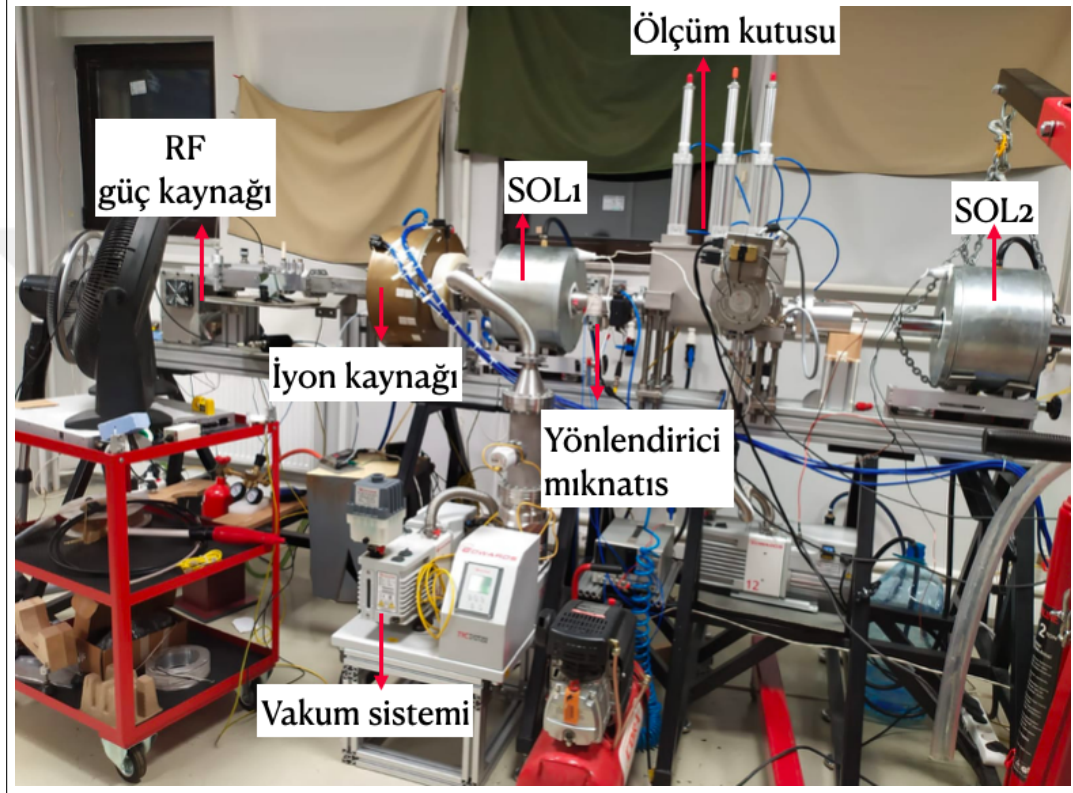
Kandilli Algıç, Hızlandırıcı ve Enstrümantasyon Laboratuvarı (KAHVELab)'nda yürütülen doğrusal proton hızlandırıcısı projesinde, proton demeti üretmek için H_2 (hidrojen) gazı kullanılmaktadır. H_2 gaz akışı kontrol edilerek plazma odasına hidrojen akışı sağlanır ve hidrojen iyonize edilir. H^0 ve H^+ , H^- vb. iyonlar üretilir. Üretilen iyonların arasından + yüklü olanlar plazma odasındaki elektrot aracılığıyla ayrıştırılır. Bu projede 2.45 GHz frekanslı mikrodalga güç kaynağı kullanılmaktadır. İyon kaynağından üretilen 20 keV enerjili proton demetinin enerjisinin mümkün olan en az kayıpla demet transfer hattı ile 800 MHz'de çalışacak bir RFQ'ya iletilerek 2 MeV'e çıkarılması amaçlanmaktadır. Demet RFQ'ya girmeden önce sırasıyla, düşük enerjili demet transfer hattı boyunca bir adet solenoid, yönlendirici mıknatıs (steerer), ölçüm kutusu, yönlendirici mıknatıs ve tekrar solenoidden geçirilmektedir. Hızlandırıcı sistemin tüm elemanları sırasıyla Şekil 3.1'de gösterilmektedir.

Tüm bu elemanlarla sistem çalıştırılıp ölçüm alınmadan önce benzetim çalışmaları yapılmalıdır. Benzetim çalışmasının ilk basamağı hedeflenen özelliklerde demet üretimidir. Bu amaçla ilk olarak iyon kaynağının yapısını ve dinamiklerini hesaba katarak istatistiksel olarak parçacık dağılımını hesaplayan gerçeğe en yakın demet üretme programlarından biri olan IBSimu ile demet dosyası üretilmiştir [22]. IBSimu'da üretilen demet dosyaları kullanılarak demetin iyon kaynağından çıktıktan sonra RFQ'ya ulaştığı noktaya kadar sistem içinde maruz kalacağı sürüklenme miktarı, odaklayıcı olarak kullanılan solenoidler ve demet transfer hattının benzetimi transfer matrisleriyle Python dilinde yazılan program (PyDEDA) ile yapılmıştır.

Şekil 3.2'de KAHVELab'da bulunan iyon kaynağı, DEDA hattı ve vakum sistemi görülmektedir. Şekilde gösterilen SOL2 adlı solenoidin ardından 800 MHz'de çalışacak RFQ'nun gelmesi planlanmaktadır. Planlanan RFQ'nun ilk prototipi üretilmiştir. Bu sistemle ilgili detaylar Kısım 3.2'de verilecektir.



Şekil 3.1: Proton hızlandırıcı sistemi şeması [15]



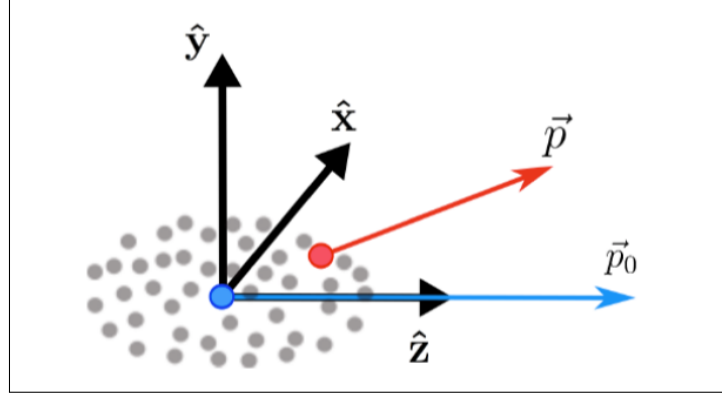
Şekil 3.2: KAHVELab iyon kaynağı ve DEDA sistemi

Solenoidlerden geçerek RFQ'ya ulaştırılmak istenen demetin içsel etkileşimlerle oluşan uzay yükü hesabı PyDEDA'da transfer matrisleriyle yapılmıştır. Bu kısımda uzay yükü hesabının detaylarından bahsedilecektir.

3.1.1. Faz Uzayı

Bu çalışmada uzay yükü hesabına başlamadan önce demetin tanımlanması için gerekli bir kaç özelliğin tanımı ve hesabı verilecektir. Bunlardan ilki faz uzayıdır. Faz uzayı, parçacıkların dağılımının konum ve açı koordinatları (x, x', y, y', z, z') ile tanımlanmasına denir. Parçacık demetleri her parçacığın bir nokta ile ifade edildiği ve demetteki tüm parçacıkların 6 boyutlu (x, x', y, y', z, z') faz uzayıyla tanımlanır. Parçacıkların konum ve açı

eksenleri Şekil 3.3'te gösterilmiştir. Faz uzayındaki $\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$ konum bilgisini, \vec{p} momentum bilgisini vermektedir.



Şekil 3.3: Parçacıkların konum ve açı eksenleri [30]

Parçacığın ilerlediği eksene göre kendi eksenindeki değişimi Denklem 2.19'da verilmiştir. Bu denklemden hareketle demetin momentum değeri, açı değeri olarak ifade edilebilir. Denklem 3.1, 3.2 ve 3.3'te açı değerleri hesaplanmıştır.

$$x' \equiv \frac{dx}{ds} = \frac{p_x}{p} = \frac{\gamma m \dot{x}}{\gamma m \dot{s}}, \quad (3.1)$$

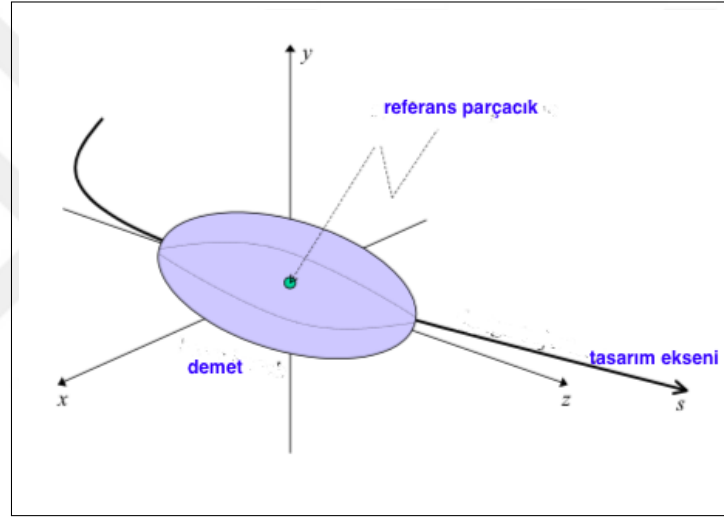
$$y' \equiv \frac{dy}{ds} = \frac{p_y}{p} = \frac{\gamma m \dot{y}}{\gamma m \dot{s}}, \quad (3.2)$$

$$z' \equiv \frac{dz}{ds} = \lim_{\Delta s \rightarrow 0} \frac{\Delta z}{\Delta s} = \frac{\Delta v}{v} = \frac{1}{\gamma^2} \frac{\Delta p}{p}. \quad (3.3)$$

Denklemlerdeki \dot{x}, \dot{y} konumların zamana göre türevini belirtir. Demetin hızlandırılmak ya da transfer edilmek istendiği eksene tasarım ekseni (design trajectory) denir ve bağımsız bir değişken olan s ile tanımlanır. Şekil 3.4'te referans parçacık ve tasarım ekseni gösterilmiştir. Hızlandırıcı fiziğinde parçacığın hızlandığı eksen için genellikle z ekseni kullanılır. Demetin koordinat sisteminde $0,0,0$ noktasında olduğu kabul edilen parçacık, referans parçacık

(synchronous particle) olarak tanımlanır. Denklem 3.3'te z düzlemi x ve y düzleminden farklı ifade edilmiştir. Bu farklılık; bir parçacık için z konumu belirlenirken o parçacığın z eksenindeki konumundan, v hızına sahip referans parçacığın boylamsal eksenindeki konumunun farkı alınarak hesaplanmasından gelir.

s eksenindeki her bir noktada, belirli bir $v(s)$ 'ye sahip bir referans parçacık vardır [30]. Demetteki veya bir demet boğçasındaki parçacıkların hızı, konumu ve açısı referans parçacığa göre tanımlanır. Görelî hız βc ve görelî γ tasarım eksenine göre tanımlanır. x - y düzlemi demetin enine düzlemini ifade ederken, z eksenini demetin boyuna eksenini ifade eder [30].



Şekil 3.4: Demetin tasarım eksenini [30]

Parçacıkların yoğunluğu ise faz uzayında aynı konum ve açıda kaç parçacık olduğuyula tanımlanır ve N ile gösterilir. Faz uzayında küçük bir dV hacmi seçilirse o hacimdeki parçacık yoğunluğu $n(x, x', y, y', z, z')$ şeklinde ifade edilebilir. O hacimdeki parçacık sayısı dN olur. Denklem 3.4 birim hacimdeki parçacık yoğunluğunu (intensity) ifade etmektedir [32].

$$dN = ndV = ndxdydzdx'dy'dz'. \quad (3.4)$$

Etkileşimde bulunmayan bir demetin hareketi faz uzayında parçacıkların karşılık geldiği noktaların hareketine eşdeğerdir. Parçacık kümesinin hareket etmesi faz uzayında kapladığı

hacmin de hareket etmesi demektir. Parçacıkların aralarındaki etkileşimin yok sayıldığı ve parçacık kaybının olmadığı varsayılan bir sistemde toplam parçacık sayısı ve parçacıkların faz uzayında karşılık geldiği noktalar süreklilik denkleminde göre sabit kalmalıdır. Faz uzayındaki her bir parçacık için v hız vektörü tanımlandığında, süreklilik denklemi Denklem 3.5 gibi olur [32].

$$\nabla \cdot (nv) + \frac{\partial n}{\partial t} = 0, \quad (3.5)$$

Süreklilik denklemi kullanılarak sistemin Hamilton denklemleri düzenlendiğinde $\frac{\partial n}{\partial t} = 0$ olur [32]. Buna göre faz uzayındaki parçacık yoğunluğu n sabit olur. Liouville teoremi, n değerinin korunmasıyla parçacıkların hareket ettiği faz uzayı hacminin de sabit olduğunu söyler. Teorem, değerlendirilen düzlem boyunca sınırları olan fonksiyonların sabit fonksiyon olduğunu ifade eder. Bir analogiyle açıklamak gerekirse; sınırları belli ve içindeki parçacık sayısı değişmeyen bir balon sıkıldığında, sıkıldığı hacim kadar başka bir bölgeden şişerek toplam hacmi ve içindeki parçacık sayısı sabit kalır. Ancak hacimdeki parçacıkların dağılımlarının değişebileceği unutulmamalıdır. Liouville teoremi, doğrusal olmayan kuvvetlerin olmadığı ve farklı eksenler arası eşleşmenin (coupling) olmadığı sistemlerde normalize yayılımının ϵ_{norm} korunduğunu söyler [32].

İyon kaynağında üretilen parçacık demetlerinin genellikle iki simetrik düzlemi vardır. z yönünde hızlandırılmak istenen bir demetin $x - z$ ve $y - z$ düzlemleri arasında simetrik olması beklenir. İyon kaynağı çıkışında demetin x ve y yönündeki yayılım değerlerinin ve x_{rms} ve y_{rms} değerlerinin birbirine oldukça yakın olması beklenir. Bu çalışmada IBSimu'da üretilen 3939 parçacıklı demetin iyon kaynağından çıktığı sıradaki hesaplamaları yapılmıştır. PyDEDA'da elde edilen değerler Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1 incelendiğinde demetin x_{rms} ve y_{rms} değerlerinin birbirlerine yakın olduğu dolayısıyla demetin x ve y yönünde simetrik olduğu görülmektedir.

Tablo 3.1: İyon kaynağı çıkışında elde edilen demet parametreleri

Parametreler	Değerler
x_{rms}	1.31 mm
x'_{rms}	1.66 mrad
$\epsilon_{x-x'}$	$3.807e-6 \pi$ m rad
y_{rms}	1.31 mm
y'_{rms}	1.67 mrad
$\epsilon_{y-y'}$	$3.97e-6 \pi$ m rad

3.1.2. Boyuna Eksende Faz Uzayı

Hızlandırıcı fiziği benzetim programlarında üretilen demetler için z yerine $\Delta\phi$ ve Δt tercih edildiği gözlenebilir. Burada $\Delta\phi$ referans parçacıkla herhangi bir parçacığın arasındaki RF faz farkını, Δt ise herhangi bir parçacığın referans parçacığa göre bir noktaya varış zamanının ne kadar ileride veya geride olduğunu ifade eder. Derece cinsinden verilmiş olan $\Delta\phi$ 'yi ve saniye cinsinden verilen Δt 'yi metre cinsinden boyuna eksen ifadesi olan z 'ye dönüştürmek için aşağıdaki dönüşümler kullanılır [30].

$$z = -vT \frac{\Delta\phi}{360} = -\beta\lambda \frac{\Delta\phi}{360} = \Delta t(v + \Delta v) = -\beta c \Delta t(1 + z') \quad (3.6)$$

Denklem 3.6'da verilen T RF periyodu, λ ise boş uzaydaki RF dalgaboyunu temsil eder. PyDEDA'da, IBSimu'da üretilen demetin z konumunun hesabı z yerine $z_{ibs} \frac{\beta\lambda}{2\pi}$ ifadesi yazılarak sağlanmıştır. z_{ibs} olarak verilen değer IBSimu demet dosyasında beşinci sütunda yer alan $\Delta\phi$ değerleridir. 1., 2., 3., ve 4. sütunlar sırasıyla x, x', y, y' değerlerine karşılık gelir.

3.1.3. Debye Uzunluğu

Peter Debye tarafından geliştirilen, plazma fiziğinde sıkça kullanılan bir parametre olan Debye uzunluğu, bir yük taşıyıcının plazmalardaki ve diğer iletken materyallerdeki yük ayrımının meydana gelebileceği mesafe olarak tanımlanmıştır [33]. Parçacıkların birbirleriyle etkileşime girmeye başladığı bir uzaklık eşiği vardır. Bu mesafeye 'Debye uzunluğu' denir ve λ_D ile gösterilir. Denklem 3.7 Debye uzunluğunun ortam, sıcaklık, parçacık yoğunluğu

ve yükü ile arasındaki ilişkiyi göstermektedir:

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 kT}{nq^2}}. \quad (3.7)$$

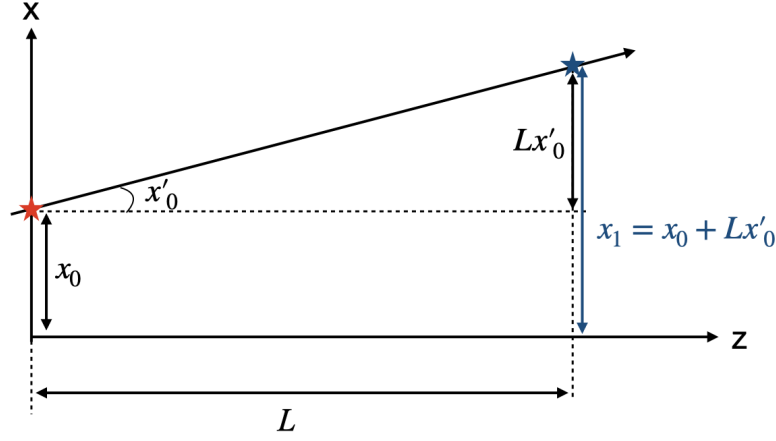
Denklem 3.7’de yer alan ϵ_0 boş uzaydaki elektriksel geçirgenliği, q parçacık yükünü, kT ısı enerjisini, n yük yoğunluğunu ifade eder. $kT = mc^2 \epsilon_{norm}^2 / a^2$ olarak hesaplanacaktır. İfadede yer alan mc^2 durgun parçacığın enerjisini; ϵ_{norm} normalize yayınıcı; a , x_{rms} ve y_{rms} değerlerini ifade eder. Eğer demetin rms boyu $\lambda_D \gg a$ ise demet içi etkileşimler göz ardı edilebilir düzeydedir ve demet yayınıcı hakimiyeti altındadır. Öte yandan eğer parçacıklar arasında etkileşim için yeter mesafe olan Debye uzunluğu, demetin rms boyundan küçükse $\lambda_D \ll a$ demet içi etkileşimler vardır ve demet uzay yükü etkisi altındadır. [27, 31]. Demetin etki altında olduğu bu rejimler bu kıyasa bakılarak uzay yükü etkisi altındaki demetler ve yayınıcı etkisi altındaki demetler olmak üzere ikiye ayrılır. Bir hızlandırıcı kovukta hızlandırılacak demetin, demet içi etkileşimlerinin ne düzeyde demet dinamiğini etkileyeceğinin benzetimlerle hesaplanması çok önemlidir. Liouville teoremini sağladığı bilinen demetin faz uzayındaki hacminin sabit kalması faz uzayının şeklinin sabit kalacağı anlamına gelmez, doğrusallığı bozan etkilerin varlığı demet içi dinamiği etkiler. Bu etki demetin uzay yükü değerinin fazla yüksek olmasıyla ve etkinin büyüklüğüne göre demeti dağıtarak adeta patlatmasıyla (beam blow up) sonuçlanır [32]. Bu sebeple uzay yükü etkisinin hesaplanması önem taşır. KAHVELab’daki proton demeti benzetimi üzerinde yazılan benzetim programında 1.4 mA akım değerine sahip demetin λ_D değeri hesaplanmıştır, $\lambda_D = 8.09$ metredir ve $x_{rms} = 0.25$ metredir. λ_D değeri x_{rms} ve y_{rms} değerinden büyük çıkmıştır. Elde edilen bu değerlere göre demet uzay yükü etkisi altında değil yayınıcı etkisi altındadır.

3.2. TRANSFER MATRİSLERİ

3.2.1. Sürüklenme Matrisleri

IBSimu’da üretilen demet dosyası kolonlar ve sütunlardan oluşan bir dizi (array) elemanıdır. Bu demet dosyasında parçacıkların konum bilgileri ve açı bilgileri de bulunmaktadır.

Parçacıkların konumlarına doğrusal yaklaşım uygulanarak parçacıklar belirli bir mesafeye matris dönüşümleri yapılarak sürüklenebilir.



Şekil 3.5: Parçacıkların sürüklenme uzunluğu hesabı

Şekil 3.5'teki x - z koordinat düzleminde verilen kırmızı yıldız şekli parçacığın ilk konumunu, mavi yıldız ise parçacığın son konumunu göstermektedir. Şekil 3.5'te parçacığın sürüklenmeden sonraki yeni konumu x_1 , doğrusal bir denklem olarak yazılmıştır. Bu doğrusal denklem uygun matris yazılarak ifade edildiğinde bir benzetim programı için daha uygulanabilir hale gelecektir. Denklem 3.8'de parçacıkların enine ekseninde konum ve açıları bir sütun matrisiyle gösterilmiştir. Parçacıkların x eksenindeki ilk konumu x_0 , açısı da x'_0 olarak alınmıştır.

$$X = \begin{pmatrix} x_0 \\ x'_0 \end{pmatrix} \quad (3.8)$$

Demetin sürüklendiği boşlukta demetin optiğine müdahalesi olan elemanlar bulunmaz. Sürüklenmek istenen boşluk boyu L olan bir demetin sürüklenme matrisi Denklem 3.9'da verilmiştir.

$$M_{\text{sür}_1} = \begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.9)$$

Demetin x eksenindeki konum-açı matrisi olan X matrisi, $M_{\text{sür}_1}$ matrisi ile çarpıldığında demet L boyu kadar yer değiştirmiş ve yeni konum-açı matrisi elde edilmiş olur.

$$R_{\text{sür}_1} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x'_1 \end{pmatrix} = M_{\text{sür}_1} \begin{pmatrix} x_0 \\ x'_0 \end{pmatrix} \quad (3.10)$$

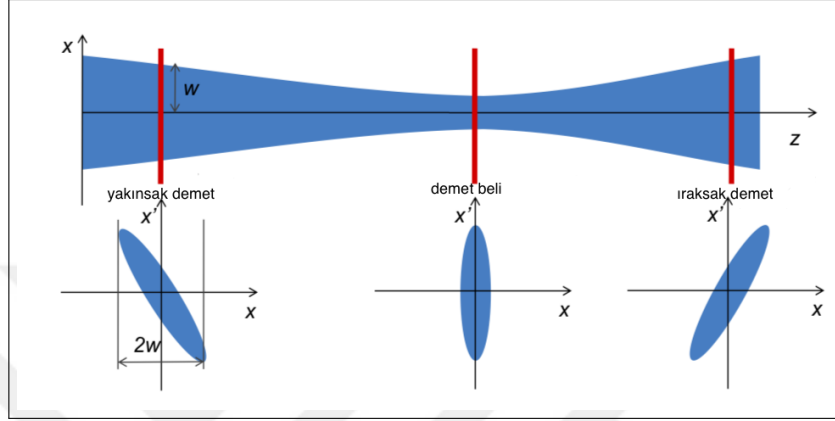
6 boyutlu faz uzayının (x, x', y, y', z, z') 2 boyuttaki izdüşümü olarak yazılan sürüklenme matrisini 6 boyutta yazmak istediğimizde Denklem 3.11 elde edilir. Matriste yer alan sıfırların sürüklenme uzayı boyunca x, y, z değerlerinin arasında eşleşme (coupling) olmadığından, eksenler birbirinden bağımsız sürüklendiği için 6 boyutlu matrisin 2 boyutlu matrislerinin bir araya gelmesiyle oluştuğu şeklinde düşünülebilir. Denklemden diğer eksenlerden farklı olarak demet z ekseninde hızlandığı için Einstein'ın ortaya koyduğu uzay büzülmesi (length contraction) etkisiyle görelî parametreye bölünmüştür [30]. İlk durumları $x_0, x'_0, y_0, y'_0, z_0, z'_0$ olan demet, sürüklenme matrisi ile çarpılarak $x_1, x'_1, y_1, y'_1, z_1, z'_1$ değerlerini almıştır:

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x'_1 \\ y_1 \\ y'_1 \\ z_1 \\ z'_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & L & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & L/\gamma^2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_0 \\ x'_0 \\ y_0 \\ y'_0 \\ z_0 \\ z'_0 \end{pmatrix} \quad (3.11)$$

3.2.2. Solenoid Matrisleri

Parçacık demeti, RFQ'ya aktarılmadan önce solenoidler yardımıyla odaklanır. Demet hızlandırılmadan önce belirlenmiş mesafelerde odaklanma (focusing), sürüklenme (drifting) etkisi altında bırakılır. Bu odaklama ve bazen odaktan uzaklaştırma (defocusing) işlemlerinin demet üzerindeki etkisi ışığın merceklerle ilişkisine benzer. Odaklayıcı mıknatıslar ince kenarlı mercek görevi görerek demeti odak noktasında sıkıştırır. Odaklayıcı mıknatısların özelliklerine bağlı bir odak mesafesi vardır. Bu odak mesafesinden demet geçerken en

sıkışık halini alır. Demetin bu haline "demet beli" (beam waist) denir. Şekil 3.6'da demetin art arda odaklanma, sürüklenme, odaktan uzaklaşma ve sürüklenme hareketinin (FODO: focusing+drift+ defocusing+drift) merkezinde demet beli gösterilmektedir. Solenoidlerin veya dörtkutupluların yeri, sırası ve sayısı değiştirilerek demet belinin konumu değiştirilebilir [29].



Şekil 3.6: Demet zarfı [34]

Aynı anda x ve y yönünde odaklayıcı araçlardan biri solenoiddir. KAHVELab'da proton demetini odaklamak için farklı sarım sayılarına sahip iki adet solenoid kullanılmaktadır. Denklem 3.12'de manyetik kuvvet dönme kuvvetine eşitlenmiştir. Denklemde verilen B solenoidin oluşturduğu manyetik alanı, ρ ise bükme yarıçapını, p hareketli parçacığın momentumunu ifade eder. $B\rho$ ifadesine ise manyetik bükülmezlik (magnetic rigidity) denir [29]. Merkezci kuvvet aynı eksendeki manyetik kuvvete eşitlendiğinde:

$$\begin{aligned} qvB &= m \frac{v^2}{\rho}, \\ eB &= \frac{\vec{p}}{\rho}, \\ B\rho &= \frac{p}{e} \end{aligned} \quad (3.12)$$

$$B\rho = \frac{pc}{qc} = \frac{\sqrt{E_{toplam}^2 - E_{durgun}^2}}{c} \quad (3.13)$$

denklemini elde edilir. Denklem 3.13'de pc değeri eV cinsinden yazılmıştır. $B\rho$ 'nun birimi

$T.m'$ 'dir [35]. Kullanılan demet için PyDEDA'da hesaplanan $B\rho$ değeri 12.75 Tm'dir.

Kullanılan solenoidlerin odaklama kapasitelerini belirleyen parametre olan gradyan k aşağıdaki gibi tanımlanır:

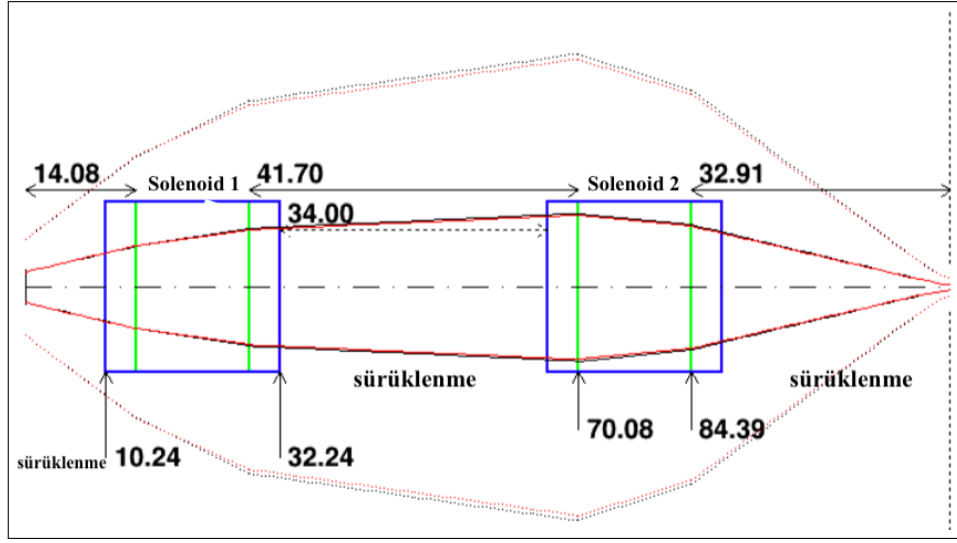
$$k = \frac{qB_z}{2p_z} = \frac{B_z}{2B\rho}. \quad (3.14)$$

KAHVELab'daki doğrusal proton hızlandırıcısı sisteminin solenoidleri sırasıyla 1869 G ve 1931.3 G manyetik alana sahiptir. Bu iki solenoid için hesaplanan gradyan k değerleri $k_1 = 4.57$, $k_2 = 4.72$ olarak hesaplanmıştır. Solenoidlerin sıkıştırma etkisinin benzetimi yapılırken solenoid matrisleri kullanılır. Denklem 3.15'te verilen matris M_{sol} , doğrusal yaklaşım kullanarak yazılmış bir solenoid matrisidir [36]. k solenoidin gradyan değeri, l solenoidin etkin uzunluğunun çarpımına eşittir. KAHVELab'daki her iki solenoidin farklı k ve l değeri için solenoid matrisleri tez kapsamında PyDEDA'da hesaplanmıştır. Matrisin daha derli toplu görünmesi için $\phi = kl$ tanımı yapılarak solenoid matrisi yazıldığında:

$$M_{sol} = \begin{pmatrix} \cos^2 \phi & \frac{\sin \phi \cos \phi}{k} & \sin \phi \cos \phi & \frac{\sin^2 \phi}{k} \\ -k \cos \phi \sin \phi & \cos^2 \phi & -k \sin^2 \phi & \sin \phi \cos \phi \\ -\sin \phi \cos \phi & -\frac{\sin^2 \phi}{k} & \cos^2 \phi & \frac{\sin \phi \cos \phi}{k} \\ k \sin^2 \phi & -\sin \phi \cos \phi & -k \cos \phi \sin \phi & \cos^2 \phi \end{pmatrix} \quad (3.15)$$

elde edilir. Sürüklenme matrisiyle yeni konum-açı değerleri alan demet, SOL1 matrisiyle odaklanma etkisinde kalmıştır. Şekil 3.7'de verilen uzunluklar cm cinsinden olup yeşil çizgiler solenoidin etkin uzunluğunun sınırlarıdır. Şekil 3.7'de kırmızı renkli dar olan zarf çizimi takip edildiğinde görselin en sağında demetin sıkıştığı görülmektedir. RFQ'ya girmeden hemen önce demetin uzay yükü etkisiyle dağılmadan sıkışabildiği maksimum değere göre sistemdeki elemanların birbirine ve RFQ'ya göre mesafeleri belirlenir.

İyon kaynağından üretilen 1.4 mA'lık proton demeti dosyasından çekilen x, x', y, y', z, z' demet matrisi bilgisiyle öncelikle sürüklenme matrisi çarpılarak demetin 14.08 cm sürüklendiği bulunmuştur. Parçacıkların sürüklenme matrisi ile çarpıldıktan sonraki yeni konumları,



Şekil 3.7: DEMİRCİ programında iyon kaynağından çıkan demetin RFQ'ya kadar izlediği yolun çizimi [3]

sistemdeki ilk solenoidin (SOL1) başlangıç noktasıdır. Denklem 3.11 ilk sürüklenen demetin matrisidir.

Yeni konum-açı matrisi, SOL1 için hesaplanan k ve l değeri girilerek yazılan solenoid matrisiyle çarpıldığında parçacıklar Şekil 3.7'ye göre $14.08 + 14.32 = 28.40$ cm'ye ulaşmış olurlar. SOL1'in bitimindeki demet matrisi R_{sol_1} 'dir. Aynı süreç verilen sürüklenme uzunlukları ve ikinci solenoid için hesaplanarak tekrar edilmiştir. Denklem 3.16'deki $R_{sür_1}$ demetin ilk sürüklenmeden sonraki matrisini, M_{SOL1} ilk solenoid matrisini, R_{sol_1} sürüklenen demetin 1. solenoidden geçtikten sonraki matrisini ifade etmektedir. Ardından R_{sol_1} ikinci sürüklenme matrisi $R_{sür_2}$ ile ve ikinci solenoid matrisi M_{SOL2} ile çarpılmıştır ve ikinci solenoidin bitiminde 84.39 cm'deki demet matrisi R_{sol_2} elde edilmiştir:

$$\begin{aligned} R_{sol_1} &= M_{SOL1} R_{sür_1}, \\ R_{sol_2} &= M_{SOL2} R_{sür_2} R_{sol_1}. \end{aligned} \quad (3.16)$$

Elde edilen R_{sol_2} matrisi RFQ'ya girmeden önceki sürüklenme hattında uzay yükü etkisi dahil edilerek yapılan hesaplamalarda kullanılmıştır.

3.3. UZAY YÜKÜ HESAPLARI

İyon kaynağında üretilen demetin RFQ'ya hızlandırılmak için aktarılmasından önce demet profil ölçümleri ve yayılım hesabı benzetim programlarıyla yapılmalıdır. Bu yayılım hesabına etki eden niceliklerden biri de uzay yüküdür. Uzay yükünü hesaplamanın iki temel yöntemi vardır. Bunlardan biri yük çemberi (rings of charge), bir diğeri ise Coulomb (Coulomb method) yöntemidir. Coulomb yöntemiyle uzay yükü parçacıkların birbirleriyle etkileşiminin ortalamasını hesaplariken, yük çemberi yönteminde bir çember seçilerek buradaki uzay yükü etkisi hesabı üzerinden demet dağılımına göre bir yaklaşım oluşturulur. Yük çemberi yöntemi daha hızlı çalışan bir algoritma içermesiyle birlikte hata payı Coulomb hesabına göre yüksektir. Bu tezde, RFQ'ya girmeden önce demetin yayılım değerinin, ortalama Coulomb kuvveti etkisiyle yani uzay yükü etkisiyle ne kadar değiştiği bu kuvvetlere doğrusal yaklaşım uygulanarak transfer matrisleri kullanılmasıyla bir PyDEDA'da hesaplanmıştır. Tezin bu kısmında IBSimu programı ile geliştirilen demet dosyasının girdi olarak kullanılması ve KAHVELab'daki demet hattı araçlarından ölçüm değerlerinin referans alınmasıyla PyDEDA'da yazılan uzay yükü hesabı detaylandırılacaktır [22, 30].

3.3.1. Enerji Hesabı

Bu çalışmaya öncelikle 20 keV kinetik enerjiye sahip proton demetinin sistemdeki toplam enerjisi ve göreceli parametrelerin (γ ve β) hesaplanması ile başlanmıştır.

$$E_{toplam} = E_{hareket} + E_{durgun} \quad (3.17)$$

Demetin kinetik enerjisi $E_{hareket}$ ve protonun durgun enerjisi E_{durgun} ile gösterilmiştir. 20 keV enerjili demetin toplam enerjisi $E_{toplam} = 2 \times 10^4 + 0.938 \times 10^9$ eV'tur. Burada enerji birimleri eV cinsinden verilmiştir. 20 keV enerjiye sahip demetin göreceli parametreleri $\gamma = E_{toplam}/E_{durgun} \approx 0.0000213$ ve $\beta = \sqrt{1 - 1/\gamma^2} = 0.00653$ olarak hesaplanmıştır.

3.3.2. Demetin Kuvvet ve Hareket Denklemleri

Demete etki eden elektromanyetik alanların tümünü içeren Lorentz kuvveti $\vec{F}(x,y,z)$ ile gösterilmiştir. Bu kuvvetler dış kaynaklı ve iç kaynaklı olmak üzere iki türlü etkiyle oluşabilir. Birincisi dışarıdan belirli kaynaklar kullanılarak; örneğin manyetik dörtkutuplu odaklayıcı mıknatıs ile manyetik alan oluşturulabilir. İkincisi ise içsel elektrik alana bağlı uzay yükü kuvveti gibi demetin iç dinamiğinin kendiliğinden oluşturduğu alanlardır. Dışarıdan etkiyle oluşturulan kuvvetler bir \vec{K} vektörüyle ifade edilmiştir:

$$\vec{F}_{dış} = -\vec{K}(s) \cdot \vec{r} \quad (3.18)$$

$\vec{K} \equiv (\kappa_x(s), \kappa_y(s), \kappa_z(s))$ demetin dış kaynaklı etkilerinin üç boyuttaki bileşenleri olarak verilmiştir. Denklem 2.27'de demete etki eden kuvvetlerin tümü tek bir denklemde, Denklem 2.47'de ise demetin kendi içinde oluşturduğu görelî Lorentz kuvvetleri yazılmıştı. Bu denklemde $\beta c \times B_{demet}$ ifadesindeki vektörel çarpım sonucu demetin boyuna ekseninde yani tasarım ekseninde manyetik alan oluşmaz. Yalnızca tasarım eksenine dik yönde E_{demet} ile doğru orantılı manyetik alan oluşur. Bu alan parçacıkların tasarım eksenindeki toplu etkisine (collective effect) bağlı olarak meydana gelir. Tüm bunlar değerlendirildiğinde üç boyutta (x,y,z) demete etki eden kuvvetler yazılmak istendiğinde aşağıdaki denklemler elde edilir [30]:

$$F_x = -\kappa_x(s)x + \frac{q}{\gamma^2} E_x(x,y,z;s), \quad (3.19)$$

$$F_y = -\kappa_y(s)y + \frac{q}{\gamma^2} E_y(x,y,z;s), \quad (3.20)$$

$$F_z = -\kappa_z(s)z + qE_z(x, y, z; s). \quad (3.21)$$

İçsel alan denklemleri üzerinde gerekli dönüşümler yapılarak elektrik alan doğrusallaştırıldığında (linearization) aşağıdaki alan denklemleri elde edilir [30]:

$$E_x \approx \frac{\langle xE_x \rangle}{\langle x^2 \rangle} x, \quad (3.22)$$

$$E_y \approx \frac{\langle yE_y \rangle}{\langle y^2 \rangle} y, \quad (3.23)$$

$$E_z \approx \frac{\langle zE_z \rangle}{\langle z^2 \rangle} z. \quad (3.24)$$

Gerçek sistemlerde oluşan alanlar için yapılan doğrusal yaklaşımlar, demetin en yoğun olduğu bölgeler için doğruya en yakın sonucu vermektedir. Demetin rms davranışı düşünüldüğünde alanlara doğrusal yaklaşım uygulamak oldukça kullanışlıdır [30].

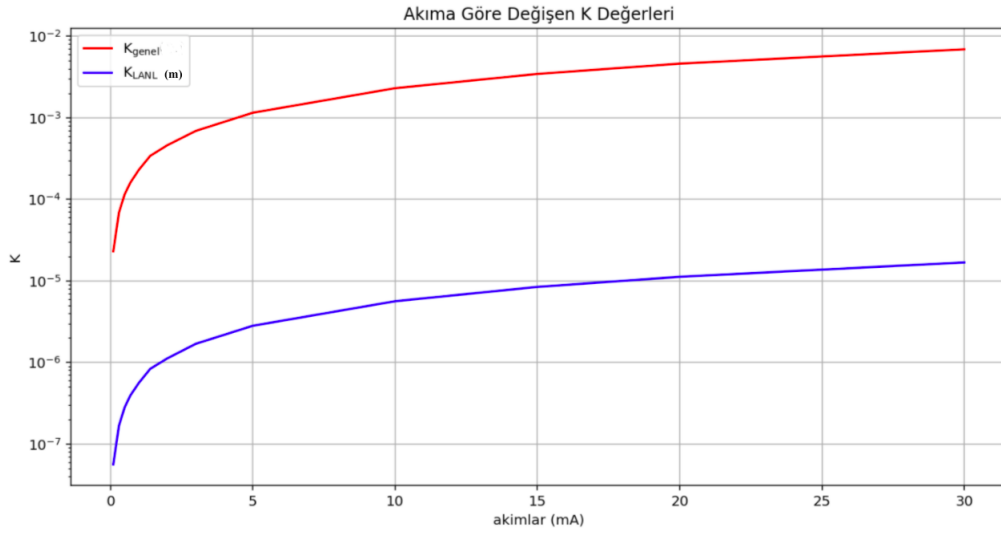
3.3.3. Yük Sıkışıklığı

Hızlandırıcı fiziğinde, uzay yükünün demet üzerindeki etkisinin ölçeği olarak yeni bir parametre tanımlanmıştır ve buna yük sıkışıklığı (beam perveance) denir, K ile gösterilir. Yük sıkışıklığına birden fazla yaklaşım yapılmıştır. Bu yaklaşımlardan biri Denklem 3.25'te verilmiştir [30]. Verilen denklemde K 'nın birimi metredir.

$$K \equiv \frac{qN}{2\pi\epsilon_0} \frac{1}{\gamma^3\beta^2} \frac{q}{mc^2}. \quad (3.25)$$

Bu denklemde ϵ_0 boş uzaydaki elektriksel geçirgenlik sabitini, N demet bohçasındaki toplam parçacık sayısını ifade eder. Yük sıklığı, uzay yükü etkisinin demeti ne kadar etkilediği ile ilgili bir ölçektir. Uzay yükü etkisinin olduğu her durumda sıfırdan farklı bir değer alır. Bir çok kaynakta genel yük sıklığı (general beam perveance) tanımı kullanılmıştır [13, 37, 38]. Denklem 3.25'te verilen K ve yaygın olarak kullanılan Denklem 3.26'daki K değerleri Tablo 3.2'de verilen demet parametreleri kullanılarak PyDEDA'da hesaplanmış ve Şekil 3.8'deki karşılaştırmalar yapılmıştır.

$$K_{genel} = \frac{qI}{2\pi\epsilon_0} \frac{1}{\gamma^3 \beta^3 mc^3} \quad (3.26)$$



Şekil 3.8: Farklı akım değerleri için elde edilen K_{genel} ve K değeri karşılaştırmaları

Denklem 3.26'da verilen genel yük sıklığı denkleminde I demetin akım değeridir. Bu denklemle verilen K_{genel} değeri birimsizdir. Şekil 3.8'de artan akım değeriyle demetin daha fazla uzay yükü etkisinde kaldığı görülmektedir. 0.1 mA - 0.5 mA aralığının dışında birim zamandaki toplam parçacık sayısı ve uzay yükü etkisinin beklendiği üzere doğru orantılı olduğunun benzetimi yapılmıştır. Bir diğer yük sıklığı formülasyonu ise akımlar üzerinden tanımlanmıştır [27]. Denklem 3.27'de ise K parametresi doğrudan demetin gördüğü zirve akım değeriyle ilişkilendirilmiştir. Bu formülasyon incelendiğinde demetin uzay yükü etkisinin demetin akım değeriyle doğrudan orantılı ve ilişkili olduğu bir kez daha görülür.

$$K_{sc} = \frac{I_{max}}{2I_A} \quad (3.27)$$

$$I_A = 4\pi\epsilon_0 \frac{m_0 c^3}{q}$$

Denklem 3.27’de yer alan I_{max} maksimum demet akımını (peak current), I_A ise proton için Alfvén akımı limiti ($\approx 31300kA$) ifade eder [27, 39]. Alfvén akım limiti bir demet içinde oluşan manyetik alanın parçacıkların yönünü değiştirmeye başladığı akıma denir ve bu denklemde m_0 protonun durgun kütesini ifade eder [40]. PyDEDA’da kullanılmak üzere Denklem 3.25’te yer alan yük sıklığı tanımları tercih edilmiştir. Elde edilen $K = 8.34 \times 10^{-7}$ m’dir.

Tablo 3.2: Demet parametreleri

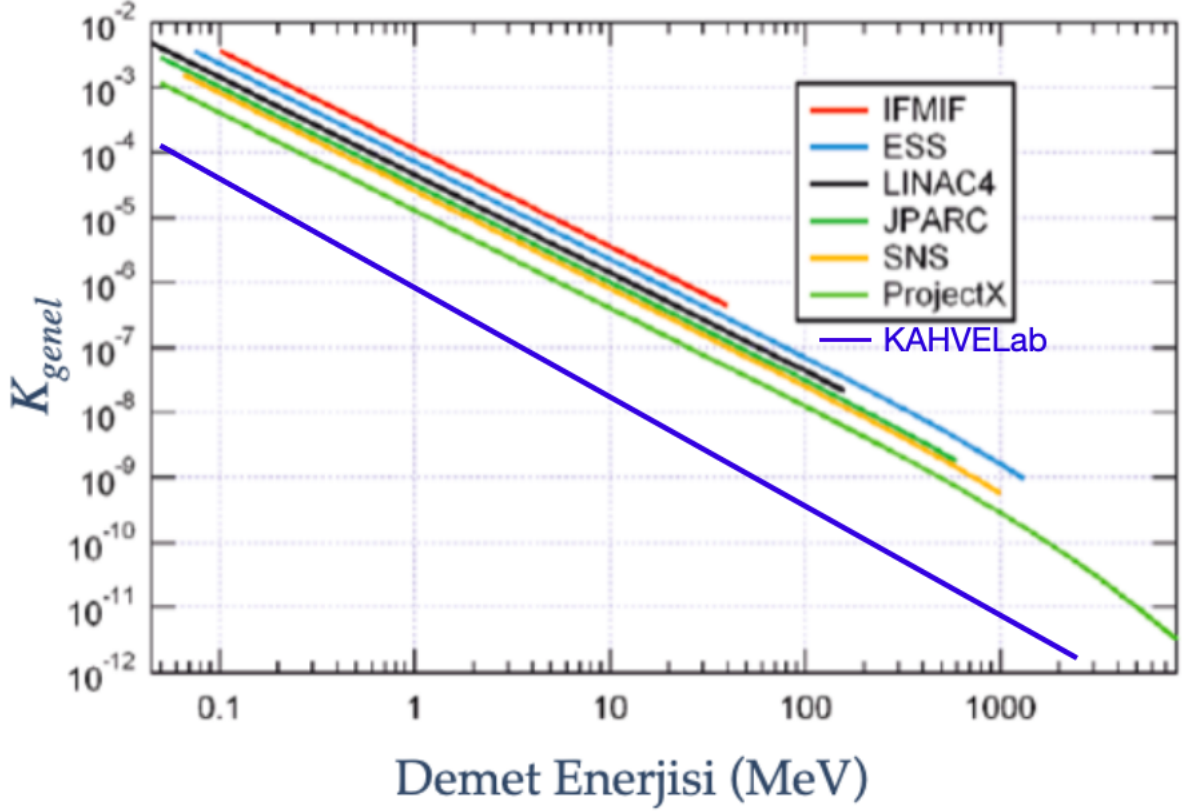
Parametreler	Değerler
Enerji (keV):	20
Işık hızı (m/s):	2.99-e8
Frekans (MHz):	800
Demetteki Parçacık Sayısı:	3000

Yük sıklığı değeri, demetin uzay yükü etkisinin hakimiyetinde olup olmadığını belirlemede de önemlidir. M. Reiser Denklem 3.28’de verilen karşılaştırmanın sağlandığı durumlarda demetin uzay yükü etkisi hakimiyetinde olduğunu vurgulamıştır [41]. Demet üzerinde uzay yükü veya yayılım hakimiyetini belirlemede K faktörünü ve a demet rms boyunun etkisini kullanan bir yaklaşım sunmuştur:

$$K_{genel} a^2 \gg \epsilon^2 \quad (3.28)$$

IBSimu’da elde edilen demet için Denklem 3.28’de verilen değerler yerine konduğunda; $K_{genel} a^2 = 2.03 \times 10^{-13} m^2$ ve $\epsilon^2 = 1.58 \times 10^{-11} \pi^2 m^2 rad^2$ olarak elde edilmiştir. Demete hakim olan etkinin yayılım olduğu bir kez daha K değerinin dikkate alındığı bir yaklaşımla teyit edilmiştir. Şekil 3.9’da farklı deneyler için ulaşılan demet enerji seviyelerine göre K_{genel} değerinin değişimi gösterilmektedir [42]. Şekildeki lacivert çizgi KAHVELab’taki proton

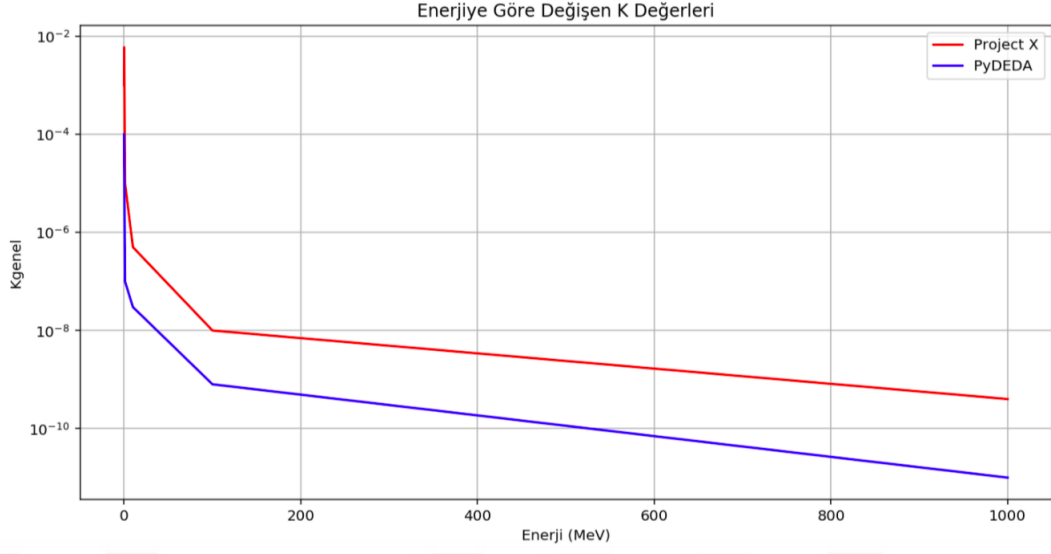
demetini temsil etmektedir. Yük sıklığı uzay yükü etkisinin ne kadar olduğunu söyleyen doğrusal bir parametredir.



Şekil 3.9: Farklı deneyler için demet enerjisine göre değişen yük sıklığı grafiği [42]

Şekil 3.9 ve Şekil 3.10 incelendiğinde farklı enerjilerde ve farklı parametrelerde oluşturulmuş demetler için demetin enerjisi arttıkça uzay yükü etkisinin göstergesi olan K değerinin beklendiği gibi açık bir şekilde azaldığı görülmektedir. Bu sonuçlar bizi Şekil 2.21'de verilen hızlandıkça değişen alanlar için enerjinin ve etkinin ters orantılı olduğu sonucuna götürmektedir. Şekil 3.10'da, Şekil 3.9'dan alınan ProjectX deneyinin verileri ile KAHVELab proton demetinin verilerini karşılaştırmak için çizdirilmiştir ve enerji - yük grafiğini temsil etmektedir. [42, 43].

Uzay yükünün oluşturduğu manipulatif etki, Lorentz kuvveti cinsinden Denklem 2.47'de ifade edilmişti. Bu kuvvet denklemlerinden hareket denklemleri elde edilmek istendiğinde uzay yükü etkisiyle içsel kuvvetin oluşturduğu hareket denklemi yük sıklığı parametresiyle ifade edilerek aşağıdaki gibi yazılabilir: [30].



Şekil 3.10: ProjectX deneyinden ve geliştirilen PyDEDA'dan elde edilen enerji - yük sıklığı verilerinin karşılaştırılması

$$x'' + \frac{\gamma'}{\gamma} x' + k_x^2 x = K \frac{2\pi\epsilon_0}{qN} E_x, \quad (3.29)$$

$$y'' + \frac{\gamma'}{\gamma} y' + k_y^2 y = K \frac{2\pi\epsilon_0}{qN} E_y, \quad (3.30)$$

$$z'' + \frac{\gamma'}{\gamma} z' + k_z^2 z = -\frac{\gamma'}{\gamma} \gamma^2 K \frac{2\pi\epsilon_0}{qN} E_z. \quad (3.31)$$

Yukarıdaki denklemlerde k uzay yükü dahil edilmemiş demetin faz ilerlemesini (phase advance) sembolize eder. Denklem 3.32'de demetteki veya bir demet bohçasındaki toplam yük Q , üretilen demetin akımı I ve sistemin çalıştırıldığı RF değeri cinsinden ifade edilmiştir [30].

$$Q = \frac{I}{f}. \quad (3.32)$$

Benzetim çalışmalarında kullanılan 1.4 mA akım değeri ve 800 MHz frekans değerine sahip demetin toplam parçacık sayısı $Q/q = N = 12 \times 10^6$ mertebesindedir. Gerçek bir demette var olan parçacık sayısı 10^6 mertebesinde olduğu halde benzetim çalışmaları sırasında cpu zamanını kısa tutmak için 10^3 mertebesindeki demetlerle çalışılmıştır. IBSimu'da üretilen 3939 parçacıklı ve Path Manager programında üretilen 3000 ve 5000 parçacıklı demet benzetimleri için yük sıklığı hesabı PyDEDA kullanılarak yapılmıştır [22, 44].

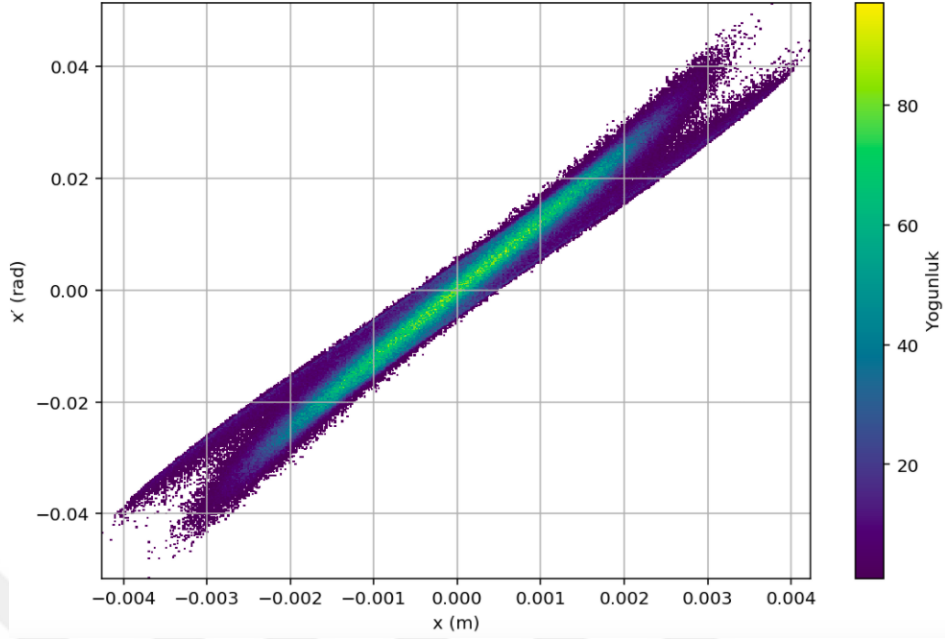
3.3.4. Eliptik Demet

Demetin faz uzayındaki parçacık dağılımının eliptik olarak simetrik bir geometrisi olduğu Şekil 2.17'deki görselde verilmiştir. Parçacıkların yoğunluk fonksiyonunun üç boyutta (x,y,z) integrali alınarak üç boyutlu dağılım fonksiyonu elde edilir. Demet yoğunluğu bu eliptik faz uzayı içerisinde Gauss dağılımı (normal dağılım) oluşturacak şekilde IBSimu programıyla üretilmiştir. Demetin yoğunluğunun normal dağılıma sahip olduğu faz uzayı elipsinin hemen altında yer alan yeşil Gauss tepeciğinden anlaşılabilir. Dağılım fonksiyonunun $A(x,y,z;s)$ üç boyutlu integrali alınarak da parçacık sayısı N elde edilir [30]. Parçacıkların birbirleri arasındaki etkileşimi bu eliptik olan simetrik yörünge içinde olduğu için, her eksendeki uzay yükü etkileşimi hesaplanırken eliptik integraller kullanılır. Bu nedenle doğrusallaştırılmış elektrik alanının her bir eksendeki hesabı için Carlson eliptik integralleri kullanılmıştır [45–47].

Şekil 3.11'de PyDEDA kullanılarak çizdirilen IBSimu demet dosyasının $x - x'$ faz uzayının, Şekil 2.17'de verilen faz uzayından farklı olduğu ve tam anlamıyla eliptik olmadığı görülmektedir. İki görsel arasındaki bu farkın sebebi, IBSimu programının demet üretirken hesaba kattığı uzay yükü etkisidir. Şekil 3.11'de parçacık yoğunluğunun yüksek olduğu bölge demetin merkezidir (beam core). Elipsin dışında görülen çatallaşma uzay yükü etkisinin bir göstergesidir.

x,y,z yönlerindeki demet için eliptik integral hesapları düzenlendiğinde aşağıda verilen ikinci dereceden Carlson eliptik integrali elde edilir [45, 46] :

$$R_D(x,y,z) \equiv \frac{3}{2} \int_0^\infty \frac{dt}{(t+x)^{1/2}(t+y)^{1/2}(t+z)^{3/2}} \quad (3.33)$$



Şekil 3.11: 3939 parçacıklı demet için PyDEDA kullanılarak elde edilen demetin $x - x'$ faz uzayı ve yoğunluğu

Bu denklemde x, y, z eksen ve konum bilgisini vermektedir, t ise eliptik koordinat değişkenidir. Eliptik integraller kullanılarak elektrik alan momentleri yazıldığında [30] :

$$\langle xE_x \rangle = \frac{\Lambda(A)}{\sqrt{3}} \frac{Q}{24\pi\epsilon_0} \frac{1}{(\langle x^2 \rangle)^{1/2}} R_D \left[\frac{\langle y^2 \rangle}{\langle x^2 \rangle}, \frac{\langle z^2 \rangle}{\langle x^2 \rangle}, 1 \right] \quad (3.34)$$

$$\langle yE_y \rangle = \frac{\Lambda(A)}{\sqrt{3}} \frac{Q}{24\pi\epsilon_0} \frac{1}{(\langle y^2 \rangle)^{1/2}} R_D \left[\frac{\langle x^2 \rangle}{\langle y^2 \rangle}, \frac{\langle z^2 \rangle}{\langle y^2 \rangle}, 1 \right] \quad (3.35)$$

$$\langle zE_z \rangle = \frac{\Lambda(A)}{\sqrt{3}} \frac{Q}{24\pi\epsilon_0} \frac{1}{(\langle z^2 \rangle)^{1/2}} R_D \left[\frac{\langle x^2 \rangle}{\langle z^2 \rangle}, \frac{\langle y^2 \rangle}{\langle z^2 \rangle}, 1 \right] \quad (3.36)$$

denklemleri elde edilir. Λ değeri demet dağılım profilini ifade eden parametredir. Farklı dağılımlar için, örneğin düzgün, waterbag (parabolik) veya içi boş küresel dağılım (hollow distribution) için Λ değerleri değişmektedir [30, 48]. Denklem 3.34, 3.35 ve 3.36'da verilen

Λ değeri Gauss dağılımı (normal dağılım) için $\Lambda = \sqrt{\frac{3}{\pi}} \approx 0.98$ 'dir. Bu tezde, IBSimu'da üretilen demetin özellikleri belirlenirken normal dağılım seçildiği için Λ değeri olarak normal dağılım için hesaplanan değer kullanılmıştır. A ise demetin dağılım profilidir [30].

KAHVELab'da RFQ öncesinde SOL2'den sonra demetin sürüklendiği 32.91 cm'lik hat boyunca uzay yükü etkisi benzetimi çalışılmıştır. f odaksızlaştırma faktörü, demetin odaklandığı eksenden uzay yükü etkisiyle ne kadar dağılacığının göstergesi olan parametredir. Uzay yükü etkisini içeren matris yazılırken, 32.91 cm uzunluğundaki hat 33'e bölünerek 1 cm'e yakın sürüklenmede bir uzay yükü etkisi olan f 'yi, yeniden hesaplayarak demeti aynı zamanda itekleyen (kick) sürüklenme matrisiyle uzay yükü matrisi çarpılmıştır. f hesabı yapılan uzunluğa adım büyüklüğü denir ve s ile gösterilir, $s = 32.91/33$ olarak bulunur. Uzay yükü etkisi hesaplanırken f odaksızlaştırma parametresi dahil edilen transfer matrisi bir döngü içinde yazılır ve her bir adımda demeti tekrar itekleyerek demette oluşan momentum itmesi (momentum impulse) demetle çarpılarak yazdırılır. Bu hesabın hata miktarını azaltmak için adım büyüklüğü olan Δs 'i olabildiğince ufak seçmek gerekir. Bu sebeple PyDEDA'da aynı hesaplar $\Delta s = 1$ mm seçilerek de yapılmıştır. Çıkan sonuçların birbirine oldukça yakın olduğu tespit edilmiştir. Programın çalışma hızını arttırmak ve güç tasarrufu sağlamak için 1 cm ile sonuçlar alınmaya devam edilmiştir.

$$\frac{dp}{dt} = F_{\text{içsel}(x,y,z)} \quad (3.37)$$

Denklem 3.37'de demetin momentum değişimlerinin oluşturduğu içsel kuvvet $F_{\text{içsel}}$ ile gösterilmiştir.

$$\Delta p_x \approx \frac{q}{\gamma^2} \frac{\langle x E_x \rangle}{\langle x^2 \rangle} \Delta t x \quad (3.38)$$

Denklem 3.22, 3.23 ve 3.24'teki alan dönüşümleri kullanıldığında içsel etkilere bağlı oluşan Lorentz kuvveti Denklem 3.38'deki gibi yazılır. Denklemde verilen t değeri konum ve hız cinsinden yazılmak istendiğinde $\Delta t = \frac{\Delta s}{v}$ olur. Buna göre Denklem 3.38 yeniden düzenlendiğinde;

$$\Delta x' \approx \frac{1}{\gamma^2 \beta^2} \frac{q}{\gamma m c^2} \frac{\langle x E_x \rangle}{\langle x^2 \rangle} \Delta s x, \quad (3.39)$$

elde edilir. Bu denklemde yer alan Δs ve x parametreleri haricindeki değişkenler, demetin uzay yükü etkisi ile odaklandığı eksenden ne kadar uzaklaşmaya meyilli olduğunu gösteren f değeridir. Denklem daha sade bir ifadeyle yazılmak istendiğinde;

$$\Delta x' \equiv \frac{\Delta s}{f} x \quad (3.40)$$

denklemi elde edilir. Bu denklemde verilen doğrusal ilişki bir matris formatında yazılarak demet matrisiyle bir döngü içerisinde çarpılır. Sonuç olarak çıkan matris demetin uzay yükü etkisiyle uğradığı değişiklikleri gösterir.

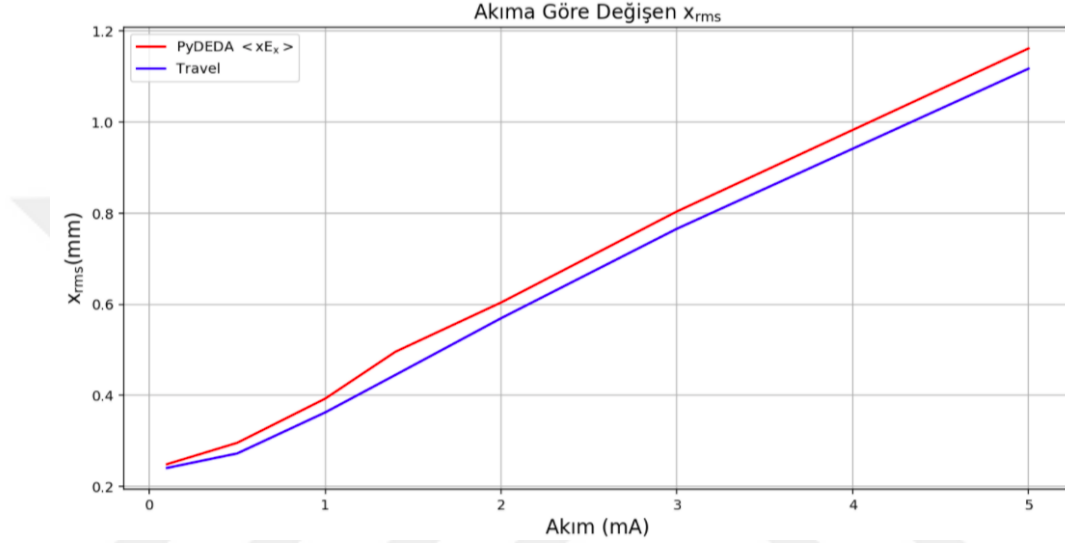
$$\frac{1}{f} \equiv \frac{1}{\gamma^2 \beta^2} \frac{q}{\gamma m c^2} \frac{\langle x E_x \rangle}{\langle x^2 \rangle} \quad (3.41)$$

Denklem 3.41'de elde edilen f değeri kullanılarak uzay yükü matrisinde yerine yazılır. Denklem 3.42'de demetin iki boyuttaki projeksiyonu için uzay yükü matrisi yazılmıştır. Bu matris, demet matrisiyle ve sürüklenme matrisiyle çarpılarak n adımındaki konum-açı vektörü $n + 1$ adımına getirilir.

$$\begin{pmatrix} x_{n+1} \\ x'_{n+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{\Delta s}{f_x} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_n \\ x'_n \end{pmatrix} \quad (3.42)$$

Uzay yükü matrisi Denklem 3.16'da verilen M_{sol_2} demet matrisi ile çarpılmıştır. Demetin SOL2'den sonra 32.91 cm'lik sürüklenmesi boyunca her Δs mesafesinde bir uzay yükü etkisi Coulomb metoduyla hesaplanmıştır. Doğrusallaştırılmış elektrik alan formülüyle hesaplanan odaksızlaştırma parametresi f için bulunan değer, matriste yerine yazıldığında ulaşılan

demet matrisinin x_{rms} ve y_{rms} değerlerinin uzay yükü etkisiyle büyüdüğü gözlemlenmiştir. Aynı demet ve aynı parametler ile farklı akım değerleri için Denklem 3.39'un kullanılmasıyla hesaplanan x_{rms} değerlerinin nasıl değiştiği Şekil 3.12'de, CERN'ün geliştirdiği TRAVEL programından elde edilen sonuçlarla karşılaştırılarak sunulmuştur. Değişen akım değerine göre değişen x_{rms} değerleri, TRAVEL programının çıktısı olarak üretilen *.dst* uzantılı dosyaların Plotwin programında açılmasıyla elde edilmiştir.



Şekil 3.12: Farklı akım değerleri için $\langle xE_x \rangle$ ile hesaplanan uzay yükünün x_{rms} 'e etkisi. Kırmızı çizgi PyDEDA'dan elde edilen verileri, mavi TRAVEL programından alınan verileri temsil etmektedir.

PyDEDA'da girdi olarak 3939 parçacıklı demet dosyası kullanılmıştır. Elde edilen hareket ve kuvvet denklemlerinden yüklü parçacıkların birbirine uyguladıkları ortalama Coulomb etkisiyle birbirlerini ne kadar ittikleri ve her bir yüklü parçacıkta oluşan etkinin ortalamasının demetin dinamiğini ne kadar değiştireceği gösteren odaksızlaştırma parametresi f hesaplanmıştır. Bu değer, Denklem 3.41'de verilen doğrusallaştırılmış elektrik alan ifadesiyle bulunabileceği gibi ikinci dereceden Carlson eliptik integrali ve LANL makalesinde kullanılan K parametresi hesaplara dahil edilerek de bulunabilir [30]. Eliptik integral ve K ile bulunan odaksızlaştırma parametresi f_{sc} ile gösterilmiştir:

$$\frac{1}{f_{sc,x}} = \frac{K}{2} \left[\frac{1}{5} \frac{1}{\langle x^2 \rangle} \right]^{3/2} R_D \left[\frac{\langle y^2 \rangle}{\langle x^2 \rangle}, \frac{\langle z^2 \rangle}{\langle x^2 \rangle}, 1 \right], \quad (3.43)$$

$$\frac{1}{f_{sc,y}} = \frac{K}{2} \left[\frac{1}{5} \frac{1}{\langle y^2 \rangle} \right]^{3/2} R_D \left[\frac{\langle x^2 \rangle}{\langle y^2 \rangle}, \frac{\langle z^2 \rangle}{\langle y^2 \rangle}, 1 \right], \quad (3.44)$$

$$\frac{1}{f_{sc,z}} = \frac{K}{2} \left[\frac{1}{5} \frac{1}{\langle z^2 \rangle} \right]^{3/2} R_D \left[\frac{\langle x^2 \rangle}{\langle z^2 \rangle}, \frac{\langle y^2 \rangle}{\langle z^2 \rangle}, 1 \right]. \quad (3.45)$$

Denklem 3.43, 3.44 ve 3.45 incelendiğinde, denklemlerin x, y, z eksenlerine göre değişmediği görülür. Bunun sebebi, etkinin görelî olmamasıdır. Sistemin hareket denklemleri parçacıklar arasında oluşan uzay yükü etkisi dahil edilerek ifade edildiğinde, bu etki matematiksel olarak yayda oluşan sönümlenme kuvvetine benzetilebilir. Karşı koyan kuvvet olarak uzay yükü, yayın kuvvet ve hareket denklemlerindeki sönümlenme kuvvetine benzer. Yayın hareket dinamiğini etkileyen bir faktör olduğu için bu iki parametre arasında analogi kurulabilir. Basitçe düşünülürse sönümlenme kuvveti, yayın yaptığı harekete ters bir etki yapar, uzay yükü etkisi de demetin hareket dinamiğini etkiler ve demetin odaklanmasını bozar. Tıpkı bir dörktuplu miknatısın veya ışık optiğinde merceğin odağı olduğu gibi uzay yükü de ortalama Coulomb kuvvetinin, aynı yüklü iyonların birbirini itmesiyle, demeti odaktan uzaklaştıran bir etki yapar [30].

K ve R_D değerleri yerine yazılarak hesaplanan f değeri, SOL2'den sonra oluşan demet matrisiyle RFQ'dan hemen önce yer alan 32.91 cm'lik sürüklenme hattı boyunca her Δs boyunda yeniden hesaplanarak yeni demetle çarpılır. PyDEDA'da benzetimi yapılan demetin parametreleri ve demetin geçtiği solenoidlerin değerleri Tablo 3.3'te verilmiştir.

f değeri demetin uzay yükü etkisinde bırakıldığı hat boyunca ne kadar odaktan uzaklaşacağını gösteren sayısal bir değerdir.

Elde edilen sürüklenme ve uzay yükü matrisi 6 boyutta yazılmak istenirse;

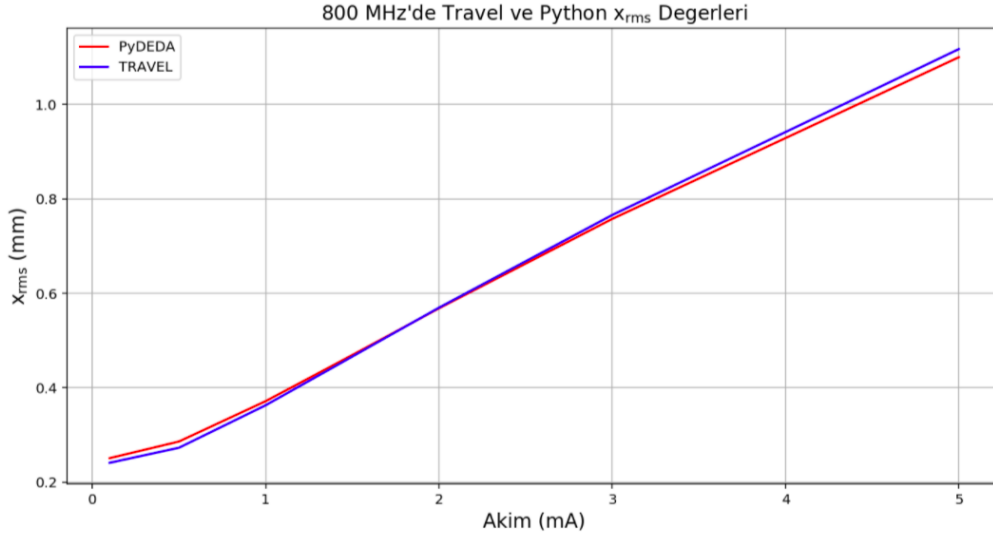
Tablo 3.3: 3939 Parçacıklı Demetin parametreleri

Parametreler	Değerler
Akım (mA)	1.4
Enerji (keV)	20
Işık hızı (m/s)	2.99e8
Frekans (MHz)	800
Manyetik Alan (Sol-1) (T)	0.1869
Manyetik Alan (Sol-2) (T)	0.1931
Gradyan k (Sol-1) (T/m)	4.57
Gradyan k (Sol-2) (T/m)	4.72
Yük Sıkışıklığı K (perveance) (m)	7.85e-7
Adım Büyüklüğü Δs (mm)	10
Toplam yük Q (C)	1.75e-12
Demetteki Parçacık Sayısı	3939

$$M_{uy} = \begin{pmatrix} 1 & L & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & L/\gamma^2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\Delta s}{f_{s,x}} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\Delta s}{f_{s,y}} & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\Delta s}{f_{s,z}} & 1 \end{pmatrix}. \quad (3.46)$$

matrisi elde edilir. Bu hesaplama birlikte 117.3 cm'lik DEDA hattında sürüklenen ve solenoidlerden geçirilen demetin RFQ'ya girişinden önce x ve y yönlerindeki rmslerinin uzay yükü etkisiyle ne kadar değiştiği hesaplanabilir. Şekil 3.13'te farklı akım değerleri için PyDEDA'dan ve TRAVEL programından elde edilen x_{rms} değerleri karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar birbirleriyle oldukça yakındır. Şekil 3.12'de alınan sonuçlarla kıyaslandığında Şekil 3.13'te alınan değerlerin TRAVEL çıktılarıyla daha iyi örtüştüğü görülmektedir. Bu sebeple Kısım 4.1.'de yapılacak farklı karşılaştırmalar için K ve R_D parametreleri kullanılarak elde edilen Denklem 3.43, 3.44 ve 3.45 kullanılmıştır.

IBSimu'da üretilen 3939 parçacıklı 800 MHz frekanslı, 20 keV iyon kaynağı çıkış enerjisine sahip demet, 14.08 cm sürüklenip 14.31 cm etkin uzunluğa ve 0.1869 T manyetik alana sahip 1682 sarımlı ilk solenoidten geçirildikten sonra (SOL1), 41.70 cm daha sürüklenerek



Şekil 3.13: Farklı akım değerleri için uzay yükünün x_{rms} 'e etkisi, Kırmızı çizgi PyDEDA'dan elde edilen verileri, mavi TRAVEL programından alınan verileri temsil etmektedir.

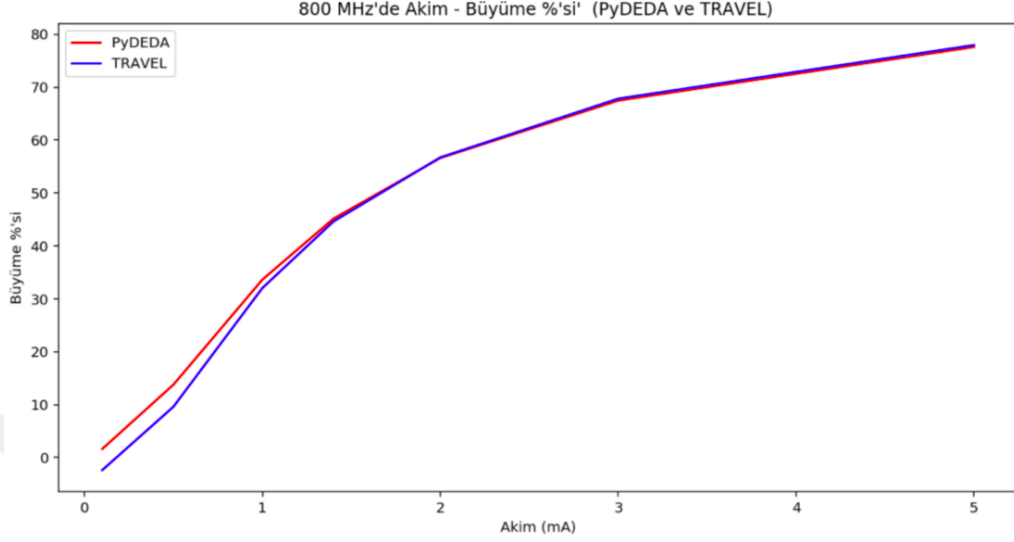
14.31 cm etkin uzunluğa ve 0.1931 T manyetik alana sahip 4000 sarımlı ikinci solenoidden (SOL2) geçirilmiştir. SOL2'den hemen sonra ve RFQ'dan hemen önce yer alan 32.91 cm'lik sürüklenme hacmi boyunca demete uzay yükü etkisi uygulanmıştır. Uzay yükü matrisi demetle çarpıldıktan sonra bulunan yeni matris üzerinden elde edilen x_{rms} değerleri, TRAVEL programında aynı demet, tamamen aynı etkilere maruz bırakılarak tekrar simule edilmiş farklı akımlar için karşılaştırması yapılmıştır. Farklı frekans, farklı akım ve farklı demetlerle yapılan karşılaştırmalara ve detaylarına Kısım 4.1.'de değinilecektir.

Akım (mA)	PyDEDA $x_{rms} - y_{rms}$ (mm)	TRAVEL $x_{rms} - y_{rms}$ (mm)	Fark %
0.1	0.241 - 0.235	0.251 - 0.245	3.91
0.5	0.273 - 0.266	0.286 - 0.278	4.62
1.0	0.363 - 0.358	0.371 - 0.363	2.34
1.4	0.445 - 0.4413	0.45 - 0.443	0.95
2.0	0.57 - 0.567	0.568 - 0.563	0.24
3.0	0.766 - 0.765	0.758 - 0.754	1.09
5.0	1.118 - 1.12	1.1 - 1.1	1.56

Tablo 3.4: 800 MHz frekansta farklı akım değerleri için farklı programlardan elde edilen x_{rms} ve y_{rms} değerleri.

Tablo 3.4, Tablo 3.3'teki değerler referans alınarak, iki adet solenoid ve sürüklenmenin ardından RFQ öncesi sistemdeki son sürüklenme hattında uzay yükü etkisi dahil edilerek elde edilen x_{rms} ve y_{rms} değerlerini göstermektedir. Şekil 3.13'te elde edilen x_{rms} ve y_{rms} değerlerinin PyDEDA ve TRAVEL çıktılarının küçük bir farkla uyduğu görülmektedir.

2 mA'lık akım değerinde PyDEDA ve TRAVEL sonuçları %1'den daha az bir fark göstermektedir.



Şekil 3.14: Demetin x_{rms} değerinin uzay yükü etkisiyle büyüme yüzdesi. Kırmızı çizgi PyDEDA'dan elde edilen verileri, mavi TRAVEL programından alınan verileri temsil etmektedir.

Şekil 3.14'te PyDEDA ve TRAVEL programlarında, farklı akımlar için uzay yükü etkisi dahil edilerek elde edilen x_{rms} değerlerinin, uzay yükü etkisi sisteme dahil edilmeden hesaplanan x_{rms} değerine göre büyüme yüzdesi gösterilmiştir. Bu çalışma ile uzay yükünün demeti ne oranda büyüttüğü daha iyi görülmektedir. Demetin y_{rms} değerlerinde de benzer sonuçlar elde edilmiştir. PyDEDA'da elde edilen verilerin TRAVEL program çıktılarıyla uyumlu olduğu görülmektedir.

3.3.5. Yayınım Büyümesi

Pek çok hızlandırıcı uygulaması, yüksek yük yoğunluğuna sahip bir demetin olabildiğince odaklı olmasını gerektirir. Bu amaca ulaşmak için faz uzayındaki parçacık yoğunluğunun seyrelmesine neden olan tüm faktörleri kontrol etmek gerekmektedir. Doğrusal parçacık hızlandırıcılardan RFQ, hedef olarak seçilen parametrelere ve tasarım parametrelerine göre kendisine aktarılan demetle ilgili sınırları olan bir sistemdir. Demetin profiliyle ilgili bilgilerin demet RFQ'ya girmeden önce hesaplanması ve benzetimlerinin yapılması parçacık yoğunluğunu kaybetmeden hedeflenen enerjilere ulaşmak adına büyük önem taşır. Demet profili ölçümlerinin en bilinenlerinden biri Kısım 2.4.1.'de bahsi geçen yayınımdır. RFQ'ya aktarılmak istenen odaklanmış demetin yayınıminin büyümesi istenmeyen bir durumdur. Bu

sebeple yayınımı büyütebilecek etkilerin incelenmesi gerekir.

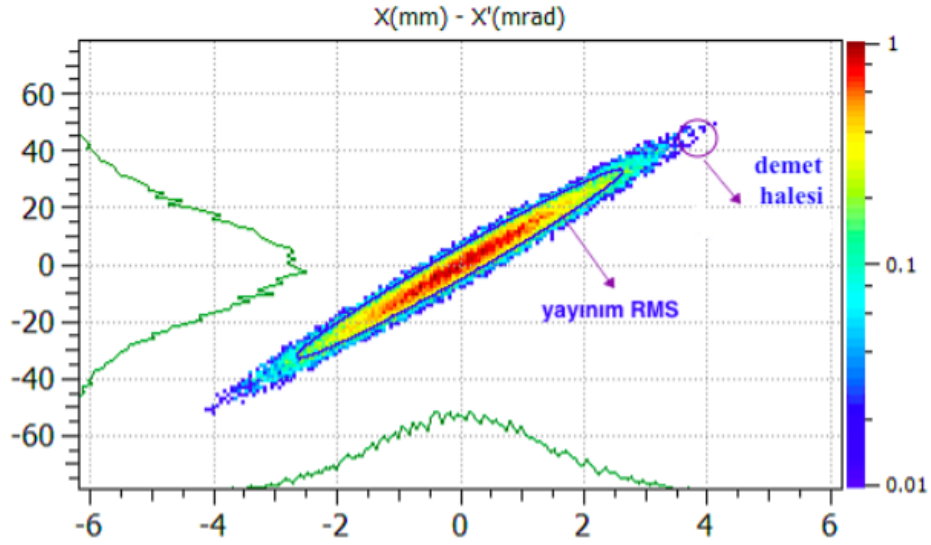
Yayınım büyümesinin en temel sebepleri şöyledir:

- Doğrusal Olmayan Dış Kuvvetler
- İçsel Etkileşimler

Dışardan uygulanan mıknatıslarla odaklanmanın artırılması içsel etkileşimleri tetikleyici bir etki oluşturur, böylece demetin ϵ_{rms} değeri artar. Liouville kuramı korunduğu halde artan yayınım, parçacıkların dağıldığı faz uzayının alanı sabit kaldığı halde faz uzayı içindeki parçacık yoğunluğu dağılımının değişmesi anlamına gelir. Diğer bir deyişle demetteki yük dağılımı yinelenmiş (redistribution of charges) olur. Alanın korunduğu ama dağılımın değiştiği bir sistemde ϵ_{rms} değerinin kapsadığı alandaki parçacık dağılımı da değişmiş olur. Bu dağılımın değişimiyle uzay yükü etkisiyle demetin dış kısmına yakın olan parçacık sayısı artacaktır. Demetin dış kısmı, demetin içinde bulunduğu yüzeyle teması sonucu kaybolacak ilk parçacıkları barındırır. Bu sebeple dış kısımda ne kadar parçacık kaybolacağı o bölgedeki parçacık dağılımı ile ilgilidir. Demetin odaklanıp hızlandırılacağı kümeden uzak bölgede yer alan bu parçacıklara 'hale parçacıklar' ve bu parçacıkların uzay yükü etkisi ile oluşumuna "hale oluşumu (halo formation)" denir. PyDEDA x_{rms} ve y_{rms} değerleri hesaplanırken uzay yükü etkisine bağlı büyümeler hesaba katılsa bile uzay yükünün parçacıklar arasındaki itme etkisiyle hale parçacıklar oluşur. Böylelikle demetin dağılımının değişmesiyle ϵ_{rms} 'de doğrudan büyüme görülemeyebilir [13, 31, 48].

Şekil 3.15, TRAVEL programıyla benzetimi yapılmış bir demetin Plotwin programından elde edilen faz uzayı grafiğini göstermektedir. Demetin faz uzayını gösteren bu grafikte proton demetinin yarıçapının yaklaşık 4 mm olduğu görülmekte, x eksenini mm cinsinden demetin x eksenindeki pozisyonunu, y eksenini ise demetin momentumunun küçük açı yaklaşımı kullanılarak açı ifadesine dönüştürülmüş halini mrad cinsinden temsil etmektedir. Bu faz uzayında belirlenen bir RMS yayınım alanı dışında kalan hale parçacıklar gösterilmiştir [2, 23].

Düşük β 'lı yüksek yoğunluklu demetlerde yayınım, Coulomb kuvvetinin ortalama etkisi olan uzay yükü etkisiyle büyür. Bu tezde, uzay yükü etkisine bağlı olan yayınım büyümesi doğrudan PyDEDA'da yazılmış ancak yayınım değerinde bir değişim gözlemlenmemiştir ve



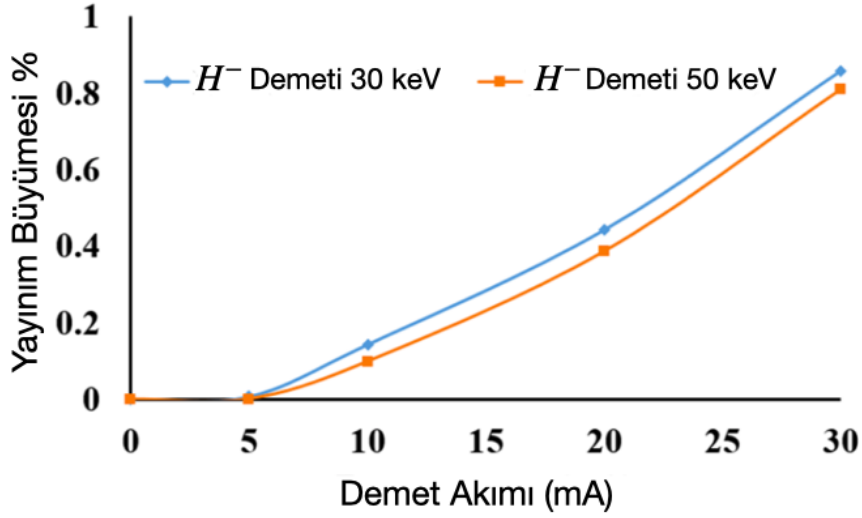
Şekil 3.15: Hale etkisi

bu sonucun nedenleri araştırılmıştır. x_{rms} ve y_{rms} değerlerindeki büyümelerin de yayılımı büyütmemesinin nedeni hale etkisiyle açıklanmıştır [32].

Şekil 3.16'da görülen grafikte V. Lizarraga, uzay yükü etkisiyle yayılım büyümesi üzerine yaptığı bir çalışmada, 50 cm'lik bir sürüklenme hattı boyunca üretilen H^- iyon demeti için 30 ve 50 keV enerjilerde, 1 - 30 mA akım değerleri arasında tarama yapmıştır. Yapılan taramadan elde edilen sonuçlar TRAVEL ve IBSimu çıktılarıyla karşılaştırılmıştır. Beklendiği üzere, akım artışı yayılım artışını tetiklemiştir, ancak meydana gelen artış %1'den az olmuştur. Bu mertebelerdeki yayılım artışları gerçek deney düzeneklerinde ihmal edilebilir [49]. Şekil 3.16'da 30 ve 50 keV enerjiye sahip demetin uzay yüküne bağlı yayılım büyümesi oranı verilmektedir. Bu grafikte 5 mA'lık akımın altında yayılım büyümesi görülmemiştir.

V. Lizarraga'nın paylaştığı veriler kullanılarak PyDEDA'da mevcut demetin aynı akım ve enerjilerde benzetimi yapılarak yayılım hesabı kontrol edilmiştir. x_{rms} ve y_{rms} boylarında akımın artmasıyla artış ve enerjinin artmasıyla azalma gözlemlendiği halde ϵ_{rms} değeri sabit kalmıştır.

T.Wangler'in makalesinde λ_D uzunlukları hesaplanarak demete hakim olan etkinin belirlenmesinin ardından yayınımdaki büyüme aşağıdaki şekilde formülize edilmiştir [31]:



Şekil 3.16: Farklı enerji ve akımlarda yayınım büyümesi oranı [49]

$$\frac{\varepsilon_f}{\varepsilon_i} = \sqrt{\frac{1 + q^2 N a U_{ni}}{60 \sqrt{5} \pi \varepsilon_0 \gamma^3 m c^2 \varepsilon_i^2}} \quad (3.47)$$

Denklem 3.47’de a rms demet boyutu, U_{ni} doğrusal olmayan alan enerjisi parametresi, N bir demet boğçasındaki toplam parçacık sayısını simgeler. Bu formülasyon PyDEDA’da mevcut demete entegre edildiğinde $\varepsilon_f/\varepsilon_i$ değerinin 1.00000234 çıktığı görülmüştür. PyDEDA’da elde edilen parametreler kullanıldığında, demetin uzay yükü hakimiyeti altında olmadığı tekrar görülmüş olur.

Uzay yükü parçacıkların birbirleriyle etkileşimlerinde oluşan bir etki olduğu için iyon kaynağında parçacıklar üretildiği andan itibaren oluşur. Bu sebeple iyon kaynağı tasarlanırken uzay yükü etkileri göz önünde bulundurulmalıdır. Elektrotların tipi ve iyon kaynağı içindeki uzunluk uzay yüküne bağlı yayının artmaması için önemlidir. Birlikte çıkan iyonlardan H^+ iyonunun erken ayrılması, azalan uzay yükü etkisiyle yayınım artışını azaltır [50]. Düşük enerjilerde daha fazla olan etkiyi en aza indirmek için demet enerjisini mümkün mertebe yükseltmek gerekir. Demetin iyon kaynağından çıkış enerjisinin 10 keV’in üstünde olması demetin patlamaması (blow up) için kritiktir [51].

Sonuç olarak, PyDEDA kullanılarak yapılan uzay yükü hesaplamalarında kullanılan doğrusallık varsayımı gereği, uzay yükü kaynaklı yayınım büyümesi bu tür bir matris

koduyla hesaplanamamaktadır. Bunun yanında bu tür bir matrislerle hesap yapan bir program elips parametreleri ve x ve y eksenlerindeki rms boylarını belirlemede oldukça hızlı ve kullanışlıdır [13, 52].

3.4. HIZLANDIRICI KOVUKTA ELEKTROMANYETİK ALAN ÖLÇÜMLERİ

Belirli bir rezonans frekansında çalışan RF güç kaynağıyla kanatları beslenerek merkezinde oluşan elektrik alan vasıtasıyla parçacık demetlerini hızlandıran kovuğa RFQ denir. RFQ'nun içinde oluşan elektrik alan ve hızlandırılan parçacıklar aynı eksen üzerindedir. Manyetik alan ise kanat diplerine doğru gidildikçe diğer bir deyişle RFQ'nun merkezinden çapsal olarak uzaklaştıkça artmaktadır. RFQ'ların üretiminde iletim kalitesini arttırmak için saf bakır gibi iletkenliği yüksek metaller tercih edilir. Kanat uçlarındaki kiplerin işlenmesi sırasındaki hassasiyet içeride oluşan elektrik alanın geometrisi açısından ve parçacıkların hesaplanan şekilde hızlandırılabilmesi açısından çok önemlidir.

Bu çalışmada, elektromanyetik dalganın dağıldığı kovuk boyunca elektrik ve manyetik alanın özellikli bir boncuk ile etkilendiği boncuk-çekim deneyi düzeneği oluşturulmuş, kontrol programlarıyla takibi yapılmıştır. Boncuğun elektrik alanı ve manyetik alanı yerel olarak değiştiren etkisi ve fazdaki kayma miktarı incelenerek, oluşan elektromanyetik alanın düzgünlüğü test edilir. Boncuk-çekim deney düzeneğinde kullanılan araçlar şunlardır:

- Adım Motor, Sürücü Devresi ve Arduino Devresi
- Güç Kaynağı
- Vektör Ağ Analizörü
- LabVIEW Kontrol Sistemi
- Termometre ve Nem Ölçer

Bu çalışmada, 35 cm yüksekliğindeki davul kovuk (pillbox) için yazılımsal ve donanımsal alt yapı çalışmaları ve üretilen RFQ deneme modülü için testler gerçekleştirilmiştir. Davul kovukta çalışılan ve ölçüm alınan mekanizmanın hazırlanmasının ardından prototip RFQ'nun üretiminin tamamlanmasıyla donanımsal yenilikler eklenmiştir. Böylece, 800

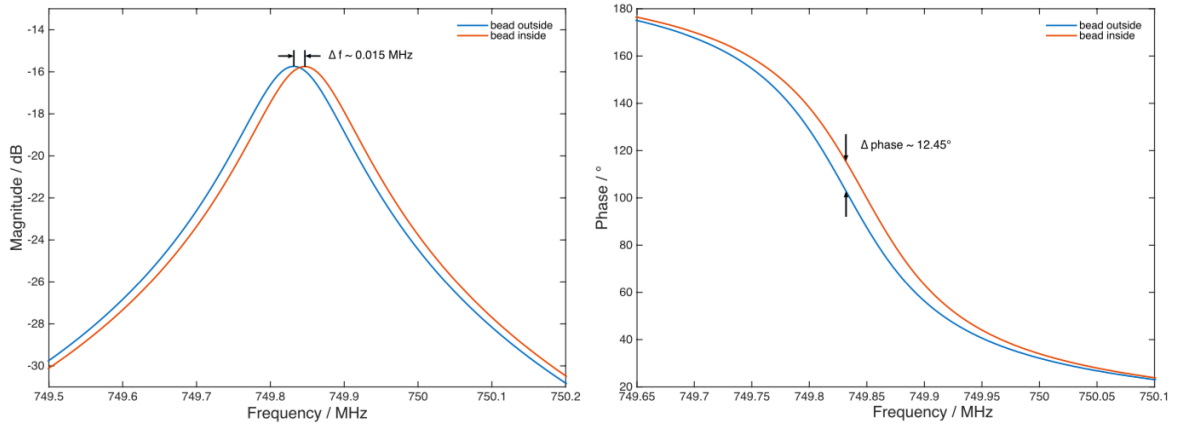
MHz'de çalışan 50 cm boyunda deneme üretimi RFQ modülü için elektromanyetik alan testleri de yapılmıştır. TÜBİTAK-1001 projesi kapsamında 1 m uzunluğundaki RFQ ile iyon kaynağından alınan 20 keV enerjili proton demetinin enerjisinin 2 MeV'a ulaştırılması hedeflenmektedir. Bu amaçla 50 cm boyunda 2 adet RFQ modülü üretimi daha gerçekleştirilecek ve bu iki modül birleştirilecektir.

3.4.1. Slater Pertürbasyon Kuramı

Boncuk-çekim deneyinde, demetin geçeceği eksen boyunca içeride oluşturulan elektromanyetik alanı bozan bir boncuk kullanılarak kovuk boyunca z ekseninde rezonans frekansta kayma oluşturulur. Bu frekans değişikliği sistemde depolanan enerji miktarında değişiklik yaratır. Bu deney yöntemi ile alan bozulumu iki şekilde ölçülebilir:

- Frekans Farkı,
- Faz Farkı.

Frekans farkı ölçülerek yapılan ölçümlerde farklar oldukça küçük olduğu için bu yöntem yüksek hassasiyette ölçüm yapmayı gerektirir. Bu sebeple çok sık tercih edilen yöntemlerden değildir.



Şekil 3.17: 750 MHz RFQ frekans (sol) ve faz (sağ) grafikleri [53]

Şekil 3.17'de verilen grafikler CERN'ün ürettiği 750 MHz'lik RFQ için yapılan boncuk çekim deneyinde alınan sonuçları göstermektedir. Grafiklerde kırmızı veriler boncuk içerideyken, mavi veriler ise boncuk dışarıdayken alınmıştır. Elde edilen sonuçlarda

frekanstaki kaymadan okunan $\Delta f = 0.015$ MHz değerinin faz kaymasında oluşan etkiye kıyasla daha küçük olduğu görülmüştür. Faz hesabının oluşturduğu grafiğin eğiminin fazla olması farkın görünürlüğünü arttırmıştır. Bu sebeple fazda meydana gelen değişiklik kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır. Fazda ve frekansta meydana gelen değişimlerin kovuktaki enerji değişimi ile ilişkisi Denklem 3.48'de verilmiştir [53].

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{\Delta f}{f} = \frac{\tan \phi(f)}{2Q} \quad (3.48)$$

Denklem 3.48'de verilen ϕ faz değeri, Q ise f değeri için elde edilen kalite faktörüdür. Kalite faktörü Q , sinyal iletimi olan bir sistemdeki verimi belirtmek için kullanılan bir terimdir ve kovukta depolanan enerjiyle kovuk duvarında ısıya dönüşen güç arasındaki ilişkiyi temsil etmektedir. Kovuk içine gönderilen güçten olabildiğince az gücün geri yansması hedeflenir. Kovuk içinden yansıyan gücün az olması, kalite faktörünün yüksek olması anlamına gelir.

$$Q = \frac{fU}{P} \quad (3.49)$$

Denklem 3.49'da verilen P değeri kovuk üzerinde kaybedilen güç miktarıdır. Denklem 3.50'de P tanımı yapılmıştır. U ise kovuk üstünde depolanan enerjidir ve davul kovuk için $1/f^2$ ile orantılıdır. Böylece frekans arttıkça kovuk üzerinde depolanan enerji azalır. Denklemdeki Z , $1/\sqrt{f}$ ile orantılı yol empedansıdır. Denklem 3.51'deki V voltaj değerini, I ise akımı ifade eder.

$$P = V^2/Z, \quad (3.50)$$

$$Z = \frac{V}{I}. \quad (3.51)$$

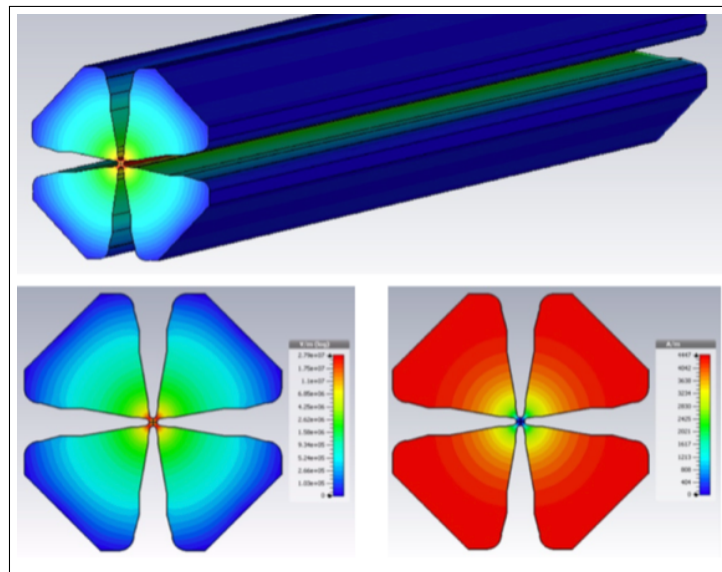
Denklem 3.49 ve 3.50 birlikte düşünüldüğünde Q faktörünün $Q \propto 1/\sqrt{f}$ ile orantılı olduğu görülür. Bu ilişki, kovuğun beslendiği RF güç kaynağının frekansı arttıkça kalite faktörü Q 'nun azalacağını söyler [13].

Denklem 3.48 ile oluşan faz kayması hesaplanarak J. C. Slater tarafından geliştirilen pertürbasyon kuramında yerine konmuştur. Kurama göre, kovuk içine gönderilen nesnenin oluşturduğu frekansa bağlı faz değişikliği, kovukta oluşturulan E ve H değerleriyle ilişkilidir [54]. Slater pertürbasyon kuramının geliştirdiği bu ilişki Denklem 3.52'de gösterilmiştir.

$$\frac{\tan \phi(f)}{2Q} = \frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta U}{U} = -\frac{\pi r^3}{U} \left[\epsilon_0 \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} E_0^2 + \mu_0 \frac{\mu_r - 1}{\mu_r + 2} H_0^2 \right] \quad (3.52)$$

Denklem 3.52'de verilen Δf frekanstaki değişikliği, f kovuğun rezonans frekansını, r kovuktan geçirilen boncuğun yarıçapını, ϵ_r boncuğun geçirgenliği, μ_r boncuğun manyetik geçirgenliği, U sistemde depolanan toplam enerjiyi, \vec{E}_0 elektrik alan genliğini, \vec{H}_0 ise manyetik alan genliğini ifade etmektedir.

Kovuk içinde oluşan alanlar Şekil 3.18'de verilmiştir. Elektrik alanın demetin geçtiği z eksenı boyunca en yüksek, manyetik alanın ise kanat duvarlarında en yüksek olduğu görülmektedir. Pertürbe edilmek istenen alana göre boncuk türü ve boncuğun geçtiği yer değişmelidir.



Şekil 3.18: Kovuk içi alan dağılımları - sol üst: elektrik alan dağılımı, sol alt: elektrik alan dağılımı, sağ alt: manyetik alan dağılımı [15]

KAHVELab'daki davul kovuk için tasarlanıp üretilen sistemde elektrik alanda bir bozulma oluşturulmak istenmiştir. Bu amaçla kovuğun merkezinden boncuk geçirilmiştir. Boncuğun geçirildiği eksenin manyetik alanın en düşük değeri aldığı eksen olduğu düşünüldüğünde, bu eksen üzerindeki alanın bozulmasında gömülü devre modeline göre H_0 'ın etkisi ihmal edilir [55, 56]. Elektrik alanda bozulma oluşturmak için boncuğun dielektrik bir maddeden oluşması tercih edilmiştir. Manyetik alanda oluşan etki ihmal edildiğinde Denklem 3.53 elde edilir. Davul kovuk için yapılan testlerde elektrik alan hesabı için bu formülasyon kullanılmıştır.

$$\frac{\Delta f}{f} \cong \frac{\Delta U}{U} = -\frac{\pi r^3}{U} \left[\epsilon_0 \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} E_0^2 \right]. \quad (3.53)$$

KAHVELab'da davul kovuk için gerçekleştirilen testlerde boncuk-çekim düzeneğinin ve davul kovuğun tasarımı gereği dielektrik boncuk, kovuğun merkezinden geçirilerek E_0 elektrik alanı üzerinde pertürbasyon sağlanarak oluşan faz farkı hesaplanmıştır.

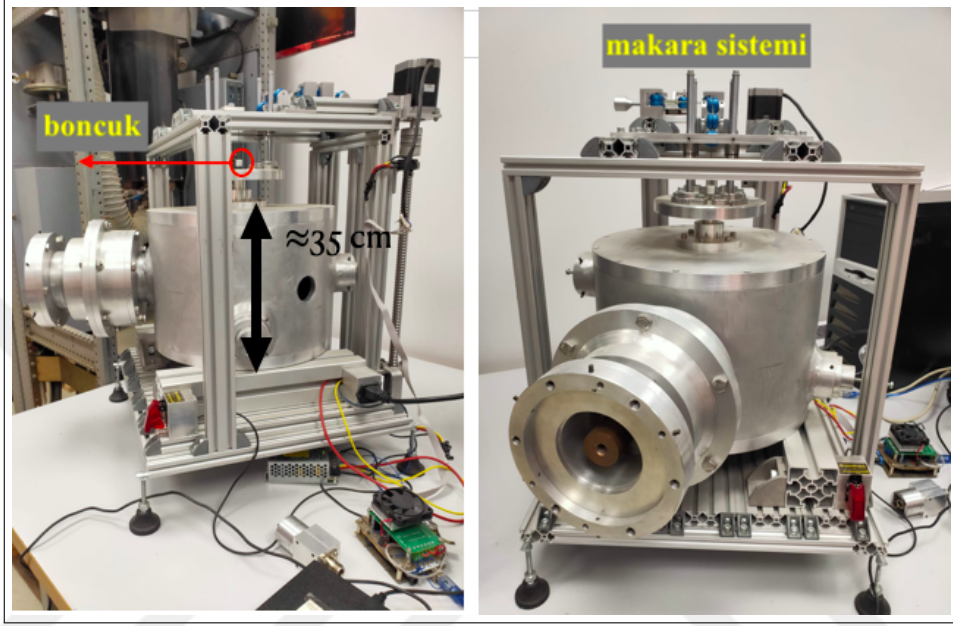
Bozulma yaratılmak istenen alan olarak manyetik alan seçilirse, tıpkı elektrik alan pertürbasyonundaki gibi boncuk, manyetik alanın yüksek olduğu bir noktadan geçirilmelidir. Bu nokta RFQ için kanat duvarlarına yakın noktalardır. Manyetik alan bozulumu ile frekans farkı ve buna bağlı olarak da faz farkı ölçülmek istendiğinde iletken bir boncuk tercih edilmelidir. Bu yöntemle boncuk-çekim deneyi yapılırken gömülü eleman devre modeline göre manyetik alan baskın olup elektrik alan ihmal edilebilir hale gelmiştir [55, 56]. Bu yöntemle göre Denklem 3.52 yeniden düzenlendiğinde Denklem 3.54 elde edilir:

$$\frac{\Delta f}{f} \cong \frac{\Delta U}{U} = -\frac{\pi r^3}{U} \left[\mu_0 \frac{\mu_r - 1}{\mu_r + 2} H_0^2 \right]. \quad (3.54)$$

Deneme üretimi RFQ modülü için tasarlanan boncuk-çekim yöntemi ile elektromanyetik alan testlerinde kovukta pertürbasyon H_0 manyetik alanı için sağlanmıştır. RFQ'nun kanat duvarlarına yakın 4 çeyreğinden iletken boncuk geçirilmiş ve Denklem 3.54 kullanılarak fazdaki kayma hesaplanmıştır.

3.4.2. Davul Kovuk İçin Elektromanyetik Alan Test Düzeneği ve Elemanları

KAHVELab'da gerçekleştirilen davul kovuk boncuk-çekim deneyinde kullanılan deney düzeneği Şekil 3.19'da verilmiştir.



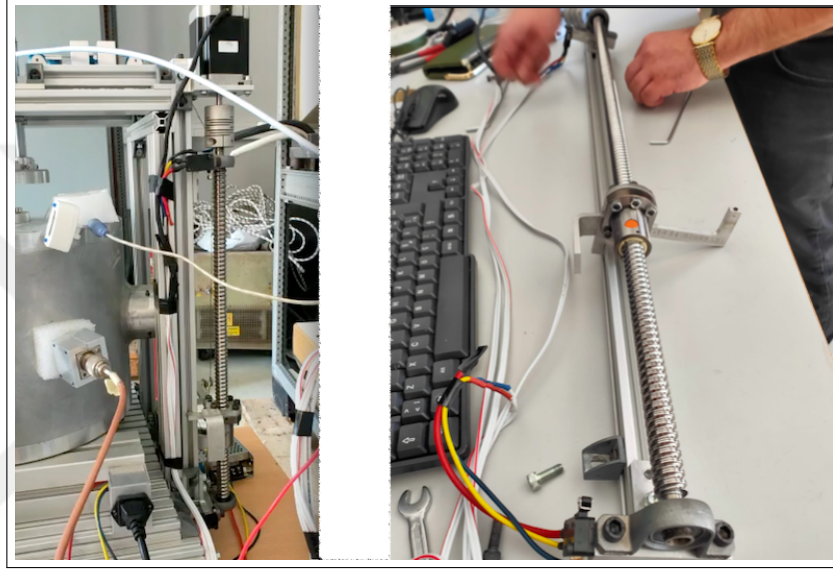
Şekil 3.19: Davul kovuk ve boncuk-çekim deney düzeneği

Davul kovuğun yerleştirildiği sigma profil iskeletinin üst kısmında ve alt kısmında boncuğun takıldığı ipin dolaşmadan kontrollü bir şekilde hareketini sağlamak amacıyla makaralar bulunmaktadır. Deney sırasında boncuğun küçük adımlarla hareketini sağlayan bir adım motoru ve sürücü devresi, esnemeyen bir ip, bir adet güç kaynağı ve kovuğun içinde güç ölçümü yapabilmek için anten, yansıyan güç ve iletilen güç bilgisine ulaşmak için vektör ağ analizörü (VNA), metal kovuğun sıcaklık ve nem değişimlerine verdiği tepkileri ölçebilmek için arduino nem ölçer ve termometre kullanılmıştır. Ayrıca tüm bu sistemin bilgisayardan kontrolünü gerçekleştirmek amacıyla LabVIEW programı kullanılarak bir kontrol kodu hazır hale getirilmiştir [57]. Bir sonraki kısımdan itibaren tüm deney elemanlarıyla ilgili detaylar sırasıyla verilecektir.

3.4.3. Adım Motoru, Sürücü Devresi ve Arduino Devresi

Boncuğun kovuk içinde yavaşça eşit adımlarla ilerlemesini sağlamak için sisteme adım motoru takılır. Adım motorları bir tam turda atılacak adım sayısının ayarlanabilir olmasından

ötürü bir çok alanda kullanılan bir motor türüdür. Hassas ölçüm alabilmek ve motorun dönüşündeki sarsıntıdan sistemin en az etkilenmesi sağlamak için yavaş hızlar tercih edilir. Bu yavaş hızlarda dahi motorun ürettiği tork yüksektir. Adım motorunun içindeki dişliler sayesinde adım hassasiyeti arttırılmıştır. Davul kovuk ve RFQ ölçümlerinde kullanılmak üzere NEMA standardı çift kutuplu motor kullanılmıştır. Bu motorlarda motorun konumunu algılayan bir sensör yoktur. Atılan adım sayısı bilgisiyle bilgisayar üzerinden kontrol edilerek motorun konumu ayarlanır ve diğer parametreleri hesaplanır.

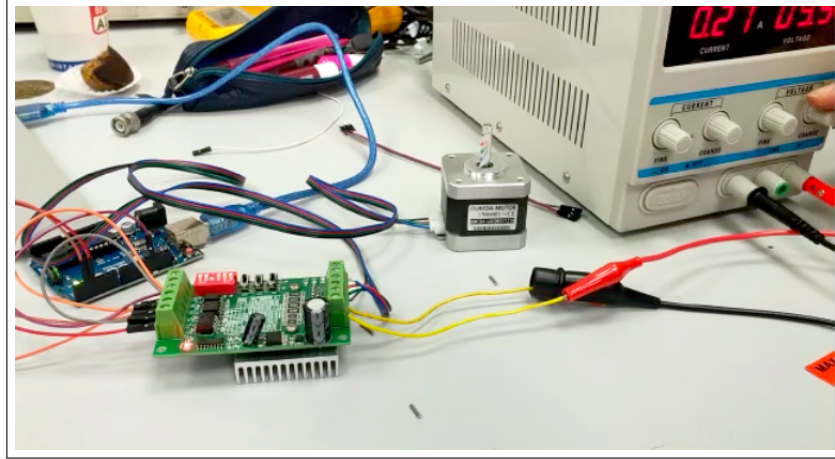


Şekil 3.20: Adım motor, vidalı mil ve rulman

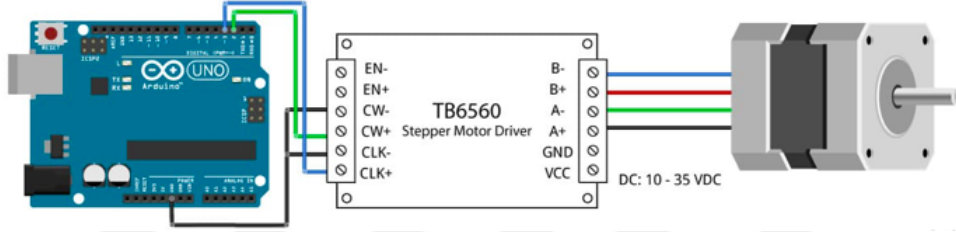
Şekil 3.20’de motorun tork uyguladığı kaplin, vidalı mil ve üzerinde gezen rulman görülmektedir. Rulman torkun uygulandığı yöne doğru üstünde sarılmış esnemeyen bir ip yardımıyla yukarı veya aşağı yönde tek bir eksen üzerinde boncuğun hareketini sağlar. Adım motor bir güç kaynağına bağlı sürücü devresi ve ona bağlı Arduino kontrol devresiyle hangi yönde hangi hızla kaç adım atılacağını belirler. 24 V’luk güç kaynağı kullanarak motor içindeki bobinlere istenen yönde gerilim sağlanır.

Şekil 3.21’de verilen motorun sürücü devresine güç kaynağıyla elektrik verilir. Herhangi küçük bir adım motorunda dahi her bir bobin 100 mA’dan fazla akım çeker. Bu nedenle motoru doğrudan bir arduino kontrol devresine bağlamak mümkün değildir, Arduino’ya bağlanmadan önce motoru bir sürücü kartına bağlamak gerekir. KAHVELab’da kullanılan adım motoru için kullanılan sürücü devresinin adı TB6560’tır [58].

Şekil 3.22’de verilen şemaya göre bağlantıların uygun şekilde yapılmasının ardından sürücü



Şekil 3.21: Motor, Arduino, sürücü devresi ve güç kaynağı



Şekil 3.22: Motor TB6560 sürücü devresi ve güç kaynağı bağlantı şeması [58]

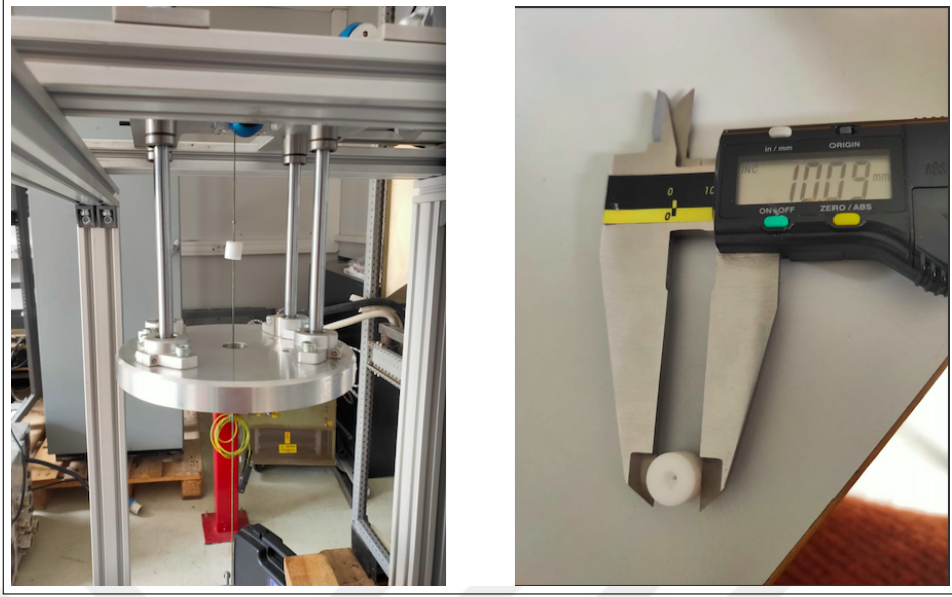
devre kontrol devresi olan Arduino UNO ile bağlanır. Motorun hareketleri, Arduino kontrol devresi ile LabVIEW programı üzerinden yazılan kod ile kontrol edilir.

3.4.4. Boncuk

Elektromanyetik alanda değişiklik yaratacak boncuk materyalinin etki oluşturulmak istenen alana göre belirlenmesi gerekmektedir. Kullanılan teflon boncuk için $\epsilon_r = 2.1$ 'dir [59]. Şekil 3.23'te verilen görselde davul kovuk için kullanılan teflon boncuğun yarıçapı 5.7 mm'dir. 0.8 mm kalınlığında esnemeyen ip kullanılmıştır.

3.4.5. Sıcaklık

Boncuk-çekim deneyi sırasında, deney ortamında meydana gelen sıcaklık değişimlerinin ölçümler üzerinde oldukça belirgin bir etkiye sahip olduğu ölçümler sırasında gözlenmiştir. Bu gözlemler sonucunda ortamın sıcaklık ve nem dengesinin doğrudan frekansa ve dolaylı olarak faza etkisi araştırılmıştır. CERN'ün hadron terapide kullanılmak üzere ürettiği 2 m uzunluğundaki hedef enerjisi 5 MeV olan, 749.283 MHz rezonans frekansına sahip



Şekil 3.23: Davul kovukta boncuk-çekim deneylerinde kullanılan teflon boncuk

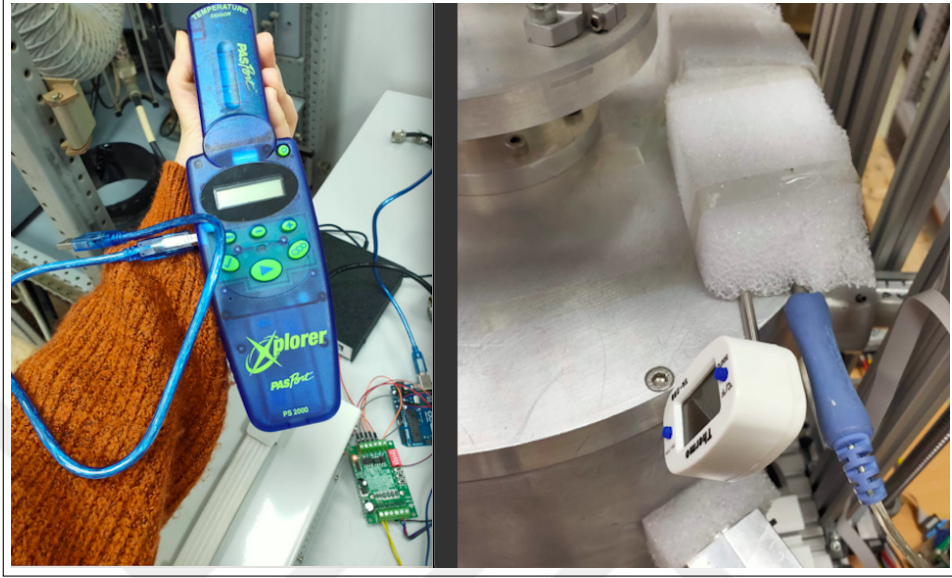
bakır RFQ üzerinde yapılan araştırmalar incelenmiştir [53, 60]. CERN'ün paylaştığı ölçüm sonuçlarında frekans değişiminin sıcaklık değişimi ile ilişkisi $\frac{\Delta f}{f_0} = -1.66 \times 10^{-5} (1/K) \cdot \Delta T$ şeklinde verilmiştir. Bu ifadede f_0 , RFQ'nun çalıştığı rezonans frekansa, 1.66 değeri ise bakır için doğrusal genleşme katsayısına, ΔT ise sıcaklık değişiminin Kelvin biriminden ifadesine karşılık gelir.

$$\begin{aligned} \Delta T = \pm 1 \text{ K} &\implies \Delta f = \mp 0.0124 \text{ MHz} \\ \Delta T = \pm 5 \text{ K} &\implies \Delta f = \mp 0.0622 \text{ MHz} \end{aligned} \quad (3.55)$$

Denklem 3.55'te sıcaklık farkının frekansta oluşturduğu kayma miktarı verilmiştir. Denklemdeki K Kelvin cinsinden sıcaklık farkıdır. Şekil 3.17'de verilen grafikte boncuğun oluşturduğu frekans değişikliğinin $\Delta f = 0.015 \text{ MHz}$ mertebesinde olduğu hatırlanırsa Denklem 3.55'te $\pm 1 \text{ K}$ için elde edilen değer neredeyse boncuğun oluşturduğu frekans kaymasına eşit olduğu görülür. Bu sebeple frekansta değişiklik yaratacak etkilerden sıcaklık etkisi göz ardı edilerek yalnızca boncuğun yarattığı etki ölçülmeye çalışılmıştır.

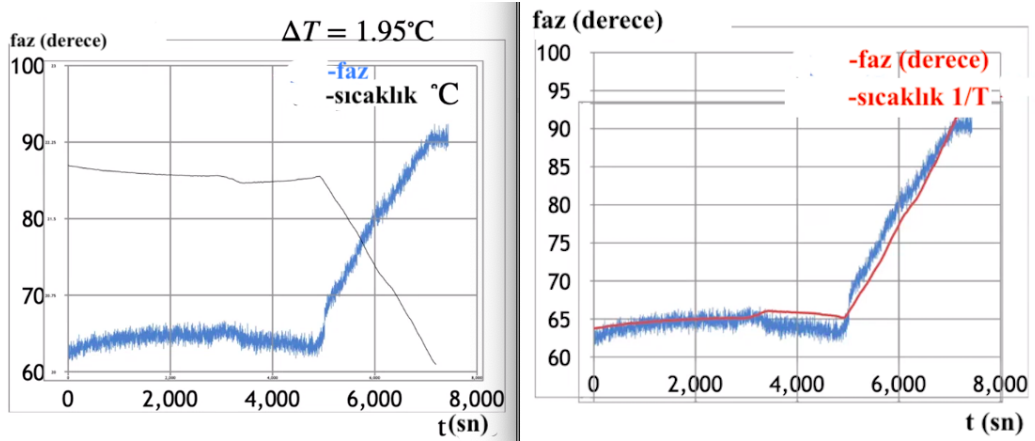
Buradan hareketle, sisteme sıcaklık ve nem ölçer elemanlar eklenmiştir. Şekil 3.25'te solda başlangıç, bitiş ve sıklık koşulları belirlenerek sürekli sıcaklık ölçümü yapılabilen ve virgülden sonra 3 haneye kadar anlamlı sayı verebilen Capstone cihazı görülmektedir

[61]. Sağda ise bu cihazdan çıkan mavi algılayıcı uç, dijital termometre ve bir köpük yardımıyla ortamdaki izole edilerek kovuktaki sıcaklık değişimlerinin iki ölçüm aygıtı ile gerçekleştirildiği gösterilmiştir.



Şekil 3.24: Capstone sıcaklık ölçer cihaz, algılayıcı uç ve dijital termometre

Tespit edilen sıcaklık ve faz ilişkisinin ölçüm boyunca alınan T sıcaklık değerlerinin zaman eksenine göre simetriği ile orantılı olduğu Şekil 3.24'te verilen grafikte görülmektedir.



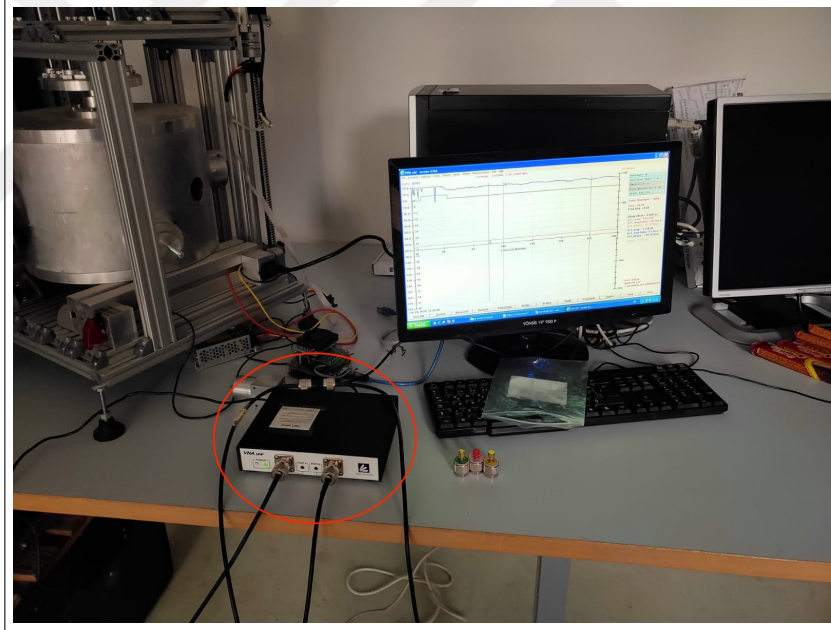
Şekil 3.25: Faz ve sıcaklık - zaman (sol), faz ve $1/T$ - zaman (sağ) grafikleri (Sıcaklık grafiğinin değerleri grafik üzerinde paylaşılammıştır ancak grafiğin başlangıç ve bitiş noktası arasındaki toplam sıcaklık değişimi $1.95\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'dir)

Şekil 3.25'te boncuk-çekim sistemi çalıştırılmadığı durumda alınan 2 saatlik ölçüm sonuçları verilmiştir. Solda verilen grafikte zamana bağlı sıcaklık değişimi ve zamana bağlı faz değişimi grafikleri üst üste çizdirilmiştir. Ortalama 2 derecelik bir sıcaklık değişiminin

zamana bağılı grafiğinin simetrisi alınarak faz grafiğinin üstüne sağdaki gibi çizdirilmiştir. Sıcaklıktaki değişimin fazdaki değişimle ters orantılı görülmektedir.

3.4.6. Vektör Ağ Analizörü

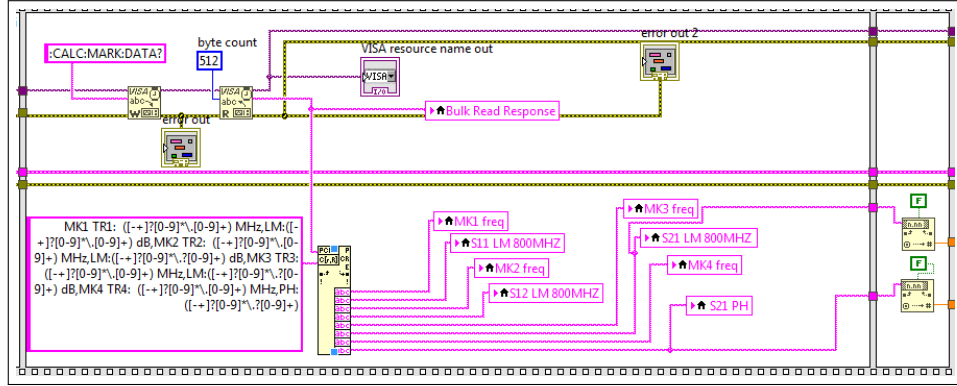
Vektör Ağ Analizörü (VNA), kovuk içindeki empedansla RF kaynağın empedansı arasındaki ilişkiyi ölçmek için kullanılır. İletilen ve yansıyan güçle ilgili S saçılma parametreleri aracılığıyla bilgi verir [55, 62]. Davul kovuk içine yerleştirilen anten VNA ile beslenerek kovuk içindeki güç iletimi ve yansıyan güçle ilgili hesaplamalar yapılmıştır. KAHVELab'daki davul kovuğun ölçümleri sırasında iki farklı VNA denenmiştir. Bunlardan biri Array Solutions marka VNA-UHF 636A modelindeki manuel ve ayırık ölçüm alan ağ analizörüdür [63]. Bir diğeri ise dijital ve sürekli ölçüm alabilen Anritsu marka VNA'dır [64].



Şekil 3.26: VNA-UHF 636A ve ölçüm düzeneği

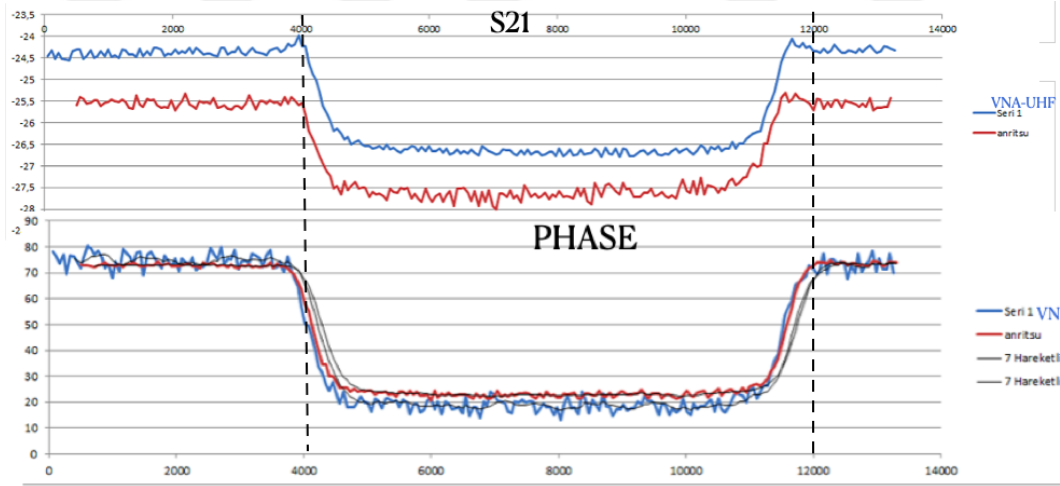
Şekil 3.26'da VNA'dan iletim yapan koaksiyel kabloların kalibrasyonu yapılmaktadır. Bu VNA'da Windows bilgisayardaki Registry Key kontrol sistemi aracılığıyla komut verilerek uzaktan ölçüm alınması sağlanmıştır. Sistemin içinden boncuk geçirilerek S parametreleri ve faz değişimleri LabVIEW programı kullanılarak yazılan kod üzerinden elde edilmiştir. Kalibrasyon yapıldıktan sonra ölçüm alırken taranmak istenen frekans aralığı ve ne sıklıkla ölçüm alınacağı programa girilerek iletim parametrelerinden S_{21} ve faz ölçümleri alınır. S parametreleri, VNA cihazının portlarına iletilen sinyali tanımlayan parametrelerdir. VNA'nın

port sayısına göre parametre sayısı artar. S_{21} değeri giriş portundaki (port 1) sinyalin ne kadarının çıkış portuna (port 2) iletildiğini ifade eder [55].



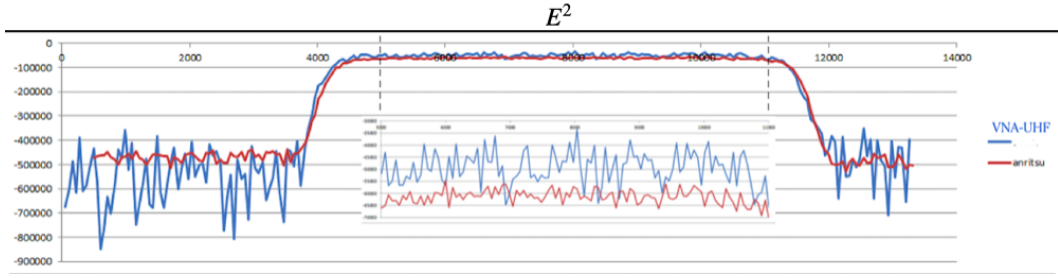
Şekil 3.27: LabVIEW Anritsu VNA kontrol kodu blok diyagramı

Mevcut olan sisteme bu VNA bağlanarak sürücü kodu LabVIEW’de yazılmış ve Anritsu marka VNA ile ölçüm sonuçları karşılaştırılmıştır. Şekil 3.27’de LabVIEW’de Anritsu VNA için yazılan sürücü kodunun blok diyagramının bir kısmı görülmektedir. Elde edilen S_{21} ve S_{11} ölçüm sonuçları bir excel dosyasına kaydedilmiş ve karşılaştırma grafikleri çizilmiştir. Burada S_{11} giriş portuna geri ne kadar sinyal döndüğünü gösteren S parametresidir.



Şekil 3.28: Farklı VNA’lardan alınan ölçümlerle S_{21} ve faz değeri karşılaştırması

Şekil 3.28’de boncuk-çekim deneyi yapılmış ve boncuğun kovuk içindeki hareketi boyunca veri alınmıştır. VNA-UHF 636A ve Anritsu VNA’dan okunan faz ve S_{21} değerleri karşılaştırılmıştır. Şekil 3.29’daki grafikte gürültünün daha net görülebilmesi için boncuk kovuğa girdikten sonra elde edilen E^2 değerlerinin doğrusal kısmına yaklaşılmıştır. VNA-UHF cihazında daha fazla gürültü olduğu mavi çizgi ile çizilen grafikten görülmüştür.



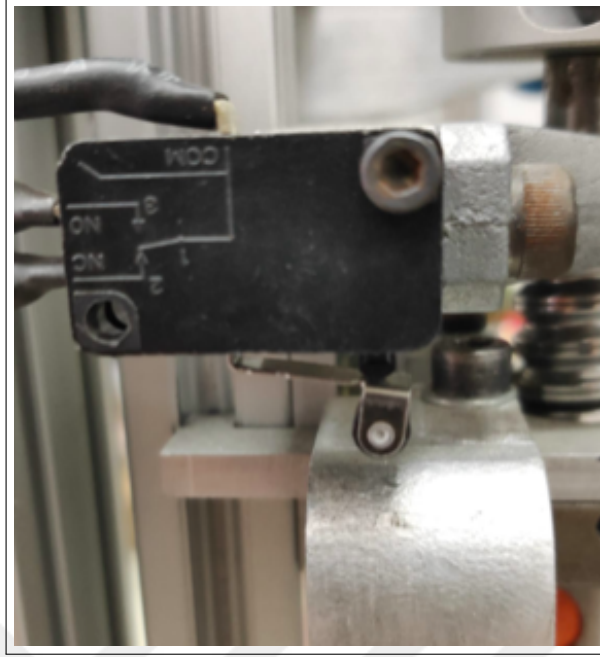
Şekil 3.29: Boncuğun kovuk içinde olduğu sırada alınan E^2 değerleri

3.4.7. LabVIEW

"LabVIEW, donanım ve veri içgörülerine hızlı erişim ile test, ölçüm ve kontrol gerektiren uygulamalar için sistem mühendisliği yazılımıdır." [65]. LabVIEW, boncuk-çekim deneyindeki elektronik elemanların birbirleriyle haberleşmesini sağlayan ve sistemle ilgili kontrolleri yapabilen bir yazılımdır. Blok diyagram üzerinden yazılan kodlar yardımıyla sistem içinde uzaktan kontrol sağlamaya yarar. Gerekli kodlar yazılarak sisteme komutlar verilebilir, sonuçlar kaydedilebilir, değerler değiştirilebilir, döngüler vb. yazılabilir. Bu çalışmada boncuk çekim deneyleri önce davul kovukta sonra RFQ deneme modülünde gerçekleştirilmiş, her ikisinde de bahsi geçen tüm elemanların kontrolleri LabVIEW programında yazılan kod ile sağlanmıştır.

Deney sisteminin tasarımından ve kullanılan deney elemanlarından kaynaklı boncuk bir döngü içinde hareket etmez. Yukarı ve aşağı yönlü hareket ederek kovuk içindeki hareketini tamamlar. Bu hareketin bitme sinyalini, motora ve sisteme veren deney elemanı vidalı millerin başında ve sonunda yer alan anahtarlardır. Şekil 3.30'da anahtarlardan biri gösterilmektedir. LabVIEW'de yazılan kontrol kodunda iki anahtar arası toplam adım mesafesi 20 kez denenerek motorun adım atlayıp atlamadığı kontrol edilmiştir. Sonuçlar birbirine oldukça yakın gelmiştir. Buradan hareketle, anahtara basan rulmana bağlı metal parçanın anahtarları zorlamaması için *homing* kodu yazılmıştır. Bu kod sayesinde her seferinde boncuğun konumu deney başlamadan önce aynı noktaya getirilir. Böylelikle alınan ölçümlerin karşılaştırması daha doğru bir biçimde yapılır. Boncuğun aşağı veya yukarı yönlü her bir turundan sonra *homing* yapılır.

Davul kovuk için VNA UHF 636A ve Anritsu VNA'nın, deneme RFQ modülü için Rohde-Scwartz ZN20 tipindeki VNA'yla LabVIEW'in haberleşmesini sağlayacak sürücü ve



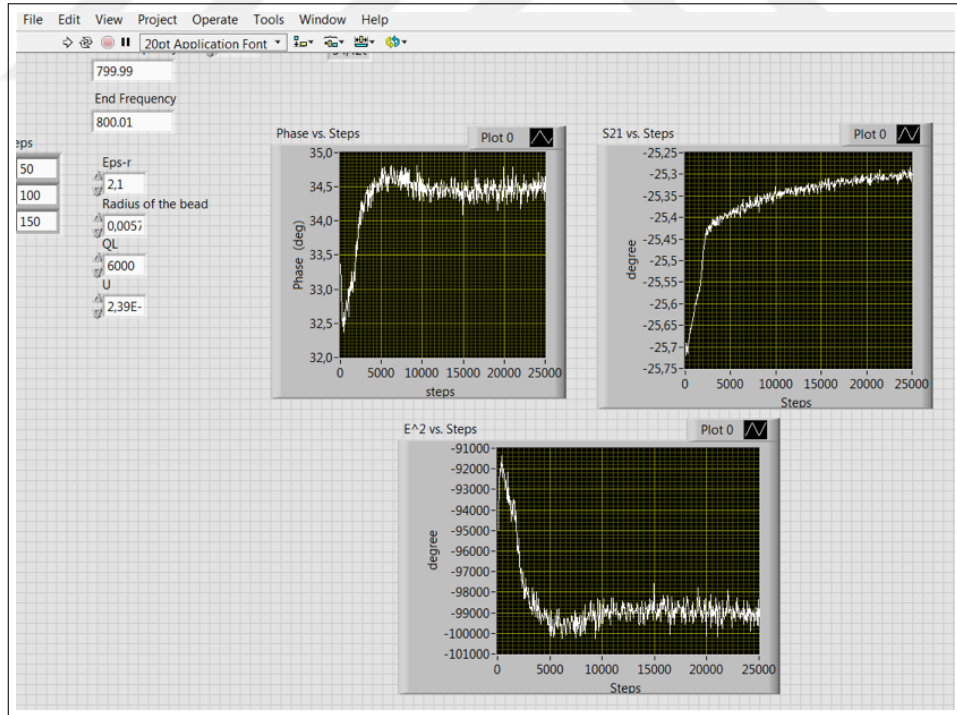
Şekil 3.30: Anahtar

kontrol kodu yazılmıştır. Aşağıda LabVIEW kodunun yaptığı işler sırasıyla verilmiştir:

- VNA ve Arduino'yla haberleşir,
- Homing yaparak boncuğun konumunu ayarlar,
- Döngüyü başlatır,
- Arduino ile haberleşerek kod içinde belirlenen hızda motora adım attırır,
- Boncuk ilerler,
- Alan değişir,
- VNA ile ölçüm alır,
- Alınan ölçümlerde taranan frekans bandında belirlenen frekans değerinde (800 MHz) okunan faz değerini seçer ve saklar,
- Seçilen faz değerini Slater pertürbasyon kuramında yerine yazar,
- \vec{E} elektrik alanını hesaplar,
- Grafikte yerine yazar,

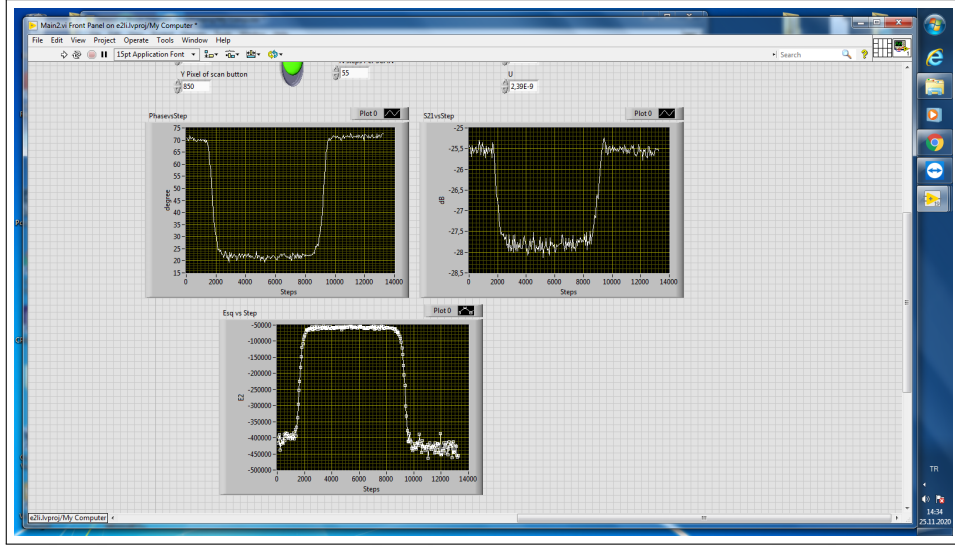
- Motora adım attırır ve boncuk ilerler,
- Anahtar elemanından sinyal aldığı zamana kadar döngü devam eder,
- Motor durur,
- Döngü biter,
- Kod çıkış yapar.

Döngünün tamamlanmasının ardından LabVIEW program arayüzünde E^2 , faz ve S_{21} değerlerinin atılan adım sayısına göre grafiği çıktı olarak verilir. Şekil 3.31’de verilen görselde VNA-UHF ile alınan ölçüm boncuk kovuktan çıkmadan kaydedilmiştir. Grafikler incelendiğinde boncuğun 5000. adımda kovuk içine girdiği ve alan üzerinde yarattığı etki görülmektedir. Ayrıca bu şekilde ölçüm yapılan sistemin taradığı frekans değerleri, teflon boncuğun ϵ_r değeri, boncuğun yarıçapı, kovuğun Q_L kalite faktörü değeri ve sistemin enerji değeri U da gösterilmektedir.



Şekil 3.31: VNA-UHF ile boncuğun davul kovuğa girişinde alınan ölçüm grafikleri

Boncuğun bir tam aşağı yönlü hareketinden alınan ölçüm sonuçları LabVIEW’de çizdirilmiş ve elde edilen grafikler Şekil 3.32’de gösterilmiştir. Boncuğun giriş ve çıkışında fazda meydana gelen değişiklikler grafik üzerinde gözle görülür seviyededir.



Şekil 3.32: Anritsu ile alınan ölçüm grafikleri

3.4.8. RFQ Boncuk-Çekim Deneyi

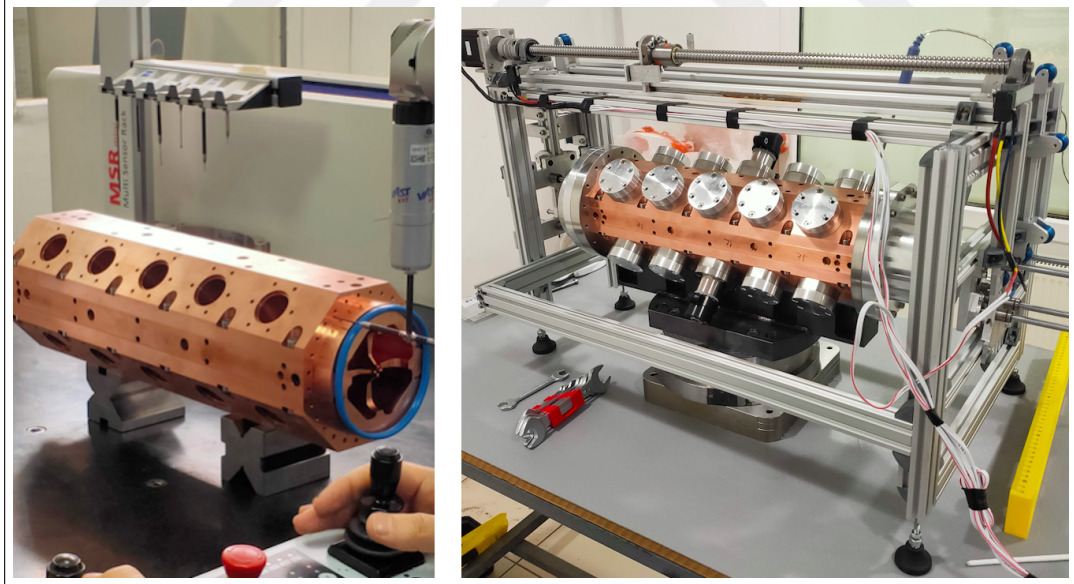
Toutatis, Parmteq ve Lidos programları kullanılarak kanat tasarımı yapılan deneme RFQ modülünün üretimi Ankara'daki DORA MAKİNA firmasında gerçekleştirilmiştir [66]. Davul kovuk kullanılarak test edilen sistem, üretimi tamamlanan RFQ modülünün elektromanyetik alan testlerini yapmak üzere Ankara'ya götürülmüştür. RFQ modülü ile gerçekleştirilen boncuk çekim deneyinde her bir çeyreğin orta noktasından RFQ modülünün kanat duvarlarına yakın olacak şekilde 7 mm uzunluğunda ve 4 mm çapında alüminyum boncuk geçirilerek H manyetik alanın bozulması beklenir.



Şekil 3.33: RFQ deneme modülünün kanatları, DORA Makina, OSTİM, Ankara

Yüksek frekanslara çıkıldıkça dalga boyu kısaldığı için RFQ'nun boyu kısalmır. Daha kısa bir RFQ'yu işlemek ve üretmek hassasiyet konusunda zorlayıcı bir faktördür. Kanatların birbirine simetrisi ve hatta montaj sırasındaki simetri dahi RFQ'nun içindeki boşlukta oluşacak elektromanyetik alanın dağıldığı hacmin simetrisini etkiler. Şekil 3.33'te görülen kanatlar, Ankara'da üretimi gerçekleştirilen 800 MHz'de çalışacak RFQ deneme modülünün parçalarıdır. Bu çalışmada üretilen RFQ deneme modülünün boncuk-çekim düzeneği ile elektromanyetik alan testleri gerçekleştirilmiştir. Davul kovuktan farklı olarak RFQ deneme modülünün boyu 50 cm'dir. Buna bağlı olarak boncuk-çekim deney düzeneğindeki sigma profillerin boyu uzatılmıştır. Böylelikle RFQ sigma profil iskeletinin içine sığabilir hale gelmiştir.

Hizalama işlemindeki hassasiyetin öneminden ötürü üretimi tamamlanan RFQ deneme modülünün montajı üzerinde çalışılmıştır. RFQ deneme modülünün montajı koordinat ölçüm metrolojisi (Coordinate Measurement Machines, CMM) tezgahında yapılmıştır. RFQ deneme modülünün montajlanması, hizalanması ve boncuk-çekim düzeneğine yerleştirilmesi sırasında alınan resimler Şekil 3.34'te gösterilmektedir.

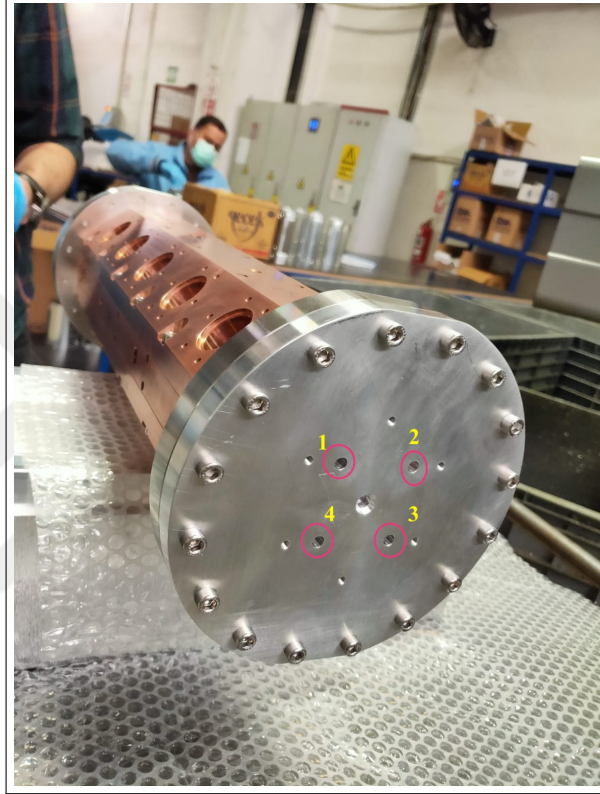


Şekil 3.34: Sol: RFQ deneme modülünün CMM ölçümüyle montajı ve hizalanması, sağ: RFQ deneme modülünün boncuk-çekim düzeneğine yerleştirilmesi

RFQ deneme modülünün montaj ve hizalanması yapıldıktan sonra sistemi kapatan flanşlarının ve 2 ayarlayıcısının da montajı da tamamlanmıştır. Tüm eklenen parçalar alkolle temizlendikten sonra flanşların arasına vakum değerinin düşmesine yardımcı olacak oringler yüksek vakum gres yağıyla yağlandıktan sonra yerleştirilmiştir. Son olarak montajlaması

biten RFQ deneme modülü boncuk-çekim deney düzeneğinin içine yerleştirilmiştir.

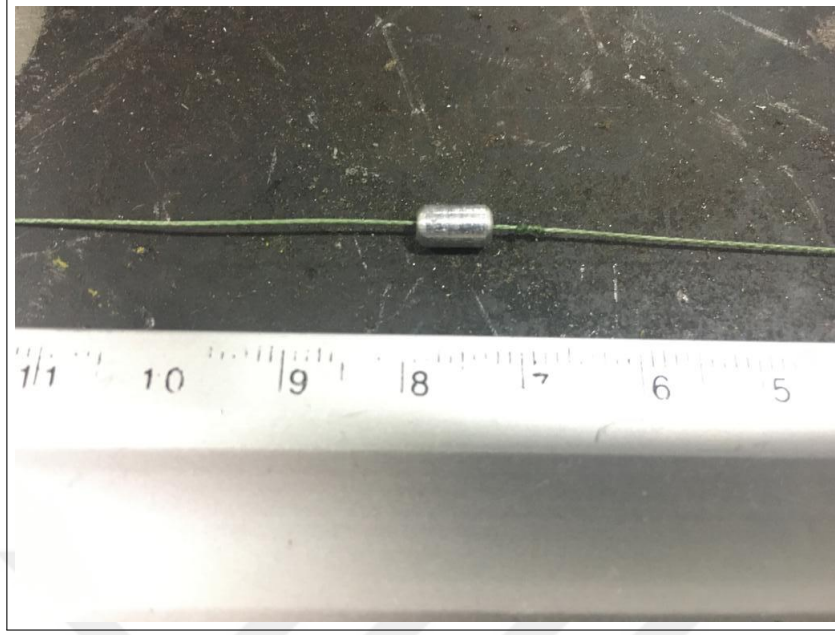
Daha sonra RFQ deneme modülünün VNA, Arduino, sıcaklık sensörleri ve güç kaynağı ile bağlantıları gerçekleştirilmiştir. Bu işlemler tamamlandıktan sonra ilk iş boncuk ve ipin bu sisteme bağlanması olmuştur. RFQ'nun her bir çeyreğinden ölçüm alabilmek için her ölçümün ardından boncuk ve ip, yeni delik için yeniden ayarlanmıştır.



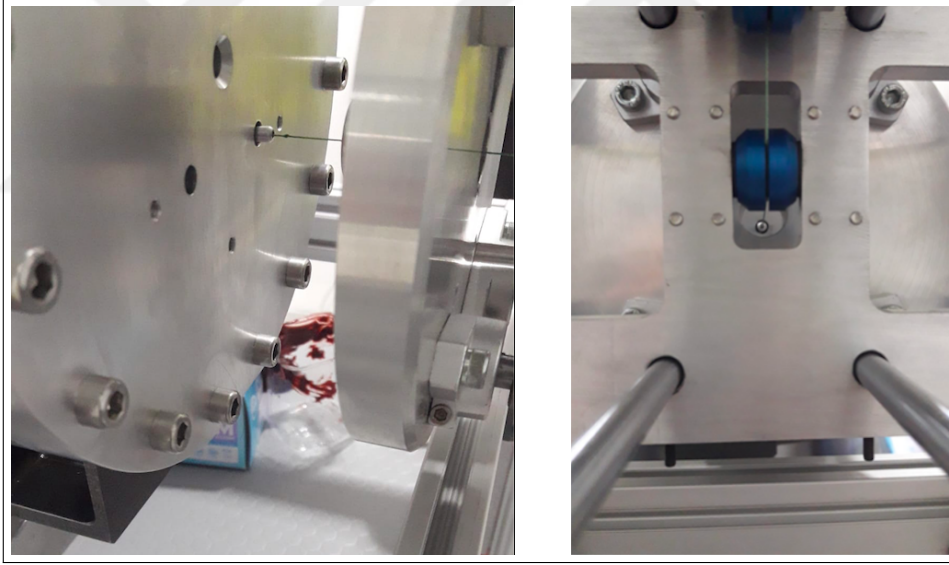
Şekil 3.35: RFQ deneme modülünün kapak delikleri

Şekil 3.35'te RFQ deneme modülünün kapak kısmında bulunan delikler görülmektedir. Her bir çeyrekteki delik saat yönünde sırayla numaralandırılmıştır. Kısım 4.2'de paylaşılacak ölçüm sonuçları bu çeyrek numaralarıyla ifade edilecektir. RFQ deneme modülünde boncuğun geçtiği deliğin, demetin geçtiği z ekseninden mesafesi r ile ifade edilmiştir. RFQ deneme modülü için $r = 2.83$ cm'dir. Her bir çeyrek için boncuk deliğin merkezine hizalanır ve kovuk içindeki alanda oluşan değişim VNA'dan okunan parametreler kullanılarak hesaplanır.

RFQ deneme modülü sisteminde kullanılan 7 mm uzunluğundaki boncuk ve 0.3 mm kalınlıktaki ip Şekil 3.36'da gösterilmektedir.

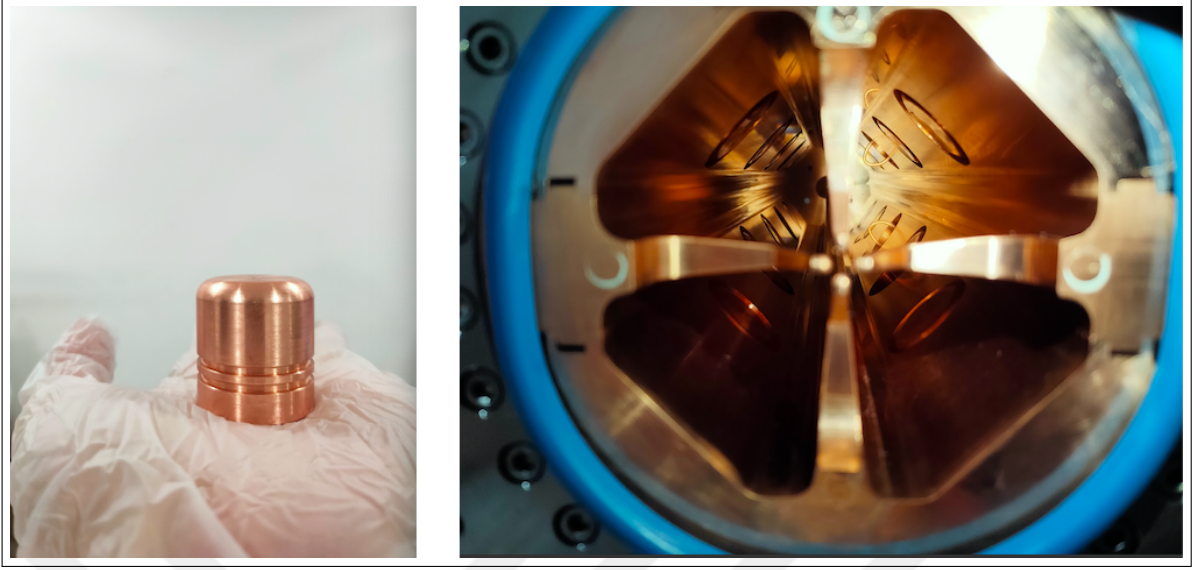


Şekil 3.36: RFQ deneme modülü sisteminde kullanılan alüminyum boncuk ve ip



Şekil 3.37: Boncuğun geçirileceği deliğin merkeze göre ayarlanması

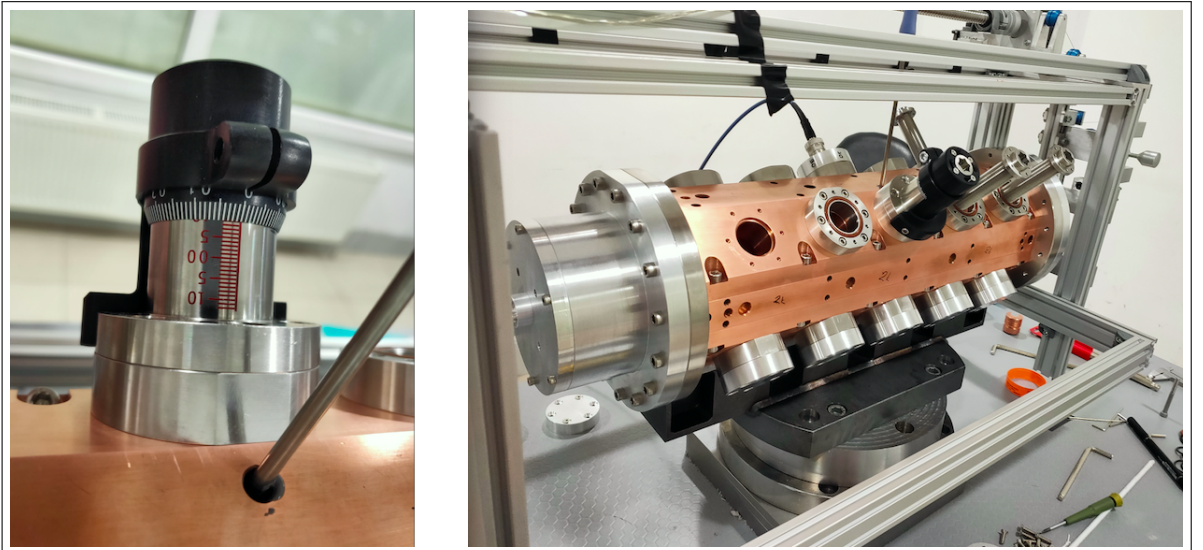
Şekil 3.37’de sisteme geçirilen boncuğun, geçtiği delik üzerinden merkezlemesinin yapıldığı andan bir kare gösterilmektedir. Boncuk-çekme deneyi yapılırken adım motorun dönme miktarı ve hızı istenen ölçüm sayısına ve hızına göre ayarlanmıştır. Yapılan ayarlamalar sonucunda ölçüm alınırken motorun bir adımında boncuğun z ekseninde alacağı yol $dz = 4.7$ mm olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.38: RFQ deneme modülü sistemindeki ayarlayıcılar

3.4.9. Ayarlayıcılar

RFQ kovuğun, iyon kaynağı ve ardından iletim hattından aktarılan demetin z ekseninin merkezinde, odaklı ve parçacık kaybı en az düzeyde olacak şekilde hızlandırılabilmesi için kovuğun içindeki elektromanyetik alanın dağılımının simetrik olması gerekir. Alanın dağıldığı hacmin simetrisi elektrik alanın simetrisini etkiler. Bu simetri ayarlayıcılar vasıtasıyla sağlanır.



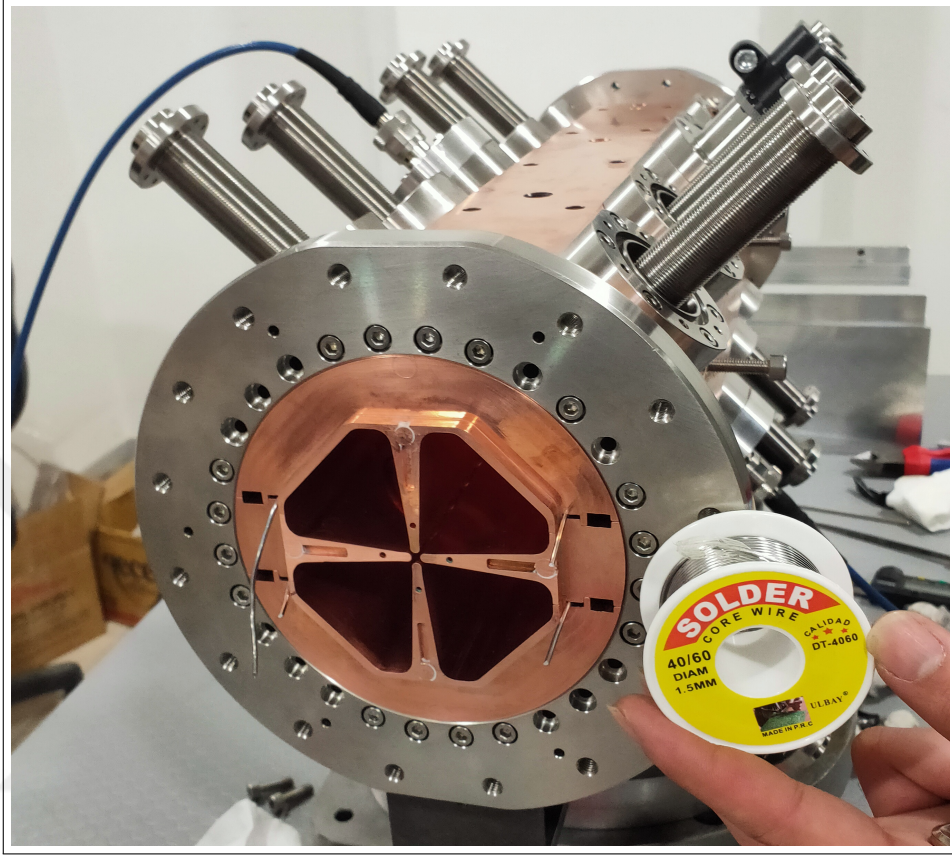
Şekil 3.39: RFQ deneme modülü sistemindeki ayarlayıcılar

Şekil 3.38’de soldaki fotoğraf ayarlayıcı parçanın RFQ deneme modülüne yerleştirilmeden önceki halini göstermektedir. Ayarlayıcı kısımların ne kadar içeride ve dışarıda olacağı geometrinin stabil kalabilmesi açısından önemlidir. Bu sebeple RFQ girişinde ayarlayıcıların kovuğun ne kadar içinde olduğunu ölçen bir ölçek konumlandırılmıştır. Sağdaki fotoğrafta kovuk içinde görünen yuvarlak kısımlar ayarlayıcı parçaların kovuk içindeki pozisyonunu göstermektedir. Aynı görselde çember şeklinde bükülen bakır telden yapılmış antenler de görülmektedir. Hassas ayarlama yapılan bu aparatın Şekil 3.39’da yakından ve uzaktan görselleri paylaşılmıştır. RFQ deneme modülünün 18 adet ayarlayıcı girişi, 2 adet de anten girişi olmak üzere her çeyrekte 5 giriş olacak şekilde toplamda 20 adet girişi bulunmaktadır. 4 kanatlı bir yapıdan oluşan RFQ deneme modülünün 4 kanadının merkezinden ayarlayıcılar, boncuğa değmeyecek şekilde boncuğun geçirilmesiyle sağlanır.

Donanımsal ayarlamaları tamamlanan RFQ deneme modülü sistemi, yansıma güç ölçümleri yapılmak üzere Rohde-Schwartz VNA’ya bağlanmıştır [67]. Bu VNA’dan S_{21} parametresi, Q değeri, f frekans ve ϕ faz değeri okunabilmektedir.

RFQ deneme modülü için VNA’dan okunan Q değeri 200 civarındadır. Bu Q değeri bakır kovuk için beklenen değerlerin ortalama 30 kat altındadır. Q değerinin bu denli düşük çıkmasına sebep olan etkenler araştırılmıştır. Hizalama, elektrik iletimi ve deneme modülü temizlenirken kullanılan pastanın sebep olmuş olabileceği düşünülerek denemeler yapılmıştır. Önce kovuk sökülerek benzin ve alkolle tekrar temizlenmiş ve kalite faktörü tekrar ölçülmüş, kayda değer bir iyileşme gözlenmemiştir. Aynı zamanda silindirik alüminyum bir boru için pastayla silinmeden önce ve sonra kalite faktörü ölçümleri yaparak elmas içerikli pastanın etkisinin olup olmadığı test edilmiştir ve etkinin kayda değer düzeyde olmadığı görülmüştür. Böylelikle Q faktörünün düşük gelmesinin iletim kaynaklı olması ihtimali güçlenmiştir. Yapılan testler sonucunda kalite faktöründeki değerin beklenenin altında gelmesinin sebebinin, sistemin RF kapaklarının (RF seal) henüz elimize ulaşmamasından kaynaklı sisteme dahil edilememesi olduğu anlaşılmıştır. Kovukta meydana gelen RF kaçaqlarını azaltmak için, RF kapakların geleceği yere 1.5 mm kalınlığında lehim teli yerleştirilmiş ve elektriksel iletim artırılmıştır. Lehim telleri sisteme dahil edildikten sonra VNA’dan okunan Q değerleri RFQ deneme modülünün kapakları açıkken 3000 civarındayken, kapaklar takıldıktan sonra 4000 mertebesine çıkmıştır. Q değeri kullanılan bakır kovuk için beklenenin altında olmasına rağmen 30 katlık fark 1.5 katlık farka dönüştürülmüştür. Lehim telleriyle kurulan sistemde boncuk-çekme deneyi yapılarak

ölçümler alınmıştır. Şekil 3.40'ta kullanılan lehim teli ve sisteme döşenmiş lehim tellerinin uçları görülmektedir.

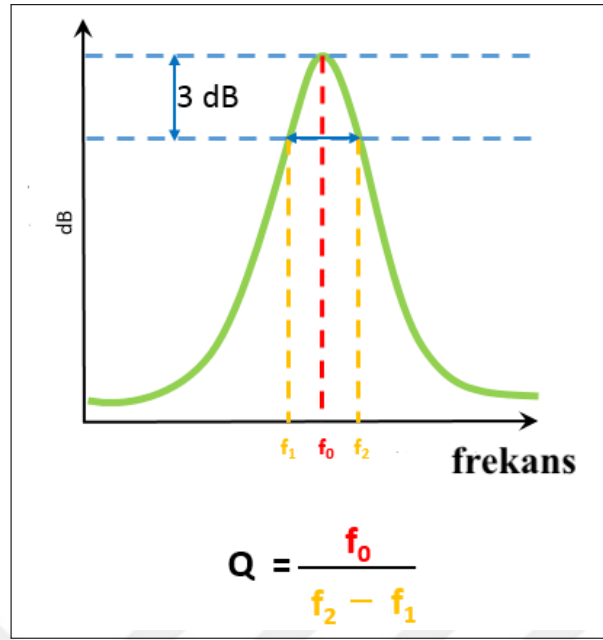


Şekil 3.40: RFQ deneme modülü ve RF kapaklar yerine manyetik alan ölçümleri sırasında kullanılan lehim teli

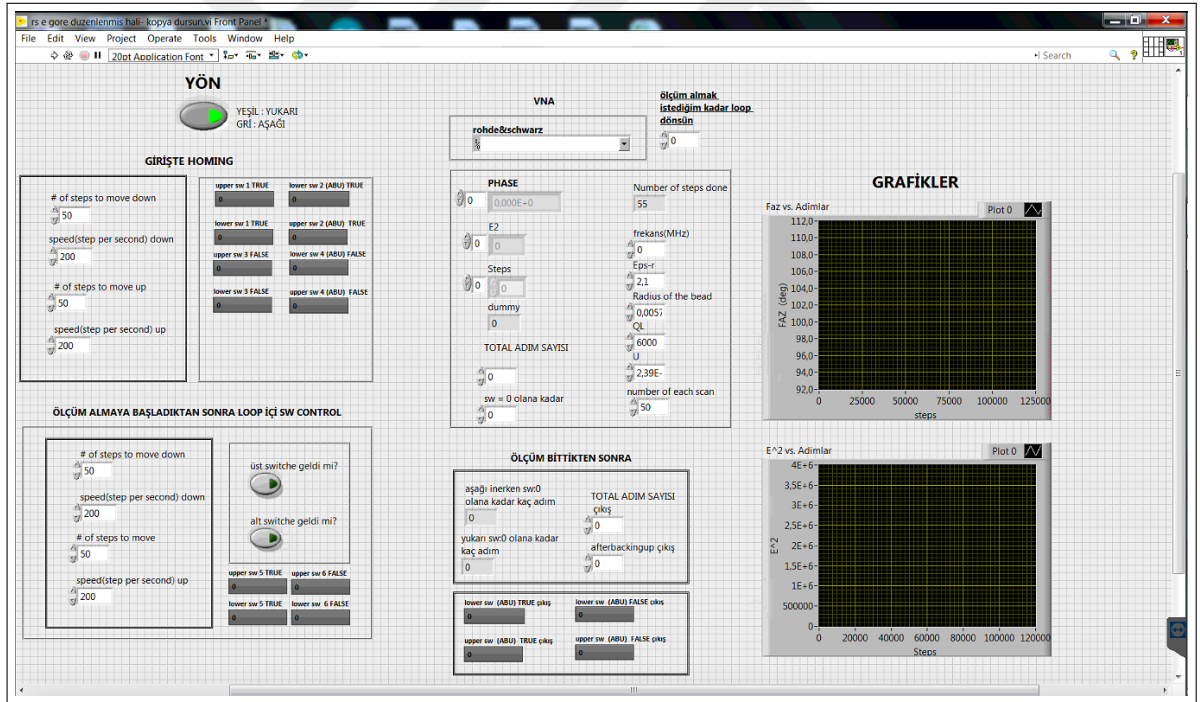
Kalite faktörü ölçümleri sırasında ise yarım güç yöntemi olarak da bilinen "3 dB yöntemi" kullanılmıştır. 3 dB yöntemiyle kalite faktörü hesaplanırken rezonans frekans merkeze alınarak, rezonans frekansın - 3 dB ve + 3 dB noktalarındaki frekans değerleriyle bir yaklaşım yapılır [15, 68].

Şekil 3.41'de gösterilen f_0 ; rezonans frekansı, f_1 ve f_2 ise ± 3 dB değerine karşılık gelen frekansları göstermektedir.

Şekil 3.42'de RFQ deneme modülü için hazırlanan boncuk-çekim deneyinin LabVIEW kontrol programı görülmektedir. Sistemin homing, yön, motor hızı ve adım uzunluğu gibi bir çok parametresinin kontrol edilebildiği bu programda boncuğun sisteme girişinin manyetik alan üzerinde yarattığı bozulma alınan faz değerleriyle çizdirilmiştir. RFQ deneme modülündeki her bir çeyrek için boncuk çekim deney sonuçları kısım 4.2'de paylaşılmıştır.



Şekil 3.41: 3 dB yöntemiyle kalite faktörü hesabı [68]

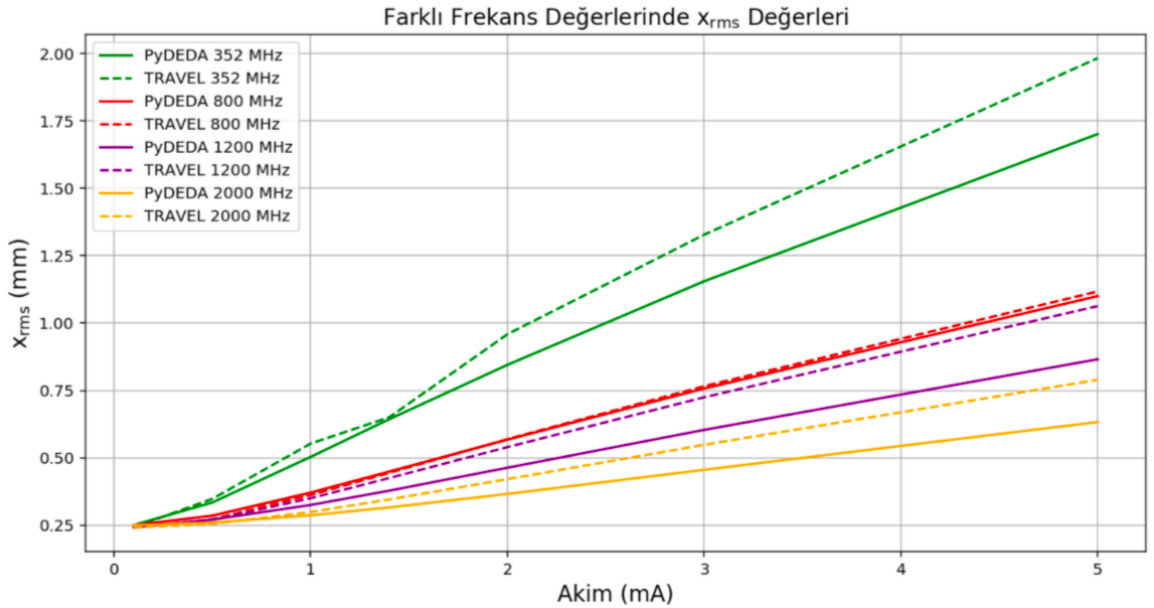


Şekil 3.42: RFQ deneme modülünden alınan ölçümleri kontrol eden LabVIEW programı

4. BULGULAR

4.1. UZAY YÜKÜ BENZETİMİ BULGULARI

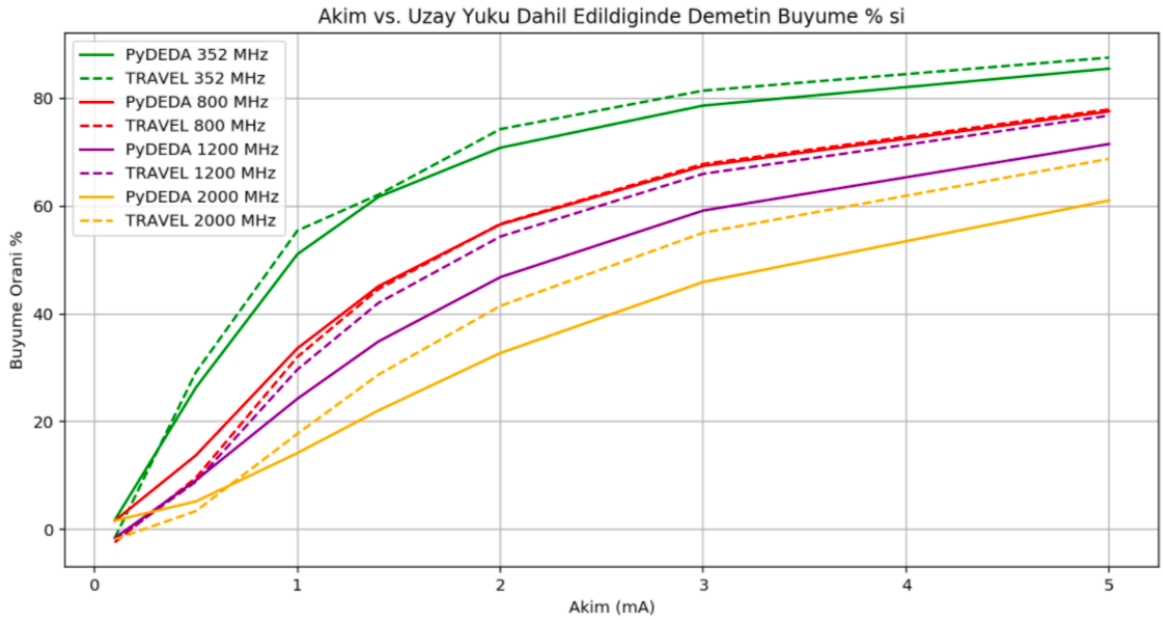
Dışarıdan hızlandırıcı sisteme eklenen araçların veya demetin içsel etkileşimlerinin sonucu olan uzay yükü etkisi gibi doğrusal olmayan kuvvetler (nonlinear forces), yayınının artmasına (emittance growth) sebep olur. Yayınının kontrolü ve büyümesinin sebeplerini kavramak, RFQ'ya aktarılacak demetin yoğunluğunun azalmaması ve parçacık kaybetmemek için önemlidir. KAHVELab'ta gerçekleştirilen TÜBİTAK-3501 'Düşük enerjili proton demeti için ölçüm kutusu tasarımı ve üretimi, testleri' başlıklı proje kapsamında yapılan benzetim çalışmalarında uzay yükü etkisiyle demetin x_{rms} ve y_{rms} boylarındaki değişimi PyDEDA'da çalışılmıştır. Bu çalışmanın devamı olarak, PyDEDA'da x_{rms} ve y_{rms} 'deki değişime sebep olan uzay yükü etkisinin yayınının üzerindeki etkileri incelenmiştir. Uzay yükü matrisi M_{uy} kullanılarak hesaplanan x_{rms} ve y_{rms} değerleri ile demetin $x-x'$ ve $y-y'$ faz uzaylarının yayınımları hesaplanmıştır. Doğrusal yaklaşımla elde edilen elektrik alan ve bununla ilişkili Lorentz kuvveti hesapları kullanılarak demetin yaratacağı uzay yükü etkisi, K yük sıkışıklığı ve f odaksızlaştırma faktörü hesaplanmış, bir matris formunda demete uygulanmış ve uzay yükü etkisi altında sürüklenme hattı boyunca yayınının değerlerinin değişmediği gözlemlenmiştir [31, 38, 52].



Şekil 4.1: Farklı frekans değerleri için akıma bağlı x_{rms} değerlerinin TRAVEL-PyDEDA kodu karşılaştırması

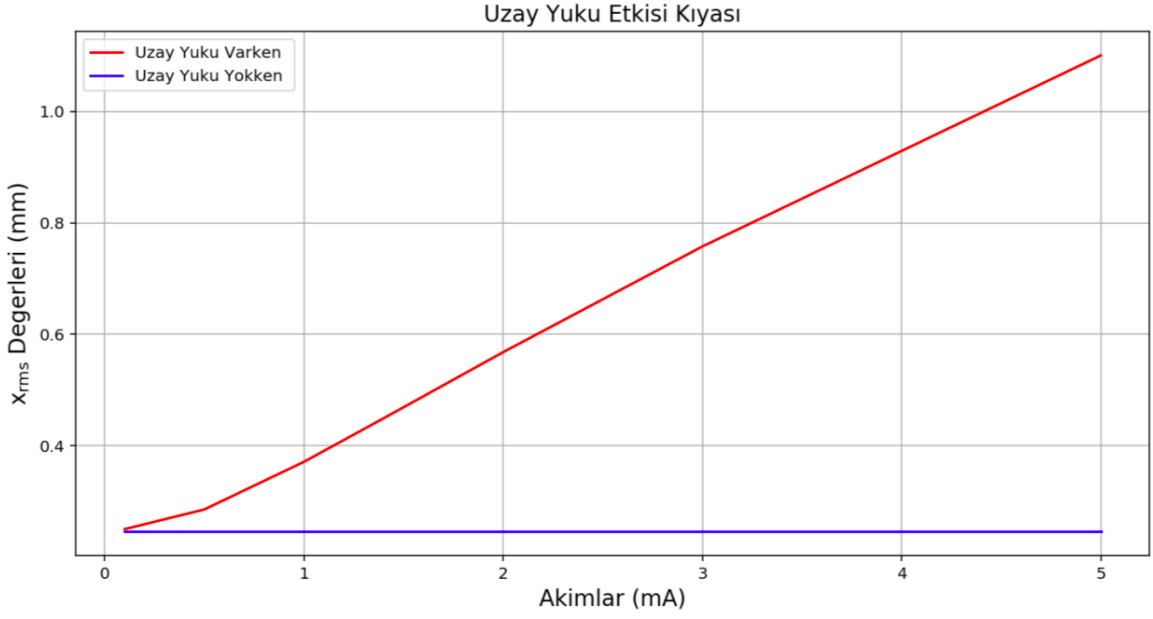
800 MHz, 1.4 mA'de x_{rms} ve y_{rms} değerleri için elde edilen artış Şekil 3.13'te verilmiştir. Aynı demet kullanılarak farklı frekans ve akım değerleri için demetin RFQ'ya girmeden hemen önce, uzay yükü etkisi altında sürüklenmesinin sonrasında x_{rms} ve y_{rms} değerleri Şekil 4.1'de farklı programlar için karşılaştırılmıştır. Tüm frekans değerleri için akım arttıkça x_{rms} 'in arttığı görülmektedir. Bununla beraber PyDEDA ve TRAVEL sonuçlarının birbirine en yakın olduğu frekans 800 MHz'dir. Bu çalışmada kullanılan frekans değerleri daha önce KAHVELab bünyesinde tasarlanan kovukların çalıştığı frekanslar olduğu için tercih edilmiştir.

3939 parçacıklı demet için x_{rms} ve y_{rms} değerleri ve TRAVEL programına göre fark yüzdeleri Tablo 3.4'te verilmiştir. Tablo incelendiğinde, akım değeri olarak 2 mA seçildiğinde elde edilen PyDEDA ve TRAVEL sonuçlarının birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. 800 MHz frekans ve 2 mA akım değeri TRAVEL ile en uyumlu sonuçları veren iki parametredir. KAHVELab'da üretilecek RFQ'ya iletilecek sürekli demet (DC) için 1.4 mA akım çekilmesi planlanmıştır. Tezin bu kısmında paylaşılan veriler demetin SOL2'den RFQ'ya kadar olan sürüklenme hattında yapılan benzetim sonuçlarını içermektedir.



Şekil 4.2: Farklı frekans değerleri için akıma bağlı büyüme yüzdeleri TRAVEL-PyDEDA karşılaştırması

Şekil 4.2'de farklı frekans ve akım değerlerinde elde edilen x_{rms} ve y_{rms} değerleri için, demetin uzay yükü dahil edilmeden ve uzay yükü dahil edildiğinde elde edilen büyüme yüzdesinin karşılaştırılması verilmiştir. Şekil 4.3'te 800 MHz ve 1.4 mA değerleri için



Şekil 4.3: Uzay yükünün dahil edildiği ve edilmediği durumlarda farklı akım değerleri için x_{rms} değişimleri

PyDEDA'da uzay yükü dahil edildiği ve edilmediği durumda x_{rms} değerleri hesaplanmış ve sonuçlar paylaşılmıştır. Uzay yükü etkisi dikkate alınarak yapılan hesaplamalarda demetin etkiye bağlı büyümesi açıkça görülmektedir. 1.4 mA'de demetin x_{rms} değeri 2 katına çıkmıştır. Etki dahil edilmediğinde ise beklendiği gibi demetin x_{rms} boyunda değişim olmadığı görülmüştür. Şekil 4.2 incelendiğinde frekans küçüldükçe demetin büyüme oranının arttığı görülmektedir. 5 mA akım değerinde 352 MHz frekans değerine sahip demetin büyüme oranı %80'i geçmiştir. 0.1 mA - 0.5 mA akım değeri aralığında PyDEDA ve TRAVEL'den alınan değerlere göre büyüme yüzdeleri kıyaslandığında 1.2 GHz'te alınan sonuçların birbirine yakın olduğu görülürken akım arttıkça iki çıktı arasındaki fark artmıştır. Artan akım değeriyle birlikte 800 MHz frekans değeri için PyDEDA ve TRAVEL'in sonuçları birbirine yaklaşmıştır.

Tablo 4.1 ve Tablo 4.2'de sırasıyla 3000 ve 5000 parçacıklı demetler için uzay yükü etkisinin dahil edildiği (+UY) ve uzay yükü etkisinin dahil edilmediği (-UY) durumlarda Python ve TRAVEL programlarından alınan değerler sunulmuştur. Tablolarda karşılaştırması yapılan 3000 ve 5000 parçacıklı bu iki demet dosyası Path Manager Programında üretilmiştir [44]. Tablolarda verilen α_t ve β_t ifadeleri demetin Twiss parametrelerini ifade etmektedir. Elde edilen TRAVEL çıktıları incelendiğinde uzay yükü etkisi hesaplara dahil edilmiş bir demet için hesaplanan x, x', y, y' 'daki ϵ_{rms} değerinin ortalama %15 arttığı görülmektedir. Geliştirilen

	+ UY TRAVEL	+UY PyDEDA	- UY TRAVEL	- UY PyDEDA
x_{rms} mm	0.50	0.48	0.24	0.25
x'_{rms} mrad	11.77	11.59	16.55	16.57
α_t	0.7716	0.9823	-0.1570	-0.2489
β_t	0.0535	0.0580	0.0148	0.0153
$\epsilon_{rms_{x-x'}} \pi$ m rad	4.65e-6	3.96e-6	3.96e-6	3.96e-6
$\epsilon_{rms_{y-y'}} \pi$ m rad	4.45e-6	3.82e-6	3.96e-6	3.82e-6

Tablo 4.1: 3000 parçacıklı demet için PyDEDA ve TRAVEL programlarından elde edilen değerler. Burada +UY ifadesi uzay yükü etkisinin dahil edildiği ve -UY ifadesi de uzay yükü etkisinin dahil edilmediği durumlara karşılık gelmektedir.

	+ UY TRAVEL	+UY PyDEDA	- UY TRAVEL	- UY PyDEDA
x_{rms} mm	0.49	0.48	0.24	0.25
x'_{rms} mrad	11.70	11.59	16.54	16.57
α_t	0.7789	0.9823	-0.1847	-0.2489
β_t	0.0534	0.0580	0.0150	0.0153
$\epsilon_{rms_{x-x'}} \pi$ m rad	4.55e-6	3.96e-6	3.96e-6	3.96e-6
$\epsilon_{rms_{y-y'}} \pi$ m rad	4.44e-6	3.82e-6	3.96e-6	3.82e-6

Tablo 4.2: 5000 parçacıklı demet için PyDEDA ve TRAVEL programlarından elde edilen değerler. Burada +UY ifadesi uzay yükü etkisinin dahil edildiği ve -UY ifadesi de uzay yükü etkisinin dahil edilmediği durumlara karşılık gelmektedir.

PyDEDA'dan alınan sonuçlarda ise doğrusal yaklaşım sebebiyle ϵ_{rms} değerinin uzay yükü etkisiyle değişimi görülememektedir [52].

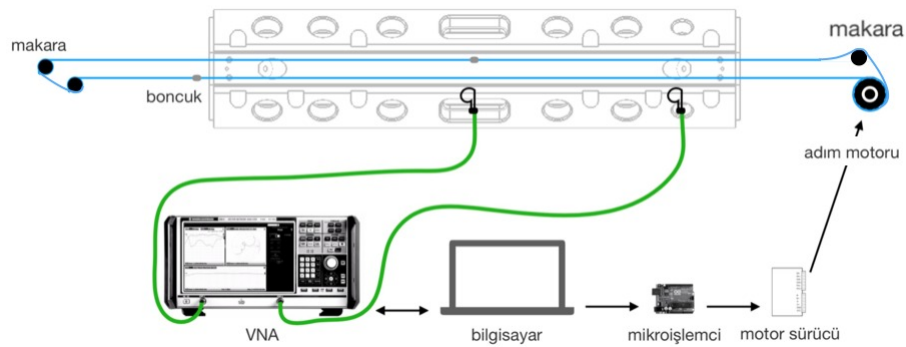
Doğrusal yaklaşım uygulanarak hesaplanan uzay yükü etkisi PyDEDA'da matrislerle yazılmıştır. PyDEDA'dan ve TRAVEL programından elde edilen çıktılar karşılaştırılmıştır. PyDEDA'da uzay yükü kodunun ve TRAVEL programının karşılaştırıldığı bir diğer konu çalışma hızlarıdır. Geliştirilen Python kodu, TRAVEL programından daha hızlı çalışmaktadır. Tablo 4.3'te farklı parçacık sayılarındaki demetler için iki programın çalışma hızları karşılaştırılmıştır. PyDEDA sayesinde yüksek parçacıklı demetlerde bile hızlıca demetin x_{rms} ve y_{rms} değerlerindeki büyümeler gözlemlenebilir olmuştur.

Toplam Parçacık Sayısı:	PyDEDA sn	TRAVEL (sn)
3000	27	28
3939	30	45
5000	42	71
20.000	142	1102
50.000	327	6855

Tablo 4.3: Farklı sayıda parçacıklı demetler için uzay yükü hesap süresi karşılaştırma tablosu

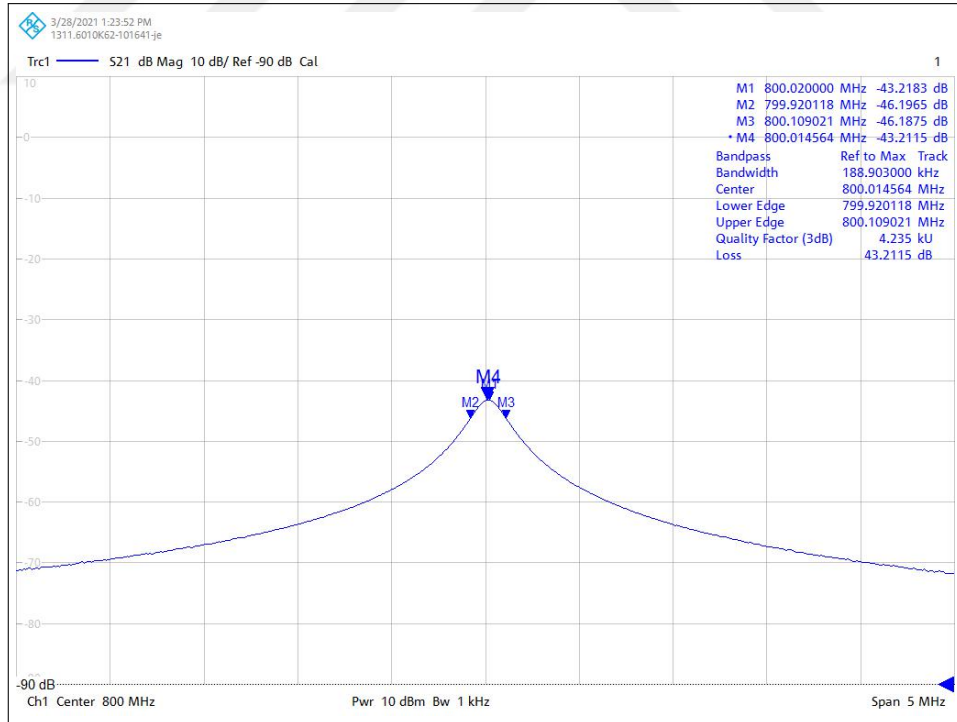
Bu tabloda sunulan süreler incelendiğinde parçacık sayısı arttıkça programların hesap sürelerinin uzadığı görülmektedir. Bu, parçacıklar arası etkileşimin hesaplandığı bir kod için beklenen bir durumdur. Öte yandan, PyDEDA ile TRAVEL programının çıktı verme hızı arasındaki fark parçacık sayısı arttıkça artmıştır.

4.2. BONCUK-ÇEKİM DENEYİ BULGULARI



Şekil 4.4: Boncuk-çekim deney düzeneği şeması, Doç. Dr. N. Gökhan Ünel tarafından oluşturulmuştur

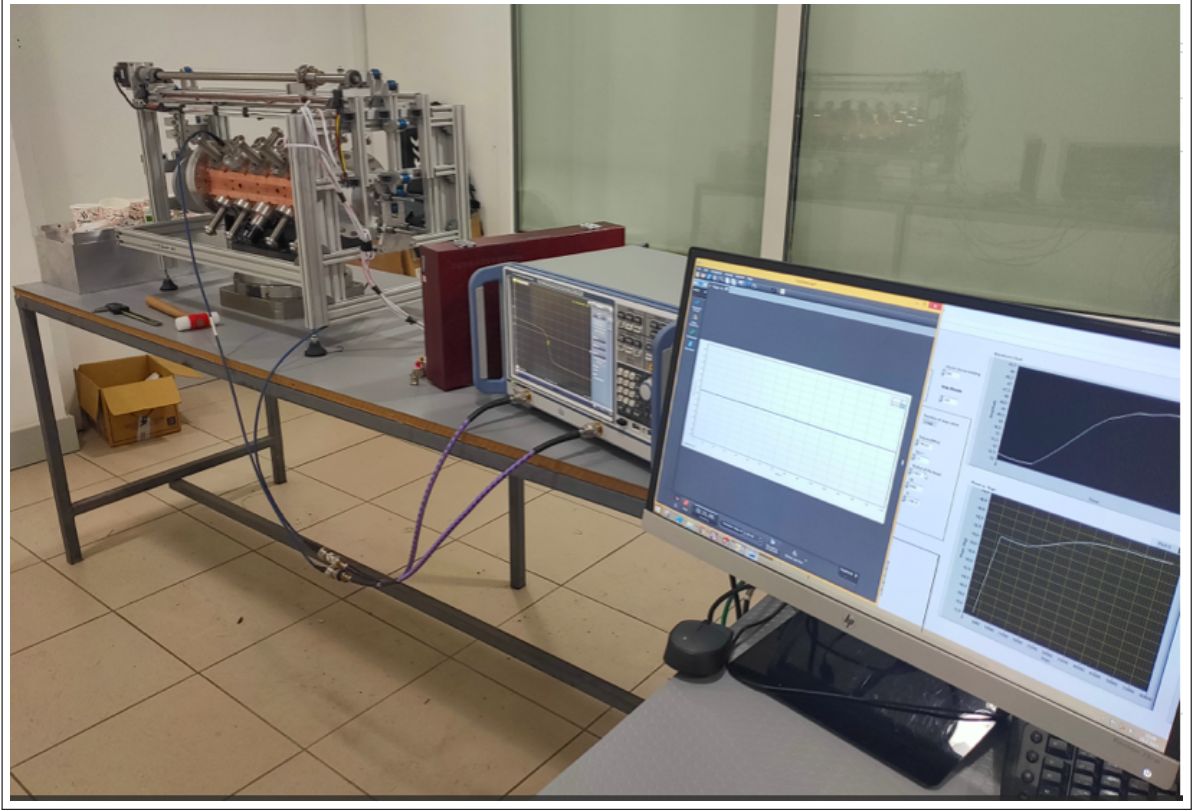
Hızlandırıcı kovuklarda elektromanyetik alan testleri gerçekleştirmek için tercih edilen yaygın yöntemlerden biri boncuk-çekim deneyidir. Bu çalışmada deney davul kovuk ve üretilen RFQ deneme modülü ile gerçekleştirilmiştir. Tezin bu kısmında deneyden elde edilen sonuçlar paylaşılacaktır. Boncuk-çekim deney düzeneğinin elemanlarını gösteren şema Şekil 4.4'te verilmiştir. Kovuk içinde yer alan bir RF verici ve alıcı döngü anten kullanılarak kovuğun çalıştığı rezonans frekans ve kalite faktörü Q bir VNA aracılığıyla okunmuştur. Ayarlayıcıların RFQ deneme modülünün iç yüzeyiyle aynı hizada olduğu durumda Rohde-Scwartz marka VNA'dan alınan ölçümlerde RFQ deneme modülünün salınım frekansının 800.01 MHz olduğu okunmuştur. Yapılan ölçümlerde, deneme modülünde RF kapaklarının geleceği kısımların lehim teli ile döşendiği durumda kalite faktörü 4235 olarak bulunmuştur. Bu değer ideal bir bakır için olması gereken değer 66% 'sına karşılık gelmektedir. Kalite faktörünün beklenenin altında olmasının nedenlerinin RF kaçakları önleyici malzemelerin temininin ölçümler yapılırken sağlanmamış olması ve ayarlayıcı konumlarının hassas bir şekilde ayarlanamaması olduğu düşünülmektedir. VNA ölçümünden elde edilen grafik Şekil 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4.5: Kalite faktörü ölçümleri

Ortalama 3 saat süren deney boyunca ortamın sıcaklığının, nem değerinin ve boncuğun konumunun sürekli olarak ölçümleri alınmıştır. Şekil 4.6'da RFQ'nun elektromanyetik alan ölçümlerinin yapıldığı boncuk-çekim deney düzeneği görülmektedir. Düzeneğin verildiği

görselde; VNA, boncuk-çekim sistemi ve elemanları, RFQ, sıcaklık ve nem ölçer, LabVIEW kontrol programı görülmektedir.



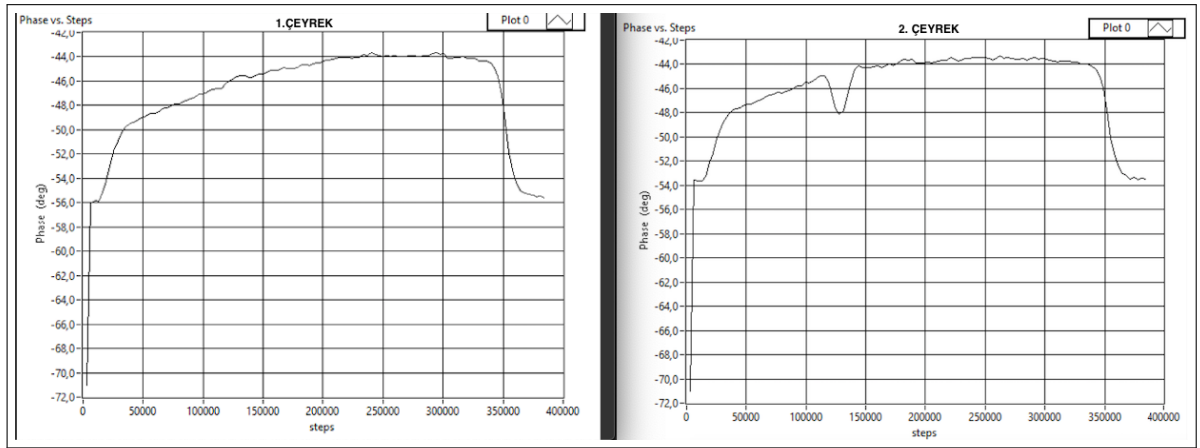
Şekil 4.6: Boncuk-çekim deney düzeneği

	1. Çeyrek	2. Çeyrek	3. Çeyrek	4. Çeyrek
Frekans (MHz)	799.70	799.71	799.83	801.74
Nem Oranı (%)	29	29	29	30
Sıcaklık Farkı (°C)	0.03	0.07	0.15	0.03
Faz Farkı (°)	12	10	16	18

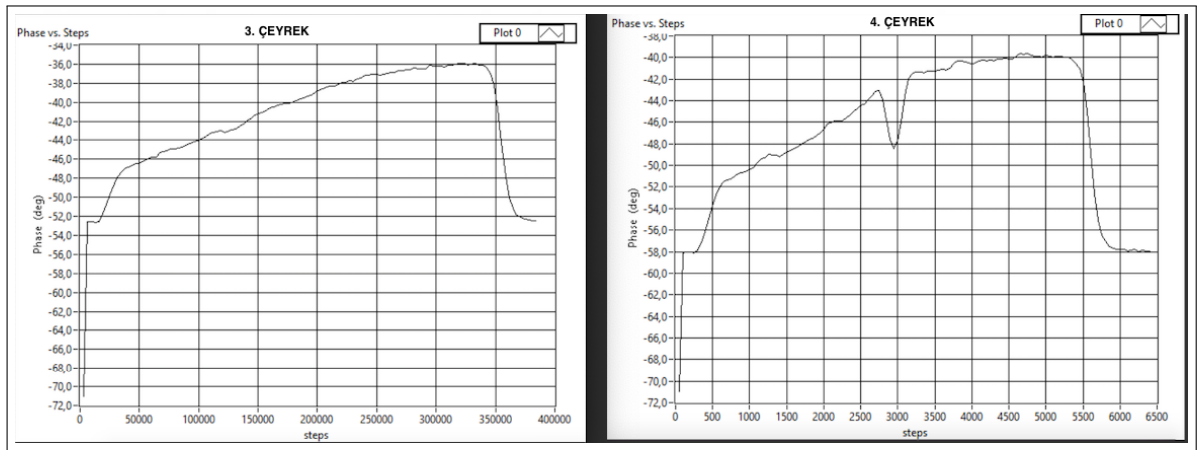
Tablo 4.4: 4 Çeyrekte alınan ölçümler

Tablo 4.4'te RFQ deneme modülünün her bir çeyreği için elde edilen değerler paylaşılmıştır. Değerler incelendiğinde tüm deney boyunca sıcaklık farkı en fazla 0.1 derece olmuş, nem ise neredeyse değişmemiştir. Fazda meydana gelen değişimler hesaplanarak manyetik alanın ne kadar değiştiği hesaplanmıştır.

Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'de boncuğun kovuğun içine girmesiyle VNA'dan okunan değerlerden rezonans frekansa karşılık gelen değer ayıklanarak, boncuğun yarattığı bozulma faz cinsinden LabVIEW kontrol programında çizdirilmiştir. Her bir çeyrek için yapılan deneylerde alınan sonuçlar ayrı ayrı paylaşılmıştır. 2. ve 4. çeyrekte grafik yönünün



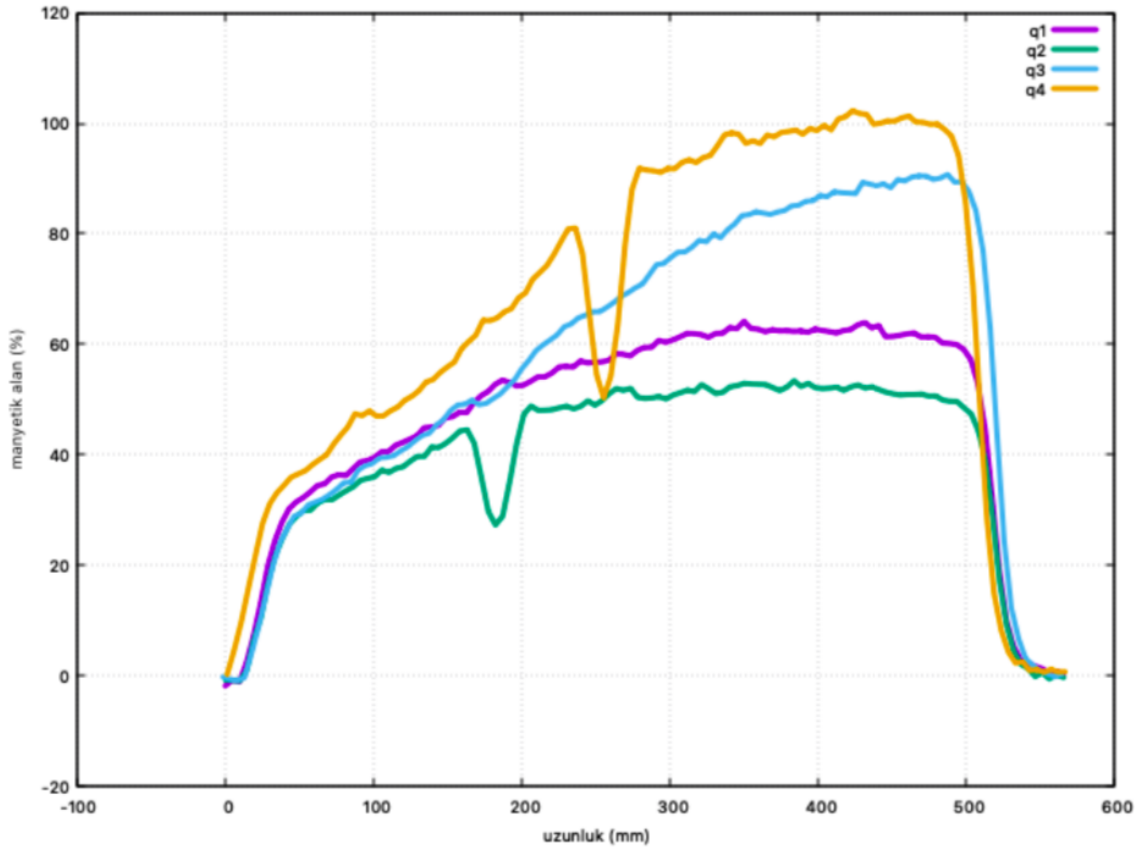
Şekil 4.7: 1. ve 2. Çeyrekten alınan ölçüm



Şekil 4.8: 3. ve 4. Çeyrekten alınan ölçüm

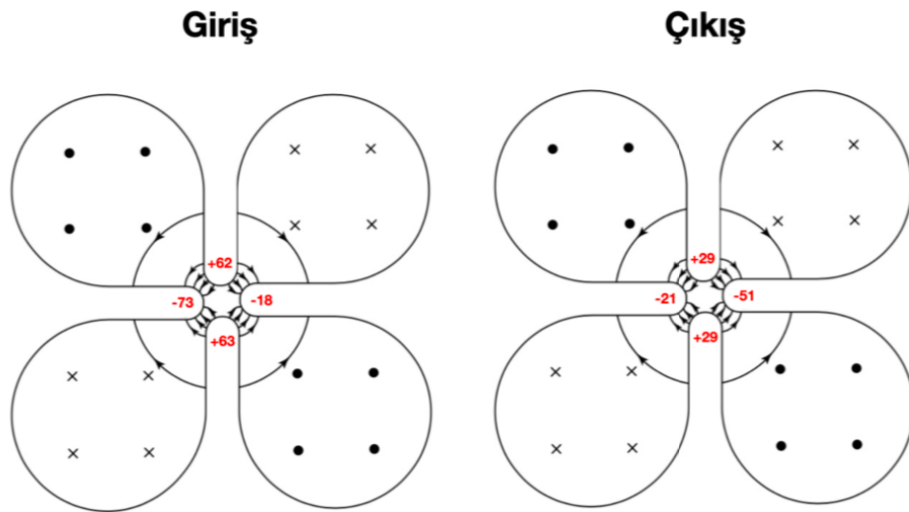
değiştiği görülmektedir. Bu değişikliğin sebebi kovuğun o konumunda yer alan RF kapsayıcı antendir.

Şekil 4.9'da verilen grafikte $q1$, 1. quadrant yani 1. çeyreği; $q2$, 2. çeyreği; $q3$, 3. çeyreği ve $q4$, 4. çeyreği ifade eder. Bu grafikte her bir çeyrek için boncuğun yarattığı değişikliğin % cinsinden karşılaştırması görülmektedir. Testin amacının alanın düzgünlüğünü kontrol etmek olduğu hatırlandığında, her bir çeyrek için alınan ölçümlerin birbiriyle tamamen uyumlu olmamasının sebepleri araştırılmıştır. Bunlardan biri parçaların birleştirme işlemi sırasında oluşan hizalama hataları sebebiyle kanat içi geometride oluşan simetri kaybıdır. Kovuk içindeki alanın simetrisini sağlamaya yarayan ayarlayıcı elemanların yalnızca 2 tanesinin hassas ayarlama başlıklarının üretimi tamamlanmıştır. Bu sebeple diğer ayarlayıcıların konumları hassas bir şekilde ayarlanamamıştır. Şekil 4.9'da görülen grafikte boncuk kovuk içine girdikten sonraki manyetik alan değişiminin davul kovuk örneğindeki gibi doğrusal



Şekil 4.9: z eksen konumu - manyetik alan değişim %'si

olması beklenirken eğimli olmasının sebeplerinden biri ayarlayıcı konumlarıdır. Şekil 4.10'da RFQ deneme modülünün giriş ve çıkış kısmındaki kanat uçlarının birbirine göre ölçümleri ve farkları verilmiştir.



Şekil 4.10: Birleştirme hataları

Yapılan ölçümlerden elde edilen sonuçlar KAHVELab üyeleri tarafından geliştirilen DemirciPro programına yüklenerek kovuk içi ayarlayıcı, kalite faktörü vb. etkenlerin hesaplanmasıyla daha gerçekçi bir RFQ tasarımı ve demet dinamiği benzetim koduna ulaşılması planlanmaktadır [69]. Tüm bu etkenleri birlikte hesaplayabilen bir başka RFQ tasarım programı günümüzde bulunmamaktadır. DemirciPro aynı zamanda DEDA hattı ve iyon kaynağı ile ilgili parametrelerin girilerek demet benzetimi yapabilen bir programdır. Programın elde ettiği sonuçlar CERN'ün geliştirdiği TRAVEL programının sonuçlarıyla da karşılaştırılmıştır [69].



5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Hızlandırıcı fiziğinde, gerçek sistemlerde veri alınmadan önce benzetim yapmak deney yapan kişilerin sağlığı ve deneyde hedeflenen kriterlere ulaşmak açısından büyük önem taşır. Hızlandırıcı sistemlerin amacına göre kriterleri ve hedefleri değişse de çoğunun temel hedefi yüksek yoğunluklu, odaklı bir demetin olabildiğince küçük bir faz uzayında dağılım göstermesidir. Küçük bir hacimde olabildiğince fazla miktarda odaklı parçacıklardan oluşan demetin hedef noktasında (target) oluşturacağı etki de enerjisine göre daha fazla olur. Bu sebeple demetin hızlandırıcı kovuğa ulaşmadan önce yayınında artışa sebep olabilecek etkenlerin araştırılması, benzetimlerinin yapılması ve kovuğa aktarılacak demetin boyutlarının ve sıkışma miktarının incelenmesi önem taşımaktadır. Demet boyutlarında ortalama Coulomb etkisiyle büyümeye sebep olan uzay yükü etkisinin değişen akım değerlerinde demeti nasıl etkilediği bulgular kısmında paylaşılmıştır. Uzay yükü etkilerinin dahil edilmediği durumlarda benzetim çalışmalarıyla tutarlı sonuçlara ulaşılamadığı görülmüştür. Gerçeğe daha yakın bir demet dinamiği benzetimi yapmak için bu hesapların dahil edilmesi elzemdir.

Uzay yükü etkisi her bir parçacığın tüm parçacıklarda oluşturduğu etkinin hesaplanmasını gerektirdiğinden oldukça karmaşık yöntemleri olan bir hesaplamadır [52]. T. Wangler, uzay yükü etkisine bağlı yayının büyümesiyle ilişkili yaptığı araştırmalar sonucunda hala çözülememiş sorular olduğunu ve bu konuda yapılması gereken çok fazla iş olduğunu vurgulamıştır [31]. Daha hızlı ve pratik sonuçlar alabilmek için doğrusal yaklaşım uygulanan elektrik alan hesabıyla ve buna ek olarak, demetin K yük sıkışıklığı ve R_D eliptik integral hesaplarıyla ayrı ayrı elde edilen değerler, matris formalizmiyle PyDEDA'da uygulanmıştır. İyon kaynağı ve DEDA hattında yer alan SOL2 çıkışına kadar tamamen uyumlu sonuçlar veren PyDEDA ve TRAVEL koduna, SOL2'den sonra gelen sürüklenme hattı boyunca uzay yükü etkisi dahil edilmiştir. Etkinin x_{rms} ve y_{rms} boylarındaki yansıması KAHVELab'da geliştirilen PyDEDA'yla, CERN'in kullandığı TRAVEL programının çıktıları referans alınarak kıyaslandığında benzerlik göstermiştir. Ancak matris yaklaşımının bir sonucu olarak ϵ_{rms} 'te meydana gelen etki görülememiştir.

TRAVEL programıyla kıyaslama yapılırken kronometre aracılığıyla zaman tutulmuş ve

kullanılan demet dosyasının içerdiği parçacık sayısı arttıkça Coulomb yöntemiyle hesap yaptırılan TRAVEL kodunun, PyDEDA'dan oldukça yavaş olduğu gözlemlenmiştir. Bu tezde geliştirilen kod kullanılarak x_{rms} ve y_{rms} boyutlarında demetin değişimini elde etme hızımız artmıştır. Bu, harcanan güç ve zaman anlamında ciddi kazanç sağlamıştır.

Bu tezde, demetin içsel etkilerle oluşturduğu elektrik alanın ve kuvvetlerin incelenmesinin ardından, hesapları yapılan sürüklenme hattının hemen devamında yer alacak RFQ için testler yapılmıştır. RFQ deneme modülü üretildiği sırada, deney düzeneği davul kovuk üzerinde test edilmiştir. Deneme üretimi tamamlanan hızlandırıcı kovuğun demeti hedeflenen enerjilere en az kayıpla ulaştırabilmesi için, kovuk içinde oluşturulan elektromanyetik alanın düzgünlüğü boncuk-çekim yöntemiyle test edilmiştir. Deney elemanlarının temininin sağlanmasının ardından tüm sistemle haberleşmeyi ve sistemin kontrolünü sağlayan LabVIEW kontrol programı yazılmıştır. Yapılan boncuk-çekim deneyinde manyetik alan pertürbe edilmiş ve alüminyum boncuğun varlığının yarattığı faz kayması ölçülmüştür. Taranan frekans aralığında elde edilen faz değişim değerlerinden 800 MHz için elde edilen sonuçlar kullanılmış, Slater bozulma kuramının ortaya koyduğu yaklaşımda yerine koyularak manyetik alanda meydana gelen bozulma gözlemlenmiştir. Boncuğun her adımında bu etki hesaplanarak kovuk içinde oluşan bozulma ölçülmüştür. Bozulmanın düzgünlüğü incelenerek kovuğun birleştirme hatalarının yarattığı etkinin farkına varılmış ve kanat birleşim noktalarındaki RF kaçaklardan ötürü kalite faktörü beklenen değerinin altında gelmiştir.

Boncuk-çekim deneyi ile elde edilen sonuçlar incelenerek hızlandırıcı kovuğun tasarlanan şekilde çalışabilmesi için gerekli iyileştirmelerin yapılması planlanmaktadır. Böylece RFQ üretimi tamamlanıp veri alındığında demetin hedeflenen hızlara en az kayıpla ulaşması sağlanacaktır.

KAYNAKLAR

- [1]. Python Software Foundation. Python Language Reference, version 2.7.
- [2]. A. Perrin, e., J.F. Amand, 2007, *TRAVEL v4.07 User Manual* , CERN, Geneva, Switzerland.
- [3]. B.Yasatekin, 2014, *Design Studies with DEMIRCI for SPP RFQ*, Comp. Phys. Comm.
- [4]. Anonim, 2014, *Ten Things You Might Know About Particle Accelerators*
<https://www.symmetrymagazine.org/article/april-2014/ten-things-you-might-not-know-about-particle-accelerators>, [Ziyaret Tarihi: 25.05.2021]
- [5]. Anonim, 2014, *What Is An Accelerators*,
<https://home.cern/science/accelerators>, [Ziyaret Tarihi: 26.05.2021]
- [6]. Vincent Baglin, 2009, *Vacuum in Accelerators*,
<https://indico.cern.ch/event/43703/contributions/1086897/attachments/939254/1331887/Baglin.pdf>, [Ziyaret Tarihi: 26.05.2021]
- [7]. Anonim, 2018, *Elektron ve Çekirdeğin Keşfi*,
<https://tr.khanacademy.org/science/chemistry/electronic-structure-of-atoms/history-of-atomic-structure/a/discovery-of-the-electron-and-nucleus>, [Ziyaret Tarihi: 21.05.2021]
- [8]. Anonim, *National Museums Scotland, Cockroft-Walton Generator*, <https://www.nms.ac.uk/explore-our-collections/stories/science-and-technology/cockroft-walton-generator>, [Ziyaret Tarihi: 18.04.2021]
- [9]. Anonim, 2017, *Cockroft Walton Generator*, <https://www.globalsino.com/EM/page3257.html>, [Ziyaret Tarihi: 20.05.2021]
- [10]. Kapchinskii, I. M. ve Teplyakov, V. A., 1970, *Linear Ion Accelerator with Spatially Homogeneous Strong Focusing* Prib. Tekh. Eksp., No.2, 19.
- [11]. Lombardi, A. M., 2016, CERN Accelerator School (CAS), *The Radio Frequency Quadrupole (RFQ)* , pp.201-207., doi: 10.5170/CERN-2006-012.201.
- [12]. Feynman, Richard, 2016, *Feynman Fizik Dersleri*, ALFA Yayınları, Volume II.
- [13]. Wangler, Thomas P., 2008, *RF Linear Accelerators*, John Wiley and Sons, Michigan, pp. 283-287, ISBN:978-3-527-40680-7.
- [14]. Wolski, Andrzej, 2011, *Theory Of Electromagnetic Fields*, CERN Accelerator School (CAS), 8-17 June 2010, Ebeltoft Denmark, CERN, Creative Commons Attribution, 15-67.

- [15]. Ünel, N. Gökhan, 2016, *SPP RFQ Tasarımı ve Üretimi* [PowerPoint presentation], Hızlandırıcı ve Algıç Çalıştayı, <https://indico.cern.ch/event/489217/timetable>, [Ziyaret Tarihi: 11 Mayıs 2021].
- [16]. Crandall, K.R., Wangler, T.P., Young, L.M., Billen, J.H., Neuschaefer, G.H., Schrage, D.L. 1996, *PARMTEQ - RFQ Design Codes*, CERN LINAC4 Project, LA-UR-96-1836. <http://linac4-project.web.cern.ch/linac4-project/>, [Ziyaret Tarihi: 25 Mart 2014]
- [17]. Duperrier, Romuald., 2000, *TOUTATIS: A radio frequency quadrupole code. Physical Review Special Topics*, PHYS REV SPEC TOP-AC. 3. 10.1103/PhysRevSTAB.3.124201.
- [18]. LIDOS.RFQ.DESIGNER Version 1.3, <http://www.ghga.com/accelsoft/>, [Ziyaret Tarihi: 25 Mart 2014.]
- [19]. T. J. Boyd, 1982, *Kilpatrick's criterion*, Los Alamos Group AT-1 report AT-1:82-28.
- [20]. Andres, Silvia Verdu, 2009, CLIC Experimental and Breakdown Studies Meeting, *Research on Kilpatrick's Criterion*, <https://indico.cern.ch/event/76081/contributions>, [Ziyaret Tarihi:12 Mayıs 2021].
- [21]. Salim Oğur, 2015, *Emittance Measurement For Low Energy Proton Beams*, Thesis (Master), Bogazici University.
- [22]. T. Kalvas, O. Tarvainen, T. Ropponen, O. Steczkiewicz, J. Rje, ve H. Clark, 2010, *IBSIMU: A three-dimensional simulation software for charged particle optics*, Review of Scientific Instruments.
- [23]. D. Uriot and N. Pichoff, *Status of TraceWin Code*, Proc. 6th International Particle Accelerator Conference (IPAC'15), Richmond, VA, USA, May 3-8, 2015, 6. International Particle Accelerator Conference, pp. 92–94, Geneva, Switzerland.
- [24]. Yıldız, V. (2012). *Doğrusal Hızlandırıcılara Giriş*, <https://indico.cern.ch/event/187227/attachments/261624/365520/LINACs.pdf>, [Ziyaret Tarihi: 15.04.2021]
- [25]. Nergiz, Zafer, 2015, *Elektron Demet Tanısı*, HPFBÜ Okulu, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir.
- [26]. Wiedemann, H., 2007, *Particle Accelerator Physics*, Springer, Stanford.
- [27]. Massimo, Ferrario, M. Migliorati, and L. Palumbo, 19–29 August 2013, *Space Charge Effects*, CAS-CERN Accelerator School: Advanced Accelerator Physics, Trondheim, Norway.
- [28]. Ferrario, Massimo, 2017, *Recapitulation of Relativity and Space Charge*, CERN Accelerator School, Erice, Italy.
- [29]. Lund, Steven M., Barnard, John J., 2017 *Transverse Beam Dynamics*, USPAS. https://people.nsc1.msu.edu/~lund/uspas/bpisc_2017/lec_set_02/tpd.pdf, [Ziyaret Tarihi: 28 Mayıs 2021].

- [30]. Christopher K., Allen ve Nicholas D., Pattengale, 2002, *Theory and Technique of Beam Envelope Simulation*, Los Alamos National Laboratory, New Mexico.
- [31]. Wangler, Thomas P., 2008, *Emittance Growth From Space Charge Forces*, AIP Conference Proceedings 253, 21 (1992)
- [32]. Reiser, Martin, 2008, *Theory and Design Charged Particle Beam*, WILEY-VCH Verlag GmbH and Co. KGaA, Weinheim ISBN: 978-3-527-40741-5
- [33]. Anonim, *Debye Length*, <https://www.plasma-universe.com/debye-length>
- [34]. Uli Raich, 2009, *Accelerator Beam Diagnostic*, USPAS and University of New Mexico, <https://uspas.fnal.gov/materials/09UNM/Emittance.pdf>
- [35]. W. Barletta, L. Spentzouris, E. Harms, USPAS, *Overview on Magnetic Fields*, https://uspas.fnal.gov/materials/12MSU/xverse_dynamics.pdf, [Ziyaret Tarihi: 15.06.2021].
- [36]. Anonim, *Basics of Beam Dynamics*, https://uspas.fnal.gov/materials/13Duke/SCL_Chap3.pdf, [Ziyaret Tarihi: 20 Mayıs 2021].
- [37]. Franchetti, Guiliano, 2014 *Space Charge*, CERN Accelerator School, GSI, Prague.
- [38]. Hofmann, Ingo, 2015, *Space Charge Effect in Linacs*, CERN-School High Intensity Limitations, GSI Darmstadt, Germany.
- [39]. D. Kehne, M. Reiser and H. Rudd, *Experimental studies of emittance growth due to initial mismatch of a space charge dominated beam in a solenoidal focusing channel*, Conference Record of the 1991 IEEE Particle Accelerator Conference, 1991, pp. 248-250 vol.1, doi: 10.1109/PAC.1991.164263.
- [40]. DAVIES, J. R., 2006, *The Alfvén limit revisited and its relevance to laser-plasma interactions*, Laser and Particle Beams. Cambridge University Press, 24(2), pp. 299–310. doi: 10.1017/S0263034606060460.
- [41]. Reiser, Martin, 1991, *Free Energy and Emittance Growth In Nonstationar Charged Particle Beams*, //J.Appl.Phys. 70(4), 1919 (1991)
- [42]. Daniela Leitner, Damon Todd ve Daniel Winklehner, 2016, *Fundamentals of Ion Sources USPAS*, Lawrence Berkeley National Laboratory, Massachusetts Institute of Technology http://www-eng.lbl.gov/~dleitner/USPAS_2016_Fundamental_Of_Ion_Sources/4_Thursday_AM_SpaceCharge.pdf
- [43]. Holmes, Stephen D., 2013, *Project X: Accelerator Reference Design*, United States, doi:10.2172/1128035.
- [44]. Coco, V., 2004, *Generic Algorithm for Beam Matching in PATH Manager*, CERN-AB-Note-2004.
- [45]. B.C. Carlson, 1977, *SIAM Journal on Mathematical Analysis*, Vol. 8, pp. 231-242.
- [46]. B.C. Carlson, 1987, *Math. Comp.*, Vol. 49, pp. 595-606.

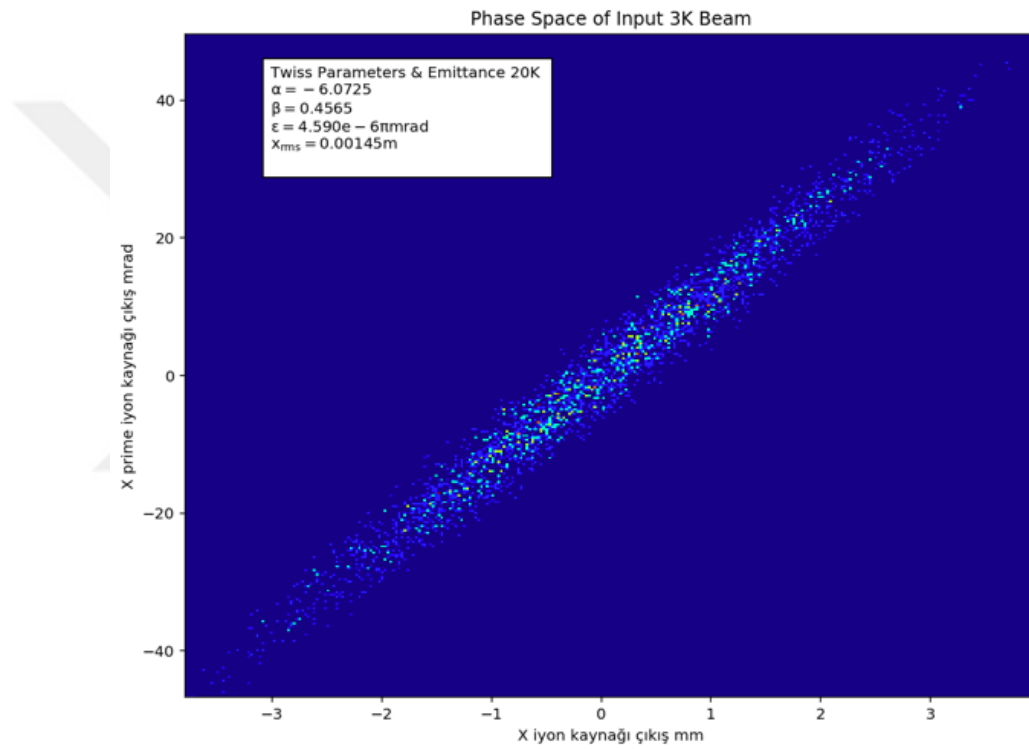
- [47]. Shubaly, Murray, 1975, *Space Charge Fields of Elliptically Symmetric Beams*, North Holland Publishing Co., Atomic Energy of Canada Limited, Ontario, Canada.
- [48]. F.R. Sacherer, 1971, *RMS Envelope Equations with Space Charge*, IEEE Trans. Nucl. Sci., Vol. NS-18, pp. 1105-1107.
- [49]. Lizarraga, Valerio C. A., 2018, *Emittance Growth Due To Space Charge Compensation and Beam Intensity Instabilities In Negative Ion Beams*, Facultad de Ciencias Fisico-Matematicas Universidad Autonoma de Sinaloa, Culiacan, Mexico
DOI:10.1103/PhysRevAccelBeams.21.030101
- [50]. Bailey, R., 2013, *High Power Hadron Machines*, Proceedings of the CAS–CERN Accelerator School, Bilbao, Spain, CERN-2013-001.
- [51]. Bellodi, G., H. J. De Grandsaignes D'Hauterives ve D. Noll, 2021, *Linac4 source extraction re-design for higher current operation*, Geneva, CERN.
- [52]. Nicholas D. Pattengale ve Christopher K. Allen, 2002, *The Software Anatomy of a Flexible Accelerator Simulation Engine*, Cornell University, arXiv:physics/0207099.
- [53]. B. Koubek, A. Grudiev ve M. Timmins, 2017, *RF Measurements and Tuning of the 750 MHz HF-RFQ*, CERN, Geneva, Switzerland.
- [54]. Guillaume, J., 2015, *RF Bead Pull Measurements of the DQW Cavity*, <https://cds.cern.ch/record/2044542.pdf>, [Ziyaret Tarihi: 11.06.2021].
- [55]. Akkurt, Nihan, 2018, *RFQ Kovuğun Elektromanyetik Özelliklerinin Ölçülmesi*, Tez (Doktora), Eskişehir Osmangazi Üniversitesi.
- [56]. Michael F. Robbins, *Electronics: Practical Circuit Design and Analysis, Lumped Circuit Model*, CircuitLab Inc., 2021.
- [57]. Bitter, R., Mohiuddin, T. ve Nawrocki, M., 2006. *LabVIEW: Advanced programming techniques*, version 2019, Crc Press.
- [58]. Benne de Bakker, *TB6560 Stepper Motor Driver Arduino Tutorial*, <https://www.makerguides.com/tb6560-stepper-motor-driver-arduino-tutorial>
- [59]. Sears, F. W., Zemansky, M. W., Young, H. D., University Physics, 6th Ed., Addison-Wesley, 1982., <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Tables/diel.html>
- [60]. Lewandowski, J. R., Bowden, G., Miller, R. H., ve Wang, J. W., 2005, *Accelerator structure bead pull measurement at SLAC*, SLAC PUB. doi: SLAC.PUB.11193.
- [61]. Anonim, <https://www.pasco.com/products/software/capstone#downloads-panel>
- [62]. Oğuz Koçer, 2019, *UHF Bandında RF Dolaştırıcı Tasarımı, Üretimi ve Ölçümleri*, Tez (Yüksek Lisans), İstanbul Üniversitesi.

- [63]. Anonim, 2013, Array Solutions, *Array Solutions VNA-UHF 636A*, <https://w5big.com/vnauh.htm>
- [64]. Anonim, 2021, Anritsu, *Anritsu MS2038C VNA Master* <https://www.anritsu.com/en-US/test-measurement/support/downloads?model=MS2038C>
- [65]. Anonim, <https://www.labview.com>
- [66]. Anonim, <https://www.doramakina.com.tr>
- [67]. Anonim, 2021, *ZNB20 Vector Network Analyzer*, Rohde and Schwarz GmbH Co. Germany., https://www.rohde-schwarz.com/dk/manual/r-s-znb-znbt-user-manual-manuals-gb1_78701-29151.html
- [68]. Schaldenbrand, Peter, 2020, *How to calculate damping from a FRF?*, Siemens, <https://community.sw.siemens.com/s/article/how-to-calculate-damping-from-a-frf>
- [69]. Cakir, O., Celebi, E., Cetinkaya, H., Kolenoglu, H., Turemen, G., Uysal, Z. and Unel, G. 2021. "DemirciPro's tools for completing the Linac: Ion source and LEBT line", arXiv:2103.11829v1 [physics.acc-ph].

EKLER

EK 1. DEDA Hattı Boyunca PyDEDA'da Alınan Faz Uzayı Grafikleri

İyon kaynağından RFQ'ya kadar sürüklenen ve solenoidlerden geçirilen 3000 ve 5000 parçacıklı demetin izlediği yol boyunca PyDEDA'da elde edilen grafikler verilmiştir.



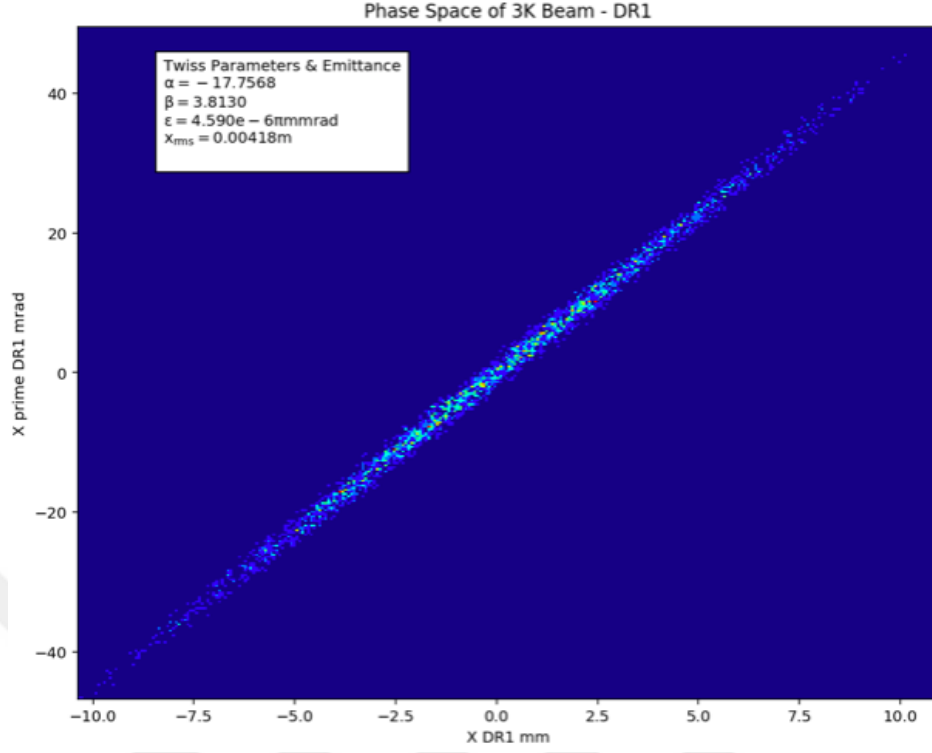
Şekil 1.1: 3000 parçacıklı demetin iyon kaynağı çıkışı faz uzayı görüntüsü PyDEDA'da çizdirilmiştir.

EK 2. Plotwin Programından Alınan Demet Verileri

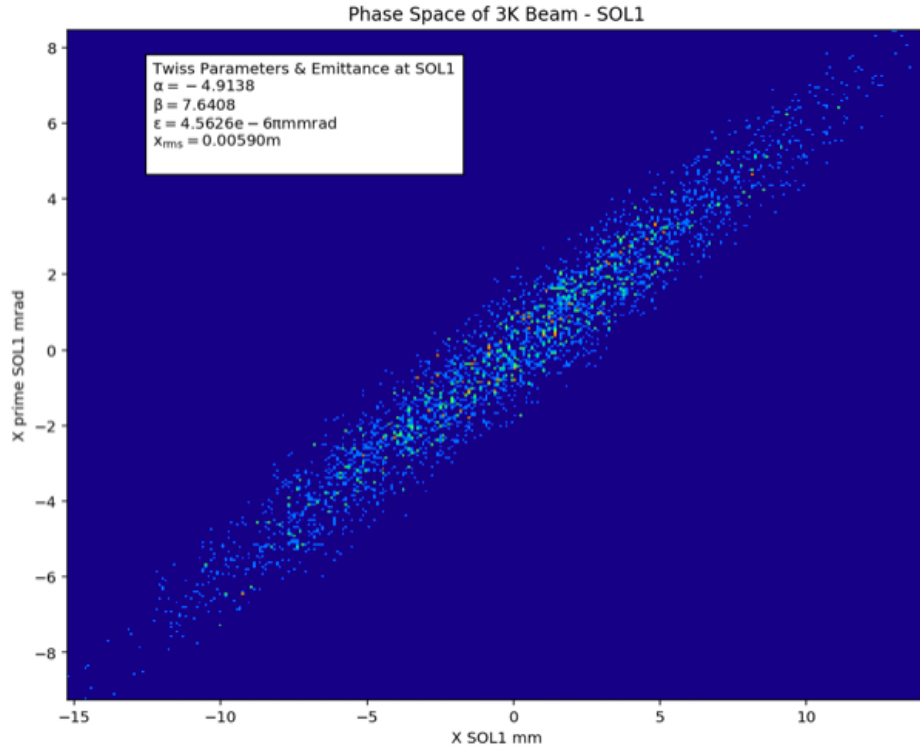
3000 ve 5000 parçacıklı demetler için SOL2 ve RFQ arasında kalan sürüklenme hattı boyunca uzay yükü dahil edilerek ve edilmeyerek TRAVEL programından elde edilen çıktıların Plotwin programındaki görselleri verilmiştir.

EK 3. Python'da Geliştirilen Uzay Yükü Hesaplamaları Kodu (PyDEDA)

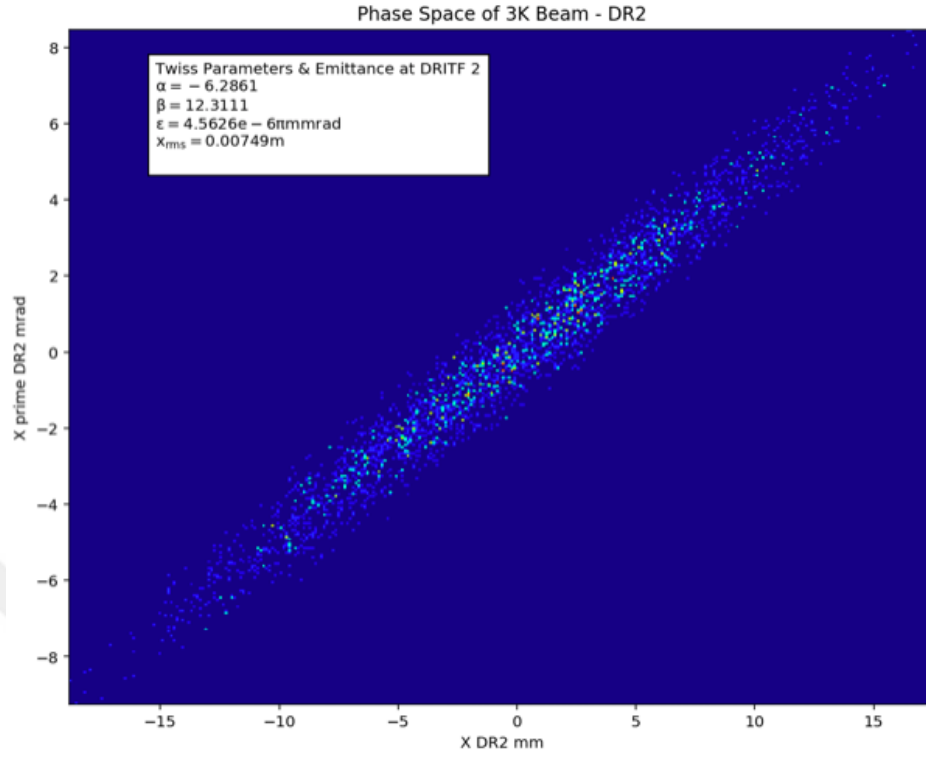
3000 ve 5000 parçacıklı demetler için SOL2-RFQ arasında TRAVEL programında uzay yükü dahil edilerek ve edilmeyerek elde edilen grafikler verilmiştir.



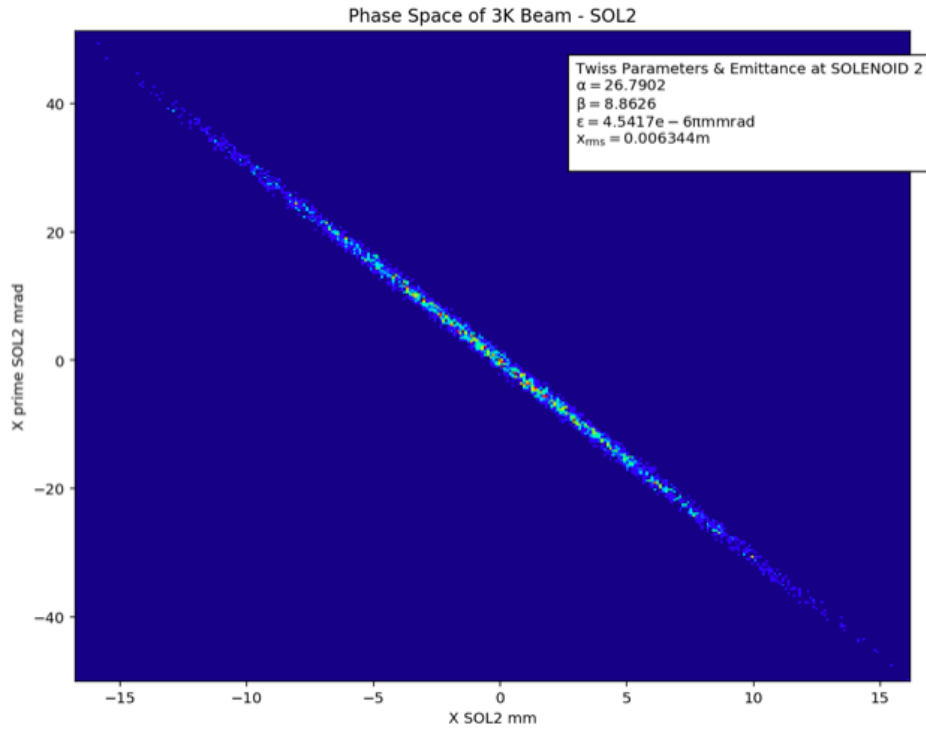
Şekil 1.2: 3000 parçacıklı demetin 1.sürüklenmeden sonraki faz uzayı görüntüsü PyDEDA'da çizdirilmiştir.



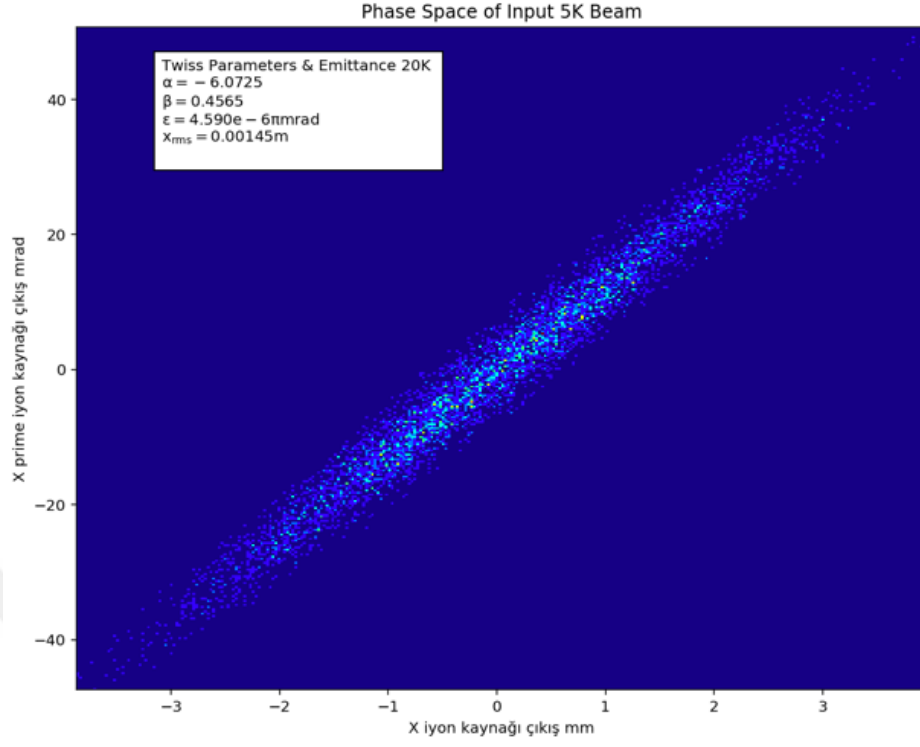
Şekil 1.3: 3000 parçacıklı demetin SOL1 çıkışındaki faz uzayı görüntüsü PyDEDA'da çizdirilmiştir.



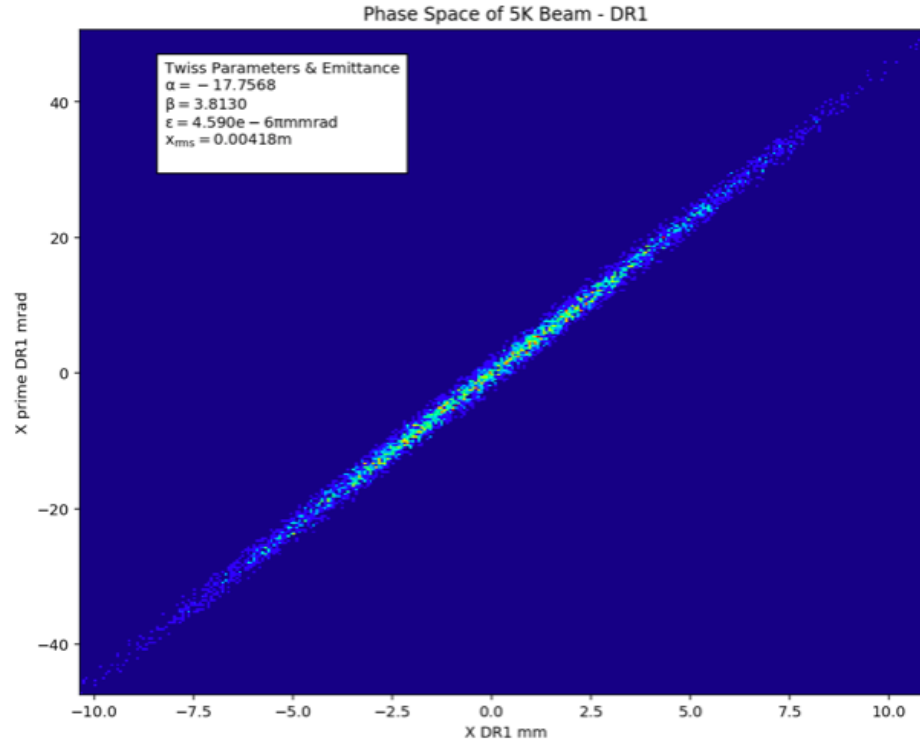
Şekil 1.4: 3000 parçacıklı demetin 2.sürüklenmeden sonraki faz uzayı görüntüsü PyDEDA'da çizdirilmiştir.



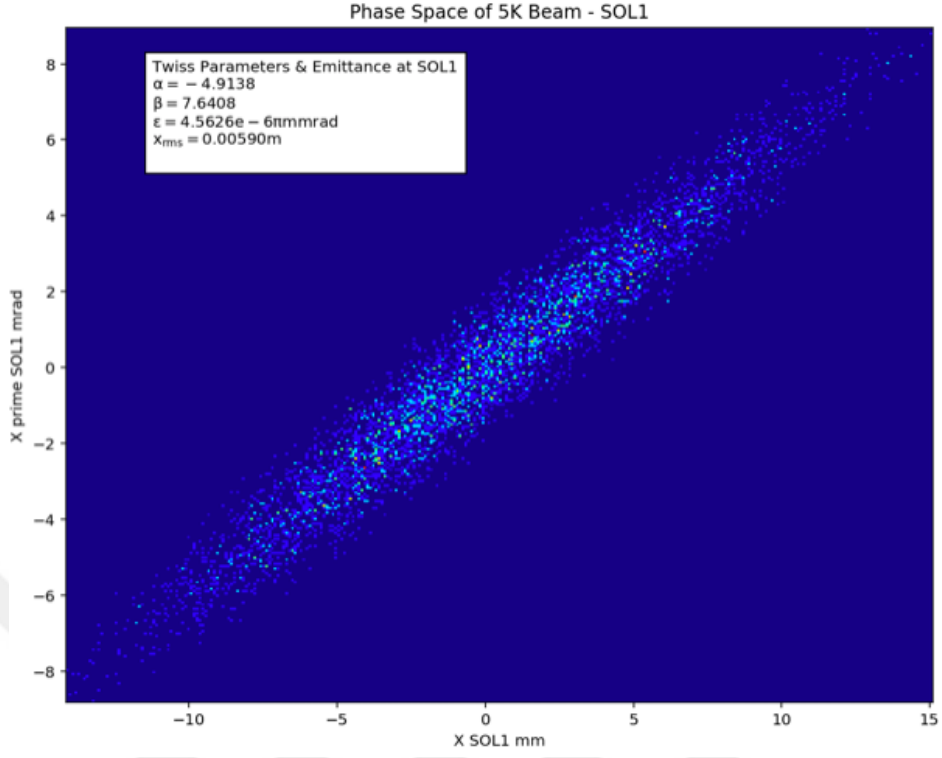
Şekil 1.5: 3000 parçacıklı demetin SOL2 çıkışındaki görüntüsü PyDEDA'da çizdirilmiştir.



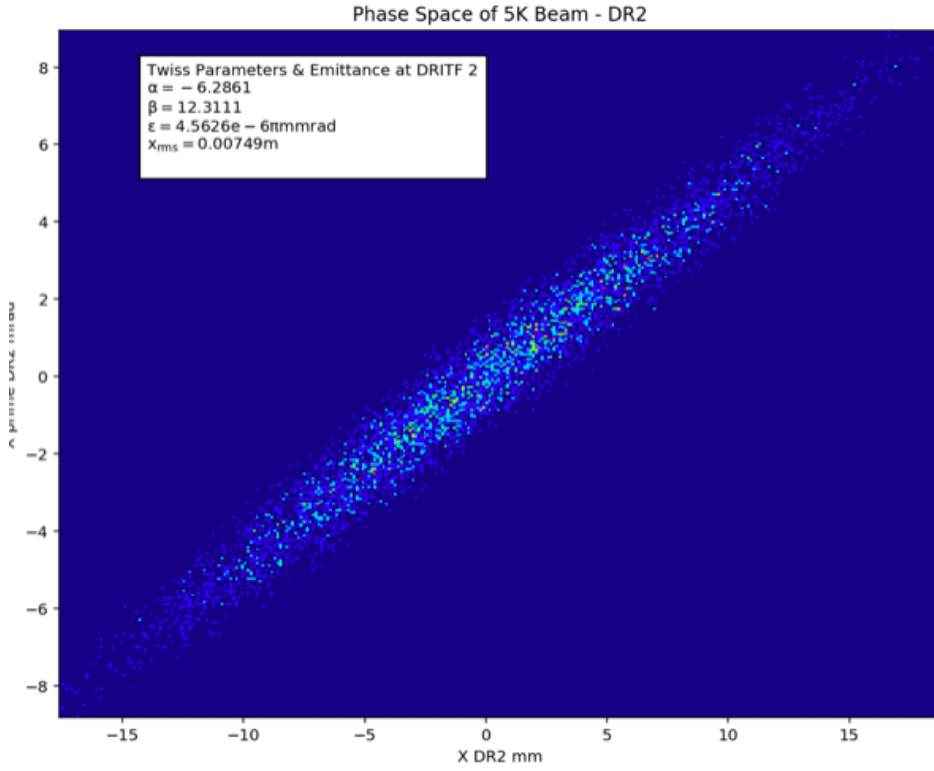
Şekil 1.6: 5000 parçacıklı demetin iyon kaynağı çıkışı faz uzayı görüntüsü PyDEDA'da çizdirilmiştir.



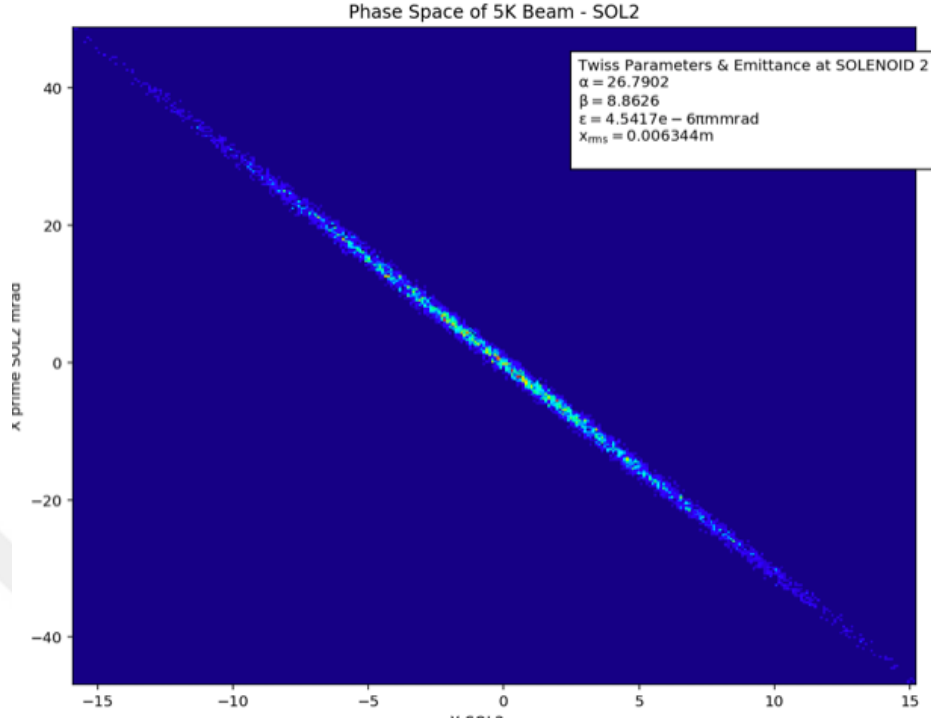
Şekil 1.7: 5000 parçacıklı demetin 1.sürüklenmeden sonraki faz uzayı görüntüsü PyDEDA'da çizdirilmiştir.



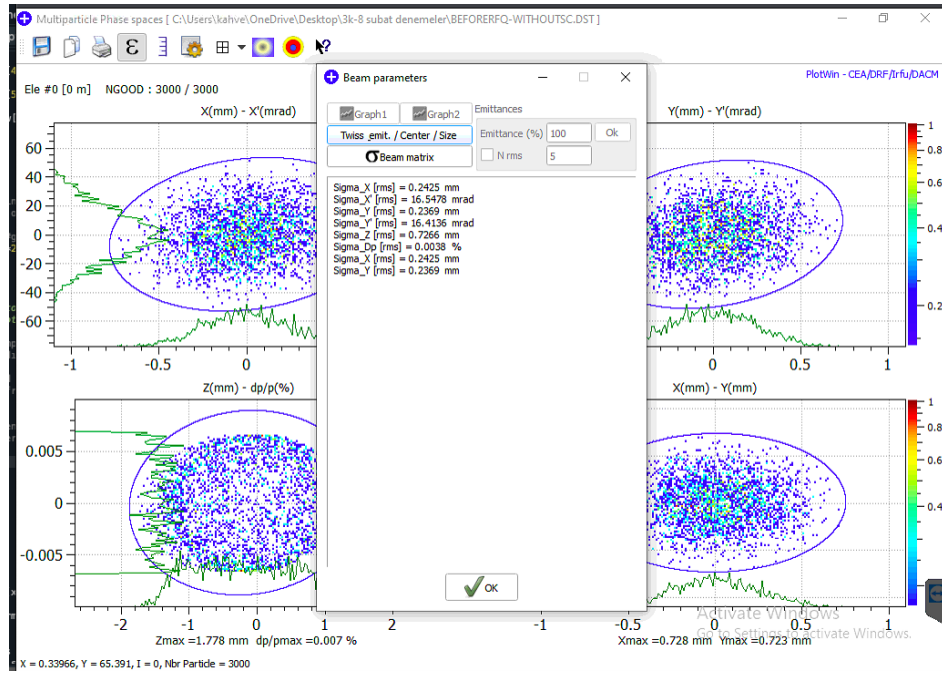
Şekil 1.8: 5000 parçacıklı demetin SOL1 çıkışı faz uzayı görüntüsü PyDEDA'da çizdirilmiştir.



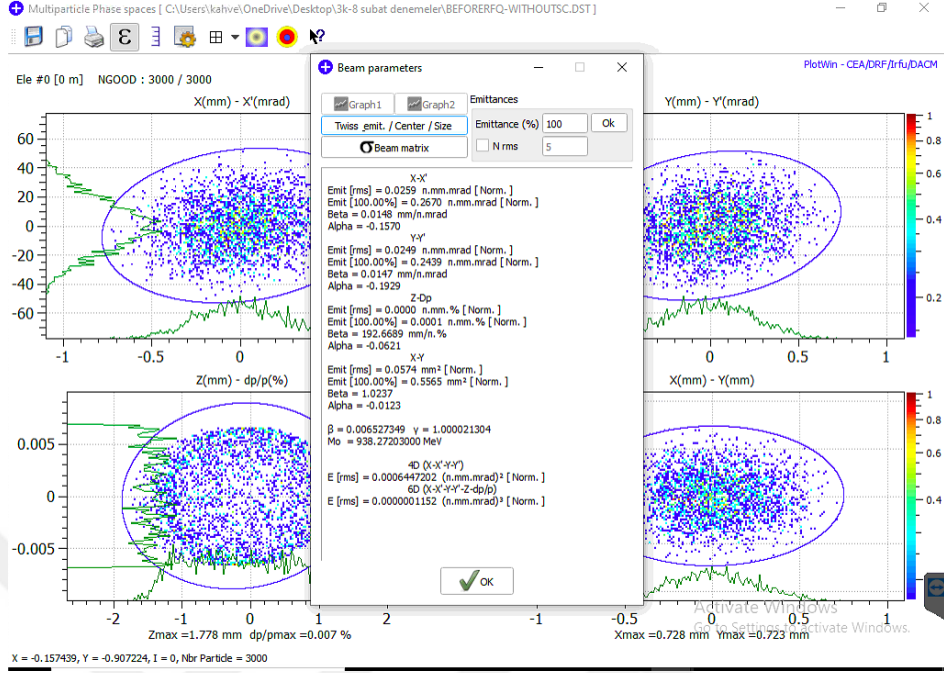
Şekil 1.9: 5000 parçacıklı demetin 2.sürüklenmeden sonraki faz uzayı görüntüsü PyDEDA'da çizdirilmiştir.



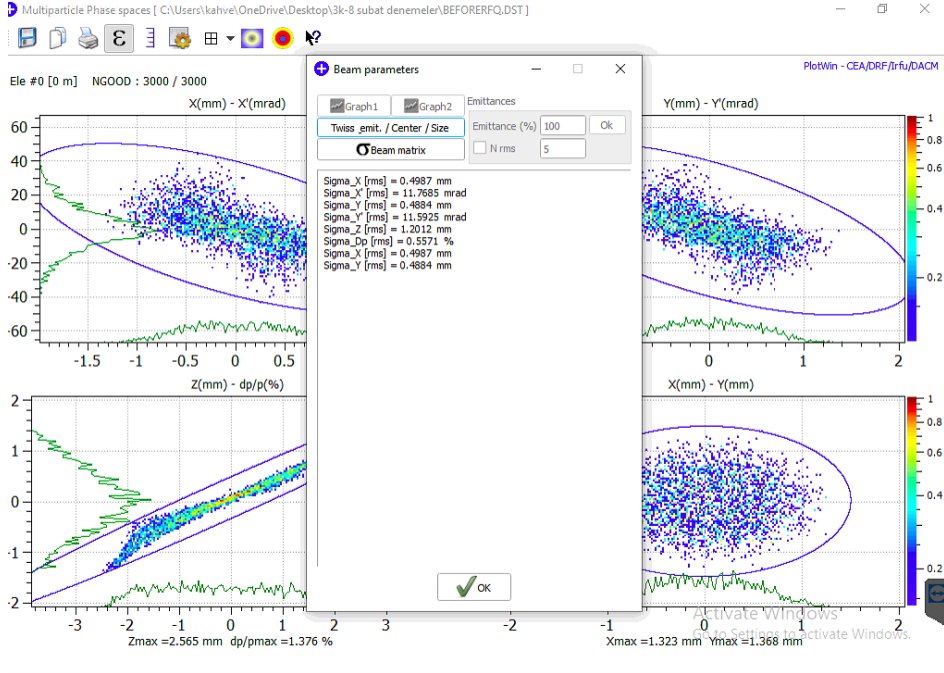
Şekil 1.10: 5000 parçacıklı demetin SOL2 çıkışındaki görüntüsü PyDEDA'da çizdirilmiştir.



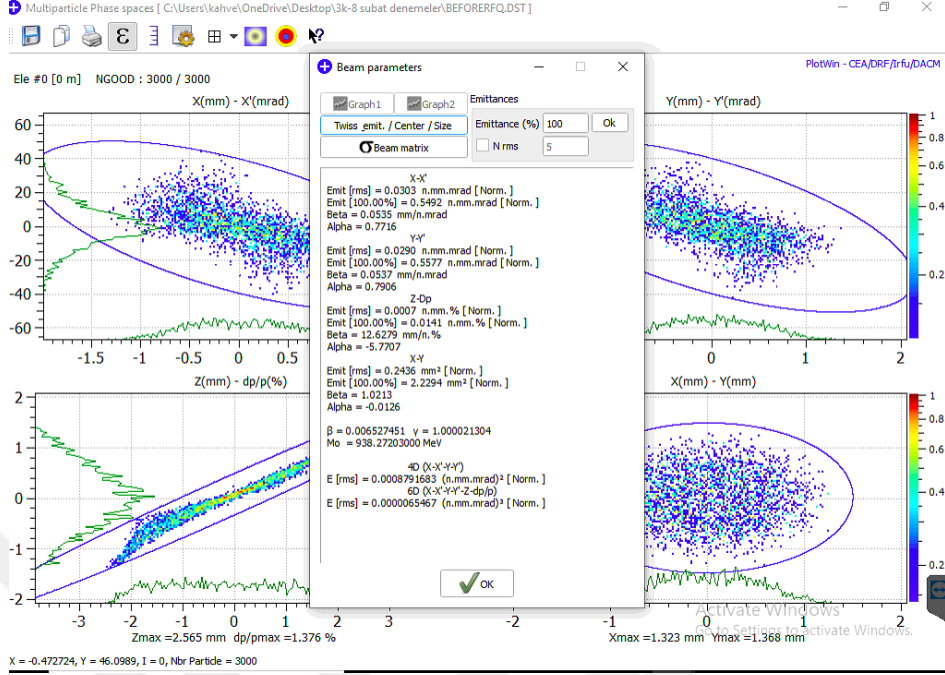
Şekil 2.1: 3000 parçacıklı demetin RFQ öncesindeki sürüklenmede uzay yükü etkisi dahil edilmeden elde edilen x_{rms} , x'_{rms} , y , y'_{rms} değerleri



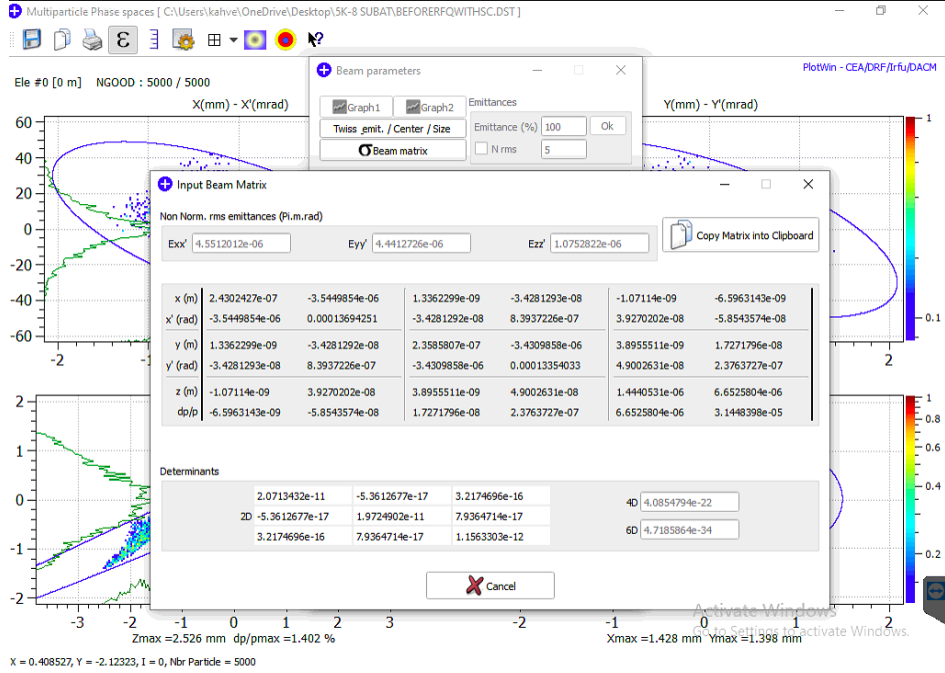
Şekil 2.2: 3000 parçacıklı demetin RFQ öncesindeki sürüklenmede uzay yükü etkisi dahil edilmeden elde edilen Twiss parametreleri



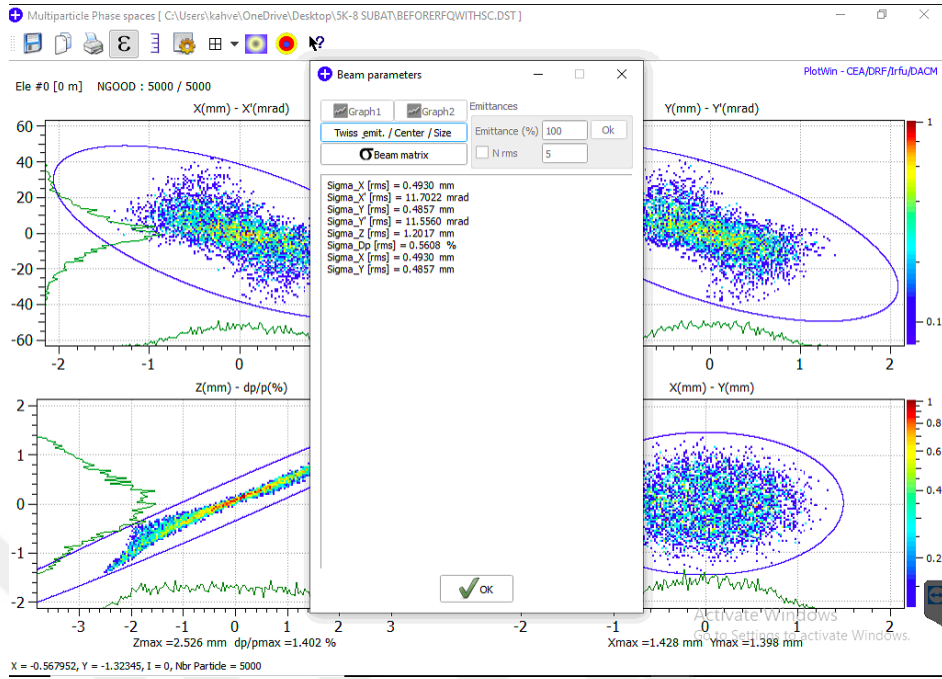
Şekil 2.3: 3000 parçacıklı demetin RFQ öncesindeki sürüklenmede uzay yükü etkisi dahil edilerek elde edilen $x_{rms}, x'_{rms}, y, y'_{rms}$ değerleri



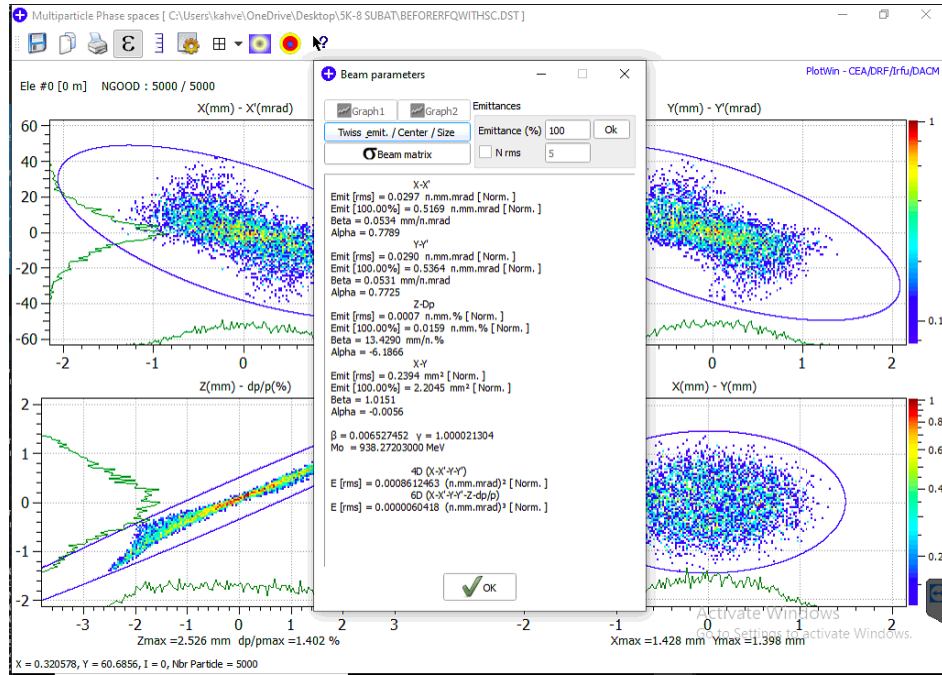
Şekil 2.4: 3000 parçacıklı demetin RFQ öncesindeki sürüklenmede uzay yükü etkisi dahil edilerek elde edilen Twiss parametreleri



Şekil 2.5: 5000 parçacıklı demetin RFQ öncesindeki sürüklenmede uzay yükü etkisi dahil edilerek elde edilen demet matrisi ve ϵ_{rms} değerleri



Şekil 2.6: 5000 parçacıklı demetin RFQ öncesindeki sürüklenmede uzay yükü etkisi dahil edilerek elde edilen $x_{rms}, x'_{rms}, y, y'_{rms}$ değerleri



Şekil 2.7: 5000 parçacıklı demetin RFQ öncesindeki sürüklenmede uzay yükü etkisi dahil edilerek elde edilen Twiss parametreleri

```

demet=np.array(parcacik_sol)
demet=demet.astype(np.float)
Ltot=0

for i in range (33):
    sc=[]
    from mpmath import *
    mp.dps = 25; mp.pretty = True
    Rdx= elliprd(mean(demet[2]**2)/mean(demet[0]**2),mean(demet[4]**2)/mean(demet[0]**2),1)
    Rdy= elliprd(mean(demet[0]**2)/mean(demet[2]**2),mean(demet[4]**2)/mean(demet[2]**2),1)
    Rdz= elliprd(mean(demet[0]**2)/mean(demet[4]**2),mean(demet[2]**2)/mean(demet[4]**2),1)

    # Fsc_i= ((K/2)*(5*(mean(demet[0]**2)))**(-3/2)*Rdx) #Fsc_x: 1/f
    #Fsc_j= ((K/2)*(5*(mean(demet[2]**2)))**(-3/2)*Rdy)
    #Fsc_k= ((K/2)*(5*(mean(demet[4]**2)))**(-3/2)*Rdz)

    xEx=((0.98)/(12*sqrt(3))*((Q)/(2*pi*perm))*(1/(sqrt(mean(demet[0]**2))))*Rdx)
    yEy=((0.98)/(12*sqrt(3))*((Q)/(2*pi*perm))*(1/(sqrt(mean(demet[2]**2))))*Rdy)
    zEz=((0.98)/(12*sqrt(3))*((Q)/(2*pi*perm))*(1/(sqrt(mean(demet[4]**2))))*Rdz)
    Fsc_i=(1/((p_gamma_rel**3)*(p_beta_rel**2)))*(1/p_rest_eV)*(xEx/(mean(demet[0]**2)))
    Fsc_j=(1/((p_gamma_rel**3)*(p_beta_rel**2)))*(1/p_rest_eV)*(yEy/(mean(demet[2]**2)))
    Fsc_k=(1/((p_gamma_rel**3)*(p_beta_rel**2)))*(1/p_rest_eV)*(zEz/(mean(demet[4]**2)))

    print("Kya göre 1/f:",Fsc_i)

    l_sc1=0.3291/33
    ds=0.3291/33
    l_sc1=ds|
    Ltot+=l_sc1
    sc=np.array([[1, 0, 0, 0,0,0],
                 [ds*Fsc_i, 1, 0, 0,0,0],
                 [0, 0, 1, 0,0,0],
                 [0, 0, ds*Fsc_j, 1,0,0],
                 [0, 0, 0,0,1, 0],
                 [0, 0, 0,0,ds*Fsc_k, 1]])

```

Şekil 3.1: PyDEDA'da uzay yükü hesabı yapılan kısım-1

```

drift3=np.array([[1, l_sc1, 0, 0,0,0],
                 [0, 1, 0, 0,0,0],
                 [0, 0, 1, l_sc1,0,0],
                 [0, 0, 0, 1,0,0],
                 [0, 0, 0, 0,1,l_sc1],
                 [0,0,0,0,0,1]])

[x_sc,x_sc2,y_sc,y_sc2,z_sc,z_sc2]=demet
Transfer=dot(drift3, sc)
demet=dot(Transfer, demet)
print(Fsc_i, i)
demet=demet.astype(np.float)
print(Ltot)

```

Şekil 3.2: PyDEDA'da uzay yükü hesabı yapılan kısım-2

```

B1=0.1869 # Gauss in Tesla
Bro=p_beta_rel*p_tot_eV*1e-9*3.3355 #magnetic rigidity of proton
K1=B1/(2*Bro)
print("K1 value:", K1)

B2=0.19313 # Gauss in Tesla2
Bro=p_beta_rel*p_tot_eV*1e-9*3.3355 #magnetic rigidity of proton
K2=B2/(2*Bro)
print("K2 value:", K2)
parcacik= np.array([x,x2,y,y2,z_real,z2]) #parçacıkları ibsimudan alındığı

K=((q*N)/(2*pi*perm))*(1/((p_gamma_rel**3)*(p_beta_rel**2)))*(1/p_rest_eV) #los alamos beam perveance
print("beam perveance K in LANL formula:", K)

#k1=Kgradient*1.05
#k2=Kgradient*1.085

len1=0.1408501 #metre
drift1= np.array([[1,len1,0,0,0,0],
                 [0,1,0,0,0,0],
                 [0,0,1,len1,0,0],
                 [0,0,0,1,0,0],
                 [0,0,0,0,1,len1],
                 [0,0,0,0,0,1]])
drl=dot(drift1, parcacik)
x_rms_drl=(mean(drl[0]**2)-mean(drl[0])**2)**(1/2)
print("DR1 x_rms: ",x_rms_drl)
[x_drl,x2_drl,y_drl,y2_drl,z_drl,z2_drl]=drl

xp_rms_drl=(mean(drl[1]**2)-mean(drl[1])**2)**(1/2)
print("DR1 xp_rms: ",xp_rms_drl)

E_rms_drl=sqrt(mean(drl[0]**2)*mean(drl[1]**2)-(mean(drl[0]*drl[1]))**2)

E_norm_drl=p_beta_rel*p_gamma_rel*E_rms_drl #normalize emittance for p+ beam WHICH IS CONSERVED.

```

Şekil 3.3: PyDEDA'da solenoid matrisleri ve K değeri hesabı

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Şeyma Esen	Şeyma ESEN
Doğum Yeri	
Doğum Tarihi	
Uyruğu	<input checked="" type="checkbox"/> T.C. <input type="checkbox"/> Diğer:
Telefon	
E-Posta Adresi	
Web Adresi	http://

Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	Boğaziçi Üniversitesi
Fakülte	Eğitim Fakültesi
Bölümü	Fizik Öğretmenliği
Mezuniyet Yılı	2019

Yüksek Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Enstitü Adı	Fen Bilimleri
Fizik Anabilim Dalı	Fen Bilimleri
Yüksek Enerji ve Plazma Fiziği Programı	Yüksek Enerji ve Plazma Fiziği
Mezuniyet Tarihi	2021