

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

**GELECEK NESİL ÇEMBERSEL ELEKTRON POZİTRON ÇARPIŞTIRICI
(FCC- e^+e^-) ENJEKTÖR TESİSİ İÇİN ÖN-ENERJİ ÖTELEYİCİ
SİNKROTRONU TASARIMI**

Özgür ETİŞKEN

FİZİK ANABİLİM DALI

**ANKARA
2021**

Her hakkı saklıdır

ÖZET

Doktora Tezi

GELECEK NESİL ÇEMBERSEL ELEKTRON POZİTRON ÇARPIŞTIRICI (FCC- e^+e^-) ENJEKTÖR TESİSİ İÇİN ÖN-ENERJİ ÖTELEYİCİ SİNKROTRONU TASARIMI

Özgür ETİŞKEN

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Abbas Kenan ÇİFTÇİ

Eş Danışman: Dr. Yannis PAPAPHILIPPOU

Gelecek nesil çembersel elektron-pozitron çarpıştırıcı (FCC- e^+e^-) enjektör kompleksi, yüksek yoğunluklu e^+ ve e^- demetlerini üretmek ve hızlı tekrarlama frekansı ile çarpışma enerjisinde, çarpışma halkasına aktarmakla yükümlüdür. Demetin, ana-enerji öteleyici halkaya aktarılmasından önce olması planlanan ön-enerji öteleyici halkası için iki seçenek değerlendirilmektedir: Az miktarda güncellenmiş Süper Proton Sinkrotronu'nun (SPS) kullanılması ya da yeni bir çembersel hızlandırıcı tasarlanması. Bu çalışmanın amacı, var olan SPS hızlandırıcısının ön-enerji öteleyici olarak kullanılması için gerekliliklerin ve parametrelerin incelenmesi ve bu seçeneğe ek olarak alternatif ön-enerji öteleyici halkasının kavramsal tasarımının yapılmasıdır. Bu çalışma, temel parametrelerin belirlenmesi, demet optiği tasarımı, genel plan, magnet alan ve hizalama hatalarını kapsayacak şekilde tek parçacık lineer ve lineer olmayan demet dinamiği optimizasyonunu içermektedir. Buna ek olarak, uzay yükü ("space charge"), boyuna mikro-dalga kararsızlığı, enine mod bağlaşım kararsızlığı ("transverse mode coupling instability"), iyon etkileri ("ion effects"), elektron bulutu ("e-cloud"), demet-içi saçılımı ("intra-beam scattering") ve koherent sinkrotron ışınımı etkilerini dahil ederek yoğunluk eşik değer tahmini hesaplamaları da bu tezin kapsamı içerisindedir.

Şubat 2021, 125 sayfa

Anahtar Kelimeler: Demet optiği tasarımı, enerji öteleyici sinkrotronu, lepton çembersel hızlandırıcı, lineer olmayan demet dinamiği, magnet hizalama hataları, magnet alan hataları, dinamik aralık, kolektif etkiler, sinkrotron ışınımı, SPS, sönüm magneti, Robinson sönüm magneti.

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

PRE-BOOSTER RING DESIGNS OF THE FUTURE CIRCULAR COLLIDER (FCC- e^+e^-) INJECTOR COMPLEX

Özgür ETİŞKEN

Ankara University
Graduate School of Natural and Applied Science
Department of Physics

Supervisor: Prof. Dr. Abbas Kenan ÇİFTÇİ

Co-supervisor: Dr. Yannis PAPAPHILIPPOU

The Future Circular Collider (FCC) e^+e^- injector complex needs to produce and to transport a high-intensity e^+ and e^- beams at a fast repetition rate for topping up its collision energy. Two options have been considered as a pre-accelerator ring before the bunches are transferred to the high-energy booster: either using slightly modified Super Proton Synchrotron (SPS) or designing a new ring. The purpose of this study is to explore the needs and parameters of the existing SPS as pre-booster ring and to provide the conceptual design of an alternative accelerator ring. This study includes establishing the basic parameters, the optics design, layout, single particle linear, non-linear dynamics optimization, including magnetic and alignment errors for the pre-booster ring. In addition, an analytical estimation of intensity thresholds have been performed, studying the impact of: space charge (SC), longitudinal microwave instability (LMI), transverse mode coupling instability (TMCI), ion effects, electron cloud, intra-beam scattering (IBS) and coherent synchrotron radiation (CSR).

February 2021, 125 pages

Keywords: Optics design, booster ring, lepton ring, non-linear dynamics, alignment errors, field errors, multipole errors, dynamic aperture, collective effects, synchrotron radiation, the SPS, damping wiggler magnet, Robinson wiggler magnet.

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Sanırım akademik yaşamımın şimdiye kadar olan kısmına baktığımda en önemli dönüm noktalarından birkaçı şu şekilde sıralanabilir: Uzun yıllar evvel yolumun Ankara Üniversitesi ve şu anki üniversite tez danışmanım ile kesişmesi, CERN (Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi) ile ilk bağlantıyı kurmam ve CERN tez danışmanlarımla tanışmam, çalışmalarımı tam zamanlı olarak CERN’de yürütme fikrinin ilk defa aklımda yer ettiği Budapeşte’de katıldığım CERN hızlandırıcı okulu ve tabii ki ailemle birlikte nihayet bu hedefe ulaştığım gün. Böylece, belki de tekrarını yaşayamayacağım ve asla unutamayacağım yaklaşık 4 yıllık süreyi CERN’de değerlendirme fırsatı buldum.

2010 yılından beri tanıdığım ve tanıştığım günden beri gelişimimde büyük katkıları olan ve bu fırsatı yakalamamda büyük pay sahibi olan üniversite tez danışmanım sayın hocam Prof. Dr. Abbas Kenan ÇİFTÇİ’ye teşekkür ederim.

2015 yılında ilk defa ofisinde bilimsel tartışma fırsatı bulduğumda çok etkilendiğim ve her geçen gün kendisine ve bilgisine olan saygımın artarak devam ettiği CERN tez danışmanım Dr. Yannis PAPAPHILIPPOU’ya bana kattıkları için teşekkür ederim. Tanıştığımız ilk günden beri, kendisiyle önceleri aramızda 2500 km mesafeden çalışmaya başladığım ve daha sonra CERN’de karşı ofisinde çalışma fırsatı bulduğum, her ihtiyacım olduğunda yönlendirmeleri ve yardımlarıyla, benim için bir örnek bilim insanı modeli olmuştur.

Geçtiğim birkaç seneyi gözden geçirdiğimde birçok önemli an hatırlıyorum. Bunların en önemlilerinden biri yolumun Dr. Fanouria ANTONIOU ile kesişmesidir. Bu alanda öğrendiğim birçok şeyi kendisiyle beraber, onun yardımıyla öğrendiğimi söylemem asla yanlış olmayacaktır. Yalnızca bilimsel desteği ile değil arkadaşça yaklaşımı ile kendisiyle bilimsel ve hayata dair sohbetlerimizi asla unutmuyacağım. Kendisine minnettarım. Bendeki yeri her zaman çok özel olacaktır.

Dr. Frank ZIMMERMANN ile ilk görüşmemiz internet üzerinden bir toplantı vasıtasıyla oldu. Kendisi ile bir dizi fikir alışverişi yaptıktan sonra beni CERN’e bir hafta davet etmesi ve benimle bir hafta boyunca ilgilenmesi CERN’e ilk adımı atmamı sağlamış ve hayatımın farklı bir yöne yönelmesine neden olmuştur, kendisine tüm destekleri için teşekkür ederim.

Bu süreçte, çeşitli nedenlerle birçok defa umutsuzluğa düştüğüm oldu. Beni çok sefer, tanımaktan büyük mutluluk duyduğum bir hocamın hayata karşı umutlu bakışı bu umutsuzluk döngüsünden çıkarmıştır. Bu alanın Türkiye’de önünü açmak için çabalamış, engeller ve zorluklara göğüs germek zorunda kalmış, bu yolda çalışma arkadaşlarını ve dostlarını bir bilimsel toplantının arifesinde uçak kazasında kaybetmiş ama umudunu asla kaybetmemiş sayın Prof. Dr. Saleh SULTANSOY’a bana öğrettikleri için sonsuz teşekkür ederim.

Lisans, yüksek lisans ve doktora derslerinde aynı sınıfı paylaştığım dostum Dr. Cafer BAYAR’a ayrı yer açmak isterim. Yaklaşık 15 yıllık arkadaşlığımıza çok şeyler sığdırdık: Beraber sınavlara hazırlandık, aynı konferanslarda sunumlar verdik, beraber öğrendik ve hayat bize CERN’de bir süre aynı ofisi paylaşma fırsatı verdi. Ondan çok şey öğrendim ve her öğrendiğim bilgiyi kendisiyle paylaşma mutluluğunu yaşadım. Paylaşmak, tartışmak ve bunları yaparken öğrenmek kolay bulunabilir şeyler değil. Biz bunun kıymetini hep bildik. Umarım bundan sonraki senelerde de yollarımız akademik anlamda kesişir, kendisine bana kattıkları için sonsuz teşekkür ederim.

Bu alanın sayfa sınırlamasından dolayı uzun uzun teşekkür etme imkanı bulamadığım için bana kırılmayacaklarına inandığım, Ankara Üniversitesi’nden Prof. Dr. Orhan ÇAKIR, Dr. Kahraman ZENGİN, CERN’den Prof. Dr. Katsunabu OIDE, Dr. Bernard HOLZER, Dr. Hannes BARTOSIK, Dr. Stefania Parthena PAPADOPOULOU, Dr. Tobias TYDECKS, Dr. Bastian HAERER, Dr. Roberto KERSEVAN, Dr. Salim OĞUR, Dr. Andrea LATINA, Michail ZAMPETAKIS, Hikmet BURSALI, SLS’den (İsviçre Işınım Kaynağı Tesisi) Dr. Masamitsu AIBA, HZB’den (Helmutz Zentrum Berlin) Dr. Ji LI, Gazi Üniversitesi’nden Doç. Dr. Metin YILMAZ, TOBB Üniversitesi’nden Dr. Cihan AKSOP, ev sahibim ve arkadaşım Louis Bernard SECRET, CERN-ABP-HSI/INC birimine, FCC- e^+e^- enjektör toplantısı, FCC- e^+e^- demet optiği toplantısı, FCC enjektör çalışma toplantısı, CERN-ABP-HSI/INC birimi öğrenci toplantısı katılımcılarına, dostlarım Gökhan ŞENTÜRK, Halil ŞENOL, Burak DEMİR, bana tüm destek veren arkadaşlarım ve meslektaşlarıma teşekkür ederim.

Son olarak anneme (Hatice ETİŞKEN), babama (Özcan ETİŞKEN), kardeşlerime (Elif Şura ve Hazan ETİŞKEN), eşime (Gülşah ETİŞKEN) ve ikiz kızlarımıza (Ela ve Ruya ETİŞKEN) bana kattıkları ve destekleri için çok teşekkür ediyorum.

Özgür ETİŞKEN

Ankara, Şubat 2021

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAY SAYFASI	
ETİK	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ	1
1.1 Gelecek Nesil Çembersel Hızlandırıcı (FCC)	1
1.2 FCC- e^+e^- Enjektör Tesisi Genel Planı	3
1.3 Tezin Amacı	5
1.4 Giriş Demet Parametreleri, Tasarım Sınırlamaları ve Gereklilikleri	6
1.5 FCC- e^+e^- Enjeksiyon Planı	8
2. KURAMSAL TEMELLER	11
2.1 Çembersel Hızlandırıcı Tasarımı: Temel Gereklilikler ve Bilgiler	11
2.2 Demet Parametreleri	13
2.2.1 Tur başına enerji kaybı	13
2.2.2 Sönüm zamanı	16
2.2.3 Enerji yayılımı	18
2.2.4 Paketçik uzunluğu	19
2.2.5 Momentum sıkışıklık faktörü	20
2.2.6 Faz uzayı temsili ve emittans	21
2.2.7 Emittansın zamanla değişimi	22
2.2.8 Kromatiklik	26
2.2.9 Enerji kabulü	27
2.2.10 Sinkrotron ışınımı integralleri	28
2.2.11 Bir hücrenin faz ilerlemesi	31
2.3 Tasarımda Kullanılan Elemanlar ve Temel Hücre	32
2.4 Kolektif Etkiler	38
3. ALTERNATİF ÖN-ENERJİ ÖTELEYİCİ HALKA TASARIMI	40
3.1 Parametre Ölçeklendirmesi	40
3.2 Demet Optik Tasarımı ve Genel Plan	43

3.3	Emittans Optimizasyonu	48
3.4	Enerji Artışı Süresince Yatay Emittans	50
3.5	RF Voltajı ve Enerji Kabulü	52
3.6	Lineer Olmayan Demet Dinamiği Optimizasyonu	55
3.6.1	İdeal örgü	55
3.6.2	Hatalar: magnet hizalama ve alan hataları	59
3.7	Farklı Çıkış Enerjisi Tartışması	68
4.	SÜPER PROTON SİNKROTRON (SPS)	70
4.1	SPS Tasarımı ve Gerekli Değişimler	70
4.2	Sönüm Magnetleri	73
4.3	Robinson Sönüm Magnetleri	76
4.4	SPS için Çıkış Enerjisi Tartışması	79
4.5	RF Voltajı ve Enerji Kabulü	80
4.6	Faz İlerlemesi ve Dinamik Aralık	82
5.	KOLEKTİF ETKİLER	86
5.1	Demet-içi Saçılım (IBS)	87
5.2	Uzay Yüğü (SC)	91
5.3	Boyuna Mikro-Dalga Kararsızlığı (LMI)	92
5.4	Enine Mod Bağlaşım Kararsızlığı (TMCI)	93
5.5	İyon Etkileri	94
5.6	Elektron Bulutu	96
5.7	Koherent Sinkrotron Işınımı (CSR)	98
6.	SİNKROTRON İŞİNİMİ	101
7.	EMİTTANS KABULÜ	105
8.	SONUÇ VE TARTIŞMA	109
	KAYNAKLAR	112
	EK 1: Bazı parçacık hızlandırıcı fiziği terimlerinin Türkçeleştirilmesi	117
	ÖZGEÇMİŞ	121

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

A_{crit}	Kritik kütle
α_c	Momentum sıkışıklık faktörü
B	Manyetik alan
b	Vakum haznesi yarıçapı
$\beta_{x,y}$	Betatron fonksiyonu
$\gamma \cdot \epsilon$	Normalize emittans
γ	Rölativistik lorentz faktörü
C	Çevre uzunluğu
C_γ	Işınım sabiti
c	Işık hızı
c_q	Kuantum sabiti
$D(S)$	Dispersiyon fonksiyonu
D	Sönüm paylaşım numarası
\mathcal{D}	Difüzyon faktörü
$\delta E/E$	Enerji kabulü
E	Demet enerjisi
e	Elektron yükü
ϵ	Emittans
$\epsilon_{eq.}$	Denge emittansı
F	Dipol magnet oranı
ϕ	Faz ilerlemesi
ϕ_s	RF fazı
\mathcal{H}	Dispersiyon H fonksiyonu (“curly-H”)
h	Harmonik sayısı
θ	Dipol magnet bükme açısı
I	Akım
I_A	Alfven akımı
$I_{1,2,3,4,5}$	Sinkrotron ışınım integralleri
$J_{x,y,z}$	Sönüm paylaşım numarası
$K(s)$	Kuadrupol magnet gücü
k_B	Boltzman sabiti
Λ	Stupakov-Heifets parametresi
λ_w	Sönüm magnet periyodu
N_b	Paketçik popülasyonu

p	Vakum basıncı
P_{sr}	Sinkrotron ışınım gücü
$Q_{x,y}$	Betatron ayarı
r_e	Elektron yarıçapı
r_p	Proton yarıçapı
ρ	Bükme yarıçapı
ρ_{neutr}	Nötralizasyon yoğunluğu
ρ_{th}	Eşik yoğunluk değeri
$S(s)$	Sekstupol magnet gücü
σ	İletkenlik
σ_δ	Enerji yayılımı
$\sigma_{x,y}$	Demet boyutu
σ_z	Paketçik uzunluğu
$\tau_{x,y,z}$	Sönüm zamanı
U_0	Tur başına enerji kaybı
V_{rf}	RF voltajı
W_{rf}	RF frekansı
W_0	Dolanım frekansı
$\xi_{x,y,z}$	Kromatiklik
Z_0	Vakum empedansı

Kısaltmalar

ABP	Accelerators and Beam Physics
BE	Beams Department
BPM	Demet Görüntüleme Cihazı
CLIC	Kompakt Lineer Çarpıştırıcı
CSR	Koherent Sinkrotron Işınımı
DR	Sönümleme Halkası
DW	Sönüm (normal) Magneti
ESRF	Avrupa Sinkrotron Işınım Tesisi
FCC	Gelecek Nesil Çembersel Hızlandırıcı
FCC- e^+e^-	Gelecek Nesil pozitron-elektron Çembersel Hızlandırıcı
FMA	Frekans Haritası Analizi
GeV	Giga-elektron-volt
HSI	Hadron Synchrotron Incoherent Effects Section
ILC	Uluslararası Lineer Çarpıştırıcı

IBS	Demet-içi Saçılım
INC	Incoherent Effects Section
LDMX	Light Dark Matter Experiment
LEP	Büyük Elektron-Pozitron Çarpıştırıcı
LHC	Büyük Hadron Çarpıştırıcı
LMI	Boyuna Mikro-Dalga Kararsızlığı
MAD	Methodical Accelerator Design
MeV	Mega-elektron-volt
MV	Mega-volt
NAFF	Numerical Analysis of Fundamental Frequencies
PBR	Ön-enerji Öteleyici Halka
PDR	Ön-sönümlenme Halkası
PS	Proton Sinkrotron
RDT	Rezonans Sürücü Terimler
RW	Robinson Sönüm Magneti
SC	Uzay Yüğü
SLS	İsviçre Işınım Kaynağı Tesisi
SPS	Süper Proton Sinkrotron
TMCI	Enine Mod Bağlaşım Kararsızlığı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1	ILC (mavi), CLIC (yeşil), CEPC (siyah) ve FCC- e^+e^- (kırmızı) için kütle merkezi enerjisi ve karşılık gelen ışınlık değerleri (Abada vd. 2019a)	2
Şekil 1.2	FCC- e^+e^- enjektör kompleksinin şematik gösterimi (Abada vd. 2019a)	4
Şekil 1.3	SPS çembersel hızlandırıcısı ile birlikte FCC- e^+e^- enjektör planı şeması	9
Şekil 1.4	Alternatif ön-enerji öteleyici ile birlikte FCC- e^+e^- enjektör şeması . . .	9
Şekil 3.1	Ana-enerji öteleyici halkasının bükücü magnet manyetik alanının (B), enerji (E) ve dipol oranı (F) ile parametrizasyonu	41
Şekil 3.2	Alternatif ön-enerji öteleyici halkasının çıkış enerjisinde yatay emittans (üst-sol), tur başına enerji kaybı (üst-sağ), enerji yayılımı (sağ-alt) ve giriş enerjisinde (yatay) sönüm zamanının (sol-alt), çevre uzunluğu (C) ve hızlandırıcı dipol oranı (F) ile parametrizasyonu	43
Şekil 3.3	Alternatif ön-enerji öteleyici halkası tasarımında kullanılan temel FODO (dipol magnetli) hücre yapısı	44
Şekil 3.4	Alternatif ön-enerji öteleyici halkası genel planı	45
Şekil 3.5	Ön-enerji öteleyici halka tasarımında bir yay FODO hücresi için optik fonksiyonları. Yatay (siyah), düşey (kırmızı) ve yatay dispersiyon (yeşil) fonksiyonu.	46
Şekil 3.6	Ön-enerji öteleyici halkanın düz bölgesi için optik fonksiyonları. Yatay (siyah), düşey (kırmızı) ve yatay dispersiyon (yeşil) fonksiyonu	46
Şekil 3.7	Ön-enerji öteleyici halkanın tamamı için optik fonksiyonları. Yatay (siyah), düşey (kırmızı) ve yatay dispersiyon (yeşil) fonksiyonu	47
Şekil 3.8	Alternatif ön-enerji öteleyici tasarımının yatay emittansının, yatay ve düşey faz ilerlemesine bağlı olarak parametrizasyonu	48
Şekil 3.9	Alternatif ön-enerji öteleyici tasarımının kromatiklik (üst), momentum sıkışıklık faktörü (alt-sol) ve “tune shift with amplitude” parametrelerinin yatay ve düşey faz ilerlemesine bağlı parametrizasyonu	49
Şekil 3.10	Ön-enerji öteleyici halka tasarımında giriş enerjisinde farklı giriş emittans değerlerinde denge emittansına ulaşılmasının gösterimi	51
Şekil 3.11	Ön-enerji öteleyici halka tasarımında, enerji artışı ile birlikte farklı giriş emittans değerleri için yatay emittans parametresinin değişimi	52
Şekil 3.12	Alternatif ön-enerji öteleyici halka tasarımının enerji artışı ile birlikte tur başına enerji kaybı (U_0) (kırmızı), RF voltajı (V) (mavi) parametreleri	53
Şekil 3.13	Alternatif ön-enerji öteleyici halka tasarımının enerji artışı ile enerji yayılımı ($\sigma_s(\%)$) (sarı) ve enerji kabulü ($\delta E/E(\%)$) (yeşil)	54

Şekil 3.14	Alternatif ön-enerji öteleyici tasarımı için beşinci derece rezonans sürücü teriminin bazı Hamiltonian modları ((3,2,0,0), (2,1,1,1), (3,0,1,1), (1,0,2,2), (1,0,3,1), (2,1,2,0))	56
Şekil 3.15	Farklı tam sayılı betatron ayar değerlerine karşılık ayar haritası. Sistematik (kırmızı), sistematik olmayan (mavi), normal (düz çizgi) ve eğri (kesikli çizgi) rezonans çizgileri	58
Şekil 3.16	Enerji sapmasına ($\Delta P / P_0$) karşılık yatay (Q_x) (sol) ve düşey (Q_y) (sağ) betatron ayar değişimi	58
Şekil 3.17	Alternatif ön-enerji öteleyici halkası için ideal örgü (siyah), ideal momentumdan sapmış (“off-momentum”) parçacıklar (kırmızı ve mavi) için dinamik aralık hesabı. “Fringe field” dahil edilmiştir ve parçacık izleme simülasyonları 26000 tur için yapılmıştır. Hatalar dahil değildir .	59
Şekil 3.18	Alternatif ön-enerji öteleyici tasarımı için farklı elemanlara hatalar uygulandığındaki hassasiyet: Kapalı yörünge maks./rms. (üst-sol/sağ), betatron fonksiyonu (alt-sol) ve betatron ayarı (alt-sağ)	61
Şekil 3.19	Yatay (üst) ve düşey (alt) uzayda, kapalı yörünge bozulmasının hatalar uygulandıktan sonraki (mavi çizgi) ve düzeltme sonrasındaki (kırmızı) görünümü	62
Şekil 3.20	Alternatif ön-enerji öteleyici tasarım için tüm halkanın, hatalar uygulanmadan (üst-sol), hatalar uygulandıktan sonra (üst-sağ), kapalı yörünge düzeltilmesi sonrası (alt-sol) ve yeniden eşmele prosedürü sonrası (alt-sağ), yatay (siyah) ve düşey (kırmızı) betatron fonksiyonları, yatay (yeşil) ve düşey (mavi) dispersiyon fonksiyonları	63
Şekil 3.21	Alternatif ön-enerji öteleyici tasarımı için üçüncü dereye kadar rezonans diyagramında çalışma noktası. Sistematik (kırmızı), sistematik olmayan (mavi), normal (düz çizgi) ve eğri (kesikli çizgi) rezonans çizgileri. Siyah nokta çalışma noktasını gösterirken, yeşil noktalar +/- % 1.5’a kadar momentum sapması durumundaki ayar kaymasını gösterir	64
Şekil 3.22	Alternatif ön-enerji öteleyici halkası tasarımı için ideal örgü (sarı), ideal momentumdan sapmış (“off-momentum”) parçacıklar (yeşil ve magenta) ve hataların dahil edildiği durum için (kırmızı, mavi ve siyah) dinamik aralık hesabı. “Fringe field” dahil edilmiştir ve parçacık izleme simülasyonları 26000 tur için yapılmıştır	65

Şekil 3.23	Alternatif enerji öteleyici halka tasarımı için hatalar ve “fringe field” dahil edilerek, ideal momentumlu (orta), ideal momentumdan sapmış (% +1.5 (üst), % -1.5 (alt)) parçacıklar için difüzyon haritası (sol) ve frekans haritası (sağ)	66
Şekil 4.1	SPS hızlandırıcısı için iki farklı faz ilerlemesine karşılık gelen dispersiyon \mathcal{H}_x fonksiyonu: Mevcut değer (mavi çizgi, 90^0) ve optimum değer (kırmızı çizgi, 135^0). Ortalama değerler ise kesikli çizgi ile gösterilmiştir	70
Şekil 4.2	SPS hızlandırıcısı için yatay emittans değerinin farklı yatay ve düşey faz ilerlemesi ile parametrizasyonu	72
Şekil 4.3	Çıkış enerjisinde yatay emittans (üst-sol), tur başına enerji kaybı (üst-sağ), enerji yayılımı (alt-sağ) ve giriş enerjisindeki sönüm zamanı (alt-sol) parametrelerinin sönüm magnet uzunluğu (L_w) ve manyetik alanı (B_w) ile parametrizasyonu	74
Şekil 4.4	SPS hızlandırıcısının, bir süper-periyot için, normal sönüm ve Robinson sönüm magnetlerin yerini de gösterecek şekilde optik fonksiyonları. Yatay (siyah), düşey (kırmızı) betatron fonksiyonları ve yatay dispersiyon (yeşil) fonksiyonu	75
Şekil 4.5	Yatay emittans (ϵ_x) (mavi) ve enerji yayılımının (σ_δ) (kırmızı) Robinson sönüm magnetin etkisi ile değişen sönüm paylaşım numarası (D) ile parametrizasyonu. Bu hesaplama çıkış enerjisi için, sönüm magneti de hesaba katılarak yapılmıştır	77
Şekil 4.6	SPS hızlandırıcısının şematik gösterimi	78
Şekil 4.7	SPS hızlandırıcısının, normal sönüm ve Robinson sönüm magnetin bulunduğu hücrelerin optik fonksiyonları. Yatay (siyah), düşey (kırmızı) betatron fonksiyonları ve yatay dispersiyon (yeşil) fonksiyonu	79
Şekil 4.8	SPS hızlandırıcısı için enerji artışı ile birlikte tur başına enerji kaybı (U_0) (kırmızı) ve RF voltajı (V) (mavi) parametreleri	81
Şekil 4.9	SPS hızlandırıcısı için enerji artışı ile birlikte enerji yayılımı ($\sigma_s(\%)$) (sarı) ve enerji kabulü ($\delta E/E(\%)$) (yeşil) parametreleri	81
Şekil 4.10	SPS hızlandırıcısının yatay emittansın farklı yatay ve düşey faz ilerlemeleri ile parametrizasyonu	82
Şekil 4.11	Doğal kromatiklik (x/y, üst/orta) ve momentum sıkışıklık faktörü (alt) parametrelerinin faz ilerlemesine bağlı olarak değişimi	83

Şekil 4.12	Üçüncü dereceye kadar rezorans diyagramı (üst): sistematik (kırmızı), sistematik olmayan (mavi), normal (düz çizgi) ve eğri (kesikli çizgi) rezonans çizgileri. Siyah nokta, çalışma noktası, yeşil noktalar $\pm 1.0\%$ kadar momentum sapması durumundaki ayar kaymasını gösterir. İdeal ve ideal olmayan momentumdaki parçacıklar için dinamik aralık (alt)	84
Şekil 5.1	Touschek etkisi (sol) ve demet-içi saçılımda (sağ) momentum değişimi temsili (Wolski 2009)	88
Şekil 5.2	Alternatif ön-enerji öteleyici hızlandırıcı tasarımı için IBS ile (mavi kesikli çizgi) ve IBS dahil edilmeden (kırmızı sürekli çizgi) geometrik emittans değişimi	89
Şekil 5.3	Alternatif ön-enerji öteleyici hızlandırıcısı için enerji artışı boyunca yatay geometrik emittans davranışı (IBS dahil)	90
Şekil 5.4	Olası moleküllerin ve alternatif ön-enerji öteleyici tasarım için kritik kütle hesaplaması	95
Şekil 5.5	Olası moleküllerin ve SPS hızlandırıcısının bir süperperiyotu için kritik kütle hesaplaması	96
Şekil 6.1	SPS hızlandırıcısının, FCC- e^+e^- enjektöründe, dört farklı mod için, tt (mavi), Z (kırmızı), H (siyah), W (yeşil), giriş platosunu, enerji artışı, çıkış platosunu ve enerji sönümünü gösteren döngü uzunluğu	101
Şekil 6.2	FCC- e^+e^- enjektör tesisini de kapsayacak şekilde bazı merkezlerin sinkrotron ışınım gücü karşılaştırması	102
Şekil 6.3	İçten aşımli dairesel alüminyum disk ile dairesel helicoflex contası (solda). Doğrudan vakum kısmındaki SPS başlığına montelenmiş özel tasarım sinkrotron ışınım maskesi (sağda) (Kersevan R., Sözlü görüşme 2019)	103
Şekil 7.1	Alternatif ön-enerji öteleyici tasarımı için dinamik aralığın kabul edebildiği maksimum emittans değerleri için, bu değerlerin vakum haznesi açısından uygunluğunun değerlendirilmesi için enine kabul grafiği	105
Şekil 7.2	SPS hızlandırıcısının ön-enerji öteleyici halka olarak kullanılması durumunda, dinamik aralık değerinin izin verdiği maksimum emittans değerlerinin mekanik aralık için de kabul edilebildiğini kontrol etmek için enine kabulün (R_{acc}) mekanik genişlik (yatay/düşey, X_{mech}/Y_{mech}) ile karşılaştırılması	107

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1	6 GeV çıkış enerjili doğrusal hızlandırıcıdan ön-enerji öteleyici halkaya enjekte edilen demetin parametreleri	7
Çizelge 1.2	FCC- e^+e^- projesi enjektör tesisi için ön-enerji öteleyici halkası tasarım gereklilikleri	8
Çizelge 1.3	FCC- e^+e^- enjektör parametreleri	10
Çizelge 3.1	Dipol magnet parametreleri	47
Çizelge 3.2	Alternatif ön-enerji öteleyici tasarım için sistematik ve rastgele multipol hatalar	60
Çizelge 3.3	Alternatif ön-enerji öteleyici tasarımı hizalama ve ana alan hataları . .	61
Çizelge 3.4	Alternatif ön-enerji öteleyici tasarımı parametreleri	67
Çizelge 3.5	Alternatif ön-enerji öteleyici halkası için farklı çıkış enerjisi seçenekleri için demet parametrelerinin karşılaştırılması	68
Çizelge 4.1	SPS için mevcut durumda, üzerine hiçbir ekleme yapılmadan, yalnızca faz ilerlemesi optimizasyonu yapılarak elde edilen parametreler	73
Çizelge 4.2	Farklı çıkış enerjisi seçenekleri için SPS hızlandırıcısı parametrelerinin karşılaştırılması	80
Çizelge 4.3	FCC- e^+e^- projesi enjektör tesisi ön-enerji öteleyici hızlandırıcısı olarak SPS halkası parametreleri	85
Çizelge 5.1	Kolektif etki hesaplamaları için gerekli olan sabit değerler	86
Çizelge 5.2	Giriş platosunda, IBS dahil ederek emittans hesaplanmasında kullanılan demet parametreleri	88
Çizelge 5.3	FCC- e^+e^- enjektörü ön-enerji öteleyici hızlandırıcı opsiyonları için kolektif etki hesaplamaları	99
Çizelge 6.1	SPS'in LEP enjektörü, FCC- e^+e^- enjektörü olarak ve FCC- e^+e^- alternatif halkasının sinkrotron ışınımı (SI) parametreleri	104
Çizelge 7.1	SPS ve alternatif tasarımda, "on/off axis" enjeksiyon metotları için kabul edilebilir emittans değerleri	108

1. GİRİŞ

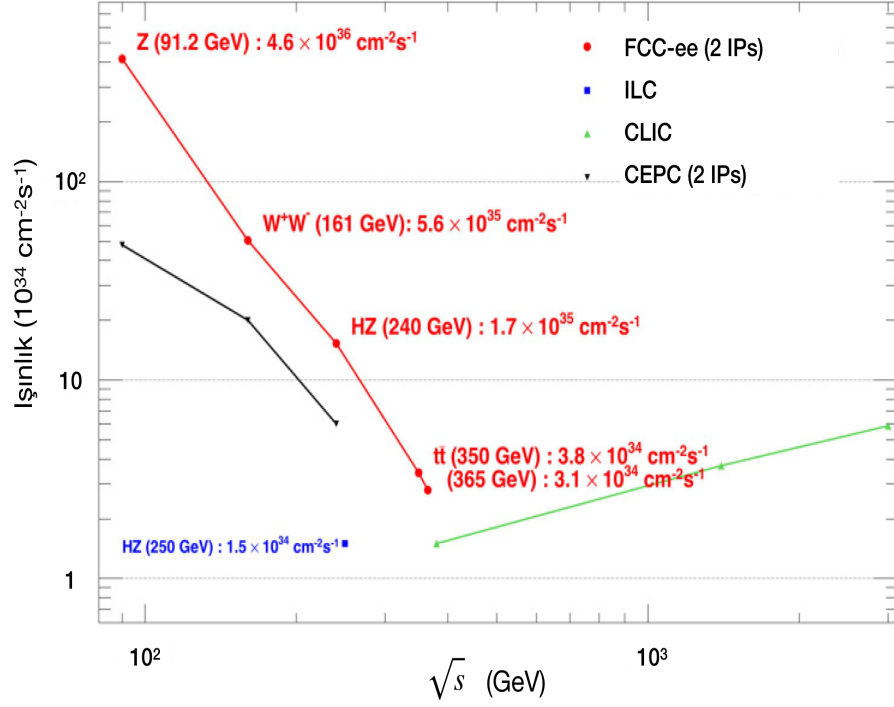
1.1 Gelecek Nesil Çembersel Hızlandırıcı (FCC)

Günümüzden 110 sene evvel, 1911 yılında, bilim insanı ve kendisine fırsat verdiği öğrencisi, Ernest Rutherford ve Ernest Marsden, tarafından alfa parçacıkları demetinin ince altın folyo üzerine yönlendirilmesi ile, o günün şartlarında yeni bir atom resminin çizildiği zamandan günümüze, benzer yöntemle çalışan birçok parçacık hızlandırıcı, farklı amaçlar için (yüksek enerji fiziği, nükleer fizik, ışınım kaynağı, medikal uygulamalar vb.) kullanılmıştır.

CERN, 1954 yılında kurulduktan sonra, 1957 yılında Senkrosinkrotron (“Synchrocyclotron”), 1959 yılında Proton Sinkrotronu (“Proton Synchrotron”, PS), 1976 yılında Süper Proton Sinkrotron (“Super Proton Synchrotron”, SPS), 1989 yılında Büyük elektron-pozitron Çarpıştırıcı (“Large electron-positron Collider”, LEP), 2008 yılında ise Büyük Hadron Çarpıştırıcı (“Large Hadron Collider”, LHC) başta olmak üzere birçok parçacık hızlandırıcısına ev sahipliği yaptı. Kritik bir aşama olan, Higgs parçacığının keşfi ile, parçacık fiziği, temel parçacıklar ve etkileşimleri açıklayan teori olan Standart Modeli tamamlayarak önemli bir noktaya ulaşmıştır. Ancak bu modelin cevapsız bıraktığı; karanlık maddenin doğası, evrendeki madde-antimadde asimetrisinin kaynağı, nötrino kütlesi varlığı ve hiyerarşisi gibi sorular bulunmaktadır. Bu soruların yanıtını bulmak ve Higgs parçacığını daha iyi anlamak için yüksek enerji parçacık hızlandırıcılarına ihtiyaç vardır.

FCC, elektron-pozitron ve proton-proton çarpıştırıcısının tamamlayıcısı olarak, bazı var olan altyapılarını da kullanarak LEP ve LHC’den edinilen tecrübe ve başarının üzerine inşaa edilmesi planlanmaktadır. FCC’nin iki aşamalı çalışma planı bulunmaktadır: Farklı kütle merkezi enerjilerinde (91.2 GeV, 160 GeV, 240 GeV, 365 GeV), yüksek kesinlikli ölçümler için temiz bir ortamda fazla sayıda Z^0 bozonu, $W^+ W^-$ çifti, üst kuark (t) ve Higgs üretimi olacak şekilde, elektron-pozitron çarpıştırmak (FCC- $e^+ e^-$), deney başına 5×10^{10} Higgs bozonu, 10^{13} W bozonu, 10^{12} üst kuark veri toplayacak şekilde, 100 TeV kütle merkezi enerjili proton çarpıştırmak (FCC-hh). Ayrıca FCC-hh, kuark-gluon plazma ve güçlü etkileşme çalışmaları üzerine ağır iyon çarpışmalarına da uygun olacaktır. Bunların yanı sıra, yeni fizik araştırmaları üzerine ek çalışmalar yapmak için 3.5 TeV kütle merkezi enerjili elektron-proton çarpıştırılması (FCC-eh) üzerine planlamalar da yapılmaktadır (Benedikt vd. 2020, Benedikt vd. 2019, Abada vd. 2019a).

Dünyada, benzer amaçlara hizmet etmek üzere tasarım çalışmaları devam eden, FCC- e^+e^- , Uluslararası Lineer Çarpıştırıcı (ILC), Kompakt Lineer Çarpıştırıcı (CLIC), Çembersel elektron-pozitron Çarpıştırıcı (CEPC) için ışınlık ("luminosity") ve kütle merkezi enerjileri şekil 1.1'de gösterilmektedir.



Şekil 1.1 ILC (mavi), CLIC (yeşil), CEPC (siyah) ve FCC- e^+e^- (kırmızı) için kütle merkezi enerjisi ve karşılık gelen ışınlık değerleri (Abada vd. 2019a)

FCC- e^+e^- projesi, çok yönlü inceleme olanakları sunacak şekilde planlanmaktadır (Abada vd. 2019a):

- Yüksek kesinlikli, elektrozayıf ve Higgs gözlemleri,
- Standart modelin fazla sayıdaki parametrelerinin daraltılması,
- Standart model ile ilgili küçük, ama önemli sapmaları açıklamak,
- Standart model ötesi yeni nadir süreç veya parçacıkları gözlemlemek, böylece temel keşif imkanını artırmak.

Gelecek nesil çembersel pozitron-elektron çarpıştırıcı kompleksinin, yaklaşık 100 km uzunluğunda çevreye sahip olacak çarpıştırıcı halkası ile birlikte, tasarım çalışmaları devam etmektedir. 2014 yılında proje başlangıç toplantısı yapılan projenin, nihai tasarıma giden yolda ilk aşama olan kavramsal tasarım süreci tamamlanmış ve projenin tüm kısımlarını içeren kavramsal tasarım raporu 2019 yılında yayımlanmıştır (Abada vd. 2019a, Abada vd. 2019b, Abada vd. 2019d, Abada vd. 2019c).

1.2 FCC- e^+e^- Enjektör Tesisi Genel Planı

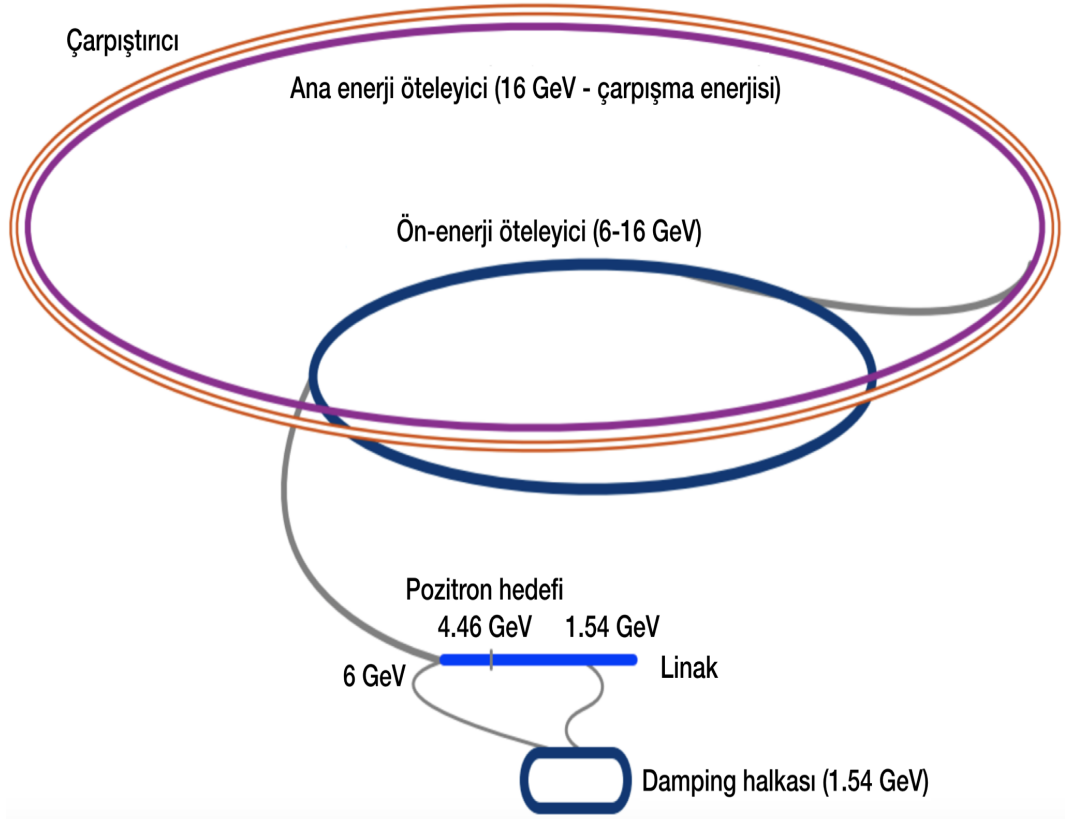
FCC- e^+e^- hızlandırıcı kompleksi tasarımı, farklı çarpışma enerjilerinde yüksek ışınlıklı demet sağlayacak şekilde planlanmakta ve Büyük Hadron Çarpıştırıcısında yürütülen araştırmaların genişletilmesini hedeflemektedir. FCC- e^+e^- , kütle merkezi enerjisi 91.2 ve 365 GeV arasında değişen dört farklı deney için yüksek ışınlıklı demet sağlayacak şekilde ve Z, W, Higgs ve üst (“top”) parçacık araştırmaları adına yüksek hassasiyetli araştırma tesisi olarak planlanmaktadır. Ayrıca FCC- e^+e^- , yasaklı bozunmaların, Standard Model’den küçük sapmaların veya keşfedilecek yeni parçacıkların işaret edebileceği “yeni fizik” araştırmaları için eşi görülmemiş hassasiyet taahhüt etmektedir (Abada vd. 2019a, Abada vd. 2019b, Abada vd. 2019d, Abada vd. 2019c, Oide vd. 2017).

FCC- e^+e^- projesinin planlanan enjektör kompleksi tasarımı temelde;

- kaynaktan çıkan demeti 6 GeV’e kadar hızlandıran bir e^+e^- hızlandırıcısını,
- demetin enerjisini 6 GeV enerjiden 16 GeV’e çıkararak (öteleyen) bir ön-enerji öteleyici (“pre-booster”) hızlandırıcısını,
- demeti nihai enerjiye çıkaracak çarpıştırıcı halka ile aynı tünele kurulması düşünülen bir ana-enerji öteleyici (“main booster”) hızlandırıcısını

kapsamaktadır (Ogur vd. 2018a, Etisken vd. 2019b, Haerer vd. 2018). Burada kısaca ana kısımları tanımlanan FCC- e^+e^- enjektör tesisinin şematik planı şekil 1.2’de gösterilmiştir.

Enjektör kompleksi içerisindeki ön-enerji öteleyici halkası tasarımı için CERN’de var olan SPS, öncelikli seçenek olarak değerlendirilmektedir. Ancak, SPS hızlandırıcısını,



Şekil 1.2 FCC- e^+e^- enjektör kompleksinin şematik gösterimi (Abada vd. 2019a)

FCC- e^+e^- enjektöründe ön-enerji öteleyici olarak kullanmanın, bu tezin ilerleyen kısımlarında irdelendiği üzere, makine müsaitliği, yüksek sinkrotron ışınımı, vakum haznesi sınırları ve RF gücü gereksinimleri gibi bir dizi zorluğu bulunmaktadır.

SPS hızlandırıcısı, ilk çalışmaya başladığı 1979 yılından itibaren, çarpıştırıcı halka ve enjektör tesisinin bir parçası olarak bazı deneylerde görev almıştır. W ve Z parçacıklarının CERN’de keşfi sonrası elde edilmiş Nobel ödülü dahil, ilk çalıştığı günden beri başarılı bir şekilde çalışmayı sürdürmüştür. SPS hızlandırıcısı, CERN’ün şu andaki tesis planında ise, LHC, NA61/SHINE (“the SPS Heavy Ion and Neutrino Experiment”) ve NA62 deneyi (“Kaon Factory”), COMPASS deneyi (“The Common Muon and Proton Apparatus for Structure and Spectroscopy”) için demet sağlamaktadır. Buna ek olarak, SPS hızlandırıcısının AWAKE (“The Advanced Proton Driven Plasma Wakefield Acceleration Experiment”) deneyi için demet sağlaması planlanmaktadır. Bunun yanı sıra, CLIC (“the Compact Linear Collider”) projesi (SPS hızlandırıcısını damping halkası test tesisi olarak kullanmak) ve LDMX (“the Light Dark Matter Experiment”) deneyleri için SPS’in

dahil olduğu bir takım planlar bulunmaktadır (sabit hedef deneyi için demet sağlayıcı olarak) (Anonymous 2020, Papaphilippou vd. 2013, Etisken vd. 2018, Akesson vd. 2019).

Ek olarak, SPS hızlandırıcısını FCC- e^+e^- enjektör kompleksinde kullanmak, mümkün olduğunca var olan yapının korunmak zorunda olunmasından (başka deneyler ve projeler için kullanılıyor ya da kullanılması planlanıyor olmasından dolayı) ve az miktarda revizyon yapılma imkanından dolayı ek sınırlamalar içerir. Bunun yanı sıra, tezin ilerleyen bölümlerinde tartışıldığı üzere, yapılacak revizyonlara rağmen, var olan vakum haznesi ve RF sisteminin, yüksek akım gereklilikleri ve yüksek tur başına enerji kaybından dolayı, FCC- e^+e^- projesinde kullanılmak için bazı zorluklar içerdiği görülmektedir. Tüm bu engellerin aşılabilir ölçekte olmasına rağmen, ön-enerji öteleyici çembersel hızlandırıcısı için ikinci bir seçeneğin de değerlendirilmesi akılcı bulunmuştur.

Sözü edilen konular değerlendirildiğinde, SPS hızlandırıcısının FCC- e^+e^- için doğal olarak düşünülmesinin (daha evvel hem lepton hızlandırıcısının bir parçası olarak kullanılması hem de halen çalışır durumda olmasından dolayı) yanı sıra yeni bir ön-enerji öteleyici tasarımının yapılmasına karar verilmiştir. Bu nedenle, yeni bir ön-enerji öteleyici halkası tasarımı var olan plana (SPS) alternatif olarak çalışılmaktadır (Papaphilippou vd. 2016, Ogur vd. 2018b). Bu çalışma, bundan sonra alternatif ön-enerji öteleyici halkası olarak anılacaktır. Projenin şu anki politikası gereği, her iki seçenek için de çalışmalar paralel şekilde devam ettirilmiştir.

1.3 Tezin Amacı

Bu tezde, FCC- e^+e^- projesi enjektör kompleksinin, 6 GeV enerji ile gelen demeti kabul edip, enerjisini 16 GeV'e çıkararak sonraki hızlandırıcıya aktaran ön-enerji öteleyici çembersel hızlandırıcı seçenekleri üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Tezin temel amacı, var olan SPS hızlandırıcısının bu amaç doğrultusunda uygunluğunun değerlendirilmesi, revizyon önerileri sunulması, uygulanması ve yeni bir alternatif ön-enerji öteleyici çembersel hızlandırıcı kavramsal tasarımının ortaya konulmasıdır.

Bu kapsamda, SPS ve alternatif çembersel hızlandırıcı için öncelikle tasarım gereklilikleri ve sınırları belirlenmiş, sonrasında aşağıda belirtilen çalışmalar yürütülmüştür.

Alternatif halka seçeneği için, ilk olarak parametre ölçeklendirmesi yapılmış ve genel hızlandırıcı planı oluşturulmuştur. Sonrasında, lineer ve lineer olmayan demet dinamiği optimizasyonu yapılmıştır. Rezorans sürücü terimler (“resonance driving terms”), betatron ayar haritası, frekans haritası analizi (“frequency map analysis”) gibi bazı ileri teknikler kullanılarak dinamik aralık hesabı yapılmıştır. Hizalama ve magnet alan hataları, ideal momentumdan sapmış (“off-momentum”) parçacıklara ek olarak dinamik aralık parçacık izleme (“tracking”) hesaplamalarına dahil edilmiştir. Bunun yanı sıra, parçacıkların birbirleri ve hızlandırıcı elemanları ile etkileşmelerinden ortaya çıkan kolektif hesap değerlendirmeleri yapılmıştır. Gerekli demet akımına ve tur başına enerji kaybına karşılık gelen sinkrotron ışınımı için vakum haznesinin temel gerekliliklerini belirlemek adına temel hesaplamalar yapılmıştır.

SPS hızlandırıcısının kullanılması seçeneği için ise, çalışmalar var olan hızlandırıcının temel parametrelerinin FCC- e^+e^- enjektör kompleksi enerji ölçeği için değerlendirilmesi ile başlamıştır. Buna göre, hızlandırıcının çıkış enerjisindeki yatay emittansı ve sönüm zamanı tasarım gerekliliklerinin şu anki hali ile sağlanamayacağı tespit edilmiştir. Böylece, temelde, SPS hızlandırıcısının ön-enerji öteleyici halkası gerekliliklerini sağlaması için iki öneride bulunulmuştur: Daha düşük emittansa (yatay) ve kısa sönüm zamanına ulaşmak için yatay yönde yeni (optimum) faz ilerlemesi belirlenmesi ve hızlandırıcıya sönüm magnetleri (normal sönüm magneti ve Robinson sönüm magneti) eklenmesi. Sonrasında, sönüm ve Robinson sönüm magnetlerinin analitik hesaplamalar ile karakteristikleri belirlenmiş ve simülasyon hesaplamaları yapılmıştır. Son olarak, dinamik aralık hesabı, kolektif etki değerlendirmesi, temel sinkrotron ışınımı hesaplaması yapılmıştır.

Bu tezde, demet dinamiği ve parçacık izleme (“particle tracking”) simülasyon çalışmaları MAD-X ve MAD-PTC (CERN 2020a, CERN 2020b) programları ile, analitik hesaplamalar ise Python ve Matlab (*Python* 2020, Little 2020) programları ile yapılmıştır.

1.4 Giriş Demet Parametreleri, Tasarım Sınırlamaları ve Gereklilikleri

Ön-enerji öteleyici çembersel hızlandırıcı, FCC- e^+e^- enjektör tesisi içerisinde, doğrusal hızlandırıcı ile ana-enerji öteleyici çembersel hızlandırıcısı arasında bulunmaktadır. Temel olarak, bu çembersel hızlandırıcının amacı, doğrusal hızlandırıcıdan gelen 6 GeV enerjili demeti, enine ve boyuna uzayda kabul etmek (hızlandırıcıya olabildiğince düşük demet

kaybı ile almak), demetin enerjisini 6 GeV'den 16 GeV'e çıkarmak ve ana enerji öteleyici için gerekli özelliklerde demeti göndermektir.

Doğrusal hızlandırıcıdan gelen ve ön-enerji öteleyici halkaya enjekte edilecek demetin özellikleri, bu halka için bir dizi gereklilik tanımlar. Çizelge 1.1'de, hızlandırıcıya giriş demet parametreleri gösterilmiştir.

Buna göre, doğrusal hızlandırıcı yatay ve düşey yönde emittans değeri 0.55 nm.rad, 0.11 nm.rad olacak şekilde tasarlanmıştır. Enerji yayılımı (rms.) % 0.5 ve demet uzunluğu ise 10 mm'dir (Ogur vd. 2018a, Ogur vd. 2018b, Ogur 2019, Etisken vd. 2019a). Demetin girişteki enerji yayılımı ile ilişkili olarak enerji kabul gerekliliği % 1.5 (3σ) şeklinde belirlenmiştir (ön-enerji öteleyici halkasının enjeksiyon kayıplarını en aza indirmek için). Çıkış enerjisindeki yatay emittans ve enerji yayılımı gerekliliği ise ana enerji öteleyici halkanın kabul şartlarından (dinamik aralık ve enerji kabulü) gelmektedir. Böylece, yatay emittans ve enerji yayılımı sırasıyla 5 nm·rad ve % 0.3 olarak belirlenmiştir. Bunun yanı sıra, giriş enerjisindeki yarım saniye civarındaki kısa giriş platosu, kısa sönüm zamanı gerekliliği (0.1 s) uygulamış olur.

Ek olarak, demetin ön-enerji öteleyici halkasına alınırken uygulanacak enjeksiyon yöntemi dinamik aralık gerekliliği için önemlidir. Ön-enerji öteleyici halkasının hem “on-axis” hem de “off-axis” yöntemi için yeterli dinamik aralığa sahip olacak şekilde ayarlanması hedeflenmiştir. Bu nedenle, halkanın giriş enerjisinde, enjeksiyon noktasında, dinamik aralığın yaklaşık 6.5 mm olması planlanmaktadır. Ek olarak, tur başına enerji kaybı ise RF parametrelerini makul ölçeklerde tutmak adına yaklaşık 30 MeV olarak belirlenmiştir.

Böylece, ana enerji öteleyici hızlandırıcısı, doğrusal hızlandırıcı ve enjeksiyon yöntemi

Çizelge 1.1 6 GeV çıkış enerjili doğrusal hızlandırıcıdan ön-enerji öteleyici halkaya enjekte edilen demetin parametreleri

Giriş parametreleri	Değer
Enerji [GeV]	6
Emittans [nm·rad] (h/v)	0.55/0.11
Enerji yayılımı [%] (rms.)	0.5
Paketçik uzunluğu [mm]	10 ^a

^a Doğrusal hızlandırıcı çıkış demet boyu 1 mm'dir. Ancak, ön-enerji öteleyici hızlandırıcıdan önce demet boyunun 10 mm'ye çıkarılması planlanmaktadır (Etisken vd. 2019a)

Çizelge 1.2 FCC- e^+e^- projesi enjektör tesisi için ön-enerji öteleyici halkası tasarım gereklilikleri

Parametreler	Değer
Giriş enerjisi [GeV]	6
Çıkış enerjisi [GeV]	16 ¹
Sönüm (“damping”) zamanı @giriş (enine) [s]	0.1
Geo. emittans @çıkış (yatay) [nm·rad]	5
Tur başına enerji kaybı @çıkış [MeV]	30
Enerji kabulü @giriş [%]	1.5 ^a
Dinamik aralık @giriş (enine) [mm]	6.5
Enerji yayılımı @çıkış [%]	0.3

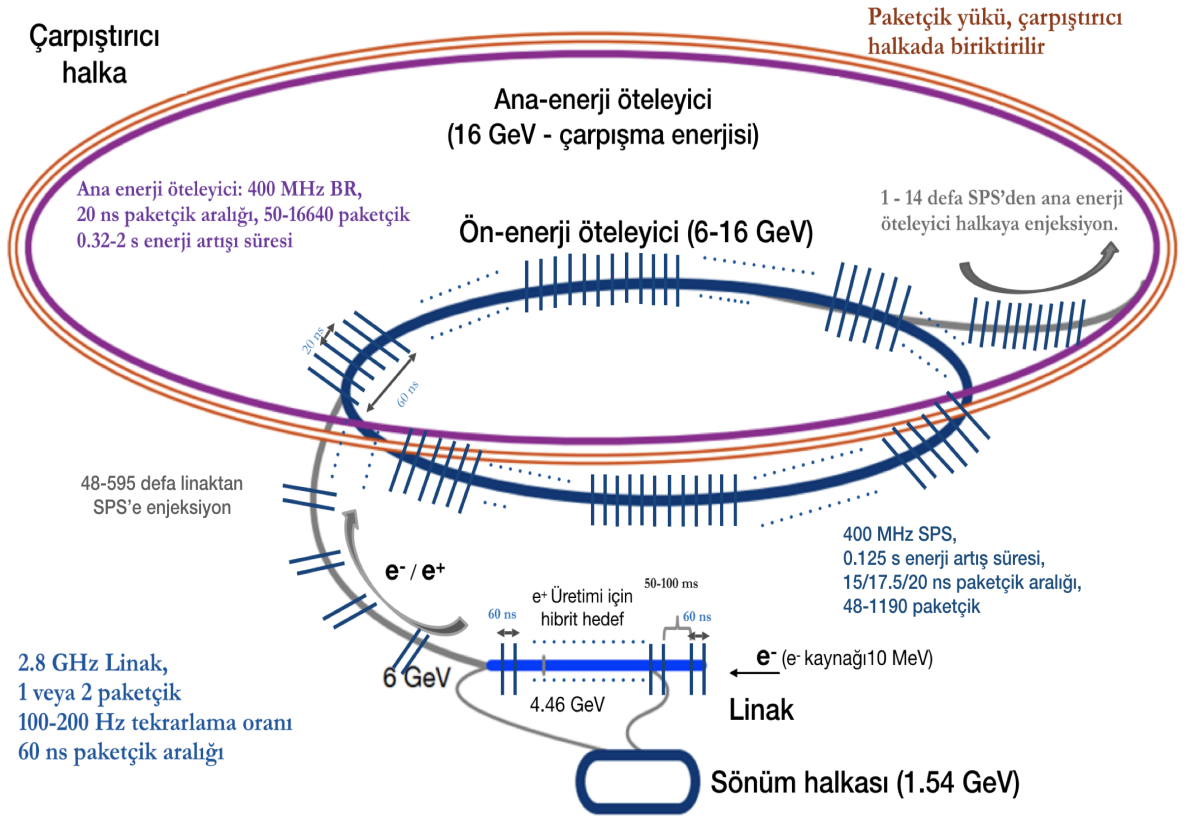
^a Tezin ilerleyen kısımlarında tartışıldığı üzere (bölüm 7.), var olan vakum haznesi genişliğinden gelen sınırdan dolayı, SPS için enerji kabulü % 1.0 olarak tanımlanmıştır

tarafından belirlenen gereklilikler çizelge 1.2’de özetlenmiştir. Bunun yanı sıra, var olan SPS’in olabildiğince yapısının korunması gerekliliğinden dolayı ek sınırlamalar vardır.

1.5 FCC- e^+e^- Enjeksiyon Planı

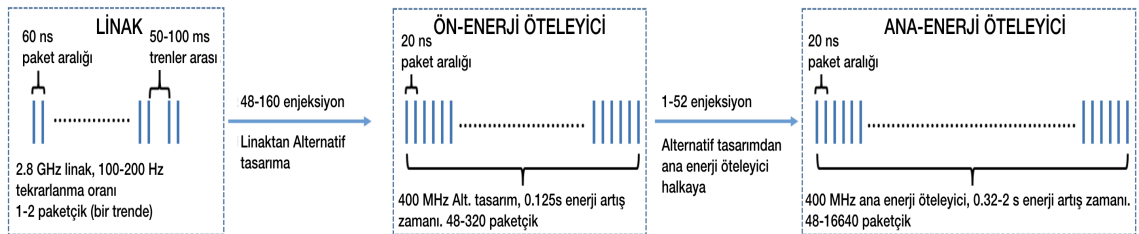
FCC- e^+e^- projesi tasarımı, yüksek ışınlıklı dört farklı enerjideki deneyler için demet sağlayacak şekilde planlanmaktadır: Z (45.6 GeV), WW (80 GeV), Higgs (120 GeV) ve tt (182 GeV) (Abada vd. 2019a). Çizelge 1.3, ön-enerji öteleyici olarak SPS ve alternatif halka tasarımını kapsayacak şekilde, enjeksiyon zinciri demet parametrelerini farklı modlar için özetlemektedir. Burada, paketçik sayısı ve paketçik yoğunluğu anlamında değerlendirildiğinde en zorlayıcı durum, özellikle SPS’in kapsadığı enjeksiyon zinciri için Z opsiyonu olarak görünür.

Hızlandırıcı içerisinde, parçacıklar yalnız olarak değil toplu halde hareket ettirilir. Birçok parçacık bir araya getirilerek bir paketçik oluşturulmuş olur. Peş peşe birçok paketçik hareketi ise bir demet hareketini tanımlamış olur. Yani demet, paketçik ya da paketçiklerden oluşur. Aynı zamanda birden fazla paketçik bir arada hareketi ile paketçik trenleri de oluşturulabilir. Bu sefer, bir demet hızlandırıcı içerisindeki trenlerden oluşmuş olur. Hızlandırıcının enjeksiyon yapısına bağlı olarak, küçükten büyüğe doğru parentez içerisinde İngilizce isimleri de belirtilerek şu şekildedir: Parçacık (“particle”), paketçik (“bunch”), paketçik treni (“bunch train”), demet (“beam”). Buna göre, FCC- e^+e^- enjektöründe, 2.13×10^{10} parçacıklı doğrusal hızlandırıcı paketçik yoğunluğu gerekmektedir ve bu doğrusal hızlandırıcı 1 veya 2 paketçik 100-200 Hz tekrarlama frekansı ile



Şekil 1.3 SPS çembersel hızlandırıcısı ile birlikte FCC- e^+e^- enjektör planı şeması

hızlandırılmalıdır. Doğrusal hızlandırıcı içerisinde hızlanan demetler 48/160 defa alternatif ön-enerji öteleyici halkasına enjekte edilmelidir. Bu sayı SPS'in enjektör tesisi içerisinde yer alması halinde 48/595 olmalıdır. Ön-enerji öteleyici hızlandırıcı seçeneklerinin 400 MHz'lik RF sistemlerine sahip olması planlanmaktadır. Ön-enerji öteleyici içerisindeki enerji artış zamanı ("ramping time") 0.125 s ve paketçikler arasındaki mesafe ("bunch spacing") 15/17.5/20 ns olarak planlanmaktadır. Dolayısıyla, ön-enerji öteleyici olarak alternatif halka ve SPS seçenekleri için toplam paketçik sayısı sırasıyla 48/320 ve



Şekil 1.4 Alternatif ön-enerji öteleyici ile birlikte FCC- e^+e^- enjektör şeması

48/1190 arasında değişmektedir.

Bu durumda, ana enerji öteleyici halkası için gerekli olan ve sayıları 48 ile 16640 arasında değişen paketçik sayısını doldurmak için ön-enerji öteleyici halkadan ana enerji öteleyici halkaya, alternatif halka tasarımı ve SPS için sırasıyla 1/52 ve 1/14 kez enjeksiyon yapılması gerekmektedir. Sırasıyla, SPS ve alternatif ön-enerji öteleyici hızlandırıcısını kapsayacak şekilde planlanan tesisin enjeksiyon planları şekil 1.3 ve şekil 1.4’de şematize edilmiştir.

Çizelge 1.3 FCC- e^+e^- enjektör parametreleri

Parametre [birim]	Z	W	H	tt
Demet enerjisi [GeV]	45.6	80	120	182.5
Dolum türü	Full/Top-up	Full/Top-up	Full/Top-up	Full/Top-up
Linak paketçik/atım	2	2	1	1
Linak tekrarlama oranı [Hz]	200	100	100	100
Paketçik popülas. ($\times 10^{10}$)	2.13/1.06	0.94/0.56	0.94/0.56	1.38/0.82
Lin. enjk. sys. (SPS ile)	594/595	500	328	48
Lin. enjk. sys. (Alt. halka ile)	160	50	164	48
SPS min. paket aralığı [ns]	15/17.5/20	22.5	67.5	450
Alt. halka min. pkt. aralığı [ns]	20	65	40	137.5
SPS devir sayısı	14	2	1	1
Alt. halka devir sayısı	52	20	2	1
SPS paketçik sayısı	1188/1190	1000	393	50
Alt. halka paketçik sys.	320	100	164	48
SPS devir zamanı [s]	3.3	5.4	3.6	0.8
Alt. halka devir zamanı [s]	1.15	0.85	1.99	0.83
SPS “duty factor”	0.76	0.49	0.23	0.05
Alt. tasarım “duty factor”	0.98	0.77	0.26	0.05
BR/çarpıştırıcı (paket sys.)	16640	2000	328	48
BR devir sayısı	10/1	20/1	20/1	20/1
Dolum zam. (SPS ile) [s]	958/95.9	520/26	277.2/13.9	227.7/11.4
Dolum zam. (Alt. halka ile) [s]	1224/122	722/38	291/14	227/11

2. KURAMSAL TEMELLER

Hızlandırıcı tasarımında ve bu tez özelinde kullanılan terimlerin, analitik ve nümerik hesaplamaların çok geniş bir teorik altyapısı vardır. Bu bölümde, çembersel bir hızlandırıcı tasarımının temel prensiplerinin tartışılması ve temel kavramların açıklanması hedeflenmektedir. Gerekli ileri düzey teorik açıklamalar, bu tezin konusu olan çembersel ön-enerji öteleyici hızlandırıcıların tasarımlarının açıklanması sırasında ilgili bölümlerde yapılmıştır.

2.1 Çembersel Hızlandırıcı Tasarımı: Temel Gereklilikler ve Bilgiler

Çembersel hızlandırıcıların kullanım amaçlarına göre çeşitli hedefleri vardır. Bu tezin konusu olan ön-enerji öteleyici halkası, FCC- e^+e^- hızlandırıcı projesi tesisinin enjektör kısmında yer alır ve tesis için esas amaç olan çarpıştırıcı halkasında yapılacak deneyler için gerekli olan demet parametrelerine ulaşılmasını sağlayan bir hızlandırıcı dizisinin parçasıdır. Burada söz konusu olan ön-enerji öteleyicisi ve genel manada bir enerji öteleyici halka tasarımının temelde 3 amacı bulunur:

- Kabul: Gelen demetin çembersel hızlandırıcı tarafından minimum kayıp ile kabul edilmesi. Burada kabul, enine ve boyuna kabul olarak iki şekilde incelenir. Gelen demetin emittans, enerji yayılımı, enerjisi gibi parametreler çembersel hızlandırıcının tasarım esaslarını etkiler.
- Sönümlenme ("damping"): Çembersel hızlandırıcıya gelen demet, enerji artışı olmadan evvel belirli bir süre bu hızlandırıcı içerisinde sabit enerji ile tutulur. Bu süreçte emittans, enerji yayılımı, demet uzunluğu gibi parametreler, giriş değerlerine bağlı olarak, bir miktar azalmaya (sönüme) uğrayarak halka tasarımının belirlediği denge ("equilibrium") değerlerine ulaşabilir.
- Enerji artırımı (ötelenmesi): Gelen demet, enerji öteleyici halkasına kabul edildikten sonra hedeflenen enerji artışı sağlanmalıdır. Burada demetin enerji öteleyici halkasından çıkış enerjisi, demetin aktarılacağı bir sonraki hızlandırıcı tarafından belirlenir. Enerji ölçeği ve sonraki hızlandırıcının talep ettiği temel özellikler, RF

parametreleri, magnet değerleri, tur başına enerji kaybı gibi birçok parametre ile ilişkilidir.

Yukarıda belirtilen temel amaçlara göre, bir hızlandırıcı tasarımında dikkat edilmesi ve takip edilmesi gereken temel aşamalar aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- Gereklilik ve sınırlamalar: Çembersel hızlandırıcıdan önceki doğrusal hızlandırıcıdan demet belirli özelliklerle çıkar. Çembersel hızlandırıcıdan sonraki demetin gideceği ana enerji öteleyici halkanın ise bazı kabul şartları bulunur. Bu nedenle, hızlandırıcının kompleksteki konumuna göre, ön ve arka kısmındaki hızlandırıcılar belirli şartlar ve sınırlar koyar. Bunun yanı sıra teknolojik sınırlamalar da olabilir. Tüm bu şartların belirlenmesi ve değerlendirilmesi önemlidir.
- Çembersel hızlandırıcı taslak planı: Gereklilik ve sınırlamalar belirlendikten sonra, demet emittansı, sönüm zamanı, enerji yayılımı, tur başına enerji kaybı vb. temel parametreler incelendikten sonra, bu şartları sağlayabilecek bir hızlandırıcının taslak planı belirlenebilir.
- Lineer tasarım: Tasarım sürecinin sonraki aşaması, bükücü ve odaklayıcı magnetler kullanılarak temel parametrelerin hesaplanması ve garanti edilmesi olan lineer tasarım aşamasıdır.
- Lineer olmayan tasarım: Lineer tasarımın tamamlanmasının ardından kromatikliğin düzeltilmesi için sekstupol magnetlerin temel tasarım örgüsüne eklenmesi ile başlayan ve detaylı hesaplamalar neticesinde makinenin çalışma noktasının ve uygun dinamik aralık hesabının sağlanması aşamasıdır. Halka tasarımının en zorlayıcı adımıdır.
- Hatalar: Bir önceki aşama ile beraber değerlendirilebilse de başlı başına önemli bir konudur. Bu aşamada magnet ana alan hataları, multipol hataları ve hizalama hataları, lineer olmayan örgü tasarımının üzerine eklenerek daha gerçekçi sonuçların elde edildiği aşamadır.
- Kolektif etkiler: Bu aşamada, bir paketçikte bulunan parçacıkların yüklerinden dolayı birbirini etkilemesi, paketçiklerin birbirlerini etkilemesi, hızlandırıcının kendisinin demete olan etkisi gibi etkilerin hesaba katılarak sınırların belirlendiği aşamadır.

- Sinkrotron ışınımı: Lepton hızlandırıcılarında değerlendirilmesi gereken önemli bir konudur. Bir tasarım yaparken tüm sınırları değerlendirilerek ve aynı zamanda maliyeti de uygun düzeylerde tutmak için göreceli küçük hızlandırıcılar tasarlanması hedeflenir. Bu da sinkrotron ışınımının yüksek olmasına sebep olur. Sinkrotron ışınımı hesaplamasının değerlendirilmesi ve temel önerilerin tasarımın henüz ön aşamalarında (kavramsal tasarım) yapılması önemlidir.

Bu tezin konusu olan FCC- e^+e^- projesi enjektör kompleksi için ön-enerji öteleyici halka tasarımında genel olarak bu sıralanan aşamalar takip edilmiştir. Bu aşamalar özellikle alternatif halka tasarımı için önemli olup, SPS için ise halihazırda bir makine olduğundan bazı aşamalar atlanmıştır.

2.2 Demet Parametreleri

Bu kısımda, hızlandırıcı fiziğinde ve bu tezde kullanılan bazı temel parametrelerinin tanımları verilmiştir. Ek olarak çembersel hızlandırıcı taslak planı olarak isimlendirilen aşama için gerekli olan bazı parametrelerin dipol doluluk oranı (“filling factor”, F), yani hızlandırıcının ne kadarının dipol magnet ile kaplı olduğunun ölçüsü ve hızlandırıcı çevre uzunluğu ile ilişkisi de kurulmuştur. Bu, özellikle tasarımın ilk aşamalarından olan ve genel çerçevede nasıl bir hızlandırıcıya ihtiyaç duyulacağını belirlemek için önemlidir.

2.2.1 Tur başına enerji kaybı

Klasik elektromanyetik teoriye göre yüklü bir parçacık ivmeli hareket sırasında radyasyon (ışınım) yayar. Parçacık hızlandırıcıları düşünüldüğünde, bu doğrusal bir hızlandırıcıda hızlanan parçacık veya çembersel hızlandırıcıdaki dipolün içerisinde geçen bir parçacık olabilir. Doğrusal hızlandırıcı içerisindeki rölativistik bir parçacık küçük bir hızlanmaya maruz kalır, dolayısıyla doğrusal hızlandırıcı içerisindeki sinkrotron ışınımı genelde ihmal edilir düzeydedir. Çembersel hızlandırıcılarda ise dipol magnetin içerisinde hareket eden parçacığın hızının yönündeki değişime karşılık gelen ivmeli hareketten kaynaklanan ışınım çok yüksek olabilir. Bu ışınım, demet özellikleri üzerinde önemli etkilere sahiptir (Wolski 2014b).

Çembersel hızlandırıcı içerisinde dolanan yüklü parçacık, özellikle elektron ve pozitronlar, dipol magnetlerdeki bükme etkisinden dolayı sinkrotron ışınımı yayarlar. Bu ışınımın özellikleri, istenen şekilde ayarlanıp yönlendirilerek temel ve uygulamalı araştırmalarda, teknoloji ve tıp alanı gibi konularda kullanılır. Ancak aynı zamanda sinkrotron ışınımı, çembersel hızlandırıcılarda, enerji kaybından dolayı hızlandırıcının limitlerini de belirler (Wiedemann 2015). Bu bölümde, bir çembersel hızlandırıcıda, sinkrotron ışınımından dolayı tur başına kaybedilen enerjinin pratik hesaplama sonucu gösterilmiştir. Tur başına enerji kaybının (“energy loss per turn”) hesaplanması için sinkrotron ışınım gücünün (“synchrotron radiation power”) bir dolanım boyunca integrali alınmalıdır (Wolski 2014b, Lee 2015):

$$U_0 = \oint P_\gamma dt \quad (2.1)$$

Burada P_γ sinkrotron ışınım gücü olarak bilinir ve aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$P_\gamma = \frac{2}{3} r_c m c^3 \frac{\beta^4 \gamma^4}{\rho^2} \quad (2.2)$$

$$P_\gamma = \frac{c C_\gamma E^4}{2\pi \rho^2} \quad (2.3)$$

Burada, c ışık hızı, ρ dipol bükme yarıçapı, E demet enerjisi ve C_γ bir sabit olup elektron için aşağıdaki gibidir:

$$C_\gamma = \frac{4\pi}{3} \frac{r_0}{(m.c^2)^3} = 1.41733 \times 10^{-14} \text{msW}/(\text{GeV})^4 = 8.8460 \times 10^{-5} \text{m}/(\text{GeV})^3 \quad (2.4)$$

Parçacık türleri bazında yorumlamak gerekirse, C_γ proton için, çok daha büyük kütleye

sahip olduğundan küçükken, elektron ise kütlesi küçük olmasından ötürü çok daha büyük değere ulaşır. Bu nedenle sinkrotron ışınımı elektron ve pozitron için çok daha önemli hale gelir (proton için $C_\gamma = 7.783 \times 10^{-18} m / (GeV)^3$) (Wolski 2014b).

O halde U_0 aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$U_0 = P_\gamma \frac{2\pi\rho}{\beta c} = \frac{4\pi}{3} r_c m c^2 \beta^3 \frac{\gamma^4}{\rho} \quad (2.5)$$

Bu eşitlik pratik birimlerle aşağıdaki gibi yazılır:

$$U_0 = C_\gamma \frac{E^4 [GeV]}{\rho [m]} \quad (2.6)$$

Hızlandırıcının tamamı düşünüldüğünde ne kadarının dipol ile dolu olduğunun ölçüsüne dipol doluluk oranı denir ve burada F ile gösterilmiştir (çembersel hızlandırıcılarda bu oran genelde 0.7 civarındadır). Bundan sonraki aşamada, denklem 2.6 dipol doluluk oranı (F) ve çevre uzunluğu (C) ile ilişkili şekilde yazmak için:

$$F = \frac{Nl}{C} \quad (2.7)$$

$$C = 2\pi\rho \quad (2.8)$$

Bu iki eşitliğe bakıldığında:

$$\rho = \frac{FC}{2\pi} \quad (2.9)$$

Bu formül göz önüne alınarak son adıma ulaşılr.

$$U_0 = 2\pi C\gamma \frac{E^4}{FC} \quad (2.10)$$

Böylece, önemli parametrelerden biri olan tur başına enerji kaybı (U_0), dipol doluluk oranı (F) ve çevre uzunluğu (C) ile ilişkilendirilmiş olur. Görüldüğü üzere, tur başına enerji kaybı, çevre uzunluğu ile ters, enerjinin dördüncü kuvveti ile doğru orantılıdır. Böylece, yüksek enerjilerde ve küçük çevreye sahip hızlandırıcılarda tur başına enerji kaybı yüksek sinkrotron ışıınımdan dolayı belli sınırlara sahip olur: Bu ışıınımin vakum haznesine çarpması, enerji kaybının telafisi için yüksek RF gücü gerekliliği. Teknik ve ekonomik limitlerden dolayı tur başına enerji kaybı, aslında demetin çıkabileceği maksimum enerjiyi de belirlemiş olur.

Tur başına enerji kaybı özellikle bu tezin konusu olan SPS halkasının FCC- e^+e^- enjektör tesisinde ön-enerji öteleyici olarak kullanılmasında, hızlandırıcının çıkış enerjisi için limit unsuru olmaktadır. Bununla ilgili tartışma, ilgili bölümde (bölüm 6.) yapılmıştır.

2.2.2 Sönüm zamanı

Hızlandırıcı içerisindeki parçacıkları bir arada tutmak için odaklama metotları kullanılır. Böylece, periyodik bir örgü içerisinde hareket eden kararlı parçacıklar hat boyunca, bir referans enerjisinde hareket eden referans parçacığının etrafında, bir salınım hareketi sergiler. Buna betatron salınımı (“betatron oscillations”) denir. Bu enine salınıma benzer olarak boyuna harekete bakıldığında da bir salınım vardır. Enerji sapması sıfır olan bir referans parçacığı düşünüldüğünde, bu parçacık tur başına kaybettiği enerjiyi telafi etmek için girdiği RF kavite içerisine ve ihtiyacı olan elektrik alanına her seferinde doğru zamanda girdiği düşünülür. Referans parçacığına göre pozitif yönde enerji sapmasına sahip

parçacık ise RF kaviteye girdiğinde geriye yönelme (enerji sapması anlamında) eğiliminde olur, daha az enerji kazanımı sağlayarak referans parçacığına yaklaşır. Bunun tersi durumda, negatif yönde enerji sapması olan, yani referans parçacığından daha geç RF kaviteye giren, parçacık daha fazla enerji kazanımı sağlayarak referans parçacığına yaklaşır. Böylelikle, pozitif yönde enerji sapması olan parçacık bir süre sonra negatif yönlü enerji sapmasına, negatif yönlü enerji sapmasına sahip olan ise pozitif yönlü enerji sapmasına sahip olur. Bu süreç, böylece boyuna düzlemde tekrarlanarak devam eder buna sinkrotron salınımı (“synchrotron oscillations”) denir.

Yukarıda bahsi geçen yüklü parçacıkların ivmeli hareketinden dolayı oluşan sinkrotron ışınımı, betatron salınımı ve sinkrotron salınımında daralmaya neden olur ve bu salınımlar için bir sönüm zamanı (“damping time”) söz konusu olur (Wolski 2014b). Daha sonra tartışılacak farklı etkilerden dolayı, bu sönüm sifıra ulaşmaz ve bir denge noktasında son bulur.

Burada, tur başına enerji kaybı için yapılabilecek benzer şekilde sönüm zamanını F ve C 'ye bağlı yazmak amaçlanmıştır (sönüm zamanı $(\tau_s)=1/\text{“damping coefficient}(\alpha_s)\text{”}$).

$$\alpha_s = \frac{P_\gamma}{2E} \quad (2.11)$$

$$P_\gamma = \frac{cc_\gamma E^4}{2\pi\rho^2} \quad (2.12)$$

Denklem 2.9, burada yerine konulduğunda aşağıdaki sonuç elde edilir.

$$P_\gamma = \frac{cc_\gamma E^4 4\pi^2}{\pi(FC)^2} \quad (2.13)$$

O halde α_s şu şekilde yazılır:

$$\alpha_s = \frac{\pi c E^4 c_\gamma}{(FC)^2} \frac{1}{2E} \quad (2.14)$$

$$\alpha_s = \frac{\pi c E^3 c_\gamma}{(FC)^2} \quad (2.15)$$

Bu durumda, sönüm zamanı aşağıdaki gibi F ve C 'ye bağlı şekilde elde edilir.

$$\tau_x = 1/\alpha_s = \frac{(FC)^2}{\pi c E^3 c_\gamma} \quad (2.16)$$

Buradan da görüleceği üzere, sönüm zamanı enerji ile ters orantılı, çevre uzunluğu ile doğru orantılıdır.

2.2.3 Enerji yayılımı

Sinkrotron ışınımı etkisinden dolayı (ve kuantum uyarım), demet içerisindeki parçacıkların enerji değişimi, demette bir denge enerji yayılımına (“equilibrium energy spread”) neden olur (Wiedemann 2015).

$$\sigma_s = \frac{c_q^{1/2} \gamma}{(2\rho J_E)^{1/2}} \quad (2.17)$$

Burada $J_E = 2$ (boyuna sönüm paylaşım oranı), $c_q = 3.83 \times 10^{-3}$ ve $\gamma = E/mc^2$.

Denklemler 2.9, burada yerine konduğunda aşağıdaki sonuç elde edilir.

$$\sigma_s^2 = \frac{c_q \gamma^2 \pi}{(FC)} \quad (2.18)$$

Buradan da görüldüğü üzere denge enerji yayılımı, demetin enerjisi ve çevresi ile (dipol bükme yarıçapı ile de denebilir) ilişkilidir.

2.2.4 Paketçik uzunluğu

Daha evvel de ifade edildiği üzere, çembersel hızlandırıcı içerisindeki bir paketçik içerisindeki parçacıklar farklı zamanlarda (enerji yayılımından dolayı) RF hızlandırma elemanına girer ve sinkrotron salınımı hareketi sergiler. Böylece, paketçik içerisindeki parçacıklar, bir referans noktası (parçacığı) civarında bu salınım hareketini sergilerken, paketçinin boyuna bir dağılımı olmasına neden olur. Bu boyuna dağılıma paketçik uzunluğu (“bunch length”) denir. Paketçik uzunluğu ile enerji yayılımı arasında sıkı bir ilişki bulunmaktadır (Wolski 2014b, Tecker 2020, Tecker 2016).

Çembersel hızlandırıcılarda, paketçik uzunluğunun hesaplanması, enerji yayılımı ile de ilişkili olarak aşağıdaki şekilde yapılabilir (Lee 2015, Antoniou 2012).

$$\sigma_s = \sigma_\delta C \left(\frac{\alpha_c E}{2\pi h (eV_0^2 - U_0^2)^{1/2}} \right)^{1/2} \quad (2.19)$$

Burada σ_s paketçik uzunluğu, σ_δ enerji yayılımı, h harmonik sayısı (RF frekansının izin verdiği toplam “bucket” sayısı), α_c momentum sıkışıklık faktörü, E demet enerjisi, V_0 RF voltajı, U_0 tur başına enerji kaybını temsil etmektedir.

2.2.5 Momentum sıkışıklık faktörü

Bu tezin konusu olan ön-enerji öteleyici halkasında olduğu gibi, enerji artışı ile birlikte parçacığın hızındaki değişim çok küçüktür, dolayısıyla ultra-relativistik parçacıklar için bu değişim, parçacığın takip edeceği yörünge üzerindeki etki çok küçüktür. Ancak, çembersel hızlandırıcı içerisinde dispersiyonun varlığında (dipol magnetin doğal sonucu), daha evvelde açıklandığı gibi referans parçacığına göre dipol magnete belirli enerji yayılımı ile giren parçacıklar farklı yörüngeler izler. Enerjiye bağımlı bu değişim, özellikle boyuna dinamikte önemli bir parametredir. Momentum yayılımına karşılık gelen parçacığın çembersel hızlandırıcı boyunca takip ettiği yörünge farkı, momentum sıkışıklık faktörü (“momentum compaction factor”) olarak isimlendirilir.

Yörünge farkı ve momentum sıkışıklık faktörü aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\Delta C = \left(\oint \frac{D(s)}{\rho} ds \right) \delta \quad (2.20)$$

$$\alpha_c = \frac{1}{C} \frac{d\Delta C}{d\delta} = \frac{1}{C} \oint \frac{D(s) ds}{\rho} \quad (2.21)$$

Burada D dispersiyon fonksiyonunu, ρ bükme yarıçapını ifade eder.

FODO hücresi için momentum sıkışıklık faktörü aşağıdaki gibi daha basit halde yazılabilir.

$$\alpha_c \approx \frac{(D_F + D_D)\theta}{2L} \approx \frac{\theta^2}{\sin \phi/2} \approx \frac{1}{Q_x^2} \quad (2.22)$$

Burada L yarı-FODO uzunluğunu θ dipol bükme açısını, ϕ FODO faz ilerlemesini ve Q_x betatron ayarını ifade eder (Lee 2015, Wolski 2014b, Wiedemann 2015, Bryant ve

Johnsen 1993).

2.2.6 Faz uzayı temsili ve emittans

Hızlandırıcı fiziğinde çok defa kullanılan faz uzayı (“phase space”) grafikleri, eksenleri farklı dinamik değişkenlerine karşılık gelen iki boyutlu uzay olarak tanımlanabilir (Wolski 2014b). Bir demet, faz uzayında dağılmış parçacıklardan oluşur. Parçacıkların, faz uzayında (konum-momentum) kapladıkları alana emittans (“emittance”) denir. Parçacıklar, hızlandırıcı içerisinde hareket ederken, faz uzayı şekli değişebilse de faz uzayı alanı sabit kalır. Faz uzayındaki parçacık yoğunluğu korunumu “Liouville” teoremi olarak bilinir. Bu teorem, korunumlu kuvvetler altında faz uzayındaki parçacık yoğunluğunun değişmediğini ifade eder. Bu teorem, parçacık demeti yoğunluğunun değişmeyeceğini ifade eder, ancak bu gerçekte böyle olmaz. Bu teoremden, parçacık yoğunluğunun sürekli bir dağılımda olduğu ve sinkrotron ışınımı yaymadığı varsayılır. Parçacıkların sürekli bir dağılım olarak ifade edilmesi durumunda, yüklerinden dolayı etkileşmesi görmezden gelinmiş olur. Gerçek bir demette ise parçacıkların birbirlerine fazlasıyla yaklaşmasından ötürü oluşan Coulomb kuvveti sürekli dağılım için hesaplanan kuvvetten daha büyük olur. Ayrıca özellikle leptonların çembersel bir hızlandırıcıda olması durumunda, sinkrotron ışınımı da hesaba katılmalıdır. “Liouville” teoremi enerji kaybı olan sistemlerde geçerli değildir. Sinkrotron ışınımı, demet içi saçılım gibi simplektif olmayan etkiler (Wolski 2014b, Conte ve MacKay 2008) altında emittans artık değişmez değildir (Wiedemann 2015, Wolski 2014b, Lee 2015, Conte ve MacKay 2008).

Emittans, hızlandırıcı içerisinde belirli sönümlenme ve uyarılma etkileri ile (genelde) bir kaç sönüm zamanı sonrasında denge emittansı denene değerine ulaşır. Bu kısımda, önce diğer parametrelerde olduğu gibi denge emittansın C (çevre) ve F (hızlandırıcının dipol oranı) ile ilişkili hali (yatay yönde) daha sonraki kısımlarda kullanılmak üzere çıkarılmış ve sonrasında çembersel bir hızlandırıcıda zamanla emittansın hangi etmenlere bağlı olarak değiştiğine bakılmıştır. Emittans basit hali ile şu şekilde yazılabilir (FODO hücresi için belirli yaklaşımlar ile) (Wolski 2013). Sinkrotron ışınım integrallerine bağlı daha genel hali ve tartışması ileleyen bölümlerde yapılmıştır:

$$\epsilon = F_{lattice} c_q \rho \theta^3 \quad (2.23)$$

Burada $\theta = \frac{2\pi}{N} = l/\rho$ (dipol magnet bükme açısı) ve $F_{lattice}$ parametresi örgüye bağlı bir değerdir (FODO için optimum emittansın elde edilebildiği faz ilerlemesinde bu değer 1.2'dir).

Burada denklem 2.7, 2.9 kullanılırsa aşağıdaki sonuç elde edilir.

$$\epsilon = F_{lattice} c q \gamma^2 \frac{(2\pi)^3 l^3}{F^3 C^3} \quad (2.24)$$

Böylece emittans, sönüm zamanı, enerji yayılımı ve tur başına enerji kaybı parametreleri F (hızlandırıcının dipol oranı) ve hızlandırıcının çevre uzunluğu ile ilişkili olarak ifade edilmiştir. Bunlar, bölüm 3.1'de hızlandırıcının taslak planını belirlemek için kullanılmıştır.

Denklem 2.24, halkanın belirlediği geometrik emittans değerini verir. Bir hızlandırıcıda emittansın zamana göre değişimi ise aşağıda detaylı olarak incelenmiştir.

2.2.7 Emittansın zamanla değişimi

Enerji öteleyici çembersel bir hızlandırıcıda emittans, şu üç etki altında belirlenir (kolektif etkiler düşünülmediğinde):

- adyabatik sönüm,
- sinkrotron ışınımı sönümü,
- kuantum uyarım.

Geometrik emittans, enerji artışı sırasında sabit değildir ve enerji ile azalır. Buna adyabatik sönüm denir. Bu esasında, faz uzayı düşünüldüğünde momentumdaki artışın faz uzayındaki azalmasına karşılık gelmesidir. Dolayısıyla, buna gerçek sönüm değil sanki-sönüm denir. Bu durumda, normalize emittans ($\gamma \cdot \epsilon$) enerji artışı boyunca sabit kalır (Wolski 2014b, Wiedemann 2015). Ancak bu durum, yalnızca sinkrotron ışınımının ihmal

edilebilir düzeylerde olduğu doğrusal hızlandırıcılarda (lepton ya da hadron) ya da çembersel (hadron) hızlandırıcılarında geçerli olan durumdur. Lepton çembersel hızlandırıcı söz konusu olduğunda, sinkrotron ışınımı da hesabın içerisine katılmalıdır. Bu durum, aşağıda tartışılmıştır.

Ancak öncesinde, yalnızca adyabatik sönüm altında, yani bir enerji artışı olduğunda, emittans (yatay) değişimi şu şekilde ifade edilir:

$$\frac{d\epsilon_x}{dt} = -\frac{1}{\gamma(t)} \frac{d\gamma(t)}{dt} \epsilon_x \quad (2.25)$$

Daha evvel de belirtildiği üzere, lepton hızlandırılan çembersel hızlandırıcılarında, ışınım (sinkrotron) hesaba katılmalıdır. Bu sinkrotron ışınımı etkisi emittans için bir sönüm anlamına gelirken aynı zamanda kuantum uyarımı da beraberinde getirmektedir. Sinkrotron ışınımı ile birlikte emittans azalmaya başlar. Sinkrotron ışınımı parçacığın kütesinin dördüncü kuvveti ile ters orantılı olduğundan lepton için önemli ancak hadron gibi ağır parçacıklar için genelde ihmal edilebilir düzeyde olur.

Emittansın, yalnızca sinkrotron sönümü altındaki değişimi ise aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\frac{d\epsilon_x(t)}{dt} = -\frac{2}{\tau_x(t)} \epsilon_x(t) \quad (2.26)$$

Bu etkiler altında, yukarıdaki denklemden görüleceği üzere, emittansın sinkrotron ışınımı altında zamanla sifıra gitmesi beklenir. Ancak sinkrotron ışınımı etkisi başka bir etkiyi, ancak bu sefer uyarım etkisini beraberinde getirir: Kuantum uyarılma. Salınan fotonlar, betatron ve sinkrotron salınımında uyarılmaya neden olur ve bu demet emittansını artırır. Bu etki sinkrotron ışınımı sonucu yayılan kuantalar halindeki fotonlar yüzünden olur.

Emittansın, yalnızca kuantum uyarımı altındaki değişimi aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\frac{d\epsilon_x}{dt} = +\frac{2}{\tau}\epsilon_{x,eq} \quad (2.27)$$

Bu üç etki beraber düşünüldüğünde demet emittansı, adyabatik sönüm ve sinkrotron ışınımı sönümü etkisiyle azalma eğilimindeyken, kuantum uyarım etkisiyle artma eğilimindedir. Sonuç olarak, emittans bu üç etki altında hızlandırıcı içerisinde bir denge durumu bulur. Emittansın bu üç etki altındaki değişimi aşağıdaki şekilde ifade edilir (Wiedemann 2015, Wolski 2014b, Lee 2015, Huang ve Ruth 1998, Cornelis ve Schmidt 1989).

$$\frac{d\epsilon}{dt} = \underbrace{-\frac{1}{\gamma(t)} \frac{d\gamma(t)}{dt} \epsilon}_1 - \underbrace{\frac{2}{\tau_x} \epsilon}_2 + \underbrace{\frac{2}{\tau_x} \epsilon_{eq}}_3 \quad (2.28)$$

1 → Adyabatik sönüm

2 → Sinkrotron ışınımı sönümü

3 → Kuantum uyarım

Burada, denklem 2.28 kullanılarak enerji artışının olmadığı durum için özel bir çözüm yapılacaktır. Enerji artışının olmaması, adyabatik sönüm etkisinin olmaması anlamına gelir. Denklem 2.28'deki ilk terim adyabatik sönüm terimidir ve enerji değişimi olmadığında sıfıra gider. Bu nedenle denklem, sinkrotron ışınımı ve kuantum uyarımı altında şu hale gelir:

$$\frac{d\epsilon}{dt} = -\frac{2}{\tau}\epsilon + \frac{2}{\tau}\epsilon_{eq} \quad (2.29)$$

Bu denklem, FCC- e^+e^- enjektör kompleksi, ön-enerji öteleyici seçenekleri için enerji artışı olmadığı giriş ve çıkış platolarında geçerlidir. Enerji artışının olduğu durumdaki çözüm daha karmaşıktır, ilerleyen kısımlarda bu durumda emittansın zamanla evrilmesi

de hesaplanmıştır.

Bu denklemin yazmanın diğere bir şekli:

$$\epsilon' + \frac{2}{\tau}\epsilon = \frac{2}{\tau}\epsilon_{eq} \quad (2.30)$$

Eğer her iki taraf $e^{\frac{2t}{\tau}}$ ile çarpılırsa:

$$\epsilon' e^{\frac{2t}{\tau}} + \frac{2}{\tau} e^{\frac{2t}{\tau}} \epsilon = \frac{2}{\tau} \epsilon_{eq} e^{\frac{2t}{\tau}} \quad (2.31)$$

Eşitliğin sol tarafı şu şekilde yazılabilir: $(\epsilon e^{\frac{2t}{\tau}})'$. Bu durumda eşitlik şu hali alır:

$$(\epsilon e^{\frac{2t}{\tau}})' = \frac{2}{\tau} \epsilon_{eq} e^{\frac{2t}{\tau}} \quad (2.32)$$

$t = 0$ 'dan $t = t$ 'ye integral alındığında:

$$\int_0^t (\epsilon e^{\frac{2t}{\tau}})' = \int_0^t \frac{2}{\tau} \epsilon_{eq} e^{\frac{2t}{\tau}} \quad (2.33)$$

$$\left(\epsilon e^{\frac{2t}{\tau}} \right) \Big|_0^t = \frac{2}{\tau} \epsilon_{eq} \left(\frac{\tau}{2} e^{\frac{2t}{\tau}} \right) \Big|_0^t \quad (2.34)$$

$$\epsilon(t)e^{\frac{2t}{\tau}} - \epsilon_0 e^{\frac{2.0}{\tau}} = \epsilon_{eq} e^{\frac{2t}{\tau}} - \epsilon_{eq} e^{\frac{2.0}{\tau}} \quad (2.35)$$

$$\epsilon(t)e^{\frac{2t}{\tau}} - \epsilon = \epsilon_{eq} e^{\frac{2t}{\tau}} - \epsilon_{eq} \quad (2.36)$$

Her iki taraf $e^{-\frac{2t}{\tau}}$ ile çarpıldığında:

$$\epsilon(t) = \epsilon_0 e^{-\frac{2t}{\tau}} + \epsilon_{eq} - \epsilon_{eq} \left(1 - e^{-\frac{2t}{\tau}}\right) \quad (2.37)$$

Son adım olarak bu denklem aşdğıdaki genel halini almış olur.

$$\epsilon(t) = \epsilon_0 e^{-\frac{2t}{\tau}} + \epsilon_{eq} \left(1 - e^{-\frac{2t}{\tau}}\right) \quad (2.38)$$

Bu, enerji artışının olmadığı, çembersel hızlandırıcı durumları için emittans değişimini veren genel bir formüldür. Enine emittans, giriş emittansından bağımsız olarak sinkrotron ışınımı ve kuantum uyarımı etkisiyle denge durumuna belirli bir süre sonra ulaşır. Bu süre bir kaç sönüm zamanına eşittir.

2.2.8 Kromatiklik

Demet enerjisine göre, parçacıklar üzerinde farklılık gösteren odaklama gücü etkisinin sonucunda farklı enerji sapmalarına sahip parçacıkların farklı odaklanmaları durumuna kromatiklik (“chromaticity”) denir. Farklı şekillerde tanımlanabilen bu olgunun temeli budur ve hızlandırıcı tasarım ve optimizasyonunda önemli bir parametredir.

Odaklayıcı magnetlerden oluşan periyodik ve tekrarlanmış bir hat düşünülduğünde, bir parçacığın odaklayıcı magnet tarafından saptırılması, kuadropol magnete girme yörüngesine, kuadropolün boyuna, manyetik alanına ve parçacığın enerjisine bağlıdır. Parçacık hareketinin parçacık enerjisine bağımlılığı örgü fonksiyonlarında değişimlere neden olur. Bu konuda ise, hücre başına betatron faz ilerlemesi değişir: Kromatiklik olarak tanımlanan şey de budur. Bu hücrelerin bir çembersel hızlandırıcı oluşturduğu durumda ise bu değişim betatron ayar değişimine neden olur. Eğer bu kromatiklik büyük ise, çok küçük enerji sapmasına sahip bir demet bile betatron ayar haritasındaki rezonans çizgilerine (tam ve yarım) ulaşabilir ve demet kayıplarına neden olur. Tezin ilerleyen bölümlerinde detaylandırıldığı üzere, parçacık dinamiği dipol ve kuadropol magnet hataları durumunda bu rezonans çizgileri, demet kararlılığını bozacak etkileri ortaya çıkarabilecek kritik öneme sahip olur. Buna ek olarak, bazı demet kararsızlıkları da yine kromatiklikle ilişkilidir. Burada özetlenen nedenlerden ötürü, çembersel hızlandırıcılarda bu kromatikliği kontrol etmek büyük önem arz eder (Wolski 2014b). İlerleyen konularda bu kromatiklik üzerine tartışma detaylandırılarak devam ettirilmiştir.

2.2.9 Enerji kabulü

Çembersel parçacık hızlandırıcılarında, sinkrotron ışınımından dolayı kaybolan enerjinin geri kazanımı ve gerekliyse enerji artırımı için RF kavitelemeler kullanılır. Daha evvelde bahsedildiği üzere parçacıklar, farklı enerjilerde RF kavitenin elektrik alanına girerek sinkrotron salınımı hareketi yapar. Tabii ki bu enerji sapmasının bir sınırı vardır. Halen kararlı sinkrotron salınımı yapabilen maksimum enerji sapmasının sınırına halkanın enerji kabulü (“energy acceptance”) denir. Bu boyuna demet dinamiğinde önemli bir parametre ve sınırlamadır. Bu terime enerji kabulü dendiği gibi, farklı kaynaklarda maksimum enerji sapması (“maximum energy deviation”), momentum kabulü (“momentum acceptance”), boyuna kabul (“longitudinal acceptance”), “bucket area” olarak da isimlendirilir (Wiedemann 2015, Lee 2015, Wolski 2014b, Bryant ve Johnsen 1993).

Buradan da anlaşılacağı üzere, parçacıklar RF voltajı ile ancak uygun şartlarda kararlı sinkrotron salınımı da yaparak enerji kazanabilir, buna da faz kararlılığı denir (“phase stability”). Bu kararlı ve kararsız bölgenin sınırı detaylı incelenerek kararlı bölge belirlenebilir. Bu sınıra seperatiks (“seperatix”) denir. Bu seperatiksler arasında kalan bölge kararlıdır ve buna “RF buckets” denir. Burada bahsi geçen boyuna faz uzayındaki toplam

“RF bucket” sayısına harmonik sayısı (“harmonic number”) denir. Harmonik sayısı aynı zamanda bir çembersel hızlandırıcıya yerleştirebilecek maksimum paketçik sayısı demektir. Harmonik sayısı, RF frekansı ile demet dolanım frekansının oranıyla bulunur (Wolski 2014b).

$$h = \frac{W_{rf}}{W_0} = \frac{W_{rf}}{c/C} \quad (2.39)$$

Burada c ışık hızı, C çevre uzunluğu, W_{rf} ise RF frekansdır.

Enerji kabulü ise aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

$$\left(\frac{\delta E}{E}\right)^2 = \pm \left[\frac{qV}{\pi h \alpha_c E_0} ((2 \cos \phi_s) + (2\phi_s - \pi) \sin \phi_s) \right] \quad (2.40)$$

Burada V RF voltajı, h harmonik sayısı, α_c momentum sıkışıklık faktörü (“momentum compaction factor”), E demetin enerjisi ve ϕ_s RF fazıdır:

$$\phi_s = \arcsin \left(\frac{U_0}{V_0} \right) \quad (2.41)$$

Genelde, bir hızlandırıcı tasarımında, momentum sıkışıklık faktörü, enerji, harmonik sayısı, tur başına enerji kaybı, diğer gerekliliklerden dolayı belirli değerlere sahip olduğundan, enerji kabulü RF voltajı ile ayarlanabilir.

2.2.10 Sinkrotron ışınımı integralleri

Bu kısmı tamamlamadan evvel sinkrotron ışınımı integrallerinden bahsetmek faydalı olacaktır. Daha evvel bahsedildiği üzere, emittans, enerji yayılımı, sönüm zamanı, tur başına

enerji kaybı gibi parametreler sinkrotron ışınımı ile değişmektedir. Bu parametrelerin daha evvel F ve C 'ye bağlı basit eşitlikleri daha sonra tezin ilgili kısmında (bölüm 3.1) kullanılmak üzere gösterildi. Burada daha genel ifadeler ile birlikte, bu parametrelerin özellikle SPS seçeneği için emittans ve Robinson sönüm magneti tartışmaları sırasında (Bölüm 4.) kullanılmak üzere ifade edilmiştir. Sinkrotron ışınımı durumunda bir demetin denge parametrelerini ifade etmek için beş integral ("synchrotron radiation integrals") kullanılır. Bu integraller ve bağlı demet özellikleri aşağıda özetlenmiştir (Lee 2015, Wolski 2014b).

$$\epsilon_0 = c_q \gamma^2 \frac{I_5}{J_x I_2} \quad (2.42)$$

$$\sigma_\delta^2 = c_q \gamma^2 \frac{I_3}{J_z I_2} \quad (2.43)$$

$$\tau_x = 2 \frac{E_0}{U_0 J_x} T_0 \quad (2.44)$$

$$U_0 = \frac{c_\gamma}{2\pi} E^4 I_2 \quad (2.45)$$

Burada, ϵ emittans, σ_δ enerji yayılımı, τ_x sönüm zamanı, U_0 tur başına enerji kaybı, T_0 dolanım periyodu ($\beta c / (2\pi R)$), $I_{1,2,3,4,5}$ ise sinkrotron ışınımı integralleridir:

$$I_1 = \oint \frac{\eta_x}{\rho} ds \quad (2.46)$$

$$I_2 = \oint \frac{1}{\rho^2} ds \quad (2.47)$$

$$I_3 = \oint \frac{1}{\rho^3} ds \quad (2.48)$$

$$I_4 = \oint \frac{\eta_x}{\rho^3} \left(\frac{1}{\rho^2} + 2k_1 \right) ds \quad (2.49)$$

$$I_5 = \oint \frac{\mathcal{H}_x}{\rho^3} ds \quad (2.50)$$

Burada, η dispersiyon, ρ dipol bükme yarıçapı, k_1 dipol alanı içerisindeki kuadrupol gradyenidir. \mathcal{H}_x fonksiyonu şu şekilde ifade edilir:

$$\mathcal{H}_x = \gamma_x \eta_x^2 + 2\alpha_x \eta_x \eta_{px} + \beta_x \eta_{px}^2 \quad (2.51)$$

Burada, α , β , γ "twiss" parametreleridir.

Ayrıca J_x , J_y ve J_z sönüm paylaşım numarası olarak anılır ve şu şekilde ifade edilir.

$$J_x = 1 - D, J_y = 1, J_z = 2 + D \quad (2.52)$$

Burada, $D = \frac{I_4}{I_2}$ şeklindedir.

Sönüm paylaşım sayılarının toplamı, örgü tasarımıdan bağımsızdır ve şu şartı sağlar:

$$J_x + J_y + J_z = 4 \quad (2.53)$$

Buna Robinson teoremi denir (Robinson 1958). Robinson teoremine göre, çembersel bir hızlandırıcıda sinkrotron ışınımından kaynaklı toplam sönüm sabit iken, farklı yönlerdeki sönümler arasında değişiklikler olabilir. Bu konu Robinson sönüm magneti tartışılırken detaylandırılmıştır (Bölüm 4.).

2.2.11 Bir hücrenin faz ilerlemesi

Faz ilerlemesi (“phase advance”) ile emittans, kromatiklik, enerji yayılımı ve momentum sıkışıklık faktörü (“momentum compaction factor”) gibi parametreler arasında sıkı bir ilişki vardır. Hızlandırıcı tasarımının temel aşamalarından birisi tüm bu değerler ve gereksinimleri göz önüne alındığında en optimum noktayı seçmektir.

Faz ilerlemesi optimizasyonu, genellikle bir tur başına tek bir hücrenin faz ilerlemesi taranırken bunlara karşılık gelen önemli parametrelerin değerlendirilmesi ile yapılır. Burada bir hücrenin faz ilerlemesi ile halkanın betatron ayarı arasındaki ilişki aşağıdaki gibidir (Lee 2015).

$$Q_{x,y} = \frac{P \times \phi}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \int_s^{s+C} \frac{ds}{\beta_{x,y}(s)} \quad (2.54)$$

Burada, ϕ faz ilerlemesini, P ise hücre sayısını ifade eder.

Betatron ayarı, bir turdaki betatron salınımı sayısı olarak ifade edilir. Betatron ayarı, hızlandırıcının çalışma noktası olarak isimlendirilir ve lineer olmayan etkiler göz önüne alınarak ince ayar yapılarak son halini alması önemlidir.

2.3 Tasarımda Kullanılan Elemanlar ve Temel Hücre

Hızlandırıcı tesisleri amaçlarına göre farklılık göstermekle beraber birçok alt-yapının bir araya gelmesiyle oluşur. Bunlardan bazıları: Kaynak, doğrusal hızlandırıcı, ön-enerji öteleyici, transfer hattı, depolama halkası ve çarpıştırıcı halkadır. Demet, kaynakta oluşturulduktan sonra yüksek enerjilere çıkması için bir takım hızlandırıcı zincirinin içerisinde alınır (Lee 2015).

Parçacık hızlandırıcılarında, parçacığı hızlandırıcı içerisinde yönlendirmek, odaklamak, kromatikliği düzeltmek, hızlandırmak, hataları tespit etmek, hataları düzeltmek gibi bir takım gereklilikler için çeşitli elektromanyetik elemanlar kullanılmaktadır. Bu teze konu olan çalışmada kullanılan elemanlar aşağıdaki gibidir:

- Dipol/bükücü ("dipole, bending") magnet
- Kaudrupol/odaklayıcı ("quadrupole, focusing magnet") magnet
- Sekstupol ("sextupole") magnet
- RF hızlandırma elemanı
- Demet görüntüleme cihazı ("beam position monitor, BPM")
- Korrektör/düzeltilici magnet ("corrector magnet")
- Sönüm magneti
- Robinson sönüm magneti

Burada belirtilen elemanlar, demet parametrelerini belirleyen ve parçacıkları gereklilik ve sınırlar çerçevesinde hızlandıran öğelerdir. Hızlandırıcılarda, demet kayıplarını önlemek ve istenen parametrelere ulaşmak için dikkatli hesaplamalar sonucunda bir magnet dizisi oluşturulur. Hızlandırıcılarda kullanılan magnetler uyguladıkları alanlara ve etkilerine göre sınıflandırılır. Yönlendirme ve yörünge kontrolü için iki kutuplu bükücü magnetler, odaklama ve demet boyutu için dört kutuplu odaklayıcı magnetler, kromatikliği kontrol etmek için altı kutuplu sekstupol veya daha yüksek kutuplu magnetler kullanılır (Lee 2015).

Dipol magnetler, yüklü parçacıkları istenen yörüngede hareket ettirebilmek için kullanılır. Dipol magnetin bükme açısı ve manyetik alanı sırasıyla aşağıdaki gibi verilir:

$$\theta = \frac{e}{P_0} \int_{s_1}^{s_2} B dl \quad (2.55)$$

$$\oint B \cdot dl = 2\pi \frac{P_0}{e} = 2\pi B \rho \quad (2.56)$$

Burada P_0 , B manyetik alanlı dipol magnetin içinden geçen e yüklü parçacığın momentumu, ρ bükme yarıçapıdır.

Denklem 2.55 ve denklem 2.56'dan anlaşıldığı üzere, magnetin manyetik alan ve bükme açısı, demetin enerjisine göre belirlenir. Bir parçacık, bükücü magnetin etkisi ile, hız, enerji ve manyetik alana göre tanımlanabilen bir referans yörüngeyi takip eder. Eğer bir parçacığın enerjisi referans enerjisinden farklı ise, yani bir enerji sapması var ise, parçacık referans yörüngesinden enerji sapmasına bağlı olarak farklı bir yörüngede hareket eder. Referans yörüngesinden farklı olan bu sapma dispersiyon olarak tanımlanır.

Parçacık hızlandırıcılarında odaklayıcı magnetlerin görevi, enine odaklama uygulayarak demet boyunu kontrol etmektir. Odaklayıcı magnetin manyetik alanı:

$$\vec{B} = B_1(y\hat{x} + x\hat{y}) \quad (2.57)$$

Burada \hat{x} ve \hat{y} , sırasıyla yatay ve düşey yönleri ifade eder.

Odaklayıcı magnetler dört kutupludur ve merkez noktasında manyetik alan sıfırdır. Yani, tam magnetin ortasından geçen parçacık hiç bir kuvvet hissetmezken, merkezden sapsmış (\hat{x}, \hat{y}) şekilde olan parçacık sapmanın boyutu ve yönüne bağlı olarak magnetik alan etkisi hisseder. Merkezden yatay ve düşey yönde sapsmış e elektrik yüklü, V hızı ile hareket

eden parçacık için Lorentz kuvveti aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$(\vec{F}) = evB_1\hat{s} \times (y\hat{x} + x\hat{y}) = -evB_1y\hat{y} + evB_1x\hat{x} \quad (2.58)$$

Hareket denklemi yazıldığında:

$$\frac{1}{v^2} \frac{d^2x}{dt^2} = \frac{eB_1}{\gamma m v} x \quad (2.59)$$

$$\frac{1}{v^2} \frac{d^2y}{dt^2} = -\frac{eB_1}{\gamma m v} y \quad (2.60)$$

Bu nedenle, yatay yönde odaklayıcı etki gösteren bir kuadrupol, düşey yönde dağıtıcı etki gösterir. Bunun tersi de doğrudur; yani düşey yönde odaklayıcı etki gösteren bir kuadrupol yatay yönde dağıtıcı etki gösterir. Yaygın kullanıma göre, yatay odaklayıcı magnete F-tipi kuadrupol, düşey odaklayıcı magnet D-tipi kuadrupol denir. Bir hızlandırıcı tasarımında, tek tip bir kuadrupol kullanılması durumunda, parçacıklar bir yönde odaklanırken diğer yönde dağılma etkisi gösterir. Ancak bu iki tip kuadrupolin birbiri ardına kullanılmasıyla her iki yönde odaklama sağlamak mümkündür. Bir F-tipi ve bir D-tipi kuadrupol magnetler belli uzaklıklarla yerleştirilir ve aynı tipte kuadrupol magnetler aynı gradyene sahip olacak şekilde tekrarlanırsa bu yapı periyodik bir yapı olmuş olur. Kuadrupol magnet çiftleri ve aralarındaki boşluk ile oluşan bu yapıya FODO hücre denir. Burada F, F-tipi odaklayıcı magneti, D, D-tipi odaklayıcı magneti, O ise magnetler arasındaki boşluğu temsil eder (Lee 2015, Wolski 2014b, Bryant ve Johnsen 1993).

FODO hücresi yalnızca kuadrupol magnetlerden oluşabileceği gibi kuadrupol magnetlerin arasına bükücü magnetlerin yerleştirilmesiyle de kullanılabilir. Düşük emittans elde edilmesi gereken veya fazla sayıda manyetik eklenti aracı (“insertion device”) konulmasının gerekli olması gibi özel talepleri olan tasarımlarda FODO hücreden farklı yapılar

kullanılır. Bu tezin konusu her iki ön-enerji öteleyici halkanın tasarımı FODO hücresi üzerine kurulu olduğundan bu yapıların detaylarına girilmeyecektir.

Odaklayıcı magnetler yatay ve düşey olarak parçacıklara odaklayıcı etki verecek şekilde yerleştirilir. Ancak odaklayıcı magnetlerin odaklaması, gelen parçacıkların momentumuna bağlı olarak farklı noktalara gerçekleşir. Bu da demetin yayılmasına neden olur ve odaklayıcı etki tarafından belirlenen betatron ayarı kaymasına neden olur. Bu kromatik etkinin kontrol edilebilmesi, çembersel hızlandırıcılarda iki nedenle çok önemlidir: Ayar kayması sonucu rezonans etkilerinden dolayı demetin kaybedilmesi ve “head-tail instability” tarafından demet kayıplarının önlenmesi (Wiedemann 2015).

Dipol ve kuadrupol magnetlerden enerji sapması sonucunda gelen kromatik etkilere doğal kromatiklik (“natural chromaticity”, lineer kromatiklik de denir) denir. Yüksek dereceli alanların bileşenlerinin ortaya çıkardıkları kromatik etkiler bazı durumlarda (örneğin çok güçlü sekstupol kullanımlarında) lineer olmayan kromatiklik de önemli hale gelebilir.

Yukarıda bahsedildiği üzere enerji sapmasının olduğu durumlarda dipol magnetlerden geçen parçacık farklı yörüngeleri takip eder. Bu aslında farklı enerjilerdeki parçacıkları belirlemiş olur. Böylece odaklayıcı magnetin hemen arkasına konacak özel sekstupol magnetler vasıtasıyla farklı enerjilerde odaklayıcı magnetten farklı odaklamalarla çıkan parçacıklara farklı etkiler ederek aynı noktaya yönlendirilir. Kuadrupolde, yüksek enerjili parçacıklar ideal parçacıktan (referans enerjili) daha az, düşük enerjili parçacık daha fazla odaklamaya tutulur. Dolayısıyla yüksek enerjili parçacıklar için odaklama etkisi, düşük enerjili parçacıklar için dağıtıcı etki gösterecek bir sekstupol magnet gerekir (Wiedemann 2015).

Enerji farklılığından kaynaklanan ayar kayması olarak tanımlanan kromatiklik, şu şekilde yazılabilir:

$$\xi_{x,y} = \frac{\Delta Q_{x,y}}{\Delta P/P_0} = (-, +) \frac{1}{4\pi} \oint \beta_{x,y} K_{x,y}(s) - S(s)D(s)ds \quad (2.61)$$

Burada, $S(s)$ sekstupol magnet gücü, $D(s)$, dispersiyon, β betatron fonksiyonu temsil

eder. Sekstupol magnetin gücünün sıfır olduğu durum doğal kromatikliği verir. Bu kromatikliği düzeltmek için dispersiyonun sıfırdan farklı olduğu, yüksek betatron fonksiyonu olan bölgelere sekstupol magnet yerleştirilerek kromatiklik düzeltilebilir. İki yönde (yatay, dikey) kromatikliği düzeltmek için iki farklı (iki aile olarak isimlendirilir) sekstupol kullanmak gerekir. Eğer lineer olmayan kromatiklik fazla ise (yüksek dereceden kromatiklik önemli oradaysa), iki aile sekstupol yeterli olmayabilir. Daha fazla aile veya oktipol magnetler kullanmak gerekebilir. Aksi halde, lineer olmayan kromatiklik durumunda ideal momentumdan sapmış ("off-momentum") parçacıklar için betatron ayar kayması yüksek seviyede olabilir.

Parçacık hızlandırıcı tasarımı, temelde enerjiye bağlı olarak demeti halkada tutabilecek dipol magnet sayısı, uzunluğu ve manyetik alanı belirlenmesi ve odaklayıcı magnetlerin yerleştirilmesi ile başlar. Yalnızca bükücü ve odaklayıcı magnetlerin yer aldığı bu yapıya lineer örgü denir. Hızlandırıcının, odaklayıcı magnetlerinin belirlediği bir çalışma noktası bulunur. Kromatiklik, bu çalışma noktasının değişiminin ölçüsü olarak da ifade edilebilir. Bu istenmeyen kromatikliği azaltmak için kullanılan altı kutuplu sekstupol magnetlerin hücreye eklenmesi ile birlikte lineer olmayan etkiler hesaba katılmış olur ve artık lineer olmayan örgü tasarımı başlamış olur.

Bir temel FODO hücresi, sadece kuadropol magnetlerden oluşabileceği gibi bu magnetlerin arasına yerleştirilmiş bükücü magnetlerle birlikte de oluşturulabilir. Bu temel hücre tekrarlanarak bir örgü oluşturulur. Bir çembersel hızlandırıcıda RF elemanlarının yerleştirilmesi, demetin halkaya alınması ve dışarı çıkarılması için gerekli olan giriş-çıkış elemanları ve eğer varsa manyetik eklenti cihazlarının yerleştirilmesi için düz bölgelere ihtiyaç duyulur. Bu düz bölgelerin oluşturulmasının farklı yöntemleri vardır. Düz bölgelerde bükme yapılmaz. Buraya özel yerleştirilmesi gereken elemanlar için yeteri kadar düz bölge bırakılır. Bu düz bölge ile yay arasında bir eşleme ("matching") alanı oluşturulmalıdır. Bu eşleme bölgesi sayesinde, betatron fonksiyonların eşlemesi ve dispersiyon fonksiyonunun düz bölgede sıfır veya sıfıra yakın bir değere çekilmesi sağlanır. RF, giriş, çıkış ve manyetik eklenti cihazlarının verimliliği için dispersiyonun küçük olması önemlidir. Bazı özel durumlarda sınırlı bir dispersiyon değeri gerekebilir, bu durumlar ileride tartışılacaktır.

Hesaplamalar yapılırken öncelikle ideal durum ele alınır. Bu, kurulum sırasında mükemmel hizalama yapılabildiği, tasarımda kullanılan magnetlerin alan hataları olmayacak mükemmellikte üretilebildiği varsayımsal durumdur. Daha sonra, bu ideal durum üzerine

ideal parçacığa göre momentum sapması ile paketçik içerisinde var olan parçacık (“off-momentum”) hesapları eklenir. Son olarak gerçekçi sonuç elde edebilmek için magnet ana alan hataları, rastgele ve sistematik multipol alan hataları ve hizalama (“alignment”) hataları eklenir. Parçacıkların hızlandırıcıya girdikten sonraki en az bir sönüm zamanı kadar geçen süre için parçacık izleme simülasyonları yapılmalıdır. Hataların eklendiği durumda, hücreye demet görüntüleme cihazları ve düzeltici magnetler eklenir. Düzeltici magnetler ile yörünge düzeltmesi yapılması durumunda bile tasarımda birçok şey değişmiş haldedir: Düz bölge ve yay arasındaki eşleme bölgesi, düz bölgedeki dispersiyon fonksiyonu, beta-tron ayarı. Parçacık izleme simülasyonlarının yapılmadan evvel bu ayarlamaların tekrar yapılması gerekir.

Bahsi geçen simülasyonlar sonucunda parçacıkların, kaybolmadan hızlandırıcı içerisinde kalabilecekleri başlangıç koşulları belirlenmiş olur. Buna dinamik aralık denir. Dinamik aralık için gereklilik koşulu, hızlandırıcıya gelen demetin niteliğine veya demetin hızlandırıcıya alınmada benimsenen enjeksiyon yöntemine bağlı olarak değişkenlik gösterebilir. Bu tezin konusu olan tasarımlar için her iki yönteminde seçilebileceği büyüklükte dinamik aralık değerleri elde edilmesi hedeflenmiştir. İlgili bölümlerde lineer olmayan tasarım optimizasyon adımları ve demetin giriş yöntemleri tartışılmıştır.

Son olarak RF elemanlarının parametreleri belirlenmesi gerekir. Daha evvel bahsedildiği üzere, yüklü parçacık hızlandırıcı içerisinde ivmeli hareket yaptığı için sinkrotron ışınımı yayar ve demet enerji kaybeder. Demetin, hızlandırıcının içerisinde kalması ve istenen enerjide gerekli parametreleri elde edebilmek için her turda kaybolan enerjinin yeniden demete verilmesi gerekir.

RF hızlandırma elemanı boyuna yüksek elektrik alanı sağlar. e elektrik yüklü bir parçacık için bir hızlandırma elemanından geçtiğindeki enerji kazancı:

$$\Delta E = e\Delta V \quad (2.62)$$

Burada, $\Delta V = V_0 \sin(W_{rf} + \phi)$ etkin voltaj, W_{rf} RF frekansı, V_0 tepe hızlandırma voltajı ve ϕ faz açısıdır (Lee 2015).

Ayrıca çembersel bir hızlandırıcıda enerji artışı yapılması gerekiyorsa bunun da, enerji kaybının telafisine ek olarak hesaba katılması gerekir. Bu kaybolan enerjinin telafisi ve enerji artırımı için RF hızlandırma elemanları kullanılır ve tasarıma göre ilgili RF parametreleri hesaplanmalıdır. Bu hesaplamada, hızlandırıcıya gelen demetin özellikleri, hızlandırıcının sağlaması gereken enerji kabulü değeri önem kazanır.

Burada bahsi geçen sinkrotron ışınımı ayrıca incelenmelidir. Bazı durumlar bu sinkrotron ışınımı hızlandırıcı elemanlarına zarar verecek veya demeti etkileyerek bozacak düzeyde olabilir. Bu durumda, tasarım gerekliliklerinin yeniden gözden geçirilmesi veya soğurucu (“absorber”) planı ya da vakum haznesi tasarımı seçenekleri değerlendirilmelidir. Bölüm 6.’da bu tezin konusu olan her iki hızlandırıcı için de bu durum değerlendirilmiştir.

2.4 Kolektif Etkiler

Parçacık hızlandırıcılarında, magnetlerden kaynaklı, manyetik alan, kuvvet ve etkiler çerçevesinde hesaplamalar yapılır. Ancak parçacıklar elektrik yükü taşıdıklarından birbirleri üzerinde de etkileri vardır. Yüksek enerjilerde ve düşük akımlarda bu etkiler ihmal edilebilir düzeylerde olsa da düşük enerjiler ve yüksek akım değerlerinde, henüz tasarım sırasında, mutlaka hesaba katılmalıdır. Demet içerisindeki parçacıkların birbirlerine olan etkileri kolektif etkiler (“collective effects”) olarak isimlendirilir. Bu etkiler çok çeşitli ve hesaplaması karışık etkilerdir: Bir paketçiğin içindeki parçacıkların birbirlerini etkilemesi, parçacıkların saçılması, bir paketçiğin diğerini etkilemesi, vakum haznesinin demeti etkilemesi, vakumda kalan iyonların demeti etkilemesi gibi etkiler bunlardan bazılarıdır (Wolski 2014b).

Her bir kolektif etki, detaylı çalışma gerektiren üzerine başlı başına bir tez yazılabilecek derinlikte konulardır. Bu tezde, tasarımın bu aşamasında belirli analitik hesaplamalarla hangi kolektif etkilerin hızlandırıcıya sınırlamalar koyabileceğini öngörmek için aşağıda sıralanan etkiler incelenmiştir.

- Demet-içi saçılım (“intra-beam scattering”)
- Uzay yükü (“space charge”),
- Boyuna mikro-dalga kararsızlığı (“longitudinal micro-wave instability”),

- Enine mod bağlaşım kararsızlığı (“transverse mode coupling instability”),
- İyon etkileri,
- Elektron bulutu,
- Koherent sinkrotron ışınımı.

Konularla ilgili gerekli teorik bilgiler ve hesaplamalar, bu tezin konusu olan her iki hızlandırıcı için de bölüm 5.’te verilmiştir.

3. ALTERNATİF ÖN-ENERJİ ÖTELEYİCİ HALKA TASARIMI

Alternatif ön-enerji öteleyici halka seçeneği için yapılan tasarımın detayları bu bölümde verilmiştir. Buna göre, ilk olarak parametre ölçeklendirmesi ve genel hızlandırıcı planı oluşturulması, lineer ve lineer olmayan dinamik optimizasyonu detayları, rezonans sürücü terimler (“resonance driving terms”), betatron ayar haritası, frekans haritası analizi gibi bazı teknik hesaplamalar sonucu dinamik aralık hesabı yapılmıştır. Ek olarak, magnet hizalama ve alan hataları, ideal momentumdan sapmış (“off-momentum”) parçacıklara ek olarak dinamik aralık parçacık izleme (“tracking”) hesaplamalarının detayları açıklanmıştır. Bunun yanı sıra, kolektif hesap değerlendirmeleri de ayrıca bölüm 5.’de yapılmıştır. Gerekli demet akımına ve enerji kaybına karşılık gelen sinkrotron ışımasını için vakum haznesinin temel gerekliliklerini belirlemek adına temel hesaplamalar da ayrıca bölüm 6.’da verilmiştir.

3.1 Parametre Ölçeklendirmesi

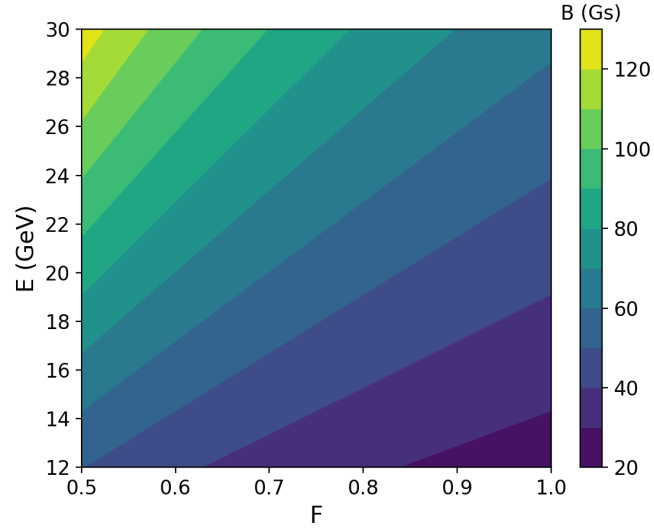
Bu bölümde, detayları verilmiş olan alternatif enerji öteleyici hızlandırıcısı, SPS hızlandırıcısına (Bölüm 4.) alternatif olarak önerilmiş, FCC- e^+e^- enjektör tesisi için ikinci ön-enerji öteleyici halka tasarımı seçeneğidir. Bu bölümde, bu tasarımın ilk aşaması olan parametre ölçeklendirme (“parameter scaling”) bölümü detaylandırılmıştır. Demet emittansı, enerji yayılımı, sönüm zamanı gibi parametreler incelenerek tasarımın genel planı belirlenmiştir.

Öncelikle, ön-enerji öteleyici halkanın çıkış enerjisi belirleme çalışması yapılmıştır. Ana enerji-öteleyici halkası (Şekil 1.2), çarpıştırıcı halka ile aynı tünelde planlandığından, çevre uzunluğu yaklaşık 98 km’dir. Çevresinin uzun olmasından ötürü, giriş enerjisindeki bükücü magnet manyetik alanı kritik derecede önemli hale gelmektedir. Bu nedenle ilk olarak, ana enerji öteleyici halkasının giriş enerjisine (bu aynı zamanda ön-enerji öteleyici halkasının çıkış enerjisidir) karşılık gelen bükücü magnet manyetik alanı hesaplanması yapılmıştır. Manyetik alan, halkanın F parametresi (hızlandırıcının dipol oranı) ve demetin enerjisi ile bağlantılı biçimde aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$B = \frac{2\pi E}{FCc} \quad (3.1)$$

Burada, E enerji, C halkanın çevresi, c ise ışık hızını temsil eder.

Ana enerji öteleyici halkası dipol magnet manyetik alanının, farklı enerjiler ve farklı F parametresi için nasıl değiştiğini şekil 3.1 göstermektedir. Burada, x eksen dipol magnet doluluk oranını (F), y eksen enerjiyi (E), farklı renkler ise ana enerji öteleyicinin dipol magnetlerinin farklı manyetik alan (B) aralıklarını göstermektedir.



Şekil 3.1 Ana-enerji öteleyici halkasının bükücü magnet manyetik alanının (B), enerji (E) ve dipol oranı (F) ile parametrizasyonu

Bir çembersel hızlandırıcıda dipol doluluk oranı parametresi, tipik olarak, yaklaşık 0.7 civarındadır. Ana-enerji öteleyici magnet için projenin bu aşamasında limit, manyetik alan kararlılığının sağlanabilmesi için, 50 Gs olarak belirlenmiştir. Ancak, mutlaka projenin ilerleyen aşamalarında bu konu üzerine prototip çalışması yapılması gerekliliği ilgili toplantılarda tartışılmıştır. Şekil 3.1'den anlaşılacağı üzere, 0.7 F değeri için ana enerji öteleyici halkanın bükücü magnet manyetik alanı 16 GeV enerji için yaklaşık 50 Gs olarak görülmektedir. Böylece, ön-enerji öteleyici halkanın çıkış enerjisi de belirlenmiş olur.

Bundan sonraki adım, 16 GeV çıkış enerjisi ve 6 GeV giriş enerjisi için bazı önemli parametrelerin çevre uzuluğu (C) ve F parametresi ile ilişkili olarak hesaplanmasıdır

(Şekil 3.2). Daha önce bölüm 2.'de ilişkilendirildiği üzere, tur başına enerji kaybı (U_0), sönüm zamanı (τ), enerji yayılımı (σ_δ) ve emittans (ϵ_x) sırasıyla aşağıdaki gibidir.

$$U_0 = \frac{2\pi C_\gamma E^4}{FC} \quad (3.2)$$

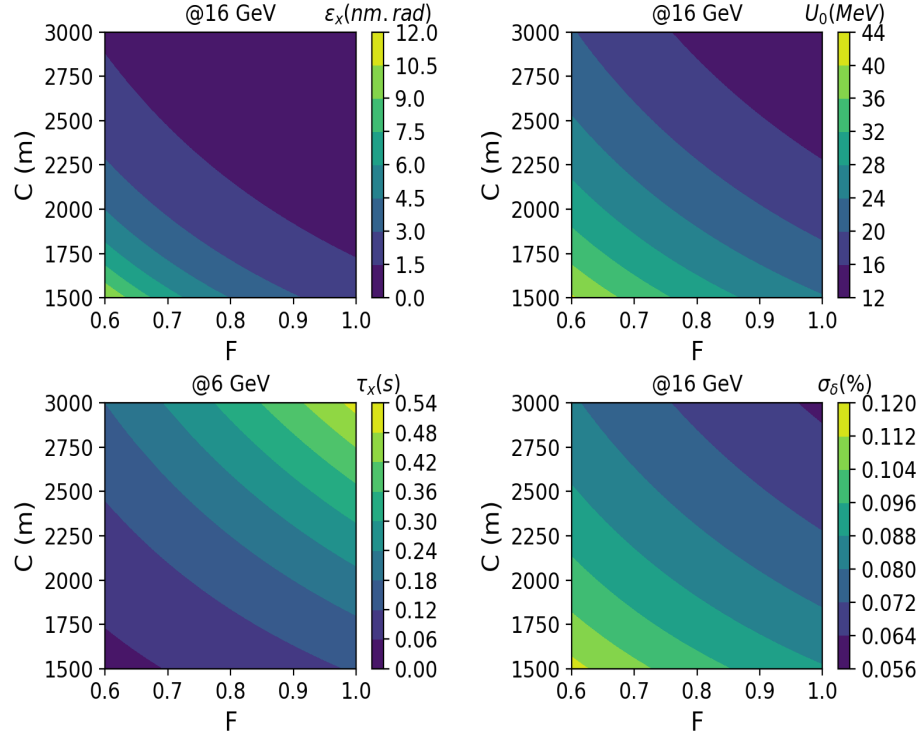
$$\tau = \frac{(FC)^2}{\pi E^3 c C_\gamma} \quad (3.3)$$

$$(\sigma_\delta)^2 = \frac{c_q \gamma^2 2\pi}{FC} \quad (3.4)$$

$$\epsilon_x = \frac{F_{lattice} c_q \gamma^2 (2\pi)^3 l^3}{(FC)^3} \quad (3.5)$$

Burada U_0 tur başına enerji kaybı, τ sönüm zamanı (yatay), σ_s enerji yayılımı, ϵ_x emittans (yatay), C_γ ve c_q sabit, E enerji, c ışık hızı, $\gamma = E/mc^2$ Lorentz factörü, l dipol magnet uzunluğu, $F_{lattice}$ örgü parametresi, F dipol oranı ve C çevre uzunluğudur.

Bu denklemlerden faydalanarak gerekli parametreleri, belirli sınırlamalar içerisinde ortaya koyabilecek bir tasarım yapabilmek için gerekli olan çevre uzunluğu çıkarımı yapılabilir. Bu, tasarlanacak halkanın genel parametrelerinin ortaya konması için önemli bir adımdır. Şekil 3.2, çıkış enerjisindeki emittans (üst-sol), tur başına enerji kaybı (üst-sağ), enerji yayılımı (alt-sağ) ile giriş enerjisindeki sinkrotron ışınımı sönüm zamanının, çevre uzunluğu ve F ile parametrisasyonunu gösterir. Tipik bir halkada dipol oranının yaklaşık 0.7 olduğu düşünüldüğünde tur başına enerji kaybını 30 MeV'in altında tutmak için gerekli olan çevre uzunluğu yaklaşık 2 km'dir. Buna göre, emittans yaklaşık 5 nm.rad, enerji yayılımı yaklaşık % 0.1 ve sönüm zamanı ise 0.18 s olarak görülmektedir.



Şekil 3.2 Alternatif ön-enerji öteleyici halkasının çıkış enerjisinde yatay emittans (üst-sol), tur başına enerji kaybı (üst-sağ), enerji yayılımı (sağ-alt) ve giriş enerjisinde (yatay) sönüm zamanının (sol-alt), çevre uzunluğu (C) ve hızlandırıcı dipol oranı (F) ile parametrizasyonu

3.2 Demet Optik Tasarımı ve Genel Plan

Alternatif ön-enerji öteleyici hızlandırıcının lineer örgü optimizasyonu analitik ve nümerik hesaplamalar ile yapılmıştır. Halka, dört düz bölge ve dört yay ("arc") olacak şekilde planlanmıştır. Halkada iki farklı FODO hücresi kullanılmıştır:

- odaklayıcı ve bükücü magnetlerden oluşan örgü (yay),
- yalnızca odaklayıcı magnetlerden oluşan örgü (düz bölge).

Bükücü magnetlerin manyetik alanları giriş enerjisinde 0.1 T iken, çıkış enerjisinde 0.27 T olmaktadır. Yay için bükücü magnetler kullanırken, düz bölgelerde yalnızca odaklayıcı magnetler kullanılarak gerekli dispersiyonsuz bölgeler oluşturulmuştur. Ayrıca, düz bölge

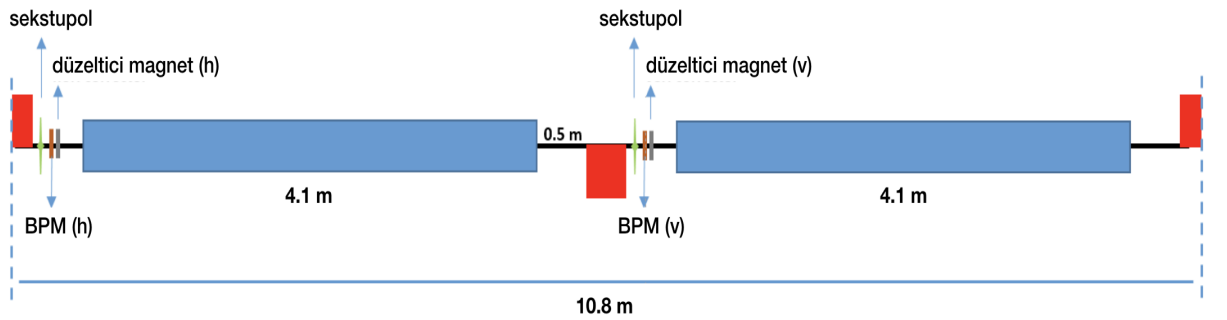
ve yay arasında da eşleme bölgeleri sayesinde dispersiyonsuz bölgeler oluşturulup betatron fonksiyonları, düz bölge ve yay arasında eşleştirilmiştir. Her bir yay 32 FODO hücresinden oluşurken her bir düz bölge ise 5 FODO hücresinden oluşturulmuştur. Düz bölgeler;

- RF hızlandırma elemanlarının yerleştirilebilmesi,
- demet giriş ve çıkış ekipmanlarının konumlandırılması,
- olası manyetik eklenti cihazları (“insertion device”)

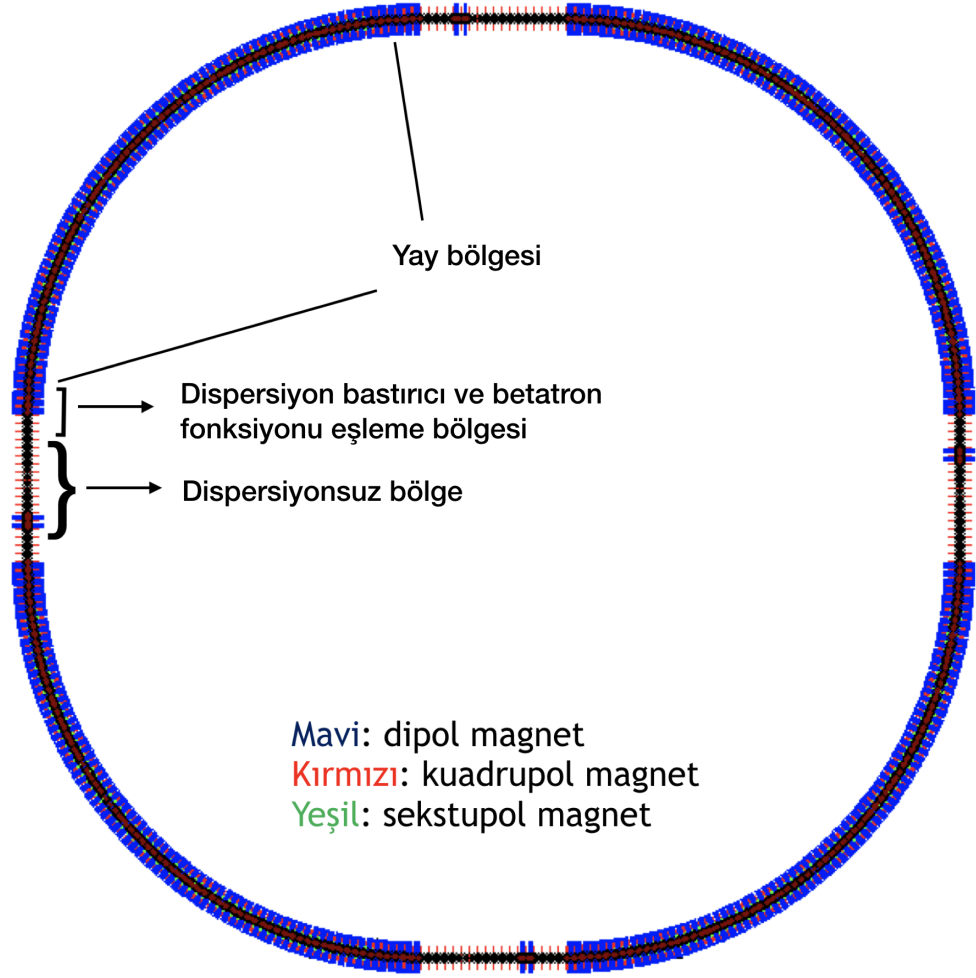
için ayrılmıştır. Bir FODO hücresinin (Şekil 3.3) uzunluğu 10.8 m ve halkanın çevresinin uzunluğu 2030.4 m’dir. Yay içerisindeki FODO hücreleri kromatikliğin düzeltilebilmesi için sekstupol magnet de içermektedir. Dispersiyonsuz bölgelerde ise sekstupol magnet kullanılmamıştır (Etisken vd. 2018, Etisken vd. 2019b).

Lineer örgü tasarımını kurarken ilk adım olarak temel parametrelerin belirlenmesi için aşağıdaki basit eşitliklerden faydalanılmıştır. Bu adım bilgisayar programlarıyla yapılacak karmaşık nümerik hesaplamalardan önce tasarımın genel çerçevesini belirlemeden evvel yapılan önemli bir adımdır.

$$U_0[keV] = 26.5 \times E^3[GeV] \times B[T] \quad (3.6)$$



Şekil 3.3 Alternatif ön-enerji öteleyici halkası tasarımında kullanılan temel FODO (dipol magnetli) hücre yapısı

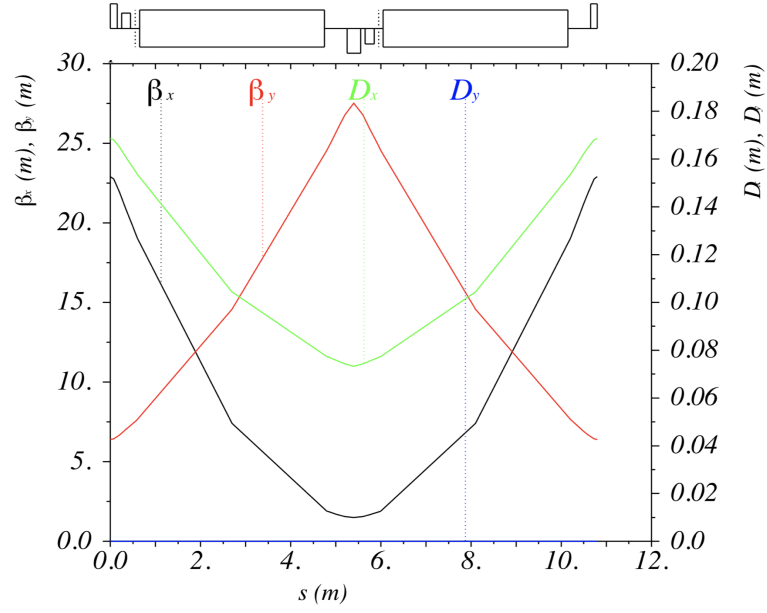


Şekil 3.4 Alternatif ön-enerji öteleyici halkası genel planı

$$\epsilon[nm.rad] = F_{FODO} \times E^2[GeV] \times \theta^3[deg.] \times 10^{-11} \quad (3.7)$$

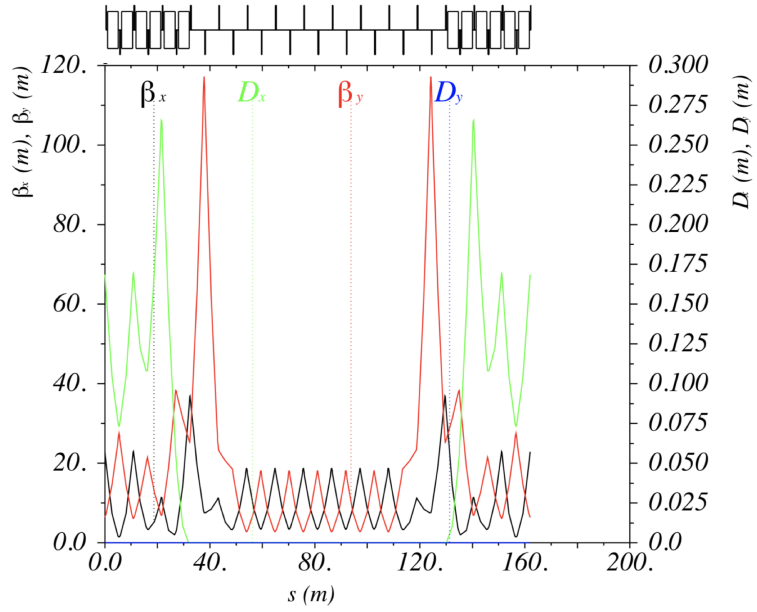
$$NlB = 2\pi \frac{P}{q} \quad (3.8)$$

Burada, U_0 tur başına enerji kaybı, E enerji, B bükücü magnet manyetik alanı, F_{fodo} faz ilerlemesine bağlı örgü parametresi (bu FODO için en optimum değer olan 1.2 olarak alınmıştır.), θ bükücü magnet bükme açısı, N ve l sırasıyla bükücü magnet sayısı ve bu



Şekil 3.5 Ön-enerji öteleyici halka tasarımında bir yay FODO hücresi için optik fonksiyonları. Yatay (siyah), düşey (kırmızı) ve yatay dispersiyon (yeşil) fonksiyonu.

magnetlerin uzunluğudur.



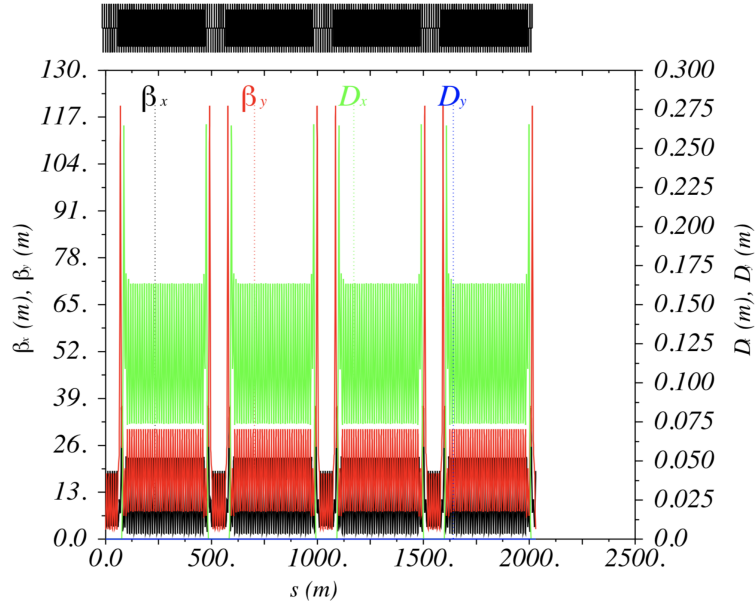
Şekil 3.6 Ön-enerji öteleyici halkanın düz bölgesi için optik fonksiyonları. Yatay (siyah), düşey (kırmızı) ve yatay dispersiyon (yeşil) fonksiyonu

Çizelge 3.1 Dipol magnet parametreleri

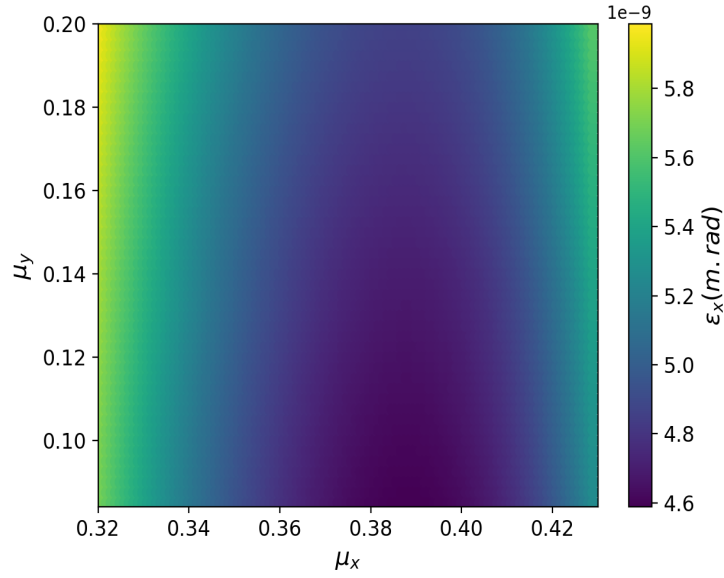
Parametreler	Değer
Magnet sayısı	304
Magnet uzunluğu [m]	4.1
Bükme açısı [degree]	1.18
Minimum manyetik alan [T]	0.1
Maksimum manyetik alan [T]	0.27

İlk olarak denklem 3.6 yardımı ile belirlenen 30 MeV'lik tur başına enerji kaybı sınırlamasına çıkış enerjisinde (16 GeV) karşılık gelen bükücü magnetik alan hesabı yapılır. Bundan bağımsız olarak denklem 3.7 vasıtasıyla çıkış enerjisindeki gerekli şart olan emitans değerini (5 nm.rad) elde etmek için gerekli bükücü magnet bükme açısı elde edilir. Elde edilen bu bükme açısı, aynı zamanda tasarımda kullanılması gereken bükücü magnet sayısını vermektedir ($N = 360/\theta$). Sonrasında, denklem 3.8 vasıtasıyla belirlenen manyetik alan ve bükücü magnet sayısına karşılık gelen magnet uzunluğu elde edilir. Böylece, dipol magnetin karakteristiği ve bir FODO hücresinin genel yapısı belli olmuştur. Çizelge 3.1, temel dipol magnet özelliklerini özetlemektedir.

Bu noktadan sonra, MAD-X programı ile nümerik hesaplamalar yapılmış ve optik tasarım oluşturulmuştur. Doğal kromatiklik, hızlandırıcının yay kısımlarına yerleştirilen iki aile



Şekil 3.7 Ön-enerji öteleyici halkanın tamamı için optik fonksiyonları. Yatay (siyah), düşey (kırmızı) ve yatay dispersiyon (yeşil) fonksiyonu

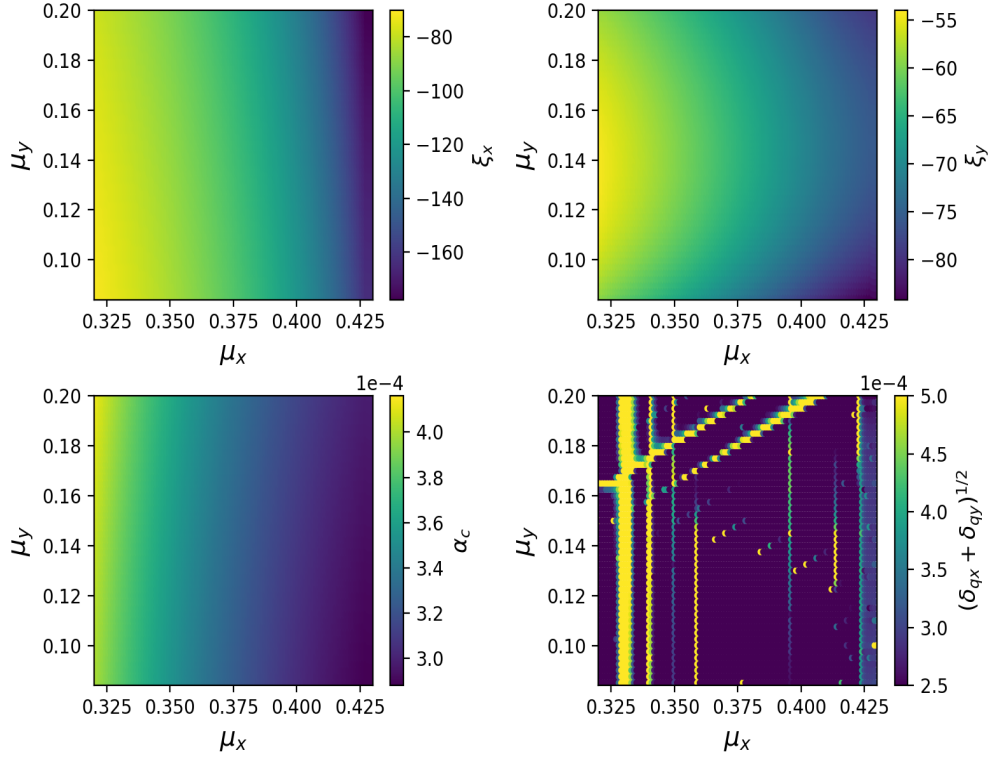


Şekil 3.8 Alternatif ön-enerji öteleyici tasarımının yatay emittansının, yatay ve düşey faz ilerlemesine bağlı olarak parametrizasyonu

sekstupol magnet (20 cm) vasıtasıyla kontrol edilmektedir. Hızlandırıcıda yayı oluşturan FODO hücresinin gösterimi şekil 3.4'teki gibidir. Ayrıca hızlandırıcı tasarımında beş dipol magnetsiz FODO hücrelerinden oluşan dispersiyonsuz bölge de oluşturulmuştur (Etisken vd. 2018, Etisken vd. 2019b). Şekil 3.5, 3.6, 3.7'de hızlandırıcının bir FODO hücresi, düz bölge ve hızlandırıcının tamamı için betatron fonksiyonları gösterilmektedir: Yatay (siyah) ve düşey (kırmızı) betatron fonksiyonu ve yatay dispersiyon (yeşil) fonksiyonu.

3.3 Emittans Optimizasyonu

FODO hücresinin yatay ve düşey faz ilerlemesine bağlı olarak değişen, hızlandırıcının yatay emittans parametrizasyonu MAD-X programı ile yapılarak, bu örgü için minimum emittans (yatay) değerine ulaşılmıştır. Çembersel hızlandırıcının geometrik emittans değeri temelde yaydaki hücreler tarafından belirlenir. Bu nedenle, gerekli emittans değeri yaydaki bir FODO hücrenin en optimum faz ilerlemesi seçilerek ayarlanmıştır ve düz bölgede faz ilerlemesi ise lineer olmayan dinamik optimizasyonu sonrasında nihai hale getirilmiştir. Böylece, hızlandırıcıyı oluşturan FODO hücrelerinin faz ilerlemesi, yay ve düz bölgelerde farklı amaçlar doğrultusunda birbirinden farklı olarak seçilmiştir.



Şekil 3.9 Alternatif ön-enerji öteleyici tasarımının kromatiklik (üst), momentum sıkışıklık faktörü (alt-sol) ve “tune shift with amplitude” parametrelerinin yatay ve düşey faz ilerlemesine bağlı parametrizasyonu

Yaydaki bir hücrenin, emittans (yatay) bakımından en optimize faz ilerlemesi şekil 3.8’de gösterildiği üzere emittansın detaylı taraması ile elde edilmiştir. Buna göre, $\mu_x = 0.36 - 0.42$ aralığında olması durumunda istenen emittans elde edilebilir. Bunun yanı sıra, bu detaylı çalışmanın sonrasında kromatiklik (üst-sol/sağ), momentum sıkışıklık faktörü (“momentum compaction factor”) (sol-alt), betatron ayar kayması (“with amplitude”) (sağ-alt) gibi parametrelerde incelenerek şekil 3.9’de gösterilmiştir. Böylece, yaydaki bir FODO hücrenin faz ilerlemesi yaklaşık 135^0 seçilmiştir. Düz bölgelerde ise yaklaşık 90^0 seçilmiştir. Bu, betatron fonksiyonun minimum değer aldığı ve enjeksiyon açısından en uygun değerdir. Nihai sonuçlara ise lineer olmayan dinamik çalışmalar sonucunda ulaşılmıştır. Bahsi geçen faz ilerlemeleri için, doğal kromatiklik, yatay ve düşey yönde sırasıyla -100 ve -60 , momentum sıkışıklık faktörü 0.32×10^{-3} ve betatron ayar kayması ise genelde düşük yaklaşık 3×10^{-4} civarında hesaplanmıştır.

Bu hesaplamalar sırasında, faz ilerlemesi taraması algoritması aşağıdaki şekilde düzenlenmiştir:

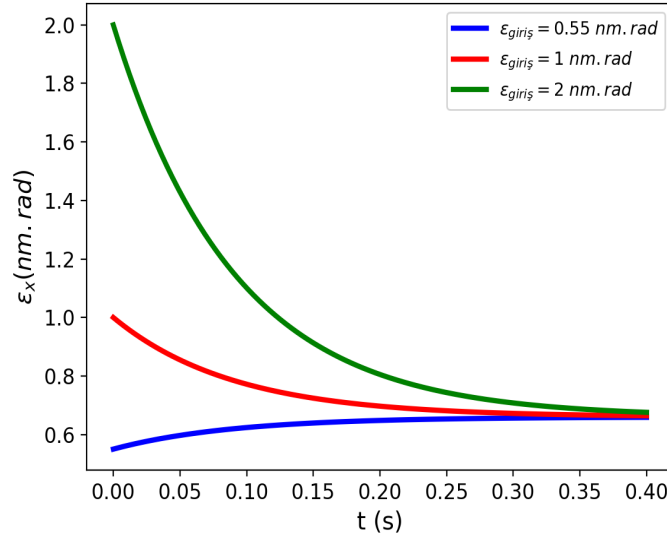
- Temel örgünün tanımlanması (yay ve düz bölge için),
↓
- Yay ve düz bölge arasında eşleme bölgesi oluşturulması,
↓
- Amaca uygun olarak bir FODO hücresi için taranacak faz aralığının belirlenmesi,
↓
- Bir faz ilerlemesi için demet parametrelerinin hesaplanması ve dosyaya yazılması,
↓
- Faz ilerlemesinin değiştirilmesi (yatay ve düşey),
↓
- Faz ilerlemesinin değişmesi sonrası bozulan eşlemenin yeniden sağlanması,
↓
- Demet parametrelerinin yeniden hesaplanması ve dosyaya yazılması,
↓
- Faz ilerlemesinin tekrar değiştirilmesi ve tarama bitene kadar sürecin tekrarlanması,
↓
- Tüm hesaplamalar, belirlenen aralıktaki faz ilerleme değerleri için yapıldıktan sonra grafikler yardımıyla analiz yapılması.

3.4 Enerji Artışı Süresince Yatay Emittans

Lineer olmayan demet dinamiği konusuna geçmeden evvel, bölüm 2.'de başlanan zaman içerisinde emittans davranışı konusunun tartışılması bu kısımda detaylandırılmıştır. Bu kısımda yatay emittansın nasıl zaman içerisinde değiştiği gösterilmiştir.

Sinkrotron ışınımı, çembersel bir hızlandırıcıda betatron ve sinkrotron salınımında sönüme neden olur. Yatay emittans sinkrotron ışınımı ile birlikte eksponansiyel şekilde azalır. Buna göre, süre uzadıkça yatay emittansın sifıra gitmesi beklenir. Ancak gerçekte bu şekilde olmaz: Işınım, belirli kuantalar (fotonlar) halinde gerçekleşir. Fotonların rastgele

yayınımı, bir parçacığın hareket denkleminde, betatron salınımı ve sinkrotron salınımında uyarılmaya neden olan bir terim gibi davranır. Bu kuantum uyarımı sayesinde, emittans, bu uyarım ile sönüm arasında bir denge emittansı bulur. Böylece emittansın zamanla değişimi, sinkrotron ışınımı ile kuantum uyarımın dengeye gelmesi sonucu oluşur (Wolski 2014b). Bu durumda daha evvel çıkarımı yapıldığı üzere giriş enerjisinde (enerji artışı olmadığı durumda) şu şekilde hesaplanır:

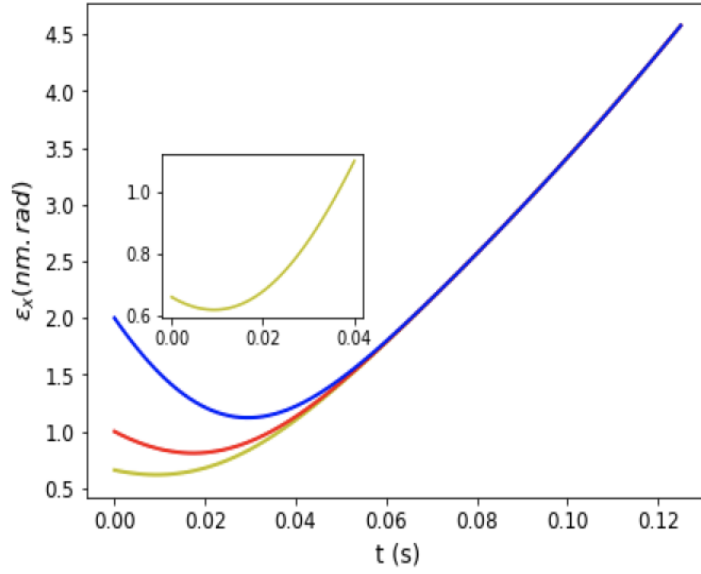


Şekil 3.10 Ön-enerji öteleyici halka tasarımında giriş enerjisinde farklı giriş emittans değerlerinde denge emittansına ulaşılmasının gösterimi

$$\epsilon(t) = \epsilon_0 \cdot e^{-\frac{2t}{\tau}} + \epsilon_{eq} \cdot \left(1 - e^{-\frac{2t}{\tau}}\right) \quad (3.9)$$

Bu formül kullanılarak alternatif enerji öteleyici halkanın giriş enerjisinde emittansının nasıl değiştiği sonucuna ulaşılır. Şekil 3.10, farklı giriş emittansları ile hızlandırıcıya giren demetin, kısa sürede denge emittansı olan 0.67 nm.rad değerine ulaştığı gösterilmektedir.

Hızlandırıcıda enerji artışı olduğu durumlarda bir başka etki daha hesaba katılmalıdır. Momentumdaki artış, paketçik içerisinde bir arada hareket eden parçacıkların faz uzayında bir daralmaya neden olur. Özetle, bu durum momentumdaki artış geometrik emittansta küçülmeye neden olur. Bu etkiye adyabatik sönüm denir.



Şekil 3.11 Ön-enerji öteleyici halka tasarımında, enerji artışı ile birlikte farklı giriş emittans değerleri için yatay emittans parametresinin değişimi

Ön-enerji öteleyici halkasında enerji artışı olduğu durumda, sinkrotron ışınımı, kuantum uyarım ve adyabatik durumu aynı anda değerlendirmek gerekir. Denklem 2.28 kullanılarak ön-enerji öteleyici halkada enerji artışı boyunca yatay emittansın nasıl evrildiğini görmek mümkündür.

Şekil 3.11’de, farklı giriş emittans (hızlanmaya başlangıç) değerleri için hızlanma boyunca emittansın nasıl değiştiği gösterilir. Burada, enerji artışı başladığında sinkrotron ışınımı sönüm etkisi ve adyabatik sönüm etkisi hakimdir, ancak belli bir noktadan sonra kuantum uyarım etkili hale gelerek emittans azalmasını dengeler ve ağır basarak emittansı enerji boyunca artırır. Giriş emittansından bağımsız olarak tüm durumlar için aynı çıkış emittansına varır.

3.5 RF Voltajı ve Enerji Kabulü

Kararlı sinkrotron salınımının halen mümkün olduğu maksimum enerji sapması değeri hızlandırıcının enerji kabulü olarak isimlendirilir (Wiedemann 2015).

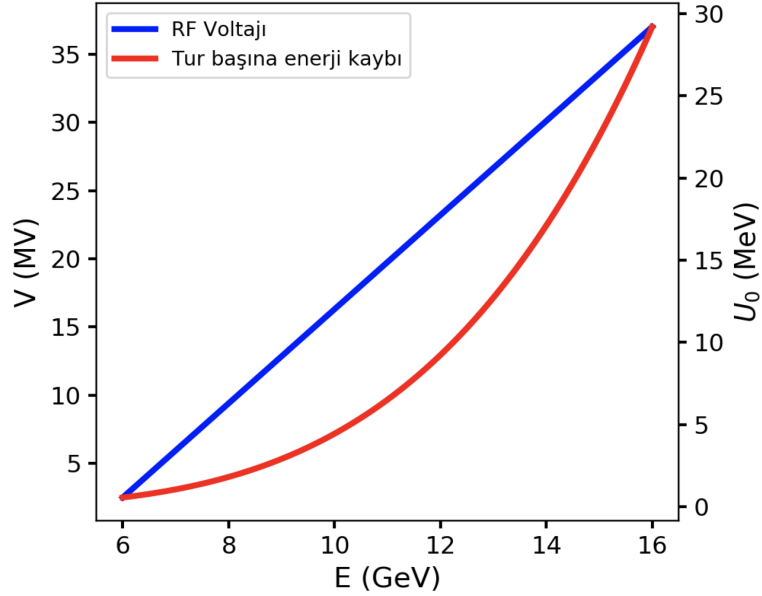
Doğrusal hızlandırıcıdan (Şekil 1.2) gelen demetin enerji yayılımının (rms.), şu anki

tasarıma göre % 0.5 olması beklenmektedir (Çizelge 1.1). Ön-enerji öteleyici halkaya demetin girişi sırasında kayıpları minimuma indirmek için, enerji kabulü gerekliliği alternatif ön-enerji öteleyici halka için % 1.5 olarak belirlenmiştir. Daha öncede belirtildiği üzere enerji kabulü aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

$$\left(\frac{\delta_E}{E}\right)^2 = \pm \left[\frac{qV}{\pi h \alpha_c E_0} ((2 \cos \phi_s) + (2\phi_s - \pi) \sin \phi_s) \right] \quad (3.10)$$

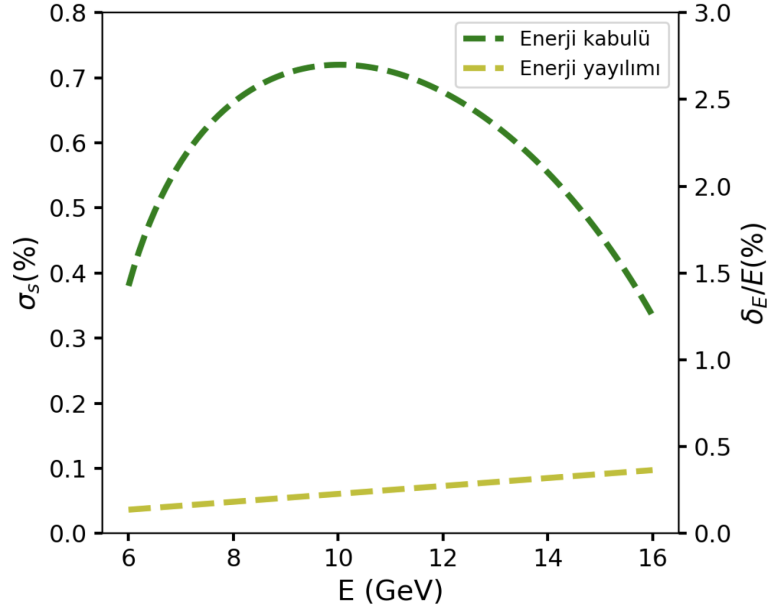
Burada V RF voltajı, h harmonik sayısı, α_c momentum sıkışıklık faktörü (“momentum compaction factor”), E demetin enerjisi ve ϕ_s ise RF fazıdır ve şu şekilde ifade edilir:

$$\phi_s = \arcsin\left(\frac{U_0}{V_0}\right) \quad (3.11)$$



Şekil 3.12 Alternatif ön-enerji öteleyici halka tasarımının enerji artışı ile birlikte tur başına enerji kaybı (U_0) (kırmızı), RF voltajı (V) (mavi) parametreleri

Yukarıdaki formülde yer alan örgüye dair parametreler, diğer demet gerekliliklerini sağlamak adına neredeyse sabitlenmiş durumda olduğundan, hızlandırıcının giriş enerjisindeki enerji kabulü büyük oranda RF voltajı ile ilişkilidir. RF voltajının değerleri ise temelde tur başına enerji kaybı ile ilişkili olarak belirlenir. RF voltajı, giriş ve çıkış enerjisinde tur başına enerji kaybına, giriş enerjisindeki gerekli enerji kabulüne, giriş-çıkış ve hızlandırma boyunca enerji yayılımına bakılarak belirlenir.



Şekil 3.13 Alternatif ön-enerji öteleyici halka tasarımının enerji artışı ile enerji yayılımı ($\sigma_s(\%)$) (sarı) ve enerji kabulü ($\delta E/E(\%)$) (yeşil)

Şekil 3.12, 3.13, burada bahsi geçen parametrelerin: Enerji yayılımı (denge, “equilibrium”) $\sigma_s(\%)$ (sarı-kesikli çizgi), RF voltajı, V (MV) (mavi-sürekli çizgi), tur başına enerji kaybı, U_0 (MeV) (kırmızı-sürekli çizgi) ve enerji kabulü, $\delta E/E(\%)$ (yeşil-kesikli çizgi) parametrelerinin alternatif ön-enerji öteleyici hızlandırıcısı enerji döngüsü boyunca demet enerjisine göre nasıl değiştiği gösterir.

Buna göre, tur başına enerji kaybı, giriş enerjisinde 0.57 MeV iken, çıkış enerjisinde 29.22 MeV değerine ulaşır ve böylece RF voltajı da belirlenmiş olur. Giriş enerjisinde RF voltajı gerekli olan % 1.5 enerji kabulünü sağlamak için 2.5 MV olarak belirlenmiş ve lineer olarak çıkış enerjisinde 37 MV’a kadar artırılır. Bu sırada, enerji yayılımının ise hızlandırma boyunca enerji kabulünden düşük kalmasından emin olunmuştur.

3.6 Lineer Olmayan Demet Dinamiği Optimizasyonu

3.6.1 İdeal örgü

Lineer olmayan etkiler, sekstupol magnetin kromatikliği düzeltmek için örgünün içerisine eklenmesiyle ve/veya magnet hataların eklenmesi ile demet dinamiği hesaplamalarına dahil edilmiş olur. Lineer olmayan etkiler altında x - y uzayında parçacığın kararlı salınım yapabildiği maksimum büyüklük, dinamik aralık olarak tanımlanır. Dinamik aralık, denge durumuna ulaşana kadar parçacığın hayatta kalabildiği demetin enjeksiyon noktasındaki maksimum genişliği olarak tanımlanabilir (Wiedemann 2015, Antoniou 2012).

Alternatif ön-enerji öteleyici hızlandırıcının demet kararlılığı ve dinamik aralık ile ilgili hesaplamaları MAD-PTC kodu ile gerçekleştirilmiştir. Bu hesaplamalar için bir dizi optimizasyon adımları takip edilmiştir (Wolski 2014b, Wiedemann 2015). Çalışma noktası (“working point”) seçimi iyi bir dinamik aralık elde edilmesinde çok önemlidir. Dinamik aralık optimizasyonu ile ilgili bazı önemli yöntemler, terimler ve düşünceler aşağıda özetlenmiştir:

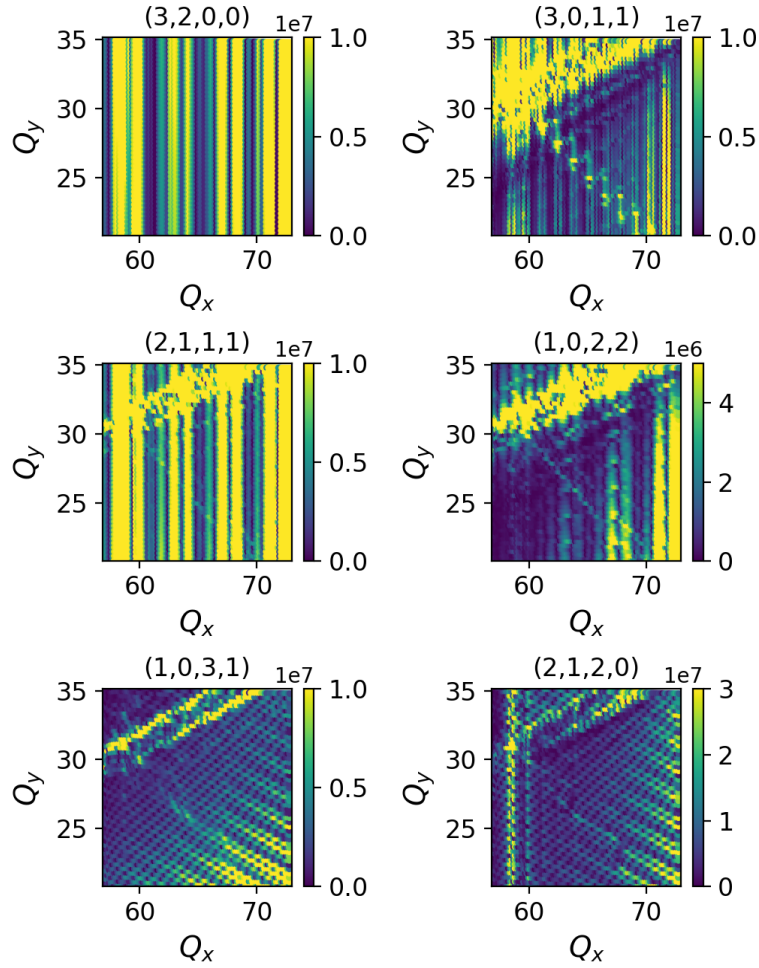
- Betatron ayar diyagramı ve karşılık gelen rezonans çizgileri,
- embersel hızlandırıcının süper-periyodikliği,
- Betatron ayarın tam sayı kısmı,
- Rezonans sürücü terimler (“resonance, driving terms”, RDT),
- Enerji sapması ve betatron ayar kayması,
- Ayar taraması ve karşılık gelen dinamik aralık,
- Daha gerçekçi sonuçlar için alan ve hizalama hataları,
- Frekans haritası analizi.

Bundan sonraki kısımda sırasıyla bu kavramlardan ve hesaplamalardan bahsedilecektir. İlk olarak hataların olmadığı ideal (“bare lattice”) durum incelenmiş, sonrasında hatalar dahil edilmiştir.

Rezonans şartı şu şekildedir:

$$(j - k) \times Q_x^{cell} + (l - m) \times Q_y^{cell} = P \times n \quad (3.12)$$

Burada j, k, l, m, n tam sayılardır. Bu rezonans çizgileri, ayar diyagramı olarak bilinen Q_x, Q_y düzlemlerinde gösterilir. Farklı rezonans çizgilerinin dinamik aralık üzerinde farklı etkileri vardır ve bu etkiler genelde yüksek derecelerde (“order”) azalma eğilimindedir. Böylece, rezonans çizgisine olan mesafe konusunda daha esnek olunabilir.



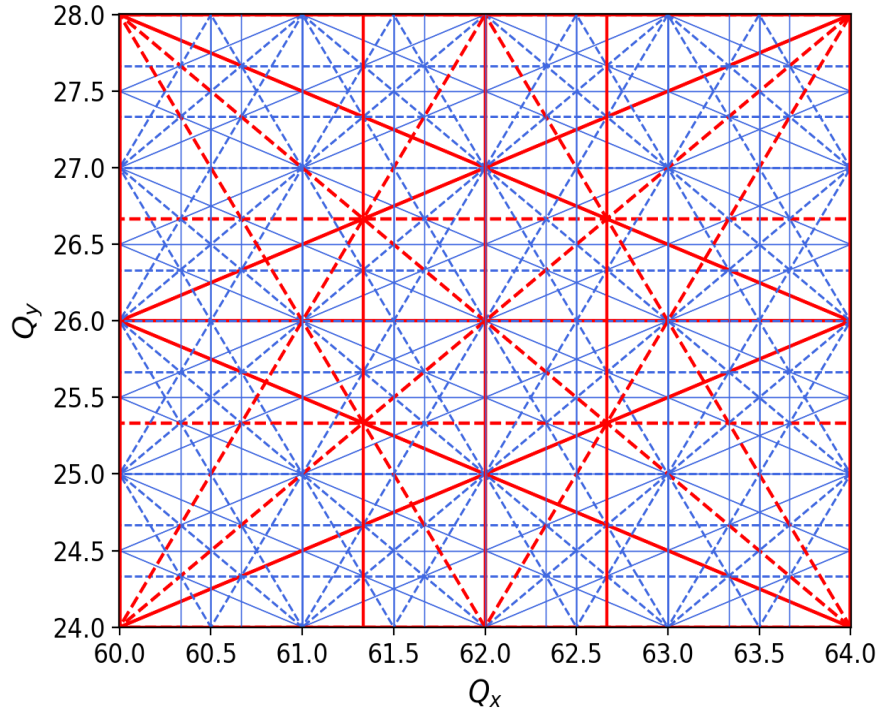
Şekil 3.14 Alternatif ön-enerji öteleyici tasarımı için beşinci derece rezonans sürücü teriminin bazı Hamiltonian modları ((3,2,0,0), (2,1,1,1), (3,0,1,1), (1,0,2,2), (1,0,3,1), (2,1,2,0))

Yüksek derecelerde, çalışma noktası bu rezonans çizgilerine çok yakın olduğu durumda bir etkisi olabilir (Wiedemann 2015, Wolski 2014b). Burada bahsi geçen çalışma noktası, dipol ve kuadropol magnetlerdeki hataların kapalı yörünge üzerinde büyük etkilere sebep olabileceğinden tam ve tam sayının yarısına karşılık gelen rezonans çizgilerinden uzak seçilir. Buna ek olarak, kromatikliğin kontrol edilmesi için gerekli olan sekstupol magnetler ile birlikte üçüncü dereceli rezonans çizgileri de önemli hale gelmiş olur. Özellikle, güçlü sekstupol magnet kullanılan tasarımlarda, yüksek dereceli rezonans çizgileri de dikkate alınmalıdır (Antoniou 2012).

Bir çembersel hızlandırıcının süper-periyodikliği bazı rezonans çizgilerinin bastırılmasına yardım edebilir: Bastırılmış rezonans çizgileri sistematik olmayan rezonans çizgisi, diğerleri ise sistematik rezonans çizgileri olarak isimlendirilir. Alternatif ön-enerji öteleyici çembersel hızlandırıcısı dört süperperiyottan oluşmaktadır. Bu, bazı rezonans çizgilerini sistematik olmayan hale getirir ve böylece farklı tam sayılı ayar değerlerine karşılık farklı ayar diyagramları elde edilir. Daha iyi bir çalışma noktası için sistematik rezonans çizgilerinden uzak durulmalıdır.

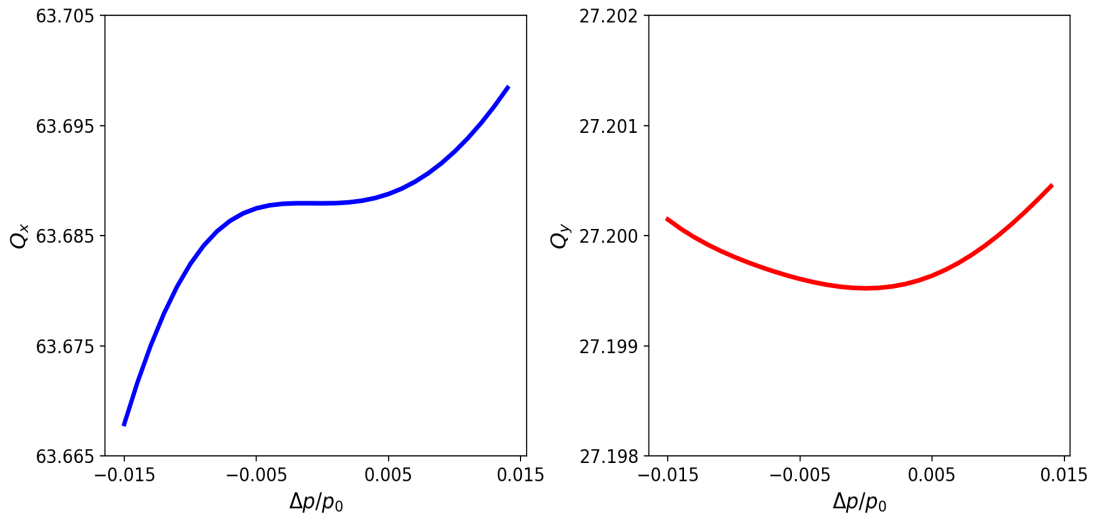
Böylece, süper-periyodikliği birden farklı olan (alternatif ön-enerji öteleyici tasarım gibi), ayar tam sayı kısmı seçimi önemli hale gelir. Şekil 3.15'te farklı tam sayılı betatron ayar değerlerine farklı sistematik rezonans çizgileri geldiği durum gösterilmektedir (bu ayar haritasından süper-periyodiklik dört olarak alınmıştır). Alternatif ön-enerji öteleyici halka için, tam sayı kısmı farklı ayar diyagramlarına karşılık gelen rezonans çizgileri incelenerek, daha az sistematik çizgilerin olduğu alan seçilmiştir. Buna ek olarak, rezonans sürücü terimler hesaplanmış ve ayar tam sayısı ve çalışma noktası için bir çerçeve belirlenmiştir. Alternatif halka tasarımı için hesaplanan rezonans sürücü terimlerin bazı modları şekil 3.14'te gösterilmektedir ((3,2,0,0), (2,1,1,1), (3,0,1,1), (1,0,2,2), (1,0,3,1), (2,1,2,0)). Bu hesaplamalar, her bir FODO hücresinin faz ilerlemesinin değiştirilmesi ile halkanın yatay ve düşey düzlemdeki ayar değerlerine karşılık gelen farklı rezonans sürücü terimlerini gösterir. Burada gösterilen altı farklı modun ve diğer modların sonucuna göre, $Q_x, Q_y = (63, 27)$ tam sayılı ayar harita için yatay ve düşey yönde en uygun harita olduğu görülmüştür. Bu değerler belirlenirken ayar diyagramlarına karşılık gelen sistematik ve sistematik olmayan rezonans çizgileri ile birlikte değerlendirilmiştir.

Ek olarak, ideal momentumda olmayan parçacıklar için, farklı enerji sapmalarına karşılık gelen betatron ayar kayması durumuna bakmak önemlidir. Alternatif ön-enerji öteleyici halka için belirlenen çalışma noktası için, enerji sapması ile ayar kayması hesaplanmıştır



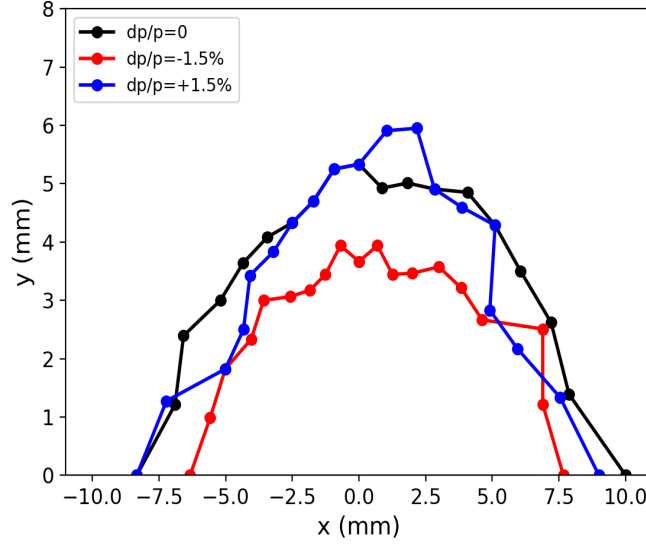
Şekil 3.15 Farklı tam sayılı betatron ayar değerlerine karşılık ayar haritası. Sistemik (kırmızı), sistemik olmayan (mavi), normal (düz çizgi) ve eğri (kesikli çizgi) rezonans çizgileri

(Şekil 3.16). Buna göre, her iki yönde de (yatay ve dikey) betatron ayarı kayması yüksek



Şekil 3.16 Enerji sapmasına ($\Delta P/P_0$) karşılık yatay (Q_x) (sol) ve dikey (Q_y) (sağ) betatron ayar değişimi

seviyede değildir. Bu kayma enerji sapması ile birlikte çok büyük olması durumunda, rezonans çizgileri nedeniyle dinamik aralığı ideal momentumda olmayan parçacıklar için çok daraltabilir. Bu durumda, lineer olmayan kromatikliği düzeltmek için ek sekstupol magnet aileleri veya oktopol magnetler kullanmak gerekebilir. Alternatif ön-enerji öteleyici halka için böyle bir durum, küçük ayar kaymasından ötürü söz konusu değildir.



Şekil 3.17 Alternatif ön-enerji öteleyici halkası için ideal örgü (siyah), ideal momentumdan sapmış ("off-momentum") parçacıklar (kırmızı ve mavi) için dinamik aralık hesabı. "Fringe field" dahil edilmiştir ve parçacık izleme simülasyonları 26000 tur için yapılmıştır. Hatalar dahil değildir

Farklı çalışma noktası değerleri için yapılan dinamik aralık hesaplarında ise en güvenli bölge $Q_x, Q_y = (63.60 - 63.80, 27.20 - 27.40)$ olarak tespit edilmiş, çalışma noktası ise $Q_x, Q_y = (63.687, 27.199)$ olarak belirlenmiştir (Şekil 3.21). Dinamik aralık hesaplaması, sekstupol magnet ve "fringe field"ları hesaba katarak 26000 tur (1 sönüm zamanı) için, magnet hataları olmaksızın, MAD-PTC ile yapılmış ve şekil 3.17'de yatay ve düşey dinamik aralığı farklı momentum sapmalarına göre gösterilmiştir.

3.6.2 Hatalar: magnet hizalama ve alan hataları

Hızlandırıcı içerisindeki elemanların kusurları (hataları) nedeniyle parçacıkların çembersel hızlandırıcı içerisinde takip ettikleri yörüngede bozulmalar, demet parametrelerinde

değişiklikler, betatron ayar kayması, betatron fonksiyonlarının bozulması, periyodikliğin bozulması ve dinamik aralık için küçülme gibi istenmeyen sonuçlar ortaya çıkabilir. Bu nedenle, dinamik aralık için daha gerçekçi sonuçlar elde etmek adına, magnet alan hataları, multipol alan hataları ve hizalama hataları hesaplamalara dahil edilmelidir.

Bu hususa, bir dizi magnet hizalama ve alan hataları alternatif ön-enerji öteleyici tasarımı üzerine uygulanmıştır. Bu uygulanan hatalar çizelge 3.2, 3.3'te gösterilmiştir. Burada, CLIC sönüm halkası için uygulanan hatalar kullanılmıştır (Ghasem vd. 2017). Şekil 3.18, alternatif halkanın çeşitli hatalar karşısındaki hassasiyetini göstermektedir. Bu grafikte, farklı elemanların hizalama ve alan hataları karşısında max./rms. (üst-sol/sağ), betatron fonksiyonu (alt-sol) ve betatron ayarı (alt-sağ) gösterilmektedir. Buna göre, orbit ve betatron bozulması, ağırlıklı olarak kuadrupol hizalama hatasından kaynaklanmaktadır. Ek olarak, kuadrupol hizalama ve alan hataları, optik bozulması ve ayar kaymasının en önemli kaynaklarıdır.

Çizelge 3.2 Alternatif ön-enerji öteleyici tasarım için sistematik ve rastgele multipol hatalar

Eleman	Derece	Sistematik hata	Rastgele hata
Dipol	2	10^{-4}	10^{-3}
	3	1.5×10^{-4}	10^{-3}
	4	-	10^{-3}
	5	5×10^{-5}	10^{-3}
	6	-	10^{-3}
	7	5×10^{-4}	10^{-3}
	8	-	10^{-3}
	9-20	-	10^{-3}
	3-5	-	10^{-3}
	6	10^{-6}	10^{-3}
	7-9	-	10^{-3}
	10	10^{-7}	10^{-3}
	Kuadrupol	11-13	-
14		10^{-8}	10^{-3}
15-17		-	10^{-3}
18		10^{-8}	10^{-3}
19-20		-	10^{-3}
4-8		-	10^{-3}
9		10^{-6}	10^{-3}
Sekstupol	10-14	-	10^{-3}
	15	10^{-7}	10^{-3}
	16-20	-	10^{-3}

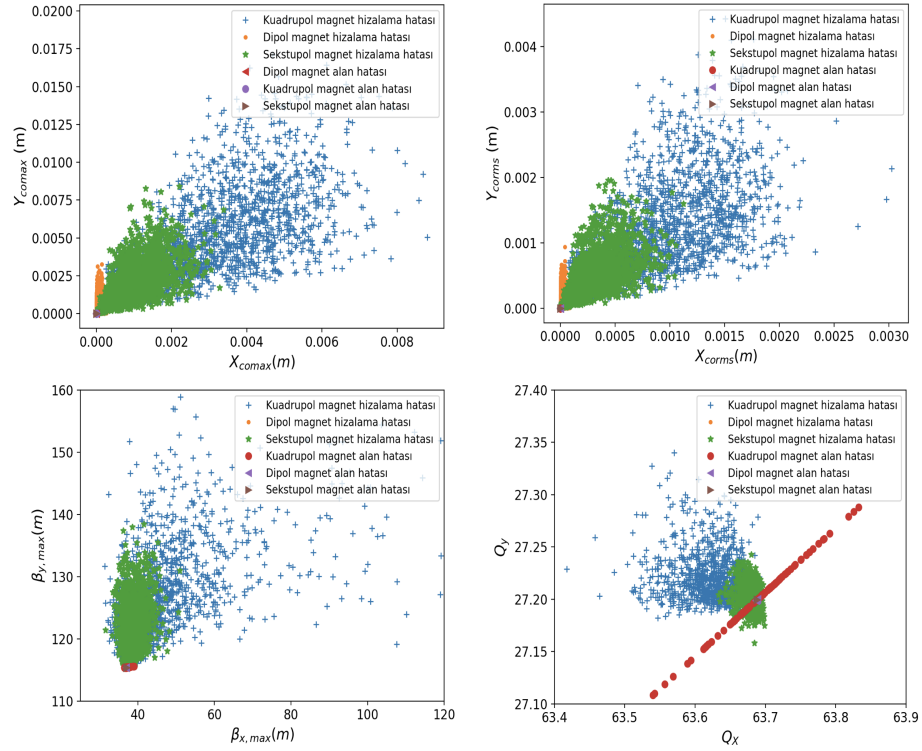
Çizelge 3.3 Alternatif ön-enerji öteleyici tasarımı hizalama ve ana alan hataları

Eleman	Hizalama hatası ^{a,b}	Ana alan hatası
Dipol	100 μm / 100 μrad	10^{-3}
Kuadrupol	100 μm / 100 μrad	10^{-3}
Sekstupol	100 μm / 100 μrad	10^{-3}

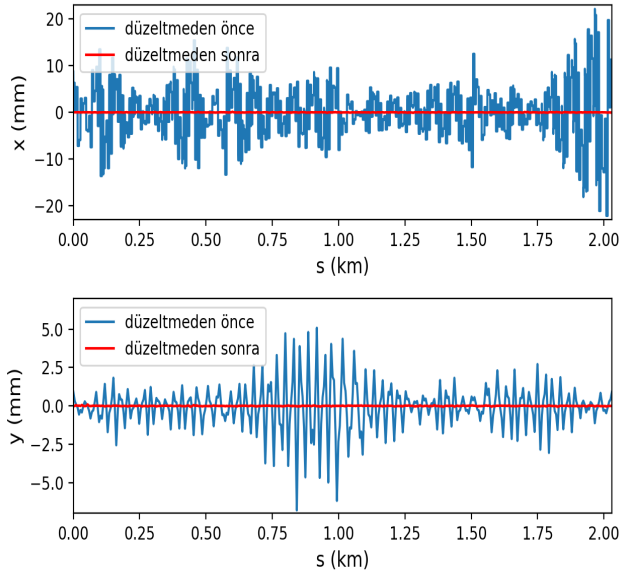
^a d_x = yatay yöndeki hizalama hatası, d_y =düşey yöndeki hizalama hatası, d_s = boyuna yöndeki hizalama hatası

^b d_ϕ = yatay eksen etrafında dönme, d_θ = düşey eksen etrafında dönme, d_ψ = boyuna eksen etrafında dönme

Orbit bozulmasının düzeltilmesi için, 188 yatay ve 188 düşey düzeltici magnetler kullanılmıştır (Şekil 3.4). Şekil 3.19 hatalar olmadan ve hatalar uygulandıktan sonraki durumlar için parçacık yörüngesini göstermektedir. Burada mavi çizgi yörüngenin düzeltme yapılmadan önceki, kırmızı çizgi ise düzeltme yapıldıktan sonraki halini göstermektedir.



Şekil 3.18 Alternatif ön-enerji öteleyici tasarımı için farklı elemanlara hatalar uygulandığındaki hassasiyet: Kapalı yörünge maks./rms. (üst-sol/sağ), betatron fonksiyonu (alt-sol) ve betatron ayarı (alt-sağ)



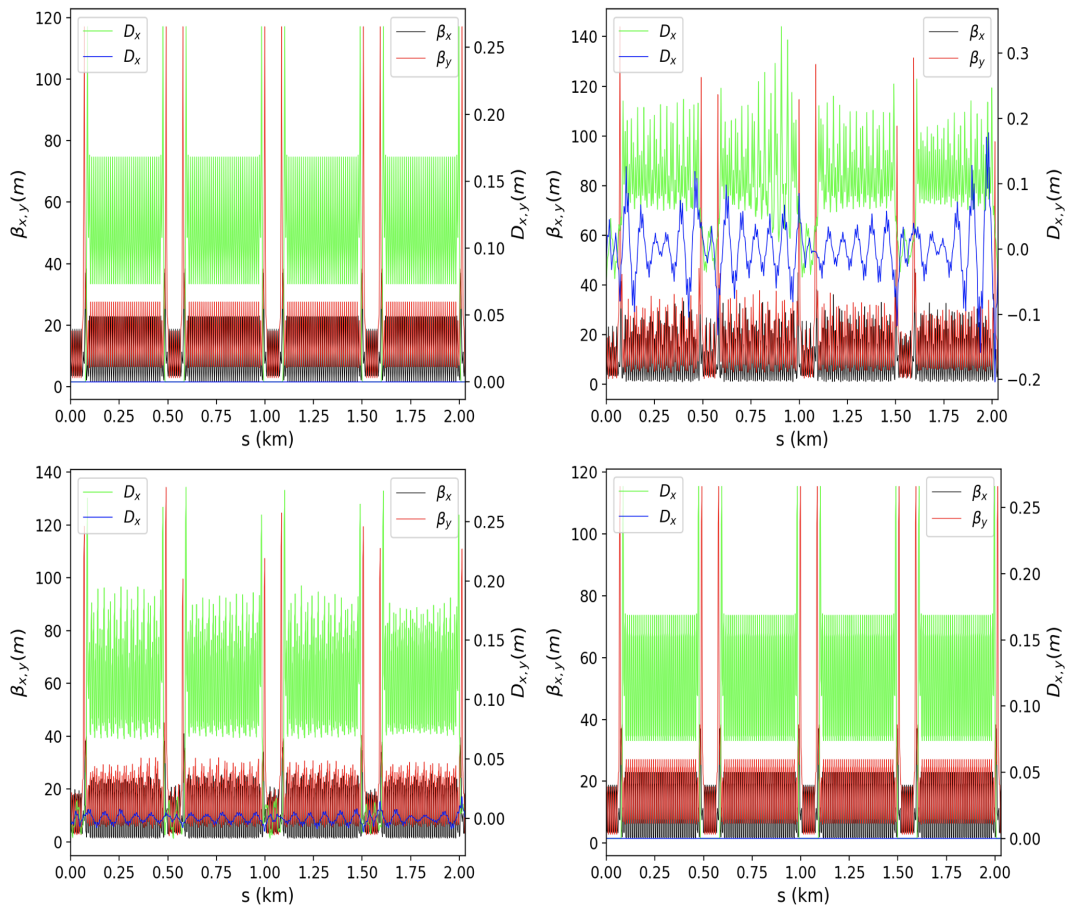
Şekil 3.19 Yatay (üst) ve düşey (alt) uzayda, kapalı yörünge bozulmasının hatalar uygulandıktan sonraki (mavi çizgi) ve düzeltme sonrasındaki (kırmızı) görünümü

Söz konusu hatalar, örgünün simetrisini bozarak dinamik aralık hesabında küçülmeye neden olabilir ve aynı zamanda yörünge bozulmasına ve "twiss" parametrelerinin değişmesine neden olur. Parçacığın takip ettiği yörünge düzeltici magnetler ile düzeltilse bile, demet optiği, yay ve düz bölge arası eşleme bölgesi, dispersiyon, kromatiklik ve ayar değişimi olur ve tüm bunların tekrar düzeltilmesi gerekir (Wiedemann 2015, Ghasem vd. 2016, Renier vd. 2011, Antoniou 2011). Bu nedenle, söz konusu hataların örgüye uygulanmasının ardından aşağıdaki adımlar uygulanmıştır:

- Hataların uygulanması,
↓
- Parçacık yörüngesinin düzeltilmesi,
↓
- Hızlandırıcının betatron ayar değerinin yeniden eşlenmesi,
↓
- Dispersiyon sönümlleme bölgesinin yeniden eşlenmesi,
↓

- Düz bölge ve yaylar arasındaki optik fonksiyonlarının eşlenmesi,
↓
- Doğal kromatikliğin düzeltilmesi,
↓
- Hataların dahil edildiği ve düzeltmelerin yapıldığı durum için dinamik aralık hesaplamalarının yeniden yapılması.

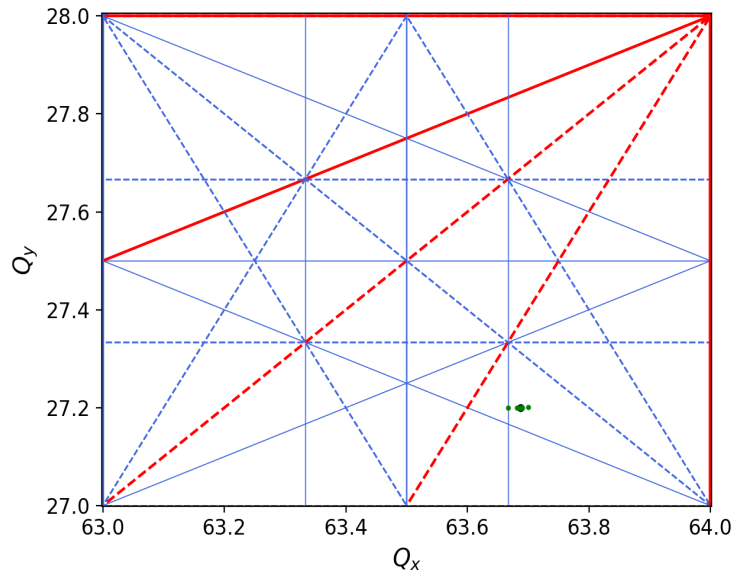
Optik fonksiyonlarının tekrar-eşleme prosedürü için hatasız örgü (üst-sol), hatalar dahil



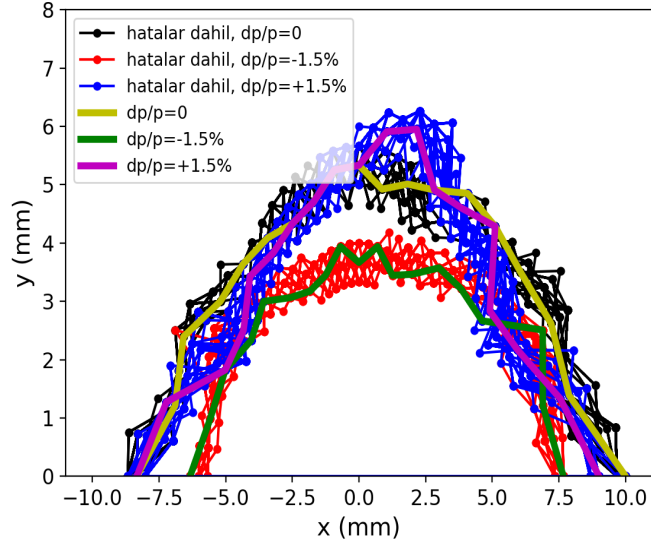
Şekil 3.20 Alternatif ön-enerji öteleyici tasarım için tüm halkanın, hatalar uygulanmadan (üst-sol), hatalar uygulandıktan sonra (üst-sağ), kapalı yörünge düzeltmesi sonrası (alt-sol) ve yeniden eşleme prosedürü sonrası (alt-sağ), yatay (siyah) ve düşey (kırmızı) betatron fonksiyonları, yatay (yeşil) ve düşey (mavi) dispersiyon fonksiyonları

edilmiş halde (üst-sağ), kapalı yörünge düzeltmesi sonrası (alt-sol) ve tüm eşleme adımları tamamlandıktan sonraki hali (alt-sağ) şekil 3.20’de gösterilmiştir. Uygulanan hatalar optik fonksiyonları bozar. Kapalı yörünge düzeltme işlemi, optik fonksiyonlarının düzelmesine katkı sağlasa da optik fonksiyonları ancak tüm eşleme adımları tamamlandığında eski halini alır.

Düzeltilme ve eşleme prosedürlerinin tamamlanmasının ardından, dinamik aralık hesabı çizelge 3.2, 3.3’te belirtilen hatalar dahil edilerek yapılmıştır. Parçacıklar, farklı başlangıç noktalarından başlatılarak 26000 tur (yaklaşık 1 sönüm zamanı) boyunca takip edilmiştir. Seçilen çalışma noktası $Q_x, Q_y = (63.687, 27.199)$ şeklindedir. Şekil 3.21, betatron ayar haritası üzerinde bu çalışma noktasını (siyah nokta) ve farklı ideal momentumdan sapmış parçacıklar (“off-momentum”) (yeşil noktalar) için ayar kaymasını göstermektedir. Dinamik aralık ise şekil 3.22’de gösterilmiştir. Sarı çizgi hatasız durumdaki dinamik aralığı gösterir, yeşil ve magenta çizgiler ideal durumdan sapmış parçacıklar (“off-momentum”) için dinamik aralığı temsil eder ve kırmızı, mavi ve siyah çizgiler ise hataların dahil edilmesindeki durumdaki dinamik aralığı gösterirler. Böylece tüm magnet hataları ve ideal olmayan momentumdaki parçacıklar dahil edildiği durumda bile yaklaşık 6.5 mm



Şekil 3.21 Alternatif ön-enerji öteleyici tasarımı için üçüncü derece kadar rezonans diyagramında çalışma noktası. Sistemik (kırmızı), sistemik olmayan (mavi), normal (düz çizgi) ve eğri (kesikli çizgi) rezonans çizgileri. Siyah nokta çalışma noktasını gösterirken, yeşil noktalar +/- % 1.5'a kadar momentum sapması durumundaki ayar kaymasını gösterir



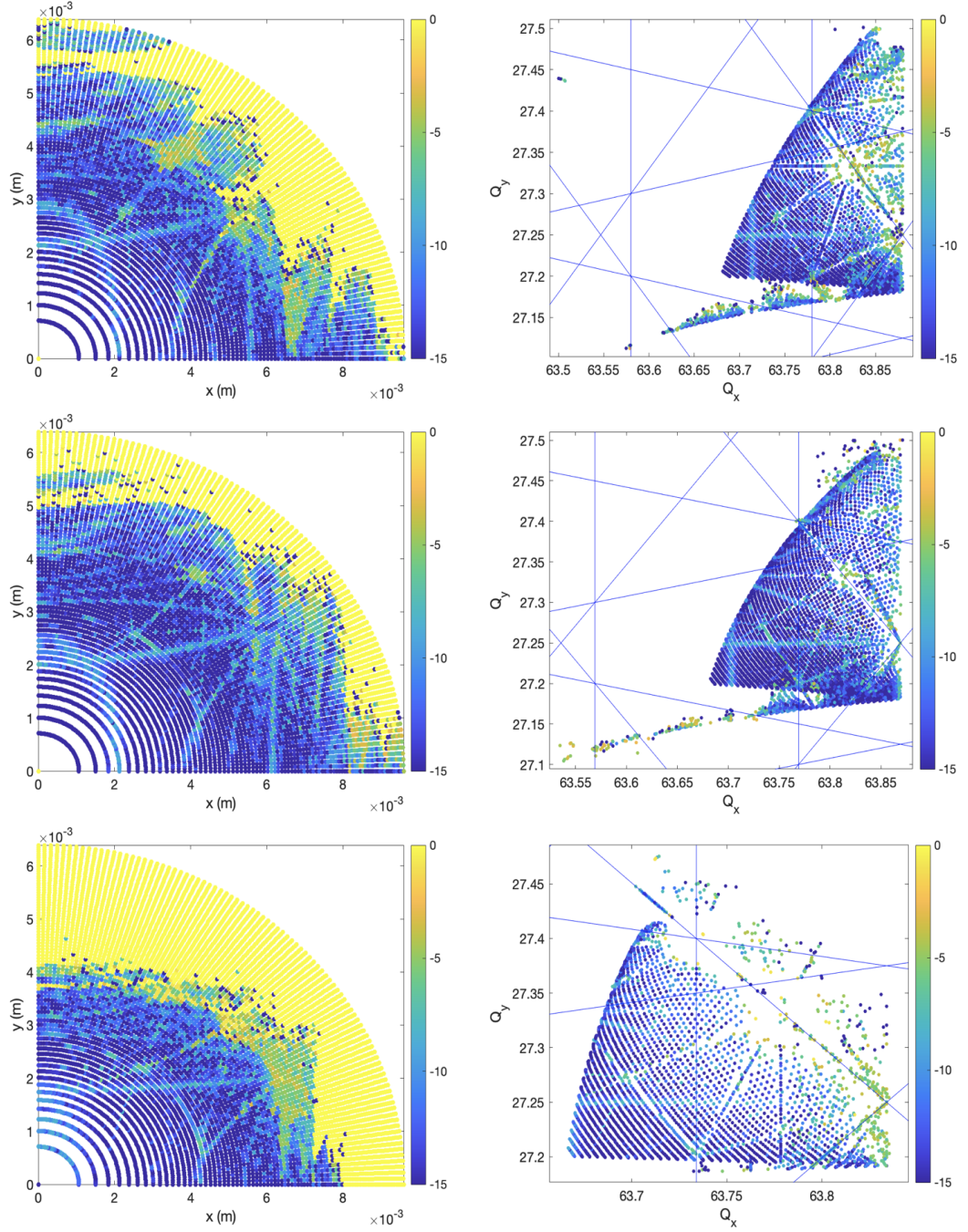
Şekil 3.22 Alternatif ön-enerji öteleyici halkası tasarımı için ideal örgü (sarı), ideal momentumdan sapmış ("off-momentum") parçacıklar (yeşil ve magenta) ve hataların dahil edildiği durum için (kırmızı, mavi ve siyah) dinamik aralık hesabı. "Fringe field" dahil edilmiştir ve parçacık izleme simülasyonları 26000 tur için yapılmıştır

dinamik aralık elde edilmiştir.

Dinamik aralık hesaplamalarına ek olarak, frekans haritası analizi ("frequency map analysis", FMA) çalışmalarına da başlanmıştır. Farklı başlangıç şartlarında parçacıkların 1056 tur parçacık izleme simülasyonları MAD-X PTC programı ile yapılmıştır. İlgili simülasyonlar sekstupol magnetler, "fringe fields" ve hataların dahil edildiği durum için gerçekleştirilmiştir. İdeal momentumlu parçacıkların yanı sıra ideal momentumdan sapmış parçacıklar için de çalışma yapılmıştır. Frekans haritası analizi, NAFF ("Numerical Analysis of Fundamental Frequencies") algoritması kullanılarak yapılmıştır (Laskar 2003, Antoniou 2012).

Şekil 3.23 (sol), ideal momentum ve ideal momentumdan sapmış parçacıkların başlangıç koşullarını difüzyon faktörüne (\mathcal{D}) bağlı olarak göstermektedir (difüzyon haritası).

$$\mathcal{D} = \log \left(\sqrt{(Q_{x1} - Q_{x2})^2 + (Q_{y1} - Q_{y2})^2} \right) \quad (3.13)$$



Şekil 3.23 Alternatif enerji öteleyici halka tasarımı için hatalar ve “fringe field” dahil edilerek, ideal momentumlu (orta), ideal momentumdan sapmış (% +1.5 (üst), % -1.5 (alt)) parçacıklar için difüzyon haritası (sol) ve frekans haritası (sağ)

Difüzyon faktörü frekansın zaman içerisinde değişim miktarının ölçüsüdür. Ayar değişim oranı, parçacık hareketinin kararlılığını tanımlamak için kullanılır: Zaman içerisindeki değişimi fazla ise düzensiz (veya kaotik) az ise kararlı olarak ifade edilir. Böylece, \mathcal{D}

negatif yönde büyüdükçe parçacık daha kararlı, sifıra yaklaştıkça daha kaotik olmaktadır (sarı noktalar ise parçacığın kaybolduğu başlangıç noktalarıdır) (Wolski 2014b, Antoniou 2012).

Şekil 3.23'te (sağ), frekans haritaları gösterilmektedir. Buradaki renkler de yine düzen veya düzensizliği anlamak için gösterilmektedir: Mavi bölgeler düzenli hareketi gösterirken sarı renk kaotik hareketi temsil etmektedir. Beyaz bölgelerde ise parçacıklar kaybolmuştur. Bozulmuş bölgeler, frekans haritasındaki rezonans çizgilerine karşılık gelir. Bu haritalardan, parçacıkların betatron ayarı ile kesişen ve dinamik aralığı sınırlayan rezonans çizgileri görünmektedir. Bu rezonansları azaltmak ve belki de dinamik aralığı iyileştirmek için detaylı çalışmalar yapılması gerekmektedir.

Bu bölümde açıklanan tüm değerlendirmeler, analitik ve simülasyon hesaplamaları nihayetinde, FCC e^+e^- enjektörü alternatif ön-enerji öteleyici hızlandırıcı tasarımı demet parametreleri çizelge 3.4'de özetlenmiştir.

Çizelge 3.4 Alternatif ön-enerji öteleyici tasarımı parametreleri

Parametre	Sembol	Giriş	Çıkış
Demet enerjisi	E [GeV]	6	16
Geo. emittans (yatay)	ϵ_x [nm·rad]	0.66	4.74
Paketçik uzunluğu	σ_z [mm]	5.9	7.2
Momentum yayılımı	σ_δ	0.3×10^{-3}	0.97×10^{-3}
Çevre uzunluğu	C [m]	2030.4	2030.4
Harmonik sayısı	h	2706	2706
Mom. sıkışıklık fak.	α_c	0.32×10^{-3}	0.32×10^{-3}
Ayar [h/v/s]	$Q_{h/v}$	63.687/27.199	63.687/27.199
Tur başına enerji kaybı	U_0 [MeV]	0.57	29.22
Sönüm zamanı [h/v/l]	$\tau_{h/v/l}$ [s]	0.18/0.18/0.09	0.01/0.01/0.05
RF frekansı	F_{rf} [MHz]	400	400
RF voltajı	V_{rf} [MV]	2.5	37
Dipol magnet uzunluğu	l_{bend} [m]	4.1	4.1
Dipol magnet alanı	B_{dipole} [T]	0.1	0.27
Doğal kromatiklik (h/v)	$\xi_{h/v}$	-99/-59	-99/-59
Dipol magnet sayısı	N_{bend}	304	304
Dinamik aralık (h/v)	DA [mm]	6.5/3.8	-
Enerji kabulü	$\frac{\delta E}{E}$ [%]	1.5	-

3.7 Farklı Çıkış Enerjisi Tartışması

Çıkış enerjisi ile ilgili tartışmalar, bölüm 3.1’de yapılmıştı. Bu kısımda açıklandığı üzere, temel limit ana-enerji öteleyici halkası tarafından belirlenir. Ana enerji öteleyici halkası, çok büyük çevreye sahip olduğundan (98 km), giriş enerjisinde dipol manyetik alanları dikkatli değerlendirilmelidir. Bu konu dikkate alınarak alternatif ön-enerji öteleyici tasarımın çıkış enerjisi, 16 GeV olarak belirlendi. Ancak bu seçeneğe alternatif olarak 18 GeV ve 20 GeV seçenekleri de ayrıca bu kısımda değerlendirilerek karşılaştırılmıştır.

Yüksek çıkış enerjisi, alternatif ön-enerji öteleyici halka için daha geniş çevre uzunluğu ve yüksek sinkrotron ışınımı, dolayısıyla yüksek RF gücü gerekliliği anlamına gelir. Diğer yandan, yüksek enerji, ana enerji öteleyici halkanın dipol alanlarını yükseltmektedir, bu ise iyi bir durumdur. Buna karşılık, düşük çıkış enerjisi, alternatif ön-enerji öteleyici halka için kısa çevre uzunluğu düşük sinkrotron ışınımı ve RF voltajı, kısa dipol magnetler ve daha az magnet anlamına gelir. Bahsi geçen üç çıkış enerjisi seçeneği içinde demet parametreleri hesaplanmış ve çizelge 3.5’te özetlenmiştir.

20 GeV çıkış enerjisi seçeneği için çevre uzunluğu 2644 m iken 18 GeV için 2240 m, 16 GeV için ise 2030 m olmaktadır. Tüm seçenekler için giriş ve çıkış enerjisinde gerekli demet parametreleri elde edilmiştir. Tur başına enerji kaybını telafi etmek için gerekli RF voltajı 20 GeV için epey yüksek olmaktadır: 67 MV. Bu değer, 18 GeV ve 16 GeV seçenekleri için sırasıyla 50 MV ve 37 MV’a kadar düşmektedir. Tüm seçenekler için çıkış enerjisindeki enerji yayılımı olması gereken % 0.3 değerinden daha düşüktür. Tüm

Çizelge 3.5 Alternatif ön-enerji öteleyici halkası için farklı çıkış enerjisi seçenekleri için demet parametrelerinin karşılaştırılması

Parametre	Seçenek 1	Seçenek 2	Seçenek 3
Çıkış enerjisi [GeV]	16	18	20
Çevre uzunluğu [m]	2030	2240	2644
Giriş enerjisi [GeV]	6	6	6
Yatay geo. emittans [nm·rad] @ çıkış enerjisi	4.74	4.63	5.01
Tur başına enerji kaybı [MeV] @ çıkış enerjisi	29.22	41.36	57.8
Sönüm zamanı (yatay) [s] @ giriş enerjisi	0.18	0.21	0.1
Enerji yayılımı (denge) [%] @ çıkış enerjisi	0.097	0.1	0.12
RF voltajı [MV] @ çıkış enerjisi	37	50	67
Sönüm magnet alanı [T]	-	-	1.3
Sönüm magnet uzunluğu (toplam) [m]	-	-	16.2

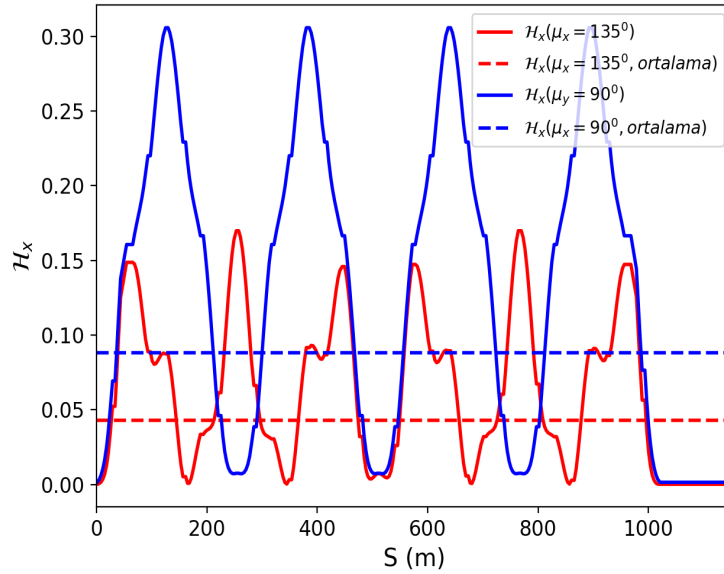
seçeneklerin sönüm zamanı yeterince kısadır. Yalnızca, 20 GeV için giriş enerjisinde sönüm zamanını kısaltmak için sönüm magnet kullanılmıştır. Bu sönüm magnetler de 0.25 s sönüm zamanının tolere edilebilir olmasının anlaşılmasıyla tasarımdan çıkarılabilir. Burada bahsedilen temel parametrelerin yanı sıra ana enerji öteleyici halkanın dipol magnetlerinin manyetik alanları ise çıkış enerjisine göre 50.8 Gs ile 63.5 Gs arasında değişmektedir.

Tezin bu bölümde tartışılan konulara ek olarak, alternatif ön-enerji öteleyici hızlandırıcı tasarımı ile ilgili, kolektif etki, sinkrotron ışınımı, kabul edilebilir emittans ve enerji yayılımı hesaplamaları ve tartışması bölüm 5., bölüm 6. ve bölüm 7.'de açıklanmıştır.

4. SÜPER PROTON SİNKROTRON (SPS)

4.1 SPS Tasarımı ve Gerekli Değişimler

CERN'ün şu andaki tesis planlamasında, SPS, en büyük ikinci hızlandırıcı konumundadır. LHC deneyine ve birçok sabit hedef deneyine demet sağlamaktadır. Hızlandırıcı altı süper-periyottan oluşur. Her bir süper-periyot düz bölgeler için 2 dipolsüz hücre dahil olmak üzere toplamda 18 FODO hücresi içerir. Düz bölgelerde dispersiyon bastırma ise tüm yayın faz ilerlemesinin 2π 'nin katı olacak şekilde ayarlanması ile sağlanmaktadır (CERN 1983, Papaphilippou vd. 2013). SPS hızlandırıcısının çevre uzunluğu 6911.5 m'dir. Hızlandırıcıda 6.26 m uzunluğunda 744 dipol magnet kullanılmıştır. SPS'in FCC- e^+e^- enjektörünün ön-enerji öteleyici hızlandırıcısı olarak kullanılması durumunda, hızlandırıcı halihazırda bazı deneyler için çalıştığından bazı ek sınırlamalar vardır: Şu anki makineye minimum ölçekte modifikasyon yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada, var olan SPS hızlandırıcısının FCC- e^+e^- enjektörünün bir parçası olarak kullanılmasının uygunluğu araştırılmış ve bir dizi öneriler sunulmuştur (Etisken vd. 2019b).



Şekil 4.1 SPS hızlandırıcısı için iki farklı faz ilerlemesine karşılık gelen dispersiyon \mathcal{H}_x fonksiyonu: Mevcut değer (mavi çizgi, 90°) ve optimum değer (kırmızı çizgi, 135°). Ortalama değerler ise kesikli çizgi ile gösterilmiştir

Var olan hızlandırıcı, FCC- e^+e^- enerji ölçeğinde, ön-enerji öteleyici halkasının gereklilikleri göz önünde bulundurularak değerlendirilmiştir. Buna göre, SPS'in FCC- e^+e^- enjektöründe ön-enerji öteleyici olarak kullanılmasında iki temel zorluk bulunur. İlk olarak, yatay geometrik emittans: Çıkış enerjisinde gerekli seviyede düşük emittans değerine ulaşmak mümkün değildir. İkinci olarak, SPS'in giriş enerjisindeki sönüm zamanı 1.8 s olarak hesaplanmış ve giriş salınımı etkinliği için ciddi derecede kısaltılması gerekir.

Bir çembersel hızlandırıcıda yatay emittansı düşürmek için birkaç yöntem vardır (Papa-philippou vd. 2013, Wiedemann 2015, Tydecks 2016, Jing-Yi vd. 2013, Abualrob vd. 2018, Wolski 2013):

- Hızlandırıcı içerisindeki dipol magnet sayısını artırmak: Böylece bir dipol magnetin bükme açısı azaltılmış olur.
- Sinkrotron ışınımın integralleri içerisindeki \mathcal{H} fonksiyonunu azaltmak: Faz ilerlemelerine karşılık gelen \mathcal{H} değerleri farklıdır. Bu durumda, hızlandırıcı yapısını hiç değiştirmeden FODO hücresi için minimum emittansı elde etmek mümkündür. Burada emittansın sinkrotron ışınımı integralleri ile yazımını hatırlatmak faydalı olacaktır:

$$\epsilon = c_q \gamma^2 \frac{I_5}{J_x I_2} \quad (4.1)$$

$$I_2 = \oint \frac{1}{\rho^2} ds \quad \text{ve} \quad I_5 = \oint \frac{\mathcal{H}_x}{\rho^3} ds \quad ; \quad \mathcal{H}_x = \gamma_x \eta_x^2 + 2\alpha_x \eta_x \eta_{px} + \beta_x \eta_{px}^2 \quad (4.2)$$

- Sinkrotron ışınımını artırmak için sönüm magneti yerleştirilebilir (sinkrotron ışınım integralleri değiştirilmiş olur).
- Sönüm paylaşım sayısını değiştirmek için ($J_{x,y,z}$) Robinson sönüm magneti eklenebilir.

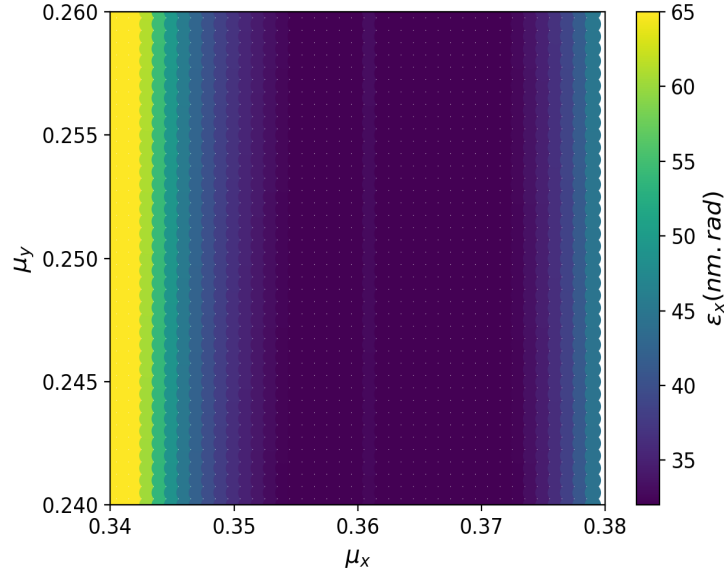
Burada belirtilen yöntemler değerlendirildiğinde, ilk yöntem hızlandırıcının tasarımında değişiklik gerektirdiğinden SPS için uygulanamaz. Ancak ikinci, üçüncü ve dördüncü yöntem uygulanabilir.

Buna göre, ilk olarak, SPS'in iki farklı faz ilerlemesine karşılık gelen \mathcal{H}_x fonksiyonları hesaplanarak şekil 4.1'de karşılaştırılmıştır: 90^0 (mevcut değer) ve 135^0 (optimum değer). Görüldüğü üzere, \mathcal{H}_x fonksiyonu ortalama değerlerden de karşılaştırılabileceği üzere yarı değerine düşmektedir. Böylece, faz ilerlemesini optimum değere getirerek yatay emittans 75 nm.rad değerinden 34 nm.rad değerine düşürülebilir.

Buna ek olarak, şekil 4.11'de MAD-X simulasyon sonuçları farklı faz ilerlemeleri için taranılarak elde edilen sonuçları gösterir. Buna göre, var olan makine ile ulaşılabilecek minimum emittans değeri ancak, en optimum faz ilerlemesi seçilmesi durumunda bile, 34 nm.rad civarında olur.

Çizelge 4.1, SPS'in faz ilerlemesi dışında bir modifikasyon olmaması durumdaki demet parametrelerini ilgili enerji skalasında göstermektedir. Görüldüğü üzere emittans halen istenen seviyede değildir ve sönüm zamanında bir değişiklik olmamıştır.

Bundan sonra, emittansın halen istenen değere düşürülememesinden dolayı, ilgili diğer tartışmalar kapsamında, faz ilerlemesi optimizasyonunun yanı sıra iki öneride bulunulmuştur: normal sönüm ve Robinson sönüm magnetlerinin dahil edilmesi (Etisken vd. 2019b). Sonraki bölümde normal sönüm ve Robinson sönüm magnetlerin demet özellikleri üzerindeki etkisi ve SPS için uygun magnet kombinasyonu tartışılmıştır.



Şekil 4.2 SPS hızlandırıcısı için yatay emittans değerinin farklı yatay ve düşey faz ilerlemesi ile parametrizasyonu

Çizelge 4.1 SPS için mevcut durumda, üzerine hiçbir ekleme yapılmadan, yalnızca faz ilerlemesi optimizasyonu yapılarak elde edilen parametreler

Parametre	Değer
Giriş enerjisi [GeV]	6
Çıkış enerjisi [GeV]	16
Çevre uzunluğu [m]	6911.5
Bükme yarıçapı [m]	741.63
Bükücü magnet uzunluğu [m]	6.26
Bükücü magnet manyetik alanı (en düşük) [Gs]	269.8
Bükücü magnet manyetik alanı (en yüksek) [Gs]	719.8
Emittans (hor.) (giriş enerjisi) [nm.rad]	4.88
Emittans (hor.) (çıkış enerjisi) [nm.rad]	34.7
Tur başına enerji kaybı (giriş enerjisi) [MeV]	0.154
Tur başına enerji kaybı (çıkış enerjisi) [MeV]	7.82
Doğal kromatiklik [h/v]	-72/-40
Sönüm zamanı (hor.) (giriş enerjisi) [s]	1.79

4.2 Sönüm Magnetleri

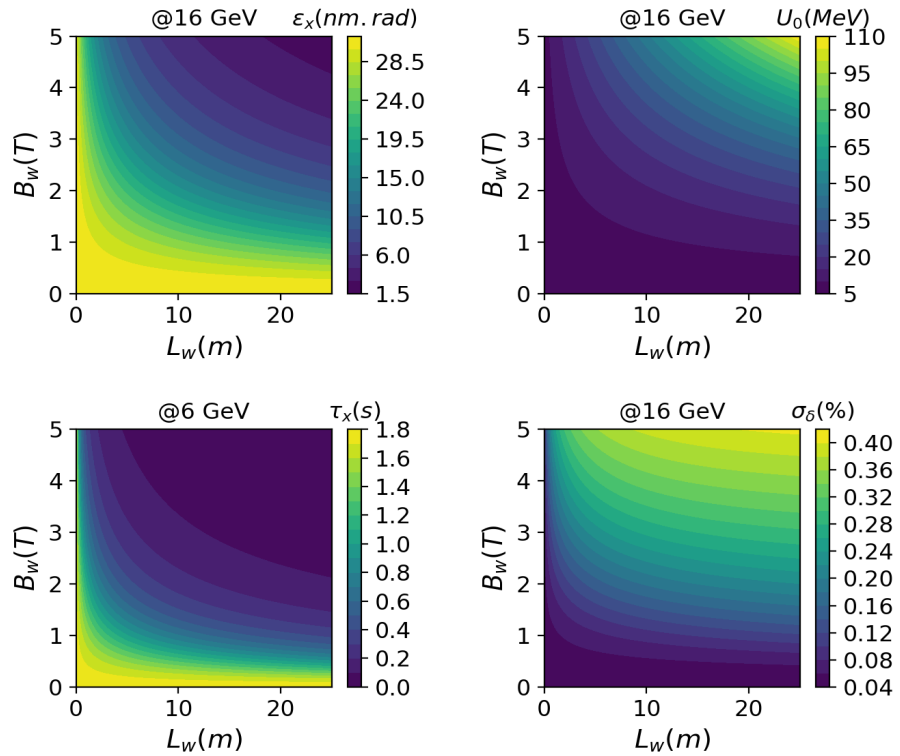
Bir FODO hücresi için minimum yatay emittans değeri yaklaşık 135^0 faz ilerlemesi ile elde edilir. Ancak en optimum değer seçilmesi durumunda bile SPS hızlandırıcısı için emittans 30 nm.rad'ı aşmaktadır (Şekil 4.2) ve sönüm zamanı da ayrıca istenen seviyeden çok uzaktadır.

Faz ilerlemesi optimizasyonunun yanı sıra, emittansı düşürmek ve sönüm zamanını kısaltmak için manyetik eklenti cihazları kullanılabilir: Robinson ("Robinson wiggler magnet") ve normal sönüm magnetleri ("damping wiggler magnet").

Daha evvel yüklü parçacığın çembersel hızlandırıcı içerisinde sinkrotron ışınımı yaptığını ve bunun da betatron salınımında, emittans değerinde, azalmaya neden olduğu belirtilmişti. Burada bahsi geçen sönüm magneti, temelde kısa dipol magnetlerin ardı ardına farklı yönlerde dizilmesiyle elde edilen özel bir magnettir ve sinkrotron ışınımı vasıtasıyla bu sönüme etki eder. Magnet tasarımı sayesinde, orbit değişmeden kalırken, önemli ölçüde sinkrotron ışınımına neden olur. Sönüm magnetlerinin yerleştirildiği konum önemlidir. Yatay emittansın kuantum uyarım etkisi dispersiyon fonksiyonuna bağlı olarak gerçekleşir. Demet emittansının kuantum uyarım ile artması için sinkrotron ışınımının

dispersiyonun olduğu bölgelerde gerçekleşmesi gerekir. Dolayısıyla, bu sönüm magnetleri, kuantum uyarımı en aza indirmek için dispersiyonun olmadığı yerde kullanılır. Sönüm magnetinin kendi dispersiyonu olduğu için kuantum uyarımdan tam olarak kaçınmak mümkün değildir. Ancak yine de sönüm magnetinden yüksek derecede verim almak için (düşük emittans anlamında) düz bölgelere yerleştirmek önemlidir. Burada özetle yapılan, sinkrotron ışınımı etkisi artırılırken kuantum uyarımı olabildiğince değişmeden bırakmaktır (Widemann 2003, Lee 2015, Bryant ve Johnsen 1993, Wolski 2014a).

Normal sönüm ve Robinson sönüm magnetlerin demet üzerinde farklı etkileri vardır. Bu etkiler, bu kısımda ve bölüm 4.3'te ayrı ayrı detaylandırılmıştır. Burada öncelikle, sönüm magnetinin ("damping wigglers"), sönüm zamanı, tur başına enerji kaybı, enerji yayılımı ve emittans üzerindeki etkileri verilmiştir. Bu parametrelerin sönüm magneti ile değişimi şu şekildedir:



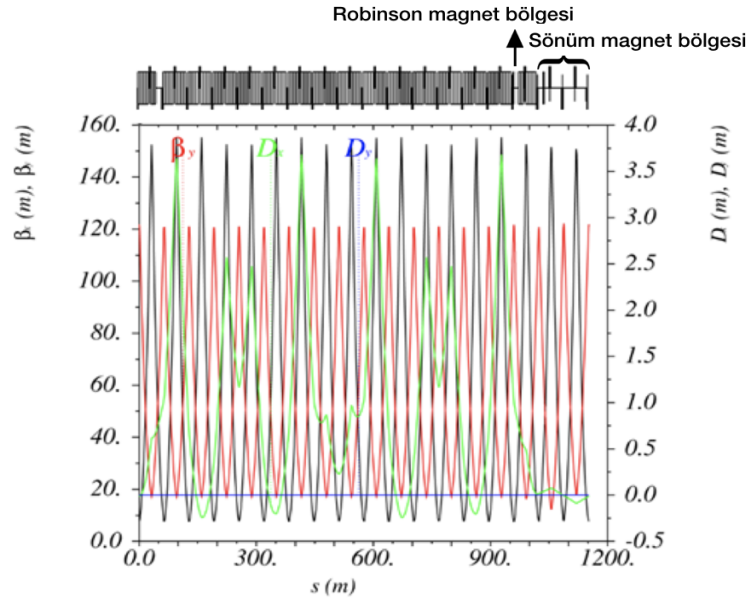
Şekil 4.3 Çıkış enerjisinde yatay emittans (üst-sol), tur başına enerji kaybı (üst-sağ), enerji yayılımı (alt-sağ) ve giriş enerjisindeki sönüm zamanı (alt-sol) parametrelerinin sönüm magnet uzunluğu (L_w) ve manyetik alanı (B_w) ile parametrizasyonu

$$\tau_x = \frac{3E_0}{2\pi r_0 c^2} \frac{C}{\beta\gamma^2(J_x + F_w)} \quad (4.3)$$

$$\epsilon_x = \frac{c_q \gamma^2}{12(1 + F_w) J_x} \left(\frac{e_r \theta^3}{\sqrt{15}} + \frac{\beta_{xw} F_w B_w^2 \gamma^3}{16(B\rho)^3} \right) \quad (4.4)$$

$$U_0 = 2\pi c_q \frac{E^4}{NI} (1 + F_w) \quad (4.5)$$

$$\sigma_s = \gamma \left(\frac{Bc_q(1 + F_w \frac{B_w}{B})}{B\rho(3 - J_x + 2F_w)} \right)^{1/2} \quad (4.6)$$



Şekil 4.4 SPS hızlandırıcısının, bir süper-periyot için, normal sönüm ve Robinson sönüm magnetlerin yerini de gösterecek şekilde optik fonksiyonları. Yatay (siyah), düşey (kırmızı) betatron fonksiyonları ve yatay dispersiyon (yeşil) fonksiyonu

Burada $F_w = \frac{L_w B_w^2}{4\pi B^2 \rho}$ sönüm magnet parametrelerine bağlı, B_w sönüm magneti manyetik alanı, L_w sönüm magneti magnetin uzunluğunu temsil eder. N toplam dipol magnet sayısı, l dipol magnet uzunluğu, ρ bükme yarıçapı, J_x sönüm paylaşım sayısı, γ Lorentz faktörü, θ dipol magnetin bükme açısı ve β_{xw} ise sönüm magnet bölgesindeki ortalama betatron fonksiyonudur.

Şekil 4.3, yatay emittans (üst-sol) değerinin, tur başına enerji kaybının (üst-sağ), enerji yayılımının (alt-sağ) çıkış enerjisindeki, sönüm zamanının (alt-sol) ise giriş enerjisindeki toplam sönüm magneti uzunluğu ve magnet alanı ile birlikte parametrisasyonunu (analitik) gösterir. Buradan görüldüğü üzere, gerekli emittans, 23 m uzunluğunda 5 T manyetik alana sahip sönüm magneti ile istenen seviyeye düşürmek mümkündür. Buna ek olarak, sönüm zamanı azalırken, enerji yayılımı artış gösterir. Ancak en önemlisi, söz konusu bu durumda tur başına enerji kaybı çok yükselmektedir (>100 MeV). Bu yüksek tur başına enerji kaybindan dolayı, emittans değerini azaltırken tur başına enerji kaybının kabul edilebilir düzeylerde olacağı başka bir yol aranmıştır. Bu nedenle Robinson sönüm magnet olarak isimlendirilen özel bir magnet incelenmiştir.

4.3 Robinson Sönüm Magnet

Bir Robinson sönüm magneti (“Robinson wiggler magnet”), normal sönüm magnetten biraz farklı olarak, bükücü-odaklayıcı magnetlerin (“combined function magnet”) ardı ardına dizilmesi ile oluşturulan özel bir magnetdir. Bu magnetler yatay emittansı ciddi miktarda azaltırken, enerji yayılımının artması yönünde bir etki gösterir (Baconnier vd. 1985, Goetsch vd. 2015, Goetsch vd. 2014, Robinson 1958, Abualrob vd. 2012, Abualrob vd. 2018, Minty ve Zimmermann 2003, Jaeschke vd. 2020). Enerji yayılımındaki bu gösterdiği artıştan dolayı, hızlandırıcıya yerleştirilebilecek Robinson sönüm magnet sayısı sınırlıdır. Aksi halde enerji yayılımı sonsuza gitmektedir (denklem 4.8). Bu sınırlamadan dolayı, SPS hızlandırıcısı için normal sönüm magneti ve Robinson sönüm magnetlerin aynı anda kullanılması planlanmıştır. Böylece, emittans istenen düzeye indirilirken tur başına enerji kaybının da kabul edilebilir seviyelerde tutulması planlanmaktadır. Ek olarak, giriş enerjisinde gerekli sönüm zamanı da elde edilmiş olur (Etisken vd. 2019b).

Bu magnetler dördüncü sinkrotron integralini (I_4) modifiye ederek D parametresini (sönüm paylaşım numarası, “damping partition number”) değiştirir. Bu ise emittans ve enerji

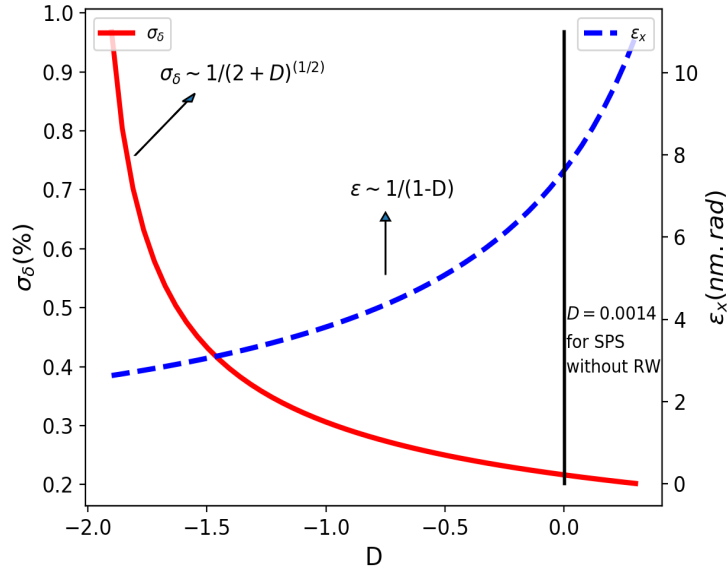
yayılımı parametrelerini aşağıdaki şekilde belirtildiği gibi etkiler.

$$\epsilon = c_q \gamma^2 \frac{I_5}{J_x I_2} \quad (4.7)$$

$$\sigma^2 = c_q \gamma^2 \frac{I_3}{J_z I_2} \quad (4.8)$$

Burada $J_x = 1 - D$, $J_z = 2 + D$, $D = I_4/I_2$, ϵ emittans, σ enerji yayılımı, $I_{2,3,4,5}$ sinkrotron ışınım integralleri, D ise sönüm paylaşım numarasıdır.

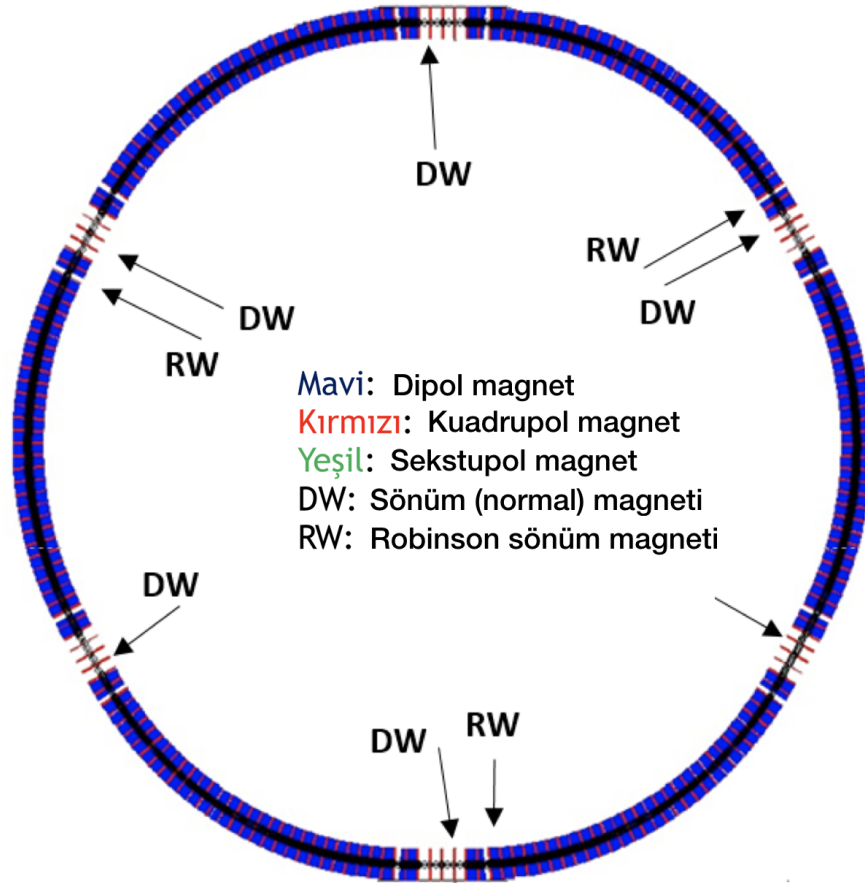
Şekil 4.5'te yatay emittans ile enerji yayılımının, D parametresi ile parametrizasyonunu göstermektedir. Sırasıyla mavi ve kırmızı kesikli çizgiler ile normal sönüm (12.5 m, 3.5 T)



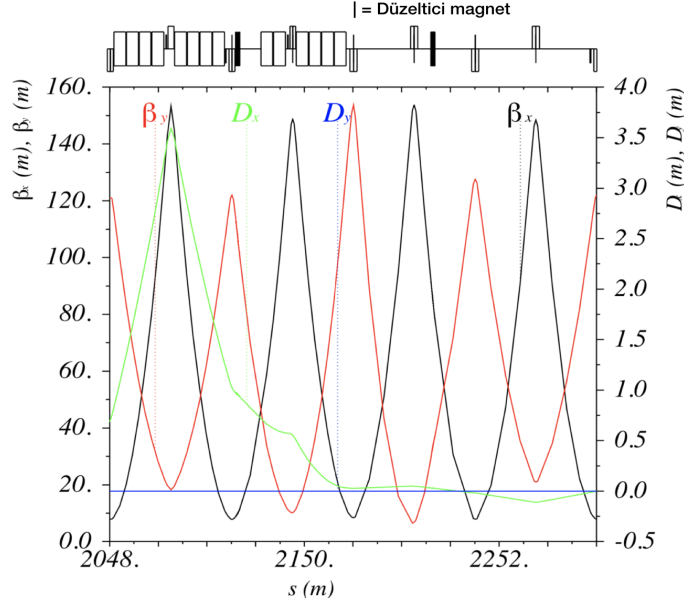
Şekil 4.5 Yatay emittans (ϵ_x) (mavi) ve enerji yayılımının (σ_δ) (kırmızı) Robinson sönüm magnetin etkisi ile değişen sönüm paylaşım numarası (D) ile parametrizasyonu. Bu hesaplama çıkış enerjisi için, sönüm magneti de hesaba katılarak yapılmıştır

ve Robinson sönüm magneti dahil edilir şekilde yatay emittans ve enerji yayılımını göstermektedir. SPS hızlandırıcısı için normalde Robinson sönüm magnet kullanılmadığı durumda $D = 0.0014$ 'tür ve Robinson sönüm etkisi eklenmeye başladıkça negatif yönde artar: Böylece emittans ciddi oranda azalırken enerji yayılımı artış etkisi göstermektedir. Dördüncü sinkrotron integralinin değiştirilmesi için, denklem 2.49'dan görülebileceği üzere, dispersiyonun sıfırdan farklı olması gerekir (Tydecks 2016). Bu nedenle, Robinson sönüm magnetler, dispersiyonlu bölgeye yerleştirilmiştir.

Şekil 4.6 tüm SPS hızlandırıcısının genel görünümünü ve şekil 4.4 de bir süper-periyotun optik fonksiyonlarını göstermektedir. Ayrıca bu şekilde, normal sönüm ve Robinson sönüm magnetlerin yerleri de gösterilmektedir. Buna ek olarak, sönüm magnetler düz bölgelere eşit olarak, hızlandırıcının periyodikliğini korumak için, yayılarak yerleştirilmiştir. Bunun yanı sıra, normal sönüm ve Robinson sönüm magnetinin, betatron fonksiyonlarını bozarak periyodikliği etkilemesini önlemek için, bu magnetlerin yerleştirildiği alanlara



Şekil 4.6 SPS hızlandırıcısının şematik gösterimi



Şekil 4.7 SPS hızlandırıcısının, normal sönüm ve Robinson sönüm magnetin bulunduğu hücrelerin optik fonksiyonları. Yatay (siyah), düşey (kırmızı) betatron fonksiyonları ve yatay dispersiyon (yeşil) fonksiyonu

düzeltilici magnetler konulmuştur. Şekil 4.7, normal sönüm ve Robinson sönüm magnetlerinin konulduğu ve düzeltilici magnetlerinde görülebildiği (şeklin üzerinde magnet örgü içerisindeki düz çizgi şeklinde gösterilen magnetler) iki FODO hücresinin demet optiği fonksiyonlarını göstermektedir.

Sonuç olarak, normal sönüm magnetleri dispersiyonsuz bölgelere 3.5 T manyetik alan ve 12.15 m uzunluğu (toplam) ile konurken Robinson sönüm magnetler dispersiyonlu bölgeye konulmuşlardır. Robinson magnetin manyetik alanı 0.5 T ve uzunluğu 6 m'dir (toplam) (Etisken vd. 2019b). Bu hesaplamalar ile birlikte tur başına enerji kaybı ve enerji yayılımı, sönüm zamanı ve yatay emittans istenen şekilde (Çizelge 4.3) sağlanabilmektedir (Etisken vd. 2019b).

4.4 SPS için Çıkış Enerjisi Tartışması

Çıkış enerjisi, projenin ilk aşamalarında 20 GeV olarak planlanmıştır (Papaphilippou vd. 2016, Etisken vd. 2018). Ancak bu seçeneğin yüksek tur başına enerji kaybı oluşturmamasından dolayı, başka opsiyonlar da araştırılmıştır. Tüm bu çalışmalar, çizelge 4.2'de

Çizelge 4.2 Farklı çıkış enerjisi seçenekleri için SPS hızlandırıcısı parametrelerinin karşılaştırılması

Parametre	20 GeV	18 GeV	16 GeV
Yatay geo. emittans [nm·rad] @ çıkış enerjisi	5.92	5.60	5.64
Tur başına enerji kaybı [MeV] @ çıkış enerjisi	128.0	73.9	31.5
Yatay sönüm zamanı [s] @ giriş enerjisi	0.003	0.005	0.01
Denge enerji yayılımı [%] @ çıkış enerjisi	0.6	0.5	0.38
RF voltajı [MV] @ çıkış enerjisi	160	90	45
Sönüm magnet alanı [T]	6	5	3.5
Sönüm magnet uzunluğu (toplam) [m]	12.15	12.15	12.15
Robinson sönüm magnet alanı [T]	0.5	0.5	0.5
Robinson sönüm magnet uzunluğu (toplam) [m]	12	12	6

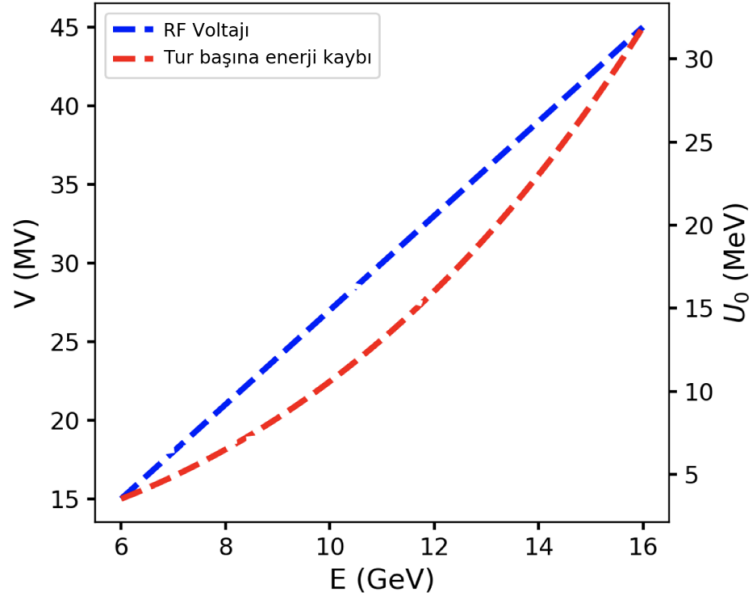
özetlenmiş ve karşılaştırılmıştır.

Görüldüğü üzere, tüm çıkış enerjisi seçeneklerinde gerekli emittans ve sönüm zamanı değerlerine ulaşılmıştır. Ancak 20 GeV ve 18 GeV seçeneklerinde tur başına enerji kaybı yüksek hale gelmiştir. Tur başına enerji kaybı 20 GeV ve 18 GeV için sırasıyla 128 MeV ve 73 MeV'dir. Ayrıca bu enerjilerde enerji yayılımı da yine belirlenen değerin üzerindedir. 16 GeV opsiyonunda ise tur başına enerji kaybı 31.5 MeV, enerji yayılımı % 0.38'dir.

Buna göre, 16 GeV seçeneği SPS için esas opsiyon olarak belirlenmiştir. Böylece, gerekli emittans değeri kabul edilebilir tur başına enerji kaybı ve enerji yayılımı ile birlikte elde edilmiş olur. Ayrıca bu opsiyonda, diğer seçeneklere nazaran daha düşük RF voltajı, daha kısa ve daha düşük manyetik alanlı sönüm magneti gerekmektedir.

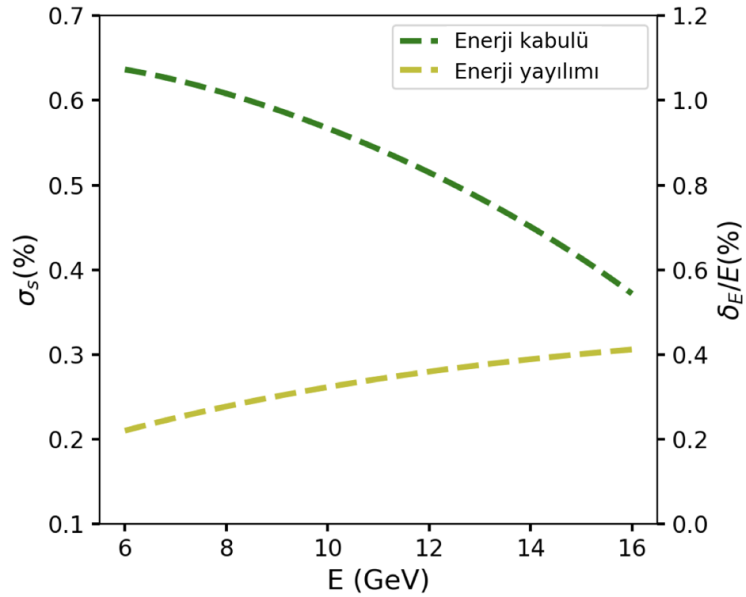
4.5 RF Voltajı ve Enerji Kabulü

Alternatif ön-enerji öteleyici hızlandırıcı tasarımına benzer şekilde SPS seçeneği için de enerji kabulü ve karşılık gelen RF parametresi hesaplamaları yapılmıştır. SPS hızlandırıcısı için, halihazırda var olan bir vakum haznesi olduğundan çizelge 1.2'de belirtilen sınırlamalara, enerji yayılımı bakımından ek sınırlama gelmektedir. Bölüm 7.'de detaylı tartışıldığı üzere, kabul edilebilir enerji yayılımı (rms.) çıkış enerjisinde yaklaşık % 0.3 olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.8 SPS hızlandırıcısı için enerji artışı ile birlikte tur başına enerji kaybı (U_0) (kırmızı) ve RF voltajı (V) (mavi) parametreleri

SPS tarafından kabul edilebilen maksimum enerji yayılımı düşünüldüğünde, SPS hızlandırıcısının giriş enerjisinde enerji kabulü % 1.0 olarak belirlenmiştir. Bu değer belirlenmesi için detaylı tartışma bölüm 7.'de yapılmıştır. Şekil 4.8, 4.9, enerji kabulü,

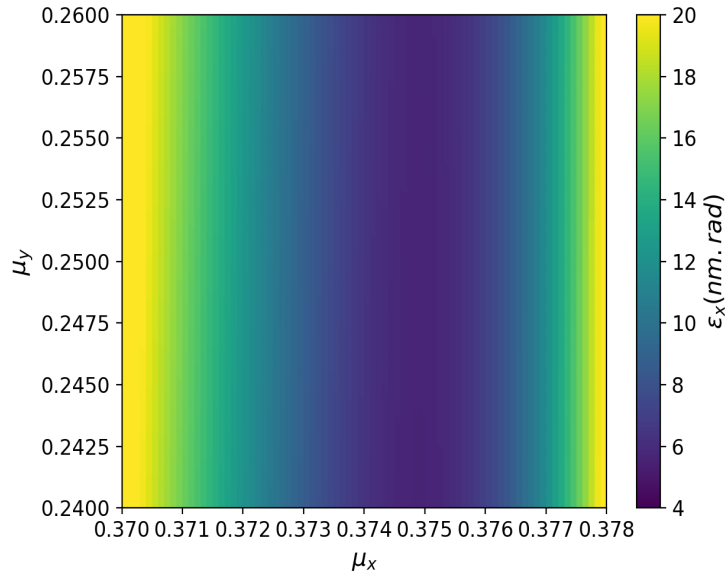


Şekil 4.9 SPS hızlandırıcısı için enerji artışı ile birlikte enerji yayılımı (σ_s) (sarı) ve enerji kabulü ($\delta E/E$) (yeşil) parametreleri

tur başına enerji kaybı ve enerji yayılımının, RF voltajı ile enerji artışı boyunca değişimini göstermektedir. Böylece, minimum RF voltajı, istenen enerji kabulünü sağlayabilecek şekilde 15 MV olarak belirlenmiş ve çıkış enerjisinde 45 MV olacak şekilde lineer olarak artırılmıştır. Ayrıca enerji yayılımının enerji artışı boyunca enerji kabulünden düşük olduğu da gösterilmiştir. Burada, tur başına enerji kaybı da 3.4 MeV ile 31.5 MeV arasında değişmektedir.

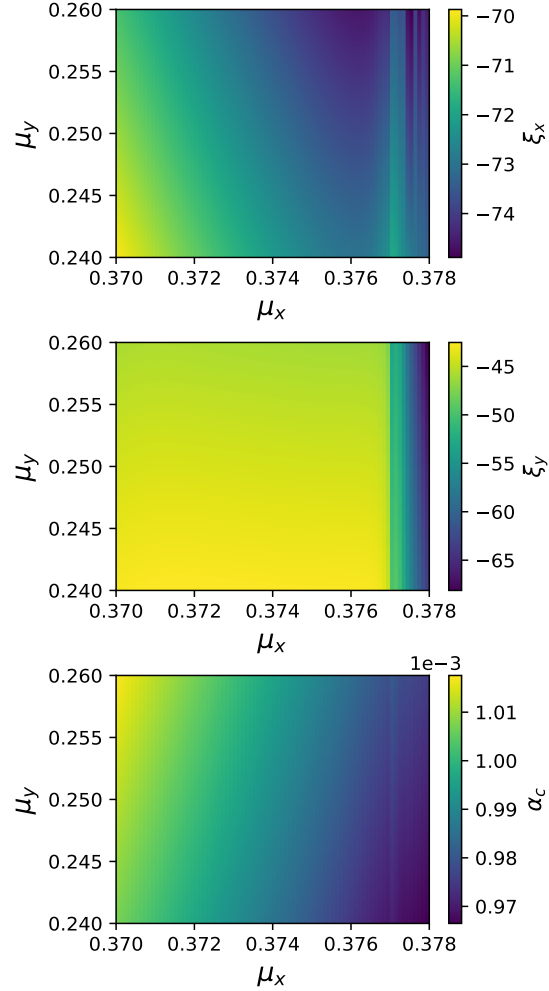
4.6 Faz İlerlemesi ve Dinamik Aralık

SPS hızlandırıcısı için daha evvel (Bölüm 4.1), emittans ile faz ilerlemesi ilişkisi tartışması yapılmıştı. Bu kısımda, farklı yatay ve düşey faz ilerlemelerine karşılık gelen yatay emittans hesaplaması MADX programı ile detaylı bir şekilde yapılmıştır. Bu detaylı çalışma bir FODO hücresinin faz ilerlemesinin değiştirilerek tüm halka için emittansın hesaplanması şeklinde (Şekil 4.10) yapılmıştır. Şekil 4.2, yalnızca $\mu_x = 0.375$ civarındaki sınırlı bir bölgenin gerekli olan emittansı sağlayabildiğini göstermektedir. Emittans-faz ilerlemesi taramasına ek olarak, yatay/düşey kromatiklik (üst/orta), momentum sıkışıklık faktörü (“momentum compaction factor”) (alt) parametreleri de incelenmiş



Şekil 4.10 SPS hızlandırıcısının yatay emittansın farklı yatay ve düşey faz ilerlemeleri ile parametrizasyonu

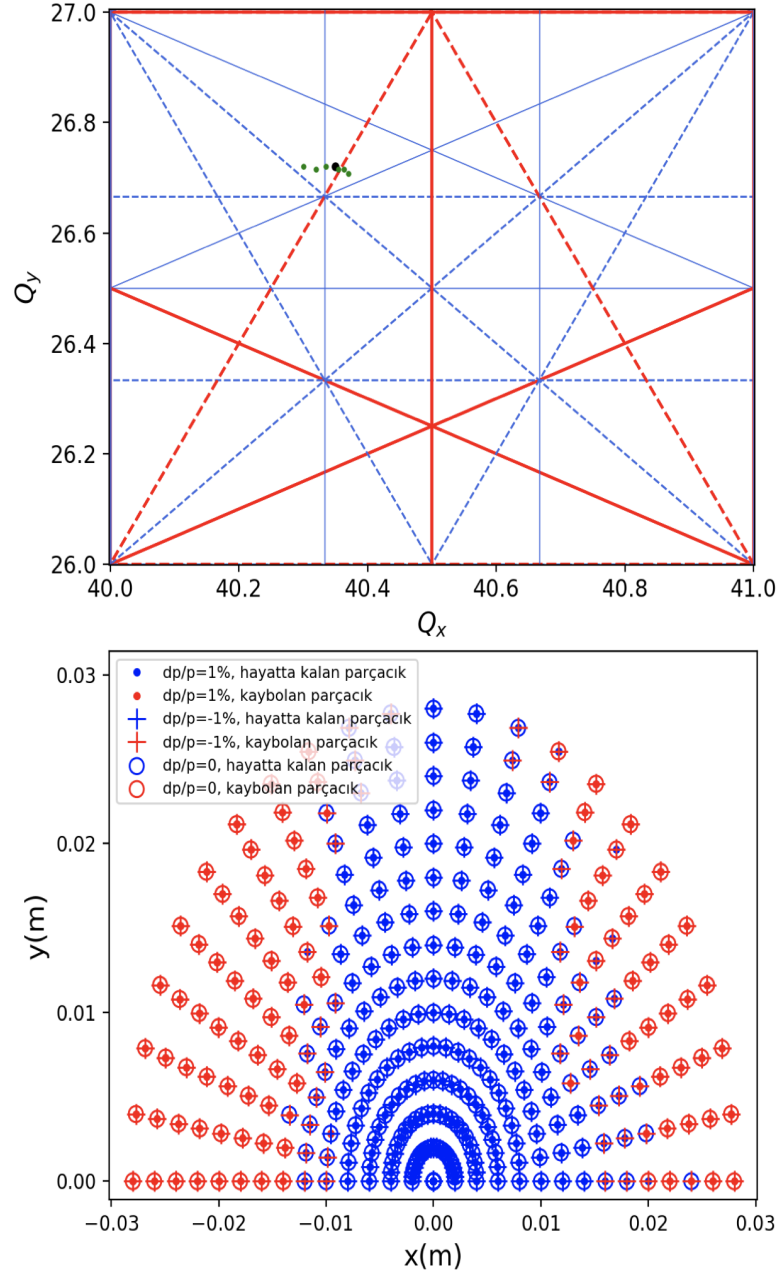
ve şekil 4.11’de gösterilmiştir. Buna göre, emittans değeri 0.375 civarında yatay faz ilerlemesinde en düşük değerini alır. Momentum sıkışıklık faktörü, artan yatay faz ilerlemesinde küçülme eğilimindedir. Doğal kromatiklik (birinci derece kromatiklik, lineer kromatiklik) faz ilerlemesi ile çok değişmemektedir.



Şekil 4.11 Doğal kromatiklik (x/y, üst/orta) ve momentum sıkışıklık faktörü (alt) parametrelerinin faz ilerlemesine bağlı olarak değişimi

Gerekli emittans değerini sağlayan sınırlı yatay faz ilerlemesi ve SPS’in mevcut düşey faz ilerlemesi, hızlandırıcının betatron ayar tam sayı kısmını vermiş olur: $Q_x, Q_y = 40, 26$. Çalışma noktası ise şu şekilde belirlenmiştir: $(Q_x, Q_y) = (40.350/26.721)$. Bu, bir FODO hücresi için $(\mu_x, \mu_y) = (0.374/0.238)$ değerine karşılık gelmektedir.

Şekil 4.12’de (üst) ayar diyagramı gösterilmektedir. Sistemik (kırmızı), sistemik olmayan (mavi), normal (düz çizgi) ve eğri (kesikli çizgi) rezonanslar bu diyagramda üçüncü



Şekil 4.12 Üçüncü derece kadar rezorans diyagramı (üst): sistematik (kırmızı), sistematik olmayan (mavi), normal (düz çizgi) ve eğri (kesikli çizgi) rezorans çizgileri. Siyah nokta, çalışma noktası, yeşil noktalar +/-% 1.0'e kadar momentum sapması durumdaki ayar kaymasını gösterir. İdeal ve ideal olmayan momentumdaki parçacıklar için dinamik aralık (alt)

dereceye kadar gösterilmiştir. Bu çalışma noktası, gerekli emittans değerini verirken aynı zamanda tam ve yarım rezonans çizgilerinden uzaktadır. Parçacık izleme (“tracking”) simülasyonları MAD-PTC programı ile yapılmış ve parçacıklar farklı başlangıç

Çizelge 4.3 FCC- e^+e^- projesi enjektör tesisi ön-enerji öteleyici hızlandırıcısı olarak SPS halkası parametreleri

Parametre	Sembol	Giriş	Çıkış
Demet enerjisi	E [GeV]	6	16
Geo. emittans (yatay)	ϵ_x [nm·rad]	0.73	5.6
Demet uzunluğu	σ_z [m]	0.041	0.055
Momentum yayılımı	σ_δ	0.3×10^{-2}	0.38×10^{-2}
Çevre uzunluğu	C [m]	6911.5	6911.5
Harmonik sayısı	h	9215	9215
Mom. sıklık fak.	α_c	0.98×10^{-3}	0.98×10^{-3}
Ayar (h/v/s)	$Q_{h/v/s}$	40.38/26.71/0.08	40.38/26.71/0.08
Tur başına enerji kaybı	U_0 [MeV]	3.4	31.5
Sönüm zamanı (h/v/l)	$\tau_{h/v/l}$ [s]	0.03/0.03/0.015	0.01/0.01/0.005
RF frekansı	F_{rf} [MHz]	400	400
RF voltajı	V_{rf} [MV]	15	45
Dipol magnet uzunluğu	l_{bend} [m]	6.26	6.26
Dipol magnet alanı	B_{dipole} [T]	0.026	0.071
Doğal kromatiklik (h/v)	$\xi_{h/v}$	-72/-40	-72/-40
Dipol magnet sayısı	N_{bend}	744	744
DW uzunluğu (toplam)	L_{dw} [m]	12.15	12.15
DW alanı	B_{dw} [T]	3.5	3.5
DW magnet sayısı	N_{dw}	6	6
DW periyodu	λ_{dw} [m]	0.05	0.05
RW uzunluğu (toplam)	L_{rw} [m]	6	6
RW alanı	B_{rw} [T]	0.5	0.5
RW magnet sayısı	N_{rw}	3	3
Enerji kabulü	$\frac{\delta E}{E}$ [%]	1.0	-

koşullarından başlayarak 4400 tur (yaklaşık bir sönüm zamanı) boyunca takip edilmiştir. Bu hesaplama sonucunda ideal olmayan momentumdaki parçacıklar dahil, magnet hataları hariç, dinamik aralık yatay yönde 10 mm olarak bulunmuştur. Düşey yönde ise 30 mm'ye kadar (vakum haznesi sınırı) sorun gözükmemektedir (Şekil 4.12). Dinamik aralık çalışmalarına, alan ve hizalama hataları da projenin ilerleyen aşamalarında eklenmelidir.

Bu bölümde açıklanan değerlendirmeler ve hesaplamalar sonucunda, FCC- e^+e^- enjektörü alternatif ön-enerji öteleyici hızlandırıcısının demet parametreleri çizelge 4.3'te özetlenmiştir. Ayrıca, SPS hızlandırıcısının, FCC- e^+e^- enjektör tesisi ön enerji öteleyici halkası olarak kullanılması için yapılan kolektif etkiler, sinkrotron ışınımı, kabul edilebilir emittans ve enerji yayılımı hesaplamaları ve tartışması bölüm 5., 6. ve 7.'de açıklanmıştır.

5. KOLEKTİF ETKİLER

Demet içerisinde, parçacıklar arasındaki etkileşimlerden dolayı ortaya çıkan etkiler, kolektif etkiler (“collective effects”) olarak isimlendirilir (Wolski 2014b). Kolektif etkiler, paketçiğin kendi içerisindeki etkileşimleri, paketçikler arasındaki etkileşimleri, demetin hızlandırıcı yapısı ile etkileşimleri kapsar. Bu etkiler, betatron ayar değişimi, emittans büyümesi ve demet kayıpları gibi istenmeyen sonuçlara neden olabilir (Chao 1993, Rumolo vd. 2005, Ferrario vd. 2014). Bu nedenle, kolektif etkileri ve kararsızlık şartlarını FCC- e^+e^- enjektörü ön-enerji öteleyici hızlandırıcı seçenekleri için, hızlandırıcının performansını etkileyen ana etmenlerden biri olabileceğinden ötürü incelemek önemlidir. Bu bölümde, kolektif etkilerin demet özellikleri üzerindeki etkisi ve/veya sınırlandırmaları, olası kararsızlıkları önlemek adına, analitik hesaplama yoluyla incelenmiştir (Chao 1993, Rumolo vd. 2005, Ferrario vd. 2014, Rumolo vd. 2008, Wolski 2014b, Koukovini-Platia vd. 2011, Nagaoka 2017, Zimmermann vd. 1997, Rumolo ve Iadarola 2017, Zimmermann 2002, Belli vd. 2018, Zimmermann 2010, Bane vd. 2010, Chao vd. 2015, Antoniou 2012, Lonza ve Schmickler 2013, Brandt vd. 1989).

Kolektif etkilerin analitik hesaplarının gerçekleştirilebilmesi için alternatif halka ve SPS halkası demet parametreleri sırasıyla çizelge 3.4, 4.3’te belirtilmiştir. Burada belirtilen parametrelere ek olarak, ilerleyen kısımlarda görüleceği üzere bazı sabit değerlere ihtiyaç vardır. Bu sabitler de çizelge 5.1’de özetlenmiştir.

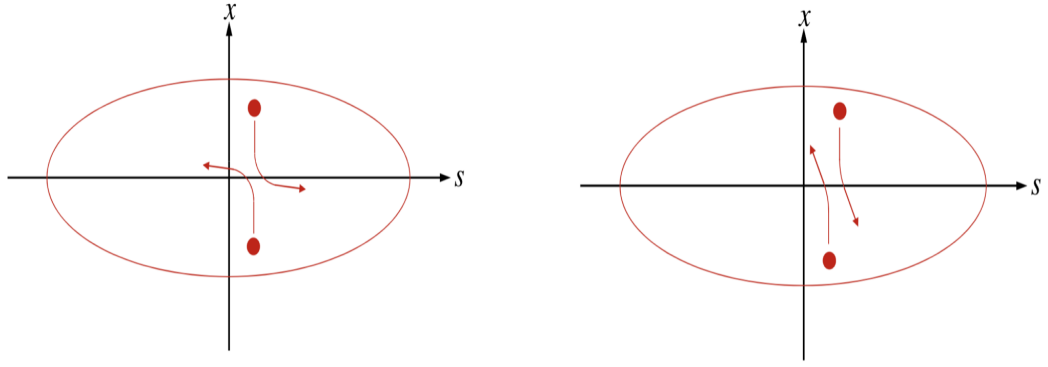
Çizelge 5.1 Kolektif etki hesaplamaları için gerekli olan sabit değerler

Sabit	Sembol	Değer
Elektron yarıçapı	r_e [m]	2.81794×10^{-15}
Vakum empedansı	Z_0 [Ω]	375
Elektron yükü	e [C]	1.602×10^{-19}
Elektron yükü	e [A.s]	1.5×10^{-19}
Işık hızı	c [m/s]	3×10^8
Proton yarıçapı	r_p [m]	1.54×10^{-18}
Alfven akımı	I_A [A]	17045
İletkenlik (Al)	σ [$\Omega^{-1}.m^{-1}$]	3.77×10^7

5.1 Demet-içi Saçılım (IBS)

Hızlandırıcılarda, dar bir hacime birçok parçacık sıkıştırıldığından demet içerisindeki parçacıkların birbirleriyle çarpışma olasılığı artar. Yüksek parçacık yoğunluklu paketçik içerisinde, iki parçacık birbirine çok yaklaştığında, yüklerinden dolayı etkileşim, genel anlamda sürekli yük dağılımı olarak değerlendirilen paketçiğin elektromanyetik alanında, ihmal edilemez yerel değişimlere neden olur. Bunlar demet içi çarpışmalar olarak ifade edilir ve demet içerisinde gözlemlenebilir bazı etkilere neden olur. Demet içi çarpışmalar, parçacıkların betatron ve sinkrotron salınımı hareketinin sonucu olarak rastlantısal şekilde gerçekleşir. Parçacıklar arasındaki çarpışma, saçılma süreci gibi değerlendirilir ve temelde parçacıkların momentumunun değişimine neden olur. Momentum değişiminin türüne göre bu saçılma iki terim altında değerlendirilir: demet-içi saçılım ("intra-beam scattering", IBS) ve Touschek etkisi. Genelde, demet içerisinde parçacıklar arası momentum değişimlerinde, parçacık kaybına neden olmayacak derecede ufak momentum değişimleri, parçacık kaybına neden olabilecek çarpışmalara oranla daha fazla gerçekleşir. Yani parçacıklar arasındaki bu etkileşmelerin bazı gözlemlenebilir sonuçları olur, fakat bunlar demet içerisinde parçacık kayıplarına neden olacak kadar değildir: buna demet-içi saçılım denir. Ancak, bazı durumlarda bu çarpışmadan kaynaklı momentum sapması, hızlandırıcının momentum kabulünü aşacak kadar büyük etkiye neden olarak demet içerisindeki parçacıkların kaybolmasına neden olabilir, bu duruma da Touschek etkisi adı verilir. Özetle, demet içerisinde, parçacık kaybına neden olacak kadar momentum değişimine sebep olan çarpışmalara Touschek etkisi denirken, demet içerisinde çok daha fazla sayıda gerçekleşen ancak demetin kaybolmasına neden olmayacak kadar küçük momentum değişimlerinin olduğu çarpışmalara demet-içi saçılma denir. Şekil 5.1, demet-içi saçılım ile Touschek etkisi arasındaki farkı temsil eden bir çizimdir.

Touschek etkisi, uzun süreler kullanıcı tarafından yüksek kararlılıkta ve parlaklıkta ışınım demetine ihtiyaç duyduklarından, demet ömrüne ("lifetime") etkisi (Touschek etkisi demet ömür zamanı tipik olarak bir ya da bir kaç saat ölçeğindedir) büyük olacak bu etki, düşük emittans ile çalışan sinkrotron ışınımı tesisleri depoloma halkarında önemli hale gelir. Sönümleme halkası ("damping ring") veya enerji öteleyici gibi halkalarda demet, hızlandırıcı içerisinde kısa süreler kalarak hemen sonraki hızlandırıcıya aktarıldığından, bu etki çoğunlukla bir limit olarak değerlendirilmez. Demet içi saçılma durumunda, ani demet kayıpları olmasa da süreç içerisinde gerçekleşen birçok çarpışma ve momentum değişimi sonucu, demet hacmi önemli ölçüde büyümeye neden olabilir. Bu bölümde



Şekil 5.1 Touschek etkisi (sol) ve demet-içi saçılımda (sağ) momentum değişimi temsili (Wolski 2009)

demet-içi saçılmadan kaynaklı alternatif ön-enerji öteleyici hızlandırıcısı tasarımındaki etkisine bakılmıştır. Genelde, sinkrotron ışınımı etkisinden dolayı elektron makinelerinde proton veya iyon hızlandırıcılarına göre emittans artmasının tersi yönde bastırabilecek etki olsa da düşük emittans ve yüksek parçacık yoğunluğu gerekliliklerinden dolayı lepton hızlandırıcılarında da mutlaka incelenmesi gereken bir durumdur (Wolski 2014b, Wolski 2009, Wiedemann 2015).

Temelde, demet-içi saçılım etkisi, demetin enerji yayılımını artırır ve dispersiyonun varlığından dolayı bu ayrıca emittans büyümesine neden olur. Hızlandırıcılarda bu etkiyi anlamak için Standart Pwinski metodu başta olmak üzere çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Temelde bu yöntemlerin hepsi, demette demet-içi saçılım kaynaklı değişimi ifade etmek için kullanılan büyüme oranını ("growth rate") hesaplamayı hedefler. Boyuna, yatay ve düşey yönde büyüme oranları sırasıyla şu şekilde ifade edilir (Wolski 2009, Wolski 2014b, Antoniou 2012):

Çizelge 5.2 Giriş platosunda, IBS dahil ederek emittans hesaplanmasında kullanılan demet parametreleri

Parametre	Değer
Enerji [GeV]	6
RF voltajı [MV]	2.5
Giriş platosu süresi [s]	0.4
Harmonik sayısı	2706
Tur başına enerji kaybı [MeV]	0.57
Demet uzunluğu [mm]	10
Paketçik yoğunluğu	2.13×10^{10}
Giriş emittansı [nm.rad] (h/v)	0.55/0.11

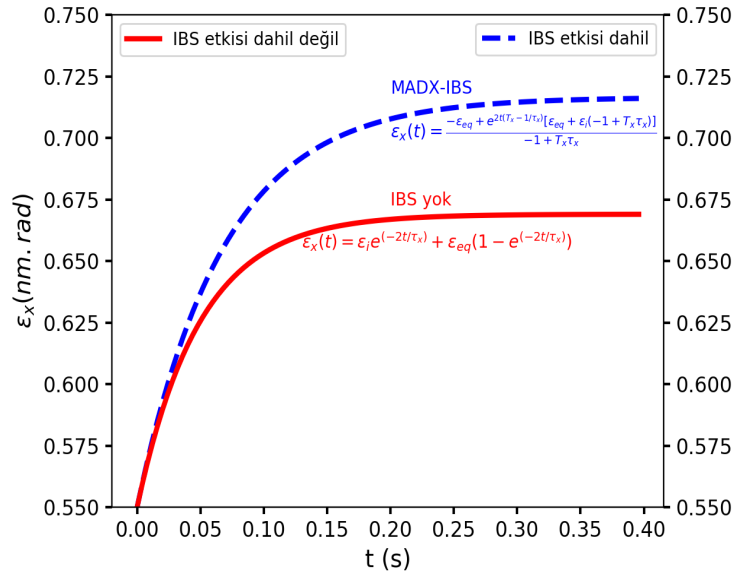
$$\frac{d\sigma_\delta}{dt} = \frac{1}{T_\delta} \sigma_\delta \quad (5.1)$$

$$\frac{d\epsilon_x}{dt} = \frac{2}{T_x} \epsilon_x \quad (5.2)$$

$$\frac{d\epsilon_y}{dt} = \frac{2}{T_y} \epsilon_y \quad (5.3)$$

Burada, T_δ , T_x ve T_y büyüme oranını temsil eder ve şu şekilde yazılabilir:

$$\frac{1}{T_i} = \langle f_i \rangle \quad (5.4)$$



Şekil 5.2 Alternatif ön-enerji öteleyici hızlandırıcı tasarımı için IBS ile (mavi kesikli çizgi) ve IBS dahil edilmeden (kırmızı sürekli çizgi) geometrik emittans değişimi

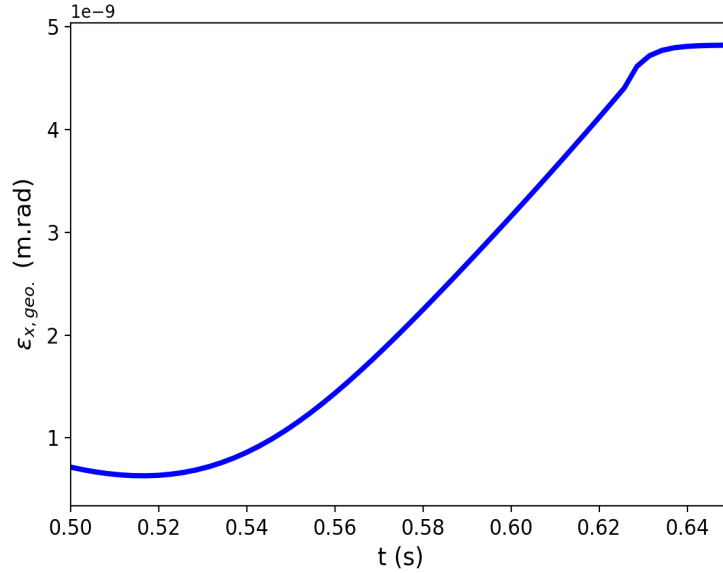
Burada, f_i fonksiyonu, demet özelliklerine; paketçik yükü, enerji, demet optiği ve denge yatay/düşey emittans, enerji yayılımına bağlı bir integrali temsil eder.

Daha evvel (bölüm 2.2.7, denklem 2.28), zamana göre değişimi yazılan ve tartışılan yatay emittans ifadesini, burada tartışılan demet-içi saçılımı etkisiyle birlikte şu şekilde yazılabilir:

$$\frac{d\epsilon}{dt} = -\frac{1}{\gamma(t)} \frac{d\gamma(t)}{dt} \epsilon - \frac{2}{\tau_x} \epsilon + \frac{2}{\tau_x} \epsilon_{eq} + \underbrace{\frac{2}{T_i} \epsilon}_{\text{IBS etkisi}} \quad (5.5)$$

Burada denklemin en sağ tarafındaki terim demet-içi saçılmadan gelen etkiyi gösterir. Özetle, emittans zaman içerisinde adyabatik sönüm, sinkrotron ışınımı sönümü, kuantum uyarım ve IBS büyüme etkisi ile değişir.

FCC- e^+e^- enjektör kompleksi alternatif ön-enerji öteleyici hızlandırıcısı giriş enerjisinde IBS etkisi hesaba katılarak MAD-X programı ile yatay emittans davranışına bakılmıştır. Bu hesap, CLIC sönüm halkası için yapılan hesaplamalarda kullanılan kod yardımıyla



Şekil 5.3 Alternatif ön-enerji öteleyici hızlandırıcısı için enerji artışı boyunca yatay geometrik emittans davranışı (IBS dahil)

yapılmıştır (Antoniou 2012). Çizelge 5.2’de, hesaplama sırasında kullanılan demet özellikleri verilmiştir. Buna göre, 6 GeV enerjili demetin giriş emittans değerleri yatay ve düşey düzlemde sırasıyla 0.55 ve 0.11 nm.rad, giriş RF voltajı 2.5 MV, harmonik sayısı 2706, tur başına enerji kaybı 0.57 MeV, giriş demet uzunluğu için 10 mm ve paketçik başına parçacık yoğunluğu 2.13×10^{10} şeklindedir.

Burada, giriş enerjisinde emittansın IBS etkisi dahil edilerek ve IBS etkisi hesaba katılmadan nasıl değiştiği gösterilir. Görüldüğü üzere, emittans üzerindeki IBS’ın büyüme etkisi yalnızca % 6’dır (Şekil 5.2).

Enerji artışı olduğu durumdaki emittans değişimi ise şekil 5.3’de gösterilmektedir. Emittans başlarda, sinkrotron ışınımı ve adiyabatik sönümün etkisiyle azalır, daha sonra kuantum uyarım ve IBS etkisi ile dengeyi bulur ve enerji ile birlikte artışa geçer.

5.2 Uzay Yüğü (SC)

Uzay yüğü (“space charge”, SC) ile, hızlandırıcı boyunca hareket eden bir parçacığa yükünden dolayı paketçikte yer alan diğer parçacıkların elektromanyetik alanın etkisi kastedilir. Bu etki betatron ayar kaymasına neden olan devamlı bir gradyen hatasına karşılık geliyor gibi düşünülebilir. İnkoherent (direkt) uzay yüğü betatron ayar kayması denklem 5.6 ile öngörülebilir. Burada, N_b paketçik popülasyonu, r_e elektron yarıçapı, C hızlandırıcının çevre uzunluğu, σ_z demet boyu, $\epsilon_{x/y}$ yatay ve düşey yönde geometrik emittans, D_x disperiyon ve σ_δ ise momentum yayılımıdır (Rumolo vd. 2008, Rumolo vd. 2005, Ferrario vd. 2014).

$$\delta Q_y^{inch} = \frac{N_b r_e C}{(2\pi)^{3/2} \gamma^3 \sigma_z} \sqrt{\frac{1}{\epsilon_y}} < \frac{\sqrt{\beta_y}}{\sqrt{\beta_x \epsilon_x + D_x^2 \sigma_\delta^2 + \sqrt{\epsilon_y \beta_y}}} > \quad (5.6)$$

Uzay yüğü etkisinden dolayı betatron ayar kayması, emittans, enerji yayılımı, betatron fonksiyonu, enerji ve paketçik yoğunluğu ile değişmektedir. Düşey yöndeki ayar kayması, giriş demet parametreleri, giriş enerjisi-denge durumunda ve çıkış enerjisinde hesaplanır.

Çizelge 5.3’de belirtildiği üzere, alternatif ön-enerji öteleyici öteleyici tasarımı için inkoherent uzay yükü ayar kayması ($\Delta_{Q_y}^{inch}$) sırasıyla giriş, denge durumu ve çıkış enerjisinde 0.0032, 0.028, 1.6×10^{-4} şeklindedir ve bu üç durum içinde çok büyük değildir. SPS için aynı hesaplama yapıldığında, sırasıyla giriş, denge durumu ve çıkış enerjisinde ayar kayması 0.0005, 0.018, 1.6×10^{-5} olur. Yatay yöndeki ayar kayması daha düşük olur. Kolektif etkiler, koherent veya inkoherent olarak da sınıflandırılır. Bu sınıflandırma, demetin içerisindeki bir parçacığın (inkoherent) veya demetin genelinin hareketiyle (koherent) ilişkili yapılmaktadır (Wolski 2014b, Ferrario vd. 2013). Uzay yükü etkisinden dolayı koherent etki görüntü yükten gelebilir. Uzay yükü etkisinden dolayı koherent ayar kayması (görüntü yük, “image charge”) demet boyundan ziyade vakum haznesinin yarıçapı ile ters orantılı olduğundan çok daha düşük olması beklenmektedir.

Tüm bunların sonucunda, uzay yükü etkisinin FCC e^+e^- enjektöründe ön-enerji öteleyici seçenekleri için sorun oluşturması beklenmemektedir.

5.3 Boyuna Mikro-Dalga Kararsızlığı (LMI)

Bir vakum haznesi içerisinde ultra-rolativistik şekilde hareket eden yüklü parçacıklardan oluşan bir paketçik düşünüldüğünde, yüklü parçacıkların oluşturduğu ve vakum haznesi ile etkileşen alan, demet içerisinde hareket eden arkadan gelen paketçiği etkileyebilir. Bu alanlara uyarılmış alanlar (“wake-fields”) denir. Vakum haznesi içerisindeki uyarılmış alanlar, parçacıklar üzerinde etki oluşturabilir. Vakum haznesi direnç-duvar empedansı (“resistive wall impedance”) boyuna mikro dalga kararsızlığı ve enine mod bağlaşım kararsızlığı (“transverse mode coupling instability”, TMCI) kaynağı haline gelebilir. Geniş bant empedansı belirli bir limiti aştığında kararsızlığa neden olur.

Boyuna mikro-dalga kararsızlığı eşik değeri Boussard kriteri denilen aşağıdaki formül ile öngörülebilir:

$$\frac{Z_0^{\parallel}}{n} = Z_0 \frac{\pi \gamma \alpha_c \sigma_\delta^2 \sigma_z}{2 N_b \cdot r_e} \left(\frac{b}{\sigma_z} \right)^2 \quad (5.7)$$

Burada Z_0 vakum empedansını (bu değer 375 Ohm civarındadır) temsil etmektedir (Wolski 2014b, Rumolo vd. 2008, Rumolo vd. 2005, Koukovini-Platia vd. 2011). Boyuna mikro-dalga kararsızlık eşik değeri (boussard kriteri), $\frac{Z_0^{\parallel}}{n_{th}} [\Omega]$) alternatif ön-enerji öteleyici halka tasarımı için giriş, denge hali ve çıkış enerjisinde sırasıyla 57.92, 1.44 ve 10.11 Ω 'dur. Bu değerler bu tasarım için öngörülen 1 Ω boyuna empedanstan yüksektir. Bu hesaplama SPS için yapıldığında, sırasıyla giriş, denge durumu ve çıkış enerjisi için 1167, 31.14, 100 Ω şeklindedir ve SPS'in boyuna empedansı olan 6.44 Ω 'dan yüksektir.

5.4 Enine Mod Bağlaşım Kararsızlığı (TMCI)

Baş-kuyruk kararsızlığı ("head tail instability") ile, paketçiğin baş kısmı tarafından oluşturulan enine uyarılmış alanların, paketçiğin kuyruk kısmının betatron salınımı üzerindeki etkisi kastedilir (Wiedemann 2015). Enine mod bağlaşım kararsızlığı ("transverse mode coupling instability", TMCI) olarak da bilinen güçlü baş-kuyruk kararsızlığı aşağıdaki gibi değerlendirilebilir:

$$R_{th}[k\Omega/m] = \frac{0.6E[GeV]Q_sQ}{\beta_y[m]Q_b[C]\sigma_t[ps]fr^2[GHz]} \quad (5.8)$$

Burada $Q_b = N_b e$ ($e = 1.602 \times 10^{-19}$), $fr = W_r / (2\pi)$, $W_r = c/b$, $\sigma_z[ps] = \sigma_z / c$ (ps biriminde demet uzunluğu).

Paketçik tarafından oluşturulan enine alanların etkisi olan enine empedans ile boyuna empedans birbirine bağlıdır (Wolski 2014b);

$$Z_t^{\perp} = \frac{c}{\pi b^2} \frac{Z_0^{\parallel}}{n} \quad (5.9)$$

Burada b vakum haznesi yarıçapıdır (Rumolo vd. 2008, Rumolo vd. 2005, Koukovini-Platia vd. 2011).

İlgili eşik değeri hesabı yapıldığında, alternatif ön-enerji öteleyici halka tasarımı için enine empedans değeri ($Z_t^\perp [M\Omega/m]$) 0.79 M Ω/m 'dir ve bu değer sırasıyla giriş, denge durumu ve çıkış enerjisindeki 5.28, 8.95 ve 37.0 M Ω/m eşik değerinden ($R_{th} [M\Omega/m]$) düşüktür. Bu hesaplamada alternatif ön-enerji öteleyici halkanın vakum haznesi 30 mm olarak alınmıştır. Aynı hesaplama SPS hızlandırıcısı için yapıldığında ise hızlandırıcının enine empedansının denge durumundaki eşik değerinden düşük olduğu görülmektedir. Bu durum projenin ilerleyen aşamalarında detaylı irdelenmelidir.

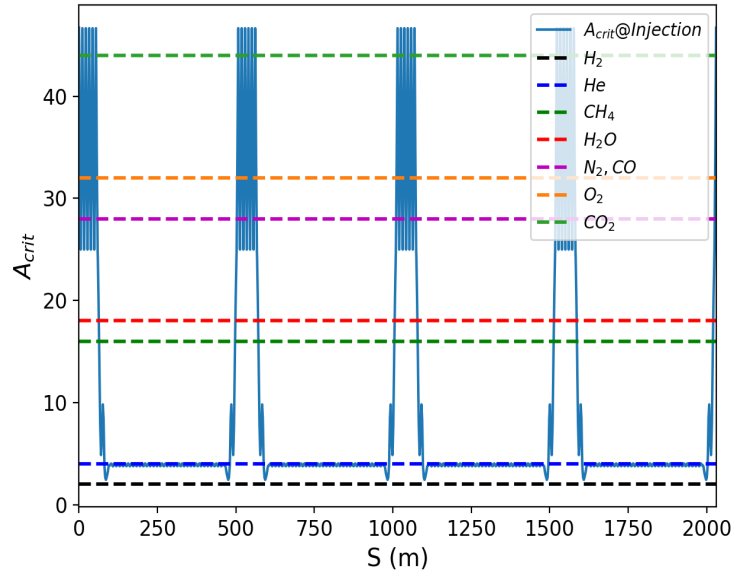
5.5 İyon Etkileri

Hızlandırıcı içerisindeki parçacıklar, vakum haznesi olarak isimlendirilen, vakumlanmış bir hazne içerisinde hızlandırıcı elemanlarının etkileri ile bir yörüngede hareket eder. Vakum haznesi içerisinde, mutlak bir boşluk elde edilemeyeceğinden, halen kalan gazlar bulunur. Bunlar hızlandırıcı içerisinde dolanan elektron demeti tarafından iyonize hale getirilebilir. Bu iyonlar arasında, kritik kütle denen bir değeri geçen iyonlar hızlandırıcı içerisinde hareket eden demetin alanında hapsolür. Bu hapsolan iyonlar elektron demetini etkiler ve ayar kaymasına neden olur. Bahsi geçen yüklü iyonların hapsolmesi için kritik kütle aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$A_{crit} \cong \frac{N_b \Delta T_b c r_p}{2\sigma_y (\sigma_x + \sigma_y)} \quad (5.10)$$

Burada ΔT_b iki paketçik arasındaki mesafe ("bunch spacing") ve $\sigma_{x/y}$ yatay/düşey demet boyutudur (Rumolo vd. 2005, Nagaoka 2017, Zimmermann vd. 1997). Alternatif ön-enerji öteleyici ve SPS seçenekleri için iyon hapsolme koşulu, hat boyunca şekil 5.4 ve şekil 5.5'de gösterilmiştir. Buna göre, bu şart tüm mümkün iyon eşik değerlerinden düşük seviyelerdedir (H_2 , He , CH_4 , H_2O , N_2 , CO , O_2 , CO_2). Bu şekillerde mavi ile gösterilen hızlandırıcı boyunca kritik kütle ve noktalı çizgiler ise hapsolabilecek farklı iyonlar için kritik kütle değerlerini gösterir.

Bu durumda, iyon etkilerinden dolayı oluşabilecek betatron ayar kaymalarına bakmak önemli hale gelir. Demetin alanında hapsolmüş ve demeti etkileyen iyon etkilerinden



Şekil 5.4 Olası moleküllerin ve alternatif ön-enerji öteleyici tasarım için kritik kütle hesaplaması

dolayı oluşan ayar kayması şu şekilde değerlendirilebilir:

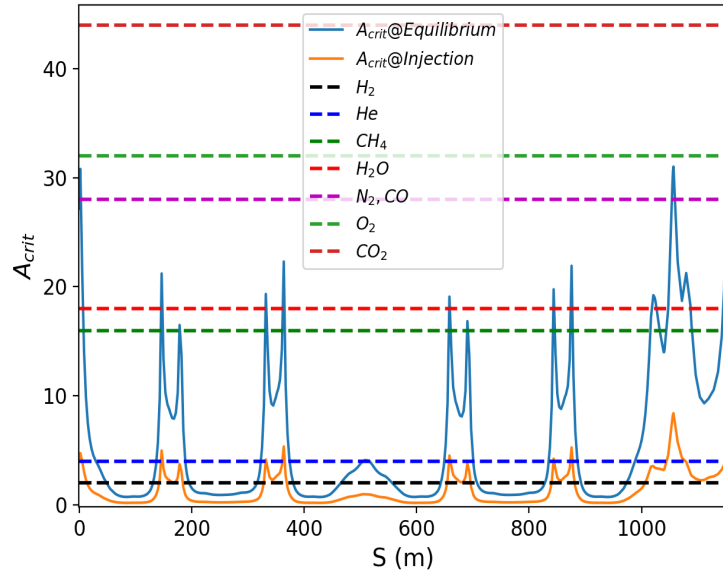
$$\Delta Q_{ion} \cong \frac{N_b n_b r_e c}{\pi \gamma \sqrt{\epsilon_x \epsilon_y}} \left(\frac{\sigma_{ion} p}{k_B T} \right) \quad (5.11)$$

Burada σ_{ion} iyonun etkin kesiti, p vakum basıncı, k_B Boltzmann sabitidir. Çizelge 5.3'te görüldüğü üzere, hesaplanan ayar kayması alternatif halka ve SPS için sırasıyla 0.002 ve 0.009 şeklindedir ve tolere edilebilir düzeydedir.

Burada ek olarak hızlı iyon kararsızlığı olarak isimlendirilen çıkış zamanına bakılacaktır:

$$\tau_{inst} \cong \frac{0.1 \gamma \sigma_x \sigma_y}{N_b n_b c r_e \beta_y \sigma_{ion}} \left(\frac{k_B T}{p} \right) \left(\sqrt{\frac{8}{\pi}} \right) \quad (5.12)$$

Bu değer sırasıyla SPS ve alternatif halka için $61 t_{rev}$ ve $134 t_{rev}$ şeklindedir. Bu çıkış



Şekil 5.5 Olası moleküllerin ve SPS hızlandırıcısının bir süperperiyodu için kritik kütle hesaplaması

zamanları bir geri-bildirim sistemi (“feedback system”) ile bastırılabilir düzeydedir. Burada, SPS için ve alternatif halka için sırasıyla 10^{-11} mbarr ve 10^{-10} mbarr vakum basınç değerleri elde edilmesi ön şart olarak belirlenmiştir. Bu durumda, SPS hızlandırıcısının var olan vakum basıncının ciddi oranda iyileştirilmesi sonucu çıkarılmıştır.

5.6 Elektron Bulutu

Bir pozitron hızlandırıcısında, vakum haznesinde kalan gazların iyonlaşması, sinkrotron ışınımından dolayı fotoelektrik yüzünden salınan elektronlar ve vakum haznesi yüzeyinden salınan elektronlar, hızlandırıcı vakum haznesi içerisinde bir elektron bulutu (“e-cloud”) oluşturabilir. Bu elektron bulutu, kararsızlıklar oluşturarak pozitron demetini etkileyebilir (Nagaoka 2017, Rumolo ve Iadarola 2017). Elektron bulutu nötrolizasyon yoğunluğu denilen bir yoğunluğa ulaştığında doyuma ulaşır. Burada, elektron bulutunun yük etkisiyle demetin çekim etkisi birbirine eşit durumdadır (Zimmermann 2002, Belli vd. 2018).

Bu kararsızlık için yoğunluğu eşik değeri şu şekilde değerlendirilir:

$$\rho_{th} = \frac{2\gamma Q_s}{\sqrt{3} Q r_e \beta_y C} \quad (5.13)$$

Burada $Q = \min(7, \frac{w_e \sigma_z}{c})$ demet ile etkileşen elektronların açısal salınım frekansı ve $W_e^2 = \frac{N_b r_e c^2}{2\sigma_z \sigma_y (\sigma_x + \sigma_y)}$. Nötralizasyon yoğunluğu:

$$\rho_{neutr} = \frac{N_b}{L_{sep} \pi b_x b_y} \quad (5.14)$$

Burada L_{sep} , m (metre) cinsinden paketçikler arasındaki mesafeyi (“bunch spacing”), $b_{x/y}$ yatay ve düşey yönde vakum haznesi yarıçapını gösterir. Alternatif ön-enerji öteleyici halkası için nötralizasyon yoğunluğu (ρ_{th}) $12.55 \times 10^{11} / m^3$. Alternatif tasarım için kararsızlık eşik değeri (ρ_{th}) giriş, denge ve çıkış durumunda sırasıyla $2.84 \times 10^{11} / m^3$, $1.43 \times 10^{11} / m^3$ ve $3.67 \times 10^{11} / m^3$ ’tür. Böylece, nötralizasyon yoğunluğu her durumdaki eşik değerden yüksektir. SPS hızlandırıcısı için nötralizasyon yoğunluğu $7.06 \times 10^{11} / m^3$ ’dir. Eşik değer hesabı ise sırasıyla giriş, denge ve çıkış durumunda $11.30 \times 10^{11} / m^3$, $1.62 \times 10^{11} / m^3$ ve $1.68 \times 10^{11} / m^3$ şeklindedir. Dolayısıyla, nötralizasyon yoğunluğu giriş enerjisi dışında eşik değerden yüksektir.

Böylece, elektron bulutu etkisinden dolayı oluşabilecek ayar kayması önemli hale gelmiş olur. Elektron bulutu tarafından indüklenen ayar kayması şu şekilde ifade edilebilir:

$$\Delta Q_{x,y} = \frac{r_e}{2\gamma} \langle \beta_{x,y} \rangle \rho_e C \quad (5.15)$$

Burada ρ_e elektron bulutu yoğunluğudur. Nötralizasyon yoğunluğundaki ayar kayması alternatif halka seçeneği için ($\Delta Q_{x/y}$) büyük değildir: Giriş enerjisinde ve denge durumunda 0.003/0.005 iken çıkış enerjisinde 0.001/0.002 şeklindedir. Bu değerler sırasıyla SPS için 0.035/0.035 ve 0.01/0.01 şeklindedir ve sorun oluşturacak büyüklükte görünmemektedir.

5.7 Koherent Sinkrotron Işınımı (CSR)

Hızlandırıcı içerisinde, ivmeli hareketten dolayı elektron-pozitron demetleri tarafından yayılan koherent sinkrotron ışınımı (“coherent synchrotron radiation”) mikro-dalga (μ -dalga) kararsızlığına sebebiyet vererek diğer demetleri etkileyebilir. Serbest elektron lazer tesislerinde istenerek oluşturulan bu ışınım, ön-enerji veya depolama halkası gibi hızlandırıcılarda demet üzerinde istenmeyen etkilere neden olur. Bu etki emittans büyümesine neden olabilir. Bu kararsızlık için Stupakov-Heifets şartı yardımıyla bir eşik yoğunluk hesabı yapılabilir.

$$\Lambda = \frac{\Lambda_b r_0 \rho}{|\alpha_c| \gamma \delta_0^2 < R >} \quad (5.16)$$

Burada ρ bükme yarıçapı, $< R > = \frac{c}{2\pi}$, $n_b = \frac{N_b}{\sqrt{2\pi}\sigma_z}$, N_b paketçik popülasyonu, α_c momentum sıkışıklık faktörü (“momentum compaction factor”), δ_0^2 enerji yayılımı, r_0 elektron yarıçapıdır (Zimmermann 2010, Bane vd. 2010, Chao vd. 2015, Wolski 2014b).

Böylece, Stupakov-Heifets parametresi şu hale gelir:

$$\Lambda = \frac{N_b r_0 \rho \sqrt{2\pi}}{C |\alpha_c| \sigma_z \gamma \delta_0^2} \quad (5.17)$$

μ -dalga kararsızlığının oluşması için paketçik uzunluğunun yeterince büyük olması gerekir (C1):

$$\sigma_z \geq 0.5 \rho \lambda^{-3/2} \quad (5.18)$$

Söz konusu kararsızlık için diğer şart ise şu şekildedir (C2):

$$\frac{\rho}{b} \leq \lambda \quad (5.19)$$

Bu kararsızlığın oluşması için iki şartın da sağlanması gerekir. Çizelge 5.3’da görüleceği üzere, SPS hızlandırıcısı için bu kararsızlık beklenmemektedir. Ancak alternatif halka için projenin ilerleyen aşamalarında bu konu derinlemesine incelenmelidir.

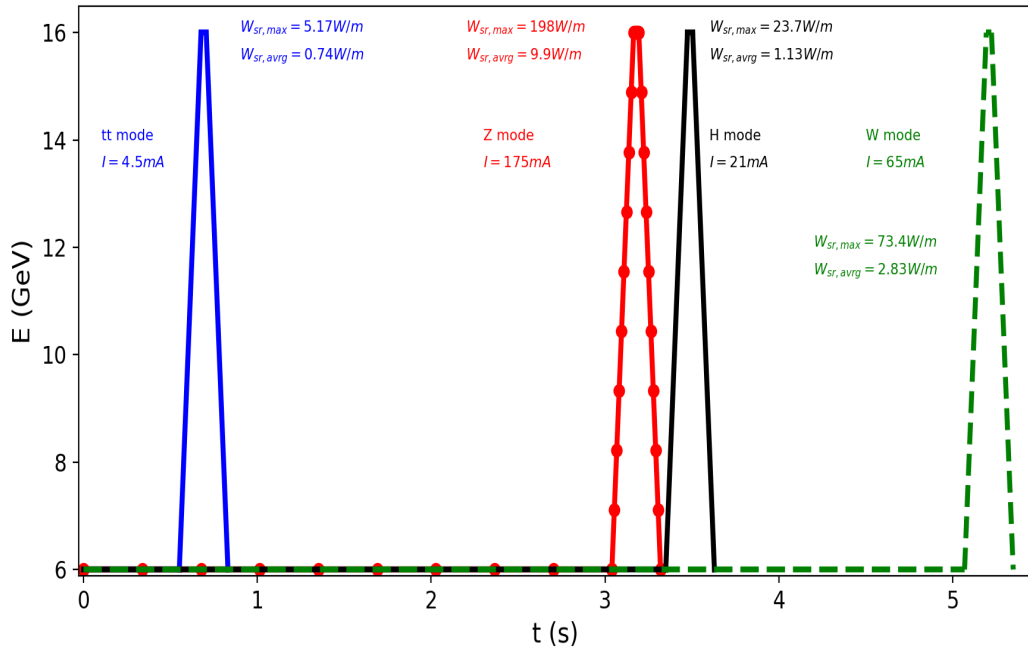
Çizelge 5.3 FCC- e^+e^- enjektörü ön-enerji öteleyici hızlandırıcı opsiyonları için kolektif etki hesaplamaları

Parametre	SPS	Alternatif tasarım
SC ayar kayması @inj.	0.0005	0.0032
SC ayar kayması @eq.	0.018	0.028
SC ayar kayması @ext.	1.6×10^{-5}	1.6×10^{-4}
Boyuna empedans [Ω]	6.44	1
Boussard kriteri @giriş [Ω]	1167	57.92
Boussard kriteri @denge [Ω]	31.14	1.44
Boussard kriteri @çıkış [Ω]	100	10.11
Vakum haznesi yarıçapı [m]	0.04	0.03
Enine empedans [$M\Omega/m$]	9.77	0.79
TMCI eşik değeri @giriş [$M\Omega/m$]	29.6	5.28
TMCI eşik değeri @denge [$M\Omega/m$]	7.10	8.95
TMCI eşik değeri @çıkış [$M\Omega/m$]	8.97	37.0
İyon etkisi ayar kayması	0.009	0.002
Hızlı iyon çıkış zamanı [t_{rev}]	61	134
e-bulutu nötr. yoğ. [$10^{11}/m^3$]	7.06	12.55
e-bulutu eşik değeri @giriş [$10^{11}/m^3$]	11.30	2.84
e-bulutu eşik değeri @denge [$10^{11}/m^3$]	1.62	1.43
e-bulutu eşik değeri @çıkış [$10^{11}/m^3$]	1.68	3.67
e-bulutu ayar kayması @giriş, @denge (yatay)	0.035	0.003
e-bulutu ayar kayması @giriş, @denge (düşey)	0.035	0.005
e-bulutu ayar kayması @çıkış (yatay)	0.01	0.001
e-bulutu ayar kayması @çıkış (düşey)	0.01	0.002
Stupakov şartı-1 [cm]	5000	0.015
Stupakov şartı-2	18525	6433
Demet uzunluğu [cm]	4.1	0.59
Stupakov parametresi	3.78	568

Bu bölümü özetlemek gerekirse, FCC- e^+e^- ön-enerji öteleyici seçenekleri için performans sınırlamalarına neden olabilecek kolektif etkiler analitik olarak hesaplanarak değerlendirilmiş ve sonuçlar çizelge 5.3'te özetlenmiştir. Analitik hesaplara dayanarak yapılan bu değerlendirmeye göre, her iki seçenek için de uzay yükü, μ -dalga kararsızlığı (boyuna), demet-içi saçılımı (IBS) ve elektron bulutu ile ilgili bir sınırlama beklenmemektedir. TMCI ile ilgili, enine empedans (Brandt vd. 1989) değeri SPS için hesaplanan denge durumundaki eşik değeri aşmaktadır. Bu nedenle, detaylı simülasyon çalışmaları ile bu konu irdelenmelidir. Ek olarak, hızlı iyon kararsızlığı çıkış zamanı $61 t_{rev}$ ve $134 t_{rev}$ olarak sırasıyla SPS ve alternatif halka için hesaplanmıştır. Bu durum, SPS için 10^{-11} mbarr ve alternatif halka için 10^{-10} mbarr vakum basıncı elde edilmesi durumunda geri-bildirim sistemiyle telafi edilebilir. Bu durum, SPS için vakum basıncının var olan duruma göre iyileştirilmesi sonucu çıkarılmıştır. Son olarak, CSR ile ilgili alternatif halka için bir sınırlama söz konusu olabilir, simülasyonlar ile sonuçlar irdelenmelidir.

6. SİNKROTRON IŞINIMI

Sinkrotron ışınım gücü değerlendirmeleri, projenin erken aşamalarında düşünülmelidir. Aksi halde, sinkrotron ışınımı vakum haznesine nüfuz ederek vakum basıncında bozulmaya neden olabilir. Sinkrotron ışınımının ana kaynağı çembersel hızlandırıcılarda dipol ve sönüm magnetlerdir. Çizelge 1.3 ve şekil 6.1'den anlaşılacağı üzere, yüksek paketçik popülasyonu ve paketçik sayısı, dolayısıyla yüksek akım gerektirdiğinden en zorlayıcı mod Z olarak görünür.

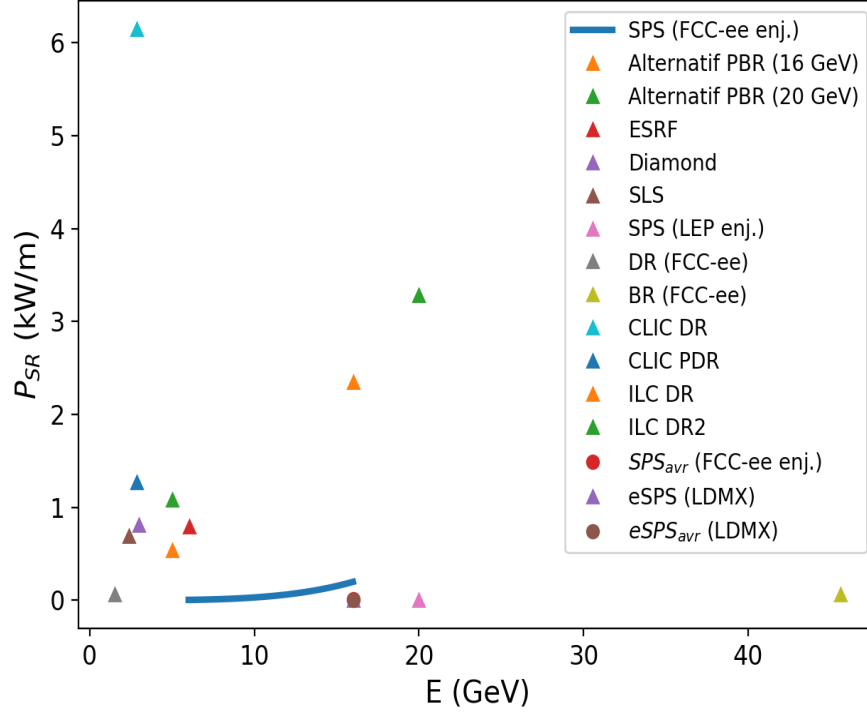


Şekil 6.1 SPS hızlandırıcısının, FCC- e^+e^- enjektöründe, dört farklı mod için, tt (mavi), Z (kırmızı), H (siyah), W (yeşil), giriş platosunu, enerji artışını, çıkış platosunu ve enerji sönümünü gösteren döngü uzunluğu

Sinkrotron ışınımı gücü şu şekilde hesaplanabilir (Wiedemann 2015):

$$P_{sr}[W/m] = \frac{U_0[eV] \cdot I_{tot}[A]}{C[m]} \quad (6.1)$$

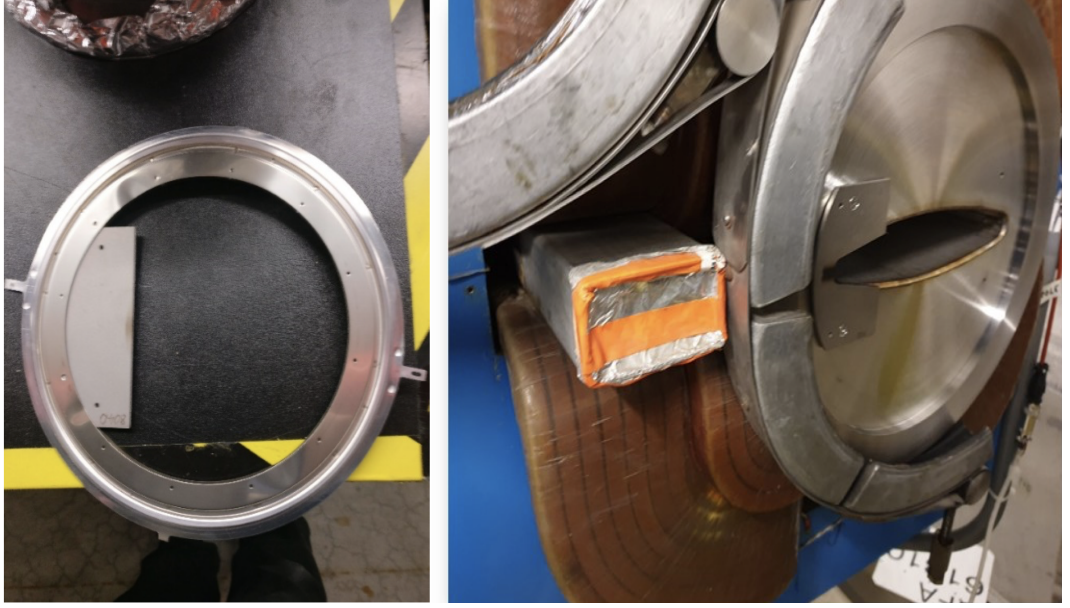
Burada U_0 tur başına enerji kaybı, C hızlandırıcının çevre uzunluğu ve I_{tot} paketçik sayısı ile orantılı demet akımını ($I_{tot} = n_b \cdot I_b$) ifade eder.



Şekil 6.2 FCC- e^+e^- enjektör tesisini de kapsayacak şekilde bazı merkezlerin sinkrotron ışınım gücü karşılaştırması

SPS hızlandırıcısı, Büyük Elektron-Pozitron Çarpıştırıcısının (LEP) 1989-2000 yılları arasında 11 yıl enjektörü olarak görev almıştır. Bu nedenle SPS'in LEP yıllarına dair lepton hızlandırdığı zamanlardan bazı veriler elimizde mevcuttur (CERN 1983, Cornelis ve Schmidt 1989, Cornelis ve Schmidt 1988). SPS içerisinde o zamanlarda, elektron demetleri 3.5 GeV'den 20 GeV'e kadar hızlandırılmıştır. Enerji ölçeği FCC- e^+e^- projesi için ise 6 GeV'den 16 GeV'e kadardır. SPS adına LEP yıllarındaki çıkış enerjisi daha yüksek olmasına rağmen FCC- e^+e^- için gerekli olan durumda özellikle eklenen sönüm magnetlerden dolayı tur başına enerji kaybı daha fazladır. Hızlandırıcıdaki paketçik sayısı ise FCC- e^+e^- projesinde SPS için 1190'a kadar çıkarken bu sayı LEP yıllarında yalnızca 8'dir. Bunun yanı sıra, FCC- e^+e^- için gerekli demet akımı LEP yılları ile karşılaştırıldığında çok yüksektir. Demet akımı SPS içerisinde LEP yıllarında 0.45 mA iken, FCC- e^+e^- projesinin enjektör tesisinde planlanan SPS için bu değer 175 mA'e kadar çıkmaktadır. Tüm bu farklılıklar, sinkrotron ışınım gücü için önemli parametrelerdir.

SPS hızlandırıcısının LEP yıllarındaki enjektör tesisindeki sinkrotron ışınımı gücü, çıkış enerjisinde 1.85 W/m'ydi ve ortalama sinkrotron ışınımı gücü yaklaşık 0.024 W/m'ye karşılık gelmekteydi. Bu yıllarda SPS için sinkrotron ışınımı ciddi sorunlar çıkarmadı. Ama yine de çıkış enerjisinde vakum haznesinin iki tarafına olası bir ışınım hasarını önlemek adına koruyucu maskeler yerleştirilme gereği duyuldu (CERN 1983, Cornelis ve Schmidt 1988).



Şekil 6.3 İçten aşımli dairesel alüminyum disk ile dairesel helicoflex contası (solda). Doğrudan vakum kısmındaki SPS başlığına monte edilmiş özel tasarım sinkrotron ışınım maskesi (sağda) (Kersevan R., Sözlü görüşme 2019)

Şekil 6.3'de içten aşımli dairesel alüminyum disk ile dairesel helicoflex contası (solda) ve doğrudan vakum kısmındaki SPS başlığına monte edilmiş özel tasarım sinkrotron ışınım maskesi görülmektedir. Maskenin vidalanmış olmasından dolayı, başlık kısmında eliptik çemberin etrafında özel başlık tiplerine göre koaksiyel boşluklar vardır. Bu tarz boşluklar düzgün çember geometrisi oluşturmak ve empedans sorunlarını önlemek için azaltılmalı ve/veya değiştirilmelidir. Hem alüminyum halkalar hem de vidalı maskeler, yüksek akımlı enerji öteleyici seçenekleri için özellikle Z modunda uygun görünmemektedir. Bu tip güç yükleri su soğutmalı conta ya da maske ile çevrelendirilmelidir (Kersevan R., Sözlü görüşme 2019).

Şekil 6.2'de SPS ve alternatif halkanın, bazı diğer hızlandırıcı merkezleri ve projeleri

Çizelge 6.1 SPS'in LEP enjektörü, FCC- e^+e^- enjektörü olarak ve FCC- e^+e^- alternatif halkasının sinkrotron ışınımı (SI) parametreleri ^a

Parametre	LEP için SPS	FCC için SPS	Alt. tasarım
Çıkış enerjisi [GeV]	20	16	16
Dipol mag. kaynaklı SI [W/m]	1.85	198	2305
Dipol mag. kaynaklı ort. SI [W/m]	0.024	8.1	191
Dipol ve DW kaynaklı SI [W/m]	-	809	-
Dipol ve DW kaynaklı ort. SI [W/m]	-	107	-
Demet akımı [mA]	0.45	7-175	160

^a FCC- e^+e^- alternatif ön-enerji öteleyici halkası tasarımında ve LEP yıllarında SPS'de sönüm magnet kullanılmamıştır.

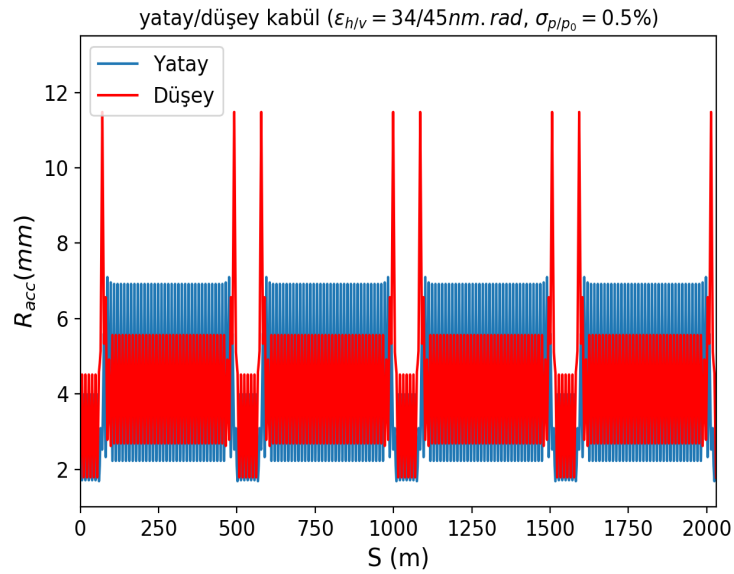
ile sinkrotron ışınım gücü anlamında karşılaştırılmıştır. Çizelge 6.1, FCC- e^+e^- enjektörü ön-enerji öteleyici halkası için SPS ve alternatif halka seçeneklerinde parametreleri özetlenmiş ve SPS'in LEP yılları ile karşılaştırılmıştır. Normal sönüm magnetin tur başına enerji kaybı üzerindeki etkisi bu magnetler için özel soğurucular ("absorbers") kullanılabileceği düşüncesiyle hesaba katılmamıştır (*Kersevan R., Sözlü görüşme 2019*). Ön-enerji öteleyici halkası olarak SPS'in maksimum sinkrotron ışınımı, yüksek paketçik sayısı ve demet akımından dolayı LEP yıllarına göre ciddi derece yüksektir (CERN 1983). SPS için maksimum ve ortalama sinkrotron ışınımı gücü sırasıyla 198 W/m ve 8.1 W/m olarak hesaplanmıştır. Bu seviyede yüksek sinkrotron ışınım gücü olan durumda su soğutmalı sistem veya özel maskeler SPS hızlandırıcısının vakum haznesine yerleştirilmelidir. Bu, şu andaki vakum haznesi ile mümkün değildir, bu nedenle su soğutmalı haznenin ve soğurucuların kullanıldığı yeni bir vakum haznesi tasarım yapılması SPS için önerilmektedir. (*Kersevan R., Sözlü görüşme 2019*).

Alternatif halka tasarımı için ise, sinkrotron ışınımı, yüksek tur başına enerji kaybı ve kısa çevre uzunluğundan dolayı, SPS'den bile daha fazladır. Bu durumda, her dipol magnetten sonra ve demetin giriş-çıkış bölgelerinde özel soğurucular ve su soğutmalı vakum haznesi kullanılması önerilmektedir.

7. EMİTTANS KABULÜ

FCC- e^+e^- enjektör kompleksi tasarımında (Şekil 1.2), ön-enerji öteleyici halkadan önceki doğrusal hızlandırıcının tasarımı için önemli bir parametre olduğundan, ön enerji öteleyici halka tasarımları için kabul edilebilir emittans değeri tartışılmalıdır. Bu bölümde, ön-enerji öteleyici hızlandırıcı opsiyonları tarafından kabul edilebilecek emittans değerleri, dinamik aralık ve vakum haznesi genişliği değerlendirilerek hesaplanmıştır.

Ön-enerji öteleyici hızlandırıcıya demet alınırken uygulanacak enjeksiyon yöntemi, halka için kabul edilebilir emittansı etkilediğinden, önemlidir. Bu bağlamda, bazı yöntemler değerlendirilmiştir: “Conventional injection scheme (off-axis/on-energy), multipole kicker injection scheme (off-axis/on-energy), synchrotron phase space injection (on-axis/off-energy), multipole kicker injection scheme (on-axis/off-energy), longitudinal injections (on-axis/off energy), non-topup injection (on-axis/on-energy)”. Bu yöntemler, projenin ilerleyen aşamalarında detaylı incelenmesi gereken konulardır. Ancak temelde, bu yöntemler için iki gereklilik şu şekilde özetlenebilir: “Off-axis” enjeksiyon yöntemi için



Şekil 7.1 Alternatif ön-enerji öteleyici tasarımı için dinamik aralığın kabul edebildiği maksimum emittans değerleri için, bu değerlerin vakum haznesi açısından uygunluğunun değerlendirilmesi için enine kabul grafiği

geniş dinamik aralık, “on-axis” enjeksiyon yöntemi için ise hızlı “kicker” magnet atım zamanı gerekmektedir. Bu konuda, ön-enerji öteleyici seçenekleri için yeterli dinamik aralık sağlanmıştır ve kısa atımlı “kicker” (10-20 ns) magnetlerin yüksek tekrarlamaya frekansı (100-200 Hz) ile çalışmasının mümkün olduğu görülmüştür (Aiba M., Sözlü görüşme 2020).

“On-axis” enjeksiyon yöntemi ile enjeksiyon yapılması durumunda, enjeksiyon bölgesindeki ilgili dinamik aralık değerine karşılık gelen maksimum kabul edilebilir emittans şu şekilde hesaplanabilir:

$$\epsilon_{max}(x/y) = \frac{(DA_{x/y} - D_{x,y}\delta - COD_{x,y})^2}{25 \times \beta_{x/y}} \quad (7.1)$$

Burada $DA_{x,y}$ dinamik aralık, $D_{x,y}$ dispersiyon fonksiyonu, $COD_{x,y}$ kapalı yörünge sapması (“closed orbit deviation”, COD), $\beta_{x,y}$ yatay ve düşey yönde betatron fonksiyonu ve δ hızlandırıcının enerji kabulüdür.

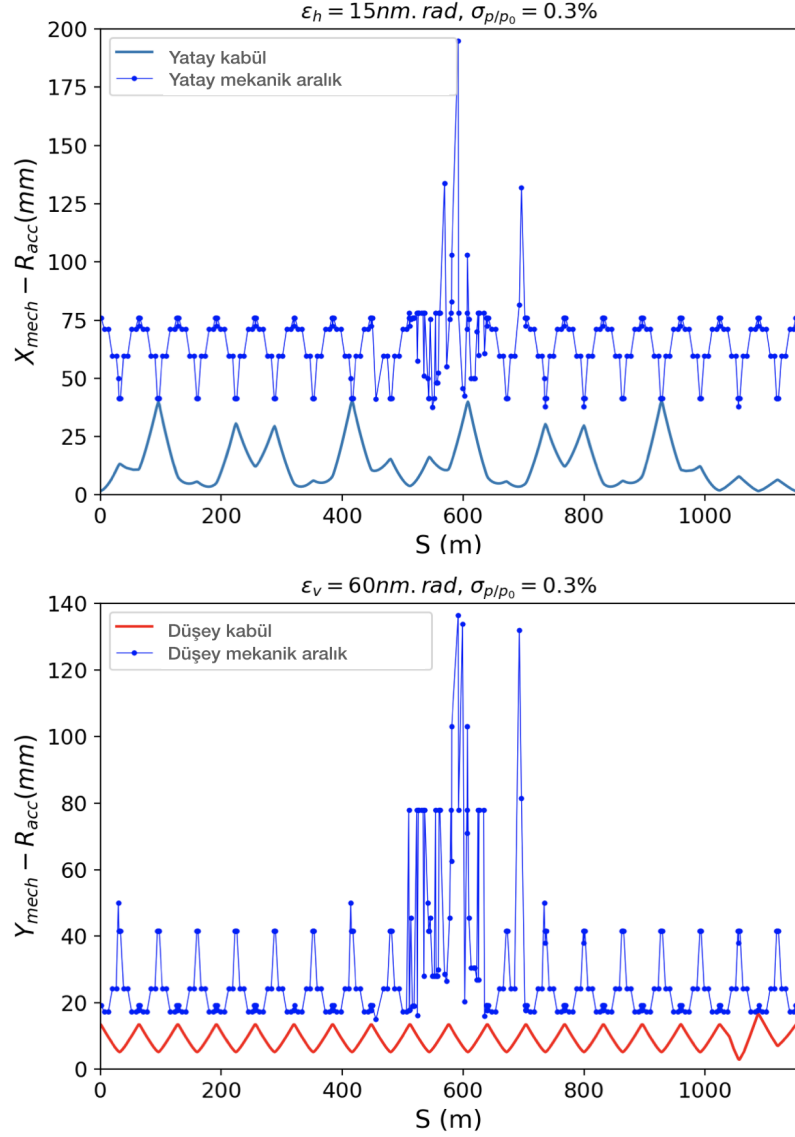
“Off-axis” yöntemi ile enjeksiyon yapılması durumunda, farklı olarak, septum magnet kalınlığı da düşünülmelir. Bu durumda, enjeksiyon bölgesindeki ilgili dinamik aralık değerine karşılık gelen maksimum kabul edilebilir emittans denklem 7.2’de belirtildiği şekilde hesaplanabilir (M.Aiba vd. 2018).

$$DA_{required} = n_s\sigma_{stored} + S_t + n_i\sigma_{injected} \quad (7.2)$$

Burada n_s ve n_i demet açıklığıdır ve 5 olarak alınmıştır, σ_{stored} ve $\sigma_{injected}$ hızlandırıcı içerisindeki (sırasıyla) demet boyutu ve hızlandırıcıya girecek olan demet boyutudur. S_t , septum magnetin kalınlığıdır: Mekanik toleranslar ve kapalı yörünge bozulması etkileri dahil 3 mm olarak alınmıştır. SPS hızlandırıcı için daha evvelde bahsi geçtiği üzere, dinamik aralığa ek olarak vakum haznesi de limit getirmektedir.

Sonuç olarak, çizelge 7.1’de özetlendiği üzere, alternatif halka için emittans kabulü yatay

ve düşey yönde, “on-axis” ve “off-axis” olması durumlarında sırasıyla 34/45 nm.rad (h/v) ve 6/45 nm.rad şeklindedir. Şekil 7.1’de alternatif ön-enerji öteleyici halkanın dinamik aralık değerinin sağladığı maksimum kabul edilebilir emittans değerleri için, bu değerlerin vakum haznesi açısından uygunluğu kontrol edilmiştir. SPS hızlandırıcısı için ise her iki enjeksiyon yönteminde kabul edilebilir emittans aynıdır, çünkü esas sınır vakum haznesinden gelmektedir: Yatay ve düşey yönde 15/60 nm.rad. Buna ek olarak, SPS için



Şekil 7.2 SPS hızlandırıcısının ön-enerji öteleyici halka olarak kullanılması durumunda, dinamik aralık değerinin izin verdiği maksimum emittans değerlerinin mekanik aralık için de kabul edilebildiğini kontrol etmek için enine kabulün (R_{acc}) mekanik genişlik (yatay/düşey, X_{mech}/Y_{mech}) ile karşılaştırılması

Çizelge 7.1 SPS ve alternatif tasarımda, “on/off axis” enjeksiyon metotları için kabul edilebilir emittans değerleri

Parametre	Alternatif tasarım	SPS
Enjeksiyon yöntemi	“on/off-axis”	“on/off-axis”
Kabul edilebilir emittans (yatay) [nm·rad]	34/6	15/15
Kabul edilebilir emittans (düşey) [nm·rad]	45/45	60/60

vakum haznesi de enerji kabulüne limit koymaktadır: % 1.0. Genelde, bu sınır dinamik aralık değerinde gelse de, SPS hızlandırıcısı için, esas olarak, yüksek dispersiyon etkisinden dolayı, sınır var olan vakum haznesinden gelmektedir. Farklı momentum sapmaları için ilgili hesaplamalar yapılmış ve enerji sapmasının %0.3'den büyük olması durumunda vakum haznesinin buna izin vermediği belirlenmiştir. Şekil 7.2'de SPS hızlandırıcısı için enine/boyuna demet güvenli kabul sınırı ve enine/boyuna mekanik aralık gösterilmiştir.

8. SONUÇ VE TARTIŞMA

FCC- e^+e^- hızlandırıcı kompleksi tasarımı, farklı çarpışma enerjilerinde yüksek ışınlıklı demet sağlayacak şekilde tasarlanmaktadır. FCC- e^+e^- projesinin planlanan enjektör kompleksi tasarımı, ana hatları ile, bir doğrusal e^+e^- hızlandırıcısı, bir ön-enerji öteleyici hızlandırıcısı ve bir ana-enerji öteleyici hızlandırıcısından oluşmaktadır. Ön-enerji öteleyici çembersel hızlandırıcı, FCC- e^+e^- enjektör tesisinde, doğrusal hızlandırıcı ile ana-enerji öteleyici çembersel hızlandırıcısı arasında planlanmaktadır. Bu hızlandırıcının amacı, doğrusal hızlandırıcıdan gelen 6 GeV enerjili demeti kabul etmek, demetin enerjisini 16 GeV'e çıkarmak ve ana enerji öteleyici için gerekli özelliklerde demeti sonraki hızlandırıcıya hazırlamaktır.

Bu tezde, FCC- e^+e^- enjektör kompleksi için, ön-enerji öteleyici çembersel hızlandırıcı seçenekleri üzerine çalışmalar yürütülmüştür. Bunlardan birisi, CERN'de halihazırda çalışan SPS hızlandırıcısının az miktarda modifiye edilerek ön-enerji öteleyici olarak kullanılması, diğeri ise tamamen yeni bir hızlandırıcı tasarlanmasıdır.

Öncelikle, LEP yıllarında lepton hızlandırıcısı olarak enjektör tesisinde çalışmış ve halen CERN hızlandırıcı tesisinde LHC başta olmak üzere birçok deney için demet sağlıyor olmasından dolayı, doğal seçenek olarak SPS incelenmiştir. Var olan hızlandırıcı şu anki hali incelenmiş ve FCC- e^+e^- enjektörü için yetersiz kalan yönleri tespit edilmiştir: Çıkış enerjisinde düşük emittans ve giriş enerjisinde kısa sönüm zamanı gerekliliğini sağlayamaması. Giriş ve çıkış enerjisinde gerekli parametreleri sağlayabilmesi için bazı öneriler sunulmuş ve bunlar uygulanmıştır: Faz ilerlemesi optimizasyonu, normal sönüm magneti ve Robinson sönüm magneti eklenmesi. Emittans (yatay yönde) bakımından faz ilerlemesi optimizasyonu kapsamında, SPS hızlandırıcısının yatay yönde faz ilerlemesi 90^0 'den 135^0 civarına değiştirilmiştir. Bunun yanı sıra 3.5 T manyetik alan ve toplam uzunluğu 12.15 m normal sönüm magneti dispersiyonsuz bölgelere, 0.5 T manyetik alanlı ve toplam 6 m uzunluklu Robinson sönüm magnetler dispersiyonlu bölgeye konulmuştur. Söz konusu eklemeler ve optimizasyon çalışmaları sonrasında gerekli parametreler elde edilmiştir. Ek olarak farklı çıkış enerjileri için de parametreler hesaplanarak karşılaştırma yapılmıştır. Yapılan parçacık izleme simulasyonları sonrasında gerekli dinamik aralık, ideal momentumlu ve ideal momentumdan sapmış parçacıklar için elde edilmiştir. Bunun yanı sıra, sinkrotron ışınımı hesaplamaları yapılarak önemli bir sonuca varılmıştır. SPS hızlandırıcısının var olan vakum haznesinin soğutmalı sistem ve soğuruculardan oluşacak

şekilde yenilenmesi gerekmektedir.

SPS hızlandırıcısı üzerine belirli değişiklikler yaparak gerekli tüm parametreler elde edilmiştir. Ancak örgü üzerinde minimum değişiklik yapma sınırı, makina müsaitliği sorunu, yeni vakum sistemi gerekliliği ve zorlu RF gerekliliği gibi nedenler göz önüne alınarak, alternatif bir hızlandırıcı tasarımı da yapılmıştır.

Alternatif ön-enerji öteleyici tasarım çalışmaları kapsamında, parametre ölçeklendirme, lineer tasarım, lineer olmayan demet dinamiği, kolektif etkiler, sinkrotron ışınımı değerlendirilmesi, kabul edilebilir emittansın belirlenmesi çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmanın sonunda FCC- e^+e^- enjektör tesisi için yeni bir ön-enerji öteleyici (alternatif) tasarımı yapılmıştır. Bu tasarıma göre, 2030 m çevre uzunluğunu sahip yeni bir hızlandırıcı ile istenen gereklilik ve sınırlar altında demet parametrelerini sağlamanın mümkün olduğu gösterilmiştir. Halka, dört düz ve dört yay bölgesinden oluşmaktadır. Her bir yay 32 FODO hücresinden oluşurken her bir düz bölge ise 5 FODO hücresinden oluşturulmuştur. Dinamik aralık için gerçekçi sonuçlar elde etmek adına, magnet alan hataları, multipol alan hataları ve hizalama hataları hesaplamalara dahil edilmiştir. Bu hususta, CLIC sönm halkası için uygulanan gerçekçi hatalar uygulanmıştır. İdeal olmayan momentum ve magnet hataları dahil edilerek dinamik aralık hesabı yapılmış ve istenen değer elde edilmiştir. Böylece tüm magnet hataları ve ideal olmayan momentumdaki parçacıklar dahil edildiği durumda yaklaşık 6.5 mm dinamik aralık elde edilmiştir. Bu dinamik aralık değeri, tezde tartışılan her iki enjeksiyon yöntemine de imkan verdiği için önemlidir. Bunun yanı sıra, alternatif halka içinde sinkrotron ışınımı hesabı sonucu, soğutucu sistem ve soğuruculardan oluşan bir vakum haznesi gerekliliği belirlemiştir. Yine bu tasarım içinde farklı çıkış enerjisi seçenekleri (18 GeV ve 20 GeV) karşılaştırılarak değerlendirmeler yapılmıştır.

Ayrıca, FCC- e^+e^- ön-enerji öteleyici seçenekleri için performans sınırlamalarına neden olabilecek kolektif etkiler, analitik olarak hesaplanarak değerlendirilmiştir. Analitik hesaplara dayanarak yapılan bu değerlendirmeye göre, her iki seçenek için de uzay yükü, boyuna mikro-dalga kararsızlığı, demet-içi saçılımı ve elektron bulutu ile ilgili bir sınırlama beklenmemektedir. TMCI ile ilgili, enine empedans değeri SPS için hesaplanan denge durumundaki eşik değeri aşmaktadır. Bu nedenle, detaylı simülasyonlarla bu konu ilerleyen aşamalarda irdelenmelidir. Ek olarak, hızlı iyon kararsızlığı çıkış zamanı $61 t_{rev}$ ve $134 t_{rev}$ olarak sırasıyla SPS ve alternatif halka için hesaplanmıştır. Bu durum, SPS için 10^{-11} mbar ve alternatif halka için 10^{-10} mbar vakum basıncı elde edilmesi durumunda geri-bildirim sistemiyle telafi edilebilir. Bu durumda, SPS için vakum basıncının

var olan duruma göre iyileştirilmesi gerektiği sonucu çıkarılmıştır.

Özetle, FCC- e^+e^- enjektör tesisi için, iki ön-enerji öteleyici halka seçeneği (SPS ve alternatif tasarım) üzerinde çalışmalar yapılmış ve FCC- e^+e^- projesi için istenen demet parametreleri sağlayan tasarımlar ortaya konmuştur.

KAYNAKLAR

- Abada vd. (2019a). “FCC – e^+e^- : The Lepton Collider,” in: *The European Physical Journal Special Topics volume 228*, pp. 261–623.
- (2019b). “FCC – hh : The Hadron Collider”. In: *The European Physical Journal Special Topics volume 228*, pp. 755–1107.
- (2019c). “FCC Physics Opportunities”. In: *European Physical Journal C 79*, p. 474.
- (2019d). “HE-LHC: The High-Energy Large Hadron Collider”. In: *The European Physical Journal Special Topics volume 228*, 1109—1382.
- Abualrob, H. vd., eds. (2012). *SOLEIL Emittance Reduction using a Robinson Wiggler*. MOPPP062. 3rd International Particle Accelerator Conference (IPAC’12). New Orleans, Louisiana, USA: JACoW Publishing.
- Abualrob, H. vd., eds. (2018). *Horizontal emittance reduction on a synchrotron radiation light source with a Robinson Wiggler*. France: arXiv:1806.09354 [physics.acc-ph].
- Aiba M., *Sözlü görüşme* (2020). Geneva, Switzerland.
- Akesson, T. vd., eds. (2019). *A primary electron beam facility at CERN*. 10th International Particle Accelerator Conference, IPAC19. Jacow Publishing.
- Anonymous (2020). *SPS-Websitesi*. <https://home.cern/science/accelerators/super-proton-synchrotron>.
- Antoniou, F., ed. (2011). *Non-linear dynamics optimizations of the CLIC damping rings*. Vol. 1067. CLIC-Note-895. CERN-ATS-2011-163. Geneva, Switzerland.
- (2012). “Optics design of intra-beam scattering dominated damping rings”. Ph.D. thesis. Nat. Tech. U. Athens.
- Baconnier, Y. vd. (1985). “Emittance control of the PS e^+e^- beams using a Robinson Wiggler”. In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 234*, pp. 244–252.
- Bane, K. L. F. vd. (2010). “Threshold studies of the microwave instability in electron storage rings”. In: *Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams 13*.
- Belli, E. vd., eds. (2018). *Electron cloud studies in FCC- e^+e^-* . MOPMK012. 9th International Particle Accelerator Conference (IPAC2018). Vancouver, BC ,Canada: Jacow Publishing.
- Benedikt, M. vd. (2019). “Future Circular Colliders”. In: *Annual Review of Nuclear and Particle Science*.

- Benedikt, M. vd. (2020). “Future Circular Colliders succeeding the LHC”. In: *Nature Physics* 16, pp. 402–407.
- Brandt, D. vd., eds. (1989). *Beam dynamics effects in the CERN SPS used as a lepton accelerator*. CERN-SPS-89/6. 13th Particle Accelerator Conference (PAC’89). Chicago, IL, USA, USA: IEEE.
- Bryant, Philip J. ve Kjell Johnsen (1993). *The Principles of Circular Accelerators and Storage Rings*. Cambridge University Press.
- CERN (1983). *LEP design report, The LEP injector chain*. by the LEP Injector Study Group.
- (2020a). *MAD-X (Methodical Accelerator Design)*. CERN-BE/ABP Accelerator Beam Physics Group.
- (2020b). *MAD-X PTC (the Polymorphic Tracking Code)*. CERN-BE/ABP Accelerator Beam Physics Group.
- Chao, A. W. vd. (2015). *Handbook of Accelerator Physics and Engineering, second edition*. Ed. by "M. Tigner, F. Zimmermann, ve K. H. Mess". World Scientific.
- Chao, Alexander Wu (1993). *Physics of collective beam instabilities in high energy accelerators*. Wiley Interscience.
- Conte, Mario ve William W. MacKay (2008). *An Introduction to the Physics of Particle Accelerators*. World Scientific.
- Cornelis, K. ve R. Schmidt, eds. (1988). *Commissioning of the SPS as LEP Injector*. 22085117. 1st European Particle Accelerator Conference (EPAC’88). Rome, Italy.
- eds. (1989). *The performance of the SPS as LEP injector*. 13th Particle Accelerator Conference (PAC’89). IEEE.
- Etisken, O. vd., eds. (2019a). *Damping bunch oscillation due to off-axis injection*. 10th International Particle Accelerator Conference (IPAC19). Melbourne, Australia: Jacow Proceedings.
- Etisken, O. vd., eds. (2019b). *Updates on alternative pre-booster ring design and wiggler magnet considerations of SPS for the FCC- e^+e^- injector*. 10th International Particle Accelerator Conference (IPAC19). Jacow Publishing.
- Etisken, Ozgur vd., eds. (2018). *Pre-booster ring considerations for FCC e^+e^- injector*. 9th International Particle Accelerator Conference (IPAC18). Jacow Publishing.
- Ferrario, M. vd., eds. (2013). *Space Charge Effects*. Vol. Proceedings of the CAS-CERN Accelerator School: Advanced Accelerator Physics. CERN-2014-009. Trondheim, Norway: Proceedings of the CAS-CERN Accelerator School.

- Ferrario, M. vd., eds. (2014). *Wakefields and instabilities in linear accelerators*. Vol. Proceedings of the CAS-CERN Accelerator School: Advanced Accelerator Physics. CERN-2014-009. Trondheim, Norway: Proceedings of the CAS-CERN Accelerator School.
- Ghasem, H. vd., eds. (2016). *Nonlinear optimization of CLIC DRs new design with variable bends and high field wigglers*. WEPMW003. 7th International Particle Accelerator Conference (IPAC16). Busan, Korea: Jacow Publishing.
- Ghasem, H. vd., eds. (2017). *Update on the CLIC DR design*. CLIC Workshop. Geneva, Switzerland.
- Goetsch, T. vd., eds. (2014). *A Robinson wiggler proposal for the Metrology Light Source*. WEPRO028. 5th International Particle Accelerator Conference (IPAC'14). Dresden, Germany: JACoW Publishing.
- eds. (2015). *Status of the Robinson Wiggler project at the Metrology Light Source*. MOPWA019. 6th International Particle Accelerator Conference (IPAC'15). Richmond, VA, USA: Jacow Publishing.
- Haerer, B. vd., eds. (2018). *Status of the FCC – e^+e^- top-up booster synchrotron*. 9th International Particle Accelerator Conference (IPAC18). Jacow Publishing.
- Huang, Zhirong ve Ronald D. Ruth, eds. (1998). *Radiation damping and quantum excitation in a focusing-dominated storage ring*. SLAC-PUB-7800. 15th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on Quantum Aspects of Beam Physics. Monterey, CA, USA: ICFA.
- Jaeschke, Eberhard J. vd. (2020). *Synchrotron Light Sources and Free-Electron Lasers*. Springer.
- Jing-Yi, L. vd. (2013). “A possible approach to reduce the emittance of HLS-II storage ring using a Robinson wiggler”. In: *Chinese Physics C* 37.
- Kersevan R., *Sözlü görüşme* (2019). Geneva, Switzerland.
- Koukovini-Platia, E. vd., eds. (2011). *Impedance effects in the CLIC damping rings*. TUPC050. 2nd Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC'11). San Sebastián, Spain: Jacow Publishing.
- Laskar, J., ed. (2003). *Frequency map analysis and particle accelerators*. Proceedings of the 2003 Particle Accelerator Conference. Orgon, USA: IEEE.
- Lee, S. Y. (2015). *Particle Accelerator Physics*. World Scientific.
- Little, J. (2020). *Matlab*. The MathWorks, Inc.
- Lonza, M. ve H. Schmickler, eds. (2013). *Multi-bunch Feedback Systems*. CERN-2014-009.503. CERN Accelerator School: Advanced Accelerator Physics Course. Trondheim, Norway: CERN.

- M.Aiba vd. (2018). “Top-up injection schemes for future circular lepton collider”. In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 880, pp. 98–106.
- Minty, M. G. ve F. Zimmermann (2003). *Measurement and Control of Charged Particle Beams*. Springer.
- Nagaoka, R., ed. (2017). *Ions*. Vol. 3/2017. CERN-2017-006-SP. Proceedings of the CAS-CERN Accelerator School: School Proceedings. Geneva, Switzerland: CERN Yellow Reports.
- Ogur, S. (2019). “Linac and damping ring designs of the future circular e^+e^- collider of CERN”. Ph.D. thesis. Bogazici University.
- Ogur, S. vd., eds. (2018a). *Layout and performance of the FCC – e^+e^- pre-injector chain*. 9th International Particle Accelerator Conference (IPAC18). Jacow Publishing.
- Ogur, S. vd., eds. (2018b). *Overall injection strategy for FCC – e^+e^-* . TUPAB03. 62th ICFA ABDW on High Luminosity Circular e^+e^- Colliders (eeFACT2018). Hong Kong, China: JACoW Publishing.
- Oide, K. vd. (2017). “Design of beam optics for the future circular collider e^+e^- collider rings”. In: *Physical Review Accelerators and Beams* 19.
- Papaphilippou, Y. vd., eds. (2013). *The SPS as an ultra-low emittance damping ring test facility for CLIC*. 4th International Particle Accelerator Conference (IPAC13). Jacow Publishing.
- eds. (2016). *Design guidelines for the injector complex of the FCC-ee*. THPMR042. 7th International Particle Accelerator Conference (IPAC16). Busan, Korea: Jacow Publishing.
- Python* (2020). Python Software Foundation.
- Renier, Y. vd., eds. (2011). *Non-linear dynamics optimization of the CLIC damping rings*. WEPC080. 2nd International Particle Accelerator Conference (IPAC11). San Sebastián, Spain: Jacow Publishing.
- Robinson, Kenneth W. (1958). “Radiation effects in circular electron accelerators”. In: *Physical Review* 111.
- Rumolo, G. ve G. Iadarola, eds. (2017). *Electron clouds*. Vol. 3/2017). CERN-2017-006-SP. Proceedings of the CAS-CERN Accelerator School: School Proceedings. Geneva, Switzerland: CERN Yellow Reports.
- Rumolo, G. vd., eds. (2005). *Collective effects in the CLIC damping rings*. MOPP049. Particle Accelerator Conference (EPAC08). Genoa, Italy: Jacow Publishing.

- Rumolo, G. vd., eds. (2008). *Collective effects in the CLIC damping rings*. European Particle Accelerator Conference (EPAC08). Genoa, Italy: Jacow Publishing.
- Tecker, F., ed. (2016). *Linear Accelerators*. Vol. CERN–Accelerator–School Course. Budapest, Hungary.
- ed. (2020). *Longitudinal Beam Dynamics in Circular Accelerators*. Vol. Proceedings of the CERN–Accelerator–School course on Introduction to Accelerator Physics. Proceedings of the CAS-CERN Accelerator School.
- Tydecks, T. (2016). “A Robinson Wiggler for the Metrology Light Source”. Ph.D. thesis. Humboldt-Universität zu Berlin.
- Widemann, Helmut (2003). *Synchrotron Radiation*. Springer.
- Wiedemann, Helmut (2015). *Particle Accelerator Physics*. Springer.
- Wolski, A., ed. (2009). *Space Charge, Intrabeam Scattering and Touschek Effects*. Vol. 4th International Accelerator School for Linear Colliders. Beijing, China.
- ed. (2013). *Design of Electron Storage and Damping Rings, Part 2: Equilibrium Emittance and Lattice Design*. Vol. US Particle Accelerator School. Fort Collins, Colorado.
- ed. (2014a). *Low-emittance Storage Rings*. Vol. Proceedings of the CAS-CERN Accelerator School: Advanced Accelerator Physics. CERN-2014-009. Trondheim, Norway: Proceedings of the CAS-CERN Accelerator School.
- Wolski, Andrzej (2014b). *Beam dynamics in high energy particle accelerators*. Imperial College Press.
- Zimmermann, F., ed. (2002). *Two-stream effects in present and future accelerators*. European Particle Accelerator Conference, Proceedings of EPAC02. Paris, France: Jacow Publishing.
- ed. (2010). *Estimates of CSR instability thresholds for various storage rings*. ATS-Note-2010-049 CLIC-Note-861. CERN.
- Zimmermann, F. vd., eds. (1997). *Experiments on the fast beam-ion instability at the ALS*. SLAC-PUB-7617. SLAC.

EK 1 Bazı parçacık hızlandırıcı fiziği terimlerinin Türkçeleştirilmesi

Bugüne kadar, dilimizde, hızlandırıcı fiziği ile ilgili yazılmış veya tercüme edilmiş (bilgim dahilinde) bir hızlandırıcı fiziği kitabı bulunmamakta, konu ile ilgili yazılmış Türkçe tezler ise sınırlı sayıdadır. Alınan eğitimler, okunan kitaplar, katılım sağlanan toplantıların tamamına yakınının İngilizce olmasından ötürü terimleri de bu şekilde özümsemekteyiz.

Bu alanda terimlerin Türkçeleştirilmesi ile ilgili bazı çalışmalar olduğunu biliyorum, ancak genelde bunlara mesafeli yaklaştığımı söylemem gerekir. Endişem, zaten az bilim insanı ve öğrencinin bu konuda çalışmaları olduğundan, halihazırda İngilizce terimlerin anlaşılmasında bile sorunlar yaşanırken, geniş bir kullanıcı kitlesi bulamadığı için var olan sorunu çözemeyecek olmasıydı. Ayrıca yapılan çalışmaları özümseyemediğimi de belirtmeden geçemeyeceğim. Ancak bu tezin Türkçe taslak halini oluşturduğumda önemli bir sorunun farkına vardım. İngilizce terimlerin olduğu haliyle tırnak içerisinde yazılması okuma bütünlüğünü ciddi anlamda bozuyordu. Üzerinde bir süre düşündükten sonra, en azından okuma bütünlüğünü sağlayacak, bizler için belli mantıklı dayanağı olacak, bu tez kapsamında bir küçük sözlük oluşturmak için meslektaşlarım Dr. Cafer Bayar ve Dr. Kahraman Zengin, danışman hocam Prof. Dr. Abbas Kenan Çiftçi'den yardım istedim. Beraber bir dizi toplantı gerçekleştirdikten sonra üzerinde büyük oranda mutabık kaldığımız bir sözlük oluşmuş oldu.

Bu kısımda, hangi İngilizce terim için ne gibi karşılıkları bu tez içerisinde görülebileceği açıklanmaktadır. Bir kelime için bazen öneriler olabileceği gibi bazen de tek bir öneri yer almaktadır. Bu çalışma yapılırken öz bir Türkçeleştirmenin hiçbir zaman amacımız olmadığını belirtmek isterim. Bu çalışmanın amacı, tez içerisinde bir okuma bütünlüğü sağlamak için mantıklı, komik olmayan, duyulduğunda çağrışım yapma veya konuyu daha iyi anlamayı sağlayacak öneriler sunmaktır. Bu çalışma sırasında bazı kelimelerin tercüme edilmesinden ziyade aynen İngilizcede kullanıldığı gibi kalmasının da uygun olacağı değerlendirildi. Bu kelimeler de yine aşağıda yer almaktadır. Terimler bu çalışmadaki hali ile teze yazılmış olsa da, bazı durumlarda ısrarla kelimelerin İngilizce halleri de parantez içerisinde yer almaktadır. Böylece henüz kullanımı yaygınlaşmamış terimlerin anlamayı azaltmaması amaçlanmıştır.

Umuyorum bu çalışma tezin okuma bütünlüğüne yardımcı olmuştur. Geri-bildirimler ve bundan sonraki yazılacak tezlerde üzerine eklenerek ve düzeltilerek devam edilmesini umarım. Bu tez içerisinde geçen ilgili terimler ve karşılıkları aşağıda verilmiştir.

Terimler ve karşılıkları:

- Absorber: Soğurucu.
Adiabatic damping: Adyabatik sönüm.
Alignment error: Hizalama hatası.
Bare lattice: İdeal örgü.
Beam: Demet.
Beam optics: Demet optiği.
Beam position monitor: Demet görüntüleme cihazı.
Betatron function: Betatron fonksiyonu.
Betatron oscillation: Betatron salınımı.
Betatron tune: Betatron ayarı.
Booster: Enerji öteleyici.
Bunch: Paketçik.
Bunch compressor: Paketçik sıkıştırıcı.
Bunch length: Paketçik uzunluğu.
Bunch spacing: Paketçik aralığı.
Bunch train: Paketçik treni.
Chromaticity: Kromatiklik.
Circular accelerator: Dairesel/çembersel hızlandırıcı.
Collective effect: Kolektif etki.
Combined-function magnet: Bükücü-odaklayıcı magnet.
Corrector magnet: Korrektör/düzeltilici magnet.
Cycle length: Döngü uzunluğu.
Damping time: Sönüm zamanı.
Damping partition number: Sönüm paylaşım sayısı.
Damping ring: Sönümleme halkası.
Damping wiggler magnet: Sönüm (normal) magneti/wiggleri.
De-focusing: Dağıtıcı.
Dipole magnet: Dipol/bükücü magnet.
Dispersion: Dispersiyon.
Electron cloud: Elektron bulutu.
Electron gun: Elektron kaynağı.
Emittance: Demet emittansı.
Energy acceptance: Enerji kabulü.
Energy deviation: Enerji sapması.

Energy spread: Enerji yayılımı.
Equilibrium emittance: Denge emittansı.
Feedback system: Geri-bildirim sistemi.
Field error: Manyetik alan hatası.
Filling factor: Dipol doluluk oranı (çembersel hızlandırıcı için).
Focusing: Odaklayıcı.
Frequency map analysis: Frekans haritası analizi.
Gradient: Manyetik gradyen.
Growth rate: Genişleme/büyüme oranı.
Harmonic number: Harmonik sayısı.
Head-tail instability: Demet baş-kuyruk kararsızlığı.
Injector complex: Enjektör kompleksi/tesisi.
Insertion device: Manyetik eklenti aracı.
Intra-beam scattering: Demet-içi saçılım.
Lattice: Magnet örgüsü.
Linac: Lineer/doğrusal hızlandırıcı, linak.
Linear beam dynamics: Lineer/doğrusal demet dinamiği.
Longitudinal acceptance: Boyuna (demet) kabulü/kabul aralığı.
Longitudinal micro-wave instability: Boyuna mikro-dalga kararsızlığı.
Momentum acceptance: Momentum kabulü/kabul aralığı.
Momentum compaction factor: Momentum sıkışıklık faktörü.
Non-linear beam dynamics: Lineer/doğrusal olmayan demet dinamiği.
Non-systematic resonance lines: Sistemik olmayan rezonans çizgileri.
Normalized emittance: Normalize emittans.
Off-momentum particle: İdeal momentumdan sapmış parçacık.
On-momentum particle: İdeal momentumlu parçacık.
Optics design: Demet optiği tasarımı.
Particle: Parçacık.
Phase advance: Faz ilerlemesi.
Phase stability: Faz kararlılığı.
Pre-booster: Ön-enerji öteleyici.
Quadrupole magnet: Kuadrupol/odaklayıcı magnet.
Quantum excitation: Kuantum uyarım.
Resistive wall impedance: Direnç-duvar empedansı.
Resonance driving terms: Rezonans sürücü terimler.
Resonance lines: Rezonans çizgileri.

RF acceptance: RF kabulü/kabul aralığı.
Ramping time (energy): Enerji artış süresi.
Robinson wiggler magnet: Robinson magneti/wiggleri.
Seperatix: Seperatiks.
Septum magnet: Septum/ayırıcı magnet.
Sextupole magnet: Sekstupol magnet.
Space charge: Uzay yükü.
Storage ring: Depolama halkası.
Strength: Manyetik güç.
Synchrotron osciallation: Sinkrotron salınımı.
Synchrotron radiation integrals: Sinkrotron ışınımı integralleri.
Systematic resonance lines: Sistematik rezonans çizgileri.
Touschek effect: Touschek etkisi.
Tracking: Parçacık izleme.
Transverse mode coupling instability: Enine-mod bağlaşım/çiftlenim kararsızlığı.
Tune map: Betatron ayar haritası/diyagramı.
Tune shift: Ayar (betatron) kayması.
Vacuum chamber: Vakum haznesi.
Wake fields: Uyarılmış alanlar.
Working point: Çalışma noktası.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Özgür Etişken
Doğum Yeri : Türkiye
Doğum Tarihi : 20/10/1988
Medeni Hali : Evli
Yabancı Dili : İngilizce (C1), Fransızca (A1)

Eğitim Durumu:

Lise : Çubuk Lisesi
Lisans : Kırıkkale Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik ABD (2009)
Yüksek Lisans : Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik ABD (2011)
Doktora : Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik ABD (2021)

Çalıştığı Kurumlar:

COAS: CERN (Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi), Cenevre/İsviçre (2021-devam ediyor)
CERN Doktora Programı: CERN (Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi), Cenevre/İsviçre (2018-2021)
COAS: CERN (Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi), Cenevre/İsviçre (2017)
Uzman: TÜBİTAK (Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu), Ankara/Türkiye (2014-2018)
Uzman Yardımcısı: TÜBİTAK (Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu), Ankara/Türkiye (2011-2014)
Matematik Öğretmeni: Çubuk Anadolu Lisesi, Ankara/Türkiye (2010-2011)
Matematik Öğretmeni: Cumhuriyet İlkokulu, Ankara/Türkiye (2010-2011)
Matematik Öğretmeni: Barbaros İlkokulu, Ankara/Türkiye (2010-2011)

Yayınlar:

M. Aichelers, O. Etişken, et. al, “A primary electron beam facility at CERN—eSPS: Conceptual design report”, CERN Yellow Reports, CERN-2020-008, 2020.

Abada, A., M. Abbrescia, S.S. Abdus Salam, O. Etişken, et al. “HE-LHC: The High-energy large hadron collider” in: The European Physical Journal Special Topics volume 228, pp. 1109-1382, <https://doi.org/10.1140/epjst/e2019-900088-6>. This article has also

been published as FCC Conceptual Design Report, 2019.

Abada, A., M. Abbrescia, S.S. Abdus Salam, O. Etisken, et al. “FCC physics opportunities” in: The European Physical Journal C, 79, 474 <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-019-6904-3>. This article has also been published as FCC Conceptual Design Report, 2019.

Abada, A., M. Abbrescia, S.S. Abdus Salam, O. Etisken, et al. “FCC-hh: The Hadron collider” in: The European Physical Journal Special Topics volume 228, pp. 755-1107, <https://doi.org/10.1140/epjst/e2019-900087-0>. This article has also been published as FCC Conceptual Design Report, 2019.

Abada, A., M. Abbrescia, S.S. Abdus Salam, O. Etisken, et al. “FCC- e^+e^- : The Lepton collider,” in: The European Physical Journal Special Topics volume 228, pp. 261–623, <https://doi.org/10.1140/epjst/e2019-900045-4>. This article has also been published as FCC Conceptual Design Report, 2019.

F. Zimmermann, O.Etisken, et. al., “Damping bunch oscillations due to off-axis injection”, Proceeding of IPAC 2019, Australia, IPAC, <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2019-WEPMP041>, 2019.

S. Ogur, O.Etisken, et. al., “Overall injection strategy for FCC ee”, eeFACT2018, Hong Kong, <https://doi.org/10.18429/JACoW-eeFACT2018-TUPAB03>, 2018.

O. Etisken, et. al., “Updates on alternative pre-booster ring design and wiggler magnet considerations of SPS for the FCC- e^+e^- injector”, Australia, IPAC 2019.

O. Etisken, et. al., “The SPS and an alternative ring design as pre-booster ring of FCC- e^+e^- injector”, AIP Conference Proceedings, TFD34, Bodrum, Turkey, 2018.

O. Etisken, et al., “Pre-booster ring considerations for FCC e^+e^- injector,” Vancouver, Canada, <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2018-MOPMF002>, 2018.

O. Etisken, et al., “Conceptual design of a pre-booster ring for FCCee Injector preliminary design of FCC- e^+e^- pre-Injector Complex”, peer-reviewed IOP Science paper of

IPAC, Journal of Physics: Conference Series, Volume 874, conference, doi:10.1088/1742-6596/874/1/012014, 2017.

O. Etisken, et al., “Conceptual design of a pre-booster ring for FCC e^+e^- injector preliminary design of FCC- e^+e^- pre-Injector Complex”, Kopenhag, Denmark, paper TU-PAB014. <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2017-MOPVA029>, 2017.

O. Etisken, et al., “Preliminary design study of a pre-booster damping ring for the FCC- e^+e^- injector,” Proceeding of CERN BINP Workshop, Geneva, Switzerland, 2016.

O. Etisken and A.K.Ciftci “Design of 3 GeV booster ring lattic”, AIP Conference Proceedings, 1722, 070005, 2016.

Sunumlar:

CERN-ABP Group Information Meeting, Pre-booster ring design of the FCC-ee Injector Complex, Geneva, Switzerland, January, 2021 (via videoconferencing due to covid-19 pandemic).

FCCEe-Overall parameter optimization meeting - 8, Update on the pre-booster rings acceptance, Geneva, Switzerland, October, 2020 (via videoconferencing due to covid-19 pandemic).

124th FCC ee Optic Design Meeting, Acceptances of the pre-booster ring options of FCCEe injector complex, Geneva, Switzerland, September, 2020 (via videoconferencing due to covid-19 pandemic).

Turkish Physical Society-International Physics Congress, Collective effect estimates for the PBR options of FCCEe, September, (via videoconferencing due to covid-19 pandemic), Bodrum, Turkey, 2020.

FCCEe-Overall parameter optimization meeting -3, Parameters of the PBR options of FC-Cee injector complex, (via videoconference due to covid-19 pandemic)Geneva, Switzerland, August, 2020.

104th FCC ee Optic Design Meeting, An update and discussion on the synchrotron radiation of the SPS, Geneva, Switzerland, October, 2019.

FCC physics, detector, accelerator, workshop mini-workshop, FCC e^+e^- injector complex, Antalya, Turkey, September, 2019.

103rd of FCC ee optic design meeting, Overview of FCC e+e- injector complex, Geneva, Switzerland, September, 2019.

FCC Week 2019, “Collective effect estimates for the FCC e+e- pre-booster rings”, Brussels, Belgium, June 2019.

FCC-ee injector meeting, Collective effect estimates for the FCC- e^+e^- pre-booster rings, Geneva, Switzerland, June, 2019.

20th of FCCee injector meeting, New layout for alternative ring and wiggler magnet considerations of SPS, Geneva, Switzerland, August, 2018.

9th International Particle Accelerator Conference, Pre-booster ring considerations for FCC-ee, Vancouver, Canada, June, 2018.

FCC Week, Conceptual design of a pre-Booster ring(s) for FCC e^+e^- Injector, Amsterdam, The Netherlands, April, 2018.

18th of FCCee injector meeting, Update on FCCee pre-booster, Geneva, Switzerland, March 2018.

15th of FCCee injector meeting, Emittance evaluation through FCCee, Geneva, Switzerland, October 2017.

13th of FCCee injector meeting, Preliminary results for SPS as pre-booster, Geneva, Switzerland, July 2017.

FCC Week, Conceptual design of a pre-booster ring for FCCee injector, Berlin, Germany, April, 2017.

8th of FCCee injector meeting, Pre-booster damping ring design for the FCCee injector, Geneva, Switzerland, March 2017.

CERN Accelerator School: Determination of main parameters for a pre-booster damping Ring for the FCC e+e- injector, Hungary, 2016.

CERN-BINP Workshop for Young Scientists in ee Colliders, Preliminary design study of a pre-booster damping ring, Switzerland, 2016.

FCC Week, Preliminary design study of a pre-booster damping ring, Rome, Italy, 2016.

9th International Physics Conference of the Balkan Physical Union, Design of 3 GeV booster ring lattice, Istanbul, 2015.

9th International Physics Conference of the Balkan Physical Union, Design of an alternative damping ring synchrotron for the FCC-ee, Istanbul, 2015.

First International Workshop on Machine and Research Aspect of the Proposed Turkish Light Sources: TAC booster ring Design, Istanbul, 2011.