

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**OSİLATÖR MODDA SERBEST ELEKTRON LAZERLERİ İÇİN OPTİK
KAVİTE BİLEŞENLERİNİN OPTİMİZASYONU VE TASARIMI**

Şeyma Cemile BİÇER

FİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ANKARA
2019**

Her hakkı saklıdır

TEZ ONAYI

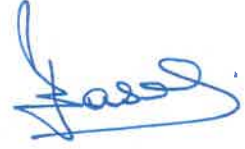
Şeyma Cemile BİÇER tarafından hazırlanan “Osilatör Modda Serbest Elektron Lazerleri için Optik Kavite Bileşenlerinin Optimizasyonu ve Tasarımı” adlı tez çalışması 28/06/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Ömer YAVAŞ
Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

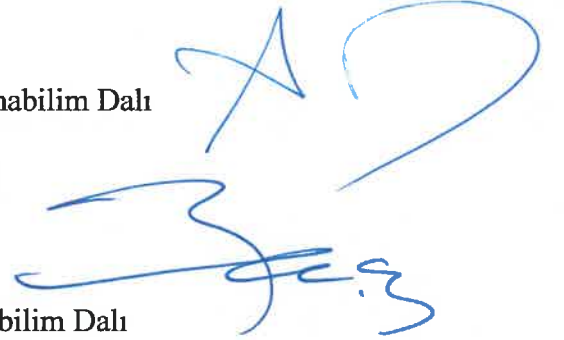


Jüri Üyeleri:

Başkan: Prof. Dr. Ergun KASAP
Gazi Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü



Üye : Prof. Dr. Ali Ulvi YILMAZER
Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı



Üye : Prof. Dr. Ömer YAVAŞ
Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Özlem YILDIRIM
Enstitü Müdür Vekili

ETİK

Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

28.06.2019

Ş. C. Biçer

Şeyma Cemile BİÇER

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

OSİLATÖR MODDA SERBEST ELEKTRON LAZERLERİ İÇİN OPTİK KAVİTE BİLEŞENLERİNİN OPTİMİZASYONU VE TASARIMI

Şeyma Cemile BİÇER

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ömer YAVAŞ

Elektron hızlandırıcılarına dayalı olarak yüksek pik güçlü, dalga boyu ayarlanabilir serbest elektron lazeri optik kavite içeren osilatör modda da (O-SEL) üretilebilmektedir. Bu çalışmada TARLA O-SEL tesisi için U35 ve U110 salındırıcı magnet kullanılarak 3-250 mikron dalga boylarında yüksek pik güçlü serbest elektron lazerin elde edilebilmesi için elektron demeti, salındırıcı magnet ve optik kavite sistemi parametreleri optimize edilmiştir.

U35 ve U110 salındırıcı magnetleri ile yüksek pik güçlü 3-250 mikron dalga boyu SEL üretilebilmesi amacıyla TARLA elektron demeti parametreleri değerlendirilmiştir. Salındırıcı magnetlerin türü ve malzemesi belirlenmiş ve Radia yazılımı ile manyetik alan dağılım desenleri elde edilmiştir. SEL ışınımının band genişliği belirlenmiş ve maksimum kazanç için gerekli parametre optimizasyonu yapılmıştır. Salındırıcıda elektron demetin maksimum sapma açısı belirlenmiştir. Optik kavite sistemi için ise optik kavitenin türü, boyu, ana parametreleri ve Gauss demet yayılımı belirlenmiştir. Optik kavitede, aynaların yansıma özelliğini artırmak üzere gerekli olan ayna kaplama malzemesi ve yöntemi belirlenmiştir. Optik kavitenin vakum seviyesi ve bileşenleri de ayrıca incelenmiştir.

Sonuç olarak, TARLA tesisi için belirlenen elektron demeti, U35 ve U110 salındırıcı magnetleri ve optik kavite parametrelerine bağlı olarak SEL demetlerinin dalga boyu, enerjisi, pik ve ortalama foton akısı ve parlaklığı, kazancı ve kayıp yüzdesi, pik ve ortalama gücü elde edilmiştir.

Haziran 2019, 99 sayfa

Anahtar Kelimeler: Serbest Elektron Lazeri, Osilatör SEL, Salındırıcı Magnet, Optik Kavite, TARLA

ABSTRACT

Master Thesis

OPTIMIZATION AND DESIGN OF OPTICAL CAVITY COMPONENTS FOR FEL-OSCILLATOR FACILITIES

Şeyma Cemile BİÇER

Ankara University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Physics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Ömer YAVAŞ

Free Electron Laser with tunable wavelength and high peak power based on electron accelerators can be produced in oscillator mode (O-FEL) including optical cavity system. In this study, optimization of the main parameters of electron beam, undulator magnets and optical cavity system of TARLA O-FEL facility is studied to obtain high peak power FEL beams in 3-250 micron wavelengths by using U35 and U110 undulator magnets.

In the beginning, existing TARLA electron beam parameters are revisited to use in recently proposed U35 and U110 undulator magnets to produce FEL beams in 3-250 microns wavelength region. The types and materials of undulator magnets are defined and magnetic field patterns are obtained by RADIA software. The bandwidth of the FEL beams are defined and the parameter optimization required for maximum gain are done. The maximum deflection angle of electron beam in undulator magnets are defined. The type, length, main parameters of optical cavity system and the Gaussian beam spread are defined. In the optical cavity, to obtain high reflectivity for mirrors, needed coating materials and techniques are defined. Vacuum level and components for optical cavity system are also studied.

As a result, based on defined electron beam, U35 and U110 undulators and optical cavity parameters for TARLA facility, the wavelength, energy, peak and average photon fluxes and brightness, gain and lost percentages, peak and average powers of proposed FEL beams are obtained.

June 2019, 99 pages

Key Words: Free Electron Laser, Oscillator FEL, Undulator Magnet, Optical Cavity, TARLA

TEŞEKKÜR

Tez çalışma konusu olarak, kurulumu ülkemiz için önemli olan TARLA tesisinde ışınım üretimi bölümümün kapsamlı olarak incelenmesini belirleyen, çalışmalarım sırasında sürekli yol gösteren, yardımlarını esirgemeyen, her adımda teşvik ve motivasyon sağlayan ve anlayış gösteren değerli danışman hocam Prof. Dr. Ömer YAVAŞ'a (Ankara Üniversitesi, Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı) içtenlikle teşekkürlerimi sunarım.

Teorik çalışmalarımda sorularıyla beni düşündüren ve aynı zamanda düşündürürken öğreten, dolu zaman diliminde bana zaman ayırıp çalışmalarım hakkında aydınlatıcı görüşlerini sunan Hızlandırıcı Teknolojileri Enstitüsü Müdürü ve TARLA Tesisi Proje Koordinatörü Doç. Dr. Avni AKSOY'a teşekkürlerimi sunarım.

Beni yetiştiren, büyüten, bana güvenen, her daim başaracağıma inanan sevgili babam Prof. Dr. Ahmet BİÇER (Gazi Üniversitesi, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı), sevgili annem Saliha BİÇER'e çok teşekkür ederim.

Zor zamanlarımda benim yanımda olan sevgili abilerim Hakan BİÇER'e, Ahmet Tarık BİÇER'e, Hakkı BİÇER'e çok teşekkür ederim.

Neşe kaynağım olan tatlı yeğenlerim Saliha Selinay BİÇER'e, Belinay Betül BİÇER'e, Ahmet BİÇER'e çok teşekkür ederim.

Şeyma Cemile BİÇER
Ankara, Haziran 2019

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAYI	
ETİK	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER	4
2.1 Elektron Demet Parametreleri	5
2.1.1 Demet enerjisi	5
2.1.2 Demet akımı ve zaman yapısı	5
2.1.3 Demet dinamiği ve emittansı	7
2.2 Undulatör ve Undulatör Işınımı	10
2.2.1 Magnet çeşidi ve malzemesi	11
2.2.2 Magnetik alan	12
2.2.3 Enerji aktarımı	13
2.2.4 Elektronun salınımı ve undulatör şiddeti	14
2.2.5 Undulatör ışınımı ve temel dalga boyu	17
2.2.5.1 Işınımın spektral genişliği ve enerji yayılımı	19
2.2.5.2 Kavite içi oluşan güç ve net kazanç	20
2.3 Optik Kavite ve Gauss Demeti	21
2.3.1 Işın izleme teorisi ve periyodiklik koşulu	22
2.3.2 Kararlılık koşulu ve optik kavite çeşitleri	23
2.3.3 Boyuna ve enine modlar	25
2.3.4 Gauss demeti	27
2.3.4.1 Demetin yayılımı	29
2.3.5 Optik kaplama	32
2.4 Osilatör Modda Serbest Elektron Lazerinin (O-SEL) Ana Parametreleri	34
2.4.1 Dalga boyu ve enerjisi	34
2.4.2 Kırınım limitli ışınım demeti	34
2.4.3 Parlaklık	36
2.4.4 Tek geçiş kazancı	39
2.4.5 Sistemin doyma noktası ve elde edilen güç	40
3. MATERYAL VE YÖNTEM	43
3.1 Wolfram Mathematica 11.0	43
3.2 RADIA 4.31	44
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	51
4.1 Elektron Demet Parametreleri	51
4.2 TARLA için Öngörülen Undulatör ve Parametreleri	53

4.2.1 Undulatörün periyot sayısı	55
4.2.2 Manyetik alanı ve geometrik boyutu	56
4.2.3 Undulatörde elektronun sapma açısı ve undulatör şiddeti	64
4.2.4 Undulatör ışınımın spektral band genişliği ve enerji yayılımı	65
4.3 Optik Kavite ve Gauss Demeti parametreleri	67
4.3.1 Optik kavite boyu ve aynaların eğrilik yarıçapı	68
4.3.2 Ayna kaplama ve yansıma	68
4.3.3 Optik kavite içerisindeki Gauss demetin bel boyutu	70
4.3.4 Optik kavitede vakum ihtiyacı ve bileşenleri	73
4.4 O-SEL'in Ana Parametreleri	73
4.4.1 OSEL'in dalga boyu ve enerjisi	75
4.4.2 Kırınım limitli ışınım demetin emittansı, diverjansı ve yarıçapı	78
4.4.3 OSEL'in pik ve ortalama parlaklığı	79
4.4.4 Tek geçiş kazancı	85
4.4.5 Kazanç düzeltme faktörleri ve optik kayıp	88
4.4.6 OSEL'in gücü	88
5. SONUÇ	91
KAYNAKLAR	95
ÖZGEÇMİŞ	98

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

A	Amper
A	Salınım Genliği
Akb	Atmosfer Basıncı
α	Alfa Twiss Parametresi
α_{loss}	Kavite İçi Kayıp Kesri
α_{out}	Optimum Açıklık Kesri
b	Odak Derinliği
B	Pik Magnetik Alan
β	Hız Oranı
$\bar{\beta}$	Elektronun Ortalama Hızı
β	Beta Fonksiyonu
β'	Beta Fonksiyonun Türevi
β_x	Demet Belindeki Beta Fonksiyonu
B_{etk}	Etkin Spektral pik parlaklık
$\langle B_{etk} \rangle$	Etkin Spektral Ortalama parlaklık
B_{max}	Maksimum Spektral pik parlaklık
$\langle B_{max} \rangle$	Maksimum Spektral Ortalama parlaklık
B_{spk}	Spektral pik parlaklık
$\langle B_{spk} \rangle$	Ortalama Spektral parlaklık
bw	Band Width
C	Coulomb
c	Parçacığın Hızı
C_c	Slippage Düzeltme Faktörü
C_e	Kazanç Zayıflama Faktörü
cm	Santimetre
C_x	Dikey Sonlu Emittans Düzeltme Faktörü
C_y	Yatay Sonlu Emittans Düzeltme Faktörü
d	Koruyucu Kaplamanın Geometrik Kalınlığı
DC	Doğru Akım
eV	Elektron Volt
ε	Verim
ϵ	Emittans
ϵ_x	Dikey Emittans
ϵ_y	Yatay Emittans
ϵ_N	Normalize Emittans
ϵ_r	Işınım Demetinin Emittansı
E_0	Durgun Kütle Enerjisi

E	Demet Enerjisi
$\Delta E/E$	Görelî Elektron Enerji Yayılımı
E_L	Işınımın Elektrik Alanı
E_{SEL}	SEL Enerjisi
Σ_x	Dikey Doğrultuda Toplam Foton Parametresinin Yarıçapı
$\Sigma_{x'}$	Dikey Doğrultuda Toplam Foton Parametresinin Diverjansı
Σ_y	Yatay Doğrultuda Toplam Foton Parametresinin Yarıçapı
$\Sigma_{y'}$	Yatay Doğrultuda Toplam Foton Parametresinin Diverjansı
Σ	Toplam Foton Demetinin Alanı
f	Tekrarlanma Oranı
Δf	Boyuna Frekans
f_B	Bessel üzeltme Fonksiyonu
f_{rez}	Rezonans Frekansı
g	Undulatörün Gap Aralığı
g_0	Tek Geçiş Kazanç Parametresi
\hat{g}_0	Düzeltilmiş Tek Geçiş Kazanç Parametresi
g	Boyutsuz Parametre
GeV	Giga Elektron Volt
GHz	Giga Hertz
G_{max}	Maksimum Tek Geçiş Kazanç Parametresi
G_{doyma}	Doyma Noktasındaki SEL Kazancı
$\Delta\gamma$	Elektronun Enerji Kaybı
γ	Lorentz Çarpanı
Υ	Gama Twiss Parametresi
γ_r	Rezonans Enerji
h	Plank Sabiti
h	Harmonik Sayı
Hz	Hertz
\hat{I}	Pik akımı
$\langle I \rangle$	Ortalama Demet Akımı
I_A	Alfven Akımı
I_p	Atma Akımı
$J_{0,1}$	Bessel Fonksiyonu
k	Enine Mod Yayılımının Enine İndisi
K	Undulatör Şiddeti
ξ	Kisi/Xi
k_u	Undulatörün Dalga Sayısı
kW	kilo Watt
$\Delta\lambda/\lambda$	Işınımın Band Genişliği
λ_u	Undulatörün Dalga Boyu

λ_{SEL}	SEL Dalga Boyu
L_u	Undulatör boyu
L_c	Optik Kavite Boyu
m_0	Parçacığın Kütlesi
m	Metre
m	Pozitif Tam Sayı
μ	z'den bağımsız nicelik
M	Işın Matrisi
M^2	Demet Kalite Faktörü
mA	Mili Amper
mbar	Milibar
meV	Mili Elektron Volt
MeV	Mega Elektron Volt
MHz	Mega Hertz
μm	Mikrometre
mm	Milimetre
mrad	Miliradyan
MW	Mega Watt
n	Kırılma İndisi
η	Tur sayısı
nmrad	Nanometreradyan
N	Undulatör kutup sayısı
$NdFeB$	Neodymium Iron Boron
\dot{N}_{ph}	Pik Foton Akısı
$\langle \dot{N}_{ph} \rangle$	Ortalama Foton Akısı
N_u	Undulatörün Periyot Sayısı
p	Enine Mod Yayılımın Boyuna İndisi
p_0	Görelî Momentum
Δp	Boyuna Momentum
ΔP	Optik Kavite İçinde Üretilen Güç
Pa	Pascal
pC	Piko Coulomb
P_{demet}	Elektron Demetinin Gücü
\hat{P}_{demet}	Pik Elektron Demet Gücü
$\langle P_{demet} \rangle$	Ortalama Elektron Demet Gücü
P_{doyma}	Doyma Noktasındaki Kavite İçindeki Güç
π	Pi Sayısı
P_η	Undulatörün Çıkışındaki Optik Atma Gücüne
P_s	Doğal Yayılım Gücü
ps	Pikosaniye

\hat{P}_{SEL}	Pik SEL Gücü
p_x	Dikey Enine Momentumudur
p_y	Yatay Enine Momentumudur
ϕ	Enine Mod Yayılımın Açı İndisi
Φ	Undulator Ekseninin Yakın Çevresinde Azimutal Gözlem Açısı
q	Paketçik Yüğü
q_e	Elektron Yüğü
r	Enine Modun Yarçap İndisi
R	Ayna Eğrilik Yarıçapı
\mathcal{R}	Yansımaya Katsayısı
rad	Radyan
RF	Radyo Frekans
$SmCo$	Samaryum Kobalt
s	Saniye
$\sigma_{\gamma/\gamma}$	Göreceli RMS Demet Enerji Yayılımı
σ_r	Işınım Demetin Yarıçapı
σ'_r	Işınım Demetin Diverjansı
σ_x	Demet Yarıçapı
σ'_x	Demet Diverjansı
σ_z	Paketçik Boyu
$\theta(z)$	Sapma Açısı
θ_{max}	Maksimum Sapma Açısı
T	Tesla
T_{atma}	Işınımın Atma Süresi
THz	Tera Hertz
τ_{μ}	Paketçik Süresi
T_{μ}	Paketçik Arasındaki Süre
T_p	Atma Süresi
T_{rep}	Atma Tekrarlanma Periyodu
ϑ	Undulatorde Işınımın Yayılma Açısı
v	Parçacığın Hızı
\mathbf{v}	Bozunum Parametresi
w_0	Gauss Demetinin Minimum Bel Boyutu
$w(z)$	Gauss Demetinin İlerleme Eksenine Göre Bel Boyutu
\bar{w}	Undulator Boyunca Ortalama Optik Mod Boyutu
ΔW	Enerji Aktarımı
W	Watt
x	Demetin İlerleme Yönüne Dik Olan Dikey Enine Koordinatı
$x(t)$	Elektronun Undulator içindeki Enine Hareketi
x'	Elektron Demetin Yörüngesinin Dikey Enine Eğimi

y	Elektron Demetin İlerleme Yönüne Dik Olan Yatay Enine Koordinatı
y'	Elektron Demetin Yörüngesinin Yatay Enine Eğimi
z	Elektron Demetin İlerleme Yönünde Olan Boyuna Koordinatı
z_R	Rayleigh Uzunluğu
ZrO_2	Zirkonyum Oksit

Kısaltmalar

Ar-Ge	Araştırma ve Geliştirme
CW	Continuous Wave
HG	Hermite-Gaussian
LG	Laguerre-Gaussian
MeV	Mega Elektron Volt
OSEL	Osilatör modda Serbest Elektron Lazeri
RMS	Root Mean Square
SEL	Serbest Elektron Lazeri
TARLA	Turkish Accelerator and Radiation Laboratory in Ankara
TEM	Transverse Electro-Magnetic
THM	Türk Hızlandırıcı Merkezi
UHV	Ultra High Vacuum
IR	Infrared

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Demet akımı ve zaman yapısı (Wiedemann 2007).....	6
Şekil 2.2 Konum-eğim faz uzayında (x, x') demetin kapladığı alanın elips şeklinde oluşumu (Turner 1994'den değiştirilerek alınmıştır).....	8
Şekil 2.3 Faz Uzay Elipsi (Wiedemann 2007'den değiştirilerek alınmıştır).....	9
Şekil 2.4 Undulatör magnet ve undulatör magnette elektronun sinüsel salınımı (Wille 1998'den değiştirilerek alınmıştır).....	10
Şekil 2.5 Hibrit Undulatör Magnet (Reiche 1999).....	11
Şekil 2.6 Kalıcı magnet ile Hibrit magnet karşılaştırılması (Wille 1998'den değiştirilerek alınmıştır).....	12
Şekil 2.7 Hibrit magnetin geometrik boyutları (Elleau vd. 2000'den değiştirilerek alınmıştır).....	13
Şekil 2.8 Undulatörde elektronun hareketi ve oluşan ışınının elektrik alan bileşeni (Anonymous 2019a'dan değiştirilerek alınmıştır).....	14
Şekil 2.9 Undulatörde elektronların sinüsel salınımı (Howells 1992'den değiştirilerek alınmıştır).....	15
Şekil 2.10 Undulatör ışınımı (Wille 1998'den değiştirilerek alınmıştır).....	17
Şekil 2.11 Undulatör ışınımının spektrumu (Howells 1992'den değiştirilerek alınmıştır).....	19
Şekil 2.12 Net kazanç oluşumu (Anonymous 2019a'dan değiştirilerek alınmıştır).....	21
Şekil 2.13 Osilatör SEL'in şematik gösterimi (Kim vd. 2018).....	22
Şekil 2.14 Optik kavite kararlılık diyagramı (Svelto 2010'den değiştirilerek alınmıştır).....	24
Şekil 2.15 Kararlı ve kararsız optik kavite (Silfvast 2005).....	25
Şekil 2.16 Kavite içinde oluşan iki farklı boyuna mod (Silfvast 1995).....	25
Şekil 2.17 Optik kavitede biraz farklı frekanslarda farklı yönlerde hareket eden iki farklı enine mod (Silfvast 1995).....	27
Şekil 2.18 Enine mod dereceleri (Nguyen vd. 2009).....	28
Şekil 2.19 Optik kavite içinde Gauss Demetin bel boyutu (Anonymous 2019a'dan değiştirilerek alınmıştır).....	29
Şekil 2.20 Gauss demet için bazı parametrelerin gösterimi (Silfvast 2005).....	30
Şekil 2.21 Maksimum doldurma faktörü için Optimum Rayleigh uzunluğu (Anonymous 2019a'dan değiştirilerek alınmıştır).....	32
Şekil 2.22 Yüksek indisli, tek katmanlı dielektrik kaplamadan ışığın yansımaları (Anonymous 2019b).....	33
Şekil 2.23 Maksimum foton parlaklık için eşleşme işlemi (Wiedemann 2003).....	38
Şekil 3.1 Mathematica 11.0 kütüphanesi (Anonymous 2017b).....	44
Şekil 3.2 Mathematica'nın alt yazılım paketi olan Radia'nın çalıştırma talimatı.....	45
Şekil 3.3 RADIA'da Hibrit Undulatör Miknatısı oluşturma, renkleri ve manyetik malzemeleri dağıtma fonksiyonu.....	46
Şekil 3.4 Magnetik malzemeyi tanımlama fonksiyonu.....	47
Şekil 3.5 Radia'da NdFeB magnet, vanadyum kutup için hibrit undulatör magnet oluşturma fonksiyonu.....	48
Şekil 3.6 RADIA'da Hibrit undulatörün geometri çizim fonksiyonu.....	49
Şekil 3.7 RADIA'da belirlenen malzeme ve geometrik boyutlara göre magnetik alan hesap fonksiyonu.....	49
Şekil 3.8 RADIA'da hesaplanan magnetik alana bağlı olarak undulatörün merkezinde enine magnetik alan grafiği çizim fonksiyonu.....	50
Şekil 3.9 RADIA'da hesaplanan magnetik alana bağlı olarak undulatörün boyuna magnetik alan grafiği çizim fonksiyonu.....	50
Şekil 4.1 U35 için şematik görünüm (6 kutuplu).....	58
Şekil 4.2 $N_u = 40$ ve $g = 20$ mm olan U35 için undulatörün merkezinde enine magnetik alan grafiği ($B=0.338671$ T, Roll-off field: +17 mm).....	59
Şekil 4.3 $N_u = 40$ ve $g = 25$ mm olan U35 için undulatörün merkezinde enine magnetik alan grafiği ($B=0.214436$ T, Roll-off field at +17 mm).....	59
Şekil 4.4 $N_u = 40$ ve $g = 20$ mm olan U35 için undulatörün boyuna magnetik alan grafiği ($B=0.338671$ T).....	60
Şekil 4.5 $N_u = 40$ ve $g = 25$ mm olan U35 için undulatörün boyuna magnetik alan grafiği ($B=0.214436$ T).....	60
Şekil 4.6 U110 için şematik görünüm (6 kutuplu).....	61

Şekil 4.7 $N_u = 30$ ve $g = 75$ mm olan U110 için undulatörün merkezinde enine magnetik alan grafiği ($B=0.24529$ T, Roll-off field at +20 mm).....	62
Şekil 4.8 $N_u = 30$ ve $g = 88$ mm olan U110 için undulatörün merkezinde enine magnetik alan grafiği ($B=0.168418$ T, Roll-off field at +20 mm).....	62
Şekil 4.9 $N_u = 30$ ve $g = 75$ mm olan U110 için undulatörün boyuna magnetik alan grafiği ($B=0.24529$ T).....	63
Şekil 4.10 $N_u=30$ ve $g=88$ mm olan U110 için undulatörün boyuna magnetik alan grafiği ($B=0.168418$ T).....	63
Şekil 4.11 SEL Kazanç eğrisi.....	66
Şekil 4.12 Bazı metallerin dalga boyuna göre yansıtıcılık yüzdesi (Anonymous 2019b).....	69
Şekil 4.13 $N_u=40$ olan U35'te 3-32 μ m dalga boyu için Gauss Demetin optik eksenin ilerleme yönüne göre bel boyu değişimi	71
Şekil 4.14 $N_u = 30$ olan U110'da 22-252 μ m dalga boyu için Gauss Demetin optik eksenin ilerleme yönüne göre bel boyu değişimi	72
Şekil 4.15 U35 için undulatör şiddeti ve demet enerjisine göre SEL dalga boyu	76
Şekil 4.16 U35 için undulatör şiddeti ve demet enerjisine göre SEL enerjisi	76
Şekil 4.17 U110 için undulatör şiddeti ve demet enerjisine göre SEL dalga boyu	77
Şekil 4.18 U110 için undulatör şiddeti ve demet enerjisine göre SEL enerjisi	78
Şekil 4.19 U35 için 15-40 MeV ve SEL dalga boyuna göre maksimum spektral pik parlaklık	80
Şekil 4.20 U110 için 15-40 MeV ve SEL dalga boyuna göre maksimum spektral pik parlaklık.....	80
Şekil 4.21 U35 için 15-40 MeV demet enerjisine ve SEL dalga boyuna göre etkin spektral pik parlaklık.....	81
Şekil 4.22 U110 için 15-40 MeV demet enerjisine ve SEL dalga boyuna göre etkin spektral pik parlaklık.....	82
Şekil 4.23 U35 için 15-40 MeV demet enerjisine ve SEL dalga boyuna göre maksimum spektral ortalama parlaklık.....	83
Şekil 4.24 U110 için 15-40 MeV demet enerjisine ve SEL dalga boyuna göre maksimum spektral ortalama parlaklık.....	83
Şekil 4.25 U35 için 15-40 MeV demet enerjisine ve SEL dalga boyuna göre etkin spektral ortalama parlaklık.....	84
Şekil 4.26 U110 için 15-40 MeV demet enerjisine ve SEL dalga boyuna göre etkin spektral ortalama parlaklık.....	84
Şekil 4.27 Dördüncü nesil ışınım kaynağı olan SEL'in yıllara göre pik ve ortalama parlaklık değerleri (Yavaş 2008)	85
Şekil 4.28 $N_u=40$ olan U35 için undulatör şiddeti ve enerjiye göre tek geçiş kazanç yüzdesi	86
Şekil 4.29 $N_u=30$ olan U110 için undulatör şiddeti ve enerjiye göre yüzdeleri tek geçiş kazancı	87
Şekil 4.30 $N_u=40$ olan U35 için undulatör şiddeti ve enerjiye göre elde edilen SEL'in pik gücü.....	89
Şekil 4.31 $N_u=30$ olan U110 için undulatör şiddeti ve enerjiye göre elde edilen SEL'in pik gücü.....	90

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 Hibrit undulatörün pik alanını tanımlayan katsayılar ve gap aralığı koşulu (Elleume vd. 2000).....	13
Çizelge 4.1 TARLA elektron demeti parametreleri (Aksoy 2015)	51
Çizelge 4.2 U35 ve U110 için belirlenen elektron demeti parametreleri	53
Çizelge 4.3 U35 için belirlenen kararlılık koşuluna uygun minimum ve maksimum manyetik gap aralığına göre elde edilen pik manyetik alan değerleri	57
Çizelge 4.4 U110 için belirlenen kararlılık koşuluna uygun minimum ve maksimum manyetik gap aralığına göre elde edilen pik manyetik alan değerleri	57
Çizelge 4.5 U35 için belirlenen geometrik boyutlar.....	58
Çizelge 4.6 U110 için belirlenen geometrik boyutlar.....	61
Çizelge 4.7 U35'te elde edilen pik manyetik alana göre undulatör şiddet değerleri	64
Çizelge 4.8 U110'da elde edilen pik manyetik alana göre undulatör şiddet değerleri	64
Çizelge 4.9 U35 ve U110'da elde edilen manyetik alanda 15-40 MeV enerjiye göre belirlenen elektronun maksimum sapma açısı	65
Çizelge 4.10 U35 ve U110'da ışınımın spektral band genişliği, göreceli rms demet enerji yayılımı	65
Çizelge 4.11 $N_u = 40$ olan U35 ve $N_u = 30$ olan U110 için minimum ve maksimum SEL dalga boyuna göre rezonans enerji ve maksimum kazanç için gereken enerji	66
Çizelge 4.12 U35 ve U110 için belirlenen optimum Rayleigh uzunluğu, kararlılık parametresi ve aynaların eğrilik yarıçap değerleri	68
Çizelge 4.13 U35 ve U110 optik ayna metal kaplamanın yansıma artışı için minimum ve maksimum SEL dalga boyu için gereken ZrO_2 ($n=2.1$) koruyucu dielektrik malzemenin geometrik kalınlığı	70
Çizelge 4.14 $N_u = 40$ olan U35'te 3-32 μm dalga boyu için Gauss demetin minimum bel boyutu, undulatör çıkışındaki bel boyutu, aynalardaki bel boyutu değeri	71
Çizelge 4.15 $N_u = 30$ olan U110'da 22-252 μm dalga boyu için Gauss demetin minimum bel boyutu, undulatör çıkışındaki bel boyutu, aynalardaki bel boyutu değeri	72
Çizelge 4.16 Elektromanyetik Spektrumun Infrared bölgesi için frekans, dalga boyu, enerji aralıkları (Anonymous 2019c).....	77
Çizelge 4.17 U35 ve U110 için 15-40 MeV enerjili elektronla elde edilen minimum ve maksimum SEL dalga boyuna göre kırınım limitli ışınım demetin yarıçap ve diverjans değerleri.....	79
Çizelge 4.18 Periyot sayısı $N_u = 40$ olan U35 ve $N_u = 30$ olan U110 için pik foton akısı	79
Çizelge 4.19 U35 ve U110 için elde edilen SEL dalga boyuna göre dikey ve yatay foton diverjansı ve yarıçapı.....	81
Çizelge 4.20 Periyot sayısı $N_u = 40$ olan U35 ve $N_u = 30$ olan U110 için ortalama foton akısı.....	82
Çizelge 4.21 U35 ve U110 için 15-40 MeV enerjide elde edilen 3-250 μm SEL dalga boyuna göre kırınım sınırları dahil toplam foton demetinin alanı	86
Çizelge 4.22 U35 ve U110 için kazanç zayıflama ve slippage düzeltme faktörü değerleri	88

1. GİRİŞ

Düşük enerjili elektron demetleri kullanılarak serbest elektron lazeri elde etmenin bir yöntemi de çok kutuplu undulatör (salındırıcı) magnet aracılığı ile elde edilen ışınımı her iki yanında yansıtıcı aynaların bulunduğu bir optik kavite ortamında güçlendirmek ve güç doyumuna ulaştıktan ve lazer özelliğini sağladıktan sonra yarı saydam aynadan dışarı almaktır. Bu çalışmanın amacı düşük enerjili (<50 MeV) elektron demetleri kullanılarak elde edilecek ve genel olarak kızılötesi (infrared) bölgeye düşen serbest elektron lazeri üretimine olanak sağlayan salındırıcı magnet ve bunu içeren aynalı optik kavite sisteminin fiziğini incelemek, parametre optimizasyonunu yapmak ve elektron demetinin parametrelerini de dikkate alarak istenilen özelliklerde serbest elektron lazeri elde edecek şekilde tasarım çalışmalarını detaylandırmak ve elde edilecek sonuçları 10-40 MeV enerjili TARLA infared SEL tesisinin undulatör ve optik kavite sistemlerine uygulamaktır.

Bu tesiste SEL elde edilmesini sağlayacak salındırıcı magnet ve optik kavite için parametre optimizasyonuna yönelik daha önce bazı çalışmalar yapılmış olmasına rağmen, SEL üretim sisteminin bir bütün olarak ele alınıp hem elektron demetinde gündeme gelen güncellemeleri hem de ışınım kullanıcıları tarafından ihtiyaç duyulan infrared ışınım karakteristiklerini karşılayacak şekilde kurulum öncesi yeniden detaylandırılmasına ihtiyaç bulunmaktadır. Bu tez çalışmasında bu hedef gözetildiği için çalışmanın proje kapsamında oluşan bilgi birikimine dayalı olarak detaylandırılmış olması önemli görülmektedir.

Tezin kuramsal kısmında elektron demeti, undulatör magnetler, optik kavite ve elde edilen O-SEL parametreleri olmak üzere dört ana bölümde incelenmiştir. Elektron demetinin parametreleri kısmında demetin enerjisi, demet akımı, zaman yapısı, demet dinamiği, demet gücü ve yayılımı (emittansı) incelenmiştir. Undulatör magnet kısmında undulatör magnetin tanımı, geometrik boyutu, çeşidi ve malzemesi, manyetik açıklığı (gap), şiddet parametresi, manyetik alanı dağılımı, undulatörde enerji aktarımı, undulatörde elektron demetinin sapma açısı ve salınım genliği incelenmiştir.

Undulatör ışınımı kısmında undulatör ışınımının temel dalga boyu, ışınım dalgasının atma süresi, ışınımın spektral genişliği, enerji yayılımı, kavite içi güç ve net kazanç incelenmiştir. Optik kavite kısmında optik kavitede ışın izleme teorisi, periyodiklik ve kararlılık koşulu, optik kavite çeşidi, optik kavitede oluşan lazer modları incelenmiştir. Optik kavite gauss yayılımı kısmında optik kavitede gauss demetin tanımı, yayılımı, bel konumu ve Rayleigh uzunluğu, odak derinliği, emittansı, aynaların yarıçapı ve optik kaplama malzemesinin çeşidi ve özellikleri incelenmiştir. OSEL kısmında SEL dalga boyu, enerjisi, foton emittansı, foton akısı, parlaklığı, kazancı, pik gücü verilmiştir.

Materyal ve yöntem kısmında tasarım için kullanılan Radia 4.31 ve analitik hesaplar için kullanılan Mathematica 11.0 yazılımı tanıtılmış, kullanım amacı ve şekli belirtilmiştir. Ayrıca bu tasarım ve optimizasyon çalışmasında amaca yönelik kullanılan teknik bilgiler açıkça verilmiştir.

Bulgular ve tartışma kısmında U35 ve U110 için 15-40 MeV demet enerjisinde yüksek pik güçlü 3-250 μm dalga boyu SEL üretilmesi için gerekli elektron demetin paket boyu, paket süresi, pik akımı, pik demet gücü, ortalama demet gücü, diverjans, yarıçap, emittans değerleri belirlenmiştir.

Undulatör magnet için, magnetin türü ve malzemesi seçilmiş olup bu özelliklere göre yüksek pik güçlü 3-250 mikron dalga boyu üretilmesi için gereken periyot sayısı, gap aralığı belirlenmiş ve kararlılık koşuluna uygunluğu kontrol edilmiştir. Belirlenen parametrelere göre pik manyetik alan hesaplanmış, Radia yazılımı ile ihtiyaç duyulan magnetik alanı veren undulatör magnet ve kutup geometrik boyutları belirlenmiş olup enine ve boyuna magnetik alan grafikleri çizilmiş ve magnetik alan dağılımı kontrol edilmiştir. Undulatörede elektronun sapma açısı ve undulatör şiddeti, elde edilen ışınımın band genişliği, göreceli rms demet enerji yayılımı, kavite içi güç ve maksimum kazanç için gereken enerji yayılımı bulunmuştur.

Optik kavite için kavite türü ve boyu, rayleigh uzunluğu, aynaların eğrilik yarıçapı, aynaların kaplama malzemesi, korucuyu tabaka malzemesi ve kalınlığı belirlenmiştir. Bunun yanısıra optik kavite içinde oluşan Gauss demetin optik eksenin ilerleme yönüne

göre bel boyu değişimi, vakum aralığı, malzemesi, basıncı ve gereken pompa çeşidi belirlenmiştir.

U35 ve U110 için belirlenen parametrelere göre SEL dalga boyu, ışınım demetin diverjansı, yarıçapı, emittansı, pik ve ortalama foton akısı, yatay doğrultuda toplam foton parameresinin diverjansı ve yarıçapı, kırınım sınırları dahil elektron ve ışınım demetinin oluşturduğu toplam foton alanı belirlenmiştir. Maksimum spektral pik ve ortalama parlaklığı, etkin spektral pik ve ortalama parlaklık, tek geçiş kazancı, optik kavite kaybı, pik ve ortalama SEL gücü bulunmuştur. Son olarak bulgular kısmında elde edilen tüm veriler tartışılmıştır.

Sonuçlar kısmında 10-40 MeV enerjili elektron demeti kullanılarak 3-250 μm dalga boylu ışınım elde edebilmek amacıyla TARLA için ngrlen U35 ve U110 undulatrleri için yapılan optimizasyonda gereken elektron demeti, undulatör, optik kavite ve elde edilen O-SEL'in parametre değerleri verilmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER

On yıllar boyunca bilim insanları, çıplak gözle görülemeyecek kadar küçük olan nesnelere incelemek için mikroskop kullandılar. Ancak mikroskoplarda kullanılan görünür ışık atom, molekül ve atom altı parçacıkları incelemek için yeterli dalga boyuna sahip olmadığından, bu boyutları incelemek için elektron mikroskobunun yanı sıra parçacık hızlandırıcılarından yararlanılmıştır. Hızlandırıcılarda ivmelendirilen yüklü parçacıkların ışınım yapması sonucu elde edilen ışınımın “hızlandırıcıya dayalı ışınım kaynakları” denilmiş ve kızıl ötesi (infrared) bölgeden sert X-ışınları bölgesine uzanan dalga boyu bölgesindeki bu ışınım günümüzde temel ve uygulamalı bilimlerin her alanında ileri düzeyli Ar-Ge ve uygulama çalışmalarında kullanılır hale gelmiştir.

Hızlandırıcıya dayalı ışınım ilk olarak parçacık fiziği amaçlı olarak kurulmuş sinkrotronlarda parazitik moda ortaya çıkmıştır. Bu ışınım 1. nesil ışınım kaynağı olarak adlandırılmıştır. Sinkrotronlarda yer alan eğici (dipol) magnetlerin ışınım üretmek amacıyla kullanımından elde edilen ışınım 2. Nesil ışınım denilmiştir ve bu ışınım geniş band karakterlidir ve elektron demeti kalitesi düşüktür ($\epsilon > 100$ nmrad). Üçüncü nesilden elde edilen ışınım ise; yayını (emittans) düşük ($20 \text{ nmrad} < \epsilon < 100 \text{ nmrad}$) yüksek kaliteli elektron demetlerinin yüksek akı ve parlaklığı, ayarlanabilir dalga boylu ışınımın elde edilmesi için çok kutuplu wiggler ve undulatör magnetlerin kullanılması ile elde edilen ışınımdır. Üçüncü nesil ışınım kaynaklarından sonra, yayını çok küçük olan ($\epsilon < 20 \text{ nmrad}$) yüksek kaliteli ve genelde doğrusal hızlandırıcılardan elde edilen elektron demetlerinin özel undulatör magnetlerden geçirilmesi yoluyla elde edilen lazer karakterli (kohorent ve monokromatik) ışınım 4. nesil ışınım olarak anılmışlardır (Winick 1995).

Bu bölümde osilatör moda SEL üretimi için kuramsal bilgiler verilmiş olup elektron demet parametreleri, undulatör ve undulatör ışını, optik kavite ve Gauss yayılımı, O-SEL'in ana parametreleri olmak üzere dört ana başlık altında incelenmiştir.

2.1 Elektron Demet Parametreleri

Serbest Elektron Lazeri (SEL) üretimi için kullanılacak elektron demetleri için başta küçük yayılım (emittans) değeri olmak üzere, enerji, akım ve zaman yapısı gibi bazı parametrelerin istenilen değeri sağlaması ve iyi optimize edilmiş olması gerekir. Demetin hızlandırıcı içindeki davranışının analizi açısından ise enine ve boyuna demet dinamiğinin kapsamlı olarak incelenmesi gerekmektedir.

2.1.1 Demet enerjisi

Parçacık demetinin enerjisi bu enerjiye sahip parçacıklardan oluşan demetin enerjisini ifade eder. Parçacığın kütlesi m_0 , parçacığın hızı v , ışık hızı c , $\beta = v/c$ hız oranı, $\gamma = 1/\sqrt{1 - \beta^2}$ lorentz çarpanı, durgun kütle enerjisi $E_0 = m_0c^2$ olmak üzere görelî toplam demet enerjisi $E = \gamma m_0c^2$ ile görelî momentumu $p_0 = \gamma m_0v$ arasındaki bağıntı aşağıdaki gibidir (Serway vd. 2005).

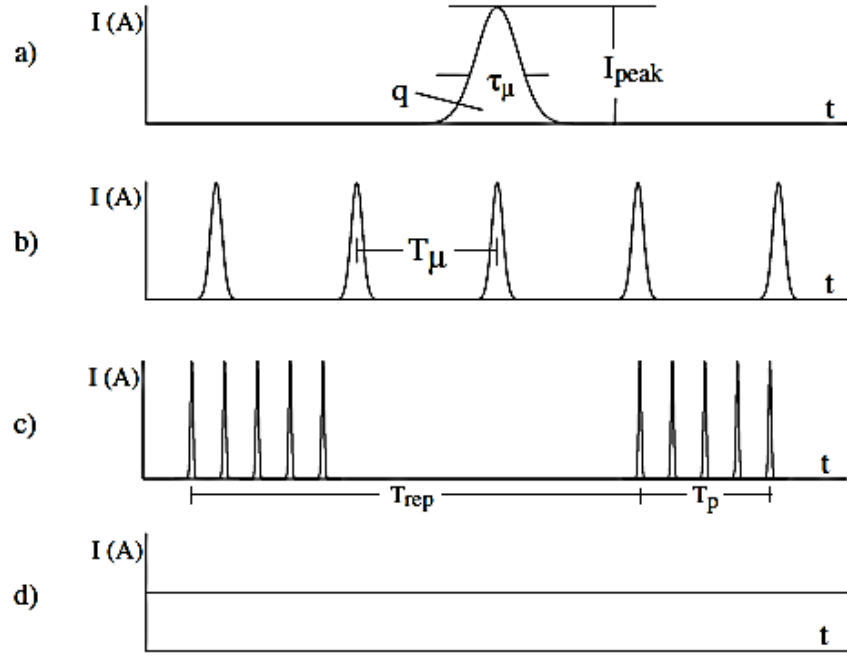
$$E^2 = p_0^2c^2 + (E_0)^2 \quad (2.1)$$

Bu ifade aşağıdaki şekilde de yazılabilir:

$$cp_0 = \sqrt{E^2 - E_0^2} = m_0c^2\sqrt{\gamma^2 - 1} = \beta\gamma m_0c^2 = \beta E \quad (2.2)$$

2.1.2 Demet akımı ve zaman yapısı

Bir parçacık demeti, parçacık akışının zaman yapısına göre iki farklı şekilde tanımlanır: Parçacığın akışı sürekli ise sürekli demet, eğer parçacıklar sonlu uzunluklu paketçikler içinde ise mikro atmalı veya paketçikli demet. Sürekli demet DC hızlandırıcı alanlarla, paketçikli demetler ise RF alanların kullanıldığı hızlandırıcılarda oluşturulabilir (Wiedemann 2007).



Şekil 2.1 Demet akımı ve zaman yapısı (Wiedemann 2007)

Şekil 2.1’de demet akımı ve zaman yapısı gösterilmiştir. Demet yoğunluğu da denilen demet akımı, birim zamanda birim kesit alanından geçen elektrik yük miktarıdır. Demet akımı için, ölçümde kullanılan zaman aralığına bağlı olarak, dört farklı tanımla karşılaşılır. Bunlar paketçik akımı ya da pik akımı (Şekil 2.1a), atma akımı (Şekil 2.1b), ortalama demet akımı (Şekil 2.1c) ve sürekli demet akımıdır (Şekil 2.1d).

En küçük paketçik birimi mikro-paketçiktir. Şekil 2.1a’da gösterilen paketçik akımı ya da pik akımı \hat{I} , SI birim sisteminde toplam paketçik yükü q , paket boyu σ_z ve paketçik süresi τ_μ olmak üzere aşağıdaki şekilde verilir.

$$\hat{I}[A] = q[C]/\tau_\mu[s] \quad (2.3)$$

$$\tau_\mu[s] = \sigma_z[m]/c[m/s] \quad (2.4)$$

Paketçik serisi bir demet atması oluşturur. Ardışık paketçikler arasındaki süre T_μ olmak üzere Şekil 2.1b’de gösterilen atma akımı I_p şu şekilde ifade edilir.

$$I_p = \hat{I} \frac{\tau_\mu}{T_\mu} = \frac{q}{T_\mu} \quad (2.5)$$

Şekil 2.1c'de gösterilen ortalama demet akımı, hızlandırıcılarda tam bir döngü boyunca ortalama demet akımıdır.

$$\langle I \rangle = I_p \frac{T_p}{T_{rep}} \quad (2.6)$$

Burada T_p atma süresi, T_{rep} atma tekrarlanma periyodudur. Ayrıca elektron demetinin enerjisi ve akımına bağlı olarak elektron demetinin gücü aşağıdaki şekilde hesaplanır (Dattoli vd. 2009).

$$P_{demet}[MW] = I[A]E[MeV] \quad (2.7)$$

Buradaki I demet akımı, pik akımı olursa \hat{P}_{demet} şeklinde ifade edilen pik demet gücünü, ortalama demet akımı olursa $\langle P_{demet} \rangle$ şeklinde ifade edilen ortalama demet gücünü elde ederiz.

2.1.3 Demet dinamiği ve emittansı

Bir parçacık demetinin hareketini incelemek için faz uzayındaki demet dinamiğini dikkate alırız. Demet iletim hattı boyunca herhangi bir noktada bulunan altı boyutlu faz uzayındaki her parçacık $(x, p_x, y, p_y, z, \Delta p)$ şeklinde belirtilen bir nokta ile temsil edilir. Burada x ve y sırasıyla demetin ilerleme yönüne dik olan yatay ve dikey enine koordinatı, z ilerleme yönünde olan boyuna koordinatı ya da referans yörüngesi boyunca eğrisel koordinatı, $x' = dx/dz$ ve $y' = dy/dz$ sırasıyla demet yörüngesinin yatay ve dikey enine eğimi, Δp boyuna momentumu, p_x ve p_y sırasıyla yatay ve dikey enine momentumudur (Turner 1994).

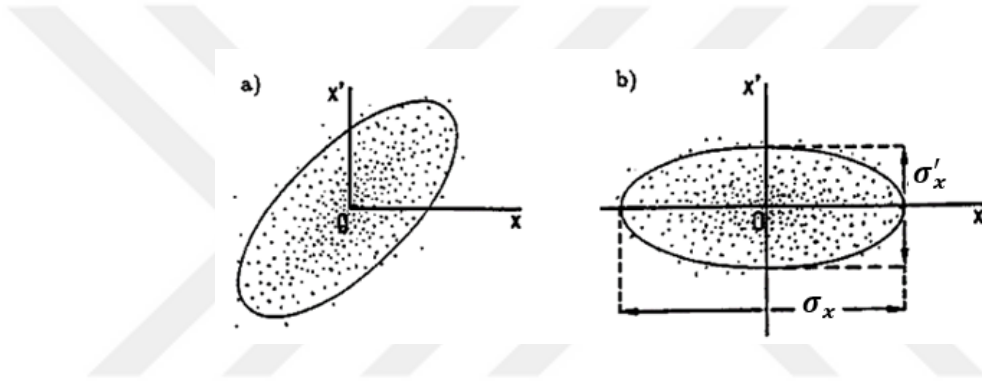
Parçacığın enine momentum ile demetin eğimi arasında aşağıdaki gibi bir bağlantı vardır.

(2.8)

$$p_x = p_0 x' \quad (2.9)$$

$$p_y = p_0 y'$$

Aynı zamanda x ve y konum değişkenlerinin eşlenik momentumu sırasıyla x' ve y' olan demetin eğimleridir ve dolayısıyla iki boyutlu faz uzayında her demet (x, x') ve (y, y') düzleminde olmak üzere iki farklı enine faz elipsleri vardır. Buradaki faz elipsler tarafından kaplanan alana emittans (yayınım) denir ve ϵ ile gösterilir.



Şekil 2.2 Konum-eğim faz uzayında (x, x') demetin kapladığı alanın elips şeklinde oluşumu (Turner 1994'den değiştirilerek alınmıştır)

Şekil 2.2a'da görüldüğü gibi (x, x') faz uzayındaki parçacık demeti, faz elipsi olarak adlandırılan bir elipsle çevrelenmiştir. Buradaki iki boyutlu (x, x') faz elipsi tarafından kapladığı alana demetin dikey emittansı (ϵ_x) denilir ve aşağıdaki şekilde verilir.

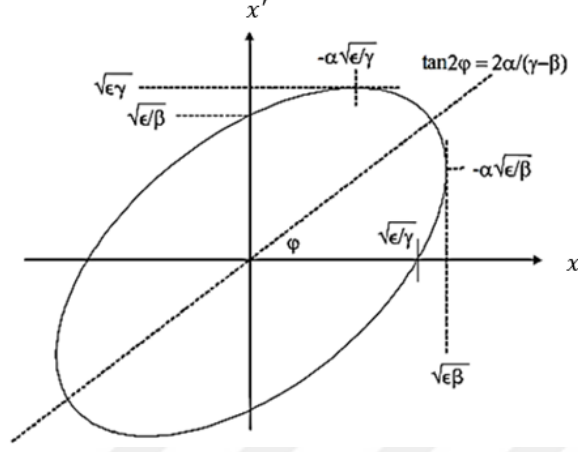
(2.10)

$$\epsilon_x [mm.mrad] = \pi \times \sigma_x [mm] \times \sigma'_x [mrad]$$

İki boyutlu (y, y') faz elipsi tarafından kapladığı alan için denklem 2.10'daki x yerine y yazılırsa demetin yatay emittansı (ϵ_y) elde edilir.

Emittans elipsinin dik ve eğik olmak üzere iki gösterimi vardır ve eğer elips dik ise elipsin yatay ve dikey eksenleri koordinat eksenleri ile çakışır (Şekil 2.2b). Buradaki

emittans elipsin yatay ve dikey eksenlerin yarı uzunluğuna sırasıyla demet yarıçapı (σ_x) ve demet diverjansı (σ'_x) denilir.



Şekil 2.3 Faz Uzay Elipsi (Wiedemann 2007'den değiştirilerek alınmıştır)

Şekil 2.3'te maksimum ve minimum konum ve eğim ifadeleri verilmiştir. Twiss parametresi, β beta fonksiyonu ve β' beta fonksiyonunun türevine bağlı olarak $\alpha = -(1/2)\beta'$, $\gamma = (1 + \alpha^2)/\beta$ şeklindedir ve buradan elektron demetinin maksimum yarıçapı σ_x ve diverjansı σ'_x şu şekilde ifade edilir.

$$\sigma_x [mm] = \sqrt{\epsilon_x [mm.mrad] \beta \left[\frac{mm}{mrad} \right]} \quad (2.11)$$

$$\sigma'_x [mrad] = \sqrt{\epsilon_x \sqrt{\frac{1+\alpha^2}{\beta}}} = \sqrt{\epsilon_x \gamma} \quad (2.12)$$

$\alpha = 0$ için diverjans $\sigma'_x [mrad] = \sqrt{\epsilon_x [mm.mrad] / \beta [mm/mrad]}$ olur. Demet yarıçapında $\alpha = 0$ için yerel minimum (demet beli) ve maksimum değeri vardır. Demet belindeki beta fonksiyonu aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$\beta_x \left[\frac{mm}{mrad} \right] = \frac{\sigma_x [mm]}{\sigma'_x [mrad]} = \frac{\sqrt{\epsilon \beta}}{\sqrt{\epsilon / \beta}} \quad (2.13)$$

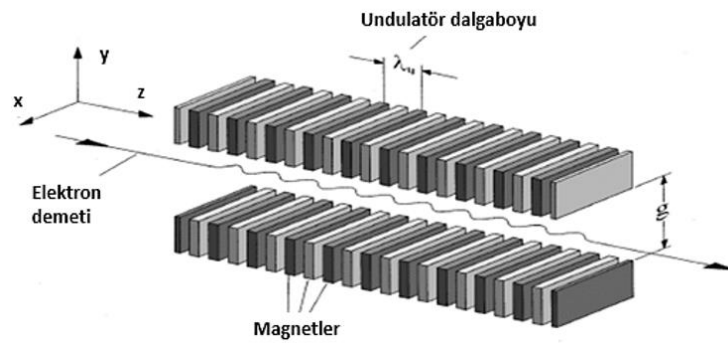
Liouville'nin teoremine göre bir parçacık demetindeki tüm parçacıklar kendi faz elipslerinin sınırları içinde kalarak hareket eder. Hızlandırma olmayan demet iletim hattında Liouville teoremi geçerlidir ve emittans değeri bu faz uzayında korunur.

Parçacık enerjisinin değiştiği doğrusal ya da dairesel hızlandırıcılarda emittans değeri sabit değildir ve parçacık hızlandırıldığında momentumla ters orantılı olarak azalır. Buradan anlaşılmaktadır ki, hızlandırıcı kavitede momentumun enine bileşeni sabit kalıp, boyuna bileşen artarak demetin diverjansı azalmaktadır ve bu olaya adyabatik sönüm (adiabatic damping) denilir. Dolayısıyla burada normalize emittans denilen ve ϵ_N şeklinde ifade edilen, enerjiye bağlı farklı bir emittans tanımlamak gerekir. Bu normalize emittans değeri hızlandırıcı boyunca sabit kalması sağlanmalıdır.

$$\epsilon_N [mm.mrad] = (p_0/m_0c)\epsilon = \beta\gamma\epsilon [mm.mrad] \quad (2.14)$$

Emittans ile normalize emittans arasındaki önemli fark, normalize emittansta konum değişkenlerinin eşlenik momentumun, demetin eğimi yerine enine momentuma eşit olmasıdır. Dolayısıyla her parçacığın iki boyutlu faz uzayı (x, p_x) ve (x, p_y) düzleminindedir ve denklem 2.8 ve denklem 2.9'daki ifade burada da geçerli olduğundan faz uzayı yörüngesi yine bir elipstir ve elips alanı $\pi\epsilon_N(m_0c)$ şeklinde ifade edilir.

2.2 Undulatör ve Undulatör Işınımı



Şekil 2.4 Undulatör magnet ve undulatör magnette elektronun sinüsel salınımı (Wille 1998'den değiştirilerek alınmıştır)

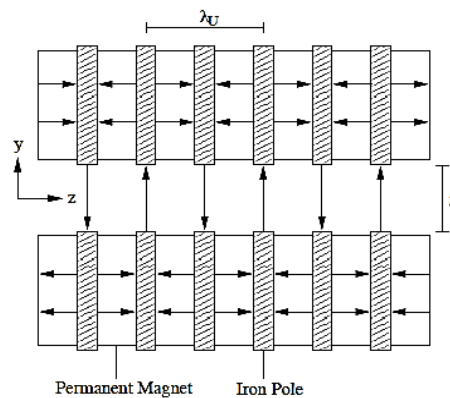
SEL'in üretmek için gerekli ana donanım çok kutuplu undulator (salıdırıcı) magnettir. Undulator magnet şekil 2.4'te görüldüğü gibi z ana eksenini boyunca birbirinden manyetik açıklık (gap) kadar uzakta olacak şekilde karşı karşıya yerleştirilen N tane eşit ve simetrik kutup parçalarında oluşan çok kutuplu bir magnettir.

Magnetin her iki ucunda, undulatorun dış bölgesindeki demet yoluyla eşleşecek şekilde yarım kutuplar bulunur. Bitişik her undulator kutup çifti λ_u uzunluğunda bir undulator dalga boyu oluşturur. Tüm mıknatıs N kutup sayısı olmak üzere, $N_u = \frac{1}{2}N$ periyot sayısında oluşur ve undulatorun boyu aşağıdaki şekilde tanımlanır (Wiedemann 2003).

$$L_u[m] = \lambda_u[m] \times N_u \quad (2.15)$$

2.2.1 Magnet çeşidi ve malzemesi

Kalıcı (permanent), süperiletken ve elektromagnet olmak üzere üç undulator magnet çeşidi vardır. Manyetik alanın yönüne göre de undulatorler düzlemsel ve helisel olmak üzere ikiye ayrılır. Düzlemsel undulatorde, boşluk boyunca manyetik alan yönü sabittir, helisel undulatorde ise manyetik alan vektörü, aksel mesafenin bir fonksiyonu olarak eksen etrafında döner (Reiche 1999, Elleaume vd. 2000).

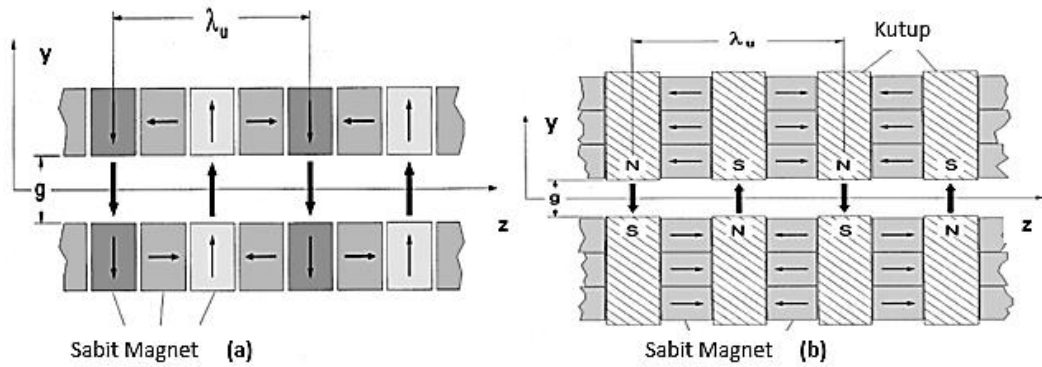


Şekil 2.5 Hibrit Undulator Magnet (Reiche 1999)

Şekil 2.5'te gösterildiği gibi kalıcı undulötör magnetlerde magnetik akıyı yoğunlaştırmak ve kalıcı magnetlerden daha büyük magnetik alana ulaşmak amacıyla arasına kalıcı magnetler arasına kutuplar yerleştirilir ve buna hibrit undulötör magnet denilir. Hibrit undulötörün magnet malzemesi yaygın olarak $Nd_2Fe_{14}B$, $SmCo_5$, $SmCo_{17}$; kutup malzemesi ise demir ve vanadyum (high saturation cobalt steel) kullanılır. NdFeB magnet için Fe ve B doğada çoktur ve Nd malzemesi ise Sm'ye göre daha sık bulunur (Bahrdt 2010).

2.2.2 Magnetik alan

Gerçekte undulötördeki magnetik alan sinüzoidal değildir ve bu sebeple magnetik alan sadece tek uzaysal harmonikleri olan bir Fourier serisi olarak temsil edilebilir. Kalıcı magnet alanı 1,5,9 vb. harmonikleri, hibrit magnet alanı 1,3,5 vb. harmonikleri içerir. Çift harmonikler undulötörün magnetik yapısından dolayı elde edilemez. Maxwell denklemlerinin sonucu olarak harmonik sayısı arttıkça pik alana katkısı azalır. Dolayısıyla hibrit magnetteki 3. harmoniğin pik alana katkısı büyüktür. Kalıcı magnette bu hibrit özelliği olmadığından pik alan katkısı ihmal edilir ve temel dalga sürecinde yükseltme ve yayılma katkısı olmaz. Hibrit magnette demir (iron) yerine vanadyum kullanılması pik alanı biraz daha artırmasına yol açar (Elleume vd. 2000).



Şekil 2.6 Kalıcı magnet ile Hibrit magnet karşılaştırılması (Wille 1998'den değiştirilerek alınmıştır)

Her bir magnet türü için B pik magnetik alanı, g undulötörün gap aralığına ve λ_u undulötör dalga boyuna bağlı olarak aşağıdaki gibi tanımlanır.

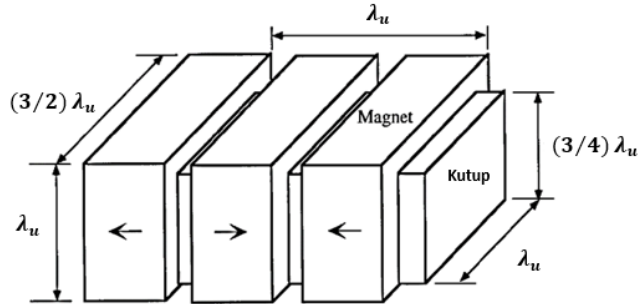
$$B[T] = a[T] \exp \left(b \left(\frac{g}{\lambda_u} \right) + c \left(\frac{g}{\lambda_u} \right)^2 \right) \quad (2.16)$$

Hibrit undulatör magnet türüne göre denklem 2.16'daki a, b ve c katsayıları ve gap kararlılık koşulu çizelge 2.1'de verilmektedir.

Çizelge 2.1 Hibrit undulatörün pik alanını tanımlayan katsayılar ve gap aralığı koşulu (Elleaume vd. 2000)

Hibrit Magnet Türü	a	b	c	Gap aralığı
Vanadyum Permanyumlu	3.694	-5.068	1.520	$0.1 < g/\lambda_u < 1$
Demir Kutuplu	3.381	-4.730	1.198	

Hibrit magnetin, belirlenen pik magnetik alanı verecek şekilde ve λ_u toplam periyot uzunluğu değişmemek koşuluyla magnet ve kutup kalınlığı ve birbirleriyle şekil 2.7'deki gibi orantılı olacak şekilde genişliği ve yüksekliği seçilmelidir.



Şekil 2.7 Hibrit magnetin geometrik boyutları (Elleaume vd. 2000'den değiştirilerek alınmıştır)

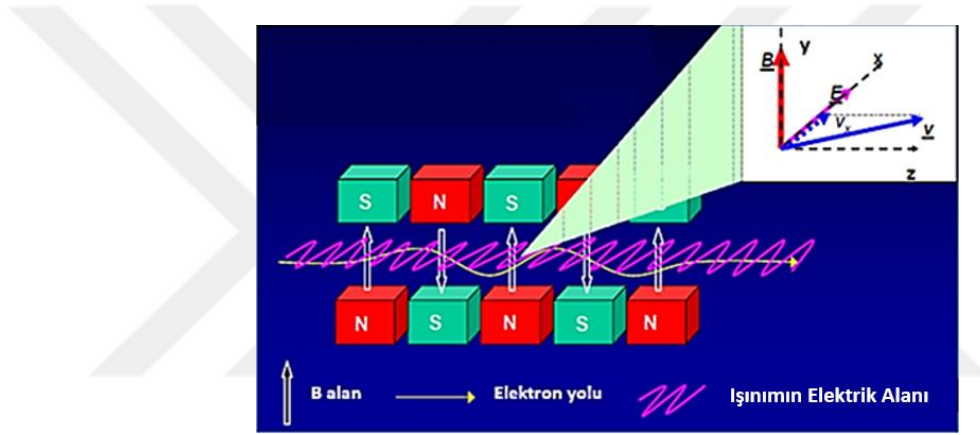
2.2.3 Enerji aktarımı

Yüklü bir parçacık elektromanyetik alanla karşılaştığında parçacık üzerine Lorentz kuvveti etki eder. Lorentz kuvvetin elektrik alan bileşeni ile parçacık hızlandırılır, magnetik alan bileşeni ile parçacığın yönü değiştirilir. Undulatörde elektrondan ışınım alanına enerji aktarımı aşağıda verildiği gibi Lorentz kuvvetin elektrik alan bileşeni etki eder (Wiedemann 2003).

$$\Delta W = e \int E_L d_s = e \int E_L v dt \quad (2.17)$$

Burada E_L ışınının elektrik alanı olmak üzere enerji transferini sağlamak için parçacık hız vektörü ile elektrik alan vektörü paralel olmalıdır.

Şekil 2.8’de görüldüğü gibi elektrik alan yönü x doğrultusundadır ve dolayısıyla düzlemsel bir undulatörde elektronların x, z düzleminde (yatay düzlemde) salınması için, sağ el kuralına göre manyetik alan y yönünde olmalıdır. Böylece elektronlar, ışınının elektrik alanına paralel olacak şekilde salınım yaparak enerji transferi mümkün hale gelir.



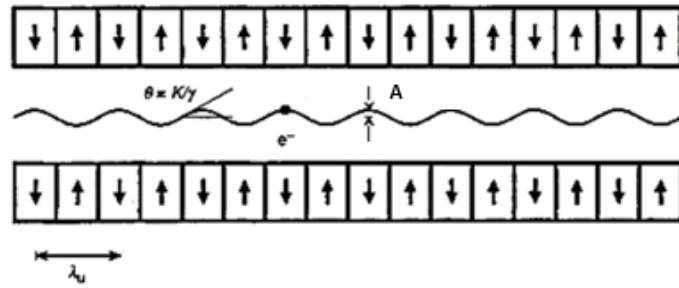
Şekil 2.8 Undulatörde elektronun hareketi ve oluşan ışınının elektrik alan bileşeni (Anonymous 2019a’ dan değiştirilerek alınmıştır)

2.2.4 Elektronun salınımı ve undulatör şiddeti

Elektron demeti undulatörün kutupları arasındaki düşey sinüsel magnetik alan sayesinde yatay düzlemde sinüsel salınım yapar ve bu ivmeli hareket sonucunda ışınım ortaya çıkar. Enine periyodik salınım sebebiyle ortaya çıkan doğal ışınım esas olarak küçük spektral hat genişliğinde olduğundan fotonlar girişim yapabilirler ve yayılan ışınım eş fazlıdır (tutarlı/kohorenttir) (Wille 1998).

Eş fazlılık, zamansal ve uzaysal olmak üzere iki çeşidi vardır. Zamansal eş fazlılık zaman olarak aynı fazda üretilen ışınım demetleri, uzaysal eş fazlılık (kohorentlik) ise

konum olarak aynı fazda üretilen ışınım demetleri demektir. Eğer yüksek bir zamansal eş fazlılık sağlanıyorsa bu, aynı derecede monokromatik bir demete sahip olunduğu anlamına gelmektedir. Eğer yüksek uzaysal eş fazlılık sağlanıyorsa bu aynı zamanda demetin iyi bir paralelleştiriciye (collimatör) sahip olduğu anlamına gelir. SEL’i güçlendirmek için hem uzaysal hem de zamansal eşfazlılık bir arada olmalıdır (Howells 1992).



Şekil 2.9 Undulatörde elektronların sinüsel salınımı (Howells 1992’den değiştirilerek alınmıştır)

Şekil 2.9’da görüldüğü gibi yatay düzlemde hareket eden elektronun undulator içindeki enine hareketi aşağıdaki gibi tanımlanabilir (Wiedemann 2003).

$$x(t) = A \cos(k_u \bar{\beta} ct) \quad (2.18)$$

Burada elektronun ortalama hızı $\bar{\beta}$ ve salınım genliği A aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$\bar{\beta} = \beta \left(1 - \frac{K^2}{4\gamma^2} \right) \quad (2.19)$$

$$A = \frac{K}{\gamma k_u} = \frac{\lambda_u K}{2\pi\gamma} \quad (2.20)$$

Elektronun demet yönü referans yörüngesine paralel olan kutbun ortasındaki bir noktadan başlayarak ($z = 0$) çeyrek periyot mesafesindeki bir z noktası boyunca sapma açısı ise aşağıdaki şekilde verilir.

$$\theta(z) = -\frac{cq_e}{cp_0} B_0 \frac{1}{k_u} \cosh k_u y \sin k_u z \quad (2.21)$$

Burada $q_e = e = 1.602 \times 10^{-19} C$ elektron yükü, $k_u = 2\pi/\lambda_u$ undulatörün dalga sayısı, B_0 undulatörün magnetik alanıdır. Maksimum elektronun sapma açısı, denklem 2.21'de $y = 0$ ve $k_u z = \pi/2$ yerlerine yazılarak aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$\theta_{max} = -\frac{cq_e}{cp_0} B_0 \frac{\lambda_u}{2\pi} = \frac{ceB_0\lambda_u}{2\pi\beta E} \quad (2.22)$$

Pratik birimler cinsinden maksimum elektronun sapma açısı şu şekilde verilir.

$$\theta_{max}[rad] = 0.04771345 \times \lambda_u[m] \times \frac{B_0[T]}{E[GeV]} \quad (2.23)$$

Görelî koşullarda $\beta = 1$ olmak üzere undulatör şiddet parametresi maksimum sapma açısına bağı olarak h . harmonik için aşağıdaki şekilde tanımlanır.

$$K_h = \beta\gamma\theta_{max} = \frac{cq_e}{2\pi h m_0 c^2} B_0 \lambda_u \quad (2.24)$$

Harmonik sayısı $h = 1$ olmak üzere undulatör şiddet parametresi pratik birimler cinsinden şu şekilde verilir.

$$K = 0.93373 [T^{-1} cm^{-1}] B_0 [T] \lambda_u [cm] \quad (2.25)$$

Temel dalga boyuna şiddet parametresi etki eder ve harmoniklerin etkisi hesaba katıldığında undulatör şiddeti aşağıdaki gibi harmoniklerin toplamı yoluyla elde edilir (Howells 1992).

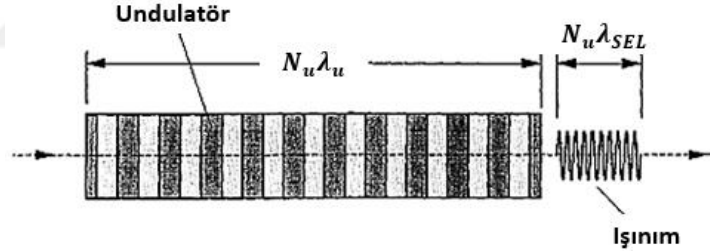
$$K = \sqrt{\sum_h K_h^2} = \frac{e}{k_u m_0 c} \sqrt{\sum_h \frac{B_0^2}{h^2}} \quad (2.26)$$

Undulatörde görelî koşullar altında elektronun sapma açısı $\theta = K/\gamma$ ve $K < 1$ olduğundan, ışınımın yayılımı $1/\gamma$ 'dan daha küçük, bir başka deyişle eğici magnetlerden daha dar bir spektrum ve daha şiddetli elektrik alan elde edilir.

Bu tez raporundaki denklemler düzlemsel undulatöre göre verildiğinden, helisel undulatör için olan denklemleri elde etmek için K yerine $\sqrt{2}K$ yazılmalıdır. Ayrıca optik kavite kullanıldığından girişim sebebiyle birbirlerini yok etmemeleri için tek bir harmonik etki ve pik magnetik alanı yüksek olan $h = 1$ dikkate alınmalıdır.

2.2.5 Undulatör ışınımı ve temel dalga boyu

Şekil 2.7'de görüldüğü gibi undulatör periyodu N_u olmak üzere bir elektron, undulatörden geçtiğinde N_u tane salınım gerçekleştirir. Elektronların N_u tane salınımın her birinden gelen ışınım alanlarının süperpozisyonuna undulatör ışınımı denilir (Wille 1998).



Şekil 2.10 Undulatör ışınımı (Wille 1998'den değiştirilerek alınmıştır)

Şekil 2.10'da undulatörde çıkan ışınım dalgasının atmalı yapısı gösterilmiştir. Burada görüldüğü gibi elektron undulatörün sonuna geldiğinde önünde λ_{SEL} ışınım dalga boyuna sahip N_u salınımlarından oluşan bir ışınım dalgası oluşur. Undulatörün çıkışında oluşan bu ışınımın atma süresi (puls duration) aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$T_{atma} [S] = N_u \frac{\lambda_{SEL} [m]}{c [m/s]} \quad (2.27)$$

Rezonansta elektron demetinin her undulatör periyodunda bir ışınım dalga boyu geride kalmasına slippage mesafesi denir. Elektron demeti ile ışınım atması arasında maksimum etkileşimi sağlamak amacıyla elektron demetinin metre cinsinden paket uzunluğu σ_z aşağıda verildiği gibi undulatörün tüm kutupları boyunca slippage mesafesinden daha uzun olmalıdır.

$$\sigma_z[mm] \approx N_u \times \lambda_{SEL}[mm] \quad (2.28)$$

Aynı zamanda slippage kaymasından yola çıkarak ışınım dalga boyunun elektron hareketi ile yakından ilişkili olduğunu gösterir. Undulatörde bir ϑ açısı yaparak yayılan ışınımın h .inci harmoniği için temel dalga boyu denklemi aşağıdaki gibidir (Howells 1992).

$$\lambda_{SEL,h} = \frac{\lambda_u}{2\gamma^2 h} \left(1 + \frac{1}{2} K^2 + \gamma^2 \vartheta^2 \right) \quad (2.29)$$

Denklemdaki $\lambda_u/2\gamma^2$ faktörü iki ayrı etkiden oluşur. Bu etkilerin biri olan $1/\gamma$ faktörü, hareketli elektron tarafından gözlemlenen undulatör boyundaki Lorentz büzüşmesi (Lorentz contraction) ve diğeri $1/2\gamma$ faktörü, gözlemcinin ve görelî koşula uygun elektronun hızına bağlı olarak yayılan dalga boyundaki görelî doppler kaymasıdır.

Undulatör ışınımının temel dalga boyu denklemi aynı zamanda sürekli enerji transferini mümkün kılar ve bu nedenle serbest elektron lazerinin oluşumunu başlatmak doğal undulatör ışınımının kullanılması en uygun yöntemdir.

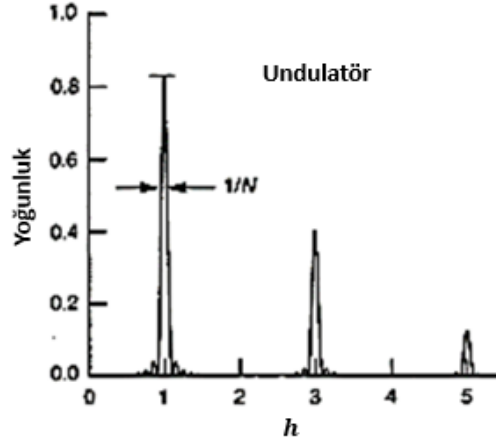
Pratik birimler cinsinden $h = 1$ ve $\vartheta = 0$ için ışınım dalga boyunun enerjiye bağlı olarak aşağıdaki şekilde hesaplanabilir (Wiedemann 2003).

$$\lambda_{SEL}[\mu m] = 1305.6 \frac{\lambda_u[cm]}{E^2[MeV]^2} \left(1 + \frac{K^2}{2} \right) \quad (2.30)$$

Bu temel ışınım denklemi aynı zamanda undulatör ışınımının eşfazlılık şartıdır (Wille 1998).

2.2.5.1 Işınımın spektral genişliği ve enerji yayılımı

Şekil 2.11’de görüldüğü gibi bir undulatörün spektrumu birkaç harmonikte keskin bir pike sahiptir (Howells 1992).



Şekil 2.11 Undulatör ışınımının spektrumu (Howells 1992’den değiştirilerek alınmıştır)

Undulatör ışınımının spektral genişliği, undulatör periyodunun sayısı ve harmonik sayısı ile orantılı olarak azalır. N_u periyot ve h .inci harmonik için spektral band genişliğini aşağıdaki gibidir.

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{1}{hN_u} \quad (2.31)$$

Görelî elektron enerji yayılımı ($\Delta E/E$) ile undulatör ışınımı spektral band genişliği arasında aşağıdaki gibi bir bağıntı vardır.

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{\Delta\gamma}{\gamma} = \frac{1}{2} \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \leq \frac{1}{2hN_u} \quad (2.32)$$

Elektron demetinin enerji yayılımının undulatör ışınımı spektral band genişliğinden daha az olması kazanç azalmasını en aza indirir. Kazanç azalmasını ihmal edebilmek için maksimum enerji yayılımı aşağıdaki koşulu sağlamalıdır.

$$\frac{\Delta\gamma}{\gamma} < \frac{1}{4N_u} \quad (2.33)$$

Işınım demetin yarıçapı σ_r olmak üzere elektronların %99.7'si $\pm 3\sigma_r$ 'nin içinde olduğunu varsayarsak, bu durumda göreceli rms demet enerji yayılımı aşağıdaki gibi verilir.

$$\frac{\sigma\gamma}{\gamma} < \frac{1}{24N_u} \quad (2.34)$$

2.2.5.2 Kavite içi oluşan güç ve net kazanç

Kavite içi gücün sabit kaldığını, kırınım ve yansıma gibi pasif kayıpların olmadığını varsayarsak elektron demetinden çıkan güç kavite içi üretilen güce eşit olur. Bu durumda denklem 2.32'de $h = 1$ için elektronun enerji kaybı $\Delta\gamma$ ifadesini çekip eşitliğin her iki tarafı zamana bölünürse kavite içi üretilen güç aşağıdaki gibi bulunur (Dattoli vd. 2009).

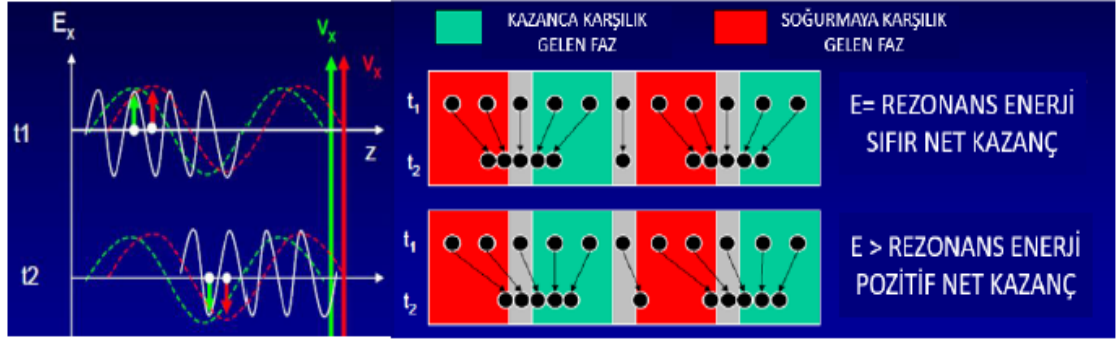
$$\Delta P [MW] = \frac{P_{demet} [MW]}{2N_u} \quad (2.35)$$

Kavite içi oluşan ışınım demet gücünün, elektron demet gücünün oranına verim ($\varepsilon = \Delta P / P_{beam}$) denir.

Sonlu enerji yayılımına sahip bir parçacık demetindeki tüm parçacıklar eş zamanlılık koşulunu tam olarak karşılayamaz ve bu durumu düzeltmek için rezonans enerji γ_r tanımlanır (Wiedemann 2007).

$$\gamma_r^2 = \frac{\lambda_u [mm]}{2\lambda_{SEL} [mm]} \left(1 + \frac{1}{2} K^2 \right) \quad (2.36)$$

Buradaki rezonans enerji tam olarak eş zamanlılık koşulunun yerine getirildiği demet enerjisidir. Işınım alanından geçen elektron başına enerji kaybı $\Delta\gamma$ olmak üzere bu koşula uymayan diğer parçacıkların enerjisi $\gamma = \gamma_r + \Delta\gamma$ şeklindedir.

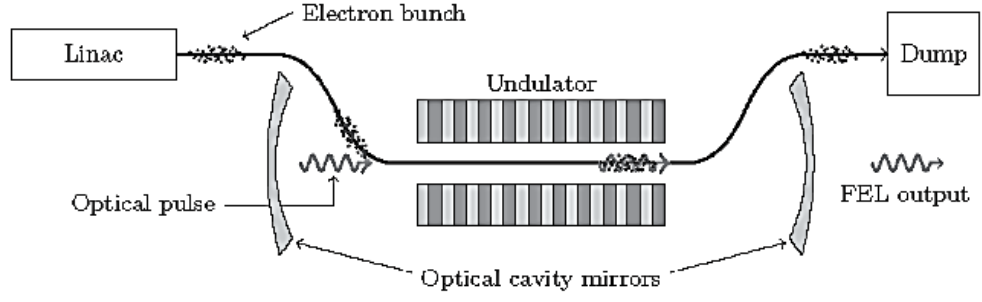


Şekil 2.12 Net kazanç oluşumu (Anonymous 2019a'dan değiştirilerek alınmıştır)

Şekil 2.12'de görüldüğü gibi asimetrik oluşturulması Osilatör SEL'de ışınım alanının güçlendirilmesini ve net kazanç oluşumunu sağlar. Çünkü rezonans enerjide elektronlar enjekte edilirse ışınım alanıyla mükemmel bir şekilde çakışan ve ışınım alanına enerji veren elektronlar ile ışınım alanından enerji alan elektronların sayıları eşit olur. Dolayısıyla net kazanç sağlanması için enjekte edilen elektronlara rezonans enerjisinden küçük bir miktar daha fazla enerji verilmesi gerekir. Böylece ışınım alanına enerji veren elektronlar, ışınım alanından enerji alan elektronlara göre daha çok ışınım alanıyla eşzamanlı hale gelirler ve net kazanç oluşur.

2.3 Optik Kavite ve Gauss Demeti

Şekil 2.13'te olduğu gibi O-SEL sisteminde undulatör iki ayna arasında konular ve bir elektron demeti, bir eğici magnet yardımıyla undulatörün eksenine yönlendirilir. Bunun sonucunda oluşan ışınım aynalardan yansıtılarak tekrar undulatöre girmesini sağlayarak undulatör eksenini boyunca elektron demeti ile birlikte yayılması sağlanır. Bu aynalı sisteme optik kavite denilir. Bir ışınım atması undulatöre tekrar girdiğinde, elektron paketi de aynı anda undulatöre girerek ışınım demetini eşfazlı olarak güçlendirilmesi sağlanır (Wiedemann 2003).



Şekil 2.13 Osilatör SEL'in şematik gösterimi (Kim vd. 2018)

2.3.1 Işın izleme teorisi ve periyodiklik koşulu

Undulatörden yayılan ışınım, elektromanyetik ışındaki tüm teorileri yöneten Maxwell denklemleri tarafından açıklanan bir elektromanyetik dalga olayıdır. Undulator ışınımının optik kavite içerisindeki durumunu geometrik optiğe dayanan bir ışın izleme teorisi ile ayrıntılı olarak açıklanabilir (Yoo vd. 2000).

Bir ışın izleme yöntemi, ışığı bir optik sistemde izlemek için (2×2) 'lik bir matris kullanır. A, B, C, D matrix elemanları olmak üzere enine bir düzlemde Ayna-1'den Ayna-2'ye geçen bir ışın için, ışın matris denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ x_2' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_1' \end{pmatrix} \quad (2.37)$$

Toplam ışın matrisini M yazmak için ışının aldığı yolu dikkate alarak her bir yol için elde edilen matris çarpılmalıdır. Periyodiklik koşulu için, M ışın matrisinin determinanı bir olmalıdır (Turner 1994).

$$\det|M| = AD - BC = 1 \quad (2.38)$$

Genel ifadeyi kaybetmeden yukardaki denklemi şu şekilde de yazılabilir.

$$\cos \mu = \frac{1}{2} \text{trace}M = \frac{1}{2} (A + D) \quad (2.39)$$

Buradaki yeni ve z 'den bağımsız nicelik olan $\mu = \cos^{-1} (A + D)/2$, eğer yukardaki denklemin değeri birden küçük ise reel ya da gerçek, birden büyük ise kompleks ya da sanaldır. μ reel ise parçacık η .inci turda aynı yere gelir yani periyodiktir.

2.3.2 Kararlılık koşulu ve optik kavite çeşitleri

Kararlı bir rezonatör için μ reel olmalıdır ve denklem 2.39'a göre optik kavite için genel kararlılık koşulu aşağıdaki gibi tanımlanır (Svelto 2010).

$$-1 < \left(\frac{A + D}{2} \right) < 1 \quad (2.40)$$

Optik kavitede bir ışının Ayna-1 den yansıyor optik kaviteden geçip Ayna-2'den yeniden yansıyor tekrar Ayna-1'e gelip bir periyodun tamamlandığı toplam matris denklemini için L_c optik kavite boyu, R ayna eğrilik yarıçapı olmak üzere denklem 2.39'dan aşağıdaki ifade elde edilir.

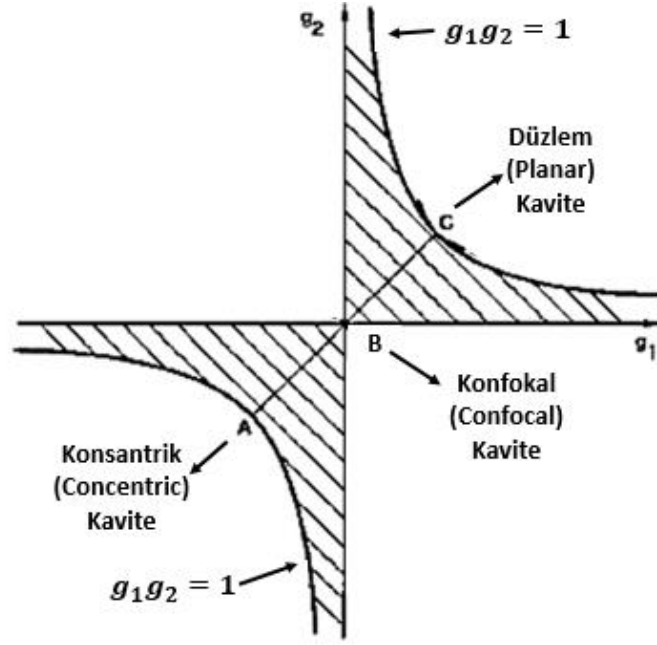
$$\frac{A + D}{2} = 2 \left(1 - \frac{L_c}{R_1} \right) \left(1 - \frac{L_c}{R_2} \right) - 1 \quad (2.41)$$

Burada kavite için iki boyutsuz parametre olan g_1 ve g_2 terimlerini aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$g_{1,2} = 1 - (L_c[m]/R_{1,2}[m]) \quad (2.42)$$

Bu yeni iki parametreyi kullanarak denklem 2.41'i denklem 2.40'da yerine yazıp optik kavite kararlılık koşulu daha basit bir şekilde aşağıdaki gibi yazılabilir.

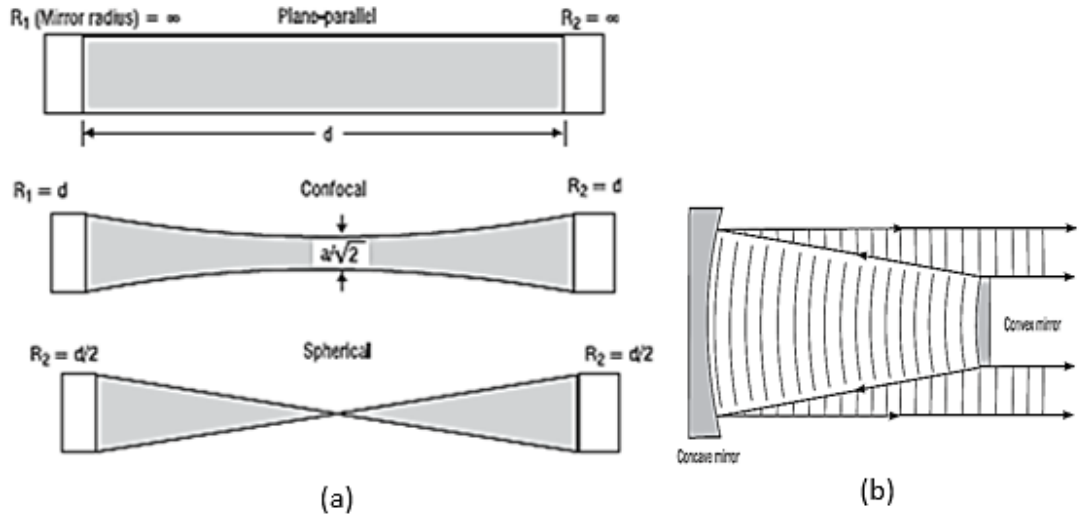
$$0 < g_1 g_2 < 1 \quad (2.43)$$



Şekil 2.14 Optik kavite kararlılık diyagramı (Svelto 2010'den değiştirilerek alınmıştır)

Şekil 2.14'te g_1 , g_2 düzleminde kararlılık koşuluna uygun olarak kararlı ve kararsız bölgeler gösterilmiştir. Buradaki taralı olan kararlılık koşulunu karşılayan alandır. Sınır değerlerde kavite kararlı ya da kararsız olabilirler ve bunlara marjinal (az kararlı) kavite denilir. A-C noktaları arasındaki ince çizgi ise aynı eğrilik yarıçapına sahip aynalardan oluşan simetrik kaviteyi tanımlar.

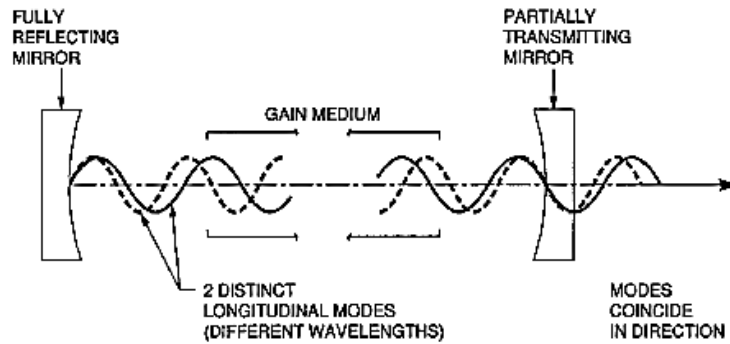
Şekil 2.15'te kararlı ve kararsız optik kavite çeşitleri gösterilmiştir. Kararlı kavitede (Şekil 2.15a) ışın her iki aynadan yansıdığı anda undulatörün eksenine doğru yönelir ve kayıp miktarı kararsız kaviteye (Şekil 2.15b) göre çok azdır. Marjinal kavitede ise kayıp miktarı bu iki kavitenin kayıp miktarlarının arasında yer alır (Silfvast 2005).



Şekil 2.15 Kararlı ve kararsız optik kavite (Silfvast 2005)

2.3.3 Boyuna ve enine modlar

Işınım demeti aynalar arasında gidip gelerek güçlenir. Işınım demetin kazanç band genişliği içindeki dalga boylarından bazıları diğerlerine göre daha fazla gelişme gösterir. Bunlar ışınının kavitede durağan dalga oluşturan dalga boyları ya da frekanslardır. Bir optik kavite içinde bulunan sonsuz sayıda dalga boyları arasından bu özellikteki dalga boyları güçlenir, diğerleri ise zayıflar.



Şekil 2.16 Kavite içinde oluşan iki farklı boyuna mod (Silfvast 1995)

Şekil 2.16’da kavite içinde aynı yönde hareket eden, ancak biraz farklı frekanslarda iki farklı boyuna mod gösterilmiştir. Kazanç band aralığı içindeki bu gelişmiş durağan dalgalar, ayrı frekans değerlerini temsil ettikleri için boyuna mod olarak adlandırılırlar.

Güçlenme eğiliminde olan boyuna modların oluşması için optik kavite uzunluğu, ışınının yarı dalga boylarının tam katlarına eşit olması gerekir ($L_c = m\lambda/2$, m pozitif tam sayı). Bu koşul aynı zamanda elektromanyetik durağan dalganın elektrik alanının aynada sıfır olmasını da sağlar. Bu şartlar altında rezonans frekansı aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

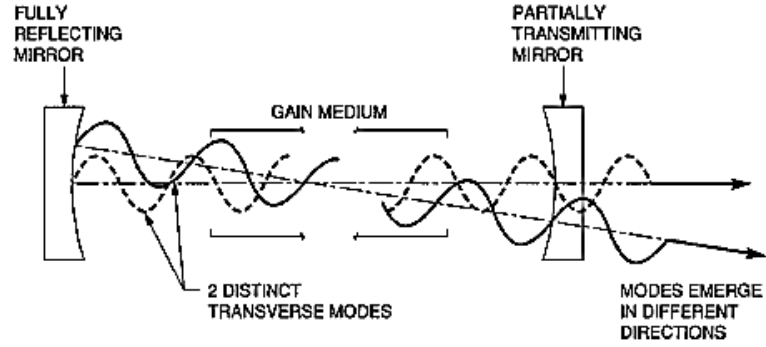
$$f_{rez} = m(c/2L_c) \quad (2.44)$$

Buradaki m tam sayısı optik kavite boyunca modun yarı-dalga boyu sayısıdır ve bu nicelik kavite gidiş dönüş sürecinde modlar arasında frekans farkı oluşturur. İki boyuna mod arasındaki frekans farkı ya da boyuna frekans şu şekilde verilir.

$$\Delta f = c/2L_c \quad (2.45)$$

Ardışık yansımalar nedeniyle istenilen noktada genliklerin artırılarak kayda değer bir toplam alan elde etmek için modlar aynı fazda toplanmalıdır. Bunun içinde denklem 2.44 ve denklem 2.45 birbirine eşit olmalı yani $m = 1$ olmalıdır. Bu durumda paket tekrarlanma oranı f olmak üzere optik kavite boyu arasındaki ilişki aşağıdaki gibi ifade edilir ve zamansal tutarlılık sağlanır. Ayrıca ışınının bir turdan sonraki faz kayması da sıfır olur.

$$f[Hz] = c/2L_c[m] \quad (2.46)$$



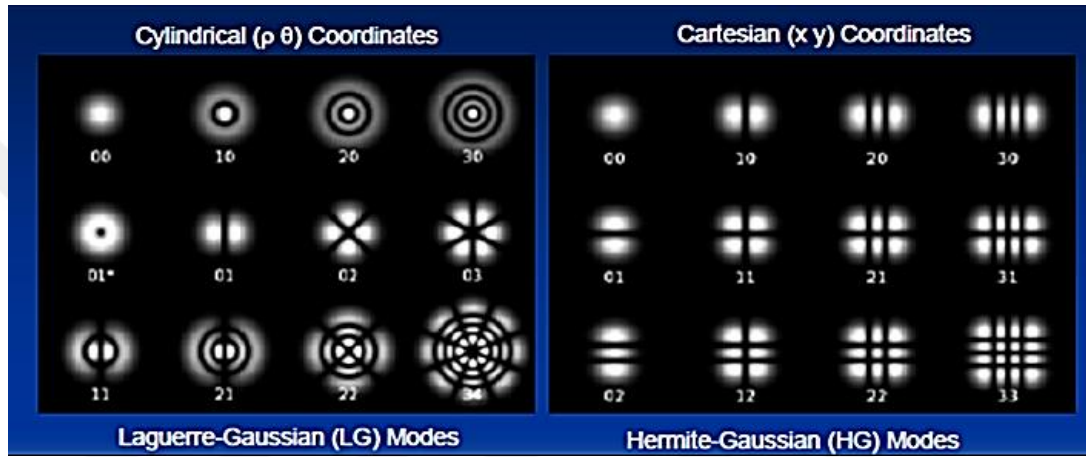
Şekil 2.17 Optik kavitede biraz farklı frekanslarda farklı yönlerde hareket eden iki farklı enine mod (Silfvast 1995)

Optik kavite içinde ışınım demetinin birden fazla boyuna modu olduğunda bu modlar aynı doğrultuda fakat farklı dalga boylarında (frekanslarla) ilerlerken birden fazla farklı enine modlar şekil 2.17’de gösterildiği gibi küçük bir farkla farklı optik yollarda (yönlerde) ilerler. Ayrıca her enine mod, farklı optik yol uzunlukları nedeniyle, denklem 2.45’e göre ayrılmış farklı frekanslarda birkaç boyuna moddan oluşabilir. Ayrıca optik kavitede ışınımdaki bu boyuna (longitudinal) ve enine (transverse) mod’lar sırasıyla lazer demetinin frekansını (zamansal) ve uzaysal dağılımını belirlememize olanak sağlar.

2.3.4 Gauss demeti

Enine modlar kararlı kaviteyle oluşur ve enine elektromanyetiğin (Transverse Electro-Magnetic) simgesi olarak TEM şeklinde gösterilir. En düşük dereceli enine mod TEM_{00} ile gösterilir ve modun derecesi ne kadar küçükse, demet çapı o kadar küçülür, uzak alan diverjansı daralır. Bu yüzden TEM_{00} modu genellikle en istenilen moddur ve dairesel bir dağılıma sahiptir. Bu mod genellikle enine kesitti bir gauss profiline benzediğinden Gauss Modu olarak adlandırılır. Enine modlar içindeki boyuna mod sayısı, genellikle optik frekanslar için çok büyük olduğundan alt indis olarak gösterimde yer almaz (Anonymous. 2018b).

Enine modun yayılım denklemi kartezyen koordinatlardaki Hermite-Gaussian (HG) mod denir ve TEM_{pk} ile gösterilir. Bu gösterimdeki p ve k alt indisleri sırasıyla y (boyuna) ve x (enine) doğrultudaki boşluk sayısını gösterir. Yayılım denklemi aynı zamanda yarıçap (r) ve açı (ϕ) olmak üzere silindirik formda da yazılabilir. Kararlı kavite için $TEM_{r\phi}$ ile gösterilen silindirik koordinatlardaki moda Laguerre-Gaussian (LG) mod denir. Düşük dereceli TEM_{00} modu için her ikisi de aynı fonksiyon özellikleri gösterir fakat yüksek dereceli modlar için birbirinden çok farklıdır.



Şekil 2.18 Enine mod dereceleri (Nguyen vd. 2009)

Deneysel olarak geleneksel lazerler tam olarak gaussiyen formda değildir, başka modlar da eklenir ve karışık (mixed) mod ortaya çıkar. Bu yüzden lazer demetinin teorik bir Gauss şekline sapmasını tanımlamak amacıyla demet kalite faktörü olan M^2 terimi kullanılır. Teorik Gauss demeti için $M^2 = 1$ alınır.

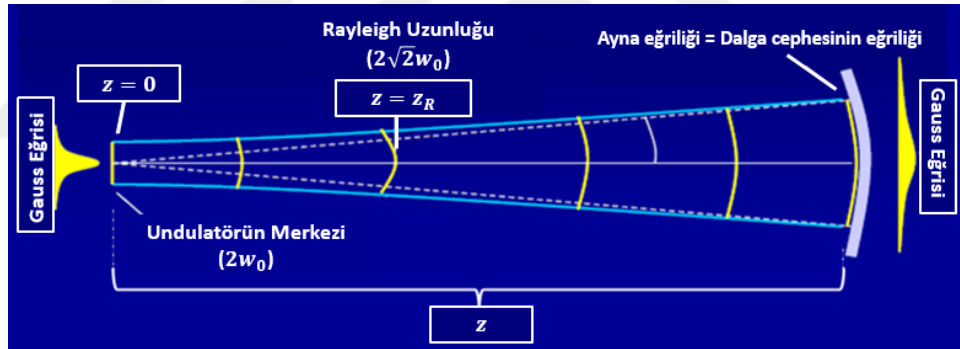
TEM_{00} modu elde etmek için yüksek dereceli modların kayıp sayısını artırarak, düşük dereceli modların salınım sayısı artırılmalıdır. Bu işlem optik kavitedeki kısmi geçirgen aynada bulunan sabit ya da değişken açıklığa sahip bir delik konularak sağlanır ve açıklığın çapı demette sadece TEM_{00} modu kalana kadar azaltılır.

2.3.4.1 Demetin yayılımı

Enine düzlemde genişleyen Gauss demetinin optik kavite aynalar arasında bir yerde minimum demet beline sahiptir ve demet bu konumdan aynalara doğru dalga cephesi genişleyerek ilerler. Genişleyen bu Gauss demetinin dalga cephesinin eğrilik yarıçapı ilerleme yönüne bağlı olarak aşağıdaki gibi verilir (Anonymous 2018b).

$$R(z) = z \left[1 + \left(\frac{\pi w_0^2}{\lambda_{SEL} z} \right)^2 \right] \quad (2.47)$$

Buradaki z dalga cephesinin düz olduğu düzlemden yayılan mesafedir ve w_0 dalga cephesinin düz olduğu konumdaki ışınım demetinin minimum bel yarıçapıdır. Kararlı kavitede aynalar üzerindeki dalga cephesinin eğriliği, aynanın eğriliğiyle tam olarak eşleşir (Şekil 2.19).



Şekil 2.19 Optik kavite içinde Gauss Demetin bel boyutu (Anonymous 2019a'dan değiştirilerek alınmıştır)

Kararlı kavite için Gauss demetinin minimum olduğu belin yeri ($z = 0$ olarak da belirtilir) ve yarıçapı, aynaların eğrilik yarıçapı ve kavite boyuna bağlı olarak belirlenebilir. İki adet düz aynadan oluşan düzlemsel bir kavitede $R = \infty$ ve demet belini ayna yüzeyindedir. Simetrik kavite ($R_1 = R_2 = R$) demet belini aynaların ortasında bulunur. Simetrik olmayan bir kavitede ($R_1 \neq R_2$) ise demet belinin Ayna-1'e olan uzaklık (z_1) şu şekilde hesaplanır.

$$z_1 = \frac{L_c(R_2 - L_c)}{R_1 + R_2 - 2L_c} \quad (2.48)$$

Demet belinin Ayna-2'ye olan uzaklık ise $z_2 = L_c - z_1$ şekilde hesaplanır.

Eğrilik yarıçapları eşit olan bir simetrik kavitede gauss demetin minimum bel yarıçapı aşağıdaki gibidir.

$$w_0[mm] = \left\{ \frac{\lambda_{SEL}[mm]}{2\pi} [L_c[mm](2R[mm] - L_c[mm])]^{1/2} \right\}^{1/2} \quad (2.49)$$

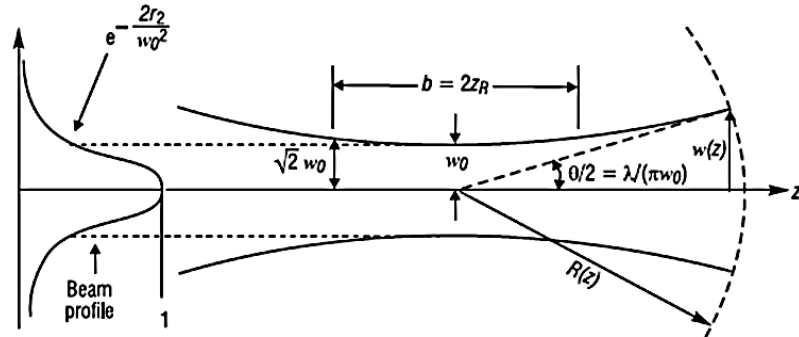
Simetrik olmayan bir kavitede gauss demetin minimum bel yarıçapı ise şu şekilde tanımlanır.

$$w_0 = \left\{ \frac{\lambda_{SEL}}{2\pi} \left[L_c(R_1 - L_c)(R_2 - L_c) \frac{(R_1 + R_2 - L_c)}{(R_1 + R_2 - 2L_c)^2} \right]^{1/2} \right\}^{1/2} \quad (2.50)$$

Burada ikinci aynanın eğrilik yarıçapı R_2 aşağıdaki gibi verilir.

$$R_2 = \frac{(R_1 z_1 + z_2^2 - z_1^2)}{z_2} \quad (2.51)$$

Simetrik kavite için denklem 2.50'nin denklem 2.49'a indirgenildiğini görebiliriz. Bel yarıçapının iki katına yani $2w_0$ olan demet çapına spot boyutu denilir.



Şekil 2.20 Gauss demet için bazı parametrelerin gösterimi (Silfvast 2005)

Şekil 2.20’de görüldüğü gibi Gauss demetinin bazı parametrelerin ifadeleri verilmiştir. Burada Gauss demetin $z = 0$ ’dan z mesafe yayıldıktan sonraki bel yarıçapı olan $w(z)$ ise aşağıdaki gibi hesaplanır (Silfvast 2005).

$$w(z)[mm] = w_0[mm] \left[1 + \left(\frac{\lambda_{SEL}[mm]z[mm]}{\pi w_0^2[mm^2]} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.52)$$

Aynı zamanda burada gösterilen demet bel yarıçapının $\sqrt{2}$ katı kadar yayıldığı $z = z_R$ mesafesine Rayleigh uzunluğu denilir ve aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda_{SEL}} \quad (2.53)$$

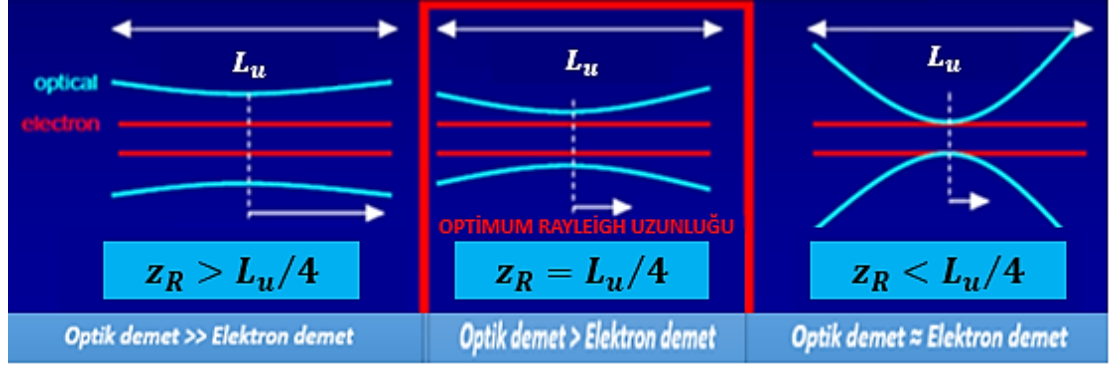
Simetrik kavite için, denklem 2.49’u denklem 2.53’te yerine yazarsak Rayleigh uzunluğu ile aynaların yarıçapı arasında aşağıdaki gibi bağıntı elde edilir.

$$z_R[m] = \frac{1}{2} \sqrt{L_c[m](2R[m] - L_c[m])} \quad (2.54)$$

Demetin $z = 0$ konumundan her iki yöne doğru $z = \pm z_R$ mesafe kadar ilerlediğinde elde edilen toplam uzunluğuna ($b = 2z_R$) odak derinliği denir.

Etkin bir kazanç için, elektron demet alanının ve ışınım alanının geometrik büyüklüğü eşleştirilmelidir. Doldurma faktörü bu enine örtüşmeyi hesaba katar. Maksimum doldurma faktörü için optimum eşleşmenin olduğu Rayleigh uzunluğu aşağıdaki gibi verilir ve bu uzunluğa optimum Rayleigh uzunluğu denir (Anonymous 2019a).

$$z_R[m] = L_u[m]/4 \quad (2.55)$$



Şekil 2.21 Maksimum doldurma faktörü için Optimum Rayleigh uzunluğu (Anonymous 2019a'dan değiştirilerek alınmıştır)

Şekil 2.21'de görüldüğü gibi eğer Rayleigh uzunluğu optimum değerden büyük olduğunda undulatör boyunca ortalama optik demet boyutu elektron demetinden çok büyük olur ve doldurma faktörü minimumdur. Eğer Rayleigh uzunluğu optimum değerden küçük olursa demetlerin alanı tam eşit olmasında rağmen optik demetin bükümü çok şiddetli olduğundan yine doldurma faktörü küçük olur.

2.3.5 Optik kaplama

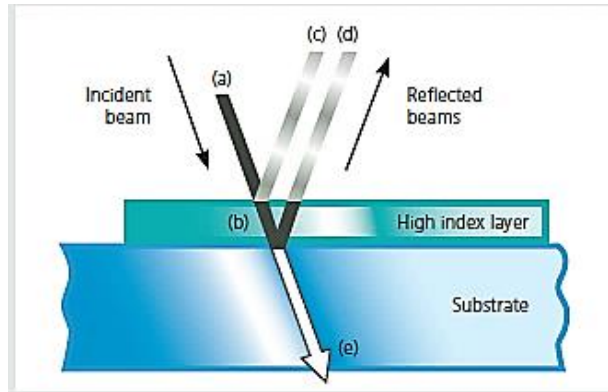
Optik ayna seçiminde ilk önce alt tabaka (substrat) malzemesi belirlenir. Alt tabakanın malzemesi çoğunlukla çeşitli camlardan yapılır. İstenilen optik özelliklere göre malzemenin yansımaya veya iletim özelliklerini artırmak için alt tabakayı çeşitli kaplama malzemeleriyle kaplanır. Bu optik kaplama aynı zamanda istenilen dalga boyu band aralığı genişliğine uygun yansıtıcı özelliğinde, oluşan lazer hasar eşiğini kaldırabilecek kadar yüksek eşikli, saçılma ve soğurma gibi optik kayıpları düşük ve geliş açısına bağlılığı göz önünde bulundurarak seçilmelidir (Anonymous 2019b).

Kaplamanın malzemesinin seçiminin yanında optik kaplama yöntemi de önemlidir. Kaplama yöntemi olarak püskürtme ve buharlaştırma olmak üzere iki çeşittir. Püskürtme yöntemiyle düşük saçılma kayıpları, en az spektral kayma, yüksek lazer hasar eşiğine ve yüksek mekanik kararlılığa elde edilir. Buharlaştırma işlemi ile yüksek saçılma kayıplarına, düşük soğurma ve yüksek lazer hasar eşiği elde edilir.

Optik kaplamalar çeşitleri yapıldığı malzemeye göre metal, dielektrik ve metal-dielektrik kaplama olarak sınıflandırılabilir. Optik kaplamada metal kaplamalar kendi spesifik özellikleriyle malzemenin yansıtıcılığını artırırken, dielektrik kaplamalar girişim yaparak yansımaya katsayısını artırır (Kaiser 2008, Anonymous 2019b)

Metal kaplamalı aynalar geniş band spektrumlu, geliş açısına bağlı olmadığından tüm açılarda eşit derecede yansıtır ve dolayısıyla polarizasyona duyarlıdır. Bu özelliklerin yanı sıra metal kaplamalar en düşük hasar eşiğine sahiptir, mekanik ve kimyasal bombardımana karşı hassastır ve koruyucu tabaka ile korunmaları gerekir. Bu koruyucu tabaka ile metallerin yansımaya katsayısını duruma göre artabilir ya da azalabilir.

Dielektrik kaplamalar sert ve aşınmaya karşı dayanıklı, dar spektrumlu, düşük soğurmaya sahip, kaplamalar s- ve p-kutuplaşma bileşenlerine bağlıdır. Dielektrik malzemeler optik yüzeylerin yansıtıcılığını dielektrik (antireflection) kaplama ile sıfırdan, düşük kayıplı ayna ile %100'e kadar değiştirebilir. Tek bir dielektrik tabakalı bir yüzeye gelen ışın şekil 2.22'de gösterildiği gibi yansıtılır. Burada c ile d yansıyan ışınları faz farkına göre yapıcı ve yıkıcı girişim oluşturabilir. Bu faz farkına optik kalınlık da denilir.



Şekil 2.22 Yüksek indisli, tek katmanlı dielektrik kaplamadan ışığın yansıması (Anonymous 2019b)

Yüksek indisli dielektrik tabaka yansıtıcılığı artırırken, düşük indisli dielektrik tabaka yansıtıcılığı azaltır. Şekil 2.22'deki yansıyan iki ışın arasındaki faz farkı (optik kalınlık) çeyrek dalga yığını (quarter-wave stack) denilen $\lambda_{SEL}/4$ değerindeki yüksek indisli

dielektrik için malzemenin maksimum yansıtıcılık elde edilirken, düşük indis için minimum yansıma katsayısı elde edilir.

Eğer bu faz farkı $\lambda_{SEL}/2$ ise yüzeyin yansıması bu dalga boyunda değişmeden kalır. Optik kalınlık $\lambda_{SEL}/4$ ve kaplamanın kırılma indisi n dersek, koruyucu kaplamanın geometrik kalınlığı d aşağıdaki ifadeden bulunur.

$$nd[\mu m] = \lambda_{SEL}[\mu m]/4 \quad (2.56)$$

2.4 Osilatör Modda Serbest Elektron Lazerinin (O-SEL) Ana Parametreleri

O-SEL'in işleyişi, elektron demetin doğal yayılımı ile başlatılır ve güçlendirme, elektron demetinden ışınım alanına net enerji transferi ile gerçekleşir ve ışınım alanı doyuma noktasına ulaşip kararlı duruma gelene kadar elektronların undulator içinden geçmesi sağlanır (Kim vd. 2018).

2.4.1 Dalga boyu ve enerjisi

SEL'in dalga boyu denklem 2.30'daki temel dalga boyu denklemi ile hesaplanır. SEL'in enerjisi ise $\vartheta = 0$ için pratik birimler cinsinden aşağıdaki şekilde verilir (Wiedemann 2003).

$$E_{SEL}[eV] = 950 \times 10^{-6} \frac{E^2[MeV]^2}{\lambda_u[cm] \left(1 + \frac{1}{2}K^2\right)} \quad (2.57)$$

2.4.2 Kırınım limitli ışınım demeti

Temel dalga boyu denklemi doppler etkisiyle elektromanyetik spektrumda mordan kırmızıya doğru kayar ve bu kırmızıya kayma miktarını şu şekilde bulabiliriz (Howells 1992).

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_{SEL,h}} = \frac{\lambda_{SEL,h}(\vartheta) - \lambda_{SEL,h}(0)}{\lambda_{SEL,h}(0)} = \frac{\gamma^2\vartheta^2}{1 + \frac{K^2}{2}} \equiv (\gamma^*)^2\vartheta^2 \quad (2.58)$$

Burada kolaylık açısından yeni nicelik γ^* tanımlanmıştır ve spektral band genişliği $\Delta\lambda/\lambda_{SEL} = 1/2N_u$ için $\vartheta = \sigma'_r$ açısı şu şekilde hesaplanır.

$$\sigma'_r[mrad] = \frac{1}{\gamma^*} \sqrt{\frac{1}{2N_u}} = \sqrt{\frac{\lambda_{SEL}[mm]}{L_u[mm]}} \times 10^3 \quad (2.59)$$

Bu açıdan daha küçük olan açılarda $1/hN_u$ spektral açı değeri kırmızıya kaymada fazla bozulmaz. Dolayısıyla σ'_r açısına kırınım limitli ışınım emittansının yayılma açısı, bir başka deyişle ışınım demetinin diverjansı denilir. Kırınım limitinin kaynak yarıçapı, bir başka deyişle ışınım demetinin yarıçapı şu şekilde hesaplanır (Wiedemann 2003).

$$\sigma_r[mm] = \frac{\sqrt{\lambda_{SEL}[mm]L_u[mm]}}{2\pi} \quad (2.60)$$

Kırınım limitli ışınım demetinin emittansı ise aşağıdaki şekilde verilir.

$$\epsilon_r[mm.mrad] = \frac{1}{2} \sigma_r[mm] \sigma'_r[mrad] = \frac{\lambda_{SEL}}{4\pi} \quad (2.61)$$

Bu ifade aynı zamanda kırınım sınır koşuludur ve bu ifade elektron demetinin emittans değerinden daha küçük olursa ışınım demet emittansının azalmasına sebep olur. Uzaysal koherentlik (eş fazlılık) sağlamak ve kırınım limitini sağlayan ışınım üretmek için, elektronun emittans değeri aşağıdaki koşulu sağlaması gerekir.

$$\epsilon_{x,y} \leq \frac{\lambda_{SEL}}{4\pi} \quad (2.62)$$

2.4.3 Parlaklık

Parlaklığa, eğer elektronun emittans değeri kırınım limitindeyse kırınım daha baskındır. Eğer elektronun emittans değeri kırınım limitinden çok büyükse elektron demet emittansı baskındır yani parlaklığa elektron demet emittansı etki eder ve emittans değeri denklem 2.58'deki koşula uymak zorunda değildir. Elektron demetinin emittansının etkilediği parlaklığa spektral parlaklığı, kırınım etki ettiği parlaklığa kırınım limitli spektral parlaklık denilir.

Bir faz uzayındaki foton demeti tarafından oluşturulan 6-boyutlu olarak spektral parlaklık aşağıdaki gibi verilir.

$$\mathcal{B}_{spk} [foton/s/mm^2/mrad^2/bw] = \frac{\dot{N}_{ph}}{4\pi^2 \sigma_x \sigma_{x'} \sigma_y \sigma_{y'} (\Delta\lambda/\lambda)} \quad (2.63)$$

Burada \dot{N}_{ph} foton akısıdır ve kavite içi gücün tek bir fotonun enerjisine bölünerek aşağıdaki gibi hesaplanır (Thompson 2003).

$$\dot{N}_{ph} \left[\frac{foton}{s} \right] = \frac{\Delta P [MW]}{hc/\lambda_{SEL} [\mu m]} \quad (2.64)$$

Buradaki $h = 6.626075 \times 10^{-32} J.s$ değerine sahip plank sabitidir. Elektron demet emittansının ihmal edilebildiği kırınımın baskın olduğu koşulda maksimum kırınım limitli spektral parlaklık ise şu şekilde verilir.

$$\mathcal{B}_{max} [foton/s/mm^2/bw] = \frac{4}{\lambda_{SEL}^2 [mm^2] (\Delta\lambda/\lambda)} \dot{N}_{ph} \quad (2.65)$$

Bunların yanında bir de etkin spektral parlaklık vardır. Bu durumda elektron demetleri undulatörün girişinde alınıp undulatörün içinde simetrik olarak ilerlediği varsayılır ve buradaki etkin foton parlaklığı, elektron demeti ile kırınım limitli ışınım demeti arasındaki eşleşme durumuna bağlı olarak değişir. Etkin spektral parlaklık aşağıdaki gibi hesaplanır (Wiedemann 2003).

$$B_{etk} [foton/s/mm^2/mrad^2/bw] = \frac{\dot{N}_{ph}}{4\pi^2 \Sigma_x \Sigma_{x'} \Sigma_y \Sigma_{y'} (\Delta\lambda/\lambda)} \quad (2.66)$$

Burada foton akısını hesaplariken pik akımı kullanırsa pik parlaklık, ortalama akım kullanılırsa ortalama akım elde edilir.

Denklem 2.66'daki Σ_x , $\Sigma_{x'}$ sırasıyla dikey doğrultuda toplam foton parametresinin yarıçapı ve diverjansı; Σ_y , $\Sigma_{y'}$ ise sırasıyla yatay doğrultuda toplam foton parametresinin yarıçapı ve diverjansıdır. Undulatörün girişindeki emittans parametreleri σ_0 ile ifade edilerek bu parametreler elektron yol üzerinde yaptığı salınım, sonlu demet diverjansı ve eğik yatay gözlem açısının etkileri de eklenerek aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$\Sigma_{x'}^2 [\text{mrad}^2] = \sigma_{0,x'}^2 + \frac{1}{2} \sigma_r^2 \quad (2.67)$$

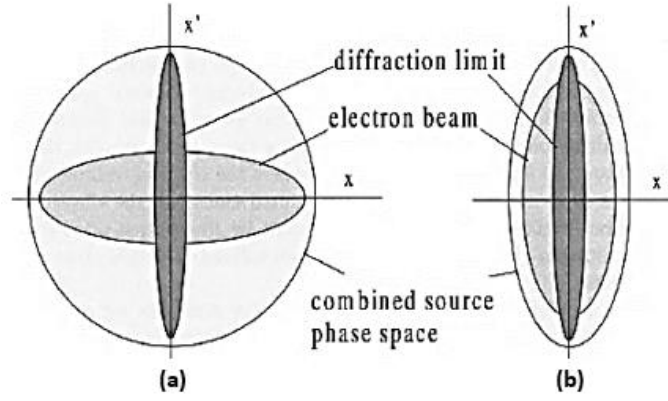
$$\Sigma_x^2 [\text{mm}^2] = \sigma_{0,x}^2 + \frac{1}{2} \sigma_r^2 + \left(\frac{\lambda_u K}{2\pi\gamma} \right)^2 + \frac{1}{12} \sigma_{0,x'}^2 L_u^2 + \frac{1}{36} \theta_{max}^2 L_u^2 \quad (2.68)$$

$$\Sigma_x^2 [\text{mm}^2] = \sigma_{0,x}^2 + \frac{1}{2} \sigma_r^2 + \left(\frac{\lambda_u K}{2\pi\gamma} \right)^2 + \frac{1}{12} \sigma_{0,x'}^2 L_u^2 + \frac{1}{36} \theta_{max}^2 L_u^2 \quad (2.69)$$

$$\Sigma_{y'}^2 [\text{mrad}^2] = \sigma_{0,y'}^2 + \frac{1}{2} \sigma_r^2 \quad (2.70)$$

$$\Sigma_y^2 [\text{mm}^2] = \sigma_{0,y}^2 + \frac{1}{2} \sigma_r^2 + \frac{1}{12} \sigma_{0,y'}^2 L_u^2 + \frac{1}{36} \varphi^2 L_u^2$$

Denklem 2.68'de verilen ifade de elektron yol üzerinde yaptığı salınım (baştan üçüncü terim), sonlu demet diverjansı (dördüncü terim) ve eğik yatay gözlem açısından (beşinci terim) dolayı yatay yönde fotonun genişliği artmıştır. Denklem 2.70'de verilen ifade de φ undulator ekseninin yakın çevresinde azimutal gözlem açısıdır. Burada sonlu demet diverjansı (üçüncü terim) ve eğik dikey gözlem açısından (dördüncü terim) dolayı dikey yönde fotonun yüksekliği artmıştır.



Şekil 2.23 Maksimum foton parlaklık için eşleşme işlemi (Wiedemann 2003)

Şekil 2.23'te iki boyutlu (x, x') faz uzayında maksimum foton parlaklığı elde etmek için elektron demeti ile kırınım limitli ışınım demetinin eşleşme işlemi gösterilmiştir. Burada şekil 2.23a'da zayıf bir eşleşme durumu vardır ve bu durumda elektron demetin yarıçapı kırınım limitli ışınım demetinin yarıçapına göre çok büyükken, elektron demetin diverjansı kırınım limitli ışınım demetinin diverjansına göre çok küçüktür ve sonuç olarak faz uzayında etkin foton yoğunluğu ve foton demetin parlaklığı azalır. Parlaklığı artırmak için merkezde elektron demetini odaklayarak yarıçapı azaltılıp diverjansın büyümesi sağlanır (Şekil 2.23b).

Etkin foton demet parlaklığı, her iki emittansın yönleriyle büyük ölçüde etkilendiğinden, eğer bu iki emittansın yönlerini eşleştirirsek, foton demetin parlaklığı maksimum olur. Bunu yapmak için elektron demetini çok fazla odaklamamız gerekir ve bunun sonucunda ortaya çıkan foton faz uzay elipsi, iki elipsin birbiriyle tam olarak çakıştığı bir daireye dönüşür ve burada optimum odaklama optimum eşleşme gerçekleşir. Kırınım sınırları dahil toplam foton demetinin alanı aşağıdaki gibi verilir (Thompson 2003).

$$\Sigma [\text{mm}^2] = 2\pi \times \sqrt{\frac{\bar{w}^2}{4} + \sigma_x^2} \sqrt{\frac{\bar{w}^2}{4} + \sigma_y^2} \quad (2.71)$$

Burada \bar{w} undulator boyunca ortalama optik mod boyutudur ve aşağıdaki gibi verilir.

$$\bar{w}[mm] = \frac{w_0}{L_u} \int_{-L_u/2}^{+L_u/2} \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda_{SEL}[mm] \times z[mm]}{\pi \times w_0^2[mm^2]} \right)^2} dz \quad (2.72)$$

Denklem 2.71'deki ifade $\frac{d\Sigma}{d\beta_x} = 0$ ile bulunan demet belindeki beta fonksiyonu β_x için foton demet alanı minimum değerini alarak elektron demeti ile ışınım demeti arasında maksimum etkileşim elde edilir ve bu değer şu şekilde verilir.

$$\beta_x[mm/mrad] = \frac{\sigma_r[mm]}{\sigma_{r'}[mrad]} = \frac{L_u[m]}{2\pi} \quad (2.73)$$

2.4.4 Tek geçiş kazancı

Her bir elektronun undulatörden geçişinde ışınımın elektromanyetik alana aktardığı enerjiye tek-geçiş kazancı (single-pass gain) denir (Wiedemann 2007). Tek geçiş kazanç parametresi aşağıdaki gibi hesaplanır (Thompson 2013) .

$$g_0 = \frac{16\pi\lambda_{SEL}[m]L_u[m]N_u^2\xi f_B^2\hat{I}[A]}{\gamma I_A[A] \Sigma [m^2]} \quad (2.74)$$

Burada $\xi = K^2/[4(1 + 2K^2)]$ olmak üzere doğrusal kutuplanmış undulatördeki elektronların ideal olmayan sinüs yörüngesini dikkate alan $f_B = J_0(\xi) - J_1(\xi)$ Bessel düzeltme fonksiyonu ve $I_A = 17kA$ Alfven akımıdır.

Maksimum tek geçiş kazancını hesaplamak için denklem 2.74'teki tek geçiş kazancına, elektron demetin enerji yayılımından kaynaklanan kazanç zayıflama (C_e), slippage (C_c), dikey ve yatay sonlu emittans (C_x, C_y) düzeltme faktörleri eklenerek yeni düzeltilmiş tek geçiş kazanç parametresi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\hat{g}_0 = g_0 \times C_e \times C_c \times C_x \times C_y \quad (2.75)$$

Burada C_e elektron demetinin göreceli kök ortalama kare (rms, root mean square) demet enerji yayılımıyla (σ_γ/γ) bağlantısı aşağıda verildiği gibidir.

$$C_e = \frac{1}{1+1.7 \times [4 \times N_u \times (\sigma_\gamma / \gamma)]^2} \quad (2.76)$$

Denklem 2.75'teki diğer katsayılar aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$C_c = \frac{1}{1 + \frac{N_u \lambda_{sel} [mm]}{3 \sigma_z [mm]}} \quad (2.77)$$

$$C_x = \frac{1}{1 + \left[\pi N_u \frac{\epsilon_{N,x} [mm.mrad]}{\lambda_u [mm]} \left(\frac{K}{1 + (K^2/2)} \right) \right]^2} \quad (2.78)$$

$$C_y = \frac{1}{1 + \left[\pi N_u \frac{\epsilon_{N,y} [mm.mrad]}{\lambda_u [mm]} \left(\frac{K(2/\sqrt{2})}{1 + (K^2/2)} \right) \right]^2} \quad (2.79)$$

Bu durumda maksimum tek geçiş kazancı aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$G_{max} = 0.85 \hat{g}_0 + 0.19 \hat{g}_0^2 + 4.12 \times 10^{-3} \hat{g}_0^3 \quad (2.80)$$

2.4.5 Sistemin doyma noktası ve elde edilen güç

Işınım demetinin undulatörden η .inci geçişten sonra undulatörün çıkışındaki optik atma gücüne P_η ve doğal yayılım gücü P_s dersek ilk geçişten sonra undulatörün çıkışındaki güç P_1 , doğal yayılım gücüne eşit olur ($P_1 = P_s$). İlk geçişten sonra aynalardan yansıyor tekrar undulatöre geldiğinde $\eta \geq 2$ olmak üzere η .inci turdaki güç, aşağıda verildiği gibi hem SEL kazancı G hem de aynaların yansımaya katsayısı R bağlı olarak değişir (Kim vd. 2018).

$$P_\eta = R(1 + G)P_{\eta-1} + P_s \quad (2.81)$$

Burada görüldüğü gibi ilk doğal yayılımdan sonra her geçişte kazanılan net kazanç $R(1 + G)$ kadardır ve tek geçiş kazancı optik kayıplarından (optik kavite içinde ve optik

aynada oluşan toplam kayıp) büyük olduğunda net kazanç artar ve osilatör SEL için lazer elde etmek için $\mathcal{R}(1 + G) > 1$ olmalıdır. Bu koşul altında η .inci geçişten sonraki güç aşağıda verildiği gibi η ile katlanarak artar.

$$P_\eta = \frac{[\mathcal{R}(1 + G)]^\eta - 1}{\mathcal{R}(1 + G) - 1} P_s \quad (2.82)$$

Kavite içindeki gücün üssel büyümesi belli bir seviyeye ulaştınca durur ve daha da güçlendirilmesi için undulatörden geçirilirse, ışınım artık ponderomotive potansiyelindeki elektronları yakalar ve ışınımaya enerji veren bu elektronları, enerji alan elektronlara dönüştürmeye başlar. Bu durumda kazancın küçük sinyal kazanç değeri azalır ve sistem kararlı duruma ulaşır bir başka deyişle doyma noktasına ulaşır. Doyma noktasına ulaştığındaki kazanç değerine G_{doyma} denir ve $\mathcal{R}(1 + G_{doyma}) = 1$ olur.

Doyma noktasına ulaşan bir sistemde kazanç, optik kayba eşit olur ya da bir başka deyişle optik kayıplar kavite içi güce (ΔP) eşit olduğunda doyma noktasına ulaşmış olur. Kaybı olmayan ideal bir optik hattı için doyma noktasındaki bir sistemde aynalardaki iletimden kaynaklanan kayıp, doyma noktasındaki kavite içindeki güç P_{doyma} olmak üzere $(1 - \mathcal{R})P_{doyma}$ şeklinde verilir. Dolayısıyla doyma noktasındaki kavite içi optik güç P_{doyma} ifadesi $\Delta P = (1 - \mathcal{R})P_{doyma}$ denkleminde çekilerek aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$P_{doyma} \approx \frac{1}{2N_u(1 - \mathcal{R})} P_{beam} \quad (2.83)$$

Kavite içindeki optik elemanlar ve aynalar, osilatörün kararlı yapıda çalışabilmesi için bu güce dayanacak yapıda olmalıdırlar. Doyma noktasında elde edilen bu güç her tam bir devirden sonra soğurma, optik elemanların kenarlarında kırınım gibi pasif kayıplar, yararlı amaçlar için dışardan bağlanarak kavite dışı iletime yol açan birçok farklı mekanizma ve kısmı aynadaki delikten çıkan kayıp gibi aktif kayıplar sebebiyle azalır.

Kavite içi kayıp kesri α_{loss} , aynanın deliğinden çıkan kayıp sebebiyle optimum açıklık kesri α_{out} ve maksimum kazanç için enjekte edilmesi gereken elektron pik demet gücü \hat{P}_{demet} olmak üzere optik kaviteden çıkan SEL'in pik gücü \hat{P}_{SEL} aşağıdaki gibidir.

$$\hat{P}_{SEL}[MW] = \left(\frac{\alpha_{out}}{\alpha_{out} + \alpha_{loss}} \right) \frac{\hat{P}_{demet}[MW]}{2N_u} \quad (2.84)$$

Burada α_{out} ifadesi maksimum tek geçiş kazancı cinsinden aşağıdaki gibi verilir.

$$\alpha_{out} = 2 \times 10^{-17} \times G_{max}^3 - 2.9 \times 10^{-4} G_{max}^2 + 0.2 G_{max} + 0.024 \quad (2.85)$$

Bir Osilatör SEL'den elde edilen kullanışlı bir ışınım için, sistemden çıkarılmadan önce bir süre doyma noktasında çalıştırılması gerekir. Bu yüzden eğer her bir makro-atmalı paketçiklerin içinde, sistemi doyma noktasına ulaştırmak için gerekenden daha fazla elektronu varsa atmalı yapıya sahip bir hızlandırıcı ile osilatör çalıştırılabilir. Bunun yanı sıra bir CW (continuous wave) sürekli dalga yapısına sahip bir hızlandırıcı ile osilatör süresiz olarak kararlı durumda çalıştırılabilir. Bu şekilde çalıştırılarak SEL, daha yüksek ortalama foton akısına sahip kararlı kaynak görevi görür.

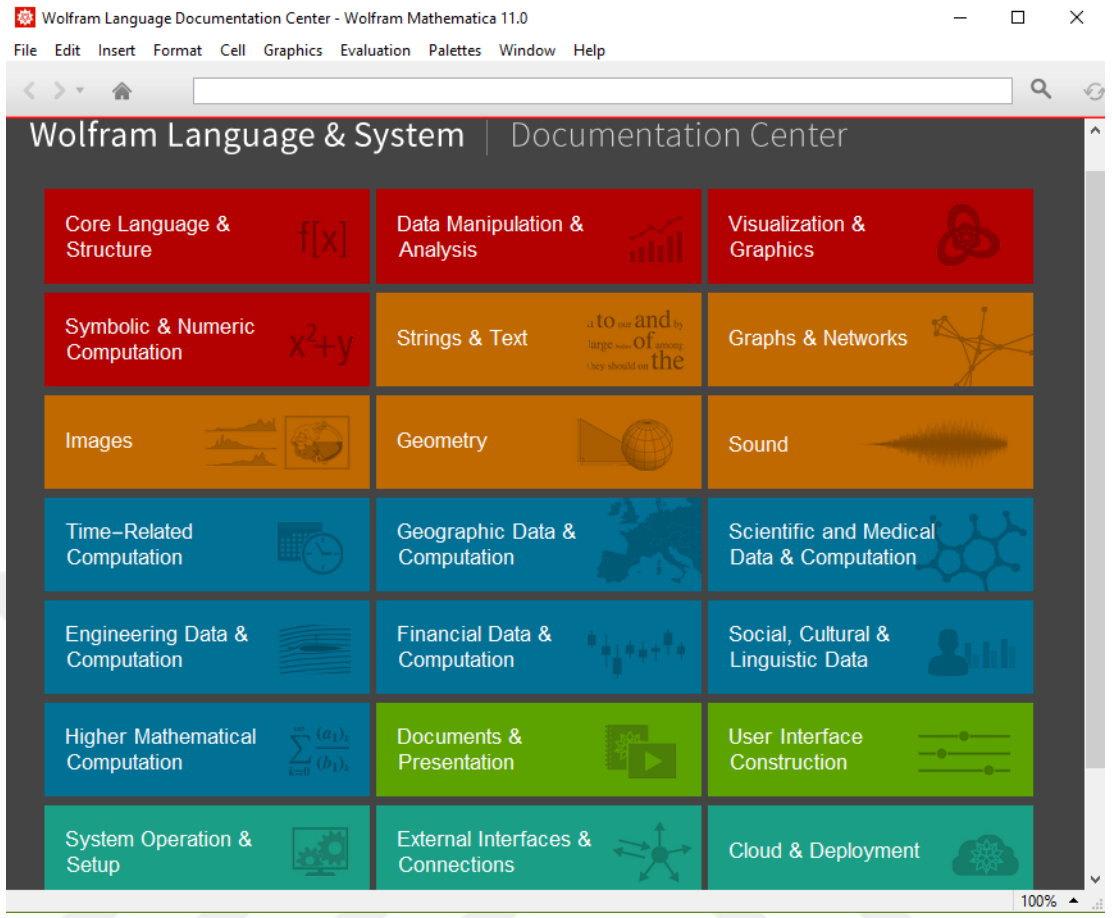
3. MATERYAL VE YÖNTEM

Çalışmada öncelikle osilatör modda SEL üretimin fiziği çalışılacak ve ardından düşük enerjili elektron hızlandırıcılarına dayalı SEL üretimini mümkün kılacak tasarımları gerçekleştirmek için RADIA yazılımı, analitik hesaplar için MATHEMATICA yazılımı kullanılmıştır. Bu tasarım ve optimizasyon çalışmasında TARLA IR SEL tesisinde imalatı gerçekleştirilecek optik kavite sistemi çerçevesinde;

- Optik kavitenin fiziği, geometrisi, malzemesi ve teknolojisi,
- Aynaların özellikleri, yansıtma oranları ve kaplama teknolojileri,
- Optik kavitede gerekli vakum bileşenlerinin tanımlanması,
- Undulator magnetlerin parametre (geometrik boyutları, kutup şekli ve malzemesi, gap ve kutup aralıkları, şiddet parametresi, magnetik alan dağılımı) optimizasyonu yapılmış olup,
- Elde edilecek SEL demetleri için dalga boyu, enerji, ortalama ve pik güç ve parlaklık dağılımları analiz edilecek, sonuçlar bilimsel yöntemlerle raporlandırılmıştır.

3.1 Wolfram Mathematica 11.0

Mathematica 11.0 programı 2016 yılında çıkmıştır. Şekil 3.1'de görüldüğü gibi mathematica dilinde verilmiş birçok alanda konu ve konuların içinde birçok örnek ve çizimler yapılabilmektedir. (Anonymous 2017a).



Şekil 3.1 Mathematica 11.0 kütüphanesi (Anonymous 2017b)

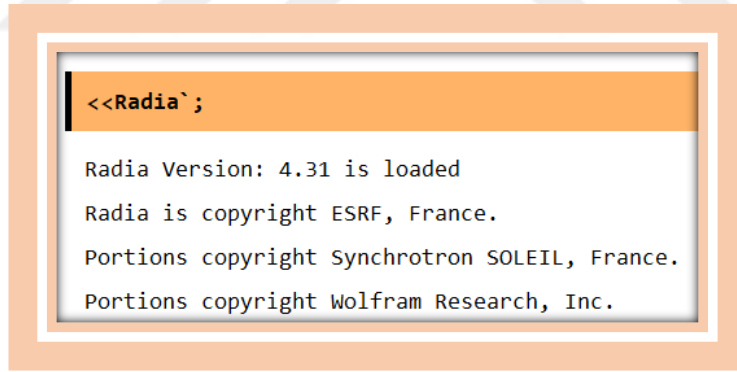
3.2 RADIA 4.31

Radia, C++ dilinde bir program olup 3B magnetostatik hesaplama için uygun hızlı bir çoklu platform yazılımıdır. Kalıcı veya demir mıknatıslar, bobinler, lineer ve lineer olmayan yumuşak (soft) manyetik malzemelerden yapılmış undulatör ve wiggler tasarımı için optimize edilmiştir. Radia, ticari olarak temin edilebilen bir sonlu eleman paketi ve ESRF Eklenti Cihazları Laboratuvarı'nda inşa edilmiş gerçek cihazlarla karşılaştırılması sonucunda uygun olduğu görülmüş bir programdır (Anonymous 2017c).

Radia, ayrıca Mathematica içinde kullanılan bir yazılım paketi olup Sinkrotron Işınım Kaynakları için Eklenti Cihazlarının geliştirilmesinde karşılaşılan fiziksel ve teknik problemleri çözmek için tasarlanmış olmasına rağmen farklı fizik dallarında da kullanılabilir.

Radia yazılım paketinin içinde Basit başlangıç, ESRF Süperiletken Wiggler, Genel Hibrit Undulatör, Düzgünce Magnetlenmiş Küre, Basit Dipol Mıknatıs, Basit Quadrupol Mıknatıs olmak üzere altı adet örnek vardır. Tez çalışmamızla ilgili olarak verilen örnekler içinde üçüncü örnek olan Genel Hibrit Undulatör kullanılmıştır.

Radia Dağılımının 3. örneğinde, hibrit tipte kısa bir kalıcı undulatör magnet oluşturur, oluşan undulatör için magnetik alanı hesaplar ve onu bazı bölgeler için magnetik alan grafiklerini verir. Bu işlemleri yapmadan önce Mathematica'dan Radia paketini çalıştırmamız gerekmektedir. Komutlar mathematicadaki gibi shift-enter tuşu ile çalıştırılır. Şekil 3.2'deki talimat Radia paketini yükler ve Radia sürüm numarasını devreye dahil eder.



```
<<Radia`;  
  
Radia Version: 4.31 is loaded  
Radia is copyright ESRF, France.  
Portions copyright Synchrotron SOLEIL, France.  
Portions copyright Wolfram Research, Inc.
```

Şekil 3.2 Mathematica'nin alt yazılım paketi olan Radia'nin çalıştırma talimatı

Kabul edilebilir bir hassasiyette manyetik alan elde etmek için segmentasyonu artırmak esastır. Bu örnekteki segmentasyon, kutup için $n_p = \{2,2,5\}$ ve mıknatıs için $n_m = \{1,3,1\}$ olarak ayarlanmıştır. Bu, undulatörünün pik alanındaki % 1 mertebesinde mutlak bir hataya karşılık gelir.

```

und [] := Module [ {},
  zer = { 0, 0, 0 };
  Grp = radObjCnt [ {} ];

  (* Principal Poles and Magnets *)
  y = lp [ [ 2 ] ] / 4;
  Pole = RadObjFullMag [ { lp [ [ 1 ] ] / 4, y, -lp [ [ 3 ] ] / 2 - gap / 2 }, { lp [ [ 1 ] ] / 2, lp [ [ 2 ] ] / 2, lp [ [ 3 ] ] }, zer, np, Grp, mp, cp ];
  y += lp [ [ 2 ] ] / 4;

  For [ i = 1, i <= NumPer, i ++, (
    initm = { 0, Mod [ i + 1, 2 ] - Mod [ i, 2 ], 0 };
    y += lm [ [ 2 ] ] / 2;
    Magnet = RadObjFullMag [ { lm [ [ 1 ] ] / 4, y, -lm [ [ 3 ] ] / 2 - gap / 2 - gapoffset }, { lm [ [ 1 ] ] / 2, lm [ [ 2 ] ] / 2, lm [ [ 3 ] ] }, initm, nm, Grp, mm, cm ];
    y += ( lm [ [ 2 ] ] + lp [ [ 2 ] ] ) / 2;

    Pole = RadObjFullMag [ { lp [ [ 1 ] ] / 4, y, -lp [ [ 3 ] ] / 2 - gap / 2 }, { lp [ [ 1 ] ] / 2, lp [ [ 2 ] ] / 2, lp [ [ 3 ] ] }, zer, np, Grp, mp, cp ];

    y += lp [ [ 2 ] ] / 2;
  ) ];

  initm = { 0, Mod [ NumPer, 2 ] - Mod [ NumPer + 1, 2 ], 0 };
  y += lm [ [ 2 ] ] / 4;
  Magnet = RadObjFullMag [ { lm [ [ 1 ] ] / 4, y, -lm [ [ 3 ] ] / 2 - gap / 2 - gapoffset }, { lm [ [ 1 ] ] / 2, lm [ [ 2 ] ] / 2, lm [ [ 3 ] ] }, initm, nm, Grp, mm, cm ];

  (* Mirrors *)
  RadTrfZerPerp [ Grp, { 0, 0, 0 }, { 1, 0, 0 } ];
  RadTrfZerPara [ Grp, zer, { 0, 0, 1 } ];
  RadTrfZerPerp [ Grp, zer, { 0, 1, 0 } ];
  Grp
]

```

Şekil 3.3 RADIA’da Hibrit Undulatör Mıknatısı oluşturma, renkleri ve manyetik malzemeleri dağıtma fonksiyonu

Radia programını çalıştırdıktan sonra fonksiyon oluşturulur. Şekil 3.3’deki fonksiyon ayna simetrik benzerleri ile birlikte bir hibrit undulatör magneti oluşturur, renkleri, manyetik malzemeleri dağıtır ve segmentasyonu ayarlar. Kullanılan fonksiyon çok geneldir ve hemen hemen herhangi bir hibrit undulatör oluşturmak için kullanılabilir.

```

H = {0.8, 1.5, 2.2, 3.6, 5, 6.8, 9.8, 18, 28, 37.5, 42, 55, 71.5, 80, 85, 88,
M = {0.000998995, 0.00199812, 0.00299724, 0.00499548, 0.00699372, 0.00999145,
ma = N[Table[{H[[i]]*4*Pi*10^(-7), M[[i]]}, {i, 1, Length[H]}]];

RadPlotOptions[];
ListPlot[ma,
Joined->True,
AxesLabel->{"H [Tesla]", "Mag [Tesla]"}]

ListPlot[ma,
Joined->True,
PlotRange->{{0,0.001},{0,2.2}},
AxesLabel->{"H [Tesla]", "Mag [Tesla]"}]

mp=radMatSatIso[ma];

```

Şekil 3.4 Magnetik malzemeyi tanımlama fonksiyonu

Şekil 3.4'teki talimatlar, girildiği noktaya bağlı olarak M (T) ve H (A/m) mıknatıslanma yoluyla malzemeyi tanımlar. Malzemenin "radMatSatIso" işlevinin, her ikisi de Tesla'da ifade edilen H ve M değerlerini içeren "ma" giriş parametresi ile çağrılmasıyla tanımlanmaktadır. Seçilen kutup malzemesi "mp" doğrusal olmayan bir izotropik manyetik malzeme olup tanımlanan çizelge 2.1'deki vanadyum permandur parametrelerine uyum göstermektedir.

```
radUtiDelAll[];

(* General Parameters *)
gap=20;NumPer=40;per=46;gapoffset=1;

(* Pole Parameters *)
lp={60,7.7,45};np={2,2,5};cp={1,0,0};
ll=per/2-lp[[2]];

(* Magnet Parameters *)
lm={90,9.8,60};nm={1,3,1};cm={0,0,1};

(* Define Pole Material *)
mp=radMatSatIso[ma];

(* Define NdFeB with 1.27 Tesla Remanent Magnetization *)
mm=RadMatNdFeB[1.27];

(* Build the Structure *)
Grp=und[];
```

Şekil 3.5 Radia’da NdFeB magnet, vanadyum kutup için hibrit undulatör magnet oluşturma fonksiyonu

Şekil 3.5’teki talimatlar, NdFeB mıknatısları ve daha önce tanımlanmış olan kutup malzemeden yapılmış bir undulatör inşa eder. Burada “Genel Parametreler” kısmında gap aralığı, “Numper” kısmında periyot sayısı ve “per” kısmında grafik çiziminde sadece eksen aralığını belirlememizi sağlayan sayı girilir. “Kutup ve Magnet Parametreleri” kısmında sırasıyla genişlik - kalınlık – yükseklik olmak üzere geometrik boyutlar girilir. Renklendirmede sırasıyla kırmızı-yeşil-mavi {R,G,M} olmak üzere üç ana rengi vardır. Seçeceğimiz rengi 1, seçmediğimiz rengi 0 olarak değer veririz ve iki renk seçip seçtiğimiz renklere 1 denilerek iki rengin karışımı bir renk oluşturmak mümkündür. Son olarak seçtiğimiz kalıcı magnet malzemesi için magnetik alan belirlenir.


```
draw=radObjDrw[Grp];

RadPlot3DOptions[];
Show[Graphics3D[draw]
,ViewPoint->{5,-1.5,2}
,PlotRange->All]
```

Şekil 3.6 RADIA'da Hibrit undulatörün geometri çizim fonksiyonu

Şekil 3.6'daki talimatlar şekil 3.5'teki geometrik özelliklere göre undulatörün 3B grafiğini çizer.

```
t0=AbsoluteTime[];
re=RadSolve[Grp,0.0003,1000];
t1=AbsoluteTime[];

Print["Solved in : ",Round[t1-t0]," seconds"];
Print["Number of Iterations : ",re[[4]]];
Print["Average Stability of Magnetization at the last iteration : ",N[re[[1]],2]," T"];
Print["Maximum Absolute Magnetization at the last iteration : ",N[re[[2]],4]," T"];
Print["Maximum H vector at the last iteration : ",N[re[[3]],4]," T"];
Print[""];
Print["Central Field Bz(0,0,0) : ",N[radFld[Grp,"Bz",zer],4]," T"];

Solved in : 4 seconds
Number of Iterations : 69
Average Stability of Magnetization at the last iteration : 0.000287668 T
Maximum Absolute Magnetization at the last iteration : 2.2878 T
Maximum H vector at the last iteration : 1.17893 T

Central Field Bz(0,0,0) : 0.338671 T
```

Şekil 3.7 RADIA'da belirlenen malzeme ve geometrik boyutlara göre magnetik alan hesap fonksiyonu

Şekil 3.7'deki talimatlar şekil 3.5'teki parametreleri kullanarak undulatörü oluşturan her bir magnetik bloğun magnetik alanını hesaplar. Buradaki hesaplanan magnetik alana göre şekil 3.8'deki talimatlar undulatörün merkezinde enine magnetik alan grafiğini, şekil 3.9'daki talimatlar undulatörün boyuna magnetik alan grafiği çizer.

```
RadPlotOptions [];  
Plot[radFld[Grp,"Bz",{x,0,0}],{x,-(NumPer+1)/2*per,(NumPer+1)/2*per}  
,AxesOrigin->{0,0}  
,FrameLabel->{"X [mm]","Bz [T]","Y = Z = 0",""}]
```

Şekil 3.8 RADIA'da hesaplanan magnetik alana bağlı olarak undulatörün merkezinde enine magnetik alan grafiği çizim fonksiyonu

```
RadPlotOptions [];  
Plot[radFld[Grp,"Bz",{0,z,0}],{z,-(NumPer+1)/2*per,(NumPer+1)/2*per}  
,AxesOrigin->{0,0}  
,FrameLabel->{"Z [mm]","Bz [T]","Y = X = 0",""}]
```

Şekil 3.9 RADIA'da hesaplanan magnetik alana bağlı olarak undulatörün boyuna magnetik alan grafiği çizim fonksiyonu

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Türk Hızlandırıcı Merkezi (THM)'nin ilk tesisi olarak önerilmiş olup kurulumu sürdürülen TARLA tesisi 10-40 MeV enerjili süperiletken elektron hızlandırıcısına dayalı 3-250 μm dalga boyu aralığında serbest elektron lazeri üretmeyi ve bu ışınımı Ar-Ge çalışmalarında kullanmayı hedeflemektedir (Aksoy vd. 2008, Yavaş 2016, Aksoy vd. 2018). Işınım kaynaklarının parametrizasyonu ve tasarımı ileri düzeyde hızlandırıcı fiziği, demet fiziği, magnet fiziği, ışınım fiziği, lazer fiziği ve optik kavite bilgisi gerektirmektedir. Bu bölümde TARLA'da istenilen SEL dalga boyuna erişebilmek için olması gereken elektron demet, U35 ve U110 undulatör magnet, optik kavite ve vakum optimizasyonu yapılmış ve bu parametrizasyonu ile elde edilen kazanç ve O-SEL gücü verilmiş olup sonuçlar değerlendirilmiştir.

4.1 Elektron Demet Parametreleri

Elektron demetin kararlı biçimde undulatör içinde taşınabilmesi için minimum 15 MeV elektron demet enerjisi öngörülmüştür. TARLA elektron demeti parametreleri çizelge 4.1'de verilmiştir. Bu parametreleri kullanarak istenilen dalga boyu için optik kavite bileşenlerinin optimizasyonu yapılmıştır.

Çizelge 4.1 TARLA elektron demeti parametreleri (Aksoy 2015)

Parametre	Birimi	U35	U110
Demet Enerjisi	MeV	15-40	
Paket Yüğü	pC	77	
Ortalama Demet Akımı (max)	mA	1	
Paketçik Tekrarlanma Oranı	MHz	13	
Normalize Dikey Enine Emittans	mm.mrad	12.254	13.885
Normalize Yatay Enine Emittans	mm.mrad	12.692	14.589

Yüksek pik güçlü 3-250 μm dalga boylu SEL üretimi için optik kavite bileşenlerinden olan elektron demet parametrelerinden ilk önce paket boyu belirlenmiştir. U35 ve U110 undulötör içinde elektron demeti ile ışınım demeti arasındaki etkileşim ihtimali denklem 2.28'deki elektron demetin paket boyunu ve katları alınarak artırılmalıdır. Bunun yanı sıra bu paket boyundaki artış kazanç ve SEL gücünü azaltmaktadır. Bu iki hususu dikkate alarak U35 için elektron demetin paket boyu olarak gücü çok düşürmemek adına denklem 2.28'deki ifadenin iki katı alınmıştır.

SEL üretimi için kazanç en az % 40-50 mertebesinde olmalıdır, bu değer altındaki kazançlarda ışınım elde etmek zordur. U110 için 252 μm dalga boylu ışınım için yapılan optimizasyonda kazanç % 40'ın üstüne çıkması için paket boyu denklem 2.28'deki ifade alınmıştır.

Belirlenen paket boyuna göre denklem 2.4'de ps cinsinde paketçik süresi belirlenmiştir. Çizelge 4.1'deki paket yükünü ve belirlenen paketçik süresini kullanarak denklem 2.3'den pik akımı hesaplanmıştır. Çizelge 4.1'deki elektron demet enerjisine ve belirlenen pik akımına göre denklem 2.7'den pik demet gücü belirlenmiştir. Çizelge 4.1'deki ortalama akım ve enerjiye göre ortalama demet gücü 15 MeV için 15 kW, 40 MeV için 40 kW belirlenmiştir.

Çizelge 4.1'deki normalize emittans değerine ve enerjiye göre denklem 2.14'den elektron demetin dikey ve yatay enine emittansı hesaplanmıştır. Elektron demeti ile ışınım demeti arasındaki maksimum etkileşimi sağlamak için demet belindeki beta fonksiyonu denklem 2.73'ten hesaplayarak bu değere ve belirlenen emittansa göre elektron demetin dikey ve yatay yarıçapı denklem 2.11'den, dikey ve yatay diverjansı denklem 2.10'dan belirlenmiştir. U35 ve U110 için belirlenen elektron demet parametreleri çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2 U35 ve U110 için belirlenen elektron demeti parametreleri

Parametre	Birim	U35 (Nu=40)		U110 (Nu=30)	
		15 MeV (32 μm)	40 MeV (3 μm)	15 MeV (252 μm)	40 MeV (22 μm)
Paket Boyu	mm	2.6	0.28	7.56	0.68
Paketçik Süresi	ps	8.7	1.0	25.2	2.3
Pik Demet Akımı	A	8.88	81.05	3.05	34.08
Pik Demet Gücü	MW	133	3242	46	1372
Dikey Diverjans	mrad	0.435	0.266	0.301	0.184
Dikey Yarıçap	mm	0.304	0.186	0.497	0.304
Dikey Emittans	mm.mrad	0.416	0.156	0.470	0.176
Yatay Diverjans	mrad	0.442	0.271	0.309	0.189
Yatay Yarıçap	mm	0.310	0.190	0.509	0.312
Yatay Emittans	mm.mrad	0.430	0.161	0.494	0.185

4.2 TARLA için Öngörülen Undulatör ve Parametreleri

TARLA'da 3-250 μm dalga boyu aralığında SEL elde edebilmek için iki farklı undulatör dalga boyuna sahip iki tane SEL hattı gerekmektedir. Bu tez çalışmasında TARLA'da öngörülen undulatör dalga boyu $\lambda_u = 35\text{mm}$ (U35) ve $\lambda_u = 110\text{mm}$ (U110) için optimize yapılmıştır.

Undulatör boyunca elektronları enine salınım yaptırmak için boşluk boyunca manyetik alan yönü sabit olan düzlemsel kalıcı undulatör seçilmiştir. Ayrıca manyetik akıyı yoğunlaştırmak ve kalıcı magnetten daha büyük magnetik alana sahip olmak için hibrit undulatör seçilmiştir. Magnet malzemesi olarak doğada SmCo'dan daha yaygın olarak bulunduğundan NdFeB magnet seçilmiştir. Kutup malzemesi olarak yüksek pik manyetik alan elde etmek için vanadyum permendur malzeme seçilmiştir.

U35 ve U110 için öngörülen periyot sayısı birkaç parametreleri göz önüne alınarak seçilmiştir. İlk olarak dikkat edilmesi gereken parametre kazanç ve SEL gücüdür. Undulatörün periyot sayısı azaldıkça spektral band genişliğinin artmasından dolayı kazanç azalmakta ve SEL pik gücü artmaktadır.

U35 ve U110'da elde edilen 3-250 μm dalga boyu aralığında SEL için öngörülen periyot sayısı SEL üretimi için gerekli olan kazancı ve istenilen yüksek pik SEL gücü göz önüne alarak seçilmiştir.

İkinci olarak dikkat edilmesi gereken parametre ise gap aralığıdır. Periyot sayısını seçmeden önce 3-250 μm dalga boyu üretilmesi için gereken gap aralığı çizelge 2.1'deki kararlılık koşuluna uygun olarak belirlenmiştir. SEL dalga boyu ve periyot sayısına bağlı olarak değişen optik demet yarıçapı denklem 2.56'dan belirlenip buna vakum kalınlığı ve magnet ile vakum arası boşluk eklenerek undulatörde olması gereken minimum gap aralığı belirlenmiştir. Belirlenen bu minimum gap aralığı, 3-250 μm SEL dalga boyuna üretimi için gereken gap aralığından küçük olmalıdır ve öngörülen periyot sayısı bu hususu dikkate alınarak seçilmiştir.

Belirlenen minimum ve maksimum gap aralığına ve çizelge 2.1'deki vanadyumlu hibrit magnet için uygun parametrelere göre denklem 2.16'dan pik manyetik alan hesaplanmıştır. Undulatör tasarımında "demetin salınım hareketi boyunca manyetik alan değerinin sabit kaldığı alana magnetik alan düzgünlüğü (roll-off-field)" denilmektedir (Aksoy 2015).

Undulatörün öngörülen periyot sayısına göre seçtiğimiz geometrik boyutlar magnetik alanın düzgün olduğu mesafeyi etkilemektedir. Radia'da magnet malzemesi olarak NdFeB, kutup malzemesi olarak çizelge 2.1'deki vanadyum permandur parametrelerine uygunluk gösteren malzeme seçilmiştir. Radia'da seçilen malzeme ile hesaplanan magnetik alan değeri, çizelge 2.1'deki vanadyumlu hibrit magnet için uygun parametrelere göre denklem 2.16'dan hesaplanan pik manyetik alan ile karşılaştırılmıştır.

Öngörülen periyot sayısına göre denklem 2.15'de undulatörün boyu belirlenmiştir. Şekil 2.7'deki orantıyı bozmayacak şekilde magnet ve kutbun genişliği ve yüksekliği artırılarak her iki undulatör içinde manyetik alanın düzgün olduğu mesafe artırılmıştır.

Şekil 2.7’de gösterilen kalınlığa uygun olacak şekilde magnet ve kutbun kalınlığı belirlenen pik alanı verecek şekilde optimize edilmiştir.

Undulatör boyunca magnetik alan aynı değerde olması gerekmektedir ve gap sayısı arttıkça kenarlardaki magnetik alan artmaktadır. Çizelge 2.1’deki kararlılık koşuluna uygun olan maksimum gap aralığı, aynı zamanda belirlenen geometrik boyuta bağlı olarak undulatörün kenarları ile undulatör boyunca magnetik alan yakın olacak şekilde seçilmiştir. Radia programıyla hibrit undulatör magnet için belirlenen minimum ve maksimum gap aralığı ve geometrik boyut ölçülerine göre undulatörün merkezinde enine ve undulatörün boyuna manyetik alan grafiği çizilmiştir.

Belirlenen minimum ve maksimum gap aralığına bağlı olarak belirlenen manyetik alan için olması gereken undulatör şiddet değerleri denklem 2.25’ten belirlenmiştir. Ayrıca belirlenen magnetik alan ve çizelge 4.1’deki demet enerjisine göre undulatörde elektronun maksimum sapma açısı denklem 2.23’ten hesaplanmıştır.

Öngörülen periyot sayısına göre denklem 2.31’den undulatörlerden elde edilen ışınımın spektral band genişliği, denklem 2.34’ten kazanç azalımı ihmal edebilmek için belirlenen göreceli rms demet enerji yayılımı hesaplanmıştır. Belirlenen undulatör şiddeti ve 3-252 μm SEL dalga boyuna göre denklem 2.36’dan rezonans enerji hesaplanmıştır. Kazanç eğrisi Mathematica programı kullanılarak çizdirilmiştir. Kazanç eğrisinde maksimum değeri veren ve denklem 2.32’ye uygun enerji yayılımı belirlenmiştir.

4.2.1 Undulatörün periyot sayısı

Daha önce bahsedilen periyot seçimindeki ikinci hususa göre U35 için seçilebilecek maksimum periyot sayısı 60 olmasında rağmen 3 μm dalga boylu ışınım için elde edilen gücü 3.5 MW’dan 7.84 MW’a çıkarmak için $N_u = 40$ seçilmiştir.

U110 için seçilebilecek maksimum periyot sayısı 45'tir. Radia'da çizilen magnetik alan dağılımına göre tek sayılı periyotlarda düzgün alan dağılımı olmamaktadır. Bu sebeple maksimum 40 seçilmektedir ve 250 μm dalga boylu ışınım için seçtiğimiz paket boyunda elde ettiğimiz minimum kazanç % 66 ve maksimum gücü 0.06 MW elde edilmektedir.

Periyot sayısı 40 olan U110 için güç çok düşük olduğundan minimum kazanç % 40'ın altına düşmeyecek şekilde gücü 0.11 MW çıkarmak için $N_u = 30$ seçilmiştir. Bu periyot sayısından daha azı seçildiğinde kazanç % 40'ın altına düştüğünden ışınım üretilmemektedir.

4.2.2 Manyetik alanı ve geometrik boyutu

Işınım demetin yarıçapı, elektron demet yarıçapından daha büyük olduğundan minimum vakum aralığı ışınım demetin yarıçapına göre belirlenmiştir. Periyot sayısı $N_u = 40$ olan U35 undulatörde 3-32 μm dalga boyundaki ışınımın yarıçapı maksimum $\sigma_r = 1.07 \text{ mm}$ olup elektronların %99.7 si $\pm 3\sigma_r$ içinde olduğunu düşünürsek optik demet enine ebatı 6.4 mm olmaktadır. Bunun yanı sıra vakum kalınlığı 1.5 mm ve undulatör ve vakum arası boşluk 0.5 mm olup bunların undulatörün merkezinden her iki tarafta simetrik olduğundan minimum gap aralığı en az 17 mm olmalıdır. 32.5 μm dalga boyu için 20 mm gap aralığı gerekmektedir ve bu da koşula uygun olduğundan minimum gap aralığı olarak seçilmiştir. Daha küçük bir gap aralığında undulatör şiddeti $K \gg 1$ olduğundan seçilmemiştir.

Maksimum gap aralığı ise çizelge 2.1'deki kararlılık koşuluna uygun olarak 34 mm değerine kadar seçilebilir. Bunun yanı sıra Radia ile çizilen boyuna magnetik alan grafiğinde magnetik alan undulatörün kenarları ile undulatör boyunca yaklaşık aynı magnetik alana sahip olacak şekilde maksimum gap aralığı azaltılarak 25 mm olarak seçilmiştir.

Periyot sayısı $N_u = 30$ olan U110 undulatörde 22-252 μm dalga boyundaki ışınım için maksimum yarıçapı $\sigma_r = 4.59 \text{ mm}$ olup optik demet enine ebatı 27.5 mm olmaktadır. Bunun yanı sıra vakum kalınlığı 1.5 mm ve undulatör ve vakum arası boşluk 0.5 mm olup bunların undulatörün merkezinden her iki tarafta simetrik olduğundan minimum gap aralığı 60 mm olmalıdır. 252 μm dalga boyu için 75 mm gap aralığı gerekmektedir ve bu da koşula uygun olduğundan minimum gap aralığı olarak seçilmiştir.

U110 için maksimum gap aralığı ise kararlılık koşuluna uygun olarak 109 mm seçilebilir. Radia ile çizilen boyuna magnetik alan grafiğinde magnetik alan undulatör boyunca aynı olacak şekilde maksimum gap aralığı azaltılarak 88 mm olarak seçilmiştir.

U35 ve U110 için belirlenen minimum ve maksimum manyetik gap aralığına göre elde edilen pik manyetik alan değerleri sırasıyla çizelge 4.3 ve çizelge 4.4’de verilmiştir.

Çizelge 4.3 U35 için belirlenen kararlılık koşuluna uygun minimum ve maksimum manyetik gap aralığına göre elde edilen pik manyetik alan değerleri

Gap aralığı (mm)	Gap/ λ_u	Pik Manyetik Alan (T)
20	0.57	0.34
25	0.71	0.21

Çizelge 4.3’te görüldüğü gibi U35 için 32.58 μm dalga boyu için gerekli olan 20 mm gap aralığında 0.34 T, 3.56 μm dalga boyu için gerekli olan 25 mm gap aralığında 0.21 T pik magnetik alan bulunmuştur.

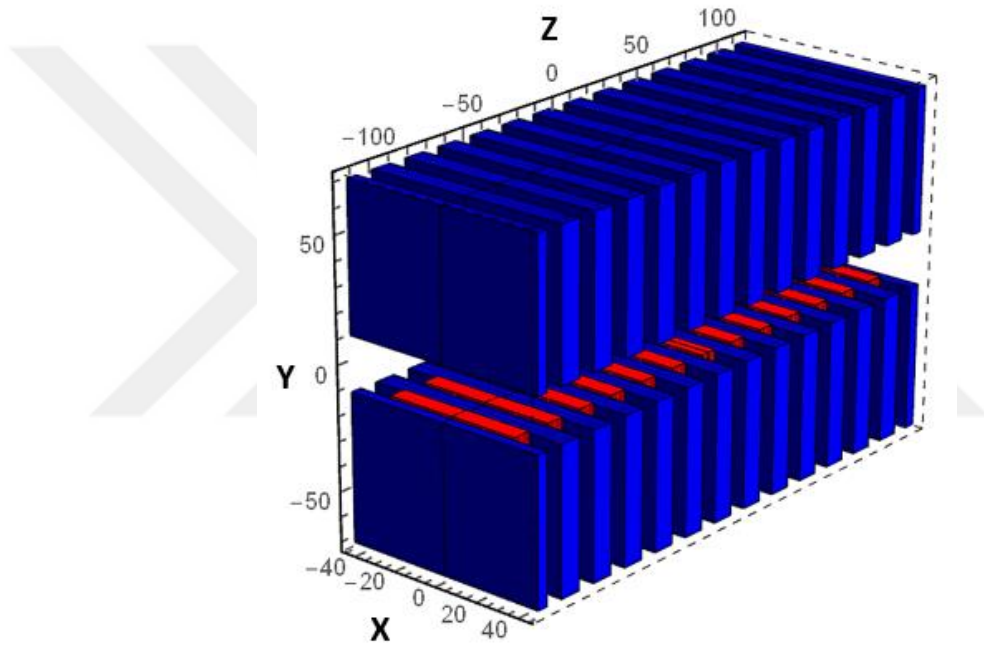
Çizelge 4.4 U110 için belirlenen kararlılık koşuluna uygun minimum ve maksimum manyetik gap aralığına göre elde edilen pik manyetik alan değerleri

Gap aralığı (mm)	Gap/ λ_u	Pik Manyetik Alan (T)
75	0.68	0.24
88	0.80	0.17

Çizelge 4.4’te görüldüğü gibi U110 için 252.02 μm dalga boyu için gerekli olan 75 mm gap aralığında 0.24 T, 22.58 μm dalga boyu için gerekli olan 88 mm gap aralığında 0.17

T pik magnetik alan bulunmuştur. Çizelge 4.3 ve çizelge 4.4'te görüldüğü gibi seçilen gap aralığı değerleri kararlılık koşuluna uygun olduğu görülmüştür.

Periyot sayısı $N_u = 40$ olan U35 için undulatör boyu 1.40 m'dir ve şekil 4.1'de U35 undulatörün 6 kutuplu şematik görünümü verilmiştir. Burada U35 için çizelge 4.3'teki pik manyetik alanı verecek şekilde 1.27 T sabit magnet özellikte NdFeB magnet malzemesi ve çizelge 2.1'deki vanadyum permandur parametrelerine uygunluk gösteren kutup malzemesi seçilmiş olup geometrik boyutları çizelge 4.5'te belirlenmiştir.



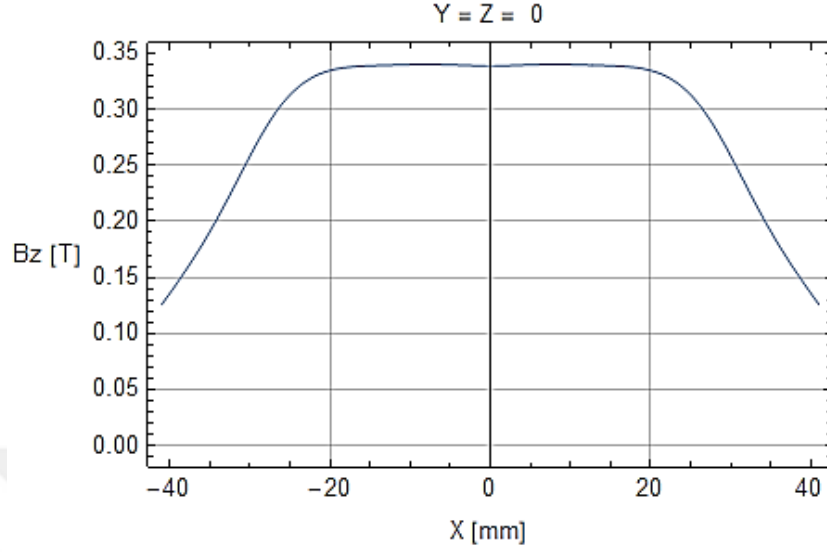
Şekil 4.1 U35 için şematik görünüm (6 kutuplu)

Çizelge 4.5 U35 için belirlenen geometrik boyutlar

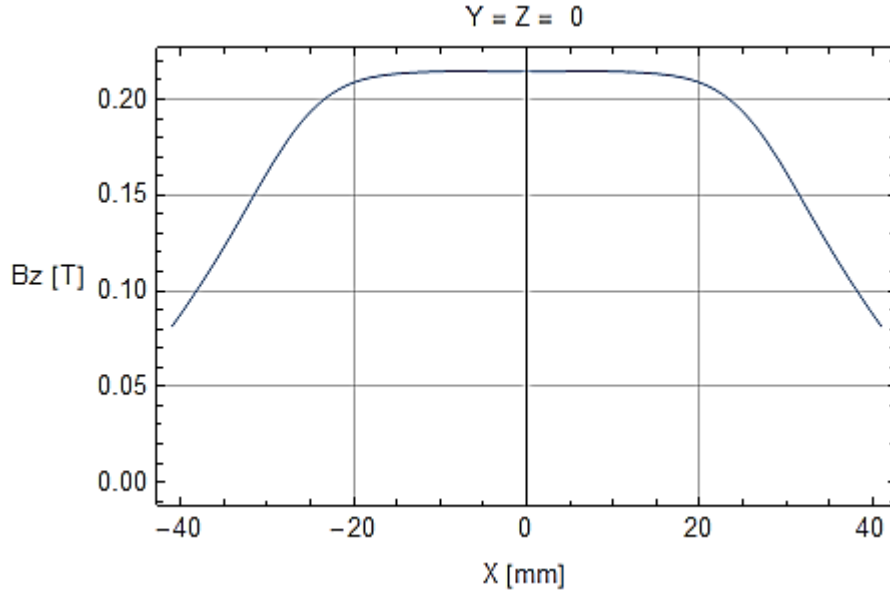
U35	NdFeB Magnet	Vanadyum Kutup
Genişlik (X)	90 mm	60 mm
Yükseklik (Y)	60 mm	45 mm
Kalınlık (Z)	9.8 mm	7.7 mm

Periyot sayısı $N_u = 40$ olan U35 için çizelge 4.5'teki geometrik boyutları kullanarak minimum ve maksimum gap aralığında undulatörün merkezinde alan grafikleri sırasıyla

şekil 4.2 ve şekil 4.3'te ve boyuna manyetik alan grafikleri sırasıyla şekil 4.4 ve şekil 4.5'te verilmiştir.



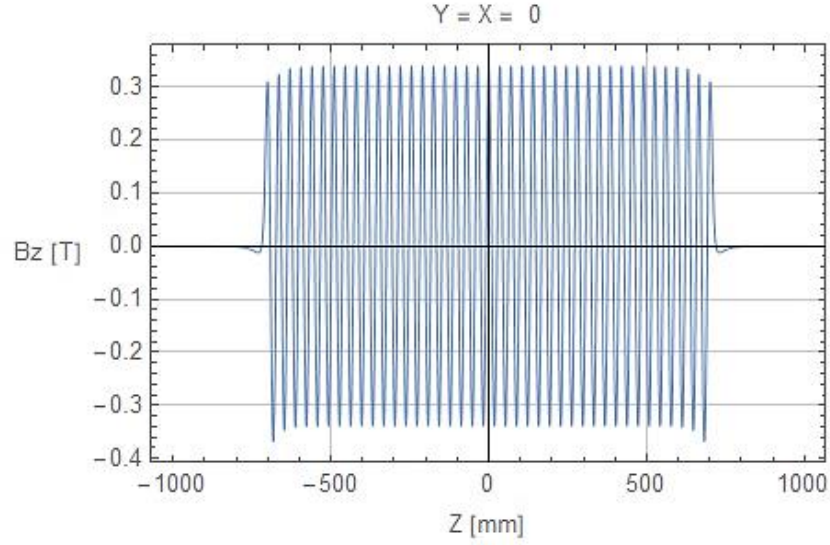
Şekil 4.2 $N_u = 40$ ve $g = 20$ mm olan U35 için undulatörün merkezinde enine magnetik alan grafiği ($B=0.338671$ T, Roll-off field: ± 17 mm)



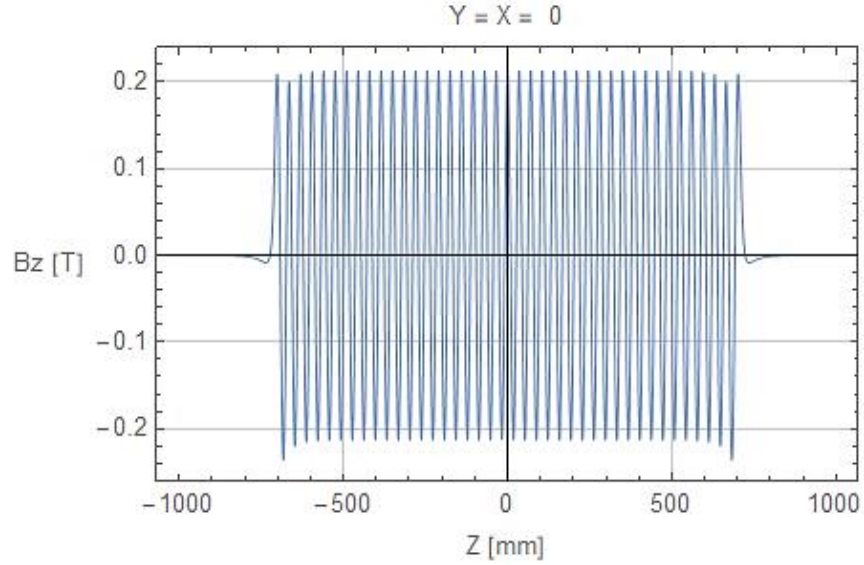
Şekil 4.3 $N_u = 40$ ve $g = 25$ mm olan U35 için undulatörün merkezinde enine magnetik alan grafiği ($B=0.214436$ T, Roll-off field at ± 17 mm)

Şekil 4.2 ve şekil 4.3'te görüldüğü gibi U35 için belirlenen çizelge 4.5'teki geometrik boyutlara göre elde edilen manyetik alan ± 17 mm aralığında oldukça düzgündür ve roll-

off değeri 10^{-3} mertebesinde bulunmuştur. Ayrıca Radia ile hesaplanan manyetik alan çizelge 4.3'te hesaplanan magnetik alana oldukça yakın bir değer elde edilmiştir.



Şekil 4.4 $N_u = 40$ ve $g = 20$ mm olan U35 için undulatörün boyuna magnetik alan grafiği ($B=0.338671$ T)

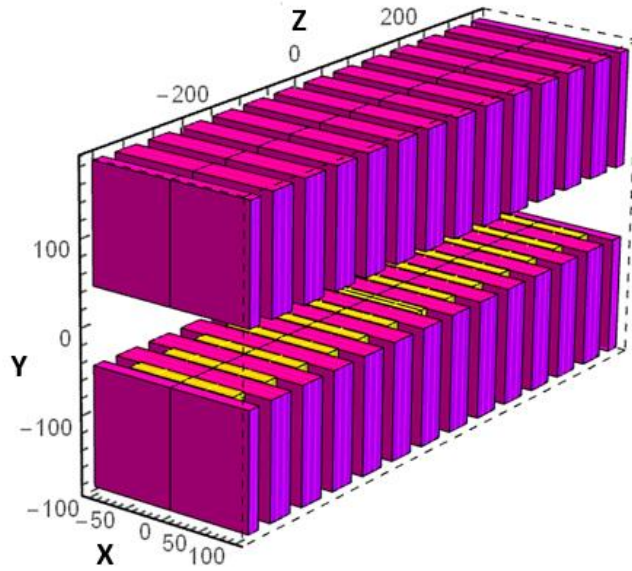


Şekil 4.5 $N_u = 40$ ve $g = 25$ mm olan U35 için undulatörün boyuna magnetik alan grafiği ($B=0.214436$ T)

Şekil 4.4 ve şekil 4.5'te görüldüğü gibi undulatörün gap aralığı arttıkça kenarlardaki magnetik alan artmaktadır ve undulatör boyunca elde edilen magnetik alana göre kenarların çok fazla artması istenilmeyen bir durumdur ve elektronun kararlı bir şekilde

enine salınımını olumsuz etkiler. Bu sebeple kararlılık koşuluna uygun seçilen maksimum gap aralığı azaltılarak undulatrörün kenarlarındaki magnetik alan ile undulatrör boyunca magnetik alan değeri yakın olan gap değeri seçilmiştir. Şekil 4.5'te görüldüğü gibi $g = 25 \text{ mm}$ için undulatrör boyunca oldukça yakın manyetik alan değeri elde edilmiştir.

Periyot sayısı $N_u = 30$ olan U110 için undulatrör boyu 3.30 m'dir ve şekil 4.6'da U110 undulatrörün 6 kutuplu şematik görünümü verilmiştir. Burada U110 için belirlenen çizelge 4.4'teki pik manyetik alanı verecek şekilde 1.27 T sabit magnet özellikte NdFeB magnet malzemesi ve vanadyum kutup malzemesi kullanılmış olup geometrik boyutları çizelge 4.6'da belirlenmiştir.

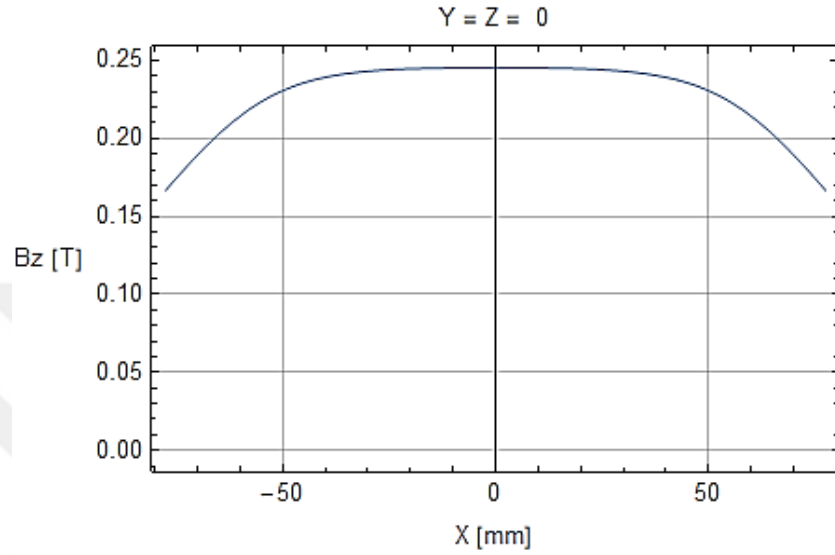


Şekil 4.6 U110 için şematik görünüm (6 kutuplu)

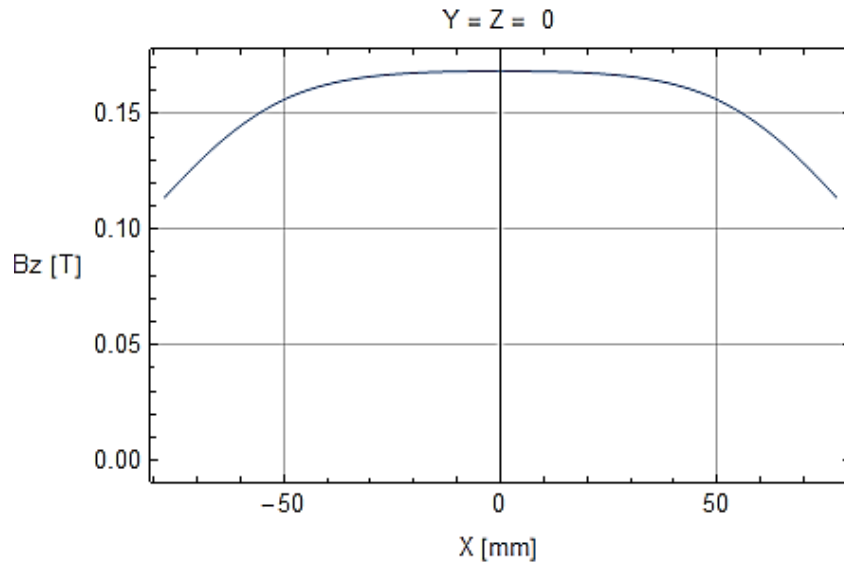
Çizelge 4.6 U110 için belirlenen geometrik boyutlar

U110	NdFeB Magnet	Vanadyum Kutup
Genişlik (X)	210 mm	140 mm
Yükseklik (Y)	140 mm	105 mm
Kalınlık (Z)	34.8 mm	20.2 mm

Periyot sayısı $N_u = 30$ olan U110 için çizelge 4.6'daki geometrik boyutları kullanarak minimum ve maksimum gap aralığında undulatörün merkezinde alan grafikleri sırasıyla şekil 4.7 ve şekil 4.8'de ve boyuna manyetik alan grafikleri sırasıyla şekil 4.9 ve şekil 4.10'da verilmiştir.

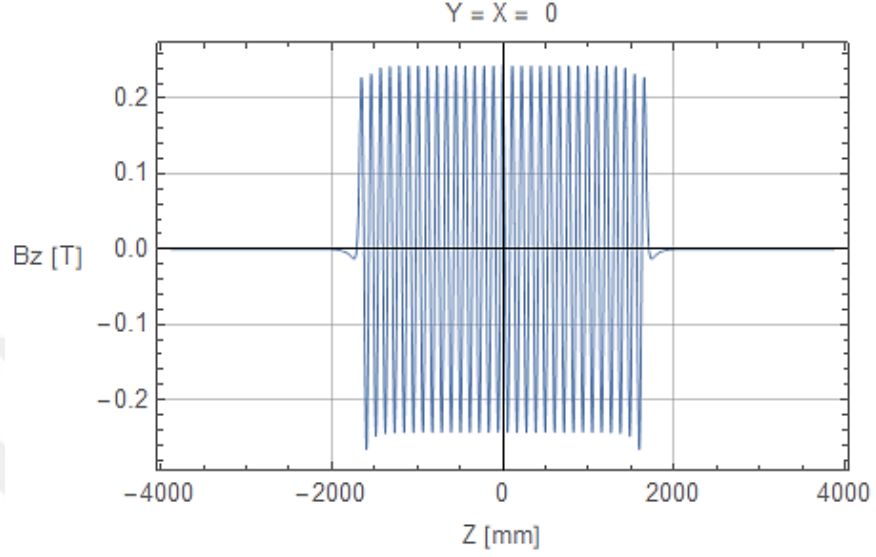


Şekil 4.7 $N_u = 30$ ve $g = 75$ mm olan U110 için undulatörün merkezinde enine magnetik alan grafiği ($B=0.24529$ T, Roll-off field at ± 20 mm)

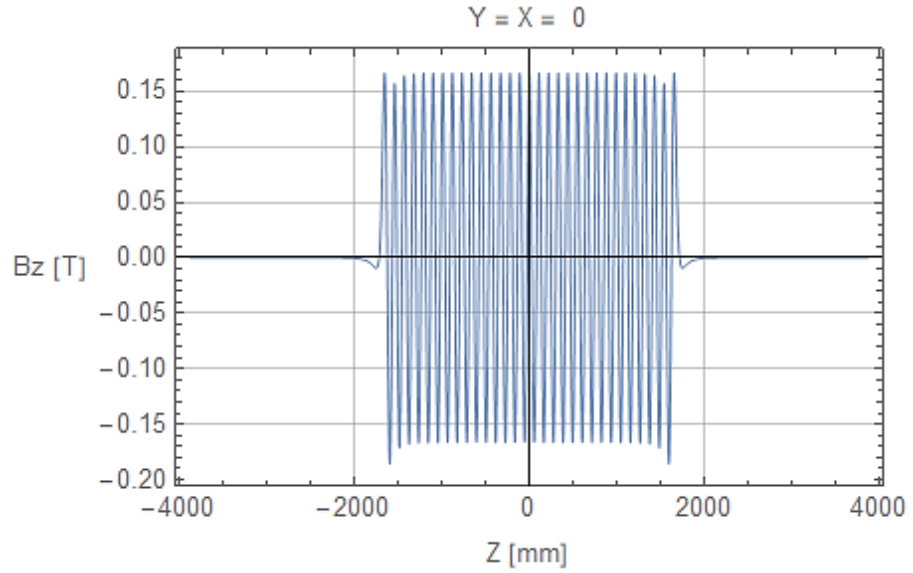


Şekil 4.8 $N_u = 30$ ve $g = 88$ mm olan U110 için undulatörün merkezinde enine magnetik alan grafiği ($B=0.168418$ T, Roll-off field at ± 20 mm)

Şekil 4.7 ve şekil 4.8’de görüldüğü gibi çizelge 4.6’da belirlenen geometrik boyutlara göre elde edilen manyetik alan ± 20 mm aralığında oldukça düzgündür ve roll-off değeri 10^{-3} mertebesinde bulunmuştur.



Şekil 4.9 $N_u = 30$ ve $g = 75$ mm olan U110 için undulatörün boyuna magnetik alan grafiği ($B=0.24529$ T)



Şekil 4.10 $N_u=30$ ve $g=88$ mm olan U110 için undulatörün boyuna magnetik alan grafiği ($B=0.168418$ T)

Şekil 4.9 ve şekil 4.10’da görüldüğü gibi Radia’da hesaplanan magnetik alan ile çizelge 4.4’te hesaplanan magnetik alana oldukça yakındır. Ayrıca şekil 4.10’da görüldüğü gibi seçilen maksimum gap aralığı $g = 88 \text{ mm}$ için undulatör boyunca yakın manyetik alan değeri elde edilmiştir.

4.2.3 Undulatörde elektronun sapma açısı ve undulatör şiddeti

U35 ve U110 için sırasıyla çizelge 4.3 ve çizelge 4.4’te belirlenen pik manyetik alan için minimum ve maksimum undulatör şiddet değerleri çizelge 4.7 ve çizelge 4.8’de verilmiştir.

Çizelge 4.7 U35’te elde edilen pik manyetik alana göre undulatör şiddet değerleri

Pik Manyetik Alan (T)	Undulatör Şiddeti
0.34	1.10
0.21	0.70

Çizelge 4.7’de görüldüğü gibi U35’te $32.58 \mu\text{m}$ dalga boyu için elde edilen 0.34 T pik magnetik alan için undulatör şiddeti 1.1, $3.56 \mu\text{m}$ dalga boyu elde edilen 0.21 T pik magnetik alan için undulatör şiddeti 0.70 bulunmuştur.

Çizelge 4.8 U110’da elde edilen pik manyetik alana göre undulatör şiddet değerleri

Pik Manyetik Alan (T)	Undulatör Şiddeti
0.24	2.43
0.17	1.74

Çizelge 4.8’de görüldüğü gibi U110’da $252.02 \mu\text{m}$ dalga boyu için elde edilen 0.24 T pik magnetik alan için undulatör şiddeti 2.43, $22.58 \mu\text{m}$ dalga boyu elde edilen 0.17 T pik magnetik alan için undulatör şiddeti 1.74 bulunmuştur.

Çizelge 4.3’de U35 için ve çizelge 4.4’de U110 için elde edilen manyetik alanda, 15-40 MeV enerjiye göre belirlenen undulatörde elektronun maksimum sapma açısı çizelge 4.9’da verilmiştir.

Çizelge 4.9 U35 ve U110’da elde edilen manyetik alanda 15-40 MeV enerjiye göre belirlenen elektronun maksimum sapma açısı

Undulatör	Elektron Sapma Açısı ($\times 10^{-8}$ rad)
U35	4 - 0.9
U110	8.3 - 2.2

Çizelge 4.9’da görüldüğü gibi U35’te 40 MeV enerjide $3\mu\text{m}$ dalga boyu için elektronun maksimum sapma açısı 0.9×10^{-8} rad, U110’da 15 MeV enerjide $252 \mu\text{m}$ dalga boyu için elektronun maksimum sapma açısı 8.3×10^{-8} rad olarak bulunmuştur.

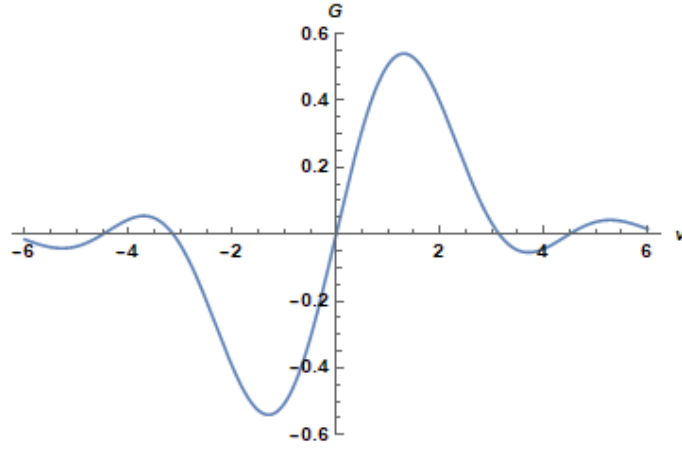
4.2.4 Undulatör ışınımın spektral band genişliği ve enerji yayılımı

Periyot sayısı $N_u = 40$ olan U35 ve $N_u = 30$ olan U110 ‘da elde edilen ışınımın spektral band genişliği ve kazanç azalımını ihmal edebilmek için belirlenen göreceli rms demet enerji yayılımı değerleri çizelge 4.10’da verilmiştir.

Çizelge 4.10 U35 ve U110’da elde edilen ışınımın spektral band genişliği, göreceli rms demet enerji yayılımı

Undulatör	Nu	Band Genişliği ($\Delta\lambda/\lambda$)	Göreceli Rms Demet Enerji Yayılımı ($\sigma\gamma/\gamma$)
U35	40	0.0250	0.00103
U110	30	0.0333	0.00138

SEL’in kazanç eğrisi asimetriktir ve boyutsuz olan enerji bozunum (detuning) parametresi $\nu = 2\pi N_u(\Delta\gamma/\gamma)$ olmak üzere $G = -\frac{d}{d(\nu)}\left(\frac{\sin(\nu)}{\nu}\right)^2$ kazanç eğrisi şekil 4.11’de gösterildiği gibidir. Burada görüldüğü gibi maksimum kazanç için, bozunum parametresi pozitif kazanç eğrisinin pik değerini veren $\nu = 1.3$ değerine sahip olunmalıdır ve sisteme bu bozunum değerini veren elektronlar enjekte edilmelidir (Wiedemann 2007).



Şekil 4.11 SEL Kazanç eğrisi

Bu kazanç eğrisi aynı zamanda Madey teoremidir ve bu teoreme göre spektral band genişliğinin artmasına neden olan herhangi bir etkinin, küçük sinyal kazancında bir azalmaya neden olur. Dolayısıyla daha önceden bahsettiğimiz gibi undulatörlerin periyot sayısının azalmasıyla doğal band genişliği arttığından kazancı düşürmektedir.

Çizelge 4.11’de periyot sayısı $N_u = 40$ olan U35 ve $N_u = 30$ olan U110 için belirlenen undulatör şiddeti ve 3-252 μm SEL dalga boyuna göre rezonans enerji değeri verilmiştir. Ayrıca şekil 4.11’deki maksimum kazanç için gereken enerji yayılımı ve verilmesi gereken enerji değeri verilmiştir.

Çizelge 4.11 $N_u = 40$ olan U35 ve $N_u = 30$ olan U110 için minimum ve maksimum SEL dalga boyuna göre rezonans enerji ve maksimum kazanç için gereken enerji

	$\lambda_{\text{sel}} [\mu\text{m}]$	γr	$\Delta\gamma/\gamma$	γ
U35 ($N_u=40$)	3	78.28	0.0052	78.69
	32	29.35		29.51
U110 ($N_u=30$)	22	78.28	0.0069	78.82
	252	29.35		29.56

Çizelge 4.11'deki maksimum kazanç için verilmesi gereken enerji yayılımı denklem 2.32'deki koşula uygun olup rezonans enerjiden biraz fazla olması gerektiği görünmektedir.

4.3 Optik Kavite ve Gauss Demeti parametreleri

U35 ve U110 için seçilen optik kavitenin boyu, çizelge 4.1'deki paketçik tekrarlanma oranını kullanarak denklem 2.46'dan hesaplanmıştır. Optik kavite çeşidi olarak kavite içi kaybının diğer çeşitlere göre az olması ve enine mod olan gauss demeti oluşturmak için kararlı kavite özelliğine sahip olan yakın konsantrik ($R > L_c/2$) optik kavite seçilmiştir. Optik kavitedeki aynaların eğrilik yarıçapları eşit alarak simetrik bir kavite seçilmiştir.

Seçilen kararlı kavite için denklem 2.43'deki kararlılık koşuluna uygun olacak şekilde aynaların eğrilik yarıçapı belirlenmiştir. Optik aynaların eğrilik yarıçapına bağlı olarak Rayleigh uzunluğu ve bel boyutu değişmektedir. Maksimum doldurma faktörü için optimum Rayleigh uzunluğu denklem 2.55'ten belirlenmiştir. Rayleigh uzunluğu optimum değerden büyük olduğunda optik demet boyutu elektron demetine göre daha da büyüdüğünden doldurma faktörü azalır ve kazanç düşer, aynı zamanda aynaların eğrilik yarıçapı arttığından Gauss demetin bel boyutu da azalır. Undulatörün çıkışındaki spot boyutu seçtiğimiz ışın için belirlenen gap aralığını aştığı durumlarda, kazancı çok düşürmeden ve kararlılığa da uygun olarak Rayleigh uzunluğu artırılabilir.

Bu husus için “K. Saeki ve diğerleri, $g^2 \leq 0.95$ kararlılık parametresinde neredeyse optimal bir doldurma faktörü verdiğini” göstermiştir (Aksoy 2015). Bu hususları dikkate aldığımızda U35 ve U110'da elde edilen 3-252 μm dalga boylu ışınım için undulatörün çıkışındaki spot boyutu gap aralığını aşmadığından Rayleigh uzunluğu için denklem 2.55'teki optimum değeri alınmıştır.

Belirlenen kavite boyuna bağlı olarak optimum Rayleigh uzunluğu veren aynaların eğrilik yarıçapını bulmak için denklem 2.54 kullanılmıştır ve denklem 2.43'deki

kararlılık koşuluna uygunluğu kontrol edilmiştir. Bunun yanı sıra aynaların kaplama malzemesi, yöntemi ve yansımaya özelliği belirtilmiştir. Ayrıca malzemenin yansımaya özelliğini artırmak ve malzemeyi korumak için seçilen koruyucu tabaka belirlenmiş ve koruyucu tabakanın kalınlığı denklem 2.56'dan hesaplanmıştır.

Seçilen simetrik kavite içinde oluşan Gauss demetin minimum bel konumu optik kavitenin merkezinde olup minimum bel boyutu denklem 2.49'dan, merkezden ve aynalara kadar optik eksenin ilerleme yönüne göre değişen bel boyutu denklem 2.52'den belirlenmiştir. Mathematica'da U35 ve U100'da elde edilen ışınım dalga boyu için Gauss demetin optik eksenin ilerleme yönüne göre bel boyu değişimi çizilmiştir. Son olarak optik kavitede vakum ihtiyacı ve bileşenleri belirtilmiştir.

4.3.1 Optik kavite boyu ve aynaların eğrilik yarıçapı

Zamansal eşfazlı olacak şekilde optik kavite boyu 11.53 m olarak belirlenmiştir. U35 ve U110 için optimum Rayleigh uzunluğuna uygun seçilen Rayleigh uzunluğu ve aynaların eğrilik yarıçapı çizelge 4.12'de verilmiştir.

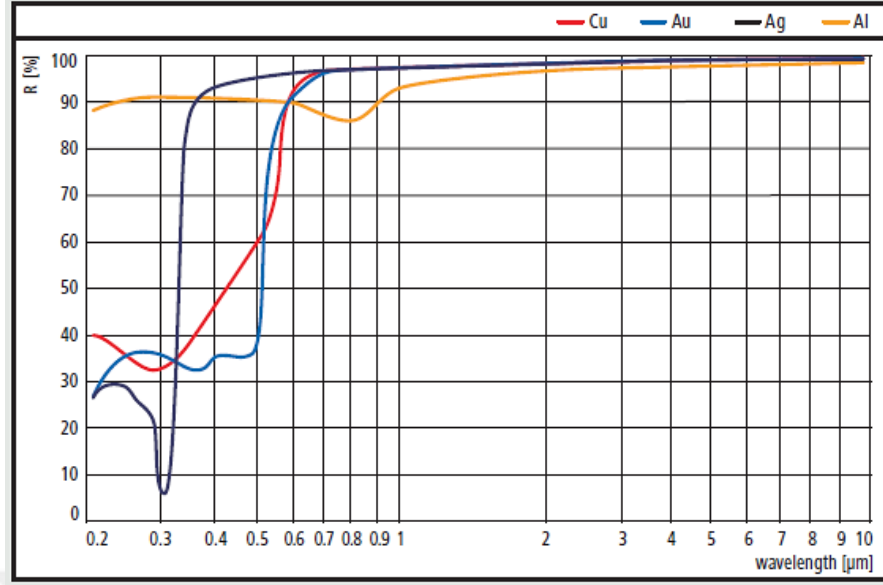
Çizelge 4.12 U35 ve U110 için belirlenen optimum Rayleigh uzunluğu, kararlılık parametresi ve aynaların eğrilik yarıçap değerleri

	N_u	Z_R (m)	g^2	R (m)
U35	40	0.35	0.99	5.79
U110	30	0.83	0.92	5.88

Çizelge 4.12'de görüldüğü gibi seçilen ayna parametreleri kararlılık koşuluna uygun olup kararlı kavite yapısını bozmamaktadır.

4.3.2 Ayna kaplama ve yansımaya

U35 ve U110'da kullanılan optik kavite için şekil 4.12'de görüldüğü gibi 3-252 μm kızılötesi bölgesinde ışınımı yansıtma için geniş band spektrumlu olan ve yansımaya özelliği %90-%99 olan metaller ile aynalar kaplanmalıdır.



Şekil 4.12 Bazı metallerin dalga boyuna göre yansıtıcılık yüzdesi (Anonymous 2019b)

Ayrıca UV spektral band aralığında ($\lambda < 0.4 \mu\text{m}$) en iyi yansıma Alüminyum (Al) metali, görünür bölge aralığında ($0.4-0.7 \mu\text{m}$) en iyi yansıma Gümüş (Ag) ve kızılötesi (IR) bölgesinde ($\lambda > 0.7\mu\text{m}$) ise Altın (Au), Gümüş (Ag) ve Bakır (Cu) en iyi yansıma özelliğini gösterir.

IR bölgesinde altın, gümüş ve bakır kullanılabilmesine rağmen bunların içinde altın diğerlerine göre kimyasal olarak daha karardır ve korucu olmadan da kullanılabilir. Altının dezavantajı yumuşak olup kolay çizilebilmesi ve temizlemenin zor olmasıdır. Bu sorun koruyucu tabaka ile giderilebilir.

Saçılma, gelen dalga boyunun azalmasıyla büyük ölçüde artar ve IR için çok büyük problem olmamasına rağmen püskürtme yöntemi kaplama ile buharlaşmaya göre daha az saçılma kaybı elde edilebilir.

Koruyucu tabaka olarak dayanıklı ve dar spektrumlu olan dielektrik kullanılırsa metalin hem korunması hem de metalin yansımalarını girişimle artırması ya da değişmeden kalması sağlanabilir. Bu metal ve dielektrikten oluşan tüm tabaka sistemine metal-dielektrik kaplama denir.

Metalin yansımısını artırmak için yüksek indisli dielektrik tabaka kullanılır. U35 ve U110 optik aynalardaki metalleri korumak ve yansımısını artırmak için yüksek indisli ZrO_2 ($n = 2.1$) kullanılabilir. Kullanılan bu kaplama için 15-40 MeV enerjide elde edilen minimum ve maksimum SEL dalga boyuna göre koruyucu dielektriğin geometrik kalınlığı çizelge 4.13'te verilmiştir.

Çizelge 4.13 U35 ve U110 optik ayna metal kaplamanın yansımaya artışı için minimum ve maksimum SEL dalga boyu için gereken ZrO_2 ($n=2.1$) koruyucu dielektrik malzemenin geometrik kalınlığı

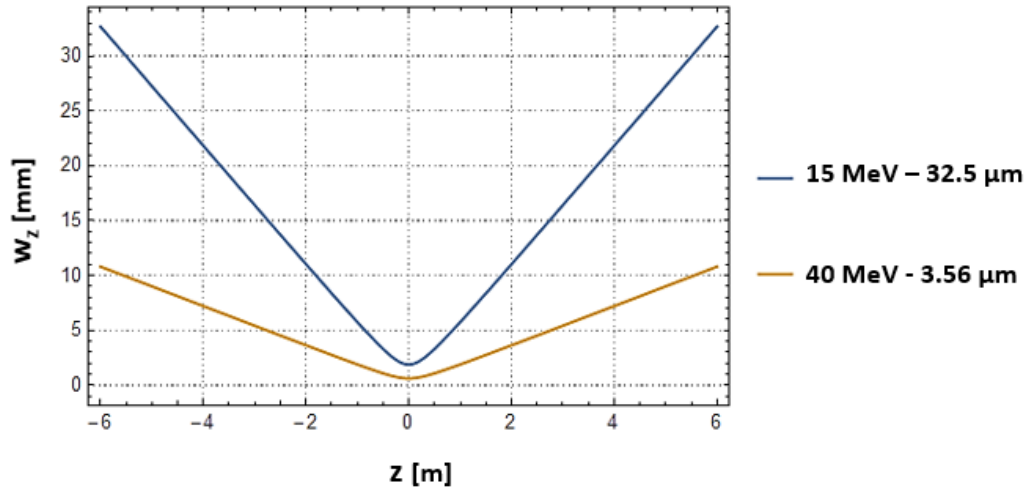
U35		U110	
$\lambda_{sel}(\mu m)$	d (μm)	$\lambda_{sel}(\mu m)$	d (μm)
3.56	0.43	252.2	30.29
32.50	3.91	22.58	2.71

Ayna kaplama malzemesi olarak IR bölgesinde %90-99 aralığında yansıtan altın malzemesini korumak ve yansımaya özelliğini artırmak için yüksek indisli ($n = 2.1$) olan ZrO_2 dielektrik koruyucu malzemenin geometrik kalınlığı, 3-250 μm dalga boylu ışınım için, 0.43-30.29 μm bulunmuştur.

Buradaki tek dielektrik katman kullanıldığından dielektriğin dar spektrumu sebebiyle, metalin sahip olduğu geniş spektrumunun çoğu bölümde yansımayı azaltır. Bu sorun, metallere üzerinde çok katmanlı dielektrik kaplama oluşturularak metalin band aralığı yeniden artırılarak çözülebilir. Bunun yanı sıra, altın malzemesi korunmadan da kullanılabilmesine rağmen eğer koruma istenilirse iki dielektrik katman kullanıldığında metalin yansımaya özelliği değişmez ve dolayısıyla spektrum band genişliği de değişmez kalır.

4.3.3 Optik kavite içerisindeki Gauss demetin bel boyutu

Belirlenen optik kavite boyu ve çizelge 4.12'deki U35 için yarıçap parametreleri kullanarak 3-32 μm dalga boylarındaki Gauss demetin optik eksenin ilerleme yönüne göre $z = \pm 5.77$ m aralığındaki bel boyu değişimi şekil 4.13'te verilmiştir.



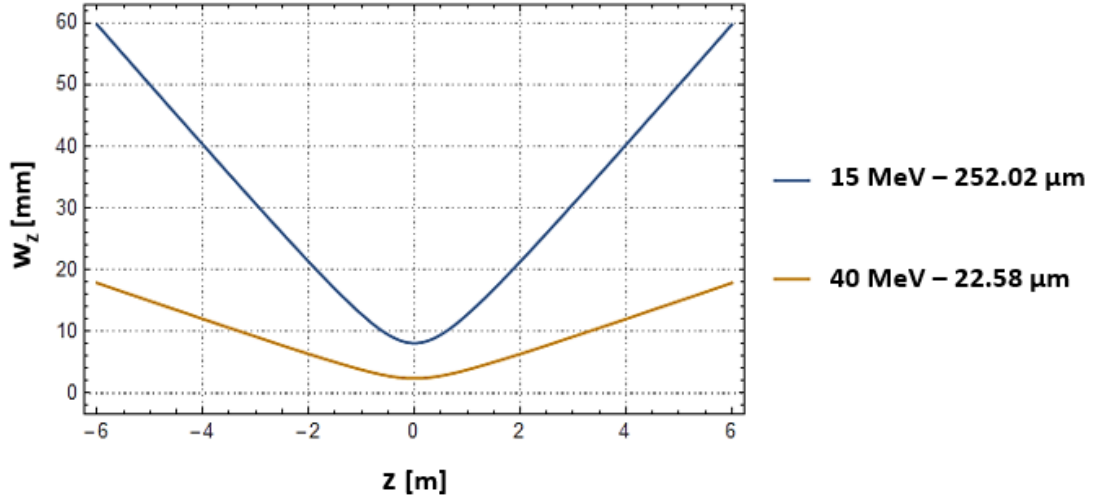
Şekil 4.13 $N_u = 40$ olan U35'te 3-32 μm dalga boyu için Gauss Demetin optik eksenin ilerleme yönüne göre bel boyu değişimi

Periyot sayısı $N_u = 40$ olan U35'te 3-32 μm dalga boyu için şekil 4.13'te görüldüğü gibi Gauss demetin minimum bel boyutu, undulatör çıkışındaki bel boyutu, aynalardaki bel boyutu değerleri çizelge 4.14'te verilmiştir.

Çizelge 4.14 $N_u = 40$ olan U35'te 3-32 μm dalga boyu için Gauss demetin minimum bel boyutu, undulatör çıkışındaki bel boyutu, aynalardaki bel boyutu değeri

$\lambda_{\text{SEL}} (\mu\text{m})$	w_0	$w_z (z = 0.7 \text{ m})$	$w_z (z = 5.77 \text{ m})$
3.56	0.63 mm	1.41 mm	10.39 mm
32.5	1.90 mm	4.25 mm	31.40 mm

U35 undulatör için 3.56 μm dalga boyu ışınım elde etmek için 25 mm gap aralığı, 32.50 μm dalga boyu ışınım elde etmek için 20 mm gap aralığı gerekmektedir ve şekil 4.13'te görüldüğü gibi undulatör çıkışındaki ($z = 0.7 \text{ m}$) bel boyutu sırasıyla 1.41 mm ve 4.25 mm, spot boyutu sırasıyla 2.82 mm ve 8.5 mm olup seçilen gap değerlerine uygunluk göstermektedir. U110 için çizelge 4.12'deki yarıçap parametrelerini kullanarak 22-252 μm dalga boylarındaki Gauss demetin optik eksenin ilerleme yönüne göre bel boyu değişimi şekil 4.14'te verilmiştir.



Şekil 4.14 $N_u = 30$ olan U110'da 22-252 μm dalga boyu için Gauss Demetin optik eksenin ilerleme yönüne göre bel boyu değişimi

Periyot sayısı $N_u = 30$ olan U110'da 22-252 μm dalga boyu için şekil 4.14'te görüldüğü gibi Gauss demetin minimum bel boyutu, undulator çıkışındaki bel boyutu, aynalardaki bel boyutu çizelge 4.15'te verilmiştir.

Çizelge 4.15 $N_u = 30$ olan U110'da 22-252 μm dalga boyu için Gauss demetin minimum bel boyutu, undulator çıkışındaki bel boyutu, aynalardaki bel boyutu değeri

$\lambda_{\text{SEL}} (\mu\text{m})$	w_0	$w_z (z = 1.65 \text{ m})$	$w_z (z = 5.77 \text{ m})$
22.58	2.44 mm	5.44 mm	17.19 mm
252.02	8.14 mm	18.2 mm	57.43 mm

U110 undulator için 22.58 μm dalga boyu ışınım elde etmek için 88 mm gap aralığı, 252.02 μm dalga boyu ışınım elde etmek için 75 mm gap aralığı gerekmektedir ve Şekil 4.14'te görüldüğü gibi undulator çıkışındaki ($z = 1.65 \text{ m}$) bel boyutu sırasıyla 5.44 mm ve 18.2 mm, spot boyutu sırasıyla 11 mm ve 36 mm olup seçilen gap değerlere uygunluk göstermektedir.

4.3.4 Optik kavitede vakum ihtiyacı ve bileşenleri

Vakum atmosfer basıncın altındaki basınçlarda ve dış atmosferden daha az parçacık, atom veya molekül içeren gazla dolmuş bir hacimdir. Bir hacimdeki sürekli hareket halinde olan parçacıklar dış kabın duvarlarına çarparak yüzeye “basınç” denilen bir kuvvet uygular. SI birim sisteminde basınç birimi aşağıdaki gibidir. (Marguardt 1999).

$$1 Pa = 9.87 \times 10^{-6} atm \quad (2.86)$$

Belirli bir hacimdeki parçacık sayısına ya da parçacık sayısına bağlı olarak çeşitli basınç değerlerine göre farklı vakum seviyeleri ya da sınıfları vardır. İleri yüksek vakum (Ultra High Vacuum-UHV) kimyasal ve biyolojik teknikler, atomik-fizik araştırmaları, yüksek enerjili temel parçacık fiziği ve hızlandırıcıya dayalı ışınım kaynaklarının geliştirilmesine olanak sağlamıştır. Basınç değeri 10^{-10} ile $10^{-7} Pa$ arasındadır. UHV pompaları turbo-moleküler ($10^0 - 10^{-11}$ mbar), titanyum ($10^{-3} - 10^{-11}$ mbar), iyon püskürtme ($10^{-6} - 10^{-13}$ mbar) ve buharlaşmaz-alıcı-pompa (non-evaporable-getter) & kriyojenik pompadır ($10^{-6} - 10^{-16}$ mbar).

Vakumlu kaplar çok yavaş aşınan ve düşük gaz çıkış oranına sahip alüminyum, (oksijensiz) bakır, paslanmaz çelik, titanyum gibi malzemelerden imal edilmektedir ve zamanla yüzeye yapışan farklı elementlerle kirlenen kaplar fiziksel, kimyasal veya ısı işlemlerle dikkatlice malzemeye zarar vermeden temizlenir.

4.4 O-SEL'in Ana Parametreleri

U35 ve U110 için çizelge 4.1'deki demet enerjisi ve sırasıyla çizelge 4.7 ve çizelge 4.8'deki belirlenen minimum ve maksimum undulatör şiddet aralığına göre denklem 2.30'dan SEL'in dalga boyu, denklem 2.57'den SEL'in enerjisi belirlenmiştir. Mathematica'da undulatör şiddeti ve enerjiye göre SEL'in dalga boyu ve enerji grafiği çizilmiştir.

U35 ve U110'da elde edilen 3-252 μm SEL dalga boyuna göre kırınım limitli ışınım demetin yarıçapı denklem 2.60'dan, diverjansı denklem 2.59'dan ve emittansı denklem 2.61'den hesaplanmıştır. Uzaysal koherentlik (eş fazlılık) sağlamak ve kırınım limitini sağlayan ışınım üretmek için, elektronun emittans değeri denklem 2.52'deki kırınım sınır koşulunu sağlaması gerekmektedir ve elde ettiğimiz sonuç bu koşula uygun olduğu gösterilmiştir.

U35 ve U110 için çizelge 4.2'deki belirlenen pik demet gücü ve periyot sayısına göre denklem 2.35'den kavite içi üretilen gücü belirlenip SEL dalga boyuna göre denklem 2.60'dan foton akısı belirlenmiştir. Denklem 2.52'deki kırınım sınır koşulu sağlanmasından dolayı parlaklığa kırınımın etki ettiği için belirlenen foton akısına, çizelge 4.10'daki spektral band genişliğine ve SEL dalga boyuna göre denklem 2.58'deki kırınımın baskın olduğu maksimum spektral pik parlaklık denklem 2.65'ten belirlenmiştir.

Belirlenen ışınımın ve çizelge 4.2'deki elektron demetinin yarıçapı ve diverjansını kullanarak foton demetin dikey ve yatay yarıçapı sırasıyla denklem 2.68 ve denklem 2.70'den dikey ve yatay diverjansı sırasıyla denklem 2.67 ve denklem 2.69'dan hesaplanmıştır. Belirlenen foton akısı, foton yarıçapı ve diverjansını kullanarak denklem 2.66'dan etkin spektral pik parlaklık hesaplanmıştır. Mathematica'da 15-40 MeV demet enerjisi için SEL dalga boyuna göre değişen pik parlaklık değerleri gösterilmiştir. Aynı işlemler denklem 2.64'teki foton akısı hesabında pik güç yerine çizelge 4.1'deki ortalama akım ve enerjiden hesaplanan ortalama güç alınarak ortalama parlaklık değerleri belirlenip çizilmiştir.

Periyot sayısı $N_u = 40$ olan U35 ve $N_u = 30$ olan U110 için sırasıyla çizelge 4.14 ve çizelge 4.15'deki minimum bel boyutu ve çizelge 4.2'deki elektronun dikey ve yatay yarıçapını kullanarak denklem 2.71 ve denklem 2.72'den foton demetinin alanı hesaplanmıştır. Belirlenen foton demet alanına, çizelge 4.7 ve çizelge 4.8'deki undulör şiddetine, çizelge 4.1'deki demet enerjisine, çizelge 4.2'deki pik akımına, periyot sayısına, 3-250 μm SEL dalga boyuna göre denklem 2.74'ten tek geçiş kazancı

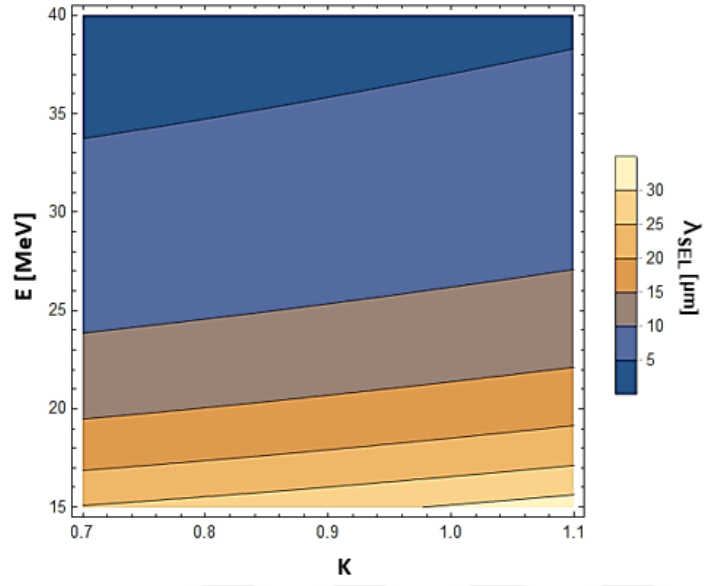
hesaplanmıştır. Mathematica'da undulatör şiddeti ve enerjiye göre yüzde tek geçiş kazanç grafiği çizilmiştir.

Periyot sayısı $N_u = 40$ olan U35 ve $N_u = 30$ olan U110 için çizelge 4.10'daki göreceli rms demet enerji yayılımına göre düzeltme faktörlerinden kazanç zayıflama faktörü denklem 2.76'dan hesaplanmıştır. Çizelge 4.2'deki paket boyuna göre slippage faktörü denklem 2.77'den; çizelge 4.1'deki normalize emittans ve çizelge 4.7, çizelge 4.8'deki undulatör şiddetine göre dikey ve yatay sonlu emittans faktörleri sırasıyla denklem 2.78 ve denklem 2.79'dan hesaplanmıştır. Belirlenen tek geçiş kazancı ve düzeltme faktörleri kullanarak denklem 2.75'ten düzeltilmiş tek geçiş kazanç parametresi hesaplanmış olup bu değer denklem 2.80'de maksimum tek geçiş kazanç değerini belirlemek için kullanılmıştır. Belirlenen maksimum tek geçiş kazancına göre denklem 2.85'ten optimum açıklık kesri belirlenmiştir.

Belirlenen optimum açıklık kesri ve kavite içi kayıp kesri ile çizelge 4.2'deki belirlenen pik demet gücü kullanarak denklem 2.84'ten pik SEL gücü hesaplanmıştır. Mathematica'da undulatör şiddeti ve enerjiye göre SEL pik güç grafiği çizilmiştir. Pik demet gücü yerine çizelge 4.1'deki ortalama akım ve enerjiden hesaplanan ortalama güç değeri alınarak aynı yöntemle ortalama SEL gücü hesaplanmıştır.

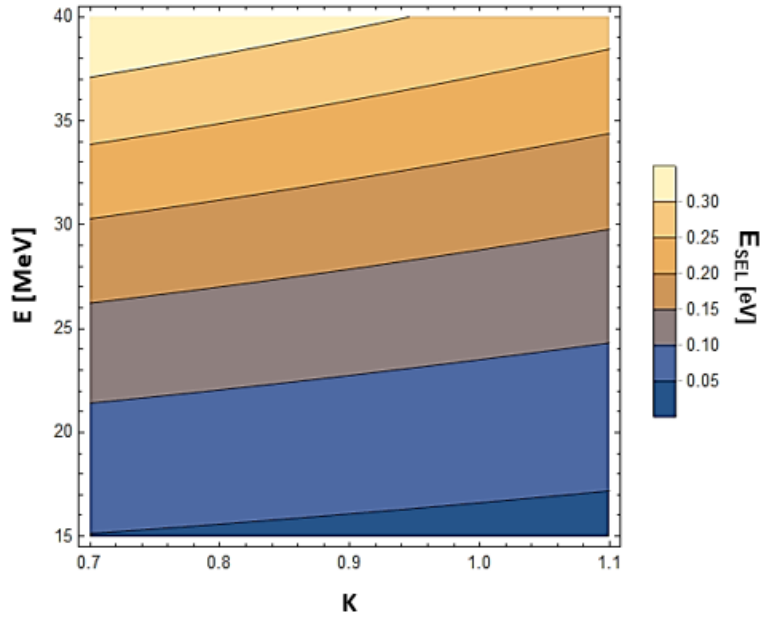
4.4.1 OSEL'in dalga boyu ve enerjisi

U35 için çizelge 4.7'de belirlenen minimum ve maksimum undulatör şiddet parametresine ve 15–40 MeV demet enerjisi için SEL'in dalga boyu ve enerjisi sırasıyla şekil 4.15 ve şekil 4.16'da gösterilmiştir.



Şekil 4.15 U35 için undulator şiddeti ve demet enerjisine göre SEL dalga boyu

Şekil 4.15'te görüldüğü gibi U35 için belirlenen çizelge 4.7'deki minimum undulator şiddeti $K = 0.7$ ve yüksek enerjide 40 MeV için $3.56 \mu\text{m}$ dalga boylu ışınım, maksimum undulator şiddeti $K = 1.1$ ve düşük enerjide 15 MeV için $32.50 \mu\text{m}$ dalga boylu ışınım elde edilmektedir. Çizelge 4.16'ya baktığımızda U35 undulatörden elde ettiğimiz ışınımın dalga boyları sırasıyla yakın ve orta IR bölgesinde olduğunu görmekteyiz.



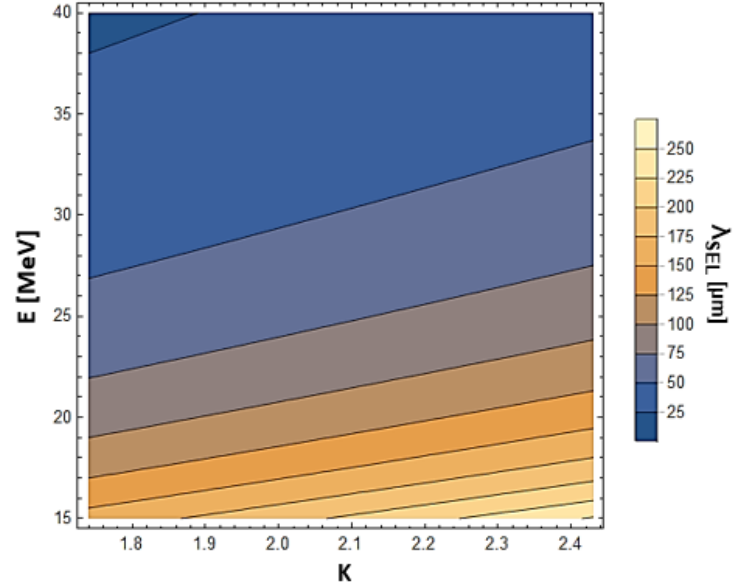
Şekil 4.16 U35 için undulator şiddeti ve demet enerjisine göre SEL enerjisi

Şekil 4.16’da görüldüğü gibi U35 için belirlenen çizelge 4.7’deki minimum undulatör şiddeti $K = 0.7$ ve yüksek enerjide 40 MeV için 0.35 eV enerjide ışınım, maksimum undulatör şiddeti $K = 1.1$ ve düşük enerjide 15 MeV için 0.038 eV enerjide ışınım elde edilmektedir.

Çizelge 4.16 Elektromanyetik Spektrumun Infrared bölgesi için frekans, dalga boyu, enerji aralıkları (Anonymous 2019c)

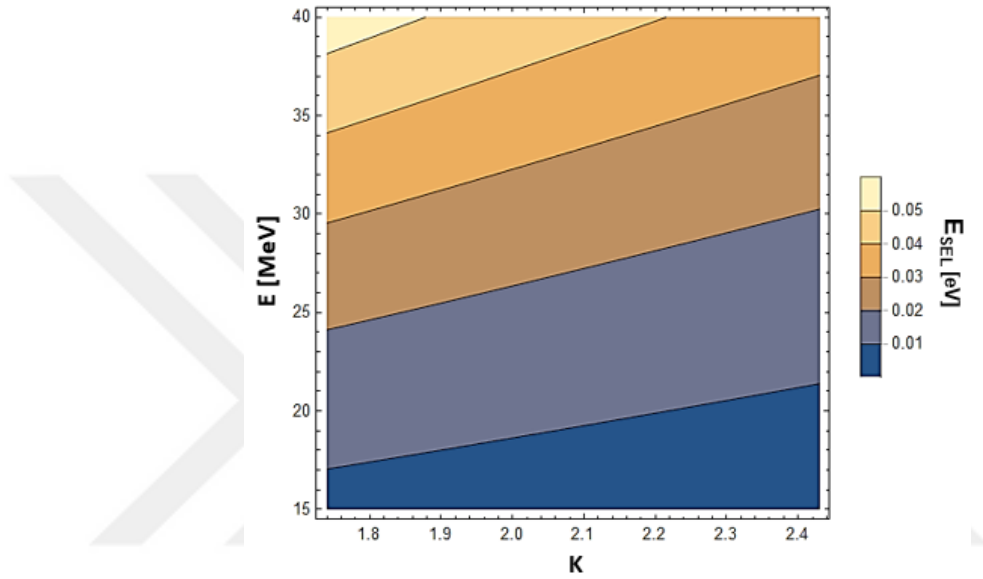
Bölge	Frekans	Dalga Boyu	Enerji
Yakın Kızılötesi (NIR)	300 THz – 30 THz	1 μm – 10 μm	1.24 eV-124 meV
Orta Kızılötesi (MIR)	30 THz – 3 THz	10 μm – 100 μm	124 meV-12.4 meV
Uzak Kızılötesi (FIR)	3 THz – 300 GHz	100 μm – 1 mm	12.4 meV-1.24 meV

U110 için çizelge 4.8’de belirlenen minimum ve maksimum undulatör şiddet parametresine ve 15–40 MeV demet enerjisi için SEL’in dalga boyu ve enerjisi sırasıyla şekil 4.17 ve şekil 4.18’de gösterilmiştir.



Şekil 4.17 U110 için undulatör şiddeti ve demet enerjisine göre SEL dalga boyu

Şekil 4.17’de görüldüğü gibi U110 için belirlenen çizelge 4.8’deki minimum undulatör şiddeti $K = 1.74$ ve yüksek enerjide 40 MeV için 22.58 μm dalga boylu ışınım, maksimum undulatör şiddeti $K = 2.43$ ve düşük enerjide 15 MeV için 252.02 μm dalga boylu ışınım elde edilmektedir. Çizelge 4.16’ya baktığımızda U110 undulatörden elde ettiğimiz ışınımın dalga boyları sırasıyla orta ve uzak IR bölgesinde olduğunu görmekteyiz.



Şekil 4.18 U110 için undulatör şiddeti ve demet enerjisine göre SEL enerjisi

Şekil 4.18’de görüldüğü gibi U110 için belirlenen çizelge 4.8’deki minimum undulatör şiddeti $K = 1.74$ ve yüksek enerjide 40 MeV için 0.05 eV enerjide ışınım ışınım, maksimum undulatör şiddeti $K = 2.43$ ve düşük enerjide 15 MeV için 0.005 eV enerjide ışınım elde edilmektedir.

4.4.2 Kırınım limitli ışınım demetin emittansı, diverjansı ve yarıçapı

Periyot sayısı $N_u = 40$ olan U35 ve $N_u = 30$ olan U110 için sırasıyla çizelge 4.7 ve çizelge 4.8’deki minimum ve maksimum undulatör şiddetinde 15-40 MeV enerjili elektronla elde edilen SEL dalga boyuna göre kırınım limitli ışınım demetin yarıçap ve diverjans değerleri çizelge 4.17’de verilmiştir.

Çizelge 4.17 U35 ve U110 için 15-40 MeV enerjili elektronla elde edilen minimum ve maksimum SEL dalga boyuna göre kırınım limitli ışınım demetin yarıçap ve diverjans değerleri

U35				U110			
λ_{sel} [μm]	σ_r' (mrad)	σ_r (mm)	ϵ_r (mm.mrad)	λ_{sel} [μm]	σ_r' (mrad)	σ_r (mm)	ϵ_r (mm.mrad)
3.56	1.59	0.36	0.28	252.02	8.74	4.59	20.06
32.50	4.82	1.07	2.59	22.58	2.62	1.37	1.80

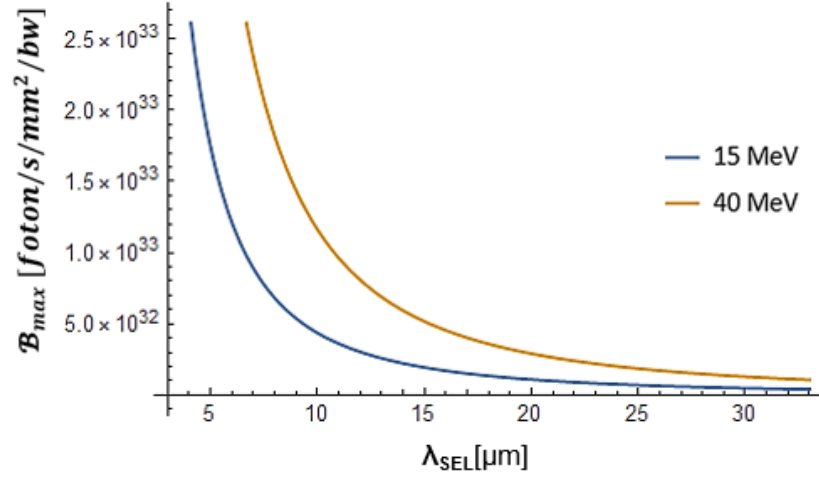
U35 ve U110 için çizelge 4.2'deki 15-40 MeV demet enerjisine göre belirlenen elektronun dikey ve yatay emittans değerleri, çizelge 4.17'de görüldüğü gibi kırınım limitli ışınım demetinin emittans değerinden küçük olup denklem 2.58'deki koşulunun sağlamaktadır. Bu durumda uzaysal eşfzlilik sağlanmış ve kırınım limitini sağlayan ışınım üretilip parlaklığa kırınım etki etmektedir.

4.4.3 OSEL'in pik ve ortalama parlaklığı

Parlaklığa kırınım etki ettiğinden kırınımın baskın olduğu elektron demet emittansının ihmal edilebildiği koşulda U35 ve U110 için 15-40 MeV demet enerjisine göre maksimum spektral pik parlaklık sırasıyla şekil 4.19 ve şekil 4.20'de verilmiştir. U35 ve U110 için pik foton akısı çizelge 4.18'de verilmiştir.

Çizelge 4.18 Periyot sayısı $N_u = 40$ olan U35 ve $N_u = 30$ olan U110 için pik foton akısı

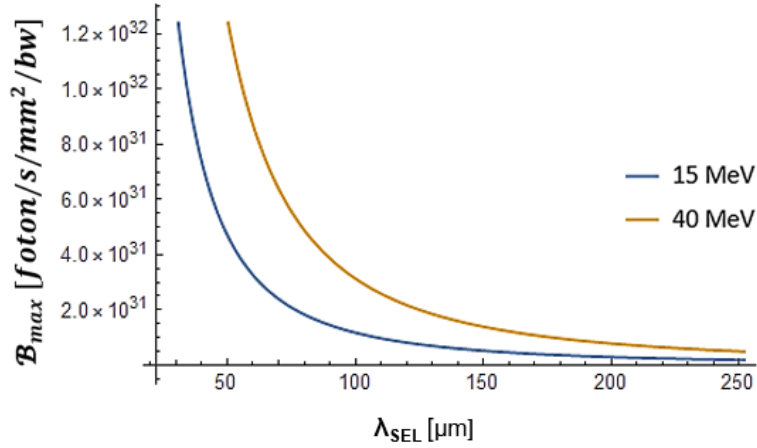
	E (MeV)	N_{ph} (foton/s)
U35 ($N_u = 40$)	15	2.7×10^{26}
	40	7.6×10^{26}
U110 ($N_u = 30$)	15	9.7×10^{26}
	40	2.6×10^{27}



Şekil 4.19 U35 için 15-40 MeV ve SEL dalga boyuna göre maksimum spektral pik parlaklık

Şekil 4.19’da görüldüğü gibi U35’te 40 MeV demet enerjisinde 3 μm dalga boylu ışınım için maksimum spektral pik parlaklık 10^{33} mertebesinde, 15 MeV demet enerjisinde 32.50 μm dalga boylu ışınım için 10^{31} mertebesinde elde edilmektedir.

Şekil 4.20’de görüldüğü gibi U110’da 15 MeV demet enerjisinde 252 μm dalga boylu ışınım için maksimum spektral pik parlaklık 10^{30} mertebesinde, 22.58 μm dalga boylu ışınım için 10^{32} mertebesinde elde edilmektedir.



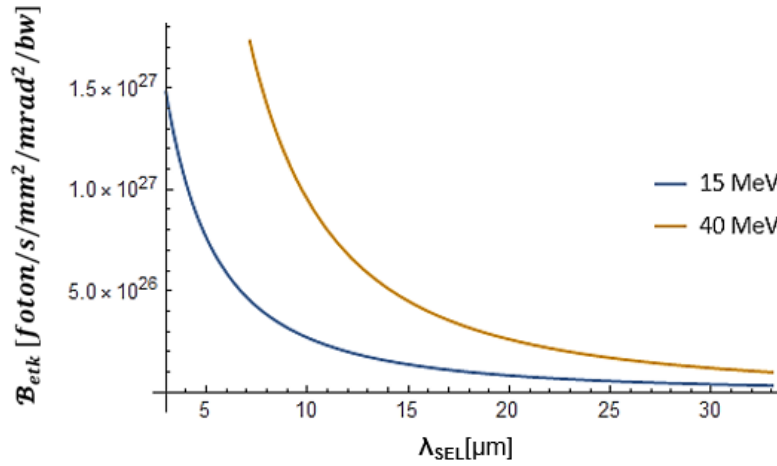
Şekil 4.20 U110 için 15-40 MeV ve SEL dalga boyuna göre maksimum spektral pik parlaklık

Çizelge 4.17'deki ışınımın yarıçapı ve diverjansı, çizelge 4.2'deki elektron demetin diverjans ve yarıçapına göre 3 μm ve 252 μm dalga boyu için yatay doğrultuda toplam foton demetin dikey-yatay diverjans ve yarıçap değerleri çizelge 4.19'da verilmiştir. Burada hesaplanan toplam foton demetin yarıçap değerleri elektron yol üzerinde yaptığı salınım, sonlu demet diverjansı ve eğik yatay gözlem açısının etkileri ihmal ederek hesaplanmıştır.

Çizelge 4.19 U35 ve U110 için elde edilen SEL dalga boyuna göre dikey ve yatay foton diverjansı ve yarıçapı

$\lambda_{\text{SEL}}(\mu\text{m})$	Dikey ve Yatay Foton Diverjansı (mrad)	Dikey ve Yatay Foton Yarıçapı (mm)
3.56 μm	1.16	0.31
252 μm	6.19	3.29

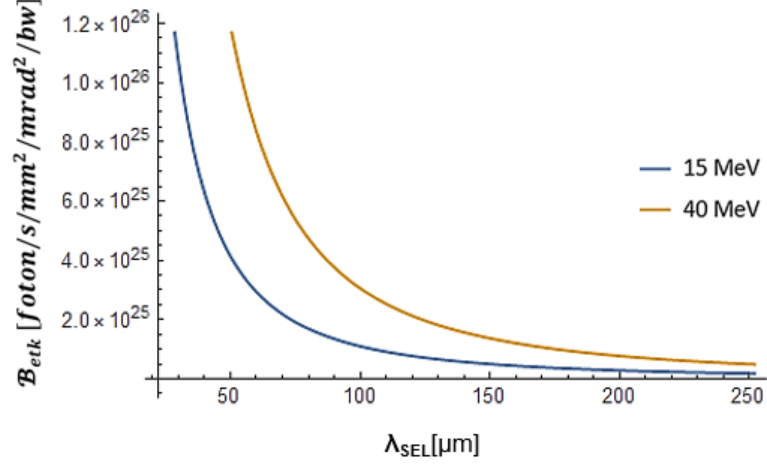
U35 ve U110 için parlaklığa hem elektron demeti hem de kırınım limitli ışınım demetinin etki ettiği ve aralarındaki eşleşme duruma bağlı olarak değişen etkin spektral pik parlaklık sırasıyla şekil 4.21 ve şekil 4.22'de verilmiştir.



Şekil 4.21 U35 için 15-40 MeV demet enerjisine ve SEL dalga boyuna göre etkin spektral pik parlaklık

Şekil 4.21'de görüldüğü gibi U35 için etkin spektral pik parlaklık 40 MeV demet enerjisinde 3 μm dalga boyu ışınım için 10^{27} mertebesinde, 15 MeV demet enerjisinde

32.50 μm dalga boylu ışınım için 10^{25} mertebesinde etkin spektral parlaklık değeri elde edilmektedir.



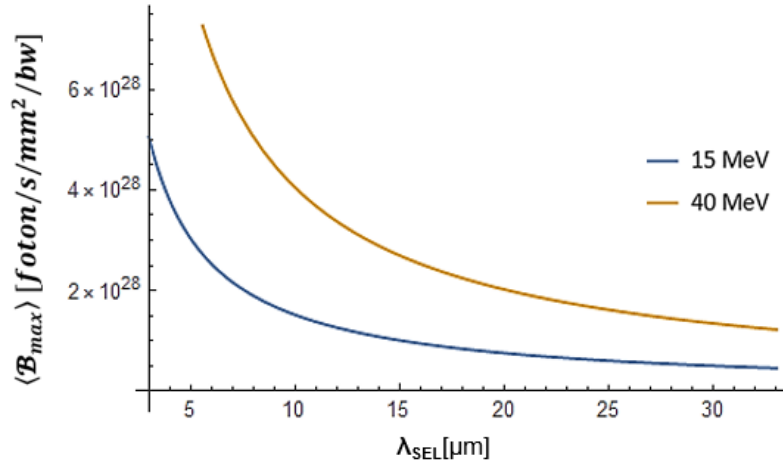
Şekil 4.22 U110 için 15-40 MeV demet enerjisine ve SEL dalga boyuna göre etkin spektral pik parlaklık

Şekil 4.22’de görüldüğü gibi U110 için etkin spektral pik parlaklık 15 MeV demet enerjisinde 252 μm dalga boylu ışınım için 10^{24} mertebesinde, 22.58 μm dalga boylu ışınım için 10^{26} mertebesinde elde edilmektedir. Maksimum spektral pik parlaklığa göre etkin spektral parlaklıktaki bu azalma, elektron demetinin katkısı sonucunda beklenen bir durumdur.

Çizelge 4.20 Periyot sayısı $N_u = 40$ olan U35 ve $N_u = 30$ olan U110 için ortalama foton akısı

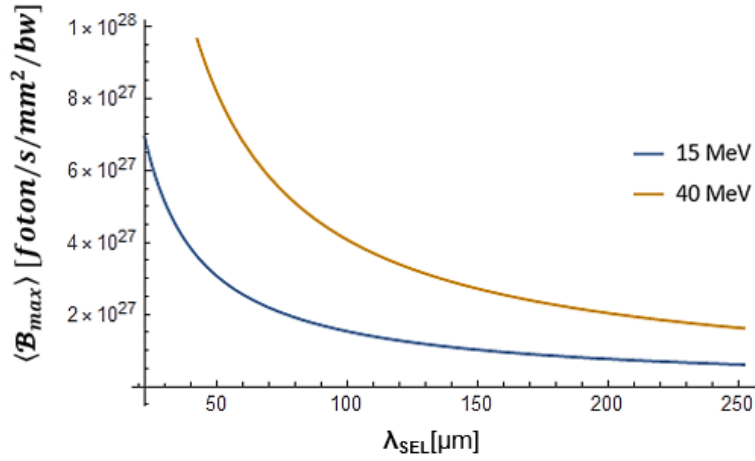
	λ_{SEL} (μm)	$\langle N_{\text{ph}} \rangle$ (foton/s)
U35 ($N_u = 40$)	3 μm	9.0×10^{21}
	32 μm	3.1×10^{22}
U110 ($N_u = 20$)	22 μm	7.6×10^{22}
	252 μm	3.2×10^{23}

U35 ve U110 için 15-40 MeV ve SEL dalga boyuna göre maksimum spektral ortalama parlaklık sırasıyla şekil 4.23 ve şekil 4.24’te verilmiştir. Burada kullanılan ortalama foton akısı çizelge 4.20’de verilmiştir.



Şekil 4.23 U35 için 15-40 MeV demet enerjisine ve SEL dalga boyuna göre maksimum spektral ortalama parlaklık

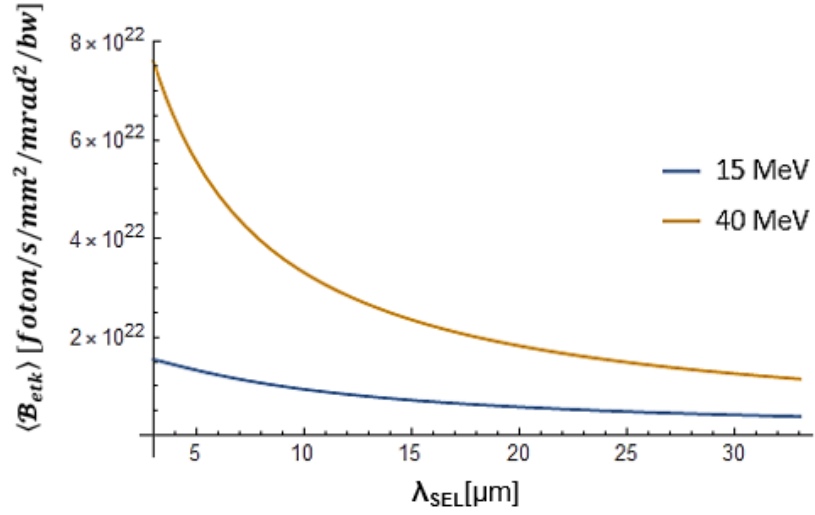
Şekil 4.23'te görüldüğü gibi U35'te 40 MeV demet enerjisinde 3 μm dalga boylu ışınım için maksimum spektral ortalama parlaklık 10^{29} mertebesinde, 15 MeV demet enerjisinde 32.50 μm dalga boylu ışınım için 10^{27} mertebesinde elde edilmektedir.



Şekil 4.24 U110 için 15-40 MeV demet enerjisine ve SEL dalga boyuna göre maksimum spektral ortalama parlaklık

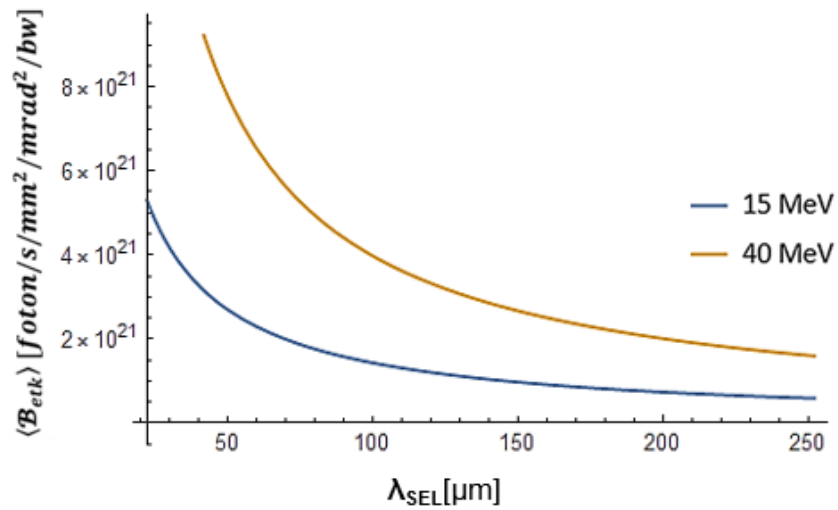
Şekil 4.24'te görüldüğü gibi U110'da 15 MeV demet enerjisinde 252 μm dalga boylu ışınım için maksimum spektral ortalama parlaklık 10^{26} mertebesinde, 40 MeV demet enerjisinde 22.58 μm dalga boylu ışınım için 10^{28} mertebesinde elde edilmektedir.

U35 ve U110 için parlaklığa hem elektron demeti hem de kırınım limitli ışınım demetinin etki ettiği ve aralarındaki eşleşme duruma bağlı olarak değişen etkin spektral ortalama parlaklık sırasıyla şekil 4.25 ve şekil 4.26’da verilmiştir.



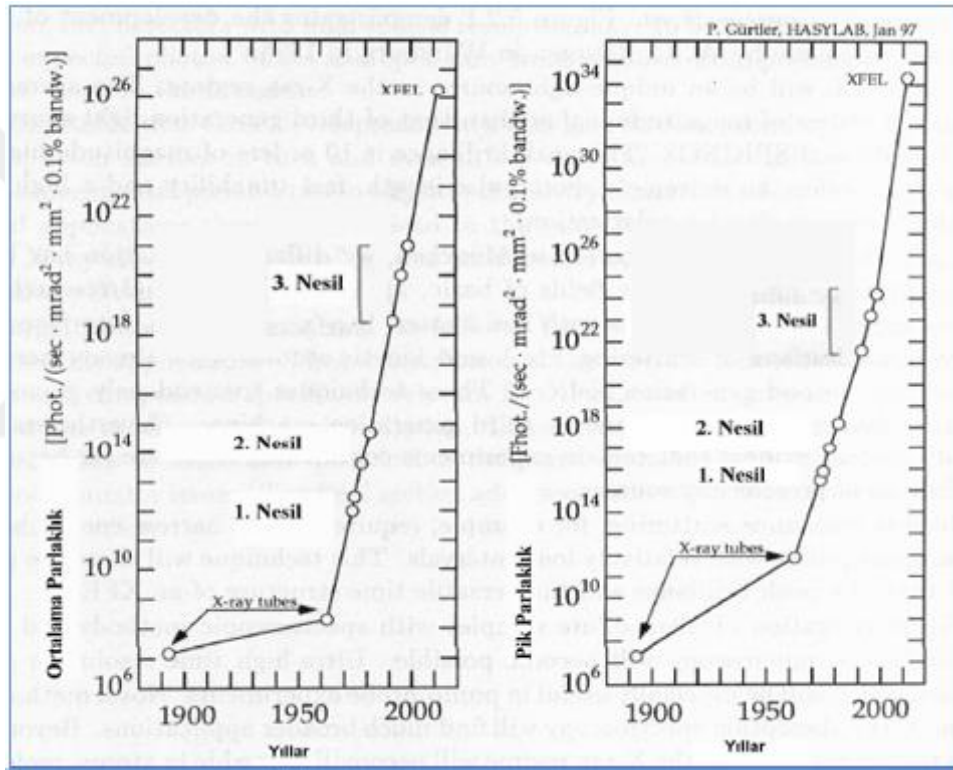
Şekil 4.25 U35 için 15-40 MeV demet enerjisine ve SEL dalga boyuna göre etkin spektral ortalama parlaklık

Şekil 4.25’te görüldüğü gibi U35’te 40 MeV demet enerjisinde 3 μm dalga boylu ışınım için etkin spektral ortalama parlaklık 10^{22} mertebesinde, 15 MeV demet enerjisinde 32.50 μm dalga boylu ışınım için 10^{21} mertebesinde elde edilmektedir.



Şekil 4.26 U110 için 15-40 MeV demet enerjisine ve SEL dalga boyuna göre etkin spektral ortalama parlaklık

Şekil 4.26’da görüldüğü gibi U110’da 15 MeV demet enerjisinde 252 µm dalga boylu ışınım için etkin spektral ortalama parlaklık 10^{20} mertebesinde, 40 MeV demet enerjisinde 22.56 µm dalga boylu ışınım için 10^{22} mertebesinde elde edilmektedir. Burada ortalama parlaklık değeri pik parlaklık değerinden az çıkması beklenen bir durumdur, çünkü çizelge 4.18’de ve çizelge 4.20’de görüldüğü gibi pik foton akısı, ortalama foton akısından daha büyüktür. Ayrıca Şekil 4.27’de görüldüğü gibi elde edilen parlaklık mertebeleri, SEL için beklenen pik ve ortalama parlaklık mertebesinde dir.



Şekil 4.27 Dördüncü nesil ışınım kaynağı olan SEL'in yıllara göre pik ve ortalama parlaklık değerleri (Yavaş 2008'den değiştirilerek alınmıştır)

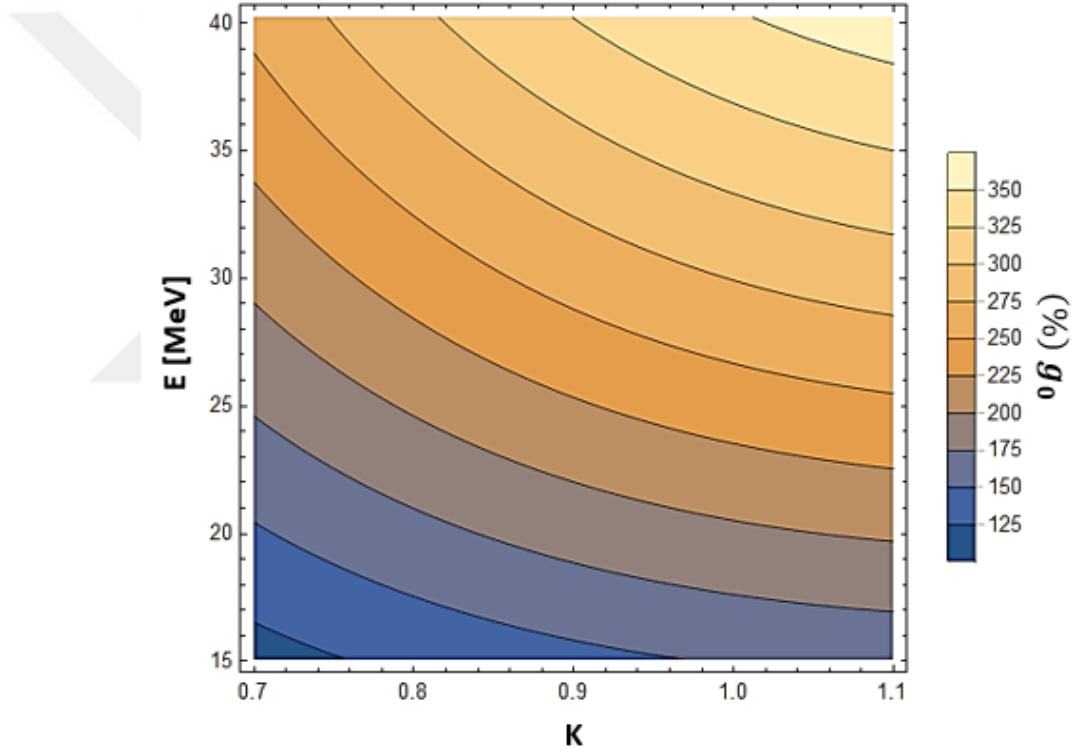
4.4.4 Tek geçiş kazancı

U35 ve U110’da 15-40 MeV enerjide elde edilen sırasıyla 3-32 µm ve 22-252 µm SEL dalga boyu minimum bel boyutu ve elektronun dikey/yatay yarıçapını kullanarak kırınım sınırları dahil toplam foton demetinin alanı çizelge 4.21’de verilmiştir.

Çizelge 4.21 U35 ve U110 için 15-40 MeV enerjide elde edilen 3-250 μm SEL dalga boyuna göre kırınım sınırları dahil toplam foton demetinin alanı

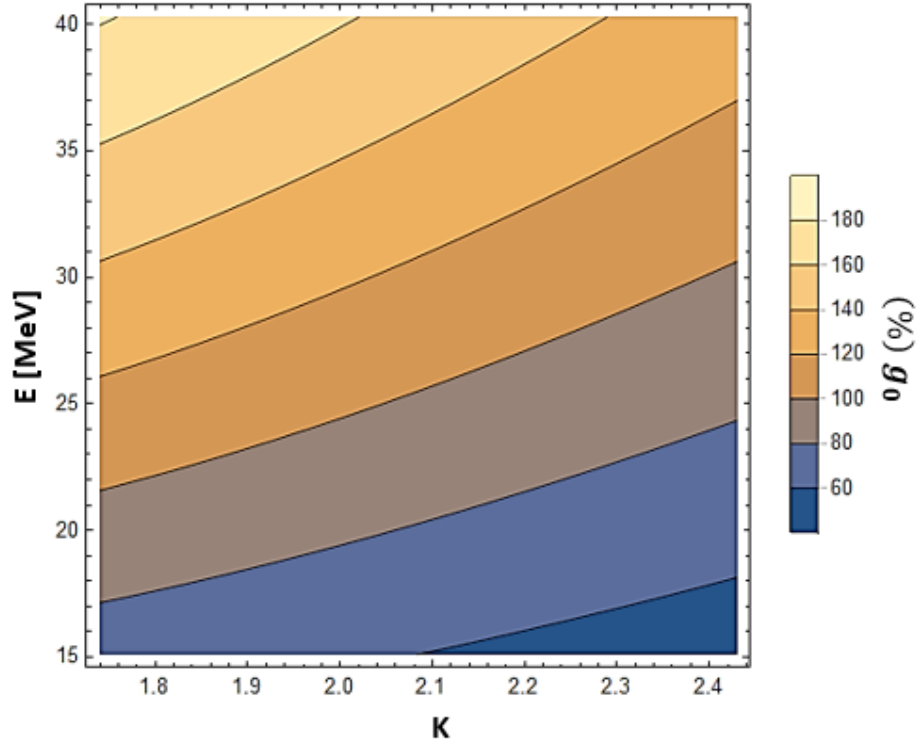
Undulatör	$\lambda_{\text{SEL}} (\mu\text{m})$	$\Sigma (\text{mm}^2)$
U35	3.56	0.85
	32.50	6.28
U110	22.58	10
	252.02	105

Periyot sayısı $N_u = 40$ olan U35 ve $N_u = 30$ olan U110 için undulatör şiddeti ve enerjiye göre yüzdeli tek geçiş kazancı sırasıyla şekil 4.28 ve şekil 4.29’da verilmiştir.



Şekil 4.28 $N_u=40$ olan U35 için undulatör şiddeti ve enerjiye göre tek geçiş kazanç yüzdesi

Şekil 4.28’de görüldüğü gibi $N_u = 40$ olan U35 için $K = 0.7$ ’de 40 MeV demet enerjisinde elde edilen 3.56 μm dalga boylu ışınımında tek geçiş kazancı yüzdesi % 256, $K = 1.1$ ’de 15 MeV demet enerjisinde elde edilen 32.50 μm dalga boylu ışınımında tek geçiş kazancı yüzdesi % 156 değerindedir.



Şekil 4.29 $N_u=30$ olan U110 için undulator şiddeti ve enerjiye göre yüzdeli tek geçiş kazancı

Şekil 4.29'da görüldüğü gibi $N_u = 30$ olan U110 için $K = 1.74$ 'te 40 MeV demet enerjisinde elde edilen $22.58 \mu\text{m}$ dalga boylu ışınımında tek geçiş kazancı yüzdesi % 179, $K = 2.43$ 'te 15 MeV demet enerjisinde elde edilen $252.02 \mu\text{m}$ dalga boylu ışınımında tek geçiş kazancı yüzdesi % 49 değerindedir.

U35 ve U110 için 3-252 μm dalga boyu için yüksek güç elde etmek için seçtiğimiz undulator periyodunun kazanç azalmasına yol açmasına karşın, kazanç artması için belirlediğimiz paket boyu, optimum rayleigh uzunluğu, demet belindeki beta fonksiyonu seçimi sonucunda kazancı çok düşürmeyip istenilen ışınımın oluşumu için minimum olarak gerekli olan % 40-50 üzerinde kazanç değerine ulaşılmıştır.

4.4.5 Kazanç düzeltme faktörleri ve optik kayıp

U35 ve U110 için göreceli rms demet enerji yayılımından dolayı kaynaklanan kazanç zayıflama (C_e), slippage (C_c), normalize emittanstan dolayı dikey ve yatay sonlu emittans (C_x , C_y) düzeltme faktör değerleri çizelge 4.22’de verilmiştir.

Çizelge 4.22 U35 ve U110 için kazanç zayıflama ve slippage düzeltme faktörü değerleri

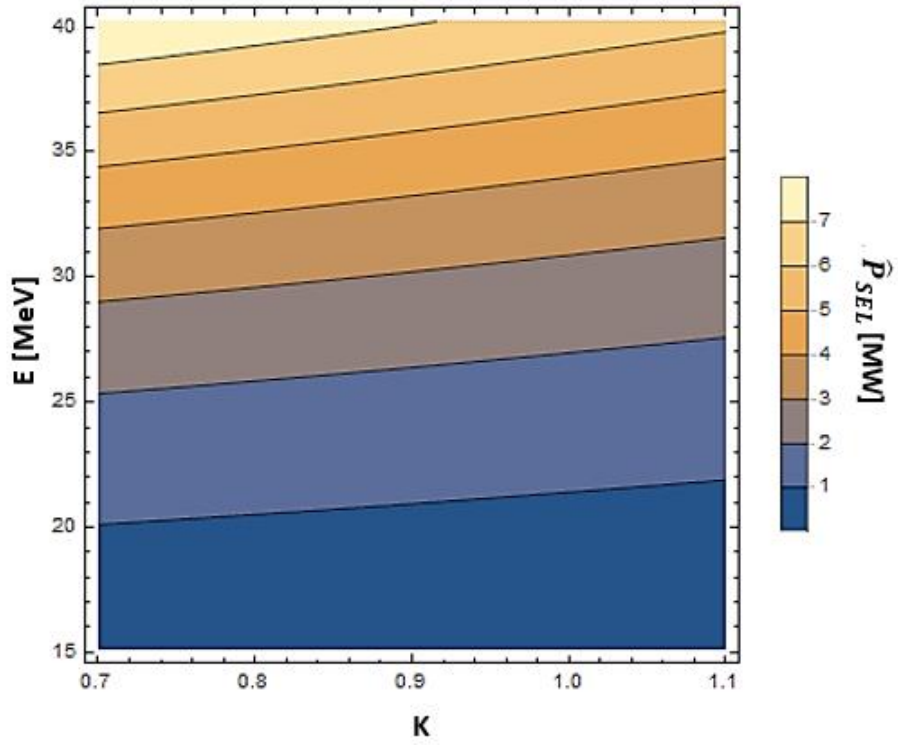
	U35 (3 μm dalga boyu için)	U110 (252 μm dalga boyu için)
Kazanç zayıflama faktörü (C_e)	0.955	
Slippage düzeltme faktörü (C_c)	0.857	
Dikey Sonlu Emittans (C_x)	0.0016	0.0183
Yatay Sonlu Emittans (C_y)	0.0008	0.0084

SEL sisteminde kavite içi kayıp ve aynadaki açıklıktan çıkan optimum açıklık kesri olmak üzere iki tane kayıp vardır. TARLA’da öngörülen kavite içi kayıp U35 için 0.1 (%10), U110 için 0.15 (%15) değerindedir (Aksoy 2015). U35 ve U110 için belirlenen tek geçiş kazanç değerleri ve çizelge 4.22’deki düzeltme faktörleri kullanılarak düzeltilmeli tek geçiş parametresi belirlenmiştir.

Belirlenen değeri kullanarak maksimum tek geçiş kazancı hesaplanmıştır. U35 ve U110 için belirlenen maksimum tek geçiş kazancı ile ayna deliğinden çıkan optimum açıklık kesri 0.024 (% 2.4) olarak belirlenmiştir.

4.4.6 OSEL’in gücü

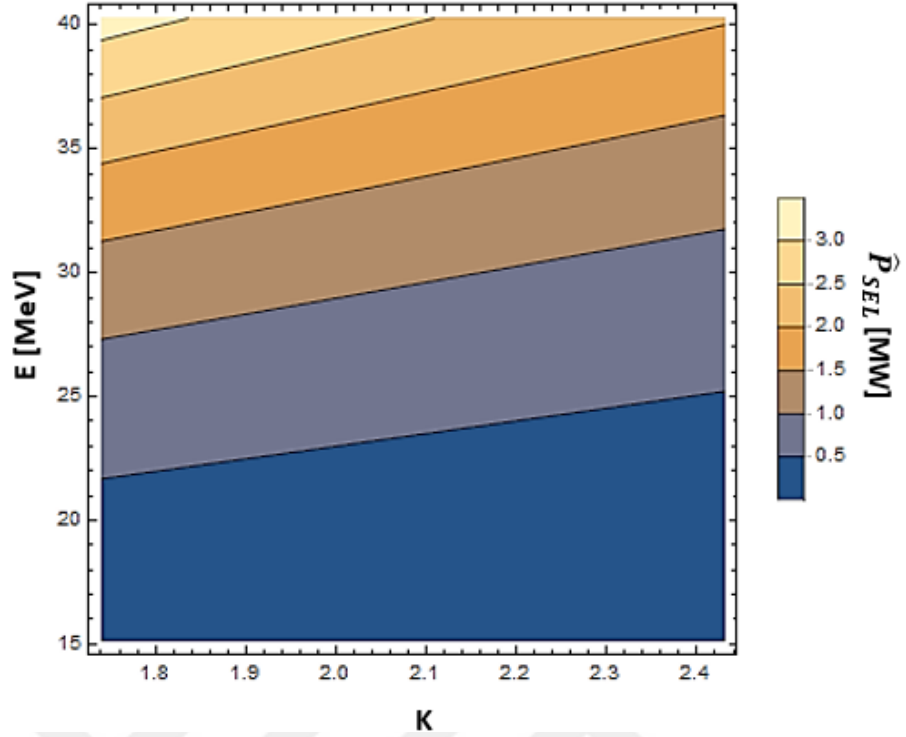
U35 ve U110 için undulatör şiddeti ve enerjiye göre SEL’in pik gücü sırasıyla şekil 4.30 ve şekil 4.31’de verilmiştir.



Şekil 4.30 $N_u=40$ olan U35 için undulator şiddeti ve enerjiye göre elde edilen SEL'in pik gücü

Şekil 4.30'da görüldüğü gibi $N_u = 40$ olan U35 için düşük undulator şiddeti ve yüksek enerjide maksimum SEL gücü elde edilmektedir. Burada $K = 0.7$ 'de 40 MeV demet enerjisinde elde edilen $3.56 \mu\text{m}$ dalga boylu SEL'in pik gücü 7.84 MW, $K = 1.1$ 'de 15 MeV demet enerjisinde elde edilen $32.50 \mu\text{m}$ dalga boylu ışınımında SEL'in pik gücü 0.32 MW değerindedir.

Sonuç olarak U35 için elde etmek istediğimiz $3.56 \mu\text{m}$ dalga boylu SEL için seçtiğimiz elektron demetin paket boyu, undulatorün periyot sayısı ile elde etmek istediğimiz 7.84 MW'lık yüksek pik güce % 256 kazançla elde edilebilmiştir.



Şekil 4.31 $N_u=30$ olan U110 için undulator şiddeti ve enerjiye göre elde edilen SEL'in pik gücü

Şekil 4.31'de görüldüğü gibi $N_u = 30$ olan U110 için $K = 1.74$ 'te 40 MeV demet enerjisinde elde edilen 22.58 μm dalga boylu SEL'in pik gücü 3.16 MW, $K = 2.43$ 'te 15 MeV demet enerjisinde elde edilen 252.02 μm dalga boylu SEL'in pik gücü 0.11 MW değerindedir.

Sonuç olarak U110 için 252.02 μm dalga boylu SEL elde etmek için seçtiğimiz elektron demetin paket boyu, undulatorün periyot sayısı ile 0.11 MW maksimum güce % 49 kazançla elde edilebilmiştir.

Denklem 2.74'teki tek geçiş kazançtaki pik akımı yerine çizelge 4.2'deki ortalama akım olarak ve aynı basamaklardan geçerek U35'te 15-40 MeV enerjiye göre elde edilen SEL'in ortalama gücü sırasıyla 36 W ve 97 W, U110 için sırasıyla 29 W ve 77 W elde edilmektedir.

5. SONUÇ

Bu tez çalışmasında düşük enerjili elektron demetini kullanarak yüksek pik güçlü, dalga boyu ayarlanabilir serbest elektron lazeri için optik kavite bileşenlerinin optimizasyonu ve tasarımı yapılmıştır. TARLA tesisi için 10-40 MeV enerjili demetleri kullanarak öngörülen U35 ve U110 salındırıcı için 3-250 μm dalga boyu aralığında yüksek pik güçlü serbest elektron lazerin elde edilmesinde gerekli optik kavite bileşenleri ve değerleri verilmiştir. SEL üretim sistemi bir bütün olarak ele alınıp belirli dalga boylu ışınımı ve kullanıcı tarafından ihtiyaç duyulan SEL karakteristiklerini karşılayacak şekilde optik kavite bileşenlerinden elektron demeti, undulatör, optik kavite olmak üzere üç ana bölümde incelenmiş, belirlenen parametrelerle elde edilen SEL'in karakteristik özellikleri verilmiştir.

Osilatör SEL sisteminde yüksek pik güçlü 3-250 μm dalga boylu SEL üretimi için optik kavite bileşenlerinden ilk olarak optik kaviteye eğici magnet aracılığıyla giren elektron demeti parametreleri belirlenmiştir.

U35 ve U110 undulatörlerinde elektron demeti ile ışınım demeti arasındaki etkileşim ihtimali artırmak, yüksek pik güçlü ve kazancı en az % 40-50 olan sırasıyla 3 μm ve 250 μm dalga boylu ışınım üretilebilmesi için elektron demetin paket boyu sırasıyla 0.28 mm ve 7.56 mm bulunmuştur. Bu paket boyları için paketçik süreleri sırasıyla 1.0 ps ve 25.2 ps bulunmuştur.

TARLA tesisin elektron demet enerjisi 15-40 MeV, paket yükü 77 pC, ortalama demet akımı 1 mA, paket tekrarlanma oranı 13 MHz, normalize enine emittans 12-14 mm.mrad değerindedir. Bu parametreleri kullanarak U35 ve U110'da sırasıyla 3 μm ve 250 μm dalga boylu ışınım için elektron demetin pik demet akımı sırasıyla 81 - 3 A, ortalama demet gücü 15-40 kW, pik demet gücü 3242 - 46 MW, emittansı 0.16-0.5 mm.mrad bulunmuştur. Elektron demeti ile ışınım demetinin maksimum etkileşim için seçilen beta fonksiyonuna göre elektron demetin diverjansı ise sırasıyla 0.27 - 0.3 mrad, yarıçapı sırasıyla 0.19-0.5 mm bulunmuştur.

Optik kavite bileşenlerinden serbest elektron lazeri üretimine olanak sağlayan undulatör magnet U35 ve U110'da pik magnetik alanı artırmak için düzlemsel hibrit undulatör seçilmiştir.

Yüksek pik güçlü 3-250 μm dalga boylu ışınım için vakum kalınlığı 0.5 mm, undulatör ile vakum arası boşluk 1.5 mm olmak üzere sırasıyla U35 için minimum ve maksimum gap aralığı 20-25 mm, U110 için gap aralığı 75-88 mm seçilmiştir. Belirlenen değerler kararlılık koşuluna ve ışınımın optik demet ebatına uygun olduğu gösterilmiştir. U35 (3 μm) ve U110 (252 μm) için belirlenen sırasıyla 25-75 gap aralığına göre pik manyetik alan sırasıyla 0.21-0.24 T bulunmuştur. U35 ve U110 için öngörülen periyot sayısı istenilen dalga boyunda yüksek pik güçlü 3-250 μm dalga boylu SEL üretimi için sırasıyla 40 ve 30 seçilmiştir.

Radia'da magnet ve kutup malzemesi olarak sırasıyla NdFeB ve vanadyum permandur özelliği gösteren malzeme seçilmiştir. Belirlenen gap aralığına uygun hesaplanan pik magnetik alanı veren ve undulatör boyunca aynı pik magnetik alan değerinde olacak şekilde undulatör geometrik boyutları belirlenmiştir. U35 (3 μm) ve U110 (252 μm) için magnetin geometrik boyutları sırasıyla genişlik-yükseklik-kalınlık olmak üzere 90 - 60 - 9.8 mm ve 210 - 140 - 34.8 mm, kutbun geometrik boyutları sırasıyla 60 - 45 - 7.7 mm ve 140 - 105 - 20.2 mm belirlenmiştir. Belirlenen geometrik boyutlar ve gap aralığına göre Radia'da undulatörün merkezde enine ve boyuna alan grafikleri çizdirilmiştir. U35 (3 μm) ve U110 (252 μm) için çizilen grafiklerde magnetik alan düzgünlüğü sırasıyla 17- 20 mm olduğu görülmüştür.

U35 ve U110 için 3-250 μm dalga boyu için belirlenen magnetik alana ve demet enerjisine göre undulatörde elektronun maksimum sapma açısı sırasıyla 0.9×10^{-8} - 8×10^{-8} rad ve undulatör şiddeti 0.70-2.43 belirlenmiştir. Undulatörden elde edilen ışınımın periyot sayısına bağlı olarak band genişliği 0.025-0.033, kazanç azalımını ihmal edebilmek için belirlenen göreceli rms demet enerji yayılımı 0.0010-0.0014 bulunmuştur. Kazanç eğrisi Mathematica'da çizilmiş olup, U35 ve U110 için maksimum kazancı veren enerji yayılımı sırasıyla 0.0052 ve 0.0069 olarak belirlenmiş

ve net kazanç için rezonans enerjiden biraz fazla enerji verilmesi gerektiği gösterilmiştir.

U35 (3 μm) ve U110 (252 μm) için simetrik ve optik kaybın az olması için kararlı kavite özelliğinde olan yakın konsantrik optik kavite seçilmiş olup boyu 11.53m belirlenmiştir. Yüksek kazanç elde etmek için Rayleigh uzunluğu sırasıyla 0.35-0.83 m ve bu değeri veren aynaların eğrilik yarıçapı 5.79-5.88 m bulunmuş olup kararlılık koşuluna uygun olduğu gösterilmiştir. Ayna kaplama malzemesi olarak IR bölgesinde %90-99 aralığında yansıtıcı altın seçilmiştir. Ayrıca malzemeyi korumak ve yansıma özelliğini artırmak için yüksek indisli ($n = 2.1$) olan ZrO_2 dielektrik koruyucu malzemenin geometrik kalınlığı, 3-250 μm dalga boylu ışınım için, 0.43-30.29 μm bulunmuştur. Dielektriğin dar spektrumu sebebiyle metal malzemenin spektrumunu daraltmamak için geometrik kalınlığın iki katı alınarak yansıma ve band genişliğini etkilemeden koruma görevi üstlendiği belirtilmiştir.

Optik kavite içinde oluşan Gauss demetin beli kavitenin merkezinde olup U35 ve U110'da elde edilen 3-250 μm dalga boylu ışınım için minimum bel boyu sırasıyla 0.63-8.14 mm, undulatör çıkışındaki bel boyu 1.41-18.2 mm, aynalardaki bel boyutu 10.39-57.43 mm bulunmuştur. Undulatör çıkışındaki spot boyutunun seçilen gap aralığına uygun olduğu gösterilmiştir. Optik kavite için ileri yüksek vakum ihtiyaç olup bu vakuma uygun pompa çeşidi ve basınç değerleri verilmiştir. TARLA'da kavite içi kayıp sırasıyla % 10 - % 15 olduğu öngörülmektedir. Optimum açıklık kesrinden çıkan kayıp ise, kavite için kazanç düzeltme faktörlerini hesaba katarak % 2.4 olarak bulunmuştur.

U35 ve U110 için belirlenen elektron demeti, undulatör ve optik kavite parametrelerine göre SEL dalga boyu sırasıyla yakın-uzak IR bölgede 3.56-252 μm , enerjisi 0.35-0.005 eV bulunmuş olup istenilen dalga boyuna ulaşıldığı gösterilmiştir. U35 ve U110'da elde edilen 3-250 μm dalga boylu ışınım için kavite içi güce bağlı olarak pik foton akısı sırasıyla 7.6×10^{26} - 9.7×10^{26} foton/s, ortalama foton akısı sırasıyla 10^{21} - 10^{23} foton/s belirlenmiştir. Oluşan foton demetin parametrelerine bağlı ve kırınım koşuluna uygun olduğu gösterilerek maksimum spektral pik parlaklığı ise sırasıyla 10^{33} - 10^{30}

foton/s/mm²/bw ve maksimum spektral ortalama parlaklık 10²⁹-10²⁶, etkin spektral pik parlaklık 10²⁷-10²⁴ foton/s/mm²/mrad²/bw ve etkin spektral ortalama parlaklık 10²²-10²⁰ bulunmuştur. U35'te 15-40 MeV enerjiye göre elde edilen SEL'in ortalama gücü sırasıyla 36 W ve 97 W, U110 için sırasıyla 29 W ve 77 W elde edilmektedir.

Sonuç olarak bu çalışmada, U35 ve U110'da yüksek pik güçlü 3-252 µm dalga boylarında ışınım elde etmek için optimize edilen optik kavite bileşenlerinden undulatör periyodunun kazanç azalmasına yol açmasına karşın, kazanç artması için belirlediğimiz paket boyu, optimum rayleigh uzunluğu, demet belindeki beta fonksiyonu seçimi sonucunda kazancı çok düşürmeyip istenilen ışınımların oluşumu için 3.56 µm dalga boylu SEL'in % 256 kazançla 7.84 MW yüksek pik gücü ve 252 µm dalga boylu SEL'in % 49 kazançla 0.11 MW yüksek pik gücü elde edilebileceği gösterilmiştir.

KAYNAKLAR

- Aksoy, A., Karşlı, Ö. ve Yavaş, Ö. 2008. The Turkish Accelerator Complex IR FEL Facility, Infrared Physics & Technology. 51; 378-381.
- Aksoy, A. ve Karşlı Ö. (Eds) 2015. TARLA Technical Design Report. IAT, Ankara University.
- Aksoy, A., Karşlı, Ö., Aydın, A., Kaya, Ç., Ketenoğlu, B., Ketenoğlu, D. ve Yavaş, Ö. 2018. Current Status of Turkish Accelerator and Radiation Laboratory in Ankara. The TARLA Facility Canadian Journal of Physics, 96; 837–842.
- Anonymous. 2017a. Web Sitesi: <https://www.wolfram.com/mathematica/quick-revision-history.html>, Erişim tarihi: 20.05.2017
- Anonymous. 2017b. Web Sitesi: <https://reference.wolfram.com/legacy/language/v11/>, Erişim tarihi: 21.05.2019
- Anonymous. 2017c. Web Sitesi: <http://www.esrf.eu/Accelerators/Groups/InsertionDevices/Software/Radia/Documentation>, Erişim tarihi:22.05.2019
- Anonymous. 2018a. Web Sitesi: <http://www.bgu.ac.il/~glevi/website/Guides/Lasers.pdf>, Erişim Tarihi: 04.12.2018, 36.5-36.10
- Anonymous. 2019a. Web Sitesi: https://www.astec.stfc.ac.uk/Pages/Thompson_FELs.pdf, Erişim Tarihi: 16.02.2019
- Anonymous. 2019b. Web Sitesi: https://www.layertec.de/files/catalog/2017/LAYERTEC_Optics_And_Coatings_Full_Version.pdf, Erişim tarihi: 26.02.2019
- Anonymous. 2019c. Web Sitesi: https://tr.wikipedia.org/wiki/Elektromanyetik_tayf, Erişim tarihi:18.05.2019
- Dattoli, G., Franco, M. D., Labat, M., Ottaviani P. L. and Pagnutti, S. 2009. Introduction to physics of free electron laser and comparison with conventional laser sources. ENEA, Italy, In: Free Electron Lasers, Sándor Varró, 2012, 13-26, Croatia.
- Elleume, P., Chavanne, J. ve Faatz, B. 2000. Design considerations for a 1 Å SASE undulator, In: Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A:

Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 455, Issue 3, 503–509.

- Howells, M.R. ve Kincaid, B.M. 1992. The Properties of Undulator Radiation. 2-8, 25-26, 12-19, 31-33, Lawrence Berkeley Laboratory University of California.
- Kaiser, N. 2008. Old rules useful to the designer of optical coatings. In: *Vakuum in Forschung und Praxis*, Volume 20, Issue 1, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Pages 7-14, Weinheim.
- Kim, K. J., Ryan, L. and Huang, Z. 2018. Fel Oscillator Principles. In: *CAS–CERN Accelerator School: Free electron lasers and Energy Recovery Linacs*, Bailey, R. 493-494, Hamburg, Germany.
- Marquardt, N. 1999. Introduction to the principles of vacuum physics, In: *CAS–CERN Accelerator School: Vacuum technology*, Turner, S., Scanticon Conference Centre, Snekersten, Denmark.
- Nguyen, D., Russell, S. and Moody, N. 2009. Particle Accelerator School Day2: Theory and Practice of Free Electron Lasers. LA-UR 09-02731, University of New Mexico.
- Reiche, S. 1999. Numerical Studies for a Single Pass High Gain Free Electron Laser. PhD thesis (unpublished). University of Hamburg, Department of Physics, 10-11, Hamburg.
- Serway, R.A., Moses, C.J ve Moyer, C.A. 2005. *Modern Physics*. 3rd Edition, Thomson Learning Academic Resource Center, 43-46, USA.
- Silfvast, T. W., CREOL and University of Central Florida. 1995. Lasers. Orlando, Florida. In: *Handbook of Optics, Volume I, Fundamentals, Techniques and Design*, 2.nd Edition, Bass vd., McGraw-Hill, 11.21-11.28, USA.
- Silfvast, T. W., School of Optics/CREOL and University of Central Florida. 2005. Lasers. Orlando, Florida. In: *Fundamentals of Photonics*, Roychoudhuri, C., 25-27, USA.
- Svelto, O. 2010. *Principles of Lasers*. 5nd Edition, Springer, Milan, 131-135, 163-166, 172-173 Italy.
- Thompson, N. 2003. ERL Prototype Free-Electron Laser, 4GLS Feasibility Report, erlp-ofel-rpt-0001, 10-20.

- Turner, S. 1994. CAS–CERN Accelerator School: Fifth General Accelerator Physics Course. Vol. I, Geneva, 49-60, 93-95, 289-291, Finland.
- Wiedemann, H. 2003. Synchrotron Radiation. Springer-Verlag, 10-11, 45-52, 88-90, 177-183,187-189, 204-207, 220-225, 262-266, New York.
- Wiedemann, H. 2007. Particle Accelerators Physics. Springer-Verlag, 153-159, 868-873, New York.
- Wille, K. 1998. Introduction to insertion devices, In: CAS–CERN Accelerator School: Synchrotron radiation and free electron lasers, Turner, S. Grenoble, 61-73, France.
- Winick, H. 1995. Synchrotron Radiation Sources-A Premier. World Scientific.
- Yavaş, Ö. 2008. Doğrusal ve Dairesel Hızlandırıcılar. IV-Ulusal Parçacık Hızlandırıcıları ve Dedektörleri Yaz Okulu (UPHDYO-IV), Bodrum.
- Yavaş, Ö. 2016. Turkish Accelerator Center Project: The Results of 3rd Stage and Vision of the Project. Balkan Physics Letters, 24,241023; 191-202.
- Yoo, J., Cho, S. O., Jeong, Y. U., Lee, B. C. and Lee, J. vd. 2000. Optical Resonator Theory. Korea Atomic Energy Research Institute, 1-12, Laboratory for Quantum Optics.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Şeyma Cemile BİÇER

Doğum Yeri : Ankara

Doğum Tarihi : 08.05.1987

Medeni Hali : Bekâr

Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu

İlköğretim : Tevfik İleri İlköğretim Okulu (1993-2001)

Lise : Kurtuluş Lisesi (2001-2004)

Lisans Bölümü : Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fizik Mühendisliği
(2007-2013)

Yüksek Lisans: Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Mühendisliği Bölümü, Osilatör Modda Serbest Elektron Lazerleri için Optik Kavite Bileşenlerinin Optimizasyonu ve Tasarımı (2016-2019)

Staj

Türkiye Atom Enerjisi Kurumu, SANAEM/AR-GE Bölümü, Füzyon Birimi ve Hızlandırıcı Fiziği Birimi (2011)

Yüksek Lisans Semineri

Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Mühendisliği Bölümü, SEL Üretimi için Optik Kavite Yapısı ve TARLA Tesisi için Optik Kavite Optimizasyonu (2017)

Sertifikalar

Ankara Üniversitesi Yabancı Diller Yüksekokulu Müdürlüğü, Yabancı Dil Hazırlık Sınıfı (İngilizce) Başarı Sertifikası (2007).

Ankara Üniversitesi Enformatik Bölüm Başkanlığı, Bilgisayar Eğitimi Programı (Donanım, Windows, Word, Excel, PowerPoint, İnternet) Başarı Belgesi (2007).

Milli Eğitim Bakanlığı, Özel İki Teknik Bilişim Bilgisayar ve Yabancı Dil Kursu-Ankara, Solidworks Programı ile Bilgisayar Destekli Tasarım, Solidworks 2011 Başarı Belgesi ve Solidworks Kullanıcısı Ünvanı (2014).

