

TÜRK HIZLANDIRICI MERKEZİ (THM)
SERBEST ELEKTRON LAZERİ OPTİK KAVİTE
PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ VE
HESAPLANMASI
HATİCE YILMAZ
Yüksek Lisans Tezi
Fizik Anabilim Dalı
Eylül, 2010

TÜRK HIZLANDIRICI MERKEZİ (THM) SERBEST ELEKTRON LAZERİ OPTİK KAVİTE
PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ VE HESAPLANMASI

Hatice YILMAZ

Dumlupınar Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliği Uyarınca
Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Doç. Dr. Hatice DURAN YILDIZ

Eylül, 2010

KABUL ve ONAY SAYFASI

Hatice YILMAZ'ın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı TÜRK HIZLANDIRICI MERKEZİ (THM) SERBEST ELEKTRON LAZERİ OPTİK KAVİTE PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ VE HESAPLANMASI başlıklı bu çalışma, jürimizce Dumlupınar Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliğın ilgili maddeleri uyarınca değeriendirilerek kabul edilmiştir.

...../...../2010

Üye : Doç. Dr. Hatice DURAN YILDIZ (Danışman)

Üye : Doç. Dr. Suat ÖZKORUCUKLU

Üye : Doç. Dr. Zeki KARTAL

Fen Bilimleri Enstitüsün Yönetim Kurulu'nun/...../2010 gün ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Atalay KÜÇÜKBURSA
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TÜRK HIZLANDIRICI MERKEZİ (THM) SERBEST ELEKTRON LAZERİ OPTİK KAVİTE PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ VE HESAPLANMASI

Hatice YILMAZ

Fizik Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2010

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Hatice DURAN YILDIZ

ÖZET

Bu çalışmada endüstriyel yönden büyük bir öneme sahip olan ve çok fazla kullanım alanı bulunan lazerlerden bahsedilerek teknolojik bakımdan gelişmişliği sağlayan bu önemli sistemin çalışma prensipleri ve çeşitleri incelenmiştir. Bu tez kapsamında lazer çeşitlerinden olan serbest elektron lazerleri (SEL) tanımlanarak özellikleri, fiziki ve çeşitleri hakkında bilgiler verilmiştir. Serbest elektron lazerleri, Osilatör SEL, Yükselteç SEL ve Kendiliğinden Genlik Artırmalı (SASE) SEL olmak üzere üç çeşittir. Osilatör Sel'in Kızılötesi Bölgesinde (Infrared FEL, IR-FEL) çalışan IR-FEL lazerinin çalışma modu incelenmiştir. Kızılötesi Serbest Elektron Lazerlerinde lazerin üretildiği kısım olan rezonatör ve optik kavite parametrelerinin belirlenmesi, hesaplanması ve bu parametrelerin uygunluğunun incelenmesi çalışılmaktadır. Ankara Üniversitesi koordinatörlüğünde yürütülen Türk Hızlandırıcı Merkezi (THM), DPT-YUUP projesi kapsamında kurulumu planlanan kızılötesi serbest elektron lazeri laboratuvarı için optik kavite parametreleri ve bu parametrelerin Dünyadaki laboratuvarlardaki optik kavite değerleri ile ne kadar uyum içinde olduğuna bakılmıştır. Türkiye'de kurulması planlanan ilk serbest elektron lazeri laboratuvarı olması bakımından öneme sahip olan bu projenin sonuçlandırılması ile teknolojik bakımdan gelişmiş ülkeler seviyesine çıkmak, bilimsel, endüstriyel, tıp ve teknolojik uygulamalar gibi birçok alanda kendi ihtiyaçlarımızın bir kısmını karşılayarak dış ülkelere bağımlılığın azaltılması hedeflenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Serbest Elektron Lazeri, Türk Hızlandırıcı Merkezi (THM) Projesi, IR-SEL, Rezonatör Yapısı, Optik Kavite

TURKISH ACCELERATOR CENTER (TAC) FREE ELECTRON LASERS DETERMINATION AND CALCULATION OF OPTICAL CAVITY PARAMETERS

Hatice YILMAZ

Department of Physics, Masters Thesis, 2008

Thesis Advisor: Assoc. Prof. Dr. Hatice DURAN YILDIZ

SUMMARY

In this study, it has been mentioned about lasers which have an important role in terms of industry, and have many areas of use. The types of this system have been investigated which supplies the improvement in terms of technology. In this thesis, the electron lasers, which is one of the laser types, is described, and the information about their physics, features and types is given. There are three types of FEL, oscillator FEL, amplifier FEL and SASE. The mode of IR-FEL lasers has been investigated which works in the infrared area of oscillator FEL. The suitability of the resonator and optic cavity parameters which produce the laser in the infrared free electron laser, and their calculation, determination is being studied in this research. THM is being performed by the coordinatorship of Ankara University and they aim to establish an infrared free electron laser laboratory in the framework of DPT-YUUP Project. To establish this laboratory the optic cavity parameters and the harmony of those parameters with the world laboratories optic cavity rates has been analysed. This Project is important in terms of the first free electron laser laboratory which is established in Turkey. The aim of the Project is to reach developed countries level in terms and to reduce our dependency to external countries through supplying some of our needs in lots of areas such as science, industry, medical and technology.

Key Words: Free Electron Laser, Turkish Accelerator Center (TAC) Project, IR-FEL, Resonator System, Optic Cavity

TEŞEKKÜR

Lisans ve Yüksek Lisans eğitimim boyunca bana her konuda destek olan, araştırma ve çalışmalarında benden tecrübe ve tavsiyelerini esirgemeyen danışmanım Sayın Doç. Dr. Hatice DURAN YILDIZ’a ve Türkiye açısından büyük öneme sahip YUUP projesinin başkanlığını yaparak bizlere yol gösteren ve destek olan Sayın Prof. Dr. Ömer YAVAŞ’a teşekkür ederim.

Ayrıca katkılarından dolayı arkadaşlarım Metin Aydar, Mehmet YILMAZ ve her zaman manevi destek sağlayan, hayatımda önemli yere sahip olan arkadaşım Fatin ALAN’a ve aileme teşekkürlerimi sunarım.

Hatice YILMAZ

Bu tez çalışması, “Türk Hızlandırıcı Merkezi Teknik Tasarımı ve Test Laboratuvarları (DPT2006K-120470)” konulu proje tarafından desteklenmiştir.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xii
1.GİRİŞ	1
1.1. Işınım Kaynakları.....	1
1.2. Lazer Nedir? ve Çalışma Prensibi.....	4
1.3. Lazer Işının Özellikleri	5
1.4. Lazerlerin Kullanım Alanları	6
1.5. Lazer Çeşitleri	7
2.SERBEST ELEKTRON LAZERLERİ.....	8
2.1. Serbest Elektron Lazerinin Çalışma Prensibi ve Özellikleri	11
2.2. Serbest Elektron Lazeri Uygulama Alanları.....	16
3. TÜRK HIZLANDIRICI MERKEZİ	18
3.1 Türk Hızlandırıcı Merkezi IR-FEL Sistemi	19
3.2 Türk Hızlandırıcı Merkezi Rezonatör Sistemi	21
4.TÜRK HIZLANDIRICI MERKEZİ REZONATÖR SİSTEMİ PARAMETRELERİNİN HESAPLAMALARI	30
4.1. THM Rezonatör Sistemi Parametrelerin Analitik Olarak Hesaplanması	30
4.2. THM Rezonatör Sistemi Parametrelerin C++ Programı, Genesis ve GLAD kodları ile Modellenmesi.....	41
4.2.1.C++ Programı ile Optik Kavite Hesapları ve Sonuçları	41
4.2.2. GLAD Programı ile Optik Kavite Hesapları ve Sonuçları	46
4.2.3. Genesis Programı ile Optik Kavite Hesapları ve Sonuçları	51

İÇİNDEKİLER DİZİNİ (devam)

	<u>Sayfa</u>
5. SONUÇ VE TARTIŞMA	58
6. KAYNAKLAR DİZİNİ.....	60

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Işınım kaynaklarının zaman içerisinde gelişimi.....	3
2.1. Elektromagnetik spektrum	8
2.2. Serbest elektron lazerinin bileşenleri	8
2.3. Salındırıcı magnetten yayılan sinkrotron ışımalarının geometrisi	9
2.4. Serbest elektron lazeri düzeneği.....	12
2.5. Rezonatör Sistemi içinde elektron demetinin davranışı.....	12
2.6a. Undulatör içinde elektron demetinin zamanla güçlenerek lazer ışını oluşturmaları	13
2.6.b. Elektron demetinin davranışı	14
3.1. THM Deney İstasyonları.....	19
3.2. THM IR –SEL Yapısı	20
3.3. THM IR-SEL için linak'ın şematik görünümü	20
3.4. Rezonatör bileşenleri.....	23
3.5. Undulatör Yapısı.....	24
3.6. Planar ve Helical Undulatörler.....	25
3.7. Rayleigh uzunluğunun şematik gösterimi	26
3.8. Demet belinden z kadar uzaklıkta elektron demet için spot büyüklüğünün değişimi	26
3.9. Kararlılık Parametresi	27
3.10. Ayna çeşitleri ve özellikleri	28
3.11. Aynaların kararlılık özellikleri.....	29
3.12. Eş Merkezli (Concentric) Ayna Yapısı	29
4.1. Elektron demetinin bel uzunluğuna göre TEM Modlarının belirlenmesi	44
4.2. U25 Undulatörü için geçerli olan TEM Modlarından bazıları	45
4.3. U90 Undulatörü için geçerli olan TEM Modlarından bazıları	46
4.4. Durgun durumda U25 için enerji kaybı.....	47
4.5. U25 undulatörü için gümüş kaplamalı ayna kullanıldığında kırınım kayıpları	48
4.6. U25 undulatörü için gümüş kaplamalı ayna kullanıldığında enerji kayıpları	48
4.7. U25 undulatörü için altın kaplamalı ayna kullanıldığında kırınım kayıpları	49
4.8. U25 için 1.100mm ayna yarıçap değerindeki enerji kayıpları	49
4.9. U25 için 1.100mm ayna yarıçap değerindeki kırınım kayıpları.....	50
4.10. U90 undulatörü için gümüş kaplamalı ve 1.126mm delikli ayna için enerji kaybı.....	50
4.11. U90 undulatörü için gümüş kaplamalı ve 1.126mm delikli ayna için kırınım kaybı	51
4.12. U25 için rezonatördeki lazer gücünün Rayleigh konumuna göre değişimi	55

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
4. 13. Demet enerjisi, undulatör aralığı ve SEL Dalgaboyunun birbirlerine göre değişimi...	56
4.14. Doyuma ulaşma süresi boyunca geçişlere göre (250 geçiş için) kazancın değişimi.....	57

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Elektromagnetik spektrumun dalga boyu, frekans ve enerji aralığı.....	10
2.2. Klasik lazerler ile SEL' in karşılaştırılması	15
3.1. THM IR SEL için elektron demeti parametreleri.....	21
4.1. THM Lazer, Elektron Demeti, Undulatör Parametreleri.....	30
4.2. THM IR-SEL için analitik hesap sonuçları	37
4.3. Ayna kaplama malzemeleri	40
4.4. Ayna materyalleri ve özellikleri	40

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklamalar</u>
THM	Türk Hızlandırıcı Merkezi
IR	Kızılötesi (Infrared)
SEL	Serbest Elektron Lazeri
THM IR-SEL	Türk Hızlandırıcı Merkezi Kızılötesi Serbest Elektron Lazeri
YUUP	Yaygınlaştırılmış Ulusal ve Uluslar Arası Proje
CW	Sürekli Dalga
UV	Ultra Viyole
VUV	Vakum Ultra Viyole
EM	Elektromagnetik
<u>Simgeler</u>	<u>Açıklamalar</u>
e^-	Elektron
p	Proton
λ_u	Undulatör Dalga Boyu
L_u	Undulatör Uzunluğu
L_c	Optik Kavite Uzunluğu
ω_0	Gaussian Demetinin Beli
ω_z	Gaussian Demetinin Undulator Bitimindeki Büyüklüğü
ω_1	Birinci Ayna Üzerinde Elde Edilen Işınımın Boyu
ω_2	İkinci Ayna Üzerinde Elde Edilen Işınımın Boyu
λ_L, λ_R	Elde Edilen Lazerin Dalga Boyu
g	Gap Mesafesi
$g_1 \times g_2$	Kararlılık Parametreleri
$\mathcal{G}_0$	Kazanç Parametresi
B_0	Manyetik Alan
K	Undulatör Kuvvet Parametresi
k_u	Undulatör Dalga Sayısı
m	Elektronun Kütlesi

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (Devamı)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklamalar</u>
e	Elektronun yükü
γ	Elektronun enerjisi
Σ_e	Elektron demetinin enine kesit alanı
Σ_L	Optiksel demetin enine kesit alanı
R_1, R_2	Aynalar üzerindeki eğrilik yarıçapı
I_0	Alfven akımı
I	Elektron demetinin akımı
G	Net SEL kazancı
$\mathcal{E}$	Elektron demeti emittansı
$\mathcal{E}_n$	Normalize emittans (yayınım)
Z_R	Rayleigh uzunluğu
$\sigma_{x,y}$	x ve y yönündeki enine elektron demeti büyüklüğü
p	piko biriminin sayısal değeri 10^{-12}
n	nano biriminin sayısal değeri 10^{-9}
ps	pikosaniye
fs	femtosaniye
C	Coulomb değeri
mrاد	mili radyan
MeV	Mega Elektron Volt
GeV	Giga Elektron Volt
TeV	Tera Elektron Volt

1. GİRİŞ

Günümüz teknolojilerinin en önemli araçlarından olan lazerler son 20 yılda hızla gelişmiş ve kullanım alanları da paralel şekilde yaygınlaşmıştır. Dünya ülkelerinde olduğu gibi ülkemizde de bu konu ile ilgili detaylı çalışmalar yoğun bir şekilde devam etmektedir. Özellikle en fazla gelişim gösteren lazer çeşidi olan Serbest Elektron Lazerleri (SEL), yüksek enerji fiziği, nükleer ve malzeme fiziği gibi bilimsel ve fiziksel araştırma alanlarının yanında tıp ve medikal alandaki uygulamaları ile tercih sebebidir. Fiziksel amaç ve teknolojileri yönünden ayrılan mevcut ışınım kaynaklarından 4. nesil ışınım kaynakları SEL olarak bilinmektedir.

1.1. Işınım Kaynakları

Yükli parçacıklar eğrisel bir yörüngede hızlandırıldıkları zaman enerjilerinin bir kısmını ışıma yaparak kaybederler. Oluşan bu ışınım sinkrotron ışınımı (SI) denilmektedir. Hafif parçacıklardan (elektron) elde edilen ışınım enerjisi aynı yörünge için ağır parçacıklardan (proton) elde edilenden yaklaşık 10^{13} kat daha fazladır. Bu büyük oran günümüzde dairesel hızlandırıcılar ile ulaşılabilen enerjilere hafif parçacıklar için bir üst limit koymaktadır. Sinkrotron ışınımı elde edildiği donanım ve özellikle kaynaklık eden parçacık demetinin özelliklerine göre 1. 2. ve 3. nesil şeklinde gelişim göstererek günümüze ulaşmıştır. 4. nesil ışınım ise son 15 yıldır aktif olarak üzerinde çalışılan SEL'dir. SEL, rölativistik bir elektron (e^-) demetinin undulator olarak adlandırılan magnetten geçirilirken izlediği sinüsel (harmonik salınım) yol nedeniyle kinetik enerjisinin bir kısmını elektromagnetik (EM) ışınım yoluyla ayarlanabilir, yüksek parlaklık ve tek enerjili lazer ışını olacak şekilde ışıması ile elde edilmektedir [1, 2]. Bu tez çalışmasında, Türk Hızlandırıcı Merkezi (THM) lazer sisteminde elektron parçacığı üretilecek, hızlandırılacak ve yüksek parlaklık verecek şekilde ışıma yapması sağlanacaktır. Bu tür lazerler iki modda üretilmektedir; salındırıcı magnetle birlikte optik kavitede ışığı belirli bir akı değerine ulaştırana kadar karşılıklı ayna sistemleri arasında salındırmak şeklinde olmak üzere osilatör modunda (O modu) veya salındırıcı magnetten tek geçişli ve koherent ışınım ile kendiliğinden genlik yükseltmeli "Amplifier" modunda (A modu) üretilebilir. Dalgaboyu ayarlanabilir, monokromatik, koherent, yüksek akı ve parlaklık değerlerine sahip bu lazerler, bu özellikleri ile 2. ve 3. nesil sinkrotron ışınım kaynaklarına üstünlük sağlamaktadırlar. Dalgaboyu aralığı mm'den kızılötesine (IR), vakum ultraviyole'den (VUV) yumuşak ve sert x-ışını (Angström) bölgesine kadar uzanan bu lazerlerin günümüzde fiziksel araştırmalardan, biyolojik ve kimyasal süreçlerin araştırılmasına, mikro-spektroskopik yöntemlerle analizden mikro-cerrahiye, savunma sanayiinden denizaltı radar sistemlerine kadar onlarca uygulama alanı mevcuttur. Özellikle pikosaniye uzunluklu ve nC yük yoğunluklu

paketçiklerden oluşan çok düşük emittans (yayınım) değerlerine sahip e^- demetlerine dayalı x-ışını bölgesine düşen serbest elektron lazerleri, gerek bilimsel araştırma, gerekse uygulamalı alanlarda hızlandırıcıya dayalı yeni lazerler olarak son on yılda büyük önem kazanmışlardır [3].

Hızlandırıcılarla elde edilen ışınlamalar genel olarak hafif parçacıkların rölativistik enerjilerle dairesel yörünge hareketi esnasında yapılan EM ışımalara dayanır. Bu ışımlar veya başka deyişle dairesel yörüngeler, eğici magnetler ve düz kısımlara yerleştirilen undulator veya zigzaglayıcı magnetler aracılığı ile gerçekleştirilmektedir. Işınlamalar günümüze kadar dayandıkları teknoloji, fiziksel amaç ve parametreleri açısından 4. nesilde incelenmektedir [4].

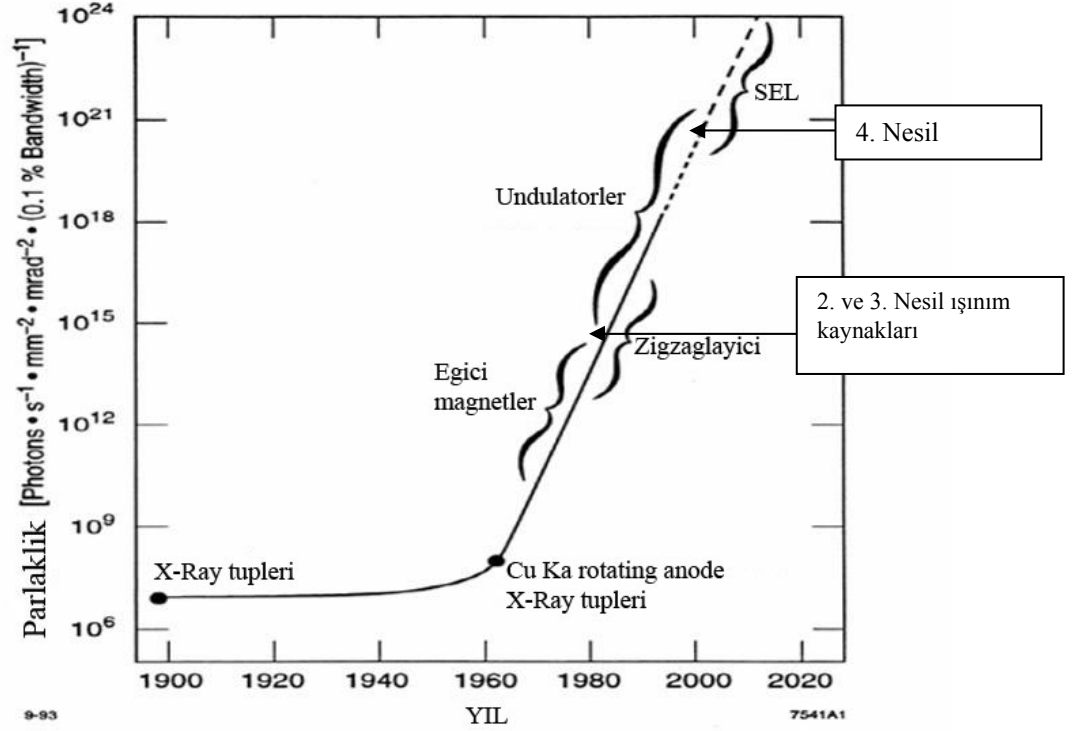
1. nesil ışınlam kaynakları: Genellikle yüksek enerji fiziği deney çalışmaları için kurulan halka şeklindeki temel parçacık çarpıştırıcılarının ışımlarını içermektedir. DORIS [5], PETRA [6], PEP ve TRISTAN [7] elektron-pozitron çarpıştırıcıları 1. Nesil ışınlam kaynaklarıdır.

2. nesil ışınlam kaynakları: İlk olarak 1974 yılında Tokya’da işleme alınan 380 MeV lik SOR ringi olan ışınlam için sadece eğici magnetleri kullanan ve birden fazla demet hattına sahip olacak şekilde inşa edilmiş sinkrotronlardır. (Berlinde bulunan 0.8 GeV’lik BESSY I, ve Daresbury’da bulunan 2 GeV’lik SRS 2. Nesil ışınlam kaynaklarıdır [8]).

3. nesil ışınlam kaynakları: Düşük yayınlı, e^- demetlerine, undulator veya zigzaglayıcı magnetlerin yerleştirileceği düz kısımlara sahip ve iki kategoride anılan halka şekilli ışınlam kaynaklarıdır. 3. nesil 1. kategori ışınlamalar 100-200 m çevreli, 1-2 GeV’lik ringleri ve 2 keV’den düşük spektral bölgeyi kapsamaktadır (VUV ve yumuşak x-ışını gibi). Berlin de bulunan 1.5 - 2 GeV’lik BESSY II [8], ve 1.5-2 GeV’lik ELETTRA, Trieste [9] 3. nesil 1. kategoriye giren ışınlam kaynaklarıdır. 3. nesil 2. kategori ışınlamalar ise 800-1500 m çevreli 6 - 8 GeV’lik ringleri ve 2 keV’in üzerinde spektral bölgeyi (sert x-ışını bölgesi) kapsamaktadırlar. Avrupa Sinkrotron Işınlamı Laboratuvarı (ESRF, Grenoble, Fransa [10]) 6 GeV lik enerjisi ile 3. nesil 2. kategoriye iyi bir örnektir.

4. nesil ışınlam kaynakları: Doksanlı yıllarda hayata geçirilen lineer (doğrusal) veya ring (halka) şeklindeki hızlandırıcılarda süperiletken kaviteeler ile hızlandırılan çok düşük yayınlı, yüksek pik akım değerli (pikosaniye mertebesinde paketçik uzunluğu, nC mertebesinde paketçik yükü) elektron demetleri ve gelişmiş undulator veya zigzaglayıcı magnetleri kullanılarak elde edilen ve dalga boyları nm - Angström metresinde olan, yüksek akı, parlaklık ve güç değerlerine sahip ışınlamlardır. Bu ışınlamalar SEL olarak bilinmektedirler. 2000 yılı içinde devreye giren iki önemli SEL laboratuvarı 4. nesil ışınlamalara iyi bir örneklerdir. Bunlardan bir tanesi Almanya’da bulunan Tesla Test Facility Free Electron Laser, TTF FEL,

(DESY, Hamburg, Almanya) [11] ve diğeri İtalya'da kullanılan ELETTRA FEL'dir (Trieste, İtalya) [9]. Şekil 1.1 de görüldüğü gibi 2. ve 3. Nesil ışınım kaynakları 10^{12} mertebelerinde parlaklığa sahipken 4. Nesil ışınım kaynakları 10^{18} mertebesinde parlaklığa sahiptir. Gelişen teknolojik sistemler sayesinde bu değerler ilerleyen yıllarda artacaktır.



Şekil 1.1. Işınım kaynaklarının zaman içerisinde gelişimi

4. nesil ışınım kaynakları hızlandırıcı fiziği açısından,

- Çok düşük emittans değerlerine sahip doğrusal hızlandırıcılar (linaklar),
- Söndürücü zigzaglayıcılara sahip düz kısımlar,
- Büyük ring ancak küçük FODO örgüsü ve Fokusslayıcı kuadropoller,
- Küçük ring ancak yerel kromatiklik düzeltme amaçlı sekstupoller,
- ps mertebeli paketçik (bunch) uzunluğu, nC mertebeli paketçik yükü,
- Süperiletken RF yapılar ve Düşük momentum sapması gibi faktörleri içerirler [12].

1.2. Lazer Nedir? Çalışma Prensipleri Nelerdir?

Lazer kelimesi İngilizce olarak; “Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation” (Uyarılmış Işıma ile Kuvvetlendirilmiş Işık) cümlesindeki kelimelerin baş harflerinin alınmasından türetilmiş bir kelimedir. 1960 senesinde ABD’nin California eyaletinde bulunan Hughes Araştırma Laboratuvarında Theodore H. Maiman tarafından keşfedilmiştir ve günümüzde fotonik adı verilen bilim ve teknoloji dalının temelleri atılmıştır. Lazer ışığını o güne kadar bilinen tüm ışık kaynaklarından ayıran çok önemli temel fiziksel özellikleri vardır. Lazerler, tek renkli, oldukça düz, yoğun ve aynı fazlı paralel dalgalar halinde genliği yüksek güçlü bir ışık demetidir. Normal ışık, dalga boyları muhtelif, rengarenk, yani farklı faz ve frekansa sahip dalgalardan meydana gelmektedir. Lazer ışığı ise yüksek genlikli, aynı fazda, birbirine paralel, tek renkli, hemen hemen aynı frekanslı dalgalardan oluşmaktadır. Lazerlerle üretilen ışık eşevrelidir (koherenttir). Bu uyumlu özellikleri sayesinde pek çok alanda verimli bir şekilde kullanılmaktadırlar. Lazerlerin optik frekans bölgesi yaklaşık olarak bir trilyon hertz ile üç bin trilyon hertz arasında yer alır. Bu bölge EM spektrumun kırmızı ötesi ışınları, görülebilen ışınları ve EM Spektrumun morötesi ışınlarını kapsamaktadır [13].

Optik bakımdan saydam, bir ucunda tam yansıtıcı, diğer ucunda yarı yansıtıcı iki ayna bulunan bir tüp içine gaz, sıvı veya katı bir madde doldurulmaktadır. Dışarıdan foton yollayarak, elektrik akımı geçirilerek veya kimyasal bir yolla elde edilen enerji, ortamdaki atomlara ulaştırılır. Bu atomların bazıları bu enerjiyi içlerine çekmektedirler. Fazla enerji, atomları kararsız hale getirir. Kendisine bir foton çarpan, uyarılmış ve kararsız haldeki atom, fazla enerjiyi foton yayarak verir. Fotonlar, benzer şekilde diğer fotonların yayılmasını sağlamaktadırlar. Sistemin uç noktalarına ulaşan fotonlar, aynalardan yansyarak geri dönerler ve olay bu şekilde devam etmektedir. Uyarma ve tahriklerde ortamdaki foton miktarı artmaktadır. Atomların hemen hemen hepsi, foton yaymaya başlayınca ışık kuvvetlenmektedir ve kısmen yansıtıcı aynadan dışarı çıkmaktadır. Lazer ışını bu şekilde oluşmaktadır. Klasik lazerlerle serbest elektron lazerleri hemen hemen aynı yöntemle elde edilmektedir. Normal ışıkta dalgalar, birbirini zayıflatıcı karakterde olmasına rağmen, lazerde birbirini kuvvetlendirici türdedirler. Lazer ışınları yüksek frekanslı ışınlar olduklarından güneş ışını özelliklerine sahiptirler. Ancak lazer ışınları tek frekanslı olduğu için kayıpları azdır. Ayrıca lazer ışınları aynı fazda yapılan ışık dalgaları olduğu için şiddeti büyük olur. Bu yüzden lazer ışınlarının şiddeti güneş ışınlarının şiddetinin bir milyon katıdır. EM dalga paketçisi de denilen foton, güneş ışığı füzyon reaksiyonuyla meydana gelip, bu şekilde yayılan foton enerjisidir. Lazer ışını foton yayılmasından oluşmaktadır. Lazerde foton üretimini anlayabilmek için atomların enerji değişik seviyelerinde ne gibi olaylar olduğunu bilmek gerekmektedir. Bir atomun uyarılmış durumda

bulunduğu kısa zaman aralığında üzerine belli bir dalga boyunda foton düşürülürse, atom aynı fazda foton yayar. Bu işlem ard arda tekrarlanırsa, tamamen aynı fazda bir ışın demeti elde edilir. En düşük enerji seviyesinde bulunan bir atoma dışarıdan bir foton verilirse, atom enerjisi kazanarak E_1 enerji seviyesinden E_2 enerji seviyesine uyarılmış olur. Bu atom kendi haline bırakılırsa, uyarılmış bulunduğu E_2 enerjisinden bir foton vererek tekrar E_1 enerji seviyesine düşer. Uyarılarak enerji seviyesi E_1 'den E_2 'ye yükseltile atom enerjisini geriye foton olarak yaymaya başlarken bir foton daha çarptırılırsa atomu birbiri ile aynı özellikte iki foton terk eder. Bu şekilde atom kat kat enerji seviyelerine çıkarılırsa bu seviyelerden düşerken de katlar halinde fotonlar meydana gelir. Bu işlem iki paralel ayna arasında aynı fazda olan fotonların toplanması şeklinde devam etmektedir. Lazer ışının dalga boyu aynalar arasındaki mesafe ile ilişkilidir. Aynı frekansta yani, aynı dalga boyunda yapılan foton üretimine uyarılmış yayılma işlemi denir. Milyonlarca atom için bu işlem yapılırsa aynı yöne doğru milyonlarca foton paralel ışınlar halinde bir noktadan yayılır. Bu ışınlar aynı fazda, aynı frekansta, aynı yönde olduklarından birbirine yan yana yapışıktır. Paralel aynalar arasında şiddeti bu şekilde çıkış gibi artan ışınlar, ışık frekansına eş bir frekansta, darbeler halinde oldukça parlak ışık hüzmesi olarak yayılırlar. Lazer ışınındaki enerjinin artmasının esası bu milyonlarca küçük enerji kaynaklarının çok dar bir hüzme halinde aynı yönde hem yan yana hem de ard arda birleşmesinden kaynaklanmaktadır [13]. SEL'de klasik lazerler gibi elde edilmektedir fakat fotonlar, tüp yerine zıt kutuplu magnetler arasına hapsedilmektedir ve bu bölge boyunca git gel hareketi yapmaktadırlar. Bunun sonucunda oluşan ışınının özellikleri bakımından diğer lazerlerden daha üstündürler.

1.3. Lazer Işınının Özellikleri

1. En önemli özelliği dağılmaz olması ve yön verilebilmesidir. Dalga boyunun küçük olması dağılmayı büyük ölçüde azaltır. Uyarılan atomlar belli yönlerde hareket ederler. Bu lazerin çok parlak olmasını sağlar. Lazer ışınının bu özelliğinden faydalanılarak mesafe ölçme ve fiber optik teknolojisi gelişmiştir. Lazerde “uyarılmış salım” sayesinde elde edilen fotonların oluşturduğu EM dalgalar çok az açıldıkları için çok uzak mesafelere büyük güç yoğunluğu ulaştırabilmektedirler. Lazer ışınları, “uzaysal eş evrelilik” nedeniyle doğada var olan en yüksek yönlülüğe sahiptirler [14].

2. Lazer ışını, dalga boyu tek olduğundan monokromatik özellik taşır. Frekans dağılım aralığı, frekansının milyonda biri civarındadır. Böylece istenilen frekansta çok sayıda dalgalar lazer dalgası üzerine bindirilerek haberleşmede iyi bir sinyal jeneratörü olarak kullanılmaktadır. Bu durum sayesinde aynı anda birçok bilgi bir yerden başka yere gönderilebilir [14].

3. Lazer ışını dağılmaz olduğundan kısa darbeler halinde yayınlanabilmesi mümkündür. Kayıpsız yüksek enerji nakli yapılması bu özelliği ile sağlanmaktadır. Lazer kendisinde bulunan yüksek enerji sayesinde kesme, kaynak ve delme endüstrisinde kullanılır. Ayrıca lazer darbesinin çok kısa olmasından dolayı yüksek hız fotoğrafçılığında faydalanılır. Yönlü bir hareket olmasından ise holografi ve ölçüm biliminde yararlanılır. Bütün özellikleri ile uzak mesafe ölçümlerini mümkün kılmaktadır [14].

4. Lazer ışını tek dalga boyuna sahip olduğu için lazer cinsine göre çeşitli renkte ışınlar elde etmek mümkündür [14].

1.4. Lazerin Kullanım Alanları

Günümüz teknolojisinde lazerlerin pek çok kullanım alanı vardır. Lazer ışını da güneş ışını gibi atmosferden etkilenmektedir. Bu sebeple atmosfer, radyo yayınlarındaki gibi lazer yayını için de uygun bir ortam değildir. Bu yüzden lazer ışınları, içi ayna gibi olan yerin içinden gönderilirse kayıp olmadan bir yerden diğerine ulaşır. Böylece milyonlarca değişik frekanstaki bilgi aynı anda taşınabilmektedir. Bu maksatla foto diyot kullanılmakta ve elektrik enerjisi foto diyotta ışık enerjisine çevrilmektedir. Dünyanın birçok telefon şirketleri bu tatbikata geçmişlerdir, böylece Lazer, haberleşmede kullanılabilecek özelliklere sahiptir. Lazer, uzayda mesafe ölçmede kullanılır. Peykler arasındaki mesafeyi 25 cm hata ile ölçebilmektedir. Lazerle ilk mesafe ölçümü, 1962 senesinde, Ay'a yerleştirilen argon-iyon lazeri ile yapıldı. Lazerler, inşaatlarda, boru ve tünel yapımında, yön, doğrultu tayininde ve tespitinde klasik teodolitlerden çok daha iyi ve kullanışlıdır. CO₂ lazerleri metal, cam, plastik kaynak ve kesme işlerinde kullanılır. Lazerin askeri alandaki tatbikatları çoktur. Mesafe bulma, yer tanıma maksadıyla kullanıldığı bilinmektedir. Hedefe gönderilen güdümlü mermiler, hedef yakalanınca lazer ışını ile infilak ettirilmektedir. Gece karanlığında gece görüş dürbünleri sayesinde gündüzmüş gibi operasyon yapılabilir. Çok başlıklı füzelerin hafızalarına yerleştirilen hedef resmi, füze hedefe yaklaşınca lazer ışını ile tanınır. ABD'nin 1984 yılında geliştirdiği füze savunma sistemi, düşman füzesini havada iken uzaydan gönderilen lazer ışını ile tahrip edebilmektedir. Lazerler Holografi ve fotoğrafçılıkta da kullanılır. Lazerle görüntü kaydetme süresi saniyenin 10 trilyonda biri zamanda mümkün olur. (Holografi, lazer ışınları ile üç boyutlu resim çekme ve görüntüleme tekniğidir). Sağlık alanında da lazerlerin yaygın kullanımları vardır. Tıpta lazer "kansız ameliyat" maksadı ile kullanılır. Yırtılmış göz retinası, lazer ışını ile acısız ve hızlı bir biçimde dikiş edilir. Vücudun çeşitli bölgelerindeki tümörler bıçakla açılmadan yerinde kesilerek tedavi edilebilir. Damardaki dokular, lazer ışını ile kaynar ve kanama olmaz, çürük diş çukurları dolgu yapılmak üzere acısız delinir. Son yıllarda sağlık ve estetik gibi alanlardaki uygulamaları

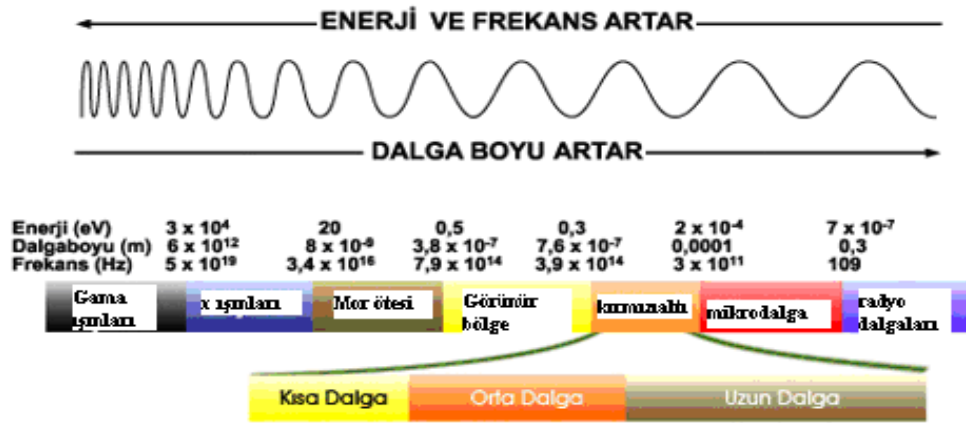
ile hayatımızda önemli yer tutmaya başlayan lazerler çeşitli ışık oyunları ile eğlence sektöründe de yerini almıştır. Lazerin görünen çok ciddi zararları olmasada olumsuz etkileri vardır. Önlem alınmadığı zaman ortaya cilt yanıkları, gözde ve ciltte geri dönülemez ciddi hasarlara sebep olabilir. Bu hasarlar maruz kalınan süre, ışının dalga boyu, enerjisi ve doku tipine bağlı olarak boyut değiştirmektedir. Ayrıca başlatılması zor olan termonükleer-füzyon olayının (hidrojen bombası ve güneşte her an meydana gelen reaksiyonlar) lazer ile tetiklenmesi beklenilmektedir. Böylece dünya enerji problemi ortadan kalkacağı düşünülmektedir. Lazer ışınının darbe süresinin saniyenin trilyonda birine düşürülmesi halinde kısa sürede üretilecek enerji bugün dünyada aynı müddette üretilmekte olan enerji toplamından fazla olacaktır [15].

1.5. Lazer Çeşitleri

Klasik lazerler, katı, sıvı, gaz, yarı iletken, TEA, Korbondioksit, Nd-Yag olmak üzere çalışma prensiplerine göre çeşitlere ayrılır. Son yıllarda hızla gelişmekte olan ve dünya kullanımında yer alan bir diğer lazer türü ise Serbest Elektron Lazerleridir (SEL). Bu lazerlerde doğrusal hızlandırıcıda hızlandırılan elektron demetinin, undulatör olarak adlandırılan sinüsel bir manyetik alandan geçerken enerjisinin bir kısmını EM ışıma olarak kaybetmesidir.

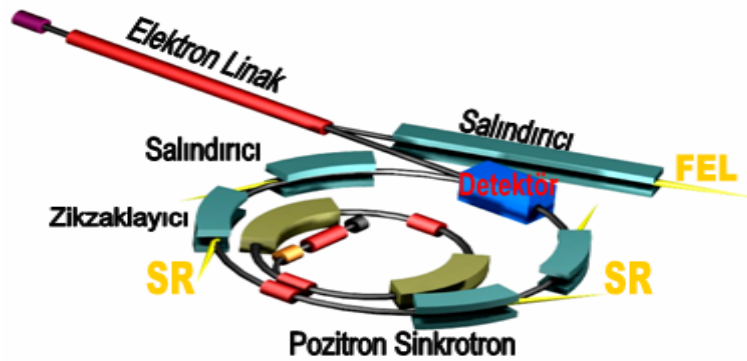
2. SERBEST ELEKTRON LAZERLERİ

Son yılların en gelişmiş teknolojisi olan Serbest Elektron Lazerleri ile günümüzde EM spektrumun kırmızıaltı bölgesinden morötesi bölgeye kadar geniş aralığı taranmaktadır (Şekil 2.1) .



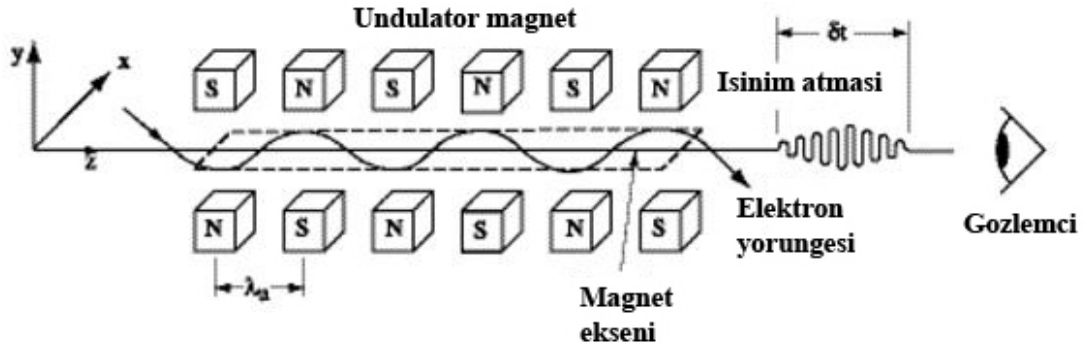
Şekil 2.1. EM Spektrum

SEL'ler atomik ve moleküler sistemlerde bağlı olmayan, serbest elektronların kullanıldığı yeni lazer türlerindendir. Özellikle son 20 yıldır bu lazerler üzerinde çalışmalara önem verilmiştir ve bu lazerlerin mevcut olduğu hızlandırıcı laboratuvarları açılmaktadır. Bu yeni tip lazer sistemlerinde elektron tabancasından elde edilen birkaç MeV enerjiye sahip elektronlar, şekil 2.2 de görüldüğü gibi lineer hızlandırıcılar (linak) veya sinkrotron gibi elektron hızlandırıcıları aracılığı ile yüksek enerjilere ulaşıncaya kadar hızlandırılmaktadır [16].



Şekil 2.2. SEL ve SR

SEL, fizik olarak temelde elektronun kinetik enerjisini eş fazlı EM ışımaya dönüştürme prensibi ile çalışmaktadır. Bu dönüşümde salıncıcı adı verilen magnetlerin oluşturduğu sinüsel manyetik alanın etkisi kullanılmaktadır [17]. Şekil 2.3’ te salıncıcı magnet kutupları arasından geçen ışımının geometrisi görülmektedir.



Şekil 2.3. Salıncıcı magnetten yayılan sinkrotron ışımının geometrisi

SEL, Lineer hızlandırıcıdan veya Sinkrotron hızlandırıcısında hızlandırıldıktan sonra lazer ışınının oluşturulacağı ve dışarıya alınacağı sistem özelliklerine göre 3’e ayrılmaktadır. Bunlar; Yükselteç SEL, Osilatör SEL ve SASE (Kendiliğinden Genlik Artırmalı Yayınım) SEL’dir. Yükselteç modu mevcut lazer ışınının, elektron demetinin salıncıcı magnetten geçirilmesi yolu ile elde edilen ışınım ile güçlendirilmesi prensibine dayanır.

Osilatör modu, elektron demetinin salıncıcı magnetten geçirilmesi yolu ile elde edilen ışınımın, salıncıcının giriş ve çıkışına yerleştirilen aynalar ile güçlendirilmesi prensibine dayanmaktadır. SASE modu rölativistik bir elektron demetinin, kutupları arasına sinüsel bir manyetik alan uygulanan uzun salıncıcı magnetten geçirilmesi prensibine dayanmaktadır. Dünyada çalışan SEL’lerin çoğu optik rezonatör fazlı düzeneklerdir. THM olarak elde edilmesi planlanan IR-SEL (kırmızıaltı SEL) bir Osilatör SEL çeşididir. Osilatör SEL’ler EM spektrumda kapsadıkları dalga boyuna göre adlandırılırlar. THM projesinin IR-SEL dışında bir de SASE SEL ışınımı elde etmeye yönelik çalışmaları hızlı bir şekilde devam etmektedir.

Elde edilmesi istenilen farklı spektral bölgeler için serbest elektron lazer dalga boyu aralıkları genellikle şu şekildedir. Uzak kızılötesi bölgesi için $1000 \mu\text{m} - 10 \mu\text{m}$, yakın kızılötesi, görünür ve ultraviyole bölge $10 \mu\text{m} - 200 \text{ nm}$, vakum ultraviyole ve daha ileri ultraviyole (VUV) bölge $200 \text{ nm} - 10 \text{ nm}$ dalga boyuna sahip lazer ışınımı elde edilmelidir. Çizelge 1.1 de EM spekturumun dalgaboyu, frekans ve enerji değerleri görülmektedir.

Çizelge 2.1. EM Spektrumun dalga boyu, frekans ve enerji aralığı

Bölge	Dalga boyu (mikrometre)	Frekans (Hz)	Enerji (eV)
Radyo	$> 10^6$	$< 3 \times 10^9$	$< 10^{-5}$
Mikro dalga	$10^3 - 10^6$	$3 \times 10^9 - 3 \times 10^{12}$	$10^{-5} - 0.01$
Kırmızıaltı	$1 - 10^3$	$3 \times 10^{12} - 4.3 \times 10^{14}$	$0.01 - 2$
Görünür	$0.4 - 1$	$4.3 \times 10^{14} - 7.5 \times 10^{14}$	$2 - 3$
Mor ötesi	$1 - 10^{-2}$	$7.5 \times 10^{14} - 3 \times 10^{17}$	$3 - 10^3$
X-ışınları	$10^{-2} - 10^{-4}$	$3 \times 10^{17} - 3 \times 10^{19}$	$10^3 - 10^5$
Gama ışınları	$< 10^{-4}$	$> 3 \times 10^{19}$	$> 10^5$

Atomik enerji seviyeleri ile herhangi bir bağımlılık olmaması sebebiyle elektronların serbest davranışları sayesinde SEL çok geniş bir dalga boyu aralığını kapsayabilmektedir. Bu durum SEL ışınımının önemini artırmaktadır. Kullanılan elektron demeti özelliklerine göre SEL, Compton ve Raman SEL olmak üzere ikiye ayrılır. Raman SEL’de düşük demet enerjilerinde elektronlar arasındaki etkileşmeler baskındır. Rölativistik parçacıklarda ise elektronlar arasındaki bu etkileşme ihmal edilebilir ve bu durumda Compton SEL ile karşılaşılır. Hızlandırıcılarda genellikle yüksek enerjili parçacıklar kullanıldığından, Compton SEL olayı gerçekleşmektedir. SEL lazeri elde edebilmek için kaliteli niceliklere sahip elektron demetine ihtiyaç vardır. Elektron demetinin özelliklerine göre ve özellikle enerji aralığına göre lazer dalga boyu aralığı değişim göstermektedir. Genel olarak elektron demetinin enerjilerine göre şu aralıklarda dalga boylu lazerler üretilmektedir;

5-10	MeV	uzak kızılötesi bölgede dalga boyu üretimi,
10-50	MeV	orta kızılötesi bölgede dalga boyu üretimi,
500-1000	MeV	UV-VUV bölgede dalga boyu üretimi,
10-20	GeV	X Işınları bölgesinde dalga boyu üretimini sağlar.

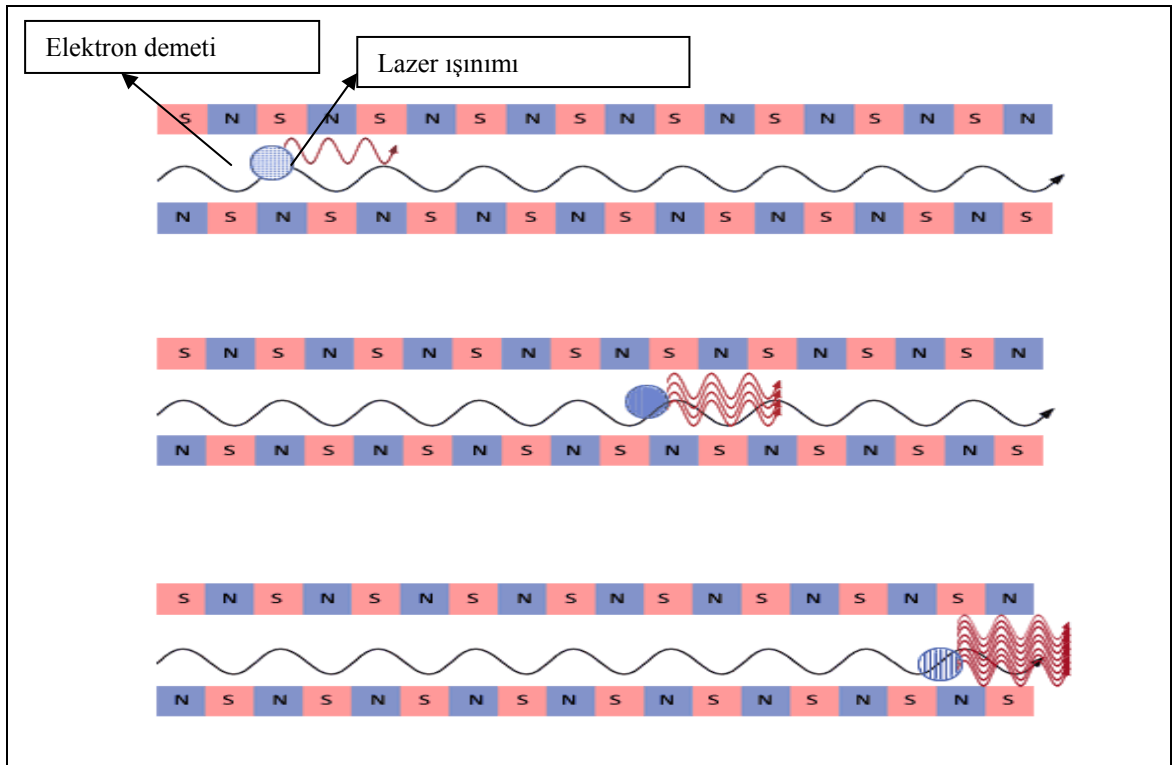
Türk Hızlandırıcı Merkezi’nde kullanılacak elektron demetinin enerji aralığı 15-40 MeV arasındadır. Bu değerler ile ülkemize kızılötesi bölgeyi kapsayan lazer tesisi kurulacaktır.

2.1. Serbest Elektron Lazerinin Çalışma Prensibi ve Özellikleri

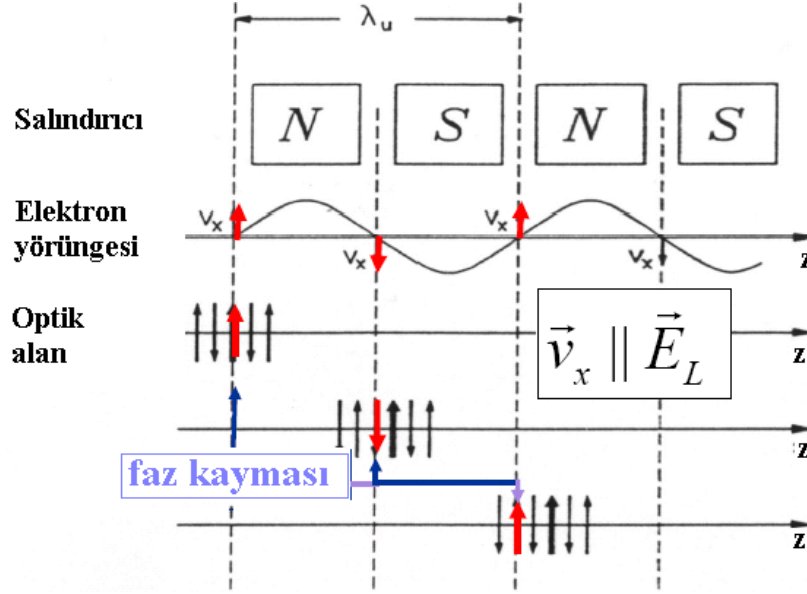
SEL, lineer hızlandırıcı veya sinkrotlardan elde edilen rölativistik elektron demetlerinin çok kutuplu olan ve kutupları arasına sinüsel bir magnetik alanın uygulandığı salındırıcı magnetlerden geçirilmesi yoluyla elde edilmektedir. Genel olarak bir lazer ışınımı elde etmek için enerjisi, akımı, yayılımı gibi özellikleri belli olan rölativistik elektron demeti ve magnetik periyotları, uzunluğu belli olan bir undulatör kullanılarak elektron demetinin undulatör içindeki hareketiyle belirli bir güce ve doyuma ulaşmış ışınımlar elde edilmektedir. Günümüzde tipik serbest elektron lazerlerinin gücü 1-100 kW aralığındadır. Şekil 2.4'te SEL'in elde edileceği düzenek gösterilmektedir. Kaynak olarak adlandırılan kısım elektron demetlerinin çıkış kaynağıdır. Hızlandırıcı bölümünde ise elektron demetleri hızlandırılmaktadır. Lineer olarak ilerleyen hızlandırılmış elektronların optik kavite sistemini girmesi için eğici magnetler kullanılmaktadır. Rezonatör içerisine giren elektron demetleri ise undulatör sayesinde yönlendirilmektedir ve oluşan ışınım aynalar sayesinde dışarıya alınmaktadır. Şekil 2.5'te ise genel SEL şemasında; elektron demetleri rezonatör içine girdikten sonra undulatörlere doğru ilerlemektedir. Undulatör içinde enerjilerine paralel olarak aynalar arasında gidip gelerek ışıma yaymaktadırlar. Başlangıçta uyumsuz olan bu ışınımalar doyuma ulaşmaya kadar aynı özelliklere sahip duruma gelmektedirler. Elektronlarda daha belirgin paketçikler şeklini almaktadır. Elektron demeti için en küçük birim, hızlandırıcı gerilimin bir dalga boyu veya bunun katları kadar aralığa sahip olan mikro paketçiklerdir. Bu şekilde oluşan uyumlu elektron paketçikleri ve ışınımalar undulatör eksenini boyunca birlikte yol almaktadırlar. Doyuma ulaşan lazer ışınımı aynalardan lazer ışını dışarı alınırken elektron demeti başka amaçlarda kullanılmak üzere sistemden dışarı alınmaktadır. SEL Osilatörün ana donanımları; Elektron demeti; rezonatör ve undulatördür.

özelliklerini barındıran bileşenlere sahip olunmalıdır.

Şekil 2.3'te görüldüğü gibi e^- demetinin x, y, z yönünde hareket bileşenleri vardır. Undulatör içindeki e^- demeti x yönünde sinüsüel hareket ederken undulatörlerin sağladığı manyetik alan ışınının z yönünde ilerlemesini ve y yönünde dalga biçiminde olmasını sağlar. Şekil 2.6 (a) ve (b), e^- demetlerinin undulatör magnetleri içindeki davranışlarının zamanla değişimini daha detaylı olarak vermektedir. Undulatör içinde e^- demetinde oluşan ışınım e^- demeti ile birlikte hareket ederken ışınım artık ışık olduğundan ışık hızı ile yoluna devam etmeye başlar. Elektronlar hiçbir zaman ışık hızına ulaşamayacağından oluşan lazer ışının arkasından gelir.



Şekil 2.6a. Undulatör İçinde Elektron Demetinin Zamanla Güçlenerek Lazer Işını Oluşturması



Şekil 2.6.b Elektron demetinin davranışı

Elde edilen foton demetinin (lazer) dalga boyu esas olarak e^- demetinin enerjisine, undulator kutup dalga boyu λ_u 'ya ve salındırıcı kuvvet parametresi K 'ya bağlıdır. Işınım e^- demetinin yapısına bağlı olarak sürekli veya çok kısa (ns, ps) uzunluklu atmalar şeklindedir. SEL'in diğer lazerlerle ve sinkrotron tabanlı ışınım kaynaklarıyla kıyaslandığında birçok önemli avantajı olduğu görülür. Geniş dalga boyu aralığında (yakın IR'den uzak IR bölgesine kadar) hassas şekilde ayarlanabilir olması avantajlarından biridir (Çizelge 2.1) [16]. Klasik lazerlerde ve sinkrotron ışınımında her dalga boyunda kısa atmalar elde etmek mümkün değilken, SEL'den her dalga boyunda kısa atmalar elde edilebilmektedir. SEL'den pikosaniye hatta femtosaniye mertebelerinde atma elde etmek mümkündür (Çizelge 2.2). Bu lazerlerden diğer klasik lazerlerin ve sinkrotron ışınımının ürettiği pik ya da ortalama parlaklıklarından çok daha yüksek değerlerde parlaklık üretilebilmektedir. SEL çalışmasında süre sınırı bulunmadığı için yüksek güçlerde çalışabilmektedir. Diğer tip lazerlerde kullanım süresi aşıldığında lazer ışını bozulmaktadır. SEL'de böyle bir sınırlama bulunmadığı için lazer ışını bozulmaz.

Klasik Lazerlere Göre IR- SEL'in avantajları sıralanacak olursa;

- ❖ Ayarlanabilir Dalga boyu
- ❖ Geniş dalga boyu aralığı: yakın IR' den uzak IR bölgesine kadar
- ❖ Tekrarlanabilir kısa atmalar: ps mertebesinde

- ❖ Ortalama parlaklığı: 10^{16}
- ❖ Yüksek pik (tepe) gücü: MegaWatt mertebesinde
- ❖ Ortalama güç: $\sim W$

Güç, birim zamanda üretilen enerjidir ve Watt cinsinden ölçülür. Gücü 1 Watt olan lazer sürekli çalıştırıldığında saniyede 1 Joule optik enerji üretecektir.

Çizelge 2.2. Klasik lazerler ile SEL'in karşılaştırılması

	Nd-YAG	CO ₂	Ti-Saphire	SEL
Dalgaboyu	1.064 μm	10.6 μm	nm Mertebesinde	mm' den nm'ye kadar ayarlanabilir
Atma yapısı	Atmalı	Sürekli	Atmalı	Atmalı
Atma süresi	Milisaniye	—	Femtosaniye	Pikosaniyeden femtosaniyeye kadar
Pik Gücü	kW	kW	kW	kW

Akı, parlaklık ve aydınlık;

Oluşan lazer ışınının kalitesi doyum uzunluğu, doyum gücü değerleri ile değerlendirilirken yüksek akı, yüksek parlaklık, yüksek güç gibi terimlerle de ifade edilmektedir. Akı; SEL ışınlarında bir saniyede bir enerji aralığından yayılan foton sayısı olarak tanımlanmaktadır. Enerji aralığı ise kullanılabilen foton enerjisinin 0.1%band genişliğinden oluşmaktadır. Bu enerji aralığındaki foton akısı [18].

$$F = \frac{\text{foton}}{s0.1\%bandgenişliği} \quad (2.1)$$

Demet kalitesi parlaklık ve aydınlık terimleriyle verilir. Aydınlık ve parlaklık, demet yayını ve elde edilen ışınım demetinin kalitesini ifade eder. Deneysel açıdan önemlidir [19].

Ayarlanabilirlik;

Lazerleri önemli kılan özelliklerden biri de ayarlanabilirliktir ki oluşan lazer ışınının dalga boyuna etki eden bir özelliktir. Elektronun enerjisi, salındırıcı magnet alanı ya da her ikisi ile değişiklikler yapılarak dalga boyu ayarlanabilmektedir. Eğer e^- enerjisinde değişiklikler yapmak istenirse en küçük değişiklikle bile e^- demetinin enerjisinin kalitesini korumak için hızlandırıcı (RF) alanının fazının ve genliğinin ayarlamasının çok dikkatli bir şekilde yapılması

gerekir. Bu zor bir iş olduğundan salındırıcı magnet aralığında değışiklikler yapmak daha elverişlidir.

Monokromatiklik;

Lazer ışınınlarının tek enerjili olmasını ifade etmektedir. Normal ışık dağınık ve birbirlerini zayıflatıcı yönde olurken lazer ışınları birbirini kuvvetlendirici yönde olmaktadır. Lazer ışınları tek enerjili olduğunda aynı hız ve aynı doğrultuda hareket ederler. Bu ise lazer ışınımını kuvvetlendirir ve gücünü artırır.

Koherentlik;

Optik kavite kullanılan osilatör SEL’de rezonatör boyunca geçişlerin çok olması nedeniyle enine koherentlik iyi bir şekilde olmaktadır. Koherentlik; demetteki fotonların temsil edildiğı ışık dalgalarının hareket aşamasında zaman ve uzayda uyum içinde olmalarıdır.

2.2. Serbest Elektron Lazerinin Uygulama alanları

SEL’in, klasik lazerlerden daha yaygın ve işlevi bakımından öneme sahip kullanım alanları vardır. Elde edilen ışınım ile bilim, fiziksel araştırmaların yanı sıra, günlük hayatta, sağlık sektörü, savunma sektörü gibi yaşamı doğrudan etki eden özellikleri vardır. Kullanım alanlarının bazıları şu şekilde sıralanabilir [20];

- Yarıiletken yapılarıdaki koherent geçiş etkilerinin araştırılması,
- Yüzey soğurum spektroskopisi ve Çözelti süreçlerinde elektrod yüzeylerinin izlenmesi,
- Elektrokimyasal arayüzlerdeki titreşim dinamiğinin karakterize edilmesi,
- Moleküllerdeki titreşimsel enerji transferlerinin incelenmesi,
- Organik moleküllerin durulma ve ayrışma süreçlerinin araştırılması,
- Yüksek çözünürlüklü yüzey spektromikroskopisi,
- Metal yüzeylerden multifoton indüksiyonu yoluyla elektron yayını,
- Foto-termal etkilerle dokuların kesilmesi, foto-mekanik etkilerle sert dokuların kaldırılması, fotokimyasal etkilerle bir yüzeyin modifikasyonu,
- Diş minesinin sertliğini ve aside karşı dayanıklılığını arttırılması, yeniden mineralize edilmesi ve dişin taç bölgesinin açığa çıkarılması,

- Yumuşak doku kesiklerinin çalışılması, kanserli dokuların temizlenmesi,
- Seçilen bölgeden kolesterolün temizlenmesi, Moleküler yapıların karakterizasyonu,
- Yüksek duyarlılıklı örneklerde Foto Akustik Spektroskopi (PAS),
- Lineer Olmayan Titreşim Spektroskopisi ve Protein dinamiklerinin araştırılması,
- Yoğun madde araştırmaları, Gaz faz spektroskopisi,
- Çevre koruma amaçlı olarak materyallerin kütle spektrometresinin ölçülmesi
- Sinir cerrahi araştırmaları, Göz siniri zarı tedavisi ve Doku dinamiklerinin araştırılması.

3. TÜRK HIZLANDIRICI MERKEZİ PROJESİ

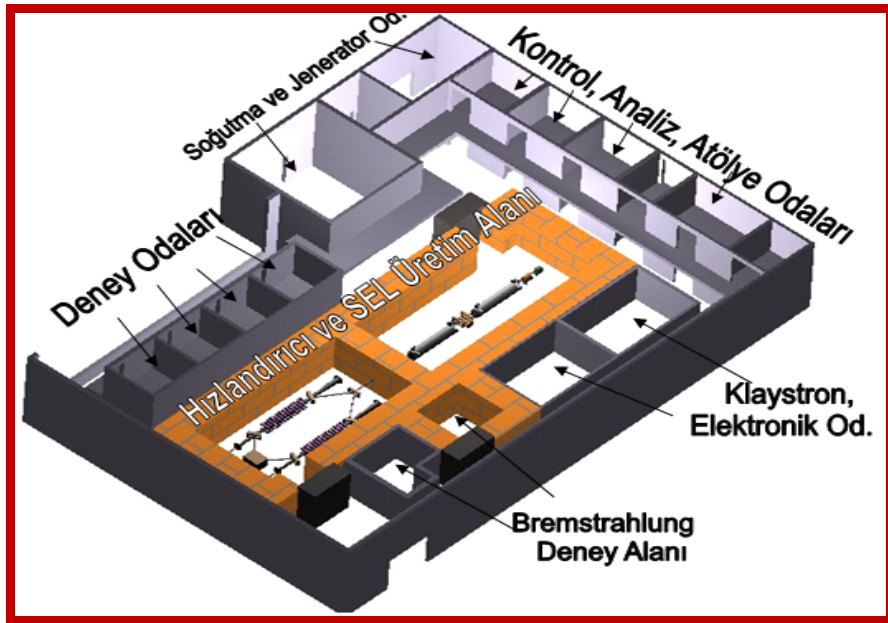
Türk Hızlandırıcı Merkezi (THM) Projesi Teknik Tasarımı ve Test Laboratuvarları Projesi, Ankara Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri birimince yürütülmekte olan Yaygınlaştırılmış Ulusal ve Uluslararası Proje (YUUP)- projesidir [21].

Üretilcek olan SEL çıkış dalgaboyu aralığına göre Dünyadaki lazer laboratuvarlarından EM spekturuma göre geniş dalga boyu aralığını kapsayacak olan (2-250 μ m) merkezin ana hedefi kızılötesi bölgede IR-SEL üretmenin yanında dört hedefi daha vardır. Bunlar,

- a) Elektron ve Pozitron demetlerinin çarpıştırılması ile parçacık fabrikasında (charm/Tau fabrikası) parçacık fiziği araştırmaları yapmak,
- b) Pozitron sinkrotronuna dayalı sinkrotron ışınımı üretmek ve kullanmak,
- c) Proton hızlandırıcısına dayalı araştırmalar yapmak.
- d) Elektron lineer hızlandırıcılarına dayalı SASE-Serbest Elektron Lazeri üretmek ve kullanmak şeklindedir.

THM projesi ile ülkemizde ilk hızlandırıcı enstitüsü ve hızlandırıcı kompleksi kurulacak ve hızlandırıcıya dayalı teknolojilerin Araştırma-Geliştirme’de kullanımı sağlanacaktır. Dünya’da 15.000 civarında hızlandırıcı mevcuttur. Dünya’da kullanılan hızlandırıcı tipleri şunlardır; Yüksek Gerilim Hızlandırıcıları, Lineer Hızlandırıcılar, İndüksiyon Hızlandırıcıları, Dairesel Hızlandırıcılar, Betatron, Siklotron, Mikrotron ve Sinkrotron Hızlandırıcılarıdır. Türk Hızlandırıcı Merkezi Projesinde Lineer Hızlandırıcı kullanılacaktır. Lineer Hızlandırıcılar; hızlandırmanın doğrusal bir yol boyunca sıralanmış bir veya birden fazla RF rezonans boşluğu ile gerçekleştirildiği hızlandırıcılardır. Parçacıkları (e^- , p vb.) hızlandırmaya yarayacak şekilde, elektrotları ve aralıkları değiştirilebilir halde bir doğru üzerinde bulunur. Elektrotların potansiyellerinin genlik ve frekansları uygun şekilde değiştirildiğinde parçacıklar plakalar arasından geçerken arka arkaya enerji artışına maruz kalırlar. Parçacık fiziğinin ve nükleer fiziğin vazgeçilmez deneysel aygıtları olan hızlandırıcılar günümüzde temel parçacıkların üretimi, ikincil demetlerin üretimi, sinkrotron ışınımı üretimi, serbest elektron lazerlerinin üretimi ve başta temel araştırmalar olmak üzere, bilim ve teknolojinin çeşitli alanlarında endüstriyel ve teknolojik ürünlerin üretiminde ve kalite kontrolünde kullanılmaktadırlar. Günümüzde 1 TeV enerjili hızlandırıcılar bulunabilmekte, 5-10 TeV’e çıkabilecek güçte hızlandırıcı çalışmaları sürmektedir.

Ülkemizde teşhis ve tedavi amaçlı kullanılan medikal linak ve küçük ölçekli siklotronlar mevcut olmakla birlikte parçacık hızlandırıcılarının Ar-Ge amaçlı kullanıldığı bir tesis yoktur. THM IR-SEL tesisi içerisinde 8 tane deney istasyonu kurulacaktır. Şekil 3.1’de THM Deney İstasyonlarının şekli verilmektedir. İstasyonlarda malzeme bilimi, biyoteknoloji, nanoteknoloji, tıp, kimya, biyoloji, ziraat, iletişim alanlarında araştırmaların yapılması mümkün olacaktır.

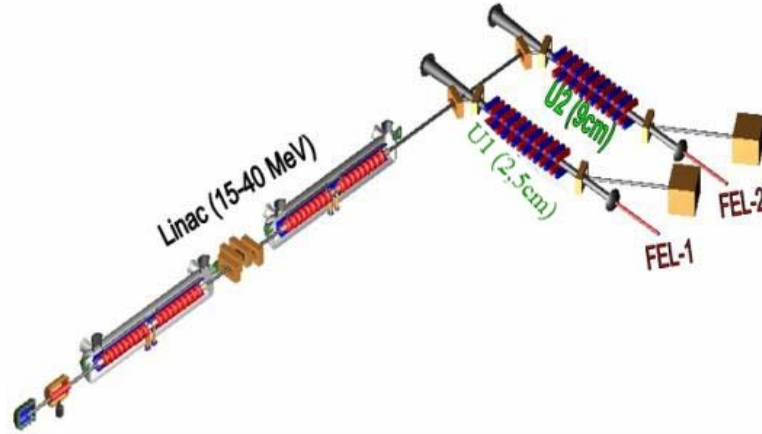


Şekil 3.1. THM Deney İstasyonları

3.1. Türk Hızlandırıcı Merkezi IR-SEL Sistemi

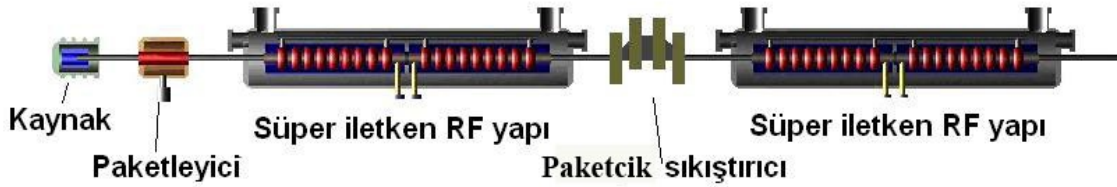
THM Projesi lazerinin 2-250 μm dalgaboyu aralığını tarayabilen salındırıcı yapı kullanarak SEL üretimi öngörülmüştür. Şekil 3.2’de taslak görünümü verilen tesis 15-40 MeV enerji aralığında e^- doğrusal hızlandırıcısı ve periyodu 2.5 ve 9 cm olan undulatörleri kapsayan iki optik sistemden oluşmaktadır. Üretilen SEL salındırıcı kipte olup uzak ve yakın kızılötesi bölgesini tarayabilecektir. SEL görelî hızlarda hareket eden e^- demetinin salındırıcı olarak adlandırılan ve manyetik alanın periyodik olarak sinüsel dizildiği birçok kutuptan geçirilerek e^- demetinin ışıma yapması ile elde edilir [22]. Salındırıcı kipte lazer üretimi ise e^- demetinin salındırıcıdan geçirilmesi yolu ile elde edilen ışımanın, salındırıcının giriş ve çıkışına yerleştirilen aynalar ile güçlendirilmesi prensibine dayanır.

Lineer hızlandırıcıların temel elamanları şekil 3.3'te olduğu gibi e^- kaynağından başlayarak paketleyici, paketçik sıkıştırıcı, hızlandırıcı RF oyuklar, odaklayıcı magnetler, eğici magnetler ve demet teşhis araçlarından oluşmaktadır.



Şekil 3.2. THM IR-SEL Düzeneği

Elektron demetinin sürekli yapıda olması için (cw) süper iletken RF oyukların kullanılması öngörülmüştür [23].



Şekil 3.3. THM IR-SEL için linak'ın şematik görünümü

Elektron tabancası e^- demetini üreten elektriksel bir cihazdır. Bir e^- tabancası, elektronların üretildiği katod ve odaklandığı elektrodlardan oluşmaktadır. Elektron tabancaları, elektronları yayma şekillerine göre termiyonik ve fotokatot tabanca olarak iki şekilde incelenir. Yüksek spektral şiddetli bir SEL elde edebilmek için elektron demetinin akımının yüksek olması gerekmektedir. Maksimum hızlandırılabilir akım miktarı

$$\varepsilon \approx \lambda_R / 4\pi \quad (3.1)$$

ise RF oyuklarına aktarılan güç ile ilişkilidir. Burada λ_R SEL'in dalga boyudur [24]. Demetlerin kalitesi, elektronların yoğunluğunun paketçik içerisinde homojen olarak dağılması ve demetlerin enine boyutunun küçük olup değişmez kalmasıyla ölçülmektedir. Elektronların paketçik içerisindeki konumu ve yörüngesinin eğimi zamanla elektron yörüngesi ideal yörüngeden sapacak şekilde biçimlenmektedir. Bu gelişme, demeti oluşturan elektronların kapladığı alanı arttırmaya çalışır. Bu kesit alanı ise, emittans (yayınım) olarak bilinmektedir ve ϵ ile simgelenmektedir. Paketleyici, yüksek pik akım elde ettikten sonra hızlandırma işleminin daha etkin olması için kaynaktan çıkan paketçiklerin sıkıştırılmaları gerekir. Kaynaktan çıkan uzun sürüklenme süreli elektronlar, paketleyici denilen RF oyuklarına gönderilir. Bu bölümde ana hızlandırıcı, oyuğun frekansı ile uyum içinde salınan bir RF alanına maruz kalır. RF alanının fazı değiştirilerek paketçiklerin orta noktası salınan alanın orijinine ayarlanır ve paketçik içerisindeki öndeki elektronlar yavaşlatılarak gerideki elektronlar hızlandırılır. THM IR-SEL için ortalama akımı 1 ve 1.6 mA olan iki opsiyon üzerinde durulmuştur. 77 MHz frekansta 1 ve 1.6 mA ortalama akım sağlamak için paketçik yükü sırasıyla 80 ve 120 pC olmalıdır. THM IR-SEL tesisinde e^- demetin ortalama gücü oyuk sonunda 16 kW olacaktır bu da 1,6 mA'lık ortalama akıma karşı gelir. 13 MHz frekanslı paketçiklerin 1,6 mA ortalama akımı sağlaması için paketçik yükü 120 pC olmalıdır (Çizelge 3.1).

Çizelge 3.1, THM IR SEL için elektron demeti parametreleri

	10 kW RF Power	16 kW RF Power
Elektron demeti enerjisi [MeV]	15 – 40	
Paketçik yükü [pC]	80	120
Ortalama Akım [mA]	1	1.6
Normalize enine rms emittance [mm mrad]	<15	
Normalize boyuna rms emittance [keV ps]	<100	
Mikro atma uzunluğu [ps]	1 – 10	
Mikro atma aralığı [ns]	77	
Makro atma uzunluğu	Sürekli atma/ayarlanabilir	

3.2. THM Projesi Rezonatör Sistemi

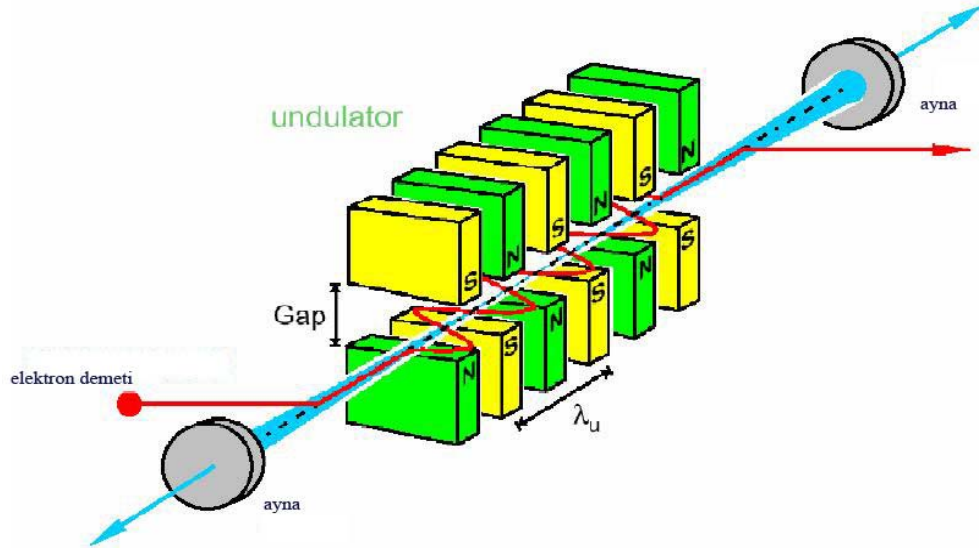
SEL, serbest elektronlardan doğrudan fotonların üretildiği bir kazanç ortamı yani optik bir sistem içerir. Bu optik sistemde kazanç oluşturmak için; değişik tip hızlandırıcılardan elde edilen e^- demetleri kullanılmaktadır. Elektron hızlandırıcıları günümüzde çok küçük yayınım

değerlerine sahip kaliteli e^- demetleri sağlayabilmektedirler. SEL'in kalite göstergesi doğrudan hızlandırıcıdan alınan demetin parlaklığına dayanmaktadır.

Osilatör modda iki ayna arasına yerleştirilen undulatör sistemi kullanılmaktadır. Bu sistem rezonatör olarak adlandırılmaktadır. Lineer Hızlandırıcıdan hızlandırılıp gelen e^- demeti undulatör ve iki aynadan oluşan bu rezonatör sistemi içinde gerekli doyuma ulaşınca kadar hapsedilmektedir (Şekil 3.4). Aynalar arasında her gidiş gelişte meydana gelen koherent e^- davranışı ile optik güç artmaktadır. Burada bütün elektronların aynı ışınlamaya katkısı sağlaması için e^- atmaları arasındaki zamanın kavite gidiş dönüş zamanına eşit olması gerekmektedir [25]. Undulatör eksenine dik yönde yoğunluk dağılımına sahip e^- demeti kullanılmaktadır. Bu e^- demeti sürekli (ayarlanabilirlikle ilgili olarak). Undulatör eksenine paralel hareket eden e^- demeti vardır. SEL osilatörlerde e^- demetinden çıkan ışınlamaya optik kavite içinde depolanır ve e^- demetiyle defalarca etkileşmektedir. Oluşan ışınlamaya doyuma ulaşınca kadar artırılmaktadır. Optik kavitede, kazanç ortamının iki ucuna yerleştirilen eğrilik yarıçapları belli olan iki ayna kullanılır. SEL optik kaviteyi diğer lazer kaviteyi ile birçok benzer özelliğe sahip olmasına rağmen çalışma prensibi olarak diğer klasik kavitelere göre daha farklı karakteristik özelliklere sahiptir. Optik kavite içerisinde lazer dalgası iki ayna arasında pek çok kez yansıtılır ve lazer dalgası ile e^- demeti arasında enerji alışverişi gerçekleşmektedir.

Optik kaviteyi lazerlerin büyük kazanç ve lazer ışığının geri beslenmesini sağlayan, lazerin büyük bir bileşenidir. SEL'in iyi çalışması ve veriminin ve kararlılığının maksimum olabilmesi için ve dışarıya alınan ışınlamaya kalitesinin iyi olabilmesi için optik kavitenin iyi bir biçimde kontrol edilmesi gerekmektedir. SEL verimi, kararlılığı ve çiftlenmiş çıkış sinyalinin demet kalitesini maksimize etmek için mod kontrollü optik bir kaviteye sahip olmak gerekmektedir [26].

Serbest Elektron Lazerlerinin undulatör yapısı Şekil 3.4'te görülmektedir. Lazer ışınlamaya elde edebilmek için bazı düzenekler sadece undulatör yapısından bazı düzenekler ise undulatör ve ayna sistemlerinin birlikte kullanıldığı rezonatör yapısından oluşmaktadır. THM projesi IR-FEL yani kızılötesi SEL elde etmek amacıyla undulatör ve bir tanesinde lazer ışınlamaya dışarıya almak için üzerinde delik bulunan iki ayna sisteminden oluşmaktadır. Şekil 2.5'ten anlaşılacağı gibi hızlandırıcıdan gelen hızlanmış e^- demeti aynalar arasında istenilen doyuma ulaşınca kadar defalarca gidip gelme hareketi yapmaktadır. THM IR-FEL optik kavite yapısı dalga boyları 2.5 ile 9 cm olan iki tane undulatörden oluşmaktadır. Dalga boyu 2.5 cm olan U25 undulatöründeki kutup sayısı 60 ve dalga boyu 9 cm olan U90 isimli undulatördeki kutup sayısı ise 40'tır. Bu kutup sayıları ile dalga boylarının çarpımı undulatörün uzunluğunu vermektedir.



Şekil 3.4. Rezonatör Bileşenleri

Undulatörler arasındaki dikey uzunluk gap aralığını vermektedir. Bu parametre rezonatör yapısının önemli bir parametresidir. N-S sırasıyla dizilmiş magnetler arasındaki uzunluk; S-S ya da N-N undulatörün dalgaboyu uzunluğunu göstermektedir ve λ_u ile simgelenmektedir. Optik kavite parametreleri ve formülleri yakından incelenirse;

Genel bir optik kavite parametreleri şu şekildedir.

λ_u : Undulatör Dalga Boyu

L_u : Undulatör Uzunluğu

L_c : Optik Kavite Uzunluğu

ω_z : Elektron Demetinin z kadar Uzaklıktaki Değeri

ω_0 : Gaussian Demetinin Beli

ω_1 : Birinci Ayna Üzerindeki Işınımın Boyutu

ω_2 : İkinci Ayna Üzerindeki Işınımın Boyu

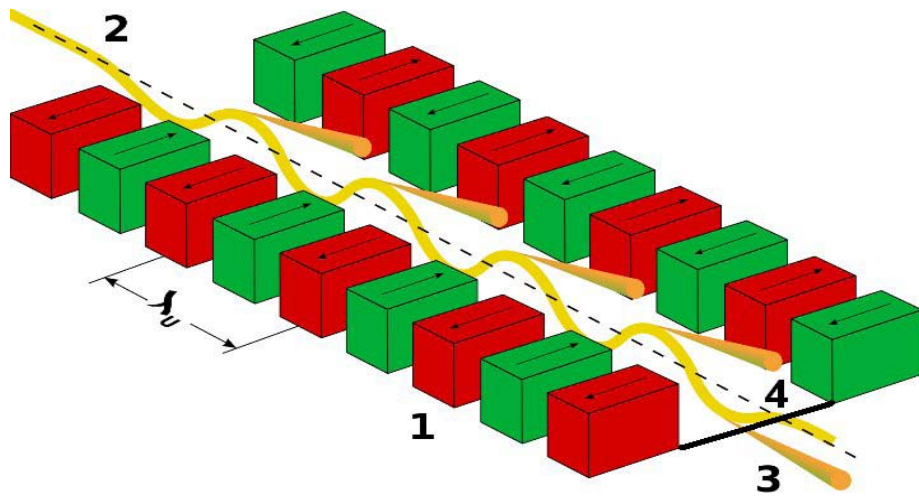
λ_c : Elde Edilen Lazerin Dalga Boyu

d : Gap Aralığı

$g_1 g_2$: Kararlılık Parametresi

g_0 : Kazanç Parametresi

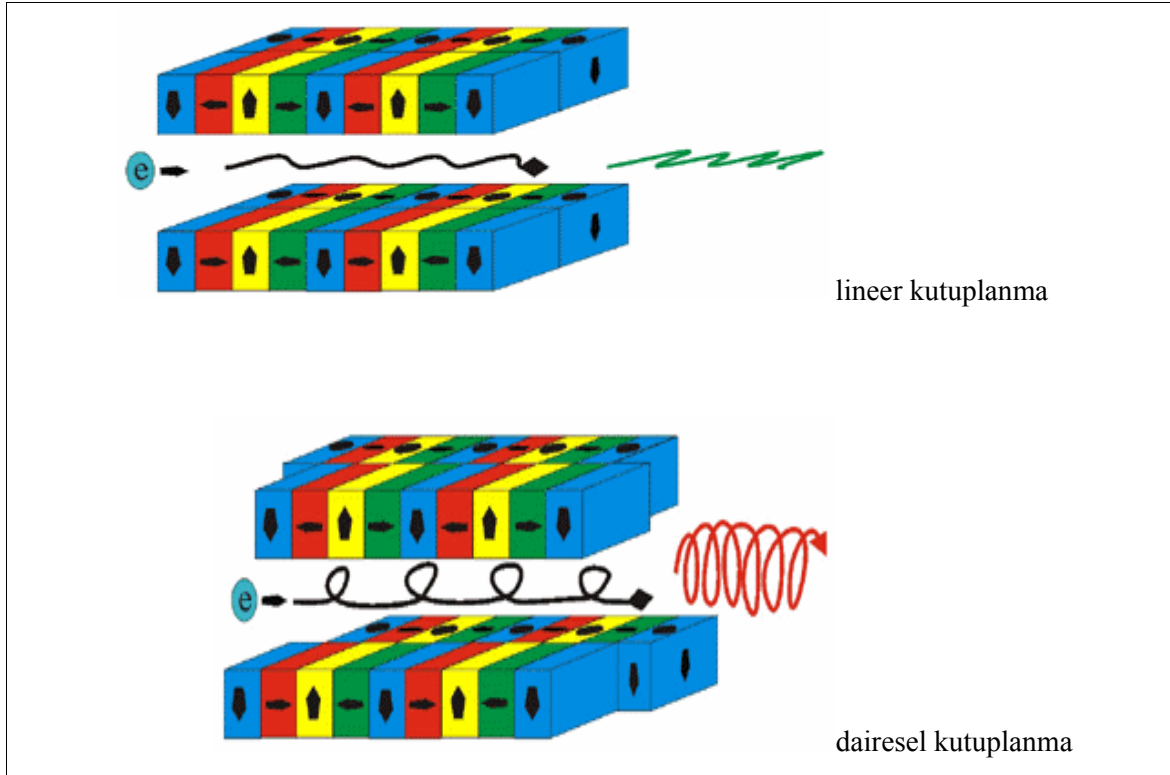
Kavite içinde hızlandırılmış e^- demetlerinin ilerlemesini ve ışıma yaymasını sağlayan magnet adı verilen özel düzenekler bulunmaktadır. Rezonatör içindeki Sinkrotron Işınmının yoğun ve olabildiğince koni özelliğinde oluşması için periyodik seriler halinde dizilmiş eğici magnetlerden oluşan özel magnet serileri zigzaglayıcı ve undulator magnetler olarak adlandırılmaktadır. THM olarak undulator yapıda magnet kullanılacaktır. Undulator magnet, elektronların ilerleme doğrultusu boyunca sağa ve sola hareket etmesini sağlayarak sinüsel harekete neden olan enine periyodik bir manyetik alan kaynağıdır [27].



Şekil 3.5. Undulator Yapısı

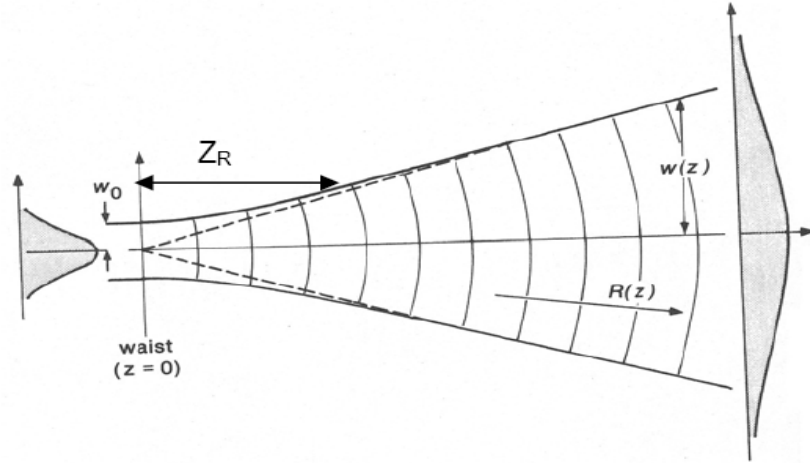
SEL’de elektron demeti ve lazer ışınının etkileşme bölgesinin uzunluğunu maksimize etmek ve enerji alışverişini yeterince sağlayabilmek için e^- demeti ve ışının aynı eksen boyunca hareket etmeleri gerekmektedir. Elektrik alan ve elektronların hızı birbirine diktir. Bu durumda enerji kazancı olması mümkün değildir. Demetlere yatay bir hız bileşeni kazandırmak için şekil 3.5 teki gibi magnet yerleştirilir. Salıncı niteliğindeki magnetler planar ve helical olmak üzere iki çeşittir. Dünyanın pek çok laboratuvarında ve ülkemize kurulması planlanan SEL rezonatör yapısında planar yapıda undulator kullanılacaktır. Şekil 3.6’dan anlaşılacağı gibi planar undulatorlerde e^- demeti zigzag şeklinde ilerlerken helical undulatorlerde sarmal şeklinde yol almaktadır [28].

Kızılötesi bölgede SEL için büyük alan kuvveti ve küçük undulator periyodu gerekir. Bu sebeple magnetler kalıcı magnetlerdir ve eksen üzerindeki alan sadece magnetler arasındaki gap değiştirilerek sağlanır. Böylece gap aralığı lazer ışınının kalitesine etki eden önemli bir niceliktir [29].



Şekil 3.6. Planar ve Helical Undulatörler

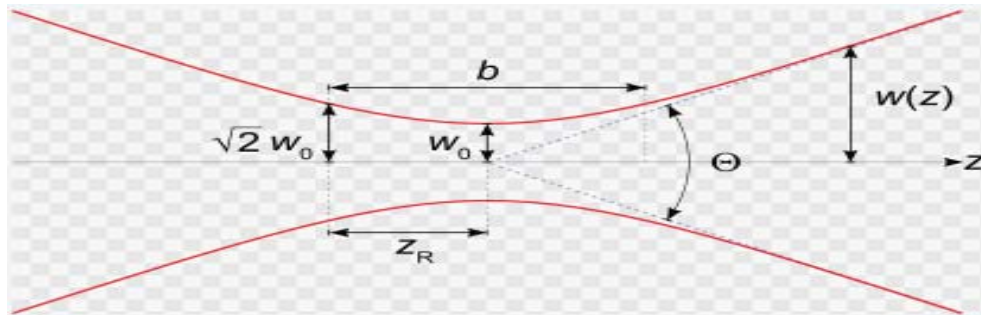
Bir düzlemsel salıncıktan elde edilen SEL'in dalga boyu, salıncığının periyodu λ_u 'ya bağlı olarak; $\lambda_{SEL} = \lambda_u / 2\gamma^2 (1 + K^2 / 2)$ ile verilmektedir.. Burada E elektron demetinin enerjisi, e elektronun yükü, m elektronun durgun kütlesi ve c ışık hızı olmak üzere $\gamma = E / mc^2$ elektron demetinin Lorentz faktörüdür. K salıncığının şiddet çarpanı, $K = eB_u \lambda_u / 2\pi mc$ olarak verilir [30]. Burada B_u salıncığının kutupları arasındaki tepe manyetik alandır ve kutupların malzemesine göre farklılık göstermektedir.



Şekil 3.7. Rayleigh uzunluğunun şematik gösterimi

Undulatörler arasında hareket eden elektron demetinin bel Gaussian demet (ω_0) olarak bilinmektedir. Birçok lazer Gaussiyen şeklinde demet yaymaktadır. Gaussiyen demet enine elektrik alan ve siddet dağılımları Gaussiyen fonksiyonlarla tanımlanan demetlerdir [31, 32]. Gaussiyen bir demetin Rayleigh uzunluğu Z_R , demetin ilerleme yönündeki demet yarıçapının, merkezi bel kalınlığından şekil 3.7 ve 3.8'deki gibi $\sqrt{2}$ katı kadar arttığı uzunluktur [33].

Demet genişliği ya da spot büyüklüğü, undulatörler arasında hareket eden elektron demetinin bel olarak bilinen ω_0 değerinin undulatörleri geçtikten sonra aynalara doğru giderken aldığı değerdir ve $\omega(z)$ ile gösterilmektedir. Gaussiyen demetin bel kalınlığı olarakta bilinmektedir. Serbest uzayda yayılan Gaussiyen demet için spot genişliği $\omega(z)$ demet ekseninde bir yerde minimum bir değere sahip olacaktır (Şekil 3.8).

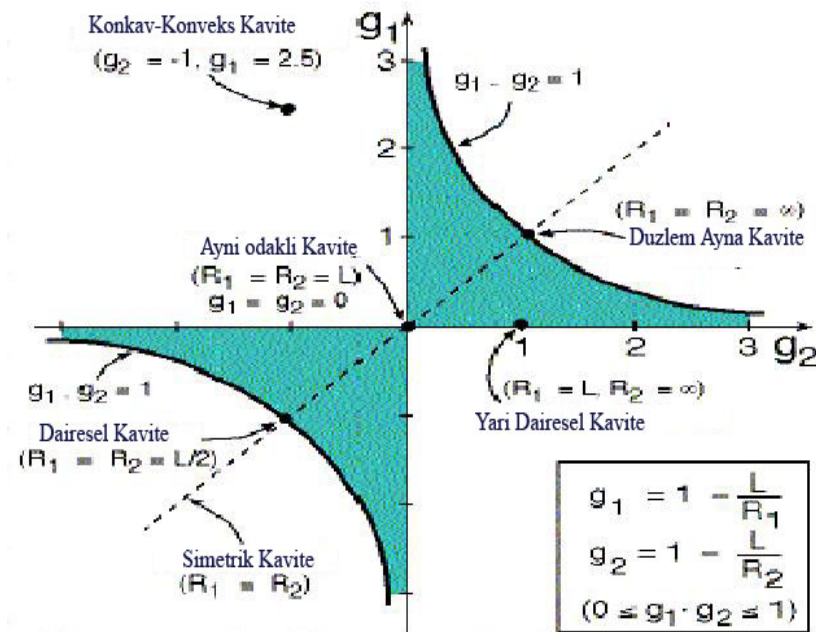


Şekil 3.8. Demet belinden z kadar uzaklıkta e^- demet için spot büyüklüğünün değişimi

Kararlılık, R_1 , R_2 ve kavite uzunluğu L_c olmak üzere olası değerlerin dar bir bölgesi, kavite içi demetin üretildiği periyodik odaklamadaki kararlı rezonatörleri oluşturmaktadır. Kavite kararsız ise, demet boyutu sınır olmaksızın büyüyecek, sonunda kavite aynalarından daha büyük olup kaybolacaktır. Böyle bir durumda lazer ışını dışarıya alınamayacaktır. Işın transfer matris analizleri gibi metotlar kullanarak kararlılık kriteri hesaplamak mümkündür.

Şekil 3.8 den anlaşıldığı gibi Kararlılık Parametresi rezonatörün kararlılığını gösterir ve;

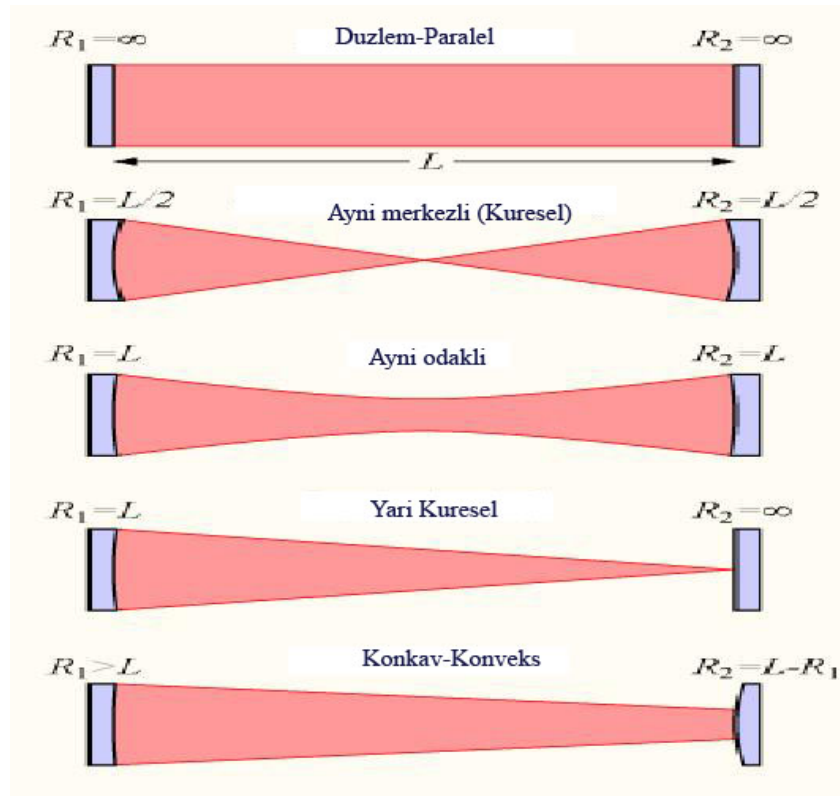
$0 \leq g_1, g_2 \leq 1$ koşulunu sağlaması gerekmektedir. Bu durumda ışınım daha kararlı yapıda oluşur ve aynalardan büyük olmayarak dışarı rahat alınabilmesi sağlanır. İyi bir lazer ışınım elde edebilmek için demetin kalitesinin yanı sıra ışınımın dışarıya alınacağı, aynanın eğrilik yarıçapı, ayna kaplaması ve ayna materyali gibi değerlerinde en verimli şekilde seçilmesi gerekmektedir. Öncelikle rezonatör de kullanılacak ayna modelinin belirlenmesi gerekmektedir. Şekil 3.9’da çeşitli ayna yapıları görülmektedir [34]. R_1 ve R_2 yarıçaplı iki aynalı bir rezonatör için çok sayıda yaygın kavite konfigürasyonu mevcuttur. Eğer iki aynanın eğrilik yarıçapı birbirine eşit ve bu değer de kavite uzunluğunun yarısına eşitse ($R_1 = R_2 = L/2$) eş merkezli ya da küresel rezonatör oluşur. Bu kavite tipi, tüm ayna aralığını dolduran aynalardaki büyük demet çaplarıyla kavitenin merkezinde bir sınırlı-kırınım demet belisi oluşturmaktadır. Bu, kavite uzunluğuna eşit eğrisel bir ayna ve bir düzlem aynayla yarıküresel bir kavitedir.



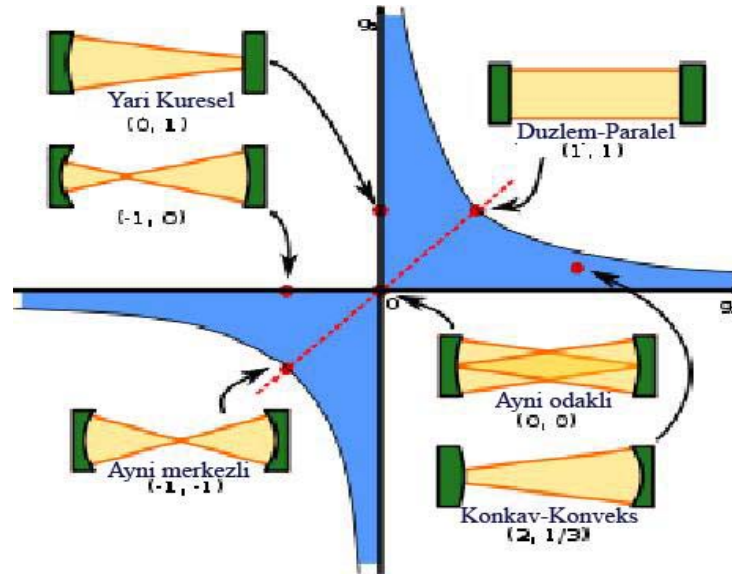
Şekil 3.9. Kararlılık Parametresi

SEL'in iyi çalışması ve veriminin, kararlılığının maksimum olabilmesi ve dışarıya alınan ışının kalitesinin iyi olabilmesi için de optik kavitenin iyi bir biçimde kontrol edilmesi gerekir. Eş merkezli yada aynı merkezli (concentric) tip rezonatörler ayarlamalardan çok etkilenmediği için kalite b.çakımından genelde bunlar kullanılmaktadır.

Ayna seçiminde tanımlanan aynalar ve kararlılık parametresi göz önünde alınırsa $0 \leq g_1 \times g_2 \leq 1$ koşulunu sağlayan ayna yapısının eşmerkezli yapıda olan aynalardan oluştuğu şekil 3.10'da görülmektedir. THM IR-SEL projesinde verimlilik bakımından ayna modeli olarak Simetrik ve Eş Merkezli rezonatör seçilmiştir (Şekil 3.11). Bu özellikteki aynalar demet belinin küçük olmasını dolayısıyla ayna üzerinde düşecek ışının dalgaboyunun büyük olmasını ve filling faktörün (doldurma faktörü) büyük olmasını sağlamaktadır. Doldurma faktörü; elektron enerjisini temel alan ve e⁻ yayılımını içeren faktördür. Lazer kazancı filling faktör ile orantılıdır.

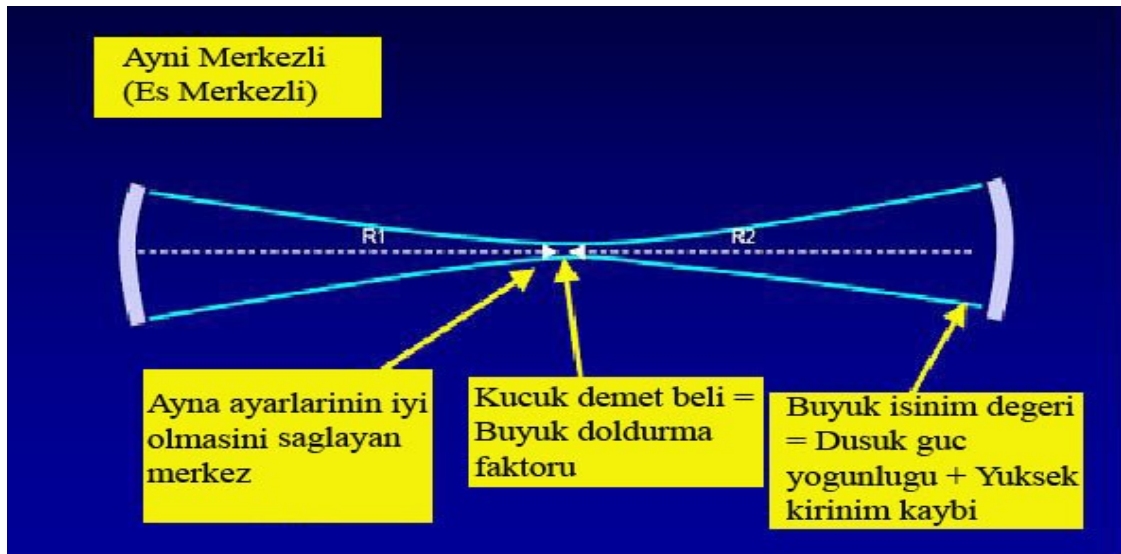


Şekil 3.10. Ayna çeşitleri ve özellikleri



Şekil 3.11. Aynaların Kararlılık Özellikleri

Aynalar üzerine düşen ışınım (spot) genişliği aynalardan daha büyük boyuta sahip olursa dışarı alınamazlar. Bu ışınımı aynalar üzerine düşürmek, minimize etmek için IR-SEL sistemlerinde optik kavitenin kısa olması gerekir. Optik kavitenin kısa olması atmalı yapıya sahip hızlandırıcılarda lazer gücünün artış süresinin kısılmasını sağlar. Fakat aynalar üzerinde deformasyona sebep olur [35].



Şekil 3.12. Eş merkezli (Concentric) Ayna Yapısı

4. TÜRK HIZLANDIRICI MERKEZİ REZONATÖR SİSTEMİ PARAMETRELERİNİN HESAPLAMALARI

4.1. THM Rezonatör Sistemi Parametrelerinin Analitik Olarak Hesaplanması

THM için öngörölmüş kızılötesi bölgedeki elektron demeti ve SEL parametreleri Çizelge 4.1’de verilmektedir. Bu değerlerden faydalanarak elde edilmesi gereken rezonatör parametreleri bu tezde hesaplanmıştır. Rezonatör boyunca ω_0 , ω_1 , ω_2 , Z_R , R_1 , R_2 gibi rezonatör ve ayna parametreleri analitik olarak hesaplanmış ve bunların yanısıra undulatör parametreleri ile de uyum içinde çalışması simülasyonlarla teyit edilmiştir. Analitik olarak elde edilen rezonatör parametreleri Genesis 1.3 simülasyon kodu ile de test edilmiştir.

Çizelge 4.1. THM Lazer, Elektron Demeti, Undulatör Parametreleri

Lazer Parametreleri		U25	U90
Dalgaboyu aralığı [μm]		2.75-27	18-250
Maximum Pik gücü (MW) (120 pC)		5	2.5
Atma Enerjisi (μJ)(max)(120 pC)		10	8
Elektron Demeti Parametreleri		10(16)kW Klystron	
Elektron Demet enerji [MeV]		15-40(15-40)	
Demet Yüğü [pC]		120	
Ortalama Demet akımı [mA]		1.6	
Normalize enine rms emittansı [mm mrad]		<15	
Normalize boyuna rms emittansı [keV ps]		<100	
Mikro atma uzunluğu		1-10	
Mikro atma aralığı [ns]		77	
Makro atma uzunluğu		Sürekli yapı /ayarlanabilir	
Undulatör Çalışmaları	U25	U90	
Undulator Periyodu [cm]	2.5	9	
Undulator Gap Aralığı [cm]	2-3	3-9	
K Parametresi (rms)	0.1-0.7	0.5-2.5	
Undulatör Periyot Sayısı (N)	60	40	
Undulator uzunluğu	1,5	3,6	

U25 ve U90 undulatörleri için analitik hesaplamalar;

Mikro atma aralığı $T = 77$ ns ve $f = 13$ MHz mikro paketçik tekrarlama frekansı olmak üzere kavite uzunluğu;

$$L_c = \frac{cT}{2} = \frac{c}{2f} \quad (4.1)$$

formülü yardımıyla hesaplanmaktadır. THM IR-SEL için verilen değerler kullanılarak kavite uzunluğu $L_c = 11.53$ m bulunmuştur. Undulatör uzunluğu “ $L_u = \text{Undulaötr periyodu} \times \text{Periyod Sayısı}$ ” ile hesaplanır.

THM-IR SEL için iki tane undulatör kullanılacaktır. Bu undulatörlerin uzunluğu;

- $\lambda_u = 2.5$ cm dalgaboylu U25 için $L_u = 2.5 \times 60 = 150$ cm = 1.5 m
- $\lambda_u = 9$ cm dalgaboylu U90 için $L_u = 9 \times 40 = 360$ cm = 3.6 m.

Rayleigh uzunluğu elektron demet belinden $\sqrt{2}$ katı kadar olan uzaklıktır (Şekil 3.7). Demet beli ise TEM modları ile ifade edilmektedir. Rayleigh Uzunluğu, kavite büyüklüğü olan L_c uzunluğunun $z_R = \frac{1}{\sqrt{12}} = \frac{1}{2\sqrt{3}}$ olduğu değerdir. THM için eşmerkezli rezonatör durumunda doldurma faktörü demet çıkış dalga boyu aralığının %50’sinden daha büyük olacağından $z_R = 2 \times \frac{1}{2\sqrt{3}}$ şeklinde ifade edilir [36].

$$\text{Rayleigh Uzunluğu} \rightarrow \lambda_u = 2.5 \text{ cm için } Z_R = \frac{2xL_u}{2\sqrt{3}} = \frac{2x1.5}{2\sqrt{3}} = 0.866 \text{ m}$$

$$\lambda_u = 9 \text{ cm için } Z_R = \frac{2xL_u}{2\sqrt{3}} = \frac{2x3.6}{2\sqrt{3}} = 2.0784 \text{ m}$$

şeklinde bulunur.

Çizelge 4.1’ de belirtildiği gibi $\lambda_u = 2.5$ cm dalgaboyuna sahip U25 undulatörü için Rayleigh uzunluğundan yola çıkarak lazer elde etmek için kullanılacak olan elektron demet beli ω_0 değeri hesaplanmıştır. U25 için lazer dalga boyu aralığı 2 (2.75) – 27 μm hedeflendiğinden bu dalgaboyu değerleri göz önünde bulundurularak hesaplar yapılmıştır.

$$Z_R = \frac{\pi(\omega_0^2)}{\lambda_R} \quad (4.2)$$

Denklemden ışıının minimum spot genişliği ω_0 değerleri hesaplanmaktadır [37].

$\lambda_R = 2.75 \mu\text{m}$ için ω_0^2 ve ω_0 değerleri şu şekilde bulunmuştur;

$$\omega_0^2 = 0.7584 \times 10^{-6} \text{ ve } \omega_0 = 0.87 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Elektron demet belini sembolize eden ω_0 parametresi aynaların eğrilik yarıçapı kullanılarak ta elde edilebilir;

$$\omega_0^4 = \left(\frac{\lambda}{\pi}\right)^2 \frac{L(R_1 - L)(R_2 - L)(R_1 + R_2 - L)}{(R_1 + R_2 - 2L)^2} \quad (4.3)$$

Eşmerkezli aynalarda $R_1 = R_2$ olduğundan yarıçap R_1 ve $R_2 = R$ alınarak demet bel

$$\omega_0^2 = \left(\frac{\lambda}{\pi}\right) \frac{[L(2R - L)]^{1/2}}{2} \quad (4.4)$$

Şeklinde elde edilir, demet bel, ω_0 , burada kullanılarak aynalar için eğrilik yarıçapları R_1 ve R_2 elde edilir [38]. $\lambda_u = 2.5 \text{ cm}$ ve $\lambda_R = 2.75 \mu\text{m}$ için $R_1 = R_2 = 5.8950 \text{ m}$ bulunmuştur.

Rayleigh uzunluğu ile ayna yarıçapları arasındaki bağıntı ise

$$Z_R = \frac{1}{2} \sqrt{L_c(2R - L_c)} \text{ Rayleigh değeri } Z_R = 0.8657 \text{ m elde edilir U25 için.}$$

Lazer ışınlarının kararlılığını belirleyen g_1 ve g_2 parametreleri[39];

$$g_1 = 1 - L_c/R_1 \text{ ve } g_2 = 1 - L_c/R_2 \quad (4.5)$$

İfadeleriyle verilir, kavite uzunluğu ve ayna eğrilik yarıçapları kullanılarak;

$g_1 = -0.955$ ve $g_2 = -0.955$ elde edilir.

Kararlılık parametreleri $0 \leq g_1 \times g_2 \leq 1$ koşulunu sağlamaktadır ve $g_1 \times g_2 = 0.9120$ değerini alır ki bu durum THM IR-SEL'in kararlı bir rezonatöre sahip olduğunu ifade eder.

Lazer ışını için kararlılık parametrelerinden olan g_1 ve g_2 , rezonatör uzunluğunu ve lazer dalgaboyu kullanılarak aynalar üzerindeki ışıının büyüklüğünü (spot size) bulmak için yapılan hesap sonucunda [39];

Birinci ayna üzerindeki ışınım büyüklüğü;

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{L_c \lambda_R}{\pi}} \left\{ \frac{g_2}{g_1 (1 - g_1 g_2)} \right\}^{\frac{1}{4}} \longrightarrow \omega_1 = 5.834 \times 10^{-3} \text{ m}$$

İkinci ayna üzerindeki ışınım büyüklüğü;

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{L_c \lambda_R}{\pi}} \left\{ \frac{g_1}{g_2 (1 - g_1 g_2)} \right\}^{\frac{1}{4}} \longrightarrow \omega_2 = 5.834 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Aynı hesaplamaları $\lambda_R = 27 \text{ } \mu\text{m}$ için yapıldığında;

$$\lambda_u = 2.5 \text{ cm için } Z_R = \frac{2xL_u}{2\sqrt{3}} = \frac{2x1.5}{2\sqrt{3}} = 0.866 \text{ m}$$

$$Z_R = \frac{\pi(\omega_0^2)}{\lambda_R}$$

Formülünden $\lambda_R = 27 \text{ } \mu\text{m}$ için ω_0^2 ve ω_0 değerleri şu şekilde bulunmuştur;

$$\omega_0^2 = 7.4465 \times 10^{-6} \text{ ve } \omega_0 = 2.7288 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Demet belinin büyüklüğü lazer dalga boyunu artırmaktadır.

Elektron demet belini sembolize eden ω_0 parametresinden;

$$\omega_0^2 = \left(\frac{\lambda}{\pi} \right) \left[\frac{L(2R - L)}{2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

ω_0 değerleri yerine yazılarak aynalar için R_1 ve R_2 değerleri elde edilebilir.

$$\lambda_u = 2.5 \text{ cm ve } \lambda_R = 27 \mu\text{m için } R_1 = R_2 = 5.8950 \text{ m}$$

Rayleigh uzunluğu ile ayna yarıçapları arasındaki bağıntıyı veren formül ile

$$Z_R = \frac{1}{2} \sqrt{L_c (2R - L_c)} \text{ Rayleigh değeri } Z_R = 0.8657 \text{ m}$$

Lazer ışınlarının kararlılığını belirleyen g_1 ve g_2 parametreleri;

$$g_1 = 1 - L_c/R_1 \text{ ve } g_2 = 1 - L_c/R_2$$

Formüllerinde kavite uzunluğu ve ayna eğrilik yarıçapları yerine yazıldığında

$g_1 = -0.955$ ve $g_2 = -0.955$ bulunmuştur.

Böylece $\lambda_R = 2.75 \mu\text{m}$ ve $\lambda_R = 27 \mu\text{m}$ için demet belı, kararlılık parametresi, aynaların eğrili yarıçapları aynı değerlerde elde edilmiştir ve U25 için test edilmiştir.

Birinci ayna üzerindeki ışı nım büyüklüğü;

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{L_c \lambda_R}{\pi}} \left\{ \frac{g_2}{g_1 (1 - g_1 g_2)} \right\}^{\frac{1}{4}} \longrightarrow \omega_1 = 0.01828 \text{ m}$$

İkinci ayna üzerindeki ışı nım büyüklüğü;

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{L_c \lambda_R}{\pi}} \left\{ \frac{g_1}{g_2 (1 - g_1 g_2)} \right\}^{\frac{1}{4}} \longrightarrow \omega_2 = 0.01828 \text{ m}$$

U90 undulatörü için yapılan hesaplamalar;

$$\text{Rayleigh Uzunluğu} \rightarrow \lambda_u = 9 \text{ cm için } Z_R = \frac{2xL_u}{2\sqrt{3}} = \frac{2x3.6}{2\sqrt{3}} = 2.0784 \text{ m}$$

$\lambda_u = 9 \text{ cm}$ için hedeflenen lazer dalga boyu 18 - 250 μm arasındadır. $\lambda_R = 18 \mu\text{m}$ için;

$$Z_R = \frac{\pi(\omega_0^2)}{\lambda_R} \searrow$$

$\omega_0^2 = 11.914 \times 10^{-6}$ ve $\omega_0 = 3.451 \times 10^{-3} \text{ m}$ büyüklüğündeki demet belı bulunmuş

olur.

$$\omega_0^2 = \left(\frac{\lambda}{\pi} \right) \frac{[L(2R - L)]^{\frac{1}{2}}}{2}$$

Bulunan ω_0 değeri kullanılarak aynalar için eğrilik yarıçap R_1 ve R_2 değeri $R_1 = R_2 = 6.5141 \text{ m}$ şeklinde elde edilir.

$$Z_R = \frac{1}{2} \sqrt{L_c(2R - L_c)} \rightarrow Z_R = 2.0783 \text{ m}$$

Kararlılık parametreleri;

$$g_1 = 1 - L_c/R_1 \text{ ve } g_2 = 1 - L_c/R_2$$

$g_1 = -0.7699$ ve $g_2 = -0.7699$ şeklinde yine kararlılık sınırları içerisinde ($0 \leq g_1 \times g_2 \leq 1$),

$g_1 \times g_2 = 0.59274$ şeklinde elde edilmiştir.

Birinci ayna üzerindeki ışınım büyüklüğü;

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{L_c \lambda_R}{\pi}} \left(\frac{g_2}{g_1(1 - g_1 g_2)} \right)^{\frac{1}{4}} \longrightarrow \omega_1 = 10.176 \times 10^{-3} \text{ m}$$

İkinci ayna üzerindeki ışınım büyüklüğü;

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{L_c \lambda_R}{\pi}} \left(\frac{g_1}{g_2(1 - g_1 g_2)} \right)^{\frac{1}{4}} \longrightarrow \omega_2 = 10.176 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$\text{Rayleigh Uzunluğu} \longrightarrow \lambda u = 9 \text{ cm için } Z_R = \frac{2xL_u}{2\sqrt{3}} = \frac{2x3.6}{2\sqrt{3}} = 2.0784 \text{ m}$$

$\lambda u = 9 \text{ cm}$ için hedeflenen lazer dalga boyu 18-250 μm arasındadır. $\lambda_R = 250 \mu\text{m}$ için işlem yapıldığında;

$$Z_R = \frac{\pi(\omega_0^2)}{\lambda_R}$$

$$\omega_0^2 = 165.47 \times 10^{-6} \text{ ve } \omega_0 = 12.863 \times 10^{-3} \text{ büyüklüğündeki demet beli bulunmuş}$$

olmaktadır.

$$\omega_0^2 = \left(\frac{\lambda}{\pi} \right) \frac{[L(2R - L)]^{\frac{1}{2}}}{2}$$

Bulunan ω_0 değeri kullanılarak U90 için aynaların eğrilik yarıçapı R_1 ve R_2 değerleri bulunur.

$R_1 = R_2 = 6.5141 \text{ m}$ elde edilir.

$$Z_R = \frac{1}{2} \sqrt{L_c(2R - L_c)} \longrightarrow Z_R = 2.0783 \text{ m}$$

Kararlılık Parametreleri;

$g_1 = 1 - L_c/R_1$ ve $g_2 = 1 - L_c/R_2$ formülleri ile $g_1 = -0.7699$ ve $g_2 = -0.7699$ bulunmuştur.

Kararlılık koşulu $0 \leq g_1 \times g_2 \leq 1$, $g_1 \times g_2 = 0,59274$ m bulunur.

Birinci ayna üzerindeki ışınlım büyüklüğü;

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{L_c \lambda_R}{\pi}} \left\{ \frac{g_2}{g_1 (1 - g_1 g_2)} \right\}^{\frac{1}{4}} \longrightarrow \omega_1 = 37.903 \times 10^{-3} \text{ m}$$

İkinci ayna üzerindeki ışınlım büyüklüğü;

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{L_c \lambda_R}{\pi}} \left\{ \frac{g_1}{g_2 (1 - g_1 g_2)} \right\}^{\frac{1}{4}} \longrightarrow \omega_2 = 37.903 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Bulunan tüm değerler çizelge şeklinde bir arada verilmiştir (Çizelge 4.2)

Çizelge 4.2. THM IR-SEL için analitik hesap sonuçları

Parametreler	U25	U90
Rezonatör Tipi	Simetrik,	
Undulatör Periyotları (cm)	2.5	9
Rezonatör Uzunluğu (m)	11.53	
Undulatör Uzunluğu (m)	1.5	3.6
1. ayna eğrilik yarıçapı, R_1 (m),	5.8950	6.5141
2. ayna eğrilik yarıçapı, R_1 (m),	5.8950	6.5141
Rayleigh Uzunluğu, Z_R (m)	0.8657	2.0784
Kararlılık Parametresi, $g_1 \times g_2$	(-0.955)* (-0.955)	
Demet Beli, ω_0 (m)	8.708×10^{-4} ($\lambda_R=2.75$)	3.451×10^{-3} ($\lambda_R=18 \mu\text{m}$)
Demet Beli, ω_0 (m)	2.7288×10^{-3} ($\lambda_R=27 \mu\text{m}$)	
Ayna üzerindeki ışınım genişliği, ω_1	5.834×10^{-3} ($\lambda_R=2.75 \mu\text{m}$)	10.176×10^{-3} ($\lambda_R=18 \mu\text{m}$)
Ayna üzerindeki ışınım genişliği, ω_1	0.0182 ($\lambda_R=27 \mu\text{m}$)	0.0379 ($\lambda_R=250 \mu\text{m}$)
Ayna üzerindeki ışınım genişliği, ω_2	5.834×10^{-3} ($\lambda_R=2.75 \mu\text{m}$)	10.176×10^{-3} ($\lambda_R=18 \mu\text{m}$)
Ayna üzerindeki ışınım genişliği, ω_2	0.0182 ($\lambda_R=27 \mu\text{m}$)	0.0379 ($\lambda_R=250 \mu\text{m}$)
Ayna Materyali	Pyrex & coating Au/Cu	Pyrex & coating Au/Cu
Ayna deliği[mm]	1.5/2	2/3

Çıkış lazer dalgaboyu aralığında da yukarıdaki değerler hesaplanabilir ve çıkış dalgaboyuna göre demet beli, ayna üzerine düşen demet büyüklüğü grafikleri elde edilebilir.

Optik kavite sisteminde kazanç modellemesi yapılırken sürekli yapıdaki ideal elektron demeti varsayarak düşük kazanç parametresini hesaplamak için değişik kazanç faktörlerini hesaba katmak ve elektron, optik demet arasındaki etkileşimi etkileyen belirli sınırlamaları modellemektir.

Dattoliye göre kazanç denklemi şu şekildedir [40];

$$g_0 = \frac{4\pi}{\gamma} \frac{\hat{I}}{I_0} \frac{\lambda L_u}{\sum_E} f\left(\frac{\Delta\omega}{\omega}\right)_0^{-2} F(\xi) \quad (4.6)$$

Burada $f = \frac{\sum_E}{\sum_L}$ doldurma faktörü ve

$$F_f = \frac{1}{\{[1 + (\omega_0/2\sigma_x)^2]^{1/2} [1 + (\omega_0/2\sigma_y)^2]^{1/2}\}} \quad (4.7)$$

ile verilir.

Doldurma faktörü; SEL kazancının hesaplanması için doldurma faktörü ile düzeltilmesi gerekir. Doldurma faktörü elektron demetinin enine kesit alanının, optik demetinin enine kesit alanına oranıdır.

$$\Sigma_e < \Sigma_L \text{ ise } F = \frac{\Sigma_e}{\Sigma_L} \quad (4.8)$$

$$\Sigma_L < \Sigma_e \text{ ise } F = 1 \quad (4.9)$$

$$I_0 = 1.7 \times 10^4 \text{ A} \quad \text{Alfven Akımı}$$

$$\left(\frac{\Delta\omega}{\omega} \right) = \frac{1}{2N} \quad \text{homojen bant genişliği} \quad (4.10)$$

U25 undulatorü için 27 μ m ve 40 MeV enerjide,

$$E = \gamma m_o c^2 \text{ formülünde (enerji aralığı 15-40MeV) } \gamma=78.27 \text{ elde edilir.}$$

$$\left(\frac{\Delta\omega}{\omega} \right) = \frac{1}{2N} = \frac{1}{120} \quad \text{Burada N=60 kutup sayısı kullanılmıştır.}$$

$$F(\xi) = \begin{cases} \frac{1}{2} \frac{k^2}{1+k^2} \text{ (helical undulator)} \\ \frac{1}{2} \frac{k^2}{1+k^2} \left(J_0 \left(\frac{k^2}{2(1+k^2)} \right) \right) - J_1 \left(\left(\frac{k^2}{2(1+k^2)} \right) \right)^2 \text{ (linear undulator)} \end{cases} \quad (4.11)$$

k-undulatorün kuvvet parametresi, $J_{0,1}$ silindiriksel Bessel Fonksiyonlarıdır

$$F(\xi) = 0.138567 \text{ planar undulator için,}$$

Bulunan değerler $g_0 = \frac{4\pi}{\gamma} \frac{\hat{I}}{I_0} \frac{\lambda L_u}{\sum_E} f\left(\frac{\Delta\omega}{\omega}\right)_0^{-2} F(\xi)$ formülünde yerine yazıldığında

$g_0=0.002197$ olarak hesaplanır.

Dattoliye göre gerçek kazancın hesaplanmasında ideal kazanç (düşük kazanç, g_0) ile diğer düzeltme faktörleri çarpılır.

$$G = 0.85g_0 + 0.19g_0^2 + 4.12 \times 10^{-3} g_0^3 \quad (4.12)$$

THM IR SEL için tek geçişteki kazanç $G_{\max}=1.8683 \times 10^{-3}$ değerinde elde edilir. Bu tek geçiş kazancının birçok geçiş üzerinden işlemlerinin yapılması ve modellenmesinin sonuçlandırılması gerekmektedir. Bu çalışmalar Genesis ve OPC denilen “Optical Propagation Code” ile devam etmektedir.

SEL lazerlerinde temel kazanç mekanizması elektron demeti ile ışınım alanı arasındaki enerji alışverişine dayanmaktadır. Işınım alanının yükseltilmesi ve elektron demetinin yavaşlaması ile pozitif kazanç sağlanmaktadır. Bu kazancı elektron demeti ile ışınım alanı arasındaki faz belirlemektedir.

Aynaların kaplanması;

Işınım elde edildikten sonra ışınımın rezonatör sisteminden dışarıya alınması için dikkat edilmesi gereken nokta ise ayna kaplamasıdır. Yansıtıcılık ve geçirgenlik özelliklerini istenilen değerlerde elde edebilmek için hem ayna malzemesi hem de kaplaması önem taşır (çizelge 4.3 ve 4.4). Aynaların kaplamasında yansıtıcılık ve verim bakımından en iyi kaplama malzemesi altındır [41]. Diğer taraftan ayna malzemesi olarak altın seçilmesi aynaları korumak açısından bakıra göre daha iyidir. Çünkü bakır altına göre daha iletkenidir. Ayna malzemesi genelde altın veya gümüş ile kaplanmış bakır (Cu) veya Silisyum (Si) olabilir.

Kaplama metodları:

- * Buharlaştırma (Evaporation)
- * Tortulaştırma (Ion Assisted Deposition)
- * Püskürtme (Ion Beam Sputtering)

Çizelge 4.3. Ayna Kaplama Malzemeleri

Kaplama Tipi	Dalgaboyu uzunluğu(nm)	Yansıtıcılık
UV zenginleştirilmiş Alüminyum (Utility Broadband Metalik Aynalar)	250-600	Rag>90%
Korumalı Alüminyum (VALUMAX Broadband Aynalar)	400-700	Rag>88%
Zenginleştirilmiş Alüminyum (Utility Broadband Metalik Aynalar)	450-700	Rag>93%
Korumalı Gümüş (Broadband Metalik Aynalar)	0.48-20µm	Rag>96%
Korumalı Altın (VALUMAX Broadband Aynalar)	0.65-20µm	Rag>96%

Çizelge 4.4 Ayna Materyalleri ve Özellikleri

Materyal	Kırılma İndeksleri	Görünen spektral bölge
Na_3AlF_6	1.35	0.20-14 µm
MgF_2	1.37	0.22-2 µm
SiO_2	1.46	0.20-8 µm
HfO_2	1.95	0.22-12 µm
ZrO_2	2.10	0.34-12 µm
Ta_2O_5	2.16	0.30-10 µm
TiO_2	2.25	0.35-12 µm
ZnS	2.55	0.38-25 µm

4.2. THM Rezonatör Sistemi Parametrelerin C++ Programı, Genesis ve GLAD kodları ile Modellenmesi

4.2.1. C++ Programı ile Optik Kavite Hesapları ve Sonuçları

Elde edilmesi planlanan lazer ışınının dalga boyu aralığı 2.75 - 2.50 μ m aralığı C++ programı ile U25 ve U90 undulatörleri için parametreler tanımlanarak ω_0 μ bel genişliği ve λ_u boyutlarına göre R değerleri hesaplanmıştır. Programa girilen 12 parametre ile rezonatör sistemi içinde lazer ışınının oluşumunun ω_z , aynalar üzerinde oluşan spot genişlikleri ω_1 , ω_2 değerleri ve aynaların yarıçapları olan R_1 , R_2 değerleri bulunmuştur. Hesaplamalar yapılırken ω_0 ve λ_u değerleri 0.01 artırılarak aralıklar taranmıştır. ω_z değerleri U25 ve U90 undulatörleri için gap değerinin yarısı kadar büyüklükte sınırlandırıldığında (çünkü demetin beli undulatör aralığının içinde kaldığı sürece lazer ışını elde edilebilecektir);

U25 için undulatörü için çıktı dosyasının bir kısmı;

w0(m)	wz(Lu/2)	lambda(m)	R(m)	ωl (m)	gl	zr(m)
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
2.500e-003	2.5000e-003	1.687e-005	6.000e+000	1.263e-002	-9.217e-001	1.164e+000
2.500e-003	2.5000e-003	1.709e-005	5.994e+000	1.279e-002	-9.236e-001	1.149e+000
2.500e-003	2.5000e-003	1.710e-005	5.994e+000	1.280e-002	-9.237e-001	1.148e+000
2.500e-003	2.5000e-003	1.711e-005	5.993e+000	1.281e-002	-9.238e-001	1.148e+000
2.500e-003	2.5000e-003	1.712e-005	5.993e+000	1.281e-002	-9.239e-001	1.147e+000
2.500e-003	2.5000e-003	1.713e-005	5.993e+000	1.282e-002	-9.239e-001	1.146e+000
2.500e-003	2.5000e-003	1.714e-005	5.993e+000	1.283e-002	-9.240e-001	1.146e+000
2.500e-003	2.5000e-003	1.715e-005	5.992e+000	1.283e-002	-9.241e-001	1.145e+000
2.500e-003	2.5000e-003	1.716e-005	5.992e+000	1.284e-002	-9.242e-001	1.144e+000
2.500e-003	2.5000e-003	1.717e-005	5.920e+000	1.285e-002	-9.243e-001	1.144e+000
2.500e-003	2.5000e-003	1.718e-005	5.992e+000	1.286e-002	-9.244e-001	1.143e+000
2.500e-003	2.5000e-003	1.719e-005	5.991e+000	1.286e-002	-9.245e-001	1.142e+000
2.500e-003	2.5000e-003	1.720e-005	5.991e+000	1.287e-002	-9.245e-001	1.142e+000
2.500e-003	2.5000e-003	1.762e-005	5.980e+000	1.317e-002	-9.280e-001	1.114e+000
2.500e-003	2.5000e-003	1.763e-005	5.980e+000	1.318e-002	-9.280e-001	1.114e+000
2.500e-003	2.5000e-003	1.764e-005	5.980e+000	1.319e-002	-9.281e-001	1.113e+000
2.500e-003	2.5000e-003	1.765e-005	5.980e+000	1.319e-002	-9.282e-001	1.112e+000
2.528e-003	3.5905e-003	2.285e-005	5.899e+000	1.678e-002	-9.546e-001	8.787e-001
2.528e-003	3.5905e-003	2.286e-005	5.899e+000	1.679e-002	-9.546e-001	8.783e-001
2.528e-003	3.5905e-003	2.287e-005	5.899e+000	1.679e-002	-9.547e-001	8.779e-001
2.528e-003	3.5905e-003	2.288e-005	5.899e+000	1.680e-002	-9.547e-001	8.775e-001
2.528e-003	3.5905e-003	2.289e-005	5.898e+000	1.681e-002	-9.548e-001	8.771e-001
2.528e-003	3.5905e-003	2.290e-005	5.898e+000	1.681e-002	-9.548e-001	8.767e-001
2.528e-003	3.5905e-003	2.291e-005	5.898e+000	1.682e-002	-9.548e-001	8.764e-001
2.528e-003	3.5905e-003	2.292e-005	5.980e+000	1.683e-002	-9.549e-001	8.760e-001
2.528e-003	3.5905e-003	2.293e-005	5.898e+000	1.684e-002	-9.549e-001	8.756e-001
2.528e-003	3.5905e-003	2.294e-005	5.898e+000	1.684e-002	-9.549e-001	8.752e-001
2.528e-003	3.5905e-003	2.295e-005	5.898e+000	1.685e-002	-9.550e-001	8.748e-001
2.528e-003	3.5905e-003	2.296e-005	5.898e+000	1.686e-002	-9.550e-001	8.744e-001
2.528e-003	3.5905e-003	2.297e-005	5.898e+000	1.686e-002	-9.551e-001	8.741e-001
2.528e-003	3.5905e-003	2.298e-005	5.897e+000	1.687e-002	-9.551e-001	8.737e-001
2.528e-003	3.5905e-003	2.299e-005	5.897e+000	1.688e-002	-9.551e-001	8.733e-001
2.528e-003	3.5905e-003	2.300e-005	5.897e+000	1.689e-002	-9.552e-001	8.729e-001
2.528e-003	3.5905e-003	2.301e-005	5.897e+000	1.689e-002	-9.552e-001	8.725e-001
2.528e-003	3.5905e-003	2.302e-005	5.897e+000	1.690e-002	-9.552e-001	8.722e-001
2.528e-003	3.5905e-003	2.303e-005	5.897e+000	1.691e-002	-9.553e-001	8.718e-001
2.528e-003	3.5905e-003	2.304e-005	5.897e+000	1.691e-002	-9.553e-001	8.714e-001
2.528e-003	3.5905e-003	2.305e-005	5.897e+000	1.692e-002	-9.554e-001	8.710e-001
2.528e-003	3.5905e-003	2.306e-005	5.896e+000	1.693e-002	-9.554e-001	8.707e-001
2.528e-003	3.5905e-003	2.307e-005	5.896e+000	1.694e-002	-9.554e-001	8.703e-001
2.528e-003	3.5905e-003	2.308e-005	5.896e+000	1.694e-002	-9.555e-001	8.699e-001
2.528e-003	3.5905e-003	2.309e-005	5.896e+000	1.695e-002	-9.555e-001	8.695e-001
2.528e-003	3.5905e-003	2.310e-005	5.896e+000	1.696e-002	-9.556e-001	8.691e-001
2.528e-003	3.5905e-003	2.311e-005	5.896e+000	1.696e-002	-9.556e-001	8.688e-001

Bu hesaplamalar sonucunda çok uzun bir çıktı dosyası olduğu için sadece bir kısmı yukarıda verilmiştir. Değerlere bakıldığında analitik hesaplarla uyum içinde oldukları görülür. Bu aralıklara bakılarak lazer ışının özelliklerine göre belirlenen parametrelerde değişiklikler yapılabilir.

Aynı işlemler U90 undulatörü için yapıldığında her ω_0 değerine farklı R yarıçapları ve Z_R uzunlukları karşılık gelmektedir. Kararlılık parametresi değerlerinin negatif elde edildiği ve $g_1 \times g_2$ sonucunun kararlılık koşul sınırı içinde kaldığı görülmüştür.

U90 için çıktı dosyasından alınan bazı değerler

w0(m)	wz(Lu/2)	lambda(m)	R(m)	ω_1 (m)	g1	zr(m)
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
7.210e-003	2.1209e-002	2.390e-004	5.846e+000	6.126e-002	-9.723e-001	6.833e-001
7.210e-003	2.1209e-002	2.400e-004	5.845e+000	6.151e-002	-9.725e-001	6.805e-001
7.210e-003	2.1209e-002	2.410e-004	5.845e+000	6.176e-002	-9.727e-001	6.776e-001
7.210e-003	2.1209e-002	2.420e-004	5.844e+000	6.201e-002	-9.730e-001	6.748e-001
7.210e-003	2.1209e-002	2.430e-004	5.843e+000	6.227e-002	-9.732e-001	6.721e-001
7.210e-003	2.1209e-002	2.440e-004	5.843e+000	6.252e-002	-9.734e-001	6.693e-001
7.210e-003	2.1209e-002	2.450e-004	5.842e+000	6.277e-002	-9.736e-001	6.666e-001
7.210e-003	2.1209e-002	2.460e-004	5.841e+000	6.302e-002	-9.738e-001	6.639e-001
7.210e-003	2.1209e-002	2.470e-004	5.841e+000	6.328e-002	-9.740e-001	6.612e-001
7.210e-003	2.1209e-002	2.480e-004	5.840e+000	6.353e-002	-9.742e-001	6.585e-001
7.210e-003	2.1209e-002	2.490e-004	5.840e+000	6.378e-002	-9.744e-001	6.559e-001
7.210e-003	2.1209e-002	2.500e-004	5.839e+000	6.404e-002	-9.746e-001	6.533e-001
7.310e-003	2.0988e-002	8.000e-005	6.529e+000	2.137e-002	-7.660e-001	2.098e+000
7.310e-003	2.0988e-002	8.100e-005	6.510e+000	2.161e-002	-7.711e-001	2.073e+000
7.310e-003	2.0988e-002	8.200e-005	6.492e+000	2.184e-002	-7.760e-001	2.047e+000
7.310e-003	2.0988e-002	8.300e-005	6.475e+000	2.208e-002	-7.808e-001	2.023e+000
7.310e-003	2.0988e-002	8.400e-005	6.458e+000	2.232e-002	-7.854e-001	1.999e+000
7.310e-003	2.0988e-002	8.500e-005	6.442e+000	2.256e-002	-7.899e-001	1.975e+000
7.310e-003	2.0988e-002	8.600e-005	6.426e+000	2.279e-002	-7.943e-001	1.952e+000
7.310e-003	2.0988e-002	8.700e-005	6.411e+000	2.303e-002	-7.985e-001	1.930e+000
7.310e-003	2.0988e-002	8.800e-005	6.396e+000	2.327e-002	-8.026e-001	1.908e+000
7.310e-003	2.0988e-002	8.900e-005	6.382e+000	2.351e-002	-8.066e-001	1.886e+000
7.310e-003	2.0988e-002	9.000e-005	6.369e+000	2.375e-002	-8.105e-001	1.865e+000
7.310e-003	2.0988e-002	9.100e-005	6.355e+000	2.399e-002	-8.142e-001	1.845e+000
7.310e-003	2.0988e-002	9.200e-005	6.343e+000	2.422e-002	-8.179e-001	1.825e+000
7.310e-003	2.0988e-002	9.300e-005	6.330e+000	2.446e-002	-8.214e-001	1.805e+000
7.310e-003	2.0988e-002	9.400e-005	6.318e+000	2.470e-002	-8.249e-001	1.786e+000
7.310e-003	2.0988e-002	9.500e-005	6.307e+000	2.494e-002	-8.282e-001	1.767e+000
7.310e-003	2.0988e-002	9.600e-005	6.295e+000	2.518e-002	-8.315e-001	1.749e+000
7.310e-003	2.0988e-002	9.700e-005	6.285e+000	2.542e-002	-8.347e-001	1.731e+000
7.310e-002	2.0988e-002	9.800e-005	6.274e+000	2.566e-002	-8.377e-001	1.713e+000
7.310e-003	2.0988e-002	9.900e-005	6.264e+000	2.591e-002	-8.407e-001	1.696e+000

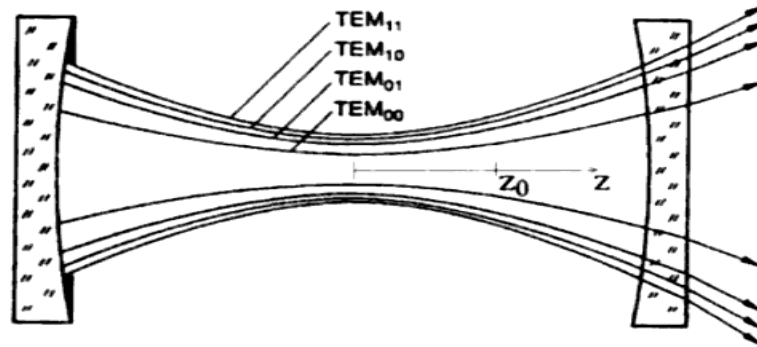
TEM Modları:

SEL verimi, kararlılığı ve çıkış sinyalinin demet kalitesini maksimize etmek için mod kontrollü bir optik kaviteye sahip olmak gerekir. Bu yüzden TEM modları kullanılır. TEM Modları elektron demet belinin ifade edildiği modlardır. (Şekil 4.1) [32]. Çıkış lazerini ifade edebilmek için osilatörde TEM Modları tanımlanmalıdır bunlar düşük ve yüksek derece modlar olabilir. En düşük TEM modları Gaussian, yüksek derecen olanlar ise Hermite ya da Laguerre Polinomlarını içerir. Hermite Polinomları dikdörtgen biçimindeki kordinatlarda, Laguerre Polinomları ise silindirik biçimli koordinatlarda kullanılmaktadır. THM IR-SEL sisteminde de düşük ve yüksek derece de modlar bulunmaktadır.

TEM Modları ve düşük modların yüksek modlara bağlılığı; $W_{pl}(z) = C_{pl}\omega_0$ ifadesi ile verilir. Bu ifade ile rezonatör içindeki demet bel kalınlıklarına göre hangi değerlerin lazer ışını oluşturacağı modellenenebilir. Farklı modlar C_{pl} ile gösterilir. C_{pl} sabit değerleri:

$C_{00}=1, C_{01}=1.5, C_{10}=1.9, C_{11}=2.15, C_{20}=2.42, C_{21}=2.63, C=...$ şeklinde devam eder.

THM IR-FEL Osilatörü IR-FEL Gaussian Mod da çalışmaktadır ki, bu durum TEM_{00} ile ifade edilir. Uygun modlar belirlendiğinde değerler, U25 ve U90 için undulatör aralığı içinde kalmalıdır. Her iki undulatör için hesaplanan undulatör aralığı değeri ile TEM modları arasında değerlendirme yapıldığında;



Şekil 4.1. Elektron demetinin bel uzunluğuna göre TEM Modlarının Belirlenmesi

$W_{pl}(z) = C_{pl}\omega_0$ ifadesinde $\omega_0 = 2.891 \times 10^{-3}$ m kullanılarak TEM_{00} , TEM_{01} , TEM_{10} , TEM_{11} , TEM_{20} modlarının U25 için undulatör gap'i içinde ($TEM < 7.499 \times 10^{-3}$) kaldığı görülmektedir.

$$W_{00} = 2.891 \times 10^{-3}$$

$$W_{01} = 4.3365 \times 10^{-3}$$

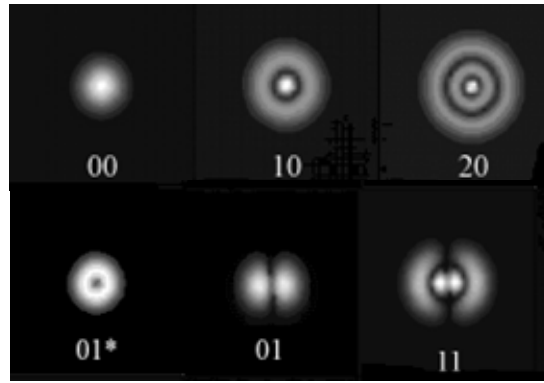
$$W_{10} = 5.4929 \times 10^{-3}$$

$$W_{11} = 6.215 \times 10^{-3}$$

$$W_{20} = 6.996 \times 10^{-3}$$

$$W_{21} = 7.603 \times 10^{-3}$$

değerlerin ilk beş tanesi şekil 4.2 deki gibi undulator gap' i içinde kalır.



Şekil 4.2. U25 Undulatorü için geçerli olan TEM Modları

U90 için TEM₀₀, TEM₀₁, TEM₁₀ modları Undulator içinde kalır.

$$W_{00} = 1.121 \times 10^{-2}$$

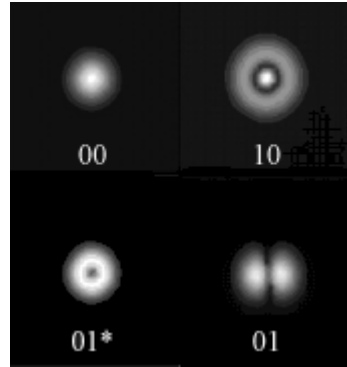
$$W_{01} = 1.681 \times 10^{-2}$$

$$W_{10} = 2.129 \times 10^{-2}$$

$$W_{11} = 2.410 \times 10^{-2}$$

$$W_{20} = 2.712 \times 10^{-2}$$

$$W_{21} = 2.948 \times 10^{-2}$$



Şekil 4.3. U90 Undulatörü için geçerli olan TEM Modları

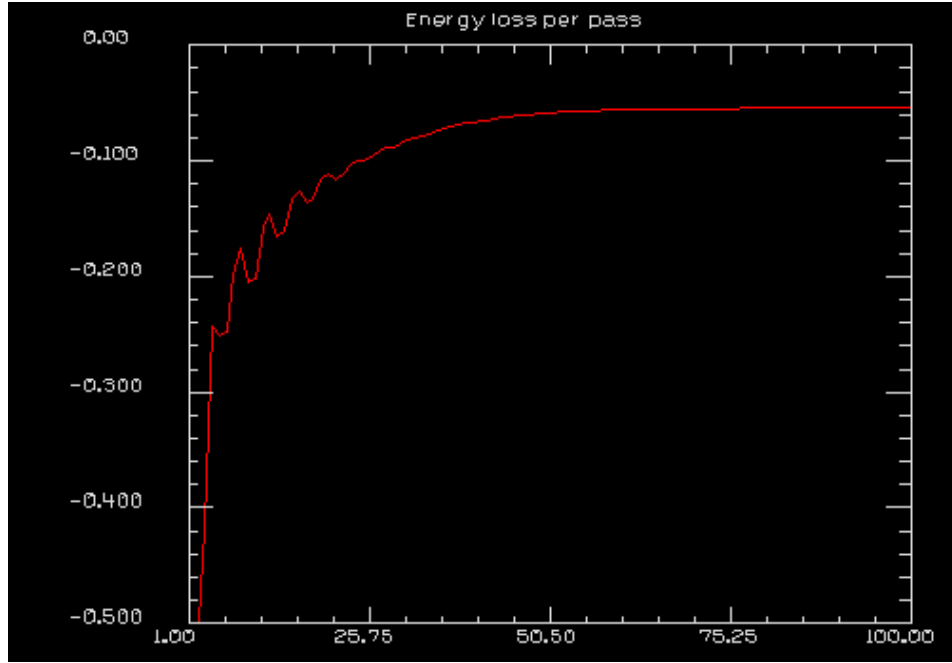
4.2.2. GLAD Programı ile Optik Kavite Hesapları ve Sonuçları

GLAD programı bütün lazer sistemlerine uygulanabilen ve lazer sisteminin baştan sona tüm analizini içeren bir programdır. Açılımı, Genel Lazer Analizi ve Dizaynı (GLAD) şeklindedir [42]. GLAD ile çok karmaşık, çoklu lazer konfigürasyonlarının analizi yapılabilir [43]. Program

- koherent ve koherent olmayan etkileşimleri, lineer olmayan kazanç modellerini
- lensler ve aynalar; küresel, toreidal ve silindiriksel
- genel aralık şekilleri, yakın ve uzak alan kırınımlarının yayılımı
- sabit, sabit olmayan rezonatör modellemesi, özel niteliklere sahip rezonatörlerin dizaynı

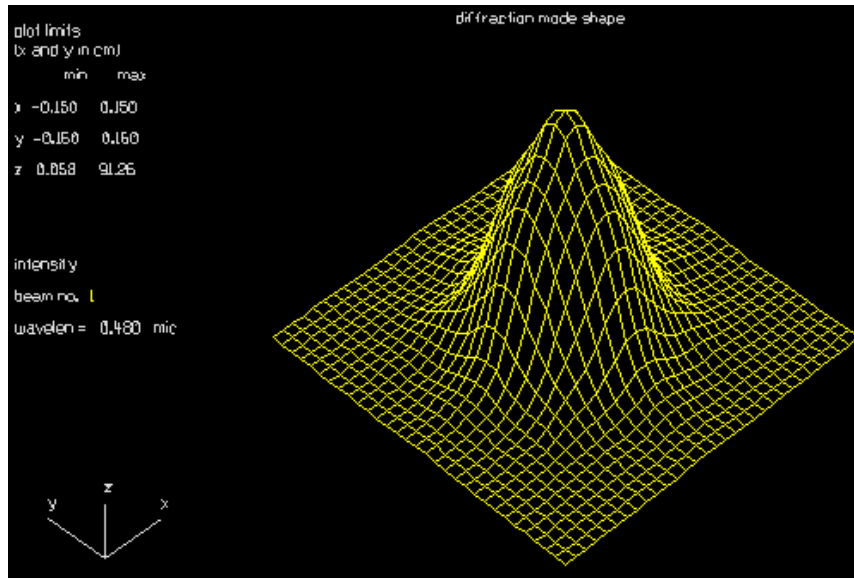
gibi pekçok konu ve özelliklerin içerilip incelenebilmesine izin verir.

GLAD programı ile yapılan nümerik ve sayısal analizler hızlıca sonuçlanabilmektedir. Bu sonuçlar yoğunluk ve faz profillerine göre belirlenmektedir. Bu profiller, toplam güç, tepe gücü, dalga önü kalitesi, dalga önü yapısının çeşitleri ve odaklanmış olan demetin özellikleri gibi bilgileri içermektedir. Yapılan çalışmada herbir geçiş için enerji kayıpları ve kırınım modlarının şekli çalışılmıştır. Kırınım modu üç boyutlu histogramla verilir. Bunlar x ve y yönündeki Gaussiyen demetin faz yarıçap eğriliği şeklinde eksenleri içerir. Enerji kayıpları durgun durumda gelişigüzel gürültüden başlayarak elde edilir. Şekil 4.4, U25 undulatörü için ayna eğrilik yarıçap değeri $R = 5.8950 \text{ m}$ 'e göre herbir geçişteki enerji kaybını gösterir. Durgun durum şartlarında yapılan bu çalışmada geçiş sayısı 100 ile sınırlandırılmıştır.

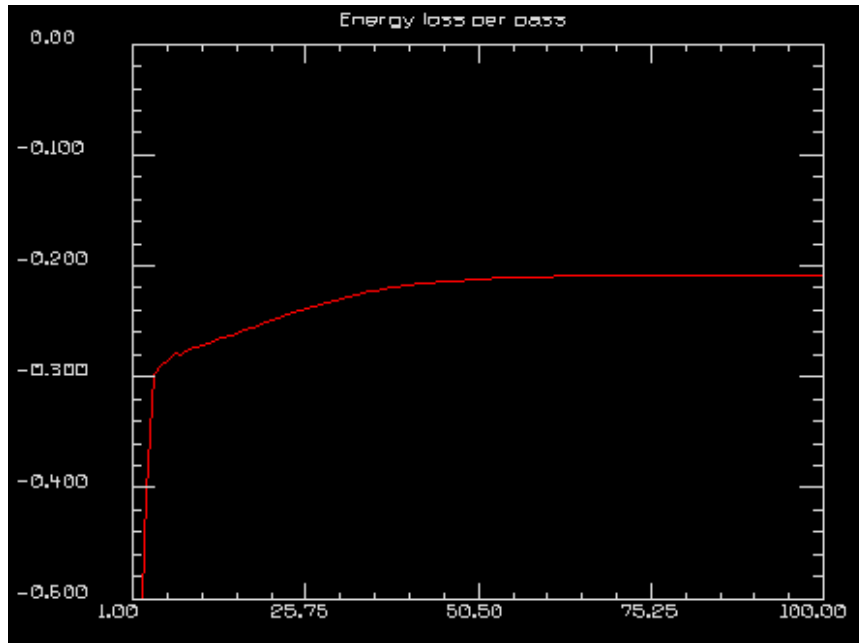


Şekil 4.4. Durgun durumlarda U25 için enerji kaybı

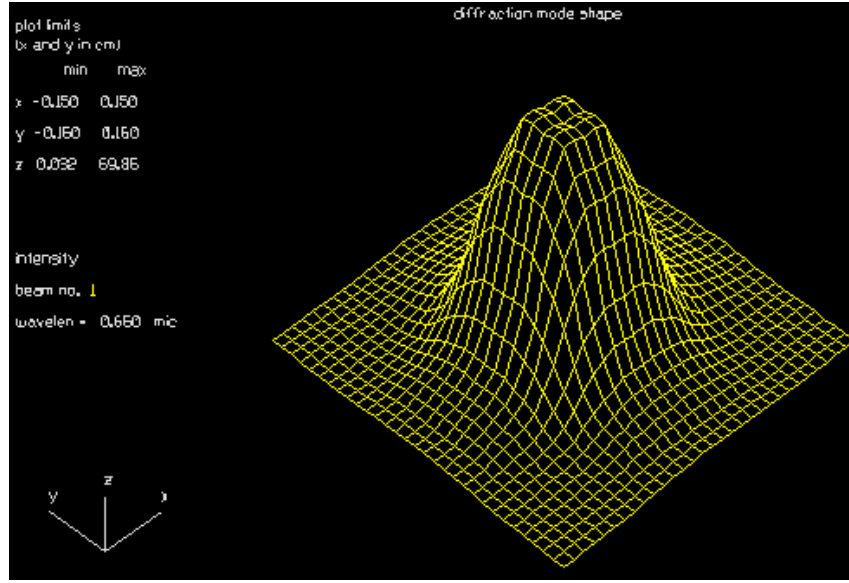
U25 için ayna kaplama malzemesi olarak gümüş seçilmiştir (Şekil 4.5). Gümüş görünür ve kızılötesi bölge için iyi bir performans verir. Korumalı gümüş ve altın kaplamalı aynalar, gümüş (0,428–20 μ m) ve altın (0,65–20 μ m) dalga boyu aralığında kullanılır (Çizelge 4.3). Dağılımı minimize etmek için, ayna çapları demet yarıçapının üç veya daha fazla katı kadardır. U25 için 100 geçişteki enerji kaybı ayna kaplama malzemesi olarak altın seçildiğinde bulunan sonuçlar Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’de verilmektedir. Kırınım kayıp şekillerine bakıldığında altın gümüşten daha hafif olmasına rağmen, gümüş ile yapılan işlemlerin daha iyi sonuç verdiği görülür.



Şekil 4.5. U25 undulatörü için gümüş kaplamalı ayna kullanıldığında kırınım kayıpları

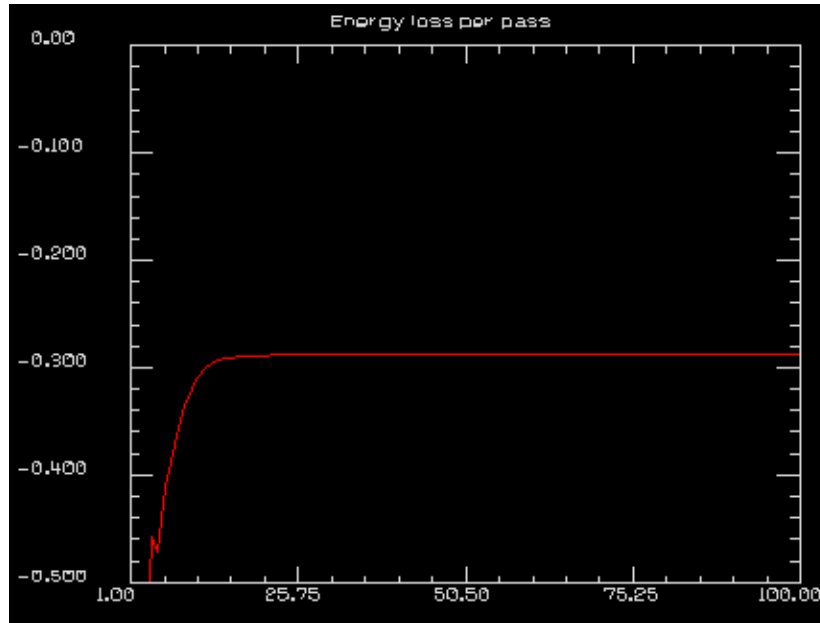


Şekil 4.6. U25 undulatörü için altın kaplamalı ayna kullanıldığında enerji kayıpları

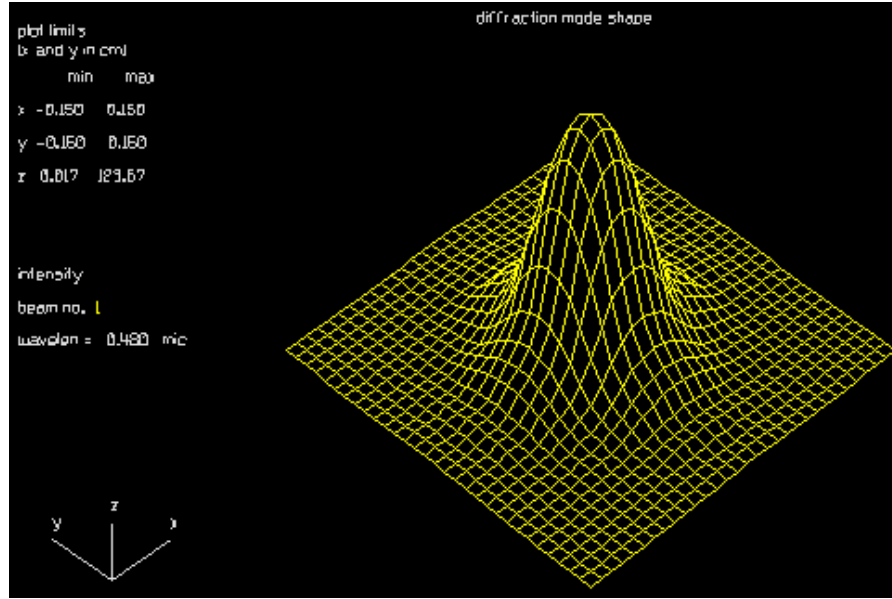


Şekil 4.7. U25 undulatörü için altın kaplamalı ayna kullanıldığında kırınım kayıpları

Ayna kaplaması olarak yine gümüş materyali seçildiğinde 1,5 m uzunluğundaki U25 undulatörünün 100 geçiş için her bir geçişteki enerji kaybı ve kırınım kayıpları Şekil 4.8 ve 4.9’da görülmektedir. Fakat burada ayna deliği olarak 1.100 mm seçilmiştir. Yukarıdaki şekiller de ise ayna deliği 1.126 mm olduğunda sonuçlar gösterilmektedir.

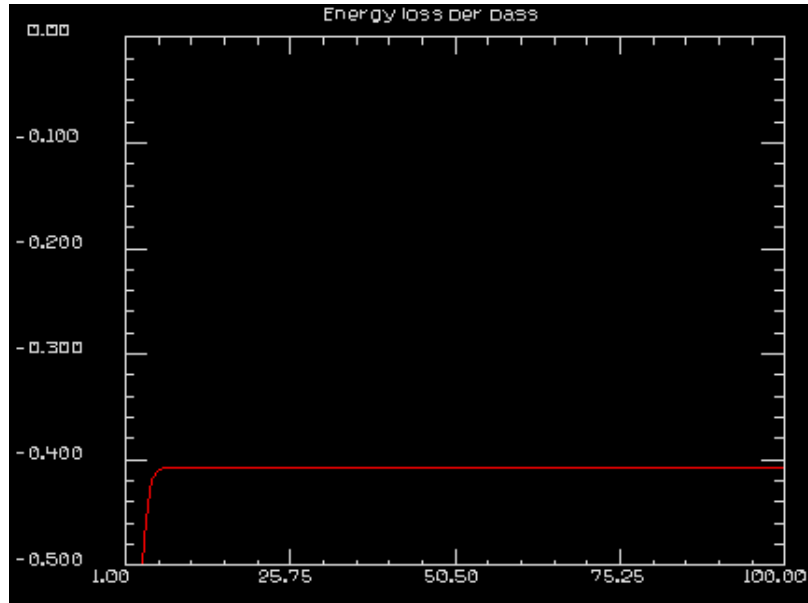


Şekil 4.8. U25 için 1.100mm ayna yarıçap değerindeki enerji kayıpları

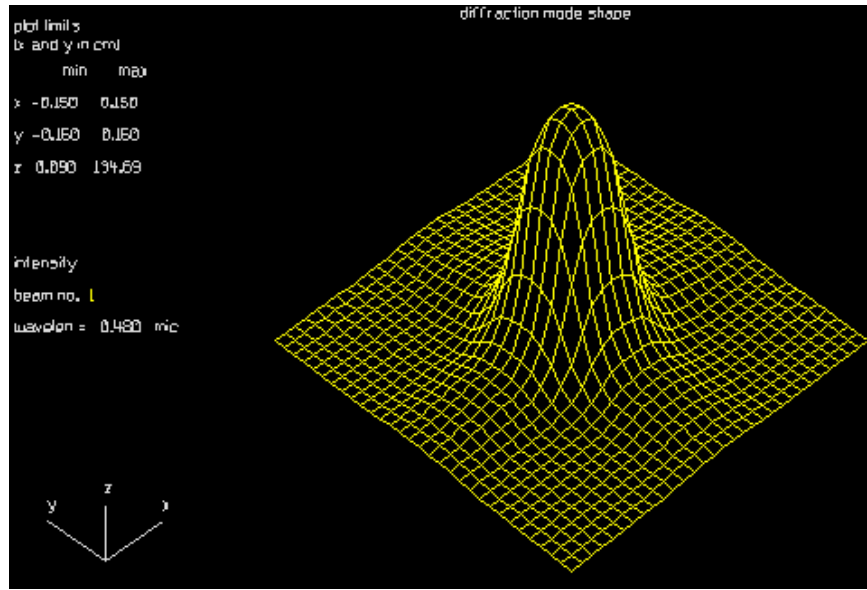


Şekil 4.9. U25 için 1.100mm ayna yarıçap değerindeki kırınım kayıpları

$\lambda_u = 9$ cm dalga boyuna sahip ve 3.6 metre uzunluğundaki U90 undulatörü için gümüş kaplamalı aynalarda 100 geçişteki, durgun haldeki her bir geçişteki enerji kaybı şekil 4.10 da olduğu gibidir. $R = 6.514$ eğrilik yarıçapı ve 1.126 mm ayna deliği ile yapılan kırınım kayıpları hesaplamaların sonucu ise şekil 4.11 de olduğu gibidir.



Şekil 4.10. U90 undulatörü için gümüş kaplamalı ve 1.126mm delikli ayna için enerji kaybı



Şekil 4.11. U90 undulatörü için gümüş kaplamalı ve 1.126 mm delikli ayna için kırınım kaybı

Durgun şartlar altında yapılan çalışmalarda U25 undulatörü ile elde edilen sonuçların U90 undulatörüne göre daha ideal olduğu ve ayna kaplama mazlemesinde altın yerine gümüş tercih edilmesinin daha avantajlı olacağı görülmektedir.

4.2.3. Genesis Programı ile Optik Kavite Hesapları ve Sonuçları

Genesis programı, pek çok lazer simulasyon program olmasına rağmen SEL modellemede en çok kullanılan programdır. Bu program, alan, parçacık çözümleri, faz uzayı yüklemesi ve zamana bağlı simulasyonlar gibi pek çok özelliği barındırmaktadır. Lazer sistemlerinde yavaş bir biçimde değişen genliklerden (eikonal alan denklemi) başlayarak çözüm üretmektedir. Genesis, bir optik rezonator içindeki undulatör kısmının modellenmesinde kullanılmaktadır. Optik rezonatörden optik malzemeye kadar modelleme Genesis ve OPC (optical yayınım kodu) ile yapılmaktadır. Genesis tek geçişlik modelleme yapan bir program olduğundan eğer çok geçiş yapılmak istenilirse içine kaynak kodları konulmalıdır [43].

Işınım alanındaki diferansiyel denklem Schrödinger denkleminde benzerdir. Kırınım konumuna göre 2. basamaktadır. Genesiste yalnızca boylsal uzay yükü gözönüne alınmaktadır. Alan ve parçacık arasında ilişki kurularak enerji ve parçacık fazı Runge-Kutta yöntemi ile çözülür. (4.basamak)

Genesis ile “Steady State Simulasyonları” ve “Time Dependent State Simulasyonları” yapılabilmektedir. Bu aşamalarda paraxial olarak ışıınım alanının optik ve kazanç elemanları arasında yayılımını sağlamak için üç optik method kullanılmaktadır [44]:

1. Spektral Metod; paraxial dalga eşitliğine Fourier dönüşümleri uygulandığında, dalga genliği;

$$\tilde{u}(k_x, k_y, z) = \tilde{u}_0(k_x, k_y) e^{-i \frac{2z}{k} (k_x^2 + k_y^2)},$$

olduğu metoddur.

2. Modifiye Fresnel Dağılım Metodu; $z=L$ için paraxial dalga yayılımı, Huygens integralinden genel bir matris halinde ifade edilir.

3. Fresnel Dağılım Metodu; boş uzay yayılımı için matris elemanı kullanımıyla elde edilir.

Genesis programında hesaplamalar yapılırken elektron demeti ve ışıınım alanı dilimlere ayırarak modelleme yapılmaktadır. Çünkü her bir integrasyon basamağında ışıınım dilimi ile elektron dilimi etkileşmektedir. Genesis’in kendi içinde bulunan yaklaşık 100 parametre vardır. Bu parametreler haricinde parametre girilemez. Fakat elektron demeti Elegant, Parmela gibi programlarla belirlenip Genesis ile çağırılabilir.

Genesis programı “yuup.in” gibi bir input dosyası ile çağırılmaktadır. Genesis girdi dosyasında

- Undulator parametresi, Elektron demeti parametresi
- Işıınım parametresi, Odaklama parametresi
- Zaman bağıli parametre, Kontrol parametresi, Grid parametreleri,

bulunur. Bu parametreler üzerinde değışiklikler yapılarak “yuup.out” gibi bir output dosyası oluşmaktadır. Bu dosya input dosyasındaki değeri ve sonrasında oluşan çıktı değeri içinde barındırır. Oluşan output dosyası ile doyum gücü, doyum uzunluğu, x ve y yönündeki electron demet davranışı, ışıınım gücü gibi değeri incelenmektedir.

Undulatör parametrelerinden olan AWO:RMS undulatör parametresi şu şekilde verilir:

$$AWO = \left(\frac{e}{mc} \right) \left(\frac{B_u}{K_u} \right)$$

Burada $B_u = \frac{B_p}{2}$ planar undulatör için tepe manyetik alan ve $B_u = B_p$ helical undulatör

için tepe manyetik alan değerleridir.

XLAMDS : Undulatör dalga boyunu tanımlamaktadır.

NWIG : Undulatör Modülünün Periyodu

IWITYP : Undulatör tipini belirler. Planar undulatör için 0, helical undulatör için 1 değeri alınır.

GAMMA0 : Elektronun temel enerjisi

CURPEAK (A) : Elektron demetinin tepe akımı.

PRADO (Watt) : Işınım alanının güç girdisi.

XLAMDS (m) : Resonant ışınım dalgaboyu

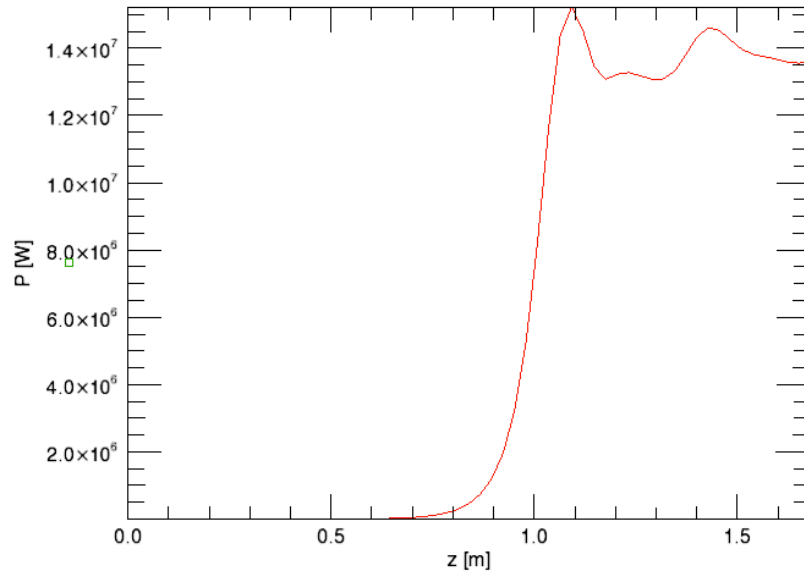
Yukarıda birkaç parametresi verilen Genesis'te parametreler girilip çalıştırıldığında ışınımın gücü, demet büyüklükleri, pozisyonları, paketçik faktörleri, 4.dereceden harmoniklere kadar paketlenmeleri ve enerji yayınımları elde edilebilmektedir.

THM IR SEL için yapılan tek geçiş hesaplamaları;

U25 undulatörü için GAMMA0 = 28 MeV için analitik olarak hesaplanan undulatör dalgaboyu, undulatör tipi, RMS, Rayleigh uzunluğu değerleri Genesis programında input dosyasında yazıldığında aşağıdaki out put dosyası oluşur:

power	increment	p_mid	phi_mid	r_size	energy	bunching	xrms	yrms
1.0000E+01	-1.3323E-13	3.1078E-02	0.0000E+00	6.8153E-04	3.8164E-17	1.0473E-15	1.1210E-04	1.1210E-04
9.9959E+00	-1.6531E-02	2.9892E-02	-6.7499E-02	6.8193E-04	3.9883E-10	1.8858E-05	1.1230E-04	1.1257E-04
9.8616E+00	-5.4113E-01	2.1339E-02	-1.3073E-01	6.8716E-04	4.4602E-10	6.4891E-05	1.1287E-04	1.1395E-04
9.5494E+00	-1.2865E+00	1.1439E-02	1.1761E-01	6.9906E-04	-8.6112E-10	1.2979E-04	1.1379E-04	1.1616E-04
9.2830E+00	-1.1320E+00	1.9548E-02	6.7726E-01	7.0998E-04	-3.1085E-09	1.9850E-04	1.1498E-04	1.1904E-04
9.4808E+00	8.4366E-01	5.8885E-02	6.5672E-01	7.0414E-04	-3.6990E-09	2.5557E-04	1.1636E-04	1.2245E-04
1.0377E+01	3.6126E+00	1.1207E-01	3.3753E-01	6.7614E-04	4.3195E-10	2.9203E-04	1.1784E-04	1.2618E-04
1.1644E+01	4.6086E+00	1.3444E-01	-8.7148E-02	6.4360E-04	9.5036E-09	3.1494E-04	1.1933E-04	1.3007E-04
1.2466E+01	2.7266E+00	1.0220E-01	-5.7380E-01	6.2981E-04	1.9125E-08	3.5339E-04	1.2074E-04	1.3394E-04
1.2210E+01	-8.2714E-01	3.6825E-02	-1.183E+00	6.4664E-04	2.2917E-08	4.3898E-04	1.2197E-04	1.3763E-04
1.1278E+01	-3.1780E+00	4.2164E-03	2.9364E+00	6.8607E-04	1.8877E-08	5.7048E-04	1.2297E-04	1.4100E-04
1.1283E+01	1.9151E-02	7.8047E-02	1.4345E+00	7.0345E-04	1.4379E-08	7.2055E-04	1.2367E-04	1.4394E-04
1.4104E+01	8.9249E+00	2.6437E-01	7.6667E-01	6.5273E-04	2.3943E-08	8.6427E-04	1.2404E-04	1.4635E-04
2.0292E+01	1.4550E+01	4.7107E-01	1.2342E-01	5.7490E-04	5.9022E-08	9.9646E-04	1.2405E-04	1.4815E-04
2.8235E+01	1.3214E+01	5.7088E-01	-5.8154E-01	5.2610E-04	1.1706E-07	1.1391E-03	1.2371E-04	1.4928E-04

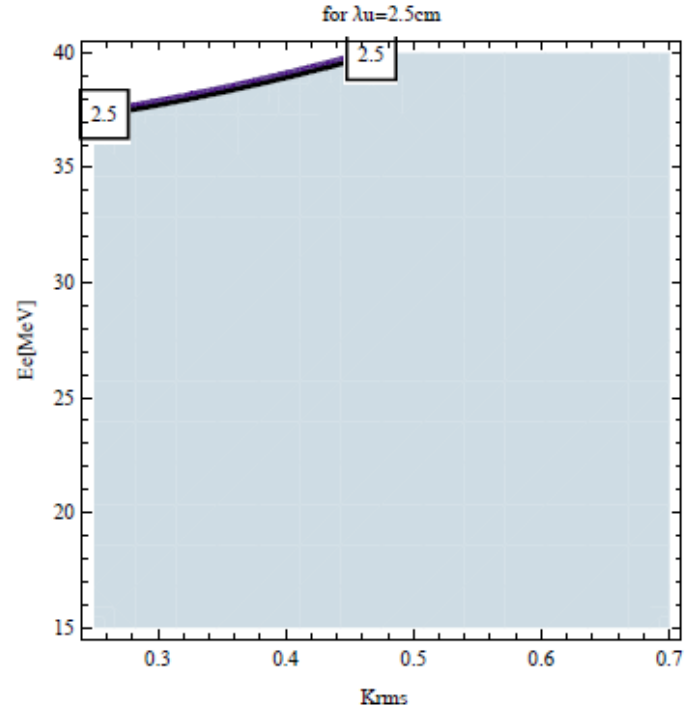
3.5332E+01	8.9693E+00	5.1598E-01	-1.429E+00	5.1787E-04	1.8106E-07	1.3323E-03	1.2303E-04	1.4973E-04
4.0908E+01	5.8616E+00	4.5400E-01	-2.535E+00	5.3850E-04	2.3536E-07	1.6052E-03	1.2205E-04	1.4946E-04
4.8783E+01	7.0428E+00	6.9296E-01	2.5030E+00	5.5950E-04	2.8897E-07	1.9556E-03	1.2083E-04	1.4849E-04
6.6901E+01	1.2633E+01	1.4659E+00	1.4434E+00	5.5008E-04	3.8778E-07	2.3608E-03	1.1943E-04	1.4685E-04
1.0327E+02	1.7367E+01	2.6687E+00	5.4427E-01	5.1771E-04	5.9918E-07	2.8066E-03	1.1795E-04	1.4459E-04
1.6119E+02	1.7809E+01	4.0044E+00	-3.2024E-01	4.9123E-04	9.7532E-07	3.3091E-03	1.1646E-04	1.4178E-04
2.3891E+02	1.5739E+01	5.2021E+00	-1.218E+00	4.8287E-04	1.5268E-06	3.9173E-03	1.1507E-04	1.3850E-04
3.3718E+02	1.3781E+01	6.7629E+00	-2.202E+00	4.8886E-04	2.2455E-06	4.6923E-03	1.1386E-04	1.3488E-04
4.7172E+02	1.3431E+01	9.7215E+00	3.0357E+00	4.9829E-04	3.1854E-06	5.6777E-03	1.1293E-04	1.3104E-04
6.8110E+02	1.4693E+01	1.6233E+01	2.0043E+00	5.0082E-04	4.5558E-06	6.8921E-03	1.1232E-04	1.2714E-04
1.0233E+03	1.6282E+01	2.7393E+01	1.0151E+00	4.9445E-04	6.7509E-06	8.3512E-03	1.1210E-04	1.2335E-04
1.5612E+03	1.6897E+01	4.3615E+01	4.4358E-02	4.8548E-04	1.0287E-05	1.0102E-02	1.1227E-04	1.1985E-04
2.3541E+03	1.6430E+01	6.3966E+01	-9.2400E-01	4.8024E-04	1.5695E-05	1.2239E-02	1.1282E-04	1.1682E-04
3.4760E+03	1.5588E+01	9.0771E+01	-1.9120E+00	4.8043E-04	2.3532E-05	1.4896E-02	1.1372E-04	1.1443E-04
5.0653E+03	1.5061E+01	1.2841E+02	-2.9161E+00	4.8377E-04	3.4637E-05	1.8216E-02	1.1489E-04	1.1283E-04
7.3759E+03	1.5032E+01	1.8853E+02	2.3782E+00	4.8707E-04	5.0579E-05	2.2331E-02	1.1626E-04	1.1213E-04
1.0800E+04	1.5253E+01	2.8206E+02	1.3979E+00	4.8870E-04	7.3992E-05	2.7368E-02	1.1774E-04	1.1237E-04
1.5854E+04	1.5356E+01	4.1825E+02	4.3313E-01	4.8930E-04	1.0864E-04	3.3493E-02	1.1924E-04	1.1353E-04
2.3174E+04	1.5185E+01	6.0803E+02	-5.3691E-01	4.9040E-04	1.5934E-04	4.0933E-02	1.2065E-04	1.1554E-04
3.3580E+04	1.4835E+01	8.5201E+02	-1.5001E+00	4.9294E-04	2.3208E-04	4.9979E-02	1.2190E-04	1.1827E-04
4.8260E+04	1.4507E+01	1.2042E+03	-2.4639E+00	4.9666E-04	3.3500E-04	6.0958E-02	1.2291E-04	1.2156E-04
6.9126E+04	1.4373E+01	1.7129E+03	2.8452E+00	5.0034E-04	4.8059E-04	7.4206E-02	1.2363E-04	1.2524E-04
9.9071E+04	1.4396E+01	2.4494E+03	1.8823E+00	5.0311E-04	6.8833E-04	9.0068E-02	1.2402E-04	1.2910E-04
1.4226E+05	1.4471E+01	3.5001E+03	9.2118E-01	5.0481E-04	9.8704E-04	1.0891E-01	1.2406E-04	1.3299E-04
2.0433E+05	1.4485E+01	5.0407E+03	-4.8619E-02	5.0594E-04	1.4172E-03	1.3112E-01	1.2374E-04	1.3674E-04
2.9303E+05	1.4421E+01	7.0593E+03	-1.0259E+00	5.0716E-04	2.0343E-03	1.5708E-01	1.2308E-04	1.4020E-04
4.1871E+05	1.4276E+01	9.7281E+03	-2.0011E+00	5.0907E-04	2.9147E-03	1.8708E-01	1.2212E-04	1.4326E-04
5.9503E+05	1.4057E+01	1.3299E+04	-2.9708E+00	5.1220E-04	4.1609E-03	2.2118E-01	1.2092E-04	1.4581E-04
8.3969E+05	1.3777E+01	1.8256E+04	2.3305E+00	5.1689E-04	5.9090E-03	2.5904E-01	1.1953E-04	1.4776E-04
1.1732E+06	1.3377E+01	2.4477E+04	1.3487E+00	5.2377E-04	8.3310E-03	2.9970E-01	1.1805E-04	1.4906E-04
1.6157E+06	1.2803E+01	3.1808E+04	3.5729E-01	5.3375E-04	1.1621E-02	3.4131E-01	1.1655E-04	1.4968E-04
2.1791E+06	1.1965E+01	3.9264E+04	-6.3691E-01	5.4830E-04	1.5950E-02	3.8101E-01	1.1515E-04	1.4959E-04
2.8604E+06	1.0883E+01	4.6341E+04	-1.6407E+00	5.6882E-04	2.1391E-02	4.1488E-01	1.1393E-04	1.4879E-04
3.6370E+06	9.6073E+00	5.1810E+04	-2.6559E+00	5.9658E-04	2.7858E-02	4.3833E-01	1.1297E-04	1.4732E-04
4.4647E+06	8.2021E+00	5.3531E+04	2.5789E+00	6.3277E-04	3.5068E-02	4.4716E-01	1.1234E-04	1.4521E-04
5.2833E+06	6.7335E+00	5.2003E+04	1.5003E+00	6.7848E-04	4.2536E-02	4.3892E-01	1.1209E-04	1.4252E-04
6.0321E+06	5.3016E+00	4.6933E+04	3.8701E-01	7.3443E-04	4.9678E-02	4.1396E-01	1.1222E-04	1.3935E-04
6.6637E+06	3.9834E+00	3.8548E+04	-7.6073E-01	8.0097E-04	5.5989E-02	3.7532E-01	1.1274E-04	1.3580E-04
7.1483E+06	2.8080E+00	2.8977E+04	-1.9154E+00	8.7833E-04	6.1118E-02	3.2741E-01	1.1360E-04	1.3200E-04
7.4779E+06	1.8032E+00	2.0295E+04	-3.1027E+00	9.6651E-04	6.4896E-02	2.7471E-01	1.1474E-04	1.2810E-04
7.6684E+06	1.0064E+00	1.2637E+04	1.8816E+00	1.0649E-03	6.7366E-02	2.2181E-01	1.1609E-04	1.2426E-04
7.7631E+06	4.9053E-01	6.7116E+03	3.5826E-01	1.1713E-03	6.8790E-02	1.7523E-01	1.1755E-04	1.2066E-04
7.8287E+06	3.3677E-01	6.2077E+03	-1.3989E+00	1.2814E-03	6.9644E-02	1.4558E-01	1.1903E-04	1.1748E-04
7.9331E+06	5.3012E-01	1.1157E+04	-2.9638E+00	1.3891E-03	7.0529E-02	1.4311E-01	1.2044E-04	1.1490E-04
8.1153E+06	9.0820E-01	2.1116E+04	2.0176E+00	1.4900E-03	7.1943E-02	1.6331E-01	1.2169E-04	1.1308E-04
8.3638E+06	1.2064E+00	3.1926E+04	8.2011E-01	1.5841E-03	7.4045E-02	1.9058E-01	1.2272E-04	1.1212E-04



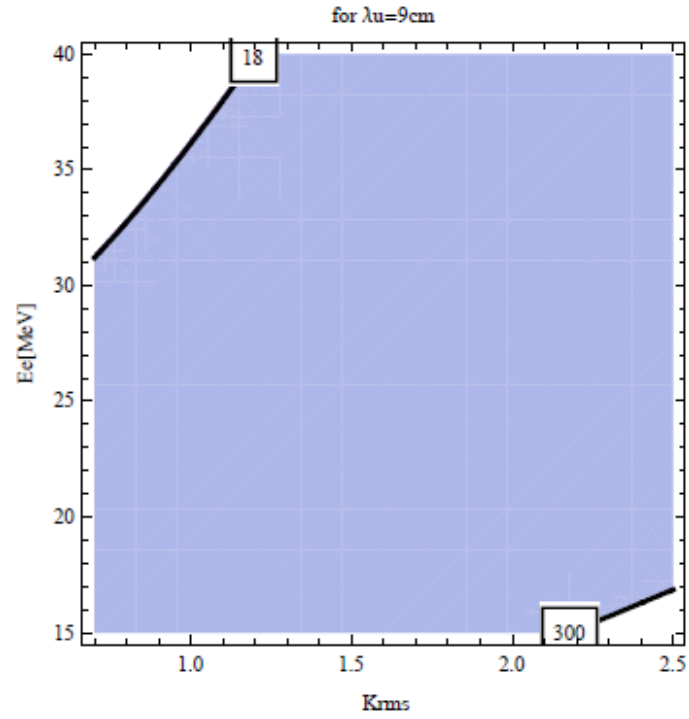
Şekil 4.12 U25 için rezonatördeki lazer gücünün konumuna göre değişimi

U25 ve U90 için FELO Programı kullanılarak, K undulatör parametresine göre çıkış lazer dalgaboyu değişimi elde edilmiş ve şekil 4.13'te görülmektedir [45]. U25 ve U90 15-20 micron arasında üstüste biner. 250 micron'dan yukarı çıkmak oldukça zor olduğu için enerjiyi 15 MeV'den daha düşük yapmanın yolları aranmaktadır.

Ayrıca FELO Programını bazı SEL parametrelerini modellemek için kullanılır. Bu parametreler kazanç, yoğunluk, güç ve rezonatör içinde git-gel prosesi süresince doyuma ulaşma durumunun grafiği elde edilebilir. FELO çıktısı olarak üç farklı (.zaman, .optik, .elektron) çeşit özellikleri veren grafik ve çıktılar elde edilmiştir. Şekil 4.14'te FELO Zaman çıktısına göre rezonatör içinde 250 tekrarlama, diğer bir deyişle git-gel için minimum undulatör kuvvet parametresine göre elde edilen kazanç grafiği görülmektedir.



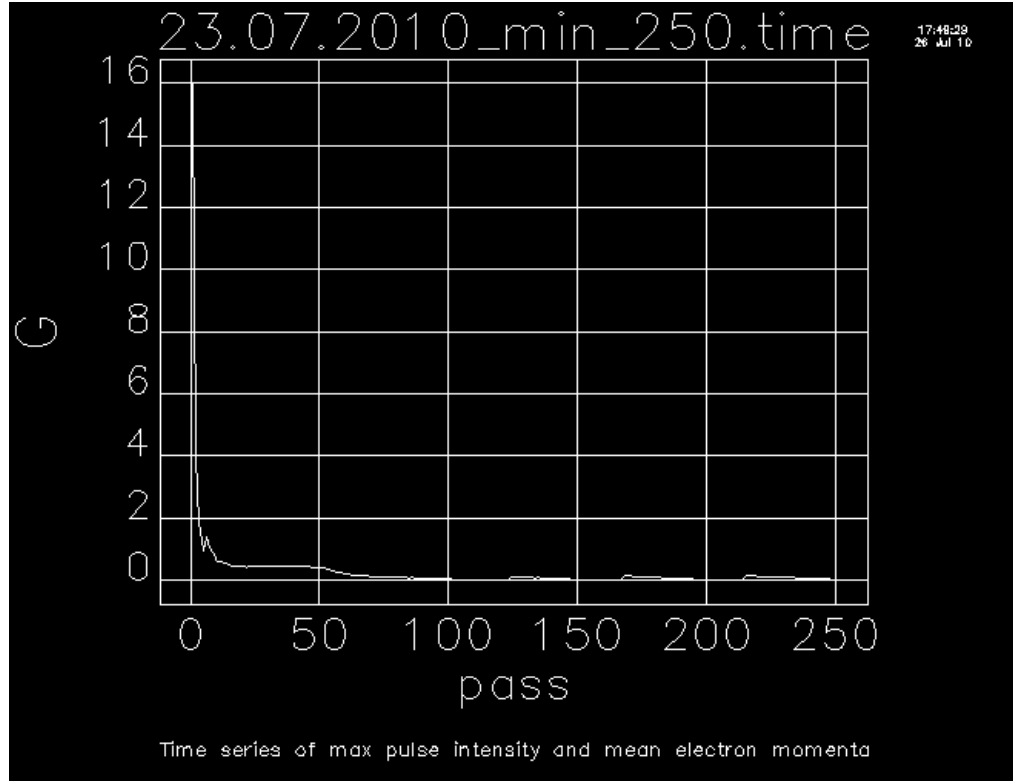
(a)



(b)

Şekil 4.13. Demet enerjisi, undulator aralığı ve SEL Dalgaboyunun birbirlerine göre değişimi.

(a)U25 ($\lambda_u = 2.5 \text{ cm}$), **(b)**U90 ($\lambda_u = 9 \text{ cm}$)



Şekil 4.14. Doyuma ulaşma süresi boyunca geçişlere göre (250 geçiş için) kazancın değişimi
U25 ($\lambda_u = 2.5$ cm) için.

SONUÇ ve TARTIŞMA

Ülkemizde tedavi ve teşhis amaçlı küçük hızlandırıcılar bulunmasına rağmen Araştırma ve Geliştirme amaçlı hızlandırıcılar ve hızlandırıcı sistemleri bulunmamaktadır. Ankara Üniversitesi'nin koordinatörlüğünü yaptığı DTP-YUUP projesi ile ülkemiz ilk Araştırma-Geliştirme (Ar-Ge) amaçlı hızlandırıcı tesisine sahip olacaktır. Bu hızlandırıcıdan elde edilecek elektronlar ile SASE ve Osilatör modda Serbest Elektron Lazerleri elde edilmesi planlanmıştır. Osilatör moddaki lazer kızılötesi bölgesini kapsamaktadır. Bu çalışmada 2.5 cm ve 9 cm dalga boyuna sahip iki tane undulatör kullanılarak oluşturulan rezonatör sistemi için Dünya'da mevcut olan SEL laboratuvarları incelenmiş ve THM, IR-SEL için çalışmalar, modellemeler yapılarak Rezonatör sistemine ait tüm parametreler (ayna, undulatör, SEL ve rezonatörün kendi parametreleri) hesaplanmış ve belirlenmiştir. Diğer laboratuvarlarla iş birliği yapılarak elde edilen sonuçların uyumluluğu tartışılmıştır. Tipik bir lazer, elektron tabancasından çıkan birkaç MeV enerjili elektronları hızlandıran hızlandırıcılardan ve hızlandırılmış elektronları kullanarak amaca ve isteğe uygun olarak elde edilmesi planlanan lazer ışınının dalgaboyunu elde etmeyi sağlayan bir rezonatör sisteminden oluşmaktadır. Detaylı yapılan modelleme çalışmalarında, tez kapsamında undulatör sisteminin özellikleri ve parametreleri, elektron demetinin undulatör ve rezonatör içinde undulatör çıkışından aynalara kadar olan kısımdaki davranışı, ayna yapısı, ayna malzemesi, aynaların kaplama malzemesi ve detaylı rezonatör parametreleri belirlenmesi için gerekli hesaplamalar ve modellemeler (Genesis 1.3, GLAD, FELO, C++, Matematik, Analitik Hesaplar) yapılmıştır. Bu hesaplamalar yapılırken en iyi verimin elde edilebileceği aralıklar belirlenmeye ve bu aralıklar üzerinde detaylı araştırma yapılmaya çalışılmıştır. İlk olarak analitik hesaplamalar yapılmıştır. Fakat planlanan dalga boyu aralığı 2.-250 mikron olduğu ve iki tane undulatör bulunduğu için tüm aralıklar için elde hesaplama yapmak mümkün olmadığından bilgisayar programlama dillerine, hesaplama programlarına ve simülasyon programlarına ihtiyaç duyulmuştur.

Bu tez çalışmasında analitik hesaplamalardan sonra C++ programı ile hesaplar yapılmıştır ve lazer sistemleri için detaylı bir analiz programı olan GLAD programı ile undulatöre ait çizimler elde edilmiştir. GLAD programına göre ayna kaplamasında ayna malzemesi olarak altın kullanılması ve kaplama malzemesi olarak gümüş kullanılmasının daha verimli sonuçlar ortaya çıkardığı görülmüştür. Rezonatör sisteminde ışınımı dışarı almayı sağlayacak olan aynalardan biri üzerinde bulunan deliğin büyüklüğü 1.126mm olduğu zaman ışınım dışarı daha iyi bir biçimde alınmakta olduğu belirlenmiştir. Dünya genelinde Serbest Elektron Lazeri laboratuvarlarında kullanılan simülasyon programları takip edilerek modelleme hesapları yapılmıştır.

SEL lazerlerinin optik kavite hesaplarında yaygın olarak kullanılan GENESİS programı ile lazerin doyuma ulaştığı doyum uzunluğu, doyum gücü değerlerine bakılmıştır. Genesis programı ile yapılan çalışmalar sonuçlanmıştır fakat Genesis parametrelerinden elektron demet parametreleri başka bir programla elde edilip Genesise kaynak dosya şeklinde aktarılırsa daha verimli sonuçlar elde edilebilir. Çünkü SEL kalitesini, elektron demetinin özellikleri ve undulatör yapısı belirlemektedir. Elektron demeti düşük enerji yayını ve yüksek pik akımına sahip olursa kazanç ortamındaki yani optik kavite sistemindeki kazanç yüksek olacaktır. THM projesinin optik kavite kısmı hesaplamalarında elektron demeti parametrelerinin fiziksel açıdan kalitesi verimliliği artıracağından özellikle GENESİS programında bu elektron demeti parametrelerine ihtiyaç duyulduğundan bunların daha doğru şekilde yapılandırılmasıyla daha iyi sonuçlar alınacağı düşünülmektedir. Genesis rezonatör içinde sadece undulatör kısmındaki geçişleri verir. Rezonatördeki çıkış lazerinin kazancını, gücü, yoğunluğu çok tekrarlama döngüsü ile FELO programı vermektedir. Bu programla 250 geçiş için çalışmalar yapılmış ve çıktılar THM IR-SEL çıkış lazeri için yüksek bir kazanç değeriyle elde edilmiş ve grafiklendirilmiştir. THM IR-SEL çalışmaları kapsamında yapılan çalışmalara ek olarak U90 için dalga klavuzu çalışmaları da yapılmalıdır. Dalga klavuzu üretme programları ile modelleme çalışmalarımız devam etmektedir. Bu çalışmalar sonucunda rezonatör içine yerleştirilmesi gereken dalga klavuzunun materyal özellikleri ve parametreleri belirlenecektir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- [1] E. L. Saldin, E. A. Schneidmiller and M. V. Yurkov, The Physics of Free Electron Lasers, Springer-Verlag, Berlin (2000)
- [2] F. Ciocci, G. Dattoli, A. Torre, A. Renieri, Insertion Devices for Synchrotron Radiation and Free Electron Laser, World Scientific (2000)
- [3] Yavaş Ö, 4. Nesil Işınım Kaynağı Olarak Serbest Elektron Lazerleri, I.Ulusal Parçacık Hızlandırıcıları ve Uygulamaları Kongresi, 2001
- [4] Synchrotron Radiation Sources-A Primer, Ed. H. Winick, World Scientific Publishing Co. (1999)
- [5] http://www.desy.de/research/photon_science/development_of_light_sources
- [6] PETRAIII: A Low Emittance Synchrotron Radiation Source Technical Design Report, Executive Summary
- [7] N. Yagi, K. Wakabayashi, H. Iwamoto, K. Horiuti, I. Kojima, T. Irving, Y. Takezawa, Y. Sugimoto, S. Iwamoto, T. Majima, Y. Amemiya, M. Ando, Jour. Synchr. Rad. 3 (1996) 305-312.
- [8] <http://www.besy.de>
- [9] <http://www.elettra.trieste.it>
- [10] <http://www.kek.jp>
- [11] <http://www.desy.de>
- [12] http://xdb.lbl.gov/Section2/Sec_2-2.html
- [13] <http://www.odevsel.com/egitim>
- [14] litarum.kocaeli.edu.tr/dosyalar/BelgeselLAZER.pps
- [15] <http://www.lightsources.org>
- [16] Tural M, Kırmızıaltı Serbest Elektron Lazerlerinin Temel ve uygulamalı araştırmalarda kullanımı, Yüksek Lisans Tezi
- [17] Dattoli, G., Renieri, A. and Torre, A. 1993. Lectures On The Free Electron Laser Theory and Related Topics. World Scientific ISBN 981-02-0565-1, 637, Singapore.
- [18] Wille, K. Mcfaal, J. 2000. The Physics of Particle Accelerators, Oxford University Press ISBN 0 19 850549 3, USA, 315.
- [19] W.A. Barletta, J. Bisognano, Free electronlasers: Present status and future challenges, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

- [20] G. Dattoli et al. CERN 90-03, Geneva (1990) 254
- [21] <http://thm.ankara.edu.tr>, <http://www.tarla-fel.org>.
- [22] G. Dattoli, A. Renieri and A. Torre, Lectures in Free-Electron Laser theory and related topics, World Scientific, Singapore (1995)
- [23] AKSOY A, KETENOĞLU B, NERGİZ Z, YAVAŞ Ö, Türk Hızlandırıcı Merkezi Kızılötesi Serbest Elektron Lazeri Tesisi (THM IR SEL) için Linak Optimizasyonu,
- [24] Gezgin S, Serbest Elektron Lazeri Parametrelerinin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi
- [25] Chesworth, A.A.. 2000. A Feasibility Study for placing an Infrared Free-Electron Laser on DIAMOND.
- [26] <http://www.wikipedia.com/gaussian function>
- [27] Wille, K. Mcfaal, J. 2000. The Physics of Particle Accelerators, Oxford University Press ISBN 0 19 850549 3, USA, 315.
- [28] Papadicev, V.A. 1996. Polarization in Free Electron Lasers. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A375 483-486.
- [29] Bakker, R.J., van der Geer C.A.J., Jaroszynski, D.A., van der Meer, A.F.G, Oepts, D. and van Amersfoort P.W. 1993. Broadband tunability of a far-infrared free electron laser. J.Appl.Phys. 74(3) 1501-1509
- [30] Isamu SATO, New Light: What is Free Electron Laser FEL?
- [31] Laser and Gaussian Beam Propagation and Transformation Javier Alda University Complutense of Madrid, Madrid, Spain,
- [32] Gaussian Beam Propagation, www.mellesgriot.com
- [33] (<http://www.atto.physik.unimuenchen.de/PhotonicsI-ChapterIII-2.pdf> 2006)
- [34] http://en.wikipedia.org/wiki/Optical_cavity
- [35] The 4GLS VUV-FEL, Neil Thompson & David Dunning, MaRS Group, ASTeC Brian M'Neil, University of Strathclyde VUV-FEL Design, Jaap Karssenberg & Peter van der Slot, Twente University 3D Optics Code (OPC)
- [36] DURAN YILDIZ H, Infrared Free Electron Laser, Resonator Parameters Optimization With Genesis, OPC and GLAD Codes.
- [37] FREE ELECTRON LASERS Giuseppe Dattoli and Alberto Renieri ENEA, Divisione Fisica Applicata, Centro Ricerche Frascati, CP. 65, 00044 Frascati, Rome (Italy)

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

- [38] FEL OSCILLATORS George R. Neil Thomas Jefferson National Accelerator Facility, Newport News, Virginia, USA
- [39] H. YILDIZ, Turkish Accelerator Complex, Fel Resonator System
- [40] G. Dattoli and A. Renieri, "Experimental and Theoretical Aspects of the Free Electron Laser", in Laser Handbook edited by M.L. Stitch and M. Bass, Elsevier Science Pub. 1895 G. Dattoli ve A. Torre, "Free Electron Laser Theory" CERN 89-03 (1989)
- [41] KARSLI Ö, Hızlandırıcılara Dayalı Kızıl Ötesi Serbest Elektron Lazeri (IR-FEL) Optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi
- [42] GLAD, Applied Optics Research Woodland, WA 98674, USA
- [43] <http://www.aor.com/> GLAD page
- [43] Genesis programı kullanma kılavuzu
- [44] Numerical Study of the Optical Properties of the 4GLS VUV-FEL Oscillator, Master Thesis Jaap G. Karssenberg
- [45] B.W.J. McNeil, et. al. "FELO: A One-Dimensional Time-Dependent FEL Oscillator Code" FEL06 Conf. p:59 (2006), <http://www.astec.ac.uk/groups/mag/software/FELO.htm>