

T.C.
NİĞDE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI

THM KIZILÖTESİ SEL YÜKSELTEÇ MODUNUN FİZİBİLİTE ÇALIŞMASI

Ünsöy KOCAÖZ

Şubat 2010

T.C.
NİĞDE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI

THM KIZILÖTESİ SEL YÜKSELTEÇ MODUNUN FİZİBİLİTE ÇALIŞMASI

Ünsoy KOCAÖZ

Yüksek Lisans Tezi

Danışman

Yrd. Doç. Dr. Hüsnü AKSAKAL

Şubat 2010

ÖZET

THM KIZILÖTESİ SEL YÜKSELTEÇ MODUNUN FİZİBİLİTE ÇALIŞMASI

KOCAÖZ, Ünsoy
Niğde Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
FİZİK Anabilim Dalı

Danışman :Yrd. Doç. Dr. Hüsnü AKSAKAL

Şubat 2010, 84 sayfa

Türk Hızlandırıcı Merkezi (THM) Kızılötesi Serbest Elektron Lazeri tesisi (Kö-SEL) Osilatör modda işletilmek üzere tasarlanmıştır. Osilatör Modunda (O modu) işletilen SEL, salındırıcı magnetle optik oyuklarda ışığı doyuma ulaştırana kadar karşılıklı ayna sistemleri arasında salındırılarak elde edilir. Yükselteç modda (Amplifier mod), elektron demetiyle birlikte salındırıcıya eşzamanlı girecek bir tohum lazere (seed lazer) ihtiyaç duyulur. Yükselteç modda Kö-SEL üretimi, salındırıcı içerisinde tohum lazerin elektron demetiyle etkileşerek güçlendirilmesi esasına dayanır. Bu çalışmada SIMPLEX (X-ray FEL Partical Simulator) simülasyon programı kullanılarak THM’de Osilatör modda elde edilmesi planlanan Kö-SEL güç miktarının aynısının veya daha fazlasının, yükselteç modda da elde edilebileceği gösterildi. Ek olarak matemetika paket programı RADIA kullanılarak sırasıyla salındırıcı tasarımı yapıldı ve salındırıcılar içerisinde elektron demetinin ayar kayması araştırıldı.

Anahtar sözcükler: SEL (Serbest Elektron Lazeri), THM Osilatör Kö-SEL, Yükselteç-SEL

SUMMARY

FEASIBILITY STUDY OF FEL AMPLIFIER MODE OF TAC IR FEL

KOCAÖZ, Ünsoy

Nigde University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Physics

Supervisor : Assistant Professor Dr. Hüsnü AKSAKAL

February 2010, 84 pages

Infrared Free Electron Laser facility of the Turkish Accelerator Complex (TAC) (IR-FEL) has been designed to operate at Oscillator Mode. A FEL Operating at the Oscillator Mode is obtained on condition that laser is undulated between two parallel mirrors in optical cavity until it reaches to saturation. At the Amplifier Mode, it is needed a seed laser entering the undulator synchronously with the electron beam. At the Amplifier Mode, production of IR-FEL is based on the amplification of seed laser due to its interaction with the electron beam in the undulator. In this study, it has been shown that the power which is the same or larger than the IR-FEL power planned to be obtained from TAC at the Oscillator Mode can be obtained at the Amplifier Mode using SIMPLEX (X-ray FEL Partical Simulator) simulation programme. In addition the designed of the undulators and electron beam tune shift in the undulators, have been performed and searched, using Mathematica package program RADIA, respectively.

Keywords: FEL (Free Electron Laser), TAC Oscillator-FEL, Amplifier-FEL

TEŞEKKÜR

Bana alıŐma olanağı sağlayan ve alıŐmanın her safhasında yakın ilgi ve önerileri ile beni yönlendiren danışman hocam, Sayın Yrd.Do. Dr. Hüsnu AKSAKAL (Niğe Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi)'a, desteklerinden dolayı ailem ve arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	iii
SUMMARY.....	iv
ÖNSÖZ.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xi
KISALTMA VE SİMGELER.....	xii
BÖLÜM I. GİRİŞ.....	1
BÖLÜM II. SERBEST ELEKTRON LAZERİ OLUŞUM AŞAMALARI.....	3
2.1 Elektron Kaynakları ve Tabanaları.....	3
2.2 Paketleyici.....	4
2.3 Hızlandırıcı.....	5
2.4 Salındırıcı.....	8
2.5 Zigzaglayıcı veya Salındırıcı Mıknatıs Fiziği.....	10
2.5.1 Salındırıcı mıknatıs alanı.....	11
2.6.2 Salındırıcı mıknatıs içinde hareket denklemi.....	12
2.6 Optik Kavite.....	15
2.7 Serbest Elektron Lazerinin Yardımcı Parçaları.....	16
2.7.1 Vakum sistemi.....	16
2.7.2 Güç sistemleri.....	17
2.7.3 Soğutma sistemleri.....	18
2.7.4 Diagonastik.....	19
2.7.5 Kontrol sistemi.....	20
BÖLÜM III. SERBEST ELEKTRON LAZERİ (SEL).....	21
3.1 Serbest Elektron Lazerinin Avantajları.....	22
3.2 Serbest Elektron Lazeri Elde Etme Yöntemleri.....	24
3.2.1 Osilatör modu (O modu).....	24
3.2.2 SASE modu.....	25
3.2.3 Yükselteç modu (A modu)	26
3.3 Serbest Elektron Lazerinin Temel Parametreleri.....	27

3.3.1 Dalgaboyu ve enerji.....	27
3.3.2. Pik paketçik akımı ve ortalama akım.....	28
3.3.3. Emitans.....	30
3.3.4 Demet ebadı.....	31
3.3.5 Güç.....	32
3.4 SEL’de Enerji Aktarımı ve Gerekli Şartlar.....	33
3.5 SEL’de Elektronların Hareket Denklemi.....	36
3.6 SEL Kazanç Bölgeleri.....	39
3.6.1 SEL düşük kazanç bölgesi.....	39
3.6.2 Mandey teoremi.....	41
3.6.3 Yüksek kazanç bölgesi.....	43
3.7 Serbest Elektron Lazerinin Kullanım Alanları.....	43
3.7.1 SEL’ in endüstriyel alanda uygulamaları.....	45
3.7.2 SEL’ in araştırma alanında uygulamaları.....	46
3.7.2.1 Serbest elektron lazerinin biyoteknolojik uygulamaları.....	47
3.7.2.2 Kanserli dokunun çıkartılması.....	47
3.7.2.3 Sinir zarı tedavisi.....	48
3.7.2.4 Beyin tümörü biyopsisi.....	48
3.7.2.5 Dişçilik.....	49
3.7.2.6 Kolesterol esterlerin seçilerek kaldırılması.....	50
3.7.2.7 Serbest elektron lazerinin fotokimya uygulamaları.....	51
3.7.3 SEL’ in malzeme ve nanoteknoloji uygulamaları.....	52
BÖLÜM IV BULGULAR ve TARTIŞMA.....	53
4.1 SIMPLEX Bulguları.....	54
4.1.1 Yükselteç modundaki Kö-SEL güç bulguları.....	54
4.1.2 Enerji yayını bulguları.....	58
4.1.3 SEL’in zaman yapısı bulguları.....	60
4.1.4 Salındırıcı içersindeki elektron demetinin bulgular.....	62
4.2 RADIA Bulguları.....	64
4.2.1 Salındırıcı tasarımı.....	64
4.2.2 Ayar kayması bulguları.....	65
BÖLÜM V. SONUÇ.....	68
KAYNAKLAR	70

EKLER.....	73
EK-1 SIMPLEX Girdi Dosyaları.....	73
a) Birinci salındırıcı girdi parametreleri.....	75
b) İkinci salındırıcı girdi parametreleri.....	70
EK-2 Radia Girdi Dosyaları.....	78
a) Radia birinci salındırıcı girdi parametreleri.....	78
b) Radia ikinci salındırıcı girdi parametreleri.....	81

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1	THM SEL düzeneği.....	3
Şekil 2.2	Mikrodalga içinde hareket eden elektronlar.....	4
Şekil 2.3	Linak içindeki sürüklenme tüpü.....	5
Şekil 2.4	Elektronlar ve hareket ettirici dalga arasındaki etkileşim.....	9
Şekil 2.5	Eğici mıknatıslardan oluşan salındırıcı	14
Şekil 2.6	Yörünge üzerindeki parçacık hızının izdüşümü.....	15
Şekil 3.1	Klasik lazer ile SEL'in karşılaştırılması.....	21
Şekil 3.2	Osilatör SEL düzeneği.....	25
Şekil 3.3	SASE SEL düzeneği.....	25
Şekil 3.4	Yükselteç (Amplifier) SEL düzeneği.....	26
Şekil 3.5	Elektron demet zaman yapısı ve atma akımları.....	29
Şekil 3.6	Faz uzay elipsi	31
Şekil 3.7	Salındırıcı lazer alanı ve elektron demeti arasındaki faz şartı.....	34
Şekil 3.8	SEL alanındaki elektron hareketi.....	39
Şekil 3.9	SEL kazanç eğrisi.....	41
Şekil 3.10	Yüzeyi SEL ile pürüzlendirilmiş polyester kumaş.....	46
Şekil 3.11	Kanserli dokunun kesilip çıkarılması.....	47
Şekil 3.12	SEL ışınımına maruz kalan beyin tümörünün MR ile görüntüsü.....	49
Şekil 3.13	5.75 µm SEL ile ışınlanmış kolesterol ve albümin.....	50
Şekil 3.14	İnsan atardamarının soğurma spektrumu.....	51
Şekil 4.1	K[0.3-0.7], S1 Ortalama güç salındırıcı uzunluğu değişimi.....	56
Şekil 4.2	K[0.7-2.5], S2 Ortalama güç salındırıcı uzunluğu değişimi.....	57
Şekil 4.3	S1, E[15-40 MeV] Ortalama güç salındırıcı uzunluğu değişimi.....	57
Şekil 4.4	E[15-40 MeV] Ortalama güç salındırıcı uzunluğu değişimi.....	58
Şekil 4.5	S1, E[15, 40 MeV] enerji yayılımının salındırıcı boyunca değişimi...	59
Şekil 4.6	S2, E[15, 40 MeV] enerji yayılımının salındırıcı boyunca değişimi..	59
Şekil 4.7	Birinci salındırıcı toplam güç zaman yapısı (I=120 pC).....	60
Şekil 4.8	İkinci salındırıcı toplam güç zaman yapısı (I=120 pC).....	61
Şekil 4.9	Birinci salındırıcı toplam güç zaman yapısı (I=80 pC).....	61
Şekil 4.10	İkinci salındırıcı toplam güç zaman yapısı (I=80 pC).....	62

Şekil 4.11	S1, Enine demet abatlari (σ_x, σ_y)'nin salındırıcı uzunluğuna göre değişimi.....	63
Şekil 4.12	S2, Enine demet abatlari (σ_x, σ_y)'nin salındırıcı uzunluğuna göre değişimi.....	63
Şekil 4.13	Salındırıcı kesiti.....	64
Şekil 4.14	S1, Manyetik alan (B_y) salındırıcı uzunluğuna göre değişimi.....	65
Şekil 4.15	S2, Manyetik alan (B_y) salındırıcı uzunluğuna göre değişimi.....	65
Şekil 4.16	S1, Yatay ayar kayması.....	64
Şekil 4.17	S1, Dikey ayar kayması.....	66
Şekil.4.18	S2, Yatay ayar kayması.....	66
Şekil 4.19	S2, Dikey ayar kayması.....	67

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.2	Geleneksel lazerler ile SEL' in karşılaştırılması.....	23
Çizelge 4.1	TAC Kö-SEL Elektron demeti parametreleri.....	55
Çizelge 4.2	TAC Kö-SEL salındırıcı parametreleri.....	55
Çizelge 4.3	S1, S2 için K ve E değerlerine göre çıkış gücü değerleri.....	58

SİMGELER DİZİNİ

\vec{B}_u	Salırdırıcı içindeki manyetik alan
β	Elektronun hız faktörü
c	Işık hızı
E	Elektron demeti enerjisi
e	Parçacık yükü
ε	Emitans
γ	Elektronun rölativistik faktörü (Lorentz faktörü)
K	Salırdırıcı kuvvet parametresi
k_L	Dalga sayısı
m	Elektronun kütlesi
μ_0	Boş uzayın magnetik geçirgenlik katsayısı
N_u	Salırdırıcı peryodu
g	Salırdırıcı açıklığı
G_L	SEL kazancı
λ_u	Salırdırıcı dalgaboyu
λ	Lazer fotonunun dalgaboyu
I_{pik}	Elektron demetinin pik akımı
R_s	Kavite yüzey direnci
S1	Birinci salırdırıcı
S2	İkinci salırdırıcı
Z_R	Rayleigh uzunluğu
ω_L	Lazer frekansı
W_L	Lazer alanında depolanan enerji
φ_0	Başlangıç fazı
θ_u	Sapma açısı
ψ_{\pm}	Faz farkı

KISALTMALAR

CERN	Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi
CW	Sürekli dalga
DPT	Devlet Planlama Teşkilatı
FEL	Free Electron Laser
Kö-SEL	Kızılötesi Serbest Elektron Lazeri
Nİ	Normal iletken
NCW	Non Conductivity Water
IR	Kızılötesi Radyasyon
RF	Radyo Frekans
SASE	Kendiliğinden Genlik Artımlı Yayınım
SEL	Serbest Elektron Lazeri
Sİ	Süper iletken
THM	Türk Hızlandırıcı Merkezi
TAC	Turkish Accelerator Center
UHF	Ultra Yüksek Frekans
UV	Ultra Viyole
VUV	Vakum Ultra Viyole
YUUP	Yaygınlaştırılmış Ulusal ve Uluslararası Proje
YAG	Yttrium Aluminium Garnet

BÖLÜM I

GİRİŞ

Parçacık hızlandırıcılarında hızlandırma işlemi, doğrusal ya da dairesel bir yörünge üzerinde yapılabilir. Doğrusal hızlandırıcılara kısaca ‘linac (linear accelerator)’ denir. Dairesel hızlandırıcıların ise birkaç çeşidi vardır: Kullandığı manyetik ve elektrik alanlar sabit olanlara ‘siklotron’, değişken olanlara ‘sinkrotron’, biri sabit diğeri değişken olanlara ise ‘siklosinkrotron’ denir [1]. Doğrusal hızlandırıcılarda, parçacıkları yüksek enerjilere çıkarmak, hızlandırıcının boyunu uzatmakla mümkündür. Bu, inşaat maliyetlerini artıran bir unsurdur. Buna karşılık, dairesel hızlandırıcılarda, ayrıca bir merkezkaç kuvveti altında ivmelenen parçacıkların yaptığı ‘sinkrotron ışıması’ büyük enerji kayıplarına yol açar.

Hızlandırıcılar çeşitli amaçlar için çeşitli şekillerde kurulurlar. Örneğin SEL (Serbest Elektron Lazeri) elde etmek için: Doğrusal bir hızlandırıcıda, hızlandırılan elektron demeti, salındırıcı olarak adlandırılan sinüsel bir manyetik alan içeren mıknatıs sistemi içinden geçerken enerjisinin bir kısmını elektromanyetik ışınım olarak kaybeder. Oluşan bu ışınım “Serbest Elektron Lazeri (SEL)” olarak adlandırılır; Japonya IFEL ve Almanya ELBE bu merkezlerden bazılarıdır. Sinkrotron ışınımı elde etmek için: Sinkrotronlar parçacık demetlerinin belirli bir hızlandırma düzeneğinden defalarca geçecek şekilde tasarlanırlar [2]. Bu güne kadar inşa edilmiş en büyük sinkrotron Avrupa ülkelerinin ortak araştırma merkezi olan CERN’deki elektron-pozitron çarpıştırıcısı LEP (Large Electron Positron) idi. PETRA Almanya, ESRF Fransa bu merkezlere örnek olarak sayılabilir. Günümüzde TeV enerjili sinkrotronlar mevcuttur (TEVATRON, HERA, LHC,...). LEP yerine daha yüksek kütle merkezi enerjili, ‘Büyük Hadron Çarpıştırıcısı’ (LHC, ‘Large Hadron Collider’) yapıldı. 2009 yılında çalışır hale gelen LHC işletmeye alındığında, dünyanın en büyük ve en yüksek enerjili hızlandırıcısı olacaktır. LHC’de protonların, kuarklar ve gluonlardan oluşan bileşenleri arasındaki çarpışmaların enerjisi 7 TeV olacaktır. Daha önceki 180 GeV LEP ya da Fermilab TEVATRON ise 2 TeV kütle merkezi enerjisine ulaşmıştı [1]. Teknik ve teknolojik açıdan gerçekleştirilmesi ilk defa mümkün olabilecek bir deney olan LHC ile kurşun atomu çekirdekleri çarpıştığında oluşan sıcaklık ve basınç güneşin merkezinden 100 bin kat daha fazla bir seviyeye çıkacaktır. Deneyin hedefi bu

kadar yüksek ısı ve basınçta oluşan şartlarda maddeye ait özellikleri araştırmak. Bunu yaparken de evrenin ilk oluşum sürecinde bir kereye mahsus gerçekleşmiş olan, enerjinin maddeye dönüşüm aşamalarını, çok yüksek hızlarda kurşun parçacıklarının arpıştırılmasıyla mikro boyutlarda gerçekleştirmeyi amaçlamaktadır [3].

Türk Hızlandırıcı Merkezi (THM) Ankara niversitesi koordinatörlüğünde toplam 10 niversiteden (Ankara, Gazi, İstanbul, Boğaziçi, Doğş, Uludağ, Dmlpınar, Erciyes, S. Demirel ve Niğde niversiteleri) yaklaşık 70 araştırmacının katılımı ile Devlet Planlama Teşkilatı (DPT) Yaygınlaştırılmış Ulusal ve Uluslararası Proje (YUUP) formatında yürütülmektedir. Bu projeyle Türk Hızlandırıcı Merkezi'nin teknik tasarım raporunun yazılması ve lkemizin Ar-Ge amaçlı ilk parçacık hızlandırıcı tesisinin kurulması 2013 yılında da tamamlanması hedeflenmektedir. Elektron ve pozitron demetlerinin çarpıştırılması ile parçacık fabrikasında (phi fabrikası) parçacık fiziğ araştırmaları yapmak, pozitron sinkrotronuna dayalı sinkrotron ışınımı üretmek ve kullanmak, elektron lineer hızlandırıcılarına dayalı serbest elektron lazeri üretmek ve kullanmak, proton hızlandırıcısına dayalı araştırmalar yapmak planlanmaktadır. Türk Hızlandırıcı Merkezinin kurulumunun 2013-2020 yılları arasında tamamlanması öngörülmektedir. Bu proje kapsamında merkezin ilk aşamasını oluşturacak olan Kızılötesi Serbest Elektron Lazeri (osilatör K-SEL) laboratuvarı kurulması ülkemizde hızlandırıcı teknolojilerinin Ar-Ge amacıyla kullanılmasının ilk adımını oluşturacaktır. Kurulacak SEL laboratuvarında 15-40 MeV enerji aralığındaki bir lineer elektron hızlandırıcısı (linak) ile 2-200 μm dalgaboyu aralığında kızılötesi serbest elektron lazeri (K-SEL) elde edilmesi planlanmaktadır [4]. Bu amaçla, son bir yılda yoğnlaşan çabalar sonucu elde edilecek K-SEL için kullanılacak optik oyukların yapısı ile kızılötesi SEL'in ana parametreleri belirlenmeye çalışılmıştır.

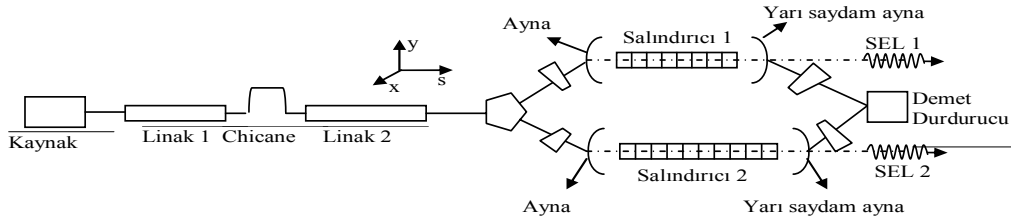
Bu tez çalışmasında yükselteç modda Serbest Elektron Lazeri (SEL) retilmesini ve Türk Hızlandırıcı Merkezi (THM) kızılötesi SEL'in yükselteç modda elde edilmesi nerisi ele alınmıştır. Elde edilen ışınım eş-fazlı, tek renkli ve dalgaboyu ayarlanabilir yapıdadır. SIMPLEX (X-ray FEL Practical Simulator) simülasyon programı yardımı ile 15-40 MeV enerji aralığında elektron demetleri kullanılarak SEL elde edilmiştir. Elde edilen kızılötesi SEL'in osilatör modda elde edilmesi planlanan THM kızılötesi SEL'inden daha yüksek güç değrlerine ulaşıldığı gözlemlenmiştir. Aynı zamanda düşük kazanç ve yüksek kazanç modları incelenmiştir.

BÖLÜM II

SERBEST ELEKTRON LAZERİ OLUŞUM AŞAMALARI

SEL elde edebilmek için bir elektron kaynağı (elektron tabancası), bu elektron kaynağından çıkan elektronları sıkıştırmak için paketleyici, paketlenmiş elektronları rölativistik hızlara çıkarabilecek bir hızlandırıcı, hızlandırılan bu elektronların salınım yapmasını sağlamak için bir salındırıcı ve salındırıcıda oluşacak ışınımı doyuma ulaştırmak için optik oyuğa ihtiyaç vardır.

Elektron demeti $z(s)$ doğrultusunda hareket etmektedir. Salındırıcı içindeki manyetik alan y doğrultusunda ve salınım düzlemi x dir. THM SEL düzeneğinin şematik görünüşü Şekil 2.1’de görülmektedir. Bu bölüm içerisinde hızlandırıcı düzeneğindeki elamanlar sırası ile ilerleyen alt bölümlerde anlatılmaktadır.



Şekil 2.1 THM SEL düzeneği

2.1 Elektron Kaynakları ve Tabancaları

Bir hızlandırıcıyı temel olarak iki kısımda inceleyebiliriz. Enjektör ve ana hızlandırıcı, enjektör kısmında istenilen özellikteki parçacıkları üreten kaynak yer alır. Elektronlar, elektron tabancası adı verilen bir yapıdan elde edilirler. Elektron demeti üretmenin iki temel yolu vardır.

- Termoiyonik yayılım: Isıtılan katot yüzeyden belirli sıcaklıklarda elektron yayınlanır.

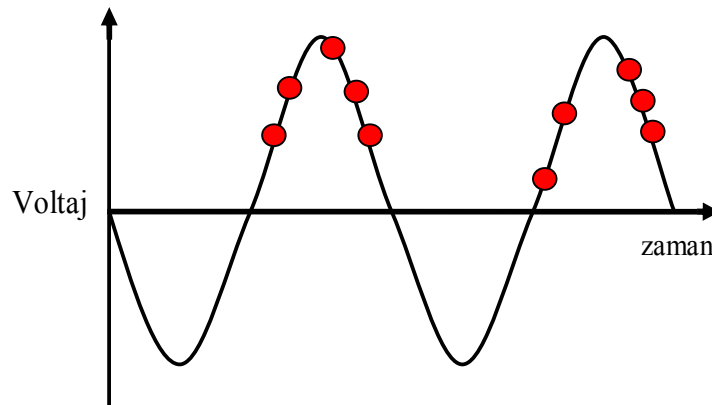
- Foto yayını: Işığa duyarlı katot malzeme üzerine yönlendirilmiş bir lazer atması gönderilerek elektron yayını sağlanır.

Elektron tabancası elektron demetlerini üreten, odaklayan, kontrol eden ve saptıran elektrot yapılarıdır. Bir elektron tabancası, elektronların üretildiği katod ve odaklandığı elektrodlardan oluşur. Elektron tabancaları, elektronları yayma şekillerine göre termiyonik ve fotokatot tabanca olarak iki şekilde incelenebilir [5].

2.2 Paketleyici

Elektron tabancasından çıkan elektron demeti, sıkıştırılarak etkin bir şekilde hızlandırılmak için alt harmonik paketleyici (SHB) adı verilen Radyo Frekans (Radio Frequency-RF) RF oyuklara aktarılır. Paketleyicinin amacı, elektron tabancasından çıkan elektron demetini paketlemek, frekans değerini artırarak dalgaboyunu küçültmek ve demeti hızlandırmaktır.

Şekil 2.2'de gösterildiği gibi elektronlar, RF içinde mikrodalganın tepesinde iken dalgadan daha fazla enerji alırlar ve daha fazla hızlanırlar. Öyle ki, dalga üzerinde yüksek seviyelerde bulunan elektronlar, daha alçakta yavaş ilerleyen elektronlara yetişirler. Dalganın alçak seviyelerinde bulunan elektronlar ise, hızlarını yavaşlatırlar ve elektron paketçisine geri çekilirler. Böylece RF içindeki mikrodalganın etkisiyle paketçikler biçimlenmeye başlarlar [6].



Şekil 2.2 Mikrodalga içinde hareket eden elektronlar

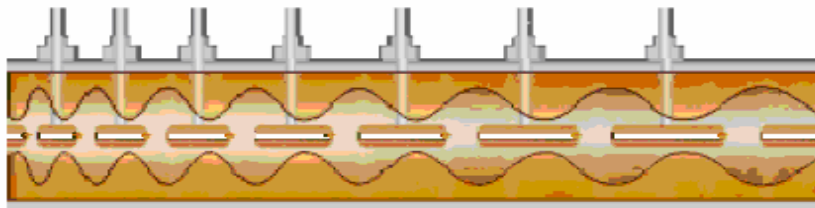
Alt harmonik paketleyicide biçimlenen elektron paketçiklerinin frekans değerleri lineer hızlandırıcıya girmek için yeterli değildir. Alt harmonik paketleyiciden çıkan paketçikler daha yüksek frekans değerlerine çıkmak için ana paketleyiciye girerler. Ana paketleyici ile alt harmonik paketleyicinin çalışma sistemi benzerdir. Fakat ana paketleyiciler, daha yüksek RF frekansına sahiptir ve elektron demetlerinin emitansını daha da küçülterek paketçiği sıkıştırmaya yararlar. Dolayısıyla sıkışan paketçiklerin hızları bir miktar daha artar. Daha sonra elektronlar artan hızları ile lineer hızlandırıcıya sokulurlar [6].

2.3 Hızlandırıcı

Ana paketleyiciden çıkan elektron paketçikleri rölativistik hızlara çıkmak için dairesel veya lineer hızlandırıcılarda hızlandırılırlar. Dairesel hızlandırıcılarda, elektron demetleri daire içinde defalarca tur atarak rölativistik hızlara ulaşırlar. Ancak burada elektron demetleri sinkrotron ışınımı sebebi ile enerjilerini kaybederler. Elektron demetlerinin istenilen hızlara ulaşabilmeleri için daireyi yüksek sayıda turlamaları gerekir.

Lineer hızlandırıcılarda ise elektron demetleri hızlandırıcıyı bir kez geçerek rölativistik hızlara ulaşırlar. Linak, demetin hareket doğrultusu boyunca sıralanmış bir dizi sürüklenme (drift) tüplerinden meydana gelir. Bu tüpler, yüksek frekanslarda alternatif voltaj sağlayan bir RF kaynağına bağlıdır.

Linak, elektronların hızını arttırmaya devam etmek için ilave RF gücü alır ve onları ana paketleyiciye göre daha dar paketçiklere sıkıştırır (Şekil 2.3). Buna göre, paketleyicinin RF frekansı, hızlandırıcı oyuklarının çalışma frekansı ile uyum içerisinde olmalıdır [6].



Şekil 2.3 Linak içindeki sürüklenme tüpü

Hızlandırıcıya giren elektronlar, elektriksel alan ile birinci drift tûpüne doğru hızlandırılırlar. Sürekli demet, birinci drift tûpünden geçerken, hızlandırma alanının fazına bağlı olarak parçacıkların bir kısmı hızlanırken bir kısmı yavaşlar. Bir sonraki aralığa vardıklarında, diğer drift tûpü uzadıkça RF mertebesindeki elektromanyetik alan elektronları hızlandırır. Elektron demeti, drift tûpleri ile yüksek hızlara (ışık hızına yakın rölativistik hızlara) ulaştıktan sonra hızlandırıcıdan çıkar [6].

Lineer hızlandırıcılarının süper iletken (Sİ) ve normal iletken (Nİ) olmak üzere çeşitleri vardır. Sİ oyuk teknolojisinin kullanımı, hızlandırıcılarda ihtiyaç duyulan gücü azaltmak için kullanılır. Sİ hızlandırıcılar çok düşük öz dirence sahip olduğundan RF güç kayıpları çok düşüktür ve elektron demetlerini sürekli mikro paketçikli yapıda oluşturabilirler [13].

RF alanı kullanan Sİ hızlandırıcılarda, atmalar mikro paket yapısında olduğundan düşük pik akımı oluşur. Hızlandırılmış paketçik yükü de düşük değere sahiptir. Paketler arası mesafe sürekli ayarlanabilir olduğundan birçok paketçik hızlandırılabilir ve ortalama akım yüksek olmaktadır.

Hızlandırıcılarda, oyuk direncinden dolayı oluşacak RF güç kayıpları $P_{dış}$ aşağıdaki eşitlikte verildiği gibidir [13].

$$P_{dış} = \int_{kavite_du\ var} R_s |H(r, \theta, z)|^2 dz \quad (2.1)$$

Burada $H(r, \theta, z)$ oyuk içinde salınan RF alanının manyetik alan bileşeni, R_s oyuk yüzey direncidir. R_s , Sİ ve Nİ hızlandırıcıları için farklı şekillerde hesaplanır.

Sİ hızlandırıcıları için yüzey direnci

$$R_s(\Omega) = 9.10^{-9} \frac{f_{RF}^2 (GHz)}{T(K)} \exp\left(-\alpha \frac{T_c}{T}\right) + R_{res} \quad (2.2)$$

ile ifade edilir. Burada, $\alpha = 1,92$, $T_c = 9,2K$ kritik sıcaklık ve $R_{res} \sim 10^{-9} \Omega$ değerindedir. Sİ hızlandırıcılarda yüzey direnci çok küçük olduğundan, RF güç kayıpları nerede ise sıfırdır ve hızlandırma gradyeni 10 MV/m ile 20 MV/m mertebesindedir.

Nİ hızlandırıcılardaki oyuk yüzey direnci ise,

$$R_s = \sqrt{\mu_0 \pi f_{RF} / \sigma} \quad (2.3)$$

olarak ifade edilir. Burada, σ iletkenlik katsayısı ve μ_0 boş uzayın magnetik geçirgenlik katsayısıdır. Normal iletken hızlandırıcılarda yüzey direnci yüksek değerlerde olduğundan oyuk içerisinde yüksek RF güç kaybından dolayı, oyuk içerisine belirli aralıklar ile RF alanı pompalanır ve atmalı paketçik yapıda elektron demeti hızlandırılır. Bundan dolayı, hızlandırıcı gradyenti 50 MV/m mertebesine kadar çıkabilir [14].

Nİ hızlandırıcılarda RF oyuğu içerisinde RF varlığı 10 μs ile sınırlı olduğundan sadece bu süre içerisinde makro paketçikler hızlandırılabilir. Daha sonraki 0,1 s boyunca tekrar RF dolması beklenir ve bu 0.1 s boyunca hızlandırma yapılamaz. Nİ hızlandırıcılar, atmalı paketçik yapısında çalıştığından yüksek değerlerde pik akımı oluştururlar. Ancak az sayıda paketçik hızlandığından dolayı, ortalama akım düşüktür. Hızlandırılmış paketçik yükü ise, yüksek değere sahiptir. Nİ hızlandırıcılarda atma içerisinde paketçikler 3 GHz oranına kadar sıkıştırılabilir.

Sİ hızlandırıcılarında, atmanın tekrarlama frekansı 13 MHz civarında iken, Nİ hızlandırıcılarında ise 1 GHz civarındadır. Tekrarlama frekansı arttıkça elde edilen lazerin ortalama gücü azalır. Bu yüzden Sİ hızlandırıcılarında elde edilen lazerin ortalama gücü Nİ hızlandırıcılarından elde edilen lazerden yaklaşık 100 kat daha fazladır. RF'de çalışan hızlandırıcılardan elde edilen lazerin bütün dinamiği elektromanyetik atma yapısına bağlıdır. Lineer hızlandırıcı içerisinde, elektron atması ışık hızından daha yavaş hareket ettiği için elektron paketçigi ile elektromanyetik dalga arasındaki faz farkı kayma mekanizmasının bir etkisidir [11].

2.4 Salındırıcı

Salındırıcılar elektron demetinin sinüsel hareket yapmasını sağlamak için zıt kutuplu mıknatıslardan oluşur. Salındırıcı içerisindeki mıknatısların özelliği, ana eksen boyunca eşli mıknatıslar dizisi olmasıdır. Her biri zıt kutuplu olarak karşılıklı dizilir ve g aralığı ile birbirlerinden ayrılırlar. Salındırıcının en önemli faktörü manyetik alandır. Manyetik alan, salındırıcı boyunca titreşim yapan sinüsoidal dalga halindedir. Dolayısıyla bu manyetik alan, salındırıcı içerisinden geçen elektronun hareketini de titreşimli şekilde getirir. Salındırıcının şiddeti elde edilecek lazerin dalgaboyunu doğrudan etkiler. Bir salındırıcı için şiddet çarpanı,

$$K = \frac{eB_u \lambda_u}{2\pi mc} = 0.934 B_u [T] \lambda_u [cm] \quad (2.4)$$

olarak ifade edilir. Burada e elektron yükü [0.299792 GeV/mT], B_u salındırıcının kutupları arasındaki manyetik alan, m elektronun kütlesi, c ışık hızı, λ_u salındırıcı dalgaboyudur. $K \ll 1$ için, elektronun titreşim hareketinin genliği küçüktür ve radyasyon dar enerji bantları boyunca girişim desenleri sergiler. Eğer $K \gg 1$ ise elektronun titreşim genliği büyüktür ve elektronlar kararlı bir yörünge izleyemezler.

Türk Hızlandırıcı Merkezi'nde kullanılması düşünülen somaryum kobalttan ($\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$) yapılmış salındırıcının manyetik alanı, aşağıdaki gibi verilir.

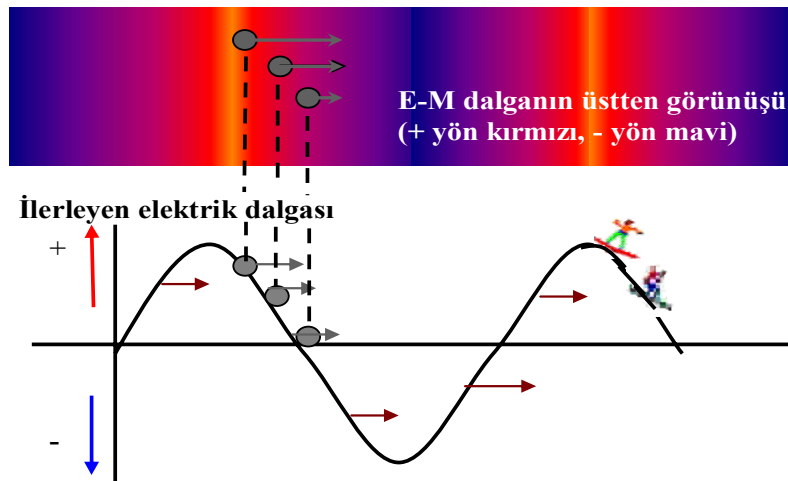
$$B_u [T] = 3.381 \exp \left(-4.73 \left(\frac{g}{\lambda_u} \right)^2 \right) \quad (2.5)$$

Salındırıcılar, manyetik alanın sapma gücünde farklılık gösterirler. Eğer maksimum sapma açısı, kendiliğinden radyasyon yayınının yaptığı açıdan daha büyükse, ileriye doğru sürekli yayınım olmaz ve salındırıcı içerisinde yayınım son bulur [12].

Salındırıcı alanından geçen elektron demetleri, salındırıcıdaki alandan etkilenecek elektromanyetik dalgalar yayınlırlar. Salındırıcı alanı ve elektromanyetik dalganın uzaysal varyasyonları birleşerek hareket ettirici dalga olarak adlandırılan atmaları

oluştururlar. Elektronlar ile bu atmalar arasındaki etkileşim, SEL'deki uyarılmış ışımaya sebep olur. Atmalar, ivmeli elektronların yayınladığı elektromanyetik dalgalar ile aynı frekansa sahiptir, ancak atmaların dalga sayısı elektromanyetik ve salındırıcı alanlardaki dalga sayısının toplamı kadardır. Aynı frekansa ve daha fazla dalga sayısına, dolayısıyla da daha kısa dalgaboyuna sahip olan atmalar, elektromanyetik dalgalardan daha yavaş hareket ederler. Bu sebeple atmalar, hareket ettirici dalga olarak adlandırılır. Buna ek olarak, hareket ettirici dalga ışık hızında hareket eden elektromanyetik dalgadan daha yavaş hareket ettiğinden, hızları ile sınırlandırılan elektronlarla eş zamanlı olabilir. Hareket ettirici dalga ile eş zamanlı hareket eden elektronlar rezonansa kabul edilir. Elektronlar ve hareket ettirici dalga arasındaki etkileşim, kıyıya yaklaşan bir grup sörfçü ile dalgalar arasındaki ilişkiye benzer (Şekil 2.4). Eğer sörfçüler suda durağan olarak kalırsa, dalga ile sörfçülerin hızları arasındaki fark fazla olur. Gelen bir dalga, sörfçüleri yalnızca havaya kaldıracak ve daha sonra eski seviyelerine indirecektir. Sörfçüler ve dalga arasında hacimsel veya ortalama bir yer değişimi olmayacaktır [6].

Eğer sörfçüler dalgayı yakalayabilir ve hızlarını dalganın hızına uydurabilirlerse, dalga ile aynı frekansa sahip olurlar ve dalgadan momentum kazanarak sahile taşınırlar. Bu durum, SEL'deki rezonans etkileşiminin altında yatan fiziksel temeldir, ancak SEL'de elektronlar dalgayı güçlendirirler.



Şekil 2.4 Elektronlar ve hareket ettirici dalga arasındaki etkileşim

Rezonans etkileşimi, ω açısal frekanslı ve k dalga sayılı elektromanyetik dalga ile aynı frekansta dalga üreten k_u dalga sayılı salındırıcı manyetik alanı ile karakterize edilir. Salındırıcı ve elektromanyetik dalgaların dalga sayılarının toplamına eşit $k + k_u$ sayıda

atmalar üretilir. Hareket ettirici dalganın hızı, dalganın açısal frekansının, dalga sayısına oranı ile verilir. Sonuç olarak bu hızı, elektron demetine uygulanır ise SEL' deki rezonans durumu, z yönündeki hızı v_z olan demet için

$$\frac{\omega}{k + k_u} \approx v_z \quad (2.6)$$

şeklinde ifade edilir. Burada, z yönü elektron demetinin akış yönünü ve salındırıcı alanının simetri eksenini belirtir. Hızları rölativistik hızlara yakın olan elektronlar, z eksenini boyunca hareket ederken, z 'ye dik yönlerde dalgalanmaya zorlanırlar [13].

SEL'de elektronlar normal lazer üretiminde olduğu gibi atom içinde bağlı durumda bulunmadığından enerji düzeyleri de sabit değildir. Uyarılmış yayılma özelliği ile çalışan atom ve ya moleküler lazerler, çalışma frekansı düzeyleri arasındaki enerji farkı ile sınırlıdır. Hâlbuki SEL'in frekansı ω_0 , elektron enerjisi E , salındırıcının manyetik alanı \vec{B} , salındırıcının periyodu T değiştirilerek ayarlanabilir. Uygulamada, salındırıcının yapısını değiştirmektense, elektron enerjisini değiştirmek daha kolaydır. Ayarlanabilirlik, SEL'in en önemli özelliğidir. SEL, mm dalgaboyundan UV (Ultraviyole) dalgaboylarına kadar bütün spektrumu kapsayabilir. 100 nm gibi kısa dalgaboylarında aynaların yansıtıcılıklarının azalması nedeni ile (yaklaşık %50) lazer ortamında yüksek kazanç ihtiyaç vardır. Bunun içinde salındırıcıda büyük alan kuvvetine ve küçük periyoda gerek duyulur. Ancak salındırıcılar genelde kalıcı mıknatıslardan oluştuğundan, serbest elektron lazerlerinin ayarlanabilirliği sadece elektronların demet enerjileri ile sağlanır.

2.5 Zigzaglayıcı veya Salındırıcı Mıknatıs Fiziği

Sinkrotron ışınımının yoğun ve olabildiğince koni özelliğinde oluşması için periyodik seriler halinde dizilmiş eğici (bending) mıknatıslardan oluşan özel mıknatıs serileri kullanılır. Bu mıknatıslar zigzaglayıcı (wiggler) ve salındırıcı (undulator) mıknatıslar olarak adlandırılmaktadır. Zigzaglayıcı ve salındırıcı mıknatıslar arasındaki farklılık, eğicilik kuvvetindedir ve uygun K parametresi kullanılarak belirtilmektedir.

$$Mıknatis = \begin{cases} \text{Salındırıcı} \Rightarrow K \leq 1, \theta \leq 1/\gamma \\ \text{Zigzaglayıcı} \Rightarrow K > 1, \theta > 1/\gamma \end{cases} \quad (2.7)$$

Burada K değerine karşılık mıknatısın salındırıcı veya zigzaglayıcı etkisinin fonksiyonel olarak ifadesi verilmektedir.

2.5.1 Salındırıcı mıknatıs alanı

Bir salındırıcı mıknatıs alanı, λ_u period uzunluğunda ve demet eksenini boyunca periyodiktir. Salındırıcı içersindeki manyetik alan;

$$B_y(s, y) = \frac{\partial \varphi}{\partial y} = k_u A \cosh(k_u y) \cos(k_u s) \quad (2.8)$$

şeklinde ifade edilir. A sabitini belirlemek için kutup uçlarının orta noktasındaki B_0 akı yoğunluğunun incelenmesi gerekmektedir. Bu noktanın koordinatları, $(s, y) = (\frac{\lambda_u}{4}, \frac{g}{2})$ dır.

$$A = \frac{B_0}{k_u \cosh(\pi \frac{g}{\lambda_u})} \quad (2.9)$$

$$B_y(s, y) = \frac{B_0}{\cosh(\pi \frac{g}{\lambda_u})} \cosh(k_u \frac{g}{2}) \cos(k_u s) \quad (2.10)$$

B_y , kritik olarak g / λ_u oranına bağlıdır. Bir λ_u periyot uzunluğunda, mıknatıs kutuplarının birbirine olan uzaklığını veren g değeri artıyorsa, bu durumda demete etkiyen alan hızla azalır. Bu sebeple çok kısa periyot uzunlukları için mıknatıs kutupları arasındaki aralık oldukça küçük tutulmalıdır. Minimum salındırıcı açıklığı demetin enine boyutu ile belirlenmelidir. y eksenini boyunca olan manyetik alan $y = 0$ üzerinde çalışılarak yukarıda elde edilen denklemlerden bu alanı denklem (2.11) deki şekilde ifade edilir [7].

$$B_y(s) = \frac{B_0}{\cosh(\pi \frac{g}{\lambda_u})} \cos(k_u s) \quad (2.11)$$

Bu denklem yeniden düzenlenirse kapalı formda aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\tilde{B} = \frac{B_0}{\cosh(\pi \frac{g}{\lambda_u})} \quad (2.12)$$

$$B_y(s) = \tilde{B} \cos(k_u s) \quad (2.13)$$

2.5.2 Salıdırıcı mıknatıs içinde hareket denklemi

Salıdırıcı içerisinde hareket eden elektron, salıdırıcının çeşitine göre (lineer, helisel) manyetik alan bileşenlerinden etkilenecek yatay, dikey ve dairesel hareketler yapabilir. Elektronun hareketlerini gözlemlemek için THM Kö-SEL’de kullanılması düşünülen düzlemsel salıdırıcı ele alınabilir. SEL içerisindeki, λ_u periyot uzunluğuna sahip bir düzlemsel salıdırıcı; 2.11 denkleminde gösterildiği gibi manyetik alan bileşenlerine sahiptir. Burada, Elektron bu manyetik alan bileşenlerine sahip salıdırıcı içerisinde geçerken ilerlemesini sağlayan Lorentz kuvvetinin etkisinde kalır. Lorentz kuvveti altındaki elektronun hareket denklemi,

$$\vec{F} = \dot{\vec{p}} = m\gamma\dot{\vec{v}} = e\vec{v} \times \vec{B} \quad (2.14)$$

Şeklindedir. Burada manyetik alan ve hız bileşenleri

$$\vec{B} = \begin{pmatrix} 0 \\ \vec{B}_y \\ 0 \end{pmatrix} \quad \text{ve} \quad \vec{v} = \begin{pmatrix} \vec{v}_x \\ 0 \\ \vec{v}_s \end{pmatrix} \quad (2.15)$$

denklem 2.14’de yerine yazılırsa elektronun ivmesi,

$$\dot{\vec{v}} = \frac{e}{m\gamma} \begin{pmatrix} -v_x B_y \hat{i} \\ 0 \\ v_s B_y \hat{k} \end{pmatrix} \quad (2.16)$$

şeklinde verilir. Burada \vec{B}_y , denklem 2.13'da verildiği gibidir. Böylece hareket denklemleri

$$\vec{F} = \dot{\vec{p}} = m\gamma(\dot{\vec{v}}_x, 0, \dot{\vec{v}}_s) = e(\vec{v}_x, 0, \vec{v}_s) \times (0, \vec{B}_y, 0) = e\vec{B}(v_x, 0, v_s) \times (0, \cos(k_u s), 0) \quad (2.17)$$

şeklinde ifade edilir. Denklem (2.14)'ün çözümünde, düzlemsel hareket için, elektronun s eksenini boyunca hızı, $v_s = \text{sabit}$, $\dot{s} = v_s = \beta c$ olarak alınır. β , elektronun s eksenindeki hız faktörüdür. elektronun x ve s eksenleri için hareket denklemleri ise;

$$\begin{pmatrix} \ddot{x} \\ 0 \\ \ddot{s} \end{pmatrix} = \frac{e}{m\gamma} \begin{pmatrix} -\dot{s}B_y(s)\hat{i} \\ 0 \\ \dot{x}B_y(s)\hat{k} \end{pmatrix} \quad (2.17)$$

$$\ddot{x} = -\dot{s} \frac{e}{m\gamma} B_y(s)\hat{i} \quad (2.18)$$

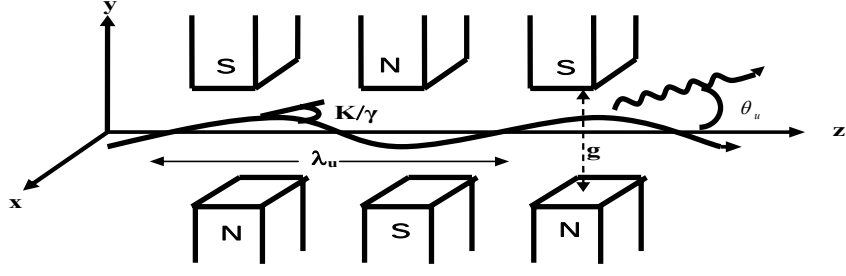
$$\ddot{x} = -\frac{\beta c e \vec{B}}{m\gamma} \cos(k_u s)\hat{i} \quad k_u = 2\pi / \lambda_u \quad (2.19)$$

burada, $\dot{x} = x'\beta c$ ve $\ddot{x} = x''\beta^2 c^2$ dönüşümü yapılırsa hareket denklemleri aşağıdaki forma dönüşür.

$$x'' = -\frac{e\vec{B}}{m\beta c\gamma} \cos(k_u s) = -\frac{e\vec{B}}{m\beta c\gamma} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_u} s\right) \quad (2.20)$$

$$x'(s) = \frac{\lambda_u e\vec{B}}{2\pi m\gamma c} \sin(k_u s) \quad (2.21)$$

Salıdırıcı mıknatıs içerisinde yatayda hareket etmek isteyen elektron, salıdırıcının boyuna manyetik alanı ile karşılaştığında boyuna hız bileşeninde periyodik değişime uğrar. Bu durum eksen boyunca hız bileşeni ile birleştiğinde yatay eksen yönünde eğilmelere neden olur. Parçacığı ideal yörüngesine götüreceği olan maksimum açı θ_u ve salıdırıcı açıklığı g, şekil 2.5'de gösterilmektedir.



Şekil 2.5 Eğici mıknatıslardan oluşan salıncıcı

İdeal yörüngesinde hareket eden elektronun ulaşacağı en büyük sapma açısı θ_u hesaplanırken $s = n\lambda_u$ ve $n = 0,1,2,\dots$ olarak alınır.

$$\theta_u = x'_{\max} = \frac{1}{\gamma} \frac{\lambda_u e B_u}{2\pi m c} \quad (2.22)$$

denklem 2,1'de tanımlanan K yukarıdaki denklemde yerine yazılarak maksimum yörünge açısı

$$\theta_u = x'_{\max} = \frac{K}{\gamma} \quad (2.23)$$

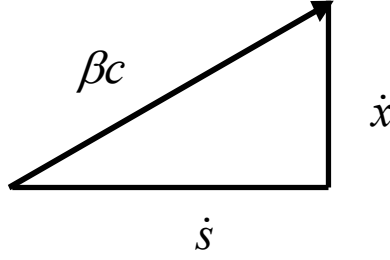
olarak ifade edilir. Salıncıcı içerisinde K parametresinin $K=1$ değeri için $\theta_u = 1/\gamma$ dır. θ_u açısı sinkrotron ışınımının doğal yayılma açısı olarak da tanımlanır. Salıncıcı mıknatıslarda K parametresine bağlı olarak eğicilik çok zayıftır ve dolayısıyla θ_u , çok küçük yayılma açısı gösterir. Zigzaglayıcı mıknatıslarda eğicilik daha kuvvetli olduğundan ışıma daha geniş bir spektrumda oluşur [7].

$$x'(s) = \frac{K}{\gamma} \sin(k_u s) = \theta_u \sin(k_u s) \quad (2.24)$$

burada $\dot{x} = \beta c x'$ ve $s = \beta c t$ dönüşümleri yapılır ve $\omega_u = k_u \beta c$ alınıp denklem yeniden düzenlenirse aşağıdaki forma dönüşür.

$$\dot{x}(t) = \beta c \theta_u \sin(\omega_u t) = \beta c \frac{K}{\gamma} \sin(\omega_u t) \quad (2.25)$$

Herhangi bir yörünge üzerindeki parçacığın hız izdüşümüne bakıldığında yatay hız bileşeni \dot{x} ve boyuna hız bileşeni \dot{s} olmak üzere bunların vektörel toplamı βc sabittir ve Şekil 2.6’da gösterilmiştir [7].



Şekil 2.6 Yörünge üzerindeki parçacık hızının izdüşümü

Parçacık hareketine elektronun durgun çerçevesinden bakıldığında $x' = x$ ve $s' = \gamma(s - \beta ct)$ Lorentz dönüşümleri uygulanarak;

$$x'(t) = -\frac{K}{k_u \gamma} \cos(\omega_u t) \quad (2.26)$$

$$s'(t) = -\frac{K^2}{8k_u \gamma^2} \sin(2\omega_u t) \quad (2.27)$$

eşitlikleri elde edilir. Bu eşitlikler, “8” rakamı şeklinde kapalı bir yörüngeyi göstermektedir. K 'nın çok küçük değerleri için s' eksenine boyunca olan hareket çok küçük olup, yatay eksen yönünde basit salınımlar şeklinde olmaktadır. K değeri arttıkça yatay genlik lineer olarak artarken boyuna hareket değişimi kuadratik (değişimin karesi) olarak artar. Böylece “8” şekli genişler [7].

2.6 Optik Oyuk

Osilatör SEL'in temel bileşenleri iki ayna, elektron demeti ve salındırıcı mıknatıstır. SEL Osilatör içinde ivmelendirilen elektronlar ileri yönde ışığa yapar. Geleneksel lazerler gibi kendiliğinden yayınım olarak adlandırılan bu ışığa, iki ayna arasında depolanır. Bu iki ayna salındırıcının baş ve son tarafında bulunur. Işınım bu aynalar

arasında gidip gelirken sonradan mıknatısa giren elektron paketçikleri ile etkileşime girer. Elektron paketçikleri ile elektromanyetik alan arasındaki etkileşme sonucunda eş evreli ışımaya meydana gelir [15].

2.7 Serbest Elektron Lazerinin Yardımcı Parçaları

Serbest elektron lazeri, bir önceki bölümde açıklanmış olan elektron tabancası, paketleyici, hızlandırıcı, salındırıcı ve optik oyuk ana parçalarının dışında vakum sistemi, güç sistemi, soğutma sistemi, diagnostik ve kontrol sistemi gibi alt parçalara da sahiptir.

2.7.1 Vakum sistemi

Vakum sistemi, elektronları enerji kaybına uğramadan ve paketçik içerisindeki elektronları kaybetmeden rölativistik hızlara çıkarabilmek için gereklidir. Elektron demetinin hareketi boyunca vakumlu bir ortam sağlanmalıdır. Vakum seviyeleri farklılıklar gösterebilir. Vakum elde edebilmek için farklı özelliklere sahip vakum pompaları kullanılabilir. Ön vakum oluşturmak için döner pompalar (10^{-3} mbar seviyelerine kadar), yüksek vakum (10^{-9} mbar) elde edebilmek için ise turbo moleküler pompalar kullanılabilir [16].

Hızlandırıcılarda türlerine bağlı olarak, hızlandırıcı performansını etkileyen birçok demet kayıpları oluşabilmektedir. Demet kayıplarının en önemli nedeni, vakum borularındaki artık gaz ile demetlerin etkileşmesidir. Bu etkileşmeler elektronların ya da artık gaz moleküllerinin çekirdek ile elastik ya da elastik olmayan saçılmasından kaynaklanır. Coulomb saçılması ve Bremsstrahlung saçılması buna örnek olarak verilebilir. Bu etkileşmeler paketçik içindeki elektronların kaybına, demetin ömrünün azalmasına ve yüksek enerjili ikincil parçacıkların (fotonlar, nötronlar) oluşmasına neden olabilir.

Hızlandırıcılardaki vakum sistemi, demet kararlılığı ve demetin ömrünün uzun olmasını amaçlar. Örneğin sinkrotron ışınım kaynakları için 10^{-9} mbar basınç, iyi bir demet ömrüne sahip olmak için tipik bir değerdir. Gerekli vakum değerlerine ulaşmak için, iyi bir vakum sistemi tasarlanmalıdır. Düşük miktarda gaz çıkışı ve düşük vakum elde

etmek için, iyi ve verimli pompalama sistemi, iyi takip sistemi, iyi temizleme ve bu temizliğin korunması gereklidir. Bu şartlar altında, ortamdaki gaz moleküllerinin yoğunluğunun azalması sağlanmış olur.

Vakum sisteminde, kaba pompalar, turbo moleküler pompa ve iyon pompa çeşitleri kullanılmaktadır. Kaba pompalar, sistemdeki basıncı 10^{-6} atm'in altına düşürmek için gereklidir. Kaba pompalama bölgeleri, ön vakum pompası ve turbo moleküler pompadan oluşur. Ön vakum pompası, basıncı atmosfer basıncından 10^{-3} mbar'a düşürmeyi gerçekleştirince turbo moleküler pompa devreye sokulur. Turbo moleküler pompalar, momentum prensibine dayalı olarak çalışırlar. Hava moleküllerini isabet alan ve döndüren vanalar, bu molekülleri aktarırlar ve moleküller rough pompanın himayesinden çıkarlar. Bu durumda sistemdeki gaz basıncı 10^{-6} atmosfer basınç düzeyine iner.

İyon pompaları ve titanyum süblimleşme pompaları ise, yüksek vakum oluşturmada yaygın kullanılan vakum pompalarıdır. İyon pompaları sistemdeki basıncı 10^{-12} atm'e düşürmek için gereklidir. İyon pompası, pompa içindeki gaz moleküllerini iyonlaştırır. Manyetik alan bu molekülleri pompa içinde küçük bir hacim içine hapseder ve iyonlaştırma sürecinde üretilen elektronlarla çarpışma sayısını artırarak pompanın verimi artırılır. Oluşan iyonlar katoda (titanyum) doğru hızlandırılırlar; katoda tutulmaya yetecek bir enerji aktarırlar ve böylece aktif pompalama sağlanmış olur.

2.7.2 Güç sistemleri

Serbest elektron lazeri elde etmek için elektronları hızlandıran hızlandırıcı yapılarda kullanılan güç kaynakları klaystron veya indüklenmiş çıkış boruları (Inductive Output Tubes-IOTs)'dan oluşmaktadır. Süperiletken oyuklar, elektron paketçiklerin hızlanmasını sağlayan elektromanyetik alan ile doldurulur. Elektronlar için enerji, yüksek güç mikrodalga klaystrondan elde edilir. Gerekli olan güç, sistemin doyma noktasına yakın seviyeler için klaystronlardan alınır. Elektron demetinin, sürüklenmeden sonra ilk oyukta düşük RF güç ile hızı ayarlanır. Daha iyi paketlenme için, giriş gücünün değeri, daha yüksek RF gücüne dönüşür ve oyuk içerisine doldurulur. Daha sonra paketleyici, biçimlenmiş elektron demetini alır. RF alan yardımıyla yüksek frekans değerlerinde sıkışan paketçikler, atmalar halinde daha hızlı şekilde yol alır [17].

Sİ hızlandırıcılarda paketçikleri hızlandırmak için düşük kW mertebesinde RF gücüne ihtiyaç duyulurken Nİ hızlandırıcılar için bu MW mertebesindedir. Bir süperiletken RF oyuğunda demete aktarılabilecek maksimum ortalama güç

$$P_{RF} = P_{demet} \quad (2.28)$$

ile sınırlıdır. RF oyuğu içinde güç kaybının olmadığı göz önüne alındığında her bir 9 hücreli oyuktan maksimum 10 kW ortalama gücünde demet elde edilebilir. Sürekli kipte paketçik hızlandırmak için sürekli kipte RF kaynağına ihtiyaç duyulur. Teknolojik olarak sürekli kipteki RF kaynağı 10 kW ya da 16 kW klaystron ile sınırlıdır. Bununla birlikte atmalı yapıda yüksek RF gücü üretebilen klaystronlar mevcuttur ve oyuk içinde yüksek güç kaybından dolayı normal iletken RF oyuklarından kullanılır.

2.7.3 Soğutma sistemleri

Sİ hızlandırıcılarının çalışma sıcaklığı 1,8 ⁰K'dir. Bu oyuklar süper sıvı helyum ile soğutulurlar. Helyum soğutma sisteminde basınç dengelenmesi, helyum soğutma kutusunda bulunan soğutma kompresörleri ile elde edilir. Gaz olarak alınmış helyum, kompresörler yardımıyla 1,3 MPa'lık basınç uygulayarak önce 4 ⁰K'e daha sonra 1,6 kPa'lık basınç uygulanarak 1,8 ⁰K'e düşürülür.

Kriyostat, 1,8 ⁰K sıcaklığının altında çalıştırılabilir olup standart çalışma sıcaklığı 2 ⁰K (31mbar)'dir. Bundan dolayı, helyum kriyostat içine 80 ⁰K termal kalkanın yerleştirilmesi ve hızlandırıcının tüm bileşenlerin süper yalıtımlı olması gerekir. Süperiletken oyukları, işlem şekillerine uygun olarak soğutmak için, 0.1 mbar'lık yüksek sabit basınç gereklidir.

Lineer hızlandırıcı kullanımı için üç arabirimde su soğutmasına ihtiyaç duyulur: Biri, klaystronlar için elektronik odalarda, biri linakta (Nİ hızlandırıcılar), diğeri ise ihtiyaç duyulursa güç kaynağının soğuması için güç kaynağındadır.

Birçok elektriksel ve RF bileşenler (klaystron, mıknatıslar) su ile soğutulur. Önemli olan buradaki bileşenlerde iletken olmayan suyun (Non Conductivity Water, NCW)

kullanılması gerektiğidir. Su soğutma sistemi kurulurken şu noktalar hesaba alınmalıdır: Bütün malzemeler su (NCW) direncine dayanıklı olmalıdır. Tüm borular, kaynak yapıldıktan ve bağladıktan sonra asitle yakılarak temizlenmelidir. Boru boyunca su basıncı, 100 Pa/m'yi geçmemelidir.

2.7.4 Diagnostik

Demet diagnostiğı, demet hattı boyunca demetin özelliklerini izleyen, demetin herhangi bir uygulama alanında kullanılabilmesi için önceden belirlenmiş özelliklerin korumasını sağlayan, donanım ve kontrol sistemlerinin bütünüdür. Bu tür sistemler hızlandırıcı laboratuvarlarının performans ve kararlılığını hızlı ve güvenli bir şekilde kontrol etmektedirler. Böylece deneyiciler ile birlikte, makine operatörlerinin ve teknisyenlerin iş yükü azalmaktadır.

Hızlandırıcı laboratuvarlarında, yapısal olarak farklı iki diagnostik sistem vardır:

- Elektron demet diagnostik sistemi
- Foton demet diagnostik sistemi

Elektron demet diagnostik sistemi hızlandırılan yüklü parçacıkların analizi için, foton demet diagnostik sistemi ise Cerenkov ışınımı, sinkrotron ışınımı, serbest elektron lazeri gibi foton demetlerinin analizi için gereklidir. Elektron demet diagnostiğı, elektron demetine zarar vermeden ölçümlemeyi ve hızlandırıcı için doğru demet ayarlarını yapmayı amaçlar. Bu işlem sırasında elektronları, demet hattı olarak adlandırılan vakumlu borular taşır. Vakum sistemi, demetin en az kayıpla ilerlemesi için demet hattı içerisindeki havayı emer. SEL laboratuvarında demet hattı, kaynaktan başlayıp elektronların durdurulacağı yere kadar gider.

Elektron demet kontrolü, elektron demetinin, elektron tabancasından çıkıp durduruluncaya kadar tüm hat boyunca, elektron pozisyonunun tespiti ve görüntülenmesi, akımın ölçümü, yükün ölçümü, demet uzunluğunun ölçümü, demet kaybı, yönlendirilmesi, odaklanması ve sıkıştırılması işleminin tümünü kapsar.

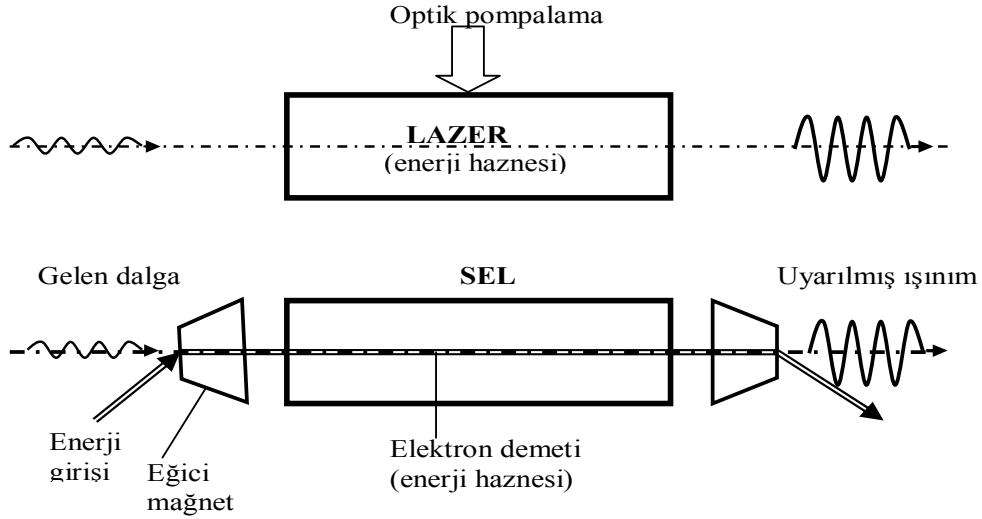
2.7.5 Kontrol sistemi

Kontrol odası, bilgisayarlar, sunucu sistemleri ve optik fiber hattına bağlı aę sistemi gibi donanımlardan oluşur. Demet borusundaki vakum seviyesi, klaystronlardan oyuklara aktarılan RF alan gücü ile fazının kontrolü ve ayarlanması, elektron demetinin ne kadarının hızlandırıcı boyunca iletilebildiği veya kaybedildiği, kuadropol mıknatıs gibi elemanların oluşturduğu akım değerlerinin ve buna bağlı olarak odaklama güçlerinin ayarlanması, lazer teşhis elemanlarından alınan lazer demetinin gücü, kontrol odasından sürekli izlenmesi gereken parametrelerdir. Kontrol sistemleri, işlemler ve incelemeler için kolaylık sağlayıp teknik ve fiziksel hesaplamalar için kullanılabilir.

BÖLÜM III

SERBEST ELEKTRON LAZERİ (SEL)

Şekil 3.1’de görüldüğü gibi klasik bir lazerde, bir hazne içerisinde (katı, sıvı veya gaz olabilir) dalga hareketi vardır ve haznedeki genliği yükseltilmiş ve aynı frekansa sahip uyarılmış ışığa indüklenir. Uyarılmış enerji optik pompalama yoluyla elde edilir. Bir serbest elektron lazerinde enerji alışverişi sınır elektronlarının kuantum geçişleri ile değil, bir manyetik alan içerisinde serbestçe salınan bir elektron demetindeki elektronlar ile ortam arasında gerçekleşen manyetik etkileşimler aracılığıyla olmaktadır. Serbest Elektron Lazeri (SEL) ismi buradan gelmektedir.



Şekil 3.1 Klasik lazer (üstteki resim) ile SEL'in karşılaştırılması. Lazerde enerji haznesi olarak kullanılan ortamın yerini SEL'de serbest elektron demeti almıştır .

Atomik enerji seviyeleri ile herhangi bir bağımlılık olmaması sebebiyle SEL çok geniş bir dalgaboyu aralığını kapsayabilmektedir. İki çeşit SEL bulunmaktadır: Compton ve Raman SEL. Raman SEL’de düşük demet enerjilerinde elektronlar arasındaki etkileşimler baskındır. Rölativistik parçacıklarda bu etkileşim ihmal edilebilir ve bu durumda Compton SEL ile karşılaşılır.

SEL prensibi açıklanırken elektromanyetik alandaki kazancın düşük kazanç mı yoksa yüksek kazanç bölgesinde mi ($G \gg 1$) olduğuna karar vermek önemlidir. İlk durum özellikle lazer alanı sabitken geçerlidir ve bu durum kazanç hesabını basitleştirmektedir [7].

SEL üretmek için MeV ile GeV mertebesine hızlandırılan elektron demeti salındırııcılardan geçerler. Rölativistik elektron demeti, salındırııcudan geçerken bu mıknatısların oluşturduğu sinüsel enine manyetik alana maruz kalırlar. Oluşan bu sinüsel manyetik alanın genliği \vec{B}_u ile ifade edilir ve genelde kG mertebesindedir. Salındırııcının periyodu (N_u) ise tipik olarak birkaç santimetredir. Salındırııcı tarafından elektronun hareket doğrultusuna dik olarak ivmelendirilen elektron demeti salındırııcı manyetik alanına tepki olarak foton salar. Her bir salındırııcı periyodunda salınan fotonlar bir foton bulutu (paketi) olusturur ve elektron demeti salındırııcının sonuna kadar bu foton paketi içerisinde salındırııcı manyetik alanından olayı zig-zag yaparak ilerler. Foton bulutunun ve salındırııcının elektromanyetik alanı elektron paketiğinde mikropaketleme etkisi yapar. Mikro paketlenmiş elektron paketiği eş fazlı foton paketiğinin yoğunluğunu arttırır. Bu şekilde elde edilen ışınım eş fazlı ışınımaya yani lazere dönüştürülür. SEL temel olarak bu prensiple çalışmaktadır [8].

Serbest elektron lazerinin dalgaboyu şekil 2.5'te görüldüğü gibi, salındırııcının ardışık iki aynı kutup arasındaki uzaklık λ_u , denklem 2.4'te tanımlanan salındırııcının kuvvet parametresi K , elektronun geliş doğrultusu ile gözlem doğrultusu arasındaki açı θ_u ve elektron demetinin Lorentz faktörü γ olmak üzere şu şekilde ifade edilir:

$$\lambda_{SEL} = \frac{\lambda_u}{2\gamma_e^2} \left(1 + \frac{K^2}{2} + \gamma_e^2 \theta_u^2 \right) \quad (3.1)$$

Işınım elektron demetinin yapısına bağlı olarak sürekli formda (sürekli dalga) veya ns, ps gibi çok kısa uzunluklu atmalar seklinde elde edilebilir. Günümüzde tipik serbest elektron lazerlerinin gücü 1–100 kW aralığında, enerji aralığı ise 1–1.10⁴ eV'tur [8].

3.1 Serbest Elektron Lazerinin Avantajları

SEL'in diğer klasik lazerlerle ve sinkrotron tabanlı ışınım kaynaklarıyla karşılaştırıldığında birçok önemli avantajı vardır. Geniş bir dalgaboyu aralığında hassas bir şekilde ayarlanabilir olması bu avantajlardan biridir. Denklem 3.1' de verilen rezonans denkleminde görüldüğü gibi, SEL ışınımının dalgaboyu, manyetik alanın (B_u) veya elektron enerjisinin (γ) değiştirilmesi ile ayarlanmaktadır. Dünyada kızılötesi

bölgeden morötesi bölgeye kadar geniş bir aralıkta ayarlanabilir serbest elektron lazeri örnekleri vardır. Tek bir hızlandırıcı ve çoklu salındırıcılar kullanarak ışınım geniş bir alanda ayarlanabilir olmaktadır [8].

Klasik lazerlerde her dalgaboyunda çok kısa atmalar elde etmek mümkün değildir. Aynı şekilde sinkrotron ışınımından da her dalgaboyunda kısa atmalar elde etmek mümkün değilken, SEL' den bu çok kısa atmalar her dalgaboyunda elde edilebilir. Böyle kısa atmalar elde etmek SEL için önemli bir avantajdır. SEL'den ise pikosaniye hatta femtosaniye mertebelerinde atma elde etmek mümkündür. Ayrıca bu lazerlerden diğer klasik lazerlerin ve sinkrotron ışınımının ürettiği pik ya da ortalama parlaklıklarından çok daha yüksek değerlerde parlaklık üretilebilmektedir. Elde edilen bu yüksek parlaklık modern teknolojiye sahip fotokatot tabancaların kullanıldığı lineer hızlandırıcılarda oluşturulmaktadır. Kızılötesi bölgede diğer lazerlere kıyasla 3-4 katı kadar parlaklık elde edilmektedir [18].

Serbest elektron lazerlerinin diğer önemli avantajlarından bir diğeri ise ayarlanabilir kısa dalga boyları ve yüksek güçler de üretebilmeleridir. Bu özelliklerinden dolayı SEL dördüncü nesil ışınım kaynakları olarak adlandırılmaktadır. Bu lazerler ile uzun ve sürekli olarak çalışmalar yapılabilir. Klasik lazerlerin çalıştırılmasında belirli bir güç sınırı bulunmaktadır. Bu sınır aşıldığı zaman lazer bozulmaktadır. Bu lazerlerde ise herhangi bir sınır bulunmamaktadır. Örneğin kimyasal oksijen iyodin (COIL) lazerler yüksek güce yaklaşık 10 dakika boyunca ulaşabilmektedir. Bu süre aşıncı lazer bozulmaktadır. Kızılötesi SEL ise yılda 2000-3000 saat çalışma süresine kadar ulaşmaktadır. Çizelge 3.1' de geleneksel lazerler ile SEL'in karşılaştırılması verilmiştir [19].

Çizelge 3.1 Geleneksel lazerler ile SEL' in karşılaştırılması

	Nd-YAG	CO ₂	Ti-Sapphire	SEL
Dalgaboyu	1.064µm	10.6µm	~ nm	Nm-mm
Atma yapısı	Atmalı	Sürekli	Atmalı	Atmalı
Atma süresi	ms	–	fs	ps-fs
Pik gücü	kW	kW	kW	mW

3.2 Serbest Elektron Lazeri Elde Etme Yöntemleri

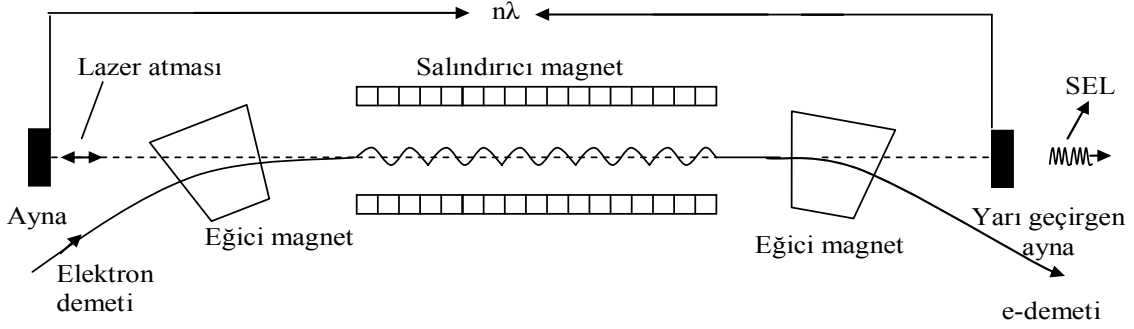
Parçacık hızlandırıcılarından mıknatıslar aracılığı ile elde edilen ışınım kaynakları tarihsel gelişim içinde 4 nesilde toplanabilir. Parazitik modda elde edilen 1. nesil ışınımlardan sonra 1970'lerde devreye giren ve sırasıyla 2. ve 3. nesil olarak geliştirilen ve kullanılan ışınım kaynakları sinkrotron halkasında depolanmış 20-100 nm emitans değerlerine sahip rölativistik elektron demetlerinin eğici (bending), salındırıcı (undulatör) ve zigzaglayıcı (wiggler) mıknatıslardan geçerken ortaya çıkan ışınımlardır. Serbest elektron lazeri ise elektron demetinin (ps, nC) özel geliştirilmiş ve optimize edilmiş salındırıcı mıknatıslardan geçirilmesi yoluyla elde edilen, sinkrotron ışınımına göre çok daha eş evreli ve monokromatik, pik parlaklık ve güç değerleri açısından sinkrotron ışınımına göre en az 10^4 kat daha iyi değerler verebilen 4. nesil ışınımlardır. Serbest elektron lazerleri üç farklı modda üretilebilir:

- Osilatör (Oscillator) modu
- Kendiliğinden genlik artımlı yayılım (SASE) modu.
- Yükselteç (Amplifier) modu

Bunlar elektron demetlerinin salındırıcı içinden geçiş sayısına göre sınıflandırılır [20].

3.2.1 Osilatör modu (O modu)

THM Kö-Sel (Türk Hızlandırıcı Merkezi Kızılötesi Serbest Elektron Lazeri) osilatör modda işletilmek üzere tasarlanmıştır. Şekil 3.2'de Osilatör SEL düzeneği gösterilmiştir. O modu salındırıcı mıknatısla birlikte optik oyuklarda ışığı belirli bir akı değerine ulaştırana kadar karşılıklı ayna sistemleri arasında salındırmak sureti ile elde edilir [21].

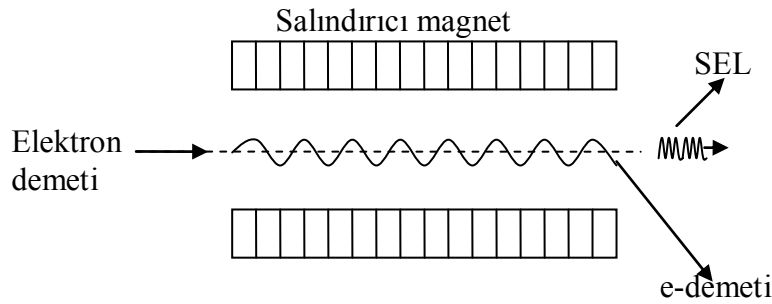


Şekil 3.2 Osilatör SEL düzeneği

Salıncıci boyunca hareket eden elektronlar ışın boyuncası, enerjilerinin bir kısmını lazer alanına aktarırlar. Elektronlar, enerji aktarımına devam etmek için ilave faz hızına ihtiyaç duyarlar. Bu durum ise salıncıci eksenı boyunca Manyetik alan ve salıncıci periyodunun düzgün değışimi ile sağlanabilir.

3.2.2 SASE modu

Kendiliğinden genlik artırımı ani yayılımın kısaltması olan SASE (Self Amplified Spontaneous Emission), rölativistik bir elektron demetinin salıncıci mıknatıstan bir kez geçirilmesi ile elde edilmektedir. Şekil 3.3'de SASE SEL düzeneği görülmektedir. Elektron demeti salıncıci içerisinde bir kez geçirilirken ışınımını genlik olarak optimum doyuma ulaşacak şekilde yapar.

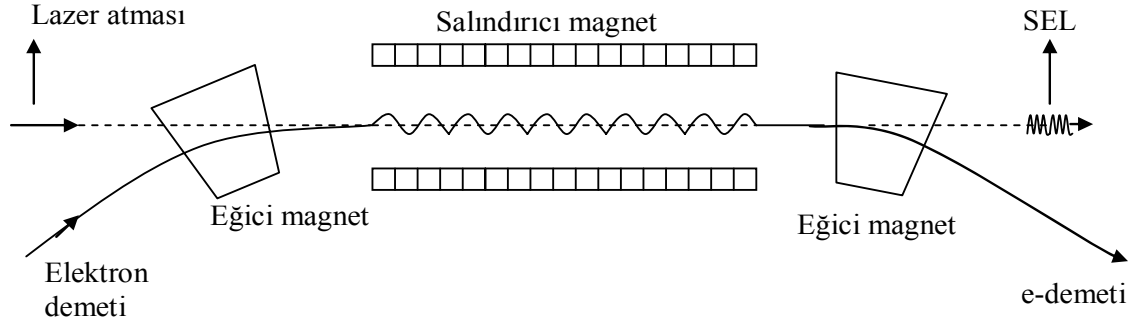


Şekil 3.3 SASE SEL düzeneği

Yükselteç ve Osilatör modda dalgaboyu teknolojik olarak 180 nm'nin altına inilemediği için (Vakum Ultra Violet) VUV ve özellikle X-ışını bölgesinde serbest elektron lazeri üretmek için dalgaboyu aralığı 100 nm olan SASE ilkesi ile çalışan laboratuarlara ihtiyaç duyulmuştur [20].

3.2.3 Yükselteç modu (A modu)

Salındırıcıya gönderilen lazer ışınının salındırıcı ışınımı ile güçlendirilmesiyle elde edilir. Bu şekilde üretilen SEL'ine Yükselteç 'Amplifier' SEL denir. Biz bu çalışmada yükselteç modu üzerinde çalışacağız. Bu mod için elektron demeti ile salındırıcıya girecek bir tohum lazere ihtiyaç vardır. Lazer atmasının enerjisini yükseltmek için, elektron demetinin enerjisi γ , ince ayar yapılarak rezonans enerjisi γ_r 'nin biraz üzerinde bir değere getirilmesi gerekir [7]. Yüksek kazanç bölgesi sadece yükselteç SEL içindir. SEL yükseltecinin SEL osilatöre göre belirgin üstünlüğü vardır. SEL osilatörün verimi $\eta \propto 0.3 N_u$ (N_u salındırıcı periyot sayısı) olup %1 mertebesindedir. Fakat SEL yükseltecinin verimi %10 düzeyindedir [25].



Şekil 3.4 Yükselteç (Amplifier) SEL düzeneği

Elektronlar ve salındırıcıya giren lazerin etkileşimi ve elektron demetinin kinetik enerjisindeki değişimi sonucu SEL gücü üstel olarak büyür.

SEL üretim esnasında olası etkiler şunlardır:

1) *Elektron demeti enerjisi yayılımı*: Elektron demeti enerji yayılımına sahip olduğundan SEL kazancı indirgenir; çünkü tüm elektronlar SEL ile rezonans halinde değildir. Eğer enerji yayılımı SEL parametresi ρ 'dan daha küçük ise etkisi ihmal edilebilir [22].

2) *Emitans etkisi*: Elektronların sonlu emitansa sahip olarak enine hareketi boyuna hızda bir yayınıma sebep olur ve elektron demeti ile üretilen lazer arasındaki bağlaşımı etkiler [22].

3) *Difraksiyon kayıpları*: Elektron demeti emitansını ve salındırıcı içindeki elektron demetinin boyutunu λ_u ve B_u belirler. Salındırıcı tek düzlemde odaklanma sağlar. Elektron demeti salındırıcı boyunca sabit bir yarıçapı vardır. Maksimum kazanç elde etmek için elektron demetinin enine kısmı ve giriş atma radyasyonu kesinlikle örtüşmelidir. Bu örtüşme difraksiyon limitleri içerisinde olmalıdır. Difraksiyon limiti uzunluğu Gaussiyen lazer demetinin Rayleigh uzunluğudur. Rayleigh uzunluğunun salındırıcı uzunluğuna eşit veya büyük olması kazancı korumak için zorunlu değildir. Eğer Rayleigh uzunluğu kazanç uzunluğundan küçükse, elektron demeti tarafından görülen lazer gücü kaybı kazanç mekanizması ile telafi edilir. Ek olarak kazanç uzunluğu Rayleigh uzunluğundan kısa olduğu zaman SEL'deki faz kayması sebebiyle yüksek kazanç mekanizması baskındır ve difraksiyon kayıpları elektron demeti komşuluğunda lazerin hapsedilmesi ile telafi edilir. Difraksiyon kayıpları dolayısı ile kazançtaki kayıpları engellemek için Rayleigh uzunluğu ve kazanç uzunluğu oranı bire çok yakın olmalıdır [22].

4) *Kayma etkisi*: Lazer ile elektron demeti atmalarının boyuna hızları arasındaki fark (kayma-etkisi) SEL'deki lazer atmasının uzaması gibi istenmeyen kararsızlıklara sebep olur. Başka bir deyişle elektron demeti ışımalarının grup hızı ışık hızından küçüktür. Optik bölgede çalışan bir SEL için salındırıcı çıkışında, lazer ve elektron atmalarının yol uzunluğu farkı λN_u ile verilir. Burada N_u salındırıcı periyot sayısıdır [22].

3.3 Serbest Elektron Lazerinin Temel Parametreleri

3.3.1 Dalgaboyu ve enerji

Bir düzlemsel salındırıcı mıknatıstan elde edilen serbest elektron lazeri için, oluşan foton demetinin dalgaboyu denklem 3.1'de tanımladığı gibidir. Lazerin dalgaboyu pratik birimler cinsinden ve $\theta_u = 1 / \gamma$ olduğu durumda aşağıdaki gibi yazılır.

$$\lambda_{SEL}(A^0) = 13.056 \frac{\lambda_u(cm)}{E^2(GeV^2)} \left(1 + \frac{K^2}{2} \right) \quad (3.2)$$

Farklı spektral bölgeler için elde edilen serbest elektron lazeri dalgaboyu aralıkları aşağıda verilmiştir.

- Uzak kızıl ötesi bölge FIR (100 μm -1000 μm),
- Orta kızıl ötesi bölge MIR (10 μm -100 μm)
- Yakın kızıl ötesi bölge NIR (1 μm -10 μm)
- Ultraviyole bölge UV (0.01 μm -10 μm),
- Vakum ultraviyole bölge VUV (0.2 μm -0.1 μm),
- X ışını bölgesi (0.01 μm -0.00001 μm) dir.

Serbest elektron lazerlerinde, salındırıcı içerisinde hareket eden elektronun sahip olduğu enerji

$$E = \gamma m_e c^2 \quad (3.3)$$

eşitliği ile ifade edilebilir. Elektromanyetik spektrumdaki bölgelere göre elektron enerjileri; uzak kızıl ötesi bölgede 5–10 MeV, orta kızıl ötesi bölgede 10–50MeV, UV-VUV bölgede 500–1000 MeV ve X ışınları bölgesi 10–20GeV'dir. Lazer dalgaboyunun ayarlanabilirliği, gerek duyulduğunda elektron enerjisinin değişimi ile yapılabilir. Denklem 3.2'ye göre, SEL'in kısa dalga boyları için elektron demetinin yüksek enerjilerine ihtiyaç duyulur [23].

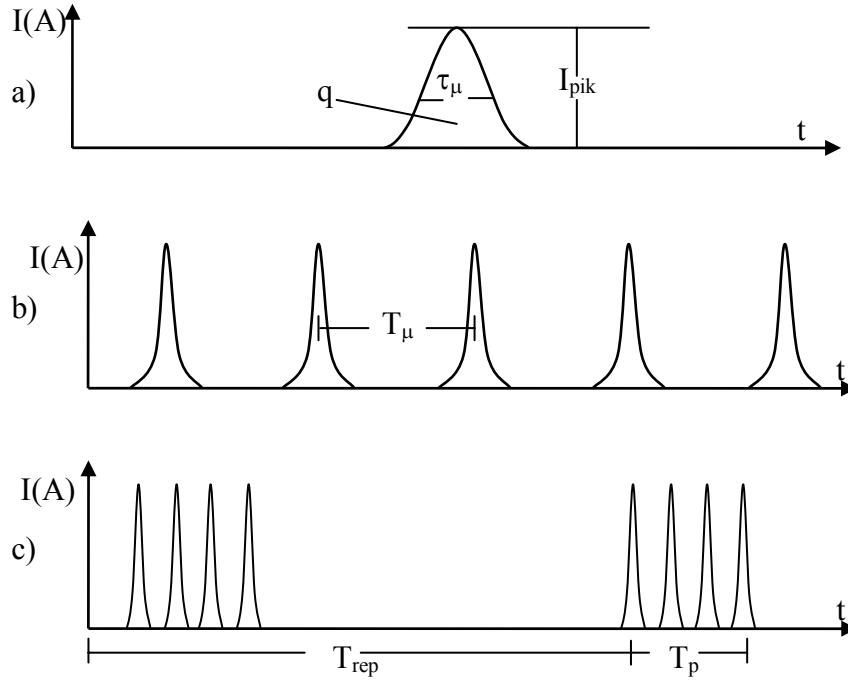
3.3.2. Pik paketçik akımı ve ortalama akım

Elektron demeti için en küçük birim, hızlandırıcı gerilimin bir dalgaboyu veya bunun katları kadar aralığa sahip olan paketçiklerdir. Hızlandırılan elektronların paketçik yapıda oluşturduğu akımın pik değeri,

$$I_{pik} = \frac{q}{\tau_\mu} \quad (3.4)$$

olarak tanımlanır. Burada q, paketçik yükü, τ_μ paketçik süresidir. Demetteki elektronlar ortak bir referans noktası etrafında faz salınımları yaparak boyuna kararlı dağılım

oluştururlar. Buna da paketçik uzunluğu denir. Şekil 3.5’de elektron demetinin zamansal yapısı (I_{pik}) görülmektedir [24].



Şekil 3.5 Elektron demetinin zaman yapısı ve atma akımları, a) Pik akımı(I_{pik}), b) Atma akımı, c)Ortalama akım

Atma akımı I_{atma} aşağıdaki şekilde yazılabilir burada T_μ paketçik periyodudur.

$$I_{atma} = I_{pik} \frac{\tau_\mu}{T_\mu} = \frac{q}{T_\mu} \quad (3.5)$$

Ortalama akım ise, elektron paketçiklerinin hızlandırıcı sonunda oluşturduğu ortalama demet akımıdır.

$$\langle I \rangle = \frac{n_\mu q}{T_r} \quad (3.6)$$

n_μ bir atma içindeki paketçik sayısı, T_r ardışık iki atma arasındaki zaman farkıdır ve aşağıdaki eşitlik ile ifade edilir.

$$T_r = \frac{1}{f_{linac}} \quad (3.7)$$

f_{linac} , birim saniyede linac tarafından üretilen atma sayısıdır. Bu RF frekansı, güç kaynağının verimliliğine bağlı olarak 50 MHz ile 9 GHz arasında değer alabilir.

Elektron demetinin zaman yapısı, oluşacak ışımının zaman yapısını ve dolayısıyla serbest elektron lazerinin zaman yapısını belirler. Bu yüzden, SEL’de elde edilecek ışımının kullanım alanları belirlenerek uygun bir elektron demet zaman yapısı oluşturulmalıdır.

3.3.3. Emitans

Demetlerin kalitesi, elektronların yoğunluğunun paketçik içerisinde homojen olarak dağılması ve demetlerin enine boyutunun küçük olup değişmez kalmasıyla ölçülür. Elektronların paketçik içerisindeki konumu ve yörüngesinin eğimi, zamanla elektron yörüngesi, ideal yörüngeden sapacak şekilde biçimlenir. Bu gelişme, demeti oluşturan elektronların kapladığı alanı arttırmaya çalışır.

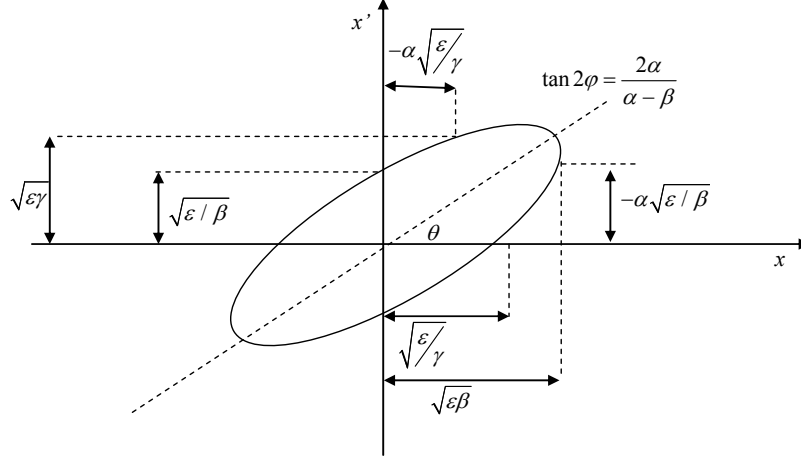
Parçacık demetinin zaman içerisindeki değişimini anlayabilmek için faz uzayında demeti incelemek kolaylık sağlar. Demeti faz uzayında tasvir etmek için Liouville teoremi çok kullanışlıdır. Gaussiyen bir demetin faz uzayında kapladığı alan elips şeklindedir ve faz uzayında parçacıklar tarafından işgal edilen elipsin alanına emitans denir. Faz uzayı elipsi Şekil 2.3’de görüldüğü gibidir [25].

Liouville teoremine göre faz uzayında işgal edilen alan (elipsin alanı) korunur. Bu teorem korunumlu kuvvetlerin etkisi altında faz uzayındaki parçacıkların yoğunluğunun sabit kaldığını söyler. Bu bilgiler ışığı altında Liouville teoremi her bir parçacığın yörüngesini demet iletim hattı boyunca herhangi bir noktada hesaplama olanağı verir. Faz uzayında bir elipsi tanıtan denklem aşağıdaki gibidir [25].

$$\gamma x^2 + 2\beta x x' + \beta x'^2 = \epsilon \quad (3.8)$$

Burada α, β, γ elips veya Twiss parametreleri olarak isimlendirilir. Bu denklem elipsin yönelimi ve şeklini belirler. Emitansa karşılık gelen alan aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\int_{elips} dx dx' = \pi \varepsilon \quad (3.9)$$



Şekil 3.6 Faz uzay elipsi

Liouville teoremine göre bütün parçacıklar elips tarafından kapsandığından ve bütün parçacıklar bu elips içerisinde kaldığından, demeti tanımlayabilmek için elips parametrelerinin demet hattı boyunca nasıl değiştiğinin bilinmesi gerekir. Demet hattının $s = 0$ başlama noktasındaki faz elipsinin denklemi [25].

$$\gamma_0 x_0^2 + 2\alpha_0 x_0 x_0' = \varepsilon \quad (3.10)$$

olarak ifade edilir. Günümüzde, ulaşılan en küçük enine emitans değeri nm-mrad mertebesinde dir.

3.3.4 Demet ebadı

Parçacık demeti hızlandırılma süresince odaklayıcı ve dağıtıcı mıknatısların yanı sıra birçok yapıdan geçer (demet izleme monitörleri, hızlandırıcı oyuklar, vb.). Bu süre içerisinde demetin çeşitli kararsızlıklardan dolayı dağılmadan ve mümkün olduğunca küçük demet ebadı ile saldırganıya getirilmesi gerekmektedir [22]. Paketçiklerin enine yarı çapları σ_x, σ_y ile boyu ise σ_z ile verilir. Günümüzdeki hızlandırıcılarda bu değer σ_z

için mm mertebesinde iken σ_x ve σ_y için μm mertebesindedir. Gaussiyen demet enine elektrik alan ve şiddet dağılımları Gaussiyen fonksiyonlarla tanımlanan demetlerdir.

Hızlandırıcının s eksenini boyunca paketçiklerin enine ebatları aşağıdaki eşitlikte verildiği gibi değişmektedir.

$$\sigma_{x,y} = \sqrt{\epsilon\beta} \left(1 + \frac{s^2}{\beta^2} \right)^{1/2} \quad (3.11)$$

Gaussian lazer demeti için enine ebat ,

$$\sigma_{x,y} = \sqrt{\frac{\lambda Z_R}{4\pi}} \left(1 + \frac{s^2}{Z_R^2} \right)^{1/2} \quad (3.12)$$

şeklinde tanımlanır. Gaussian yoğunluğunda ise hem lazer hem de elektron demeti için demet yoğunluğu aşağıdaki gibidir [22].

$$n = \frac{N_e}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp \left[-\frac{x^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y^2}{2\sigma_y^2} - \frac{(s \pm ct)^2}{2\sigma_z^2} \right] \quad (3.13)$$

3.3.5 Güç

Lazerlerin şiddeti sahip oldukları güç ile orantılıdır. Lazer ışınları aynı fazda oluşan ışık dalgaları olduğu için şiddeti büyük olur ve lazer gücü arttıkça şiddeti de artar. Çizelge 3.1' de verildiği gibi geleneksel lazerler kW mertebesinde pik gücüne sahip iken SEL, MW mertebesinde pik gücüne sahiptir. Boyutsuz SEL parametresi olan ρ aşağıda tanımlandığı gibidir

$$\rho = \frac{\text{üretilen alan enerjisi}}{e - \text{demeti enerjisi}} = \frac{1}{4\pi\sqrt{3}} \frac{\lambda_u}{L_G} \quad (3.14)$$

Bu parametre üretilen SEL'in ana karakteristiklerini belirleyen doyum parametresidir ve kazanç uzunluğu L_G ile ters orantılıdır. Doyuma ulaşılan güç değeri SASE durumunda $P_{doyum} \approx \rho P_{demet}$ ile verilir. Yüksek kazanç durumunda güç yoğunluğu ise

$$p(y, s, r) = \alpha_1 |E(y, s, r)|^2 \quad (3.15)$$

şeklindedir. Burada α_1 radyasyon dalgaboyu ve elektron enerjisi gibi sabitlere bağlıdır. Toplam güç yoğunluğu paketçik yarıçapına göre integrali alınarak aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$P(y, s) = \int p(y, s, r) dr \quad (3.16)$$

3.4 SEL'de Enerji Aktarımı ve Gerekli Şartlar

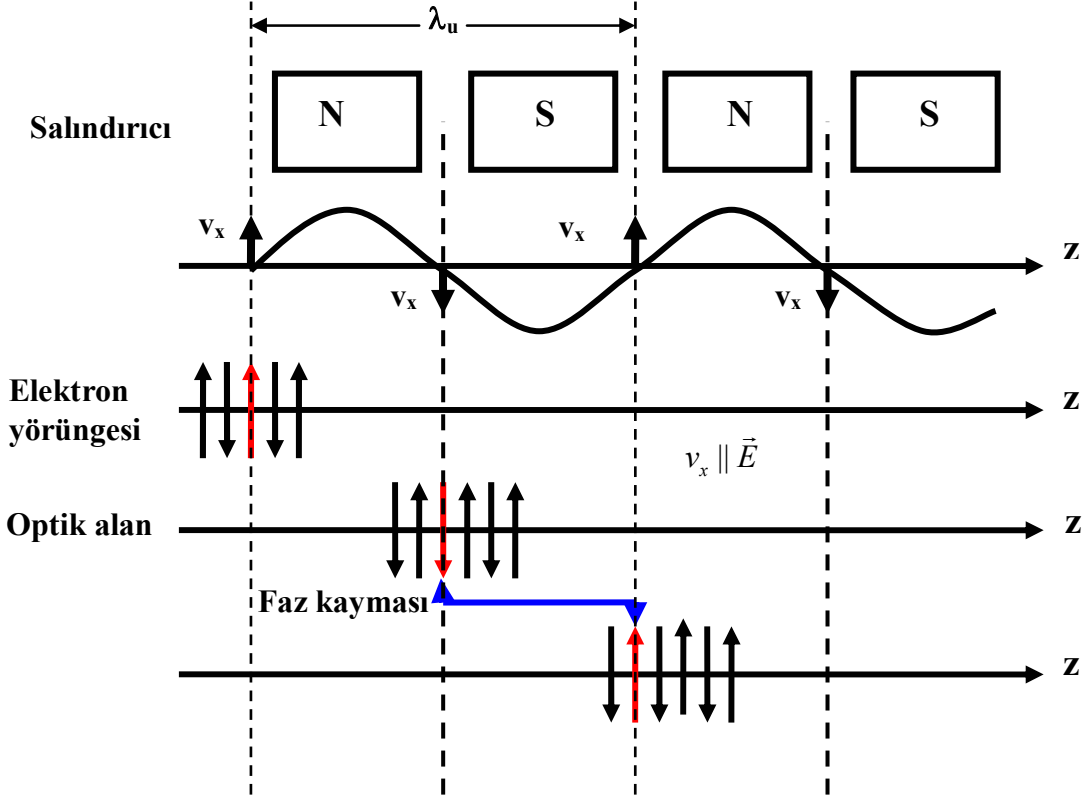
SEL'de elektron ve lazer demeti etkileşme bölgesinin uzunluğunu maksimize etmek ve böylece enerji alışverişini yeterince gerçekleştirebilmek için aynı eksen boyunca hareket etmelidir. Bu durumda elektrik alan \vec{E}_L ve elektronların hızı \vec{v} birbirine dik olmaktadır. Bu durumda enerji kazancı;

$$\Delta W = -e \int \vec{E}_L \cdot d\vec{s} = -e \int \vec{v} \vec{E}_L \cdot dt = 0 \quad (\vec{v} \perp \vec{E}_L) \quad (3.17)$$

Elektron ile lazer demeti arasındaki doğrudan enerji alışverişi bu durumda olanaksızdır. Demete yatay bir hız bileşeni kazandıran bir salındırıcı mıknatıs yerleştirildiğinde ω_u lazer frekansı, K salındırıcı mıknatıs parametresi ve k_u salındırıcı mıknatısın dalga sayısı ve γ Lorentz faktörü olmak üzere elektron demetinin hareket denklemi 2.17'de ifade edildiği gibidir.

SEL demetinin elektrik alanı bu yatay hız bileşeni ile etkileşime girebilir. Salındırıcı mıknatıs periyodu ve lazer alanı arasındaki faz ancak belirli şartları sağlaması durumunda pozitif enerji kazancı olabilmektedir. Şekil 3.7 yardımıyla sadece basit bir elektron üzerinde durularak bu durum açıklanabilir. Belirli bir t zamanda belirli bir x noktada bulunan bir elektron v_x enine hız bileşenine sahip olsun. Bu an ve konumda elektron,

lazerin elektrik alanının maksimumu ile karşılaşır ve bu alan v_x ile aynı yönde olursa bu durumda negatif yüklü elektron bu alan tarafından yavaşlatılır ve enerji lazer alanına transfer edilmiş olur [7].



Şekil 3.7 Salındırıcı mıknatıs içindeki lazer alanı ve salınan elektron demeti arasındaki faz şartı.

İkinci yarı periyotta elektron bu kez v_x hız bileşenine sahiptir. Elektron her zaman lazerin elektromanyetik alanından daha yavaş hareket ettiğinden ve aynı zamanda elektronu ileri hareketlendiren salındırıcı mıknatıs kuvvetindeki eğilim sebebiyle lazer alanı elektronun önünde hareket eder. Eğer sistemdeki faz kayması $\Delta\varphi = \pi$ olarak ayarlanırsa bu durumda elektron üzerine etkiyen elektrik alan $-\vec{E}_L$ olacaktır. Bu durumda elektron yine enerji kaybeder ve bu enerji lazer alanına aktarılır. Bu süreç, birbirini tekrarlayarak, elektron salındırıcı mıknatısın sonuna ulaşana kadar devam eder [7].

SEL'deki enerji aktarımına kalitatif olarak bakıldıktan sonra faz şartlarını incelemek gerekmektedir. \vec{E}_L elektromanyetik dalganın elektrik alanı ise bu durumda

elektromanyetik dalga ile birlikte hareket eden elektronların enerjisindeki değişim genel bir eşitlik ile denklem 3.17’da verilmektedir.

Lazer alanının x bileşeni düzlem dalga şeklinde aşağıdaki formda yazılır:

$$E_{L,x} = E_{L,0} \cos(k_L s - \omega_L t + \varphi_0) \quad (3.18)$$

burada $k_L = 2\pi / \lambda_L$ dalga sayısı, ω_L lazer frekansı ve φ_0 herhangi bir başlangıç fazıdır. K salındırıcı mıknatıs parametresi ve k_u salındırıcı mıknatısın dalga sayısı olmak üzere, elektron hızının v_x bileşeni,

$$v_x = c \frac{K}{\gamma} \sin(k_u s) \quad (3.19)$$

Elektron enerjisindeki değişim

$$\begin{aligned} \Delta W &= -\frac{ceE_{L,0}K}{\gamma} \int \cos(k_L s - \omega_L t + \varphi_0) \sin(k_u s) dt \\ &= -\frac{ceE_{L,0}K}{\gamma} \int \left\{ \sin[(k_L + k_u)s - \omega_L t + \varphi_0] - \sin[(k_L - k_u)s - \omega_L t + \varphi_0] \right\} dt \end{aligned} \quad (3.20)$$

normalde salındırıcı mıknatıs içerisinde elektron ve elektromanyetik dalga arasındaki faz açısı zamanla sabit kalıyorsa, ancak bu durumda lazer ile elektron arasında enerji transferi gerçekleşir. Faz açısı

$$\varphi_{\pm} = (k_L \pm k_u)\bar{s} \pm \omega_L t + \varphi_0 \quad (3.21)$$

olarak gosterilmektedir. Faz açısının zamana gore turevi

$$\frac{d\varphi_{\pm}}{dt} = (k_L \pm k_u)\dot{\bar{s}} - \omega_L \approx 0 \quad (3.22)$$

olmalıdır. Denklem 3.22'nin çözümü dalgaboyuna bağlı olarak yazılarak k_L ve k_u yer değiştirilirse ışınma açısı $\theta_u = 0$ için denklem 3.21 ile benzer eş evreli şarta sahip olan denklem 3.1 elde edilir.

3.20'deki enerji denklemi,

$$\varphi_- = (k_L - k_u)\bar{s} - \omega_L t + \varphi_0 \quad (3.23)$$

faz terimi ile salınırken, $\varphi_+ = (k_L + k_u)\bar{s} - \omega_L t + \varphi_0 \approx \text{sabit}$ fazı enerji alışverişine katkıda bulunur ve böylece aktarılan toplam enerji üzerindeki etki değişmez.

3.5 SEL'de Elektronların Hareket Denklemi

Elektron ($\gamma = E / mc^2$) elektromanyetik alanla etkileşir ve lazer alanına göre enerjide $\Delta\gamma$ kadar değişim ve $\Delta\psi$ kadar faz kayması meydana gelir. $\Delta\gamma (s)$ ve $\Delta\psi (s)$ fonksiyonları salındırıcı mıknatıs boyunca olan parçacık hareketini açıklayan fonksiyonlardır. Yörünge elemanı $ds (= cdt)$ başına enerjideki değişim,

$$\frac{d\gamma}{ds} = -\frac{dW}{\beta c dt} \frac{1}{m_e c^2} \quad (3.24)$$

olarak yazılabilir. Denklem 3.20 denklem 3.24 içerisinde yerine yazılırsa,

$$\frac{d\gamma}{ds} = -\frac{eE_{L,0}K}{2\gamma m_e c^2} \left\{ \sin \left[(k_L + k_u)\bar{s} - \omega_L t + \varphi_0 \right] - \sin \left[(k_L - k_u)\bar{s} - \omega_L t + \varphi_0 \right] \right\} \quad (3.25)$$

eşitliği elde edilir. Salındırıcı mıknatıs boyunca enerji transferi olması için, elektron salınımının N inci harmoniği ile lazer dalgası arasındaki fazın zamanla sabit kalması ve denklem 3.26'ya eşit olması gerekmektedir [7].

$$\psi = (k_L + Nk_u)\bar{s} - \omega_L t + \varphi_0 \quad (3.26)$$

$$\frac{d\psi}{dt} = (k_L + Nk_u)\dot{s} - \omega_L = (k_L + Nk_u)\beta c - \omega_L = 0 \quad (3.27)$$

$$\frac{d\psi}{dt} = -\frac{ck_L}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2}\right) + cNk_u = 0 \quad (3.28)$$

$$k_u = \frac{k_L}{2N\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2}\right) \quad (3.29)$$

Dalga sayısı, dalgaboyu cinsinden yeniden yazılırsa

$$\lambda_L = \frac{\lambda_u}{2N\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2}\right) \quad (3.30)$$

denklemini herhangi bir N harmoniği için genelleştirilmiş eş evreli şartıdır. Dalgaboyları her zaman pozitif sayılardır ve denklem 3.30'dan $N \leq 0$ şartının fiziksel olarak anlamsız olduğu görülmektedir. Bununla birlikte SEL için çoğu durumda tüm olası harmonikler yerine sadece tek bir harmonik düşünülür. Enerji alışverişi sadece lazer alanı mevcutken gerçekleşmektedir. Bu durum lazerdeki “zorlanmış uyarılma” ile aynıdır.

Rezonans enerjisi, lazer alanına göre faz kayması olmayan, $d\psi / ds = 0$, enerji olarak açıklanır. Rezonans enerjisi düzlemsel salındırıcıda

$$\gamma_r^2 = \frac{k_L}{2Nk_u} \left(1 + \frac{K^2}{2}\right) \quad (3.31)$$

ile verilir. SEL rezonans enerjilerine çok yakın elektron enerjilerinde oluşturulur. Enerji değişkeni olarak $\Delta\gamma$ kullanıldığında

$$\gamma = \gamma_r + \Delta\gamma \quad \text{ve} \quad \Delta\gamma \ll \gamma_r \quad (3.32)$$

özdeş bir salındırıcı miknatista γ_r rezonans enerjisi sabittir. Bu durumda $\frac{d\gamma_r}{ds} = 0$ olur.

Yörünge elemanı başına enerjideki değişim

$$\frac{d\Delta\gamma(s)}{ds} = -\frac{k_u K_L K}{2\gamma_r} \sqrt{F(N\eta)} \sin\psi(s) \quad (3.33)$$

olur. Burada K_L SEL alan parametresi $K_L = \frac{eE_{L,0}}{k_u m_e c^2}$ ve $F(N\eta)$ aşağıda tanımlanan fonksiyondur.

$$F(N\eta) = \left[J_{\frac{N-1}{2}}(N\eta) - J_{\frac{N+1}{2}}(N\eta) \right]^2 \quad (3.34)$$

$$\eta = \frac{k_L K^2}{8N\gamma^2 k_u} \quad (3.35)$$

$$\omega = \frac{2\pi N N_u}{\gamma_r} (\gamma_{ilk} - \gamma_r), \quad N = 1, 3, 5, \dots \quad (3.36)$$

Denklem 3.26'nın tekrar diferansiyeli alındığında

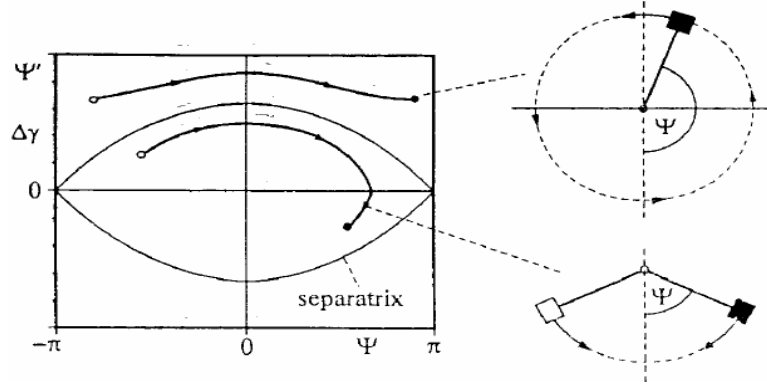
$$\frac{d^2\psi}{ds^2} = 2\frac{Nk_u}{\gamma_r} \frac{d\Delta\gamma(s)}{ds} = -\frac{Nk_u^2 K_L K}{\gamma_r^2} \sqrt{F(N\eta)} \sin\psi(s) \quad (3.37)$$

bu eşitlik sarkaç denkleminin genel gösterimidir. Burada K_L SEL alan parametresidir. Denklemin kapalı formu aşağıda verildiği gibidir

$$\psi''(s) + \Omega_L^2 \sin\psi(s) = 0 \quad (3.38)$$

$$\text{burada } \Omega \text{ frekansı; } \Omega_L^2 = \frac{Nk_u^2 K_L K}{\gamma_r^2} \sqrt{F(N\eta)} \quad (3.39)$$

s eksenini boyunca salınımın uzunluğu; $L_L = 2\pi / \Omega_L$ ve $f_L = c / L_L$ elektronun salındığı lazer alanının frekansıdır. Lazer dalgasına göre faz kayması yatay eksen boyunca şekil 3.8 de görüldüğü gibidir. Rezonans enerjisinden enerji farkı dikey olarak gösterilmiştir. İki farklı elektron hareketi ve sarkaç benzeri hareketi gösterilmiştir [7].



Şekil 3.8 SEL alanındaki elektron hareketi

3.6 SEL Kazanç Bölgeleri

3.6.1 SEL düşük kazanç bölgesi

Lazer alanındaki enerji kazancı

$$\Delta W_L = -m_e c^2 \Delta\gamma \quad (3.40)$$

olsun. Eksi işareti elektrondaki enerji kaybının lazer alanındaki enerji kazancına neden olduğunu göstermektedir. Lazer alanında depolanan enerji

$$W_L = \frac{\epsilon_0}{2} E_{L,0}^2 V \quad (3.41)$$

V lazer alanının kapladığı alan $E_{L,0}$ lazerin elektrik alanıdır. Basit bir elektronun oluşturduğu SEL kazancı;

$$G_L = \frac{\Delta W_L}{W_L} = -\frac{2m_e c^2}{\epsilon_0 E_{L,0}^2 V} \Delta\gamma \quad (3.42)$$

olarak açıklanır. Gerçekte paketçikteki bütün elektronlar lazer kazancına katkıda bulunurlar ve elektronların paketçikte homojen olarak dağıldıkları kabul edilmektedir. Her bir elektron katkısının toplamına ve salıncı mıknatısına girdiklerinde lazer

dalgasına göre bütün elektronların başlangıç fazının ortalamasına ihtiyaç duyulmaktadır. SEL'in toplam kazancı aşağıda verildiği gibidir.

$$G = -\frac{e^2 N k_u K^2}{\epsilon_0 m_e c^2} \frac{n_b}{\gamma_r^3} F(N\eta) \frac{\langle \Delta \psi' \rangle}{\Omega_L^4} \quad (3.43)$$

$n_b = \frac{n}{V}$ paketçik içerisindeki elektron yoğunluğudur ve $\langle \Delta \psi' \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta \psi'_i$ şeklinde

tanımlanır.

Zayıf lazer alanlarında $E_{L,0}$ ve K_L alan parametresi çok küçüktür ve bu yüzden $\psi''(s) + \Omega_L^2 \sin \psi(s) = 0$ eşitliğindeki Ω_L frekansı da küçük olur. Bu sebeple her bir elektronun salındırıcı mıknatıstan geçerken oluşturduğu kazanç da küçük olmaktadır. Bu yüzden lazer alanının yoğunluğu ancak yavaşça değişir ve alanın her geçiş için sabit olduğu bile düşünülebilir. Bu olay sıklıkla düşük kazançlı SEL olarak adlandırılmaktadır. Burada lazer alanı o kadar zayıftır ki Şekil 3.8'de gösterilen hemen hemen bütün elektronlar seperatriksin dışında kalmaktadır ve lazer alanında kararlı salınımlar göstermezler.

Elektronlar paketçik içerisinde eşit olarak dağıldığından ve paketçik uzunluğu lazerin dalgaboyu ile karşılaştırıldığında çok uzun olduğundan ($\lambda \gg \sigma_{e,z}$), $0 \leq \psi_{ilk} \leq 2\pi$ aralığında elektronların başlangıç fazı eşit dağılmıştır. Bütün başlangıç fazlarının ortalama değeri alındığında;

$$\langle \Delta \psi'_1 \rangle = \frac{N_u \lambda_u \Omega_L^2}{2\omega} \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (\cos(2\omega + \psi_{ilk}) - \cos \psi_{ilk}) d\psi_{ilk} = 0 \quad (3.44)$$

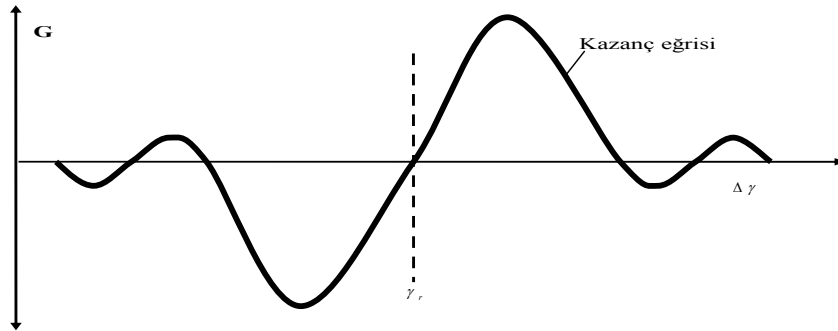
Denklem 3.34'ya göre elektron demeti ile lazer alanı arasında enerji alışverişi yoktur. Buradan SEL kazancının daha yüksek mertebelerde etkisi olduğu sonucu çıkarılabilir. Daha yüksek mertebelerin SEL kazancı ile ilişkisini göstermek için aynı hesaplamalar ikinci mertebede tekrar edilirse;

$$\langle \Delta \psi'_2 \rangle = -\frac{N_u^3 \lambda_u^3 \Omega_L^4}{8} \frac{d}{d\omega} \left(\frac{\sin \omega}{\omega} \right)^2 \quad (3.45)$$

olarak yazılabilir. Bu ortalama değer, kazanç ilişkisinde yerine yazılırsa düşük kazanç bölgesinde N inci harmonik için gerekli olan SEL kazanç faktörü elde edilmiş olur [7].

$$G_N = -\frac{\pi e^2 N K^2 N_u^3 \lambda_u^2 n_b}{4 \varepsilon_0 m_e c^2 \gamma_r^3} F(N\eta) \frac{d}{d\omega} \left(\frac{\sin \omega}{\omega} \right)^2 \quad (3.46)$$

Bu kazanç fonksiyonunun, elektronların enjeksiyon enerjisine kuvvetli bir bağımlılığı vardır. G , enjeksiyon enerjisi $\Delta \gamma$ 'nın bir fonksiyonu olarak çizilirse (Şekil 3.9) elde edilen eğri, tipik bir SEL'in kazanç eğrisidir. Rezonans enerjisinde $\gamma = \gamma_r$, eğri sıfır noktasından geçer ki bu kazanç olmadığı anlamına gelmektedir. Sonuçta, elektron enerjisi eş evreli şartı ile gerekenden daha yüksek bir değere ayarlanmalıdır.



Şekil 3.9 SEL kazanç eğrisi

3.6.2 Mandey teoremi

Anlık salındırıcı mıknatıs ışınmasının yoğunluğu aşağıdaki gibidir.

$$I(\Delta\omega) \propto \left[\frac{\sin \left(\pi N_u \frac{\Delta\omega}{\omega_u} \right)}{\pi N_u \frac{\Delta\omega}{\omega_u}} \right] \quad (3.47)$$

Bu gösterimde elektron enerjisi sabittir ve ışınımın şiddeti frekansının bir fonksiyonu olarak düşünülür. Prensip olarak frekans veya dalgaboyunu sabit tutarak demet

enerjisini değiştirmek de mümkündür ve benzer bir şiddet dağılımı verecektir. Bunu hesaplamak için N . harmonik frekansının eşzamanlılık koşulu aşağıdaki gibidir [7].

$$\omega_N = \frac{2\pi c}{\lambda_u} = \frac{4\pi c N \gamma^2}{\lambda_u \left(1 + \frac{K^2}{2}\right)} \quad (3.48)$$

Bu ifadenin enerjiye göre değişimi incelendiğinde,

$$\frac{d\omega}{d\gamma} = \frac{4\pi c N}{\lambda_u \left(1 + \frac{K^2}{2}\right)} 2\gamma = N\omega_u \frac{2}{\gamma} \quad (3.49)$$

burada ω_u salındırıcı dalgasının birinci harmoniğidir. Frekanstaki bağıl değişim, enerjideki bağıl değişim cinsinden ifade edilebilir.

$$\frac{\Delta\omega}{\omega} = \frac{2N\Delta\gamma}{\gamma} \quad (3.50)$$

$\Delta\gamma = \gamma - \gamma_r$ ifadesini kullanırsak,

$$\pi N_u \frac{\Delta\omega}{\omega_w} = \frac{2\pi N N_u}{\gamma} (\gamma - \gamma_r) \quad (3.51)$$

bulunur. Salındırıcı ışınımının şiddet dağılımı aşağıdaki gibi de yazılabilir.

$$I(\Delta\gamma) \propto \left(\frac{\sin \omega}{\omega}\right)^2 \quad (3.52)$$

Bu ifadeyi yükseltme fonksiyonu ile karşılaştırdığımızda, demet eksenini boyunca kendiliğinden salındırıcı miknatıs ışınımının şiddet dağılımının türeviyle doğru orantılı olduğu grlmektedir. Serbest elektron lazerleri teorisinde temel bir eşitlik olan bu ifade ilk defa J. M. J. Madey tarafından çok genel bir formda verilmiştir. Bu yüzden Madey teoremi olarak bilinir.

3.6.3 Yüksek kazanç bölgesi

Bir önceki alt bölümde tartışılan ve düşük kazanç bölgesinde çalışan SEL salındırıcı aygıtlarında doyuma ulaşmak için ışınımın aynalar arasında pek çok kez gidip gelmesi gerekmektedir [26].

Yüksek kazançlı tek geçiş SEL oldukça önemli bir parametre birimsiz SEL üç boyuttaki parametresidir. Bu parametre (3.14) denkleminde verildiği gibidir.

Yüksek kazançlı, optimize edilmiş bir SEL’de aşağıdaki koşul sağlanmalıdır.

$$N\rho = 1 \quad (3.53)$$

Yükseltme kazancı ise aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$G \cong \exp[4\pi\sqrt{3}] \cong 3.15 \times 10^8 \quad (3.54)$$

Kazanç uzunluğu $L_G = G^{-1}$ ile tanımlanır.

37 Serbest Elektron Lazerinin Kullanım Alanları

Serbest elektron lazerleri, gerek temel ve uygulamalı araştırmalarda, gerekse endüstriyel ve teknolojik uygulamalar gibi çok geniş bir alanda uygulama alanı bulmaktadır.

Dünya’ da pek çok uygulamalarda kullanılan 50 civarında çalışır durumda ve yaklaşık 15 civarı kurulması planlanan serbest elektron lazeri merkezi bulunmaktadır. Çalışır durumda olan bu merkezlerden 10 taneden fazlası kızılötesi uygulama alanına sahiptir. Serbest elektron lazerinin kullanım alanlarını genel kullanım alanlarına, kullanılan yöntemlere ve bilimsel araştırma amaçlı kullanıldığı yere göre sınıflandırarak aşağıdaki şekilde verebiliriz [27].

- Atomik ve moleküler spektroskopisi
- İyon demetlerinin spektroskopisi

- İyonlaşmış gaz ve plazma spektroskopisi
- Atomik ve moleküler grup spektroskopisi
- Katıhal spektroskopisi
- Yüzey ve ince film, fizik ve kimyası
- Fotokimyasal süreçlerin incelenmesi
- Biyolojik yapılar ve bunların dinamiği
- Malzeme ve yüzey işleme
- Çok tabakalı manyetik filmler
- Yarı iletkenlerin elektronik yapıları
- Ağır fermiyon metalleri
- Yüksek sıcaklık süperiletkenliği
- Katıhal reaksiyonlarının dinamiği
- X-ışını mikroskopisi ve mikro-spektroskopi
- Spektro-mikroskopisi
- Atomların ve iyonların tekli ve çoklu foton uyarılma dinamiği
- Serbest iyonlarla etkileşme
- Foton kaynaklı atomik frekans ve atomik çift oluşumu
- Lazerle uyarılmış ve dizilmiş atomların incelenmesi
- Çoklu foton süreçleri
- Grup ve radikal spektroskopisi
- Elektronik yapıların incelenmesi
- Fotokimya ve yüzey biliminde reaksiyon ve gevşeme dinamiği
- Yüzeylerde reaksiyon kinetiği
- Uyarılmış katıların yüksek çözünürlüklü fotoelektron spektroskopisi
- Magnetik malzemeler ve ışık altında çok renklilik
- Lineer olmayan magnet optik
- Floresans spektroskopisi
- Elektron atmalarının yoğun madde ile etkileşmesi
- Kuvvetli elektrik ve manyetik alanların madde ile etkileşmesi
- Lineer olmayan optik
- Lineer olmayan X-ışını optiği
- Yoğun X-ışını kaynağı olarak geçiş ışınması

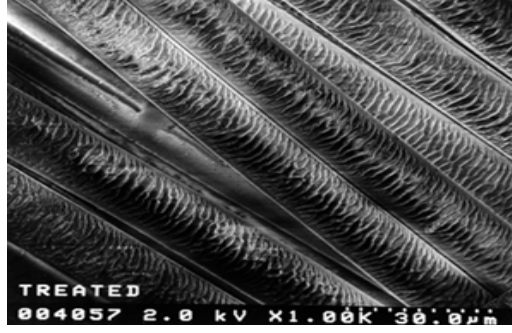
Lazer kullanıcıları ayarlanabilirlik, yüksek pik gücüne bağlı olan yüksek tekrarlanabilirlik oranları ve frekans modülasyonlu atmalara ihtiyaç duyduğunda SEL kullanımına yönelmektedirler.

3.7.1 SEL' in endüstriyel alanda uygulamaları

SEL, mikro yüzey işlemlerini kolaylaştırması nedeni ile endüstriyel uygulamalara açıktır. Endüstri ölçekli yüzey işleyici serbest elektron lazerlerinin gelişimi ile pürüzsüz yüzeylerin elde edilmesi daha kolay olmaktadır. Pürüzsüz bir yüzey sürtünmeyen, ısınmayan, kirlenmeyen, hastalık üretmeyen bir yüzeydir. Tıptan, ev eşyasına saymakla bitmeyecek kadar çok kullanım alanı vardır. Yağmur damlalarının tutunamadığı ve kolay kirlenmeyen araba camlarını, geleneksel lazerler ile basit uygulamaları yapılmakta olan bu yönteme serbest elektron lazerinin de büyük katkısı olacaktır. Yüzeylerin pürüzsüzleştirilmesi tekniğinde yüzey öncelikle Cl₂ gibi bir buhar ortamına konur ve lazer ışınımına maruz bırakılır. Yüzeyde oluşan bölgesel ısınma ile kazıma tepkimesi başlar. SEL' in ayarlanabilir dalgaboyuna sahip olması kullanılan buhar malzemesinde serbest radikallerin oluşmasına kolaylık sağlamaktadır. Yerel ısınmalar sonucu oluşan serbest radikaller yüzey ile bileşikler yaparak kopmalara yol açar. Tüm yüzeyin lazer ile taranması yüzey üzerinde düzleşmelere neden olur. SEL' in ayarlanabilir dalgaboyuna sahip olmasının yanında Çizelge 3.1' de geleneksel lazerler ile karşılaştırılan pik gücünün yüksekliği kazınma tepkimesinin hızını arttırmaktadır. Böylece işlem daha kısa zamanda yapılabilmektedir. Pürüzsüz yapısı yüzünden anti bakteriyel olarak her türlü muhafaza malzemesinin üretimi sağlanabilmektedir. Üretilen bu muhafaza malzemeleri, nakliyatta da kolaylık sağlamaktadır. Malzemeler uzun süre bozulmadan kalabilmektedir [28].

Yüzeyin pürüzsüzleştirilmesinin yanında, pürüzlendirmede de SEL kullanılarak aynı şekilde yapılan bir uygulamadır. Farklı olarak, SEL kazıma tepkimesini arttırmak yerine biriktirme tepkimesini başlatmak üzere kullanılır. SEL ile taranan yüzeyde küçük bir nokta üzerinde biriktirme tepkimesini başlatır. Ardından istenilen başka bir noktada biriktirmeyi sağlamak üzere ışın başka noktalara yönlendirilir. Bu teknikte lazerin

gücüne bağlı olarak yüzeyde yerel olarak amorf¹ ya da kristal yapılaşmaların oluşumu mümkündür.



Şekil 3.10 Yüzeyi SEL ile pürüzlendirilmiş polyester kumaş

Şekil 3.10’ de elektron mikroskobu görüntüsünde lazer ile yapay olarak pürüzlendirilmiş polyester kumaşı görülmektedir [29]. Bu tür lazer müdahaleleri ile polyestere farklı sürtünme, filtreleme, ıslanma ve görünüm özellikleri SEL ile kolayca kazandırılabilir. Özellikle çelik işlemede üretilen malzemenin gerekli özelliklere sahip olması büyük önem taşır. Kullanım şartlarına göre malzemelerin üstün dayanıklılık özelliklerine sahip olması gerekebilir. Askeri sanayi basta olmak üzere zor koşullarda dayanıklılık sınırları normalin çok üstünde olacak malzemelerin geliştirilmesine önem verilmektedir [29].

SEL ile elektronik baskı devrelerinde kullanılan bakır plakalara çok ince elektriksel yollar açılması mümkündür. SEL’ in sahip olduğu yüksek pik gücü ve ayarlanabilir dalgaboyu ile ince yollar açılması, bakır plakalar üzerinde yol dışında kalan kısmın aşındırılması ile gerçekleştirilir. Bu enerji tasarrufu hem de malzeme boyutlarının azalmasından dolayı üretim maliyetinde düşme sağlar. Geleneksel lazerlere kıyasla istenilen boyutta aşındırma ile malzeme kaldırılması yapılmakta ve kalan malzeme daha az hasar görmektedir.

3.7.2 SEL’ in araştırma alanında uygulamaları

Bu uygulamalar biyomedikal uygulamalar, malzeme ve nanoteknoloji uygulamaları ve fotokimya uygulamaları başlıkları altında gruplandırılmıştır.

¹ Bir cismin atomlarının dizilişinde rast gele düzensizlikler olan yapıya amorf denir

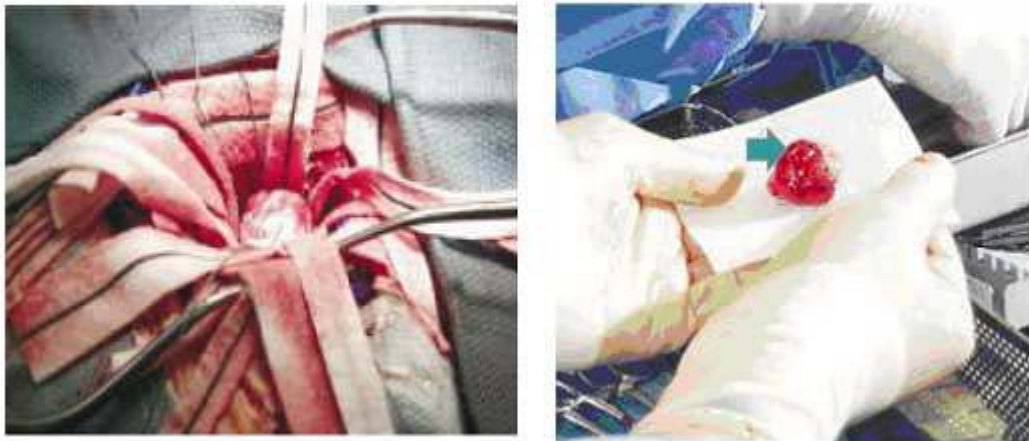
3.7.2.1 Serbest elektron lazerinin biyomedikal ve biyoteknoloji uygulamaları

Biyomedikal ve biyoteknoloji alanında SEL'ler; fototermal etkilerle kanserli dokunun kesilip çıkarılması, seçilen bölgeden kolesterolün temizlenmesi, fotomekanik etkilerle sert dokuların kaldırılması, fotokimyasal etkilerle de bir yüzeyin yeniden yapılandırılmasında kullanılır.

Moleküllerde bağ boyu titreşimleri kızılötesi bölgede yer almaktadır. Bir bağın kırılabilmesi için o bağa ait titreşime karşılık gelen dalgaboyunda ışımaya kullanılır. SEL ile istenilen kızılötesi dalgaboyunda güçlü ışımaya elde edilerek doku, kemik vb. gibi oluşumlar molekül boyutunda bağlar kırarak da kesilebilir. SEL' in atmalı yapıya sahip olması nedeni ile bu işlemde güç kontrolü, sürekli atmaya sahip olan CO₂ lazerlere göre daha kolaydır ve kesik çevresi daha az tahriş görür [19].

3.7.2.2 Kanserli dokunun çıkartılması

6.45 µm dalgaboyuna sahip lazer yumuşak doku kesikleri için uygun bir dalgaboyudur. Tıbbi uygulamalarda Vanderbilt Üniversitesindeki çalışmalar, 6.45 µm dalgaboyunun proteinlere bağlı olan amide II grubunun soğurma bandına karşılık geldiğini ve bu grubun koparılarak yumuşak doku kesiklerinin gerçekleştirilmesi için uygun olduğunu göstermiştir. Bu dalgaboyunda SEL kullanılarak kanserli dokunun kesilip çıkarılması işlemi şekil 3.1' de verilmiştir. Sol resimde kesi çalışmasının yapıldığı bölge, sağ resimde ise o bölgeden kesilerek çıkarılan doku verilmiştir [30].



Şekil 3.11 Kanserli dokunun kesilip çıkarılması

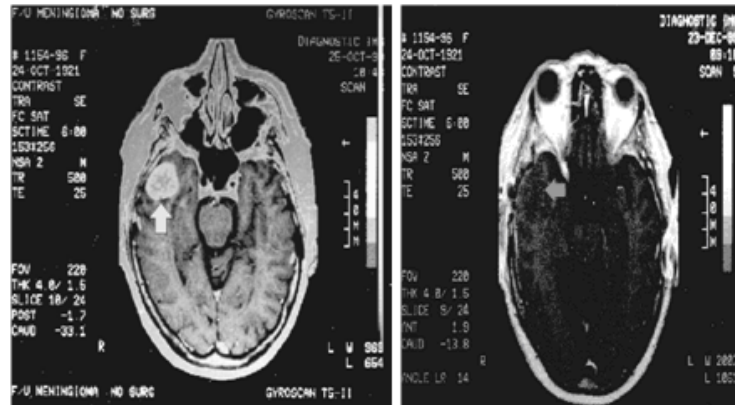
Bu çalışmalarda ilk olarak Mark III hızlandırıcısından elde edilen SEL' den elde edilen, 6.45 μm dalgaboyuna sahip ışınım kullanılmıştır [30].

3.7.2.3 Sinir zarı tedavisi

Yine 6.45 μm dalgaboyunda SEL ile optik sinir zarlarında, yanında bulunan optik sinir kesilmeden, başarılı kesiler oluşturulabilmektedir. Bu çalışma Vanderbilt üniversitesinde tavşanlar üzerinde denenerek SEL ile tavşanların optik sinir zarlarında, yanında bulunan optik sinir kesilmeden, başarılı kesiler oluşturulabilmektedir. SEL ile insanlı oküler tedavi, standart tekniklerle karşılaştırıldığında SEL ile optik sinir zarı tedavisi, Vanderbilt Üniversitesinde halen kullanılmaktadır. Göz sinir zarının tedavisi bu tedavilere bir örnektir [31].

3.7.2.4 Beyin tümörü biyopsisi

İlk insanlı SEL araştırması bir beyin tümörünün biyopsisidir. Yine 6.45 μm ' de beyinde bulunan bir tümörün, çevresinde bulunan diğer hücrelerle etkileşmesi en az olacak şekilde ışınlanması ile bu hücrenin buharlaştırılarak yok olması sağlanmaktadır. Bu yöntemde buharlaştırmaya neden olan, SEL' in yüksek enerjisidir. Şekil 3.12' de tümör bulunan bir beyin manyetik rezonansı (MR) görülmektedir. Bu tümörlü hücre bir hafta boyunca SEL ile 6.45 mikronda ışınlanarak bu hücrenin buharlaştırılması sağlanmıştır. Şekil 3.12' de sağ tarafta aynı organın bir hafta SEL ışınlanmasına maruz kaldıktan sonraki MR'ını göstermektedir. Tümör tamamıyla yok olmuştur [32].



Şekil 3.12 SEL ışınımına maruz kalan beyin tümörünün MR ile görüntüsü

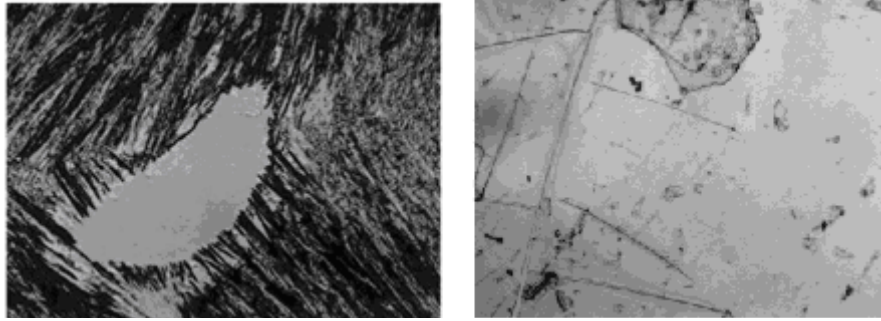
3.7.2.5 Dişçilik

SEL'in biyomedikalde bir diğer kullanım alanı da dişçiliktir. Diş minesini insan vücudunda bulunan en sert dokudur. Bu dokunun %95 i polikristal şeklinde hidroksiapatit (HAp), %4 i su ve %1 de organik molekül içermektedir. HAp'nin kimyasal formülü, $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$ şeklindedir. HAp'nin soğurma spektrumu 10 mikron civarındadır. Kızılötesi SEL ile diş minesinin ışınlanması ile HAp içinde sıkışmış olarak bulunan su molekülleri buharlaşmakta ve bu esnada mikropatlamlar meydana gelmektedir. Lazerin enerjisine de bağlı olarak mine üzerinde pürüzlenme ve düzensizlik meydana gelmektedir. Daha sonra bölgesel olarak SEL ile ışınlanan diş yüzeyi üzerinde, ışınımın etkisi ile fosfor iyonlarının düzeyi artar. Kalsiyum iyonları ile birleşen fosfor iyonları yeniden hidroksiapatit kristallerini oluşturur. Bu durum yeniden mineralizasyon olarak adlandırılır. Hidroksiapatit kristalleri mine üzerinde bulunan kollajen liflere sıkıca yapışır. Böylece kemik betonarme bir görünüm alır. Kollajen lifler kemiğin esnekliğini, hidroksiapatit kristalleri ise sertliğini sağlar. Dişin yeniden mineralizasyonu ile sertlik derecesi bozulan diş minesinin tekrardan sertleştirilmesi sağlanır. Yapılan diş yüzeyinin ışınlanması çalışmalarında CO_2 gibi atma süresi uzun olan lazerlerin örnek üzerinde ciddi bir termal etkiye neden olduğu görülmüştür. YAG lazerler (Yttrium Aluminium Garnet) kullanılarak yapılan bir çalışmada ise ışınımın diş yapısında bulunan suyun soğurma spektrumu ile mükemmel bir uyum gösterdiği gözlenmiştir. Ancak bu sefer de suyun aniden gaz haline gelmesi HAp kristalinde kopmalara neden olmuştur [33]. Bu nedenle bu tür lazerlerle diş çalışmalarında çok verimli sonuçlar alınamamıştır. Bunun dışında 9.4 μm soğurma dalgaboyuna ayarlanan SEL'in dişteki etkileri araştırılmaktadır. Bu dalgaboyu, diş üzerinde bulunan fosforik asidin bağ titreşimi ile uyumlu olduğundan diş üzerinden bu yapının kaldırılması sağlanmaktadır [34].

3.7.2.6 Kolesterol esterlerin seçilerek kaldırılması

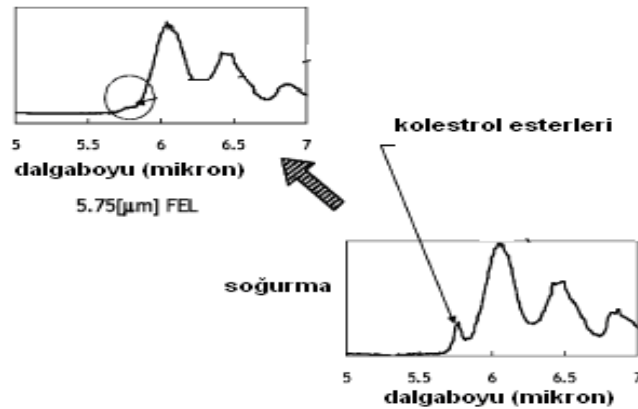
Biyoteknoloji alanında yapılan çalışmalardan bir başkası ise kolesterolün temizlenmesidir. Kolesterol esterlerini damarlardan çıkarmak çok kolay değildir. Bunun sebebi esterlerin atardamar girişlerinde yağ asitlerine çok sıkı ve karmaşık bir şekilde bağlı olmasıdır. 5.75 μm dalgaboyu, kolesterol esterlerinin germe modudur. Tavşanlar üzerinde yapılan

araştırmada kolesterol esterleri, albüminler ve atardamar duvarları 5.75 μm ile ışınlanarak etkileri incelenmiştir. Bu incelemede albüminlerin ve atardamar duvarlarının hasar görmediği, sadece kolesterol esterlerinin ayrıldığı gözlenmiştir. Bu yöntemler için kullanılan lazerler genelde UV uyarıcılı, CO_2 lazerlerdir. Ancak bu lazerlerin kullanımı hem zahmetli hem de kolesterolün çıkarılması sırasında çevresindeki dokulara zarar vermektedir. SEL' in ayarlanabilir dalgaboyuna sahip olması ve ns mertebesinde kısa atmalara sahip olması ışınlama neticesinde, kolesterol esterlerinin yanında bulunan albüminlere ve atardamar duvarlarına hasar vermemektedir [35].



Şekil 3.13 5.75 μm SEL ile ışınlanmış kolesterol ve albümin

Şekil 3.13' de 5.75 μm Kō-SEL ile ışınlanmış kolesterol ve albümin görölmektedir [35]. Bu dalgaboyunda, kolesterol esterlerinde ayrılma gözlenirken albümin yapısında herhangi bir değişiklik olmadığını göstermektedir. Işınlamadan önce kolesterolün bulunduğu, ışınlamadan sonra kolesterolün kalmadığı spektrumdan görölmektedir. Şekil 3.14' da ise insan atardamarının soğurma spektrumu görölmektedir [35].



Şekil 3.14 İnsan atardamarının soğurma spektrumu

3.7.2.7 Serbest elektron lazerinin fotokimya uygulamaları

Spektrumun 3-90 µm dalgaboyu aralığı, kızılötesi bölgede kimyasal bağları titreşim bölgesine düşmektedir. Serbest elektron lazerleri fotokimya alanında genel olarak yoğun madde ve gaz-faz fiziği çalışmaları, değişik ortamlardaki moleküllerin titreşim dinamiklerinin incelenmesi, kütle spektroskopisi için iyon oluşturmak gibi birçok araştırma alanlarında kullanılmaktadır [36].

1) Kütle spektroskopisi

Kızılötesi çoklu foton iyonizasyonu, kütle spektroskopisinde (Kütle spektroskopisi, MS=Mass Spectrometry, molekülü parçalar ve molekülün ve parçaların kütlelerini ölçer.) spektrometreye girecek iyon sayılarını arttırmaktadır. Kızılötesi SEL ile molekülün ışınlanması molekülde iyonlaşmaya neden olur. Oluşan iyonlar yeni iyonlaşmalara neden olurken, bu iyonların da kızılötesi ışınımına maruz kalması bir süre sonra çoklu foton yayılımına neden olur. Bu iyonların kütle spektrometresi ile ölçümü yapılabilir ve molekülü oluşturan iyonlar hakkında bilgi elde edilir [37].

2) İnce film

Kö-SEL' in kullanıldığı diğer bir alan da ince filmlerdir. Polietilen glikol (PEG) ince film üretiminin temelinde, yüksek enerjili bir lazer demetinin bir hedef malzeme üzerine odaklanması ve kısa süreli atımlarla bu hedef yüzeyinden plazma oluşumuna olanak verecek kadar enerjiye sahip küçük patlamalar şeklinde malzeme kaldırılması yatmaktadır. Kızılötesi SEL ile ışınlanan hedef malzeme üzerinden kaldırılan bu malzemeler hedef karşısına yerleştirilmiş bir yüzeyde biriktirilir ve bu şekilde kaplanacak yüzeyde ince film üretimi yapılmış olur [38].

3) Si atomunun izotoplarına ayrılması

Kö-SEL ile yapılan başka bir çalışma da silisyum (Si) atomunun izotoplarına ayrılmasıdır. Silisyum izotopları, yeni elektronik cihazların gelişimi ile ilgili çalışmalara olanak sağlamaktadır [39].

4) *Yüzey titreşimlerinin incelenmesi*

SEL yüzeylerdeki titreşimlerin incelenmesinde sonda olarak kullanımı ile önemli ölçüde yarar sağlamaktadır. Bu çalışmalardan biri yüzeydeki titreşimsel durulma süreçlerinin ölçülmesidir. Yüzeylerdeki titreşimsel enerji durulması molekül yüzey işlemlerinde önemli rol oynamaktadır. Titreşimsel durulma direk olarak yüzey ve yüzeye tutunanlar arasındaki ilişkiyi yansıtır. Bu yüzden yüzeylerdeki titreşimsel dinamiklerin ölçülmesi deneyleri, yüzey fiziği ve yüzey kimyasını anlamada kullanılan deneylerdir. Titreşimsel durulma hızları ise yüzeylerdeki reaksiyonların mekanizması ve kinematığı hakkında bilgi vermektedir. Titreşimsel uyarılmaların derecesi moleküllerin kimyasal reaktifliğini etkilemektedir. Titreşimsel durulma hızı, lazer ile uyarılmış yüzey olayları ile ilişkilidir. Yoğun madde ve gaz fazındaki titreşimsel enerji durulmasının pikosaniye zaman skalasında olduğu bilinmektedir [40].

3.7.3 SEL' in malzeme ve nanoteknoloji uygulamaları

Yarıiletkenlerde ve süperiletkenlerde spektroskopik uygulamalarda SEL kullanılmaktadır. SEL'in ayarlanabilir dalgaboyunun yanında sahip olduğu yüksek pik gücü, klasik lazer kullanımının çok kolay olmadığı lineer olmayan spektroskopi çalışmalarına olanak sağlamaktadır. Bu çalışmalar malzemenin yapısını anlamaya ve farklı özelliklerin tahmininde kullanılan yeni modellere yarar sağlamaktadır.

Kö-SEL'in bu alanda kullanıldığı başka bir uygulama ise yarıiletkenlerde bant içi yük taşıyıcıların durulma zamanlarının araştırılmasıdır. Kö-SEL'in ayarlanabilir dalgaboyu, foto yayılım tekniğinin kullanıldığı yarıiletken ara yüzeylerinde bant süreksizliklerinin çalışılması için üstünlüktür. Bu teknikte SEL' den alınan ışınım bant süreksizliklerinin neden olduğu enerji engelini geçebilmek için elektronların pompalanmasında kullanılmaktadır [41].

SEL'in bu alandaki ilginç uygulamalarından bir diğeri ise fotoiletkenlik ve soğurma ölçümleri için kullanılan doğrusal bant-aralık yarıiletkenlerinin incelenmesidir. SEL ışınımı kullanılarak, ps zaman skalasında yapılan pompa-sonda ölçümleri ile dar bantlı yarıiletkenler üzerindeki eş fazlı geçiş etkilerinin artışının gözlenmesine izin

vermektedir. Ayrıca yine pompa-sonda tekniği ile elde edilen iki renkli SEL'in kuantum kuyularının optik pompalanması ile yapılan çalışmalar da bulunmaktadır.

Bir spektroskopik yöntem olan "Sum Frequency Generation" (SFG) Toplam frekans üretimi tekniği yüzeylerde katkılanmış olarak bulunan yabancı maddelerin analizinde kullanılır. SFG ölçümlerindeki ilk deneyler, 5 m dalgaboylu SEL atmaları ile metanol içerisine konan platinin (Pt) yüzeyinde meydana gelen olaylar incelenmektedir [42].

BÖLÜM IV

BULGULAR ve TARTIŞMA

THM’de iki optik oyuk arasında bulunan farklı periyotlardaki (2.5cm, 9cm) iki salındırııcılardan şekil 2.1’de görüldüğü gibi 2-185 mikron dalgaboyu aralığında Kö-SEL üretilmesi planlanmaktadır [44]. SEL’in üç şekilde üretildiği bölüm 3’te anlatıldığı gibidir.

Bu çalışmada Osilatör mod ve Yükselteç modun kıyaslanması amacıyla THM Kö-SEL’e ait elektron demeti ve salındırııcı parametreleri kullanılmıştır. Amaç düzeneğin üzerinde maliyeti yüksek değişiklikler yapmadan (salındırııcı değişimi gibi) osilatör moddaki düzeneğin yükselteç modda vereceği güç değerini hesaplamak ve elde edilecek güç değerinin ulaşabileceği en yüksek değerin tespitidir.

Bu çalışmada yükselteç SEL elde edilirken giriş gücü (P_i) 50 kW olan lazer kullanıldı. Bu modda SEL, salındırııcıya giren lazerin yüksek enerjili elektron demetinin enerjisini kullanarak uygun elektromanyetik radyasyona yükseltilmesi ile oluşturulur. Salındırııcıya giren lazer, salındırııcıya λ dalgaboyu ile girer ve yükseltilmenin olabilmesi için salındırııcı parametresi K ’nın uygun değeri seçilir [46].

Bu çalışmada SEL güç hesapları için SIMPLEX 1.3 kullanılmıştır. Salındırııcı tasarımı için ise Mathematica paket programı olan RADIA kullanılmıştır.

4.1 SIMPLEX Bulguları

4.1.1 Yükselteç modundaki Kö-SEL güç bulguları

Bu çalışmada SIMPLEX 1.3 simülasyon programı yardımıyla çizelge 4.1 ve çizelge 4.2’de görülen salındırııcı ve elektron demeti parametreleri THM Kö-SEL O modu ile aynıdır. Salındırııcıya giren lazer (P_i) olarak çizelge 4.2’de görülen uygun lazer değeri seçildi ve paketçik kısaltıcı (chicane) yardımıyla nominal değerinden yaklaşık 6 kat kısa alındı. 15-40 MeV enerji aralığında elektron demetleri kullanılarak her iki salındırııcı

için ortalama gücün salındırıcı uzunluğuna göre değişimi grafikleri gnuplot grafik programı yardımıyla çizildi.

Çizelge 4.1. THM Kö-SEL Elektron demeti parametreleri

Klystron (kW)	10	16
Demet enerjisi (MeV)	15-40	15-40
Paketçik yükü (pC)	80	120
Paketçik boyu* (ps)	0.10	0.17
Mikropaket boşluğu	77	77
Ortalama akım (mA)	1	1.6
Makro atma süresi	Sürekli Dalga ve ayarlanabilir	
RMS norm. enine emit.** (π mm mrad)	5	5
RMS norm. Boyuna emit. (keV ps)	<100	<100

* Chicane kullanılarak 6 kat azaltılmış paketçik uzunluğu değeri

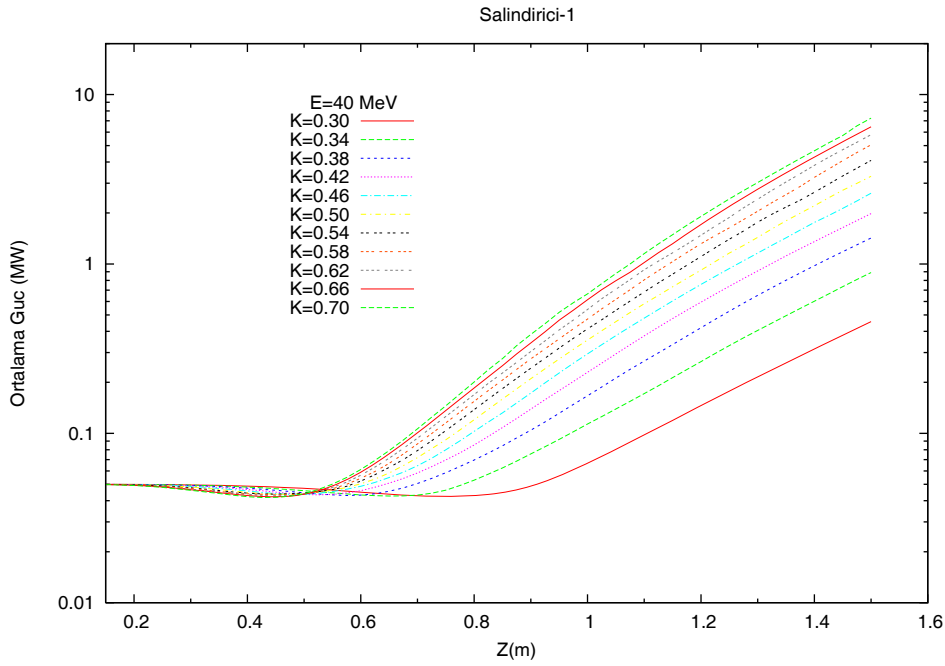
** Emitans 5 π mm mrad olarak sabit alınmıştır.

Çizelge 4.2 .THM Kö-SEL Salındırıcı (Yükselteç) parametreleri

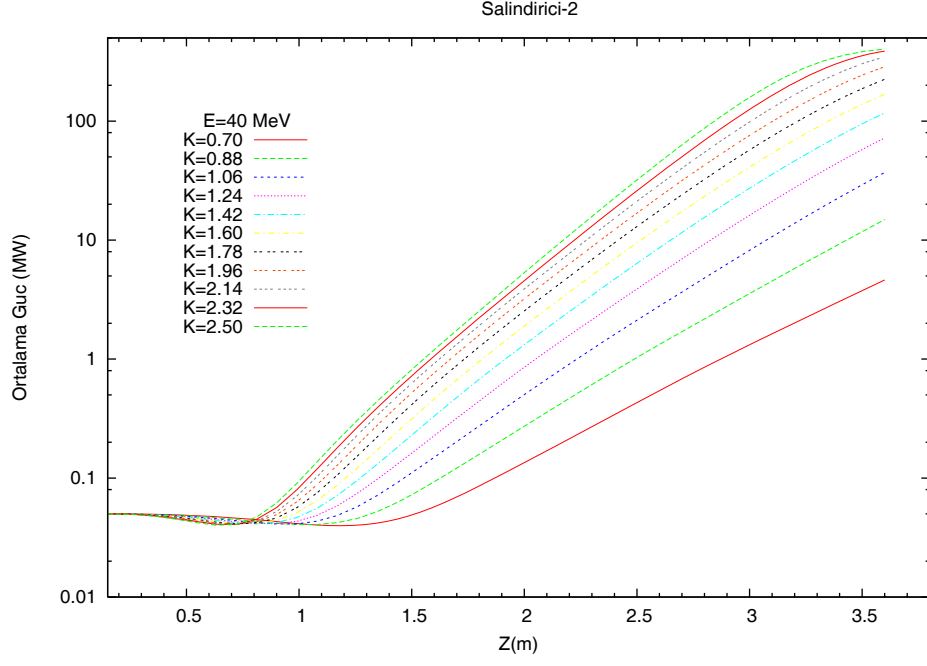
Salındırıcı (Yükselteç) parametreleri	S1	S2
Periyot (cm)	2.5	9
Salındırıcı kutup aralığı (cm)	1.6-3	5.5-9
Manyetik alan (T)	0.1-0.35	0.1-0.275
Salındırıcı parametresi (K)	0.3-0.7	0.7-2.5
Kutup sayısı (N)	56	40
SEL Parametreleri	SEL-1	SEL-2
Dalgaboyu aralığı (μ m)	2.6-27	10-185
Atma enerjisi(μ J) (80pC)	2	4
Atma enerjisi (μ J) (120pC)	4.2	55
ρ Parametresi	2.10^{-3}	$3.3.10^{-3}$
Bir ve Üç boyutta Kazanç uzunluğu L_G / L_G (m)	0.15/0.18	0.18/0.26
λ_{SEL} (μ m)	15	30
Salındırıcıya Giren Lazer Parametreleri		
Giriş gücü (kW)	50	50
Dalgaboyu λ_{in} (nm)	15	30
Rayleigh uzunluğu (cm)	50	50
Atma uzunluğu (cm)	0.03	0.03

15-40 MeV enerjili elektron demetleri kullanılarak elde edilen ortalama güç salındırıcı uzunluğu grafikleri her iki salındırıcı için aşağıdaki gibi elde edilmiştir. Şekil 4.1’ de K [0.3-0.7] aralığında değişirken Şekil 4.2’de K [0.7-2.5] aralığında değişken alındı. Şekil 4.1’den görüldüğü gibi 40 MeV enerjili elektron demeti S1’den geçerken $K=0.7$ için 8 MW güç değerine ulaşmaktadır.

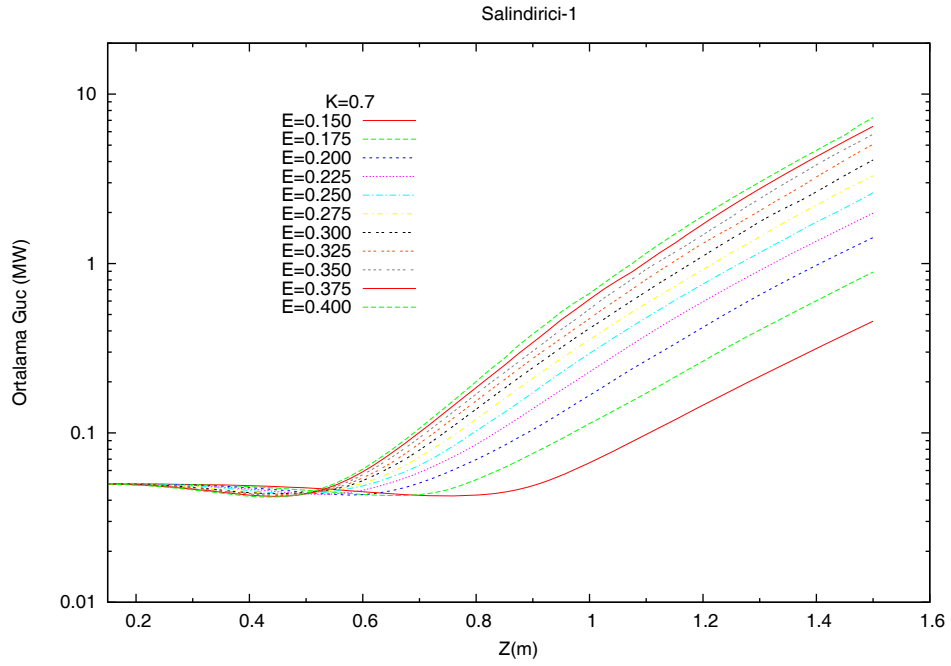
Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’den görüleceği gibi S1 için ortalama güç 1-20 MW arasında S2 için ise 0.2-25 MW arasında değişmektedir. Şekil 4.3’te birinci salındırıcı için 15-40 MeV aralığında K [0.7], şekil 4.4’te ise ikinci salındırıcı için K [2.5], değerleri sabit alınarak güç yoğunluğu (MeV)- Z (m) grafikleri çizilmiştir. Şekil 4.3 ve Şekil 4.4’den görüleceği gibi yüksek elektron demeti enerjisi S2 için 100 MW’ı aşan ve S1 için 10 MW güç değerlerine ulaşan SEL elde edilmesinde faydalı olmaktadır.



Şekil 4.1K [0.3-0.7], S1 Ortalama güç salındırıcı uzunluğu değişimi

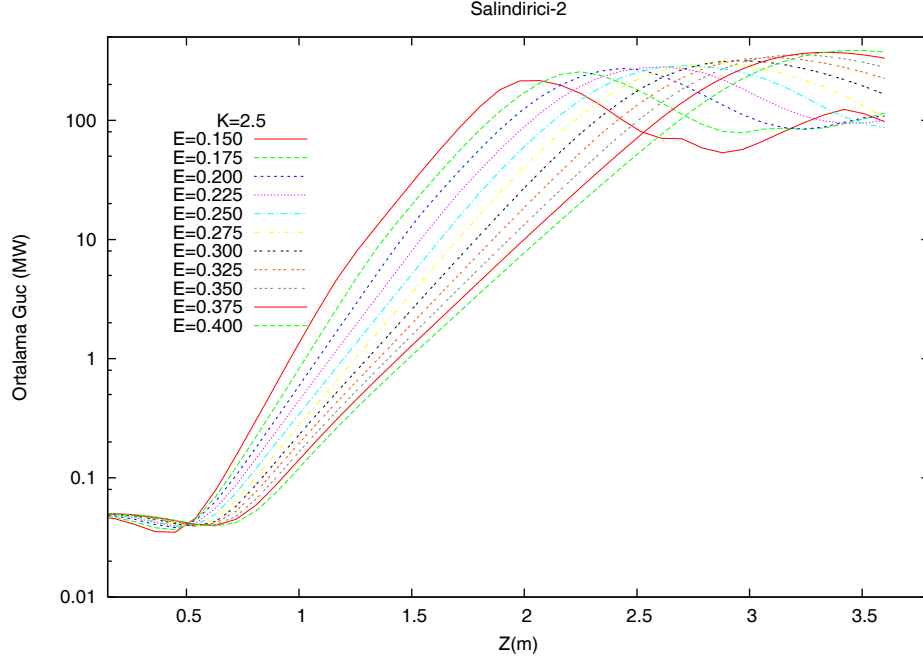


Şekil 4.2 K [0.7-2.5], S2 Ortalama güç salındırıcı uzunluğu değişimi



Şekil 4.3 S1, E [15-40 MeV] Ortalama güç salındırıcı uzunluğu değişimi

Şekil 4.1, 4.2, 4.3 ve 4.4’de verilen bulgular çizelge 4.3’te özetlendiği gibidir.



Şekil 4.4 S2, E [15-40 MeV] Ortalama güç salındırıcı uzunluğu değişimi

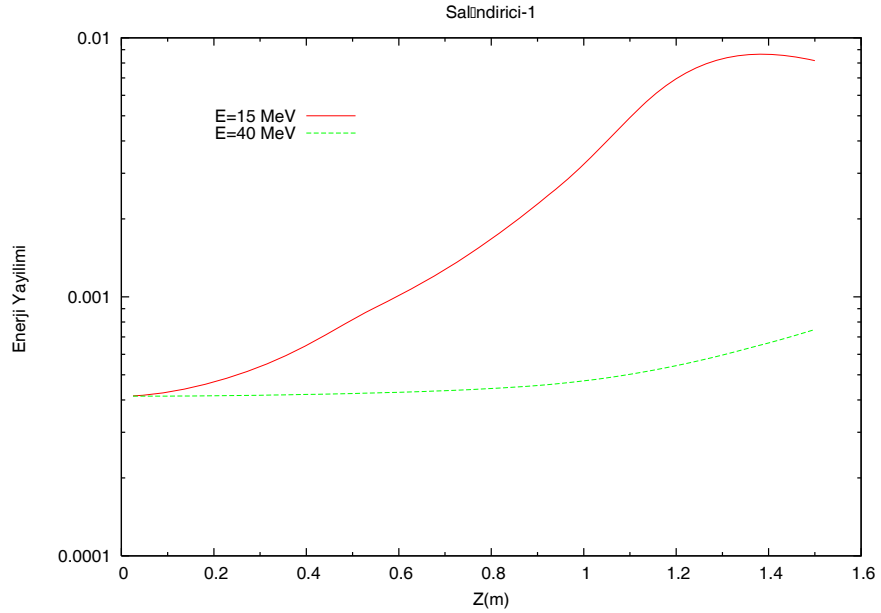
Çizelge 4.3 Salındırıcı 1 ve 2 için K ve E değerlerine göre çıkış güç değerleri

Salındırıcı 1	aralık K	aralık E
Z(m)	1.5	1.5
K	0.3-0.7	0.7
E(MeV)	15	15-40
P_i (KW)	50	50
$P_{çıkış}$ (MW)	0.7-32	0.5-36
ρ Parametresi	0.002	0.002
Salındırıcı 2	aralık K	aralık E
Z(m)	3.6	3.6
K	0.7-2.5	2.5
E(MeV)	40	15-40
$P_{giriş}$ (KW)	50	50
$P_{çıkış}$ (MW)	5-50	30-62
ρ Parametresi	0.033	0.033

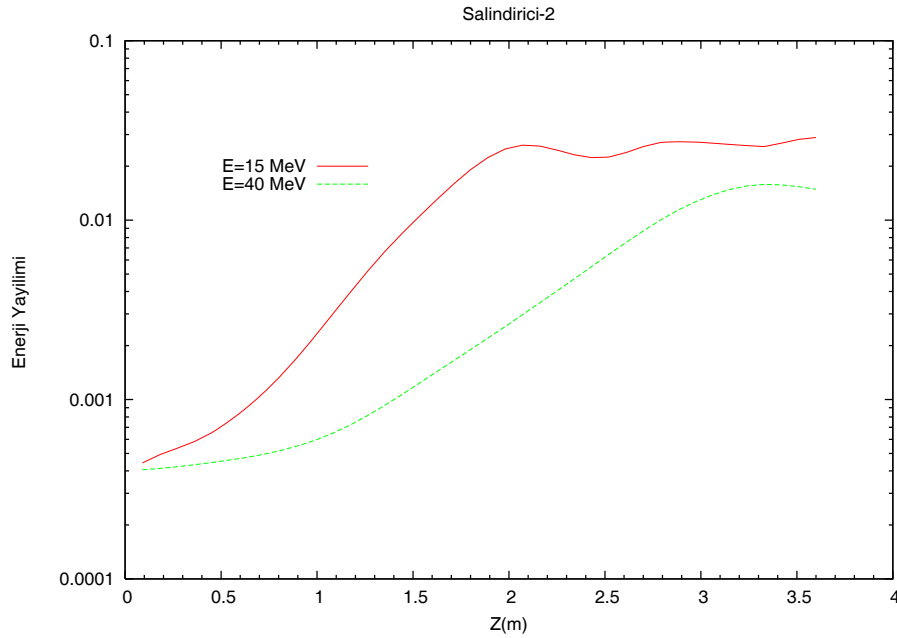
4.1.2 Enerji yayılım bulguları

Bir salındırıcıya gönderilen elektron demetlerindeki elektronların enerjisi azalır ve elektronların enerji yayılımı artar. İstenilmeyen yayılım artışını engellemek için paketleyici içerisinde paketleme işlemi kontrol etmek gerekmektedir. Paketleyici aynı zamanda demet enerji yayılımına katkıda bulunan en temel mekanizmadır ve tasarımı

SEL çalışmaları için hayati önem taşımaktadır. Pek çok linac bir ön paketleyici oyuk içerir ki bu, tabancadan çıkış enerjisini ve paketçiklenmeyi ayarlayarak kısa bir sürüklenme uzunluğunda demeti paketlenmeye hazırlar.



Şekil 4.5 S1, E [15, 40 MeV] enerji yayılımının salındırıcı boyunca değişimi



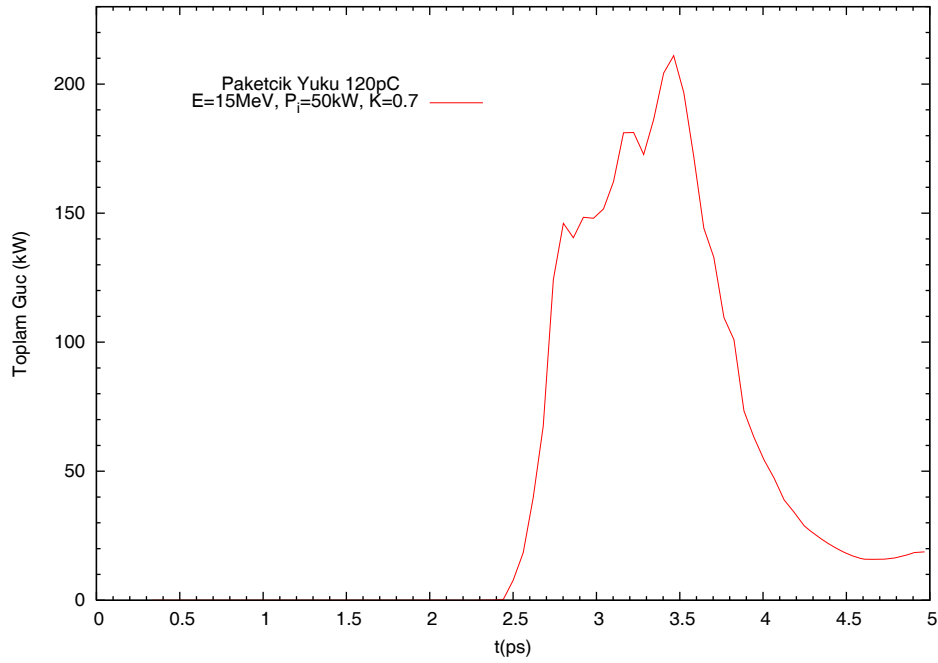
Şekil 4.6 S2, E [15, 40 MeV] enerji yayılımının salındırıcı boyunca değişimi

Birinci salındırıcıda 15MeV ve 40MeV enerjili elektron demetlerinin enerji yayılımının salındırıcı boyuyla değişimi Şekil 4.5'te görüldüğü gibidir. Şekil 4.6 ikinci salındırıcıda 15MeV ve 40MeV elektron demetlerinin enerji yayılımı salındırıcı uzunluğu grafikleri

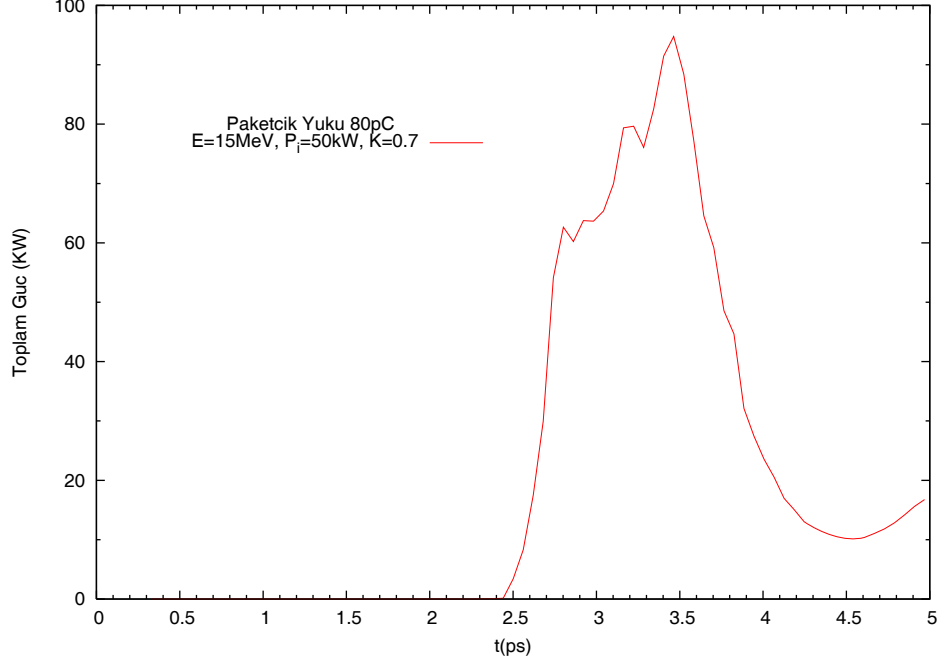
görülmektedir. Şekillerden görüldüğü gibi enerji yayılımı salındırıcı sonuna doğru giderek artmaktadır ve bu artış düşük elektron demeti enerjilerinde daha fazla olmaktadır.

4.1.3 SEL'in zaman yapısı bulguları

Lazer ışımalarının kalite ve kullanılabilirliği sadece yoğunluğuna ve mevcut dalga boyu aralığına değil aynı zamanda zaman yapısına da bağlıdır. En kısa zaman aralığı bir elektron paketçisinden üretilen bir mikro atma uzunluğudur. Bu doğrudan önemli bir büyüklük olan, ışımının bant genişliği ile belirlenir.



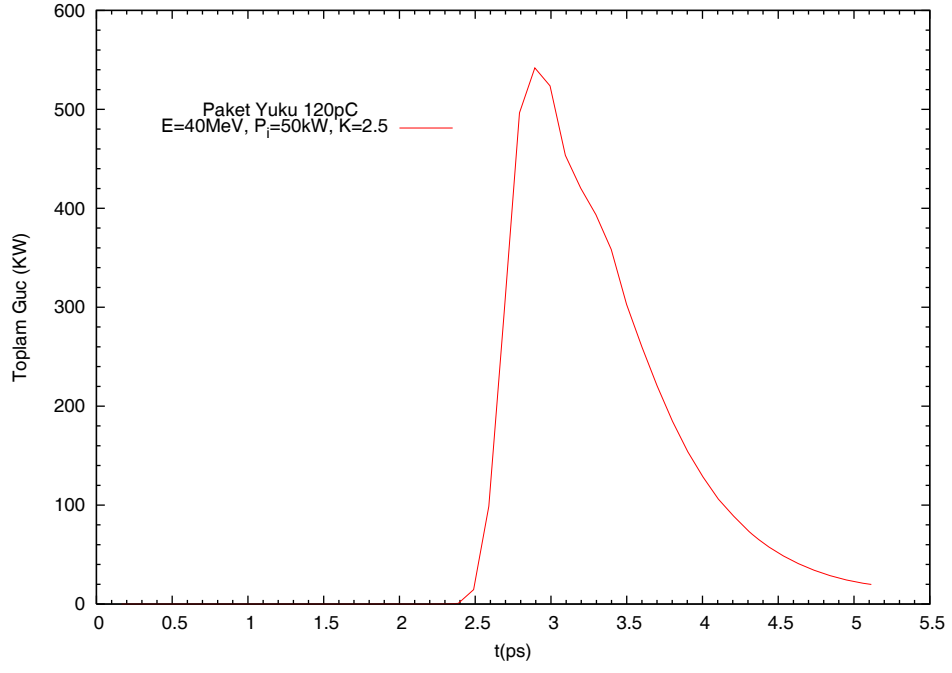
Şekil 4.7 Birinci salındırıcı toplam güç zaman yapısı (I=120 pC)



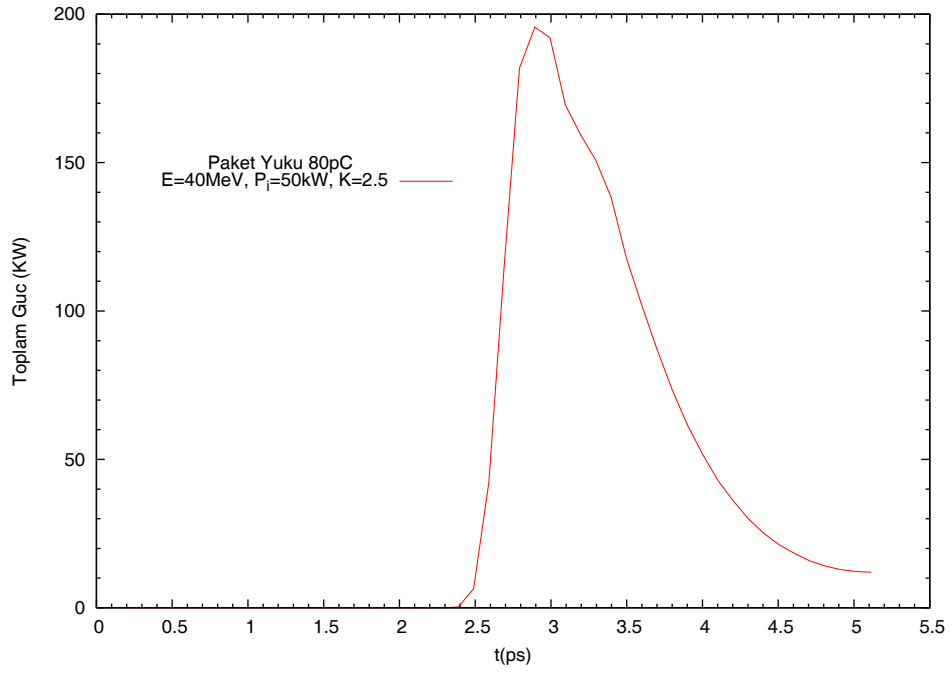
Şekil 4.8 Birinci salındırıcı toplam güç zaman yapısı (I=80 pC)

Şekil 4.7 ve şekil 4.8’de $P_i = 50$ KW iken Güç(KW)-Zaman(ps) grafikleri çizilmiştir. Her iki şekilde, birinci salındırıcıya ait olup farklı paketçik yükleri durumu incelenmiştir. Paket yükü arttıkça şekil 4.8’de görüldüğü gibi elde edilen Kö-SEL daha yüksek çıkış gücüne sahiptir.

Şekil 4.9 ve şekil 4.10’da ise ikinci salındırıcı için de paket yükü arttıkça Kö-SEL’in çıkış gücünde artış olduğu gözlenmiştir. Burada salındırıcı uzunluğu da arttıkça Kö-SEL’in çıkış gücü artmakta olduğu şekil 4.7, şekil 4.8, şekil 4.9 ve şekil 4.10’da görülmektedir. Şekil 4.7, 4.8, 4.9.ve 4.10 salındırıcıların (S1, S2) çıkışındaki toplam gücün zaman yapısını göstermektedir. Burada FWHM (Full Width Half Maximum) yarı maximum genişliğidir. Şekillerden yarı maximum genişlikleri 0.3mm olarak ölçülmüştür.



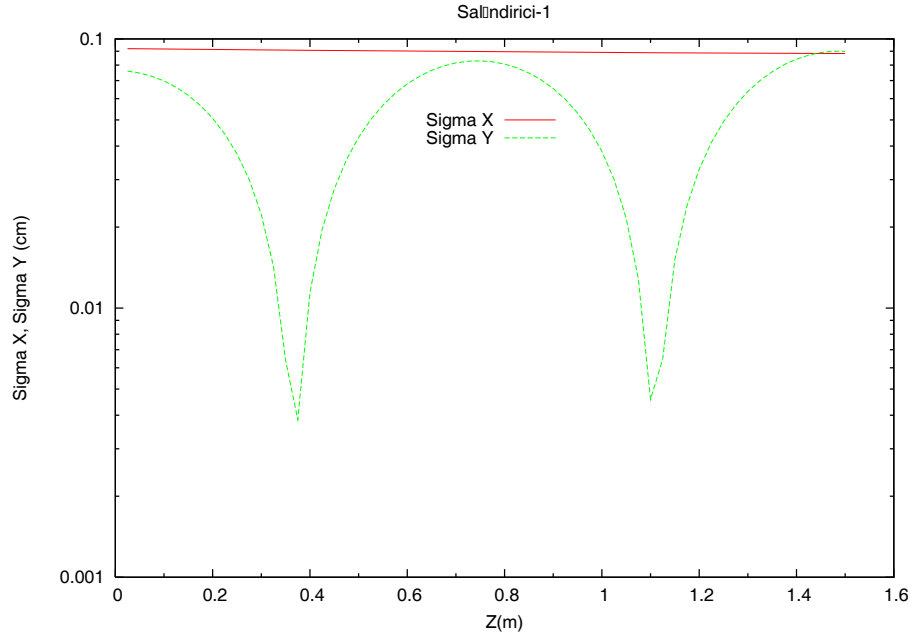
Şekil 4.9 İkinci salıncı toplam güç zaman yapısı ($I=120pC$)



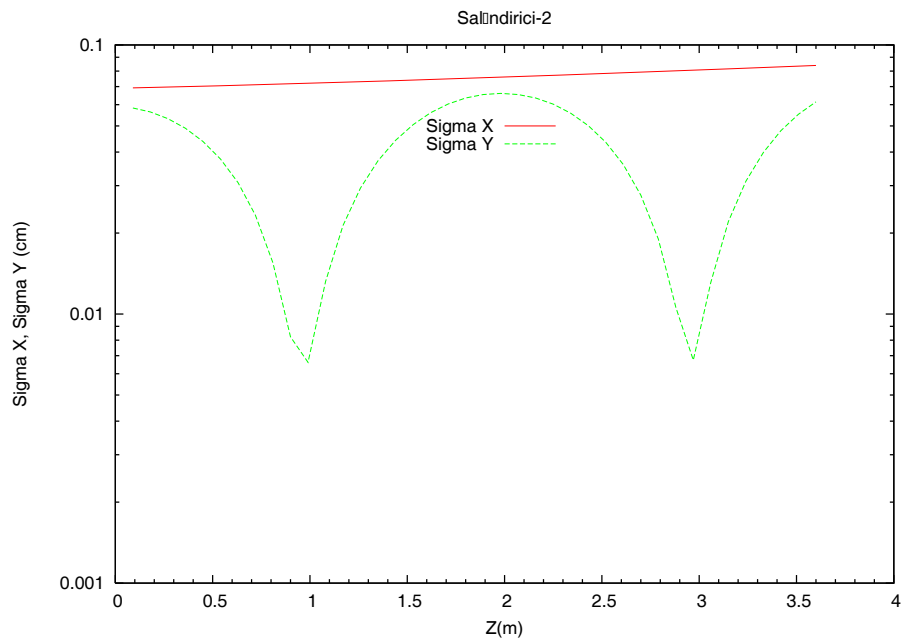
Şekil 4.10 İkinci salıncı toplam güç zaman yapısı ($I=80 pC$)

4.4 Salındırıcı içersindeki elektron demeti bulguları

Salındırıcı içersindeki elektron demetinin enine ebatlarının değışimi Şekil 4.11 ve 4.12 de görüldüğü gibidir. Şekillerden görüldüğü gibi y ekseninde demet ebadı salınma sahiptir.



Şekil 4.11 S1, Enine demet abatları (σ_x , σ_y)'nin salındırıcı uzunluğuna göre değışimi

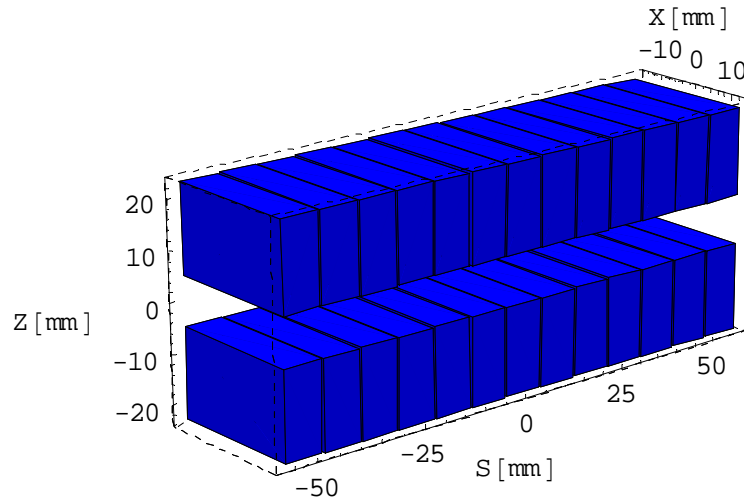


Şekil 4.12 S2, Enine demet abatları (σ_x , σ_y)'nin salındırıcı uzunluğuna göre değışimi

4.2 RADIA Buluları

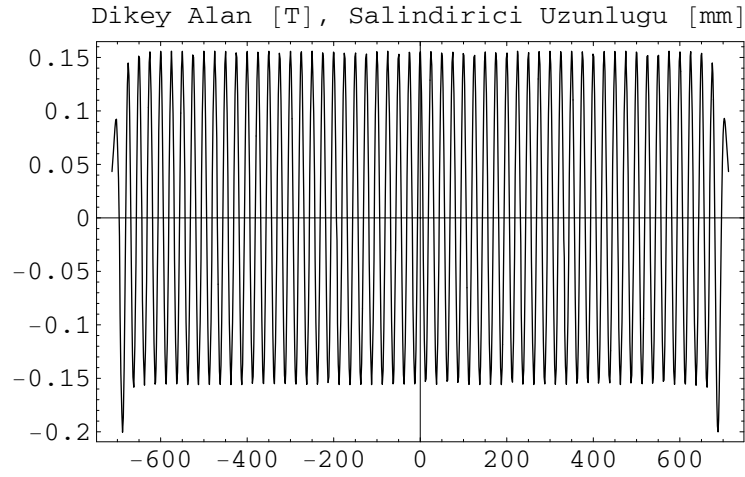
4.2.1 Salındırıcı tasarımı

RADIA programı kullanılarak THM Kö-SEL için kullanılması planlanan salındırıcı tasarlanmıştır. Mavi levhalar mıknatıs kutuplarını göstermektedir. Bu çalışmada birinci ve ikinci salındırıcı yerine salındırıcı şeklini daha net görmek için şekil 4.13’ de görüldüğü gibi salındırıcının bir kesiti çizildi. Aşağıdaki veriler gerçek boyuttaki THM salındırıcıları için hesaplandı.

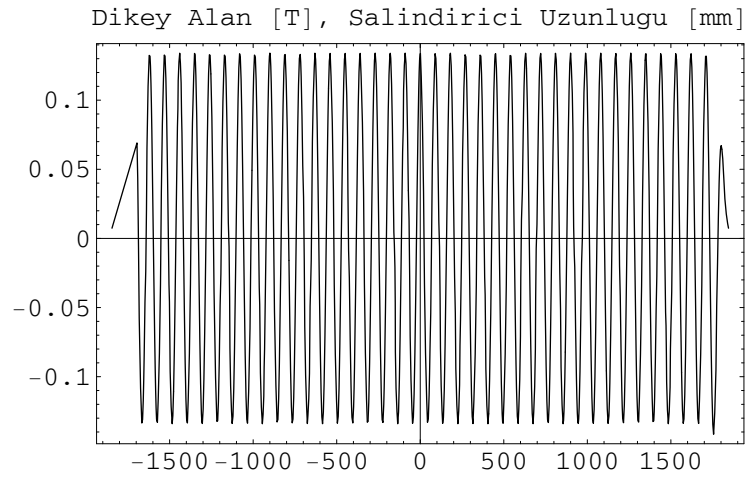


Şekil 4.13 Salındırıcı kesiti

RADIA programı kullanılarak oluşturulan dikey manyetik alan salındırıcı uzunluğu grafiği birinci ve ikinci salındırıcı için iki boyutta şekil 4.14 ve şekil 4.15’de görüldüğü gibidir.



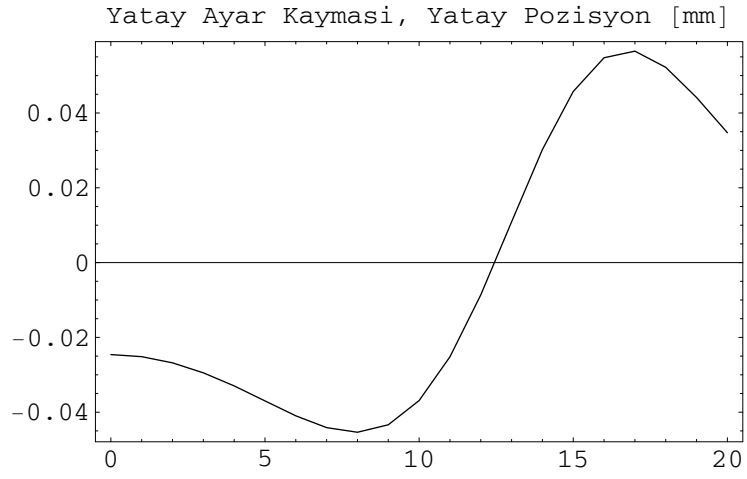
Şekil 4.14 S1, Manyetik alan (B_y) salindirici uzunluğuna göre değişimi



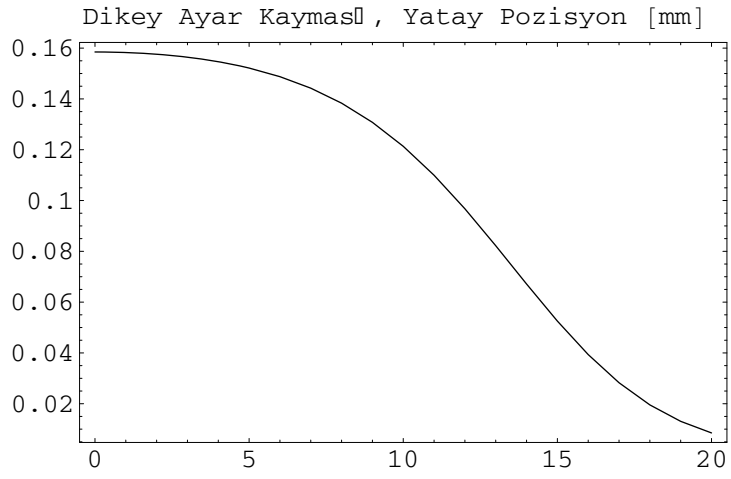
Şekil 4.15 S2, Manyetik alan (B_y) salindirici uzunluğuna göre değişimi

4.2.2 Ayar kayması bulguları

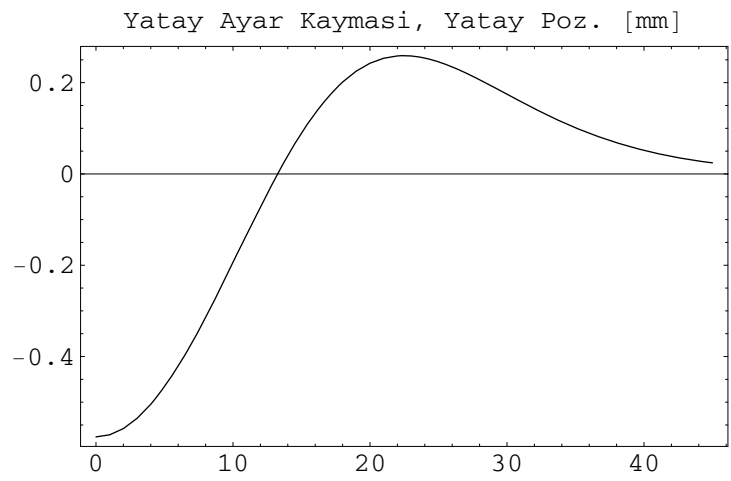
Elektronlar salindiriciyi geçerken salindirici periyodu başına bir ışına dalgaboyu oluştururlar. Bu şekilde oluşan toplam kayma $N\lambda$ dır. Elektron paketçığının uzunluğu kayma uzunluğuna yakın büyüklükteyse bu durumda optik atma daha kısa olan elektron paketçığinden daha baskın gelir ve etkileşme süresi azalır. Bu sebeple seçilen elektron paketçığının boyu kayma uzunluğundan büyük olmalıdır. Aşağıda birinci ve ikinci salindiricilere ait yatay ve dikey ayar kaymaları RADIA mathematica paket programı yardımıyla hesaplanıp yatay ve dikey kaymalar için grafikler çizdirilmiştir. S1 için yatay ayar kayması yatay pozisyon değişim aralığı [0.045,-0.045mm] iken dikey ayar kayması [0-16mm] olarak hesaplandı. İkinci salindiricida yatay ayar kayması [0-0.2mm] aralığında dikey ayar kaymasının ise [0-0.4mm] olduğu görülür.



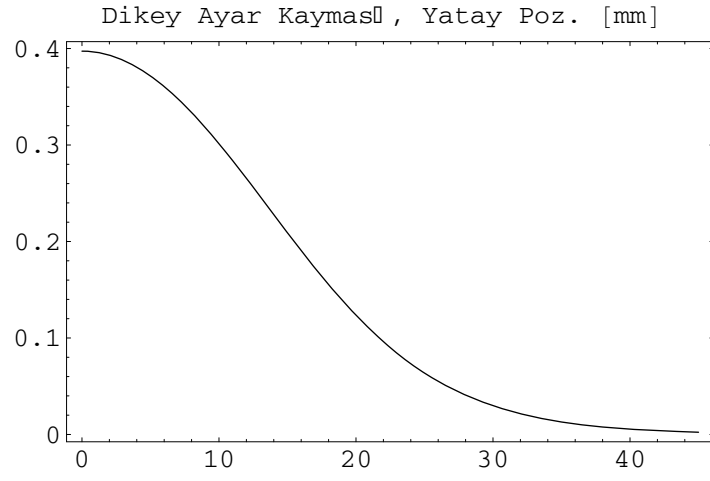
Şekil 4.16 S1, Yatay ayar kayması



Şekil 4.17 S1, Dikey ayar kayması



Şekil.4.18 S2, Yatay ayar kayması



Şekil 4.19 S2, Dikey ayar kayması

BÖLÜM V

SONUÇ

Serbest elektron lazerleri, serbest elektronlardan doğrudan fotonların üretildiği bir kazançtan oluşmaktadır. Burada kazanç oluşturmak için; değişik tip hızlandırıcılardan elde edilen elektron demetleri ve bu demetlerle birlikte salındırıcıya girecek lazer kullanılmaktadır. Elektron hızlandırıcıları günümüzde çok küçük yayılım değerlerine sahip kaliteli elektron demetleri sağlayabilmektedirler. SEL'in kalitesi elektron demetinin kalitesi ve hızlandırıcı tasarımının detayları ve salındırıcıya girecek lazer ile çok yakından ilişkilidir. SEL'in ana kalite göstergesi doğrudan hızlandırıcıdan alınan demetin parlaklığına dayanmaktadır.

Yükselteç modda SEL'in güç değerinin, THM Kö-SEL Osilatör mod parametreleri kullanılarak elde edilecek güç değeri ile aynı mertebede olabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Yükselteç mod optik oyuğa ihtiyaç duymadığından yapımı ve işletimi osilatör moda göre daha kolay olmaktadır. Maliyet olarak Osilatör moddan daha ucuz olması beklenmektedir.

Bu modun dezavantajı giriş dalgaboyu ile aynı dalgaboyuna sahip SEL üreteceğinden farklı dalgaboyları için farklı giriş lazeri kullanılmalıdır. Şu da unutulmamalıdır ki zengin uygulamaya yönelik alanları osilatörlü serbest elektron lazerinin kullanımında avantaj sağlar ve dünyadaki birçok lazer laboratuvarında osilatör moddan lazer elde edilmektedir. Her iki salındırıcıda (S1, S2) eşit güç değerine sahip salındırıcıya giriş lazeri kullanılması durumunda salındırıcı uzunluğu büyük olan salındırıcıda SEL'in daha yüksek güç değerine ulaştığı hesaplamalarımız sonucunda gözlemlenmiştir. Salındırıcı kuvvet parametresi K değeri arttıkça SEL'in gücünde artmıştır. SIMPLEX 1.3 simülasyon programı kullanılarak Sınırlı uzunluktaki salındırıcılarda yüksek güç ve parlaklık değerine sahip SEL elde etmek için uygun güçte salındırıcıya girecek lazer kullanılmalıdır. SEL'in doyumluğa ulaşması için çok periyotlu uzun salındırıcı kullanılması veya yüksek çıkış gücü verilmesiyle mümkün olabilir.

Çalışmada öncelikle; 15-40 MeV enerji aralığındaki elektron demetleri için salındırıcı ve salındırıcıya girecek lazerin özellikleri belirlenmiştir. Yükselteç SEL’inde; elde edilecek olan ışınımın enerjisi, gücü, zaman yapısı, manyetik alan, enerji yayını, ayar kayması gibi fiziksel özellikleri için gerekli grafikler çizilmiştir. Düşük enerji yayını ve yüksek pik akımı, yüksek kazanç elde edebilmek için çok büyük öneme sahiptir. Paketçik uzunluğu SEL kazancını olası en büyük değerine ulaştırmak için kayma etkisini oluşturmayacak şekilde olabildiğince uygun uzunlukta olmalıdır.

Bir salındırıcı mıknatıs tasarımında malzemenin seçimine, kalıcı, hibrid ya da elektromıknatıs olup olmadığına karar verilmesi gerekmektedir. Kısa periyodlara veya yüksek manyetik alanlara sahip salındırıcı mıknatıslara gerek duyulduğunda kalıcı mıknatıs tiplerini kullanmak elektromıknatıslara göre daha çok tercih edilmektedir. Bu çalışmada tasarımda Sm_2Co_{17} malzemedan yapılmış bir düzlem salındırıcı mıknatıs kullanılmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] Altın, V., Hızlandırıcılar, <http://www.biltek.tubitak.gov.tr/bdergi/yeniufuk/index.htm>, 14 Haziran 2009.
- [2] Sultansoy, S., Parçacık hızlandırıcıları: Türkiye’de Neler Yapılmalı, Proje No: DPT-97K-120420, Proje sonuç raporu, 2000.
- [3] Altınpınar, S., GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH, Kişisel görüşme, 2009.
- [4] SIMPLEX, X-ray FEL Practical Simulator, http://radiant.harima.riken.go.jp/cgi-bin/download_simplex.cgi, 2009.
- [5] Ozansoy, A., IR SEL Elektron Kaynağı, III.YUUP Çalıştayı, Ankara, 2007.
- [6] Yiğit S., Serbest Elektron Lazeri Parametrelerinin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta 2009.
- [7] Wille, K., The Physics of Particle Accelerators, Oxford University Press, 2004.
- [8] Wiedeman, H., Synchrotron Radiation, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 274, 2003.
- [9] Lapotolle, P. M., Septier, A.L., Linear Acceleration., North Holland Publishing Company, Amsterdam, 1970.
- [10] Wangler, T.P., Principles of RF Linear Acceleration., New York 1998.
- [11] Dattoli, G, Ciocci, F., Torre, A. and Renieri, A., World Scientific, London ISBN 98102 38329-358, 2000.
- [12] Halbach, K., Variable-Wiggler Free-Electron-Laser Oscillation, C1 44, 211, Paris, 1983.
- [13] Colson, W.B., Energy Transfer in Constant Period Free Electron Laser, Spacem Physics Department, Rice University, USA, 1980.
- [14] Duke, P.J., Synchrotron Radiation, Oxford Science Publications, 2000.
- [15] Lee S. Y., Accelerators Physics, Second Edition, World Scientific, 2004.
- [16] Hahn, U., Hesse, M., Remde, H. and Zapfe, K., Vacuum 73, 231, DESY, Hamburg, 2004.
- [17] Jacob, J., New Developments On Rf Power Sources, Grenoble, France, Proceedings of EPAC, Edinburgh, Scotland, 2006.
- [18] Darmstadt S-DALINAC IR-FEL Darmstadt <http://www.ikp.physik.tu-darmstadt.de/richter/fel/>, 2009.

- [19] Tural, M., Yüksek Lisans Tezi, Kırmızıaltı Serbest Elektron Lazerleri, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara 2008.
- [20] Yavaş, Ö., Yiğit Ş., SASE X-SEL Fiziği, Projeler ve Uygulama Alanları, Türk hızlandırıcı merkezi, <http://thm.ankara.edu.tr>, 2009.
- [21] THM Hakkında Genel Bilgi, Türk hızlandırıcı merkezi, <http://thm.ankara.edu.tr>, 2009.
- [22] Aksakal, H., 2 x 250 GeV CLIC $\gamma\gamma$ Collider Based on it's Drive Beam FEL, arXiv:0704.2583v1, 2007.
- [23] Kulipanov, G., et al, , Observation of Self-Amplified Spontaneous Emission in the Mid-Infrared in a Free Electron Laser, NIM-A, 1990.
- [24] Wideman, H., Particle Accelerator Physics, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.
- [25] Aksakal, H., CLIC-LHC'ye dayalı gama proton çarpıştırıcısının incelenmesi, Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara 2007.
- [26] Dattoli, G. and Ottaviani, P. L. Semi-analytical models of free electron laser saturation. Optics Communications, 204, 283-297, 2004.
- [27] Sultansoy, S., Parçacık hızlandırıcıları: Türkiye'de Neler Yapılmalı, Proje No: DPT-97K-120420, Proje sonuç raporu, 2000.
- [28] Minehara, E.J. Nishimura, A. and Tsukada, T. Preparation Femtosecond Laser Prevention For The Cold-Worked Stress Corrosion Crackings On Reactor Grade Low Carbon Stainless Steel. Proceedings of the FEL Conference, 2004.
- [29] Ayvazyan, V. Generation of GW radiation pulses from a VUV FEL operating in the femtosecond regime. Physical Review Letters Volume 88, Number 10, 2002.
- [30] Mackanos, M.A., Simanovski, D., Joos, K., Schwettman, H. And Janseb, H. Mid infrared optical parametric (OPO) as a viable alternative to tissue ablation with the free electron laser. Lasers in Surgery and medicine 39.230, 2007.
- [31] University Vanderbilt, <http://www.vanderbilt.edu/fel/>, 2009.
- [32] Edwards, G.S., Austin, R.H., Carrol, F. and Copeland, M.L. Free electron laser based biophysical and biomedical instrumentation. Review of Scientific Instruments, Volume 74,7, 3207, 2003.
- [33] Junbiao, Z. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 475 (2001) 630, 2004.
- [34] Satoh, S. 2004. Modification of Hydroxyapatite Crystal Using IR Laser. Proceedings of the FEL Conference, 695-698, 2004.

- [35] Awazu, K., Asakawa, M. and Horiike, H. Status Report and Biomedical Applications of the Institute of FEL, Osaka University. Nucl. Instr. and Meth. in Physics Research. A 507, 547, 2003.
- [36] Cuisset, A., Broquier, M., Crépin, C. and Dubost, H. Vibrational Dynamic In Van Der Waals Solids Probed By Photon Echo Experiments With The Clio Fel. Physics Review Letters, 85, 964, 2000.
- [37] Redlich, B. Vibrational spectroscopy of isolated clusters in the gas phase using the free electron laser. Spectroscopy and Material Properties MC5-38, 2005.
- [38] Bubb, M., Horwitz, J.S., Callahan, J.H., McGill, R.A., Houser, E.J. and Chrisey, D.B. Resonant IR pulsed-laser deposition of polymer films using free electron laser. J. Vac. Sci. Technol. A 19 (5), 2001.
- [39] Chernyshev, A.V. Status of FEL-SUT Project, and the experimental setup for multiphoton dissociation and isotope separation in the gaseous phase. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. A470 76 ,2001.
- [40] Tro, N. J. Infrared free electron laser as a probe of vibrational dynamics on surfaces. J. Opt. Soc. Am. B, Vol. 6, 1989.
- [41] Stehr, D. Relaxation dynamics of interminiband Transitions and electron cooling in doped GaAs/AlGaAs süperlattices. 28th International Conference on the Physics of Semiconductors, 2007.
- [42] Vidal, F. and Tadjeddine, A. Sum-frequency generation spectroscopy of interfaces. Rep. Prog. Phys. 68 1095, 2005.
- [43] Yavaş Ö., 4. Nesil Işınım Kaynağı Olarak Serbest Elektron Lazeri, UPHUK I TEAK, Ankara, 2001.
- [44] Aksoy A., Karşlı Ö., Yavaş Ö., The Turkish accelerator complex IR FEL Project, Infrared Physics & Technology 51 378, 2008.
- [45] Duran Yıldız H., THM IR SEL Optik Kavite Yapısı, V. YUUP Çalıştay, 5-7 Yıldız Teknik Üniversitesi, Beşiktaş, İstanbul, Haziran 2008.
- [46] Aksakal H., Kocaöz Ü., THM Kızılötesi SEL Yükselteç Modunun Fizibilite Çalışması, SDÜ Fen Dergisi (E-Dergi) 165-170, 2009.
- [47] Simplex program, http://radiant.harima.riken.go.jp/cgi-bin/download_simplex.cgi, 2009.
- [48] RADIA Version: 4.098, <http://www.esrf.eu/Accelerators/Groups/InsertionDevices/Software/Radia>

EKLER

EK-1 SIMPLEX Girdi Dosyaları

a) Birinci salındırıcı girdi parametreleri

```
[ACCELERATOR]
E_GeV 0.04
BunchQ_nC 0.12
BunchL_m 4e-05
cpeakcurrA 2000
Emittancex_pi_mm_mrad 5
Emittancey_pi_mm_mrad 5
E_spread 0.0005
betax_m 7.3
betay_m 7.4
bunchtype 1
```

```
[SOURCE]
Ky 2.5
lambda_u_cm 9
L1seg 3.6
Lintseg 3.6
cutoff 1
segments 1
funit 0
zunit 0
initialize 0
seed 1
pdec 0
keamp 0
ptype -1
resistivity 1.68e-08
enable_wake 1
enable_resist 0
enable_roughness 0
enable_synchro 0
enable_addition 0
aperture 0.0035
rough_height 1e-06
rough_length 5e-05
synchro_diel 2
synchro_thickness 1e-07
wakeplotrange 0.00015
wakeplotmesh 201
wakesave 0
```

```
[INPUTFIELD]
rayl 0.5
power 50000
lambda 0
waist_pos 0
```

```
[CALCULATION]
seed 1
```

step 1
slicestep 1
timedep 0
dimension 1
divisions 4
electrons 100
boxes 10
bunchtail -0.000075
shots 1
interval 1
slicestart 1
slicefin 10
sliceinterval 1
parinterval 1
xyrange 5
xymesh 41
edump 0
fdump 1
bendonly 0
kick 0
initialize 0
smoothing 0
startstep 1

[FOCUSING]

type 0
focusg 30
defocusg 0
length 0.01
length2 0.01
interval 2.35
periodlen 4.7
start 4.6
periods 4
betaxini 7.58
betayini 6.59
betaxav 10
betayav 0
betaratio 1
optimgradient 1
optmethod 0
alphaxini -0.33
alphayini 0.28
minpos 0

[FOCUSINGDATA]

components 0

[MAGDATA]

files 5
0
0
0
0
0

[USERINPUT]

electronbeam 0
undulator 1

[BEAMOFFSET]

ebdxini 0
ebdyini 0
ebdxdini 0
ebdydini 0
pbdxini 0
pbdyini 0
pbdxdini 0
pbdydini 0

[TRAJECTORYSPEC]

zstart 0
dz 4.5
dx 0
dy 0
Lst 0.01
proctype 1
seedtrace 1
serinit 1
serfin 10
points 0

[STEERINGDATA]

components 4
4.6 0.01 0 0
9.3 0.01 0 0
14 0.01 0 0
18.7 0.01 0 0

b) İkinci salındırıcı girdi parametreleri

[ACCELERATOR]

E_GeV 0.015
BunchQ_nC 0.12
BunchL_m 3e-05
cpeakcurrA 2000
Emittancex_pi_mm_mrad 5
Emittancey_pi_mm_mrad 5
E_spread 0.0005
betax_m 75
betay_m 75
bunchtype 1

[SOURCE]

Ky 0.3
lambda_u_cm 2.5
L1seg 1.5
Lintseg 1.5
cutoff 1
segments 1
funit 0
zunit 0
initialize 1
seed 1
pdec 0
keamp 0
ptype -1
resistivity 1.68e-08

enable_wake 0
enable_resist 0
enable_roughness 0
enable_synchro 0
enable_addition 0
aperture 0.0035
rough_height 1e-06
rough_length 5e-05
synchro_diel 2
synchro_thickness 1e-07
wakeplotrange 0.00015
wakeplotmesh 201
wakesave 0

[INPUTFIELD]

rayl 0.9608
power 50000
lambda 0
waist_pos 0

[CALCULATION]

seed 1
step 1
slicestep 1
timedep 1
dimension 1
divisions 4
electrons 100
boxes 10
bunchtail -0.000075
shots 1
interval 1
slicestart 1
slicefin 10
sliceinterval 1
parinterval 1
xyrange 5
xymesh 41
edump 0
fdump 1
bendonly 0
kick 0
initialize 0
smoothing 0
startstep 1

[FOCUSING]

type 0
focusg 30
defocusg 0
length 0.01
length2 0.01
interval 2.35
periodlen 4.7
start 4.6
periods 4
betaxini 7.58
betayini 6.59
betaxav 10
betayav 0

betaratio 1
optimgradient 1
optmethod 0
alphaxini 0.33
alphayini -0.28
minpos 0

[FOCUSINGDATA]
components 0

[MAGDATA]
files 5
0
0
0
0

[USERINPUT]
electronbeam 0
undulator 0

[BEAMOFFSET]
ebdxini 0
ebdyini 0
ebdxdini 0
ebdydini 0
pbdxini 0
pbdyini 0
pbdxdini 0
pbdydini 0

[TRAJECTORYSPEC]
zstart 0
dz 4.5
dx 0
dy 0
Lst 0.01
proctype 1
seedtrace 1
serinit 1
serfin 10
points 0

[STEERINGDATA]
components 4
4.6 0.01 0 0
9.3 0.01 0 0
14 0.01 0 0
18.7 0.01 0 0

EK-2 Radia Girdi Dosyaları

a) Radia birinci salındırıcı girdi parametreleri

```
<<Radia`;
<<Graphics`MultipleListPlot`;
Off[General::"spell1"];
SetOptions[Plot,PlotRangeAll,FrameTrue];
SetOptions[ListPlot,PlotRangeAll,FrameTrue,PlotJoinedTrue];
SetOptions[MultipleListPlot,PlotRange All,Frame True,PlotJoinedTrue];

(* Set the default Directory for creation of files *)
$NotebookDirectory=ToFileName@First["FileName"/.NotebookInformation[EvaluationNotebook[]]];
SetDirectory[$NotebookDirectory];
hyb[p_,per_,gap_,nper_,gapoffset_,{lp_,np_,matp_,cp_},{lm_,nm_,matm_,cm_},{lms_,nms_,matms_,cms_}]:=Module[{Grp,zer,yy,initm,i,in},
zer={0,0,0};in=-1;
Grp=radObjCnt[{}];
yy=lp[[2]]/4;
RadObjFullMag[p+{lp[[1]]/4,yy,-lp[[3]]/2-gap/2},{lp[[1]]/2,lp[[2]]/2,lp[[3]]},zer,np,Grp,matp,cp];
yys=yy+(lms[[2]]-lp[[2]])/4;
RadObjFullMag[p+{lp[[1]]/2+lms[[1]]/2,yys,-lms[[3]]/2-gap/2-
gapoffset},{lms[[1]],lms[[2]]/2,lms[[3]]},{in,0,0},nms,Grp,matms,cms];
yy+=lp[[2]]/4;
For[i=1,i<=nper,i++,(initm={0,Mod[i+1,2]-Mod[i,2],0};
yy+=lm[[2]]/2;
RadObjFullMag[p+{lm[[1]]/4,yy,-lm[[3]]/2-gap/2-
gapoffset},{lm[[1]]/2,lm[[2]],lm[[3]]},initm,nm,Grp,matm,cm];
yy+=(lm[[2]]+lp[[2]])/2;
RadObjFullMag[p+{lp[[1]]/4,yy,-lp[[3]]/2-gap/2},{lp[[1]]/2,lp[[2]],lp[[3]]},zer,np,Grp,matp,cp];
in*=-1;
RadObjFullMag[p+{lp[[1]]/2+lms[[1]]/2,yy,-lms[[3]]/2-gap/2-
gapoffset},{lms[[1]],lms[[2]],lms[[3]]},{in,0,0},nms,Grp,matms,cms];
yy+=lp[[2]]/2;);
initm={0,Mod[nper,2]-Mod[nper+1,2],0};
yy+=lm[[2]]/4;
RadObjFullMag[p+{lm[[1]]/4,yy,-lm[[3]]/2-gap/2-
gapoffset},{lm[[1]]/2,lm[[2]]/2,lm[[3]]},initm,nm,Grp,matm,cm];

(*Mirrors*)
RadTrfZerPerp[Grp,p,{1,0,0}];
RadTrfZerPara[Grp,p,{0,0,1}];
RadTrfZerPerp[Grp,p,{0,1,0}];
Grp]; (*wv={lx,ly,lz} for vertically magnetized magnets*)(*wh={lx,ly,lz} for Horizontally magnetized magnets*)(*si determines in which direction the magnetization is turning*)(*axe=Pi/2 (0):means undulator with horizontal (vertical) and longitudinal magnetization*)und[po_,wv_,wh_,np_,per_,br_,si_,axe_]:=Module[{g,ma,m,p,i,t,s,w},g=radObjCnt[{}];
p=po-{0,np*per/2,0};
For[i=0,i<4*np+1,i++,If[i<=np,s=0.5,s=1];
If[Mod[i,2]<=0,w=wv,w=wh];
t=-(i-1)*Pi/2*si;
m={Sin[axe]*Sin[t],Cos[t],Cos[axe]*Sin[t]}*br*s;
ma=radObjRecMag[p,w,m];
radObjAddToCnt[g,{ma}];
p=p+{0,per/4,0};];
radObjDrwAtr[g,{0,0,1}]; g];
```

```

(*wv={lx,ly,lz} for vertically magnetized magnets*)(*wh={lx,ly,lz} for Horizontally magnetized magnets*)(*si determines in which direction the magnetization is turning*)(*axe=Pi/2 (0):means undulator with horizontal (vertical) and longitudinal magnetization*)
und[po_,wv_,wh_,np_,per_,br_,si_,axe_:0]:=Module[{g,ma,m,p,i,t,s,w},g=radObjCnt[{}];
p=po-{0,np*per/2,0};
For[i=0,i<4*np+1,i++,If[i<0||i>4*np,s=0.5,s=1];
If[Mod[i,2]<0,w=wv,w=wh];
t=-(i-1)*Pi/2*si;
m={Sin[axe]*Sin[t],Cos[t],Cos[axe]*Sin[t]}*br*s;
ma=radObjRecMag[p,w,m];
radObjAddToCnt[g,{ma}];
p=p+{0,per/4,0};];
radObjDrwAtr[g,{0,0,1}]; g];

```

```

(* en T2mm3 *)
pot[gg_,{x_,z_},per_,len_,prec_:1]:=Module[{tx,tz},
tz=harm[gg,"bz",per,{x,0,z},1][[1]];
tx=harm[gg,"bx",per,{x,0,z},1][[1]];
0.5*(tx*tx+tz*tz)*len*(per/2/Pi)^2];

```

```

(* ener in GeV per and len in millimeter
angx,angz and in micro-rad
vx , vz in meter-1 *)
angx[gg_,{x_,z_},per_,len_,ener_,prec_:1]:=Module[{p1,p2,h},h=0.2;
p1=pot[gg,{x-h/2,z},per,len,prec];
p2=pot[gg,{x+h/2,z},per,len,prec];
(p2-p1)/h*0.5*(0.3/ener)^2];
angz[gg_,{x_,z_},per_,len_,ener_,prec_:1]:=Module[{p1,p2,h},h=0.2;
p1=pot[gg,{x,z-h/2},per,len,prec];
p2=pot[gg,{x,z+h/2},per,len,prec];
(p2-p1)/h*0.5*(0.3/ener)^2];
vx[gg_,{x_,z_},per_,len_,ener_,prec_:1]:=Module[{p1,p2,p3,h},h=0.2;
p1=pot[gg,{x-h/2,z},per,len,prec];
p2=pot[gg,{x,z},per,len,prec];
p3=pot[gg,{x+h/2,z},per,len,prec];
4/1000*(p1+p3-2*p2)/h^2*0.5*(0.3/ener)^2];
vz[gg_,{x_,z_},per_,len_,ener_,prec_:1]:=Module[{p1,p2,p3,h},h=0.2;
p1=pot[gg,{x,z-h/2},per,len,prec];
p2=pot[gg,{x,z},per,len,prec];
p3=pot[gg,{x,z+h/2},per,len,prec];
4/1000*(p1+p3-2*p2)/h^2*0.5*(0.3/ener)^2];
vc[gg_,{x_,z_},per_,len_,ener_,prec_:1]:=Module[{p1,p2,p3,h},h=0.2;
p1=pot[gg,{x+h/2,z-h/2},per,len,prec];
p2=pot[gg,{x+h/2,z+h/2},per,len,prec];
p3=pot[gg,{x-h/2,z-h/2},per,len,prec];
p4=pot[gg,{x-h/2,z+h/2},per,len,prec];
(p2+p3-p1-p4)/1000/h^2*0.5*(0.3/ener)^2];

```

```

(* _____ Input Parameters (to edit) _____ *)
per=25; (* Undulator period in [mm] *)
gap=20; (* Magnetic Gap in [mm] *)
br=1.2; (* Remanent Field of the material in [T] *)
nper=56; (* Number of periods *)
lx=30; (* Horizontal width of the magnet blocks in [mm] *)
lz=18; (* Vertical height of the magnet blocks in [mm] *)
airgap=0.5; (* Airgap between the magnets in [mm] *)

```

```

(* _____ Start Computations _____ *)
wv={lx,per/4-airgap,lz};
wh=wv;

```

```

p={0,0,0};
radUtiDelAll[];
g=und[p+{0,0,gap/2+lz/2},wv,wh,nper,per,br,1];
RadTrfZerPara[g,p,{0,0,1}];
x=0;
z=0;
Print["Bz = ",harm[g,"bz",per,{x,0,z},1][[1]]," T"];
etOptions[Graphics3D,
AxesTrue,
AxesLabel{"X[mm]","S[mm]","Z[mm]"},
AxesStyleThickness[0.003`],
BoxStyle{Thickness[0.001`],
Dashing[{0.01`,0.01`}]},
AmbientLightGrayLevel[0.1`],
PlotRangeAll,
SphericalRegionTrue,
ViewPoint{3.5`,-3,1.5`}];
gra=Show[Graphics3D[radObjDrw[g]]];
x=0;z=0;
gra=Plot[radFld[g,"Bz",{x,y,z}],{y,-(nper+1)/2*per,(nper+1)/2*per},PlotLabel"Dikey Alan [T],
Salindirici Uzunlugu [mm]"];
Plot[radFld[g,"Bz",{x,0,z}],{x,-20,20}];
Export["c:/MAGNETIKALAN2.EPS",gra=Plot[radFld[g,"Bz",{x,y,z}],{y,-
(nper+1)/2*per,(nper+1)/2*per},PlotLabel"Dikey Alan [T], Salindirici Uzunlugu [mm]"],"EPS"]
Plot[radFld[g,"Bz",{x,0,z}],{x,-20,20}];
Export["c:/MagnetikAlanKesiti2.eps",Plot[radFld[g,"Bz",{x,0,z}],{x,-20,20}],"EPS"]

```

```

(* _____ Input Parameters (to edit) _____ *)
len=1600; (* Total Undulator Length in [mm] *)
ener=0.04; (* Electron Energy in [GeV] *)
betax=7; (* Average Horiz. Beta Function *)
betaz=1.75; (* Average Vertic. Beta Function *)
pt={0,0}; (* Transverse coordinates {Hor,Vert} of the electron in [mm] *)

```

```

(* _____ Start Computations _____ *)
vvx=vx[g,pt,per,len,ener];
vvz=vz[g,pt,per,len,ener];
vvc=vc[g,pt,per,len,ener];
dnux=1/4/Pi*betax*vvx;
dnuz=1/4/Pi*betaz*vvz;
dnuc=1/4/Pi*sqrt[betaz*betax]*vvc;
ax=angx[g,pt,per,len,ener];
az=angz[g,pt,per,len,ener];
Print["dNux, dNuz, dNuc = ",-dnux,"",-dnuz,"",-dnuc];
Print["Equiv. Skew Quad = ",vvc*ener/0.3*10000," G"];
Print["Horiz., Vert. Angle =",-ax,"",-az," °"];
Print["Equiv. Vert. , Hor. Field Integral =",-ax*ener/0.3,"",-az*ener/0.3," Gcm"];(* This cell must be
executed after the previous ones.It computes the angle,and tune shifts as a function of the horizontal
position of an electron in the undulator. By using such plots, one may qualitatively identify undulator
fields which may pose problems

```

```

during injections or may reduce the horizontal dynamic aperture of the lattice. *)
(* Parameters defining the range and step over which the tune shift is computed and displayed *)
z=0; (* Height above axis in [mm] *)
xmin=0; (* Minimum horizontal position in [mm] *)
xmax=45; (* Maximum horizontal position in [mm] *)
dx=1; (* Horizontal Step in [mm] *)

```

```

(* _____ Start Computations _____ *)
ax=Table[{x,-angx[g,{x,z},per,len,ener]},{x,xmin,xmax,dx}];
gr=ListPlot[ax,PlotJoinedTrue,

```

```

PlotLabel"Horiz. Angle [r] vs Horiz. Pos. [mm]";
Export["c:/Tunshft1-1.eps",gr=ListPlot[ax,PlotJoinedTrue,
PlotLabel"Horiz. Angle [r] vs Horiz. Pos. [mm]"],"EPS"]
dnx=Table[{x,1/4/Pi*betax*vz[g,{x,z},per,len,ener]},{x,xmin,xmax,dx}];
gr=ListPlot[dnx,PlotJoinedTrue,
PlotLabel"Yatay Ayar Kaymasi, Yatay Poz. [mm]";
Export["c:/Tunshft2-2.eps",gr=ListPlot[dnx,PlotJoinedTrue,
PlotLabel"Yatay Ayar Kaymasi, Yatay Poz. [mm]"],"EPS"]
dnz=Table[{x,1/4/Pi*betaz*vz[g,{x,z},per,len,ener]},{x,xmin,xmax,dx}];
gr=ListPlot[dnz,PlotJoinedTrue,
PlotLabel"Vertical Tune Shift vs Horiz. Pos. [mm] ";
Export["c:/Tunshft2-3.eps",gr=ListPlot[dnz,PlotJoinedTrue,
PlotLabel"Dikey Ayar Kaymasi, Yatay Poz. [mm] ","EPS"]

```

b) Radia ikinci salındırıcı girdi parametreleri

```

<<Radia`;
<<Graphics`MultipleListPlot`;
Off[General::"spell1"];
SetOptions[Plot,PlotRangeAll,FrameTrue];
SetOptions[ListPlot,PlotRangeAll,FrameTrue,PlotJoinedTrue];
SetOptions[MultipleListPlot,PlotRange All,Frame True,PlotJoinedTrue];

(* Set the default Directory for creation of files *)
$NotebookDirectory=ToFileName@First["FileName"/.NotebookInformation[EvaluationNotebook[]]];
SetDirectory[$NotebookDirectory];
hyb[p_,per_,gap_,nper_,gapoffset_,{lp[_],np_,matp_,cp_},{lm[_],nm_,matm_,cm_},{lms[_],nms_,matms_,cms_}]:=Module[{Grp,zer,yy,initm,i,in},
zer={0,0,0};in=-1;
Grp=radObjCnt[{}];
yy=lp[[2]]/4;
RadObjFullMag[p+{lp[[1]]/4,yy,-lp[[3]]/2-gap/2},{lp[[1]]/2,lp[[2]]/2,lp[[3]]},zer,np,Grp,matp,cp];
yys=yy+(lms[[2]]-lp[[2]])/4;
RadObjFullMag[p+{lp[[1]]/2+lms[[1]]/2,yys,-lms[[3]]/2-gap/2-gapoffset},{lms[[1]],lms[[2]]/2,lms[[3]]},{in,0,0},nms,Grp,matms,cms];
yy+=lp[[2]]/4;
For[i=1,i<=nper,i++,(initm={0,Mod[i+1,2]-Mod[i,2],0});
yy+=lm[[2]]/2;
RadObjFullMag[p+{lm[[1]]/4,yy,-lm[[3]]/2-gap/2-gapoffset},{lm[[1]]/2,lm[[2]],lm[[3]]},initm,nm,Grp,matm,cm];
yy+=(lm[[2]]+lp[[2]])/2;
RadObjFullMag[p+{lp[[1]]/4,yy,-lp[[3]]/2-gap/2},{lp[[1]]/2,lp[[2]],lp[[3]]},zer,np,Grp,matp,cp];
in*=-1;
RadObjFullMag[p+{lp[[1]]/2+lms[[1]]/2,yy,-lms[[3]]/2-gap/2-gapoffset},{lms[[1]],lms[[2]],lms[[3]]},{in,0,0},nms,Grp,matms,cms];
yy+=lp[[2]]/2;];
initm={0,Mod[nper,2]-Mod[nper+1,2],0};
yy+=lm[[2]]/4;
RadObjFullMag[p+{lm[[1]]/4,yy,-lm[[3]]/2-gap/2-gapoffset},{lm[[1]]/2,lm[[2]]/2,lm[[3]]},initm,nm,Grp,matm,cm];

(*Mirrors*)
RadTrfZerPerp[Grp,p,{1,0,0}];
RadTrfZerPara[Grp,p,{0,0,1}];
RadTrfZerPerp[Grp,p,{0,1,0}];
Grp]; (*wv={lx,ly,lz} for vertically magnetized magnets*)(*wh={lx,ly,lz} for Horizontally magnetized magnets*)(*si determines in which direction the magnetization is turning*)(*axe=Pi/2 (0):means undulator with horizontal (vertical) and longitudinal magnetization*)und[po_,wv_,wh_,np_,per_,br_,si_,axe_:0]:=Module[{g,ma,m,p,i,t,s,w},g=radObjCnt[{}];
p=po-{0,np*per/2,0};

```

```

For[i=0,i<4*np+1,i++,If[i□0||i□4*np,s=0.5,s=1];
If[Mod[i,2]□0,w=wv,w=wh];
t=-(i-1)*Pi/2*si;
m={Sin[axe]*Sin[t],Cos[t],Cos[axe]*Sin[t]}*br*s;
ma=radObjRecMag[p,w,m];
radObjAddToCnt[g,{ma}];
p=p+{0,per/4,0};];
radObjDrwAtr[g,{0,0,1}]; g];

```

(*wv={lx,ly,lz} for vertically magnetized magnets)(*wh={lx,ly,lz} for Horizontally magnetized magnets)(*si determines in which direction the magnetization is turning)(*axe=Pi/2 (0):means undulator with horizontal (vertical) and longitudinal

```

magnetization*)und[po_,wv_,wh_,np_,per_,br_,si_,axe_]:=Module[{g,ma,m,p,i,t,s,w},g=radObjCnt[{}];
p=po-{0,np*per/2,0};
For[i=0,i<4*np+1,i++,If[i□0||i□4*np,s=0.5,s=1];
If[Mod[i,2]□0,w=wv,w=wh];
t=-(i-1)*Pi/2*si;
m={Sin[axe]*Sin[t],Cos[t],Cos[axe]*Sin[t]}*br*s;
ma=radObjRecMag[p,w,m];
radObjAddToCnt[g,{ma}];
p=p+{0,per/4,0};];
radObjDrwAtr[g,{0,0,1}]; g];

```

(* en T2mm3 *)

```

pot[gg_,{x_,z_},per_,len_,prec_:=Module[{tx,tz},
tz=harm[gg,"bz",per,{x,0,z},1][[1]];
tx=harm[gg,"bx",per,{x,0,z},1][[1]];
0.5*(tx*tx+tz*tz)*len*(per/2/Pi)^2];

```

(* ener in GeV per and len in millimeter

angx,angz and in micro-rad

vx , vz in meter-1 *)

```

angx[gg_,{x_,z_},per_,len_,ener_,prec_:=Module[{p1,p2,h},h=0.2;
p1=pot[gg,{x-h/2,z},per,len,prec];
p2=pot[gg,{x+h/2,z},per,len,prec];
(p2-p1)/h*0.5*(0.3/ener)^2];
angz[gg_,{x_,z_},per_,len_,ener_,prec_:=Module[{p1,p2,h},h=0.2;
p1=pot[gg,{x,z-h/2},per,len,prec];
p2=pot[gg,{x,z+h/2},per,len,prec];
(p2-p1)/h*0.5*(0.3/ener)^2];
vx[gg_,{x_,z_},per_,len_,ener_,prec_:=Module[{p1,p2,p3,h},h=0.2;
p1=pot[gg,{x-h/2,z},per,len,prec];
p2=pot[gg,{x,z},per,len,prec];
p3=pot[gg,{x+h/2,z},per,len,prec];
4/1000*(p1+p3-2*p2)/h^2*0.5*(0.3/ener)^2];
vz[gg_,{x_,z_},per_,len_,ener_,prec_:=Module[{p1,p2,p3,h},h=0.2;
p1=pot[gg,{x,z-h/2},per,len,prec];
p2=pot[gg,{x,z},per,len,prec];
p3=pot[gg,{x,z+h/2},per,len,prec];
4/1000*(p1+p3-2*p2)/h^2*0.5*(0.3/ener)^2];
vc[gg_,{x_,z_},per_,len_,ener_,prec_:=Module[{p1,p2,p3,h},h=0.2;
p1=pot[gg,{x+h/2,z-h/2},per,len,prec];
p2=pot[gg,{x+h/2,z+h/2},per,len,prec];
p3=pot[gg,{x-h/2,z-h/2},per,len,prec];
p4=pot[gg,{x-h/2,z+h/2},per,len,prec];
(p2+p3-p1-p4)/1000/h^2*0.5*(0.3/ener)^2];

```

(* _____ Input Parameters (to edit) _____ *)

per=90; (* Undulator period in [mm] *)

gap=55; (* Magnetic Gap in [mm] *)


```

br=1.2; (* Remanent Field of the material in [T]*)
nper=40; (* Number of periods *)
lx=30; (* Horizontal width of the magnet blocks in [mm]*)
lz=18; (* Vertical height of the magnet blocks in [mm]*)
airgap=0.5;(* Airgap between the magnets in [mm]*)

(* _____ Start Computations _____ *)
wv={lx,per/4-airgap,lz};
wh=wv;
p={0,0,0};
radUtiDelAll[];
g=und[p+{0,0,gap/2+lz/2},wv,wh,nper,per,br,1];
RadTrfZerPara[g,p,{0,0,1}];
x=0;
z=0;
Print["Bz = ",harm[g,"bz",per,{x,0,z},1][[1]]," T"];
etOptions[Graphics3D,
AxesTrue,
AxesLabel{"X[mm] ","S[mm] ","Z[mm] "},
AxesStyleThickness[0.003`],
BoxStyle{Thickness[0.001`],
Dashing[{0.01`,0.01`}]},
AmbientLightGrayLevel[0.1`],
PlotRangeAll,
SphericalRegionTrue,
ViewPoint{3.5`,-3,1.5`}];
gra=Show[Graphics3D[radObjDrw[g]]];
x=0;z=0;
gra=Plot[radFld[g,"Bz",{x,y,z}],{y,-(nper+1)/2*per,(nper+1)/2*per},PlotLabel"Dikey Alan [T],
Salindirici Uzunlugu [mm]"];
Plot[radFld[g,"Bz",{x,0,z}],{x,-20,20}];
Export["c:/MAGNETIKALAN2.EPS",gra=Plot[radFld[g,"Bz",{x,y,z}],{y,-
(nper+1)/2*per,(nper+1)/2*per},PlotLabel"Dikey Alan [T], Salindirici Uzunlugu [mm]"],"EPS"]
Plot[radFld[g,"Bz",{x,0,z}],{x,-20,20}];
Export["c:/MagnetikAlanKesiti2.eps",Plot[radFld[g,"Bz",{x,0,z}],{x,-20,20}],"EPS"]

(* _____ Input Parameters (to edit) _____ *)
len=3600; (* Total Undulator Length in [mm] *)
ener=0.04; (* Electron Energy in [GeV] *)
betax=7; (* Average Horiz. Beta Function *)
betaz=1.75; (* Average Vertic. Beta Function *)
pt={0,0}; (* Transverse coordinates {Hor,Vert} of the electron in [mm] *)

(* _____ Start Computations _____ *)
vvx=vx[g,pt,per,len,ener];
vvz=vz[g,pt,per,len,ener];
vvc=vc[g,pt,per,len,ener];
dnux=1/4/Pi*betax*vvx;
dnuz=1/4/Pi*betaz*vvz;
dnuc=1/4/Pi*Sqrt[betaz*betax]*vvc;
ax=angx[g,pt,per,len,ener];
az=angz[g,pt,per,len,ener];
Print["dNux, dNuz, dNuc = ",- dnux," ",-dnuz," ",-dnuc];
Print["Equiv. Skew Quad = ",vvc*ener/0.3*10000," G"];
Print["Horiz., Vert. Angle = ",- ax," ",-az," r"];
Print["Equiv. Vert. , Hor. Field Integral = ",- ax*ener/0.3," ",-az*ener/0.3," Gcm"];(* This cell must be
executed after the previous ones.It computes the angle,and tune shifts as a function of the horizontal
position of an electron in the undulator. By using such plots, one may qualitatively identify undulator
fields which may pose problems
during injections or may reduce the horizontal dynamic aperture of the lattice.*)

```

```

(* Parameters defining the range and step over which the tune shift is computed and displayed *)
z=0;      (* Height above axis in [mm] *)
xmin=0;   (* Minimum horizontal position in [mm] *)
xmax=45;  (* Maximum horizontal position in [mm] *)
dx=1;     (* Horizontal Step in [mm] *)

(* _____ Start Computations _____ *)
ax=Table[{x,-angx[g,{x,z},per,len,ener]},{x,xmin,xmax,dx}];
gr=ListPlot[ax,PlotJoinedTrue,
PlotLabel"Horiz. Angle [r] vs Horiz. Pos. [mm]"];
Export["c:/Tunshft1-1.eps",gr=ListPlot[ax,PlotJoinedTrue,
PlotLabel"Horiz. Angle [r] vs Horiz. Pos. [mm]"],"EPS"]
dnx=Table[{x,1/4/Pi*betax*vx[g,{x,z},per,len,ener]},{x,xmin,xmax,dx}];
gr=ListPlot[dnx,PlotJoinedTrue,
PlotLabel"Yatay Ayar Kaymasi, Yatay Poz. [mm]"];
Export["c:/Tuhnshft2-2.eps",gr=ListPlot[dnx,PlotJoinedTrue,
PlotLabel"Yatay Ayar Kaymasi, Yatay Poz. [mm]"],"EPS"]
dnz=Table[{x,1/4/Pi*betaz*vz[g,{x,z},per,len,ener]},{x,xmin,xmax,dx}];
gr=ListPlot[dnz,PlotJoinedTrue,
PlotLabel"Vertical Tune Shift vs Horiz. Pos. [mm]"];
Export["c:/Tunshft2-3.eps",gr=ListPlot[dnz,PlotJoinedTrue,
PlotLabel"Dikey Ayar Kaymasi, Yatay Poz. [mm]"],"EPS"]

```