

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ÜÇÜNCÜ NESİL VE DÖRDÜNCÜ NESİL IŞINIM KAYNAKLARI İÇİN
KULLANILAN MAGNETLERİN IŞINIM KARAKTERİSTİKLERİNE
ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

Yeşim CENGER

FİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ANKARA

2008

Her hakkı saklıdır

TEZ ONAYI

Yeşim CENGER tarafından hazırlanan “**Üçüncü Nesil ve Dördüncü Nesil Işınım Kaynakları için Kullanılan Magnetlerin Işınım Karakteristiklerine Etkilerinin İncelenmesi**” adlı tez çalışması 02/07/2008 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Ömer YAVAŞ

Jüri Üyeleri:

Başkan: Prof. Dr. Haluk MUTLU, Ankara Üniversitesi

Üye : Prof. Dr. Ergün KASAP, Gazi Üniversitesi

Üye : Prof. Dr. Ömer YAVAŞ, Ankara Üniversitesi

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Orhan ATAKOL

Enstitü Müdürü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ÜÇÜNCÜ NESİL VE DÖRDÜNCÜ NESİL IŞINIM KAYNAKLARI İÇİN KULLANILAN MAGNETLERİN IŞINIM KARAKTERİSTİKLERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Yeşim CENGER

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ömer YAVAŞ

Parçacık hızlandırıcılarının günümüzde birçok alanda bilimsel ve teknolojik uygulamaları mevcuttur. Bu tez çalışmasında, parçacık hızlandırıcılarında kullanılan magnetler incelenmiş ve fiziksel özellikleri özetlenmiştir. Üçüncü nesil ve dördüncü nesil ışınım kaynaklarının ışınım karakteristiklerine etkileri incelenmiştir. Türk Hızlandırıcı Merkezi (THM) projesi kapsamında kurulması planlanan kızılötesi serbest elektron lazeri tesisinde (IR SEL) kullanılacak olan salındırıcı magnetler için gereken fiziksel parametreler tartışılmıştır. Salındırıcı magnet ile lazer demeti parametreleri (parlaklık, aydınlık, akı) verilmiştir.

Türk Hızlandırıcı Merkezi projesi çerçevesinde sinkrotron ışınımına dayalı önerisi yapılmış pozitron halkası parametrizasyonu çalışılmıştır. Halkada kullanılan magnetlerin akı ve parlaklık dağılımları SPECTRA ve XOP yazılım programları aracılığıyla elde edilmiştir. Sinkrotron ışınımı için kullanılan çok kutuplu magnetlere örnek olarak, salındırıcı magnetlerin görünümü, mıknatıslanma değerleri ve pik magnetik alanı RADIA yazılım programı ile çalışılmıştır.

Temmuz 2008, 66 sayfa

Anahtar Kelimeler: Parçacık Hızlandırıcıları, Işınım Kaynakları, Sinkrotron Işınımı, Serbest Elektron Lazeri, Zigzaglayıcı Işınımı, Salındırıcı Işınımı.

ABSTRACT

Master Thesis

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF MAGNETS ON THE CHARACTERISTICS OF THIRD AND FOURTH GENERATION LIGHT SOURCES

Yeşim CENGER

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

Supervisor: Prof.Dr. Ömer YAVAŞ

Particle accelerators have many scientific and technological applications in basic and applied sciences. In this study, magnets which are used in particle accelerators are investigated and their physical properties are summarized. The effects of radiation characteristics on the third and fourth generation light sources are investigated. Required physical parameters of undulator magnets which will be used in Turkish Accelerator Center (TAC) Infrared Free Electron Laser Facility are discussed. Undulator magnet and laser beam parameters such as brightness, brilliance and flux are given.

The parametrization of proposed positron ring based synchrotron radiation (SR) facility in frame of Turkish Accelerator Center project is studied. Distributions of flux and brightness of magnets which will be used in ring are obtained via SPECTRA and XOP softwares. As an example of multipole magnets which is used for SR; view of undulator magnets, magnetization values and peak magnetic field are studied with RADIA software.

July 2008, 66 pages

Key Words: Particle Accelerators, Radiation Sources, Synchrotron Radiation, Free Electron Laser, Wiggler Radiation, Undulator Radiation.

TEŐEKKÖR

Tez alıőmam sırasında desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen aileme, yönlendirmeleri ve kontrolleri ile tezime Şekil veren danıőmanım sayın Prof. Dr. Ömer Yavaş'a, çalışmam sırasında yardımlarını esirgemeyen Dr. Zafer Nergiz'e, proje çalışma arkadaşlarıma ve her türlü sorunumda yanımda olan niőanlım Aybey Moğulkoç'a teőekkürlerimi bir borç bilirim.

Bu tez alıőması, "Türk Hızlandırıcı Merkezi Teknik Tasarımı ve Test Laboratuvarları (DPT2006K-120470)" konulu proje tarafından desteklenmiőtir.

Yeşim CENGER
Ankara, Temmuz 2008

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
SİMGELER DİZİNİ	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER	3
2.1 Parçacık Hızlandırıcılarında Kullanılan Magnetler	3
2.1.1 Eğici (bending) magnetler	3
2.1.2 Odaklayıcı (quadrupole) magnetler	5
2.1.3 Zigzaglayıcı (wiggler) magnetler	7
2.1.4 Salındırıcı (undulator) magnetler	9
2.2 Magnetlerin Fiziği ve Tasarımları Hakkında Genel Bilgiler	19
2.2.1 Arayüzey durumları	21
2.2.2 Klasik magnetler için tek boyutlu alan hesaplanması	22
2.2.3 Kalıcı magnet uyarımı	24
2.2.4 Salındırıcı magnetlerle kutuplanmanın sağlanması	27
2.3 Magnetlerin Işınım Karakteristikleri	30
3. MATERYAL VE YÖNTEM	35
4. BULGULAR	36
4.1 Giriş	36
4.2 THM IR SEL İçin Undulator Magnet Çalışması	36
4.2.1 Enerji aralığı	37
4.2.2 Enerji yayılımı	37
4.2.3 Normalize enine emittans	37
4.2.4 Mikro puls uzunluğu	37
4.2.5 Salındırıcı malzemenin tipi	38
4.2.6 Alan kuvveti	39
4.2.7 Salındırıcı periyodu ve sayısı	40
4.2.8 Salındırıcı gap aralığı	42
4.2.9 Faz hatası	42
4.3 THM Sinkrotron Halkası ve Magnet Örgüsü	43
4.3.1 THM Sinkrotron Halkası Tasarımı	43
4.3.2 Halkada kullanılan magnetlerin ışınım karakteristikleri	52
4.3.3 THM Sinkrotron Halkası için salındırıcı magnet tasarımı	59
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	61
KAYNAKLAR	63
EK-1 Magnetik Birimler	65
ÖZGEÇMİŞ	66

SİMGELER DİZİNİ

IR	Kızılötesi
SEL	Serbest Elektron Lazeri
SASE	Kendiliğinden Genlik Artırmalı Yayınım
THM	Türk Hızlandırıcı Merkezi
SI	Sinkrotron Işınımı
UV	Morötesi
VUV	Vakum Morötesi
YUUP	Yaygınlaştırılmış Ulusal ve Uluslararası Proje
ELBE	Yüksek Parlaklık ve Düşük Yayınımında Elektron Hızlandırıcısı
FLASH	Hamburg'taki Serbest Elektron Lazeri
RF	Radyo Frekansı
m_e	Elektronun kütlesi
c	Işık hızı
N_e	Bir paketçikteki elektron sayısı
N_p	Bir paketçikteki proton sayısı
L	Işınlık
LHC	Büyük Hadron Çarpıştırıcısı
B_0	Magnetik alan Kuvveti
B_r	Artık magnetik alan
L_u	Salındırıcı uzunluğu
h	Magnet bloğun boyu
g	Salındırıcının gap aralığı
k_u	Salındırıcının dalga sayısı
e	Elektronun yükü
rms	Karekök ortalamasının karesi

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Eğici magnet ışınımı	3
Şekil 2.2 Tipik bir eğici magnetin görünümü	4
Şekil 2.3 Eğici magnetin kesit görünümü	4
Şekil 2.4 Odaklayıcı magnet	5
Şekil 2.5 Magnetin soğutulması	5
Şekil 2.6 Dört kutuplu magnete ait magnetik alan çizgileri	6
Şekil 2.7 Odaklayıcı magnetlerde toplam odaklanma	7
Şekil 2.8 Zigzaglayıcı magnet ışınımı	7
Şekil 2.9 Zigzaglayıcı magnetin kesit görünümü	8
Şekil 2.10 Zigzaglayıcı magnet ışınımı	8
Şekil 2.11 Zigzaglayıcı ve salındırıcı magnet ışınımı	8
Şekil 2.12 Zigzaglayıcı magnet ışınımı ve eğici magnet ışınımı foton akısı	9
Şekil 2.13 Salındırıcı magnet	10
Şekil 2.14 Salındırıcı magnet ışınımı	10
Şekil 2.15 Kutuplardaki magnetik alan dağılımı	11
Şekil 2.16 Elektron demetinin salındırıcı içinden geçmesi	11
Şekil 2.17 Salındırıcı veya zigzaglayıcı magnet kesiti	12
Şekil 2.18 Salındırıcı magnet alanının magnet geometrisine bağlılığı	14
Şekil 2.19 Elektromagnetin kesit görünümü	14
Şekil 2.20 Kalıcı (permanent) magnetler	14
Şekil 2.21 Hibrid magnet yapısı	15
Şekil 2.22 Elektron demetinin magnetler arasında s doğrultusuyla yaptığı açı	17
Şekil 2.23 Salındırıcı magnetin kesit görünümü ve ışınımı	18
Şekil 2.24 Salındırıcı magnet içerisindeki elektron demetinin magnetik alanı ve ışınımı	18
Şekil 2.25 Geçirgen ortam için arayüzeydeki durumlar	21
Şekil 2.26 Dipol ve kuadropol magnetlerde magnetik döngü	22
Şekil 2.27 Kalıcı magnet uyarımı ile dipol magnet	24
Şekil 2.28 Magnetik döngüler	25
Şekil 2.29 Kalıcı magnetlerde alan, indüklenme ve mıknatıslanma	26
Şekil 2.30 Kalıcı magnetler için farklı materyallerin mıknatıslanma eğrileri	27
Şekil 2.31 Salındırıcı magnette kutuplanmanın elde edilmesi	29
Şekil 2.32 Parlaklık kavramı	30
Şekil 2.33 Spektral band genişliği	31
Şekil 4.1 THM IRSEL salındırıcı magnetik alanı	40
Şekil 4.2 THM IRSEL salındırıcı şiddet çarpanı	41
Şekil 4.3 Odaklayıcı magnetin parçacık demetlerini odaklaması ve yapısı	44
Şekil 4.4 Magnetlerin Beam Optics programı içerisinde kullanılan şekilleri	45
Şekil 4.5 THM SI Halkasına ait betatron fonksiyonları	46
Şekil 4.6 Halkanın genel görünümü	48
Şekil 4.7 Halkadaki parçacık tipi ve enerjisi	48
Şekil 4.8 Halkanın süper periyodu	49
Şekil 4.9 Demetin değişik durumlarda ömrü	50
Şekil 4.10 Demetin rezonans diyagramı	50
Şekil 4.11 THM SI Halkası RF kavite parametreleri	51

Şekil 4.12 CESR RF kavitenin görüntüsü	52
Şekil 4.13 THM depolama halkasında kullanılacak zigzaglayıcı magnetlerin akı grafikleri	53
Şekil 4.14 THM depolama halkasında kullanılacak zigzaglayıcı magnetlerin parlaklık grafikleri	54
Şekil 4.15 THM depolama halkasında kullanılacak salındırıcı magnet 1'e ait akı grafiği	55
Şekil 4.16 THM depolama halkasında kullanılacak salındırıcı magnet 2'ye ait akı yoğunluğu grafiği	55
Şekil 4.17 Salındırıcı magnet 1'e ait parlaklık grafiği	56
Şekil 4.18 Salındırıcı magnet 2'ye ait parlaklık grafiği	56
Şekil 4.19 THM depolama halkasında kullanılacak eğici magnetin ait parlaklık grafiği.	57
Şekil 4.20 THM depolama halkasında kullanılacak 30 mm periyotlu salındırıcı magnetin ait akı grafiği	58
Şekil 4.21 THM depolama halkasında kullanılacak 30 mm periyotlu salındırıcı magnetin ait parlaklık grafiği	58
Şekil 4.22 THM depolama halkasında kullanılacak 30 mm periyotlu salındırıcı magnetin ait RADIA programı simülasyon sonuçları	59
Şekil 4.23 THM SI Halkası salındırıcı magnetin ait pik magnetik alanı	60

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 Odaklayıcı magnetin demete etkisi	21
Çizelge 2.2 Magnet ışınımları	34
Çizelge 4.1 THM salındırıcılarının temel parametreleri	42
Çizelge 4.2 THM SI halkası için ana parametreler	47
Çizelge 4.3 THM SI halkası için magnet parametreleri	47
Çizelge 4.4 THM Depolama Halkasında kullanılması öngörülen zigzaglayıcı salındırıcı magnetler	52
Çizelge 4.5 THM depolama halkasında kullanılması öngörülen periyodu 3 cm olan salındırıcı magnet parametreleri	57

1. GİRİŞ

Hızlandırıcı teknolojisinin en çok ihtiyaç duydukları ışınım kaynaklarını, üçüncü nesil ve dördüncü nesil ışınım kaynakları kapsar. Üçüncü nesil ışınım kaynakları ile sağlanan gelişmeler ve tasarlanan hedeflere ulaşılması daha düşük elektron demet yayınlı, daha yüksek foton demet parlaklıklı ve daha kısa dalga boylarında ulaşılan kırınım limitleri ile dördüncü nesil ışınım kaynakları elde edilebileceğini göstermiştir. VUV ile sert X-ışını arasındaki bölgede elde edilen ışınımın dördüncü nesil ışınım kaynağı olarak adlandırılmasının asıl nedeni, bunların daha düşük yayınlı halkalar ile hem halka hem de lineer hızlandırıcı sürücülü kısa dalga boylu serbest elektron lazerlerinden (SEL) elde edilen demetler olmasıdır. Sert X-ışını ($\sim 2\text{Å}$) elde etmek için, dördüncü nesil ışınım kaynakları daha yüksek elektron enerjisi ve çevresi daha büyük bir depolama halkası veya lineer hızlandırıcı gerektirmektedir (Winick 1998).

SEL'ler, elektron demetini paketçik yapılarına bölerek optik alanda oldukça yüksek parlaklıkta, enine eşfazlı ışınım üretirler. Bu olay salındırıcı magnetin oluşturduğu periyodik manyetik alandaki optik alanla elektron demetinin etkileşmesi sonucu gerçekleşir. Paketlenmiş yapıdaki elektron demetinin optik alanla etkileşiminden ortaya çıkan ışınımın gücü paketlenmemiş yapıdaki elektron demetinin etkileşimi sonucu ortaya çıkan ışınımın gücünün karesine eşittir (Lee 1994). SEL'ler depolama halkası kullanarak kızılötesinden (IR), morötesine (UV) geniş bir spektral bölgede uzun yıllardır çalışmaktadır. Birçok depolama halkası uzun SEL salındırıcı magnetleri kapsayacak şekilde uzun düz kesitler içerecek şekilde tasarlanırlar. Depolama halkasına dayalı SEL'ler çok yüksek parlaklıkta ve koherentlikte ışınım üretirler ve şu an çalışmakta oldukları dalga boyu aralığı sebebiyle "dördüncü nesil" ışınım kaynağı olarak düşünülebilirler. Çalışmakta olan veya tasarım aşamasında olan depolama halkasına dayalı SEL'ler daha kısa dalga boylarında ışınım üretebilmek amacıyla araştırılmaktadır. Mevcut depolama halkalı SEL'ler, osilatör modda çalışmaktadır. Optik kavitelere ayna teknolojisine bağlı olarak henüz 200 nm altındaki dalga boylarında ışınım elde etmek zordur. Bu sebeple yapılan alternatif bir yaklaşım ise kavite kullanmayarak elektron demetinin uzun bir salındırıcı magnetten bir defalık

geçişi sırasında optik alanla etkileşmesi sonucu ışınım üretilmesidir. Bu teknik, “Kendiliğinden Genlik Artırmalı Yayınım” olarak adlandırılır (Winick 1998).

Birçok kullanıcıya koherent kızılötesi ışınım sağlayan düşük enerjili lineer (doğrusal) hızlandırıcılar kullanarak çalışan SEL kuruluşları yıllardır mevcuttur. DESY’de bulunan FLASH (Hamburg’taki Serbest Elektron Lazeri) buna en güzel örnektir. Bu araştırma merkezlerinde bulunan serbest elektron lazerlerinde depolama halkalarında olduğu gibi osilatör modda ışınım üreten optik kavite kullanılır. Son zamanlardaki gelişmeler yüksek enerjili lineer hızlandırıcılardan elde edilen elektron demetlerinin uzun bir salındırıcı magnet boyunca tek geçişte ışınım yapmasına olanak sağlamaktadır. Optik kavite olmadan da istenilen dalga boyunda ışınım elde edilebilir. Elektron demeti ve salındırıcı magnet kalitesinin artması ile angström mertebesinde dalga boylarına ulaşılabilir (Winick 1998).

Dairesel bir yörüngede ivmeli hareket eden yüklü bir parçacık elektromagnetik ışınım yapar (Winick 1998). Sinkrotron ışınımı da daireysel halkadan elde edilir. Yüklü bir parçacığın bir magnetik alan içinde rölativistik hızdaki daireysel hareketinden elde edilen ışınım “sinkrotron ışınımı” adı verilir. Ayarlanabilir dalgaboyu, yüksek parlaklık, yüksek foton akısı uzak kızılötesi bölgesinden (yaklaşık 1 mm dalgaboyu), X-ışınları bölgesine (yaklaşık 1 Å dalgaboyu) kadar geniş bir bölgede tek renkli piklere sahip olması, sinkrotron ışınımının temel özellikleri arasında sayılabilir (Wiedemann 2003).

Dairesel hızlandırıcıların oluşturulabilmesi için temel donanımlara ihtiyaç vardır. Bu temel donanımların başında magnetler gelir. Temel donanımlar arasında ayrıca RF kavite ve ön hızlandırıcı olarak doğrusal hızlandırıcılar kullanılır.

Yapılan tezin amacı, parçacık hızlandırıcılarına dayalı olarak elde edilen üçüncü nesil ve dördüncü nesil ışınım kaynaklarında kullanılan çok kutuplu zigzaglayıcı ve salındırıcı magnetlerin dalgaboyu, akı, güç ve parlaklık gibi ışınım karakteristikleri üzerindeki etkilerini incelemek ve değişik yapılarıdaki magnetlerin yapısını, fiziğini ve teknolojisini araştırmaktır.

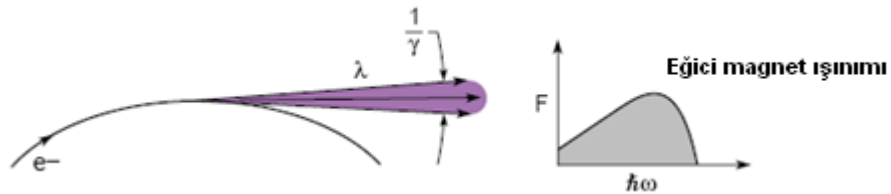
2. KURAMSAL TEMELLER

2.1 Parçacık Hızlandırıcılarında Kullanılan Magnetler

Parçacık hızlandırıcılarında magnetler demetin odaklanması, eğilmesi ve yön değiştirmesi amaçlarıyla kullanılırlar (Wiedemann 2003). Magnetler kullanım amaçlarına göre isimlendirilirler. Odaklama amaçlı kullanılan magnetler odaklayıcı (quadrupole) magnetler olarak adlandırılırken diğerleri de sırasıyla eğici (bending) magnetler, salındırıcı (undulator) magnetler ve zigzaglayıcı (wiggler) magnetlerdir. Örneğin, eğici magnetler demetin yönünü değiştirmede kullanılır. Genel anlamda magnetlerin hızlandırıcı fiziğindeki rolü çok büyüktür. Hızlandırıcı fiziği açısından magnetler, yapılacak olan deneylere ve elde edilecek herhangi bir ışınımın bölgesine göre seçilir ve tasarımı yapılır. Buna göre, kullanılacak magnetlerin süperiletken veya normal iletken seçimi gerçekleştirilir. Örneğin, LHC için kullanılan magnet türleri süperiletken teknolojiye dayanan magnetlerdir. Hızlandırıcılarda kullanılan magnet türlerini, fiziğini, tasarımlarını ve ışınım karakteristiklerini çeşitlerine göre aşağıdaki şekilde açıklamak mümkündür.

2.1.1 Eğici (bending) magnetler

Hızlandırıcılar aracılığıyla elde edilen ışınımlar, genel olarak hafif yüklü parçacıkların göreceli enerjilerle dairesel yörünge hareketi sırasında yaptıkları elektromagnetik ışınımaya dayanır (Wiedemann 2003). Bu ışınımlara neden olan dairesel hareketlilik eğici magnetlerle sağlanmaktadır. Magnetin uç kısmındaki magnetik alanın eğriselliği, aynı zamanda odaklayıcı bir etki de yapar. Eğici magnetler, düşük foton spektrumları ile düşük enerjili depolama halkalarında kullanılırlar.



Şekil 2.1 Eğici magnet ışınımı (Marks 2006)

Şekil 2.1’de eğici magnet ışınımın enerji grafiği verilmiştir. Şekil 2.1’de F, ışınımın akısını ve $\hbar\omega$ enerjisini göstermektedir. Şekil 2.2’de eğici bir magnetin hızlandırıcı yapılarla birleştirilmeden önceki görüntüsü görülmektedir.



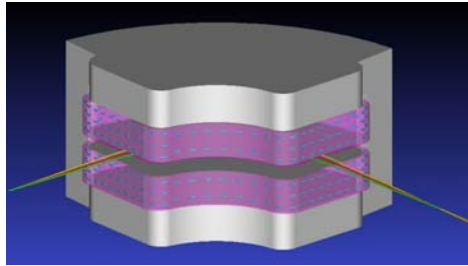
Şekil 2.2 Tipik bir eğici magnetin görünümü (www.technicoil.com/magnet.html 2008)

Aşağıda eğici magnetler için önemli formüller verilmiştir (Wilson 2001):

$$\frac{1}{\rho} (m^{-1}) = C_p \frac{B(T)}{cp(GeV)} \quad (2.1)$$

$$C_p = [c]e = 0.299792 \frac{GeV}{mT} \quad (2.2)$$

Formüllerde eğrilik yarıçapı ρ [m], ışığın hızı c [m/sn], B [T] magnetik alan ve elektronun momentumu p [GeV/c] ile verilmiştir. Şekil 2.3’te eğici magnetin kesit görünümü ışınım ile birlikte verilmiştir.



Şekil 2.3 Eğici magnetin kesit görünümü (www.technicoil.com/magnet.html 2008)

2.1.2 Odaklayıcı (quadrupole) magnetler

Parçacık hızlandırıcılarında odaklama amaçlı olarak odaklayıcı magnetler kullanılır. Bu magnetler elektron demetini yatay ve düşey ekseninde sınırlamak için gereken odaklamayı sağlarlar. Bir odaklayıcı magnette 4 tane kutup vardır. Bu kutuplar tarafından üretilen magnetik alan magnetin merkezinde sıfırdır. Merkez dışı olmayan bölgelerde enine alan merkezden uzaklaştıkça artacaktır. Bu bölgelerden geçen elektronlarda, ışığın mercekten saptığı gibi sapacaktır. Her iki düzlemde de odaklama sağlayacak odaklayıcı magnet üretmek mümkün değildir. Eğer ki, bir odaklayıcı magnet elektronları bir düzlemde odaklayacaksa diğer düzlemde dağıtacaktır. Bundan dolayı farklı konumlarda, yatayda ve düşeyde odaklayıcı magnetler kullanılarak bu durumun giderilmesi sağlanmalıdır.



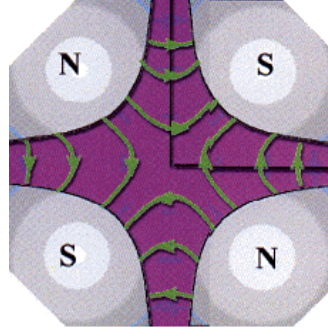
Şekil 2.4 Odaklayıcı magnet



Şekil 2.5 Magnetin soğutulması

(<http://www2.slac.stanford.edu/vvc/accelerators/magnets.html> 2008)

Şekil 2.4'te görülmekte olan odaklayıcı magnet, parçacık demetini hızlandırıcı içinde odaklar. Dört çelik kutup vardır. Bunlardan iki tanesi kuzey, diğerleri ise güney kutuplardır. Çelik kutuplarla sarmalanmış bobinin içinden akan çok miktardaki elektrik akımı, mıknatıslanmayı sağlar. Magnetin soğutmak için gerekli olan su, Şekil 2.5'te kesiti gösterilen odaklayıcı magnetin iç kısmında bulunan tüpün içinden akmaktadır. Şekil 2.6'da odaklayıcı magnet için magnetik alan çizgileri gösterilmektedir.



Şekil 2.6 Dört kutuplu magnete ait magnetik alan çizgileri

(<http://www2.slac.stanford.edu/vvc/accelerators/magnets.html> 2008)

Aşağıdaki formülde k odaklayıcının kuvvet parametresidir. g , magnetik alan gradyenidir ve magnetik alan gradyeninin birimi de metre başına Tesla'dır (Wilson 2001).

$$k(m^{-2}) = C_p \frac{g(T/m)}{cp(GeV)} \quad (2.3)$$

f , odaklayıcı magnetin odak uzaklığıdır ve kuvvet parametresiyle odaklayıcının uzunluğunun (l_q) çarpımı ile edilir.

$$1/f = kl_q \quad (2.4)$$

Magnetin iç yarıçapı R ile verilir ve karesinin yarısı referans x ve y uzaklıklarının çarpımına eşittir.

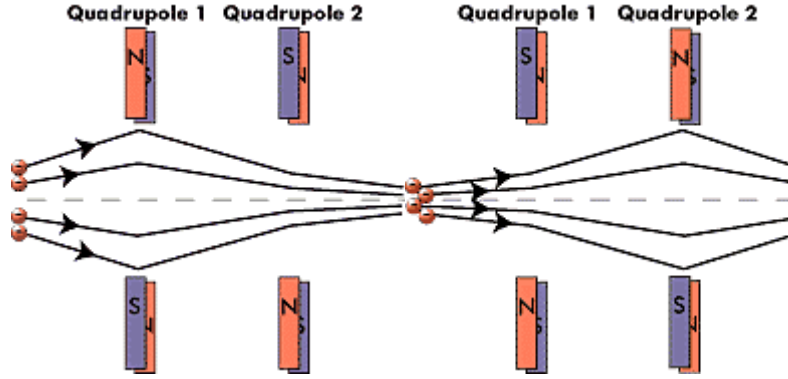
$$x.y = \pm \frac{1}{2} R^2 \quad (2.5)$$

$$B_x = -\frac{\partial V}{\partial x} = gy \quad (2.6)$$

$$B_y = -\frac{\partial V}{\partial y} = gx \quad (2.7)$$

Odaklayıcı magnete ait magnetik alanlar, skaler potansiyelin konuma göre türevinden elde edilir. Odaklayıcı düzleme gelen elektron demetine enine yönde odaklama

yapılırken, boyuna yönde dağılıma maruz kalır. Boyuna yöndeki dağılımın engellenmesi için de iki odaklayıcı magnet 90° faz farkı ile peş peşe yerleştirilir, enine ve boyuna yönünde toplam bir odaklama yapılmış olur (Şekil 2.7).

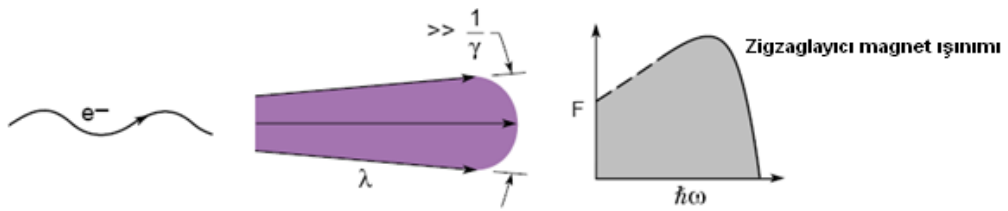


Şekil 2.7 Odaklayıcı magnetlerde toplam odaklanma

(<http://www2.slac.stanford.edu/vvc/accelerators/moremagnets.html> 2008)

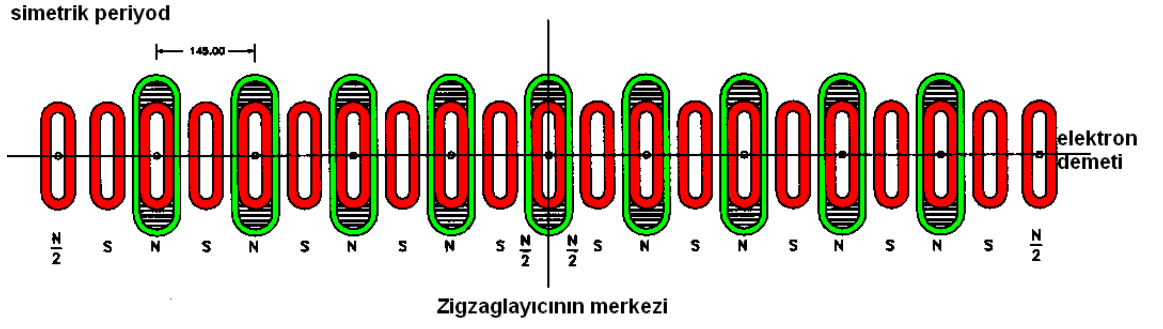
2.1.3 Zigzaglayıcı (wiggler) magnetler

Magnetik kutupların çok kullanılması tercih edilir. Bunun en önemli sebebi, foton akısının artmasını sağlamaktır (Wiedemann 2003). Zigzaglayıcı magnet ışınımı yüksek foton enerjileri için tercih edilir ve karakteristik olarak eğici magnet ışınımı ile benzerlikler gösterdiği söylenir (Attwood 2007).



Şekil 2.8 Zigzaglayıcı magnet ışınımı (Marks 2006)

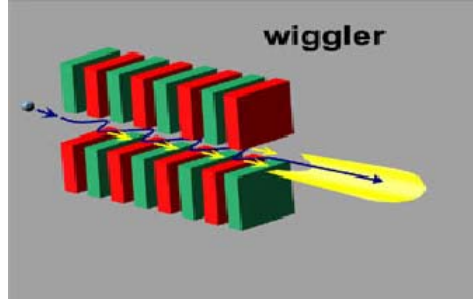
Şekil 2.8’de zigzaglayıcı magnet ışınımı ve enerji dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 2.9 Zigzaglayıcı magnetin kesit görünümü

(<http://www2.slac.stanford.edu/vvc/accelerators/moremagnets.html> 2008)

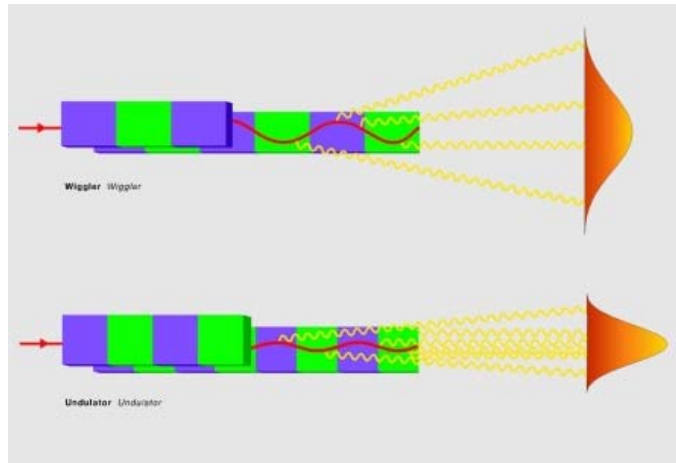
Şekil 2.9'da zigzaglayıcı magnetin kesit görünümü ve 2.10'da ışınımı verilmiştir.



Şekil 2.10 Zigzaglayıcı magnet ışınımı

(<http://www2.slac.stanford.edu/vvc/accelerators/moremagnets.html> 2008)

Zigzaglayıcı magnetten çıkan ışınım salıdırıcıdan çıkan ışınımına göre şiddeti azdır (Şekil 2.11).

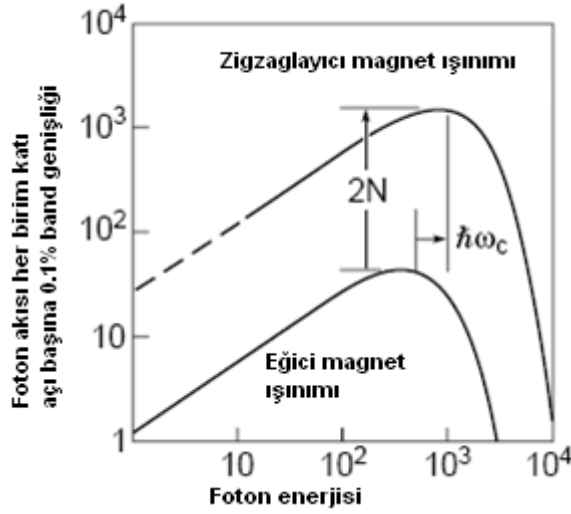


Şekil 2.11 Zigzaglayıcı ve salıdırıcı magnet ışınımı

Zigzaglayıcı magnetler için kuvvet parametresi K;

$$K = 0.934B(\text{Tesla})\lambda_p(\text{cm}) \quad (2.8)$$

formülüyle verilmektedir. Burada B, kutuplar arasında oluşan magnetik alan, Θ_w çıkan ışınım gözlenceci tarafından bakılan açı, γ Lorentz faktörü ve λ_p salındırıcı periyodudur. $K > 1$ yani $\Theta_w > \frac{1}{\gamma}$ için zigzaglayıcı magnet özelliği taşır.



Şekil 2.12 Zigzaglayıcı magnet ışınımı ve eğici magnet ışınımı foton akısı

Şekil 2.12’de zigzaglayıcı ve eğici magnet ışınimleri foton enerjisi bakımından karşılaştırılmıştır. Zigzaglayıcı magnet ışınımının band genişliği, eğici magnet ışınımının band genişliğinden 2N kadar fazladır.

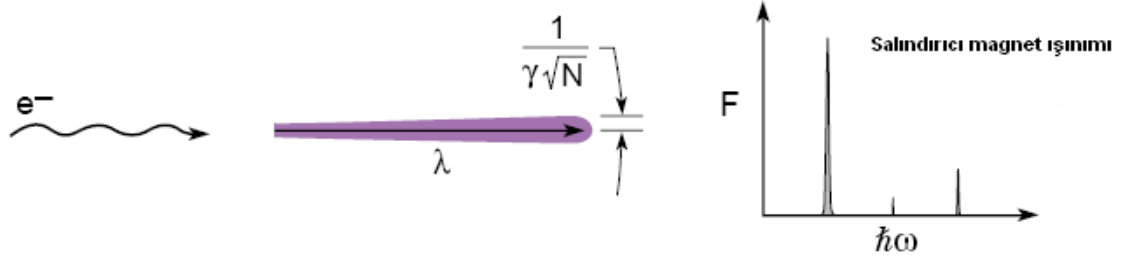
2.1.4 Salındırıcı (undulator) magnetler

Bu magnet türlerinin dışında da magnetler mevcuttur. Ancak diğer magnet türleri bu magnetlerin sıralanmasından oluşur. Salındırıcı magnetler, dipol magnetlerin ardı ardına sıralanmasından oluşur. Şekil 2.13’te salındırıcı magnetler, magnetik alan testleri yapılırken görüntülenmiştir ve salındırıcı magnet hızlandırıcı tüneli içerisinde yer almaktadır.



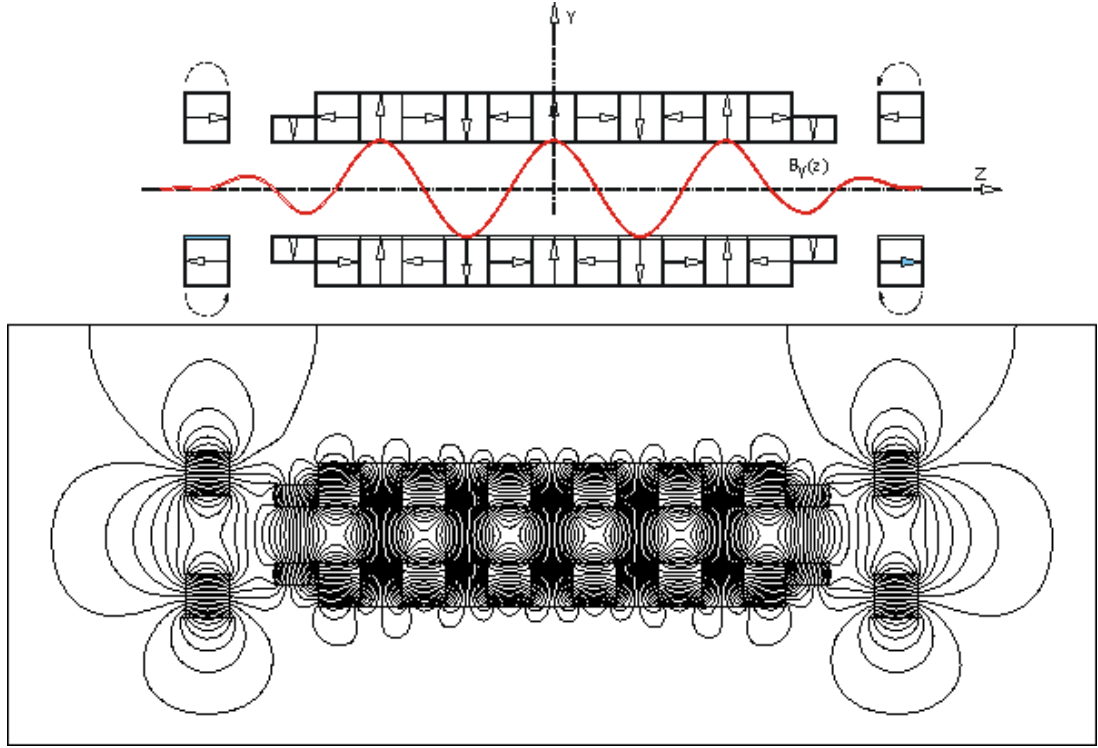
Şekil 2.13 Salındırıcı magnet (<http://www.noiw.net/zukio.jpg> 2008)

Temel olarak; salındırıcı magnet ışınımı parçacıkların $\pm 1/\gamma$ 'dan daha az bir açıda yayılmasını sağlar.



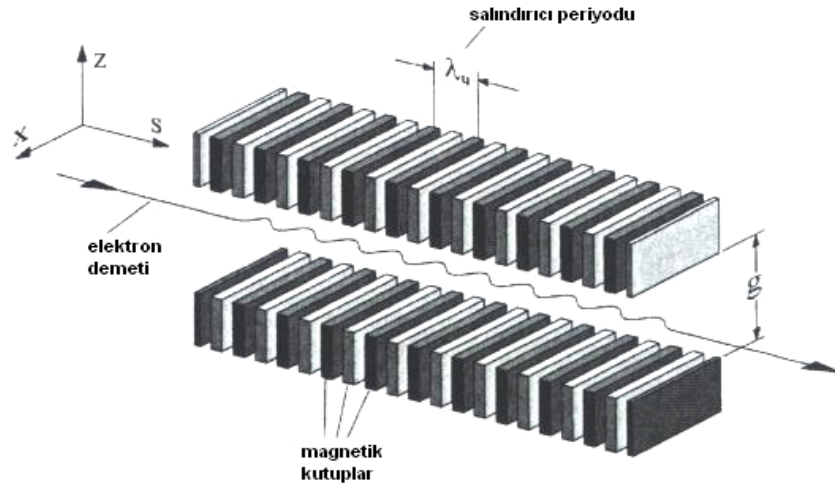
Şekil 2.14 Salındırıcı magnet ışınımı (Marks 2006)

Şekil 2.14'te salındırıcı magnet ışınımına ait enerji dağılım grafiğinde enerji değerlerinin kesikli olduğu görülmektedir. Eğici ve zigzaglayıcı magnetlerde enerji dağılımları sürekliydi. Salındırıcı magnet bize enerji değerleri kesikli olduğu için kullanıcı potansiyeli de düşünülerek istediğimiz aralıkta dalga boyunda çalışmamızı sağlar. Mıknatıslanma değerleri daha elverişli kullanılabilir.



Şekil 2.15 Kutuplardaki magnetik alan dağılımı (Lee 1994)

Şekil 2.15'te, şeklin üst kısmında elektron demeti, mıknatıslanma yönleri ve şeklin alt kısmında salıncı ve eğici magnetlerde oluşan magnetik alanlar gösterilmiştir.



Şekil 2.16 Elektron demetinin salıncıcı içinden geçmesi (Schlueter 1994)

Elektronlar, zigzaglayıcı ya da salıncıcı magnet düzleminin ortasından uzaysal bir periyodik sinüsoidal hareketle geçerler. Şekil 2.16'da periyodik magnetik alan pozitif ya da negatif yönde, yatay plakaların arasındadır. Salıncıcı veya zigzaglayıcı magnet

alanı demet boyunca, λ_u periyod uzunluğu olmak üzere, periyodiktir. (x,s,z) kartezyen koordinat sistemi kullanılır ve skaler potansiyel aşağıdaki gibi yazılabilir (Elias *et al.* 1976):

$$\varphi(s, z) = f(z) \cos\left(2\pi \frac{s}{\lambda_u}\right) = f(z) \cos(k_u s) \quad (2.9)$$

Burada kolaylık olması için magnetin x boyunca sonsuz olduğu varsayılırsa, $\varphi(x) = \text{sabit}$ alınabilir. Bilinmeyen $f(z)$ fonksiyonu dikey alan dağılımını göstermektedir. Potansiyel Laplace denklemini sağlamalıdır (Elias *et al.* 1976).

$$\nabla^2 \varphi(s, z) = 0. \quad (2.10)$$

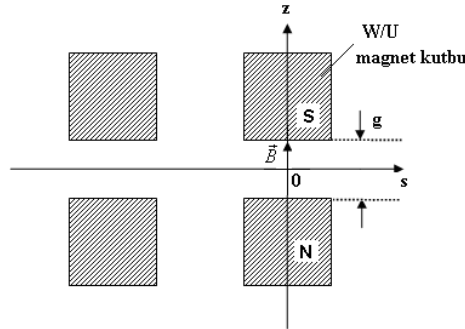
$$\frac{d^2 f(z)}{dz^2} - f(z) k_u^2 = 0 \quad (2.11)$$

Buna göre $f(z)$ için çözüm, $f(z) = A \sinh(k_u z)$ olacaktır. Bu çözüm yukarıdaki eşitlikte kullanılarak potansiyel ifadesi ve dikey alan bileşeni elde edilebilir.

$$\varphi(s, z) = A \sinh(k_u z) \cos(k_u s) \quad (2.12)$$

$$B_z(s, z) = \frac{\partial \varphi}{\partial z} = k_u A \cosh(k_u z) \cos(k_u s) \quad (2.13)$$

Burada A integrasyon sabitini belirlemek için magnet kutbunun orta nokta alanını, B_0 'ı kullanırız. Bu noktanın koordinatları $(s, z) = (\lambda_u/4, g/2)$ 'dir (Wiedemann 2003).



Şekil 2.17 Salındırıcı veya zigzaglayıcı magnet kesiti

$$B_0 = B_z \left(0, \frac{g}{2} \right) = k_u A \cosh \left(k_u \frac{g}{2} \right) = k_u A \cosh \left(\pi \frac{g}{\lambda_u} \right) \quad (2.14)$$

$$A = \frac{B_0}{k_u \cosh \left(\pi \frac{g}{\lambda_u} \right)}. \quad (2.15)$$

Bunu alan eşitliğinde kullanabiliriz.

$$B_z(s, z) = \frac{B_0}{\cosh \left(\pi \frac{g}{\lambda_u} \right)} \cosh(k_u z) \cos(k_u s) \quad (2.16)$$

Aynı şekilde s boyunca alan bileşeni,

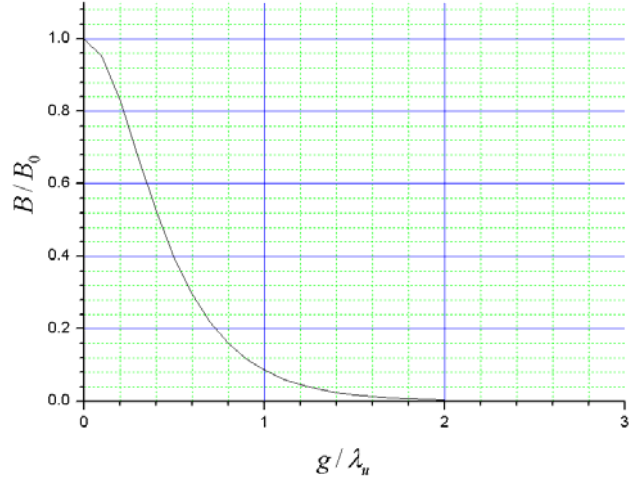
$$B_s(s, z) = \frac{B_0}{\cosh \left(\pi \frac{g}{\lambda_u} \right)} \sinh(k_u z) \sin(k_u s) \quad (2.17)$$

Denklem 2.17'deki gibidir. Demet eksenine boyunca periyodik olarak değişen magnetik alanın tepe değeri, $\frac{g}{\lambda_u}$ oranına, yani salındırıcı magnet geometrisine kritik olarak bağlıdır (Şekil 2.18).

$$B = \frac{B_0}{\cosh \left(\pi \frac{g}{\lambda_u} \right)} \quad (2.18)$$

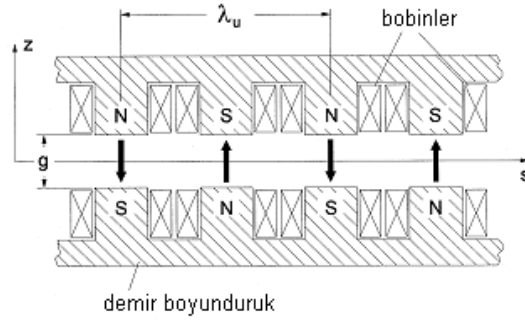
Asıl ilgilenilen alan bileşeni $z=0$ eksenindeki alan bileşenidir.

$$B_z(s) = \vec{B} \cdot \cos(k_u s) \quad (2.19)$$

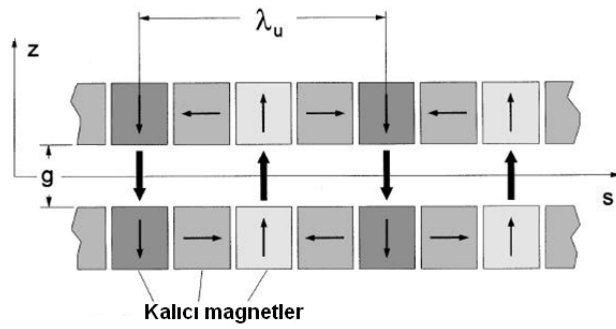


Şekil 2.18 Salındırıcı magnet alanının magnet geometrisine bağıllığı

Magnetler denildiğinde elektromagnetler ve kalıcı (permanent) magnetler akla gelmektedir. Elektromagnetler, iletkenliğini bakır tel sarımlardan alarak yüksek kalitede magnetik alan oluşturlar (Şekil 2.19).

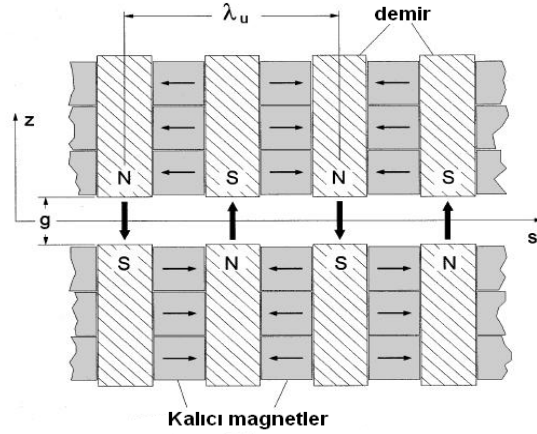


Şekil 2.19 Elektromagnetin kesit görünümü



Şekil 2.20 Kalıcı (permanent) magnetler

Kalıcı magnetler, bazı kayalıklarda doğal olarak bulunan saf magnetlerden oluşur. Samaryum materyali en iyi örneklerden biridir. Kendiliğinden mıknatıslanma özelliği olan bu magnetler aralarına demir girerek hibrid hale gelirler ve hibrid magnet adını alırlar (Şekil 2.21).



Şekil 2.21 Hibrid magnet yapısı

Elektron salındırıcı ya da zigzaglayıcı magnet boyunca ilerlerken Lorentz kuvvetine maruz kalmaktadır (Wilson 2001).

$$\vec{F} = \dot{\vec{p}} = m_e \dot{\vec{v}} = e\vec{v} \times \vec{B} \quad (2.20)$$

Burada magnetik alan B_x bileşenine sahip değildir. Buna ek olarak elektronun hızının düşey bileşeni ihmal edilmiştir. Pek çok durumda 2.21 ve 2.22 yaklaşımları sağlanmaktadır.

$$\vec{B} = \begin{pmatrix} 0 \\ B_z \\ B_s \end{pmatrix} \quad \text{ve} \quad \vec{v} = \begin{pmatrix} v_x \\ 0 \\ v_s \end{pmatrix} \quad (2.21)$$

$$\dot{\vec{v}} = \frac{e}{m_e \gamma} \begin{pmatrix} -v_s B_z \\ -v_x B_s \\ v_x B_z \end{pmatrix} \quad (2.22)$$

Hızın düşey bileşeni ihmal edilirse ($v_z=0$) ve $\dot{x} = v_x$ ve $\dot{s} = v_s$ olarak kullanarak s-x düzlemindeki çiftlenimli harekete ait denklemleri elde ederiz:

$$\ddot{x} = -\dot{s} \frac{e}{m_e \gamma} B_z(s) \quad (2.23)$$

$$\ddot{s} = \dot{x} \frac{e}{m_e \gamma} B_z(s) \quad (2.24)$$

Elektronlar salındırıcı veya zigzaglayıcı magnet boyunca hareket ederek $B_z(s)$ periyodik alan ile karşılaşır. Bu alan yatay ekseninde salınım hareketine sebep olur. Parçacığın yatay eksenindeki hızı V_x 'in aynı magnetik alan ile bağlantılı olarak boyuna hızda periyodik değişime sebep olur. Bu etki elektronların s eksenindeki orijinal hareketine eklenerek yatay ekseninde yörüngeyi eğici etkiye sahip olur. Bu denklem setinin çözümü görelî parçacıkların s eksenindeki hızlarının baskın olduğu göz önüne alınarak basitleştirilebilir. İyi bir yaklaşımla, $\dot{x} = v_x \ll c$ ve $\dot{s} = v_s = \beta \cdot c = \text{sabit}$ denilebilir. Buna göre denklem setindeki ilk denklemleri kullanarak,

$$\ddot{x} = -\frac{\beta c e \vec{B}}{m_e \gamma} \cos(k_u s) \quad (2.25)$$

eşitliği elde edilir. Zaman türevini uzaysal türevle yer değiştirmek için,

$$x' = \frac{dx}{dt} \frac{dt}{ds} = \dot{x} / \dot{s} \text{ olmak üzere, } \dot{x} = x' \beta c \text{ ve } \ddot{x} = x'' \beta^2 c^2 \text{ kullanılır.}$$

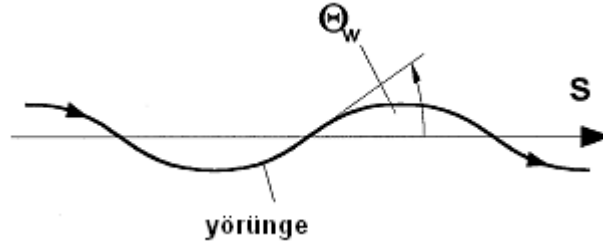
$$x'' = -\frac{e \vec{B}}{m_e \beta c \gamma} \cos(k_u s) = -\frac{e \vec{B}}{m_e \beta c \gamma} \cos\left(2\pi \frac{s}{\lambda_u}\right) \quad (2.26)$$

Bu eşitlik basit integrasyonla çözülür ve özel başlangıç koşullarıyla ilgilenmediğimiz için integrasyon sabitleri sıfıra eşitlenir. Rölativistik hızlar için $\beta = 1$ alınarak,

$$x'(s) = \frac{\lambda_u e \vec{B}}{2\pi m_e \gamma c} \sin(k_u s) \quad (2.27)$$

$$x(s) = \frac{\lambda_u^2 e \vec{B}}{4\pi^2 m_e \gamma c} \cos(k_u s). \quad (2.28)$$

elde edilmiş olur.



Şekil 2.22 Elektron demetinin magnetler arasında s doğrultusuyla yaptığı açı

Şekil 2.22’de salıncı ve zigzaglayıcı magnetler içinde hareket eden elektron demeti yörüngesinin s doğrultusuyla yaptığı açının Θ_w ile verildiği gösterilmektedir. İdeal yörüngesinde seyahat eden parçacığın ulaşacağı maksimum sapma açısı aşağıdaki eşitlikteki gibi olacaktır:

$$\theta_w = x'_{\max} = \frac{1}{\gamma} \frac{\lambda_u e B}{2\pi m_e c} \quad (2.29)$$

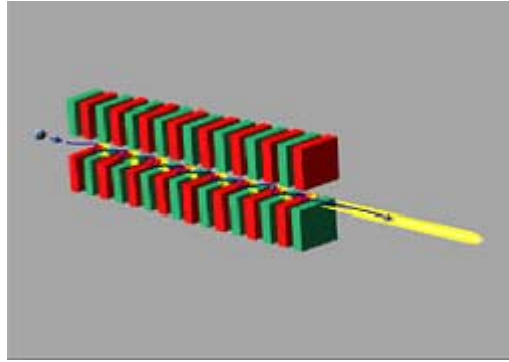
Burada boyutsuz bir nicelik olarak K salıncı kuvvet parametresini tanımlayabiliriz.

$$K = \frac{\lambda_u e B}{2\pi m_e c} \quad (2.30)$$

Buna göre maksimum yörünge açısı aşağıdaki formda olacaktır:

$$\theta_w = \frac{K}{\gamma} \quad (2.31)$$

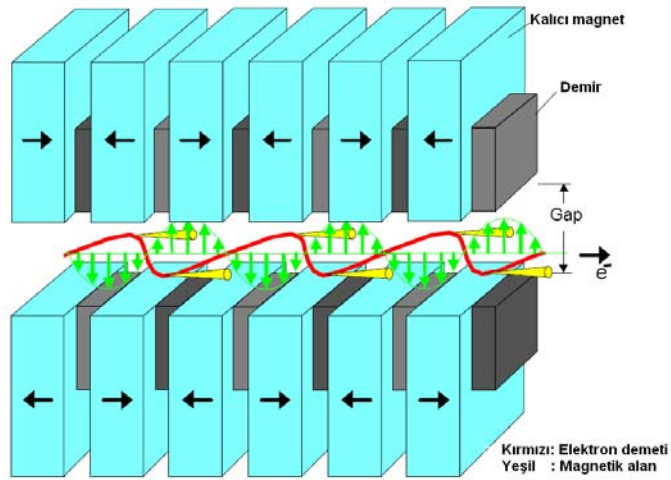
$K \leq 1$ yani $\Theta_w \leq \frac{1}{\gamma}$ için salındırıcı magnettir. $K=1$ değerine sahip bir magnette, maksimum yörünge açısı $\theta_w = 1/\gamma$ olacaktır. Bu tam olarak sinkrotron ışınımının doğal açılma açısına karşı gelmektedir. Zigzaglayıcı ve salındırıcı magnetlerin arasındaki fark, eğme kuvveti ile açıklanabilir ve bu K parametresi ile uygun bir şekilde ifade edilebilir (Wilson 2001). Salındırıcı magnetlerde eğicilik çok zayıf olduğundan tüm ışınım neredeyse paralel olarak, çok küçük bir açılma açısı ile yayımlanır. Dikkate değer ölçüde güçlü olan zigzaglayıcılar bir ışınım yelpazesi yayımlarlar (Elias *et al.* 1976).



Şekil 2.23 Salındırıcı magnetin kesit görünümü ve ışınımı

(<http://www2.slac.stanford.edu/vvc/accelerators/moremagnets.html> 2008)

Şekil 2.23'te salındırıcı magnetin kesit görüntüsü ve çıkan ışınım görülmektedir.



Şekil 2.24 Salındırıcı magnet içerisindeki elektron demetinin magnetik alanı ve ışınımı

Şekil 2.24'te salındırıcı magnet içerisinde bulunan elektron demetinin magnetik alandan nasıl etkilendiği ve çıkan ışınımı gösterilmektedir. Yeşil çizgiler magnetik alan çizgilerini ve sarı renkte olanlar da çıkan ışınımı göstermektedir.

2.2 Magnetlerin Fiziği ve Tasarımları Hakkında Genel Bilgiler

Hızlandırıcı magnetlerinin fiziği vakum içinde verilen Maxwell denklemlerine ve Lorentz Kuvvetine dayanır. Maxwell denklemleri ve Lorentz denklemleri aşağıdaki eşitliklerle verilmektedir (Wilson 2001):

$$\begin{aligned}
 \vec{\nabla} \cdot \vec{E} &= 4\pi\rho \\
 \vec{\nabla} \times \vec{E} &= -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\
 \vec{\nabla} \cdot \vec{B} &= 0 \\
 \vec{\nabla} \times \vec{B} &= \frac{4\pi}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \vec{J}
 \end{aligned}
 \tag{2.32}$$

Burada E elektrik alan, ρ serbest elektrik yük yoğunluğu, B magnetik alan ve J akım yoğunlunu ifade eder. Lorentz kuvvet denklemleri ise şu şekilde verilir:

$$\vec{F} = q\vec{E} + \frac{q}{c} \vec{v} \times \vec{B}
 \tag{2.33}$$

Uzayda sabit bir çizgi üzerinde dağılımı gösteren keyfi magnetik alan çizgilerinin B(y) fonksiyonuyla tanımlarsak, bu fonksiyon Taylor serisine açılabilir:

$$B(y) = b_0 + \frac{b_1 y}{1!} + \frac{b_2 y^2}{2!} + \frac{b_3 y^3}{3!} + \dots
 \tag{2.34}$$

Magnetik tasarım için kullanılan formüller aşağıdaki gibidir (Russenschuck 2007). Formüller genellikle hızlandırıcıda magnet tasarımlarında en çok kullanılan magnet türleri (demir ağırlıklı olanlar) için geçerlidir. Dipol magnetler için beklenen magnetik alan ve gradyan formülleri 2.35 ve 2.36'da verilmiştir.

$$B = \mu_0 \eta NI / g \quad (2.35)$$

$$NI = Bg / \mu_0 \eta \quad (2.36)$$

Burada, B dipolün merkezindeki alan (Tesla cinsinden), η magnetin etkinliği, N kutup başına halkayı dönme sayısı, I her bir dönüş için akım (Amper cinsinden) ve g dipolün yarı aralığını (metre cinsinden) vermektedir. μ_0 boşluğun geçirgenlik katsayısı olup $4\pi \times 10^{-7}$ 'ye eşittir. Odaklayıcı magnetler için benzer formüller yazılacak olursa,

$$B' = 2\mu_0 \eta NI / R_0^2 \quad (2.37)$$

$$NI = B'g / 2\mu_0 \eta \quad (2.38)$$

denklemleri elde edilir. Altı kutuplu magnetler için benzer formüller yazılacak olursa,

$$B'' = 6\mu_0 \eta NI / R_0^3 \quad (2.39)$$

$$NI = B''R_0^3 / 6\mu_0 \eta \quad (2.40)$$

denklemleri elde edilir.

Magnetostatik problemler için zaman türevi $\frac{\partial}{\partial t} = 0$ ve Maxwell eşitlikleri azaltılarak,

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} \quad (2.41)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.42)$$

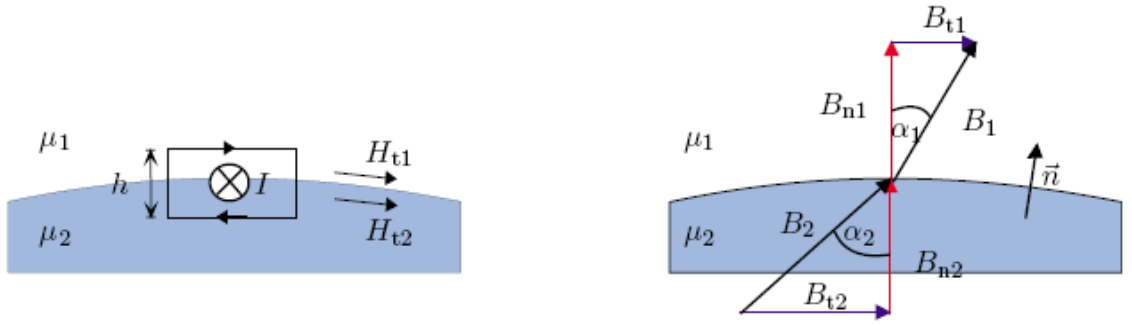
$$\vec{B} = \mu(\vec{H})\vec{H} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) \quad (2.43)$$

denklemleri elde edilir.

Çizelge 2.1 Odaklayıcı magnetin demete etkisi

Kuadropolün Adı	Odaklama Düzlemi	Demetteki Etki
Odaklayıcı kuadropol	Yatay	Demetin yatay ebatını azaltır, fakat dikey ebatını artırır.
Dağıtıcı kuadropol	Dikey	Demetin dikey ebatını azaltır, fakat yatay ebatını artırır.

2.2.1 Arayüzey durumları



Şekil 2.25 Geçirgen ortam için arayüzeydeki durumlar (Russenschuck 2007)

Yukarıdaki şekilde geçirgen ortam için ara yüzeyler gösterilerek magnetik histerisileri aşağıdaki formüllerle elde edilmiştir. Eğer integral formda Amper Yasasını uygularsak,

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{s} = \int \vec{J} \cdot d\vec{A} \quad (2.44)$$

elde edilir ve döngü şekil 2.25'te gösterilmiştir, ve $h \rightarrow 0$, kapalı halkadaki akım sıfırdır, sonsuz küçük dikdörtgen için akım olmaz. Bu sebeple,

$$H_{t1} = H_{t2} \quad (2.45)$$

$$\vec{n} \times (\vec{H}_1 - \vec{H}_2) = 0 \quad (2.46)$$

$\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$ olduğundan dolayı, arayüzey için 2.47, 48 ve 49 denklemlerini elde ederiz.

$$B_{n1} = B_{n2} \quad (2.47)$$

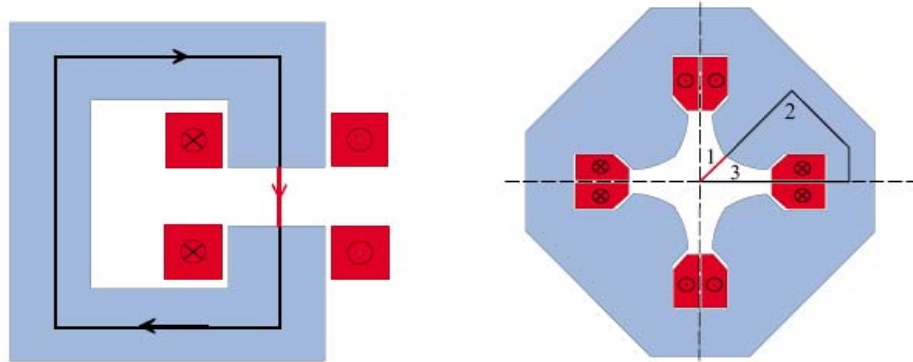
$$\vec{n} \cdot (\vec{B}_1 - \vec{B}_2) = 0 \quad (2.48)$$

Buradan;

$$\frac{\tan \alpha_1}{\tan \alpha_2} = \frac{\frac{B_{t1}}{B_{n1}}}{\frac{B_{t2}}{B_{n2}}} = \frac{\mu_1 H_{t1}}{\mu_2 H_{t2}} = \frac{\mu_1}{\mu_2} \quad (2.49)$$

elde edilir. $\mu_2 \gg \mu_1$ için $\alpha_1 \gg \tan \alpha_2$ 'dir. Bundan dolayı tüm açılar için $\pi/2 > \alpha_2 > 0$ 'dır ve $\tan \alpha_1 \approx 0$ olur. Alan çıkış çizgileri, geçirgenliği yüksek ortamdan geçirgenliği düşük ortama dik şekildedir (Russenschuck 2007).

2.2.2 Klasik magnetler için tek boyutlu alan hesaplanması



Şekil 2.26 Dipol ve kuadropol magnetlerde magnetik döngü (Russenschuck 2007)

Şekil 2.26'da dipol ve kuadropol magnetler için magnetik döngü materyallerde siyah çizgilerle ve gap için kırmızı çizgilerle gösterilmiştir. Amper yasasının integral formu

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{s} = \int_A \vec{J} \cdot d\vec{A} \text{ ile Eşitlik 2.50'yi yazabiliriz:}$$

$$H_{iron} S_{iron} + H_{gap} S_{gap} = NI \quad (2.50)$$

$$\frac{1}{\mu_0 \mu_r} B_{iron} S_{iron} + \frac{1}{\mu_0} B_{gap} S_{gap} = NI \quad (2.51)$$

$\mu_r \gg 1$ alırsak,

$$B_{gap} = \frac{\mu_0 NI}{s_{gap}} \quad (2.52)$$

böylece denklem 2.52'yi elde ederiz. Şekil 2.26'nın sağ tarafında odaklayıcı magnet için bölmelendirmeler gösterilmiştir. Orijinden kutba kadar olan bölme 1, demir boyunduruk boyunca keyfi yol bölme 2 ve x-ekseni boyunca geriye dönüş bölme 3'tür. Boyunduruğun magnetik direncini Denklem 2.53 vermektedir (Russenschuck 2007).

$$\oint \vec{H} d\vec{s} = \int_1 \vec{H}_1 d\vec{s} + \int_3 \vec{H}_3 d\vec{s} = NI \quad (2.53)$$

Odaklayıcının alan gradyenti g ile tanımlanır. $B_x=gy$ ve $B_y=gx$ 'tir. İntegrasyonda 1 numaralı yol boyunca alan denklemi aşağıda verilmiştir.

$$H = \frac{g}{\mu_0} \sqrt{x^2 + y^2} = \frac{g}{\mu_0} r \quad (2.54)$$

$\vec{H} \perp \vec{s}$ olduğundan, x-ekseni boyunca alan integrali sıfırdır. Böylelikle, denklem 2.55 elde edilir.

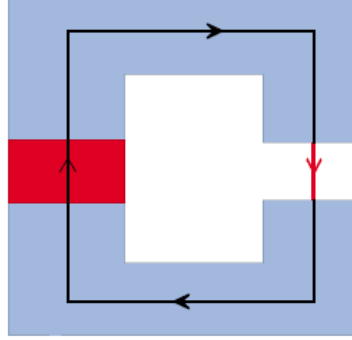
$$\int_0^{r_0} H dr = \frac{g}{\mu_0} \int_0^{r_0} r dr = \frac{g}{\mu_0} \frac{r_0^2}{2} = NI \quad (2.55)$$

$$g = \frac{2\mu_0 NI}{r_0^2} \quad (2.56)$$

Odaklayıcı magnetin alan gradyeni r_0 ile orantılıdır ve NI alanı dipolün gap uzunluğu ile lineer olarak azalmaktadır.

2.2.3 Kalıcı magnet uyarımı

Kalıcı magnet için magnetik döngü Şekil 17’de verilmektedir.



Şekil 2.27 Kalıcı magnet uyarımı ile dipol magnet (Russenschuck 2007)

Kutbun yüzeyi A_{gap} ve magnetin yüzeyi A_{mag} kullanılarak,

$$B_{mag} A_{mag} = B_{gap} A_{gap} = \mu_0 H_{gap} A_{gap} \quad (2.57)$$

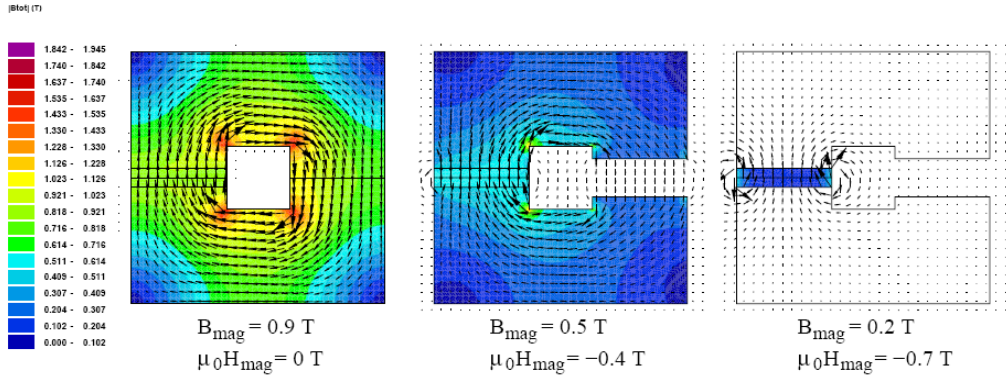
$\mu_r \gg 1$ için boyunduruğun magnetik direnci denklem 2.56’da kullanılarak elde edilebilir.

$$H_{gap} S_{gap} = -H_{mag} S_{mag} \quad (2.58)$$

$$\frac{1}{\mu_0} B_{mag} \frac{A_{mag}}{A_{gap}} S_{gap} = -H_{mag} S_{mag} \quad (2.59)$$

$$\frac{B_{mag}}{\mu_0 H_{mag}} = \frac{-S_{mag}}{S_{gap}} \frac{A_{gap}}{A_{mag}} = P \quad (2.60)$$

P geçirgenlik katsayısı olarak adlandırılır. $S_{gap} \gg S_{mag}$ ($A_{gap} = A_{mag}$ için) açık döngü olduğu zaman P sifra gider. $S_{mag} \gg S_{gap}$ ($A_{mag} > A_{gap}$ olduğu durumda akı konsantrasyon modu olarak bilinir) kısa döngü olduğu zaman P $-\infty$ 'a gider.



Şekil 2.28 Magnetik döngüler (Russenschuck 2007)

Sol baştaki magnetik akıyı gösteren döngüde hava boşluğu bulunmamaktadır. Ortadaki şekilde ise $s_{\text{gap}}=2s_{\text{mag}}$ 'tır. Sağdaki şekilde samaryum kobalt karışımı magnetin kalan alan mıknatıslanması 0,9 T'dır. Mıknatıslanma olarak şeklin altında verilen değerler mıknatıslanma olmayan eğrilerdeki değerlerdir. Eğer ki, $s_{\text{gap}}=2s_{\text{mag}}$ durumu göz önüne alınırsa, nümerik hesaplamalarla $\mu_0 H_{\text{gap}}=0.197\text{T}$, $\mu_0 H_{\text{mag}}=-0.4\text{T}$ olarak bulunur.

- Mıknatıslanma ve alan arasındaki ilişki lineer değildir.
- Mıknatıslanma, magnetik enerji değildir.
- Gap boşlukları daha fazla olan magnetler için saçak oluşturmuş magnetik alanlar önemsenmez (Russenschuck 2007).

Magnetik alanlarla mıknatıslanmış bölgelerde tüm magnetik akılar düşünülerek vakum için hesaplama yapılmıştır.

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 (\vec{J}_{\text{free}} + \vec{J}_{\text{mag}}) = \mu_0 \vec{J}_{\text{free}} + \mu_0 \vec{\nabla} \times \vec{M} \quad (2.61)$$

Eşitlik 2.61'den;

$$\text{curl} \frac{\vec{B} - \mu_0 \vec{M}}{\mu_0} = \vec{J}_{\text{free}} \quad (2.62)$$

Denklem 2.62 elde edilir. Mıknatıslanmış ortam için eşitlik 2.63 verilmiştir.

$$\vec{H} = \frac{\vec{B} - \mu_0 \vec{M}}{\mu_0} \quad (2.63)$$

Ya da denklem 2.64 kullanılabilir:

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) \quad (2.64)$$

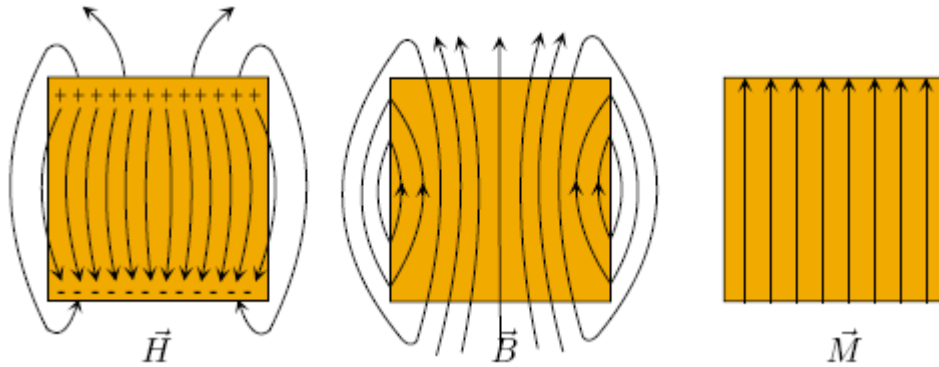
Magnetik alınganlığı olan malzemelerde (linear material) \vec{B} ve \vec{H} arasındaki ilişki;

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \chi_m \vec{H} = \mu_0 (1 + \chi_m) \vec{H} = \mu_0 \mu_r \vec{H} = \mu \vec{H} \quad (2.65)$$

denklem 2.65 ile verilir. Burada μ_r görelî geçîrgenlik ve χ_m magnetik alınganlıktır. Diğêr taraftan, eşitlik 2.64 tüm çizgisel olmayan ortamlar için geçêrlidir ve mıknatıslanma dış kısımdaki alan haricinde korunur. Magnetik indükltans \vec{B} her zaman boş kaynaktır. Örneğîn; $div \vec{B} = 0$ 'dır, fakat \vec{H} magnetik alanı sıfır değıldir:

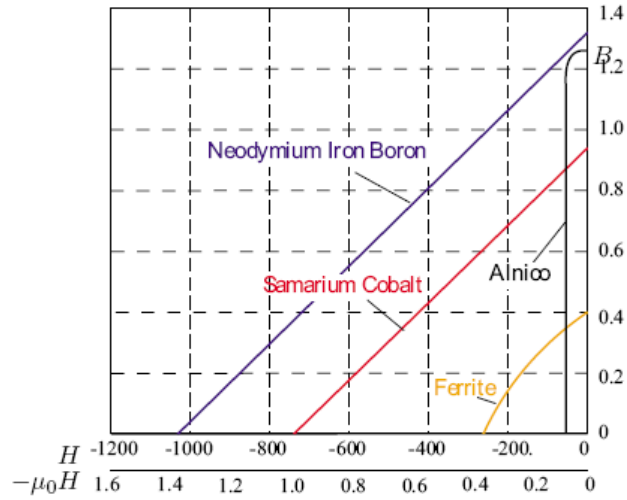
$$\nabla \cdot \vec{H} = div \frac{\vec{B} - \mu_0 \vec{M}}{\mu_0} = -\nabla \cdot \vec{M} = \rho_{mag} \quad (2.66)$$

Eşitlik 2.65'te hayali magnetik yük yoğunluğû $\rho_{mag} = -\nabla \cdot \vec{M}$ olarak tanımlanmıştır.



Şekil 2.29 Kalıcı magnetlerde alan, indüklenme ve mıknatıslanma (Russenschuck 2007)

Şekil 2.29’da kalıcı magnetler için alan, indüklenme ve mıknatıslanma gösterilmiştir. Şekil 2.28’deki magnetik döngü için sonuçlar doğrulanmıştır, \vec{M} mıknatıslanma sabitidir. Şekil 2.30’da mıknatıslanma materyal eğrileri SmCo_5 (Samarium kobalt), $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ (Neodyum demir bor) ve demir alaşımları (Fe_2O_3 gibi) görülmektedir.



Şekil 2.30 Kalıcı magnetler için farklı materyallerin mıknatıslanma eğrileri (Russenschuck 2007)

2.2.4 Salındırıcı magnetlerle kutuplanmanın sağlanması

Kutuplanmış elektromagnetik ışınım kullanmak, birçok alanda genellikle diğer yöntemlerle ulaşılamayacak verilere ulaşmamızı sağlar. Kristaller, moleküller, moleküler etkileşmeler, yüksek sıcaklık süperiletkenler, polimerler ve sıvı kristallerle çalışılırken, pek çok bilimsel ve endüstriyel uygulamada kutuplanmış elektromagnetik ışınım kullanmak gerekmektedir (Lee 1994).

Serbest elektron lazerlerinde dış bir kutuplayıcı kullanmaksızın çeşitli tiplerde salındırıcı magnetler, bu magnetlerin değişik şekillerdeki kombinasyonları veya eksen boyunca uygulanan magnetik alanlar yardımıyla kutuplanma sağlanır.

Serbest elektron lazerlerinde polarizasyon üzerindeki incelemeler salındırıcı ve yükseltici modlar için ikiye ayrılabilir. Salındırıcı durumunda başlangıç sinyali, gürültü veya elektron demetinin anlık ışınımıdır. Bu durumda eğer kavitede herhangi bir

kutuplanma seçimli olarak gerçekleşmemişse, ışınım elektron demetinin yörüngesine göre kutuplanacaktır. Düzlemsel bir yörünge için doğrusal, eliptik veya dairesel bir yörünge içinse helissel kutuplanma olacaktır. Yükseltici modunda başlangıçta doğrusal kutuplanmış bir giriş sinyali kullanılmışsa her iki şekilde de (doğrusal ve dairesel yörünge) doğrusal kutuplu çıkış alınacaktır.

Çeşitli deneylerde kutuplanma şeklini hızlı bir şekilde değiştirmek gerekir. Bu ise, eş ekseninde bir kaç salındırıcı magnetin bir arada ya da eksenlerine magnetik alan uygulanan bir veya iki salındırıcı magnetin kullanılmasıyla gerçekleştirilebilir. Kutuplanmayı değiştirmek için aşağıdaki seçenekler izlenebilir (Papadichev 1996).

Bunlardan ilki; farklı heliselliğe sahip iki salındırıcı magnetin kullanılması sağ veya sol elli dairesel kutuplanma oluşturmak için kullanılabilir. Her iki salındırıcı magnetin de aynı alan şiddeti ile çalıştırılması doğrusal kutuplanmaya sebep olacaktır. Bu durumda salındırıcı magnetin birinin akım yönünün değiştirilmesi kutuplanma düzlemini değiştirecektir.

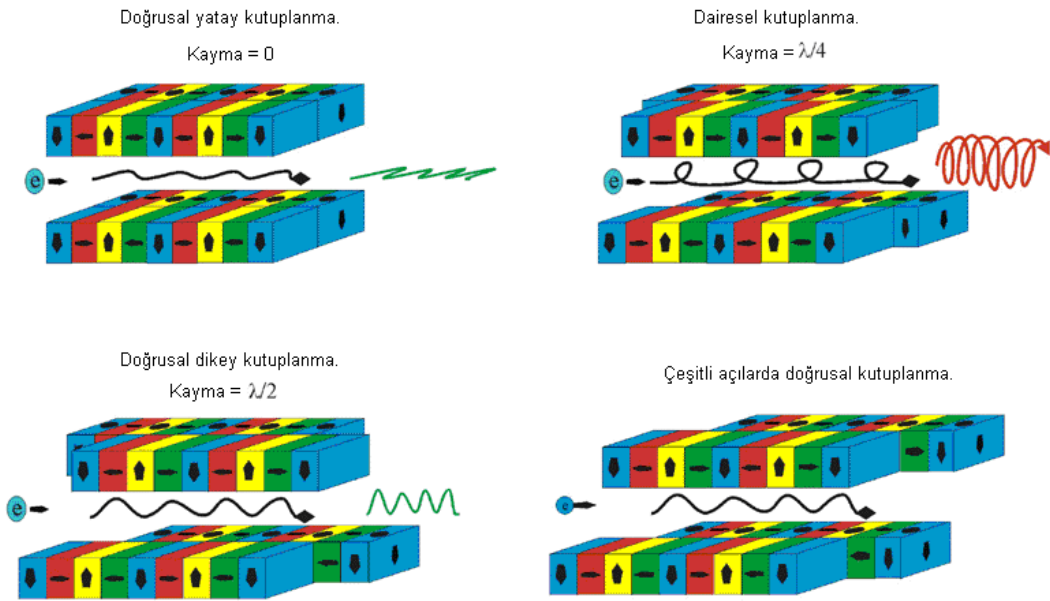
İkinci olarak; iki düzlemsel salındırıcı magnetin birinin diğerine göre 90° döndürülmüş ve ortak eksenleri boyunca salındırıcı magnetin periyodunun dörtte biri kadar ötelenmiş olarak yerleştirilmesi ile yine dairesel kutuplanma elde edilecektir. Heliselliğin değiştirilmesi salındırıcı magnetlerden birinin akım yönünün değiştirilmesi ile başarılıdır. Salındırıcı magnetlerden birinin kapatılması uyarılan salındırıcı magnetin yörünge düzleminde doğrusal kutuplanma meydana getirecektir.

Üçüncü olarak; birbirine dik ancak aynı fazda alanlara sahip iki salındırıcı magnet kullanılarak kutuplanma düzleminin değiştirilmesi salındırıcı magnetin akımında işaret veya genlik değişimi yapılarak elde edilebilir.

Dördüncü olarak; birinci salındırıcı magnetin aynı fazda olacak şekilde yerleştirilmiş üç salındırıcı magnet kullanılarak, istenilen kutuplanma şeklinin seçilmesini sağlar.

Beşinci olarak; düzlem salındırıcı magnetin eksenini boyunca magnetik alan uygulandığında dairesel kutuplanma sağlanır. Kutuplanmanın helisselliği, magnetik alanın işareti değiştirilerek değiştirilir. Alan şiddeti sıfır iken doğrusal kutuplanma sağlanır.

Son bir yol ise; elektromagnetik dalga'nın fazı kutuplanma azimutu ile korelasyon halinde ise helissel elektron yörüngesi herhangi bir düzlemde doğrusal kutuplu elektromagnetik alan oluşturmak için kullanılabilir. Bu, rastgele zaman aralıklarında birbirini izleyen, her biri farklı düzlemlerde kutuplu bir dizi ışık atmasının elde edilmesine olanak tanır. Bu serinin uzunluğu elektron demetinin uzunluğunu (paketçik veya atma) geçmemelidir. SEL giriş atmaları özel bir aygıt tarafından belirlenir ve genlikleri anlık salındırıcı ışınımı genliğinden oldukça büyük olmalıdır.

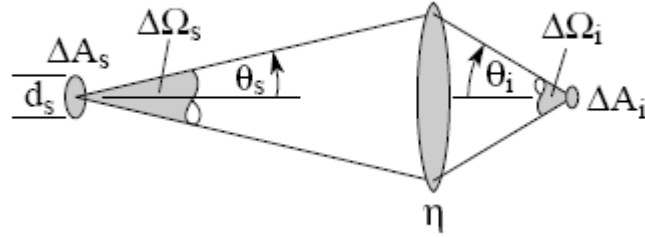


Şekil 2.31 Salındırıcı magnette kutuplanmanın elde edilmesi

2.3 Magnetlerin Işınım Karakteristikleri

Magnetlerin ışınım karakteristikleri incelenirken serbest elektron lazeri (dördüncü nesil ışınım kaynağı) ve sinkrotron ışınımı (üçüncü nesil ışınım kaynağı) dikkate alınacaktır. Serbest elektron lazerinde odaklayıcı, eğici, salındırıcı ve zigzaglayıcı magnetler kullanılırken; ışınım karakteristiklerini elde etmek açısından sinkrotron ışınımının karakteristik özelliklerini eğici magnet ışınımı, zigzaglayıcı magnet ışınımı ve salındırıcı magnet ışınımı olarak 3 formda ele alınır. Öncelikle magnetlerin karakteristik özelliklerini veren bağıntıları tanımları ile vermek gerekir. Genel olarak ışınım demetin kalitesi akı, aydınlık ve parlaklık nicelikleri ile incelenir. Parlaklık; kaynakta birim açı ve birim alan başına ışınımın gücü olarak tanımlanır ve “B” ile gösterilir (Wilson 2001):

$$B = \frac{\Delta P}{\Delta A \cdot \Delta \Omega} \quad (2.67)$$



Şekil 2.32 Parlaklık kavramı (Attwood 2007)

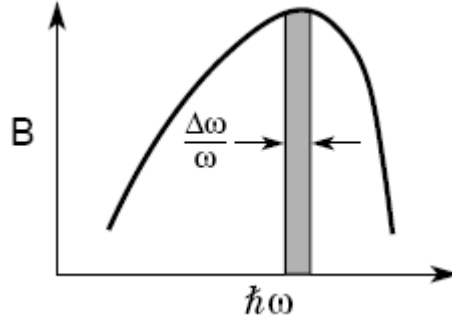
Parlaklık kavramı demet hattı tasarımlarında ve sinkrotron ışınımı deneylerinde de kullanıldığı için optik sistemlerde önem teşkil etmektedir. Mükemmel bir optik sistemin şartı aşağıda verildiği gibidir (Attwood 2007):

$$\Delta A_s \cdot \Delta \Omega_s = \Delta A_i \cdot \Delta \Omega_i = \%100 \quad (2.68)$$

Spektral parlaklık kavramı da, parlaklığın spektral band genişliğine oranı ile elde edilir. Spektral parlaklık “ $B_{\Delta\omega/\omega}$ ” ile verilir (Attwood 2007):

$$B_{\Delta\omega/\omega} = \frac{\Delta P}{\Delta A \Delta \Omega \Delta \omega / \omega} \quad (2.69)$$

Spektral band genişliği aşağıdaki şekilde verilmiştir:



Şekil 2.33 Spektral band genişliği (Attwood 2007)

Salındırıcı ışınımın spektral parlaklık kavramının anlaşılabilmesi için, enerji aralığında, birim band genişliğine saniyede düşen fotonların sayısı, yani foton akısının tanımı verilmelidir.

$$F = \frac{\text{foton}}{s \times \%0.1bg} \quad (2.70)$$

Akının bu tanımı yüksek konum çözünürlüğü gerektiren deneyler için her zaman yeterli değildir. Bu tür deneyler ışınım kaynağının noktasal olduğu varsayımına dayanırlar, yani ışınımın enine genişliği ve diverjansı son derece küçük olmalıdır. Bu durumda ışınımın enine genişliğinin ve diverjansının göz önünde bulundurulduğu aydınlık ve parlaklık kavramlarının önemi ortaya çıkmaktadır.

Aydınlık (Brilliance) demetin açısal diverjansı, $\sigma'_{x,z} = \sqrt{\varepsilon_{x,z} \beta_{x,z}}$ ile bağlantılı bir niceliktir. Tanım olarak aydınlık,

$$S = \frac{F}{2\pi\sigma'_x\sigma'_z} = \frac{F\sqrt{\beta_x\beta_z}}{2\pi\sqrt{\varepsilon_x\varepsilon_z}} = \text{foton} / s / mrad^2 / \%0.1bg \quad (2.71)$$

ile verilir (Attwood 2007). Burada F daha önce de verildiği gibi, % 0.1 band genişliğine saniyede gelen foton sayısıdır. Parlaklık, enine demet boyutları, $\sigma_{x,z} = \sqrt{\varepsilon_{x,z}\beta_{x,z}}$ ile de ilişkilidir.

$$B = \frac{F}{4\pi^2 \sigma_x \sigma_z \sigma'_x \sigma'_z} = \frac{F}{4\pi^2 \varepsilon_x \varepsilon_z} = \text{foton} / s / \text{mm}^2 / \text{mrad}^2 / \%0.1\text{bg} \quad (2.72)$$

Pratik birimler cinsinden, σ_z paketçik uzunluğu, \hat{I} pik akımı olmak üzere doyum ve pik parlaklıkları aşağıdaki eşitliklerle verilir (Attwood 2007):

$$B_s \cong 3.977 \times 10^{42} \left(\frac{E[\text{GeV}]}{N} \right)^4 \frac{\sigma_z[\text{mm}]}{(\lambda_u[\text{cm}][Kf_b(K)])^2} \quad (2.73)$$

$$B_p \cong 6.4 \times 10^{37} \frac{\hat{I}[A]}{N} \frac{E[\text{GeV}]^3}{\lambda_u[\text{cm}]L_c[\text{cm}]} \frac{\sigma_z[\text{mm}]}{1 + \frac{K^2}{2}} \quad (2.74)$$

Bu tanımlamalar gaussian bir elektron demet kesiti için verilmiştir. Bazı internet sitelerinde ve diğer kaynaklarda daha farklı tanımlar bulunmasına rağmen önemli olan, parlaklık ve aydınlık kavramlarının ikisinin de demetin konum uzayındaki yayınına bağlı olmasıdır.

Yayımlanan spektrumun çizgi şeklini türetmek kolaydır. Yayımlanan ışınım N periyodlu bir dalga trenine benzer, buna göre sonlu süreli bir etkileşmeye bağlı olarak, ışınımın spektral şekli aşağıdaki forma sahiptir (Attwood 2007).

$$f(\nu) = \left(\frac{\sin \nu / 2}{\nu / 2} \right)^2 \quad (2.75)$$

$$\nu = 2\pi N \frac{\varepsilon_n - \varepsilon}{\varepsilon_n} \quad (2.76)$$

Böylece pratik birimler cinsinden (foton/s/mrad/%0.1bg) eksen doğrultusunda ölçülecek akı,

$$\left. \frac{d^2 F_n}{d\omega d\Omega} \right|_{\theta=0} = 1.74 \times 10^{14} N^2 E^2 [GeV] I[A] F_n(K) f(nv_n) \quad (2.77)$$

$$F_n(K) = \begin{cases} \xi = \frac{1}{2} \frac{K^2}{1+K^2} \rightarrow \text{helissel undulatör için} \\ \xi = \frac{1}{4} \frac{K^2}{1+K^2/2} \rightarrow \text{doğrusal undulatör için olmak üzere} \\ \xi n^2 \left[J_{(n-1)/2}(n\xi) - J_{(n+1)/2}(n\xi) \right]^2 \end{cases} \quad (2.78)$$

şeklindedir (Wilson 2001). Burada n indisi, dalgaboyu, temel dalgaboyuna aşağıdaki gibi bağlı olan harmoniklik derecesidir:

$$\lambda_n = \frac{\lambda_u}{2n\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2} \right) = \frac{\lambda}{n} \quad \omega_n = n\omega = \frac{0.947n[E(GeV)]^2}{\lambda_u(cm)(1+K^2/2)} \quad (n=1,3,5,\dots) \quad (2.79)$$

$$\left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \right)_n = \frac{1}{nN} \quad (2.80)$$

Elektron demeti paketçığının enerji kazancı veya kaybı, elektromagnetik alandan enerji çekmek veya alana enerji vermek şeklindedir. Serbest elektron lazerinin kazancı ise tek bir geçişte kendiliğinden yayınının elektromagnetik dalga şiddetindeki oransal değişim olarak tanımlanır (Lee 1994). Elektronlar $\gamma > \gamma_r$ durumunda enerji kaybederken, $\gamma < \gamma_r$ durumunda enerji kazanırlar. $\gamma = \gamma_r$ durumunda ise daha önce de değinildiği gibi enerji geçişi olmaz. Işığın kavite içindeki olası kayıpları göz ardı edilirse, kazancın kayıptan büyük olduğu durumda sistem bir lazer salındırıcısı olarak çalışır. Kavite içinde elektromagnetik dalga enerjisindeki kaybın kazanca eşit olduğu duruma kararlı durum denir ve kararlı durumda lazer çıkış gücü pratik birimler cinsinden Eşitlik 2.81'deki gibi verilir (Lee 1994):

$$P_L = \text{verimlilik} \times EI_{ort} \quad (2.81)$$

Burada I_{ort} elektron demetinin ortalama akımı, E elektron demetinin enerjisidir. Aygıtın verimliliği ise $\sim 1/2N_u$ olarak hesaplanır. Lazer kazancı elektron demetinin pik akımı ile orantılı olduğu için lazer demetinin uzay zaman yapısı elektron demetinin yapısını yansıtır. Paketçikli demet ile çalışırken lazer demetinin uzunluğu, elektron demetinin uzunluğuna eşittir. Lazer alanındaki yükseltmenin sürdürülebilmesi için lazer atmalarının elektron demeti paketçikleri ile eşzamanlılığı da önemlidir. Eşzamanlılık, optik kavite uzunluğunun ayarlanması ile sağlanır.

Çizelge 2.2’de magnet ışınımının özellikleri ışınım karakteristiklerine, yapılarına ve fiyatlarına göre karşılaştırılmıştır.

Çizelge 2.2 Magnet ışınımaları (Attwood 2007)

Eğici magnet ışınımı	Zigzaglayıcı magnet ışınımı	Salındırıcı magnet ışınımı
Geniş spektrum	Yüksek foton enerjisi	Daha parlak ışınım
Kaliteli foton akısı	Daha fazla foton akısı	Daha küçük spot boyutu
Sıcaklık fazlası yok	Pahalı magnet yapısı	Kısmi koherentlik
Pahalı değil	Pahalı soğutma	Pahalı soğutma
Daha kolay kazanç	Daha az kazanç	Daha az kazanç

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Tezin hazırlamasında kaynaklar bölümünde belirtilen kitap ve dergiler, ayrıca konu ile ilgili dünya çapında çalışmakta olan bazı hızlandırıcı merkezlerinin internet sayfalarından giderek gerekli dökümanlardan yararlanılmıştır. Bu bilim merkezlerinden FZD, Dresden (Almanya) (www.fzd.de 2008) ve CANDLE, Yerevan (Ermenistan) (<http://www.candle.am/> 2008) tez için kullanılan önemli merkezlerdir.

Kurulması öngörülen THM Kızılötesi Serbest Elektron Lazeri tesisinde kullanılması planlanan salındırıcı magnet yapılar örnek alınarak dördüncü nesil ışınım kaynağının karakteristikleri ortaya konmuştur. Ayrıca kurulması öngörülen THM için halka tasarım çalışması Madx ve Beam Optics programlarıyla yapılmış olup, zigzaglayıcı magnetlerin ışınım karakteristikleri XOP ve SPECTRA programlarıyla incelenmiştir. Ek olarak, THM sinkrotron halkası için salındırıcı magnet tasarım çalışması RADIA programı kullanılarak magnetin 3 boyutlu görüntüleri de elde edilmiştir.

Tez çalışmam sırasında 2007 yılı Temmuz-Eylül ayları arasında iki ay süreli Almanya'da Hamburg şehrinde bulunan DESY yaz okulu programına katılarak, serbest elektron lazeri ve hızlandırıcılarda diagnostik çalışmaları hakkında deneyim kazandım. DESY FLASH elektron lazerine, MDI (Machine Diagnostic Instrument) grubu ile çalışarak demet görüntüleme monitörlerinin geliştirilmesine katkı verdim. Yine tez çalışmam sırasında THM IR SEL salındırıcı parametrelerinin çalışmalarını ve serbest elektron lazeri hakkında gerekli bazı bilgileri edinmek amacıyla 4 Nisan-10 Mayıs 2008 tarihleri arasında Almanya'nın Dresden şehrinde bulunan FZD Araştırma Merkezi ELBE Işınım Kaynağı Laboratuvarında demet uzunluğu ölçüm deneylerini bizzat yaparak, ölçümler aldım. Serbest elektron lazeri için gerekli bazı formüllerin de hesaplamalarına çalışarak, EXCEL programında grafiklerini elde ettim.

4. BULGULAR

4.1 Giriş

Parçacık hızlandırıcılarına dayalı ışınım kaynaklarında elde edilecek ışınımın enerjisi, gücü, akısı ve parlaklığı, kullanılan çok kutuplu zigzaglayıcı ve salındırıcı magnetlerin yapısına bağlıdır. Bu magnetlerin ışınımlar üzerine başlıca etkisi içlerinden geçirilen elektron demetinin dinamiğine bağlı olarak gelişen ışınımın koherentliği, monokromatikliği, eriştiği güç ve parlaklık değerleridir. Parçacık hızlandırıcılarına dayalı olarak elde edilen üçüncü nesil ve dördüncü nesil üretiminde kullanılan çok kutuplu wiggler (zigzaglayıcı) ve undulator (salındırıcı) magnetlerin dalgaboyu, akı, güç ve parlaklık gibi ışınım karakteristikleri üzerindeki etkileri tez kapsamında incelenmiştir (<http://thm.ankara.edu.tr>, 2008). Ankara Üniversitesi tarafından koordine edilen DPT2006K-120470 No'lu "Türk Hızlandırıcı Merkezinin Teknik Tasarımı ve Test Laboratuvarları" isimli YUUP projesi için ihtiyaç duyulan magnet çalışmasına da örnek olarak magnet tasarım çalışması ve ışınım karakteristikleri üzerinde çalışmalar tez içerisinde işlenmiştir. Yapılan tez çalışmasında hızlandırıcı fiziğinde kullanılan magnetlerin türlerinin öğrenilmesinin yanı sıra, fiziksel bağıntıları ve magnetlerden çıkan ışınımların karakteristikleri de ele alınarak çok yönlü bir çalışma ortaya konulmuştur. Serbest elektron lazeri için yapılan salındırıcı magnet çalışması ve sinkrotron halkası için yapılan magnet örgü yapısı ve magnetlerden çıkan ışınımları karakteristikleri çalışması bu bölümde ele alınacaktır.

4.2 THM IR SEL İçin Undulator Magnet Çalışması

Serbest Elektron Lazeri (SEL), hızlandırıcı fiziğinde dördüncü nesil ışınım kaynağı olarak bilinir. Bu serbest elektronun kaynağı, lineer hızlandırıcılar ya da sinkrotron gibi dairesel elektron hızlandırıcılarıdır. Serbest elektron lazeri, temelde elektronun kinetik enerjisini koherent elektromanyetik ışımaya dönüştürme prensibi ile çalışmaktadır. Bu dönüşümde salındırıcı adı verilen magnet yapılar kullanılmaktadır. Serbest elektron lazerlerinden elde edilen ışınım, sürekli ve ayarlanabilir bir dalgaboyuna sahiptir, femtosaniye mertebesinde atmlar üretir ve bu lazerlerin şiddeti oldukça yüksektir

(Wilson 2001). Prensiplerine göre yükselteç SEL, SASE SEL ve osilatör SEL olmak üzere üç çeşit serbest elektron lazeri vardır. Bunlardan yükselteç SEL, ışınımın dışarıdan verilen başka bir ışınım ile güçlendirilme prensibine dayanır. SASE SEL, kendiliğinden genlik artımlı yayınım (SASE) modu ile görelî elektron demetinin kutupları arasında sinüsel bir magnetik alan uygulanan salındırıcı magnetten geçerken kinetik enerjisinin bir kısmını ışına yoluyla kaybetmesi sonucu elde edilen serbest elektron lazeridir. Osilatör SEL, elektron hızlandırıcısından elde edilen görelî elektron demeti, salındırıcı magnetten geçirildiğinde magnet eksenî boyunca ani salındırıcı magnet ışınması yapar. Yayılan ışına iki ayna arasında tuzaklanarak salındırıcı magnetten sonradan giren elektron paketçikleri ile etkileşime girer. Elektron paketçikleri ile elektron manyetik alan arasındaki etkileşme ışınımın dalgaboyunun koherent yapılanmasını sağlar. Işınım alanı ile etkileşme sonucu oluşan bu koherent yapılanma koherent ışınımı oluşturur. Türk Hızlandırıcı Merkezi (THM) Serbest Elektron Lazerinin osilatör SEL modunda çalışması planlanmaktadır. Osilatör SEL'in temel bileşenleri salındırıcı (undulator) magnetler, elektron demeti ve aynalardır. Elektron demetinin salındırıcıdan geçmesiyle oluşan ışınım aynalar arasında tuzaklanır. Elektromagnetler için küçük periyotlarda karşılaşılan yüksek akım yoğunluklarına ulaşma probleminin üstesinden gelmek için saf kalıcı veya hibrit magnetler kullanılır. Salındırıcıda rezonans, elektronların negatif veya pozitif ivmelenmesini sağlar. Elektronlar rezonans etkileşmeleriyle paketçikli yapı haline gelirler.

Serbest elektron lazeri için gerekli hesaplamalar elektron demet enerjisinin ne olacağı belirlendikten sonra başlar. Tez çalışmasının bu kısmında THM için salındırıcı magnet çalışmaları bölüm 4.2'ye ait alt başlıklarda toplanarak açıklanmıştır.

4.2.1 Enerji aralığı

Belirli dalgaboyunda elektromagnetik ışınım üretmek için E , elektronun enerjisi ve K_{rms} , undulatör parametresi gereklidir. Sonuncu olarak, periyodu λ_u olan salındırıcının boyuna karar verilir (Wünsch 2008).

4.2.2 Enerji yayını

Yayınım değeri genelde % 3'tür ve rms enerji yayını sistemi imal eden ve kuran şirket tarafından garantilenir. Elektron enerji yayını için, daha fazla salındırıcı periyodu (N_u) kullanılarak kazancın duyarlılığı arttırılmıştır. Enerji yayını $\frac{\sigma_e}{E_e}$ ile verilir (Wünsch 2008).

4.2.3 Normalize enine emittans

Elektron demetinin enine emittansı ışınım karakteristiği için önem taşır ve aşağıdaki formülle verilmektedir (Wünsch 2008).

$$E_x^n = 2\gamma\sigma_x\sigma_{x'} \quad (4.1)$$

4.2.4 Mikro puls uzunluğu

Mikro puls uzunluğunu kontrol eden parametre aşağıdaki gibidir (Wünsch 2008).

$$\mu_c = \frac{\Delta}{\sigma_z}, \quad \Delta = N\lambda \quad (4.2)$$

Burada Δ (slippage) kayma uzunluğu ve σ_z atmanın rms uzunluğudur. μ_c için simülasyonlar Pulsar Physics gibi firmalar tarafından yapılır. Homojen olmayan genişleme etkileri,

$$\mu_\varepsilon = 4N\sigma_\varepsilon \quad (4.3)$$

ile belirtilir. Burada σ_ε elektron demetinin bağıl enerji yayılımıdır.

4.2.5 Salındırıcı malzemenin tipi

Salındırıcılarda kullanılan magnetik malzemeler magnetik alanın istenilen düzeyde olması için önem teşkil etmektedir. Aşağıdaki formülde magnetik alan periyot başına blok sayısı ile ilişkilendirilerek verilmiştir (Wünsch 2008).

$$B_0 = 2B_r \frac{\sin(E\pi/M)}{(\pi/M)} \left(1 - e^{-2\pi h/\lambda_u}\right) e^{-\pi g/\lambda_u} \quad (4.4)$$

Burada B_r , artık magnetik alan, E paketçik faktörü, M periyot başına magnetik blok sayısı, h magnetik blok yüksekliği, λ_u salındırıcı periyodu ve g salındırıcı aralığıdır.

Salındırıcı başına blok sayısı genellikle 4 alınır. Paketçik faktörü $0.95 < E \leq 1$ aralığındadır.

SmCo_5 için $B_r = 0.97$ T, SmCo_{17} için 1.05 T, NdFeB için 1.3 T'dır.

Seçilen malzemenin magnetik alan değerini ne kadar arttırmak istersek, malzeme doğru orantılı olarak o derece radyasyon yayacaktır. Örneğin, NdFeB bileşiminin magnetik alan değerleri iyi olmasına rağmen, radyasyondan dolayı ortama verdiği zarar daha fazladır.

THM için periyodu 3 cm ve 9 cm olan salındırıcılar için SmCo_{17} kullanılması önerilmiştir.

4.2.6 Alan kuvveti

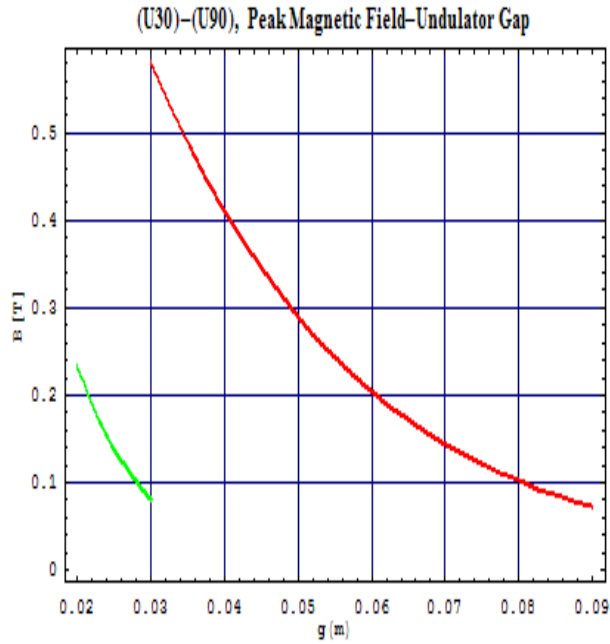
Salındırıcıda elektron demetinin izlediği eksen üzerinde oluşan salındırıcı alan genliği şu eşitliğe dayanmaktadır (Wünsch 2008):

$$B_u [T] = a \cdot \exp\left[b \frac{g}{\lambda_u} + c \left(\frac{g}{\lambda_u}\right)^2\right] \quad (4.5)$$

Burada g , salıdırıcının gap aralığıdır ve a , b ve c magnet katsayıları olup, undulatörün tipine ve materyaline bağılıdır, salıdırıcı üreten çeşitli firmaların kataloglarından malzeme seçildikten sonra belirlenirler.

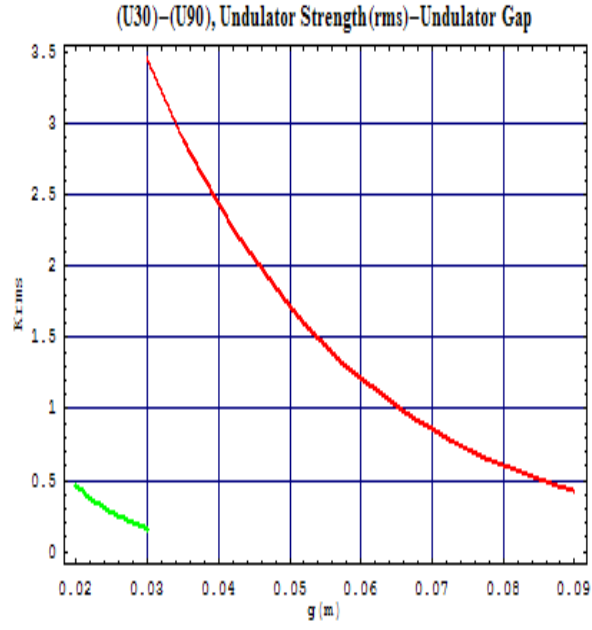
THM için bu katsayılar; $a=3.381$, $b=-4.730$ ve $c=1.98$ şeklindedir (Aksoy vd. 2008).

Bu katsayılar 4.5 eşitliğinde kullanılarak THM IRSEL için 3 cm ve 9 cm periyotlu salıdırıcılar için magnetik alanın salıdırıcı kuvvet parametresinin (şiddet çarpanının) gap açıklığına karşı grafikleri Mathematica programı ile çizdirilmiştir.



Şekil 4.1 THM IR SEL salıdırıcı magnetik alanı (Karsli ve Cenger 2008)

Şekil 4.1’de Türk Hızlandırıcı Merkezi kızılötesi serbest elektron lazeri laboratuvarında bulunması öngörülen periyotları 3 ve 9 cm olan salıdırıcıların tepe magnetik alan grafikleri salıdırıcı açıklığına karşı verilmiştir. Şekil 4.2’de ise; salıdırıcı açıklığının salıdırıcı şiddet çarpanına göre grafiğı verilmiştir.



Şekil 4.2 THM IR SEL salındırıcı şiddet çarpanı (Karslı ve Cenger 2008)

Salındırıcı şiddet çarpanı aşağıdaki formülle verilmektedir:

$$K=0,936B_u\lambda_u \quad (4.6)$$

Dalga boyu arttıkça şiddet çarpanının yükseldiği görülmektedir.

4.2.7 Salındırıcı periyodu ve sayısı

Salındırıcı periyodu ve elektronun enerjisi, üretilen lazer ışığının dalga boyunu belirler. Benzer şey, salındırıcının içindeki dalga klavuzu (waveguide) içinde yapılır (Wünsch 2008).

n=1 modu, SEL dalga klavuzunun enine modudur.

m=1 modu, dalga klavuzlarının yüzeyleri arasında, merkezde enine alan dağılımının bir maksimum oluştuğunu ifade eder. m=3 modu, 3 maksimumlu moda ve daha uzun dalga boyunda daha düşük salındırıcı parametreleri olmasını sağlar.

Zigzaglayıcı olmayan yüzeylerin değişik modları “n” ile sınıflandırılırken, zigzaglayıcı yüzeylerde “m” modu kullanılır. Temel moda n=1 ve m=0 olmaktadır. Serbest elektron lazerinde yüksek kazanç elde etmek için en az 40 salındırıcı periyodu gereklidir. En az 100 geçişten sonra doyuma gelindiğinde kazanç yüksek olur. Salındırıcılarda periyot sayısı “N_u” ile gösterilir. THM serbest elektron lazeri iki adet 3 cm ve 9 cm periyotlu salındırıcıya sahiptir. 3 cm periyotlu salındırıcının periyot sayısı 56 ve 9 cm periyotlu olan salındırıcının da periyot sayısı 40’tır (Akkurt, 2008).

THM salındırıcılarına ait çizelge aşağıda verilmektedir. Çizelge 4.1’de salındırıcılara ait karakteristik değerler görülmektedir.

Çizelge 4.1 THM salındırıcılarının temel parametreleri

THM IRSEL	Salındırıcı-1	Salındırıcı-2
Salındırıcı materyali	Sm ₂ Co ₁₇	Sm ₂ Co ₁₇
Salındırıcı periyodu[cm]	3	9
Magnetik alan [T]	0.083-0.232	0.075-0.579
Salındırıcı gap [cm]	2.0–3	5.5–9
K parametresi	0.16-0.47	0.44-3
Periyot sayısı	56	40
Uzunluğu [m]	1.68	3.6

4.2.8 Salındırıcı gap aralığı

Salındırıcılarda gap açıklığı ayarlanabilmektedir. Uygulanabilir maksimum salındırıcı açıklığı 85 mm civarındadır (Wünsch 2008). Bu da eşitlik 4.6 ile hesaplanırsa yaklaşık 0,5 civarında K değerine karşılık gelir. Bunun anlamı, daha yüksek gap açıklıklarında magnetik alan ve bundan dolayı elde edilen kazanç, lazer ışınımı için çok zayıf olur.

4.2.9 Faz hatası

Rms faz hatası, elektromagnetik dalga ile ilgili olarak % 5’ten daha küçükse, ideal bir salındırıcının kazancı % 1’den daha fazla azaltılacaktır. Faz hatası için % 8 uygundur (Wünsch 2008).

4.3 THM Sinkrotron Halkası ve Magnet Örgüsü

4.3.1 THM Sinkrotron Halkası Tasarımı

Dairesel hızlandırıcılar ilk olarak yüksek enerji deneylerinde parçacık demetlerinin çarpıştırılması için kullanılırken günümüzde dairesel hızlandırıcılar, sinkrotron ışınımı elde etmek için de kullanılmaktadır.

Türk Hızlandırıcı Merkezi projesi kapsamında gerçekleştirilen parçacık çarpıştırıcısına yönelik depolama halkası (dairese hızlandırıcı) tasarımının sinkrotron ışınım kaynağı olarak kullanılması planlanmaktadır. Tasarımı gerçekleştirilen depolama halkasının temel amacı çarpıştırıcı modunda çalışarak temel parçacıklardan olan charm parçacıklarının üretildiği bir parçacık fabrikasının uygulanmasıdır. Çarpıştırıcılarda önemli bir parametre olan ışınım;

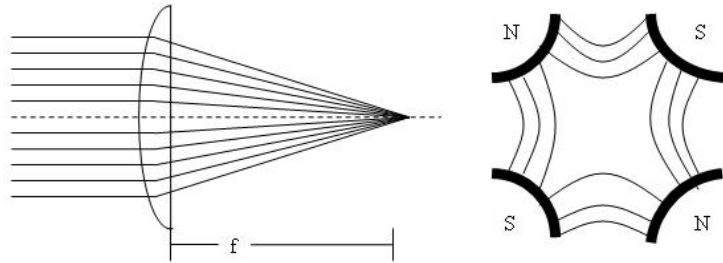
$$L = (1/4\pi)(N_1N_2/tA_T)f \quad (4.7)$$

Şeklinde verilmektedir. Burada N_1 ve N_2 , çarpışacak birinci ve ikinci demetin paketçik başına parçacık sayısı; t , ayrı ayrı paketçiklerin arasındaki zaman farkı; A_T , çarpışma bölgesinde paketçiklerin enine kesitleri ve f , parçacık paketçiklerinin dairese hızlandırıcıda dolanma frekansıdır.

İstenilen üçüncü nesil ışınımının parlaklık değerinin yüksek olması için parçacık demetinin yayılımının küçük tutulması gerekmektedir. Üçüncü nesil sinkrotron ışınım kaynaklarında yayılım 20 nm rad değerinden düşük olmalıdır. Depolama halkalarının tasarımında demetin dairese yörünge izlemesini sağlayan dairese hızlandırıcı boyunca yerleştirilmiş eğici magnetler, demetin uzaysal odaklanmasının sağlanmasına yarayan kuadropol magnetler ve demeti oluşturan yüklü parçacıkların momentum sapmalarının karşılanmasında kullanılan sextopol magnetlerin yanı sıra ışınım elde edilmesinde kullanılan salındırıcı ve zigzaglayıcı magnetler halkanın magnetik örgüsünü oluşturmaktadır. Depolama halkalarında kullanılan çeşitli örgü tipleri mevcuttur ve bu örgü tiplerinin temel amacı yayılımı minimum yapmak ve dispersiyon fonksiyonu

küçük olan magnetsiz bölgeler oluşturmaktadır (Winick 1998). Tasarımda magnetsiz bölgeler oluşturma gerekliliği vardır. Bu bölgeler, depolama halkasına demetin enjekte edilmesi için kullanılacak enjeksiyon bölgesi, sinkrotron ışınımı olarak kaybedilen demet enerjisinin karşılamasında kullanılan RF kavite, sinkrotron ışınım kaynağı olarak kullanılan salındırıcı ve zigzaglayıcı magnetlerin yerleştirilebileceği düz bölgeler ve çarpışma bölgesinin yerleştirileceği alan olarak göz önünde tutulmalıdır.

Depolama halkaları parçacıkları belli bir enerjide tutmaya yarayan sinkrotronlardır. Parçacıklar halkada dolanırlarken yaptıkları ışımadan dolayı enerji kaybederler. Bu enerji halkaya yerleştirilen bir veya daha fazla RF kavite tarafından tekrar demete sağlanır. Depolama halkaları üzerinde demetin hareketine etki eden çeşitli optik sistemler bulunur. Bu sistemin parçalarından ilki iki kutuplu magnetler olan eğici magnetlerdir. Yüklü parçacıklar eğici magnetten geçerken magnetik alan dolayısıyla saptmaya uğrar ve bu araçlar kullanılarak dairesel yörüngede dolanmaları sağlanır. Parçacık demetleri ilerlerken ışık demeti gibi dağılma gösterirler. Demetin bir arada tutulması için odaklayıcı magnetler kullanılır (Şekil 4.3).

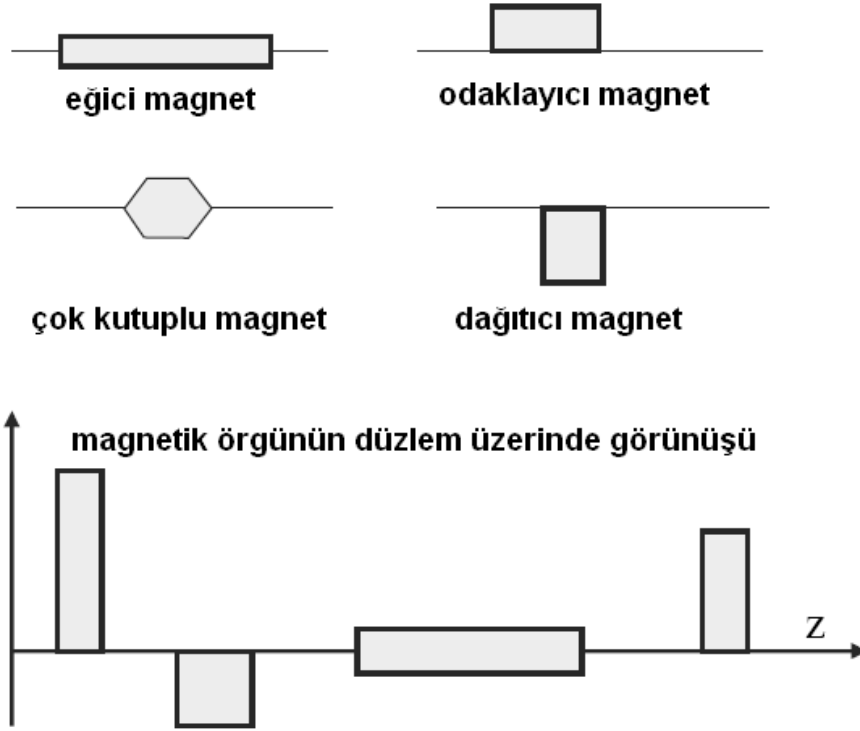


Şekil 4.3 Odaklayıcı magnetin parçacık demetlerini odaklaması ve yapısı

Bu magnetler demeti bir düzlemde odaklarken diğer düzlemde tam tersine dağıtır. Dolayısıyla bir eksen için dağıtıcı ve odaklayıcı magnetlerin belli bir düzen içerisinde yerleştirilmesi gereklidir. Bu sayede demet hem yatay hem düşey ekseninde dağılmadan depolama halkasında dolar.

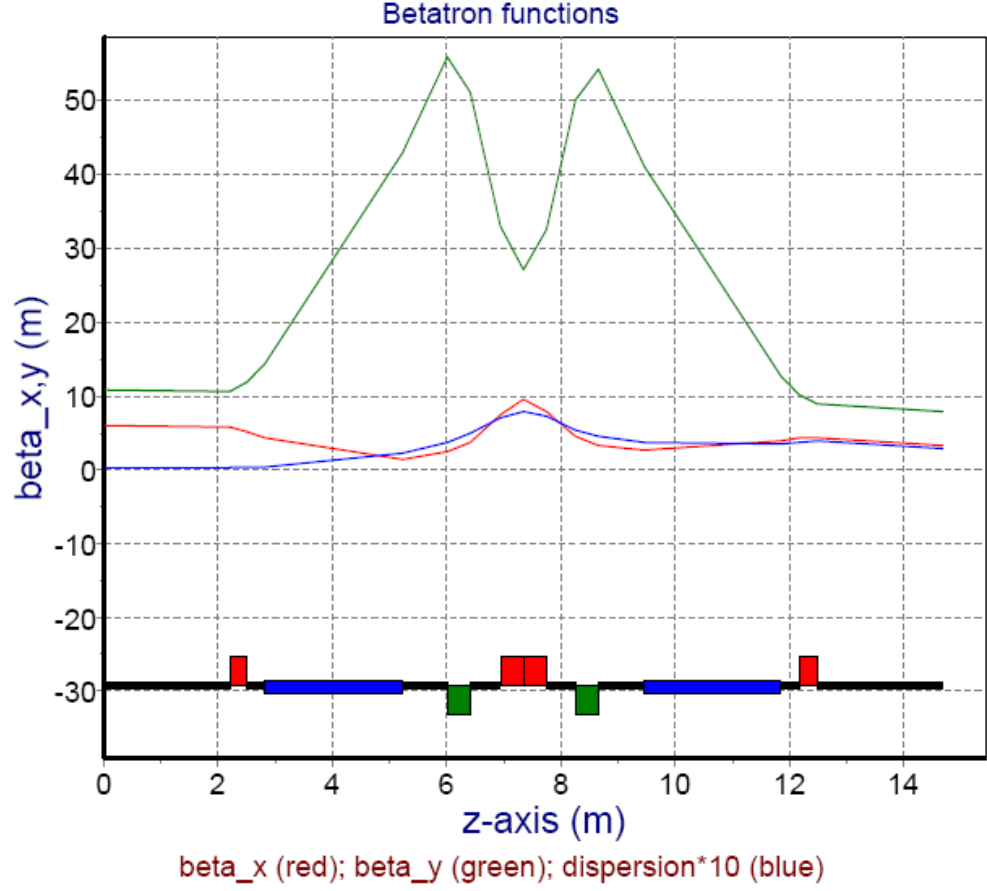
THM Charm fabrikasının depolama halkası için önerilen temel hücre DBA (double bending achromat) tipi bir yapıdır (Weidemann 2003). Yapılan tasarım çalışmasında, depolama halkasında 32 adet eğici (bending) magnet kullanılmıştır. Sinkrotron ışınımı

elde etmekte kullanılacak zigzaglayıcılar ve salındırıcılar ile RF kaviteler için ayrılan 14 adet magnetsiz bölge vardır ve her bir bölgenin uzunluğu 4.4 metredir. Çarpışma bölgesi için bırakılan iki bölgenin uzunluğu ise toplam 20 metredir. Şekil 4.5'te THM sinkrotron halkası için Beam Optics programı kullanılarak tasarlanan yarım FODO örgüsü ve betatron fonksiyonlarıyla beraber dispersiyon fonksiyonu gösterilmiştir.



Şekil 4.4 Magnetlerin Beam Optics programı içerisinde kullanılan şekilleri (Weidemann 2003)

Şekil 4.4'te FODO hücrelerini oluşturmak için kullanılan magnet türlerinin nasıl görüldüğü gösterilmektedir. Odaklayıcı olduğunda magnetler artı (+) yönde, dağıtıcı olduğunda magnetler eksen üzerinde eksi (-) yönde sıralanırlar.



Şekil 4.5 THM SI Halkasına ait betatron fonksiyonları

Tasarlanan FODO hücresi ile süper periyodu 16 adet olan bir sinkrotron halka tasarımı yapılırsa toplam betatron fonksiyonları Şekil 4.5'teki gibi olacaktır.

İdeal olmayan, gerçek bir demette parçacıkların ideal enerji sapmalarından kaynaklanan düzeltmelerin yapılması gerekmektedir. Dispersion kavramı bir parçacığın referans yörüngeye göre sapmasını tanımlamaktadır (Wilson 2001). Doğrusal demet optiği yaklaşımı ile yalnızca doğrusal terimleri göz önünde bulundurarak hareket denklemleri incelendiğinde geri çağırıcı kuvvetin yörünge doğrultusu olan s' 'e bağlılığı dışında sönümlü harmonik hareket denklemleri ile özdeşdir. Bu denklemin homojen çözümü $x \equiv 0$ 'da ki denge yörüngesi çevresinde oluşan salınımı ifade etmektedir. Bu tarz salınımlar betatron salınımları adını alırlar. THM depolama halkası tasarımında magnetsiz bölgelerde dispersiyonun düşük olması sağlanmıştır. Bu ışınım cihazlarından elde edilecek ışınımın kalitesi açısından önemlidir.

Charm fabrikasının depolama halkasına ait genel hızlandırıcı parametreleri Çizelge 4.2'den, kullanılan magnetlere ait parametreler ise Çizelge 4.3'ten görülebilir (Metz 2006).

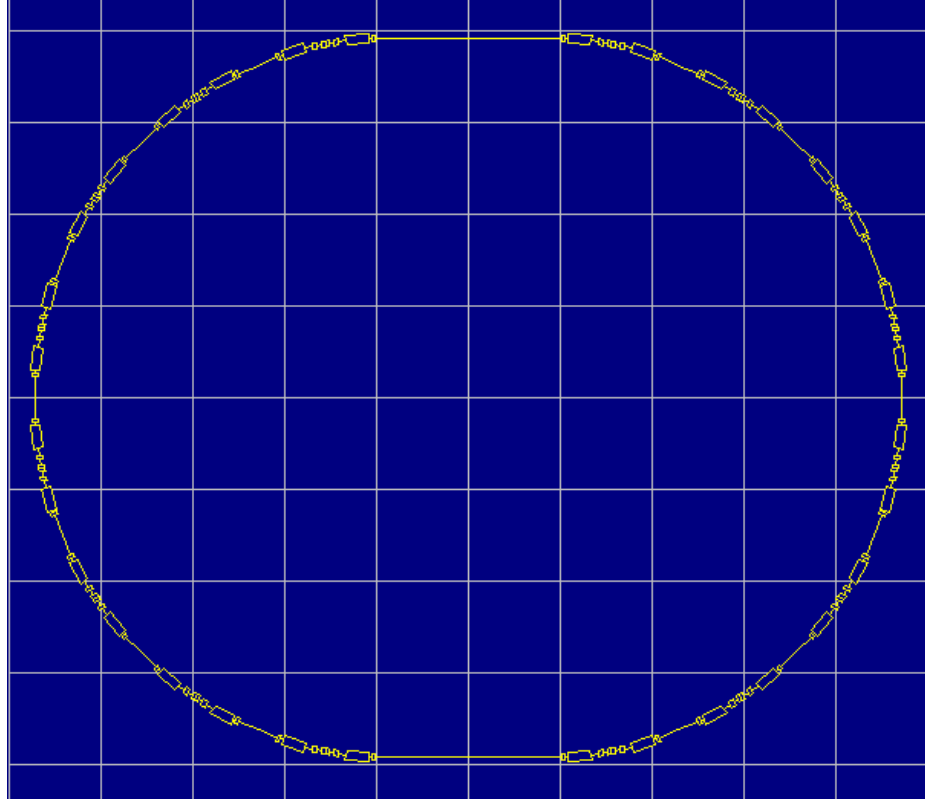
Çizelge 4.2 THM SI halkası için ana parametreler

Enerji (GeV)	3,56
Çevre (m)	258
Demet akımı (mA)	100
Tur başına enerji kaybı (MeV)	1.924
Yatay ve dikey sönüm zamanları τ_x, τ_y , (ms)	1.58, 1.568
Ayar (Q_x, Q_y)	15.8374, 1.2318
Chromaticity η_x, η_y	-22.47305, -12.9
Sinkrotron ayarı	0.022997
Harmonik sayısı	432
RF frekansı (MHz)	509.9
Toplam kullanılabilir RF gücü (kW)	100
Enerji yayılması (%)	0.1
Momentum compaction	-0.00143
Yatay ve dikey yayılım (nm rad)	20, 10

Çizelge 4.3 THM SI halkası için magnet parametreleri

	Boy (m)	k (l/m^2)	k (l/m^3)	ρ (m)	B (T)	B' (T/m)
QF1	0.38	1.65		-	-	20
QD	0.16	-1.29		-	-	-15.32
BD	1.45	-	-	7.383	1.6084	-
OF2	0.25	1.7		-		20.19

Çizelge 4.2'de QF1 ve QF2 demetin eksen boyunca odaklanmasını sağlayan odaklayıcı magnetler; QD ise demetin dağılmasını sağlayan magnetleri ve BD, bir dipol magnetten oluşan eğici magnetleri ifade etmektedir.



Şekil 4.6 Halkanın genel görünümü

Yukarıdaki şekilde THM için MAD programı çıktıları kullanılarak WINAGILE programı ile tasarlanan sinkrotron halkası görülmektedir.

selected particle type is: electron
charge multiplicity: Z = 1
rest mass: $mc^2 = 0.5110034$ MeV
atomic mass unit: A = 0.000548580253155327

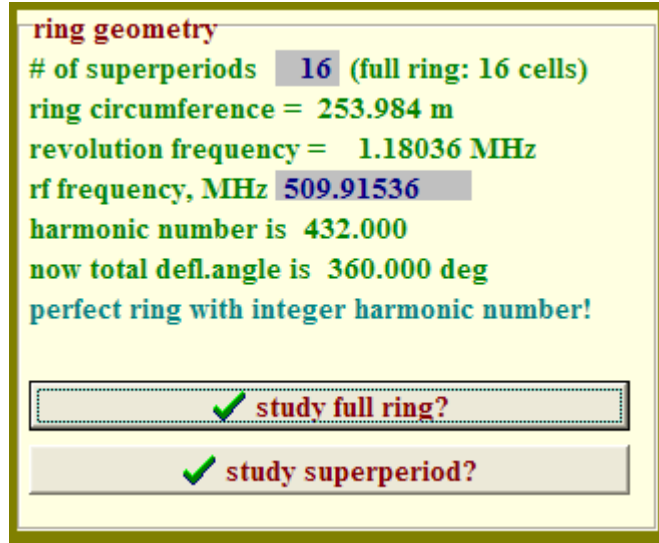
particle kinetic energy, E_{kin} (MeV)
 particle momentum, cp (MeV) **3560.000**

momentum = 3560.000 MeV/c
velocity = 2.998E8 m/sec
beta = $v/c = 0.999999990$

Şekil 4.7 Halkadaki parçacık tipi ve enerjisi

Şekil 4.7’de Beam Optics programında demet tipi ve enerjisine ait veriler görülmektedir. Ancak programda pozitron parçacığı seçilemediği için pozitron yerine elektron seçilmiştir. Bunun sebebi de pozitronun yükü hariç tüm özelliklerinin elektron ile aynı olmasıdır.

FODO hücresi kullanılarak tasarlanan depolama halkası için gerekli olan parametreler Şekil 4.8’de görüldüğü gibi program sayesinde hesaplanmıştır.



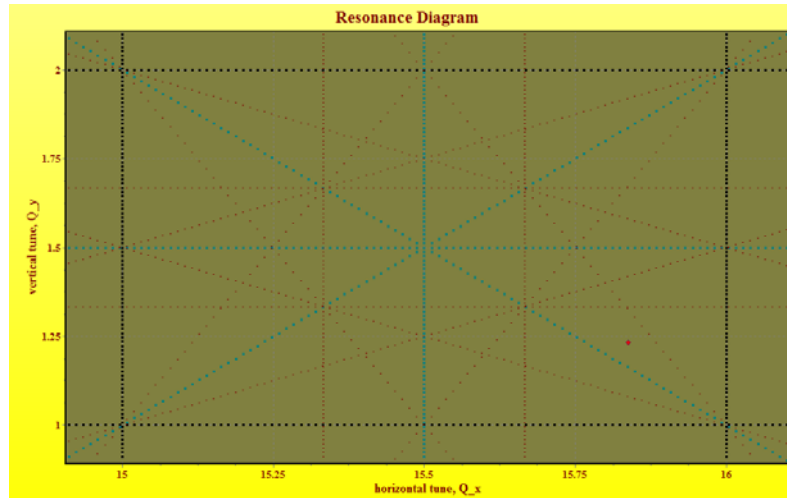
Şekil 4.8 Halkanın süper periyodu

Aşağıdaki şekilde demetin yaşam süresi elastik ve inelastik durumlar için gerekli parametreler girilerek program tarafından Coulomb saçılması, Bremsstrahlung, Touschek etkisi ve kuantum etkilenmeler için elde edilmiştir.

beam lifetime due to elastic, Coulomb scattering			
<input checked="" type="checkbox"/> update	residual gas (air, 20 deg C, 1 atm)	ratio height/width	1.0
	gas pressure, nTorr	vert. accept., mm*mr	10.0
	1.0	avg. beta_y, m	2951.2660
Coulomb scattering life time is 0.5379 hours			
beam lifetime due to inelastic scattering, Bremsstrahlung			
<input checked="" type="checkbox"/> update	residual gas (air, 20 deg C, 1 atm)	energy acceptance, %	6.871
	gas pressure, nTorr	1.0	
Bremsstrahlungs lifetime is 57.173 hours			
Touschek effect			
<input checked="" type="checkbox"/> update	energy acceptance, %	6.871	beta_x avg, m
	bunch current, mA	1.0	6.128
			coupling, %
			1.0
		beta_y avg, m	2951.266
		bunch length, mm	2.816
Touschek lifetime = 14779.960 hr			
beam lifetime due to quantum effects, clipping of Gaussian tails			
<input checked="" type="checkbox"/> update	energy acc, %	6.871	horiz. accept., mm*mr
	sig_e/E =	0.112 %	20.0
	n_e =	61.350	eps_x =
	tau_e >	6.953E39 hr	0.01328 mm*mr
			n_x =
			38.807
			eps_y =
			0.0001328 mm*mr
			n_y =
			274.408
			tau_y >
			1.396E40 hr
total quantum lifetime >= 3.49E39 hr			
total combined beam lifetime			
tot. combined beam lifetime = 0.533 hr			

Şekil 4.9 Demetin değişik durumlarda ömrü

Şekil 4.10'da THM sinkrotron halkası için tasarımı yapılan halkanın rezonans grafiği görülmektedir. Kırmızı nokta tasarladığımız halkanın rezonans durumunu göstermektedir. İdeal durumda kırmızı noktanın merkezde olması beklenir.



Şekil 4.10 Demetin rezonans diyagramı

Tasarlanan halkada kullanılacak olan RF kaviteelerin parametreleri Şekil 4.11’de verilmiştir.

rf voltage, kV <input type="text" value="19240.243"/>	rf frequency = 509.91536 MHz	change beam parameter ?	energy acceptance, % = 6.871
rf power, kW <input type="text" value="100.000"/>	harmonic number = 432.000	momentum cp, GeV <input type="text" value="3.560"/>	over voltage factor = 10
energy loss/turn = 1924.024 keV		beam current, mA <input type="text" value="100.000"/>	phase = 174.261 deg
addl. energy loss/turn [keV] <input type="text" value="0.0"/>			synchrotron frequency, kHz = 27.145
			rms bunch length, mm = 2.816
			synchrotron tune, nue_s = 0.022997
<input type="text" value="cp_min"/> < cp (GeV) < <input type="text" value="cp_max"/>			

Şekil 4.11 THM SI Halkası RF kavite parametreleri

Tasarlanan örgüde toplam 14 adet magnetsiz bölge vardır. Bunlardan iki adeti RF kaviteer için kullanılacaktır. İki adet olmasının sebebi aşağıdaki hesaplamalarla açıklanmıştır.

Parçacık başına bir turda kaybedilen enerji 1924 keV’dir. Eğici magnetlerde kaybedilen toplam güç;

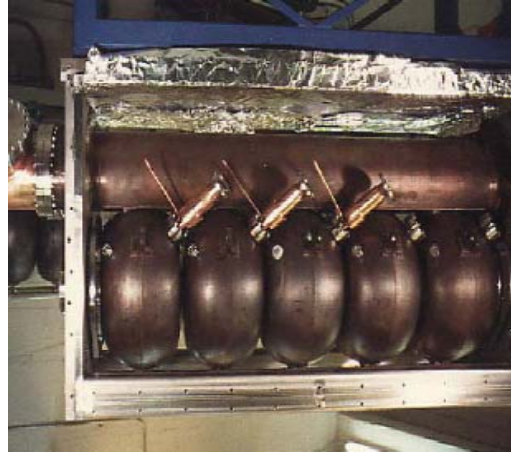
$0.0356 \text{ MeV} \cdot 100 \text{ mA} = 3.56 \text{ kW}$ olarak hesaplanır.

$3.56 \text{ kW} \cdot 32$ (eğici magnet sayısı) = 113.92 kW’tır.

Bir tur için toplam kaybedilen güç yaklaşık olarak 133 kW’tır.

Eğer Şekil 4.12’deki 5 hücreli CESR RF kavitesi kullanılırsa, hücre başına kazanılan güç 19 kW ise bir RF kavitede 95 kW’lık güç kazanımı olur.

Kaybettiğimiz güç 133 kW ise; kullanacağımız kavite sayısı $133 \text{ kW} / 95 \text{ kW} = 1.4$ çıkar. Diğer kayıplarda göz önüne alınırsa 2 adet RF kavite kullanmamız yeterli olacaktır.



Şekil 4.12 CESR RF kavitenin görüntüsü (<http://www.cern.ch/rf/cavity>, 2008)

14 adet magnetsiz bölgede 2 adet RF kavite kullanılacak ise, 2 adette dedektörler için magnetsiz bölge kullanılırsa, sinkrotron ışınımı kaynağı olarak kullanılacak aletler ile 10 adet demet hattı tasarlanabilir. Depolama halkasında bulunan 32 adet eğici magnet ile de sinkrotron ışınımı elde edilebilir.

4.3.2 Halkada kullanılan magnetlerin ışınım karakteristikleri

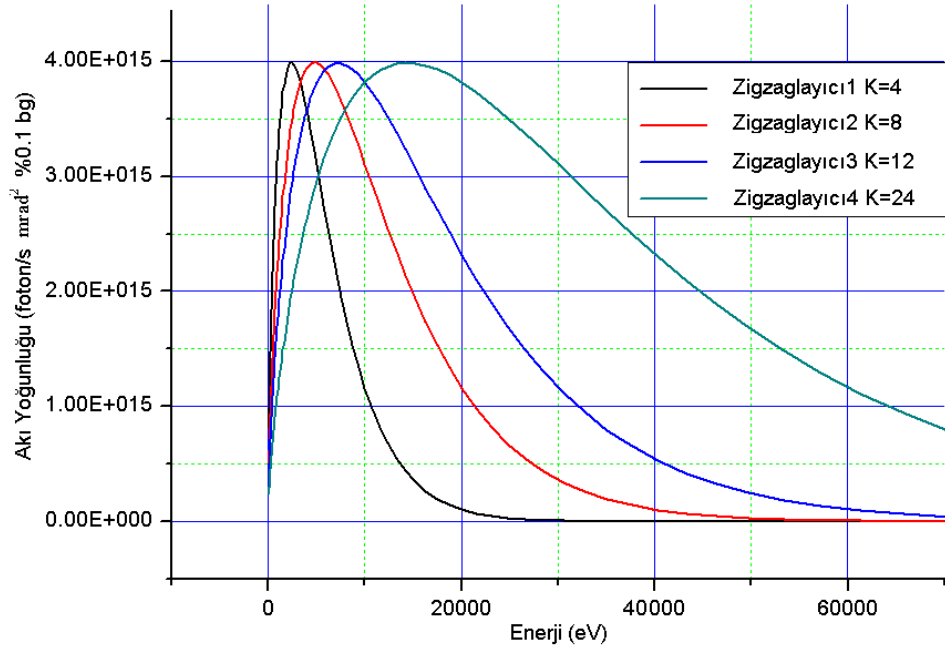
THM sinkrotron ışınım halkasında kullanılacak örnek zigzaglayıcı ve salındırıcıların ayrıntılı parametreleri Çizelge 4.4'te verilmiştir. Burada kullanılan eklentiler kalıcı magnetten ($NdFe_2$) yapılmıştır.

Çizelge 4.4 THM Depolama Halkasında kullanılması öngörülen zigzaglayıcı ve salındırıcı magnetler

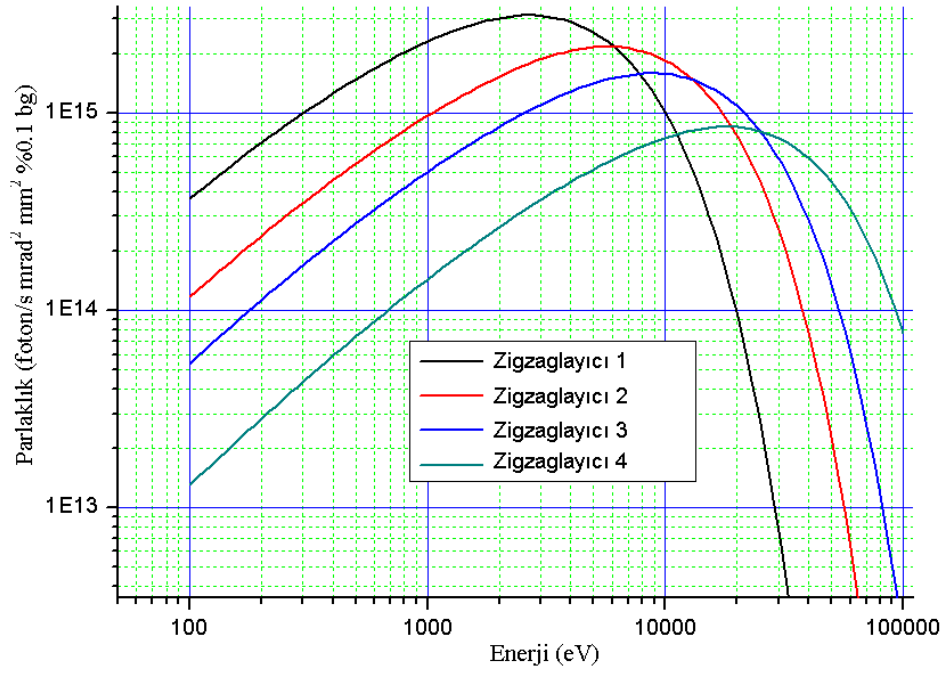
Işınım kaynağı	Zigzaglayıcı-1	Salındırıcı-1	Salındırıcı-2
Periyot uzunluğu (m)	0.10	0.08	0.04
Periyot sayısı	35	43	100
Magnetik alan (T)	0.85	0.16	0.32
K parametresi	8	1.2	1.2
Gap açıklığı (mm)	31	90	94

Yukarıda parametreleri verilen salındırıcılar ve zigzaglayıcı magnetler halka üzerindeki sinkrotron ışınım kaynaklarıdır.

Zigzaglayıcılar tasarlanırken depolama halkasının parametreleri ve magnetsiz bölgelerin uzunluğu dikkate alınarak mümkün olduğunca yüksek akı yoğunluğu ve geniş bir spektrum elde edilmeye çalışılmıştır. Zigzaglayıcı 1,2,3,4 sırasıyla $K=4, 8, 12, 24$ değerlerine sahiptir ve hepsi için periyot uzunluğu 10 cm, toplam uzunluk 3.5 m olarak alınmıştır. Bu zigzaglayıcı magnetlere ait ışınımın akı ve parlaklık grafikleri aşağıdaki gibi verilmiştir.

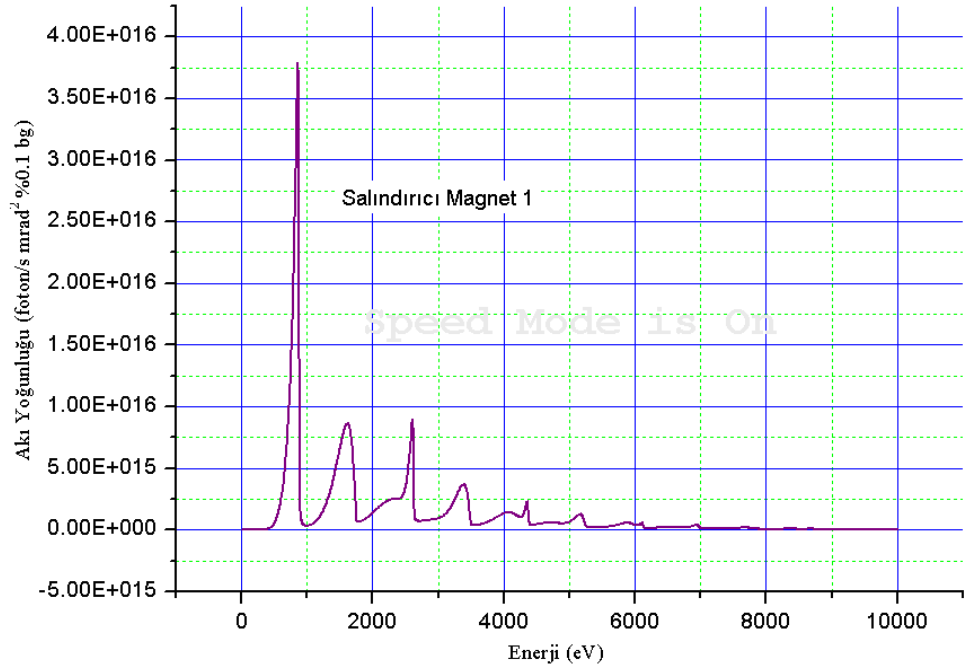


Şekil 4.13 THM depolama halkasında kullanılacak zigzaglayıcı magnetlerin akı grafikleri

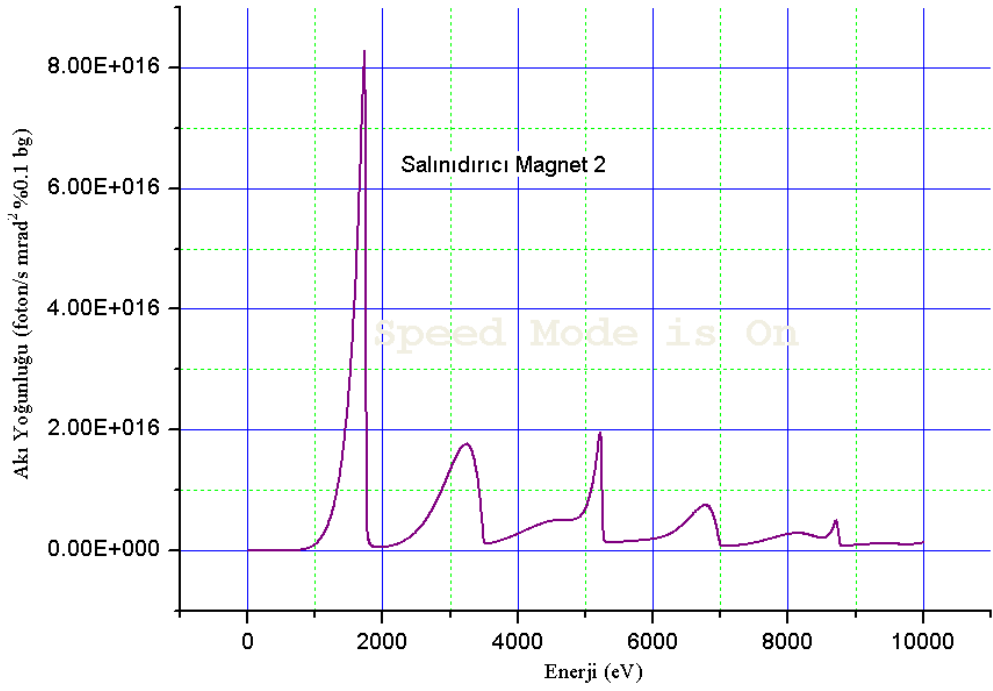


Şekil 4.14 THM depolama halkasında kullanılacak zigzaglayıcı magnetlerin parlaklık grafikleri

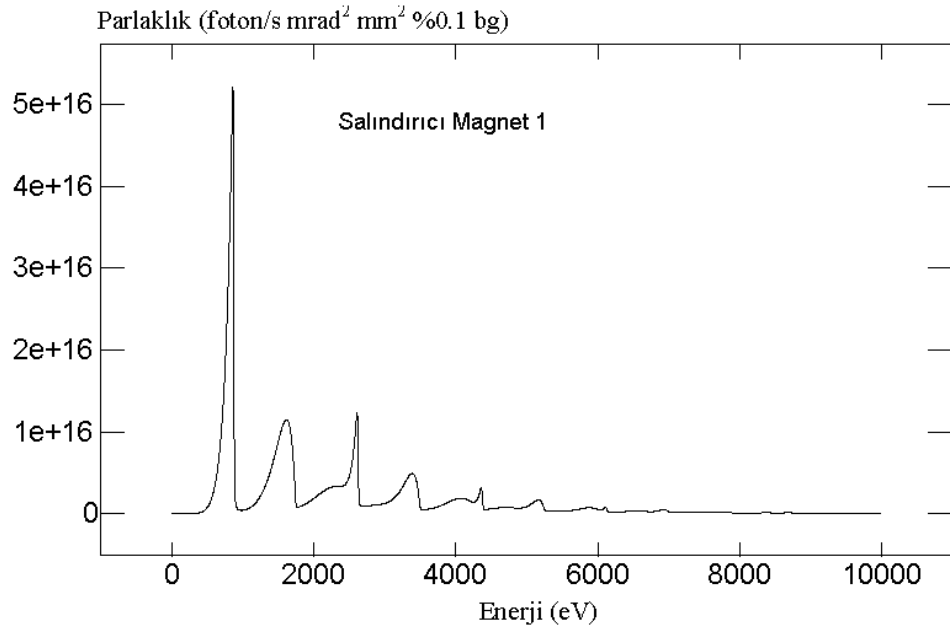
Halka tasarımında çizelgeden de görüldüğü gibi kuvvet parametreleri aynı olacak şekilde farklı geometrilere sahip olan iki çeşit salındırıcı magnet kullanılmıştır. Bu salındırıcılardan elde edilecek ışınımın akı yoğunluğu ve parlaklık grafikleri aşağıda verilmektedir.



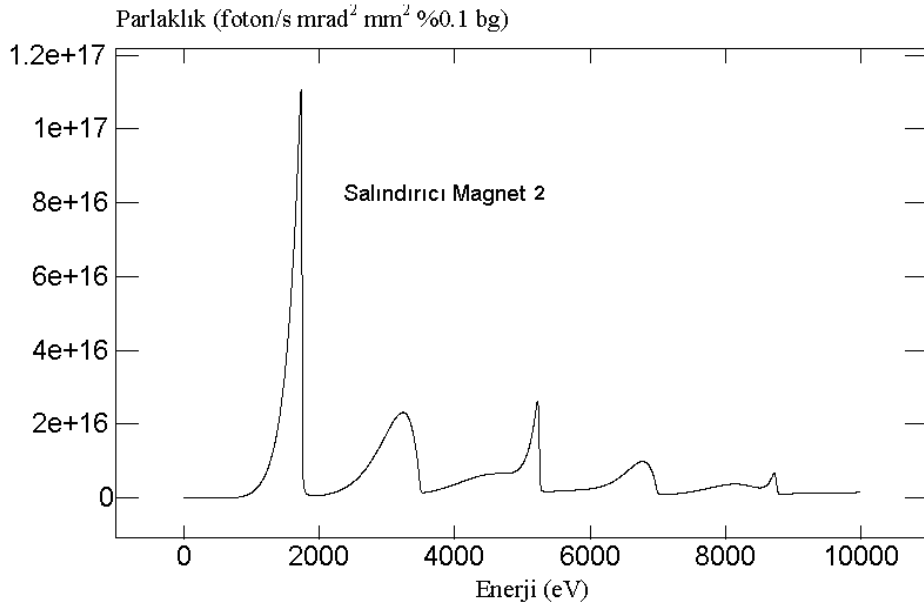
Şekil 4.15 THM depolama halkasında kullanılacak salıncırıcı magnet 1'e ait akı grafiği



Şekil 4.16 THM depolama halkasında kullanılacak salıncırıcı magnet 2'ye ait akı yoğunluğu grafiği

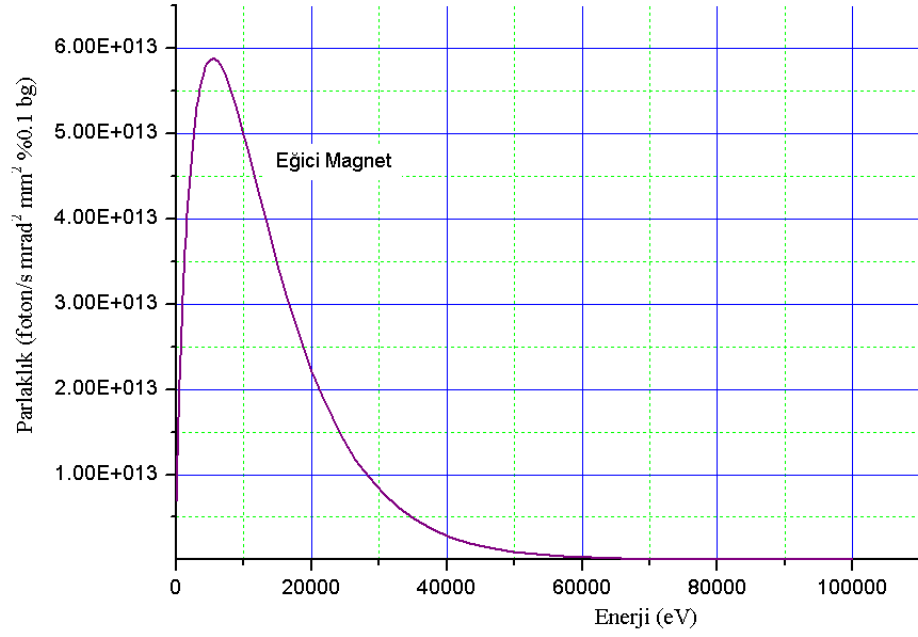


Şekil 4.17 Salıncırıcı magnet 1'e ait parlaklık grafiği



Şekil 4.18 Salıncırıcı magnet 2'ye ait parlaklık grafiği

Halkanın tasarımında kullanılan eğici magnetin eğrilik yarıçapı 12,22 m ve manyetik alanı 0,972 T'dır.



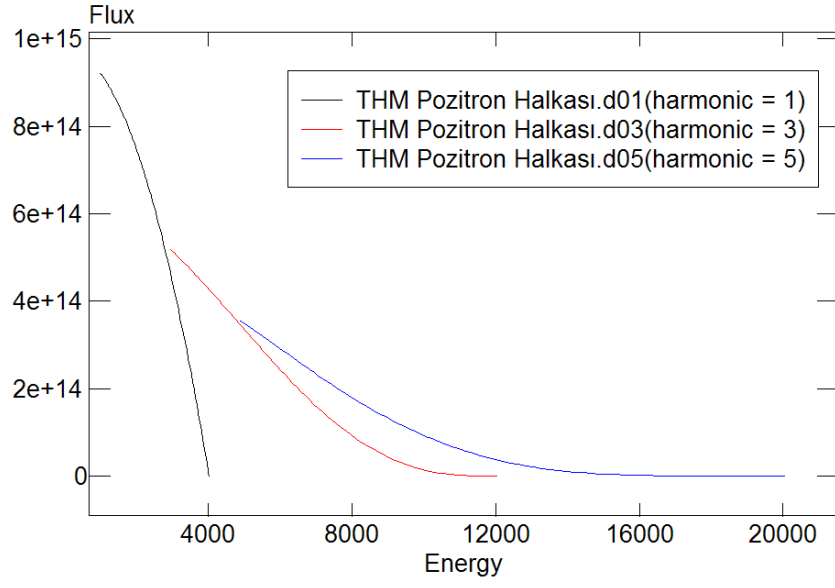
Şekil 4.19 THM depolama halkasında kullanılacak eğici magnete ait parlaklık grafiği

Türk Hızlandırıcı Merkezi depolama halkası için bir adet daha salındırıcı magnet tasarlamak istenirse parametreler aşağıdaki Çizelge 4.5'teki gibi seçilebilir.

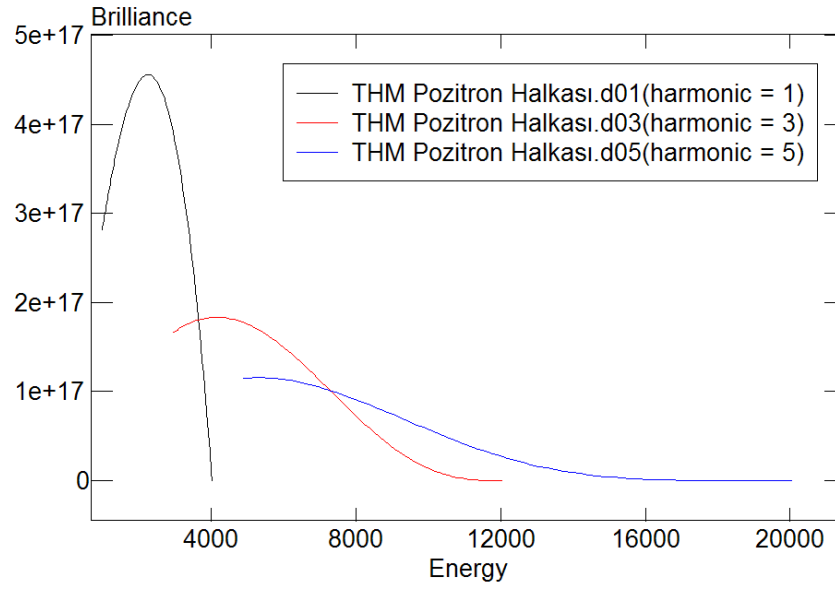
Çizelge 4.5 THM depolama halkasında kullanılması öngörülen periyodu 3 cm olan salındırıcı magnet parametreleri

Salındırıcı periyodu (mm)	30
Periyot sayısı	60
K Salındırıcı parametresi	0.3-0.9

SPECTRA programında, 56 GeV enerjili pozitron demetli THM'nin doğrusal salındırıcısı için elde edilen ışımın sonuçları 3,057 keV birinci harmonik enerjisi ve 8,6 A'lik pik akımındaki, pik parlaklığı $2,64 \cdot 10^{18}$ foton/sn.mrad².mm² .%0,1b.g. birinci harmoniğin toplam akısı ise $3,81 \cdot 10^{14}$ foton/sn.mrad² .%0,1b.g. olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.20 THM depolama halkasında kullanılacak 30 mm periyotlu salındırıcı magnete ait akı grafiği



Şekil 4.21 THM depolama halkasında kullanılacak 30 mm periyotlu salındırıcı magnete ait parlaklık grafiği

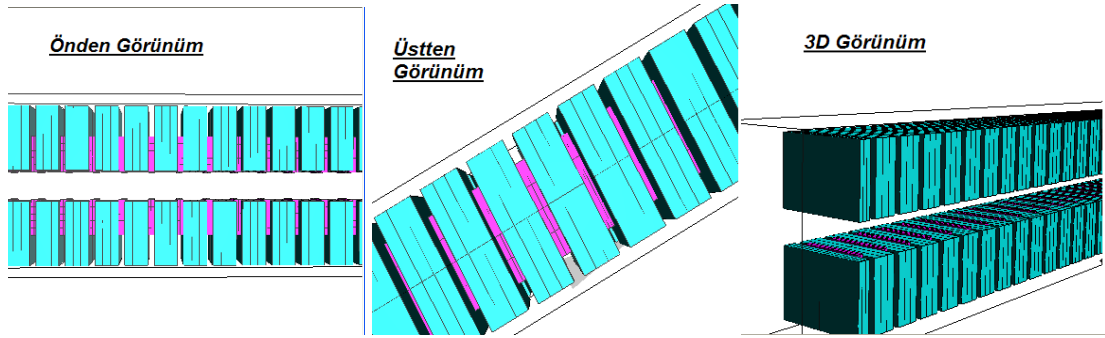
4.3.3 THM Sinkrotron Halkası için salındırıcı magnet tasarımı

THM sinkrotron ışınım halkasında kullanılmak üzere salındırıcı bir magnete ait 3 boyutlu tasarım RADIA programı kullanılarak yapılmıştır.

Salındırıcı türü Demir-Hibrit (Hybrid with Iron) kullanılacak magnet malzemesi ise NbFeB kalıcı (permanent) magnet olarak seçilmiştir. Gap aralığı 20 cm alınarak RADIA programında 3 cm periyotlu, periyot sayısı 60 olan salındırıcı tasarlanmıştır. Tasarımı yapılan salındırıcı 1.8 m uzunluğundadır. Yapılan tasarımın sonuçlarına göre;

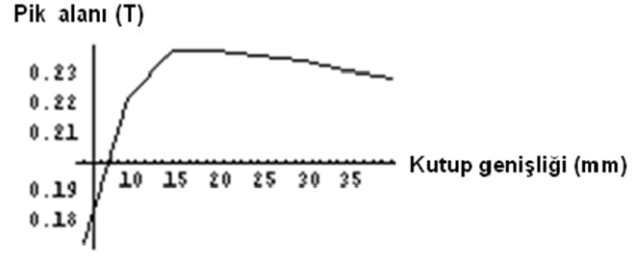
- Mıknatıslanmanın (magnetization) ortalama kararlılığı: 0,000283585 T
- Maksimum tam mıknatıslanma: 2,10744 T
- Maksimum H vektörü: 1,07691 T
- Merkezdeki magnetik alan $B_z(0,0,0)$: 0,240426 T

değerleri elde edilmiştir (Cenger vd. 2007).



Şekil 4.22 THM depolama halkasında kullanılacak 30 mm periyotlu salındırıcı magnete ait RADIA programı simülasyon sonuçları

Şekil 4.22'de THM SI halkası için tasarımı yapılan salındırıcının önden, üstten ve üç boyutta görüntüleri mevcuttur.



Şekil 4.23 THM SI Halkası salındırıcı magnete ait pik magnetik alanı (Cenger vd. 2007)

THM SI Halkası için RADIA programı kullanarak tasarlanan salındırıcı magnete ait pik alanına karşı kutup genişliği grafiği Şekil 4.23'te verilmiştir. Pik alan değerinin yaklaşık 0,24 Tesla olduğu görülmektedir.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Yapılan tez çalışmasında hızlandırıcı fiziğinde kullanılan magnetlerin türlerine, fiziğine ve ana parametrelerine yer verilmiştir. Ayrıca, magnetlerden elde edilen ışınım karakteristiklerine etkisi araştırılmıştır. Bunların yanı sıra, hızlandırıcılarda kullanılan kalıcı (permanent) magnetlerin fiziğine ve uyarımlarına özel bir yer ayrılmıştır.

- Hızlandırıcılarda kullanılan magnet türleri tez içerisinde anlatılmıştır. Kalıcı magnet uyarımı konusu fiziksel formülleriyle ayrıca ele alınmıştır.
- Salındırıcı magnet karakteristikleri incelendikten sonra THM IR SEL tesisinde kullanılması planlanan salındırıcı magnetler için fiziksel parametre değerleri hesaplanmıştır (Karşlı ve Cenger 2008).
- Sinkrotron ışınımı elde etmek amacıyla oluşturulan THM pozitron halkası için tez içerisinde bazı çalışmalar yapılmıştır. Magnetik örgü için önerilen temel hücre DBA (double bending achromat) tipi bir yapıdır. Yapılan tasarım çalışmasında, depolama halkasında 32 adet eğici (bending) magnet kullanılmıştır. Sinkrotron ışınımı elde etmekte kullanılacak zigzaglayıcılar ve salındırıcılar ile RF kaviteler için ayrılan 14 adet magnetsiz bölge vardır ve her bir bölgenin uzunluğu 4.4 metredir. Çarpışma bölgesi için bırakılan iki bölgenin uzunluğu ise toplam 20 metredir.
- THM pozitron halkasının görünümü WINAGILE programı ile ve bu halkaya ait betatron fonksiyonları Beam Optics programı ile elde edilmiştir.
- 258 m çevreli THM sinkrotron halkasında kullanılması öngörülen salındırıcı ve zigzaglayıcı magnetlerin ışınım karakteristikleri incelenmiştir. Akı ve parlaklık gibi ışınım karakteristiklerine ait değerler XOP ve SPECTRA programlarından elde edilen grafiklerle verilmiştir ve sonuçların tipik değerler olduğu gözlenmiştir.

- THM sinkrotron halkasında kullanılması öngörülen bir salındırıcı örnek alınarak, bu salındırıcıya ait geometrik çizim ve magnetik alan değerleri RADIA programıyla elde edilmiştir. Gap aralığı 20 cm alınarak, 3 cm periyotlu, periyot sayısı 60 olan salındırıcı tasarlanmıştır. Tasarımı yapılan salındırıcı 1.8 m uzunluğundadır.
- Sonuç olarak, parçacık hızlandırıcılarında kullanılan magnetik örgüleri istenilen demet kalitesinin sağlanmasında, benzer şekilde ışınım kaynaklarında kullanılan çok kutuplu magnetler ise istenilen ışınım kalitesini sağlamada vazgeçilmez bir role sahiptir. Bunun için, parçacık hızlandırıcıları ve ışınım kaynaklarında kullanılan magnetlerle ilgili Ar-Ge ve üretim çalışmaları son yıllarda büyük bir sektör oluşturmuş ve ivme kazanmıştır.

KAYNAKLAR

- Akkurt, İ. 2008. Design Report On Turkish Accelerator Center Infrared Free Electron Laser (IR FEL) and Bremsstrahlung Facility, A.Ü. YUUP Proje Grubu Ankara.
- Aksoy, A., Karşlı, Ö., Ketenoğlu, B., Yavaş, Ö., Çiftçi, A.K., Nergiz, Z. and Kasap, E. 2008. The Status of TAC Infrared Free Electron Laser (IR-FEL) Facility
- Aksoy, A., Yavaş, Ö. and Karşlı, Ö. 2008. The Turkish Accelerator Complex, IR FEL Project Infrared Physics & Technology, 51, 378-381. Proceedings of EPAC 2008, Genoa, Italy
- Anonim. 2008. Türk Hızlandırıcı Merkezi (THM). Web sitesi. <http://thm.ankara.edu.tr>
Erişim Tarihi: 03.05.2008.
- Anonymous. 2008. Web Sitesi:
<http://www2.slac.stanford.edu/vvc/accelerators/moremagnets.html>, Erişim Tarihi: 17.01.2008.
- Anonymous. 2008. Web Sitesi: www.technicoil.com/magnet.html, Erişim Tarihi: 17.01.2008.
- Anonymous. 2008. Web Sitesi:
<http://www2.slac.stanford.edu/vvc/accelerators/magnets.html>, Erişim Tarihi: 18.03.2008.
- Anonymous. 2008. Web Sitesi: <http://www.noiw.net/zukio.jpg>, Erişim Tarihi: 14.04.2008.
- Anonymous. 2008. Center for the Advancement of Natural Discoveries using Light Emission (CANDLE). Web Sitesi: <http://www.candle.am/>, Erişim Tarihi: 03.05.2008.
- Anonymous. 2008. CERN. Web Sitesi: <http://www.cern.ch/rf/cavity>, Erişim Tarihi: 02.08.2007.
- Anonymous. 2008. Forschungszentrum Dresden (FZD). Web Sitesi: <http://www.fzd.de>, Erişim Tarihi: 07.05.2008.
- Attwood, D. 2007. EE290F, <http://www.coe.berkeley.edu/AST/srms>.

- Cenger, Y. Kaya, Ç. ve Yavaş, Ö. 2007. Sinkrotron Işınımı ve Serbest Elektron Lazeri için Salındırıcı ve Zigzaglayıcı Magnetler, III. Ulusal Parçacık Hızlandırıcıları ve Uygulamaları Kongresi, 17-19 Eylül 2007, Bodrum. Web Sitesi: <http://homepage.uludag.edu.tr/~uphuk3/>, Erişim Tarihi: 11.05.2008.
- Elias, L. R., Fairbank, W. M., Madey, J. M. J., Schwettman, H. A. and Smith, T. I. 1976. Observation of stimulated emission of radiation by relativistic electrons in a spacially periodic transfer magnetic field. PRL, 36, 717.
- Karsli, Ö. ve Cenger, Y. 2008. Undulator Magnets for TAC IRFEL, Türk Hızlandırıcı Merkezi Projesi V. YUUP Çalıştay1, YTÜ, 5-7 Haziran 2008, İstanbul.
- Karlı, Ö., Mete, Ö. ve Yavaş, Ö. 2005. TAC Test Laboratuvarı Olarak Kıvılcık Ötesi Serbest Elektron Lazeri. 23. Ulusal Fizik Kongresi (TFD23), Muğla Üniversitesi, Muğla.
- Lee, S. Y. 1994. Accelerator Physics. World Scientific, 480p, Singapore.
- Marks, N. 2006. CCLRC, Daresbury Laboratory, Warrington.
- Mete, Ö., Karsli, Ö. and Yavas, Ö. 2006. An Optimization Study for an FEL Oscillator as TAC Test Facility, Proceedings of EPAC 2006, Edingburgh, Scotland
- Papadichev, V. A. 1996. Polarization in free electron lasers. NIMA, 375, 483-486.
- Russenschuck, S. 1995 Design of Accelerator Magnets. CERN Library, 1-17, Switzerland
- Schlueter, R.D. 1994. Wiggler and Undulator Insertion Devices. CA, 1-20, USA.
- Wiedemann, H. 2003. Synchrotron Radiation. Springer, 269, Germany.
- Wilson, E. 2001. An introduction to particle accelerators. Oxford University Press, 249, New York.
- Winick, H. 1998. Fourth Generation Light Sources, IEEE, 37-41, USA.
- Wünsch, R. 2008. Requirements and Recommendations for the NIJMEGEN THz-FEL

EK-1 Magnetik Birimler

Nicelik	Sembol	Birim	Birimin ismi
Mıknatıslanma	H_c	$A m^{-1}$	Metre başına Amper
Etkin Alan	A_e	m^2	Metre kare
Etkin Uzunluk	l_e	m	Metre
Etkin Geçirgenlik	μ_e	-	-
İndüklenmiş Gerilim	E	V	Volt
İndüktans	L	H	Henry
İndüktans Faktörü	A_1	nH	Nanohenry
Magnetik Alan Kuvveti	H	$A m^{-1}$	Metre başına Amper
Magnetik Akı	Φ	Wb	Weber
Akı Bağlantısı	λ	Wb-t	Weber-tur
Magnetik Akı Yoğunluğu	B	T	Tesla
Manyetomotor Kuvveti	F_m	A	Amper
Geçirgenlik	μ	$H m^{-1}$	Metre başına Henry
Vakumda Geçirgenlik	μ_0	$H m^{-1}$	Metre başına Henry
Görelî Geçirgenlik	μ_r	-	-
Relüktans (magnetik direnç)	R_m	$A W b^{-1}$	Weber başına Amper
Artık Magnetik Alan	B_r	T	Tesla

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Yeşim CENGER

Doğum Yeri : Bursa

Doğum Tarihi : 30.12.1983

Medeni Hali : Bekar

Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu

Lise : H. Ahmed Yesevi Lisesi (YDAL), Eskişehir (2002)

Lisans : Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Fizik Mühendisliği Bölümü (2006)

Yüksek Lisans: Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı (Eylül 2006- Temmuz 2008)

Çalıştığı Kurum

Ankara Üniversitesi

Türk Hızlandırıcı Merkezi Projesi (2006-)

Yayınları

- 1- Sinkrotron Işınımı ve Serbest Elektron Lazeri için Salındırıcı ve Zigzaglayıcı Magnetler, III. Ulusal Parçacık Hızlandırıcıları ve Uygulamaları Kongresi (UPHUK-III), 17-19 Eylül 2007, Bodrum.
- 2- Türk Hızlandırıcı Merkezi Kızılötesi Serbest Elektron Lazerinin Uygulama Alanları ve AR-GE Potansiyeli, III. Ulusal Parçacık Hızlandırıcıları ve Uygulamaları Kongresi (UPHUK-III), 17-19 Eylül 2007, Bodrum.