



T.C.

NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANA BİLİM DALI

SİNKROTRON IŞINIMI TESİSİ TASARIMI İÇİN FARKLI SALINDIRICI
TİPLERİNİN IŞINIM ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

SONGÜL YÜRTMEN

ŞUBAT 2024

T.C.
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANA BİLİM DALI

SİNKROTRON IŞINIMI TESİSİ TASARIMI İÇİN FARKLI SALINDIRICI
TİPLERİNİN IŞINIM ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

SONGÜL YÜRTMEN

Yüksek Lisans Tezi

Danışman

Prof. Dr. Zafer NERGİZ

Şubat 2024

Songül YÜRTMEN tarafından **Prof. Dr. Zafer NERGİZ** danışmanlığında hazırlanan “**Sinkrotron Işınımı Tesisi Tasarımı İçin Farklı Salındırıcı Tiplerinin Işınım Özelliklerinin İncelenmesi**” adlı bu çalışma jürimiz tarafından **Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Ana Bilim Dalı**’nda Y. Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Hüsnü AKSAKAL, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi

Üye : Prof. Dr. Asım SOYLU, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Üye : Prof. Dr. Zafer NERGİZ, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

ONAY:

Bu tez, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafından/....../20.... tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu’nun/....../20.... tarih ve sayılı kararıyla kabul edilmiştir.

...../...../2024

Prof. Dr. Mustafa KARATEPE
MÜDÜR

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Songül YÜRTMEN



ÖZET

SİNKROTRON IŞINIMI TESİSİ TASARIMI İÇİN FARKLI SALINDIRICI TİPLERİNİN IŞINIM ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

YÜRTMEN, Songül

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik AnaBilim Dalı

Danışman

: Prof. Dr. Zafer NERGİZ

Şubat 2024, 39 sayfa

Hızlandırıcılar temel bilimlerin birçok alanında kullanılmaktadır. Bu amaçla hızlandırıcıların kullanıldığı uygulamalardan birisi de sinkrotron ışınım kaynaklarıdır. Sinkrotron ışınım kaynakları bilimsel ve teknolojik araştırmalar için önemli tesislerdir. Işınım özellikleri hızlandırıcı ve salındırıcı parametrelerine kuvvetli bir şekilde bağlıdır. THM (Türk Hızlandırıcı Merkezi) projesinin bir parçası olan TURKAY isimli Türk Sinkrotron Işınımı Kaynağı projesinde tasarlanmış hızlandırıcının elektron demet parametreleri ile normal iletken salındırıcılar için ışınım özellikleri belirlenmiştir. Bu çalışmada ışınım özellikleri aynı makinenin elektron demeti parametreleri kullanılarak farklı tip salındırıcılar için benzetim çalışmaları yapılarak araştırılmıştır. Benzetim çalışmalarının sonuçlarından süper iletken veya helisel salındırıcılar kullanılması durumunda 5 kat daha yüksek parlaklık değerinin elde edilebileceği gösterilmiştir. Ulaşılabilen parlaklık değerindeki artış sinkrotron ışınımı kullanıcıları için tesisi daha ilgi çekici hale getirecektir.

Anahtar Sözcükler: Salındırıcı, sinkrotron ışınımı, parlaklık

SUMMARY

INVESTIGATION OF THE RADIATION PROPERTIES OF DIFFERENT UNDULATOR TYPES FOR SYNCHROTRON LIGHT FACILITY DESIGN

YÜRTMEN, Songül

Niğde Ömer Halisdemir University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Physics

Supervisor

: Prof. Dr. Zafer NERGİZ

February 2024, 39 pages

Accelerators are used in many areas of basic sciences. One of the applications in which accelerators are used for this purpose is synchrotron radiation sources. Synchrotron radiation sources are important research facilities for scientific and technical researches. The radiation parameters are strongly dependent on accelerator and undulator parameters. In Turkish Synchrotron Radiation Source Project named TURKAY which is the part of the TAC (Turkish Accelerator Center) project, the properties of radiation were investigated based on normal conducting undulators with electron beam parameters of designed accelerator. In this study, the radiation properties were investigated by performing simulation studies for different types of undulators using the electron beam parameters of the same machine. From the simulation results, it is shown that 5 times higher brilliance value can be obtained by using super conducting undulators and helical super conducting undulators. The increase in achievable brightness value will make the facility more interesting for synchrotron radiation users.

Keywords: Undulator, synchrotron radiation, brilliance

ÖN SÖZ

Yüksek Lisans tez çalışmamın yürütülmesi esnasında, çalışmalarımda bilgi ve yardımlarını esirgemeyen ve bana her türlü desteği sağlayan danışman hocam, Sayın Prof. Dr. Zafer Nergiz'e minnet ve şükran duygularımı belirtmek isterim.



İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
SUMMARY	v
ÖN SÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
SİMGE VE KISALTMALAR	xi
BÖLÜM I.....	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM II	5
KURAMSAL TEMELLER	5
2.1 Hızlandırıcıların Gelişimi ve Kullanım Alanları	5
2.1.1 Hızlandırıcılarda demet dinamiği	6
2.1.2 Betatron fonksiyonu ve emittans	9
2.2 Sinkrotron Işınımı Özellikleri ve Salındırıcılar	11
2.2.1 Eğici magnet ışıması.....	13
2.2.2 Zigzaglayıcılar	15
2.2.3 Salındırıcılar	17
2.2.4 Normal iletken salındırıcılar	19
2.2.5 Süperiletken salındırıcılar	21
BÖLÜM III	25
GEREÇ VE YÖNTEM.....	25
3.1 Parametrelerin Seçimi.....	25
3.2 Benzetim Programı	26
BÖLÜM IV	28
BULGULAR TARTIŞMA VE SONUÇ	28
4.1 Hızlandırıcı ve Salındırıcı Parametreleri	28
4.2 Parlaklık Hesaplamaları	29
BÖLÜM V	31
SONUÇ VE ÖNERİLER.....	31

KAYNAKLAR	33
ÖZ GEÇMİŞ	35
TEZ ÇALIŞMASINDAN ÜRETİLEN ESERLER	36



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Dünyadan bazı Sinkrotron ışınımı kaynakları	6
Çizelge 2.2. Salıncıcı üretiminde kullanılan bazı malzemelerin parametreleri	20
Çizelge 2.3. Salıncıcı parametreleri	21
Çizelge 2.4. Farklı tipteki SC salıncıcıları için manyetik alan, periyot ve boşluk parametreleri verilmiştir	24
Çizelge 4.1. Depolama halkasının elektron demeti parametreleri	28
Çizelge 4.2. Salıncıcı parametreleri	29

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. THM için SI üretmek üzere tasarlanmış olan TURKAY tesisinin şematik görünümü	2
Şekil 1.2. Türkiye’deki SI kullanıcılarının çalışma alanlarının dağılımı.....	3
Şekil 1.3. Türkiye'deki SI kullanıcılarının kullandıkları demet hatları dağılımı	4
Şekil 2.1. Parçacık demetinin oluşturduğu faz uzayı.....	11
Şekil 2.2. Saf kalıcı mıknatıslı salındırıcı (soldaki şekil) ve hibrit salındırıcının (sağdaki şekil) şematik gösterimi	19
Şekil 2.3. Farklı eliptik salındırıcılar	20
Şekil 2.4. Termosifon tabanlı bir iletken soğutma şeması kullanan süperiletken ekleme cihazları için bir kriyojenik depolama tankının örnek kesitsel görünümü	23
Şekil 2.5. Süperiletken salındırıcılar için sarım geometrileri	24
Şekil 3.1. TURKAY için tasarlanmış C tipi eğici magnet (Mavi kısım demir çekirdeği, kırmızı kısım ise sarımları göstermektedir)	25
Şekil 3.2. IVU 25’in şematik tasarımı	26
Şekil 3.3. SPECTRA programının ara yüzü	27
Şekil 4.1. 25 mm periyotlu vakum içi salındırıcının $K=2.1$ kırma parametresi durumunda parlaklık spektrumu.....	29
Şekil 4.2. Farklı tip salındırıcılardan elde edilecek parlaklık spektrumu	30

SİMGE VE KISALTMALAR

Simgeler

E	Elektrik alan
B	Manyetik alan
γ	Lorent faktörü
r	Yörünge eğrilik yarıçapı
β	Işık hızı biriminde elektronun hızı
γ, α, β	Current-Snyder
ε	Emitans
σ_x	Demet ebatı
ε_C	Kritik enerji
K	Salındırıcı kırma parametresi
λ_p	Salındırıcı periyot uzunluğu
g	Salındırıcıda kutuplar arası mesafe
λ_k	K .’ninci harmoniğin dalga boyu

Kısaltmalar

SAXS	Küçük Açılı X Işını Saçılması
WAXS	Geniş Açılı X Işını Saçılması
SI	Sinkrontron Işınımı
XRD	Xray Diffraction
THM	Türk Hızlandırıcı Merkezi
SCU	Süper İletken Salındırıcı
HSCU	Helisel Süper İletken Salındırıcı
IVU	Vakum İçi Salındırıcı

BÖLÜM I

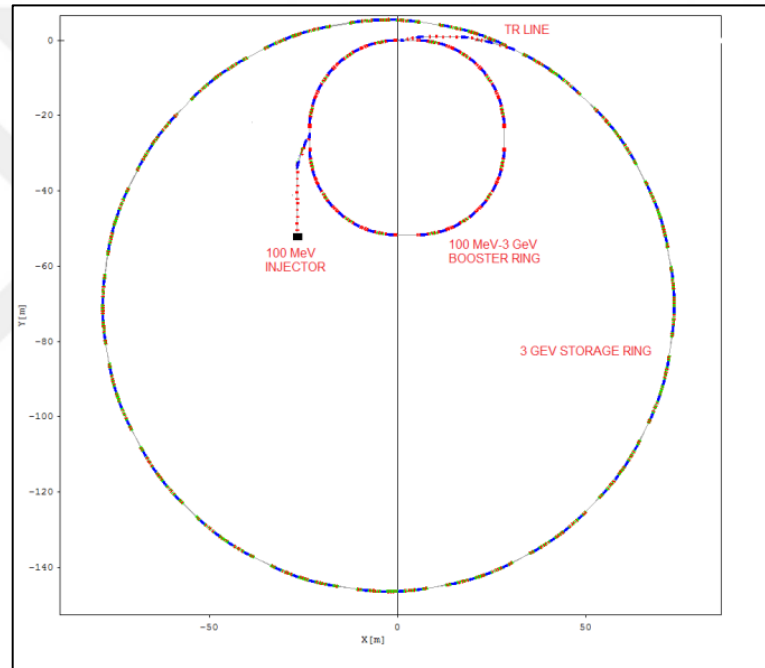
GİRİŞ

Bir sinkrotron ışınımı tesisi, üç ana hızlandırıcı yapıdan oluşur. Bu yapılar, İnjektör, öteleyici halka ve depolama halkası olarak isimlendirilir. İnjektörde elektron demeti bir elektron kaynağı tarafından üretilir ve göreceli enerjilere ulaşana kadar hızlandırılır. Göreceli enerjilere ulaşan bu elektronlar öteleyici halkaya aktarılır ve demet enerjisi gerekli enerji seviyesine burada yükseltilir. İstenilen enerji seviyesine ulaşmış olan demet, depolama halkasına aktarılır. Sinkrotron ışınımı depolama halkası üzerinde bulunan eğici magnet ve salındırıcılardan üretilir. Elektronların kaybettiği enerji halka üzerindeki bir veya daha fazla rf kovuk (radyo frekans kovuk) kullanılarak yeniden demete verilir. Bu sayede sürekli olarak her turda ışınımın üretilmesi sağlanır. Üretilen bu ışınım foton iletim hatları ile deney odalarına gönderilerek sinkrotron ışınımı kullanıcılarının hizmetine sunulur. Sinkrotron ışınımı kullanıcıları bir çok bilim dalında geniş bir araştırma çeşitliliğine sahiptir.

Sinkrotron ışınımı, makromoleküler kristalografi alanında yüksek akı, yüksek parlaklık, geniş dalga boyu aralığında dalgaboyunun değiştirilebilmesi ve polarizasyon gibi üstün özellikleri ile avantaj sağlamaktadır. Yüksek parlaklığı ile sinkrotron ışınımının geleneksel x-ışını kaynaklarına göre veri toplama süreleri kısadır. Yüksek parlaklık, daha küçük kristallerin kullanılabilmesine de olanak sağlar. Bu sayede, geleneksel x-ışını kristalografisinden daha küçük ölçekli yapıların çözülmesine imkan verir. Elektron paketçiklerinin uzunluğunun kısa olması da, zaman çözümü yapısal çalışmaların yapılmasına olanak tanır. Bu avantajlar, makromoleküler kristalografide sinkrotron kullanımını neredeyse kaçınılmaz kılmaktadır. Sinkrotronlarda sıklıkla kullanılan deneysel metodlara SAXS (Küçük Açılı X-ışını saçılması) ve WAXS (Geniş Açılı X-ışını saçılması) örnek olarak verilebilir. SAXS/WAXS deneylerinde, sinkrotron ışınımı kaynaklarının sağladığı yüksek akı, düzensiz yapıya sahip molekülerde birçok probleminin çözüme olanak sağlamıştır. SAXS/WAXS demet hatları ve deney istasyonları, düzenli ve düzensiz yapılar içeren nano-oluşumları incelemeye olanak sağlar. BioSAXS/WAXS , düzensiz protein yapısı, ilaç tasarımı, biyo-uyumlu sentetik malzeme gelişimi, biyo ve nanoteknoloji kullanımına kadar geniş bir uygulama

yelpazesine sahiptir. BioSAXS/WAXS'ın yaygınlaşması, özellikle yüksek akıllı X-ışınları sağlayan sinkrotron kaynaklarından elde edilen verilerle mümkün olmuştur.

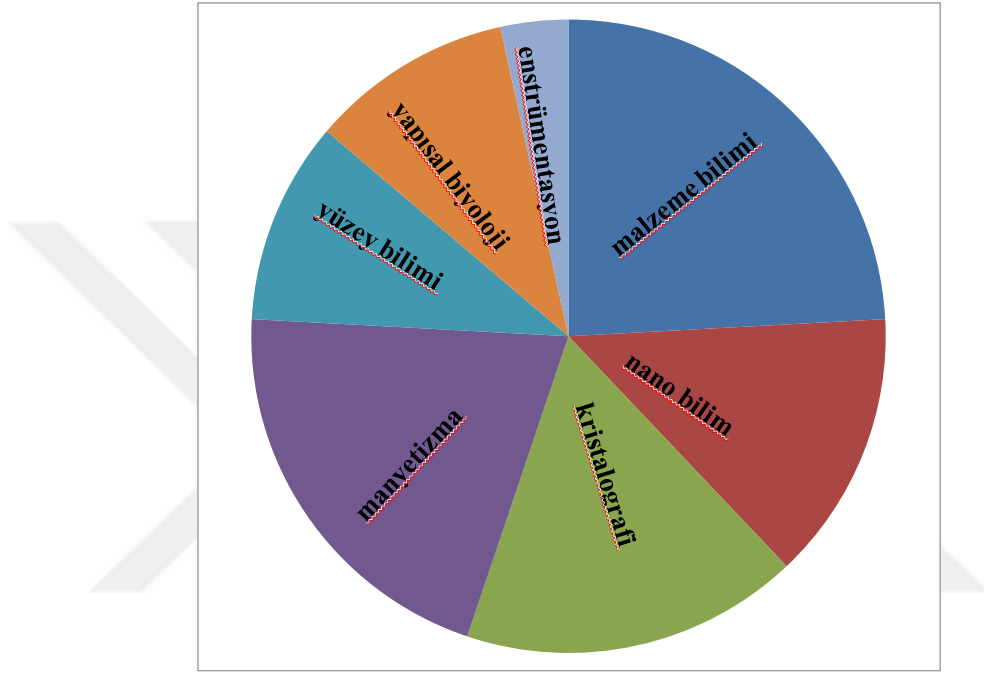
Türk Hızlandırıcı Merkezi projesi, kapsamında Türkiye’de kurulmasının faydalı olacağı düşünülen hızlandırıcı tesisleri üzerine tasarım çalışmaları yapılmıştır. Tasarımın şematik gösterimi Şekil 1.1’de gösterilmiştir. İnjektörde 100 MeV demet enerjisine çıkarılan elektronlar öteleme halkasına transfer edilerek 3 GeV’lık hedef enerjiye ulaşmaları sağlanır. Daha sonra bu elektronlar sinkrotron ışınımının üretileceği depolama halkasına aktarılır. Depolama halkasının tasarımı üretilecek ışınımın sahip olması istenilen özellikleri dikkate alınarak yapılmıştır.



Şekil 1.1. THM için SI üretmek üzere tasarlanmış olan TURKAY tesisinin şematik görünümü (Nergiz, 2015)

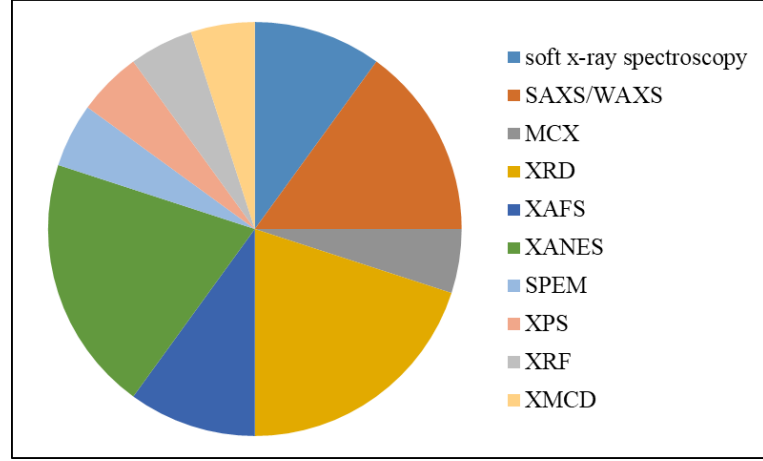
Türk Hızlandırıcı Merkezi projesinin alt projelerinden biri olan Sinkrotron Işınımı tesisi de bu kapsamda çalışılmış ve tasarım raporu hazırlanmıştır (Nergiz, 2015). Türk Hızlandırıcı Merkezi projesinin bir parçası olan Sinkrotron Işınımı tesisi, çeşitli bilimsel araştırmalar için önemli bir altyapı sunmaktadır. Kurulabilecek deney istasyonları ve kullanıcı potansiyeli de bu çerçevede çalışılmıştır.

Türkiye de sinkrotron ışınımının kullanıcı potansiyeli, Türk Hızlandırıcı Merkezi Projesi kapsamında incelenmiş ve hazırlanan sinkrotron ışınımı tesisi teknik tasarım raporunda veriler sunulmuştur (Nergiz, 2015). Potansiyel kullanıcıların başlıca çalışma alanları malzeme bilimi, manyetizma, kristalografi, nano bilim, yüzey bilimi, yapısal biyoloji ve enstrümantasyon olarak belirlenmiştir. Şekil 1.2’de verilen grafikte SI kullanıcılarının çalışma alanlarının dağılımı verilmiştir.



Şekil 1.2. Türkiye’deki SI kullanıcılarının çalışma alanlarının dağılımı (Nergiz, 2015)

THM Sinkrotron Işınımı raporunda, SI kullanıcılarının kullandıkları demet hatları dağılımı; X-ray absorption fine structure (XAFS), Soft x-ray beamline, Infrared microspectroscopy, Inelastic hard x-ray scattering, X-ray imaging for magnetic materials, X-ray diffraction (XRD), High pressure powder diffraction, Macromolecular crystallography, Smal angle x-ray scattering (SAXS) ve X-ray optics ve instrumentation demet hattı olarak belirlenmiştir. Kullanılan demet hattı dağılımı Şekil 1.3’de gösterilmiştir.



Şekil 1.3. Türkiye'deki SI kullanıcılarının kullandıkları demet hatları dağılımı (Nergiz, 2015)

Daha önce belirtildiği üzere, kullanıcılar açısından SI'nın en önemli avantajı üretilen ışınının yüksek parlaklık değerine sahip olmasıdır. Parlaklık değeri depolama halkasının elektron demeti parametrelerine ve salındırıcı parametrelerine bağlıdır. Salındırıcılarda düşük periyot uzunluğunda ne kadar yüksek manyetik alan üretilirse o dalga boyu için maksimum parlaklık sağlanır. Bu amaçla son dönemlerde süperiletken salındırıcılar bu imkanı sağlamaktadır. Bu sebeple depolama halkası üzerinde bulunan çok sayıda salındırıcının bazılarının süper iletken olması yüksek parlaklık talep eden deneyler için ilgi çekici olacaktır. Tasarlanmış depolama halkası parametreleri ile normal iletken salındırıcıların yanı sıra süper iletken salındırıcılarında kullanılabileceği göz önüne alarak hesaplamalar yapılmalıdır.

BÖLÜM II

KURAMSAL TEMELLER

2.1 Hızlandırıcıların Gelişimi ve Kullanım Alanları

Dünya genelinde büyük hızlandırıcılar, başlangıçta nükleer fizik ve parçacık fiziği deneylerinde kullanılmak üzere tasarlanmıştır. Çarpıştırıcı olarak kullanılan bu dairesel hızlandırıcılarda, eğici mıknatısların neden olduğu ışıınım, parçacıkların enerji kaybetmesine yol açıyordu. 1970'li yılların başında bu ışıının farklı deneylerde kullanılması önerilmiş ve çarpıştırıcılara foton iletim hatları eklenerek birinci nesil ışıınım kaynakları oluşturulmuştur. 1980'lerin başında, sadece sinkrotron ışıınımı üretmeyi amaçlayan ikinci nesil ışıınım kaynakları olarak adlandırılan dairesel hızlandırıcılar kurulmuştur. İkinci nesil ışıınım kaynaklarında ışıınım eğici mıknatıslardan elde edilmiştir. 1990'ların başlarında üçüncü nesil ışıınım kaynakları kurulmaya başlanmıştır. 3. Nesil ışıınım kaynaklarında eğici magnetlerle birlikte, ışıınım üreten salındırıcı (undulator) ve zigzaglayıcılar (wiggler) kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde, 4. Nesil ışıınım kaynakları olan tek geçişli makinalar olan Serbest Elektron Lazerleri (Free Elektron Laser- FEL) kurulmaktadır. Ancak, bu tesislerde ışıınım spektrumu SI sistemlerine göre daha dardır ve tek geçişli sistemler olduğu için aynı anda çok sayıda deney yapılamamaktadır. Bu tesisler genellikle sinkrotron ışıınım kaynaklarının ardından planlanan tesislerdir.

Dünyada çok sayıda sinkrotron ışıınım tesisi bulunmaktadır. Bu kaynakların büyük bölümü Amerika Birleşik Devletleri, Japonya ve çeşitli Avrupa devletlerindedir. Çizelge 2.1'de dünyadaki sinkrotron ışıınımı kaynakları verilmiştir. Son dönemde yapılan tesislerin büyük bölümü 3 GeV orta enerjili ve 500 m civarı halka çevre uzunluğuna sahiptir. Buradaki temel amaç maliyet ve verimlilik dengesini sağlamaktır. Bu tesislerin depolama halkaları tasarlanırken yüksek parlaklık değerlerine ulaşabilmek için düşük emittans değeri hedeflenmektedir. Çizelge 2.1'de dünyada bulunan çeşitli hızlandırıcıların bazı temel parametreleri verilmiştir.

Çizelge 2.1. Dünyadan bazı Sinkrotron ışınımı kaynakları (Namkung, 2010)

Işınım Kaynağı	Enerji (GeV)	Çevre (m)	Emittans (nm rad)	Akım (mA)	M.siz.B.SxUzunluk	Durum
ESRF	6	844.4	4.0	200	32x6.3 m	Çlş. (1993)
APS	7	1104	3.0	100	40x6.7 m	Çlş. (1996)
Spring-8	9	1436	3.4	100	44x7 m, 4x30 m	Çlş. (1997)
ALS	1.9	196.8	6.3	400	12x6.7 m	Çlş. (1993)
TLS	1.5	120	25	240	6x6 m	Çlş. (1993)
ELETTRA	2.4	259	7.0	300	12x6.1 m	Çlş. (1994)
PLS	2.5	280.56	12.0	200	12x6.8m	Çlş. (1995)
LNLS	1.37	93.2	100	250	6x3m	Çlş. (1997)
MAX-II	1.5	90	9.0	280	10x3.2 m	Çlş. (1997)
BESSY-II	1.7	240	6.1	200	8x4.9 m,8x5.7m	Çlş. (1999)
Siberia-II	2.5	124	98	200	12x3 m	Çlş. (1999)
N. Subaru	1.5	118.7	38	500	4x2.6 m,	Çlş. (2000)
ANKA	2.5	110.4	50	200	4x5.6 m,4x2.2m	Çlş. (2002)
SLS	2.4	288	5	400	3x11.7m,3x7m, 6x4 m	Çlş. (2001)
CLS	2.9	170.88	22.7	300	12x5.2m	Çlş. (2003)
SPEAR-3	3.0	235	18	500	12x3 m,4x4.5m, 2x7.5 m	Çlş. (2004)
SAGA-LS	1.4	75.6	7.5	300	8x2.5 m	Çlş. (2006)
SOLEIL	2.75	354.1	3.74	500	4x12m, 12x7m, 8x3.8m	Çlş. (2007)
Diamond	3.0	561.6	2.7	300	6x11.3m,18x8.3m	Çlş. (2007)
ASP	3.0	216	10	200	14x5.4m	Çlş. (2008)
Indus II	2.5	172.5	58.1	300	8x4.5m	Çlş. (2008)
SSRF	3.5	432	3.9	300	4x12m,16x6.5m	Çlş. (2009)
ALBA	3.0	268.8	4.3	400	4x8m,12x4.2m, 8x2.6 m	Çlş. (2010)
PETRAIII	6.0	2304	1	100	20x4 m	Çlş. (2010)
CANDLE	3.0	216	8.4	350	16x4.8	Planlama
MAX IV	1.5/3.0	96/528	5.6/0.24	500	12/20x5m	Çlş. (2016)
PLS-II	3.0	280	5.8	400	12x6.8m,12x3.1m	Çlş. (2012)
TPS(NSRRC)	3.0	518	1.7	400	18x7m,6x12m	Çlş. (2015)
NSLS-II	3.0	792	1.5	500	15x6 m, 15x9.3m	Çalış (2014)
SESAME	3.0	133	26	400	4x5m,8x3.5m, 4x1.9m	Çalış (2017)
ILSF	3.0	489	0.93	400	14x8m, 4x6m	Planlama

2.1.1 Hızlandırıcılarda demet dinamiği

Parçacık hızlandırıcılarında amaç yüklü parçacıkları hedeflenen yüksek enerjilere çıkarmaktır. Bu sırada parçacıkların doğrultularının değiştirilmesi ve dağılan parçacıkların toplanması gerekir. Yüklü parçacıkların yönlendirilmesi ve odaklanması Lorentz kuvveti ile sağlanır (Wille, 2000).

$$\vec{F} = e\vec{E} + \frac{e}{c}(\vec{v} \times \vec{B}) \quad (2.1)$$

Burada, $\vec{E}$ elektrik alan ve $\vec{B}$ manyetik alandır. Hızlandırma, elektrik alan ile sağlanırken manyetik alandan doğan manyetik kuvvet ile parçacıkların doğrultusu değiştirilir. Manyetik kuvvet ile hızlandırma yapılmaz. Çünkü manyetik kuvvet iş yapmaz yalnızca parçacıkların yönünü değiştirir. Yüklü parçacık demetleri eğici magnetler tarafından oluşturulan düzgün manyetik alanlar kullanılarak saptırılırlar. Bu manyetik alan demetin geçtiği bölgede sabit ve homojendir. Bir manyetik alanda demetin sapması merkezci kuvvet ve Lorentz kuvvetinin manyetik alan bileşeninin eşitliği ile belirlenir. Parçacık hızının doğrultusu ile manyetik alanın dik olduğu varsayılarak,

$$\frac{\gamma m v^2}{\rho} = \frac{e}{c} v B \quad (2.2)$$

şekline yazılabilir. Burada γ lorentz faktörü ve ρ parçacıkların takip ettiği yörüngenin eğrilik yarıçapıdır. Dipol alanı yüklü parçacık demetini çembersel bir yörünge boyunca saptırır ve bu yörüngenin yarıçapı

$$\frac{1}{\rho} = \frac{eB}{\beta E_e} \quad (2.3)$$

ile verilir. Burada $\beta = \frac{v}{c}$ ve E_e parçacık (elektron) demetinin enerjisidir.

Eğici magnetler (iki kutuplu magnetler) ve kuadropol magnetler (dört kutuplu) yüklü parçacık demetlerinin iletiminde ve odaklanmasında temel elemanlardır. Sekstupol magnetler (altı kutuplu magnetler) ise kromatik aberasyon etkisinin düzeltilmesinde kullanılır. Dipol (B_0), kuadropol (g) ve sekstupol (g') alanlarının varlığı durumunda hareket denklemi demetlerin eğriliği ($1/\rho$) için genel ifade kullanılarak belirlenebilir.

$$\frac{1}{\rho} \approx x'' = \frac{eB}{cp} \quad (2.4)$$

Burada, p parçacıkların momentumudur. Manyetik alan, üst mertebeden katkıları da içerecek şekilde

$$B = B_0 + gx + \frac{1}{2}g'x^2 + \dots \quad (2.5)$$

olarak yazılabilir. Bu ifade e/cp ile genişletilir ise

$$\frac{eB}{cp} = \frac{1}{\rho_0} + kx + \frac{1}{2}mx^2 + \dots \quad (2.6)$$

olur. Yukarıdaki ifadede $(1/\rho_0)$ terimi, eğici magnet boyunca ideal demet iletimine karşı gelmektedir. Bununla beraber ideal yörünge etrafında yapılan hareket diğer terimler tarafından belirlenir ve

$$\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_0} \approx x'' = \frac{e}{cp} (B - B_0) \quad (2.7)$$

şeklinde yazılabilir. Sonuçta hareket denklemi

$$x'' = -kx - \frac{1}{2}mx^2 + \dots \quad (2.8)$$

halini alır (Wiedemann, 1993). Yukarıdaki ifadede kx odaklanma terimine karşı gelirken $\frac{1}{2}mx^2$ kromatik ve geometrik aberasyon terimine karşı gelmektedir. Geometrik aberasyon ve daha düşük mertebeden katkılar ihmal edilirse ve kuadropol gücünün s yolu boyunca değiştiği de dikkate alınırsa hareket denklemi

$$x'' + k(s)x = 0 \quad (2.9)$$

olarak yazılabilir. Hareket denkleminin s 'e bağlı olarak çözümü zordur. Bununla beraber her bir kuadropol magnet içerisinde k sabittir ve bu durumda çözüm

$$x(s) = a \cos(\sqrt{k} s) + b \sin(\sqrt{k} s) \quad (2.10)$$

ve

$$x'(s) = -a\sqrt{k} \sin(\sqrt{k} s) + b\sqrt{k} \cos(\sqrt{k} s) \quad (2.11)$$

Olur (Wiedemann, 1993). İntegral sabitleri a ve b , başlangıç koşulları kullanılarak belirlenebilir. Yukarıdaki ifadeler, $s=0$ 'da $x = x_0$ ve $x' = x'_0$ başlangıç koşulları alınarak

$$x = x_0 \cos(\sqrt{k} s) + x'_0 \frac{1}{\sqrt{k}} \sin(\sqrt{k} s) \quad (2.12)$$

ve

$$x' = -x_0 \sqrt{k} \sin(\sqrt{k} s) + x'_0 \cos(\sqrt{k} s) \quad (2.13)$$

şeklinde yazılabilir. Bu iki denklem matris formunda yazılırsa aşağıdaki ifade elde edilir (Wiedemann, 1993).

$$\begin{pmatrix} x \\ x' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\sqrt{k} s) & \frac{1}{\sqrt{k}} \sin(\sqrt{k} s) \\ -\sqrt{k} \sin(\sqrt{k} s) & \cos(\sqrt{k} s) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_0 \\ x'_0 \end{pmatrix} \quad (2.14)$$

Kuadropol gücü parametresi k 'nin sıfırdan küçük olduğu dağıtma durumunda ise iletim matrisi

$$\begin{pmatrix} x \\ x' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cosh(\sqrt{|k|} s) & \frac{1}{\sqrt{|k|}} \sinh(\sqrt{|k|} s) \\ -\sqrt{|k|} \sinh(\sqrt{|k|} s) & \cosh(\sqrt{|k|} s) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_0 \\ x'_0 \end{pmatrix} \quad (2.15)$$

olur.

2.1.2 Betatron fonksiyonu ve emittans

Hızlandırıcı boyunca hareket eden parçacıklara ait hareket denkleminin homojen kısmı

$$x'' + k(s)x = 0 \quad (2.16)$$

harmonik salıncı denklemdir. Harmonik salıncı denklemini için, faz ve genlik değişkeni ile

$$x(s) = a_i \sqrt{\beta(s)} \cos[\psi(s) + \varphi_i] \quad (2.17)$$

şeklinde çözüm önerilebilir. Burada a_i ve φ_i i parçacığı için integrasyon sabitleri, β ve ψ sırası ile s yoluna bağlı betatron ve faz fonksiyonlarıdır. Bu denklem uyarınca parçacık ideal yörünge etrafında salınım hareketi yapar. $\hat{a}$ en büyük genlikli parçacığın genliği olarak kabul edilir ise ve kosinüslü kısım 1'e eşit alınırsa demet zarfı

$$E_{x,y}(s) = \mp \hat{a}_{x,y} \sqrt{\beta_{x,y}(s)} \quad (2.18)$$

olur. Dolayısıyla bu ifade parçacık demetinin hızlandırıcı boyunca bir s noktasındaki yatay ve düşey ekseninde demet ebatlarıdır.

Parçacıklar ideal yörünge etrafında betatron salınımlar denilen salınım hareketi yaparlar: Bu hareketin genliği ve eğimi

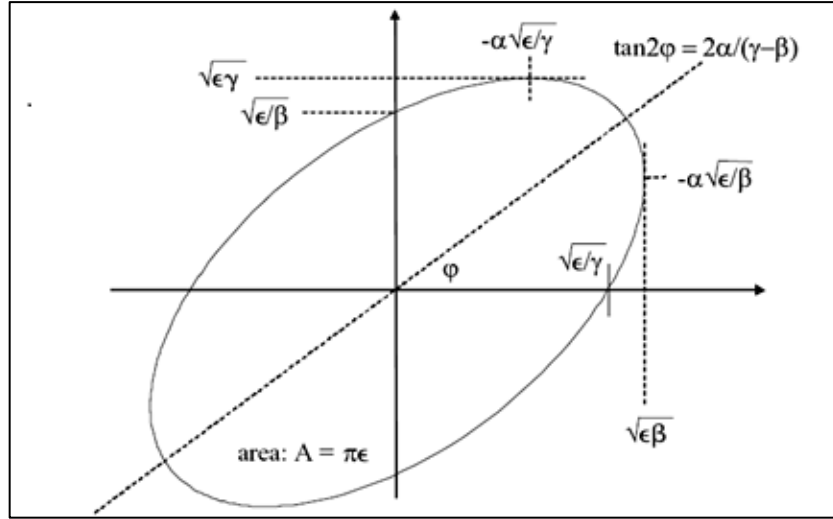
$$x(s) = a\sqrt{\beta(s)}\cos[\psi(s) + \varphi] \quad (2.19)$$

$$x'(s) = a\frac{\alpha}{\sqrt{\beta(s)}}\cos[\psi(s) + \varphi] - a\sqrt{\beta(s)}\sin[\psi(s) + \varphi]\cdot\psi'(s) \quad (2.20)$$

Olur (Wiedemann, 2001). Denklemlerde $\psi(s) + \varphi$ fazı yok edilir ise Current-Snyder değişmezi elde edilir.

$$\gamma x^2 + 2\alpha x x' + \beta x'^2 = a^2 \quad (2.21)$$

Burada $\alpha = -\frac{1}{2}\beta'$ dir. $\gamma = \frac{1+\alpha^2}{\beta}$ olmak üzere; $\alpha(s)$, $\beta(s)$ ve $\gamma(s)$ x ve y ekseninde ayrı ayrı betatron fonksiyonları veya örgü fonksiyonları olarak isimlendirilirler. Bu denklem πa alanlı elips denklemdir. Bu elips, faz elipsi olarak isimlendirilir ve iki ayrı düzlemde iki farklı faz elipsi vardır; x, x' ve y, y' . Şekil 2.1'de bahsedilen faz elipsi ve bu elipsin örgü fonksiyonları ile ilişkisi gösterilmiştir (Wiedemann, 2001).



Şekil 2.1. Parçacık demetinin oluşturduğu faz uzayı (Wiedemann, 2001)

Demetin faz elipsinin alanı $\pi\hat{a}$ sabittir ve bu alan emittansı tanımlamak için kullanılır. Genelde parçacık dağılımı gausyendir ve gausyen demet için parçacık dağılımı ile emittans arasındaki ilişki

$$\epsilon_x = \frac{\langle x^2 \rangle}{\beta_x(s)} = \frac{\sigma_x^2}{\beta_x(s)} \quad (2.22)$$

ile tanımlanır. σ_x x doğrultusunda demet ebadıdır. Dolayısıyla x ve y doğrultusunda demet ebatları $\sigma_x = \sqrt{\epsilon_x \beta_x}$ ve $\sigma_y = \sqrt{\epsilon_y \beta_y}$ olur. Aynı şekilde demet diverjansı, $\sigma_{x'} = \sqrt{\epsilon_x \gamma_x}$ ve $\sigma_{y'} = \sqrt{\epsilon_y \gamma_y}$ şeklinde olacaktır.

2.2 Sinkrotron Işınımı Özellikleri ve Salındırıcılar

Görelî hızlarda hareket eden elektronlar veya diğer yüklü parçacıklar manyetik alanlar tarafından eğrisel bir yörünge boyunca harekete zorlandıklarında hareket ettikleri yönde elektromanyetik ışınım yayınlamaktadır. Bu olaya sinkrotron ışınması (synchrotron radiation) denir.

Elektronlar veya pozitronlar gibi hafif kütleli parçacıklar tarafından parçacık hızlandırıcılarında üretilen sinkrotron ışınımı yüksek bir şiddete sahiptir. Kızılötesi, görünür ve morötesi spektrumlarının yanı sıra elektromanyetik spektrumun yumuşak ve sert x-ışını bölgelerini de içine alacak şekilde geniş bir enerji aralığına sahiptir. İlk olarak,

1947 yılında Amerika Birleşik Devletleri'ndeki General Electric Sinkrotronu'nda gözlemlenmiştir ve uzun süre sadece parçacık fiziği için bir sorun olarak kabul edilmiştir (Balerna ve Mobilio, 2015). Bunun sebebi, sinkrotron ışınımının yüksek enerjili parçacık hızlandırıcılarında enerji kaybının en önemli sebebi olmasıdır. Ancak, 1960'ların sonlarında sinkrotron ışınımının yoğun madde araştırmalarında büyük bir potansiyele sahip olduğu keşfedilmiştir. Bu keşiften sonra, sinkrotron ışınımının kullanımında yaygın bir büyüme yaşanmış ve özel sinkrotron ışınımı tesisleri inşa edilerek bu ışınım birçok araştırma alanında benzersiz bir araç haline gelmiştir. Günümüzde sinkrotron ışınımı, maddenin atomik ve moleküler düzeydeki yapısal özelliklerinden yüzey özelliklerine kadar birçok farklı konuyu incelemek için yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Örneğin, katıların kristal yapılarının analizinden protein moleküllerinin karmaşık yapılarının çözülmesine kadar birçok alanda sinkrotron ışınımından yararlanılmaktadır.

Synchrotron ışınımının önemi ve kullanım alanları giderek artmaktadır. Araştırmacılar, bu güçlü ışınımın atomik düzeyde ayrıntılı incelemeler yapma yeteneğinden faydalanarak, malzemelerin özelliklerini daha iyi anlamak ve yeni teknolojiler geliştirmek için çalışmalarını sürdürmektedir. Ayrıca, sinkrotron ışınımı tıp alanında da uygulama potansiyel taşımaktadır. Örneğin kanser tedavisinde kullanılabilecek yeni yöntemlerin geliştirilmesinde önemli bir rol oynayabilir.

Sinkrotron ışınımının ışınım kaynaklarına göre kullanıcılar açısından avantaj sağlayan özellikleri (Balerna ve Mobilio, 2015):

1. Parlaklık: Sinkrotron ışınımının diğer geleneksel ışınım kaynaklarına göre en önemli avantajlarından birisi yüksek parlaklığa sahip olmasıdır. 6 boyutlu faz uzayında parçacık sayısı olarak ifade edilen parlaklık, bir ışınım kaynağından çıkan ışınımın yoğunluğunu ve odaklanabilirliğini ifade eder. Yüksek parlaklık değerleri kullanıcıların yaptıkları deneylerde daha yüksek çözünürlüğe ve daha hassas analizlere ulaşmasına olanak tanır.

2. Geniş enerji aralığı: Synchrotron ışınımı, çok geniş bir spektrumda ışınım üretme imkanına sahiptir. Farklı uygulamalar için uygulama için gereken özel enerji aralıklarında ışınım üretilebilir. Bu özellik sinkrotron ışınımının kullanıcı potansiyelinin çok geniş olmasını sağlar ve bu sayede; malzeme karakterizasyonu, biyolojik araştırmalar, nanoteknoloji, ilaç keşfi gibi birçok alanda kullanımı mümkün kılar. Malzeme bilimi,

fizik, kimya, biyoloji, tıp, arkeoloji gibi birçok disiplinde kullanılarak çeşitli araştırmalar ve analizler gerçekleştirilebilir.

3. Ayarlanabilir polarizasyon: Sinkrotron ışınının en önemli avantajlarından biri ışının polarizasyonun kolayca ayarlanabilmesidir. Malzeme özelliklerini araştırırken, polarizasyona bağlı olarak farklı analizlerin yapılabilmesini sağlar. Manyetik malzemelerin incelemesinde polarizasyon ayarı önemli bir faktördür.

Sinkrotron ışınımı, hızlandırıcılarda eğici magnetler ile salındırıcı veya zigzaglayıcı olarak adlandırılan eklenmiş aletler kullanılarak üretilir. Eğici magnetler, hızlandırıcılarda parçacıkları dairesel bir yörüngede tutan cihazlardır. Bu nedenle, dairesel bir hızlandırıcıda çok fazla eğici magnet vardır. Eğici magnetlerin manyetik alan ve uzunluk gibi tasarım parametreleri büyük ölçüde hızlandırıcının tasarımına bağlıdır. Dolayısıyla foton özelliklerini değiştirmek için eğici magnetlerde herhangi bir değişiklik yapmak zordur. Bu sebeple hızlandırıcı tasarlanırken salındırıcı ve zigzaglayıcı magnetler için ayrılmış boş bölgeler bırakılır ve bu bölgelere bahsedilen aletler yerleştirilerek istenilen özelliklere sahip ışımaya elde edilir.

2.2.1 Eğici magnet ışınması

Eğici magnetten üretilen SI'nın spektrumu geniş ve düzdür. Işıma kavisli bir yol boyunca, herhangi bir noktadan teğetsel olarak yayılır ve depolama halkası etrafında bir ışımaya alanı oluşturur. Sapmanın olmadığı dikey düzlemde ise ışımaya $\mp 1/\gamma$ lik bir saçılma açısı oluşur.

Sinkrotron ışınmasının zamansal yapısı elektron demetinin zamansal yapısı ile benzerdir. Depolama halkasında dolanan elektronlar periyodik olarak paketçikler halinde bulunurlar. Demetler arasındaki mesafe rf dalga boyunun tam katına eşittir (500Mhz için 60cm). Tipik olarak bir sinkrontronda paketçik uzunlukları demet enerjisi ve rf voltajına bağlı olarak 1-3 cm (30-100 ps) düzeyindedir. Sonuç olarak ışınım 2 ns (500 Mhz) aralıklar ile 30-100 ps uzunluğunda atımlar şeklinde yayınlanır.

Bir B manyetik alanında r yörünge yarıçapı ile bükülen demetin yayınlayacağı ışının gücü elektron için pratik birimlerle

$$P_{\gamma} = \frac{c C_{\gamma} E^4}{2\pi \rho^2} \quad (2.23)$$

ile verilir (Wiedemann, 2001). Burada Edemet enerjisi ve

$$C_{\gamma} = \frac{4\pi}{3} \frac{r_c}{(mc^2)^3} = 8.846 \times 10^{-5} \frac{m}{GeV^3} \quad (2.24)$$

dir. Burada r_c klasik parçacık yarıçapı ve mc^2 parçacığın durgun kütle enerjisidir.

Işıma spektrumu çok küçük foton enerjilerinden kritik enerji civarındaki enerjilere kadar uzanan bir spektruma sahiptir. Kritik enerji dairesel hızlandırıcıların karakteristiğidir ve hızlandırıcının tasarımı ile kuvvetli bir şekilde ilişkilidir. Depolama halkasının geometrisinin bir parçası olan eğici mıknatısların bükme açıları sabittir, bu sebeple pratik birimlerle demet enerjisi ve manyetik alan değerine bağlı olarak

$$\varepsilon_c(keV) = 2.218 \frac{E^3(GeV)}{\rho(m)} = 0.665 E^2(GeV) B(T) \quad (2.25)$$

şeklinde verilen, kritik foton enerjisi değiştirilemez. Dolayısıyla çoğu zaman x ışınlarına yönelik gereksinimler mevcut eğici mıknatıs ve depolama halkası parametresi ile karşılanamaz. Bununla beraber birkaç eğici mıknatıs tasarımlarında değişiklik yaparak bazı foton parametreleri sınırlı da olsa değiştirilir.

Eğici magnet ışıınının kritik foton enerjisi magnetin manyetik alanı ve elektronların enerjisi tarafından belirlenir. Düşük manyetik alan ve düşük demet enerjili depolama halkalarında x ışıını şiddetini artırmak ve farklı bir kritik enerjide çalışmak için orijinal eğici magnetlerinden bazıları tamamı veya bir bölümü süper eğici adı verilen daha güçlü magnetler ile değiştirilebilir. Depolama halkasının geometrisini korumak için elektron demetini aynı açıyla saptıran yüksek alanlı daha kısa süper iletken mıknatıslar kullanılır. Geleneksel eğici magnetler nadiren 1.5 T'yı aşarken, süper iletken mıknatıslarda 5-6 T ve hatta daha yüksek değerler mümkündür. Bu sayede kritik foton enerjisi 3 ila 4 faktör artırılabilir. Bu sayede foton spektrumu sert x ışıını bölgesine kadar genişletilebilir. Bunlara süper eğiciler denir.

Düşük enerjili bir depolama halkasının da sert x ışını radyasyonu ihtiyacını karşılamak için dalga boyu kaydırıcıları da kullanılabilir. Dalga boyu kaydırıcılar farklı manyetik alan yönlerine sahip üç veya 5 süper iletken çift kutuplu magnetten oluşur. Dolayısıyla dalgaboyu kaydırıcılar bir nevi eklenmiş aletlerdir (insertion devices). Bir dalga boyu kaydırıcıdan geçen parçacık demetinin giriş ve çıkışta sapma olmayacak şekilde yukarı-aşağı veya sağa- sola hareket ettirilir. Bu koşulu sağlamak için yatay olarak sapan bir dalga boyu kaydırıcının alan dağılımının

$$\int_{-\infty}^{\infty} B_y (y = 0, z) dz = 0 \quad (2.26)$$

koşuluna uyması gerekir. Bu koşulu sağlayan dalga boyu kaydırıcının elektronun orijinal yörüngesi üzerine bir etkisi yoktur. Dolayısıyla prensipte teknik olanakların sınırladığı ölçüde olabildiğince güçlü yapılabilir.

2.2.2 Zigzaglayıcılar

Dalga boyu kaydırıcı prensibi genişletilerek zigzaglayıcı magnetler üretilebilir. Zigzaglayıcılar zıt manyetik alan yönüne sahip bir dizi 2 kutuplu mıknatıstan oluşur. Çok sayıda mıknatıs kutbu kullanmanın avantajı foton akısını artırmaktır. Zigzaglayıcı magnetler, süper iletken magnetlere göre hem daha yüksek akıya hem de daha uzun dalga boyu aralığına sahiptir. Zigzaglayıcı magnet içerisinde manyetik alan

$$B_y(x, y = 0, z) = B_0 \sin \frac{2\pi z}{\lambda_p} \quad (2.27)$$

ile değişir. Eksenden demetin kırılması yarı kutuptan kırılma açısına eşittir ve bu açı

$$\vartheta = \frac{B_0}{B_\rho} \int_0^{\lambda_p/4} \sin \frac{2\pi z}{\lambda_p} dz = \frac{B_0 \lambda_p}{B_\rho 2\pi} \quad (2.28)$$

ile verilir. Burada B_0 pik manyetik alan, λ_p zigzaglayıcının periyot uzunluğudur. B_ρ çarpımı demetin katılığı olarak isimlendirilir. Kırılma açısı kütle merkezi enerjisi biriminde demet enerjisi γ ile çarpılarak

$$K = \gamma\vartheta = \frac{[c]eB_0}{mc^2} \frac{\lambda_p}{2\pi} = 0.934B_0(T)\lambda_p(cm) \quad (2.29)$$

zigzaglayıcının güç parametresi tanımlanır.

K parametresi salındırıcı ve zigzaglayıcılar arasındaki farkı belirler. Kuvvet parametresi $K \gg 1$ ise zigzaglayıcı, $K \ll 1$ olursa salındırıcı olarak isimlendirilir. Salındırıcı ve zigzaglayıcılar farklı ışınım karakteristiklerine sahiptir. Manyetik alan kuvveti, mıknatıs kutupları arasındaki mesafeye, veya başka bir ifade ile manyetik alan boşluğuna (g) bağlı olarak değişir. Aralık değiştirilerek manyetik alan değiştirilebilir. Manyetik alanın gücü aynı zamanda periyot uzunluğu ve kullanılan magnet materyaline bağlıdır. Vanadyum permendur kutuplar kullanılarak yapılan hibrit bir zigzaglayıcının içerisinde alanın gücü $0.1\lambda_p \leq g \leq 10\lambda_p$ için yaklaşık olarak

$$B_y(T) \approx 3.33 \exp \left[-\frac{g}{\lambda_p} (5.47 - 1.8 \frac{g}{\lambda_p}) \right] \quad (2.30)$$

ifadesi ile verilir. Buradaki g mıknatıs kutupları arasındaki açıklıktır. Toplam radyasyonun gücü zigzaglayıcı magnet için denklem 2.31'da görüldüğü gibidir.

$$\langle P_\gamma \rangle = \frac{1}{3} r_c m c^2 c_\gamma^2 K^2 \frac{4\pi^2}{\lambda_p^2} \quad (2.31)$$

Pratik birimlerle bu denklem

$$\langle P_\gamma(W) \rangle = 632.7 E^2 B_0^2 I L_u \quad (2.32)$$

şeklinde yazılabilir (Wiedemann, 2001). Burada, I demet akımı ve $L_u = N_p \lambda_p$ zigzaglayıcı magnetin toplam uzunluğudur. B_0 ise zigzaglayıcının eksen boyunda pik manyetik alan değeridir.

Sinüzoidal alan dağılımı $B_0 \sin \frac{2\pi}{\lambda_p} z$ şeklinde değişen güçlü bir zigzaglayıcı magnette z eksinine göre sonlu bir açıyla yayılan radyasyon daha yumuşaktır çünkü alanın daha küçük olduğu bir kaynak noktasında üretilir. En sert radyasyon, manyetik tepe

noktasından ileri yönde yayılır. Bir zigzaglayıcının kritik foton enerjisi yayınlanma açısına göre aşağıdaki gibi değişir.

$$\varepsilon_c = \varepsilon_{c0} \sqrt{1 - \left(\frac{\gamma\psi}{K}\right)^2} \quad (2.33)$$

2.2.3 Salındırıcılar

Sinkrotron ışınım kaynaklarında parlaklığı en üst düzeye çıkararak foton kalitesini optimize etmek veya eliptik polarizasyon gibi bazı özellikleri sağlamak için salındırıcılar kullanılır. Salındırıcılar, zigzaglayıcı magnetlere benzer şekilde yapılmış ancak çok daha düşük bir alan gücüne sahip aletlerdir.

Bir salındırıcıda elektronlar çok küçük bir sapmaya uğrarlar ($\mp 1/\gamma$ den daha küçük bir açıyla) ve parçacıkların enine hareketi göreceli değildir. Salınım hareketi sonucu ışım gözlenir. Eğer N salınım periyotlarının sayısı ise elektrik alan çizgileri periyodik olarak N kez bozular ve sonuç olarak foton pulsu N_p salınımla şekillenir. Parçacığın durgun çerçevesinde salındırıcının periyot uzunluğu $\lambda_\gamma^* = \frac{\lambda_p}{\gamma}$ şeklinde lorentz büzülmesine uğrar.

Bu yayınlanan ışınımın dalga boyudur. Işımanın monokromatik doğası ve dopler kayması ile birlikte düşünüldüğünde $K \ll 1$ için salındırıcının temel undulator ışınımı dalga boyu $\lambda_\gamma \approx \frac{\lambda_p}{2\gamma^2}$ olur.

Parçacığın yörüngesi ile gözlem açısı ϑ_{obs} ile birlikte dikkate alınarak

$$\lambda_1 = \begin{cases} \frac{\lambda_p}{2\gamma^2} (1 + K^2 + \gamma^2 \vartheta_{obs}^2) & \text{helisel salındırıcı için} \\ \frac{\lambda_p}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{1}{2} K^2 + \gamma^2 \vartheta_{obs}^2\right) & \text{düzlem salındırıcı için} \end{cases} \quad (2.34)$$

şeklinde yazılır. (Wiedemann, 2001).

Düzlem salındırıcı için denklem daha yüksek harmonikleri de içerecek şekilde genişletilebilir. Bu durumda k'inci harmoniğin dalga boyu için genel ifade

$$\lambda_{k=} \frac{\lambda_p}{2\gamma^2 k} \left(1 + \frac{1}{2} K^2 + \gamma^2 \vartheta_{obs}^2 \right) \quad (2.35)$$

şeklini alır. Pratik birimde k'inci harmoniğin dalga boyu

$$\lambda_k(A^0) = 13.056 \frac{\lambda_p}{2E^2(GeV^2)} \left(1 + \frac{1}{2} K^2 + \gamma^2 \vartheta_{obs}^2 \right) \quad (2.36)$$

ve buna karşılık gelen foton enerjisi

$$E_k(eV) = 950 \frac{kE^2(GeV^2)}{\lambda_p(cm)(1+\frac{1}{2}K^2+\gamma^2\vartheta_{obs}^2)} \quad (2.37)$$

olarak yazılabilir (Wiedemann, 2001).

$K \ll 1$ için daha önce belirtildiği gibi ışıının spektrumu pikler halinde görülür. Tek sayılı pikler daha güçlü iken çift sayılı pikler daha zayıftır. Bununla beraber salındırıcının gücü arttıkça piklerin sayısı ve yoğunluğu artar. Büyük K değerlerinde spektrum sürekli gibi görünür ve zigzaglayıcının foton spektrumu meydana gelir. Salındırıcı veya zigzaglayıcı magnetler arasında yapı olarak temel bir fark yoktur. Sadece biri diğerinin daha güçlü bir versiyonudur. Ancak pratik açıdan bakıldığında ışıma özellikleri çok farklıdır. Sinkrontron ışıını kullanıcıları deneysel yeteneklerini optimize etmeleri için bu farktan yararlanırlar.

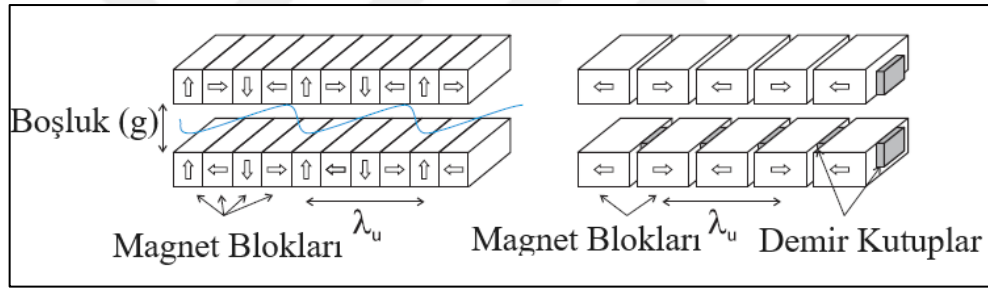
N_p periyotlu bir salındırıcıda ışıının spektral genişliği şöyle ifade edilir.

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{1}{N_p} \quad (2.38)$$

Tüm ışıının bir veya birkaç spektral çizgi halinde konsantrasyonu monokromatik foton ışıınının kullanıldığı deneyler için özellikle istenir. Çünkü ışıma yalnızca yüksek parlaklıkta istenen dalga boyu civarında üretilir. Ayrıca, optik elemanlar ve numuneler üzerinde istenmeyen ısıtma etkileri yaratan diğer dalga boylarındaki ışıma büyük ölçüde ortadan kalkmış olur.

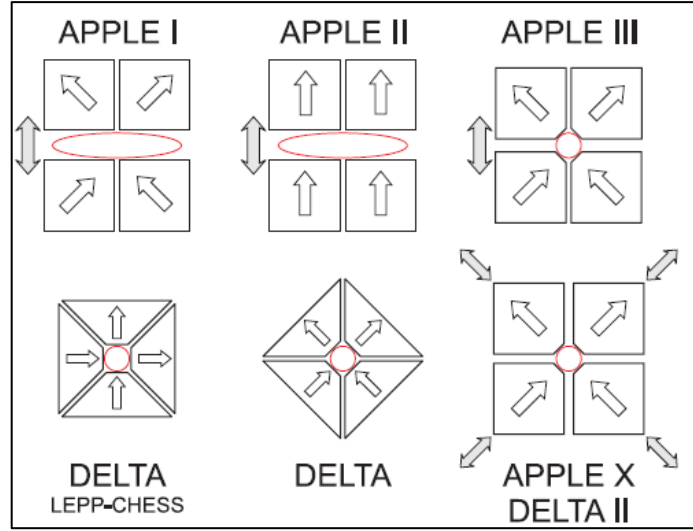
2.2.4 Normal iletken salındırıcılar

Normal iletken salındırıcıların en çok kullanılan iki tipi, saf kalıcı mıknatıslı salındırıcılar ve hibrit salındırıcı magnetlerdir. Şekil 2.2’da iki tip salındırıcı için şematik gösterimler verilmiştir (Nguyen vd., 2019). Her ikisinde de aletler iki magnet dizisi içerir ve bu diziler arasındaki boşluk (gap, g) bölgesinde periyodik manyetik alan oluşur. Saf kalıcı mıknatıslı salındırıcılar sadece magnet bloklarından oluşurken, hibrit salındırıcılarda, blokların aralarına yerleştirilen manyetik geçirgenliği yüksek bir materyal ile birleştirilir. Hibrit durum, manyetik akıyı yoğunlaştırarak oluşturulacak pik manyetik alan değerinin artmasını sağlar. Her iki salındırıcı tipinde de elektronlar salındırıcı yapının merkezindeki düzlemde salınırlar, bu sebeple bu salındırıcılara düzlemsel salındırıcılar denir. Düzlem salındırıcılarda yayımlanan ışınım elektronların salındığı düzlemle aynı düzlemde doğrusal polarizedir.



Şekil 2.2. Saf kalıcı mıknatıslı salındırıcı (soldaki şekil) ve hibrit salındırıcının (sağdaki şekil) şematik gösterimi (Nguyen vd., 2019)

Son dönemlerde polarizasyonu kontrol etmek için APPLE-II ve DELTA tipi salındırıcılar tasarlanmıştır. Bu salındırıcılar dört magnet dizisinden oluşur. Bu diziler uygun şekilde kaydırılarak elektronların helisel bir yörünge izlemeleri sağlanır. Bu sayede çembersel polarize foton demeti elde edilebilir. Bu tip salındırıcılara eliptik salındırıcılar denir. Şekil 2.3’te çalışılan çeşitli eliptik şekilli salındırıcıların blok yerleşimleri gösterilmiştir (Nguyen vd., 2019).



Şekil 2.3. Farklı eliptik salındırıcılar (Nguyen vd., 2019)

Manyetik blokların yapımında en çok kullanılan malzemeler samaryum kobalt (SmCo_5 ve $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$) ve neodyum demir boron (NdFeB) bileşikleridir . Bu materyallerin avantajı yüksek kalıcı mıknatıslanmaya ve yüksek koersiv kuvvete sahip olmalarıdır. SmCo mıknatısların NdFeB 'ye göre avantajı daha yüksek koersiviteye sahip olması ve sıcaklıkla daha az değişen mıknatıslanmaya sahip olmasıdır. NdFeB mıknatısların avantajı ise daha yüksek kalıcı mıknatıslanmaya sahip olmalarıdır. Bununla beraber NdFeB mekanik olarak daha kolay işlenir ve SmCo bileşiklerine göre daha ucuzdur. Salındırıcı tasarımında kullanılan farklı malzemeler için manyetik parametreler Çizelge 2.2'de verilmiştir

Çizelge 2.2. Salındırıcı üretiminde kullanılan bazı malzemelerin parametreleri (Onuki ve Elleaume, 2002)

Malzeme	$H_{cj}[\text{kA/m}]$	$B_r [\text{Tesla}]$	$dB_r/dT[\%/^{\circ}\text{C}]$	$T_c[^{\circ}\text{C}]$
SmCo_5	1500-2400	09.-1.01	-0.05	700-750
$\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$	800-2000	1.04-1.12	-0.035	800-850
NdFeB	1000-3000	1.0-1.4	-0.10	310-340

Farklı tip salındırıcılardan elde edilecek manyetik alanı optimize ederken veya karşılaştırırken

$$B_y(T) \approx c_1 \exp \left[-\frac{g}{\lambda_p} \left(c_2 - c_3 \frac{g}{\lambda_p} \right) \right] \quad (2.39)$$

şeklinde ifade edilen Halbach formülü kullanışlıdır (Halbach, 1983). Burada c_1 , c_2 ve c_3 salındırıcının tasarımı ve kullanılan malzemelerin tipine göre deneysel olarak elde edilmiş değerlerdir. Farklı tip bazı salındırıcılar için katsayılar Çizelge 2.3’de gösterilmiştir. Çizelgedeki düzlemsel salındırıcıda değerler magnet blokları NdFeB malzemesi olan durum için verilmiştir. Hibrit malzemede ise manyetik blok malzemesi yine NdFeB iken kutup malzemeleri ayrı ayrı demir ve vandyum permendur için verilmiştir (Elleaume vd., 2000). Delta salındırıcı için değerler Cornel enerji dönüşümlü linak için tasarlanan delta tipi salındırıcının değerleridir.

Çizelge 2.3. Salındırıcı parametreleri (Elleaume vd., 2000)

Salındırıcı	c_1	c_2	c_3
Düzlemsel paralel	2.076	-3.24	0
Hibrit (Demir)	3.381	-4.730	1.198
Hibrit (Vanadyum permendur)	3.694	-5.068	1.520
Delta (Düzlemsel alan)	1.96	-0.82	-3.31
Delta (Helisel alan)	1.45	-1.28	-2.24

2.2.5 Süperiletken salındırıcılar

Süper iletken salındırıcılar üzerine çalışmalar 1990’lü yıllarda birçok laboratuvar ve araştırma merkezinde başlamıştır ve günümüzde bir çok sinkrotron ışınım kaynağında kullanılmaktadır. Kalıcı mıknatıslı salındırıcılarda gerçekleşen büyük ilerlemelere karşın süper iletken hızlandırıcılar daha kısa periyot uzunluklarında daha büyük manyetik alan değerleri sağlamaktadır. Bugün, süper iletken ve kriyojenik teknolojilerde gerçekleşen ilerlemeler de süper iletken salındırıcıların gerçekleşmesine olanak tanımaktadır.

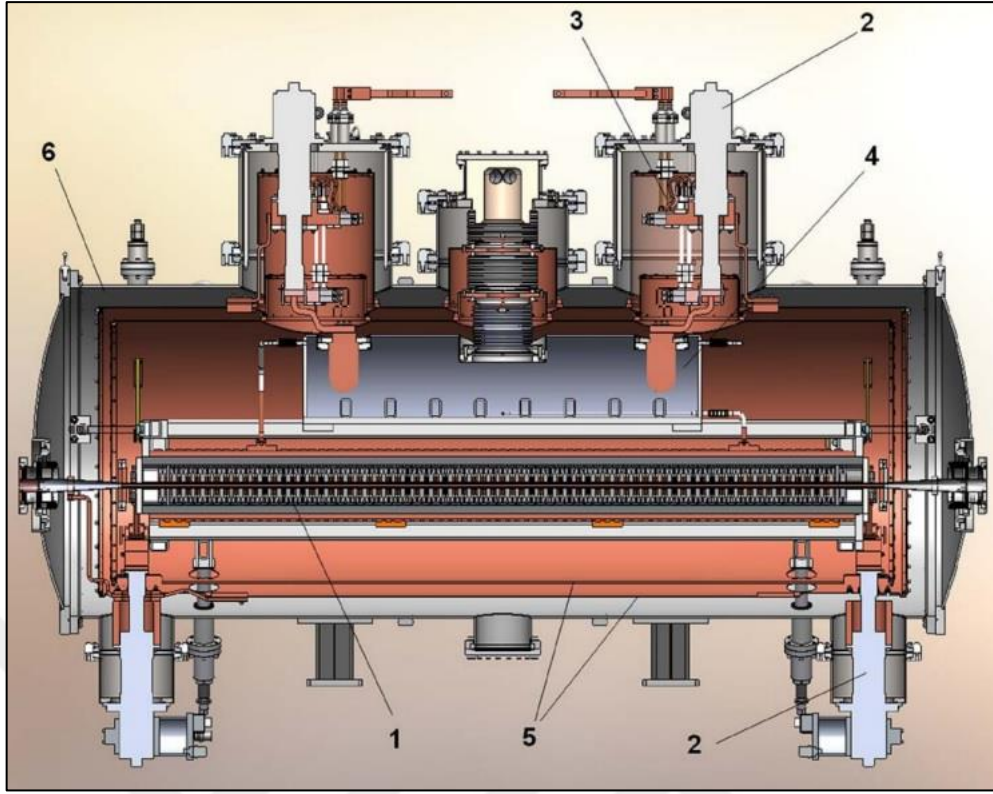
Temel olarak SCU mıknatıslar süper iletken sarımların ardışık olarak dizilmesi ile yapılır. Genel tasarımı, genellikle demir bir form üzerine sarılmış olan bir dizi süperiletken bobinden oluşur. Kalıcı mıknatıslı cihazlarda olduğu gibi, düzlem ve helisel periyodik alanlar ve gradyentli alan gibi çeşitli alan şekillenimlerinin oluşturulması mümkündür. Bu alan şekillenimleri, iletken seçimine bağlı olarak farklı sarma şemaları, sarma

prosedürleri, birleştirme teknikleri, olası sarma sonrası işlemler, soğutma ve güçlendirme yapılandırmalarına bağlı olarak farklılık gösterir.

Tüm SCU tiplerinin tipik olarak 2-4.5 K işletme sıcaklıklarında çalışması gerekir. Yüksek enerjili parçacık demeti ve salındırıcı boşluğundan geçen yüksek güçlü foton demetinden de korunmalıdır. Hemen hemen tüm SCU tipleri için dolaylı soğutma yöntemleri tercih edilir. Bir istisna, iletken vakum tüpüne (veya onunla konsantrik olan bir tüpe) doğrudan sarılan bobin montajlarıdır. Bunlar uygun bir şekilde sıvı helyum banyosuna batırılır. Bu tür yapılar için önemli örnekler, çift-sarmal helisel SCU'lardır.

Dolaylı soğutma yöntemlerinde, bobin gövdesinin içinden geçen sıvı helyum akışını veya ona termal olarak temas eden bir ısı değiş tokuşturucusu (exchanger-termosifon etkisi veya kriyojenik soğutucularla temaslı soğutma) kullanılır.

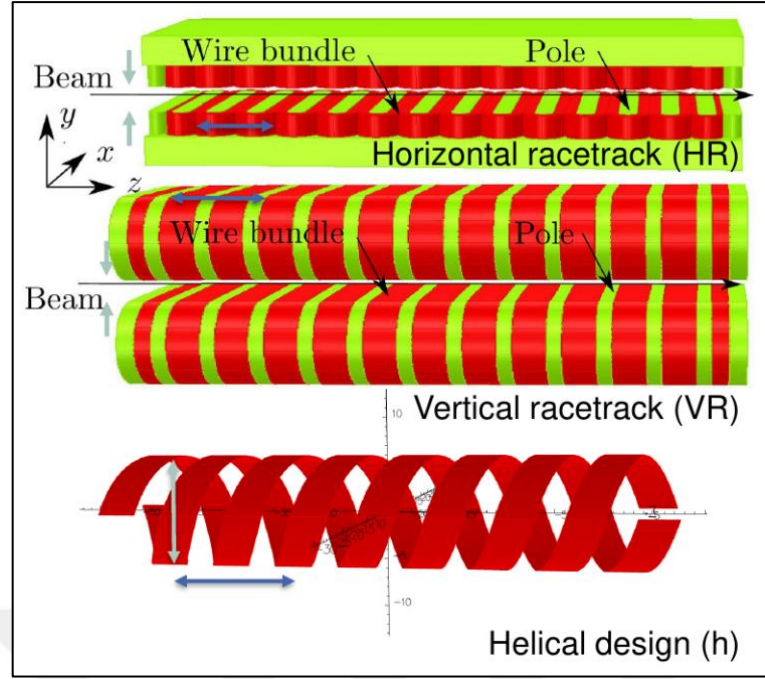
Şekil 2.4'de Budker Nükleer Fizik Enstitüsü tarafından üretilen ve Karlsruhe Araştırma Hızlandırıcısı'na (KARA) kurulan CLIC söndürücü zigzaglayıcının prototipini gösterilmektedir. Şekilde 1: zigzaglayıcı magnet, 2: kriyo-soğutucular, 3: akım iletkenleri, 4: iç sıvı helyum rezervuarı, 5: radyasyon kalkanları, 6: vakum kabı gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Termosifon tabanlı bir iletken soğutma şeması kullanan süperiletken ekleme cihazları için bir kriyojenik depolama tankının örnek kesitsel görünümü (Nguyen vd., 2019)

Düzlemsel süper iletken salındırıcılar karşılıklı iki periyodik süper iletken sarım dizisinden oluşur. Çoğu durumda sarımlar bir eksenle manyetik akıyı artıran manyetik gövdeye sarılır. En yaygın tasarım Şekil 2.5’de ortadaki tasarımda görüldüğü üzere sarımların dikey olarak sarıldığı tasarımdır. Üstteki yatay olarak sarılan tasarım, sarımlar için çok yer gerektiğinden periyot uzunluğu 20 mm’den fazla olan zigzaglayıcılarda kullanılır. Süper iletken tellerin eğrilik yarıçapı kısıtlayıcı faktör olduğu için kısa periyotlu SCU’lar dikey sarımlı tasarımlar ile mümkün olur. Yatay sarımlıların avantajı ise üretim, hizalama bakım kolaylığı şeklinde sıralanabilir. Genellikle SCU’larda aradaki boşluk mesafesi sabittir. Manyetik alanın değiştirilmesi süper iletken sarımlardaki akım değiştirilerek sağlanır.

Süper iletken helisel salındırıcıların yapımı için çeşitli tasarımlar olmasına karşın en yaygın olanı Şekil 2.5 ’da en altta belirtilen tasarımdır. Burada akım iç içe geçmiş iki ayrı sarımdan zıt yönde akar. Bunlarda manyetik alanı artırmak için iç bölge helisel demir gövde ile doldurulabilir.



Şekil 2.5. Süperiletken salındırıcılar için sarım geometrileri (Nguyen vd., 2019)

Süper iletken hızlandırıcılar da manyetik alan, periyot ve boşluk ilişkisi

$$B(\lambda_u[mm], g[mm]) = c_1 \cdot (c_2 + c_3 \lambda_u - c_4 \lambda_u^2 + c_5 \lambda_u^3) \exp(-\pi(c_6 \frac{g}{\lambda_u} - 0.5)) \quad (2.40)$$

ile ifade edilebilir. Denklemdaki katsayılar Nb-Ti ve Nb₃Sn için Çizelge 2.4’de verilmiştir.

Çizelge 2.4. Farklı tipteki SC salındırıcıları için manyetik alan, periyot ve boşluk parametreleri verilmiştir (Nguyen vd., 2019)

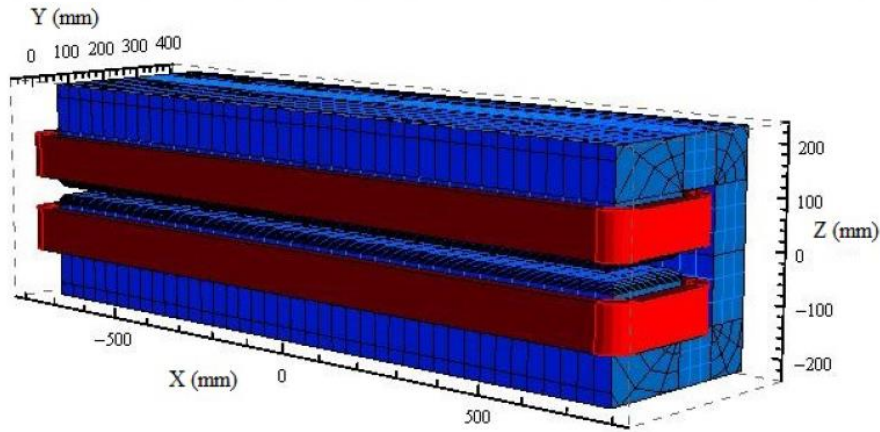
	NB-Ti		Nb ₃ Sn	
	Düzlemsel	Helissel	Düzlemsel	Helissel
C ₁	1.17	1.70±0.15	1.3	1.25±0.12
C ₂	0.28052	0.055 ± 0.013	0.28052	0.04 ± 0.05
C ₃	0.05798	0.063 ± 0.005	0.05798	0.056 ± 0.018
C ₄ /10 ⁻⁴	9	25 ± 3	9	-10 ± 20
C ₅ /10 ⁻⁶	5	51 ± 12	5	-30 ± 80
C ₆	1	0.8333 ± 0.0015	1	0.940 ± 0.006
λ_u/g	0.5	0.5	0.5	0.5

BÖLÜM III

GEREÇ VE YÖNTEM

3.1 Parametrelerin Seçimi

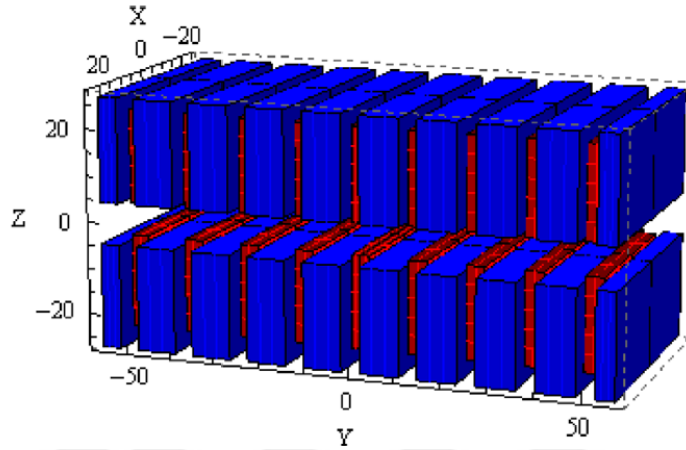
Eğici magnet, THM projesi kapsamında TURKAY depolama halkası tasarımında halihazırda önerilen mıknatıstır. Salındırıcı olarak vakum içi salındırıcı (IVU25), helissel süper iletken salındırıcı (HSCU) ve süper iletken salındırıcıdır (SCU20) seçilmiştir. Bir ışıyım kaynağındaki doğal ışıyım kaynakları olan eğici magnetler, zaten bir dairesel hızlandırıcıların ana bileşenleridir; TURKAY depolama halkasının eğici magnetleri 0,52 T'lık düşük manyetik alanlı eğici magnetlerdir (Nergiz, 2015). Şekil 3.1'de tasarlanmış olan eğici magnetin şeması gösterilmektedir. Düşük eğici magnet kullanılan tesislerde magnetlerin üretim maliyetleri ile birlikte güç ve soğutma gereksinimi de düşünüldüğünde, işletme maaliyeti de düşüktür. Ancak alanın düşük olması nedeniyle kritik enerji ve üretilen fotonların sayısı nispeten düşük olacaktır. Bu nedenle salındırıcı teknolojilerine ilişkin karar önem kazanmaktadır.



Şekil 3.1. TURKAY için tasarlanmış C tipi eğici magnet (Mavi kısım demir çekirdeği, kırmızı kısım ise sarımları göstermektedir) (Nergiz, 2017)

Salındırıcılarda kısa periyotlarda yüksek pik manyetik alan değerlerine ulaşmak için kutuplar arası boşluğun çok küçük yapılması gerekir. Klasik salındırıcılarda demetin içerisinde ilerlediği vakum borusu da bir yer kapladığı için boşluk mesafesi çok küçültülemez. Boşluğu azaltmanın bir yolu vakum borusu kullanmayıp doğrudan salındırıcının kendisini vakum içerisine almaktır. Bu tip salındırıcılara vakum içi

salındırıcı (In vacuum undulator-IVU) denir. Vakum içi salındırıcılar kutuplar arası mesafenin azalmasına ve daha büyük pik manyetik alan üretilmesine olanak tanır. IVU25, 25 mm salınım periyoduna sahip vakumlu salındırıcıdır ve pik manyetik alanı 7 mm boşluk için 0,9 T'dir Şekil 3.2'da IVU25'in tasarımının şeması verilmiştir.



Şekil 3.2. IVU 25'in şematik tasarımı (Nergiz, 2015)

Manyetik materyal mavi, demir kutuplar kırmızı ile gösterilmiştir (Anlaşılabilirlik için salındırıcının bir kısmı gösterilmiştir)

CompactLight projesinde, salındırıcı hatları için helisel süper iletken bir salındırıcı (HSCU) seçilmiştir. Seçilen HSCU'nun salınım periyodu 13 mm'dir. Eksen üzerindeki en yüksek enine alan 1,09 T'dir ve buna karşı gelen K değeri 1,33'tür. Salındırıcının borusu çapı 4,2 mm ve manyetik iç sargı çapı 5 mm olacaktır (Nguyen vd., 2019).

SCU20, KIT (Karlsruhe Teknoloji Enstitüsü) ve Bilfinger Noell GmbH iş birliğiyle üretilmektedir. 20 mm periyot uzunluğuna (SCU20) sahip tam ölçekli süper iletken salındırıcıdır. Sistem, KIT depolama halkası KARA'nın (Karlsruhe Araştırma Hızlandırıcısı) NANO ışıınım hattının kaynağında test edilmiştir (Casalbuoni vd., 2018).

3.2 Benzetim Programı

SPECTRA, sinkrotron radyasyonunun çeşitli özelliklerini hesaplamak için kullanılan bir benzetim programıdır (Tanaka ve Kitamura, 2001). Programın hesaplama kısmı C++ da yazılmıştır ve çeşitli sayısal hesaplama yöntemi kullanılarak SI özelliklerini karakterize etmekte kullanılır. Microsoft, windows, Linux ve macintosh işletim sistemlerin de

kullanılabilmektedir (Tanaka, 2021). Farklı tipteki salındırıcıların parlaklık değerleri ve spektrumları SPECTRA benzetim kodu ile hesaplanabilir. Şekil 3.3’de SPECTRA programının ara yüzü gösterilmiştir. Aynı hızlandırıcı parametreleri ile, farklı ışınım kaynakları için hesaplamalar yapılmıştır. Şekil 3.3’de arayüzde görülen ışınım kaynağı parametreleri helisel salındırıcı parametrelerinin hesaplandığı durumdur.

The screenshot displays the SPECTRA program interface with three main panels:

- Accelerator Panel:**
 - Storage Ring:
 - Energy (GeV):
 - Current (mA):
 - Circumference (m):
 - Bunches:
 - σ_z (mm):
 - Nat. Emittance (m.rad):
 - Coupling Constant:
 - Energy Spread:
 - $\beta_{x,y}$ (m):
 - $\alpha_{x,y}$:
 - $\eta_{x,y}$ (m):
 - $\eta'_{x,y}$:
 - Peak Current (A):
 - $\epsilon_{x,y}$ (m.rad):
 - $\sigma_{x,y}$ (mm):
 - $\sigma'_{x,y}$ (mrad):
 - γ^{-1} (mrad):
 - ☐ Zero Emittance
 - ☐ Zero Energy Spread
- Light Source Panel:**
 - Helical Undulator:
 - B (T):
 - λ_u (mm):
 - Device Length (m):
 - Reg. Magnet Length (m):
 - # of Reg. Periods:
 - K value:
 - ϵ_{1st} (eV):
 - $\sigma_{r,r'}$ (mm,mrad):
 - $\Sigma_{x,x'}$ (mm,mrad):
 - $\Sigma_{y,y'}$ (mm,mrad):
 - λ_{1st} (nm):
 - Flux_{1st}:
 - Brilliance_{1st}:
 - Peak Brilliance:
 - Bose Degeneracy:
 - Total Power (kW):
 - Gap-Field Relation:
 - Field Structure:
 - ☒ End Correction Magnet
- Configurations Panel:**
 - Far Field & Ideal Condition:
 - Harmonic Range: ~
 - K Range: ~
 - ϵ_{1st} Range (eV):
 - Points (K):
 - Accuracy:
 - Output File**
 - Format:
 - Folder:
 - Prefix:
 - Comment:
 - Serial Number:

Şekil 3.3. SPECTRA programının ara yüzü (Tanaka ve Kitamura, 2001)

BÖLÜM IV

BULGULAR TARTIŞMA VE SONUÇ

4.1 Hızlandırıcı ve Salındırıcı Parametreleri

Hızlandırıcı demeti parametreleri için TURKAY tesisi depolama halkasının elektron demeti parametreleri kullanılmıştır. Depolama halkasının çevresi 477 m'dir. Elektronların enerjisi 3 GeV ve tasarımda öngörülen ortalama demet akımı 500 mA'dir. Parlaklık değeri elektron demetinin emittans değerinin karesi ile ters orantılıdır. Bu sebeple son dönem tasarlanan depolama halkalarında mümkün olduğunca düşük demet emittansı değeri hedeflenmektedir. 0.51 nm rad'lık emittans değeri halkanın çevresi ile kıyaslandığında oldukça düşük bir değerdir. Depolama halkası tasarlanırken salındırıcıların yerleştirilmesi, rf kovukların yerleştirilmesi ve demetin içeri sokulması için magnetsiz boş bölgeler bırakılır. Bu bölgelerin uzunluğu 5 m'dir. Elektron demetinin depolama halkasındaki parametreleri Çizelge 4.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. Depolama halkasının elektron demeti parametreleri (Nergiz, 2015)

Parametreler	Birim	Değer
Enerji	GeV	3.0
Çevre	M	477
Demet akımı	Ma	500
Yatay emittans	nm rad	0.51
Düşey emittans	nm rad	0.0051
Boşluk bölgesinin ortasında β_x	M	12.7
Boşluk bölgesinin ortasında β_y	M	7.5
Boşluk bölgesinin ortasında D_x	M	0.09
Boşluk bölgesinin uzunluğu	M	5

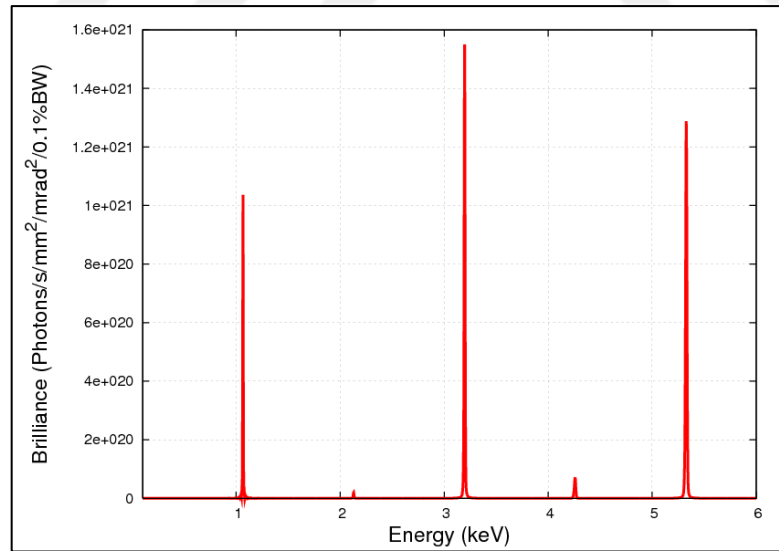
Işınının üretileceği, salındırıcılar olarak 25 mm periyotlu vakum içi salındırıcı IVU25, 20 mm periyotlu süper iletken salındırıcı SCU20 ve 13 mm periyot uzunluklu helisel süper iletken salındırıcı HSCU seçilmiştir. Seçilen salındırıcıların parametreleri Çizelge 4.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. Salındırııcı parametreleri (Nergiz, 2015)

Parametreler	IVU25	SCU20	HSCU
Periyot uzunluğu (cm)	2.5	2.0	1.3
Toplam uzunluk (m)	4	4	4
Tepe manyetik alan (T)	0.91	1.18	1.09
Maksimum K	2.10	2.20	1.33
Parlaklık (ph/s/mm ² /mrad ² /0.1BW)	1.6×10^{21}	2.7×10^{21}	8.1×10^{21}

4.2 Parlaklık Hesaplamaları

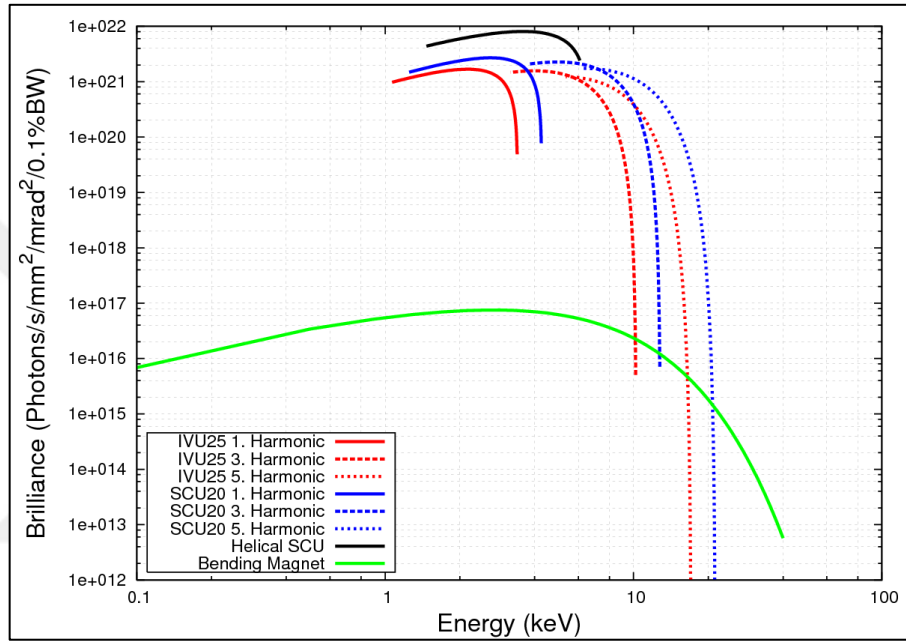
TURKAY depolama halkası ve salındırııcı parametreleri kullanılarak üretilecek ışınının özellikleri SPECTRA programı ile hesaplanmıştır. Şekil 4.1’de 25 mm periyotlu IVU25’den K’nın 2.1 olduğu durumda elde edilecek ışının spektrumu görülmektedir. Şekilden görüldüğü üzere ışınım periyodik harmonikler halinde oluşmaktadır. 1., 3. ve 5. Harmonikler güçlü iken çift sayılı harmonikler daha zayıftır. Bu sebeple salındırııcıdan üretilen ışınımdan 1. 3. ve 5. harmonikler kullanılır.



Şekil 4.1. 25 mm periyotlu vakum içi salındırııcının K=2.1 kırma parametresi durumunda parlaklık spektrumu

Salındırııcının K kırma parametresi normal iletken salındırııcılarda kutuplar arası mesafe değiştirilerek SCU’larda ise sarımlardan geçen akım değiştirilerek sağlanır. Şekil 4.2’de K değeri değiştirilerek IVU25 vakum içi salındırııcı, SCU20 20mm periyotlu super iletken

salındırıcı ve Helisel SCU'dan elde edilecek parlaklık spektrumu gösterilmektedir. Helisel SCU'dan sadece 1. Harmonik kullanışlı iken diğer salındırıcılarda diğer harmoniklerden de ışınım elde edilebilmektedir. Salındırıcılardan birkaç keV'den 10 keV'e kadar enerjiye sahip fotonlar üretilebilmektedir. K'nın bazı özel değerlerindeki parlaklık değerleri Şekil 4.2'de verilmiştir. Eğici magnetten elde edilecek ışının spektrumu daha geniş olmakla beraber parlaklık değerleri beklendiği üzere çok daha düşüktür.



Şekil 4.2. Farklı tip salındırıcılardan elde edilecek parlaklık spektrumu

BÖLÜM V

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında süper iletken ve helisel süper iletken salındırıcıların, THM projesi kapsamında tasarlanmış olan SI tesisi depolama halkası parametreleri kullanılarak elde edilecek ışının parlaklık spektrumuna katkıları incelenmiştir. Bu amaçla dünyada tasarlanmış salındırıcıların parametreleri kullanılmıştır. Seçilen salındırıcılardan biri KIT’de tasarlanmış ve KARA’da kullanılan 20 mm salındırıcı periyotlu süper iletken salındırıcı SCU20’dır. Seçilen diğer salındırıcı ise COMPACTLIGHT projesi için önerilmiş olan 13 mm periyotlu helisel süper iletken salındırıcı olan HSCU’dur. Bununla beraber karşılaştırma maksatlı daha önce çalışılmış normal iletken salındırıcı olan vakum içi salındırıcı IVU25’in ve depolama halkasında bulunan eğici magnetin parametreleri kullanılarak hesaplamalar tekrarlanmıştır. Bu amaçla, depolama halkasının elektron demeti parametreleri ve farklı tip ışınım kaynaklarının parametrelerinin girilmesi ile, ışının özelliklerinin belirlenmesini sağlayan SPECTRA benzetim programı kullanılmıştır. SCU20’den elde edilecek ışının maksimum parlaklık değeri 2.7×10^{21} ph/s/mm²/mrad²/°0.1BW olarak belirlenmiştir. Bununla beraber birinci, üçüncü ve beşinci harmoniklerden elde edilecek ışınım ile yaklaşık 1-20 keV enerji aralığında ışınım üretmek mümkün olmaktadır. Helisel salındırıcılarda yalnızca tek harmonik kullanışlıdır. 13 mm periyotlu HSCU kullanıldığında elde edilecek ışının maksimum parlaklık değeri 8.1×10^{21} ph/s/mm²/mrad²/°0.1BW olarak hesaplanmıştır. Elde edilecek ışının enerji aralığı yaklaşık 2-6 keV’dir. Dolayısıyla elde edilecek parlaklık değerinin normal iletken salındırıcı olan IVU25’e göre SCU20’de yaklaşık 2 kat, HSCU’da ise yaklaşık 5 kat fazla olacağı belirlenmiştir. Bu kullanıcılara açısından önemli bir artıştır. HSCU’da elde edilecek ışının çembersel polarize olması da bazı SI kullanıcıları için önemli bir avantaj sağlamaktadır.

Süper iletken hızlandırıcıların gerek yapım gerekse işletim maliyetlerinin fazla olmasına karşın, üretilen ışının parlaklık değerinde normal iletken salındırıcılara göre önemli bir fark vardır. Bu fark çok yüksek parlaklık isteyen kullanıcıların çalışma sürelerinin kısılması ve hassasiyetlerinin artması yönünden önemlidir. TURKAY için tasarlanmış depolama halkasının üzerinde salındırıcıların yerleştirilmesi için ayrılmış çok sayıda boş magnetsiz bölge bulunmaktadır. Bu bölgelerin büyük bölümü işletim maliyetleri

düşünölerek normal iletken salındırıcılar olacaktır. Bununla beraber bu bölgelerin bazıları süper iletken salındırıcıları için ayrılmalıdır. Bu sayede tesisin kullanıcı potansiyelinin artması ve genişlemesi sağlanacaktır.



KAYNAKLAR

Balerna, A. and Mobilio, S., Introduction to Synchrotron Radiation, **Springer-Verlag**, Berlin, 2015.

Casalbuoni, S., Bauer, S., Blomley, E., Glamann, N., Grau, A. and Holubek, T., "Performance of a full scale superconducting undulator with 20 mm period length at the KIT synchrotron", **Proceedings of IPAC2018**, 18, 4223-4225, 2018.

Elleauume, P., Chavanne, J. and Faatz, B., "Design considerations for a 1 Å SASE undulator", **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, 455(3), 503-523, 2000.

Halbach, K., "Permanent magnet undulators", **Journal de Physique Colloques**, 44, 211-216, 1983.

Namkung, W., "Review of third generation light sources", **Proceedings of IPAC10**, 10, 1-31, 2010.

Nergiz, Z., "Radiation properties of Turkish light source facility TURKAY", **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, 795, 140-143, 2015.

Nergiz, Z., "Magnet design for the storage ring of TURKAY", **Turkish Journal of Physics**, 41(1), 13-19, 2017.

Nguyen, F., Aksoy, A., Bernhard, A., Calvi, M., Clarke, J.A., Castañeda Cortés, H.M., Cross, A.W., Dattoli, G., Dunning, D., Geometrante, R., Gethmann, J., Hellmann, S., Kokole, M., Marcos, J., Nergiz, Z., Perez, F., Petralia, A., Richter, S.C., Schmidt, T., Schoerling, D., Thompson, N., Zhang, K., Zhang, L. and Zhu, D., XLS Deliverable D5.1; Technologies for the Compact Light undulator, **European Union's Horizon2020 research and innovation pro-gramme under Grant Agreement No. 777431.**, European Union, 2019.

Onuki, H. and Elleauume, P., Undulators, Wigglers and Their Applications, **CRC Press**, UK, 2002.

Tanaka, T., "Major upgrade of the synchrotron radiation calculation code SPECTRA", **Journal of Synchrotron Radiation**, 28(4), 1267-1272, 2021.

Tanaka, T. and Kitamura, H., "SPECTRA: a synchrotron radiation calculation code", *Journal of Synchrotron Radiation*, 8(6), 1221-1228, 2001.

Wiedemann, H., Particle Accelerator Physics, *Springer Verlag*, Netherland, 1993.

Wiedemann, H., Synchrotron Radiation, *Springer Verlag*, Netherland, 2001.

Wille, K., The Physics of Particle Accelerarators, *Oxford University Press*, UK, 2000.



ÖZ GEÇMİŞ

Songül YÜRTMEN tarihinde’de doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini’de tamamladı.2006 yılında girdiği Pamukkale Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü’nden mezun oldu. Konya Ereğli Mimar Ahmet Köşker Anadolu Lisesinde fizik öğretmeni olarak devam etmektedir.



TEZ ÇALIŞMASINDAN ÜRETİLEN ESERLER

Bu tez çalışmasından 1 (bir) adet uluslararası bildiri üretilmiştir. Bu üretilen çalışma aşağıda sunulmuştur.

Nergiz, Z. and Yürtmen, S. “Brilliance Spectra Of Super conducting Undulators At TURKAY”, V. *International Turkic World Congress on Science and Engineering*, Bişkek-Kırkızistan, 165-169, 15-17 September 2023.



