

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**3 GEV ENERJİLİ SİNKROTRON IŞINIMI TESİSİNDE KIZILÖTESİ
VE X-IŞINI DEMET HATLARI İÇİN IŞINIM KARAKTERİSTİKLERİNİN
VE ARAŞTIRMA TEKNİKLERİNİN İNCELENMESİ**

İrem GÖKBAYRAK

FİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ANKARA
2022**

Her hakkı saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

3 GEV ENERJİLİ SİNKROTRON IŞINIMI TESİSİNDE KIZILÖTESİ VE X-IŞINI DEMET HATLARI İÇİN IŞINIM KARAKTERİSTİKLERİNİN VE ARAŞTIRMA TEKNİKLERİNİN İNCELENMESİ

İrem GÖKBAYRAK

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ömer YAVAŞ

3. nesil sinkrotron ışınım kaynakları son yarım yüzyıldır kızılötesi bölgeden sert X-ışınları bölgesine kadar sahip oldukları yüksek akı, parlaklık değerleri ve kutuplanabilirlik özellikleri ile moleküler ve atomik düzeyde ileri düzeyli araştırmalar için vazgeçilmez bir araç olmuşlardır. Düşük yayınlı elektron demetlerinin dipol, undulatör ve wiggler tipi magnetlerden geçirilmesi ile üretilen sinkrotron ışınımı kaynakları en geniş spektral dağılımı sağlayacak şekilde genel olarak 1-10 GeV enerjili elektron demet enerjisine sahip sinkrotron hızlandırıcısına dayalı olarak kurulmaktadır. Son 25 yılda Avrupa’da kurulan ALBA (İspanya), DIAMOND, (İngiltere), SOLEIL (Fransa), ELETTRA (İtalya), BESYI-II (Almanya), SESAME (Ürdün) ile kurulumu sürmekte olan ILSF (İran) sinkrotron ışınımı tesisleri ağırlıklı olarak 3 GeV’lik demet enerjisine sahiptirler. Türk Hızlandırıcı Merkezi (THM) projesi kapsamında projelendirilen Türk Sinkrotron Işınımı tesisi TURKAY’da 3 GeV enerjili olarak planlanmıştır.

Bu çalışmada öncelikle sinkrotron ışınımının fiziği, karakteristikleri ve temel parametreleri incelenmiştir. Daha sonra yukarıda adı geçen tesisler incelenmiş ve 3 GeV enerjili sinkrotron ışınımı tesislerinde üretilen ışınımın genel özellikleri ile parametre değer aralıkları dikkate alınarak, sinkrotron ışınımının Ar-Ge ve teknoloji geliştirme amacıyla kullanıldığı alanlar ile ışınım demet karakteristikleri ve deneysel kullanım teknikleri incelenmiştir. Yapılan incelemeler ışığında, Türk Hızlandırıcı Merkezi (THM) projesi kapsamında projelendirilen TURKAY sinkrotron ışınımı tesisinin genel yapısı, alt bileşenleri, magnetik örgüsü ve ana parametreleri irdelenmiş, tesiste yer alması planlanmış ışınım demet hatları ve özellikle kızılötesi ve X-ışını demet hatları dikkate alınarak demet hattı yapıları, ışınım karakteristikleri, ışınım kullanım teknikleri ve araştırma potansiyeli için öngörülerde bulunulmuştur.

Şubat 2022, 116 sayfa

Anahtar Kelimeler: Hızlandırıcıya dayalı ışınım kaynakları, Parçacık hızlandırıcıları, Sinkrotron ışınımı, Demet hattı, Kızılötesi ışınım, X-ışını, Spektroskopi, Mikroskopi, TURKAY

ABSTRACT

Master Thesis

INVESTIGATION OF THE CHARACTERISTICS AND RESEARCH TECHNIQUES FOR INFRARED AND X-RAY BEAM LINES IN A 3 GEV SYNCHROTRON RADIATION FACILITY

İrem GÖKBAYRAK

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

Supervisor: Prof. Dr. Ömer YAVAŞ

3rd generation synchrotron radiation sources have been an indispensable tool for advanced research in molecular and atomic level with their high flux and brightness values and polarizability properties from the infrared to the hard X-ray region in last 50 years. Synchrotron radiation sources that are produced by passing low emittance electron beams through dipole, undulator and wiggler type magnets are generally based on a synchrotron accelerator with 1-10 GeV electron beam energies to provide the widest spectral distribution. ALBA (Spain), DIAMOND, (England), SOLEIL (France), ELETTRA (Italy), BESY-II (Germany) and SESAME (Jordan) synchrotron radiation facilities are established in Europe and Middle East in the last 25 years, and ILSF (Iran) facility is currently under construction mainly based on 3 GeV electron synchrotron. The Turkish Synchrotron Radiation facility (TURKAY), designed within the scope of the Turkish Accelerator Center (THM) project, is also planned with 3 GeV beam energy.

In this study, first of all, the physics, characteristics and basic parameters of synchrotron radiation were examined. Then, the facilities above were examined and the fields where synchrotron radiation is used for R&D and technology development, the required radiation beam characteristics and experimental usage techniques were examined considering the general characteristics and parameter value ranges of the radiation produced by 3 GeV energy electron synchrotron. In the light of the investigations, the general structure, sub-components, magnetic lattice and main parameters of the TURKAY synchrotron radiation facility, which was designed within the scope of the Turkish Accelerator Center (THM) project, were examined, and the planned radiation beamline lines and especially infrared and X-ray beam lines were taken into consideration. Comprehensive predictions have been made for structures, radiation characteristics, radiation utilization techniques and research potential.

February 2022, 116 pages

Key Words: Particle accelerators, Accelerator based light sources, Beamline, Synchrotron radiation, Infrared radiation, X-ray, Spectroscopy, Microscopy, TURKAY

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca bilgi ve tecrübesiyle bana destek olan, öneri ve yardımlarını esirgemeyen, titiz ve disiplinli çalışmasıyla örnek olan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Ömer YAVAŞ'a (Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı), OPA ve MADX yazılımları konusunda bilgilerini esirgemeyip yardımcı olan Dr. Ender AKDOĞAN'a, desteğini ve sevgisini benden esirgemeyip yaptığım her işte attığım her adımda yanımda olan sevgili eşim Fatih GÖKBAYRAK'a, onlara ayırmam gereken zamanlarda bile çalışmama izin verip sabırla beni bekledikleri için canım kızlarım Aynur Azra GÖKBAYRAK ve Elif Esmâ GÖKBAYRAK'a, beni yetiştiren, destekleyen bana her daim güvenen annem Aynur FIRAT, babam Alaattin FIRAT, ablalarım Fatma Elif FIRAT ve Zeynep FIRAT, abim Ömer Faruk FIRAT'a

Sonsuz minnet ve teşekkürlerimi sunarım.

İrem GÖKBAYRAK

Ankara, Şubat 2022

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAY SAYFASI	
ETİK	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xivi
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	3
2.1 Hızlandırıcılara Dayalı Işınım Kaynakları.....	3
2.2 Parçacık Hızlandırıcıları.....	4
2.3 Hızlandırıcıya Dayalı Işınım Kaynaklarının Nesilleri	5
2.4 Sinkrotron ve Sinkrotron Işınımının Temelleri	8
2.4.1 Sinkrotron.....	9
2.4.2 Sinkrotron ışınımı tesisinin ana bileşenleri	12
2.4.3 Sinkrotron ışınımının ana karakteristikleri	13
2.4.3.1 Eğici (bending) magnet ışınımı	14
2.4.3.2 Salındırıcı (undulator) magnet ışınımı.....	15
2.4.3.3 Zigzaglayıcı (wiggler) magnet ışınımı	16
2.4.3.4 Sinkrotron ışınımının kritik enerjisi ve spektrumu	16
2.5 Sinkrotron Işınımının Temel Özellikleri.....	18
2.5.1 Yüksek parlaklık.....	18
2.5.2 Geniş enerji spektrumu	18
2.5.3 Ayarlanabilirlik.....	19
2.5.4 Kutuplanabilirlik	19
2.5.5 Kısa atma süreleri	19
2.6 Sinkrotron Işınımının Genel Kullanım Alanları.....	19
2.7 Sinkrotron Işınımının Ana Parametreleri.....	20
2.7.1 Güç	20
2.7.2 Akı	22
2.7.3 Parlaklık.....	23
2.7.4 Aydınlik.....	23
2.7.5 Polarizasyon.....	24
2.7.5.1 Çizgisel polarizasyon	24
2.7.5.2 Dairesel polarizasyon.....	25
2.7.5.3 Eliptik polarizasyon	26
3. MATERYAL ve YÖNTEM	27
4. BULGULAR.....	28
4.1 III. Nesil Sinkrotron Işınımı.....	28
4.2 III. Nesil Bir Sinkrotron Tesisinde Araştırma Konu Başlıkları ve Işınım Kullanım Teknikleri.....	29
4.2.1 Makromoleküler kristalografi	29
4.2.1.1 Makromoleküler kristalografide kullanılan teknikler	30
4.2.2 Yumuşak yoğun madde	31
4.2.2.1 Yumuşak yoğun madde araştırmalarında kullanılan teknikler	33
4.2.3 Görüntüleme ve mikroskopi	34
4.2.4 Biyolojik kriyo-görüntüleme.....	36
4.2.5 Manyetik malzemeler	37
4.2.6 Yapılar ve yüzeyler	38

4.2.7 Kristalografi	39
4.2.8 Spektroskopi.....	41
4.2.8.1 Spektroskopi için kullanılan teknikler.....	42
4.3 III. Nesil Sinkrotron Işınımı Tesisleri	44
4.3.1 ALBA sinkrotron ışınımı tesisi	44
4.3.1.1 ALBA demet hatları.....	45
4.3.2 SOLEIL sinkrotron ışınımı tesisi.....	48
4.3.2.1 SOLEIL demet hatları.....	49
4.3.3 DIAMOND sinkrotron ışınımı tesisi	54
4.3.3.1 DIAMOND demet hatları.....	55
4.3.4 BESSY II sinkrotron ışınımı tesisi.....	60
4.3.4.1 BESSY II demet hatları.....	61
4.3.5 ELETTRA sinkrotron ışınımı tesisi	63
4.3.5.1 ELETTRA demet hatları.....	64
4.3.6 ILSF sinkrotron ışınımı tesisi.....	69
4.3.6.1 ILSF demet hatları	70
4.3.7 SESAME sinkrotron ışınımı tesisi.....	71
4.3.7.1 SESAME demet hatları	72
4.4 Türk Sinkrotron Işınımı Tesisi Projesi (TURKAY)	75
4.4.1 TURKAY hızlandırıcı yapısı ve ana parametreleri	75
4.4.1.1 TURKAY tesisinin genel yapısı	75
4.4.1.2 TURKAY tesisi linak ön hızlandırıcısı.....	76
4.4.1.3 TURKAY ön hızlandırıcı halkası (booster)	76
4.4.1.4 TURKAY tesisi ana halkası (main ring)	79
4.4.2 TURKAY tesisi için genel ışınım karakteristikleri	80
4.4.3 TURKAY için öngörülen ışınım demet hatları	83
4.4.3.1 Makromoleküler kristalografi (MX) demet hattı.....	84
4.4.3.2 XAFS demet hattı.....	86
4.4.3.2.1 XAFS temelli ölçüm teknikleri.....	89
4.4.3.2.2 X-ışını demet hattı genel yapısı.....	92
4.4.3.2.3 Örnek x-ışını demet hattı.....	92
4.4.3.2.4 X-ışını demet hatlarının genel araştırma potansiyeli	95
4.4.3.3 Kızılötesi (IR) spektroskopi ve mikroskopi (ISM) demet hattı.....	95
4.4.3.3.1 Kızılötesi demet hatlarının genel yapısı ve karakteristikleri	96
4.4.3.3.2 Örnek IR demet hattı.....	97
4.4.3.3.3 ISM hattının genel araştırma potansiyeli	99
5. SONUÇ VE TARTIŞMA.....	103
KAYNAKLAR	104
EK-1: OPA ve MADX Yazılımları	108
ÖZGEÇMİŞ.....	116

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

$\vec{B}$	Manyetik Alan
c	Işık Hızı
cm	Santimetre
$\vec{E}$	Elektrik Alan
e	Elektron
eV	Elektron Volt
f	Frekans
f_{rev}	Dolanım Frekansı
$\vec{F}$	Kuvvet
F	Akı
GeV	Giga Elektron Volt
GHz	Giga Hertz
H	Manyetik Alan Şiddeti
Hz	Hertz
K	Kinetik Enerji
KeV	Kilo Elektron Volt
m	Kütle
MeV	Mega Elektron Volt
mrad	Mili Radyan
MW	Mega Watt
m	Metre
MHz	Mega Hertz
nmrad	Nanometre radyan
ns	Nano Saniye
P	Güç
r	Yarıçap
$\vec{S}$	Poynting Vektörü
T	Tesla
THz	Tera Hertz
q	Parçacığın Yüğü
v	Hız
v_{faz}	Faz Hızı
W	Güç
μ	Manyetik Geçirgenlik
μm	Mikro Metre
μmrad	Mikrometre Radyan
μs	Mikro Saniye
ρ	Güç Yoğunluğu
ω	Frekans
ω_c	Kritik Frekans
ε	Elektron Demetlerinin Yayınım Değeri
ε_{kritik}	Işınımın Kritik Enerjisi
τ	Paketçinin Halkada dolanım süresi

Kısaltmalar

ALBA	İspanya Sinkrotron Işınımı Tesisi
BESSY II	Almanya Sinkrotron Işınımı Tesisi
CERN	Avrupa Nükleer Araştırmalar Merkezi
DESY	Deutsches Elektronen Synchrotron
DIAMOND	İngiltere Sinkrotron Işınımı Tesisi
DNA	Deoxyribonucleic Acid
ELBE	Electron Linac for beams with high Brilliance and low Emittance
ELETTRA	İtalya Sinkrotron Işınımı Tesisi
ESRF	Avrupa Nükleer Sinkrotron Işınımı Tesisi
EXAFS	Extended X-ray Absorption Fine Structure
FTIR	Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopi
HAXPES	Hard X-ray Photo Emission Spectroscopy
ILSF	İran Sinkrotron Işınımı Tesisi
IR	Infrared
ISM	Infrared Spectroscopy and Microscopy
IXS	Inelastic X-ray Scattering
LINAC	Linear Accelerator
MAD	Multi-wavelength Anomalous Diffraction
MX	Macromolecular Crystallography
RF	Radio Frequency
RIXS	Resonant Inelastic X-ray Scattering
RNA	Ribonucleic Acid
SAD	Single-wavelength Anomalous Diffraction
SAXS	Small Angle X-ray Scattering
SI	Sinkrotron Işınımı
SEL	Serbest Elektron Lazeri
SESAME	Ürdün Sinkrotron Işınımı Tesisi
SOLEIL	Fransa Sinkrotron Işınımı Tesisi
SRF	Superconducting Radio Frequency
TARLA	Turkish Accelerator and Radiation Laboratory

THM	Türk Hızlandırıcı Merkezi
TURKAY	Türkiye Sinkrotron Işınımı Tesisi
WAXS	Wide Angle X-ray Scattering
XAS	X-ray Absorption Spectroscopy
XAFS	X-ray Absorption Fine Structure
XANES	X-ray Absorption Near-Edge Structure
XES	X-ray Emission Spectroscopy
XRD	X-ray Diffraction Spectroscopy
XRF	X-ray Floresence Spektroskopy
XMCD	X-ray Magnetic Circular Dichroism

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Işınının pik parlaklığı ve ortalama parlaklık değerlerinin ışınım kaynaklarının nesillerine göre değişimi	7
Şekil 2.2 Işınım kaynağı olarak kullanılan magnetler ve ışınım spektrumları.....	7
Şekil 2.3 Magnetik Lorentz kuvveti.....	10
Şekil 2.4 Sinkrotron ışınım kaynağının temel bileşenleri	13
Şekil 2.5 a) Dipol magnet, elektron paketçikleri ve oluşan ışınının genel görünümü b) Dipol magnet ışınımının genel karakteristikleri c) ışınım spektrumu	14
Şekil 2.6 a) Salındırıcı magnetin genel yapısı ve temel parametreleri, b) Salındırıcı ışınının genel yapısı ve spektrum davranışı	15
Şekil 2.7 Zigzaglayıcı magnet ışınımı ve ışınım spektrumu	16
Şekil 2.8 Sinkrotron ışınımının evrensel fonksiyonu	18
Şekil 2.9 Çizgisel polarize ışık.....	24
Şekil 2.10 Dairesel polarize ışık	25
Şekil 2.11 Eliptik polarize ışık.....	26
Şekil 4.1 XES'de foton hareketi	43
Şekil 4.2 ALBA Sinkrotron ışınımı tesisinin genel dış ve iç görünümü.....	45
Şekil 4.3 SOLEIL Sinkrotron ışınımı tesisinin genel dış ve iç görünümü.....	49
Şekil 4.4 DIAMOND Sinkrotron ışınımı tesisinin genel dış ve iç görünümü.....	54
Şekil 4.5 BESSY II Sinkrotron ışınımı tesisinin genel dış ve iç görünümü.....	60
Şekil 4.6 ELETTRA Sinkrotron ışınımı tesisinin genel dış ve iç görünümü.....	63
Şekil 4.7 ILSF Sinkrotron ışınımı tesisinin genel dış ve iç görünümü.....	70
Şekil 4.8 SESAME Sinkrotron ışınımı tesisinin genel dış ve iç görünümü.....	71
Şekil 4.9 THM-SI (TURKAY) şematik görünümü.....	75
Şekil 4.10 TURKAY ön hızlandırıcısının şematik görünümü.....	76
Şekil 4.11 Ön hızlandırıcı halkanın çeyrek kesiminin betatron fonksiyonları.....	77
Şekil 4.12 Ön hızlandırıcı betatron fonksiyonları grafiği.....	78
Şekil 4.13 OPA'da tasarlanan tam tur ön hızlandırıcı sinkrotronun görünümü.....	78
Şekil 4.14 TURKAY akı spektrumunun davranışı.....	81
Şekil 4.15 TURKAY'da parlaklık spektrumunun davranışı.....	82
Şekil 4.16 XAFS ölçümü transmisyon süreci.....	87
Şekil 4.17 XAFS ölçümü soğurma süreci.....	88
Şekil 4.18 Nikel'e (Ni) ait K kenarı (1s-3d) XAFS spektrumu.....	89

Şekil 4.19 Tipik bir x-ışını demet hattındaki temel bileşenlerin şematik görünümü.	87
Şekil 4.20 NOTOS X-ışını demet hattı genel yapısı	94
Şekil 4.21 NOTOS X-ışını demet hattı deney istasyonları	95
Şekil 4.22 MIRAS IR demet hattı şematik görünümü	98
Şekil 4.23 MIRAS IR demet hattı optik düzeni	99
Şekil 4.24 Kızılötesi demet hatlarının araştırma potansiyeli.	100



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 Sinkrotron ışınımının enerjiye bağlı olarak genel kullanım alanları	19
Çizelge 4.1 ALBA sinkrotron ışınımı tesisi ana parametreleri	45
Çizelge 4.2 SOLEIL sinkrotron ışınımı tesisi ana parametreleri	49
Çizelge 4.3 DIAMOND sinkrotron ışınımı tesisi ana parametreleri.....	54
Çizelge 4.4 BESSY II sinkrotron ışınımı tesisi ana parametreleri.....	61
Çizelge 4.5 ELETTRA sinkrotron ışınımı tesisi ana parametreleri	64
Çizelge 4.6 ILSF sinkrotron ışınımı tesisi ana parametreleri.....	70
Çizelge 4.7 SESAME sinkrotron ışınımı tesisi ana parametreleri	72
Çizelge 4.8 TURKAY tesisi ana halkasının önemli parametreleri	79
Çizelge 4.9 Işınım kaynaklarının temel parametreleri	80
Çizelge 4.10 X-ışını demet hattı teknik özellikleri	93
Çizelge 4.11 MIRAS demet hattı teknik özellikleri.....	97

1. GİRİŞ

Işık, doğanın keşfi adına insan için her zaman vazgeçilmez olmuştur. Elektromanyetik spektrumun tüm dalga boyları ışık olarak adlandırılabilir ve farklı dalga boylarında farklı amaçlar için kullanılır. Kızılötesinden, görünür ışığa, ultraviyolede x-ışınlarına kadar sinkrotron ışınımı sürekli bir elektromanyetik spektrum bandını gösterir. Varlığı kuramsal olarak 19. yüzyılın sonlarında ortaya konulan sinkrotron ışınımı (Lineard 1898) deneysel olarak ilk kez ABD’de 1947 yılında kurulan 70 MeV’lik bir elektron sinkrotronunda gözlenmiştir (Baldwin 1975). 1950’li yıllardan başlayarak sinkrotron tipi dairesel hızlandırıcılarda ulaşılan yüksek demet enerjileri özellikle parçacık fiziği araştırmaları için yoğun olarak kullanılmışlardır. Yüksek enerji fiziği araştırmalarında kullanılan yüksek enerjili sinkrotronlardan parazitik modda üretilen sinkrotron ışınımı birinci nesil sinkrotron ışınımı olarak anılmıştır. 1970’lerden başlayarak amacı sinkrotron ışınımı üretmek olan elektron sinkrotronları inşa edilmiş ve öncelikle dipol magnet ışınmasının özellikleri deneysel hedefler açısından geliştirilmiş ve kullanılmıştır. Bu kaynaklar ikinci nesil olarak anılmaktadırlar. 1980’lerde, gelişen hızlandırıcı teknolojileri sayesinde elde edilen düşük yayımlı (emittans) elektron demetlerinin çok kutuplu zigzaglayıcı (wiggler) ve salındırıcı (undulator) magnetlerden geçirilmesi ile akı ve parlaklık değerleri çok daha yüksek sinkrotron ışınımı üretimi mümkün hale gelmiştir. Bu kaynaklara da üçüncü nesil sinkrotron ışınım kaynakları denilmiştir. Günümüzde dünya üzerinde 50 civarında sinkrotron ışınımı tesisi bulunmaktadır (Lightsources web sitesi 2021).

Sinkrotron ışınım kaynakları bilimsel araştırmalar için yüksek akı ve parlaklık değerine sahip, monokromatiklik ve kohorentlik derecesi yüksek ve kutuplanabilir sinkrotron ışınımı (SI) sağlamaktadırlar. Sinkrotron ışınımına ait spektrum, kızıl ötesinden başlayıp sert X-ışınlarına kadar uzanır. Tipik bir sinkrotron ışınımı kaynağından elde edilen X-ışınlarının akısı, geleneksel bir X-ışını tüpünden elde edilen X-ışınlarından bir milyon kat daha fazladır. SI’nın bu özelliği ile normal ışık kaynakları ile çok uzun sürelerde yapılabilen deneylerin süreleri dakika mertebelerine kadar düşebilmektedir. Sinkrotron ışınımı sayesinde moleküler yapı analizleri çok daha hızlı ve ayrıntılı şekilde

gerçekleştirilebilmektedir. Sinkrotron ışıını son yıllarda özellikle ilaç geliştirme ve gen bilimi çalışmalarının öne çıkan araçları haline gelmişlerdir.

Sinkrotron ışıını ve ilgili teknolojiler günümüzde yarı iletken, Li-iyon hücre, güneş pili, kataliz, petrol, çelik, polimer, ilaç, biyoloji, kimya, mikro/nanofabrikasyon, röntgen görüntüleme, madencilik, arkeoloji alanları ile savunma ve uzay endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Winick 1995).

Tez çalışması kapsamında, Avrupa ve Orta Doğuda son 25 yılda 3 GeV demet enerjisine sahip elektron sinkrotronlarına dayalı olarak kurulmuş bulunan ALBA (İspanya), DIAMOND (İngiltere), SOLEIL (Fransa), ELETTRA (İtalya), BESSY-II (Almanya), SESAME (Ürdün) ile kurulumu sürmekte olan ILSF (İran) sinkrotron ışıını tesislerinin ana parametreleri, demet hatları, araştırma konuları ve kullanılan deneysel teknikler incelenmiştir. Bu incelemeler ışığında, Türk Hızlandırıcı Merkezi (THM) projesi kapsamında önerilerek teknik tasarım çalışmaları gerçekleştirilmiş, 3 GeV enerjili 3. nesil sinkrotron ışıını tesisinin (TURKAY) genel yapısı ve magnetik örgüsü incelenmiş, ışıını demet hatları genel olarak tanımlanmış, özellikle kızılötesi (infrared, IR) ve X-ışıını demet hatlarının genel yapıları ve karakteristikleri ele alınarak araştırma konu başlıkları ve ışıını kullanım teknikleri için öneriler geliştirilmiş ve örnek demet hattı yapıları tanıtılmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1 Hızlandırıcılara Dayalı Işınım Kaynakları

Parçacık hızlandırıcıları 1920'li yıllardan başlayarak özellikle atom altı dünyaya yönelik araştırmalarda kilit rol oynamışlardır. Hızlandırıcılar zaman içinde linak, siklotron, betatron, mikrotron ve sinkrotron gibi değişik tiplerde geliştirilmiş ve günümüzde yaklaşık 40.000 hızlandırıcı başta Ar-Ge çalışmaları olmak üzere birçok alanda kullanılan vazgeçilmez araçlar halini almışlardır. Parçacık hızlandırıcıları günümüzün öncü teknolojileri olarak sayılabilecek enerji, nükleer, savunma, uzay, biyoteknoloji, sağlık, nanoteknoloji, iletişim ve ulaşım teknolojilerinde yapılan araştırma ve geliştirme çalışmalarında kullanımlarının yanı sıra birçok medikal ve endüstriyel kullanım alanına da sahiptirler.

Parçacık Hızlandırıcıları aynı zamanda son 50 yılda elektron demetlerine dayalı olarak sinkrotron ışınımı, serbest elektron lazeri ve Bremsstrahlung (frenleme) ışınımının elde edilmesinde de kullanılmaktadırlar. Özellikle sinkrotron tipi hızlandırıcılarda birkaç GeV'lik elektron demetlerinin kullanımı ile elde edilen sinkrotron ışınımı dalga boyu veya ışınım enerjisi olarak geniş spektrum aralığı sunması, yüksek akı, parlaklık değerlerine ve kutuplanabilirlik özellikleri dikkate alındığında, son yarım yüzyılda bilimsel araştırma ve teknoloji geliştirme çalışmalarında kilit rol oynamışlardır. Benzer şekilde 1990'lardan başlayarak çok düşük yayınlı elektron demetlerinin doğrusal hızlandırıcılardan elde edilerek undulatör (salındırıcı) denilen çok kutuplu magnetlerden geçirilmesi sonucu elde edilen 4. nesil serbest elektron lazerleri de özellikle ayarlanabilir dalga boyu ve çok yüksek parlaklık değerleri ile 3. nesil sinkrotron ışınımı ile birlikte yaygın kullanım alanına sahip özellikli ışınım olmuştur (Winick 1995).

Kuramsal temeller kısmında, parçacık hızlandırıcıları hakkında verilen temel bilgilerin yanı sıra tezin konusuna paralel olarak sinkrotron ışınımının fiziği, karakteristikleri, temel parametreleri, kullanım alan ve teknikleri detaylı şekilde ele alınmıştır.

2.2 Parçacık Hızlandırıcıları

Parçacık hızlandırıcıları ve çarpıştırıcılar mekanik, elektrik, elektronik, manyetizma, yazılım, katıhal, kuantum fiziği vb. temel bilim ve mühendislik alanlarına dayalı olarak üretilen ve amaçları doğrultusunda ihtiyaca göre kullanılan teknolojik donanımlardır. Parçacık hızlandırıcılarında temel olarak, ihtiyaç duyulan yüksek enerjilere çıkmak ve bu enerjilerden yararlanılarak parçacıkları sabit hedef deneylerinde, çarpıştırıcılarda veya ışıma kaynaklarında kullanmak için yüklü parçacık demetleri oluşturulur ve hızlandırılır. Hızlandırıcılarda; tek parçacık veya parçacık demeti, elektrik alan ve manyetik alan etkisindeki hareketinin yörünge, momentum, enerji kazanımı, dağılma ve toplama süreçleri gibi parametreleri açısından ele alınır (Wiedemann 2007).

Parçacık hızlandırıcılarının tipleri özellikle hızlandırmada kullanılan elektrik alanın ve bu alanı barındıran hızlandırıcı ünitenin (RF kavite) yapısına ve nasıl kullanıldığına dayalı olarak aşağıdaki gibi sınıflandırmaktadır:

Yüksek Gerilim Hızlandırıcıları (High Voltage Accelerators):

Yüklü parçacıkların yüksek bir gerilim farkı (ΔV) altında hızlanmaları ilkesine göre çalışmaktadırlar. Örneğin bir elektron bu gerilim farkı altında $K=e\Delta V$ kinetik enerjisini kazanmaktadır.

İndüksiyon Hızlandırıcıları (Induction Accelerators):

Hızlandırmada kullanılan elektrik alanın Faraday indüksiyon yasasına dayalı olarak magnetik alanın zamanla değişiminden elde edildiği hızlandırıcılardır.

Doğrusal Hızlandırıcılar (Linear Accelerators (Linac)):

Enerji kazanım bölgeleri olan RF kavitelerin bir doğru boyunca sıralandığı hızlandırıcı düzeneklerdir.

Dairesel Hızlandırıcılar (Circular Accelerators):

Parçacıkların eğici magnetler aracılığı ile dairesele bir yörüngelerde tutulduğu ve RF alanlar aracılığı ile hızlandırmanın yapıldığı hızlandırıcılardır. 4 temel tipi mevcuttur.

Dairesel hızlandırıcıların aşağıda belirtilen tipleri mevcuttur:

Betatron (Betatron):

Hafif parçacıklar için geliştirilmiş, hızlandırmada indüksiyon elektrik alanı kullanan ve sabit yörünge yarıçapına sahip dairesele hızlandırıcıdır.

Mikrotron (Microtron):

Parçacık demetinin her defasında aynı RF alan bölgesinden geçirildiği, artan enerji karşısında sabit magnetik alan uygulanması ile yörünge yarıçapının sürekli arttığı bir dairesele hızlandırıcıdır.

Siklotron (Cyclotron):

Parçacık demetinin sabit magnetik alana sahip “D” şekilli iki magnet arasındaki RF boşluğa uygulanan sinüsel gerilim sayesinde hızlandırıldığı, yörünge yarıçapının her turda giderek arttığı ve magnet sınırında demetin dışarı alındığı bir hızlandırıcı tipidir.

Sinkrotron (Synchrotron):

Parçacık demetinin sabit R yarıçaplı yörünge üzerinde RF kaviterler aracılığı ile yüksek enerjilere çıkarılabildiği, büyük ölçekli olarak inşa edilebilen ve kuvvetli odaklama uygulanan dairesele hızlandırıcıdır.

2.3 Hızlandırıcıya Dayalı Işınım Kaynaklarının Nesilleri

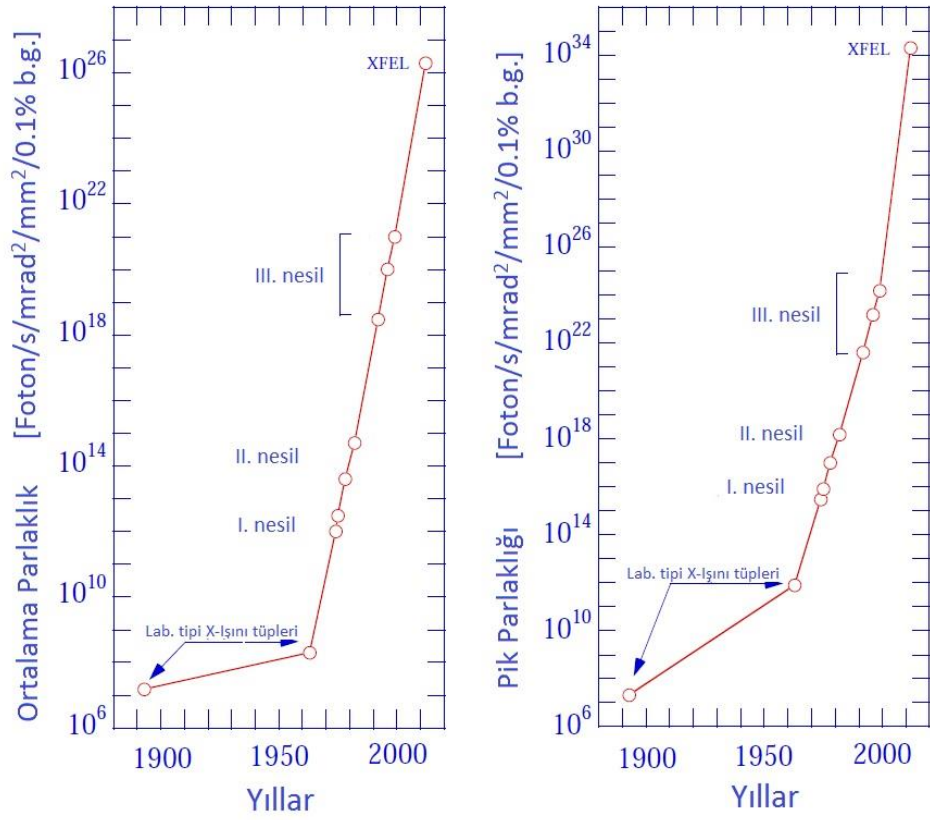
Parçacık hızlandırıcılarına dayanan ışınımları günümüze kadar olan gelişimi açısından incelendiğinde özellikle elektron demetinin ve ışınım elde etmede kullanılan magnetlerin özellikleri açısından dört farklı nesil olarak geliştiği görülmektedir (Winick 1995).

1. Nesil Işınım Kaynakları: Yüksek enerji fiziği deneyleri için kullanılan lepton çarpıştırıcılarında kullanılan yüksek enerjili sinkrotronlardan parazitik modda elde edilen sinkrotron ışınimleri 1. nesil ışınım kaynakları olarak anılmıştır.

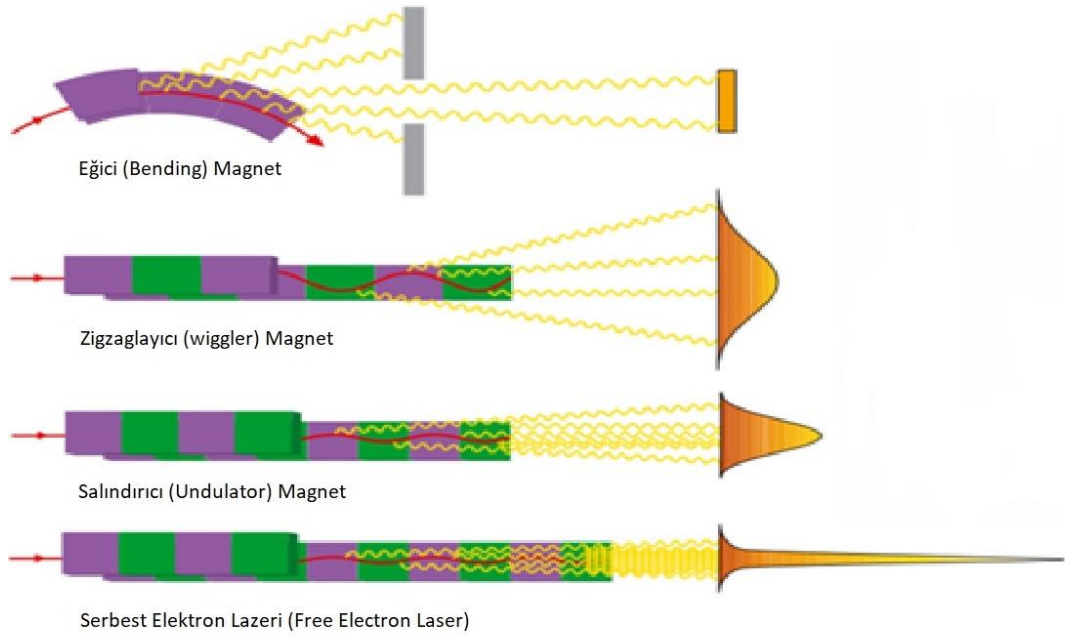
2. Nesil Işınım Kaynakları: Bu ışınım kaynakları elektron demetlerinin yüksek yayılım değerinden dolayı ($>100 \mu\text{mrad}$) ışınım akı ve parlaklık değerlerinin yeterince yüksek olmadığı ışınım kaynaklardır.

3. Nesil Işınım Kaynakları: Salındırıcı (undulator) ve zigzaglayıcı (wiggler) magnetlerden düşük emittansa sahip elektron demetleri geçirilerek elde edilen sinkrotron ışınimleri 3. nesil olarak bilinmektedirler. Yayılım değeri elektron demetleri için $20 \mu\text{mrad} < \varepsilon < 100 \mu\text{m.rad}$ aralığına düşürülerek parlaklık ve akı değerleri 2. nesil kaynaklara göre daha yüksek değerlere ulaşmışlardır.

4. Nesil SI Kaynakları: Önceki nesillere çok daha düşük yayımlı ($< 20 \text{ nm.rad}$) doğrusal elektron hızlandırıcılarından (linak) elde edilen elektron demetlerinin gelişmiş salındırıcı ve zigzaglayıcı magnetlerden geçirilmesi sonucu elde edilen serbest elektron lazerleri (SEL) günümüzde 4. nesil ışınım kaynakları olarak anılmaktadır.



Şekil 2.1 Işınımın pik parlaklığı ve ortalama parlaklık değerlerinin ışınım kaynaklarının nesillerine göre değişimi (Yavaş 2008)



Şekil 2.2 Işınım kaynağı olarak kullanılan magnetler ve ışınım spektrumları (Yavaş 2008)

2.4 Sinkrotron ve Sinkrotron Işınımının Temelleri

Sinkrotron tipi hızlandırıcıda parçacık demeti sabit R yarıçaplı yörünge üzerinde RF kaviteler aracılığı ile yüksek enerjilere ulaştırılır ve kuvvetli odaklama için yörünge üzerinde kudrupol magnetler kullanılır. Yörünge üzerinde bulunan bir veya daha çok RF kavite aracılığı ile demet heflenene enerjiye ulaştırılır. İvmeli hareket yapan yüklü parçacıklar kütlesinin dördüncü kuvveti ile ters orantılı güce sahip ışınım yaydıkları için özellikle elektron hızlandırıcılarında yarıçapa da bağılı olarak sinkrotron ışınımı eğrisel yörüngenin her noktasında parazitik olarak (istem dışı) ortaya çıkmaktadır. Parçacık çarpıştırıcılarında kullanılan sinkrotronlarda ortaya çıkan bu parazitik modda oluşan ışınımlar sinkrotron ışınımının ilk neslini de teşkil etmektedirler. Zaman içinde amacı sinkrotron ışınımı elde etmek olan sinkrotronlar inşa edilmiş ve ışınım sağlayan eğici (dipol), salındırıcı (undulatör) ve zigzaglayıcı (wiggler) magnetler de elektron demetinin parametrelerini ve elde edilmesi hedeflenen ışınımın karakteristiklerini de dikkate alarak özel olarak tasarlanır hale gelmişlerdir.

1980'lerden başlayarak ışınım amacıyla inşa edilen sinkrotronlar daha baştan çok kutuplu magnetler olan salındırıcı ve zigzaglayıcı magnetleri yörünge üzerinde bulunduracak şekilde tasarlandılar ve bunlar 3. nesil ışınım kaynakları olarak anılırlar. Bunun gibi üçüncü nesil bir ışınım kaynağı olan Avrupa Nükleer Sinkrotron Işınımı Tesisi (ESRF) 1994 yılında Fransa Grenoble'de faaliyete geçti. Çok kutuplu salındırıcı (undulatör) ve zigzaglayıcı (wiggler) magnetler literatürde sinkrotron üzerine yerleştirilen eklenti aygıtları (insertion devices) olarak da anılmakta ve sinkrotron tasarım aşamasında planlanan düz kesimlere yerleştirilmektedirler. Bunlar elektron demet enerjisinin, çok kutuplu magnetin kutup aralığının (gap) ve kullanılan salınımlı magnetik alanın genliğinin ayarlanması ile yüksek parlaklık ve akı değerlerine sahip, dalgaboyu ayarlanabilir, ışınımlar elde edilebilmesini sağlamışlardır (Winick 1995).

Sinkrotron ışınımına olan talep, tüm dünyadaki 3. nesil sinkrotronların yapımını ve mevcut sinkrotronların daha parlak ışınım oluşturmalarını, kullanım süresinin artırılmasını ve daha esnek deney istasyonlarının oluşturulması için sürekli olarak geliştirilmesini

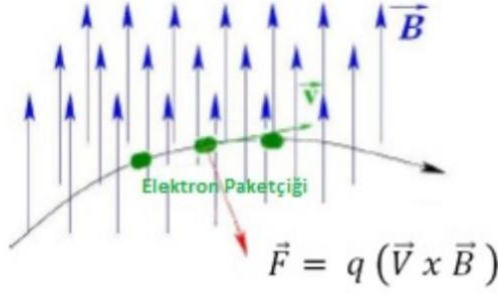
sağlar. Günümüzde sinkrotronların modüler olan yapısı sayesinde yeni teknolojiler mevcut makinelerle birleşebilir. Güçlü doğrusal hızlandırıcı (linac) teknolojisini kullanarak, Serbest Elektron Lazeri (SEL) olarak bilinen 4. nesil ışınımalar üretebilir ve SEL ışınımı sinkrotron ışınımı ile karşılaştırıldığında çok daha kısa ışınım atma uzunluklarına (ps, fs vb.) ve çok yüksek pik parlaklık ($\sim 10^{35}$) değerlerine sahiptir. Günümüz itibarıyla dünyada ikinci ve üçüncü nesil 50 civarında sinkrotron ışınımı kaynağı vardır. Bu ışınım kaynakları, spektrumun kızılötesi (infrared) bölgesinden sert X-ışını (hard X-ray) bölgesine kadar çok geniş bir aralığı kapsarlar. Sinkrotron ışınımı yukarıda da değinildiği gibi günümüzün öncü teknoloji alanlarında gerçekleştirilen Ar-Ge ve teknoloji geliştirme çalışmalarında çok geniş uygulama alanına sahiptir (Womersley 2017).

2.4.1 Sinkrotron

Sinkrotron, hızlandırma için RF elektrik alanının kullanıldığı, RF kaviteler içeren, yüklü parçacık demetlerini (e, p vb.) yörünge yarıçapı sabit tutularak yüksek enerjilere ulaştıran dairesel hızlandırıcıdır. Sinkrotronda hızlandırma işlemi elektrik alan ile sağlanırken, manyetik alan yardımı ile dairesel yörüngeler oluşturulur. Bu işlem sırasında parçacık enerji kazanırken parçacıkları sabit yörüngede tutabilmek için eğici (bending) magnet alanları artırılmalıdır. Parçacıklar düşük momentumlarda enjekte edilir ve daha sonra hızlandırılır. Parçacıklar genellikle sinkrotron içine, bir doğrusal hızlandırıcı veya mikrotrondan 10-20 MeV mertebesinde enjekte edilirler. Daha ağır parçacıklar için, hızlandırmanın ilk aşamalarında ılımlı bir frekans modülasyonu gerekebilmektedir. Demetin dolanım frekansı ile RF alan frekansının eşzamanlılığının sağlanması için genel olarak çok daha yüksek bir değere sahip olan RF alan frekansı dolanım frekansının tam katı olmalıdır (Wiedemann 2007).

Lorentz kuvvetine maruz kalan yüklü parçacıklar hareket yönüne dik yönde etkiyen magnetik kuvvetin etkisiyle dairesel yörüngede dolanırlar. Yüklü bir parçacığa etkiyen Lorentz kuvveti şu şekilde ifade edilir:

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



Şekil 2.3 Magnetik Lorentz kuvveti (Yavaş 2008)

Dairesel yörüngede dolanan q yükü için merkezci kuvvet merkezkaç kuvvet ile dengelendiği için sabit yörünge yarıçapı r aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$\frac{\gamma m v^2}{r} \hat{r} = [c] \frac{q}{c} (\vec{v} \times \vec{B}) \Rightarrow \frac{1}{r} = \frac{qB}{cp} = \text{sabit} \quad (2.2)$$

Burada q ile verilen parçacığın yükü, v parçacığın hızı, m parçacığın kütlesi, p parçacığın momentumu, B uygulanan manyetik alan, r ise sinkrotron halkasının yarıçapıdır.

$$R = r = \text{sabit} \quad (2.3)$$

Yörünge yarıçapı sabit tutulduğunda çok daha yüksek enerji değerlerine ulaşılabilir. Yörünge yarıçapı sabit olduğundan tasarım şartı,

$$\frac{1}{R} = \frac{qB}{cp} = \text{sabit} \quad (2.4)$$

Sinkrotronda bir paketçinin halkada dolanım süresi,

$$\tau = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi\gamma mc}{ZeB} \quad (2.5)$$

Parçacığın momentumu arttıkça bu parçacıkların yörüngesinin değişmemesi için eğici (bending) magnetlerin şiddeti bu duruma eşdeğer olarak arttırılır. Bu durum parçacığın momentumunun manyetik alanla orantılı olarak artırılması ile sağlanır.

$$R = \text{sabit} \Rightarrow B \sim p(t) \quad (2.6)$$

Dolanım frekansı parçacığın hızına bağlı olarak;

$$f_{\text{dolanım}} = \frac{ZecB}{2\pi cp} \beta(t) \rightarrow \beta(t) \quad (2.7)$$

$$f_{\text{rf}} = hf_{\text{dolanım}} \quad (2.8)$$

Eş zamanlılık sağlanabilmesi için, radyo frekansı (RF) dolanım frekansının tam katlarında olmalıdır. h harmonik sayısı olarak ifade edilir. Enerjinin artması sonucu parçacıkların hızlarında artış olacaktır.

$$v = \text{değişken} \quad \beta = \beta(t) \rightarrow f_{\text{rf}} \sim v(t) \quad (2.9)$$

Hafif parçacıklar rölativistlik hızlara daha kısa sürelerde ulaşırlar ve dolanımlarını ışık hızına yakın olan sabit hızlarla sürdürürler.

$$V = \text{sabit} \quad \beta = \text{sabit} \quad f_{\text{rf}} = \text{sabit} \quad (2.10)$$

Bir sinkrotronda elde edilebilecek maksimum enerji şu şekilde ifade edilir;

$$cp_{\text{max}} = \sqrt{E_{\text{kin}} (E_{\text{kin}} + 2mc^2)} = C_p B [\text{kG}] r [\text{m}] \quad (2.11)$$

$$C_p = [c]e = 0.02997926 \left[\frac{\text{GeV}}{\text{kG m}} \right] \quad (2.12)$$

2.4.2 Sinkrotron Işınımı Tesisinin Ana Bileşenleri

a) Elektron kaynağı ve enjektör

Bir termiyonik veya fotokatod elektron kaynağı ile üretilen elektronlar, genel olarak bir doğrusal RF hızlandırıcıda (linac) belirli bir enerjiye kadar (tipik olarak ~ 100 MeV) hızlandırılarak ön hızlandırıcı (booster sinkrotron) iletilirler.

b) Booster sinkrotron

Elektron demetini hedeflenen enerjiye yükselten ve demet yapısını düzenleyerek ana halkaya aktarılmasını sağlayan ön hızlandırıcıdır.

c) Ana sinkrotron (Depolama halkası)

Elektron demetinin hedeflenen enerji ve demet parametreleri ile kullanılmasını sağlayan ve ana yörünge üzerinde eğici magnetler (dipol), odaklayıcı magnetler (kuadrupol), düzeltici magnetler (sektupol), RF kaviterler ve ışınımın üretimini gerçekleştiren çok kutuplu magnetler (undulatör ve zigzaglayıcı) bulunduran ana hızlandırıcıdır.

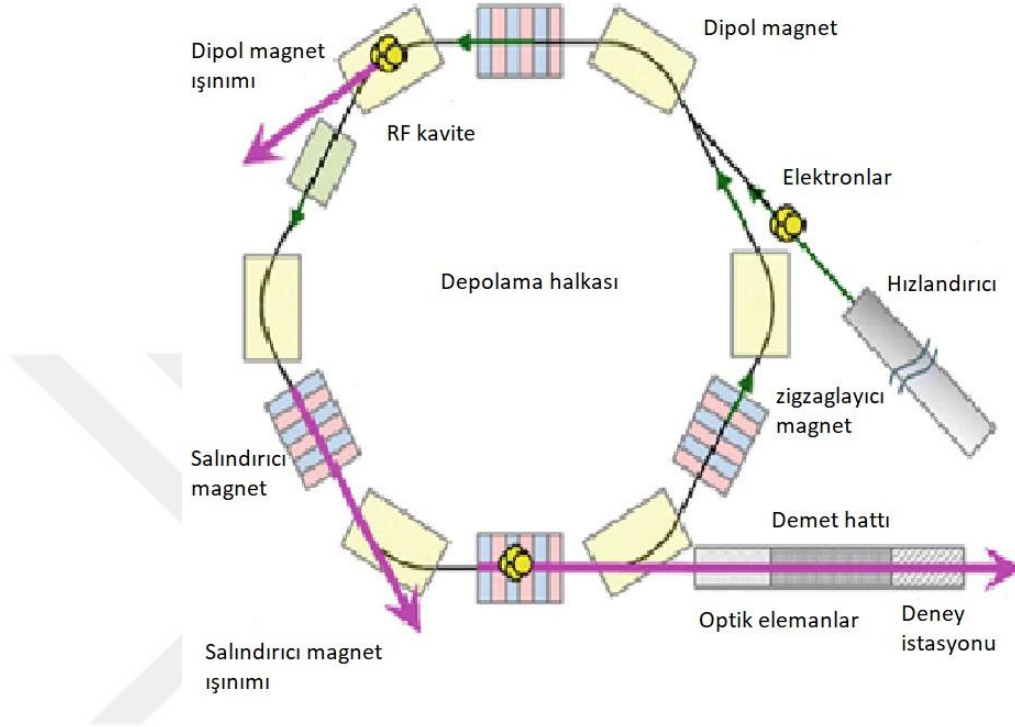
d) Eklenti cihazları (Insertion devices)

Eklenti cihazları sinkrotron yörüngesi üzerine içerisinden ışınım üretmek üzere elektron demetinin geçtiği çok kutuplu magnetlerdir. Bunlar undulator (salındırıcı) ve zigzaglayıcı (wiggler) magnetlerdir.

d) Işınım Demet Hattı

Işınım demet hattı üretilen sinkrotron ışınımının belirli optik düzeneklerden geçirilerek deney istasyonuna taşınmasını sağlayan hatlardır. Hat üzerinde ışığın şiddetini, enerjisini,

monokromatikliğini, kutupululuğunu düzenleyen optik elemanlar ve deney istasyonuna aktarılmasını sağlayan optik pencereler bulunmaktadır.



Şekil 2.4 Sinkrotron ışınım kaynağının temel bileşenleri (Uruga 2016)

2.4.3 Sinkrotron Işınımının Ana Karakteristikleri

Bir parçacık hızlandırıcısında sinkrotron ışınımı elde edebilmek için zigzaglayıcı, salıncıcı ve eğici magnetler kullanılmalıdır. Eklenti aygıtlar (insertion devices) olarak tanımlanan salıncıcı (undulator) ve zigzaglayıcı (wiggler) magnetler ile elde edilen ışınım, bazı özellikleri bakımından eğici (bending) magnetler ile elde edilen ışınımdan farklılaşmaktadır. Eklenti aygıtlardan (insertion devices) elde edilen ışınım ise karakteristikleri açısından kendi içinde ayrılmaktadırlar (Shaftan 2018).

2.4.3.1 Eğici (Bending) Magnet Işınımı

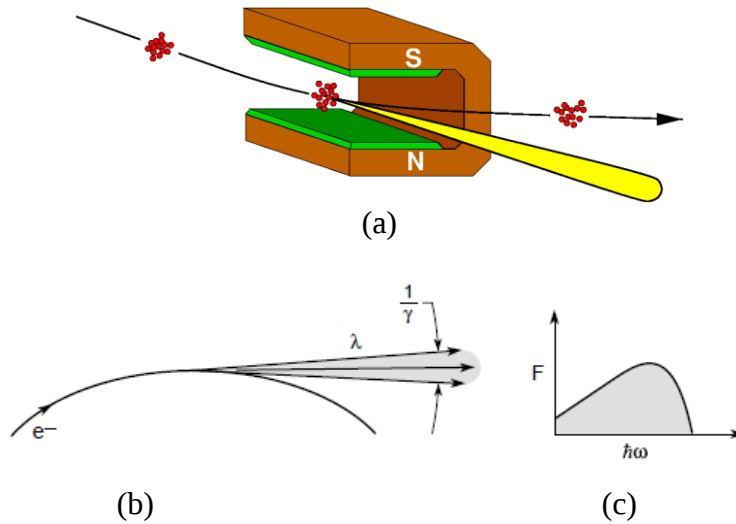
Bir eğici (dipol) magnetin karakteristik parametresi, sahip olduğu B (T) magnetik alanının içinden geçen cp (GeV) enerjili rölativistik bir demeti bükme yarıçapıdır. Bu yarıçap pratik birimlerde denlem 2.13'teki gibi verilir.

$$\frac{1}{\rho} (\text{m}^{-1}) = C_P \frac{B(\text{T})}{cp(\text{GeV})} \quad (2.13)$$

$$C_P = [c]e = 0.299792 \frac{\text{GeV}}{\text{mT}} \quad (2.14)$$

Bu ifade de $\rho[\text{m}]$ eğrilik yarıçapı, $B [\text{T}]$ manyetik alan, $c [\text{m/s}]$ ışık hızı ve $p [\text{GeV}/c]$ ise elektronun momentumudur. C_P elektron için verilen katsayıdır.

Dipol magnet ışınımının genel davranışı Şekil 2.5'te verilmiştir. Burada, γ Lorentz faktörü, $1/\gamma$ yayılım açısıdır. Işınımın akısının (F), ışınım enerjisine göre değişimi geniş band karakterlidir.



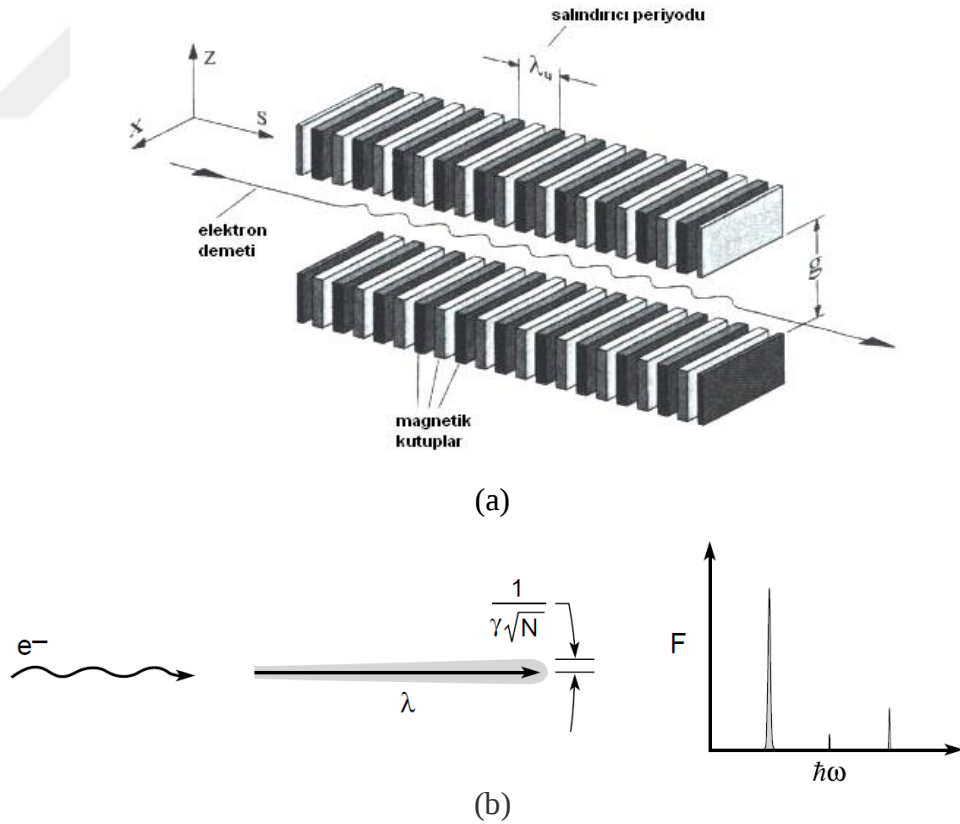
Şekil 2.5. a) Dipol magnet, elektron paketçikleri ve oluşan ışınımın genel görünümü, b) Dipol magnet ışınımının genel karakteristikleri, c) Işınım spektrumu (Attwood 2007)

2.4.3.2 Salındırıcı (Undulatör) Magnet Işınımı

Salındırıcı magnetler, kutupları arasında düşey yönde salınımlı magnetik alan üreten çok kutuplu bir magnettir ve arasından geçen elektron demetine yayat düzelemdede sinüsel bir hareket yaptırır (Şekil 2.6. a). λ_u salındırıcı kutup periyodu, g ise gap aralığı olarak bilinir. Salındırıcı magnetin şiddet parametresi K ile gösterilir ve aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$K = 0.934 B(\text{Tesla})\lambda_u(\text{cm}) \quad (2.15)$$

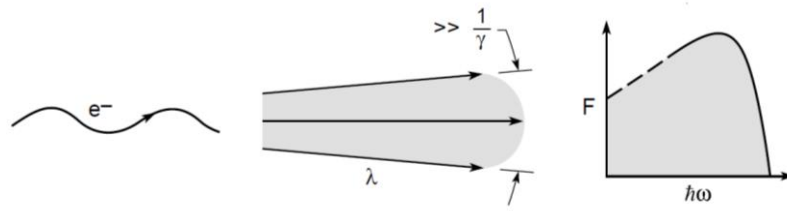
Salındırıcı magnet için şiddet parametresi $K \sim 1$ 'dir. $K > 1$ oldukça elektron demetinin çizdiği sinüsel yörüngesi daha köşeli (zigzaglı) hal almaya başlar ve magnet zigzaglayıcı (Wiggler) magnet olarak anılır. Salındırıcı magnetin ışınması lazer karakterli iken zigzaglayıcı magnetin ışınması daha geniş band karakterlidir (Atwood 2007).



Şekil 2.6. a) Salındırıcı magnetin genel yapısı ve temel parametreleri, b) Salındırıcı ışınımın genel yapısı ve spektrum davranışı (Attwood 2007)

2.4.3.3 Zigzaglayıcı (Wiggler) Magnet Işınımı

Yukarıda değinildiği üzere çok kutuplu magnetin şiddet parametresi K büyüdükçe (> 1) elektron demetinin hareketi zigzaglı hale gelir ve ışınım spketrumu geniş band karakterli hale gelir (Şekil 2.7). Zigzaglayıcı (wiggler) magnet ışınımı özellikle yüksek foton enerjisi elde etmek için tercih edilir (Wille 1998).



Şekil 2.7 Zigzaglayıcı magnet ışınımı ve ışınım spektrumu (Attwood 2007)

Zigzaglayıcı ve salındırıcı magnet ışınımının farkı aşağıdaki şekilde daha net olarak görülmektedir. Zigzaglayıcı magnet ışınımı salındırıcı magnet ışınımına göre çok daha geniş band karakterlidir. Salındırıcı magnet ışınımı ise daha monokramtik olup lazer karakterlidir.

2.4.3.4 Sinkrotron Işınımının Kritik Enerjisi ve Spektrumu

Sinkrotron ışınım spektrumu genel davranışı itibarıyla geniş band karakterlidir ve düşük frekanslardan çok yüksek freanslara kadar uzanır (kızılötesinden sert X-ışınlarına kadar). Spektrumu foton yoğunluğu açısından kiye bölen ve spektrumun tepe noktasına karşılık gelen frekansa karşılık gelen enerjiye ışınımın kritik enerjisi denilir ve bu değer elektron demetinin enerjisi ve yörünge yarıçapı cinsinden aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\epsilon_{\text{kritik}} = C_c \frac{E^3}{\rho} \quad (2.16)$$

$$C_c = \frac{3\hbar c}{2(mc^2)^3} \quad (2.17)$$

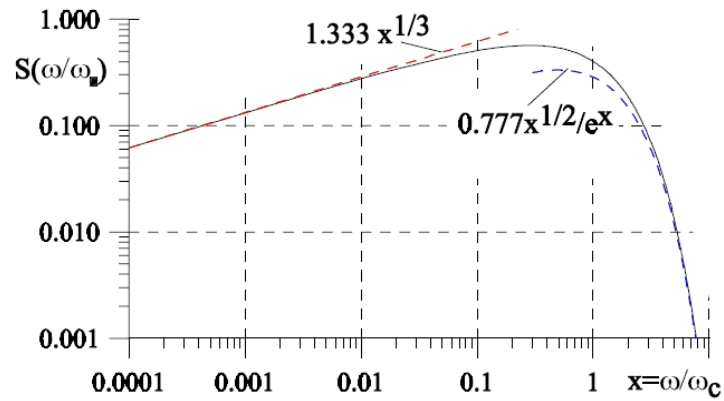
Kritik enerji değeri pratik birimlerde elektronlar için aşağıdaki gibi verilir. Burada E demet enerjisi, B ise Tesla cinsinden dipol magnet alanıdır.

$$\epsilon_{\text{kritik}}(\text{keV}) = 2.2183 \frac{E^3(\text{GeV})^3}{\rho(\text{m})} = 0.66503 E^2(\text{GeV})^2 B(\text{T}) \quad (2.18)$$

Sinkrotron ışınımının spektral davranışı, kritik enerjiye karşılık gelen kritik frekans w_c (w_{kritik}) olmak üzere, $x = w_c/w$ değişkenine göre sinkrotron ışınımının evrensel fonksiyonu olarak bilinen $S(x)$ fonksiyonu aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$S\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right) = \frac{9\sqrt{3}}{8\pi} \frac{\omega}{\omega_{\text{kritik}}} \int_{\frac{\omega}{\omega_{\text{kritik}}}}^{\infty} \frac{K_{\frac{5}{3}}(\bar{x})}{\bar{x}^{\frac{5}{3}}} d\bar{x} \quad (2.19)$$

Burada, $K_{\frac{5}{3}}(\bar{x})$, 5/3. mertebeden modifiye bessel fonksiyonudur. $S\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)$ spektrum fonksiyonunun davranışı Şekil 2.8’de görülmektedir ve bu davranış sinkrotron ışınımının geniş band karakterli genel spektrum yapısını ortaya koymaktadır (Wiedemann 2007).



Şekil 2.8 Sinkrotron ışınımının evrensel fonksiyonu (Yavaş 2009)

2.5 Sinkrotron Işınımının Temel Özellikleri

2.5.1 Yüksek parlaklık

Sinkrotron ışınımı (SI) yüksek parlaklığa sahiptir. SI için ortalama parlaklık değeri 10^{17-18} foton/s. $\text{mrad}^2.\text{mm}^2$. %0,1 bg mertebesinde olup ve pik parlaklık değeri $\sim 10^{23}$ foton/s. $\text{mrad}^2.\text{mm}^2$ %0,1bg değerine kadar çıkabilmektedir.

2.5.2 Geniş enerji spektrumu

Sinkrotron ışınımı kızılötesinden (infrared) sert x ışını (hard x-ray) bölgesine kadar çok geniş bir enerji aralığında yayımlanır.

2.5.3 Ayarlanabilirlik

Sinkrotron ışınımının dalga boyu kullanılan çok kutuplu magnetlerin gap aralığı (g) ve kutup periyoduna (λ_u) ve elektron demet enerjisine bağlı olarak ayarlanabilir özelliğe sahiptir.

2.5.4 Kutuplanabilirlik

Sinkrotron ışınımı lineer, eliptik ve dairesel olarak kutuplanabilir.

2.5.5 Kısa Atma Süreleri

Yayımlanan atmaların uzunlukları ps, ns mertebesinde elde edilebilir. Özellikle zaman çözömlmeli spektroskopi çalışmalarında bu kısa atma süreleri avantaj sağlar ve

aralarında ns, ps mertebesinde zaman farkı olan dinamik süreçlerin ve ultra-hızlı optik süreçlerin çalışılmasında çok öne çıkmaktadır.

2.6 Sinkrotron Işınımının Genel Kullanım Alanları

Çizelge 2.1. Sinkrotron ışınımının enerjiye bağlı olarak genel kullanım alanları

Enerji (eV)	Kullanım Alanları
(~ 0.1 eV)	Biyokimya, Biyofizik; Katalizli reaksiyonlar; Katıların elektron yapısı; Spektroskopik analizler
(~ 1 eV)	Fotokimya çalışmaları, X-Işını ve VUV Mikroskopisi; Yüzey ve ara yüzeylerin incelenmesi; Optik uygulamaları
(~ 10 eV)	Elektron spektroskopisi kullanımı ile kimyasal analiz çalışmaları; Moleküler fizik; Radyografi çalışmaları; Kalibrasyon ve Radyasyon standartları
(~ 100 eV)	Akışkan yüzeylerde bulunan kompleks biyomoleküllerin yapılarının incelenmesi; Işıma tahribatı inceleme çalışmaları; Fotoelektron spektroskopisi; Zigzaglayıcı ve salındırıcı magnet ışınımları üzerine yapılan araştırmalar
(~ 1000 eV)	X-Işını litografisi; Polimerik yapılar; X-Işını optik ve floresansı; Malzeme bilimi araştırmaları
(~1000-10000 eV)	Compton saçılması; X-ışınının litografisi ve tomografisi; İz elementi analiz çalışmaları; İnelastik X- Işını saçılması

2.7 Sinkrotron Işınımının Ana Parametreleri

2.7.1 Güç

Sinkrotron ışınımının gücü poynting vektöründen hareketle ifade edilebilir. Elektromanyetik dalga, enerjisini elektrik ve manyetik alan yardımı ile taşır. Poynting vektörü aşağıdaki belirtildiği gibi tanımlanır.

$$\vec{S} = c^2 \epsilon_0 (\vec{E} \times \vec{B}) \quad (2.20)$$

Elektromanyetik dalgalarda elektrik ve manyetik alanlar birbirlerine ve aynı zamanda dalganın yayılma doğrultusuna diktirler ($E \perp B \perp n$) ve E, S ve B vektörü sağ eli bir ortogonal sistem oluştururlar. Düzlem dalgalar için,

$$n \times E = B \quad (2.21)$$

özellliği kullanılarak Poynting vektörü sadece E cinsinden ifade edilebilir.

$$\vec{S} = c^2 \epsilon_0 E^2 \vec{n} \quad (2.22)$$

Poynting vektörü, ışınım enerji akışının birim yüzey alanından n doğrultusunda gerçekleşmesi olarak tanımlanır. Poynting vektörü, ışınımın elektrik alanının karesiyle değişmektedir. Poynting vektörünün integrali, ışınımı gerçekleştiren yüklü parçacığı bulunduran yüzey üzerinden ışınımın gücünü vermektedir.

$$P = \int \vec{S} d\vec{A} = \frac{2}{3} r_c \frac{mc^2}{c^3} \vec{a}^2 \quad (2.23)$$

Burada a parçacığın ivmesidir. Dairesel yörüngede rölativistik ivmeye sahip bir parçacık için ışıının gücü pratik birimler cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilmektedir (Wiedemann 2003):

$$P_{\gamma} = \left[\frac{4\pi}{\mu_0} \right] \frac{2r_c^2 c}{3(mc^2)^2} B^2 E^2 = C_B B^2 E^2 \quad (2.24)$$

$$C_B = \left[\frac{4\pi}{\mu_0} \right] \frac{2r_c^2 c}{3(mc^2)^2} = 6.0779 \times 10^{-8} \frac{W}{T^2 \text{GeV}^2} = 379.35 \frac{1}{T^2 \text{GeV}^2} \quad (2.25)$$

Sinkrotron ışıının gücü demet enerjisinin ve manyetik alanın karesiyle değişmektedir. Anlık sinkrotron ışıını, manyetik alanı ifade etmek için aşağıdaki ifadenin kullanılmasıyla gösterildiği şekilde elde edilir:

$$B = \frac{1}{\rho} \frac{\beta E}{e} \quad (2.26)$$

$$P_{\gamma} = \frac{2}{3} r_c m c^3 \frac{\beta^4 \gamma^4}{\rho^2} \quad (2.27)$$

Pratik birimler cinsinden ışıının gücü,

$$P_{\gamma} = \frac{c C_{\gamma}}{2\pi} \frac{E^4}{\rho^2} \quad (2.28)$$

Burada C_{γ} elektronlar için ifade edilen Sand ışıının sabitidir ve aşağıdaki şekilde tanımlanır,

$$C_{\gamma} = \frac{4\pi}{3} \frac{r_c}{(mc^2)^3} = 1.41733 \times 10^{-14} \frac{\text{mSw}}{\text{GeV}^4} = 8.846 \times 10^{-5} \frac{\text{m}}{\text{GeV}^3} \quad (2.29)$$

Pratik birimler cinsinden isometrik (simetrik magnet yapısına sahip) bir sinkrotronda ışıının ortalama gücü pratik birimler cinsinden elketron demetinin enerjisi, ortalama

akımı ve sinkrotron yarıçapı cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilmektedir (Wiedemann 2003).

$$\langle P_s \text{ (MW)} \rangle_{iso} = 0.088463 \frac{E^4 \text{ (GeV)}^4}{\rho \text{ (m)}} I \text{ (A)} \quad (2.30)$$

Günümüzde inşa edilen GeV enerjili sinkrotron ışınımı tesislerinde ortalama ışınım gücü birkaç kW mertebesinde dir.

2.7.2 Akı

Sinkrotron ışınımı için akı genel anlamıyla saniyede 0.1% bant genişliği başına düşen foton sayısı olarak tanımlanmaktadır. F ile gösterilmekte ve denklem 2.36’da olduğu gibi ifade edilmektedir. Sinkrotron ışınımı kaynakları için akı değeri $\sim 10^{17}$ mertebesine kadar ulaşmaktadır.

$$F = \frac{\text{foton}}{s0.1\% \text{ bg}} \quad (2.31)$$

2.7.3 Parlaklık

Parlaklık tanım olarak birim kaynak alanı başına düşen foton akısı olarak tanımlanmakta, S ile tanımlanmakta ve denklem 2.37’de olduğu gibi verilmektedir. Sinkrotron ışınımı kaynakları için ortalama parlaklık değ erleri $\sim 10^{24}$ mertebelerine kadar ulaşmaktadır. Parlaklık elektron demetinin kalitesini (iyi odaklanmış ve yeterince yüksek akımlı) ışınım a yansıtan bir parametredir. Elektron demeti ne kadar kaliteli ise ışınım o kadar parlak olacaktır.

$$S = \frac{F}{2\pi\sigma'_x\sigma'_y} = \frac{F}{2\pi} \frac{\sqrt{\beta_x\beta_y}}{\sqrt{\varepsilon_x\varepsilon_y}} \text{ (foton/s0.1%band genişliği mrad}^2\text{)} \quad (2.32)$$

Burada, σ'_x ve σ'_y enine yönlerde (x ve y) elektron demetinin açısal sapmalarıdır. x ve y enine yönleri demetin yayılımı (emittans) ε_x , ε_y ve genlik fonksiyonları β_x ve β_y olmak üzere; $\sigma'_x = \sqrt{\frac{\varepsilon_x}{\beta_x}}$ ve $\sigma'_y = \sqrt{\frac{\varepsilon_y}{\beta_y}}$ ile verilir (Wille 1996).

2.7.4 Aydınlık

Sinkrotron ışıınımı için aydınlık, elektron demetinin birim alanı başına ($\sigma_x\sigma_y$) parlaklığın bir ölçüsüdür, B ile tanımlanır ve denklem 2.38'deki gibi verilir. $\sigma_x = \sqrt{\varepsilon_x/\beta_x}$ ve $\sigma_y = \sqrt{\varepsilon_y/\beta_y}$ ile verilir (Wille 1996).

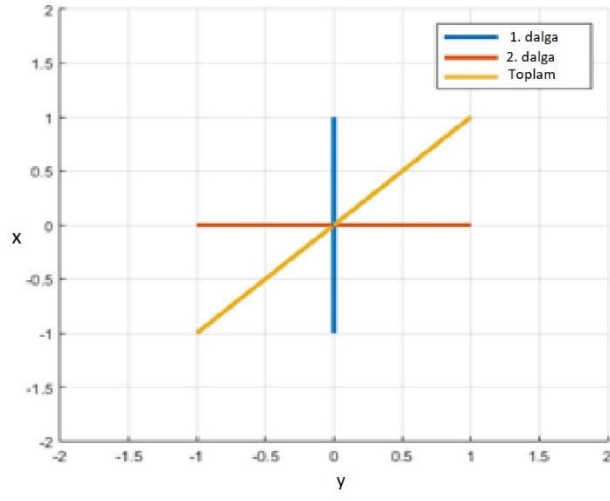
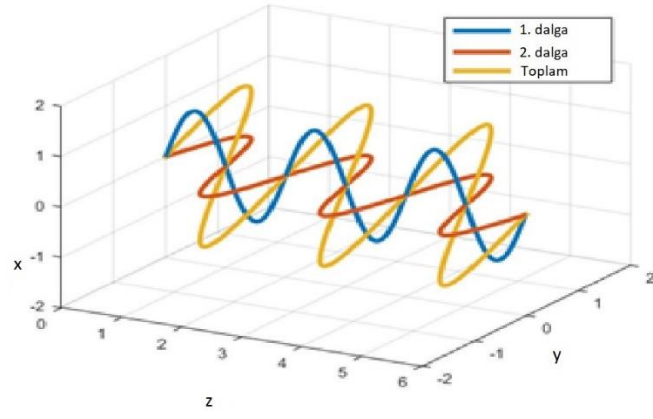
$$B = \frac{F}{4\pi^2\sigma_x\sigma_y\sigma'_x\sigma'_y} = \frac{F}{4\pi^2\varepsilon_x\varepsilon_y} \text{ (foton/s0.1%band genişliği mm}^2\text{ mrad}^2\text{)} \quad (2.33)$$

2.7.5 Polarizasyon

Enine ve boyuna dalga hareketine bağlı olarak üç tip polarizasyon vardır; doğrusal polarizasyon, dairesel polarizasyon ve eliptik polarizasyon.

2.7.5.1 Lineer Polarizasyon

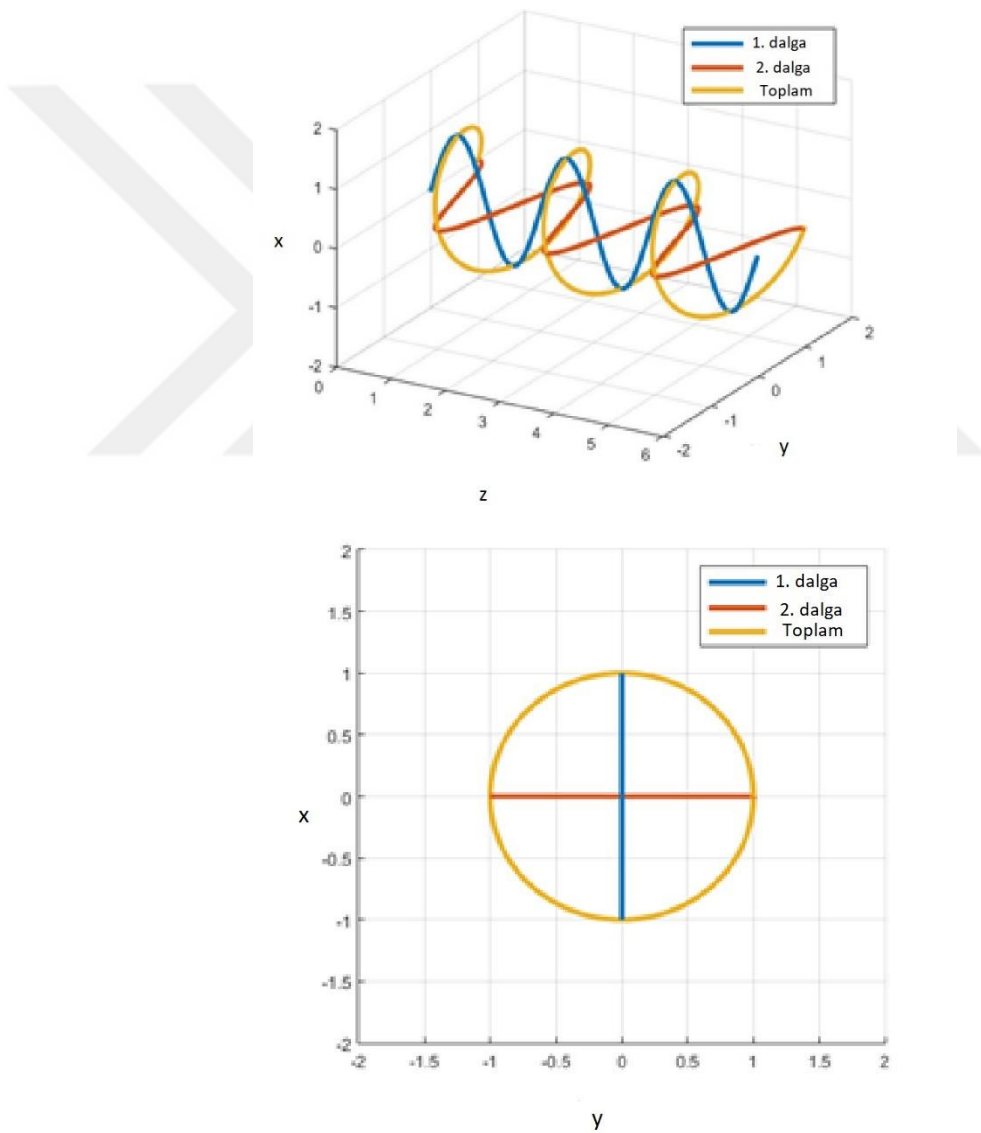
Doğrusal polarizasyon durumunda, ışığın elektrik alanı, ışığın yayılma yönü boyunca tek düzlemle sınırlı durumdadır. Örneğin E alanı sadece x yönünde salınıyor ise ışık x yönünde çizgisel kutupludur denir. Çizgisel polarize ışık Şekil 2.9'da gösterildiği gibidir.



Şekil 2.9 Çizgisel polarize ışık (Yavaş 2013)

2.7.5.2 Dairesel Polarizasyon

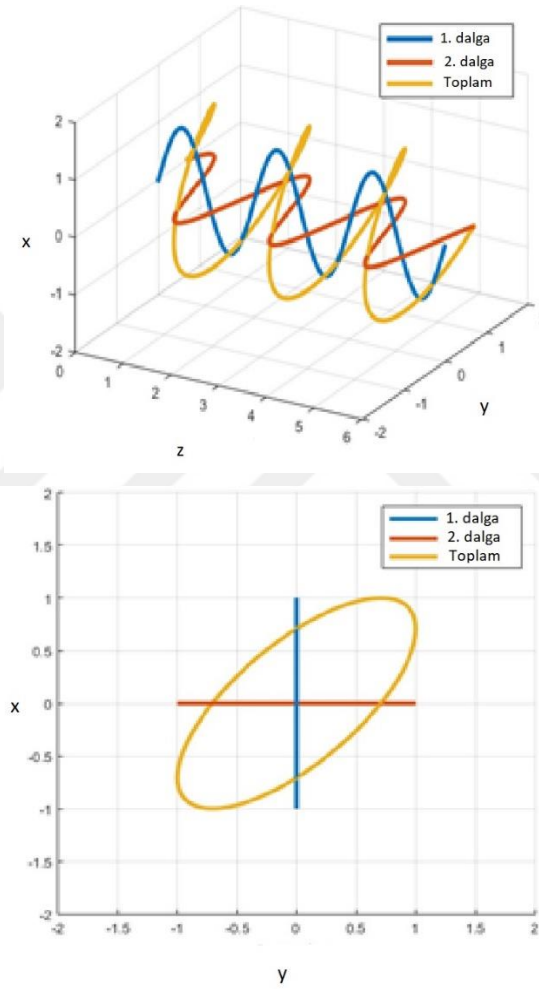
Dairesel polarizasyon aslında özel bir eliptik polarizasyondur, ancak zamanla değişen bir büyüklüğü olmayıp yalnızca yönelimi değişir, bu durumu sağlamak için yatay ve dikey polarizasyonlu iki ışının aralarında 90° faz farkı olmalıdır. Şekil 2.10 da gösterilmiştir.



Şekil 2.10 Dairesel polarize ışık (Yavaş 2013)

2.7.5.3 Eliptik Polarizasyon

Işığın elektrik alanı eliptik bir yayılımı takip eder. Lineer olan iki bileşen arasındaki faz farkı ve genlik birbirine eşit değildir. Eliptik polarizasyon şekil 2.11’de gösterilmiştir.



Şekil 2.11 Eliptik polarize ışık (Yavaş 2013)

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Tez çalışması yapılırken, öncelikle sinkrotron ışınımının fiziği, karakteristikleri, temel parametreleri, ışınım demet hattı yapısı, optik elemanları ve ışınımın kullanıldığı deneysel teknikler hakkında bilgiler, kaynaklar bölümünde bahsedilen kitap, sunum, makale, bildiri, web sayfası ve sinkrotron ışınımı tesislerinin web sayfalarından giderek kapsamlı şekilde incelenmiştir.

Yukarıda adı geçen kavramların uygulamada nasıl kullanıldığını ve önemlerini daha iyi anlamak için son 25 yılda Avrupa’da kurulan ALBA (İspanya), DIAMOND, (İngiltere), SOLEIL (Fransa), ELETTRA (İtalya), BESY-II (Almanya), SESAME (Ürdün) ile kurulumu sürmekte olan ILSF (İran) sinkrotron ışınımı tesisleri detaylı şekilde incelenmiş ve ulaşılan sonuçlar bulgular kısmında paylaşılmıştır.

Türk Hızlandırıcı Merkezi projesi kapsamında planlaması ve tasarım çalışmaları gerçekleştirilen TURKAY Sinkrotron ışınımı tesisini ön hızlandırıcılarından ana halkaya kadar yakından tanımak için magnetik örgü yapısı gözden geçirilmiş ve ön hızlandırıcı için magnetik örgü yapısı OPA ve MADX yazılımları aracılığı ile oluşturulmuş ve ana haka parametreleri verilmiştir. Ayrıca TURKAY tesisi için ışınım demet hatlarının genel yapısı, eklenti cihazları ve ışınım karakteristikleri, demet hattı optik elemanları, ışınım kullanım teknikleri ve sinkrotron ışınımı ile araştırabilecek konu başlıkları ve ışınım kullanım teknikleri için öngörüler geliştirilmiştir. Bu inceleme yapılırken özellikle TURKAY infrared ve X-ışını demet hatları öne çıkartılmış ve bu demet hatları daha detaylı çalışılmıştır.

TURKAY tesisi hızlandırıcı demet hattı magnetik örgüsü ön hızlandırıcı (Booster halkası) için birim hücreden hareketle OPA ve MADX yazılımları ile elde edilmiş ve sonuçlar Bulgularda verilmiştir. OPA ve MADX yazılımlarının kullanımına ilişkin detaylar ise Ek-1’de sunulmuştur.

4. BULGULAR

4.1 III. Nesil Sinkrotron Işınımı

III. nesil sinkrotron ışınım tesislerinde kritik ışınım enerjisinin 10 keV civarında olması ışınım spektrumunun küçük ışınım frekanslarından (bir kaç eV'luk ışınım enerjisi) sert X-ışını bölgesine kadar uzanması ($\sim 40\text{-}50\text{ keV}$) anlamına gelmektedir. Günümüz teknolojisi ile kurulan sinkrotron ışınım tesislerinde optimum çevre ve demet enerjisi değerleri ile 10 keV'lik kritik ışınım enerjisi elde edebilmenin, ortalama 500 m'lik sinkrotron çevresi ve 3 GeV'lik elektron demet enerjisi ile mümkün olduğu görülmektedir. Bunun için tez konusunda da vurgulandığı gibi tipik 3. nesil sinkrotron ışınım tesisi için olası araştırma konularının ve kullanılan tekniklerin araştırılması sözkonusu edildiği için özellikle 3 GeV enerjili tesislere vurgu yapılmıştır. Elbette daha düşük ($\sim 1\text{ GeV}$) ve çok daha yüksek ($\sim 10\text{ GeV}$) enerjili sinkrotron ışınım tesisi de mevcuttur. Dünyada yaklaşık 25 ülkede yine yaklaşık 50 civarında 3. nesil sinkrotron ışınım tesisi mevcuttur. Özellikle son 20 yılda Avrupa'da kurulan 3. nesil sinkrotron ışınım tesislerinin yukarıda açıklanan nedenlerle 3 GeV enerjili olarak kurulduğu ya da planlandığı görülmektedir. Bunlardan, yapısı ve önemli özellikleri tez çalışması kapsamında paylaşılacak olan bazıları, ALBA (Barselona, İspanya), SOLARIS (Paris, Fransa), DIAMOND (Oxford, İngiltere), BESSY-II (Berlin, Almanya) ve ELETTRA (Trieste, İtalya)'dır. İran'da (Kazvin) kurulumu sürmekte olan Iranian Light Source Facility (ILSF) 3 GeV'lik elektron demet enerjisine sahip olacak şekilde planlanmış ve kurulumu sürmektedir. Benzer gerekçeler ile Türk Hızlandırıcı Merkezi projesi kapsamında 2015 yılında ön teknik tasarımı tamamlanmış olan TURKAY sinkrotron ışınım tesisi de 3 GeV'lik demet enerjisi baz alınarak projelendirilmiştir. Türkiye'nin de kurucu üyeleri arasında yer aldığı ve Ürdün'ün Amman kenti yakınlarındaki Allan'da kurularak 2017'de hizmete giren SESAME sinkrotron ışınım tesisi 2.5 GeV enerjiye sahip 3. nesil bir sinkrotron ışınım tesisidir. Bu tesislerin tamamı tezin amacı doğrultusunda incelenmiş ve tanıtılmıştır.

Bu kesimde 3 GeV enerjili tipik bir 3. nesil sinkrotron ışıını tesisindeki olası araştırma konu başlıkları, demet hatlarının genel yapıları ve araştırmalarda kullanılan tekniklerin incelenmesi ve analizi yapılırken bu başlıklar açısından çok zengin bir spektrum ve detay sunan sinkrotron ışıını tesisi olarak Harwell’de (Oxford, İngiltere) kurulu bulunan DIAMOND sinkrotron ışıını tesisi baz alınmıştır (Diamond web sayfası 2021).

4.2 III. Nesil Bir Sinkrotron Tesisinde Araştırma Konu Başlıkları ve Işıını Kullanım Teknikleri

4.2.1 Makromoleküler Kristalografi (Macromolecular Crystallography (MX))

Makromoleküler Kristalografi (MX), biyolojik moleküllerin şekil ve yapılarını atomik çözünürlükte ortaya çıkarmaktadır. Makromoleküler kristalografi araştırmaları için kullanılan demet hatları ve özellikleri DIAMOND sinkrotron ışıını tesisinde bu amaçla kurulmuş demet hatları incelenerek daha iyi anlaşılmıştır (Diamond web sayfası 2021):

- **I02-1 VMXm:** Önemli miktarlarda protein materyali olan ve kristal üretiminin sorunlu olduğu durumlarda atomik yapı belirlemeyi amaçlayan bir mikro/nanofokus MX demet hattıdır.
Işıını Enerjisi: 7-25 keV
- **I02-2 VMXi:** Çok yönlü makromoleküler kristalografi demet hattıdır. Kristalizasyon deneyleri için doğrudan yerinde (in-situ) veri toplanması ve karakterizasyon analizinin yapılmasını sağlayan bir MX demet hattıdır.
Işıını enerjisi: 16 keV
- **I03 MX:** Optimize edilmiş MAD (Multi-wavelength Anomalous Diffraction) ve SAD (Single-wavelength Anomalous Diffraction) deneyleri için yüksek verim ve oranda otomatikleştirilmiş bir demet hattıdır.
Işıını enerjisi: 5.2- 21 keV

- **I04 Microfocus MX:** Optimize edilmiş MAD ve SAD deneyleri için 5-100 mikron arasında değişen odağa sahip, yüksek verimli ve yüksek oranda otomatikleştirilmiş demet hattıdır.
Işınım enerjisi: 6 - 18 keV
- **I04-1 Fixed Wavelength MX:** Makromoleküler kristalografi için yüksek verimde sabit dalga boyunda salınan SAD demet hattı.
Işınım enerjisi: 13.53 keV
- **I23 Long-Wavelength MX:** Doğal protein veya RNA (Ribonucleic acid) /DNA (Deoxyribonucleic acid) kristallerinde bulunan kükürt veya fosfordan gelen küçük genlikli sinyalleri kullanarak kristalografik faz problemini çözmek için kullanılır.
Işınım enerjisi: 2.1 – 11 keV
- **I24 Microfocus MX:** Birkaç mikron boyutundaki kristaller üzerinde optimize edilmiş MAD ve SAD deneyleri için yüksek verimli, değişken mikro odaklı demet hattıdır.
Işınım enerjisi: 6.4 – 20 keV

4.2.1.1 Makromoleküler Kristalografide Kullanılan Teknikler

- **Mikro Odaklama** (Microfocus): Mikrokristal veri toplama veya daha büyük homojen olmayan kristallerin alt hacimlerinin incelenmesi için özel yüksek akıllı mikro odaklı demetler.

- **Uzaktan Erişim (Remote Access):** İleri düzeyde otomatikleştirilmiş demet hatları, dünyanın her yerinden uzaktan erişim yoluyla veri toplanmasına olanak tanır. Uzaktan demet hattına veri gönderilebilir ya da uzaktan verilere erişim sağlanabilir.
- **Yerinde Veri Toplama (In-situ Data Collection):** Doğrudan kristalizasyon plakalarındaki kristallerden yerinde veri toplama ve numune karakterizasyonu.
- **Numune Nem Kontrolü (Sample Humidity Control):** Moleküler örgüyü (lattice) oluşturan protein moleküllerinin paketlenmesi yoluyla kırınım kalitesini iyileştirmek amacıyla numune kristalinin bağıl neminin kontrolü.
- **Spektroskopisi (Spectroscopy):** Enzim reaksiyon mekanizmalarını ve radyasyon hasarını incelemek için makromoleküler numunelerin çevrimiçi ve çevrimdışı UV-Vis Spektroskopisi.
- **Çok Eksenli Gonyometri (Multi-axis Goniometry):** Anormal kırınım veri toplama ve düşük simetri uzay grupları veya çok uzun eksenli birim hücreler için veri toplama stratejilerini optimize etmek için kristal yönlendirme işlemi.
- **Parça Tarama (Fragment Screening – Xchem):** Biyofiziksel tekniklerden biri olan X-ışını kristalografisi, ilk kullanılanlardandır ve doğrudan bilgi sağlayan bir tekniktir.

4.2.2 Yumuşak Yoğun Madde (Soft Condensed Matter)

Yumuşak yoğun madde araştırmalarında kızılötesi (IR) ve dairesel dikroizm (CD) spektroskopisi, hem küçük açılı X-ışını Saçılım (Small Angle X-ray Scattering, SAXS) hem de geniş açılı (Wide Angle X-Ray Scattering, WAXS) görüntüleme tekniklerini ile gerçekteştirilir. Yumuşak yoğun madde araştırmaları genel olarak iki boyutlu ince filmler

(fotovoltaikler), canlı memeli hücreleri, metal-organik çerçeveler ve kristal olmayan durumlardaki nano parçacıklar üzerine yoğunlaşmıştır.

Bu alanda kullanılan demet hatlarına örnekler yine DIAMOND tesisinden aşağıdaki gibi verilebilir (Diamond web sitesi 2020).

- **B21 Yüksek Verimli SAXS (High Throughput SAXS):** Öncelikle seyreltik çözelti sistemlerine odaklanan bir bending magnet küçük açılı X-ışını saçılımı (SAXS) demet hattıdır.

Işınım enerjisi: 6 - 23 keV

- **I22 Küçük Açılı Saçılma ve Kırınım (Small Angle Scattering and Diffraction):** Fiziksel bilimler ve yaşam bilimleri için SAXS ve WAXS demet hatları, kristal olmayan hedef kullanan bir saçılma demet hattıdır. Kristal olmayan küçük açılı kırınım, düşük periyotlu ortamlarda büyük moleküllerin yapısı ve bu moleküllerin dinamikleri hakkında bilgi sağlar.

Işınım enerjisi: 6 - 20 keV

- **B22 Çok Modlu IR Mikro ve Nano Spektroskopi (Multimode IR Micro & Nano-Spectroscopy, MIRIAM):** MIRIAM, moleküler yapıların yüksek çözünürlüklü görüntülenmesi ve FTIR aracılığıyla THz aralığına kadar yüksek hassasiyetli titreşim spektroskopisi için parlak ve çok yönlü bir mikro boyutta inceleme sağlar. Deneyler, fiziksel araştırmalar, kimyasal araştırmalar ve biyomedikal uygulamalar üzerine gerçekleştirilir.

Işınım enerjisi: 1 meV - 1 eV

- **B23 Dairesel Dikroizm (Circular Dichroism):** Yaşam bilimleri, kimya ve malzeme bilimi alanlarında özellikle proteinler, nükleik asitler, nanopartiküller ve kiral moleküllerde yapısal, fonksiyonel ve dinamik etkileşimleri araştırmak ve gözlemek için kullanılan demet hattıdır.

Işınım enerjisi: 2 - 10 eV

4.2.2.1 Yumuşak Yoğun Madde Araştırmalarında Kullanılan Teknikler

- **Dairesel Dikroizm (Circular Dichroism)**

Dairesel dikroizm, sağ, sol dairesel polarize ışığın diferansiyel soğurulmasıdır. Moleküllerin optik durumu ve çözeltideki çeşitli materyalleri, özellikle lipitler, nükleik asitler, proteinler, karbonhidratlar ve ilaçlar gibi önemli molekülleri incelemek için tercih edilen bir spektroskopi yöntemidir.

- **Kızılötesi Mikrospektroskopi (Infrared Microspectroscopy)**

Kızılötesi (IR) spektroskopisi, moleküler ölçekte analizler için kullanılan çok yönlü bir spektroskopi uygulamasıdır. Moleküler türler belirlenir ve bu moleküler türlerin miktarları, orta kızılötesi aralığında çeşitli soğurma bantlarına sahip özel titreşim spektrumları ile belirlenir. Bu tür spektrumların yüksek bilgi içeriği, veri tabanlarının çalışmasına ve özellikle organik ve biyolojik materyal tanımlamasına ve ayrıca yoğun madde çalışmalarında “parmak izi” yaklaşımına uygundur.

- **Görüntüleme (Imaging)**

Sert X-ışını görüntüleme, tüm numunenin incelenemediği tam alan görüntüleme veya ışının taranan küçük bir noktaya odaklanması yoluyla bir malzemenin yığın (bulk) verilerinin ya da alt katmanlardan gelen verilerin toplanmasına izin verir. Sinkrotron X-ışınlarının yüksek yoğunluğu ve enerjisi, geleneksel X-ışını kaynaklarından çok daha geniş bir malzeme yelpazesini ve numune kalınlıklarını görüntülemeyi mümkün kılar ve sinkrotron kaynağının parlaklığı, çok yüksek çözünürlüklü görüntüler üretir.

- **Saçılma (Scattering)**

Genellikle kristal olmayan hedeften kırınım (None Crystall Diffraction (NCD)) olarak adlandırılan küçük açılı X-ışını saçılımı, düşük periyoda sahip örneklerde büyük moleküler düzeneklerin yapısı ve dinamikleri hakkında temel bilgiler sağlar. Bu analiz türleri canlı olan organizmaların ve birçok karmaşık malzemenin (polimerler kolloidler) karakteristiklerinin anlaşılmasını sağlar. Küçük açılı olan saçılma, açısal aralık olarak 1° 'ye kadar kapsarken, WAXS $5-50^\circ$ 'yi kapsar. Anormal SAXS, incelenen elementin soğurma sonrası yakın enerjilere sahip X-ışınlarını kullanarak sinkrotron X-ışınlarının ayarlanabilir enerji özelliğinden yararlanır. Bu durum, numunenin yoğunluk dalgalanması ve spesifik bileşimi ile ilgili bilgi sağlar.

- **Spektroskopi (Spectroscopy)**

Spektroskopi deneyleri, inorganik malzemenin, biyolojik sistemlerin elementel olarak bileşimini, bu sistemlerin kimyasal durumu ve fiziksel özelliklerinin belirlenmesini sağlar. Foton enerjisi sayesinde numunenin yansıtma ve soğurma özellikleri belirlenir. Atomlar, X-ışını bölgesinde, kullanılan atomun soğurma sınırlarında iken X-ışınlarını soğurur, bu sayede elemente özgü bilgiler anlaşılır.

4.2.3 Görüntüleme ve Mikroskopi (Imaging and Microscopy)

Görüntüleme ve mikroskopi çalışmalarında çeşitli uzunluk ve zaman ölçeklerinde farklı deneysel koşullar altında numuneleri görüntülemek için elektronlar ve X-ışınları kullanılır. Bu yöntemler kimya, çevre, malzeme, biyoloji, tıp vb. birçok alanda kullanılmaktadır. Görüntüleme ve mikroskopi çalışmaları amacıyla kurulabilecek örnek demet hatları yine DIAMOND tesisinde mevcut olanlardan giderek ele alınabilir.

- **I08 Scanning X-ray Microscopy** (Taramalı X-ışını Mikroskobu): Çeşitli görüntüleme ve spektromikroskopi modları ile taramalı x-ışını mikroskobu: İletim dahil soğurma ve faza duyarlı kontrastlar ve x-ışını floresansı demet hattı.
Işınım enerjisi: 0.25 - 4.2 keV
- **K11 İkili Görüntüleme ve Kırınım** (Dual Imaging and Diffraction, DIAD): DIAD, mikron ölçeğinde aynı anda görüntüleme ve kırınım yapabilen çift ışınlı bir demet hattı olarak inşa edilmiştir. Görüntüleme yoluyla mikro yapıyı, kırınım yoluyla da malzeme içi faz oluşum ve geçişlerini çözümlemek mümkün olmaktadır.
Işınım enerjisi: 7 - 38 keV
- **I12 Tümüleşik Mühendislik, Proses ve Çevre** (Joint Engineering, Processing and Environment JEEP): Mühendislik uygulamaları, malzeme bilimi ve işleme bilimi için yüksek enerji sağlayan bir demet hattıdır. Hattın asıl amacı, görüntüleme, tomografi, kırınım ve küçük açılı saçılma yöntemleri ile numunelerin yerinde incelenmelerini sağlamaktır.
Işınım enerjisi: 53 - 150 keV
- **I13 X-Işını Görüntüleme ve Koherans** (X-ray Imaging and Coherence): Biyolojik, tıbbi, jeolojik, malzeme, mühendislik ve arkeoloji bilimlerinde görüntüleme, tomografik ve tutarlılık deneylerine ayrılmış bir demet hattıdır.
Işınım enerjisi: 8 - 30 keV
- **ePSIC**: Bilim insanlarına son teknoloji deneysel ekipman ve elektron mikroskobu ile malzeme karakterizasyon olanakları sağlamaktadır.
Hızlanma gerilimi: 30 - 300 keV

- **I14 Sert X-Işını Nano Uç (Hard X-Ray Nanoprobe):** Sert x-ışını nano-uç demet hattı, nano ölçekli mikroskopi için özel bir tesistir. Demet hattının ana teması, hem statik hem de in-situ (örneğin ıslak, ısıtılmış, yerinde gerinim) koşullar altında organik/inorganik tüm malzemeler hakkında yapısal ve kimyasal bilgiler elde etmeyi sağlamaktadır.

Işınım enerjisi: 5 - 25 keV

- **J08 Yumuşak X-Işını Ptikografi (Soft X-Ray Ptychography):** Yumuşak bir x-ışını spektro ve tomoptikografi hattıdır. (Görüntüleme modları: Ptikografi, görüntüleme, spektroskopi, XRF)

Işınım enerjisi: 0.25 – 2 keV

4.2.4 Biyolojik Kriyo-Görüntüleme (Biological Cryo-Imaging):

Biyolojik kriyo-görüntüleme çalışmaları, X-ışını, ışık ve elektron mikroskobu için özel donanımların birleşik olarak kullanımını gerektirir.

- **B24 Doğrulayıcı Kriyo-Görünteleme (Correlative Cryo-Imaging):** Biyolojik örneklerin fizyolojik koşullar altında tomografik görüntülemesine yönelik artan talebi karşılamak üzere özel olarak tasarlanmış bir tam alan transmisyon mikroskobudur.

Işınım enerjisi: ~ 500 eV

- **eBIC:** Tek parçacık analizi ve kriyo-tomografi için kriyo-elektron mikroskobu kullanımını sağlayan bir demet hattıdır.

Hızlanma gerilimi aralıkları: 3-30 keV ve 200 - 300 keV

4.2.5 Manyetik Malzemeler (Magnetic Materials)

Manyetik malzeme araştırmaları, maddenin topolojik halleri, süperiletkenlik, spintronik, iki boyutlu sistemler, skyrmionlar ve multiferroikler arasında değişen yoğun madde fiziği ile ilgili araştırmaları kapsar. Araştırmacılar tarafından elde edilen temel bilgiler, ışın çizgileri boyunca mevcut olan polarize X-ışını spektroskopisi, mikroskopi ve saçılımın yüksek hassasiyetinden yararlanır. Manyetik malzeme araştırmalarına yönelik olarak DAIMOND’da kurulu bulunan demet hatları şöyledir:

- **I06 Nanobilim** (Nanoscience): Bir PEEM, 6 T düşük sıcaklıklı (1,5 K) süper iletken mıknatıs, 2T vektör mıknatıs ve ayrıca yumuşak x-ışını kırınım vakum gonyometresi ile donatılmış bir polarize spektroskopisi ve mikroskopi demet hattıdır.

Işınım enerjisi: 106 - 1300 eV

- **I10 X-Işını Dikroizm ve Saçılma** (X-Ray Dichroism and Scattering, BLADE): Yumuşak x-ışını rezonans saçılımı (yansıma ve kırınım) ve x-ışını absorpsiyonu kullanılarak elektronik ve manyetik yapının incelenmesi için kurulmuş bir demet hattıdır. Nano yapıya sahip sistemlerin spektroskopik ve manyetik özelliklerine odaklanan çalışmalar gerçekleştirilir.

Işınım enerjisi: 500 - 1600 eV

- **I16 Malzeme ve Magnetizma** (Materials and Magnetism): Malzeme ve manyetizma demet hattı çok çeşitli malzemeleri incelemek için bir tek kristal x-ışını kırınım hattıdır.

Işınım enerjisi: 2.7 - 15 keV

- **B16 Test Demet Hattı** (Test Beamline): Dedektör ve optik teknolojisindeki son gelişmeleri deneyimlemek ve yeni teknikleri test etmek için kullanılan esnek bir demet hattıdır. Bu demet hattı, farklı çalışma modlarında tek renkli ve x-ışınları sağlar.

Işınım enerjisi: 4 - 45 keV

- **I21 İnelastik X-Işını Saçılma** (Inelastic X-ray Scattering): İki boyutlu bir görüntü kullanarak, saçılan x-ışınlarını tespit edip enerji analizini yaparken, malzemelere yüksek oranda monokromatik odaklanmış ve ayarlanabilir bir x-ışını sağlayan özel bir (RIXS) demet hattıdır.

Işınım enerji 0.20 - 3.0 keV

4.2.6 Yapılar ve Yüzeyler (Structures and Surfaces)

Yapı ve yüzey araştırmalarında çoğunlukla Açık Çözümlü Fotoelektron Spektroskopisi – ARPES, Yüzey ve Arayüz X-ışını Kırınımı, Çok Yönlü Yumuşak X-ışını Saçılımı – VERSOX, Yüzey ve Arayüz Yapısal Analizi – SISA yöntemleri kullanılmaktadır. Yapı ve yüzey araştırmaları için bilim insanları, mühendisler ve yazılımcılar işbirliği halinde çalışmaktadırlar. Elektronik yapılar hakkında bilgi edinebilme amacıyla sert X-ışını Fotoelektron Spektroskopisi (HAXPES) yöntemi kullanılır. Kataliz ve elektrokimya dahil olmak üzere ultra yüksek olmayan vakum (UHV olmayan) çalışma alanlarında, enerji malzemeleri veya kataliz gibi bir dizi bilim alanında, manyetik malzemeler, spektroskopi demet hatları ve yumuşak yoğun madde grubu alanlarında ortak araştırma olanağı sağlar.

- **I05 ARPES:** Açık çözümlü fotoemiyon spektroskopisi (ARPES) ile katıların elektronik yapılarının ve yüzeylerinin incelenmesi için kullanılan bir demet hattıdır. Ultra yüksek vakumlu düşük sıcaklıklı yüksek çözünürlüklü ARPES uç istasyonuna, Apple II dalgalayıcıdan gelen değişken polarizasyonlu yoğun, yüksek oranda monokromatik VUV'den XUV'ye foton demeti hizmet etmektedir. Işınım enerjisi: 18 - 240 eV

- **B07 Yumuşak X-Işını Hattı** (Soft X-ray Beamline): Gerçekçi koşullar altında heterojen kataliz, farmasötikler ve biyomalzemeler, elektronik ve fotonik malzemeler, sıvılar/buzlar üzerinde atmosfer ve uzay bilimi çalışmaları için uygun NEXAFAS/XPS çok yönlü bir yumuşak x-ışını demet hattı olacaktır.
Işınım enerjisi: 50 - 2800 eV

- **I07 Yüzey ve Arayüzey Kırınımı** (Surface and Interface Diffraction): Farklı çevresel koşullar altında yarı iletkenler ve biyolojik filmler gibi yüzeylerin ve arayüzlerin yapısını araştırmak için kullanılan yüksek çözünürlüklü bir x-ışını kırınım demet hattıdır.
Işınım enerjisi: 6 - 30 keV

- **I09 Yüzey ve Arayüzey Yapısal Analiz** (Surface and Interface Structural Analysis, SISA): Fotoelektron spektroskopisi, yakın kenar ve fotoelektron kırınımı kullanarak yüzeylerin ve arayüzlerin atomik ve elektronik yapılarının yüksek çözünürlüklü çalışmaları için hem yumuşak hem de sert x-ışınları sağlamak üzere tasarlanmıştır.
Işınım enerji (yumuşak x-ışını) : 100 - 2100 eV
Işınım enerjisi (sert x-ışını) : 2.1 - 20 keV

4.2.7 Kristalografi (Crystallography)

Kristalografi amacıyla kurulan ışınım demet hatları, ortam ve ortam dışı farklı koşullarda kristal, amorf ve sıvı malzemelerin yapısal özelliklerini incelemek için çeşitli x-ışını saçılımı ve kırınım tekniklerini kullanır. Bu güçlü tesisler, yoğun madde fiziği, kimya, mühendislik, malzeme bilimi ve yaşam bilimlerine kadar çok çeşitli bilim disiplinleri için kullanılmaktadır. Önemli araştırma alanları arasında piller, yeni malzemelerin sentezi ve aşırı sıcaklık veya basınç koşullarında yapısal çalışmalar sayılabilir. Sadece DIAMOND sinkrotron tesisi kristalografi ışın hattı kullanılarak 2017 yılında yaklaşık 150 bilimsel makale yayınlanmıştır.

- **I11 Yüksek Çözünürlüklü Toz Kırınımı** (High Resolution Powder Diffraction): Yapısal kristalografi için yüksek çözünürlüklü bir toz kırınım demet hattıdır. Bu demet hattı, çeşitli koşullar altındaki metal-organik çerçeveler, yüksek sıcaklıklı süper iletkenler, seramikler, alaşımlar, zeolitler ve mineraller dahil olmak üzere karmaşık malzemelerin yapısını incelemek için kullanılmaktadır.
Işınım enerjisi: 6-25 keV
- **I15 Sıra Dışı Koşullar** (Extreme Conditions): Gezegen içi koşulların yanı sıra, yüksek basınç ve ortam dışı sıcaklık gerektiren deneyler için kullanılan yüksek enerjili kırınım ve saçılma demet hattıdır.
Işınım enerjisi: 20-80 keV
- **I15-1 X-Işını Çift Dağılım Fonksiyonu** (X-ray Pair Distribution Function, XPDF): Özel bir x-ışını çift dağılım fonksiyonu demet hattıdır. Çift dağılım fonksiyonu, malzeme kimyası, katı hal fiziği, yer bilimi ve hem ex situ hem de in situ kristal, amorf ve sıvı malzemelerin içyapı analizlerinde kullanılmaktadır.
Işınım enerjisi: 40-76 keV
- **I19 Küçük Molekül Tek Kristal Kırınımı** (Small Molecule Single Crystal Diffraction): Tek kristalli x-ışını kırınım teknikleri ile küçük moleküllü sistemlerin incelenmesi için akısı ayarlanabilir bir demet hattıdır. Bu demet hattı, sıcaklık, foto-uyarma, gaz değişimi, basınç, gibi bir dış etkenin etkisiyle sistemin yapısal değişiminin haritalandırılmasına olanak sağlayan tekniklerin uygulanmasını sağlar.
Işınım enerjisi: 5-25 keV

4.2.8 Spektroskopi (Spectroscopy)

Spektroskopi çalışmaları kimya ve katalizden, çevre ve yaşam bilimlerine, malzeme bilimine, katı yoğun madde incelemelerine kadar birçok farklı disiplini kapsar. Spektroskopi amaçlı olarak kurulabilecek denet hatlarına örnekler aşağıda açıklanmaktadır:

- **I18 Mikro-odak Spektroskopisi** (Microfocus Spectroscopy): μ X-ray soğurma spektroskopisi, μ X-ray floresan görüntüleme ve yüksek parlaklıkta odaklanmış x-ışını kullanılarak kırınım sağlanır. Ayrıca, x-ışını floresan tomografi, x-ışını uyarılmış optik lüminesans (XEOL) teknikleri yer almaktadır.

Işınım enerjisi: 2.05 - 20.5 keV

- **B18 Kor XAS** (Core XAS): Genel amaçlı bir EXAFS demet hattıdır. Core-EXAFS, aktif bileşenlerin yerel yapısı, elektronik durumu, sıvılar, kristalli ve kristalli olmayan (amorfor fazlar ve kolloidler) katılar, yüzeyler ve biyomalzemeler dahil malzemelerin incelenmesi üzerine çok çeşitli çalışmalar ve uygulamalar için kullanılan bir demet hattıdır.

Işınım enerjisi: 2.05 - 35 keV

- **I20 LOLA: Çok Yönlü X-Işını Spektropi** (Versatile X-ray Spectroscopy): Üç adet çok farklı çalışma modunu kapsar: zorlu numuneler üzerinde x-ışını absorpsiyon spektroskopisi (XAS), x-ışını yayınım spektroskopisi (XES) ve enerji dağıtıcı EXAFS (EDE). Demet hattı iki wiggler magnetin ışıınımlarını kullanacak şekilde donatılmıştır.

Işınım enerjisi: 4 - 34 keV

4.2.8.1 Spektroskopi İçin Kullanılan Teknikler

- **Kırınım (Diffraction):**

Gelen X-ışınları hedef malzeme ile etkileşime girdiğinde, hedef malzeme içinde bu X-ışınlarının saçılması meydana gelir. Bir X-ışını kırınım modeli, saçılan X-ışınlarının malzeme içindeki etkileşimlerinin bir sonucu olarak yapıcı ve yıkıcı girişime maruz kaldığında gözlemlenen yoğunluktaki değişiktir. Kırınım dalgalarının yoğunluğu, kristal yapıdaki atomların türüne ve düzenine bağlıdır.

- **Enerji Dağıtkan EXAFS (Energy Dispersive EXAFS):**

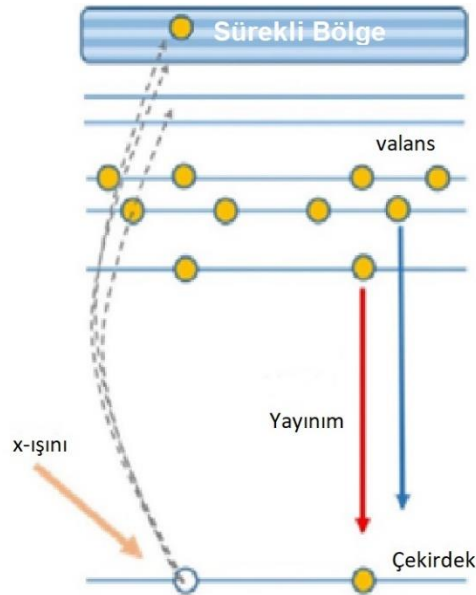
Enerji dağıtkan EXAFS metodu, monokromatik olmayan X ışınlarının eğilmiş bir kristal (polikromatör kristal) tarafından kırınımına dayanır. Polikromatik ışın önce numuneye doğru daha sonra da dedektöre ilerler. XAS'ın iki temel avantajı vardır. İlk olarak, tüm x-ışını absorpsiyon spektrumu aynı anda toplanır, bu da tekniği özellikle hızlı süreçlerin incelenmesi için faydalı kılar. İkincisi, spektral verileri toplamak için optik elemanların hiçbir hareketi gerekmediğinden, numune konumundaki odaklanmış ışının boyutu küçüktür ve çok kararlıdır.

- **Görüntüleme (Imaging):** Organik veya inorganik heterojen madde, çeşitli kontrast teknikleri kullanarak numunenin morfolojisini karakterize etmek için kullanılan X-ışınlarını farklı şekillerde zayıflatır ve dağıtır.

- **Küçük Açılı Saçılma (Small Angle Scattering- SAXS):** Madde ile etkileşimleri nedeniyle, bir numuneden geçen X-ışınları yollarından sapar (saçılır). Saçılan fotonun orijinal yoluna göre çıkış açısı, sapan yapının boyutuna ve düzenine bağlıdır. Bragg yasasına göre büyük yapılar fotonları, küçük açılarda saptırır. Bu nedenle küçük açılı x-ışını saçılımı (SAXS), nanoparçacıkların şekil ve boyut dağılımı ve olası etkileşimleri, bir malzemedeki nanometre boyutlu gözeneklerin boyutu ve düzeni, çap ve yön gibi uzun menzilli düzen hakkında bilgi sağlar. Dokularda bulunan lifler veya çözeltide bulunan proteinin dış zarfı, bunlardan bazılarıdır. SAXS analizi, ışınım ayak izi dalga boyu, ışınımın aydınlattığı yapının

boyutundan büyük olduğu için, ışınlanan hacim üzerinde ortalama nicel değerler verir.

- **X-Işını Soğurma Spektroskopisi (X-Ray Absorption Spectroscopy):** X-ışını soğurma spektroskopisi (XAS), maddenin elektronik yapısını veya geometrik yapısını anlayabilmek için kullanılan tekniklerden biridir. Deneyler genellikle yoğun ve ayarlanabilir X-ışını demetleri sağlayan demet hatlarında gerçekleştirilir. Numuneler gaz fazında, çözelti halinde veya katı olabilir.
- **X-Işını Yayılma Spektroskopisi (X-Ray Emission Spectroscopy-XES):** X-ışını emisyon spektroskopisi (XES), Bir çekirdekte çekirdek deliğini doldurmak için elektronun gelen bir x-ışını fotonu tarafından uyarıldığı ve daha sonra bu uyarılmış durumun bir x-ışını fotonu yayarak bozulduğu foton-in foton-out spektroskopilerinden biridir. Yayılan fotonun enerjisi, alakalı elektronik seviyeler arasında bulunan enerji farkıdır. X-ışını yayılım spektroskopisinin temel işlevi yayılan fotonların enerji analizidir.



Şekil 4.1 XES’de foton hareketi (Diamond tesisi web sitesi 2020)

- **X-Işını Floresans (X-ray Fluorescence-XRF):**

X-ışını Floresans (XRF), X-ışını fotonlarının numune üzerindeki atomların iç kabukta bulunan elektronları uyarıldığında olur. Elektronlar, enerjisi yüksek seviyelerden boş olan iç kabuğa geçtiğinde fotonu bırakır. Numuneden yayılan ikincil X-ışını fotonları, atomun (kaynaklandığı atom) parmak izi olan spesifik bir enerjiye sahiptir. İkincil fotonların enerji miktarlarını ölçerek, demetin numuneye çarptığı yerde numunenin elementel olarak bileşimi hakkında bilgi sahibi olunabilir. Fotonların her birinin enerjisini hassas olarak ölçmek için enerjiye duyarlı olan dedektör kullanılır. Foton sayımlarının enerjilerine karşı grafiğinde X-ışını spektrumu belirli elementlerle doğrudan ilişkili bir dizi tepe noktası gösterir. Bu sayede sadece spektruma bakarak örnekte hangi elementlerin mevcut olduğunu hızlı bir şekilde anlamak mümkündür.

4.3 III. Nesil Sinkrotron Işınımı Tesisleri

4.3.1 ALBA Sinkrotron Işınımı Tesisi (Barselona, İspanya)

ALBA (Katalanca ve İspanyolca'da "Gün Doğumu" anlamına gelir), İspanya'da Barselona yakınlarındaki Cerdanyola del Vallès'deki Barselona Sinkrotron Parkı'nda inşa edilmiş üçüncü nesil bir sinkrotron ışınım kaynağı tesisidir. On yıllık planlama ve ön tasarım çalışmasının ardından, proje 2002 yılında İspanyol ve bölgesel Katalan hükümetleri tarafından onaylanmış ve kullanıcılarla yapılan bilimsel çalıştaylar ve toplantıların ardından, tasarım çalışmaları 2004 yılında tamamlanarak inşasına 2006 yılında başlanmış ve yaklaşık 200 milyon euro kurulum maliyeti ile 2010 yılının ilk yarısında ilk 7 ışınım demet hattı ile hizmete açılmıştır (ALBA web sitesi 2021).



Şekil 4.2 ALBA sinkrotron ışınımı tesisinin sırasıyla genel dış ve iç görünümü (ALBA tesisi web sitesi 2021)

ALBA sinkrotron ışınımı tesisinin ana parametreleri Tablo 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 ALBA sinkrotron ışınımı tesisi ana parametreleri

Parametre	Birim	Değer
Enerji	GeV	3
Çevre	m	270
Demet akımı	mA	250
RF frekansı	MHz	1.11
Enine emittans	nm rad	4.58
Işınım demet hattı sayısı		13

4.3.1.1 ALBA Demet Hatları

- **BL01 - MIRAS: Kızılötesi mikrospektroskopi:**

MIRAS, Fourier dönüşümü kızılötesi (FTIR) spektroskopisi ve mikroskopisi için kurulmuş bir demet hattıdır. FTIR, bir malzemenin kızılötesi spektrumundaki soğurma veya emisyonu ve dolayısıyla kimyasal bileşimini tanımlamanın bir yoludur. Demet hattı kızılötesi bölgede 1 μm ila $\sim 100 \mu\text{m}$ dalga boyu aralığını

kapsayan kapasiteye sahiptir ve 2,5 - 14 μm arasında yapılacak araştırmalara uygun spektral bir bölge vardır.

Işınım enerjisi: 0.0124 – 0.496 eV

- **BL04 - MSPD: Malzeme Bilimi ve Toz Kırınımı Demet Hattı:** Malzeme bilimi ve toz kırınımı demet hattı, elmas rs hücreleri kullanılarak yüksek çözünürlüklü ve yüksek basınçlı toz kırınımı içindir. Demet hattı 8 - 50 keV arasında çalışır. Bu enerji aralığı, hemen hemen her toz kırınım deneyi için arzu edilen aralığı yeterince kapsar ve aynı zamanda hem toplam saçılma deneyleri hem de yüksek basınçlı kırınım gerçekleştirmek mümkündür, bunun için aynı zamanda yüksek enerjiye sahip olunması gereklidir.

Işınım enerjisi: 8 - 50 keV

- **BL06 – XAIRA:**

XAIRA, zorlu Makromoleküler Kristalografi (MX) deneylerine ve yeni tekniklere adanmış bir mikrofokus demet hattıdır. Bu demet hattı, 1 Å’da 3 x 1 μm^2 FWHM’lik stabil mikron boyutlu bir ışın sağlamayı amaçlamaktadır. Işın hattı, mikron boyutlu kristaller, iğneler ve plakalar üzerinde mikrokristalografi deneylerinin yanı sıra sabit hedefli seri kristalografi deneylerini desteklemek için tasarlanmıştır.

Işınım enerjisi: 4 - 14 keV

- **BL09 - MISTRAL Yumuşak X-Işını Mikroskobu:** Tam alan iletimli X-ışını mikroskobu demet hattı MISTRAL, biyolojik uygulamalar için su penceresinde kriyo nano-tomografiye ve çoklu keV spektral bölgelere ($E = 270 \text{ eV} - 2600 \text{ eV}$) ayrılmıştır. Bu demet hattında, spektroskopik görüntüleme yapılabilir. X-ışını mikroskobu 270 eV - 1200 eV arasında kullanılır.

Işınım enerjisi: 270-1200 eV

- **BL11 - NCD-TATLI Kristal Hedefli Olmayan Kırınım:** Küçük açılı X-ışını saçılımı (SAXS) deneyleri, polimerler, kolloidler, proteinler ve lifler gibi büyük moleküler yapıların yapısal ve dinamik bilgilerini sağlar. SAXS, biyolojik

sistemlerdeki supramoleküler organizasyon, kas liflerinin yapısı ve işlevi, kornea şeffaflığı, biyolojik membranlar, polimer işleme, mezoskopik metal partiküllerin kendi kendine montajı, kolloidler, inorganik agregalar, sıvı kristaller ve cihazları incelemek için kullanılan güçlü bir tekniktir. SAXS ve WAXS kaydı aynı anda birkaç mikrondan birkaç angstroma kadar değişen bir uzunluk ölçeğiyle sonuçlanır.

Işınım enerjisi: 6.5 -20 keV

- **BL13 - XALOC Makromoleküler kristalografi:** XALOC, mevcut ve gelecekteki Yapısal Biyoloji gruplarına, makromoleküllerin ve komplekslerin yapıları için çözümler bulmaya yardımcı olacak esnek ve güvenilir bir araç sağlamayı amaçlamaktadır. Demet hattı, dalga boyu ve deneylerle farklı birim hücre parametrelerine ve farklı kristal boyutlarına izin verir.

Işınım enerjisi: 4.6-23 keV

- **BL16 – NOTOS:** NOTOS, X-ışını Soğurma Spektroskopisi (XAS), X-ışını Kırınımı (XRD) ve enstrümantasyon testlerine ayrılmış sert bir X-ışını demet hattıdır. Aynı numune pozisyonunda XAS-XRD ölçümlerinin süreçlerini incelemek için tasarlanmıştır (Ancak bunlarla sınırlı değildir).

Işınım enerjisi: 4.9 - 30 keV

- **BL20 – LOREA:** LOREA, Açık Çözümlemeli Foto-Emisyon Spektroskopisi (ARPES) ile katıların elektronik yapısının incelenmesi için belirlenmiş bir demet hattıdır. Demet hattı, bir APPLE II sarmal dalgalanma birimi tarafından üretilen ayarlanabilir doğrusal ve dairesel polarizasyonlarla 10-1000 eV foton enerji aralığında çalışır. Enerji aralığı ve yüksek foton akısı sayesinde LOREA, 10-200 eV aralığında yüksek çözünürlüklü VUV ARPES incelemeleri için uygunken, 200-600 eV enerji aralığında (yumuşak X-ışını) ARPES ölçümlerini genişletmek mümkündür. Ek olarak, çekirdek seviyesinde fotoemisyon, rezonans fotoemisyon ve X-ışını absorpsiyon spektroskopilerine tüm enerji aralığında erişilebilir olmaktadır.

Işınım enerjisi: 10-1000 eV

- **BL22 - CLÆSS Çekirdek Seviyesi Soğurma ve Emisyon Spektroskopileri:**
CLÆSS demet hattı, birbirini tamamlayan X ışını soğurma ve emisyon spektroskopi yöntemlerin birleşik ve eş zamanlı olarak erişim sağlar. Enerji aralığı 2.4 - 63.2 keV'dir. CLEAR spektrometresi tarafından seçilebilen çıkış enerji aralığı 6,4 - 12,5 keV'dir.
Işınım enerjisi: 2.4 - 63.2 keV
- **BL24 - CIRCE Fotoemisyon Spektroskopisi ve Mikroskobu:** Gelişmiş fotoemisyon deneyleri için kullanılan değişken polarizasyonlu yumuşak bir X-ışını demet hattıdır.
Işınım enerjisi: 100 - 2000 eV
- **BL29 - BOREAS Rezonant Soğurma ve Saçılma:** Değişken polarizasyonlu yumuşak X-ışını demet hattı, temelde gelişmiş malzemelerin polarizasyona bağımlı spektroskopik incelemesi amacıyla kurulmuş bir demet hattıdır.
Işınım enerjisi: 80 eV - 4000 eV

4.3.2 SOLEIL Sinkrotron Işınımı Tesisi (Paris, Fransa)

SOLEIL (Fransızca'da "Güneş" anlamına gelir), Paris yakınlarında kurulmuş bir sinkrotron ışınımı tesisidir ve 2006 yılında devreye alınmıştır. Tesis, iki Fransız ulusal araştırma ajansı olan Fransız Ulusal Bilimsel Araştırma Merkezi (CNRS) ve Fransız Alternatif Enerjiler ve Atom Enerjisi Komisyonu (CEA) tarafından kurulan bir şirket tarafından işletilmektedir. SOLEIL, temel bilimler (biyoloji, fizik, kimya), yaşam bilimleri (özellikle kristalografi deneylerinde), malzeme bilimleri, yer bilimleri ve atmosfer ile ilgili temel araştırmalarda kullanılır. Kızılötesi (IR) bölgeden X-ışınlarına kadar çok çeşitli spektroskopik yöntemlerin ve kırınım, difüzyon gibi yapısal yöntemlerin kullanımını sunar. Uygulamalı araştırmalarda SOLEIL, eczacılık, tıp, kimya, petrokimya,

evre, nükleer enerji ve otomobil endüstrisinin yanı sıra nanoteknoloji, mikromekanik ve mikroelektronik gibi birçok farklı alanda kullanılabilir. SOLEIL, 354 m’lik bir çevreye ve 2,75 GeV demet enerjisine sahiptir (SOLEIL web sitesi 2021).



Şekil 4.3 SOLEIL sinkrotron ışınımı tesisinin sırasıyla genel dış ve iç görünümü (SOLEIL tesisi web sitesi 2021)

SOLEIL sinkrotron ışınımı tesisinin ana parametreleri Tablo 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2 SOLEIL sinkrotron ışınımı tesisi ana parametreleri

Parametre	Birim	Değer
Enerji	GeV	2.75
Çevre	m	354
Demet akımı	mA	500
RF frekansı	MHz	0.85
Enine emittans	nm rad	3.9
Işınım demet hattı sayısı		29

4.3.2.1 SOLEIL Demet Hatları

SOLEIL’de 29 demet hattı bulunmaktadır.

- **AILES:** AILES demet hattı, malzemeler ve moleküller için kızılötesi absorpsiyon spektroskopisi için kullanılır. Moleküler spektroskopi ve malzemelerin optik özellikleri üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Demet hattının en iyi performansı, maksimum 0.0008 cm^{-1} çözünürlükte $8\text{ ila }1000\text{ cm}^{-1}$ enerji aralığındadır.
Işınım enerjisi: $1 - 400\text{ meV}$
- **ANATOMIX:** Gelişmiş nanotomografi ve X-ışınları ile görüntüleme amacıyla kurulmuş olup, $5\text{ ila }50\text{ keV}$ arasındaki foton enerjilerinde çalışır.
Işınım enerjisi: $5 - 50\text{ keV}$
- **CASSIOPÉE:** Bu demet hattı, $8\text{ eV} - 1500\text{ eV}$ foton enerji aralığında fotoemisyon deneyleri için kullanılır.
Işınım enerjisi: $8 - 1500\text{ eV}$
- **CRISTAL:** Yoğunlaştırılmış maddenin yapısal özelliklerinin farklı uzunluk ve zaman ölçeklerinde, muhtemel ortam dışı koşullarda çalışmalarına ayrılmış salındırıcı tabanlı bir demet hattıdır.
Işınım enerjisi: $5 - 30\text{ keV}$
- **DEIMOS:** Manyeto- optik spektroskopi için polarize ışık kullanarak manyetik ve elektronik özelliklerin incelenmesi için kullanılan bir demet hattıdır.
Işınım enerjisi: $350 - 2500\text{ eV}$
- **DESIRS:** Ultra yüksek çözünürlüklü spektral saflık, akı ve tamamen değişken polarizasyonun bir kombinasyonu ile VUV aralığını ($5-40\text{ eV}$) kapsayan salındırıcı tabanlı bir demet hattıdır.
Işınım enerjisi: $5 - 40\text{ eV}$
- **DIFFABS:** Çok çeşitli malzemeleri incelemek için X-ışını kırınımı ve absorpsiyonunu birleştirerek kullanan bir demet hattıdır.
Işınım enerjisi: $3-23\text{ keV}$

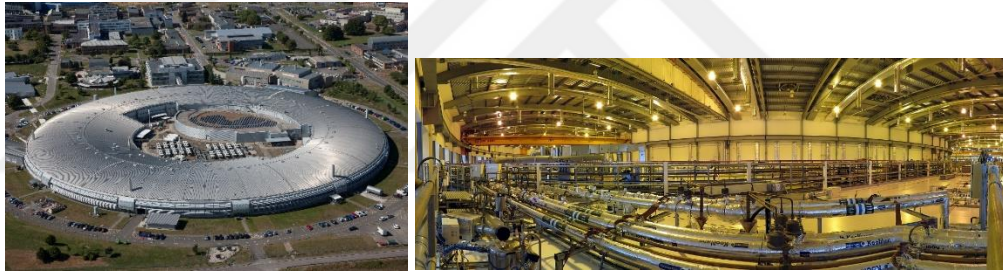
- **DISCO:** Biyokimya, kimya ve hücre biyolojisi için VUV aralığında (5-40 eV) kullanılan bir demet hattıdır.
Işınım enerjisi: 5-40 eV
- **GALAXIES:** Esnek olmayan X-ışını saçılımı (IXS) ve sert x-ışını fotoemisyonu (HAXPES) için kullanılan bir demet hattıdır.
Işınım enerjisi: 2.3 – 12 keV
- **HERMES:** Bu demet hattı, X-ışını mikroskopisi amacıyla kullanılır. İki mikroskop sistemine sahiptir: STXM (tarama iletimli x-ışını mikroskobu) ve X-PEEM (X-ışını foto emisyon elektron mikroskobu).
Işınım enerjisi: 70 – 2500 eV
- **LUCIA:** 0.6 – 8 keV enerji aralığında mikro odaklı bir demet hattıdır ve malzeme karakterizasyonu amacıyla kurulmuştur.
Işınım enerjisi: 0.6 – 8 keV
- **MARS:** Çevre, sağlık ve enerji uygulamaları için radyoaktif numunelerin karakterizasyonunu sağlar.
Işınım enerjisi: 3.5 - 36 keV
- **MÉTROLOGIE:** Optik bileşenler ve dedektör konularında Ar-Ge çalışmalarını gerçekleştirmek amacıyla kurulmuş bir metroloji demet hattıdır.
Işınım enerjisi: 30 eV - 40 keV
- **NANOSCOPIUM:** Çok modlu ve çok uzunluk ölçekli (30nm - 1µm) X-ışını görüntülemeyi sağlayan bir demet hattıdır.
Işınım enerjisi: 5 KeV - 20 KeV

- **ODE:** Optik dağılımlı EXAFS yöntemi ile farklı koşullardaki çeşitli malzemelerin incelenmesini sağlar.
Işınım enerjisi: 3.5 - 25 KeV
- **PLÉIADES:** Elektron ve iyon analizi için polarize ışık kaynağıdır. Seyreltilmiş fazda spektroskopi için yüksek çözünürlüklü yumuşak X-ışınları kullanılır.
Işınım enerjisi: 10 eV - 1000 eV
- **PROXIMA-1:** Kristalografi kullanarak biyolojik makromoleküllerin yapısal analizi amacıyla kurulmuş bir demet hattıdır.
Işınım enerjisi: 6.5 - 15.0 keV
- **PROXIMA-2A:** Biyoloji ve mikro kristalografi için kullanılan bir demet hattıdır.
Işınım enerjisi: 6 - 18 keV
- **PSICHÉ:** Özel sıcaklık ve basınç koşulları altında X-ışını kırınımı ve yüksek enerjide (15-100 keV) soğurma kontrastı ile tomografi için kullanılan bir demet hattıdır.
Işınım enerjisi: 15-100 keV
- **PUMA:** Arkeolojik çalışmalar için optimize edilmiş bir sert X-ışını görüntüleme demet hattıdır.
Işınım enerjisi: 4 - 60 keV
- **ROCK:** Kimyasal analizler için kullanmak üzere tasarlanmıştır. Enerji aralığı 4-40 keV dir.
Işınım enerjisi: 4.5 - 40 keV
- **SAMBA:** Sert x-ışını soğurma spektroskopisi (XAS) demet hattıdır. Fizikten kimyaya, malzeme ve çevre bilimlerine kadar geniş bir alanda araştırma için kullanılmaktadır.
Işınım enerjisi: 4.9 - 40 keV

- **SEXTANTS:** Polarize yumuşak X-ışını ile elastik ve elastik olmayan saçılma yoluyla katıların manyetik ve elektronik özelliklerinin incelenmesi için kullanılır. 50-1800 eV enerji aralığındadır.
Işınım enerjisi: 50 – 1700 eV
- **SIRIUS:** Yumuşak arayüzler ve rezonans araştırmaları için kullanılır ve salındırıcı demet hattıdır. Ayarlanabilir polarizasyona sahip demet 1.4-13 keV enerji aralığındadır.
Işınım enerjisi: 1.4 - 13 keV
- **SIXS:** Arayüzlerin (gaz-katı, katı-katı veya katı-sıvı) ve nano nesnelerin yapısal analizleri amacıyla kullanılmaktadır. Enerjisi 5-20 keV aralığındadır.
Işınım enerjisi: 5 -20 keV
- **SMIS:** Kızılötesi spektromikroskopi demet hattıdır. ~1 - 100 μm spektral aralıkta yüksek parlaklıkta kızılötesi radyasyon sağlar ve 2.5 - 50 μm spektral aralık için optimize edilmiştir. Basınç, sıcaklık ve ışık polarizasyon kontrolü altında analiz olanağı sunar.
Işınım enerjisi: 1 – 0.025 eV
- **SWING:** Küçük ve geniş açılı X-ışını saçılma yöntemi ile makro moleküller, nano malzemeler, yumuşak madde ve dokular gibi karmaşık yapı örneklerini incelemek amacıyla kurulmuş bir demet hattıdır.
Işınım enerjisi: 5 - 16 keV
- **TEMPO:** Fotoelektron spektroskopisi kullanılarak malzemelerin elektronik ve manyetik özelliklerinin incelenmesi için kullanılan yumuşak X-ışını demet hattıdır.
Işınım enerjisi: 50 – 1500 eV

4.3.3 DIAMOND Sinkrotron Işınımı Tesis (Harwell, Oxford, İngiltere)

DIAMOND Light Source, İngiltere Oxfordshire'daki Harwell Bilim ve İnovasyon Kampüsü'nde 2007 yılında kurulmuş bir sinkrotron ışınımı tesisidir. Özellikle, proteinlerden yeni ilaçların tasarlanması için bilgi sağlamak üzere çok çeşitli malzemelerin yapısını ve özelliklerini araştırmak ve arkeolojik araştırmalar için kullanılmaktadır. 3 GeV enerjili DIAMOND, 32 ışınım demet hattına sahip orta enerjili bir sinkrotron ışınımı tesisidir. Tesis, Mart 2002'de kurulan bir ortak girişim şirketi olan Diamond Light Source Ltd. tarafından işletilmektedir. DIAMOND, uzak kızılötesinden sert X-ışınlarına kadar değişen dalga boylarında sinkrotron ışınımı üretir, 561,6 m'lik bir çevreye ve 3 GeV'lik demet enerjisine sahip üçüncü nesil bir ışınım kaynağıdır. Aktif olarak kullanılan 32 ışınım demet hattına sahiptir (DIAMOND web sitesi 2021).



Şekil 4.4 Diamond sinkrotron ışınımı tesisinin sırasıyla genel dış ve iç görünümü
(Diamond tesisi web sitesi 2021)

DIAMOND sinkrotron ışınımı tesisinin ana parametreleri Çizelge 4.3'de verilmiştir.

Çizelge 4.3 DIAMOND sinkrotron ışınımı tesisi ana parametreleri

Parametre	Birim	Değer
Enerji	GeV	3
Çevre	m	561.6
Demet akımı	mA	300
RF frekansı	MHz	500
Enine emittans	nm rad	3.14
Işınım demet hattı sayısı		32

4.3.3.1 DIAMOND Demet Hatları

- **I15 Aşırı Koşullar Demet Hattı:** Yoğun sıcaklık ve basınç altında malzemeleri incelemek için kullanılmaktadır.
Işınım enerjisi: 20 – 80 keV
- **I16 Malzemeler ve Manyetizma Demet Hattı:** Malzemelerin elektronik ve manyetik özelliklerini atomik seviyede araştırmak için kullanılmaktadır.
Işınım enerjisi: 2.7 – 15 keV
- **I02 Makromoleküler Kristalografi Demet Hatları:** Proteinler dahil karmaşık biyolojik örneklerin yapısını analiz için kullanılmaktadır.
Işınım enerjisi: 7-25 keV
- **I18 Mikrofokus Spektroskopi Demet Hattı:** Ay kayaları ve jeolojik numuneler gibi karmaşık malzemelerin kimyasal bileşimini haritalandırmak için kullanılmaktadır.
Işınım enerjisi: 2.05 – 20.5 keV
- **I06 Nanobilim Demet Hattı:** Yapıları milimetrenin birkaç milyonda biri hızda görüntülemek amacıyla kullanılmaktadır.
Işınım enerjisi: 80 – 2100 eV
- **I22 Kristal Olmayan Hedeften Kırınım Demet Hattı:** Canlı organizmalar, polimerler ve kolloidler dahil olmak üzere büyük, karmaşık yapıları incelemek için kullanılmaktadır.
Işınım enerjisi: 6 – 20 keV
- **B16:** Optik, detektörler ve araştırma tekniklerindeki yeni gelişmeleri test etmek için kullanılmaktadır.
Işınım enerjisi: 4 – 45 keV

- **I19 Küçük Moleküllü Tek Kristal Kırınımlı Yüksek Yoğunluklu Demet Hattı:** Yeni katalizörler ve akıllı elektronik malzemeler gibi küçük moleküllü kristal malzemelerin yapısını analiz için kullanılmaktadır.
Işınım enerjisi: 5-25 keV
- **I11 Yüksek Çözünürlüklü Toz Kırınım Demet Hattı:** Yüksek sıcaklık yarı iletkenleri ve fullerenler dahil olmak üzere karmaşık malzemelerin yapısını araştırmada kullanılmaktadır.
Işınım Enerjisi: 5 – 25 keV
- **I24 Mikrofokus Makromoleküler kristalografi Demet Hattı:** Büyük makromoleküllerin yapısı ile canlı organizmalardaki işlevleri arasındaki ilişkiyi incelemek için kullanılmaktadır.
Işınım enerjisi: 6.5 - 25 keV
- **B23:** Proteinler, nükleik asitler ve kiral moleküller gibi malzemelerdeki yapısal, işlevsel ve dinamik etkileşimleri gözlemleyebilen, yaşam bilimleri ve kimya için dairesel dikroizm demet hattıdır.
Işınım enerjisi: 2 – 10 eV
- **I12:** Mühendislik bileşenlerinin ve malzemelerin gerçek koşullar altında yüksek enerji kırınımı ve görüntülenmesi için çok amaçlı araştırma demet hattıdır.
Işınım enerjisi: 53 – 150 keV
- **104-1:** Protein komplekslerinin yapılarını araştırmak için sabit enerji ışınımı kullanan bağımsız demet hattıdır.
Işınım enerjisi: 13.53 keV
- **I20:** Kimyasal reaksiyonları incelemek ve temel bilimleri desteklemek amacıyla fiziksel ve elektronik yapıları belirlemek için çok yönlü bir X-ışını spektrometresi içeren X-ışını spektroskopisi (XAS-3) demet hattı.
Işınım enerjisi: 4 – 34 keV

- **I07:** Yarı iletkenler ve biyolojik filmler dahil olmak üzere farklı çevresel koşullar altında yüzeylerin ve arayüzlerin yapısını incelemek için yüzey ve arayüz yüksek çözünürlüklü kırınım demet hattı.
Işınım enerjisi: 6 – 30 keV
- **B18:** Yerel yapı ve aktif bileşenlerin elektronik durumu dahil olmak üzere çok çeşitli x-ışını absorpsiyon spektroskopisi uygulamalarını desteklemek için Core EXAFS ve sıvılar, kristal ve kristal olmayan (amorflar ve kolloidler) katılar, yüzeyler dahil olmak üzere malzemelerin ve biyomalzemelerin incelenmesi amacıyla kurulmuş bir demet hattıdır.
Işınım enerjisi: 2.05 – 35 keV
- **B22:** Kızılötesi Mikrospektroskopisi ile kimyasal yapı analizi amacıyla kullanılmaktadır.
Işınım enerjisi: 1 meV – 1 eV
- **I10:** Yumuşak X-ışını rezonans saçılması (yansıma ve kırınım) ve X-ışını absorpsiyonu kullanarak manyetik dikroizm ve manyetik yapı analizi için kurulmuş bir demet hattıdır.
Işınım enerjisi: 500 - 1600 eV
- **I13:** Mikro ve nano nesnelerin yapısını incelemek için X-ışını görüntüleme. X-ışını Foton Korelasyon Spektroskopisi (XPCS) ve iğne deliği tabanlı ultra küçük Açık Saçılımı (USAXS) ile farklı zaman ve uzunluk ölçeklerinde dinamik çalışmalar amacıyla kurulmuştur.
Işınım enerjisi: 8 – 30 keV
- **I09 Yüzey ve Arayüz Yapısal Analizi (SISA):** Aynı numune alanına odaklanan düşük enerjili ve yüksek enerjili ışınları birleştirecek ve yüzeylerin ve arayüzlerin yapısal analizlerinde, ayrıca nano yapılarda, biyolojik ve karmaşık malzeme araştırmalarında Ar-Ge çalışmalarına olanak sağlamaktadır.
Işınım enerjisi: 100 – 2100 eV; 2.1- 20 keV

- **I05 Açı Çözümlü Foto Emisyon Spektroskopisi (ARPES):** Açı çözümlemeli fotoemisyon spektroskopisi ile elektronik yapıların incelenmesi için kurulmuş bir demet hattıdır.
Işınım enerjisi: 18 - 240 eV
- **I08 Yumuşak X-Işını Mikroskopisi:** Malzeme bilimi, yeryüzü ve çevre bilimi, biyolojik ve biyo-tıp bilimi ve kültürel mirasın incelenmesi amacıyla kurulmuş bir demet hattıdır.
Işınım enerjisi: 0.25 – 4.2 keV
- **B21 Yüksek Verimli Küçük Açılı X Işını Saçılımı (SAXS) Demet Hattı:** Kristal olmayan, rastgele yönlendirilmiş parçacıkların incelenmesi için kullanılmaktadır.
Işınım enerjisi: 6 – 23 keV
- **I23 Uzun Dalgaboylu Makromoleküler Kristalografi:** Küçük dalga boylarını kullanarak kristalografik faz problemini çözmek için özel olarak kurulmuş bir demet hattıdır.
Işınım enerjisi: 2.1 – 11 keV
- **B24 Biyoloji için Tam Alan Cryo-transmisyon X-ışını Mikroskobu:** Özellikle biyolojik hücrelerin görüntülenmesi amacıyla tasarlanmıştır.
Işınım enerjisi: 500 eV
- **I14 Sert X-ışını Nanoprob demet hattı:** Çok çeşitli malzemelerin yapısını ve bileşimini analiz için X-ışını floresansı ve kırınım tekniklerini kullanan bir tarama sondası demet hattıdır.
Işınım enerjisi: 5 – 25 keV
- **I21 Esnek Olmayan X-ışını Saçılması (IXS):** Numunelerin manyetik, elektronik ve örgü dinamiklerini araştırmak için odaklanmış ve dalgaboyu ayarlanabilir X-ışınları kullanan demet hattıdır.

Işınım enerjisi: 0.20 – 3 keV

- **B07 VERSOX Çok Yönlü Yumuşak X-ışını Demet Hattı:** Atmosfer bilimi alanında doğal koşullar altında numunelerin incelenmesi için gaz fazı reaksiyon koşulları altında katalizörlerin araştırılması için tasarlanmıştır.

Işınım enerjisi: 50 – 2800 eV

- **VMXi:** Doğrudan yerinde kristalizasyon deneylerinden veri toplamayı amaçlayarak kurulmuş bir demet hattıdır.

Işınım enerjisi: 16 keV

- **DIAD:** Çift Görüntüleme ve Kırınım demet hattı, 0.1 saniye anahtarlama süresiyle eşzamanlı olarak uygulanan iki X-ışını mikroskopi tekniğini sunan bir demet hattıdır.

Işınım enerjisi: 7 – 38 keV

4.3.4 BESSY II Sinkrotron Işınımı Tesisi (Berlin, Almanya)

BESSY-II (İngilizce: Berlin Electron Storage Ring Society for Synchrotron Radiation), Berlin'in (Almanya) Adlershof bölgesinde kurulu 3. nesil bir sinkrotron ışınımı tesisidir. 1994'te inşasına başlanan tesis 4 Eylül 1998'de hizmete açılmıştır. Yaklaşık 100 Milyon Euro maliyetle kurulan BESYY-II sinkrotron ışınımı tesisi 1.7 GeV demet enerjisine, 240 m'lik çevreye ve 46 ışınım demet hattına sahiptir (BESSY II web sitesi 2021).

BESSY II, depolama halkasında elektron paketçikleri arası mesafe ayarlanabilir olduğu için farklı modlarda çalıştırılabilmektedir. Çoklu paketçik modu yaygın kullanılmaktadır. Bu modda, ana halkada yaklaşık 350 eşit paketçik 2 ns'lik aralıklarla dolaşmaktadır. Tek paketçik (single bunch) modu ise nadir olarak kullanılmaktadır. Bu modda aynı anda halkada bir elektron paketçigi vardır ve çok yüksek zaman çözünürlüğü ile ölçüm yapmak mümkün olmaktadır. İki ışık atması arası mesafe 800 ns'dir. BESSY II'de gerçekleştirilen araştırmalar genel olarak X-ışını absorpsiyon spektroskopisi, Fotoemiyon spektroskopisi, Fotoemiyon elektron mikroskobu, X-ışını mikroskobu, Kızılötesi spektroskopi, femtosaniye slicing, X-ışını litografisi ve protein yapı analizi alanındadır.



Şekil 4.5 BESSY-II sinkrotron ışınımı tesisinin sırasıyla genel dış ve iç görünümü (BESSY II tesisi web sitesi 2021)

BESYY-II sinkrotron ışıını tesimali ana parametreleri Çizelge 4.4’de verilmiştir.

Çizelge 4.4 BESSY-II sinkrotron ışıını tesimali ana parametreleri

Parametre	Birim	Değer
Enerji	GeV	1.7
Çevre	m	240
Demet akımı	mA	300
RF frekansı	MHz	500
Enine emittans	nm rad	5
İşınım demet hattı sayısı		46

4.3.4.1 BESSY II Demet Hatları

Bu bölümde BESSY II de bulunan demet hatlarından bazıları ele alınmıştır.

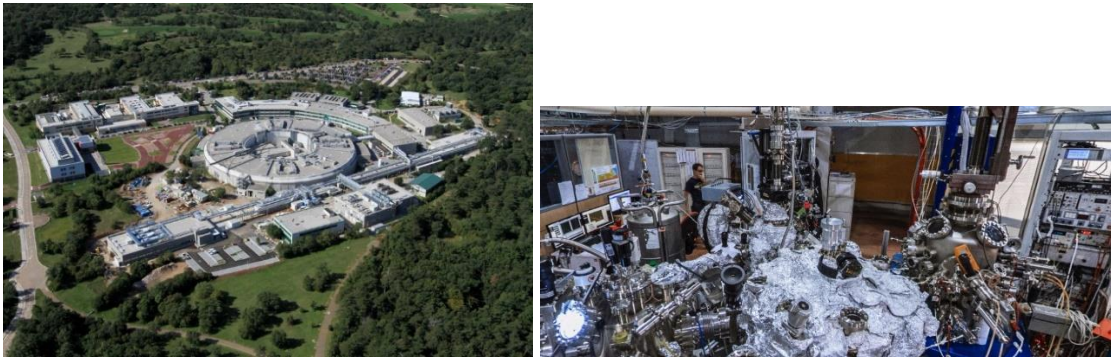
- **KMC-1:** Çok amaçlı demet hattıdır. Demet hattında sert X-ışını yüksek kinetik fotoelektron spektroskopisi (HIKE veya HAXPES) (Bio)-EXAFS, NEXAFS, absorpsiyon, yansıma ve floresan spektroskopisi gibi teknikler kullanılmaktadır. İşınım enerjisi: 4 – 12 keV
- **U49-2 PGM-1:** Yumuşak X-ışını mikroskopisi ile malzeme bilimi, moleküler dinamik ve yüzey bilimi araştırmaları için inşa edilmiş bir demet hattıdır. İşınım enerjisi: 85 - 1600 eV
- **U125-2 NIM:** Absorpsiyon spektroskopisi, floresan spektroskopisi, fotoelektron spektroskopisi, moleküllerin ve kümelerin fotoiyonizasyonu ve spektroskopik elipsometri yöntemlerini kullanabilen bir analiz demet hattıdır. İşınım enerjisi: 4 – 40 eV

- **IRIS THz/IR:** Tera Hertz (THz)'den Yakın Kızılötesine (Near Infrared, NIR) geniş bantlı kızılötesi ışınlam ile multidisipliner araştırmalar için kullanılan çok amaçlı bir demet hattıdır.
Işınlam enerjisi: 1 eV
- **Optics Beamline PM-1:** Gömülü katmanlar ve arayüzler dahil olmak üzere iç malzeme yapısının derinlemesine analizi, optik yüzeylerin tahribatsız incelenmesi ve karakterizasyonu amacıyla kurulmuş bir demet hattıdır.
Işınlam enerjisi: 12.5 – 1850 eV
- **PM4 LowDose PES:** Organik yarı iletkenlerin elektronik yapısı, moleküler miknatıslar, radyasyona son derece duyarlı organik tek kristaller, orbital tomografisi, x-ışını fotoelektron kırınımı ile yapısal ve kimyasal analizler için kullanılan bir demet hattıdır.
Işınlam enerjisi: 20 – 2000 eV
- **UE49 SGM:** Katılarda düşük enerjili uyarımların (manyetik, yörünge, nükleer ve yük serbestlik dereceleri ve bunların etkileşimi), elektronik yapının incelenmesi (bant boşluklarının ve bant genişliklerinin boyutu) ve faz ayrımı gösteren malzemelerin incelenmesi amacıyla kurulmuş bir demet hattıdır.
Işınlam enerjisi: 90 – 1400 eV
- **UE56-2 PGM-1:** Fotoelektron spektroskopisi ile malzeme ve yüzey araştırmaları amacıyla kurulmuş bir demet hattıdır.
Işınlam enerjisi: 60 – 1300 eV

4.3.5 ELETTRA Sinkrotron Işınımı Tesisi (Trieste, İtalya)

ELETTRA - Sincrotrone Trieste sinkrotron ışınımı tesisi 1987 yılında İtalya'nın Trieste şehrinde kurulmuştur. Trieste'deki bu merkez sinkrotron ışınım kaynağı ELETTRA'nın yanı sıra serbest elektron lazeri tesisi FERMI'ye de ev sahipliği yapmaktadır. ELETTRA tesisi Trieste Bilim ve Teknoloji Araştırma Alanı Konsorsiyumu, Friuli Venezia Giulia Otonom Bölgesi, İtalyan Ulusal Araştırma Konseyi ve Invitalia Partecipazioni SpA işbirliği ile işletilmektedir (ELETTRA web sitesi 2021).

ELETTRA sinkrotron ışınımı tesisi, yüksek kaliteli sinkrotron ve serbest elektron lazer ışığı üretme ve bunu malzeme ve yaşam bilimlerinde uygulama konusunda uzmanlaşmış, çok disiplinli uluslararası bir araştırma merkezidir. ELETTRA ve FERMI tesisleri, akademi ve endüstriden ulusal ve uluslararası araştırmacılara maddenin yapısını ve işlevini moleküler ve atomik seviyelere kadar hassasiyetle karakterize etme, yeni yapılar ve cihazlar tasarlama, yeni süreçler geliştirmelerine ve nano düzeyde üretim yapma olanağı tanımaktadır. ELETTRA tesisinde depolama halkalı serbest elektron lazeri de dahil olmak üzere 28 demet hattı vardır. ELETTRA'da genel olarak fotoelektron emisyon, görüntüleme, saçılma, yansıma/yayılım, soğurma, kırınım, litografi teknikleri kullanılmaktadır.



Şekil 4.6 ELETTRA sinkrotron ışınımı tesisi sırasıyla genel dış ve iç görünümü
(ELETTRA tesisi web sitesi 2021)

ELETTRA sinkrotron ışınımı tesisinin ana parametreleri Çizelge 4.5'de verilmiştir.

Çizelge 4.5 ELETTRA sinkrotron ışınımı tesisi ana parametreleri

Parametre	Birim	Değer
Enerji	GeV	2.4
Çevre	m	259.2
Demet akımı	mA	150
RF frekansı	MHz	1.157
Enine emittans	nm rad	9.7
Işınım demet hattı sayısı		28

4.3.5.1 ELETTRA Demet Hatları

- **TwinMic:** (The European Soft X-ray Transmission and Emission Microscope) X-ışını mikroskobu, difraktif X-ışını optiği, X-ışını kontrast teknolojileri ve algılama konularında, tamamlayıcı tarama ve tam alan görüntüleme modlarının avantajlarını tek bir hatta entegre ederek oluşturulmuş bir demet hattıdır.
Işınım enerjisi: 400 – 2200 eV
- **Nanospectroscopy:** Nanospektroskopi demet hattı, son teknoloji spektroskopik fotoemisyon ve düşük enerjili elektron mikroskobu (SPELEEM) kullanır. Mikroskop, 50 eV ila 1000 eV aralığında eliptik olarak polarize fotonlar iletebilen yüksek bir foton akı demet hattı ile hizmet eder. Araştırma uygulamaları, yüzeylerin, arayüzlerin, ince filmlerin ve nano yapıların kimyasal ve manyetik karakterizasyonu ile ilgili konuların çalışılmasını sağlayan bir demet hattıdır.
Işınım enerjisi: 10 – 1000 eV
- **NanoESCA:** Karmaşık ve nano yapıları malzeme sistemlerinde kimyasal ve elektronik durumların analizi, elektron spektroskopisinin nanometre yanal çözünürlükle, yani spektronanoskopi ile yapılmasını gerektirir. Bu amaca, NanoESCA demet hattında, paralel bir görüntüleme fotoelektron emisyon mikroskobu ile uygun bir enerji filtresini birleştirerek ulaşılmaktadır.
Işınım enerjisi: 5 – 1000 eV

- **SR-FEL:** Son derece yüksek parlaklığa sahip ultra kısa atmalara sahip serbest elektron lazeri ile özellikle zaman çözümlemeli analizlerin yapılmasına olanak sağlayan bir demet hattıdır. Bu hatta bir Ti:Sa lazeri ve üretilen SEL demetinin birlikte kullanılmasıyla sonda-gözlem (pump-probe) deneyleri gerçekleştirilmektedir.

Işınım enerjisi: 0.75 – 1.8 GeV

- **ESCA Microscopy:** ESCA mikroskopi ışın hattında bulunan taramalı fotoelektron mikroskobu (SPEM), kimyasal olarak yüzeye duyarlı ölçümleri yüksek uzaysal çözünürlükle birleştirmeyi sağlar.

Işınım enerjisi: 90 – 1200 eV

- **SuperESCA:** Yüksek çözünürlüklü çekirdek düzeyinde fotoemiyon spektroskopisi (HR-XPS), tek kristaller, ince filmler ve yeni nanoyapılı malzemeler arasında değişen çeşitli numunelerin elektronik ve yapısal özellikleri üzerinde derinlemesine araştırmalar yapmak amacıyla kurulan bir demet hattıdır.

Işınım enerjisi: 90 – 1800 eV

- **Spectromicroscopy:** Malzemelerin yerel bant yapısının analiz çalışmaları için kurulmuş bir demet hattıdır. VUV demeti μm altı bir noktaya odaklanır ve fotoemiyon elektronları elde edilerek açısal ve enerji dağılımı analizleri gerçekleştirilmektedir.

Işınım enerjisi: 27 – 74 eV

- **VUV Photoemission Beamline:** Yoğun madde çalışmaları için gelişmiş ölçüm olanakları sunan bir demet hattıdır ve özellikle yüksek çözünürlüklü yayılım yoluyla yüzey ve katı hal deneyleri için tasarlanmıştır. Ağırlıklı olarak metal ve yarı iletken yüzeylerin ve arayüzlerin fiziki üzerine araştırmalar gerçekleştirilmektedir.

Işınım enerjisi: 16 – 1000 eV

- **CiPo (Circular Polarization):** Dairesel Polarizasyon demet hattı (CiPo), 5 - 900 eV gibi çok geniş bir ışınım enerji aralığında değişken polarizasyona sahip ışınım demeti sağlamakta ev mazleme biliminde Ar-Ge çalışmaları için kullanılmaktadır. Işınım enerjisi: 5 – 1000 eV
- **SAXS (Small Angle X-ray Scattering):** Küçük Açık X-ışını Saçılım demet hattı yeni kompozit nanosistemlerden biyolojik makromoleküllere kadar her tür malzemenin nano ölçekli yapısını incelemek için tahribatsız ve çok yönlü standart analiz olanağı sunan bir demet hattıdır. Işınım enerjisi: 5.4 – 16 keV
- **XRD1:** Güçlü bir wiggler magnet tarafından geniş spektrumlu olarak üretilen ışınıma sahip XRD demet hattı, bilim ve teknolojiye geniş bir uygulama alanına sahip olarak, maddeyi birçok farklı seviyede yapısal olarak karakterize etme olanağı sunan bir demet hattıdır. Işınım enerjisi: 4 – 21 keV
- **Materials Science Beamline:** Çeşitli yüzeylerde malzeme bilimi, yüzey fiziği, katalizörler ve organik moleküller açısından analiz olanağı sunan çok yönlü bir demet hattıdır. Işınım enerjisi: 2 – 5.5 keV
- **SYRMEP (SYnchrotron Radiation for MEDical Physics):** Medikal Fizik Amaçlı Sinkrotron Işınımı demet hattı SYRMEP, medikal tanısal radyoloji, malzeme bilimi ve yaşam bilimi araştırmaları için kurulmuş bir demet hattıdır. Işınım enerjisi: 8 – 35 keV
- **GasPhase:** Gaz Fazı Fotoemisyona (GAPH) demet hattı, özellikle gazlı sistemler üzerine araştırmalara ayrılmış bir demet hattıdır. GAPH, 13-900 eV foton enerji aralığında serbest atomların ve moleküllerin elektronik özelliklerinin araştırılması için çok teknikli bir yaklaşım sunmaktadır. Işınım enerjisi: 13 – 900 eV

- **MCX:** X-ışını kırınımı (MCX) demet hattı ile malzeme karakterizasyonu, çok çeşitli tek kristal olmayan kırınım deneylerinin; örnekle grazing açısıl kırınımı ve yansıtma, residual stres ve doku analizi, faz tanımlama, yapısal çalışmalar ve kinetik çalışmalarının gerçekleştirilmesine olanak sunmaktadır.
Işınım enerjisi: 6 – 20 eV
- **ALOISA:** Çok teknikli uç istasyonu sayesinde yüzeylerin, adsorbatların ve ultra ince filmlerin hem kimyasını hem de yapısını araştırmasına olanak sağlayan bir demet hattıdır.
Işınım enerjisi: 130 – 1000 eV
- **BEAR:** 2,8-1600 eV (443-0.775 nm) spektral bölgede çalışabilen ve her türlü ayarlanabilir polarizasyona sahip ışınım sağlayabilen bir demet hattıdır.
Işınım enerjisi: 40 – 1600 eV
- **LILIT:** Disiplinlerarası lithografi demet hattı olan LILIT, yüksek parlaklıklı X-ışını spektrumundan yararlanarak, mikro ve nano çözünürlük düzeyinde yapıların X-ışını litografisi alanında araştırmalara olanak sağlamaktadır.
Işınım enerjisi: 1 – 12 keV
- **BACH:** Malzemelerin elektronik, kimyasal, yapısal, manyetik ve dinamik özelliklerinin araştırılması için çok teknikli bir yaklaşım sunan demet hattıdır. Yüksek yoğunluklu UV - yumuşak X-ışını foton enerji aralığında (35-1650 eV) çalışmakta olup, seçilebilir ışık polarizasyonu (doğrusal yatay ve dikey, dairesel ve eliptik) ve yüksek enerji çözünürlüğü sunmaktadır.
Işınım enerjisi: 35 – 1650 eV
- **SISSI (Synchrotron Infrared Source for Spectroscopy and Imaging):** Yüzey ve malzeme bilimi, biyokimya, adli tıp, mikroanaliz, jeoloji, hücre biyolojisi, biyomedikal teşhis, mikroakışkanlar, zaman çözümü IR, proteinler, kimyasal

kinetik vb. dahil olmak üzere çok çeşitli araştırma alanlarında kullanılan bir demet hattı olarak inşa edilmiştir.

Işınım enerjisi: 100 – 2000 eV

- **APE (Advanced Photoelectric Effect experiments):** APE, katı yüzeylerin ve nano yapıları maddelerin spektroskopik incelemesi için kullanılan bir demet hattıdır.

Işınım enerjisi: 8 – 1600 eV

- **XRF (X-Ray Fluorescence):** X-Işını Floresans demet hattı, XRF tekniğinin temel hassasiyetini ve çözünürlüğünü laboratuvar kaynaklarına kıyasla daha iyi bir düzeye taşımış ve algılama sınırlarını $\mu\text{g/g}$ düzeyine kadar düşürmüş bir demet hattıdır.

Işınım enerjisi: 2 – 14 keV

- **DXRL (Deep X-Ray Lithography):** Kontrollü X-ışını dozları ile numunelerin ışınlanmasını gerçekleştiren ve bu yolla malzeme bilimi çalışmalarına ve yeni malzemelerden yapılmış mikro cihazların imalatına olanak sağlayan bir demet hattıdır.

Işınım enerjisi: 0 – 20 keV

- **IUVS (Inelastic UltraViolet Scattering Beamline):** Ultraviyole ışınım ile esnek olmayan saçılmalara dayalı analiz olanağı sağlayan bir demet hattıdır.

Işınım enerjisi: 4.6 – 40 eV

- **BaDElPh (The Band Dispersion and Electron-Phonon Coupling Beamline):** Yüksek akı, yüksek çözme gücü ve yatay-dikey lineer polarizasyon ile 4.6 - 40 eV enerji aralığında sağladığı ışınım ile band dağılımı ve elektron-fonon çiftlenimi deneylerine olanak sağlayan bir demet hattıdır.

Işınım enerjisi: 5 – 40 eV

- **XAFS:** Eğici magnet ışımasına dayalı bir X-ışını soğurum spektroskopisi demet hattıdır ve geniş bir ışıyım enerjialarlığına (2,4 - 27 keV) sahiptir. Demet hattında temel fizikten kataliz kimyasına, malzeme biliminden çevre araştırmalarına kadar geniş bir yelpazede araştırma olanağı sunulmaktadır.

Işıyım enerjisi: 2.4 – 27 keV

- **XRD2:** Değişken enerjili demet hattı (8 - 35 keV), XRD1 hattının tamamlayıcısı olarak kurulmuş ve yüksek verimli makromoleküler kristalografi (MX) deneyleri için kullanılmaktadır.

Işıyım enerjisi: 8 – 35 keV

- **Xpress (High Pressure Diffraction Beamline):** 25 keV'lik monokromatik bir X-ışını ile yüksek basınç altında çalışılmasını sağlayan bir kırınım demet hattıdır. Demet hattında yoğun madde fiziğı, malzeme bilimi, kimya, jeofizik, mineraloji alanlarında Ar-Ge çalışmaları olanağı sağlamaktadır.

Işıyım enerjisi: 25 keV

4.3.6 ILSF Sinkrotron Işıyımı Tesisi (Qazvin, İran)

ILSF Sinkrotron ışıyım tesisi (Iranian Light Source Facility), Tahran'a yaklaşık 150 km mesafedeki tarihi Qazvin kentinde kurulmakta olan 3. nesil sinkrotron ışıyımı tesisidir. Depolama halkasının çevresi 528 m dir. İran sinkrotron ışıyımı kaynağında (ILSF), sinkrotron ışıyımı kullanılarak malzeme bilimi, yüzey bilimi, nano bilim ve teknoloji, çevre bilimleri, kimyasal süreçler, jeokimya, arkeometri ve arkeoloji, yaşam bilimleri, tıp-tanı ve tedavi, ilaç endüstrisi araştırmaları yapılması planlanmıştır (ILSF web sitesi 2021).



Şekil 4.7 ILSF sinkrotron ışınlıması tesisinin genel görünümü (ILSF tesisi web sitesi 2021)

ILSF sinkrotron ışınlıması tesisinin ana parametreleri Çizelge 4.6’da verilmiştir.

Çizelge 4.6 ILSF sinkrotron ışınlıması tesisi ana parametreleri

Parametre	Birim	Değer
Enerji	GeV	3
Çevre	m	528
Demet akımı	mA	400
RF frekansı	MHz	100
Enine emittans	nm rad	0.28
İşınım demet hattı sayısı		7

4.3.6.1 ILSF Demet Hatları

ILSF’de ilk aşamada aşağıda belirtilen işınım demet hatlarının kurulması planlanmıştır:

- **X-ışını Toz Kırınım (XPD) demet hattı:**

Bu demet hattı fizik, malzeme bilimi, kimya, endüstri gibi birçok alanında araştırma ve analiz için kullanılacaktır (İşınım enerjisi: 6 – 30 keV).

- Tek Kristal X-ışını Kırınımı (SXRD) demet hattı
- Genişletilmiş X-ışını Soğurma İnce Yapısı (EXAFS) demet hattı
- Makromoleküler Kristalografi (MX) demet hattı
- Katı Hal Elektron Spektroskopisi (SSES) demet hattı
- Spektromikroskopi (SM) demet hattı
- Gaz Fazı Elektron Yayınım (ESCA) demet hattı.

4.3.7 SESAME Sinkrotron Işınımı Tesisi (Amman, Ürdün)

Synchrotron-Light for Experimental Science and Applications in the Middle East (SESAME), UNESCO himayesinde ve CERN'ün desteği ile Türkiye'nin de kurucu ortağı olduğu 7 ülkenin işbirliği ile Allam, Ürdün'ün başkenti Amman civarındaki Allam bölgesinde kurulmuş ve 2017'de yılında hizmete açılmış 3. nesil bir sinkrotron ışınımı tesisidir. Kurucu ülkeler Bahreyn, Kıbrıs, Mısır, İran, İsrail, Pakistan, Filistin Yönetimi ve Türkiye'dir (SESAME web sitesi 2021).

SESAME depolama halkası, 133.2 çevre uzunluğuna ve 2.5 GeV enerjiye sahiptir.



Şekil 4.8 SESAME sinkrotron ışınımı tesisinin sırasıyla genel dış ve iç görünümü
(SESAME tesisi web sitesi 2021)

SESAME sinkrotron ışınlıması tesisinin ana parametreleri Çizelge 4.7’de verilmiştir.

Çizelge 4.7 SESAME sinkrotron ışınlıması tesisi ana parametreleri

Parametre	Birim	Değer
Enerji	GeV	2.5
Çevre	m	133.2
Demet akımı	mA	400
RF frekansı	MHz	500
Enine emittans	nm rad	26
İşinım demet hattı sayısı		8

4.3.7.1 SESAME Demet Hatları

SESAME’de toplam 18 demet hattı kurulması planlanmıştır. 2021 yılı itibarıyla 3 demet hattı çalışmakta, 3 demet hattı kurulum aşamasında ve 2 demet hattı ise planlanmış durumdadır. Bu 8 demet hattının neler olduğu ve kurulum amaçları aşağıda açıklanmıştır.

- **D08 - XAFS / XRF (X-ray Absorption Fine Structure/X-ray Fluorescence Spectroscopy)**

X-ışını soğurumlu ince yapı / X-ışını floresan spektroskopik demet hattı ilk kurulan demet hattı olmuş ve 2018’de çalışmaya başlamıştır. X-ışını spektroskopik çalışmaları için tasarlanmıştır ve çevre bilimi, enerji depolama, kültürel miras ve kataliz ile katı hal fiziği ve biyokimya gibi birçok alanında araştırma ve analiz için kullanılmaktadır.

İşinım enerjisi: 4.7 – 30 keV

- **D02 - Infrared Spectromicroscopy (IR)**

Kızılötesi spektromikroskopik demet hattı SESAME ile Fransa’daki SOLEIL Sinkrotron tesisinin işbirliği ile tasarlanıp kurulmuş ve Kasım 2018’de hizmete girmiştir. Demet hattı dipol magnet ışınlımasıdır ve dalga boyu 2 ila 25 μm arasında

değişen ışıınımlı sağlar. IR demet hattının potansiyel uygulamaları arasında temel bilimler, eczacılık, teşhis, çevre bilimi, malzeme bilimi, arkeoloji, kültürel miras ve sanat restorasyonu dahil olmak üzere çok çeşitli araştırma alanları bulunmaktadır.

Işıınımlı enerjisi: 0.001 – 3 eV

- **I09 - Materials Science (MS)**

Malzeme bilimi demet hattı İsviçre Işıınımlı Kaynağına sahip Paul Scherrer Enstitüsü tarafından SESAME'ye bağışlanan bileşenlerle Aralık 2020'de kurulmuştur. X-Işıınımlı Toz Kırınımlı (XRPD) uygulamaları için kullanılmaktadır ve 5 ila 25 keV arasında geniş bir ışıınımlı enerji aralığına sahiptir. MS demet hattında XRPD tekniği ile malzeme fazı tanımlaması, nicel analiz, atomik yapı analizi, yapı kusurları analizi, alan boyutu belirleme ve kinetik çalışmalar gibi malzeme mikroyapısal özelliklerinin karakterizasyonu çalışmaları mümkün olmaktadır. Demet hattında malzeme bilimi ve mühendisliğinden kimya, fizik ve arkeometriye uzanan geniş bir alanda araştırmalar yapılamaktadır.

Işıınımlı enerjisi: 5 – 25 keV

- **HESEB (Helmholtz SESAME Soft X-Ray Beamline)**

Helmholtz SESAME yumuşak x-ışıınımlı demet hattı kurulum aşamasında olup 2022 yılında faaliyete geçmesi beklenmektedir. Alman Helmholtz vakfının ve ağırlıklı olarak DESY'nin SESAME ile işbirliği ile kurulan HESEB demet hattında yumuşak X-ışıınımlı ve güçlü X-ışıınımlı optiği ve dedektör sistemleri ile katı hal, arayüz ve yüzey fiziği, fiziksel kimya, biyolojik sistemler ile yer ve çevre bilimlerinde Ar-Ge çalışmalarına olanak sağlayacaktır.

Işıınımlı enerjisi: 90 eV – 1.8 keV

- **BEATS (BEAmline for Tomography at SESAME)**

EU Horizon 2020 programı kapsamında proje desteği ile kurulmakta olan Tomografi demet hattı SESAME, ALBA (İspanya), DESY (Almanya), ESRF, (Fransa), ELETTRA (İtalya), INFN (İtalya), PSI (İsviçre) ve POLARIS (Polonya)

işbirliği ile kurulmakta olan bir sert X-ışını tam alan tomografisi demet hattıdır ve özellikle kültürel miras ve arkeolojik çalışmalara odaklanması planlanmıştır.

- **TXPES (Türk Yumuşak X-Işını Foto Elektron Spektroskopisi)**

TXPES demet hattı TENMAK'ın (Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu) koordinasyonunda Türk Hızlandırıcı ve Işınım Laboratuvarı (TARLA) ile ve Bilkent ve Koç Üniversitelerinin işbirliği ile kurulan bir Türk ışınım hattıdır. Kuruluma SESAME, DESY ve BESSY de destek olmaktadır. Demet hattında yumuşak x-ışınları ile ağırlıklı olarak yüzey ve malzeme karakterizasyon çalışmaları yapılması planlanmıştır. Demet hattının 2023 yılında devreye girmesi hedeflenmektedir.

SESAME'de kurulması planlanan diğer iki ışınım demet hattı ise;

- **Makromoleküler Kristalografi (MX)**
- **Küçük Açılı ve Geniş Açılı X-Işını Saçılımı (SAXS - WAXS)**

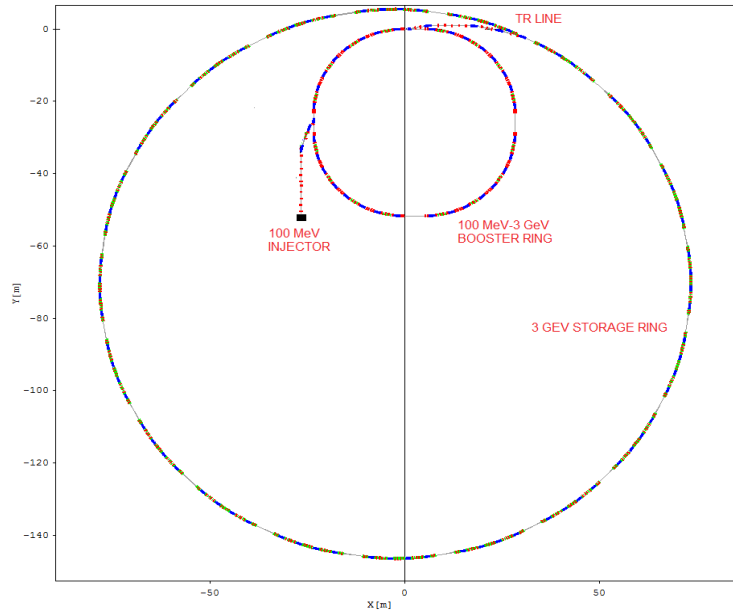
olarak belirlenmiştir.

4.4 Türk Sinkrotron Işınımı Tesisi Projesi (TURKAY)

4.4.1 TURKAY Hızlandırıcı Yapısı ve Ana Parametreleri

4.4.1.1 TURKAY Tesisinin Genel Yapısı

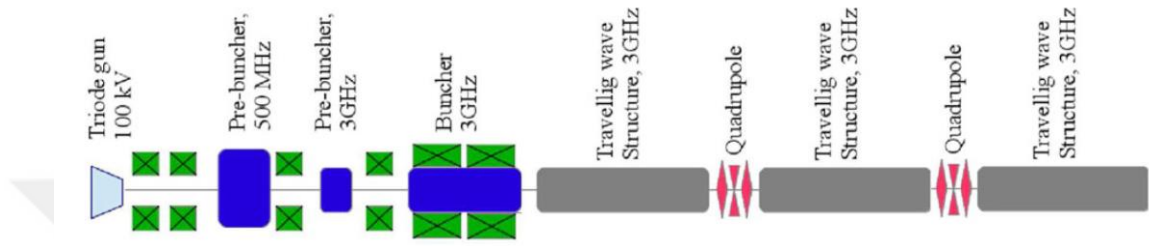
3. nesil ışınım kaynağı olarak tasarlan THM Sinkrotron Işınımı Tesisi TURKAY'ın 3 GeV demet enerjisi ile kurulması öngörülmüştür. TURKAY tesisi, THM projesi kapsamında, düz bölümlerde sonlu dağılım (0.51 nm.rad) ve akromatik durum (0.93 nm.rad) olarak, özel bir üçüncü nesil sinkrotron radyasyon tesisi olarak önerilmiştir. Tesis; enjektör linak, ön hızlandırıcı halka ve depolama halkası olmak üzere üç hızlandırıcı biriminden oluşmaktadır. Tasarlanan tesisin ön hızlandırıcıları ile birlikte genel görünümü Şekil 4.1'de sunulmuştur. (Z. Nergiz vd. 2014)



Şekil 4.9 THM-SI (TURKAY) şematik görünümü (Nergiz vd. 2014)

4.4.1.2 TURKAY Tesisi Linak Ön Hızlandırıcısı

TURKAY'ın linak ön hızlandırıcısı 100 kV DC termiyonik tabanca, 500 MHz'de çalışan bir alt harmonik ön demetleyici, 3 GHz'de çalışan bir ön demetleyici, 3 GHz'de çalışan bir duran dalga demeti ve üç adet 3 GHz'lik hızlandırıcı yapıdan oluşmaktadır. Enjektörün şematik yerleşimi Şekil 4.10'da sunulmuştur. (Z. Nergiz 2017).



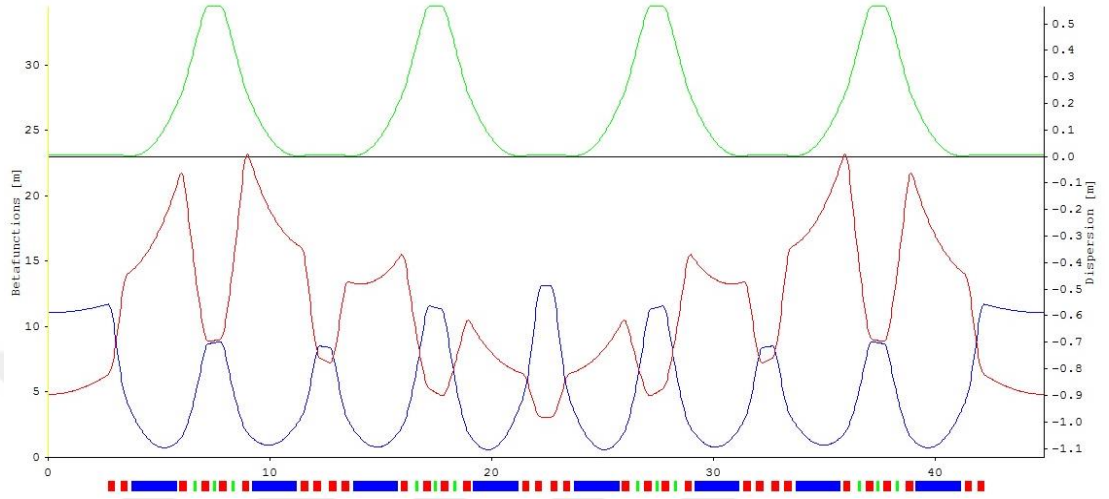
Şekil 4.10 TURKAY ön hızlandırıcısının şematik görünümü (Nergiz vd. 2017)

4.4.1.3 TURKAY Ön Hızlandırıcı Halkası (Booster)

TURKAY tesisi ön hızlandırıcısı için ana halkadan (main ring) farklı bir tunel içinde kurulacak ön hızlandırıcı halkanın örgüsü; RF, enjeksiyon, ekstraksiyon ve diyagnostik için 5 m uzunluğunda, dağılımın olmadığı 4 düz bölümden oluşan 4'lü süper simetriye sahiptir. Örgü yaklaşık 21 nm.rad değerinde küçük bir yayılım değerine ulaşmak için (<30 nmrad), sıralı magnetlerden oluşan FODO hücreleri ile tasarlanmıştır (Şekil 4.9).

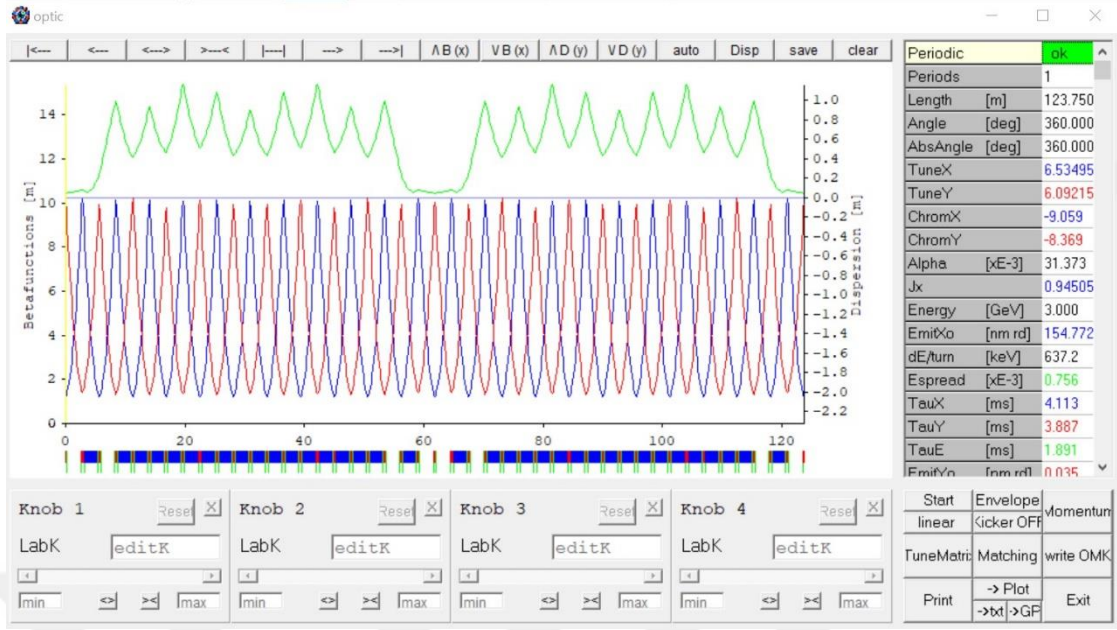
Ön hızlandırıcı halkanın süper periyodu 8 tip ve 4 tip olmak üzere iki farklı grup hücrenin sıralanması ve başta ve sonra olmak üzere 2 adet boşluktan oluşmaktadır. Tam örgü, her biri 11.25 derece bükülme açısına ve 2 m uzunluğa sahip 32 bükücü magnet içermektedir. Halkanın çevresi 500 m'lik RF frekansı için 300 harmonik sayısını sağlayabilecek şekilde 179.65 m uzunluğundadır. RF boşlukları, enjeksiyon ve ekstraksiyon bağlantıları boşluklara kurulduğundan ötürü, bu bölümlerde dispersiyon sıfıra yakın bir değer almaktadır. FODO hücrelerinin sayısı ve hücre başına betatron faz ilerlemesi düz kısımdaki dağılımın önüne geçmek için düzenlenmiştir. Halka tasarımının optik

benzetimleri OPA kodu kullanılarak yapılmıştır. Betatron fonksiyonları, manyetik elemanların konumları ile birlikte Şekil 4.11’de gösterilmiştir. Burada yer alan düz bölümlerdeki dağılım fonksiyonları sıfırdır (Akdoğan 2016).

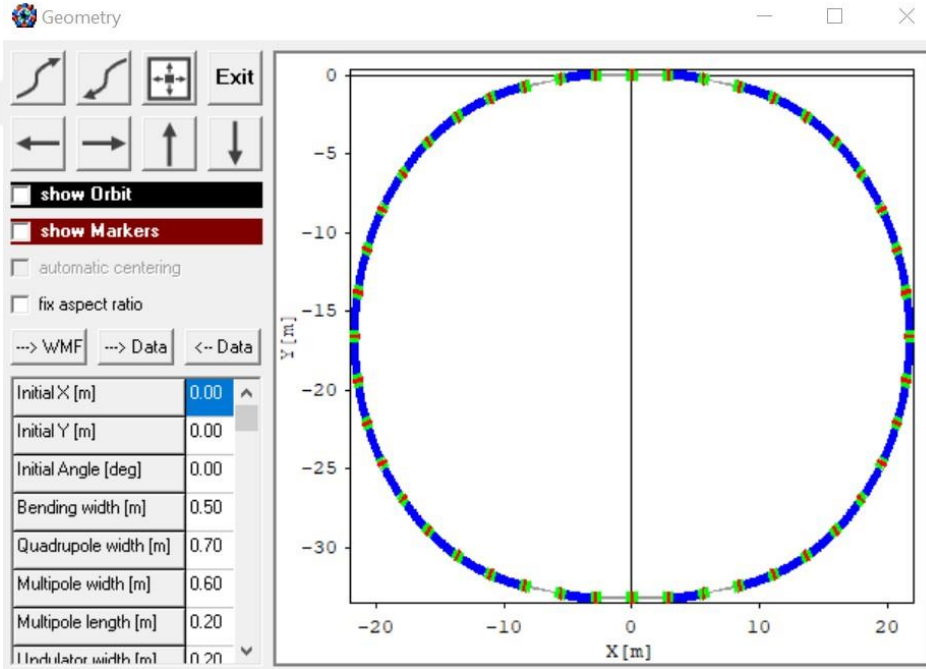


Şekil 4.11 Ön hızlandırıcı halkanın çeyrek kesiminin betatron fonksiyonları.

Ayrıca benzer yapıda yaklaşık 124 m uzunluğunda kısa ön hızlandırıcı sinkrotron tasarım çalışması yapılmıştır. OPA üzerinden çalışmalar sürdürülmüştür. Örnek çalışma 2’li simetriye sahip, yaklaşık 155 nmrad yayılım değerinde kalan bir kısa ön hızlandırıcıdır. Tasarlanan sinkrotronun betatron fonksiyonlarının grafiği ve tasarım parametreleri sağda yer alacak şekilde Şekil 4.12’de sunulmuştur. Ayrıca kısa ön halka (booster) için elde edilen tam tur halinin görünümü Şekil 4.13’de sunulmuştur.



Şekil 4.12 Ön hızlandırıcı betatron fonksiyonları grafiği



Şekil 4.13 OPA'da tasarlanan tam tur ön hızlandırıcı sinkrotronun görünümü

4.4.1.4 TURKAY Tesisi Ana Halkası (Main Ring)

Bir SI kaynağının manyetik örgüsü tasarlanırken, ana amaç yüksek parlaklık elde etmek için düşük demet yayılım değerine ulaşmaktır. Akımın hesaba katılmadığı durumda ulaşılacak doğal emittans değeri yaklaşık olarak aşağıdaki ifadede gösterildiği şekildedir:

$$\varepsilon_0 \sim \frac{E^2}{N_s^3 N_d^3} \quad (4.1)$$

Eşitlikteki E elektron demetinin enerjisi, N_s sektör sayısı ve N_d bükücü magnetlerin sayısıdır. (H. Wiedemann, 1999). TURKAY sinkrotron ışınımı tesisi dairesel hızlandırıcının çevresi yaklaşık 477 m olacak şekilde tasarlanmıştır. Tesiste ışınım dalga boyu aralığı kızılötesi bölgeden, sert X-ışınları bölgesine kadar ve ışınım enerjisi 100 eV-50 keV aralığında olacak şekilde 30'un üzerinde ışınım denet hattı olması öngörülmüştür (Z. Nergiz vd. 2015).

Çizelge 4.8 TURKAY Tesisi ana halkasının önemli parametreleri

Parametreler	Birim	Değer
Enerji	GeV	3
Çevre	m	477
Akım	mA	450
Enine Yayılım	nm.rad	0.51
RF frekansı	MHz	500
Harmonik sayı	-	795

4.4.2 TURKAY Tesisi İçin Genel Işınım Karakteristikleri

TURKAY Teknik Tasarım raporunda yapılan değerlendirme ve analizlere göre TURKAY ışınlım demet hatlarının dipol, zigzaglayıcı (wiggler) ve salındırıcı (undulator) magnetlere dayalı olarak kurulacağı öngörülerek ışınlım kritik enerjisinin de düşük ve yüksek foton enerjilerini kapsayacak şekilde düzenlenebileceği belirtilmiştir. Örneğin depolama halkasında kullanılan eğici magnetin manyetik alanı düşük olduğu için dipol ışımları düşük enerjili ışınlıma ihtiyaç duyacak deneyler için iyi bir kaynak olacağı, bu durumda kritik enerjinin 3 keV civarında olacağı ve bu değerin eğici magnet içerisine yüksek alanlı magnet eklenerek 10 keV mertebesine kadar çıkarılabileceği ve foton enerji spektrumunun sağ ucunda ışınlım enerjisi olarak 60 keV'e kadar çıkılabileceği gösterilmiştir. (Z. Nergiz vd. 2015).

TURKAY'da ışınlım üretimi için kullanılabilecek magnet türlerini, ana parametrelerini ve üretilecek ışınlımların enerji aralıklarını, parlaklık ve akı gibi önemli göstergelerini analiz için yapılan çalışmalarda elde edilen bazı önemli sonuçlar aşağıdaki tablo ve şekillerde özetlenmiştir. Magnetler olarak düşük alanlı (D.A.) ve yüksek alanlı (Y.A.) iki dipol magnet ile 25, 40 ve 90 mm'lik kutup periyot değerine sahip üç undulator magnet seçilmiştir. 25 v 40 mm kutuplu unduator magnet ile D.A. ve Y.A. dipol magnetlere ilişkin temel parametreler Tablo 4.9'da verilmiştir. (Z. Nergiz vd. 2015).

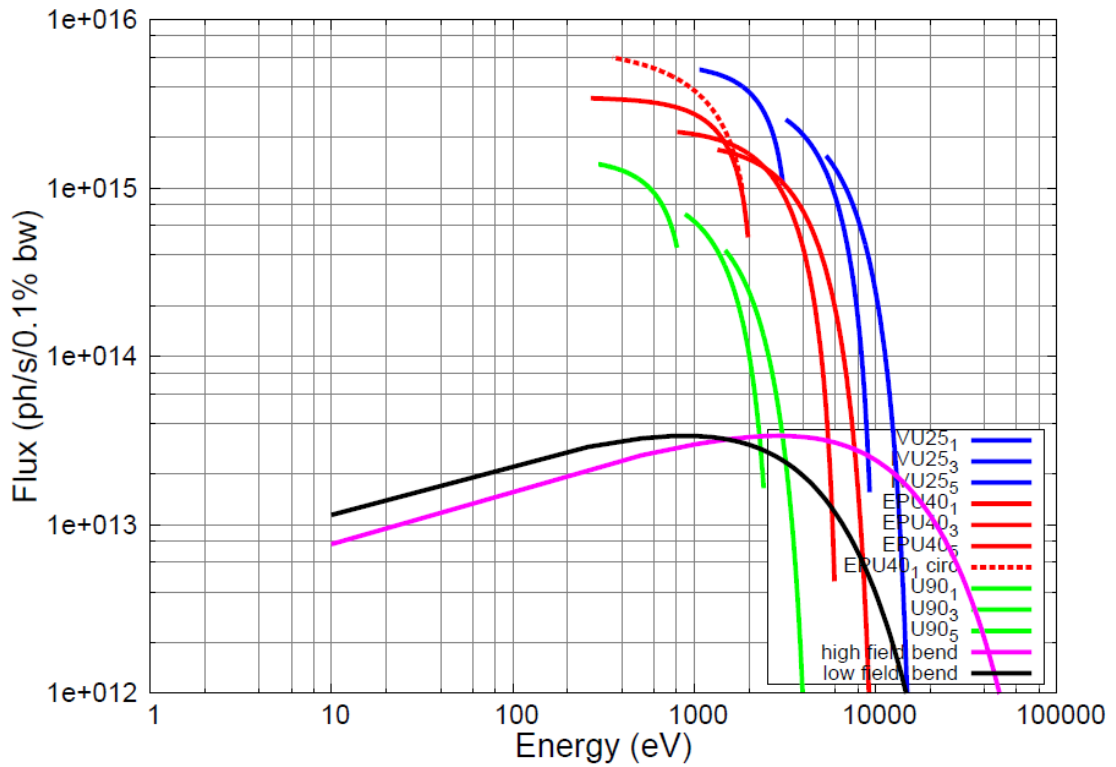
Çizelge 4.9 Işınım kaynaklarının temel parametreleri

Parametre	IVU25	EPU40	Y.A.Eğici Magnet	D.A. Eğici Magnet
Periyot uzunluğu (cm)	2.5	4.0		
Periyot sayısı	160	100		
Toplam uzunluk (m)	4	4	0.2	1.5
Minimum boşluk (mm)	7	10	-	-
Pik manyetik alan (T)	0.90	1.0	1.7	0.52
Magnet şiddet parametresi (K)	2.1	3.7	-	-

Çizelge 4.9 Işınım kaynaklarının temel parametreleri (devam)

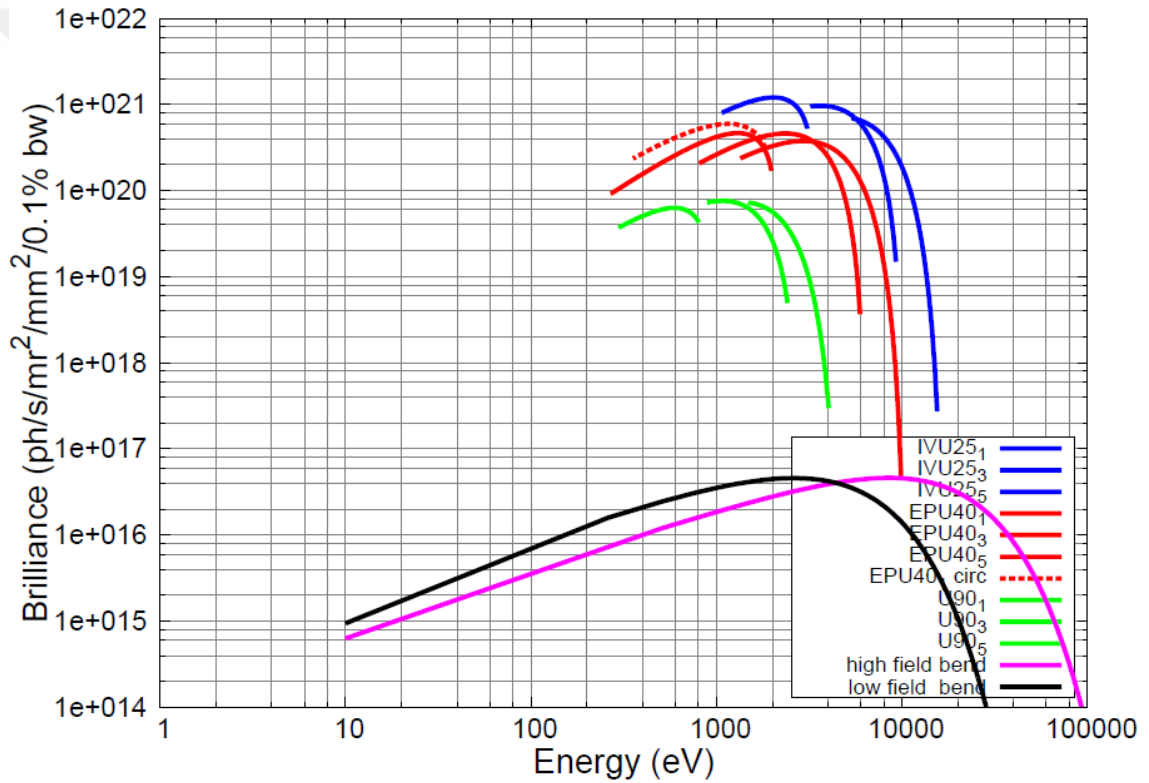
Kritik enerji	-	-	10.1	3.1
Foton enerji aralığı (keV)	1.0-12	0.3-9	0.02-60	0.01-20

Çok fazla odaklı ışınım demeti gerektirmeyen deneyler için baz alınan nicelik akıdır. Akı birim bant genişliğinde, birim zamanda oluşan foton sayısı tanımıyla ifade edilir. Eğici magnetlerde akı değeri düşey eksende bütün açılar, yatayda ise 1 mrad'lık açı üzerinden integral alınarak hesaplanmıştır. TURKAY'da kullanılması öngörülen 25, 40 ve 90 mm'lik kutup periyot değerine sahip üç undulatör magnet ve düşük alanlı (low field) ve yüksek alanlı (high field) dipol magnetler için akı spektrumu Şekil 4.14'te verilmiştir.



Şekil 4.14 TURKAY akı spektrumunun davranışı (Z. Nergiz vd. 2015)

Işınım kaynakları ile gerçekleştirilen araştırmalarda, spektroskopik ve mikroskopik teknikler açısından hassasiyeti üst düzey olan deneylerde ışınım demetinin mümkün olduğunca odaklanması gerekir. Bu durumda baz alınan demet parametresi parlaklıktır. TURKAY’da kullanılması öngörülen 25, 40 ve 90 mm’lik kutup periyot değerine sahip üç undulator magnet ve düşük alanlı (low field) ve yüksek alanlı (high field) dipol magnetler için ortalama parlaklık değerlerini veren parlaklık spektrum davranışı Şekil 4.15’de verilmiştir. Buradan hareketle TURKAY için ışınım ortalama parlaklık değeri olarak 10^{21} mertebesine ulaşılacağı görülmüştür.



Şekil 4.15 TURKAY’da parlaklık spektrumunun davranışı (Z.Nergiz vd. 2015).

4.4.3 TURKAY İçin Öngörülen Işınım Demet Hatları

Sinkrotron ışınım kaynakları, teknolojik ürünlerin ve temel bilimlerin pek çok dalına hizmet eden en önemli deney düzenekleridir. Temel avantajı aynı anda birçok farklı deney istasyonunda, çok farklı disiplinlerde araştırmaların yapılabilmesine olanak sağlamasıdır.

THM-SI Tesisi için 2015 yılında sunulan teknik tasarım raporunun hazırlık sürecinde, potansiyel kullanıcılar ile yakın temasta bulunulmuştur. 2011 yılında İstanbul'da gerçekleştirilen I. TAC Light Sources User Meetinge (TAC-LSUM) katılan ve sinkrotron ışınımı kullanımı konusunda uzman ve Dr. ünvanlı 13 bilim insanından oluşan TURKAY Kullanıcı Komitesi TURKAY'da yer alabilecek demet hatlarının neler olabileceği konusundaki çalışmalar yürütmüş ve bu konudaki öngörülerini gerekçeleri ile 2015 yılında tamamlanan TURKAY Teknik Tasarım raporuna yansıtmışlardır.

Kullanıcı Komitesinin yürüttüğü çalışmalar sonucunda Türkiye'de sinkrotron ışınımı kullanıcı potansiyelinin ağırlıklı olarak malzeme bilimi, manyetizma, kristalografi, nano bilimi, yüzey bilimi, yapısal biyoloji ve enstrümantasyon alanlarında yoğunlaştığı tespit edilmiştir. Bu tespitler ışığında TURKAY tesisinde ilk aşamada kurulması öngörülen 10 demet hattının konu başlıkları aşağıdaki gibi tespit edilmiştir (Z. Nergiz vd. 2015).

1. Makromoleküler Kristalografi (MX) Demet Hattı
2. X-Işını Soğurmalı İnce Yapı (XAFS) Demet Hattı
3. Kızılötesi (IR) Spektroskopi ve Mikroskopi (ISM) Demet Hattı
4. Yumuşak X-Işını Demet Hattı
5. Esnek Olmayan Sert X-Işını Saçılması Demet Hattı
6. Manyetik Malzemeler İçin Röntgen Görüntüleme Demet Hattı
7. X-Işını Kırınımı (XRD) Demet Hattı,
8. Yüksek Basıncılı Toz Kırınımı Demet Hattı
9. Küçük Açılı X-Işını Saçılması (SAXS) Demet Hattı
10. X-Işını Optiği ve Enstrümantasyon Demet Hattı

TURKAY için öngörülen demet hatlarından makromoleküler kristalografi demet hattı ile X-ışını ve kızılötesi (IR) ışıının içeren demet hatları için demet hatlarının amaçları ve genel yapıları, ışıının demet karaktersitikleri, ışıının kullanım teknikleri ve araştırma potansiyelleri aşağıdaki gibi verilmiştir.

4.4.3.1 Makromoleküler Kristalografi (MX) Demet Hattı

THM Sinkrotron Işıının Tesisi'nde kurulumu planlanan makromoleküler kristalografi demet hattı bir X-ışını kırınım hattı olarak ve salındırıcı magnete dayalı olarak planlanmıştır. Demet hattında enzimler, proteinler, hormonlar ve amino asitler ile bunların protein kompleksleri gibi makromoleküllerin atomik yapılarının analizi hedeflenmektedir. Yüksek akı ve parlaklığa sahip sinkrotron ışığı ile zayıf difraksiyon veren büyük biyolojik moleküllerin yapısal çalışmaları mümkün olabilmektedir. Böylece, X-ışınları protein kristalografisi ile biyomoleküllerin atomik yapıları hakkında elde edilen bilgiler onların biyolojik fonksiyonlarının anlaşılabilmesi için en temel bilgilerdir ve hayat bilimleri için vazgeçilmezdir. (Z. Nergiz 2015).

Protein ve diğer biyolojik makromoleküllerin üç-boyutlu (3D) yapılarının belirlenmesi yaşamsal faaliyetlerin anlaşılması için çok önemlidir. Makromoleküler kristalografi bu alanda, karmaşık biyolojik sistemlerin araştırılmasında kullanılan en güçlü yöntemdir. Çok sayıda protein, protein kompleksleri, nükleik asit (DNA ve RNA), virus, membrane proteinleri gibi biyolojik makromoleküllerin yapıları atomik veya yakın-atomik çözünürlükte aydınlatılmıştır. Böylece enzim kataliz mekanizmaları, bağışıklık sisteminin tepkisi, genetik bilginin kodlanması, viral enfeksiyon, ve fotosentez gibi çeşitli yaşam proseslerinin ayrıntılı olarak aydınlatılması mümkün olmuştur.

Makromoleküler kristalografide geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu özelliklerin sağladığı avantajlar şöyle özetlenebilir:

- Konvansiyonel x-ışını kaynaklarına göre sinkrotron radyasyonunun parlaklığının (brilliance) çok yüksek olması, eskiden saatlerce hatta günlerce sürebilen veri toplamanın dakikalar içinde yapılabilmesine imkan vermektedir.
- Parlaklıktaki artış aynı zamanda konvansiyonel x-ışını kristalografisinden daha küçük kristallerin kullanılabileceği anlamına gelmektedir.
- Daha yüksek çözünürlüklü yapılar elde edilebilir.
- Oldukça iyi odaklanmış demet nedeniyle çok büyük moleküllü yapılar çözülebilir.
- Farklı dalga boylarında ölçümleri gerektiren Multiple Anomalous Dispersion (MAD) teknikleri ancak sinkrotronda yapılabilir. Bu yaklaşımın birçok yararı vardır, başlıcası isomorf yer değiştirme için gereken bilgi eksikliği olmak üzere.
- Yüksek şiddet nedeniyle tam bir veri seti saniyelerce veya saniyenin kesrinde toplanabilir.
- Kısa elektron bunch uzunluğu zaman çözümü (time resolved) yapısal çalışmalar yapabilme olanağını sunar.

Bütün bu avantajlar makromoleküler kristalografide sinkrotron kullanımının neredeyse zorunlu hale geldiğinin göstergesidir.

Makromoleküler kristalografi proteinler, virüsler ve nükleik asitler (RNA ve DNA) gibi biyolojik molekülleri yaklaşık 5 Å'dan daha büyük çözünürlüğe kadar incelemekte kullanılan bir tekniktir. Bu yüksek çözünürlük, makromoleküllerin yaşayan hücrelerdeki ve organizmalardaki fonksiyonlarının ve mekanizmaların detaylı olarak aydınlatılmasına yardımcı olur.

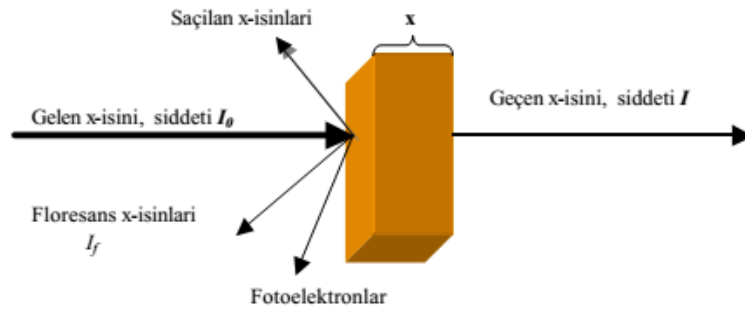
MX demet hatlarının çoğunda X-ışını dalga boyu, deney için değiştirilebilir yapıdadır. Genelde yaygın olarak dalgaboyu 0.98 Å (12 KeV) olan sert X-ışınları, 0.7 ile 2.0 Å aralığında ulaşılabilir değerlere değiştirilerek kullanılır. Ayrıca bir end-station MX demet hattında, hassas dalga boyu seçimi için floresans detektör; bir gonyometre (kristal yükleme, yönlendirme ve x-ışını demeti içinde rotasyon için); düşük sıcaklıkta deney yapmayı sağlayacak cryo-cooling sistemler ve tam otomatik işletim için geniş bilgisayar kapasitesi bulunur.

4.4.3.2 XAFS Demet Hattı

THM Sinkrotron Işınımı Tesisı TURKAY'da, sağlanacak üstün özelliklere sahip ışınların, bilimsel çalışmalar için kullanılacağı deney hatlarından birinin de X- Işını İnce Yapı Soğurma Spektroskopisi (X- ray Absorption Fine Structure Spectroscopy, XAFS) demet hattı olması planlanlanmıştır. Artık sinkrotron sistemlerinde standart olarak düşünölen “zarurı” deney istasyonlardan biri haline gelen XAFS, birçok disiplinden bilimsel disiplinin araştırmaları için kullandığı ölçüm tekniğinden ismini almaktadır. Hitap ettiğı disiplin sayısı anlamında çok büyük öneme sahiptir. Özellikle, dünyada teknolojiye dayalı endüstri kuruluşlarının Ar-Ge çalışmalarında yoğun ilgiye sahip olması, (hatta bazı Sinkrotron Laboratuarlarında kendi adlarını taşıyan ışın hattı kurduurmaları) bu alanın ölkemiz THM Sinkrotron Işınımı Tesisinde de aynı hassasiyetle üzerinde durulması gereken bir yapılanma olması gerekliliğini ortaya koymaktadır.

THM Sinkrotron Işınımı Tesisı projesi, bölgesel ve uluslararası bilim ve teknoloji dünyasını, deneysel işbirlikleri aracılığıyla buluşturacak ve ileriye yönelik uzun soluklu çalışmalara ilham verecek olması açısından atılmış en önemli adımlardan biridir. Yaygın kullanımı ve hitap ettiğı bilimsel disiplin yelpazesi bakımından çok zengin bir altyapıya sahip olan XAFS tekniğı, bu özelliklerden en fazla yararlanacak olan istasyon durumundadır.

XAFS, madde içerisinde belirlenen bir elementin, çekirdeğe yakın seviyelere ait bağlanma enerjilerinin üzerinde olan enerjilerin nasıl soğurulduğunu ayrıntılarıyla ölçer. XAFS spektrumu, belirlenen atomun yapısına ve kimyasal durumuna duyarlıdır. Belirlenen atomun en yakın komşu uzaklıkları, tur ve koordinasyon sayıları, spektrumu etkiler. XAFS, periyodik tabloda bulunan tüm elementlere uygulanabilme özelliği ile dikkat çekmektedir. Ayrıca, maddelerin kristal bir yapıda olma durumu aranmadığı için, kristal olmayan (amorf) maddelerle ilgili çalışmalarda da kullanılan birkaç yöntemden biridir. X- ışını soğurma ölçümleri, şiddeti yüksek ve enerji değeri ayarlanabilen bir X-ışını kaynağı ile yapılır. Bu durum sinkrotron ışınım kaynakları ile gerçekleştirilebilir. XAFS ölçümleri, x-ışınlarının örnek tarafından soğurulma sürecini inceler. Bu süreç şekil 4.16’da resmedilmiş olup en önemli parametre soğurma katsayı ” μ ” ‘dur.



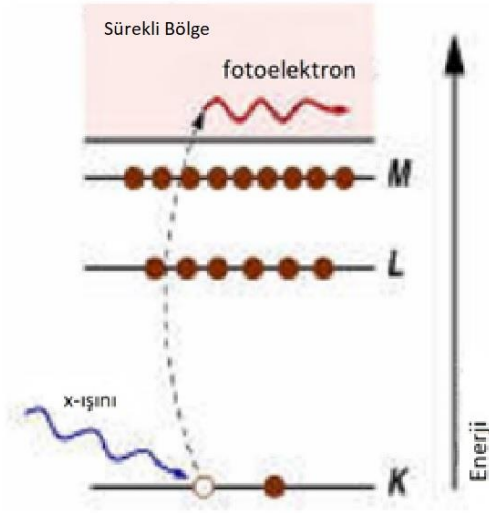
Şekil 4.16 XAFS ölçümü transmisyon süreci

Soğurma katsayısı, x-ışınlarının soğurulma olasılığının yansımasıdır. X-ışını, kullanılacak örnekten geçtiğinde, incelenen örneğin kalınlığına bağlı olarak ışın şiddeti değeri üstel olarak azalır. X- ışını şiddetindeki bu azalma, Lambert Beer yasası olarak bilinir ve aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$I = I_0 e^{-\mu(E)x} \quad (4.2)$$

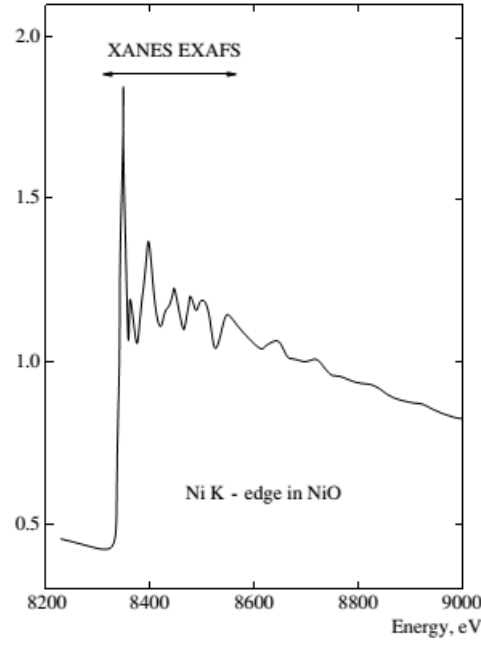
Burada, “ I_0 “ örnek üzerine gelen ışık şiddeti, “ I ” ışığın örnekten geçtikten sonraki şiddetidir. Örnek olarak kullanılan materyal ince metalik bir tabaka ya da fotonların bir

kısmını soğuran bir malzemedir. Kullanılan örnek homojen olmalıdır. X-ışını enerjilerinin uygulandığı bütün maddeler ışığı fotoelektrik etki ile soğurur. Bu süreçte bir X-ışığı Şekil 4.17’de olduğu gibi, atomun çekirdeğe yakın bir seviyesindeki elektron tarafından soğurulur. Bu seviyede bulunan elektronun soğurabilmesi için, enerjisinin gelen x-ışını enerjisine eşit, ya da gelen x-ışını enerjisinden küçük olması gerekir.



Şekil 4.17 XAFS ölçümü soğurma süreci (ESRF tesisi web sitesi 2021)

Uygun enerjili x-ışını fotonunu soğuran elektron, Fermi seviyesi üzerindeki uygun bir boşluğa, son durum olarak yerleşir. Uyarılan fotoelektrona soğurma sürecinde verilen fazla enerji, elektronun atomdan atılmasına neden olur. Yapılan bir XAFS ölçümü ile toplanan bilginin yansıması olarak spektrumun grafiği başlıca iki kısımda incelenir. Bu kısımlar XANES (X-ray Absorption Near-Edge Structure) ve EXAFS (Extended-XAFS)’tır. Şekil 4.18’de Nikel K-soğurma kenarına (1s_3d geçişi) ait XAFS spektrumu, başlıca iki kısım “XANES” ve “EXAFS” bölgesi gösterimi ile birlikte verilmiştir.



Şekil 4.18 Nikel'e (Ni) ait K kenarı (1s_3d) XAFS Spektrumu (ESRF tesisi web sitesi 2021)

Neden XAFS sorusunun çok seçkin yanıtları vardır. Örneğin, deney için oluşturulacak birçok iç/dış koşul ile malzeme hakkındaki çok çeşitli bilgiyi, çekirdeğe yakın elektron seviyelerini de dahil ederek elde etme olasılığı sunması bile önemini anlatmaya yetecektir.

4.4.3.2.1 XAFS Temelli Ölçüm Teknikleri

Günümüzde XAFS deney istasyonlarında kullanılan ölçüm tekniklerinden bazıları şunlardır:

- **Yakın Kenarı X-ışını Soğurma İnce Yapısı (XANES)** (X-ray Absorption Near Edge Structure): XANES bölgesi, XAFS spektrumunun ana soğurma piki civarını inceleyen ve ilgilenilen seviyedeki elektronların x-ışını ile etkileşimine bağlı olarak soğurma şiddetinin artmaya başladığı enerji değerinden yaklaşık 40~50 eV ötesindeki bir menzile kadar uzanan aralıktır. Soğurma sürecinde; çekirdek seviyesi bağlanma enerjisi ile X-

ışını enerjisinin eşit olması sonucu meydana gelen soğurma XANES bölgesi spektrumunu verir. XANES spektrumu, atomun kimyasal özellikleri (duyarlılığı, kimyasal bağ yapısı) ve elektronik yapısı hakkında ayrıntılı şekilde bilgi verir.

- **Genişletilmiş XAFS (Extended EXAFS):** XAFS spektrumunda, soğurma kenarının 400~2000 eV üzerine kadar uzanan bölgenin içerdiği bilgiyi araştırmaya yönelik tekniktir. EXAFS, atomdan dışarı giden fotoelektronların atoma komşu diğer atomlardan tekli olarak saçılmalarını içerir. Soğurma kenarının ötesinde bulunan ince yapı 96 yıl kadar önce Lund'da Siegbahn'ın öğrencileri olan Fricke ve Stenstrom tarafından ölçülmüştür. EXAFS bölgesi, soğuran atomdan ayrılan fotoelektronun, atoma en yakın olan komşu atomların potansiyelinden saçılması ile fotoelektronun, atomdan gelen dalga fonksiyonu ve saçılarak geri gelen dalga fonksiyonlarının girişimi sonucu oluşur. Atomun yapısı, duyarlılığın değiştiği (fazla olduğu) atomlar arası uzaklıklar, çevrede bulunan soğurma atomlarının özelliği, koordinasyon sayıları, ve bölgesel atomik yapı ile ilgili ayrıntılı bilgi verir.

- **Hızlı EXAFS (Q-EXAFS):** Hızlı kimyasal reaksiyonların yaşanabildiği değişken yapıdaki örneklerin çalışılabilmesi için geliştirilmiş bir tekniktir. Örnekte yaşanan zamana dayalı süreçler hakkında, hızlı tarama yapabilen monokromator sistemleri ile daha hızlı bilgi toplamayı mümkün kılmaktadır. Bu sistemlerin kurulumunda, kanal kesikli monokromatorler, taramalar yapmak üzere yerleştirilmiştir. Monokromator enerji taraması gerçekleştirirken soğurma şiddetindeki değişime bağlı olarak, soğurma bölgesini sürekli olarak küçük bir enerji adımı ile tarar. Özellikle katalist çalışmalarında çok başvurulan bir tekniktir.

- **Enerji Dağıtık EXAFS (Energy Dispersive EXAFS (EDE)):** Bu teknik EXAFS daki durgun örnekler üzerine yapılan ölçümlerden farklı olarak, özellikle yavaşça değişim gösteren örnek tipleri için çok uygundur. EXAFS'a göre daha kısa zaman aralığında bilgi toplayabilen bir tekniktir. Bu teknik çerçevesinde, EXAFS ta kullanılan monokromatorler yerine, x-ışını demetinin örnek üzerine odaklanmasını sağlayan, enerjiyi dağıtan, bükümlü kristal monokromatorler kullanılmaktadır. Monokromatörün sahip olduğu büküm, "polikromatör" işlevi görmesine neden olmaktadır. Monokromatörden geçen

ışınlar örneğın arkasında bulunan bir tek boyutlu dedektor üzerine düşerek çok kısa zamanda bir enerji yelpazesinin bilgisi toplanmasını sağlar.

- **Zaman Çözümlemeli XAFS** (Time-Resolved XAFS): Sinkrotron sistemlerinde, standart EXAFS kurulumu çift kristalli monokromatörler kullanılır. Bu monokromatörler istenilen X-ışını enerjisini ayarlamak için sabit durmaktadır. Monokromatörün küçük bir adımını ile bir bilgi noktası elde edilir ve yeni noktası için bilgi toplanıp birleştirilerek spektrum elde edilir. Bu tarama metodu hala en popüler metoddur. Standart EXAFS'tan farklı olarak, özellikle Q-EXAFS tekniğinde kullanılan bu yöntemle monokromatörün sabit hızda hareketi ile çok hızlı bir enerji taraması gerçekleştirilebilmektedir. Tarama zamanı bir dakikanın altında olabildiği gibi iyi bir kurulum sistemi ve uzman kullanıcılar bu süreyi 1 saniyenin de altına çekebilmektedirler.

- **Mikro XAFS:** Mikron boyutlarındaki x-ışını spotu kullanılarak, özellikle bölgesel element bazlı özellikleri (oksidasyon, türleşme vs.) araştırmayı amaçlayan bir tekniktir.

- **MCD, NCD:** Işın kaynağının kutuplanma özelliği kullanılarak, sağa ve sola polarize X-ışınları kullanılarak yapılan spin seçici soğurma spektroskopisi tekniğidir. Elde edilen sağa ve sola polarize XANES spektrumlarının farkı alınarak MCD spektrumu elde edilir. Bu teknik ile elde edilen spektrum örneğın manyetik, elektronik ve kristal yapısı hakkında bilgi taşır. "Sum rules" formülü kullanılarak malzemenin atomik bazda atomik manyetik momentini (yörünge ve spin) hesaplamak mümkündür.

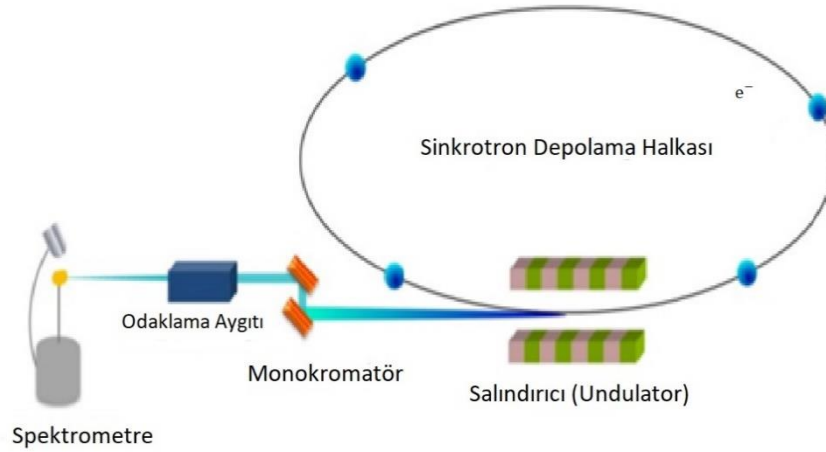
Kullanıcılara daha uygun şartlarla ölçüm imkanı sağlamak adına, iyi bir XAFS deney istasyonu tasarımı için anahtar ihtiyaçlar şunlardır:

- Geniş enerji aralığı (4 ~ 40 keV)
- Yüksek enerji çözünürlüğü ($\Delta E/E \sim 10^{-4}$)
- Foton Akısı $> 10^{12}$ photons/s
- Monokromatör tipi: Si (1 1 1)
- Basit Işın hattı optiğı (Ölçüm tekniğı bazı değışikliklere kolay adaptasyon)
- Değışik deteksiyon modları (Transmission, Floresans, CEY)

- In-situ veya Ex-situ numune ölçüm olanakları sunacak geniş istasyon odası
- İstasyona yakın örnek hazırlama amaçlı kimya laboratuvarı

4.4.3.2.2 X-Işını Demet Hattı Genel Yapısı

Bir X-ışını demet hattında, undulatör veya wiggler magnetten elde edilen yüksek akı ve parlaklık değerlerine sahip x-ışınları monokromatörlerler aracılığı ile istenilen enerji (dalga boyu) aralığı seçilerek ve gerektiği oranında odaklanarak numune üzerine gönderilir. Böyle bir hatta bulunan optik elemanlarının genel yerleşimi ve görünümü Şekil 4.19’da verilmiştir.



Şekil 4.19 Tipik bir X-ışını demet hattındaki temel bileşenlerin şematik görünümü
(Ketenoglu 2019)

4.4.3.2.3 Örnek X-ışını Demet Hattı

X-ışını demet hatlarını bir örnek üzerinden ayrıntılı olarak incelemek üzere ALBA BL-16 NOTOS demet hattı seçilmiştir.

Bu demet hattı, X-ışını soğurma spektroskopisi (XAS) ve X-ışını kırınım (XRD) tekniklerini kullanan bir sert X-ışını demet hattıdır. Aynı örnek konumunda XAS-XRD

ölçümlerinin kombinasyonu ile in-situ süreçlerini incelemek için tasarlanmıştır ancak yeteneği bunlarla sınırlı değildir.

Demet hattında elektronik yapı çalışması için kısa (XAS) ve uzun menzilli (XRD) olmak üzere iki deneysel uç istasyon kurulumu sağlanarak kimya, kataliz, enerji bilimi, nano malzemeler, yoğun madde ve çevre bilimi gibi çeşitli bilimsel disiplinlerin özel araştırma ihtiyaçları karşılanmıştır.

Önceden ayarlanmış veya özel numune ve hedef kurulumlarına izin veren geniş bir tablodan oluşan çok amaçlı bir istasyon ve iki dairesel bir kırınım ölçer istasyonu mevcuttur. Her iki istasyon da XAS (iletim ve floresan modlarında) ve XRD ortak çalışmasına izin vermektedir.

Optik bölgede bulunan üçüncü bir uç istasyon, yüksek hassasiyetli mekanik bileşenleri ve dedektör sistemlerinin performanslarını test etmek ve iyileştirmek için kurulmuştur.

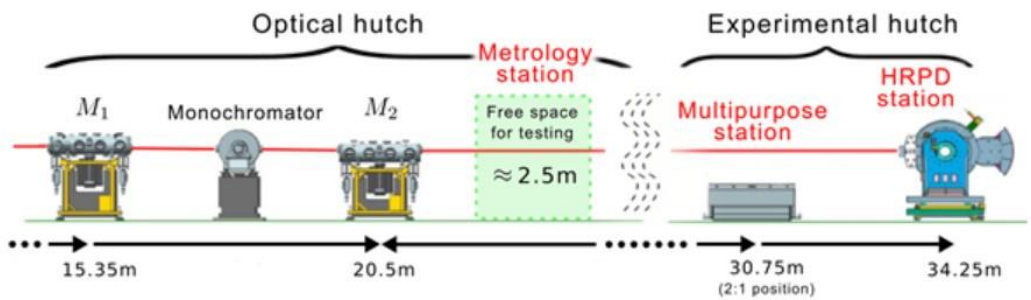
Demet hattı 4.5 - 30 keV arasında enerji değerleri ile çalışmaktadır ve çok çeşitli elementlerin XAS spektrumlarının elde edilmesini sağlamaktadır.

Çizelge 4.10 X-ışını demet hattı teknik özellikleri

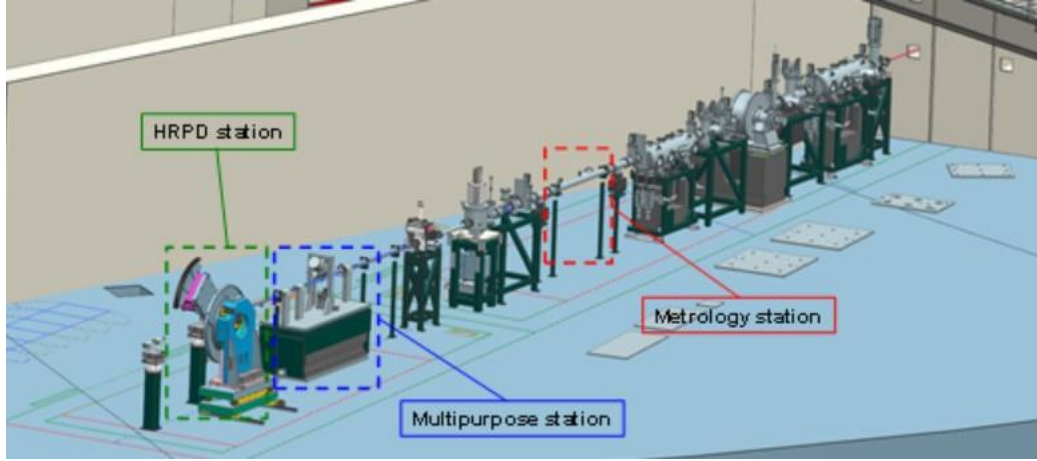
Enerji aralığı	4.9 – 30 keV
Monokromatör	2 set kristalli DCM, Si 111 ve Si 220
Minimum foton akısı	10^{11} ph/s
Örnekteki nokta özellikleri	Nokta boyutu, toroidal (M2) ayna vasıtasıyla deney ihtiyaçlarına göre her iki istasyonda da ayarlanabilir. • 100x100 μm^2'ye kadar çok amaçlı istasyon. • Difraktometre: 100 μm^2 ve 3x1 mm (HxV) arasında.

4.4.3.2.3.1 X-Işını Demet Hattı Deney İstasyonları

- **Çok amaçlı deney istasyonu:** Bu istasyon, XAS ve PD deneyleri ve metrolojik analizler için kurulmuştur. Ana bileşenleri; iletimde XAS ölçümleri için 3 iyon odası, x-ışınları demetine göre 90° çok kanallı SDD, PD ölçümleri için 2D dedektör, örnek konumunda motorlu sahne
- **HRPD-XAS deney istasyonu:** Bu istasyon hem iletim hem de floresan geometrisinde yüksek çözünürlüklü XRD ölçümlerine ve XAS ölçümlerine ayrılmıştır. Ana bileşenler; iki dairesel difraktometre ve 10 kanallı Ge (111) analizörü + analizörsüz tek nokta dedektörü, PD için konuma duyarlı dedektör, iletimde XAS ölçümleri için 3 iyon odası, XAS ölçümleri için 13 elemanlı Si floresan dedektörü.
- **Optik metroloji istasyonu:** Ekipman üzerinde test ölçümleri ve metrolojik çalışmalar yapmak için odaklama aynasından (M2) sonra optik bölmede 2,5 m'lik boş bir alan mevcuttur.



Şekil 4.20 NOTOS X-ışını demet hattı genel yapısı (ALBA tesisi web sitesi 2021)



Şekil 4.21 NOTOS X-ışını demet hattı deney istasyonları (ALBA tesisi web sitesi 2021)

4.4.3.2.4 X-Işını Demet Hatlarının Genel Araştırma Potansiyeli

XAFS'deki araştırma faaliyeti oldukça çeşitlidir ve temel fizikten katalize, malzeme ve çevre bilimine kadar uzanır.

- Düşük Enerji spektroskopisi için; karmaşık malzemeler, yüzeyler, kümeler, atom ve moleküler fizik, astrofizik, kimyasal dinamikler, biyolojik sistemler.
- Soft x-ışını spektroskopisi için; karmaşık malzemeler, manyetik malzemeler, çevre bilimi, ortam basıncında ıslak numuneler, kataliz.
- Sert X-ışını spektroskopisi için; Nükleer fizik (füzyon plazması) tespiti, x-ışınlarının uzaktan tespiti dahil astronomik spektroskopisi ve görüntüleme, demet hattı optik bileşenlerinin sinkrotron tespiti ve testi, x-ışını optik verilerinin ölçümü ve doğrulanması.

4.4.3.3 Kızılötesi (IR) Spektroskopisi ve Mikroskopisi (ISM) Demet Hattı

Kızılötesi spektroskopisi ve mikroskopisi özellikle düşük enerjili ışınım ile katı, sıvı ve gaz malzeme malzeme karaktersizasyonunda özellikle moleküler ölçekte çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Kızılötesi demet hatlarında, yüksek çözünürlükle moleküler yapıların görüntülenmesi ve THz e kadar FTIR aracılığıyla hassas titreşim

spektroskopisinde kullanılmak üzere çok yönlü ve parlak mikroprob elde edilir. IR spektroskopisi ve mikroskopisi ile genel anlamda moleküler yapı tanımlanır ve bu yapılara ait çeşitli soğurum bantlarına sahip spesifik titreşim spektrumları elde edilir ve ölçülür. (Z. Nergiz 2015).

Kızılötesi demet hatlarında deneyler, biyomedikal uygulamalardan fiziksel-kimyasal araştırmalara kadar uzanır. Kızılötesi spektroskopisi, günümüzde hemen hemen her numunenin kimyasal bileşikleri hakkında önemli bilgiler elde etmek için hızlı bir araç olarak kullanılan, bilim adamları için mevcut olan en güçlü analitik teknikler arasındadır.

4.4.3.3.1 Kızılötesi Demet Hatlarının Genel Yapısı ve Karakteristikleri

IR mikrospektroskopisi, tahribatsız ve sinkrotron tesislerinde büyük ilgi gören titreşimsel bir tekniktir. Bir mikroskobun uzaysal çözünürlüğünü IR spektrometrenin yüksek kimyasal duyarlılığı ile birleştirir. SR-IR kaynağı geniş spektral emisyon ve dalga boyu özelliklerine ek olarak, kızılötesi sinkrotron ışınımı kaynakları, geleneksel kaynaklar tarafından elde edilemeyen bir sinyal/gürültü oranı ile parlaklık/aydınlıklarında (yaklaşık 1000 kat daha parlak) avantajlar sağlar. 2.5-25 μm 'lik ($400 - 4000 \text{ cm}^{-1}$) orta kızılötesi bölge, mikroskobik ölçekte çok bilgilendiricidir (birkaç on mikron çözünürlük). Bunun başlıca nedeni, mevcut moleküler grupların çoğunun titreşim enerjilerinin bu spektral aralıkta olmasıdır.

Kızılötesi ışınım, katı ve gaz örnekleri spektroskopisi (FTIR-Fourier Transform Infrared Spektroskopisi) ve mikrospektroskopisi (μ -FTIR) yoluyla analiz etmek ve karakterize etmek için araştırma ve endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Uygulaması ve hizalaması daha kolay olduğu için, kızılötesi ışın demetlerinin çoğu, başlangıç aşamasında demet hattının dışındaki dikey ve yatay kaynak emisyonunu yönlendirmek ve odaklamak için düzlem ve toroidal (eliptik) şekilli ayna kombinasyonunu kullanır. Genellikle demet FTIR spektrometresine doğru bağlanabilmesi için silindirik veya parabolik aynalar sayesinde yönlendirilir ve yayılır. Ancak, böyle bir optimal kurulum hem toroid ayna hem de dairesel ayna tarafından üretilen optik sapmalar nedeniyle kaynağın şeklinde bozuk

görüntüler oluşturabilir. Bu durum, kızılötesi spektrometre ve mikroskopla kaynak tarafından yayılan fotonların optimum olmayan bir şekilde bağlanmasıyla sonuçlanır.

4.4.3.3.2 Örnek IR Demet Hattı

Kızılötesi demet hatlarını bir örnek üzerinden ayrıntılı olarak incelemek üzere ALBA BL-01 MIRAS demet hattı seçilmiştir.

MIRAS, Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektroskopisi ve mikroskopisi demet hattıdır. FTIR, malzemelerin kimyasal bileşimini tanımlamak için kullanılır.

Bu demet hattı, 2.5-14 μm arasındaki dalga boylarındaki araştırmalar için optimize edilmiş bir spektral bölge ile yaklaşık 1 μm ile $\sim 100 \mu\text{m}$ arasında bir dalga boyu aralığını kapsayan kızılötesi spektrometre ve mikroskop demet hattıdır. İletim, yansıma, zayıflatılmış toplam yansıma (ATR) ve numune analizi teknikleri kullanılmaktadır.

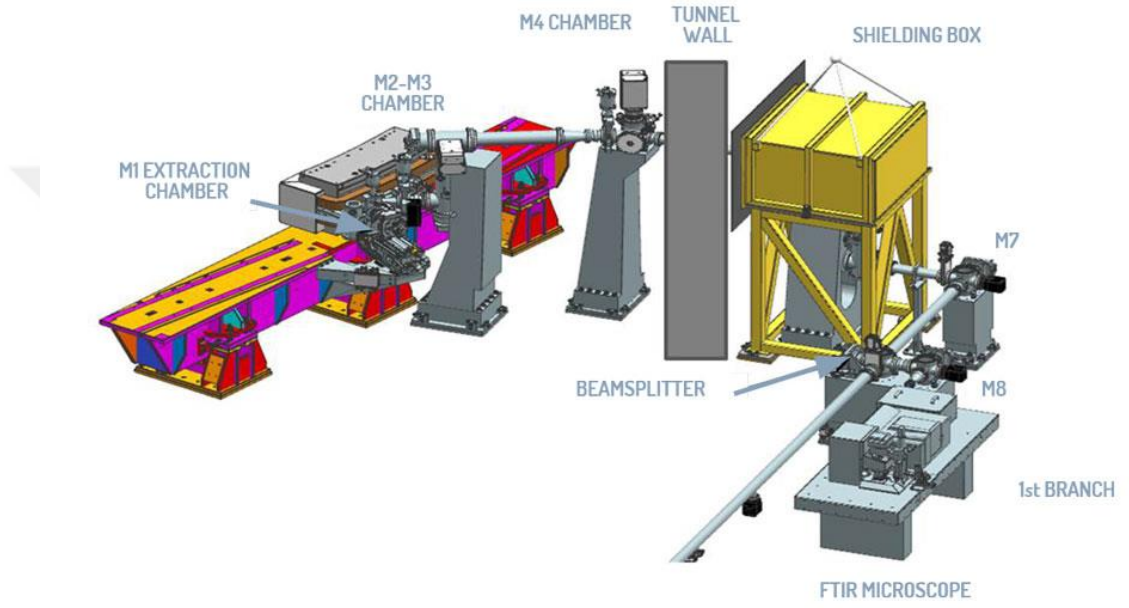
Çizelge 4.11 MIRAS demet hattı teknik özellikleri

Kaynak	Eğici magnet - 43 mrad yatay ve 25.17 mrad dikey açılma açısına sahip eğici magnetin iki ana ışınım kaynağından, kenar ve sabit alandan tam yansıması.
Enerji aralığı	$\sim 1.2 \mu\text{m}$ to $100 \mu\text{m}$
Enerji çözünürlüğü	0.2 cm^{-1} , (0.012 meV) ve üzeri (16 cm^{-1} 'e kadar)

4.4.3.3.2.1 IR Demet Hattı Düzeni

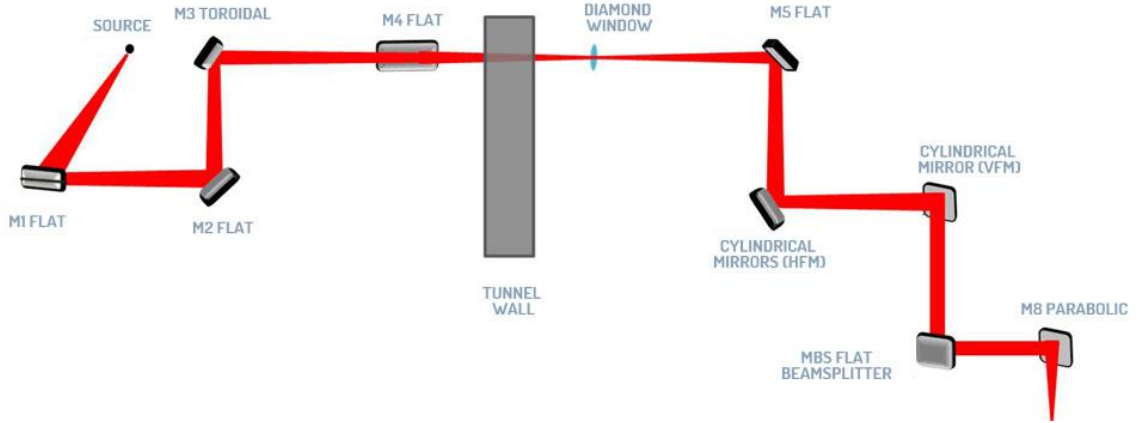
Eğici (bending) magnete dayalı kızılötesi ışınım 43 (Yatay) x 25.17 (Düşey) mrad^2 açılma açısına izin vererek bir dipol odacığından geçer ve yatay olarak yerleştirilmiş bir düz ayna kullanılarak yatay düzlemde ilerler.

Demet hattının optik düzeni, IR ışınım demetini biri ışının kenar radyasyonunu içeren iki sektöre ayırma seçeneğini içerir. Bu düzenleme demetin aynı anda farklı uç istasyonlarda kullanılmasını sağlayacaktır. Deneysel kabin ve iletim optiği, IR demet hattının ilerisi için olası güncelleme adımları dikkate alınarak düzenlenmiştir.



Şekil 4.22 MIRAS IR demet hattı şematik görünümü (ALBA tesisi web sitesi 2021)

"Kirişin yatay, sonra dikey olarak yukarı sapması" çıkarma geometrisini takiben, demeti tünel duvarı boyunca yatay olarak odaklayan toroidal bir ayna M3. İlk odaktan sonra, demet iki silindirik ayna kullanılarak hizalanır.



Şekil 4.23 MIRAS IR demet hattı optik düzeni (ALBA tesisi web sitesi 2021)

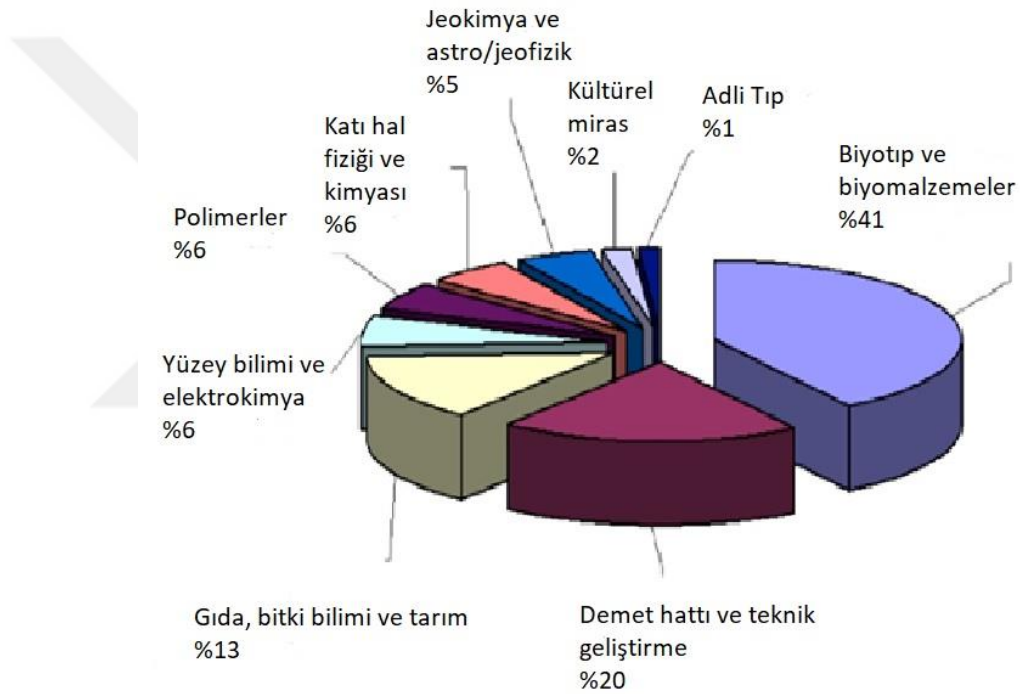
4.4.3.3 ISM Hattının Genel Araştırma Potansiyeli

Kırlzötesi demet hatlarında uygulamalar, yaşam ve malzeme bilimi, biyokimya, mikroanaliz, polimerler, arkeoloji, jeoloji, hücre biyolojisi, biyomedikal teşhis, farmasötik ve ilaç tasarımı, çevre bilimi ve adli tıp dahil olmak üzere çok çeşitli araştırma alanlarını kapsar.

- Biyoloji ve biyotıp alanında; tek hücreler, insan ve hayvan biyolojik dokuları, bakteriyel tanımlama vb.
- Arkeoloji alanında; eski el yazmaları, insan kalıntıları, mumyalar ve eski kozmetikler vb. Jeoloji alanında; mineraller, arayüzler, arkeolojik mineraller, toprak vb.
- İnce Filmler; İnce filmlerin, koruma katmanlarının vb. analizi ve kimyasal görüntülemesi.
- Farmasötik; farmasötik ürünlerin yüksek basınç analizi.

Ayrıca; IR demet hatları ile yeni katalizörlerin analizi ve geliştirilmesi, ileri malzeme çalışmaları, kanser taraması ve tıbbi teşhis, endüstriyel açıdan önemli polimer yapıların kimyasal olarak görüntülenmesi, biyomineralizasyon, işlenmiş gıda ürünlerinin analizi ve hava ve su kaynaklı kirleticilerin araştırılması üzerine çalışmalar mümkün olmaktadır.

Dünyada mevcut sinkrotron ışınımı tesislerinde yer alan IR demet hatlarının genel kullanım alanları Şekil 4.24’de verilmektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere IR sinkrotron ışınımı ile biyomalzemelerden biyotıp, gıda ve bitki biliminden yüzey bilimi ve elektrokimyaya, katı hal fiziğinden polimerlere, Jeofizikten jeokimyaya, kültürel mirastan adli tıp araştırmaşarın kadar çok geniş bir spektrumda Ar-Ge çalışmaları mümkün olmaktadır. Bu nedenle günümüzde, sinkrotron ışınımı tesislerinde IR demet hatları olmazsa olmaz niteliktedir (SESAME web sitesi 2019).



Şekil 4.24 Kızılötesi demet hatlarının araştırma potansiyeli (SESAME tesisi web sitesi 2020)

5. SONUÇ ve TARTIŞMA

Tez çalışması kapsamında parçacık hızlandırıcılarına dayalı ışınım kaynakları, ışınım nesilleri, ışınım karakteristikleri, ışınım demet hatları, ışınım kullanım teknikleri ve sinkrotron ışınımı araştırma potansiyeli kapsamlı şekilde irdelenmiştir.

Bu kapsamda, öncelikle sinkrotron tipi hızlandırıcının fiziği, ana bileşenleri, sinkrotron ışınımının fiziği, ışınım ana parametreleri ve temel karakteristikleri irdelenmiş, ışınımın kullanıldığı ana konu başlıkları ve kullanım teknikleri belirlenmiştir.

Sinkrotron ışınımı, düşük yayınımlı ($< 20 \text{ nm.rad}$) elektron demetlerinin dipol, undulator ve wiggler tipi magnetlerden geçirilmesi ile üretilmektedir. Sinkrotron ışınımı kızılötesinden sert X-ışınları bölgesine kadar (birkaç eV'dan 50-100 keV'e kadar) uzanan geniş enerji spektrumu, yüksek akı, parlaklık ve aydınlık değerleri, kısa atma süreleri, deneysel amaçla ayarlanabilen koherent ve monokromatik olabilme ve kutuplanabilirlik olma özellikleri ile günümüzde maddenin atomik ve moleküler düzeyde gerçekleştirilen fiziksel ve kimyasal analizlerinde vazgeçilmez bir araç niteliğindedir.

Sinkrotron ışınımının yansıma, kırınım ve saçılma özelliklerinin ilgili spektroskopik, mikroskopik ve görüntüleme teknikleri ile birleştirilmesi ile disiplinler arası çok sayıda alanda ileri düzeyli Ar-Ge çalışmaları yapmak, buradan üretilen bilginin teknolojiye dönüştürülmesi ile de katma değeri yüksek ürünlerin üretimi sağlanmaktadır. Bu nedenle bilim ve teknolojik göstergelerde ön sıralarda yer alan tüm ülkelerde en az bir adet sinkrotron ışınımı tesisi yer almaktadır. Dünyadayaklaşık 25 ülkede yaklaşık 50 sinkrotron ışınımı tesisi çalışır durumdadır.

3. nesil sinkrotron ışınım tesislerinde kritik ışınım enerjisinin 10 keV civarında olması, ışınım spektrumunun yakın kızılötesi bölgeden sert X-ışını bölgesine kadar uzanması

anlamına gelmektedir. Tez kapsamında incelenen 3. nesil sinkrotron ışınımı tesisleri incelendiğinde elektron demet enerjisinin 1.7 GeV'den (BESSY-II) 3 GeV'e (ALBA, DIAMOND ve ILSF), ana sinkrotron halkalarının da 133 m'den (SESAME) 561 m'ye (DIAMOND) kadar uzandığı görülmektedir.

Sinkrotron ışınımı tesisleri ağırlıklı olarak 3 GeV ve civarı enerjilerde kurulmuş olmakla birlikte değişik amaçlarla 1-12 GeV enerji aralığında kurulmuş olan sinkrotron ışınımı tesisleri de mevcuttur. Tez çalışması kapsamında incelenmek üzere örnek sinkrotron ışınımı tesisleri olarak seçilen ALBA (İspanya), SOLEIL (Fransa), DIAMOND, (İngiltere), BESSY-II (Almanya), ELETTRA (İtalya), ILSF (İran) ve SESAME (Ürdün) sinkrotron ışınımı tesisleri hızlandırıcı yapıları ve ana parametreleri, ışınım demet hatları ve karaktersitikleri, ışınım kullanım alanları ve teknikleri açılarından incelenmiştir.

Yapılan incelemeler sonucunda, sinkrotron ışınımının günümüzde başta malzeme bilimi ve karakterizasyonu olmak üzere nanoteknoloji, manyetik malzemeler, ince film teknolojisi, biyoteknoloji, enerji, savunma, uzay, nükleer, biyotıp, farmasötik ve ilaç tasarımı, genetik, biyolojik sistemler ve biyomalzemeler, yüzey ve arayüzey iyileştirme, madencilik, mikro/nanofabrikasyon, moleküler analiz, polimer kimyası, yüzey bilimi, astro ve jeofizik, kimyasal dinamikler, biyokimya, mikroanaliz, polimerler, arkeoloji, jeoloji, hücre biyolojisi, biyomedikal teşhis, çevre bilimi, adli tıp, polimer yapıların kimyasal olarak görüntülenmesi, biyomineralizasyon, işlenmiş gıda ürünlerinin analizi ve hava ve su kaynaklı kirleticilerin araştırılması, çevre bilimi, astronomik spektroskopi ve görüntüleme, demet hattı optik bileşenlerinin teşhisi ve testi, X-ışını optik verilerinin ölçümü ve doğrulanması alanlarında yapılan araştırma ve teknoloji geliştirme (Ar-Ge) çalışmalarında yoğun olarak kullanıldığı tespit edilmiştir.

Sinkrotron ışınımının kullanıldığı ana deneysel tekniklerin açılımları “Kısaltmalar” başlığı altında verilen EXAFS, FTIR, HAXPES, ISM, IXS, MAD, RIXS SAD, SAXS, WAXS, XAS, XAFS, XANES, XES, XRD, XRF ve XMCD'dir.

Bu inceleme ve tespitlerin ardından, THM projesi kapsamında önerilen, 3 GeV enerjiye dayalı olarak 3. nesil sinkrotron ışıını tesisi olarak önerilen ve 2015 yılında teknik tasarımı genel olarak ortaya konulmuş bulunan Türk Sinkrotron Işıını Tesisi'nin (TURKAY) elektron demeti yapısı irdelenmiştir. Bu kapsamda ön enerji yükseltici (booster) için elektron demeti magneto-optik analizi ve bu kapsamda sinkrotron temel hücre yapısı, betatron fonksiyonları ve hücre elemanlarının davranışı OPA ve MADX yazılımları yardımıyla analiz edilerek düşük emittanslı bir elektron demetinin elde edilebileceği gösterilmiştir.

Ardından, 2015 yılında tamamlanan TURKAY Teknik Tasarım raporunda öngörülen ilk ışıını demet hatlarının Makromoleküler Kristalografi (MX), X-Işıını Soğurmalı İnce Yapı (XAFS), Kızılötesi (IR) Spektroskopi ve Mikroskopi (ISM), Yumuşak X-Işıını, Esnek Olmayan Sert X-Işıını Saçılması, Manyetik Malzemeler İçin Röntgen Görüntüleme, X-Işıını Kırınımı (XRD), Yüksek Basınçlı Toz Kırınımı, Küçük Açılı X-Işıını Saçılması (SAXS) ve X-Işıını Optiği ve Enstrümantasyon Demet Hattı olarak belirlendiği tespiti yapıldıktan sonra bu demet hatlarından ilk üçü kapsamlı olarak ele alınmış, ışıını karakteristikleri, ışıını kullanım alanları ve teknikleri tanımlanmıştır.

TURKAY için önerilen kızılötesi (IR) ve X-ışıını demet hatlarının genel yapısı ve optik elemanları hakkında bilgi vermesi açısından, 3 GeV enerjili ALBA sinkrotron ışıını tesisinin kızılötesi (IR) demet hatlarından MIRAS demet hattı ve X-ışıını demet hatlarından NOTOS demet hattı detaylı şekilde irdelenmiştir.

Yapılan tüm inceleme ve analizler ışığında, ülkemizde ileri düzeyli Ar-Ge çalışmalarında hızlandırıcıya dayalı ışıını kaynaklarının kullanılması açısından kurulumu süren 4. nesil SEL tesisi TARLA'nın tamamlanması ve planlaması yapılmış bulunan 3. nesil sinkrotron ışıını tesisi TURKAY'ın kurulması büyük önem taşımaktadır. Tez kapsamında yapılan incelemeler, tespitler ve önerilerin bu açıdan yararlı olacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- ALBA Web Sayfası. 2020. Web Sitesi: <https://www.albasynchrotron.es/en>, Erişim tarihi: 12.05.2020
- Akdoğan, E., Nergiz, Z. and Yavaş, Ö. 2015. Booster Ring Design for TAC Synchrotron Radiation Facility (TURKAY). *Balkan Physics Letters*, 23, pp. 23–29.
- Akdoğan, E., Nergiz, Z. and Yavaş, Ö. 2016. Optimization and Upgrade Parameters of Booster Ring For TAC Synchrotron Radiation Facility. *Balkan Physics Letters*, 24 (241021), pp. 174–181.
- Akdoğan, E., Izzo S. J. and Yavaş, Ö. 2021. Magnet Engineering Studies on Booster Ring of TAC-TURKAY Synchrotron Radiation Facility. *Moscow University Physics Bulletin*, Vol. 76, No. 5, pp. 402–411 (DOI: 10.3103/S0027134921050027).
- Akdoğan, E. 2021, THM Sinkrotron Işınımı Tesisinin Ön Hızlandırıcısının Optimizasyonu ve Öngörülen Dipol ve Kuadrupol Magnetlerin Tasarımı, Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 138, Ankara
- Aksoy, A., Karşlı, Ö., Aydın, A., Kaya, Ç., Ketenoğlu, B., Ketenoğlu, D. ve Yavaş, Ö. 2018. Current Status of Turkish Accelerator and Radiation Laboratory in Ankara, The TARLA Facility *Canadian Journal of Physics*, 96; 837–842.
- Attwood, D. 2007. *Synchrotron Radiation for Materials Science Applications, Introduction to Synchrotron Radiation*, EE290F, UC Berkeley, USA
- Baldwin, G.C. and Kerst, D.W. Origin of Synchrotron Radiation, *Physics Today* 28, 1, 9 (1975)
- BESSY II Web Sayfası. 2020. Web Sitesi: <https://www.helmholtz-berlin.de/>, Erişim tarihi: 15.05.2020
- CERN Web Sayfası. 2020. Web Sitesi: <https://home.cern/>, Erişim Tarihi: 07.06.2020.
- Deniau, L., Grote, H., Roy, G. and Schmidt, F. 2019. *The MAD-X Program User's Reference Manual*. v.5.05.02.
- DIAMOND Web Sayfası. 2020. Web Sitesi: <https://diamond.ac.uk/>, Erişim tarihi: 10.05.2020
- Duke, P. J. *Synchrotron Radiation: Production and Properties*; Oxford Press: Oxford, 2000.
- ELETTRA Web Sayfa. 2020. Web Sitesi: <http://www.elettra.eu/lightsources/elettra.html>, Erişim tarihi: 21.07.2020

Howells, M.R. ve Kincaid, B.M. 1992. The Properties of Undulator Radiation. 2-8, 25 26, 12-19, 31-33, Lawrence Berkeley Laboratory University of California.

ILSF Web Sayfası. 2021. Web Sitesi: <http://ilsf.ipm.ac.ir/>, Erişim tarihi: 08.06.2021

Jain, A. K. 1997. Basic Theory of Magnets. CERN Accelerator School: Measurement and Alignment of Accelerator and Detector Magnets.

Lienard, A. 1898, L'Eclairage Elec. 16, 5

Light Sources Web Sayfası. 2020. Web Sitesi: <https://lightsources.org/>, Erişim tarihi: 10.05.2020

Marks, N. 2004. Conventional Magnets for Accelerators. In CERN Accelerator School. (DOI: 10.1002/hed.24192).

Mills, D. M. 2002. Third-Generation Hard X-Ray Synchrotron Radiation Sources: Source Properties, Optics, and Experimental Techniques. Wiley-New York, NY 2002.

Nergiz, Z., Aksakal, H., Aksoy, A., Kaya, Ç. and Kurtuluş Öztürk, Ö. 2014. The status of Turkish synchrotron radiation source machine design. IPAC 2014: Proceedings of the 5th International Particle Accelerator Conference.

Nergiz, Z. and Aksoy, A. 2015. Low emittance lattice for the storage ring of the Turkish Light Source Facility TURKAY. Chinese Physics C, 39(6), pp. 3–7. (DOI: 10.1088/1674-1137/39/6/067002).

Nergiz, Z., Kurtulus Öztürk, Ö., Aksakal, H., Aksoy, A., Kazancı, E., Tapan, İ., Koçak, F., Sayers, Z. and İde, S. 2015. THM Sinkrotron Isınımı Tesisi Teknik Tasarım Raporu (TURKAY). İç rapor TAC-SR-2015-02.

Nergiz, Z. and Aksoy, A. 2017. Injector of the Turkish light source facility TURKAY. Nuclear Science and Techniques. (DOI: 10.1007/s41365-017-0306-8).

SESAME Web Sayfası. 2021. Web Sitesi: <http://www.sesame.org.jo/>, Erişim tarihi: 05.06.2021

Shaftan, T. 2018. Synchrotron Radiation (<https://www.bnl.gov/ps/userguide/lectures/>).

Streun, A. 2012. OPA Simulation Code (3.39). <https://ados.web.psi.ch/opa/opa.pdf>, Erişim Tarihi: 04.11.2020.

TARLA Web Sayfası. 2020. Web Sitesi: <https://tarla.org.tr/>. Erişim Tarihi: 25.08.2020

TAC Web Sayfası. 2021. Web Sitesi: <http://tac.en.ankara.edu.tr/>. Erişim Tarihi: 11.10.2021

THM Web Sayfası. 2021. Web Sitesi: <http://thm.ankara.edu.tr/>. Erişim Tarihi: 25.08.2021

Turner, S. 1994. CAS–CERN Accelerator School: Fifth General Accelerator Physics Course. Vol. I, Geneva, 49-60, 93-95, 289-291, Finland.

Wiedemann, H. 1999. Particle Accelerator Physics I. Particle Accelerator Physics I. (DOI: 10.1007/978-3-662-03827-7).

Wiedemann, H. 2007. Particle accelerator physics: Third edition. In Particle Accelerator Physics: Third Edition. (DOI: 10.1007/978-3-540-49045-6).

Wiedemann, H. 2003. Synchrotron Radiation. Particle Accelerator Physics. Advanced Texts in Physics. (DOI: 10.1007/978-3-662-05034-7_20).

Wille, K. 1996. The Physics of Particle Accelerators An Introduction. Oxford University Press.

Wille, K. 1998. Introduction to insertion devices, In: CAS–CERN Accelerator School: Synchrotron radiation and free electron lasers, Turner, S. Grenoble, 61-73, France.

Winick, H. 1995. Synchrotron Radiation Sources: A Primer. World Scientific, NewYork.

Womersley, J. 2017. Applications of Particle Accelerators. ICFA Seminar.

Yavaş, Ö. 2016. Turkish Accelerator Center Project: The Results of 3rd Stage and Vision of the Project, Balkan Physics Letters, 24,241023; 191-202.

Yavaş, Ö. 2018. Ankara Üniversitesi, Fizik Müh. Böl. Parçacık Hızlandırıcıları Ders Notları, 13.Ders (FZM443), <https://acikders.ankara.edu.tr/course/view.php?id=3229>).

Yavas, Ö. 2019. The Structure of Magnetic Lattice and Dipole Magnets of TURKAY Booster Ring. VII. Ulusal Parçacık Hızlandırıcıları ve Uygulamaları Kongresi (UPHUK-VII).