

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

**THM SİNKROTRON IŞINIMI TESİSİNİN ÖN HIZLANDIRICISININ
OPTİMİZASYONU VE ÖNGÖRÜLEN DİPOL VE KUADRUPOL
MAGNETLERİN TASARIMI**

Ender AKDOĞAN

FİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ANKARA
2021**

Her hakkı saklıdır

ÖZET

Doktora Tezi

THM SİNKROTRON IŞINIMI TESİSİNİN ÖN HIZLANDIRICISININ OPTİMİZASYONU VE
ÖNGÖRÜLEN DİPOL VE KUADRUPOL MAGNETLERİN TASARIMI

Ender AKDOĞAN

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ömer YAVAŞ

Bu çalışmanın ilk kısmında sinkrotron ışınımının (SI) fiziği ve hızlandırıcıya dayalı ışınım nesilleri incelenmiş, ardından sinkrotron ışınımı ile ilgili fiziksel kavramlar tanıtılarak ışınımın ana karakteristikleri ve parametreleri konusunda bilgiler verilmiştir. Daha sonra sinkrotron tipi hızlandırıcılarda demet optiğine değinilerek ihtiyaç duyulan magneto-optik örgülerin genel yapısı açıklanmış ve bir sinkrotronda kullanılan değişik tipte magnetlerin fiziği ele alınmıştır. Sinkrotron ışınımı tesislerinde ana halka öncesi enjeksiyon amacıyla kullanılması gerekli olan ön hızlandırıcı (booster) yapı için küçük ve büyük halka yaklaşımları ve bunların avantaj ve dezavantajları tartışılmıştır. Bu bilgiler ışığında Türk Hızlandırıcı Merkezi (THM) projesi kapsamında önerilen Sinkrotron Işınımı Tesisinin (TURKAY) yapısı ve öngörülen ön hızlandırıcı halka yapıları detaylandırılarak, küçük ön hızlandırıcı halka optimizasyonu ve öngörülen bütünleşik sekstupol/kuadrupol magnet (dört ve altı kutup etkileri tek yapıda) ve dipol magnet tasarımlarına tüm detaylarıyla yer verilmiştir. Ön hızlandırıcı sinkrotron halkası tasarımı için OPA ve MADX kodları, magnetlerin tasarımları için POISSON SUPERFISH, CREO, COMSOL ve RADIA benzetim yazılımları kullanılmış ve sonuçlar grafik olarak sunulmuştur. Daha sonra, Argonne Ulusal Laboratuvarı'nda (USA), üretimi yapılmış bir düzeltici magnet üzerinde, magnet kalitesi, alan şiddeti ölçümleri ve hesaplama yöntemlerine ilişkin tüm süreci içeren çalışmalar APS-U projesi kapsamında yapılarak, sonuçları tez içerisinde sunulmuştur. Bu çalışma, önerilen THM-TURKAY tesisi için magnet yapılarının belirlenmesi, magnetik örgünün daha işlevsel olarak oluşturulabilmesi ve kullanılması, öngörülen değişik tipte magnetlerin detaylı tasarımı ve tanımlanması açısından tesisin kurulumu aşamasına doğrudan katkı sunacak önemli sonuçlar içermektedir.

Aralık 2021, 130 sayfa

Anahtar Kelimeler: Parçacık hızlandırıcıları, sinkrotron ışınımı, ön hızlandırıcı, dipol magnet, sekstupol/kuadrupol magnet, düzeltici magnet, TURKAY, THM

ABSTRACT

Ph. D. Thesis

OPTIMIZATION OF THE BOOSTER RING OF THE TAC SYNCHROTRON RADIATION FACILITY AND DESIGN STUDIES OF THE PROPOSED DIPOLE AND QUADRUPOLE MAGNETS

Ender AKDOĞAN

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

Supervisor: Prof. Dr. Ömer YAVAŞ

In this study, the physics of synchrotron radiation (SR) and ray source generations are examined, then physical concepts related to synchrotron radiation are introduced and information about the main parameters of radiation is given. Information on beam optics of charged particles was shared and information was given on the physics of magnets used in a synchrotron ring in accelerator structures. Scientific and technological uses of synchrotron radiation are defined. By mentioning the studies on small and large booster ring approaches used in the accelerator facilities, the structure of the TURKAY facility, detailed booster structures, small pre-accelerator ring optimization and envisaged integrated sextupole/quadrupole magnet (four and six pole effects in one structure) and dipole magnet designs are included in all details. In this frame, OPA and MADX codes were used for the pre-accelerator synchrotron ring design, POISSON SUPERFISH, CREO, COMSOL and RADIA simulation softwares were used for the design of the magnets, and the results were presented by graphics. In addition, all operational tests were carried out to determine the field strength and field quality in the APS-U Magnet Measurement Laboratory, which was established in April 2019 within the scope of the APS-U project at the Argonne National Laboratory (ANL, US). The results have been presented. With this study, important results that will directly contribute to the installation phase of the facility in terms of determining the magnet structures for the proposed THM-TURKAY facility, creating and using the magnetic lattice more effectively, detailed design and definition of the various types of magnets foreseen have been revealed.

December 2021, 130 pages

Key Words: Particle accelerators, synchrotron radiation, booster ring, dipole magnet, sextupole/quadrupole magnet, corrector magnet, TURKAY, TAC

TEŞEKKÜR

Yürütücülüğünü yaptığı Türk Hızlandırıcı Merkezi (THM) projesi kapsamında yapılan çalışmalar çerçevesinde TARLA ve TURKAY gibi ışınlam tesislerinin ülkemiz gündemine girmesine önayak olan, öngörülerde bulunarak THM-TURKAY tesisini konu alan bir doktora çalışması yapmam konusunda cesaretlendirici ve yönlendirici rol oynayan ve çalışmalarımın her aşamasında desteğini yanımda hissettiğim tez danışmanım, değerli hocam, Sayın Prof. Dr. Ömer YAVAŞ'a, Tez izleme komitesinde yer alarak fikir ve önerileri ile çalışmalarımın gelişimine katkıda bulunan hocalarım, Sayın Doç. Dr. Levent SELBUZ ve Sayın Doç. Dr. Zafer NERGİZ'e, ANL'deki çalışmalara katılabilmeme yardımcı olan ve orada bulunduğum süre zarfında her konuda yardımlarını esirgemeyen, Sayın Prof. Dr. Ercan E. ALP'e ve ANL'de bulunduğum süre zarfında laboratuvarın tüm imkânlarından yararlanma fırsatını sağlayan Sayın J. Z. XU'a, laboratuvar içerisinde her sorumu sabır ve tevazu ile karşılayarak, çok değerli bilgilerini esirgemeyen, Sayın A. JAIN ve Sayın C. DOOSE'a, çalışmamızın içerisinde, özel zaman ayırarak yer alan, Türkiye'ye döndükten sonra da iletişimi kesmeyerek özverisini gösteren, değerli dostum, Sayın S. J. IZZO'ya ve diğer tüm laboratuvar çalışanlarına ve APS-ASD (Accelerator Operations and Physics) ekibine gösterdikleri samimiyet ve misafirperverlik için sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Kişisel gelişimimi her daim destekleyen, 2012 yılı başından itibaren görevimi sürdürdüğüm Türk Patent ve Marka Kurumu'nun değerli Başkanı Sayın Prof. Dr. Habip ASAN'a ve bu süreçte bağlı bulunduğum tüm Daire Başkanları'na teşekkürlerimi sunarım.

Yoğun çalışmalarım sırasında sabır gösterdiği ve bana katlandığı için değerli eşime, her daim bana güç ve motivasyon sağlayan dünyalar tatlısı kızım Defne ve oğlum Mete'ye, annelik ve babalık kavramlarının çitasını oldukça yükseğe koyduğunu baba olunca anladığım, tüm gayeleri kardeşim ve benim iyi eğitim almamız olan çok değerli anne ve babama, varlığıyla güç veren çok değerli kardeşime, her zaman saygı ve övgüyle andığım, cesaret abidem, 2009 yılında hayata veda eden sevgili dedeme ve neşesini ve güler yüzünü hep özlediğim, ikinci annem, muhterem anneanneme derin minnet ve şükran duygularımı sunarım.

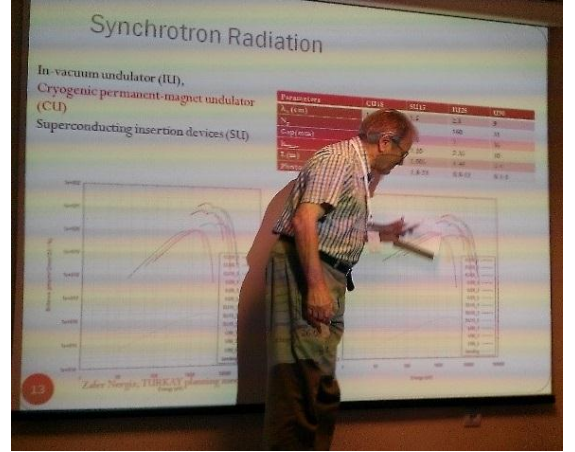
Tez çalışmalarım, TÜBİTAK'ın 2214-A Yurt Dışı Doktora Sırası Araştırma Burs Programı, 2018 yılı 1. Dönem kapsamında sağlanan destekle tamamlanmış olup (Başvuru No: 1059B141800523), sağladığı destekler ve özellikle ABD'de bulunduğum süre zarfında iletişim konusunda gösterdikleri özveri için tüm Bilim İnsanı Destekleme Daire Başkanlığı'na (BİDEB) teşekkürü borç bilirim.

Ender AKDOĞAN
Ankara, Aralık 2021

Değerli babam Vedat AKDOĞAN'ın anısına

&

*Yeryüzündeki tüm çocuklara, onların gülüşlerine
ve umut dolu bakışlarına ithaf ediyorum.*



Prof. Dr. Helmut Wiedemann (1938-2020)

*Türk Hızlandırıcı Merkezi Projesi
Uluslararası Bilimsel Danışma Komitesi (ISAC) Üyesi
HTE, Gölbaşı, Ankara (2013)
TURKAY çalışmaları anısına, saygılarımla...*

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAY SAYFASI

ETİK	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR.....	4
SİMGELER DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	5
2.1 Parçacık Hızlandırıcısı - Işınım İlişkisi.....	5
2.2 Hızlandırıcıya Dayalı Işınım Kaynakları.....	7
2.3 Sinkrotron Işınımı Tesislerinin Yapısı.....	10
2.4 Sinkrotron Işınımının Fiziği ve Temel Parametreleri.....	10
2.4.1 Compton ışıması	13
2.4.2 Poynting vektörü	14
2.5 Sinkrotron Halkasında Kullanılan Magnetler	16
2.5.1 Yüklü parçacık demetlerinin manyeto-optiği	16
2.5.2 Yüklü parçacıkların manyetik alan içerisindeki hareketi ve magnet etkileri	19
2.5.3 Dipol magnet.....	21
2.5.4 Kuadropol magnet	25
2.5.5 Sekstupol magnet	28
2.5.6 Eklenti aygıtları (Insertion devices (ID))	30
2.6 Hızlandırıcılarda Kullanılan Magnetlerin Fiziği	33
2.6.1 Manyetik alan yüzey ilişkisi	35
2.6.2 Magnetlerin diğer bileşenlerle ilişkisi ve tasarım gereksinimleri	37
2.6.3 Magnetlerin performans ihtiyaçları.....	38
2.7 Dünyadaki SI Tesisleri ve Kullanım Alanları	39
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	41

4. BULGULAR	44
4.1 THM-SI Tesisinin Yapısı.....	44
4.1.1 THM-SI tesisinin araştırma potansiyeli ve benzerleri arasındaki yeri	45
4.2 THM-SI Tesisi Linak Ön Hızlandırıcısı	47
4.3 THM-SI Ön Hızlandırıcı Halkası (Booster)	48
4.3.1 Uzun ön hızlandırıcı halka seçeneği	49
4.3.2 Kısa ön hızlandırıcı halka seçeneği	50
4.3.2.1 THM-SI tesisi kısa ön hızlandırıcısının manyetik örgü tasarımı	51
4.3.2.2 THM-SI tesisi için tasarlanan kısa ön hızlandırıcı halkadaki enerji artışının etkileri	54
4.4 THM-SI Tesisi Ana Halkası (Main Ring).....	57
4.4.1 THM-SI tesisi ana halkasındaki magnet ihtiyacı.....	60
4.5 THM-SI Tesisi Ön Hızlandırıcı Halkası İçin Öngörülen Dipol Magnet Tasarımı	61
4.5.1 C-Tipi dipol (bükücü) magnet tasarımı	62
4.5.2 H-Tipi dipol (bükücü) magnet tasarımı.....	65
4.6 THM-SI Tesisi Ön Hızlandırıcı Halkası İçin Öngörülen Sekstupol/Kuadrupol Magnet Tasarımı	68
4.7 Düzeltici (Corrector) Magnet Tasarım Detayları, Testleri ve Çalışmaların Yapıldığı Argonne Ulusal Laboratuvarı.....	72
4.7.1 Düzeltici magnet tasarım detayları	72
4.7.2 Parametreler ve ölçüm hatları	75
4.7.3 Ölçüm sonuçları.....	79
4.7.3.1 Sekstupol/kuadrupol magnet formülasyonundaki simulasyon ve test sonuçları	83
4.7.4 Deneysel çalışmaların yapıldığı APS-U Magnet Ölçüm Laboratuvarı ve ölçüm hatları	91
4.7.4.1 Advance Photon Source Upgrade Projesi (APS-U)	91
4.7.4.2 Dönen bobin ölçüm hattı (Rotating Coil (RC))	98
4.7.4.3 Dönen tel ölçüm hattı (Rotating Wire (RW)).....	99
5. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	101
KAYNAKLAR.....	106
EKLER	110

EK 1 Ön Hızlandırıcı Halka Tasarımında Kullanılan Benzetim Yazılımları	111
EK 2 Magnet Tasarımında Kullanılan Benzetim Yazılımları.....	118
ÖZGEÇMİŞ	128



SİMGELER DİZİNİ

a	ivme
B	Manyetik alan
C	Çevre
c	Işık hızı
C_p	Işınım gücü
C_γ	Sand ışınım sabiti
e	Birim elektrik yükü
E	Elektrik alan
F	Kuvvet
F_r	Merkezcil kuvveti
h	Harmonik sayı
I	Akım
K	Kuvvet parametresi
l_m	Magnetin kavis uzunluğu
N_d	Bükücü magnet sayısı
N_s	Halkadaki sektör sayısı
N_u	Salındırıcı magnet periyot sayısı
p	Momentum
ϕ	Potansiyel
P_γ	Işınım gücü
q	Parçacık yükü
S	Poynting vektörü
V	Hız
γ	Lorentz faktörü
ε	Yayılm
ε_0	Elektrik sabiti
η	Boşluğun geçirgenlik katsayısı
Θ	Sapma açısı
λ	Dalga boyu
λ_u	Salındırıcı magnet periyot uzunluğu
μ_0	Boş uzayın manyetik geçirgenlik katsayısı
τ	Sönümleme süresi
κ	Yerel eğrilik

Kısaltmalar

ANL	Argonne National Laboratory
APS	Advanced Photon Source
APS-U	Advanced Photon Source Upgrade
AWG	American Wire Gauge
CERN	Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi
DPT	Devlet Planlama Teşkilatı
FEM	Finite Element Method
HTE	Hızlandırıcı Teknolojileri Enstitüsü
LHC	Large Hadron Collider
PS	Proton Sinkrotronu
RC	Rotating Coil
RF	Radyo Frekans
RW	Rotating Wire
SASE	Self-Amplified Spontaneous Emission
SEL	Serbet Elektron Lazeri
SESAME	Synchrotron-light for Experimental Science and Applications in the Middle East
SI	Sinkrotron Işınımı
SR	Synchrotron Radiation
TAEK	Türkiye Atom Enerjisi Kurumu
TARLA	Turkish Accelerator and Radiation Laboratory
TDR	Technical Design Report
TENMAK	Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu
THM	Türk Hızlandırıcı Merkezi
TURKAY	THM Sinkrotron Işınımı Tesisi
TURKFAB	THM Parçacık Fabrikası Tesisi
TURKPRO	THM Proton Hızlandırıcı Tesisi
TURKSEL	THM SASE Serbest Elektron Lazeri

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Işınım nesillerine göre parlaklık değerlerinin değişimi (Shaftan 2018)	8
Şekil 2.2 Sinkrotron halkasının temel elemanları (Wille 1996).....	11
Şekil 2.3 Dairesel hızlandırıcılarda elektron paketçiği üzerindeki manyetik alan etkisi (Shaftan 2018)	11
Şekil 2.4 Compton saçılmasında enerji ve momentumun korunumu (Wiedemann 2007)	13
Şekil 2.5 Bükücü magnet ışınımı (Attwood 2007)	21
Şekil 2.6 APS-U bünyesinde test sürecindeki tipik bir eğici magnetin görünümü.....	21
Şekil 2.7 Bükücü (dipol) magnet çeşitleri (Mühle 2017).....	22
Şekil 2.8 İki paralel demir iletkenden oluşan C-Tipi magnet üzerindeki Akım (I) ve Manyetik Alan (B) ilişkisi (Wille 1996).....	23
Şekil 2.9 Bükücü magnet kutupları arasındaki alanın sınırları (Wille 1996).....	24
Şekil 2.10 Yüksek alan kuvvetlerinde manyetik alan B ile bobin akımı I arasındaki ilişki (Wille 1996).....	25
Şekil 2.11 Odaklayıcı magnetin temel davranışı ve yapısı (Wille 1996).....	26
Şekil 2.12 Dört kutuplu magnetin çeyrek kesiti üzerinde, akımın fonksiyonu olarak alan gradyentinin hesabında izlenecek kontur (Wille 1996)	27
Şekil 2.13 Sekstupol magnetlerin olmadığı durumda odaklanma durumu	29
Şekil 2.14 Sekstupol magnetlerin varlığında odaklanma durumu	30
Şekil 2.15 APS bünyesinde kullanılan Revolver tipi undulator (solda) ve model görünümü (sağda)	31
Şekil 2.16 Salındırıcı magnetin ışınımı (solda) ve spektrumu (sağda) (Attwood 2007). 31	
Şekil 2.17 Salındırıcı magnetin kutuplardaki manyetik alan dağılımı	32
Şekil 2.18 Sinkrotron ışınımı kaynakları ve yayılan ışınım (Shaftan 2018).....	33
Şekil 2.19 Manyetik geçirgen iki farklı ortamdaki durum.....	36
Şekil 2.20 Magnetlerin ilişki içerisinde olduğu olgular	37
Şekil 4.1 Tasarlanan TURKAY tesisinin görünümü (Nergiz vd. 2014)	45
Şekil 4.2 THM projesi kapsamında geliştirilen işbirlikleri (Mavi ile belirtilen merkezler ile işbirliği protokolü imzalanmış, kırmızı ile belirtilen merkezlerde ise bilimsel çalışmalarda bulunulmuştur.)	47
Şekil 4.3 TURKAY ön hızlandırıcısının şematik görünümü (Nergiz vd. 2017)	48
Şekil 4.4 Uzun ön hızlandırıcı halkanın bir süper periyodunun optik fonksiyonları (Nergiz vd. 2017).....	49
Şekil 4.5 Çeyrek ön hızlandırıcı halkanın magnetlerinin dizilimi	51
Şekil 4.6 Ön hızlandırıcı halkanın çeyrek kesiminin optik fonksiyonları. Mavi ve kırmızı eğriler, sırasıyla yatay ve dikey beta, yeşil eğri ise dağılım fonksiyonunu belirtmektedir.....	52

Şekil 4.7 Rezonans diyagramı. Yeşil artı, betatron salınımları sırasındaki çalışma noktasını ifade eder ($Q_x = 12.88$ (Yatay) and $Q_y = 3.21$ (Dikey))	53
Şekil 4.8 100 MeV'den 3 GeV'e hızlandırma sürecinde demet enerjisindeki değişim.	55
Şekil 4.9 100 MeV'den 3 GeV'e hızlandırma sürecinde, demet yatay yayılım değerinin (ϵ_x) değişimi	55
Şekil 4.10 Demet yatay yayılım değerinin (ϵ_x) zamanla değişimi	56
Şekil 4.11 Enerji artırımı sürecinde demet yayılımındaki değişim.....	56
Şekil 4.12 Sonlu dağılım modu için ana hücredeki betatron ve dispersiyon fonksiyonları (Nergiz vd. 2015)	59
Şekil 4.13 Temel hücre boyunca betatron ve dispersiyon fonksiyonları. Üstteki şekil sonlu dispersiyon durumunu, alttaki şekil akromatik durumu göstermektedir (Nergiz vd. 2015).....	61
Şekil 4.14 Tasarlanan C-tipi bükücü magnetin profili	62
Şekil 4.15 Comsol Multiphysics yazılımı kullanılarak modellenen C-Tipi dipol magnet için, dikey manyetik alan bileşeninin manyetik akı yoğunluğu benzetimi (Alan değeri T cinsinden gösterilmiştir).....	63
Şekil 4.16 a) Boyuna (X) ve b) Enine (Z) eksenleri boyunca manyetik alan dağılımı ...	65
Şekil 4.17 Radia yazılımı ile tasarlanan H-Tipi bükücü magnet. Kırmızı kısım bobinleri ve mavi kısım boyunduruğu ifade etmektedir (Uzunluk değerleri mm cinsinden gösterilmiştir.)	66
Şekil 4.18 H-Tipi bükücü magnetin manyetik alan haritası (Poisson Superfish yazılımı üzerinden, 1010 tip demir seçilerek, benzetim yapılmıştır. Uzunluk değerleri cm cinsinden gösterilmiştir.)	66
Şekil 4.19 H-Tipi bükücü magnetin yatay eksen (Y), magnetik alanın dikey bileşeninin (B_y) değişimi yeşil renk ile, benzer şekilde dikey eksen boyunca değişimi (X) ise kırmızı renk ile gösterilmiştir.....	67
Şekil 4.20 Tasarlanmış bütünleşik magnetin dikey bileşeninin akım yoğunluğu simülasyonu (A/m^2 biriminde ifade edilmiştir.)	69
Şekil 4.21 Dikey manyetik alan bileşeninin dağılımı a) Enine eksen (X eksen) boyunca b) Boyuna eksen (Z eksen) boyunca.....	70
Şekil 4.22 Bütünleşik sekstupol/kuadrupol magnetin kutup profili (Çizim mm ve inç cinsinden gösterilmiştir.)	71
Şekil 4.23 Düzeltici magnetin CAD modeli (A) Sol yan görünümü ve (B) İnç cinsinden önden görünümü.....	73
Şekil 4.24 A) Corrector magnetin harmonik analizinin yapıldığı deney düzeneği, B) Magnetin ön profilden görünümü, C) Magnetin arka profilden görünümü ...	74
Şekil 4.25 Bobin boyutları (İnç olarak gösterilmiştir.) A) Tekli bobin (1 iletken, 2 lamine cam/epoksi ve 3 cam elyaf bant) B) Çift katlı bobin	75
Şekil 4.26 APS-U magnet ölçüm laboratuvarı şeması (Izzo 2020).....	76
Şekil 4.27 APS-U Magnet Ölçüm Laboratuvarı'nın konumu.....	76
Şekil 4.28 RC ölçüm hatları (Izzo 2020)	78

Şekil 4.29 Yatay alan düzeltici modda alan harmoniklerinin ölçümleri. Kırmızı oklarla sol üst köşede gösterildiği gibi sadece yan direklerdeki uzun bobinlere akım verilmiştir	80
Şekil 4.30 Dikey alan düzeltici modda alan harmoniklerinin ölçümleri. Merkez bobinlere ve kısa her iki yandaki bobinlere, kırmızı oklarla sol üst köşede gösterildiği gibi akım verilmiştir	81
Şekil 4.31 Dört kutuplu düzeltici modda alan harmoniklerinin ölçümleri. Merkez bobinlere ve kısa her iki yandaki bobinlere, kırmızı oklarla sol üst köşede gösterildiği gibi akım verilmiştir	81
Şekil 4.32 Yan bobinlerin farklı akım değerlerinde dikey alanın (B_y) yatay koordinata (x) karşı değişimi	82
Şekil 4.33 Döner bobin ölçümü sırasında düzeltici magnetin sıcaklık sapmaları.....	83
Şekil 4.34 Magnet bobin bağlantı şeması	84
Şekil 4.35 36 mm çapında dairesel diyafram açıklığına sahip altı kutuplu magnetin manyetik akı yoğunluğunun benzetimi.....	84
Şekil 4.36 36 mm çaplı dairesel açıklıkta dikey manyetik alan bileşeni için manyetik akı yoğunluğu sapması a) Enine eksen boyunca değişim (X eksen) ve b) Magnet boyunca değişim (Z eksen)	85
Şekil 4.37 Kutup kenarları etrafındaki manyetik akı yoğunluğu sapması	86
Şekil 4.38 Sadece kuadrupol alanın varlığında manyetik alan grafiği a) enine tarandığı durum (X eksen) b) boyuna tarandığı durum (Z eksen).....	87
Şekil 4.39 Sadece sekstupol alanın varlığında manyetik alan grafiği a) enine tarandığı durum (X eksen) b) boyuna tarandığı durum (Z eksen).....	88
Şekil 4.40 Sekstupol ve kuadrupol alanların varlığında manyetik alan grafiği a) enine tarandığı durum (X eksen) b) boyuna tarandığı durum (Z eksen)	89
Şekil 4.41 Altı kutuplu magnetin normalleştirilmiş katsayıları (Koyu bloklar kuadrupol alanı, açık olanlar ise sekstupol alanı ifade etmektedir.) a) sadece dörtlü alanın varlığında b) sadece sekstupol alanın varlığında.....	90
Şekil 4.42 Sekstupol ve kuadrupol alanı için normalleştirilmiş katsayılar (Koyu bloklar kuadrupol alanı, açık olanlar ise sekstupol alanı ifade etmektedir) ...	91
Şekil 4.43 APS'in görünümü ve bileşenleri (The Advanced Photon Source Web Sayfası 2019)	92
Şekil 4.44 APS-U projesi magnet ailesi (Izzo 2020)	94
Şekil 4.45 APS-U Projesi kapsamında kurulan Magnet Ölçüm Laboratuvarı ölçüm hatları (Solda dönen bobin ve sağda dönen tel ölçüm hatları gösterilmektedir).....	95
Şekil 4.46 ANL Magnet Ölçüm Laboratuvarı RC1 ve RC2 ölçüm hatlarının görünümü.....	96
Şekil 4.47 Örnek bir magnet ölçüm çalışması sırasında kaydedilen sıcaklık değişim grafiği (Mor, plaka üzerindeki ısıölçeri; turuncu, ölçüm hattındaki ısıölçeri ve yeşil ise ortam sıcaklığını temsil etmektedir.)	97

Şekil 4.48 ANL bünyesinde, APS-U projesi kapsamında ilk kurulan dönen bobin ölçüm hattı (RC1)	98
Şekil 4.49 APS-U projesi kapsamında kurulumu yapılan ilk dönen tel ölçüm hattı (RW)	100



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 Parçacık hızlandırıcılarının başlıca kullanım alanları	7
Çizelge 2.2 Çeşitli kaynakların manyetik alan büyüklüklerinin kıyaslanması	16
Çizelge 2.3 Çok kutuplu magnetlerin yaklaşık alan büyüklükleri	20
Çizelge 2.4 Magnet tasarım gereksinimleri	
Çizelge 2.5 Dünya üzerindeki bazı sinkrotron ışınımı kaynakları	40
Çizelge 4.1 Orta doğu ve Avrupa'daki sinklotron ışınımı tesisleri (2021).....	47
Çizelge 4.2 TURKAY enjektör doğrusal hızlandırıcısının demet parametreleri	48
Çizelge 4.3 Booster halkasının ana parametreleri.....	50
Çizelge 4.4 Ön hızlandırıcı halkanın ana parametreleri	52
Çizelge 4.5 Ana halkanın temel tasarım parametreleri	58
Çizelge 4.6 Tasarlanan C-Tipi dipol magnetin ana parametreleri	64
Çizelge 4.7 Tasarlanan H-tipi dipol magnetin ana parametreleri	67
Çizelge 4.8 Tasarlanan bütünleşik sekstupol/kuadrupol magnetin ana parametreleri	72
Çizelge 4.9 Üretilen düzeltici magnetin ana parametreleri	79
Çizelge 5.1 3 GeV enerjili önde gelen SI tesislerinin booster halkalarının temel yapısının parametreleri	102

1. GİRİŞ

20. yüzyılın başlarında, 1905'te Albert Einstein'ın ortaya koyduğu özel görelilik ve enerji-kütle özdeşliği ($E=mc^2$) ilkeleri, temel yüklü parçacıkların rölativistik hızlara kadar hızlandırılmasının fiziğinin anlaşılmasını ve yeni parçacıkların keşfi için gerekli enerji eşiklerin belirlenmesini sağlamıştır (Einstein 1905c, 1905a). Einstein'ın aynı yıl ortaya koyduğu, foton (ışık) demetinin etkileşime girdiği yüzeyden elektron sökmesini açıklayan fotoelektrik olay, yüklü parçacık üretimi ve demet oluşum sürecinin başlatılabilmesine öncülük etmiş ve Einstein'a 1921 yılı Nobel Fizik ödülünü kazandırmıştır (Einstein 1905b). Tüm bu temel bulguların yanı sıra, 1911'de Rudherford'un saçılma deneyi sonrası atom çekirdeğinin keşfiyle birlikte atomun yapısı tam olarak tanımlanmış ve atom altı dünyasının keşfine doğru yolculuk başlamıştır (Rutherford 1911). Bu olay aynı zamanda yeni bir çağın başlangıcı olmuştur. Bu yolculukta, atomik boyutta daha derine inmek için yüksek enerjili parçacık veya radyasyon (ışınım) ihtiyacı parçacık hızlandırıcıları kavramının doğmasına yol açmıştır. 1920'li yılların sonlarında RF (radyo frekans) alanların hızlandırıcılarda kullanılmaya başlanması ile sırasıyla RF doğrusal hızlandırıcıları, betatron, mikrottron, siklotron ve sinkrotron tipi dairesel hızlandırıcılar geliştirilmiştir (Wiedemann 2007). 1950'lerde ise büyük ölçekli sinkrotronlar ile GeV enerjili demetler elde edilebilmiştir. 1954'te CERN'de kurulan ve 1959'da faaliyete geçen ilk proton sinkrotronunun demet enerjisi 27 GeV'dir. Günümüzde CERN'de kurulan yeni nesil elektron-pozitron veya proton-proton çarpıştırıcılarının uzunluklarının 100 km'ye, enerjilerinin ise 100 TeV'e ulaşması beklenmektedir. Bu çarpıştırıcılar 2030-2050 yılları arasında çalıştırılması planlanmaktadır.

Yüklü parçacıkların ivmeli hareketinden kaynaklanan ışıınımların atomik düzeyde kuramsal olarak ortaya konulması 19. yy'ın sonlarına doğru gerçekleşmiştir. İlk sinkrotron ışıınımları ise 1947'de General Motors firması tarafından geliştirilip üretilen bir elektron sinkrotronunda gözlenmiştir (Wiedemann 2003; Winick 1995). 20. yy'ın ikinci yarısında, gerek yüksek enerjili temel parçacık demetlerinin (elektron, pozitron, proton, anti proton, müon vb.) gerekse sinkrotron ışıınımlarının temel ve uygulamalı bilimlerde, bilimsel araştırma ve Ar-Ge amacıyla kullanımı büyük bir hızla gelişmiştir. 21. yy'ın ilk çeyrek diliminin tamamlanmak üzere olduğu günümüzde, dünya üzerinde yaklaşık 40

bin parçacık hızlandırıcısı çok değişik amaçlarla kullanılır hale gelmiştir (Womersley 2017).

Parçacık hızlandırıcıları ve ışınım kaynakları alanlarında geliştirilen ve uygulanan deneysel teknikler gün geçtikçe bilimsel birçok soruya yanıt vermektedir. Aynı zamanda bu tip tesislerin, bulundukları ülkelere bilimsel ve maddi anlamda katkıları oldukça fazladır. Geçmişte bu alanda büyük yatırımlar yapan ülkeler, ABD, Almanya, İngiltere, Fransa gibi, refah düzeylerinde sıçramalar yaşamışlardır. Bu ülkeler bilimsel ve teknolojik olarak ortaya koydukları gelişmeleri Nobel ödülleri ile süslemişlerdir (Nobel fizik Ödülleri Web Sayfası 2020). Ülkelerin kazandığı tüm dallardaki Nobel ödül sayılarına bakacak olursak, 2019 yılı itibarıyla ilk sıraları alan ülkeler ABD (383), İngiltere (132), Almanya (108), Fransa (68), İsveç (32), Rusya (31) ve İsviçre (28) şeklinde sıralanmaktadır. Bu ülkelere daha yakından bakılacak olursa, özellikle son yarım yüzyılda uzaydan-savunmaya, tıptan-genetiğe, ulaşımdan-iletişime, ilaçtan-gıdaya, biyoteknolojiden-nanoteknolojiye vb. birçok alanda gelişmelere öncülük yapan ülkeler olduğu görülmektedir.

1954 yılında, 12 Avrupa ülkesi tarafından kurulan dünyanın en büyük hızlandırıcı ve parçacık fiziği merkezi olan CERN (Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi), kurduğu hızlandırıcı ve çarpıştırıcılar, geliştirdiği teknolojiler ve keşifleri ile sadece parçacık ve hızlandırıcı teknolojileri alanında değil, tüm bilim dallarının ve teknolojinin lokomotifi haline gelmiştir (Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi (CERN) Web Sayfası 1954). CERN’de ulaşılan sonuçlar 6 Nobel Fizik Ödülü’ne konu olmuştur. Higgs bozonu, teorik olarak adının geçmesinden yaklaşık olarak yarım asır sonra CERN’de proton-proton çarpıştırıcısı olan Büyük Hadron Çarpıştırıcısı’nda (LHC) yapılan deneylerde, 2012 yılında keşfedildiği duyurulmuştur. Bu başarılarından dolayı, teoriyi yazan bilim insanları (P. Higgs ve F. Englert) Nobel Fizik Ödülü’ne layık görülmüşlerdir. Parçacık hızlandırıcıları ve hızlandırıcıya dayalı ışınımaların kullanılması ile fizik, kimya ve tıp alanında yapılan araştırmalar, 50’nin üzerinde Nobel ödülüne layık görülmüştür. Türkiye, 1961’den bu yana “Gözlemci” statüsünde üyesi olduğu CERN’e, 6 Mayıs 2015 tarihinde “Ortak” (Asosye) üye olmuştur (TENMAK 1956). Türkiye aynı zamanda 2004 yılından bu yana kurucu ortağı olduğu, Ürdün’ün Amman kentinde kurulan Ortadoğu Sinkrotron Işınımı Merkezi SESAME’nin üyesidir (SESAME Web

Sayfası 2003). Türkiye-CERN ve Türkiye-SESAME ilişkileri, Türkiye Atom Enerjisi Kurumu (TAEK) (28 Mart 2020 itibariyle TENMAK tarafından yürütülmektedir (TENMAK Web Sayfası 1956).

Gelişmiş ülkeler, ekonomik başarılarını birinci elden ürettikleri bilime ve teknolojiye borçludur. Bu teknolojilerin önemli bir kısmı genellikle büyük çaplı elektron ve proton hızlandırıcılarında üretilmektedir. Maddenin temel yapıtaşlarını belirleyen “Standard Model” dediğimiz kuark, lepton ve bozonlardan oluşan teorinin kanıtlanması 2012 yılında Higgs parçacığının deneysel olarak kanıtlanması ile bir üst aşamaya ulaşmıştır. Böylesi bir keşfin ortaya konulması, CERN gibi 67 yıldır parçacık hızlandırıcıları üzerinde faaliyetlerini sürdüren bir laboratuvarı, tüm dünya fizikçilerinin, mühendislerinin ve yazılımcılarının katılımı ile mümkün olabilmiştir. Dünya çapında, 1970’li yıllardan başlayarak elektron sinkrotronlarına dayalı üçüncü nesil Sinkrotron Işınımı tesisleri, 1990’lı yıllardan başlayarak da elektron linaklarına dayalı dördüncü nesil Serbet Elektron Lazeri (SEL) tesisleri kurulmaya başlanmıştır. Temel ve uygulamalı bilimlerde yapılan Ar-Ge ve teknoloji geliştirme çalışmalarında adeta çığır açan bu tesislerin dünyadaki sayısı 100 civarındadır (Lightsources web sayfası 2020).

Ülkemizde parçacık hızlandırıcılarının kurulumu ve kullanılmasına yönelik bazı küçük ölçekli çalışma ve uygulamalara 1960’lı yıllarda başlanmıştır. Çağdaş düzeyde ülke ihtiyaçları dikkate alınarak yapılan ilk fizibilite çalışması, Devlet Planlama Teşkilatı (DPT) desteği ile 1996’da Ankara Üniversitesi tarafından DPT’ye önerilen, “**Parçacık Hızlandırıcıları: Türkiye’de Neler Yapılmalı?**” konulu projenin desteklenmesi ile gerçekleştirilmiştir. 2000 yılı sonunda tamamlanmış olan bu çalışmada, esas olarak bünyesinde değişik tip ve enerjide hızlandırıcı ve ışınım tesislerini barındıracak bir ulusal hızlandırıcı merkezinin, Türk Hızlandırıcı Merkezi (THM) adıyla kurulması önerilmiştir. Çalışmaların ikinci aşaması 2001-2005 yılları arasında “THM’nin Genel Tasarımı” teması ile yürütülmüş ve THM bünyesinde yer alması öngörülen hızlandırıcı, çarpıştırıcı ve ışınım kaynaklarının temel parametreleri ve araştırma potansiyelleri tanımlanmıştır. THM konulu proje serisinin üçüncü aşaması ise, 2006-2015 yılları arasında, Ankara Üniversitesi’nin koordinatörlüğünde ve 12 üniversitenin işbirliği ile “**Türk Hızlandırıcı Merkezi’nin Teknik Tasarımı ve Test Laboratuvarları**” adı altında, Devlet Kalkınma Teşkilatı’nın (Kalkınma Bakanlığı) desteği ile yürütülmüştür

(Türk Hızlandırıcı Merkezi Projesi Web Sayfası 1997; Yavaş 2015). Üçüncü aşama çalışmaları sonucunda, ülkemizin ilk Hızlandırıcı Teknolojileri Enstitüsü (HTE) 26 Şubat 2010 tarihinde Ankara Üniversitesi bünyesinde kurulmuştur (Hızlandırıcı Teknolojileri Enstitüsü 2010). Enstitü, 2011 yılından bu yana Kalkınma Bakanlığı tarafından desteklenen Elektron Hızlandırıcısı ve Lazer Tesisi'nin (TARLA) tasarımı, kurulumu, işleme alınması ve idame ettirilmesi görevlerini üstlenmiştir. Kurulumu yapılan tesis ülkemizde elektron hızlandırıcısına dayalı ilk ışınım tesisi olma özelliğini taşımaktadır. TARLA, Ulusal Araştırma Altyapıları Üst Kurulu tarafından 2 Aralık 2020 tarihinde **“Türk Hızlandırıcı ve Işınım Laboratuvarı”** adı ile Ulusal Merkez statüsüne kavuşturulmuştur (Turkish Accelerator & Radiation Laboratory (TARLA) 2020). THM kapsamında kurulması öngörülen, 3 GeV enerjili elektron sinrotronuna dayalı Sinkrotron Işınımı Tesisi'nin (TURKAY), 1-6 GeV enerjili doğrusal elektron hızlandırıcısına dayalı SASE-SEL Tesisi'nin (TURKSEL), 2 GeV enerjili doğrusal proton hızlandırıcısını hedefleyen Proton Hızlandırıcı Tesisi'nin (TURKPRO) ve charm kuarklarının rezonansta üretimini ve bozunumlarının incelenmesini mümkün kılacak elektron-pozitron çarpıştırıcısına dayalı 3.77 GeV kütle merkezi enerjili Parçacık Fabrikası Tesisi'nin (TURKFAB) teknik tasarım raporları (TDR) tamamlanmış ve 2016 yılı içinde Kalkınma Bakanlığı'na iletilmiştir.

Tez çalışması kapsamında, THM projesinde önerilen ve 3 GeV enerjili elektron sinkrotronuna dayalı Sinkrotron Işınımı Tesisi'nin (TURKAY) ön hızlandırıcısının (booster) optimizasyonunun yapılması ve ön hızlandırıcıda yer alacak dipol ve kuadropol magnetlerin tasarımı hedeflenmiştir. Sinkrotron ve magnet teknolojileri konularında kuramsal temelleri konu alan ikinci bölümde, sinkronronun yapısı, fiziği ve bu yapı üzerinde kullanılan magnetlerin fiziği ve tasarım ilkeleri alt başlıklarda incelenmiştir. Tez çalışmasında kullanılan materyal ve yöntemlerin açıklandığı üçüncü bölümde tasarımlarda kullanılan programlara ilişkin bilgiler paylaşılmıştır. TURKAY tesisi ön hızlandırıcısının optimizasyonunun ve ihtiyaç duyulan dipol ve kuadropol magnetlerin tasarımının yapıldığı dördüncü bölümde ise, TURKAY tesisinin yapısı, öngörülen booster yapıları ve bu yapılar üzerinde öngörülen bütünleşik sekstupol-kuadropol magnet ve dipol magnet tasarımlarına tüm detaylarıyla yer verilmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1 Parçacık Hızlandırıcısı - Işınım İlişkisi

Alfred Lienard, yüklü parçacıkların hareketiyle ortaya çıkan etkilerin hesabında, gecikmeli potansiyeller kavramını ilk kez telaffuz eden Fransız fizikçidir. Bu kavram, günümüzde sinkrotron ışınımı olarak bilinen kavramın temelini oluşturmaktadır. Bu teori günümüzde ders kitaplarında yer almaktadır. Sonrasında bu kavram E. Wiechert tarafından geliştirildiği için, günümüzde “Lienard-Wiechert Gecikmeli Potansiyeli” olarak anılmaktadır (Liénard 1898).

Hızlandırıcılarda ulaşılan enerji üst sınırı, 20.yy’ın sonlarına doğru başlayarak, gelişen teknolojinin yardımıyla, günümüzde TeV mertebesine ulaşmıştır. Parçacık hızlandırıcıları doğrusal ve dairesel olmak üzere iki ana grupta toplanmaktadırlar. Doğrusal olan hızlandırıcılara linak, dairesel olanlara ise siklotron ve sinkrotron örnek olarak verilebilir.

Rölativistik parçacıkların bir yada daha fazla RF kaviteden geçirilerek yüksek enerji değerlerine ulaşabilmeleri için büyük çapta sinkrotronlara ihtiyaç vardır. Parçacıklar defalarca dairesel yörüngede tur atarak ve her turda RF kaviteden enerji kazanarak istenilen enerji seviyesine ulaşabilir. Aynı zamanda ulaşılacak maksimum manyetik alan değeri için de bir limit vardır. Bu limit normal iletken magnetler için 1.5 T, süperiletken magnetler için ise 20 T’dir. Eğer halkadaki enerji 1 GeV’den büyükse, yarıçapın da orantılı olarak yaklaşık birkaç metre büyümesi ile dengelenebilir. Bu durumu dengeleyecek magnetin üretimi hemen hemen imkansızdır. Buradan hareketle yüklü parçacığın sabit bir yörüngede, saptırıcı magnetlerden geçerek dolandığı bir tasarım fikri ortaya atılmıştır. Tasarımda manyetik alan enerji ile eş zamanlı olarak artmakta ve böylece yörünge yarıçapı sabit kalmaktadır. Bu tip hızlandırıcılara “**Sinkrotron**” adı verilmiştir. Sinkrotronlarda ivmeli hareket eden yüklü parçacıkların yaydığı elektromanyetik ışınım da “**Sinkrotron Işınımı**” olarak isimlendirilmiştir (Wiedemann 2003).

Hızlandırıcıya dayalı ışınım; sinkrotron ışınımı, serbest elektron lazeri ve frenleme

(Bremsstrahlung) ışıınımları olarak bilinmektedir. Yüklü parçacıkların ışıma yapmasını anlamada elektronun foton soğurması veya yayması için gerekli koşulları anlamak önemlidir. Bu anlamda enerji ve momentum korunumu yasaları ve elektromanyetik dalgalar için enerji akışını ifade eden Poynting vektörü önemli niceliklerdir.

Dairesel hızlandırıcıların oluşturulabilmesi için, sabit bir yarıçap etrafında, temel bir dolanım ihtiyacı vardır. Bu temel dolanımı oluşturan yapı magnetlerden oluşur. Parçacıkların enerjilerini istenilen seviyede tutmak için RF kaviteler ve ön hızlandırmayı sağlamak için doğrusal hızlandırıcılar kullanılır. Hızlandırıcılarda elde edilen ışıınımlar, genellikle hafif parçacıkların yüksek enerjilerde dairesele harekete zorlanmasıyla elde edilen elektromanyetik ışıınımlardır. Sinkrotron ışıınımları adı verilen bu ışıınım, elektron tabancasından elektronların ayrılmasıyla başlar ve sonrasında bu elektronlar ön doğrusal hızlandırıcı (pre-linac) tarafından hemen hemen ışık hızına ulaşacak ölçüde ivmelendirilirler. Devamında, enerjilerinin artırılması için ön hızlandırıcı halkaya transfer edilirler. İstenilen enerjiye ulaştığında, en dışta yer alan depolama halkasına (main ring) iletilirler. Yüklü parçacıkların kapalı yörüngede döndürölme işlemi, vakum altında seri olarak yerleştirilmiş bir dizi magnet yardımı ile yapılır. Her bir bükücü magnet, ürettiğı manyetik alan etkisiyle hareketini sürdüren elektronların yönünü değıştirmeye zorlayarak sinkrotron ışıınım demetleri oluşmasını sağlarlar. Üretilen bu ışıın demetleri herhangi bir alanda kullanılmak üzere, uygun monokromatörler kullanılarak, istenilen bir dalga boyu değıerine ayarlanabilir (Wille 1996).

Sinkrotronların magneto-optik ve RF yapıları gereğı, parçacık demetleri belirli bir enerji değıerine ulaşmış olarak sinkrotron içerisine aktarılmalıdır. Bu koşul lineer hızlandırıcılar yardımıyla ön hızlandırma yapılarak sağlanmaktadır. Bu ışıınımlara neden olan dairesele yörüngeler, bükücü (dipol) magnetler kullanılarak oluşturulmaktadır. Dairesel hızlandırıcı boyunca oluşturulan düz kısımlara yerleştirilen eklenti aygıtları (insertion devices), salındırııcı (undulatör) magnetler veya zigzaglayıcı (wiggler) magnetler yardımıyla, yüksek parlaklığa sahip ışıınımlar elde edilebilir. Hızlandırıcılarda elde edilen yüklü parçacık demetlerinin doğrudan kullanımı ve bu demetlerin birincil demet olarak kullanılması ile üretilen ışıınımların (SI, SEL veya frenleme ışıınımları) ve nötronların, günümüzde bir çok sektörde kullanıldığı bilinmektedir. Çizelge 2.1

parçacık demetlerinin temel kullanım alanlarını ve bu alanlarda uygulamaların hangi alt başlıklarda yoğunlaştığını göstermektedir (Yavaş 2018).

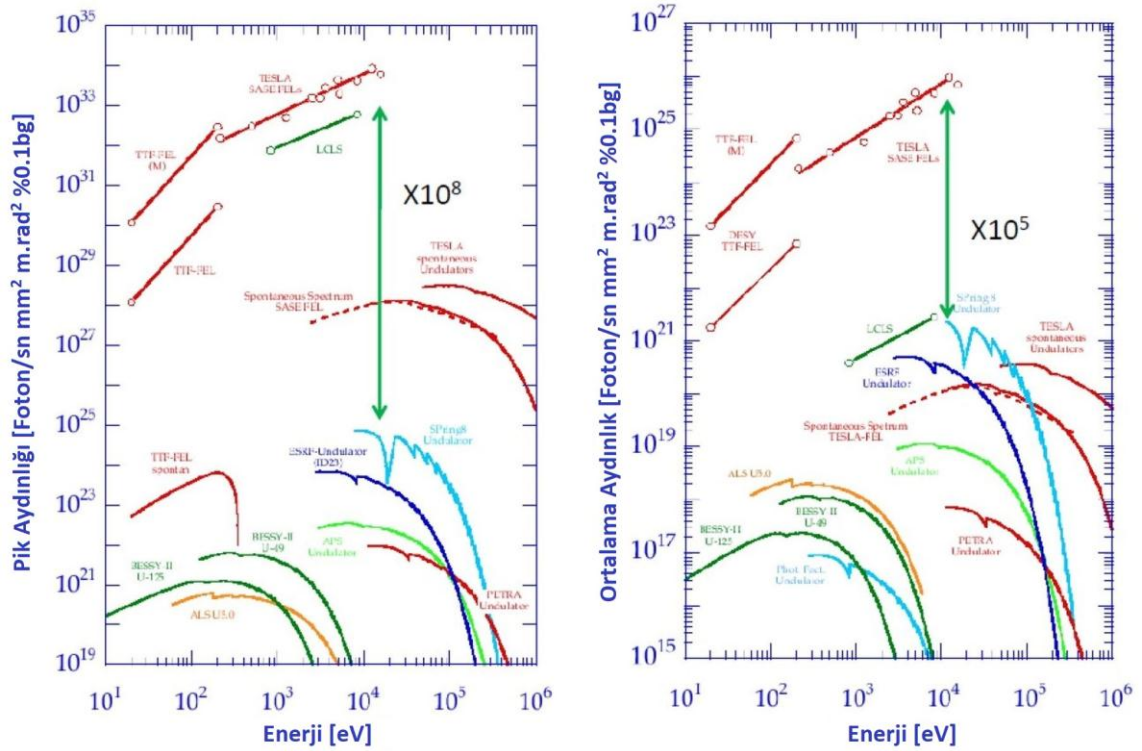
Çizelge 2.1 Parçacık hızlandırıcılarının başlıca kullanım alanları

• Parçacık Fiziği ve Nükleer Fizik Araştırmaları • Malzeme Bilimi ve Uygulamaları • Hızlandırıcı Sürümlü Sistemler (HSS) ve Nükleer Atık Dönüşümü • Nükleer Teknoloji • Savunma ve Güvenlik Sanayi • Uzay Sanayi • Yaşam Bilimleri ve Medikal Uygulamalar	• Hızlandırıcıya Dayalı Işınım Kaynakları (SEL ve Bremsstrahlung ışınımı üretimi) • Gıda Sanayi • Madencilik Sanayi • Bilişim ve İletişim Teknolojileri • Fotonik Araştırma ve Uygulamaları • Biyoteknoloji • Nanoteknoloji • Arkeoloji • Mücevher Sektörü • Çevre Uygulamaları
---	---

2.2 Hızlandırıcıya Dayalı Işınım Kaynakları

Parçacık hızlandırıcılarına dayanan ışınım kaynakları teknolojisi, amacı ve parametreleri açısından tarihsel süreçte dört ayrı nesil olarak gruplandırılmıştır. Genel anlamda hafif parçacık (lepton) çarpıştırıcılarının parazitik ışınimleri I. nesil ışınım olarak bilinir. DESY'deki (Almanya) DORIS ve PETRA (www.desy.de), KEK'deki (Japonya) PEP ve TRISTAN (www.kek.jp) elektron-pozitron demetlerinden elde edilen ışınım örnek olarak gösterilebilir. 1970'li yılların ortalarında sinkrotron ışınımına artan ilgi ile beraber, özellikle ABD, birçok Avrupa ülkesi ve Japonya'da II. nesil sinkrotron ışınım kaynaklarının geliştirilmesi süreci başlamıştır. II. nesil ışınım kaynağı olarak tasarlanan halkalar tamamen sinkrotron ışınımı üretimi amacıyla inşa edilmiştir (Winick 1995). Bu ışınım kaynakları ≥ 100 nm.rad değerinde yayılım ve 10^{16} mertebesinde parlaklık değerlerine ulaşmaktadır. II. nesil ışınım kaynaklarında bükücü magnetler kullanılarak ışınım elde edilir. Elde edilen ışınım demet hatları ile deney istasyonlarına taşınır. II. nesil ışınım kaynaklarının ilk örneği, 1974 yılında Tokyo'da

çalışmaya başlayan SOR'dur (380 MeV). Halka üzerindeki düz kısımlara eklenti cihazlar olan salındırııcı ve zigzaglayıcı magnetlerin yerleştirilmesi ve bu magnetlerden düşük yayımlımlı elektron demetleri geçirilerek elde edilen ışınım ise III. nesil olarak bilinmektedir. Salındırııcı magnetler, eğici magnetlerden elde edilen ışınımın gücünden ortalama 10^4 kat daha fazla güce sahip ışınım sağlamaktadır. III. nesil ışınımın genellikle 20-100 nm.rad parçacık demeti yayılımı sonucu ortaya çıkmaktadır. 90'lı yılların başında süperiletken uygulamaların başlaması ile birlikte hızlandırıcılarda kullanılan süperiletken kavite, çok düşük yayımlımlı (<20 nm.rad) yüksek pik akımına sahip elektron demetlerinin elde edilmesini mümkün kılmıştır (Uzunluğu ps ve yükü nC mertebesindedir). Bu ışınım IV. nesil veya Serbest Elektron Lazeri (SEL) olarak bilinirler. Işınım nesillerine göre parlaklık değerlerinin değişimi Şekil 2.1'de gösterilmiştir (Shaftan 2018).



Şekil 2.1 Işınım nesillerine göre parlaklık değerlerinin değişimi (Shaftan 2018)

SEL'in temeli elektronun kinetik enerjisini koherent elektromanyetik ışımaya dönüştürme prensibine dayanmaktadır. Burada salındırııcı magnetler (undulatörler) kullanılmaktadır. Elde edilen ışınım; femtosaniye (fs) mertebesinde, şiddetli ve

sürekli atmalar şeklindedir. Aynı zamanda ayarlanabilir bir dalgaboyuna sahiptir. Çalışma prensibine göre üç farklı grup altında toplanmıştır (Yükselteç SEL, SASE SEL ve Osilatör SEL). Yükselteç SEL, bir dış kaynak yardımıyla ışınının güçlendirilmesi prensibine dayanır. SASE SEL, kendiliğinden genlik artırımı yayılım ile görelî elektron demetinin kutupları arasında sinüsel bir manyetik alan altında salındırıcı magnetten geçerken, enerjisinin bir kısmını ışımaya yoluyla kaybetmesi sonucu elde edilir. Osilatör SEL ise, görelî elektron demeti salındırıcı magnetten geçerken bir ışımaya yapmaktadır. Yayılan ışınım iki ayna arasında tuzaklanarak salındırıcı magnetten sonradan giren elektron paketçikleri ile etkileşime girmesi sonucu koherent ışımaya meydana gelir. Elde edilen bu ışımaya Osilatör SEL adı verilir (Wiedemann 2003).

Salındırıcı magnet içerisinde hareket eden elektronlar enine salınım gösterirler. Magnet, periyodik manyetik alandan dolayı ortaya çıkan salınımların periyot uzunluğunu etkileyen frekansa sahiptir. Salındırıcı magnetteki ışımaya yoğunluğu periyot sayısı ile doğru orantılıdır. Yeterli sayıda periyot sayısına sahip olan bir salındırıcı magnetin ürettiği ışımaya yoğunluğu, normal sinkrotron ışımayaından çok daha fazla olabilmektedir. Üretilen ışımaya yoğunluğu yüksek ve monokromatiktir. Salındırıcı magnetlerden elde edilen ışımaya kullanıldığı bir çok deneyde, salındırıcı magnet spektrum çizgisinin genişliği büyük önem arz etmektedir. Bu genişlik, temel olarak periyot uzunluğu (λ_u) ve salındırıcı magnet periyot sayısı (N_u) ile belirlenebilir. Salındırıcı magnetten yayılan ışımaya spektral çizgi keskinliği, salındırıcı magnetin periyot sayısı ile doğru orantılıdır. Bir düzlemsel salındırıcıdan elde edilen SEL'in dalgaboyu, temel harmonik için aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir (Wiedemann 2003):

$$\lambda_{SEL} = \frac{\lambda_u}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2} \right) \quad 2.1$$

Burada λ_u düzlemsel salındırıcının periyot uzunluğu, K kuvvet parametresi ve γ Lorentz faktörüdür. Salındırıcıdan oluşan ışınım, aynalar arasında tuzaklanır. Elektromagnetlerdeki küçük periyotların sebep olduğu yüksek akım yoğunluğu problemi, saf mıknatıs veya hibrit magnetlerin kullanılmasıyla önlenir. Salındırıcıdaki rezonans durumu, elektronların negatif veya pozitif ivmelenmesini ve

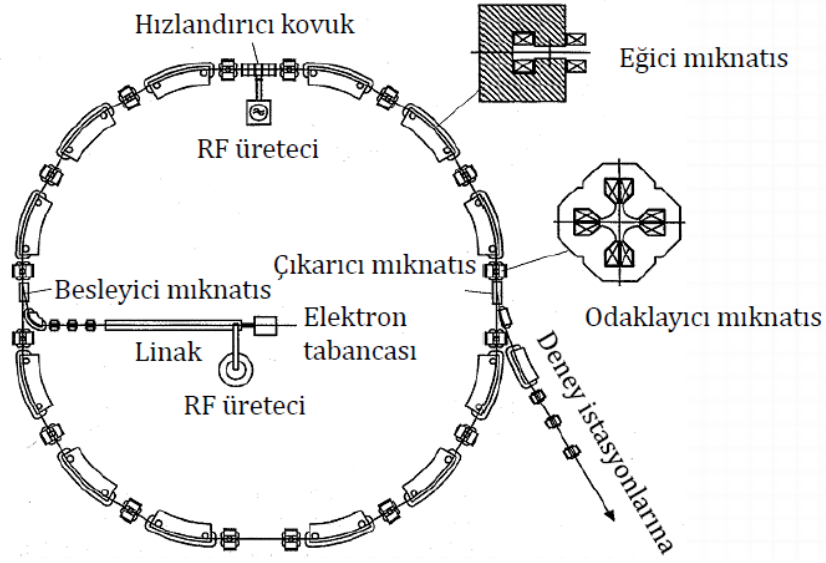
bunun sonucunda paketçikli yapı haline gelmesini sağlar.

2.3 Sinkrotron Işınımı Tesislerinin Yapısı

Dairesel hızlandırıcı kavramından bahsederken öncelikle karşımıza isimleri birbirine çok yakın, “siklotron” ve “sinkrotron” adında iki kavram ön plana çıkmaktadır. Siklotron, dairesele bir yörüngede, sabit bir manyetik alan ve frekans altında, değişen elektrik alanın etkisiyle yüklü parçacıkların yüksek enerji değerlerine çıkarılması için kullanılan dairesele bir hızlandırıcıdır. Sinkrotron ise değişen manyetik alanla yörünge yarıçapının sabit tutulduğu ve parçacıkların RF alanlarla hızlandırıldığı dairesele hızlandırıcılardır. Sinkrotronlarda, elektronlar elektron tabancası yardımıyla üretilir. Ardından doğrusal hızlandırıcı (linak) tarafından ışık hızına çok yakın bir değere kadar (% 99.9997) ivmelendirilirler. Daha sonra, enerjilerinin artırılması amacıyla ön hızlandırıcı halkaya transfer edilirler. Buradan da en dışta bulunan ana halkaya gönderilirler (Winick 1995). Her bir bükücü (dipol) magnetten geçen elektronlar, üzerlerine etkiyen manyetik alan etkisiyle yörüngelerinin değişmesi sonucu elektromanyetik ışınım yayarlar. Ortaya çıkan sinkrotron ışın demeti özelliği gereği belirli bir deneysel teknik için kullanılmak üzere istenilen dalgaboyu değerine ayarlanabilir. Daha sonra parçacıklar sinkrotron halkasına transfer edilir. Burada RF kaviterler ve magnetlerin yardımıyla, parçacık yörüngesi boyunca hızlandırılırlar. Sinkrotron halkasının tasarımında önemli bir diğer husus ise halka çevresinin, dalgaboyunun tam katı olacak şekilde tasarlanmasıdır. Sinkrotron tipi hızlandırıcılar, genel olarak çarpıştırıcılar (collider) ışınım üretimi için kurulan depolama halkalarında (storage ring) kullanılırlar. Ana halkalarda, parçacık demeti enerjisi sabit tutulur. Çarpıştırıcılar ise zıt yönlerde hareket eden iki parçacık demetinin çarpıştırılmasını sağlayan düzeneklerdir.

2.4 Sinkrotron Işınımının Fiziği ve Temel Parametreleri

Sinkrotronlarda parçacıklar dairesele bir yörünge izler ve hareketleri doğrultusunda yerleştirilen RF kaviterlerden geçerken elektrik alan tarafından hızlandırılırlar. Sinkrotron halkasının temel elemanları Şekil 2.2’de gösterildiği şekildedir (Wille 1996).

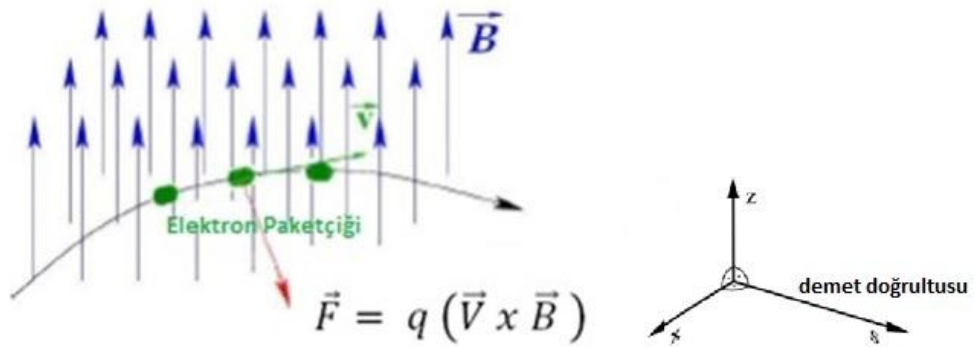


Şekil 2.2 Sinkrotron halkasının temel elemanları (Wille 1996)

Sinkrotron halkalarında elektrik alan yardımıyla hızlandırma sağlanırken, manyetik alan yardımıyla da dairesel yörüngeler oluşturulur. Aşağıdaki Lorentz eşitliği bu durumu ifade etmektedir.

$$\mathbf{F} = q \mathbf{E} + \frac{q}{c} (\mathbf{V} \times \mathbf{B}) \quad 2.2$$

Yukarıdaki eşitlikte; q parçacığın yükü, $\mathbf{E}$ elektrik alan vektörü, $\mathbf{V}$ hızı ve $\mathbf{B}$ manyetik alan vektörüdür. Manyetik alan şiddeti, dairesel hızlandırıcıların yörünge yarıçaplarının belirlenmesinde önemli bir faktör olmakla beraber bu iki parametre birbirleriyle ters orantılıdır (Şekil 2.3).



Şekil 2.3 Dairesel hızlandırıcılarda elektron paketçisi üzerindeki manyetik alan etkisi (Shaftan 2018)

Yüksek enerjilere ancak yarıçapı sabit bir yörüngedeki hareketle ulaşılabilir. Bu durum için tasarım şartı aşağıdaki eşitlik ile ifade edilmiştir:

$$\frac{\gamma m v^2}{r} \hat{r} = [c] \frac{q}{c} (\mathbf{V} \times \mathbf{B}) \Rightarrow \frac{1}{r} = \frac{q B}{c p} = \text{sabit} \quad 2.3$$

Yukarıdaki eşitlikte; m kütlesi, p momentumunun büyüklüğü ve r yörünge yarıçapıdır. Sinkrotronda bir paketçiğin halkada dolanım periyodu aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\tau = \frac{2 \pi r}{V} = \frac{2 \pi \gamma m c}{Z e B} \quad 2.4$$

Yüklü parçacıklardan oluşan demetin sabit yarıçapta kalabilmesi, manyetik alanın ve parçacığın momentumunun orantılı olarak artırılmasıyla sağlanır.

$$r = \text{sabit} \Rightarrow B \sim p(t) \quad 2.5$$

Dolanım frekansı (f_{tur}), parçacığın hızına bağlı olarak aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$f_{\text{tur}} = \frac{Z e c B}{2 \pi c p} \beta(t) \rightarrow \beta(t) \quad 2.6$$

$$f_{\text{rf}} = h f_{\text{tur}} \quad 2.7$$

h harmonik sayısı (orantı katsayısı) olarak adlandırılır. Demeğin hızlandırılabilmesi için eşzamanlılık koşulunun sağlanması gerekir. Bu koşul rf frekansının, dolanım frekansının tam katı olduğu durumda sağlanabilir.

Enerjinin artmasıyla birlikte, hafif parçacıklar kısa bir sürede ışık hızına yakın bir değere ulaşırken, ağır parçacıkların da hızları bir miktar artar. Sinkrotron halkasında ulaşılacak maksimum enerji yörüngenin yarıçapına ve uygulanan manyetik alana bağlıdır (Eşitlik 2.8).

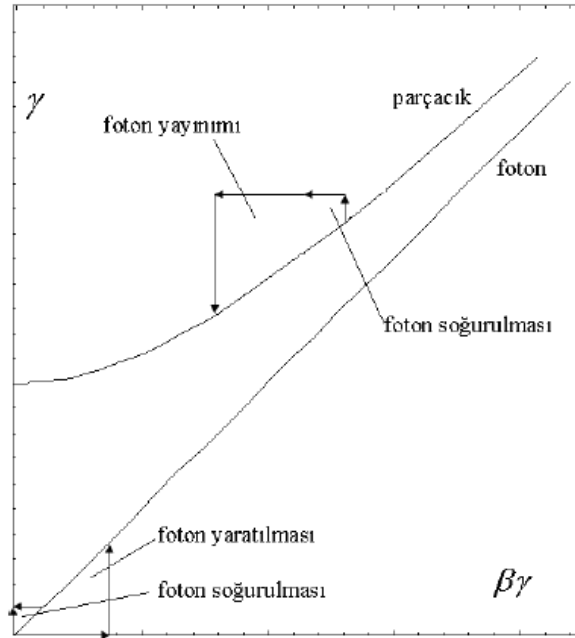
$$c p_{\text{max}} = \sqrt{E_k (E_k + 2 m c^2)} = C_p B[\text{kG}] r[\text{m}] \quad 2.8$$

$$C_p = [c] e = 0.02997926 \left[\frac{\text{GeV}}{\text{kG m}} \right] \quad 2.9$$

Bir diğ er önemli parametre ise ışınımın gücüdür. ışınım gücünü tanımlamadan önce iyi anlaşılması bakımından, gelen bir fotonun serbest elektronlardan elektromanyetik ışınım üretmek için saçılmasını konu alan Compton olayı ve Poynting vektörü konularına kısaca değinmek yerinde olacaktır.

2.4.1 Compton ışınımı

Serbest elektronlardan elektromanyetik ışınım üretmek için, enerji-momentum korunumunu ihlal etmeden, gelen yüksek enerjili bir fotonun serbest elektronlara çarparak saçılmasını konu alan Compton olayını kullanabiliriz. Bir elektron, fotonla çarpıştıktan sonra fotonu soğurur ve yeni bir foton yayar. Etkileşim esnasında bir yandan çarpışan fotonun momentumunda kayıp olurken, diğ er yandan enerjisi artar. Elektron da enerji-momentum uzayında, ortalama bir noktaya taşınır. şekil 2.4'te Compton saçılması sürecinde enerji-momentum korunumu grafik üzerinde gösterilmiştir. Sinkrotron ışınımı üretilmesinde de bu süreç işlemektedir (Wiedemann 2007).



şekil 2.4 Compton saçılmasında enerji ve momentumun korunumu (Wiedemann 2007)

2.4.2 Poynting vektörü

Poynting vektörü, bir elektromanyetik dalganın birim zamanda birim yüzeyden ilettiği enerji akısının ölçüsüdür. Elektrik alan ile manyetik alanın çarpımı, güç yoğunluğu boyutundadır. Poynting vektörü, “P” veya “S” harfi ile gösterilir ve elektrik alanının karesiyle doğru orantılı olarak değişmektedir. Poynting vektörü enerji akışını tanımlar ve düzlem dalgalar için aşağıdaki gibi tanımlanır (Wiedemann 2007):

$$\mathbf{S} = c^2 \epsilon_0 E^2 \mathbf{n} \quad 2.10$$

Dalganın yayılma doğrultusu, elektrik ve manyetik alanlar birbirlerine diktir ($\mathbf{E} \perp \mathbf{B} \perp \mathbf{n}$). Poynting vektörünün kapalı bir yüzey üzerinden integrali alındığında, birim zamanda yayınlanan enerji yani güç elde edilir. Işınmının yayıldığı yüzey üzerinden Poynting vektörünün integrali ışınımın gücünü vermektedir. Küresel koordinatlarda düşünersek, R yükün bulunduğu noktaya olan uzaklık ve a parçacığın ivmesi olmak üzere;

$$\mathbf{n} d\mathbf{A} = R^2 \sin \theta d\theta d\phi \quad 2.11$$

$$P = \int \mathbf{S} d\mathbf{A} = \frac{2}{3} r \frac{m}{c} a^2 \quad 2.12$$

Buradan hareketle güç ifadesini, aşağıdaki özdeşliği kullanarak, Eşitlik 2.14’deki gibi tanımlayabiliriz:

$$a^2 = \gamma^6 \{a^2 - [\boldsymbol{\beta} \times a^2]\} \quad 2.13$$

$$P = \frac{2}{3} r m c \gamma^6 [\dot{\boldsymbol{\beta}}^2 - (\boldsymbol{\beta} \times \dot{\boldsymbol{\beta}})^2] \quad 2.14$$

Beta (β) parametresinden ötürü, ışınımın gücü büyük oranda parçacık yörüngesine bağlıdır. İvmenin, hareket yönüne dik ve paralel bileşenleri ışınım gücüne katkı verecektir ($\dot{\boldsymbol{\beta}} = \dot{\boldsymbol{\beta}}_{\parallel} + \dot{\boldsymbol{\beta}}_{\perp}$). Sinkrotron ışınımının gücüne, paralel ve enine ivmelenmeden gelen katkılar Eşitlik 2.15 ve 2.16’da gösterildiği şekilde yazılabilir.

$$P_{||} = \frac{2}{3} \frac{r}{m c} \left(\frac{d\mathbf{p}_{||}}{dt} \right) \quad 2.15$$

$$P_{\perp} = \frac{2}{3} \frac{r}{m c} \gamma^2 \left(\frac{d\mathbf{P}_{\perp}}{dt} \right)^2 \quad 2.16$$

Eşitlik 2.16'daki dik kuvvet ifadesi yerine Lorentz kuvveti kullanılarak, ışıınım gücü pratik birimler cinsinden aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$P_{\gamma} = \left[\frac{4 \pi}{\mu_0} \right] \frac{2 r^2 c}{3 (m c^2)^2} B^2 E^2 = C_B B^2 E^2 \quad 2.17$$

$$C_B = \left[\frac{4 \pi}{\mu_0} \right] \frac{2 r^2 c}{3 (m c^2)^2} = 6.0779 \times 10^{-8} \frac{W}{T^2 GeV^2} = 379.35 \frac{1}{T^2 GeV s} \quad 2.18$$

Eşitlik 2.17'de görüldüğü gibi sinkrotron ışıınımı gücü, demet enerjisinin ve manyetik alanın karesiyle doğru orantılıdır. Anlık sinkrotron ışıınımı aşağıdaki şekilde gösterilebilir:

$$B = \frac{1}{\rho} \frac{\beta E}{e} \quad 2.19$$

$$P_{\gamma} = \frac{2}{3} r m c^3 \frac{\beta^4 \gamma^4}{\rho^2} \quad 2.20$$

ışıınım gücünü pratik birimler cinsinden aşağıdaki gibi yazabiliriz:

$$P_{\gamma} = \frac{c C_{\gamma}}{2 \pi} \frac{E^4}{\rho^2} \quad 2.21$$

Burada, C_{γ} elektronlar için Sand ışıınım sabitidir ve aşağıdaki şekilde tanımlanabilir:

$$C_{\gamma} = \frac{4 \pi}{3} \frac{r}{(m c^2)^3} = 1.41733 \times 10^{-14} \frac{msW}{GeV^4} = 8.846 \times 10^{-5} \frac{m}{GeV^3} \quad 2.22$$

2.5 Sinkrotron Halkasında Kullanılan Magnetler

Manyetizmanın keşfi 4000 yıl öncesine dayanmaktadır. “Magnet (mıknatıs) kelimesinin kökeni Yunancadır. Efsaneye göre bu isim, sürüsünü otlatırken ayakkabısının çivileri ve sopasının ucu manyetit (Fe_3O_4) adı verilen kayalara yapışıp kalan “Magnes” adlı bir çobandan gelmektedir. M.Ö. VI. yy’da yaşamış olan M. Thales, Manisa (Magnesia) bölgesindeki Spıl Dağı eteklerinde bulduğu bir taşın demiri çektiğini görünce, bu taşın yörenin adına atfen “Magnesia taşı” adını vermiştir. Aynı zamanda mıknatısla ilgili ilk deneyleri de M. Thales yapmıştır.” (Daniel 1981).

Magnetler, ilk olarak pusulada kullanılmıştır. 1269 yılında, P. Maricourt, doğal bir mıknatısın yüzeyine ve çevresine iğneler yerleştirilip iğnelerin aldığı yönlerden yararlanarak bir mıknatısın çevresindeki manyetik etkiyi gözlemlemiştir. Manyetik alan büyüklükleri konusunda bize fikir vermesi açısından, laboratuvarlarda kullanılan magnet tiplerinin alan büyüklüklerinin; laboratuvar magneti, Dünya, insan beyni gibi yapılarla kıyaslanması Çizelge 2.2’de sunulmuştur.

Çizelge 2.2 Çeşitli kaynakların manyetik alan büyüklüklerinin kıyaslanması

Manyetik Alan Kaynağı	Büyüklüğü (T)
Kuvvetli süperiletken laboratuvar magneti	30
Kuvvetli sıradan laboratuvar magneti	0.1
Tıpta kullanılan MR birimi	2
Güneş’in yüzeyi	10^{-2}
Dünya’nın yüzeyi	0.5×10^{-4}
İnsan beyninin içi (sinir atımlarından kaynaklı)	10^{-13}

2.5.1 Yüklü parçacık demetlerinin manyeto-optiği

Manyetik ve elektrik alanlar birçok şekilde üretilebilirler. Genel olarak bu alanlar, gelişigüzel yönlerde, farklı konumlarda ve değişen güçlerde ortaya çıkabilir. Rastgele bir alan dağılımında, yüklü parçacıkların tam yolu için genel bir matematiksel formül elde etmek imkansızdır. Parçacık demeti taşıma sistemlerini tasarlamak için, kullanılan elektromanyetik alanların özellikleri ile ilgili bazı düzenleme ve basitleştirmenin

gerekliliği benimsenmiştir.

Demet optiklerinde genel amaç, yüklü parçacıkları istenilen bir yol boyunca, A noktasından B noktasına taşımaktır. Bu ideal yol boyunca konuşlandırılan çeşitli magnetler, magnetik örgüyü oluşturmaktadır. Bir yüklü parçacık demeti taşıma sistemini bükücü (eğici veya dipol) ve odaklayıcı (kuadrupol) magnet parametrelerini içeren eksiksiz optik sistem olarak tanımlayabiliriz. Daha uzun demet hatları üretmek için periyodik veya simetrik örgü sistemleri gelişigüzel sayıda tekrarlanabilir. Magnetler sistematik bir şekilde sıralanarak kapalı bir halka oluşturduğunda, belirli bir periyodik magnet örgüsü elde edilmiş olur.

Yüklü bir parçacığı önceden tanımlanmış bir yol boyunca yönlendirmek için merkezci kuvvet ve Lorentz kuvvet dengesi ile belirlenen parçacıkları saptıran manyetik alanlar kullanılır.

$$m \gamma V^2 \kappa + e [\mathbf{V} \times \mathbf{B}] = 0 \quad 2.23$$

Yukarıdaki denklemde $\kappa = (\kappa_x, \kappa_y, 0)$ yerel eğrilik olarak tanımlanır ($\kappa_{x,y} = 1/\rho_{x,y}$, $\rho_{x,y}$ yörüngenin eğrilik vektörüdür). Yukarıdaki eşitlikte, manyetik alan vektörünün ($\mathbf{B}$) hız vektörüne ($\mathbf{V}$) normal olarak yönlendirildiğini varsayıyoruz. Bu varsayım ile demet dinamiği formülasyonunu basitleştirmek adına, lineer demet dinamiğinin hareketini tamamen enine alanlarla kısıtlamış oluyoruz. Rölativistik demetler için parçacık hızlarının enine bileşenleri, parçacık hızı V_z 'ye ($V_x \ll V_z$, $V_y \ll V_z$, $V_z \approx V_s$) göre çok küçüktür. Yüklü parçacığın momentumunun ($p = \gamma m V$) yüküne oranı p/e ; manyetik katılık olarak adlandırılmaktadır (manyetik katılık: $B\rho$). Bir hızlandırıcıda yüklü parçacıklar yörünge düzlemine dik olarak uygulanan manyetik alan etkisi altında, belli bir ρ yarıçapı ile arzu edilen doğrultuya bükülüp yönlendirilebilir (Eşitlik 2.24).

$$\frac{1}{\rho} = \left| \frac{e}{p} B \right| = \left| \frac{e c}{\beta E} B \right| \quad 2.24$$

B alanı etkisinde, tam bir yörüngede, bir parçacığın açısal dönüş frekansı aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$\omega = \left| \frac{e c^2}{E} B \right| \quad 2.25$$

Yukarıdaki ifade Larmor frekansı olarak bilinir (Larmor 1897). Genellikle, magnet gücünü normalleştirmek için aşağıdaki ışın sertliği ifadesi tanımlanır:

$$|B \rho| = \frac{p}{e} \quad 2.26$$

Pratik birimler kullanarak, ışın sertliği ve eğrilik ifadeleri aşağıdaki şekilde elde edilir:

$$B \rho \text{ (Tm)} = \frac{10}{2.998} \beta E \text{ (GeV)} \quad 2.27$$

Burada ρ eğrilik yarıçapıdır ve aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$\frac{1}{\rho} \text{ (m}^{-1}\text{)} = \frac{|B|}{|B \rho|} = 0.2998 \frac{|B \text{ (T)}|}{\beta E \text{ (GeV)}} \quad 2.28$$

Relativistik parçacıklar için yukarıdaki ifadede ($\beta \approx 1$) alınır. Manyetik alandaki sapma açısı aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\theta = \int \frac{ds}{\rho} \quad 2.29$$

Bükücü alanlar gibi değişmeyen alanlar için (l_m magnetin kavis uzunluğu olmak üzere) manyetik alandaki sapma açısı aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$\theta = \frac{l_m}{\rho} \quad 2.30$$

Manyetik potansiyellerin ifadeleri, istenen alanları üreten cihazları tasarlama konusunda fikir vermektedir. Çok kutuplu alanlar, çoğunlukla: Demir ağırlıklı magnetler yardımıyla veya elektrik akımı taşıyan iletkenlerin doğru yerleştirilmesi yöntemiyle olmak üzere iki şekilde üretilir. İkinci yöntem çoğunlukla süperiletken magnetlerde, yaklaşık 2 T ve üzeri yüksek manyetik alan şiddeti istenildiği durumda, kullanılmaktadır. Demir ağırlıklı magnetlerde, alanlar demir yüzeylerin şekli ile belirlenir. Metalik yüzeyler, elektrik alanları için eşpotansiyel yüzeylerdir. Demirin asla

sonsuz geçirgenliğe ulaşmaması, istenen manyetik potansiyele göre tasarlanmış demir yüzeyler oluşturarak, belirli çok kutuplu magnetler üretilebilmesine engel değildir. Ön tasarım hesaplamaları için, ferromanyetik malzemenin sonsuz geçirgenliğini varsaymak yeterlidir (Wiedemann 2007).

2.5.2 Yüklü parçacıkların manyetik alan içerisindeki hareketi ve magnet etkileri

Yüklü bir parçacığın dairesel hareketini Şekil 2.3'te gösterilen kartezyen koordinat sistemiyle $K=(x, z, s)$ şeklinde tanımlayabiliriz. Demet doğrultusu s , yatay ve dikey eksenler sırasıyla x ve z olarak belirlenmiştir. Sadelik açısından, parçacıkların esas olarak s doğrultusunda paralel hareket ettiğini $V = (0, 0, V_s)$ ve manyetik alanın yalnızca enine bileşenlerinin olduğunu varsayarak $B = (B_x, B_z, 0)$ varsayıyoruz. Manyetik alanda, yatay düzlemde hareket eden bir parçacık için, Lorentz kuvveti $F_x = -e v_s B_z$ ve merkezci kuvveti $F_r = \frac{m V_s^2}{R}$ arasında bir denge vardır. Burada m , parçacık kütlesi ve R , yörüngenin eğrilik yarıçapıdır. $p = m V_s$ dengeleyici kuvveti, aşağıdaki eşitliğin oluşmasına yol açmaktadır:

$$\frac{1}{R(x, z, s)} = \frac{e}{p} B_z(x, z, s) \quad 2.31$$

Dikey sapma için karşılık gelen bir ifade, demetin enine boyutları, parçacık yörüngesinin eğrilik yarıçapına kıyasla küçük olduğundan, manyetik yörüngesinin ideal yörünge yakınında olduğu durumda aşağıdaki eşitlikteki gibi genişletilebilir:

$$B_z(x) = B_{z0} + \frac{dB_z}{dx} x + \frac{1}{2!} \frac{d^2 B_z}{dx^2} x^2 + \frac{1}{3!} \frac{d^3 B_z}{dx^3} x^3 + \dots \quad 2.32$$

Yukarıdaki eşitliğin her iki tarafını e/p ile çarparak aşağıdaki ifade elde edilebilir:

$$\begin{aligned} \frac{e}{p} B_z(x) &= \frac{e}{p} B_{z0} + \frac{e}{p} \frac{dB_z}{dx} x + \frac{1}{2!} \frac{e}{p} \frac{d^2 B_z}{dx^2} x^2 + \frac{1}{3!} \frac{e}{p} \frac{d^3 B_z}{dx^3} x^3 + \dots \quad 2.33 \\ &= \frac{1}{R} + k x + \frac{1}{2!} m x^2 + \frac{1}{3!} o x^3 + \dots \end{aligned}$$

Demetin etrafındaki manyetik alan, her biri parçacığın yolu üzerinde farklı bir etkiye sahip olan çok kutupluların bir toplamı olarak kabul edilebilir. Bu doğrultuda, Eşitlik 2.33'ün sağındaki terimler 2^n 'nci kutup etkisi olarak tanımlanabilir. Burada, n terimin eşitlikteki konumu olmak üzere, 2^n 'nci kutup etkisi olarak tanımlanabilir. Bu doğrultuda 1'inci terim iki kutuplu alan etkisi, 2'nci terim 4 kutuplu alan etkisi olarak sıralanır. Bahsettiğimiz çok kutuplu magnetler, Çizelge 2.3'te listelenmiştir.

Hızlandırıcılarda sadece demeti yönlendirmek için, zayıf kuvvette ilk iki çok kutuplu magnetler kullanılırsa lineer demet optiğinden bahsedilebilir. Çünkü mevcut bükme kuvveti tek bir değer olur (bükme yarıçapı R olan bükücü magnet etkisi) ve enine yer değiştirmeyeyle doğrusal olarak artar (kuvvet parametresi k olan dörtkutuplu alan etkisi). Daha yüksek multipoller (altı kutuplu alan, sekiz kutuplu alan vb.) ya istenmeyen alan hatalarıdır ya da bilinçli olarak alan düzeltmesi gibi özel bir amaç için eklenmiştir (Wille 1996).

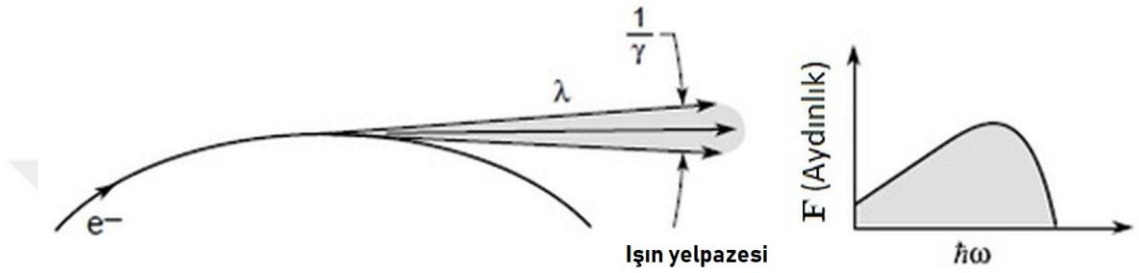
Çizelge 2.3 Çok kutuplu magnetlerin yaklaşık alan büyüklükleri

Çok kutuplu	Eşitlik	Etkisi
İki kutuplu magnet	$\frac{1}{R} = \frac{e}{p} B_z(x)$	Demeti bükmek
Dört kutuplu magnet	$k = \frac{e}{p} \frac{dB_z}{dx}$	Demeti odaklamak
Altı Kutuplu magnet	$m = \frac{e}{p} \frac{d^2 B_z}{dx^2}$	Kromatik hataları düzeltmek
Sekiz kutuplu magnet	$o = \frac{e}{p} \frac{d^3 B_z}{dx^3}$	Alan hatalarını düzeltmek

Gelecek bölümlerde, boyundurukları demirden olan ve manyetik alanın kutuplardaki sarımlardan akan alan tarafından üretildiği, hızlandırıcılarda en sık kullanılan magnet türleri tanımlanacaktır.

2.5.3 Dipol magnet

Dipol magnetler (eğici veya bükücü), parçacıkların dairesel hareketi bükücü magnetlerle sağlanmaktadır. Hızlandırıcılarda elde edilen ışınlımlar, genel olarak hafif yüklü parçacıkların göreceli enerjilerle dairesel yörünge hareketi sırasında yaptıkları elektromanyetik ışıma dayanır. $1/\gamma$ yayılım açısı olmak üzere, Şekil 2.5'deki çizimde bükücü magnet ışınlımının grafiği sunulmuştur (Attwood 2007).



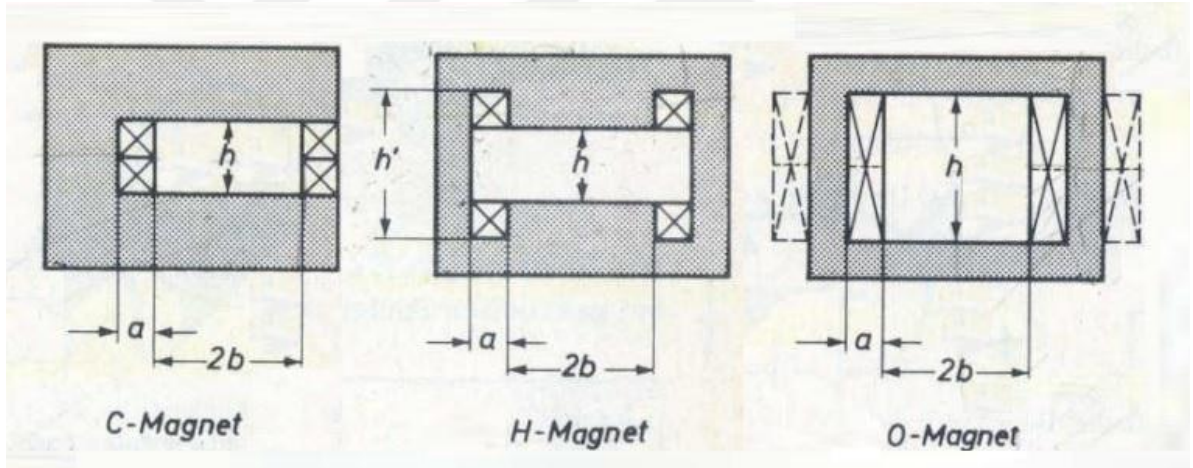
Şekil 2.5 Bükücü magnet ışınlımı (Attwood 2007)

Şekil 2.6'da APS-U projesi kapsamında kullanılması planlanan ve test hattına yerleştirilmiş tipik bir bükücü magnet gösterilmiştir.



Şekil 2.6 APS-U bünyesinde test sürecindeki tipik bir eğici magnetin görünümü

Hızlandırıcı sistemlerde kullanılan bükücü magnetler 3 çeşittir. Bunlardan en yaygın kullanılan C-tipi magnettir. H-tipi magnetin de kullanım alanı olmakla beraber, O-tipi (pencere çerçevesi) magnetlerin kullanım alanı oldukça dardır. Şekil 2.7’de magnet tiplerinin geometrileri gösterilmiştir. Hangi tip bükücü magnetin tercih edileceği kullanım amacına bağlıdır. Burada her tip magnetin artı ve eksileri belirleyicidir. En çok tercih edilen C-tipi magnetler klasik tasarıma sahiptir. Magnet içerisine kolaylıkla erişilebilir olması bu tip magnetleri ön plana çıkarmaktadır. H-tipi magnetler simetrik ve istikrarlı olması bakımından tercih edilirler. O-tipi magnetler ise yüksek kalitede manyetik alan sağlaması, simetrik ve sert bir yapıya sahip olması bakımından öne çıkmaktadır. Ayrıca bu tip magnetlerde ince metal plakaların (pole shim) kullanımına ihtiyaç yoktur. C-tipi ve H-tipi magnetlerde metal plakaların kullanımı zorunludur. Ek olarak H-tipi magnetlerde magnet içerisine erişim zor olduğu için yönetimi zordur (Mühle 2017).



Şekil 2.7 Bükücü (dipol) magnet çeşitleri (Mühle 2017)

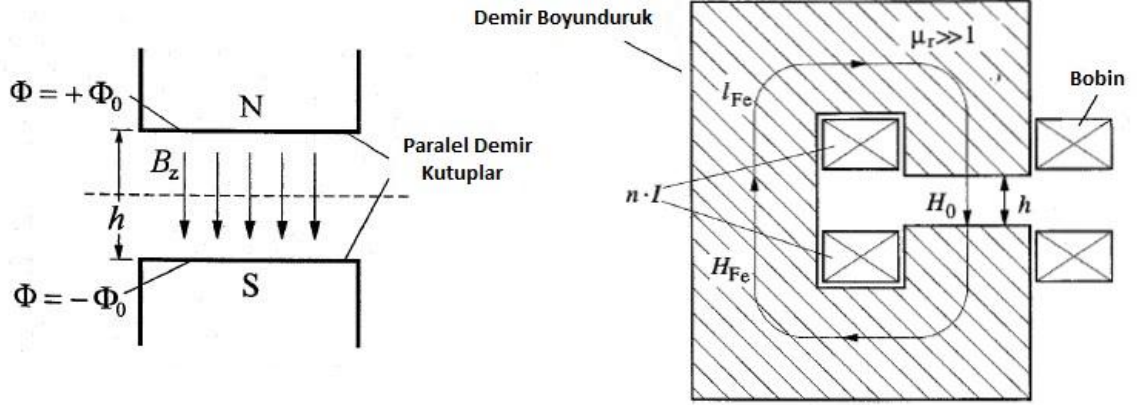
Yüklü parçacıklar x ekseni boyunca aşağıdaki gibi belirlediğimiz sabit bir alana sahiptir:

$$G_z(x) = B_0 = \text{sabit} \quad 2.34$$

Gerekli potansiyel ifadesini aşağıdaki şekilde tanımlayabiliriz:

$$\phi(x, z) = B_0 z \quad 2.35$$

Eşpotansiyel ifade $\phi(x, z) = \phi_0 = \text{sabit}$, bu nedenle x eksenine paralel olarak z mesafesinden geçen bir çizgidir (Şekil 2.8).



Şekil 2.8 İki paralel demir iletkenlerden oluşan C-Tipi magnet üzerindeki Akım (I) ve Manyetik Alan (B) ilişkisi (Wille 1996)

Bükücü magnetler, x eksenine göre simetrik iki demir kutuptan oluşur. Kutup uçları arasında, magnet boyundurukları etrafındaki akım ve bunun sonucu oluşan manyetik alan en basit şekilde Maxwell denklemi kullanılarak hesaplanabilir ($\oint H ds = I_{tot}$). Burada bobinlerin sarım sayısı n ve sarımlardan geçen akım değerini de I olarak kabul edildiği durumda, toplam akım değeri $I_{tot} = nI$ olacaktır. Çözümü sadeleştirmek adına, kutup uçları arasındaki H_0 alanını ve demir boyunduruktaki alanı H_{Fe} sabit bir değer olarak kabul edilmiştir. $H_{Fe} = H_0/\mu_r$ ve $\mu_r \gg 1$ yaklaşımıyla aşağıdaki eşitlik yazılabilir:

$$nI = \oint H ds = H_{Fe} l_{Fe} + H_0 h \approx H_0 h \quad 2.36$$

$\mu_r = 1$ olduğu durumda, magnet uçları arasındaki manyetik alan değeri $B_0 = \mu_0 H_0$ olarak tanımlanabilir. Böylelikle bükücü magnet için manyetik alan ifadesi aşağıdaki formda düzenlenebilir:

$$B_0 = \mu_0 \frac{nI}{h} \quad 2.37$$

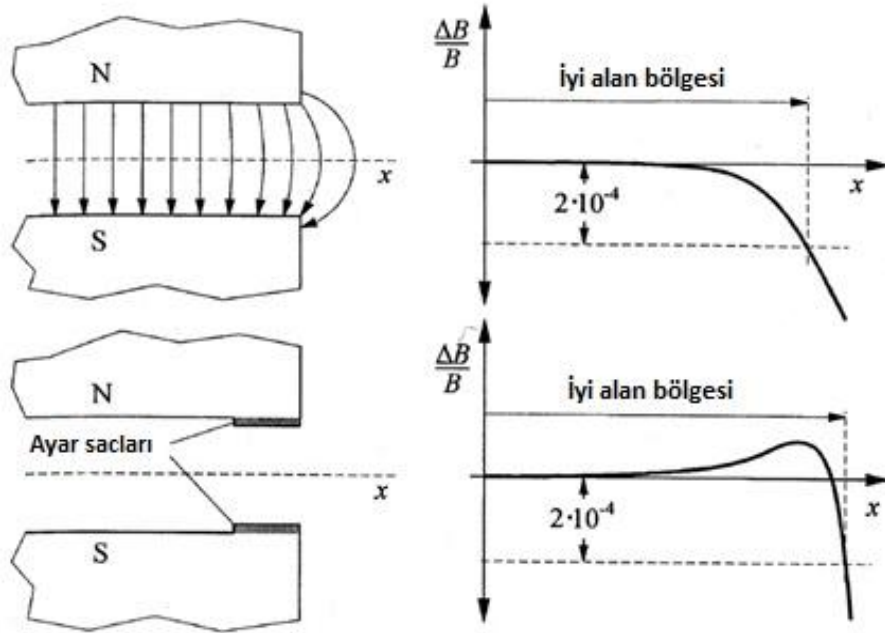
Yukarıdaki eşitlikten hareketle bükücü magnetin kuvvet ifadesi aşağıdaki şekilde

yazılabilir:

$$\frac{1}{\rho} (m^{-1}) = C_P \frac{B(T)}{c p (GeV)} \quad 2.38$$

Eşitlikte $C_P = [c] e = 0.299792 \text{ GeV/mT}$ sabit bir değer, ρ eğrilik yarıçapı, B manyetik alan, c ışık hızı ve p elektronun momentumudur.

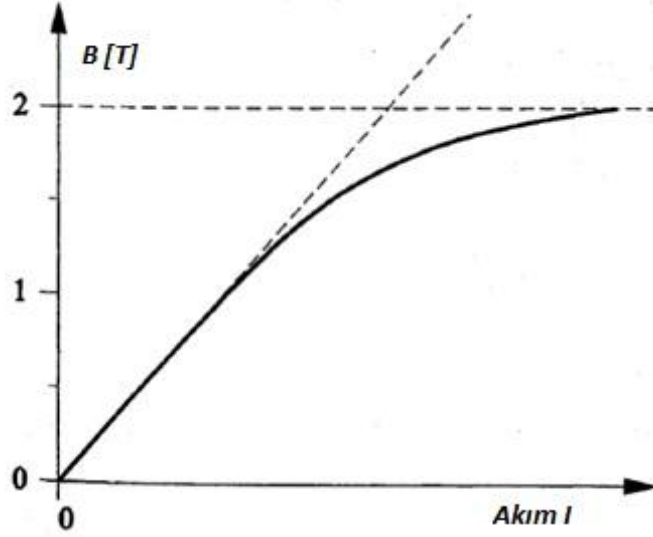
Homojen bir alan sadece sonsuz uzun kutuplar tarafından üretilebilir. Laboratuvar ortamında bu ideal alandan sapmalar olacaktır. Magnetin merkezi ekseninden, belirli bir yatay mesafenin ötesinde kutupların kenarındaki alan çizgilerinin dışarı doğru itildiğinden ötürü alanın düştüğü anlaşılmaktadır (Şekil 2.9). Bu durum, yararlı bölge alanını kısıtlar. Alanın sınırı, genellikle alanın bir faktör tarafından azaldığı mesafe olarak kabul edilir ($\Delta B/B \sim 2 \times 10^{-4}$).



Şekil 2.9 Bükücü magnet kutupları arasındaki alanın sınırları (Wille 1996)

Alandaki azalma, ince metal plaka şeklindeki yassı demir şeritlerin (pole shim) kutup uçlarına takılmasıyla kısmen telafi edilebilir. Böylece alanın belirli bir kutup genişliği için yararlı bölgesi artırılmış olur. Ferro magnetlerdeki bir başka problem, Şekil 2.10'daki manyetik uyarılma eğrisinden görülebileceği gibi doygunluktur. Düşük alan

kuvvetlerinde ($B < 1$ T), manyetik alan ve akım arasındaki ilişki çok iyi bir yaklaşımla doğrusaldır.

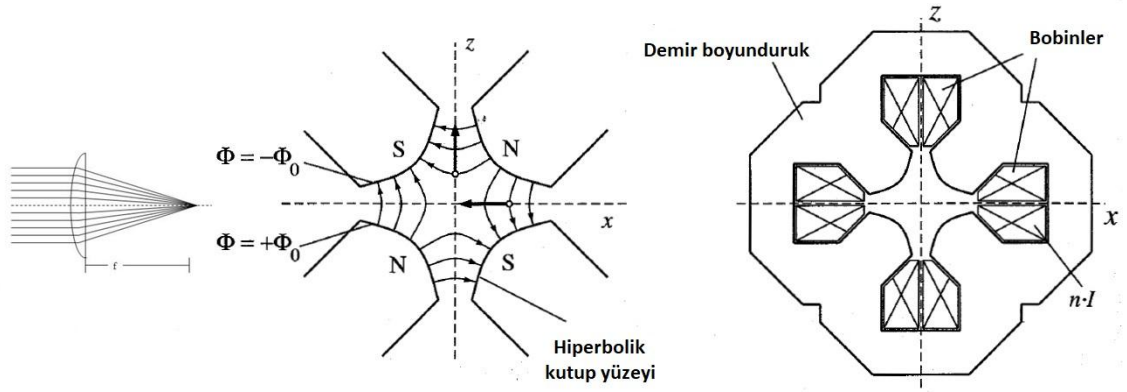


Şekil 2.10 Yüksek alan kuvvetlerinde manyetik alan B ile bobin akımı I arasındaki ilişki (Wille 1996)

1 T'nın üzerinde, manyetik alan akımın gerisinde kalır ve 2 T civarında sabit bir değerde doğrusallaşır. Bu noktadan sonra akımı arttırmak anlamsızdır. Bu nedenle, elde edilen manyetik alan değeri ferro magnetler için mutlak üst limiti temsil etse de pratikte bu değerin çok altındaki değerlere ulaşılabilir (1.5 T'yı aşamazlar). Demeti odaklamak için, demet eksenini boyunca kaybolan ve enine mesafe x eksenini ile doğrusal olarak artan dörtlü alanlar kullanılır.

2.5.4 Kuadrupol magnet

Kuadrupol magnetler, diğer bir adıyla odaklayıcı magnetler demetin bir arada tutulması için kullanılır. Odaklayıcı magnetin temel davranışı Şekil 2.11'de gösterilmiştir.



Şekil 2.11 Odaklayıcı magnetin temel davranışı ve yapısı (Wille 1996)

Yüklü parçacık demeti yörünge boyunca ilerlerken dağılma eğilimindedir. Kuadrupol magnetler, bir düzlemde demeti odaklarken diğer düzlemde dağıtırlar. Bu nedenle, demetin hem yatay hem de düşey ekseninde dağılmadan hareket edebilmesi için dağıtıcı ve odaklayıcı kuadrupoller belirli bir dizilime tabi olması gerekir. Hızlandırıcı halkadaki demetin alan formu aşağıdaki eşitlik ile gösterilebilir:

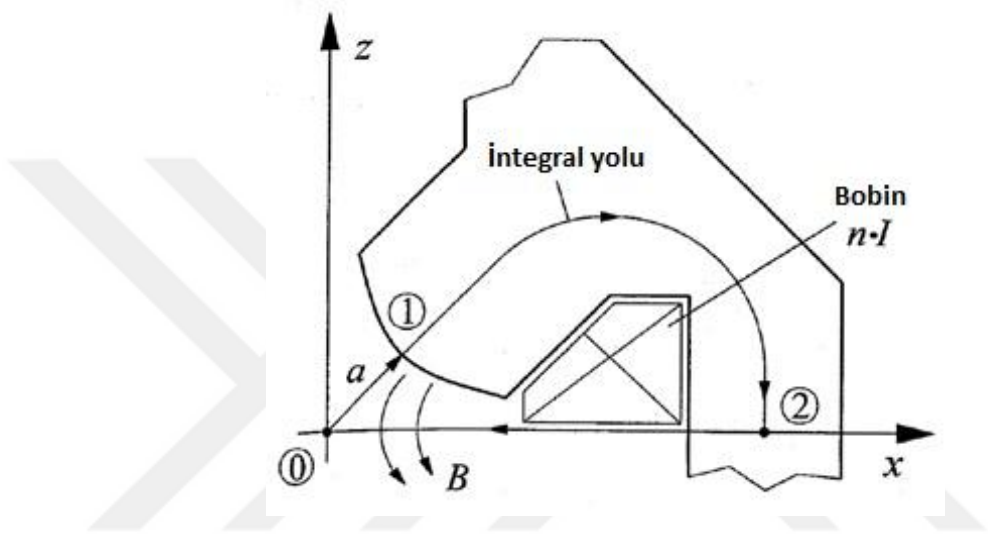
$$G_z = g x, \quad g = \frac{dB_z}{dx} \quad 2.39$$

Bu aşamada genel potansiyel ifadesi göz önünde bulundurularak ($\Phi(x, z) = G_z(x) z - \frac{1}{6} \frac{d^2 G_z(x)}{dx^2} z^3$) gerekli potansiyel aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\psi(x, z) = g x z \quad 2.40$$

Verilen bir ψ_0 değeri için $z(x)$ eşpotansiyelleri, bu formun hiperbolleridir. Bu nedenle, bir dört kutuplu magnet, Şekil 2.11'de gösterildiği gibi, Kuzey-Güney-Kuzey-Güney kutupları ile düzenlenmiş hiperbolik yüzeylere sahip dört adet kutuptan oluşmaktadır. Kutuplar, etraflarındaki bobinlerden geçirilen akım yardımıyla uyarılırlar. Sonuç olarak oluşan alan çizgilerinin kutuplar arasındaki dağılımı, demeti dikey veya yatay düzlemde odaklayan, diğer düzlemde de dağıtan bir magnete neden olur. Yani dört kutuplu magnetler bir düzlemde odaklama yapıyorsa aynı anda diğer düzlemde de demeti dağıtmaktadır. Bu nedenle, demeti düzgün bir şekilde odaklamak için, birbirine göre 90° döndürülerek konumlandırılmış en az iki dört kutuplu magnet kullanılması gerekir.

Bobinlerdeki akım I ve $g = \frac{dB_z}{dx}$ ekseninin alan gradyanı arasındaki ilişki $\oint H d_s$ integralinin tekrar hesaplanmasıyla belirlenebilir. Şekil 2.12’de gösterilen magnet kesitinde, bobinin etrafına uygun bir kapalı kontur seçilir. Demet eksenini (0 noktası) üzerinde başlar ve kutup ucunu ortalayarak devam eder (1 noktası), demir boyunduruk içerisinde geçerek x eksenini keser (2 noktası) ve oradan başlangıç noktasına döner.



Şekil 2.12 Dört kutuplu magnetin çeyrek kesiti üzerinde, akımın fonksiyonu olarak alan gradyanının hesabında izlenecek kontur (Wille 1996)

Belirtilen kontur üzerindeki tam dolanımın parçalı integral formu aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\oint H d_s = \int_0^1 H_0 d_s + \int_1^2 H_{Fe} d_s + \int_2^0 H d_s = nI \quad 2.41$$

Demir boyunduruk içinde, H_{Fe} 'nin integral değeri ihmal edilebilir ($\mu_r \gg 1$). Aynı zamanda, x eksenini boyunca integral de sıfırdır. Çünkü burada her zaman manyetik alan s doğrultusuna diktir. Bu nedenle sadece demet eksenini ile kutup arasındaki alan dikkate alınır. Bu alan değeri, potansiyel ifadesinden hareketle (Eşitlik 2.42) aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$B_x = gz, B_z = gx \quad 2.42$$

Sıfır noktasından bir noktasına doğru çizilen konturdan, manyetik alana gelen katkıyı aşağıdaki eşitlikle gösterebiliriz:

$$H = \frac{g}{\mu_0} \sqrt{x^2 + z^2} = \frac{g}{\mu_0} \sqrt{2}x = \frac{g}{\mu_0} r \quad 2.43$$

Burada seçilen özel kontur için $x = z$ ve orjinden kutup ucuna kadar olan uzaklığın da yarıçap olduğu görülmektedir. Yarıçapın a olduğu durumda, bahsettiğimiz diğer yaklaşımları dikkate alarak, Eşitlik 2.44'yı aşağıdaki şekilde yazabiliriz:

$$\int_0^a H dr = \frac{g}{\mu_0} \int_0^a r dr = \frac{g}{\mu_0} \frac{a^2}{2} = nI \quad 2.44$$

Buradan gradyen ifadesi aşağıdaki gibi düzenlenebilir:

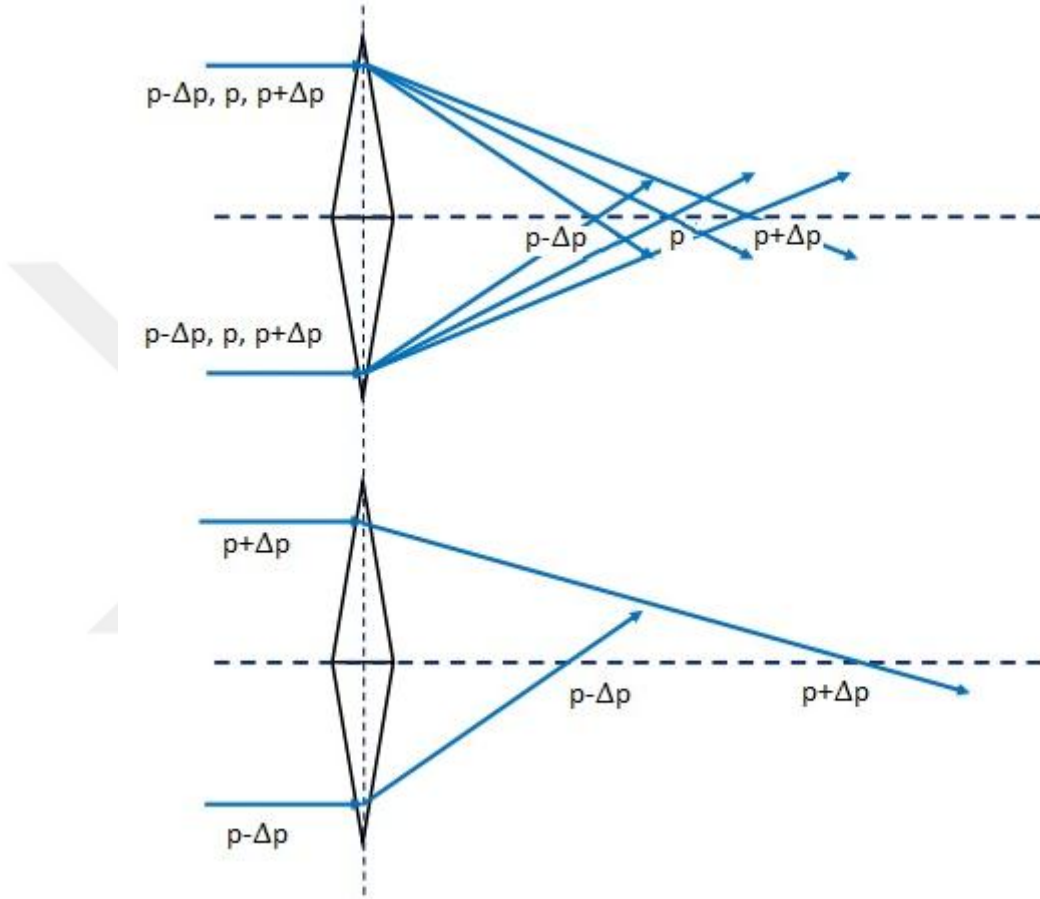
$$g = \frac{2 \mu_0 n I}{a^2} \quad 2.45$$

Burada dört kutuplu magnetler için elde ettiğimiz gradyen ifadesi bize şunu söylemektedir: $g \propto 1/a^2$ olduğu durumda kutup ucu, magnetin merkezinden uzaklaştıkça ihtiyaç duyulan akım miktarı artar. Diğer bir ifadeyle magnetin ihtiyaç duyduğu güç miktarı artar (Wille 1996). Elektron demeti şiddetinin yüksek olduğu depolama halkalarında kapalı yörünge bozulması hata kaynaklarından bir tanesidir. En büyük etki dört kutuplu magnetlerin hizalama hatalarından gelmektedir. Kapalı yörünge bozulmasına maruz kalan parçacıklar kapalı yörüngeye dışına kaçacaklardır.

2.5.5 Sekstupol magnet

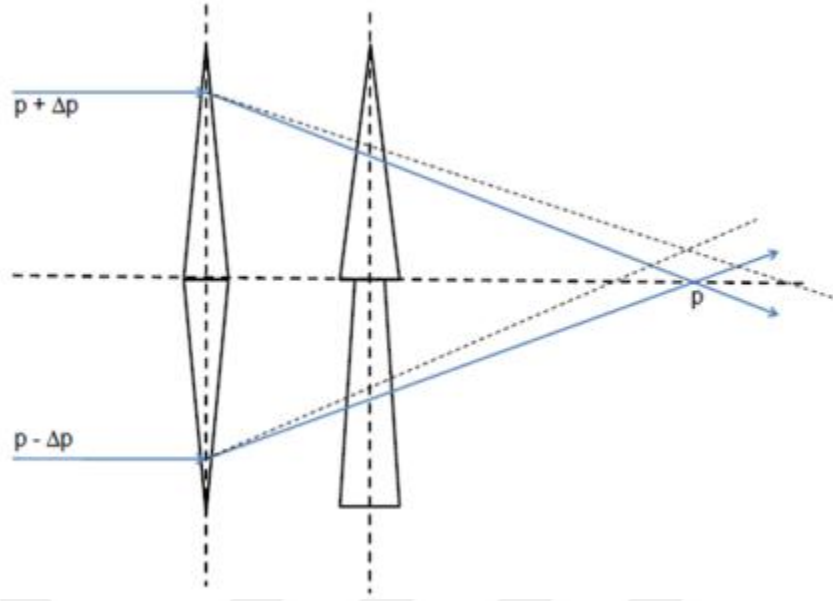
Altı kutuplu magnetlerdir. Temel işlevi kromatikliği ayarlamak olsa da kuadrupol magnetlerde olduğu gibi, demeti odaklamayı da sağlar. Ayrıca uç noktalarda demete etki ederek, kromatik sapmayı düzelten optik yapılarıdır.

Kromatiklik, demeti oluşturan parçacıkların enerjilerindeki farklılığın bir ölçüsü olarak tanımlanabilir. Diğer bir ifadeyle, demetteki parçacıkların enerji ve frekans değerlerindeki değişimdir. Şekil 2.13'te tasarlanan örgü içerisinde sekstupol magnetin eksikliğinde ortaya çıkan durum gösterilmiştir. Burada farklı enerjilerdeki parçacık demetleri, momentum eşitsizliğinden ötürü farklı noktalara odaklanmaktadır.



Şekil 2.13 Sekstupol magnetlerin olmadığı durumda odaklanma durumu

Diğer örnekte, örgü içerisinde sekstupol magnet kullanıldığında oluşan odaklanma durumu gösterilmiştir. Burada ise parçacık demetleri momentum değerlerindeki farklılığa rağmen aynı noktaya odaklanabilmektedirler. Dolayısıyla aynı enerji değerindedirler. Sonuç olarak bu iki örnek karşılaştırıldığında sekstupol magnetin örgü içerisindeki önemli rolü ortaya çıkmaktadır.



Şekil 2.14 Sekstupol magnetlerin varlığında odaklanma durumu

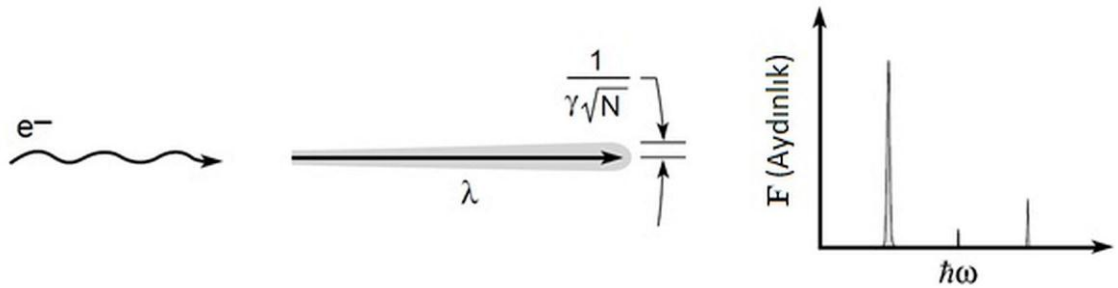
2.5.6 Eklenti aygıtları (Insertion devices (ID))

Sinkrotron halkası üzerinde ayrılmış düz kısımlara yerleştirilen ve eklenti aygıtlar olarak bilinen salındırıcı ve zigzaglayıcı magnetlerdir (undulator ve wigglers). Bu magnetlerden düşük yayımlı elektron demeti geçirilerek, bükücü magnetlerden elde edilen ışıınımdan 10^4 kat daha güçlü ışıınımlar elde edilebilmektedir. Salındırıcı magnetler temelde bir dizi bükücü magnetin ard arda sıralanmasıyla oluşur. Şekil 2.15'te gösteriler salındırıcı magnetler testleri yapılırken fotoğraflanmıştır.



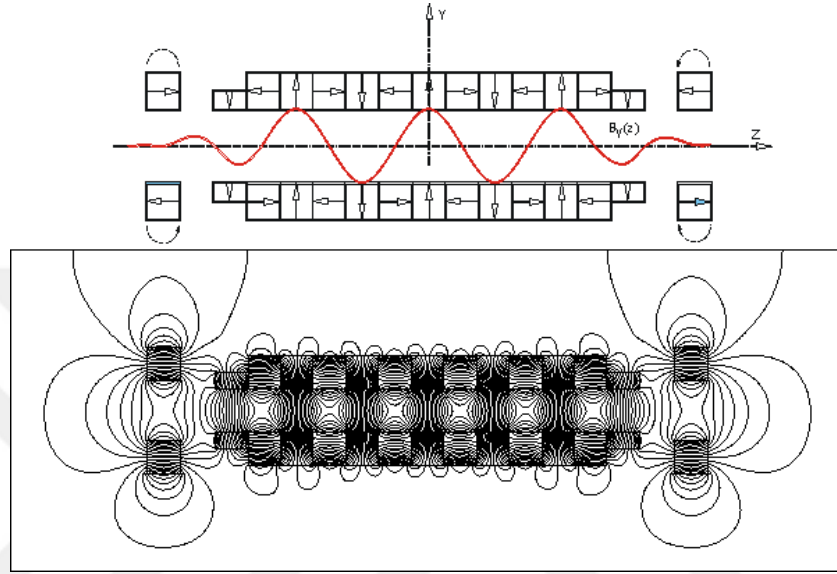
Şekil 2.15 APS bünyesinde kullanılan Revolver tipi undulator (solda) ve model görünümü (sağda)

Salındırıcı magnetlerden elde edilen ışınım oldukça parlak, koherent ve yayılımı sık olabilir. Bükücü magnetlere kıyasla yayılım açısı $\sqrt{N}$ kat daha dardır (N: Periyot sayısı). Salındırıcı magnetler kullanılarak harmonik ışınım üretilebilir fakat bu magnetin uzunluğuna bağlıdır. Salındırıcı magnet ışınımı yüklü parçacıkların $\pm 1/\gamma$ aralığında yayılmasına izin verir.



Şekil 2.16 Salındırıcı magnetin ışınımı (solda) ve spektrumu (sağda) (Attwood 2007)

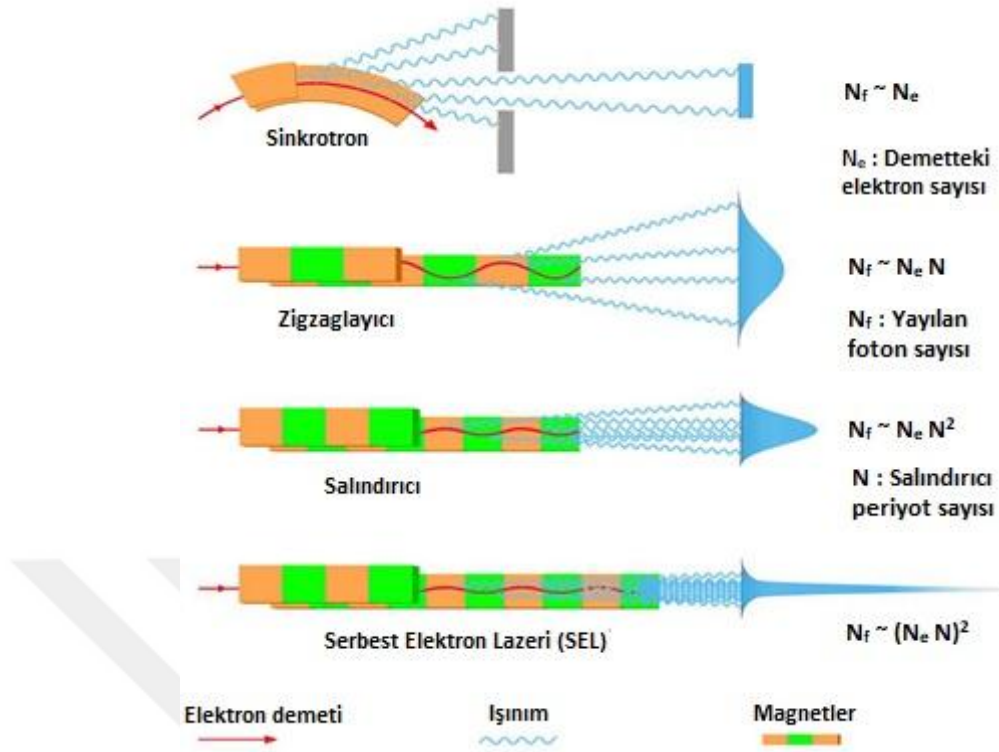
Şekil 2.16’da salındırıcı magnet ışınımının enerji değerlerinin kesikli olduğu görülmektedir (Attwood 2007). Bu özelliği istenilen aralıktaki dalga boyunda çalışılmasına olanak sağlamaktadır. Diğer yandan, bükücü ve zigzaglayıcı magnetlerde enerji dağılımları sürekli dir. Şekil 2.17’nin üst kısımda mıknatıslanma doğrultusu, alt kısmında alan dağılımı gösterilmiştir.



Şekil 2.17 Salındırıcı magnetin kutuplardaki manyetik alan dağılımı

Zigzaglayıcı magnet yapısı da salındırıcı magnete benzerdir. Işıma spektrumu bükücü magnetlerde olduğu gibi çok geniştir. Magnet içerisinde ivmelendirme daha yüksek ve yüksek foton enerji değerlerinde pikler üretilebilmektedir. Çok daha fazla ışınım olsa da bu magnetlerden yayılan ışınım daha az parlaktır. Bu magnetlerden elde edilen ışınım yüksek foton enerjileri için tercih edilmektedir.

Bir undulatörde enine doğrultuda elektron hareketi, açılma açısı sırasına göre ayarlanır. Ancak bir zigzaglayıcıda, hareketin, açılma açısından daha büyük olması sağlanır ve bu nedenle daha geniş bir ışın ortaya çıkar. Şekil 2.18’de zigzaglayıcı magnetten çıkan ışınımın, salındırıcıdan çıkan ışınımına göre şiddetinin daha az olduğu çizimle gösterilmiştir (Zhukovsky 2016).



Şekil 2.18 Sinkrotron ışınımı kaynakları ve yayılan ışınım (Shaftan 2018)

Zigzaglayıcı magnetler için kuvvet parametresi (K), B manyetik alan, λ_p magnet periyodu olmak üzere aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$K = 0.934 B(Tesla) \lambda_p(cm) \quad 2.46$$

2.6 Hızlandırıcılarda Kullanılan Magnetlerin Fiziği

Hızlandırıcılarda magnetler, yüklü parçacık demetinin yönlendirilmesi ve odaklanması için kullanılırlar. Magnetler yardımıyla, kapalı bir yörünge boyunca demetin transferinin sağlanması amaçlanmaktadır. Hızlandırıcı magnetlerin temeli, vakum altında Maxwell denklemleri ve Lorentz kuvvetine dayanmaktadır. Maxwell denklemleri aşağıdaki eşitliklerle gösterilmiştir (Wiedemann 2007):

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 4 \pi \rho \quad 2.47$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{d\mathbf{B}}{dt} \quad 2.48$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad 2.49$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \frac{4\pi}{c} \frac{d\mathbf{E}}{dt} + \mathbf{J} \quad 2.50$$

Yukarıdaki Maxwell denklemlerinde; $\mathbf{E}$ elektrik alan, $\mathbf{B}$ manyetik alan, $\mathbf{J}$ akım yoğunluğu ve ρ serbest elektrik yük yoğunluğudur. Eşitlik 2.2’de ifade edilen, bir birim elektrik yükü taşıyan parçacık için Lorentz kuvveti üzerinden hareket edilirse, bu kuvvet hem elektrik hem de manyetik alandan kaynaklı iki bileşene sahip olduğu görülecektir. Ayrıca bu kuvvet sadece parçacık demetini yönlendirmede değil, aynı zamanda odaklamakta da kullanılır.

Hızlandırıcılarda kullanılan magnetler permanent magnetler ve elektromagnetler olmak üzere iki ana başlık altında toplanabilir. Ayrıca elektromagnetler; süperiletken ve normal iletken olmak üzere kendi içinde iki ayrı başlıkta gösterilebilir. Onlar da kendi içinde ikiye ayrılırlar. Süperiletken magnetler, bobin ağırlıklı ($B < 9 \text{ T}$) ve demir ağırlıklı ($B < 2 \text{ T}$) olarak iki kısımda; normal iletken magnetler ise bobin ağırlıklı ($B < 1 \text{ T}$) ve demir ağırlıklı ($B < 2 \text{ T}$) magnetler olmak üzere sınıflandırılabilir.

Bir $B(y)$ fonksiyonu, uzayda sabit bir çizgi üzerinde, keyfi manyetik alan çizgilerinin dağılımını tanımlayacak olursa, bu fonksiyonun Taylor seri açılımı aşağıdaki şekilde olacaktır:

$$B(y) = b_0 + \frac{b_1 y}{1!} + \frac{b_2 y^2}{2!} + \frac{b_3 y^3}{3!} + \dots \quad 2.51$$

Hızlandırıcılarda demir ağırlıklı bükücü magnetlerin tasarımlarında kullanılan, manyetik tasarım kıstaslarını belirleyen formüller aşağıda verilmiştir:

$$B = \frac{\mu_0 \eta N I}{g} \quad 2.52$$

$$N I = \frac{B g}{\mu_0 \eta} \quad 2.53$$

Yukarıdaki formüllerde geçen B bükücü magnetin merkezindeki alan, N her kutup için dönme sayısı, I akım ve g bükücü magnetin kutup uçları arasındaki açıklığı ifade etmektedir. μ_0 boşluğun geçirgenlik katsayısı olup, $4 \pi 10^{-7}$ H/m'dir. Demir ağırlıklı odaklayıcı magnetler için de benzer şekilde:

$$B' = \frac{2 \mu_0 \eta N I}{R_0^2} \quad 2.54$$

$$N I = \frac{B'' g}{2 \mu_0 \eta} \quad 2.55$$

Altı kutuplu magnetler için ise aşağıdaki gibi düzenlenebilir:

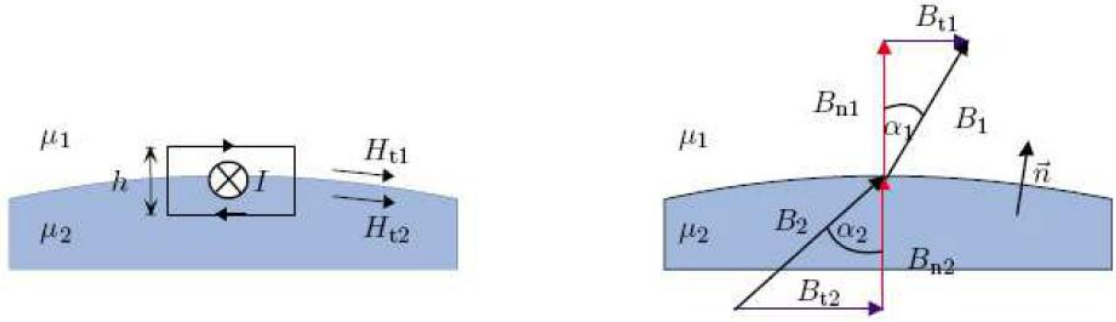
$$B'' = \frac{6 \mu_0 \eta N I}{R_0^3} \quad 2.56$$

$$N I = \frac{B'' R_0^3}{6 \mu_0 \eta} \quad 2.57$$

Odaklama etkisi demet üzerinde yatay ve dikey yönlerde olmak üzere iki farklı odaklama düzleminde gözlemlenebilir. Yatay yönde odaklanma, demetin yatay ebatını azaltırken aynı zamanda dikey ebatını artırır. Bu odaklayıcı kuadrupol olarak bilinirken, tam tersi etkiye sahip olanı ise dağıtıcı kuadrupol olarak bilinir.

2.6.1 Manyetik alan yüzey ilişkisi

Manyetik alanın geçirgen ortamdaki davranışı Şekil 2.19'da ara yüzeyler üzerinde gösterilmiştir. Eğer integral form üzerinde Ampere yasasını uygulanırsa Eşitlik 2.58'deki denklem elde edilir.



Şekil 2.19 Manyetik geçirgen iki farklı ortamdaki durum

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{s} = \int \mathbf{J} \cdot d\mathbf{A} \quad 2.58$$

Şekil 2.19’da gösterilen h değeri sıfıra yaklaştığı için, kapalı halkadaki akım değeri sıfır olmaktadır. Sonsuz küçük olan dikdörtgende akım olmayacağı için aşağıdaki eşitlikleri yazabiliriz:

$$H_{t1} = H_{t2} \quad 2.59$$

$$\mathbf{n} \times (\mathbf{H}_1 - \mathbf{H}_2) = 0 \quad 2.60$$

$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0$ olduğundan ötürü, ara yüzey için aşağıdaki denklemleri yazabiliriz:

$$B_{n1} = B_{n2} \quad 2.61$$

$$\mathbf{n} \cdot (\mathbf{B}_1 - \mathbf{B}_2) = 0 \quad 2.62$$

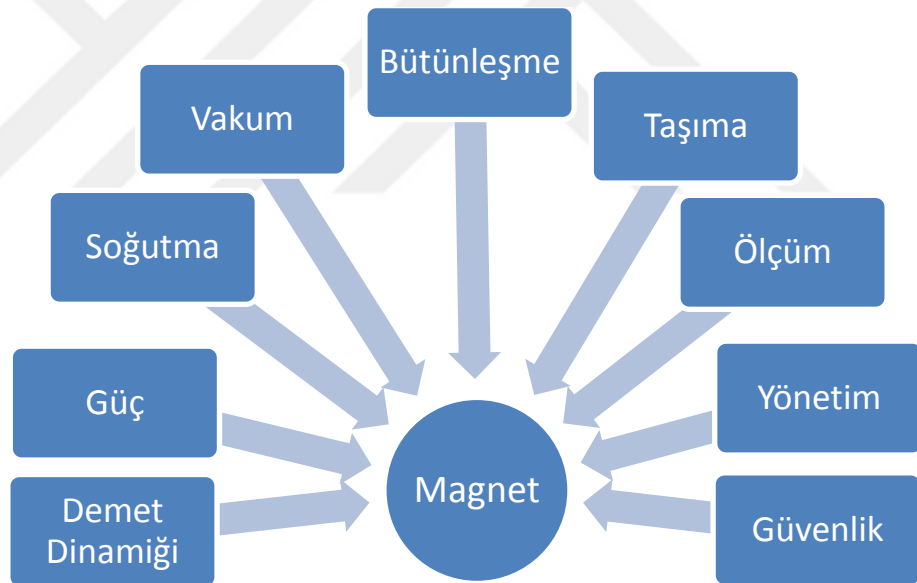
Yukarıdaki denklemlerden hareketle aşağıdaki eşitlik yazılabilir:

$$\frac{\tan \alpha_1}{\tan \alpha_2} = \frac{\frac{B_{t1}}{B_{n1}}}{\frac{B_{t2}}{B_{n2}}} = \frac{\mu_1 H_{t1}}{\mu_2 H_{t2}} = \frac{\mu_1}{\mu_2} \quad 2.63$$

$\mu_2 \gg \mu_1$ olduğu durumda, $\alpha_1 \gg \alpha_2$ olacaktır. Bundan dolayı, eşitlikteki tüm açılar için $\pi/2 > \alpha_2 > 0$ koşulu sağlanmaktadır ve bu durumda $\tan \alpha_1 \approx 0$ olur. Alan çizgileri geçirgenliği yüksek olan ortamdan başlayıp, geçirgenliği düşük olan ortama dik şekilde uzanmaktadır.

2.6.2 Magnetlerin diğer bileşenlerle ilişkisi ve tasarım gereksinimleri

Hızlandırıcılarda kullanılan magnet tipleri, görüldüğü gibi birbirinden bağımsız birer elektronik cihaz olarak düşünülemez. Magnetler kendisi gibi birçok cihaz ve sistemle iletişim halinde olan yapılardır. Bu ilişki tasarım aşamasında bütünüyle ele alınarak ihtiyaçlar belirlenmelidir. Magnetlerin ilişki içerisinde olduğu yapılardan; demet optiği, güç dönüştürücü ve soğutucu yapıları bellidir ve bu yapıların kapasiteleri tasarım sürecinin başından itibaren hesaba katılır. Fakat vakum, ölçüm ve bütünleşik çalışma testleri sonraki aşamada hesaba katılması gereken önemli parametrelerdendir. Ayrıca hassasiyetle sürdürülen ve tüm etkilerin hesaba katıldığı sistemlerde taşıma ve güvenlik ölçütlerinin de göz önünde bulundurulması gerekir. Bahsettiğimiz tüm etkilerin magnetle olan ilişkisi Şekil 2.20’de görselleştirilerek sunulmuştur.



Şekil 2.20 Magnetlerin ilişki içerisinde olduğu olgular

Genel olarak magnetlerin hızlandırıcının hangi ünitesinde kullanılacağı (ana halka, ön hızlandırıcı, transfer hattı vb.) ve magnetin rolü belirlenmelidir (bükme, odaklama vb.). Ardından hızlandırıcının tolerans değerleri ve maliyeti göz önünde bulundurularak, magnet ihtiyacının genel çerçevesi çizilerek ihtiyaç belirlenir. Bundan sonraki adım performansa dair beklentiler olacaktır.

Manyetik alan şiddeti arttıkça, yayılım (emittans) ve enerji yayılımına etkileri artmakla beraber, örgü üzerindeki bazı magnetlerin ek güç kaynakları yardımıyla kuvvet parametreleri çok az değiştirilerek kontrol edilmeleri mümkün olabilmektedir.

2.6.3 Magnetlerin performans ihtiyaçları

Magnet tasarımına başlayacak bir grup önceden temel tasarım gereksinimlerini bilmelidir. Temel parametreleri aşağıdaki gibi sıralayabiliriz:

- Demet parametreleri (demetin tipi, enerji aralığı, sapma açısı)
- Manyetik alan değeri
- Magnet açıklığı (fiziksel ve manyetik açıklık değerleri)
- İşletim modu

Çizelge 2.4 Magnet tasarım gereksinimleri

Genel İhtiyaçlar	• Magnet tipi ve amacı • Uygulama • Adet
Performans Gereksinimleri	• Demet parametreleri • Alan gereksinimleri • Magnet açıklığı • Operasyon modu
Fiziksel Gereksinimler	• Geometrik boyutları • Kolay ulaşılabilirlik (Magnet tipi)
İhtiyaçların Belirlenmesi	• Güç dönüştürücü • Soğutma • Vakum
Çevresel Etmenler	• Sıcaklık • İyonize radyasyon • Elektromanyetik uyumluluk • Güvenlik

2.7 Dünyadaki SI Tesisleri ve Kullanım Alanları

Günümüzde parçacık hızlandırıcıları temel parçacık fiziği ve nükleer fizik çalışmalarının yanı sıra; biyolojiden tıp alanına, malzeme biliminden ara yüzey fiziğine, X-ışını fotoelektron spektroskopisinden nötron tedavisine, kimyadan arkeometriye, farmakolojiden radyolojiye, akaryakıt yataklarının tespitinden çevre bilimine, jeolojiden toryuma dayalı nükleer santrallere, gen biliminden mikro yapıların oluşumuna, kristalografiden mikro yapıların oluşumuna, proteinlerden gen bilimine ve savunmaya kadar daha sayamadığımız yüzlerce kullanım alanı mevcuttur.

Elektronik, bilgisayar, lazer, internet, GPS, cep telefonu gibi günlük yaşantımızı yakından etkileyen alanlar, MRI, PET, Röntgen gibi görüntüye dayalı sağlık teknolojileri, yeni ortaya çıkan HIV, SARS, EBOLA, COVID gibi virüslerin yapılarının çabuk çözülerek, bu hastalıklara karşı ilaç ve tedavi yöntemlerinin geliştirilmesi, daha etkili ve daha ucuz ilaçların piyasaya sürülmesi gibi birçok üretken teknolojilere ancak ve ancak parçacık hızlandırıcılarına erişimi olan ülkeler ulaşabilmektedir. Çizelge 2.5'te Dünya üzerinde bulunan bazı SI tesislerinin temel parametreleri ve mevcut durumları gösterilmiştir (Lightsources web sayfası 2020).

Çizelge 2.5 Dünya üzerindeki bazı sinkrotron ışınımı kaynakları

Işınım Kaynağı	Enerji (GeV)	Çevre (m)	Yayılım (nm.rad)	Akım (mA)	Magnetsiz Bölge Sayısı x Uzunluğu (m)	Durum
ESRF	6	844.4	4.0	200	32 x 6.3	Çlş. (1993)
APS	7	1104	3.0	100	40 x 6.7	Çlş. (1996)
Spring-8	9	1436	3.4	100	44 x 7, 4 x 30	Çlş. (1997)
ALS	1.9	196.8	6.3	400	12 x 6.7	Çlş. (1993)
TLS	1.5	120	25	240	6 x 6	Çlş. (1993)
ELETTRA	2.4	259	7.0	300	12 x 6.1	Çlş. (1994)
PLS	2.5	280.56	12.0	200	12 x 6.8	Çlş. (1995)
LNLS	1.37	93.2	100	250	6 x 3	Çlş. (1997)
MAX-II	1.5	90	9.0	280	10 x 3.2	Çlş. (1997)
BESSY-II	1.7	240	6.1	200	8 x 4.9, 8 x 5.7	Çlş. (1999)
Siberia-II	2.5	124	98	200	12 x 3	Çlş. (1999)
N. Subaru	1.5	118.7	38	500	4 x 2.6	Çlş. (2000)
ANKA	2.5	110.4	50	200	4 x 5.6, 4 x 2.2	Çlş. (2002)
SLS	2.4	288	5	400	3 x 11.7, 3 x 7, 6 x 4	Çlş. (2001)
CLS	2.9	170.88	22.7	300	12 x 5.2	Çlş. (2003)
SPEAR-3	3.0	234.14	10	500	9 x 2.3, 4 x 3.7, 2 x 1.5	Çlş. (2004)
SAGA-LS	1.4	75.6	7.5	300	8 x 2.5	Çlş. (2006)
SOLEIL	2.75	354.1	3.74	500	4 x 12, 12 x 7, 8 x 3.8	Çlş. (2007)
Diamond	3.0	561	2.7	300	6 x 11.3, 18 x 8.3	Çlş. (2007)
ASP	3.0	216	10	200	14 x 5.4	Çlş. (2008)
Indus II	2.5	172.5	58.1	300	8 x 4.5	Çlş. (2008)
SSRF	3.5	432	3.9	300	4 x 12, 16 x 6.5	Çlş. (2009)
ALBA	3.0	268.8	4.3	400	4 x 8, 12 x 4.2, 8 x 2.6	Çlş. (2010)
PETRAIII	6.0	2304	1	100	20 x 4	Çlş. (2010)
CANDLE	3.0	216	8.4	350	16 x 4.8	İnşaat
MAX IV	1.5/3.0	96/528	5.6/0.24	500	12/20 x 5	İnşaat
PLS-II	3.0	280	5.8	400	10 x 5.8, 10 x 3.1	Çlş. (2012)
TPS	3.0	518	1.7	400	18 x 7, 6 x 12	Çlş. (2013)
NSLS-II	3.0	780	2.1	500	15 x 8, 15 x 5	İnşaat
SESAME	2.5	133	26	400	4 x 5, 8 x 3.5, 4 x 1.9	Çlş. (2017)
ILSF	3.0	489.6	0.93	400	14 x 8, 14 x 6	Çlş. (2019)

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Tezin hazırlanmasında kaynaklar bölümünde belirtilen makale, kitap, dergi ve bildirilerden yararlanılmıştır. Ayrıca tez konusu ile ilgili alandaki çalışmalarla önde gelen CERN, Cenevre (İsviçre) www.cern.ch, ANL, IL (USA) www.anl.gov ve SESAME, Allan (Ürdün) www.sesame.org.jo gibi araştırma merkezlerinin internet sitelerinden yararlanılmıştır. Ek olarak, Türkiye Atom Enerjisi Kurumu'nun (TAEK) (28 Mart 2020 itibarıyla TENMAK) 06 Kasım 2014 tarihinde yürürlüğe giren SESAME'deki faaliyetlerin desteklenmesine yönelik ikili işbirliği kapsamında, 01-05 Mayıs 2017 tarihleri arasında 5 gün süre ile Ürdün'ün Başkenti Amman'a yaklaşık 25 km uzaklıktaki Allan'da yer alan tesis ziyaret edilmiştir. Burada Türkiye'deki Türk Hızlandırıcı Merkezi çalışmaları hakkında güncel bilgiler paylaşılmıştır. Özellikle, yapılan çalışmalar sonucunda bir elektron hızlandırıcısı ve ışınlama tesisi (TARLA) kurulumunun yanı sıra, değişik tip ve kabiliyette GeV enerjili 4 büyük ölçekli hızlandırıcı ve ışınlama tesisinin, 2015 sonunda tamamlanan, tasarım çalışmaları hakkında bilgiler verilmiştir (Türk Hızlandırıcı Merkezi Projesi Web Sayfası 1997). Dr. M. Attal (SESAME demet hattı sorumlusu) ile birlikte, Türkiye'de tasarım çalışmaları devam eden TURKAY-SI tesisi ile ilgili parametreler incelenmiş, demet dinamiği ve örgü tasarım çalışmaları ile ilgili fikir alışverişinde bulunulmuştur. Ayrıca, TÜBİTAK 2214-A Burs Programı kapsamında, yukarıda saydığımız hızlandırıcı alanında önemli tesislerden biri olan ANL, Chicago (USA) ulusal araştırma laboratuvarında, Mart-Aralık 2019 ayları arasında, 9 ay süre ile araştırmalara katılım sağlanmıştır. APS-U (Advanced Photon Source Upgrade) projesi kapsamında, APS'in ana halkasında kullanılmak üzere üretilmiş yeni magnetlerin, çeşitli tip testlerinin yapılarak karakteristiklerinin belirlenmesi konusunda çalışmalar yürütülerek, elde edilen bilgi ve deneyimler magnet tasarım çalışmalarına yansıtılmıştır. Tüm bulgular tez içerisinde paylaşılmıştır.

Tez çalışması iki ana kısımdan oluşmaktadır. İlk kısımda, THM kapsamında kurulması planlanan TURKAY tesisi kapsamında, alternatif bir ön hızlandırıcı (booster) halka tasarlanarak detaylandırılmıştır. Halka örgüsünün tasarımında Beam Optics, OPA ve MADX kodları kullanılmıştır. İkinci olarak Booster halkası üzerinde kullanılması planlanan odaklayıcı ve bükücü magnetlerin fiziğine odaklanılarak, literatürdeki magnet

çeşitleri incelendikten sonra, odaklayıcı ve bükücü magnet tasarım çalışmaları yapılmıştır. Magnet tasarım çalışmaları kapsamında Poisson, Radia ve Comsol Multiphysics modelleme yazılımları kullanılmıştır. Elde edilen tüm sonuçlar bu bölümde grafikler aracılığı ile sunularak irdelenmiştir.

Tasarım süreci sırayla; bir taban çizgisi kutup konturunun tanımlanması, performans analizi, geometrisinin ayarlanmasıyla konturun iyileştirilmesi, istenen iki boyutlu alan genişliği ve bütünlüğü elde edilene kadar işlemin tekrar edilmesinden oluşur. Demirin manyetik davranışı doğrusal olmadığından, hesaplamalar yinelemeli olarak gerçekleştirilir. Demirin doğrusal olmayan manyetik özellikleri her bir yinelemede hesaplanan alan genişliği göz önünde bulundurularak ayarlanabilir.

OPA yazılımı ile bir hızlandırıcı halka sıfırdan başlanarak, iki boyutta eksiksiz bir şekilde tamamlanabilmektedir. Yazılım üzerinden alınan çıktı modeller, TRACY veya MAD gibi diğer yazılımlara dâhil edilerek kullanılmaya elverişlidir. Tez kapsamında, ön hızlandırıcı halka tasarımı aşamasında, OPA benzetim yazılımı kullanılmıştır. Bu program yardımıyla bir hat üzerinde temel bir örgü oluşturulup, daha sonra bu temel örgünün tekrar ettirilmesiyle tam bir halka oluşturulabilmektedir. Demetin bu halka içerisindeki hareketi ve halkanın yapısı incelenerek demetin halka içerisindeki hareketinin benzetimi yapılabilmektedir (EK 1).

Üç boyutlu bir magnetin üretimi, iki boyutlu tasarımla başlamaktadır. İki boyutlu bir magnet tasarım süreci, bobinlerin uyarılması, fiziksel boyutu, konumu ve demir boyunduruğun fiziksel sınırları ile belirlenen ideal olmayan sınır koşullarını kullanarak, belirli bir alan genişliği ve homojenliği elde etmek için öncelikle kutup konturunun belirlenmesini gerektirir. Tasarım süreci, bir taban çizgisi kutup konturunun tanımlanmasını, tanımlanan konturun performansının analiz edilmesini, şeklinin tanımlanmasıyla konturun iyileştirilmesini, istenen alan genişliği ve bütünlüğü elde edilene kadar işlemi tekrar edilmesi süreçlerini içerir.

Demirin manyetik davranışı doğrusal olmadığından, hesaplamalar yinelemeli olarak gerçekleştirilmeli, çeliğin doğrusal olmayan manyetik özellikleri her bir yinelemede

hesaplanan alan genliğinde ayarlanmalıdır. İki boyutlu alan dağılımı üzerinde hesaplamaları gerçekleştirmek için en az iki boyuta analiz yapabilen bir yazılım gereklidir. Poisson Superfish ve Comsol Multiphysics (3 boyutlu) bu hesaplamaları yapan yazılımlardan iki tanesidir. Tez çalışmaları kapsamında bu iki yazılım ve ek olarak teknik çizimler konusunda oldukça yetenekli bir yazılım olan Creo yazılımı kullanılmıştır. Üretime yönelik mekanik tasarımlar bu yazılım üzerinden çizilmiştir (EK 1).

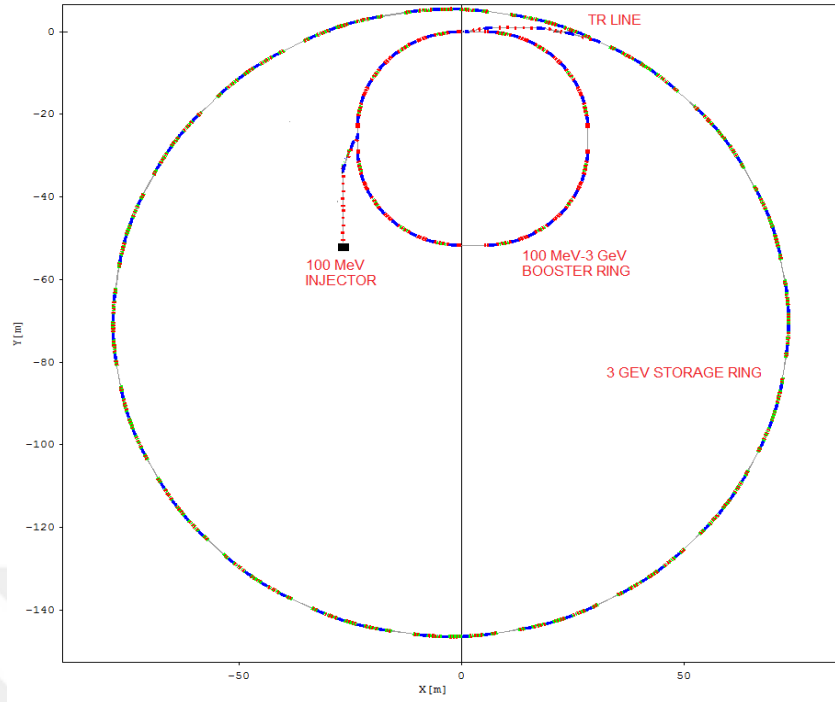


4. BULGULAR

4.1 THM-SI Tesisinin Yapısı

“Planlanan Türk Hızlandırıcı Merkezi Sinkrotron Işınımı Tesis (THM-TURKAY) 3 GeV enerjili elektron sinkrotronuna dayalı 3. nesil ışınım kaynağı olarak tasarlanmış ve birçok araştırmanın aynı anda yapılmasına olanak sağlaması bakımından, ülkemiz ve bölgemizde ilk olacaktır. Tesis, Avrupa’da son 25 yılda kurulan BESSY-II (Almanya), ELETTRA (İtalya), ALBA (İspanya), DIAMOND (İngiltere) ve SOLEIL (Fransa) sinkrotron ışınımı tesisleri ile (~3 GeV demet enerjili) aynı kategoride yer almaktadır. Tesisin araştırma potansiyeli, üzerinde kurulu bulunan demet hatları ve deney istasyonları ile başta malzemelerin atom ve moleköl düzeyinde karakterizasyonu olmak üzere; nanoteknoloji, biyoteknoloji, genetik, kimya, çevre, savunma, uzay, tıp, enerji, yakıt, ilaç, teşhis vb. onlarca alanda ileri düzeyli spektroskopi ve görüntüleme teknikleri ile kısa sürede ve aynı anda Ar-Ge çalışması yapılmasını sağlayacaktır.” (Turkish Accelerator Center (TAC) Project Web Sitesi 2001).

TURKAY tesisi, Türk Hızlandırıcı Merkezi (THM) projesi kapsamında, düz bölümlerde 0.51 nm.rad (sonlu dağılım) ve akromatik durumda 0.93 nm.rad olarak, özel bir üçüncü nesil senkrotron radyasyon tesisi statüsünde önerilmiştir. Esas olarak enjektör linak, güçlendirici halka (booster ring) ve depolama halkası (storage ring) olmak üzere üç alt sistemden oluşur. Tasarlanan tesisin alt bileşenleriyle birlikte manyetik örgüsü Şekil 4.1’de sunulmuştur (Nergiz vd. 2014).



Şekil 4.1 Tasarlanan TURKAY tesisinin görünümü (Nergiz vd. 2014)

4.1.1 THM-SI tesisinin araştırma potansiyeli ve benzerleri arasındaki yeri

THM Sinkrotron Işınım Tesisi için hazırlanan ve 2015 yılında sunulan teknik tasarım raporunun hazırlık sürecinde, potansiyel kullanıcılar ile yakın temasta bulunulmuştur. Bugün itibarıyla bu kullanıcı grubu 130 bilim insanına ulaşmıştır. THM-SI Kullanıcı Grubunu 13 kişiden oluşan bir komite organize etmiştir. Bu komite kendi arasında defalarca toplantılar düzenlemiş, sonraki senelerde yapılan toplantılara ve THM-SI Tesisi'nin bilimsel gerekçelerinin hazırlanmasına destek vermiştir. Ayrıca komite, Türkiye'deki kullanıcıların çalışma alanlarının dağılımı, ihtiyaçları, talepleri ve tecrübeleri hakkında bilgi toplanmış ve sonuç olarak Türkiye'deki SI kullanıcılarının araştırma alanları: Malzeme bilimi, Manyetizma, Kristalografi, Nano bilimi, Yüzey bilimi, Yapısal biyoloji ve Enstrümantasyon olarak belirlenmiştir (Nergiz vd. 2015).

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 birinci faz demet hatları belirlenirken iki husus öne

çıkmiştir. Birincisi potansiyel kullanıcıların istek ve ihtiyaçları, ikincisi ise gelecek yirmi yıl içerisinde teknoloji ve bilimin geleceği noktaya dair öngörülerdir. Bu şekilde hem kullanıcıların talebi olan demet hatları kurulabilir hem de henüz kullanıcı potansiyeli az olan demet hatlarına da yer vererek kullanıcı dolaylı olarak bu yeni teknolojilerle tanıştırılıp, kanalize edilerek daha gelişmiş araştırmalara yönlendirilebilir. Komite yukarıda belirtilen anket sonuçlarına dayanarak ve önümüzdeki yirmi yıl içerisinde bilimin ve teknolojinin gelebileceği noktayı da göz önünde bulundurarak, THM-SI Tesisi için, proje yönetimine birinci fazda 10 adet demet hattı önermiştir. Önerilen demet hatları aşağıda sıralanmıştır:

1. X-ışını soğurmalı ince yapı demet hattı (XAFS),
2. Yumuşak X-ışını demet hattı,
3. Kızılötesi mikrospektroskopi demet hattı
4. Esnek olmayan sert x-ışını saçılması demet hattı
5. Manyetik malzemeler için röntgen görüntüleme demet hattı
6. X-ışını kırınımı demet hattı (XRD)
7. Yüksek basınçlı toz kırınımı demet hattı
8. Makromoleküler kristalografi demet hattı
9. Küçük açılı x-ışını saçılması demet hattı (SAXS),
10. X-ışını optiği ve enstrümantasyon demet hattı.

SI tesislerinin kurulması ve işletilmesi oldukça pahalı yatırımlar olmasına karşın dünyanın gelişmiş ülkelerinin SI tesislerine ayırdıkları kaynaklar ortadadır. Bu tip tesisler orta ve uzun vadede yapılan yatırımları teknolojik gelişmeler olarak döndürmektedir. Dünyada bilginin bu kadar kolay yayıldığı bir ortamda rekabet gücünün korunabilmesi amacıyla herhangi bir ürün için daha iyi, daha etkin veya daha gelişmiş modellerinin piyasaya sürülmesi zorunluluğu vardır. Bu sayede devletler veya şirketler herhangi bir ürün pazarında liderliğe yükselebilir veya liderliğini koruyabilirler. Bu da Ar-Ge faaliyetlerine büyük kaynaklar ayırmakla mümkün olur. THM projesi çerçevesinde dünyanın önde gelen hızlandırıcı ve ışınım merkezleri ile işbirlikleri geliştirilmiştir (Şekil 4.2).



Şekil 4.2 THM projesi kapsamında geliştirilen işbirlikleri (Mavi ile belirtilen merkezler ile işbirliği protokolü imzalanmış, kırmızı ile belirtilen merkezlerde ise bilimsel çalışmalarda bulunulmuştur.)

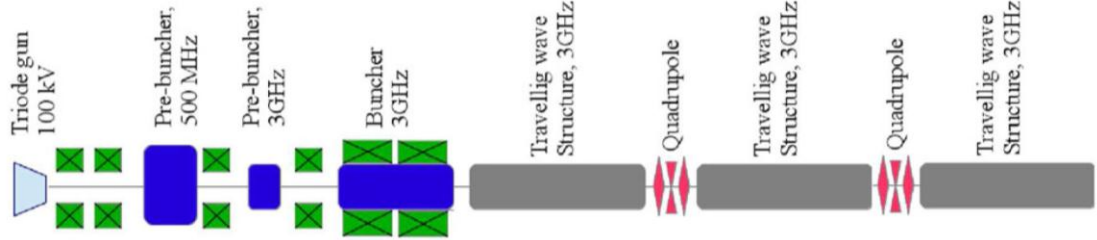
Çizelge 4.1 Orta doğu ve Avrupa'daki sinklotron ışınımı tesisleri (2021)

Işınım Kaynağı	Enerji [GeV]	Çevre [m]	Yayılım [nm.rad]	Akım [mA]	Durum
TURKAY	3	477	0.51	450	Proje
ALBA	3	268.8	4.3	400	İşletimde
ELETTRA	2	259.2	7	300	İşletimde
SOLEIL	2.75	354.1	3.9	430	İşletimde
DIAMOND	3	561.5	3.17	300	İşletimde
MAX IV	3	528	0.24	500	İşletimde
SESAME	2.5	133.1	26	400	İşletimde
ILSF	3	489	0.93	400	Kurulmakta

4.2 THM-SI Tesisi Linak Ön Hızlandırıcısı

TURKAY'ın ön hızlandırıcı bağlantısı; 100 kV DC termoiyonik 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 dalga hızlandırıcı yapıdan oluşmaktadır.

Enjektörün şematik yerleşimi Şekil 4.3'te sunulmuştur (Nergiz vd. 2017).



Şekil 4.3 TURKAY ön hızlandırıcısının şematik görünümü (Nergiz vd. 2017)

Elektron tabancası 500 MHz'lık bir yükselteç tarafından düzenlenebilen standart triyot tabanca olarak düşünülmüştür. Akım katottan çıktıktan sonra, elektron demetleri, oda sıcaklığı 1 ns uzunluğunda düzenlenmiş bir voltaj sistemi ile oluşturulabilir.

Demetlerin ön demetleme aşamasında, oda sıcaklığında 10 ps değerine kadar sıkıştırılması planlanmaktadır. Demetler iki farklı hareketli dalga hızlandırıcı yapı ile 150 MeV nihai mertebeye kadar hızlandırılacaktır. Çizelge 4.2'de demet hatlarının parametreleri yer almaktadır (Nergiz vd. 2017).

Çizelge 4.2 TURKAY enjektör doğrusal hızlandırıcısının demet parametreleri

Parametre	Birim	Tek Demet	Çoklu Demet
Enerji	MeV	>150	>150
Atım uzunluğu	ns	1	600
Atım yükü	nC	1	6
RMS yayılım	mm.mrad	<50	<50
Enerji yayılım	%	<1	<1

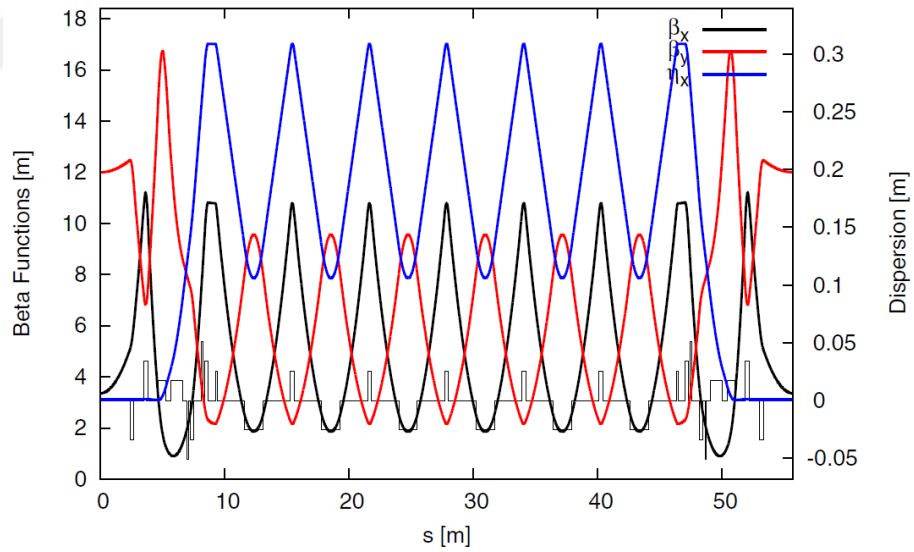
4.3 THM-SI Ön Hızlandırıcı Halkası (Booster)

Ön hızlandırıcı halka tasarımı konusunda literatürde iki farklı alternatif bulunmaktadır. Bunlardan birincisi, ana halka içerisinde küçük bir ön hızlandırıcı, diğeri ise ana halkayla aynı tünelde yer alacak şekilde tasarlanan uzun ön hızlandırıcı seçenekleridir. TURKAY tesisi için her iki seçenek THM-TDR (Teknik Tasarım Raporu) çalışması

kapsamında ön tasarım çalışmaları yapılmıştır (Nergiz vd. 2015). Daha sonra burada yer alan tasarımların optimizasyonları yapılarak daha güncel yayınlar ve sunumlar yapılmıştır (Yavas 2019). Bu doğrultuda çalışmalar devam etmektedir. Tez kapsamında kısa ön hızlandırıcı halka tasarımı çalışılmış olup, bulgular kısmında sunulmuştur.

4.3.1 Uzun ön hızlandırıcı halka seçeneği

TURKAY tesisi ön hızlandırıcısı için seçeneklerden biri uzun ön hızlandırıcı halkadır. Ana halka ile aynı tünelde, 445.6 m uzunluğunda, 8 süper hücreden oluşan ve 500 MHz çalışma frekansına sahip bir halka tasarlanmıştır. Bu tasarımda her bir süper periyot çoklu fonksiyon yapısına sahip 6 FODO hücresi ve 2 eşleştirme hücresinden (matching cell) oluşmaktadır. Şekil 4.4'te bir süper periyot gösterilmiştir. Yayılım değeri 3 GeV enerji değerinde, 2.92 nm.rad'dır. Uzun ön hızlandırıcı halkanın ana parametreleri Çizelge 4.3'te sunulmuştur (Nergiz vd. 2017).



Şekil 4.4 Uzun ön hızlandırıcı halkanın bir süper periyodunun optik fonksiyonları (Nergiz vd. 2017)

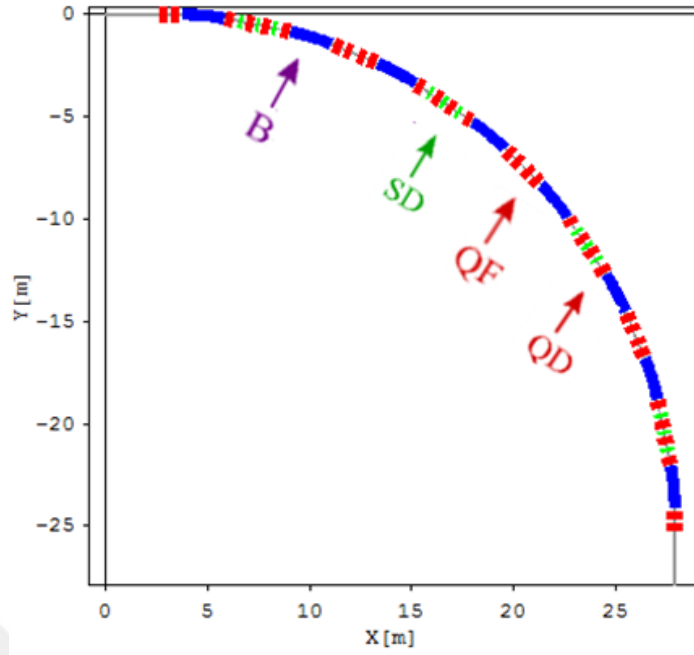
Çizelge 4.3 Booster halkasının ana parametreleri

Parametre	Birim	Değer
Enerji	GeV	0.15–3.0
Çevre	m	445.6
Yatayda yayılım	nm.rad	2.92
Tur başına enerji kaybı (3 GeV)	keV	461.6
Maks. b_x/b_y	m	11/16.5
Bölümün ortasında b_x/b_y	m	3.35/12
Betatron ayarı Q_x/Q_y	-	30.85/13.92
Doğal kromatiklik n_x/n_y	-	-29.63/-20.18
Süper periyodların sayısı	-	8
Sönümlenme süresi Y/D/Uzun.	ms	10.680/19.323/16.228
Harmonik sayısı	-	742

4.3.2 Kısa ön hızlandırıcı halka seçeneği

Kısa ön hızlandırıcı halka, depolama halkasından bağımsız olarak ayrı bir tünelde inşa edilmektedir. Böylece halka daha kolay yönetilebilir olmakta ve daha küçük bir manyetik örgü olacağı için magnet maliyetinden tasarruf sağlanabilmektedir. Bu nedenle ek maliyetler daha fazladır.

Ön hızlandırıcı halkanın örgüsü; RF, enjeksiyon, ekstraksiyon ve diyagnostik için 5 m uzunluğunda, dağılımın olmadığı 4 düz bölümden oluşan 4'lü süper simetriye sahiptir. Bu konseptin temel amacı, yüksek verimli enjeksiyon işlemlerine yol açan emisyon ve elektron ışını boyutunu küçük tutmaktır. Bu nedenle, örgü yaklaşık 21 nm değerinde küçük bir yayılım değerine ulaşmak için, sıralı magnetlerden oluşan FODO hücreleri ile tasarlanmıştır. Şekil 4.5, çeyrek ön hızlandırıcı halkanın manyetik yapısını göstermektedir.



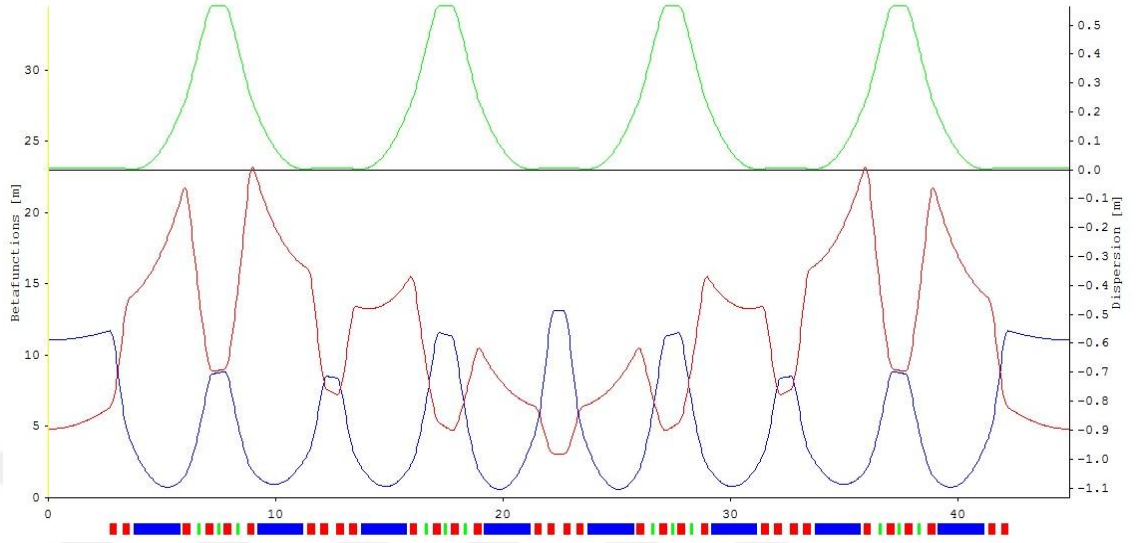
Şekil 4.5 Çeyrek ön hızlandırıcı halkanın magnetlerinin dizilimi

Ön hızlandırıcı halka tasarımıdaki temel amaç, inşaat maliyetlerini olabildiğince düşük tutarak, 30 nm.rad değerinden daha düşük bir yayılım değerine ulaşmaktır. Depolama halkasına olan enjeksiyondaki kaybın azaltılması ve top-up işlemlerinin verimliliğinin artırılması için küçük yayılım değeri gereklidir. Bu doğrultuda, tasarlanan küçük ön hızlandırıcı halkanın yayılımı, 3 GeV demet enerjisinde yaklaşık 21 nm.rad'dır (Akdoğan vd. 2015).

4.3.2.1 THM-SI tesisi kısa ön hızlandırıcısının manyetik örgü tasarımı

Ön hızlandırıcı halkanın süper periyodu 8 A tipi, 4 B tipi hücre ve 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 yaklaşık olarak 180 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 (Streun 2012). Betatron fonksiyonları, manyetik elemanların konumları ile birlikte Şekil

4.6’da gösterilmiştir. Burada yer alan düz bölümlerdeki dağılım fonksiyonları sıfırdır.



Şekil 4.6 Ön hızlandırıcı halkanın çeyrek kesiminin optik fonksiyonları. Mavi ve kırmızı eğriler, sırasıyla yatay ve dikey beta, yeşil eğri ise dağılım fonksiyonunu belirtmektedir

Ön hızlandırıcı halkanın doğal kromatikliği yatay ve dikey olmak üzere -18.161/-13.045’tir. Kromatikliği düzeltmek için 2 farklı tip sekstupol magnet kullanılması öngörülmüştür. Çizelge 4.4’te halkanın ana parametreleri sunulmuştur.

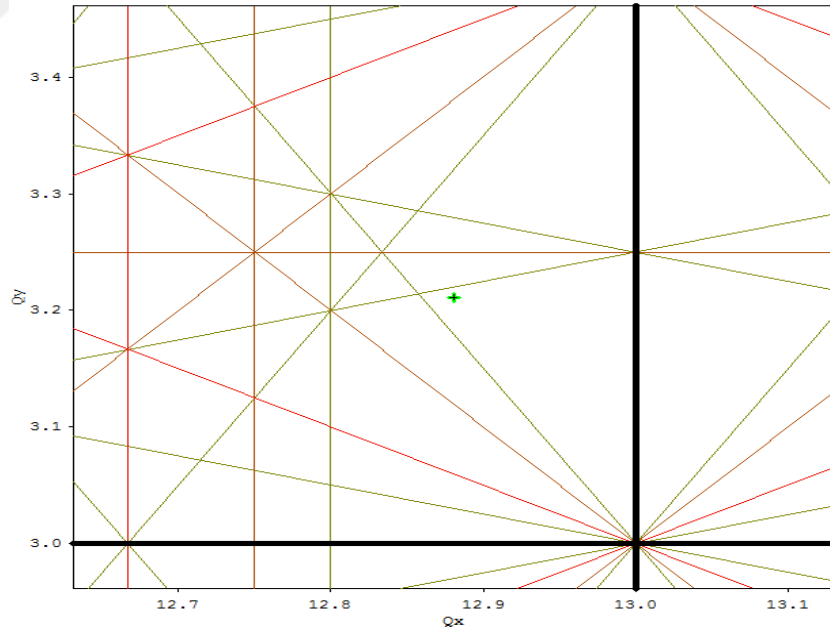
Çizelge 4.4 Ön hızlandırıcı halkanın ana parametreleri

Parametre	Değer
Giriş enerjisi (GeV)	0.1
Çıkış enerjisi (GeV)	3
Çevre	179.65
Doğal kromatiklik (Yat./Dik.)	-22.68/-12.33
Tur başına enerji kaybı (keV)	703.4
Tam enerjilendirildiği durumda enerji kaybı (nm.rad)	21.2
Düz bölümlerin sayısı	4

Çizelge 4.4 Ön hızlandırıcı halkanın ana parametreleri (devam)

Parametre	Değer
Düz bölümlerin uzunluğu (m)	5
RF Frekansı (MHz)	500
Harmonik sayısı	300
Maks. Demet sayısı	300
Demet yükü (nC)	1
RMS Demet uzunluğu (mm)	5.9
Betatron ayarı, x/y	12.88/3.21
Sönümleme süreleri [$\tau_x/\tau_y/\tau_s$] (ms)	5.46/5.11/2.48

Betatron salınımlarının çalışma noktası, Şekil 4.7’de gösterilen, yatayda 12.88 ve dikeyde 3.21 olan betatron ayar değerlerine karşılık gelmektedir. Enerji artırımı sürecindeki benzetimi sonucu bize güçlü rezonans çizgilerinden geçmeyen bir çalışma noktası göstermektedir.



Şekil 4.7 Rezonans diyagramı. Yeşil artı, betatron salınımları sırasındaki çalışma noktasını ifade eder ($Q_x = 12.88$ (Yatay) and $Q_y = 3.21$ (Dikey))

16 odaklayıcı ve 32 dağıtıcı olmak üzere, 2 tip ve toplamda 48 sekstupol magnet doğal

kromatikliği yatayda -22.68, dikeyde -12.33 değerlerinde tutmaktadır. Bu magnetler FODO örgüsünde kuadropol magnetlerin öncesinde veya sonrasındaki uygun alanlara konuşlandırılmıştır.

4.3.2.2 THM-SI tesisi için tasarlanan kısa ön hızlandırıcı halkadaki enerji artışının etkileri

Ön hızlandırıcı halka, elektron demetini 100 MeV enjeksiyon enerjisinden 3 GeV çıkış enerjisine, 0.25 saniyede ve 2 Hz tekrarlama oranıyla hızlandıracak şekilde tasarlanmıştır. Elektronların karşılık gelen enerji rampası sinüzoidal davranmaktadır. Eşitlik 4.1 ve 4.2’de gösterilmiştir.

$$E(t) = E_0(\alpha - \sin 2\pi ft) \quad 4.1$$

α ve E_0 katsayıları, ilk ve son enerjiler tarafından belirlenir. f tekrarlanma frekansdır. $E(t)$ elektron enerjisini ifade etmektedir.

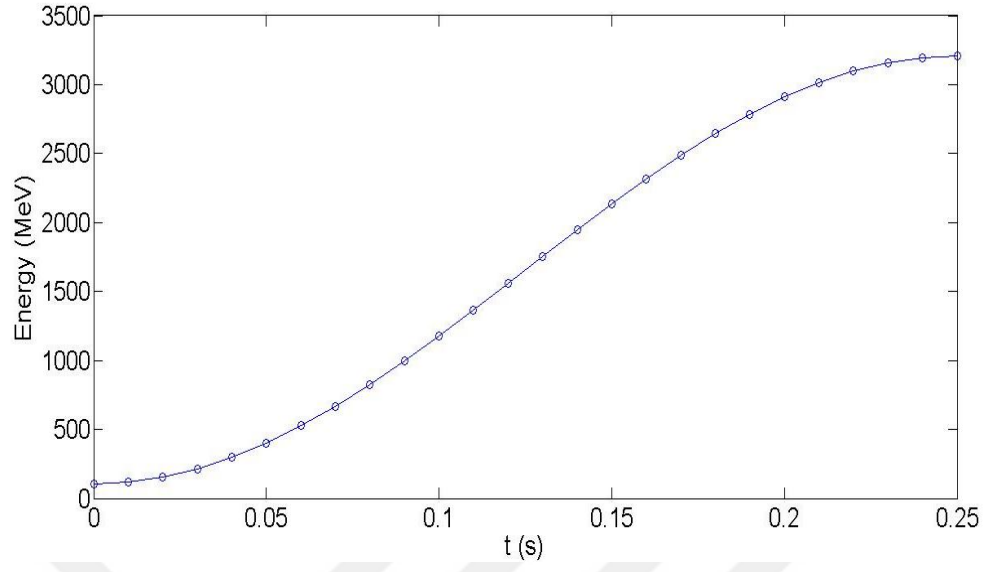
$$E_0 = \frac{E_{inj} + E_{ext}}{2}, \quad \alpha = \frac{E_{inj} + E_{ext}}{E_{inj} - E_{ext}} \quad 4.2$$

Tasarlanan halkada en düşük 21 nm.rad yayılım değerine ulaşılabilir. Demet enerjisinin artışı sırasında, yatay yayılım değeri (ϵ_x), aşağıdaki eşitliğin sonucudur. Bu denklemde birinci terim adyabatik sönümlemeyi, ikincisi radyasyon sönümlemesi ve sonuncusu kuantum uyarımını ifade etmektedir.

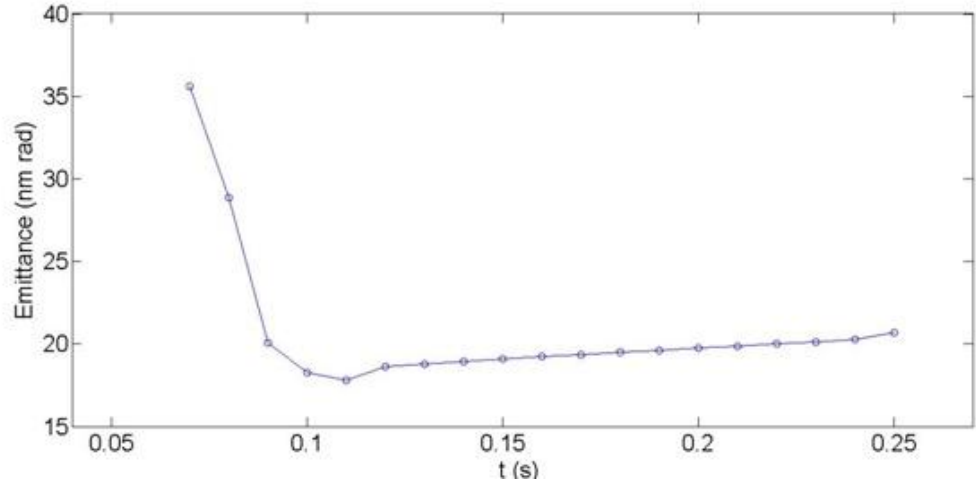
$$\frac{d\epsilon}{dt} = -\frac{1}{\gamma(t)} \frac{d\gamma(t)}{dt} \epsilon - \frac{2}{\tau_x} \epsilon + \frac{1}{J_x} \frac{2}{\tau_x} C_q \gamma^2(t) \frac{I_5}{I_2} \quad 4.3$$

Ayrıca denklemde geçen $\gamma(t)$ görelilik faktörü, J_x yatay sönümleme bölüm numarası, $U(t)$ her bir turdaki enerji kaybı, T_0 devir periyodu, C_q kuantum sabiti yaklaşık 3.832 10^{-13} m, I_2 ve I_5 manyetik örgü tarafından tanımlanan ışıyım integralleridir.

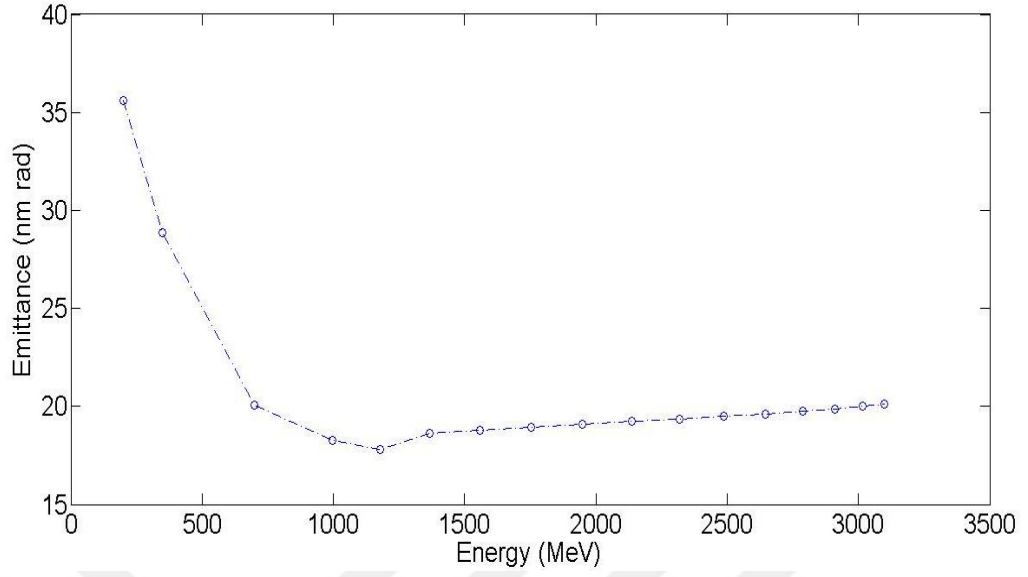
Enerji ve yayılımdaki değişim grafikleri, MATLAB (MathWorks 2000) üzerinden hesaplanarak, sırasıyla Şekil 4.8, Şekil 4.9 ve Şekil 4.10’da sunulmuştur.



Şekil 4.8 100 MeV'den 3 GeV'e hızlandırma sürecinde demet enerjisiindeki değişim



Şekil 4.9 100 MeV'den 3 GeV'e hızlandırma sürecinde, demet yatay yayılım değerinin (ϵ_x) değişimi

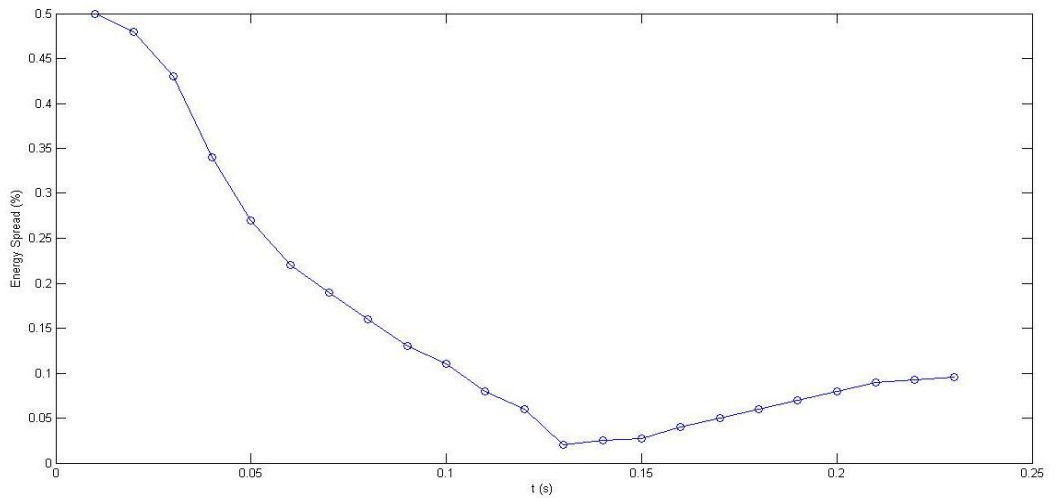


Şekil 4.10 Demet yatay yayılım değerinin (ϵ_x) zamanla değişimi

Hızlandırma sürecinde enerji kaybının hesaplandığı bir diğer ifade Eşitlik 4.4'te yer almaktadır.

$$\left. \frac{d\sigma^2}{dt} \right|_{eg} = C_q \gamma^2(t) \frac{2}{J_z \tau_z} \frac{I_3}{I_2} - \left(\frac{2}{\tau_z} + \frac{1}{\gamma(t)} \frac{d\gamma(t)}{dt} \right) \sigma^2 \quad 4.4$$

Burada J_z ve τ_z boylamsal sönümlenme süreleri, I_3 ve I_2 radyasyon integralleridir. Şekil 4.11, enerji artırımı sürecinde TURKAY ön hızlandırıcısındaki enerji yayılımının zaman evrimini göstermektedir.



Şekil 4.11 Enerji artırımı sürecinde demet yayılımındaki değişim

Bu bölümdeki çalışmada TURKAY tesisi için küçük ön hızlandırıcı halka yaklaşımı yapılarak, mevcut ana halkanın içerisinde, Şekil 4.1’de görüldüğü gibi, bağımsız ayrı bir simetrik FODO örgüsünden oluşan tasarım yapılmıştır. Burada amaçlanan temelde, ön hızlandırıcı halkanın yönetiminde kolaylık sağlamak ve örgü magnet maliyetinde tasarruf sağlamaktır. Küçük olmasının dez avantajı, büyük halka tasarımına göre, yayılım değerinin daha yüksek seviyede olmasıdır.

Ön hızlandırıcı seçeneği ile ilgili farklı tasarım çalışmaları yapılmıştır (Akdoğan vd. 2015). Yapılan bu çalışmalar sonucunda, en düşük 21.2 nm.rad değerine ulaşılmıştır (Akdoğan vd. 2016). Bu değer benzer tesislere baktığımızda kabul edilebilir seviyelerdedir. Bu nedenle ön hızlandırıcı halka yaklaşımı da büyük halka yaklaşımına alternatif olabilir.

4.4 THM-SI Tesisi Ana Halkası (Main Ring)

Bir depolama halkasının en önemli kısmı optik yapısıdır. Depolanan demetin ana parametreleri manyetik örgü ile belirlenir. Bir SI kaynağının manyetik örgüsü tasarlanırken, temel hedef yüksek parlaklık elde etmek için düşük demet yayılım değerine sahip olmaktır. Sıfır akımda ulaşılacak doğal yayılım (emittans) değeri; enerji, sektör sayısı ve eğici magnet sayısı ile yaklaşık olarak aşağıdaki ifadede gösterildiği şekilde orantılı olarak değişmektedir:

$$\epsilon_0 \sim \frac{E^2}{N_s^3 N_d^3} \quad 4.5$$

Burada E elektron demetinin enerjisi, N_s sektör sayısı ve N_d bükücü magnetlerin sayısıdır (Wiedemann 1999). Yukarıda verilen denklem ve son dönemlerde dünyadaki eğilimler uyarınca çoklu eğici magnetli (multi-bend) örgü üzerine çalışılmaya karar verilmiştir.

Çevresi yaklaşık 477 m olan TURKAY (THM-SI), sinkrotron ışınımının dalga boyu kızılötesi bölgeden, sert X-ışınları bölgesine kadar ve enerjisi 100 eV- 50 keV aralığında olacak şekilde, 36 demet hattı ve deney istasyonu kurulabilmesine imkân

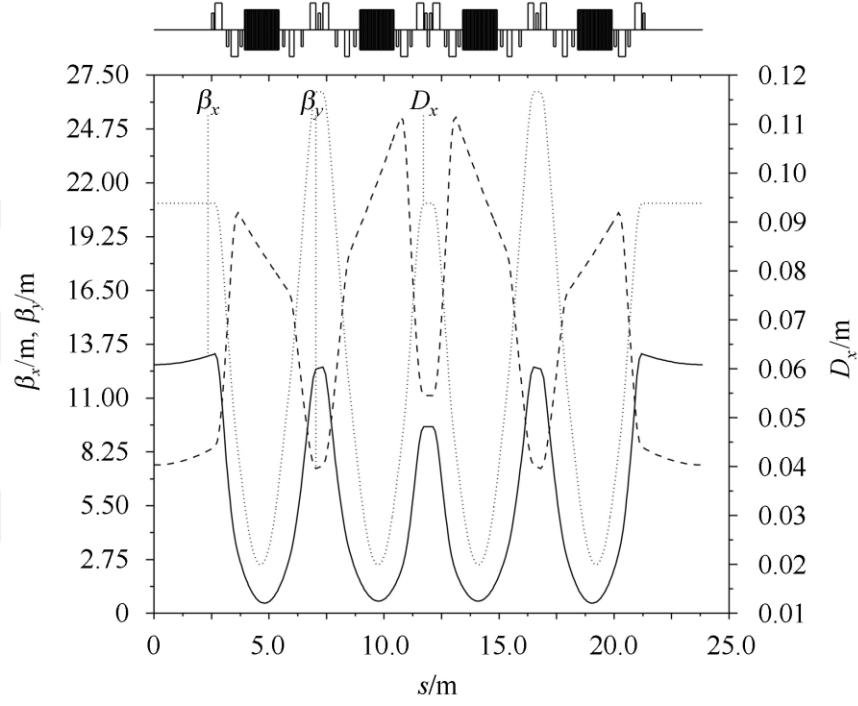
verecek ölçekte tasarlanmıştır. Halkanın çalışma noktası rezonans bölgesinden olabildiğince uzak bir noktada seçilmiştir. Ana halkanın tüm parametreleri Çizelge 4.5'te sunulmuştur. Tasarım detaylarına referans olarak gösterilen (Nergiz vd. 2015) makalesinden ulaşılabilir.

Çizelge 4.5 Ana halkanın temel tasarım parametreleri

Parametre	Birim	F.D. Mode	Achr. Mode
Enerji	GeV	3	3
Çevre	m	477	477
Akım	mA	450	450
Enine Yayılım	nm.rad	0.51	0.93
Boyuna Yayılım	nm.rad	0.0051	0.009
Tur başına enerji kaybı	keV	375.1	375.1
Maks. β_x	m	12.7	15.4
Maks. B_y	m	25.3	28.1
Betatron ayarı Q_x/Q_y	-	31.19/6.15	36.24/6.18
Doğal kromatiklik ξ_x/ξ_y	-	-70/-38	-84/-43
Düz bölümlerin sayısı	-	20	20
Düz bölümlerin uzunluğu	-	5	5
RMS enerji yayılımı	%	0.05	0.058
RF frekansı	MHz	500	500
Harmonik sayısı	-	795	795
Demet yükü	nC	1	1
RMS demet uzunluğu	mm	2.1	2.1
Momentum kabulü	%	4.8	5.6
Momentum sıkıştırma faktörü	-	0.00032	0.00025
Touschek yaşam ömrü	h	11	18.6

Düşük ve düz bölümlerde sonlu yayılım değerine sahip (0.51 nm.rad), bir örgü yapısı oluşturabilmek için ana hücre, 4 adet bükücü magnetten oluşan çoklu bükücü temel örgü olarak tasarlanmıştır (Şekil 4.12). Bu örgü yapısı kolaylıkla akromatik moda dönebilmektedir. Yapılan benzetim çalışmalarında bu modda yayılım değeri 0.93 nm.rad olarak hesaplanmıştır.

Depolama halkası 20 ana hücreden oluşmaktadır. Aynı zamanda 20 düz bölüm vardır. Bunlardan 2 tanesi demet iletimi ve RF kavitesi için düşünülmüştür. Kalan düz bölümlere salındırıcıların (undulatör) konuşlandırılması planlanmaktadır. Kromatik hataları ve doğrusal olmayan etkileri düzeltmek için 7 çeşit sekstupol magnet kullanılmıştır. Tüm halka üzerinde 80 bükücü, 4 çeşit olmak üzere 320 odaklayıcı ve 7 çeşit 460 sekstupol magnet kullanılmıştır.



Şekil 4.12 Sonlu dağılım modu için ana hücredeki betatron ve dispersiyon fonksiyonları (Nergiz vd. 2015)

Alternatif olarak, 4'lü eğici magnetlerden oluşan örgü tipinde, eğici magnet ve kuadrupol parametreleri bir miktar değiştirilerek ayrı bir tasarım çalışması yapılmış ve TURKAY-2 olarak isimlendirilmiştir. Bu tasarımda halka çevresi 529 m'ye çıkmakla birlikte demet yayılımı 0.32 nm.rad değerine düşürülebilmektedir.

TURKAY tesisi, ilk ön doğrusal hızlandırıcı (Pre-injector linac), transfer hattı ve ana halka ile aynı tünelde yer alması planlanan ön hızlandırıcı halka tasarımları THM Teknik Tasarım Raporu'nda (THM-TDR) (Nergiz vd. 2015) ve ayrı bir yayın olarak sunulmuştur (Nergiz vd. 2017). TURKAY-2 için yapılan optik hesaplamalar yine bu raporda ayrıntılı olarak sunulmuştur.

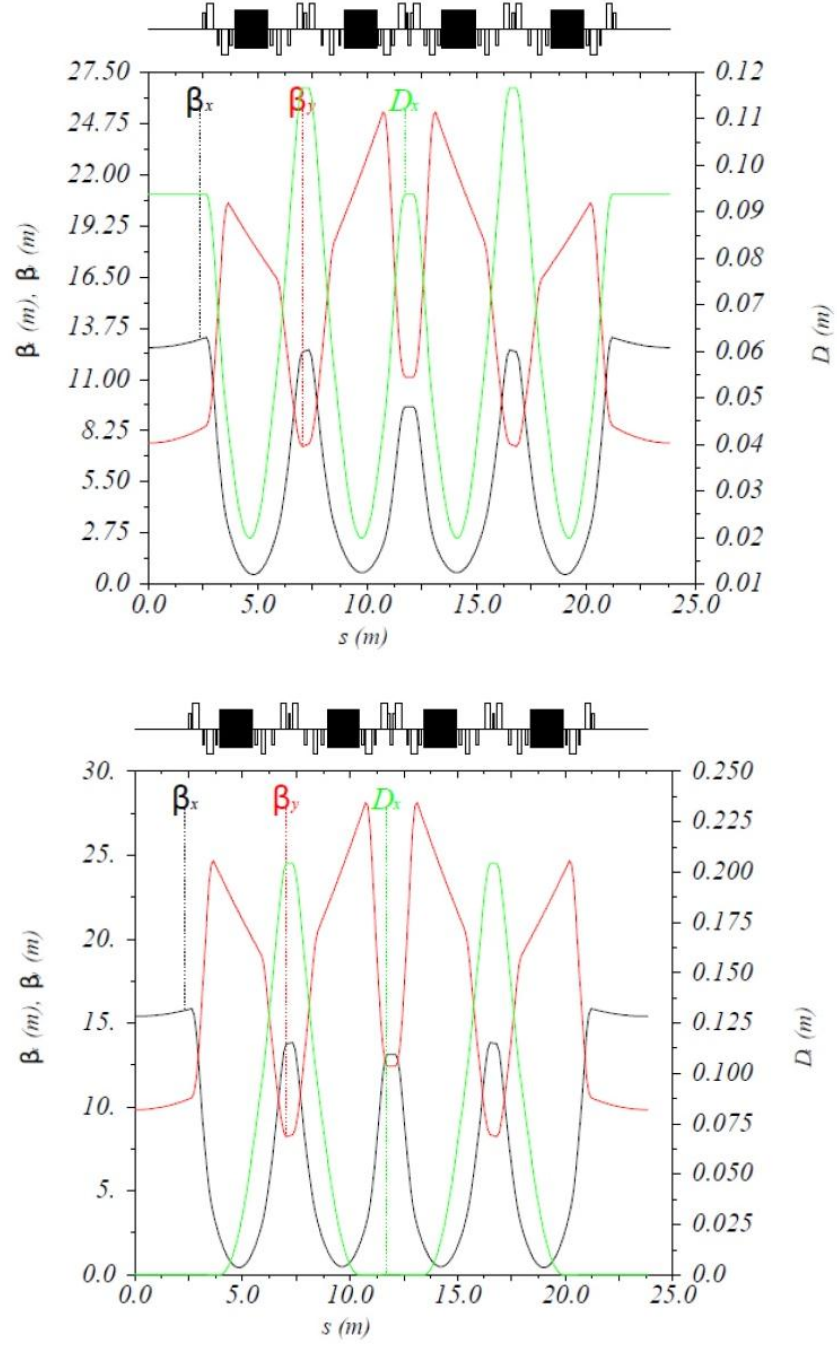
4.4.1 THM-SI tesisi ana halkasındaki magnet ihtiyacı

Önceki bölümde bahsedilen tipte bir ön hızlandırıcı halkada; 128 adet odaklayıcı, 96 adet bükücü ve 128 adet düzeltici (sektupol) magnete ihtiyaç duyulmaktadır (Nergiz vd. 2017).

Düşük yayılım değerine ulaşabilmek için 4 eğici magnetten oluşan temel hücre tasarlanmıştır. Temel hücre, 4 adet eğici magnet ve 4 farklı tipte 16 adet dört kutuplu magnetten oluşmuştur. Depolama halkası ise bu temel yapının 20 defa tekrar etmesiyle meydana gelmiştir. Temel yapı üzerindeki betatron ve dispersiyon fonksiyonlarının dağılımı Şekil 4.13'te gösterilmiştir. Bu durumda depolama halkasının çevresi 477 m olmaktadır (Nergiz vd. 2015).

7 tip altı kutuplu magnet (sektupol magnet) kullanılmıştır. Bu altı kutuplu magnetlerin amacı kromatikliği azaltmak ve doğrusal olmayan etkileri düzeltmektir. Halka üzerinde toplamda 80 bükücü magnet, 320 dört kutuplu magnet ve 460 altı kutuplu magnet bulunmaktadır. Eğici magnetler 1.5 m uzunluğundadır ve içlerindeki manyetik alan gücü değeri 0.52 T'dır. Halka üzerinde kullanılan altı kutuplu magnetlerin olumsuz tarafı doğrusal olmayan etkilere sebep olmalarıdır. Bu etkileri düzeltmek için ise yine altı kutuplu magnetler kullanılır. Bahsi geçen doğrusal olmayan etkiler dinamik aralık olarak tanımlanan ve demetin kalitesini belli eden parametreye kısıtlamalar getirir. Dinamik aralık özellikle demetin depolama halkasına alınmasında önem taşımaktadır.

Halka üzerinde 20 adet magnetsiz bölge bulunmaktadır ve her birinin uzunluğu 5 m'dir. Bu magnetsiz bölgelerin biri demetin depolama halkasına alınması için, diğeri rf kovuk yerleştirmek için, kalan 18 tanesi ise ışınlam elde edilecek salındırıcı magnetler içindir. Sektör sayısı, temelde bütçe ile ilintili olarak, halkanın çevre uzunluğuna konulan kısıtlamadan kaynaklanmaktadır. Yapılan tasarımda halkamız izomanyetik yapıdadır. Buradaki temel amaç dinamik aralık düşünüldüğünde simetrik yapıların daha avantajlı olmasıdır (Nergiz vd. 2015).



Şekil 4.13 Temel hücre boyunca betatron ve dispersiyon fonksiyonları. Üstteki şekil sonlu dispersiyon durumunu, alttaki şekil akromatik durumu göstermektedir (Nergiz vd. 2015)

4.5 THM-SI Tesisi Ön Hızlandırıcı Halkası İçin Öngörülen Dipol Magnet Tasarımı

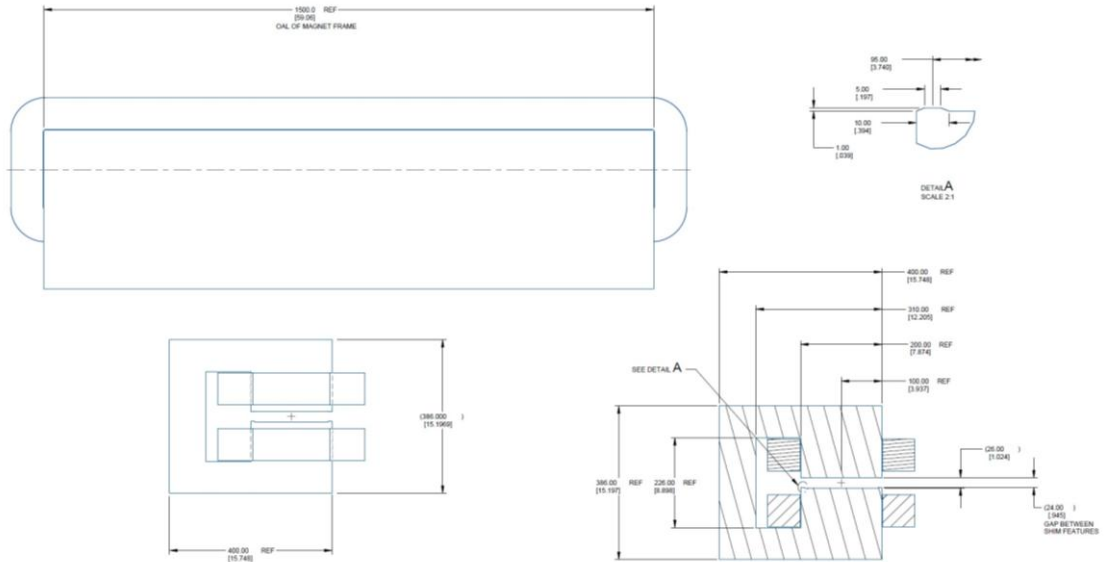
Bu bölümde, TURKAY adıyla önerilen 3. nesil sinkrotron ışınnımı kaynağı tesisinin

uzun seçenek ön hızlandırıcısında ihtiyaç duyulan bir bükücü magnet (iki kutuplu) tasarım çalışması yapılmıştır. Bükücü magnet tasarımında biri C-tipi, diğeri H-tip olmak üzere iki adet farklı geometri üzerine, Radia ve Poisson Superfish yazılımlarına ek olarak, C-tipi bükücü magnet tasarımı COMSOL Multifizik 3D (COMSOL Multiphysics® 2020) ve Creo Parametrik 3D (Creo Parametric 3D Modeling Software 2020) programları aracılığıyla detaylandırılmıştır.

Uzun ön hızlandırıcı halka üzerinde yer alan bükücü magnetler özdeşdir. Halkada bulunan bükücü magnetlerin özdeş olmasının avantajı, izomanyetik depolama halkalarında dinamik aralığın daha geniş olmasıdır.

4.5.1 C-Tipi dipol (bükücü) magnet tasarımı

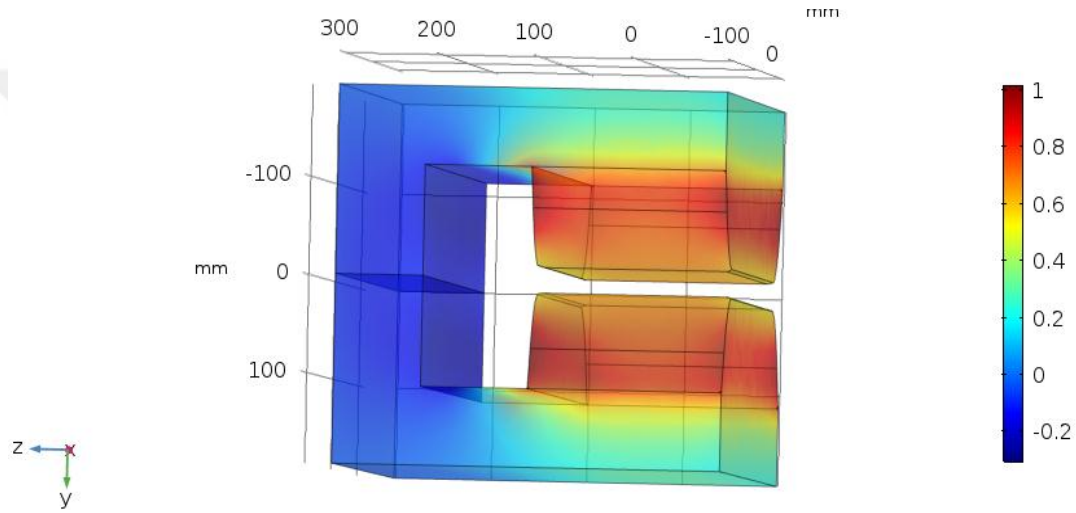
Ön hızlandırıcıda halka 96 özdeş bükücü magnet bulunmaktadır. Her biri 1.5 m uzunluğa sahip ve 26 mm kutup aralığında 0.65 T manyetik alan üretir. Magnetin bükme yarıçapı 15.4 m'dir. Bu değer elektron demetini 3.0 GeV enerji değerinde 3.75 derece saptırmaktadır (Nergiz vd. 2017). Creo yazılımı yardımıyla çizimleri yapılan magnetin profili ve boyutları Şekil 4.14'te sunulmuştur.



Şekil 4.14 Tasarlanan C-tipi bükücü magnetin profili

Magnet tipi “C” şeklinde seçilmiştir. Bu tip bir yapıda ekstraksiyon daha kolaydır. Ayrıca bükücü magnet vakum bölümünün daha kolay bir şekilde yerleştirilmesine izin verir. Aynı zamanda dikdörtgen bir kutup profiline sahiptir. Dikdörtgen magnetler daha büyük bir iyi alan bölgesine (good field region) ihtiyaç duyar, imalatı daha basittir ve bu tip magnetlerde tolerans değerlerine ulaşmak daha kolaydır (A. Jain (Personal communication) 2019).

Dikey bileşenin manyetik akı yoğunluğu benzetim sonucu Şekil 4.15’te gösterilmiştir.



Şekil 4.15 Comsol Multiphysics yazılımı kullanılarak modellenen C-Tipi dipol magnet için, dikey manyetik alan bileşeninin manyetik akı yoğunluğu benzetimi (Alan değeri T cinsinden gösterilmiştir)

Optimum akım yoğunluğunun (j) belirlenmesi doğrudan ekonomik ölçütlere bağlıdır. Düşük yoğunluk, daha az elektrik faturasına ve pahalı bir güç dönüştürücü ihtiyacına neden olur, bu da hızlandırıcı tüneline daha az ısı dağılımı anlamına gelir. Öte yandan, yüksek yoğunluğun avantajları, daha düşük maliyet ve daha küçük bobin ve magnetlerdir (Marks 2004).

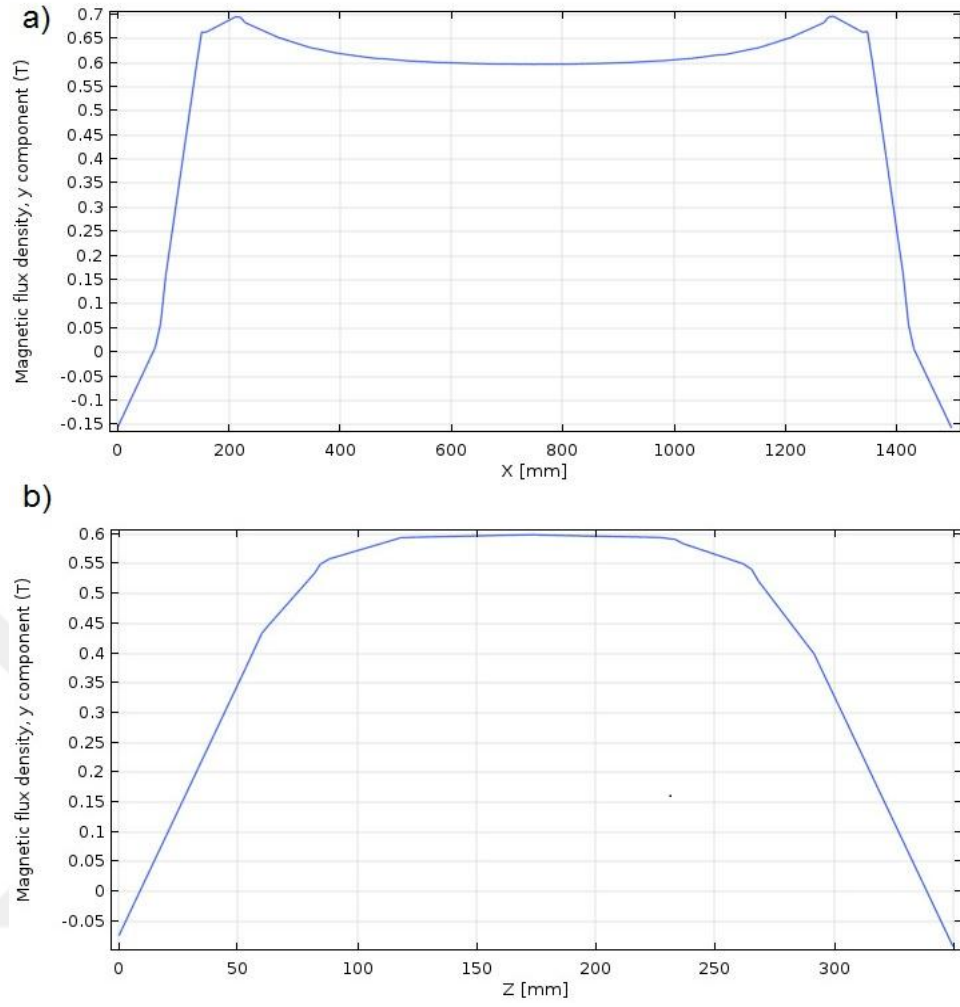
Yapılan tasarımda toplam uyarma akımı 13500 Tur.Amper (NI) olarak belirlenmiştir. Ancak toplam bakır alanı ve dönüş sayısı (N) olmak üzere iki serbestlik derecesi mevcuttur. Modelimizde her bir bobin 75 sarımdan oluşmaktadır. Boşluğu dolduracak

şekilde 3x25 olmak üzere, 3 katlı olacak şekilde sarım yapılmıştır. Standart tasarım, içi boş ve soğutma suyu hattı içeren, dikdörtgen bakır (veya alüminyum) iletkenidir. İzolasyonu sağlamak için cam bez ve epoksi reçine kullanılmıştır. Sarım sayısı 75 ve iletken akım 180 A olmak üzere toplam iletken alanı 6000 mm²'dir. Tasarlanan bükücü ve sekstupol/kuadrupol magnetlerin ana parametreleri Çizelge 4.6'da sunulmuştur. Tasarım detaylarına (Akdoğan vd. 2021) referansdaki makaleden ulaşılabilir.

Çizelge 4.6 Tasarlanan C-Tipi dipol magnetin ana parametreleri

Parametre	Değer
Magnetik uzunluk (mm)	1569.5
Demir uzunluğu (mm)	1500
Bükücü alan (T)	0.65
Bükme yarıçapı (deg.)	5.625
Açıklık çapı (mm)	26
İyi alan aralığı (mm)	±14
Boyutlar (e/b/y) (mm)	400/1500/386
Bükücü bobin akımı (A)	13500
Toplam sarım sayısı	75
Magnet tipi	C

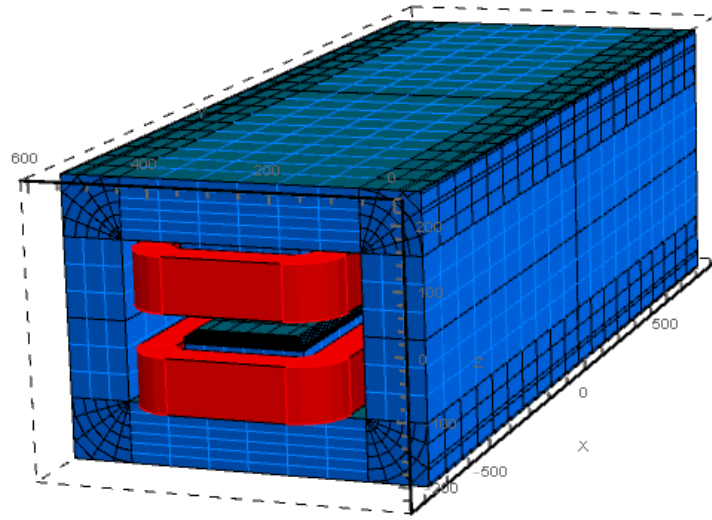
Magnet içerisinde manyetik alanın, demet yönü (X eksen) ve demet yönüne dik eksen (Z eksen) boyunca değişimleri sırasıyla Şekil 4.16'da sunulmuştur.



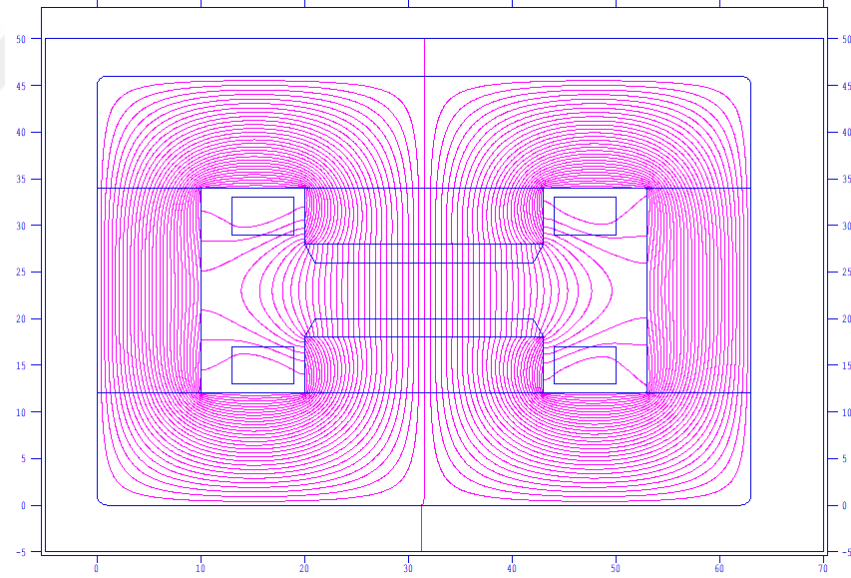
Şekil 4.16 a) Boyuna (X) ve b) Enine (Z) eksenleri boyunca manyetik alan dağılımı

4.5.2 H-Tipi dipol (bükücü) magnet tasarımı

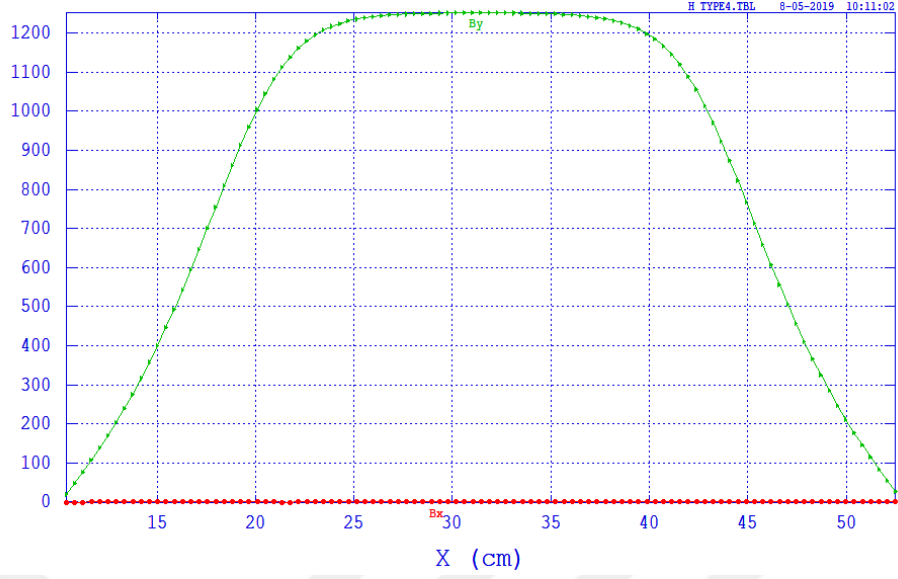
H tipi bükücü magnet Radia ve Poisson Superfish yazılımları kullanılarak modellenmiştir. Tasarlanan bükücü magnet Şekil 4.17’de gösterilmiştir. 52 x 92 mm²’lik boşlukta 4900 Tur.Amper akım değeri için manyetik alanın değişimi iki boyutlu olarak Şekil 4.18’de sunulmuştur. Elde edilen manyetik alanın eğici magnetin eksenleri boyunca değişimi Şekil 4.19’da sunulmuştur.



Şekil 4.17 Radia yazılımı ile tasarlanan H-Tipi bükücü magnet. Kırmızı kısım bobinleri ve mavi kısım boyunduruğu ifade etmektedir (Uzunluk değerleri mm cinsinden gösterilmiştir)



Şekil 4.18 H-Tipi bükücü magnetin manyetik alan haritası (Poisson Superfish yazılımı üzerinden, 1010 tip demir seçilerek, benzetim yapılmıştır. Uzunluk değerleri cm cinsinden gösterilmiştir)



Şekil 4.19 H-Tipi bükücü magnetin yatay eksen boyunca (Y), magnetk alanın dikey bileşeninin (By) değişimi yeşil renk ile, benzer şekilde dikey eksen boyunca değişimi (X) ise kırmızı renk ile gösterilmiştir

Tasarlanan magnetin uzunluğu 1.21 m'dir. Bobin başına sarım sayısı 40 turdur. Bu koşullarda elde edilen manyetik alan değeri 0.65 T'dır. Tasarlanan H-tipi dipol magnetin ana parametreleri Çizelge 4.7'de yer almaktadır.

Çizelge 4.7 Tasarlanan H-tipi dipol magnetin ana parametreleri

Parametre	Değer
Magnetik uzunluk (mm)	1266.06
Demir uzunluğu (mm)	1210
Bükücü alan (T)	0.65
Bükme yarıçapı (deg.)	5.625
Açıklık çapı (mm)	52
İyi alan aralığı (mm)	±15
Boyutlar (e/b/y) (mm)	620/1210/450
Bükücü bobin akımı (A)	13500
Magnet tipi	H

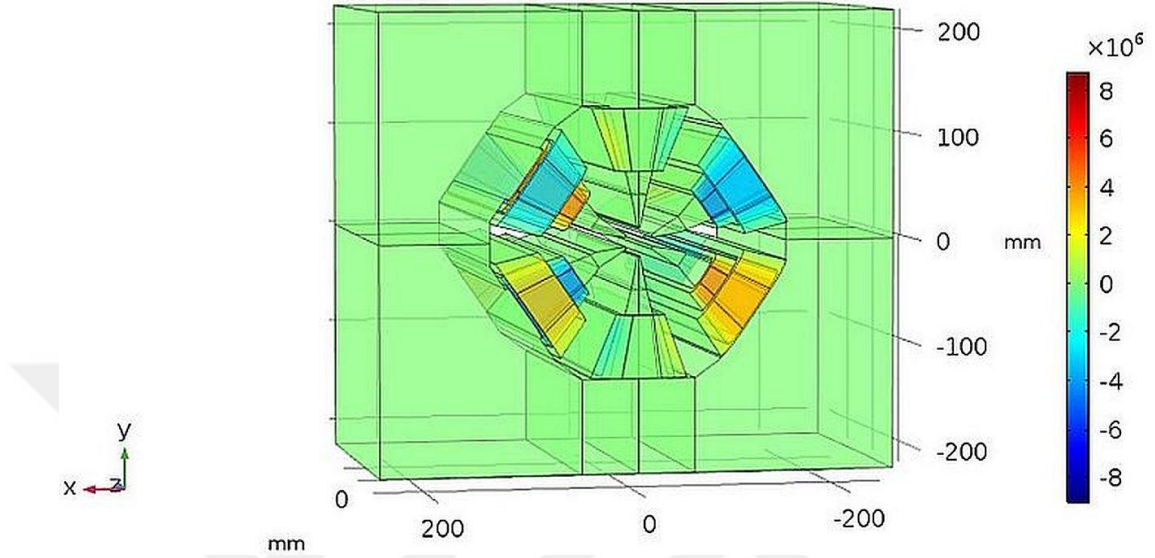
4.6 THM-SI Tesisi Ön Hızlandırıcı Halkası İçin Öngörülen Sekstupol/Kuadrupol Magnet Tasarımı

Tasarım çalışmalarında, tüm magnet bileşenlerinin geometrisi Creo Parametric 3D yazılımı kullanarak geliştirilmiştir. Magnet boyundurukları C10100 çeliği kullanılarak modellenmiş olup, üç boyutlu Comsol Multiphysics yazılımı üzerinden manyetik alan haritaları oluşturulmuştur (Oxygen-Free Electronic Copper (C10100) 2020).

Elektromagnetlerin çalışma mantığında, belirli bir kutup geometrisinin dış profili boyunca takip edilen sarımlar yoluyla iletilen elektrik akımı bir manyetik alanı indüklemektedir. Yüklü parçacıkların bir kısmı, artan enerji ile birlikte dörtlü alanlar tarafından daha az bükülür. Diğer bir ifadeyle yüklü parçacıkların tamamı aynı derecede bükülmezler. Alanı yönlendirmek, şekillendirmek, güçlendirmek ve ortaya çıkan kromatik etkiyi önlemek amacıyla, bükülmeyi ve odak noktasını burada tarif edilen sekstupol/kuadrupol magnet yardımıyla düzeltmek amaçlanmıştır. Bu doğrultuda düşük karbonlu bir demir boyunduruk kullanarak bir sekstupol/kuadrupol bütünleşik magnet tasarım çalışması yapılmıştır. Bu tür demir ağırlıklı magnetler, hızlandırıcı sistemlerde yaklaşık 2 T maksimum manyetik alanda doyurulmuş en yaygın kullanılan magnetlerdir. Genel bir kural olarak, sargıların ısınması ile soğutma kapasiteleri arasındaki dengeyi korumak için düzenli magnetlerdeki akım yoğunluğu yaklaşık 8 A/mm²'yi geçmemelidir (Wiedemann 2007). Bobin hâkim magnetler, alanı şekillendirmek için sargılarda akan akım tarafından doğrudan üretilen akıyı kullanır. Magnet bobinleri için yaygın malzemeler bakır ve alüminyumdur. Bobin pozisyonu, alanın mukavemeti ve homojenliği değişkenleri daha az bir öneme sahiptir.

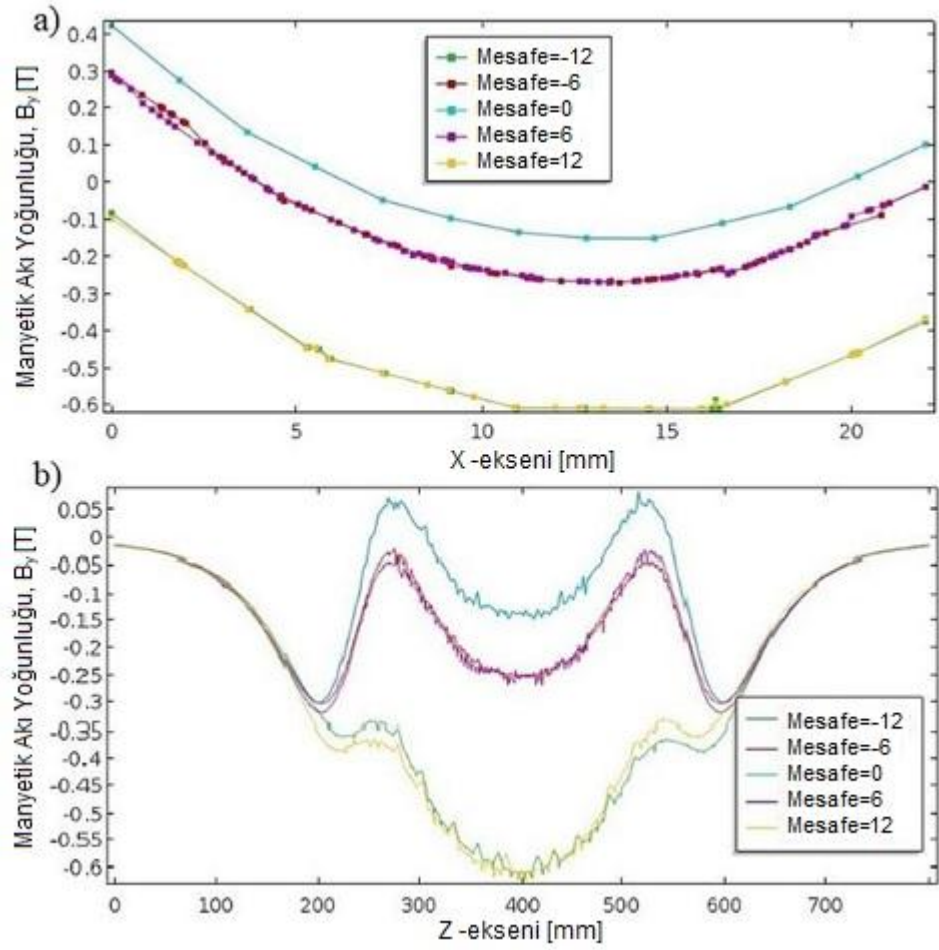
Kuadrupol ve sekstupol alanları, tasarladığımız kutup profili ve bu alanlara özgü bobinler yardımıyla elde edilmiştir. Tasarımı yapılan magnetin mıknatıslanma özellikleri, analitik yöntemler kullanarak belirlenmiştir. 3D tasarım sayesinde, magnet özellikleri fonksiyonel ve performans gereksinimlerini içerecek şekilde tanımlanmıştır. Tasarım çalışmamızda 0.6 T maksimum dikey alan ve 313.9 mm maksimum manyetik uzunluk için analizler gerçekleştirilmiştir (Manyetik uzunluk yaklaşık olarak $L_{iron} + 2rk$ değerine eşittir.) Burada r diyafram yarıçapıdır, k geometrik faktördür (Genellikle sekstupol için 0.53 değerine eşittir) (Abdelwahab vd. 2003). Şekil 4.20'de dikey

manyetik alan bileşeninin akım yoğunluğu her bir sekstupol bobinlerinde 0.8 A/mm^2 , kuadrupol bobinlerinde 1.6 A/mm^2 'dir.



Şekil 4.20 Tasarlanmış bütünleşik magnetin dikey bileşeninin akım yoğunluğu simülasyonu (A/m^2 biriminde ifade edilmiştir.)

Önemli bir nokta, tasarlanan magnette sekstupol ve kuadrupol bobinlerine ayrı ayrı enerji verilebilmesidir. Bu özellik magnetimizin gruplanan bobinlerine farklı enerji değerlerinde çalıştırılabilme ve her iki etkiyi ayrı ayrı kontrol edebilme yeteneği vermektedir. Manyetik alan muntazam bir şekilde değişirken, alan kalitesi 26 mm çapında dairesel bir diyafram içinde enine X eksenine boyunca dağıtılır. Şekil 4.21, magnet merkezi etrafındaki boyuna (Z eksenine) eksenine ile birlikte X eksenine üzerindeki akı yoğunluğunun sapmasını gösterir. Burada magnetin içerisinde bir uçtan diğer uca yaylar yerleştirilerek simülasyonlar gerçekleştirildi. Bu yay, boyuna (Z eksenine) için (0, 0, -400; X, Y, Z) noktasından (0, 0, 400; X, Y, Z) noktasına kadar uzanır. Öte yandan, diğer yay enine (X eksenine) için (-11, 0, 0; X, Y, Z) noktasından (11, 0, 0; X, Y, Z) noktasına kadar uzanır. Dikey magnetik alan ($X_1 \rightarrow X_2: 10.9 \rightarrow 15.9$; $Y_1, Y_2: -12, 12$, $Z: 148.8$) aralığında maksimum değerlere sahiptir.

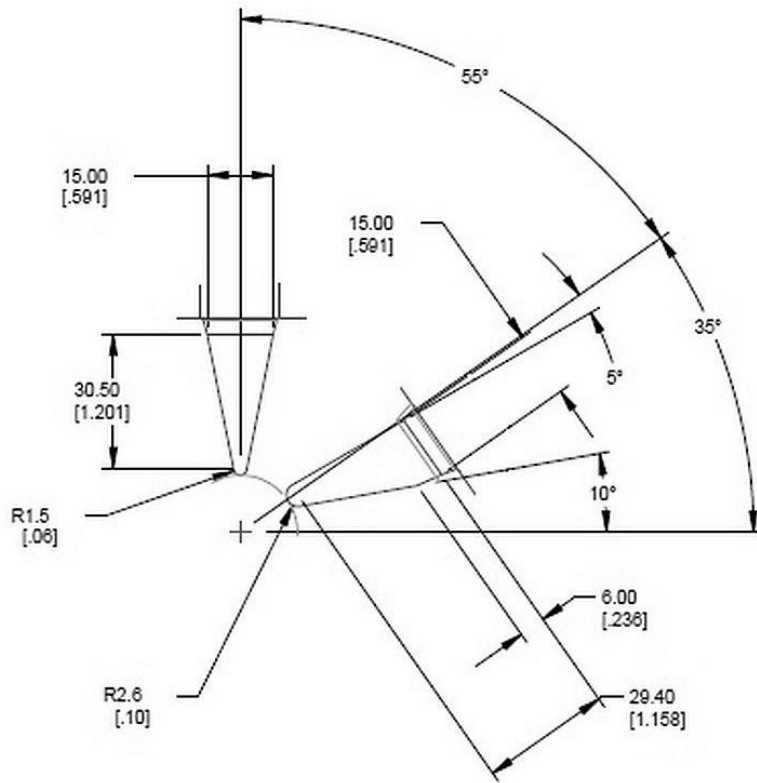


Şekil 4.21 Dikey manyetik alan bileşeninin dağılımı a) Enine eksen (X eksen) boyunca b) Boyuna eksen (Z eksen) boyunca

B_y Her bir kutuptaki mıknatıslanma, eşit kuzey ve güney kutuplarından oluşan bir dizi üretir. Kuadrupol, sekstupol ve daha yüksek dereceli magnetler için, belirsizliği önlemek amacıyla, kutup ucu alanı veya referans yarıçapındaki alan önem arz etmektedir. Bizim durumumuzda, dik bir sekstupol için kutup profili $3x^2y - y^3 = R^3$ olarak tanımlanır, burada R simetrik olarak hizalanmış magnet merkezinin yarıçapıdır (Wiedemann 2007). Alan homojenliğini arttırmak ve çok kutuplu bileşenlerin bazılarını azaltmak için kutup kenarı şimlari (shim) ve uç kısımlara kesikler (chamfer) uygulanabilir. Bununla birlikte, bu yapıda bir sekstupol alan bileşenini elde etmek için yan kutuplara bazı asimetriler uygulanmıştır. Gerçek kutup şeklinin teorik şekle yakın değerlerde olması, izin verilen harmonikleri en aza indirmek ve alan kalitesini iyileştirmek için tasarım aşamasında kullanılan şimlerle sonlandırılması da tercih edilir.

Sonsuz olmayan kutbu telafi etmek için kutup kenarlarına şimler eklenir. Bu yöntem mekanik hassasiyetin kontrolünü kolaylaştırır ve aynı zamanda düşük maliyetlidir. Şimlerin geometrileri ve şekilleri, harmonik hataların genliğini belirler (Tanabe 2005). Orta kutuplar ve yan kutuplar birbirine simetrikler ve ayrı ayrı incelenir.

Vurgulanması gereken bir diğerk önemli nokta, magnet kutuplarının geometrisidir. Kutupların çok dar olduğu durumda akı yoğunluğu çok yükselir, böylece doygunluk meydana gelir. Çok kalın olduğu durumda ise, bitişik sarımlar arasında daha az boşluk kalması nedeniyle, magnet geometrisi montaj için sorunlu hale gelir. Bu nedenle, merkezi açıklıkta alan kalitesini sağlamak için daha yüksek uyarma akımları gerektirir. Kutup genişliğini artırarak doygunluğu azaltmak mümkündür. Kutup kökü, doygunluğunu en aza indirmek için kutup uzunluğu kutbun yanından minimum akıya ulaşmak için radyal yönde mümkün olduğu kısı tasarlanmalıdır (Wiedemann 2007). Magnet kutuplarının ve boyundurukların ayrıntılı tasarımı Şekil 4.22’de ve önerilen bütünleşik sekstupol/kuadrupol magnetin ana parametreleri Çizelge 4.8’de sunulmuştur.



Şekil 4.22 Bütünleşik sekstupol/kuadrupol magnetin kutup profili (Çizim mm ve inç cinsinden gösterilmiştir.)

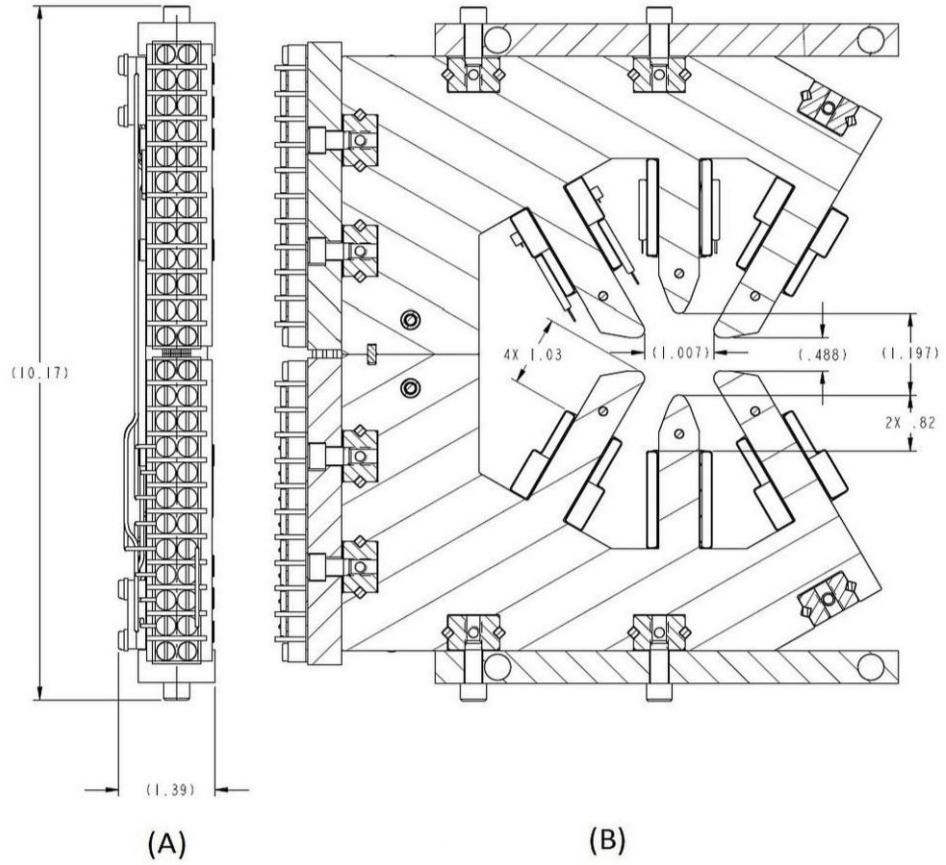
Çizelge 4.8 Tasarlanan bütünleşik sekstupol/kuadrupol magnetin ana parametreleri

Parametre	Değer
Magnetik uzunluk (mm)	313.9
Demir uzunluğu (mm)	300
Maks. dikey alan (T)	0.6
Sekstupol bobinlerdeki akım yoğunluğu (A.mm ⁻²)	0.8
Kuadrupol bobinlerdeki akım yoğunluğu (A.mm ⁻²)	1.6
Açıklık çapı (mm)	26
Güzel alan aralığı (-)	±15
Boyutlar (e/b/y) (mm)	500/300/440
Kuadrupol bobin akımı (A)	4800
Sekstupol bobin akımı (A)	10000
Magnet tipi	Bütünleşik

4.7 Düzeltici (Corrector) Magnet Tasarım Detayları, Testleri ve Çalışmaların Yapıldığı Argonne Ulusal Laboratuvarı

4.7.1 Düzeltici magnet tasarım detayları

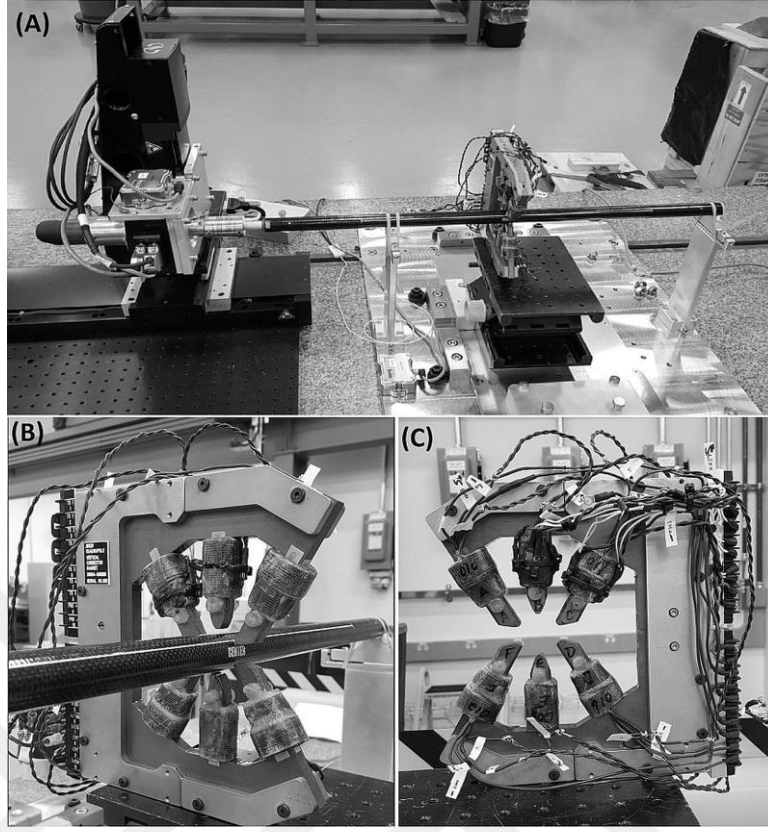
Malzeme olarak, Yükseltici halkalarda yüksek oranda saf demir tercih edilmez. Çünkü yüksek elektrik iletkenliği girdap akımlarına neden olabilir. Bu nedenle düzeltici magnet tasarım ve üretiminde, boyunduruk malzemesi olarak % 0.17 - 0.22 arasında karbon içeriğine sahip, ucuz, düşük karbonlu çelik (AISI 4720 Alaşımlı çelik 2020) ve bobinler için içi boş bakır iletken tercih edilmiştir (Oxygen-free electronic Copper (C10100) 2020). Magnet bileşenlerinin geometrisi Creo Parametric 3D yazılımını kullanarak geliştirilmiştir (Creo Parametric 3D Modeling Software 2020). Düzeltici magnetin referans yarıçapı (R_{ref}) 10 mm alınmıştır. Magnet profili Şekil 4.23'te gösterilmiştir.



Şekil 4.23 Düzeltici magnetin CAD modeli (A) Sol yan görünümü ve (B) İnç cinsinden önden görünümü

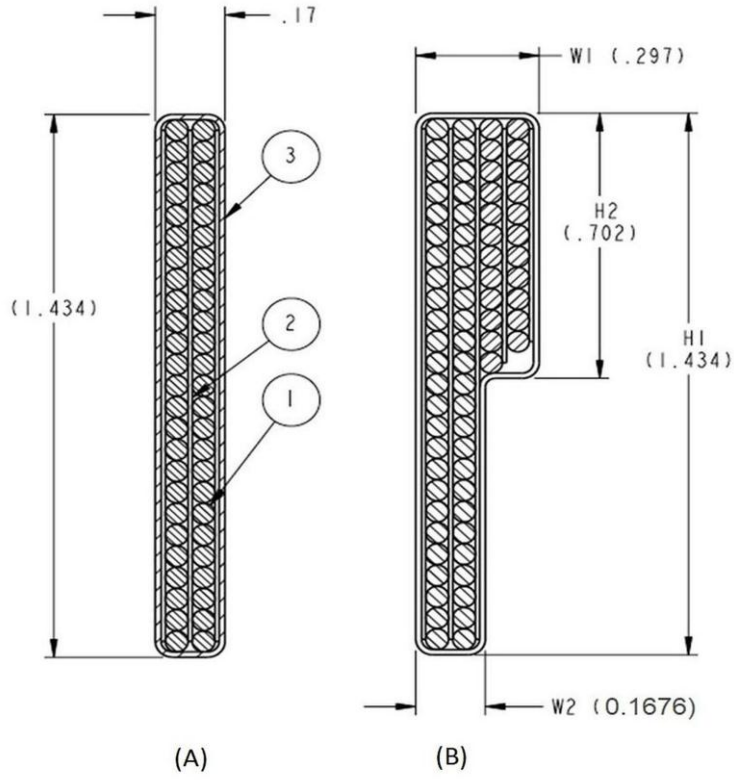
Ayar sacları (shim), bobinin üst kısmı ile direğin üst kısmı arasındaki boşluğa yerleştirilmiştir. Bobinler epoksi ile kaplıdır. Cam elyaf ve tel yalıtımları eklendiğinde, iletken bloğun tepesi ile direğin tepesi arasındaki mesafe 0.036 inç olmaktadır. Bu durum, merkez bobin ve her iki taraftaki iç ve dış yan bobinler için de geçerlidir. Düzeltici magnetin uzunluğu 10 mm'dir. Yanlara başka bileşenlerin eklenmesiyle (manyetik olmayan destek plakaları, elektrik bağlantıları vb.) uzunluğu 45 mm'ye çıkmıştır.

Üretimi yapılan düzeltici magnet bobininin iç boyutları X yönünde 0.621 inç ve Z yönünde 0.460 inç'tir. Bobinin içindeki köşe yarıçapı 0.086 inçtir. Magnet üzerinde iki farklı bobin tipi bulunmaktadır. Bobinlerin magnet üzerindeki yerleşimi Şekil 4.24-B ve C'de gösterilmiştir.



Şekil 4.24 A) Corrector magnetin harmonik analizinin yapıldığı deney düzeneği, B) Magnetin ön profilden görünümü, C) Magnetin arka profilden görünümü

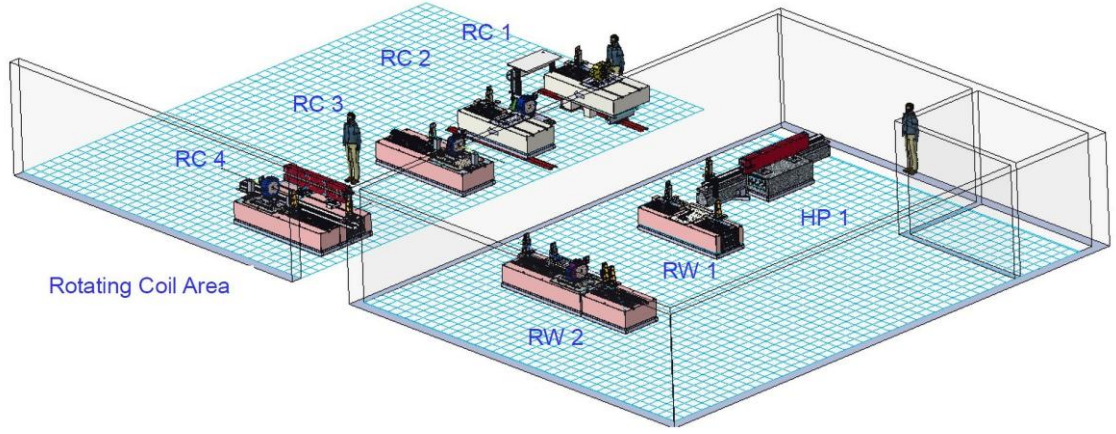
Bobinin her katında 25 sarım vardır. Bu da merkezdeki bobinler için toplam 50 sarıma takabül etmektedir (Şekil 4.25-A). Yan bobinlere ayrı ayrı güç verilen iki bölüm bulunmaktadır (Şekil 4.25-B). İç bobin, merkez kutbundaki bobin ile aynıdır. Benzer şekilde boyunduruk etrafında konuşlandırılmıştır. Eşit dönüş sayısı ve boyuta sahiptir. Dış bobinler ise birinci katmanda 12 ve ikinci katmanda 11 olmak üzere toplam 23 dönüşe sahiptir. Bobin katmanları arası, bobinin içi ve dışı 0.01 inç kalınlığında lamine cam/epoksi (Scotchply) ile sarılmıştır. Bobinin tamamı ise 0.014 inç kalınlığında cam elyaf ile sarılmıştır. Kullanılan iletken 16 awg (Amerikan tel ölçü birimi) iletkenidir. Kullanılan bakırın çapı 0.0508 inçtir. Tüm sağlanan izolasyonla birlikte telin toplam çapı 0.0548 inç'e çıkmaktadır. Bobin yapısı tüm bileşenleriyle birlikte Şekil 4.25'te sunulmuştur.



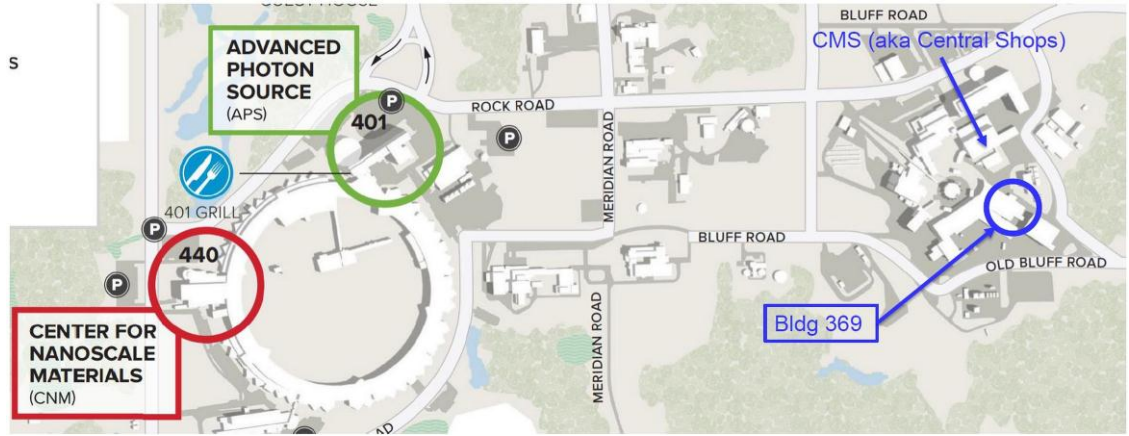
Şekil 4.25 Bobin boyutları (İnç olarak gösterilmiştir.) A) Tekli bobin (1 iletken, 2 lamine cam/epoksi ve 3 cam elyaf bant) B) Çift katlı bobin

4.7.2 Parametreler ve ölçüm hatları

Argonne Ulusal Laboratuvarı (ABD) APS-U Manyetik Ölçüm ve Hizalama Laboratuvarı'nda tüm tasarım ve deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Laboratuvarın şematik görünümü Şekil 4.26'da ve kampüs içerisindeki konumu da Şekil 4.27'de gösterilmiştir (Izzo 2020). Önceki bölümde tasarım detaylarını paylaştığımız düzeltici magnetin, APS-U projesinde salındırıcı magnetler arasında kullanılması planlanmaktadır. Bu tip bir düzeltici magnet, demet yörüngesini kontrol ederek, öteleyici halkada demetlerdeki kayıpları azaltmak için TURKAY tesisinin yükseltici halkasında kullanılabilir. Gerçekleştirdiğimiz bu deneysel çalışmamızda elde ettiğimiz ölçümlerin yol gösterici olması amaçlanmıştır.



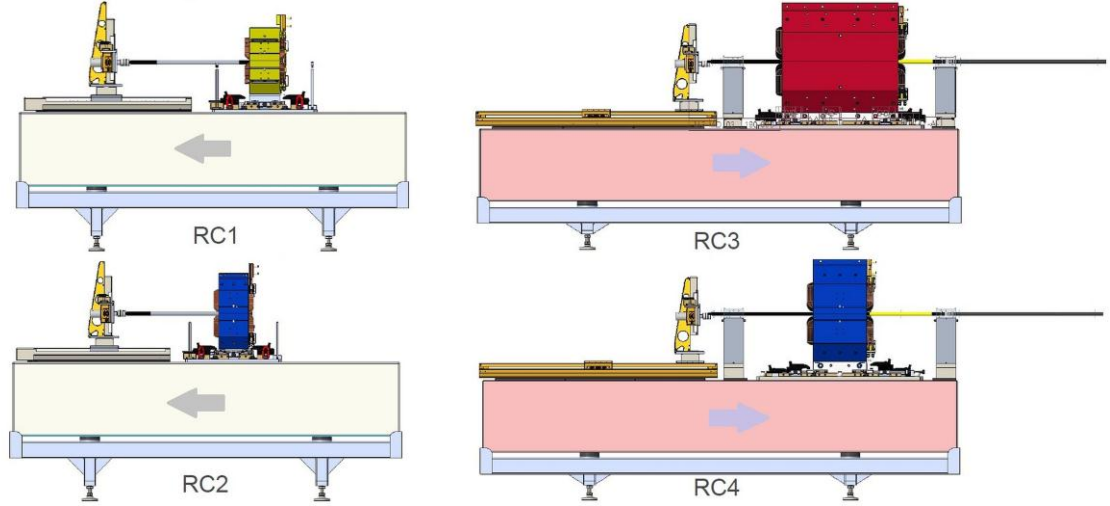
Şekil 4.26 APS-U magnet ölçüm laboratuvarı şeması (Izzo 2020)



Şekil 4.27 APS-U Magnet Ölçüm Laboratuvarı'nın konumu

Döner bobin ölçüm testi sırasında, bobin AC hattına senkronize olarak, sabit 1 Hz frekansla dönmektedir. Bobinden gelen veri, dar bir bant genişliği dalga analizörü ve her bir Fourier katsayısının genliği ile Fourier analizine tabi tutulur. Bu sistemde, bobinin dönme frekansına (ω) karşılık gelen Fourier katsayısı, çift kutuplu alandır; 2ω frekansına karşılık gelen katsayı, dört kutuplu alandır; 3ω katsayısı altı çiftli alandır ve daha yüksek alanlar için benzer şekilde devam etmektedir (Cobb vd. 1965). Her turda birkaç yüz ölçüm noktası toplayabilmesi için harmonik bobin çubuğunun dönüşü kalibre edilmiştir. Harmonik bobin çubuğunun dönüşü, bilinen harmonik özelliklere sahip bir magnet yardımıyla ve bilinen bir alanda, dönüş

başına birkaç yüz ölçüm noktası üzerinden kalibre edilmiştir. Bu ölçüm tezgâhına normal konumunda bir magnet monte edilip, ardından bir bobin tertibatı ve rutin ölçüm tekniği ile ölçüm yapılmaktadır. Ölçüm tamamlandığında, magnet Y ekseninde etrafında döndürülüp, monte edilerek (180 derece döndürülür), diğer bir ifadeyle demet yönünün tersi yönde magnet konumlandırılarak tekrar bir ölçüm alınarak süreç tamamlanır (Jain 2019). Daha sonra harmonik bobin geometrisi yardımıyla alan harmonikleri çıkarılmıştır. Dönen bobinleri kullanan bu teknik, hızlandırıcı magnetlerde harmonik katsayı ölçümleri için en uygun, doğru ve yaygın olarak kullanılan tekniktir. Döngü düzleminin, test edilen magnet eksenine paralel, keyfi bir açısal yönde yönlendirilebildiği radyal bobin tezgâhında tüm deneysel ölçümler gerçekleştirilmiştir. Radyal bobini oluşturmak için, radyal bir düzleme bir tel halkası yerleştirilmiştir. Ölçüm hattında bir çift, magnet eksenine paralel olan bir tel halkası kullanılır. Bu halka, alanın azimutal bileşenine duyarlıdır. Harmonik katsayılar, alan bileşenlerinin azimutal değişimiyle ilgilidir. Böylece, durdurulan akının azimutal değişimi dönen bobin ile ölçülmektedir. Daha sonra harmonik bobin geometrisinin bilgisi kullanarak, alan harmonikleri çıkarılmaktadır (Walckiers 2011). Şekil 4.24-A'da dönen bobin tezgâhındaki düzeltici magneti analiz etmek için kullanılan gerçek deneysel düzenek gösterilmiştir. Şekil 4.28'de ise tüm dönen bobin ölçüm hatları üzerinde magnetlerin hızlanmaları gösterilmiştir (Izzo 2020). Döner bobinlerin kullanıldığı bu teknik, hızlandırıcı magnetlerde harmonik katsayı ölçümleri için en uygun, doğru ve yaygın olarak kullanılan tekniktir.



Şekil 4.28 RC ölçüm hatları (Izzo 2020)

Vektör alanları ile tasarlanan model hesaplamalarının çıktılarının değerlendirmesinde "Avrupa Konvansiyonu" kullanmayı tercih ediyoruz ($n \geq 1$). Bu notasyonda alan gösterimleri sıfırdan başlar. Konvansiyon, $2n$ -kutuplu normal ve eğimli bileşenleri bir n indisi ile belirtir. Normal ve asimetrik (skew) bileşenler açısından, $B(z)$ 'nin genişlemesi aşağıdaki eşitlikle ifade edilir (Jain 1997):

$$B(z) = B_y(x, y) + iB_x(x, y) = \sum_{n=1}^{\infty} (B_n + iA_n) \left(\frac{x + iy}{R_{ref}} \right)^{n-1} \quad 4.6$$

Konvektif hava soğutmalı bir iletkendeki maksimum akım değeri, önerdiğimiz hava soğutmalı magnet için de geçerli olan, 1.5 A/mm^2 'dir (Lopes 2016). Bakırın çapı (yalıtım hariç) 0.0508 inçtir. Modelde, iletken blok üzerinde düzgün bir akım yoğunluğu kullanılmıştır. Kullanılan akım yoğunluğunun sayısal değeri, teldeki akımın dönüş sayısı ile çarpımının dış yalıtımı kaldırılmış bobinin enine kesitine bölümüne eşittir. Çizelge 4.9'da üretilen düzeltici magnetin fabrikasyon parametreleri sunulmuştur.

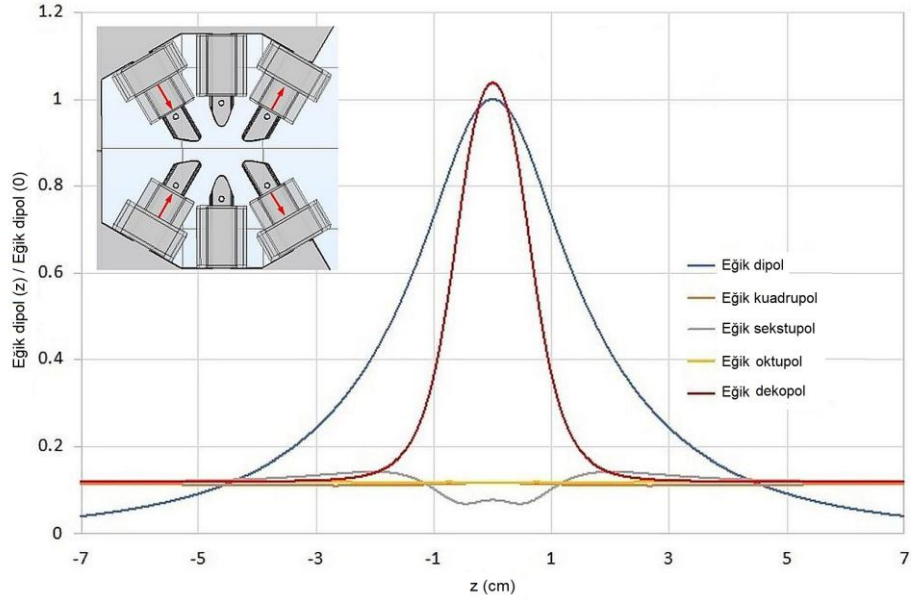
Çizelge 4.9 Üretilen düzeltici magnetin ana parametreleri

Parametre	Birim	Değer
Min. Eğik (Skew) Kuad. integral alan	Gauss	301
Min. Dikey Düzeltici integral alanı	Gauss.cm	528
Akım	A	3.81
Etkin uzunluk	cm	4.5
Her bir eğik kuadropol bobbini için tur sayısı (Merkez/Kenar)	adet/adet	50/24
Kutup başına dikey düzeltici tur sayısı	adet	50
Toplam direnç eğik/dikey	Ω	0.21/0.18
Toplam İndüktans eğik/dikey	mH	2/1.8
Aralık çapı	mm	36
Toplam kütle	Kg	7.4

4.7.3 Ölçüm sonuçları

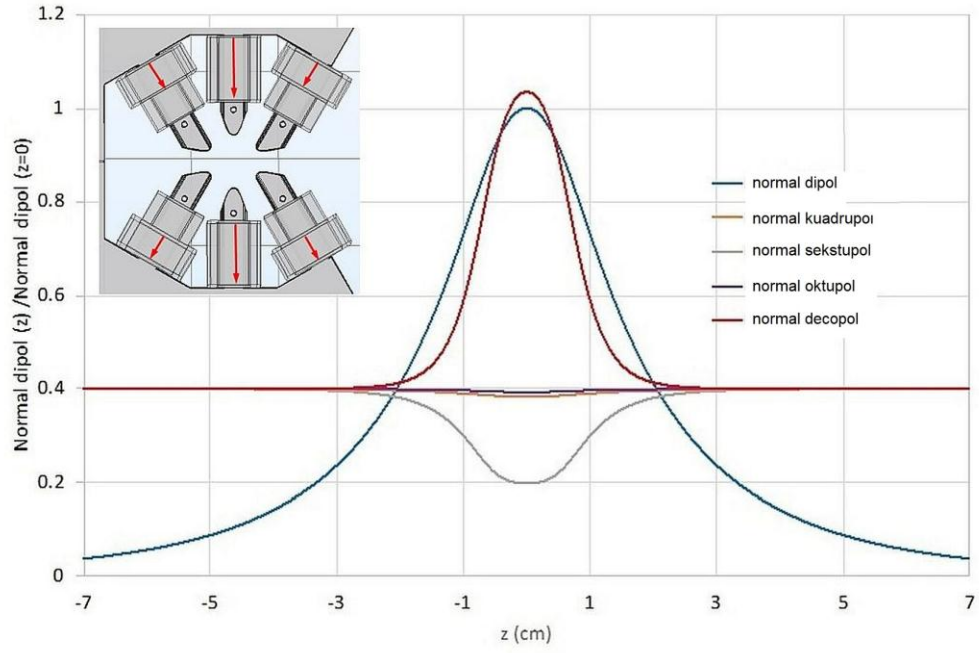
Düzeltilici magnetin orijinal tasarımında, bobinler geleneksel yalıtımlı bakır magnetin telinden imal edilmiştir. Bu nedenle, magnetin soğutması doğal konveksiyonla hava soğutmalı bobinler aracılığıyla yapılmıştır. Sargı hassasiyeti, yalıtım kalınlığı ve iletken kesiti göz önünde bulundurularak, magnet için çalışma akımı 3.81 A seçilmiştir. Kullanılan iletken malzeme, epoksi aşıl原因mış cam elyaf bantlarla yapılan ek yalıtıma sahip bakır magnet teldir. Tüm ölçümler dikey ve yatay alanlar olarak -3.81 A ile +3.81 A arasında değişen üç farklı enerjili seviyede gerçekleştirilmiştir. Boyuna (Z eksen) ve enine eksen (X eksen) dikey olan manyetik alan bileşenleri ölçülmüştür. Bu magnetin bir asimetric (skew) dört kutuplu, yatay alan ve dikey alan düzeltici olarak kullanılarak yapılan deneyler, 3.81 A akımın uygulanabilir olduğunu ve magnetin aşırı ısınmadığını göstermiştir. Bu nedenle, deneysel ölçümlerde maksimum akım 3.81 A tercih edilmiştir. Bu da bakır üzerinde 2.91 A/mm^2 'lik bir akım yoğunluğuna karşılık gelmektedir. Bobinlerdeki akım yoğunluğu merkez ve iç yan bobinlerde 1.82 A/mm^2 ve kısa dış yan bobinlerde 1.75 A/mm^2 olmaktadır. Şekil 4.29'da sadece yan kutuplardaki uzun

bobinlere akım verilmiştir. Burada geçerli yön, yatay bir alan oluşturmak için oklarla gösterildiği gibi kuzey kutbu oluşturmak için kullanılmıştır.

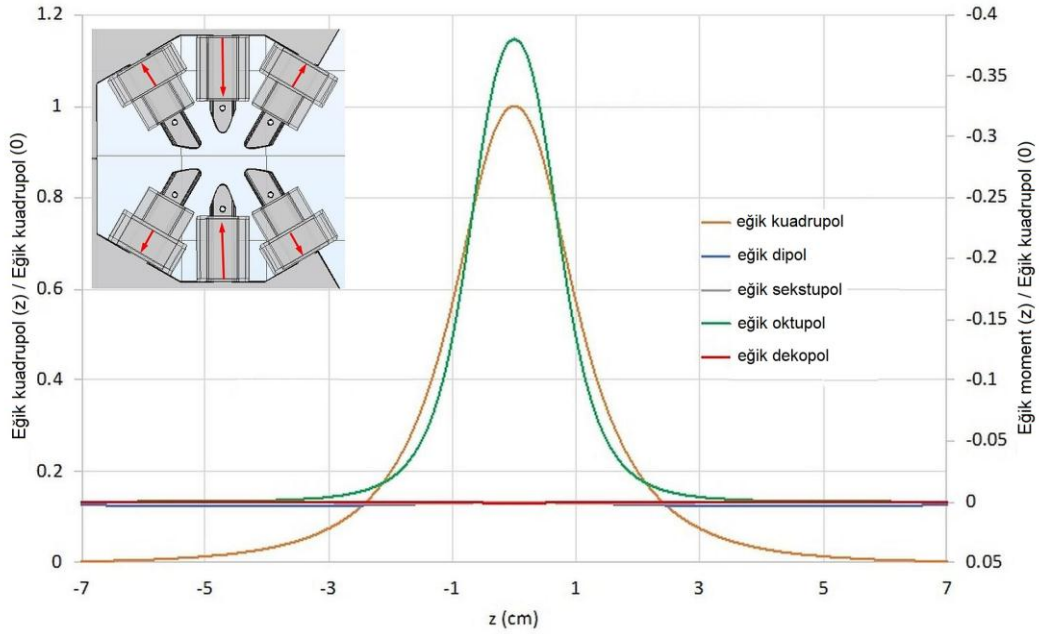


Şekil 4.29 Yatay alan düzeltici modda alan harmoniklerinin ölçümleri. Kırmızı oklarla sol üst köşede gösterildiği gibi sadece yan direklerdeki uzun bobinlere akım verilmiştir

Benzer şekilde, merkez bobinler ve kısa yanlardaki bobinler Şekil 4.30 ve Şekil 4.31’de gösterildiği şekilde güçlendirilmiştir. Bu deneyde, sırasıyla dikey alan düzeltici ve dört kutuplu düzeltici magnet üzerinden çok kutuplu alan momentleri ölçülmüştür. Mevcut yön, grafik üzerinde oklarla gösterildiği gibi kuzey kutbu üretmek için kullanılmıştır.

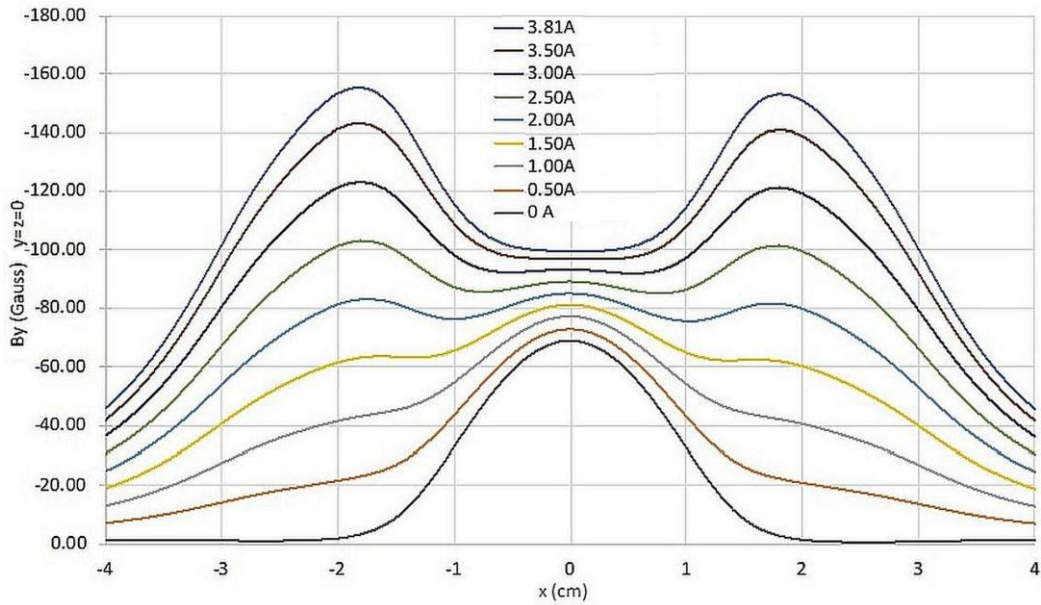


Şekil 4.30 Dikey alan düzeltici modda alan harmoniklerinin ölçümleri. Merkez bobinlere ve kısa her iki yandaki bobinlere, kırmızı oklarla sol üst köşede gösterildiği gibi akım verilmiştir



Şekil 4.31 Dört kutuplu düzeltici modda alan harmoniklerinin ölçümleri. Merkez bobinlere ve kısa her iki yandaki bobinlere, kırmızı oklarla sol üst köşede gösterildiği gibi akım verilmiştir

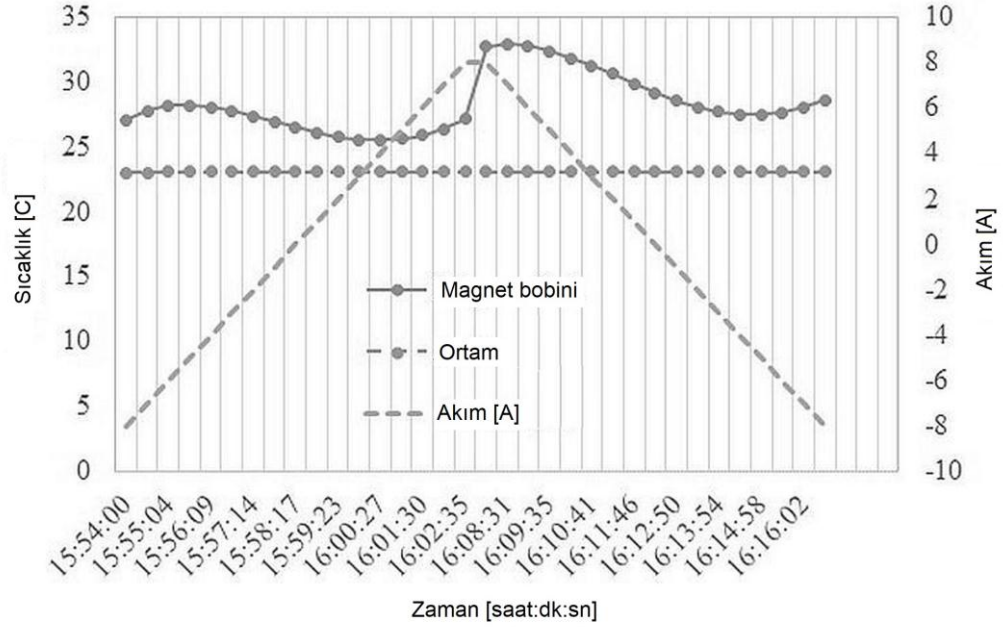
Şekil 4.32, dikey düzeltici modda çok kutuplu momentlerin yan bobinlerdeki akımla nasıl değiştiğini göstermektedir. Dipol (iki kutuplu) ve dekopol (on kutuplu) momentler akımla birlikte büyümektedir. Diğer momentler (dört, altı ve sekiz kutuplu) ya sürekli olarak küçük bir değerdir ya da akımla birlikte azalmaktadır. Maksimum 3,81 A akım değerinde sıfıra en yakın değerde olmaktadır. Yan bobinlerdeki akım düştükçe dipol momentini düşmektedir. Ancak dört kutuplu ve sekiz kutuplu moment değerleri daha hızlı düşmektedir. Burada on kutuplu moment, dipol momentini daha yakından izliyor gibi görünüyordur. Özellikle altı kutuplu, en yüksek akım değeri için en küçüktür ve yan bobinlerdeki akım değeri düştükçe yükselmektedir. Yan bobinlerdeki akım değeri düştükçe, x ekseninde pik noktasını ± 2 cm'ye yakın bir değere düşmektedir. Bu durum aynı zamanda $x = 0$ 'da B_y alanını da azaltmaktadır.



Şekil 4.32 Yan bobinlerin farklı akım değerlerinde dikey alanın (B_y) yatay koordinata (x) karşı değişimi

Yapılan tüm ölçümlerde bobinlere 3.81 A akım verilmiş ve her ölçüm adımında sıcaklık değerleri kaydedilmiştir. 23°C laboratuvar sıcaklığında deneyler gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.33, hava soğutmalı bobinlerin deney sürecindeki hareketini göstermektedir. Grafikteki noktalı çizgi, ölçüm sırasında bobinlerin ısı

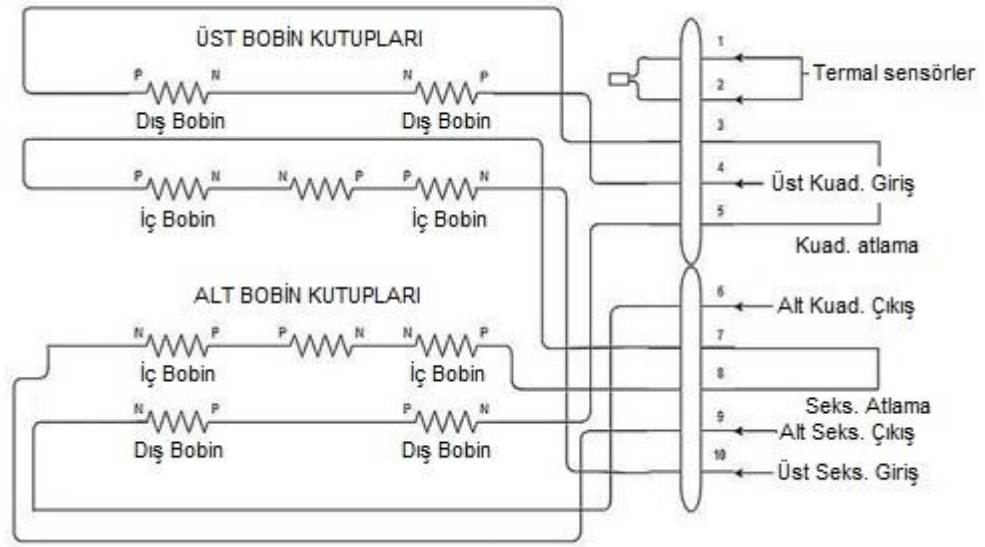
sapmalarını göstermektedir. Noktalı kesikli çizgi ortam akımını ve kesikli düz çizgi ölçümler sırasındaki mevcut sapmayı temsil etmektedir.



Şekil 4.33 Döner bobin ölçümü sırasında düzeltici magnetin sıcaklık sapmaları

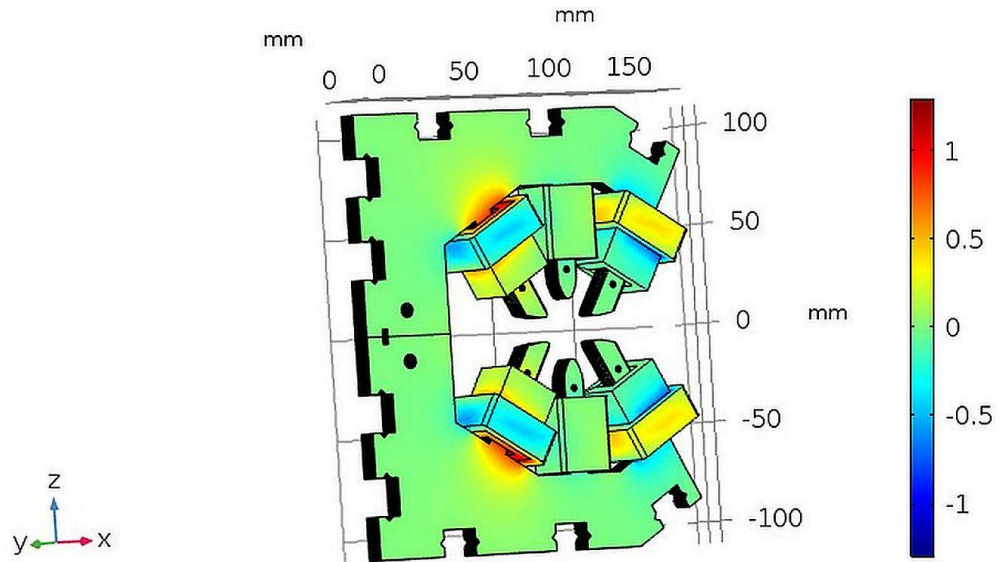
4.7.3.1 Sekstupol/kuadrupol magnet formülasyonundaki simülasyon ve test sonuçları

Üretimi yapılan düzeltici magnetin boyunduruğu kullanılarak, sekstupol ve kuadrupol alanları üretecek şekilde bobinlerinin bağlantıları yeniden yapılmış ve aynı boyunduruk yapısı ve kutup profili ile bütünleşik yapıda nasıl sonuç verdiği incelenmiştir. Magnetin form ve işlevini belirlemek için Çizelge 4.7'de paylaşılan ana parametreler çerçevesinde, Creo yazılımı üzerinde CAD modeli oluşturulmuştur. Ardından manyetik alan simülasyonu COMSOL Multifizik 3D yazılımı aracılığı ile yapılmıştır. Simülasyonda magnet bobinlerine üç farklı sarım uygulanmıştır. Farklı sarımlara sahip bobinlerin, sarım sayıları N ve N' olduğu durumda, dört kutuplu alanı elde etmek için sahip olduğu akım değeri (dış bobinler için) NI ve $-NI'$ olmaktadır. Benzer şekilde sekstupol alanı için akım değeri (iç bobinler ve iki orta kutup için) $N'I$ ve $-N'I'$ yazılabilir. Boyunduruk perspektifine göre, bu üç farklı akımı $(N+N')I$, $(N-N')I$ ve NI olarak görebiliriz. Bu konfigürasyon Şekil 4.34'te devre elemanları kullanılarak yapılan çizimle gösterilmiştir.



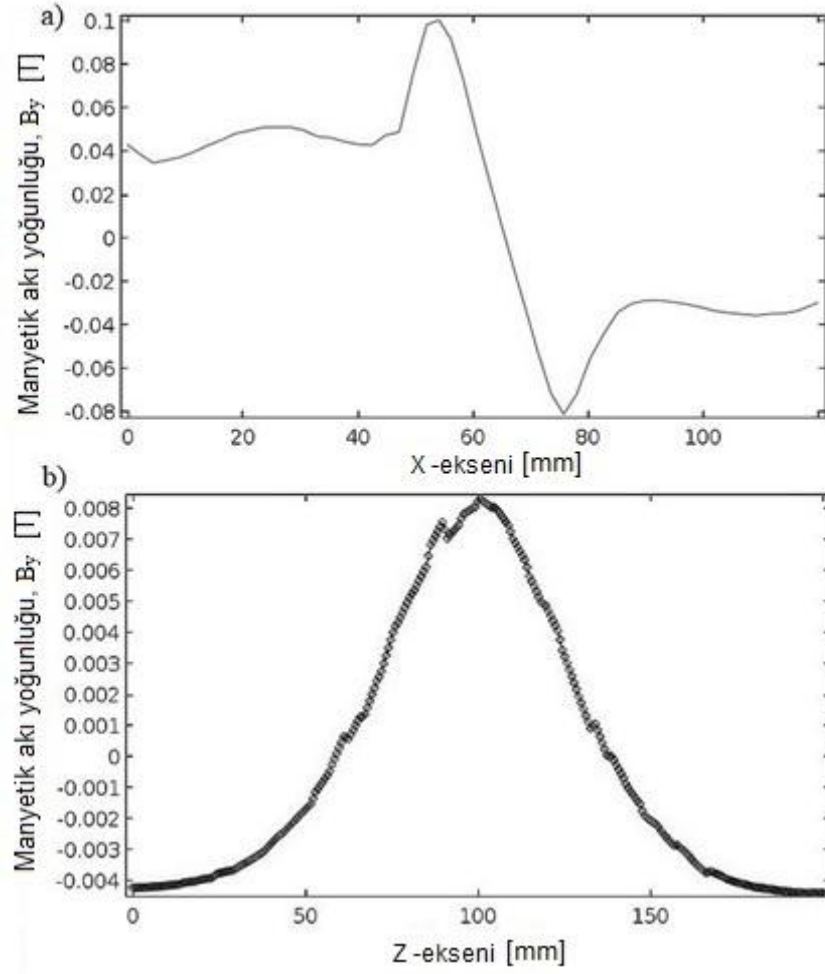
Şekil 4.34 Magnet bobin bağlantı şeması

Şekil 4.35'te Comsol yazılımı yardımıyla hesaplanan, magnet bobinleri üzerindeki manyetik akı yoğunluğu dağılımı sunulmuştur. Burada manyetik akı yoğunluğu sekstupol bobinlerde 2 A/mm^2 ve kuadrupol bobinlerde 4 A/mm^2 olmaktadır.

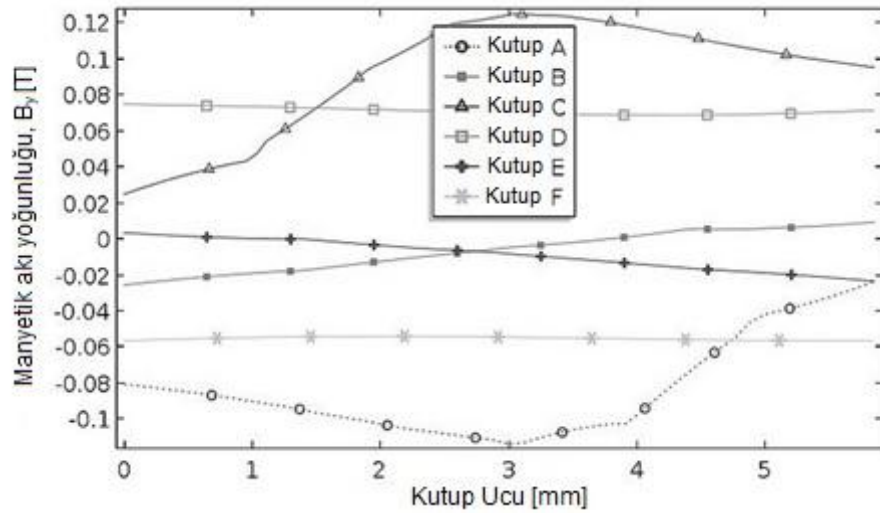


Şekil 4.35 36 mm çapında dairesel diyafram açıklığına sahip altı kutuplu magnetin manyetik akı yoğunluğunun benzetimi

Tasarım kistaslarına göre, manyetik akı yoğunluğu X ekseninde 0.1 T ile -0.08 T arasında değişmekte ve maksimum alan magnet boyunca 80 gauss değerine ulaşmaktadır (Şekil 4.36). Alanın kutup uçları üzerindeki dağılımı Şekil 4.37’de sunulmuştur.

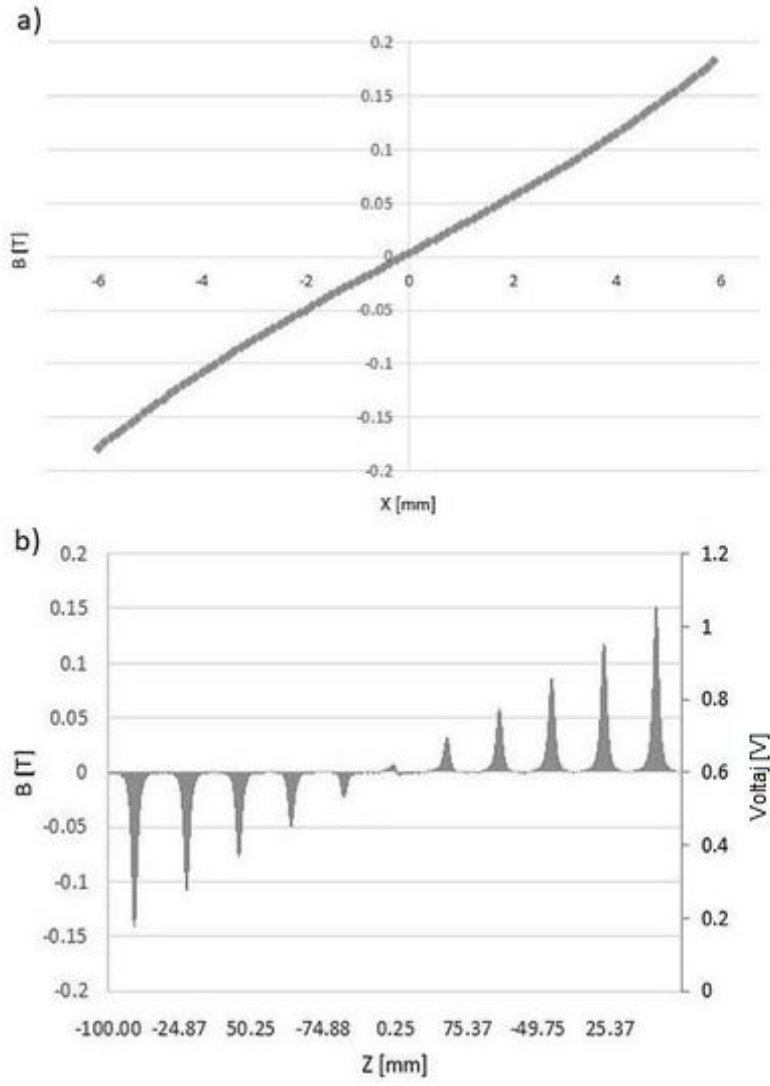


Şekil 4.36 36 mm çaplı dairesel açıklıkta dikey manyetik alan bileşeni için manyetik akı yoğunluğu sapması a) Enine eksen boyunca değişim (X eksen) ve b) Magnet boyunca değişim (Z eksen)

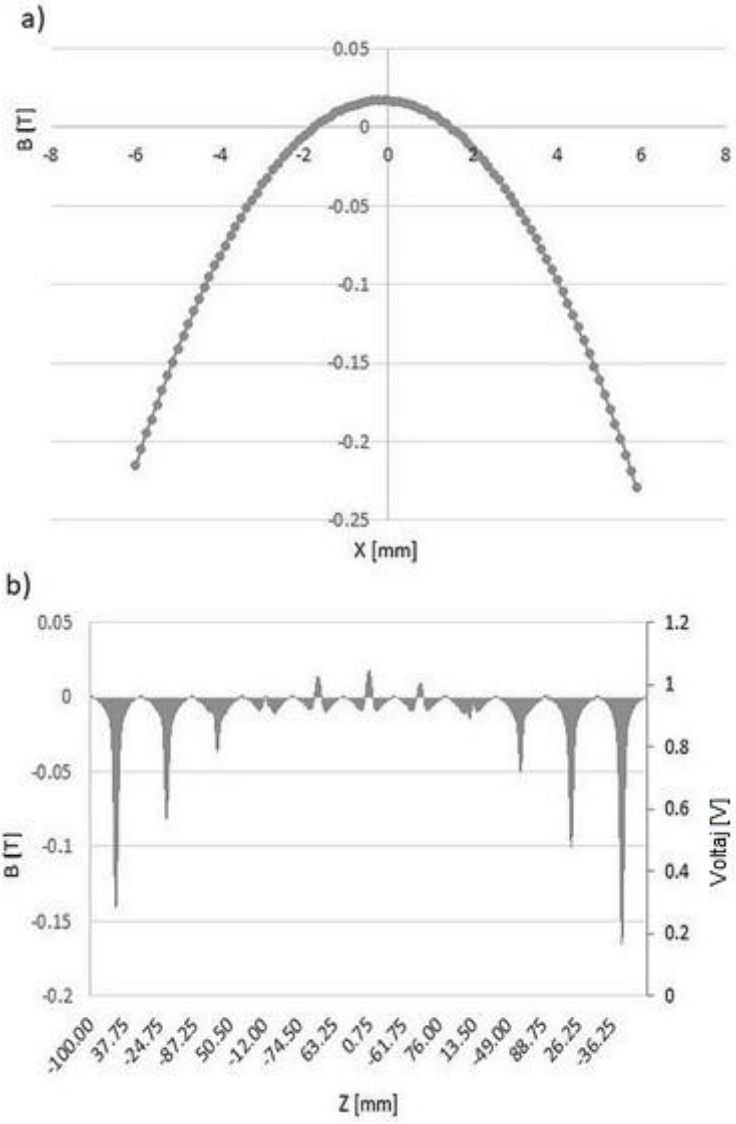


Şekil 4.37 Kutup kenarları etrafındaki manyetik akı yoğunluğu sapması

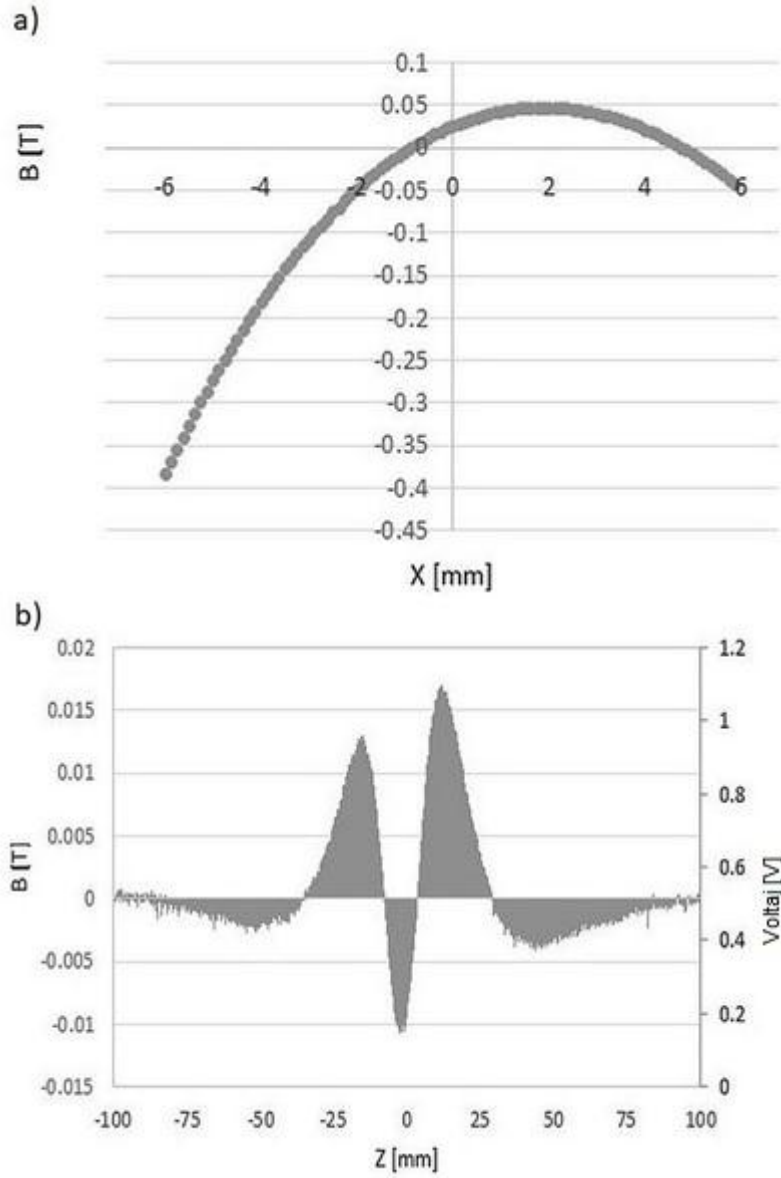
Tüm ölçümler kuadrupol, sekstupol ve bütünleşik alan formunda, $[-8, +8]$ A aralığında değişen akım değerleri ile birlikte üç farklı sarım yapısına sahip devrede gerçekleştirilmiştir. Manyetik alan bileşenleri, boyuna (Z) ve enine (X) eksenlerine dik olarak ölçülmüştür. Deneyler ortalama $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta ve 7 A uyarma akımında gerçekleştirilmiştir. Sadece dört kutuplu etkiye sebep olan bobinlere enerji verilmesi durumunda, enine (X) ve boyuna (Z) eksenleri için manyetik alan sapma grafikleri Şekil 4.38'de sunulmuştur. Benzer şekilde, sırasıyla Şekil 4.39 ve Şekil 4.40'da sadece sekstupol bobinleri ve sekstupol ile kuadrupol bobinlerinin bütünleşik enerjilendirildiği durumlar için manyetik alan sapmaları gösterilmiştir.



Şekil 4.38 Sadece kuadrupol alanın varlığında manyetik alan grafiği a) enine tarandığı durum (X eksen) b) boyuna tarandığı durum (Z eksen)



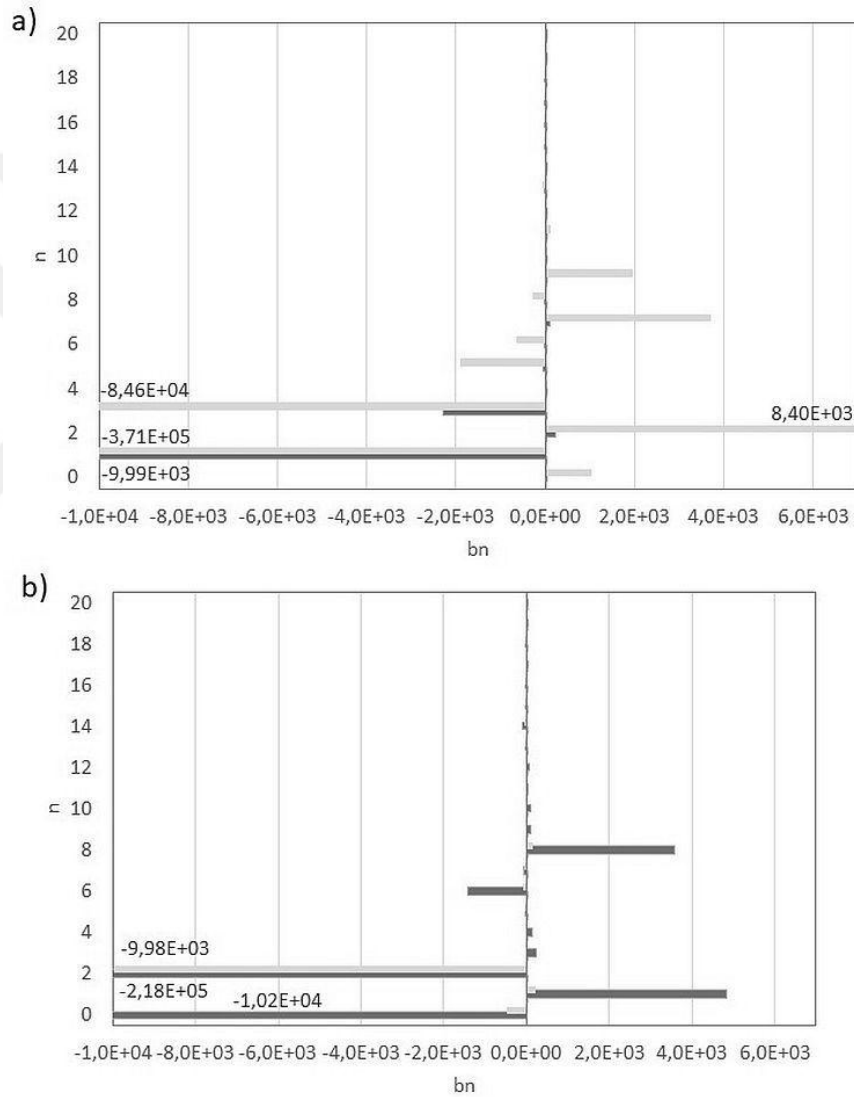
Şekil 4.39 Sadece sekstupol alanın varlığında manyetik alan grafiği a) enine tarandığı durum (X eksen) b) boyuna tarandığı durum (Z eksen)



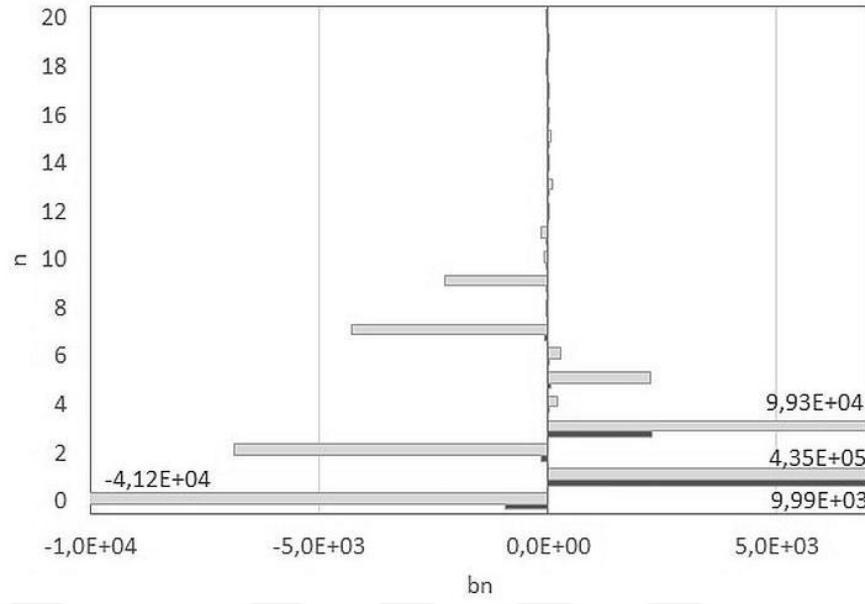
Şekil 4.40 Sekstupol ve kuadrupol alanların varlığında manyetik alan grafiği a) enine tarandığı durum (X eksenine göre) b) boyuna tarandığı durum (Z eksenine göre)

Bir kuadrupolde, B_5 ve B_9 etkileri (sırasıyla beş ve dokuz kutuplu alan etkileri) ölçülerek, boyunduruğun teorik tasarıma ne kadar iyi yaklaştığı konusunda bir fikir edinebiliriz. Kutup doygunluğu durumunda, ideal eşpotansiyel yüzeyin bozulması nedeniyle harmonik içerik artar. Örneğin, bir dört kutupluda, B_5 sıfır ise, B_5 ve B_9 daha yüksek alan değerlerinde sıfırlanmayacaktır. Bir dört kutupluda, ancak simetri koşulları tamamen yerine getirilirse diğer yüksek harmonikler büyük ölçüde yok olabilir. Bunun dışında hiçbir durumda kaybolmazlar. Geleneksel dört kutuplu tasarımı sekiz kat

simetriye sahiptir. Mevcut altı kutuplu magnet dört kat simetriye sahiptir. Bu nedenle, tasarlanmış kutup uçları ile elde edilen sistematik çok kutuplu bileşenler ($n = 5$ ve $n = 9$) bütünleşik magnet için olabildiğince küçüktür. Sekstupol için bir başka ortaya çıkması beklenen bileşen olan sekiz kutup etkisi ($n = 8$) olabildiğince küçüktür. Döner bobin tezgâhında harmonikleri bütünleşmiş alan değerleri olarak elde ettik. Şekil 4.41 ve Şekil 4.42’de çoklu genlik spektrumu olarak mevcut harmoniklerin değerleri sunulmuştur.



Şekil 4.41 Altı kutuplu magnetin normalleştirilmiş katsayıları (Koyu bloklar kuadrupol alanı, açık olanlar ise sekstupol alanı ifade etmektedir.) a) sadece dörtlü alanın varlığında b) sadece sekstupol alanın varlığında



Şekil 4.42 Sekstupol ve kuadrupol alanı için normalleştirilmiş katsayılar (Koyu bloklar kuadrupol alanı, açık olanlar ise sekstupol alanı ifade etmektedir)

Özetle, genlikleri ölçerek gerçek çok kutuplu magnetin, teorik tasarım değerlerine ideal sınır koşulları ile ne kadar iyi yaklaşıldığı tahmin edebilir ve çok kutupluların simetrisinin bir ölçümü elde edilebilmektedir. Beklendiği gibi yüksek harmoniklerin genlikleri, artan harmonik derecesine oranla hızla azalır. Diğer çok kutuplu alan bileşenlerinin az miktarda etkisi olmasına rağmen, saf dört kutuplu alan (B_1) olabildiğince büyüktür. Tasarımdaki simetri gibi bazı hükümler, en azından dörtlü alan katsayısını azaltmak için yapılmalıdır. Böylece varlığı diğer çok kutuplu katsayıları maskeleyemez ve bu durum sekstupol tasarımı için de geçerlidir.

4.7.4 Deneysel çalışmaların yapıldığı APS-U Magnet Ölçüm Laboratuvarı ve ölçüm hatları

4.7.4.1 Advance Photon Source Upgrade Projesi (APS-U)

APS'deki röntgenler, 1.1 km uzunluğunda dairesel bir depolama halkasında manyetik örgüden geçerken, neredeyse ışık hızında hareket eden yüksek enerjilerdeki elektronlar tarafından üretilir. X-ışınları, depolama halkasından uç deney istasyonlarına yayılır. Orada, araştırmacılar geniş bir zaman ve enerji ölçeği yelpazesinde çok çeşitli

sistemlerde maddenin yapısını ve kimyasını araştırmak için çeşitli teknikler kullanarak çalışmalarını yürütmektedir. Şekil 4.43'te APS'in yapısı gösterilmiştir (The Advanced Photon Source Web Sayfası 2019).



Şekil 4.43 APS'in görünümü ve bileşenleri (The Advanced Photon Source Web Sayfası 2019)

ABD'de dünyanın dört bir yanındaki ülkelerden, her yıl 5500'den fazla araştırmacı APS'de çeşitli deneyler yürütmektedir. Burada yapılan çalışmalara ilişkin önemli çıktılar aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

- İki Nobel Ödülüne layık görüldü (üçüncüsüne katkıda bulundu),
- Çok sayıda ilacın geliştirilmesini destekledi (HIV virüsünün ilerlemesini durdurmak için en başarılı ilaçlardan biri de bunlara dâhildir.),
- Tortul kayaç taşından (shale) yağ çıkarma için bir takım geliştirmeler yapıldı,
- Daha performanslı, yenilenebilir piller dâhil olmak üzere geliştirilmiş ürünler, daha verimli araçlar, daha güçlü altyapı malzemeleri ve daha güçlü elektronik ürünler ortaya çıkarıldı.

APS-U projesi direktörü Robert Hettel, APS-U hakkında şu sözleri söylemiştir: “Bu proje bilimsel bir oyun değiştirici olacak. APS'in sınırlarının genişletilmesi,

araştırmacıların depolama halkası X-ışınlarıyla daha önce hiç göremedikleri ölçekte yapıları inceleyebilmelerine imkân verecektir. Organizmalar gibi gerçek örneklerin derinliklerine bakılabilir ve atomların gerçek zamanlı hareketleri görülebilir. Bu tür aşırı ayrıntılar, temel bilimde yeni sınırlar ve keşiflere yol açmakla birlikte, endüstrilerdeki çok çeşitli ve önemli sorunların çözülmesine yardımcı olacaktır.” demiştir.

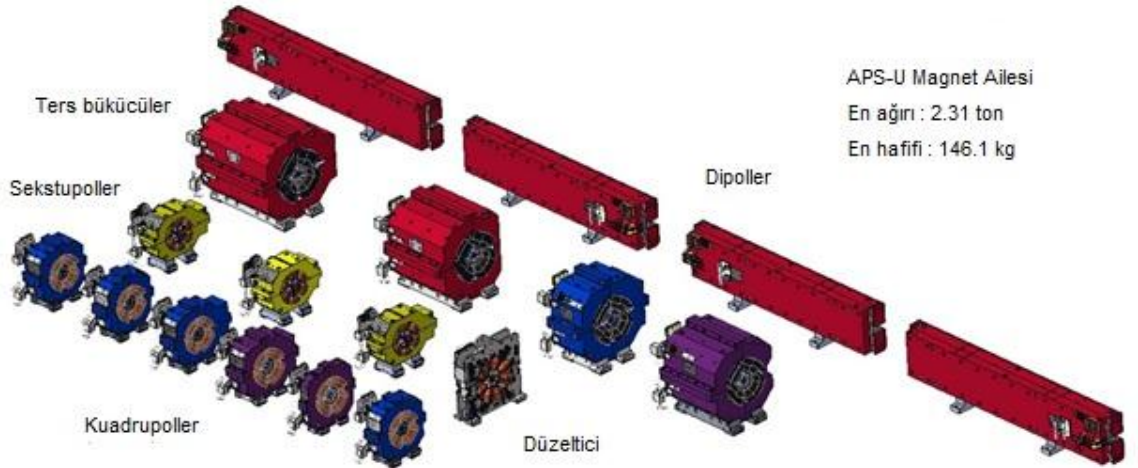
APS-U projesi kapsamında öngörülen, gelecekteki olası önemli keşiflerin örneklerini aşağıdaki şekilde sıralayabiliriz:

- Güneş ışığını enerjiye dönüştüren devrimci sistemler ve bu enerjiyi depolamanın yolları,
- Günümüz antibiyotiklerine dirençli enfeksiyonları tedavi etmek için yeni ilaçlar,
- Beynin nöronlarla bilgiyi işleme ve depolama biçiminin daha iyi anlaşılması,
- Çevre kirliliğine yol açan maddelerin, topraktaki hareketine ilişkin ayrıntılı mekanizmalar,
- Dünya’nın çekirdeğinin yapısının dönüşümsel olarak anlaşılması,
- Daha temiz ve daha verimli biyoyakıtlar.

APS’deki bilim adamları, eski bir Mısır mumyasının bileşimini Chicago Field Müzesi’nde Tyrannosaurus rex örneği olan SUE’nin kollarını inceleyerek, tarih ve arkeolojinin sırlarını ortaya çıkardılar. Bunlara ek olarak, APS araştırması, meteorlar, uzay tozu ve jeolojik kayalar ve mineraller ile Güneş sistemini ve Dünya’nın kendisini anlamamıza yardımcı olmuştur. Argonne Ulusal Laboratuvarı (ANL) Direktörü Paul Kearns: “Yükseltilmiş APS, bilime tamamen yeni bir ölçekte olanak sağlayacak ve mikroelektronikten polimerlere, kuantuma kadar çok çeşitli araştırma dallarında keşiflere olanak sağlayacaktır.” demiştir (The Advanced Photon Source Web Sayfası 2019).

APS-U projesinin amacı, tesis bünyesindeki depolama halkasını değiştirmek ve daha güçlü X-ışını tesisini oluşturan X-ışını huzmelerini ve diğer donanımları geliştirerek halkayı güncellemektir. Böylelikle APS-U depolama halkası, mevcut makineden çok

daha fazla bükücü ve odaklayıcı magnet ile birlikte yeni bir tasarıma, çok daha güçlü eğimli akromatik örgüye ve 100 ila 1000 kat daha parlak X-ışınına sahip olacaktır. Ayrıca kullanılan tekniğe bağlı olarak, bilim insanlarının bir örnekteki temel atomların konumunu, kimliğini ve dinamiklerini haritalamaları mümkün olabilecektir. Bunu başarmak için çoklu hibrit bükücüye sahip akromatik manyetik örgü geliştirilmiştir. APS bünyesindeki 40 sektörden her birinde 4 boyuna eğimli dipol, 3 enine eğimli dipol, 6 ters eğimli dipol, 10 dört kutuplu ve 6 sekstupol olmak üzere toplamda 29 ana magnet bulunmaktadır. Ayrıca, her sektörde 4 hızlı ve çok fonksiyonlu düzeltici magnet bulunmaktadır. Şekil 4.44'te APS-U için tasarım çalışmaları yapılmış ve ölçümleri için çalışmaların yapıldığı magnet ailesi sunulmuştur (Izzo 2020). Hedef 1320 adet magnetin, bileşenleriyle birlikte 2026 yılının ilk çeyreği itibariyle ölçümlerinin tamamlanmasıdır.



Şekil 4.44 APS-U projesi magnet ailesi (Izzo 2020)

18 Mart 2019 – 22 Aralık 2019 tarihleri arasında, TÜBİTAK 2214-A Burs Programı'yla, APS-U (Advance Photon Source Upgrade) projesi kapsamında, Argonne Magnet Ölçüm Laboratuvarı'nda Araştırmacı olarak çalışmalara katılım sağlanmıştır. Orada bulunulan süre zarfında önceki kesimde sonuçları paylaşılan düzeltici magnet üzerinde testler ve buna benzer, APS-U projesi kapsamında tasarımları yapılan ve üretimleri tamamlanan yeni nesil magnetlerin bir bölümünün ölçümleri yapılmıştır. Seri olarak dört ve altı kutuplu magnetlerin ölçümlerini gerçekleştirilmiştir. Yine aynı

dönemde iki kutuplu magnetlerin ölçüm hattının da altyapısı hazırlanarak, üretimleri için sipariş verilmiştir. 2019 yılı sonu itibariyle laboratuvarın görünümü Şekil 4.45'te yer almaktadır.



Şekil 4.45 APS-U Projesi kapsamında kurulan Magnet Ölçüm Laboratuvarı ölçüm hatları (Solda dönen bobin ve sağda dönen tel ölçüm hatları gösterilmektedir)

Planlamaya göre laboratuvar bünyesine; 4 adet Dönen Bobin (RC), 2 adet Dönen Tel (RW) ve 1 adet Bükücü Magnet Ölçüm Hattı (HP) kazandırılması planlanmıştır. 2019 yılı ortalarında kurulan APS-U Magnet Ölçüm Laboratuvarı; manyetik ölçümler, hizalama ve ön montaj amacıyla kurulmuş olup, hızlandırıcı sistemleri grupları altında, APS-U Projesi'nin bir parçası olarak yer almaktadır. Burada yapılan testlerin sonuçları, hızlandırıcının çalışması için gerekli olan çeşitli magnetlere alan kuvvetleri hakkında veri sağlamaktadır. Çok kutuplu magnetlerin değerleri, her magnet tipi için optimize edilmiş olan dönen tel ve bobin düzenekleri ile ölçülmektedir.

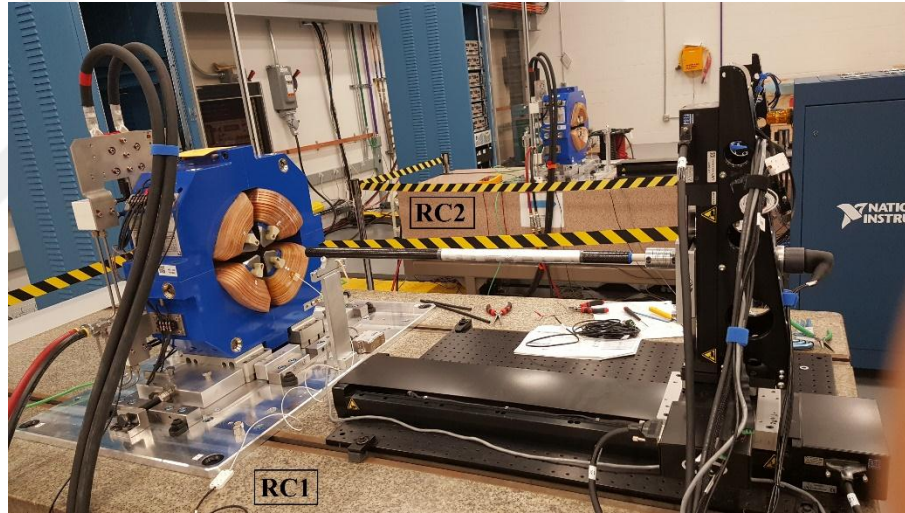
Laboratuvardaki iş akışını aşağıdaki gibi sıralayabiliriz;

- i. Üreticiden magnetin teslim alınması.
- ii. Magnet ön kontrollerinin yapılması.
- iii. Magnet ölçümleri - Alan kalitesinin belirlenmesi (Dönen Bobin)
- iv. Magnet ölçümleri - Referans belirlenmesi çalışması (Dönen Tel)

Laboratuvarın iş süreci içerisinde, üreticiden gelen tüm magnetler, gereksinimleri karşıladıklarından emin olmak için ön kontrolden geçirilmektedir. İlk olarak magnet grubunun sorumluluğunda olan sağlamlık ve uygunluk denetimleri yapılmaktadır. Bu

denetimlerde magnetlerin, sözleşmede belirtilen şartlara göre üretildiği doğrulanmaktadır. Bu denetimler öncelikle şunları içerir: Nakliye sırasında görünen herhangi bir hasar için görsel denetimler, kutup ucu boşluklarının ve diğer mekanik simetri parametrelerinin mekanik testleri, elektriksel direnç kontrolleri ve hi-pot testi (yüksek potansiyel veya yüksek gerilim testi) ve magnet alan polarizasyonunun kontrolüdür. Yapılan bu testler sonucu bir magnet onaylanırsa, ölçümleri yapılmak üzere magnet ekibine aktarılır.

1'inci dönen bobin tezgâhında (Rotating Coil 1 (RC1)) Q1 tipi magnetler 250 A çalışma akımı ile çalıştırılmaktadır. Q2 ve diğer tipler için 2'inci dönen bobin tezgâhı (RC2) kullanılmaktadır. Bu ölçüm hatlarının farkı yapılan kalibrasyonlardır. RC1 ve RC2 tezgâhlarının görünümü Şekil 4.46'da yer almaktadır.



Şekil 4.46 ANL Magnet Ölçüm Laboratuvarı RC1 ve RC2 ölçüm hatlarının görünümü

RC2 tezgâhında altı kutuplu magnet ölçümünün yapılabilmesi için bobin motorunun içerisine anahtar yerleştirilerek, altı kutuplu magnet ölçümü yapılacağı sırada 3'üncü seviye sinyallerin okunabilmesi sağlanmıştır. Diğer bir ifadeyle çalışan tarafından yönetilen anahtar, dört kutuplu magnet sinyalleri ile altı kutuplu magnet sinyalleri arasında geçiş yapmaktadır. Dönen bobin tezgâhlarındaki ölçümler sırasında 5 tip sinyal okunmaktadır. Anahtar sayesinde üçüncü seviye (sektupol) sinyalleri elde edebiliriz. Bu tezgâhta çalışma akımı 200 A'dır. Ölçümleri yapılan magnetlerde hata payı ± 10

4.7.4.2 Döner bobin ölçüm hattı (Rotating Coil (RC))

Döner bobin ölçümünde magnetin alan kalitesi belirlenmektedir (Şekil 4.48). Aşağıdaki üç ana adımdan oluşmaktadır:

- i. Ölçülecek magnetin QR kodu taranır ve yeni bir dosya oluşturulur,
- ii. Ana bobin uyarma akımı yükseltme ölçümü yapılır,
- iii. Benzer şekilde, ana bobin uyarma akımı düşürme ölçümü yapılır ve her iki sonuç kaydedilir.

Gerekli görüldüğü durumlarda aşağıdaki ek ölçümler de yapılmaktadır:

- Yatay düzeltici ölçümü
- Dikey düzeltici ölçümü
- Asimetrik dörtlül düzeltici ölçümü
- Hall prob veri ölçümü



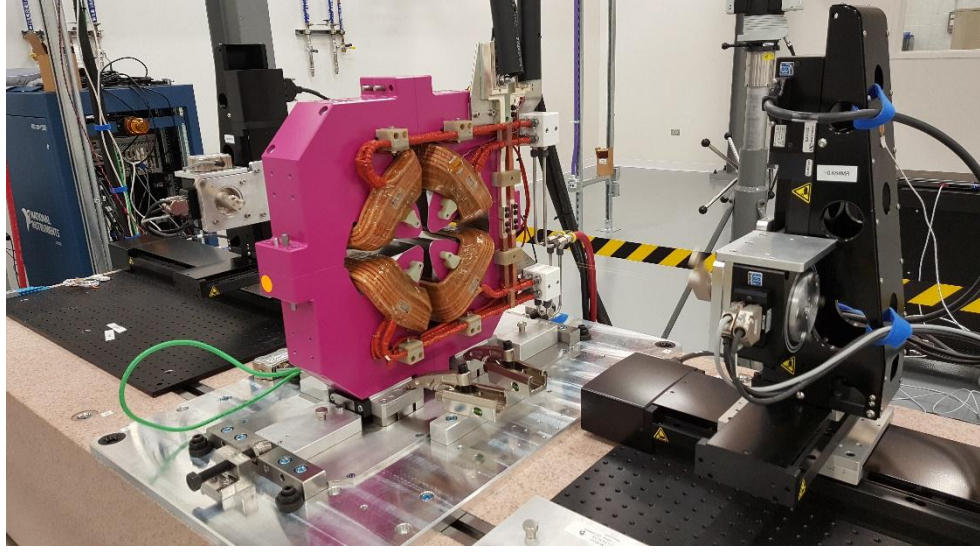
Şekil 4.48 ANL bünyesinde, APS-U projesi kapsamında ilk kurulan döner bobin ölçüm hattı (RC1)

4.7.4.3 Döner tel ölçüm hattı (Rotating Wire (RW))

Döner tel ölçümü magnetin manyetik merkezini belirlemek için yapılır. Ölçüm adımları aşağıdaki gibidir:

- i. Magnetin QR kodu taranır ve yeni bir dosya açılır,
- ii. Döner tel geometrisinin kalibrasyonu yapılır,
- iii. Tel eksenini ve manyetik ölçümler nominal akımda hizalanır,
- iv. Manyetik merkez ile magnet referanslarını ilişkilendirmek için magnet referansları ve referans yüzeyleri araştırılır (Fiducializasyon),
- v. Manyetik merkezin X ve Y kaymaları referans yüzey üzerinden okunarak kaydedilir.

Fiducializasyon çalışması, araştırma grubu tarafından tanımlanmış bir koordinat sistemi üzerinde gerçekleştirilmektedir. Bu koordinatlar, mekanik merkez hattının, referans değerlere transferini tamamlamak için belirlenmektedir. Rijit gövdenin başlangıç noktasının ve üç boyutun tanımlanmasını içerir. Genellikle X ve Y orijinleri kutup uçlarının merkez çizgisi tarafından belirlenirken, Z için sıfır koordinatı magnetin boylamasına merkezidir. Rulo simetrisinin orta düzleminden sapma ve eğim, magnetin her iki ucundaki kutup uçlarının merkeze yerleştirilmesiyle tanımlanır. Magnete ve tüm ortam bileşenlerine dair tüm uzunluk ölçümleri bu koordinat sistemi üzerinde tanımlanır.



Şekil 4.49 APS-U projesi kapsamında kurulumu yapılan ilk dönen tel ölçüm hattı (RW)

Koordinat sistemi üzerinde ölçümler tamamlandıktan sonra LabVIEW yazılımı üzerinden çalıştırılan kod ile birlikte Fourier dönüşüm grafiğinin (FFT) pik değerleri okunmakta ve sonra telin bağlı olduğu blok negatif yönde hareket ettirilerek tel gerdirilip, temel rezonans frekansı istenilen değere yakınlştırılmaktadır. 1.2 metrelik bir telin yaklaşık 100 Hz'lik rezonans frekansı olmaktadır. Bu değer telde yaklaşık -28 mikronluk bir sarkma sağlamaktadır.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

THM projesi çerçevesinde TURKAY olarak isimlendirilen sinkrotron ışınımı tesisi için tasarım çalışması yapılmıştır (iki farklı yaklaşımla ana halka (sinkrotron), alternatifli ön hızlandırıcı halka, yüksek manyetik alanlı eğici magnet ve kuadrupol magnet, salındırıcı magnet ve alt sistemler). Aynı zamanda demet hatları planlanmış ve tasarımları yapılarak, ışınım özellikleri, demet profili, ölçümü ve görüntülenmesi konusunda analizler yapılarak raporda paylaşılmıştır (Nergiz vd. 2015).

Hızlandırıcılarda kısa ve uzun olmak üzere iki tip ön hızlandırıcı halka seçeneğinden bahsetmek mümkündür. Kısa ön hızlandırıcı halka seçeneğinin ana dezavantajı, depolama halkasından ayrı tünelde olması nedeniyle maliyetinin fazla olmasıdır. Ayrıca, ön hızlandırıcı iletim hattı, ana halka ile ön hızlandırıcı halka arasındaki onlarca metre ölçekte yolu engellemektedir. Sert bir iç duvar ve bu zorunlu kararlılık gereksinimi inşaat maliyetlerini artırır. Bu nedenle, uzun seçenek ön hızlandırıcı halkanın manyetik örgüsü temel alınarak, doktora tezi kapsamında dipol magnet ve sekstupol/kuadrupol bütünleşik magnet tasarımları yapılmış ve mühendislik çizimleri ile birlikte sonuçları tez içerisinde sunulmuştur. Tez çalışması kapsamında tasarlanan kısa ön hızlandırıcı halka yaklaşımında, dörtlü süpersimetriye sahip halkalar arası demet transferini yüksek verimle gerçekleştirebilmek için, FODO örgüsü tasarlanarak 3 GeV enerji bandında 21.2 nm gibi küçük bir yayılım değerine ulaşılmıştır. Bu çalışmada yapılan tasarımın dünyada mevcut ve yapılmakta olan ışınım kaynakları ile kıyaslanabilir olması hedeflenmiştir. Bu çerçevede 179.65 m uzunluğunda ve 21.2 nm.rad yayılım (emittans) değerine sahip kısa ön hızlandırıcı halka tasarımı yapılmıştır. TURKAY tesisi için yapılan kısa ve uzun ön hızlandırıcı halka yaklaşımı, Çizelge 5.1’de 3 GeV enerjili önde gelen tesislerle kıyaslandığında hesaplanan enerji yayılım değeri rekabet edebilecek düzeyde düşük kalmaktadır.

Çizelge 5.1 3 GeV enerjili önde gelen SI tesislerinin booster halkalarının temel yapısının parametreleri

Işınım kaynağı	Çevre [m]	Yayılm [nm.rad]	Süperperiyod sayısı	Tipi
TURKAY-1	445.6	2.92	8	Uzun
Çizelge 5.1 3 GeV enerjili önde gelen SI tesislerinin booster halkalarının temel yapısının parametreleri (devam)				
TURKAY-2	179.65	21.2	4	Kısa
ALBA	249.6	9	4	Uzun
DIAMOND	158.4	150	2	Kısa
ASP	130.2	33	2	Kısa
CANDLE	192	74.9	4	Uzun
TPS	496.8	10.3	6	Uzun
NSLS-2	780	11.5	15	Uzun
ILSF	504	3.503	7	Uzun

Aynı zamanda 18 Mart 2019 – 22 Aralık 2019 tarihleri arasında, TÜBİTAK'ın 2214-A Burs Programı'yla, APS-U (Advance Photon Source Upgrade) projesi magnet test çalışmalarına 9 ay süre ile katılım sağlanıp, üretimi tamamlanan bir düzeltici magnet üzerinde test çalışmaları yapılarak tez kapsamında sonuçları sunulmuştur. Yapılan çalışmalarda test magneti iki farklı modda teste tabi tutulmuştur. İlk olarak APS-U ana halkasındaki asıl görevi olması planlanan undulator magnetler arasında, demeti düzeltici rolü kapsamında 3.81 A çalışma akımıyla enerjilendirilmiştir (Bobinin her bir sarımı (bakır teli) üzerinde 2.91 A/mm^2 'lik bir akım yoğunluğuna karşılık gelmektedir.) Bu durumda bobinlerdeki akım yoğunluğu, merkez ve iç yan bobinlerde 1.82 A/mm^2 ve kısa dış yan bobinlerde 1.75 A/mm^2 olmaktadır. Merkez ve yan bobinler ayrı ayrı olmak üzere 3 farklı enerjilendirme durumu söz konusudur (yatay alan düzeltici, dikey alan düzeltici, dört kutuplu düzeltici). Deneysel sonuçlara göre, akımla birlikte dipol ve dekopul momentleri büyümektedir. Bununla birlikte diğer alan değerleri ya sürekli olarak küçüktür ya da akımla birlikte azalır ve maksimum 3.81 A akım değerinde sıfıra yaklaşmaktadır. Yan bobinlerin akımı düştükçe dipol momentleri de düşmektedir. Aynı zamanda kuadropol ve oktopol momentleri de daha hızlı düşmektedir. Burada dekopul alan değerinin, dipol alanı daha yakından izlediği görülmüştür. Özellikle altı kutuplu alan değeri, en yüksek akım değerinde en küçük

değer olarak ölçülmüştür. Yan bobin akımı düştükçe bu değer artmaktadır. Burada uygulanan 3.81 A akım değerinin uygulanabilir olduğu ve magnetin aşırı ısınmadığı gözlenmiştir. İkinci olarak ise üretilen düzeltici magnet kullanılarak sekstupol ve kuadrupol alanların varlığında manyetik alan ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

Tasarlanan C-Tipi dipol magnetin toplam uyarma akımı 13500 Tur.Amper (NI) olarak belirlenmiştir. Bobinler ile boyunduruk arası boşluğu dolduracak şekilde 3 kat ve toplamda 75 sarım (3x25) olarak düşünülmüştür. Bu durumda toplam iletken alanı 6000 mm² olarak hesaplanmıştır. İletkenden geçen akım 180 A olmak üzere ulaşılan maksimum magnetik alan değeri 0.65 T olarak hesaplanmıştır. Benzer şekilde H-tipi magnet için 52 x 92 mm²'lik boyunduruk arası boşlukta, 40 sarımlı bobin kullanılmış ve 4900 Tur.Amper akım değeri için hesaplanan manyetik alan değeri 0.65 T olmuştur.

Sekstupol/kuadrupol bütünleşik magnet tasarım çalışmamızda kuadrupol ve sekstupol alanlar, tasarladığımız kutup profili ve her bir sekstupol bobinlerinde 0.8 A/mm², kuadrupol bobinlerinde 1.6 A/mm² dikey manyetik alan bileşeninin akım yoğunluğu yardımıyla elde edilmiştir. Tasarım çalışmalarında 313.9 mm maksimum manyetik uzunluk için, 26 mm magnet açıklığında analizler gerçekleştirilmiştir. Ulaşılan maksimum dikey alan değeri 0.6 T olmuştur. Tasarlanan bütünleşik magnet, TURKAY tesisinin ön hızlandırıcısında, geometrik sapmaların en aza indirilmesinde kullanılması planlanan dörtlü bir manyetik alan bileşeniyle bütünleştirilmiş bir altı kutuplu magnettir. Ayrıca, Argonne Ulusal Laboratuvarı'nda testlerinin yapıldığı düzeltici magnet benzetim ve ölçüm çalışmaları sunulmuştur. Sekstupol/kuadrupol bütünleşik magnetin benzerleri, son zamanlarda diğer bazı sinklotron radyasyon tesislerinin güçlendirici halkalarına uygulanmıştır. Dörtlü ve ikili alanların tek yapıda elde edildiği bütünleşik magnetler oldukça fazla kullanılmaya başlanmış olup, bunun yanı sıra altı ve dört kutuplu yapıların da bütünleşik olarak kullanılmaya başladığı görülmektedir. Bunlara en bilinen örnekler olarak; Hindistan'daki foton kaynaklarında (Indus 1 ve Indus 2) sınırlı boşluktaki kromatik sapmalarını düzeltmek için dörtlü magnetler, bütünleşik olanlar ile (sekstupol/kuadrupol magnet) değiştirilmiştir (Thakur vd. 2009). Ayrıca, Tayvan Foton Kaynakları'nda (TPS) magnetlerin ve vakum odalarının boyutlarını en aza indirmek, yer ve inşaat maliyetinden ve güç tüketiminden tasarruf etmek için kullanılmaktadırlar (Jan 2015).

TURKAY ön hızlandırıcısı için nihai parametreler henüz belirlenmiş olmasa da bu çalışma, önceki makalede (Nergiz vd. 2017) ve teknik tasarım raporunda (Turkish Accelerator Center (TAC) Project 2001) olası demet çapı değer aralığındaki hesaplamalara dayanarak yapılan, güçlendirici halka ile sekstupol ve kuadrupol magnetler hakkında bir ön çalışmadır. Burada kullanılan mantık ve kazanılan tecrübe, netleşen tasarım parametreleriyle birlikte kolaylıkla güncellenebilecektir.

THM'nin ilk tesisi olarak kurulumu süren Süperiletken Elektron Hızlandırıcısı ve Serbest Elektron Lazeri Tesisi (**TARLA**) 2014 yılında çıkartılan 6550 sayılı “Ulusal Araştırma Altyapılarının Desteklendirilmesine Dair Kanun” kapsamında yapılan değerlendirmelerin ve gerekli yasal prosedürlerin tamamlanmasının ardından, 02.12.2020 tarihinde Ankara Üniversitesi ile Ulusal Üst Kurul arasında imzalanan protokol ile “**TARLA: Türk Hızlandırıcı ve Işınım Laboratuvarı**” adıyla “Ulusal Merkez” statüsüne kavuşturulmuştur. Hızlandırıcı ve ışınım kaynakları alanında ulusal düzeyde tüzel kişiliğin tanımlanmış olması, THM kapsamında önerilen ve TURKAY'ın dâhil olduğu büyük ölçekli ve GeV enerjili hızlandırıcı ve ışınım tesislerinin hayata geçirilmesi konusunda da çok önemli bir adım olmuştur. TARLA'nın tamamlanmasının ardından önümüzdeki birkaç yıl içinde Türkiye'nin kendi 3. nesil sinkrotron ışınımı tesisini (TURKAY) kurmayı gündemine alması beklenmektedir.

THM projesi kapsamında TURKAY'ın tasarımını yapan ve tasarım raporunu 2015 yılında ortaya koyan ekip tarafından, TURKAY Sinkrotron Işınımı tesisinin planlanan tüm ışınım demet hatlarını (> 20) hayata geçirecek şekilde kurulmasına karar verilmesinin ardından, kurulumun 8-10 yıllık bir süreyi kapsayacağı, yaklaşık 250 civarında bilimsani ve mühendisin kurulumda görev alacağı ve maliyetin yaklaşık 250 MEuro civarında olacağı öngörülmüştür.

Sonuç olarak, ülkemizde 40 MeV enerjili doğrusal elektron hızlandırıcısına dayalı 4. nesil ışınım (serbest elektron lazeri) tesisinin (TARLA) kurulmuş ve ulusal merkez statüsünü kazanmış olması, 3 GeV enerjili, 3. nesil sinkrotron ışınımı tesisi TURKAY'ın ve 1-6 GeV doğrusal elektron hızlandırıcısına dayalı SASE-SEL tesisi TURKSEL'in planlanmış olması son derece değerlidir. Bu ışınımaların disiplinlerarası ileri düzeyli Ar-Ge çalışmaları açısından ülkemiz araştırmacı ve sanayicilerine sunduğu araştırma

altyapısı ve olanaklar ile günümüzün savunma, uzay, iletişim, enerji, malzeme, biyoteknoloji, nanoteknoloji vb. jenerik teknoloji alanlarında ülkemize kazandıracakları ile birlikte ele alınınca, bu büyük ölçekli yüksek teknolojik ısıtım tesislerinin alt sistemlerine yönelik bilimsel çalışmaların önemi çok daha iyi anlaşılabacaktır.



KAYNAKLAR

- Abdelwahab, S. A., Al-Adwan, A., Al-Dmour, E., Amro, A., Attal, M., Delsim-Hashemi, H., Einfeld, D., Elsis, A., Foudeh, D., Hassanzadegan, H., Holstein, F., Huttel, E., Khubeis, I., Kalantari, B., Mostafa, K., Plesko, M., Sarraf, R., Tarawneh, H., Tavakkoli, K., Toukan, K., Varnaseri, S., Voss, G. A., Weihreter, E., Winick, H., Al-Faques, S. 2003. Conceptual Design Report for the Upgrading of SESAME to 2.5 GeV. Chapter 6 - Magnets. Appendix Yellow Book, pp. 1–25.
- AISI 4720 Alaşımlı çelik. 2020. Materyal Web Sitesi: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=e308fc9c47f54bbcac3170d997934c06>. Erişim Tarihi: 03.11.2019
- 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., Nergiz, Z. and Yavaş, Ö. 2015. Booster Ring Design for TAC Synchrotron Radiation Facility (TURKAY). *Balkan Physics Letters*, 23, pp. 23–29.
- Attwood, D. 2007. *Synchrotron Radiation for Materials Science Applications*.
- Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi (CERN) Web Sayfası. 1954. <https://home.cern/>, Erişim Tarihi: 07.06.2020.
- Cobb, J. K. and Muray, J. J. 1965. Magnetic field measurement and spectroscopy in multipole fields. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. (DOI: 10.1109/TNS.1965.4323660).
- COMSOL Multiphysics®. 2007. Web Sitesi: <https://www.comsol.com/product-download/5.4/windows>, Erişim Tarihi: 19.07.2018
- COMSOL Multiphysics Reference Manual, Stockholm, Sweden. 2007.
- Creo Parametric 3D Modeling Software. 2020. Web Sitesi: <https://www.ptc.com/en/cad-software-blog/download-creo-5-now>. Erişim Tarihi: 08.10.2019
- Daniel C., M. 1981. *History of magnetism*. Springer.
- Deniau, L., Grote, H., Roy, G. and Schmidt, F. 2019. *The MAD-X Program User's Reference Manual*. v.5.05.02.
- Einstein, A. 1905. Does the inertia of a body depend upon its energy-content. *Annalen Der Physik*, 18, pp. 639–641.
- Einstein, A. 1905. On a Heuristic Point of View about the Creation and Conversion of Light, translated from german by Haar, T. *Annalen Der Physik*, pp. 1–18.

- Einstein, A. 1905. On the electrodynamics of moving bodies (Zur Elektrodynamik bewegter Körper). *Annalen Der Physik*, 17, pp. 891-921.
- Hızlandırıcı Teknolojileri Enstitüsü. 2010. <http://hte.ankara.edu.tr/>, Erişim Tarihi: 25.08.2021
- Izzo, J. S. 2020. Magnet Measurement Lab Mechanical Design. APS Magnet Group Internal presentation.
- Jain, A. K. 1997. Basic Theory of Magnets. CERN Accelerator School: Measurement and Alignment of Accelerator and Detector Magnets.
- Jain, A. 2019. (Personal communication), Argonne National Laboratory.
- Jan, J. C., Kuo, C. Y., Chang, C. H., Chen, H. H., Chu, Y. L., Yu, Y. T., Lin, F. Y., Huang, M. H., Yang, C. S., Sheng, I. C., Hwang, C. S., Luo, G. H. and Chen, C. T. 2015. Magnet design and control of field quality for TPS booster and storage rings. 6th International Particle Accelerator Conference, IPAC 2015, pp. 1370–1372. (DOI: 10.18429/JACoW-IPAC2015-TUAD1).
- Larmor, J. 1897. LXIII. On the theory of the magnetic influence on spectra; and on the radiation from moving ions . The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science. (DOI: 10.1080/14786449708621095).
- Liénard, A. 1898. Champ électrique et magnétique produit par une charge concentrée en un point et animée d'un mouvement quelconque. *G. Carré et C. Naud*, 16 5; *ibid.* pp. 53-106.
- Lightsources web sayfası. 2020. <https://lightsources.org/>. Erişim Tarihi: 10.05.2020.
- Lopes, M. 2016. Magnet Excitation and Coil Design. FNAL (<https://uspas.fnal.gov/>).
- Marks, N. 2004. Conventional Magnets for Accelerators. In CERN Accelerator School. (DOI: 10.1002/hed.24192).
- MathWorks. 2000. MATLAB Using MATLAB Graphics. Matlab. Web Sitesi: <https://www.mathworks.com>. Erişim Tarihi: 02.11.2017
- Menzel, M. T. and Stokes, H. K. 1987. User's Guide For The Poisson/Superfish Group of Codes. Accelerator Theory and Simulation Group, AT-6.
- Mühle, C. 2017. Magnets and Special Magnets. (https://indico.cern.ch/event/451905/contributions/2159052/attachments/1426231/2188351/CAS_2017_Erice_Magnets_and_Special_Magnets.pdf)
- 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., Kurtuluş 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).
- Nobel fizik Ödülleri Web Sayfası. 2020. Web Sitesi: <https://www.nobelprize.org/>. Erişim Tarihi: 10.08.2021
- Orta Doğu Sinkrotron Işınımı Merkezi (SESAME) Web Sayfası. 2003. Web Sitesi: <http://www.sesame.org.jo>. Erişim Tarihi: 14.07.2021
- Oxygen-free electronic Copper (C10100). 2020. Web Sitesi: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=25cdd9bd3ebb4941be91cb0bee4cc661>. Erişim Tarihi: 03.11.2019
- Rutherford, E. 1911. LXXIX. The scattering of α and β particles by matter and the structure of the atom. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 21(6), pp. 669–688. (DOI: 10.1080/14786440508637080).
- 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.
- Tanabe, J. T. 2005. Iron dominated electromagnets: Design, fabrication, assembly and measurements. In Iron Dominated Electromagnets: Design, Fabrication, Assembly and Measurements. (DOI: 10.1142/5823).
- Thakur, V., Mishra, R. K. and Singh, G. 2009. 2D-Simulation of Combined Function Quadrupole/Sextupole Magnet for Existing Booster Synchrotron. InPAC.
- The Advanced Photon Source Web Sayfası. 2019. Web Sitesi: <https://www.aps.anl.gov/>. Erişim Tarihi: 10.03.2021
- Turkish Accelerator & Radiation Laboratory (TARLA). 2020. Web Sitesi: <https://tarla.org.tr/>. Erişim Tarihi: 25.08.2021
- Turkish Accelerator Center (TAC) Project. 2001. Web Sitesi: <http://tac.en.ankara.edu.tr/>. Erişim Tarihi: 11.10.2021
- Türk Hızlandırıcı Merkezi Projesi Web Sayfası. 1997. Web Sitesi: <http://thm.ankara.edu.tr/>. Erişim Tarihi: 25.08.2021
- Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu (TENMAK). 1956. Web Sitesi: <https://www.tenmak.gov.tr/>. Erişim Tarihi: 11.11.2021
- Walckiers, L. 2011. Magnetic measurement with coils and wires.
- Wiedemann, H. 1999. Particle Accelerator Physics I. Particle Accelerator Physics I. (DOI: 10.1007/978-3-662-03827-7).
- Wiedemann, H. 2003. Synchrotron Radiation. Particle Accelerator Physics. Advanced Texts in Physics. (DOI: 10.1007/978-3-662-05034-7_20).
- Wiedemann, H. 2007. Particle accelerator physics: Third edition. In Particle Accelerator Physics: Third Edition. (DOI: 10.1007/978-3-540-49045-6).
- Wille, K. 1996. The Physics of Particle Accelerators An Introduction. Oxford University Press.

- Winick, H. 1995. Synchrotron Radiation Sources: A Primer. World Scientific, NewYork. (DOI: 10.1142/2444).
- Womersley, J. 2017. Applications of Particle Accelerators. ICFA Seminar.
- Yavas, Ö. 2019. The Structure of Magnetic Lattice and Dipole Magnets of TURKAY Booster Ring. VII. Ulusal Parçacık Hızlandırıcıları ve Uygulamaları Kongresi (UPHUK-VII).
- Yavaş, Ö. 2015. THM Projesi YUUP Aşaması Çıktıları. THM Projesi YUUP Aşaması Çıktıları.
- 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>).
- Zhukovsky, K. 2016. Undulators for Short Pulse X-Ray Self-Amplified Spontaneous Emission-Free Electron Lasers. High Energy and Short Pulse Lasers, pp. 221–226. (DOI: 10.5772/64439)

EKLER

EK 1 Ön Hızlandırıcı Halka Tasarımında Kullanılan Benzetim Yazılımları

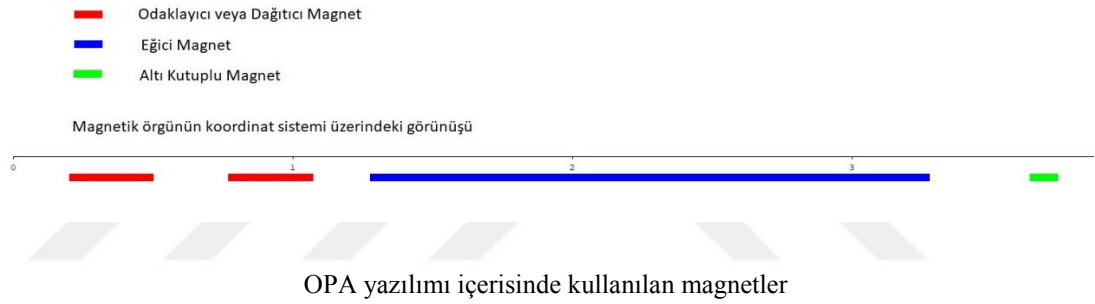
EK 2 Magnet Tasarımında Kullanılan Benzetim Yazılımları

EK 1 Ön Hızlandırıcı Halka Tasarımında Kullanılan Benzetim Yazılımları

OPA

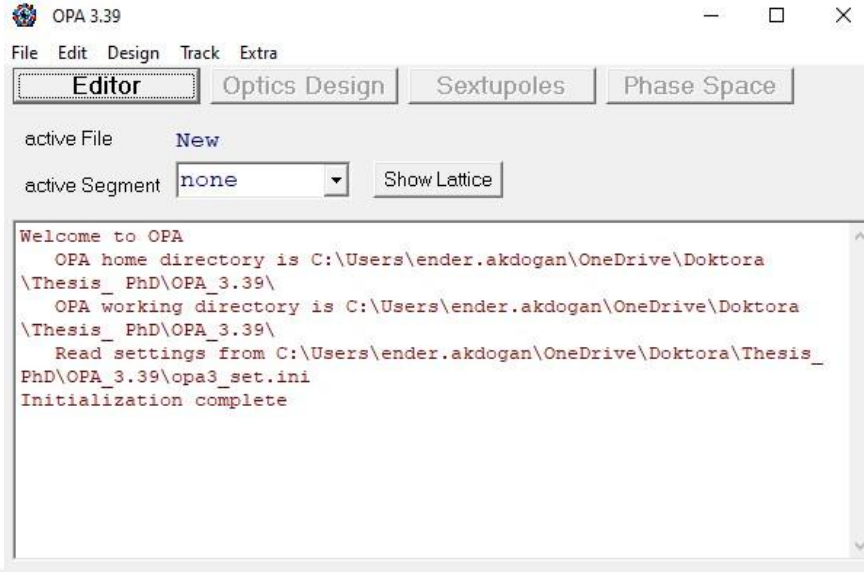
OPA yazılımı, 1980'li yıllarda elektron halkaları için bir tasarım aracı üzerinde çalışmaya başlayan Klaus Wille (DELTA / Dortmund) OPTIK koduna dayanmaktadır. 1993 yılında, bunu daha da geliştiren ve İsviçre Işık Kaynağı SLS'nin tasarımında yoğun olarak kullanan Andreas Streun'a aktarılmıştır. OPA'nın geliştirilmesinde ayrıca Johan Bengtsson (BNL), Simon Leemann (MAX-Lab) ve Michael Borland (APS)'ın da katkıları bulunmaktadır.

OPA yazılımında eklenen magnetler ve tipleri aşağıda gösterilmiştir.



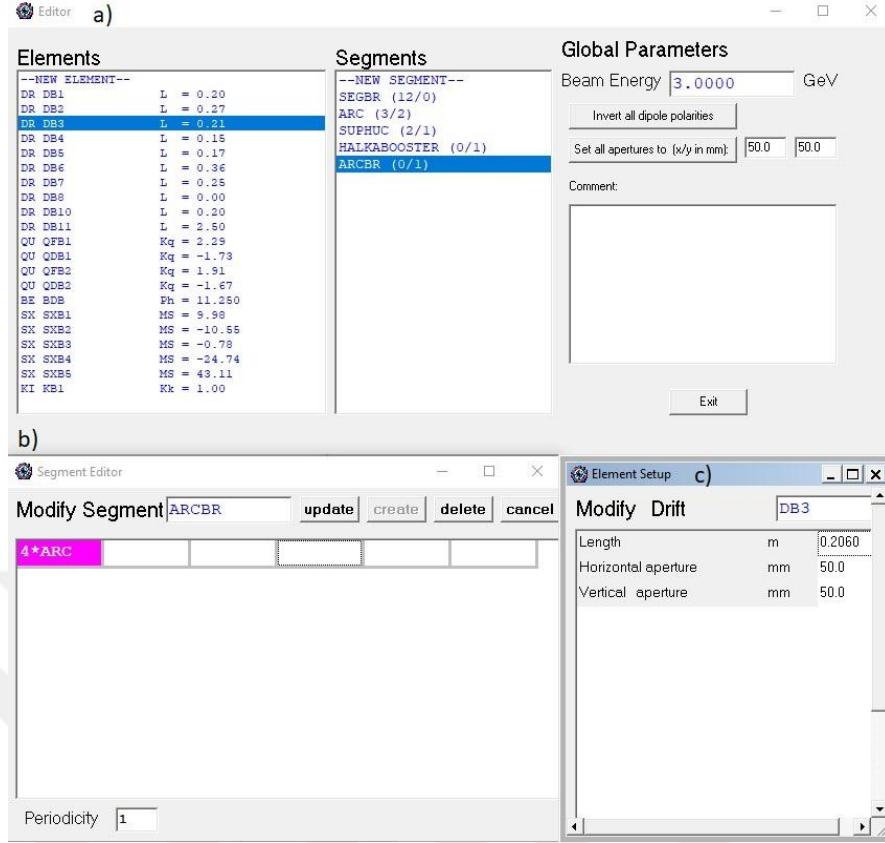
OPA yazılımı arayüzünde odaklayıcı ve dağıtıcı magnetin gösterimleri aynıdır. Fakat yazılım üzerinde magnet görsellerine tıkladığınızda her magnet tipine özel parametrelerin bulunduğu harici bir pencere açılmaktadır. Burada bulunan değerler üzerinden odaklayıcı bir magnet mi? Yoksa dağıtıcı bir magnet mi? olduğu öğrenilebilir. Aynı zamanda açılan ekran üzerinden istenilen herhangi bir parametre ile ilgili değişiklik yapılabilir.

Yazılım OPA.exe dosyası üzerinden çalıştırılmaktadır. İlk etapta bizi karşılayan ekran aşağıdaki ana ekrandır.



OPA yazılımı ana ekranının görünümü

Tasarım dosyası bu ekran üzerinden, “Editor” seçeneği seçilerek, aşağıda gösterilen ekranlar üzerinden, her bir örgü elemanı tek tek tanıtılarak oluşturulabileceği gibi, doğrudan herhangi bir text editörde de her bir örgü elemanının parametreleri girilerek oluşturulabilir.



a) OPA yazılımı editör ekranı, b) FODO örgüsü tasarım ekranı, c) Örgü elemanı tanımlama ekranını göstermektedir

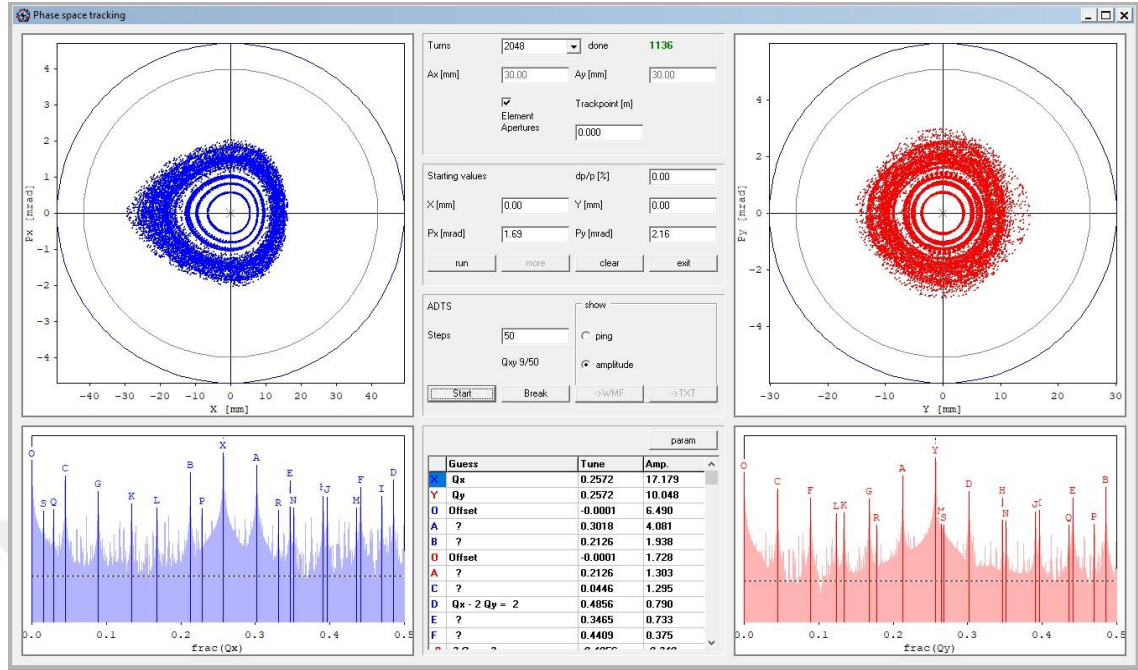
```

TAC-TURKAY Short Opt Booster.opa
1 { ...:\users\toshiba\desktop\opa\opa_3.39\TAC-TURKAY Short Opt Booster.opa }
2
3 {----- global parameters (units: gev, m, rad) -----}
4
5 energy = 3.000000;
6
7   betax  = 11.0651738; alphax  = 0.0000000;
8   etax   = 0.0064105; etaxp   = 0.0000000;
9   betay  = 4.8245965; alphay  = 0.0000000;
10  etay   = 0.0000000; etayp   = 0.0000000;
11  orbitx  = 0.0000000000; orbitxp = 0.0000000000;
12  orbity  = 0.0000000000; orbityp = 0.0000000000;
13  orbitdpp= 0.0000000000;
14
15 {----- table of elements (units: m, m^-2, deg, t; mm, mrad) -----}
16 {
17   conventions: quadrupole: k>0 horizontally focusing
18   {
19     sextupole : k=m*1, m:=bpoletip/r^2/(b*rho)
20   }
21
22   db1 : drift, l = 0.200000, ax = 50.00, ay = 50.00;
23   db2 : drift, l = 0.269700, ax = 50.00, ay = 50.00;
24   db3 : drift, l = 0.206000, ax = 50.00, ay = 50.00;
25   db4 : drift, l = 0.150000, ax = 50.00, ay = 50.00;
26   db5 : drift, l = 0.168000, ax = 50.00, ay = 50.00;
27   db6 : drift, l = 0.360600, ax = 50.00, ay = 50.00;
28   db7 : drift, l = 0.252600, ax = 50.00, ay = 50.00;
29   db8 : drift, l = 0.000000, ax = 50.00, ay = 50.00;
30   db10 : drift, l = 0.200000, ax = 50.00, ay = 50.00;
31   db11 : drift, l = 2.500000, ax = 50.00, ay = 50.00;
32   qfb1 : quadrupole, l = 0.300000, k = 2.271000, ax = 50.00, ay = 50.00;
33   qdb1 : quadrupole, l = 0.300000, k = -1.713500, ax = 50.00, ay = 50.00;
34   qfb2 : quadrupole, l = 0.300000, k = 1.907000, ax = 50.00, ay = 50.00;
35   qdb2 : quadrupole, l = 0.300000, k = -1.680000, ax = 50.00, ay = 50.00;
36   bdb : bending, l = 2.000000, t = 11.250000, k = -1.043357,
37       t1 = 0.000000, t2 = 0.000000, gap = 0.00,
38       klin = 0.0000, klex = 0.0000, k2in = 0.0000,
39       k2ex = 0.0000, ax = 50.00, ay = 50.00;
40   sxb1 : sextupole, l = 0.100000, k = 9.980390, n = 1,
41       ax = 50.00, ay = 50.00;
42   sxb2 : sextupole, l = 0.100000, k = -10.549490, n = 1,
43       ax = 50.00, ay = 50.00;
44   sxb3 : sextupole, l = 0.100000, k = -0.780628, n = 1,
45       ax = 50.00, ay = 50.00;
46   sxb4 : sextupole, l = 0.100000, k = -24.739807, n = 1,
47       ax = 50.00, ay = 50.00;
48   sxb5 : sextupole, l = 0.100000, k = 43.108190, n = 1,
49       ax = 50.00, ay = 50.00;
50   kbl : kicker, k = 1.000, ax = 50.00, ay = 50.00;
51
52 {----- table of segments -----}
53
54 segbr : db1, qfb1, db2, qdb1, db3, bdb, db6,
55       sxb4, db7, qfb2;
56 arc : segbr, db10, sxb5, db11, -segbr;
57 suphuc : db11, 4*arc, db11;
58 halkabooster : 4*suphuc;
59
60 { ...:\users\toshiba\desktop\opa\opa_3.39\TAC-TURKAY Short Opt Booster.opa }
61

```

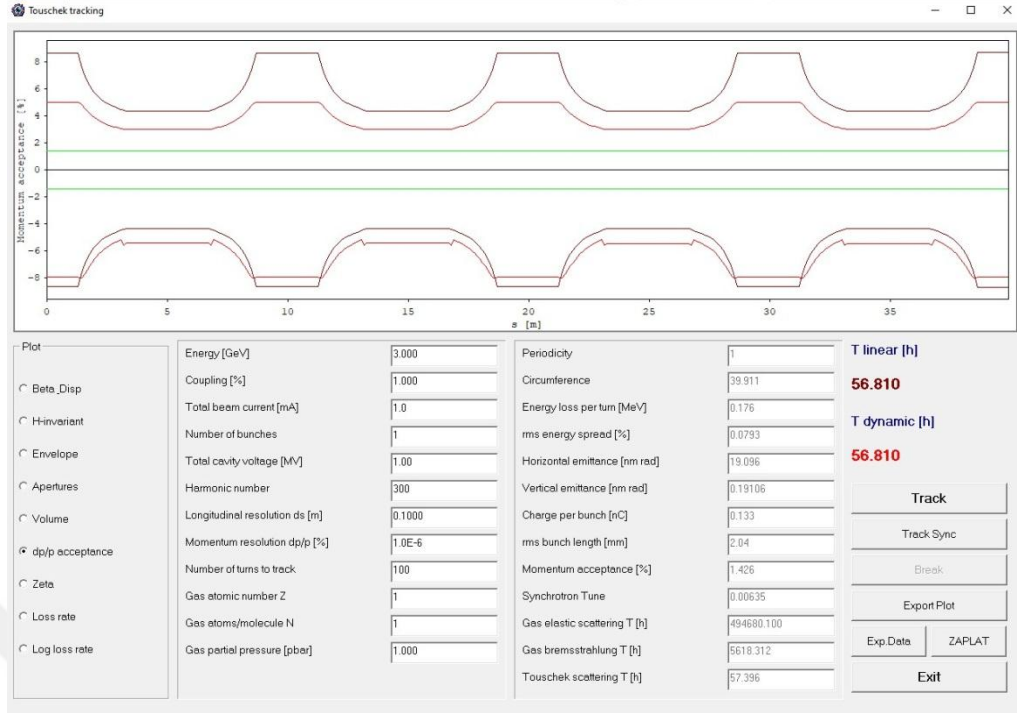
Text editör üzerinde oluşturulan örnek bir tasarımın detayları

Tasarlanan halkadaki demetin faz uzayındaki yatay ve dikey dağılımı görülmek istendiği durumda, yazılım üzerinden şu adımlar takip edilmelidir: Ana menü üzerinden "Track" > "Phase Space" adımları izlenir. Burada oluşacak daireler veya elipsler, fiziksel açıklığın verdiği doğrusal kabulü göstermektedir. Diyagramların üzerinde sol tıklayarak veya orta panele sayı girerek başlangıç koşulları belirlenir. "dp/p" alanına momentum sapması değeri girilir. "Run" tuşuna basıldığında parçacık üst panelde verilen sayıda döndürüldüğü durumun benzetimi yapılarak, benzetim çıktısı görüntülenir. "More" tuşu üzerinden daha fazla tur sayısı belirtilebilir. "Clear" tuşu paneli temizler ve "Exit" programı sonlandırır.



Demetin faz uzayındaki enine ve boyuna dağılımının benzetimi

Touschek yaşam ömrünün benzetimini yapmak için yazılım üzerinden “Track” > “Touschek Lifetime” adımları takip edilmelidir. Aşağıdaki ekran üzerinden “Track” butonuna bastıktan sonra, program kafes boyunca Δs kadar adım atar ve parçacıkları eksen üzerinde başlatır, fakat momentum sapması Touschek saçılımını $\Delta p = p$ eşitliği ile simüle etmektedir. "Break" butonu, yazılım çalışırken herhangi bir anda durdurmaya izin verir. Yazılımın çalışması bittiğinde, lineer durumda olduğu gibi, kayıp oranları ve ömür için tüm hesaplama sonuçları grafiklere eklenir. Aşağıdaki gibi, pozitif (kırmızı) ve negatif (mavi) olacak şekilde iki adet dinamik momentum kabulü için sonuç görüntülenebilecektir.



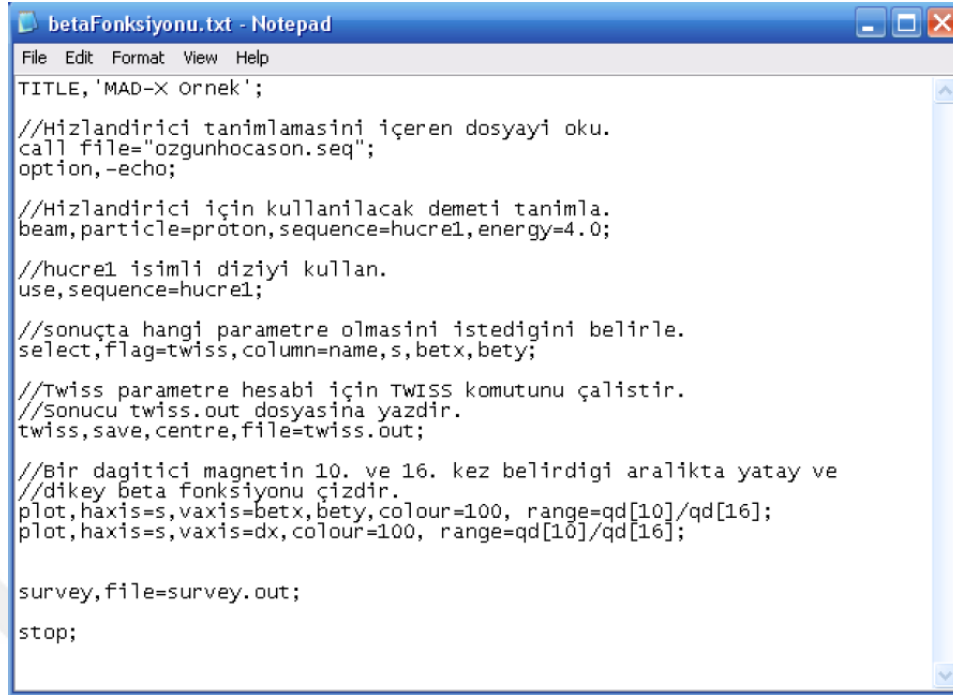
Demetin Touschek yaşam ömrünün benzetimi

Tasarladığımız FODO örgüsünün benzetimini MAD-X programı kullanarak yapmak istersek, OPA yazılımından elde edeceğimiz çıktıyı, MAD-X'in girdisi olarak kullanabiliriz. OPA yazılımı <https://ados.web.psi.ch/opa/> web sayfası üzerinden temin edilebilir (Streun 2012).

MADX Yazılımı

Manyetik örgü tasarımında kullanılan bir başka programdır. Program üzerinde oluşturulan örgü için parametrelerin hesaplamaları, hızlandırıcı üzerinde oluşabilecek kusurların benzetimi ve demet dinamiği benzetimi yapabilir.

Programın notasyonunda kod satırları “;” işareti ile sonlandırılır. Yorum satırları “\” veya “!” işareti ile başlar. Aritmetik fonksiyonlar ve geciktirilmiş ifadeler için “=” veya “:=” işareti kullanılabilir. Önceden tanımlanmış sabitler (e, π , mp, me vb.) kullanılabilir. Bu yönleriyle MAD-X dili C ile çok benzerdir. Aşağıda örnek MAD-X kod bloğu gösterilmiştir.



```
betaFonksiyonu.txt - Notepad
File Edit Format View Help
TITLE, 'MAD-X Ornek';

//Hizlandirici tanimlamasini iceren dosyayi oku.
call file="ozgunhocason.seq";
option,-echo;

//Hizlandirici icin kullanilacak demeti tanimla.
beam,particle=proton,sequence=hucrcl,energy=4.0;

//hucrcl isimli diziyi kullan.
use,sequence=hucrcl;

//sonuta hangi parametre olmasini istedigini belirle.
select,flag=twiss,column=name,s,betx,bety;

//Twiss parametre hesabi icin TWISS komutunu alistir.
//Sonucu twiss.out dosyasina yazdir.
twiss,save,centre,file=twiss.out;

//Bir dagitici magnetin 10. ve 16. kez belirdigi aralikta yatay ve
//dikey beta fonksiyonu izdir.
plot,haxis=s,vaxis=betx,bety,colour=100, range=qd[10]/qd[16];
plot,haxis=s,vaxis=dx,colour=100, range=qd[10]/qd[16];

survey,file=survey.out;

stop;
```

Örnek MAD-X kod bloğu

Program ıktısında yer alan bazı parametrelerin aıklamaları aēaēıda verilmiētir:

- BETXMAX : Beta x fonksiyonunun yatay eksenindeki aldıēı en büyük deēeridir.
- DXMAX : Yatay eksenindeki en büyük daēınım deēeridir.
 - DXRMS : Yatay eksenindeki daēınının rms deēeridir.
 - XCOMAX : Yatay eksenindeki kapalı yörünge sapmasının aldıēı en büyük deēeridir.
 - XRMS : Yatay eksenindeki kapalı yörünge sapmasının rms deēeridir.
 - Q2 : Dikey eksenindeki ayar deēeridir.
 - DQ2 : Dikey eksenindeki renksellik deēeridir.
 - BETYMAX : Beta fonksiyonu icin dikey eksenindeki en büyük deēeridir.
 - DYMAX : Dikey eksenindeki en büyük daēınım deēeridir.
 - DYRMS : Dikey eksenindeki daēınının rms deēeridir.
 - YCOMAX : Dikey eksenindeki kapalı yörünge sapmasının en büyük deēeridir.
 - YCORMS : Kapalı yörünge sapmasının dikey eksenindeki rms deēeridir.
 - DELTAP : Enerji fark deēeridir.

MAD-X programı web sayfası üzerinden temin edilebilir (Deniau vd. 2019).

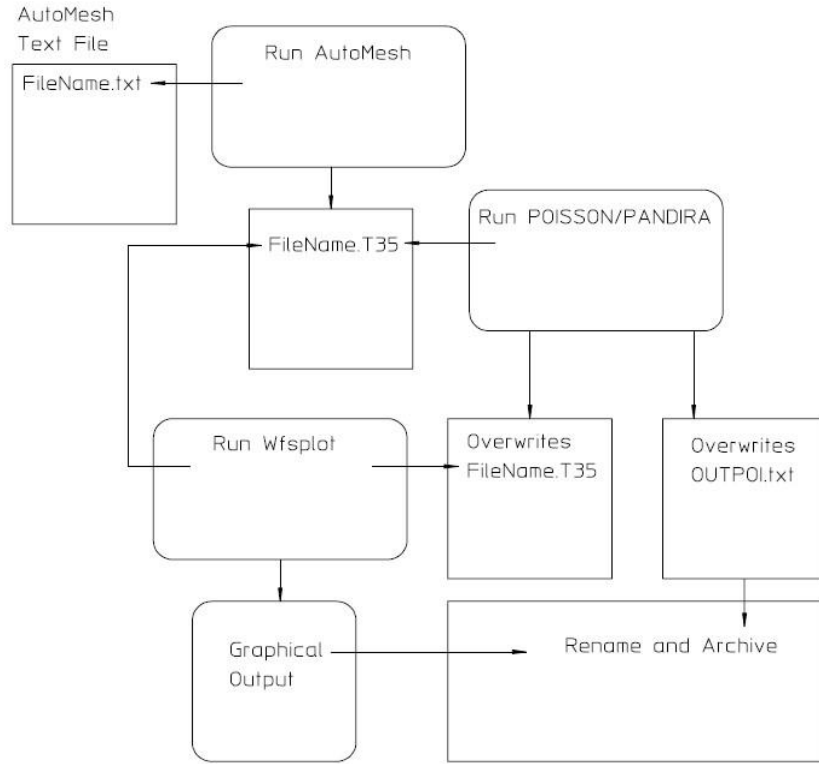
EK 2- Magnet Tasarımında Kullanılan Benzetim Yazılımları

POISSON SUPERFISH

Poisson Superfish grup kodları, Ronald Holsinger tarafından Klaus Halbach'ın teorik yardımıyla iki farklı problemi çözmek için yazılan bir dizi yazılımdır. Poisson ve Pandira, Berkeley'deki LBNL'de Klaus Halbach ve Ron Holsinger tarafından geliştirilen bir manyetostatik kod ailesinde yer alan kodlardır. Bu kodlar ilk olarak Fortran yazılım dilinde derlenmiştir. Ardından UNIX C diline dönüştürülmüştür. Son olarak Microsoft Windows işletim sistemi üzerinde çalışacak şekilde derlenmiştir.

Manyetostatik ve elektrostatik alanların hesaplanması ve radyo frekans kavitelemin rezonans frekanslarının ve alanların hesaplanması (iki boyutlu kartezyen veya üç boyutlu silindirik bir geometride) ve kavitelemin tasarımı için yaygın olarak kullanılmaktadır (Menzel & Stokes 1987). Bir magnet veya kavite probleminin oluşturulması aşamasında verilen başlangıç geometrisi için ağ oluşturmak üzere Automesh ve Lattice adlı iki ortak program kullanır. Tekplot programı, her iki problemde biri için grafiksel çıktı sağlamaktadır.

Tez kapsamında tasarım çalışmaları yapılan magnetlerin 2 boyutlu manyetik alan haritalarının çıkarılmasında Poisson Superfish yazılımı kullanılmıştır. Yazılım üzerinde dosyaların oluşturulması ve hesaplamaların akış şeması aşağıda gösterilmiştir (Tanabe 2005).



Poisson yazılımı hesaplama akışı diyagramı (Tanabe 2005)

Program için girdi dosyası oluşturulurken, tasarımcı ilk olarak iki boyutlu mıknatıs sorununun çözümü için sınır koşullarını, geometriyi ve istenen çıktı biçimini açıklayan bir metin dosyası yazar. Automesh, bu metin dosyasındaki girdileri kullanarak çalışır. Aşağıda örnek bir girdi dosyası gösterilmiştir. Girdi dosyası her “&” sembolü arasına yazılan ifadelerden oluşur. Üst grup parametreler problemi ve varsa problemin çözümüne ilişkin sınır koşullarını içermektedir.

```
C Type Dipol.am - Not Defteri
Dosya Düzen Biçim Görünüm Yardım
Title
TAC-TURKAY Dipole Magnet Design
ENDTitle
&reg kprob=0, ;
mode=-1, ;
mat=1, ;
kmax=512, lmax=512 &

&po x=-5,y=-5 & ; en dis yüzey
&po x=80,y=-5 &
&po x=80,y=50 &
&po x=-5,y=50 &
&po x=-5,y=-5 &
```

Modelin tanımlanması

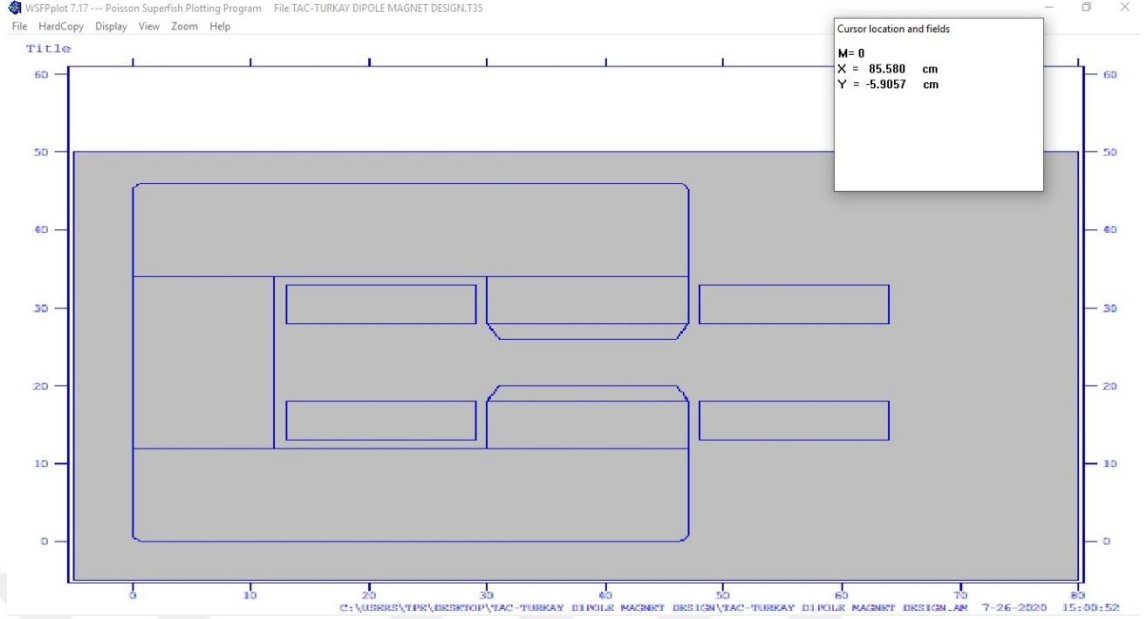
Tasarlanan ilk konturun düzlem
üzerindeki noktaları

Superfish yazılımı örnek girdi dosyası

Text dosyası olarak hazırlanan girdi dosyasının uzantısı “.am” türüne çevrilerek, bulunduğu klasörde üzerine çift basılarak yazılım tetiklenir. Ardından çalışan yazılım girdi dosyası içeriğindeki her bir nokta koordinatını okuyarak kapalı konturları oluşturur ve mesh tanımlamalarını yaparak bize aşağıdaki gibi “.T35” tipinde bir çıktı dosyası verir.

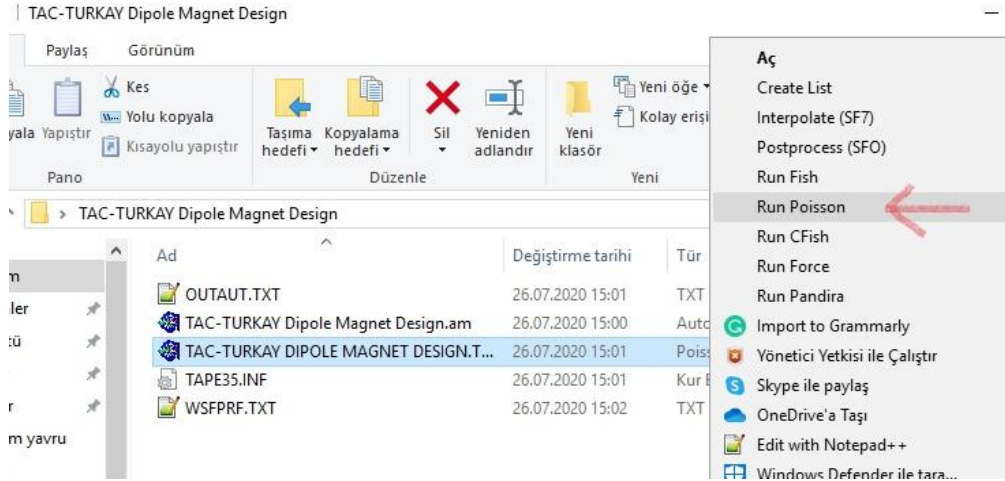
```
Automesh 7.17 --- Poisson Superfish Mesh Generator
File Help
Reading input data from file
C:\USERS\TPE\DESKTOP\TAC-TURKAY DIPOLE MAGNET DESIGN\TAC-TURKAY DIPOLE MAGNET DESIGN.AM
Problem description:
Title
TAC-TURKAY Dipole Magnet Design
ENDTitle
Problem file C:\USERS\TPE\DESKTOP\TAC-TURKAY DIPOLE MAGNET DESIGN\TAC-TURKAY DIPOLE MAGNET DESIGN.AM
Total number of mesh points: 264196
Region 1 done, 5 fixed points, 2045 total boundary points.
Region 2 done, 9 fixed points, 783 total boundary points.
Region 3 done, 9 fixed points, 783 total boundary points.
Region 4 done, 5 fixed points, 553 total boundary points.
Region 5 done, 5 fixed points, 315 total boundary points.
Region 6 done, 5 fixed points, 317 total boundary points.
Region 7 done, 5 fixed points, 232 total boundary points.
Region 8 done, 5 fixed points, 230 total boundary points.
Region 9 done, 5 fixed points, 287 total boundary points.
Region 10 done, 5 fixed points, 285 total boundary points.
Region 11 done, 5 fixed points, 289 total boundary points.
Region 12 done, 5 fixed points, 287 total boundary points.
Generation completed.
```

Kontur ve mesh yapısının hesaplanması



Çıktısı alınan “.T35” dosyasında tasarımı yapılan örnek bükücü magnet görünümü

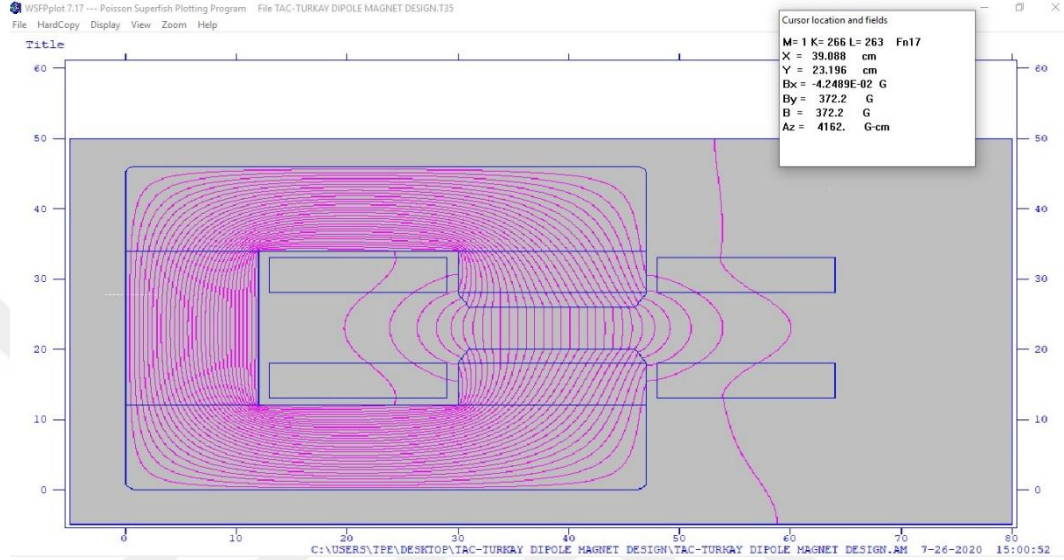
Tasarlanan geometri, olduğu aşamada son adım olarak çıktısı olan “.T35” türündeki dosya üzerine sağ tıklayarak Poisson hesaplaması çalıştırılır.



Tasarım dosyası üzerinde Poisson hesaplamasının başlatılması

Bu aşamadan sonra oluşturduğumuz geometrimiz üzerinde, girilen parametreler fiziksel olarak herhangi bir hataya sebep olmadıysa, ortaya aşağıdaki gibi bir manyetik alan

haritası çıkacaktır. Üzerinde imleci gezdirdiğimizde dinamik olarak, üzerinde bulunduğumuz noktadaki değerleri anlık olarak bize gösteren harici bir panel yer almaktadır.



Poisson Superfish hesaplama sonucu ortaya çıkan C-tipi bükücü magnet üzerindeki manyetik alan haritası

Hesaplamanın sonucu tüm ayrıntılarıyla outpoi.txt ve outsf7.txt dosyalarına yazılmaktadır. Ayrıca herhangi bir hata olduğu takdirde outaut.txt dosyası içerisinde hata detaylarına ulaşılabilmektedir.

CREO

Parametric Teknoloji Şirketi (Parametric Technology Corporation (PTC)) 2009 yılında Creo'yu geliştirmeye başlamış ve 2010 yılı Haziran ayında Las Vegas'ta "Project Lightning Kod" adını kullanarak duyurmuştur. Şirket 2011 yılı Haziran ayında da Creo 1.0'i piyasaya sürmüştür.

Creo, ürün tasarımını destekleyen bilgisayar destekli tasarım (Computer-aided design (CAD)) uygulamalarının bir paketidir. Paket, her biri ürün geliştirme içinde bir kullanıcı rolü için farklı özellikler sunan farklı uygulamaları bünyesinde barındırır. Yazılım,

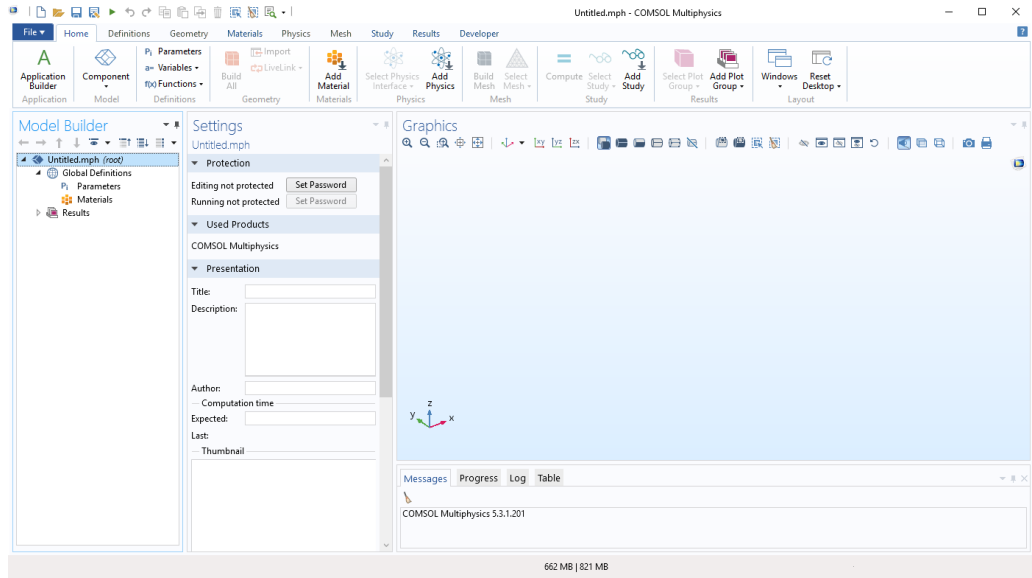
Microsoft Windows işletim sistemi üzerinde çalışır ve üç boyutlu CAD parametrik özellikli katı modelleme, üç boyutlu doğrudan modelleme, iki boyutlu ortografik görüntüler, sonlu eleman analizi ve benzetim, şematik tasarım, teknik çizimler, görüntüleme ve görselleştirme için farklı uygulamalar sağlar.

Creo Elements ve Creo Parametric, CATIA, Siemens NX/Solidedge ve SolidWorks yazılımlarının yer aldığı aile içerisinde rekabet halindedir (Creo Parametric 3D Modeling Software 2020).

COMSOL MULTIPHYSICS

Comsol Multiphysics, her türlü bilimsel problemi 2 ve 3 boyutlu olarak modellemek ve çözmek için kullanılan, güçlü ve etkileşimli bir benzetim yazılımıdır. Yazılım, modele genel bir bakış ve modelin tüm işlevlerine erişmenizi sağlayan bir model oluşturucu (model builder) ile güçlü bir tümleşik masaüstü ortamı sağlar.

COMSOL Multiphysics yazılımı ile konvansiyonel modelleri, çoklu fizik olaylarını çözen ve aynı anda çoklu modellere kolayca genişletilebilmeye olanak sağlamaktadır. Yazılım, kendi bünyesindeki yerleşik fizik arabirimlerini ve malzeme özelliklerinin bulunduğu kütüphaneleri kullanarak, temel denklemleri tek tek tanımlamak yerine, malzeme özellikleri yüklenebilmektedir. Ayrıca yazılım üzerinde kısıtlamalar, kaynaklar ve akışlar gibi ilgili fiziksel nicelikleri tanımlayarak modeller oluşturulabilmektedir.



COMSOL Multiphysics yazılımı ana ekranı

Yazılım üzerinde; değişkenler, ifadeler veya sayılar her zaman doğrudan hesaplama ve gözetleme açısından bağımsız olarak, katı ve akışkan etki alanlarına, sınırlara, kenarlara ve noktalara uygulanabilir. Comsol Multiphysics yazılımı daha sonra dâhili olarak tüm modeli temsil eden bir denklem seti derlemektedir. Yazılım bünyesindeki fizik arayüzleri kullanılarak aşağıdaki başlıklarda çeşitli çalışmalar yapılabilmektedir:

- Durağan ve zamana bağlı (geçici) çalışmalar,
- Doğrusal ve doğrusal olmayan çalışmalar,
- Öz frekans, tasarımsal ve frekans tepki çalışmaları.

Oluşturulan modellerin çözümlemesi yapılırken, Comsol Multiphysics yazılımı bir dizi gelişmiş sayısal analiz aracı kullanarak sorunu bir araya getirmekte ve ardından çözümü gerçekleştirmektedir. Çalışmalar çok işlemcili sistemleri, küme hesaplamayı kullanabilmekte ve toplu işleri ve parametrik taramaları çalıştırabilmektedir. COMSOL Multiphysics yazılımı, geometri, ağ, fizik, etütler, görsellik ve sonuçları oluşturan tüm adımları kaydetmek için diziler oluşturur. Modelin herhangi bir parçası parametreleştirilebilmesini kolaylaştırır. Basitçe model ağacındaki bir değişkene yeni değer vererek mevcut dizinin tekrar çalıştırılmasına olanak sağlamaktadır. Yazılım,

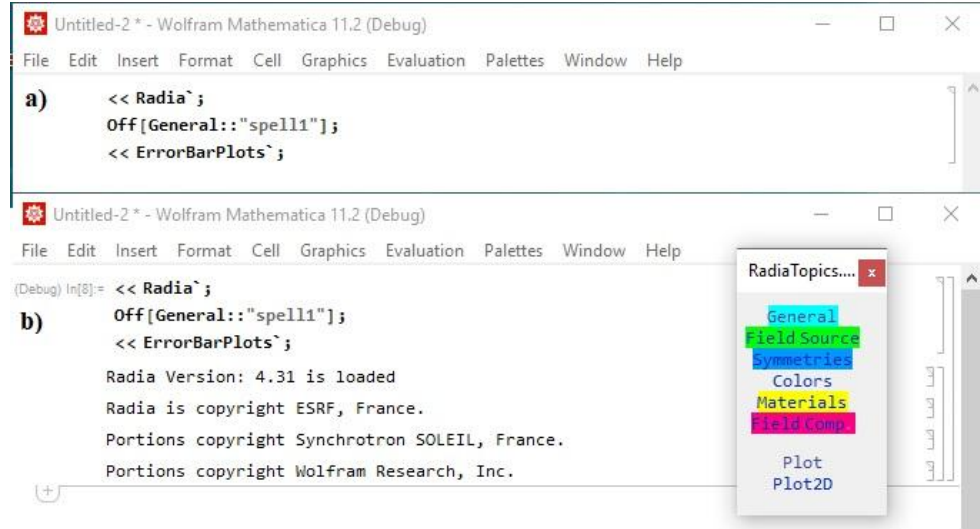
modeldeki diğer tüm bilgileri ve verileri hafızasında tutar ve yeniden uygulayabilir (COMSOL Multiphysics Reference Manual 2007).

RADIA

Sinkrotron ışınımı kaynaklarında yer alan eklenti cihazlar geliştirilirken karşılaşılan fiziksel ve teknik sorunları çözmek için tasarlanmış, Mathematica yazılımı altında çalışan bir kod paketidir. Radia kodunda manyetik alanın ve alan integrallerinin bir çizgi boyunca doğru ve hızlı hesaplanmasına çok özel bir dikkat gösterilmiştir. Bu kod, manyetostatik yapıların üç boyutlu sınır problemleri ile ilgili etkili bir çözüme ihtiyaç duyulan farklı fizik dallarında da kullanılabilir. Ayrıca lineer ve lineer olmayan, izotropik ve anizotropik manyetik malzemeler (demir ve sabit mıknatıslar gibi) ve elbette farklı şekillerdeki akım taşıma elemanları ile çeşitli problemlerin çözümünde oldukça başarılıdır.

1992'den bu yana üretilen tüm ESRF eklenti cihazları (<https://www.esrf.eu/>) bu kod veya önceki sürümleri kullanılarak tasarlanmıştır. Radia kodu ile manyetik alan ve alan integrallerine ilişkin çok sayıdaki benzetim yazılımları, üretimin akabinde yapılan ölçümlerle doğrulanmıştır. Bu nedenle, Radia'nın verimli bir şekilde kullanılmasıyla, merkezi alanın yanı sıra hesapta olmayan diğer alanlar dâhil olmak üzere hesaplanabilmektedir. Ayrıca, sabit mıknatıslı salındırıcı, wiggler veya herhangi bir magnet türü tasarlanabilmektedir.

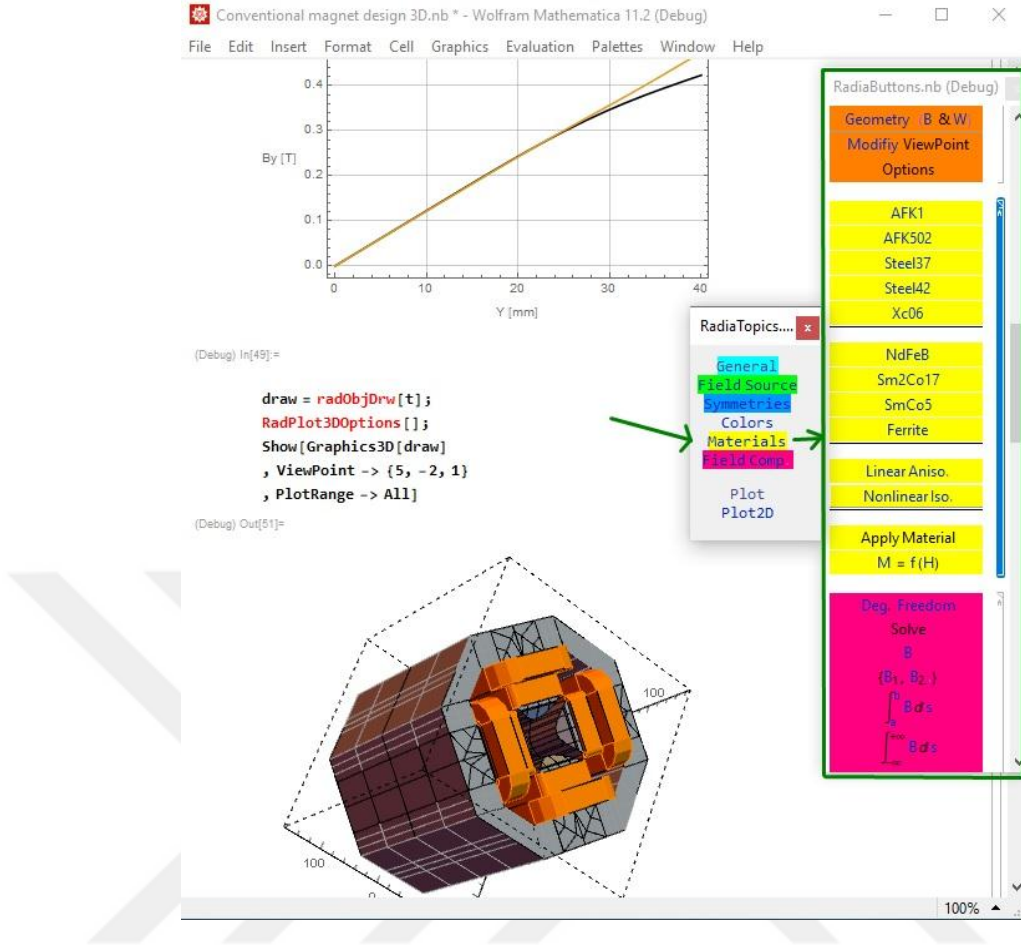
Radia kodu, Windows, Mac ve Linux platformlarında Mathematica yazılımı içerisinde harici yüklenen bir paket üzerinden çalıştırılabilmektedir. ESRF'in web sitesinden indirilen Radia paketi, Mathematica yazılımının yüklendiği klasöre kopyalanır ve bir editör penceresi açılarak Aşağıda gösterildiği gibi komut yardımıyla çalıştırıldığında, uygulama ek penceresiyle birlikte kod derlenip girişe hazır hale gelmektedir.



Mathamatica yazılımı üzerinde Radia paketinin başlatılması a) Radia paketi başlatılması için girilen komut, b) Radia yazılımı devreye girdiğinde gelen bilgiler ve açılan harici “Radia Topics” penceresi

Radia’da kullanılan yöntem hacim integral yöntemidir. Bu yöntemde birim nesneler oluşturulur ve oluşturulan nesnelere özellikleri atanır. Her nesne, mıknatıslanma açısından genel problemin çözümü için bir dizi daha küçük nesnelere bölünebilir. Problemin çözümü, nesneler arasında karşılıklı etkileşimleri temsil eden bellekte büyük bir matris oluşturarak gerçekleştirilir. Buna Etkileşim Matrisi adı verilmiştir. Her birimdeki nihai mıknatıslama, malzeme özelliklerini dikkate alarak Etkileşim Matrisi’nin anlık mıknatıslama vektörü ile çarpımı dizisi ile tekrarlanır. Bu yaklaşımda, alan üreten nesnelere (tipik olarak demir) bir tür segmentasyon uygulanır. Ancak Sonlu Eleman Yöntemi (FEM) yaklaşımının aksine, vakumu birbirine bağlamak gerekmez.

Radia’nın çekirdek kısmı nesne yönelimli C ++ ile yazılmış bir pakettir. Mathematica ve Igor Pro arayüzlü sürümleri mevcuttur. Mathematica yazılımı üzerinde çalıştırılan Radia paketi üzerinden elde edilen bir model ve grafik çıktısı aşağıda gösterilmiştir. Alan verilerinin işlenmesi script dilleri (Mathematica ve Igor Macro) üzerinden yapılır. Bir ve iki boyutlu alan grafikleri de yine bu script dilleri aracılığıyla elde edilir.



Radia yazılımı üzerinde oluşturulan grafik ve geometri. “Radia Topics” penceresi üzerinden açılan alt malzeme seçim ekranı