

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DOKTORA TEZİ**

**TAEK PROTON HIZLANDIRICI TESİSİ AR-GE ODASINDA  
PROTON DEMETİ İLE MALZEME BİLİMİ UYGULAMALARI İÇİN  
DEMET İLETİM HATTI VE DENEY İSTASYONU TASARIMI**

**Alper Nazmi YÜKSEL**

**FİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ANKARA  
2020**

**Her hakkı saklıdır**

## ÖZET

Doktora Tezi

### TAEK PROTON HIZLANDIRICI TESİSİ AR-GE ODASINDA PROTON DEMETİ İLE MALZEME BİLİMİ UYGULAMALARI İÇİN DEMET İLETİM HATTI VE DENEY İSTASYONU TASARIMI

Alper Nazmi YÜKSEL

Ankara Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ömer YAVAŞ

Bu çalışmada; Türkiye Atom Enerjisi Kurumu Proton Hızlandırıcı Tesisi (TAEK-PHT) Ar-Ge ışınlama odasında gelen proton demetinin enerjisinin 2 ile 30 MeV arasında ayarlanabildiği, pikoamper seviyesindeki akım değerlerine inilebilen, vakum ortamında çalışan ve tam otomatik bir düzeneğin tasarımı anlatılmaktadır. Günümüzde düşük akımlı demetler radyasyon dayanım testlerinden, PIXE, RBS, PIGE ve PESA gibi yüklü parçacık demeti uygulamalarına dayalı tahribatsız malzeme analizlerine kadar pek çok araştırma alanında kullanılmaktadır. TAEK-PHT'deki siklotron özellikle radyoizotop üretimi için tasarlandığından, hızlandırıcıdan elde edilen demetin enerjisi ve akımı bahsedilen uygulamaları doğrudan gerçekleştirebilmek için yeterli değildir. Bu sebeple mevcut Ar-Ge demet hattının sonuna monte edilmek üzere; bir enerji düşürücü sistemi, enerji ölçüm sistemi, kolimatör bütünü, deney/ışınlama odacığı ve Faraday kabından oluşan bir düzenek tasarlanmıştır. Enerji düşürücü sistemin tasarımı sırasında farklı enerji düşürücü folyo ve kolimatör konfigürasyonlarının hedef düzlemindeki demet enerjisi, enerji yayılımı, demet akısı ile demet akısı homojenliği üzerine etkileri araştırılmıştır. Gelen proton demetinin akım değerine ve ışınlama süresine bağlı olarak enerji düşürücü sistemi üzerindeki sıcaklık artışı ve radyo-aktivasyon miktarları hesaplanmıştır. Demet enerjisini ölçebilmek için tasarımda Si(Li) dedektöre dayalı bir enerji ölçüm sisteminin yer alması öngörülmüştür. Işınlama odacığı, demet karakterizasyonu ve numune tutmak/değiştirmek amacıyla kullanılacak donanımların yanı sıra, dedektörler ve ilgili ölçüm üniteleri ile pnömomatik silindirler, servo-motor ve vakum bileşenleri için gereken bağlantı portlarını içermektedir. İlaveten bir Faraday kabı ile ilgili hassas elektronik ünitesi tasarlanarak, üretilmiş ve test edilmiştir. Söz konusu Faraday kabı ve hassas elektroniği ile pikoamper seviyesindeki demet akımları başarılı bir şekilde ölçülerek tasarımın validasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmayla; ülkemizdeki üniversitelerin, devlet kurumlarının ve sanayi kuruluşlarının ihtiyaç duyabileceği birçok ışınlama uygulaması için kullanılacak önemli bir altyapının tasarımı ortaya konmuştur.

**Temmuz 2020, 117 sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** Parçacık hızlandırıcısı, siklotron, proton, demet hattı, tasarım, ışınlama düzeneği, enerji düşürücü, kolimatör, ışınlama odacığı, vakum altında, düşük demet akımı, düşük demet enerjisi

## ABSTRACT

Ph. D. Thesis

A DESIGN STUDY ON BEAMLINER AND EXPERIMENTAL STATION  
FOR THE PROTON BEAM APPLICATIONS IN MATERIAL SCIENCE  
AT TAEA PROTON ACCELERATOR FACILITY R&D IRRADIATION VAULT

Alper Nazmi YÜKSEL

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

Supervisor: Prof. Dr. Ömer YAVAŞ

This thesis describes the studies carried out in Turkish Atomic Energy Authority Proton Accelerator Facility (TAEA-PAF) R&D irradiation vault to design a fully automated and in-vacuum irradiation set-up capable of adjusting proton beam energy between 2-30 MeV with beam currents down to picoamperes. The low current beams may be used for a wide range of research including radiation damage testing and non-destructive material analysis with ion beam applications such as PIXE, RBS, PESA and PIGE. The energy and current of the beam extracted from TAEA-PAF cyclotron are not suitable to perform aforementioned applications since the accelerator is primarily designed for medical radioisotope production. The additional set-up including an energy degrader system, an energy measurement system, a collimator assembly, an irradiation chamber and a Faraday cup was designed to be connected to end of the existing R&D Beamline in order to adjust the beam parameters as required. The effects of different degrader foil and collimator configurations on the beam energy, energy spread, beam fluence and beam fluence homogeneity at the target plane were investigated for the design of the energy degrader system. Temporal thermal behavior and activation of degrader system were analyzed depending on the beam current and irradiation time. The design includes an energy measurement system with a Si(Li) detector for the beam energy measurement. The irradiation chamber includes equipment for beam characterization and sample manipulation and connection ports for detectors and related measurement units, pneumatic cylinders, servo-motor and vacuum components. A Faraday cup and related low noise electronics were designed, manufactured and tested. Picoampere range beam current was measured successfully with the Faraday cup and related electronics for design validation. In this study; the design of an important infrastructure for many irradiation applications needed by the universities, government agencies and the industry in our country is completed.

**July 2020, 117 pages**

**Key Words:** Particle accelerators, cyclotron, proton, beamline, design, irradiation set-up, energy degrader, collimator, irradiation chamber, in-vacuum, low beam current, low beam energy.

## ÖNSÖZ

Türkiye Atom Enerjisi Kurumu'nun çalışma programında da belirtildiği üzere, Nükleer ve Hızlandırıcı teknolojilerinin ülkemiz çıkarlarına uygun olarak kullanılabilmesi için bu teknolojileri edinmek, geliştirmek, ülkemizdeki uygulama alanlarını yaygınlaştırmak ve ülke altyapısını güçlendirmek en önemli hedefler arasında yer almaktadır. Bu amaç kapsamındaki hedeflerin başında ise parçacık hızlandırıcısı teknolojilerini edinmek gelmektedir. Birincil amacı radyoizotop üretimi olan TAEK Proton Hızlandırıcı Tesisi'deki Ar-Ge Işınlama Odası sayesinde ülkemizdeki bilim insanlarının hızlandırıcıya dayalı farklı alanlarda araştırma yapmasına olanak sağlanması hedeflenmiştir.

Ülkemizin, proton hızlandırıcısına dayalı araştırma yapma kabiliyetini geliştirmesi bakımından söz konusu ışınlama odasındaki Ar-Ge demet hattının etkili kullanımı oldukça önemlidir. Bu ana fikirden yola çıkarak Türkiye Atom Enerjisi Kurumu desteği ile Ocak 2018'de "TAEK Proton Hızlandırıcısı Tesisi Ar-Ge Demet Hattında Düşük Akımlı Işınlama Düzeneginin Kurulması ve Demet Özelliklerinin Belirlenmesi (Proje No: A2.H4.P1)" isimli araştırma projesi kapsamında gereken çalışmalar başlatılmıştır.

Söz konusu projenin amacına hizmet etmek üzere önemli çıktılar sağlanması beklenen söz konusu tez çalışması kapsamında yapılan çalışmaların başarılı şekilde sonuçlanmasıyla; önümüzdeki süreçte hem yurt içinden hem de yurt dışından gelecek özellikle çok düşük akımlı ve nispeten düşük enerjili proton demetleri ile ışınlama taleplerine cevap verecek bir hizmetin hayata geçirilmesi adına önemli bir aşama geride bırakılmıştır.

Alper Nazmi YÜKSEL  
Ankara, Temmuz 2020

## TEŞEKKÜR

Bünyesinde görev yapmaktan onur duyduğum Türkiye Atom Enerjisi Kurumu tarafından desteklenen tez çalışmam süresince, TAEK-PHT'dekine benzer hızlandırıcıların kullanıldığı önemli bilimsel uygulamalarla alakalı teknolojilerin ülkemize entegrasyonuna ilişkin yapılacak çalışmalarda yararlanılacağına inandığım bu eseri, Kurumumuza yaraşır bir şekilde tamamlama gayreti içerisinde oldum. Bu çalışma TAEK A2.H4.P1 nolu proje kapsamında gerçekleştirilmiştir.

Projenin hayata geçirilmesi için iradesini ortaya koyan TAEK Başkanlık Makamına ve Radyasyon ve Hızlandırıcı Teknolojileri Dairesi Başkanlığı'na (eski adıyla Sarayköy Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi Müdürlüğü'ne) teşekkürlerimi sunarım. Doktora eğitimim sırasından rehberliğini ve desteğini esirgemeyen hocam Sayın Prof. Dr. Ömer YAVAŞ'a teşekkürlerimi sunarım. Çalışmalarımın yürütülmesi sırasında yönlendiriciliği ve desteği nedeniyle Sayın Dr. Serdar BULUT'a teşekkür ederim. Tez İzleme Komitesi üyeleri olarak tez çalışmama yapmış oldukları değerli katkılar ve destekleri için hocalarım Sayın Prof. Dr. Ali Ulvi YILMAZAER ve Prof. Dr. İlkyay TÜRK ÇAKIR'a teşekkürlerimi sunarım. Tezimin çatısını oluşturan benzetim ve modelleme çalışmalarındaki çok önemli katkıları nedeniyle Sayın Dr. Görkem TÜREMEN'e en kalbi teşekkürü borç bilirim. İmalat gerektiren çalışmalar sırasındaki emeği ve alın teri nedeniyle RHTD mekanik atölye çalışanı Sayın Kemal DOĞAN'a teşekkür ederim.

Eğitim hayatım süresince hep yanımda olan, zorluklara göğüs gerip büyük fedakârlıklar göstererek bugünlere ulaşmamı sağlayan CANIM AİLEME sonsuz şükranlarımı sunarım. Tez çalışmalarım boyunca her tükendiğim anda beni teşvik eden, gönlümü yasladığım CANIM EŞİME ve doğduğu gün elinde olmayarak dâhil olduğu bu zorlu süreçte kendisine istediği zamanı ayıramadığım, fakat tebessümü ile bana nefes aldırın TATLI MELEĞİME sonsuz sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

Alper Nazmi YÜKSEL  
Ankara, Temmuz 2020

## İÇİNDEKİLER

### TEZ ONAY SAYFASI

ETİK.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT .....	iii
ÖNSÖZ.....	iv
TEŞEKKÜR .....	v
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ .....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ .....	5
2.1 Örnek Demet Hattı ve Deney İstasyonu Çözümleri.....	5
2.2 Malzeme Analizi Çalışmalarında Tercih Edilen Parçacık Hızlandırıcısı Tabanlı Önemli Yüklü Parçacık Demeti Uygulamaları .....	12
2.2.1 Proton uyarımlı X-Işını yayınımlı yöntemi .....	12
2.2.2 Rutherford geri saçılım spektroskopisi yöntemi.....	17
2.2.3 Parçacık uyarımlı Gama-Işını yayınımlı yöntemi.....	20
2.2.4 Protonla elastik saçılma analizi yöntemi .....	23
2.2.5 Değerlendirme.....	25
3. MATERYAL ve YÖNTEM .....	27
3.1 Materyal .....	27
3.2 Yöntem .....	42
4. BULGULAR ve TARTIŞMA .....	45
4.1 Demet Hattı 1.1 Üzerinde Proton Demeti Özelliklerinin Belirlenmesi .....	45
4.1.1 Emittans belirleme çalışmaları .....	45
4.1.1.1 Demet emittansının tanımı .....	45
4.1.1.2 Kuadrupol varyasyon yöntemi .....	46
4.1.1.3 Emittansın belirlenmesi için oluşturulan deney düzeneği.....	48
4.1.1.4 Emittans değerinin belirlenmesi .....	49
4.1.1.5 Tartışma .....	52
4.1.2 Enerji doğrulama çalışmaları .....	53
4.1.2.1 Demet Hattı 1.1'in işler hale getirilmesine yönelik çalışmalar .....	53

4.1.2.2 Durdurma gücü hesabı kullanılarak demet enerjisinin doğrulanması.....	55
4.1.2.3 Folyo aktivasyon yöntemi .....	57
4.1.2.4 Yöntemin Demet Hattı 1.1’de uygulanması.....	59
4.1.2.5 Folyoların proton demeti ile aktivasyonu ve HpGe dedektör ile analizi .....	63
4.1.2.6 Tartışma .....	69
4.1.3 Düşük akım ölçüm çalışmaları ve en düşük akım seviyesinin belirlenmesi ...	71
4.1.3.1 Faraday kabın tasarımı .....	71
4.1.3.2 Faraday kabın imalatı ve montajı .....	76
4.1.3.3 Elektronik ölçüm ünitesinin oluşturulması .....	79
4.1.3.4 En düşük akım değerinin belirlenmesi.....	80
4.1.3.5 Tartışma .....	83
4.2 Demet Hattı ve Deney İstasyonu Bütününün Tasarımı.....	84
4.2.1 Enerji düşürücü sisteminin tasarımı.....	87
4.2.2 Enerji ölçüm sisteminin belirlenmesi.....	99
4.2.3 Deney (Işınlama) odacığının tasarımı .....	101
4.2.4 Tartışma.....	103
5. SONUÇ .....	106
KAYNAKLAR .....	109
ÖZGEÇMİŞ.....	114

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

p	Proton
$k_e$	Kinematik faktör
k	Quadrupole strength (Kuadrupol gücü)
$\epsilon_N$	Normalized emittance (Normalize demet yayınıımı)
$\epsilon_{rms}$	Root mean square emittance (Ortalama karekök demet yayınıımı)
$E_0$	Gelen yüklü parçacık enerjisi
$\Theta$	Saçılma açısı
$\alpha_T$	Twiss alfa
$\beta_T$	Twiss beta
$\gamma_T$	Twiss gama
Z	Hedef malzeme atom numarası
z	Gelen parçacık atom numarası
barn	Tesir kesiti birimi
ppm	Parts per million (Milyonda bir birim)
A	Işınlama sonundaki aktivite
n	Hedef malzemede birim yüzeydeki çekirdek sayısı
$\sigma$	Reaksiyon tesir kesiti
$\lambda$	Radyoaktif bozunum sabiti
$t_i$	Işınlama zamanı
$D_j$	Gama enerji spektrumundaki pik alanı
$\epsilon$	Dedektör verimi
$I_\gamma$	Gama ışını yayınlanma olasılığı
$t_m$	Detektör sayım zamanı
$T_{max}$	Tek bir çarpışmayla hedef atomuna transfer edilen maksimum enerji
dE/dx	Demet durdurma gücü (MeV cm <sup>2</sup> /g)
$\delta$	İyonizasyon kaybı yoğunluk etkisi düzeltmesi
$m_e$	Elektronun kütlesi
$r_e$	Klasik elektron yarıçapı (2,817 x 10 <sup>-13</sup> cm)
$N_A$	Avagadro sayısı (6,022 x 10 <sup>-23</sup> mol <sup>-1</sup> )
$\beta$	v/c
$\gamma$	1/ $\sqrt{1-\beta^2}$
MΩ	megaohm



## **Kısaltmalar**

BNL	Brookhaven National Laboratory
CAS	CERN Accelerator School
CCD	Charge Coupled Device
FWHM	Full Widht at Half Maximum (maksimum yarı-yükseklik genişliği)
HKS	Hızlandırıcı Kontrol Sistemi
JNRI	The Joint Nuclear Research Institute (JNRI) of Russia (Dubna)
KIRAMS	Korea Institute of Radiological & Medical Sciences
LLRF	Low Level Radio Frequency
MOPA	Master Oscillator Power Amplifier
NRA	Nuclear Reaction Analysis
PIGE	Particle Induced Gamma-Ray Emission
PIXE	Proton induced X-ray Emission
PTFE	Polytetrafluoroethylene
RBS	Rutherford Backscattering Spectrometry
PESA	Proton Elastic Scattering Analysis
RADEF	Radiation Effect
RF	Radio Frequency
RHTD	Radyasyon ve Hızlandırıcı Teknolojileri Dairesi
SANAEM	Sarayköy Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi
SET	Single Event Test
SSD	Silicon Drift Detector
TAEK	Türkiye Atom Enerjisi Kurumu
TAEA	Turkish Atomic Energy Authority

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 TAEK Proton Hızlandırıcı Tesisi .....	1
Şekil 1.2 TAEK PHT hızlandırıcı sistemi ve hedef odalarının yerleşimine ilişkin gösterim .....	2
Şekil 1.3 Ar-Ge Işınlama Odası ve Demet Hattı 1.1 (kurulmdan hemen sonraki görünüm) .....	3
Şekil 2.1 KIRAMS (Güney Kore)'daki MC50 medikal siklotron bazlı tesisteki test demet hattı ve ışınlama sistemi.....	6
Şekil 2.2 Jyvaskla (Finlandiya)'daki 18-30 MeV enerjili siklotronun RADEF ünitesi ve Ar-Ge maksatlı ağır iyon hattı .....	6
Şekil 2.3 Jyvaskla'daki RADEF ünitesi ağır iyon ışınlama odacığının şematik gösterimi ve görünümü.....	7
Şekil 2.4 RADEF ünitesinin hava ortamındaki ışınlama bölümüne ilişkin şematik gösterimi .....	8
Şekil 2.5 Flevrov Laboratuvarı (JINR-Rusya)'ndaki malzeme analizi çalışmaları için kullanılan 2,5 MeV enerjili siklotron ve PIXE maksatlı ışınlama odacığının şematik gösterimi.....	9
Şekil 2.6 Arronax Tesisi (CNRS-Fransa)'ndeki C70 Siklotronu ve demet hattı yapılanmasının şematik gösterimi .....	10
Şekil 2.7 Arronax Tesisi'ndeki PIXE ve PIGE çalışmalarında kullanılan demet hattı ve deney istasyonu.....	10
Şekil 2.8 Nishina Memorial Cyclotron Center (Japonya) bünyesindeki PIXE ve RBS çalışmaları için kullanılan demet hattı ve deney istasyonu .....	11
Şekil 2.9 PIXE yöntemine ilişkin şematik gösterim; (a) malzemenin protonla bombardımanı ve iyonizasyonu (b) K kabuğundan X-Işını yayılımı (c) Auger elektronu oluşumu (d) Coster-Kroning geçişi .....	12
Şekil 2.10 Abo Akademi Üniversitesi (İngiltere) harici PIXE deney düzeneği ve şematik gösterimi .....	14
Şekil 2.11 Ruđer Bošković Enstitüsü (Hırvatistan) vakum altında çalışan PIXE düzeneği .....	16
Şekil 2.12 Cambridge Ulusal Araştırma Merkezi(İngiltere) PIXE/RBS odacığı ve şematik gösterimi .....	17

Şekil 2.13 RBS yönteminde enerji ve momentum korunumuna ilişkin şematik gösterimi.....	18
Şekil 2.14 Si plaka üzerindeki GaAs tabakanın RBS yöntemi ile analizi: (a) Şematik gösterim (b) Saçılan parçacıklardan elde edilen enerji spektrumu .....	19
Şekil 2.15 Louisiana Hızlandırıcı Merkezi (ABD) PIGE/PIXE/RBS vakum odacığı ve şematik gösterimi .....	21
Şekil 2.16 PIGE yönteminin prensibine ilişkin şematik gösterim .....	21
Şekil 2.17 PIGE yöntemi ile yoğunluk (derinlik) profilinin belirlenmesine ilişkin şematik gösterim .....	22
Şekil 2.18 Çekya Bilimler Akademisi Nükleer Fizik Enstisü PIGE/PIXE/RBS/PESA vakum odacığı ve şematik gösterimi.....	23
Şekil 2.19 Katı bir numunedeki H, C ve O elementleri için elde edilen örnek bir PESA spektrumu .....	24
Şekil 3.1 Cyclone® 30 hızlandırıcısı ve Demet Hattı 1.1'e ilişkin şematik gösterim ....	27
Şekil 3.2 Cyclone® 30 hızlandırıcısının görünümü ve ana bölümleri (üstten bakış) .....	28
Şekil 3.3 Cyclone® 30 hızlandırıcısının harici (Multicusp) iyon kaynağı sisteminin görünümü .....	30
Şekil 3.4 Cyclone® 30 hızlandırıcısı HKS yazılımı üzerinden enjeksiyon hattının şematik gösterimi .....	31
Şekil 3.5 Cyclone® 30 hızlandırıcısının üst ve alt kavitesi ve Dee'lerin görünümü .....	32
Şekil 3.6 Cyclone® 30 hızlandırıcısının RF sistemine ilişkin şematik gösterim.....	34
Şekil 3.7 Cyclone® 30 hızlandırıcısının RF nihai yükselteci (solda) ve hızlandırıcı kavitesi içerisindeki elektrot-dee kublajının (sağda) görünümü .....	35
Şekil 3.8 Cyclone® 30 hızlandırıcısının kavitesi içinde H <sup>-</sup> iyonlarının enerjilerine bağlı olarak yörüngelerini gösteren şematik gösterim .....	36
Şekil 3.9 Cyclone® 30 hızlandırıcısının kavitesi içinde H <sup>-</sup> iyonlarının ortalama yörünge yarıçaplarının değişime karşılık kinetik enerji değişimi .....	37
Şekil 3.10 Cyclone® 30 hızlandırıcısının stripper (çubuk) sisteminin dışarıdan ve kavite içinde görünümü.....	38
Şekil 3.11 Cyclone® 30 hızlandırıcısının kavite içindeki demet çıkış noktasının (solda) ve demeti kavite dışına bükme dâhili dipol mıknatısın (sağda) görünümü .....	38
Şekil 3.12 Demet Hattı 1.1'e ilişkin şematik gösterim ve ana bileşenleri .....	39

Şekil 4.1 Yüklü parçacık demetinin faz uzayındaki dağılımına (Emittansı) ilişkin şematik gösterim .....	45
Şekil 4.2 Bir demet hattı üzerindeki demet spot boyutunun ve dağılımın gözlemlenmesini sağlayan düzenek ve şematik gösterimi.....	46
Şekil 4.3 Demet iletim hattındaki kuadrupol mıknatısın manyetik alanının değiştirilmesiyle demetin demet görüntüleyici üzerindeki profilinin değişimi ve emittans değerinin belirlenmesi.....	47
Şekil 4.4 Demet Hattı 1.1 üzerinde bulunan ve demet spotunun gözlemlenmesini sağlayan düzenek (a) ve 30 MeV ve 0,3 $\mu\text{A}$ 'lık bir proton demeti için elde edilen demet spotu (b).....	48
Şekil 4.5 Demet Hattı 1.1 üzerindeki son kuadrupol mıknatısın akım değerinin değiştirilmesi elde edilen demet spotu görüntüleri ve değişimi.....	49
Şekil 4.6 Son kuadrupol mıknatısın belli besleme akım değerlerine karşılık elde edilen demetin; (a) yatay ve (b) düşey spot genişliklerinin karesine göre değişimine ilişkin çizdirilen parabol-fit denklemi .....	51
Şekil 4.7 Demet İletim Hattı 1.1'in sonuna monte edilen flanaj bütünüünün imalat aşamalarından kesitler.....	54
Şekil 4.8 Demet Hattı 1.1'in son kısmına ait (a) flanajın montajından önce (b) montajdan sonraki görünüm.....	54
Şekil 4.9 Durdurma gücü hesabıyla proton demetinin enerjisini belirleme düzeneği ....	55
Şekil 4.10 Demet Hattı 1.1 çıkışındaki (a) 19,8 MeV enerjili (b) 20,2 MeV enerjili proton demetleri için elde edilen ekran görüntüleri .....	56
Şekil 4.11 KIRAMS(G.Kore)'daki MC-50 siklotronunun enerji ölçümü ve doğrulaması için tercih edilen birbiri ardı sıra gelen folyo aktivasyon deneyi (stacked foil activation experiment) düzeneğine ilişkin şematik gösterim ...	57
Şekil 4.12 KIRAMS'daki MC-50 siklotronunda proton demetinin enerjisinin doğrulanmasına yönelik "folyo aktivasyon yöntemi" ile elde edilen sonuçların, benzetim sonuçlarıyla mukayesesi .....	58
Şekil 4.13 Demet Hattı 1.1'deki folyo aktivasyon yöntemiyle enerji ölçümü ve doğrulaması çalışmaları için tercih edilen folyo bütünüüne ilişkin şematik gösterim.....	59
Şekil 4.14 Demet Hattı 1.1'de gelen proton demetinin enerji ölçümü ve doğrulaması çalışmalarına yönelik olarak gerçekleştirilen folyo aktivasyon yöntemi için kullanılan bütüne ilişkin görünüm .....	60

Şekil 4.15 Demet Hattı 1.1’de folyo aktivasyon yöntemiyle enerji ölçümü ve doğrulaması çalışmaları için kullanılan folyo bütünüün demet hattı çıkışına montajı sonrası karşıdan ve yandan görünümü .....	61
Şekil 4.16 Aktiflenmiş durumdaki bir bakır folyoya ait gama sayımı spektrumu .....	65
Şekil 4.17 <sup>nat</sup> Cu(p, n) <sup>63</sup> Zn reaksiyonu için tesir kesiti değerleri .....	66
Şekil 4.18 I. ve II. folyolardan yayımlanan 669,62 keV’lik gama ışınları için spektrumdan ölçülen pik alanları oranı (D <sub>1</sub> /D <sub>2</sub> ) ile SRIM/TRIM programıyla iki folyo üzerinde hesaplanan enerji değerlerine karşılık literatürden elde edilen tesir kesiti oranları (σ <sub>1</sub> /σ <sub>2</sub> ) .....	67
Şekil 4.19 I. ve III. folyolardan yayımlanan 669,62 keV’lik gama ışınları için spekturumdan ölçülen pik alanları oranı (D <sub>1</sub> /D <sub>3</sub> ) ile SRIM/TRIM programıyla her iki folyo üzerinde hesaplanan enerji değerlerine karşılık literatürden elde edilen tesir kesiti oranları (σ <sub>1</sub> /σ <sub>3</sub> ) .....	68
Şekil 4.20 I. ve IV. ile III. ve IV. folyolardan yayımlanan 669,62 keV’lik gama ışınları için spekturumdan ölçülen pik alanları oranları (D <sub>2</sub> /D <sub>4</sub> , D <sub>3</sub> /D <sub>4</sub> ) ile SRIM/TRIM programıyla folyolar üzerinde hesaplanan enerji değerlerine karşılık literatürden elde edilen tesir kesiti oranları (σ <sub>2</sub> /σ <sub>4</sub> , σ <sub>3</sub> /σ <sub>4</sub> ) .....	68
Şekil 4.21 Faraday kabın ve alt sistemlerinin tasarımı ilişkin şematik gösterimi .....	71
Şekil 4.22 Faraday kabı içerisindeki (a) proton akısı (b) ikincil electron akısı .....	73
Şekil 4.23 Faraday kabı üzerinde elektron baskılayıcı ünitesinin etkisinin gösterimi ....	74
Şekil 4.24 Faraday kabı üzerinde; (a) 30 MeV enerjili ve 1 µA akım değerine sahip proton demetinin, 1 saatlik ışınlama süresince oluşturacağı termal etki (b) 100 nA ve 1 µA akımlı proton demetlerinin yaratacağı zamana bağlı olarak sıcaklığa değişimi .....	75
Şekil 4.25 Faraday kabın imalatı için oluşturulan CAD çizimi .....	76
Şekil 4.26 Faraday kabın montajı öncesinde üretilen tüm alt bileşenlerin görüntüleri .....	77
Şekil 4.27 Vakum sızdırmaz olarak tümlleme işlemi tamamlanan Faraday kabın görünümü .....	77
Şekil 4.28 Faraday kabın He kaçak dedektörü ile yapılan vakum sızdırmazlık testinden görünüm .....	78
Şekil 4.29 Faraday kabın test öncesi anahtar mıknatısın 3 numaralı çıkışına montajı sonrası görünümü .....	79
Şekil 4.30 Akım ölçüm sistemi elektronik ölçüm ünitesinin görünümü .....	80

Şekil 4.31 Akım ölçüm sistemi için oluşturulan arayüz ile mantık devresine ilişkin şematik gösterim .....	81
Şekil 4.32 Faraday kabı vasıtasıyla ölçülen zamana bağlı proton demet akımı (1 nA seviyesinde kararlı) .....	82
Şekil 4.33 Faraday kabı vasıtasıyla ölçülen zamana bağlı proton demeti akımı (50 pA seviyesinde kararlı) .....	83
Şekil 4.34 TAEK PHT vakum altında çalışan Düşük Akımlı Işınlama Sistemi.....	87
Şekil 4.35 Enerji Düşürücü (ED) Sistemin tasarımına ilişkin CAD çizimi .....	88
Şekil 4.36 Hedef düzlemindeki demet özelliklerini hesaplamak maksadıyla kullanılan FLUKA benzetimleri için oluşturulan (DAKIS) geometrisi.....	89
Şekil 4.37 15,5 MeV başlangıç enerjili proton demetinin enerji düşürücü sisteminde farklı kalınlıktaki alüminyum folyolardan geçtikten sonra hedef düzlemindeki enerji yayılımı.....	89
Şekil 4.38 15,5 MeV başlangıç enerjili proton demetinin; 0,1, 0,6 ve 1,2 mm kalınlıktaki enerji düşürücü folyolardan geçtikten sonraki, hedef düzlemindeki (polinom fit edilmiş) demet akısı homojenlikleri.....	91
Şekil 4.39 (a) Tekli, üçlü ve beşli enerji düşürücü folyolar için hedef düzlemindeki demet akısı homojenlikleri (b) Enerji düşürücü folyo kullanılmadan, tekli, üçlü ve beşli folyolar kullanılarak hedef düzleminde (polinom fit edilmiş) elde edilen demet .....	92
Şekil 4.40 15,5 MeV başlangıç enerjili proton demeti için farklı kolimatör açıklıkları hesaba katılarak elde edilen hedef düzlemindeki (polinom fit edilmiş) demet akısı homojenlikleri .....	94
Şekil 4.41 Farklı malzemelerden enerji düşürücü folyolardan geçen 15,5 MeV başlangıç enerjili proton demeti için hedef düzlemindeki (Gausyen fit edilmiş) demet enerji yayılımları .....	95
Şekil 4.42 Farklı malzemeli enerji düşürücü folyolardan geçerek, 15 MeV başlangıç enerjisinden, 5 MeV enerjiye düşürülen proton demeti için hedef düzlemindeki (polinom fit edilmiş) demet akısı homojenlikleri.....	96
Şekil 4.43 1 $\mu$ A'lık demet akımına sahip proton demetinin, 1 saat boyunca herhangi bir soğutma olmayan alüminyum enerji düşürücü folyolar üzerinden geçişi sırasındaki sıcaklık dağılımı.....	98
Şekil 4.44 1 saat boyunca üzerinden 100 nA ve 1 $\mu$ A'lık akım değerine sahip proton demetleri geçirilen alüminyum folyolardaki zamanla yaşanacak sıcaklık artışı .....	99
Şekil 4.45 Enerji ölçüm sistemini oluşturan bölümlere ilişkin şematik gösterimi.....	99

Şekil 4.46 Enerji ölçüm sistemine ilişkin olarak oluşturulan CAD çizimi ..... 100

Şekil 4.47 Deney (ışınlama) odacığının ve ilgili bölümlerini gösteren CAD çizimi .... 102



## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 PIXE yöntemine ilişkin önemli uygulamalar.....	15
Çizelge 2.2 RBS yöntemine ilişkin uygulama alanları ve sağladığı avantajlar .....	20
Çizelge 2.3 Proton demetine dayalı olası yüklü parçacık demeti uygulamaları ve bunlara ilişkin uygulamadaki demet enerjisi, akımı ve demet spot boyutu değerleri.....	25
Çizelge 3.1 Cyclone® 30 hızlandırıcısının teknik özellikleri .....	29
Çizelge 4.1 Demet Hattı 1.1 üzerinde bulunan son kuadrupol mıknatısın akım değerinin değiştirilmesi ile elde edilen demet spotunun yatay ve düşen eksenlerdeki boyutları ve değişimleri .....	50
Çizelge 4.2 Demet Hattı 1.1'deki 30 MeV enerjili, 0,3 $\mu$ A akımlı proton demet i için hesaplanan yatay ve düşey enine emittans değerleri ile twiss parametreleri.....	51
Çizelge 4.3 Şekil 4.13'de verilen deney düzeneğinde görülen her bir bakır folyo üzerinde SRIM-2013 programı kullanılarak hesaplanan ortalama proton demeti enerji değerleri.....	62
Çizelge 4.4 Bakır folyoların üzerine düşen proton demeti enerjilerine karşılık gelen tesir kesiti oranları ile bu enerjilerde aktiflenen bakır folyoların 669,62 keV'lik gama enerjilerine ait pik alanı oranı.....	69
Çizelge 4.5 Bilinmeyen enerjilerde proton demetleri ile ışınlandığı varsayılan bakır folyolar için hesaplanan katsayı oranları ve dolayısıyla belirlenen enerji değerleri.....	70
Çizelge 4.6 15,5 MeV başlangıç enerjili proton demetinin enerji düşürücü sisteminde farklı kalınlıklardaki folyolardan geçtikten sonra hedef düzlemdeki enerji yayılımı ve demet akısı .....	90
Çizelge 4.7 Farklı sayıda folyo için hedef düzlemdeki oransal (nispi) demet akıları.....	93
Çizelge 4.8 Farklı kolimatör açıklıkları için oransal demet akısı değerleri .....	94
Çizelge 4.9 Farklı malzemelerden enerji düşürücü folyolar için Al, Cu and W için oransal demet akıları .....	96



## 1. GİRİŞ

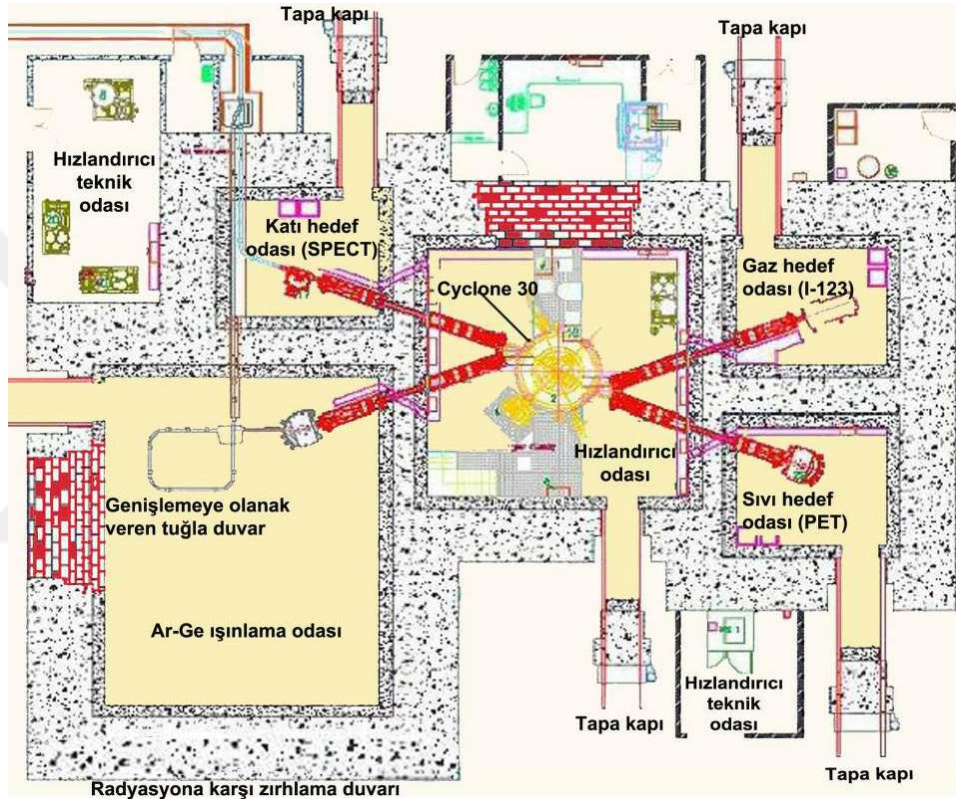
Günümüzde özellikle nükleer tıp uygulamalarında teşhis ve tedavi amaçlı kullanılan radyoizotop ve radyofarmasötiklerin üretimi için tercih edilen ve orta enerjili hızlandırıcılar grubunda kabul edilen siklotronların bulunduğu çok amaçlı hızlandırıcı tesislerinde, yüklü parçacıkların kullanıldığı malzeme bilimi araştırmalarının yanı sıra birtakım endüstriyel uygulamaların da gerçekleştirilebildiği görülmektedir. (Yüksel 2008). Anılan çerçevede siklotronlardan elde edilen düşük akımlı proton demetleri PIXE, PIGE, RBS ve PESA vb. (Ishii 2018 ve Verma, 2018) tekniklerden uygulandığı malzeme analiz çalışmalarının yanısıra radyasyon dayanım testleri (Anders vd. 2018) için tercih edilebilmektedir.

Emsalleri arasında en önemlilerinden birisi olan Türkiye Atom Enerjisi Kurumu Proton Hızlandırıcı Tesisi (TAEK-PHT) (Şekil 1.1), yukarıda bahsi geçen çalışmaların yapılabildiği çok fonksiyonlu bir tesis olma özelliğine haizdir (TAEK-PHT 2012). Tesisin işletmeye alınmasıyla birlikte ülkemizde ilk defa ticari maksatlı radyoizotop üretimi ile birlikte aynı zamanda proton demetine dayalı Ar-Ge çalışmalarının yapılabileceği önemli bir altyapıya sahip olunmuştur (TAEK-PHT 2013).



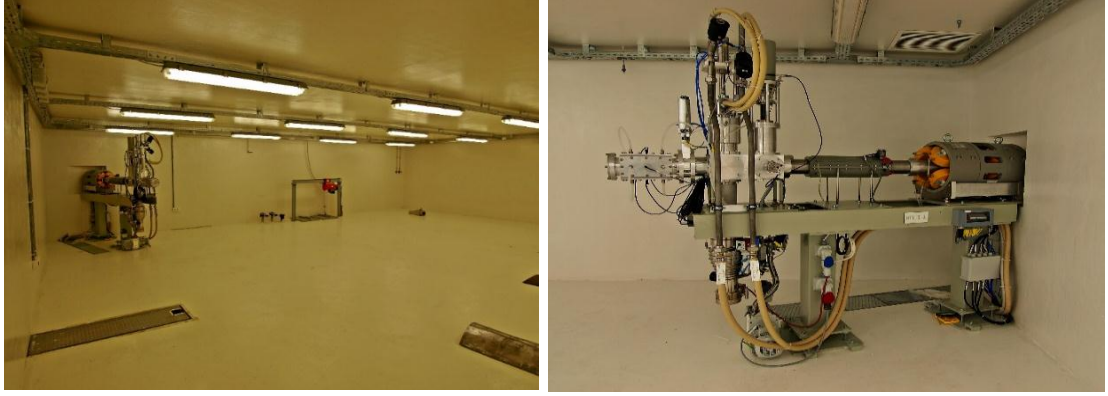
Şekil 1.1 TAEK Proton Hızlandırıcı Tesisi

TAEK PHT, aslında temel amacı nükleer tıp uygulamalarında kullanılan ve ülkemizin ihtiyacı olan hızlandırıcıya dayalı radyoizotopları üretmek olan endüstriyel bir tesistir. Bu maksatla tesisin merkezinde tesisin kalbi olan hızlandırıcının yer aldığı hızlandırıcı odası bulunmaktadır. Hızlandırıcıdan elde edilen proton demeti dört ana demet (iletim) hattı vasıtasıyla, üçü radyoizotop üretimi, birisi araştırma, uygulama ve eğitim için ayrılmış dört ayrı ışınlama odasına iletilmektedir (Şekil 1.2).



Şekil 1.2 TAEK PHT hızlandırıcı sistemi ve hedef odalarının yerleşimine ilişkin gösterim

Söz konusu ana demet iletim hatlarından “Demet Hattı 1.1” siklotronun elde edilen proton demetini Ar-Ge ışınlama odasına taşıyabilmesine rağmen; Cyclone® 30 (Ion Beam Application S.A./Belçika) hızlandırıcı sistemi, yüksek akım değerlerine (1200  $\mu$ A'ya kadar) sahip, orta enerji seviyesindeki proton demetlerini (15-30 MeV) sağlamak üzere tasarlandığından (IBA S.A 2008), bahse konu uygulamaları gerçekleştirmek için tek başına yeterli olmayıp, ilave donanım ve sistemlerle donatılması gerekmektedir (Şekil 1.3).



Şekil 1.3 Ar-Ge Işınlama Odası ve Demet Hattı 1.1 (kurulumdan hemen sonraki görünüm)

Anlaşılabacağı üzere Ar-Ge çalışmaları için önemli bir alt yapı sunan TAEK-PHT benzeri çok fonksiyonlu hızlandırıcı tesisleri için; hızlandırıcıdan elde edilen yüklü parçacık demetinin, yapılacak Ar-Ge çalışmasına göre değişiklik gösteren demet parametreleri dâhilinde, kullanılacakları deney istasyonuna taşınımının sağlanması önemli bir ihtiyaçtır (Yuksel ve Yavas 2011). Bu maksatla TAEK-PHT Ar-Ge ışınlama odası içerisinde proton demetinin deneysel uygulamalar için kullanılacağı alt demet hatları ile bunlarla bağlantılı deney istasyonlarına yönelik çalışmalar hâlihazırda devam etmektedir.

Bu tasarımların başarılı olabilmesi için öncelikle taşınımı gerçekleştirilecek yüklü parçacık demetinin profilinin doğru olarak belirlenmesi gerekmektedir (Forck 2011). Ancak, TAEK-PHT'deki siklotronun çıkışındaki enerji (15-30 MeV) değeri mevcut Hızlandırıcı Kontrol Sistemi (HKS) üzerindeki algoritma sayesinde hesaplanmakta olup, gerçek zamanlı bir ölçüm yapılamamaktadır. Proton demetinin akım değeri ise mevcut HKS'nin kabiliyeti gereği, en düşük 0,1  $\mu\text{A}$  olarak ölçülebilmektedir. Bu bağlamda tez çalışması kapsamında özellikle düşük akım uygulamalarına hizmet etmesi hedeflenen proton demetinin; öncelikle enerji değerinin doğru olarak belirlenmesi, çok daha düşük akım (pikoamper) seviyesindeki değerlere inilmesi, bu seviyedeki düşük akımların ölçülmesi, ilaveten enine demet dinamiği açısından önemli olan benek (spot) boyutu ile demet yayını (emittansı) vb. parametrelerinin (bir diğer deyişle demet profilinin) belirlenmesine çalışılmıştır.

Söz konusu çalışmaların ardından, düşük proton demeti akımı ile enerjisi gerektiren, öncelikle malzeme ışınlaması ve testi için kullanılacak, ileride ise yüklü parçacık demeti analiz metotlarının gerçekleştirilebileceği esnekliğe sahip (demetin istenen parametreler dâhilinde taşınımı için) özgün bir demet hattı ile deney istasyonu düzeneğinin tasarımı yapılmıştır. Tasarım özetle mevcut Ar-Ge Demet Hattı'nın devamında yer alacak yeni bir alt demet iletim hattı, onun hemen sonundaki ışınlama istasyonu ve ilgili alt sistem/bileşenleri içermektedir. Bu düzenek temel olarak, bir enerji düşürücü sistem, bir enerji ölçüm sistemi, koni kolimatör sistemi, ışınlama odacığı ve bir Faraday kabından oluşmaktadır.

Kurumumuzun hedefleri doğrultusunda böyle bir demet hattı ve deney istasyonu bütünüünün tasarımının yapılması; nükleer fizik, malzeme bilimi ve hızlandırıcı teknolojilerine ilişkin değişik araştırmaların yapılabilmesini mümkün kılacak bir alt yapının ülkemize kazandırılması adına önemli bir aşamanın ilk safhasıdır. Zira söz konusu altyapı aynı zamanda ilgili alanlarda çalışmalarını sürdüren araştırma enstitülerimiz ve üniversitelerimiz için de oldukça önemlidir. İlaveten tez esnasında yapılan çalışmalarla kazanılan deneyim sayesinde ülkemizde konuyla ilgili ihtiyaç duyulan yetişmiş insan gücüne yönelik önemli bir katkının da yapıldığına inanılmaktadır.

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

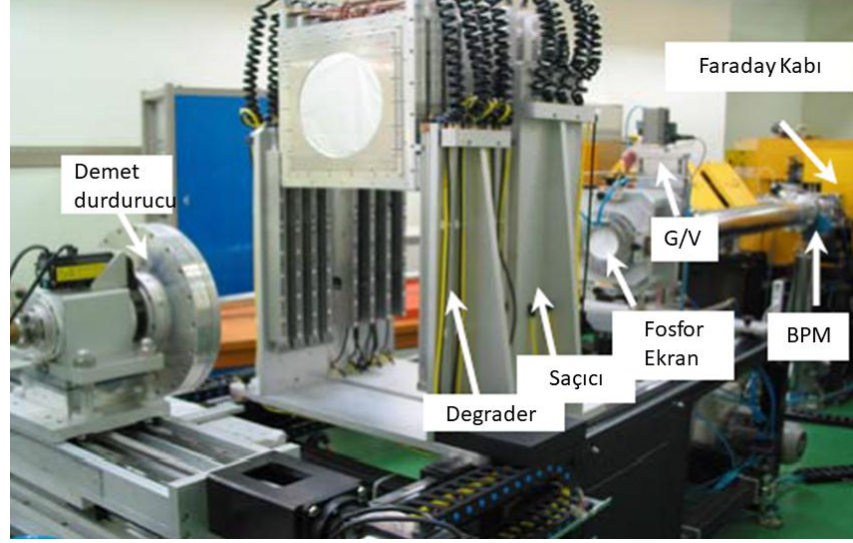
Günümüzde tandetron, pelletron, Van de Graff ve siklotron tip hızlandırıcılardan elde edilen yüklü parçacık demetleri kullanılarak, demet parametrelerine (parçacık türü, enerji aralığı, yoğunluğu, emittansı, spot boyutu, enerji yayılımı vb.) bağlı olarak radyasyon dayanım testlerinden, malzeme analizi amaçlı tahribatsız ölçümleri ve farklı nükleer spektroskopik deneyleri vb. değişik çalışmalar yapılabilmektedir.

Yüklü parçacık demetlerinin söz konusu çalışmaların yapılacağı kullanım noktasına, kullanım amacına uygun parametreler dâhilinde iletilebilmesi oldukça önemlidir. Bunun için özgün taşıyıcı demet hattı ve deney istasyonu çözümlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle Ar-Ge maksatlı uygulamalarda faydalanılan mevcut özgün taşıyıcı demet hattı çözümlerine ilaveten, yeni tasarımlar üzerine de çalışmalar hâlihazırda devam etmektedir.

### 2.1 Örnek Demet Hattı ve Deney İstasyonu Çözümleri

G.Kore’de olası proton demeti kullanıcıları arasında yapılan talep araştırması, birçok kullanıcının ışınlama derinliğinin, dozunun ve sıcaklığın kontrol edilebileceği geniş enerji, akım ve puls aralığına sahip bir proton demetine ihtiyaç duyulduğunu göstermiştir. Bu gereksinimleri karşılamak üzere; pulslu bir demet dağılımı elde etmek üzere bir AC mıknatıs, demet enerjisinin kontrolü için bir degrader, demet akımı kontrolü için bir kolimatör, hassas enerji seçimi için bir enerji filtresi ve tarayıcı mıknatıs içeren bir demet hattı çözümü öngörülmüştür. Bu amaçla KIRAMS'taki MC-50 siklotronunda bir test demet hattı kurulmuştur (Şekil 2.1). Söz konusu test demet hattı; güç iletimi için kullanılacak yarı iletken malzemelerin geliştirilmesi, nanometre mertebesindeki dayanıklı malzemelerin proton demeti ile kesilmesi, bazı mikro-organizmaların ve bitkilerin (tohumların) mutasyonu, uzay uygulamalarında (single event test vb.) kullanılmaktadır (Choi and PEPF Team 2005).





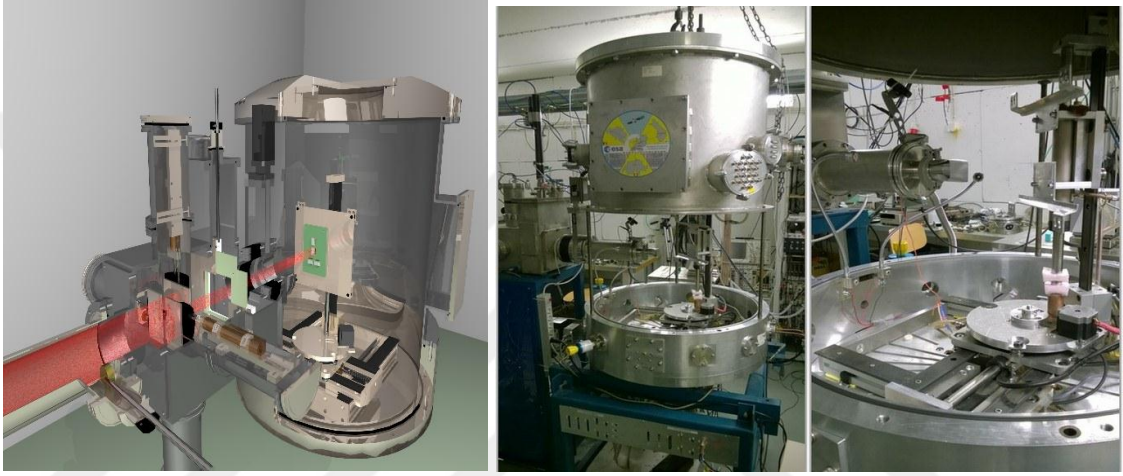
Şekil 2.1 KIRAMS (Güney Kore)'daki MC50 medikal siklotron bazlı test demet hattı ve ışınlama sistemi

Finlandiya'da bulunan JYFL Hızlandırıcı Merkezi'nde hem ağır iyon (döteron) hem de proton demetleri siklotron kullanılarak sırasıyla 9-15 MeV ve 18-30 MeV enerjili olarak, 50-100  $\mu\text{A}$  akım aralığında elde edilebilmektedir. Şekil 2.2'de verilen şekilde bir taşıyıcı demet hattı ağı ve deney düzeneği yapılanmasının tercih edildiği tesisteki RADEF Ünitesinde, demet hatlarının modüler yapısı sayesinde nükleer spektroskopiden malzeme araştırmalarına kadar değişik çalışmalar yapılabilmektedir (Heikkinen, 2020).



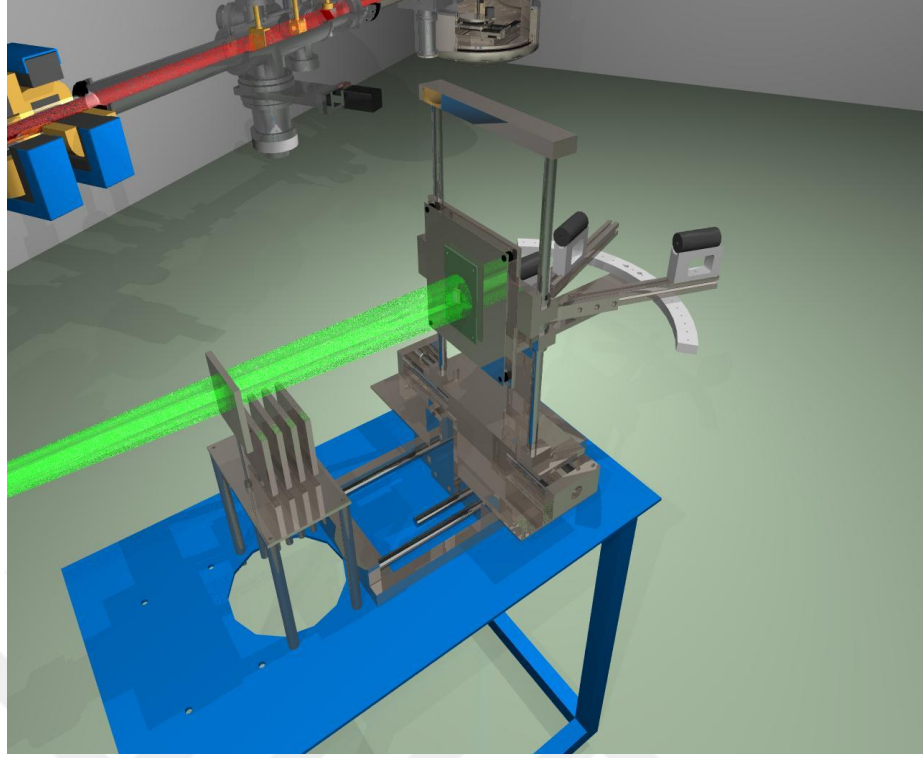
Şekil 2.2 Jyvaskla (Finlandiya)'daki 18-30 MeV enerjili siklotronun RADEF ünitesi ve Ar-Ge maksatlı ağır iyon hattı

RADEF ünitesinde yüklü parçacıklar ilk seçenekte 75 cm çapında ve 81 cm yüksekliğindeki bir vakum odacığı içerisine yönlendirilmektedir (Şekil 2.3). Işınlanacak malzeme, tankın içerisinde bulunan 25x25 cm<sup>2</sup> boyutlarındaki alüminyum plaka üzerine monte edilmiş, üç boyutta hareket edebilen bilgisayar kontrollü taşıyıcı cihaz vasıtasıyla istenen pozisyonda konumlandırılabilir. Demet hattının diğer tarafına monte edilen büyütme objektifli bir CCD kamera, ışınlanacak malzemenin doğru pozisyonda yerleştirilip yerleştirilmediğinin kontrolünü sağlar.



Şekil 2.3 Jyvaskla'daki RADEF ünitesi ağır iyon ışınlama odacığının şematik gösterimi ve görünümü

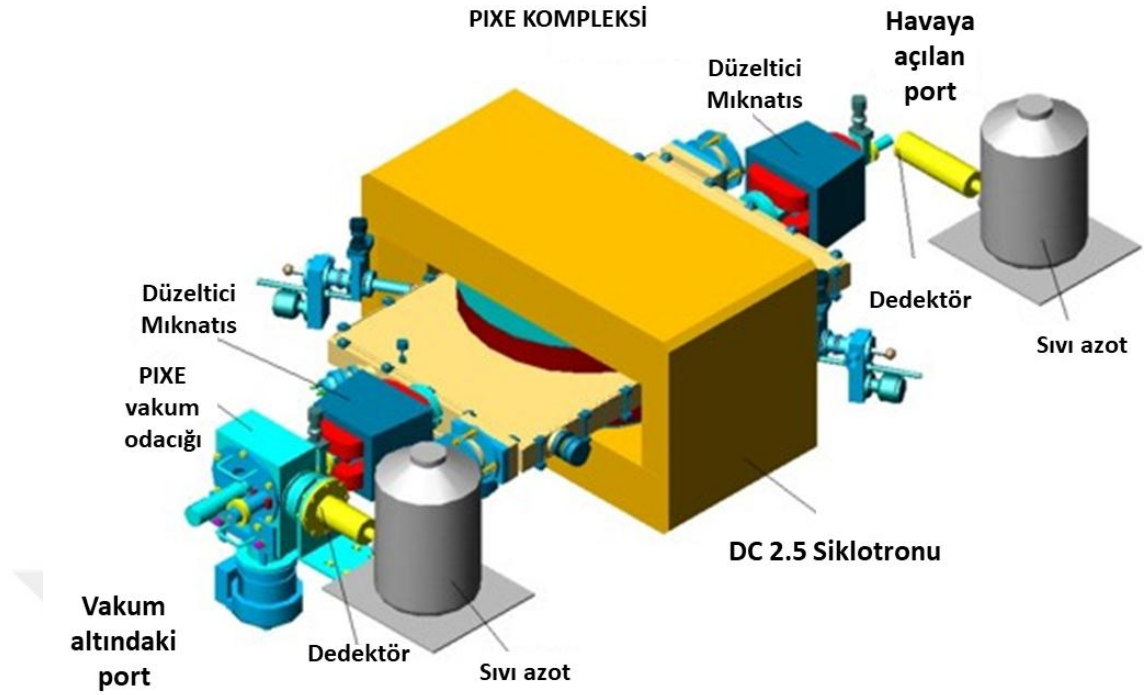
RADEF ünitesindeki bir diğer seçenekte ise havada yayılan proton demeti ile ışınlama yapabilmektir. Proton demeti öncelikle, demet hattının vakumunu ortam basıncından ayırmaya yarayan 200 µm'lik tungsten bir folyo üzerinden atmosfer ortamına alınır. Demet ışınlama noktası ile demet hattı çıkış noktası arasında istenilen her noktaya yönlendirilebilir. Çoğunlukla bu mesafe 1 m civarındadır. Proton demeti ışınlama sistemine girmeden önce, boyutu en fazla 10x10 cm<sup>2</sup> olan dikdörtgen şeklindeki özel bir kolimatörden geçer (Şekil 2.4).



Şekil 2.4 RADEF ünitesinin hava ortamındaki ışınlama bölümüne ilişkin şematik gösterimi

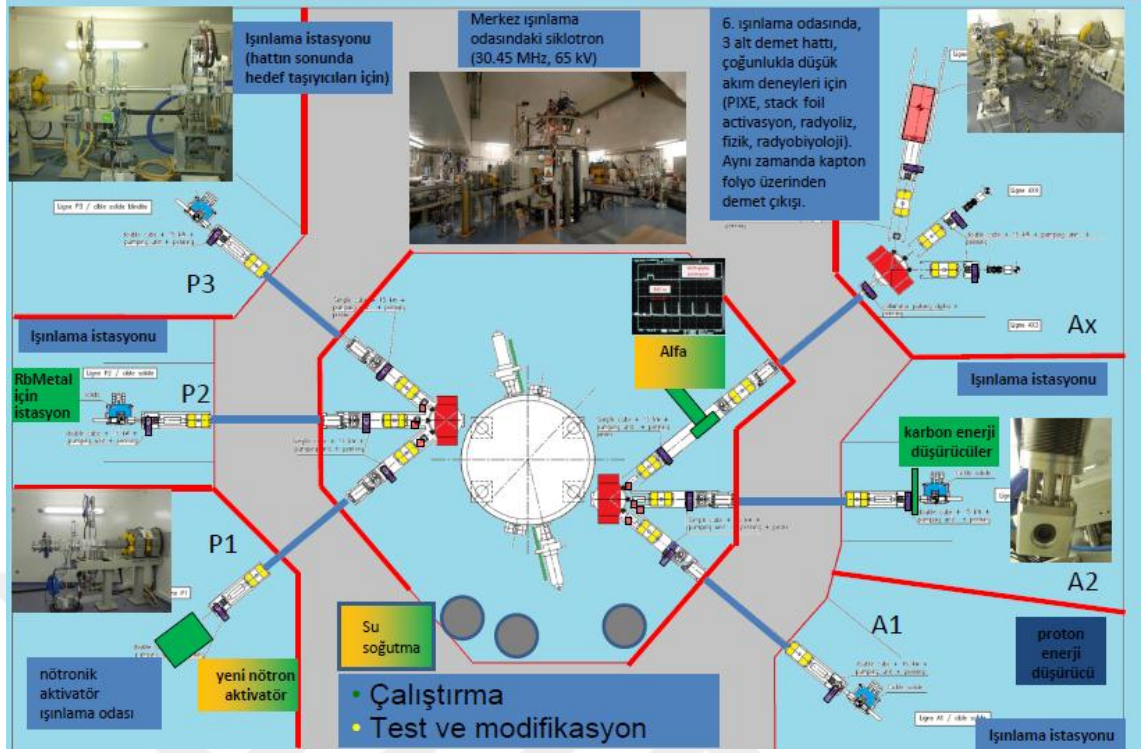
Rusya'da JINR bünyesindeki Flevrov Laboratuvarı'nda 2,5 MeV Siklotron, yüksek gerilim elektrostatik hızlandırıcılarına bir alternatif olarak malzemelerin proton demeti ile analizi için tasarlanmıştır. Başlıca avantajları küçük boyutu ve yüksek verimliliğidir. Bu siklotronun özelliği simetrik bir tasarıma sahip olmasıdır. Söz konusu özellik, proton demetlerinin iki yönlü olarak çıkışını sağlamaktadır (Şekil 2.5). Bu hızlandırıcı kullanılarak malzemelerin PIXE yöntemiyle analizi; ~ 1-10 ppm hassasiyetinde ve 100  $\mu\text{m}$  derinliğine kadar yapılabilmektedir. Malzemelerin rezonans nükleer reaksiyon analizi (NRA), 0.1 mb tesit kesitli bir  $\gamma$  ölçüm analiziyle yapılabilmektedir. Malzemelerin protonla geri saçılma analizi ise ppm seviyesinden, ppb yoğunluğuna kadar ve 0,1-10  $\mu\text{m}$  derinliklerde RBS yöntemi sayesinde yapılabilmektedir. Ayrıca proton elastik saçılma yöntemi (PESA) ile malzeme analizleri yapılabilmektedir. Belirli enerjiler ve saçılma açıları için proton saçılma kesitleri ( $Z < 10$ ) RBS'den daha iyi sonuç vermektedir.





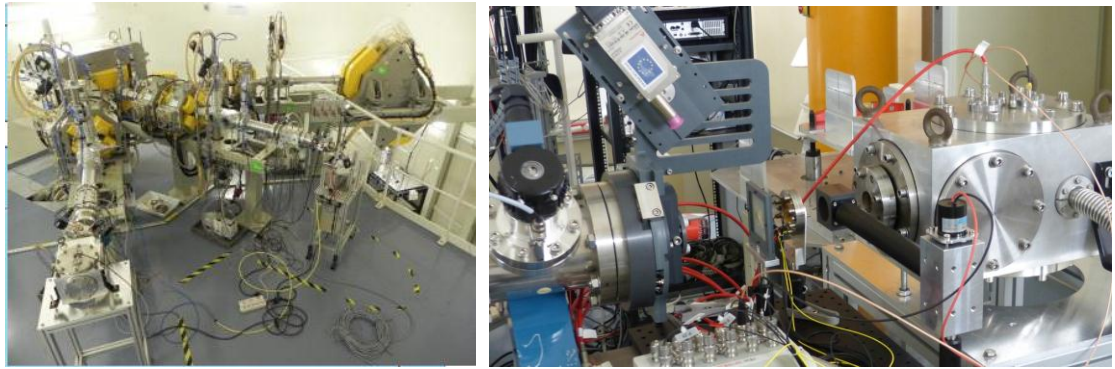
Şekil 2.5 Flevrov Laboratuvarı (JINR-Rusya)'ndaki malzeme analizi çalışmaları için kullanılan 2,5 MeV enerjili siklotron ve PIXE maksatlı ışınlama odacığının şematik gösterimi

Fransa'nın Nantes şehrindeki IBA S.A tarafından kurulan Arronax Tesisi'ndeki C70 (17-68 MeV enerjili) model siklotron tipi hızlandırıcı sistemindeki 6 demet hattından 3 tanesi, özellikle düşük akımlı (150 fA, 40 nA) yüklü parçacık uygulamaları vasıtasıyla çok katmanlı malzeme analizleri ve radyobiyojoloji uygulamaları için tahsis edilmiştir (Şekil 2.6).



Şekil 2.6 Arronax Tesisi (CNRS-Fransa)'ndeki C70 Siklotronu ve demet hattı yapılanmasının şematik gösterimi

Şekil 2.7'de görülen söz konusu demet hatlarından birisi, malzemelerin PIXE ve PIGE yöntemleri ile nicel analizinin ( $Z < 11$ ) yapılmasına imkan sağlayan demet hattı uzantısı ve deney istasyonu çözümünü içermektedir (Mouchard 2019).



Şekil 2.7 Arronax Tesisi'ndeki PIXE ve PIGE çalışmalarında kullanılan demet hattı ve deney istasyonu

Nishina Memorial Cyclotron Center (Japonya) bünyesindeki Ion Beam Accelerator Co. Firması (Japonya) tarafından tasarlanan ultra kompakt siklotron ile tasarlanan demet iletim hattı ve deney istasyonu sayesinde Parçacık Uyarımlı X-ışını Emisyonu (PIXE) ve Rutherford Geri Saçılma (RBS) yöntemleri gerçekleştirilebilmektedir (Şekil 2.8). Söz konusu çalışmalar kapsamında özellikle toplum sağlığı açısından önemli olan ve biyo-medikal malzemelerin analizi sırasında başvuru flor atomunun tespiti yapılmaktadır. Söz konusu siklotron, proton ve alfa-parçacıklarını 3 MeV'lik bir enerjiye kadar sırasıyla 10  $\mu$ A ve 5  $\mu$ A'lik maksimum akımlarla hızlandırabilmektedir.



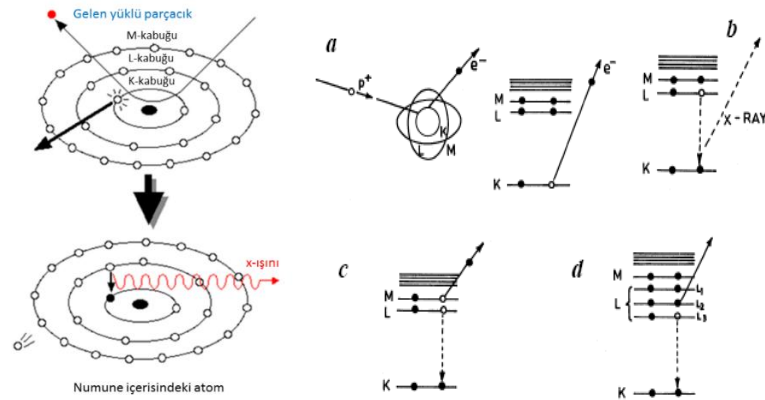
Şekil 2.8 Nishina Memorial Cyclotron Center (Japonya) bünyesindeki PIXE ve RBS çalışmaları için kullanılan demet hattı ve deney istasyonu

## 2.2 Malzeme Analizi Çalışmalarında Tercih Edilen Parçacık Hızlandırıcısı Tabanlı Önemli Yüklü Parçacık Demeti Uygulamaları

Günümüzde hızlandırıcılardan elde edilen yüklü parçacık demetlerinin kullanıldığı birçok uygulama mevcuttur. Özellikle düşük akımlı ve (nisbeten) düşük enerjili proton demetlerinin kullanıldığı PIXE, PIGE, RBS ve PESA vb. yöntemler sıklıkla başvurulan uygulamalar olarak dikkat çekmektedir. Söz konusu uygulamalar sırasında hızlandırıcılardan elde edilen yüklü parçacıklar, amaca özgün tasarlanan düzenekler vasıtasıyla uygulamaların gerçekleştirileceği özel tasarımı deney istasyonlarına yönlendirilirler. Hızlandırıcılardan gelen proton demetleri hayata geçirilen özel çözümler vasıtasıyla değişik enerji ve akım değerlerinde ayarlanarak malzeme ışınlatma, test ve analiz (karakterizasyon) maksatlı kullanılırlar.

### 2.2.1 Proton uyarımlı X-Işını yayını yöntemi

Analitik bir metot olan proton uyarımlı X-Işını yayını yönteminde (Proton Induced X-ray Emission-PIXE), Protonlar numune yüzeyine yakın bölgelerdeki ( $10.000 \text{ \AA}^0$ ) atomların elektronları ile esnek olmayan çarpışmalar yaparak, bu elektronları uyarırlar. Uyarılmış durumdaki elektronlar karakteristik X-ışınları yayınlarken yeniden kararlı hale dönerler (Şekil 2.9).



Şekil 2.9 PIXE yöntemine ilişkin şematik gösterim; (a) malzemenin protonla bombardımanı ve iyonizasyonu (b) K kabuğundan X-Işını yayını (c) Auger elektronu oluşumu (d) Coster-Kroning geçişi

PIXE yönteminde karakteristik X-ışını tesir kesiti yüksektir. Yayınlanan karakteristik X-ışınları Si(Li) ya da Germanyum detektörler ile tespit edilir. Detektörden gelen sinyaller (pikler halinde) güçlendirilerek bir puls yükseklik analizöründe toplanır. Her bir puls, numune içindeki her bir elementin bağlanma enerjisine karşılık gelir. Böylece numuneyi oluşturan elementler tespit edilerek, malzemenin yapısının çözümlenmesi sağlanır.

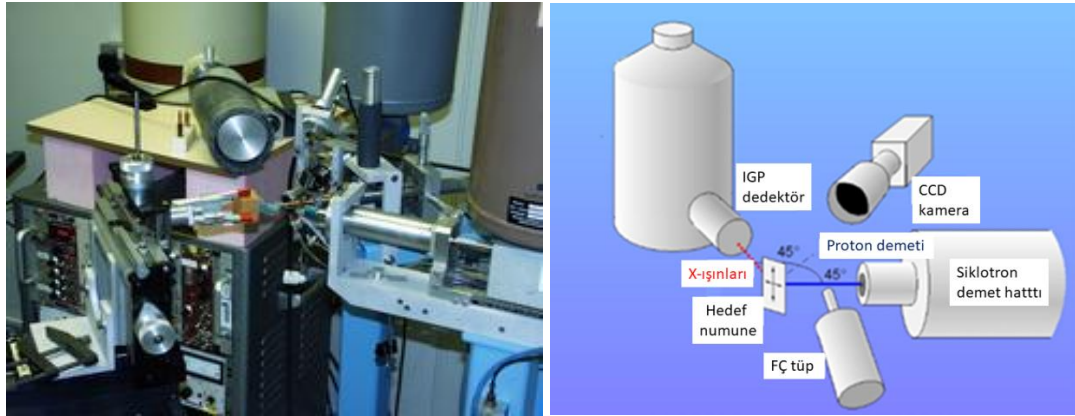
Hedef malzeme yüzeyinin proton demetiyle taranması sonucunda; (detektör katı açısı, verimi ve X-ışını yayılımı tesir kesiti gibi kritik parametreler bilindiği için) numuneden yayımlanan X-ışınlarının miktarının (şiddeti) tespit edilmesi durumunda öncelikle hedef yüzeyindeki elementel dağılım belirlenebilir. Sonuç olarak X-ışını yayılımının miktarı malzemede bulunan elementin yoğunluğu ile orantılıdır ve ppm mertebesinde belirlenebilir.

PIXE yönteminde (1-5) MeV enerjili proton demetleri kullanılarak,  $Z > 11$  olan elementlerin numune içerisindeki konsantrasyonları tahribatsız olarak analiz edilebilir. PIXE analizi genellikle 2-3 MeV proton demeti enerjilerinde yapılır. Çünkü bu enerjilerde karakteristik X-ışınlarının tesir kesitleri, sürekli X-ışınlarına nazaran daha yüksektir. 3 MeV'in altındaki enerjilerde ise karakteristik X-ışınlarının tesir kesiti, enerjiye bağlı olarak hızla düşer. Bu durum analiz verimini doğrudan etkiler. Kalın numunelerde ise protonların malzeme içerisinde enerjilerinin azalımının analiz sonucuna etkisi (gelen demetin enerjisine de bağlı olarak) ihmal edilemeyecek seviyededir. Bu sebeple 3 MeV ve altındaki enerjilerde çok ince malzemeler kullanılması nicel analiz bakımından yerinde olmaktadır (Ishii 2019). Bir diğer ifadeyle proton demetinin enerjisinden dolayı analiz edilecek numunenin kalınlığı ile ilgili bir kısıt bulunmaktadır. Örnek olarak 3 MeV enerjili bir proton, bakır malzemeye ancak 35  $\mu\text{m}$  kadar nüfuz edebilmektedir. Bu durumda analiz işlemi yapılırken genel olarak düşük atom numaralı çekirdeklerde K kabuğuna, ağır çekirdeklerde ise L kabuğuna ait karakteristik X-ışınlarından faydalanılmaktadır.



Söz konusu enerjilerin yanı sıra nispeten daha yüksek enerjili protonlarla PIXE yapmak da mümkündür. Artan enerji değeri ile birlikte bu defa ağır çekirdeklerin K kabuğundan karakteristik X-ışını yayımlama olasılıkları artmaktadır. Böylece numuneye gönderilen proton demetinin nispeten daha yüksek enerjili olması sayesinde, ağır elementlerin ve kalın malzemelerin analizlerini yapmak mümkün olabilmektedir. 30 MeV enerjili proton demeti bakır içerisinde 1,6 mm ye kadar ilerleyebilmektedir. Bu sayede bakır içerisinde 1 mm derinliğe kadar birçok elementin yayacağı K kabuğuna ait X-ışınları ölçülerek malzeme analiz edilebilmektedir.

Ayrıca daha yüksek enerjili protonların malzeme içerisinde saçılımı, enerji kaybı ve açısal dağılımı, düşük enerjili protonlara nazaran daha az olacaktır. Böylelikle gelen demetin ve dolayısıyla numunenin vakum altında bulunmasına gerek kalmaksızın, hava ortamında ışınlanarak yine hava ortamında analiz yapılması mümkün olacaktır. Abo Akademi Üniversitesi'ndeki (İngiltere) harici demet hatlı PIXE deney düzeneği sayesinde, 20 MeV enerjiye kadar proton demeti sağlayabilen MGC-20 siklotronundan elde edilen 3 MeV enerjili protonlarla biyolojik ve jeolojik numune analizleri yapılmaktadır (Şekil 2.10).



Şekil 2.10 Abo Akademi Üniversitesi (İngiltere) harici PIXE deney düzeneği ve şematik gösterimi

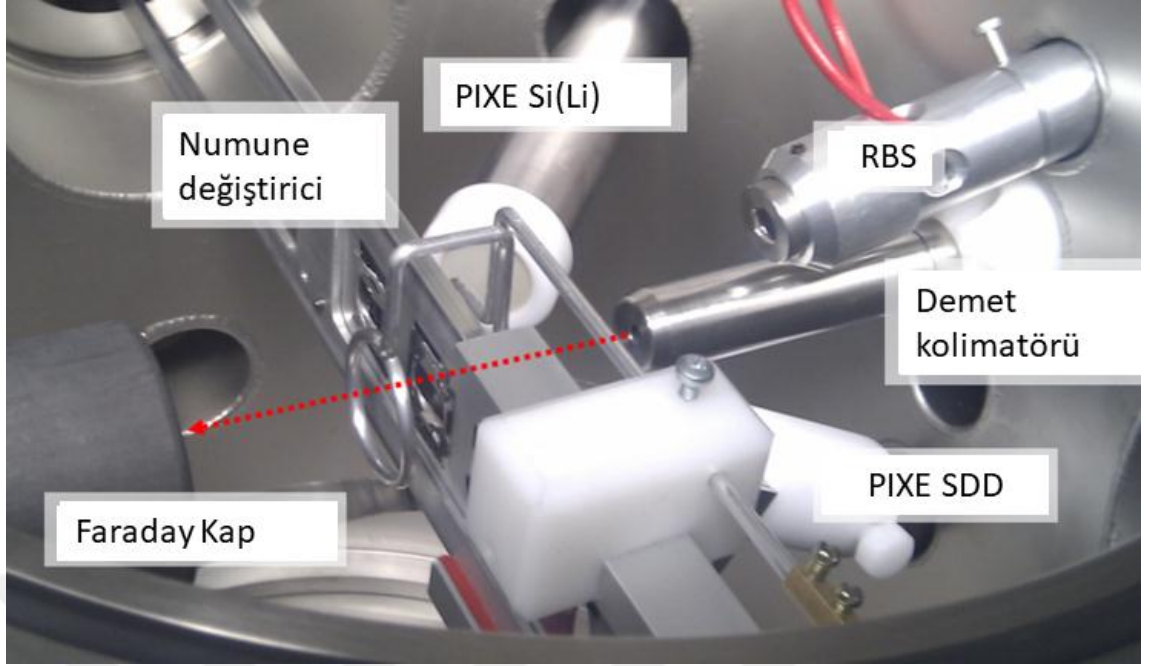
Jeolojide nadir toprak elementlerinin tayininde, arkeolojide özellikle korozyona uğramış ve yüzeyinde katman oluşmuş parçaların analizinde ve kalın örneklerin analizlerinde yüksek enerjili PIXE yapılması daha avantajlı ve kullanışlıdır. PIXE yönteminin uygulandığı önemli alanlar Çizelge 2.1'de verilmektedir.

Çizelge 2.1 PIXE yöntemine ilişkin önemli uygulamalar

UYGULAMA ALANI	AÇIKLAMA
<b>Biyomedikal uygulamalar</b>	Dermatolojik numune analizleri, nörobiyoloji
<b>Jeolojik uygulamalar</b>	Deniz suyu, tatlı su vb. analizleri, maden arama çalışmaları
<b>Arkeolojik uygulamalar</b>	Eski çömlek, papirüs, el yazması parçalarının incelenmesi
<b>Malzeme analizleri</b>	Katıhal fiziği ve elektronuğu (korozyon ve aşınma, tek kristal ya da yüzeylerin safsızlık ölçümleri vb.) ile diğer malzeme (saf metaller, katalitik malzemeler, asitler, seramik tabanlı süperiletken malzemeler vb.) analizleri, sodyumdan, uranyuma kadar pek çok element, nadir toprak elementleri

Bununla birlikte artan enerji değerleri PIXE analizinde bazı dezavantajları beraberinde getirmektedir. Yüksek enerjili protonlar ile numune ışınlandığında oluşan arka-plan (fon) dağılımı dedeksiyon limitini doğrudan etkilemektedir. Ayrıca oluşacak nükleer reaksiyonlardan dolayı hedef malzemenin radyo-aktivasyon durumu söz konusudur. Yine bu nükleer reaksiyonlar nedeniyle oluşacak ikincil gama ışınları ikincil bir iyonizasyona ve dolayısıyla istenmeyen X-ışını oluşumuna neden olacağından fazladan bir arka plan fonu daha getirecektir. Bu durumda dedektör penceresi, oluşacak radyasyona karşı 5 cm'lik bir kurşun zırhla korunarak, arka-plan dağılımı etkisi azaltılabilir. 100 MeV enerjili proton demetleri ile bazı arkeolojik eserlerin PIXE yönetimi ile analiz edilmesi sırasında; 10 MeV mertebesinde de bu analizin verimli olarak yapılabileceği görülmüştür. Zira söz konusu enerji seviyesinde X-ışınları spektrumuna arka fon olarak gelebilecek başlıca katkılar; yarı serbest elektron bremsstrahlung (quasi-free electron bremsstrahlung, 0-10 keV) ve ikincil elektron bremsstrahlung (secondary electron bremsstrahlung, 0-40 keV) olarak gözlemlenmiştir (Denker vd. 2004). Arka plan X-ışınları spektrumundaki maksimum enerji proton demeti enerjisinin artmasıyla birlikte artar.

PIXE yöntemi, özellikle yüksek çözünürlüklü (220 eV) Si(Li) dedektörlerin gelişimi ile birlikte önemli bir analiz yöntemi haline gelmiştir (Şekil 2.11). Söz konusu dedektör sistemi kalın (etli) yapısından dolayı Uranyum atomunun K seviyesine ait karakteristik X-ışınlarını dahi ölçebilmektedir. Ancak dedektörün çalışması için gerek duyulan sıvı azot soğutma sisteminden dolayı dedektör ebatları büyüktür (Johansson vd. 1995).



řekil 2.11 Ruđer Bořković Enstitüsü (Hırvatistan) vakum altında alıřan PIXE dözeneęi

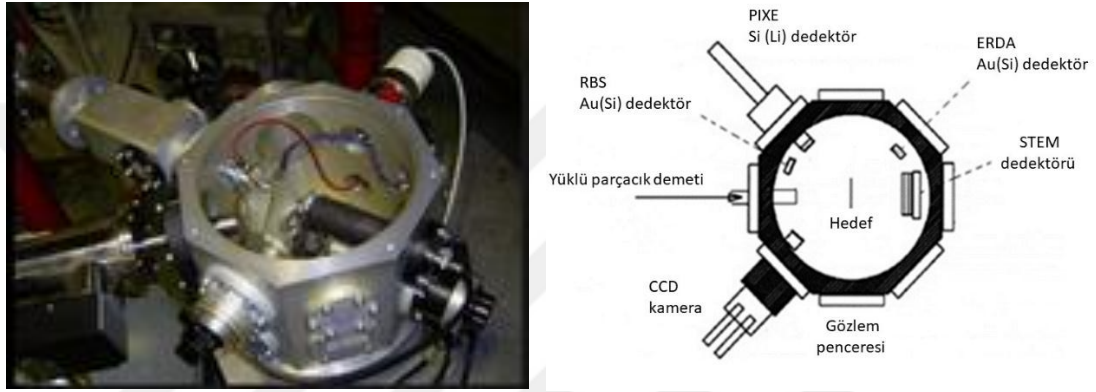
Yakın zamanda SSD (silicon drift detector)'lerin geliştirilmesiyle birlikte, 125-140 eV'lik çözünürlüğe sahip, küçük boyutlardaki sistemlerle, X-ışını tespiti yapılabilir hale gelmiştir (Ishii, 2019). Bu dedektörlerin dedeksiyon menzilinin 0,55 mm olması sebebi ile ağır çekirdekler için ölçüm verimi düşüktür. Bu sebeple yüksek atom numaralı çekirdeklerin tespiti ve analizi için CdTe dedektörlerin kullanımının daha uygun olduğu kanısı yaygındır.

Nispeten daha yüksek enerjili proton demetleri ile yapılan bir PIXE çalışmasında; iki adet X-ışını dedektörü, numune üzerine gönderilen proton demetinin geliş doğrultusu ile 135° açı yapacak şekilde yerleştirilerek kullanılmıştır (Denker 2004). Bu dedektörlerden birincisi 155 eV'lik çözünürlüğe sahip, 12,5 mm<sup>2</sup> etkili yüzeyi olan bir Si(Li) dedektördür. İkincisi ise 300 mm<sup>2</sup> etkili dedektör yüzeyine sahip, 180 eV çözünürlüklü (5,9 keV enerjili X-ışınları için) bir HpGe dedektördür. Analiz denemesi sırasında 0,1-1 pA'lık proton demetleriyle numune ışınlanmış ve 200 saniye süresince sayımlar yapılmıştır. Arka plan fon etkisini azaltmak üzere, X-ışını ölçüm dedektörü önüne 50 µm kalınlığında bir Be pencere yerleştirilmiştir. Doğal fonda oluşan X-ışını pikleri, doğal gama ışınlarından kaynaklanmaktadır.



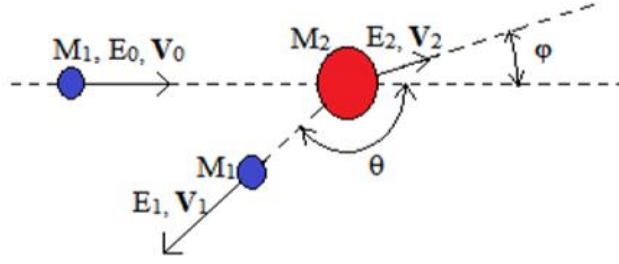
## 2.2.2 Rutherford geri saçılım spektroskopisi yöntemi

Rutherford geri saçılım spektrometresi (Rutherford Backscattering Spectrometry-RBS) protonların kullanıldığı bir diğer tahribatsız çoklu element analiz yöntemidir. PIXE'nin tamamlayıcısı olarak nitelendirilir ve donanım gereksinimi açısından benzerlikler göstermektedir. Aynı analiz düzeneğini (vakum çemberi, numune tutucu, elektronik vb.) kullanarak aynı anda hem PIXE hemde RBS yapmak mümkündür (Şekil 2.12).



Şekil 2.12 Cambridge Ulusal Araştırma Merkezi (İngiltere) PIXE/RBS odacığı ve şematik gösterimi

RBS analizleri çoğunlukla malzemenin kompozisyonu ve elementlerin malzeme içindeki dağılımının tespiti için kullanılmaktadır. Bu metotta bir vakum odacığı içerisinde gerçekleştirilen ölçümler analiz edilir. PIXE yönteminde yüklü parçacık demeti ile ışınlanan malzemedan yayınlanan X-ışınları tespit edilirken, RBS yönteminde dedektör doğrultusunda malzemedan geriye saçılan yüklü parçacık demetinin enerjisi ve miktarı tespit edilir. Fiziksel bir açıklamayla;  $M_2$  kütleli ve  $Z_2$  atom numaralı hedef çekirdekten, belli bir açıyla elastik olarak saçılan  $M_1$  kütleli ve  $Z_1$  atom numaralı yüklü parçacıkların ölçümü neticesinde, momentum ve enerjinin korunumu yasaları kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda analize yönelik bilgiler sağlanmaktadır (Şekil 2.13).



Şekil 2.13 RBS yönteminde enerji ve momentum korunumuna ilişkin şematik gösterimi

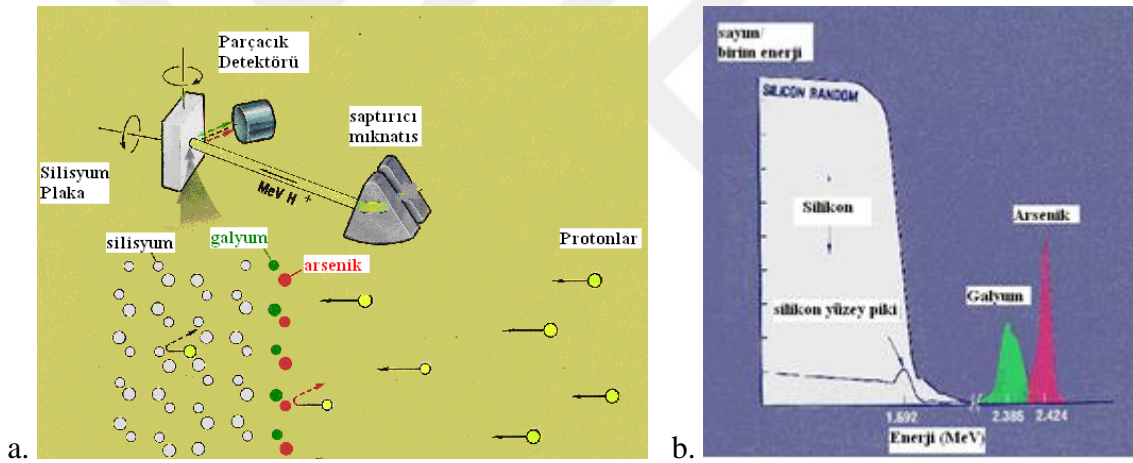
RBS yöntemi ile malzeme analizi, temel olarak aşağıda verilen eşitlik kullanılarak gerçekleştirilir. Burada “ $k_e$ ” değeri kinematik faktördür ve atomlar için ayırt edici bir özelliktir. “ $E_0$ ” gelen parçacıkların enerjisi, “ $\theta$ ” ise saçılma açısıdır.

$$E = E_0 k_e, \quad k_e = \left[ \frac{M_1 \cos \theta + \sqrt{M_2^2 - M_1^2 \sin^2 \theta}}{M_1 + M_2} \right] \quad 2.1$$

Hedef malzemenin çok ince olması durumunda saçılan parçacıkların enerjisi hedef malzeme atomunun çekirdeğinin kütlesine bağlıdır. Hedef malzemenin kalın olması durumunda ise hedefin kalınlığı da saçılan parçacıkların enerjisini etkileyen bir diğer parametre olarak dikkate alınmalıdır. Bu yöntemde gelen yüklü parçacık demetlerinin alfa,  $^{12}\text{C}$  veya  $^{14}\text{N}$  gibi daha ağır iyonlardan seçilmesi kütle ve derinliğe bağlı olarak çözünürlük hassasiyeti açısından avantaj sunmaktadır.

Söz konusu yöntemin bazı olumsuz tarafları bulunmaktadır. Bunlar yüklü parçacıklarla ışınlanan hedef malzemelerin tahribata uğraması ve kullanılan dedeksiyon sisteminin düşük performans göstermesidir. Proton demeti ile RBS yapmanın bazı avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Özellikle hafif çekirdeklerin analizinde protonlar alfa çekirdeklerine göre çok daha kullanışlıdır. Hafif çekirdekler için proton demetinin geri saçılma tesir kesiti, alfa parçacıklarından çok daha yüksektir. Bir diğer avantajı kalın malzemelerde daha fazla derine girebilme özelliğidir. Bunun yanında tesir kesitleri ile ilgili belirsizliklerin fazla olması nedeniyle, ağır çekirdekleri ayırmadaki performansının düşük olması protonun sahip olduğu dezavantajdır.

PIXE yöntemine nazaran RBS yönteminde; gelen yüklü parçacık sayısının iyi bir şekilde bilinmesi çok daha büyük önem arz etmektedir. Hedef malzeme içerisinde hafif atomların yoğun olması vb. durumlarda hafif atomlar, gelen parçacıklar üzerinde geriye saçılma etkisinden ziyade yavaşlatma etkisi yaratacağından, saçılan parçacıkların sayısını/ verimi etkileyecektir. Söz konusu etkinin iyi anlaşılabilmesi için, gelen parçacıkların sayısının doğru bir şekilde ölçülmesi önemlidir. RBS için 10-100 nA aralığındaki bir yüklü parçacık demeti akımı (dolayısıyla parçacık sayısı) analiz için tercih edilmektedir. RBS yönteminde gelen demetin çapının küçük olması saçılan parçacıkların katı açısı açısından önemlidir. Uygulamada 0,2 mm yarıçaplı demetler tercih edilmektedir. 3 MeV enerjili proton demetleri kullanılarak, RBS ve PIXE yöntemi vasıtasıyla numunelerin yapısındaki klor miktarı belirlenmiştir (Van IJendoorn vd. 1994).



Şekil 2.14 Si plaka üzerindeki GaAs tabakanın RBS yöntemi ile analizi: (a) Şematik gösterim (b) Saçılan parçacıklardan elde edilen enerji spektrumu

Bir elementten saçılan yüklü parçacık miktarı, elementin numunedeki bulunma sıklığı ile orantılıdır. Bu nedenle RBS yöntemi ile katı numunedeki her bir elementin derinlik profili nicel olarak elde edilebilir. Örneğin; analiz sırasında puls yükseklik analizörü ile ölçülen, Ga veya As elementlerinin varlığını temsil eden sinyalin pik genişliğinin, GaAs filminin kalınlığı veya bölgesel yoğunluğu ile orantılı olduğu söylenebilir (Şekil 2.14). Sonuç olarak çok katmanlı malzemelerin ve ince filmlerin yapısal analizleri için enerji/ derinlik arasında bir ilişki elde edilebilir. Genel olarak RBS yönteminin uygulama alanları Çizelge 2.2’de verilmektedir.

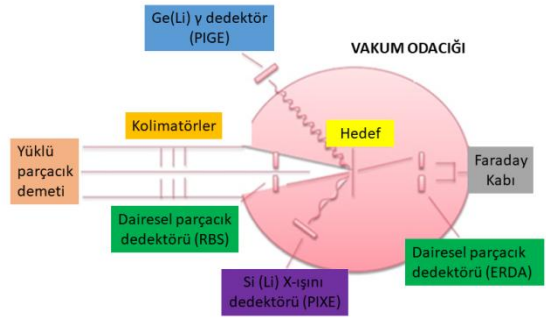
Çizelge 2.2 RBS yöntemine ilişkin uygulama alanları ve sağladığı avantajlar

UYGULAMA ALANLARI	AVANTAJLAR
Numunedeki elementlerin derinlik bilgisi (Kati numunelerdeki safsızlıkların derinlik profilleri elde edilir, ince filmlerin kalınlık ve kompozisyon analizleri)	Analiz için kullanılan derinlik çözünürlüğü iyi bir numune-detektör açısı ile 50 Å'e kadar düşürülebilmektedir.
RBS, X ışınlarının detektör penceresinde soğurulduğu hafif element analizlerinde PIXE yöntemini tamamlayıcı bir metottur	Çabuk analiz imkânı sunar. Normal bir analiz 10 dk'dan daha kısadır.
Ağır element analizleri için oldukça hassastır	X ışını spektroskopisinin aksine kolay bir biçimde kullanılabilir bilgi haline dönüştürülebilir. RBS spektrumu ve sistemin benzetim yeteneği sayesinde ölçüm parametrelerinin analizi kolaydır.

### 2.2.3 Parçacık uyarımlı Gama-Işını yayını yöntemi

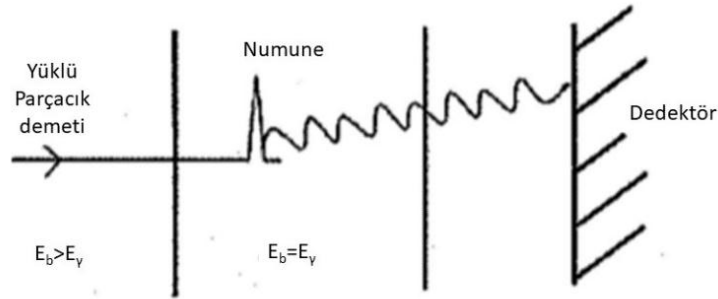
PIXE yöntemi bir malzemenin atom yapısı ve kimyasal bileşimi hakkında bilgi vermektedir. Buna karşın parçacık uyarımlı Gama-Işını yayını (Particle Induced Gamma-ray Emission-PIGE) gibi nükleer reaksiyona dayalı analiz yöntemlerinde düşük atom numaralı çekirdeklerin izotopik olarak analizi yapılabilmektedir.

PIGE yöntemi daha çok Li, F, Na, Mg ve Al gibi düşük atom numaralı ( $Z$ ) elementlerin, numune yüzeyindeki konsantrasyonlarını belirlemek için kullanılmaktadır. Ayrıca PIGE yöntemi ile  $^{13}\text{C}$ ,  $^{15}\text{N}$ ,  $^{18}\text{O}$ ,  $^{19}\text{F}$ ,  $^{22}\text{Ne}$ ,  $^{23}\text{Na}$ ,  $^{24}\text{Mg}$ ,  $^{26}\text{Mg}$ ,  $^{27}\text{Al}$  ve  $^{30}\text{Si}$  gibi izotopların malzeme içerisindeki derinlik profilleri belirlenebilmektedir (Wang ve Nastasi 2011). PIGE analizleri genellikle PIXE ve RBS teknikleri ile birlikte uygulanabildiğinden, bu üç teknik birbirinin tamamlayıcısı olan yöntemler olarak kabul edilmektedir (Şekil 2.15).



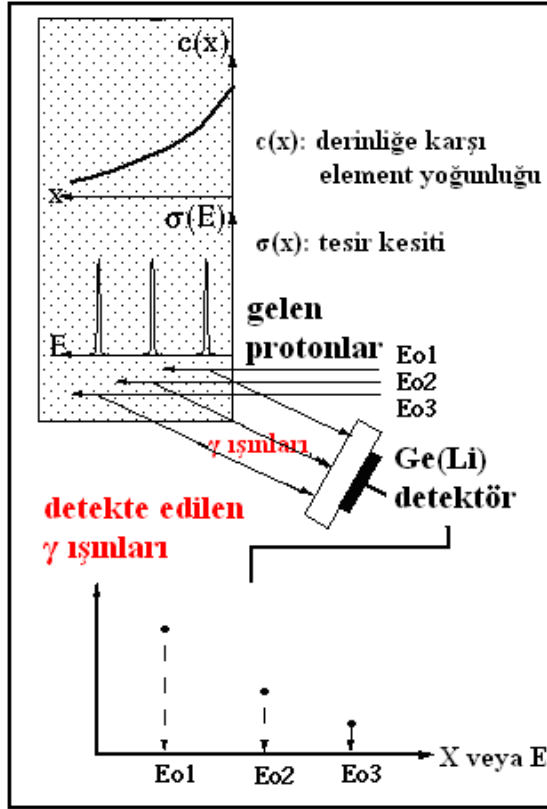
Şekil 2.15 Louisiana Hızlandırıcı Merkezi (ABD) PIGE/PIXE/RBS vakum odacığı ve şematik gösterimi

PIGE tekniğinde bir numunenin yoğunluk profili bilgisi, ( $p, \gamma$ ) reaksiyonları vasıtasıyla farklı proton enerjileri ve tesir kesitlerinden faydalanılarak dolaylı olarak elde edilebilmektedir. PIGE yönteminde yüklü parçacık (genellikle proton) hedef atomun çekirdeğine yaklaştığı sırada Coulomb kuvvetinin etkisiyle geriye doğru itilir. Şayet gelen parçacık Coulomb kuvvetini yenecek büyüklükte bir enerjiye sahip ise Coulomb engelinden geçerek, çekirdek içerisine nüfuz eder. Burada yaşanan etkileşim neticesinde gama ışını ve parçacık yayınımları ile sonuçlanan bir nükleer reaksiyon meydana gelir (Şekil 2.16).



Şekil 2.16 PIGE yönteminin prensibine ilişkin şematik gösterim

Hedef malzemeye gelen yüklü parçacıkların numuneye çarptığı anda oluşan gama ışınları eş zamanlı olarak tespit edilmektedir. Söz konusu yöntemdeki ölçüm tekniği oluşan ani gamaların sayımı prensibine dayanmaktadır. Bununla birlikte ışınlama neticesinde oluşan radyo-aktivasyonun (gama ışınlarının) ışınlama sonrasında sayılması ile de analiz yapmak mümkündür.



Şekil 2.17 PIGE yöntemi ile yoğunluk (derinlik) profilinin belirlenmesine ilişkin şematik gösterim

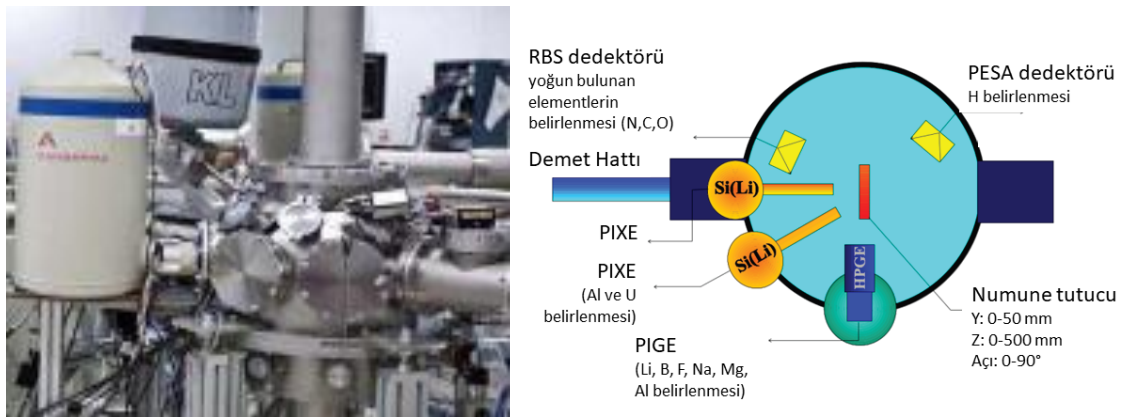
Hedef malzeme belli enerjilerdeki yüklü parçacıklarla ışındığında yüzey üzerinde oluşacak gama ışınlarının vereceği enerji spektrumu malzemenin kompozisyonu hakkında bilgi vermektedir. Bilindiği üzere yayınlanan her gama ışınının enerjisi yayınlandığı çekirdeğe özgüdür ve numunelerin elementel karakterizasyonu ile izotop karakterizasyonu çalışmaları için kullanılmaktadır. Söz konusu yöntemle belli bir derinliğe (uygulamada en fazla 50  $\mu\text{m}$ ) kadar derinlik profili elde etmek mümkündür. Şekil 2.17'den görüleceği üzere hedef üzerine gelen parçacıkların enerjisi ile malzemede oluşan gama ışınları arasında derinliğe bağlı olarak bir ilişki/orantı kurulmaktadır. Bu yöntemde gelen parçacıkların enerjilerindeki belirsizliğin düşük olması oldukça önemlidir.

PIXE yöntemi ile pek çok benzerliği olan PIGE analizlerinde daha büyük hacimli Ge(Li), NaI(Ti) ya da HPGe yarı-iletken detektörler kullanılmaktadır. Ge(Li) detektörlerin verimleri kötü, ancak çözünürlükleri (rezolüsyonları) oldukça iyidir. NaI(Ti) detektörlerin ise verimleri iyi, fakat çözünürlükleri kötüdür.

Söz konusu dedektörler standart gama kalibrasyon kaynakları kullanılarak kalibre edilmektedir. Gelen demetin enerjisinin kalibrasyonunda ise  $991.90 \pm 0,04$  keV [ $^{27}\text{Al}(p,\gamma)^{28}\text{Si}$  reaksiyonu] veya  $429.57 \pm 0,09$  keV [ $^{15}\text{N}(p,\gamma\alpha)^{12}\text{C}$  reaksiyonları sayesinde] rezonans enerjisi olarak kullanılmaktadır. Analizi etkileyecek başlıca etmenler ise dedektör verimi, rezonans enerjisi, tesir kesiti ve gelen parçacık akımı olarak dikkat çekmektedir.

#### 2.2.4 Protonla elastik saçılma analizi yöntemi

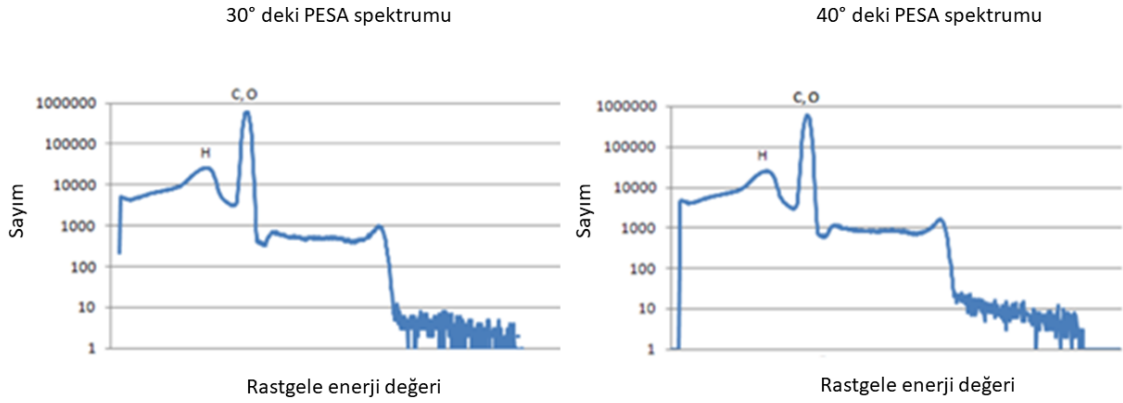
PIXE ve PIGE analiz yöntemleri vasıtasıyla birçok elementin nicel ve nitel olarak tayinini yapmak mümkün olmasına rağmen, hidrojen gibi hafif elementlerin analizini yapmak mümkün değildir. Bu sebeple ince yapı malzemeler içerisindeki hidrojen gibi hafif elementlerin analizleri için proton elastik saçılma analizi (Proton Elastic Scattering Analysis- PESA) yöntemi tercih edilmektedir. Bu yöntemde proton demeti ya da alfa parçacıkları hedef numunedeki hidrojen atomuna çarpıtıldığında, gelen demetin enerjisine bağlı olarak hidrojen atomları belli bir enerji ve doğrultuda saçılır. Bu yöntemde 2-5 MeV enerjili proton demetleri kullanılarak ve gelen demetin ilerleme doğrultusu ile 25, 30 ve 40 derecelik açılarla yerleştirilen silikon yüzeyli bariyer dedektör (silicon surface barrier detector) vasıtasıyla analiz yapılabilir (Şekil 2.18).



Şekil 2.18 Çekya Bilimler Akademisi Nükleer Fizik Enstitüsü PIGE/PIXE/RBS/PESA vakum odacığı ve şematik gösterimi



Temel olarak proton demeti hedef malzeme ile etkileştiğinde doğrudan durabilir ya da hedef çekirdeğin saçılmasına neden olabilir. Bu durumda enerji ölçüm dedektöründe iki ayrı pik gözlenir. Bu piklerden küçük olanı hidrojen atomuna, diğer pik ise araştırılan ağır çekirdeklere ait olacaktır (Şekil 2.19).



Şekil 2.19 Katı bir numunedeki H, C ve O elementleri için elde edilen örnek bir PESA spektrumu

Analiz sonucunda dedektörden elde edilecek verilerle numune içerisinde ne kadar hidrojen atomunun bulunduğu analiz edilmesi gereklidir. Bu yöntemde dedektör kalibrasyonu için, genellikle içerisindeki hidrojen atomu yoğunluğu bilinen Mylar folyolar referans malzeme olarak kullanılmaktadır. Hedef malzemeye gelen belli sayıdaki proton, hedef malzemedeki yine belli sayıdaki hidrojen atomu ile etkileşerek hidrojen atomlarının saçılmasına neden olur. Saçılan atomlardan dedektör doğrultusunda ilerleyenlerin algılanması analizi mümkün kılmaktadır. Söz konusu etkileşim saçılma tesir kesitiyle tanımlanır ve genel olarak birim katı açısına diferansiyel tesir kesitidir.

PIXE/ PESA yöntemlerinin birlikte uygulanacağı hedef ışınlama düzeneklerinde saçılma açısına bağlı olarak dedektör pozisyonlarının ayarlanması çok önemlidir. Gelen proton ile saçılan hidrojen atomu aynı kütleyle sahip olduğundan saçılma açısının değeri  $\pi/2$ 'den büyük olamayacaktır. Saçılma açısının sıfır olması ise enerji transferinin düşük olması anlamına geldiğinden, hedefteki farklı kütleli atomlar ile saçılan protonlar birbirinden ayırt edilemeyecektir. Saçılma açısının  $\pi/2$ 'ye yaklaşması durumunda ise teorik olarak saçılan parçacığın enerji çözünürlüğünün artması beklenirken, öte yandan



saçılan parçacığın alacağı yolun uzaması nedeniyle, enerjisi üzerinde bozulmalar yaşanabilecektir. Bu vb. hususlar göz önünde bulundurularak, deney odacığının tasarımı sırasında sağlayacağı kolaylıklar açısından PESA dedektörü için uygun yerleştirme açısı 45° olarak seçilebilir (Voltr vd. 1999).

## 2.2.5 Değerlendirme

Bilindiği üzere malzeme bilimi araştırmalarına yönelik proton demetleriyle yaygın olarak gerçekleştirilen yüklü parçacık demeti uygulamaları için gereken demet enerjisi, akımı ve benek boyutları genel itibarla TAEK PHT'deki Cyclone® 30 hızlandırıcısından elde edilen değerlerden daha düşüktür. Bu bağlamda TAEK-PHT Ar-Ge ışınlama odasında çalışılabilecek proton demetine dayalı olası yüklü parçacık demeti uygulamaları ve bunlara ilişkin literatürde rastlanan proton demeti enerjisi, akımı ve spot (benek) boyutu değerleri Çizelge 2.3'de paylaşılmaktadır.

Çizelge 2.3 Proton demetine dayalı olası yüklü parçacık demeti uygulamaları ve bunlara ilişkin uygulamadaki demet enerjisi, akımı ve demet spot boyutu değerleri

Uygulama	Demeti enerjisi, akımı ve demet spot boyutu isterleri
PIXE	1-4 MeV ve 1 $\mu$ A'lik demet, spot boyutu: 4 mm (IAEA, 2000)
	16 MeV ve 100 nA'lik demet, spot boyutu: 1 mm (Schmelmer, 2001))
	30-72 MeV ve birkaç pA'lik demet, spot boyutu: 1 mm (Denker, 2005)
	18 MeV ve birkaç $\mu$ A'lik demet, spot boyutu: 1 mm (Lo'pez, 2008)
RBS	1-2 MeV ve 10 nA'lik proton demetleri, spot boyutu: 1 mm (IAEA, 2000)
PIGE	2 MeV ve 5 nA'lik proton demetleri, spot boyutu: 3mm (Braccini, 2011)
	13 MeV ve birkaç $\mu$ A'lik proton demetleri, spot boyutu: 2 mm (Park, 2013)
PESA	2,7 MeV ve 2 nA'lik demet, spot boyutu: ~ 2 mm (Verma, 2018)

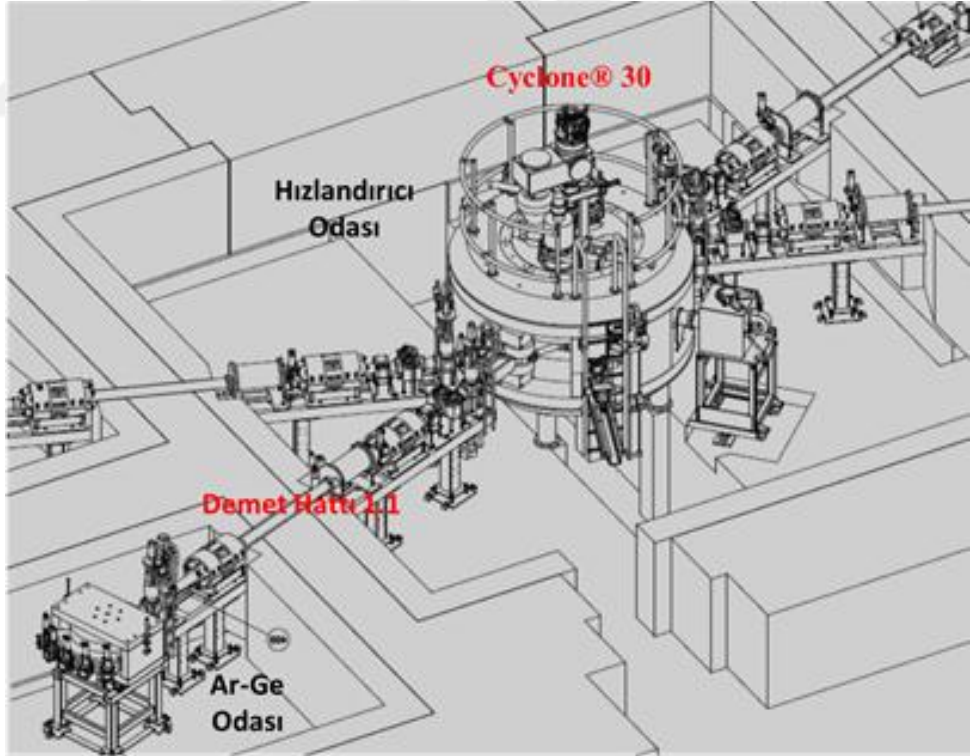
Söz konusu tekniklerden çoğu literatürde eş zamanlı olarak uygulanabilmektedir. Örneğin PIXE, PIGE, RBS ve PESA uygulamalarına yönelik düzenekler aynı deney istasyonunda kurulabilmektedir. Bunlardan PIXE ve RBS, birlikte hayata geçirilen en yaygın uygulamalardır (IAEA 2000).

Hedeflenen uygulamaları gerçekleştirmek için ihtiyaç duyulan demetin enerjisinin 1-5 MeV arasında değiştiği görülmektedir. TAEK-PHT'deki hızlandırıcı sisteminden mevcut durum itibarıyla elde edilebilen en düşük enerji değeri olan 15 MeV'den, söz konusu enerji değerlerine düşmek için enerji düşürücü plakalar kullanılabilir. Olabildiğince mono-enerjitik bir demet elde edilmesi önemlidir. Bunun için ilk aşamada saçıcı plaka ve kolimatör bütünleri kullanılabilir. Ayrıca gelen proton demeti düzgün bir dağılıma sahip olmalı ve demet içerisindeki protonlar birbiriyle aynı doğrultuda hareket etmelidir. Bu maksatla bir dizi kolimatör kullanılabilir. Demet akımı yaygın olarak  $< 100$  nA olacak şekilde tercih edilmektedir. Hedef üzerine gönderilen proton demetinin hedef noktasındaki akımı ve enerjisi hassas bir şekilde ölçülmelidir. Bu amaçla Faraday kabı çözümleri ve enerji ölçüm dedektörleri tercih edilmelidir. Düşük akımlı ve enerjili proton demetleri ile çalışılacağından deney istasyonu yeterince vakumlanabilmelidir. Detektörler sadece numunenin yüzeyinden çıkan karakteristik ışınları görüntülemeli ve buna uygun olarak konumlandırılmalıdır. Tercih edilecek dedektör sisteminin türüne bağlı olarak istenmeyen arka fon sinyallerini önlemek için filtreleme gereksinimi olabilecektir. Dedektör verimliliği ile hedef numunenin bazı özellikleri (kalınlık vb.) bilinmelidir. Deney/ışınlama odacığı içerisinde tüm geometrik parametreler (demet, numune ve dedektör arasındaki mesafeler ve açılar) küçük müdahalelerle yeniden düzenlenebilir olmalıdır.

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

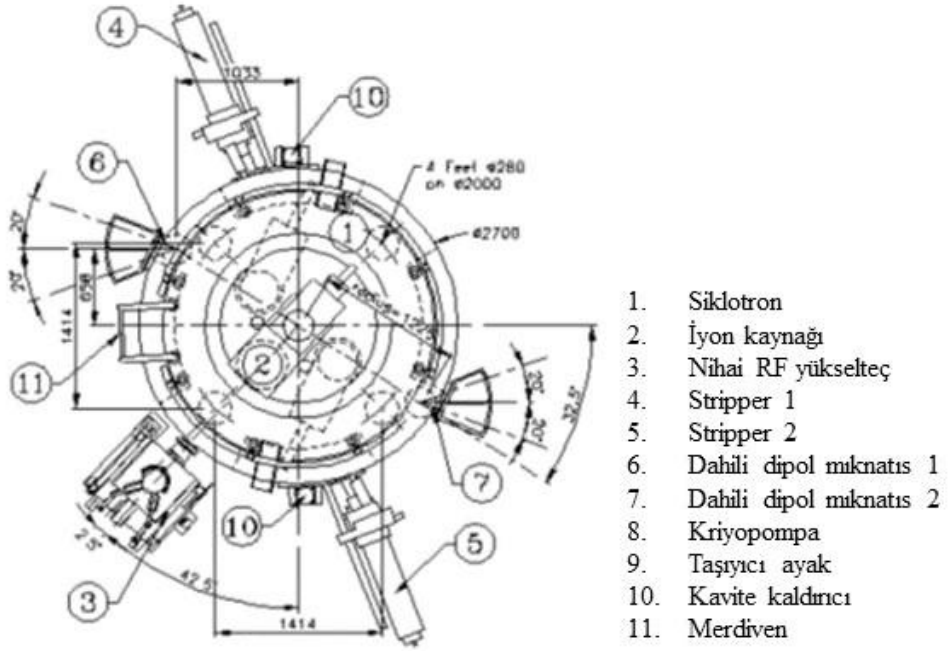
#### 3.1 Materyal

Tez konusuna esas tasarım çalışması sırasında; TAEK-PHT Hızlandırıcı Odasında yer alan hızlandırıcı ile hızlandırıcıdan elde edilen proton demetini Ar-Ge Işınlama Odasına ileten Demet Hattı 1.1 ile ilgili mevcut alt yapı esas alınmıştır. TAEK-PHT'nin merkezinde Ion Beam Application S.A Firması (Belçika) tasarımı olan Cyclone® 30 model siklotron tipi dairesel bir hızlandırıcı sistemi yer almaktadır. Söz konusu hızlandırıcı sisteminden enerjisi 15-30 MeV arasında, akım değeri ise 0,1  $\mu$ A-1,2 mA arasında ayarlanabilen proton demeti elde edilmektedir. Hızlandırıcı sistemi, üç tanesi üretim, bir tanesi ise araştırma amaçlı olarak kullanılan dört ana demet hattı vasıtasıyla, dört farklı ışınlama istasyonu ile bağlantılıdır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 Cyclone® 30 hızlandırıcısı ve Demet Hattı 1.1'e ilişkin şematik gösterim

TAEK PHT’de bulunan yüksek performanslı Cyclone® 30 model hızlandırıcı ve ana bölümleri Şekil 3.2’de, teknik özellikleri ise Çizelge 3.1’de verilmektedir.



Şekil 3.2 Cyclone® 30 hızlandırıcısının görünümü ve ana bölümleri (üstten bakış)

Çizelge 3.1 Cyclone® 30 hızlandırıcısının teknik özellikleri

Tipi	Siklotron
Model	Cyclone® 30
Tasarımcısı	Ion Beam Applications S.A (Belçika)
Toplam demet hattı sayısı	4
Demet çıkış noktası	2
Eş zamanlı demet sayısı	2
Hızlandırılan iyon türü	H <sup>-</sup>
Oluşturulan iyon türü	H <sup>+</sup>
Demet enerjisi	15–30 MeV, değişken
Demet akımı	Maksimum 1,2 mA, değişken
Ekstraktör	Karbon folyo
Normalize demet yayını	Yatay <15 mm.mrad, Düşey <10 mm.mrad
Enerji yayılımı	400 keV
Dee sayısı	2
Sektör sayısı	4
Kavite mıknatıs şekli	Deep Valley
Manyetik alan şiddeti değeri	0,12-1,7 Tesla
Toplam ağırlığı	Yaklaşık 50 ton
İyon kaynağı sistemi	Harici (multicusp)
Ana vakum sistemi	Kriyojenik pompa (4 adet) <10 <sup>-7</sup> mbar
RF sistemi	4 HM, 65,5 MHz, 50 kV'luk dee gerilimi
Maksimum güç tüketimi	150–180 kW (30 MeV ve 1,2 mA için)

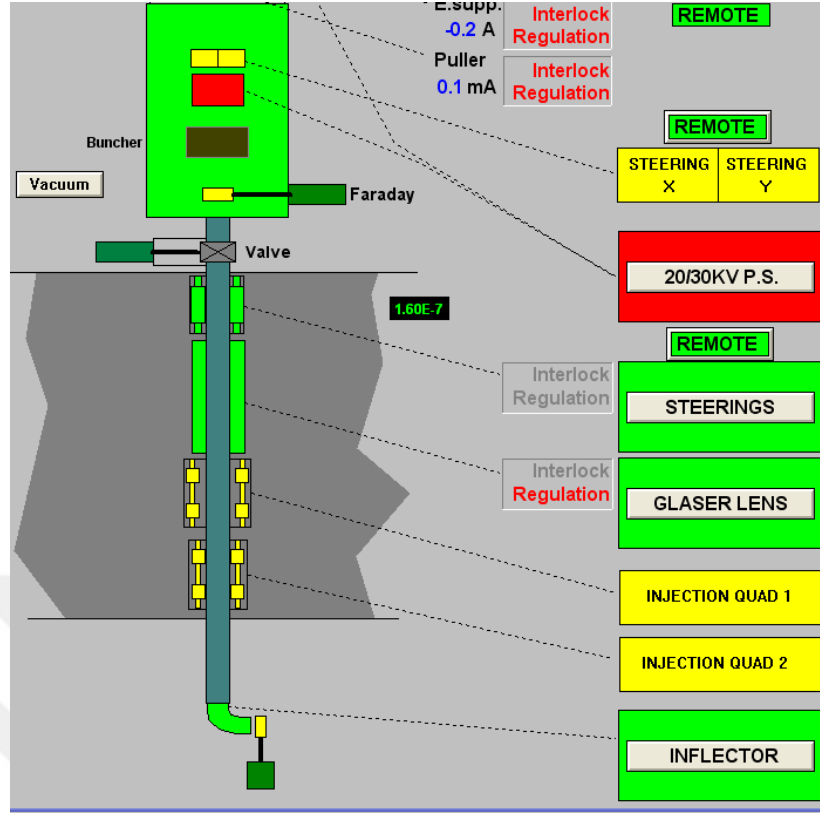
**İyon kaynağı sistemi;** Cyclone® 30 hızlandırıcısı harici çok kutuplu (multicusp) negatif iyon kaynağına sahip olup, söz konusu iyon kaynağı siklotron kavitesi içerisinde hızlandırılmak üzere H- iyonlarını üretmektedir. Bahsekonu iyon kaynağı D-Pace olarak bilinen (Kanada) tasarım ofisi tarafından tasarlanarak üretilmiş, sisteme entegrasyonu ise IBA S.A. tarafından gerçekleştirilmiştir. TAEK PHT'deki Cyclone® 30 modelinde ultraparlak (15 mA) kategoride kabul edilen bir iyon kaynağı mevcut olup, akım daha da yükseltilebilir özelliktedir (Şekil 3.3).



Şekil 3.3 Cyclone® 30 hızlandırıcısının harici (Multicusp) iyon kaynağı sisteminin görünümü

İyon kaynağı tantaldan yapılmış 4 adet flamanı sahiptir. Siklotron ve iyon kaynağı bir vakum valfi marifetiyle birbirinden ayrılmış durumda olup, iyon kaynağının öncül vakumu 2 adet mekanik pompa ile sağlanmaktadır. İyon kaynağı üzerinde üç ana elektrot (elektron baskılayıcı elektrot, plazma ızgarası ve 30-40 kV hızlandırıcı plaka) yer almakta olup, hidrojen plazması içerisinde  $H^+$  iyonlarını çekip çıkarmak (ekstrakte etmek) için optimize edilmiştir. Ark akımı, iyon kaynağından sağlanan akım değeri ile siklotron çıkışında elde edilen akım değerini dengelemek için, hızlı bir geri besleme döngüsü vasıtasıyla PLC tarafından sürekli izlenir. Tüm değerler hızlandırıcı operatörü gözlemlenmektedir.

**Enjeksiyon hattı;** İyon kaynağından elde edilen düşük enerjili  $H^+$  demetleri, hemen ardından gelen sistem olan enjeksiyon hattı içerisinde enflektöre doğru taşınır. Demet bu esnada bir yandan güçlü manyetik lenslerle odaklanırken, aynı zamanda demet zarfı siklotron hızlandırma kavitesi isteklerini karşılayacak şekilde ayarlanır. Demetin birincil hizalanması, enine demet dinamiği açısından X ve Y doğrultularında etki gösteren iki adet yönlendirici mıknatıs ile yapılır. Enjeksiyon hattında hem demet durdurucu ve hem de bir ölçüm ünitesi olarak kullanılan bir Faraday kabı mevcuttur. Ana RF sistemi ile irtibatlı olan bir paketçikleyici sayesinde yüklü parçacık demetinin bir rezonans dahilinde ön hızlandırması yapılarak, enjeksiyon verimliliğini ayarlanır (Şekil 3.4).



Şekil 3.4 Cyclone® 30 hızlandırıcısı HKS yazılımı üzerinden enjeksiyon hattının şematik gösterimi

Söz konusu enjeksiyon verimliliği % 12'lerden, % 25'e kadar yükseltilebilmektedir. Bu sayede iyon kaynağından elde edilen belli bir akım değerine sahip demet ile hedef üzerinde yüksek akımda sürekli çalışmak mümkündür. Son olarak Enjeksiyon Hattından aşağıya doğru hareket eden  $H^-$  demetleri hızlandırma işleminin yapılacağı siklotron kavitesine sokulurlar. Bu amaçla özel tasarımı iki adet elektrottan meydana gelen ve demeti hızlandırıcının merkezine yönlendiren, döndürücü ve eğici bir elektrostatik kanal olan enflektör sistemi kullanılmaktadır. Odaklanan iyonlar enjeksiyon hattının en altına kadar düşey olarak hareket ederler. Ancak iyonlar siklotron kavitesinin içerisinde yatay doğrultuda, spiral bir yörüngede hareket edeceğinden, enjeksiyon hattının en altına yerleştirilen bu enflektör aracılığıyla vasıtasıyla düşey durumdan yatay hale bükülürler. Enflektör, demeti yalnızca yatay düzlemde bükmekle kalmayıp, aynı zamanda kavitede izlenecek yatay spiral yörüngenin başlangıcına da yönlendirir. Enjeksiyon hattı, bir vakum valfi ile hızlandırıcının ana vakumundan izole edilmiş durumdadır. Enjeksiyon hattı iki adet turbomoleküler pompa (isteğe bağlı) ile vakumlanmaktadır. Demet, enjeksiyon hattı sonrasında siklotron merkezindeki ilk birkaç hızlandırma turundan



sonrasında pop-up olarak adlandırılan bir proba ulaşır. Söz konusu prob, iyon kaynağından elde edilen demetin, enjeksiyon ve hızlanma verimliliğini kontrol etmek için kullanılır. Şayet demetin enjeksiyon verimi istenen oranda değilse; bu prob üzerinden takip edilerek, iyon kaynağının, enjeksiyon hattının parametrelerinin kontrol bilgisayarı üzerinden ayarlanması ile optimize edilebilir.

**Mıknatıs bütünü ve hızlandırıcı kavitesi;** Enflektör sistemi üzerinden siklotron kavitesinin merkezine (median plane) aktarılan  $H^-$  demeti ana bobin sistemi tarafından oluşturulan bir manyetik-elektrik alan etkisinde kalır.  $H^-$  iyonları kavite merkezine girişten hemen sonra Dee olarak isimlendirilen elektrotlara uygulanan RF gerilimin yarattığı güçlü ve değişken elektrik alanlar vasıtasıyla, yerine göre itilerek veya çekilerek hızlandırılırlar (Şekil 3.5).

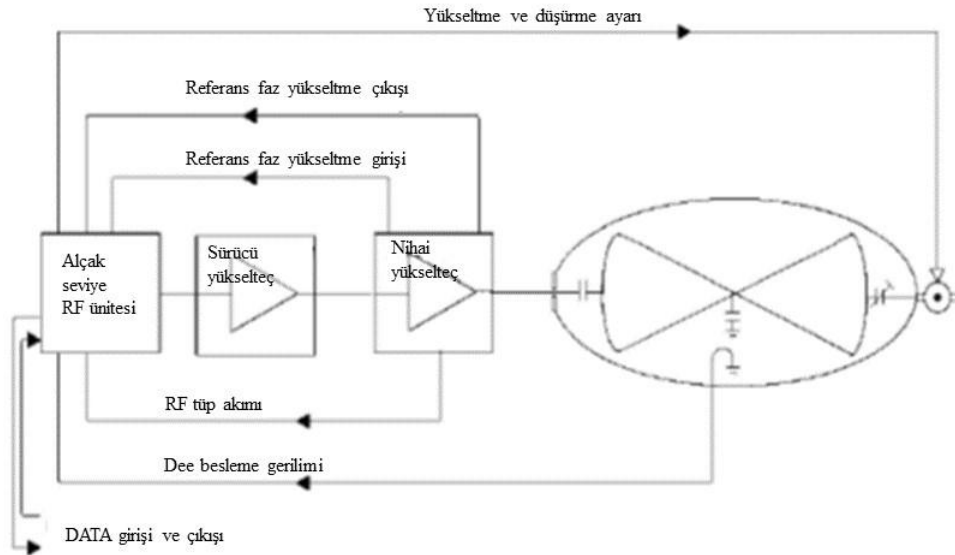


Şekil 3.5 Cyclone® 30 hızlandırıcısının üst ve alt kavitesi ve Dee'lerin görünümü



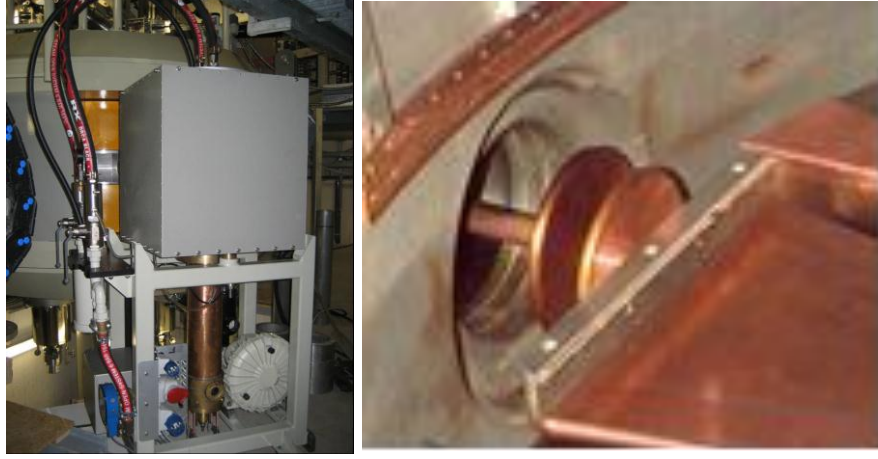
Hızlandırma sırasında negatif yüklü hidrojen demetleri Dee'lerden herhangi birine yaklaşmaya başladığında, Dee'nin voltajı pozitif'e değiştirilerek negatif yüklü demetlerin bu Dee tarafından çekilmesi sağlanır. Yüklü parçacıklar söz konusu Dee'yi geçtiğinde ise, bu sefer Dee'nin gerilimi negatife dönüştürülerek, aynı parçacığın itilmesi sağlanır. Hızlandırıcı kavitesinde Dee'lerin haricindeki bölgelerde yüklü parçacıklara net bir elektrik alan etkisi olmayıp, sadece eylemsizlik hareketi ve manyetik alan etkisinden kaynaklanan yörüngesel (dairesele) bir hareket söz konusudur. Parçacıkların hareketleri saat istikametinin tersi yönündedir. Cyclone® 30 hızlandırıcısında; 30'ar derecelik 2 adet Dee bulunmaktadır. Negatif yüklü hidrojen atomu demetleri, Dee ve karşı Dee olarak adlandırılan kısımlar arasındaki 4 farklı hızlandırıcı bölgeden her geçişlerinde, Dee'lere uygulanan RF hızlandırıcı geriliminin yarattığı elektrik alanın etkisi sayesinde dairesele hareketlerinin yarıçapları ile birlikte enerjilerini de arttırlar. Bu durum parçacıkların giderek hızlanmasına neden olur. Parçacıkların siklotron kavitesini bir defa dolanımı için geçen süre sabittir; çünkü yörünge hızı arttıkça alınan açısal yolda artmaktadır. Kavite içerisindeki metal gövdenin üst (tepe) bölümünde yüksek, alt (çukur) bölümünde düşük manyetik alan oluşturulabilen 4 kademeli derin vadi olarak adlandırılan yapısı (Şekil 3.5), hızlandırma işleminin boyunca yüklü parçacık demetinin odaklanmış bir şekilde bir arada kalmasını ve böylece demet kayıplarının minimum seviyede tutulmasını sağlar. Şayet siklotron kavitesi içerisinde bu şekilde kuvvetli bir manyetik alan olmasaydı; iyonlar ilk Dee'yi geçip belli bir miktar enerji kazandıktan sonra siklotronun iç duvarlarına çarparak saçılırlardı. Manyetik alan kuvveti ile merkezci kuvvet arasındaki denge, iyonların siklotron merkezi etrafında dairesele bir yörüngede dolmasını sağlar (senkronizasyon). Parçacıkların bu devirsel hareketinin sürekli olarak yönü değişen bir elektrik alanına bağlı olarak, eş zamanlı olması oldukça önemlidir. Dee'ler yukarıda bahsedildiği gibi negatif yüklü hidrojen atomu demetlerinin hareketine uygun olarak yüklenmezler ise hızlandırma yetersiz olacak, hatta aynı yükler birbirini iteçeğinden parçacıklar yavaşlayarak aksine enerjilerini kaybedeceklerdir. Elektrik alanın frekansı iyonun yörünge hızına eş olmak zorunda değildir. Ancak tam katı olmak zorunda olduğudur. Sonuç olarak vakumlu bir ortamda giderek hızlanan parçacık demeti, merkezden dışarıya doğru spiral bir yörünge izleyerek, hızını demet çıkış yarıçapına kadar en yüksek değerine çıkarır.

**RF sistemi;** RF sistemi, yüklü parçacık demetlerinin belli bir dolanım frekansı ile hızlandırılmasını temin eder. Başlangıçta RF sistemi, siklotron kavitesindeki Dee'lere kısa süreli olarak düşük güçlerde RF yüklemeleri yapar. Ancak daha sonra bu güç yüklemeleri, olağan çalışma için ihtiyaç duyulan RF gücüne ulaşılan kadar giderek yükselir. Cyclone® 30'un RF sistemi iyi bir frekans kararlılığına sahiptir. Bir frekans sentezleyici ile sayısallaştırılmış kontrol elektroniği içeren düşük seviye RF sistemi (LLRF), temelde bir ön sürücü yükselteci (5 kW) ile bir nihai yükselteci ve ilgili güç besleme sistemlerinden oluşur (Şekil 3.6). Cyclone® 30 siklotronunda demeti hızlandırmak için kullanılan nihai yükselteç 100 kW gücündedir. RF sistemi demetin hızlandırılabilmesi için siklotronun içinde bulunan zıt yüklü, iki adet düz, saf bakırdan yapılmış hızlandırıcı elektrot (Dee) üzerinden beslenir.



Şekil 3.6 Cyclone® 30 hızlandırıcısının RF sistemine ilişkin şematik gösterim

Nihai yükselteç, aslında bir katoda sahip tetrod tabanlı alüminyum bir yapıdır ve doğrudan siklotron kavitesine irtibatlıdır (Şekil 3.7). Bu nedenle güç aktarım mesafesi oldukça kısadır ve böylelikle güç yükseltecinden kaynaklı kararsızlıklar en aza indirilmiştir. Bu tür bir kuplaj sayesinde Dee'lere uygulanan voltaj sabit tutulur ve böylelikle RF sisteminin verimliliği tüm güç seviyelerinde en yüksek seviyededir.

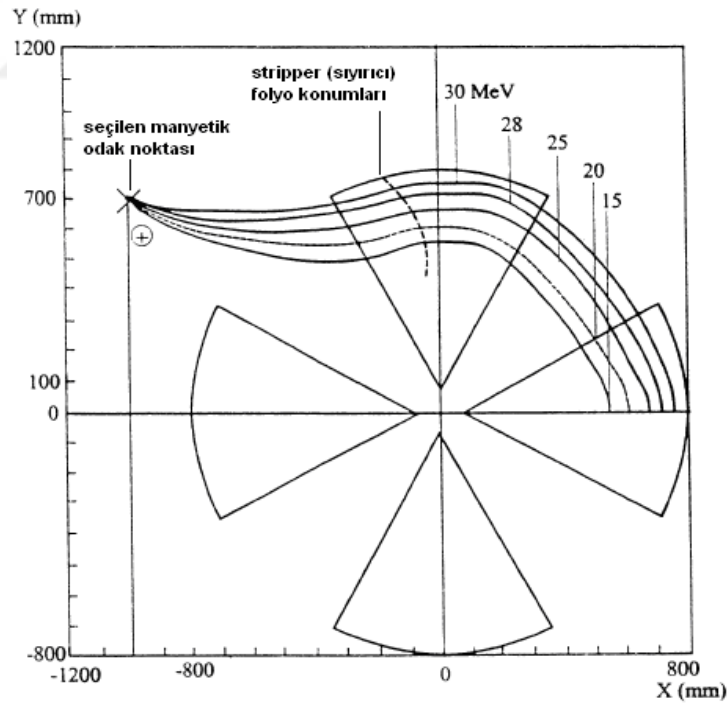


Şekil 3.7 Cyclone® 30 hızlandırıcısının RF nihai yükselteci (solda) ve hızlandırıcı kavitesi içerisindeki elektrot-dee kublajının (sağda) görünümü

Nihai yükseltecin RF giriş elektronik devresinin mevcut tasarımı, ayarlama ve eşleştirme ihtiyacını azaltacak şekildedir. Söz konusu iki Dee bölümü karşılıklı olarak vadi şeklindeki bir yarık ile irtibatlıdır ve siklotronun tam merkezinde birbirlerine bağlanırlar. Her bir Dee, aslında her biri yarım dalga rezonatör olan iki dikey gövde ile desteklenir. 30°'lik açılara sahip her iki Dee, parçacık dolanım frekansına bağlı olan dördüncü harmonik modda çalışır. Dee'lerin bağlı olduğu bakırdan yapılmış söz konusu derin vadi boşluklar hızlandırılan demetin ilerleme yolu üzerine çıkmaz. Dee'lerin düşük kapasitansı (derin vadi yapının bir diğer yararı) ve rezonatörlerin özel geometrisi, boşluk başına 5 kW kadar düşük bir RF güç paylaşımı ile yüksek voltaja çıkılması sağlar. Cyclone® 30'un RF yapısı, 50 kV Dee voltajı sağlamak için sadece 11 kW'lık bir RF gücüne ihtiyaç duyar. Buna ek olarak, Dee plakaları ve bağlı olduğu bakır duvarlar termal iletim ile soğutulur. Böylece siklotron kavitesi içerisinde su soğutma devresi olmadığından vakumu bozabilecek herhangi bir sızıntı riski de yoktur. Bu durum özetle daha az enerji tüketimi, daha düşük soğutma gereksinimi ve hızlandırıcı elektrotların iyi bir termal stabiliteye sahip olması vb. avantajları beraberinde getirmektedir. RF sistemlerinde; sıcaklık, demet akımı ve vakum seviyesi gibi parametrelerde çoğunlukla dalgalanmalar görülmektedir. Genelde sistem kendini bu koşullara göre otomatik olarak ayarlayabilmelidir. Cyclone® 30 RF sisteminin kalbini oluşturan düşük seviye RF elektronik devresi (LLRF) bu maksatla görev yapar. LLRF sistemi, RF sistemi frekansı ile Dee voltajının mükemmel bir şekilde uyumlu olmasını sağlayan bir MOPA (Master Oscillator Power Amplifier) tasarımına sahiptir. Bu sayede

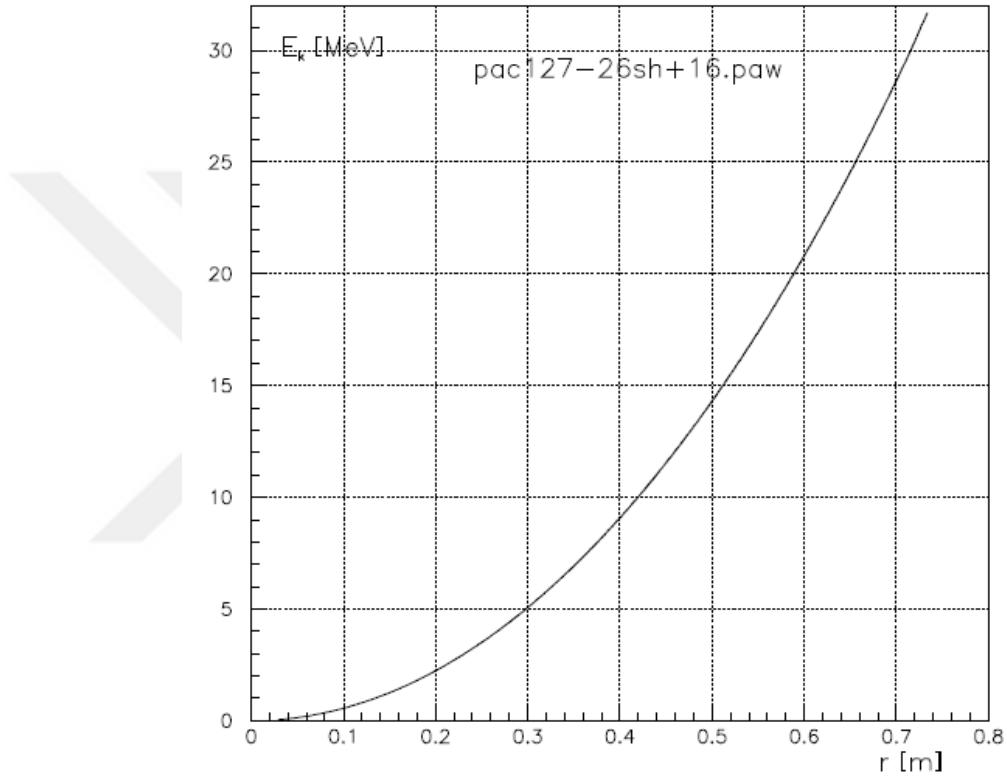
RF sisteminin, koşullandırma süresi kısadır ve karmaşık başlatma prosedürleri gerektirmez. Devre, bir mikro denetleyici ile denetlenir ve operatör konsoluyula sürekli bilgi alışverişi yapar. Voltaj, dalgalanma ve frekans okumaları görsel olarak izlenebilir. Bir sıcaklık dengeleyicisine sahip olan hassas frekans sentezleyicinde (osilatör kartı ve modülatör kartı) çok kararlı bir frekans kuvarsının kullanımı esas alınmıştır. RF güç sisteminin sürücü frekansı 65,5 Mhz'dir. LLRF sistemindeki diğer özel sistemler, spark (kıvılcım) önleyici, kavite mesafe ayar motoru kontrolcüsü, dalgalanma kontrolü için faz tespiti devresi ve RF tüpün akım regülasyon üniteleridir. Siklotron voltaj ve akım geri beslemesi de faz dengeleme vb. maksatlı olarak LLRF sistemine iletilir.

**Demet çıkış (ekstraksiyon) sistemi;** Siklotron kavitesi içerisinde merkezden dışarıya doğru spiral bir yörünge izleyerek hareket eden H<sup>+</sup> demetleri arzu edilen enerji seviyesine karşılık gelen çıkış yarıçapına kadar hızlandırılırlar. H<sup>+</sup> iyonları buralarda sıyırıcı karbon folyolara (stripper carbon foil) çarparlar (şekil 3.8).



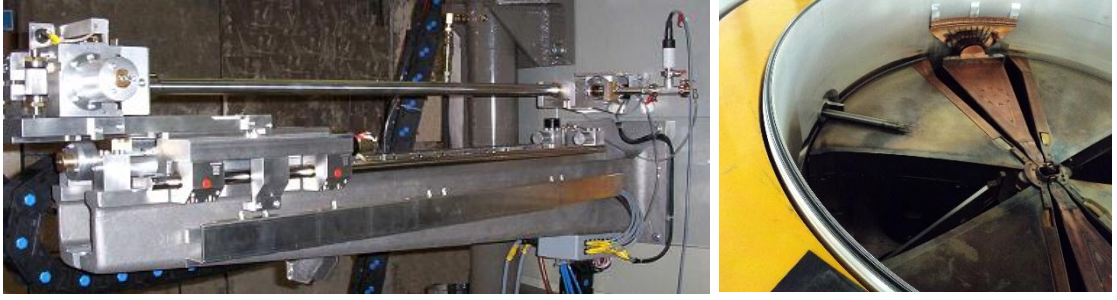
şekil 3.8 Cyclone® 30 hızlandırıcısının kavitesi içinde H<sup>+</sup> iyonlarının enerjilerine bağlı olarak yörüngelerini gösteren şematik gösterim

Burada karbon atomları ile esnek olmayan çarpışmalar yapan  $H^-$  parçacığından iki elektron sıyrılarak  $H^+$  parçacığı (proton) elde edilir. Söz konusu sıyrıcı folyolar siklotron kavitesinin merkez düzleminde, minimum (iç) ve maksimum (dış) yarıçaplar arasında, belli radyal mesafelere karşılık gelecek şekilde bir çubuk (rod) vasıtasıyla yerleştirilirler. Stripper çubuğun hızlandırıcının merkezine göre olan radyal pozisyon/ mesafe ayarı parçacık demetlerinin çıkış enerjisini belirler (Şekil 3.9).



Şekil 3.9 Cyclone® 30 hızlandırıcısının kavitesi içinde  $H^-$  iyonlarının ortalama yörünge yarıçaplarının değişime karşılık kinetik enerji değişimi

Cyclone® 30 hızlandırıcısında iki adet stripper (çubuk) sistemi bulunmaktadır. Bu nedenle aynı anda iki parçacık demeti elde edilebilmektedir. Hızlandırıcının ekstraksiyon sisteminin bu özelliği sayesinde birbirine göre  $180^\circ$  açı veya vev yapan iki demet hattına aynı anda proton demeti yönlendirilebilmektedir. Böylelikle iki demet hattında aynı anda, aynı enerjilerde fakat paylaşılan akım değerlerinde ışınlama yapmak mümkündür (Şekil 3.10).



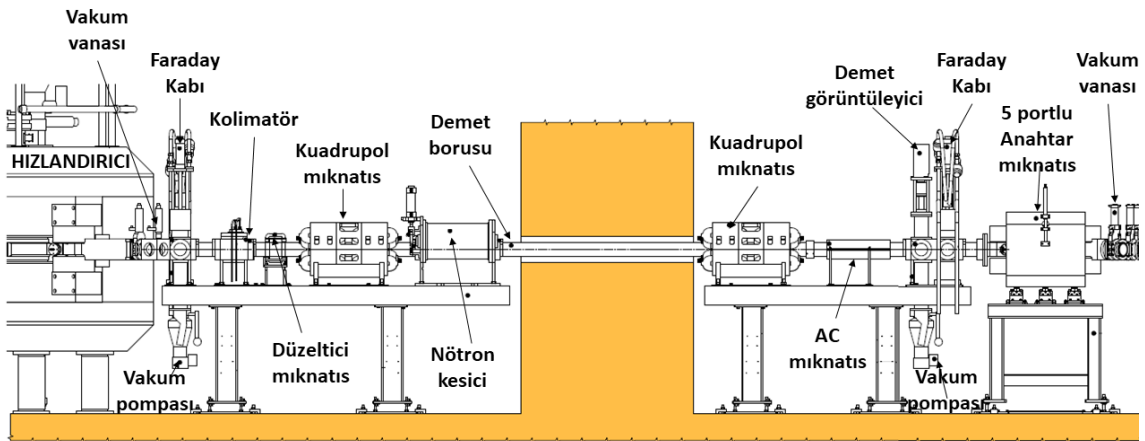
Şekil 3.10 Cyclone® 30 hızlandırıcısının stripper (çubuk) sisteminin dışarıdan ve kavite içinde görünümü

Büyük yarıçap parçacık demetlerinin hızlandırılabilceği daha yüksek enerji anlamına gelmektedir. Çıkış (ekstraksiyon) noktasında parçacık yükünün negatiften pozitifte değişmesi; parçacıklar üzerine etkiyen eğici kuvvetin yönünü değiştirerek, bu sefer parçacığın dışarıya doğru bükülmesini sağlar. Böylece parçacıklar siklotron kavitesindeki demet çıkış noktasına doğru aynı kuvvet büyüklüğü ile (parçacık üzerine etkiyen manyetik alan ile onun oluşturduğu kuvvetin büyüklüğü sabittir) bükülerek ilerler (Şekil 3.11).  $H^+$  demetleri bu doğal bükülmeye birlikte, çıkış noktasından itibaren bir dipol mıknatısın etkisinde kalarak odaklanmış halde kavite dışarısına alınırlar. Buradan sonra  $H^+$  demeti vakum altındaki bir port üzerinden kullanılacağı ana demet hattına aktarılır.



Şekil 3.11 Cyclone® 30 hızlandırıcısının kavite içindeki demet çıkış noktasının (solda) ve demeti kavite dışına bükten dâhili dipol mıknatısın (sağda) görünümü

**Demet Hattı 1.1;** Hızlandırıcıdan elde edilen demeti bir başka konuma emniyetli bir şekilde taşıyabilmek için demet (iletim) hattı olarak adlandırılan ve vakum altında çalışan sistemler kullanılmaktadır. TAEK-PHT'deki Demet Hattı 1.1; Ar-Ge maksatlı çalışmalar için ayrılmış olup, Cyclone® 30'dan elde edilen demeti Ar-Ge ışınlama odasına iletmektedir. Şekil 3.12'de ana bölümleri gösterilen Demet Hattı 1.1 sırasıyla; 1. vakum izolasyon vanası, 1. Faraday kabı (Faraday cup), drum kolimatör, düzeltici mıknatıs, 1. kuadropol mıknatıs (quadrupole magnet), nötron kesici (neutron shutter), 2. kuadropol mıknatıs, AC mıknatıs, demet görüntüleyici (beam viewer), 2. Faraday kabı ve 2. vakum izolasyon vanasından meydana gelmektedir. Son olarak hattın sonuna farklı uygulamaları gerçekleştirebilmek üzere monte edilen aslında bir dipol mıknatıs olan 5 adet çıkış portuna sahip anahtar mıknatıs (switching magnet) mevcuttur.



Şekil 3.12 Demet Hattı 1.1'e ilişkin şematik gösterim ve ana bileşenleri

Yüklü parçacık demetlerinin bir demet iletim hattında en az kayıpla iletilebilmesi için demet iletim hattında  $10^{-6}$  Torr'luk bir vakum değerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle demet hattının vakum sistemi başlangıç (öncül) vakumu ( $10^{-2}$  Torr) sağlayan iki adet mekanik pompa ile nihai (istenen) vakum seviyesini sağlayan iki adet yağ difüzyon pompasından oluşmaktadır. Demet hattının vakumunu hızlandırıcıdan ayırmaya yarayan bir adet vakum izolasyon vanası bulunmaktadır. Kontrol sistemi, demet iletimi için ihtiyaç duyulan vakumun başlatılmasını ve vakum seviyesinin takibini yapar. Bu maksatla ilk olarak; vakumlanması gereken demet iletim hattı, diğer bölümlerden izole edilir. Bu işlem sırasında hızlandırıcı ile demet hattı ve

deney/ çalışma istasyonları arasındaki vakum valfleri kapatılır. Demet hattı bu şekilde izole edildikten sonra çalışmaya başlayan mekanik pompalar, vakum seviyesini  $10^{-2}$  değerine düşürür. Bu seviyeden sonra yağ difüzyon pompası devreye girerek,  $10^{-6}$  Torr'luk vakum seviyesine inilir. Diğer bölgelerde de hemen hemen aynı vakum değerine ulaşıldığında izolasyon valfleri açılarak demetin iletim hattına aktarımına izin verilir.

Demet iletim hattındaki bir diğer donanım da demetin yolunu tümüyle kapatacak şekilde Pnömatik olarak indirilip kaldırılabilen Faraday kabıdır. Gerektiği durumlarda üzerinde su soğutma kanalları bulunan bakır malzemeden yapılmış olan bu donanım, aynı zamanda demetin akımını da ölçer. Faraday kabı demetin akım değerinin ölçülmesinin haricinde demeti durdurmak (beam stopper) içinde kullanılmaktadır. Demet hattı 1.1 üzerindeki 2 adet Faraday kabı mevcut olup, her biri 15 kW'lık bir soğutma kapasitesine sahiptir. Bu ise 30 MeV enerjide 500  $\mu$ A'lık bir demetin ihtiyaç duyulduğunda önlenebileceği anlamına gelir.

Demet hattındaki yer alan X/Y (iki adet) düzeltici/hizalayıcı (steering) mıknatıslar, demetin, kuadrupol mıknatıslara ulaşmasından evvel, düşey ve yatay doğrultulardaki pozisyon hatalarını düzelterek, iyi bir merkezlemeyle kuadrupol mıknatıslara girmesini sağlar. Bu düzeltmeler çok küçük değerlerdedir ve ancak yine de yapılmalıdır.

İletim ve yönlendirme işleminin doğasındaki fiziksel etkiler nedeniyle demet yapısında yaşanan bozulmalar odaklayıcı manyetik elemanlarla düzeltilir. Bu maksatla ikili (doublet) veya üçlü (triplet) örgü (lattice) yapılarına kuadrupol mıknatıslar kullanılmaktadır. Demet Hattı 1.1'de iki adet dublet kuadrupol mıknatıs bulunmaktadır. Bu örgü sayesinde demetin uzun mesafelere taşınması mümkündür. Hızlandırıcıdan elde edilen demet, Demet Hattı 1.1 üzerinden 6 m mesafeye kadar çıkış parametreleri muhafaza edilerek iletilebilmektedir.



Yüklü parçacık demetinin transferinin gerçekleştirildiği demet iletim hattındaki nötron engelleyiciler, aslında ne bir demet diyagnostiği ekipmanı, ne de bir kontrol ekipmanı olup, tamamıyla personel ve donanım güvenliğini için kullanılan bir bileşendir. Bor katkılı polietilenden malzeme içeren nötron kesiciler aynı Faraday Kaplarda olduğu gibi pnömatik olarak demet iletim yolu üzerine indirilirler ve demet hattında, demetin bir cidara çarpması vs. etkiler nedeniyle oluşabilecek nötronları soğururlar. Söz konusu nötron engelleyiciler, hızlandırıcı çalışırken ana demet hatlarında meydana gelebilecek nötron akısının, personelin bakım vb. durumlar için bulunabileceği ancak herhangi bir ışınlamanın olmadığı yerlere nüfuz etmesini önler. Bu maksatla ışınlamanın yapıldığı ışınlama odasının kapılarıyla, kontrol sistemi üzerinden irtibatlıdır ve kapılardan birisinin açık olması durumunda kendiliğinden devreye girer.

Bir demet iletim hattı boyunca demetin spot buyutunun ve hizalamasının görsel olarak izlenmesinin gerektiği durumlar bulunmaktadır. Bunun için demet görüntüleyici (beam viewer) olarak adlandırılan sistemler kullanılır. Yapı itibarıyla Faraday kabına çok benzemekle birlikte, durdurucu bakır yüzey üzerinde proton demetinin çarpması ile ışın yapan bir alümina malzeme bulunur. Bu sayede demet iletim hattında düşük akımlarda demetin pozisyon ve şekillenim bilgisi elde edilir. Demet Hattı 1.1 üzerinde 2 kW'lık kapasiteye sahip bir adet demet görüntüleyici yer almaktadır.

**Anahtar mıknaıtıs;** Bunların haricinde çoğunlukla demet iletim hatlarının sonuna yerleştirilen anahtar (switching) mıknaıtıslar demet hatlarındaki bir diğer önemli enstrümantasyondur. Gerçekte tek bir girişı fakat birden fazla çıkışı olan bir dipol mıknaıtıs türüdür. Gelen demet, anahtar mıknaıtısın bobinlerine uygulanan akım değerine bağlı olarak oluşturulan manyetik alanın yarattığı kuvvetin büyüklüğü oranında tek bir ara yüz ile istenen çıkışa doğru bükülebilmektedir. TAEK-PHT'deki Demet Hattı 1.1'in sonunda 5 çıkış portuna sahip bir anahtar mıknaıtıs monte edilmiştir. Bu sayede gelen demet  $-40^{\circ}$ ,  $-20^{\circ}$ ,  $0$ ,  $20^{\circ}$  ve  $40^{\circ}$ 'lik açılarla istenen çıkışa doğru yönlendirilebilir.

### 3.2 Yöntem

Malzeme bilimi araştırmalarına yönelik olarak özellikle proton demetleri kullanılarak yaygın bir şekilde başvuru olan yüklü parçacık demeti uygulamalarındaki demet enerjileri, akım değerleri ve spot (benek) boyutları, TAEK PHT'deki siklotronun elde edilen değerlerden düşüktür. Çalışma sırasında belirtilen bu gereksinimi karşılayacak bir çözüme ilişkin olarak çalışılmıştır.

Çalışmanın başlangıç aşaması olarak; TAEK-PHT'de gerçekleştirilebileceği düşünülen ve benzer tesislerde hayata geçirilmiş bulunan, TAEK-PHT'de elde edilen proton demetinden nispeten daha düşük enerjili ve çok daha düşük akımlı demetlerle yapılan yüklü parçacık demeti uygulamaları incelenmiştir. Anılan çerçevede bu uygulamaları gerçekleştirebilmek için ihtiyaç duyulan demet parametrelerinin (demet spot boyutu/ emittansı, demet enerjisi ve demet akımı vb.) neler olduğu ve aynı zamanda bunların hangi yöntemlerle belirlenmeye veya hesaplanmaya çalışıldığı araştırılmıştır.

Bu bağlamda enine demet dinamiği açısından oldukça önemli olduğu tespit edilen demet spot (benek) boyutu ve demet yayını (emittans) parametrelerinin Demet Hattı 1.1 üzerinde belirlenmesine yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Söz konusu çalışmalar sırasında Kuadropol Tarama/Varyasyon (Quadrupole Scan/Variation) olarak adlandırılan yöntemden faydalanılmıştır (Forc 2011). Yöntemin uygulanması sonucunda demet hattı üzerinde proton demeti için elde edilen veriler görüntü analiz/işleme amacıyla açık kaynak erişimli bir program olan Fiji Beam Profiler (NIH Image. 2016) yazılımı ile analiz edilerek, ulaşılan sonuçlar paylaşılmıştır.

Bir diğer önemli parametrenin demet enerjisi olduğu görülmüş ve bunun doğru bir şekilde belirlenmesi üzerine çalışılmıştır. TAEK-PHT'deki hızlandırıcıdan elde edilen demetin enerjisi; Hızlandırıcı Kontrol Sistemi (HKS) üzerinden, hızlandırıcının tasarım parametrelerine dayalı bir algoritmayla hesaplanmakta olup, gerçek zamanlı bir ölçüm yapılmadığından teyide muhtaçtır. Bu sebeple demetin siklotron çıkışındaki enerji bilgisinin (15-30 MeV) Demet Hattı 1.1'in sonunda deneysel olarak

belirlenmesine çalışılmıştır. Bu maksatla proton demetinin enerjisine bağlı olarak durdurma gücünün hesaplanmasını esas alan “birbiri ardı sıra gelen folyo aktivasyon (stacked foil activation)” yönteminden faydalanılmıştır. Bu yöntem ile yapılan çalışmaları destekleyen yüklü parçacık menzil ve etkileşim hesaplamalarında SRIM/TRIM benzetim programından faydalanılmıştır (Ziegler 2000).

Bir diğer önemli demet parametresi siklotrondan elde edilen proton demetinin akımıdır. Söz konusu akım değeri HKS üzerinden izlenebilmektedir. Ancak mevcut HKS sisteminin ölçüm kabiliyetindeki sınırlamalar nedeniyle en düşük akım değeri olarak 0,1  $\mu\text{A}$  okunabilmektedir. Ancak çok daha düşük akımlı uygulamalara hizmet etmesi hedeflenen bir proton demetinin elde edilmesi amaçlanmaktadır. TAEK-PHT’deki hızlandırıcının iyon kaynağı parametreleri ile hassas ayarlamalar yapılarak düşük akım seviyelerine (pikoamper) inilebileceği bilinmekle birlikte, söz konusu seviyelerdeki akım değerlerini doğru olarak ölçülebilecek bir sistem bulunmamaktadır. Bunun için oldukça hassas elektroniğe sahip yeni bir Faraday kabı tasarlanmıştır. Yeni Faraday kabı yapılan tasarıma göre mevcut atölye yetenekleri dâhilinde üretilmiştir. Daha sonra Faraday kabı ve hassas elektronik sistemi Demet Hattı 1.1’in sonuna monte edilmiştir. Labview programı (National Instruments 2019) kullanılarak oluşturulan kontrol ara yüzü sayesinde birkaç nanoamper ve hatta pikoamper seviyesindeki akım değerleri gerçek zamanlı olarak kararlı bir şekilde ölçülebilmektedir.

TAEK-PHT’deki hızlandırıcıdan elde edilen demetin Demet Hattı 1.1 üzerinde ve sonundaki parametrelerinin belirlenmesinin ardından, düşük akım ve enerji gerektiren ve arzu edilen malzeme ışınlama, test ve (yüklü parçacık) analiz çalışmalarına hizmet edecek, demeti arzu edilen parametreler dâhilinde taşınımını sağlayacak düzeneğin tasarımına başlanmıştır. Tasarım çalışmaları sonucunda mevcut Demet Hattı 1.1 (Ar-Ge Demet Hattı) devamında yer alacak alt demet iletim hattı ile onun hemen sonundaki ışınlama istasyonunun hangi alt sistem ve bileşenlerden meydana gelmesi gerektiği belirlenmiştir. Buna göre söz konusu düzenek (özgün bir demet hattı ile deney istasyonu) temel olarak, bir enerji düşürücü sistem, bir enerji ölçüm sistemi, kolimatör sistemi, ışınlama odacığı ve bir Faraday kabından oluşmaktadır. Tasarım çalışmaları

sırasında yüklü parçacık-malzeme etkileşimin önem arz ettiği durumlarda FLUKA (Ferrari 2005) ve CST (CST Studio Suite 2019) benzetim programları kullanılarak tasarım belirginleştirilmiştir. Bu çalışmalar neticesinde alt sistemlerde farklı konfigürasyonlar esas alınarak, elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı bir şekilde tablo ve grafikler halinde paylaşılmıştır. Netice itibariyle belirlenen en uygun konfigürasyona ilişkin sonuçlar paylaşılmıştır. Tasarım çalışmalarının sonunda demet hattı-deney istasyonu bütünüünün yukarıda bahsedilen alt bileşenlerine yönelik üç boyutlu katı modeller Inventor Programı (Autodesk 2020) kullanılarak oluşturulmuştur.



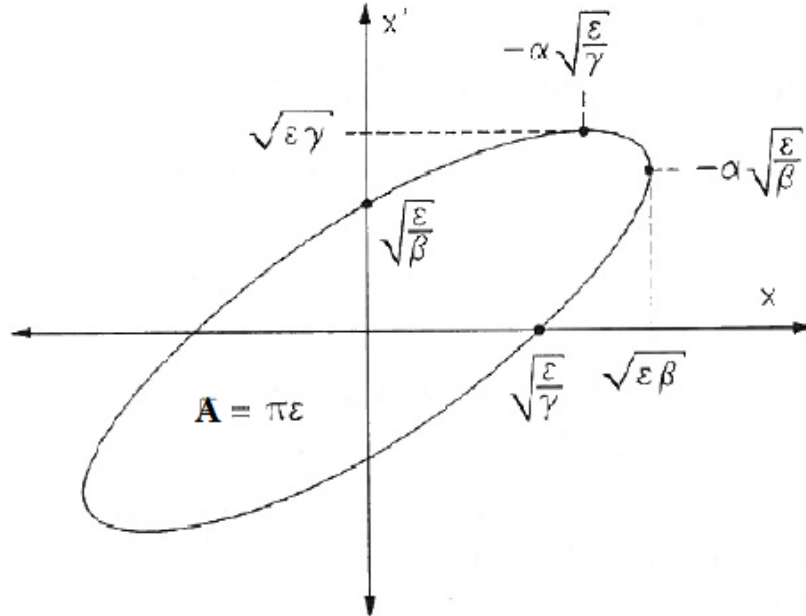
## 4. BULGULAR ve TARTIŞMA

### 4.1 Demet Hattı 1.1 Üzerinde Proton Demeti Özelliklerinin Belirlenmesi

#### 4.1.1 Emittans belirleme çalışmaları

##### 4.1.1.1 Demet emittansının tanımı

Hızlandırıcıdan elde edilen yüklü parçacık demetlerinin başka bir hızlandırıcı yapıya veya herhangi bir demet iletim hattına transfer edilmesinden önce, başlangıç koşullarının tam olarak anlaşılabilmesi büyük önem arz etmektedir. Bu bağlamda da ihtiyaç duyulan parametrelerin başında demet emittansı gelmektedir (Raich 2009). Yüklü parçacık demetinin emittansı (yayınıcı), aynı zamanda bir hızlandırıcının performansını da belirleyen önemli bir parametredir (Braun 2008). Demet emittansı enine ve boyuna doğrultular için ayrı ayrı olarak tanımlanmaktadır. Enine emittans, parçacıklar tarafından faz uzayında kaplanan alan (elips) olarak tanımlanır (Şekil 4.1).

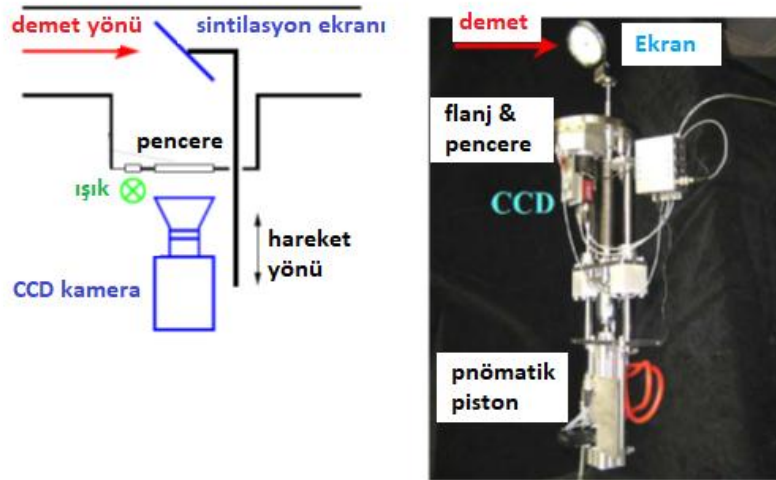


Şekil 4.1 Yüklü parçacık demetinin faz uzayındaki dağılımına (emittansına) ilişkin şematik gösterim

Demetin içerdığı her yüklü parçacık, belirli bir konumda, belirli bir hızla hareket eder. Demet emittansını hesaplamak için  $x$  (pozisyon),  $x'$  (hız) eksenlerinin oluşturduğu bir düzlemde parçacıkların kapladığı söz konusu eliptik alan değeri  $\pi$ 'ye bölünür. Elipsin kendisi ve yönelimi, Twiss veya Courant-Snyder parametreleriyle ilişkili olan 4 parametre  $\epsilon$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  ile tanımlanır. Demet, demet iletim hattı boyunca ilerlerken,  $x$  ve  $x'$  eksenlerinin oluşturduğu düzlemdeki elipsin yönelimi ve en/boy oranı değişir, ancak alanı hep sabit kalır. Emittans değerleri belirlenirken farklı tipte uygulamalar ve yöntemler kullanılmaktadır, bunlardan başlıcaları; slit-wire/grid scan, three grid scan, allison scanner, pepper-pot scan ve quadrupole variation/scan olarak adlandırılan yöntemlerdir (Forck 2011, Minty 2004 ve Nesteruk 2015).

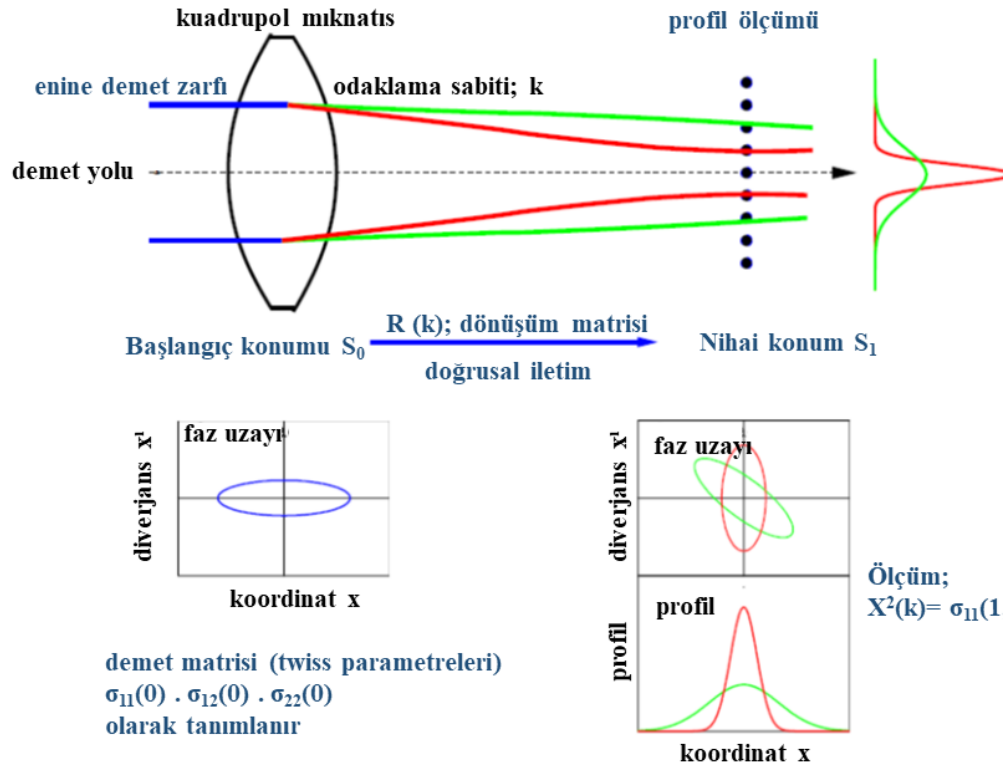
#### 4.1.1.2 Kuadropol varyasyon yöntemi

Kuadropol varyasyon yönteminde; yüklü parçacık demeti, demet iletim hattı üzerinde bulunan bir demet görüntüleyici (sintilasyon) ekran üzerine düşürülür. Farklı türlerdeki sintilasyon malzemelerinden yapılan ve aynı zamanda üzeri ölçeklendirilmiş olan söz konusu sintilasyon ekranı üzerine proton demetinin düşürülmesi ile görünür ışık bölgesinde bir ışık huzmesinin oluşması sağlanır.



Şekil 4.2 Bir demet hattı üzerindeki demet spot boyutunun ve dağılımının gözlemlenmesini sağlayan düzenek ve şematik gösterimi

Böylelikle yüklü parçacık demetinin şekillenimi yani demetin spotu/boyutu elde edilir. Söz konusu görüntü bir monitör/ DVR sistemi ile bağlantılı olan Şekil 4.2'deki gibi bir CCD kamera vasıtasıyla izlenir (Forck 2011). Kuadrupol varyasyon yönteminde esas olarak demet iletim hattında bulunan son kuadrupol mıknatısın oluşturduğu manyetik alan değeri değiştirilerek, demet spotunun değişimi takip edilir. Her bir manyetik alan değerine karşılık gelen demet spotuna ilişkin görüntü monitör/ DVR sistemi üzerinden alınır. Elde edilen (demet spotuna ilişkin) görüntüler, görüntü işleme maksatlı bir analiz programı yardımıyla incelenerek, enine demet eksenindeki dağılım, yani demetin yatay ve dikey doğrultulardaki boyutları elde edilir. Şekil 4.3 bir demet iletim hattı üzerinde  $S_0$  konumunda yer alan kuadrupol (odaklayıcı) mıknatısın oluşturduğu manyetik alanın değiştirilmesi sonucunda, yüklü parçacık demetinin  $S_1$  konumundaki demet görüntüleyici üzerindeki profilinin değişimini ve  $S_0$  noktasındaki emittans değerinin belirlenmesine ilişkin metodun şematik gösterimini ifade etmektedir (Forck, 2011).



Şekil 4.3 Demet iletim hattındaki kuadrupol mıknatısın manyetik alanının değiştirilmesiyle demetin demet görüntüleyici üzerindeki profilinin değişimi ve emittans değerinin belirlenmesi

#### 4.1.1.3 Emittansın belirlenmesi için oluşturulan deney düzeneği

Söz konusu çalışmada TAEK-PHT'deki mevcut Ar-Ge Demet Hattı ve imkânları kullanılarak, 30 MeV enerjili ve  $\sim 0,3 \mu\text{A}$ 'lık akıma sahip bir proton demeti için emittans ölçümü gerçekleştirilmiştir. Bu maksatla TAEK-PHT Ar-Ge ışınlama odasındaki demet iletim hattı üzerinde yer alan 2 kW'lık "beamviewer (demet gözleyici)" olarak adlandırılan bir sintilasyon ekran (alümina) üzerine proton demeti düşürülmüştür. Şekil 4.4 (a)'da TAEK-PHT Ar-Ge ışınlama odası demet hattı üzerinde bulunan ve demet şekilleniminin gözlemlenmesini sağlayan analog görüntüleme düzeneği ve Panasonic-Tomron marka kamera-optik lens cihazı görülmektedir. Şekil 4.4 (b)'de ise 2 kW'lık demet gözleyici üzerine düşürülen 30 MeV enerjili ve  $0,3 \mu\text{A}$  akıma sahip proton demeti için elde edilen şekillenim verilmektedir.



(a)



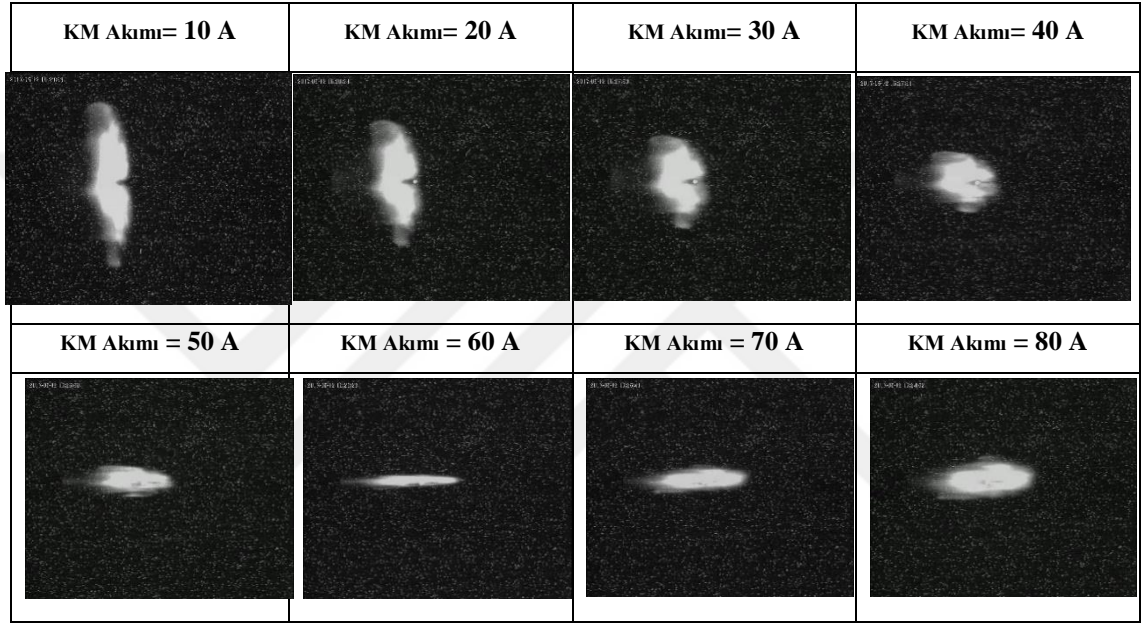
(b)

Şekil 4.4 Demet Hattı 1.1 üzerinde bulunan ve demet spotunun gözlemlenmesini sağlayan düzenek (a) ve 30 MeV ve  $0,3 \mu\text{A}$ 'lık bir proton demeti için elde edilen demet spotu (b).



#### 4.1.1.4 Emittans değerinin belirlenmesi

Demet iletim hattındaki son kuadrupol mıknatısın besleme akımının ve dolayısıyla oluşturduğu manyetik alan değerinin değiştirilmesiyle, 2 kW'lık "beamviewer (demet gözleyici)" zerindeki alümina malzemeden yapılmış sintilasyon ekranı üzerine düşürülen proton demetinin spotunda (boyutunun) yaşanan değişim Şekil 4.5'de verildiği Şekilde gerçekleşmiştir.



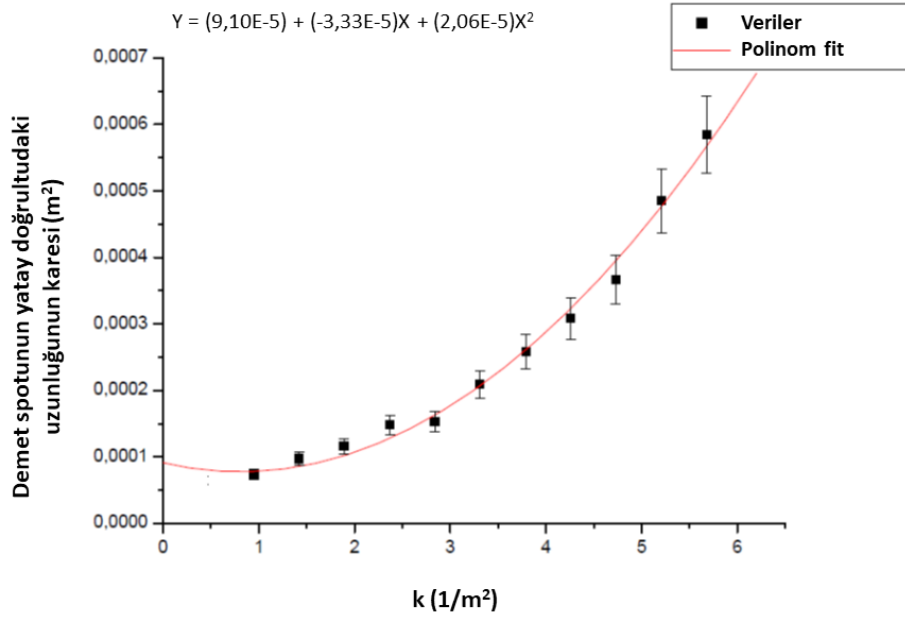
Şekil 4.5 Demet Hattı 1.1 zerindeki son kuadrupol mıknatısın akım değerinin değiştirilmesi elde edilen demet spotu görüntüleri ve değişimi

Elde edilen görüntüler "Fiji Beam Profiler" olarak adlandırılan görüntü işleme amaçlı analiz programı ile analiz edilmiştir (NIH Image, 2016). Bu program kullanılarak demet spotunun enine eksendeki yatay ve düşey doğrultulardaki genişlikleri elde edilmiştir. Demet Hattı 1.1 üzerinde bulunan son kuadrupol mıknatısın akım değerinin değiştirilmesi ile Ar-Ge Demet Hattı zerindeki mevcut ekran üzerinde elde edilen demet spotunun yatay ve düşen eksenlerdeki boyutları ve değişimleri tablolaştırılarak izelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1 Demet Hattı 1.1 üzerinde bulunan son kuadrupol mıknatısın akım değerinin değiştirilmesi ile elde edilen demet spotunun yatay ve düşey doğrultudaki boyutları ve değişimleri

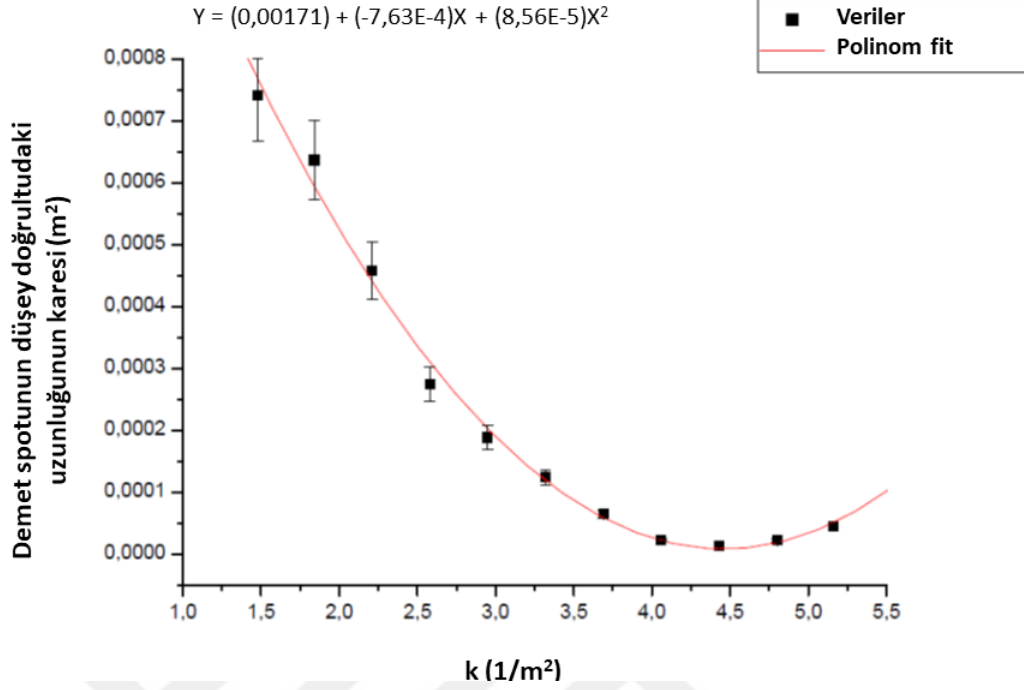
Kuadrupol mıknatıs akımı, I (A)	Yatay spot genişliği, $\sigma_x$ (mm)	Düşey spot genişliği, $\sigma_y$ (mm)
10,00	8,60	35,9
20,00	10,78	27,2
30,00	12,38	21,4
40,00	16,05	13,7
50,00	19,15	8,0
60,00	24,19	3,6
70,00	23,73	6,7
80,00	22,93	9,4

Son kuadrupol mıknatısın Çizelge 4.1’de verilen besleme akımları kullanılarak, her bir akım değerine karşılık gelen quadrupole strength (k) değerleri hesaplanmıştır (Minty 2004). Daha sonra yatay ve düşeydeki spot boyutlarının (spot genişliğinin karesi; m<sup>2</sup> birimindedir) değişimi son kuadrupol mıknatısın besleme akımına, dolayısıyla “k” değerine bağlı olarak çizdirilmiş, elde edilen grafikler için parabolik fit işlemi yapılarak, bu grafiklere ait parabol denklemleri elde edilmiştir (Şekil 4.6).



(a)

Şekil 4.6 Son kuadrupol mıknatısın belli besleme akım değerlerine karşılık elde edilen demetin; (a) yatay ve (b) düşey spot genişliklerinin karesine göre değişimine ilişkin çizdirilen parabol-fit denklemleri



(b)

Şekil 4.7 Son kuadrupol mıknatısın belli besleme akım değerlerine karşılık elde edilen demetin; (a) yatay ve (b) düşey spot genişliklerinin karesine göre değişimine ilişkin çizdirilen parabol-fit denklemi (devam)

Kuadrupol varyasyon yöntemi için tercih edilen matematiksel metot uyarınca; elde edilen parabol denklemlerinin katsayıları kullanılarak yatay ve düşey doğrultulardaki emittans değerleri ile Twiss parametreleri hesaplanarak Çizelge 4.2’de verilmiştir (Minty 2004).

Çizelge 4.2 Demet Hattı 1.1’deki 30 MeV enerjili, 0,3  $\mu$ A akımlı proton demeti için hesaplanan yatay ve düşey enine emittans değerleri ile twiss parametreleri

Yataydaki enine emittans değeri ve Twiss parametrelerine ilişkin elde edilen değerler									
A	B	C	S <sub>11</sub>	S <sub>12</sub> (m)	$\epsilon_x$ rms ( $\pi$ mm.mrad)	$\epsilon_x N$ ( $\pi$ mm.mrad)	$\beta_x$	$\alpha_x$	$\gamma_x$
2,06E-05	8,08E-01	7,76E-05	1	0,95	14,11	3,63	0,52	0,96	3,36
Düşeydeki enine emittans değeri ve Twiss parametrelerine ilişkin elde edilen değerler									
A	B	C	S <sub>11</sub>	S <sub>12</sub> (m)	$\epsilon_y$ rms ( $\pi$ mm.mrad)	$\epsilon_y N$ ( $\pi$ mm.mrad)	$\beta_y$	$\alpha_y$	$\gamma_y$
8,56E-05	4,46E+00	9,28E-06	1	0,95	9,95	2,56	3,04	16,73	83,49

#### 4.1.1.5 Tartışma

TAEK PHT'deki IBA tasarımı Cyclone® 30 hızlandırıcısına ait teknik broşür verilerine göre; 30 MeV enerjili proton demeti için;  $\epsilon_x \text{ rms} < 15 \pi \text{ mm.mrad}$  ve  $\epsilon_y \text{ rms} < 10 \pi \text{ mm.mrad}$  olarak verilmektedir (IBA S.A. 2008) Çalışma neticesinde TAEA-PHT R&D Demet Hattı 1.1 için;  $\epsilon_x \text{ rms}$  değeri  $\sim 14 \pi \text{ mm.mrad}$  ve  $\epsilon_y \text{ rms}$  değeri  $\sim 9,95 \pi \text{ mm.mrad}$  olarak elde edilmiştir (Yuksel vd. 2018). Hesaplanan emittans ve Twiss parametlerine ilişkin değerlerin hızlandırıcının iyon kaynağının parametrelerine ve ekstraksiyon sisteminde bulunan ve hızlandırılan H<sup>+</sup> atomlarının elektronları ayırarak, onları protona dönüştüren stripper (karbon folyo) sistemine bağlı olarak değişiklik gösterebildiği görülmüştür (Nesteruk 2015). Çalışmanın yapıldığı andaki iyon kaynağı parametreleri ve stripper sisteminin durumuna göre; hesaplanan emittans ve twiss parametlerine ilişkin değerlerin Cyclone® 30 hızlandırıcısına ait teknik broşürde verilen ve yukarıda belirtilen değerler ile uyumlu olduğu görülmektedir. Daha yeni bir ekran ile birlikte, yeni bir karbon (stripper) folyo kullanılması ve iyon kaynağında yapılacak hassas ayarlamalar ile daha iyi sonuçlar elde edilebileceği değerlendirilmiştir.

Bilindiği üzere emittans, demet kalitesini tanımlamaktadır. Buna ek olarak, herhangi bir demet hattı için başlangıç koşullarını sağlar, herhangi bir demet hattında minimum demet kaybını temin edecek operasyonel ayarların hesaplanmasına müsaade eder. Böylelikle bir demetin demet hattı borusuna temas edip etmeyeceği bilgisini de verir. Ayrıca, istenen amaca hizmet edecek bir demet hattı ve ilgili deney istasyonu modelinin geliştirilmesine ve doğrulanmasına katkısı olur. Bilindiği gibi TAEK-PHT'deki endüstriyel maksatlı makinanın, özellikle Ar-Ge çalışmaları için düşük demet akımı seviyelerinde kullanılması hedeflenmektedir. Bu maksatla, TAEK Ar-Ge Işınlama Odası'nda demetin istenen parametreler dahilinde taşınımını mümkün kılacak spesifik demet hatları ve ilgili deney istasyonları üzerine çalışmalar devam etmektedir. Sonuç olarak; bu çalışma sayesinde, Demet Hattı 1.1 için emittans değerinin belirlenmesinin yukarıda belirtilen çalışmaların yapılması sırasında kullanabilecek önemli bir verinin hesaplanması açısından önemli olduğu değerlendirilmektedir.

#### **4.1.2 Enerji doğrulama çalışmaları**

TAEK PHT'deki hızlandırıcıdan elde edilen proton demetinin enerjisi, demet ekstraksiyon sistemi sayesinde 15-30 MeV aralığında arzu edilen değerine ayarlanabilmektedir.

Proton demetinin enerjisi ekstraksiyon sistemindeki stripper bölümündeki (karbon) folyonun hızlandırıcının merkezine doğru olan radyal doğrultudaki mesafesi ile belirlenmektedir. Radyal ekseninde hızlandırıcının merkezine doğru yaklaşıldıkça, hızlandırılan demetin kavite içerisindeki dönüş sayısı azalacağından daha düşük enerjili proton demetleri elde edilmektedir. Bu sebeple karbon folyonun pozisyonu (hızlandırıcının merkezine olan mesafesi) istenen enerji değerinin ayarlanması adına oldukça kritiktir. Söz konusu pozisyonda yaşanabilecek en küçük bir sapma dahi, enerji değerinin gerçek değerinden farklı olmasına neden olabilmektedir.

Proton demetinin enerjisinde oluşabilecek sapmaları tespit etmek ve dolayısıyla enerji değerinin doğruluğundan emin olmak, yüklü parçacık uygulamasının gerçekleşeceği noktada istenen nükleer etkileşimin oluşması adına oldukça önemlidir. Yüklü parçacık demetlerinin enerjisinin doğrulanması (hatta ölçülmesine) yönelik dolaylı çalışmalar için literatürde farklı yöntemler tercih edilmektedir. Anılan çerçevede çalışma kapsamında “durdurma gücü hesaplama yöntemi” ve “birbiri ardı sıra gelen folyo aktivasyon deneyi (stacked foil activation experiment)” yöntemleri kullanılmıştır.

##### **4.1.2.1 Demet Hattı 1.1'in işler hale getirilmesine yönelik çalışmalar**

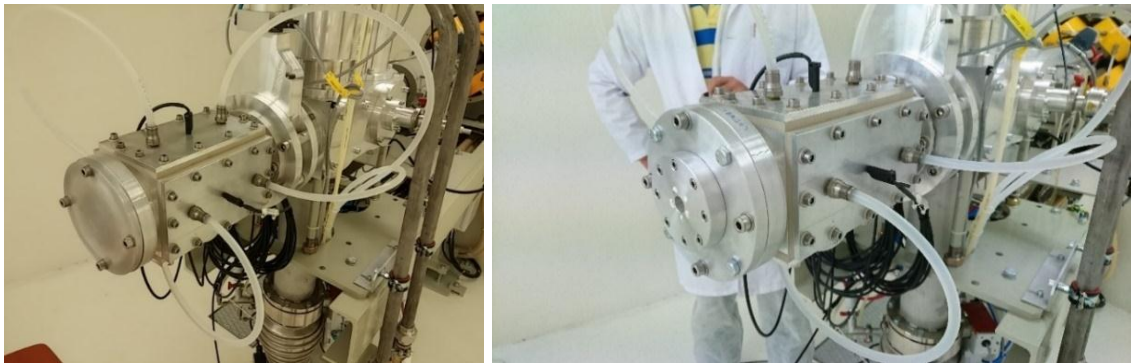
Yöntemlerle ilgili deneysel uygulamalara başlamadan evvel, çalışmanın gerçekleştirileceği ve tesisin kurulumu sırasında körlenmiş halde bırakılan Demet Hattı 1.1'in çıkışının kullanılabilir hale getirilmesi için gereken hazırlıklar gerçekleştirilmiştir. Bu maksatla 50 µm kalınlığındaki ve 29 mm çapındaki havar folyoyu muhafaza edecek bir flanjin tasarımı yapılmış, tasarlanan flanjin mevcut mekanik atölye imkanları dâhilinde üretilmiştir (Şekil 4.7).



Şekil 4.8 Demet İletim Hattı 1.1'in sonuna monte edilen flanj bütünüünün imalat aşamalarından kesitler

Tasarlanan flanj sisteminde yüksek erime noktasına sahip olması ( $1480\text{ C}^0$ ), yüksek mukavemeti ve aynı zamanda esnek bir yapıya sahip olması ( $29,5 \times 10^6\text{ PSI}$ ), iyi termal iletkenlik göstermesi ( $13,0\text{ W/m.K}$ ) ve korozyona karşı dayanıklı olması gibi nedenlerden ötürü havar malzemeden bir folyo kullanılması tercih edilmiştir (IAEA 2012).

İmalatı tamamlanan flanj bütünü Demet Hattı 1.1'in sonuna monte edilerek, demeti dışarı alabilmek için gereken pencere hattın sonuna açılmıştır (Şekil 4.8). Böylelikle IBA S.A firması tarafından gerçekleştirilen kurulum çalışmaları sırasında körlenmiş halde bırakılan söz konusu demet iletim hattı ilk defa kullanılabilir hale getirilmiştir. Bu sayede 15- 30 MeV enerji aralığında ve  $0,1\text{-}2\ \mu\text{A}$  akım değerlerindeki proton demetlerinin havada birkaç cm'lik serbest uçuşla soğutma ihtiyacı gerektirmeyen kısa süreli ışınlama çalışmalarında güvenli bir şekilde kullanılması mümkün hale gelmiştir.



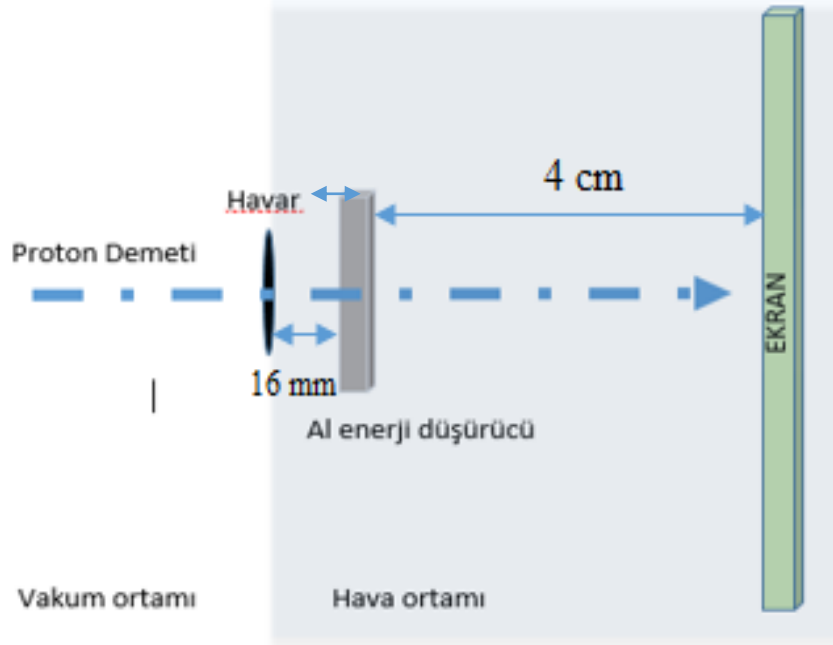
(a)

(b)

Şekil 4.9 Demet Hattı 1.1'in son kısmına ait (a) flanjın montajından önce (b) montajdan sonraki görünüm

#### 4.1.2.2 Durdurma gücü hesabı kullanılarak demet enerjisinin doğrulanması

Folyo aktivasyon yöntemine yönelik çalışmalara başlamadan önce; durdurma gücü yöntemi kullanılarak, gelen demetin enerjisinin belirlenmesine yönelik bazı deneme çalışmaları yapılmıştır. Bu amaçla öncelikle, Hızlandırıcı Kontrol Sistemi aracılığıyla (HKS) enerjisi 15-30 MeV arasındaki ayarlanabilen proton demetleri için; Demet Hattı 1.1'in sonuna yerleştirilen flanjdaki 50 µm'luk havar pencereden geçtikten sonra havadaki menzillerine ilişkin olarak SRIM-2013 (Ziegler 2000) benzetim programı ile hesaplamalar yapılmıştır. Anılan çerçevede Şekil 4.9'da şematik gösterimi verilen deney düzeneği programa tanıtılmıştır. Buna göre demet hattında ilerleyen proton demeti, 50 µm kalınlığındaki havar (vakum ayırma) pencereden geçerek, hava ortamında 16 mm süzüldükten sonra, 2 mm kalınlığındaki alüminyum enerji düşürücü plakaya gelmektedir. Demetin alüminyum enerji düşürücü plakayı geçtikten sonra, 4 cm uzaklıktaki fosfor ekrana ulaşmasını mümkün kılacak en düşük enerji değerinin 20,2 MeV olacağı hesaplanmıştır.

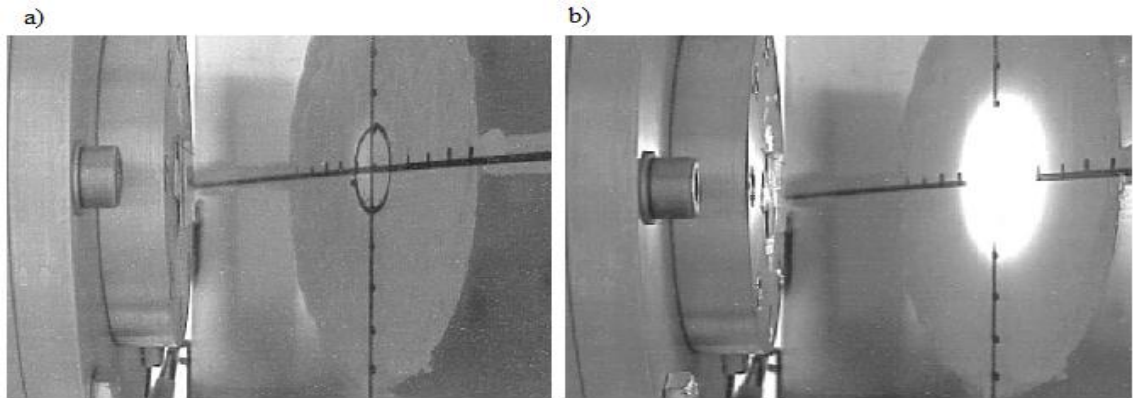


Şekil 4.10 Durdurma gücü hesabıyla proton demetinin enerjisini belirleme düzeneği



Şekil 4.9’de şematik gösterimi verilen düzenek, Şekil 4.10’da görüldüğü şekilde deneysel olarak hayata geçirilmiştir. Öncelikle hızlandırıcı kontrol sisteminden 19 MeV enerji ve 3  $\mu\text{A}$ ’lık akım değerine sahip olduğu bilgisi görülen proton demeti (demet hattından çıkmadan önce) ilgili düzenekten geçirilerek yerleştirilen fosfor ekran üzerine düşürülmeye çalışılmıştır.

Başlangıçta ekran üzerinde herhangi bir parlama ya da ölçülebilen bir akım değeri gözlenmemiştir. Daha sonra hızlandırıcı kontrol sistemi üzerinden proton demetinin enerjisi 0,1 MeV’lik aralıklarla arttırılmaya başlanmıştır. 19,4 MeV’lik demet enerjisine çıkıldığında ekran üzerinde 0,5  $\mu\text{A/h}$ ’lik bir akımın oluştuğu ölçülmüş, ancak fosfor ekran üzerinde herhangi bir parlama gözlenmemiştir. Şekil 4.10 (a)’da görüleceği gibi enerji değeri 19,8 MeV civarına yükseltildiğinde ekranda hafif bir parlamanın oluşmaya başladığı görülmüş ve aynı zamanda ekran üzerinde 1,5  $\mu\text{A/h}$ ’lik bir akım değeri ölçülmüştür. Enerji değerinin 20,2 MeV seviyesine kadar artırılması sonucunda ise ekrandaki parlamanın daha da şiddetlendiği gözlenmiş, akım değerinin de 2,1  $\mu\text{A}$  değerine yükseldiği ölçülmüştür (Şekil 4.10 (b)). Enerji değerinin 20,2 MeV’den daha yüksek seviyelere çıkarıldığında ise ekran üzerinde gözlemlenen akım değerinin artık değişmediği görülmüştür. Bu durum 20,2 MeV’lik enerji seviyesinde tüm protonların artık ekrana ulaştığı sonucunu göstermektedir. Elde edilen bu sonucun SRIM-2013 programından hesaplanan enerji değeri ile uyumlu olduğu görülmüştür.

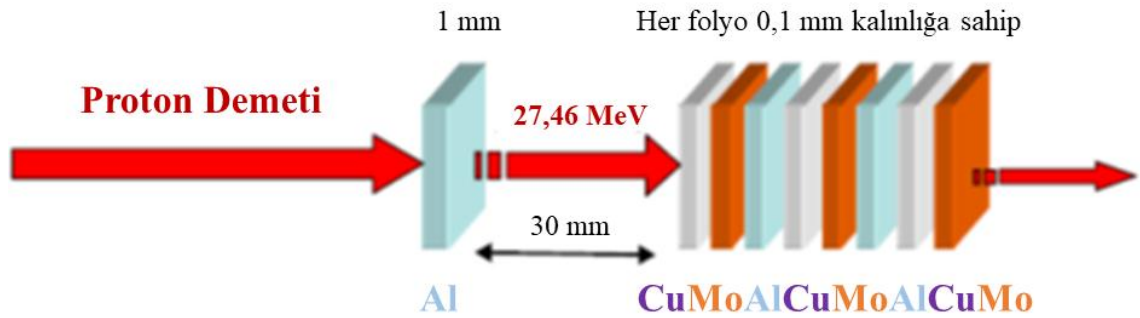


Şekil 4.11 Demet Hattı 1.1 çıkışındaki (a) 19,8 MeV enerjili (b) 20,2 MeV enerjilli proton demetleri için elde edilen ekran görüntüleri



#### 4.1.2.3 Folyo aktivasyon yöntemi

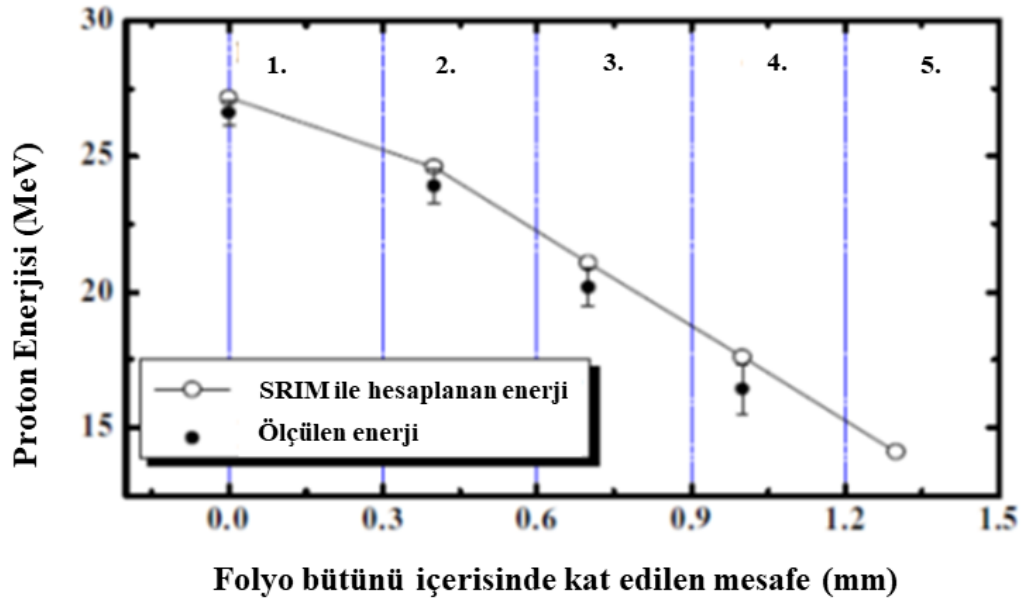
Yüklü parçacık demetlerinin enerjisinin doğrulanması için “birbiri ardı sıra gelen folyo aktivasyon deneyi (stacked foil activation experiment)” olarak adlandırılan deneysel yöntem yaygın olarak başvurulmaktadır. Bu yöntemde gelen yüklü parçacık demetinin enerjisine bağlı olarak farklı kalınlıklarda ve sayılarda degrader (enerji düşürücü) plakalar kullanılmaktadır. Hızlandırıcıdan gelen proton demetinin enerjisi, söz konusu enerji düşürücü plakalar sayesinde (gerektiği kadar sayıda plakayı yineleyerek) sıfıra düşürülmektedir. Literatürde farklı malzeme ve kalınlılardaki folyo konfigürasyonlarının kullanıldığı çalışmalar mevcuttur (Burrage, 2009, Avila-Rodriguez, 2009 ve Gogan, 2011). Bunlardan KIRAMS (G.Kore)’da yapılan ve Şekil 4.11’de şematik gösterimi verilen bir çalışmada, demet hattına belirli bir açıyla yerleştirilen bakır folyolar, 35 MeV enerjili proton demeti ile ışınlarak aktive edilmiştir (Khandaker, 2011).



Şekil 4.12 KIRAMS(G.Kore)’daki MC-50 siklotronunun enerji ölçümü ve doğrulaması için tercih edilen birbiri ardı sıra gelen folyo aktivasyon deneyi (stacked foil activation experiment) ilişkin şematik gösterim

Burada proton demeti enerji düşürücü plakalardan geçişi sırasında; demet durdurma gücü nedeniyle bir yandan enerjisini kaybederken, diğer yandan da meydana gelen  $^{nat}\text{Cu}(p,xn)^{62}\text{Zn}/^{nat}\text{Cu}(p,xn)^{65}\text{Zn}$  vb. reaksiyon nedeniyle plakaları aktiflemektedir. Aktiflenen plakalar ışınlama işleminin tamamlanmasının ardından dedektörler vasıtasıyla ölçüme tabi tutulurlar. Yöntemin özelliği nedeniyle yarı iletken detektörler yaygın olarak tercih edilmekte olup (Kim vd. 2007), bu dedektörleri sırasıyla plastik (Schneider ve Renker 1997) ve sıvı sintilasyon (Ha vd. 1994) detektörleri izlemektedir.

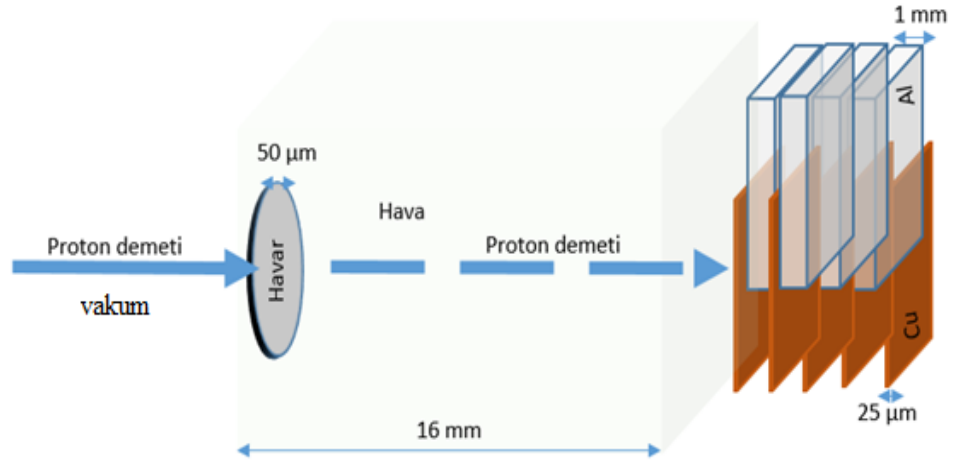
Gelen proton demetinin enerji değerinin doğrulanması işlemi; aktiflenen (bakır) folyoların dedektör sisteminde saydırılmasıyla elde edilen gama spektrumundaki tepe (pik) alanlarından yararlanılarak hesaplanan tesir kesitlerinin, literatürdeki (her bir enerji değerine özgün olan)  $^{nat}\text{Cu}(p,xn)^{62}\text{Zn}/^{nat}\text{Cu}(p,xn)^{65}\text{Zn}$  reaksiyonlarının tesir kesitleri ile karşılaştırılmasıyla yapılmıştır (Ha vd. 1994). Bu ve benzer çalışmalarda, çoğu zaman birden fazla nükleer reaksiyondan faydalanılmakta olup, reaksiyonlar sonucunda oluşan farklı enerjilere sahip gama ışınları sayılmaktadır. Bu çalışmalarda aynı zamanda toplam plaka sayısı/ kalınlığından yola çıkarak, deneysel verileri esas alan SRIM 2013 (Ziegler 2000) vb. benzetim programları aracılığıyla hesaplanan demet durdurma gücünden faydalanılarak, gelen demetinin enerjisinin de tespiti yapılabilmektedir. KIRAMS'daki MC-50 siklotronundan elde edilen proton demetinin enerjisinin doğrulanmasına yönelik olarak folyo aktivasyon deneyi (foil activation experiment) ile elde edilen ölçüm sonuçlarının, SRIM programı kullanılarak elde edilen benzetim sonuçlarıyla mukayesesi Şekil 4.12'de verilmektedir.



Şekil 4.13 KIRAMS'daki MC-50 siklotronunda proton demetinin enerjisinin doğrulanmasına yönelik "folyo aktivasyon yöntemi" ile elde edilen sonuçların, benzetim sonuçlarıyla mukayesesi

#### 4.1.2.4 Yöntemin Demet Hattı 1.1’de uygulanması

Demet Hattı 1.1’de folyo aktivasyon yöntemiyle gelen proton demetinin enerjisinin ölçümü ve doğrulanması çalışmaları sırasında; 25  $\mu\text{m}$  kalınlığında, 20x20  $\text{mm}^2$  ebatlarında, 5 adet bakır folyo ile 1 mm kalınlığında, 20x20  $\text{mm}^2$  ebatlarında, 4 adet alüminyum enerji düşürücü plakadan oluşan bir konfigürasyon tercih edilmiştir. Söz konusu konfigürasyona ilişkin şematik gösterim Şekil 4.13’de verilmektedir.



Şekil 4.14 Demet Hattı 1.1’deki folyo aktivasyon yöntemiyle enerji ölçümü ve doğrulanması çalışmaları için tercih edilen folyo bütününe ilişkin şematik gösterim

Şekil 4.14 (a)’da söz konusu yöntemin deneysel uygulaması sırasından kullanılan folyo bütünüünün açık/detay görünümü (sırasıyla “Sabitleyici Parça- 25  $\mu\text{m}$ ’lik bakır plaka- 1mm’lik alüminyum plaka-25  $\mu\text{m}$ ’lik bakır plaka-1mm’lik alüminyum plaka-25  $\mu\text{m}$ ’lik bakır plaka-1mm’lik alüminyum plaka-25  $\mu\text{m}$ ’lik bakır plaka-1mm’lik alüminyum plaka-25  $\mu\text{m}$ ’lik bakır plaka-Sabitleyici Parça) ve montaj öncesindeki tümleşik hali ise Şekil 4.14 (b)’de verilmektedir.



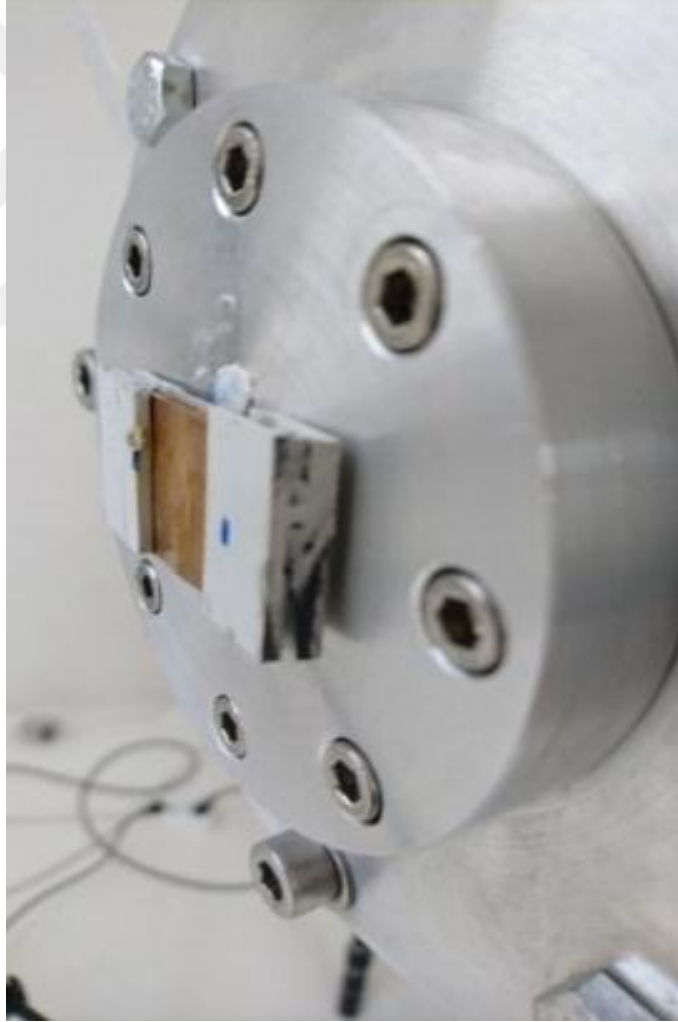
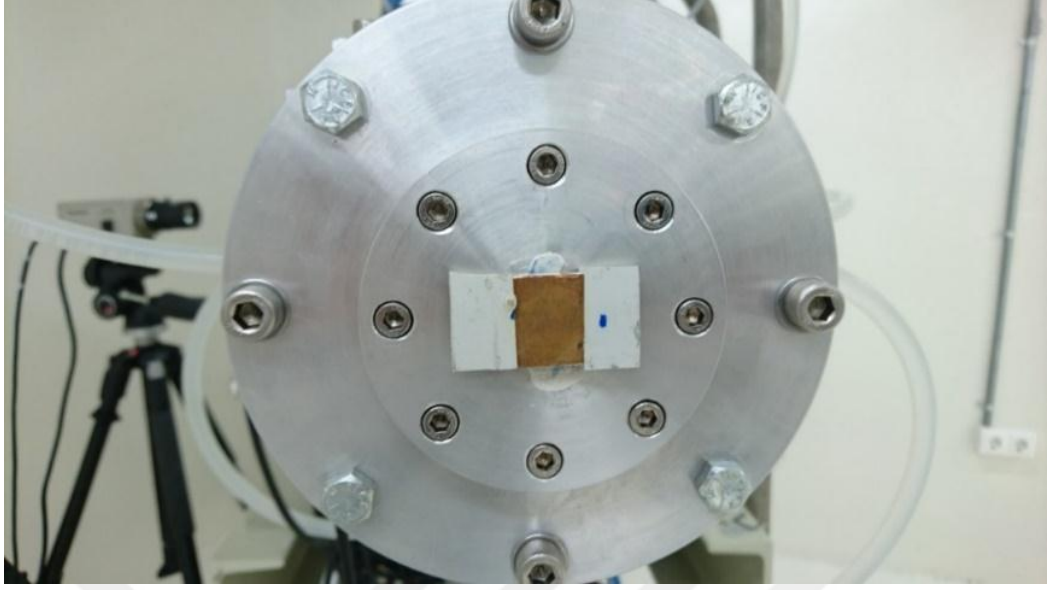
(a)



(b)

Şekil 4.15 Demet Hattı 1.1’de gelen proton demetinin enerji ölçümü ve doğrulaması çalışmalarına yönelik olarak gerçekleştirilen folyo aktivasyon yöntemi için kullanılan bütüne ilişkin görünüm

Folyo bütünü Demet Hattı 1.1’in sonuna Şekil 4.15’deki gibi yerleştirilmiştir. Buna göre Demet Hattı 1.1’de ilerleyen proton demeti flanaj sistemindeki 50 $\mu$ m kalınlığındaki havar pencereden geçerek, yaklaşık 16 mm hava ortamında serbest uçtukten sonra bakır folyo bütünü içerisinde durdurma gücü enerjisi oranında ilerlemektedir (Şekil 4.12).



Şekil 4.16 Demet Hattı 1.1’de folyo aktivasyon yöntemiyle enerji ölçümü ve doğrulaması çalışmaları için kullanılan folyo bütünüünün demet hattı çıkışına montajı sonrası karşıdan ve yandan görünümü

Şekil 4.13’de verilen şematik gösterim esas alınarak uygulanan yöntem sırasında; deney düzeneğinde ilk bakır folyo üzerine erişen proton demetinin enerjisinin hızlandırıcı kontrol sisteminden gözlenen enerji değeri olduğu kabul edilmiştir. Yine proton demetinin diğer bakır folyolara ulaştığı anlardaki enerji değerleri SRIM-2013 benzetim programı kullanılarak hesaplanmıştır. Buna ek olarak farklı başlangıç enerjileri (15-30 MeV) için her bir bakır folyo üzerindeki ortalama proton demeti enerji değerleri SRIM-2013 benzetim programı kullanılarak hesaplanmış, elde edilen sonuçlar Çizelge 4.3’de tablo halinde verilmiştir. Bakır folyoların aynı akım, fakat değişik enerji değerlerindeki proton demetleriyle ışınlandığı kabul edilmiştir.

Çizelge 4.3 Şekil 4.13’de verilen deney düzeneğinde görülen her bir bakır folyo üzerinde SRIM-2013 programı kullanılarak hesaplanan ortalama proton demeti enerji değerleri

<b>Geliş enerjisi (MeV)</b>	<b>1. bakır folyo (MeV)</b>	<b>2. bakır folyo (MeV)</b>	<b>3. bakır folyo (MeV)</b>	<b>4. bakır folyo (MeV)</b>
30,000	29,430	24,960	19,370	13,050
29,000	28,400	23,850	18,357	11,131
28,000	27,436	22,620	16,892	8,923
27,000	26,420	21,484	15,379	6,087
26,000	25,388	20,254	13,795	1,978
25,000	24,370	19,046	12,103	-
24,000	23,352	17,758	10,241	-
23,000	22,336	16,543	8,177	-
22,000	21,314	15,207	5,696	-
21,000	20,287	13,812	2,016	-
20,000	19,247	12,404	-	-
19,000	18,220	10,882	-	-
18,500	17,708	10,087	-	-
18,000	17,184	9,314	-	-
17,500	16,664	8,477	-	-
17,000	16,146	7,527	-	-
16,500	15,621	6,538	-	-
16,000	15,113	5,503	-	-
15,500	14,582	4,259	-	-
15,000	14,058	2,756	-	-

#### 4.1.2.5 Folyoların proton demetleri ile aktivasyonu ve HpGe dedektör ile analizi

Gelen proton demeti enerjisinin en doğru şekilde belirlenebilmesi için; deney düzeneğindeki bakır folyolar, hızlandırıcıdan gelen ve Çizelge 4.3’de belirtilen enerji değerlerindeki proton demetleri ile ışınlanmıştır. Işınlama işlemleri ortalama 0,5  $\mu\text{A}$ ’lık akım değeri ile 120 saniye süresince yapılmıştır. Proton demetinin bakır folyo bütünü içerisinde ilerlemesi sırasında tüm bakır plakalar, gelen demetin enerjisine bağlı bir tesir kesiti oranında aktive olmaktadır. Aktiflenen bakır folyoların bir HpGe yarıiletken dedektörde sayımı sonucunda (pik alanları kullanılarak) elde edilen aktivasyon miktarları ile enerji değerleri arasında orantısal bir ilişki oluşturularak gerçek enerji değeri/ düzeltmelerinin hesaplanmasına çalışılmıştır.

Bakır folyoların proton demetleriyle ışınlanması sonucunda,  $^{nat}\text{Cu}(p,xn)^{62}\text{Zn}$  ve  $^{nat}\text{Cu}(p,xn)^{65}\text{Zn}$  reaksiyonları sayesinde, elde edilen piklere ait alanların birbirlerine oranları, teorik tesir kesitlerinin birbirlerine olan oranları ile karşılaştırılmıştır. Tüm bakır folyolara hemen hemen aynı miktarda proton geldiği ve bakır folyoların aktivasyon miktarları için oranlama değeri dikkate alındığından, akım değerinde ve ışınlama süresindeki sapmaların sonucu etkilemediği kabul edilmiştir. Yeri gelmişken, söz konusu çalışmalarda birden fazla nükleer reaksiyondan faydalanıldığı ve bu reaksiyonlardan elde edilen farklı enerjilerdeki gama ışınlarının sayıldığı dikkate alındığında, HpGe dedektörünün verim kalibrasyonunun doğru sonuçların elde edilmesi adına büyük bir önem arz ettiği görülmektedir.

Bu çalışmada proton demetinin enerjisinin belirlenmesinde bakır folyoların ışınlanması sırasında meydana gelen  $^{nat}\text{Cu}(p,n)^{63}\text{Zn}$  reaksiyonuna ait 669,62 keV (% 8,2) ve 962,06 keV (% 6,5) enerjili gama ışınlarına ait piklerden faydalanılmıştır. Her iki gama ışını piki için sonuçlar birbiri ile uyumlu olduğundan sadece 669,62 keV enerjili gama piki için elde edilen sonuçlar paylaşılmıştır. Proton demeti ile ışınlanan bakır folyoların aktivitesi aşağıda verilen denklem ile hesaplanmaktadır.

$$A = nI\sigma(1 - e^{-\lambda t_i}) \quad 4.1$$

Burada;

*A: Işınlama sonundaki aktiviteyi,*

*n: Hedefte birim yüzeye düşen çekirdek sayısını,*

*$\sigma$ : Reaksiyon tesir kesitini,*

*$\lambda$ : Radyoaktif bozunma sabitini,*

*$t_i$ : Işınlama zamanını temsil etmektedir.*

Bakır folyolar, Çizelge 4.3'de verilen enerji değerlerine sahip proton demetleriyle, hemen hemen aynı akım değeri ve aynı süre boyunca ışınlanmıştır. Ancak söz konusu folyoların her biri üzerine düşen proton demeti enerjisinin, folyoların arasında bulunan 1 mm kalınlıktaki alüminyum enerji düşürücü plakalar sebebiyle farklı olacağı gözden kaçırılmamalıdır. Bu durumda her bir bakır folyo için aktivasyon değeri aşağıdaki eşitlikle hesaplanır.

$$A_j = nI\sigma_j(1 - e^{-\lambda t_i}) \quad j = 1,2,3,4,5 \quad 4.2$$

Herhangi iki farklı bakır folyonun aktivasyon oranları ise aşağıdaki denklem ile elde edilmektedir.

$$\frac{A_j}{A_k} = \frac{\sigma_j}{\sigma_k} \quad j \neq k: 1,2,3,4,5 \quad 4.3$$

Aktif folyolar için sayım işlemi, Canberra HpGe dedektörü ve ilgili Genie 2000 analiz yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yarı iletken dedektördeki aktivasyon miktarı ise aşağıdaki denklemde verildiği gibidir;

$$A_j = \frac{D_j}{\varepsilon_a I_\gamma t_\delta} \quad 4.4$$



Burada;

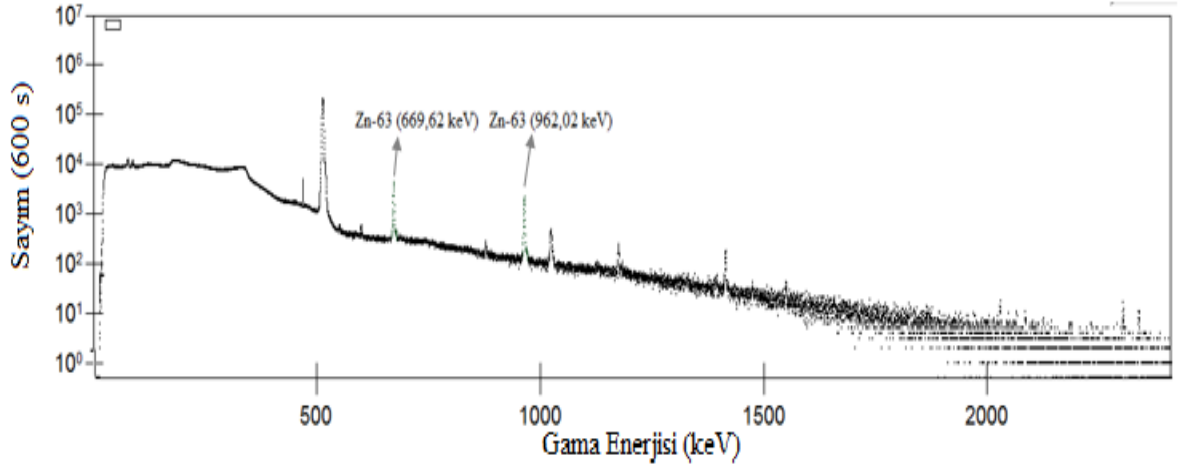
$D_j$ : Gama piki alanını,

$\varepsilon$ : Dedektör verimini,

$I_\gamma$ : Gama yayımlanma olasılığını,

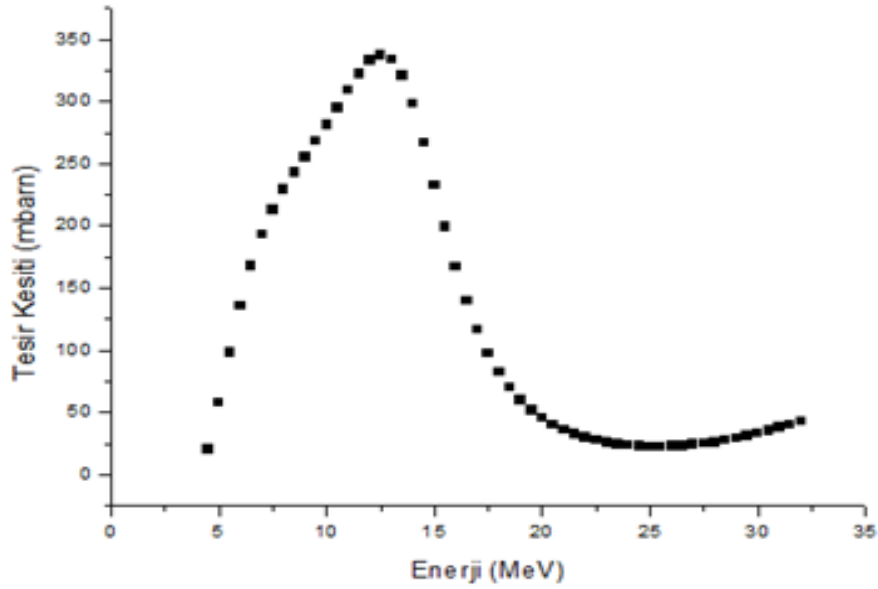
$t_m$ : Dedektörde ölçüm zamanını, temsil etmektedir.

Denklem 4.4'den anlaşılacağı üzere, oluşturulan deney düzeneğinde herhangi bir ışınlama için bakır folyoların aktivasyon miktarlarının oranları, aslında pik alanlarının oranlarının kendisidir. Bakır folyoların  $^{nat}\text{Cu}$  (p,n)  $^{63}\text{Zn}$  reaksiyonu sayesinde aktiflenmesi sonrasında; HpGe dedektör kullanılarak yapılan sayım işleminde elde edilen 669,62 keV ve 962,06 keV enerjili gama ışınlarının (Şekil 4.16) pik alanlarının oranı ile denklem 4.3'de verildiği üzere bakır folyolar üzerine düşen farklı proton demeti enerjilerine karşılık gelen tesir kesiti değerlerinin oranları birbirleri ile tutarlı olmalıdır. Ancak her iki durum için verilen değerlerin belli bir oranda hata içermesi sebebiyle birebir aynı değerlerin elde edilmesi çok kolay değildir.



Şekil 4.17 Aktiflenmiş durumdaki bir bakır folyoya ait gama sayımı spektrumu

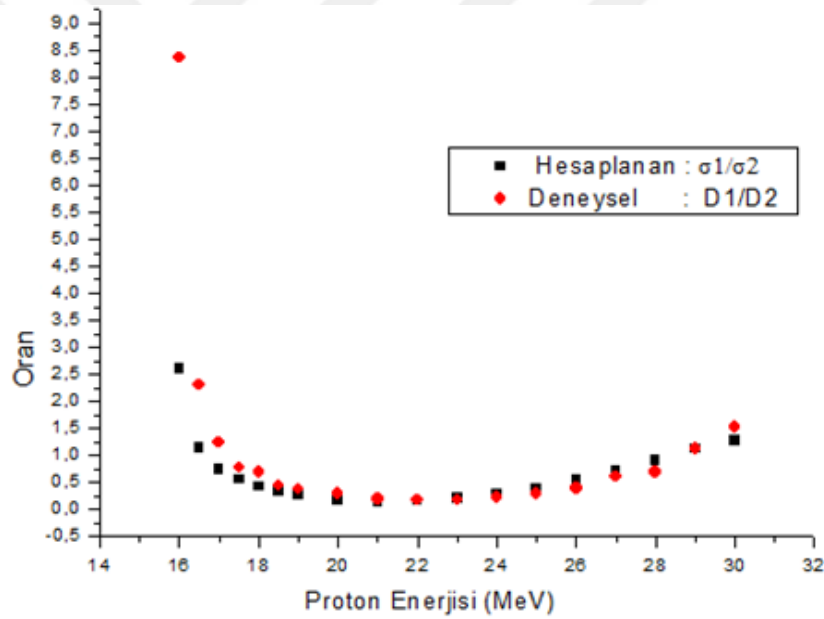
$^{63}\text{Cu}(p,n)^{63}\text{Zn}$  reaksiyonu için Çizelge 4.3’de verilen proton demeti enerji değerlerine karşılık gelen reaksiyon tesir kesiti değerleri ise Şekil 4.17’de gösterilmiştir (IAEA, 2001). Ara enerji değerlerine karşılık gelen tesir kesiti değerleri ise ilgili referans değerleri kullanılarak interpolasyon yöntemiyle belirlenmiştir (Originlab 2000).



Şekil 4.18  $^{nat}\text{Cu}(p, n)^{63}\text{Zn}$  reaksiyonu için tesir kesiti değerleri

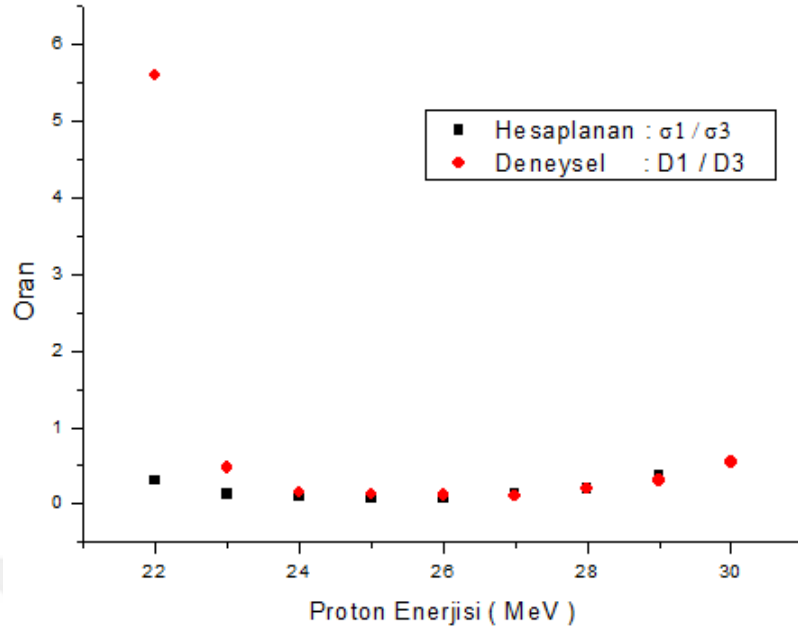
Belirlenen deney düzeneği için her bir bakır folyo üzerinde (gelen proton enerjisi esas alınarak TRIM benzetim programı ile) hesaplanmış proton demetinin enerjisine karşılık gelen ve deneysel olarak elde edilen gama ışını pik alanı oranları hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerler ile literatürdeki söz konusu enerji değerlerine karşılık gelen tesir kesiti değerlerinin uyumlu olması büyük önem arz etmektedir. Söz konusu uyumun sağlanması durumunda, deney düzeneği kullanılarak yapılacak denemeler sonucunda elde edilecek tesir kesiti oranları sayesinde proton demetinin enerjisinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Anılan çerçevede, Çizelge 4.3’de verilen enerji değerlerine karşı gelen reaksiyon tesir kesiti değerlerinin ön görülebilmesi için; Şekil 4.17’deki 4,5-32 MeV arasındaki belli enerji değerlerine karşılık gelen tesir kesitlerini veren grafik, interpolasyon yöntemi ile daha küçük enerji değeri aralıklarına ayrılmıştır (Ziegler 2000). Elde edilen bu değerler yardımıyla her bir bakır folyo üzerindeki enerji değerine karşı gelen tesir kesiti değerleri  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  ve  $\sigma_4$  olarak gösterilmiştir. Değerlendirme kısmında da söz konusu değerlerin oranları kullanılmıştır.

Aktiflenmiş durumdaki bakır folyolar HpGe yarıiletken dedektöründe 600 saniye boyunca sayılmıştır. Sayım sırasındaki oluşacak ölü zamanı düşürmek amacıyla, bakır folyolar dedektör kristalinden 20 cm uzakta olacak şekilde yerleştirilmiştir. Dört bakır folyo için  $^{nat}\text{Cu}(p, n)^{63}\text{Zn}$  reaksiyonuna ait 669,62 keV enerjili gama ışınları için pik alanları sırasıyla  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$  ve  $D_4$  olarak gösterilmiştir. Çizelge 4.3’de verilen proton demeti enerji değerlerine karşılık gelen pik alanlarının oranları hesaplanmıştır. Buna göre; birinci ve ikinci bakır folyoların 15-30 MeV aralığındaki proton demeti ile ışınlanması sırasındaki gama ışını pik alanlarının ( $D_1/D_2$ ) oranı ile gelen proton enerjisi için SRIM/TRIM programı ile her bir bakır folyo üzerinde hesaplanan enerji değerine karşılık gelen ve literatürden elde edilen ( $\sigma_1/\sigma_2$ ) tesir kesiti oranları Şekil 4.18’de verilmiştir (IAEA, 2001).

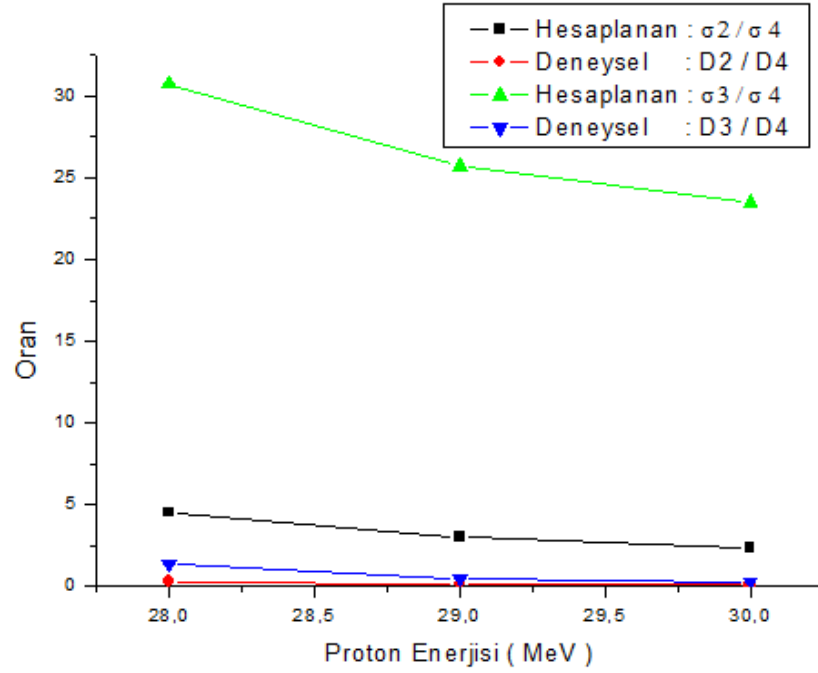


Şekil 4.19 I. ve II. folyolardan yayımlanan 669,62 keV’lik gama ışınları için spektrumdan ölçülen pik alanları oranı ( $D_1/D_2$ ) ile SRIM/TRIM programıyla iki folyo üzerinde hesaplanan enerji değerlerine karşılık literatürden elde edilen tesir kesiti oranları ( $\sigma_1/\sigma_2$ )

Birinci ve üçüncü bakır folyolar için gama ışını pik alanlarının ( $D_1/D_3$ ) oranı ile her bir folyo üzerinde hesaplanan enerji değerine karşılık gelen literatürdeki ( $\sigma_1/\sigma_3$ ) tesir kesiti oranları Şekil 4.19’da verilmiştir.



Şekil 4.20 I. ve III. folyolardan yayımlanan 669,62 keV'lik gama ışınları için spekturumdan ölçülen pik alanları oranı ( $D_1/D_3$ ) ile SRIM/TRIM programıyla her iki folyo üzerinde hesaplanan enerji değerlerine karşılık literatürden elde edilen tesir kesiti oranları ( $\sigma_1/\sigma_3$ )



Şekil 4.21 I. ve IV. ile III. ve IV. folyolardan yayımlanan 669,62 keV'lik gama ışınları için spekturumdan ölçülen pik alanları oranları ( $D_2/D_4$ ,  $D_3/D_4$ ) ile SRIM/TRIM programıyla folyolar üzerinde hesaplanan enerji değerlerine karşılık literatürden elde edilen tesir kesiti oranları ( $\sigma_2/\sigma_4$ ,  $\sigma_3/\sigma_4$ )

İkinci ve dördüncü ile üçüncü ve dördüncü bakır folyoların 15-30 MeV enerji aralığındaki proton demetleriyle ışınlanması sırasındaki  $^{nat}\text{Cu}(p,n)^{63}\text{Zn}$  reaksiyonu sonucunda yayımlanan 669,62 keV'lik gama ışını ( $D_2/D_4$ ,  $D_3/D_4$ ) pik alanları oranları ile gelen proton demeti enerjisi için SRIM/TRIM programı ile her bir bakır folyo üzerinde hesaplanan enerji değerine karşılık gelen ve literatürden elde edilen ( $\sigma_2/\sigma_4$ ,  $\sigma_3/\sigma_4$ ) tesir kesiti oranları Şekil 4.20'de paylaşılmıştır. Farklı sıralamalar esas alınarak elde edilen bütün pik alanı oranları ile ( $D_1/D_2$ ,  $D_1/D_3$ ,  $D_2/D_3$ ,  $D_2/D_4$ ,  $D_3/D_4$ ) bunlara ilişkin hesaplanan tesir kesiti oranları ( $\sigma_1/\sigma_2$ ,  $\sigma_1/\sigma_3$ ,  $\sigma_2/\sigma_3$ ,  $\sigma_2/\sigma_4$ ,  $\sigma_3/\sigma_4$ ) Çizelge 4.4'de verilmiştir.

Çizelge 4.4 Bakır folyoların üzerine düşen proton demeti enerjilerine karşılık gelen tesir kesiti oranları ile bu enerjilerde aktiflenen bakır folyoların 669,62 keV'lik gama enerjilerine ait pik alanı oranı

Enerji	$\sigma_1/\sigma_2$	$D_1/D_2$	$\sigma_1/\sigma_3$	$D_1/D_3$	$\sigma_2/\sigma_3$	$D_2/D_3$	$\sigma_2/\sigma_4$	$D_2/D_4$	$\sigma_3/\sigma_4$	$D_3/D_4$
30,0	1,2783	1,5199	0,5425	0,5679	0,4244	0,3725	2,3560	0,0964	23,4676	0,2580
29,0	1,1281	1,1185	0,3739	0,2800	0,3292	0,2510	3,0165	0,1203	25,7070	0,4798
28,0	0,9113	0,6879	0,2022	0,1438	0,2254	0,2149	4,5054	0,2961	30,7235	1,3902
27,0	0,7076	0,6132	0,1253	0,0978	0,1586	0,1595	5,6460		38,1585	8,3752
26,0	0,5327	0,3952	0,0704	0,0759	0,1391	0,1921				
25,0	0,3936	0,2960	0,0761	0,1021	0,1785	0,3450				
24,0	0,2800	0,2211	0,0878	0,1206	0,3135	0,5443				
23,0	0,2065	0,1719	0,1223	0,2582	0,5922	1,5021				
22,0	0,1566	0,1700	0,3008	4,9918	1,9203	29,4425				
21,0	0,1384	0,1970								
20,0	0,1671	0,2918								
19,0	0,2525	0,3699								
18,5	0,3245	0,4488								
18,0	0,4220	0,6953								
17,5	0,5549	0,7681								
17,0	0,7465	1,2363								
16,5	1,1369	2,2979								
16,0	2,6020	8,3651								
15,5										
15,0										

#### 4.1.2.6 Tartışma

Sonuç olarak ışınlamalar sırasında 4 adet bakır folyo aynı anda ve her bir deneme için aynı sırada ışınlandığından bakır folyolar üzerine gelen proton sayısının yaklaşık olarak aynı olduğu söylenebilir. Aktiflenen bakır folyolara ait gama ışını pikleri  $^{nat}\text{Cu}(p,n)^{63}\text{Zn}$  reaksiyonuna ait olup; 669,62 keV ve 962 keV enerjili gama ışınları HpGe

detektöründe sayılmıştır. Elde edilen deneysel katsayı oranları ile literatürden tespit edilen tesir kesitleri kullanılarak hesaplanan oranların uyumlu olduğu görülmektedir.

Folyolar arasındaki farklı kombinasyonlar ile katsayı oranları sırasıyla Şekil 4.18, Şekil 4.19 ve Şekil 4.20’de paylaşılmıştır. Katsayı oranları karşılaştırıldığında folyolar üzerine düşen proton enerjisinin  $E_p < 5-6$  MeV olduğu durumlarda tesir kesitlerinin değerlerinde ve pik alanlarında (aktivasyon daha azdır) hata oranının % 10 seviyesinden yüksek olması sebebiyle bu enerji seviyeleri için hesaplanan ve deneysel olarak elde edilen katsayı oranları arasındaki uyum biraz daha azdır. Hızlandırıcıdan elde edilen ve enerjisi 15-30 MeV arasında değişen proton demetleri için Şekil 4.12’de verilen folyo düzeneği kullanılarak proton demeti enerjisini belirlemek mümkündür.

Söz konusu yöntemin doğrulanmasına yönelik olarak kontrollü bir uygulama gerçekleştirilmiştir. Anılan çerçevede bakır folyo bütünü, hızlandırıcı operatörü tarafından keyfi olarak tercih edilen 3 farklı proton demeti enerji değeri kullanılarak ışınlanmıştır. Ancak operatör tarafından tercih edilen enerji değerleri, hesaplama yöntemini tatbik eden analiz sorumlusundan gizlenmiştir.

Işınlama sonucunda aktiflenen bakır folyolar analiz sorumlusu tarafından HpGe dedektöründe sayılmıştır. Sayım işleminin ardından oluşturulan metot kullanılarak bilinmeyen enerji değerleri belirlenmeye çalışılmıştır. Uygulama sonucunda belirlenen ışınlama enerjilerinin aslında hızlandırıcı operatörü tarafından gizlenen enerji değerleri ile aynı değerler olduğu gözlenmiştir (Çizelge 4.5).

Çizelge 4.5 Bilinmeyen enerjilerde proton demetleri ile ışınlandığı varsayılan bakır folyolar için hesaplanan katsayı oranları ve dolayısıyla belirlenen enerji değerleri

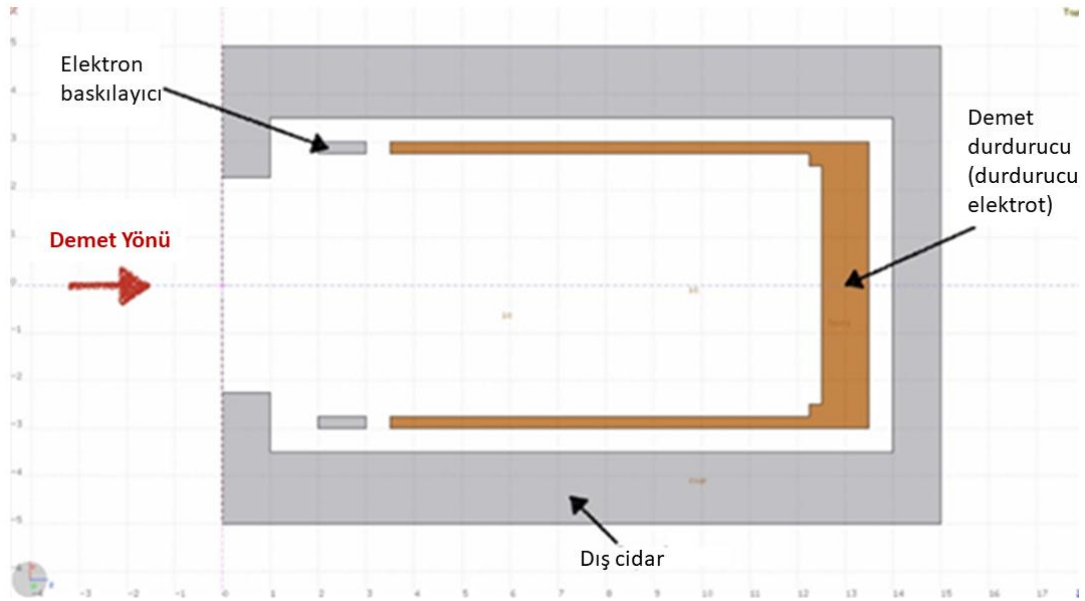
Işınlama	$D_1/D_2$	$D_1/D_3$	$D_1/D_4$	$D_2/D_3$	$D_2/D_4$	$D_3/D_4$	bilinmediği varsayılan enerji (MeV)	yöntemle belirlenen enerji (MeV)
1	0,32991	0,11279	-	0,34187	-	-	25	25
2	0,18904	-	-	-	-	-	21	21
3	0,65727						18	18

### 4.1.3 Düşük akım ölçüm çalışmaları ve en düşük akım seviyesinin belirlenmesi

TAEA-PHT’de gerçekleştirilmesi hedeflenen uygulamalar için nano ve pikoamper seviyesinde düşük akımlı proton demetlerinin hassas bir şekilde ölçümü ve izlenmesi önemlidir. Ancak mevcut hızlandırıcı kontrol sistemi, hızlandırıcıdan elde edilen en düşük 0,1  $\mu\text{A}$  değerine sahip proton demeti akımlarını ölçebilen bir akım okuma ünitesine sahiptir. Bu bağlamda istenen akımları ölçebilecek farklı bir düzeneğin tasarımı, imalatı ve testleri gerçekleştirilerek, en düşük akım seviyesi belirlenmiştir.

#### 4.1.3.1 Faraday kabın tasarımı

Nanoamper ve hatta daha düşük seviyelerdeki proton demeti akımları (pikoamper) Faraday kabı (FK) gibi demeti önleyici/durdurucu (destructive) yöntemlerle ölçülebilmektedir (Forc 2011). Bu maksatla yeni bir Faraday kabı, FLUKA ve CST benzetim programları kullanılarak tasarlanmıştır. Genel hatları itibariyle tasarım; bir demet durdurucu, dış duvar (cidar) ve bir elektron baskılayıcı bölümden oluşmaktadır. Demet durdurucu bölümü, en doğru akım değeri ölçümü için dış duvardan ve baskılayıcı halkadan elektriksel olarak yalıtılmıştır (Şekil 4.21).



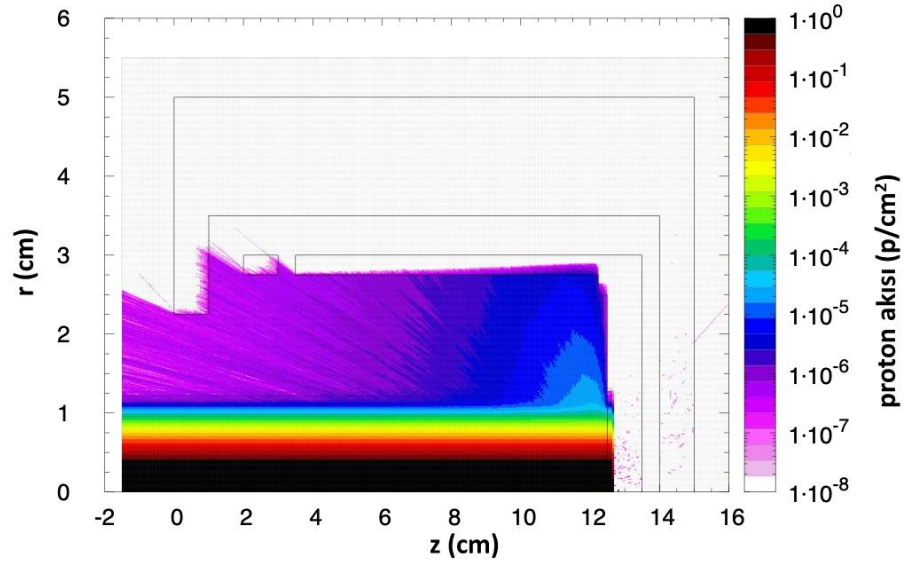
Şekil 4.22 Faraday kabın ve alt sistemlerinin tasarımına ilişkin şematik gösterimi

Doğru bir tasarım için öncelikle (30 MeV civarındaki enerji değerine sahip proton demetleri için) akım ölçümü sırasındaki ölçüm hatalarını tahmin etmek üzere FLUKA programı ile gereken benzetim çalışmaları yapılmıştır. Şekil 4.22 (a)'dan da görüleceği üzere; karar verilen tasarım boyutları uyarınca gelen ve saçılan proton demetlerinin demet durdurucu içerisinde durdurulabileceği görülmektedir. Buna göre FK'dan kaçan protonların sayısı  $10^{-6}$  proton/cm<sup>2</sup>'dir. Demet durdurucunun 2,7 cm<sup>2</sup>'lik bir dairesel açıklığa sahip olduğu hesaba katıldığında, 100 nA'lık bir demet akımı için yaklaşık 2,4 pA'lık bir ölçüm hatasının olacağı görülmektedir. Söz konusu değer, uygulamaya yönelik hedefler doğrultusunda gerçekleştirilecek demet akımı ölçümleri ile ilgili ölçüm doğruluğu açısından kabul edilebilir seviyededir.

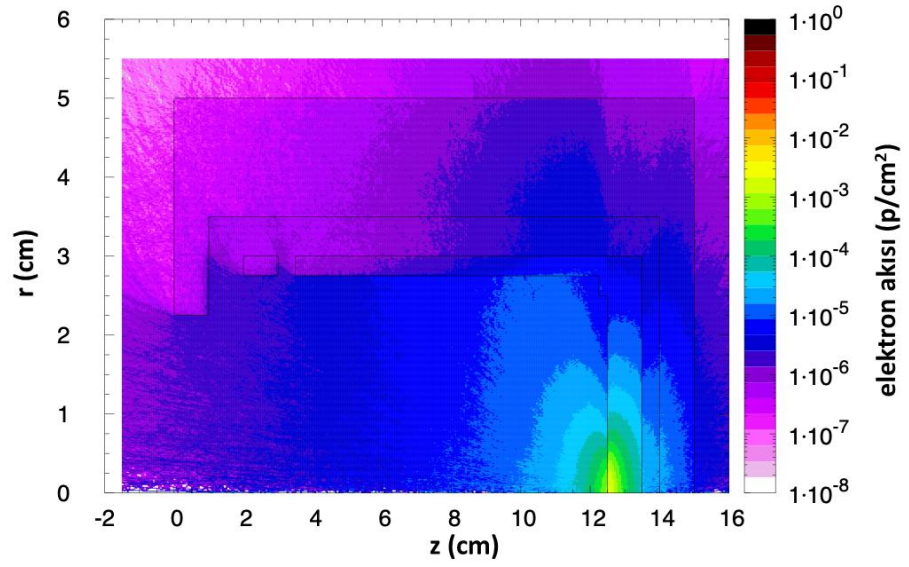
FK tasarımı için başka bir önemli husus, demet durdurucu ile proton demetinin etkileşimi neticesinde oluşan ikincil elektronların baskılanması durumudur. Bu bağlamda keV ve üzerindeki enerjilere sahip ikincil elektronların oluşumuna ilişkin benzetim çalışmaları FLUKA ile yapılmıştır. Şekil 4.22 (b)'den görüldüğü üzere, proton demetleri demet durdurucuya (bakır) çarptığında, keV üzerindeki enerjilere sahip (proton başına)  $10^{-3}$  elektron/cm<sup>2</sup> oluştuğu ve bunlardan  $5 \times 10^{-6}$  elektron/cm<sup>2</sup>.p'nin tasarımında bir elektron baskılayıcı ünitesinin bulunmaması durumunda FK'dan kaçtığı görülmektedir. Bu nedenle 100 nA civarında bir proton demet akımı için, 11,9 pA civarında bir ölçüm hatasının olacağı öngörülmektedir. 100 eV'nin altındaki enerjilere sahip elektronların ise tüm ikincil elektronlara oranının % 90 civarındadır (Hasselkamp vd. 1992).

Yukarıda bahsedilen ikincil elektronların FK'dan kaçmasını önlemek ve böylelikle en doğru akım ölçümünün yapılmasını temin için tasarıma bir elektron baskılayıcı elektrot eklenmiştir. Bu baskılayıcının ikincil elektronlar üzerindeki etkisini görmek üzere CST benzetim programı kullanılarak bir model oluşturulmuştur. Şekil 4.23'de gösterildiği üzere elektron baskılayıcı elektrot üzerine -500 V'luk bir gerilim uygulandığı takdirde, tüm ikincil elektronların (100 eV enerjili ve % 10 enerji yayılımına sahip) FK'dan kaçışı önlenmektedir.



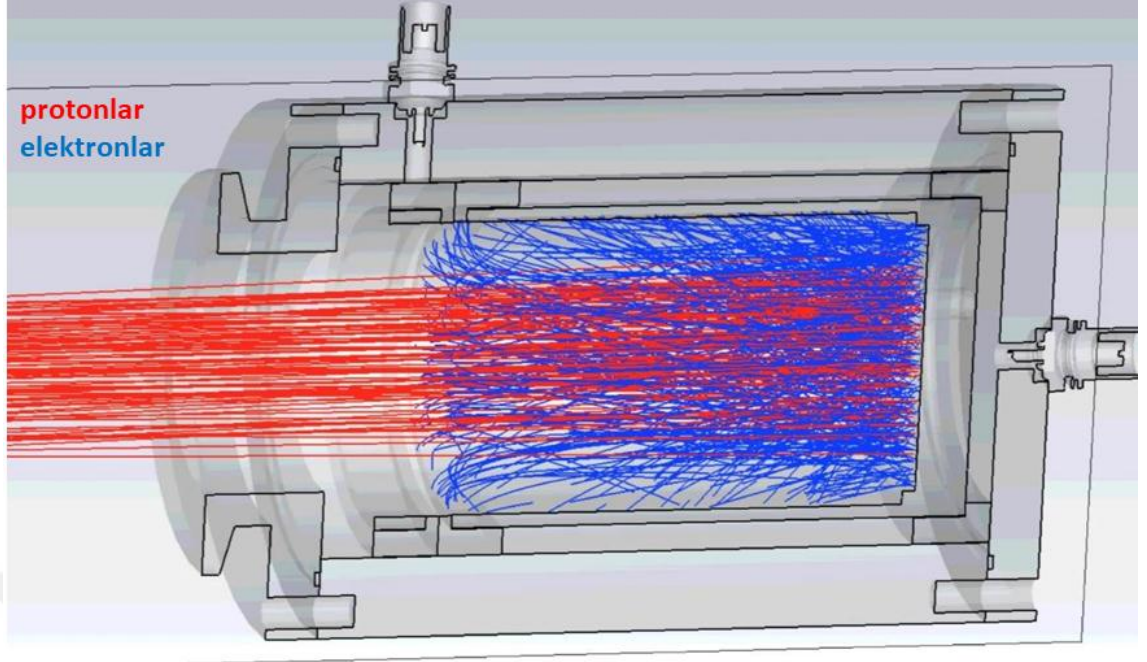


(a)



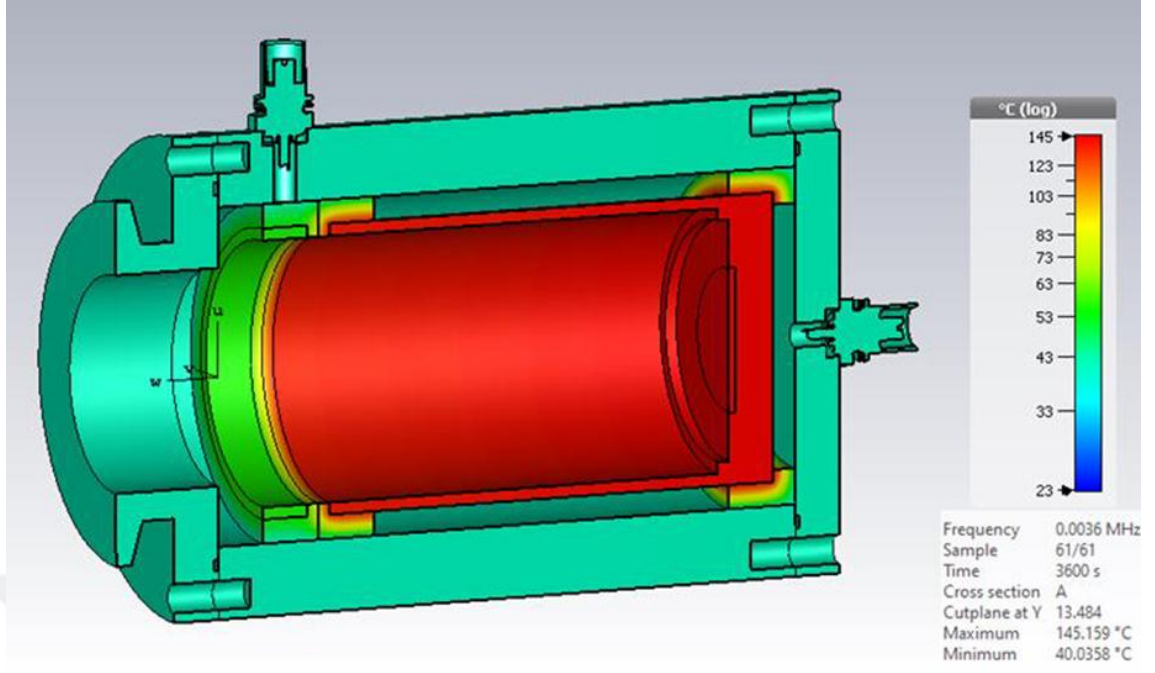
(b)

Şekil 4.23 Faraday kabı içerisindeki (a) proton akısı (b) ikincil electron akısı

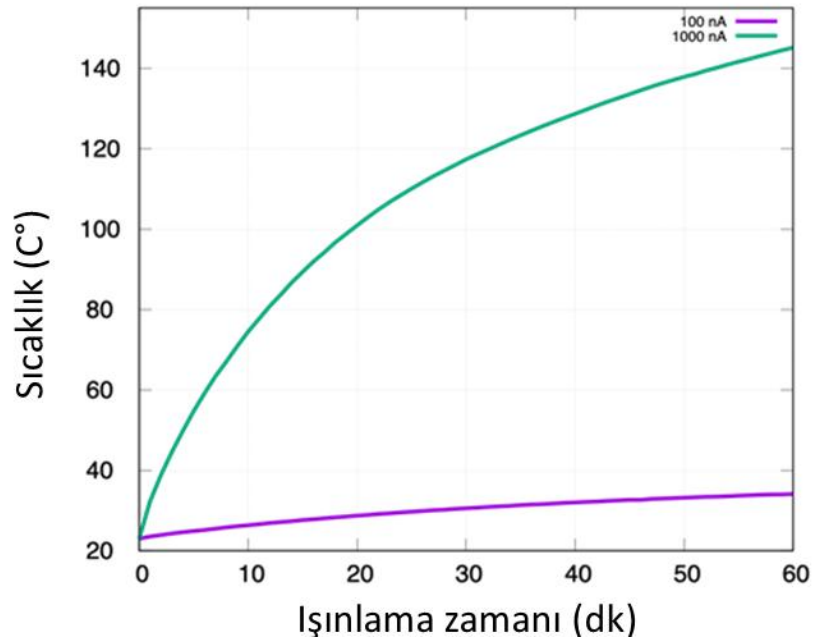


Şekil 4.24 Faraday kabı üzerinde elektron baskılayıcı ünitesinin etkisinin gösterimi

Bakır, teflon ve alüminyum malzemelerden imal edilmesi düşünülen FK'nın, gelen proton demetinin oluşturacağı ısı yük altındaki davranışının kestirilmesi tasarımın gerçekçiliği ve doğruluğu açısından önemli olan bir diğer önemli husustur. Bu nedenle gelen proton demetinin FK'yı oluşturan malzemeler (bakır, teflon ve alüminyum) ile etkileşimi sonucunda, FK üzerinde oluşturacağı ısı yük ve sıcaklık dağılımı CST programından faydalanarak simüle edilmiştir. Bu kapsamda 30 MeV enerjili ve 1  $\mu$ A akım değerine sahip proton demetinin 1 saatlik ışınlama boyunca FK üzerinde oluşturduğu ısı dağılımı Şekil 4.24 (a)'da gösterilmiştir. 1 saatlik ışınlama neticesinde dış duvardaki sıcaklık değerinin 145 C°'ye yükseldiği Şekil 4.24 (b)'de görülebilir. 100 nA'lık bir demet akımı ile 1 saatlik bir ışınlama yapıldığı durumda ise sıcaklık değerinin 35 C° civarında termal dengeye ulaştığı görülmektedir. Bu nedenle tasarlanan FK kullanılarak, herhangi bir soğutmaya ihtiyaç duymaksızın 100 nA civarındaki akım değerleri için uzun süreli ışınlamalar gerçekleştirilmek mümkündür.



(a)

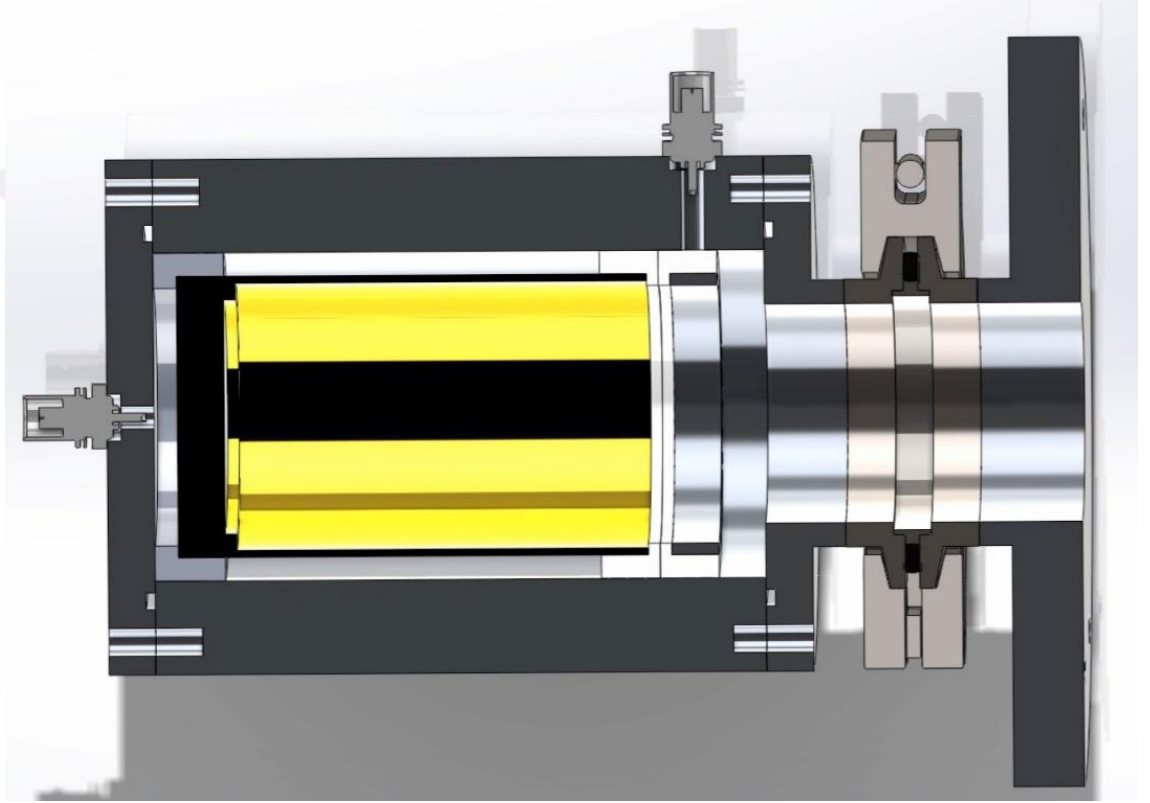


(b)

Şekil 4.25 Faraday kabı üzerinde; (a) 30 MeV enerjili ve 1  $\mu\text{A}$  akım değerine sahip proton demetinin, 1 saatlik ışınlama süresince oluşturacağı termal etki (b) 100 nA ve 1  $\mu\text{A}$  akımlı proton demetlerinin yaratacağı zamana bağlı olarak sıcaklık değişimi

#### 4.1.3.2 Faraday kabın imalatı ve montajı

Tasarımı tamamlanan Faraday kabı oluşturan parçaların imalatı için gerekli olan bakır, alüminyum ve teflon malzemelerin temin edilmesinin ardından, tüm bileşenler yapılan tasarımına uygun olarak oluşturulan Şekil 4.25’deki 3 boyutlu katı model çizimine göre mevcut mekanik atölyenin imkânları dâhilinde imal edilmiştir.



Şekil 4.26 Faraday kabın imalatı için oluşturulan CAD çizimi

FK'yı oluşturan bölümlerden demet durdurucu elektrot ile elektron baskılayıcı elektrot bileşenleri bakır malzemeden, dış (cidar) duvar alüminyum malzemeden ve elektriksel yalıtım için kullanılacak izolasyon halkaları ise PTFE (teflon) malzemeden üretilmiştir (Şekil 4.26).



Şekil 4.27 Faraday kabın montajı öncesinde üretilen tüm alt bileşenlerin görünümü

Üretilen bileşenler vakum sızdırmaz şekilde bir araya getirilerek tümlenme işlemi tamamlanmıştır. Son olarak sinyal iletimi için kullanılacak ve aynı zamanda elektron baskılayıcı elektrota gereken yüksek voltaj beslemesini sağlayacak olan BNC tipteki konnektörlere ilişkin bağlantılar yapılarak, FK'nın dış cidarına vakum sızdırmaz özelliğe sahip epoksi yapıştırıcı ile montajı tamamlanmıştır (Şekil 4.27).



Şekil 4.28 Vakum sızdırmaz olarak tümlenme işlemi tamamlanan Faraday kabın görünümü

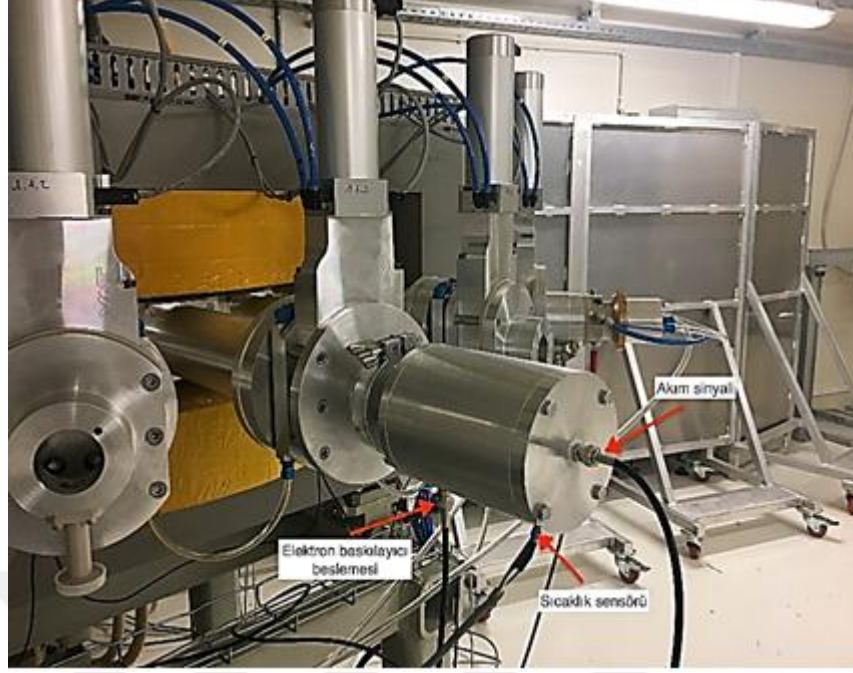


Vakum altında çalışacak olan FK'nın tümleme işlemlerinin tamamlanmasının ardından, He kaçak dedektörü kullanılarak vakum sızdırmazlık testleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan testler neticesinde Ar-Ge demet hattının operasyonu için gereken vakum seviyesini ( $< 5.10^{-6}$  mbar) olumsuz etkileyecek seviyede herhangi bir kaçağın ( $<10^{-12}$  mbar.l/s) FK'da olmadığı görülmüştür (şekil 4.28). Sonuç olarak FK'nın ve bileşenlerinin imalat, montaj ve devreye alma işlemlerinin elektriksel iletkenlik ve vakum sızdırmazlık açılarından başarıyla gerçekleştirildiği görülmüştür.



şekil 4.29 Faraday kabı için He kaçak dedektörü ile yapılan vakum sızdırmazlık testinden görünüm

Vakum sızdırmazlık ve elektriksel iletkenlik testleri tamamlanan FK, gerçek zamanlı düşük akım ölçüm test/denemelerini gerçekleştirmek maksadıyla uygun bir flanş bağlantısıyla (Ar-Ge) Demet Hattı 1.1'in sonundaki 5 çıkışlı anahtar mıknaťsın, üç numaralı çıkış portuna monte edilmiştir (şekil 4.29).



Şekil 4.30 Faraday kabın test öncesi anahtar mıknatısın 3 numaralı çıkışına montajı sonrası görünümü

FK'dan alınacak ölçüm sinyallerini Ar-Ge laboratuvarına yerleştirilen akım ölçüm elektronik ünitesine aktarmak üzere yaklaşık olarak 45 m RG58 tipi koaksiyel kablo kullanılmıştır.

#### 4.1.3.3 Elektronik ölçüm ünitesinin oluşturulması

FK'dan gelen analog akım sinyalinin işlenerek anlamlı bir hale getirilebilmesi, bir diğer ifadeyle gerçek zamanlı olarak ölçüm alınabilmesi için bir elektronik ölçüm ünitesi tasarlanmıştır. Söz konusu ölçüm sistemi temelde bir Arduino I/O kartı ile bir baskı-devre kartından meydana gelmektedir.

Baskı devre kartı tümüyle RHDT Radyasyon Ölçme ve İzleme Birimi bünyesindeki Elektronik Laboratuvarı'nın yetenekleri ölçüsünde hazırlanmıştır. Hazırlanan elektronik ölçüm ünitesinin ortam gürültüsünden etkilenmemesi için, ünite Faraday kafesi vazifesi görecektir alüminyumdan yapılmış olan bir kutu içerisine yerleştirilmiştir (Şekil 4.30).



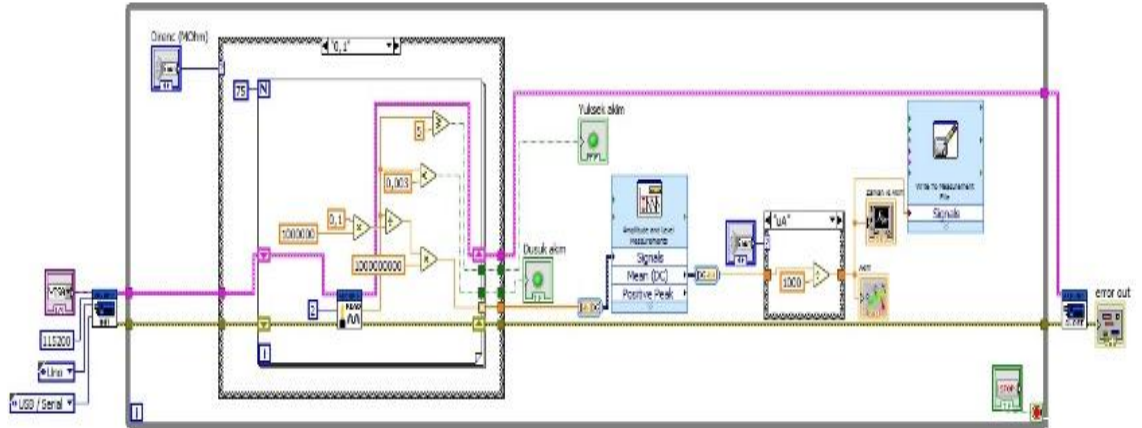
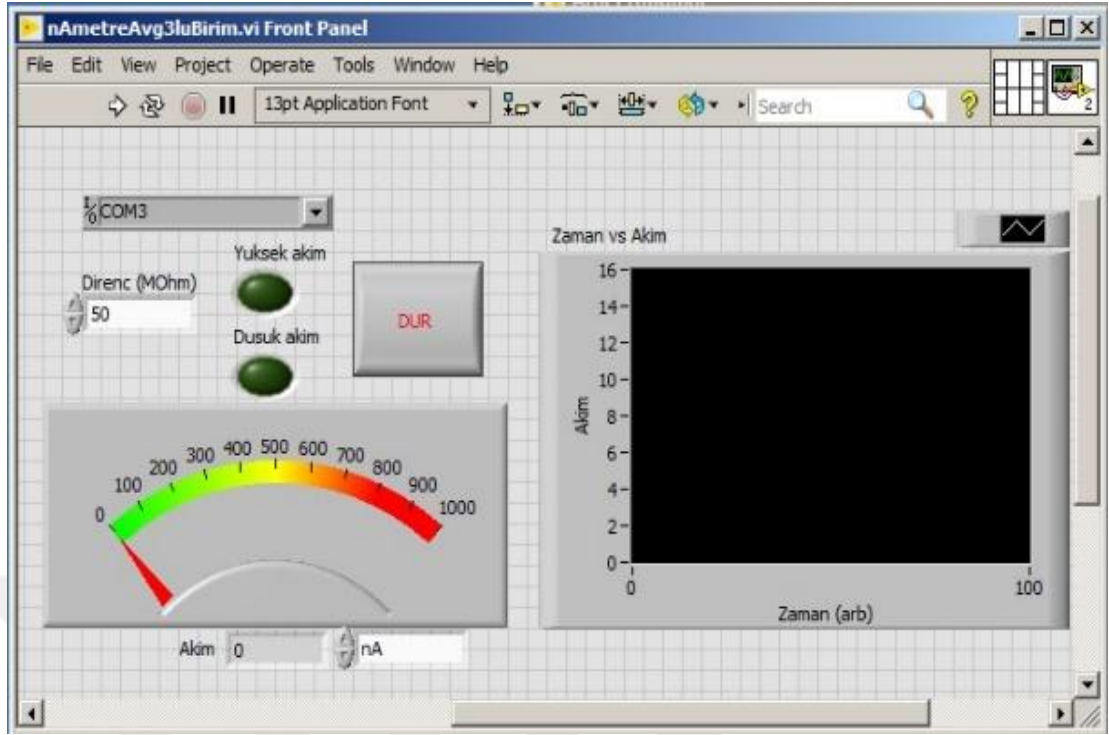
Şekil 4.31 Akım ölçüm sistemi elektronik ölçüm ünitesinin görünümü

Anılan çerçevede FK'dan gelen analog demet akımı sinyali, megaohm ( $M\Omega$ ) mertebesindeki bir direnç üzerinden toprağa aktarılmaktadır. Bu esnada direnç üzerinde oluşan potansiyel fark, Arduino I/O kartı esaslı bir voltmetre ile ölçülerek demet akımının değeri sayısal olarak hesaplanabilmektedir. Bununla birlikte tasarıma, FK üzerinde sıcaklık değişimini izleyerek, ani bir aşırı ısınma durumunu farketmek üzere bir PT100 sıcaklık sensörü ilave edilmiştir.

#### 4.1.3.4 En düşük akım değerinin belirlenmesi

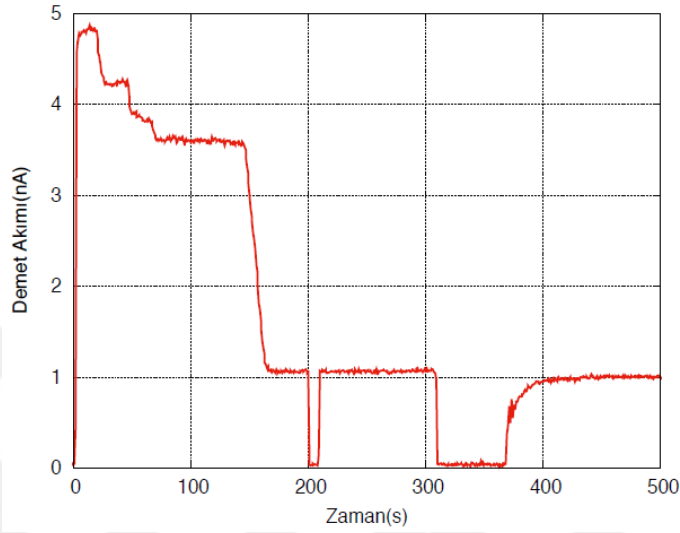
Ar-Ge Demet Hattı sonundaki kararlı bir şekilde elde edilecek en düşük proton demeti akımının belirlenmesine yönelik çalışmalar yapılmıştır. Söz konusu ölçüm işleminin eş zamanlı olarak yapılabilmesi için Labview programı (National Instruments, 2018) kullanılarak bir ölçüm ve hesaplama arayüzü oluşturulmuştur (Şekil 4.31).





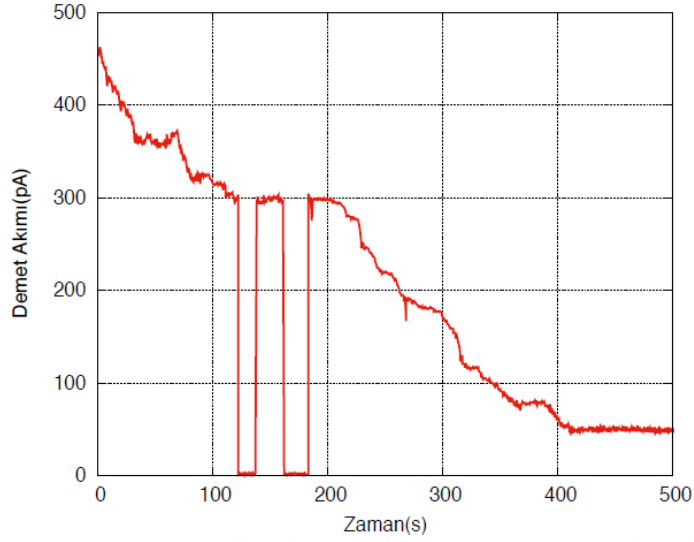
Şekil 4.32 Akım ölçüm sistemi için oluşturulan arayüz ile mantık devresine ilişkin şematik gösterim

Akım ölçüm elektroniğinde kullanılan arduino kartın minimum analog giriş sinyal seviyesinin  $\sim 50$  mV ile sınırlı olması nedeniyle, sistemin ölçüm kabiliyeti çerçevesinde ilk test ölçümleri sırasında en düşük olarak 1 nA seviyesinde kararlı akım değerleri elde edilmiştir (Şekil 4.32).



Şekil 4.33 Faraday kabı vasıtasıyla ölçülen zamana bağlı proton demet akımı (1 nA seviyesinde kararlı)

Ancak hedeflenen uygulamalar sırasında daha düşük akım seviyelerine inilmesi gerekeceğinden, özellikle pikoamper seviyesindeki ölçümlerin daha hassas bir şekilde gerçekleştirebilmesine yönelik olarak, tasarlanan ölçüm sistemine bir piko-ampermetre (Keithley 6482) ilave edilmiştir. Bununla birlikte söz konusu akım seviyeleri için; FK'dan gelen analog sinyali ölçüm ünitesine aktarmak üzere kullanılan koaksiyel kablo, daha hassas olan triaksiyel kablo ile değiştirilmiştir. Ölçüm sistemindeki söz konusu donanımsal iyileştirmelerin ardından hızlandırıcının iyon kaynağı (IS ve ARC) ve enjeksiyon hattı alt sistemlerinin parametreleri ile hassas ayarlamalar yapılmıştır. Bu sayede Şekil 4.33'den görüldüğü gibi önce 300 pA seviyelerinde ve müteakiben 50 pA seviyelerinde kararlı akımlar elde edilmiştir. Demet akımının ve ölçüm sisteminin doğruluğunun tekrarlanabilirliğini gözlemleyebilmek adına; demet akımı 300 pA seviyesindeyken, iyon kaynağının hiçbir parametresi değiştirilmeden, demet iki kez kapatılıp açılmıştır. Ölçümler sırasında gürültü önleme ve ortalama filtreleme yöntemleri kullanılarak 50 pA'lık bir akım ölçümü için belirsizlik  $\pm 2,5$  pA'e kadar düşürülmüştür.



Şekil 4.34 Faraday kabı vasıtasıyla ölçülen zamana bağlı proton demeti akımı (50 pA seviyesinde kararlı)

#### 4.1.3.5 Tartışma

Mevcut hızlandırıcı kontrol sisteminin ölçüm ekipmanları, elektroniği ve yazılımı, en düşük 0,1  $\mu\text{A}$ 'e kadar olan demet akımlarını ölçebilmeyi mümkün kılmaktadır. Ancak hedeflenen uygulamalar için pA seviyesindeki akımları olabildiğince doğru ölçebilen bir sisteme ihtiyaç bulunmaktadır. Bu amaçla, yüksek hassasiyetli (düşük gürültülü) elektroniğe sahip yeni bir Faraday kabı tasarlanmış, üretilmiş ve test edilmiştir. Faraday kabının termal dayanımına ilişkin yapılan benzetim çalışmaları, 100 nA proton demeti akımı için, 1 saat ışınlamanın sonunda, Faraday kabı üzerinde oluşacak sıcaklığın, herhangi bir soğutma olmaksızın  $35\text{C}^{\circ}$  civarında termal dengeye ulaştığını göstermektedir. Faraday kabı, gelen demetin saçılımından ve aynı zamanda ikincil elektron oluşumundan kaynaklanacak ölçüm hatalarını en aza indiren uygun bir geometriye sahiptir ve aynı zamanda bir baskılayıcı elektrot içermektedir. Bu sayede pikoamper düzeyindeki akım ölçümleri tasarlanan FC kullanılarak kararlı bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

## 4.2 Demet Hattı ve Deney İstasyonu Bütününün Tasarımı

IBA S.A tasarımı Cyclone®30 hızlandırıcısından proton demetleri 15-30 MeV enerji aralığında elde edilebilmekte ve en düşük olarak 0,1  $\mu$ A akım değerinde ölçülebilmektedir. Mevcut sistemden kaynaklanan kısıtlar nedeniyle, hedeflenen çalışmalar için gereken daha düşük akım ve enerji değerlerini elde edebilmek için, Ar-Ge Demet Hattının ilave bileşenlerle teçhiz edilmesi ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Çalışmanın bu bölümünde; hızlandırıcıdan elde edilen demetin enerjisini 2 MeV'e düşürecek ve pikoamper seviyesinde bir akım değeriyle ışınlama yapmayı olası kılacak, enerji düşürücü sistemi, enerji ölçüm sistemi, konik kolimatör, ışınlama odacığı ile Faraday kabı bileşenlerinden meydana gelen ve toplam uzunluğu 1,8 m olan bir demet hattı ve ışınlama istasyonunun tasarımına ilişkin olarak çalışmalara yer verilmiştir.

TAEK-PHT'de yer alan Cyclone®30 hızlandırıcısında negatif yüklü hidrojen atomu, tur başına 170 keV'lik bir enerji kazanmaktadır. Hızlandırıcı kavitesinin tasarımına bağlı olarak; yüklü parçacık enerji kazandıkça, ardışık iki yörünge arasındaki mesafe de artar. Cyclone®30 hızlandırıcısında düşük enerjili yörüngelerin birbirine olan yakınlığı ve mevcut ekstraksiyon sisteminin boyutsal özellikleri nedeniyle, 15 MeV altındaki enerji değerlerinde siklotronun kararlı bir şekilde demetin doğrudan ekstrakte edilmesi pratikte mümkün değildir. Bu sebeple yüklü parçacık demetinin enerjisini amaçlandığı gibi 2 MeV'a düşürebilmek için bir enerji düşürücü sistemi tasarlanmıştır. Tasarlanan enerji düşürücü sistemi ve hızlandırıcının ekstraksiyon sisteminin uyumlu olarak kullanılması sayesinde demetin 2-15 MeV arasında arzu edilen enerji seviyesinde ayarlanması mümkün olacaktır. Ancak enerjisi enerji düşürücü sistemindeki folyolar vasıtasıyla düşürülmesi sırasında çoklu Coulomb saçılmalarının meydana gelmesi demet parametrelerini etkileyecektir. Bilindiği üzere yüklü parçacık demetinin enerjisi, hedef malzeme ile demetin etkileşimi sırasında meydana gelen elastik çarpışmalar, atomik uyarımlar ve iyonizasyonlar nedeniyle kademeli olarak azalır. Bu bağlamda aşağıda verilen Bethe-Bloch formülü, ağır yüklü parçacıkların ortalama enerji kaybı (durma gücü) oranını vermektedir.

$$-\frac{dE}{dx} = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[ \frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right] \quad 4.5$$

Burada;

$A$ : hedef malzemenin kütle numarasını,

$K/A = 4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 / A = \text{MeV g}^{-1} \text{cm}^2$ , for  $A = 1 \text{g mol}^{-1}$

$z$ : gelen parçacığın atom numarasını,

$Z$ : hedef malzemenin atom numarasını,

$T_{max}$ : tek bir çarpışmada transfer edilen maksimum enerjiyi,

$$T_{max} = \frac{2 m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{1 + 2\gamma m_e / M + (m_e / M^2)}$$

$\delta(\beta\gamma)$ : iyonizasyon kaybı için yoğunluk etkisi düzeltmesini,

$x = \rho s$ : yüzey yoğunluğunu veya kütle kalınlığını ( $\text{g/cm}^2$ ),

$s$ : malzemenin uzunluğunu,

$dE/dx$ : durdurma gücünü ( $\text{MeV cm}^2/\text{g}$ ) temsil etmektedir.

Söz konusu formül, aynı yüzey yoğunluk kalınlığına sahip farklı malzemeler için enerji kaybının hemen hemen aynı olacağını göstermektedir (Leo 1994). Bununla birlikte malzemelerdeki saçılma miktarı, malzemeler içerisindeki etkileşim uzunluğunun (radiation length) farklı olması nedeniyle çeşitlilik göstermektedir. Enerji düşürücü sistemin tasarımı sırasında söz konusu fiziksel gerçekler ile bunların etkileri dikkate alınmıştır.

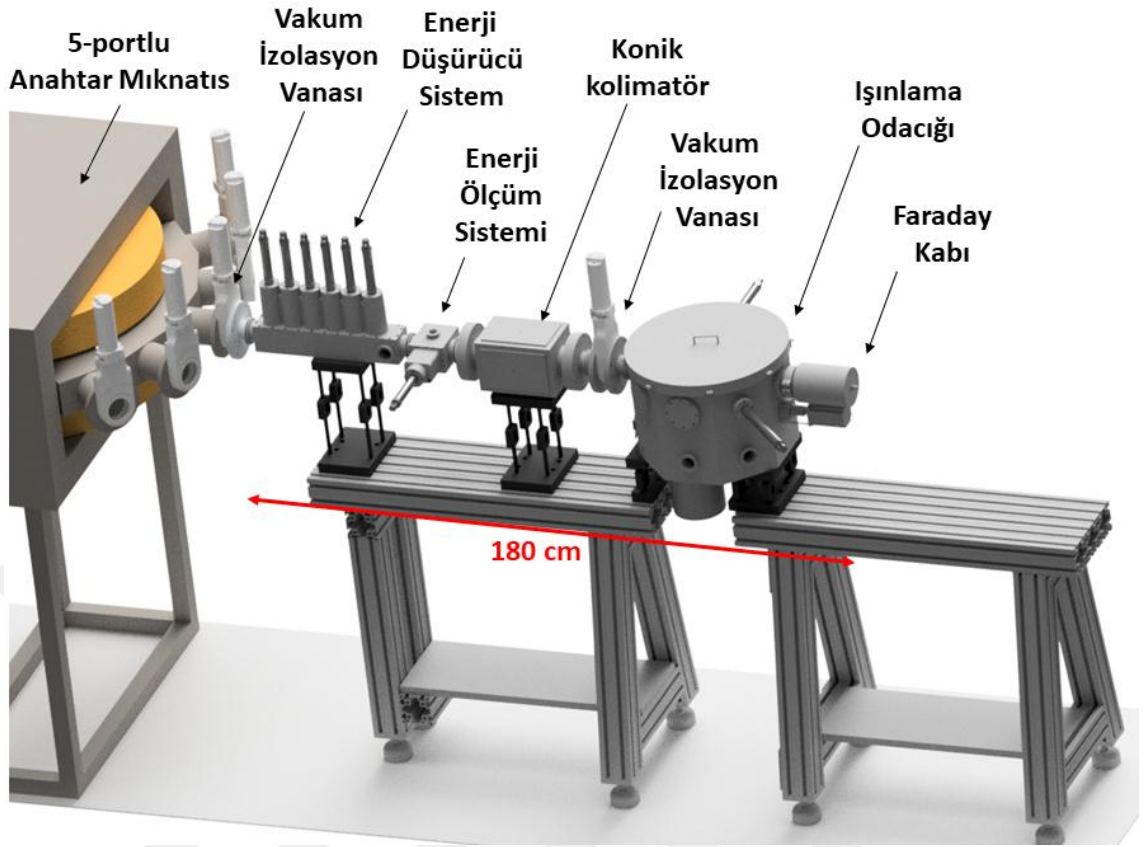
Cyclone®30 siklotron sisteminin enjeksiyon hattı, 1.2 mA'ya kadarlık bir akımı sağlamak üzere optimize edilmiştir. Düşük akımlı demetlerin kullanılacağı ışınlama çalışmaları, parçacık detektörü testleri ve yüklü parçacık demeti uygulamalarının gerçekleştirilebilmesi için, hızlandırıcı sisteminin enjeksiyon hattındaki solenoid mıknatısın devre dışı bırakılmasını da içeren bazı parametrelerinin ayarlanmasını gerekmektedir (Auger vd. 2015). IBA S.A. tarafından sağlanan hızlandırıcı kontrol sisteminin ölçüm hassasiyeti, nispeten yüksek akımları ölçmek için tasarlanmış olup 0,1  $\mu\text{A}$ 'dır. Bu nedenle, yüksek hassasiyetli bir ölçüm elektroniği ile pikoamper seviyelerine inen demet akımlarını ölçebilen bir Faraday kabı tasarlanmış, üretilmiş ve test edilmiştir. Söz konusu tasarıma ilişkin ayrıntılar Bölüm 4.1.3'te detaylarıyla birlikte verilmiştir.

Işınlama odacığının tasarımı, aynı çalıştırmada birden fazla örneğin ışınlanabilmesini, değiştirilebilir kolimatörler sayesinde demet şekilleniminin ayarlanabilmesini, numunenin ışınlanması öncesinde demet homojenliğinin ve akımının ölçülmesini ve farklı dedektör sistemlerinin odacığın etrafına yerleştirilmesini sağlayabilecek özellikte gerçekleştirilmiştir.

Tasarım ayrıca ışınlama odacığına girmeden hemen önce demeti kolime etmek için bir konik kolimatörü (4-jaw collimator) içermektedir. Söz konusu kolimatör mevcut Ar-Ge demet hattının bir parçasıyken, anahtar mıknaıtıs montajı sırasında IBA S.A. tarafından sökülen ve aslında atıl durumda bekleyen bir bileşen olup, yapılan tasarım sayesinde değerlendirilmesi mümkün olacaktır. Bu kolimatör gerektiğinde su soğutması bağlanarak kullanılabilir özellikte haizdir.

İlave olarak demet hattının vakumu ile ışınlama odacığının vakumunu birbirinden ayıran ve aynı zamanda demet hattında herhangi bir vakum kaybına neden olmadan ışınlama odacığına hızlı bir şekilde erişimi sağlayacak ikinci bir vakum izolasyon vanasının kullanılması planlanmıştır. Demet hattının ve ışınlama odacığının güvenli bir şekilde çalışması için  $5 \times 10^{-6}$  mbar'dan düşük bir vakum seviyesi yeterli olduğundan, demet hattı bileşen bağlantılarında KF tipi kelepçelerin kullanılması hedeflenmiştir. Bu detay, gerektiğinde bileşenlerin kolay bir şekilde değiştirilmesine de müsaade verecektir. Demet hattı ve ışınlama odacığında pikoamper seviyesinde akımların kullanılacağı dikkate alınarak, sistem özel bir soğutma ünitesine ihtiyaç duymayacak şekilde tasarlanmıştır.

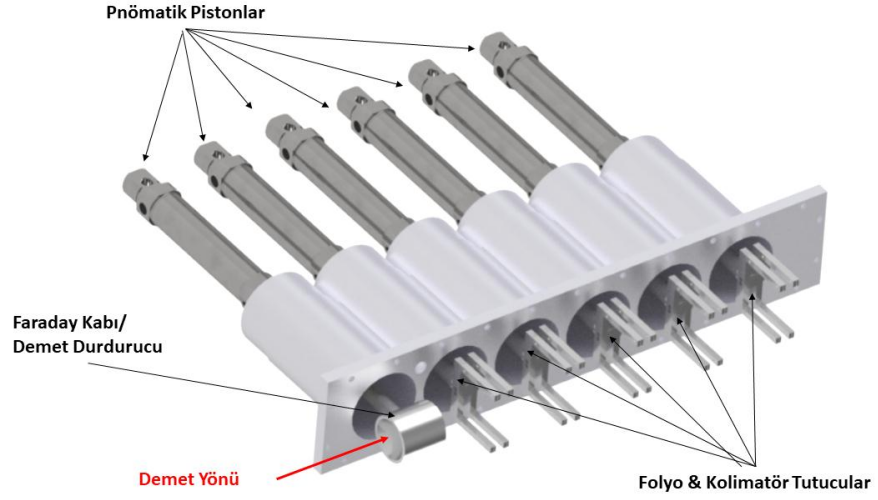
Tüm demet hattı bileşenleri, ışınlama nedeniyle oluşabilecek radyoaktiviteyi asgari seviyede tutmak için alüminyum malzemeden üretilecek şekilde tasarlanmıştır. Demet hattı boyunca gerek demet diyagnostiği, gerekse enerji ayarlama maksatlı bileşenlerin demet eksenine uygun bir şekilde konumlandırılmasını temin edecek ve pnömatik pistonlardan oluşacak bir sistem tasarlanmıştır. Tüm bu bileşenleri gösteren tasarlanan demet hattı ve deney istasyonu bütününe ilişkin şematik çizimi Şekil 4.34'de verilmektedir.



Şekil 4.35 TAEK PHT vakum altında çalışan Düşük Akımlı Işınlama Sistemi

#### 4.2.1 Enerji düşürücü sisteminin tasarımı

Hızlandırıcı sisteminden elde edilen demetin enerjisi hâlihazırda 15-30 MeV arasında elde edilebilmektedir. Demet enerjisinin 15 MeV'den, yüklü parçacık uygulamaları için tercih edilecek en düşük enerji değeri olan 2 MeV'e kadar kademeli olarak düşürülmesini mümkün kılacak bir enerji düşürücü sistemi tasarlanmıştır. Önerilen tasarım; enerji düşürücü sistemine gelen proton demetinin akımını ölçmek veya durdurmak için kullanılacak bir adet Faraday kabı ile gelen demetin enerjisi düşürmek için kullanılacak farklı kalınlık veya farklı tipte folyo malzemeler ile demetin şekillenimini düzenlemek (toparlamak) için kullanılacak kolimatör (1 cm'lik dairesel açıklık) bütünü taşıyan 5 adet tutucuyu içermektedir. Alüminyum tutuculardaki folyoların etkin yüzey alanı  $16 \text{ cm}^2$ 'dir ve montaj sistemi sayesinde kolaylıkla değiştirilebilir özelliktedir.

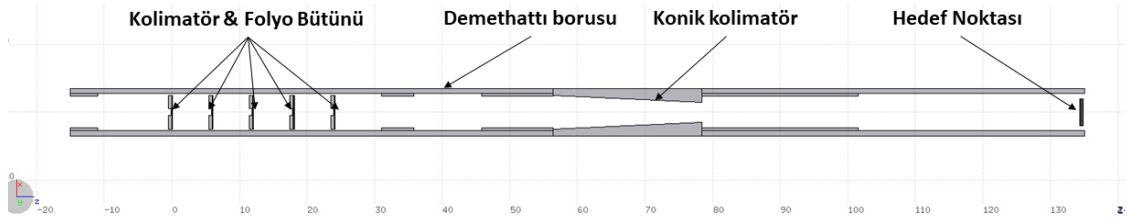


Şekil 4.36 Enerji Düşürücü (ED) Sistemin tasarımına ilişkin CAD çizimi

Tasarlanan enerji düşürücü sisteminde, söz konusu 6 farklı ünitenin ( 1 Faraday kabı, 5 adet folyo/kolimatör bütünü) birbirinden bağımsız olacak şekilde hareket ettirilebilmesi (demet ilerleme yönü/ekseni üzerinde indirilip kaldırılabilmesi) için 6 adet pnömatik piston kullanılması öngörülmüştür. (Şekil 4.35)

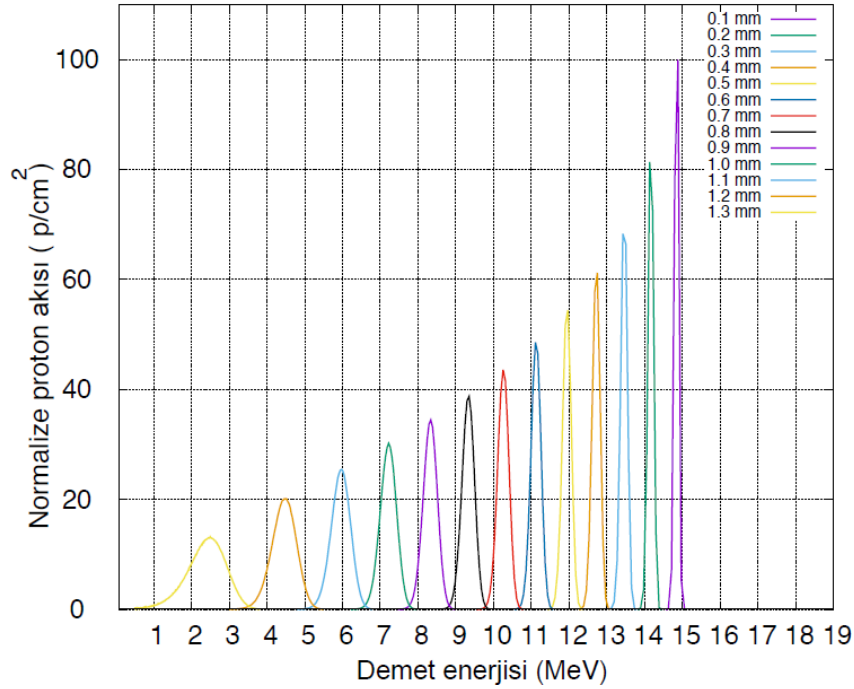
Enerji düşürücü sisteminin tasarımı sırasında hedef düzlemindeki (ışınlama noktasındaki) proton demetinin özellikleri bilgisayar benzetimleri ile çalışılmıştır. Farklı enerji düşürücü ve kolimatör konfigürasyonları için (farklı folyo malzemeleri, değişik folyo sayıları ve farklı folyo kalınlıkları dikkate alınarak) hedef noktasındaki demet enerjisinin yayılımı (energy spread) ve demet akısının (beam fluence) homojenliği (dağılımını) incelenmiştir. Söz konusu demet parametrelerini öngörebilmek için FLUKA benzetim kodu (Ferrari 2005) kullanılmıştır. Benzetim çalışmaları esnasında, gelen demetin tanımlanması sırasında hızlandırıcının iyon kaynağı ve ekstraksiyon (stripper) sisteminden kaynaklanabilecek enerji yayılımları ihmal edilmiştir. Gelen demetin uzaysal (spatial) profili için ise enine düzlemde her iki ekseninde 5 mm'lik FWHM'a sahip Gaussiyen bir dağılım esas alınmıştır. Monte Carlo yaklaşımlı benzetim çalışmaları, güvenilir istatistikî sonuçlar elde edebilmek için 15 milyon olay ile gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan demet hattı deney istasyonu bütününe ilişkin geometrinin FLUKA uygulaması Şekil 4.36'da verilmiştir.





Şekil 4.37 Hedef düzlemindeki demet özelliklerini hesaplamak amacıyla kullanılan FLUKA benzetimleri için oluşturulan (DAKIS) geometrisi

Siklotronun ekstraksiyon sisteminden ekstrakte edilebilir demet enerjisinin en düşük 15 MeV olması nedeniyle, benzetim çalışmaları sırasında demetin başlangıç enerjisi 15,5 MeV olarak seçilmiştir. Bu kapsamda başlangıç enerjisi 15,5 MeV olan proton demetinin 0,1 mm ile 1,3 mm arasında değişen kalınlıklara sahip alüminyum enerji düşürücü folyolardan geçtikten sonra, hedef düzlemindeki (noktasındaki) enerji değeri ve enerji yayılımı araştırılmıştır (Şekil 4.37).



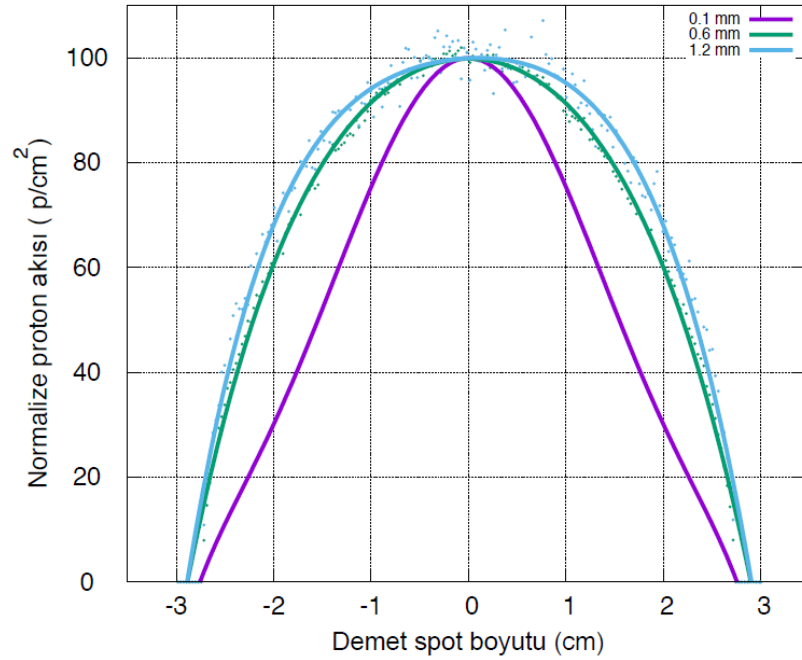
Şekil 4.38 15,5 MeV başlangıç enerjili proton demetinin enerji düşürücü sisteminde farklı kalınlıktaki alüminyum folyolardan geçtikten sonra hedef düzlemindeki enerji yayılımı

Elde edilen deęerler izelge 4.6'da tablolařtırılmıřtır. Beklendięi gibi enerji dūřurcū folyo kalınlıęı ile birlikte demetin enerji yayılımı artarken, demet enerjisi ve akısı azalmaktadır. 2 MeV'in altındaki enerji deęerleri için enerji yayılımı FWHM'nin % 50'si kadar olurken ve hedef noktasındaki demet akısı % 10 civarına gerilemektedir. PIXE ve PIGE vb. yūklū parçacık demeti uygulamalarında sōz konusu enerji yayılımının artması ilave bir arka plan oluřturmakta ve yapılacak nicel analizlerde etkileřim tesir kesiti hatasını artırmaktadır (Johansson 1988, Ishii 2019). Bir dięer yūklū parçacık yōntemi olan RBS teknięinde ise, gelen yūklū parçacık demetinin enerji yayılımındaki artıř analiz edilecek numuneden farklı açılarda yūklū parçacık saçılımını arttıracadıęından analizi doęrudan etkileyecektir (IAEA 2000). Bununla birlikte, benzetim sonuçları uyarınca elde edilen enerji yayılım deęerleri ile nitel olarak malzeme analizi yapmak mūmkündür (izelge 4.6). Yapılan tasarıma enerji dūřurcū sistemden hemen sonra gelecek bir dipol mıknatıs-slit bütūnū ilave edilmesiyle, enerji yayılımının dūřürölmesi ve bōylelikle dūřuk dedeksiyon limitleri içerisinde olsa dahi nicel olarak malzeme analizi yapmak mūmkūn olabilecektir.

Çizelge 4.6 15,5 MeV bařlangıç enerjili proton demetinin enerji dūřurcū sisteminde farklı kalınlıklardaki folyolardan geçtikten sonra hedef dūzlemdeki enerji yayılımı ve demet akısı

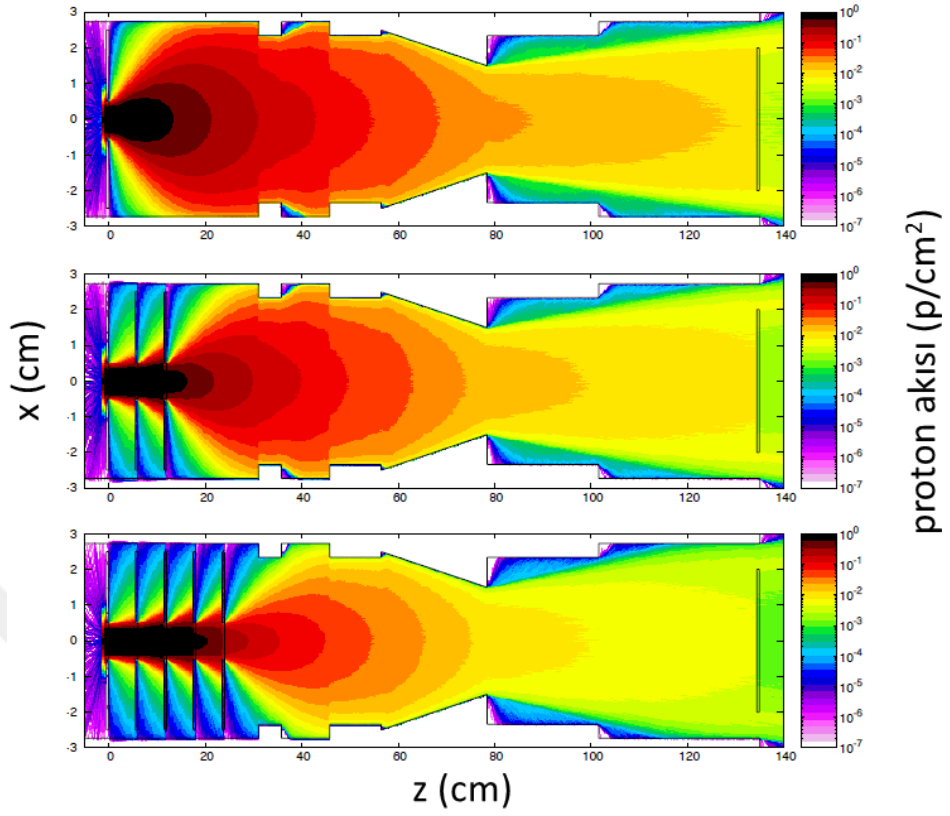
<b>Degrader kalınlığı (mm)</b>	<b>Demet ıkış enerjisi (MeV)</b>	<b>Demet enerjisi yayılımı-FWHM (%)</b>	<b>Hedef noktasındaki akı (relative %)</b>
0.1	14.9	1.07	100.00
0.2	14.1	1.28	81.50
0.3	13.4	1.64	68.30
0.4	12.7	2.04	61.20
0.5	12.0	2.20	54.42
0.6	11.1	2.88	48.57
0.7	10.2	3.53	43.53
0.8	9.3	4.30	38.74
0.9	8.3	5.30	34.45
1.0	7.2	6.94	30.20
1.1	6.0	9.83	24.45
1.2	4.5	16.22	20.14
1.3	2.5	45.20	13.20

Aranan gerekliliklerden birisi olan ışınlama homojenliği için önemli bir diğer parametre, hedef düzlemindeki demet akısının homojenliğidir. Demet akısının hedef düzlemindeki homojenliği, kalınlığı 0,1 mm, 0,6 mm ve 1,2 mm olan alüminyum enerji düşürücü folyolar için araştırılmıştır. Şekil 4.38'den görüleceği üzere demetin kalın folyo malzemelerde daha fazla saçılması ve boyuna momentumunun azalması nedeniyle, 1,2 mm'lik kalınlığa sahip enerji düşürücü folyo tercih edilmesi hedef düzlemindeki demet akısının homojenliği açısından avantaj sunmaktadır. Enerji düşürücü sisteminde 0,1 mm, 0,6 mm ve 1,2 mm kalınlıklara sahip alüminyum folyoların tercih edildiği durumlar için demetin hedef düzlemindeki homojenliği (16 cm<sup>2</sup>'lik bir yüzey alanı için) sırasıyla % 30,1, % 60,7 ve % 68,1 olarak hesaplanmıştır.

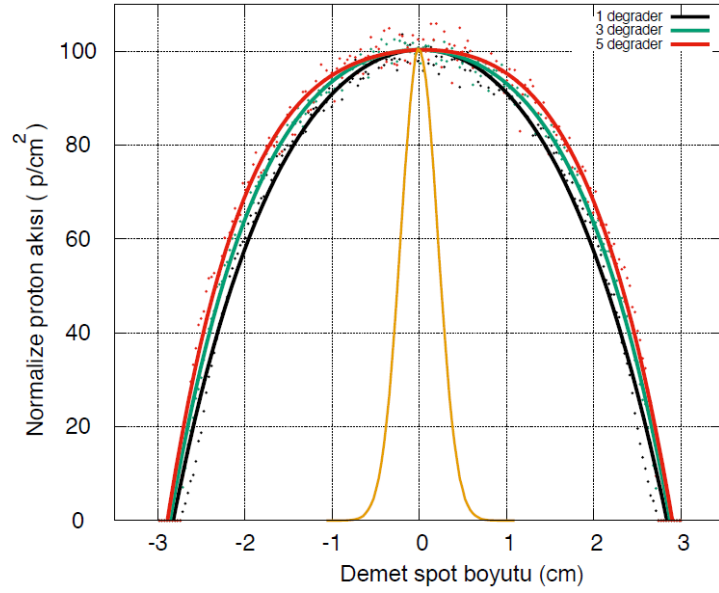


Şekil 4.39 15,5 MeV başlangıç enerjili proton demetinin; 0,1, 0,6 ve 1,2 mm kalınlıktaki enerji düşürücü folyolardan geçtikten sonraki, hedef düzlemindeki (polinom fit edilmiş) demet akısı homojenlikleri

Çalışma esnasında farklı enerji düşürücü sistem konfigürasyonlarının demet akısı homojenliği ve nispi akı üzerine etkisi bir başka problem olarak ele alınmıştır. Bu bağlamda gelen demetin enerjisini 15 MeV'den 5 MeV'ye düşüren ve farklı sayılarda folyolar içeren (tekli, 3'lü ve 5'li), ancak aynı toplam kalınlığa sahip konfigürasyonlar için hedef düzlemindeki demet akısının homojenliği çalışılmıştır. (Şekil 4.39).



(a)



Şekil 4.40 (a) Tekli, üçlü ve beşli enerji düşürücü folyolar için hedef düzlemindeki demet akısı homojenlikleri (b) Enerji düşürücü folyo kullanılmadan, tekli, üçlü ve beşli folyolar kullanılarak hedef düzleminde (polinom fit edilmiş) elde edilen demet

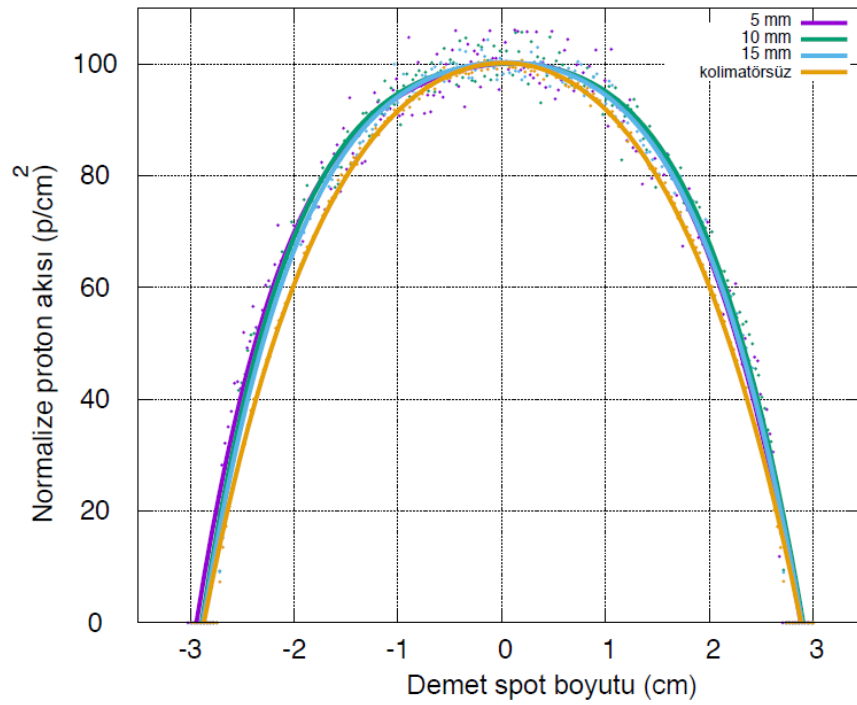
Söz konusu tek folyolu, 3 folyolu ve 5 folyolu kombinasyonlar dikkate alınarak yapılan benzetim çalışmaları neticesinde; hedef düzleminde  $16 \text{ cm}^2$ 'lik bir yüzey alanı için sırasıyla % 58, % 64 ve % 69 oranlarında demet homojenliği elde edilmiştir. Bir diğer deyişle; aynı toplam kalınlığa erişilecek şekilde enerji düşürücü folyo sayısını artırdığımızda, yaşanan saçılma artışının sebep olduğu demet diverjansının artmasından ötürü, hedef düzlemindeki demet akısının homojenliğinin daha iyi bir hale geldiği görülmektedir. Çizelge 4.7'de, aynı demet enerjisi esas alınarak, farklı enerji düşürücü konfigürasyonları için hesaplanan hedef düzlemindeki nispi demet akısı değerleri verilmiştir. Hesaplamalar tekli ve 5 folyolu konfigürasyonlar arasında demet kaybı açısından % 50 oranında bir farklılık olduğunu göstermektedir. Bu nedenle 5-folyolu konfigürasyon, demet akısının daha çok azalmasına sebep olmasına rağmen, demet homojenliğinin daha önemli olduğu uygulamalar için daha iyi bir seçenektir.

Çizelge 4.7 Farklı sayıda folyo için hedef düzlemindeki oransal (nispi) demet akıları

Konfigürasyon	Hedef noktasındaki akı (% rölatif)
degradersiz	100.0
1 degrader	0.4
3 degrader	0.3
5 degrader	0.2

Bir diğer çalışma olarak enerji düşürücü sisteminde (folyoların hemen arkasında) kullanılan kolimatörlerin açıklığının, hedef düzlemindeki demet akısının homojenliği ile nispi akı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu maksatla 15,5 MeV enerjili gelen proton demeti için, enerji düşürücü sisteminde herhangi bir kolimatör kullanılmadığı durum ile 5 mm, 10 mm ve 15 mm'lik dairesel açıklıklara sahip kolimatör kullanıldığı durumlar için hedef düzlemindeki demet akısının homojenliği hesaplanmıştır (Şekil 4.40). Görüleceği üzere kolimatör kullanılmayan durum için hedef düzlemindeki ( $16 \text{ cm}^2$ 'lik bir yüzey alanı için) demetin homojenliği % 60 iken, 5 mm, 10 mm ve 15 mm'lik kolimatör açıklıkları için sırasıyla % 70, % 69 ve % 67'dir.

Sonuçlar uyarınca kolimatör açıklığının demet akısının homojenliği üzerinde az bir etkisi olmasına rağmen, demet akısının kendisi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmektedir (Çizelge 4.8). Aslında 15 mm'lik bir kolimatör açıklığı, demetin homojenliği ve akısı göz önüne alındığında iyi bir seçim olarak dikkat çekmektedir. Ancak hedeflenen malzeme ışınlama ve analiz maksatlı yüklü parçacık uygulamaları için demetin homojenliğinin, demet akısından daha önemli olarak kabul edilmesi nedeniyle, tasarım için 10 mm'lik bir kolimatör açıklığı tercih edilmiştir.

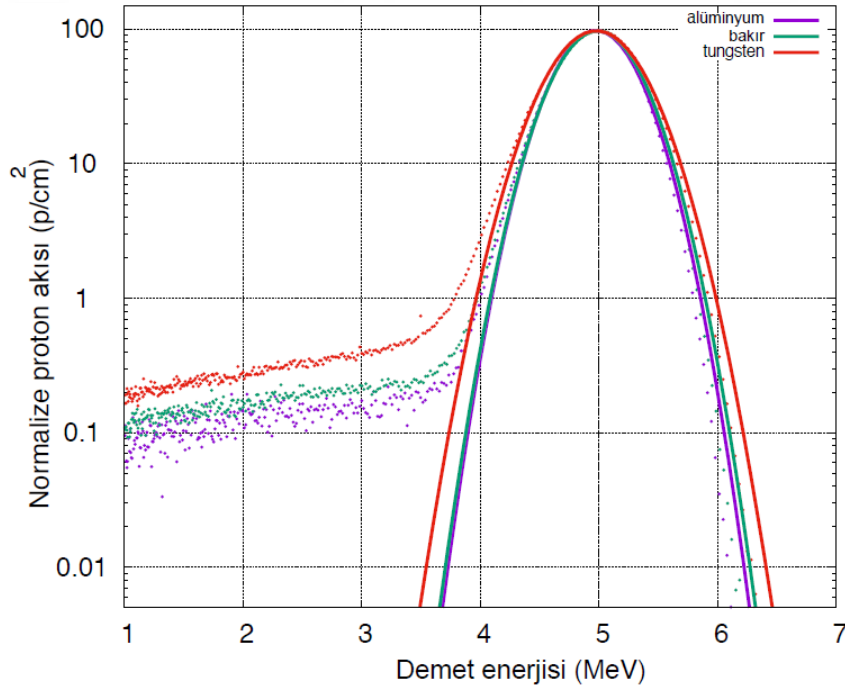


Şekil 4.41 15,5 MeV başlangıç enerjili proton demeti için farklı kolimatör açıklıkları hesaba katılarak elde edilen hedef düzlemindeki (polinom fit edilmiş) demet akısı homojenlikleri

Çizelge 4.8 Farklı kolimatör açıklıkları için oransal demet akısı değerleri

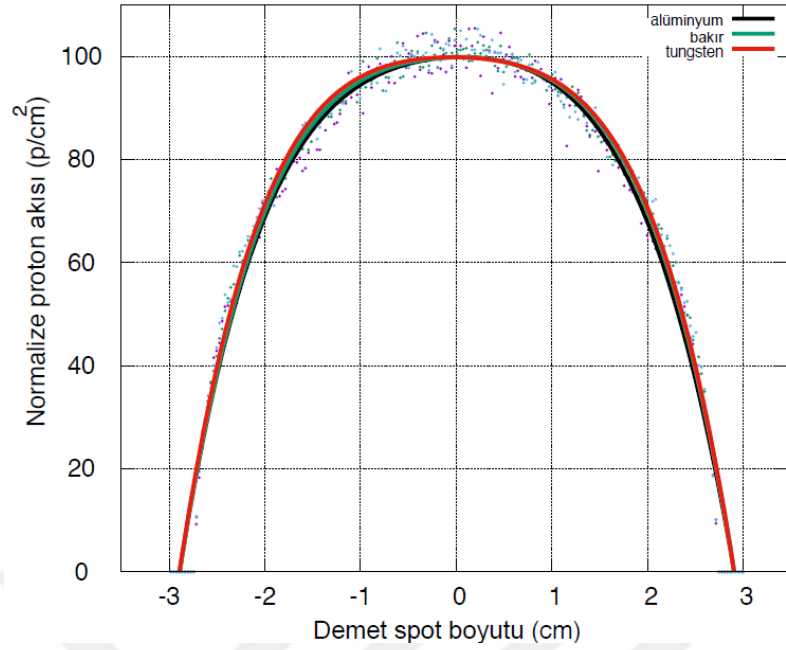
Konfigürasyon	Hedef noktasındaki akı (% nispi)
kolimatörsüz	100.0
15 mm açıklık	60.0
10 mm açıklık	29.4
5 mm açıklık	3.1

Bir diğer husus olarak enerji düşürücü folyo malzeme türünün hedef düzlemindeki demetin özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. İlgili benzetim çalışmaları gelen demetin enerjisini 15,5 MeV'den 5 MeV'e düşürecek alüminyum, bakır ve tungsten malzemeler için yapılmıştır. Buna göre öngörülen folyoların kalınlıkları sırasıyla 1.17 mm, 0.44 mm, 0.30 mm olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.41, enerji düşürücü folyolardan geçen proton demetinin enerjisinin yayılımını göstermektedir. Benzetim sonuçlarına göre alüminyum (FWHM % 13,4) ve bakır folyolar (FWHM % 13,8), tungstene (FWHM% 15,4) nazaran, 100 keV'den daha düşük bir enerji yayılımına neden olmaktadır.



Şekil 4.42 Farklı malzemelerden enerji düşürücü folyolardan geçen 15,5 MeV başlangıç enerjili proton demeti için hedef düzlemindeki (Gausyen fit edilmiş) demet enerji yayılımları

Buna göre, gelen demet enerjisi için aynı nihai enerji değerini verecek kalınlıklara sahip farklı enerji düşürücü folyo malzemelerin, demetin hedef düzlemindeki homojenliği üzerinde ihmal edilebilir bir etkiye sahip olduğu görülmektedir (Şekil 4.42).



Şekil 4.43 Farklı malzemeli enerji düşürücü folyolardan geçerek, 15 MeV başlangıç enerjisinden, 5 MeV enerjiye düşürülen proton demeti için hedef düzlemindeki (polinom fit edilmiş) demet akısı homojenlikleri

Farklı enerji düşürücü folyo malzemeleri için demetin hedef düzlemindeki homojenliği hemen hemen aynı olsa dahi, hedef düzlemine olan demet iletim oranları farklıdır. Hedef düzleme en düşük demet iletimini (en fazla demet kaybını) yüksek Z'si nedeniyle tungsten, en verimli iletimi düşük Z'ye sahip alüminyum göstermektedir (Çizelge 4.9). Söz konusu nedenlerden ötürü alüminyum daha iyi bir tercih olabilecektir.

Çizelge 4.9 Farklı malzemelerden enerji düşürücü folyolar için Al, Cu and W için oransal demet akıları

Degrader Malzeme	Hedef noktasındaki akı değeri (relative %)
Alüminyum	100.0
Bakır	17.9
Tungsten	1.2

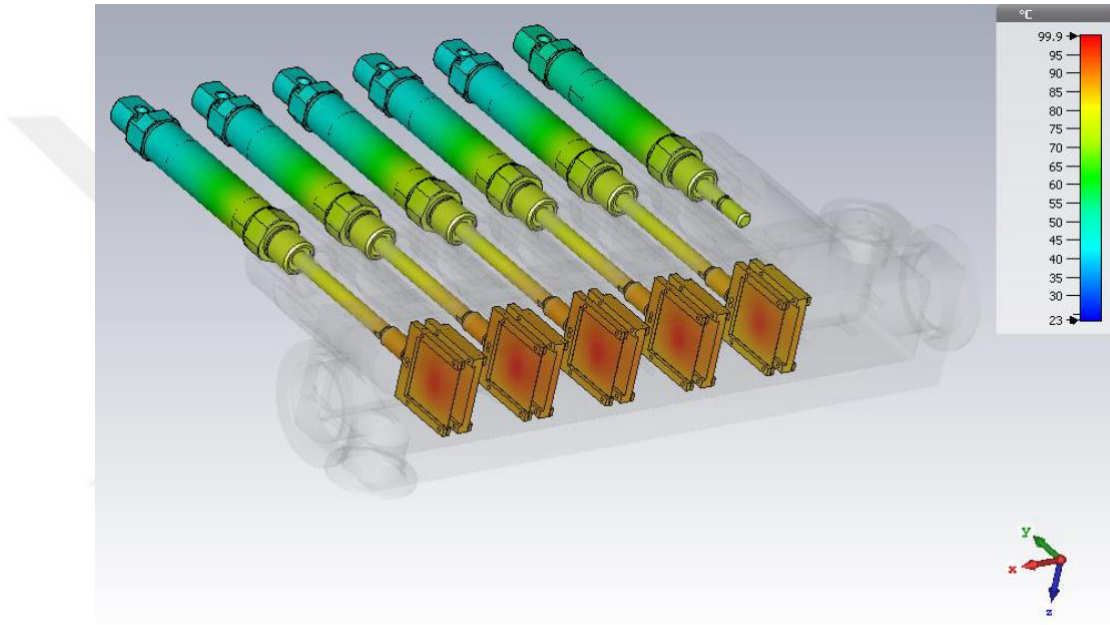
Enerji düşürücü folyo malzeme seçimi için göz önünde bulundurulması gereken bir diğer önemli husus; yapılacak ardışık ışınlamalar neticesinde enerji düşürücü folyo malzemelerde yaşanacak radyoaktivasyon miktarıdır. Bu nedenle aynı demet parametreleri kullanılarak, farklı folyo malzemelerin radyoaktivasyonu çalışılmıştır.



Anılan çerçevede 15,5 MeV enerjili ve 100 nA'lık akıma sahip bir proton demetinin bakır ve alüminyum enerji düşürücü folyolar üzerinden geçişi sırasında oluşturabileceği radyonüklitler belirlenmiş ve demetin 1 saat boyunca folyolar üzerinde indüklediği aktivasyon miktarları hesaplanmıştır. Benzetim sonuçları bakır folyodan geçiş sırasında Zn-65, Zn-63, Zn-62 ve Cu-62 radyonüklitlerinin üretildiğini göstermektedir. Bu radyonüklitlerden en yüksek yarılanma ömrüne sahip (245 gün) Zn-65 haricinde diğerlerinin ışınlamadan sonraki birkaç gün içinde radyoaktivasyonlarının kabul edilebilir bir seviyeye ineceğini görülmektedir. Böylece bakır folyo kullanıldığı durumda Zn-65 radyoaktivasyonundan kaynaklı arka plan radyasyonunun her bir ışınlama ile üzerine eklenerek artmaya devam edeceği aşikârdır. Alüminyum folyo için ise benzetim sonuçları, aynı demet parametreleri ve ışınlama süresi dikkate alındığında kaydadeğer olarak sadece Si-27 (yarılanma ömrü: 4.16 saniye) radyonüklitinin üretileceğini göstermektedir. Bu sonuç ışınlamadan birkaç dakika sonra hiçbir arka plan radyasyonunun kalmayacağını işaret etmektedir. Alüminyumun, radyasyon güvenliği açısından daha uygun çalışma koşulları sunması ve dahası düşük arka plan radyasyonu gerektiren PIGE vb. gama ışını ölçümlerini içeren uygulamaların hedeflenmesi nedeniyle daha iyi bir seçenektir.

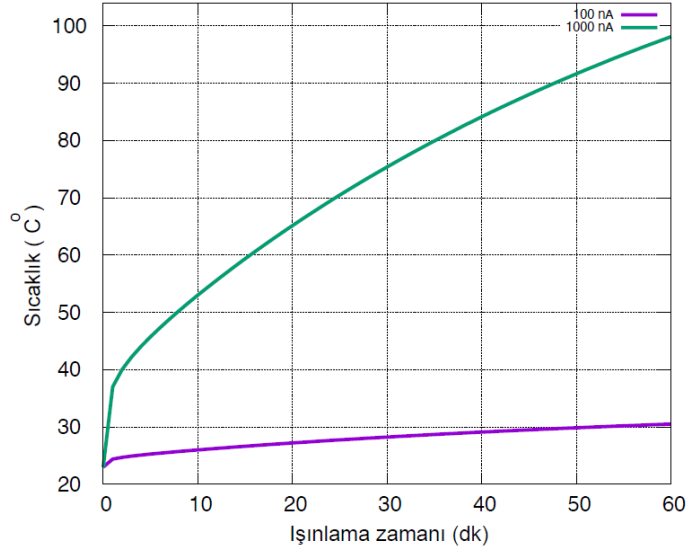
Proton demetlerinin enerjilerinin 15,5 MeV'den 5 MeV'e düşürülmesi sırasında meydana gelen nükleer reaksiyonlar nedeniyle, birincil ve ikincil radyasyon olarak; x-ışınları, gama ışınları ve nötronlar oluşmaktadır. Söz konusu radyasyonlar yüklü parçacık uygulamalarına dayalı malzeme analizi çalışmaları sırasında veri sağlayan karakteristik x-ışınları ile gama ışınlarına ilişkin enerji spektrumlarında bir arka fon oluşumuna neden olmaktadır. Işınlama odacığının etrafına yerleştirilmesi amaçlanan dedektörlerin bu arka fon radyasyonuna karşı zırhlanması önem arz etmektedir. Böylelikle düşük arka fon radyasyonu sayesinde bir yandan dedektörlerin algılama limitleri iyileştirilirken, diğer yandan ölü zaman düşürülür. Bilindiği üzere gama ışınlarından kaynaklanabilecek arka fon, düşük atom numaralı malzemeler ve yüksek atom numaralı malzemelerden oluşan bir zırhlama kombinasyonu kullanılarak azaltılabilmektedir (Mrda vd. 2004). Işınlama odacığındaki nihai kolimatör ile dedektörleri gören numune tutucu vb. bileşenler için malzeme seçimi de söz konusu arka planın azaltılmasında kritik öneme sahiptir.

Tasarımın tamamlayıcı çalışması olarak; enerji düşürücü sisteminin ısıl mukavemeti/dayanıklılığı CST EMS yazılımı (CST Studio Suite 2019) ile incelenmiştir (Şekil 4.43). Bu maksatla gelen demetin enerji düşürücü sisteminden geçişi sırasında enerjisinde (15,5 MeV'den 5 MeV'e düşülmesi sebebiyle) 10,5 MeV'lik bir enerjisi kaybı olacağı ve bu enerji kaybının da folyolar üzerinde eşit olarak dağıldığı kabulü yapılmıştır. Benzetimler enerji düşürücü sisteminde hava ortamı ile teması olan tüm sınır (kenar) yüzeyler için 5 W/mK'lık bir termal iletim katsayısı referans alınarak yapılmıştır.



Şekil 4.44 1  $\mu\text{A}$ 'lık demet akımına sahip proton demetinin, 1 saat boyunca herhangi bir soğutma olmayan alüminyum enerji düşürücü folyolar üzerinden geçişi sırasındaki sıcaklık dağılımı

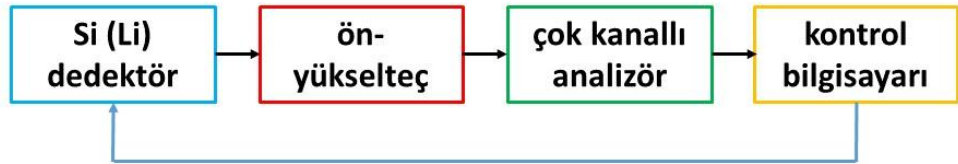
Benzetim sonuçları neticesinde, 100 nA ve 1  $\mu\text{A}$ 'lık akımlara sahip proton demetlerinin, enerji düşürücü sistemindeki alüminyum folyolardan 1 saat geçişi süresince meydana gelecek sıcaklık artışı Şekil 4.44'de verilmiştir. Buna göre alüminyum folyo sıcaklığı, 100 nA akım ile 1 saatlik ışınlama sırasında maksimum 30 C<sup>o</sup>'ye ulaşmaktadır. Bununla birlikte, 1 saat boyunca 1  $\mu\text{A}$ 'lık akıma sahip proton demeti için söz konusu sıcaklık değerinin 95 C<sup>o</sup>'nin üzerine çıktığı görülmektedir. Alüminyum folyo, herhangi bir soğutma olmaksızın, 100 nA akımla ışınlandığında bütünlüğünü koruyabilmektedir.



Şekil 4.45 1 saat boyunca üzerinden 100 nA ve 1  $\mu$ A'lik akım değerine sahip proton demetleri geçirilen alüminyum folyolardaki zamanla yaşanacak sıcaklık artışı

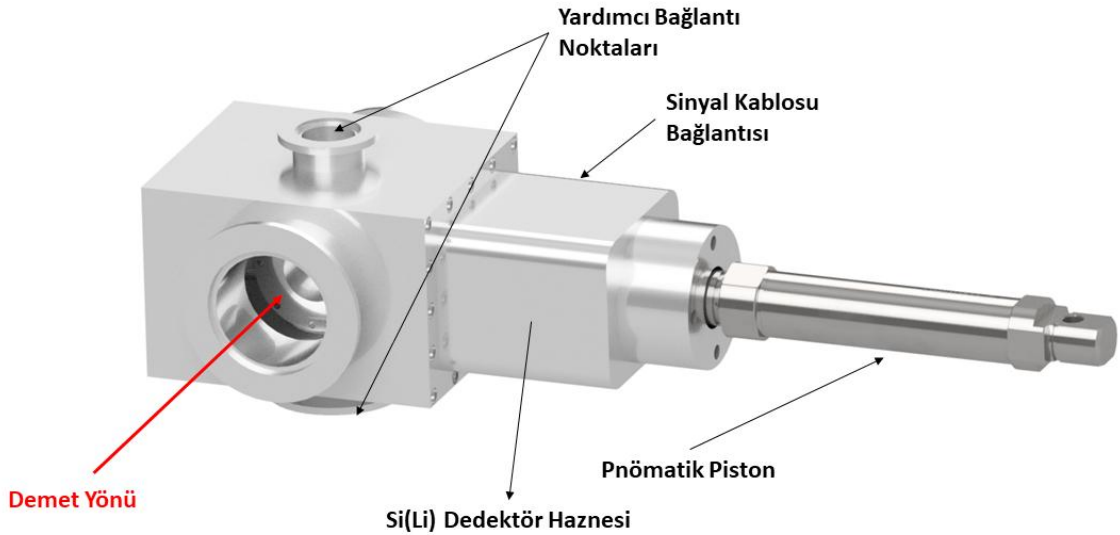
#### 4.2.2 Enerji ölçüm sisteminin belirlenmesi

Tasarlanan demet iletim hattı ve deney istasyonu üzerinde proton demetinin enerjisinin ve enerji yayılımının yüksek hassasiyetle ölçülmesi hedeflenen uygulamalar için oldukça önem arz etmektedir (Campajola vd. 2019). Yüklü parçacık demetlerinin enerji ölçümleri için gelen parçacıkların enerjilerinin tamamını soğurabilme özellikleri nedeniyle çoğunlukla yarı iletken dedektörler tercih edilmektedir (Kim vd. 2008). Anılan çerçevede özellikle modüler bir yapıya sahip olacak ve tercihen enerji düşürücü sisteminden geçen proton demetlerinin enerjisini ölçmek üzere kullanılacak bir enerji ölçüm sistemine tasarım kapsamında yer verilmesi kararlaştırılmıştır (Şekil 4.45).



Şekil 4.46 Enerji ölçüm sistemini oluşturan bölümlere ilişkin şematik gösterimi

Enerji ölçüm sistemi esas itibarıyla bir Si(Li) dedektör, bir ön yükselteç, bir çok kanallı analizör ve kontrol yazılımından meydana gelmelidir. Sistemin kalbini oluşturan Si(Li) dedeksiyon bölümü; 5 mm kalınlığında ve yüzey alanı 500 mm<sup>2</sup> olan bir Si(Li) folyodan oluşacaktır. Dedektörün 5 mm kalınlığına sahip Si(Li) folyo malzemesi sayesinde, sisteme herhangi bir zarar vermeden 30 MeV'e kadar proton enerjileri ölçülebilecektir (Mirion Technologies 2019). Ayrıca çok düşük akımların kullanılacak olması ve soğutma gerektirmemesi nedeniyle Si(Li) dedektörün amaca uygun şekilde hizmet edeceği düşünülmektedir. Düşük akımlı proton demetlerinin enerjisinin ve enerji yayılımını tam olarak belirlenebilmesi için ölçümlerin vakum altında gerçekleştirilmesi esastır. Bu maksatla aynı zamanda dedektörün içine yerleştirileceği bir vakum odacığı tasarlanmıştır. Söz konusu odacık üzerinde bulunacak vakum sızdırmaz bir BNC çıkış bağlantısı sayesinde, dedektörden gelen sinyal ön yükselteç ünitesine aktarılacaktır. Pnömatik bir sistem vasıtasıyla dedektör ihtiyaç duyulduğu anda demet eksenine indirilecek ve kaldırılacaktır (Şekil 4.46). Böylelikle demet enerjisi ve enerji yayılımı gerçek zamanlı olarak ölçülebilecek ve aynı zamanda demetin enerji değeri mevcut hızlandırıcı kontrol sisteminden alınan veri ile mukayese edilebilecektir.



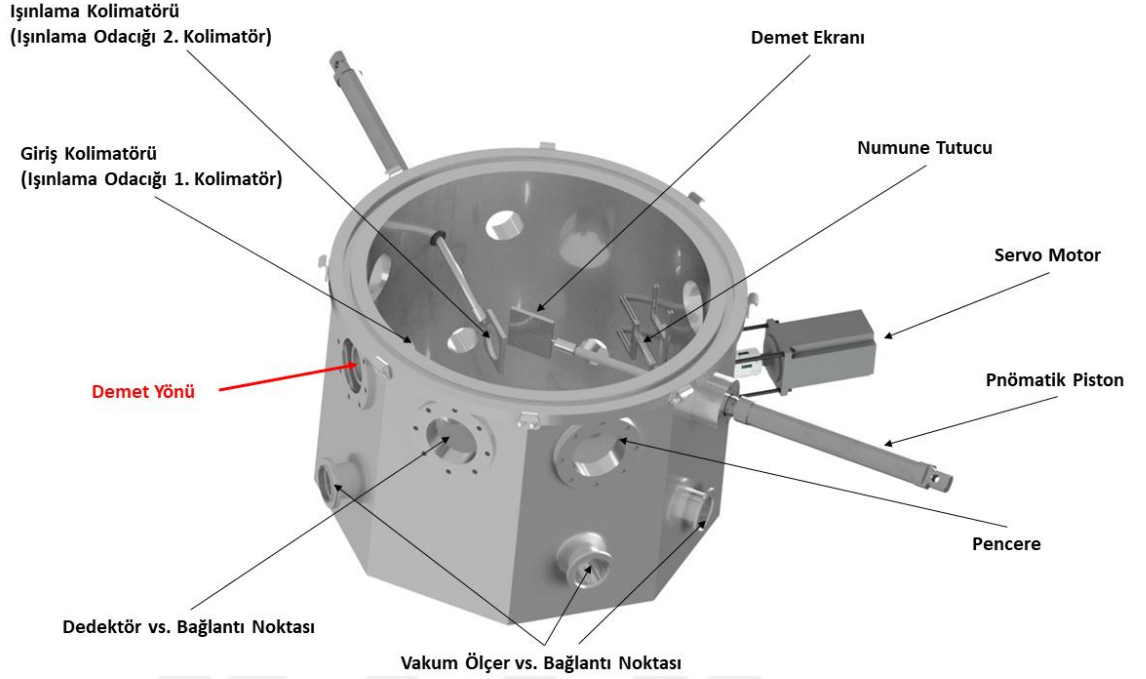
Şekil 4.47 Enerji ölçüm sistemine ilişkin olarak oluşturulan CAD çizimi

### 4.2.3 Deney (Işınlama) odacığının tasarımı

Deney (ışınlama) odacığına ilişkin tasarım çalışmalarının başlangıcında literatürdeki olası yüklü parçacık uygulamaları ayrıntılı olarak incelenmiştir (Lucile, 2015). Deney odacığının pratikte çeşitli teknikler için uygulama esnekliği sağlayabilecek ve özellikle ölçüm sistemleri vb. cihazların kolay entegrasyonu gibi ihtiyaçlara cevap verecek bir geometriye sahip olması prensibi benimsenmiştir.

Işınlama odacığının iç ve dış cidarlarının şekli sırasıyla silindirik ve sekizgen olarak tercih edilmiştir. Tasarımın bu şekilde seçilmesinin nedeni, olası ek parçalar için yeterli alan elde edilmesi, parçaların daha kolay bir şekilde montajının yapılabilmesi ve vakumlama direncinin düşük olması (lower vacuum pumping resistance) vb. avantajları beraberinde getirmesidir. Deney odacığı ve iç bileşenleri, proton demetinden veya oluşacak ikincil radyasyon etkileriyle kolay bir şekilde aktiflenmemesi için alüminyum malzemeden yapılacak şekilde tasarlanmıştır. İlaveten alüminyum malzeme kolay işlenebilme özelliğine sahip olması nedeniyle ayrıca tercih sebebidir. Deney odacığı içerisinde kullanılan doğrusal hareketli parçaların ve bunlarla ilgili elektronik sistemlerin radyasyon ortamında kolay bir şekilde arızalanmasını önlemek için, arızalanma ihtimali yüksek olan elektriksel motorlar yerine pnömatik pistonların kullanılması planlanmıştır.

Deney odacığı, vakum pompası girişi, farklı alt sistemlerin pnömatik olarak hareket ettirilmesini sağlayan piston girişleri, demet hattı bağlantısı, ışınlanacak numunelerin üzerine monte edileceği taşıyıcı sisteminin dairesel bir şekilde hareket ettirilebilmesi için kullanılacak servo motorun girişi ve düşük akım ölçüm sisteminin (FK) bağlantısı vb. girişleri içerecek şekilde tasarlanmıştır (Şekil 4.47). Önerilen tasarımda farklı amaçlarla kullanılmak üzere toplamda 16 adet vakum sızdırmaz port bulunmaktadır. Yukarıdakilere ilave olarak; vakum altında ışınlanmış olan numuneleri ışınlama işleminin hemen sonrasında kolaylıkla değiştirebilmek ve bir sonraki ışınlama için gereken bekleme süresini kısaltabilmek (vakumlama zamanını düşürebilmek için) için deney odacığından hemen öncesine bir vakum izolasyon vanasının konması benimsenmiştir.



Şekil 4.48 Deneysel (ışınlama) odacığını ve ilgili bölümlerini gösteren CAD çizimi

Bununla birlikte deney odacığı içerisine gerektiği durumlarda kolay bir şekilde müdahale edilebilmesini temin etmek üzere; üst taraftan vakum sızdırmaz özellik gösterecek bir tapa kapak sayesinde erişim sağlanması ön görülmüştür. Tapa kapağın kolay sökülüp takılabilmesi için çok sayıda vida ile sabitlemek yerine yaylı bir mandalla (kelepçeli) sıkıştırarak sabitleme çözümü benimsenmiştir. Bu maksatla 8 adet mandal kullanılması ön görülmüştür.

Deneysel odacığı içerisine monte edilmek üzere, katı formdaki 4 farklı malzemeyi ışınlamayı mümkün kılacak alüminyumdan yapılmış 4 kollu karuzel tipte bir numune taşıyıcı sistemi ön görülmüştür. Bu sayede tapa kapak açılmaksızın 4 farklı numune tek bir seferde ışınlanabilecektir. Ayrıca bu tasarım sayesinde numune ışınlamasının olmadığı anlarda demet, demet eksenini merkezleyecek şekilde yerleştirilecek numune taşıyıcı karuzel sisteminin iki kolu arasındaki açıklıktan Faraday kabına doğru engellenmeden geçebilecektir. Bu husus demet akımının, numunenin ışınlama işlemine başlamadan evvel istenen değerde olup olmadığının Faraday kabıyla tespitini temin edecektir.

Vakum odacığı içerisinde yer alan demet ekranları sayesinde, numunenin uygun şekilde ışınlmasını temin etmek üzere, ışınlama öncesinde demet profili teşhisi yapılabilecektir. Söz konusu demet profilinin sağlıklı bir şekilde gözlemlenebilmesi için vakum odacığı üzerinde vakum sızdırmaz cam pencerelere yer verilmiştir.

Deney odacığının CAD çiziminden de kolayca görülebileceği üzere; PIXE, PIGE, RBS veya PESA vb. yüklü parçacık uygulamalarının aynı deney odacığı içerisinde gerçekleştirilebilmesi maksadıyla gerekli olan muhtemel dedektör ve okuma ünitelerinin monte edilebileceği flanj bağlantı noktaları ön görülmüştür. Bu amaçla tasarım üzerinde özellikle dedektörlerin monte edilebileceği farklı noktalarda 4 adet 45°'lik açılarla gövde üzerine işlenecek portun olması fikri benimsenmiştir. Bu sayede detektör sistemleri ile ilgili elektronik okuma ünitelerinin deney odacığına ilave edilmesiyle PIXE ve RBS analizlerinin aynı anda gerçekleştirmek mümkün olabilecektir (IAEA, 2000). Buna ek olarak, Ge (Li)  $\gamma$  ışını detektörü kullanılarak PIGE ve PESA analizleri aynı zamanda yapılabilecektir (Braccini vd. 2011).

#### **4.2.4 Tartışma**

Çalışmanın son bölümünde malzeme ışınlama, test ve analiz, radyasyon dozu tatbiki ve ileride yüklü parçacık demeti analizlerinin dâhil olabileceği düşük akım ve düşük enerjili proton demeti uygulamaları için kullanılabilir düzeneğin tasarımı paylaşılmıştır. Tasarım mevcut Ar-Ge Demet Hattının devamında yer alacak demet hattı ile sonundaki deney istasyonunu ve ilgili alt sistem/bileşenleri kapsamaktadır. Düzenek temel olarak, bir enerji düşürücü sistem, enerji ölçüm sistemi, kolimatör sistemi, ışınlama odacığı ve bir Faraday kabından oluşmaktadır (Yuksel vd. 2020).

Enerji düşürücü sistemin tasarımında enerji düşürücü folyo kalınlıkları, sayıları, kolimatör açıklıkları ve malzeme türünün hedef düzlemindeki demet enerjisi, enerji yayılımı ve demet akısı homojenliği üzerine etkileri incelenmiştir. Benzetimler tarafından tahmin edildiği üzere folyo kalınlığı arttıkça demetin akısının homojenliği artarken, hedef düzlemindeki enerji yayılımı artmaktadır. Buradan hareketle daha düşük enerji yayılımı gerektiren demet uygulamaları için enerji spektrometresi vazifesi

görecek bir mıknatıs-yarık (slit) mekanizması vb. bileşenlerin tasarıma eklenmesi dikkate alınabilir. Hedef düzlemindeki proton demeti akısının homojenliği, hedef düzleminde (aynı miktarda enerji düşümünü sağlayan aynı toplam kalınlığa sahip) enerji düşürücü folyo sayısı arttıkça iyileşmektedir. 5 folyolu konfigürasyon tercih edildiğinde hedef düzleminde  $16 \text{ cm}^2$ 'lik bir kesit alanı için neredeyse % 70 oranında bir demet akısı homojenliği elde edilebilmektedir. Demet akısı ve demet akısı homojenliği açılarından yapılan getiri-götürü değerlendirmesi neticesinde, tasarımda 10 mm'lik kolimatör opsiyonun tercih edilmesinin (uygulama spesifik olarak) daha yerinde olacağı görülmüştür.

Farklı folyo malzemeleri için hedef düzlemindeki demet akısı homojenliği hemen hemen aynı olmasına karşın, demet akısının kendisi farklılık arz etmektedir. Folyo olarak düşünülen malzemeler arasında, en düşük Z'ye sahip olan alüminyum en az % 80'lik bir demet akısı homojenliği sağlamaktadır. Ayrıca folyo malzemelerin ısısal mukavemetini tahmin etmek için yapılan benzetimler sonucunda hedeflenen uygulamalar için alüminyum enerji düşürücü folyoların arzu edilen ışınlama sürelerinde ve akım değerlerinde herhangi bir aktif soğutma olmaksızın zarar görmeden kullanılabilceği görülmektedir. Bununla birlikte alüminyum folyo malzemenin ışınlanması sonucunda, birkaç saniyelik yarılanma ömrüne sahip ikincil radyonüklitler üretilmektedir. Bu durum gerek personelin gerekse kritik donanımın radyasyondan korunması anlamında alüminyum folyoların diğer folyolara nazaran daha makbul olduğu anlamına gelmektedir.

Yukarıda bahsedilen tüm bu sonuçlardan yola çıkarak, 5 ince folyodan oluşan, alüminyum malzemedan tercih edilecek ve 10 mm'lik kolimatör açıklığına sahip enerji düşürücü sistem konfigürasyonunun uygun çözüm olacağı değerlendirilmiştir. Bu tasarım, çeşitli numunelerin vakum altında  $4 \text{ cm}^2$ 'lik bir yüzey alanında veya hava ortamında daha büyük yüzey alanlarında homojen bir şekilde ışınlanmasına müsaade eden bir demet karakteristiğini sağlamaktadır. Söz konusu demet karakteristiklerinin nicel yüklü parçacık demeti analizleri için yeterli olduğu görülmektedir. Tasarıma gereken donanımlar eklenerek, ileride yapılması hedeflenen nitel ölçümler için uygun hale getirilebilir.



Tasarlanan düzenekte proton demeti enerjisinin ve enerji yayılımının yüksek hassasiyetle ölçülmesi gerektiğinden, çalışılacak en yüksek enerji değeri ile optimum akım değeri göz önünde bulundurularak su soğutması gerektirmeyen ve aynı zamanda vakum altında çalışabilecek Si(Li) dedektör odaklı bir enerji ölçüm sisteminin kullanılmasının yerinde olacağı düşünülmüştür.

Öncelikle malzemelerin vakum altında ışınlama, test ve analiz çalışmaları için kullanılacak ve aynı zamanda yakın gelecekte gerçekleştirilmesi hedeflenen bahsedilen yüklü parçacık uygulamaları için evrilebilecek bir ışınlama odacığı ile alt bileşenlerinin tasarımı, ileride ilave edilmesi gerekebilecek enstrümantasyonlar için bağlantı noktaları (portları) ve rezerv bölümler öngörülerek gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla gerekli katı model oluşturulmuştur.

Söz konusu vakum odacığının devamına ise Bölüm 4.1.3'de detayları verilen ve tasarım, üretim ve test çalışmaları tamamlanan Faraday kabı yerleştirilecektir. Düzeneğin tasarımı, gerektiği durumlarda odacığın sonundaki FC'nin çıkartılarak, proton demetinin bir folyo vasıtasıyla hava ortamına alınmasını ve ışınlamanın hava ortamında yapılmasına imkân verecek bir esnekliği de sağlamaktadır.

## 5. SONUÇ

TAEK-PHT’de bulunan siklotronun temel amacı, nükleer tıpta tanısal amaçlı kullanılan hızlandırıcıya dayalı radyoizotopların üretimidir. Bununla birlikte TAEK PHT’deki mevcut Ar-Ge demet hattı ile bilim insanlarımızın hızlandırıcıya dayalı farklı alanlarda araştırma yapmasına olanak sağlanması hedeflenmiştir. Ülkemizin, proton hızlandırıcısına dayalı araştırma yapma kabiliyetini geliştirilmesi bakımından bu hattın etkin olarak kullanımı oldukça önemlidir. Tesisin kuruluş felsefesine uygun olarak radyofarmasötik üretimi için ticari anlamda yüksek akım değerleri ile çalışılması gerektiğinden (40-250  $\mu$ A), hızlandırıcının iyon kaynağı ve diğer alt sistemleri (ekstraksiyon, akım ölçüm vb.) buna uygun olarak tasarlanmıştır. Ancak hızlandırıcılarda, radyoizotop üretimine yönelik araştırma çalışmaları ile hızlandırıcıya dayalı ikincil nötron üretim çalışmaları haricindeki araştırmaların çoğunlukla düşük enerjilerde (<15 MeV) ve düşük akım seviyelerindeki (nanoamper ve hatta pikoamper) proton demetleri kullanılarak yapıldığı görülmektedir. Bu bağlamda düşük akımlı ve nispeten daha düşük enerjili demetler özellikle PIXE, PIGE, RBS, PESA vb. yüklü parçacık yöntemlerinin uygulandığı malzeme ışınlama, test ve analiz çalışmaları ile radyasyon dayanım testleri için tercih edilmektedir.

Doktora tezi kapsamındaki çalışmalar; ilki “Demet Hattı 1.1 üzerinde proton demetinin özelliklerinin belirlenmesi” ve ikincisi “Demet Hattı 1.1 sonrasına kurulumu öngörülen yeni Demet hattı ve deney istasyonu bütünüünün tasarımının yapılması” olacak şekilde iki ana esasta sürdürülmüştür.

Birinci esas kapsamında hızlandırıcıdan elde edilen demetin spot (benek) boyutu ve demet yayını (emittans) parametreleri “kuadropol tarama (Quadrupole Scan)” yöntemi vasıtasıyla belirlenmiştir. Daha sonra hızlandırıcıdan elde edilen demetin “birbiri ardı sıra gelen folyo aktivasyon (stacked foil activation)” yöntemi sayesinde enerji değeri ölçülerek doğrulanması yapılmıştır. Son olarak mevcut sistemin imkân kabiliyetinin ötesinde olan mikroamper seviyesinden çok daha düşük akım değerlerini ölçebilmeyi mümkün kılacak, bir FK ile düşük gürültülü ölçüm elektroniği içeren akım ölçüm sisteminin tasarımı, imalatı, kurulumu ve testleri yapılmıştır. Ardından, FK ve

İlgili elektronik kullanılarak hızlandırıcıdan kararlı olarak elde edilen en düşük proton demeti akımı belirlenmeye çalışılmıştır. Hızlandırıcının iyon kaynağı (filament ve ARC) ve enjeksiyon hattı parametreleri ile hassas ayarlamalar yapılarak pA akım seviyesinde kararlı proton demetleri elde edilmiştir.

İkinci esas çalışmaları kapsamında ise; Ar-Ge Işınlama odasında yer alan Demet Hattı 1.1'in (sonundaki anahtar mıknatısın çıkış portlarından birisinin) devamına kurulacak, öncelikle malzeme ışınlama ve test maksatlı olarak hizmet verecek ve aynı zamanda önemli yüklü parçacık uygulamalarının gerçekleştirilebilmesi için kolayca everilebilecek, düşük enerjili, düşük akımlı, vakum altında çalışacak bilgisayar kontrollü demet hattı ve deney istasyonuna (ışınlama odacığı) ilişkin tasarım gerçekleştirilmiştir. Tasarım temel olarak bir enerji düşürücü sistemi, enerji ölçüm sistemi, konik kolimatör, bir deney (ışınlama) odacığı ve akım ölçüm sistemi (Faraday kabı) bileşenlerinden oluşmaktadır.

Enerji düşürücü sistemi için en uygun konfigürasyona karar vermek üzere bir dizi benzetim çalışması yerine getirilmiştir. Enerji düşürücü sistemin tasarımında farklı enerji düşürücü folyo malzemelerinin, folyo kalınlıklarının, folyo sayılarının ve farklı kolimatör açıklıklarının hedef düzlemindeki demetin enerjisi, enerji yayılımı ve demet akısı, demet akısı homojenliği üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bununla birlikte enerji düşürücü folyolar üzerinde meydana gelen sıcaklık artışı ve ilaveten aktivasyon miktarı, demet enerjisine, akımına ve ışınlama süresine bağlı olarak hesaplanmıştır.

Tasarımda proton demetinin enerji yayılımını yüksek hassasiyetle ölçmek üzere su soğutması gerektirmeyecek ve aynı zamanda vakum altında çalışabilecek Si(Li) dedektör içeren bir enerji ölçüm sisteminin bulunması öngörülmüştür. Tasarım çalışmalarında bir diğer husus olarak; farklı yüklü parçacık teknikleri için uygulama esnekliği sağlayacak gereken ölçüm cihazlarının kolay entegrasyonuna müsaade eden ve vakum altında çalışacak bir deney (ışınlama) odacığının imalata esas katı modeli oluşturulmuştur. Işınlama odasının dış ve iç yapısı (geometrisi) ileriye dönük farklı uygulamalara hizmet edecek ek bileşenler için daha fazla alan ve vakum direnci gibi birtakım avantajları sağlayacak şekilde belirlenmiştir.

Sonuç olarak; TAEA PHT’de yer alan 15-30 MeV enerji aralığında ve 1.2 mA'ya kadar akımda proton demeti üretebilen, öncelikle tıbbi maksatlı radyoizotop üretimi amacı ile tasarlanmış endüstriyel maksatlı bir makine kullanılarak, 2-30 MeV enerji aralığında ve pikoamper akım seviyelerine kadar inilebilen proton demetleriyle araştırma ve analiz çalışmalarının yapılmasına imkan sağlayacak bir düzeneğin tasarımı başarıyla tamamlanmıştır.

Tasarım çalışmalarının ardından demet hattı ve deney istasyonu düzeneğinin hayata geçirilmesiyle birlikte, farklı düşük akım ve enerji değerleri için, hedef ışınlama noktasında arzu edilen demet profiline sahip proton demetlerinin elde edilmesine yönelik denemelerin gerçekleştirilmesi hedeflenmektedir. Bu çalışmalar gerçekleştirirken tasarım bulgularına dayalı; uygun konfigürasyonlar (enerji düşürücü ve kolimatör seçenekleri) esas alınarak, hedef ışınlama noktasında homojen ve kararlı bir demet oluşturabilmek adına ilgili demet profilleri sorgulanacaktır.

Söz konusu tasarım çalışmasının devamı olarak; tasarlanan sistemin 2020 yılı sonuna kadar kurulumunun ve işletmeye alma testlerinin tamamlanması ve ayrıca belirtilen yüklü parçacık demeti analiz yöntemleri başta olmak üzere, olası diğer uygulamalar üzerine çalışmalar gerçekleştirilmesi TAEK tarafından planlanmaktadır.

## KAYNAKLAR

- Anders, J., Braccini, S., Carzaniga, T., Ereditato, A., Fehr, A., Meloni, F., Merlassino, C., Miucci, A., Rimoldi, M. and Weber, M. 2018. A facility for radiation hardness studies based on the Bern medical cyclotron, arXiv:1803.01939v1 [physics.ins-det].
- Auger, M., Braccini, S., Ereditato, A., Nesteruk, K.P., Scampoli, P. 2015. Low current performance of the Bern medical cyclotron down to the pA range, Meas. Sci. Technol. 26 (2015) 094006 (6pp).
- Autodesk. 2020. Inventor Program. Web Sitesi: <https://www.autodesk.com/products/inventor/overview?plc=INVPROSA&term=1-YEAR&support=ADVANCED&quantity=1>., Erişim Tarihi: 26.03.2020.
- Avila-Rodriguez, M.A., Rajander, J., Lill, J.-O., Gagnon K., Schlesinger J., Wilson J.S., McQuarrie S.A., Solin O. 2009. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B, 267, p. 1867-1872.
- Braccini, S., Ereditato, A., Kreslo, I., Nirrko, M., Scampoli, P., Weber, M. 2011. 2 MeV external proton beam line for PIGE/PIXE applications, Web Site: <http://cas.web.cern.ch/CAS/Greece-2011/PosterSession/Martti.pdf> (Access Date: 29/06/2018)
- Braun, H. 2008. CAS Beam Diagnostic Course, 2.6.2008, Dourdan.
- Burrage, J.W., Asad A.H., Fox R.A., Price R.I., Campbell A.M., Siddiqui S. 2009 Australas Phys Eng Sci Med, 32(2), p. 92-97.
- Campajola, L., Braccini, S., Casolaroa, P., De Lucaa D., Ereditato, A., Häffner, P.D. and Scampoli, P. 2019. Measurement of the proton beam energy of a medical cyclotron based on Rutherford Back-Scattering Analysis, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 440, 114–117.
- Choi, B.H. and PEFP Team. 2005. Proton Engineering Frontier Project, AIP Conference Proceedings 773, 244; <https://doi.org/10.1063/1.1949538>.
- CST Studio Suite. 2019. CST Studio Suite Electromagnetic Field Simulation Software Web Sitesi: <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/>, Erişim Tarihi: 26.03.2020
- Denker, A. and Opitz, J. 2004. Paintings-high-energy protons detect pigments and paint-layers, Nucl. Ins. Meth B: Beam Interactions with Materials and Atoms, Volume 213, p; 677-682.

- Denker, A., Bohne, W., Campbell, J.L., Heide, P., Hopman, T.J., Maxwell, A.J., Opitz-Coutureau, J., Rauschenberg, J., Röhrich J. And Strub, E. 2005. High-energy PIXE using very energetic protons: quantitative analysis and cross-sections X-Ray Spectrometry, X-Ray Spectrometer, 34; 376–380.
- Ferrari, A. 2005. FLUKA code-2011.2x.6: a multi-particle transport code, CERN-2005-10, INFN/TC\_05/11, SLAC-R-773.
- Forc, P. 2011. Joint University Accelerator School Lecture Notes on Beam Instrumentation and Diagnostics, January-March 2011, p.23, (Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI) Darmstadt, Germany).
- Gagnon, K., Jensen, M., Thisgaard, H., Publicover, J., Lapi, S., McQuarrie, S.A., Ruth, T.J. 2011. A new and simple calibration-independent method for measuring the beam energy of a cyclotron, Applied Radiation and Isotopes, 69, p. 247-253.
- Ha, J.H., Kim, J.C., Kim, Y.K., Youn, M., Chae, S.J., Chung, H.T., Choi, J.H., Lee, C.S., Kwon, J.U., Moon, C.B., Chai, J.S., Kim, Y.S., Lee, J.D. 1994. Energy measurement of 50 MeV proton beam with a NaI(Tl) scintillator, Nucl. Instr. & Methods A, 350, issue 3, p; 411-414.
- Hasselkamp, D., Rothard, H., Groeneveld, K.O., Kemmler, J., Varga, E. Winter, H. 1992. Particle Induced Electron Emission 2, Springer-Verlag.
- Heikkinen, J. 2020. MCC30/15 Cyclotron for The JYFL Accelerator Laboratory. Web Sitesi:<https://www.jyu.fi/science/en/physics/research/infrastructures/accelerator-laboratory/radiation-effects-facility/facility-overview>, Erişim Tarihi: 09.05.2020.
- IAEA. 2000. Instrumentation for PIXE and RBS-December 2000, IAEA TECDOC-1190.
- IAEA. 2001. Charged Particle Cross-Section Database for Medical Radioisotope Production: Diagnostic Radioisotopes and Monitor Reactions, IAEA-TECDOC-1211, p. 1.
- IAEA. 2012. Cyclotron Produced Radionuclides: Operation and Maintenance of Gas and Liquid Targets, Radioisotopes and Radiopharmaceuticals Series, No: 4, p 5-11.
- IBA S.A. 2008. IBA Cyclone® 30 Product Description Booklet (C30-TPD-R03), p.29.
- Ishii, K. and Hitomi, K. 2018. Theoretical detection limit of PIXE analysis using 20 MeV proton beams, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 417, 37–40.

- Ishii, K. 2019. PIXE and Its Applications to Elemental Analysis, *Quantum Beam Sci.*, 3, 12; doi:10.3390/qubs3020012.
- Johansson, S.A.E, Campbell, J.L., Malmqvist, K.G. 1995. Particle-Induced X-Ray Emission Spectrometry (PIXE). Wiley, New York.
- Johansson, S. A. E. and Campbell, J. L. PIXE: A novel technique for elemental analysis, published by John Wiley & Sons, New York, 1988.
- Khandaker, M.U., Kim, G., Kim, K., Kassim, H.B.E, and Nikouravan, B. 2011. Investigations of proton beam energy of the MC-50 cyclotron at KIRAMS, *International Journal of the Physical Sciences*, Vol. 6 (13), p. 3168-3174.
- Kim, K.R, Cho, Y.S., Hong, I.S., Park, B.S., Yun. S.P., Kim, H.S., Kim, K.R., Cho, Y.S., Hong, I.S., Park, B.S., Yun, S.P., Kim, H.S. 2007. Proton beam energy measurement using semiconductor detectors at the 45 MeV test beamline of PEFP, *Proceedings of PAC07*, Albuquerque, New Mexico, USA.
- Kim, K.R., Cho, Y.S., Kim, H.J., So, J.H, and Lee, M.Y. 2008. Proton Energy Measurement Using Si Li and Scintillation Crystal Detector in the MC 50 Cyclotron, *Journal of Nuclear Science and Technology*, Supplement 5, 538–541.
- Leo, W. *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments: A How-to Approach Second Revised Edition*, Springer-Verlag, 1994.
- Lo'pez J.G. 2008. The new Cyclone 18/9 beam transport line at the CNA (Sevilla) for High Energy PIXE applications *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 266, 1583–1586
- Lucille, B., Serruys, Y., Miro, S., Trocellier, P., Bordas, E., Leprêtre, F., Brimbal, D., Loussouarn, T., Martin, H., Vaubaillon, S., Pellegrino, S and Bachiller-Perea, D. 2015. Ion irradiation and radiation effect characterization at the JANNUS-Saclay triple beam facility, *Cambridge Journal, J. Mater. Res.*, Vol. 30, No. 9, p; 1183-1195.
- Minty, M. 2004. *Diagnostics II-Lecture Notes*, CERN Accelerator School, Sept 2004.
- Mirion Technologies. 2019. Silicon Lithium (SiLi) Detectors for Charged Particles, Web Sitesi: [https://mirion.s3.amazonaws.com/cms4\\_mirion/files/pdf/spec-sheets/ops203\\_sili\\_detectors\\_for\\_charged\\_particles\\_spec\\_sheet\\_1.pdf?1557864044](https://mirion.s3.amazonaws.com/cms4_mirion/files/pdf/spec-sheets/ops203_sili_detectors_for_charged_particles_spec_sheet_1.pdf?1557864044)).Erişim Tarihi: 05.06.2020.
- Mrda, D.S., Bikit, I.S., Anicin, I.V., Slivka, J.M., Hansman, J.J., Zikic-Todorovic N.M., Varga, E.Z., Curcic, S.M., Puzovi, J.M. 2004. Background Reduction Using Fe and Pb Shielding, *Journal of Research in Physics* Vol. 30, No. 1, 49 – 54.
- National Instruments. 2019. What is the Labview, Web Sitesi: <https://www.ni.com/en-tr/shop/labview.html>, Erişim Tarihi: 26.03.2020.

- Nesteruk, K. (2015). Study of the Transverse Beam Emittance of the Bern Medical Cyclotron, Proceeding of IBIC 2015, Melbourne, Australia. (ISBN 978-3-95450-176-2)
- NIH Image. 2016. Fiji Beam Profiler's Image-J software. Web Sitesi: <https://imagej.net/Fiji>, Erişim tarihi: 10.05.2020.
- Originlab. 2000. Origin 6.0 program. Web Sitesi: <https://www.originlab.com/index.aspx?go=Support&pid=439>, Erişim Tarihi: 10.05.2020.
- Park, S.H. 2013. Characterization of the Beam Profile for the PIXE/PIGE Beam Line at the CRC Proton Cyclotron, Journal of the Korean Physical Society, Vol. 63, No. 7, p; 1291-1295
- Raich, U. 2009. Emittance Measurement, Accelerator Beam Diagnostics, USPAS 09, New Mexico Albuquerque NM, June 23-26, 2009.
- Schmelmer, O. 2001, Particle induced X-ray emission using high energy ions with respect to microprobe application, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 179, 469-479
- Schneider, U. and Renker, D. 1997. Proton energy measurements using a NaI(Tl) scintillator, Nucl. Instr. & Methods A, 388, p. 199-203.
- TAEK-PHT. 2012. Turkish Atomic Energy Authority Proton Accelerator Facility, Web Sitesi: <https://www.taek.gov.tr/en/institutional/affiliates/saraykoey-nuclear-research-and-training-center/quality-management-unit/1750-proton-accelerator-division.html>, Erişim Tarihi: 26.03.2020.
- TAEK-PHT. 2013. TAEK PHT Tanıtım Kitapçığı, Türkiye Atom Enerjisi Kurumu, Ankara.
- Van IJzendoorn, L.J., Niemantsverdriet, J.W., Severens, R.J., Van Dijk, P.W.L. and De Voigt, M.J.A. 1994. Applications of cyclotron based ion scattering, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 89, 114-121.
- Verma, S. 2018. Standardization of the ion beam facility at Chandigarh cyclotron for simultaneous PIXE and PESA analysis, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 417, 60-64.
- Voltr, J., Kral, J., Nejedly, Z., 1999. PESA as a complementary tool to PIXE at CTU Prague, Nucl. Ins. Meth. Phy. Res. B, 150, 554-558.
- Wang, Y. and Nastasi, M. 2011. Handbook of Modern Ion Beam Materials Analysis (Volume 2).



- Yuksel, A.N. 2008. Siklotron Tipi Hızlandırıcılar, Kullanım Alanları, Radyoizotop Üretimi ve Medikal/ Endüstriyel Uygulamaları, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi.
- Yuksel, A.N. and Yavas, O. 2011. Beam Transport Line (BTL) Design Studies For 15-30 MeV Proton Beam for R&D Applications, Balkan Physics Letter, Vol 19, 191049, pp. 428-437. (ISSN:1301-8329)
- Yuksel, A.N., Bulut, S., Serin, N.O., Recepoglu, E. 2018. The Determination of the Beam Characteristics of R&D Beam Transport Line of Turkish Atomic Energy Authority Proton Accelerator Facility by Using Quadrupole Variation Method, Turkish Journal of Nuclear Science, Cilt. 30, No. 1.
- Yuksel, A.N., Turemen, G., Bulut, S., Serin, N.O., Yavas,O., “Design of Beam Instrumentation for In-Vacuum Materials Irradiation and Testing in a 30 MeV Medical Cyclotron”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 977, DOI: 10.1016/j.nima.2020.164290, 2020.
- Ziegler, J. F. and Biersack, J. P. 2000. SRIM-2000: The Stopping and Range of Ions in Matter (IBM-Research, town, New York, 2000), p. 40.

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Alper Nazmi YÜKSEL

Doğum Yeri : Merkez/ Aydın

Doğum Tarihi : 15.01.1978

Medeni Hali : Evli

Yabancı Dili: : İngilizce

### Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Aydın Efeler Lisesi (1994)

Lisans : Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi  
Fizik Mühendisliği Bölümü (1999)

Yüksek Lisans: Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı (2008)

Doktora : Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı (2020)

### Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl

TSE Standart Kontrol Dairesi Başkanlığı (1999-2000)

Milli Savunma Bakanlığı ARGE ve Teknoloji Dairesi Başkanlığı (2001-2006)

TAEK Radyasyon ve Hızlandırıcı Teknolojileri Dairesi (Eski SANAEM) (2006-.....)

### Proje Çalışmaları

2006-2012, “A1.H4.P2.01-Hızlandırıcı Kurulması”, DPT-TAEK Projesi, Proje Elemanı,

2006-2010, “III-B.06.DPT.1-Bor Nötron Yakalama Terapisi için Bor İçeren Polimerik Taşıyıcı Bileşiklerin Sentezlenmesi ve Laboratuvar Koşullarında Denenmesi”, DPT-TAEK Projesi, Proje Elemanı.

2009-2012, “A3.H2.P2.06-Yüklü Parçacıklar için Demet Hattı Tasarımı ve Demet Parametrelerinin Ölçülmesi”, TAEK Projesi, Proje Elemanı.

2009-2010, “CERN-A5.H2.P1.01-12-Demet Dinamiği, Demet Teşhisi ve Kontrolü Teknikleri ve Uygulamaları”, TAEK Projesi, Proje Elemanı.

2012-2013, “A3.H1.P4.02-TAEK PHT'de Radyoizotop ve Radyofarmasotik Üretimi”, TAEK Projesi, Proje Sorumlusu.

2012-2013, “A3.H2.P4.01-TAEK PHT'de Ar-Ge Faaliyetleri, TAEK Projesi”, Proje Sorumlusu.

2012-2014, “TUR/6/011-Improving Expertise on the Management of the TAEK Proton Accelerator Facility (TAEKPAF) and Radiopharmaceutical Production”, Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı Projesi, Proje Elemanı.

2014-....., “A4.H6.F3-TAEK Proton Hızlandırıcısı Tesisinde (PHT) radyoizotop, radyofarmasötik üretimi ve Ar- Ge faaliyetlerinin yapılması”, TAEK Projesi, Faaliyet Elemanı.

2014-....., “A5.H6.F1-Nükleer alanda ulusal ve uluslararası kuruluşlarla işbirliğinde bulunulması ve ilgili yükümlülüklerin yerine getirilmesi”, TAEK Faaliyeti, Faaliyet Elemanı.

2018-2019, “A2.H4.P1-TAEK Proton Hızlandırıcı Tesisi Ar-Ge Demet Hattında Düşük Akımlı Işınlama Düzeneginin Kurulması ve Demet Özelliklerinin Belirlenmesi”, TAEK Faaliyeti.

2019-....., “A2.H4.P1-Ge<sup>68</sup>/Ga<sup>68</sup> Jeneratörü Tasarımı ve Geliştirilmesi”, TAEK Projesi, Proje Elemanı.

2020-....., “A2.H4.P7-Proton Demeti ile Tahribatsız Malzeme Analiz Sisteminin Kurulumu”, TAEK Projesi, Proje Elemanı.

## **Makaleler**

**A. N. YUKSEL, G. TUREMEN, S. BULUT, N. O. SERİN, O. YAVAS,** “Design of Beam Instrumentation for In-Vacuum Materials Irradiation and Testing in a 30 MeV Medical Cyclotron”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 977, DOI: 10.1016/j.nima.2020.164290, 2020.

**YUKSEL, A.N., BULUT S., SERİN, N.O., RECEPOGLU, E.,** “The Determination of The Beam Characteristics of R&D Beam Transport Line of TAEA PAF by Using Quadrupole Variation Method”, Turkish Journal of Nuclear Science, Volume 30 No.1, 2018.

**YUKSEL, A. N., YAVAS, O.,** “Beam Transport Line (BTL) Design Studies for 15-30 Mev Proton Beam for R&D Applications”, Balkan Physics Letters 19, 191049, pp. 428-437, 2011.

## **Uluslararası Bildiriler**

**YUKSEL, A. N., BULUT, S., TUREMEN, G., SERİN, N. O., RECEPOGLU, E., OZBEY, A.,** “The Low-Current Proton Beam Irradiation System (LCPBIS) Establishment and Beam Properties Characterization Studies at TAEA Proton Accelerator Facility (PAF) R&D Beamline”, 7th Internationally Participated Congress on Particle Accelerators and Applications (UPHUK-VII), September 02-03, 2019, Bodrum, Turkey (2019).

**TUREMEN, G., BULUT, S., YUKSEL A. N., SERİN, N. O., OZBEY, A., RECEPOGLU E.,** “Multi-purpose Proton Beam Irradiation Setup and Beam Characterization Studies at TAEA-PAF”, International Conference on Theoretical and Experimental Studies in Nuclear Applications and Technology” (TESNAT’19), 2019, Book of Abstracts p. 55, Amasya, Turkey.

**BULUT, S., YUKSEL, A. N., TUREMEN, G., SERİN, N. O., RECEPOGLU, E., OZBEY, A.,** “The Studies for Establishing a Low-Current Irradiation System and Determination of Beam Properties at TAEA Proton Accelerator Facility R&D Irradiation Vault”, Turkish Physical Society 34th International Physics Congress (TPS34), September 5-9, 2018, Bodrum, Turkey.

**YUKSEL, A. N.**, “The Experiences based on Cyclotron & PET Targetry operation@ TAEA-Proton Accelerator Facility”, 10th IBA PET Cyclone® Users Meeting, 20-24th September 2015, Bern/ Switzerland.

**YUKSEL, A. N.**, RECEPOĞLU, E., BULUT, S. and SERIN, N. O., “The Studies for Establishing Required Infrastructures @ TAEA Proton Accelerator Facility R&D Irradiation Vault”, Turkish Physical Society 33rd International Physics Congress (TPS33), September 6-10, 2017, Bodrum, Turkey.

**YUKSEL, A. N.**, RECEPOGLU, E., UNAL, S., “TAEA Proton Accelerator Facility Project Phase, Features, Objectives and Future Plans”, Technical Meeting Conference on Management Strategies for Accelerator Facilities, 15-19 September 2014, Saint-Aubin/ France

**YUKSEL, A. N.**, “A Study on R&D Beam Transport Line Design for TAEK Proton Accelerator Facility”, International Conference of Young Scientists and Specialists «Current issues on the Peaceful Use of Atomic Energy», June 6-8 2012, Almaty/ Kazakhstan.

#### **Ulusal Bildiriler:**

**A.N.YUKSEL**, “CERN’e Ortak Üye Olunması Süreci, CERN ile İlişkilerden Sorumlu Kurum Olarak, TAEK’in Rolü, Sorumlulukları, Destekleri ve Çalışmaları”, 33. Türk Fizik Derneği Kongresi Paneli, 06 Eylül 2017, Bodrum-Muğla.

**A.N. YÜKSEL**, “Siklotron Tipi Hızlandırıcılar ve Radyoizotop/ Radyofarmasotik Üretimi”, XIV. Ulusal Medikal Fizik Kongresi, 21-24 Kasım 2013, Antalya.

**A.N. YÜKSEL**, “TAEK Proton Hızlandırıcı Tesisi”, I. Ulusal Proton Hızlandırıcıları Çalıştayı (UPHÇ-I), 18 Nisan 2013, Ankara.

**A.N. YUKSEL**, Ö. YAVAŞ, “15-30 MeV Enerjili Proton Demetinin Ar-Ge Çalışmalarında Kullanımına Yönelik Demet İletim Hattı Tasarım Çalışmaları”, IV. Ulusal Parçacık Hızlandırıcıları ve Uygulamaları Kongresi (UPHUK-IV), 30 Ağustos-1 Eylül 2010, Bodrum-Muğla.

**A.N. YÜKSEL**, Ö. YAVAŞ, S. ÜNAL, A. TANRIKUT, “Siklotron Tipi Hızlandırıcılar, Radyoizotop Üretimi ve Önemli Kullanım Alanları”, IV. Ulusal Parçacık Hızlandırıcıları ve Uygulamaları Kongresi (UPHUK-IV), 30 Ağustos-1 Eylül 2010, Bodrum-Muğla.

**A. TANRIKUT**, **A.N. YÜKSEL**, S. ÜNAL, İ. TÜKENMEZ, “TAEK Proton Hızlandırıcı Tesisi”, IV. Ulusal Parçacık Hızlandırıcıları ve Uygulamaları Kongresi (UPHUK-IV), 30 Ağustos-1 Eylül 2010, Bodrum-Muğla.