

CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PROTONLARIN HEDEF MADDE İLE ETKİLEŞMESİNİN
FLUKA SİMÜLASYON YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Engin KARAMAN

Anabilim Dalı : Fizik

Programı : Nükleer Fizik

MANİSA 2013

CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PROTONLARIN HEDEF MADDE İLE ETKİLEŞMESİNİN
FLUKA SİMÜLASYON YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Engin KARAMAN

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 30.10.2013

Tezin Savunulduğu Tarih : 13.11.2013

Tez Danışmanı : Yrd.Doç.Dr. Rahmi KÜÇER

Diğer Jüri Üyeleri : Prof.Dr. Tahsin BABACAN

: Doç.Dr. Levent ŞIK

MANİSA 2013

İçindekiler

Şekil Listesi	I
Tablo Listesi	III
Teşekkür	IV
Özet	V
Abstract	VI
1. Giriş	1
2. Kuramsal Bilgiler	2
2.1. Parçacık Hızlandırıcıları	2
2.1.1. Hızlandırıcılar için Tarihsel Gelişmeler	3
2.1.2. Hızlandırıcı Tipleri ve Kavramları	5
2.1.2.1. Van de Graaff	7
2.1.2.2. Cockcroft-Walton	8
2.1.2.3. Lineer Hızlandırıcı(Linak)	8
2.1.2.4. Betatron	9
2.1.2.5. Siklotron	10
2.1.2.6. Mikrotron	11
2.1.2.7. Sinkrotron	12
2.1.3. Proton Hızlandırıcısı	13
2.2. Protonların Madde ile Etkileşimi	14
2.3. Nükleer Etkileşmelerde Nötron Verimi	16
2.3.1. Ani Radyasyon Alanının Özellikleri	19
2.3.2. Parçalanma (Spallation) Süreci	20
2.4. Nötronların Madde ile Etkileşmesi	22
2.5. Monte Carlo Yöntemi	24
2.5.1. FLUKA Monte Carlo Kodu	25
3. Malzeme ve Yöntem	26

3.1. Benzetim Özellikleri ve Yöntemi	26
3.2. Bulgular	29
4. Sonuç ve Tartışma	51
Kaynaklar	53
Özgeçmiş	55

Şekil Listesi

Şekil 2. 1 Parçacık hızlandırıcılarının tarihsel gelişim gösterimi.....	5
Şekil 2. 2 Van de Graaff Üretecinin şematik gösterimi.	7
Şekil 2. 3 Cockcroft ve Walton Üretecinin şematik gösterimi.....	8
Şekil 2. 4 RF Linak.	8
Şekil 2. 5 Betatronun temel yapısı.	9
Şekil 2. 6 Siklotronun şematik tasarımı.	10
Şekil 2. 7 Mikrotronun şematik tasarımı.....	11
Şekil 2. 8 Sinkrotronun şematik gösterimi.	12
Şekil 2. 9 TAEK Proton Hızlandırıcısı Tesisi	13
Şekil 2. 10 THM Proton Hızlandırıcı Tesisi bölümlerinin şematik gösterimi.	13
Şekil 2. 11 Proton Hızlandırıcısının olası uygulama alanları.....	14
Şekil 2. 12 Protonların atom veya çekirdeklerle etkileşimleri.....	14
Şekil 2. 13 Proton Bragg piki.....	15
Şekil 2. 14 Proton enerjisine bağlı nükleer etkileşim olasılığı.....	16
Şekil 2. 15 Farklı hedef maddeler için protonların erişme uzaklıkları ile esnek olmayan çekirdek etkileşim olasılıklarının gösterimi	17
Şekil 2. 16 Farklı hedef maddeler için proton başına toplam nötron verimi.....	19
Şekil 2. 17 Parçalanma tepkimesinin genel tasarımı.....	20
Şekil 2. 18 İntra-Nükleer Kaskat.....	21
Şekil 2. 19 Geliş parametresine göre protonun ağır çekirdekle oluşturduğu İntra-Nükleer Kaskatın şematik gösterimi.	21
Şekil 3. 1 Geometrinin farklı açılardan görünüşü.	27
Şekil 3. 2 Oluşturulan benzetim geometrisinin şematik gösterimi.....	28
Şekil 3. 3 Farklı proton enerjileri için berilyum hedef uzunluğuna göre nötron verimi	34
Şekil 3. 4 Farklı proton enerjileri için berilyum hedef uzunluğuna göre normalize nötron verimi	35
Şekil 3. 5 Farklı berilyum hedef uzunluğu için proton enerjisine göre normalize nötron verimi	35
Şekil 3. 6 Farklı proton enerjileri için bakır hedef uzunluğuna göre nötron verimi.....	36
Şekil 3. 7 Farklı proton enerjileri için bakır hedef uzunluğuna göre normalize nötron verimi	36
Şekil 3. 8 Farklı bakır hedef uzunluğu için proton enerjisine göre normalize nötron verimi ..	37

Şekil 3. 9 Farklı proton enerjileri için kurşun hedef uzunluğuna göre nötron verimi.....	38
Şekil 3. 10 Farklı proton enerjileri için kurşun hedef uzunluğuna göre normalize nötron verimi	38
Şekil 3. 11 Farklı kurşun hedef uzunluğu için proton enerjisine göre normalize nötron verimi	39
Şekil 3. 12 Farklı proton enerjileri için toryum hedef uzunluğuna göre nötron verimi	40
Şekil 3. 13 Farklı proton enerjileri için toryum hedef uzunluğuna göre normalize nötron verimi	40
Şekil 3. 14 Farklı toryum hedef uzunluğu için proton enerjisine göre normalize nötron verimi	41
Şekil 3. 15 Farklı proton enerjileri için hedef kütle numarasına göre nötron verimi.....	42
Şekil 3. 16 3 GeV enerjili protonların Be, Cu, Pb, Th hedeflerin etkileşimi ile oluşan nötronların radyal dağılımları.....	43
Şekil 3. 17 Th hedef için oluşan nötronların radyal dağılımları.....	44
Şekil 3. 18 Th hedef için uzunluğa bağlı radyal nötron dağılımları.....	45
Şekil 3. 19 Be, Cu, Pb, Th hedefler için nötron akı dağılımları	46
Şekil 3. 20 Th hedef için proton enerjilerine bağlı nötron akı dağılımları.....	47
Şekil 3. 21 Th hedef için değişen uzunluklara göre nötron akı dağılımları	48
Şekil 3. 22 20cmx60cm boyutlarında silindir kurşun hedef için nötron verimi (n/p).....	50

Tablo Listesi

Tablo 2. 1 Günümüzde parçacık demetleri için bazı temel parametrelerin değer aralıkları	2
Tablo 2. 2 Parçacık Hızlandırıcılarının karakteristik özellikleri.	6
Tablo 2. 3 Bazı çekirdek reaksiyonları için eşik enerjileri.....	18
Tablo 2. 4 Nötron etkileşimlerinin sınıflandırılması	23
Tablo 2. 5 FLUKA'da taşınan parçacıkların enerji aralıkları.	25
Tablo 3. 1 Benzetimde kullanılan hedeflerin karakteristik özellikleri	27
Tablo 3. 2 Berilyum hedef için proton enerjisine ve hedef uzunluğuna bağlı gelen proton başına nötron verimleri (n/p).....	30
Tablo 3. 3 Bakır hedef için proton enerjisine ve hedef uzunluğuna bağlı gelen proton başına nötron verimleri (n/p).....	31
Tablo 3. 4 Kurşun hedef için proton enerjisine ve hedef uzunluğuna bağlı gelen proton başına nötron verimleri (n/p).....	32
Tablo 3. 5 Toryum hedef için proton enerjisine ve hedef uzunluğuna bağlı gelen proton başına nötron verimleri (n/p).....	33
Tablo 3. 6 FLUKA (çalışmada) ve LAHET kodları ile 1 GeV enerjili protonların kurşun hedef ile etkileşimlerinde nötron verimleri	49

Teşekkür

Yüksek lisans tez çalışmam süresince karşılaştığım zorlukların çözümlenmesinde değerli bilgileri ve tecrübeleri ile yardımlarını esirgemeyen kıymetli danışman hocam Yrd.Doç.Dr. Rahmi KÜÇER'e teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Ayrıca maddi ve manevi desteği ile her zaman yanımda olan annem Asuman KARAMAN, babam Arif KARAMAN ve yüksek lisans fikrini bana aşılayan abim Emrah KARAMAN'a çok Teşekkür ederim.

Bu araştırmada yer alan nümerik hesaplamalar, TÜBİTAK ULAKBİM, Yüksek Başarım ve Grid Hesaplama Merkezi'nde (TRUBA Kaynaklarında) gerçekleştirilmiştir. Bu olanakları sağlayan yetkililere teşekkür ederim.

Özet

Nötron elde etmek için hedef madde bombardımanında genellikle protonlar kullanılır. Yüksek enerjili protonun hedef çekirdekle etkileşmesi ile nötron verimi, gelen parçacıkların belirli enerjisi için maddenin yapısına ve boyutlarına göre değişir. Genellikle, gelen proton başına nötron sayısı ifade edilir. Hedeften çıkan nötronların dağılımı, hedefin yavaşlatıcı özelliğine bağlıdır. Özellikle, proton enerjisine bağlı olarak yüksek-Z'li hedefler için nötron veriminde önemli artma görülür. Nötron veriminin en büyük değerde olması için hedef ağır metal (tungsten, kurşun, uranyum) olması gerekir. Hedeften çıkan nötronların dağılımı, hedefin yavaşlatıcı özelliğine de bağlıdır. Benzetim programları, hedef belirlemek için kullanılır. Benzetiminin amacı proton demetiyle farklı kalınlıklı hedef etkileşmesinin incelenmesi ve nötron veriminin belirlenmesidir.

Benzetimde kullanılan hedef; çapı 20 cm, uzunluğu 60 cm olan bir silindirdir. Çap sabit, uzunluk (20, 30, 40, 50, 60 cm) ve proton enerjisi (0.03, 0.3, 0.6, 1.0, 2.0, 3.0 GeV) olarak değişmektedir. Protonların, hedef çevresindeki maddelerle etkileşimi önlemek için ortam vakum seçildi. Hedef madde olarak berilyum, bakır, kurşun ve toryum kullanıldı.

Bu çalışmanın amacı; farklı enerjilerdeki protonların, farklı hedef maddeler (veya hedef boyutları) ile etkileşmelerinde oluşan nötronların verimliliğini FLUKA Monte Carlo benzetim kodu kullanarak belirlemektir.

Çalışmaların sonucunda; nötron verimi ve nötron akısı protonların enerjileri, hedef madde ve hedef maddenin boyutuna bağlı olarak elde edildi. Ulaşılan değerler, benzer çalışmalarda elde edilen değerler ile uyumludur.

Abstract

Protons are generally used to bombard the target matter to produce neutrons. The neutron yield from the high-energy proton interaction with the target nuclei depends on the material type as well as its size for a given incident particle energy. For practical purpose it is the number of neutrons obtained per incident proton. Neutron yield increases significantly for high-Z targets depending on proton energies increase. In order to maximize the neutron production the target must be a heavy metal (tungsten, lead, uranium). The axial distribution of leakage neutrons from the target depends on the target moderator coupling. Simulation programs are used for the determination of the target. The purpose of the simulation is to analyze interacting the different thickness target with proton beams and the determination of neutron yield.

The target used in the simulation was a cylinder with diameter 20 cm, length 60 cm. The diameter is fixed and vary the length (20, 30, 40, 50, 60 cm) and the proton energy (0.03, 0.3, 0.6, 1.0, 2.0, 3.0 GeV). In order to avoid the interaction of protons, with the material in the surrounding of the target medium was chosen as vacuum. Beryllium, copper, lead and thorium were used as target materials.

The purpose of this study is to determine neutron yield which appears in the interactions of protons at different energies with different target materials (or target dimensions) by using FLUKA Monte Carlo simulation code.

As a result of the studies, the neutron yield and neutron flux were found depending on the energy of protons, the target materials and size of the target material. Obtained values were found to be in agreement with the values in literature.

1. Giriş

Proton hızlandırıcıları, düşük enerjili proton demetlerinin başlangıç enerjilerini artırılarak hedeflenen değere ulaşmalarını sağlayan donanımlardır. Hızlandırıcılarda temel amaç iyon kaynağından çıkış enerjileri kilo elektron volt (keV) mertebelerinde olan yüklü parçacıkları, kullanım amaçlarına uygun enerjilere (MeV, GeV ya da TeV) kadar hızlandırmaktır.

Yüklü parçacık olan protonlar, yolları üzerindeki atomlarla Coulomb etkileşmesi yapar. Düşük enerjili protonlar hedef madde ile nükleer tepkimeler oluşturur. Hedef ve protonların etkileşme olasılıkları, protonların enerjilerine göre değişir. Yüksek enerjili protonların hedef madde ile etkileşmesi sonucu hadronlar (proton, nötron, pion...) oluşur. Proton, hedef çekirdekle etkileştikten sonra, hedeften bazı parçacıklar ya da hafif çekirdeklerin çıkmasına neden olur. Hedef çekirdekten çıkan ikincil yüksek enerjili parçacıklar, çevresindeki çekirdeklerle etkileşebilir. Zincirleme oluşan bu işlemler parçalanma ve buharlaşma işlemlerini oluşturur. Böylece dışarıya fazladan yüklü parçacık ve foton salınımı gerçekleşir. Yayınlanan radyasyonlar mermi parçacıklara bağlı olduğu gibi hedef maddeye de bağlıdır. Deneyisel uygulamalarda kullanılacak ikincil parçacıklar veya fotonlar için uygun hedef belirlenir. Hedef için verimi yüksek ve sürekli olması ile birlikte oluşan ikincil parçacıkların hedeften minimum kayıpla çıkması önemlidir. Uygulamalarda genelde, yaygın olarak kullanılan ikincil parçacıklardan biri nötronlardır.

Gelen protonların enerjilerine bağlı olarak nötron verimi hedefin atom ağırlığı ile doğru orantılı olduğundan bakır, tantal ve kurşun gibi maddeler hedef olarak kullanılabilir. Eğer hedeften yüksek nötron verimi veya fisyon ürünleri elde edilmek istenilirse, genellikle hedef olarak uranyum, toryum gibi ağır çekirdekli maddeler seçilir.

Hedef maddelerin belirlenmesinde analitik bağıntılar ve benzetim programları kullanılır. Benzetim programlarında, istenilen enerjilerde mermi parçacıklar hedefle etkileştirilir ve oluşan ürün parçacıklar incelenir. Ürün parçacıkların gelen parçacıklara oranı ile de parçacık verimi belirlenebilir.

Bu çalışmada; proton enerjilerine, hedef maddeye ve hedefin boyutlarına bağlı etkileşimlerle nötron oluşumu, FLUKA Monte Carlo benzetim kodu kullanarak incelendi.

2. Kuramsal Bilgiler

2.1. Parçacık Hızlandırıcıları

Parçacık hızlandırıcıları ve çarpıştırıcıları, ihtiyaçlara göre tasarlanan ve temelde mekanik, elektrik, manyetizma, elektronik, yazılım, istatistik, termodinamik, katı hal, kuantum fiziği gibi temel bilim ve mühendislik alanlarına dayalı olarak üretilen ve kullanılan teknolojik donanımlardır. Yüklü parçacık demetlerini oluşturmak ve hızlandırmadaki amaç, ihtiyaç duyulan yüksek enerjilere ulaşmak ve bu enerjideki parçacıkları; sabit hedef deneylerinde, çarpıştırıcılarda veya ışıma kaynağı olarak kullanmaktır.

Hızlandırıcı fiziği, tek parçacığın veya parçacık demetinin, elektrik ve manyetik alanlar etkisindeki hareketini; yörünge, momentum, enerji kazanımı, dağılma ve toplama süreçleri gibi parametreler açısından ele alıp inceleyen bir daldır.

Çarpıştırıcılar; bir parçacık demetini farklı bir demet veya bir anti- parçacık demeti ile amaca uygun bir kütle merkezi enerjisi ve ışınlık ile çarpıştıran aygıtlardır. Hızlandırma doğrusal veya dairesel yörüngeler boyunca yapılabilir.

Günümüzde elektron, pozitron, proton, antiproton, müon gibi yüklü parçacık demetleri değişik tekniklerle GeV ve TeV mertebesindeki enerjilere ulaştırılabilmektedir.

Hızlandırıcılarda ulaşılan maksimum enerji değeri ortalama her 7 yılda bir مرتبة artarak son 50 yılda 10^6 'dan 10^{13} mertebesine yükselmiştir. 1950'lerde kuvvetli odaklamalı bir sinkrotronda 10^6 eV'ye ulaşmış olmasına rağmen 2008'de çalışmaya başlayan LHC'deki p-p çarpıştırıcısında proton demetlerinin enerjisi 7 TeV'dir. Tablo 2. 1'de günümüzde kullanılan parçacık demetleri için enerji, akım, atma ve yaşam süre aralıkları verilmiştir [1].

Tablo 2. 1 Günümüzde parçacık demetleri için bazı temel parametrelerin değer aralıkları [1].

Demet Enerjisi (E)	keV – TeV
Demet Akımı (i)	μA – kA
Atma (puls) Süresi (τ)	Sürekli – ps
Demet Yaşam Süreleri	μs - Haftalar

Parçacık demetleri; elektron, proton, nötron, pion, kaon, müon, nötrino ve antiparçacık, atom ve moleköl demetleri şeklinde oluşturulabilir. Demetler sürekli, paketcikli (bunched) veya atmalı (pulsed) yapıda olabilirler. Parçacık ve foton demetlerini, bunların doğasını, davranışlarını, demet-madde ve demet-ışınma etkileşmelerini demet fiziği inceler. Demetler üzerinde kullanılan alanlar statik, atmalı, Radyo Frekans (RF) salınımlı olabilir [1].

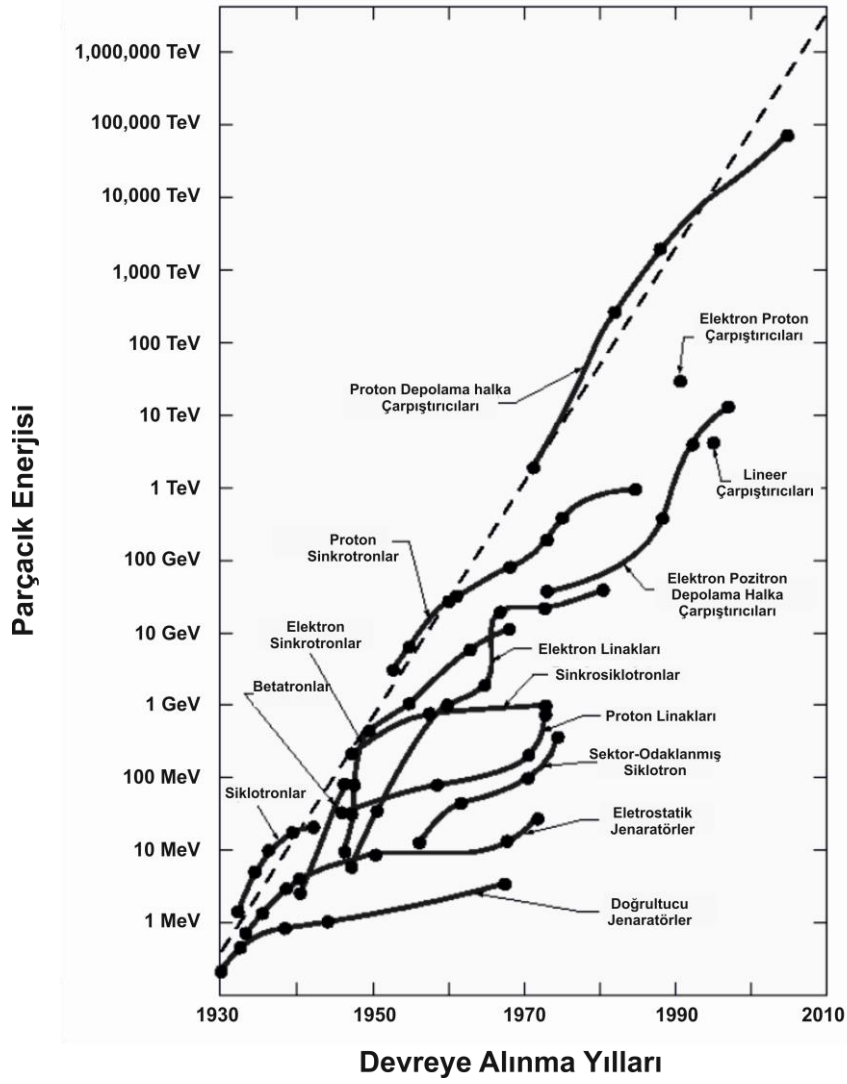
2.1.1. Hızlandırıcılar için Tarihsel Gelişmeler

Hızlandırıcılar için önemli tarihsel gelişmelerin tarih, kişi ve olay sırasına göre gösterimi;

- 1815 Proust: Atomların hepsinin hidrojenden yapıldığını savunan ilk atom modeli.
- 1839 Faraday: Yük boşalımı (glowdischarge) üzerine ilk yayın...
- 1858 Plücker: Katot ışınları ve bunların, manyetik alanı ile saptırılması.
- 1867 Lorentz: Maxwell ile eşzamanlı olarak elektromanyetik teoreinin açıklanması.
- 1874 Helmholtz: Elektriğin atomik yapısının açıklanması.
- 1883 Maxwell: "Treatise on Electricity and Magnetism"
- 1883 Edison: Isıl ışınım (thermionic emission).
- 1887 Hertz: Elektro manyetik dalgalar ve fotoelektrik etkinin gözlenmesi.
- 1891 Stoney: İlk kez 'elektron' ismi kullanılmıştır.
- 1895 Lorentz: Elektron teorisi, Lorentz kuvveti, Lorentz dönüşümleri...
- 1895 Röntgen: X-ışınlarının keşfi.
- 1897 Thompson: e/m oranı ve katot ışınlarının bulunması.
- 1898 Lienard: Elektrik ve manyetik alanlar içinde parçacığın hareketini, dairesel hareket yapan yüklü parçacığın sinkrotron ışınımı yapacağını gösterdi.
- 1905 Einstein: Özel görelilik, Fotoelektrik Olay.
- 1907 Schottky: Atomik spektrum ve sinkrotron teorisi.
- 1909 Milikan: Deneyisel olarak e-değerinin ölçülmesi.
- 1913 Frank-Hertz: İvmeli elektronlarla atomların uyarılması.
- 1914 Marsden: İlk olarak alfa parçacıklarının protondan saçılması.
- 1920 Greinaker: İlk kafes jeneratörünün kurulması

- 1922 Wideroe: sürüklenme tüpleri ile modern linak teorisinin ortaya çıkışı
- 1928 Van de Graff: ilk yüksek gerilim jeneratörünün yapılması
- 1932 Lawrence ve livingston: 1.2 MeV’lik Siklotronun yapılması
- Cockcroft-Walton: protonlar 300 keV’e kadar hızlandırıldı
- 1941 Kerst, Serber: ilk betatronun çalıştırılması
- 1941 Touschek, Serber: depolama halkası formülasyonunun yapılması
- 1945 Blewett: deneysel amaçlar için sinkrotron ışınımının elde edilmesi
- 1947 Alvares: Berkeley’de ilk proton linakının yapılması
- 1954 Lofgren: Betatron’da 5.7 GeV’lik protonların hızlandırılması
- 1959 DESY: Alman elektron Sinkrotronu DESY’nin kuruluşu
- 1961 KEK: Japonya yüksek enerji fiziği merkezinin (KEK) kuruluşu
- 2008 CERN LHC’nin ilk kez çalıştırılması (yüzyılın deneyleri: ATLAS, CMS, LHC-b, ALICE)
- 2010 Dünya’da 150’si büyük ölçekli ve parçacık fiziği araştırmalarına odaklanmış olmak üzere 20.000 civarında parçacık hızlandırıcısı mevcuttur.
- 2010’lar ILC ($E_{cm} = 0,5 TeV$ enerjili e^+e^- çarpıştırıcısı), Türk Hızlandırıcı Merkezi’nin hayata geçmesi (TARLA Tesisi) [1],[2]
- 2012 TAEK 30 MeV enerjili Proton Hızlandırıcısı.
- ...

Parçacık hızlandırıcılarının tarihsel gelişiminin bulunduğu “Livingston çizimi” olarak adlandırılan gösterim Şekil 2. 1’de görülmektedir.



Şekil 2. 1 Parçacık Hızlandırıcılarının tarihsel gelişim gösterimi [3].

2.1.2. Hızlandırıcı Tipleri ve Kavramları

Parçacıkların hızlandırılması için parçacığa elektrik ve manyetik alan etki ettiği için hızlandırıcılar bu özelliklerine göre tanımlanır. Elektrostatik yüksek voltaj üretici (Van de Graaff), yüksek voltaj dönüştürücü (Cockcroft-Walton) potansiyel değişim tipindeki hızlandırıcılardır. Periyodik tipteki hızlandırıcılar ise demet dolanımına göre lineer (Linak), sarmal (Mikrotron, Sinkrotron), dairesel (Betatron, Siklotron) olarak tanımlanır. Çeşitli hızlandırıcı tipleri için hızlandırılan parçacıklar, elektrik ve manyetik alan özellikleri, genel enerji ve akım değerleri, Tablo 2.2’de verildi. Bazı enerji ve akım değerleri dünyadaki önemli hızlandırıcılardan alınmıştır.

Tablo 2. 2 Parçacık Hızlandırıcılarının karakteristik özellikleri [4], [5].

Hızlandırıcı Tipi	Hızlandırılan Parçacık	Elektrik Alan	Manyetik Alan	Tipik Enerji	Tipik Ortalama Akım
Van de Graff	e, p, d, α	Düzenli	-	1-6 MeV	100 μ A
Cockcroft-Walton	e, p, d, α	Düzenli	-	1 MeV	1 mA
Linak	e	Sabit frekans	-	20 GeV	50 μ A
Linak	p	Sabit frekans	-	800 MeV LAMPF*	1 mA
Linak	Ağır iyon	Sabit frekans	-	10 x (Atom No) MeV	1 μ A
Betatron	e	Elektromanyetik	Düzenli, Değişken	300 MeV	1 μ A
Siklotron	p, d, α , v.b.	Sabit frekans	Düzenli, Sabit	15 MeV/u	500 μ A
Siklotron AVF (Azimutal değişen alan)	p, d, α , v.b.	Sabit frekans	AVF, Sabit	20-80 MeV/u	100 μ A
Mikrotron	e	Sabit frekans	Düzenli	4 GeV CEBAF*	100 μ A
Sinkrotron	p	Kipleme	Düzenli, Değişken	6 GeV	1 μ A
Sinkrotron AG (dalgalı Gradyent)	p	Kipleme	AG, Değişken	450 GeV SPS*	10 μ A
Depolama Halkası	e	-	-	8 GeV Spring-8*	100 mA

*LAMPF: Los Alamos Mezon Fiziği Tesisi (USA)

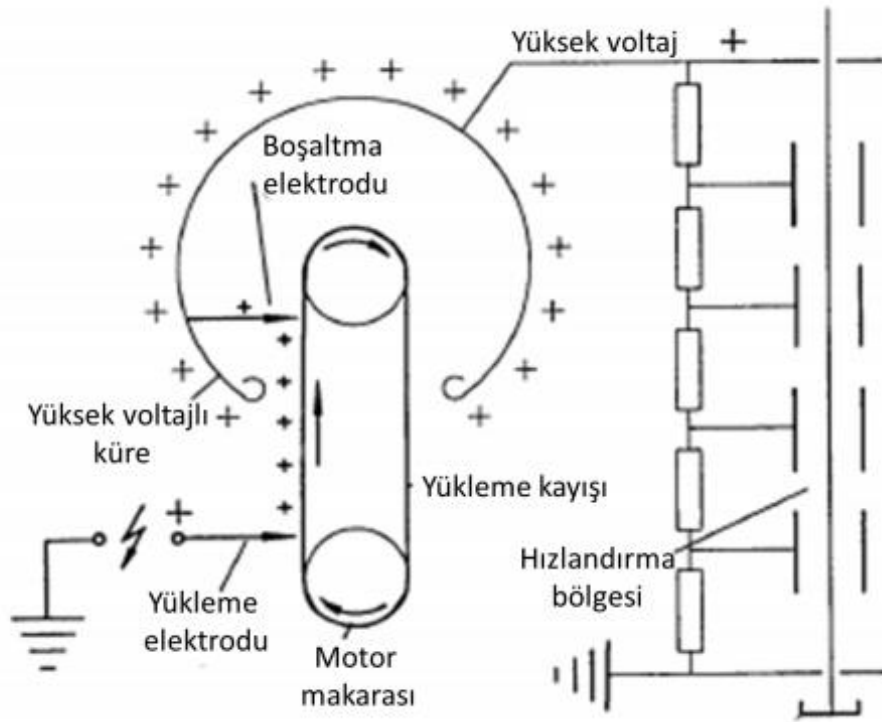
*CEBAF: Sürekli Elektron Demeti Hızlandırıcı Tesisi (USA)

*SPS: Süper-Proton Sinklotronu (CERN)

*Spring-8: Süper Foton Halkası-8

2.1.2.1. Van de Graaff

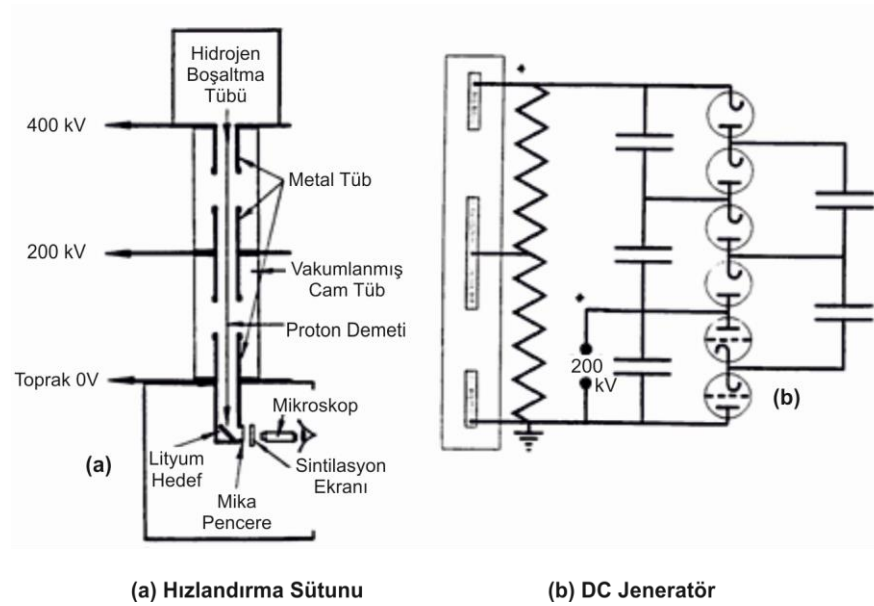
Van de Graaff hızlandırıcısı, Metal bir elektrottan çıkan elektrik yükleri bir taşıyıcı bant aracılığı ile büyük bir iletken küreye aktarılır. Yüksek yük değerine ulaşan iletken kürenin potansiyeli ile toprak ucu arasında, hedef için yeterince yüksek gerilim oluşturulur (Şekil 2. 2). 1930’larda nükleer fiziğin gelişmesinde ve anlaşılmasında büyük katkısı olmuştur.



Şekil 2. 2 Van de Graaff Üretecinin şematik gösterimi [6].

2.1.2.2. Cockcroft-Walton

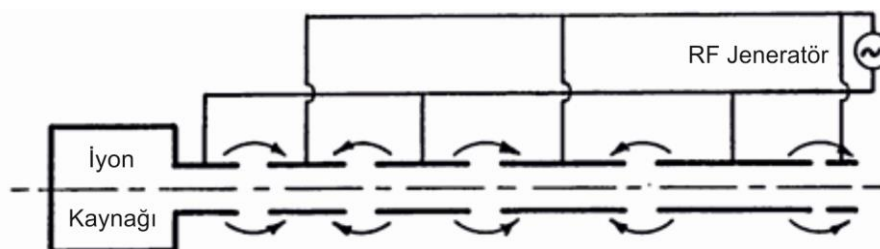
1932’de 300 keV’e kadar hızlandırılan protonlar ile lityum hedef etkileşimi ile α parçacıkları elde edilmiştir (Şekil 2. 3). Bir sığanın levhaları arasındaki potansiyel farkını, gerilim çoğaltıcı devre ile istenilen düzeye çıkarma ilkesine dayanır. Bir dizi sığa, uygun yerleştirilmiş diyotlar aracılığı ile yüklenir.



Şekil 2. 3 Cockcroft ve Walton Üretecinin şematik gösterimi [7]

2.1.2.3. Lineer Hızlandırıcı(Linak)

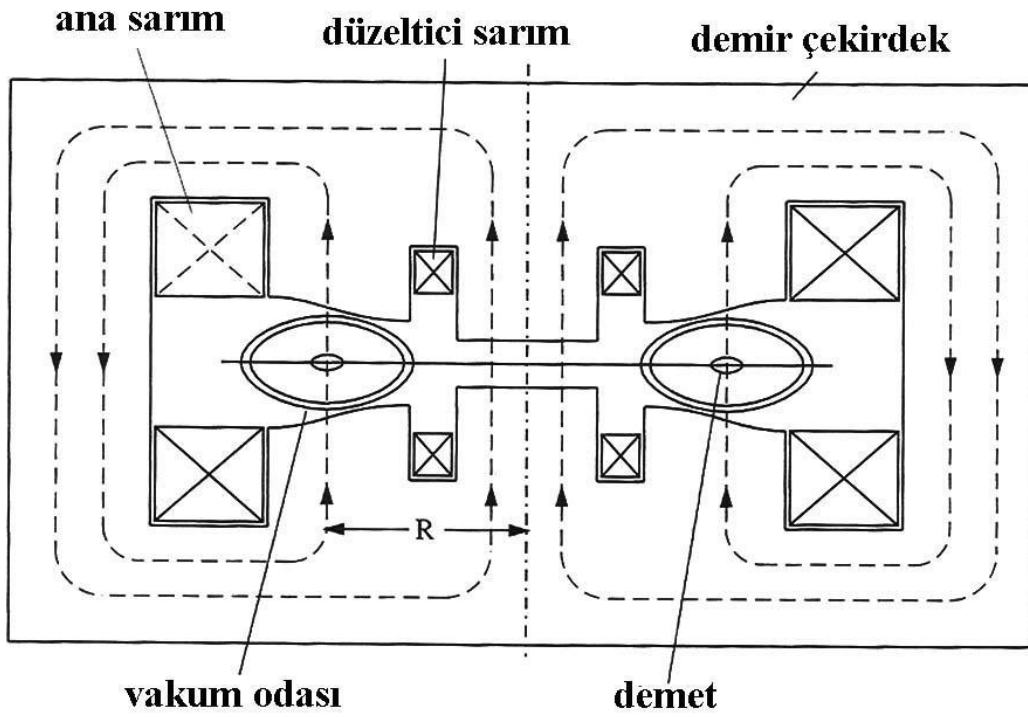
Enerji kazanım bölgeleri olan RF kavitelerin bir doğru boyunca sıralandığı hızlandırıcı düzenekleridir (Şekil 2. 4).



Şekil 2. 4 RF Linak [7].

2.1.2.4. Betatron

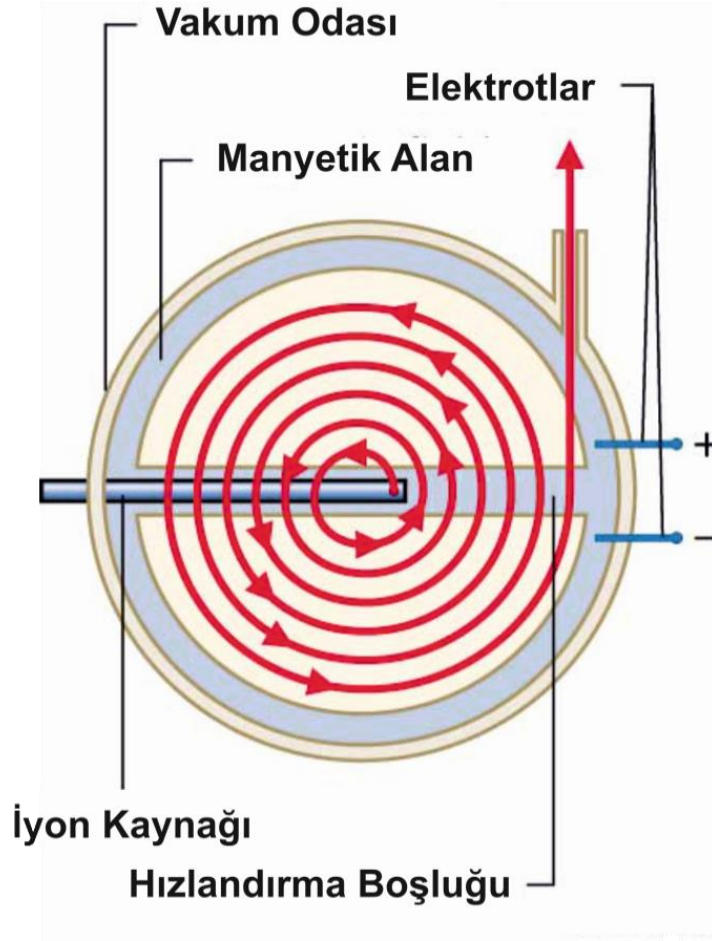
Hafif parçacıklar için kullanılan sabit yarıçaplı indüksiyon ilkesiyle hızlandırma yapan düzeneklerdir (Şekil 2. 5) [1].



Şekil 2. 5 Betatronun temel yapısı [8].

2.1.2.5. Siklotron

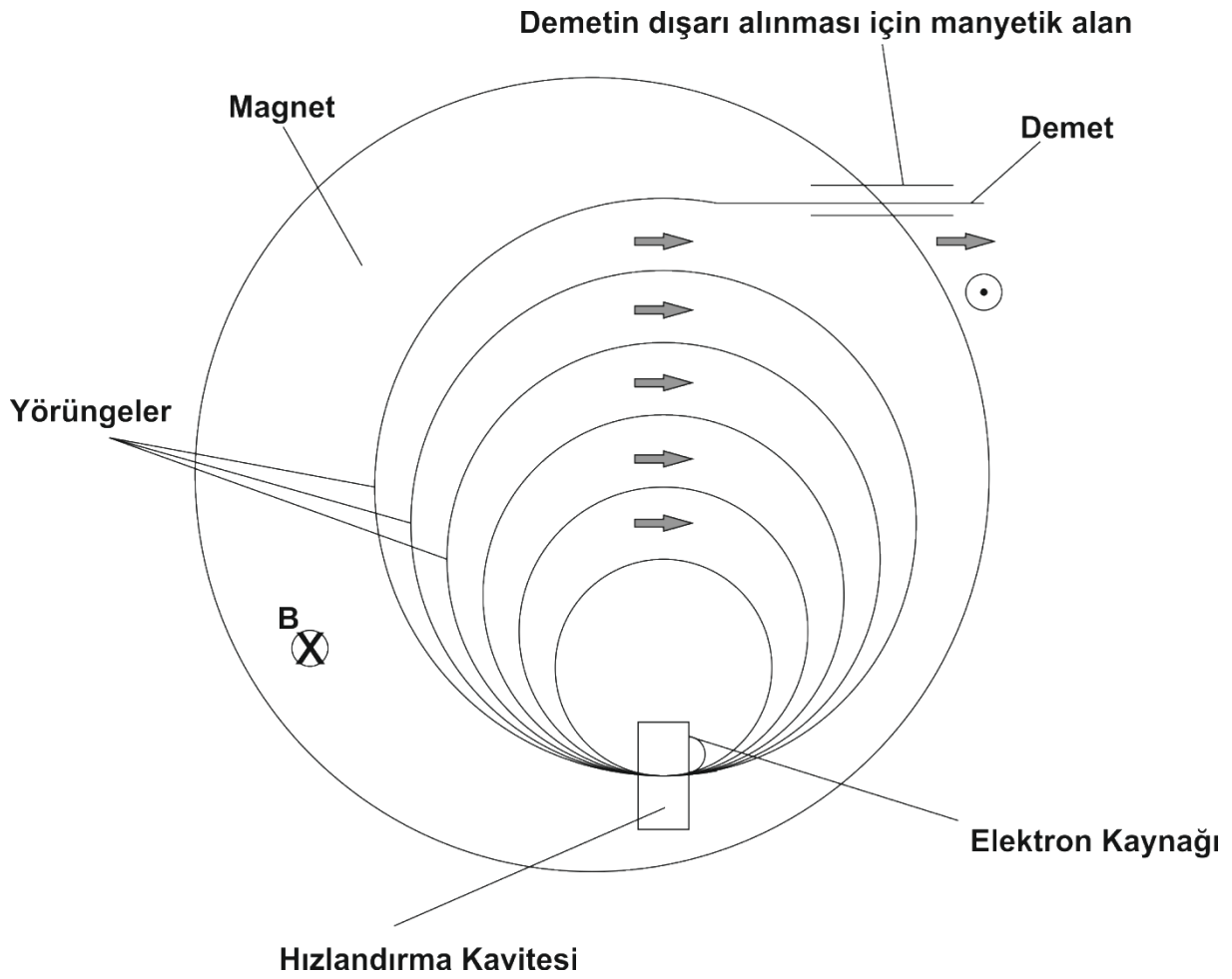
Proton veya ağır iyonların sinüsel RF gerilim sayesinde dairesel magnetler içinde sipiral çizerek hızlandırılmasını ve kullanılmasını sağlayan düzeneklerdir (Şekil 2. 6).



Şekil 2. 6 Siklotronun şematik tasarımı [9].

2.1.2.6. Mikrotron

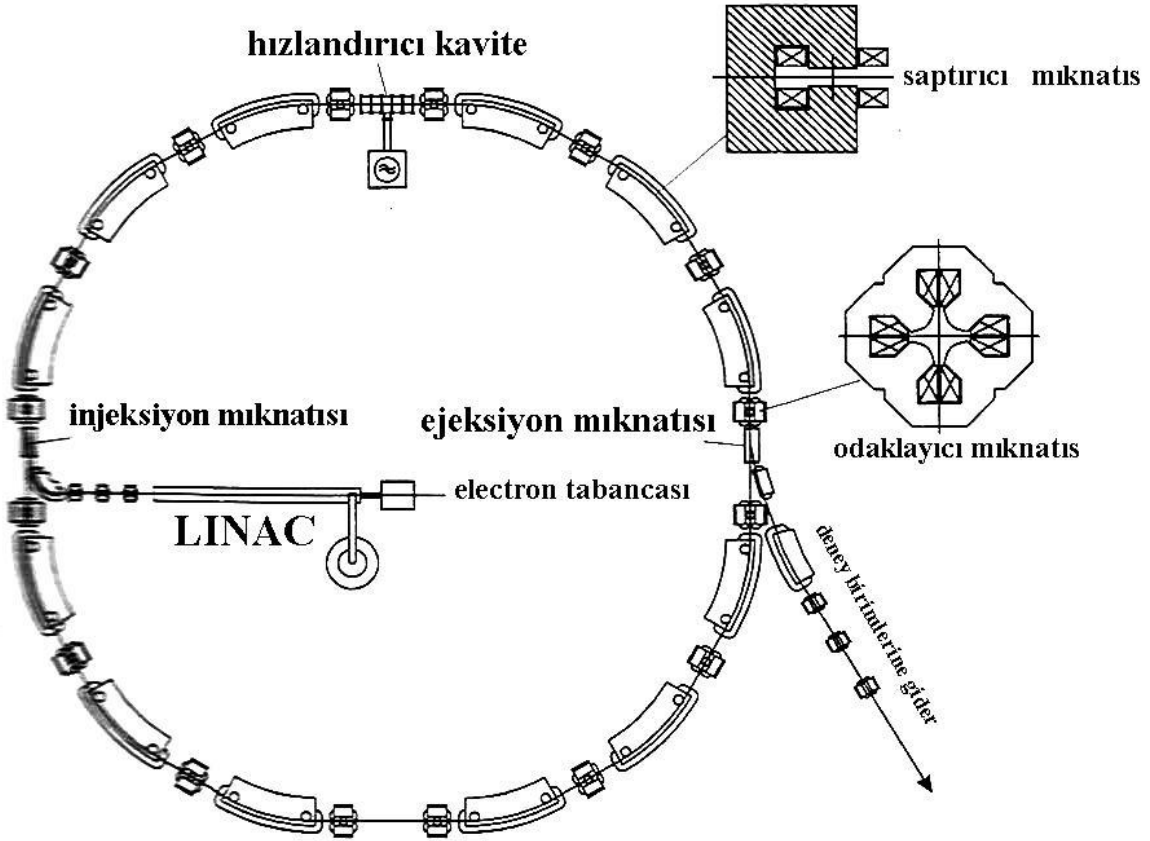
Parçacıkların demet yörüngesinin tek noktasına uygulanan alanla bükülerek, aynı kaviteden pek çok kez artan yörünge yarıçaplarıyla geçirilmesi ilkesine dayanan bir hızlandırma düzeneğidir (Şekil 2. 7).



Şekil 2. 7 Mikrotronun şematik tasarımı [1].

2.1.2.7. Sinkrotron

Parçacıkların uygun magnetler ile sabit R yarıçapında tutulduğu ve RF kaviteler ile hızlandırıldığı düzeneklerdir (Şekil 2. 8).



Şekil 2. 8 Sinkrotronun şematik gösterimi [8].

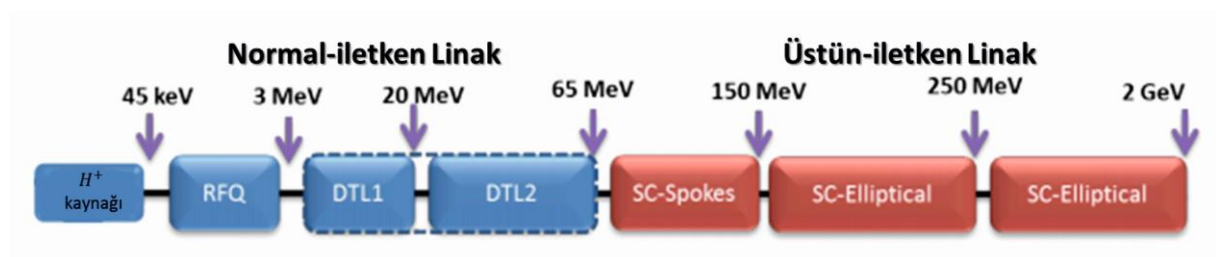
2.1.3. Proton Hızlandırıcısı

Yükü parçacık olan protonların başlangıç enerjilerinin artırılarak, uygulama için gerekli değere ulaşmalarını sağlayan donanımlardır. Yüksek enerjili protonlar, madde ile etkileşerek ikincil parçacıkların oluşmasına neden olur. Uygulama alanına göre uygun hedeflerden üretilen ikincil parçacıklar bilim ve teknolojinin birçok alanında, çeşitli araştırma ve uygulamalarda kullanılır.

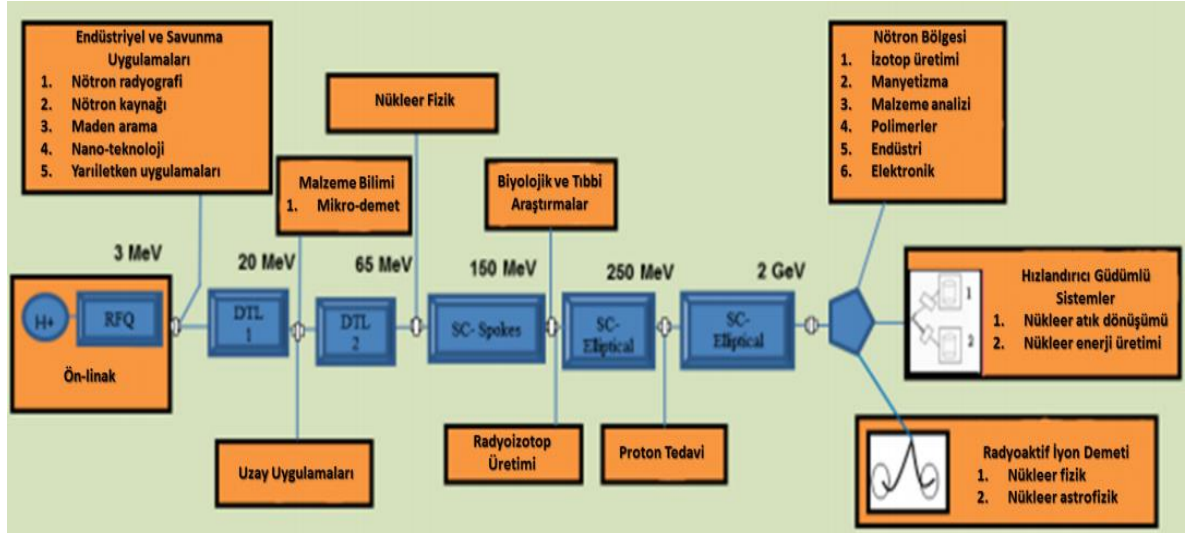
Proton hızlandırıcısı olarak ülkemizde bulunan en önemli tesis Türkiye Atom Enerji Kurumu (TAEK) bünyesinde radyoizotop üretimi, kalite kontrol gibi sağlık ve araştırma amaçlı kurulmuş, 30 MeV enerjili Proton Hızlandırıcı Tesisidir (Şekil 2. 9). Ülkemizde aktif olan daha yüksek enerjili proton hızlandırıcı tesisi bulunmamaktadır. Türk Hızlandırıcı Merkezi (THM) projesi kapsamında kurulması planlanan 2 GeV enerjili proton hızlandırıcı tesisi ve uygulama alanları ile ilgili şematik gösterimler; Şekil 2. 10 ve Şekil 2. 11'dedir.



Şekil 2. 9 TAEK Proton Hızlandırıcısı Tesis [10]



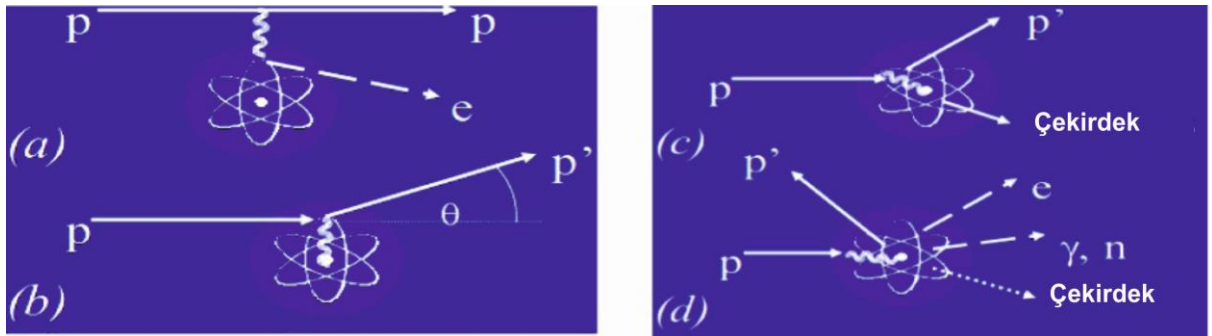
Şekil 2. 10 THM Proton Hızlandırıcı Tesis bölümlerinin şematik gösterimi [11].



Şekil 2. 11 Proton Hızlandırıcısının olası uygulama alanları [11].

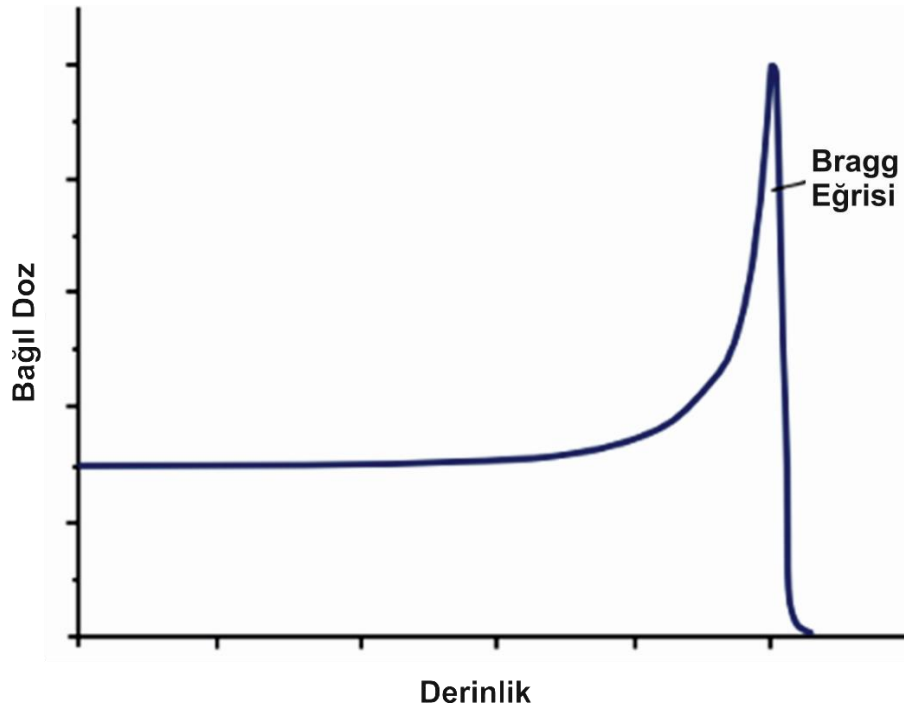
2.2. Protonların Madde ile Etkileşimi

Yüklü parçacık olan protonlar yolları üzerindeki atom veya çekirdeklerle etkileşerek enerjilerinin bir kısmını ya da tamamını kaybeder. Protonların atom veya çekirdek ile etkileşimleri elektronlarla iyonlaşma veya uyarılma, Coulomb saçılması, elastik veya elastik olmayan çekirdek saçılması şeklindedir (Şekil 2. 12).



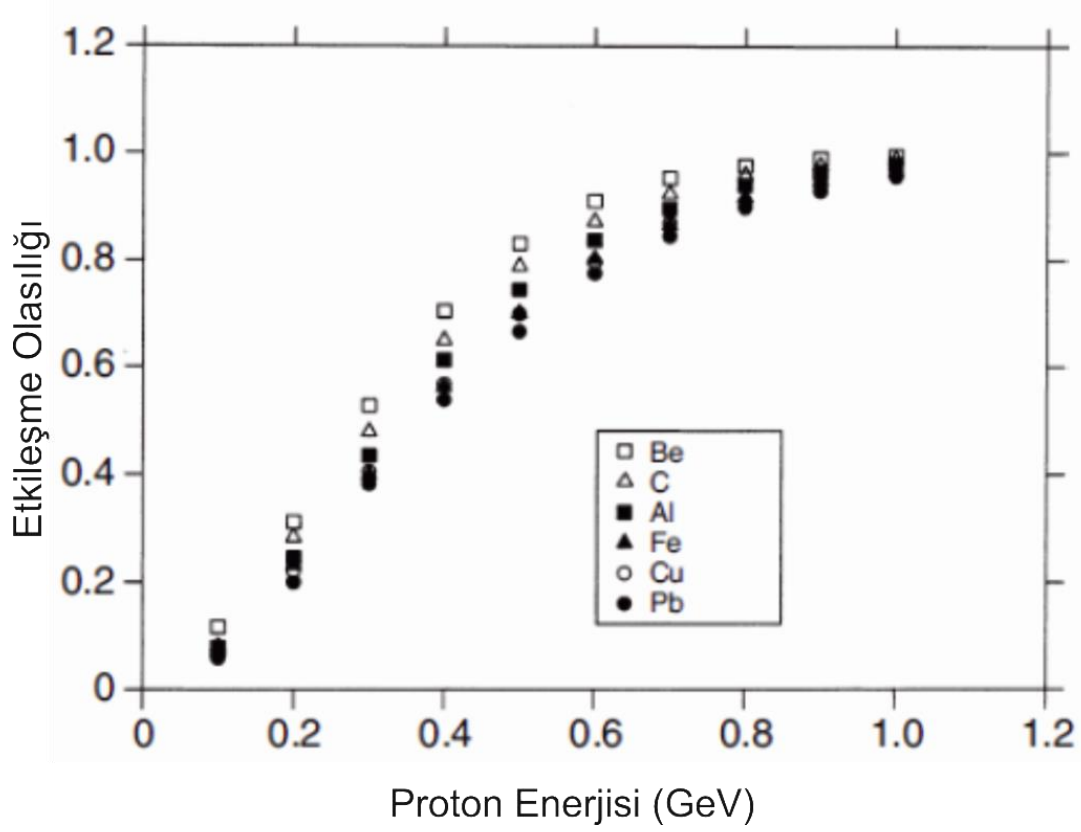
Şekil 2. 12 Protonların atom veya çekirdeklerle etkileşimleri: a) elektronik (iyonizasyon, uyarılma) b) Coulomb saçılmaları c) elastik çekirdek saçılması d) elastik olmayan çekirdek saçılması [12].

Etkileşmesinin büyük bir kısmını protonların elektronlarla yaptıkları elektromanyetik etkileşmeler oluşturur. Yörüngelerdeki elektronlara enerji aktararak atomların iyonlaşması sağlanır ve bundan dolayı protonların yolları üzerinde doz dağılımı gözlenir. Protonların etkileştiği ortamdaki soğurulan doz iyonlaşma sayısı veya birim yol başına kaybettikleri enerjili ile orantılıdır. Protonlar ile elektronlar arasındaki kütle farkı büyük olduğundan protonlar madde içinde neredeyse düz bir çizgi halinde yol alır. Protonların madde içindeki doz dağılımları erişme uzaklıklarının sonlarına doğru iyonlaşmadaki artmaya bağlı olarak doz değerinde de aşırı artma (Bragg piki) olur (Şekil 2. 13). Enerjisini kaybeden protonlar ise madde içinde soğurulur [13].



Şekil 2. 13 Proton Bragg piki [13].

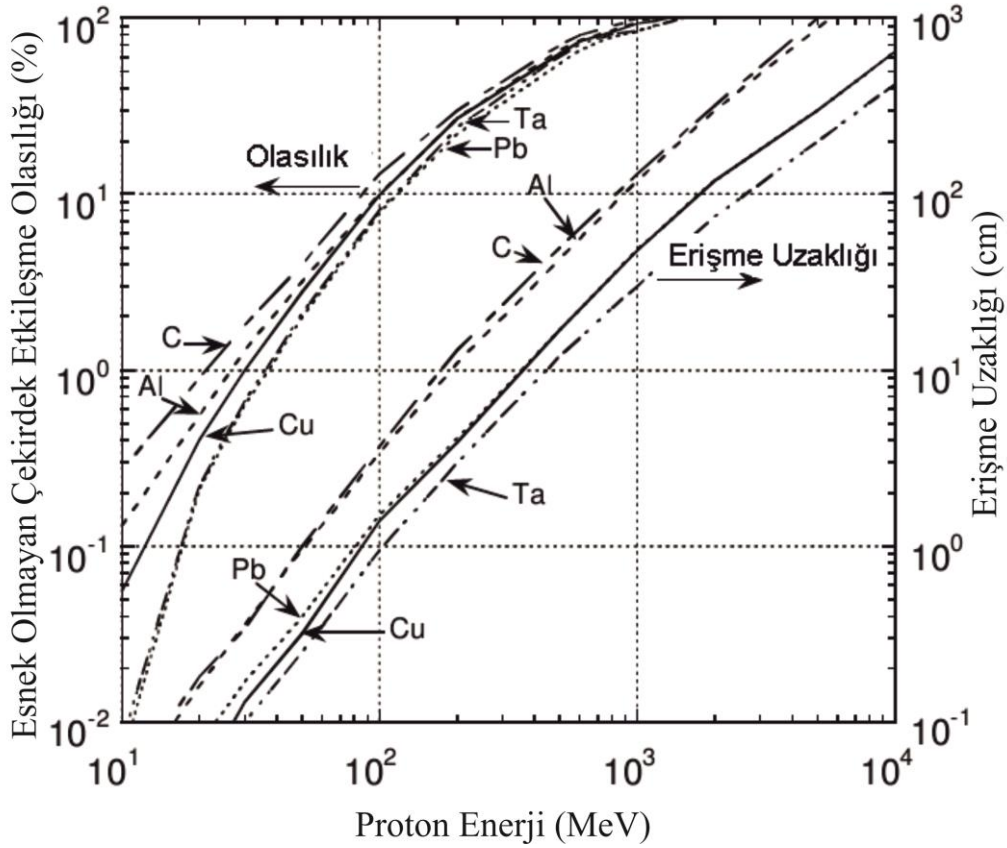
Kinetik enerjisi hedef çekirdeğin Coulomb engelini aşabilecek kadar yüksek olan protonlar, nükleer tepkimeye neden olur. Proton enerjisi artmasıyla, nükleer tepkimeler ile elektromanyetik etkileşimler değişir. Protonların enerjisine bağlı nükleer tepkimeler bir üst sınıra kadar artma devam eder. Üst sınıra ulaşıldığında, hedef maddeden bağımsız olarak etkileşme olasılığı, enerjide artış olsa da sabit kalır (Şekil 2. 14) [14].



Şekil 2. 14 Proton enerjisine bağlı nükleer etkileşim olasılığı [14].

2.3. Nükleer Etkileşmelerde Nötron Verimi

Protonların hedef madde ile etkileşmesi, enerjilerine ve hedef maddeye bağlı olarak değiştiğinden, hedefteki erişme uzaklıklarında ve hedefle yaptıkları esnek olmayan çarpışma olasılıklarında farklılık görülür (Şekil 2. 15). Erişme uzaklıkları enerji ile doğru orantılı olarak değişir. Esnek olmayan çarpışma olasılıkları ise yaklaşık 1000 MeV enerji değerine kadar düzenli bir artma gösterdiği halde daha yüksek enerjilerde, enerji ile doğru orantılı artma göstermez, değişim yaklaşık sabit kalır.



Şekil 2. 15 Farklı hedef maddeler için protonların erişme uzaklıkları (sağda bulunan eğriler ve sağ taraftaki eksen) ile esnek olmayan çekirdek etkileşme (solda bulunan eğriler ve sol taraftaki eksen) olasılıklarının gösterimi [15].

Protonların enerjilerine bağlı olarak hedef madde ile etkileşmelerinde farklılık olduğundan nötron verimlerinde de farklılık görülür.

Proton enerjilerinin 10 MeV düşük olduğu bölgelerde, doğrudan tepkimeler ile nötron üretilir. Bu bölgede endotermik çekirdek tepkimelerin gerçekleşmesi için dikkate alınması gereken enerji sınır değeri ($E_{\text{eşik}}$) önemlidir. $E_{\text{eşik}}$ değeri; mermi parçacığının kütlesine (m_p), hedef çekirdeğin kütlesine (M) ve reaksiyon enerjisine (Q) bağlıdır ve

$$E_{\text{eşik}} = \frac{m_p + M}{M} |Q|,$$

eşitliği ile ifade edilir. Bir nükleer tepkime için Q -değeri (etkileşme ile açığa çıkan enerji), parçacıkların

$$Q_v = [(m_1 + m_2) - (m_3 + m_4)]c^2$$

kütle farklarından belirlenir.

Nötron elde edilmesi için hedef olarak kullanılan bazı maddeler için eşik enerjisi 10 MeV'den oldukça düşük değerlerde gerçekleşir. Tablo 2. 3 bazı çekirdek reaksiyonları (p,n) için eşik enerjileri görülmektedir.

Tablo 2. 3 Bazı çekirdek reaksiyonları için eşik enerjileri [16].

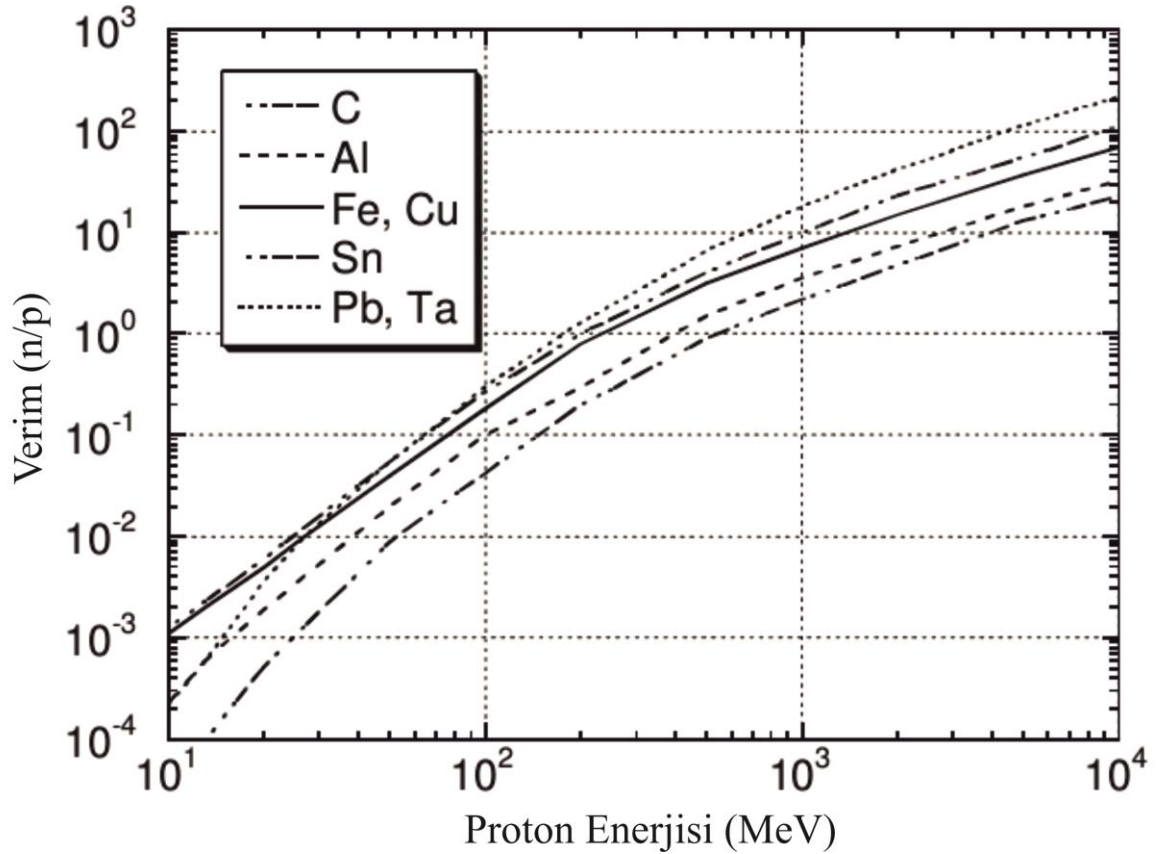
Reaksiyon	Eşik enerjisi (MeV)
${}^3\text{H}(p, n) {}^3\text{He}$	1.019
${}^7\text{Li}(p, n) {}^7\text{Be}$	1.882
${}^{45}\text{Sc}(p, n) {}^{45}\text{Ti}$	2.908
${}^{51}\text{V}(p, n) {}^{51}\text{Cr}$	1.5656
${}^{63}\text{Cu}(p, n) {}^{63}\text{Zn}$	4.214
${}^{65}\text{Cu}(p, n) {}^{65}\text{Zn}$	2.1646

10-200 MeV enerji aralığındaki protonların oluşturduğu nötronlar, protonların madde ile etkileşmesiyle oluşan radyasyonlu alanların en etkin parçacıklarıdır. Bu enerji alanında nötron verimleri düşük enerji durumlara göre enerjinin fonksiyonu olarak daha düzgün artma gösterir.

200-1000 MeV enerji aralığında, enerjiye bağlı olarak daha fazla tepkime gerçekleşir. Proton sayısına yaklaşık sayıda nötronlar yayınlanır. Yüksek enerjilerde proton ve nötronların radyasyon etkileri genel olarak aynıdır. Ayrıca, bu enerji aralığında kaskat nötronları, buharlaşma nötronlarından daha önemlidir. Gelen parçacığın enerjisinin artması ile radyasyon alanı, daha ilerilerde ve farklı yapılarla görülür.

1000 MeV'den daha büyük proton enerjilerinde nötron verimlerinin belirlenmesi, birbirini izleyen birçok tepkimenin gerçekleşmesinden ve bu tepkimelerde oluşan bazı çekirdeklerin bozunması ile de nötronlar oluştuğundan oldukça güçtür. Ayrıca, oluşan ikincil parçacıklar da hedef içinde veya dışında yeni etkileşmeler yaparak nötron oluşumuna neden olur [15].

Düşük enerjilerde, buharlaşma nötronları olarak bilinen nötronlar oluşur. Bu nötronlar, gelen parçacıklardan çekirdeklerin enerji soğurması sonucu oluşur. Üretilen diğer nötronlar, nükleer tepkimelerden yayınlanan kaskat nötronlarıdır. Nötron verimi (Y) $50 < E_p < 500$ MeV için $Y \propto E_p^2$; $E_p > 1.0$ GeV için ise $Y \propto E_p$ enerji değerlerine bağlı olarak değişir. Farklı maddeler için gelen proton başına, enerjinin fonksiyonu olarak toplam nötron verimleri Şekil 2. 16'da gösterilmiştir [15], [16], [17].



Şekil 2. 16 Farklı hedef maddeler için proton başına toplam nötron verimi [15].

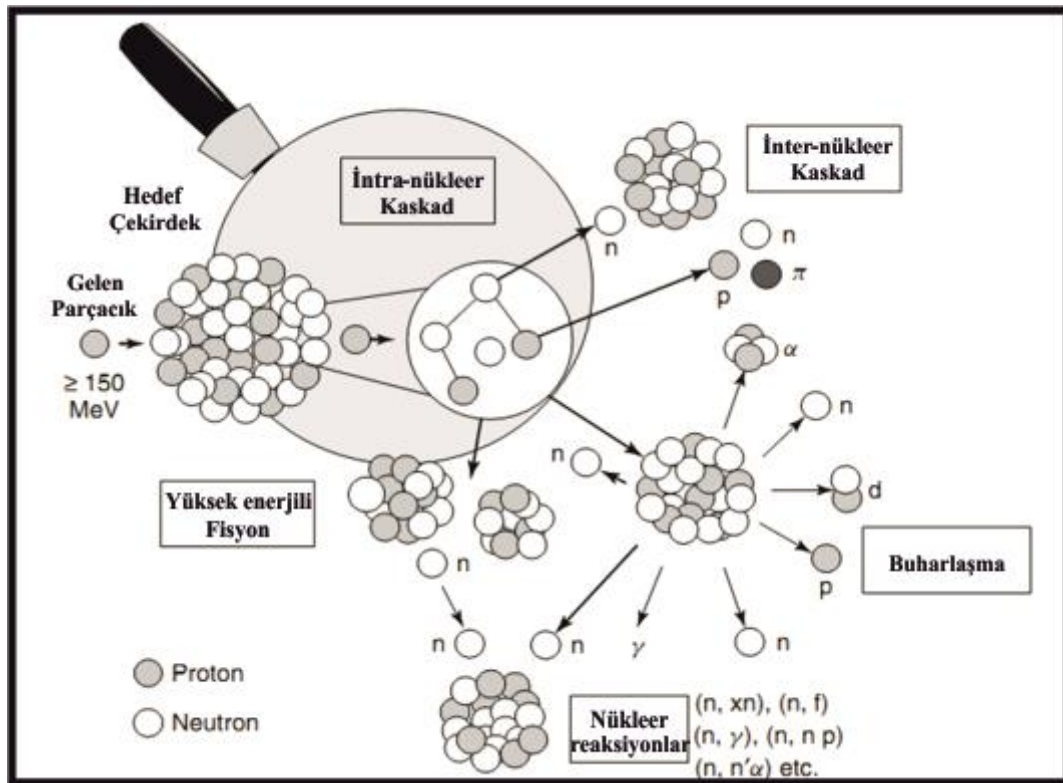
2.3.1. Ani Radyasyon Alanının Özellikleri

Madde ile hızlandırılmış protonların, bir etkileşim noktası yanında ani radyasyon alanında karmaşık olduğu açıktır ve protonların enerjisi arttıkça daha karmaşık hale gelir. Alan, yüklü ve foton gibi nötr parçacıkların karışımından oluşur. Yukarıda tarif edilen tüm etkileşimler ve etkileşim noktaları civarındaki radyasyon alanının tahminlerine olanak tanıyan, hedefte ve demet yığınlarındaki enerji birikimini hesaplamak için gerekli olanlar gibi birçok benzetim kodları mevcuttur.

1 GeV'den daha düşük proton enerjilerinde sadeleştirme oluşur çünkü nükleer reaksiyonlarda üretilen yüklü parçacıkların aralıkları, nötronlara karşı koruma sağlamak için yeteri kadar kalın bir kalkan içinde değişmektedir. Bunun anlamı, bu enerji aralığında hızlandırıcı kalkanı dışındaki radyasyon alanı, nötronlar tarafından belirlenir ve domine edilir demektir [14].

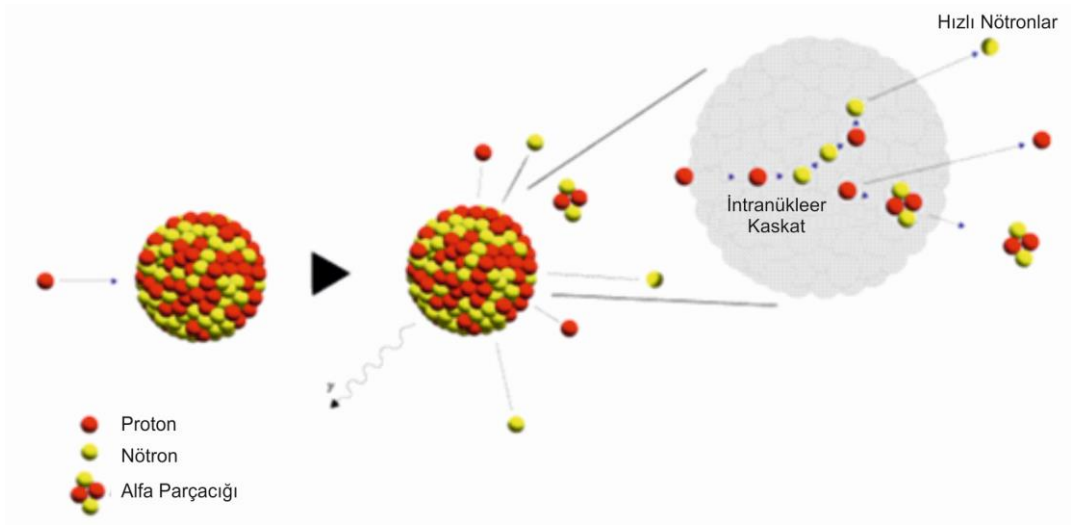
2.3.2. Parçalanma (Spallation) Süreci

Yüksek enerjili hadronların (proton, nötron vb.) ya da hafif çekirdeklerin (döteryum, trityum, alfa vb.), ağır çekirdeklerle çarpışmasıyla oluşan çekirdek tepkimesi parçalanma (spallasyon) olarak ifade edilir. Tepkimenin gerçekleşmesi için gelen parçacık enerjisinin, hedef çekirdekteki nükleonların etkileşme enerjisinden daha yüksek olması gerekir. Başlangıçta, gelen parçacık ile hedef çekirdek arasında çarpışmalar sonucu çekirdekten temel parçacıklar veya hafif çekirdekler çıkar. Yeterli enerjisi olan ikincil parçacıklar yeni parçalanma tepkimeleri yapabilir. Düşük enerjili olanlar ise çevredeki çekirdekler tarafından yakalanarak radyoaktif izotop oluşmasına neden olur. Parçalanma tepkimesinin genel şematik tasarımı Şekil 2. 17'da görülmektedir.

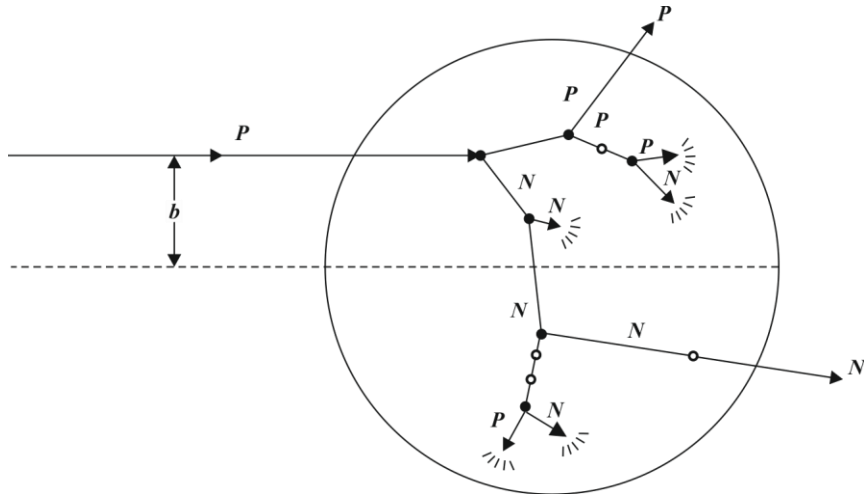


Şekil 2. 17 Parçalanma tepkimesinin genel tasarımı [18], [19].

Yüksek enerjili parçacıkların hedef çekirdekte bulunan nükleonlar ile etkileşmelerini tanımlamada intra-nükleer kaskat modeli kullanılır (Şekil 2. 18). Gelen parçacığın kinetik enerjisi, elastik çarpışmalar ve nükleon-nükleon etkileşimleri ile hedefi oluşturan nükleonlar tarafından paylaşılır (Şekil 2. 19). Gelen parçacık enerjisinin bir kısmı uyarılma yoluyla hedef çekirdeğe, geri kalanı ise açığa çıkan nükleonlara aktarılır. Parçacığın yeterli enerjisi olduğunda, hedef çekirdeğin nükleonlarıyla çarpışarak çekirdekten geçebilir ve aynı şekilde farklı bir çekirdeğin nükleonlarıyla da çarpışabilir. İntra-nükleer kaskat çok hızlı gerçekleşen bir evredir (10^{-22} sn) [20]. Kaskat ile uyarılmış çekirdek buharlaşma veya fisyon tepkimeleri yapar ve yeni uyarılmış çekirdek oluşur.



Şekil 2. 18 İntra-Nükleer Kaskat [19].



Şekil 2. 19 Geliş parametresine göre protonun ağır çekirdekle oluşturduğu İntra-Nükleer Kaskatın şematik gösterimi. (Kısa oklar, nükleonların yakalanması sonucu çekirdeğin uyarılma katkılarını göstermektedir) [20], [21].

İntra-nükleer kaskat süreci sonucunda yayınlanan nükleonlar (>20 MeV), çevredeki çekirdeklerin nükleonları ile çarpışır ve inter-nükleer kaskat olarak adlandırılan yeni parçalanma tepkimeleri oluşturur veya enerjileri ile çekirdekleri yüksek seviyelere uyarır. Bu çekirdekler de daha sonra çeşitli yollarla tekrar uyarılabilir (de-eksitasyon) (10^{-16} sn). Buharlaştırma işlemiyle proton, nötron ve alfa parçacıkları gibi hafif parçacıklar yayınlanır veya fisyonu benzer iki, üç bölünme sonucu tekrar uyarılabilir (de-eksitasyon).

Tekrar uyarılma ile uyarılmış çekirdek, son nükleonun bağlanma enerjisinin (~ 8 MeV) altına düşene kadar parçacık yayınlar. Kalan enerji ise çekirdekten gama radyasyonu olarak yayınlanır. Gama yayınlanması sonunda da tekrar uyarılma sürecinin sona ermeyebilir. Gama yayınladıktan sonra çekirdek, genellikle radyoaktiftir ve kararlı çekirdek olana kadar bozunma devam eder.

2.4. Nötronların Madde ile Etkileşmesi

Nötronlar, yüksüz parçacık olduğundan kısa menzilli nükleer kuvvetler nedeniyle genellikle yalnız atom çekirdekleriyle etkileşir. Çekirdeğe yaklaştıklarında, yüklü parçacıklarda olduğu gibi Coulomb potansiyel duvarını yenmek zorunda değildir. Çekirdek ile etkileşebilmeleri için çekirdeğe en az 10^{-13} cm kadar yaklaşması gerekir [22]. Nötron-elektron etkileşim olasılığı da vardır fakat nötron-çekirdek etkileşimine göre bu olasılık çok düşük olduğundan önemsizdir. Nötron etkileşimi, nötronların enerjisine bağlı olduğu gibi hedef maddeye ve maddenin izotopik yapısına da bağlıdır.

Nötronlar genellikle kinetik enerjilerini göre sınıflandırılır. Oda sıcaklığında, 2200 m/s hızına karşılık gelen 1/40 eV enerjili nötronlar *termal nötronlar*, 10 keV ile 10 MeV arasındaki nötronlar *hızlı nötronlar* olarak tanımlanır. Termal ve hızlı nötronlar arasındaki nötronlar *orta enerjili nötronlar*, 10 MeV'den büyük enerjili nötronlar ise *yüksek enerjili nötronlar* olarak ifade edilir.

Farklı nötron-çekirdek etkileşim olasılıkları vardır ve etkileşmeler nötronların enerjisine göre değişir. Nötronların enerjilerine göre etkileşimleri Tablo 2. 4'de verildi.

Tablo 2. 4 Nötron etkileşimlerinin sınıflandırılması [22].

Düşük enerjili etkileşimler ($E < 1$ eV)

- Radyoaktif yakalanma ile foton yayınlanması $\{(n, \gamma)$ tepkileri}
- Radyoaktif yakalanma ile yüklü parçacıkların yayınlanması $\{(n, \alpha)$ ve (n, p) tepkimeleri}
- Fisyon (bölünme) tepkimeleri

Yüksek enerjili etkileşimler ($1\text{eV} < E < 20$ MeV)

- Elastik saçılma
- Elastik olmayan saçılma
- Rezonans nötron soğurulması
- Birden çok parçacık tepkimeleri $\{(n, 2n), (n, pn)$ ve $(n, p2n)\}$

Çok yüksek enerjili etkileşimler ($E > 20$ MeV)

- Parçalanma tepkimeleri
- Ekzotik parçacık oluşumu

Düşük enerjili nötronlar (<20 MeV) için tesir kesitleri, oldukça geniş olarak incelendiği halde daha yüksek enerjiler için incelenme yetersizdir. Burada farklı bir uygulama, yüksek enerjili protonların hedef maddeler ile etkileşmesiyle oluşan nötronlarda görülür. Yüksek enerjili proton hızlandırıcılarında, zırhlamada için önemli olan nötronlarla çalışmalar yapılmıştır. Genellikle, termal enerji üzerindeki tesir kesitleri, MeV enerji aralığına kadar düzgün olarak değişir. Bu enerji aralığında oldukça geniş rezonanslar görünür.

Nötronların yalnız en hafif çekirdekler olan hidrojen ve döteryum ile etkileşiminde rezonans gözlenmez. Ağır çekirdeklerde rezonans, hafif çekirdeklerden çok daha düşük enerjilerde (eV bölgesinde) görünür. Hafif ve ağır çekirdekler arasındaki ara bölgede ise çekirdeklerin rezonansları birkaç yüz eV ile birkaç keV arasında değişir.

Yüksek enerjili bölgesinde, saçılma en önemli nötron etkileşimidir. Genellikle, elastik saçılma olmasına rağmen nötron enerjisi saçılan çekirdeğin ilk uyarılmış enerji değerinden fazla ise elastik olmayan saçılma da olur. 8 MeV'den daha yüksek enerjilerde $(n, 2n)$, (n, pn) ve $(n, p2n)$ gibi parçacık tepkimeleri olabilir. Çok yüksek enerjili nötronlar, parçalanma tepkimesi oluşturur. Bu işlemde, hedef çekirdekten çok sayıda nükleon (proton ve nötron)

veya hafif parçacık yayınlanır. Ultra yüksek enerjili nötron etkileşimlerinde ise birçok ekzotik ikincil parçacıklar gözlenir [22].

2.5. Monte Carlo Yöntemi

Monte Carlo yöntemi, istatistiksel ve matematiksel tekniklerle bir deneyi veya üzülmesi gereken bir fiziksel olayı rasgele denemeler yolu ile oluşan verilere göre belirlenmesi yöntemidir. Bu yöntem, analitik zmn zor ya da imkansız olduğu matematik veya fizik problemlerinin üzümünde iyi sonuçlar vermektedir.

Monte Carlo yöntemi, integrallerin hesaplanmasında; kısmi diferansiyel denklemlerin ile lineer denklem sistemlerinin üzümünde, nötron yayınımları, gama ışınımları soğurulması problemlerinde, parçacık fiziğinde bozunum genişliklerinin ve saçılma tesir kesitlerinin hesaplanması gibi yerlerde de yaygın olarak kullanılmaktadır.

Monte Carlo yöntemi, radyasyon parçacıklarının madde içinden geçerken yapmış oldukları etkileşimlerin, olasılık dağılımlarına uygulanan rastgele denemelerle zlmesinde kullanılır. Yöntem, radyasyon taşınımı problemlerinin zm için kullanılan analog yönteme sayısal bir açıklama getirir ve analitik yöntemler ile kolayca tasarlanamayacak, gerçeğe uygun geometrilerde etkileşimleri belirlemede en kullanışlı yöntemlerden biridir.

Monte Carlo yöntemi, parçacık etkileşimlerini tanımlayan niceliklerin belli olasılık dağılımlarına sahip olduğu varsayımından yola çıkarak, madde içinde yol alan her parçacığın izlerini birer birer takip eder. Hesaplama bir dizi yörünge üreterek her bir paracısının olası süreçlerden rastgele seçildiği bir mantık üzerinde ilerler. Bu yöntemde enerji, yn ve menzil değerleri olasılık dağılımlarından rastgele seçilir. Bu sayede, her bir parçacığın madde içinde yaptığı etkileşimler takip edilebilir ve birçok fiziksel niceliğin dağılımı çok sayıda parçacık için izlenerek belirlenebilir.

Günümüzde yüksek hızlı bilgisayarlar ve gelişmiş Monte Carlo kodları olmasına rağmen, bu yaklaşım ile bilgisayarın hesaplama zamanı çok uzundur, dolayısıyla sonsuz sayıda parçacığı izlemek mümkün değildir. Monte Carlo yönteminin ana eksikliği, onun rastgele mantığından kaynaklanmaktadır. Ortaya çıkan bütün sonuçlar istatistiksel kararsızlıklardan etkilenir. Bu nedenle, istatistiksel kararsızlıkları düzenleyen değişken azaltma yöntemleri geliştirilmiştir.

2.5.1. FLUKA Monte Carlo Kodu

FLUKA, parçacık fiziğine uyumlu Monte Carlo benzetim program paketidir. Yüksek enerji fiziği, proton ve elektron hızlandırıcısı için hedef tasarımı, nötrino fiziği, zırh tasarımı, detektör ve teleskop tasarımı, kozmik ışın çalışmaları, dozimetri ve radyasyondan korunma, hızlandırıcı tasarımı, medikal fizik ve radyobiyojoloji gibi birçok alanda kullanılabilir. FLUKA'nın tasarımı ve gelişiminde en önemli özellik, her zaman gerekli modern ve fiziksel modellere göre düzenlemeler yapılması ve uygulanmasıdır.

FLUKA mümkün oldukça, özgün ve bilinen en küçük modellere dayanır. Tepkimeler ve tepkime çeşitleri deneysel verilerle denetlenir. Genel olarak sonuçlar; enerji, hedef, mermi bileşenlerinin tamamı için en az parametreye göre düzenlenmesiyle elde edilir. Karmaşık durumlarda fiziksel modellerin tanımlanması ve ölçeklendirilmesi de doğal olarak artmaktadır. Doğrudan uygun deneysel verilerin olmadığı durumda öteleme uygulanır.

Günümüzde FLUKA, çok geniş enerji aralıklarında (Tablo 2. 5) 60 farklı parçacığın (foton, elektron, nötrino, müon, hadronlar, antiparçacıklar, ağır iyonlar, vb.) madde ile etkileşmelerinin hassasiyet ile benzetimini yapabilir durumdadır. Aynı zamanda polarize fotonların ve optik fotonların taşınmasının da benzetimini gerçekleştirebilir. FLUKA iyi bilinen kombinasyonel geometri paketinin gelişmiş bir versiyonunu kullanarak, en karmaşık geometrilere bile benzetim gerçekleştirebilir. FLUKA kombinasyonel geometri yüklü parçacıkların, elektrik ve manyetik alanlar içinde bile izini sürebilecek şekilde tasarlanmıştır. Ayrıca çeşitli görselleştirme ve hata ayıklama araçlarına sahiptir. FLUKA'nın başka hiçbir Monte Carlo kodunda bulunmayan bir başka özelliği ise, eğilimli (bias) kipte kullanılabilmesinin yanı sıra tamamen analog bir kod gibi de kullanılabilir [5].

Tablo 2. 5 FLUKA'da taşınan parçacıkların enerji aralıkları.

	İkincil parçacıklar	Birincil parçacıklar
Yüklü hadronlar	1 keV-20 TeV	100 keV-20 TeV (10 PeV*)
Nötronlar	Termal – 20 TeV	Termal – 20 TeV
Antinötronlar	50 MeV – 20 TeV	100 MeV – 20 TeV
Müonlar	1 keV – 1000 TeV	100 keV – 1000 TeV
Elektronlar	1 keV – 1000 TeV	70 keV – 1000 TeV
Fotonlar	1 keV – 1000 TeV	7 keV – 1000 TeV

*DPMJET kodu ile.

3. Malzeme ve Yöntem

Hızlandırıcılarda, hızlandırılan yüklü parçacıkların hedef ile etkileşimiyle oluşan ürün parçacıklar;

-Hedef maddeye

-Hedef boyutlarına

-Gelen parçacığın tipine ve enerjisine

bağlı olduğundan bu çalışmada, farklı enerjilerdeki proton demetlerinin hedef maddelerine göre nötron verimleri FLUKA Monte Carlo benzetim kodu ile incelendi.

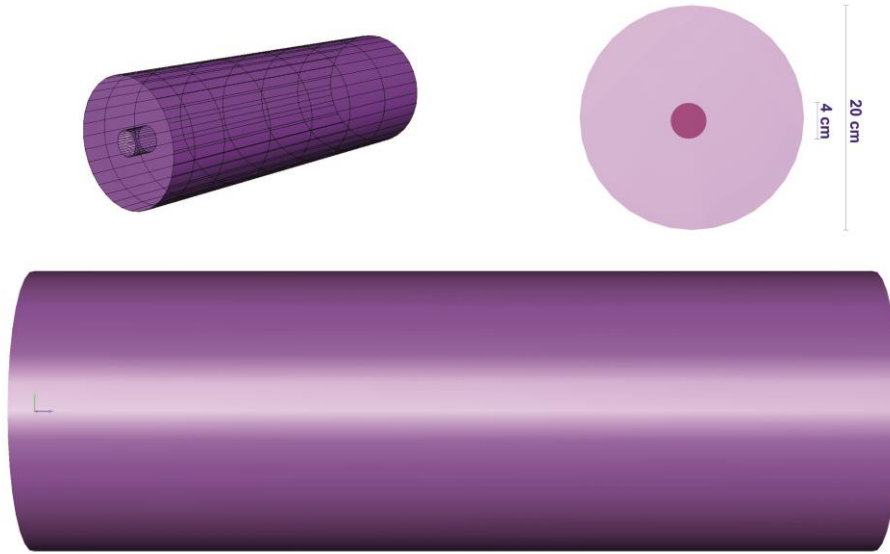
3.1. Benzetim Özellikleri ve Yöntemi

FLUKA Monte Carlo benzetim kodu ile 3 GeV proton hızlandırıcısının farklı enerjiler (30, 300, 600, 1000, 2000, 3000 MeV) için yoğunlukları ve atom numaraları (küçük, orta ve büyük) farklı hedef madde ile etkileşimler incelendi. Hedef madde olarak, berilyum (Be), bakır (Cu), kurşun (Pb), toryum (Th) elementleri kullanıldı. Oluşan ürün parçacıklardan yalnız nötronlar için proton başına verim incelendi. FLUKA kodu ile proton hızlandırıcısı benzetimi yapılırken kullanılan hedef maddelerin karakteristik özellikleri, Tablo 3.1’de gösterildi.

Tablo 3. 1 Benzetimde kullanılan hedeflerin karakteristik özellikleri [23].

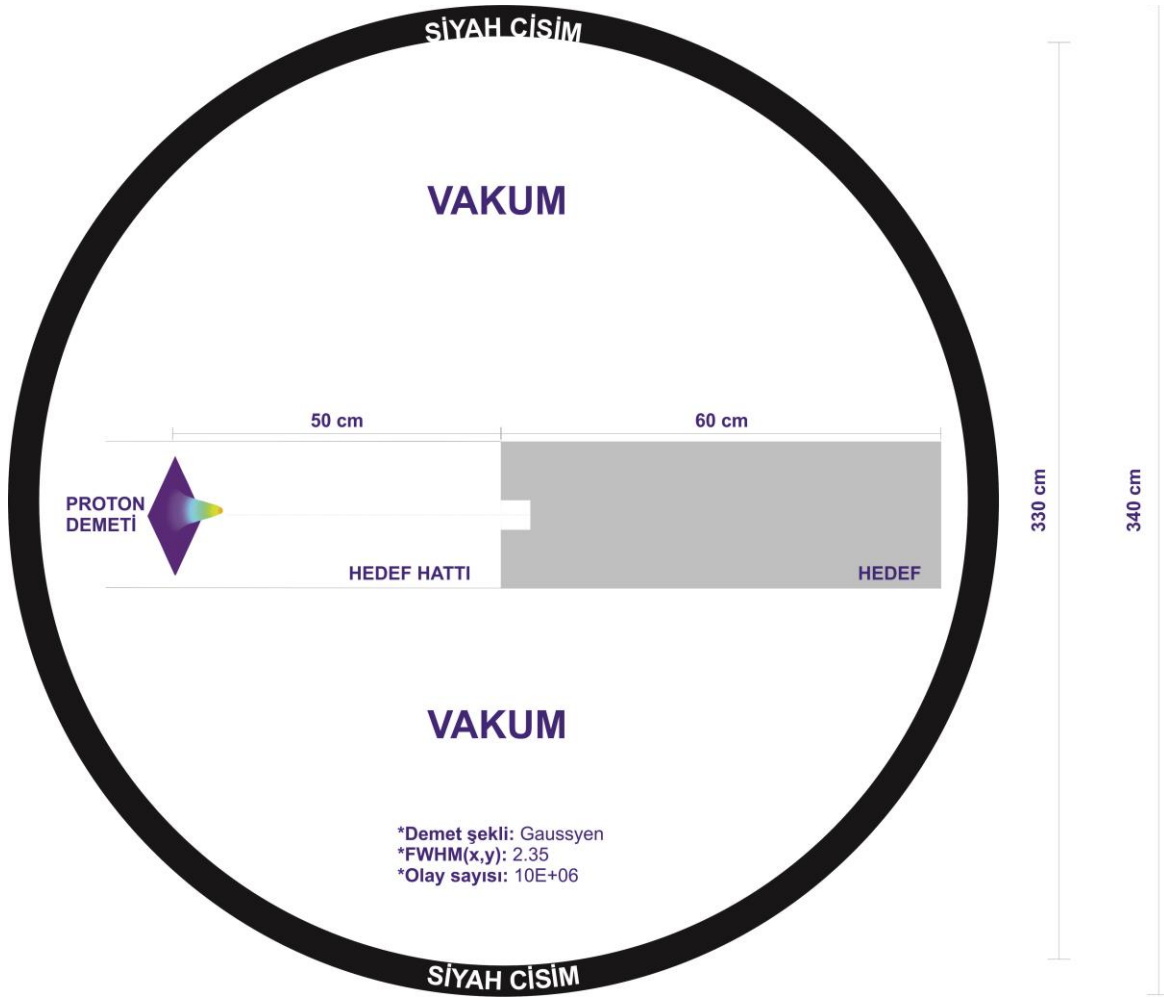
Hedef Madde	Yoğunluk [g/cm ³]	İzotop	İzotop Oranı
Berilyum	1.848	⁹ ₄ Be	100
Bakır	8.96	⁶³ ₂₉ Cu	68.499
		⁶⁵ ₂₉ Cu	31.501
Kurşun	11.35	²⁰⁶ ₈₂ Pb	24.000
		²⁰⁷ ₈₂ Pb	22.900
		²⁰⁸ ₈₂ Pb	53.100
Toryum	11.72	²³² ₉₀ Th	100

FLUKA Monte Carlo benzetim kodu ile, 0.03, 0.3, 0.6, 1, 2, 3 GeV enerjili protonların hedef maddeler ile etkileşmesini incelemek için 10 cm yarı çapında 20, 30, 40, 50, 60 cm uzunluklarında hedef tasarımı yapıldı. Protonların geliş doğrultusu yüzeyinde, silindirik hedefin merkezinde 2 cm yarıçapında ve 4 cm derinliğinde silindirik bir oyuk oluşturuldu. Oyuk, protonların hedef ile ilk etkileşimi sonrası olası parçacık kayıplarının minimum olması için oluşturuldu. Hedef tasarımının farklı açılardan görünüşü ve oluşturulan oyuk Şekil 3. 1’ de görülmektedir.



Şekil 3. 1 Geometrinin farklı açılardan görünüşü.

Gelen proton demeti karakteristiği nokta kaynak olarak değil, Yarı Maksimum Seviye Genişliği (FWHM) (x,y) düzlemi için 2.35 cm olacak şekilde Gaussiyen olarak doğrusal yapıda seçildi. Proton demeti ile hedefin etkileşimini incelemek için iç yarıçapı 115 cm, dış yarıçapı 120 cm olan siyah cisim olarak bilinen ortam oluşturuldu. Ayrıca, 50 cm uzaklıktan hedefe gelen proton demetinin hedefe gelmeden önce ortamda bulunan maddelerle etkileşiminin demet kaybına neden olmasını engellemek için ortam vakum olarak tanımlandı. Oluşturulan geometrik yapının şematik gösterimi Şekil 3. 2’de verildi.



Şekil 3. 2 Oluşturulan benzetim geometrisinin şematik gösterimi.

FLUKA kodunda benzetim geometrisi oluşturulurken, geometrinin en dış katmanının siyah cisim olarak seçilmesinin nedeni kodun bu noktadan sonra parçacıkların takibini bırakması gerektiğini gösterir. Böylece, yalnız tanımlanan geometrik yapı içindeki etkileşimleri incelenir. Geometrik yapının içinde hedef çevresinin vakum olarak alınması ise protonların yalnız belirlenen hedef maddesi ile etkileşmesine olanak verir. Hedef harici etkileşimler engellenmiş olur.

FLUKA kodunda, benzetimde kullanılacak bazı parametrelerin önceden belirlenmiş olarak tutulduğu bir anahtar (DEFAULTS) bulunur. Bu çalışmada, benzetim hesapları için özellikle proton hızlandırıcılarında nötronları incelemek için oluşturulmuş parçacık sınırlarına uygun olan 'NEW-DEFA' seçeneği seçildi.

Benzetim için girdi kütüğünü oluştururken, nötronları incelemek için detektör olarak USRBIN anahtarı ve nötronların akılarını ölçmek için ise USRBDX anahtarı kullanıldı. Detektör boyutları olarak R: 100 cm, z: 160 cm alındı. Nötron akıları için ise Emin: 1E-09, Emax: 1 olarak tanımlandı.

Genel olarak Monte Carlo kodları kullanarak, yüksek enerjilerde, yüksek parçacık/olay sayısı ile benzetim yapmak günümüz bilgisayarları için de oldukça uzun süren bir işlemdir. Bu nedenle bu gibi hesaplamalarda küme bilgisayarlara ihtiyaç duyulur. Bu çalışmadaki benzetimler, TÜBİTAK Tr-Grid kümesi üzerinde hesaplandı. FLUKA kodu ile yapılan benzetimlerde farklı enerjilerdeki protonlar için 1E+06 parçacık ve 10 çevrim için benzetim gerçekleştirildi. Benzetimler, Monte Carlo yöntemine uygun olarak farklı rastgele sayılar ile yapıldı.

3.2. Bulgular

Farklı enerjilerdeki (30, 300, 600, 1000, 2000, 3000 MeV) protonların berilyum, bakır, kurşun, toryum hedef maddelerinin farklı uzunlukları (20, 30, 40, 50, 60 cm) ile etkileşmesiyle oluşan proton, nötron, pion, müon, foton gibi ürünlerden yalnız nötronlar incelendi ve proton başına nötron verimleri belirlendi.

Her bir hedef için proton enerjisine ve kalınlığa bağlı olarak gelen proton başına nötron verimleri incelendi. Her bir hedef için oluşturulan tablolar; berilyum için Tablo 3. 2, bakır için Tablo 3. 3, kurşun için Tablo 3. 4, toryum için Tablo 3. 5'te verildi.

Tablo 3. 2 Berilyum hedef için proton enerjisine ve hedef uzunluğuna bağlı gelen proton başına nötron verimleri (n/p)

Berilyum	0.03 GeV	0.3 GeV	0.6 GeV	1 GeV	2 GeV	3 GeV
20 cm	0.024433	0.50240	0.73459	0.94183	1.1806	1.2694
30 cm	0.024469	0.77673	1.1629	1.5284	1.9942	2.2014
40 cm	0.024853	0.98749	1.5271	2.0666	2.7749	3.1226
50 cm	0.024529	1.0349	1.8138	2.5147	3.4680	3.9794
60 cm	0.024963	1.0535	2.0439	2.8776	4.0784	4.9861

Tablo 3. 3 Bakır hedef için proton enerjisine ve hedef uzunluğuna bağlı gelen proton başına nötron verimleri (n/p)

Bakır	0.03 GeV	0.3 GeV	0.6 GeV	1 GeV	2 GeV	3 GeV
20 cm	0.011899	1.6388	4.1776	6.5048	11.110	14.304
30 cm	0.011897	1.7203	5.2770	8.9825	16.233	21.595
40 cm	0.011930	1.7496	5.4892	10.344	19.452	26.641
50 cm	0.011949	1.7583	5.5766	10.951	21.349	29.736
60 cm	0.012062	1.7590	5.6012	11.187	22.341	31.571

Tablo 3. 4 Kurşun hedef için proton enerjisine ve hedef uzunluğuna bağlı gelen proton başına nötron verimleri (n/p)

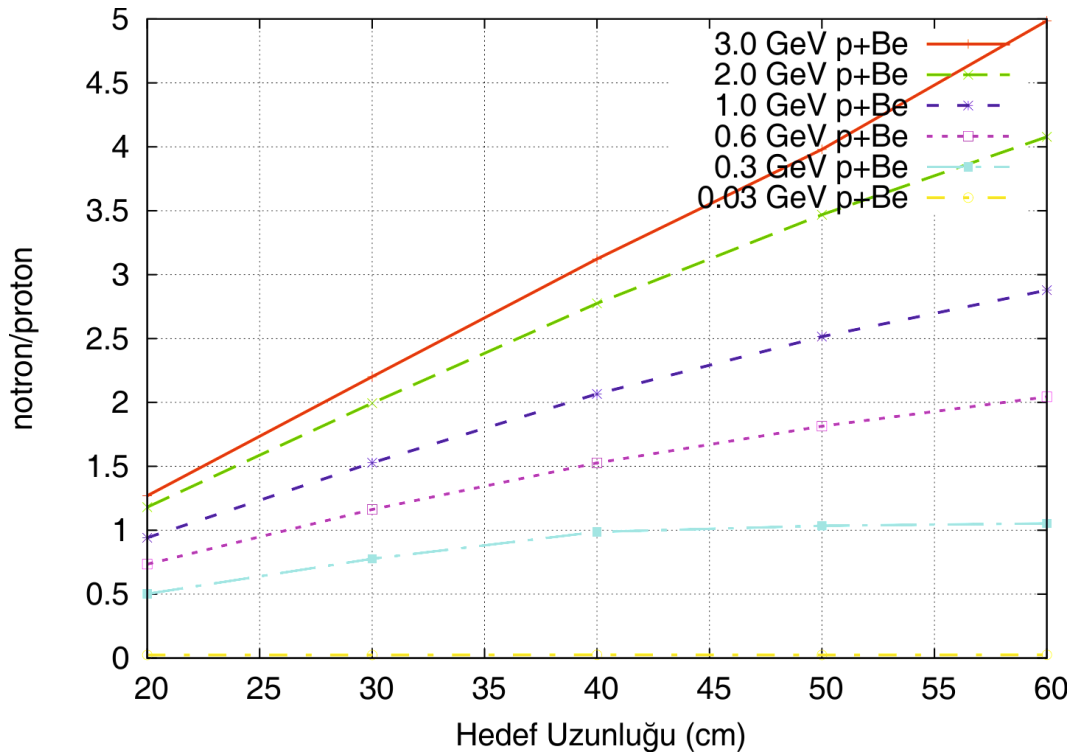
Kurşun	0.03 GeV	0.3 GeV	0.6 GeV	1 GeV	2 GeV	3 GeV
20 cm	0.018407	3.7104	9.8753	15.699	26.850	35.080
30 cm	0.018609	3.8511	12.300	21.134	38.150	51.213
40 cm	0.017991	3.9061	12.725	24.002	45.092	61.946
50 cm	0.018512	3.9069	12.844	25.353	49.160	68.570
60 cm	0.018687	3.9183	12.918	25.820	51.329	72.452

Tablo 3. 5 Toryum hedef için proton enerjisine ve hedef uzunluğuna bağlı gelen proton başına nötron verimleri (n/p)

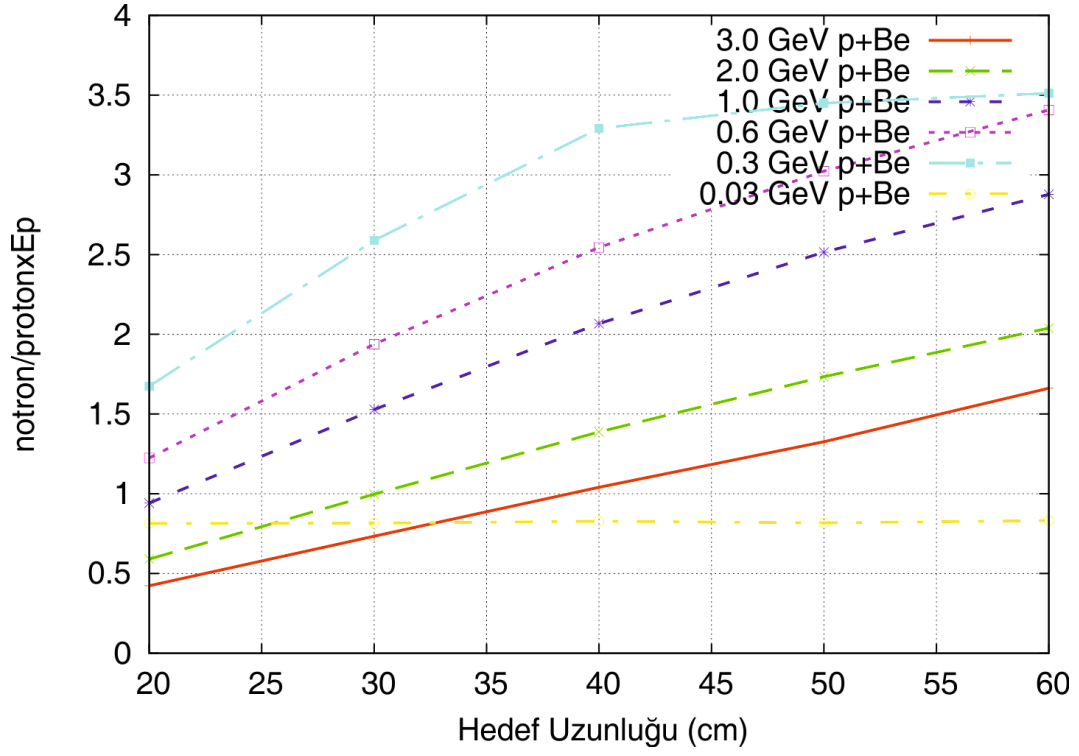
Toryum	0.03 GeV	0.3 GeV	0.6 GeV	1 GeV	2 GeV	3 GeV
20 cm	0.039091	5.0095	12.838	19.78	34.110	44.749
30 cm	0.039424	5.2054	16.079	26.986	48.341	65.260
40 cm	0.039335	5.2518	16.613	30.776	57.226	78.660
50 cm	0.039583	5.2914	16.782	32.478	62.210	86.965
60 cm	0.039082	5.2756	16.833	33.08	64.984	91.707

Tablo 3. 2, Tablo 3. 3, Tablo 3. 4 ve Tablo 3. 5'ten görüldüğü gibi gelen proton başına nötron verimleri; proton enerjisine, hedef maddeye ve hedef maddenin boyutlarına (uzunluğuna) bağlı olarak farklılık gösterir. Farklılık, protonların madde içinde erişme uzaklıkları ve hedefin atom numarasına bağlı olarak değiştiği, elde edilen nötron verim değerlerinden görülmektedir.

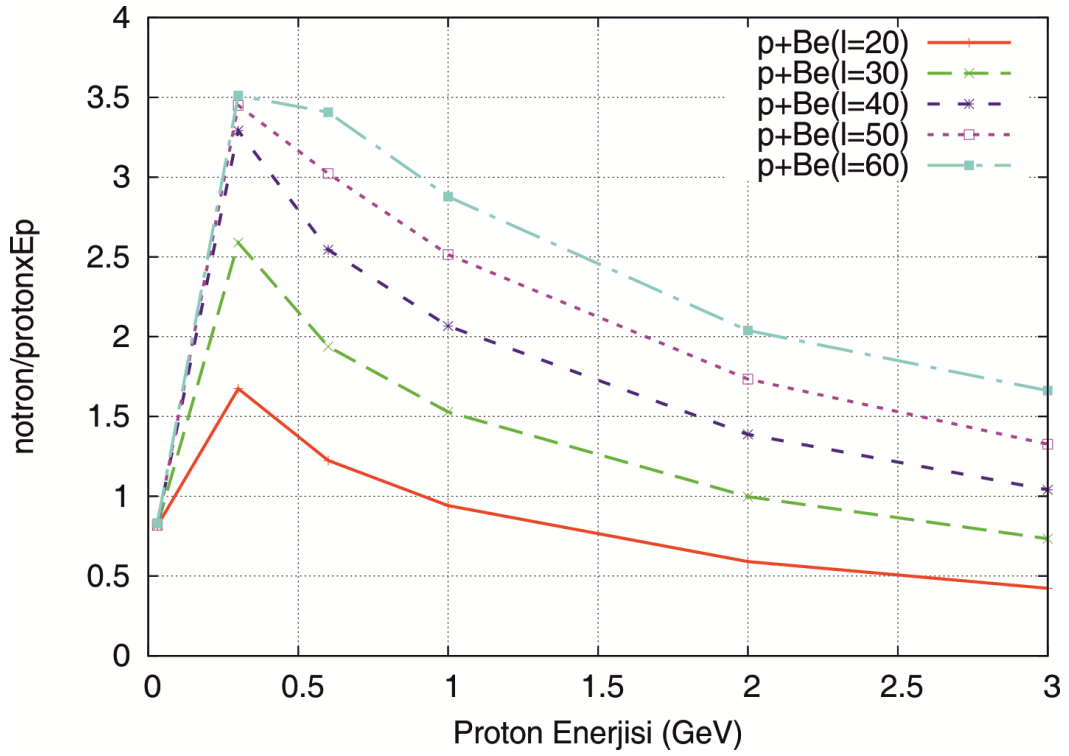
Berilyum, bakır, kurşun ve toryum hedef maddeler için hedef uzunluğuna (yarıçap sabit) ve proton enerjisine göre oluşturulan şekiller; Berilyum için Şekil 3. 3, Şekil 3. 4 ve Şekil 3. 5'te, Bakır için Şekil 3. 6, Şekil 3. 7 ve Şekil 3. 8'te; Kurşun için Şekil 3. 9, Şekil 3. 10 ve Şekil 3. 11'de; Toryum için Şekil 3. 12, Şekil 3. 13 ve Şekil 3. 14'te verildi.



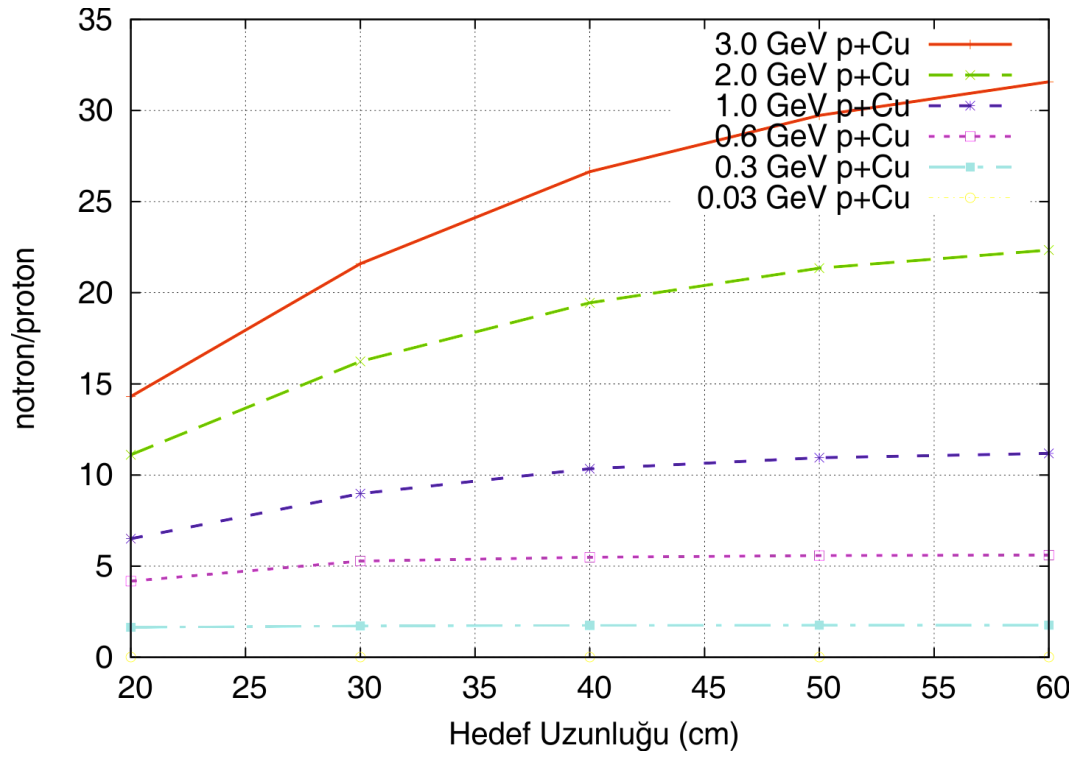
Şekil 3. 3 Farklı proton enerjileri için berilyum hedef uzunluğuna göre nötron verimi



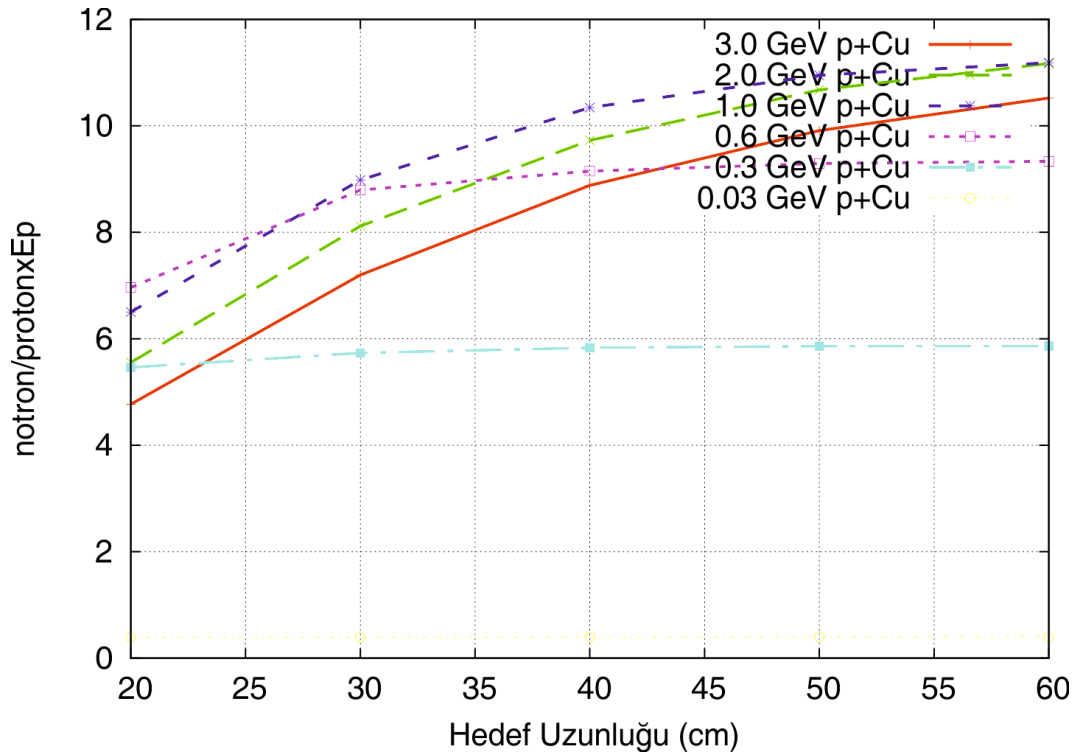
Şekil 3. 4 Farklı proton enerjileri için berilyum hedef uzunluğuna göre normalize nötron verimi



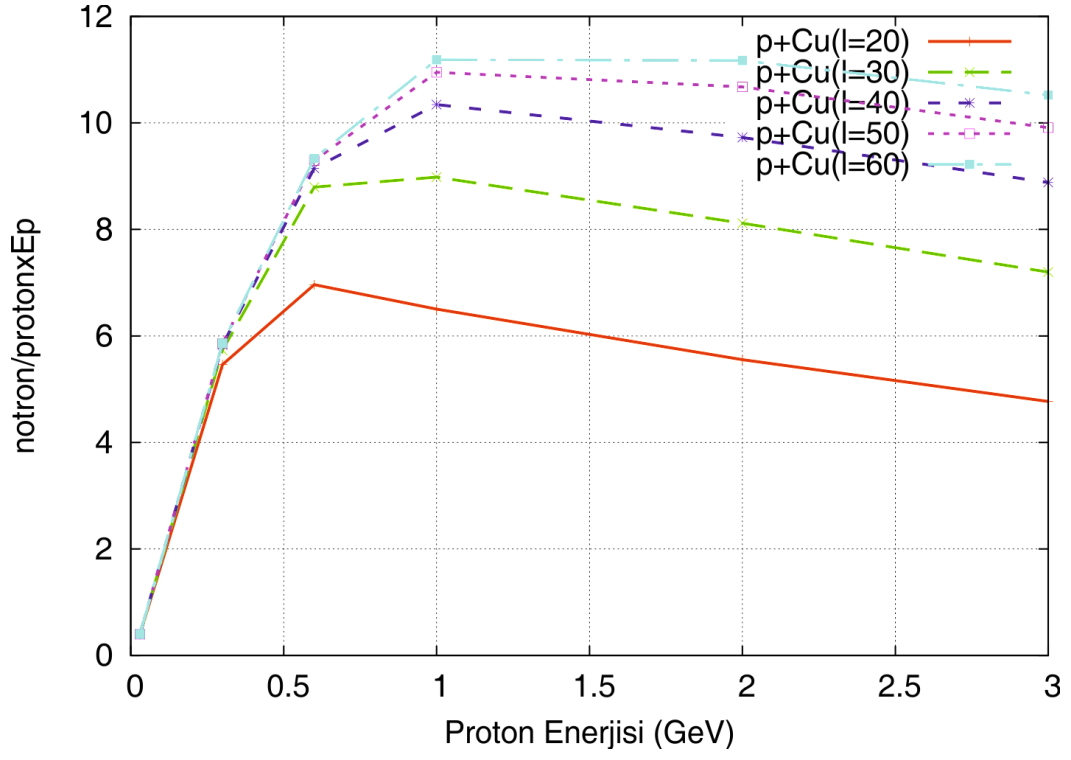
Şekil 3. 5 Farklı berilyum hedef uzunluğu için proton enerjisine göre normalize nötron verimi



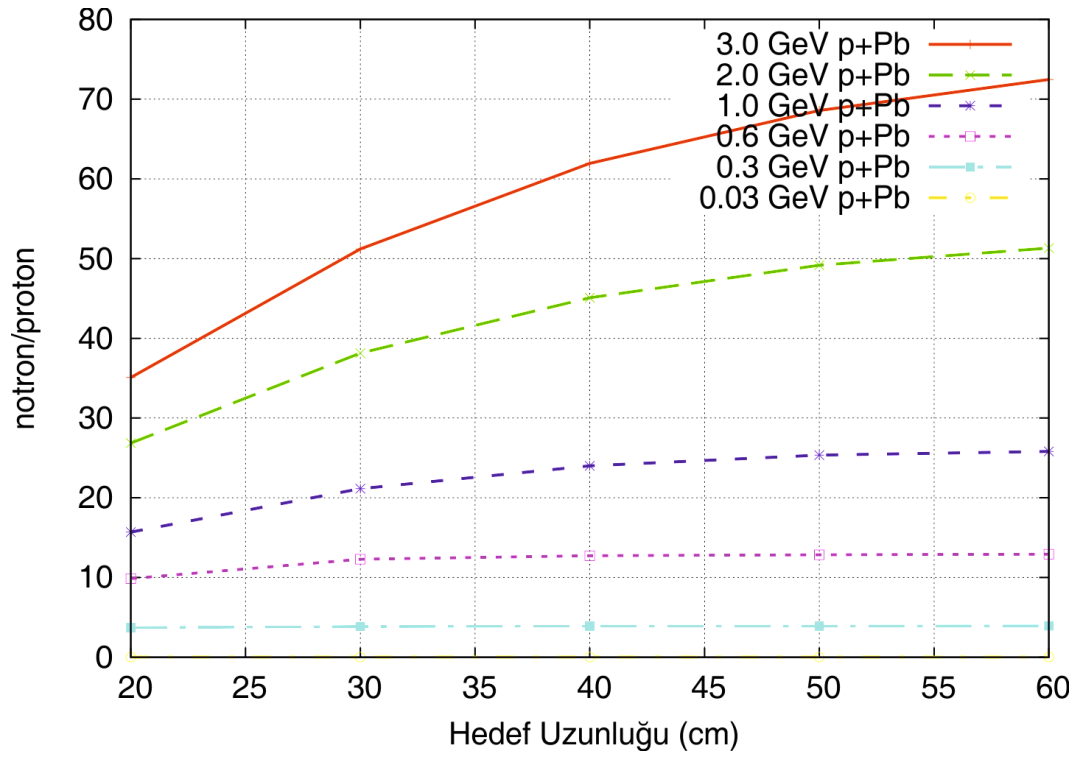
Şekil 3. 6 Farklı proton enerjileri için bakır hedef uzunluğuna göre nöttron verimi



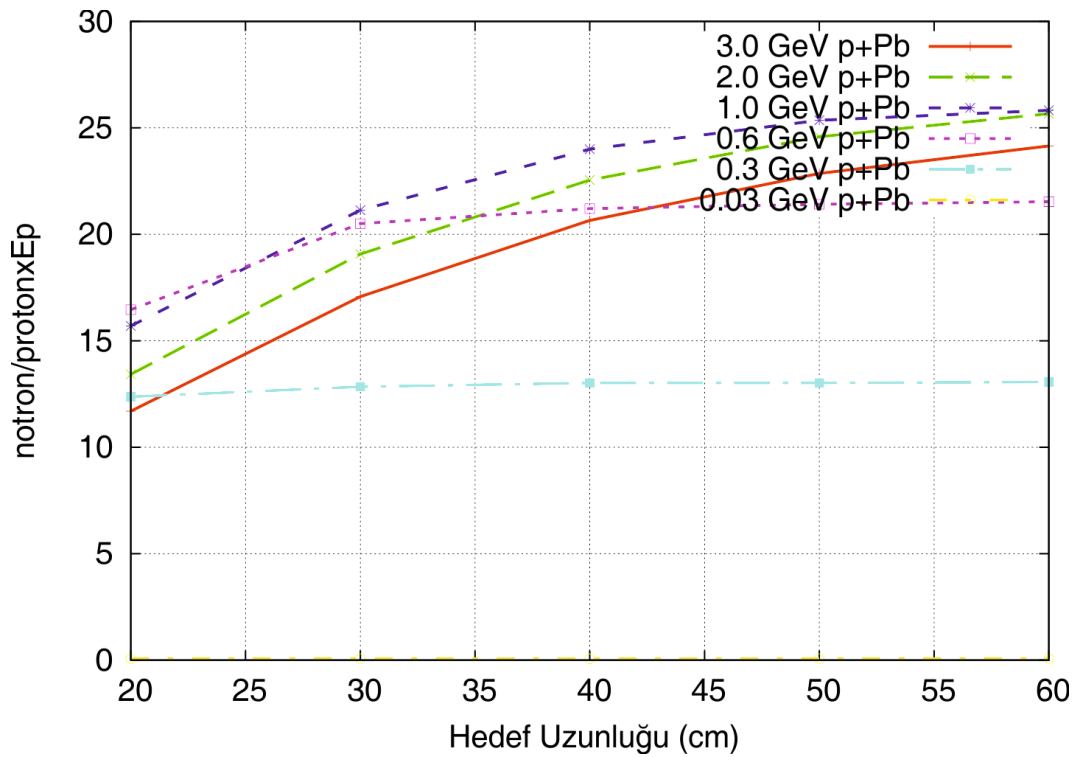
Şekil 3. 7 Farklı proton enerjileri için bakır hedef uzunluğuna göre normalize nöttron verimi



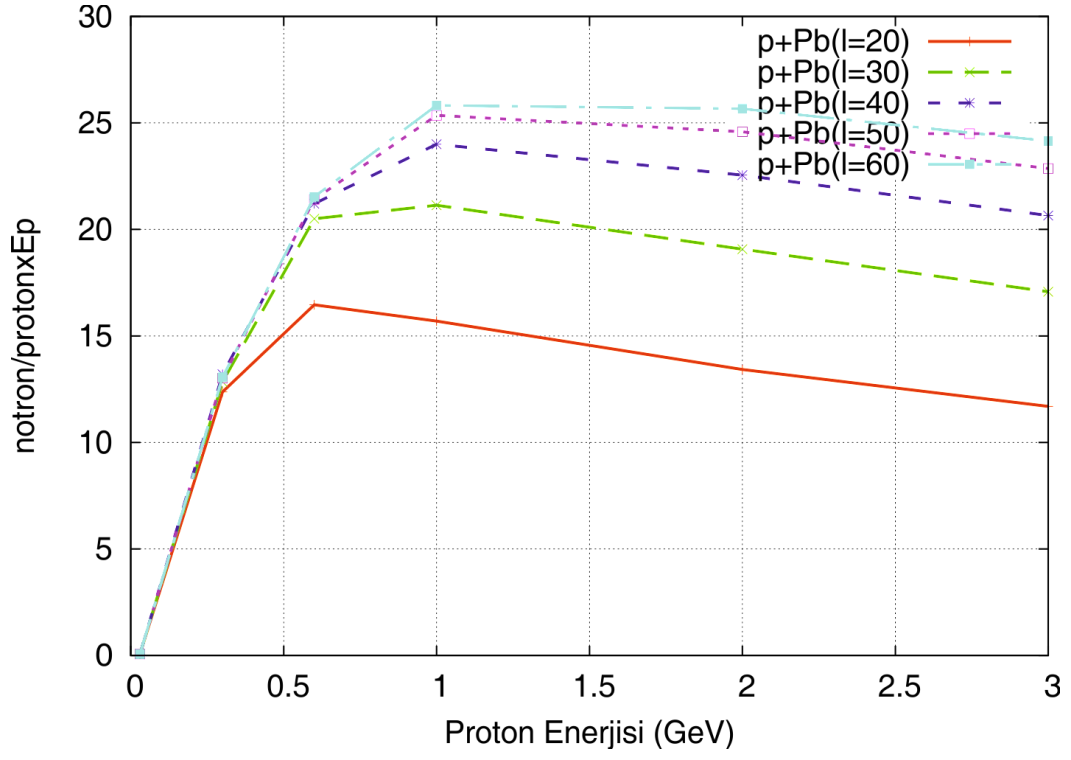
Şekil 3. 8 Farklı bakır hedef uzunluğu için proton enerjisine göre normalize nötron verimi



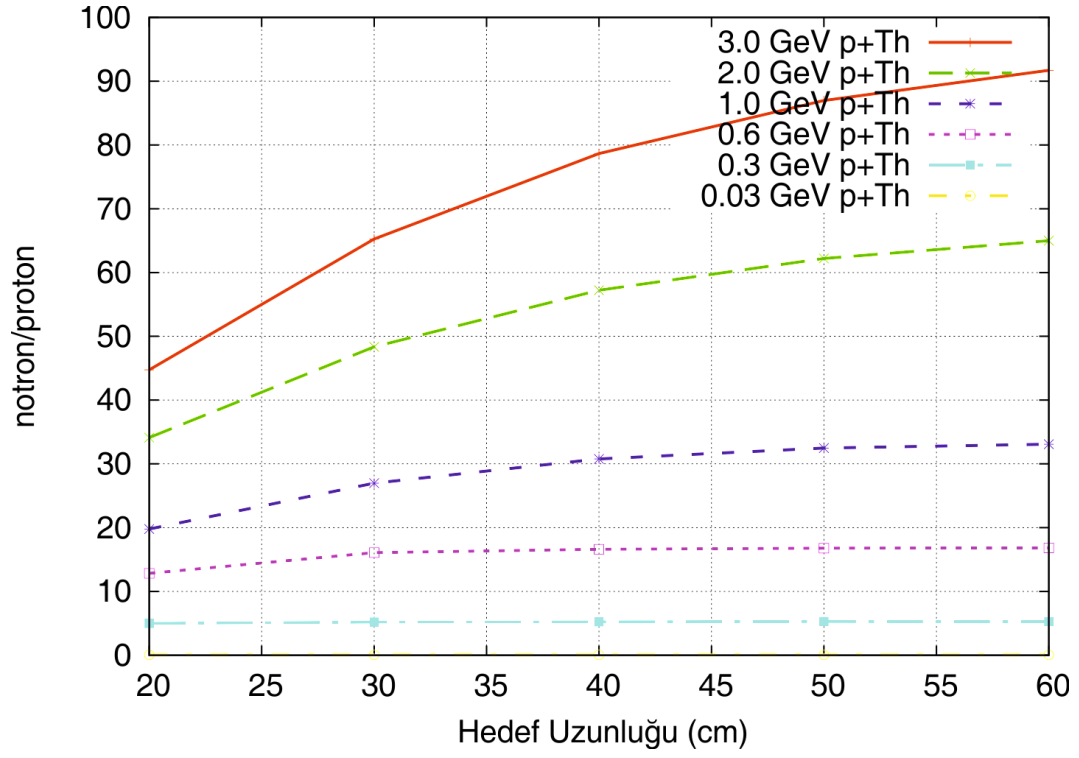
Şekil 3. 9 Farklı proton enerjileri için kurşun hedef uzunluğuna göre nötron verimi



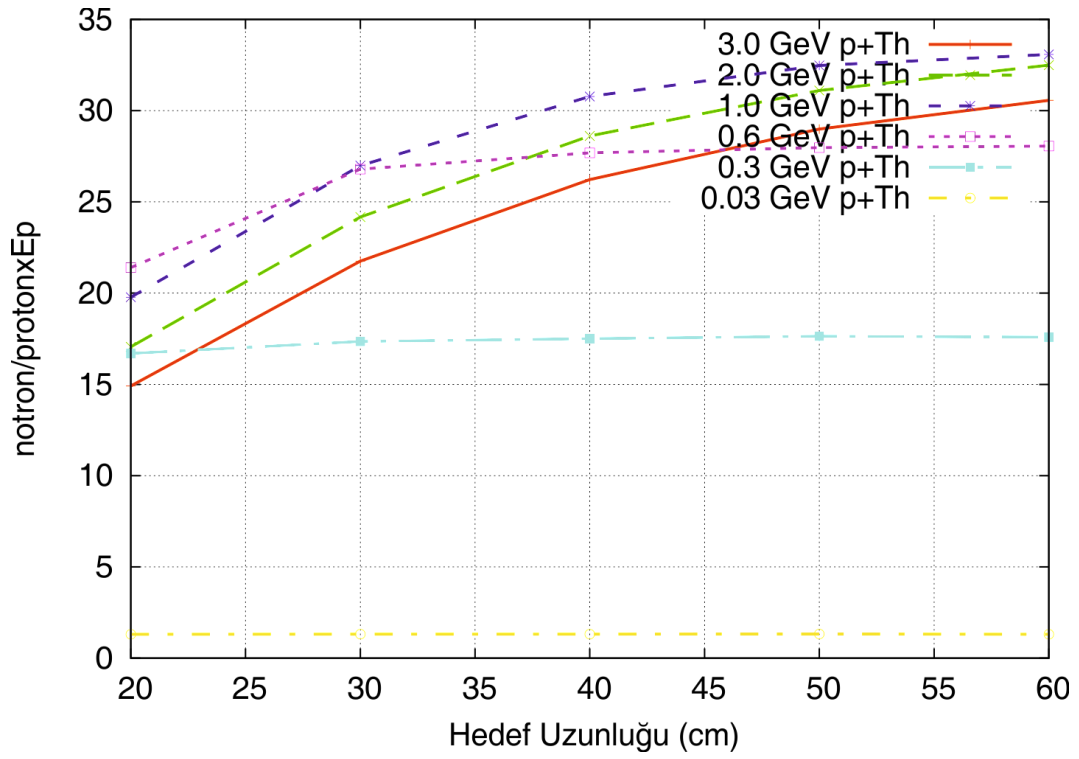
Şekil 3. 10 Farklı proton enerjileri için kurşun hedef uzunluğuna göre normalize nötron verimi



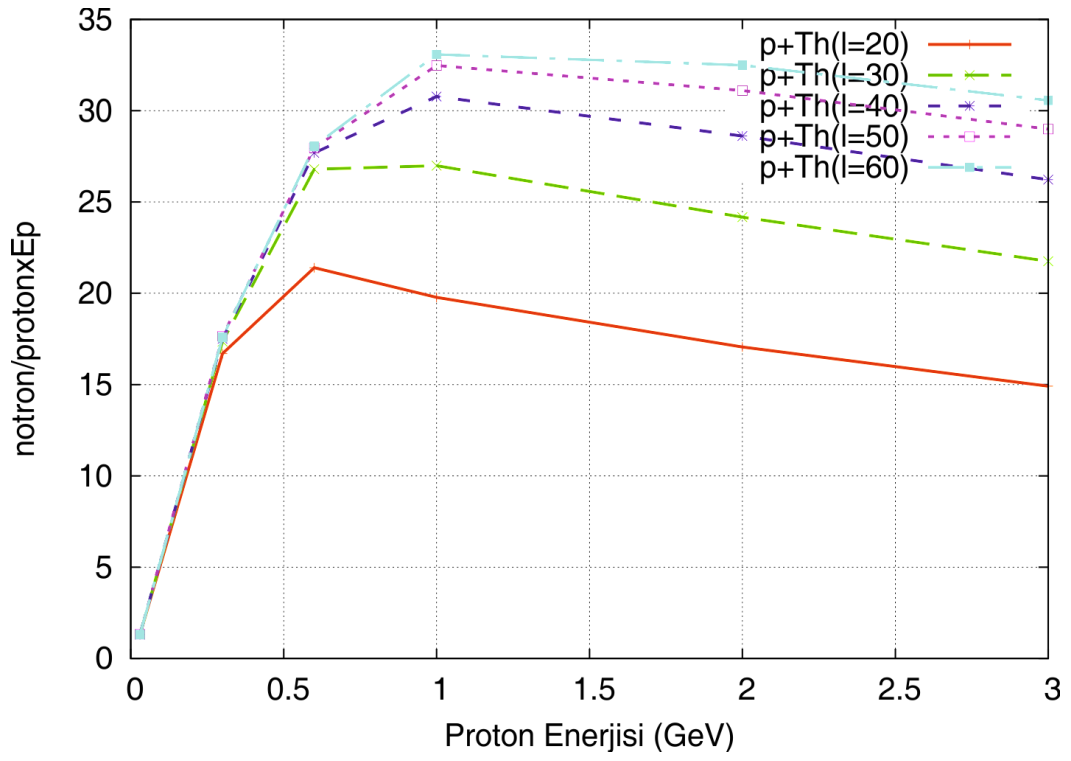
Şekil 3. 11 Farklı kurşun hedef uzunluğu için proton enerjisine göre normalize nötron verimi



Şekil 3. 12 Farklı proton enerjileri için toryum hedef uzunluğuna göre nöttron verimi



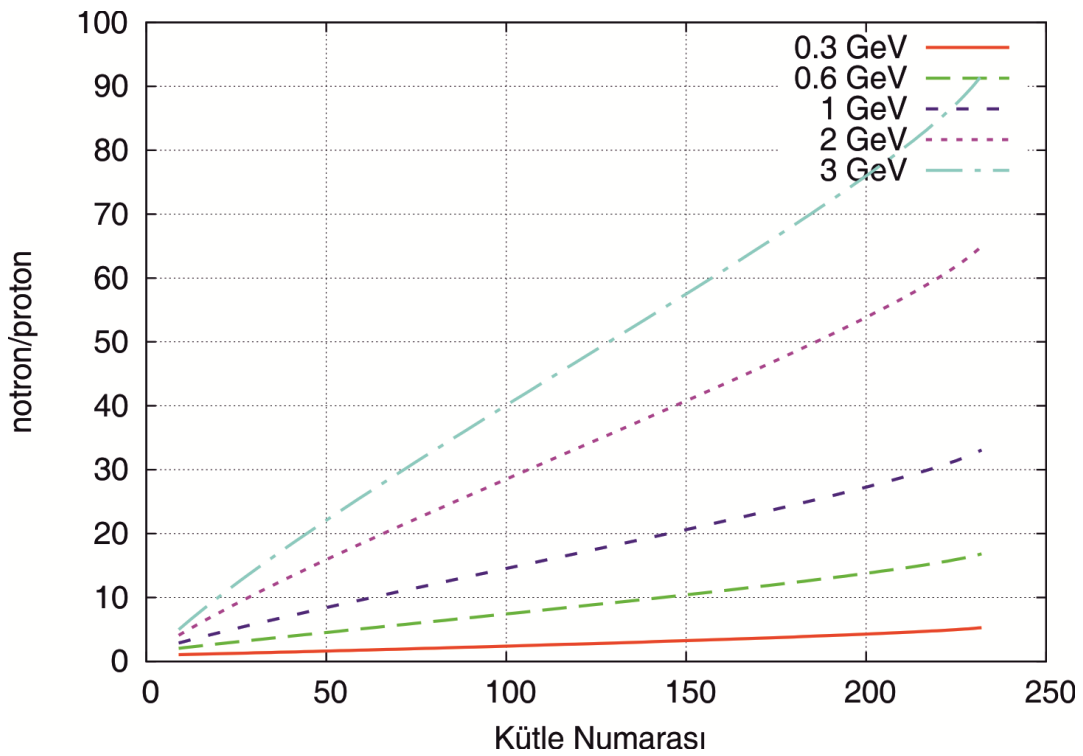
Şekil 3. 13 Farklı proton enerjileri için toryum hedef uzunluğuna göre normalize nöttron verimi



Şekil 3. 14 Farklı toryum hedef uzunluğu için proton enerjisine göre normalize nötron verimi

Hedef uzunluğuna ve proton enerjisine göre normalize nötron verim şekilleri, nötron verimi için gerekli kalınlık ve enerjiyi gösterir. Belirli kalınlık ve enerji değerine kadar nötron verimi, doğru orantılı olarak artış gösterir. Nötron verimi; daha yüksek kalınlık değerlerinde yaklaşık sabit kalır, enerji değerlerinde ise enerji ile ters orantılı olarak azalır. Normalize verim Şekillerinden daha belirgin olarak görüldüğü gibi farklı hedef uzunluğu için protonların enerjilerine göre nötron verimi; berilyum hedef için ~0.3 GeV diğer hedefler için ise ~1 GeV değerlerine kadar artma, daha yüksek enerjilerde ise azalma olur.

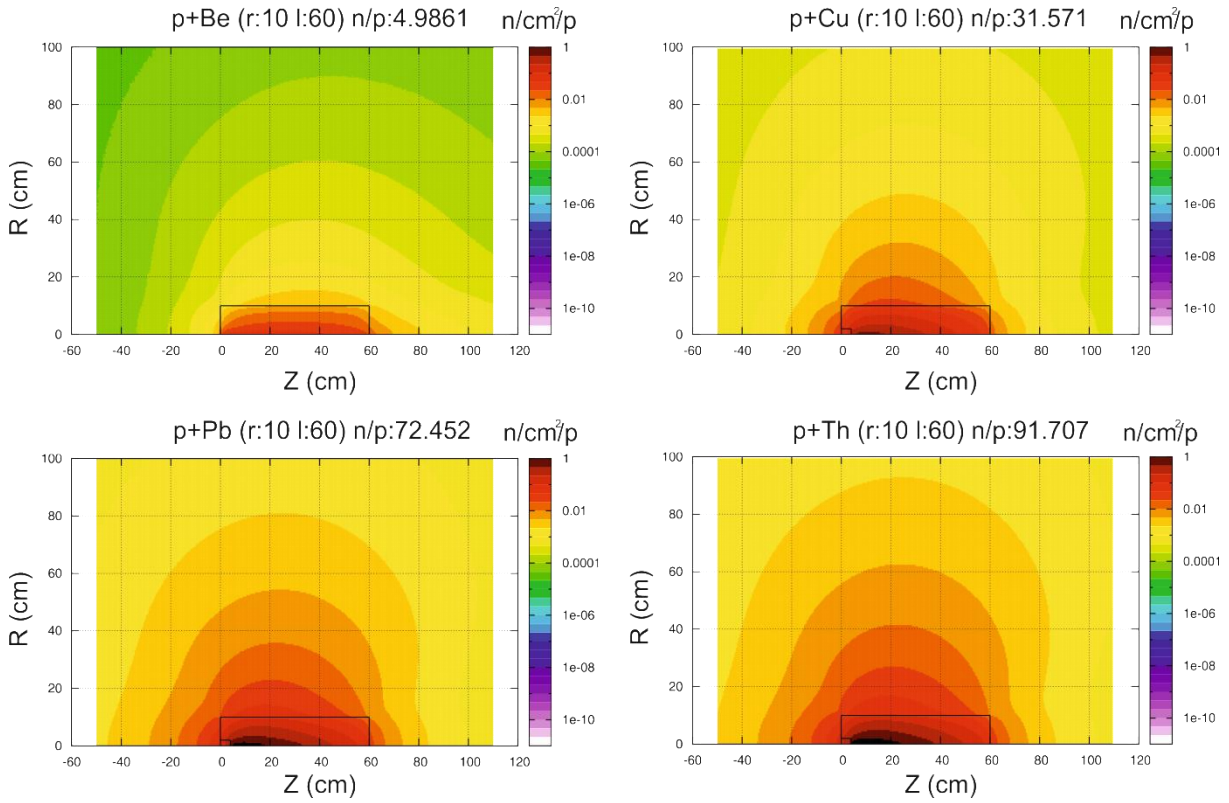
Nötron verimi yalnız protonların enerjilerine ve hedefin boyutlarına değil aynı zamanda hedefin kütle numarasına da bağlıdır. Hedef boyutları sabit (r:10 cm, l:60 cm), kütle numarasına bağlı olarak nötron verimi Şekil 3. 15'ten de görüldüğü gibi genelde doğru orantılı olarak değişmektedir.



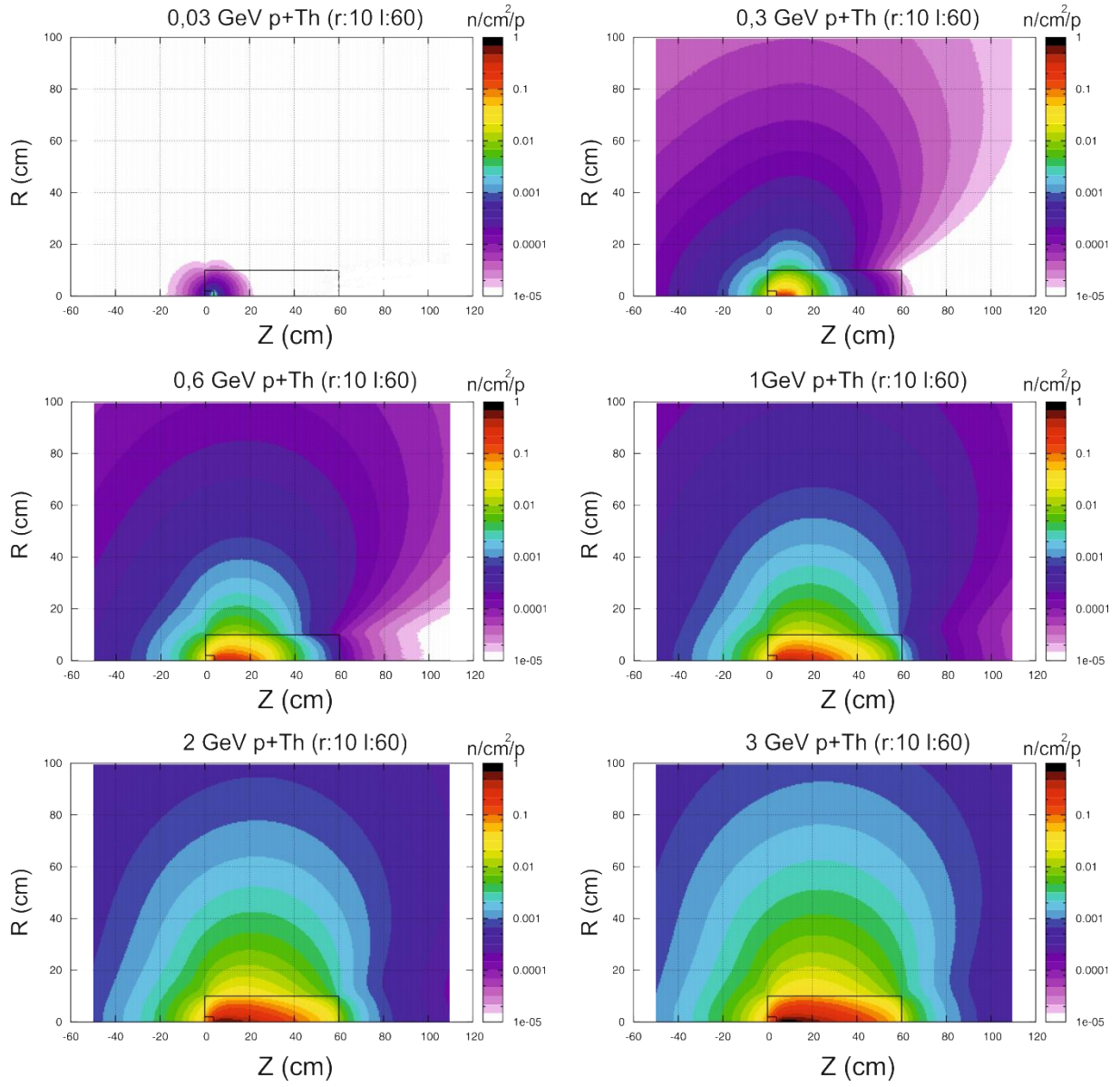
Şekil 3. 15 Farklı proton enerjileri için hedef kütle numarasına göre nötron verimi

Protonların enerjileri ve hedef boyutları sabit (r:10 cm, l:60 cm) olduğunda farklı hedefler için oluşan nötronların radyal dağılımında da farklılık görülür. Uygulama olarak 3 GeV enerjili protonların, berilyum, bakır, kurşun ve toryum hedeflerle etkileşimi ile oluşan

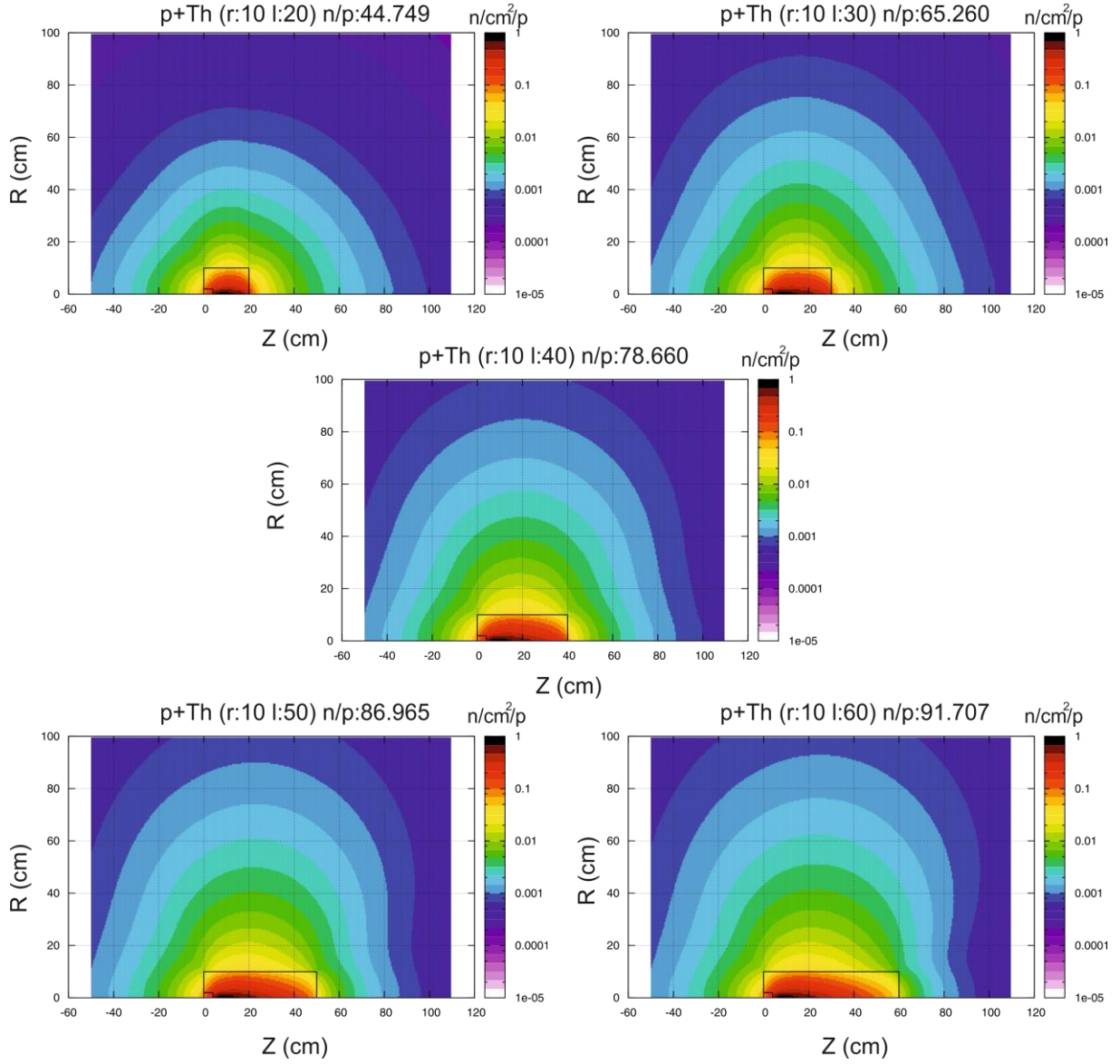
proton başına nötronların radyal dağılımları incelendi ve elde edilen radyal dağılımlar Şekil 3. 16’ da verildi. Hedef ve hedef boyutları sabit, protonların enerjilerine bağlı dağılımlar için toryum hedeften elde edilen nötronların dağılımları ise Şekil 3. 17’ dedir. Proton enerjisi (3 GeV) ve hedef (Th) sabit, hedefin boyutları değişken olduğundaki nötronların radyal dağılımları da Şekil 3. 18’de bulunmaktadır.



Şekil 3. 16 3 GeV enerjili protonların Be, Cu, Pb, Th hedeflerin etkileşimi ile oluşan nötronların radyal dağılımları



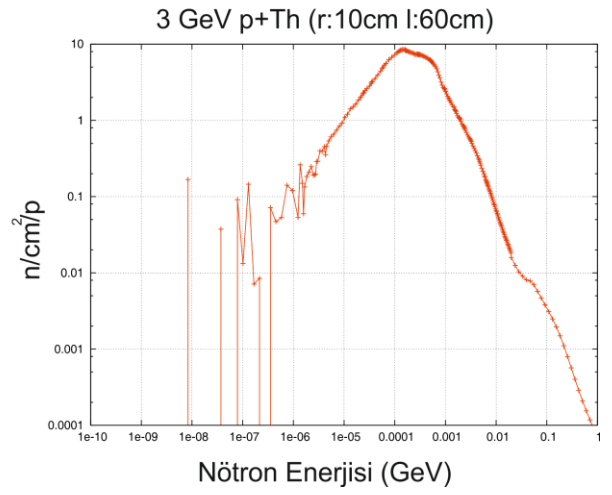
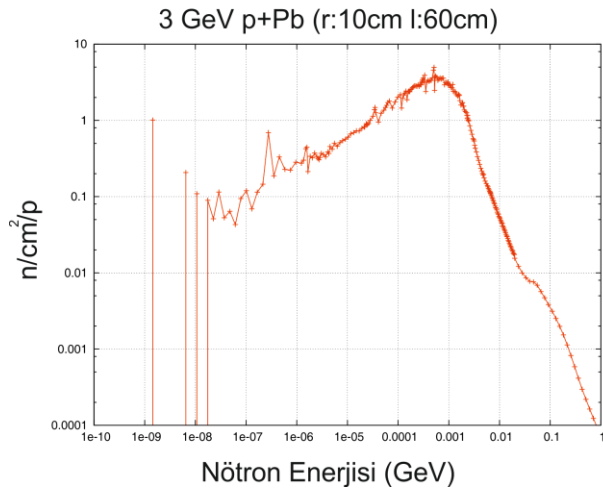
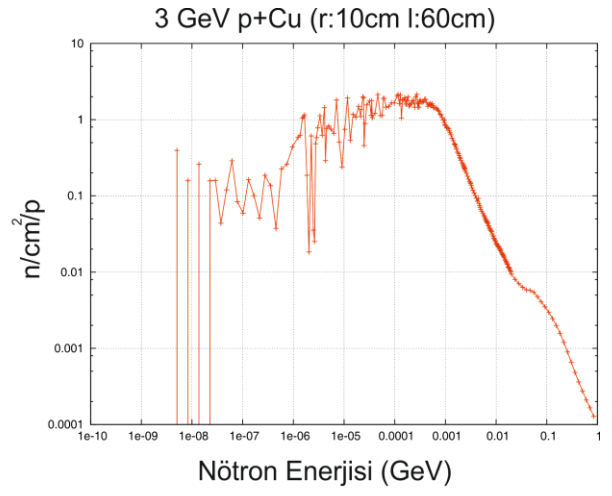
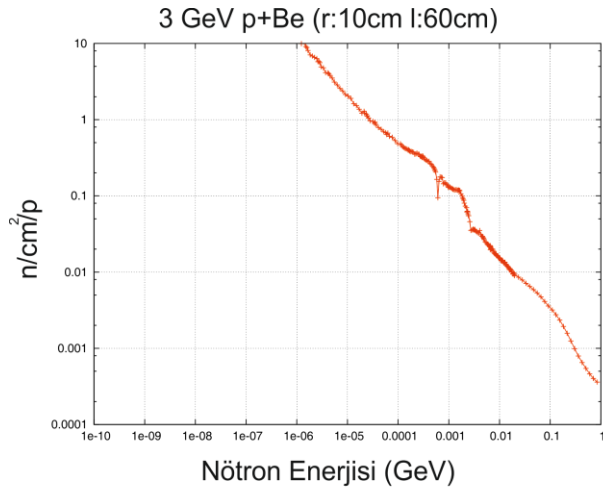
Şekil 3. 17 Th hedef için oluşan nötronların radyal dağılımları



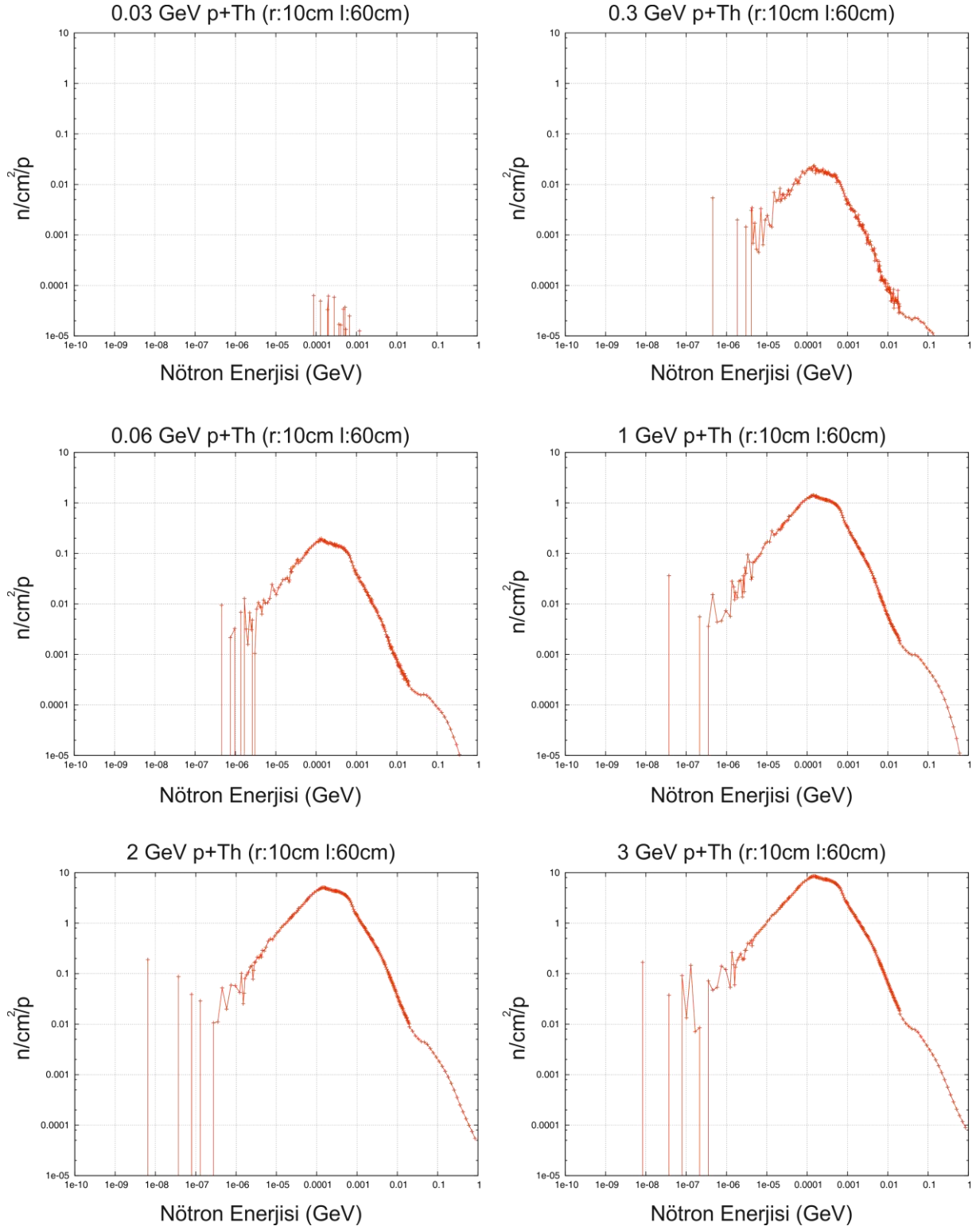
Şekil 3. 18 Th hedef için uzunluğa bağlı radyal nötron dağılımları

Protonların hedef madde ile etkileşmesiyle oluşan nötronların radyal dağılımları; hedef maddenin atom numarasına, parçalanma olayına ve protonların hedefteki erişme uzaklığına göre değişir.

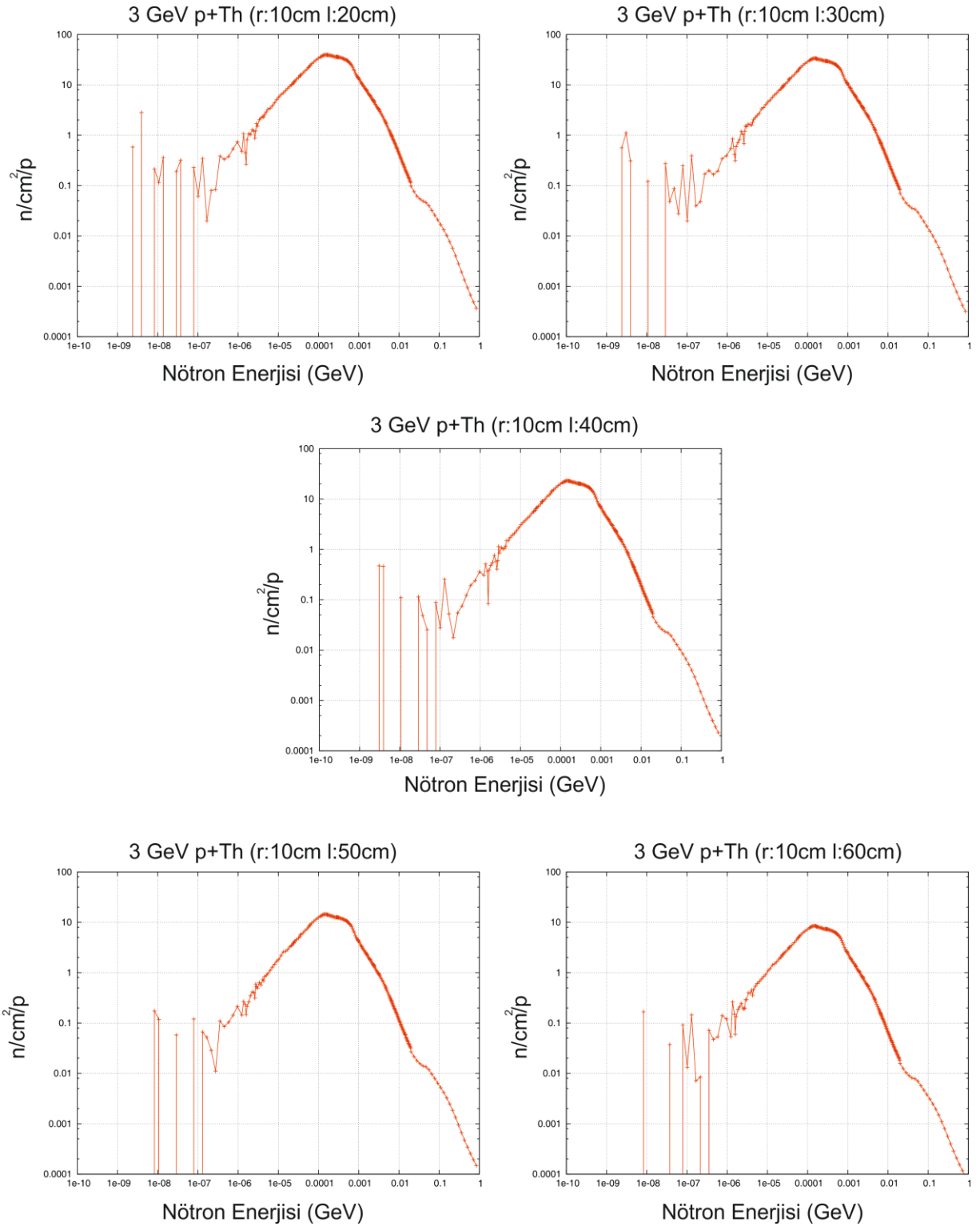
Protonların enerjilerine ve hedef maddeye bağlı olarak oluşan nötronların enerjilerinde de farklılık görülür. Protonların enerjisi sabit (3 GeV), değişken hedefler için proton başına nötron akıları Şekil 3. 19'de ve sabit hedef (Th), protonların enerjilerine bağlı nötron akı dağılımları ise Şekil 3. 20'de verildi. Şekil 3. 21'de ise proton enerjisi ve hedef sabit, hedef boyutlarına göre nötron akısı görülmektedir.



Şekil 3. 19 Be, Cu, Pb, Th hedefler için nötron akı dağılımları



Şekil 3. 20 Th hedef için proton enerjilerine bağlı nötron akı dağılımları



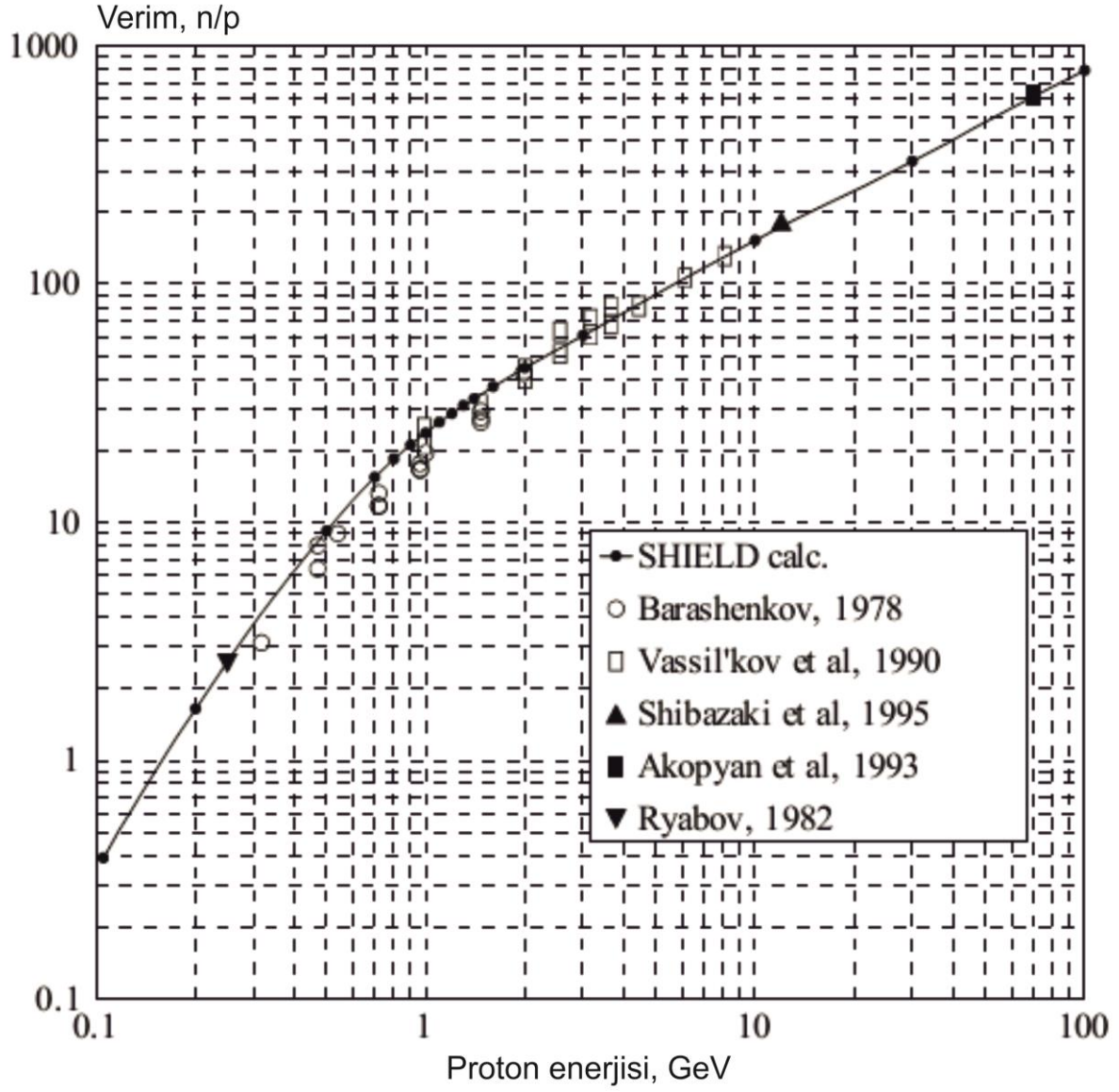
Şekil 3. 21 Th hedef için değişen uzunluklara göre nötron akı dağılımları

Nötron akı dağılımları; nötron verimi, proton enerjisi ile doğru orantılı, ikincil etkileşmeler nedeniyle hedefin boyutları ile ters orantılı olarak değişir.

Benzetim ile elde edilen sonuçlar ile [24], [25], [26], [27] referanslarındaki veriler arasında uyumluluk görülmektedir. Örnek olarak; protonların, çalışmada tanımlanan silindirik hedef boyutlarında(r:10cm) kurşun hedef ile etkileşmesi LAHET [24] ve SHIELD [26] kodları ile incelenmiş, belirlenen nötron verimleri Tablo 3. 6 ve Şekil 3. 22’de verilmiştir. Ayrıca,Tablo 3. 6’de aynı hedef uzunlukları için çalışmada belirlenen nötron verimleri de bulunmaktadır.

Tablo 3. 6 FLUKA (çalışmada) ve LAHET kodları ile 1 GeV enerjili protonların kurşun hedef ile etkileşimlerinde nötron verimleri

Kalınlık (cm)	Nötron Verimi	
	FLUKA	LAHET [24]
20	15.699	16.087
30	21.134	20.859
40	24.002	23.480
50	25.353	24.954
60	25.820	25.769



Şekil 3. 22 20cmx60cm boyutlarında silindir kurşun hedef için nötron verimi (n/p) [26]

4. Sonuç ve Tartışma

Proton hızlandırıcılarında, hızlandırılan protonların hedef maddeyle etkileşimi ile oluşan ürün parçacıklardan nötronların verimi için yarıçapı sabit ($r=10$ cm), yan yüzey uzunlukları farklı (20, 30, 40, 50, 60 cm) olan silindirik hedefler kullanıldı. Protonların, belirlenen boyutlardaki hedef madde için elde edilen nötron verimleri; Tablo 3. 2, Tablo 3. 3, Tablo 3. 4 ve Tablo 3. 5'te verildi. Tablolardan da görüldüğü gibi nötron verimleri; protonların enerjisine, hedef maddeye ve hedef maddenin boyutlarına göre farklılık gösterir.

Hedef maddenin boyutları silindirik olarak seçildiğinde; hedefin hacimsel değişimi, uzunluğa ve yarıçapa bağlıdır. Uygulamada, yarıçap sabit alındığından, hedefin yalnız uzunluğundaki değişime bağlı olarak nötron verimi incelendi. Protonların madde içinde erişme uzaklığı enerjilerine bağlıdır. Protonların erişme uzaklığından daha büyük boyutlu hedeflerde, nötronların madde ile etkileşmesi nedeniyle nötron veriminin olumsuz etkilendiği görüldü.

Farklı proton enerjileri için hedef uzunluğuna göre nötron verimi ve normalize nötron verimi; belli bir değere kadar hedef uzunluğu ile doğru orantılı olarak değiştiği, Daha yüksek enerjilerde ise yaklaşık sabit kaldığı görüldü. Proton enerjisi ve normalize nötron verimi (berilyum hedef dışında) arasındaki değişim; 1 GeV enerji değerine kadar genelde ani artmalar şeklinde daha yüksek enerjilerde ise azalma olarak gözlenir.

Proton enerjisi (3 GeV) ve hedef boyutları ($r:10$ cm, $l:60$ cm) sabit, atom numaraları farklı; Be, Cu, Pb ve Th hedefler için nötronların iki boyutta radyal dağılımları incelendi. Şekil 3. 16'da görüldüğü gibi, atom numaraları düşük, orta ve ağır hedefler için dağılımların, atom numarasına göre değiştiği görülmektedir. Ağır atom numaralı hedeflerde, parçalanma olayında gözlenen fisyon nedeniyle nötron dağılımı sola doğru eğilim göstermektedir.

Hedef (Th) ve hedef boyutları sabit ($r:10$ cm, $l:60$ cm), protonların enerjilerine bağlı radyal dağılımdan (Şekil 3. 17) görüldüğü gibi proton enerjileri, nötron verimi için önemlidir. Dağılımlardan düşük enerjilerde parçalanma olayı gerçekleşmediği görülmektedir. Uygulamalarda hedef için istenilen nötron akısı ve verimine uygun proton enerjisi belirlenebilir. Ayrıca proton enerjisi (3 GeV) ve hedef (Th) sabit, hedef boyutlarına bağlı radyal dağılımlardan (Şekil 3. 18) da uygun hedef boyutları bulunabilir.

Protonların hedef ile etkileşmesi ile oluşan nötron akı dağılımları için en yüksek değerler; hedef, proton enerjisi ve hedef boyutlarına göre incelendi. Belirlenen değerler sırasıyla; Th, 3 GeV ve 20 cm'dir. Hedef boyutlarındaki artış, nötron akı dağılımlarını olumsuz etkilemektedir.

FLUKA benzetim kodu ile elde edilen sonuçlar ile benzer çalışmalarda elde edilen değerlerin uyumlu olduğu Tablo 3. 6 ve Şekil 3. 22'den görülmektedir ve sonuçların güvenilirliği için önemlidir.

Radyasyonun madde ile etkileşimi hesaplamalarında Monte Carlo yöntemi kullanıldığında, istatistiksel dalgalanmalara dikkat edilmelidir. Dalgalanmalar, elde ettiğimiz sonuçların doğruluğuna etki etmektedir. Özellikle düşük parçacık sayısı ile hesap yapıldığında sonuçların güvenilirliği de doğru orantılı olarak azalır. Güvenilir sonuç elde etmek için parçacık sayısını arttırmak gerekir. Parçacık sayısını artırarak daha iyi sonuçlar elde etmek için TÜBİTAK Tr-Grid altyapısından yararlanıldı. Hesaplamalar $10E+6$ parçacık sayısı ile 10 çevrim şeklinde yapıldı.

Kaynaklar

- [1] Yavaş, Ö., Temel Hızlandırıcı Fiziği 1: Hızlandırıcı Tipleri, VII. Uluslararası Katılımlı Parçacık Hızlandırıcıları ve Dedektörleri Yaz Okulu UPHDYO-7, Ders Notları; 2011.
- [2] Henderson, S., Holmes, J., Zhang, Y., Introduction to Accelerators, USPAS, Lecture 1a, January 2009.
- [3] Steere, A.R., A Timeline of Major Particle Accelerators, Master of Science Thesis, Michigan State University, 2005.
- [4] Nakamura, T., “Radiation Physics and Accelerator Safety Engineering”, Chijinkan-Shokan, 1995 (in Japanese).
- [5] Türemen, G., FLUKA Benzetim Kodunun Proton Hızlandırıcıları için Zırh Maddelerinin Belirlenmesinde Kullanılması, Yüksek Lisans Tezi, Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa 2012.
- [6] Hendee, W. R., Ibbott, G.S., Hendee, E.G., Radiation Therapy Physics, John Wiley & Sons, Inc , Hoboken, NewJersey, 70-71, 2005.
- [7] Bryant, P.J., A Brief History and Review of Accelerators, CERN Geneva Switzerland. (http://cds.cern.ch/record/261062/files/p1_2.pdf) (Haziran 2013)
- [8] Blogger, Parçacık Fiziği. Privacy Matters c/o Google Inc. 1600 Amphitheatre Parkway Mountain View CA 94043, ABD.), 2007.
<http://parcacikfizigi.blogspot.com/2007/10/parack-hzlandrclar.html> (Mayıs 2013)
- [9] <http://www.answers.com/topic/cyclotron> (Mayıs 2013)
- [10] Tanrıkut, A. Ulusal Proton Hızlandırıcı Çalıştayı, TAEK-SANAEM, 18-19 Nisan 2013, Ankara, (Sözlü bildiri olarak sunuldu).
- [11] The Turkish Accelerator Center (TAC) Project, 4th Status Report to ISAC; 2012
- [12] Smith, A., Paganetti, H., Proton Therapy, AAPM 49th Annual Meeting , 2007
- [13] Küçer, R., Küçer, N. and Türemen, G., Monte Carlo Computation of the Energy Deposited by Protons in Water, Bone and Adipose, Journal of the Korean Physical Society, DOI: 10.3938/jkps.62.591, 62:4, 591-594, 2013.
- [14] Mauro, E., Radiation Protection Studies For CERN LINAC4/SPL Accelerator Complex, PhD Thesis, EPFL -Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Lausanne, Switzerland, 2009.
- [15] Cossairt, J. D. Radiation Physics For Personnel and Environmental Protection, Fermi National Accelerator Laboratory, Fermilab Report TM-1834, Revision 11, November 2011.

- [16]NCRP Report No:144, Radiation Protection for Particle Accelerator Facilities, National Council on Radiation Protection and Measurements, 70-101, 2003.
- [17]Vylet V., Prompt Radiation Fields at Accelerators, HPS Professional Development School, January 31 – February 2 2008, Oakland, CA, (Oral Presentation).
- [18]Filges, D.,/ Goldenbaum, F. Handbook of Spallation Research Theory, Experiments and Applications, Wiley-VCH, Berlin, 2009
- [19]Türemen, G., Küçer, R., " Proton Hızlandırıcıları (PH) için Spallasyon Tepkimelerinin İncelenmesi" X. THM YUUP Çalıştayı, 9 - 11 Aralık 2011, Ankara (Sözlü bildiri olarak sunuldu).
- [20]Krasa, A., Neutron Emission in Spallation Reactions of 0.7 – 2.0 GeV Protons on Thick, Lead Target Surrounded by Uranium Blanket, PhD Thesis, Czech Technical University, Prague, 2008.
- [21]Friedlander, G., Kennedy, J. W., Macias, E. S., Miller, J. M., Nuclear and Radiochemistry, J. Wiley & Sons, New York, 173, 1981.
- [22]Strašík, I., Activation Study of High-Energy Heavy-Ion Accelerators, PhD Thesis, Slovak University of Technology, Bratislava 2009.
- [23]Genç, G., Demir, N., Yapıcı, H. “Neutronic Limits in Various Target Mediums Driven by a Proton Beam of 1 GeV Energy” 13th ICENES2007 3-8 June 2007, İstanbul (Oral Presentation).
- [24]Giao, N.M., Truc, L.T.T., Thu, N.T.A., Screening Effect in (pn) Reactions on Heavy Element $^{206}_{82}\text{Pb}$, $^{308}_{92}\text{U}$, $^{184}_{74}\text{W}$, $^{197}_{79}\text{Au}$, $^{206}_{82}\text{Pb}$, The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics, United Nations Educational, scientific and cultural Organization and International Atomic Energy Agency, Miramare Trieste, IC/2010/057, 2010. Available at: <http://publications.ictp.it>
- [25]Kolevatov, R.S., Kudinovich, I.V., Krylov, A.N., Svistunov, Yu.A. Efremov, D.V., Calculation of Targets for ADS Using GEANTS-4, Proceedings of LINAC08, Victoria, BC, Canada, 272-275, 2008.
- [26]Sobolevsky, N., Mustafin E., Monte Carlo Calculation of Neutron Yield from Extended Iron and Lead Targets Irradiated by 1 and 3.65 GeV/u Ion Beams, GSI-Acc-Note-2003-09-001, 2003.
- [27]Hashemi-Nezhad, S.R., Westmeier, W., Zamani-Valasiadou M., Thomaske, B., Brandt, R Optimal ion beam, target type and size for accelerator driven systems: Implications to the associated accelerator power. Annals of Nuclear Energy 38 1144–1155, 2011

Özgeçmiş

KİŞİSEL BİLGİLER:

- Adı Soyadı : Engin KARAMAN
- Doğum Tarihi : 23.02.1987
- Doğum Yeri : İZMİR

-Eğitim Durumu:

- Lisans: Fizik, Celal Bayar Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi 2010 Mezunu, Manisa

BİLİMSEL FAALİYETLER:

-Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan sözlü bildiriler:

- **E.Karaman**, R.Küçer: “Yüksek Enerjili Protonların Hedef Maddelerle Etkileşmesinin Fluka Simülasyon Programı İle İncelenmesi.” 28th International Physics Congress, p320, 6-9 September, Bodrum-Turkey(2011).

-Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan poster bildiriler:

- R.Küçer, G.Türemen, **E.Karaman**, D.Sarıyer, N.Küçer: “Yüksek Enerjili Protonların iç Zırh Maddeleriyle Etkileşmesinin Simülasyon Programı ile İncelenmesi.” 28th International Physics Congress, p865, 6-9 September, Bodrum-Turkey(2011).
- R.Küçer, **E.Karaman**, G.Türemen, D.Sarıyer, N.Küçer: “Farklı Maddelerden Oluşan Hedef ile Protonların Etkileşmesinin Simülasyon Programı ile İncelenmesi”, 28th International Physics Congress, p866, 6-9 September , Bodrum-Turkey(2011).
- R.Küçer, **E.Karaman**, N.Küçer: “Protonların Hedef Madde ile Etkileşmesinin Fluka Benzetim Kodu ile İncelenmesi”, 30th International Physics Congress, 2-5 September, İstanbul-Turkey(2013).