

Proton Hızlandırıcılarında Farklı Maddeler İçin Zırh Kalınlıklarının Analitik Yöntemle Belirlenmesi

Demet Sarıyer^{1,*}, Rahmi Küçer²

¹Celal Bayar Üniversitesi, Turgutlu Meslek Yüksekokulu, 45400 Turgutlu, Manisa, Türkiye

²Celal Bayar Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, 45140 Manisa, Türkiye

*Yazışılan yazar e-posta: demet.sariyer@cbu.edu.tr

Alınış: 18 Mart 2013, Kabul: 22 Nisan 2013

Özet: Proton hızlandırıcılarında, protonların hedef veya hızlandırıcı bileşenleri ile yaptığı etkileşmeler sonucu, yüksek yoğunluklu ve yüksek enerjili radyasyon alanları oluşur. Bu radyasyon alanlarının, çalışanlar ve çevre halkı üzerindeki etkisinin izin verilen doz sınırlarında olması için zırhlama yapılıır. Zırh tasarımı, ulusal kanunlar ile belirlenen radyasyon limitleri göz önünde bulundurularak hızlandırıcının normal ve anormal çalışma durumunda oluşabilecek en yüksek doz değerlerine göre yapılır. Zırh tasarımı yapılırken, zırh maddesi tek bir maddeden oluşabileceği gibi tabaka şeklinde birbirini takip eden farklı maddelerden veya bu maddelerin özel alaşımından oluşabilir. Bu çalışmada, Türk Hızlandırıcı Merkezi bünyesinde kurulması planlanan proton hızlandırıcısının farklı enerji bölgelerinin (50, 100, 300, 500 ve 1000 MeV) zırh tasarımında kullanılacak farklı maddeler için zırh kalınlıkları Moyer modeli ile belirlendi ve kalınlık değerleri birbiri ile karşılaştırıldı.

Anahtar kelimeler: Radyasyondan korunma, proton hızlandırıcı, zırh tasarımı, Moyer modeli.

Determination of Shielding Thicknesses by Using Analytical Method for Different Materials in Proton Accelerators

Abstract: Radiation fields with high-intensity and high-energy are formed as a result of the interactions of protons with the target or the accelerator components in proton accelerators. Shielding is made for being under permissible dose limit of these radiation fields that effect on radiation workers and public. Shield design taking into consideration radiation limits determinate by the national laws, the state of the accelerator to study normal and abnormal conditions is made according to the highest dose that may occur. As a shield designed, the shielding materials can occur in the form of a single material, the consecutive different materials or a particular alloy of these materials. In this paper, shield thickness was determined by Moyer model, for different materials can be used in shield design of different energy regions (50, 100, 300, 500 and 1000 MeV) of proton accelerator, which is planned to be built of at the Turkish Accelerator Center and thickness values are compared with each other.

Key words: Radiation protection, proton accelerators, shielding design, Moyer model.

1. Giriş

İyon kaynağından elde edilen düşük enerjili protonların istenilen özelliklerde ve enerjilerde elde edilmesini sağlayan proton hızlandırıcıları, yüksek enerji fiziği, nükleer fizik, güç üretimi, endüstri ve tıp gibi birçok alanda kullanılmaktadır [1-3].

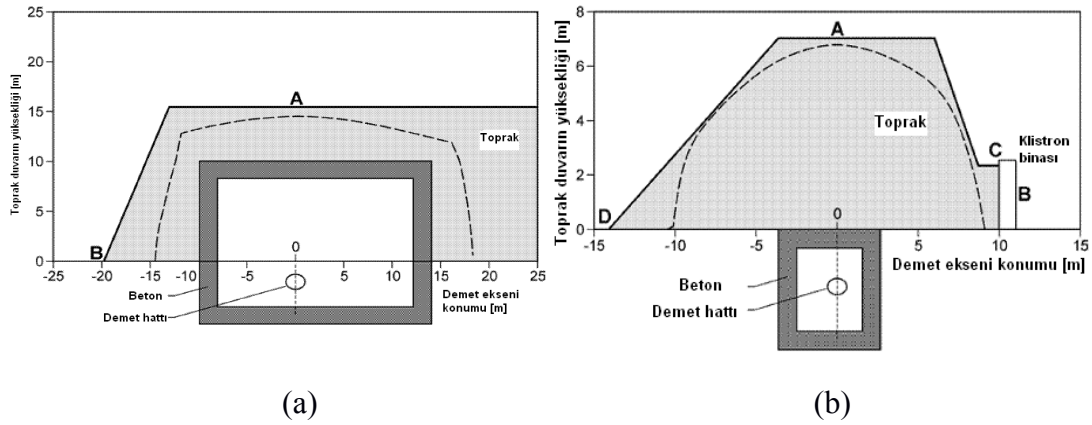
Proton hızlandırıcılarında, yüksek enerjili protonların hedef veya çevre maddeler ile etkileşmeleri sonucu yüksek enerjili ve yoğunluklu radyasyonlu alanlar oluşur. Radyasyonlu alanlarda proton, elektron, pozitron gibi yüklü parçacıklar olabileceği gibi nötron, foton gibi yüksüz parçacıklar da olabilir [4]. Etkileşme anında gözlenen

radasyon ani radasyon, etkileşme sonrası ortamda gözlenen radasyon ise indüklenmiş (aktivasyon) radasyondur [5].

Hızlandırıcı tesisinde çalışanlar ile tesis çevresindeki halk için radasyon seviyesinin izin verilen değerlere düşürülmesi ile radasyonlu ortamda bulunan alet ve cihazların radasyondan en az etkilenmeleri istenir. Bunun için radasyon kaynağı ile belirlenen konum arasına yeterli kalınlıkta uygun zırh maddesi yerleştirilerek zırhlama yapılır. Proton hızlandırıcılarında zırhlama nötronlara göre yapılır. Nötronlar için yapılan zırhlama diğer parçacıklar ve fotonlar için de etkili olmaktadır. Zırh maddesi olarak beton, ağır beton, toprak, demir, çelik, kurşun, polietilen gibi maddeler kullanılır. Zırh, tek bir maddeden oluşabileceği gibi farklı maddelerden veya maddelerin bileşimlerinden oluşabilir. Zırh kalınlıkları, hızlandırılan protonun enerjisine ve zırh maddesine göre değişir [4, 6, 7].

Hızlandırıcı zırh tasarımı yapılırken; hızlandırıcı yapısı (sinkrotron, siklotron vb.), hızlandırıcı demet parametreleri (parçacık türü, enerjisi ve şiddeti), her bir enerjideki akım yoğunluğu, demet şekli ve gönderimi, demet çalışma modları (normal veya anormal çalışma durumu), demet çalışma zamanı, demet kayıpları, hedef madde çeşidi, geometrisi ve boyutları, zırh maddesi (bileşimi, yoğunluğu, kalınlığı vb.), tesisin fiziksel yerleşimi (yer altında veya üzerinde olması), doz limitleri göz önünde bulundurulur [8, 9].

Protonların enerjisine bağlı olarak demet hattının bulunduğu tünelin bir kısmı (~1000 MeV'den düşük enerjili protonlar için) veya tamamı (~1000 MeV'den yüksek enerjili protonlar için) yer seviyesinin altında inşa edilmesiyle toprak ikincil zırh olarak kullanılabilir (Şekil 1).



Şekil 1. (a) Hızlandırıcı tünelinin bir kısmının yer seviyesinin altında inşa edilmesi. (b) Hızlandırıcı tünelinin tamamının yer seviyesinin altında inşa edilmesi [10].

Günümüzde zırh kalınlıkları ve zırh dışındaki doz değerlerinin belirlenmesi için geliştirilen birçok benzetim kodunun yanı sıra bazı ampirik bağıntılar ile de hesaplama yapılabilmektedir. Zırh kalınlıkları ve zırh dışındaki doz eşdeğerlerinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan ampirik bağıntılar; Tesch'in formülü ve Moyer modelidir [11-14]. Bu amaç için kullanılan benzetim kodları ise FLUKA, MARS15, EGS4 gibi Monte Carlo kodlarıdır [15-17].

Bu çalışmada, Türk Hızlandırıcı Merkezi tarafından kurulması planlanan proton hızlandırıcısının farklı enerji bölgelerinin (50, 100, 300, 500 ve 1000 MeV) zırh tasarımı toprak, standart beton, ağır beton ve demir zırh örnekleri için Moyer modeli ile yapıldı. Belirlenen zırh kalınlıkları kontrolsüz alanlar, çevre halk için bulunan değerlerdir.

2. Materyal ve Metot

Hızlandırıcılarda zırh tasarımı için en çok kullanılan analitik yöntemlerden biri Moyer Modeli'dir. Moyer modeline göre zırh dışındaki doz eşdeğeri;

$$H(\theta) = \frac{1}{r^2} \cdot \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} F(E) \cdot B(E, \theta) \cdot \exp\left(-\frac{d(\theta)}{\lambda(E)}\right) \cdot \frac{d^2n(E, \theta)}{dE d\Omega} \cdot dE \quad (1)$$

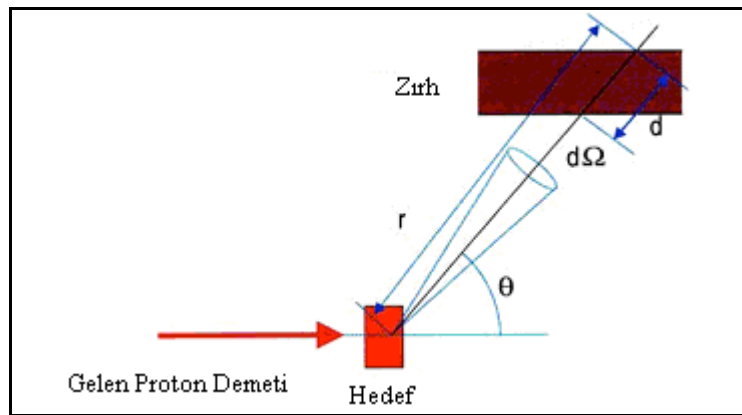
eşitliği ile ifade edilir [11, 18]. Burada;

- $H(\theta)$: Doz eşdeğer oranı
 $F(E)$: Akı-Doz dönüşüm faktörü
 $B(E, \theta)$: Build-up faktörü (boyutsuz)

$\exp\left(-\frac{d(\theta)}{\lambda(E)}\right)$: Zayıflatma faktörü

$\frac{d^2n(E, \theta)}{dE d\Omega}$: Nötron diferansiyel verimi

Gelen proton demetinin hedef ile etkileşmesi sonucu oluşan radyasyonun, belli bir uzaklıkta belirlenen bir nokta için doz değeri gerekli zırh kalınlıkları veya zırh maddeleri ile kabul edilebilir düzeylere düşürülebilir. Şekil 2'den görüldüğü gibi, hedef üzerinde alınan nokta ile doz değerinin belirlendiği nokta arasındaki geometrik konum önemlidir.



Şekil 2. Demet-hedef etkileşmesi noktası ile zırhın geometrik gösterimi [11, 18]

Zırh dışındaki radyasyon seviyesi;

$$H(d, \theta) = r^{-2} H_{\theta} \exp[-d(\theta) / \lambda] \quad (2)$$

eşitliği ile bulunur. Burada;

r : Kaynak ile seçilen nokta arasındaki uzaklık

d : θ yönündeki zırh kalınlığı

λ : Zırh maddesi için zayıflatma faktörü

H_{θ} : Zırhlanmamış kaynak için birim uzaklıktaki radyasyon seviyesidir [15, 17, 19, 20].

Kaynak ile zırh arasındaki konum 90° ($\pi/2$) olduğunda; H_{θ} yerine H_0 kullanılır ve

$$H_0 = 1,26 \times 10^{-14} E_p^{0,8} \text{ Sv. m}^2 \quad (3)$$

ifadesi ile bulunur. Burada, E_p , GeV mertebesindeki proton enerjisidir [15, 17].

Zırh maddesi ve enerjiye bağlı λ zayıflatma faktörü ise;

$$\rho\lambda = 110 \frac{\text{g}}{\text{cm}^2} \left[1 - \exp\left(-\frac{E^{0,714}}{42}\right) \right] \quad (4)$$

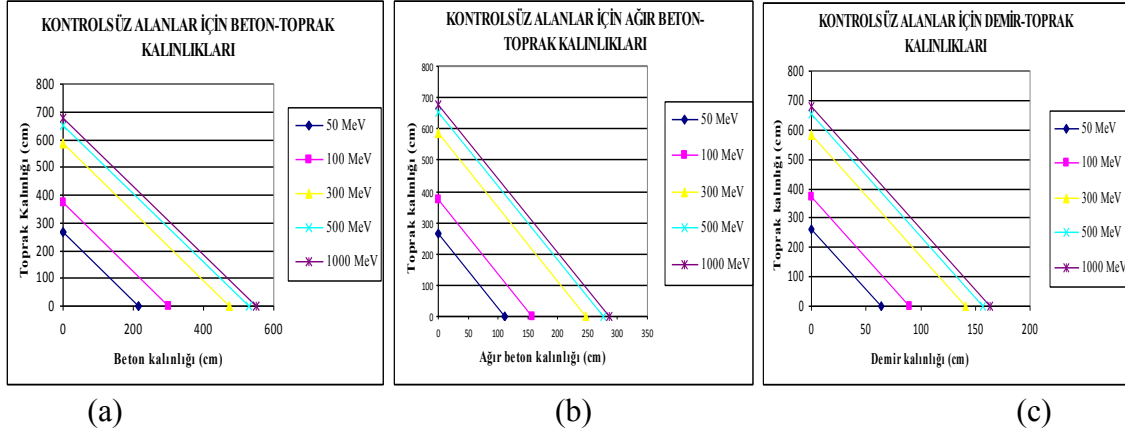
empirik bağıntısı ile bulunur [21].

3. Bulgular

Minimum zırh kalınlıkları, zırh dışında izin verilen maksimum doz hızı değerlerine göre belirlendi. Ulusal doz hızı değerleri; kontrolsüz alanlar için $0,1 \mu\text{Sv/h}$ ve kontrollü alanlar için ise $10 \mu\text{Sv/h}$ 'dir [22]. Farklı enerjilerde protonlar için toprak, standart beton, ağır beton ve demir zırh kalınlıkları kontrolsüz alanlara göre belirlenerek Tablo 1'de verildi. Ayrıca, standart beton, ağır beton ve demir zırh kalınlıkları ile toprak zırh kalınlıkları arasındaki ilişki de Şekil 3 (a,b,c)'te bulunmaktadır.

Tablo 1. Kontrolsüz alanlar için toprak, standart beton, ağır beton ve demir zırh maddeleri için gerekli zırh kalınlıkları.

Proton Enerjisi (MeV)	H_0 (Sv m^2)	λ (gr / cm^3)	Kontrolsüz alanlar için gerekli minimum zırh kalınlıkları (cm)			
			Toprak ($\rho : 1.9 \text{ gr / cm}$)	Standart beton ($\rho : 2.35 \text{ gr / cm}$)	Ağır beton ($\rho : 4.5 \text{ gr / cm}$)	Demir ($\rho : 7.9 \text{ gr / cm}$)
50	1,15E-15	35,44	264,03	213,47	111,48	63,50
100	2,00E-15	51,88	372,73	301,35	157,37	89,64
300	4,81E-15	82,81	585,43	473,32	247,18	140,80
500	7,24E-15	95,30	653,14	528,07	275,77	157,09
1000	1,26E-14	105,95	678,60	548,66	286,52	163,21



Şekil 3. Farklı proton enerjilerine göre (a) standart beton-toprak, (b) ağır beton-toprak, (c) demir-toprak zırh kalınlıkları arasındaki ilişki.

4. Tartışma ve Sonuç

Hızlandırıcının normal ve anormal çalışma durumları için tesisin içinde ve dışında izin verilen doz değerlerine göre zırh tasarımı yapılır. Normal çalışma durumunda parçacık enerji kaybı 1 W/m, anormal çalışma durumlarında 10 W alınır. Zırh kalınlıklarının belirlenmesinde zırh dışında izin verilen maksimum doz hızı değerleri kontrolsüz alanlar için 0,1 $\mu\text{Sv/h}$ ($<1\text{mSv/yıl}$) ve kontrollü alanlar için ise 10 $\mu\text{Sv/h}$ ($<20\text{mSv/yıl}$) alındı.

Bu çalışmada 50-1000 MeV enerji bölgesinde hızlandırılmış protonların zırh tasarımı için gerekli zırh kalınlıkları, anormal çalışma durumunda oluşabilecek enerji kaybı göz önünde bulundurularak, uygun zırh maddeleri için analitik yöntemle belirlendi.

Tablo 1 ve Şekil 3'ten görüldüğü gibi zırh kalınlıkları protonların enerjileri ile doğru, zırh maddelerinin yoğunlukları ile ise ters orantılı olarak değişmektedir. Belirlenen zırh kalınlıkları Agosteo ve Silari [15] ile Magistris ve Silari [17] tarafından yapılan benzer çalışmalarla uyumluluk göstermektedir. Örnek olarak; 100 MeV enerjili protonlar için elde ettiğimiz standart beton zırh kalınlığı 301,35 cm iken, Agosteo ve Silari'de bu değer 305 cm, Magistris ve Silari'de ise 270 cm'dir.

Ayrıca, belirli enerjilerdeki protonlar için izin verilen doz değerlerine göre uygun olmayan kalınlıkta standart beton, ağır beton ve demir zırh olarak kullanıldığında, bu kalınlıklara ilave olarak gerekli minimum toprak kalınlığı Şekil 3'ten kolaylıkla belirlenebilir. Örneğin, 1000 MeV enerjili protonların zıhlanmasında: yalnız demir kullanıldığında 163,21 cm, yalnız toprak kullanıldığında 678,60 cm kalınlık gerekli olduğu halde demir ve toprak birlikte kullanıldığında; 140,00 cm demir ile 100,00 cm toprak yeterli olduğu görülmektedir.

Kaynaklar

- [1] THM-Türk Hızlandırıcı Merkezi Projesi web sitesi: <http://thm.ankara.edu.tr> (15 Şubat 2013).
- [2] Wiedemann, H., 1993. Particle Accelerator Physics, Basic Principles and Linear Beam Dynamics, Pages (25-50), (53-73), (75-116), (265-297).
- [3] Wilson, E., 2001. Particle Accelerators, Pages (1-20), (138-158), (185-207).
- [4] Rokni, S. H., Cossairt, J. D., Liu, J. C., 2008. Radiation Shielding at High-Energy Electron and Proton Accelerators, SLAC-PUB-13033, FERMILAB-PUB-07-608-ESH.
- [5] Magistris, M., Silari, M., 2006. Prompt Radiation, Shielding and Induced Radioactivity in a High-Power 160 MeV Proton Linac, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 562: 967-971.
- [6] Cossairt, J. D., 2011. Radiation Physics for Personnel and Environmental Protection, Fermilab Report TM-1834 Revision 11, Presented at sessions of The U.S Particle Accelerator School.
- [7] Ipe, N. E., 2010. PTCOG Publications Sub-Committee Task Group on Shielding Design and Radiation Safety of Charged Particle Therapy Facilities, PTCOG Report 1.
- [8] Arnaudon, L., et al., 2006. Linac4 Technical Design Report, CERN-AB-2006-084 ABP/RF.
- [9] Nakashima, H., OM-L-11 Radiological Safety of Accelerator Facilities, Japan Atomic Energy Research Institute.
- [10] Moormann, R. Safety and Licencing of the European Spallation Source (ESS), Jül-4136
- [11] Biarrotte, J., Mueller, A. C., Carlucci, B., 2004. PDS-XADS Preliminary Design Studies of an Experimental Accelerator-Driven System, CONTRACTN: FIKW-CT-2001-00179
- [12] Moyer, B. J., 1962. Method of Calculation of the Shielding Enclosure for the Berkley Bevatron, on Proc. 1st. Int Conf. Shielding around High Energy Accelerators, Presses Universitaires de France, Paris, 65.
- [13] Stevenson, G., Kuei-Lin, L., Thomas, R. H., 1982. Determination of Transverse Shielding for Proton Accelerators Using the Moyer Model, *Health Phys*, 43: 13-29.
- [14] Tesch, K., 1985. A Simple Estimation of lateral Shielding for Proton Accelerators in the Energy Range from 50 to 1000 MeV, *Rad Prot Dos* 1, 165-172.
- [15] Agosteo, S., Silari, M., 2001. Preliminary Shielding Calculations for a 2 GeV Superconducting Proton Linac, European Organisation for Nuclear Research European Laboratory Particle Physics, TECHNICAL MEMORANDUM TIS-RP/TM/2001-028, CERN NUFAC Note 088
- [16] Battistoni, G., et al., 2011. Applications of FLUKA Monte Carlo Code for Nuclear and Accelerator Physics, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 269: 2850-2856.
- [17] Magistris, M., Silari, M., 2005. Shielding Requirements and Induced Radioactivity in the 3.5 GeV SPL, CERN.
- [18] Hanslik, R., 2006. Sicherheitstechnische Analyse und Auslegungsaspekte von Abschirmungen gegen Teilchenstrahlung am Beispiel von Spllationsanlagen im Megawatt Bereich, Berichte des Forschungszentrums Jülich; 4225 ISSN 0944-2952, Zentralabteilung Technologie D 468 (Diss., Wuppertal, Univ.).
- [19] Ene, D., 2010. Radioprotection studies for the ESS Superconducting Linear Accelerator Preliminary Estimates, ESS AD Technical Note ESS/AD/0003.
- [20] Silari, M., 2008. A (Cern) History of Accelerator Shielding, CERN-SC-2008-RP-PP, EDMS: 925026.
- [21] Court, J. D., Pitcher, E. J., Ferguson, P. D., Russel, G. J., Patton, B. W., 1998. Preliminary Earth Berm Shielding Calculations for The Accelerator Production of Tritium 1700-MeV Accelerator, Published in Proceedings of Topical Meeting on Nuclear Applications of Accelerator Technology, November 16-20, 1997, Albuquerque Nm.
- [22] T.A.E.K. Radyasyon Güvenliği Yönetmeliği, 2000. İkinci kısım, ikinci bölüm, madde 10-b (RG-24/3/2000-23999).

Rahmi Küçer e-posta: rkucer@hotmail.com