

100-250 MeV Enerjili Proton Hızlandırıcıları için Beton ve Toprak Zırh Kalınlıklarının FLUKA Monte Carlo Kodu ile Belirlenmesi

Demet Sarıyer^{1,*}, Rahmi Küçer²

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

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

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

Alınış: 08 Kasım 2013, Kabul: 18 Şubat 2014

Özet: Proton hızlandırıcılarında zırh tasarımı temel olarak hadronik saçanak ile oluşan ikincil nötronlara göre yapılır. Nötronlar, çoğunlukla intranükleer saçanaklar ve sonrası oluşan buharlaşma reaksiyonlarından oluşur. İnanükleer saçanakta, yüksek enerjili nötronlar oluşurken, buharlaşma reaksiyonlarında daha düşük enerjili bol nötron oluşur. Toplamda bu nötronlar, proton hızlandırıcılarında zırh tasarım gerekliliklerini oluşturur. Zırh tasarım amaçları için, geliştirilmiş Monte Carlo çoklu parçacık taşınım kodları kullanılır.

Bu çalışmada Türk Hızlandırıcı Merkezi (THM) bünyesinde kurulması planlanan proton hızlandırıcı tesisinin zırh tasarımı için gerekli zırh kalınlıklarını belirlemek için standart beton ve toprak zırh maddesi seçildi. Tesisin 100 ve 250 MeV enerji bölgeleri için gerekli olan beton ve toprak zırh kalınlıkları, hızlandırıcının anormal çalışma durumu için FLUKA Monte Carlo kodu ile belirlendi.

Anahtar kelimeler: Proton hızlandırıcı, radyasyondan korunma, Monte Carlo kod, zırh tasarımı

Determination by FLUKA Monte Carlo Code of Shield Thicknesses of Concrete and Soil for 100-250 MeV Proton Accelerators

Abstract: Shielding of proton accelerators mainly is made the attenuation of the secondary neutrons generated in the hadronic cascade. Neutrons mainly result from the intranuclear cascades and subsequent evaporation reactions. Whereas intranuclear cascades create high-energy neutrons, evaporation reactions produce copious neutrons that lower energies. In total, these neutrons dictate the shielding requirements of a proton accelerator. For shielding design purposes, several advanced multi-particle Monte Carlo transport codes are available.

In this paper, standard concrete and soil shield materials were chosen to determine the minimum required shield thickness for shield design of proton accelerator facility, which is planned to build of at Turkish Accelerator Center (TAC). Required shield thicknesses of standard concrete and soil were determined with FLUKA Monte Carlo code, for 100 and 250 MeV energy regions of facility for abnormal condition.

Key words: Proton accelerator, radiation protection, Monte Carlo code, shield design

1. Giriş

Proton hızlandırıcılarında, demet olarak kullanılan protonların hedef veya çevre maddeler ile etkileşmesi sonucu hadronlar (protonlar, nötronlar, pionlar vb.) oluşur. Hadronik saçanak olarak adlandırılan bu etkileşmesi sonucu oluşan parçacıklar da ortamdaki maddelerle etkileşerek proton, nötron, foton, elektron ve pozitron gibi ikincil parçacıkların oluşmasına neden olur. Oluşan ikincil parçacıkların ortalama sayısı ve enerjisi birincil proton demetinin enerjisine göre değişir. İkincil parçacıklardan olan

nötronlar, bolluk ve yüksek giricilik özellikleri nedeniyle radyasyondan korunmada esas alınır [1-4].

Proton hızlandırıcılarında zırh tasarımı, nötronlara göre yapılır. Zırh tasarımı için zırh maddesi seçiminde maddenin kalınlığı, ağırlığı, yoğunluğu, nötronlara karşı tutuculuk özellikleri, homojenliği ve maliyeti gibi faktörler göz önünde bulundurulur [5-7].

Beton, proton hızlandırıcılarında zırh maddesi olarak oldukça yaygın kullanılır. Yüksek giriciliği olan hızlı nötronları yavaşlatmak için gerekli olan bazı elementler (hidrojen, demir vb.) içeren beton, nötron zırhlamasında önemli bir maddedir [3, 6].

Toprak, protonların enerjisine bağlı olarak demet hattının bulunduğu tünelin bir kısmının veya tamamının yer seviyesinin altında inşa edildiğinde ikincil zırh olarak kullanılır [8, 9].

Hızlandırıcılarda zırh tasarımı, hızlandırıcının normal ve anormal çalışma durumları için tesisin içinde ve dışında izin verilen doz değerlerine göre yapılır. Normal çalışma durumunda parçacık enerji kaybı 1 W/m (demet kaybı olarak saniye ve metre başına $6,24 \cdot 10^{12}/E$), anormal çalışma durumlarında 10 W (demet kaybı olarak saniye başına $6,24 \cdot 10^{13}/E$) alınır [10, 11]. 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 $10 \mu\text{Sv/h}$ ($<20 \text{ mSv/yıl}$) alınır [12].

Günümüzde zırh kalınlıkları ve zırh dışındaki doz değerlerinin belirlenmesi için analitik yöntemler ve uygun olarak geliştirilmiş Monte Carlo çoklu-parçacık taşınım kodları kullanılır. Yaygın olarak kullanılan analitik yöntemler Tesch'in formülü ve Moyer Modelidir [8, 13-15]. Kullanılan Monte Carlo kodları ise FLUKA, MCNPX, PHITS, MARS15 VE GEANT4' tür [16-18].

FLUKA, parçacık taşınımı ve parçacıkların madde ile etkileşmelerini hesaplamak için geliştirilmiş çok amaçlı bir Monte Carlo kodudur. FLUKA' nın, kozmik ışın fiziği, nötrino fiziği, hızlandırıcı tasarımı, kalorimetri, parçacık izleme ve detektör tasarımı, hızlandırıcı güdümlü sistemler, atık dönüşümü, enerji üretimi, zırh tasarımı, dozimetri ve radyasyon korunumu, uzay radyasyonu, sağlık fiziği gibi kullanım alanları mevcuttur [19].

Bu çalışmada Türk Hızlandırıcı Merkezi bünyesinde kurulması planlanan proton hızlandırıcı tesisinin farklı enerji bölgeleri (100 ve 250 MeV) için ortam dozu benzetimleri sonucu gerekli olan minimum standart beton ve toprak zırh kalınlıkları, anormal çalışma durumunda oluşabilecek enerji kaybı göz önünde bulundurularak, FLUKA Monte Carlo kodu ile belirlendi.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada proton hızlandırıcı tesisinin farklı enerji bölgelerinde tamamen demet kaybı ile oluşan ikincil nötronların zayıflatılması için gerekli zırh tasarımı FLUKA Monte Carlo kodunun 2011.2 versiyonu ile yapıldı. Zırh tasarımında $6 \cdot 10^8$ parçacık kullanıldı. Zırh kalınlıklarının belirlenmesinde anormal çalışma durumları göz önünde bulunduruldu ve demet kayıpları saniye başına $6,24 \cdot 10^{13}/E$ bağıntısı ile hesaplandı [10,

11]. Bu değer, 100 ve 250 MeV enerjili protonlar için sırasıyla saniye başına 6.24×10^{11} , 2.496×10^{11} protonun demet kaybına karşılık gelir.

Zırh tasarımı yapılırken, 100 ve 250 MeV enerjili protonların zırhlanması için 5 m x 5 m x 10 m boyutlarında içi hava dolu bir tünel tasarlandı. Tünelde, demet eksenini yan duvarlara 2,5 m uzaklıkta yerleştirildi. Zırh tasarımı yapılırken zırh maddesi olarak standart beton ve toprak kullanıldı. Zırh kalınlığının toplam boyutu 24 m olarak alındı. Zırhın en dışı da kodun parçacıkları takip etmeyi bir noktada bırakması için 1 m yarıçapında siyah cisim olarak seçildi. Zırh tasarımında kullanılan maddelerin yoğunlukları ve atomik bileşimleri Tablo1’ de verildi.

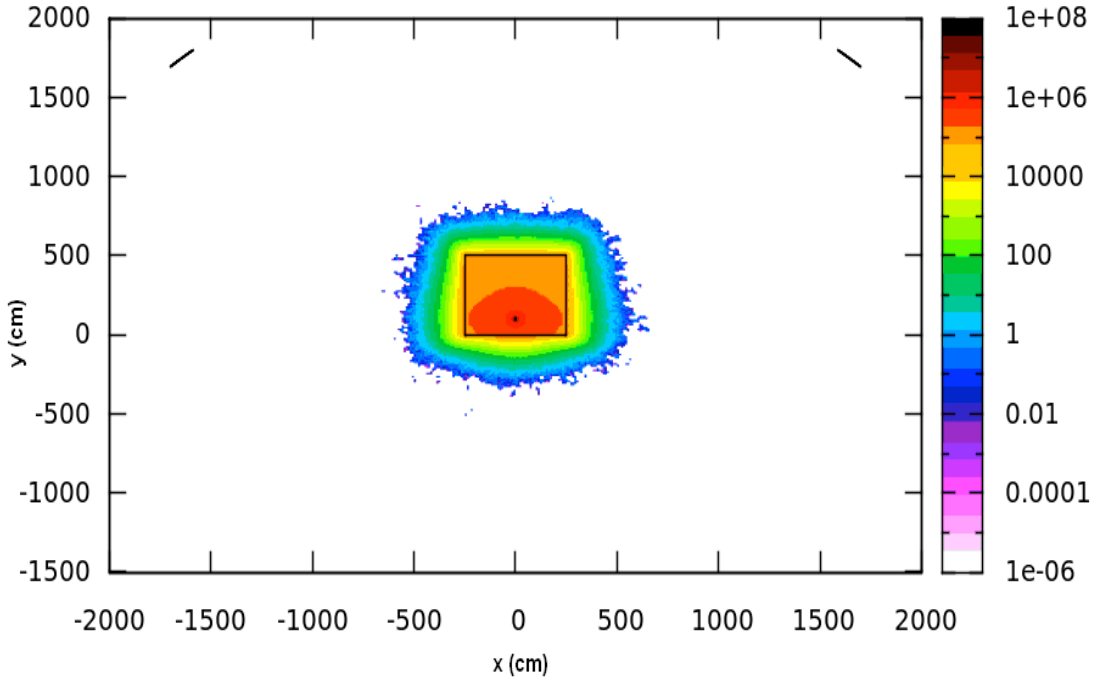
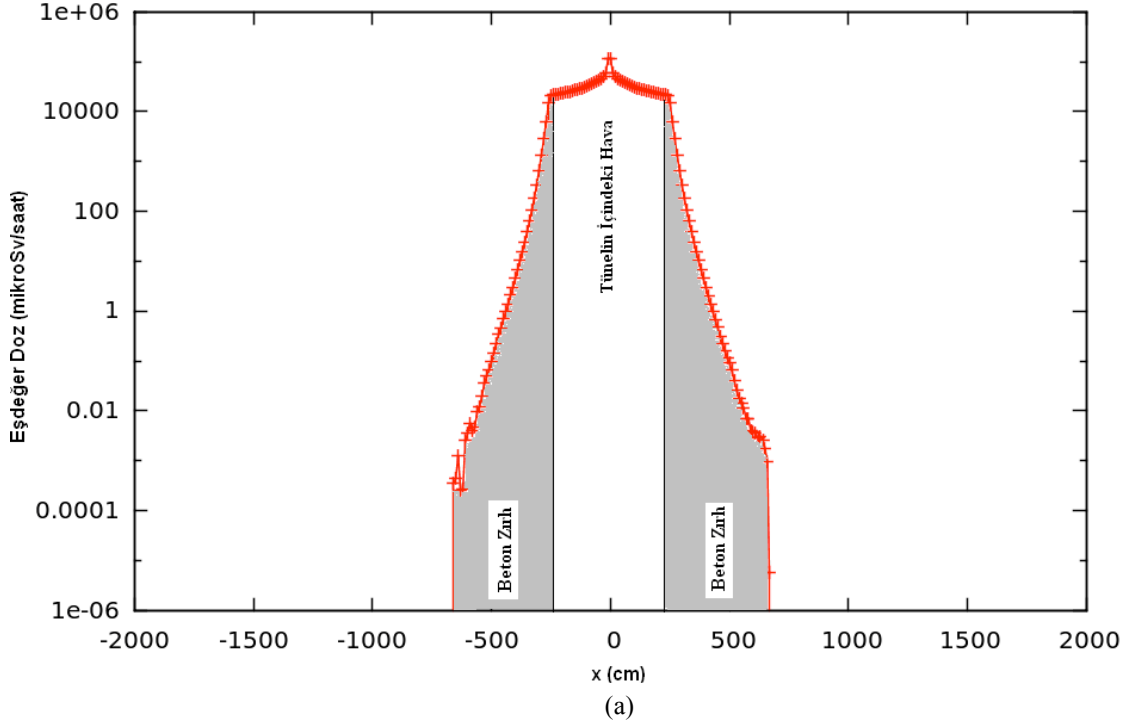
Tablo 1. Zırh tasarımı için kullanılan maddelerin özellikleri

Element	Tünel içindeki hava ($\rho=0,00120484 \text{ g/cm}^3$) [19]	Standart beton ($\rho=2,34 \text{ g/cm}^3$) [19]	Toprak ($\rho=1,9 \text{ g/cm}^3$) [19]
C	0,0001248	23,0	-
O	0,231781	40,0	43,77
N	0,755267	-	-
Ar	0,012827	-	-
Si	-	12,0	28,1
Ca	-	12,0	3,65
H	-	10,0	-
Mg	-	2,0	2,11
Al	-	-	8,24
Fe	-	-	5,09
Ti	-	-	0,45
Mn	-	-	0,07
K	-	-	2,64
Na	-	-	2,84

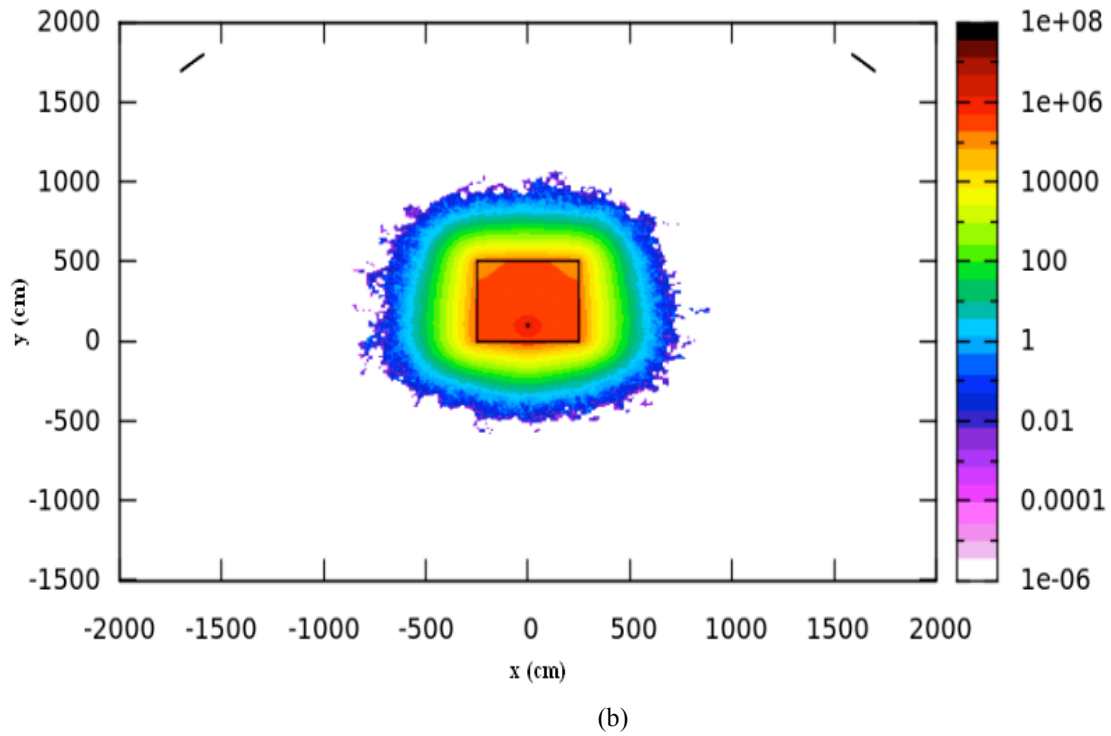
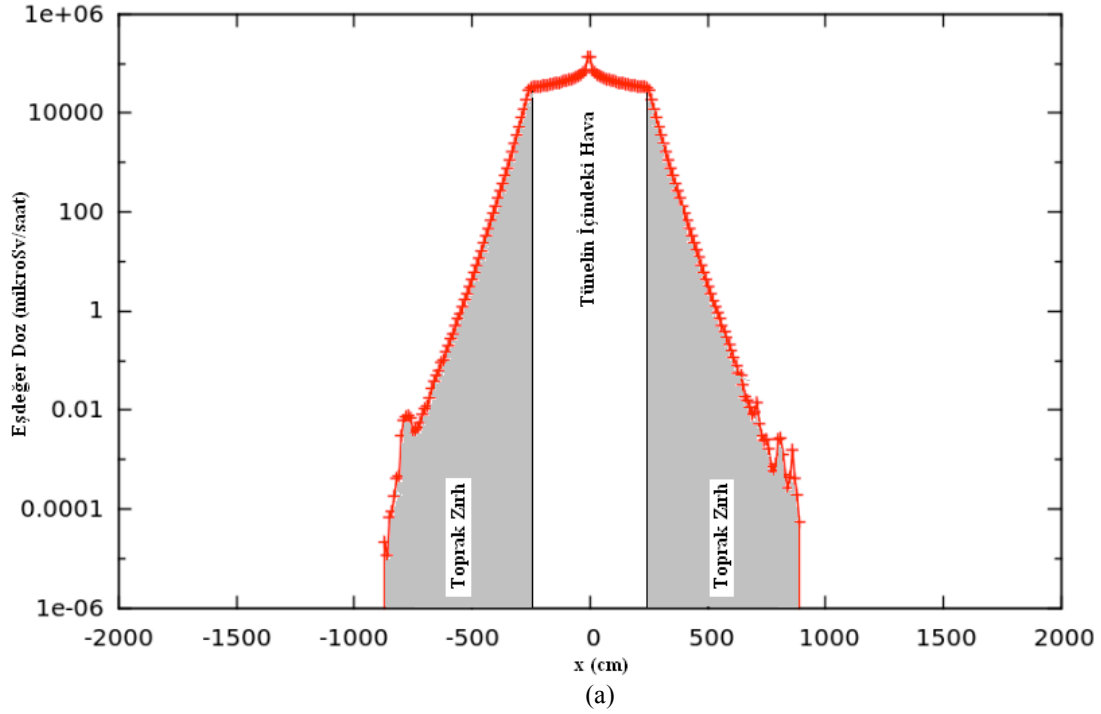
Proton hızlandırıcılarında zırh tasarımı nötronlara göre yapıldığından nötron kaynağı olarak genellikle bakır veya demir kullanılır [16, 20]. Bu nedenle, zırh tasarımı için boyutları 5 x 5 x 5 cm³ olan bakır hedef madde olarak seçildi. Doz dağılımlarını belirlemek için detektör olarak USBIN anahtarı kullanıldı. Detektörün boyutları x, y ve z eksenleri için 3400, 3000 ve 1900 cm olarak belirlendi. Ayrıca USBIN anahtarında x, y ve z eksenleri için bin sayıları sırasıyla 340, 300 ve 190 olarak alındı. Böylece benzetimde kullanılan detektörün birim hacim elemanın boyutları 10 x 10 x 10 cm³ olarak seçildi.

3. Bulgular

USBIN detektöründen elde edilen doz dağılımları 100 MeV enerjili protonlar için standart beton ve toprak zırh maddeleri için sırasıyla Şekil 1 ve 2’ de verildi. Şekillerde x-y skalası cm, renkli skala mikroSievert/saat’ tir.



Şekil 1. 100 MeV enerjili protonların beton içinde a) x eksenı boyunca doz dağılımı, b) doz dağılımının XY grafiği

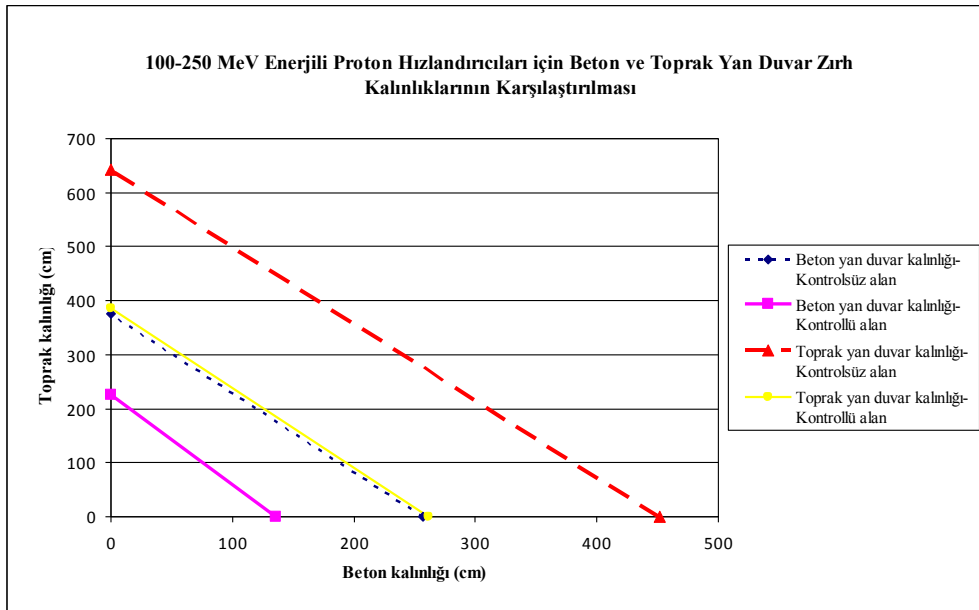


Şekil 2. 100 MeV enerjili protonların toprak içinde a) x eksenini boyunca doz dağılımı, b) doz dağılımının XY grafiği

FLUKA kodu yardımıyla beton ve toprak örnekleri için elde edilen doz dağılımlarından maksimum müsaade edilen doz değerlerine göre zırh kalınlıkları belirlenerek Tablo 2’ de verildi. Ayrıca, standart beton ve toprak yan duvar kalınlıkları arasındaki ilişki Şekil 3’ te gösterildi.

Tablo 2. 100 ve 250 MeV enerjili protonlar için FLUKA kodu ile hesaplanan gerekli beton ve toprak yan duvar kalınlıkları

Proton Demet Enerjisi (MeV)	Maksimum İzin Verilen Doz Hızı Değerleri			
	Kontrolsüz Alan 0,1 μ Sv/h		Kontrollü Alan 10 μ Sv/h	
	Yan Duvar Kalınlıkları			
	Beton zırh kalınlığı (cm)	Toprak zırh kalınlığı (cm)	Beton zırh kalınlığı (cm)	Toprak zırh kalınlığı (cm)
100	257,197	376,136	135,606	225,758
250	451,515	642,045	260,985	386,364



Şekil 3. Standart beton-toprak yan duvar kalınlıkları arasındaki ilişki

4. Tartışma ve Sonuç

Proton hızlandırıcılarında radyasyon güvenliği için zırh tasarımı nötronlara göre yapılır. Zırh tasarımında beton, ağır beton ve toprak gibi zırh maddeleri kullanılır. Beton ve ağır beton zırh hızlandırıcı genelinde kullanılabilir. Toprak zırh ise yer altında inşa edilen hızlandırıcı tesislerinde ikincil zırh maddesi olarak etkin olur.

Bu çalışmada THM bünyesinde kurulması planlanan proton hızlandırıcı tesisinin 100 ve 250 MeV enerji bölgeleri için zırh tasarımı yapıldı ve gerekli olan beton ve toprak zırh kalınlıkları FLUKA Monte Carlo kodu ile belirlendi. Zırh kalınlıkları, zırh dışında izin verilen maksimum doz hızı değerlerine göre ve anormal çalışma durumuna göre tanımlandı.

Tablo 2' den görüldüğü gibi beton ve toprak için zırh kalınlıkları proton enerjileri ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Toprağa göre yoğunluğu daha fazla olan beton

maddesi için zırh kalınlık değerlerinin daha az olduğu, böylece, zırh maddesinin yoğunluğu ile kalınlık değerlerinin ters orantılı olduğu görülmektedir. Beton ve toprak örnekleri için belirlemiş olduğumuz zırh kalınlık değerleri Magistris ve Silari [17] ve Sarıyer ve Küçer [21] ve Agosteo ve arkadaşları [22] tarafından yapılmış olan benzer çalışmalar ile uyumluluk göstermektedir.

Ayrıca 100-250 MeV enerjili proton hızlandırıcı tünelinin bir kısmı veya tamamının yer seviyesinin altında inşa edilmesiyle toprağın ikincil zırh maddesi olarak kullanılması durumunda gerekli olan minimum toprak kalınlık değerleri Şekil 3 yardımıyla belirlenebilir. Şekilden görüldüğü gibi, 100 MeV enerjili proton hızlandırıcısı toprağın 100 cm altında inşa edilmesi durumunda zırh dışında maksimum doz hızı değerinin $0,1 \mu\text{Sv/h}$ ' den daha az olması için 190 cm beton zırh yeterli olurken, 250 MeV enerjili proton hızlandırıcısı toprağın 100 cm altında inşa edilmesi durumunda 383 cm beton kalınlığı yeterli olmaktadır.

Teşekkür

Bu çalışmada yer alan tüm nümerik hesaplamalar TÜBİTAK ULAKBİM, Yüksek Başarım ve Grid Hesaplama Merkezi'nde (TRUBA kaynaklarında) gerçekleştirilmiştir.

Kaynaklar

- [1] Agosteo, S., Magistris, M., Mereghetti, A., Silari, M., Zajacova, Z., 2007. Shielding Data for 100-250 MeV Proton Accelerators: Double Differential Neutron Distributions and Attenuation in Concrete, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B*, 265: 581-598.
- [2] Agosteo, S., Fasso, A., Ferrari, A., Sala, P.R., Silari, M., Tabarelli de Fatis, P., 1996. Double Differential Distributions and Attenuation in Concrete for Neutrons Produced by 100-400 MeV Protons on Iron and Tissue Targets, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B*, 114: 70-80.
- [3] Thomas, R. H., Casey, W. R., Cossairt, J. D., O'Brien, K., Rohring, N., Stapleton, G. B., Swanson, W. P., Slaback, L.A., 2005. Radiation Protection for Particle Accelerator Facilities, NCRP Report No. 144.
- [4] Agosteo, A., Rollet, S., Silari, M., Theis, C., 2008. Dosimetry in Radiation Fields Around High-Energy Proton Accelerators, *Radiation Measurements*, 43: 1024-1032.
- [5] 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. Accelerator-Driven System, CONTRACTN: FIKW-CT-2001-00179.
- [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] Biarrotte, J., Mueller, A.C., Carlucc, B., 2004. PDS-XADS Preliminary Design Studies of an Experimental.
- [9] Andersson, S., 2010. Evaluation of the Radiation Protection at the new Radiotherapy treatment department at the University Hospital of Umea, MSc thesis, 30 hp, Engineering Physics-Medical Physicist, 300 hp.
- [10] Ene, D., et al., 2011. Radiation Protection Studies for ESS Superconducting Linear Accelerator, *Progress in Nuclear Science and Technology*, 2: 382-388.
- [11] Ene, D., 2010. Radioprotection Studies for the ESS Superconducting Linear Accelerator Preliminary Estimates, ESS AD Technical Note ESS/AD/0003.
- [12] T.A.E.K. Radyasyon Güvenliği Yönetmeliği, 2000. İkinci kısım, ikinci bölüm, madde 10-b (RG-24/3/2000-23999).

- [13] 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, p. 65.
- [14] Stevenson, G., Kuei-Lin, L., Thomas, R.H., 1982. Determination of Transverse Shielding for Proton Accelerators Using the Moyer Model, *Health Physics*, 43: 13-29.
- [15] Tesch, K., 1985. A Simple Estimation of lateral Shielding for Proton Accelerators in the Energy Range from 50 to 1000 MeV, *Radiation Protection Dosimetry*, 1: 165-172.
- [16] 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 NUFACT Note 088
- [17] Magistris, M., Silari, M., 2005. Shielding Requirements and Induced Radioactivity in the 3.5 GeV SPL, CERN.
- [18] 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.
- [19] Ferrari, A., et al., 2011. FLUKA: A Multi-Particle Transport Code, CERN-2005-010.
- [20] Magistris, M., et al., 2007. Radiation Protection Considerations for the Installation of Linac 4 in the Existing Linac 2 Building, CERN-SC-2007-031-RP-TN.
- [21] Sarıyer, D., Küçer, R., 2013. Proton Hızlandırıcılarında Farklı Maddeler İçin Zırh Kalınlıklarının Analitik Yöntemle Belirlenmesi, *SDÜ Fen Dergisi (E-Journal)*, 8(1): 100-105.
- [22] Agosteo, S., Magistris, M., Silari, M., 2011. Shielding of Proton Accelerators, *Radiation Protection Dosimetry*, 146: 414-424.

Rahmi Küçer e-posta: rkucer@hotmail.com