

Proton Hızlandırıcılarında Kontrollü Alanlar için Gerekli Olan Zırh Kalınlıklarının FLUKA Monte Carlo Kodu ile Belirlenmesi

Demet Sariyer^{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: 03 Mart 2014, Kabul: 07 Nisan 2014

Özet: Proton hızlandırıcılarında hızlandırılan protonlar ile oluşan ani radyasyon alanı, fotonların yanı sıra yüklü ve yüksüz parçacıkların karışımını içermesi nedeniyle oldukça kompleksdir. Proton hızlandırıcılarında zırh tasarımının amacı, radyasyon çalışanlarını ve genel halk üyelerini ani radyasyondan korumak için, hızlandırıcı ve ekipmanlarında oluşan baskın nötron radyasyonunu zayıflatmaktır.

Bu çalışmada, proton hızlandırıcı tünelinin üç farklı enerjide zırh tasarımı için FLUKA Monte Carlo parçacık taşınım kodu kullanıldı. Proton hızlandırıcı tünelinin kontrollü alanları için minimum çatı kalınlıkları belirlendi. Zırh maddesi olarak standart beton ve toprak kullanıldı.

Anahtar kelimeler: Proton hızlandırıcı, radyasyondan korunma, FLUKA, zırh maddesi

Determination by FLUKA Monte Carlo Code of Thicknesses of Shielding Required for Controlled Areas in Proton Accelerators

Abstract: The prompt radiation field produced by accelerated protons in proton accelerator is quite complex, consisting of a mixture of charged and neutral particles as well as photons. The goal of shielding design in proton accelerators is to attenuate the prompt radiation produced in the accelerator and its associated equipment of which neutrons are the dominant shielding concern, in order to protect radiation workers and member of the general public.

In this paper, the Monte Carlo particle transport code FLUKA was used to shielding design in the proton accelerator tunnel at three different energies. Minimum roof shield thicknesses were determined for controlled areas of proton accelerator tunnel. Standard concrete and soil were used as shielding material.

Key words: Proton accelerator, radiation protection, FLUKA, shield material

1. Giriş

Protonlar madde ile etkileştiği zaman ikincil parçacıkların spalasyonu şeklinde ani radyasyonun oluşumuna sebep olur. Ani radyasyon, hızlandırıcının aktif olduğu durumlarda proton demetinin hedef ve hızlandırıcı bileşenleri ve istenmeden oluşan demet kayıplarının hızlandırıcının yapısal bileşenleri ile etkileşmesi ile oluşur. Hızlandırılan protonların madde ile etkileşmesiyle oluşan ani radyasyon alanı kompleksdir ve proton enerjisinin artmasıyla birlikte daha da kompleks hale gelir. Ani radyasyon alanı, nötronlar, fotonlar ve yüklü parçacıkların birçok çeşidini içerir. Nötronlar, proton hızlandırıcılarının zırh dışındaki baskın bileşenidir ve zırh tasarımı nötronlara göre yapılır [1-3].

Proton hızlandırıcılarında zırh tasarımı yapılırken, hızlandırıcı çeşidi, hızlandırıcı demet parametreleri (demet çeşidi, enerjisi ve yoğunluğu), her bir enerjideki akım ve

yoğunluğu, demet şekli ve gönderimi, demet çalışma modları (normal ve anormal çalışma), demet çalışma zamanı, demet kayıpları, hedef madde ve boyutu, zırh maddesi (bileşimi, yoğunluğu ve kalınlığı), hızlandırıcı tünel yerleşimi (yer seviyesinin altında veya üzerinde) ve doz limitleri göz önünde bulundurulur [4, 5].

Zırh tasarımı için zırh maddesi seçiminde maddenin kalınlığı, ağırlığı, yoğunluğu, nötronları tutma özellikleri, homojenliği ve maliyeti gibi faktörler göz önünde bulundurulur. Zırh maddesi olarak genellikle, beton, ağır beton, toprak ve demir kullanılır [6-8].

Beton, proton hızlandırıcılarında radyasyonundan korunmak ve radyasyonun etkilerini minimum seviyeye indirmek için kullanılan düşük maliyetli, kolay kullanımlı ve iyi yapısal özellikli mükemmel bir zırh maddesidir [7]. Toprak ise, protonların enerjisine bağlı olarak hızlandırıcı tünelinin bir kısmının veya tamamının yer seviyesinin altında inşa edilmesiyle ikincil zırh olarak kullanılması bakımından önemlidir [8, 9].

Zırhlamanın amacı, ülkenin ulusal kanunlar ile belirlediği radyasyon limitlerine göre hızlandırıcı tünelinden tünel dışındaki bir noktaya etkili doz eşdeğer oranını azaltmaktır. Bu limitler, genellikle, halk alanları için 0,1 $\mu\text{Sv/h}$ ve kontrollü alanlar için 10 $\mu\text{Sv/h}$ ' tir. Bu değerler, halk için yıllık 1 mSv' lik ve radyasyon çalışanları için 2000 saatlik çalışma zamanı için 20 mSv' lik doz eşdeğer oranını sağlar [10-12].

Zırh tasarımında zırh hesaplamaları için, birçok analitik metot ve geliştirilmiş çoklu-parçacık Monte Carlo taşınım kodları kullanılabilir. FLUKA, MARS15, EGS4, MCNPX ve PHITS gibi Monte Carlo kodları, kompleks üç boyutlu geometriler için, zırh tasarımında doğru sonuçlar sağlar [13-16].

FLUKA, parçacıkların madde ile etkileşim ve parçacık taşınım hesaplamaları için, proton ve elektron hızlandırıcılarını kapsayan uygulamalarda hedef tasarımı, zırh tasarımı, kalorimetri, aktivasyon, dozimetri, detektör tasarımı, hızlandırıcı sürücü sistemleri, kozmik ışınlar, nötrino fiziği, radyoterapi uygulamalarını kapsayan çok amaçlı Monte Carlo taşınım kodudur [16, 17].

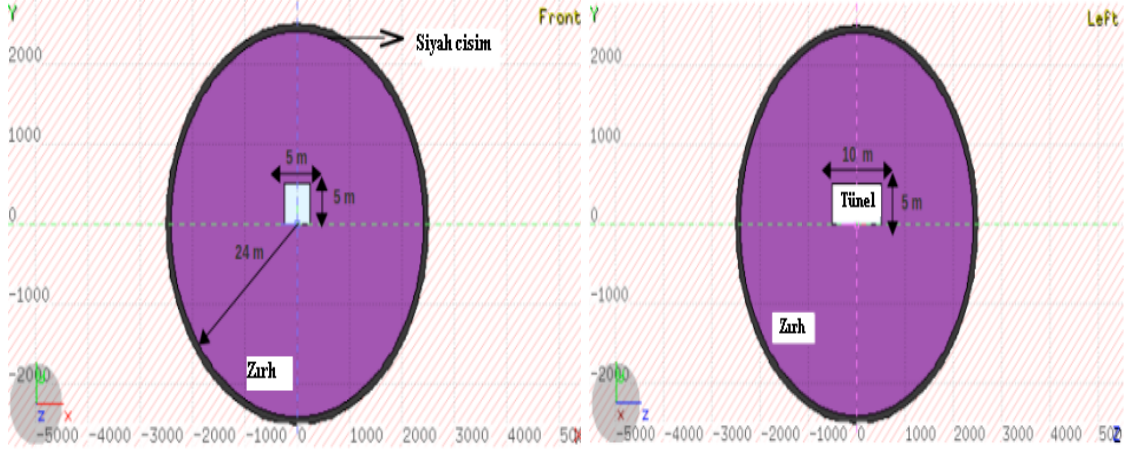
Bu çalışmada, proton hızlandırıcı tesisinin 50, 100 ve 250 MeV enerji bölgeleri için gerekli olan minimum çatı zırh kalınlıkları FLUKA Monte Carlo kodu ile belirlendi. Standart beton ve toprak zırh maddesi olarak kullanıldı.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada, proton hızlandırıcısının farklı enerji bölgelerinde anormal çalışma durumunda oluşan ani radyasyonun zırhlaması için gerekli olan zırh tasarımı FLUKA Monte Carlo kodunun 2011.2 versiyonu ile yapıldı. Anormal çalışma durumu nokta kaybı olarak tasarlandı. Anormal çalışma durumundaki demet kayıpları 10 W olarak alındı. Bu değer, 50, 100 ve 250 MeV enerjili protonlar için sırasıyla saniye başına 12.28×10^{11} , 6.24×10^{11} , 2.496×10^{11} protonun demet kaybına karşılık gelir [11, 12].

Şekil 1' den görüldüğü gibi zırh tasarımı yapılırken, 50-250 MeV enerjili protonların zırhlaması için 5 m x 5 m x 10 m boyutlarında içi hava dolu bir tünel tasarlandı.

Tünelde, demet eksenine çatıya 4 m uzaklıkta yerleştirildi. Standart beton ve toprak zırh maddesi olarak kullanıldı. Zırh kalınlığının toplam boyutu 24 m 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 Tablo 1’ de verildi.

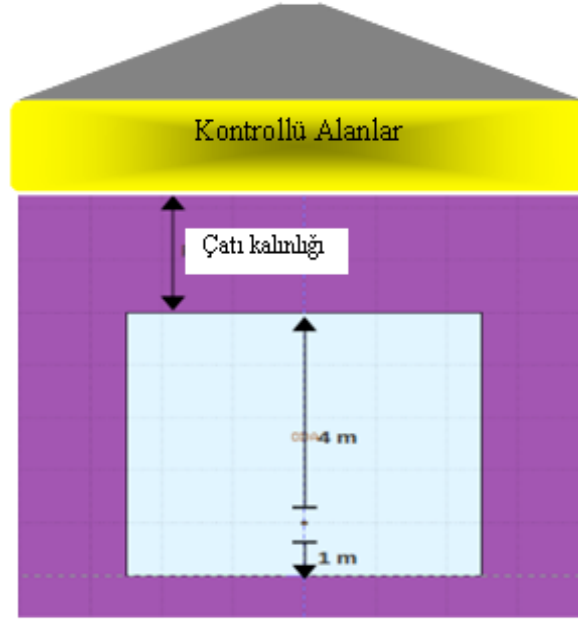


Şekil 1. Tünel ve zırh kalınlıklarının enine kesit (solda) ve yandan (sağda) görünüşü. x yatay eksen ve z demet doğrultusudur

Tablo 1. Zırh tasarımında kullanılan maddelerin yoğunlukları ve bileşimleri [17]

Zırh Maddesi	Element	Fraksiyon (%)	Yoğunluk (g/cm ³)
Tünel içindeki hava	C	0,0001248	0,00120484 g/cm ³
	O	0,231781	
	N	0,755267	
	Ar	0,012827	
Toprak	O	43,77	1,9 g/cm ³
	Si	28,1	
	Ca	3,65	
	Mg	2,11	
	Al	8,24	
	Fe	5,09	
	Ti	0,45	
	Mn	0,07	
	K	2,64	
	Na	2,84	
Standart beton	C	23,0	2,34 g/cm ³
	O	40,0	
	Si	12,0	
	Ca	12,0	
	H	10,0	
	Mg	2,0	

Zırh tasarımda 5 m x 5 m x 10 m boyutlarındaki tünelin üst yüzeyine radyasyon çalışanları için kontrollü alanlar inşa edileceği varsayıldı. Kontrollü alanlar için tasarımda kullanılan tünel kesitinin şematik gösterimi Şekil 2’ de gösterildi.

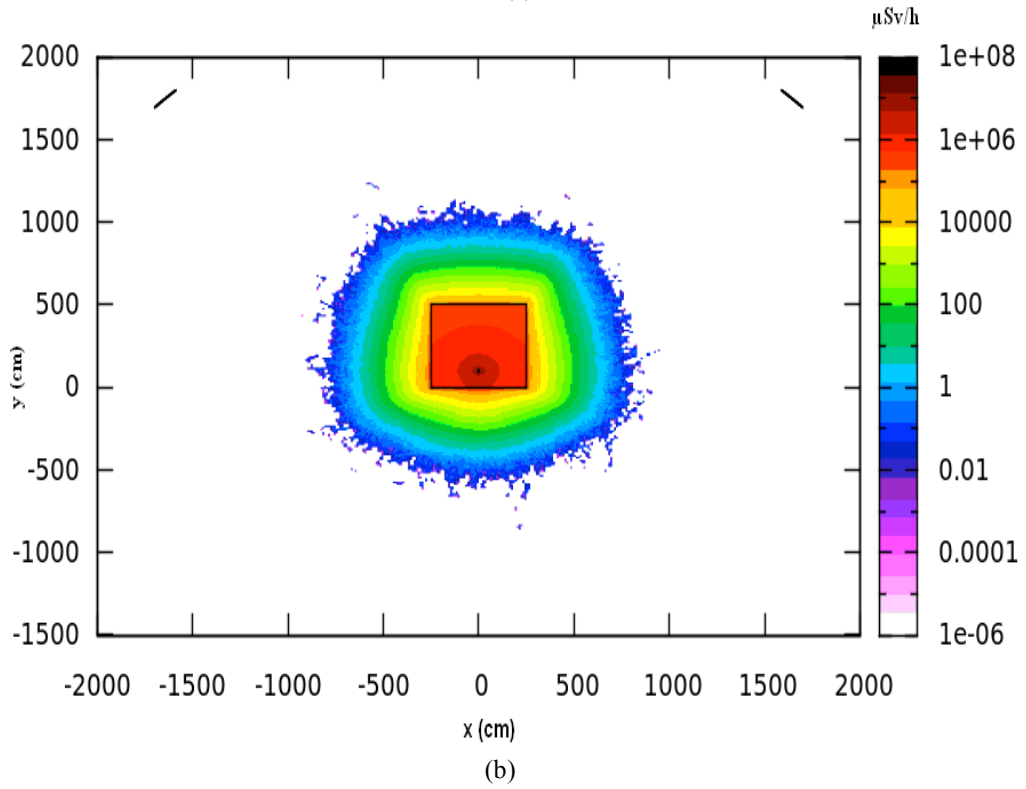
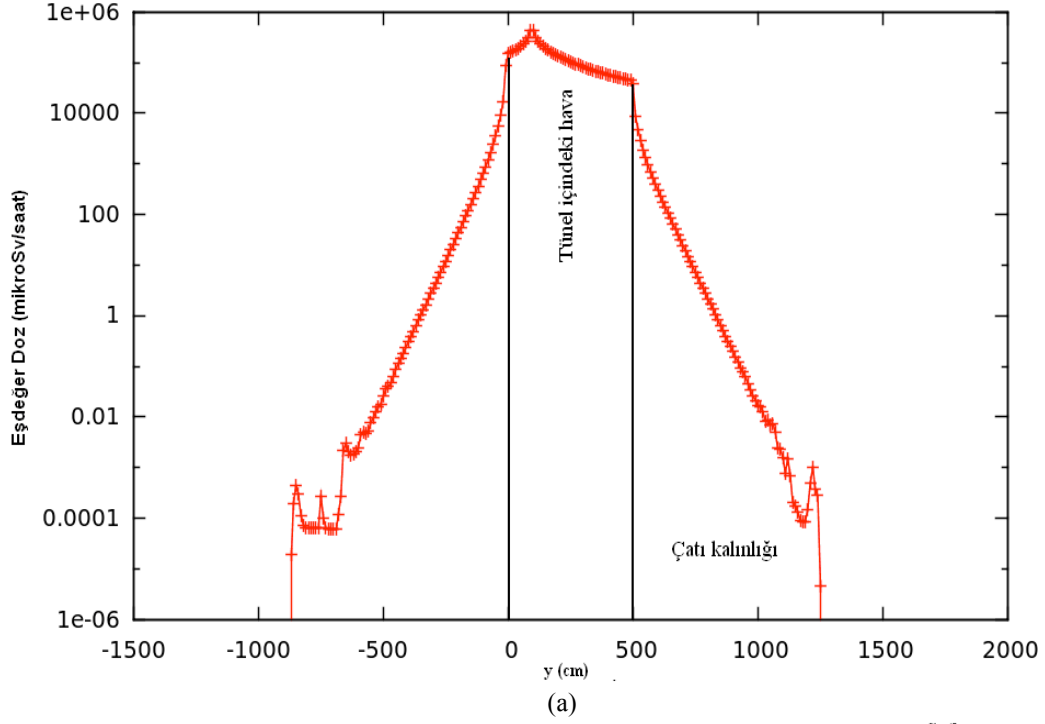


Şekil 2. Zırh tasarımında kullanılan tünel kesitinin şematik gösterimi

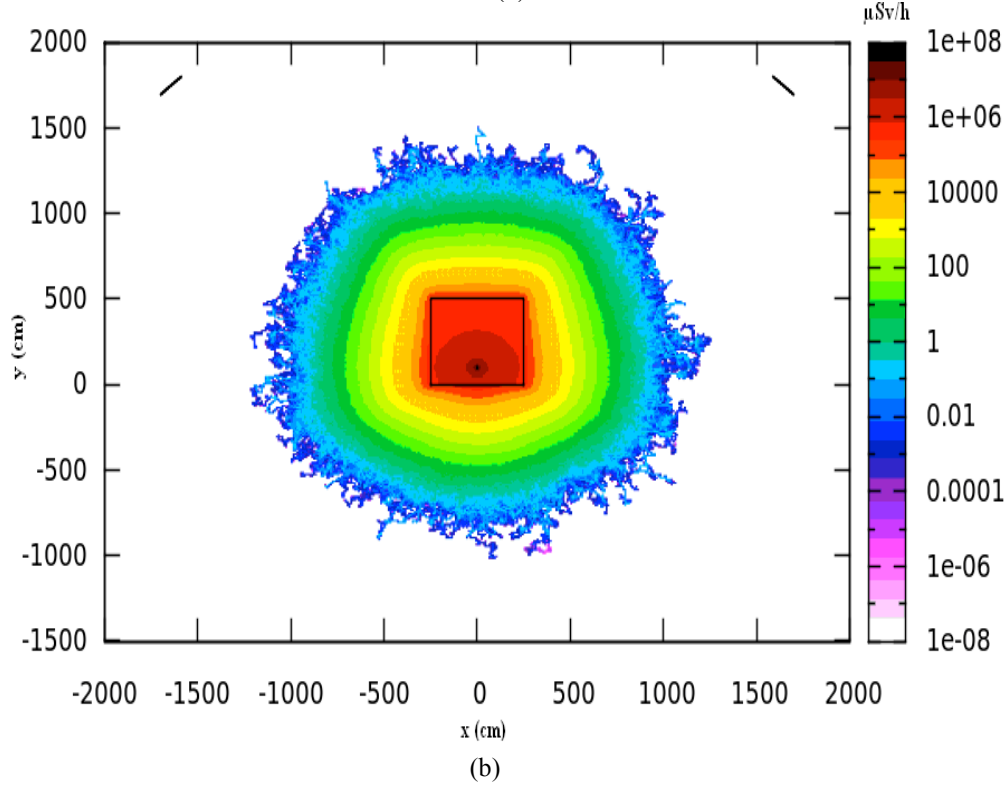
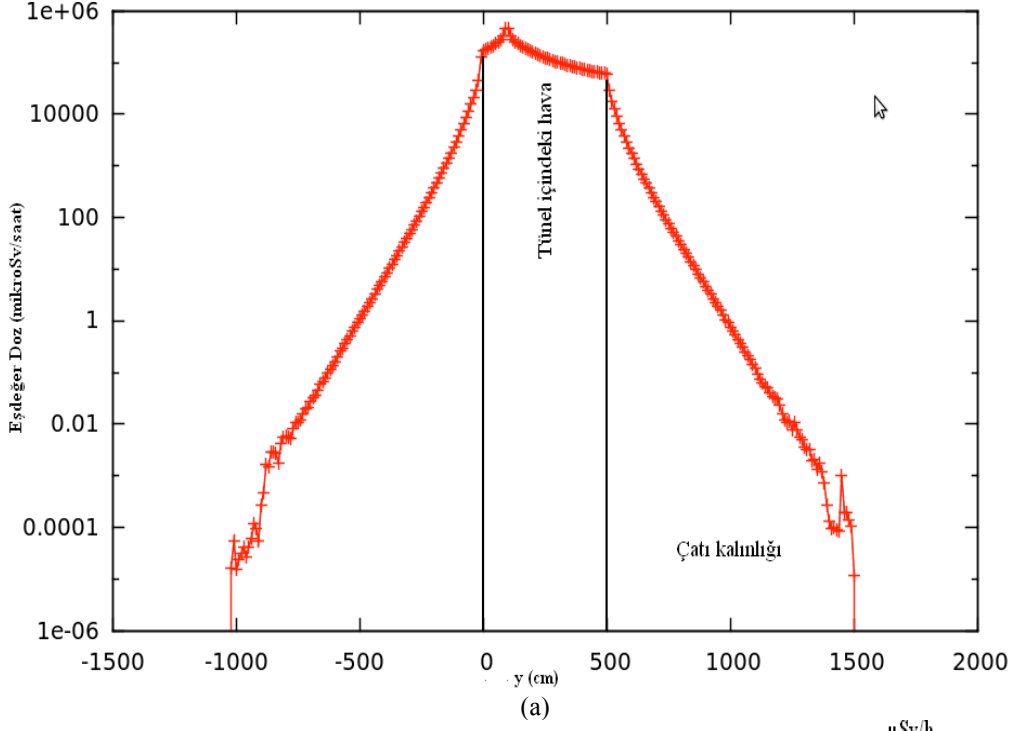
Zırh tasarımı yapılırken, boyutları 5 cm x 5 cm x 5 cm olan bakır, hedef madde olarak seçildi ve kayıp protonların kalın bakır hedefe çarptığı varsayıldı. Doz dağılımlarını belirlemek için detektör olarak USRBIN anahtarı kullanıldı. Detektörün boyutları x, y ve z eksenleri için 3400, 3000 ve 1900 cm olarak belirlendi. Ayrıca USRBIN anahtarında x, y ve z eksenleri için bin sayıları 340, 300 ve 190 olarak alındı. Dolayısıyla benzetimde kullanılan detektörün birim hacim elemanın boyutları 10 cm x 10 cm x 10 cm olarak seçildi.

3. Bulgular

FLUKA kodu kullanılarak USRBIN detektöründen elde edilen doz dağılımları 250 MeV enerjili protonlar için standart beton ve toprak zırh maddeleri için sırasıyla Şekil 3 ve 4'te verildi.



Şekil 3. 250 MeV enerjili protonların beton zırh maddesi içinde a) y ekseni boyunca doz dağılımı, b) doz dağılımının XY grafiği

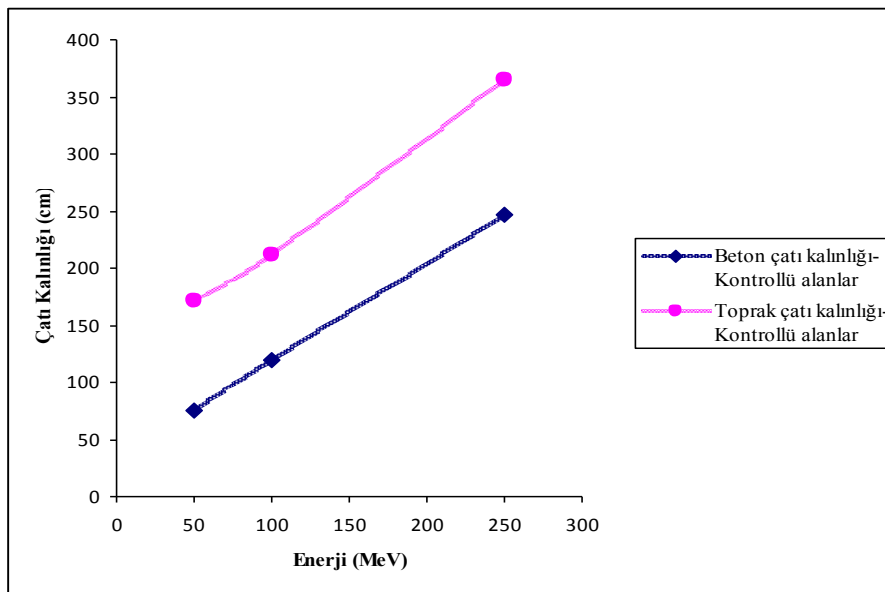


Şekil 4. 250 MeV enerjili protonların toprak zırh maddesi içinde a) y eksenini boyunca doz dağılımı, b) doz dağılımının XY grafiği

Beton ve toprak zırh maddeleri için elde edilen doz dağılımlarından maksimum müsaade edilen doz değerlerine göre çatı kalınlıkları belirlenerek Tablo 2’ de gösterildi. Ayrıca, kontrollü alanlar için standart beton ve toprak çatı kalınlıkları arasındaki ilişki Şekil 5’ te gösterildi.

Tablo 2. 50, 100 ve 250 MeV enerjili protonlar için FLUKA kodu ile belirlenen gerekli beton ve toprak çatı kalınlıkları

Proton Demet Enerjisi (MeV)	İzin Verilen Maksimum Doz Hızı Değerleri			
	KontROLSÜZ alanlar 0,1 μ Sv/h		Kontrollü alanlar 10 μ Sv/h	
	Beton çatı kalınlığı (cm)	Toprak çatı kalınlığı (cm)	Beton çatı kalınlığı (cm)	Toprak çatı kalınlığı (cm)
50	136,79	281,297	75, 142	171,591
100	237,547	364,82	119, 223	211,364
250	435,085	619,34	246, 496	364,82



Şekil 5. Kontrollü alanlar için standart beton ve toprak çatı kalınlıkları arasındaki ilişki

4. Tartışma ve Sonuç

Proton hızlandırıcılarında zırh tasarımı ulusal kanunlar ile belirlenen doz limitlerine göre yapılır. TAEK radyasyon güvenliği yönetmeliğinde [10] belirlenmiş olan doz limitleri, halk alanları için 0,1 μ Sv/h ve kontrollü alanlar için 10 μ Sv/h' tir.

Bu çalışmada proton hızlandırıcısının 50, 100 ve 250 MeV enerji bölgeleri için minimum çatı kalınlıkları FLUKA Monte Carlo kodu ile belirlendi. Bu değerler belirlenirken 10 W'lık demet kaybı göz önünde bulunduruldu ve radyasyon çalışanları için ani radyasyon seviyesinin 10 μ Sv/h' e düşürülmesi hedeflendi.

Hızlandırıcı boyunca oluşan ani radyasyon seviyesini 0,1 μ Sv/h ve 10 μ Sv/h' e düşürmek için gerekli olan beton ve toprak çatı zırh kalınlık değerleri Tablo 2' de verildi. Beton ve toprak zırh maddeleri için belirlemiş olduğumuz çatı zırh kalınlıkları Agosteo ve arkadaşları [13], Agosteo ve Silari [14] ve Magistris ve Silari [15] tarafından yapılmış olan benzer çalışmalar ile uyumluluk göstermektedir.

Şekil 5’ te kontrollü alanlar için enerjinin bir fonksiyonu olarak gerekli olan beton ve çatı zırh kalınlıkları arasındaki ilişki verildi. Şekilden de görüldüğü gibi, 250 MeV enerjili proton hızlandırıcısı tüneline çalışacak radyasyon çalışanları için tünelin üst kısmında inşa edilebilecek kontrollü alanlar için zırh dışındaki maksimum doz hızı değerinin 10 $\mu\text{Sv/h}$ ’ den daha az olması için gerekli olan çatı kalınlıkları beton zırh maddesi için 246,496 cm, toprak zırh maddesi için 364,82 cm’ dir.

Teşekkür

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

Kaynaklar

- [1] Moritz, L. E., 2001. Radiation Protection at Low Energy Proton Accelerators, *Radiation Protection Dosimetry*, 96 (4): 297-309.
- [2] Mauro, E., 2009. Radiation Protection Studies for CERN Linac4/SPL Accelerator Complex, PhD Thesis, Institut de physique de l’énergie et des particules, 153 pages.
- [3] Agosteo, A., Rollet, S., Silari, M., Theis, C., 2008. Dosimetry in Radiation Fields Around High-Energy Proton Accelerators, *Radiation Measurements*, 43: 1024-1032.
- [4] Nakashima, H., 2009. Operational Radiation Protection Issues Specific to High-Intensity Beams, *Radiation Protection Dosimetry*, 137 (1-2): 35-50.
- [5] Ipe, M. E., 2010. Basics of Shielding Design for Charged Particle Therapy Facilities, PTCOG EW.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Ipe, N. E., 2010. PTCOG Publications Sub-Committee Task Group on Shielding Design and Radiation Safety of Charged Particle Therapy Facilities, PTCOG Report 1.
- [9] Biarrotte, J., Mueller, A. C., Carlucci, B., 2004. PDS-XADS Preliminary Design Studies of an Experimental.
- [10] T.A.E.K. Radiation Safety Regulations, 2000. The second portion, the second part, section 10-b (RG-24/3/2000-23999).
- [11] Ene, D., et al., 2011. Radiation Protection Studies for ESS Superconducting Linear Accelerator, *Progress in Nuclear Science and Technology*, 2: 382-388.
- [12] Ene, D., 2010. Radioprotection Studies for the ESS Superconducting Linear Accelerator Preliminary Estimates, ESS AD Technical Note ESS/AD/0003.
- [13] Agosteo, S., Magistris, M., Silari, M., 2011. Shielding of Proton Accelerators, *Radiation Protection Dosimetry*: 1-11.
- [14] 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
- [15] Magistris, M., Silari, M., 2005. Shielding Requirements and Induced Radioactivity in the 3.5 GeV SPL, CERN.
- [16] Battistoni, G., et al., 2011. Application of FLUKA Monte Carlo Code for Nuclear and Accelerator Physics, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 269: 2850-2856
- [17] Ferrari, A., et al., 2011. FLUKA: A Multi-Particle Transport Code, CERN-2005-010.

Rahmi Küçer e-posta: rkucer@hotmail.com