

EŞYÖNLÜ NOKTASAL, TEKYÖNLÜ DÜZLEMSEL VE ÇIZGİSEL KAYNAKLAR İÇİN SUDA GAMA IŞINI DOZ BİRİKİM ETKENLERİNİN MCNP YAZILIMININ KULLANILARAK HESAPLANMASI

Haluk Atak*, Osman Şahin Çelikten, Mehmet Tombakoğlu

Hacettepe Üniversitesi Nükleer Enerji Mühendisliği Bölümü 06532, Beytepe/Ankara

Bu çalışmada farklı enerjilerdeki gama ışınları ile farklı kalınlıklarındaki suda; eşyönlü noktasal, tekyönlü düzlemsel ve sonlu/sonsuz çizgisel kaynaklar için MCNP yazılımını kullanarak doz birikim etkenlerini hesapladık. Bulunan bu etkenler daha sonra Taylor ve Berger formlarına sokularak matematiksel fonksiyonlar olarak ifade edildi. Çizgisel kaynaklar için, Sievert fonksiyonu ve noktasal kaynak sonuçlarıyla oluşturulan Taylor formundaki sabitler kullanılarak Monte Carlo sonuçlarıyla karşılaştırılmak üzere birikim etkeni tablosu oluşturuldu. Çizgisel kaynak hariç hesaplanan tüm etkenler literatürdeki tablo değerleriyle karşılaştırıldı; çizgisel kaynak için elde edilen değerler de kendi oluşturduğumuz tabloyla karşılaştırıldı. Benzeşim sonucu oluşan istatistiksel hataları azaltmak için MCNP yazılımındaki varyans azaltma tekniklerinden “zorunlu çarpışma” seçeneği kullanıldı.

Anahtar Kelimeler: MCNP, Gama Işını Birikim Etkeni, Radyasyon Zırhlaması, Taylor Formu, Berger Formu

CALCULATION OF GAMMA RAY DOSE BUILDUP FACTORS IN WATER FOR ISOTROPIC POINT, PLANE MONODIRECTIONAL AND LINE SOURCES USING MCNP CODE

Gamma ray dose buildup factors in water for isotropic point, plane monodirectional and infinite/finite line sources were calculated using the MCNP code. The buildup factors are determined for gamma ray energies of 1, 2, 3 and 4 Mev and for shield thicknesses of 1, 2, 4 and 7 mean free paths. The calculated buildup factors were then fitted in the Taylor and Berger forms. For the line sources a buildup factor table was also constructed using the Sievert function and the constants in Taylor form derived in this study to compare with the Monte Carlo results. All buildup factors were compared with the tabulated data given in literature. In order to reduce the statistical errors on buildup factors, “forced collision” option was used in the MCNP calculations.

Keywords: MCNP, Gamma Ray Buildup Factor, Radiation Shielding, Taylor Form, Berger Form

* ha@hacettepe.edu.tr

1.GİRİŞ

Radyasyondan korunmada zırh uygulamaları, radyoaktif maddelerin taşınması ve depolanması, tıbbi uygulamalar ve radyasyon kaynaklarının kullanıldığı diğer uygulamalarda maruz kalınan dozu hesaplayabilmek için ilgili noktadaki toplam enerji bağımlı foton akısının kesin olarak bilinmesi önem arz etmektedir.

Bir metal zırh gibi yüksek yutuculuğu olan bir malzeme, ışın kaynağı ve detektör arasına yerleştirildiğinde, fotonlar malzeme içinde hem saçılmaya uğrar hem de ikincil proseslerle yeni fotonlar oluşturur. Bu yeni oluşan ve saçılan fotonlar da hiç saçılmadan malzemeden geçenlerle birlikte detektöre ulaşır. Bu durum sonucunda foton akısı, arada hiç malzeme yokken elde edilen akıya göre büyük ölçüde değişikliğe uğrar[1]. Saçılan bu fotonların aynı zamanda enerjileri de değişmekte ; detektöre ulaşan foton akısı, ışın demetinin büyüklüğüne, fotonların enerji dağılımına, yutucu malzemenin çeşidine ve geometrisine bağlı hale gelmektedir.

Hiç saçılmayan birincil fotonlara ek olarak, saçılan fotonların alınan doz üzerindeki etkisini incelemek için yapılan hesaplamalarda değeri birden büyük olan doz birikim etkeni (buildup factor) kullanılmaktadır.

Doz birikim etkeni genel olarak, bir noktadaki toplam foton sayısının etkisinden kaynaklanan doz miktarının, hiç çarpışma yapmadan gelen fotonların etkisiyle meydana gelen doz miktarına oranıdır. Diğer bir şekilde ifade edecek olursak,

$$B(E, \mu r) = \frac{\text{Toplam parçacık sayısından kaynaklanan doz}}{\text{Hiç çarpışmadan gelen parçacık sayısından kaynaklanan doz}} = \frac{X_b}{X_u} \quad (1)$$

X_u değeri ilgili noktadaki enerji bağımlı foton akısına bağlıdır ve analitik olarak hesaplanabilir. Örneğin tek yönlü bir foton demetinin r kalınlığındaki bir ortamdan geçmesiyle elde edilen X_u değeri,

$$X_u = X_0 e^{-\mu(E)r} \quad (2)$$

formülüyle ifade edilir.

Burada X_0 , arada malzeme yokken (örneğin vakum ortamı için) maruz kalınan dozu; μ , enerji bağımlı doğrusal azaltma katsayısını; $B(E, \mu r)$, enerji ve uzaklığa bağlı doz birikim etkenini; μr , E enerjisindeki fotonun hiçbir çarpışma yapmadan malzeme içinde gidebileceği mesafeyi gösteren birimsiz uzaklığı ifade etmektedir.[1,2]

Bu çalışmada farklı enerjilerdeki gama ışınları ile farklı kalınlıklarındaki suda; eşyönlü noktasal, tekyönlü düzlemsel ve sonlu/sonsuz çizgisel kaynaklar için MCNP yazılımı kullanılarak doz birikim etkenleri hesaplandı. Bulunan bu etkenler Taylor ve Berger formlarına sokularak matematiksel fonksiyonlar olarak ifade edildi ve sonuçlar referans[1] değerleriyle karşılaştırıldı.

2.HESAPLAMA YÖNTEMİ

İlgili noktalardaki toplam akı değerlerini hesaplamak için bir Monte-Carlo benzeşim programı olan MCNP5[4] kullanıldı. Kaynak enerjileri 1,2,3 ve 4MeV ve su kalınlığı ise 1,2,4 ve 7 mfp(ortalama serbest yol) olarak alındı. Kaynak enerjisi her biri 1 keV olan gruplara ayrıldı(Çizelge 1) daha sonra MCNP5 çıktı dosyası bir Matlab®[5] betiği ile ilişkilendirilerek doz birikim etkenleri hesaplandı.

MCNP5 programındaki modelde sonsuz su ortamı kullanıldı ve gerekli akı değerleri ilgili kalınlıklara yüzeyler yerleştirilerek elde edildi.

Noktasal ve düzlemsel kaynaklar için bulunan doz birikim faktörleri Taylor formuna,

$$B(E, \mu r) = Ae^{-\alpha_1 \mu r} + (1-A)e^{-\alpha_2 \mu r} \quad (3.a)$$

ve Berger formuna,

$$B(E, \mu r) = 1 + C\mu r e^{-\beta \mu r} \quad (3.b)$$

sokuldu[1].

Çizelge 1.

Enerji(MeV)	Kalınlık (mfp)	Grup Yapıları
1	1,2,4,7	1000 grp (her grup 1keV)
2	1,2,4,7	2000 grp (her grup 1keV)
3	1,2,4,7	3000 grp (her grup 1keV)
4	1,2,4,7	4000 grp (her grup 1keV)

Eş yönlü noktasal kaynak için doz birikim faktörü,

$$B(E, \mu r) = \frac{X_b}{X_0} = \frac{\sum_g \phi_g \left(\frac{\mu(E_g)}{\rho} \right)_{(abs,tissue)}^g E_g}{\frac{1}{4\pi r^2} e^{-\mu(E)r} \left(\frac{\mu(E)}{\rho} \right)_{(abs,tissue)} E} \quad (4)$$

Tek yönlü düzlemsel kaynak için doz birikim faktörü,

$$B(E, \mu r) = \frac{X_b}{X_0} = \frac{\sum_g \phi_g \left(\frac{\mu(E_g)}{\rho} \right)_{(abs,tissue)}^g E_g}{e^{-\mu r} \left(\frac{\mu(E)}{\rho} \right)_{(abs,tissue)} E} \quad (5)$$

Çizgisel kaynaklar için ise doz birikim faktörü noktasal kaynak sonuçlarından elde edilen Taylor formundaki sabitler kullanılarak ,

$$\varphi_u = \frac{S}{4\pi R} [F(\theta_1, \mu R) + F(\theta_2, \mu R)] \quad (6.a)$$

$$\varphi_b = \frac{S}{4\pi R} \sum A_n \int_{-\theta_1}^{-\theta_2} \exp[-(1+\alpha_n)\mu R \sec\theta] d\theta \rightarrow \varphi_b = \frac{S}{4\pi R} \sum A_n \{F[\theta_1, (1+\alpha_n)\mu R] + F[\theta_2, (1+\alpha_n)\mu R]\} \quad (6.b)$$

$$B = \frac{\varphi_b}{\varphi_u} \quad (7)$$

şeklinde hesaplandı.

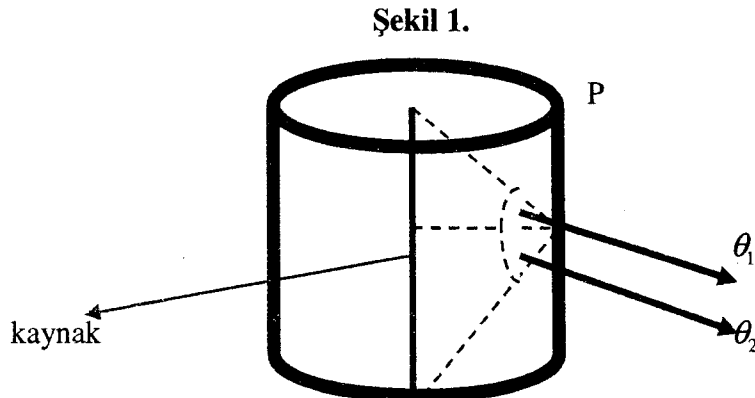
Burada φ_b , MCNP benzeşiminde oluşturulan enerji gruplarının uç noktasındaki akı değerleri; X_b , ilgili noktadaki toplam enerji bağımlı foton demetinden kaynaklanan doz; X_0 , yine aynı ilgili noktadaki hiç çarpışma yapmamış foton demetinden kaynaklanan doz, $\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{(abs.tissue)}$ dedektör olarak düşünülen dokunun enerji bağımlı kütle soğurum katsayısı[6];

φ_u , çarpışma yapmadan geçen foton akısı, φ_b toplam foton akısı, α_n ise noktasal kaynaklar için elde ettiğimiz Taylor sabitleridir. Burada Sievert integral fonksiyonu,

$$F = \theta e^{-\mu R} \overline{F[\theta, \mu R]} \quad (8)$$

olarak alınmış olup, $\overline{F[\theta, \mu R]}$ değiştirilmiş(modified) Sievert integral fonksiyonunu göstermektedir.[7]

Sonsuz ve sonlu çizgisel kaynaklar için doz birikim faktörü hesaplarken kullandığımız geometri Şekil 1. 'de gösterilmiştir.



Burada P, doz birikim etkeninin hesaplandığı noktayı; θ kaynağın suyun içindeki yerleşimini belirten açıyı(sonlu kaynak için $\theta_1 = \theta_2 = 45^\circ$, sonsuz kaynak için $\theta_1 = \theta_2 = 90^\circ$ alındı).

Doz birikim etkenindeki istatistiksel hata, hata yayılması(error propagation) yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\sigma_B = \sigma_{\frac{X_b}{X_0}} = \frac{1}{X_0} \sigma_{X_b} \quad (9)$$

Burada X_0 'ın sabit ve hiçbir hata getirmediği; hatanın MCNP hesaplaması sonuçlarından elde ettiğimiz grup akılarından kaynaklandığı varsayılmıştır.

$$\sigma_{X_b}^2 = \left[\left(\frac{\mu(E_1)}{\rho} \right)_1 E_1 \sigma_{\varphi_1} \right]^2 + \left[\left(\frac{\mu(E_2)}{\rho} \right)_2 E_2 \sigma_{\varphi_2} \right]^2 + \dots + \left[\left(\frac{\mu(E_g)}{\rho} \right)_g E_g \sigma_{\varphi_g} \right]^2 \quad (10)$$

Grup akılarının standard sapması σ_{φ_g} , MCNP sonuçlarından alınan bağıl hata,

$$R_i = \frac{\sigma_{\varphi_i}}{\varphi_i} \quad (11)$$

kullanılarak hesaplanmıştır. Burada $\bar{\varphi}_i$ MCNP'den alınan ortalama grup akı değerleridir.

3.SONUÇLAR

3.1 Elde Edilen Benzeşim Sonuçlarının Tablosal Gösterimi

Çizelge 2.

Enerji(MeV)	Kalınlık(mfp)	Eş yönlü noktasal kaynak		Tek yönlü düzlemsel kaynak	
		B*	B**	B*	B**
1 MeV	1 mfp	2.0858±0.0009	2.13	2.1382±0.0009	2.26
	2 mfp	3.6404±0.0022	3.71	3.2360±0.0023	3.39
	4 mfp	7.7373±0.0091	7.68	5.8753 ±0.0086	6.27
	7 mfp	15.8729±0.0580	16.12	10.8895±0.0533	11.5
2 MeV	1 mfp	1.8435 ±0.0007	1.83	1.8531±0.0009	1.84
	2 mfp	2.8431±0.0017	2.77	2.6520±0.0018	2.63
	4 mfp	5.0469±0.0067	4.88	4.3724±0.0065	4.28
	7 mfp	8.8740±0.0408	8.46	7.1398± 0.0372	6.96
3 MeV	1 mfp	1.7331±0.0006	1.69	1.7295±0.0007	1.69
	2 mfp	2.5056 ±0.0015	2.42	2.3859±0.0016	2.31
	4 mfp	4.0902 ±0.0057	3.91	3.7234± 0.0057	3.57
	7 mfp	6.6115±0.0324	6.23	5.7684±0.0316	5.51
4 MeV	1 mfp	1.6596±0.0006	1.58	1.6488±0.0007	1.58
	2 mfp	2.2994±0.0014	2.17	2.2154±0.0014	2.10
	4 mfp	3.5578±0.0051	3.34	3.3280±0.0051	3.12
	7 mfp	5.4649± 0.0285	5.13	4.9623±0.0276	4.63

B* MCNP5 benzeşimi sonuçları hesaplanan doz birikim etkeni, B** Referans[3] den alınan doz birikim etkeni

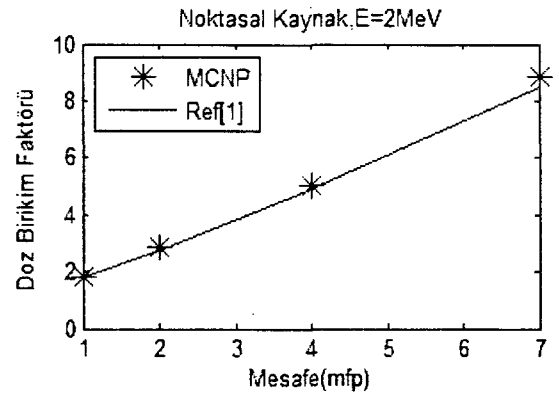
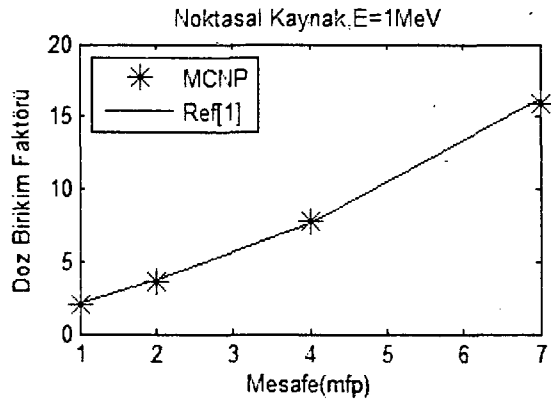
Çizelge 3.

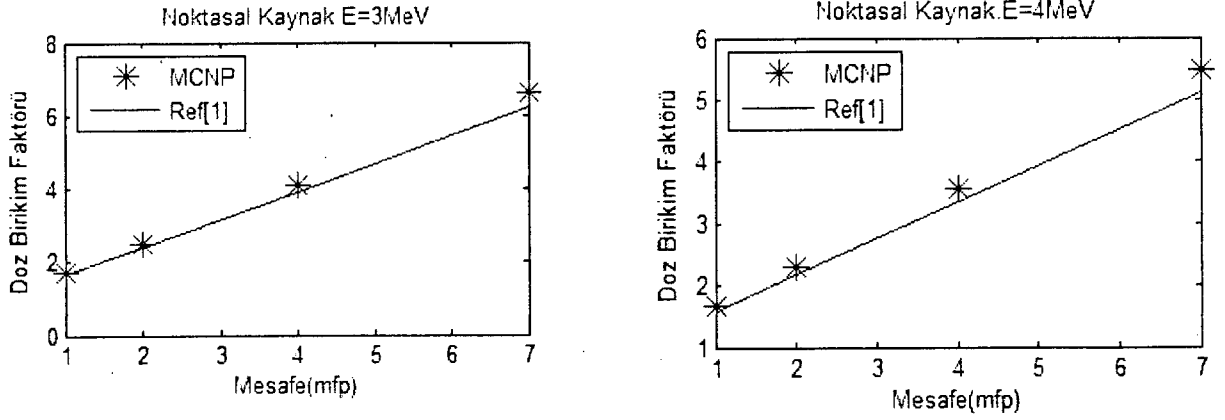
Enerji(MeV)	Kalınlık(mfp)	Sonsuz çizgisel kaynak		Sonlu çizgisel kaynak($\Theta=45^\circ$)	
		B*	B**	B*	B**
1 MeV	1 mfp	2.7455±0.0097	2.4603	2.2516±0.0079	2.1588
	2 mfp	4.6735±0.0388	4.0256	4.025±0.0363	3.6340
	4 mfp	8.8371±0.2676	8.0212	8.1261±0.2473	7.7106
	7 mfp	14.8273±1.820	18.2172	14.7317±1	17.9811
2 MeV	1 mfp	2.3430±0.0108	1.6235	1.9630±0.0094	1.4909
	2 mfp	3.5743±0.0424	2.3629	3.1605±0.0397	2.1762
	4 mfp	5.5366±0.1986	4.4734	5.2828±0.1959	4.2787
	7 mfp	7.8491±0.8707	7.9658	7.5606±0.8590	8.3066
3 MeV	1 mfp	2.1438±0.0005	1.4583	1.8232±0.0087	1.3624
	2 mfp	3.0241±0.0011	1.9768	2.7046±0.0386	1.8462
	4 mfp	4.6442±0.2300	3.4498	4.4785±0.2294	3.3203
	7 mfp	4.7058±0.5094	7.9900	4.6103±0.5080	7.8421
4 MeV	1 mfp	2.0041±0.0104	1.4175	1.7356±0.0091	1.3310
	2 mfp	2.7527±0.0419	1.8726	2.4897±0.0396	1.7585
	4 mfp	3.9894±0.2836	3.0741	3.8345±0.2825	2.9804
	7 mfp	4.2156±0.4189	6.3677	4.1951±0.4189	6.2890

B* MCNP5 benzeşimi sonuçları hesaplanan doz birikim etkeni, B** (Eş.7.b) kullanılarak hesaplanan doz birikim etkeni

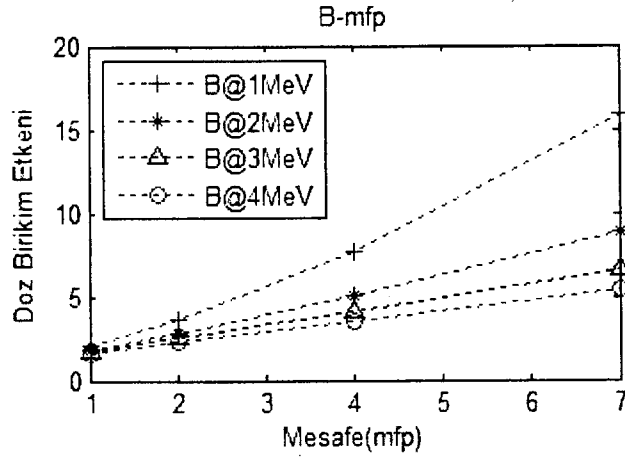
3.2 Elde Edilen Benzeşim Sonuçlarının Grafikselsel Gösterimi

Eş yönlü noktasal kaynak için MCNP ile hesaplanan doz birikim faktörleri, ve Ref[1] değerleri,



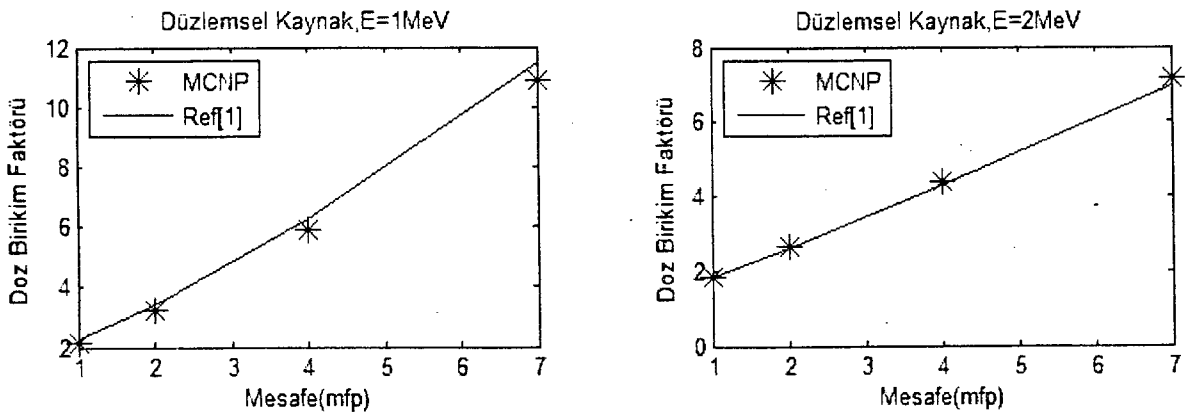


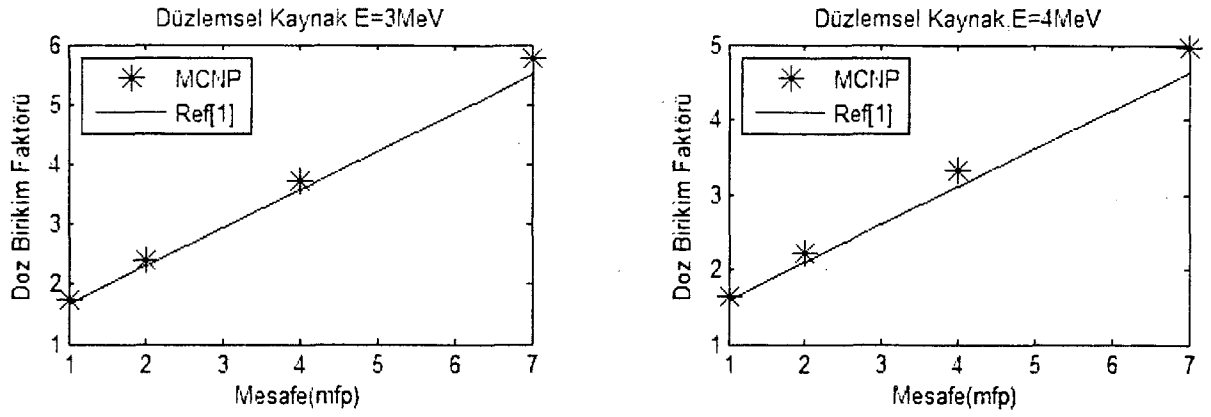
Şekil 2. Noktasal Kaynak Doz Birikim Etkenleri



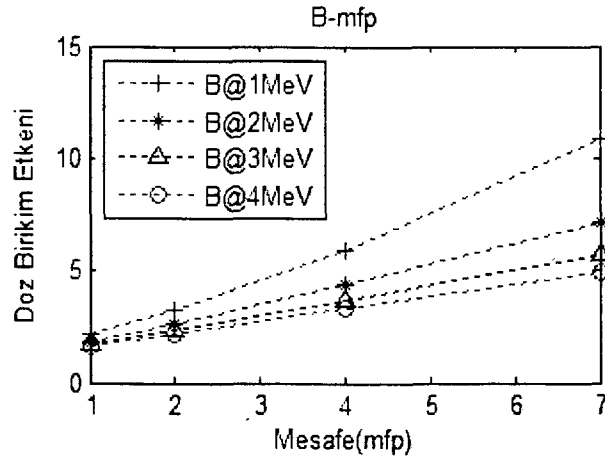
Şekil 3. Hesaplanan Noktasal Kaynak Doz Birikim Etkenleri, Enerjiye Bağlı Davranış

Tek yönlü düzlemsel kaynak için MCNP ile hesaplanan doz birikim faktörleri, ve Ref[1] değerleri,





Şekil 4. Düzlemsel Kaynak



Şekil 5. Hesaplanan Düzlemsel Kaynak Doz Birikim Etkenleri, Enerjiye Bağlı Davranış

3.3 Noktasal ve Düzlemsel Kaynaklar için Elde Edilen Taylor ve Berger Sabitleri

Çizelge 4.

	Çizgisel Kaynak				
	Taylor Sabitleri			Berger Sabitleri	
	A	α_1	α_2	C	β
1MeV	-1.185	20.33	-0.2849	1.165	-0.08616
2 MeV	12.46	-0.4568	-0.4649	0.8602	-0.03847
3 MeV	6.307	-0.2849	-0.2863	0.7332	-0.01277
4 MeV	19.9	-0.3011	-0.3034	0.6494	0.002671

Çizelge 5.

	Düzlemsel Kaynak				
	Taylor Sabitleri			Berger Sabitleri	
	A	α_1	α_2	C	β
1MeV	9.392	-0.4134	-0.4197	1.018	-0.04676
2 MeV	11.75	-0.3787	-0.3849	0.8086	-0.01152
3 MeV	18.74	-0.3103	-0.3129	0.6948	0.003007
4 MeV	-20.40	-0.2733	-0.2717	0.6206	0.001341

4.TARTIŞMA VE YORUM

Enerji değerleri sabitken su katmanını kalınlaştırdığımızda detektörün bulunduğu noktaya saçılan fotonların katkısı da arttığından doz birikim etkeninin de arttığı gözlemlendi. Su katmanının kalınlığı sabit tutulduğu zaman ise, yüksek enerjiye sahip olan fotonların sistemden kaçma olasılıkları da artacağından, doz birikim etkenlerinde azalma meydana geldi. Noktasal ve düzlemsel kaynaklar için elde edilen doz birikim etkenleriyle referans değerleri karşılaştırıldığında göreceli hatanın en fazla %7 civarında olduğu ve genel olarak MCNP sonuçlarının referans değerlerinden daha yüksek çıktığı görüldü. Enerji değerinin artmasıyla hesaplanan hataların da düştüğü gözlemlendi.

Doz birikim etkeni tablolarından da görüleceği üzere, su katmanının kalınlığını artırdıkça birikim etkeniyle ilişkili göreceli hatanın da arttığını görmekteyiz. Bu hataların düşürülmesi için örneklem sayısını artırmanın yanı sıra varyans azaltma tekniklerinden olan geometriyi bölme ve zorunlu çarpışma teknikleri kullanıldı.

Çizgisel kaynaklar için doz birikim etkeni ,Monte Carlo sonuçları ve Sievert fonksiyonu ile elde edilen analitik değerlerle karşılaştırıldığında sapmaların çok yüksek olduğu gözlemlendi. Bu sapmaların temel nedeni olarak Monte Carlo benzeşim kodunda kullandığımız noktasal detektör yönteminin göreceli hatalarının yüksek olması gösterilebilir.Çizgisel kaynak için birikim etkeni hesaplarırken noktasal kaynak sonuçlarından elde ettiğimiz Taylor sabitlerini kullandığımızdan ve bu sabitlerin de yüksek hatalar içereceğini göz önüne aldığımızda böyle bir karşılaştırmadan ziyade çizgisel kaynak için verilecek erişilebilir literatür değerlerinin gerektiği sonucuna varırız.

5. KAYNAKLAR

- [1] Lamarsh, John R., Baratta, Anthony J., Introduction to Nuclear Engineering,3rd Edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 2001.
- [2] Güvendik, Mevlüt, Buildup Factor Formulae for Multi-Layer Shields, University of Missouri-Rolla, Doktora Tezi, 1999
- [3]Martin, James E., Physics for Radiation Protection, 2nd Edition, Wiley-VCH, Bedford Road USA, 2006
- [4]A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5, X-5 Monte Carlo Team.
- [5]Matlab®, The MathWorks Inc.
- [6] Hubbell J. H., Seltzer S. M., Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients, U.S. Department of Commerce, 1995
- [7] February 1997. Ph.D. Qualifying Examination. Applied Health Physics
<http://nuclear.tamu.edu/academics/qualifiers/Health%20Physics/Applied/Spring%2097%20Applied%20HP-II.pdf>