



Bazı Biyolojik Bileşiklerin Kütleli Enerji Soğurma Katsayılarının Monte Carlo Yöntemiyle Hesaplanması

Aycan ŞENGÜL¹, Ahmet BOZKURT^{*2}

¹Akdeniz Üniversitesi, Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksek Okulu, Tıbbi Görüntüleme Teknikleri Bölümü, 07058, Antalya, Türkiye

²Akdeniz Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, 07058, Antalya, Türkiye

*yazışılan yazar e-posta: abozkurt@akdeniz.edu.tr

(Alınış: 01.06.2021, Kabul: 30.08.2021, Yayımlanma: 25.11.2021)

Öz: Bu çalışma, insan vücudundaki organ ve dokuların bileşiminde yer alan on üç biyolojik bileşik için kütleli enerji soğurma katsayılarının Monte Carlo yöntemi kullanılarak hesaplanmasını amaçlamaktadır. MCNP radyasyon taşıma yazılımı ile gerçekleştirilen simülasyonlarda, kare prizma şeklinde bir soğurucu malzeme üzerine paralel bir foton demeti yönlendirilerek, tek enerjili bir noktasal foton kaynak geometrisi kullanılmıştır. Problem geometrisindeki tüm bileşenler, hedef soğurucu dışındaki malzemelerde gerçekleşebilecek etkileşimleri önlemek için bir vakum küresi (r=100 cm) ile çevrelenmiştir. 10 keV-20 MeV aralığında yirmi sekiz farklı foton enerjisinde gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda elde edilen μ_{en}/ρ değerleri NIST tablolarından elde edilen değerler ile kıyaslanmış ve uyumlu bulunmuştur. Bu yöntemin kütleli enerji soğurma katsayıları literatürde yer almayan malzeme bileşimleri ve enerji değerleri için alternatif bir hesaplama aracı olarak kullanılabilirliği düşünülmektedir.

Anahtar kelimeler: Monte Carlo, Kütleli enerji soğurma katsayısı, Biyolojik bileşikler, Fotonlar

Monte Carlo Estimation of Mass Energy Absorption Coefficients of Some Biological Compounds

Abstract: This study aims to compute total mass energy absorption coefficients of thirteen biological samples found in human body using the Monte Carlo method. The simulations were carried out using MCNP radiation transport software and utilized rectangular parallelepiped shaped absorbers upon which a point source emitted mono-energetic and parallel beam of photons. All the components in the problem geometry were surrounded by a vacuum sphere (r=100 cm) to avoid any interactions in materials other than the sample. The simulations were performed for twenty-eight photon energies in 10 keV-20 MeV energy range and μ_{en}/ρ results were compared with data from NIST compilations which indicated very good agreement. This method can be used for calculations of mass energy absorption coefficients for materials or energies where data are not available in literature.

Key words: Monte Carlo, Mass energy absorption coefficient, Biological compounds, Photons

1. Giriş

Gama veya x-ışını gibi iyonize edici etkiye sahip fotonlar, maddesel ortamdaki gericilik özellikleri nedeniyle medikal uygulamalardan, nükleer ve endüstriyel ürünlere kadar yaygın bir kullanım alanına sahiptir. Fotonlar, enerjilerinin bir kısmını içinden geçtikleri materyalin elektronlarına aktardıklarında iyonlaşma ve uyarılma olaylarına yol açarlar. Bu etkileşimler, soğurucu malzemenin atomik bileşimi ve gelen fotonun enerjisine bağlı olarak zırhlama hesaplarında doğrusal veya kütleli zayıflama katsayıları (μ/ρ) yardımıyla ele alınır [1]. Biyolojik ortamlarda fotonların enerji bırakımı sonucu ortaya çıkacak deterministik veya stokastik karakterdeki radyasyon etkileri ise doğrusal veya kütleli enerji soğurma katsayıları (μ_{en}/ρ) kullanılarak anlaşılmalı çalışılır. Her iki nicelik, soğurucu ortamın birim kütlesi başına fotonların sırasıyla saçılma veya soğurma etkileşimlerine girme olasılığı veya enerji soğurulma olasılığını temsil eder [2].

Farklı foton enerjilerinde çeşitli malzemeler için kütleli zayıflama katsayılarını bildiren çalışmalar literatürde mevcuttur [3]. μ/ρ , enerjisi bilinen bir foton için, zırhlayıcı malzemenin gerekli kalınlığını belirlemede kullanılmasına rağmen, ışınlanan malzemelerdeki radyasyon etkileri hakkında doğrudan bilgi sağlayamaz. Biyolojik ortamlar söz konusu olduğunda, radyasyonun canlı dokular üzerindeki etkisi gelen fotonların enerjisi, ışınlanan ortamın özellikleri ve birim kütle başına biriken enerji olarak tanımlanan soğurulan doz ile ilişkilendirilir. Böylece kütleli enerji soğurma katsayısı (μ_{en}/ρ), tıp ve sağlık fiziğinde önemli bir araç olarak kabul edilir ve soğurulan dozu tahmin etmek için değerli bilgiler sağlar [4]. Birçok element, bileşik veya karışım için μ_{en}/ρ verilerini içeren çevrimiçi veya yazılıma gömülü tablolar literatürde mevcuttur [5].

Literatürdeki çalışmalar hem deneysel [6-8] hem de hesaplamalı [9, 10] değerlendirmelere dayanan μ/ρ ve μ_{en}/ρ değerlerini sağlasa da, bu veri tabanları genellikle belirli enerjilerde ve sınırlı sayıda malzeme için mevcuttur. Dozimetrik olarak anlamlı olan vücut dokuları söz konusu olduğunda ise veriler, NIST gibi çevrimiçi tablolar veya XMUDAT gibi bilgisayar kodlarıyla sınırlıdır [3, 11]. μ_{en}/ρ değerleri doğrudan elde edilmemiş herhangi bir malzeme için, tablolardan alınan bireysel μ/ρ veya μ_{en}/ρ değerleri üzerinden toplamsallık kuralı kullanılarak hesaplanabilmektedir. Ancak bu sürecin hesaplamalara bazı hatalar getirdiği bildirilmiştir [12]. Herhangi bir malzeme için, istenen enerjilerde μ/ρ veya μ_{en}/ρ değerlerinin Monte Carlo tekniği ile belirlenebileceğine dair çalışmalar da son yıllarda yapılmıştır [8, 9].

Bu çalışma, bazı biyolojik malzemeler için (Aminocaproic asit, Arachidic asit, Behenic asit, Glycoprotein, Heneicosylic asit, Lactose, L-Lysine, L-Serine, L-Tryptophan, Margaric asit, Nonadecylic asit, Subtilisin ve Thrombin) 10 keV-20 MeV enerji aralığındaki μ_{en}/ρ verilerinin Monte Carlo yöntemi ile hesaplanmasını amaçlamaktadır. İzlenen metot, basit bir model geometrisine, kaynak tanımına ve malzeme içeriğindeki ağırlık yüzdelerine dayalı olarak herhangi bir element, bileşik veya karışım için geniş bir enerji aralığında kütleli enerji soğurma katsayılarının değerlendirilmesine izin vermektedir. Böylece radyasyonun biyolojik ortamlardaki hasar ve etkilerinin anlaşılması mümkün olur.

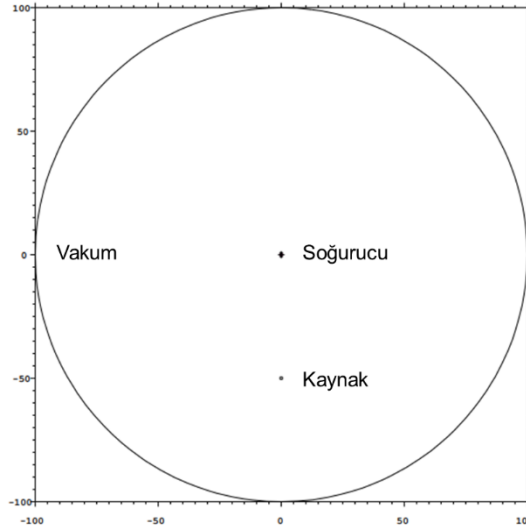
2. Materyal ve Metot

Monte Carlo yöntemi, bilim ve mühendisliğin farklı alanlarında yaygın olarak kullanılan istatistiksel bir sayısal analiz tekniğidir. Bu teknik, analitik veya sayısal olarak çözülmesi zor olan bir fiziksel veya matematiksel bir probleme ait niceliklerin ortalamalarını tahmin etmek için olasılık dağılımlarını ve rastgele sayıları kullanır.

İyonlaştırıcı radyasyonun madde ile etkileşimleri de olasılığa dayalı olduğundan, radyasyon taşınım problemleri Monte Carlo yöntemi ile kolaylıkla çözülebilmektedir. Foton taşıma analizlerinde, problem geometrisindeki kaynak özelliklerine ve malzemelerin element bileşimlerine bağlı olarak akı, enerji birikimi, doz gibi dozimetrik büyüklükleri hesaplamak için alternatif bir yoldur [13].

Bu çalışma kapsamında ele alınan foton kaynağının özellikleri, biyolojik bileşiklerin geometri ve radyasyon etkileşim özellikleri ile soğurulan enerji miktarları MCNP 6.1 program paketi ile modellenmiştir. Bu kod, Los Alamos Ulusal Laboratuvarı'nda geliştirilen genel amaçlı bir radyasyon taşıma yazılımı olup üç boyutlu geometrilerde çeşitli parçacıkların transportunu gerçekleştirebilme kapasitesine sahiptir [14]. MCNP, geniş bir enerji aralığında, farklı parçacıkların etkileşimlerini türetmek için çeşitli fizik paketlerini veya tesir kesiti tablolarını kullanır.

Çalışmamızda gerçekleştirilen simülasyonlarda, kare prizma şeklinde (a=1 cm; t=1 ortalama serbest yol kalınlığında, cm) modellenen on üç farklı soğurucu hedef üzerine, 50 cm uzağa konumlandırılmış, noktasal bir kaynaktan çıkan tek enerjili fotonlar yönlendirilmiştir. İnsan vücudundaki doku ve organların bileşimlerinde yer alan bileşiklerden seçilen ve bu çalışmada incelenen hedef malzemelerin kimyasal formülleri ve molekül ağırlıkları Tablo 1'de verilmiştir. Bu konfigürasyonda, soğurucu aynı zamanda enerji soğurması ve akı skorlaması yapmak üzere detektör olarak da tanımlanmıştır. Problem geometrisinin tüm bileşenleri, numune dışında yer alan materyallerdeki foton etkileşimlerini önlemek için bir vakum küresi (r=100 cm) içine yerleştirilmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. μ_{en}/ρ hesaplanması için kullanılan MCNP model geometrisi

Tablo 1. Çalışmada incelenen biyolojik bileşiklerin bazı özellikleri

Numune	Kimyasal Formül	Moleküler Ağırlık (g/mol)
Aminocaproic asit	$C_6H_{13}NO_2$	131.17
Arachidic asit	$C_{20}H_{40}O_2$	312.53
Behenic asit	$C_{22}H_{44}O_2$	340.58
Glycoprotein	$C_{28}H_{47}N_5O_{18}$	741.69
Heneicosylic asit	$C_{21}H_{42}O_2$	326.56
Lactose	$C_{12}H_{22}O_{11}$	342.30
L-Lysine	$C_6H_{14}N_2O_2$	146.19
L-Serine	$C_3H_7NO_3$	105.09
L-Tryptophan	$C_{11}H_{12}N_2O_2$	204.23
Margaric asit	$C_{17}H_{34}O_2$	270.45
Nonadecylic asit	$C_{19}H_{38}O_2$	298.50

Subtilisin	C ₂₆ H ₃₂ N ₃ O ₆ Cl	518.00
Thrombin	C ₁₂ H ₁₀ C ₁ N ₃ S	263.75

İncelenen her bir numune için, 10 keV-20 MeV aralığında 28 farklı foton enerjisinde gerçekleştirilen simülasyonlarda, istatistiksel hatayı %0.1'den düşük tutmak amacıyla 10⁷ parçacık öyküsü çalıştırılmıştır. Herhangi bir varyans azaltma tekniği kullanılmamıştır. Simülasyonlar, 64 GB ram belleğe sahip Intel Xeon 3.9 GHz hızında bir iş istasyonunda gerçekleştirilmiştir.

Her bir Monte Carlo simülasyonu sonucunda, enerji akısı (MeV/cm² cinsinden Φ_E) ve enerji bırakımı (MeV cinsinden $E_{bırakımı}$) değerleri kaydedilmiştir. Daha sonra bu sonuçlar ile incelenen tüm bileşik ve enerjiler için her bir numuneye karşılık gelen kütsel enerji soğurma katsayıları Eşitlik (1) yardımıyla elde edilmiştir. Bu denklemde soğurucunun kütlesi m (g cinsinden) ve yoğunluğu ρ (g/cm³ cinsinden) ile verilmiştir.

$$\frac{\mu_{en}}{\rho} = \frac{E_{bırakımı}}{\Phi_E m} \quad (1)$$

3. Bulgular

Çalışma kapsamında ele alınan biyolojik bileşikler için kütsel enerji soğurma katsayılarına ilişkin Monte Carlo değerleri Tablo 2'de verilmiştir. Simülasyonlarda, Denklem (1) kullanılarak μ_{en}/ρ değerlerini elde etmek için her bir soğurucunun ortalama hücre akısı, enerji akısı ve enerji bırakım değerleri MCNP 6.1 ile hesaplanmıştır.

Tablo 2. Çalışma kapsamında ele alınan biyolojik bileşikler için çeşitli foton enerjilerinde MCNP ile hesaplanan kütle enerji soğurma katsayıları (cm²/g)

Energy (MeV)	Aminocaproic Asit		Arachidic Asit		Behenic Asit		Glycoprotein		Heneicosylic Asit	
	NIST	MCNP	NIST	MCNP	NIST	MCNP	NIST	MCNP	NIST	MCNP
0.01	2.879	2.879	2.168	2.17	2.136	2.139	3.438	3.437	2.152	2.154
0.015	0.7909	0.795	0.5921	0.5958	0.5832	0.5868	0.9475	0.9516	0.5874	0.5911
0.02	0.3163	0.3199	0.237	0.24	0.2334	0.2364	0.3788	0.3826	0.2352	0.2381
0.03	0.09211	0.09405	0.07094	0.07244	0.06998	0.07146	0.1087	0.1109	0.07044	0.07193
0.04	0.04444	0.04547	0.03639	0.03712	0.03603	0.03674	0.05064	0.05189	0.0362	0.03692
0.05	0.03008	0.03061	0.02644	0.02679	0.02627	0.02662	0.03278	0.03341	0.02635	0.0267
0.06	0.02512	0.02538	0.02335	0.02351	0.02327	0.02342	0.02632	0.02666	0.0233	0.02346
0.08	0.02319	0.02322	0.02285	0.02283	0.02284	0.02281	0.02322	0.0233	0.02284	0.02281
0.1	0.02398	0.02391	0.02415	0.02404	0.02416	0.02404	0.02358	0.02354	0.02416	0.02404
0.15	0.02702	0.02684	0.0276	0.0274	0.02762	0.02742	0.02624	0.02609	0.02761	0.02741
0.2	0.02922	0.02905	0.02993	0.02975	0.02996	0.02977	0.02831	0.02816	0.02994	0.02976
0.3	0.03154	0.03137	0.03235	0.03217	0.03239	0.03221	0.03053	0.03038	0.03237	0.03219
0.4	0.03242	0.0323	0.03326	0.03313	0.03329	0.03316	0.03137	0.03126	0.03328	0.03315
0.5	0.03262	0.03253	0.03347	0.03338	0.03351	0.03341	0.03157	0.03149	0.03349	0.03339
0.6	0.03248	0.0324	0.03333	0.03324	0.03336	0.03328	0.03143	0.03136	0.03335	0.03326
0.8	0.03171	0.03167	0.03253	0.0325	0.03257	0.03253	0.03068	0.03065	0.03255	0.03251
1	0.03069	0.03067	0.03149	0.03147	0.03152	0.03151	0.02969	0.02968	0.03151	0.03149
1.25	0.02933	0.02933	0.0301	0.0301	0.03013	0.03013	0.02838	0.02838	0.03011	0.03012
1.5	0.02803	0.02803	0.02877	0.02876	0.0288	0.02879	0.02712	0.02712	0.02878	0.02878
2	0.02577	0.02578	0.02643	0.02644	0.02646	0.02647	0.02494	0.02496	0.02644	0.02646
3	0.02248	0.02249	0.02301	0.02302	0.02303	0.02304	0.0218	0.02181	0.02302	0.02303
4	0.02026	0.0203	0.02068	0.02072	0.0207	0.02074	0.0197	0.01974	0.02069	0.02073
5	0.0187	0.01875	0.01904	0.01908	0.01905	0.01909	0.01824	0.01828	0.01904	0.01909
6	0.01755	0.0176	0.01781	0.01786	0.01782	0.01787	0.01717	0.01721	0.01781	0.01786
8	0.01598	0.01606	0.01612	0.0162	0.01612	0.0162	0.01572	0.01579	0.01612	0.0162
10	0.01497	0.01507	0.01502	0.01513	0.01503	0.01513	0.0148	0.0149	0.01502	0.01513
15	0.01357	0.01373	0.01347	0.01363	0.01346	0.01363	0.01356	0.01371	0.01347	0.01363
20	0.01288	0.01309	0.01267	0.01289	0.01266	0.01289	0.01295	0.01315	0.01267	0.01289

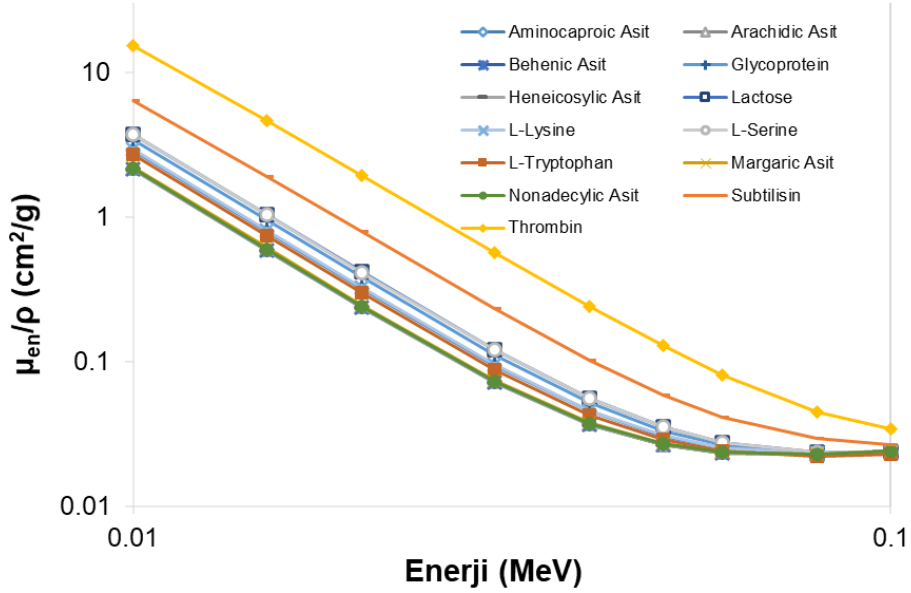
Tablo 2. (devam)

Energy (MeV)	Lactose		L-Lysine		L-Serine		L-Tryptophan	
	NIST	MCNP	NIST	MCNP	NIST	MCNP	NIST	MCNP
0.01	3.737	3.735	2.923	2.923	3.727	3.725	2.703	2.704
0.015	1.032	1.036	0.8028	0.8069	1.029	1.033	0.74	0.7437
0.02	0.4128	0.4169	0.321	0.3245	0.4114	0.4155	0.2954	0.2987
0.03	0.118	0.1204	0.09331	0.09526	0.1175	0.12	0.08606	0.08778
0.04	0.05429	0.05565	0.04488	0.04591	0.05414	0.05549	0.04172	0.04263
0.05	0.03454	0.03526	0.03026	0.03079	0.03448	0.03519	0.02844	0.02892
0.06	0.0273	0.02768	0.02519	0.02546	0.02729	0.02767	0.0239	0.02412
0.08	0.02361	0.02371	0.02317	0.02321	0.02363	0.02373	0.02222	0.02224
0.1	0.02378	0.02375	0.02394	0.02386	0.02382	0.02379	0.02305	0.02297
0.15	0.02631	0.02616	0.02694	0.02677	0.02637	0.02621	0.02601	0.02584
0.2	0.02836	0.02821	0.02913	0.02896	0.02842	0.02826	0.02814	0.02798
0.3	0.03057	0.03041	0.03145	0.03128	0.03063	0.03048	0.03039	0.03023
0.4	0.0314	0.0313	0.03232	0.0322	0.03147	0.03136	0.03123	0.03112
0.5	0.0316	0.03152	0.03252	0.03243	0.03167	0.03159	0.03143	0.03134
0.6	0.03146	0.03139	0.03238	0.0323	0.03152	0.03146	0.03129	0.03122
0.8	0.03071	0.03068	0.03161	0.03158	0.03078	0.03075	0.03054	0.03051
1	0.02972	0.02971	0.03059	0.03058	0.02978	0.02977	0.02956	0.02955
1.25	0.0284	0.02841	0.02924	0.02924	0.02846	0.02847	0.02825	0.02826
1.5	0.02715	0.02714	0.02794	0.02794	0.0272	0.0272	0.027	0.027
2	0.02497	0.02498	0.02569	0.02571	0.02502	0.02504	0.02483	0.02484
3	0.02183	0.02185	0.02241	0.02243	0.02188	0.02189	0.02167	0.02168
4	0.01974	0.01978	0.02021	0.02025	0.01979	0.01982	0.01956	0.01959
5	0.01829	0.01833	0.01866	0.0187	0.01833	0.01837	0.01807	0.01811
6	0.01722	0.01727	0.01752	0.01756	0.01726	0.01731	0.01698	0.01702
8	0.0158	0.01587	0.01596	0.01603	0.01583	0.0159	0.01549	0.01557
10	0.01489	0.01499	0.01497	0.01506	0.01492	0.01502	0.01455	0.01465
15	0.01366	0.01382	0.01358	0.01373	0.0137	0.01384	0.01324	0.01339
20	0.01308	0.01328	0.0129	0.0131	0.01311	0.01331	0.01259	0.0128

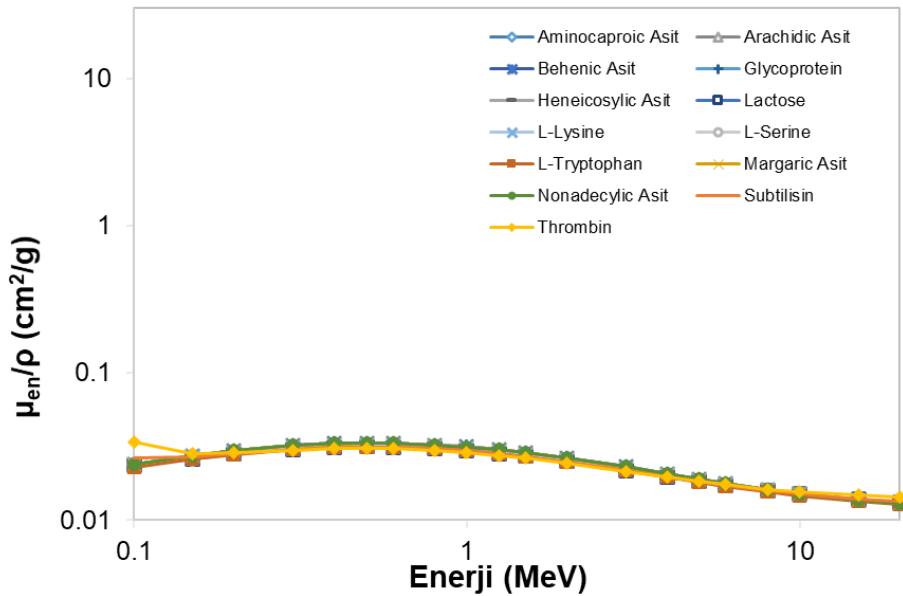
Tablo 2. (devam)

Energy (MeV)	Margaric		Nonadecylic		Subtilisin		Thrombin	
	Asit	Asit	NIST	MCNP	NIST	MCNP	NIST	MCNP
0.01	2.229	2.231	2.186	2.189	6.343	6.424	15	15.24
0.015	0.609	0.6128	0.5972	0.6009	1.869	1.89	4.544	4.599
0.02	0.2438	0.2468	0.2391	0.242	0.7763	0.7875	1.914	1.938
0.03	0.07275	0.0743	0.07149	0.073	0.2267	0.2319	0.5585	0.569
0.04	0.03708	0.03784	0.0366	0.03734	0.09957	0.1026	0.2357	0.2422
0.05	0.02675	0.02713	0.02653	0.02689	0.05727	0.05902	0.1248	0.129
0.06	0.0235	0.02367	0.02339	0.02356	0.04015	0.04122	0.07797	0.08082
0.08	0.02289	0.02286	0.02286	0.02284	0.02876	0.02921	0.04363	0.04503
0.1	0.02414	0.02403	0.02415	0.02404	0.02626	0.02645	0.03326	0.03403
0.15	0.02755	0.02736	0.02758	0.02739	0.0269	0.02683	0.02833	0.02848
0.2	0.02987	0.02969	0.02991	0.02973	0.0285	0.02839	0.02863	0.02865
0.3	0.03229	0.03211	0.03233	0.03216	0.03049	0.03036	0.02996	0.02988
0.4	0.03319	0.03307	0.03324	0.03311	0.03128	0.03118	0.03058	0.03052
0.5	0.03341	0.03331	0.03345	0.03336	0.03145	0.03138	0.0307	0.03065
0.6	0.03326	0.03318	0.03331	0.03322	0.0313	0.03124	0.03053	0.03049
0.8	0.03247	0.03243	0.03251	0.03248	0.03055	0.03053	0.02978	0.02977
1	0.03142	0.03141	0.03147	0.03146	0.02956	0.02956	0.0288	0.02882
1.25	0.03004	0.03004	0.03008	0.03008	0.02825	0.02826	0.02752	0.02754
1.5	0.02871	0.0287	0.02875	0.02874	0.027	0.027	0.0263	0.02632
2	0.02638	0.02639	0.02641	0.02643	0.02484	0.02486	0.02422	0.02426
3	0.02296	0.02298	0.02299	0.02301	0.02173	0.02175	0.02132	0.02135
4	0.02065	0.02069	0.02067	0.02071	0.01966	0.01971	0.01944	0.0195
5	0.01901	0.01905	0.01903	0.01907	0.01823	0.01828	0.01817	0.01825
6	0.01779	0.01784	0.0178	0.01785	0.01718	0.01724	0.01727	0.01736
8	0.01611	0.01619	0.01611	0.01619	0.01577	0.01586	0.01609	0.01622
10	0.01502	0.01512	0.01502	0.01513	0.01488	0.015	0.01538	0.01556
15	0.01348	0.01364	0.01347	0.01363	0.01367	0.01386	0.01447	0.01475
20	0.01269	0.01291	0.01268	0.0129	0.01308	0.01334	0.01406	0.01443

İncelenen biyolojik bileşiklerin hesaplanan μ_{en}/ρ değerleri incelendiğinde, Şekil 2(a)'da gösterildiği gibi, yaklaşık 100 keV'e kadar, MCNP sonuçlarının foton enerjisinin bir fonksiyonu olarak keskin bir düşüş sergilediği gözlenmektedir. Grafikteki bu davranış, özellikle yüksek atom numaralı elementler için fotoelektrik soğurmanın düşük enerjilerde baskın etkileşim olmasıyla açıklanabilir. Örneğin %13.4 oranında Cl ve %12.2 oranında S içeren Thrombin düşük enerjilerde en yüksek μ_{en}/ρ değerlerine sahiptir. Benzer şekilde Nonadecylic Asit ise (C oranı %76.6) en düşük μ_{en}/ρ değerlerini sunar.



(a) 0.010-0.1 MeV



(b) 0.10-20 MeV

Şekil 2. İncelenen bileşiklerin MCNP 6.1 ile hesaplanan kütlese enerji soğurma katsayıları (cm^2/g)

Bu enerji aralığının ötesinde, Compton saçılması baskın olduğundan, bir malzemenin μ_{en}/ρ değerlerinin Z 'ye bağımlılığı ortadan kalkmaktadır. Bu nedenle Şekil 2(b)'de

görüldüğü gibi tüm numunelerin μ_{en}/ρ değerleri birbirine yakın çıkmaktadır. Böylece malzemelerin foton soğuruculukları arasında dikkate değer bir fark gözlenmemekte ve hafif bir artışın ardından yüksek enerjilere kadar yavaşça bir azalım görülmektedir.

4. Sonuç ve Yorum

Bu çalışma, insan vücudunda yer alan bazı biyolojik bileşiklerin kütleli enerji soğurma katsayılarının Monte Carlo hesaplamaları ile belirlenmesini amaçlamıştır. Elde edilen değerler, bileşikler için NIST tablolarında yer alan element bazındaki veriler yardımıyla hesaplanan μ_{en}/ρ değerleri ile kıyaslanmış ve oldukça iyi uyumlar gözlenmiştir ($R^2 = 1$ mertebesinde). Bu sonuçlar ışığında, ölçüm imkanlarının laboratuvar ortamında kullanılabilecek gama pikleri ile sınırlı olması veya ilgilenilen bir malzemenin fiziksel olarak üretilmesindeki zorluklar nedeniyle ölçümlerin gerçekleştirilememesi gibi kısıtlamaların var olması durumlarında Monte Carlo yaklaşımının güvenle kullanılabileceğini göstermektedir. Öte yandan, μ_{en}/ρ niceliği soğurucu bir malzeme tarafından soğurulan kaynak fotonlarının ortalama enerjilerini ifade ettiğinden soğurulan dozu tahmin etmede daha gerçekçi sonuçlar elde etmeye imkan sağlar. Bu nedenle biyolojik özellikli materyallerde radyasyonun oluşturacağı etkilerin doğrudan hasar ile ilişkilendirilmesinin daha doğru bir yaklaşım olduğu düşünülmektedir.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyanı

Aycan Şengül: Araştırma, Biçimsel Analiz, Orijinal Taslak Yazımı.
Ahmet Bozkurt: Kavramsallaştırma, Metodoloji, Yazılım, Doğrulama, İnceleme ve Düzenleme.

Destek ve Teşekkür Beyanı

Bu çalışmanın yazarları olarak herhangi bir destek ve teşekkür beyanımız bulunmadığını bildiririz.

Çatışma Beyanı

Bu çalışmanın yazarları olarak herhangi bir çatışma beyanımız bulunmadığını bildiririz.

Etik Kurul Onayı ve/veya Aydınlatılmış Onam Bilgileri

Bu çalışmanın yazarları olarak herhangi bir etik kurul onayı ve/veya aydınlatılmış onam bilgileri beyanımız bulunmadığını bildiririz.

Kaynakça

- [1] T. E. Johnson, *Introduction to Health Physics*, New York, NY: McGraw-Hill Education, 2017.
- [2] J. K. Shultis and R. E. Faw, *Fundamentals of Nuclear Science and Engineering*, New York, NY: Marcel Dekker, 2002.
- [3] J. H. Hubbell, "Photon mass attenuation and energy-absorption coefficients," *Int. J. Appl. Radiat. Isot.*, 33, 269-1290, 1982.
- [4] M. J. Berger and J. Hubbell, *XCOM: Photon cross sections on a personal computer*, NBSIR-87-3597, National Bureau of Standards, Washington, DC (USA). 1987.
- [5] C. Sureka and C. Armpilia, *Radiation biology for medical physicists*, Boca Raton, FL: CRC Press, 2017.
- [6] M.S. Al-Buriah, H. Arslan, and B.T. Tonguç, "Mass attenuation coefficients, water and tissue equivalence properties of some tissues by Geant4, XCOM and experimental data," *Indian J. Pure Appl.*, 57, 433-437, 2019.

- [7] M. E. Phelps, E. J. Hoffman, and M. M. Ter-Pogossian, "Attenuation coefficients of various body tissues, fluids, and lesions at photon energies of 18 to 136 keV," *Radiology*, 117, 573-583, 1975.
- [8] A. Şahin and A. Bozkurt, "Monte Carlo calculation of mass attenuation coefficients of some biological compounds," *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fen Dergisi*, 14, 408-417, 2019.
- [9] A. Bozkurt and A. Sengul, "Monte Carlo approach for calculation of mass energy absorption coefficients of some amino acids," *Nucl. Eng. Technol. (In Press)*, 2021.
- [10] E. Ermis, F. Pilicer, E. Pilicer, and C. Celiktaş, "A comprehensive study for mass attenuation coefficients of different parts of the human body through Monte Carlo methods," *Nucl. Sci. Tech.*, 27, 54, 2016.
- [11] B.M. Ladhaf and P.P. Pawar, "Studies on mass energy-absorption coefficients and effective atomic energy-absorption cross sections for carbohydrates," *Radiat. Phys. Chem.*, 109, 89-94, 2015.
- [12] P. P. Pawar and G. K. Bichile, "Studies on mass attenuation coefficient, effective atomic number and electron density of some amino acids in the energy range 0.122–1.330 MeV," *Radiat. Phys. Chem.*, 92, 22-27, 2013.
- [13] P. Andreo, "Monte Carlo techniques in medical radiation physics," *Phys. Med. Biol.*, 36 (7), 861-920, 1991.
- [14] C. J. Werner (editor). *MCNP Users Manual - Code Version 6.2*, LA-UR-17-29981, Los Alamos National Laboratory, USA, 2017.