

T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

GAMA IŞINLARININ FARKLI MALZEMELERDE
SOĞURULMASININ İNCELENMESİ

Cihad TEKİN

Danışman: Doç. Dr. Abdullah Engin ÇALIK

Fizik Anabilim Dalı
Nükleer Fizik

İzmir
Eylül 2024

Cihad TEKİN tarafından YÜKSEK LİSANS tezi olarak sunulan “GAMA IŞINLARININ FARKLI MALZEMELERDE SOĞURULMASININ İNCELENMESİ” başlıklı bu çalışma Ege Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile Ege üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi'nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 02/09/2024 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği/oyçokluğu ile başarılı bulunmuştur.

Jüri üyeleri

İmza

Jüri Başkanı :

Raportör Üye :

Üye :

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “GAMA IŞINLARININ FARKLI MALZEMELERDE SOĞURULMASININ İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

04/09/2024

İmzası

Cihad TEKİN

ÖZET**GAMA IŞINLARININ FARKLI MALZEMELERDE
SOĞURULMASININ İNCELENMESİ**

TEKİN, Cihad

Yüksek Lisans Tezi, Fizik Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. A. Engin ÇALIK

Eylül 2024, 59 sayfa

Bu çalışmada, farklı enerjilerdeki gama ışınlarının çeşitli soğurucu malzemelerden geçişleri incelenmiştir. GEANT4 simülasyon programı ile elde edilen kütle soğurma katsayıları ile literatürdeki deneysel kütle soğurma katsayıları karşılaştırılmıştır. Simülasyon sonucu elde edilen kütle soğurma katsayıları ile deneysel kütle soğurma katsayıları arasında uyumsuzluk olduğu görülmüştür. Bu uyumsuzluk kesirsel soğurma denklemi kullanılarak giderilmiştir.

Caputo kesirsel türev tanımı kullanılarak tanımlanan ve çözülen soğurma denklemi kullanılarak yarı değer kalınlıklar için GEANT4'den elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlar arasındaki farkı düzelteren kesirsel türev mertebeleri hesaplanmıştır. Bu mertebelerinin soğurucu malzeme kütlesi ve gama enerjisi ile arasındaki ilişki araştırılıp, sonuç olarak malzeme kütlesi ve gama enerjisi arttıkça kesirsel mertebenin standart çözüme yaklaştığı gözlemlenmiştir.

Anahtar sözcükler: Gama Işınları, Soğurma Denklemi, Kesirsel Matematik, Caputo Kesirsel Türevi, GEANT4 Simülasyonu

ABSTRACT**INVESTIGATION OF ABSORPTION OF GAMMA RADIATION
IN DIFFERENT MATERIALS**

TEKİN, Cihad

M.Sc. in Department of Physics

Supervisor: Assoc. Prof. A. Engin ÇALIK

September, 2024 59 pages

In this study, the passage of gamma rays at different energies through various absorbing materials was examined. The mass attenuation coefficients obtained from the GEANT4 simulation were compared with the experimental mass absorption coefficients found in the literature. It was observed that there was a discrepancy between the mass absorption coefficients obtained from the simulation and the experimental ones. This discrepancy was corrected using the fractional absorption equation.

Fractional derivative orders, defined and solved using the absorption equation with the Caputo fractional derivative definition, were calculated to correct the difference between the results obtained from GEANT4 and the experimental results for half-value thicknesses. The relationship between these orders and the mass of the absorbing material and gamma energy was investigated, and it was observed that as the material mass and gamma energy increased, the fractional order approached the standard solution.

Keywords: Gamma Rays, Attenuation Equation, Fractional Calculus, Caputo Fractional Derivative, GEANT4 Simulation

ÖNSÖZ

Tez konusunu seçerken nükleer fizik, son derece ilgi çekici matematik yöntemler ve yazılım mühendisliği gibi farklı disiplinleri birleştirmenin, bu kadar kısa bir sürede bana öğretebileceklerinin farkında değildim. Daha önce de, yıllardır ticari projelerde yazılım geliştiriciliği yapıyor olmam ve bu alandaki birikimimi akademik bir çalışmada kullanma şansı yakalamam, tezin üzerinde çalışmamda beni en çok motive eden etkenlerden biri oldu.

Kesirsel matematiğin, gelişime çok açık ve çok farklı yaklaşımlarla tanımlanıyor olması ufuk açıcı. Uygulaması yapılabilecek alanları düşündüğünüzde, uçsuz bucaksız, henüz her köşesi keşfedilmemiş bir dünyayla karşılıyorsunuz. Bu tezin üzerinde çalışmak, bilim ve mühendisliğe çocukluğumdan beri olan merakımı en tatmin eden deneyim oldu.

İZMİR

02/09/2024

Cihad Tekin

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
İÇ KAPAK	ii
KABUL VE ONAY SAYFASI	iii
ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI	v
ÖZET	vii
ABSTRACT	ix
ÖNSÖZ	xi
İÇİNDEKİLER	xiii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xv
TABLOLAR DİZİNİ	xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xix
1 GİRİŞ	1
2 GAMA IŞIMASI	6
2.1 Gama Bozunumu Enerjisi	7
2.2 Gama Işınlarının Maddeyle Etkileşimi	8
2.2.1 Fotoelektrik Etki	10
2.2.2 Compton Saçılması	10
2.2.3 Çift Oluşum	10
3 KESİRSEL MATEMATİK	11
3.1 Kesirsel Türev Hesaplama Yöntemleri	13
3.1.1 Riemann-Liouville Kesirsel Türevi	13
3.1.2 Caputo Kesirsel Türevi	14
3.2 Soğurma Denkleminin Kesirsel Çözümü	14
4 SİMÜLASYON	17
4.1 GEANT4	17
4.2 Tasarım ve Mimari	18
4.3 Programın Yazılması	21
4.3.1 Geometri ve Soğurucu Malzemeler	21
4.3.2 Gama Kaynağı	23

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
4.3.3 Çalıştırma ve İzleme	24
5 HESAPLAR VE SONUÇLAR	28
5.1 Simülasyonla Kütle Soğurma Katsayısının Bulunması	28
5.2 Kesirsel Türev Mertebesinin Bulunması	34
6 TARTIŞMA	49
KAYNAKLAR DİZİNİ	51
TEŞEKKÜR	58
ÖZGEÇMİŞ	59



ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
1.1 GEANT4 uygulamasının Qt grafiksel arayüzlü bir ekran görüntüsü	4
2.1 $^{60}_{27}Co$ bozunma diyagramı (Ahmad et al., 2022)	6
2.2 Germanyumun farklı gama enerjileriyle gerçekleştirdiği etkileşim yöntemleri	9
3.1 $f(x) = x^2$ fonksiyonunun $0 < \alpha < 1$ aralığındaki kersirsel türev mertebeleri ile değişimi	13
4.1 GEANT4 araç kategorileri hiyerarşik şeması	19
4.2 Simülasyon geometrisi	21
4.3 5 Gama ışınının soğurucu malzemeden geçişi	25
4.4 100 Gama ışınının soğurucu malzemeden geçişi	25
4.5 10.000 Gama ışınının soğurucu malzemeden geçişi	25
5.1 Zn ve 279,12 keV enerjili gama ışınları için $\ln\left(\frac{I(x)}{I_0}\right) = f(x)$ değişimi	29
5.2 Altın ve 1115,5 keV enerjili gama ışınları için $\ln\left(\frac{I(x)}{I_0}\right) = f(x)$ değişimi	29
5.3 4Be için α 'nın gama enerjisine göre değişimi	36
5.4 6C için α 'nın gama enerjisine göre değişimi	36
5.5 ^{12}Mg için α 'nın gama enerjisine göre değişimi	36
5.6 ^{13}Al için α 'nın gama enerjisine göre değişimi	37
5.7 ^{16}S için α 'nın gama enerjisine göre değişimi	37
5.8 ^{22}Ti için α 'nın gama enerjisine göre değişimi	37
5.9 ^{26}Fe için α 'nın gama enerjisine göre değişimi	38
5.10 ^{28}Ni için α 'nın gama enerjisine göre değişimi	38
5.11 ^{29}Cu için α 'nın gama enerjisine göre değişimi	38
5.12 ^{30}Zn için α 'nın gama enerjisine göre değişimi	39
5.13 ^{40}Zr için α 'nın gama enerjisine göre değişimi	39
5.14 ^{41}Nb için α 'nın gama enerjisine göre değişimi	39
5.15 ^{42}Mo için α 'nın gama enerjisine göre değişimi	40
5.16 ^{47}Ag için α 'nın gama enerjisine göre değişimi	40

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Sayfa

5.17	$_{50}Sn$ için α 'nın gama enerjisine göre değişimi	40
5.18	$_{57}La$ için α 'nın gama enerjisine göre değişimi	41
5.19	$_{64}Gd$ için α 'nın gama enerjisine göre değişimi	41
5.20	$_{72}Hf$ için α 'nın gama enerjisine göre değişimi	41
5.21	$_{74}W$ için α 'nın gama enerjisine göre değişimi	42
5.22	$_{79}Au$ için α 'nın gama enerjisine göre değişimi	42
5.23	$_{82}Pb$ için α 'nın gama enerjisine göre değişimi	42
5.24	$_{90}Th$ için α 'nın gama enerjisine göre değişimi	43
5.25	$_{92}U$ için α 'nın gama enerjisine göre değişimi	43
5.26	$_{94}Pu$ için α 'nın gama enerjisine göre değişimi	43
5.27	88,09 keV enerjili gama ışınları için α 'nın soğurucu malzemelerin kütle numarasına göre değişimi	44
5.28	145,41 keV enerjili gama ışınları için α 'nın soğurucu malzemelerin kütle numarasına göre değişimi	44
5.29	208,36 keV enerjili gama ışınları için α 'nın soğurucu malzemelerin kütle numarasına göre değişimi	45
5.30	279,12 keV enerjili gama ışınları için α 'nın soğurucu malzemelerin kütle numarasına göre değişimi	45
5.31	411,8 keV enerjili gama ışınları için α 'nın soğurucu malzemelerin kütle numarasına göre değişimi	46
5.32	661,6 keV enerjili gama ışınları için α 'nın soğurucu malzemelerin kütle numarasına göre değişimi	46
5.33	1115,5 keV enerjili gama ışınları için α 'nın soğurucu malzemelerin kütle numarasına göre değişimi	47
5.34	1598 keV enerjili gama ışınları için α 'nın soğurucu malzemelerin kütle numarasına göre değişimi	47
5.35	2753,9 keV enerjili gama ışınları için α 'nın materyale soğurucu malzemelerin kütle numarasına göre değişimi	48

TABLOLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
4.1 Soğurucu olarak kullanılan malzemeler	23
4.2 Kullanılan gama kaynakları (Conner et al., 1970)	24
4.3 Maksimum soğurucu malzeme kalınlıkları - Enerji'ler keV, kalınlıklar mm cinsindedir	27
5.1 Gama enerjisi (<i>keV</i>) ve soğurucu malzemeye göre simülasyondan bulunan <i>kütle soğurma katsayıları</i> $\mu_{sim}(cm^2/g)$	30
5.2 Gama enerjisi (<i>keV</i>) ve soğurucu malzemeye göre simülasyondan bulunan <i>yarı değer kalınlıkları</i> $x_{1/2_{sim}}(g/cm^2)$	31
5.3 Gama enerjisi (<i>keV</i>) ve soğurucu malzemeye göre deneysel <i>kütle</i> <i>soğurma katsayıları</i> $\mu_{deney}(cm^2/g)$ (Conner et al., 1970)	32
5.4 Gama enerjisi (<i>keV</i>) ve soğurucu malzemeye göre deneysel <i>yarı</i> <i>değer kalınlıkları</i> $x_{1/2_{deney}}(g/cm^2)$	33
5.5 Gama enerjisi (<i>keV</i>) ve soğurucu malzemeye göre hesaplanan α kesirsel türev mertebeleri	35

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
μ	Kütle soğurma katsayısı
μ_{sim}	Simülasyondan hesaplanan kütle soğurma katsayısı
μ_{deney}	Deneysel kütle soğurma katsayısı
I	Gama ışınları şiddeti
$x_{1/2}$	Yarı değer kalınlığı
α	Kesirsel türev/integral mertebesi
D^α	Kesirsel türev operatörü
J^α	Kesirsel integral operatörü
${}^{RL}D^\alpha$	Riemann-Liouville kesirsel türev operatörü
${}^CD^\alpha$	Caputo kesirsel türevi
$\Gamma(z)$	Gama fonksiyonu
E_α	Mittag-Leffler fonksiyonu

1 GİRİŞ

Röntgen'in 1895 yılında x-ışınlarını(Röntgen, 1895), Paul Villard'ın 1900 yılında γ -ışınlarını keşfetmesi(Gerward, 1999) ile radyasyon kavramı özellikle fizik, mühendislik ve tıp dallarında birçok çalışmaya konu olmuştur. Bilim insanlarının bu mucizevi keşifleri verimli bir şekilde kullanmalarına rağmen x-ışınlarının ve γ -ışınlarının insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkileri, "radyasyondan korunma" başlığı altında bir takım önlemler alınmasına sebep olmuştur. Radyasyon kaynağından belli bir mesafede durulması, radyasyona maruz kalınan sürenin minimum tutulması ve zırlama yapılması radyasyondan korunma yöntemlerinin temel prensipleri olarak belirlenmiştir. Günlük yaşantımızda doğal radyasyonu önlemek imkansız olsa da, özellikle yapay radyasyon olarak adlandırılan x-ışınlarının ve γ -ışınlarının canlı sağlığı üzerindeki etkisini azaltmak, alınacak önlemler ile mümkün olabilir. Bu kapsamda bilim insanları öncelikle, radyasyon ile soğurucu malzeme (zırlama) arasındaki ilişkiyi

$$\frac{dI(x)}{dx} = -\mu_m I(x) \quad (1.1)$$

diferansiyel denklemi ile tanımlanmışlardır. Burada; x , soğurucu malzemenin kalınlığı; μ_m , kütle soğurma katsayısı ve $I(x)$, x kalınlığındaki soğurucu malzemedan geçen γ -ışını şiddetidir. (1.1) diferansiyel denkleminin standart çözümü

$$I(x) = I_0 e^{-\mu_m x} \quad (1.2)$$

şeklinde dir. I_0 , γ -ışını şiddetinin x kalınlığındaki soğurucu malzemedan geçmeden önceki şiddetidir. γ -ışınları sahip oldukları yüksek enerji nedeniyle yüksek yoğunluklu soğurucu malzemeler ile absorbe edilir. Bu soğurucu malzemelerin gücü ise (1.2) denklemi kullanılarak elde edilen yarı-değer kalınlık tanımı ile belirlenir. Yarı-değer kalınlık; başlangıçtaki γ -ışını şiddetini yarıya düşüren soğurucu malzeme kalınlığı olarak tanımlanmakta olup,

$$x_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu_m} \quad (1.3)$$

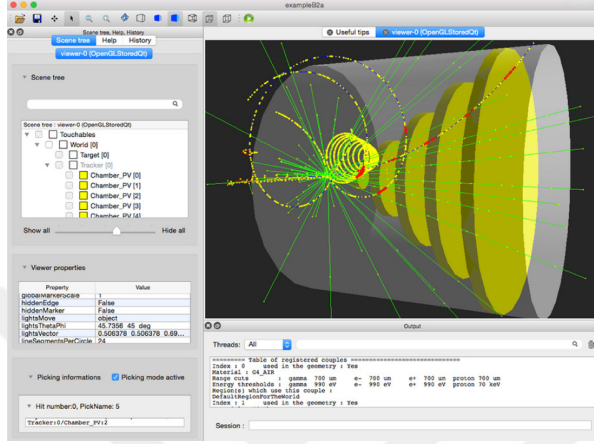
formülü ile ifade edilir.

Yüksek enerjilere sahip olması sebebiyle özellikle γ -ışınlarının insan sağlığını olumsuz etkilemeyecek şekilde absorbe edilmesi son derece önemlidir. Bu bağlamda, farklı enerjiye sahip γ -ışınlarının verimli bir şekilde soğurulması için kurulacak deneysel düzeneğe önceden karar vermek adına simülasyon çalışmaları yapılmaktadır (Gerward et al., 2001; Medhat and Wang, 2013; Singh et al., 2015a; Medhat, 2015; Singh et al., 2015b; Vahabi et al., 2017; Elbashir et al., 2019; Al-Buriahi et al., 2019; Akman et al., 2019; Arslan, 2019; Akyildirim et al., 2020; Kebaili et al., 2020; Şengül, 2023). Şöyle ki; Gerward ve arkadaşları, x-ışını ve γ -ışını soğurma katsayılarının hesaplanması için XCOM simülasyon programının Windows sürümünü geliştirmiştir (Gerward et al., 2001). Medhat ve Wang, 59.5, 81.0, 356.5, 661.6, 1173.3 ve 1332.5 keV enerjilerine sahip γ -ışınlarının farklı malzemeler için kütle soğurma katsayılarını GEANT4, XCOM ve deneysel olarak hesaplamışlardır (Medhat and Wang, 2013). Singh ve arkadaşları, 279.1 keV, 661.6 keV, 662 keV, 1115.5 keV, 1173 keV ve 1332 keV enerjilerine sahip γ -ışınlarının karbon çeliğinin ve paslanmaz çelik alaşımlarının kütle soğurma katsayılarını GEANT4 ve MCNP simülasyon kodlarını kullanarak hesaplamış, deneysel sonuçlarla kıyaslamıştır (Singh et al., 2015a). Medhat, 59.5, 80, 356, 661.6, 1173,2 ve 1332, keV foton enerjilerinde farklı tipteki kompozit malzemeler için kütle soğurma katsayılarını GEANT4 ile simüle etmiş olup, teorik ve deneysel sonuçlarla karşılaştırmıştır (Medhat, 2015). Singh ve arkadaşları, karbon, azot, silisyum, hava, sodyum iyodür ve bazı nükleer iz dedektörlerinin kütle soğurma katsayılarını 1 keV - 20 MeV aralığındaki enerjilere sahip γ -ışınları için GEANT4 simülasyon kodu kullanarak hesaplamıştır (Singh et al., 2015b). Vahabi ve arkadaşları, bazı polimer soğurucular için MCNP4C simülasyon kodu kullanarak kütle soğurma katsayılarını hesaplamışlardır. 59.5, 279.1, 511, 661.6, 662, 1115.5, 1173.2, 1274.5 ve 1332.5 keV enerjili γ -ışınları için mevcut deneysel verilerle ve XCOM programından elde edilen simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırma yapmışlardır (Vahabi et al., 2017). Elbashir ve arkadaşları, farklı enerji seviyelerindeki γ -ışınlarının $Bi_2O_3-ZnO-B_2O_3$ ve $TeO_2-ZnO-CdO-$

$Li_2O - V_2O_5$ cam sistemleri için MCNP5 ve GEANT4 simülasyon kodlarını kullanarak kütle soğurma katsayılarını belirlemiştir. Elde edilen sonuçları XCOM verileri ile karşılaştırmışlardır (Elbashir et al., 2019). Al-Buriahi ve arkadaşları, kas, yağ ve kan gibi bazı dokuların kütle soğurma katsayılarını GEANT4 simülasyonu kullanarak incelemişlerdir. Simüle sonuçları, literatüde bulunan deneysel ve XCOM verileri ile kıyaslamışlardır (Al-Buriahi et al., 2019). Akman ve arkadaşları, Bingöl ili ve Genç ilçesi sınırları içerisinde bulunan 8 farklı noktadan almış oldukları toprak numunelerinin zırlama parametreleri 15 farklı foton enerjisi için ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar XCOM ve FFAST programları ile elde edilen sonuçlar ile kıyaslanmıştır (Akman et al., 2019). Arslan yapmış olduğu çalışmada, yağ dokusu, kas dokusu ve kemik dokusu için kütle soğurma katsayılarını GEANT4 simülasyon paketi ile 20 keV - 50 MeV enerji aralığında foton enerjisi için incelemiştir (Arslan, 2019). Akyıldırım ve arkadaşları, zirkonyum silikat cam sisteminin radyasyon zırlama parametrelerini (kütle soğurma katsayıları, yarı-değer kalınlıkları vb.) FLUKA ve XCOM yazılımları ile elde etmiştir (Akyıldırım et al., 2020). Kebaili ve arkadaşları, üçlü lityum borotellürit sistemleri için 284 keV - 1.33 MeV enerjileri arasında gama ışını zırlama parametrelerini (kütle soğurma katsayıları, yarı-değer kalınlıkları vb.) GEANT4 ile simüle etmiştir (Kebaili et al., 2020). Şengül ise, insan vücudunda sentetik malzeme olarak kullanılan biyomalzemelerin lineer soğurma katsayılarını, yarı-değer kalınlıklarını ve onuncu-değer kalınlıklarını GAMOS 6.2 simülasyon programını kullanarak elde etmiştir. Elde ettikleri sonuçları, deneysel ve XCOM kodu ile elde ettiği sonuçlarla kıyaslamıştır (Şengül, 2023).

Günümüzde parçacık fiziği ve nükleer fizikteki ilerlemeler, geliştirilen yeni teorileri test edecek olan deneyleri de bir o kadar zorlu hale getirmiştir. Bu deneyler genelde inşa etmesi zor, kompleks ve maliyetli detektörleri, bu detektörlerden alınacak veriyi işleyecek büyük bilgisayar kümelerini ve tüm bunların operasyonunu yürütecek onlarca bilimciyi gerektirmektedir. Tüm bu zorluklar parçacık fiziğinde bilgisayar simülasyonlarının öneminin anlaşılmasını sağlamış, ilgili teknolojilerin geliştirilmesini hızlandırmıştır.

GEANT4 (GEometry ANd Tracking), üzerinde parçacıkların madde içerisinde geçişinin simülasyonunun yapıldığı bir platformdur ve parçacık, yüksek enerji, nükleer ve hızlandırıcı fiziğinden, medikal ve uzay bilimine kadar farklı alanlarda uygulamaları yapılmaktadır (Allison et al., 2006). Bu tez çalışmasında da gama ışınlarının madde içinden geçişini incelemek için kullanılmıştır.



Şekil 1.1: GEANT4 uygulamasının Qt grafiksel arayüzlü bir ekran görüntüsü

GEANT4'un temelleri 1993 yılında CERN ve KEK laboratuvarlarında yapılan iki farklı çalışmanın sonuçlarıyla atılmıştır. Bu çalışmalarda nesne yönelimli programlama, paralel çalıştırma, çoklu kullanım (multithreading) gibi modern bilgisayar teknolojilerinin o zamanlarda kullanılan GEANT3 programını nasıl geliştirebileceği araştırılmış, sonuçları CERN Detektör Araştırma ve Geliştirme Komitesine (DRDC) sunulmuştur. Ardından da dünya çapında 100'den fazla bilimci ve mühendisin çalışmasıyla 1999'da ilk versiyonu çıkmıştır (Agostinelli et al., 2003).

Simülasyonu yapılan fiziksel süreçlerde alınan sonuçlar gerçeğe çok yakın olabileceği de, gerçek fiziksel deneylerden alınan sonuçların hassasiyetinde olması beklenemez. Bu yüzden bu tez çalışmasında simülasyondan deneye yakın sonuçlar alınabilmesi için kesirsel matematikten faydalanılmış, kesirsel türev mertebesinin sonuçlara etkisi araştırılmıştır.

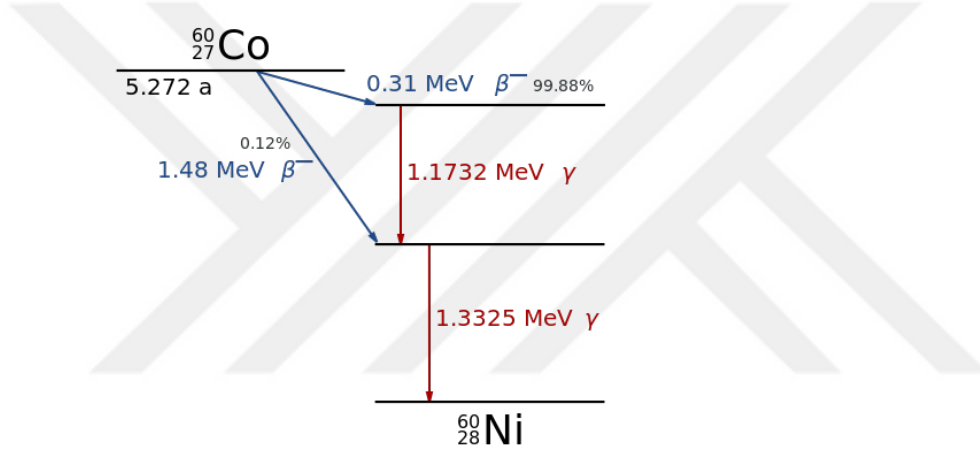
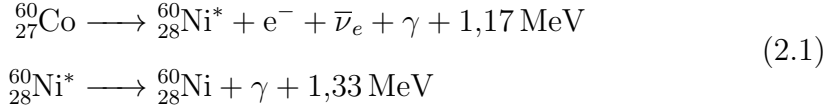
Kesirsel matematik, standart tam sayılı türev ve integral mertebesinin gerçek sayılara genelleştirilmiş halidir. Kökeni Leibniz'e kadar dayanmaktadır

ve o zamandan bugüne bir çok matematikçi bu konu üzerinde çalışmıştır (Podlubny, 1999). Kesirsel türev ve integrallerin literatürde bir çok tanımı vardır. Bu çalışmada Riemann-Liouville ve Caputo tanımları tanıtılmış, soğurma denkleminin Caputo tanımına göre çözümü kullanılmıştır.

Bu çalışmada; GEANT4 simülasyonu ile 88.09 keV, 145.41 keV, 208.36 keV, 279.12 keV, 411.80 keV, 661.60 keV, 1115.50 keV, 1598.00 keV ve 2753.90 keV enerjili gama ışınları için Berilyum (Be), Karbon (C), Magnezyum (Mg), Alüminyum (Al), Kükürt (S), Titanyum (Ti), Demir (Fe), Nikel (Ni), Bakır (Cu), Çinko (Zn), Zirkonyum (Zr), Niyobyum (Nb), Molibden (Mo), Gümüş (Ag), Kalay (Sn), Lantan (La), Gadolinyum (Gd), Hafniyum (Hf), Tungsten (W), Altın (Au), Kurşun (Pb), Toryum (Th), Uranyum (U) ve Plütonyum (Pu) soğurucu malzemeler için kütle soğurma katsayıları ve yarı-değer kalınlıkları hesaplanmıştır. GEANT4 simülasyonu ile elde edilen yarı-değer kalınlıkların, deneysel yarı-değer kalınlıklar ile uyumlu olmadığı görülmüştür. Bu uyumsuzluğu giderebilmek için kesirsel soğurma denklemini kullanarak deneysel verileri ve simülasyon sonuçlarını eşdeğer yapan kesirsel türev mertebeleri hesaplanmıştır. Kesirsel türev mertebelerinin γ -ışını enerjilerine ve soğurucu malzemelerin özelliklerine bağlılığı araştırılmıştır.

2 GAMA IŞIMASI

Alfa ve beta bozunmaları, hatta çoğu nükleer reaksiyon, ürün çekirdeği uyarılmış halde bırakır. Bu uyarılmış çekirdek kısa süre içerisinde bir ya da daha fazla gama ışınını yayarak kararlı hale geçer. Örneğin; $^{60}_{27}\text{Co}$ önce beta bozunumu ile 0,31 MeV enerjili elektron ve $1,17\text{ MeV}$ enerjili gama yayımlayıp uyarılmış $^{60}_{28}\text{Ni}^*$ oluşturur. Sonra bu uyarılmış haldeki $^{60}_{28}\text{Ni}^*$ tekrar $1,33\text{ MeV}$ enerjili gama ışını yayarak taban enerjili hale geçer:



Şekil 2.1: $^{60}_{27}\text{Co}$ bozunma diyagramı (Ahmad et al., 2022)

Gama ışınları da x ışınları ve görünür ışık gibi elektro-manyetik radyasyon fotonudur ve enerjileri atom çekirdeğinin enerji seviyeleri arasındaki farklar olan 0,1 ile 10 MeV arasında değişir. Bu enerji seviyelerine karşılık gelen dalga boyları 10^4 ve 100 fm arasındadır. Dalga boyları spektrumdaki diğer elektro-manyetik dalgalara göre çok daha kısadır. Örneğin, görünür ışıktan 10^6 kat daha kısadır.

Nükleer spektroskopinin detayları, uyarılmış durumlar hakkındaki bilgiye bağlıdır ve bu nedenle gama ışını yayınlanması üzerine olan çalışmalar nükleer spektroskopinin standart tekniği haline gelmiştir. Bu yöntemin kullanışlı

olmasının sebeplerinden biri de gama ışınlarının gözlemlenmesinin daha kolay olması (örneğin hava içinde ihmal edilebilir bir miktarda soğurulur ve saçılır) ve bu ışınların enerjilerinin ve dolayısıyla uyarılmış durumların enerjilerinin doğru bir şekilde ölçülebilmesidir. Ayrıca gama ışını yayınlanması ve gama ışını yayınlanması ile gerçekleşen iç dönüşümün incelenmesi, uyarılmış durumların spinlerinin ve paritelerinin açıklanmasını sağlar (Krane, 1988).

2.1 Gama Bozunumu Enerjisi

Durgun kütlesi M olan bir çekirdeğin bozunmayla, başlangıçtaki uyarılmış E_i enerjisinden E_f enerjisine geçişi ele alındığında, momentumun korunumu için ürün çekirdeğin p_R geri tepme momentumuna ve buna karşılık gelen ($T_R = p_R^2/2M$) T_R kinetik enerjisine sahip olması gerekir. Toplam enerji ve momentumun korunumundan:

$$\begin{aligned} E_i &= E_f + E_\gamma + T_R \\ 0 &= \mathbf{p}_R + \mathbf{p}_\gamma \end{aligned} \quad (2.2)$$

elde edilir. Buradan da $p_R = p_\gamma$ olduğu görülebilir; ürün çekirdeğin momentumun büyüklüğü gamanın momentumuna eşit ama ters yönde bir momentuma sahiptir. $\Delta E = E_i - E_f$ ve gamanın relativistik enerjisi $E_\gamma = cp_\gamma$ denklemleri kullanılarak:

$$\Delta E = E_\gamma + \frac{E_\gamma^2}{2Mc^2} \quad (2.3)$$

elde edilir. Çözümü de:

$$E_\gamma = Mc^2 \left[-1 \pm \left(1 + 2 \frac{\Delta E}{Mc^2} \right)^{1/2} \right] \quad (2.4)$$

olarak bulunur. Enerji farkı ΔE genelde MeV seviyesinde, A çekirdeğin kütle numarası olmak üzere, durgun $Mc^2 = A * 10^3$ de MeV seviyesindedir. Böylece $\Delta E \ll Mc^2$ olduğu anlaşılır ve bu yüzden kare kök açılımındaki sadece ilk üç terimi aldığımızda 10^{-3} ile 10^{-4} arasında hassasiyetle gamanın enerjisi:

$$E_\gamma \cong \Delta E - \frac{(\Delta E)^2}{2Mc^2} \quad (2.5)$$

olarak bulunur. Bu çözümden $\Delta E \cong E_\gamma$ ile 2.3 denkleminde ulaşılmıştır.

Gama ışınının tam enerjisi ΔE bozunum enerjisinden biraz daha azdır. Bu geri tepme düzeltmesi genelde zaten deneysel ölçümün hata payı seviyelerinden daha küçük olan, ihmal edilebilecek 10^{-3} seviyelerindedir. Düşük enerjili gama ışınları yapan çekirdekte bu geri tepme enerjisi 1 eV değerinden daha küçüktür ve ihmal edilebilir. Yüksek enerjili gama ışınlarında ise (örneğin nötron yakalamasıyla oluşan 5-10 MeV seviyelerindeki gama ışınları) geri tepme enerjisi 100 eV seviyelerine çıkar ve bu enerji atomun madde içerisindeki konumunu değiştirmeye yeterli olabilir. Bu etkiye *radyasyon hasarı* denir ve katıların incelenmesinde önemli bir rol oynar. (Krane, 1988)

2.2 Gama Işınlarnın Maddeyle Etkileşimi

Gama ışınlarının herhangi bir madde içinden geçerken soğurulma olasılığı, o maddenin kalınlığına ve yoğunluğuna bağlıdır. Bu kapsamda, gama ışını şiddetinin soğurucu kalınlığına bağlı olarak değişimi

$$\frac{dI(x)}{dx} = -\mu_m I(x) \quad (2.6)$$

diferansiyel denklemi ile verilmektedir. Bu diferansiyel denklemin çözümü

$$\begin{aligned} \int \frac{dI(x)}{I(x)} &= \int -\mu_m dx \\ \ln I(x) &= -\mu_m x + C \\ I(x) &= e^{-\mu_m x + C} \end{aligned}$$

şeklinde elde edilir. Burada $x = 0$ için çözüme devam edilirse

$$I(0) = I_0 = e^C$$

ifadesi elde edilir. (2.6) diferansiyel denkleminin çözümü

$$I(x) = I_0 e^{-\mu_m x} \quad (2.7)$$

şeklinde standart soğurma denklemi elde edilir. (2.7) denkleminde; I_0 , başlangıçtaki ($x = 0$) gama ışını şiddetidir. Bu şiddeti yarıya düşüren kalınlığa yarı-

değer kalınlık denilir. Yarı-değer kalınlık $x_{1/2}$ sembolü ile gösterilmekte olup,

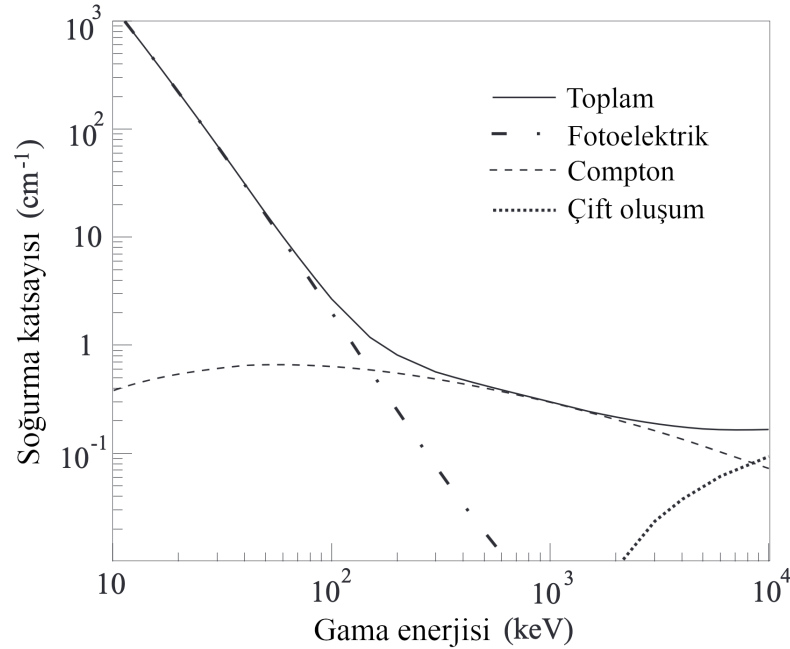
$$\begin{aligned} \frac{I_0}{2} &= I_0 e^{-\mu_m x_{1/2}} \\ x_{1/2} &= \frac{\ln 2}{\mu_m} \end{aligned} \quad (2.8)$$

şeklinde tanımlanır. Burada μ_m , kütle soğurma katsayısı olup, lineer soğurma katsayısının (μ) yoğunluğa (ρ) bölümü ile

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho}$$

şeklinde tanımlanır.

Gama ışınları soğurucu malzeme içinden geçerken üç fiziksel süreçle madde ile etkileşir. Bunlar *fotoelektrik etki*, *çift oluşum* ve *Compton saçılması*dır. Düşük enerjili (0.01-0.5 MeV) gama ışınları daha çok fotoelektrik etki, orta seviye (0.1-10 MeV) Compton saçılması, yüksek enerjili (1.02 MeV'den yukarı) gama ışınlarında çift oluşum yoluyla etkileşim gerçekleştirirler. Şekil 2.2'de, germanyum soğurucu malzemenin farklı gama enerjileri için hangi etkileşim yönteminin ne oranda gerçekleştirdiği gösterilmektedir.



Şekil 2.2: Germanyumun farklı gama enerjileriyle gerçekleştirdiği etkileşim yöntemleri

2.2.1 Fotoelektrik Etki

Fotoelektrik etki, gama fotonunun enerjisini atom elektronuna aktarır, elektronu atomdan koparmasına denir. Elektronlar atoma *bağlanma enerjisi* adı verilen enerjiyle bağlıdır ve elektronun atomdan kopabilmesi için, gelen fotonun en az bu enerjiye sahip olması gerekir.

2.2.2 Compton Saçılması

Compton saçılması, gelen gama fotonunun enerjisinin bir kısmını atom elektronuna aktarır, daha düşük bir enerjiyle, farklı bir yönde devam etmesine denir.

2.2.3 Çift Oluşum

Çift oluşum, gelen gama fotonunun, atom çekirdeğinin elektrik alanıyla etkileşerek, enerjisinin elektron-pozitron çifti kütlesine dönüşmesine denir. En az iki elektron kütle enerjisi olan 1,02 MeV enerjiye sahip gama fotonları çift oluşum gerçekleştirebilir.

3 KESİRSEL MATEMATİK

Bir $f(x)$ fonksiyonu üzerine etki eden tam sayı mertebeli türev ve integral işlemcileri sırasıyla

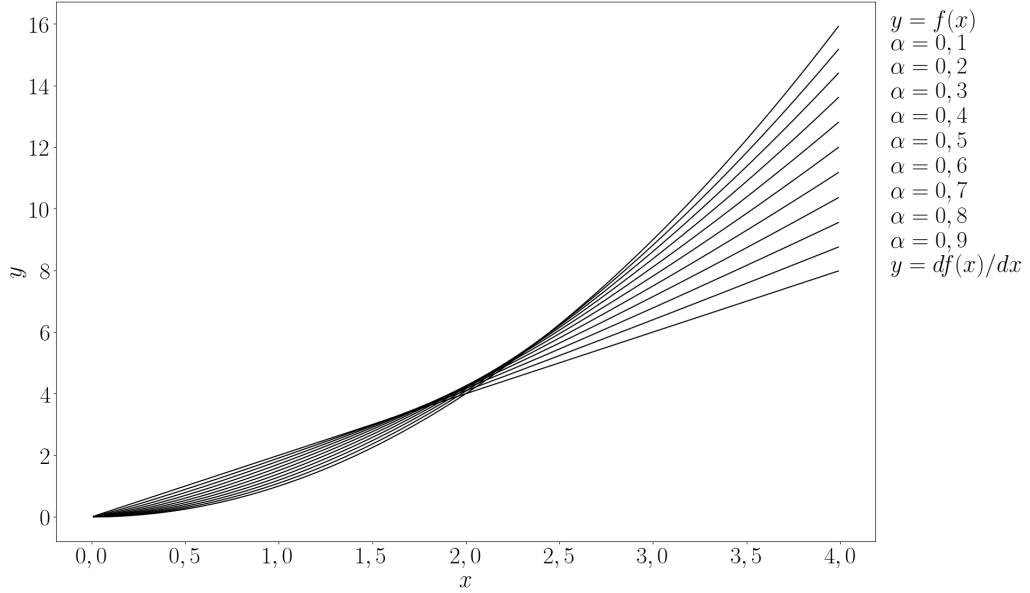
$$Df(x) = \frac{d}{dx}f(x)$$

$$Jf(x) = \int_0^x f(x)dx$$

şeklinde tanımlanır. Burada D ; türev operatörü, J ise integral işlemcisidir. Eğer bu tam sayı mertebeli türev ve integral işlemcileri, kesirsel mertebeli olacak şekilde genelleştirilirse matematiğin bir alt dalı olan kesirsel matematik tanımı yapılır. Kesirsel matematik ilk olarak 1600'lü yılların sonlarında L'Hospital ile Leibniz'in mektuplaşmalarında ortaya çıktığı düşünülmektedir. Leibniz, $y(x) = x$ olması durumunda $\frac{d^{1/2}y(x)}{dx^{1/2}} = 2\sqrt{\frac{x}{\pi}}$ çözümünü L'Hospital'e sunmuştur. Leibniz'in bilim dünyasına sunmuş olduğu bu çözüm ile kesirsel matematik, 300 yılı aşkın bir süredir, özellikle fen ve mühendisliğin birçok alanına konu olmuştur. Fizikte; nükleer bozunma denklemi (Çalık et al., 2013, 2014), radyasyon soğurma denklemi (Şen and Çalık, 2014; Şen et al., 2014, 2019), Bateman denklemi (Cruz-Lopez and Espinosa-Paredes, 2022; Jornet, 2023), kondansatör dolun ve boşalma denklemleri (Ertik et al., 2015) ve kinematik hareket denklemleri (Elzahar et al., 2020), kimyada; lambert-beer yasası (Casasanta et al., 2012, 2022) ve kimyasal kinematik denklemler (Qureshi and Aziz, 2020), mühendislikte;RC-LC-RLC devrelerini tanımlayan diferansiyel denklemler (Çalık et al., 2016; Gomez-Aguilar et al., 2017), Hooke yasası (Gomez-Aguilar et al., 2012, 2015), elektronik sistemleri tanımlayan diferansiyel denklemler (Podlubny, 1999) gibi birçok konu ve kavram kesirsel matematik kullanılarak yeniden incelenmiştir. Çalık ve arkadaşları; ilk defa kesirsel matematik kullanarak nükleer bozunma denklemini çözmüşlerdir. Elde ettikleri çözüm ile deneysel yarı-ömür değerleri ile kesirsel teorik yarı-ömür sonuçlarını eşdeğer kılan kesirsel türev mertebelerini belirlemiştir (Çalık et al., 2013). Yine Çalık ve arkadaşları; Sb, Tm, Lu, Ta, Re, Ir, Au, Tl ve Bi gibi küresel proton yayıcıların yarı-ömür değerlerini kesirsel matematik ile hesap-

lamışlardır (Çalık et al., 2014). Şen ve arkadaşları; soğurma denklemini ilk defa Caputo kesirsel türevi ile çözmüş, farklı radyoaktif beta kaynakları kullanarak alüminyum soğurucular için deneysel ve standart teorik yarı-değer kalınlıkları arasındaki uyumsuzluğu kesirsel matematik kullanarak gidermişlerdir (Şen and Çalık, 2014), (Şen et al., 2014). Benzer hesaplamaları onuncu-değer kalınlıkları için de yapmışlardır (Şen et al., 2019). Cruz-Lopez ve Espinosa-Paredes ile Jornet farklı yıllarda, nükleer fizikte seri bir radyoaktif bozunmayı anlatan Bateman denklemlerini kesirsel matematik kullanarak incelemişlerdir (Cruz-Lopez and Espinosa-Paredes, 2022; Jornet, 2023). Casasanta ve arkadaşları farklı yıllarda, bir çözelti içinden geçen ışığın şiddetindeki değişimi ifade eden Lambert-Beer Yasasını kesirsel matematik kullanarak incelemişlerdir (Casasanta et al., 2012, 2022). Qureshi ve Aziz; kimyasal kinetik reaksiyonları tanımlayan diferansiyel denklemleri Caputo kesirsel türev operatörü ile yeniden tanımlamışlardır (Qureshi and Aziz, 2020). Çalık ve arkadaşları; LC elektrik devresinde yükün zamanla değişimini ifade eden ikinci mertebeden diferansiyel denklemi kesirsel matematik ile yeniden çözmüşlerdir (Çalık et al., 2016). Gomez-Aguilar ve arkadaşları; RC, LC ve RL elektrik devrelerindeki değişimleri ifade eden diferansiyel denklemleri kesirsel matematik kullanarak yeniden tanımlamışlardır (Gomez-Aguilar et al., 2017). Gomez-Aguilar ve arkadaşları; kütle-yay ve yay-damper gibi mekanik salınımları ifade eden sistemleri kesirsel matematik kullanarak incelemişlerdir (Gomez-Aguilar et al., 2012, 2015). Ayrıca Podlubny, kesirsel matematiğin elektrik devrelerine uygulanışını ele almıştır (Podlubny, 1999).

Kesirsel matematik, çeşitli malzemelerin ve fiziksel süreçlerin hafıza ve kalıtsal özelliklerini tanımlamak için bir matematiksel yöntem olarak kullanılabilir. Bu tür etkiler klasik modellerde genellikle göz ardı edilebilir ve tam sayı mertebeli modellerle karşılaştırıldığında kesirli matematiğin sunduğu avantajlardan biridir. Kesirsel matematik, yukarıda örnekleri verildiği gibi bilimin farklı birçok alanında kendini gösterir. Şekil 3.1'de $f(x) = x^2$ fonksiyonunun $0 < \alpha < 1$ aralığındaki kesirsel türev mertebeleri ile nasıl değiştiği gösterilmiştir.



Şekil 3.1: $f(x) = x^2$ fonksiyonunun $0 < \alpha < 1$ aralığındaki kesirsel türev mertebeleri ile değişimi

3.1 Kesirsel Türev Hesaplama Yöntemleri

En yaygın kesirsel türev tanımları; Grünwald-Letnikov, Riemann-Liouville ve Caputo kesirsel türev tanımlarıdır. Bu çalışmada; daha çok analitik hesaplamalar için kullanılan Riemann-Liouville ve Caputo kesirsel türev tanımlarına yer verilmiştir.

3.1.1 Riemann-Liouville Kesirsel Türevi

En genel tanımı ile Riemann-Liouville kesirsel türev tanımı, $m - 1 < \alpha \leq m$ ve $m \in \mathbb{N}^+$ olmak üzere:

$$\begin{aligned} {}_a^{RL}D_x^\alpha f(x) &= D^m J^{m-\alpha} f(x) \\ &= \frac{d^m}{dx^m} \left[\frac{1}{\Gamma(m-\alpha)} \int_a^x (x-t)^{m-\alpha-1} f(t) dt \right] \end{aligned} \quad (3.1)$$

şeklinde tanımlanır. Burada; m pozitif doğal sayıları alan türev mertebesi, α kesirsel türev mertebesi ve $\Gamma(m-\alpha)$ ise gama fonksiyonu olarak tanımlanır. Gama fonksiyonu en genel hali ile

$$\Gamma(z) = \int_0^\infty t^{z-1} e^{-t} dt \quad (3.2)$$

integrali ve

$$\Gamma(z) = (z - 1)! \quad (3.3)$$

$$\Gamma(z + 1) = z! \quad (3.4)$$

faktöriyel fonksiyonu olarak tanımlanır.

3.1 Riemann-Liouville tanımında $\alpha = m$ olması durumunda standart türev tanımı elde edilmektedir (Podlubny, 1999).

3.1.2 Caputo Kesirsel Türevi

Caputo kesirsel türev tanımı, 3.1 Riemann-Liouville tanımındaki D^m türev operatörü ile $J^{m-\alpha}$ integral işlemcisinin yer değiştirilmesi ile elde edilir.

Caputo kesirsel türevi, $\alpha > 0$, $m - 1 < \alpha \leq m$ ve $m \in N^+$ olmak üzere:

$$\begin{aligned} {}^C D_x^\alpha f(x) &= J^{m-\alpha} D^m f(x) \\ &= \frac{1}{\Gamma(m-\alpha)} \int_a^x (x-t)^{m-\alpha-1} f^{(m)}(t) dt \end{aligned} \quad (3.5)$$

şeklinde tanımlanır.

Caputo kesirsel türev tanımı, Riemann-Liouville tanımında olduğu gibi $\alpha = m$ durumlarında standart türev tanımına dönüşür. Caputo kesirsel türev tanımı, özellikle fizik ve mühendislik uygulamalarında en çok tercih edilen tanımdır (Podlubny, 1999).

3.2 Soğurma Denkleminin Kesirsel Çözümü

Gama ışını şiddetinin herhangi bir soğurucu malzeme kalınlığıyla değişimi 2.6 denklemi ile, standart çözümü de 2.7 denklemiyle verilmiştir. 2.6 denklemindeki tam sayı mertebeli türev operatörü olan D ifadesi, α kesirsel türev mertebesi olacak şekilde yeniden yazılırsa:

$$D^\alpha I(x) = -\mu^\alpha I(x) \quad (3.6)$$

elde edilir. 3.5 Caputo kesirsel türev tanımına göre 3.6 denklemini tekrar düzenlenirse:

$$J^{m-\alpha} D^m I(x) = -\mu^\alpha I(x) \quad (3.7)$$

$$J^m D^m I(x) = -\mu^\alpha J^\alpha I(x) \quad (3.8)$$

$$I(x) - \sum_{k=0}^{m-1} I^{(k)}(0) \frac{x^k}{k!} = -\mu^\alpha J^\alpha I(x) \quad (3.9)$$

elde edilir. 2.6 denkleminin birinci mertebeden bir diferansiyel denklem olması sebebiyle $m = 1$ için çözüme devam edilirse,

$$I(x) = I(0) - \mu^\alpha J^\alpha I(x) \quad (3.10)$$

halini alır. Bu denkleme Laplace dönüşümü uygulanıp, sabitin ve n katlı integralin dönüşümleri yerlerine yazılırsa:

$$\mathcal{L}\{I(x)\} = \mathcal{L}\{I(0)\} - \mu^\alpha \mathcal{L}\{J^\alpha I(x)\} \quad (3.11)$$

$$\mathcal{L}\{I(x)\} = \frac{I(0)}{s} - \frac{\mu^\alpha}{s^\alpha} \mathcal{L}\{I(x)\} \quad (3.12)$$

$$\mathcal{L}\{I(x)\} = I(0) \frac{s^{\alpha-1}}{\mu^\alpha + s^\alpha} \quad (3.13)$$

elde edilir. Ters Laplace dönüşümü uygulandığında:

$$I(x) = I(0) \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{s^{\alpha-1}}{\mu^\alpha + s^\alpha} \right\} \quad (3.14)$$

elde edilir. Taylor serisine açıldığında:

$$\begin{aligned} I(x) &= I(0) \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{1}{s} \frac{1}{1 + \frac{\mu^\alpha}{s^\alpha}} \right\} \\ &= I(0) \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{1}{s} \left[1 - \frac{\mu^\alpha}{s^\alpha} + \frac{\mu^{2\alpha}}{s^{2\alpha}} - \frac{\mu^{3\alpha}}{s^{3\alpha}} + \dots \right] \right\} \\ &= I(0) \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{1}{s} - \frac{\mu^\alpha}{s^{\alpha+1}} + \frac{\mu^{2\alpha}}{s^{2\alpha+1}} - \frac{\mu^{3\alpha}}{s^{3\alpha+1}} + \dots \right\} \\ &= I(0) \left[\mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{1}{s} \right\} - \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{\mu^\alpha}{s^{\alpha+1}} \right\} + \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{\mu^{2\alpha}}{s^{2\alpha+1}} \right\} - \dots \right] \\ &= I(0) \left[1 - \mu^\alpha \frac{x^\alpha}{\alpha!} + \mu^{2\alpha} \frac{x^{2\alpha}}{(2\alpha)!} - \mu^{3\alpha} \frac{x^{3\alpha}}{(3\alpha)!} + \dots \right] \\ &= I(0) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-\mu^\alpha x^\alpha)^n}{(n\alpha)!} \end{aligned} \quad (3.15)$$

olarak bulunur. Faktöriyel kısım yerine 3.3 ile verilen gama fonksiyonunu yazıldığında:

$$I(x) = I(0) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-\mu^\alpha x^\alpha)^n}{\Gamma(n\alpha + 1)} \quad (3.16)$$

elde edilir. Bu çözümün toplam sembollü kısmı Mittag-Leffler fonksiyonudur ve aşağıdaki şekilde tanımlanır (Mittag-Leffler, 1903):

$$E_\alpha(z) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{z^k}{\Gamma(\alpha k + 1)} \quad (3.17)$$

$I(0) \rightarrow I_0$ başlangıç durumu ve Mittag-Leffler fonksiyonu yerine yazıldığında:

$$I(x) = I_0 E_\alpha(-\mu^\alpha x^\alpha) \quad (3.18)$$

bulunur. Bu çözüm 2.6 denkleminin kesirsel çözümüdür. Elde edilen bu kesirsel soğurma denklemi ilk defa beta parçacıklarının alüminyum malzemelerde soğurulması çalışmalarında kullanılmıştır (Şen and Çalık, 2014; Şen et al., 2014).

4 SİMÜLASYON

Modern deneysel bilimde önemli bir trend, karmaşık dedektörlerin tasarımı ve ürettikleri verilerin yorumlanmasında simülasyona olan artan bağımlılıktır. Gerçekten de, simülasyon, yüksek enerji fiziği ve uzay bilimleri gibi alanlarda kritik görev haline gelmiştir. (Allison et al., 2016)

4.1 GEANT4

GEANT4, parçacıkların madde içerisinde geçişini simüle etmeye yarayan bir araçlar paketidir. İçine elektromanyetik, hadronik, optik gibi fiziksel süreçler, uzun ömürlü parçacıklar, materyaller ve elementler ile 250 eV'den TeV'a kadar enerji spektrumunu kapsayan veri setleri dahil edilmiştir. GEANT4 ile fiziksel modeller kullanıp, kompleks geometrik yapılarla, parçacık fiziği, nükleer fizik, hızlandırıcı tasarımı, uzay mühendisliği ve medikal fizik gibi farklı disiplinlerde çok çeşitli uygulamalar tasarlanabilmektedir. İçinde bulunan araçlar dünya çapında fizikçi ve yazılım mühendislerinin iş birliği ile geliştirilmiştir.

GEANT4'un gelişim geçmişi, 1993 yılında CERN ve KEK'te bağımsız olarak yapılan iki çalışmaya dayanmaktadır. Her iki grup da, modern bilgi işlem tekniklerinin mevcut GEANT3 programının sunduklarını nasıl geliştirebileceğini araştırmak istemiştir. Bu iki faaliyet birleşmiş ve CERN Dedektör Araştırma ve Geliştirme Komitesi'ne (DRDC, CERN Detector Research and Development Committee), nesne yönelimli teknolojiye dayalı bir simülasyon programı inşa etme önerisi sunmuştur. Ortaya çıkan proje RD44 olarak isimlendirilmiş; Avrupa, Rusya, Japonya, Kanada ve Amerika Birleşik Devletleri'nden 10'dan fazla deneyin katkılarıyla 100'den fazla bilim insanı ve mühendisinin çabalarını içeren küresel bir işbirliği haline gelmiştir. Ar-Ge aşaması, ilk üretim sürümünün Aralık 1998'de teslim edilmesiyle tamamlanmıştır. Daha sonra araç takımının geliştirilmesini ve iyileştirilmesini sürdürmek, bakımını yapmak ve kullanıcı desteği sağlamak için GEANT4 İşbirliği, Ocak 1999'da kurulmuştur. (Agostinelli et al., 2003)

4.2 Tasarım ve Mimari

Parçacıkların madde içerisinde ilerleyişi simülasyonu aşağıdaki başlıkları kapsar:

- Geometri ve materyal
- Madde-parçacık etkileşimi
- Fiziksel süreç ve etkileşme takibi
- Çarpışma/etkileşim yönetimi ve sayısallaştırma
- Gerçekleşen olayların ve yolların yönetimi
- Görselleştirme
- Kullanıcı ara yüzü

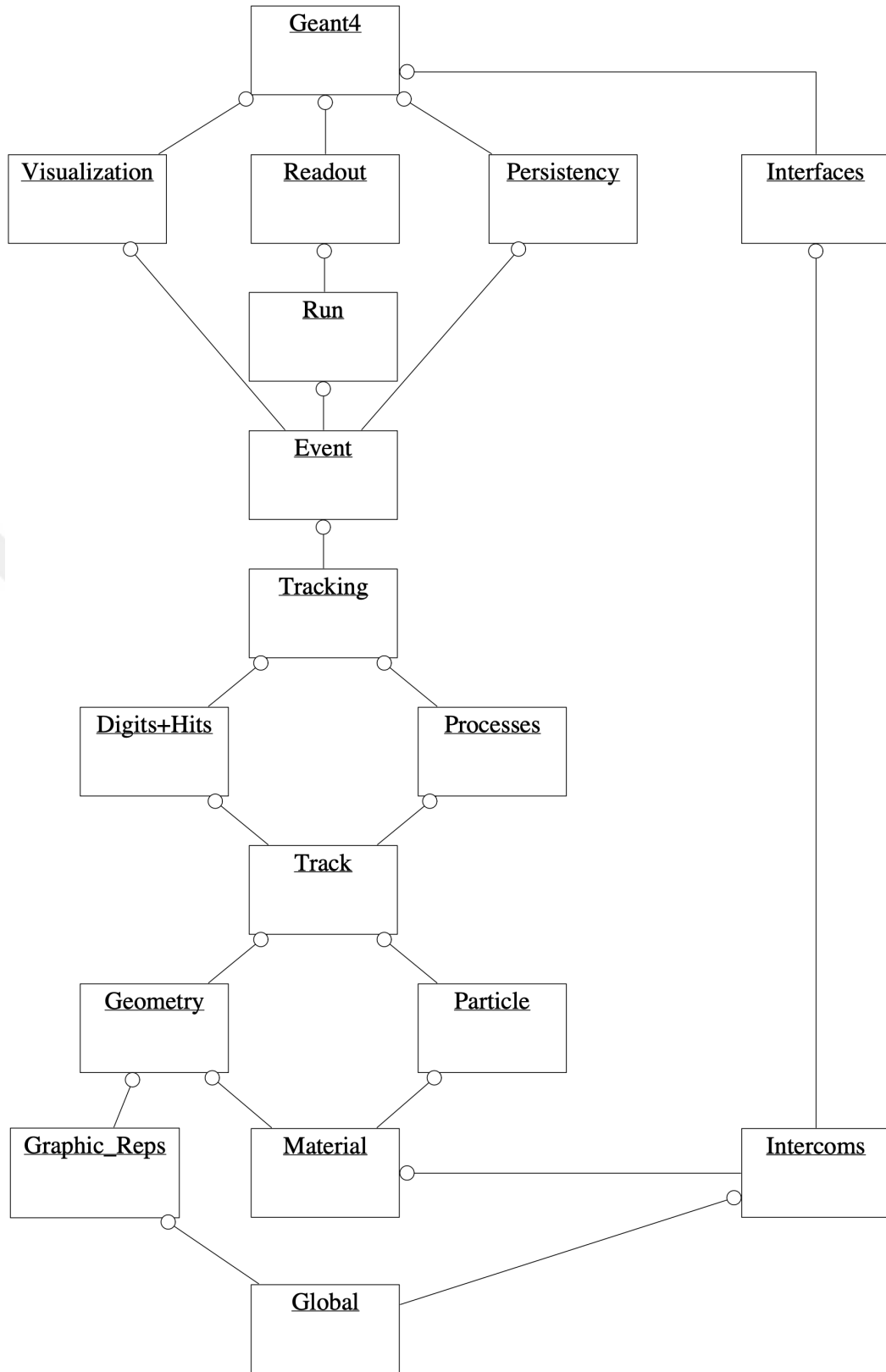
GEANT4 araç takımı, kullanıcıya farklı şekil ve malzemelerdeki (muhtemelen büyük bir sayıda) bileşenlerle geometrik bir model oluşturma imkanı sunar ve "duyarlı" öğeleri tanımlayarak detektör tepkilerini simüle etmek için gerekli bilgileri (etkileşim/çarpışma) kaydedebilir. Gerçekleşen olayların birincil parçacıkları iç ve dış kaynaklardan elde edilebilir.

GEANT4, parçacıkların davranışını modellemek için kapsamlı bir fiziksel süreçler kümesi sağlar. Kullanıcı, farklı yaklaşımlar ve uygulamalar arasından seçim yapabilir ve sağlanan küme üzerinde değişiklik yapabilir veya ekleyebilir.

Ayrıca, grafiksel kullanıcı arabirimleri seçerek araç takımıyla etkileşimde bulunabilir ve geometriyi ve izleri çeşitli grafik sistemleri üzerinden iyi tanımlanmış bir arayüz aracılığıyla görselleştirebilir; kullanıcıya bu arayüzü seçtiği başka sistemler üzerine uygulama imkanı verilir.

Genel olarak, araç takımındaki sınıflar, kullanıcının özel uygulamaları için hizmetlerini genişletebilmesi veya değiştirebilmesi için son derece yeniden kullanılabilir ve kompakt bir şekilde tasarlanmıştır. Kullanıcı, nesne yönelimli programlama yöntemlerini izleyerek bunu gerçekleştirebilir.

Şekil 4.1'deki şema GEANT4 araç kategorilerinin birbiriyle ilişkisini göstermektedir. (Agostinelli et al., 2003)



Şekil 4.1: GEANT4 araç kategorileri hiyerarşik şeması

Şemanın altındaki kategoriler neredeyse tüm üst kategoriler tarafından kullanılır ve araç takımının temelini oluşturur. Bunlar, birim sistemleri, sabitler, sayısal işlemler ve rasgele sayı işleme gibi unsurları kapsayan global kategorisi; malzemeler; parçacıklar; grafiksel görselleştirme; dedektör tanımı için hacimsel geometri; ve GEANT4 ile etkileşim için bir araç sağlayan ve aynı zamanda birbirlerine bağımlı olmamaları gereken modüller arasında iletişim sağlayan interkomlar bulunmaktadır. Interkomlar ayrıca; mevcut temel işlevselliği kullanarak genişleten, ek işlevsellik sunan "plug-in"ler için arayüzlerin depolama alanıdır.

Bunların üstünde, parçacıkların takip edilmesi ve geçirdikleri fiziksel süreçleri tanımlamak için gereken kategoriler bulunmaktadır. İzleme kategorisi, parçacıkların ve adımların sınıflarını içerir; bu sınıflar, fiziksel etkileşim modellerinin uygulamalarını içeren süreçler tarafından kullanılır. Ayrıca bu süreçlerden biri olan taşıma, parçacıkların geometri modelinde taşınmasını ve isteğe bağlı olarak süreçlerin parametrelendirilmesini tetikleme imkanı sağlar. Tüm bu süreçler, takip kategorisi tarafından çağrılabilir ve bir parçacığın aldığı yolun evrilmesine katkılarını yönetir ve hacim içindeki çarpışmalar ve sayısallaştırma için bilgi sağlamayı taahhüt eder.

Bunlara ek olarak, etkinlik kategorisi, parçacık yollarını ve simülasyonda gerçekleşen olayları takip edilebilmesini sağlar. "Okuma" biriktirilmiş ölçümlerin simülasyon programı dışına çıkarılmasına imkan veren kategoridir.

Son olarak, yukarıda anlatılan tüm bu özellikleri kullanan ve araç takımını dışındaki sistemlerle (programsal arayüzler aracılığıyla) bağlantı kuran görselleştirme araçları, süreklilik ve kullanıcı arayüzü kategorileri sağlar. (Agostinelli et al., 2003)

GEANT4 açık kaynak kodlu bir yazılımdır ve herkes tarafından CERN'ün GEANT4 için oluşturduğu web sitesinden indirilip kullanılabilir. Kullanım koşulları ve fikri mülkiyetle ilgili lisans dosyası yine aynı web sitesinde bulunmaktadır.

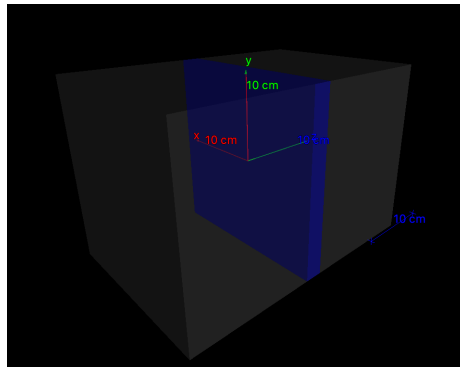
4.3 Programın Yazılması

GEANT4 uygulamalarının çalıştırılabilmesi için öncelikle C++ ile yazılmış kaynak kodlarının derlenmesi gerekir. Böylece GEANT4 kütüphanesi uygulama derlenirken linklenebilir hale gelir. Uygulama yazılırken kaynak kodlarının içinde bulunan başlık (header) dosyaları uygulama kodlarının içerisinde çağırılarak GEANT4 sınıf ve fonksiyonları kullanılır.

GEANT4 derlenmeden önce kullanıcının seçtiği görselleştirme kütüphanelerinin de bilgisayara daha önceden kurulmuş olması gerekir. Daha sonra derleme için gerekli dosyaları oluşturan CMake dosyalarındaki parametreler, seçilen görselleştirme kütüphanesine göre ayarlanıp, GEANT4 kurulumu yapılır. Bu çalışmadaki görseller GEANT4'un Qt kütüphanesiyle entegrasyonu kullanılarak oluşturulmuştur.

4.3.1 Geometri ve Soğurucu Malzemeler

Simülasyonda kullanılan tüm malzemeler ve özellikleri NIST veritabanından alınmış ve GEANT4'un içinde halihazırda bulunmaktadır. Deneyin gerçekleşeceği hacim kutu şeklinde (G4Box) tasarlanıp içi hava ile doldurulmuştur (G4_AIR). Daha sonra gama ışınlarını soğuracak olan malzeme bu kutunun ortasına levha olarak (G4Box) yerleştirilmiş (G4PVPlacement), kalınlığı z doğrultusunda parametrik olarak değiştirilebilecek şekilde programlanmıştır. Simülasyon düzeneği Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Soğurucu olarak kullanılan 24 farklı malzeme Tablo 4.1'de listelenmiştir.



Şekil 4.2: Simülasyon geometrisi

```
// Material manager instance
G4NistManager* nist = G4NistManager::Instance();
G4bool checkOverlaps = true;
// World
G4double world_sizeXY = 20*cm, world_sizeZ = 30*cm;
G4Material* world_mat = nist->FindOrBuildMaterial("G4_AIR");
G4Box* world_solid = new G4Box(
    "World", 0.5*world_sizeXY, 0.5*world_sizeXY, 0.5*world_sizeZ
);
G4LogicalVolume* world_logic = new G4LogicalVolume(
    world_solid, world_mat, "World"
);
G4VPhysicalVolume* fWorldPhysical = new G4PVPlacement(
    0, G4ThreeVector(), world_logic, "World", 0, false,
    0, checkOverlaps
);
// Absorber
G4ThreeVector absorber_position = G4ThreeVector(0, 0, 0);
G4Material* absorber_material =
    nist->FindOrBuildMaterial(fAbsorberMaterial);
fAbsorberSolid = new G4Box(
    "World", 0.5*world_sizeXY, 0.5*world_sizeXY, 0.5*fAbsorberTickness
);
fAbsorberLogical = new G4LogicalVolume(
    fAbsorberSolid, absorber_material, "Absorber"
);
fAbsorberPhysical = new G4PVPlacement(
    0, absorber_position, fAbsorberLogical, "Absorber", world_logic,
    false, 0, checkOverlaps
);
```

Tablo 4.1: Soğurucu olarak kullanılan malzemeler

Element Adı	Sembol	Atom No	GEANT4 Adı	Yoğunluk (g/cm^3)
Berilyum	Be	4	G4_Be	1,848
Karbon	C	6	G4_C	2
Magnezyum	Mg	12	G4_Mg	1,74
Alüminyum	Al	13	G4_Al	2,699
Kükürt	S	16	G4_S	2
Titanyum	Ti	22	G4_Ti	4,54
Demir	Fe	26	G4_Fe	7,874
Nikel	Ni	28	G4_Ni	8,902
Bakır	Cu	29	G4_Cu	8,96
Çinko	Zn	30	G4_Zn	7,133
Zirkonyum	Zr	40	G4_Zr	6,506
Niyobyum	Nb	41	G4_Nb	8,57
Molibden	Mo	42	G4_Mo	10,22
Gümüş	Ag	47	G4_Ag	10,5
Kalay	Sn	50	G4_Sn	7,31
Lantan	La	57	G4_La	6,154
Gadolinium	Gd	64	G4_Gd	7,9004
Hafniyum	Hf	72	G4_Hf	13,31
Tungsten	W	74	G4_W	19,3
Altın	Au	79	G4_Au	19,32
Kurşun	Pb	82	G4_Pb	11,35
Toryum	Th	90	G4_Th	11,72
Uranyum	U	92	G4_U	18,95
Plütonyum	Pu	94	G4_Pu	19,84

4.3.2 Gama Kaynağı

Gama kaynağı (G4ParticleGun) GEANT4 içinde hazır olarak gelen tanımlamayla (G4ParticleDefinition) oluşturulup, enerjisi parametrik olarak

değiştirilebilecek şekilde programlanmıştır. Kaynak içi hava dolu kutunun uç kısmına, ışınları z yönünde, absorbe levhaya dik gelecek şekilde konumlandırılmıştır. Kullanılan farklı gama enerjileri Tablo 4.2'de verilmiştir.

```
G4String particleName = "gamma";
fParticleGun = new G4ParticleGun(n_particle);
G4ParticleTable* particleTable = G4ParticleTable::GetParticleTable();
G4ParticleDefinition* particle =
    particleTable->FindParticle(particleName);
fParticleGun->SetParticleDefinition(particle);
fParticleGun->SetParticleMomentumDirection(G4ThreeVector(0.,0.,1.));
fParticleGun->SetParticleEnergy(particleEnergy*keV);
```

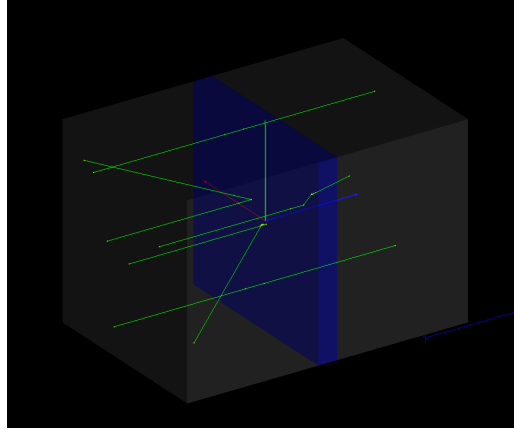
Tablo 4.2: Kullanılan gama kaynakları (Conner et al., 1970)

Kaynak	Enerji (<i>keV</i>)	Yarı ömür
¹⁰⁹ <i>Cd</i>	88,09	453 gün
¹⁴¹ <i>Ce</i>	145,41	32,5 gün
¹⁷⁷ <i>Lu</i>	208,36	6,7 gün
²⁰³ <i>Hg</i>	279,12	46,9 gün
¹⁹⁸ <i>Au</i>	411,80	2,7 gün
¹³⁷ <i>Cs</i>	661,60	30 yıl
⁶⁵ <i>Zn</i>	1115,50	245 gün
¹⁴⁰ <i>La</i>	1598,00	40,2 saat
²⁴ <i>Na</i>	2753,90	15 saat

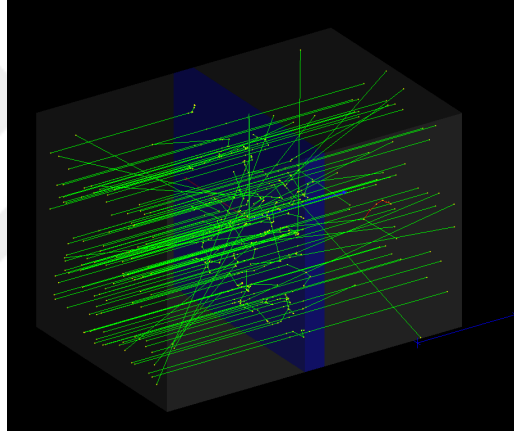
4.3.3 Çalıştırma ve İzleme

Simülasyon programı çalıştırıldığında gama enerjisi, absorbe materyali ve materyalin kalınlığını değiştirebilmek için GEANT4'da uygulama içi haberleşmeyi sağlayan DetectorMessenger sınıfı kullanılmıştır. Böylece değişmesi gereken parametreler çalışma esnasında güncellenebilir olmuş, uygulamayı kapatıp açma gerekliliği ortadan kaldırılmıştır. GEANT4'un makro çalıştırma

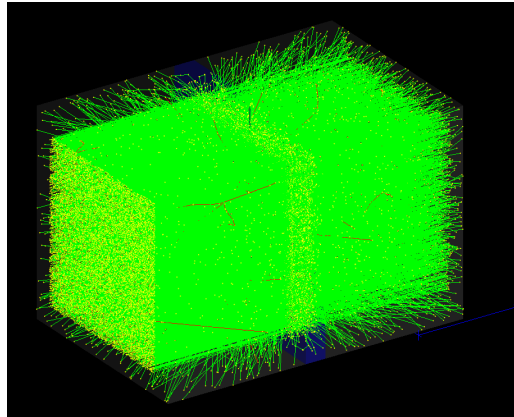
özelliği kullanılarak makro dosyaları hazırlanmış ve çalışma bu dosyalarla başlatılmıştır.



şekil 4.3: 5 Gama ışınının soğurucu malzemededen geçişi



şekil 4.4: 100 Gama ışınının soğurucu malzemededen geçişi



şekil 4.5: 10.000 Gama ışınının soğurucu malzemededen geçişi

Simülasyon kodları hazırlanıp derlendikten sonra, test edilmek istenen her malzeme ve gama enerjisi çiftini otomatik olarak programda çalıştıran bir kod betiği *python* programlama diliyle yazılmıştır. Seçilen gama enerjisi için maksimum malzeme kalınlığı belirlenip, bu kalınlık 40 eşit aralığa bölündükten sonra her farklı kalınlık için simülasyon programı çalıştırılmıştır. Her malzeme ve enerji çifti için seçilen maksimum kalınlıklar Tablo 4.3'den görülebilir.

Simülasyon her çalıştığında, gerçekleşen olaylar, gama ışınlarının izlediği yollar ve soğurucu malzeme ile etkileşimi gibi fiziksel süreçler çalıştırma nesnesi (RunAction) kullanılarak biriktirilmiş ve çalışma bittiğinde sonuçların dosyaya yazılması sağlanmıştır.

Her çalışma sonucu dosyası, seçilen malzeme, malzeme kalınlığı, gama enerjisi ile detektöre ulaşan gama sayımlarını içermektedir. Daha sonra bu sonuç dosyaları *python* betiğinde okunarak işlenmiş ve hesapları yapılmıştır.

Tablo 4.3: Maksimum soğurucu malzeme kalınlıkları - Enerji'ler keV, kalınlıklar mm cinsindedir

	Gama enerjileri (<i>keV</i>)								
	88,09	145,41	208,36	279,12	411,8	661,6	1115,5	1598	2753,9
4Be	12	13	14	15	16	17	18	19	20
6C	12	13	14	15	16	17	18	19	20
${}^{12}Mg$	12	13	14	15	16	17	18	19	20
${}^{13}Al$	8	9	10	11	12	13	14	15	16
${}^{16}S$	10	11	12	13	14	15	16	17	18
${}^{22}Ti$	3	4	5	6	7	8	9	10	11
${}^{26}Fe$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
${}^{28}Ni$	0,8	2	3	4	5	6	7	8	9
${}^{29}Cu$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
${}^{30}Zn$	0,9	2,2	4	5	6	7	8	9	10
${}^{40}Zr$	0,5	1,4	3	4	5	6	7	8	9
${}^{41}Nb$	0,3	1	2	3	4	5	6	7	8
${}^{42}Mo$	0,3	0,8	1,5	3	4	5	6	7	8
${}^{47}Ag$	0,2	0,7	1,2	3	4	5	6	7	8
${}^{50}Sn$	0,25	0,8	1,2	2	3	4	5	6	7
${}^{57}La$	0,2	0,7	1,5	2,5	4	5	6	7	8
${}^{64}Gd$	0,1	0,5	1	2	3	4	5	6	7
${}^{72}Hf$	0,05	0,2	0,5	0,8	2	3	4	5	6
${}^{74}W$	0,025	0,1	0,3	0,6	1	2	3	4	5
${}^{79}Au$	0,025	0,1	0,2	0,5	1	2	3	4	5
${}^{82}Pb$	0,05	0,2	0,4	0,8	1,2	2	3	4	5
${}^{90}Th$	0,15	0,15	0,3	0,6	1,2	3	4	5	6
${}^{92}U$	0,075	0,075	0,2	0,4	0,8	1,2	3	4	5
${}^{94}Pu$	0,075	0,075	0,175	0,3	0,7	1,2	3	4	5

5 HESAPLAR VE SONUÇLAR

Çalışma iki ayrı aşamada gerçekleştirilmiştir: önce literatürden (Conner et al., 1970) deneysel olarak tayin edilmiş kütle soğurma katsayılarına karşılık gelen kütle soğurma katsayıları GEANT4 simülasyonu ile bulunmuş, sonra da tüm materyal-gama enerjisi çifti için deneysel ve simülasyon yarı değer kalınlıkları arasındaki uyumsuzluğu düzelteren α kesirsel türev mertebesi hesaplanmıştır.

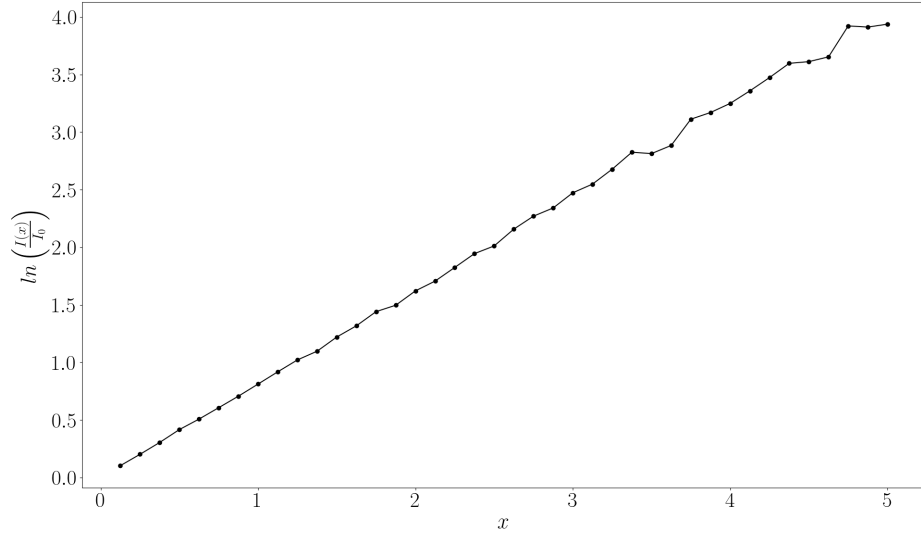
Enerji ve atom numaraları ile α mertebesi arasındaki muhtemel ilişkiyi görebilmek için değişimi gösteren grafikleri çizilmiş, elde edilen nümerik sonuçlar tablolarda verilmiştir.

5.1 Simülasyonla Kütle Soğurma Katsayısının Bulunması

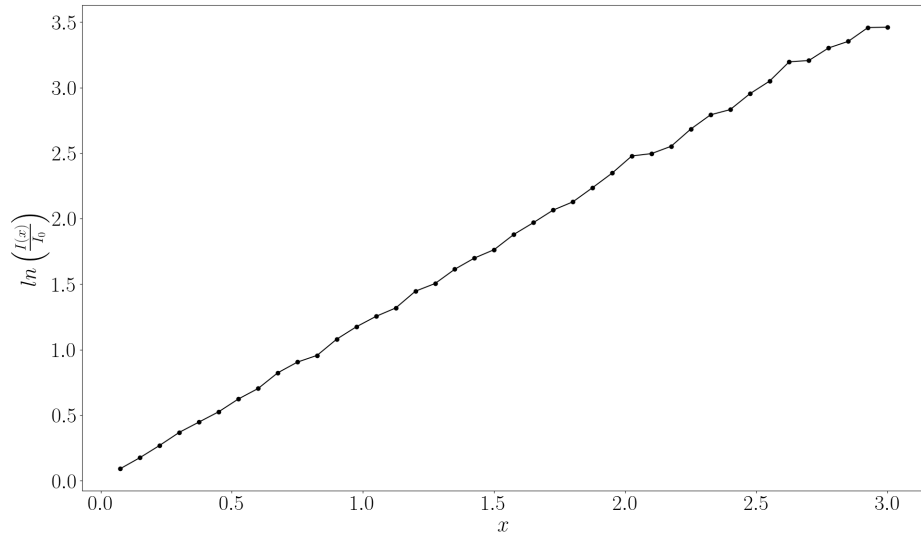
Denklem 2.7 kullanılarak *kütle soğurma katsayısı* için:

$$\mu = -\frac{\ln\left(\frac{I(x)}{I_0}\right)}{x} \quad (5.1)$$

ifadesi elde edilir. Bu sonuca göre μ 'yü elde edebilmek için simülasyondan alınan sayımlar ile tüm materyal ve gama enerjileri için $\ln\left(\frac{I(x)}{I_0}\right) = f(x)$ grafiği çizilip, grafiğin eğiminden *kütle soğurma katsayıları* bulunmuştur. Şekil 5.1 ve Şekil 5.2 bu grafiklere örnektir. Tüm gama enerjisi-soğurucu malzeme çiftleri için bu grafikler çizilip gerekli hesaplamalar yapılmıştır. Simülasyondan bulunan μ_{sim} değerleri Tablo5.1'de, literatürden alınan deneysel μ_{deney} değerleri de Tablo5.3'de verilmiştir.



Şekil 5.1: Zn ve 279,12 keV enerjili gama ışınları için $\ln\left(\frac{I(x)}{I_0}\right) = f(x)$ değişimi



Şekil 5.2: Altın ve 1115,5 keV enerjili gama ışınları için $\ln\left(\frac{I(x)}{I_0}\right) = f(x)$ değişimi

Tablo 5.1: Gama enerjisi (keV) ve soğurucu malzemeye göre simülasyondan bulunan *kütle soğurma katsayıları* $\mu_{sim}(cm^2/g)$

	Gama enerjileri (keV)								
	88,09	145,41	208,36	279,12	411,8	661,6	1115,5	1598	2753,9
${}_4Be$	0,1350	0,1188	0,1065	0,0966	0,0839	0,0692	0,0539	0,0446	0,0329
${}_6C$	0,1390	0,1212	0,1085	0,0985	0,0857	0,0705	0,0550	0,0457	0,0338
${}_{12}Mg$	0,1709	0,1355	0,1192	0,1076	0,0933	0,0769	0,0600	0,0499	0,0376
${}_{13}Al$	0,1734	0,1335	0,1165	0,1050	0,0909	0,0749	0,0584	0,0486	0,0369
${}_{16}S$	0,2053	0,1399	0,1184	0,1059	0,0912	0,0750	0,0585	0,0487	0,0373
${}_{22}Ti$	0,3118	0,1583	0,1212	0,1042	0,0881	0,0718	0,0559	0,0466	0,0364
${}_{26}Fe$	0,4453	0,1899	0,1325	0,1093	0,0903	0,0729	0,0566	0,0473	0,0373
${}_{28}Ni$	0,5409	0,2136	0,1426	0,1150	0,0936	0,0751	0,0580	0,0485	0,0385
${}_{29}Cu$	0,5703	0,2147	0,1400	0,1114	0,0899	0,0721	0,0555	0,0465	0,0370
${}_{30}Zn$	0,6187	0,2280	0,1450	0,1138	0,0910	0,0725	0,0559	0,0469	0,0373
${}_{40}Zr$	1,2662	0,3784	0,1957	0,1328	0,0952	0,0720	0,0544	0,0456	0,0373
${}_{41}Nb$	1,3619	0,4023	0,2050	0,1371	0,0969	0,0728	0,0548	0,0459	0,0376
${}_{42}Mo$	1,4480	0,4212	0,2115	0,1399	0,0975	0,0724	0,0544	0,0456	0,0374
${}_{47}Ag$	1,9716	0,5493	0,2598	0,1611	0,1047	0,0744	0,0549	0,0459	0,0381
${}_{50}Sn$	2,2591	0,6178	0,2838	0,1694	0,1063	0,0739	0,0540	0,0450	0,0375
${}_{57}La$	3,1437	0,8497	0,3699	0,2062	0,1183	0,0767	0,0542	0,0450	0,0380
${}_{64}Gd$	4,1921	1,1429	0,4805	0,2566	0,1365	0,0822	0,0558	0,0459	0,0390
${}_{72}Hf$	5,6299	1,5277	0,6426	0,3311	0,1650	0,0909	0,0583	0,0473	0,0404
${}_{74}W$	5,9955	1,6406	0,6852	0,3525	0,1719	0,0935	0,0590	0,0478	0,0408
${}_{79}Au$	6,9798	1,9452	0,8098	0,4092	0,1947	0,1011	0,0616	0,0492	0,0420
${}_{82}Pb$	7,4519	2,1071	0,8758	0,4430	0,2072	0,1050	0,0628	0,0497	0,0423
${}_{90}Th$	2,2847	2,5817	1,0850	0,5454	0,2490	0,1192	0,0670	0,0519	0,0438
${}_{92}U$	2,4582	2,7027	1,1441	0,5762	0,2605	0,1232	0,0683	0,0525	0,0442
${}_{94}Pu$	2,6303	2,8355	1,2011	0,6056	0,2719	0,1278	0,0696	0,0533	0,0448

Tablo 5.2: Gama enerjisi (keV) ve soğurucu malzemeye göre simülasyondan bulunan *yarı* değer kalınlıkları $x_{1/2_{sim}}$ (g/cm^2)

	Gama enerjileri (keV)								
	88,09	145,41	208,36	279,12	411,8	661,6	1115,5	1598	2753,9
${}_4Be$	5,133	5,836	6,507	7,172	8,261	10,021	12,870	15,543	21,092
${}_6C$	4,988	5,720	6,387	7,037	8,086	9,826	12,594	15,181	20,482
${}_{12}Mg$	4,056	5,116	5,816	6,439	7,430	9,008	11,559	13,895	18,439
${}_{13}Al$	3,997	5,193	5,949	6,601	7,622	9,259	11,869	14,249	18,789
${}_{16}S$	3,376	4,956	5,852	6,547	7,598	9,246	11,847	14,219	18,597
${}_{22}Ti$	2,223	4,379	5,717	6,651	7,872	9,657	12,410	14,861	19,059
${}_{26}Fe$	1,557	3,650	5,232	6,343	7,677	9,507	12,243	14,646	18,591
${}_{28}Ni$	1,282	3,244	4,860	6,027	7,405	9,236	11,950	14,287	18,017
${}_{29}Cu$	1,215	3,228	4,950	6,224	7,710	9,618	12,482	14,918	18,751
${}_{30}Zn$	1,120	3,040	4,781	6,092	7,619	9,563	12,389	14,789	18,575
${}_{40}Zr$	0,547	1,832	3,541	5,219	7,282	9,631	12,739	15,210	18,584
${}_{41}Nb$	0,509	1,723	3,381	5,056	7,151	9,524	12,638	15,085	18,414
${}_{42}Mo$	0,479	1,646	3,278	4,955	7,111	9,568	12,737	15,211	18,519
${}_{47}Ag$	0,352	1,262	2,668	4,303	6,621	9,312	12,621	15,095	18,182
${}_{50}Sn$	0,307	1,122	2,442	4,093	6,523	9,382	12,845	15,390	18,465
${}_{57}La$	0,220	0,816	1,874	3,362	5,860	9,037	12,787	15,405	18,258
${}_{64}Gd$	0,165	0,606	1,443	2,701	5,077	8,434	12,432	15,096	17,766
${}_{72}Hf$	0,123	0,454	1,079	2,094	4,201	7,629	11,880	14,643	17,167
${}_{74}W$	0,116	0,422	1,012	1,966	4,031	7,412	11,743	14,511	16,972
${}_{79}Au$	0,099	0,356	0,856	1,694	3,561	6,859	11,252	14,091	16,518
${}_{82}Pb$	0,093	0,329	0,791	1,565	3,345	6,602	11,042	13,933	16,381
${}_{90}Th$	0,303	0,268	0,639	1,271	2,784	5,814	10,348	13,368	15,823
${}_{92}U$	0,282	0,256	0,606	1,203	2,661	5,627	10,145	13,193	15,685
${}_{94}Pu$	0,264	0,244	0,577	1,145	2,549	5,424	9,959	13,016	15,476

Tablo 5.3: Gama enerjisi (keV) ve soğurucu malzemeye göre deneysel *kütle soğurma katsayıları* $\mu_{deney}(cm^2/g)$ (Conner et al., 1970)

	Gama enerjileri (keV)								
	88,09	145,41	208,36	279,12	411,8	661,6	1115,5	1598	2753,9
4Be	0,1360	0,1193	0,1070	0,0968	0,0829	0,0684	0,0530	0,0442	0,0329
6C	0,1560	0,1357	0,1209	0,1087	0,0940	0,0771	0,0604	0,0495	0,0373
${}^{12}Mg$	0,1817	0,1403	0,1205	0,1090	0,0932	0,0765	0,0602	0,0489	0,0376
${}^{13}Al$	0,1827	0,1382	0,1198	0,1064	0,0905	0,0744	0,0581	0,0481	0,0368
${}^{16}S$	0,2274	0,1527	0,1286	0,1115	0,0951	0,0782	0,0608	0,0510	0,0388
${}^{22}Ti$	0,3384	0,1711	0,1267	0,1072	0,0885	0,0713	0,0559	0,0463	0,0361
${}^{26}Fe$	0,4841	0,2036	0,1392	0,1127	0,0906	0,0726	0,0561	0,0464	0,0375
${}^{28}Ni$	0,5754	0,2225	0,1499	0,1187	0,0944	0,0750	0,0579	0,0486	0,0378
${}^{29}Cu$	0,6005	0,2297	0,1473	0,1165	0,0911	0,0728	0,0552	0,0463	0,0371
${}^{30}Zn$	0,6546	0,2420	0,1538	0,1185	0,0928	0,0730	0,0561	0,0464	0,0372
${}^{40}Zr$	1,3330	0,3990	0,2060	0,1392	0,0975	0,0716	0,0539	0,0452	0,0372
${}^{41}Nb$	1,4680	0,4250	0,2150	0,1456	0,0997	0,0729	0,0552	0,0456	0,0377
${}^{42}Mo$	1,5180	0,4530	0,2220	0,1485	0,1008	0,0730	0,0547	0,0450	0,0375
${}^{47}Ag$	2,0310	0,5770	0,2700	0,1697	0,1075	0,0758	0,0555	0,0457	0,0380
${}^{50}Sn$	2,3840	0,6450	0,2920	0,1772	0,1092	0,0744	0,0535	0,0445	0,0370
${}^{57}La$	3,2760	0,8870	0,3820	0,2165	0,1227	0,0779	0,0540	0,0448	0,0374
${}^{64}Gd$	4,3760	1,1840	0,4940	0,2691	0,1405	0,0831	0,0562	0,0453	0,0386
${}^{72}Hf$	5,6960	1,5670	0,6450	0,3413	0,1684	0,0920	0,0582	0,0469	0,0398
${}^{74}W$	6,1480	1,6870	0,7050	0,3689	0,1775	0,0960	0,0596	0,0475	0,0407
${}^{79}Au$	7,0060	1,9820	0,8230	0,4248	0,1998	0,1031	0,0621	0,0489	0,0420
${}^{82}Pb$	6,5760	2,1460	0,9010	0,4621	0,2130	0,1074	0,0632	0,0494	0,0415
${}^{90}Th$	2,4260	2,6220	1,0930	0,5575	0,2548	0,1202	0,0672	0,0516	0,0436
${}^{92}U$	2,5730	2,7560	1,1560	0,5876	0,2671	0,1244	0,0688	0,0525	0,0437
${}^{94}Pu$	2,7660	2,9290	1,2130	0,6290	0,2844	0,1323	0,0718	0,0540	0,0455

Tablo 5.4: Gama enerjisi (keV) ve soğurucu malzemeye göre deneysel *yarı değer kalınlıkları*
 $x_{1/2_{deney}} (g/cm^2)$

	Gama enerjileri (keV)								
	88,09	145,41	208,36	279,12	411,8	661,6	1115,5	1598	2753,9
${}_4Be$	5,097	5,810	6,478	7,161	8,361	10,140	13,088	15,682	21,081
${}_6C$	4,443	5,108	5,733	6,377	7,374	8,987	11,470	13,994	18,588
${}_{12}Mg$	3,815	4,940	5,752	6,359	7,437	9,057	11,508	14,175	18,435
${}_{13}Al$	3,794	5,016	5,786	6,515	7,659	9,322	11,936	14,417	18,825
${}_{16}S$	3,048	4,539	5,390	6,217	7,289	8,862	11,402	13,591	17,878
${}_{22}Ti$	2,048	4,051	5,471	6,466	7,832	9,722	12,400	14,964	19,185
${}_{26}Fe$	1,432	3,404	4,980	6,150	7,651	9,550	12,356	14,948	18,479
${}_{28}Ni$	1,205	3,115	4,624	5,839	7,343	9,246	11,980	14,271	18,342
${}_{29}Cu$	1,154	3,018	4,706	5,950	7,609	9,515	12,555	14,971	18,668
${}_{30}Zn$	1,059	2,864	4,507	5,849	7,469	9,500	12,364	14,945	18,633
${}_{40}Zr$	0,520	1,737	3,365	4,980	7,109	9,681	12,853	15,335	18,658
${}_{41}Nb$	0,472	1,631	3,224	4,761	6,952	9,508	12,564	15,197	18,401
${}_{42}Mo$	0,457	1,530	3,122	4,668	6,876	9,495	12,679	15,396	18,499
${}_{47}Ag$	0,341	1,201	2,567	4,085	6,448	9,144	12,496	15,177	18,260
${}_{50}Sn$	0,291	1,075	2,374	3,912	6,348	9,316	12,961	15,594	18,719
${}_{57}La$	0,212	0,781	1,815	3,202	5,649	8,898	12,841	15,472	18,558
${}_{64}Gd$	0,158	0,585	1,403	2,576	4,933	8,341	12,336	15,295	17,948
${}_{72}Hf$	0,122	0,442	1,075	2,031	4,116	7,534	11,904	14,770	17,425
${}_{74}W$	0,113	0,411	0,983	1,879	3,905	7,220	11,622	14,583	17,031
${}_{79}Au$	0,099	0,350	0,842	1,632	3,469	6,723	11,171	14,166	16,496
${}_{82}Pb$	0,105	0,323	0,769	1,500	3,254	6,454	10,961	14,031	16,698
${}_{90}Th$	0,286	0,264	0,634	1,243	2,720	5,767	10,313	13,423	15,912
${}_{92}U$	0,269	0,252	0,600	1,180	2,595	5,572	10,081	13,213	15,880
${}_{94}Pu$	0,251	0,237	0,571	1,102	2,437	5,239	9,659	12,827	15,237

5.2 Kesirsel Türev Mertebesinin Bulunması

İki sonuç arasındaki farkı düzelteren kesirsel α mertebesini hesaplayabilmek için deneysel μ_{deney} değerlerinden 2.8 denklemini kullanılarak $x_{1/2_{deney}}$, *yarı değer kalınlıkları* bulunmuştur. Bulunan bu deneysel $x_{1/2_{deney}}$ değerleriyle simülasyondan bulunan μ_{sim} , 3.18 kesirsel çözümünde yerine yazılıp α mertebesi hesaplanmıştır:

$$\begin{aligned}
 I(x) &= I_0 E_\alpha(-\mu^\alpha x^\alpha) \\
 I(x_{1/2}) &= \frac{I_0}{2} \\
 \frac{1}{2} &= E_\alpha(-\mu_{sim}^\alpha * x_{1/2_{deney}}^\alpha)
 \end{aligned} \tag{5.2}$$

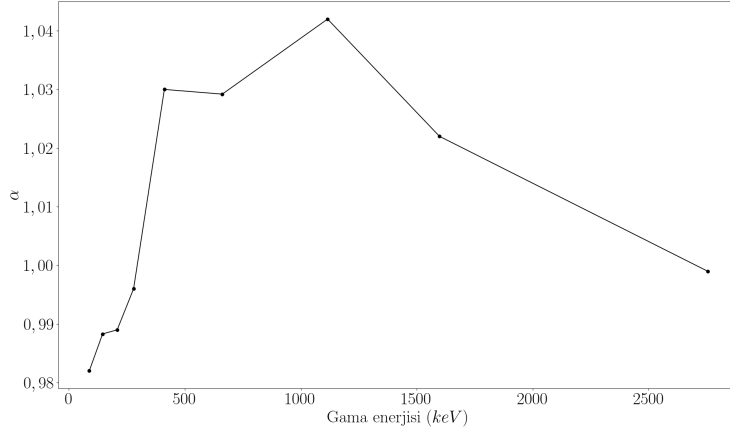
Böylece simülasyondan hesaplanan μ_{sim} değerleriyle deneysel $x_{1/2_{deney}}$ yarı değer kalınlıklarını veren kesirsel türev mertebesi α bulunmuştur. Bu işlem tüm soğurucu malzeme-gama enerjisi çifti için yapılmış ve sonuçlar Tablo 5.5’de verilmiştir. Ayrıca α ’nın enerjiye göre değişimi Şekil 5.3-5.26 arasında, atom numarasına göre değişimi Şekil 5.27-5.35 arasındaki grafiklerde gösterilmiştir.

Tüm hesaplamalar *python* programlama dili kullanılarak, *numpy*, *pandas* ve *scipy* paketlerinin yardımıyla yapılmış, grafikler *matplotlib* paketi yardımıyla çizilmiştir.

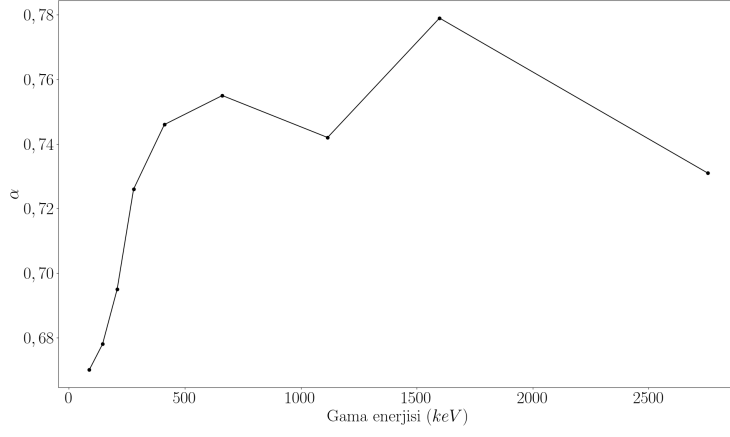
Denklem 3.10’e geçişte standart türev mertebesi olan $m = 1$ kullanılmış, ancak hesaplama sonuçlarında 1’den büyük değerler de bulunmuştur. Bu değerlerin büyük çoğunluğunun 1’den büyük ama 1’e çok yakın olması sebebiyle bu düşük fark, ölçümdeki hata payı ve simülasyondan sayımdaki hata payı olarak yorumlanmıştır.

Tablo 5.5: Gama enerjisi (keV) ve soğurucu malzemeye göre hesaplanan α kesirsel türev mertebeleri

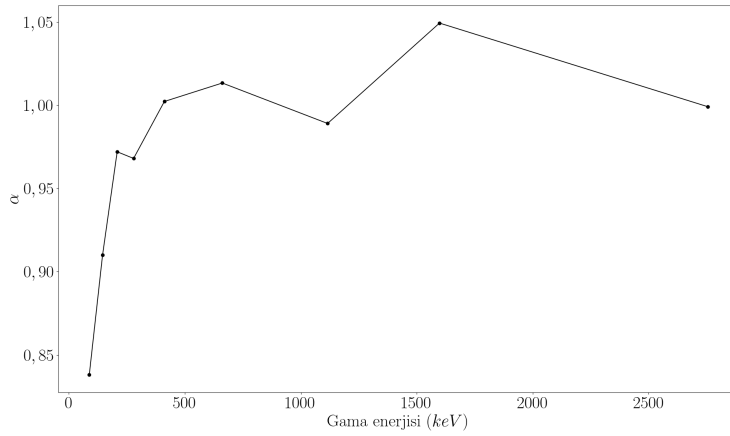
	Gama enerjileri (keV)								
	88,09	145,41	208,36	279,12	411,8	661,6	1115,5	1598	2753,9
${}_4Be$	0,9820	0,9883	0,9890	0,9960	1,0300	1,0292	1,0420	1,0220	0,9990
${}_6C$	0,6700	0,6780	0,6950	0,7260	0,7460	0,7550	0,7420	0,7790	0,7310
${}_{12}Mg$	0,8380	0,9100	0,9720	0,9680	1,0022	1,0133	0,9890	1,0493	0,9991
${}_{13}Al$	0,8630	0,9100	0,9281	0,9670	1,0120	1,0170	1,0140	1,0290	1,0050
${}_{16}S$	0,7150	0,7600	0,7760	0,8640	0,8920	0,8900	0,9010	0,8820	0,8980
${}_{22}Ti$	0,7780	0,7900	0,8850	0,9271	0,9870	1,0163	0,9980	1,0171	1,0162
${}_{26}Fe$	0,7730	0,8140	0,8710	0,9202	0,9911	1,0111	1,0230	1,0510	0,9850
${}_{28}Ni$	0,8360	0,8950	0,8700	0,9182	0,9782	1,0030	1,0060	0,9970	1,0442
${}_{29}Cu$	0,8650	0,8210	0,8680	0,8820	0,9661	0,9730	1,0143	1,0090	0,9890
${}_{30}Zn$	0,8510	0,8430	0,8440	0,8940	0,9491	0,9830	0,9950	1,0260	1,0080
${}_{40}Zr$	0,8650	0,8610	0,8660	0,8770	0,9382	1,0130	1,0220	1,0202	1,0100
${}_{41}Nb$	0,7980	0,8560	0,8760	0,8410	0,9271	0,9960	0,9850	1,0182	0,9980
${}_{42}Mo$	0,8770	0,8050	0,8730	0,8420	0,9132	0,9810	0,9880	1,0300	0,9970
${}_{47}Ag$	0,9240	0,8720	0,9000	0,8630	0,9320	0,9540	0,9750	1,0133	1,0110
${}_{50}Sn$	0,8590	0,8880	0,9270	0,8820	0,9300	0,9820	1,0222	1,0330	1,0340
${}_{57}La$	0,8930	0,8880	0,9170	0,8720	0,9050	0,9602	1,0102	1,0110	1,0403
${}_{64}Gd$	0,8880	0,9090	0,9290	0,8760	0,9260	0,9720	0,9800	1,0323	1,0252
${}_{72}Hf$	0,9701	0,9350	0,9901	0,9220	0,9480	0,9680	1,0050	1,0213	1,0370
${}_{74}W$	0,9360	0,9280	0,9270	0,8811	0,9180	0,9330	0,9740	1,0122	1,0083
${}_{79}Au$	0,9902	0,9520	0,9590	0,9030	0,9330	0,9490	0,9813	1,0131	0,9963
${}_{82}Pb$	1,2993	0,9531	0,9270	0,8910	0,9292	0,9420	0,9810	1,0180	1,0474
${}_{90}Th$	0,8410	0,9602	0,9812	0,9440	0,9410	0,9790	0,9911	1,0100	1,0140
${}_{92}U$	0,8810	0,9500	0,9740	0,9500	0,9351	0,9750	0,9840	1,0040	1,0310
${}_{94}Pu$	0,8680	0,9160	0,9750	0,9020	0,8830	0,9100	0,9211	0,9630	0,9601



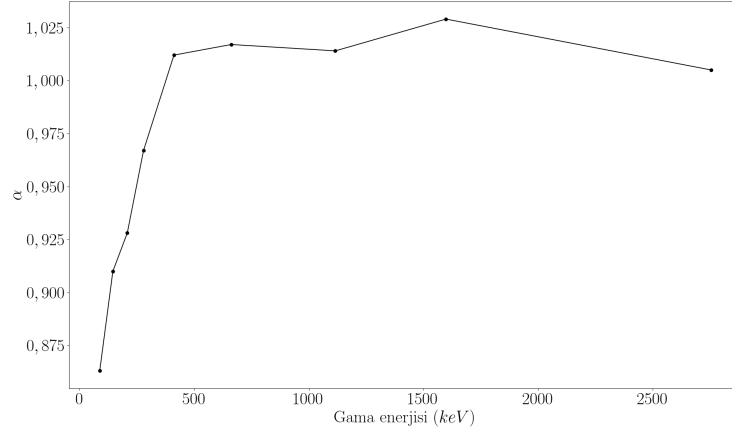
Şekil 5.3: ${}^4\text{Be}$ için α 'nın gama enerjisine göre değişimi



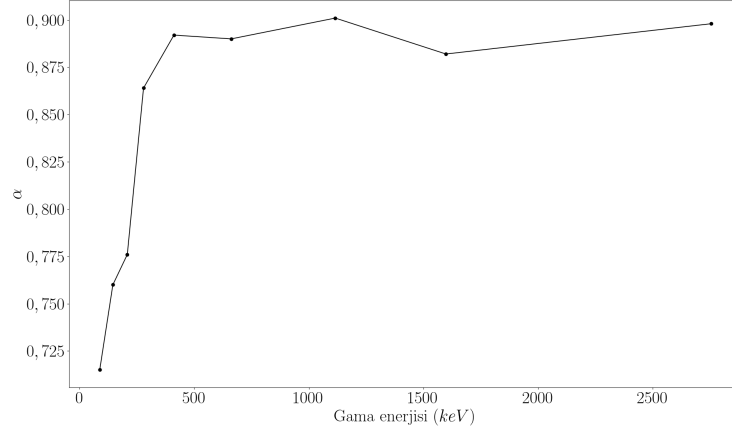
Şekil 5.4: ${}^6\text{C}$ için α 'nın gama enerjisine göre değişimi



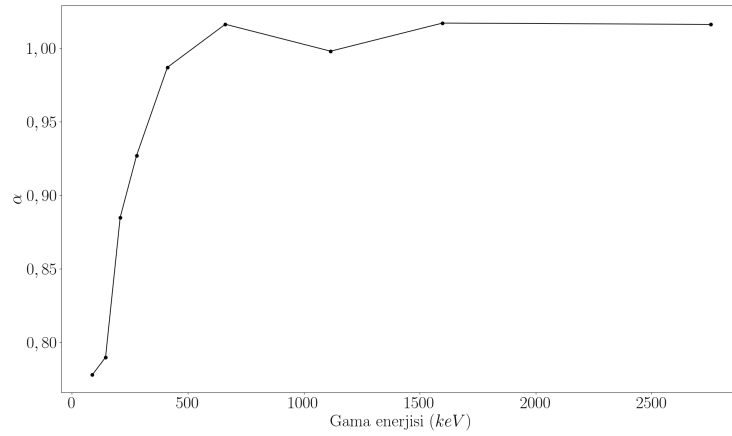
Şekil 5.5: ${}^{12}\text{Mg}$ için α 'nın gama enerjisine göre değişimi



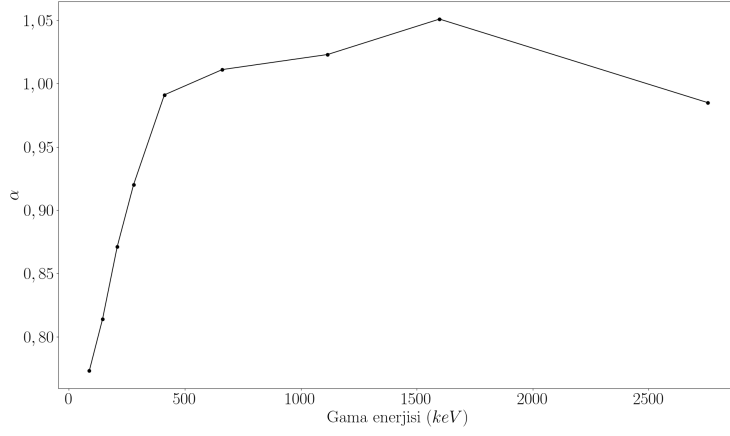
Şekil 5.6: ^{13}Al için α 'nın gama enerjisine göre değişimi



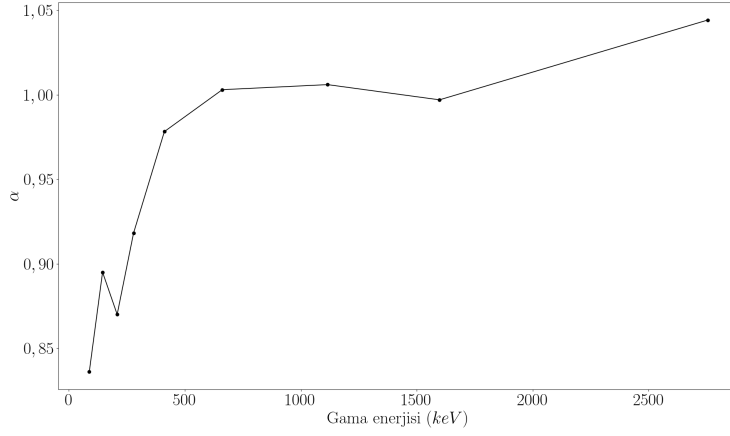
Şekil 5.7: ^{16}S için α 'nın gama enerjisine göre değişimi



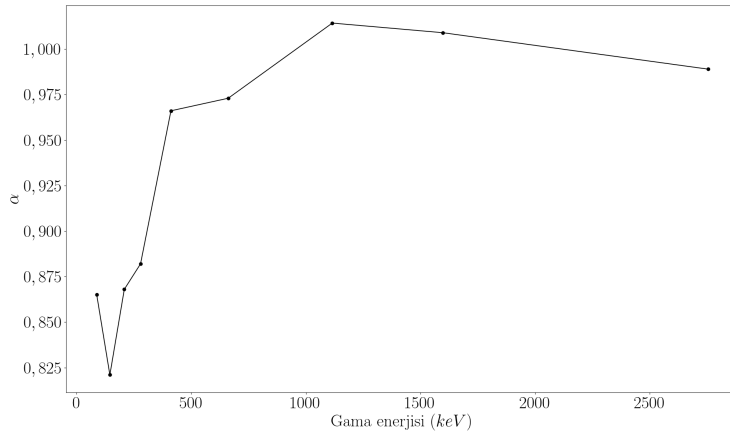
Şekil 5.8: ^{22}Ti için α 'nın gama enerjisine göre değişimi



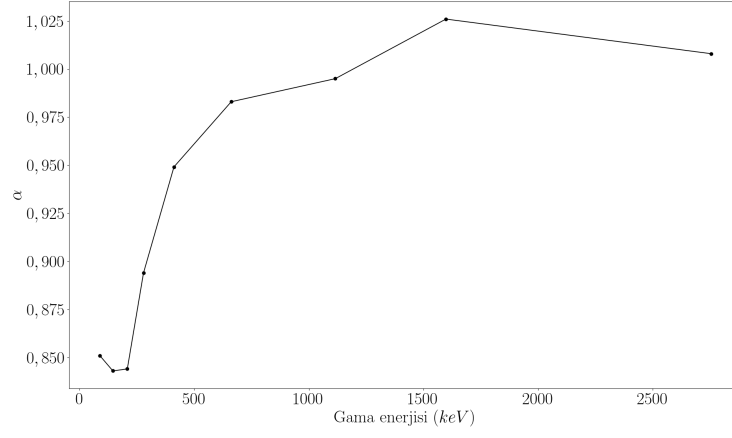
Şekil 5.9: ${}_{26}\text{Fe}$ için α 'nın gama enerjisine göre değişimi



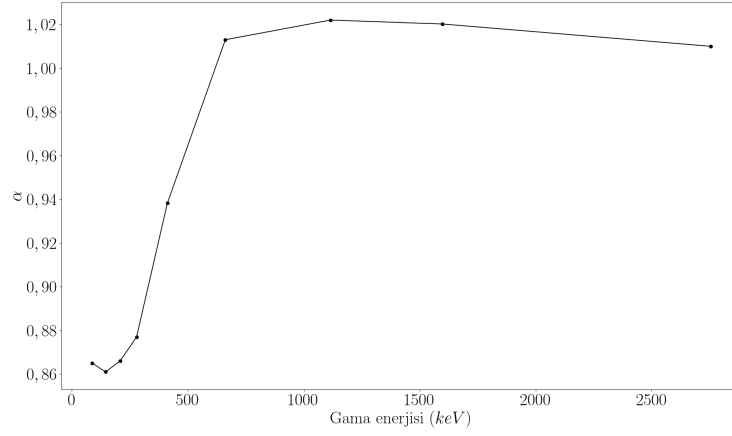
Şekil 5.10: ${}_{28}\text{Ni}$ için α 'nın gama enerjisine göre değişimi



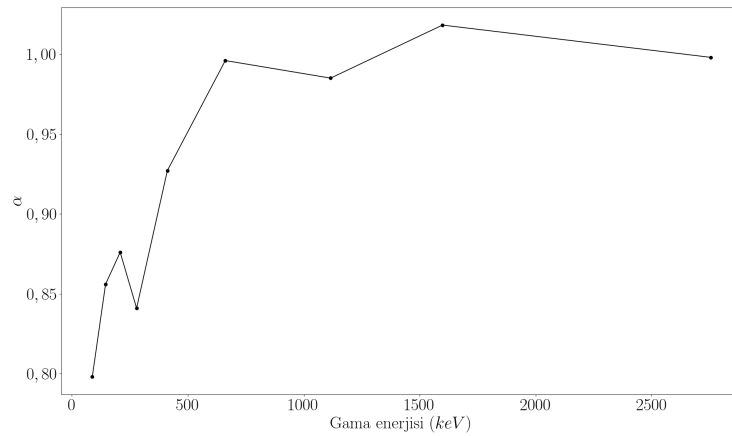
Şekil 5.11: ${}_{29}\text{Cu}$ için α 'nın gama enerjisine göre değişimi



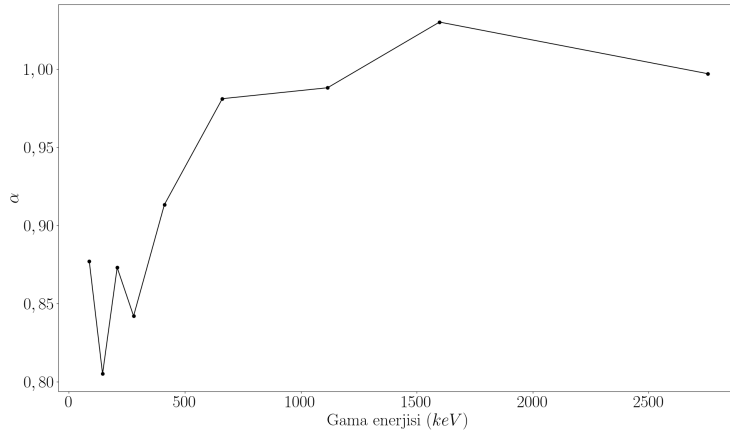
Şekil 5.12: ${}_{30}\text{Zn}$ için α 'nın gama enerjisine göre değişimi



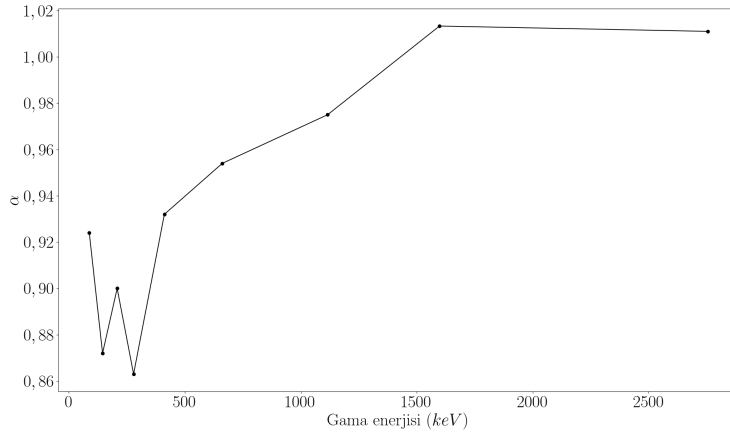
Şekil 5.13: ${}_{40}\text{Zr}$ için α 'nın gama enerjisine göre değişimi



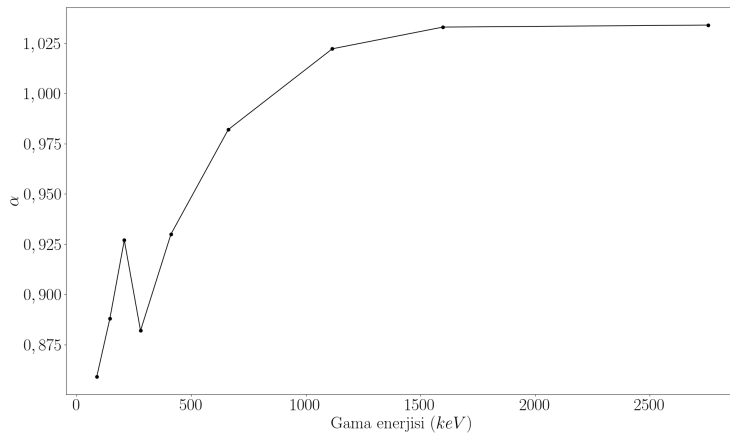
Şekil 5.14: ${}_{41}\text{Nb}$ için α 'nın gama enerjisine göre değişimi



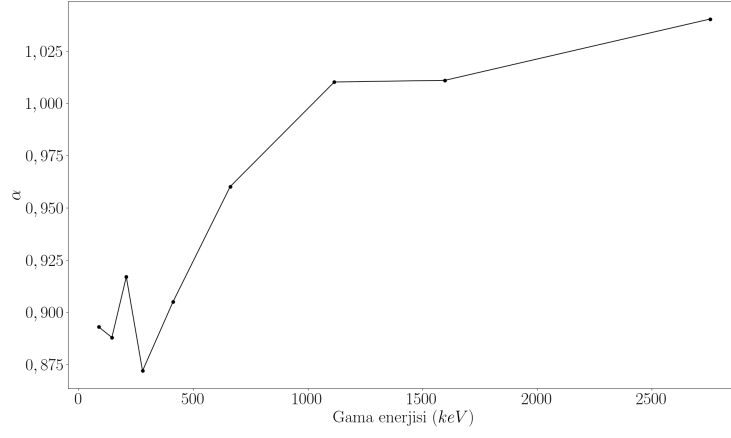
Şekil 5.15: ^{42}Mo için α 'nın gama enerjisine göre değişimi



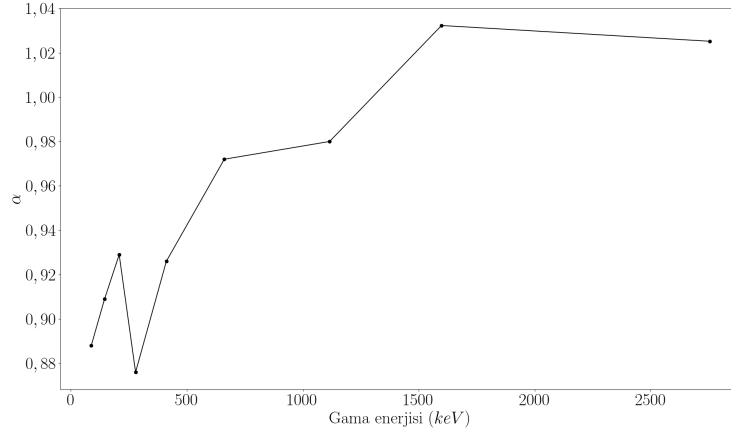
Şekil 5.16: ^{47}Ag için α 'nın gama enerjisine göre değişimi



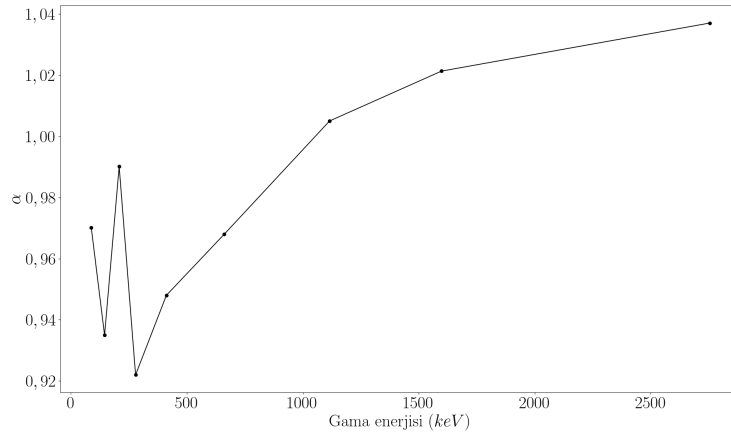
Şekil 5.17: ^{50}Sn için α 'nın gama enerjisine göre değişimi



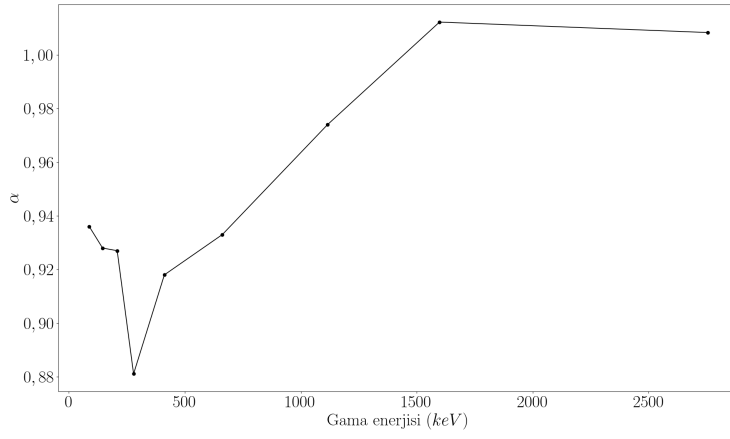
Şekil 5.18: ^{57}La için α 'nın gama enerjisine göre değişimi



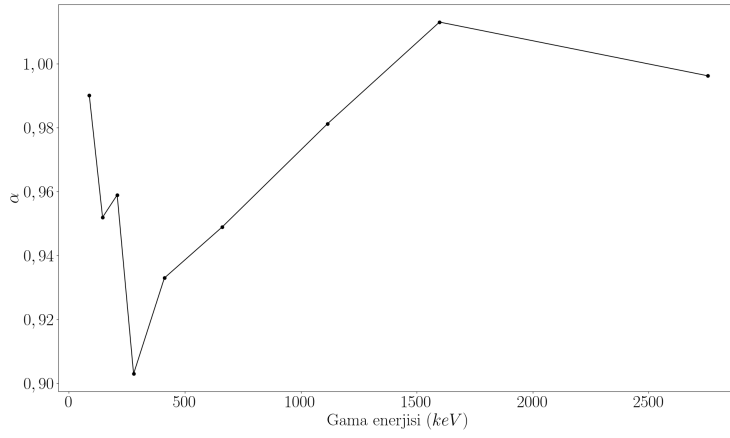
Şekil 5.19: ^{64}Gd için α 'nın gama enerjisine göre değişimi



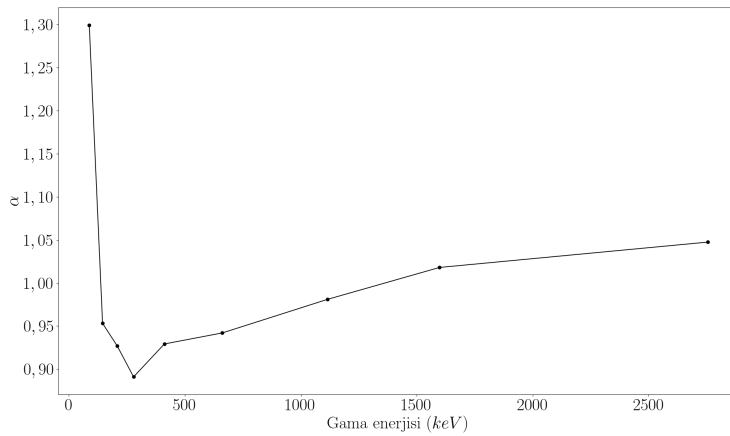
Şekil 5.20: ^{72}Hf için α 'nın gama enerjisine göre değişimi



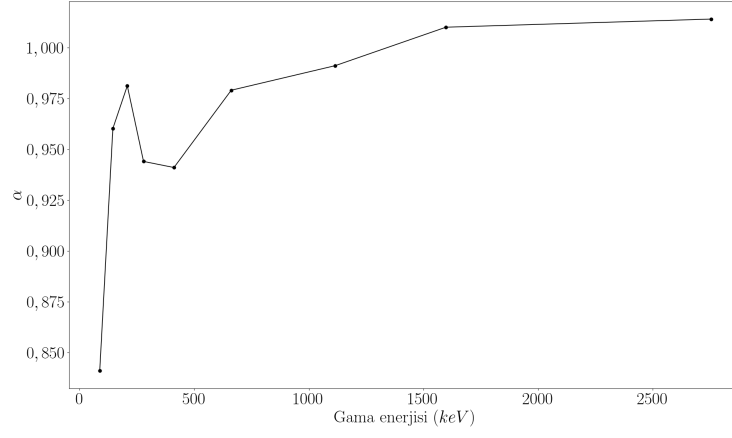
Şekil 5.21: ${}_{74}W$ için α 'nın gama enerjisine göre değişimi



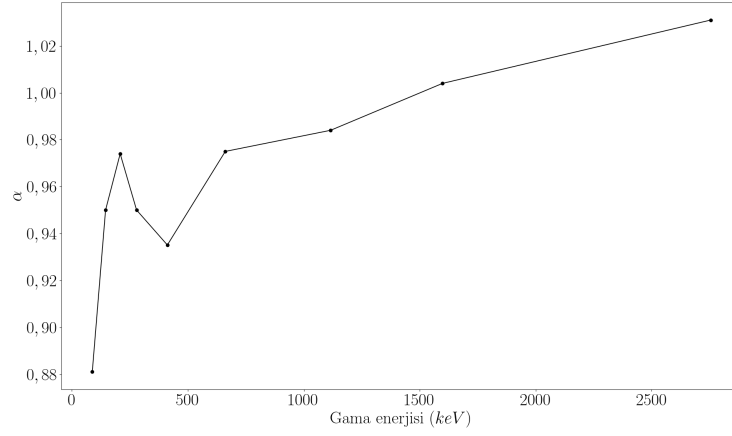
Şekil 5.22: ${}_{79}Au$ için α 'nın gama enerjisine göre değişimi



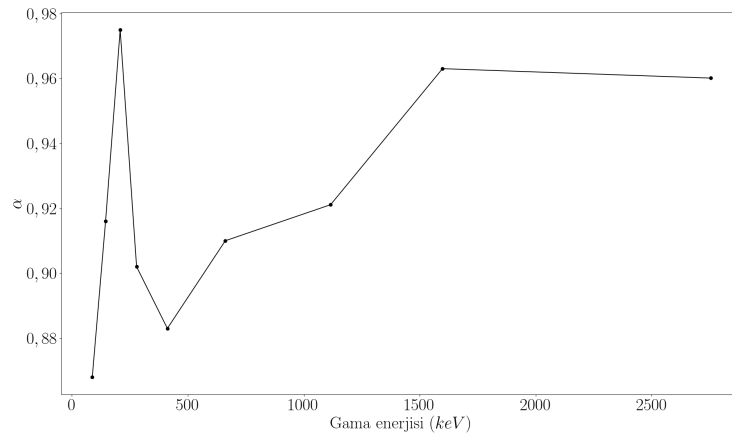
Şekil 5.23: ${}_{82}Pb$ için α 'nın gama enerjisine göre değişimi



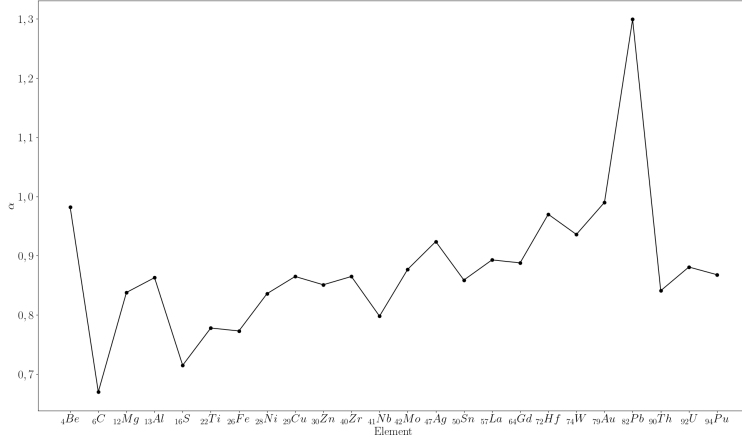
Şekil 5.24: ${}_{90}\text{Th}$ için α 'nın gama enerjisine göre değişimi



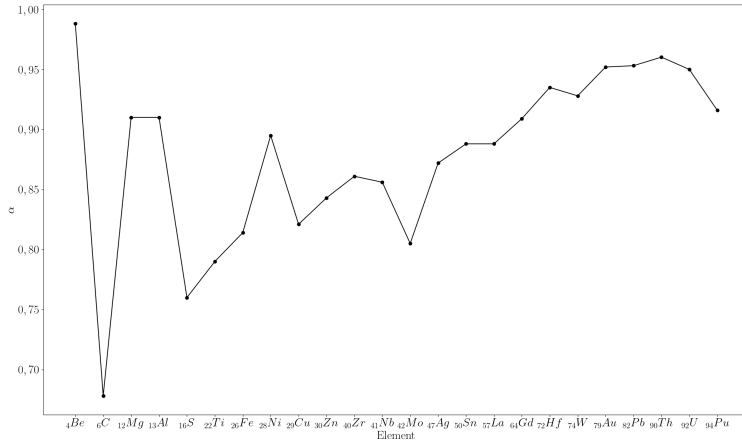
Şekil 5.25: ${}_{92}\text{U}$ için α 'nın gama enerjisine göre değişimi



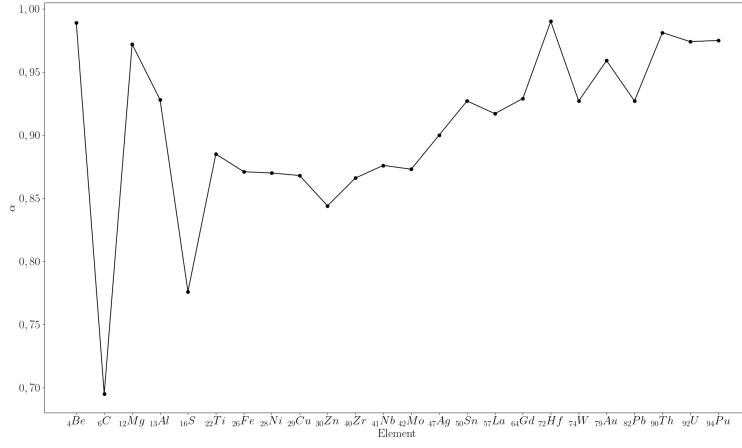
Şekil 5.26: ${}_{94}\text{Pu}$ için α 'nın gama enerjisine göre değişimi



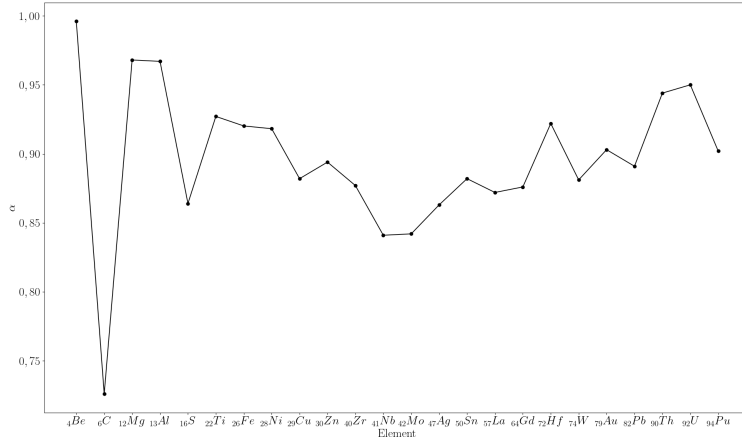
Şekil 5.27: 88,09 keV enerjili gama ışınları için α 'nın soğurucu malzemelerin kütle numarasına göre değişimi



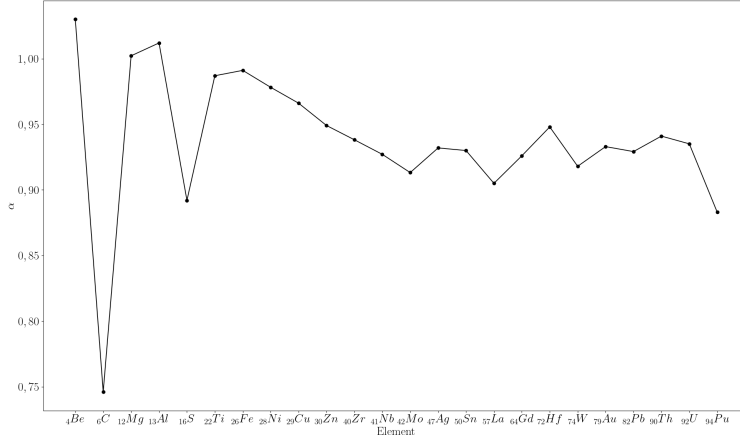
Şekil 5.28: 145,41 keV enerjili gama ışınları için α 'nın soğurucu malzemelerin kütle numarasına göre değişimi



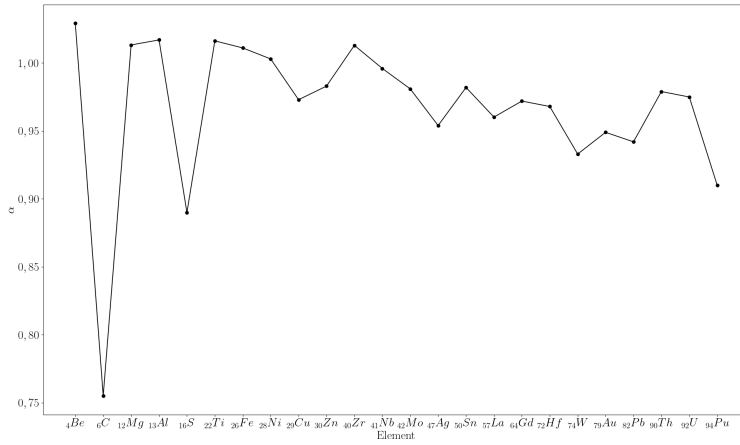
Şekil 5.29: 208,36 keV enerjili gama ışınları için α 'nın soğurucu malzemelerin kütle numarasına göre değişimi



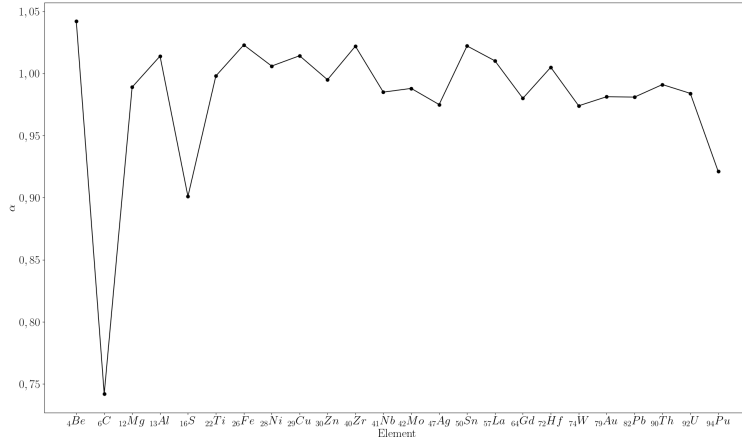
Şekil 5.30: 279,12 keV enerjili gama ışınları için α 'nın soğurucu malzemelerin kütle numarasına göre değişimi



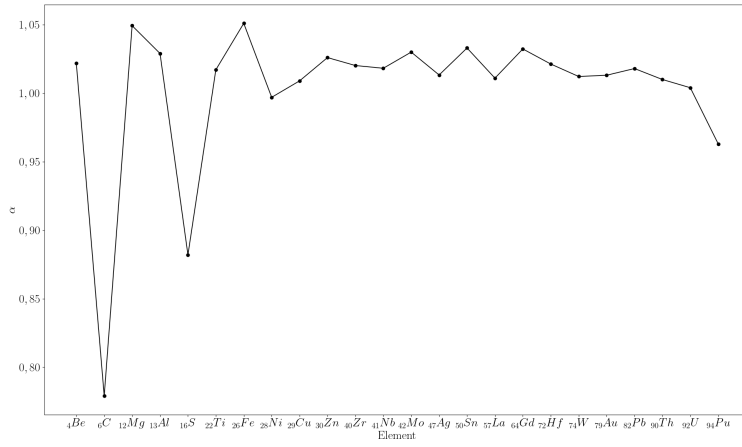
Şekil 5.31: 411,8 keV enerjili gama ışınları için α 'nın soğurucu malzemelerin kütle numarasına göre değişimi



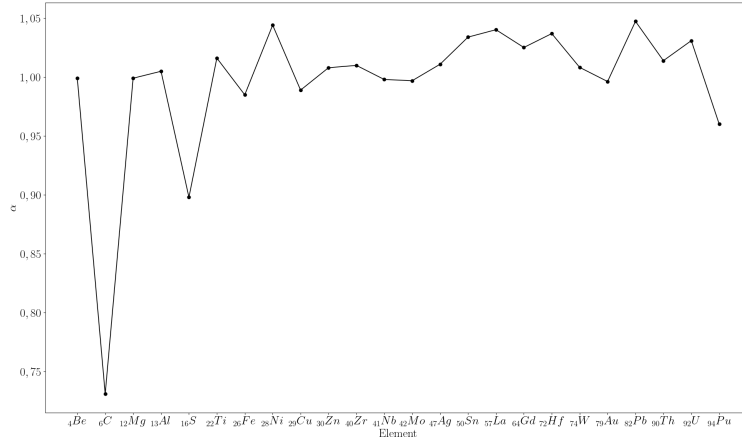
Şekil 5.32: 661,6 keV enerjili gama ışınları için α 'nın soğurucu malzemelerin kütle numarasına göre değişimi



Şekil 5.33: 1115,5 keV enerjili gama ışınları için α 'nın soğurucu malzemelerin kütle numarasına göre değişimi



Şekil 5.34: 1598 keV enerjili gama ışınları için α 'nın soğurucu malzemelerin kütle numarasına göre değişimi



Şekil 5.35: 2753,9 keV enerjili gama ışınları için α 'nın materyale soğurucu malzemelerin kütle numarasına göre değişimi



6 TARTIŞMA

Gama ışınlarının madde içerisindeki ilerleyişi ile ilgili çalışmaların önemi özellikle canlı hücrelere etkisi açısından oldukça önemlidir. Bu etki yüzünden canlılarla yapılacak herhangi bir deneyin tehlikeleri göz önünde bulundurulduğunda simülasyonlar oldukça iyi bir alternatif olarak kullanılabilir. Bu çalışmayla GEANT4 simülasyonlarının gerçek deneylere ne kadar yakın sonuçlar verebildiği gösterilmiştir.

Kesirsel matematik, fizik ve mühendislikte ilginç uygulamaları olan bir matematik dalıdır. Kuantum fiziğinde kesirsel Schrödinger denklemi ve elektronikte kesirsel PID kontrol döngüsü bu uygulamalara birer örnektir. Bu çalışmada soğurma denkleminin kesirsel olarak çözümü aşağıdaki şekilde uygulanmıştır:

$$I(x) = I_0 E_\alpha(-\mu^\alpha x^\alpha)$$

Bu çözümle kesirsel matematik, parçacık ve madde etkileşimi simülasyonlarından daha gerçekçi sonuçlar almayı sağlayabilecek bir araç olarak sunulmuştur.

Çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- İlk aşamada tamamlanan simülasyondan alınan sonuçlar ile literatürden alınan sonuçlar karşılaştırıldığında GEANT4'un madde/parçacık etkileşimi simülasyonlarında çok başarılı olduğu gözlemlenmektedir.
- Tablo 5.3 ile tablo 5.1 karşılaştırıldığında ortalama hata payının %2,8'den daha az olduğu görülebilir. En yüksek hata payları sırasıyla malzeme olarak karbon (6C) ve kükürtte (16S), gama enerjisi olarak da 88,09 keV ve 145,41 keV'de görülmüştür. Bunlar ortalamadan çıkarıldığında da hata payı yaklaşık olarak %1,7 civarına düşmektedir.
- 5.3-5.35 arasındaki grafiklerde incelendiğinde, hem atom kütlesi hem de gama enerjisi arttıkça kesirsel türev mertebesi α 'nın 1'e, yani standart türev mertebesine yaklaştığı açıkça görülmektedir. Bu sonuçtan da,

yüksek enerjili ışınlar ve yüksek kütleli malzemeler için GEANT4'un daha iyi sonuç verdiği söylenebilir.



Kaynaklar

Agostinelli S., Allison J., Amako K., Apostolakis J., Araujo H., Arce P., Asai M., Axen D., Banerjee S., Barrand G., Behner F., Bellagamba L., Boudreau J., Broglia L., Brunengo A., Burkhardt H., Chauvie S., Chuma J., Chytráček R., Cooperman G., Cosmo G., Degtyarenko P., Dell'Acqua A., Depaola G., Dietrich D., Enami R., Feliciello A., Ferguson C., Fesefeldt H., Folger G., Foppiano F., Forti A., Garelli S., Giani S., Giannitrapani R., Gibin D., Gómez Cadenas J. J., González I., Gracia Abril G., Greeniaus G., Greiner W., Grichine V., Grossheim A., Guatelli S., Gumplinger P., Hamatsu R., Hashimoto K., Hasui H., Heikkinen A., Howard A., Ivanchenko V., Johnson A., Jones F. W., Kallenbach J., Kanaya N., Kawabata M., Kawabata Y., Kawaguti M., Kelner S., Kent P., Kimura A., Kodama T., Kokoulin R., Kossov M., Kurashige H., Lamanna E., Lampén T., Lara V., Lefebvre V., Lei F., Liendl M., Lockman W., Longo F., Magni S., Maire M., Medernach E., Minamimoto K., Mora de Freitas P., Morita Y., Murakami K., Nagamatsu M., Nartallo R., Nieminen P., Nishimura T., Ohtsubo K., Okamura M., O'Neale S., Oohata Y., Paech K., Perl J., Pfeiffer A., Pia M. G., Ranjard F., Rybin A., Sadilov S., Di Salvo E., Santin G., Sasaki T., Savvas N., Sawada Y., Scherer S., Sei S., Sirotenko V., Smith D., Starkov N., Stoecker H., Sulkimo J., Takahata M., Tanaka S., Tcherniaev E., Safai Tehrani E., Tropeano M., Truscott P., Uno H., Urban L., Urban P., Verderi M., Walkden A., Wander W., Weber H., Wellisch J. P., Wenaus T., Williams D. C., Wright D., Yamada T., Yoshida H. & Zschiesche D. (2003). Geant4 - A Simulation Toolkit. European Organization for Nuclear Research (CERN) Switzerland. DOI: 10.1016/S0168-9002(03)01368-8

Ahmad, S., Hammad, R., Seemin R. (2022). Gamma Radiation-Induced Synthesis of Polyaniline-Based Nanoparticles/Nanocomposites, Journal of Electronic Materials, DOI: 10.1007/s11664-022-09823-0

Akman, F. Turan, V., Sayyed, M.I., Akdemir, F., Kaçal, M.R., Durak, R. and Zaid, M.H.M. (2019). Comprehensive study on evaluation of shielding

parameters of selected soils by gamma and X-rays transmission in the range 13.94–88.04 keV using WinXCom and FFAST programs, *Results in Physics*, 15(2019), 102751.

Akyildirim, H., Kavaz, E., El-Agawany, F.I., Yousef, E. and Rammah, Y.S. (2020). Radiation shielding features of zirconolite silicate glasses using XCOM and FLUKA simulation code, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 545(2020), 20245.

Al-Buriahi, M.S., Arslan, H. and Tonguç, B.T. (2019). Mass attenuation coefficients, water and tissue equivalence properties of some tissues by Geant4, XCOM and experimental data, *Indian Journal of Pure & Applied Physics*, 57(2019), 433-437.

Allison, J., Amako, K., Apostolakis, J., Araujo, H., Arce Dubois, P., Asai, M., Barrand, G., Capra, R., Chauvie, S., Chytráček, R., Cirrone, G. A. P., Cooperman, G., Cosmo, G., Cuttone, G., G. Daquino, G., Donszelmann, M., Dressel, M., Folger, G., Foppiano, F., Generowicz, J., Grichine, V., Guatelli, S., Gumplinger, P., Heikkinen, A., Hrivnacova, I., Howard, A., Incerti, S., Ivanchenko, V., Johnson, T., Jones, F., Koi, T., Kokoulin, R., Kossov, M., Kurashige, H., Lara, V., Larsson, S., Lei, F., Link, O., Longo, F., Maire, M., Mantero, A., Mascialino, B., McLaren, I., Mendez Lorenzo, P., Minamimoto, K., Murakami, K., Nieminen, P., Pandola, L., Parlati, S., Peralta, L., Perl, J., Pfeiffer, A., Pia, M. G., Ribon, A., Rodrigues, P., Russo, G., Sadilov, S., Santin, G., Sasaki, T., Smith, D., Starkov, N., Tanaka, S., Tcherniaev, E., Tomé, B., Trindade, A., Truscott, P., Urban, L., Verderi, M., Walkden, A., Wellisch, P. J., Williams, D. C., Wright, D., & Yoshida, H. (2016). Geant4 Developments and Applications. DOI: 10.1109/TNS.2006.869826

Allison J., Amako K., Apostolakis J., Arce P., Asai M., Aso T., Bagli E., Bagulya A., Banerjee S., Barrand G., Beck B. R., Bogdanov A. G., Brandt D., Brown J. M. C., Burkhardt H., Canal Ph., Cano-Ott D., Chauvie S., Cho K., Cirrone G. A. P., Cooperman G., Cortés-Giraldo M. A., Cosmo

G., Cuttone G., Depaola G., Desorgher L., Dong X., Dotti A., Elvira V. D., Folger G., Francis Z., Galoyan A., Garnier L., Gayer M., Genser K. L., Grichine V., Guatelli S., Guèye P., Gumplinger P., Howard A. S., Hřivnáčová I., Hwang S., Incerti S., Ivanchenko A., Ivanchenko V. N., Jones F. W., Jun S. Y., Kaitaniemi P., Karakatsanis N., Karamitros M., Kelsey M., Kimura A., Koi T., Kurashige H., Lechner A., Lee S. B., Longo F., Maire M., Mancusi D., Mantero A., Mendoza E., Morgan B., Murakami K., Nikitina T., Pandola L., Paprocki P., Perl J., Petrović I., Pia M. G., Pokorski W., Quesada J. M., Raine M., Reis M. A., Ribon A., Ristić Fira A., Romano F., Russo G., Santin G., Sasaki T., Sawkey D., Shin J. I., Strakovsky I. I., Taborda A., Tanaka S., Tomé B., Toshito T., Tran H. N., Truscott P. R., Urban L., Uzhinsky V., Verbeke J. M., Verderi M., Wendt B. L., Wenzel H., Wright D. H., Wright D. M., Yamashita T., Yarba J. & Yoshida H. (2016). Recent Developments in GEANT4. Geant4 Associates International Ltd., 9 Royd Terrace, Hebden Bridge HX7 7BT, United Kingdom. DOI: 10.1016/S0168-9002(03)01368-8

Arslan, H. (2019). Photon attenuation parameters for some tissues from Geant4 simulation, theoretical calculations and experimental data: a comparative study, *Nuclear Science and Techniques*, 30(96), 10s.

Casasanta, G., Ciani, D. and Garra, R. (2012). Non-exponential extinction of radiation by fractional calculus modelling, *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 113(2012), 194-197.

Casasanta, G., Falcini, F. and Garra, R. (2022). Beer–Lambert law in photochemistry: A new approach. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 432(2022), 114086.

A. L. Conner, H. F. Atwater, and Elizabeth H. Plassmann (1970). *Gamma-Ray Attenuation-Coefficient* University of California, Los Alamos Scientific Laboratory, Los Alamos, New Mexico, USA. Measurements.

Cruz-Lopez, C.A. and Espinosa-Paredes, G. (2022). Fractional radioactive

decay law and Bateman equations, Nuclear Engineering and Technology, 54(1), 275-282.

Çalık, A.E., Şirin, H., Ertik, H., Öder, B. and Şen, M. (2014). Half-lives of spherical proton emitters within the framework of fractional calculus, International Journal of Modern Physics E, 23(9), 1450044.

Çalık, A.E., Ertik, H., Öder, B. and Şirin, H. (2013). A fractional calculus approach to investigate the alpha decay processes, International Journal of Modern Physics E, 22(7), 1350049.

Çalık, A.E., Şirin, H., Ertik, H., Şen, M. (2016). Analysis of charge variation in fractional order LC electrical circuit, Revista Mexicana de Fisica, 62(2016), 437-441.

Elbashir, B.O., Sayyed, M.I., Dong, M.G., Elmahroug, Y., Lakshminarayana, G. and Kityk, I.V. (2019). Characterization of $Bi_2O_3 - ZnO - B_2O_3$ and $TeO_2 - ZnO - CdO - Li_2O - V_2O_5$ glass systems for shielding gamma radiation using MCNP5 and Geant4 codes, Journal of Physics and Chemistry of Solids, 126(2019), 112-123.

Elzahar, E.R., Gaber, A.A., Aljohani, A.F., Machado, J.T. and Ebaid, A. (2020). Generalized Newtonian fractional model for the vertical motion of a particle, Applied Mathematical Modelling, 88(2020), 652-660.

Ertik, H., Çalık, A.E., Şirin, H., Şen, M. and Öder, B. (2015). Investigation of electrical RC circuit within the framework of fractional calculus, Revista Mexicana de Fisica, 61(2015), 58-

Gerward, L. (1999). Paul Villard and his Discovery of Gamma Rays, Physics in Perspective, 1(1999), 367-383.

Gerward, L., Guilbert, N., Jensen, K.B. and Levring, H. (2001). X-ray absorption in matter. Reengineering XCOM, Radiation Physics and Chemistry, 60(1-2), 23-24.

- Gomez-Aguilar, J.F., Atangana, A., Morales-Delgado, V. F. (2017). Electrical circuits RC, LC, and RL described by Atangana–Baleanu fractional derivatives, *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 45(11), 1514-1533.
- Gomez-Aguilar, J.F., Rosales-Garcia, J.J., Bernal-Alvarado, J.J., Cordova-Fraga, T. and Guzman-Cabrera, R. (2012). Fractional mechanical oscillators, *Revista Mexicana de Fisica*, 58(2012), 348-352.
- Gomez-Aguilar, J.F., Yepez-Martinez, H., Calderon-Ramon, C., Cruz-Orduna, I., Escobar-Jimenez, R.F. (2015). Modeling of a Mass-Spring-Damper System by Fractional Derivatives with and without a Singular Kernel, *Entropy*, 2015(17), 6289-6303.
- Jornet, M. (2023). On the random fractional Bateman equations, *Applied Mathematics and Computation*, 457(2023), 128197.
- Kebaili, I., Sayyed, M.I., Boukhris, I. and Al-Buriahi, M.S. (2020). Gamma-ray shielding parameters of lithium borotellurite glasses using Geant4 code, *Applied Physics A*, 126(536), 7s.
- Kenneth S. Krane (1988). *Introductory Nuclear Physics*. ISBN: 0-471-80553-X
- Lee, I. Y., Deleplanque, M. A., Vetter K. (2003). Developments in Large Gamma-Ray Detector Arrays, Nuclear Science Division, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, 94720, USA, *Reports on Progress in Physics*, 66 (2003) 1095–1144
- Medhat, M.E. (2015). Comprehensive study of photon attenuation through different construction matters by Monte Carlo Simulation, *Radiation Physics and Chemistry*, 107(2015), 65-74.
- Medhat, M.E. and Wang, Y. (2013). Geant4 code for simulation attenuation of gamma rays through scintillation detectors, *Annals of Nuclear Energy*, 62(2013), 316-320.

- Miller, K. S. & Ross, B. (1993). An Introduction to the Fractional Calculus and Fractional Differential Equations ISBN: 0-471-58884-9
- Mittag-Leffler, M.G. (1903). Sur la Nouvelle Fonction $E_\alpha(x)$, Comptes Rendus de l'Academie des Sciences Paris, 137(1903), 554-558.
- Podlubny, I. (1999). Technical University of Kosice, Slovak Republic. Fractional Differential Equations. ISBN: 0-12 558830-2
- Podlubny, I. (1999). Fractional Differential Equations, Academic Press, San Diego.
- Qureshi, S. and Aziz, S. (2020). Fractional modeling for a chemical kinetic reaction in a batch reactor via nonlocal operator with power law kernel, Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 542(2020), 123494.
- Röntgen, W.C. (1895). Ueber eine neue art von strahlen, Ann. D. Phys. U. Chem. N. F., (64), 12-17.
- Singh, V.P., Medhat, M.E. and Shirmardi, S.P. (2015). Comparative studies on shielding properties of some steel alloys using Geant4, MCNP, WinXCOM and experimental results, Radiation Physics and Chemistry, 106(2015), 255-260.
- Singh, V.P., Medhat, M.E. and Badiger, N.M. (2015). Photon energy absorption coefficients for nuclear track detectors using Geant4 Monte Carlo simulation, Radiation Physics and Chemistry, 106(2015), 83-87.
- Şen, M. and Çalık, A.E. (2014). Calculation of half-value thickness for aluminum absorbers by means of fractional calculus, Annals of Nuclear Energy, 63(2014), 46-50.
- Şen, M., Çalık, A.E. and Ertik, H. (2014). Determination of half-value thickness of aluminum foils for different beta sources by using fractional calculus, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 335(2014), 78-84.

Şen, M., Çalık, A.E. and Şirin, H. (2019). Theoretical investigation of tenth-value thicknesses of aluminium absorbers, AIP Conference Proceedings, 2178(1), 030058.

Şengül, A. (2023). Gamma-ray attenuation properties of polymer biomaterials: Experiment, XCOM and GAMOS results, Journal of Radiation Research and Applied Sciences, 16(4), 100702.

Vahabi, S.M., Bahreinipour, M. and Zafarghandi, M.S. (2017). Determining the mass attenuation coefficients for some polymers using MCNP code: A comparison study, Vacuum, 136(2017), 73-76.



TEŞEKKÜR

Tez çalışmamda bilgisi ve tecrübesini esirgememiş, yüksek lisans eğitiminin keyifle geçmesini sağlamış, beni hep daha çok çalışmaya, kendimi geliştirmeye teşvik eden, örnek bir bilimci ve eğitimci olarak tanıdığım Doç. Dr. Abdullah Engin Çalık hocama teşekkürlerimi borç bilirim.

Ayrıca bana yüksek lisans yolunu açmış ve bu süreçte yardımlarını esirgememiş Doç. Dr. Hüseyin Şirin hocama teşekkürlerimi sunarım.

Tüm eğitim hayatım boyunca benden hiçbir desteğini esirgememiş aileme sonsuz teşekkürü borç bilirim.

02/09/2024

İmzası

Cihad Tekin

ÖZGEÇMİŞ

Üniversiteye kadar olan eğitimini İstanbul, Erzincan ve Denizli’de tamamladı. Bilime ve mühendisliğe olan ilgisi sayesinde 2006 yılında Ege Üniversitesinde fizik bölümüne başladı. Lisans eğitiminin ikinci yılında yazılım geliştirici olarak bilgi teknolojileri sektörüne giriş yaptı. 2015 yılında fizik ana bilim dalı, nükleer fizik programında yüksek lisansa başladı ama çeşitli sebeplerle yarıda bırakıp 2023’te devam etti.

