

**T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI**



**KAN DOKUSUNDAKİ FOTON ETKİLEŞİM TESİR
KESİTLERİNİN DÜŞÜK ENERJİLİ FOTONLAR İÇİN
HESAPLANMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DUYGU GENCER

BALIKESİR, KASIM - 2018

**T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI**



**KAN DOKUSUNDAKİ FOTON ETKİLEŞİM TESİR
KESİTLERİNİN DÜŞÜK ENERJİLİ FOTONLAR İÇİN
HESAPLANMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DUYGU GENCER

Jüri Üyeleri : Dr. Öğr. Üyesi Aysun BÖKE (Tez Danışmanı)

Dr. Öğr. Üyesi Gülay İNLEK

Dr. Öğr. Üyesi Cengiz AKAY

BALIKESİR, KASIM - 2018

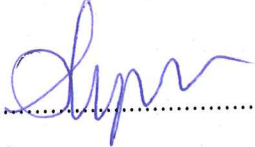
KABUL VE ONAY SAYFASI

Duygu GENCER tarafından hazırlanan “KAN DOKUSUNDAKİ FOTON ETKİLEŞİM TESİR KESİTLERİNİN DÜŞÜK ENERJİLİ FOTONLAR İÇİN HESAPLANMASI” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 02.11.2018 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

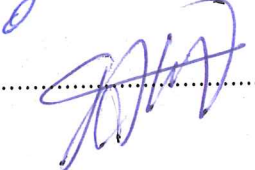
Danışman
Dr. Öğr. Üyesi AYSUN BÖKE


.....

Üye
Dr. Öğr. Üyesi Gülşay İNLEK


.....

Üye
Dr. Öğr. Üyesi Cengiz AKAY


.....

Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Prof. Dr. Necati ÖZDEMİR

.....

ÖZET

KAN DOKUSUNDAKİ FOTON ETKİLEŞİM TESİR KESİTLERİNİN DÜŞÜK ENERJİLİ FOTONLAR İÇİN HESAPLANMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DUYGU GENCER

BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FİZİK ANABİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI: DR. ÖĞR. ÜYESİ AYSUN BÖKE)

BALIKESİR, KASIM - 2018

Fotoelektrik soğurma, koherent (Rayleigh) ve inkoherent (Compton) saçılmayı içine alan foton etkileşim tesir kesitleri, 1-150 keV enerji aralığında kan dokusu için hesaplanmıştır. Moleküler fotoelektrik soğurma tesir kesiti değerleri atomik tesir kesiti verilerinden hesaplanmıştır. Moleküler koherent ve inkoherent saçılma tesir kesitleri, sırasıyla rölativistik modifiye olmuş form faktör ve inkoherent saçılma fonksiyonu yaklaşımı kullanılarak hesaplanmıştır. Moleküler girişim etkilerini hesaba katarak elde edilen moleküler form faktör ve inkoherent saçılma fonksiyonu ayrıca hesaplanmıştır. Koherent saçılmaya moleküler girişim etkilerinin dâhil edilmesi ile kan dokusundan saçılan radyasyonun daha doğru bilgisi medikal görüntüleme için temin edilmiş olacaktır.

ANAHTAR KELİMELER: Kan dokusu, foton etkileşim tesir kesitleri, fotoelektrik soğurma, koherent saçılma, inkoherent saçılma, moleküler form faktör, moleküler girişim etkisi.

ABSTRACT

THE CALCULATION FOR LOW ENERGY PHOTONS OF THE PHOTON INTERACTION CROSS SECTION IN BLOOD TISSUE

**M.SC. THESIS
DUYGU GENCER
BALIKESIR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
PHYSICS
(SUPERVISOR: ASSIST. PROF. DR. AYSUN BÖKE)**

BALIKESIR, NOVEMBER 2018

The photon interaction cross sections which contain the photoelectric absorption, coherent (Rayleigh) and incoherent (Compton) scattering are calculated for blood tissue in the energy range of 1-150 keV. The molecular photoelectric absorption cross section is achieved from atomic cross section data. The molecular coherent (Rayleigh) and incoherent (Compton) scattering cross sections are estimated using relativistic modified form factor and incoherent scattering function approximation, respectively. The molecular form factor updated including molecular interference affects and incoherent scattering function were also calculated. With the inclusion of the molecular interference effects in the coherent (Rayleigh) scattering, the more accurate data of the radiation scattered from blood will be provided for medical imaging.

KEYWORDS: Blood tissue, photon interaction cross sections, photoelectric absorption, coherent scattering, incoherent scattering, molecular form factor, molecular interference effect.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

| | |
|--|-----------|
| ÖZET..... | i |
| ABSTRACT..... | ii |
| İÇİNDEKİLER..... | iii |
| ŞEKİL LİSTESİ..... | iv |
| TABLO LİSTESİ..... | v |
| SEMBOL LİSTESİ..... | vi |
| ÖNSÖZ..... | vii |
| 1. GİRİŞ..... | 1 |
| 2. X-IŞINLARININ MADDE İLE ETKİLEŞİMLERİ..... | 3 |
| 2.1 Fotoelektrik Soğurma..... | 3 |
| 2.2 Koherent (Rayleigh) Saçılma..... | 3 |
| 2.3 İnkohherent (Compton) Saçılma..... | 4 |
| 3. TESİR KESİTİ..... | 6 |
| 3.1 Diferansiyel Tesir Kesiti..... | 6 |
| 3.2 Lineer Zayıflama Katsayısı..... | 8 |
| 3.3 Kütle Zayıflama Katsayısı..... | 8 |
| 4. MONTE CARLO BENZETİŞİM YÖNTEMİ..... | 9 |
| 4.1 Etkileşim Sürecinin Simülasyonu..... | 10 |
| 5. SONUÇ VE TARTIŞMA..... | 11 |
| 6. KAYNAKLAR..... | 33 |
| 7. EKLER..... | 37 |
| EK A..... | 37 |
| EK B..... | 40 |
| EK C..... | 43 |

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

- Şekil 3.1:** θ açısında $d\theta$ açı aralığına diferansiyel saçılma.....8
- Şekil 5.1:** ICRP [10] ve ICRU [9] elementel bolluklar kullanılarak hesaplanan teorik moleküler form faktör değerlerinin, deneysel form faktör değerleri [11] ile birlikte gösterimi.....16
- Şekil 5.2:** ICRP [10] elementel bolluk kullanılarak hesaplanan moleküler koherent ve inkoherent saçılma tesir kesitleri.....20
- Şekil 5.3:** ICRU [9] elementel bolluk kullanılarak hesaplanan moleküler koherent ve inkoherent saçılma tesir kesitleri.....20
- Şekil 5.4:** Monte Carlo simülasyon sonuçlarının 50 keV (mavi çizgi), 100 keV (kırmızı çizgi) ve 150 keV (siyah çizgi) foton enerjileri için gösterimi.....31
- Şekil 5.5:** ICRU [9] elementel bolluk kullanılarak hesaplanan moleküler fotoelektrik soğurma tesir kesitleri.....32

TABLO LİSTESİ

Sayfa

- Tablo 5.1:** Kan dokusuna ait relativistik modifiye olmuş atomik form faktörleri kullanılarak hesaplanan teorik moleküler form faktörleri olan $F_m(x)$, ICRP [10] ve ICRU [9] elementel bolluklar kullanılarak sütun 3 ve 4'te sırasıyla sunulmuştur. Peplow ve Vergheese [11] deneysel sonuçları da sütun 2'de karşılaştırmalı olarak listelenmiştir.....12
- Tablo 5.2:** Teorik moleküler inkoherent saçılma fonksiyonları olan $S_m(x)$, ICRP [10] ve ICRU [9] elementel bolluklar kullanılarak hesaplanmış ve sırasıyla sütun 2 ve 3'te listelenmiştir.....18
- Tablo 5.3:** ICRP [10] elementel bolluk kullanılarak, moleküler koherent (Rayleigh) saçılma tesir kesitleri sütun 2'de, girişim etkileri dâhil edilerek hesaplanan moleküler koherent saçılma tesir kesitleri sütun 3'te listelenmiştir. Moleküler inkoherent (Compton) saçılma ve moleküler fotoelektrik soğurma tesir kesitleri de sırasıyla sütun 4 ve 5'te sunulmaktadır.....21
- Tablo 5.4:** ICRU [9] elementel bolluk kullanılarak, moleküler koherent (Rayleigh) saçılma tesir kesitleri sütun 2'de, girişim etkileri dâhil edilerek hesaplanan moleküler koherent saçılma tesir kesitleri sütun 3'te listelenmiştir. Moleküler inkoherent (Compton) saçılma ve moleküler fotoelektrik soğurma tesir kesitleri de sırasıyla sütun 4 ve 5'te sunulmaktadır.....24
- Tablo 5.5:** Kan dokusuna ait ICRP [10] ve ICRU [9] elementel bolluklar kullanılarak hesaplanan lineer zayıflama katsayılarının [1/cm] sonuçları, sütun 2 ve 3'te sırasıyla sunulmuştur. Hesaplanan bu sonuçlar, literatürdeki teorik ve deneysel veriler ile sütun 4'te karşılaştırılmıştır.....27

SEMBOL LİSTESİ

| | |
|----------------|---|
| σ | : Tesir kesiti |
| σ_{ph} | : Fotoelektrik tesir kesiti |
| N_A | : Avagadro sayısı |
| ρ | : Yoğunluk |
| A_i | : i . elementin atomik kütlesi |
| w_i | : i . elementin kütle kesri |
| σ_i | : i . elementin atomik tesir kesiti |
| $S(x, Z)$ | : İnkohherent saçılma fonksiyonu |
| σ_{inc} | : İnkohherent saçılma tesir kesiti |
| $d\sigma_{KN}$ | : Klein-Nishina diferansiyel saçılma tesir kesiti |
| θ | : Açık ($0 - \pi$) |
| $S_m(x)$ | : Moleküler inkohherent saçılma fonksiyonu |
| $S_i(x, Z_i)$ | : i . elementin atomik inkohherent saçılma fonksiyonu |
| W | : Moleküler ağırlık |
| M_i | : i . elementin atomik kütlesi |
| Z_i | : i . elementin atom sayısı |
| σ_{coh} | : Koherent saçılma tesir kesiti |
| $d\sigma^T$ | : Serbest bir elektron için klasik ya da Thomson tesir kesiti |
| $F_m(x)$ | : Moleküler form faktör |
| $F_i(x, Z_i)$ | : i . elementin atomik form faktörü |
| ϕ | : Açık ($0 - 2\pi$) |
| Ω | : Toplam katı açı |
| $d\Omega$ | : Katı açı |
| σ_T | : Toplam tesir kesiti |
| A | : Alan |
| r | : Mesafe |
| μ | : Lineer zayıflama katsayısı |
| ph | : Fotoelektrik soğurma |
| R | : Koherent (Rayleigh) saçılma |
| C | : İnkohherent (Compton) saçılma |
| μ_{ph} | : Fotoelektrik soğurmada sorumlu lineer zayıflama katsayısı |
| μ_R | : Koherent (Rayleigh) saçılmadan sorumlu lineer zayıflama katsayısı |
| μ_C | : İnkohherent (Compton) saçılmadan sorumlu lineer zayıflama katsayısı |
| $f(x)$ | : x 'e bağlı olarak değişen sıklık fonksiyonu |
| $p(x)$ | : Olasılık yoğunluk fonksiyonu |
| $P(x)$ | : Toplam olasılık yoğunluk fonksiyonunu |
| q | : Rastgele sayı |
| $p(i)$ | : Belirli bir etkileşim tipinin meydana gelme olasılığı |
| σ_i | : Belirli bir etkileşim tipinin meydana gelme tesir kesiti |
| i | : Meydana gelen etkileşimlerin sayısı |
| P_{inc} | : İnkohherent saçılma olasılık fonksiyonu |
| P_{coh} | : Koherent saçılma olasılık fonksiyonu |
| N_i | : Kan dokusundaki i . element |
| Q_i | : Kan dokusundaki i . elementin kütlesi |

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde, değerli bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşan, kendisine ne zaman ihtiyaç duysam kıymetli zamanını ayırıp sabırla ve ilgiyle bana faydalı olabilmek için elinden gelenin fazlasını sunan, güler yüzüyle samimiyetini benden hiçbir zaman esirgemeyen ve gelecekteki meslek hayatımda da bana verdiği değerli bilgilerinden faydalanabileceğimi düşündüğüm kıymetli danışmanım Dr.Öğr. Üyesi Aysun BÖKE'ye teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmamı yürütmede, deneyimlerini ve desteğini benden esirgemeyen sevgili arkadaşım Nadir KAPLAN'a çok teşekkür ederim.

Hayatım boyunca maddi ve manevi desteğini benden hiçbir zaman esirgemeyen, bu hayattaki en büyük şansım olan değerli; Babam Sedat GENCER'e, Annem Zühal Nihal GENCER'e ve Ağabeyim Ufuk GENCER'e sonsuz teşekkür ederim.

Balıkesir, 2018

Duygu GENCER

1. GİRİŞ

Moleküller, dokular ve biyolojik materyaller için foton etkileşim tesir kesitleri, medikal radyasyon fizik komitesi ve medikal radyasyon teknolojisi alanında gereklidir [1-3]. Saçılan radyasyonun bilgisi ve saçılma sürecinin doğru bir tarifi görüntüleme sisteminin tam olarak anlaşılmasına müsaade eder. Teknik, farklı vücut dokularından koherent bir şekilde saçılan fotonların dağılımındaki farklılıklara dayanır [4]. Koherent ve inkoherent saçılma dağılımları, radyolojik görüntüyü simüle etmek için detaylı olarak bilinmelidir. Radyografik teknikler spesifik bir organ veya vücudu oluşturan biyolojik dokular arasındaki zayıflama katsayılarının farklılıklarına dayalıdır. Zayıflama katsayıları endüstriyel, biyolojik, ziraat alanında ve medikal çalışmalarda büyük etkiye sahiptir. Zayıflama katsayılarının doğru değerleri teorinin geçerli olduğu bölgeleri oluşturmak için gereklidir. Bundan başka tomografi, radyasyon biyofiziği gibi zıt alanlarda da gerekli veri temin eder. Dokuların zayıflama özelliklerinin doğru bilgisi görüntüleme kalitesini iyileştirmek ve aynı zamanda hastada soğurulan dozu minimize etmek için gereklidir [5]. Bu değerler bilgisayarla hesaplanmış tomografi (CT) taramalarında görülenler ve bilginin doğru yorumlanması için ayrıca yardımcı olacaktır [6].

Zayıflama katsayılarının tabloları literatürde, Berger ve Hubbell [7] tarafından verilen XCOM isimli bilgisayar programı kullanılarak hesaplanmıştır. Ancak bu program, farklı atomlardan saçılan fotonlar arası girişim etkilerini ihmal ettiğinden dolayı koherent saçılma difraksiyonunda meydana gelen fotonların girişimini doğru bir şekilde modellemez. Moleküller ve kompleks yapılarıdaki koherent saçılmayı daha doğru bir şekilde modellemek için simülasyonun modifiye edilmiş olması gerekmektedir [8].

Bu çalışmada kanın düşük enerjili foton etkileşim özellikleri çalışılmıştır. Kanın elementel kompozisyon ve yoğunlukları, ICRU [9] ve ICRP [10] den temin edilmiştir. ICRU [9] kullanılarak hesaplanan rölativistik modifiye olmuş moleküler form faktörlerinin, deneysel moleküler form faktörleri [11] ile daha uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Bu yüzden tüm teorik hesaplamalar, ICRU [9] kullanılarak elde edilmiştir. Fotoelektrik soğurma, koherent ve inkoherent saçılma tesir kesitlerini

içine alan teorik zayıflama katsayıları, daha önce rapor edilen deneysel zayıflama katsayıları [6, 12, 13] ile uyum içerisinde olduğu gözlemlenmiştir. Moleküler girişim etkilerinin dâhil edildiği moleküler form faktörlerinin katılması ile tekrar düzenlenen Monte Carlo programı, kan dokusundan saçılan fotonların enerji dağılımını simüle etmek için kullanılmıştır. Simülasyonun sonuçları 50 keV, 100 keV ve 150 keV enerjiler için sunulmuştur. Bildiğimiz kadarıyla bu çalışmada bulunan sonuçlar literatürde daha önce rapor edilmemiştir. Bu yönüyle, bu çalışma önemlidir.



2. X-IŞINLARININ MADDE İLE ETKİLEŞİMLERİ

1-150 keV enerji aralığında foton ve madde arasındaki üç etkileşim süreci göz önünde bulundurulmalıdır: Fotoelektrik soğurma, koherent (Rayleigh) saçılma ve inkoherent (Compton) saçılma.

2.1 Fotoelektrik Soğurma

Bir bileşik veya karışım için moleküler fotoelektrik tesir kesitine (σ_{ph}) ait verilerin eksikliğinden dolayı, moleküler fotoelektrik tesir kesiti olan σ_{ph} (cm^{-1}) (her bir element için barn ve cm arasında uygun dönüşüm yapılarak), (2.1) eşitliğine [14] göre hesaplanabilmektedir.

$$\sigma_{ph} = \rho N_A \sum_i \frac{w_i}{A_i} \sigma_i \quad (2.1)$$

Burada N_A avagadro sayısı, ρ yoğunluktur. A_i , w_i ve σ_i ise sırasıyla; i . elementin atomik kütlesi, kütle kesri ve ortamın atomik fotoelektrik tesir kesitidir. Moleküler fotoelektrik soğurma tesir kesitleri, dokuların bileşimlerine ve yoğunluklarına göre (2.1) eşitliği kullanılarak elde edilmiştir. Atomik fotoelektrik tesir kesitleri, Scofield [15] teorik verilerinden alınmıştır.

2.2 Koherent (Rayleigh) Saçılma

Moleküler koherent (Rayleigh) saçılma tesir kesiti, molekül başına tüm mümkün saçılma açıları üzerinden diferansiyel tesir kesitlerinin integre edilmesi ile bulunmuş olur. Bunu, (2.2) eşitliğindeki gibi moleküler form faktör cinsinden ifade edebiliriz.

$$\sigma_{mol} = \int_{\theta=0}^{\theta=\pi} d\sigma^T(\theta) [F_m(x)]^2 \quad (2.2)$$

Burada $d\sigma^T$, tek bir serbest elektron için klasik veya Thomson [16] tesir kesitidir. $F_m(x)$, momentum transfer değişkeni olan x ($x = \lambda^{-1} \sin(\theta/2)$)'in bir fonksiyonu olan moleküler form faktördür.

Moleküler form faktörünü hesaplamak için basit bir toplam kuralı kullanılır. Bu kural aşağıdaki (2.3) eşitliğindeki gibi formülize edilebilir.

$$\frac{F_m^2(x)}{W} = \sum_i \frac{w_i}{M_i} F_i^2(x, Z_i) \quad (2.3)$$

Burada M_i , w_i ve Z_i sırasıyla, i . elementin atomik kütlesi, kütle kesri ve atom sayısıdır. W moleküler ağırlıktır. $F_m(x)$, $x \geq 1 \text{ \AA}^{-1}$ 'in değerleri için hesaplanan moleküler form faktör değerleridir. i . elementin atomik form faktörü olan $F_i(x, Z_i)$, Schaupp ve diğ. gerçekleştirdikleri çalışma [20] verilerinden alınmıştır. Momentum transferinin küçük değerlerinde, moleküler girişim etkilerinden dolayı, teorik moleküler form faktörler uygulanamaz. Bu sebeple, $x < 1 \text{ \AA}^{-1}$ değerleri için, $F_m(x)$ değerleri, Peplow ve Verghese [11] deneysel verilerinden alınmıştır. Daha önceki araştırmacılar [7, 17-19] tarafından rapor edildiği gibi, momentum transferinin büyük değerlerinde, bağımsız atomik modelin (IAM) kullanımı ile elde edilenlerle deneysel veriler arasında bir uyum vardır ve bu nedenle toplam kuralı uygulanabilir. Bir molekül için basit bir toplam kuralı (2.3) eşitliğinde verildiği gibi, moleküler form faktörünü hesaplamak için kullanılmaktadır.

2.3 İnkohherent (Compton) Saçılma

Bir fotonun serbest durgun bir elektrondan inkohherent (Compton) saçılması, kutuplanmamış X-ışınları için, Klein ve Nishina (KN) tarafından [21] diferansiyel saçılma kesiti iyi tanımlanmıştır. Düşük gelen enerjilerde, elektron bağlama enerjisi, inkohherent saçılma etkileşimlerinin ihtimalini azaltır. Bu durum, “KN formülü” [21] ile düşük momentum transfer değerlerinde bir düzeltme faktörü olan, elektronun bağlanma etkilerini açıklayan ve inkohherent saçılma fonksiyonu (ISF) olarak adlandırılan $S(x, Z)$ ile çarpılmasıyla bir modifikasyona yol açmaktadır [22, 23]. ISF'yi hesaba dâhil ederek, atom başına toplam inkohherent saçılma tesir kesiti, (2.4) eşitliğindeki gibi yazılabilir.

$$\sigma_{inc} = \int_{\theta=0}^{\theta=\pi} d\sigma_{KN}(\theta) S(x, Z) \quad (2.4)$$

Saçılan dalgalar arasındaki girişim etkileri ve $S(x, Z)$ fonksiyonu üzerindeki moleküler bağlanmanın etkisinin çok az olması nedeniyle, bir molekül ya da karışım için inkohherent saçılma fonksiyonu olan $S_m(x)$, IAM tarafından tahmin edilmektedir.

Böylece, bir molekül veya karışım için toplam kuralının, ISF'nin hesaplanmasında geçerli olduğu görülmektedir. Moleküler inkohherent saçılma fonksiyonu olan $S_m(x)$, dokuların bileşim ve yoğunluklarına göre x 'in tüm değerleri için atomik inkohherent saçılma fonksiyonu olan $S_i(x, Z_i)$ den (2.5) eşitliği kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$\frac{S_m(x)}{W} = \sum_i \frac{w_i}{M_i} S_i(x, Z_i) \quad (2.5)$$

Burada M_i , w_i , ve Z_i sırasıyla, i . elementin atomik kütlesi, kütle kesri, ve atom sayısıdır. W moleküler ağırlıktır. Atomik inkohherent saçılma fonksiyonu $S_i(x, Z_i)$, Hubbell ve diğ. [24] tablolarından alınmıştır.

3. TESİR KESİTİ

Düşük enerjili Gama ışınları maddeyle;

- a) Fotoelektrik Olay
- b) Koherent Saçılma (Rayleigh Saçılma)
- c) İnkohherent Saçılma (Compton Saçılma)

olmak üzere üç şekilde etkileşme yapmaktadır.

Gama ışınlarının maddeyle etkileşmesindeki bu olayların her birinin olma olasılığı; gelen parçacığın enerjisine ve etkileşme ortamının yapısına bağlıdır. Etkileşmenin olma olasılığı, tesir kesiti ile ilişkilidir. Kısaca, tesir kesiti; fotonun gördüğü hedef atomun etki alanı olarak ifade edilebilir, σ simgesi ile gösterilir. Alan boyutunda olduğundan birimi barn (b)'dir ($1b = 10^{-24} \text{ cm}^2 = 10^{-28} \text{ m}^2$). Toplam tesir kesiti ise, elektromanyetik dalga paketçiklerinin maddeyle meydana getirdiği bu etkileşmelerin toplamıdır.

$$\sigma = \sigma_{ph} + \sigma_{coh} + \sigma_{inc} \quad (3.1)$$

Burada; σ_{ph} , fotoelektrik olay, σ_{coh} , koherent saçılma ve σ_{inc} , inkohherent saçılma tesir kesitleridir.

3.1 Diferansiyel Tesir Kesiti

Gelen parçacıklar hedef çekirdekleriyle etkileştiklerinde, her zaman sadece bir tür nükleer reaksiyon meydana getirmeleri beklenmez. Örneğin, birden fazla türde reaksiyon meydana gelmişse; her farklı tür için, her bir tür tesir kesiti genellikle farklı olacaktır. Bu özel tesir kesitlerine kısmi tesir kesitleri denir. Toplam tesir kesiti ise, bunların toplamına eşit olacaktır. Nükleer reaksiyon veya saçılma meydana geldikten sonra, dışarı gönderilen parçacıklar çoğu kez anizotropik dağılım gösterirler ve aynı zamanda farklı açılarda, farklı enerjilere sahip olurlar. Geliş istikametiyle θ açısı yaparak; $d\Omega$ katı açısı içinde, saniyede saçılan parçacıkların sayısının bilinmesi önemlidir. Bunun hesabının yapılabilmesi için, açığa bağımlı başka bir tesir kesiti türü belirlenir. Bu yeni tesir kesitine diferansiyel tesir kesiti adı

verilir. Birim katı başına düşen tesir kesiti olarak tarif edilir. Bu $\sigma(\theta, \phi)$ olarak gösterilebilir.

$$\sigma(\theta, \phi) = \frac{d\theta}{d\Omega} \quad (\text{tesir kesiti/steradian}) \quad (3.2)$$

Böylece toplam tesir kesiti,

$$\sigma_T = \int \frac{d\theta}{d\Omega} d\Omega \quad (3.3)$$

şeklinde ifade edilebilir. $d\Omega$ katı açısının değeri Şekil (3.1)'in yardımıyla hesaplanabilir. $d\Omega$ katı açısı,

$$d\Omega = \frac{\text{alan}}{(\text{mesafe})^2} = \frac{dA}{r^2} = \frac{(rd\theta)(r \sin \theta d\phi)}{r^2} = \sin \theta d\theta d\phi \quad (3.4)$$

ifadesiyle verilir. Toplam katı açısı,

$$\Omega = \int_{\Omega} d\Omega = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} \sin \theta d\theta d\phi = 4\pi \quad (3.5)$$

katı açısı kesri ise,

$$\frac{d\Omega}{\Omega} = \frac{A}{r^2} \times \frac{1}{4\pi} = \frac{A}{4\pi r^2} \quad (3.6)$$

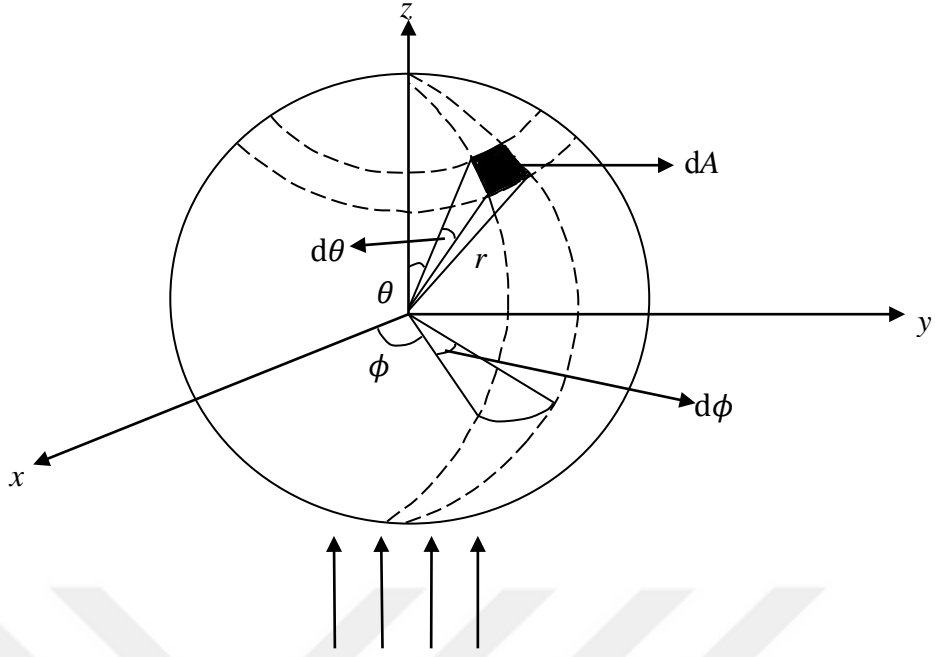
şeklindedir. σ_T , toplam tesir kesiti (3.3) ve (3.4) bağıntıları birleştirilerek bulunabilir.

$$\sigma_T = \int \frac{d\sigma}{d\Omega} d\Omega = \int \frac{d\sigma}{d\Omega} \sin \theta d\theta d\phi \quad (3.7)$$

Diferansiyel tesir kesiti ϕ 'den bağımsız ise, toplam tesir kesiti; (ϕ üzerinden integrasyonu sonrasında)

$$\sigma_T = 2\pi \int \frac{d\sigma}{d\Omega} \sin \theta d\theta \quad (3.8)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada $\frac{d\sigma}{d\Omega} = \sigma(\theta)$ diferansiyel tesir kesitidir.



Şekil 3.1: θ açısında, $d\theta$ açılı aralığına diferansiyel saçılma.

3.2 Lineer Zayıflama Katsayısı

Lineer zayıflama katsayısı μ (cm^{-1}), her bir foton etkileşiminden gelen katılımlarla (3.9) eşitliğindeki gibi ifade edilebilir.

$$\mu = \mu_{ph} + \mu_R + \mu_C \quad (3.9)$$

Burada, ph , R ve C sırasıyla, fotoelektrik soğurma, koherent (Rayleigh) saçılma ve inkoherent (Compton) saçılmayı belirler.

3.3 Kütle Zayıflama Katsayısı

Kütle zayıflama katsayısı, fotonun etkileştiği ortamda, birim alana düşen kütle başına etkileşme adedidir. μ_m simgesi ile gösterilir ve (3.10) eşitliğindeki gibi ifade edilir.

$$\mu_m = \frac{\mu}{g} \quad (3.10)$$

Kütle zayıflama katsayısı, lineer zayıflama katsayısının, ortamın yoğunluğuna bölünmesi ile elde edilir. Birimi m^2/kg 'dır. Bir fotonun kg/m^2 derinliğinde yapacağı toplam etkileşme adedidir.

4. MONTE CARLO BENZETİŞİM YÖNTEMİ

Monte Carlo benzetişim yöntemi, matematiksel veya mantıksal modeller kullanarak bilgisayar aracılığıyla sistem üzerinde deneyler yapmaya yarayan sayısal bir yöntemdir. Monte Carlo uygulamalarında karmaşık sistemler ele alınır. Bu sistemde bulunan değişkenlerin sıklık dağılımları belirlenir. Elde edilen sonuçlardan sıklık fonksiyonu oluşur. x 'e bağlı olarak değişen sıklık fonksiyonu $f(x)$ olsun, sıklık fonksiyonu kullanılarak oluşturulacak olasılık yoğunluk fonksiyonu ise $p(x)$ olsun; olasılık yoğunluk fonksiyonu olan $p(x)$ fonksiyonunu ise,

$$p(x) = \frac{f(x)}{\int_0^{x_0} f(x) dx} \quad (4.1)$$

olarak tanımlamak mümkündür. Olasılık yoğunluk fonksiyonu kullanılarak oluşturulan toplam olasılık yoğunluk fonksiyonunu da (4.2) eşitliğindeki gibi tanımlayabiliriz:

$$P(x) = \int_0^x p(x^*) dx^* \quad (4.2)$$

Elde edilen x 'e bağlı toplam olasılık yoğunluk fonksiyonu $P(x)$, 0 ve 1 arasında değişen değerler almaktadır. Eğer, 0 ve 1 arasında değişen gelişigüzel sayılar üretebilir ve $P(x)$ fonksiyonu yardımıyla bu üretilen gelişigüzel sayılara karşılık gelen x değerlerini bulabilirsek Monte Carlo benzetişim yöntemini uygulamış oluruz. Üretilen gelişigüzel sayıları q ile gösterelim. Bu durumda q sayıları da 0 ve 1 arasında değişen sayılar olduğu için toplam olasılık yoğunluk fonksiyonu,

$$P(x) = q \quad (4.3)$$

olarak ifade edilebilir. Bu q sayılarına karşılık gelen x değerlerini de,

$$x = P^{-1}(q) \quad (4.4)$$

ile formüle edebiliriz. Monte Carlo benzetişim yöntemi bu mantığa dayalı olarak uygulanmış ve sonuçlar alınmıştır.

4.1 Etkileşim Sürecinin Simülasyonu

Ortamda bir etkileşimin meydana geldiği belirlendikten sonra, üç olası etkileşim işleminden biri rastgele örnekleme ile seçilir. Belirli bir etkileşim tipinin meydana gelme olasılığı $p(i)$, onun tesir kesiti olan σ_i ile orantılıdır.

$$p(i) = \frac{\sigma_i}{\sigma_T} \quad (4.5)$$

Burada σ_T toplam tesir kesitidir. i , meydana gelen etkileşimlerin sayısı olmak üzere, aşağıda verilen toplam olasılık yoğunluk fonksiyonu ile rastgele bir değişkendir.

$$P(i) = \frac{\sum_{j=1}^i \sigma_j}{\sigma_T} = \sum_{j=1}^i p(j) \quad (4.6)$$

i sayısı, $[0,1]$ 'de eşit olarak dağılmış bir rastgele sayı q üreterek ve hangi özellikte olduğunu bularak seçilir.

$$P(i-1) \leq q \leq P(i) \quad (4.7)$$

Böylece i . etkileşim süreci, ortaya çıkan etkileşim olarak seçilmektedir. Diferansiyel ve toplam tesir kesitlerden bir olasılık yoğunluk fonksiyonunun oluşturulması, Monte Carlo yönteminin uygulanmasını sağlar.

Program, fotoelektrik soğurma tesir kesitlerine ek olarak koherent, inkoherent saçılma tesir kesitlerini de hesaplar. Giriş foton enerjisi kontrol edilebilir her bir foton enerjisi için, Monte Carlo simülasyonu 5000 kez tekrarlanır. Fotonun etkileşim tipi, aşağıdaki koşullar aracılığıyla rastgele sayı q kullanılarak örneklenir.

$0 < q < P_{inc}$ ise, etkileşimin inkoherent (Compton) saçılma olduğuna karar verilir. Saçılma açısı daha sonra yeniden rastgele sayı üretilerek örneklenmeli ve böylece saçılan foton enerjisinin değeri belirlenmelidir.

$P_{inc} < q < (P_{inc} + P_{coh})$ ise, etkileşimin koherent (Rayleigh) saçılma olduğuna karar verilir. Saçılan foton, orijinal enerjisini korur.

Eğer $(P_{inc} + P_{coh}) < q < 1$ ise, etkileşimin fotoelektrik soğurma olduğuna ve fotonun soğurulduğuna karar verilir.

5. SONUÇ VE TARTIŞMA

Moleküler fotoelektrik soğurma katsayıları (2.1) eşitliği kullanılarak elde edilmiştir. Moleküler koherent saçılma katsayıları, hem moleküler girişim etkilerinin hesabı ile hem de moleküler girişim etkileri olmaksızın (2.2) eşitliğine göre hesaplanmıştır. Teorik moleküler form faktör değerleri, iki ayrı elementel bolluk olan ICRP [10] ve ICRU [9] kullanılarak (2.3) eşitliğine göre belirlenmiştir. ICRP [10] ve ICRU [9] elementel bollukları EK B ve EK C'de sırasıyla verilmiştir. Kan dokusuna ait rölativistik modifiye olmuş atomik form faktörleri kullanılarak, ICRP [10] ve ICRU [9] adlı iki ayrı elementel bolluk kullanılarak hesaplanmış olan moleküler form faktör değerleri; $x = 0$ 'dan, $x = 10^2 \text{ \AA}^{-1}$ 'e kadar olan momentum transfer değerlerine karşılık olarak Tablo 5.1'de listelenmiştir.

Tablo 5.1: Kan dokusuna ait rölativistik modifiye olmuş atomik form faktörleri kullanılarak hesaplanan teorik moleküler form faktörleri olan $F_m(x)$, ICRP [10] ve ICRU [9] elementel bolluklar kullanılarak sütun 3 ve 4'te sırasıyla sunulmuştur. Peplow ve Verghese [11] deneysel sonuçları da sütun 2'de karşılaştırmalı olarak listelenmiştir.

| $x(\text{Å}^{-1})$ | $F_m(x)$ Peplow ve Verghese [11] | $F_m(x)$ ICRP [10] | $F_m(x)$ ICRU [9] |
|--------------------|--|-----------------------|----------------------|
| 0 | 8.3774 | 113.4588 | 27.0676 |
| 1.00 E-02 | 8.3774 | 113.3189 | 27.0340 |
| 2.00 E-02 | 8.3774 | 112.8991 | 26.9331 |
| 3.00 E-02 | 8.3774 | 112.2151 | 26.7689 |
| 4.00 E-02 | 8.3774 | 111.2699 | 26.5419 |
| 5.00 E-02 | 8.3774 | 110.0810 | 26.2565 |
| 6.00 E-02 | 8.3774 | 108.6666 | 25.9171 |
| 7.00 E-02 | 8.3774 | 107.0449 | 25.5280 |
| 8.00 E-02 | 8.3774 | 105.2343 | 25.0937 |
| 9.00 E-02 | 8.3774 | 103.2787 | 24.6247 |
| 1.00 E-01 | 8.3774 | 101.1698 | 24.1192 |
| 1.10 E-01 | 9.8599 | 98.9520 | 23.5876 |
| 1.20 E-01 | 13.6911 | 96.6412 | 23.0340 |
| 1.30 E-01 | 17.5081 | 94.2684 | 22.4658 |
| 1.40 E-01 | 20.6188 | 91.8351 | 21.8833 |
| 1.50 E-01 | 23.5296 | 89.3714 | 21.2937 |
| 1.60 E-01 | 24.5856 | 86.8893 | 20.6998 |
| 1.70 E-01 | 24.1860 | 84.4064 | 20.1061 |
| 1.80 E-01 | 23.1872 | 81.9353 | 19.5154 |
| 1.90 E-01 | 22.1313 | 79.4901 | 18.9311 |
| 2.00 E-01 | 21.2323 | 77.0829 | 18.3560 |
| 2.20 E-01 | 20.8756 | 72.3887 | 17.2353 |
| 2.40 E-01 | 19.2632 | 67.9023 | 16.1650 |
| 2.50 E-01 | 17.6223 | 65.7673 | 15.6558 |
| 2.60 E-01 | 15.8386 | 63.6845 | 15.1594 |

Tablo 5.1 devamı: Kan dokusuna ait rölativistik modifiye olmuş atomik form faktörleri kullanılarak hesaplanan teorik moleküler form faktörleri olan $F_m(x)$, ICRP [10] ve ICRU [9] elementel bolluklar kullanılarak sütun 3 ve 4'te sırasıyla sunulmuştur. Peplow ve Verghese [11] deneysel sonuçları da sütun 2'de karşılaştırmalı olarak listelenmiştir.

| $x(\text{Å}^{-1})$ | $F_m(x)$ Peplow ve Verghese [11] | $F_m(x)$ ICRP [10] | $F_m(x)$ ICRU [9] |
|--------------------|--|-----------------------|----------------------|
| 2.80 E-01 | 13.1090 | 59.7339 | 14.2182 |
| 3.00 E-01 | 12.0645 | 56.0696 | 13.3458 |
| 3.20 E-01 | 11.7220 | 52.6758 | 12.5383 |
| 3.40 E-01 | 11.6692 | 49.5702 | 11.7999 |
| 3.50 E-01 | 11.5208 | 48.1141 | 11.4539 |
| 3.60 E-01 | 11.4281 | 46.7277 | 11.1245 |
| 3.80 E-01 | 10.8559 | 44.1280 | 10.5072 |
| 4.00 E-01 | 10.0868 | 41.7795 | 9.9499 |
| 4.20 E-01 | 9.1465 | 39.6435 | 9.4433 |
| 4.40 E-01 | 8.5300 | 37.7266 | 8.9889 |
| 4.50 E-01 | 8.0677 | 36.8311 | 8.7767 |
| 4.60 E-01 | 7.8580 | 35.9902 | 8.5775 |
| 4.80 E-01 | 7.5226 | 34.4167 | 8.2049 |
| 5.00 E-01 | 7.1602 | 33.0055 | 7.8706 |
| 5.50 E-01 | 7.0332 | 30.0745 | 7.1768 |
| 6.00 E-01 | 6.6337 | 27.8016 | 6.6386 |
| 6.50 E-01 | 6.0843 | 26.0287 | 6.2182 |
| 7.00 E-01 | 5.8503 | 24.6109 | 5.8814 |
| 8.00 E-01 | 5.3452 | 22.4605 | 5.3683 |
| 9.00 E-01 | 4.8158 | 20.8307 | 4.9771 |
| 1.00 E+00 | 4.6731 | 19.4466 | 4.6437 |
| 1.10 E+00 | 4.3763 | 18.1908 | 4.3409 |
| 1.20 E+00 | 4.0909 | 16.9813 | 4.0496 |
| 1.30 E+00 | 3.8141 | 15.8193 | 3.7701 |
| 1.40 E+00 | 3.5459 | 14.7044 | 3.5024 |

Tablo 5.1 devamı: Kan dokusuna ait rölativistik modifiye olmuş atomik form faktörleri kullanılarak hesaplanan teorik moleküler form faktörleri olan $F_m(x)$, ICRP [10] ve ICRU [9] elementel bolluklar kullanılarak sütun 3 ve 4'te sırasıyla sunulmuştur. Peplow ve Vergheese [11] deneysel sonuçları da sütun 2'de karşılaştırmalı olarak listelenmiştir.

| $x(\text{Å}^{-1})$ | $F_m(x)$ Peplow ve Vergheese [11] | $F_m(x)$ ICRP [10] | $F_m(x)$ ICRU [9] |
|--------------------|---|-----------------------|----------------------|
| 1.50 E+00 | 3.2890 | 13.6282 | 3.2445 |
| 1.60 E+00 | 3.0436 | 12.6020 | 2.9989 |
| 1.70 E+00 | 2.8082 | 11.6302 | 2.7667 |
| 1.80 E+00 | 2.5884 | 10.7169 | 2.5487 |
| 1.90 E+00 | 2.3844 | 9.8642 | 2.3454 |
| 2.00 E+00 | 2.1946 | 9.0717 | 2.1566 |
| 2.20 E+00 | 1.8536 | 7.6627 | 1.8213 |
| 2.40 E+00 | 1.5667 | 6.4721 | 1.5382 |
| 2.50 E+00 | 1.4398 | 5.9507 | 1.4143 |
| 2.60 E+00 | 1.3255 | 5.4746 | 1.3012 |
| 2.80 E+00 | 1.1248 | 4.6420 | 1.1035 |
| 3.00 E+00 | 0.9577 | 3.9492 | 0.9390 |
| 3.30 E+00 | 0.7580 | 3.1224 | 0.7428 |
| 3.50 E+00 | 0.6520 | 2.6828 | 0.6384 |
| 3.60 E+00 | 0.6057 | 2.4918 | 0.5930 |
| 3.90 E+00 | 0.4890 | 2.0099 | 0.4785 |
| 4.00 E+00 | 0.4565 | 1.8739 | 0.4461 |
| 4.20 E+00 | 0.3991 | 1.6371 | 0.3898 |
| 4.60 E+00 | 0.3088 | 1.2641 | 0.3008 |
| 5.00 E+00 | 0.2424 | 0.9926 | 0.2359 |
| 5.40 E+00 | 0.1931 | 0.7910 | 0.1876 |
| 5.50 E+00 | 0.1828 | 0.7490 | 0.1775 |
| 5.80 E+00 | 0.1557 | 0.6390 | 0.1510 |
| 6.00 E+00 | 0.1405 | 0.5769 | 0.1361 |
| 6.20 E+00 | 0.1270 | 0.5225 | 0.1230 |

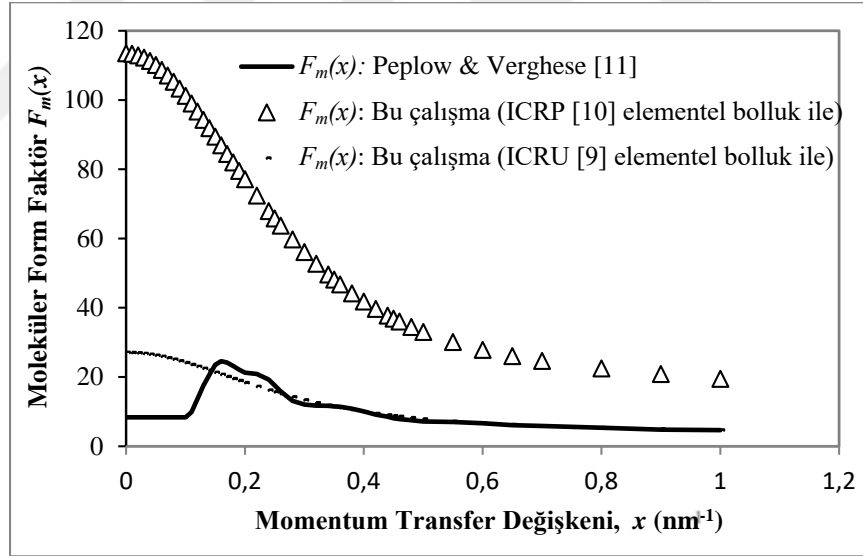
Tablo 5.1 devamı: Kan dokusuna ait rölativistik modifiye olmuş atomik form faktörleri kullanılarak hesaplanan teorik moleküler form faktörleri olan $F_m(x)$, ICRP [10] ve ICRU [9] elementel bolluklar kullanılarak sütun 3 ve 4'te sırasıyla sunulmuştur. Peplow ve Verghese [11] deneysel sonuçları da sütun 2'de karşılaştırmalı olarak listelenmiştir.

| $x(\text{Å}^{-1})$ | $F_m(x)$ Peplow ve Verghese [11] | $F_m(x)$ ICRP [10] | $F_m(x)$ ICRU [9] |
|--------------------|--|-----------------------|----------------------|
| 6.60 E+00 | 0.1047 | 0.4319 | 0.1011 |
| 7.00 E+00 | 8.7041 E-02 | 0.3605 | 8.3904 E-02 |
| 7.40 E+00 | 7.2972 E-02 | 0.3034 | 7.0157 E-02 |
| 8.00 E+00 | 5.6777 E-02 | 0.2376 | 5.4352 E-02 |
| 9.00 E+00 | 3.8584 E-02 | 0.1633 | 3.6619 E-02 |
| 1.00 E+01 | 2.7111 E-02 | 0.1158 | 2.5457 E-02 |
| 1.10 E+01 | 1.9549 E-02 | 8.4339 E-02 | 1.8164 E-02 |
| 1.20 E+01 | 1.4440 E-02 | 6.2729 E-02 | 1.3248 E-02 |
| 1.40 E+01 | 8.3488 E-03 | 3.6550 E-02 | 7.4435 E-03 |
| 1.60 E+01 | 5.1426 E-03 | 2.2497 E-02 | 4.4327 E-03 |
| 1.80 E+01 | 3.3318 E-03 | 1.4457 E-02 | 2.7620 E-03 |
| 2.00 E+01 | 2.2488 E-03 | 9.6216 E-03 | 1.7840 E-03 |
| 2.20 E+01 | 1.5725 E-03 | 6.5961 E-03 | 1.1859 E-03 |
| 2.50 E+01 | 9.6873 E-04 | 3.9166 E-03 | 6.6948 E-04 |
| 2.80 E+01 | 6.2884 E-04 | 2.4329 E-03 | 3.9150 E-04 |
| 3.10 E+01 | 4.2593 E-04 | 1.5667 E-03 | 2.3381 E-04 |
| 3.50 E+01 | 2.6726 E-04 | 9.1212 E-04 | 1.1869 E-04 |
| 4.00 E+01 | 1.5996 E-04 | 4.9318 E-04 | 4.8717 E-05 |
| 4.50 E+01 | 1.0155 E-04 | 2.8490 E-04 | 1.6705 E-05 |
| 5.00 E+01 | 6.7678 E-05 | 1.7867 E-04 | 6.4646 E-06 |
| 6.00 E+01 | | 9.7472 E-05 | 1.2903 E-05 |
| 7.00 E+01 | 1.8550 E-05 | 7.3687 E-05 | 1.3885 E-05 |
| 8.00 E+01 | | 6.1155 E-05 | 1.2581 E-05 |
| 9.00 E+01 | | 5.1392 E-05 | 1.0818 E-05 |
| 1.00 E+02 | 4.7502 E-06 | 4.3196 E-05 | 9.1440 E-06 |

Tablo 5.1 devamı: Kan dokusuna ait rölativistik modifiye olmuş atomik form faktörleri kullanılarak hesaplanan teorik moleküler form faktörleri olan $F_m(x)$, ICRP [10] ve ICRU [9] elementel bolluklar kullanılarak sütun 3 ve 4'te sırasıyla sunulmuştur. Peplow ve Verghese [11] deneysel sonuçları da sütun 2'de karşılaştırmalı olarak listelenmiştir.

| $x(\text{Å}^{-1})$ | $F_m(x)$ Peplow ve Verghese [11] | $F_m(x)$ ICRP [10] | $F_m(x)$ ICRU [9] |
|--------------------|--|-----------------------|----------------------|
| 1.00 E+03 | 1.3002 E-09 | | |
| 1.00 E+06 | 1.0167 E-18 | | |
| 1.00 E+09 | 1.1412 E-27 | | |

Teorik moleküler form faktörlerinin sonuçları, deneysel form faktörleri [11] ile birlikte karşılaştırmalı olarak Şekil 5.1'de, değişimin en çok gözlemlendiği bölge olan $x \leq 1 \text{ nm}^{-1}$ değerleri için gösterilmiştir.



Şekil 5.1: ICRP [10] ve ICRU [9] elementel bolluklar kullanılarak hesaplanan teorik moleküler form faktör değerlerinin, deneysel form faktör değerleri [11] ile birlikte gösterimi.

Şekil 5.1'de görüldüğü gibi ICRU [9] elementel bolluk kullanılarak elde edilen teorik moleküler form faktör değerleri, deneysel form faktörleri [11] ile uyum içerisindedir. Ancak $x \cong 0.2 \text{ nm}^{-1}$ değerine kadar meydana gelen farklılık moleküler girişimin etkisinden kaynaklanmaktadır.

Moleküler inkoherent saçılma katsayıları ve moleküler inkoherent saçılma fonksiyonları sırasıyla, (2.4) ve (2.5) eşitliklerine göre hesaplanmıştır. Moleküler inkoherent saçılma fonksiyonları hem ICRP [10] hem de ICRU [9] elementel bolluklar kullanılarak; $x = 0$ 'dan, $x = 10^9 \text{ \AA}^{-1}$ 'e kadar olan momentum transfer değerlerine karşılık hesaplanmış ve Tablo 5.2'de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.



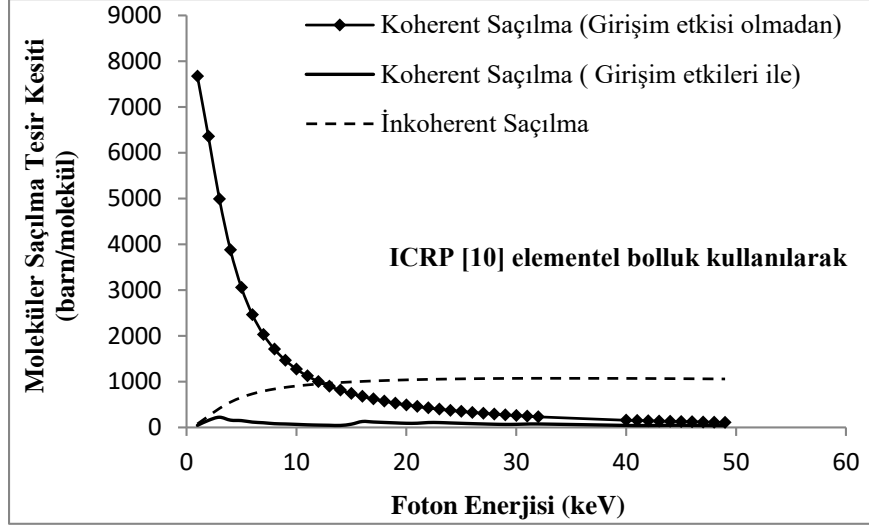
Tablo 5.2: Teorik moleküler inkoherent saçılma fonksiyonları olan $S_m(x)$, ICRP [10] ve ICRU [9] elemental bolluklar kullanılarak hesaplanmış ve sırasıyla sütun 2 ve 3'te listelenmiştir.

| $x(\text{\AA}^{-1})$ | $S_m(x)$ ICRP [10] | $S_m(x)$ ICRU [9] |
|----------------------|-----------------------|----------------------|
| 0 | 0 | 0 |
| 5.00 E-03 | 1.0502 | 6.0255 E-02 |
| 1.00 E-02 | 3.9708 | 0.2277 |
| 1.50 E-02 | 9.0229 | 0.5174 |
| 2.00 E-02 | 15.9504 | 0.9146 |
| 2.50 E-02 | 24.8152 | 1.4229 |
| 3.00 E-02 | 35.5398 | 2.0380 |
| 4.00 E-02 | 56.8386 | 3.5679 |
| 5.00 E-02 | 95.3390 | 5.4669 |
| 7.00 E-02 | 178.0015 | 10.2053 |
| 9.00 E-02 | 276.6211 | 15.8573 |
| 1.00 E-01 | 329.8277 | 18.9057 |
| 1.25 E-01 | 467.4152 | 26.7838 |
| 1.50 E-01 | 604.9972 | 34.6591 |
| 1.75 E-01 | 735.0360 | 42.0966 |
| 2.00 E-01 | 854.1161 | 48.9020 |
| 2.50 E-01 | 1055.1263 | 60.3788 |
| 3.00 E-01 | 1209.6084 | 69.1860 |
| 4.00 E-01 | 1412.0985 | 80.7069 |
| 5.00 E-01 | 1525.8314 | 87.1693 |
| 6.00 E-01 | 1594.8867 | 91.0997 |
| 7.00 E-01 | 1643.0107 | 93.8481 |
| 8.00 E-01 | 1681.5438 | 96.0551 |
| 9.00 E-01 | 1714.9138 | 97.9688 |
| 1.00 E+00 | 1745.3502 | 99.7137 |
| 1.25 E+00 | 1809.7240 | 103.3978 |
| 1.50 E+00 | 1858.4729 | 106.1784 |
| 2.00 E+00 | 1916.4803 | 109.4751 |

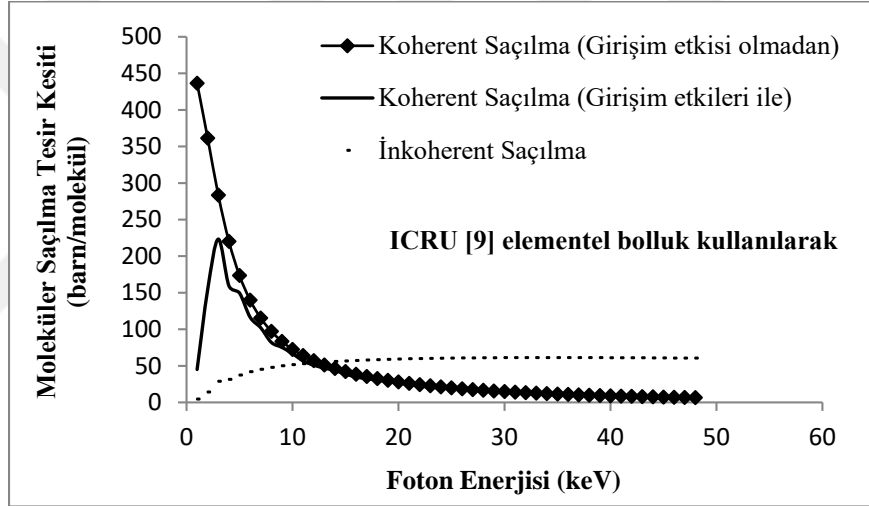
Tablo 5.2 devamı: Teorik moleküler inkoherent saçılma fonksiyonları olan $S_m(x)$, ICRP [10] ve ICRU [9] elemental bolluklar kullanılarak hesaplanmış ve sırasıyla sütun 2 ve 3'te listelenmiştir.

| $x(\text{\AA}^{-1})$ | $S_m(x)$ ICRP [10] | $S_m(x)$ ICRU [9] |
|----------------------|-----------------------|----------------------|
| 2.50 E+00 | 1941.9055 | 110.9155 |
| 3.00 E+00 | 1952.5289 | 111.5165 |
| 3.50 E+00 | 1956.9817 | 111.7686 |
| 4.00 E+00 | 1958.9514 | 111.8802 |
| 5.00 E+00 | 1960.2991 | 111.9567 |
| 6.00 E+00 | 1960.6531 | 111.9767 |
| 7.00 E+00 | 1960.7750 | 111.9835 |
| 8.00 E+00 | 1960.8250 | 111.9862 |
| 1.00 E+01 | 1960.8367 | 111.9868 |
| 1.50 E+01 | 1960.8411 | 111.9870 |
| 2.00 E+01 | 1960.8412 | 111.9870 |
| 5.00 E+01 | 1960.8414 | 111.9870 |
| 8.00 E+01 | 1960.8414 | 111.9870 |
| 1.00 E+02 | 1960.8414 | 111.9870 |
| 1.00 E+03 | 1960.8414 | 111.9870 |
| 1.00 E+06 | 1960.8414 | 111.9870 |
| 1.00 E+09 | 1960.8414 | 111.9870 |

ICRP [10] kullanılarak hesaplanan moleküler koherent ve inkoherent saçılma tesir kesitleri Şekil 5.2'de, ICRU [9] kullanılarak hesaplanan moleküler koherent ve inkoherent saçılma tesir kesitleri ise, Şekil 5.3'te gösterilmiştir.



Şekil 5.2: ICRP [10] elementel bolluk kullanılarak hesaplanan moleküler koherent ve inkoherent saçılma tesir kesitleri.



Şekil 5.3: ICRU [9] elementel bolluk kullanılarak hesaplanan moleküler koherent ve inkoherent saçılma tesir kesitleri.

Koherent saçılma üzerine moleküler girişimin etkisi, çok düşük değerdeki foton enerjileri için önemli bir azalmaya yol açmaktadır. Bu durum, Şekil 5.3'te görüldüğü gibi, ICRU [9] ile hesaplanan moleküler koherent saçılma tesir kesiti değerlerinde açık biçimde gözlemlenmiştir. ICRP [10] ile hesaplanan moleküler koherent saçılma tesir kesiti değerlerinde ise net olarak gözlemlenememiştir. Buradan da anlaşılacağı üzere; ICRU [9] elementel bolluk ile yapılan hesaplamaların daha uygun olduğu görülmektedir. ICRP [10] elementel bolluk kullanılarak hesaplanan moleküler saçılma ve soğurma katsayıları değerleri Tablo 5.3'te, ICRU [9] elementel bolluk kullanılarak hesaplananlar ise Tablo 5.4'te listelenmiştir.

Tablo 5.3: ICRP [10] elementel bolluk kullanılarak, moleküler koherent (Rayleigh) saçılma tesir kesitleri sütun 2'de, girişim etkileri dâhil edilerek hesaplanan moleküler koherent saçılma tesir kesitleri sütun 3'te listelenmiştir. Moleküler inkoherent (Compton) saçılma ve moleküler fotoelektrik soğurma tesir kesitleri de sırasıyla sütun 4 ve 5'te sunulmaktadır.

| E [keV] | Koherent [barn/molekül] | Koherent [barn/molekül] (Girişim etkileri ile) | İnkoherent [barn/molekül] | Fotoelektrik [1/cm] |
|------------|----------------------------|--|------------------------------|------------------------|
| 1 | 7672.7075 | 45.0195 | 78.8372 | 3985.3970 |
| 2 | 6359.6123 | 154.5013 | 247.6709 | 601.4763 |
| 3 | 4992.6187 | 223.3316 | 416.0085 | 193.4508 |
| 4 | 3881.4846 | 159.5313 | 553.0016 | 84.2993 |
| 5 | 3058.6975 | 149.5993 | 655.8402 | 43.3079 |
| 6 | 2464.3847 | 116.5549 | 734.3242 | 24.9556 |
| 7 | 2031.4598 | 102.1548 | 794.0316 | 17.6455 |
| 8 | 1711.2612 | 82.1065 | 839.9183 | 10.4695 |
| 9 | 1467.6643 | 75.3141 | 876.0018 | 7.8587 |
| 10 | 1276.9784 | 66.6557 | 905.1166 | 5.2489 |
| 11 | 1127.4763 | 56.7743 | 929.1613 | 4.4930 |
| 12 | 1004.0118 | 50.9194 | 949.3833 | 3.7371 |
| 13 | 901.7092 | 47.0733 | 966.6669 | 2.9812 |
| 14 | 816.0632 | 43.5476 | 981.4787 | 2.2258 |
| 15 | 743.8867 | 71.0767 | 994.3696 | 1.4698 |
| 16 | 679.8519 | 129.8534 | 1005.8044 | 1.2937 |
| 17 | 624.4941 | 118.7353 | 1015.8365 | 1.1173 |
| 18 | 575.7657 | 108.7158 | 1024.6012 | 0.9410 |
| 19 | 532.5264 | 99.3594 | 1032.3884 | 0.7647 |
| 20 | 493.5867 | 90.4515 | 1039.2509 | 0.5883 |
| 21 | 459.6413 | 91.6671 | 1045.0785 | 0.5454 |
| 22 | 428.2278 | 107.1634 | 1050.0764 | 0.5025 |
| 23 | 399.7015 | 106.4810 | 1054.4299 | 0.4597 |
| 24 | 374.0833 | 97.8346 | 1058.2373 | 0.4168 |
| 25 | 350.7951 | 89.9687 | 1061.6080 | 0.3739 |

Tablo 5.3 devamı: ICRP [10] elementel bolluk kullanılarak, moleküler koherent (Rayleigh) saçılma tesir kesitleri sütun 2'de, girişim etkileri dâhil edilerek hesaplanan moleküler koherent saçılma tesir kesitleri sütun 3'te listelenmiştir. Moleküler inkoherent (Compton) saçılma ve moleküler fotoelektrik soğurma tesir kesitleri de sırasıyla sütun 4 ve 5'te sunulmaktadır.

| E [keV] | Koherent [barn/molekül] | Koherent [barn/molekül] (Girişim etkileri ile) | İnkoherent [barn/molekül] | Fotoelektrik [1/cm] |
|------------|----------------------------|--|------------------------------|------------------------|
| 26 | 329.2614 | 82.5182 | 1064.6019 | 0.3310 |
| 27 | 309.9185 | 75.8920 | 1067.1166 | 0.2881 |
| 28 | 291.9785 | 69.6974 | 1069.1201 | 0.2452 |
| 29 | 275.7311 | 65.5939 | 1070.6937 | 0.2023 |
| 30 | 260.9595 | 67.5599 | 1071.9205 | 0.1594 |
| 31 | 246.8724 | 73.7496 | 1072.8590 | 0.1497 |
| 32 | 233.8614 | 75.5801 | 1073.5342 | 0.1400 |
| 33 | 222.0934 | 70.4431 | 1073.9965 | 0.1304 |
| 34 | 210.9231 | 65.5921 | 1074.2086 | 0.1207 |
| 35 | 200.7150 | 61.1990 | 1074.1641 | 0.1110 |
| 36 | 191.1445 | 57.0905 | 1073.9027 | 0.1013 |
| 37 | 182.2195 | 53.2861 | 1073.4805 | 9.1624 E-02 |
| 38 | 174.0808 | 49.8831 | 1072.8793 | 8.1945 E-02 |
| 39 | 166.3334 | 46.6944 | 1072.1418 | 7.2262 E-02 |
| 40 | 159.0162 | 43.5623 | 1071.2848 | 6.2580 E-02 |
| 41 | 152.4187 | 41.7636 | 1070.3008 | 5.9341 E-02 |
| 42 | 146.2278 | 41.9490 | 1069.1942 | 5.6102 E-02 |
| 43 | 140.2477 | 43.4158 | 1067.9714 | 5.2862 E-02 |
| 44 | 134.6180 | 46.2844 | 1066.6575 | 4.9623 E-02 |
| 45 | 129.2989 | 47.1806 | 1065.2626 | 4.6384 E-02 |
| 46 | 124.3253 | 44.7106 | 1063.7903 | 4.3145 E-02 |
| 47 | 119.6656 | 42.3869 | 1062.2424 | 3.9906 E-02 |
| 48 | 115.1786 | 40.1991 | 1060.6323 | 3.6667 E-02 |
| 49 | 110.9728 | 38.1610 | 1058.9749 | 3.3428 E-02 |
| 50 | 107.0272 | 36.2572 | 1057.2457 | 3.0189 E-02 |

Tablo 5.3 devamı: ICRP [10] elementel bolluk kullanılarak, moleküler koherent (Rayleigh) saçılma tesir kesitleri sütun 2'de, girişim etkileri dâhil edilerek hesaplanan moleküler koherent saçılma tesir kesitleri sütun 3'te listelenmiştir. Moleküler inkoherent (Compton) saçılma ve moleküler fotoelektrik soğurma tesir kesitleri de sırasıyla sütun 4 ve 5'te sunulmaktadır.

| E [keV] | Koherent [barn/molekül] | Koherent [barn/molekül] (Girişim etkileri ile) | İnkoherent [barn/molekül] | Fotoelektrik [1/cm] |
|------------|----------------------------|--|------------------------------|------------------------|
| 55 | 90.0677 | 28.2802 | 1047.9753 | 2.3401 E-02 |
| 60 | 76.9508 | 25.0677 | 1037.9336 | 1.6613 E-02 |
| 65 | 66.3568 | 25.9052 | 1027.4554 | 1.4076 E-02 |
| 70 | 57.8276 | 21.3948 | 1016.7559 | 1.1539 E-02 |
| 75 | 50.8310 | 17.7983 | 1005.9996 | 9.0014 E-03 |
| 80 | 45.0072 | 14.8749 | 995.2521 | 6.4641 E-03 |
| 85 | 40.2314 | 14.1073 | 984.5977 | 5.6254 E-03 |
| 90 | 36.0779 | 15.0792 | 974.0834 | 4.7882 E-03 |
| 95 | 32.5500 | 13.0868 | 963.7498 | 3.9495 E-03 |
| 100 | 29.4979 | 11.4053 | 953.6031 | 3.1106 E-03 |
| 105 | 26.8511 | 9.9737 | 943.6686 | 2.8825 E-03 |
| 110 | 24.5671 | 8.7736 | 933.9455 | 2.6544 E-03 |
| 115 | 22.5416 | 7.7435 | 924.4451 | 2.4263 E-03 |
| 120 | 20.7992 | 7.5770 | 915.1687 | 2.1982 E-03 |
| 125 | 19.2095 | 8.0543 | 906.1176 | 1.9701 E-03 |
| 130 | 17.7966 | 7.5679 | 897.2830 | 1.7420 E-03 |
| 135 | 16.5354 | 6.8344 | 888.6570 | 1.5139 E-03 |
| 140 | 15.3999 | 6.1879 | 880.2422 | 1.2858 E-03 |
| 145 | 14.3721 | 5.6090 | 872.0345 | 1.0577 E-03 |
| 150 | 13.4563 | 5.1046 | 864.0332 | 8.2961 E-04 |

Tablo 5.4: ICRU [9] elementel bolluk kullanılarak, moleküler koherent (Rayleigh) saçılma tesir kesitleri sütun 2'de, girişim etkileri dâhil edilerek hesaplanan moleküler koherent saçılma tesir kesitleri sütun 3'te listelenmiştir. Moleküler inkohherent (Compton) saçılma ve moleküler fotoelektrik soğurma tesir kesitleri de sırasıyla sütun 4 ve 5'te sunulmaktadır.

| E [keV] | Koherent [barn/molekül] | Koherent [barn/molekül] (Girişim etkileri ile) | İnkohherent [barn/molekül] | Fotoelektrik [1/cm] |
|------------|----------------------------|--|-------------------------------|------------------------|
| 1 | 436.4842 | 45.0199 | 4.5438 | 4028.4900 |
| 2 | 361.4381 | 154.5013 | 14.1998 | 605.9803 |
| 3 | 283.5085 | 223.3316 | 28.8252 | 196.0545 |
| 4 | 220.3036 | 159.5313 | 31.6495 | 85.7926 |
| 5 | 173.5775 | 149.5993 | 37.5158 | 44.0700 |
| 6 | 139.8626 | 116.5549 | 41.9892 | 25.4062 |
| 7 | 115.3173 | 102.1548 | 45.3905 | 17.9704 |
| 8 | 97.1664 | 82.1065 | 48.0045 | 10.5347 |
| 9 | 83.3569 | 75.3141 | 50.0608 | 7.9048 |
| 10 | 72.5439 | 66.6557 | 51.7207 | 5.2749 |
| 11 | 64.0614 | 56.7743 | 53.0922 | 4.5147 |
| 12 | 57.0538 | 50.9194 | 54.2463 | 3.7545 |
| 13 | 51.2446 | 47.0733 | 55.2331 | 2.9942 |
| 14 | 46.3788 | 43.5476 | 56.0788 | 2.2340 |
| 15 | 42.2763 | 38.8311 | 56.8149 | 1.4737 |
| 16 | 38.6365 | 34.8029 | 57.4679 | 1.2967 |
| 17 | 35.4891 | 32.4035 | 58.0408 | 1.1197 |
| 18 | 32.7184 | 30.4232 | 58.5412 | 0.9427 |
| 19 | 30.2597 | 28.5424 | 58.9856 | 0.7657 |
| 20 | 28.0454 | 26.5609 | 59.3772 | 0.5887 |
| 21 | 26.1150 | 24.4019 | 59.7096 | 0.5458 |
| 22 | 24.3291 | 22.4998 | 59.9946 | 0.5028 |
| 23 | 22.7076 | 20.8291 | 60.2426 | 0.4598 |
| 24 | 21.2514 | 19.6589 | 60.4595 | 0.4169 |
| 25 | 19.9277 | 18.6631 | 60.6513 | 0.3739 |

Tablo 5.4 devamı: ICRU [9] elementel bolluk kullanılarak, moleküler koherent (Rayleigh) saçılma tesir kesitleri sütun 2'de, girişim etkileri dâhil edilerek hesaplanan moleküler koherent saçılma tesir kesitleri sütun 3'te listelenmiştir. Moleküler inkoherent (Compton) saçılma ve moleküler fotoelektrik soğurma tesir kesitleri de sırasıyla sütun 4 ve 5'te sunulmaktadır.

| E [keV] | Koherent [barn/molekül] | Koherent [barn/molekül] (Girişim etkileri ile) | İnkoherent [barn/molekül] | Fotoelektrik [1/cm] |
|------------|----------------------------|--|------------------------------|------------------------|
| 26 | 18.7040 | 17.5747 | 60.8216 | 0.3310 |
| 27 | 17.6048 | 16.7443 | 60.9646 | 0.2880 |
| 28 | 16.5854 | 15.8454 | 61.0783 | 0.2450 |
| 29 | 15.6621 | 14.8712 | 61.1675 | 0.2021 |
| 30 | 14.8228 | 13.9421 | 61.2370 | 0.1591 |
| 31 | 14.0225 | 13.1084 | 61.2900 | 0.1494 |
| 32 | 13.2835 | 12.3092 | 61.3279 | 0.1398 |
| 33 | 12.6150 | 11.7119 | 61.3537 | 0.1301 |
| 34 | 11.9804 | 11.1784 | 61.3653 | 0.1204 |
| 35 | 11.4006 | 10.7166 | 61.3622 | 0.1107 |
| 36 | 10.8570 | 10.2362 | 61.3468 | 0.1011 |
| 37 | 10.3500 | 9.7819 | 61.3221 | 9.1391 E-02 |
| 38 | 9.8877 | 9.4238 | 61.2873 | 8.1715 E-02 |
| 39 | 9.4477 | 9.0832 | 61.2448 | 7.2039 E-02 |
| 40 | 9.0320 | 8.6512 | 61.1953 | 6.2362 E-02 |
| 41 | 8.6572 | 8.2605 | 61.1387 | 5.9131 E-02 |
| 42 | 8.3056 | 7.8725 | 61.0751 | 5.5899 E-02 |
| 43 | 7.9659 | 7.5175 | 61.0049 | 5.2667 E-02 |
| 44 | 7.6461 | 7.1852 | 60.9295 | 4.9436 E-02 |
| 45 | 7.3440 | 6.8619 | 60.8494 | 4.6204 E-02 |
| 46 | 7.0615 | 6.5865 | 60.7650 | 4.2972 E-02 |
| 47 | 6.7969 | 6.3538 | 60.6763 | 3.9741 E-02 |
| 48 | 6.5420 | 6.1344 | 60.5840 | 3.6509 E-02 |
| 49 | 6.3031 | 5.9398 | 60.4891 | 3.3277 E-02 |
| 50 | 6.0789 | 5.7500 | 60.3901 | 3.0045 E-02 |

Tablo 5.4 devamı: ICRU [9] elementel bolluk kullanılarak, moleküler koherent (Rayleigh) saçılma tesir kesitleri sütun 2'de, girişim etkileri dâhil edilerek hesaplanan moleküler koherent saçılma tesir kesitleri sütun 3'te listelenmiştir. Moleküler inkoherent (Compton) saçılma ve moleküler fotoelektrik soğurma tesir kesitleri de sırasıyla sütun 4 ve 5'te sunulmaktadır.

| E [keV] | Koherent [barn/molekül] | Koherent [barn/molekül] (Girişim etkileri ile) | İnkoherent [barn/molekül] | Fotoelektrik [1/cm] |
|------------|----------------------------|--|------------------------------|------------------------|
| 55 | 5.1156 | 4.9309 | 59.8594 | 2.3281 E-02 |
| 60 | 4.3704 | 4.1491 | 59.2850 | 1.6516 E-02 |
| 65 | 3.7686 | 3.5301 | 58.6857 | 1.3991 E-02 |
| 70 | 3.2841 | 3.1098 | 58.0740 | 1.1466 E-02 |
| 75 | 2.8867 | 2.7528 | 57.4591 | 8.9411 E-03 |
| 80 | 2.5559 | 2.4600 | 56.8449 | 6.4159 E-03 |
| 85 | 2.2846 | 2.1736 | 56.2359 | 5.5825 E-03 |
| 90 | 2.0487 | 1.9278 | 55.6351 | 4.7492 E-03 |
| 95 | 1.8483 | 1.7413 | 55.0446 | 3.9158 E-03 |
| 100 | 1.6750 | 1.5918 | 54.4649 | 3.0824 E-03 |
| 105 | 1.5247 | 1.4523 | 53.8973 | 2.8562 E-03 |
| 110 | 1.3949 | 1.3483 | 53.3418 | 2.6300 E-03 |
| 115 | 1.2799 | 1.2309 | 52.7990 | 2.4038 E-03 |
| 120 | 1.1810 | 1.1256 | 52.2690 | 2.1776 E-03 |
| 125 | 1.0907 | 1.0325 | 51.7519 | 1.9513 E-03 |
| 130 | 1.0105 | 0.9507 | 51.2472 | 1.7251 E-03 |
| 135 | 0.9388 | 0.8863 | 50.7544 | 1.4989 E-03 |
| 140 | 0.8744 | 0.8306 | 50.2738 | 1.2727 E-03 |
| 145 | 0.8160 | 0.7758 | 49.8049 | 1.0465 E-03 |
| 150 | 0.7640 | 0.7303 | 49.3478 | 8.2023 E-04 |

Kan dokusuna ait, bu çalışmada hesaplanan lineer zayıflama katsayılarının (1/cm) sonuçları, literatürdeki teorik [25] ve deneysel sonuçlar [6, 12, 13] ile birlikte Tablo 5.5'te karşılaştırılmıştır.

Tablo 5.5: Kan dokusuna ait ICRP [10] ve ICRU [9] elementel bolluklar kullanılarak hesaplanan lineer zayıflama katsayılarının [1/cm] sonuçları, sütun 2 ve 3'te sırasıyla sunulmuştur. Hesaplanan bu sonuçlar, literatürdeki teorik ve deneysel veriler ile sütun 4'te karşılaştırılmıştır.

| E[keV] | ICRP [10] | ICRU [9] | Referanslar |
|--------|-----------|-----------|--------------|
| 1 | 3985.4187 | 4028.6454 | 4072.52 [25] |
| 2 | 601.5470 | 606.5093 | 613.846 [25] |
| 3 | 193.5631 | 196.8451 | 196.1 [25] |
| 4 | 84.4245 | 86.3920 | 85.4996 [25] |
| 5 | 43.4495 | 44.6567 | 44.1066 [25] |
| 6 | 25.1051 | 25.9032 | 25.546 [25] |
| 6,9 | 18.2332 | 17.6860 | 16.4 [12] |
| 7 | 17.8030 | 18.4330 | |
| 8 | 10.6315 | 10.9426 | 10.918 [25] |
| 9 | 8.0259 | 8.2979 | |
| 10 | 5.4197 | 5.6461 | 5.63496 [25] |
| 11 | 4.6662 | 4.8592 | |
| 12 | 3.9129 | 4.0842 | |
| 13 | 3.1593 | 3.3150 | |
| 14 | 2.4060 | 2.5463 | |
| 15 | 1.6571 | 1.7736 | 1.77868 [25] |
| 16 | 1.4933 | 1.5860 | |
| 17 | 1.3167 | 1.4033 | |
| 18 | 1.1402 | 1.2216 | |
| 19 | 0.9636 | 1.0401 | |
| 20 | 0.7869 | 0.8581 | 0.86284 [25] |
| 21 | 0.7452 | 0.8095 | |
| 22 | 0.7059 | 0.7614 | |
| 23 | 0.6637 | 0.7140 | |
| 24 | 0.6199 | 0.6681 | |
| 25 | 0.5762 | 0.6226 | |
| 26 | 0.5326 | 0.5767 | |

Tablo 5.5 devamı: Kan dokusuna ait ICRP [10] ve ICRU [9] elementel bolluklar kullanılarak hesaplanan lineer zayıflama katsayılarının [1/cm] sonuçları, sütun 2 ve 3'te sırasıyla sunulmuştur. Hesaplanan bu sonuçlar, literatürdeki teorik ve deneysel veriler ile sütun 4'te karşılaştırılmıştır.

| E[keV] | ICRP [10] | ICRU [9] | Referanslar |
|--------|-----------|----------|-----------------------------------|
| 27 | 0.4890 | 0.5316 | 0.454-0.463 [13] |
| 28 | 0.4453 | 0.4862 | |
| 29 | 0.4020 | 0.4405 | |
| 30 | 0.3597 | 0.3948 | 0.399196 [25] |
| 31 | 0.3512 | 0.3827 | |
| 32 | 0.3420 | 0.3706 | |
| 33 | 0.3315 | 0.3592 | |
| 34 | 0.3210 | 0.3479 | |
| 35 | 0.3105 | 0.3367 | |
| 36 | 0.3001 | 0.3255 | |
| 37 | 0.2896 | 0.3143 | |
| 38 | 0.2793 | 0.3034 | |
| 39 | 0.2689 | 0.2925 | |
| 40 | 0.2585 | 0.2813 | 0.283974 [25] |
| 41 | 0.2548 | 0.2767 | |
| 42 | 0.2514 | 0.2721 | 0.308 [13] 0.267 [6] |
| 43 | 0.2482 | 0.2675 | |
| 44 | 0.2452 | 0.2630 | |
| 45 | 0.2419 | 0.2585 | |
| 46 | 0.2380 | 0.2541 | |
| 47 | 0.2340 | 0.2499 | |
| 48 | 0.2301 | 0.2457 | |
| 49 | 0.2262 | 0.2415 | |
| 50 | 0.2224 | 0.2374 | 0.23956 [25] |
| 55 | 0.2125 | 0.2264 | |
| 60 | 0.2034 | 0.2154 | 0.214-0.222 [13] 0.216982 [25] |

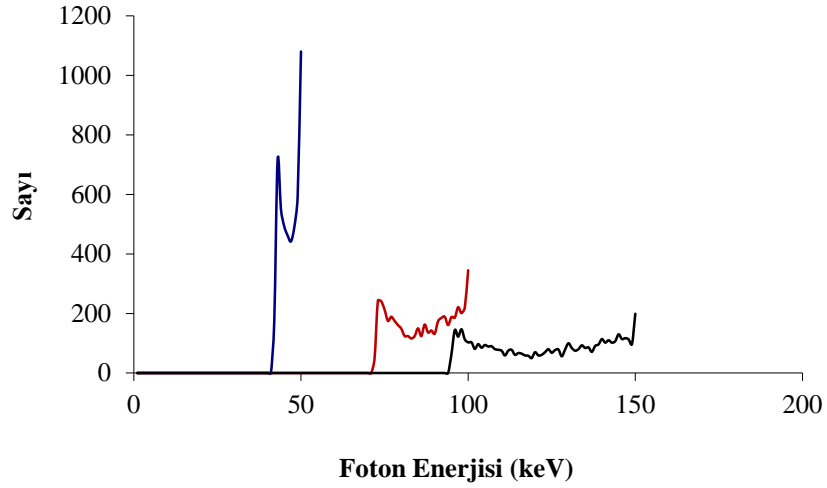
Tablo 5.5 devamı: Kan dokusuna ait ICRP [10] ve ICRU [9] elementel bolluklar kullanılarak hesaplanan lineer zayıflama katsayılarının [1/cm] sonuçları, sütun 2 ve 3'te sırasıyla sunulmuştur. Hesaplanan bu sonuçlar, literatürdeki teorik ve deneysel veriler ile sütun 4'te karşılaştırılmıştır.

| E[keV] | ICRP [10] | ICRU [9] | Referanslar |
|--------|-----------|----------|---|
| 65 | 0.1992 | 0.2091 | |
| 68 | 0.1961 | 0.2056 | 0.245 [13] 0.202 [6] |
| 70 | 0.1940 | 0.2033 | |
| 75 | 0.1889 | 0.1977 | |
| 80 | 0.1840 | 0.1923 | 0.193238 [25] |
| 85 | 0.1811 | 0.1887 | |
| 90 | 0.1786 | 0.1852 | |
| 95 | 0.1756 | 0.1820 | |
| 100 | 0.1727 | 0.1788 | 0.204 [13] 0.179 [6] 0.179458[25] |
| 105 | 0.1705 | 0.1764 | |
| 110 | 0.1683 | 0.1741 | |
| 115 | 0.1663 | 0.1718 | |
| 120 | 0.1644 | 0.1696 | |
| 122 | 0.1637 | 0.1687 | 0.168-0.170 [13] |
| 125 | 0.1626 | 0.1674 | |
| 130 | 0.1608 | 0.1654 | |
| 135 | 0.1589 | 0.1634 | |
| 140 | 0.1571 | 0.1615 | |
| 145 | 0.1553 | 0.1596 | |
| 150 | 0.1536 | 0.1578 | 0.158046 [25] |

Tablo 5.5'te, bu çalışmada hesaplanan lineer zayıflama katsayılarının literatürdeki verilerle uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Moleküler fotoelektrik tesir kesitleri, moleküler girişim etkilerini dâhil eden moleküler form faktör ve moleküler inkohherent saçılma fonksiyonları Monte Carlo simülasyon programının

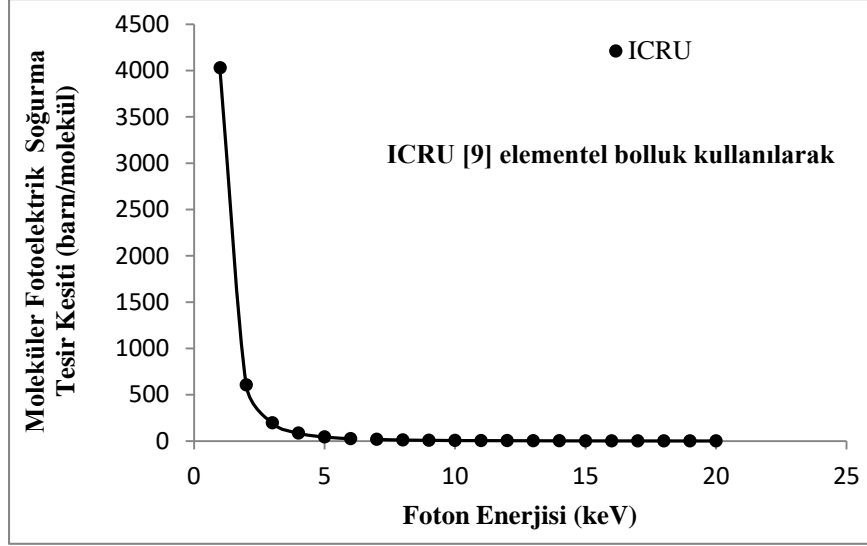
içerisine katılmıştır. Moleküler girişim etkilerinin dâhil edilmesi ile Monte Carlo simülasyon programı modifiye edilmiştir.

Kan dokusunda, saçılma yapan bir fotonun saçılmadan sonraki enerji dağılımı ve saçılma olasılıkları kullanılarak Monte Carlo benzetişim yöntemi uygulanmıştır. Gelen fotonun ortamdaki etkileşiminde meydana getirebileceği olay çeşitleri; koherent saçılma, inkoherent saçılma ve fotoelektrik olay şeklindedir. Fotonun ortamdaki etkileşimi neticesinde meydana getirebileceği koherent saçılma, inkoherent saçılma ve fotoelektrik olay olma olasılıkları tanımlanmıştır. 0 ve 1 arasında eşit olasılıkla gelen bir sayı üretilmiş ve üretilen bu sayı değerine göre saçılma türü belirlenmiştir. Saçılmanın inkoherent saçılma olması hâlinde, bu enerjiye ait inkoherent saçılma olasılıkları hesaplanmıştır. Yeni bir sayı daha üretilerek ve bu yeni sayının inkoherent saçılma olasılığı olduğu farzedilerek bu üretilen yeni sayıya karşılık gelen saçılma açısı tespit edilmiştir. Bu açığa karşılık gelen fotonun enerjisi kutulanmıştır. Saçılmanın koherent saçılma olması hâlinde, fotonun enerji kaybetmediği düşünülerek gelen fotonun enerjisi kutulanmıştır. Saçılmanın fotoelektrik soğurulma olayı olması hâlinde ise, gelen fotonun tamamen soğurulduğu düşünülmüştür. Fotonun enerji dağılımının elde edilmesine ait bilgisayar programı akış diyagramı EK A'da verilmiştir. Her bir foton enerjisi için Monte Carlo simülasyon işlemi beş bin kez tekrar edilmiştir. Kan dokusundan saçılan fotonların enerji dağılımları 50 keV, 100 keV ve 150 keV foton enerjileri için Şekil 5.4'te gösterilmiştir.



Şekil 5.4: Monte Carlo simülasyon sonuçlarının 50 keV (mavi çizgi), 100 keV (kırmızı çizgi) ve 150 keV (siyah çizgi) foton enerjileri için gösterimi.

Saçılan fotonların enerji dağılımı 50 keV için % 78.32, 100 keV için % 93.10 ve 150 keV için % 96.02 bir oran ile inkoherent tarafından baskın olmuştur. Koherent saçılımının dağılıma katkısı 50 keV için % 21.6, 100 keV için % 6.9 ve 150 keV için % 3.98 aralığında bulunmuştur. Fotoelektrik soğurma 40 keV altı foton enerjilerinde toplam zayıflama katsayısı için sorumlu olan önemli bir faktördür. Moleküler fotoelektrik soğurma tesir kesiti, ICRU [9] elementel bolluk kullanılarak hesaplanmış ve Şekil 5.5'te sunulmuştur.



Şekil 5.5: ICRU [9] elementel bolluk kullanılarak hesaplanan moleküler fotoelektrik soğurma tesir kesitleri.

Şekil 5.5'te görülebileceği gibi, kan dokusuna ait fotoelektrik tesir kesiti değerleri 20 keV altı foton enerjileri için önemli olmuştur. Bu sebeple, fotoelektrik soğurmanın dağılıma katılımı 50 keV için % 0.08'lik bir oran ile çok düşüktür. Şuan ki sonuçlar kan karakterizasyonu ve Monte Carlo kodlarında modelleme için medikal X-ışını saçılma araştırması alanına değerli bilgi temin edecektir.

6. KAYNAKLAR

- [1] Hubbell, J. H., "Review of photon interaction cross section data in the medical and biological context", *Physics in Medicine and Biology*, 44, R1–R22, (1999).
- [2] Seltzer, S. M., "Calculation of Photon Mass Energy-Transfer and Mass Energy-Absorption Coefficients", *Radiation Research*, 136, 147-170, (1993).
- [3] Boone, J. M. and Chavez, A. E., "Comparison of x-ray cross sections for diagnostic and therapeutic medical physics", *Medical Physics*, 23, 1997-2005, (1996).
- [4] Elshemey, W M., Elsayed, A. A. and El-Lakkani, A., "Characteristics of low-angle x-ray scattering from some biological samples", *Phys. Med. Biol.*, 44, 2907–2915, (1999).
- [5] Geraldelli, W., Tomal, A. and Poletti, M. E., "Characterization of tissue-equivalent materials through measurements of the linear attenuation coefficient and scattering profiles obtained with polyenergetic beams", *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 60, 566-571, (2013).
- [6] Phelps, M. E., Hoffman, E. J. and Ter-Pogossian, M. M., "Attenuation coefficients of various body tissues, fluids and lesions at photon energies of 18–136 keV", *Radiology*, 117, 573–583, (1975).
- [7] Berger, M. J. and Hubbell, J. H., "XCOM : photon cross sections on a personal computer", *NBSIR-87-3597*, Washington, (1987).
- [8] Lakshmanan, M.N., Harrawood, B.P., Samei, E. and Kapadia, A.J. "Volumetric x-ray coherent scatter imaging of cancer in resected breast tissue: a Monte Carlo study using virtual anthropomorphic phantoms", *Phys. Med. Biol.*, 60, 6355-6370, (2015).

- [9] ICRU (International Commission on Radiation Units and Measurements), "Photon, Electron, Proton and Neutron International data for Body Tissues", ICRU Report46, (1992).
- [10] ICRP (International Commission on Radiological Protection), "Report of the Task Group on Reference Man", ICRP Report 23, Pergamon, Oxford, (1975).
- [11] Peplow, D. E. and Verghese, K., "Measured molecular coherent scattering form factors of animal tissues, plastics and human breast tissue", *Phys. Med. Biol.*, 43, 2431–2452, (1998).
- [12] Kosanetzky, J., Knoerr, B., Harding, G. and Neitzel, U., "X-ray diffraction measurements of some plastic materials and body tissues", *Med. Phys.*, 14, 526-532, (1987).
- [13] Rao, P. S. and Gregg, E. C., "Attenuation of monoenergetic gamma rays in tissues", *Am. J. Roentgenol*, 123, 631–637, (1975).
- [14] Zaidi, H., "Comparative evaluation of photon cross-section libraries for materials of interest in PET Monte Carlo simulations", *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 47, 2722-2735, (2000).
- [15] Scofield, J. H., "Theoretical photoionization cross sections from 1 to 1500 keV", *Lawrence Livermore Laboratory Report*, UCRL-51326, (1973).
- [16] Thomson, J. J., *Conduction of Electricity Through Gases*, Cambridge University PressCambridge, London,(1906).
- [17] Hubbell, J. H. and Seltzer, S. M., "Tables of X-ray mass attenuation coefficients and mass energy absorption coefficients 1 keV to 20 MeV for elements Z=1 to 92 and 48 additional substances of dosimetric interest", *Report NISTIR 5632*, (1995).

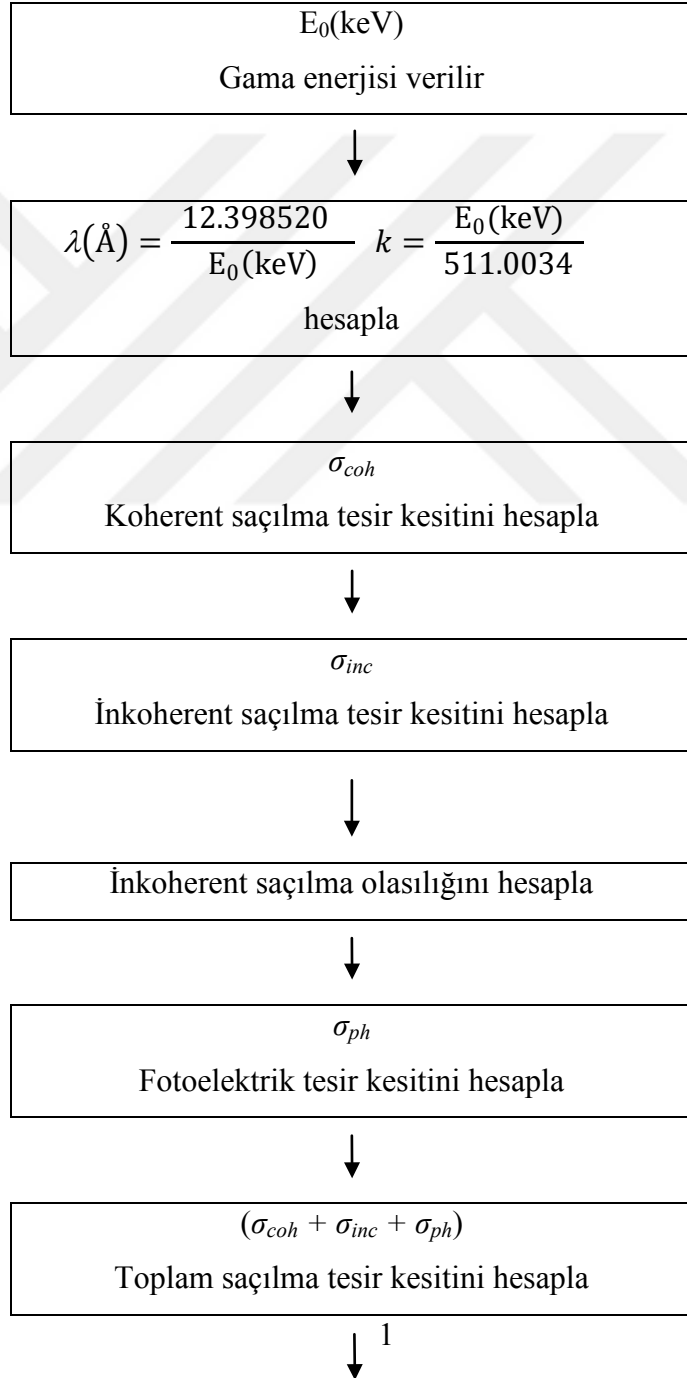
- [18] Tartari, A., Casnati, E., Bonifazzi, C. and Baraldi, C., "Molecular differential cross sections for x-ray coherent scattering in fat and polymethyl methacrylate", *Phys. Med. Biol.*, 42, 2551-2560, (1997).
- [19] Theodorakou, C. and Farquharson, M. J., "Human soft tissue analysis using x-ray or gamma-ray techniques", *Phys. Med. Biol.*, 53, R111-R149, (2008).
- [20] Schaupp, M., Schumacher, F., Smend, P., Rullhusen, J. H. and Hubbell, J. H., "Small-angle Rayleigh Scattering of Photons at High Energies: Tabulations of Relativistic HFS Modified Atomic Form Factors", *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 12, 467-512, (1983).
- [21] Klein, O. and Nishina, Y., "Über die Streuung von Strahlung durch freie Elektronen nach der neuen relativistischen Quantendynamik von Dirac", *Z. Phys.*, 52, 853-868, (1929).
- [22] Harding, G., Kosanetzky, J. and Neitzel, U., "X-ray diffraction computed tomography", *Med. Phys.*, 14, 515-525, (1987).
- [23] Johns, P. C., and Wismayer, M. P., "Measurement of coherent x-ray scatter form factors for amorphous materials using diffractometers", *Phys. Med. Biol.*, 49, 5233-5250, (2004).
- [24] Hubbell, J. H., Veigele, W. J., Briggs, E. A., Brown, R. T., Cromer, D. T. and Howerton, R. J., "Atomic form factors, incoherent scattering functions, and photon scattering cross sections", *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 4, 471-538, (1975).
- [25] Hubbell, J. H., "Photon mass attenuation and energy-absorption coefficients from 1 keV to 20 MeV", *Int. J. Appl. Radiat. Isot.*, 33, 1269-1290, (1982).



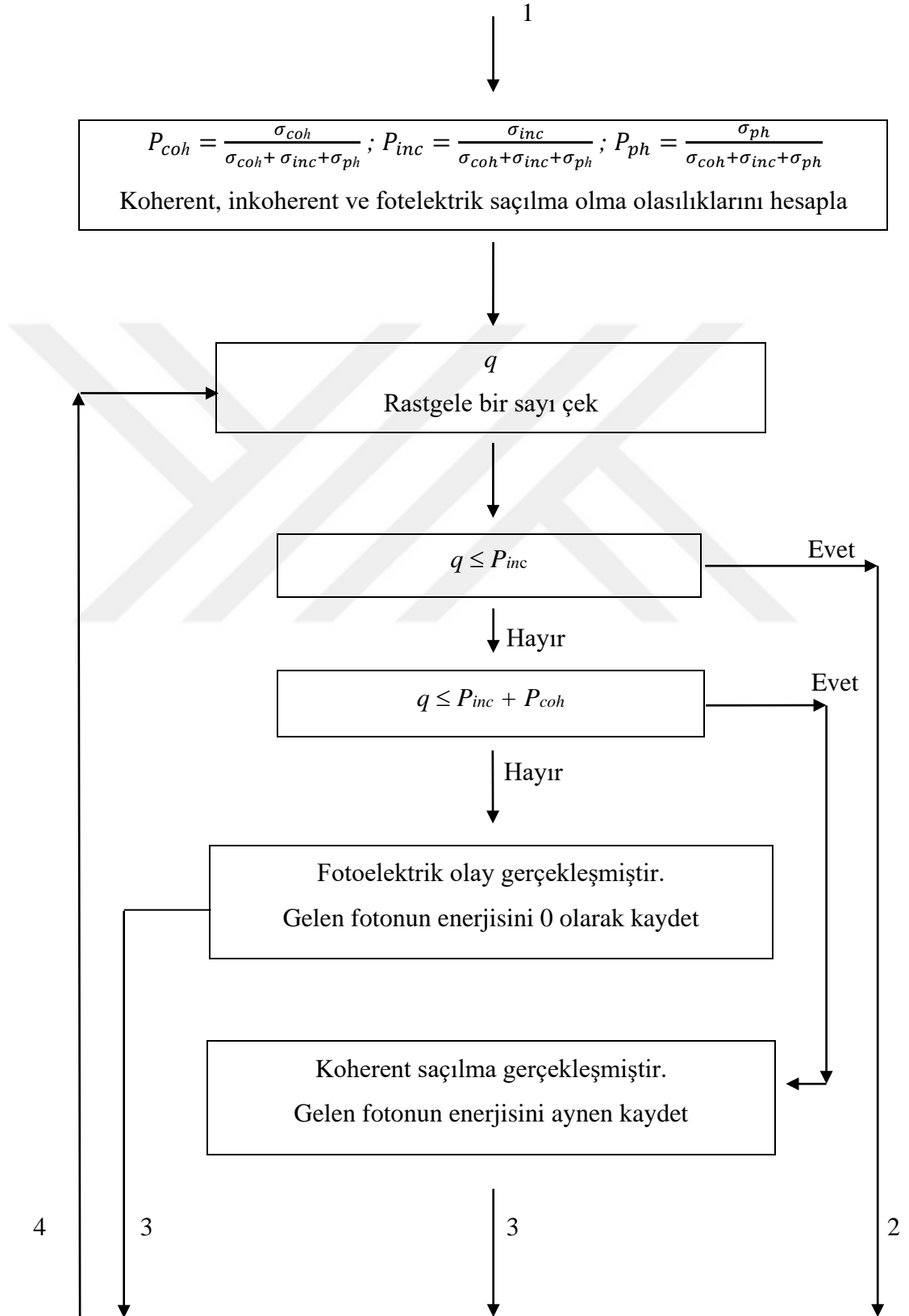
EKLER

7. EKLER

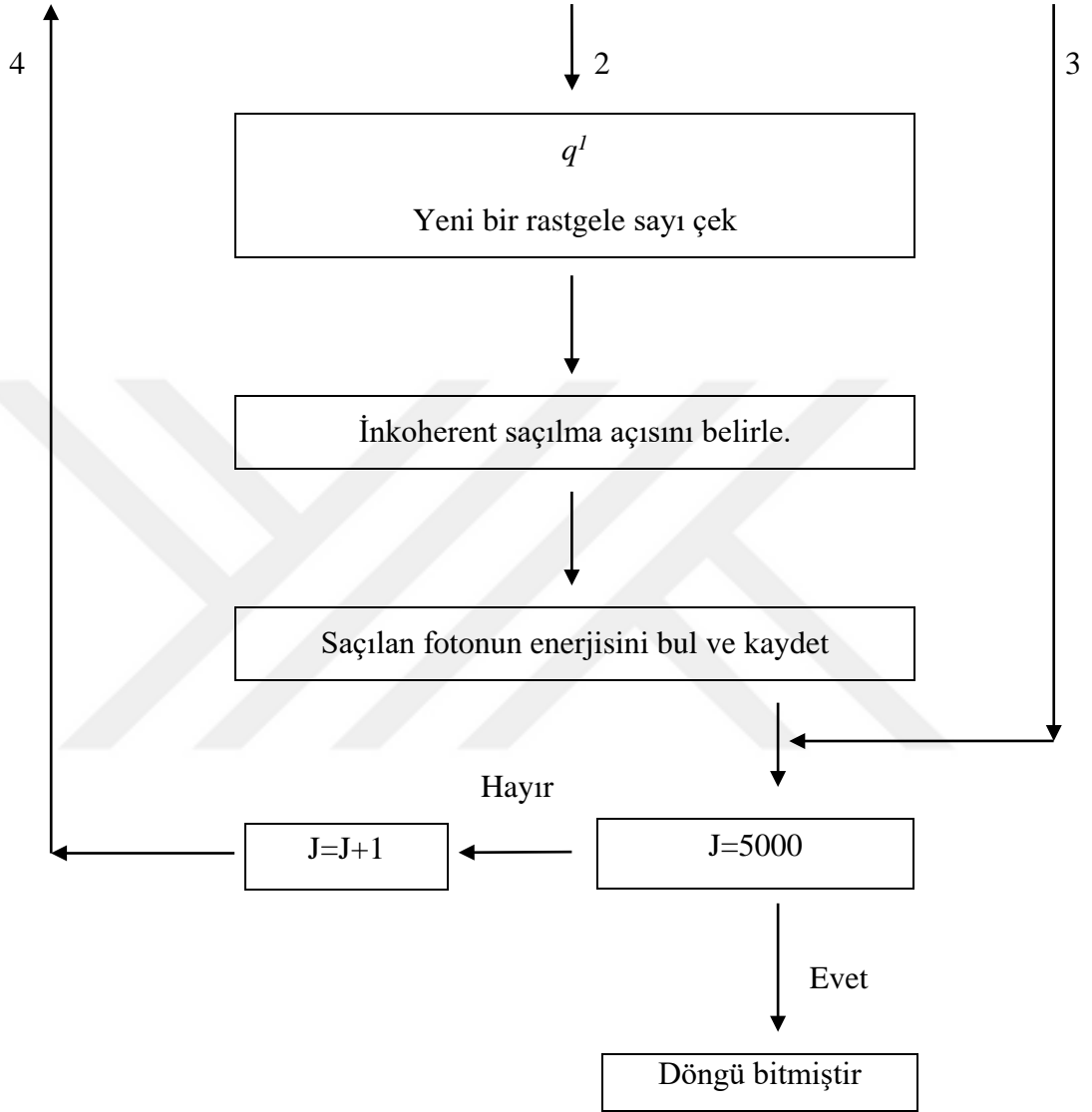
EK A: Gelen Fotonun Saçılmadan Sonraki Enerji Dağılımını Veren Bilgisayar Akış Diyagramı



**EK A devamı: Gelen Fotonun Saçılmadan Sonraki Enerji Dağılımını
Veren Bilgisayar Akış Diyagramı**



**EK A devamı: Gelen Fotonun Saçılmadan Sonraki Enerji Dağılımını
Veren Bilgisayar Akış Diyagramı**



EK B: Kan dokusuna ait ICRP 23 [10] raporunun elementel bolluk değerleri. N_i , kan dokusundaki i . element, Q_i , kan dokusundaki i . elementin kütlesi, w_i , kan dokusundaki i . elementin kütle kesri (organdaki elementin kütlesi/toplam kan doku kütlesi) ve M_i , i . elementin kütlesi. (Burada bir insana ait toplam kan dokusu 5500 g ve yoğunluğu 1.06 g/cm³ olarak alınmaktadır.)

| N_i | Q_i | w_i | w_i/M_i |
|---------|---------|-------------|-------------|
| Al E-13 | 1.9 E-3 | 3.4545 E-7 | 1.2803 E-8 |
| Sb E-51 | 2.4 E-5 | 4.3636 E-9 | 3.5838 E-11 |
| As E-33 | 2.5 E-3 | 4.5455 E-7 | 6.0670 E-9 |
| Ba E-56 | 1.0 E-3 | 1.8182 E-7 | 1.3240 E-9 |
| Be E-4 | 5.2 E-7 | 9.4545 E-11 | 1.0491 E-11 |
| Bi E-83 | 6.2 E-5 | 1.1273 E-8 | 5.3943 E-11 |
| B E-5 | 5.2 E-4 | 9.4545 E-8 | 8.7453 E-9 |
| Br E-35 | 2.6 E-2 | 4.7273 E-6 | 5.9162 E-8 |
| Cd E-48 | 3.6 E-5 | 6.5455 E-9 | 5.8228 E-11 |
| Ca E-20 | 3.1 E-1 | 5.6364 E-5 | 1.4064 E-6 |
| C E-6 | 5.4 E+2 | 9.8182 E-2 | 8.1745 E-3 |
| Cs E-55 | 1.5 E-5 | 2.7273 E-9 | 2.0521 E-11 |
| Cl E-17 | 1.5 E+1 | 2.7273 E-3 | 7.6928 E-5 |
| Cr E-24 | 1.4 E-4 | 2.5455 E-8 | 4.8956 E-10 |
| Co E-27 | 1.7 E-6 | 3.0909 E-10 | 5.2448 E-12 |
| Cu E-29 | 5.6 E-3 | 1.0182 E-6 | 1.6023 E-8 |
| F E-9 | 9.5 E-4 | 1.7273 E-7 | 9.0918 E-9 |
| Au E-79 | 2.1 E-7 | 3.8182 E-11 | 1.9385 E-13 |
| H E-1 | 5.5 E+2 | 0.1 | 9.9209 E-2 |
| I E-53 | 2.2 E-4 | 4 E-8 | 3.1520 E-10 |
| Fe E-26 | 2.5 | 4.5455 E-4 | 8.1394 E-6 |
| Pb E-82 | 1.4 E-3 | 2.5455 E-7 | 1.2285 E-9 |
| Li E-3 | 1.4 E-4 | 2.5455 E-8 | 3.6673 E-9 |

EK B devamı: Kan dokusuna ait ICRP 23 [10] raporunun elementel bolluk değerleri. N_i , kan dokusundaki i . element, Q_i , kan dokusundaki i . elementin kütlesi, w_i , kan dokusundaki i . elementin kütle kesri (organdaki elementin kütlesi/toplam kan doku kütlesi) ve M_i , i . elementin kütlesi. (Burada bir insana ait toplam kan dokusu 5500 g ve yoğunluğu 1.06 g/cm³ olarak alınmaktadır.)

| N_i | Q_i | w_i | w_i/M_i |
|---------|---------|-------------|-------------|
| Mg E-12 | 2.1 E-1 | 3.8182 E-5 | 1.5710 E-6 |
| Mn E-25 | 1.4 E-4 | 2.5455 E-8 | 4.6334 E-10 |
| Hg E-80 | 2.6 E-5 | 4.7273 E-9 | 2.3567 E-11 |
| Mo E-42 | 8.3 E-5 | 1.5091 E-8 | 1.5730 E-10 |
| Ni E-28 | 1.6 E-4 | 2.9091 E-8 | 4.9564 E-10 |
| Nb E-41 | 2.1 E-5 | 3.8182 E-9 | 4.1097 E-11 |
| N E-7 | 1.6 E+2 | 2.9091 E-2 | 2.0769 E-3 |
| O E-8 | 4.1 E+3 | 7.4545 E-1 | 4.6592 E-2 |
| P E-15 | 1.9 | 3.4545 E-4 | 1.1153 E-5 |
| K E-19 | 8.8 | 1.6 E-3 | 4.0922 E-5 |
| Rb E-37 | 1.4 E-2 | 2.5455 E-6 | 2.9783 E-8 |
| Se E-34 | 1.1 E-3 | 2 E-7 | 2.5329 E-9 |
| Ag E-47 | 9.9 E-4 | 1.8 E-7 | 1.6687 E-9 |
| Na E-11 | 1.0 E+1 | 1.8182 E-3 | 7.9087 E-5 |
| Sr E-38 | 1.8 E-4 | 3.2727 E-8 | 3.7351 E-10 |
| S E-16 | 1.0 E+1 | 1.8182 E-3 | 5.6702 E-5 |
| Sn E-50 | 6.8 E-4 | 1.2364 E-7 | 1.0415 E-9 |
| Ti E-22 | 1.4 E-4 | 2.5455 E-8 | 5.3179 E-10 |
| U E-92 | 4.6 E-6 | 8.3636 E-10 | 3.5126 E-12 |
| V E-23 | 8.8 E-5 | 1.6 E-8 | 3.1409 E-10 |
| Y E-39 | 2.6 E-5 | 4.7273 E-9 | 5.3172 E-11 |
| Zn E-30 | 3.4 E-2 | 6.1818 E-6 | 9.4537 E-8 |
| Zr E-40 | 1.3 E-2 | 2.3636 E-6 | 2.5910 E-8 |

EK B devamı: Kan dokusuna ait ICRP 23 [10] raporunun elementel bolluk değerleri. N_i , kan dokusundaki i . element, Q_i , kan dokusundaki i . elementin kütlesi, w_i , kan dokusundaki i . elementin kütle kesri (organdaki elementin kütlesi/toplam kan doku kütlesi) ve M_i , i . elementin kütlesi. (Burada bir insana ait toplam kan dokusu 5500 g ve yoğunluğu 1.06 g/cm³ olarak alınmaktadır.)

| N_i | Q_i | w_i | w_i/M_i |
|---------|---------|------------|-------------|
| Ga E-31 | 1.6 E-5 | 2.9091 E-9 | 4.1724 E-11 |
| Si E-14 | 1.4 E-1 | 2.5455 E-5 | 9.0634 E-7 |

EK C: Kan dokusuna ait ICRU 46 [9] raporunun elementel bolluk değerleri. N_i , kan dokusundaki i . element, w_i , kan dokusundaki i . elementin kütle kesri ve M_i , i . elementin kütlesi. (Burada bir insana ait toplam kan dokusu 5500 g ve yoğunluğu 1.06 g/cm³ olarak alınmaktadır.)

| N_i | w_i | w_i/M_i |
|-------|-------|------------|
| H | 0.102 | 1.0119 E-1 |
| C | 0.11 | 9.1585 E-3 |
| N | 0.033 | 2.3560 E-3 |
| O | 0.746 | 4.6627 E-2 |
| Na | 0.001 | 4.3498 E-5 |
| P | 0.001 | 3.2285 E-5 |
| S | 0.002 | 6.2371 E-5 |
| Cl | 0.003 | 8.4620 E-5 |
| K | 0.002 | 5.1153 E-5 |