

**T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ÖZGÜL SOĞURMA ORANLARININ GÖRÜNTÜSEL BİR VÜCUT MODELİ
YARDIMIYLA MONTE CARLO YÖNTEMİ KULLANILARAK BELİRLENMESİ**

Nuri YORULMAZ

FİZİK ANABİLİM DALI

**ŞANLIURFA
2006**

Yrd. Doç. Dr. Ahmet BOZKURT danışmanlığında, Nuri YORULMAZ'ın hazırladığı “Özgöl Soğurma Oranlarının Görüntüsel Bir Vücut Modeli Yardımıyla Monte Carlo Yöntemi Kullanılarak Belirlenmesi” konulu çalışma 19/09/2006 tarihinde aşığıdaki jüri tarafından Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Yrd. Doç. Dr. Ahmet BOZKURT

Üye : Doç. Dr. Necmettin YAZICI

Üye : Yrd. Doç. Dr. Oral OLTULU

Bu Tezin Fizik Anabilim Dalında Yapıldığını ve Enstitümüz Kurallarına Göre Düzenlendiğini Onaylarım.

Prof. Dr. İbrahim BOLAT
Enstitü Müdürü

Bu alışma HÜBAK Tarafından Desteklenmiştir.
Proje No: 647

Not: Bu tezde kullanılan özgöl ve başka kaynaktan yapılan bildirimlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
ÖZ	ii
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	v
ÇİZELGELER DİZİNİ	vi
SİMGELER DİZİNİ	vii
1. GİRİŞ	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	4
3. MATERYAL ve YÖNTEM	8
3.1. Radyasyon birimleri	8
3.1.1. Nükleer tıpta doz hesaplamaları	11
3.2. Monte Carlo yöntemi	13
3.2.1. Monte Carlo yönteminin bir foton problemine uyarlanması	16
3.3. MCNP (Monte Carlo N-Particle) radyasyon taşıma programı	22
3.3.1. MCNP uygulamasına bir örnek	23
3.4. VIPMAN tüm insan modeli	30
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	35
4.1. Giriş	35
4.2. Organ dozlarında istatistiksel hatalar	37
4.3. Organ dozları	38
4.4. Etkin doz	41
4.5. Özgül soğurma oranları	45
4.6. Radyofarmasötikler	56
4.6.1. S-Değerleri	58
4.6.2. Radyofarmasötikler ve etkin doz	59
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	62
KAYNAKLAR	64
ÖZGEÇMİŞ	66
EK 1 – Organ doz değerleri	67
EK 2 – Organ doz grafikleri	84
EK 3 – SAF değerleri	89
ÖZET	98
SUMMARY	100

ÖZ

Yüksek Lisans Tezi

ÖZGÜL SOĞURMA ORANLARININ GÖRÜNTÜSEL BİR VÜCUT MODELİ YARDIMIYLA MONTE CARLO YÖNTEMİ KULLANILARAK BELİRLENMESİ

Nuri YORULMAZ

**Harran Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı**

Danışman : Yrd. Doç. Dr. Ahmet BOZKURT

Yıl : 2006, Sayfa : 100

Nükleer tıp uygulamalarında incelenen organlar hakkında tanısal bilgi edinilirken, aynı esnada hastanın hayati açıdan risk taşıyan diğer organlarının ne kadar doz aldıklarının bilinmesi, radyasyon riski açısından büyük önem taşır. Bu çalışmada, 103 kg ağırlığında ve 1.86 m boyundaki bir insanın gerçek anatomisine dayanılarak oluşturulmuş bir görüntüsel vücut modeli olan VIP-MAN kullanılarak bir Monte Carlo simülasyon metodu olan MCNP programı yardımıyla nükleer tıpta tanı/tedavi sırasında farklı organ ve dokuların soğuracakları enerjiler hesaplanarak, bu değerler yardımıyla organların özgül soğurma oranları (SAF) ve S-değerleri belirlenmiştir. Bu işlem iki farklı şekilde simüle edilmiştir. Birincisi monoenerjik kaynak organlar (0.01, 0.015, 0.02, 0.03, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 4.0 MeV enerjili fotonlar için) kullanılarak yapılan simülasyonlar ve diğeri sekiz farklı sintigrafi çeşidi için radyofarmasötikler kullanarak yapılan simülasyonlardır (beyin Tc-99m, tiroit I-123, karaciğer Tc-99m, böbrek Tc-99m, pankreas Se-75, dalak Tc-99m, kalp Tl-201 ve kırmızı kemik iliği Tc-99m sintigrafileri). VIPMAN vücut modelinin, radyasyon kaynağının vücut içerisinde düşünüldüğü ilk çalışma olan bu tezden elde edilen SAF ve S-değerleri, literatürde referans insan modelleriyle elde edilen verilerle kıyaslanmıştır. Yapılan bu kıyaslamalar sonucunda vücut modelleri arasındaki farklılıklardan kaynaklanan küçük farkların dışında birebir uyum gözlenmiştir. Ayrıca hem monoenerjik kaynaklar için hem de sintigrafi simülasyonları için vücudun aldığı etkin doz değerleri de hesaplanmıştır.

ANAHTAR KELİMELELER : SAF, S-Değeri, Monte Carlo Metodu, VIPMAN

ABSTRACT

MSc Thesis

COMPUTING SPECIFIC ABSORBED FRACTIONS USING A TOMOGRAPHIC BODY MODEL AND THE MONTE CARLO TECHNIQUE

Nuri YORULMAZ

**Harran University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Physics**

**Supervisor : Yrd. Doç. Dr. Ahmet BOZKURT
Year : 2006 , Page : 100**

When obtaining diagnostic information about the organs assessed in nuclear medicine applications, it is necessary to know how much radiation dose is received by vitally important organs of the patient. In this study, the VIPMAN whole-body model, which is a tomographic model created based on the anatomy of a 1.86 m tall and 103 kg male body, was used together with the Monte Carlo code MCNP to compute the energies absorbed by various organs and tissues of a patient undergoing a nuclear medicine procedure and by using these values to determine their specific absorbed fraction (SAF) and S-values . Two different cases are studied: monoenergetic photon source distributed in selected organs (12 different energies: 0.01, 0.015, 0.02, 0.03, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 4.0 MeV) and a radionuclide distributed in an organ of interest (8 different radiopharmaceuticals: Tc-99m in brain, liver, kidneys, spleen, and red bone marrow; I-123 in thyroid; Se-75 in pancreas, Tl-201 in heart). This thesis study is the first using VIPMAN body model for internal radiation sources and in comparison the SAF and S-values obtained from this study agree reasonably well with those from the literature that use different body models except in limited number of situations which can be explained by the differences in size, location, the method of modeling certain organs of the body. In addition, the effective dose involved in both monoenergetic and radionuclide cases were calculated.

KEY WORDS : SAF, S-Value, Monte Carlo Method, VIPMAN

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezimin hazırlanmasında yardımlarını esirgemeyen ve bana sürekli desteğini dile getiren sayın danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Ahmet BOZKURT'a teşekkürlerimi bir borç bilirim. Ayrıca bana sürekli destek veren eşim ve aileme şükranlarımı sunarım.

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa No
Şekil 1.1. (a) Tüm vücut kemik sintigrafisi (b) Tiroid sintigrafisi.....	2
Şekil 3.1. Gelişi güzel sayı eksen ve olasılık dağılımları.....	14
Şekil 3.2. Alanı $\pi/4$ olan çeyrek birim çember.....	15
Şekil 3.3. Monte Carlo yöntemini anlamaya yönelik π sayısının hesaplanması.....	15
Şekil 3.4. Fotoelektrik olayında fotonun madde ile etkileşimi.....	17
Şekil 3.5. Compton olayında fotonun madde ile etkileşimi.....	18
Şekil 3.6. Çift oluşumu olayı.....	18
Şekil 3.7. Soğurucu ortamın atom numarasına göre foton etkileşimlerinin gerçekleşme olasılıkları.....	20
Şekil 3.8. Fotonların Pb ortamındaki etkileşimlerinin foton enerjisine bağımlılığı.....	20
Şekil 3.9. Monte Carlo yönteminin işleyiş algoritması.....	21
Şekil 3.10. MCNP'ye örnek problem için oluşturulan geometri.....	24
Şekil 3.11. Örnek veri giriş dosyasının hücre kartları bölümü.....	25
Şekil 3.12. Örnek MCNP giriş dosyasının yüzey kartları bölümü.....	26
Şekil 3.13. Örnek MCNP giriş dosyasının veri kartları bölümü.....	29
Şekil 3.14. (a) Renkli fotoğraf (b) Bilgisayarlı tomografi (c) Magnetik rezonans yöntemiyle elde edilen görüntü.....	31
Şekil 3.15. a) Bilgisayara aktarılmış bir kesit görüntüsü b) Aynı fotoğrafın organ veya doku özellikleri tanıtilarak segmente edilmiş.....	31
Şekil 3.16. VIPMAN vücut modelinde renklere karşılık gelen doku ve organlar.....	32
Şekil 3.17. VIPMAN vücut modelini oluşturan ve renklere karşılık gelen doku veya organların sayılarla gösterimi. şekilde ki görüntüyü tamamen rakamlar oluşturmaktadır.....	32
Şekil 3.18. VIPMAN vücut modelini oluşturan dilimlerin büyüklüğü.....	33
Şekil 3.19. (a) VHP veri tabanlarından elde edilen görüntüsü (b) Voxel vücut modeli (c) VIPMAN vücut modelinin MCNP-plot görüntüsü.....	33
Şekil 4.1. Kaynak organ beyin için, a) konuma göre b) büyüklüğe göre hedef organlardan alınan veriler sonucunda ortaya çıkan istatistiksel hata değerleri.....	39
Şekil 4.2. Kaynak organ beyin olduğunda, bazı hedef organların aldıkları dozlar.....	40
Şekil 4.3. Sekiz farklı kaynak organ için vücudun aldığı etkin dozun enerjiye göre değişimi.....	44
Şekil 4.4. Tiroid dokusu için, elde edilen verilerin radar ile kıyaslanması.....	46
Şekil 4.5. Testis dokusu için, elde edilen verilerin radar ile kıyaslanması.....	47
Şekil 4.6. Beyin dokusu için, elde edilen verilerin radar ile kıyaslanması.....	48
Şekil 4.7. İnce bağırsak dokusu için, elde edilen verilerin radar ile kıyaslanması.....	49
Şekil 4.8. Göğüs dokusu için, elde edilen verilerin radar ile kıyaslanması.....	50
Şekil 4.9. Kas dokusu için, elde edilen verilerin radar ile kıyaslanması.....	51
Şekil 4.10. Kırmızı kemik iliği dokusu için, elde edilen verilerin radar ile kıyaslanması.....	52
Şekil 4.11. Akciğer dokusu için, elde edilen verilerin radar ile kıyaslanması.....	53
Şekil 4.12. Dört farklı vücut modeli için, 100 keV enerjili fotonlar yayan altı farklı kaynak organ için kaynak-hedef organ ilişkisine göre SAF değerlerinin kıyaslanması.....	55
Şekil 4.13. Dört farklı vücut modeli için, 1 MeV enerjili fotonlar yayan altı farklı kaynak organ için kaynak-hedef organ ilişkisine göre SAF değerlerinin kıyaslanması.....	56
Şekil 4.14. (a) Karaciğer (b) Böbrek sintigrafisi S değerlerinin (rad/microci-sa) VIPMAN ve referans insan için kıyaslanması.....	60
Şekil 4.15. Sekiz farklı sintigrafi çeşidi için vücudun aldığı etkin doz değerlerinin kıyaslanması.....	61

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa No
Çizelge 3.1. Radyasyon ağırlık faktörleri	10
Çizelge 3.2. İnsanların alabileceği tavsiye edilebilir yıllık doz limitleri	10
Çizelge 3.3. Organ ağırlık faktörü (w_T) değerleri (ICRP, 1990).....	11
Çizelge 3.4. Al, Pb ve Fe için kütleli zayıflama katsayıları (cm^2/g).....	19
Çizelge 3.5. MCNP’de geometrileri oluşturmak için kullanılan yüzey kartları.....	27
Çizelge 3.6. MCNP’de çalışılabilecek parçacık türleri.....	28
Çizelge 3.7. MCNP’de kullanılan tally kartları.....	30
Çizelge 3.8. VIPMAN vücut modelinde bulunan bazı organ veya dokuların özellikleri.....	34
Çizelge 4.1. Nükleer tıpta kullanılan bazı radyoizotoplar, kullanıldıkları prosedürler ve özellikleri.....	36
Çizelge 4.2. Sekiz farklı kaynak organdan yayılan 12 farklı enerjilere sahip Monoenerjik fotonlar için etkin doz değerleri (Sv).....	43
Çizelge 4.3. Referans insan ile VIPMAN vücut modellerinde organ kütlelerinin kıyaslanması.....	55
Çizelge 4.4. Nükleer tıp prosedürlerinden 8 farklı sintigrafi çeşidi için hesaplanan S- değerleri (Mev/g).....	57
Çizelge 4.5. Karaciğer ve böbrek sintigrafisi için elde edilen S-değerlerinin (rad/microCi-sa) VIPMAN ve Referans insan için kıyaslanması.....	58
Çizelge 4.6. Sekiz farklı sintigrafi çeşidi için vücudun aldığı etkin doz değerleri.....	61

SİMGELER DİZİNİ

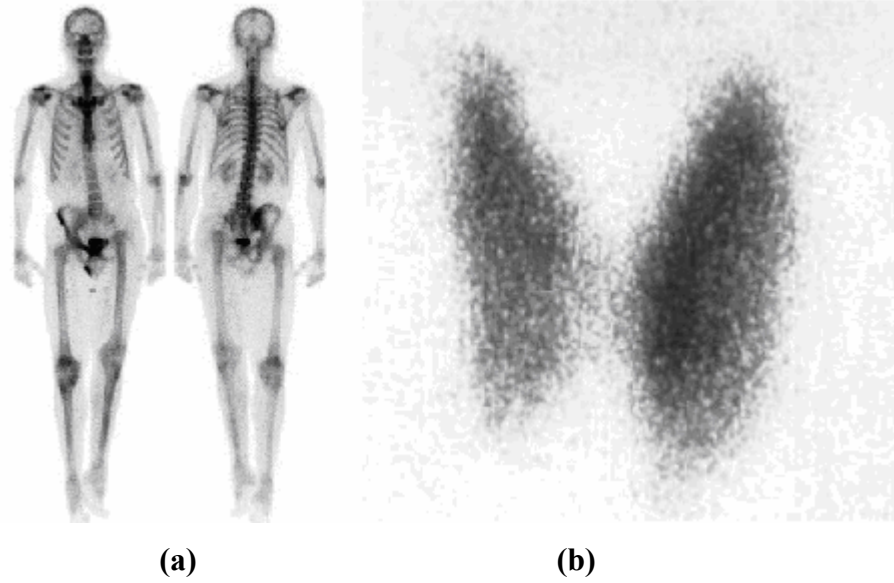
Bq, Ci	Aktivite Birimleri
D	Soğurulan Doz Miktarı
ε	Soğurulan Radyasyon Enerjisi
Gy	Soğurulan Doz Birimi
H_T	Eşdeğer Doz
w_R	Radyasyon Ağırlık Faktörü
Sv	Eşdeğer Doz Birimi
E	Etkin Doz
A	Aktivite
$\tilde{A}$	Kümülatif Aktivite
Φ	Özgül Soğurma Oranı
ϕ	Kaynaktan Yayılan Enerjinin Soğurulma Oranı
Δ	Bozunum Başına Açığa Çıkan Enerji
$S(r_h \leftarrow r_k)$	S-Değeri
r_h	Hedef Bölge
r_k	Kaynak Bölge
q_i	Rastgele Sayı
P_n	Olasılık
I_0	Foton Demetinin Şiddeti
μ	Zayıflama Katsayısı
x	Fotonun Madde İçerisinde Kat Ettiği Yol
τ	Fotoelektrik Olay
σ	Compton Olayı
κ	Çift Üretim

1. GİRİŞ

Radyasyonun biyolojik sistemler üzerindeki etkileri, radyoaktif çekirdek bozunumlarını araştıran ilk araştırmacılar ve iyonize radyasyonla uğraşan kişilerin vücutlarında meydana gelen çeşitli doku hasarları sonucunda öğrenilmiştir. Bunun yanı sıra, atom ile ilgili yapılan çalışmalar sonucunda, temeli çekirdek parçalanması olan atom bombalarının yaydığı radyasyonun da tahrip edici etkileri olduğu görülmüştür.

20. yüzyıl başlarında yapılan bilimsel çalışmalar ve geliştirilen teknoloji, radyasyonun zararlı yönlerinin yanında tıbbi ve endüstriyel alanlarda yararlı kullanımlarının da olabileceğini göstermiştir. Nükleer santrallerde iyonize edici özelliğe sahip, nötronların başlattığı çekirdek bölünmesi (Fisyon) olayından enerji üretilirken, tıpta x ve gama ışınlarından çeşitli hastalık ya da anormallikler hakkında tanısal bilgi elde etmede veya iyileştirilmesi yönünde tedaviler geliştirmede yararlanılmaktadır. Örneğin x-ışınları, konvansiyonel radyolojide vücudun iç yapısındaki olumsuzlukları tespit etmede ve tomografide kemik ve yumuşak doku anatomisi hakkında görüntüsel bilgi elde etmede kullanılmaktadır. Yine x ve gama ışınları onkolojide tümörlü dokuların yok edilmesinde terapötik amaçlarla da tercih edilmektedir.

Radyasyon kaynağının vücut dışında yer aldığı bu tür uygulamaların yanı sıra nükleer tıp uygulamalarında hasta vücuduna verilen ve düşük dozda radyasyon yayan radyoaktif maddeler aracılığıyla, vücut organlarının görüntülenmesi, organ fonksiyonlarının değerlendirilmesi ve sınırlı da olsa hasarlı organların tedavisi sağlanabilmektedir. Genellikle kısa yarı ömürlü radyoaktif çekirdeklerin tercih edildiği nükleer tıp prosedürlerinde, incelenen organın özelliklerine uygun, kimyasal çözeltiler hazırlanarak, damardan enjeksiyon veya ağızdan ya da solunum yoluyla hasta vücuduna verilerek uygulanır. Kimyasal çözeltide bulunan radyoaktif



Şekil 1.1. (a) Tüm vücut kemik sintigrafisi (b) Tiroit sintigrafisi

çekirdekten yayılan gama ışınları bir gama kamerası yardımıyla toplanır ve bilgisayara aktararak istenilen bölge hakkında görüntüsel bilgi elde edilir. Bu teşhis yöntemine genel olarak *sintigrafi* adı verilir. Şekil 1.1’de tüm vücut kemik sintigrafisi (a) ve tiroit sintigrafisi (b) ile elde edilmiş görüntüler verilmiştir.

X ve gama ışınları olarak adlandırılan yüksek enerjili (keV~MeV) fotonlara oranla α , β ve nötron gibi radyasyonlar madde içerisinde oldukça kısa menzillere sahiptirler ve genellikle bu tür ışımlar yapan radyoaktif maddeler hastaya verildiklerinde vücut dışına çıkamadıklarından gama kamerası ile tespit edilemezler. Bu yüzden radyoaktif bir madde, görüntüsel bilgiye katkısı olmayan parçacık radyasyonları yayıyorsa, nükleer tıpta tercih edilmez ve madde içerisinde daha uzun menzile sahip foton yayıcılarından yararlanır. Ancak nükleer tıp prosedürlerinde kullanılan radyoaktif çekirdeklerin yarı ömürlerinin kısa olması ve düşük enerjili gama fotonları yayması hasta sağlığı açısından önemlidir. Nükleer tıp prosedürlerinde kullanılan bu şekildeki radyoaktif çekirdeklere genel olarak *radyofarmasötikler* adı verilir.

Çoğunlukla tanısal amaçlı görüntülemeye yönelik olan nükleer tıpta, hastaya uygulanan radyofarmasötiğin yayacağı radyasyonların hangi organları etkileyeceği

ve hastanın toplam riskinin tespiti önemli bir konudur. Çünkü şüphe altındaki organa verilecek radyasyon dozunun, diğer sağlıklı doku ve organlar üzerinde hasar oluşturmaması istenir. Bu bilginin pratikte klinik ölçümlerle belirlenmesi mümkün olmadığından, bilgisayar ortamında oluşturulmuş vücut benzeri modeller kullanılarak hesaplanır. Bu modeller, 1970'li yıllarda geliştirilen ve organ ile doku hacimlerinin basit geometrik şekillerle temsil edildiği matematiksel modeller olabileceği gibi, 1990'lı yılların sonlarına doğru geliştirilen ve gerçek vücut görüntülerine dayanan tomografik modeller de olabilir.

Bu çalışmada görüntüsel bir tüm vücut modeli olan VIPMAN kullanılarak, bir radyasyon taşıma programı olan MCNP yardımıyla yaygın nükleer tıp uygulamaları için hasta riski belirlenmeye çalışılmıştır. Daha önce matematiksel modellerle yapılan çalışmalara kıyasla, bu çalışmada gerçek renkli fotoğraflarla oluşturulmuş VIPMAN vücut modeli kullanılarak elde edilen soğurulan organ dozu ve etkin doz değerleri, bir nükleer tıp uygulamasında söz konusu olan hasta riskini daha gerçekçi bir şekilde ortaya koyacaktır. Ayrıca bu çalışma, VIPMAN tüm vücut modelinin kullanıldığı diğer çalışmaların aksine, radyoaktif kaynağın vücut içinde bulunduğu ilk çalışma olması açısından bir ilktir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Nükleer tıpta tanı/teşhis alanında herhangi bir organ için görüntüleme veya tedavi amaçlı uygulama yapılırken, içerisinde radyoaktif madde bulunan bir çözelti farklı yollarla vücuda verilir. Bu yüksek lisans tezinde amaç, bu tür prosedürler sırasında incelenecek organ dışında diğer hayati organların kaynaktan soğurdukları doz oranını yani, o organların özgül soğurma oranlarını (SAF) ve kullanılan aktiviteye bağlı olan S-değerlerini Monte Carlo yöntemi yardımıyla ve görüntüsel bir vücut modeli kullanarak tespit etmektir.

Smith (1984) tarafından hazırlanan ve bu konuda yapılan ilk çalışmalardan bir olan makalesinde, MIRD yöntemiyle nükleer tıpta farklı prosedürler göz önüne alınarak söz konusu olan etkin doz alımı kıyaslanmıştır. Ayrıca tanısal nükleer tıptaki doz aralıkları için yumurtalık ve kemik iliğinin soğuracağı dozlar belirlenerek, en yüksek dozu alan organ saptanmıştır. Bu çalışmada çoğu nükleer tıp prosedürü için 10 mSv'den daha düşük bir etkin doz alımının söz konusu olduğunu ve en yüksek doz alan organın ise 25 mGy'den daha düşük bir doz soğurduğu saptanmıştır.

Andreo (1991) tarafından hazırlanan diğer bir makalede ise medikal radyasyon fiziğinde kullanılan, Monte Carlo yönteminin kullanım amaçları ile temel taşları açıklanarak, foton ve elektron transferlerinde uygulanabilirliği tartışılmıştır. Ayrıca bu çalışmada, nükleer tıp uygulamalarında soğurulan doz hesapları, görüntüleme sistemleri ve radyoterapi fiziği ile ilgili bilgiler verilerek, radyasyon güvenliği açısından yapılması gerekenler özetlenmiştir.

Petoussi ve Zankl (1998) beraber yürüttükleri bir çalışmada, tek enerjili (monoenerjik) foton kaynakları için Monte Carlo yöntemi kullanarak voxel tabanlı bir antropomorfik modelde bazı önemli organlar için elde edilebilecek SAF değerleri hesaplanmış ve üretilen değerler matematiksel modellerden elde edilen değerlerle kıyaslanmıştır. Bazı hedef-kaynak organ kombinasyonlarında ortaya çıkan uyumsuz

sonuçların bu organların farklı modellerde farklı kütle, büyüklük ve konuma sahip olmasından kaynaklanabileceği vurgulanmıştır.

Jones (1998) tarafından yapılan bir çalışmada, NORMAN adı verilen voxel tabanlı bir vücut modeli manyetik rezonans (MR) görüntülerinden yola çıkılarak oluşturulmuş ve bu model iyonize radyasyonun vücut içi ve dışında olduğu durumlarda organ dozu hesaplamalarında kullanılmıştır. Nükleer tıp uygulamaları için bu model 10 keV-4 MeV enerji aralığındaki fotonların, bir organa yerleştiği bir prosedürde diğer organların özgül soğurma oranları (SAF) hesaplanmıştır. Ayrıca bu değerler Cristy- Eckerman tarafından geliştirilen MIRD5 fantomuyla hesaplanan değerlerle kıyaslanmıştır.

Yoriyaz ve ark. (2000) yaptıkları bir çalışmada, bilgisayarlı tomografi verilerine dayanarak hastaya özgü vücut modelleri oluşturarak, vücut içi kaynak organlar için doz hesabından yeni bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Bu çalışmada radyasyon taşıma ve enerji depolama ile ilgili, Monte Carlo yöntemine dayalı MCNP-4B adı verilen bir program kullanmışlardır. Voxel tabanlı bu modellerde radyasyon transferi ile ilgili yapılan simülasyonlar sonucunda elde edilen veriler, literatürdeki verilerle genelde uyumluluk gösterdiği gibi bazı farklılıklarda göstermiştir. Çalışma sonucunda ortaya çıkan bu farklara neden olarak, organ kütlelerindeki farklılık ile matematiksel modellerde olmayıp voxel tabanlı modellerde bulunan birebir organ eşdeğerliği gösterilmiştir.

Nükleer Tıp Derneği'nin MIRD (Dahili Tıbbi Radyasyon Dozu) Komitesi tarafından 2000 yılında yayınlanan bir raporda, nükleer tıp çalışmaları için dâhili dozun hesaplanmasında kullanılacak teknikler, denklemler ve kaynaklar belirlenmiştir (Toohey, 2000). Farklı kaynak organlarda yerleşmiş radyoaktif maddelerin diğer hedef organlarda oluşturacağı etki SAF değerleri olarak verilmiş ve radyoaktif kaynağın fiziksel ve biyolojiksel yarılanma süreleri göz önüne alınarak tablolar halinde sunulmuştur.

Clariand ve ark. (2000) farklı boylara sahip yetişkin anatomik modeller kullanarak vücut içi organ dozlarını hesaplamıştır. Bu makalede MIRD model dizaynına göre, boyları 160, 170, 180 cm olan erkek ve boyları 150, 160, 170 cm olan kadın anatomik modeller oluşturulmuştur. Bu yeni modellerde idrar torbası ile mideyi I-131 radyoizotopunun izotropik olarak dağılmış olduğu kaynaklara dönüştürerek, diğer bazı vücut organlarında S-değerleri Monte Carlo yöntemine göre hesaplanmıştır. Çalışma sonucunda dozimetrik parametrelerde vücut morfolojisinin önemi ortaya çıkarılmıştır.

Yine Xu ve ark. (2000) tarafından yapılan bir çalışmada fotonlar, elektronlar, nötronlar ile proton etkileşimlerini kapsayan ve Monte Carlo yöntemiyle organ dozu hesaplamaları için, Ulusal Tıp Kütüphanesinden Görünür İnsan Projesi (VHP) adı altında renkli fotoğraflardan oluşturulan ve VIPMAN adı verilen tüm insan vücut modeli hakkında ayrıntılı bilgiler verilmiştir. Bu model 1.86 m boyunda, 103 kg ağırlığında ve 38 yaşlarında bir erkek model olup, gerçek insan anatomisine dayanır. Bu makalede adı geçen VIPMAN tüm insan modeli, bu yüksek lisans tezinde kullanılmıştır.

Smith ve ark. (2000) realistik voxel tabanlı insan modeller kullanarak, vücuda verilen bazı radyonüklitlerin yerleşeceği kaynak organları belirleyerek, diğer organların soğuracakları dozu, kullanılan aktivite başına hesaplamışlardır. Üretilen değerler MIRD yöntemiyle hesaplanan doz değerleriyle kıyaslanmış ve gözlenen farklılıkların çoğunlukla %10 civarında olduğunu belirterek, organ kütlelerindeki farklılıktan kaynaklanabileceği vurgulanmıştır.

Xu ve Chao (2003) tarafından hazırlanan bir makalede Cristy-Eceman tarafından oluşturulan anatomik vücut modeli ile VIPMAN modelinde mide-bağırsak bölgesinin özgül soğurma oranları (SAF) hesaplanarak, iki modelden alınan veriler kıyaslanmıştır. Hesaplamalar her iki model için de mide-bağırsak bölgesinden farklı yapılar için, farklı enerjilerde yapılarak kıyaslamaları grafiklere aktarılmıştır. Ayrıca bu modellerin ICRP-66 raporlarındaki referans insan modeli ile kıyaslamaları yapılmıştır. Elde edilen sonuçlardan bazı enerjiler ve kaynak-hedef kombinasyonları

için VIPMAN ile diğer matematiksel model arasında önemli uyumsuzlukların ortaya çıktığı gözlenmiştir. Bunun nedeni olarak ta VIPMAN gibi tomografik modellerin daha gerçekçi oluşturulan modeller olması gösterilmiştir.

Chao ve Xu (2004) görünür insan projesine dayalı tomografik kafatası/beyin modelinde S-değerlerinin hesaplandığı bir çalışma yapmışlardır. Bu model beyincik, gözler, kafatası, tiroit ve görme sinirleri gibi birbirinden farklı 15 yapı içerir. S-değerleri hesaplanırken bir Monte Carlo kod sistemi olan EGS4 programı kullanılmıştır. Ölçümler C-11, O-15, F-18, Tc-99m ve I-123 radyofarmasötikleri için alınmıştır.

Chengyu Shi (2004) tarafından hazırlanan bir doktora tezinde ise, yine tomografik bir vücut modeli kullanılarak vücut içi doz miktarı ölçülmüştür. Bilgisayarlı tomografi görüntülerinden oluşturulmuş olan model, gebe bir kadın modelidir. Hazırlanan bu tezde yine Monte Carlo metodu kullanılmış olup, vücuttaki bir çok organ kaynak olarak seçilerek diğer organların özgül soğurma oranları (SAF) hesaplanarak grafikler halinde gösterilmiştir. Ayrıca bu tezde, vücut içi dozimetri uygulamalarında SAF'ın nasıl kullanılacağı açıklanmıştır.

Petoussi ve ark. (2005) tarafından yayınlanan bir makalede farklı cinsiyet ve yaşlardaki hastalar için doz hesaplama sistemlerini ve hasta dozunun hesaplanması bakımından voxel tabanlı modellerin avantajları ifade edilmiştir. Bu çalışmada MIRD tipi matematiksel modeller olan ve farklı yaşlarda 4 erkek ile 3 kadın modelde farklı kaynak organlar için özgül soğurma oranları (SAF) hesaplanarak tablolar halinde gösterilmiştir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Radyasyon Birimleri

Çoğu nükleer olayların ortaya çıkmasından sorumlu olan radyoaktif çekirdeklerin kararsızlıkları genellikle aktivite kavramı ile ifade edilir. Bu nicelik, birim zamandaki bozunan çekirdek sayısı olarak tanımlanır ve SI birim sistemindeki birimi Bq biçiminde gösterilen Becquerel'dir. Daha önceleri radyum çekirdeğinin bir gramının aktivitesi esas alınarak, 3.7×10^{10} Bq'e eşit olan Curie, aktivitenin birimi olarak kullanılmaktaydı ancak, Ci ile gösterilen bu birim pratikte çok büyük olduğundan genellikle mCi (10^{-3} Ci) ve μ Ci (10^{-6} Ci) biçiminde kullanılmaktaydı.

Madde ile etkileşen radyasyonun iyonlaştırma enerjisinin ölçülmesi, üretilen iyonize yükün miktarı ile ilgilidir. Normal şartlarda atomun çekirdeğinden yayımlanan γ ışınları ve yörüngeden yayımlanan x -ışınları maddesel ortamda iyonize edici etkiye yol açacak enerjiye sahiptir. Elektrik yükünün SI'deki birimi Coulomb (C) olup, burada ifade edilen temel yük miktarı bir proton veya elektrondaki yüklerin büyüklüğü, yani 1.6×10^{-19} C'dur. Normal şartlarda havanın bir kilogramında γ ve x -ışınlarının oluşturacağı iyonize yük miktarı 2.58×10^{-4} C olup, bu miktar Röntgen olarak tanımlanır ve R ile gösterilir. Ancak bu birim, sadece yüksek enerjili foton radyasyonu için tanımlandığından diğer radyasyon türleri için genişçe uygulanabilirliği yoktur.

Radyasyonun maddesel ortamda soğurulması sonucu oluşacak fiziksel etkilerin belirlenmesi amacıyla *soğurulan doz* kavramı kullanılır ve bu nicelik, radyasyona maruz kalan malzemenin herhangi bir bölgesindeki soğurulan radyasyon enerjisinin, soğuran bölgenin kütlesine oranı şeklinde tanımlanır (Denklem 3.1).

$$D = \frac{\varepsilon}{M} \quad (3.1)$$

Burada, D , soğurulan doz ve ε , malzemenin M kütlesi içerisinde bırakılan enerji miktarıdır. D 'nin SI'deki birimi Gray (Gy) olup, $1 \text{ Gy} = \frac{\text{Joule}}{\text{kg}}$ şeklindedir. Önceleri soğurulan doz için, radyasyon soğurma dozu olarak tanımlanan rad birimi kullanılmaktaydı ($100 \text{ rad} \cong 1 \text{ Gy}$).

İnsan vücudunun radyasyonla ışınlanmasıyla oluşacak etkilerin araştırıldığı çalışmalarda, radyasyonla ışınlamanın miktarı ve radyasyon türüne bağlı olarak oluşacak biyolojik etkilerin tahmin edilebilmesi için uygun bir yol gerekir. Ayrıca, radyasyonun farklı türleri (γ , x , veya $\beta^\pm$ v.b.) tarafından yapılan ışınlama sonucu, vücuttaki organ veya dokularda aynı miktarda soğurulan enerji, farklı biyolojik hasarlara neden olabilir. Bu yüzden uluslararası bir kuruluş olan International Commission on Radiological Protection (ICRP; uluslararası Radyasyondan Korunma Komitesi) radyasyon ağırlık faktörü olan w_R 'yi radyasyonun farklı türleri için bir insan vücudundaki biyolojik hasarı incelemek için tanımlamıştır. Vücuttaki biyolojik hasarın bu şekilde hesaplanması *eşdeğer doz* olarak adlandırılır ve

$$H_T = w_R D_T \quad (3.2)$$

şeklinde ifade edilir. Burada H_T , T organı için eşdeğer dozu, w_R , radyasyon ağırlık faktörünü, D_T , organ içinde soğurulan dozunu ifade eder. Eşdeğer dozun SI'daki birimi Sievert (Sv) olup, bunun yanı sıra halen *rem*'de bir eşdeğer doz birimi olarak kullanılır ($100 \text{ rem} = 1 \text{ Sv}$).

İyonlaştırıcı enerjiye sahip radyasyon türleriyle ışınlanan organ veya dokularda radyasyon hasarı oluşur. Bu yüzden T dokusunun (veya vücut organları, kısımları) belirli bir türünde H_T eşdeğer doz, soğurulan dozların, ağırlıklarının toplamı şeklinde ifade edilmelidir. Yani;

$$H_T = \sum_R w_R D_{T,R} \quad (3.3)$$

olmalıdır. Burada, $D_{T,R}$ T dokusunda soğurulan R radyasyonundan kaynaklanan dozu ifade eder. Çizelge 3.1’de ICRP-60 tarafından farklı radyasyon türleri için w_R değerleri verilmiştir (ICRP, 1991). Çizelge 3.2’de ICRP-60 tarafından tavsiye edilen limit olarak tüm vücudun veya vücudun belli kısımlarının radyasyona tabi tutulması sonucunda bir yıl için alınabilecek maksimum limit ifade edilmiştir. Eğer vücut, tek tür bir radyasyona maruz bırakılırsa, vücuttaki organların yoğunlukları, büyüklükleri ve bileşimleri değişiklikler gösterdiğinden her bir organın alacağı radyasyon dozu da farklılık içerecektir. Bu farklılıkları ifade etmek üzere w_T ile gösterilen farklı dokular için organ ağırlık faktörü değerleri Çizelge 3.3’te gösterilmiştir (ICRP, 1991).

Çizelge 3.1. Radyasyon ağırlık faktörleri

Radyasyon tipi	w_R
Fotonlar, Tüm enerjilerde	1
Elektronlar, Tüm enerjilerde	1
Nötronlar < 10 keV	5
10-100 keV	10
> 100 keV- <2 MeV	20
2-20 MeV	10
> 20 MeV	5
Protonlar > 20 MeV	5
Alfa parçacıkları, ağır çekirdekler	20

Çizelge 3.2. İnsanların alabileceği tavsiye edilebilir yıllık doz limitleri

Vücut Parçası	Çalışanlar için (mSv)	Genel insanlar (mSv)
Tüm Vücut	20	1
Göz merceği	150	15
Deri	500	50
Eller ve Ayaklar	500	----

Çizelge 3.3. Organ ağırlık faktörü (w_T) değerleri

Doku veya Vücut Parçası	w_T
Yumurtalık	0.20
Kemik İliği	0.12
Kalın Bağırsak	0.12
Akciğer	0.12
Mide	0.12
İdrar Torbası	0.05
Meme	0.05
Karaciğer	0.05
Yemek Borusu	0.05
Tiroid	0.05
Deri	0.01
Kemik yüzeyi	0.01
Diğer (Adrenal, Beyin, İnce Bağırsak, Böbrek, Kas, Pankreas, Dalak, Timus, ve rahim)	0.05
TOPLAM	1.0

ICRP tarafından, vücudun farklı kısımlarında gerçekleşecek radyasyon ışınlamalarıyla oluşacak biyolojik hasarların tam olarak hesaplanabilmesi için *etkin doz* kavramı tanımlanmıştır. E ile gösterilen etkin doz,

$$E = \sum_T w_T H_T \quad (3.4)$$

şeklinde ifade edilir.

3.1.1. Nükleer tıpta doz hesaplamaları

Nükleer tıp uygulamalarında amaç, vücuda radyasyon verilerek, ilgilenilen doku ya da organ hakkında görüntüsel bilgi edinmektir. Ancak, hastanın sağlıklı doku ve organlarında radyasyon hasarı oluşması istenmediğinden diğer organların ne kadar doz alacağının bilinmesi, radyasyon riski açısından önem teşkil eder. Bu noktada, söz konusu dokular için soğurulan doz hesaplamalarında ilk olarak, her

birim kütle başına soğurulan enerji miktarını her doku veya organ için belirlemek gereklidir. Buradan yola çıkarak öncelikle, hedef organın doz soğurma hızını tanımlamak yerinde olacaktır (Denklem 3.5).

$$\dot{D} = \frac{A \sum_i n_i E_i \phi_i}{m} \quad (3.5)$$

Burada $\dot{D}$, doz soğurma hızı (birimi rad/saat veya Gy/sn), A , aktivite (birimi μ Ci veya MBq), n , her nükleer bozunum sonucunda E enerjisi ile yayılan radyasyon parçacığı sayısı ($\Delta = nE$ şeklinde ifade edilebilir) ve ϕ , kaynaktan yayılan enerjinin, m kütleli hedef organ tarafından soğurulma oranı olarak tanımlanır (Stabin, 2006).

Kaynak bölgesinde meydana gelen toplam radyoaktif bozunumların sayısı olarak tanımlanan ve Denklem 3.6'daki gibi gösterilen kümülatif aktivite göz önünde bulundurularak, Denklem 3.5 zamana göre integre edilirse, sonuçta bize hedef organda soğurulan kümülatif doz miktarını verecektir (Denklem 3.7).

$$\tilde{A} = \int_{t_1}^{t_2} A(t) dt \quad (3.6)$$

$$D = \frac{\tilde{A} \Delta \phi}{m} \quad (3.7)$$

Denklem 3.5 içerisinde tanımlanması gereken diğer bir kavram, özgül soğurma oranı olarak bilinen yani Specific Absorbed Fraction (SAF)'tır. Φ ile gösterilen SAF, herhangi bir organda (hedef) soğurulan radyasyon enerjisinin, radyoaktif kaynağı içeren organdan (kaynak) yayımlanan enerjiye oranının, hedef organın kütlesine bölünmesi ile elde edilir (Denklem 3.8).

$$\Phi = \frac{\phi}{m} \quad (3.8)$$

Daha önceden de bahsedildiği gibi, radyasyonun vücutta soğurulması sonucu oluşacak fiziksel etkilerin belirlenmesinde soğurulan doz kavramı kullanılır. Kaynak organdan yayılan radyasyonun hedef organda ne kadarlık bir doz bırakacağına bilinmesi, fiziksel etkilerin tahmin edilmesi açısından önemlidir. Bu noktada, kaynak bölgesinde her birim kümülatif aktiviteye karşılık, hedefte biriken doz olarak tanımlanan ve bilinmesi önemli diğer bir nicelik S -değeri olarak adlandırılır ve

$$S(r_h \leftarrow r_k) = \sum_i \Delta\Phi(r_h \leftarrow r_k) \quad (3.9)$$

şeklinde ifade edilir. Bu terim denklem 3.9'da da görüldüğü gibi SAF değerlerinin bozunum başına enerji (Δ) ile çarpımı şeklindedir. Denklem 3.9'da parantez içerisindeki kavramlardan r_h , hedef bölgesini ve r_k , kaynak bölgesini ifade eder. Sonuç olarak SAF ve S -değerleri gibi kavramlar düşünülerek Denklem 3.7'nin son hali

$$D(r_h \leftarrow r_k) = \tilde{A}_k S(r_h \leftarrow r_k) \quad (3.10)$$

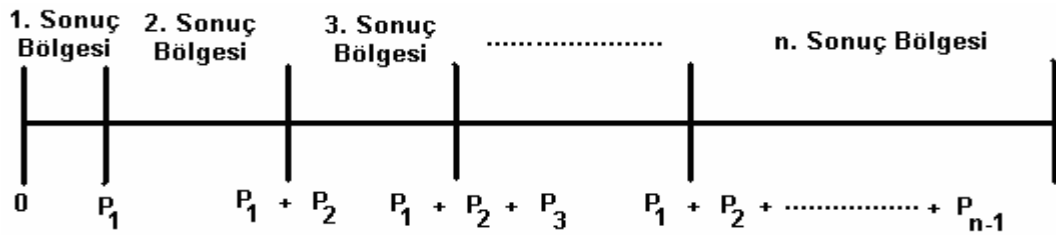
şeklinde olacaktır.

3.2. Monte Carlo Yöntemi

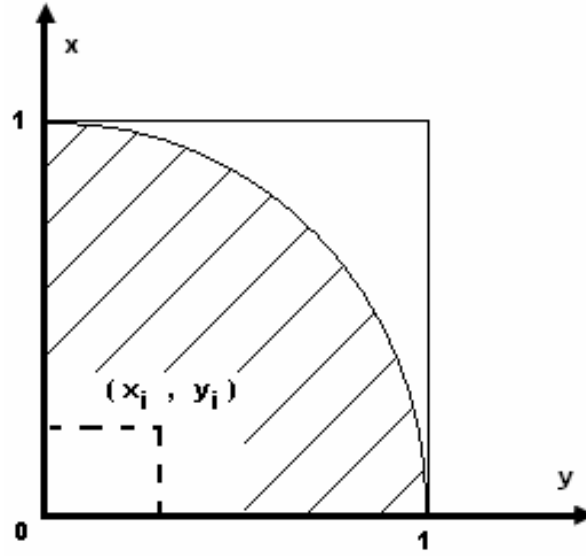
Monte Carlo, istatistiksel teknikler kullanılarak fiziksel bir olayın ya da matematiksel bir problemin sayısal modeller yardımıyla temsil edilmesi yöntemidir. Bir probleme Monte Carlo Yöntemi uygulandığında, rastgele sayılar kullanılarak, bu problemdeki değişkenler belli olasılık dağılım fonksiyonları ile ifade edilir ve hesaplanmak istenen parametre (kabul edilebilir hata sınırları içinde olmak şartıyla) simülasyonlar sonucunda elde edilir. Rastgele sayılar elde etmek için $[0,1]$ kapalı birim aralığında düzgün dağılım gösteren sürekli bir değişkenin herhangi bir değeri esas alınır. Örneğin; bir olay veya deney sonucunda alınan değerler bize bir geliş güzel sayı kümesi oluşturur. Elde edilen bu geliş güzel sayıların her birine q_i diyelim. Genellikle bir deneyin, belli olasılıklarla meydana gelen farklı sonuçları

vardır. Bu nedenle, olasılıklar dahilinde oluşacak her bir sonucu ayrı birer olay olarak düşünülebilir. Tüm bunların ışığında, bir deney sonucunda n tane sonucun ortaya çıktığını ve her bir sonucun $P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$ şeklinde olasılıklara sahip olduğunu varsayalım. Şimdi bu n tane olayı Şekil 3.1'deki gibi olasılık bölgelerine bölelim. Buna göre, deney sonucunda elde edilen q değerleri hangi sonuç bölgesine düşerse, deney de o sonuçta son bulmuştur. Yani; $0 < q_i < P_1$ ise 1. sonuç, $P_1 \leq q_i \leq P_1 + P_2$ ise 2. sonuç ve $P_1 + P_2 + \dots + P_{n-1} \leq q_i < 1$ ise n . sonuç olduğu anlaşılır (Şekil 3.1).

Bu metodolojinin ilk uygulamalarından biri, π sayısının hesaplanması problemidir. Şekil 3.2'de görülen ve alanı $\pi/4$ 'e eşit olan çeyrek birim çemberi düşünelim. Olasılık dağılım fonksiyonu olarak, çeyrek birim çember dışında seçilecek her bir rastgele (x_i, y_i) sayı çifti için $x_i^2 + y_i^2 > 1$ ifadesi ve çember içinde kalan her bir nokta için $x_i^2 + y_i^2 \leq 1$ ifadesi doğru olacaktır. Bu durumda çeyrek birim çemberin dışında kalacak her bir geliş güzel sayı çiftimiz için bu şart sağlanmayacaktır ve hesaplamalara katılmayacaktır. İşte bu özellik kullanılarak, $[0,1]$ aralığında geliş güzel seçilecek her bir x ve y değeri için bu şart sınındığında çeyrek birim çemberin altında kalanların sayısı ve dolayısıyla oranı belirlenebilir. Böylece elde edilen bu oran çeyrek birim çemberin alanı olan $\pi/4$ 'ü yaklaşık olarak belli bir hata çerçevesinde verecektir. Şekil 3.3'te yapılan hesaplamaların Microsoft Excel'de hazırlanmış ekran çıktısı verilmiştir.



Şekil 3.1. Geliş güzel sayı eksenini ve olasılık dağılımları

Şekil 3.2. Alanı $\pi/4$ olan çeyrek birim çember

Microsoft Excel - pi-sayisi.xls							
Dosya Düzen Görünüm Ekle Biçim Araçlar Veri Pencere Yardım							
Arial 10 K T A [Icons] % , +,0,00 +,00							
C53 fx							
	A	B	C	D	E	F	G
1	x	y	sınama				
2	0.43908717	0.48642402	1	simülasyon sayısı		50	
3	0.38163022	0.20169222	1	1'lerin toplamı		43	
4	0.03061087	0.84065681	1	1'lerin oranı		0.860	
5	0.30184552	0.63617754	1	pi/4'ün hesaplanan değeri		0.860	
6	0.11096762	0.0242766	1	pi/4'ün bilinen değeri		0.785	
7	0.63177455	0.86920107	0	hata payı		9.55%	
8	0.63500604	0.60560137	1				
48	0.1084103	0.90888201	1	simülasyon sayısı		10000	
49	0.34152582	0.33645281	1	1'lerin toplamı		7883	
50	0.51441277	0.25914023	1	1'lerin oranı		0.788	
51	0.22750466	0.53460445	1	pi/4'ün hesaplanan değeri		0.788	
52				pi/4'ün bilinen değeri		0.785	
53				hata payı		0.42%	
54							

Şekil 3.3. Monte Carlo yöntemini anlamaya yönelik π sayısının hesaplanması. A2 ve B2 hücrelerinde $S_SAYI_ÜRET()$ komutu ile rastgele sayı üretilmiştir. C kolonunda $EĞER(KAREKÖK(A2^2+B2^2)<1,1,0)$ komutuyla $\sqrt{x^2 + y^2} < 1$ sınaması yapılmıştır

Bu örnekte dikkat edilmesi gereken en önemli nokta, bir olayın sonucunun doğru olarak tahmin edilebilmesi için olasılık sınamasında kullanılacak olasılık fonksiyonunu en doğru şekilde seçmektir ($x_i^2 + y_i^2 > 1$ ve $x_i^2 + y_i^2 \leq 1$ gibi). Ayrıca bir diğer önemli nokta, sınama sayısıdır ki, artan deneme sayısı sonuçtaki hata payını düşürecektir. Şekil 3.3'te görüldüğü gibi 50 deneme sonucunda % 9.55 hata ile sonucuna ulaşılırken, 10 000 deneme yapıldığında hata payı azalarak % 0.42 olmaktadır.

3.2.1. Monte Carlo yönteminin bir foton problemine uyarlanması

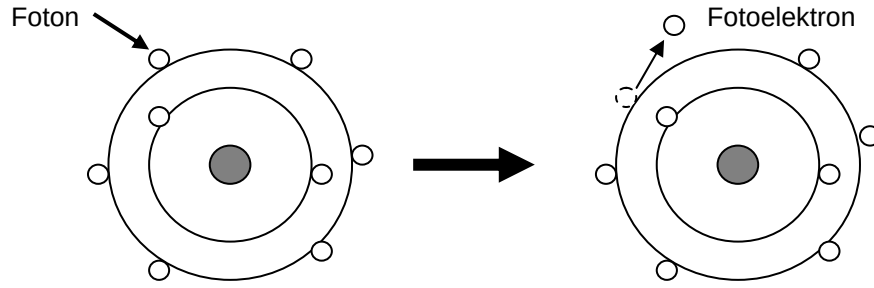
Soğurucu bir ortama giren I_0 şiddetindeki bir foton demetinin çok küçük bir x mesafesini kat ettiğinde, demet şiddetinde meydana gelecek azalma,

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (3.11)$$

ifadesi ile verilir. Burada I_0 gelen, I ise x mesafesini kat eden foton demetinin şiddetini verirken, μ ise soğurucu bir ortama giren bir foton için etkileşime girme olasılığını veren *zayıflama katsayısı*dır. Bu denklemde I ile I_0 arasındaki ilişki bir olasılık dahilinde olup, I/I_0 ifadesi sıfır ile bir arasında rastgele değerler alacaktır. Buradan yola çıkarak; eğer I/I_0 ifadesinin değeri biliniyorsa, foton demetinin malzeme içinde kat ettiği mesafe Denklem 3.12'de gösterildiği gibi hesaplanabilir.

$$x = -\frac{1}{\mu} \ln\left(\frac{I}{I_0}\right) \quad (3.12)$$

I_0 , demet şiddetinin I 'ya düşmesinin sebebi, foton demetinin ortamda yol alırken enerjisine bağlı olarak geçireceği fiziksel etkileşimlerdir. Bu etkileşimlerden biri olan *fotoelektrik olay*, düşük enerjili fotonların madde içerisinden geçerken atomun son yörüngelerindeki elektronlarından birine çarpması sonucu tüm enerjisini kaybetmesi ve elektronu yerinden sökmesi durumudur (Şekil 3.4). Yerinden sökülen



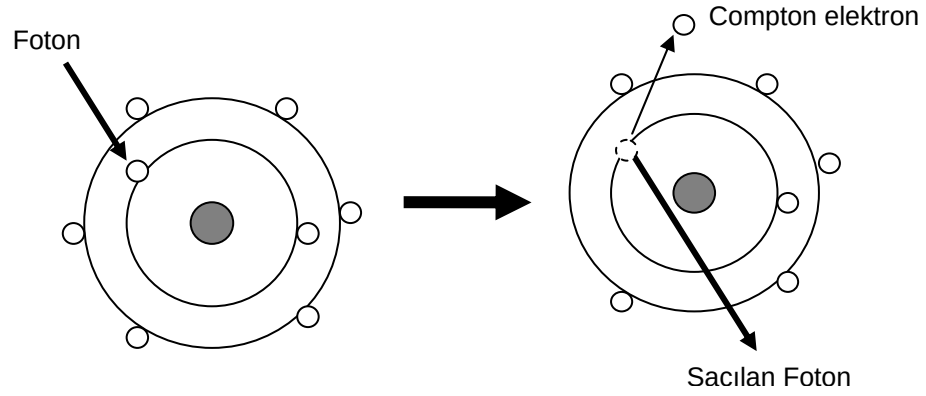
Şekil 3.4. Fotoelektrik olayında fotonun madde ile etkileşimi

elektrona *fotoelektron* denir ve bu elektronun yeri, bir üst yörünge elektronu tarafından doldurulurken, karakteristik radyasyon adı verilen x-ışınları yayımlanır. Fotoelektrik etkileşimin sonrasında atom iyonize hale gelirken, atomdan salınan fotoelektron, diğer atomlarla etkileşerek çok sayıda ikincil iyonizasyonlara neden olur. Fotoelektrik olay, radyografik görüntü elde edilmesini sağlayan bir etkileşimdir. Görüntülemeye yönelik radyolojide fotoelektrik olaya bağlı dokular arası absorpsiyon farklılıkları kaydedilerek görüntüleme yapılmaktadır.

Genellikle orta enerjili fotonların atom numarası düşük olan maddeler ile etkileşiminde görülen *Compton olayı*, foton demetinin madde içerisinden geçerken yapabileceği etkileşim türlerinden bir diğeridir. Gelen foton, atomun yörüngelerinden bir elektron söker ve enerjisi azalmış bir şekilde yön değiştirerek yoluna devam eder. Atomdan sökülen elektrona *Compton elektronu* denir ve bu elektronun boşalttığı yörünge daha dış yörüngedeki bir başka elektron tarafından doldurulurken yine karakteristik radyasyon ortaya çıkar (Şekil 3.5).

Tanısal radyoloji ve nükleer tıp pratiğinde, saçılmanın önemli bir kısmından Compton saçılması sorumludur. Diğer bir foton etkileşim türü olan *çift üretim* olayında ise, enerjisi yeteri kadar büyük bir foton atom çekirdeğinin çok yakınından geçmesiyle, kütlesi olmayan fotonun enerjisinden aynı anda biri negatif yüklü elektron diğeri pozitif yüklü pozitron olmak üzere iki parçacık yaratır. Böylece elektromanyetik bir dalgadan madde meydana gelmiş olur (Şekil 3.6).

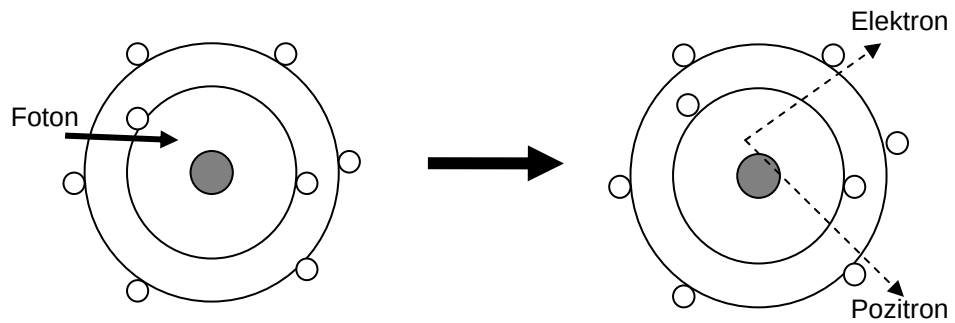
Foton etkileşimleri incelenirken gelen foton ile hedef atomların etkileşme olasılığının bir ölçüsü olarak tanımlanan *tesir kesitinden* de bahsedilmelidir. Buna



Şekil 3.5. Compton olayında fotonun madde ile etkileşimi

göre, hedef atomun gelen fotonun enerjisine bağlı olan tesir kesitinin doğru olarak modellenmesi, Monte Carlo yöntemi ile çözülmesi istenen foton problemlerinin gerçekçi bir biçimde simüle edilmesi anlamına gelir. Bu noktada bilgisayar ortamında oluşturulmuş veri tabanlarına ihtiyaç vardır.

Çizelge 3.4'te Al, Pb ve Fe için gelen fotonun enerjisine bağlı olarak tesir kesitleri ile o enerjilerde fotonun yapacağı etkileşim türü de gösterilmiştir. Şekil 3.8'de ise kurşun levha üzerine gönderilen foton demeti için farklı enerjilerde, Şekil 3.7'da ise atom numarasının büyüklüğüne göre hangi etkileşim mekanizmalarının etkin olduğu görülebilmektedir.



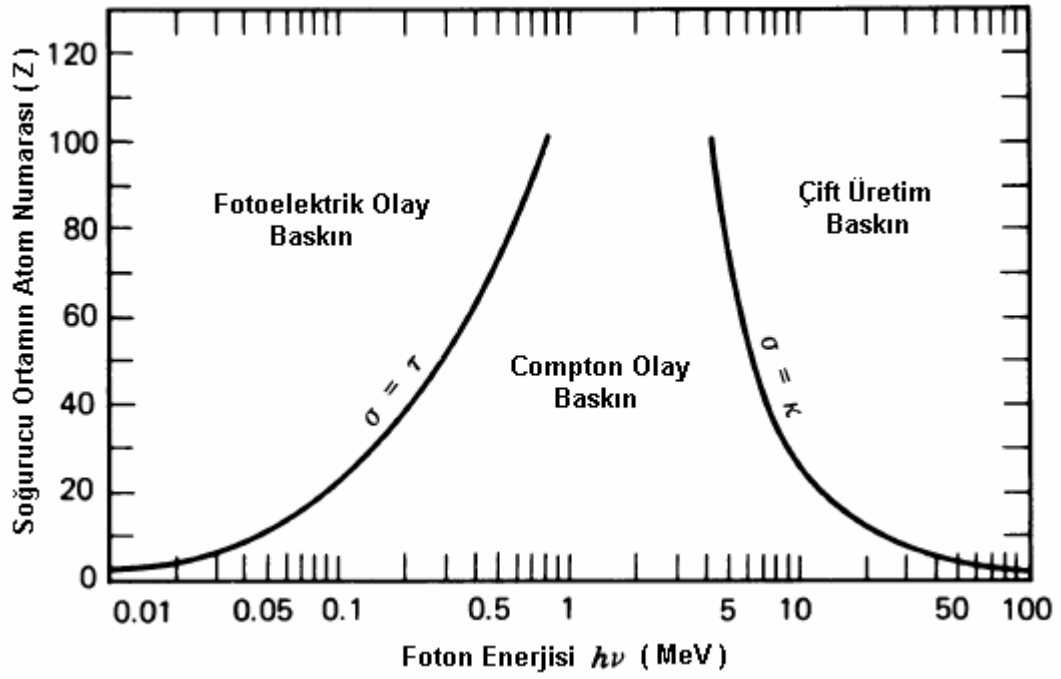
Şekil 3.6. Çift oluşumu olayı

Çizelge 3.4. Al, Pb ve Fe için kütleli zayıflama katsayıları (cm^2/g)

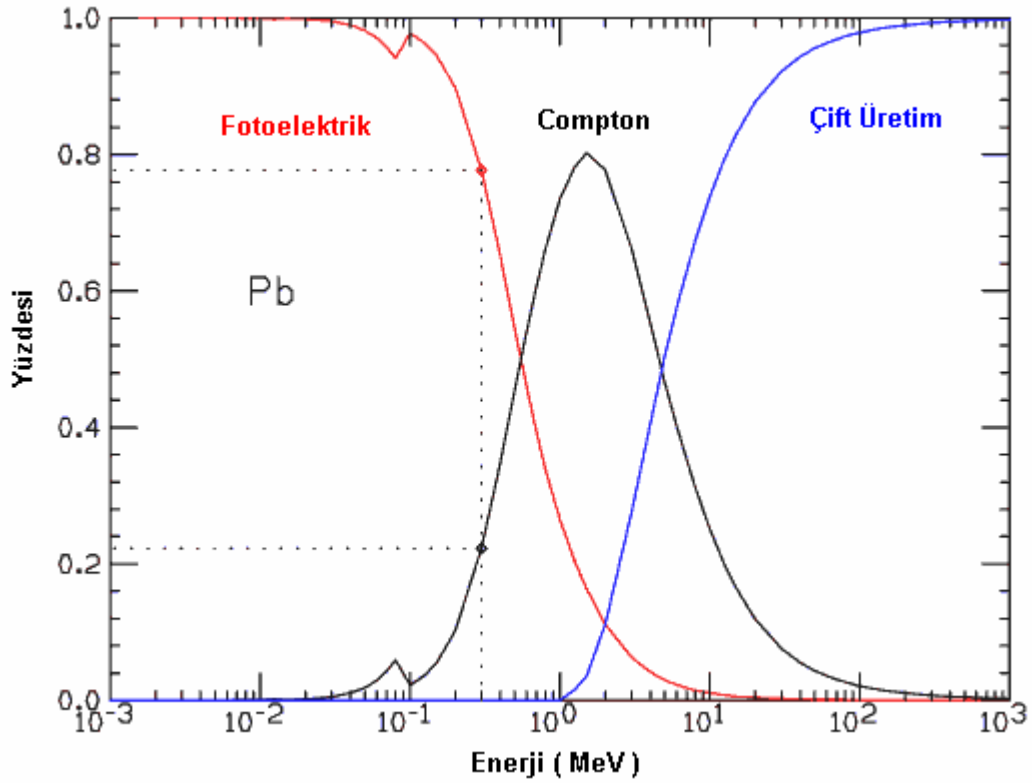
Alüminyum (Al)			
Enerji (MeV)	Fotoelektrik Olay (τ)	Compton Olayı (σ)	Çift Üretimi (κ)
0.001	1180	0.014	0.000
0.01	25.6	0.106	0.000
0.1	0.018	0.139	0.000
1	0.000	0.061	0.000
10	0.000	0.015	0.008
100	0.000	0.002	0.021
500	0.000	0.001	0.027
1000	0.000	0.000	0.028
5000	0.000	0.000	0.029
10000	0.000	0.000	0.029
50000	0.000	0.000	0.029
100000	0.000	0.000	0.029

Kurşun (Pb)			
Enerji (MeV)	Fotoelektrik Olay (τ)	Compton Olayı (σ)	Çift Üretimi (κ)
0.001	5200	0.004	0.000
0.01	126	0.045	0.000
0.1	5.24	0.099	0.000
1	0.018	0.050	0.000
10	0.001	0.012	0.037
100	0.000	0.002	0.090
500	0.000	0.001	0.109
1000	0.000	0.000	0.113
5000	0.000	0.000	0.117
10000	0.000	0.000	0.117
50000	0.000	0.000	0.118
100000	0.000	0.000	0.118

Demir (Fe)			
Enerji (MeV)	Fotoelektrik Olay (τ)	Compton Olayı (σ)	Çift Üretimi (κ)
0.001	9080	0.009	0.000
0.01	169	0.085	0.000
0.1	0.204	0.130	0.000
1	0.000	0.059	0.000
10	0.000	0.014	0.015
100	0.000	0.002	0.040
500	0.000	0.001	0.049
1000	0.000	0.000	0.051
5000	0.000	0.000	0.053
10000	0.000	0.000	0.053
50000	0.000	0.000	0.053
100000	0.000	0.000	0.054

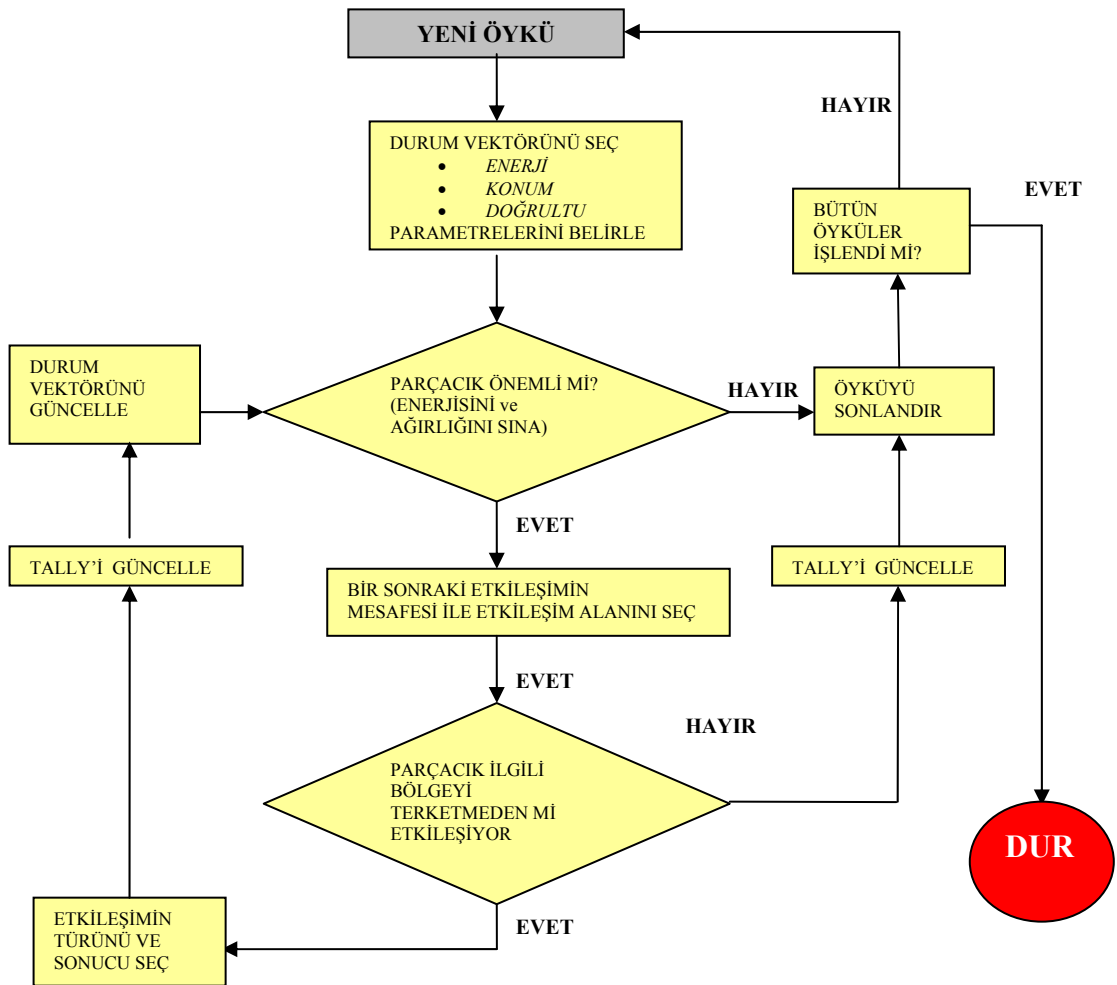


Şekil 3.7. Soğurucu ortamın atom numarasına göre foton etkileşimlerinin gerçekleşme olasılıkları



Şekil 3.8. Fotonların Pb ortamındaki etkileşimlerinin foton enerjisine bağımlılığı

Daha önceden de bahsedildiği gibi herhangi bir ortama giren bir fotonun, o ortamdaki etkileşimleri çok karmaşık bir olaydır. Bu etkileşimler belli bir istatistik doğaya sahiptir. Bundan dolayı foton etkileşimlerini incelerken bir istatistiksel modelleme yöntemi olan Monte Carlo yönteminin kullanılması olumlu sonuçlar verecektir. Bu tür yapılacak bir çalışma için Şekil 3.9'teki algoritma açıklayıcı olacaktır (Er, 2003). Bu algoritmaya göre, Monte Carlo yöntemini kullanan programda yaratılacak her bir foton ayrı ayrı incelenir ve her foton ayrı birer öykü olarak ele alınır. Buna göre tek bir fotonun öyküsü fotonun enerji, konum ve uçuş doğrultusu gibi parametrelerini belirleyecek durum vektörünün seçimi ile başlatılır. Daha sonra parçacığın enerjisinin yeterli olup olmadığı ve takip edilen her bir parçacığın izlenmeye değer öneme sahip olup olmadığı sınanır. Eğer



Şekil 3.9. Monte Carlo yönteminin işleyiş algoritması

parçacık önemsiz ise, yani enerjisi çok azalmış, soğurulmuş ya da ortamdan kaçmış ise bu parçacığın öyküsü sonlandırılır. Öyküsüne devam eden parçacığın yeni adımı için, bir sonraki etkileşimin mesafesi ve etkileşim alanı (yüzey kesimi) seçilir. Daha sonra, parçacığın yapacağı bu etkileşimin seçilen bölge sınırları içinde gerçekleşip gerçekleşmeyeceği sınıranır. Eğer parçacık seçilen bölgenin dışında etkileşirse tally (hesaplama) güncelleştirilir ve bu öykü de sonlandırılır. Aksi durumda etkileşimin türü ve sonucu belirlenir. Bir sonraki adım, tally ve durum vektörü güncelleşmesi yapılarak yeni etkileşim için parçacık önemini yeniden kontrol etmektir. Anlatılan tüm bu adımlar her bir parçacık için tekrar edilir ve hesaplamalar yapıldıktan sonra simülasyon sona erdirilir. Son olarak tally'lerden elde edilen verilerin ortalaması Monte Carlo yönteminin tahmini olarak sunulur.

3.3. MCNP (Monte Carlo N-Particle) Radyasyon Taşıma Programı

MCNP foton, elektron ve nötron gibi iyonize edici radyasyon türlerinin maddesel ortamlardan geçişlerini Monte Carlo yöntemini kullanarak modelleyen bir bilgisayar programıdır (Briesmeister, 1997). MCNP yaklaşık 40000 satır fortran ve yorumlar içeren 1000 satır C kaynak kodlayıcı ile programı uygulayan genel bir bloğa sahiptir. Program 1940'lı yıllarda nükleer savunma ve nükleer silahlar tasarlamak için geliştirilmiş olup Los Alamos Laboratuvarlarında teorik fizik çalışmaları için geliştirilmiş bir koddur.

Üç boyutlu geometrilerin tanımlanabildiği ve noktasal, yüzeysel ya da hücresel dağılımlı kaynakların oluşturulabildiği bu program, radyasyon etkileşimleri, başlangıç konumları, uçuş doğrultuları gibi niceliklere, çeşitli olasılık dağılımlarına dayanan değerler atar. Sonuçta herhangi bir bölgedeki parçacık akısı, enerji bırakımı, soğurulan doz gibi niceliklerin ortalama değerlerini verir. MCNP, sürekli enerjiye sahip nükleer ve atomik veri kütüphanelerini kullanır. Fiziksel ölçümlere ya da matematiksel hesaplamalara dayanan bu nükleer verilerin birincil kaynakları Livemore'dan ve Los Alamos'taki Applied Nuclear Science (T-2) Group tarafından derlenen bilgilerin Evaluated Nuclear Data File (ENDF) sistemi, Evaluated Nuclear Data Library (ENDL) ve Activation Library (ACTL)'nin değerlendirmeleri

sonucunda elde edilir. Nükleer veri tabloları nötron etkileşimlerini, nötron-indüklenmiş foton, foton etkileşimleri, nötron dozimetrisini ve termal parçacık saçılımını (α, β) içerir.

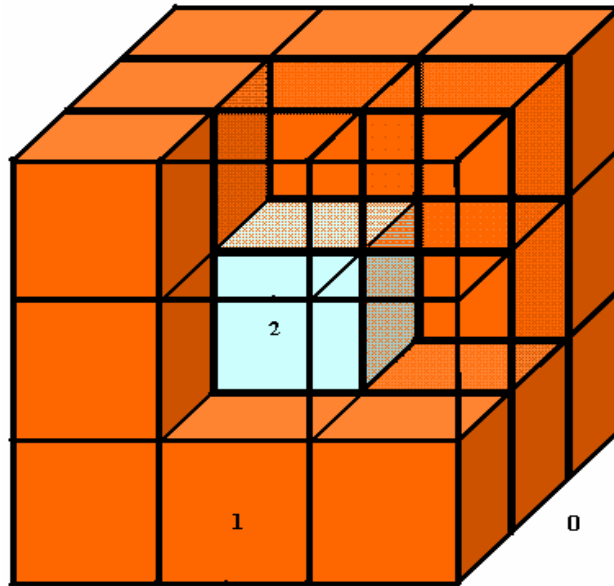
MCNP programı yardımıyla bir problem çözülmek istendiğinde, öncelikle mevcut olan geometri özelliklerinin, malzeme bilgilerinin, kaynak türü ile yapısı ve programdan istenilen sonucun türü ile ilgili bilgilerin bir veri giriş dosyasında tanımlanması gerekir. Bu dosya *hücre kartı*, *yüzey kartı* ve *veri kartı* olmak üzere üç temel bölümden meydana gelir ve her temel bölüm bir satırlık boşlukla diğerinden ayrılır. Hücre Kartları bölümünde hücrelerin geometrisi, yoğunluğu, materyal özelliği ve önem derecesi belirtilir. Yüzey Kartları bölümünde hücre kartları bölümünde tanımlanan hücrelerin geometrileri için gerekli yüzeyler ve düzlemler tanımlanır. Veri Kartları bölümünde ise tanımlanan hücrenin özellikleri yani hangi bileşimlerden oluştukları, kaynak bilgileri ile programdan istenecek bilgilere dair veriler ve sına sayıları tanımlanır.

3.3.1. MCNP uygulamasına bir örnek

Bu bölümde tezde kullanılan MCNP giriş dosyasının, minimize edilmiş bir durumunu gösteren örnek bir veri giriş dosyasının nasıl hazırlanacağı anlatılmıştır. Bir kenarı 0.5 cm olan 27 adet küpten oluşan, bir kenarı 1.5 cm olan büyük bir küp düşünelim. Büyük küpün merkezinde ki küçük küp su ile dolu olsun. Etrafında onu saran küpler alüminyumdan yapılmış ve en dış tarafta da hava bulunsun. Foton kaynağı olarak seçilen su dolu küp Şekil 3.10'da 2, diğer küpler 1, dış dünya ise 0 numarası ile ifade edilmiştir. Bütün bu geometri, yarıçapı 1000 cm olan ve içi hava ile dolu bir küre ile sarılmış olsun. Kaynaktan 0.5 Mev'lik fotonlar izotropik (her yöne eş dağılım gösteren) olarak dağılıyor olsun. Bu örnek problemde, kaynaktan yayılan fotonların diğer küplerde bıraktıkları enerjileri tespit etmeye çalışalım.

Hücre Kartları : Bir MCNP veri giriş dosyası hazırlanırken ilk olarak yapılması gereken, problemde yer alan hücrelerin tanımlanmasıdır. Şekil 3.11'de MCNP veri giriş dosyamızın Hücre Kartları bölümü verilmiştir. MCNP'de bir küp tanımlarken

düzlem yüzeylerden yararlanılır. Bir küpün 6 adet yüzeyi bulunduğundan, kesişen 6 düzlemin arasında kalan hacim bize bir küp verecektir. Bu yüzden yapılması gereken hücre kartları bölümünde küpleri oluşturmaktır. Şekil 3.11'a bakıldığında 5. satırda sırasıyla; hücre numarası 10 olan, 1 numaralı malzemeden yapılmış (malzeme veri kartları alanında tanıtılacak), yoğunluğu 2.7 gr/cm³ olan ve 11, 12, 13, 14, 15 ile 16 numaralı düzlemler arasında kalan hücre tanımlanmaktadır. Bu özelliklere sahip fazla sayıda küp var ise, bunları teker teker tanımlamak yerine programa bunlar çoğalttırılabilir. Bu yüzden 5. satırın sonunda u=1 ifadesi ile bir evren (universe) tanımlanarak bu özelliğe sahip küpler 1 numarası ile etiketlenmiştir. Farklı özelliğe sahip küpler varsa bunları ayrı ayrı tanımlamak gerekecektir. Bu örnek dosyada iki farklı tür küp olduğundan 8. satırda da, hücre numarası 20 olan 2 numaralı malzemeden yapılmış yoğunluğu 1.0 gr/cm³ olan diğer bir küp tanımlanmıştır. Bu farklı özelliğe sahip küp de (u=2 ifadesi ile) 2 numarası ile etiketlenmiştir. Küpler tanımlandıktan sonra her küpü saracak dış dünyalar tanımlanmalıdır. 6. ve 9. satırlarda sırasıyla 5. ile 8. satırlarda oluşturulan küpleri saran (#10 ve #20, hücre numarası 10 ve 20 olan malzemelerin dışını ifade eder) hücre numaraları 101 ve 102 olan dış dünyalar tanımlanmıştır.



Şekil 3.10. MCNP'ye örnek problem için oluşturulan geometri

Buraya kadar Şekil 3.10'da görülen küçük küplerin iç kısmı veya başka bir deyişle, bir bardağın içindeki su tanımlanmıştır. Bundan sonra yapılacak olan 12. satırda tanımlandığı gibi ($u=99$) ifadesi kullanılarak 99 numarası ile etiketlenmiştir) bardağı tanımlayarak, içini bu su ile doldurmaktır. 13. satırda $lat=1$ komutuyla kübik örgü şeklinde ($lat=2$ altıgenlerden oluşan arı kovanı şeklinde) ve $fill=-1:1 -1:1 -1:1$ komutuyla üç boyutta (-1, 0 1 şeklinde) üçer sıra ile, oluşturulan küçük küplerin (bardakların) çoğaltılıp, 15, 16 ve 17. satırlardaki gösterilen (3 boyutta) sıra ile dizilmeleri sağlanmıştır. 20. satırda, Şekil 3.10'da gösterilmiş olan büyük küp yani, en dış kısım tanımlanarak burası 99 numarası ile etiketlenmiş hücreler tarafından doldurulmuştur ($fill=99$, Şekil 3.11'de “-” işareti iç bölge anlamındadır) .

Bu bölümde yapılacak son işlem ise bütün geometrimizi saran dış dünyamızı oluşturarak (26. satır), dış dünyamız ile geometrimiz arasında kalan boş kısımları, veri kartları bölümünde tanıtılacak ve yoğunluğu 0.001205 g/cm^3 olan 99 numaralı

```

1- voxel icinde dagitik radyoaktif kaynak modeli
2- c
3- c ..... hucre kartlari .....
4- c voxel tur 1
5- 10 1 -2.7 11 -12 13 -14 15 -16 u=1
6- 101 0 #10 u=1
7- c
8- 20 2 -1.0 11 -12 13 -14 15 -16 u=2
9- 102 0 #20 u=2
10- c
11- c kubik model (3x3x3=27)
12- 199 99 -0.001205 111 -112 113 -114 115 -116 u=99
13- lat=1 fill=-1:1 -1:1 -1:1
14- c orgu sirasi:
15- 1 1 1 1 1 1 1 1 1
16- 1 1 1 1 2 1 1 1 1
17- 1 1 1 1 1 1 1 1 1
18- c
19- c kubik modelin disi (hava)
20- 200 99 -0.001205 211 -212 213 -214 215 -216 fill=99
21- c
22- c model ve etrafındaki her sey
23- 998 99 -0.001205 -999 #200
24- c
25- c herseyi kapsayan 0-onemli dis dunya (hava)
26- 999 0 999
27-

```

Şekil 3.11. Örnek veri giriş dosyasının hücre kartları bölümü (c ile başlayan her satır yorum olarak algılanır ve dikkate alınmaz)

hava ile doldurmaktadır (23. satır). 26. satırda oluşturulan dış dünyanın dışı, malzeme numarası sıfır olduğundan önemsiz kabul edilir.

Yüzey Kartları : MCNP giriş dosyasında geometrinin tanımlandığı hücre kartları bölümü hazırlandıktan sonra, yüzey kartları bölümünde tanımlanan geometri oluşturulur. Şekil 3.12’de örnek olarak verilen MCNP giriş dosyasının, yüzey kartları bölümü gösterilmiştir. Hücre kartları bölümünde tanımlanan geometrimiz küplerden oluştuğundan 5, 8 ve 20. satırlarda verilen düzlemlerin konumları ile uzunlukları bu bölümde tanıtılmıştır. Tabi tanımlanmak istenen geometri her zaman küp olmayabilir. Örneğin hücre kartları bölümünde tanımlanan dış dünya genelde küre olarak seçildiğinde yüzey kartları bölümünün 53. satırında `999 so 1000.0` ifadesi ile hücre numarası `999`, yarıçapı 1000 cm olan ve `so` komutuyla orjinde merkezlenmiş bir küre yüzeyi tanıtılmıştır. Hücre kartları bölümünde tanımlanan geometrimiz küplerden oluştuğundan 5, 8 ve 20. satırlarda verilen düzlemlerin konumları ile uzunlukları bu bölümde tanıtılmıştır. Tabi tanımlanmak istenen geometri her zaman küp olmayabilir.

```

28- c ..... yuzey kartlari .....
29- c voxel duzlemleri
30- 11 px -0.25
31- 12 px 0.25
32- 13 py -0.25
33- 14 py 0.25
34- 15 pz -0.25
35- 16 pz 0.25
36- c
37- 111 px -0.25
38- 112 px 0.25
39- 113 py -0.25
40- 114 py 0.25
41- 115 pz -0.25
42- 116 pz 0.25
43- c
44- c model duzlemleri
45- 211 px -0.75 $ 0.5*3=1.5cm(x=0.75cm)
46- 212 px 0.75
47- 213 py -0.75
48- 214 py 0.75
49- 215 pz -0.75
50- 216 pz 0.75
51- c
52- c dis dunya icin kure
53- 999 so 1000.0
54-

```

Şekil 3.12. Örnek MCNP giriş dosyasının yüzey kartları bölümü

Örneğin hücre kartları bölümünde tanımlanan dış dünya genelde küre olarak seçildiğinde yüzey kartları bölümünün 53. satırında 999 so 1000.0 ifadesi ile hücre numarası 999, yarıçapı 1000 cm olan ve so komutuyla orjinde merkezlenmiş bir küre yüzeyi tanımlanmıştır. MCNP’de tanımlanan geometriler yüzeylerle oluşturulduğu için değişik geometrik yapılar için farklı tür yüzeyler tanımlanmalıdır. Çizelge 3.5’te MCNP’de kullanılabilecek yüzey türleri ve bunlara ait matematiksel parametreler gösterilmiştir (Er, 2003).

Veri Kartları : Bir MCNP giriş dosyasında problem için geometri tanımlamaları bittikten sonra problemde kullanılacak kaynak ve malzeme bilgileri ile sonuçta programdan istenen bilgiler için bazı tanımlamaların yapıldığı veri kartları bölümü hazırlanır. Veri kartları bölümünde ilk olarak problemin türü belirlenir.

Çizelge 3.5. MCNP’de geometrileri oluşturmak için kullanılan bazı yüzey kartları

Kısaltma	Yüzey Türü	Tanımlama	Denklem
p	Düzlem	Genel	$Ax + By + Cz - D = 0$
px	Düzlem	x-eksenine dik	$x - D = 0$
py	Düzlem	y-eksenine dik	$y - D = 0$
pz	Düzlem	z-eksenine dik	$z - D = 0$
so	Küre	Orjin merkezli	$x^2 + y^2 + z^2 - R^2 = 0$
so	Küre	Genel	$(x - \bar{x})^2 + (y - \bar{y})^2 + (z - \bar{z})^2 - R^2 = 0$
sx	Küre	x-ekseni merkezli	$(x - \bar{x})^2 + y^2 + z^2 - R^2 = 0$
sy	Küre	y-ekseni merkezli	$x^2 + (y - \bar{y})^2 + z^2 - R^2 = 0$
sz	Küre	z-ekseni merkezli	$x^2 + y^2 + (z - \bar{z})^2 - R^2 = 0$
c/x	Silindir	x-eksenine paralel	$(y - \bar{y})^2 + (z - \bar{z})^2 - R^2$
c/y	Silindir	y-eksenine paralel	$(x - \bar{x})^2 + (z - \bar{z})^2 - R^2$
c/z	Silindir	z-eksenine paralel	$(x - \bar{x})^2 + (y - \bar{y})^2 - R^2$
cx	Silindir	x-ekseninde	$y^2 + z^2 - R^2$
cy	Silindir	y-ekseninde	$x^2 + z^2 - R^2$
cz	Silindir	z-ekseninde	$x^2 + y^2 - R^2$

Verilen bu örnek bir foton problemi olduğundan Şekil 3.13'te 57. satırda `mode p` komutu kullanılmıştır. Şekil 3.13'te verilen örnek için veri kartları bölümü gösterilmiştir. Çizelge 3.6'da MCNP'de transportunun hesaplanabileceği diğer parçacık türleri verilmiştir (Er, 2003). 60. satırda hücre kartları bölümünde tanımlanan geometriler için `imp:p 1 6r 0` komutuyla foton transferi için önem bilgileri verilmiştir. Bu komut ile programa, hücre kartları bölümünde tanımlanan birinci geometriden başlayarak sonraki 6 geometriye de foton transferi için “önem derecesini %100 kabul et”, en sonda tanımlanan geometri için “önem derecesini sıfır kabul et”, yani “bu geometride foton transferini takip etme”, emri verilmiş olur.

Kaynak parçacıkların özelliklerinin tanıtılması için 63-68. satırlarda `sdef` komutu ile başlayarak sırasıyla kaynak parçacıkların türü (`par 2 = foton`), parçacıkların üretilmeye hangi hücreden başlandığı, başlangıç konumu, üretilen parçacıkların radyal olarak dağılımı, eksenel dağılımı ve başlangıç enerjileri tanıtılmaya başlanmıştır. Bu satırlarda kullanılan `cel d1`, `pos d2`, `erg d5`, `ext d4` ve `rad d3` komutlarında görülen `d1`, `d2`, `d3`, `d4` ve `d5` ifadeleri, bu özelliklerin sonraki satırlarda açıklanacağını gösterir. 71. satırda `200` nolu hücrenin içindeki `199` nolu hücrenin merkezinde bulunan `2` nolu hücreyi kaynak olarak seçileceğini ve 75. satırda kaynak parçacıkların üretilme noktasının orjin olarak seçildiği ifade edilerek 72. ve 76. satırlarda önem dereceleri verilir. 79 ve 83. satırlarda yarıçapı 0.35355 cm ve yüksekliği 0.5 cm olan bir silindir tanımlanır ki, bu tanımlama kaynak parçacıkların hücre dağılımında seçilen `2` nolu hücrenin boyutlarıyla eşdeğerdir. Kaynak bilgi tanımlamalarında son olarak 87. satırda, üretilen parçacıkların başlangıç enerjilerinin 0.5 MeV olacağı gösterilir.

Çizelge 3.6. MCNP'de çalışılabilecek parçacık türleri

Mode	Görev
mode n	Sadece varsayılan nötron transferi
mode n p	Nötron ve etkilenmiş foton transferi
mode p	Sadece foton transferi
mode e	Sadece elektron transferi
mode p e	Foton ve elektron transferi
mode n p e	Nötron, etkilenmiş foton ve elektron transferi

```

55- c ..... veri kartlari .....
56- c problem turunu belirten kart
57- mode p
58- c
59- c hucre onem bilgileri
60- imp:p 1 6r 0 $ foton onemleri
61- c
62- c kaynak ozelliklerinin tanimlandigi kart
63- sdef par 2 $ kaynagin yayinlayacagi parçack turu (2 = foton)
64- cel d1 $ kaynak parçaciklarinin hucre dagilimi
65- pos d2 $ kaynak parçaciklarinin baslangic konum dagilimi
66- rad d3 $ kaynak parçaciklarin radyal dagilimi
67- ext d4 $ kaynak parçaciklarin eksenel dagilimi
68- erg d5 $ kaynak parçaciklarin baslangic enerji dagilimi
69- c
70- c kaynak parçaciklarinin hucre dagilimi
71- si1 l 200:199:2
72- sp1 d 1
73- c
74- c kaynak parçaciklarinin baslangic konum dagilimi
75- si2 l 0.0 0.0 0.0
76- sp2 d 1.0
77- c
78- c kaynak parçaciklarin radyal dagilimi
79- si3 0 0.35355 $parçaciklarini 0.35355 cm yarıcap içinde yarat
80- sp3 -21 0
81- c
82- c kaynak parçaciklarin eksenel dagilimi
83- si4 l -0.25 0.25 $parçaciklarini 0.5 cm uzunluk içinde yarat
84- sp4 d 1.0 1.0
85- c
86- c kaynak parçaciklarin baslangic enerji dagilimi
87- si5 l 0.50
88- sp5 d 1.0
89- c malzeme bileşimleri
90- m1 13000 -1
91- m2 1000 -0.111
92- 8000 -0.889
93- c
94- c hava
95- m99 6000 -0.000124
96- 7000 -0.7553
97- 8000 -0.2318
98- 18000 -0.0128
99- c tally tanımlama kartlari
100- fc6 sadece fotonların hücrelerde bıraktığı enerji
101- f6:p 1
102- c tally enerji karti
103- e0
104- c çalıştırılacak parçacik sayısı
105- nps 1e6

```

Şekil 3.13. Örnek MCNP giriş dosyasının veri kartları bölümü

90, 91 ve 94. satırlarda daha önce hücre kartlarında ifade edilen malzemelerle ilgili olarak, malzemenin içeriği ve bu içeriğin oranı verilir. Örneğin **m2** ifadesi ile hücre kartları bölümünde hücre numarası **20** olan hücre için **2** numaralı malzemenin hidrojen (**1000**) ve oksijenden (**8000**) sırasıyla % 11.1 ile % 88.9 oranında

Çizelge 3.7. MCNP’de kullanılan tally kartları

Sembolü	Tally Türü	Birimi
f1	Tüm yüzey üzerinden integre edilen parçacık akımı	parçacık
f2	Yüzey üzerinden ortalama akı	Parçacık/cm ²
f4	Hücre üzerinden ortalama akı	Parçacık/cm ²
f5a	Nokta veya halka dedektörün parçacık akısı	Parçacık/cm ²
f6	Her bir hücrede biriken enerji	MeV/g
f8	Dedektörde üretilen pulsların enerji dağılımı	

oluşturduğunu gösterir. Son olarak 101. satırda verilen **f6:p 1** tally kartı ile sadece fotonların izlenmesi gerektiğini ve önem derecesini %100 olduğu ve son satırda ise yapılacak simülasyonun **1e6** ifadesi ile 1×10^6 sayıda parçacık ile yapılacağı belirtilmiştir. Çizelge 3.7’de MCNP’de kullanılan diğer tally türleri gösterilmiştir (Er, 2003).

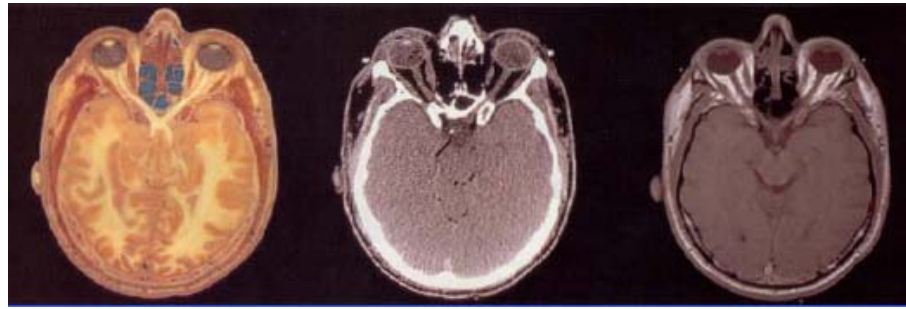
3.4. VIPMAN Tüm İnsan Modeli

Bu çalışmada Görünür İnsan Projesi (Visible Human Project, VHP) verilerine dayanan 1.86 m boyunda, 103 kg ağırlığında 38 yaşında bir erkek model olan VIPMAN tüm vücut modeli kullanılmıştır (Xu, 2000). Bu model oluşturulurken gerçek bir insan vücudu teknolojik yöntemlerle, enine ince dilimler halinde bölünmüş ve her dilimin fotoğrafları çekilerek bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Çekilen fotoğrafın kalitesini bilgisayarlı tomografi ve magnetik rezonans yöntemiyle alınan görüntülerle kıyaslamak daha açıklayıcı olabilir (Şekil 3.14) .

Bilgisayar ortamına aktarılan görüntüler tamamen fotoğraf olduğundan bu fotoğraflardaki her bir rengin, hangi organ ya da dokuya ait olduğunun belirlenerek anlamlandırılması gerekir. Bu işleme *segmentasyon* denir. Bu anlamlandırma yapılırken çekilen fotoğraflardaki renklere bakılarak her dokuya bir rakam verilir. Örneğin hava 99, karaciğer dokusu 35, deri 23, gözler 13 vb. Bu işlem her dilime uygulanmış ve tüm vücut sayılarla ifade edilmiştir. Şekil 3.15’de vücuttan alınan kesitin fotoğrafı (a) ve bilgisayarda segmentasyonu yapılmış bir vücut dilimi (b)

gösterilmiştir (Bozkurt, 2000). Şekil 3.16’da ise segmentasyonu yapılmış bir dilimdeki renklere karşılık gelen doku ve organların bir kısmı gösterilmiştir (Chao, 2001). Şekil 3.17’de vücut diliminin sayılarla temsili bir örnek olarak verilmiştir.

VIPMAN temel olarak 1878 adet 1 mm kalınlığında enine dilimlerden oluşmuştur. Bu dilimleri oluşturan pixellerin boyutu $0.33 \times 0.33 \text{ mm}^2$ olup, fotoğraf çözünürlüğü 1760×1024 pixeldir (Şekil 3.18). Tüm vücut 3.4 milyar pixel ve 6 milyondan fazla voxel içermektedir. VIPMAN görüntü dosyaları, gerek anatomik gerekse de fiziksel olarak organ veya dokuların yerleri, geometrileri ile doku bileşimleri çok iyi bir şekilde Monte Carlo kodları olarak ifade edilmiştir. Çizelge 3.8’te VIPMAN vücut modelinde bulunan doku ve organlar hakkında bilgiler bulunmaktadır (Bozkurt, 2000).

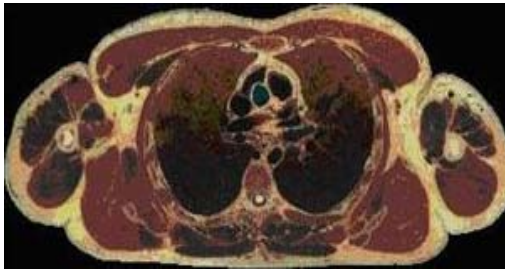


(a)

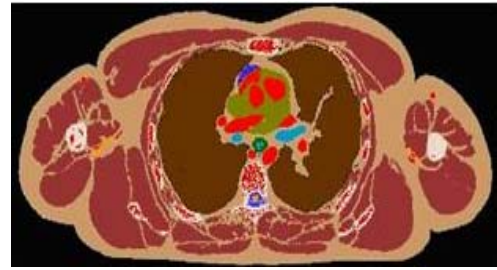
(b)

(c)

Şekil 3.14. (a) Renkli fotoğraf (b) Bilgisayarlı tomografi (c) Magnetik rezonans yöntemiyle elde edilen görüntü



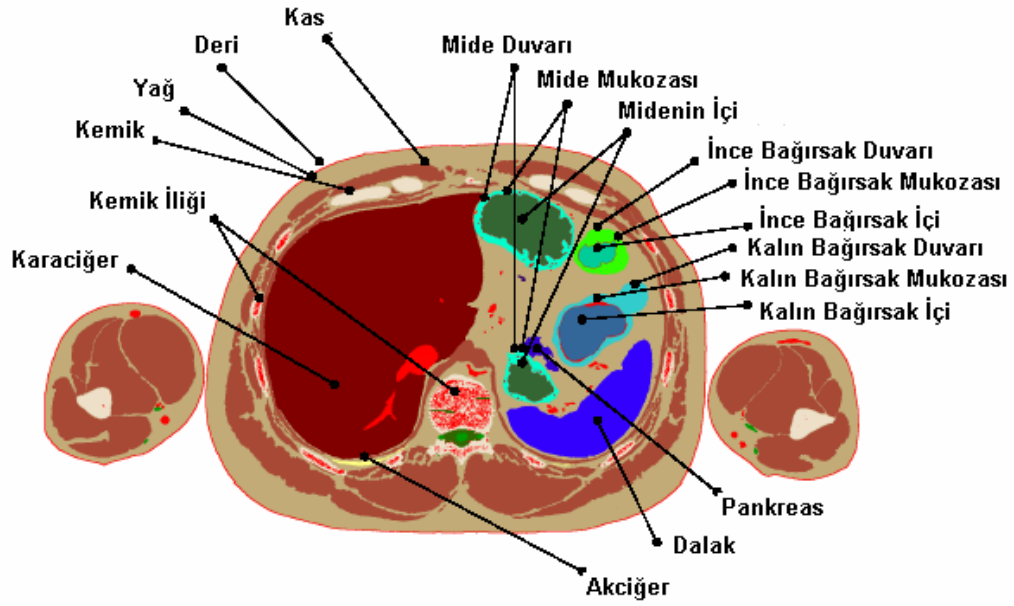
(a)



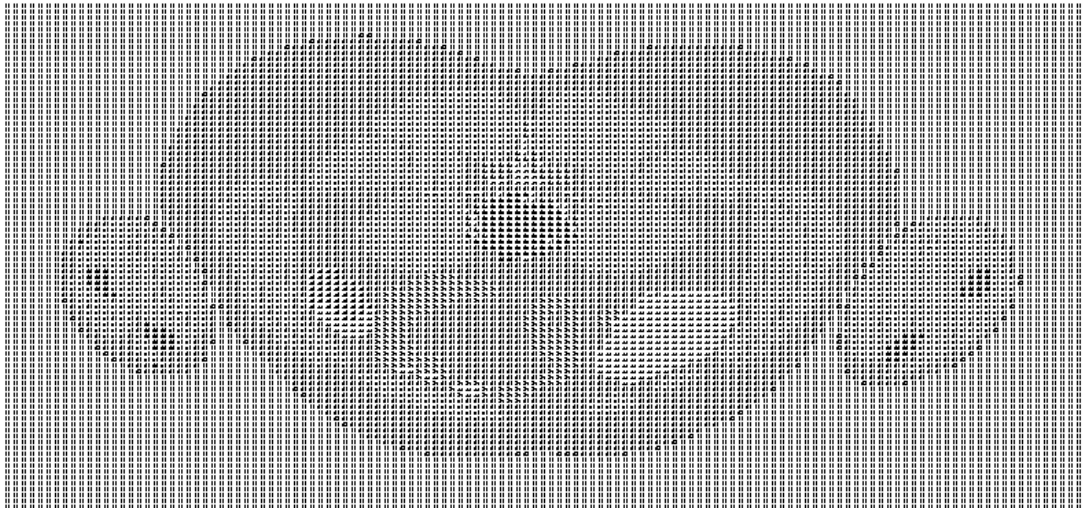
(b)

Şekil 3.15. a) Bilgisayara aktarılmış bir kesit görüntüsü b) Aynı fotoğrafın organ veya doku özellikleri tanımlanarak segmente edilmiş

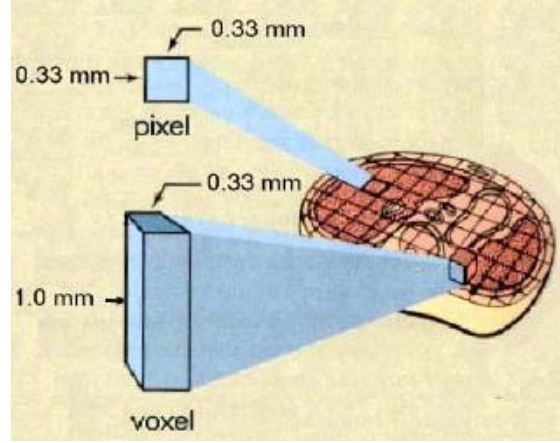
VIPMAN tüm insan modeli MCNP programına tanıtılırken belli bir koordinat seçimi yapılmıştır. Buna göre; vücudun ön kısmı -y yönü, sol kol +x yönü ve baş kısmı +z yönünde olacak şekilde koordine edilmiştir. Kullanılan vücut modeli Şekil 3.19’te VHP veri tabanından alınmış görüntüsü, voxellerden oluşturulmuş görüntüsü ve MCNP programından alınan görüntü gösterilmiştir (Bozkurt, 2000; Chao, 2001).



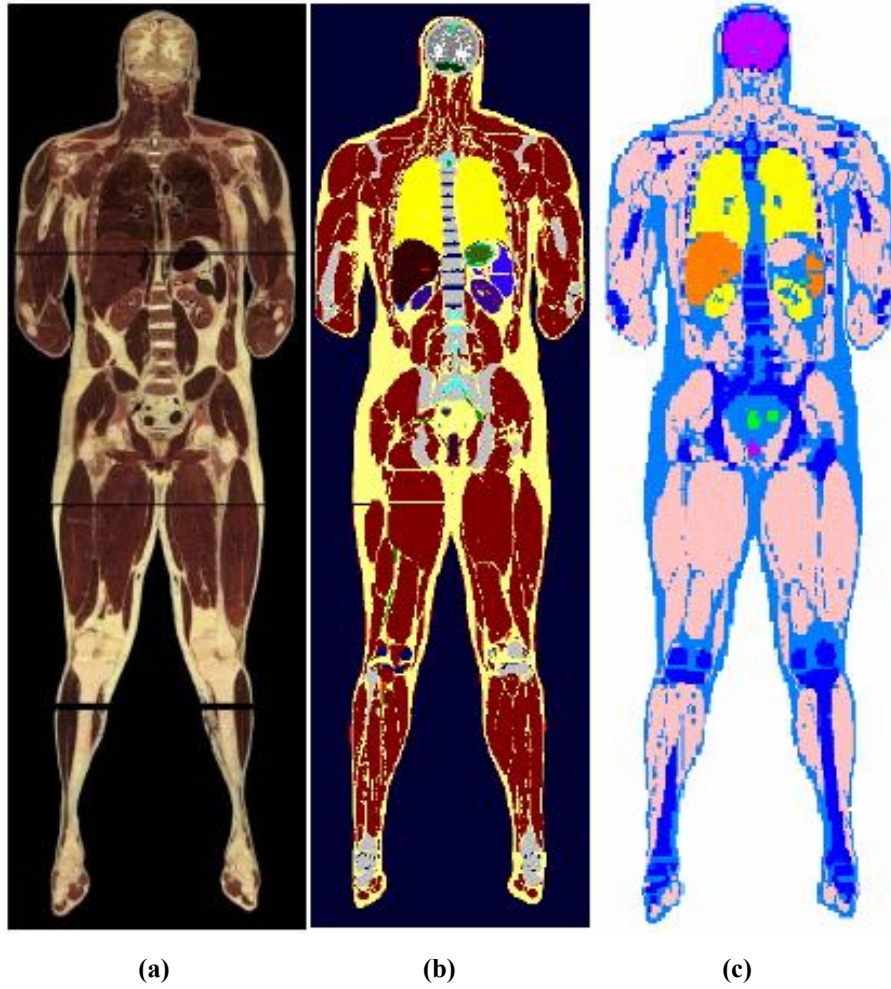
Şekil 3.16. VIPMAN vücut modelinde renklere karşılık gelen doku ve organlar



Şekil 3.17. VIPMAN vücut modelini oluşturan ve renklere karşılık gelen doku veya organların sayılarla gösterimi. Şekilde ki görüntüyü tamamen rakamlar oluşturmaktadır



Şekil 3.18. VIPMAN vücut modelini oluşturan dilimlerin büyüklüğü



Şekil 3.19. (a) VHP veri tabanlarından elde edilen görüntüsü (b) Voxel vücut modeli (c) VIPMAN vücut modelinin MCNP-plot görüntüsü

Çizelge 3.8. VIPMAN vücut modelinde bulunan bazı organ veya dokuların özellikleri

Organlar	Voxel Sayısı	Yoğunluk (g/cm ³)	Kütle (gr)
İdrar Torbası	621	1.02	40.5
Kemik	92 929	1.55	9227.8
Göğüs (Erkek)	571	0.92	33.6
Bağırsaklar			
Alt Kalın Bağırsak	5 613	1.04	373.6
Üst Kalın Bağırsak	9 326	1.04	620.7
Yemek Borusu	600	1.04	39.9
Karaciğer	28 802	1.05	1935.5
Akciğer	54 709	0.26	910.4
Kırmızı Kemik İliği	17 831	0.98	1118.4
Deri	32 616	1.10	2296.2
Mide Duvarı	2 327	1.04	154.9
Testisler	322	1.04	21.4 (1)
Tiroit	409	1.05	27.5
Diğer Organlar			
Adrenal	123	1.02	8.0
Beyin	18 735	1.04	1247.4
Böbrekler	5 029	1.05	338.0
Kas	645 491	1.04	42 963.9
Pankreas	1 232	1.05	82.8
İnce Bağırsak	18 573	1.04	1236.2
Dalak	3 536	1.06	239.9
Timus	175	1.03	11.5
Göz Merceği	16	1.10	1.1
Kalp Duvarı	6 096	1.03	401.8
Prostat	290	1.05	19.5
Tüm Vücut	5 941 740	-	103 202.3

4. ARASTIRMA BULGULARI ve TARTISMA

4.1. Giriş

Nükleer tıp uygulamalarında, içerisinde prosedüre bağlı olarak seçilmiş radyoaktif madde bulunan kimyasal bir çözelti hazırlanarak, hastaya ağızdan veya damardan enjeksiyon şeklinde verilir. Bu çözeltideki radyoaktif kaynaktan yayılan fotonlar gama kameralarıyla algılanarak görüntüler elde edilir ve söz konusu vücut bölümü hakkında tanısal bilgiye ulaşılmış olur. Görüntülenecek vücut bölgesinin özelliklerine uygun radyofarmasötikler kullanılması gerekir. Nükleer tıpta teşhis için kullanılacak radyofarmasötiklerin (radyoizotopların) istenen özellikleri şöyle sıralanabilir.

- Radyoizotop mümkünse sadece gama ışını saçmalıdır. Çünkü alfa ve beta ışınları, hem vücudun aldığı radyasyon dozunu yükseltir, hem de görüntü kalitesini düşürür.
- İdeal bir radyoizotopun yaydığı gamaların enerjisi kullanılan dedektörlerin verimi açısından 100-250 keV arasında olmalıdır.
- Radyofarmasötik kolay elde edilebilir olmalı, fiyatı makul olmalı ve yarı ömrü kullanıma uygun olmalıdır,
- İdeal radyofarmasötiğin etkin yarı ömrü çekim süresinin yaklaşık 1.5 katı olmalıdır.
- Radyofarmasötiğin hastaya toksin (zehirli) etkisi olmamalıdır.

Nükleer tıp uygulamalarında teşhise yönelik yapılan çalışmalarda, hazırlanacak radyofarmasötiğin içerisinde kullanılabilecek ve farklı yollarla üretilen birçok radyoizotop mevcuttur. Çizelge 4.1’de bazı radyoizotoplar ve özellikleri verilmiştir.

Bu tez çalışmasında, nükleer tıp prosedürlerinden sekiz farklı sintigrafi çeşidi için vücuttaki diğer organların aldıkları dozlar, MCNP programı yardımıyla elde

Çizelge 4.1. Nükleer tıpta kullanılan bazı radyoizotoplar, kullanıldıkları prosedürler ve özellikleri

Radyoizotop	Yarı Ömür	Gama Enerjisi	Görüntülenen Organ
I-123	13.1 gün	159 (keV)	Beyin Beyin damarlarında kan akışı Böbrek Tiroit*
I-131	8 gün	364 (keV)	Böbrek üstü bezleri Tiroit
In-111	2.8 gün	174.245 (keV)	Alyuvarlar Beyin
Se-75	120.4 gün	265 (keV)	Pankreas*
Tc-99m	6.02 saat	140 (keV)	Akciğer Beyin* Böbrek* Dalak* Karaciğer* Kemik Kemik iliği* Safra kesesi Tiroit Tükrük bezleri
Tl-201	73 saat	167 (keV)	Kalp kası* Akciğer
Xe-133	5.3 gün	81 (keV)	Beyin Karaciğer

* Bu çalışmada uygulanan nükleer tıp prosedürleri.

edilmiştir. Bu prosedürlere uygun olarak Çizelge 4.1’de verilen radyoizotoplardan beyin, böbrek, karaciğer, dalak ve kırmızı kemik iliği sintigrafileri için Tc-99m, kalp sintigrafisi için Tl-201, pankreas sintigrafisi için Se-75 ve tiroit sintigrafisi için I-123 kullanılmıştır. İlk olarak kaynak organlar 0.01, 0.015, 0.02, 0.03, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 ve 4.0 MeV gibi 12 farklı enerjiye sahip fotonların yayıldığı monoenerjik kaynaklar olarak düşünülerek simülasyonlar yapılmıştır. Bu simülasyonlar sonucunda, 60 farklı organ veya doku için soğurulan doz değerleri MeV/g cinsinden elde edilmiş ve bu değerler 1.6×10^{-10} çarpanıyla çarpılarak

soğurulan doz birimi olan Gy'e dönüştürülmüştür. Bu hesaplamalar sonucunda bazı organlar için, elde edilen foton başına soğurulan doz değerleri sekiz farklı kaynak organ için EK-1'de verilmiştir.

Yapılan simülasyonlarda görüntülenmek istenen organ tamamen kaynak organ ve diğer organ ile dokular dedektör olarak atanmıştır. Bölüm 3'de anlatılan F6 tipii tally dedektörler ile fotonların doku ve organlarda bıraktıkları enerjiler MeV/g cinsinden elde edilmiştir. Daha sonra bu veriler, Bölüm 3'te anlatılan hesaplama yöntemleriyle her organ için SAF ve S-değerlerine dönüştürülmüştür.

4.2. Organ Dozlarında İstatistiksel Hatalar

EK-1'de verilen ve yapılan simülasyonlar sonucunda oluşturulan tablolardaki verilerin kullanılabilirliği açısından istatistiksel hata oranları büyük önem taşımaktadır. Çünkü istatistiksel hatası %100 olan bir değer kullanılamazken, %50 hataya sahip bir değer ise şüpheyle kullanılacaktır. Bu çalışmada elde edilen veriler için istatistiksel hata değerlerinin %20'yi geçmemesine özen gösterilmiştir. Bu hata değeri, verinin kullanılabilirliğinde güven oranını büyük ölçüde artırır.

Herhangi bir organın doz değerine karşılık gelen istatistiksel hata, fotonların bu organ içerisinde yapacakları etkileşim sayısı ile ters orantılıdır. Yani etkileşim sayısı arttıkça hata değerleri düşecektir. Kaynak organdan yayılan fotonlar vücutta ilerlerken, yapacakları her etkileşim sonucunda enerji kaybına uğrayacaklarından belli bir mesafe sonra sahip oldukları enerjilerini yitirirler. Bunun sonucu olarak da, kaynak organın konumuna göre uzakta bulunan hedef organlara ulaşabilen foton sayısı nispeten az olacak ve bu organ içerisinde geçirecekleri etkileşim sayısı da düşecektir. Kaynak organdan yayılan fotonların enerjileri arttıkça daha uzak organlara ulaşabilme olasılıkları da artacaktır.

Örneğin Çizelge EK-1.1'de kaynak organ olarak seçilen beyin için, diğer organların istatistiksel hata değerlerine bakıldığında; yapıcı küçük ve büyüklükleri birbirine yakın olan tiroit, dalak ve testisler de elde edilen hata değerleri, bu

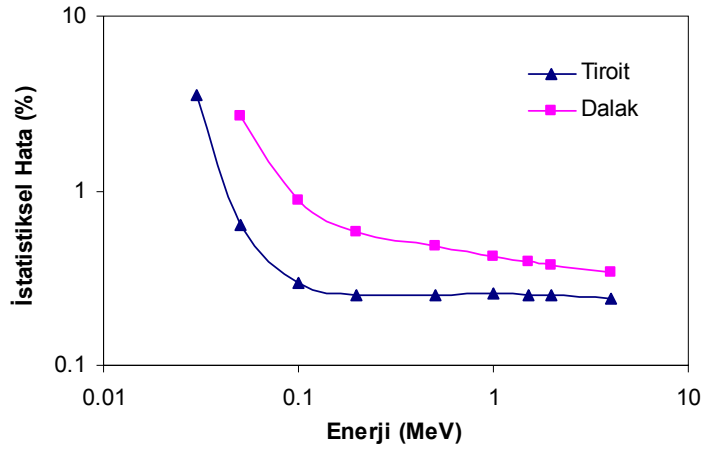
organların kaynak organ olan beyine uzaklıklarına bağı olarak değişmektedir. Tiroit, kaynak organ olan beyine, dalak ve testislere göre daha yakın olduğundan daha fazla fotonla etkileşeceğinden sonuç olarak bu dokuda alınan verilerin istatistiksel hata değerleri daha az çıkmıştır. Ayrıca istatistiksel hata oranları açısından her organ kendi içerisinde incelenirse, kaynak organ olan beyinden yayılan fotonların enerjileri arttıkça, fotonlar daha uzun yol alabileceklerinden, hata değerlerinin buna bağı olarak düştüğü görülecektir.

Çizelgelere bakıldığında istatistiksel hatalar açısından göze çarpan diğer bir özellik, hedef organların hacimce büyüklüğü veya vücuttaki dağılımıdır. Örneğin, hacimce diğer organlara göre daha fazla yer kaplayan ve konum olarak kaynak organ olan beyine uzaklıkları hemen hemen aynı olan kalp ile akciğerler kıyaslandığında, akciğerlerin soğurduğu doza ait istatistik hataların bu organa göre daha küçük olan kalbin hata oranlarından daha düşük olduğu görülmektedir. Buna paralel olarak vücutta dağınık olarak bulunan deri, kırmızı kemik iliğı ve kemik dokusunda alınan veriler için istatistiksel hatalar çok küçük değerlerdedir.

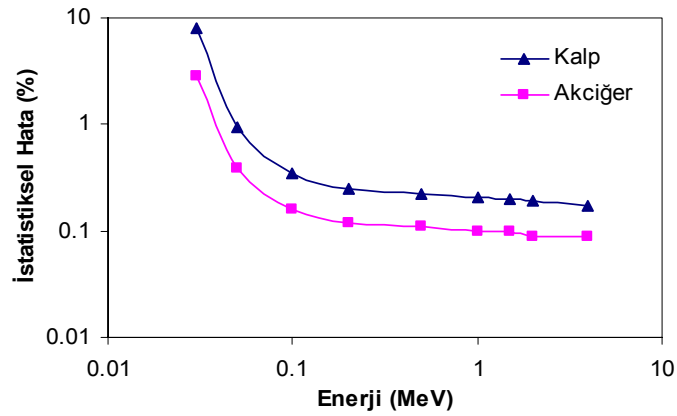
Sonuç olarak, EK-1’de verilen tablolar tek tek incelendiğinde, sekiz farklı kaynak organ için hedef organlarda alınan verilere ait istatistiksel hata değerleri, hedef organların kaynak organa göre konumları ile hedef organların hacimce büyüklüğüne ve kaynaktan yayılan fotonların enerjilerine bağı olarak değişim göstermektedir. Şekil 4.1’de gösterilen grafiklerde kaynak organ beyin için, hedef organların a) konum ve b) büyüklüğüne bağı olarak istatistiksel hata değişimi gösterilmiştir. Bu grafiklerde hataların enerjiye göre ters orantılı bir şekilde değiştiğı de görülmektedir.

4.3. Organ Dozları

Hedef organların aldıkları dozların enerjiye ve birbirlerine göre değişimleri kaynak organ beyin olduğu durumda Şekil 4.2’de görülmektedir. Radyoaktif kaynağın beyinde yoğunlaştığı durumda diğer organların soğuracakları radyasyon dozu kaynaktan yayımlanan enerjiye ve hedef organların kaynak organa olan



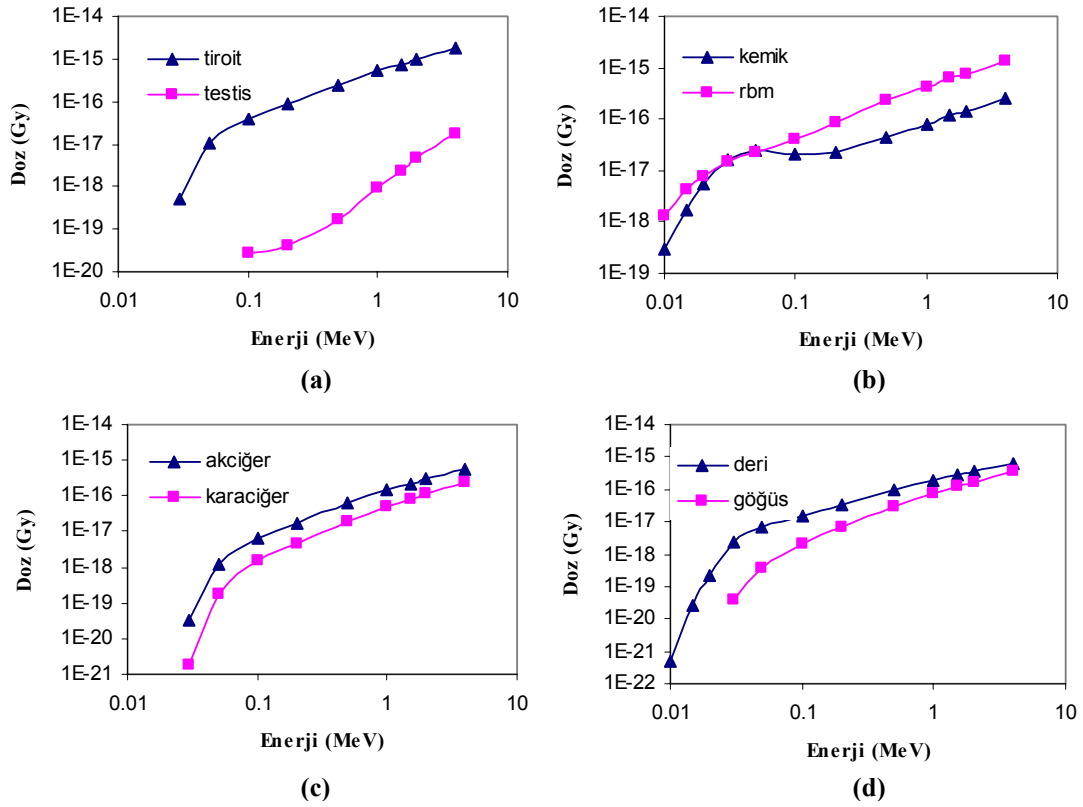
(a)



(b)

Şekil 4.1. Kaynak organ beyin için, a) konuma göre b) büyüklüğe göre hedef organlardan alınan veriler sonucunda ortaya çıkan istatistiksel hata değerleri

uzaklıklarına bağlı olarak değişmektedir. Kaynak fotonlarının enerjisi arttıkça giricilikleri de artacağından Şekil 4.2'deki grafiklerde görüldüğü gibi hedef organlarda soğurulan dozda da artma görülmektedir. Şekil 4.2 (a)'da kaynağın beyin olması durumunda tiroit ve testis hedef organları için dozun foton enerjisine bağımlılığı görülmektedir. Hacimsel büyüklükleri birbirlerine yakın olan bu iki organın soğurduğu dozlardaki farklılık tamamen bu organların kaynak organ olan beyine olan uzaklıkları ile ilgilidir. Görüldüğü gibi beyine yakın olan tiroit bezinde, testislere oranla daha fazla doz birikmektedir.



Şekil 4.2. Kaynak organ beyin olduğunda, bazı hedef organların aldıkları dozlar

Aynı durum Şekil 4.2 (b)'de ise kırmızı kemik iliği ve kemik dokusu için gösterilmiştir. Her iki organda görece vücuda düzgün dağılmış olduklarından dolayı, özellikle düşük enerjilerde benzer dozlar almakta, ancak artan foton enerjisi ile yine bu organların yoğunlaştıkları vücut bölgeleri önemli hale gelmektedir. Kan üreten bir doku olan kırmızı kemik iliği, vücudun kafatası, kaburgalar ve göğüs kemiği gibi yassı kemiklerinin iç kısmında yer alır. Beyine daha yakın olan bu bölgeler kaynak beyinken daha fazla doz alacaklarından Şekil 4.2 (b)'de yüksek enerjilerde görülen farklılık elde edilecektir.

Şekil 4.2 (b)'de görülen önemli diğer bir nokta ise düşük enerjilerde kemik dokusunun aldığı dozun artış hızıdır. Bunun nedeni kemik dokusunun değeri 1.55 g/cm^3 olan yoğunluğu ile ilgilidir. Düşük enerjilerdeki (0.015-0.05 MeV) fotonlar kemik dokusu gibi yoğun bir ortama girdiklerinde, yapacakları ilk etkileşimde enerjilerinin büyük kısmını kaybederler, yani bulundukları ortama bırakırlar.

Şekil 4.2 (c)'de karaciğer ile akciğer dokularının aldıkları dozlar görülmektedir. Her iki organın konumları hemen hemen aynı olmasına karşılık akciğerlerin hacimce büyük olması daha fazla doz almalarına yol açmaktadır. Şekil 4.2 (d)'de de aynı özellikten kaynaklanan derinin doz fazlalığı görülmektedir. Deri ve göğüz dokusu vücudun dış kısmında bulunan dokulardır. Kaynağın beyin olması ve göğüs dokusunun kaynağa olan uzaklığı ve derinin tüm vücudu sardığı düşünülürse bu sonuç olası bir sonuç olacaktır.

Radyoaktif kaynağın diğer yedi kaynak organda olması durumunda, hedef organların soğuracakları dozun bu organların vücuttaki konumlarına ve dağılımlarına, büyüklükleri ile derinliklerine bağlı olarak nasıl değiştiği EK-2'te grafiklerle verilmiştir.

4.4. Etkin Doz

Bu çalışma da MCNP programı ile 0.01, 0.015, 0.02, 0.03, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 ve 4.0 MeV gibi 12 farklı enerjiye sahip fotonların yayıldığı monoenerjik kaynaklar düşünülerek yapılan simülasyonlar sonucunda, sekiz farklı kaynak organ için 60 farklı organ veya doku için soğurulan doz değerleri MeV/g cinsinden elde edilmiştir. Öncelikle bu veriler Bölüm 3'te anlatıldığı gibi, radyasyon ağırlık faktörü (fotonlar için 1) ile çarpılarak her organ için eşdeğer doz hesaplanmıştır. Kritik organlar için elde edilen eşdeğer doz değerlerinin, her birinin uygun organ ağırlık faktörü (Çizelge 3.3) ile çarpılması ve bu değerlerin toplanması ile etkin doz hesaplanmıştır (Denklem 3.4).

Etkin doz hesaplanırken dikkat edilmesi gereken önemli bir nokta, “remainder” adı verilen ve Çizelge 3.3'te “diğerleri” olarak tanımlanan sekiz organın (bu çalışmada kullanılan tüm vücut modeli olan VIPMAN erkek olduğundan, yumurtalıklar remainder içinde alınmamıştır) etkin doza katkısını belirlemektir. Önemsiz organlar olarak nitelendirilen bu organların etkin doza katkısı hesaplanırken, eşdeğer doz değerlerine bakılır. Eğer bu önemsiz organların herhangi biri diğer tüm organlardan daha fazla eşdeğer doza sahip ise, bu organın eşdeğer doz

değeri 0.025 ile diğer önemsiz organların sahip oldukları eşdeğer doz değerlerinin ortalamaları ise 0.025 ile çarpılarak etkin doza eklenir. Fakat bu önemsiz organlardan hiçbirisi maksimum dozu almamışsa önemsiz organların eşdeğer doz değerlerinin ortalamaları alınarak 0.05 ile çarpılır ve etkin doza bu şekilde eklenir.

Bu çalışmada 12 farklı enerjide sekiz farklı kaynak organ için elde edilen foton başına etkin doz değerleri Çizelge 4.2’de gösterilmiştir. Bu veriler Şekil 4.3’te bir grafik halinde özetlendiğinde, foton başına etkin doz değerlerinin enerjiye göre nasıl değiştiği daha net bir şekilde görülebilir. Grafikte görüldüğü tiroit sintigrafisinde en yüksek doz alınırken, beyin sintigrafisi en düşük etkin dozu almıştır. Bunun nedenini anlamak için sekiz farklı sintigrafi çeşidi için seçilen kaynak organlardan yayılan 4 MeV enerjiye sahip fotonların, vücuda dağıttığı toplam radyasyon dozunun organ dağılımına bakılması yeterli olacaktır.

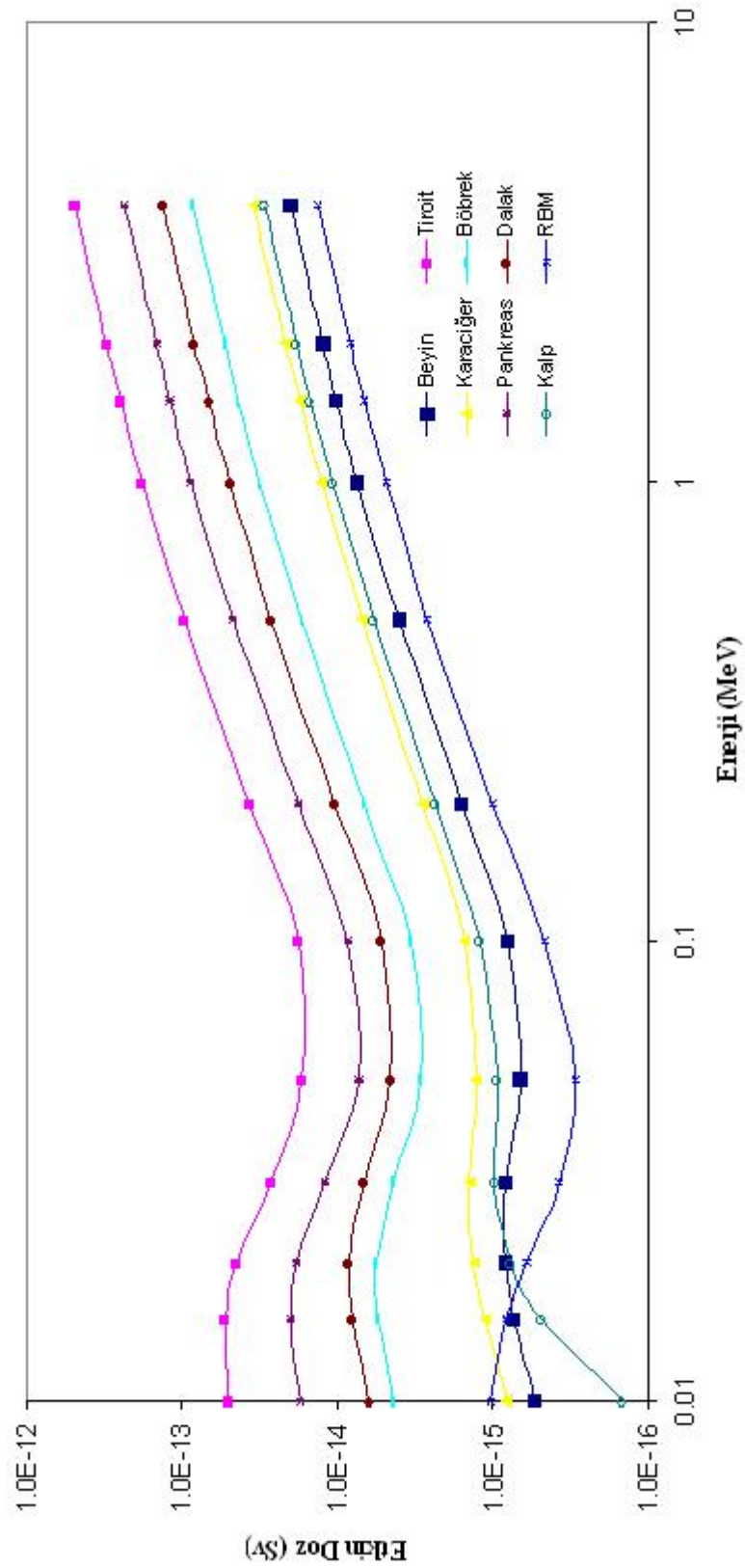
Kaynak organ tiroit iken, kaynak organdan yayılan 4 MeV enerjili fotonların vücuda bıraktıkları toplam radyasyon dozunun ortalama %90’ı tiroit tarafından tutulmaktadır. Yani vücuda dağılan radyasyon dozunun sadece %10’u diğer organlar tarafından soğurulmuştur. Ayrıca bu %10’luk kısmın ortalama %7.5’i organ ağırlık faktörleri büyük değerlere sahip organlar (yemek borusu, akciğer, kırmızı kemik iliği vb.) arasında paylaşılması ve etkin doz hesabı için tiroidin organ ağırlık faktörü de göz önüne alındığında, tiroit sintigrafisi için etkin doz değerinin niçin en büyük değerleri aldığı açıklanmış olur. Aynı şekilde beyin sintigrafisi prosedürü için 4 MeV enerjili fotonların vücuda dağılan radyasyon dozunun ortalama %85’ini almıştır. Belki bu oran etkin doza, remainder olarak adlandırılan önemsiz organlardan gelen katkıyı büyütecektir. Fakat remainder organlarının etkin doza katkısının düşük oluşu (0.025 çarpanı ile) göz önüne alındığında, vücuda dağılan radyasyon dozunun geri kalan kısmının hangi organlarda dağıldığına bakılması gerekir.

Vücuda dağılan radyasyon dozunun %11’ini başta tiroit ve kırmızı kemik iliği olmak üzere bazı önemli organlara dağılmıştır. Fakat diğer sintigrafi prosedürlerine bakıldığında bu değer nispeten küçük kalmaktadır. Ayrıca beyin sintigrafisi için kaynak organ olarak seçilen beyinin vücuttaki konumuna baktığımızda, vücudun en

Çizelge 4.2. Sekiz farklı kaynak organdan yayılan 12 farklı enerjiye sahip monoenerjik fotonlar için etkin doz değerleri (Sv)

Foton Enerjisi (MeV)	Beyin	Tiroit	Karaciğer	Böbrekler
0.01	1.34E-17	2.48E-15	4.19E-17	1.09E-16
0.015	1.85E-17	2.63E-15	6.60E-17	1.39E-16
0.02	2.16E-17	2.24E-15	9.10E-17	1.50E-16
0.03	2.24E-17	1.41E-15	1.26E-16	1.43E-16
0.05	2.05E-17	9.00E-16	1.53E-16	1.37E-16
0.1	2.89E-17	9.82E-16	2.16E-16	1.91E-16
0.2	5.93E-17	2.01E-15	3.98E-16	3.63E-16
0.5	1.57E-16	5.27E-15	9.48E-16	8.87E-16
1	3.04E-16	9.82E-15	1.74E-15	1.64E-15
1.5	4.33E-16	1.35E-14	2.40E-15	2.27E-15
2	5.48E-16	1.66E-14	2.98E-15	2.82E-15
4	9.34E-16	2.66E-14	4.90E-15	4.63E-15
Foton Enerjisi (MeV)	Pankreas	Dalak	Kalp	K.K.İliği
0.01	4.36E-16	1.60E-16	8.04E-18	1.23E-16
0.015	5.25E-16	2.18E-16	3.92E-17	1.02E-16
0.02	5.22E-16	2.45E-16	8.53E-17	8.09E-17
0.03	4.43E-16	2.37E-16	1.51E-16	6.73E-17
0.05	3.65E-16	2.11E-16	1.90E-16	7.89E-17
0.1	4.64E-16	2.75E-16	2.62E-16	1.37E-16
0.2	8.95E-16	5.26E-16	4.82E-16	2.75E-16
0.5	2.21E-15	1.29E-15	1.15E-15	6.81E-16
1	4.07E-15	2.38E-15	2.11E-15	1.26E-15
1.5	5.59E-15	3.28E-15	2.92E-15	1.75E-15
2	6.91E-15	4.06E-15	3.62E-15	2.17E-15
4	1.12E-14	6.62E-15	5.93E-15	3.58E-15

tepesinde bulunması Şekil 4.3'teki eğriyi açıklamaktadır. Çünkü beyin diğer kritik organların hemen hemen hepsine uzak kalmaktadır. Ayrıca altı farklı kaynak organ için vücudun aldığı etkin doz miktarları, kaynaktan yayılan fotonların enerjileri 15-50 keV arasında iken genel olarak küçük düşüşler gösterirken, daha yüksek enerjilerde ise bu düşüş yerini, yaklaşık olarak doğrusal bir artışa bırakmıştır. Bunun nedeni orta enerjilerde fotonlarının giriciliklerinin artması ve daha yüksek enerjilerde fotonların geçirecekleri etkileşim türünün değişmesi (Compton olayı) gösterilebilir.

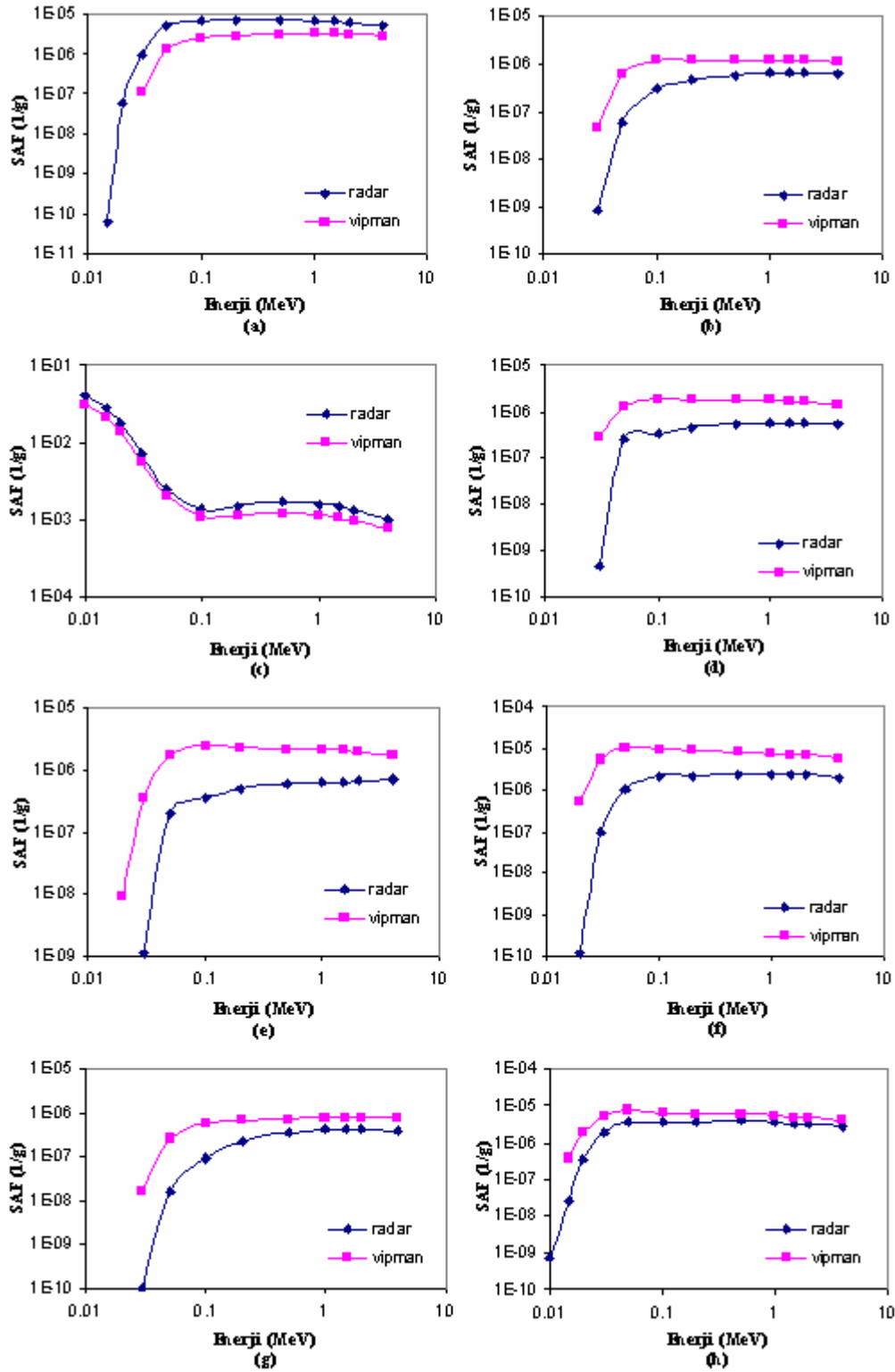


Şekil 4.3. Sekiz farklı kaynak organ için vücudun aldığı etkin dozun enerjiye göre değişimi

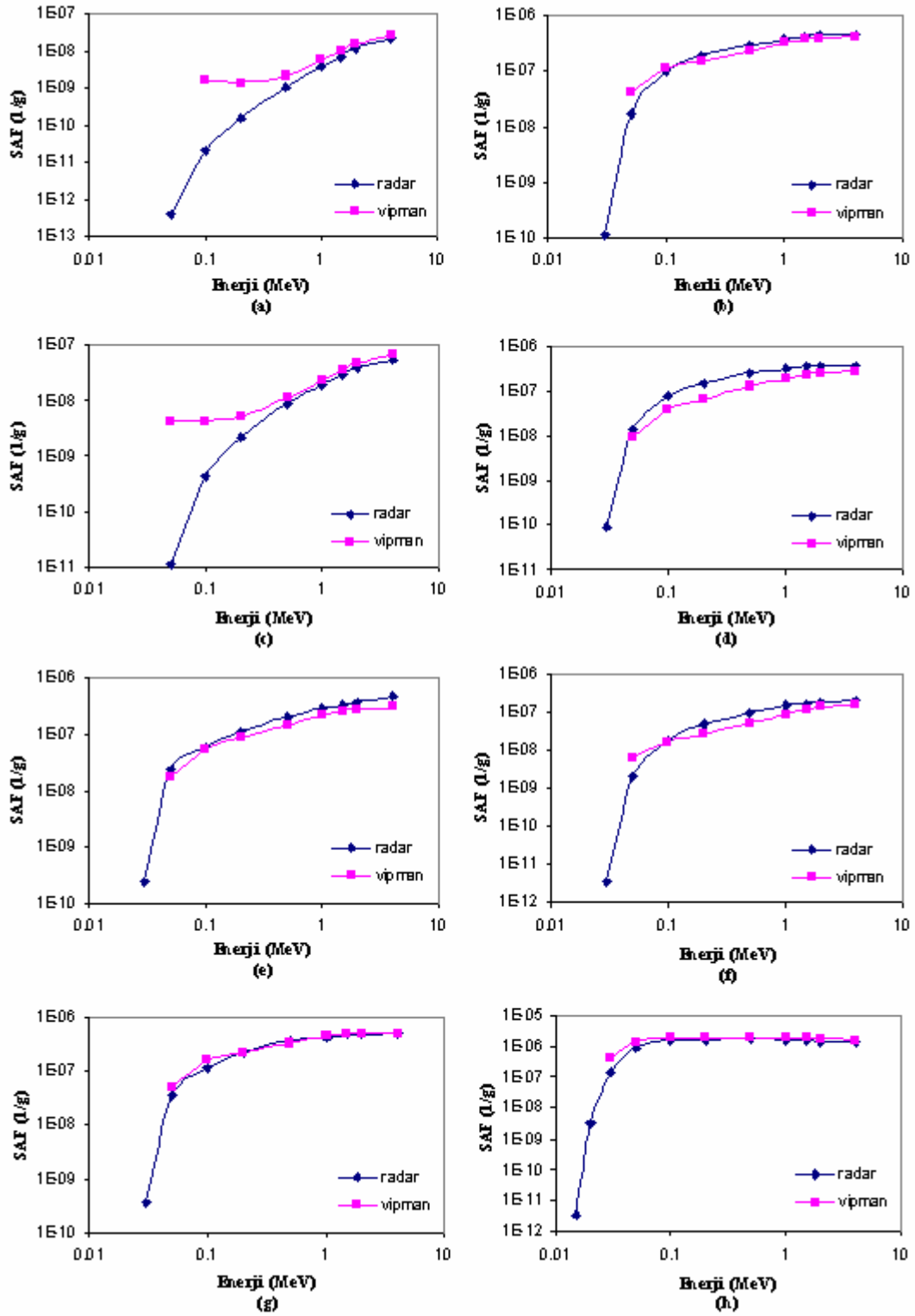
4.5. Özgöl Soğurma Oranları

MCNP programı ile 0.01, 0.015, 0.02, 0.03, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1, 1.5, 2 ve 4 MeV enerjilerdeki fotonların yayıldığı monoenerjik kaynaklar düşünülerek yapılan simülasyonlar sonucunda, sekiz farklı kaynak organ için 60 farklı organ veya dokuda MeV/g cinsinden elde edilen soğurulan doz değerleri, Denklem 3.8’de ifade edildiği gibi, kaynak enerjisine bölünerek her organ için her enerjide özgöl soğurma oranı adı verilen SAF tespit edilmiştir. 12 farklı enerji ve sekiz farklı sintigrafi çeşidi için bazı organların hesaplanan SAF değerleri EK-3’te verilmiştir. Ayrıca hesaplanan değerlerin kabul edilebilirliğinin sınanması için, MIRD fantomunun kullanıldığı aynı sintigrafi çeşitleri için literatürde bulunan SAF değerleri (Stabin, 1995) ile kıyaslama yapılmıştır. Tiroit, testis, beyin, ince bağırsak, göğüs, kas, kırmızı kemik iliği ve akciğer dokuları için sekiz farklı sintigrafi çeşidine göre yapılan bu kıyaslamalar Şekil 4.4 - 4.11’de gösterilmiştir.

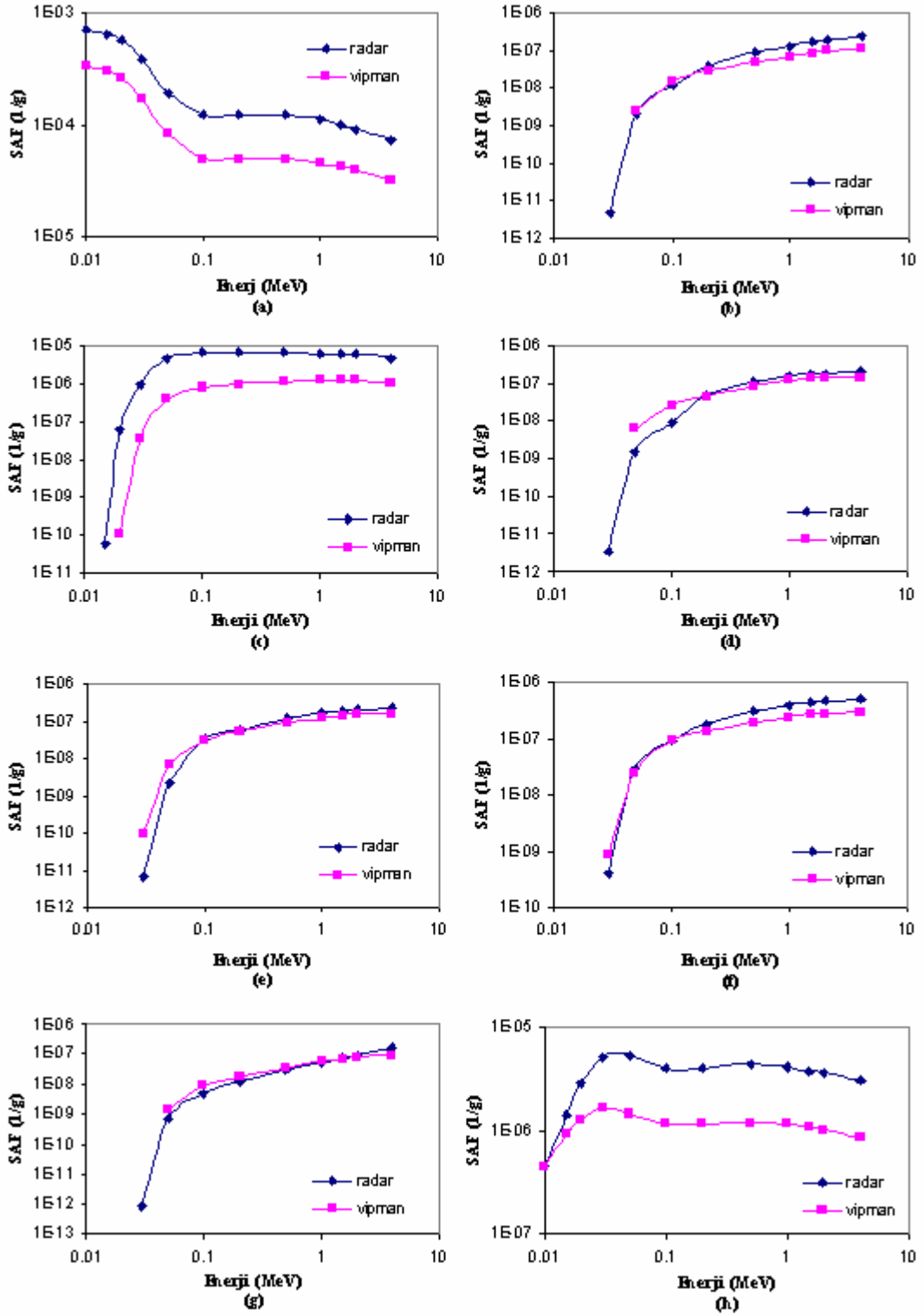
Kıyaslamaları yapılacak bu organlar gelişi güzel değil, tam aksine vücuttaki konum ve dağılımları ile önem derecelerine göre seçilmiştir. Büyüklükleri hemen hemen aynı olması ve vücuttaki konumları açısından birinin vücudun üst bölümünde diğerinin alt bölgede kalması açısından tiroit ve testis seçilmiştir. Ayrıca genetik açıdan önemli bir organ olması açısından testis ve tiroit dokusunun kansere yakalanma riskinin düşünülmesi bu etkenler arasında yer alır. Diğer taraftan vücutta görece dağılmış olarak bulunan ve kan üretiminde rol alan kırmızı kemik iliği ile vücudu tamamen saran kas dokusunun yanında, vücuttaki konumları itibarıyla ve hacimlerinin büyüklüğü nedeniyle boşaltım sisteminin önemli organı ince bağırsak ve hayati önem açısından solunum organı olan akciğer seçilmiştir. Yine kanser oluşum tehlikesinin bulunduğu ve vücudun yüzeyinde bulunan göğüs ile vücudun en tepesinde ve diğer organlara uzak bulunması bakımından beyin seçilmiştir.



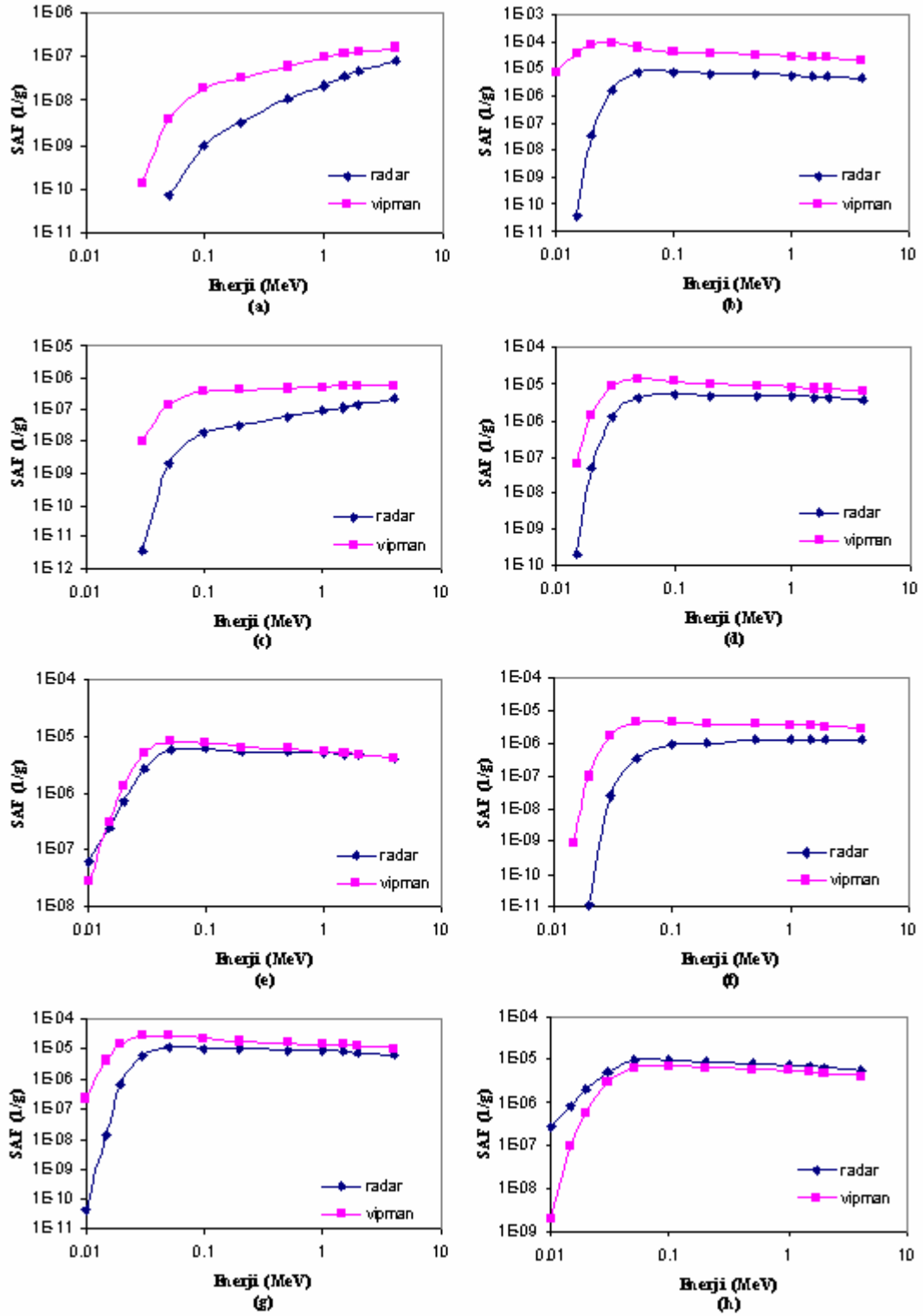
Şekil 4.4. Tiroit dokusu için, elde edilen verilerin radar ile kıyaslanması. Kaynak organ: a) Beyin, b) Pankreas, c) Tiroit, d) Dalak, e) Karaciğer, f) Kalp, g) Böbrek, h) Kırmızı Kemik İliği



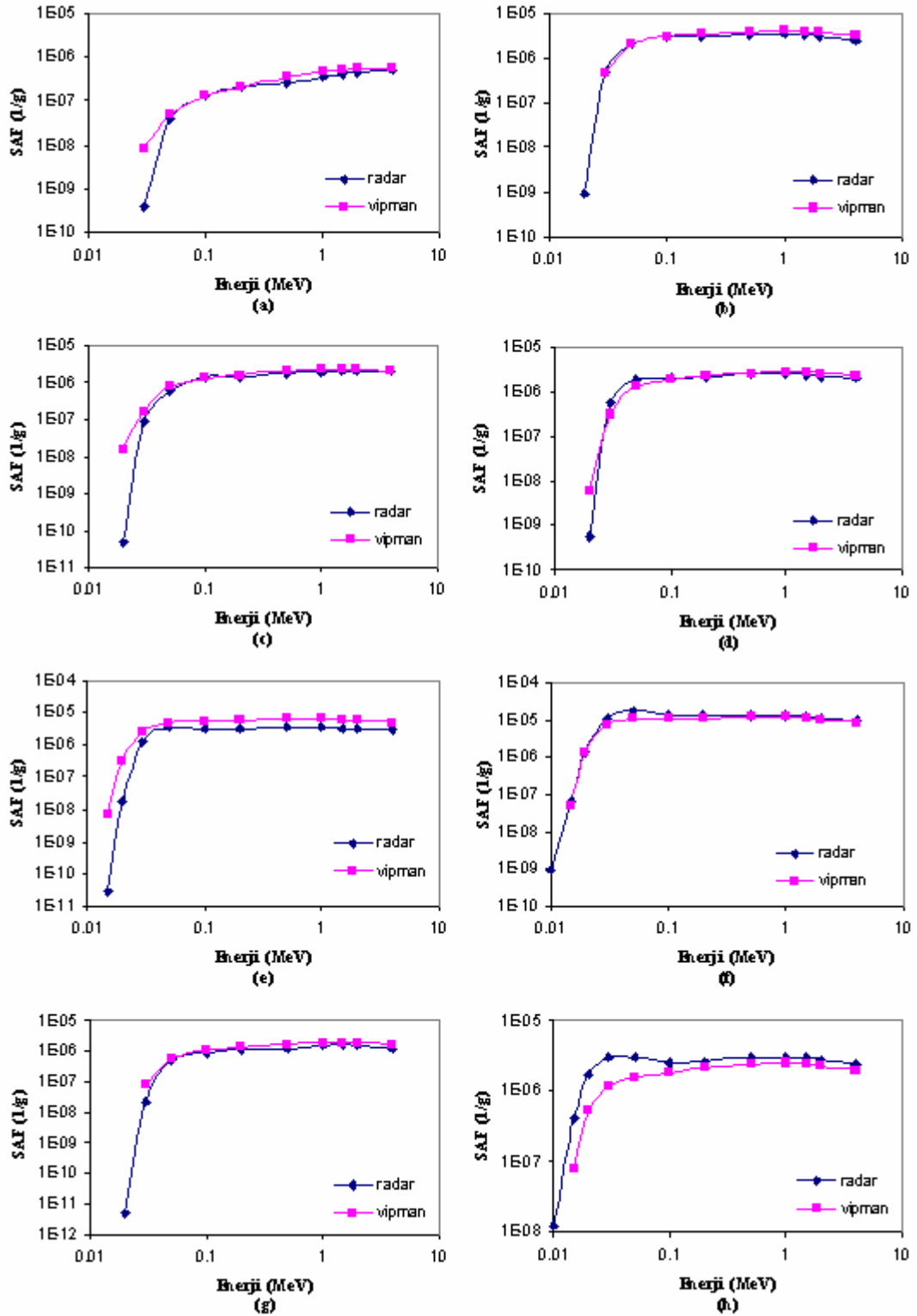
Şekil 4.5. Testis dokusu için, elde edilen verilerin radar ile kıyaslanması. Kaynak organ: a) Beyin, b) Pankreas, c) Tiroit, d) Dalak, e) Karaciğer, f) Kalp, g) Böbrek, h) Kırmızı Kemik İliği



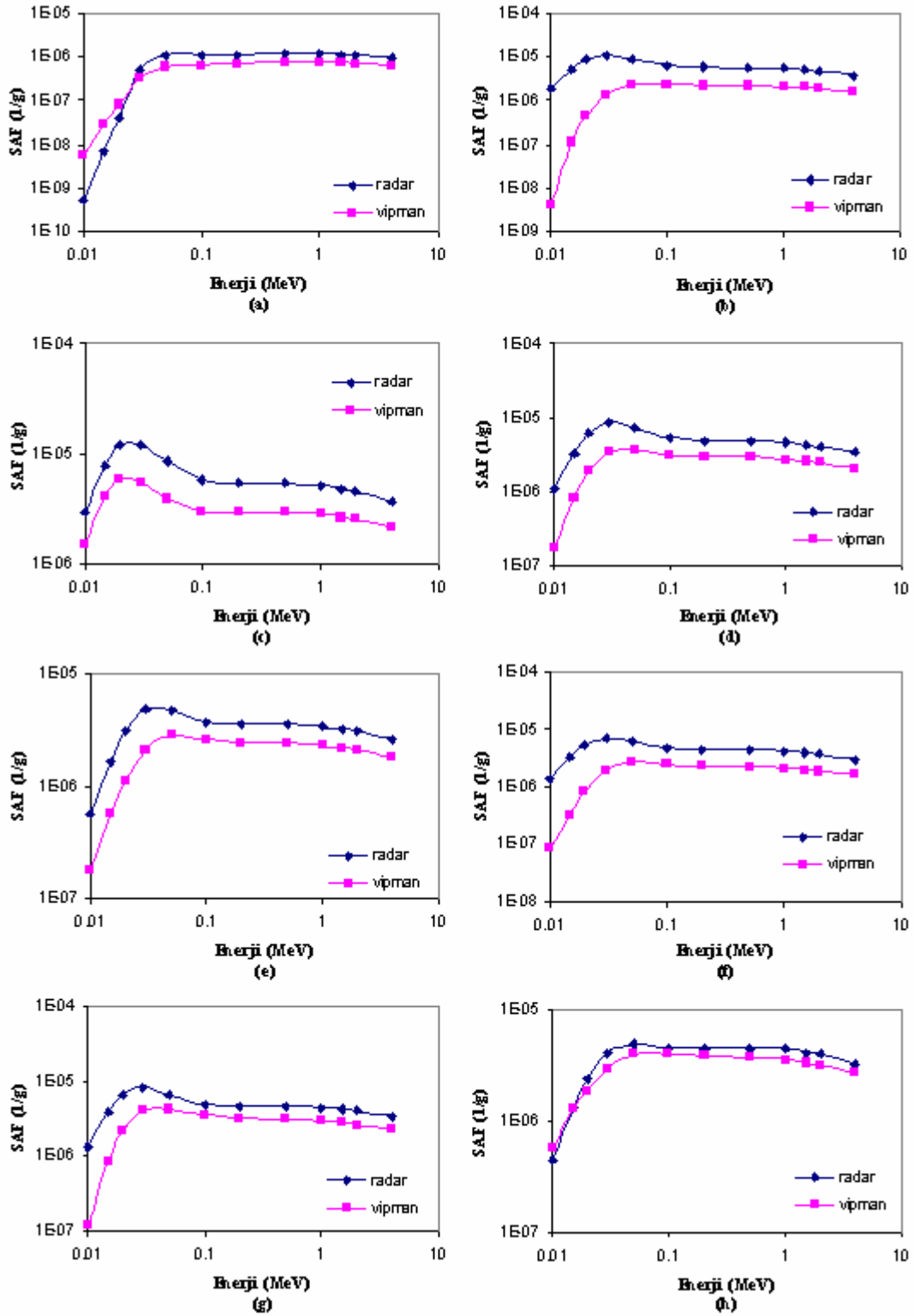
Şekil 4.6. Beyin dokusu için, elde edilen verilerin radar ile kıyaslanması. Kaynak organ: a) Beyin, b) Pankreas, c) Tiroit, d) Dalak, e) Karaciğer, f) Kalp, g) Böbrek, h) Kırmızı Kemik İliği



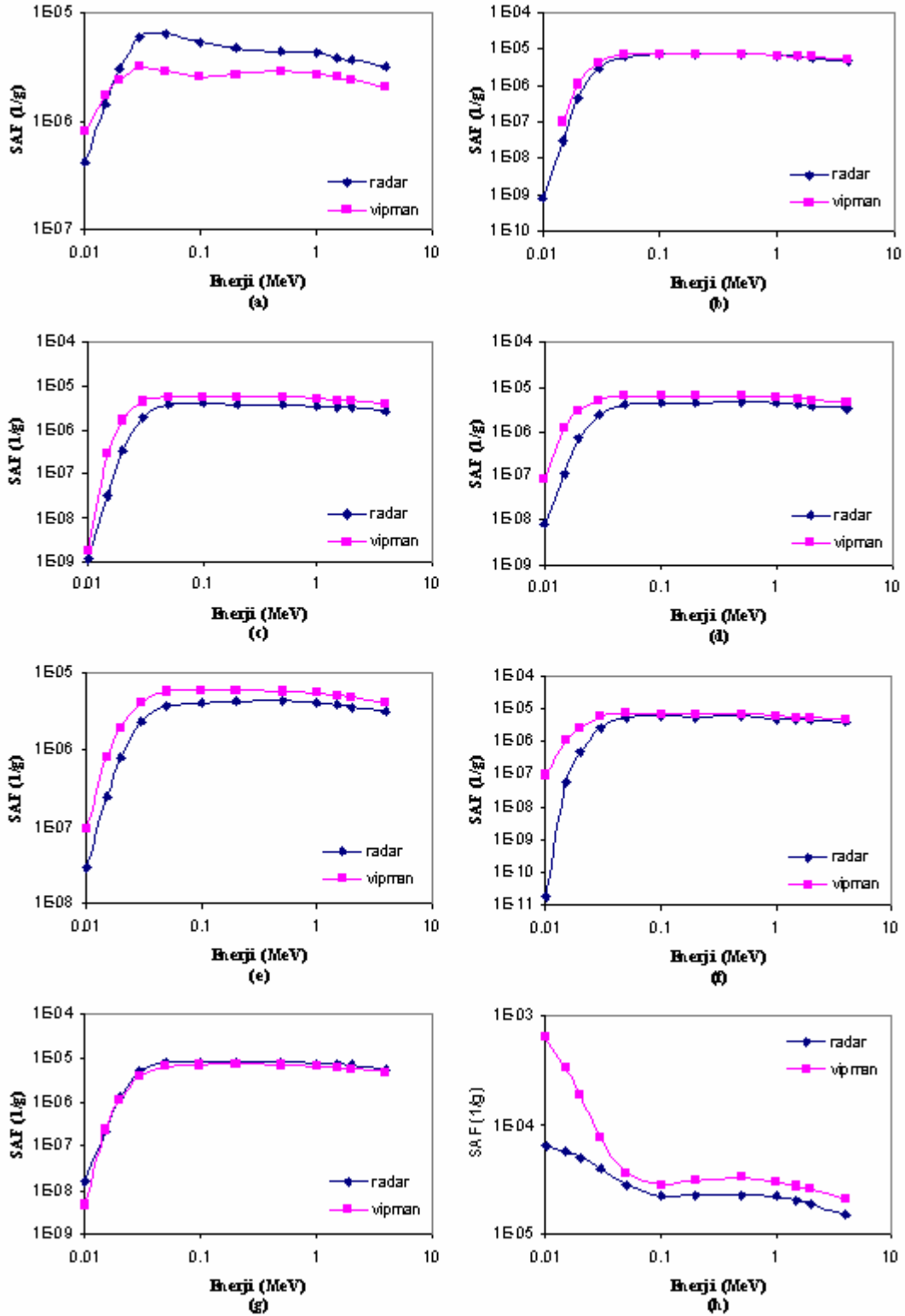
Şekil 4.7. İnce bağırsak dokusu için, elde edilen verilerin radar ile kıyaslanması. Kaynak organ:
a) Beyin, b) Pankreas, c) Tiroit, d) Dalak, e) Karaciğer, f) Kalp, g) Böbrek, h) Kırmızı
Kemik İliği



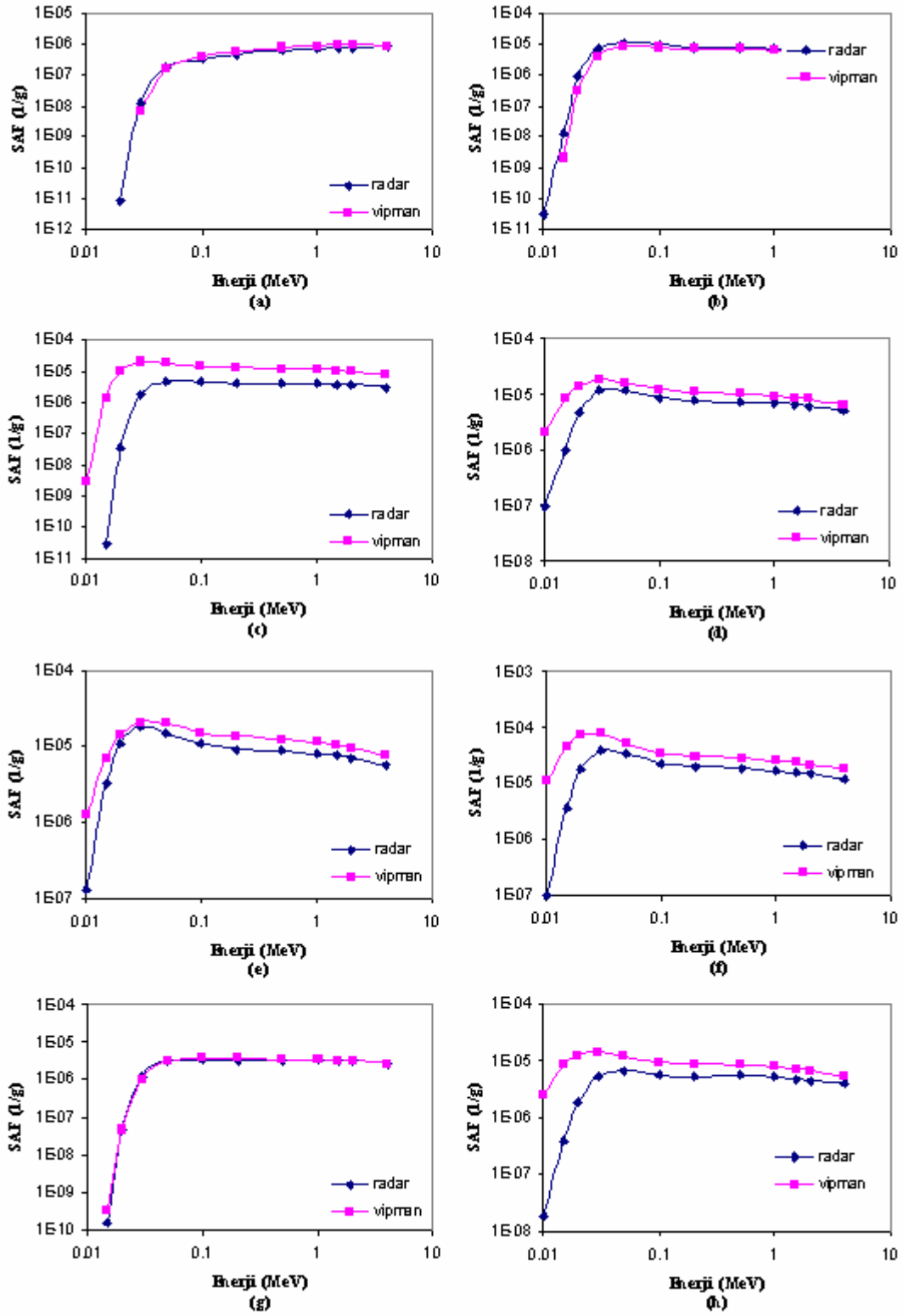
Şekil 4.8. Göğüs dokusu için, elde edilen verilerin radar ile kıyaslanması. Kaynak organ: a) Beyin, b) Pankreas, c) Tiroit, d) Dalak, e) Karaciğer, f) Kalp, g) Böbrek, h) Kırmızı Kemik İliği



Şekil 4.9. Kas dokusu için, elde edilen verilerin radar ile kıyaslanması. Kaynak organ: a) Beyin, b) Pankreas, c) Tiroit, d) Dalak, e) Karaciğer, f) Kalp, g) Böbrek, h) Kırmızı Kemik İliği



Şekil 4.10. Kırmızı Kemik İliği dokusu için, elde edilen verilerin radar ile kıyaslanması. Kaynak organ: a) Beyin, b) Pankreas, c) Tiroit, d) Dalak, e) Karaciğer, f) Kalp, g) Böbrek, h) Kırmızı Kemik İliği



Şekil 4.11. Akciğer dokusu için, elde edilen verilerin radar ile kıyaslanması. Kaynak organ:
a) Beyin, b) Pankreas, c) Tiroit, d) Dalak, e) Karaciğer, f) Kalp, g) Böbrek, h) Kırmızı Kemik İliği

Şekil 4.4 - 4.11'deki grafiklere bakıldığında genel olarak bu çalışmada elde edilen verilerle, literatürden alınan “radar” veritabanı sonuçları arasında iyi bir uyumun sağlandığı görülmektedir. Ancak bazı uyumsuzlukların yaşandığı özel durumlar da söz konusudur. Örneğin, testis dokusunun kıyaslandığı Şekil 4.5'te kaynak organ beyin ve tiroitken grafikte düşük enerjilerde kötü bir uyum gözlenmektedir. Bunun nedeni olarak, bu kaynak organın testislere olan uzaklığı gösterilebilir. Ayrıca bu çalışmada kullanılan VIPMAN vücut modelinin sadece bir tane testise sahip olması da bu uyumsuzluğu açıklamaya yardımcı olacaktır. Yine beyin dokusunun kıyaslandığı Şekil 4.6-(h)'ta kaynak organ kırmızı kemik iliği iken nispeten kötü bir uyum gözlenmektedir. Bunun nedeni olarak da, kullanılan her iki modelin organ büyüklük, yoğunluk, kütleleri vb. gibi farklılıklar gösterilebilir.

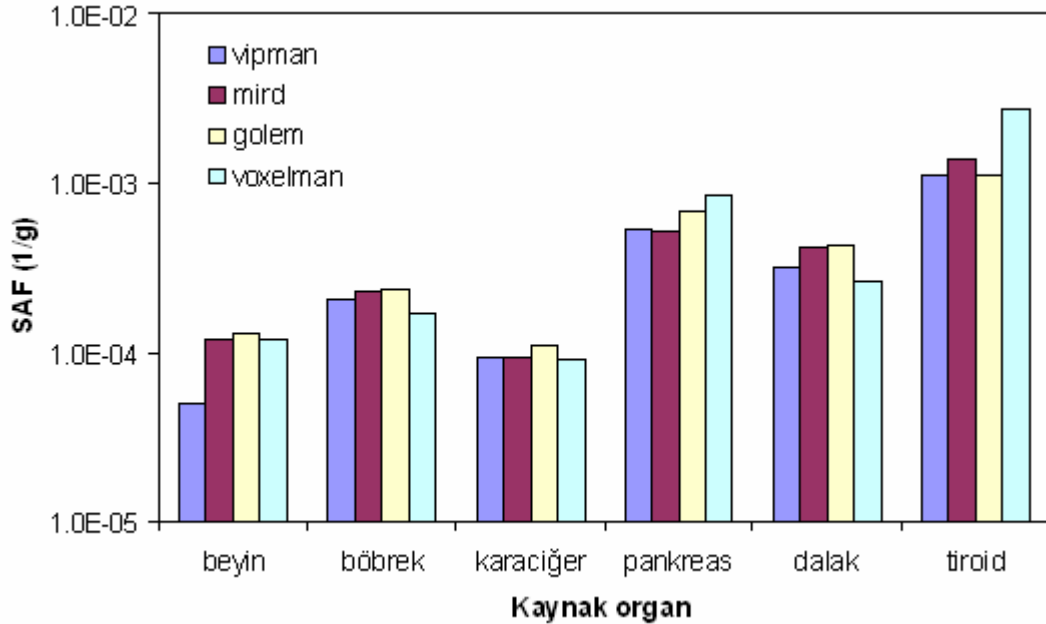
Kıyaslamalarda ortaya çıkan uyumsuzlukların genel bir nedeni olarak modeller arasındaki farklar verilebilir. Radar da kullanılan vücut modeli olan MIRD fantomu ideal bir insan modeli (1.76 m boyunda 73 kg ağırlığında) iken, çalışmada kullanılan VIPMAN vücut modeli gerçek bir insanın anatomisine dayanılarak düzenlenmiş olup 1.86 m boyunda, 103 kg ağırlığındaki bir erkek vücudunun özelliklerine sahiptir. MIRD fantomu ile VIPMAN tüm vücut modelinin organ kütleleri arasındaki fark Çizelge 4.3'te görülmektedir.

Petoussi ile Zankl'ın 1998 yılında yaptığı bir çalışmada MIRD, Golem ve Voxelman fantomları kullanarak 100 keV ile 1 MeV enerjili fotonlar yayan kaynak organlar için kaynak ve hedef organın aynı olduğu durumlarda elde edilen SAF değerleri kıyaslanmıştır (Petoussi, 1998). Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'deki grafiklerde bahsedilen modeller ile bu tez çalışmasından elde edilen SAF değerlerinin kıyaslamaları gösterilmiştir.

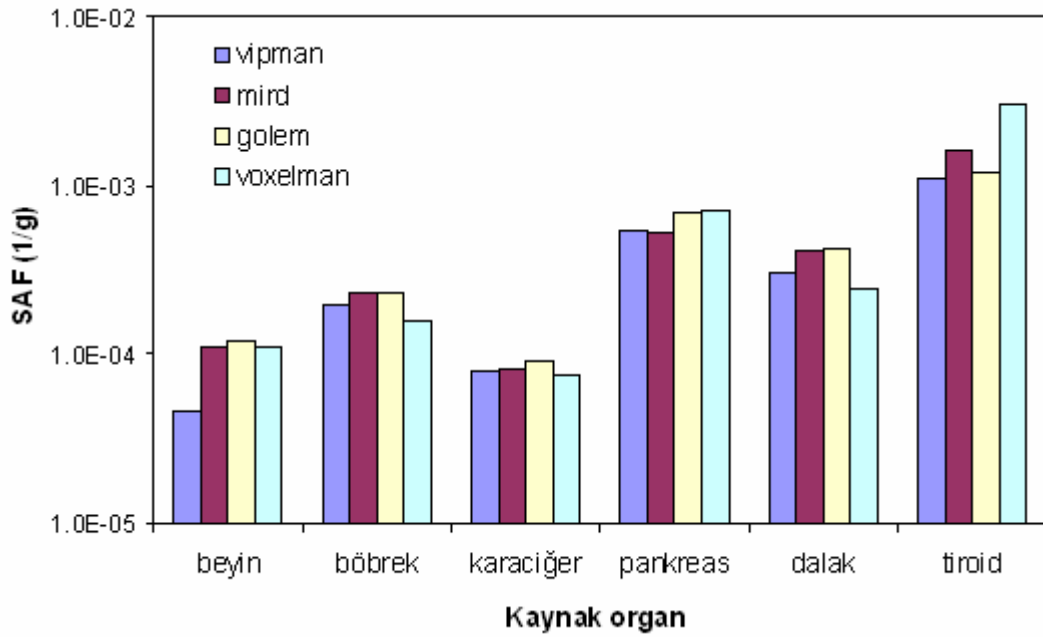
Genel olarak dört model arasında altı farklı kaynak için iyi bir uyum söz konusu iken, kaynak organ beyin iken, beyinin özgül soğurma oranı VIPMAN'de diğerlerine göre daha düşük çıkmıştır. Her iki enerji seviyesi için bu açıkça görülmektedir. Buna sebep olarak yine Çizelge 4.3'teki organ büyüklükleri arasındaki fark ve organ yapıları gösterilebilir (Bozkurt, 2004).

Çizelge 4.3. Referans İnsan ile VIPMAN vücut modellerinde organ kütlelerinin kıyaslanması

Organlar	Kütle (g)	
	VIPMAN	Referans İnsan
Adrenal	8.0	14.0
Mesane	40.5	45.0
Kemik	9 227.8	10 000.0
Beyin	1 247.4	1 429.0
Göğüs	33.6 (erkek)	26.0 (erkek)
Kalp	401.8	330.0
Böbrekler	338.0	310.0
Karaciğer	1 935.5	1 800.0
Alt Kalın Bağırsak	373.6	295.0
Akciğer	910.4	1 000.0
Pankreas	82.8	100.0
Deri	2 296.2	2 600.0
İnce Bağırsak	1 236.2	1 040.0
Dalak	239.9	180.0
Mide	154.9	150.0
Testisler	21.4 (1 adet)	35.0 (2 adet)
Timus	11.5	20.0
Tiroit	27.5	20.0
Üst Kalın Bağırsak	620.7	295.0
Tüm Vücut	103 202.3	70 000.0



Şekil 4.12. Dört farklı vücut modeli için, 100 keV enerjili fotonlar yayan altı farklı kaynak organ için kaynak-hedef organ ilişkisine göre SAF değerlerinin kıyaslanması



Şekil 4.13. Dört farklı vücut modeli için, 1 MeV enerjili fotonlar yayan altı farklı kaynak organ için kaynak-hedef organ ilişkisine göre SAF değerlerinin kıyaslanması

4.6. Radyofarmasötikler

Bu çalışmada, nükleer tıp prosedürlerinden olan sekiz farklı sintigrafi uygulamalarında kullanılan radyofarmasötikler için simülasyonlar yapılmıştır. Beyin, böbrek, karaciğer, dalak ve kırmızı kemik iliği sintigrafileri için Tc-99m (140 keV-gama), kalp sintigrafisi için Tl-201 (167 keV-gama), pankreas sintigrafisi için Se-75 (265 keV-gama) ve tiroit sintigrafisi için I-123 (159 keV-gama) kullanılmıştır. MCNP'ye uyarlanan her bir sintigrafide model olarak, sintigrafisi yapılacak olan organ kaynak organ, diğer organlar (hedef organlar) ise dedektör olarak seçilmiştir ve aynı monoenerjik kaynaklarda olduğu gibi 100 000 parçacık için simülasyonlar yapılmıştır.

MCNP ile yapılan simülasyonlar sonucunda MeV/g cinsinden elde edilen foton başına birim kütleye düşen enerji miktarları, daha önce Bölüm 3'te bahsedilen (Denklem 3.9) S-değerleridir. Her bir hedef organ için elde edilen S-değerleri kaynak organdan yayılan enerjiye bölündüğünde 1/g cinsinden SAF değerleri elde edilir.

Çizelge 4.4. Nükleer tıp prosedürlerinden 8 farklı sintigrafi çeşidi için hesaplanan S-değerleri (MeV/g) (KKİ: kırmızı kemik iliği)

Hedef Organlar	Sintigrafi Çeşidi							
	Beyin	Tiroit	Karaciğer	Böbrek	Pankreas	Dalak	Kalp	KKİ
Adrenal	9.136E-09	1.910E-07	5.216E-06	9.265E-06	9.265E-06	4.129E-06	1.530E-06	1.799E-06
Beyin	5.883E-06	1.520E-07	5.397E-09	1.704E-09	1.704E-09	5.272E-09	1.981E-08	1.512E-07
Göğüs	2.360E-08	2.458E-07	8.294E-07	1.801E-07	1.801E-07	3.003E-07	1.810E-06	2.777E-07
Safra Kesesi	9.578E-09	2.057E-07	8.981E-06	2.282E-06	2.282E-06	6.421E-07	1.424E-06	6.872E-07
Alt Kalın Bağırsak	4.590E-09	8.097E-08	4.811E-07	3.174E-06	3.174E-06	4.349E-06	7.122E-07	1.131E-06
İnce Bağırsak	3.602E-09	6.488E-08	9.870E-07	2.796E-06	2.796E-06	1.488E-06	7.030E-07	9.129E-07
Mide	1.715E-08	3.431E-07	3.289E-06	1.944E-06	1.944E-06	4.788E-06	5.322E-06	8.304E-07
Üst Kalın Bağırsak	6.186E-09	1.189E-07	3.164E-06	3.135E-06	3.135E-06	1.018E-06	1.109E-06	6.930E-07
Kalp	4.557E-08	1.360E-06	2.449E-06	6.384E-07	6.384E-07	1.378E-06	2.882E-05	1.000E-06
Böbrekler	5.573E-09	1.054E-07	2.479E-06	2.840E-05	2.840E-05	5.127E-06	7.437E-07	1.149E-06
Karaciğer	1.661E-08	3.662E-07	1.252E-05	2.470E-06	2.470E-06	8.782E-07	2.820E-06	9.191E-07
Akciğerler	6.910E-08	2.144E-06	1.940E-06	5.427E-07	5.427E-07	1.619E-06	5.181E-06	1.263E-06
Kas	9.250E-08	4.682E-07	3.579E-07	4.645E-07	4.645E-07	4.224E-07	3.912E-07	5.412E-07
Pankreas	9.840E-09	1.933E-07	3.693E-06	4.861E-06	4.861E-06	4.056E-06	2.173E-06	1.156E-06
Kırmızı Kemik İliği	3.618E-07	8.938E-07	8.276E-07	1.020E-06	1.020E-06	8.648E-07	1.083E-06	4.169E-06
Kemik	7.543E-07	7.883E-08	1.076E-08	9.397E-09	9.397E-09	1.136E-08	1.815E-08	6.715E-08
Deri	1.382E-07	1.920E-07	1.607E-07	1.719E-07	1.719E-07	1.935E-07	1.664E-07	1.649E-07
Dalak	1.552E-08	2.899E-07	8.738E-07	5.121E-06	5.121E-06	4.406E-05	1.570E-06	9.538E-07
Testis	2.025E-10	8.005E-10	9.540E-09	2.741E-08	2.741E-08	7.711E-09	3.787E-09	2.716E-07
Timus	7.581E-08	4.216E-06	1.082E-06	2.209E-07	2.209E-07	4.690E-07	1.204E-05	1.503E-06
Tiroit	3.659E-07	1.759E-04	3.301E-07	9.057E-08	9.057E-08	2.632E-07	1.452E-06	8.758E-07
Mesane	2.524E-10	2.692E-09	5.783E-08	1.809E-07	1.809E-07	4.457E-08	2.051E-08	1.802E-06

Aynı şekilde simülasyonlar sonucunda elde edilen S-değerleri 1.6×10^{-10} çarpanı ile çarpılarak soğurulan doz birimi Gy'e dönüştürülmüş olur. Daha sonrada her sintigrafi çeşidi için vücudun aldığı toplan etkin doz değerleri hesaplanabilir. Bazı organ için elde edilen S-değerleri Çizelge 4.4'te sunulmuştur.

4.6.1. S-Değerleri

Çizelge 4.5'te VIPMAN tüm vücut modeli kullanılarak elde edilen S-değerlerinin literatürde bulunan Richard Toohey ve arkadaşlarının hesapladığı referans insan modelinden alınan S-değerleriyle kıyaslanması karaciğer ve böbrek sintigrafileri için verilmiştir (Toohey, 2000).

Çizelge 4.5. Karaciğer ve böbrek sintigrafisi için elde edilen S değerlerinin (rad/microCi-sa) VIPMAN ve Referans İnsan için kıyaslanması (Toohey, 2000)

Hedef Organlar	Sintigrafi Çeşidi			
	Karaciğer		Böbrek	
	VIPMAN	R.İNSAN	VIPMAN	R.İNSAN
Adrenal	2.45E-06	4.50E-06	4.35E-06	1.10E-05
Mesane	4.21E-06	1.60E-07	1.07E-06	2.80E-07
Kemik (toplam)	5.05E-09	1.10E-06	4.41E-09	1.40E-06
Mide	1.54E-06	1.90E-06	9.12E-07	3.60E-06
İnce Bağırsak	4.63E-07	1.60E-06	1.31E-06	2.90E-06
Üst Kalın Bağırsak	1.48E-06	2.50E-06	1.47E-06	2.90E-06
Alt Kalın Bağırsak	2.26E-07	2.30E-07	1.49E-06	7.20E-07
Böbrekler	1.16E-06	3.90E-06	1.33E-05	1.90E-04
Karaciğer	5.87E-06	4.60E-05	1.16E-06	3.90E-06
Akciğerler	9.10E-07	2.50E-06	2.55E-07	8.50E-07
Kırmızı Kemik İliği	3.88E-07	1.60E-06	4.78E-07	3.80E-06
Kas	1.68E-07	1.10E-06	2.18E-07	1.30E-06
Yumurtalık	-	4.50E-07	-	1.10E-06
Pankreas	1.73E-06	4.20E-06	2.28E-06	6.60E-06
Deri	7.53E-08	4.90E-07	8.06E-08	5.30E-07
Dalak	4.10E-07	9.20E-07	2.40E-06	8.60E-06
Testis	4.47E-09	6.20E-08	1.29E-08	8.80E-08
Tiroit	1.55E-07	1.50E-07	4.25E-08	4.80E-08
Rahim	-	3.90E-07	-	9.40E-07
Tüm Vücut	-	2.20E-06	-	2.20E-06

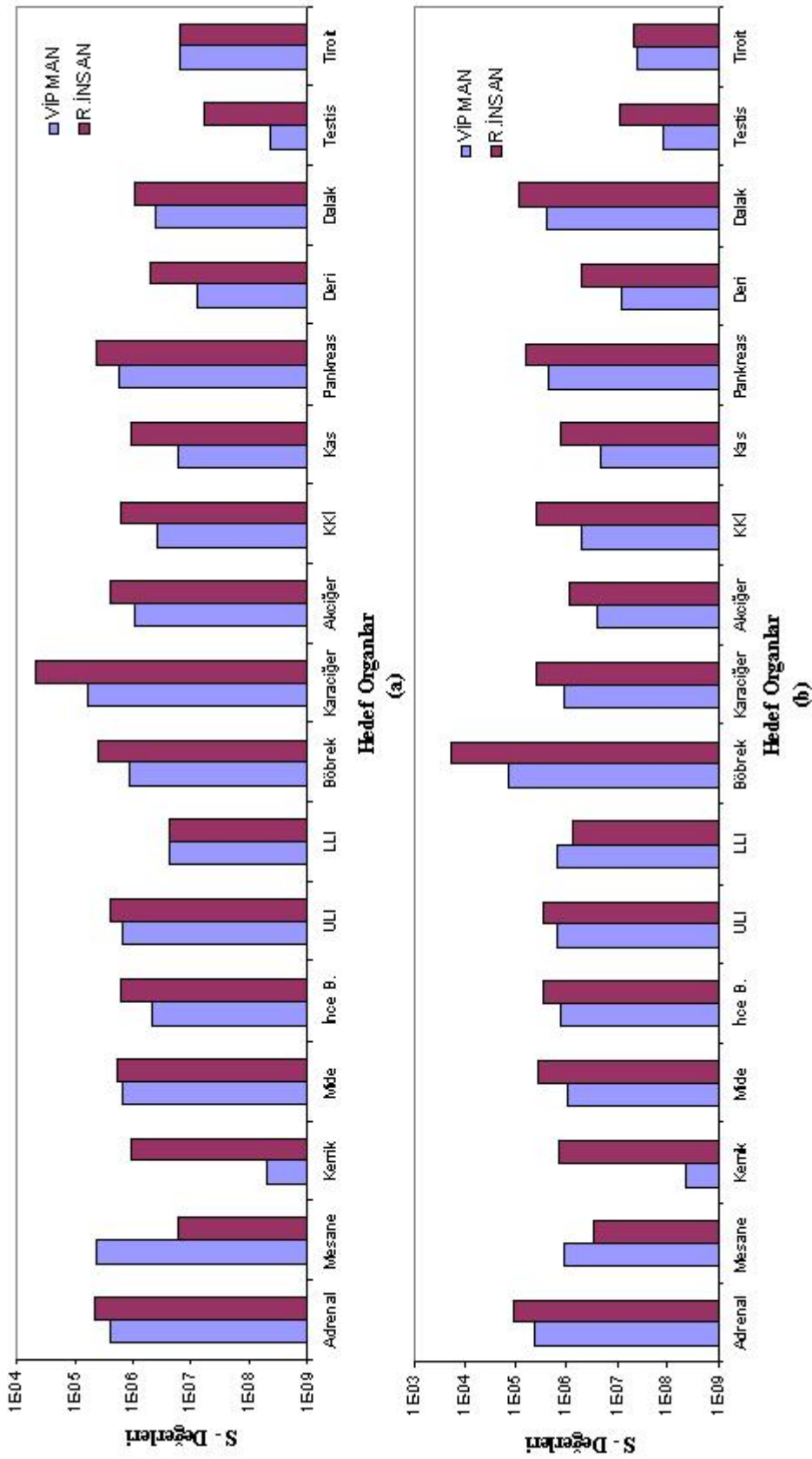
Şekil 4.14'deki grafiklerden de görülebileceği gibi genel olarak S-değerlerinin kıyaslanmasında iyi bir uyum gözlenirken, her iki sintigrafi çeşidinde de kemik dokusu için S-değerlerinde gözle görülür bir fark vardır. Her iki vücut modelindeki organ veya dokulardaki hacimsel ve geometrik yapı farklılıklarının yanı sıra kütleli ağırlıkları arasındaki farklılıklar da buna neden olarak gösterilebilir. Bunun yanı sıra özel bir durum olarak testis dokusu için s-değerleri arasında yarı yarıya bir fark görülüyor. Bu farkın nedeni ise daha önceden de bahsedildiği gibi VIPMAN vücut modelinde sadece bir adet testisin bulunması gösterilebilir.

4.6.2 Radyofarmasötikler ve etkin doz

Beyin, tiroit, karaciğer, böbrek, pankreas, dalak, kalp ve kırmızı kemik iliği sintigrafilerinden elde edilen S-değerlerinin soğurulan doz birimi olan Gy'e dönüştürülmesiyle, bu sintigrafiler için söz konusu olan etkin doz değerleri Bölüm 4.4'te bahsedilen yöntem kullanılarak hesaplanmıştır (Çizelge 4.6). Bu verilerin kendi içerisinde kıyaslanması için çizilen grafik Şekil 4.15'te verilmiştir.

Şekil 4.15'te, pankreas sintigrafisinde vücudun aldığı etkin doz değerinin, diğer sintigrafilerden yüksek olduğu görülmektedir. Bunun nedeni kullanılan radyofarmasötiklerin yaydığı gamaların enerjileridir. Çünkü pankreas sintigrafisi için kullanılabilen tek radyofarmasötik olan Se-75'in yaydığı gamaların enerjisi (265 keV), diğer sintigrafi çeşitleri için kullanılan radyofarmasötiklerin yaydığı gamaların enerjilerinin yaklaşık iki katıdır.

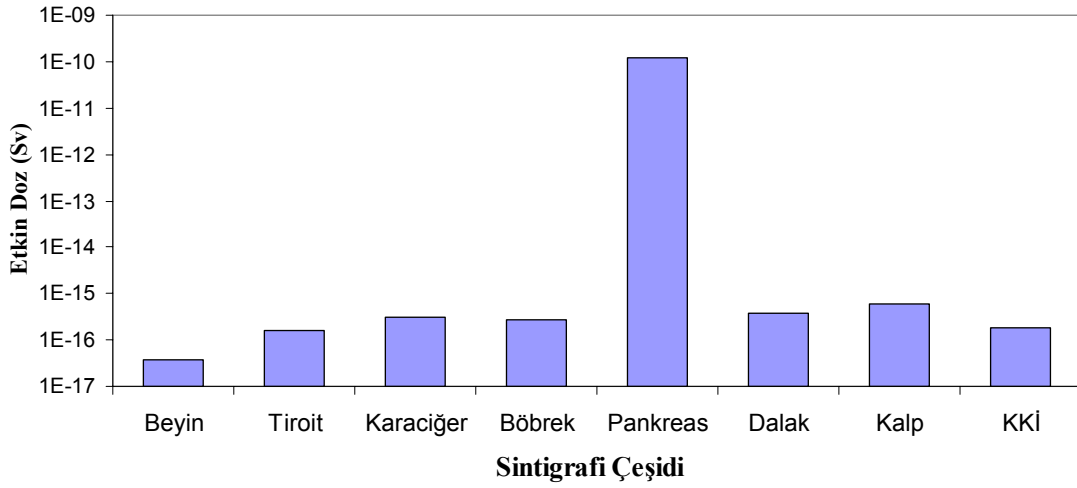
140 keV enerjiye sahip gamalar yayan Tc-99m'nin kullanıldığı karaciğer, böbrek, kalp ve kırmızı kemik iliği sintigrafileri için vücudun aldığı etkin doz değerleri birbirlerine çok yakındır. Fakat gerek vücudun en üst tarafında bulunması gerekse de etkin doza katkısı bakımından önemli organlara uzaklığı düşünüldüğünde, beyin sintigrafisi sonucu vücudun aldığı etkin doz değerinin düşüklüğü normaldir.



Şekil 4.14. (a) Karaciğer (b) böbrek sintigrafisi S değerlerinin (rad/microCi-sa) VIPMAN ve referans insan için kıyaslanması (KKI: Kırmızı Kemik İliği, ULI: Üst Kalın Bağırsak, LLI: Alt Kalın Bağırsak)

Çizelge 4.6. Sekiz farklı sintigrafi çeşidi için vücudun aldığı etkin doz değerleri

Sintigrafi Çeşidi	Radyofarmasötik	Gama Enerjisi	Etkin Doz (Sv)
Beyin	Tc-99m	140 keV	3.641E-17
Tiroit	I-123	159 keV	1.590E-16
Karaciğer	Tc-99m	140 keV	3.063E-16
Böbrek	Tc-99m	140 keV	2.651E-16
Pankreas	Se-75	265 keV	1.222E-10
Dalak	Tc-99m	140 keV	3.816E-16
Kalp	Tl-201	167 keV	5.955E-16
Kırmızı Kemik İliği	Tc-99m	140 keV	1.798E-16



Şekil 4.15. Sekiz farklı sintigrafi çeşidi için vücudun aldığı etkin doz değerlerinin kıyaslanması

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışmada nükleer tıp prosedürlerinden olan beyin, tiroit, karaciğer, böbrek, dalak, pankreas, kalp ve kırmızı kemik iliği sintigrafileri esnasında vücuda verilen radyofarmasötiklerin diğer organlarda bıraktıkları dozlar tespit edilerek, her bir sintigrafi sonucunda vücudun aldığı etkin doz değerleri bulunmuştur. Ayrıca organların özgül soğurma oranları (SAF) ve aktiviteyle ilgili olarak S-değerleri hesaplanmıştır. Bu çalışmada gerçek bir insan anatomisine dayanan VIPMAN vücut modeli kullanılmıştır. Sintigrafi prosedürleri bir radyasyon taşıma programı olan ve MCNP adı verilen program ile simüle edilmiştir.

Yapılan çalışmada simülasyonlar iki farklı şekilde düşünülerek yapılmıştır. İlk olarak, sintigrafisi simüle edilecek sekiz organ birer monoenerjik foton kaynağı olarak düşünülerek MCNP'ye tanıtılmıştır. Bu kaynaklardan 0.01, 0.015, 0.02, 0.03, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 ve 4.0 MeV enerjiye sahip fotonlar izotropik olarak vücuda yayılmaktadır. Yapılan 96 simülasyon sonucunda elde edilen verilerle etkin doz değerleri ile SAF değerleri hesaplanmıştır.

İkinci olarak, nükleer tıpta sintigrafiler için vücuda verilen radyoaktif kaynaklar göz önüne alınarak simülasyonlar yapılmıştır. Yani beyin, böbrek, karaciğer, dalak ve kırmızı kemik iliği sintigrafileri için bu organlar Tc-99m kaynağı, kalp sintigrafisi için bu organ Tl-201 kaynağı, pankreas sintigrafisi için bu organ Se-75 kaynağı ve tiroit sintigrafisi için ise tiroit bir I-123 kaynağı olarak ele alındı. Yapılan simülasyonlar sonucunda her bir sintigrafi çeşidi için vücudun etkin doz değerleri ile organların SAF değerleri hesaplanmıştır. Ayrıca aktiviteyle ilgili olarak her sintigrafi çeşidi için S-değerleri hesaplanmıştır.

Hesaplanan bu değerler literatürde farklı vücut modeli ve farklı programlarla elde edilen verilerle kıyaslanmıştır. Bu kıyaslamalar sonucunda, genelde

sonuçlarımız literatürle çok iyi bir uyum göstermekle beraber, bazı noktalarda farklılıklar da ortaya çıkmıştır. Bu farklılıklar kullanılan vücut modellerinde ki organ büyüklükleri ile organ ağırlıkları arasındaki farklardan kaynaklanmış olabileceği sonucuna varılmıştır.

İleriki çalışmalar için daha farklı sintigrafi çeşitleri için aynı işlemler yapılabilir ve elde edilen değerlerin kullanılabilirliği açısından yapılan simülasyon sayısı da arttırılabilir. Bunun yanı sıra nükleer tıpta tanı ve tedavi için yapılan sintigrafiler için farklı radyofarmasötikler kullanılarak yapılabilecek simülasyonlar ileriki çalışmalar açısından değerlendirilmesi gereken bir konu olabilir.

Bu çalışmada sadece fotonlar göz önüne alınarak simülasyonlar yapılmış olup, sonuçlar fotonlara bağlı olarak değerlendirilmiştir. Yine, ileriki çalışmalarda fotonlarla beraber elektronlar ve nötronlarda düşünülerek yapılacak simülasyonlarla, bu sintigrafiler sırasında vücudun soğuracağı radyasyon dozu bakımından daha verimli sonuçlar alınmış olur.

KAYNAKLAR

- ANDREO, P., 1991. Monte Carlo Techniques in Medical Radiation Physics. *Phys. Med. Biol.*, 36(7):861-920.
- BOZKURT, A., 2000. Assessment of Organ Doses From Exposure to Neutrons Using The Monte Carlo Technique and an Image-Based Anatomical Model. PhD Thesis, Rensselaer Polytechnic Institute Troy, New York, 154s.
- BOZKURT, A. and XU, X.G., 2004. Fluence-to-Dose Conversion Coefficients for Monoenergetic Proton Beams Based on The VIP-MAN Anatomical Model. *Radiation Protection Dosimetry*, 112(2):219–235.
- BRIESMEISTER, J.F., 1997. MCNP-A General Monte Carlo N-particle Transport Code, Version 4B. Los Alamos, NM:Los Alamos National Laboratory; Report LA-12625-M.
- CHAO, T.C. and XU, X.G., 2001. Specific Absorbed Fractions from the Image-Based VIP-MAN Body Model and EGS4-VLSI Monte Carlo Code: Internal Electron Emitters. *Phys. Med. Biol.* 46:901–927.
- CHAO, T.C. and XU, X.G., 2004. S-Values Calculated from a Tomographic Head/Brain Model for Brain Imaging. *Phys. Med. Biol.*, 49:4971–4984.
- CLARIAND, I., BOUCHET, L.G., RICARD, M., DURIGON, M., DI PAOLA, M. and AUBERT, B., 2000. Improvement of Internal Dose Calculations Using Mathematical Models of Different Adult Heights. *Phys. Med. Biol.* 45:2771–2785.
- ER, N., 2003. Göğüs Röntgenogramlarında Hasta Dozunun Monte Carlo Yöntemi İle Belirlenmesi. Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Şanlıurfa, 46s.
- ANONİM, 1991. International Commission on Radiological Protection. 1990 recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Oxford, UK:Pergamon Pres; ICRP Publication 60.
- JONES, D.G., 1998. A Realistic Anthropomorphic Phantom for Calculating Specific Absorbed Fractions of Energy Deposited from Internal Gamma Emitters. *Radiation Protection Dosimetry*, 79:411-414.
- KRAMER, R., VIEIRA, J.W., KHOURY, H.J. and LIMA, A., 2004. MAX Meets ADAM: A Dosimetric Comparison Between a Voxel-Based and a Mathematical Model for External Exposure to Photons. *Phys. Med. Biol.* 49:887–910.
- PETOUSSI, N. and ZANKL, M., 1998. Voxel Anthropomorphic Models as a Tool for Internal Dosimetry. *Radiation Protection Dosimetry*, 79(1-4):415-418.
- PETOUSSI, N., ZANKL, M. and NOSSKE, D., 2005. Estimation of Patient Dose from Radiopharmaceuticals Using Voxel Models. *Cancer Biotherapy & Radiopharmaceuticals*, 20(1):103-109.
- SHI, C., 2004. Development and Application of a Tomographic Model From CT Images for Calculating Internal Dose to a Pregnant Woman. PhD Thesis, Rensselaer Polytechnic Institute Troy, New York, 133s.
- SMITH, T., 1984. Internal Exposure of Patients and Staff in Diagnostic Nuclear Medicine Procedures. *J. Soc. Radiol. Prot.*, 4(2):45-57.

- SMITH, T., PETOUSSI, N. and ZANKL, M., 2000. Comparison of Internal Radiation Doses Estimated by MIRD and Voxel Techniques for a “Family” of Phantoms. *Eur. J. Nucl. Med.*, 27:1387-1398.
- STABIN, M., 2006. <http://www.doseinfo-radar.com/SAFAdfm.xls>
- STABIN, M., 2006. Nuclear Medicine Dosimetry. *Phys. Med. Biol.* 51:R187–R202.
- TOOHEY, R.E., STABIN, M.G. and WATSON, E.E., 2000. Internal Radiation Dosimetry: Principles and Applications. The AAPM/RSNA Physics Tutorial for Residents, 20:533-546.
- YORIYAZ, H., STABIN, M.G. and DOSSANTOS, A., 2000. Monte Carlo MCNP-4B-Based Absorbed Dose Distribution Estimates for Patient-Specific Dosimetry. *J. Nucl Med.*, 42:662–669.
- XU, X.G. and CHAO, T.C., 2003. Calculations of Specific Absorbed Fractions of the Gastrointestinal Tract Using a Realistic Whole Body Tomographic Model. *Cancer Biotherapy & Radiopharmaceuticals*, 18(3):431-436.
- XU, X.G., CHAO, T.C. and BOZKURT, A., 2000. VIP-MAN: An Image-Based Whole-Body Adult Male Model Constructed from Color Photographs of the Visible Human Project for Multi-Particle Monte Carlo Calculations. *Health Phys.*, 78(5):476–486.

ÖZGEÇMİŞ

1981 yılında Adıyaman’da doğdu. İlköğretimini Mersin’de, ortaöğretimini Şanlıurfa’da ve lise eğitimini Mersin’de tamamladı. 1999 yılında Harran Üniversitesi Fen Edebiyat Fizik Bölümünü kazanarak 2003 yılında lisans eğitimini tamamladı. Eylül 2003’te Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalında halen devam etmekte olduğu yüksek lisans yapma hakkını kazanarak, 2003 Aralık’ta ise enstitü araştırma görevlisi olarak çalışmaya başladı. 2005 aralık ayından beri Harran Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Genel Fizik Anabilim Dalında araştırma görevlisi olarak halen çalışmaktadır.

EK 1. Organ Doz Değerleri

Ek 1.1.a. Kaynak beyin olduğunda bazı organlar için MCNP'den alınan doz (Gy) ve standart hata (%) değerleri

Enerjiler (MeV)	0.01		0.015		0.02		0.03		0.05		0.1	
Hedef Organlar	Doz (Gy)	%	Doz (Gy)	%	Doz (Gy)	%	Doz (Gy)	%	Doz (Gy)	%	Doz (Gy)	%
Adrenal	-	-	-	-	-	-	-	-	5.459E-20	9.1	8.146E-19	2.29
Beyin	5.308E-16	0.01	7.191E-16	0.01	8.256E-16	0.01	8.144E-16	0.01	6.637E-16	0.01	7.976E-16	0.01
Göğüs	-	-	-	-	-	-	4.08E-20	9.18	3.883E-19	2.13	2.022E-18	0.98
Safra Kesesi	-	-	-	-	-	-	-	-	6.895E-20	7.78	8.18E-19	2.06
Alt Kalın Bağırsak	-	-	-	-	-	-	-	-	4.11E-20	3.71	3.972E-19	1.16
İnce Bağırsak	-	-	-	-	-	-	6.364E-22	19.0	3.076E-20	2.94	3.051E-19	0.92
Mide	-	-	-	-	-	-	2.102E-21	17.98	1.859E-19	1.84	1.534E-18	0.62
Üst Kalın Bağırsak	-	-	-	-	-	-	-	-	5.678E-20	2.61	5.312E-19	0.83
Kalp	-	-	-	-	-	-	1.192E-20	7.96	6.747E-19	0.95	4.391E-18	0.35
Böbrekler	-	-	-	-	-	-	-	-	3.9E-20	4.39	4.613E-19	1.2
Karaciğer	-	-	-	-	-	-	1.82E-21	12.08	1.661E-19	1.29	1.463E-18	0.43
Akciğerler	-	-	-	-	-	-	3.409E-20	2.86	1.236E-18	0.39	6.706E-18	0.16
Kas	9.29E-21	0.79	6.596E-20	0.3	2.659E-19	0.15	1.603E-18	0.06	4.872E-18	0.03	1.031E-17	0.02
Pankreas	-	-	-	-	-	-	-	-	7.736E-20	4.98	8.217E-19	1.4
Kırmızı Kemik İliği	1.276E-18	0.35	4.159E-18	0.15	7.728E-18	0.09	1.51E-17	0.04	2.272E-17	0.03	4.027E-17	0.02
Kemik	2.896E-19	0.1	1.77E-18	0.05	5.315E-18	0.03	1.583E-17	0.02	2.423E-17	0.02	2.147E-17	0.02
Deri	4.891E-22	13.26	2.635E-20	1.39	2.286E-19	0.37	2.313E-18	0.08	7.156E-18	0.03	1.494E-17	0.02
Dalak	-	-	-	-	-	-	-	-	1.624E-19	2.68	1.321E-18	0.88
Testis	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.612E-20	14.02
Timus	-	-	-	-	-	-	-	-	1.07E-18	2.57	7.257E-18	0.91
Tiroit	-	-	-	-	-	-	5.242E-19	3.5	1.063E-17	0.64	3.987E-17	0.3
Mesane	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.753E-20	10.83

Ek 1.1.b. Kaynak bevin olduğunda bazı organlar için MCNP'den alınan doz (Gy) ve standart hata (%) değerleri

Enerjiler (MeV)	0.2		0.5		1.0		1.5		2.0		4.0	
Hedef Organlar	Doz (Gy)	%	Doz (Gy)	%	Doz (Gy)	%	Doz (Gy)	%	Doz (Gy)	%	Doz (Gy)	%
Adrenal	2.817E-18	1.38	1.204E-17	1.07	3.482E-17	0.92	6.016E-17	0.84	8.652E-17	0.79	1.85E-16	0.71
Beyin	1.568E-15	0.01	3.965E-15	0.01	7.324E-15	0.01	1.005E-14	0.01	1.24E-14	0.01	1.999E-14	0.01
Göğüs	6.732E-18	0.78	2.854E-17	0.65	7.483E-17	0.57	1.239E-16	0.53	1.724E-16	0.5	3.448E-16	0.46
Safra Kesesi	2.775E-18	1.28	1.209E-17	1.02	3.452E-17	0.88	6.02E-17	0.81	8.72E-17	0.76	1.898E-16	0.69
Alt Kalın Bağırsak	1.313E-18	0.76	6.033E-18	0.61	1.804E-17	0.53	3.264E-17	0.48	4.808E-17	0.44	1.092E-16	0.39
İnce Bağırsak	1.044E-18	0.58	4.845E-18	0.45	1.511E-17	0.37	2.819E-17	0.34	4.23E-17	0.31	1.006E-16	0.27
Mide	4.749E-18	0.4	1.826E-17	0.32	4.792E-17	0.28	8.101E-17	0.26	1.143E-16	0.24	2.388E-16	0.22
Üst Kalın Bağırsak	1.776E-18	0.52	7.981E-18	0.4	2.39E-17	0.34	4.297E-17	0.31	6.309E-17	0.29	1.42E-16	0.26
Kalp	1.179E-17	0.25	3.992E-17	0.22	9.696E-17	0.21	1.574E-16	0.2	2.163E-16	0.19	4.301E-16	0.17
Böbrekler	1.677E-18	0.71	7.921E-18	0.53	2.4E-17	0.44	4.321E-17	0.4	6.371E-17	0.37	1.423E-16	0.33
Karaciğer	4.62E-18	0.29	1.81E-17	0.23	4.84E-17	0.2	8.174E-17	0.18	1.152E-16	0.17	2.39E-16	0.16
Akciğerler	1.792E-17	0.12	6.035E-17	0.11	1.412E-16	0.1	2.222E-16	0.1	2.999E-16	0.09	5.721E-16	0.09
Kas	2.202E-17	0.02	6.022E-17	0.02	1.218E-16	0.03	1.782E-16	0.03	2.3E-16	0.03	4.098E-16	0.03
Pankreas	2.742E-18	0.85	1.102E-17	0.67	3.009E-17	0.59	5.262E-17	0.55	7.578E-17	0.52	1.684E-16	0.47
Kırmızı Kemik İliği	8.617E-17	0.02	2.263E-16	0.02	4.339E-16	0.02	6.125E-16	0.03	7.709E-16	0.03	1.302E-15	0.03
Kemik	2.316E-17	0.02	4.434E-17	0.02	8.16E-17	0.02	1.153E-16	0.02	1.462E-16	0.02	2.586E-16	0.03
Deri	3.385E-17	0.02	9.489E-17	0.02	1.887E-16	0.02	2.708E-16	0.02	3.443E-16	0.02	5.913E-16	0.02
Dalak	4.366E-18	0.58	1.83E-17	0.48	4.985E-17	0.42	8.401E-17	0.39	1.182E-16	0.37	2.395E-16	0.34
Testis	4.099E-20	11.41	1.67E-19	11.03	8.916E-19	6.72	2.33E-18	5.32	4.782E-18	4.25	1.725E-17	2.95
Timus	2.009E-17	0.72	6.866E-17	0.71	1.638E-16	0.69	2.616E-16	0.66	3.528E-16	0.65	6.817E-16	0.61
Tiroit	8.706E-17	0.25	2.451E-16	0.25	5.108E-16	0.26	7.6E-16	0.25	9.839E-16	0.25	1.753E-15	0.24
Mesane	7.092E-20	5.57	4.955E-19	3.27	2.264E-18	2.17	5.259E-18	1.71	9.343E-18	1.45	2.878E-17	1.08

Ek 1.2.a. Kaynak tiroit olduğunda bazı organlar için MCNP'den alınan doz (Gy) ve standart hata (%) değerleri

Enerjiler (MeV)	0.01		0.015		0.02		0.03		0.05		0.1	
Hedef Organlar	Doz (Gy)	%	Doz (Gy)	%	Doz (Gy)	%	Doz (Gy)	%	Doz (Gy)	%	Doz (Gy)	%
Adrenal	-	-	-	-	-	-	2.451E-19	5.75	4.19E-18	1.09	1.76E-17	0.48
Beyin	-	-	-	-	3.432E-22	16.76	1.722E-19	0.79	3.25E-18	0.16	1.347E-17	0.07
Göğüs	-	-	-	-	5.231E-20	9.6	7.874E-19	1.79	6.299E-18	0.47	2.15E-17	0.25
Safra Kesesi	-	-	-	-	-	-	1.913E-19	5.87	4.658E-18	0.94	1.903E-17	0.43
Alt Kalın Bağırsak	-	-	-	-	-	-	1.511E-19	2.29	2.045E-18	0.55	7.608E-18	0.26
İnce Bağırsak	-	-	-	-	-	-	4.671E-20	2.69	1.201E-18	0.48	5.817E-18	0.21
Mide	-	-	-	-	2.51E-20	6.71	1.469E-18	0.74	1.139E-17	0.24	3.419E-17	0.13
Üst Kalın Bağırsak	-	-	-	-	1.821E-21	16.97	1.749E-19	1.58	2.671E-18	0.38	1.102E-17	0.18
Kalp	-	-	2.385E-20	5.9	1.763E-18	0.69	2.536E-17	0.17	7.968E-17	0.08	1.478E-16	0.06
Böbrekler	-	-	-	-	-	-	7.717E-20	3.54	1.98E-18	0.61	9.502E-18	0.26
Karaciğer	-	-	-	-	2.111E-20	3.58	1.601E-18	0.44	1.279E-17	0.15	3.689E-17	0.09
Akciğerler	4.232E-21	8.32	3.567E-18	0.34	2.993E-17	0.11	9.849E-17	0.05	1.508E-16	0.03	2.301E-16	0.02
Kas	2.445E-18	0.05	1.013E-17	0.03	1.888E-17	0.02	2.654E-17	0.01	3.139E-17	0.01	4.836E-17	0.01
Pankreas	-	-	-	-	-	-	2.071E-19	3.62	4.534E-18	0.66	1.852E-17	0.29
Kırmızı Kemik İliği	2.959E-21	8.05	7.249E-19	0.42	5.302E-18	0.13	2.193E-17	0.05	4.588E-17	0.03	8.847E-17	0.02
Kemik	1.135E-21	3.1	3.849E-19	0.27	4.965E-18	0.09	3.097E-17	0.03	6.373E-17	0.03	6.561E-17	0.02
Deri	4.342E-21	4.67	6.647E-19	0.3	3.862E-18	0.1	9.338E-18	0.05	1.175E-17	0.03	1.878E-17	0.02
Dalak	-	-	-	-	1.533E-20	10.49	1.439E-18	1.04	9.961E-18	0.34	2.872E-17	0.19
Testis	-	-	-	-	-	-	-	-	3.451E-20	14.46	6.956E-20	8.94
Timus	-	-	5.191E-19	5.83	1.612E-17	1.05	1.23E-16	0.31	2.651E-16	0.16	4.397E-16	0.12
Tiroit	4.955E-14	0.01	5.235E-14	0.01	4.396E-14	0.01	2.69E-14	0.01	1.669E-14	0.01	1.775E-14	0.01
Mesane	-	-	-	-	-	-	-	-	1.677E-20	11.85	1.658E-19	3.49

Ek 1.2.b. Kaynak tiroit olduğunda bazı organlar için MCNP'den alınan doz (Gy) ve standart hata (%) değerleri

Enerjiler (MeV)	0.2		0.5		1.0		1.5		2.0		4.0	
Hedef Organlar	Doz (Gy)	%	Doz (Gy)	%	Doz (Gy)	%	Doz (Gy)	%	Doz (Gy)	%	Doz (Gy)	%
Adrenal	3.899E-17	0.37	1.007E-16	0.37	2.023E-16	0.37	3.018E-16	0.37	3.935E-16	0.37	7.268E-16	0.35
Beyin	3.239E-17	0.06	9.654E-17	0.05	2.055E-16	0.05	3.069E-16	0.05	4.002E-16	0.05	7.168E-16	0.05
Göğüs	5.245E-17	0.22	1.639E-16	0.22	3.66E-16	0.21	5.636E-16	0.21	7.499E-16	0.2	1.395E-15	0.19
Safra Kesesi	4.275E-17	0.34	1.166E-16	0.34	2.416E-16	0.34	3.604E-16	0.34	4.695E-16	0.34	8.45E-16	0.33
Alt Kalın Bağırsak	1.65E-17	0.21	4.483E-17	0.22	9.546E-17	0.22	1.457E-16	0.22	1.942E-16	0.22	3.712E-16	0.21
İnce Bağırsak	1.345E-17	0.16	3.826E-17	0.15	8.587E-17	0.15	1.359E-16	0.15	1.854E-16	0.15	3.678E-16	0.14
Mide	6.864E-17	0.11	1.702E-16	0.11	3.356E-16	0.11	4.901E-16	0.11	6.337E-16	0.1	1.131E-15	0.1
Üst Kalın Bağırsak	2.452E-17	0.14	6.879E-17	0.14	1.488E-16	0.14	2.286E-16	0.14	3.044E-16	0.14	5.733E-16	0.13
Kalp	2.683E-16	0.06	6.396E-16	0.06	1.205E-15	0.06	1.702E-15	0.06	2.145E-15	0.06	3.636E-15	0.06
Böbrekler	2.174E-17	0.19	5.988E-17	0.19	1.271E-16	0.19	1.942E-16	0.18	2.592E-16	0.18	4.912E-16	0.17
Karaciğer	7.323E-17	0.07	1.806E-16	0.07	3.508E-16	0.07	5.061E-16	0.07	6.483E-16	0.07	1.135E-15	0.07
Akciğerler	4.268E-16	0.02	1.009E-15	0.02	1.829E-15	0.03	2.508E-15	0.03	3.1E-15	0.03	5.044E-15	0.03
Kas	9.49E-17	0.01	2.402E-16	0.01	4.567E-16	0.01	6.428E-16	0.01	8.08E-16	0.01	1.36E-15	0.01
Pankreas	3.889E-17	0.23	9.744E-17	0.23	1.978E-16	0.24	2.976E-16	0.24	3.923E-16	0.24	7.323E-16	0.23
Kırmızı Kemik İliği	1.824E-16	0.02	4.58E-16	0.02	8.59E-16	0.02	1.201E-15	0.02	1.503E-15	0.02	2.51E-15	0.02
Kemik	6.747E-17	0.02	1.128E-16	0.02	1.955E-16	0.02	2.699E-16	0.02	3.378E-16	0.02	5.824E-16	0.03
Deri	3.994E-17	0.02	1.107E-16	0.02	2.231E-16	0.02	3.235E-16	0.02	4.144E-16	0.02	7.225E-16	0.02
Dalak	5.821E-17	0.16	1.463E-16	0.16	2.827E-16	0.16	4.05E-16	0.16	5.173E-16	0.16	8.952E-16	0.16
Testis	1.615E-19	6.09	9.044E-19	4.39	3.796E-18	3.38	8.584E-18	2.77	1.508E-17	2.39	4.372E-17	1.88
Timus	8.483E-16	0.13	2.095E-15	0.14	3.908E-15	0.15	5.441E-15	0.15	6.797E-15	0.15	1.123E-14	0.16
Tiroit	3.652E-14	0.01	9.654E-14	0.01	1.798E-13	0.01	2.464E-13	0.01	3.028E-13	0.01	4.843E-13	0.01
Mesane	6.519E-19	1.87	3.261E-18	1.27	1.093E-17	0.99	2.095E-17	0.86	3.226E-17	0.78	8.275E-17	0.64

Ek 1.3.a. Kaynak karaciğer olduğunda bazı organlar için MCNP'den alınan doz (Gy) ve standart hata (%) değerleri

Enerjiler (MeV)	0.01		0.015		0.02		0.03		0.05		0.1	
Hedef Organlar	Doz (Gy)	%	Doz (Gy)	%	Doz (Gy)	%	Doz (Gy)	%	Doz (Gy)	%	Doz (Gy)	%
Adrenal	2.806E-17	0.98	1.064E-16	0.45	1.939E-16	0.28	3.296E-16	0.16	4.386E-16	0.1	6.339E-16	0.08
Beyin	-	-	-	-	-	-	4.584E-22	17.47	5.038E-20	1.32	4.71E-19	0.41
Göğüs	-	-	1.609E-20	19.56	1.017E-18	1.85	1.273E-17	0.39	4.053E-17	0.17	9.073E-17	0.12
Safra Kesesi	5.467E-17	0.56	2.126E-16	0.26	4.169E-16	0.16	7.06E-16	0.09	8.343E-16	0.07	1.096E-15	0.06
Alt Kalın Bağırsak	-	-	4.708E-21	15.75	2.763E-19	1.99	5.33E-18	0.39	2.483E-17	0.15	5.725E-17	0.09
İnce Bağırsak	4.475E-20	2.16	7.481E-19	0.6	4.157E-18	0.27	2.399E-17	0.11	6.709E-17	0.06	1.218E-16	0.04
Mide	9.772E-18	0.4	4.680E-17	0.18	1.015E-16	0.11	1.938E-16	0.07	2.753E-16	0.05	4.024E-16	0.04
Üst Kalın Bağırsak	1.895E-18	0.5	1.740E-17	0.2	5.91E-17	0.11	1.702E-16	0.06	2.781E-16	0.04	3.953E-16	0.03
Kalp	1.676E-18	0.64	1.438E-17	0.23	4.249E-17	0.13	1.161E-16	0.07	2.052E-16	0.05	3.058E-16	0.04
Böbrekler	4.863E-19	1.34	9.100E-18	0.36	3.717E-17	0.18	1.141E-16	0.09	2.016E-16	0.06	3.081E-16	0.04
Karaciğer	8.045E-16	0.01	1.122E-15	0.01	1.325E-15	0.01	1.397E-15	0.01	1.252E-15	0.01	1.514E-15	0.01
Akciğerler	2.025E-18	0.38	1.687E-17	0.14	4.602E-17	0.08	1.027E-16	0.04	1.573E-16	0.03	2.377E-16	0.02
Kas	2.873E-19	0.14	1.406E-18	0.07	3.557E-18	0.04	1.036E-17	0.03	2.319E-17	0.02	4.259E-17	0.01
Pankreas	1.261E-19	5.26	6.017E-18	0.84	3.754E-17	0.32	1.618E-16	0.13	3.129E-16	0.08	4.649E-16	0.06
Kırmızı Kemik İliği	1.494E-19	1.1	1.844E-18	0.26	6.086E-18	0.12	1.964E-17	0.05	4.593E-17	0.03	9.447E-17	0.02
Kemik	6.595E-20	0.63	1.139E-18	0.18	5.729E-18	0.09	2.489E-17	0.04	5.326E-17	0.03	6.26E-17	0.02
Deri	-	-	2.138E-20	1.62	4.133E-19	0.31	3.259E-18	0.08	9.327E-18	0.04	1.844E-17	0.02
Dalak	-	-	-	-	1.505E-19	3.25	6.959E-18	0.44	4.213E-17	0.16	1.037E-16	0.09
Testis	-	-	-	-	-	-	-	-	1.376E-19	7.07	8.573E-19	2.51
Timus	-	-	-	-	1.307E-18	3.82	1.827E-17	0.78	6.584E-17	0.32	1.298E-16	0.21
Tiroit	-	-	-	-	2.907E-20	17.73	1.671E-18	1.94	1.394E-17	0.57	3.855E-17	0.31
Mesane	-	-	-	-	-	-	5.564E-20	7.89	1.107E-18	1.47	5.637E-18	0.59

Ek 1.3.b. Kaynak karaciğer olduğunda bazı organlar için MCNP'den alınan doz (Gy) ve standart hata (%) değerleri

Enerjiler (MeV)	0.2			0.5			1.0			1.5			2.0			4.0		
Hedef Organlar	Doz (Gy)	%		Doz (Gy)	%		Doz (Gy)	%		Doz (Gy)	%		Doz (Gy)	%		Doz (Gy)	%	
Adrenal	1.158E-15	0.08		2.713E-15	0.09		4.914E-15	0.09		6.74E-15	0.1		8.327E-15	0.1		1.357E-14	0.1	
Beyin	1.587E-18	0.27		6.763E-18	0.21		1.878E-17	0.18		3.244E-17	0.16		4.646E-17	0.15		9.871E-17	0.14	
Göğüs	1.994E-16	0.11		5.399E-16	0.11		1.062E-15	0.11		1.518E-15	0.11		1.925E-15	0.11		3.267E-15	0.11	
Safra Kesesi	2.004E-15	0.06		4.768E-15	0.06		8.671E-15	0.07		1.189E-14	0.07		1.467E-14	0.07		2.379E-14	0.07	
Alt Kalın Bağırsak	1.059E-16	0.08		2.492E-16	0.08		4.761E-16	0.09		6.823E-16	0.09		8.7E-16	0.08		1.516E-15	0.08	
İnce Bağırsak	2.13E-16	0.04		4.848E-16	0.04		8.949E-16	0.05		1.254E-15	0.05		1.577E-15	0.05		2.667E-15	0.05	
Mide	7.254E-16	0.04		1.694E-15	0.04		3.084E-15	0.04		4.252E-15	0.04		5.275E-15	0.04		8.659E-15	0.04	
Üst Kalın Bağırsak	6.89E-16	0.03		1.589E-15	0.03		2.887E-15	0.03		3.98E-15	0.03		4.939E-15	0.04		8.106E-15	0.04	
Kalp	5.311E-16	0.04		1.22E-15	0.04		2.227E-15	0.04		3.084E-15	0.04		3.841E-15	0.04		6.351E-15	0.04	
Böbrekler	5.372E-16	0.04		1.224E-15	0.05		2.221E-15	0.05		3.068E-15	0.05		3.816E-15	0.05		6.302E-15	0.05	
Karaciğer	2.837E-15	0.01		6.94E-15	0.01		1.27E-14	0.01		1.74E-14	0.01		2.145E-14	0.01		3.461E-14	0.01	
Akciğerler	4.265E-16	0.02		9.867E-16	0.02		1.788E-15	0.02		2.461E-15	0.02		3.052E-15	0.02		5.009E-15	0.02	
Kas	8.018E-17	0.01		1.957E-16	0.01		3.736E-16	0.01		5.318E-16	0.01		6.751E-16	0.01		1.162E-15	0.01	
Pankreas	7.925E-16	0.06		1.773E-15	0.06		3.188E-15	0.07		4.38E-15	0.07		5.425E-15	0.07		8.998E-15	0.07	
Kırmızı Kemik İliği	1.899E-16	0.02		4.634E-16	0.02		8.637E-16	0.02		1.209E-15	0.03		1.517E-15	0.03		2.551E-15	0.03	
Kemik	6.648E-17	0.02		1.03E-16	0.02		1.725E-16	0.02		2.373E-16	0.02		2.976E-16	0.02		5.184E-16	0.02	
Deri	3.749E-17	0.02		1.013E-16	0.02		2.062E-16	0.02		3.03E-16	0.02		3.919E-16	0.02		6.988E-16	0.02	
Dalak	1.919E-16	0.08		4.437E-16	0.08		8.293E-16	0.09		1.172E-15	0.09		1.483E-15	0.09		2.542E-15	0.09	
Testis	2.728E-18	1.58		1.153E-17	1.31		3.386E-17	1.14		5.967E-17	1.04		8.699E-17	0.98		1.909E-16	0.87	
Timus	2.382E-16	0.2		5.522E-16	0.23		1.022E-15	0.25		1.434E-15	0.26		1.809E-15	0.26		3.065E-15	0.26	
Tiroit	7.349E-17	0.26		1.776E-16	0.28		3.456E-16	0.3		4.979E-16	0.3		6.387E-16	0.3		1.123E-15	0.3	
Mesane	1.47E-17	0.41		4.67E-17	0.36		1.068E-16	0.34		1.682E-16	0.32		2.275E-16	0.31		4.405E-16	0.29	

Ek 1.4.a. Kaynak böbrekler olduğunda bazı organlar için MCNP'den alınan doz (Gy) ve standart hata (%) değerleri

Enerjiler (MeV)		0.01		0.015		0.02		0.03		0.05		0.1		
Hedef Organlar	Doz (Gy)	%	Doz (Gy)	%	Doz (Gy)	%	Doz (Gy)	%	Doz (Gy)	%	Doz (Gy)	%	Doz (Gy)	%
Adrenal	5.700E-17	0.93	3.552E-16	0.31	6.644E-16	0.19	8.706E-16	0.12	8.496E-16	0.1	1.115E-15	0.08		
Beyin	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.163E-20	3.99	1.351E-19	1.09
Göğüs	-	-	-	-	-	-	-	3.675E-19	3.51	4.851E-18	0.76	1.837E-17	0.37	
Safra Kesesi	-	-	3.483E-19	8.38	8.243E-18	1.48	6.883E-17	0.41	1.705E-16	0.21	2.837E-16	0.15		
Alt Kalın Bağırsak	3.099E-18	0.72	3.414E-17	0.25	1.091E-16	0.14	2.375E-16	0.08	2.983E-16	0.06	3.939E-16	0.05		
İnce Bağırsak	3.730E-19	1.14	1.059E-17	0.25	4.721E-17	0.12	1.466E-16	0.06	2.426E-16	0.04	3.508E-16	0.03		
Mide	-	-	4.432E-19	2.27	6.167E-18	0.56	5.002E-17	0.18	1.376E-16	0.09	2.404E-16	0.07		
Üst Kalın Bağırsak	1.822E-18	0.73	2.52E-17	0.23	8.544E-17	0.12	1.986E-16	0.07	2.803E-16	0.05	3.904E-16	0.04		
Kalp	-	-	-	-	2.665E-20	8.62	3.945E-18	0.62	3.04E-17	0.2	7.62E-17	0.12		
Böbrekler	4.360E-15	0.01	5.412E-15	0.01	5.494E-15	0.01	4.333E-15	0.01	2.898E-15	0.01	3.316E-15	0.01		
Karaciğer	4.999E-19	0.79	9.181E-18	0.22	3.743E-17	0.12	1.145E-16	0.07	2.009E-16	0.05	3.069E-16	0.04		
Akciğerler	-	-	7.969E-22	19.0	1.496E-19	1.97	5.056E-18	0.3	2.606E-17	0.11	6.31E-17	0.07		
Kas	1.938E-19	0.27	2.0E-18	0.1	6.955E-18	0.05	1.956E-17	0.03	3.431E-17	0.02	5.604E-17	0.01		
Pankreas	2.764E-19	4.83	1.464E-17	0.74	7.841E-17	0.3	2.664E-16	0.14	4.332E-16	0.09	6.112E-16	0.07		
Kırmızı Kemik İliği	7.503E-21	7.22	5.799E-19	0.69	3.565E-18	0.25	1.857E-17	0.1	5.255E-17	0.05	1.154E-16	0.04		
Kemik	1.458E-21	5.81	2.503E-19	0.52	2.199E-18	0.18	1.355E-17	0.07	3.755E-17	0.04	5.335E-17	0.03		
Deri	-	-	3.04E-21	6.32	2.113E-19	0.61	3.209E-18	0.12	1.022E-17	0.05	1.999E-17	0.03		
Dalak	3.267E-18	0.88	5.194E-17	0.25	1.765E-16	0.14	4.033E-16	0.08	5.034E-16	0.06	6.398E-16	0.05		
Testis	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.007E-19	5.77	2.686E-18	2.05	
Timus	-	-	-	-	-	-	2.182E-19	8.64	6.32E-18	1.44	2.389E-17	0.65		
Tiroit	-	-	-	-	-	-	7.966E-20	12.83	2.061E-18	2.12	9.561E-18	0.88		
Mesane	-	-	-	-	-	-	2.465E-19	5.15	4.452E-18	1.02	1.886E-17	0.45		

Ek 1.4.b. Kaynak böbrekler olduğunda bazı organlar için MCNP'den alınan doz (Gy) ve standart hata (%) değerleri

Enerjiler (MeV)	0.2		0.5		1.0		1.5		2.0		4.0	
Hedef Organlar	Doz (Gy)	%	Doz (Gy)	%	Doz (Gy)	%	Doz (Gy)	%	Doz (Gy)	%	Doz (Gy)	%
Adrenal	2.089E-15	0.08	5.009E-15	0.09	9.101E-15	0.09	1.246E-14	0.09	1.536E-14	0.09	2.483E-14	0.09
Beyin	5.415E-19	0.65	2.823E-18	0.46	9.182E-18	0.36	1.697E-17	0.32	2.556E-17	0.29	5.863E-17	0.25
Göğüs	4.568E-17	0.31	1.415E-16	0.3	3.076E-16	0.29	4.674E-16	0.28	6.154E-16	0.27	1.12E-15	0.26
Safra Kesesi	4.926E-16	0.15	1.103E-15	0.17	1.992E-15	0.18	2.745E-15	0.18	3.415E-15	0.18	5.651E-15	0.19
Alt Kalın Bağırsak	6.973E-16	0.05	1.623E-15	0.05	2.949E-15	0.05	4.062E-15	0.05	5.034E-15	0.05	8.237E-15	0.05
İnce Bağırsak	6.037E-16	0.03	1.367E-15	0.03	2.471E-15	0.04	3.405E-15	0.04	4.226E-15	0.04	6.956E-15	0.04
Mide	4.191E-16	0.06	9.424E-16	0.07	1.709E-15	0.07	2.368E-15	0.07	2.955E-15	0.07	4.92E-15	0.07
Üst Kalın Bağırsak	6.834E-16	0.04	1.571E-15	0.04	2.845E-15	0.04	3.915E-15	0.04	4.852E-15	0.04	7.951E-15	0.04
Kalp	1.393E-16	0.1	3.229E-16	0.1	6.123E-16	0.11	8.744E-16	0.11	1.113E-15	0.11	1.93E-15	0.11
Böbrekler	6.649E-15	0.01	1.699E-14	0.01	3.138E-14	0.01	4.297E-14	0.01	5.286E-14	0.01	8.481E-14	0.01
Karaciğer	5.358E-16	0.04	1.222E-15	0.04	2.218E-15	0.04	3.065E-15	0.04	3.812E-15	0.04	6.297E-15	0.04
Akciğerler	1.216E-16	0.06	2.931E-16	0.06	5.563E-16	0.06	7.899E-16	0.06	1.002E-15	0.06	1.718E-15	0.06
Kas	1.034E-16	0.01	2.491E-16	0.01	4.713E-16	0.01	6.673E-16	0.01	8.442E-16	0.01	1.444E-15	0.02
Pankreas	1.048E-15	0.07	2.352E-15	0.07	4.213E-15	0.08	5.77E-15	0.08	7.137E-15	0.08	1.163E-14	0.08
Kırmızı Kemik İliği	2.349E-16	0.03	5.725E-16	0.04	1.065E-15	0.04	1.491E-15	0.04	1.87E-15	0.04	3.139E-15	0.04
Kemik	6.042E-17	0.03	9.317E-17	0.03	1.56E-16	0.03	2.159E-16	0.03	2.725E-16	0.03	4.815E-16	0.03
Deri	3.966E-17	0.03	1.056E-16	0.03	2.15E-16	0.03	3.164E-16	0.03	4.103E-16	0.03	7.349E-16	0.03
Dalak	1.123E-15	0.05	2.616E-15	0.05	4.742E-15	0.06	6.513E-15	0.06	8.054E-15	0.06	1.313E-14	0.06
Testis	7.379E-18	1.38	2.686E-17	1.22	6.924E-17	1.13	1.167E-16	1.06	1.624E-16	1.02	3.302E-16	0.94
Timus	5.159E-17	0.53	1.324E-16	0.54	2.711E-16	0.55	4.031E-16	0.55	5.28E-16	0.55	9.696E-16	0.53
Tiroit	2.143E-17	0.66	5.839E-17	0.66	1.26E-16	0.68	1.921E-16	0.68	2.582E-16	0.67	4.951E-16	0.64
Mesane	4.352E-17	0.34	1.198E-16	0.31	2.466E-16	0.31	3.686E-16	0.3	4.824E-16	0.3	8.791E-16	0.29

Ek 1.5.a. Kaynak pankreas olduğunda bazı organlar için MCNP'den alınan doz (Gy) ve standart hata (%) değerleri

Enerjiler (MeV)	0.01		0.015		0.02		0.03		0.05		0.1	
Hedef Organlar	Doz (Gy)	%	Doz (Gy)	%	Doz (Gy)	%	Doz (Gy)	%	Doz (Gy)	%	Doz (Gy)	%
Adrenal	5.992E-17	0.92	4.656E-16	0.27	1.002E-15	0.15	1.395E-15	0.1	1.327E-15	0.08	1.653E-15	0.07
Beyin	-	-	-	-	-	-	-	-	1.994E-20	2.93	2.386E-19	0.82
Göğüs	-	-	-	-	-	-	2.202E-18	1.35	1.677E-17	0.4	4.805E-17	0.23
Safra Kesesi	2.909E-16	0.34	7.543E-16	0.17	9.214E-16	0.13	9.101E-16	0.1	8.408E-16	0.08	1.087E-15	0.07
Alt Kalın Bağırsak	5.702E-18	0.53	4.831E-17	0.21	1.229E-16	0.13	2.258E-16	0.08	2.831E-16	0.06	3.788E-16	0.05
İnce Bağırsak	1.177E-17	0.2	8.72E-17	0.08	2.246E-16	0.05	4.111E-16	0.03	4.831E-16	0.03	6.142E-16	0.02
Mide	3.792E-17	0.29	2.306E-16	0.12	5.012E-16	0.07	8.082E-16	0.04	8.802E-16	0.03	1.108E-15	0.03
Üst Kalın Bağırsak	1.456E-18	0.81	2.625E-17	0.23	1.217E-16	0.11	3.489E-16	0.05	4.901E-16	0.04	6.338E-16	0.03
Kalp	-	-	5.144E-21	16.85	1.64E-18	1.03	4.068E-17	0.19	1.4E-16	0.09	2.4E-16	0.06
Böbrekler	2.88E-19	2.5	1.548E-17	0.39	8.295E-17	0.17	2.796E-16	0.08	4.501E-16	0.05	6.191E-16	0.04
Karaciğer	1.338E-19	1.5	6.37E-18	0.26	4.013E-17	0.11	1.706E-16	0.05	3.23E-16	0.04	4.69E-16	0.03
Akciğerler	-	-	4.948E-21	11.9	9.991E-19	0.8	1.967E-17	0.15	6.784E-17	0.07	1.304E-16	0.04
Kas	6.81E-21	1.36	2.719E-19	0.23	1.39E-18	0.1	6.478E-18	0.05	1.901E-17	0.03	3.862E-17	0.02
Pankreas	1.725E-14	0.01	1.972E-14	0.01	1.787E-14	0.01	1.205E-14	0.01	7.283E-15	0.01	8.503E-15	0.01
Kırmızı Kemik İliği	-	-	2.417E-19	1.3	3.28E-18	0.31	2.073E-17	0.1	5.697E-17	0.05	1.185E-16	0.03
Kemik	-	-	1.677E-20	1.09	4.294E-19	0.31	6.836E-18	0.1	3.008E-17	0.05	4.948E-17	0.03
Deri	-	-	-	-	3.784E-20	1.39	1.376E-18	0.18	6.822E-18	0.06	1.58E-17	0.04
Dalak	4.378E-20	6.91	7.666E-18	0.66	5.967E-17	0.24	2.315E-16	0.11	3.765E-16	0.07	5.159E-16	0.06
Testis	-	-	-	-	-	-	-	-	3.363E-19	6.57	1.701E-18	2.57
Timus	-	-	-	-	-	-	1.755E-18	3.36	2.183E-17	0.77	6.198E-17	0.41
Tiroit	-	-	-	-	-	-	2.304E-19	7.49	4.836E-18	1.4	1.896E-17	0.64
Mesane	-	-	-	-	-	-	1.271E-19	6.66	2.649E-18	1.35	1.162E-17	0.58

Ek 1.5.b. Kaynak pankreas olduğunda bazı organlar için MCNP'den alınan doz (Gy) ve standart hata (%) değerleri

Enerjiler (MeV)	0.2		0.5		1.0		1.5		2.0		4.0	
Hedef Organlar	Doz (Gy)	%	Doz (Gy)	%	Doz (Gy)	%	Doz (Gy)	%	Doz (Gy)	%	Doz (Gy)	%
Adrenal	3.065E-15	0.07	7.329E-15	0.07	1.327E-14	0.08	1.813E-14	0.08	2.232E-14	0.08	3.6E-14	0.08
Beyin	8.668E-19	0.51	3.82E-18	0.38	1.118E-17	0.32	2.029E-17	0.28	3.006E-17	0.27	6.883E-17	0.23
Göğüs	1.106E-16	0.2	3.131E-16	0.2	6.415E-16	0.2	9.401E-16	0.2	1.208E-15	0.19	2.105E-15	0.19
Safra Kesesi	2.051E-15	0.07	4.985E-15	0.07	9.106E-15	0.08	1.248E-14	0.08	1.54E-14	0.08	2.489E-14	0.08
Alt Kalın Bağırsak	6.665E-16	0.05	1.545E-15	0.05	2.804E-15	0.05	3.86E-15	0.06	4.783E-15	0.06	7.832E-15	0.06
İnce Bağırsak	1.078E-15	0.02	2.503E-15	0.02	4.532E-15	0.03	6.217E-15	0.03	7.683E-15	0.03	1.25E-14	0.03
Mide	1.997E-15	0.03	4.703E-15	0.03	8.512E-15	0.03	1.165E-14	0.03	1.436E-14	0.03	2.325E-14	0.03
Üst Kalın Bağırsak	1.086E-15	0.03	2.478E-15	0.03	4.468E-15	0.03	6.128E-15	0.03	7.581E-15	0.03	1.236E-14	0.03
Kalp	4.04E-16	0.06	8.99E-16	0.06	1.639E-15	0.07	2.279E-15	0.07	2.849E-15	0.07	4.766E-15	0.07
Böbrekler	1.048E-15	0.04	2.346E-15	0.04	4.201E-15	0.05	5.756E-15	0.05	7.116E-15	0.05	1.162E-14	0.05
Karaciğer	7.912E-16	0.03	1.765E-15	0.03	3.171E-15	0.03	4.359E-15	0.03	5.405E-15	0.03	8.875E-15	0.03
Akciğerler	2.336E-16	0.04	5.351E-16	0.04	9.813E-16	0.04	1.367E-15	0.04	1.711E-15	0.04	2.867E-15	0.04
Kas	7.216E-17	0.02	1.738E-16	0.02	3.329E-16	0.02	4.766E-16	0.02	6.079E-16	0.02	1.058E-15	0.02
Pankreas	1.778E-14	0.01	4.644E-14	0.01	8.616E-14	0.01	1.18E-13	0.01	1.45E-13	0.01	2.319E-13	0.01
Kırmızı Kemik İliği	2.354E-16	0.03	5.654E-16	0.04	1.046E-15	0.04	1.461E-15	0.04	1.831E-15	0.04	3.07E-15	0.04
Kemik	5.655E-17	0.03	8.375E-17	0.03	1.377E-16	0.03	1.9E-16	0.03	2.396E-16	0.03	4.241E-16	0.03
Deri	3.219E-17	0.03	8.74E-17	0.03	1.809E-16	0.03	2.687E-16	0.03	3.503E-16	0.03	6.345E-16	0.03
Dalak	8.74E-16	0.05	1.966E-15	0.05	3.534E-15	0.05	4.854E-15	0.05	6.014E-15	0.05	9.851E-15	0.05
Testis	4.8E-18	1.71	1.829E-17	1.5	4.978E-17	1.35	8.465E-17	1.26	1.215E-16	1.21	2.611E-16	1.09
Timus	1.208E-16	0.36	2.936E-16	0.39	5.691E-16	0.41	8.239E-16	0.41	1.056E-15	0.41	1.861E-15	0.41
Tiroit	3.823E-17	0.5	9.374E-17	0.54	1.926E-16	0.58	2.91E-16	0.59	3.864E-16	0.58	7.23E-16	0.57
Mesane	2.741E-17	0.42	7.847E-17	0.38	1.689E-16	0.37	2.571E-16	0.36	3.411E-16	0.35	6.395E-16	0.33

Ek 1.6.a. Kaynak dalak olduğunda bazı organlar için MCNP'den alınan doz (Gy) ve standart hata (%) değerleri

Enerjiler (MeV)		0.01		0.015		0.02		0.03		0.05		0.1		
Hedef Organlar	Doz (Gy)	%	Doz (Gy)	%	Doz (Gy)	%	Doz (Gy)	%	Doz (Gy)	%	Doz (Gy)	%	Doz (Gy)	%
Adrenal	9.545E-19	7.25	1.933E-17	1.37	7.384E-17	0.6	2.133E-16	0.26	3.359E-16	0.16	5.055E-16	0.13		
Beyin	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5.298E-20	1.84	4.491E-19	0.6
Göğüs	-	-	-	-	1.882E-20	16.72	1.532E-18	1.58	1.06E-17	0.48	3.169E-17	0.27		
Safra Kesesi	-	-	-	-	3.88E-20	19.73	3.329E-18	1.82	2.66E-17	0.54	7.409E-17	0.3		
Alt Kalın Bağırsak	4.815E-18	0.56	5.328E-17	0.2	1.75E-16	0.11	3.675E-16	0.06	4.316E-16	0.05	5.405E-16	0.04		
İnce Bağırsak	-	-	1.633E-19	2.08	4.653E-18	0.4	4.386E-17	0.12	1.13E-16	0.07	1.861E-16	0.05		
Mide	2.073E-17	0.37	1.05E-16	0.15	2.087E-16	0.09	3.426E-16	0.06	4.237E-16	0.05	5.852E-16	0.04		
Üst Kalın Bağırsak	3.819E-21	16.94	7.445E-19	1.27	6.145E-18	0.42	2.895E-17	0.16	6.887E-17	0.1	1.241E-16	0.07		
Kalp	-	-	3.466E-20	6.99	1.483E-18	1.14	2.636E-17	0.25	9.38E-17	0.11	1.722E-16	0.08		
Böbrekler	3.234E-18	0.74	5.137E-17	0.21	1.737E-16	0.12	3.983E-16	0.07	5.002E-16	0.05	6.395E-16	0.04		
Karaciğer	-	-	-	-	1.67E-19	1.71	6.93E-18	0.28	4.192E-17	0.11	1.041E-16	0.07		
Akciğerler	3.274E-18	0.41	2.021E-17	0.17	4.57E-17	0.11	8.874E-17	0.07	1.275E-16	0.05	1.967E-16	0.04		
Kas	2.732E-19	0.2	2.026E-18	0.08	5.899E-18	0.05	1.609E-17	0.03	3.018E-17	0.02	5.057E-17	0.01		
Pankreas	4.061E-20	11.97	6.957E-18	1.09	5.535E-17	0.38	2.176E-16	0.16	3.608E-16	0.1	5.098E-16	0.08		
Kırmızı Kemik İliği	1.319E-19	1.64	3.022E-18	0.27	9.455E-18	0.13	2.433E-17	0.06	4.887E-17	0.04	9.811E-17	0.03		
Kemik	6.885E-20	0.86	2.498E-18	0.17	1.261E-17	0.08	4.425E-17	0.04	7.311E-17	0.03	7.332E-17	0.03		
Deri	-	-	4.571E-20	1.69	8.873E-19	0.31	5.665E-18	0.09	1.28E-17	0.05	2.252E-17	0.03		
Dalak	6.271E-15	0.01	8.035E-15	0.01	8.344E-15	0.01	6.757E-15	0.01	4.567E-15	0.01	5.155E-15	0.01		
Testis	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7.59E-20	14.45	6.499E-19	4.17
Timus	-	-	-	-	-	-	2.279E-18	2.81	1.959E-17	0.78	5.371E-17	0.42		
Tiroit	-	-	-	-	-	-	1.402E-18	2.98	1.071E-17	0.92	3.014E-17	0.49		
Mesane	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5.366E-19	2.96	4.065E-18	0.97

Ek 1.6.b. Kaynak dalak olduğunda bazı organlar için MCNP’den alınan doz (Gy) ve standart hata (%) değerleri

Enerjiler (MeV)	0.2		0.5		1.0		1.5		2.0		4.0	
Hedef Organlar	Doz (Gy)	%	Doz (Gy)	%	Doz (Gy)	%	Doz (Gy)	%	Doz (Gy)	%	Doz (Gy)	%
Adrenal	9.08E-16	0.13	2.084E-15	0.15	3.757E-15	0.16	5.164E-15	0.16	6.395E-15	0.16	1.046E-14	0.17
Beyin	1.553E-18	0.39	6.999E-18	0.3	1.968E-17	0.25	3.368E-17	0.23	4.78E-17	0.21	9.883E-17	0.2
Göğüs	7.407E-17	0.24	2.128E-16	0.23	4.417E-16	0.23	6.522E-16	0.22	8.433E-16	0.22	1.484E-15	0.21
Safra Kesesi	1.431E-16	0.27	3.398E-16	0.3	6.408E-16	0.33	9.098E-16	0.33	1.153E-15	0.34	2.001E-15	0.34
Alt Kalın Bağırsak	9.594E-16	0.04	2.254E-15	0.04	4.093E-15	0.05	5.621E-15	0.05	6.951E-15	0.05	1.132E-14	0.05
İnce Bağırsak	3.198E-16	0.05	7.231E-16	0.05	1.322E-15	0.05	1.84E-15	0.05	2.302E-15	0.05	3.852E-15	0.05
Mide	1.063E-15	0.04	2.51E-15	0.04	4.568E-15	0.04	6.279E-15	0.05	7.771E-15	0.05	1.268E-14	0.05
Üst Kalın Bağırsak	2.218E-16	0.06	5.138E-16	0.07	9.561E-16	0.07	1.344E-15	0.07	1.691E-15	0.07	2.862E-15	0.07
Kalp	2.939E-16	0.07	6.541E-16	0.08	1.195E-15	0.08	1.667E-15	0.08	2.09E-15	0.08	3.513E-15	0.08
Böbrekler	1.124E-15	0.04	2.616E-15	0.05	4.739E-15	0.05	6.505E-15	0.05	8.047E-15	0.05	1.311E-14	0.05
Karaciğer	1.927E-16	0.06	4.45E-16	0.06	8.31E-16	0.06	1.174E-15	0.06	1.485E-15	0.06	2.542E-15	0.06
Akciğerler	3.579E-16	0.03	8.314E-16	0.04	1.505E-15	0.04	2.07E-15	0.04	2.565E-15	0.04	4.203E-15	0.04
Kas	9.471E-17	0.01	2.316E-16	0.01	4.399E-16	0.01	6.23E-16	0.01	7.879E-16	0.01	1.346E-15	0.01
Pankreas	8.755E-16	0.08	1.978E-15	0.1	3.553E-15	0.1	4.875E-15	0.11	6.037E-15	0.11	9.876E-15	0.11
Kırmızı Kemik İliği	1.998E-16	0.03	4.925E-16	0.03	9.203E-16	0.03	1.288E-15	0.03	1.616E-15	0.04	2.709E-15	0.04
Kemik	7.628E-17	0.03	1.233E-16	0.02	2.098E-16	0.03	2.887E-16	0.03	3.614E-16	0.03	6.251E-16	0.03
Deri	4.483E-17	0.03	1.191E-16	0.03	2.391E-16	0.03	3.484E-16	0.03	4.484E-16	0.03	7.915E-16	0.03
Dalak	1.031E-14	0.01	2.638E-14	0.01	4.873E-14	0.01	6.674E-14	0.01	8.209E-14	0.01	1.317E-13	0.01
Testis	2.114E-18	2.57	1.035E-17	1.98	3.096E-17	1.71	5.557E-17	1.55	8.17E-17	1.45	1.842E-16	1.28
Timus	1.055E-16	0.36	2.533E-16	0.37	4.833E-16	0.38	6.946E-16	0.38	8.873E-16	0.38	1.547E-15	0.38
Tiroit	5.888E-17	0.41	1.442E-16	0.44	2.798E-16	0.46	4.034E-16	0.47	5.138E-16	0.47	8.908E-16	0.47
Mesane	1.174E-17	0.64	3.978E-17	0.53	9.509E-17	0.48	1.524E-16	0.46	2.076E-16	0.44	4.122E-16	0.41

Ek 1.7.a. Kaynak kalp olduğunda bazı organlar için MCNP'den alınan doz (Gy) ve standart hata (%) değerleri

Enerjiler (MeV)	0.01		0.015		0.02		0.03		0.05		0.1	
Hedef Organlar	Doz (Gy)	%	Doz (Gy)	%	Doz (Gy)	%	Doz (Gy)	%	Doz (Gy)	%	Doz (Gy)	%
Adrenal	-	-	-	-	2.623E-19	9.58	1.522E-17	0.98	7.497E-17	0.35	1.585E-16	0.22
Beyin	-	-	-	-	-	-	4.066E-21	7.35	2.024E-19	0.94	1.43E-18	0.34
Göğüs	-	-	1.217E-19	8.77	4.395E-18	1.21	3.501E-17	0.32	8.306E-17	0.17	1.647E-16	0.12
Safra Kesesi	-	-	-	-	1.912E-19	10.13	1.313E-17	0.98	7.06E-17	0.34	1.473E-16	0.21
Alt Kalın Bağırsak	-	-	-	-	5.247E-19	1.97	1.121E-17	0.38	4.04E-17	0.17	7.583E-17	0.12
İnce Bağırsak	-	-	2.338E-21	16.57	3.304E-19	1.5	8.491E-18	0.28	3.654E-17	0.12	7.39E-17	0.08
Mide	2.618E-19	3.57	1.987E-17	0.4	9.592E-17	0.17	2.726E-16	0.08	4.05E-16	0.06	5.633E-16	0.04
Üst Kalın Bağırsak	-	-	7.52E-20	4.03	1.882E-18	0.76	1.906E-17	0.22	6.290E-17	0.11	1.174E-16	0.08
Kalp	3.554E-15	0.01	4.187E-15	0.01	4.16E-15	0.01	3.431E-15	0.01	2.472E-15	0.01	2.83E-15	0.01
Böbrekler	-	-	-	-	2.468E-20	9.05	3.83E-18	0.71	3.022E-17	0.22	7.602E-17	0.13
Karaciğer	1.627E-18	0.43	1.405E-17	0.17	4.155E-17	0.11	1.133E-16	0.07	2.01E-16	0.05	3.03E-16	0.04
Akciğerler	1.773E-17	0.18	1.094E-16	0.08	2.414E-16	0.05	3.896E-16	0.03	4.275E-16	0.02	5.448E-16	0.02
Kas	1.376E-19	0.28	7.954E-19	0.12	2.663E-18	0.07	9.555E-18	0.04	2.189E-17	0.02	3.979E-17	0.02
Pankreas	-	-	-	-	1.509E-18	2.24	3.83E-17	0.37	1.345E-16	0.17	2.364E-16	0.11
Kırmızı Kemik İliği	1.421E-19	1.79	2.593E-18	0.36	8.637E-18	0.16	2.716E-17	0.06	5.601E-17	0.04	1.05E-16	0.03
Kemik	3.601E-20	1.2	1.207E-18	0.25	7.203E-18	0.11	3.468E-17	0.05	7.168E-17	0.03	7.626E-17	0.03
Deri	-	-	1.229E-20	2.86	2.915E-19	0.47	2.568E-18	0.12	7.602E-18	0.06	1.558E-17	0.03
Dalak	-	-	3.314E-20	8.88	1.453E-18	1.49	2.592E-17	0.32	9.244E-17	0.15	1.7E-16	0.1
Testis	-	-	-	-	-	-	-	-	5.074E-20	16.14	2.647E-19	6.58
Timus	1.448E-16	0.53	4.78E-16	0.28	7.707E-16	0.2	9.727E-16	0.13	9.244E-16	0.1	1.192E-15	0.09
Tiroit	-	-	-	-	1.696E-18	3.44	2.504E-17	0.73	8.674E-17	0.33	1.552E-16	0.22
Mesane	-	-	-	-	-	-	-	-	1.694E-19	5.4	1.36E-18	1.75

Ek 1.7.b. Kaynak kalp olduğunda bazı organlar için MCNP'den alınan doz (Gy) ve standart hata (%) değerleri

Enerjiler (MeV)	0.2		0.5		1.0		1.5		2.0		4.0	
Hedef Organlar	Doz (Gy)	%	Doz (Gy)	%	Doz (Gy)	%	Doz (Gy)	%	Doz (Gy)	%	Doz (Gy)	%
Adrenal	2.879E-16	0.2	6.583E-16	0.22	1.209E-15	0.23	1.688E-15	0.24	2.12E-15	0.24	3.574E-15	0.24
Beyin	4.189E-18	0.23	1.526E-17	0.2	3.861E-17	0.17	6.339E-17	0.16	8.829E-17	0.15	1.788E-16	0.14
Göğüs	3.542E-16	0.11	9.34E-16	0.12	1.784E-15	0.12	2.508E-15	0.12	3.14E-15	0.12	5.21E-15	0.11
Safra Kesesi	2.672E-16	0.2	6.213E-16	0.22	1.156E-15	0.23	1.628E-15	0.24	2.055E-15	0.24	3.486E-15	0.24
Alt Kalın Bağırsak	1.332E-16	0.11	3.089E-16	0.12	5.818E-16	0.13	8.258E-16	0.13	1.048E-15	0.13	1.804E-15	0.13
İnce Bağırsak	1.32E-16	0.08	3.093E-16	0.08	5.872E-16	0.09	8.375E-16	0.09	1.065E-15	0.09	1.841E-15	0.09
Mide	1.006E-15	0.04	2.353E-15	0.05	4.282E-15	0.05	5.894E-15	0.05	7.303E-15	0.05	1.194E-14	0.05
Üst Kalın Bağırsak	2.081E-16	0.07	4.871E-16	0.07	9.161E-16	0.08	1.294E-15	0.08	1.635E-15	0.08	2.783E-15	0.08
Kalp	5.603E-15	0.01	1.431E-14	0.01	2.647E-14	0.01	3.63E-14	0.01	4.471E-14	0.01	7.191E-14	0.01
Böbrekler	1.398E-16	0.11	3.24E-16	0.12	6.138E-16	0.12	8.754E-16	0.12	1.114E-15	0.12	1.93E-15	0.12
Karaciğer	5.298E-16	0.04	1.22E-15	0.04	2.227E-15	0.04	3.083E-15	0.04	3.839E-15	0.04	6.345E-15	0.04
Akciğerler	9.827E-16	0.01	2.312E-15	0.02	4.181E-15	0.02	5.719E-15	0.02	7.052E-15	0.02	1.142E-14	0.02
Kas	7.43E-17	0.01	1.788E-16	0.01	3.374E-16	0.01	4.773E-16	0.01	6.036E-16	0.01	1.033E-15	0.01
Pankreas	4.046E-16	0.11	9.038E-16	0.12	1.647E-15	0.13	2.29E-15	0.13	2.863E-15	0.13	4.783E-15	0.13
Kırmızı Kemik İliği	2.077E-16	0.03	5.038E-16	0.03	9.338E-16	0.03	1.302E-15	0.03	1.629E-15	0.03	2.72E-15	0.03
Kemik	7.674E-17	0.03	1.176E-16	0.02	1.954E-16	0.02	2.664E-16	0.03	3.319E-16	0.03	5.702E-16	0.03
Deri	3.253E-17	0.03	8.927E-17	0.03	1.824E-16	0.03	2.68E-16	0.03	3.467E-16	0.03	6.174E-16	0.03
Dalak	2.922E-16	0.09	6.534E-16	0.1	1.195E-15	0.1	1.666E-15	0.1	2.092E-15	0.1	3.516E-15	0.1
Testis	8.698E-19	4.0	4.273E-18	3.05	1.491E-17	2.44	2.844E-17	2.19	4.457E-17	1.99	1.101E-16	1.69
Timus	2.326E-15	0.09	5.807E-15	0.1	1.072E-14	0.1	1.476E-14	0.1	1.825E-14	0.1	2.958E-14	0.1
Tiroit	2.726E-16	0.21	6.392E-16	0.24	1.206E-15	0.25	1.706E-15	0.26	2.149E-15	0.26	3.653E-15	0.26
Mesane	4.272E-18	1.06	1.67E-17	0.82	4.463E-17	0.71	7.543E-17	0.65	1.072E-16	0.62	2.276E-16	0.55

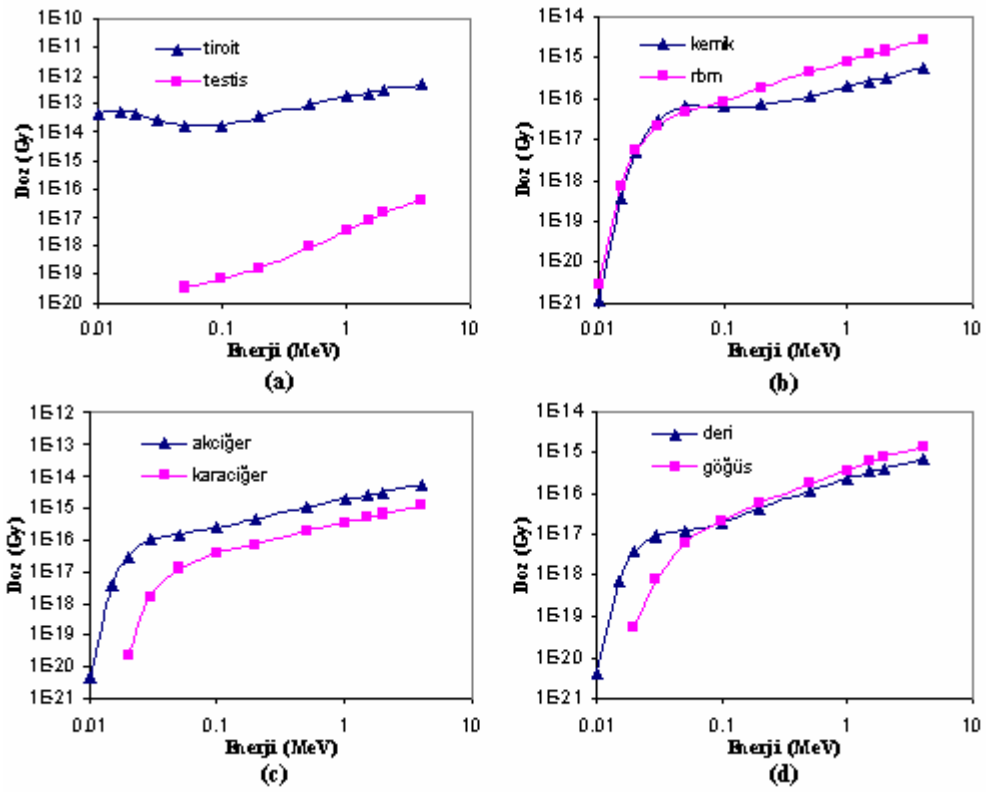
Ek 1.8.a. Kaynak kırmızı kemik iliği olduğunda bazı organlar için MCNP'den alınan doz (Gy) ve standart hata (%) değerleri

Enerjiler (MeV)		0.01		0.015		0.02		0.03		0.05		0.1		
Hedef Organlar	Doz (Gy)	%	Doz (Gy)	%	Doz (Gy)	%	Doz (Gy)	%	Doz (Gy)	%	Doz (Gy)	%	Doz (Gy)	%
Adrenal	-	-	5.914E-18	2.59	2.234E-17	1.1	6.158E-17	0.49	1.162E-16	0.28	2.1E-16	0.19		
Beyin	7.179E-19	0.55	2.242E-18	0.33	4.101E-18	0.25	7.945E-18	0.17	1.157E-17	0.12	1.851E-17	0.1		
Göğüs	-	-	1.898E-19	7.24	1.703E-18	1.95	5.621E-18	0.81	1.225E-17	0.44	2.93E-17	0.29		
Safra Kesesi	-	-	3.797E-19	7.27	2.022E-18	2.91	1.074E-17	1.03	3.591E-17	0.46	8.071E-17	0.29		
Alt Kalın Bağırsak	1.387E-20	10.13	8.24E-19	1.51	4.799E-18	0.59	2.424E-17	0.22	6.742E-17	0.11	1.349E-16	0.08		
İnce Bağırsak	3.288E-21	11.74	2.277E-19	1.67	1.775E-18	0.61	1.384E-17	0.20	5.039E-17	0.1	1.09E-16	0.06		
Mide	1.849E-20	12.45	5.931E-19	1.97	3.364E-18	0.8	1.683E-17	0.31	4.8E-17	0.16	9.846E-17	0.11		
Üst Kalın Bağırsak	-	-	1.46E-19	2.97	1.132E-18	1.01	9.232E-18	0.32	3.634E-17	0.14	8.217E-17	0.09		
Kalp	1.799E-19	2.89	3.035E-18	0.71	1.035E-17	0.39	3.369E-17	0.2	7.083E-17	0.12	1.214E-16	0.09		
Böbrekler	6.895E-21	15.12	6.483E-19	1.91	4.121E-18	0.77	2.273E-17	0.29	6.776E-17	0.14	1.372E-16	0.09		
Karaciğer	1.808E-19	1.33	2.128E-18	0.47	7.084E-18	0.28	2.368E-17	0.16	5.737E-17	0.1	1.103E-16	0.07		
Akciğerler	3.874E-18	0.4	2.047E-17	0.19	3.949E-17	0.13	6.528E-17	0.08	9.24E-17	0.06	1.495E-16	0.04		
Kas	9.077E-19	0.12	3.114E-18	0.07	5.876E-18	0.06	1.403E-17	0.04	3.123E-17	0.02	6.254E-17	0.01		
Pankreas	-	-	2.736E-19	5.65	3.643E-18	1.44	2.429E-17	0.46	7.06E-17	0.22	1.39E-16	0.15		
Kırmızı Kemik İliği	1.021E-15	0.01	8.124E-16	0.01	5.916E-16	0.01	3.718E-16	0.02	2.876E-16	0.02	4.58E-16	0.01		
Kemik	1.983E-17	0.05	6.537E-17	0.03	1.081E-16	0.03	1.58E-16	0.02	1.787E-16	0.02	1.58E-16	0.02		
Deri	1.444E-20	3.53	1.808E-19	0.78	6.309E-19	0.34	2.411E-18	0.13	7.544E-18	0.06	1.816E-17	0.03		
Dalak	1.555E-19	3.96	3.542E-18	0.99	1.112E-17	0.57	2.932E-17	0.32	6.09E-17	0.19	1.138E-16	0.13		
Testis	-	-	-	-	-	-	1.996E-18	3.12	1.133E-17	1.05	3.087E-17	0.57		
Timus	2.27E-18	4.73	1.549E-17	1.67	3.629E-17	0.94	7.538E-17	0.49	1.077E-16	0.31	1.743E-16	0.24		
Tiroit	-	-	8.826E-19	5.1	6.123E-18	1.75	2.678E-17	0.67	6.35E-17	0.36	1.063E-16	0.25		
Mesane	6.071E-19	4.61	6.315E-18	1.47	1.691E-17	0.81	5.214E-17	0.36	1.099E-16	0.2	2.097E-16	0.14		

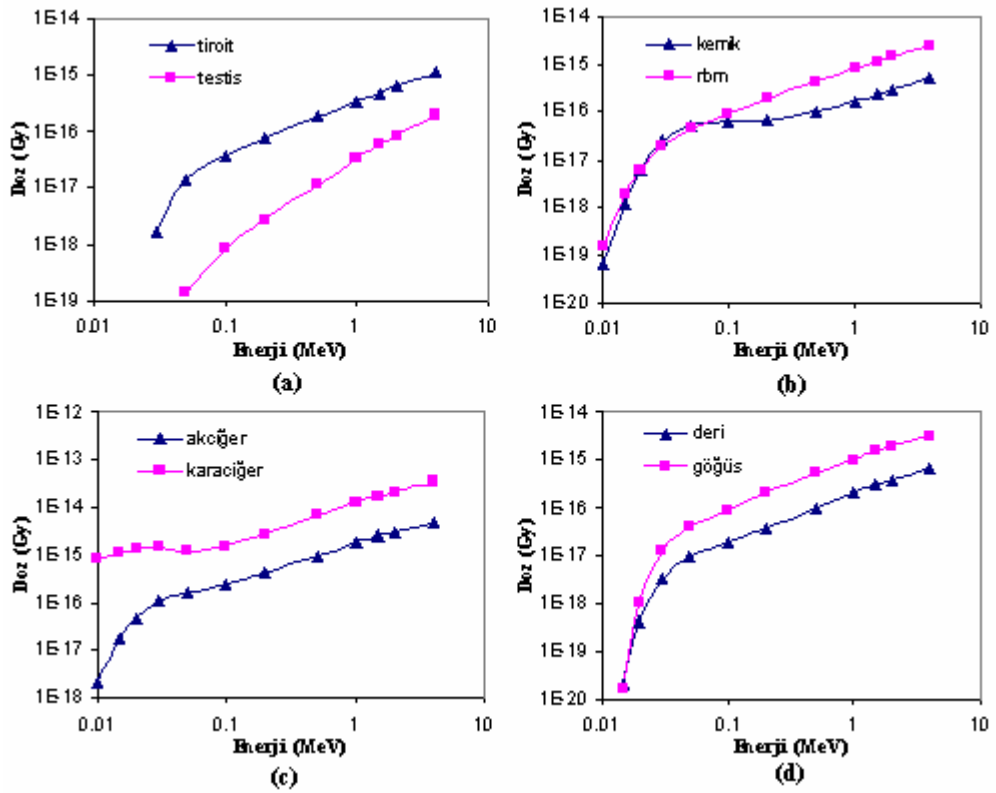
Ek 1.8.b. Kaynak kırmızı kemik iliği olduğunda bazı organlar için MCNP'den alınan doz (Gy) ve standart hata (%) değerleri

Enerjiler (MeV)	0.2	0.5	1.0	1.5	2.0	4.0
Hedef Organlar	Doz (Gy)	%	Doz (Gy)	%	Doz (Gy)	%
Adrenal	4.05E-16	0.19	9.673E-16	0.21	1.77E-15	0.21
Beyin	3.761E-17	0.09	9.743E-17	0.09	1.863E-16	0.09
Göğüs	6.834E-17	0.27	1.941E-16	0.27	3.945E-16	0.27
Safra Kesesi	1.529E-16	0.27	3.616E-16	0.3	6.774E-16	0.31
Alt Kalın Bağırsak	2.503E-16	0.07	5.792E-16	0.07	1.061E-15	0.08
İnce Bağırsak	2.005E-16	0.06	4.611E-16	0.06	8.498E-16	0.06
Mide	1.841E-16	0.1	4.307E-16	0.11	7.958E-16	0.11
Üst Kalın Bağırsak	1.528E-16	0.08	3.572E-16	0.08	6.678E-16	0.09
Kalp	2.198E-16	0.09	5.115E-16	0.09	9.395E-16	0.1
Böbrekler	2.531E-16	0.09	5.845E-16	0.09	1.073E-15	0.1
Karaciğer	2.029E-16	0.06	4.718E-16	0.07	8.696E-16	0.07
Akciğerler	2.849E-16	0.04	6.774E-16	0.04	1.23E-15	0.04
Kas	1.234E-16	0.01	3.025E-16	0.01	5.69E-16	0.01
Pankreas	2.534E-16	0.13	5.795E-16	0.15	1.059E-15	0.15
Kırmızı Kemik İliği	1.002E-15	0.01	2.604E-15	0.01	4.834E-15	0.01
Kemik	1.758E-16	0.02	3.275E-16	0.02	5.745E-16	0.02
Deri	3.931E-17	0.03	1.082E-16	0.03	2.21E-16	0.03
Dalak	2.121E-16	0.12	4.996E-16	0.13	9.253E-16	0.14
Testis	6.204E-17	0.49	1.582E-16	0.52	3.101E-16	0.53
Timus	3.451E-16	0.24	8.542E-16	0.26	1.578E-15	0.27
Tiroit	1.938E-16	0.24	4.612E-16	0.26	8.611E-16	0.27
Mesane	4.074E-16	0.13	9.605E-16	0.15	1.746E-15	0.15

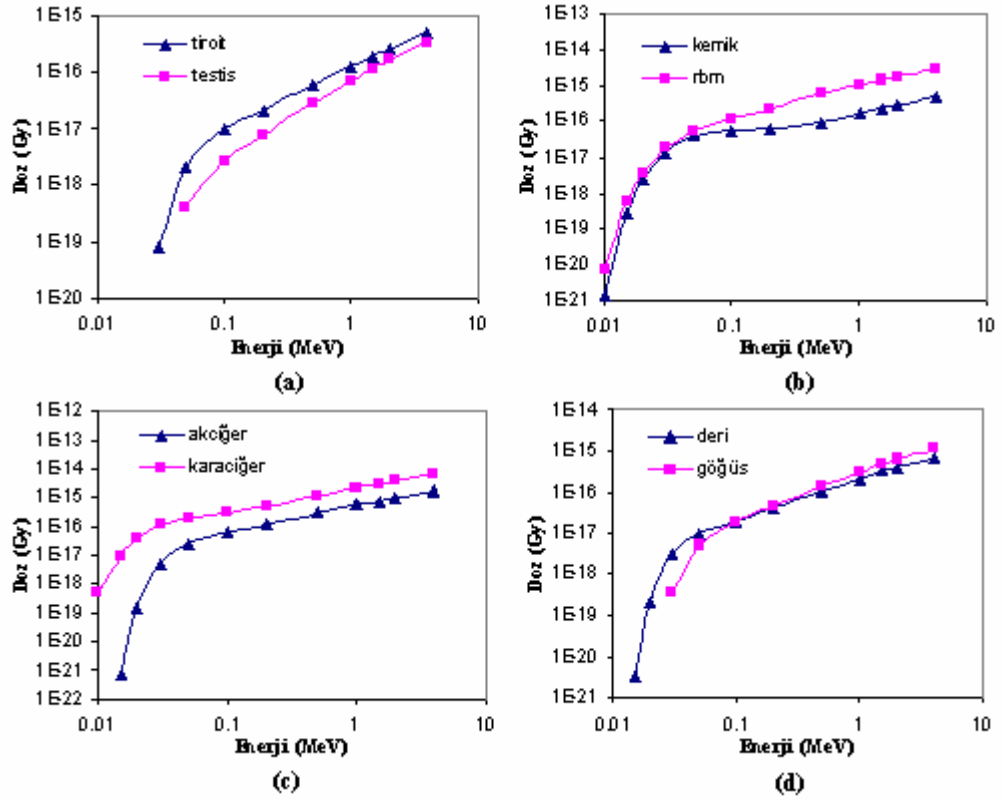
EK 2. Organ Doz Grafikleri



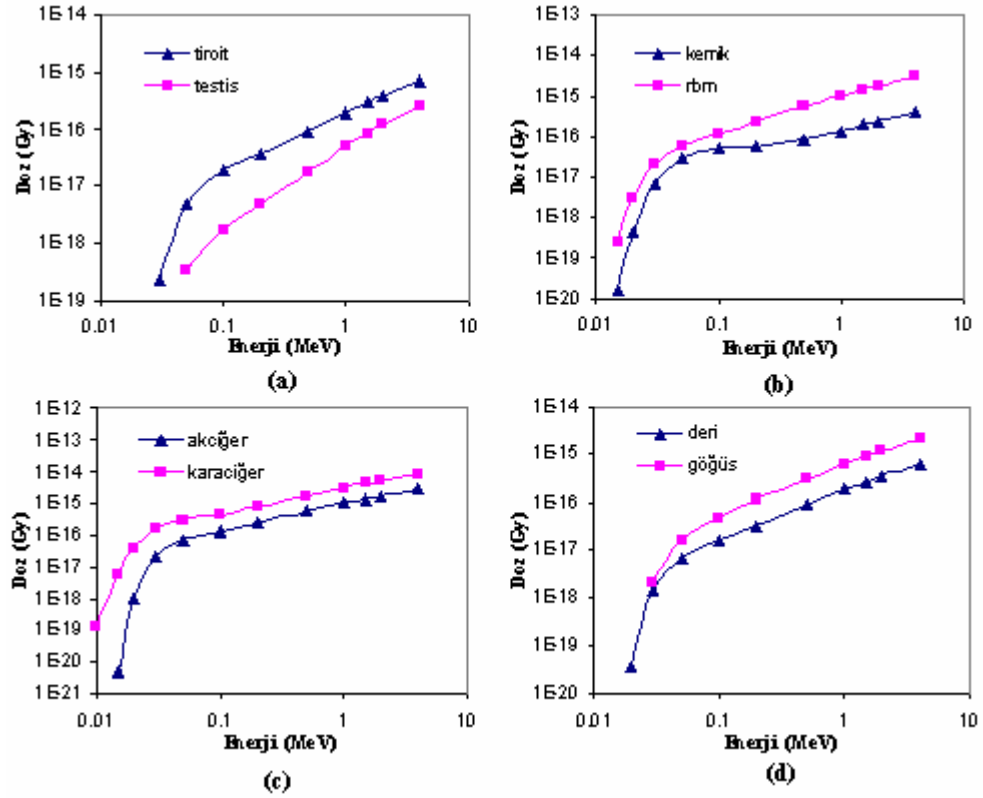
Ek 2.1. Kaynak organ tiroit olduğunda, bazı hedef organların aldıkları dozlar



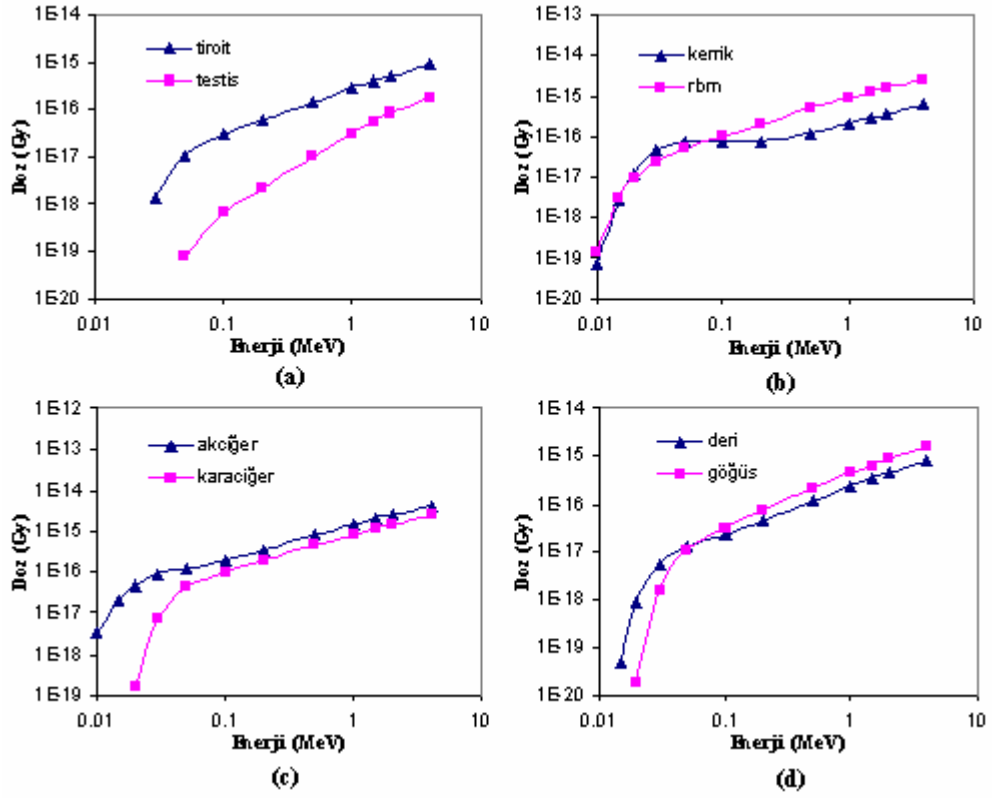
Ek 2.2. Kaynak organ karaciğer olduğunda, bazı hedef organların aldıkları dozlar



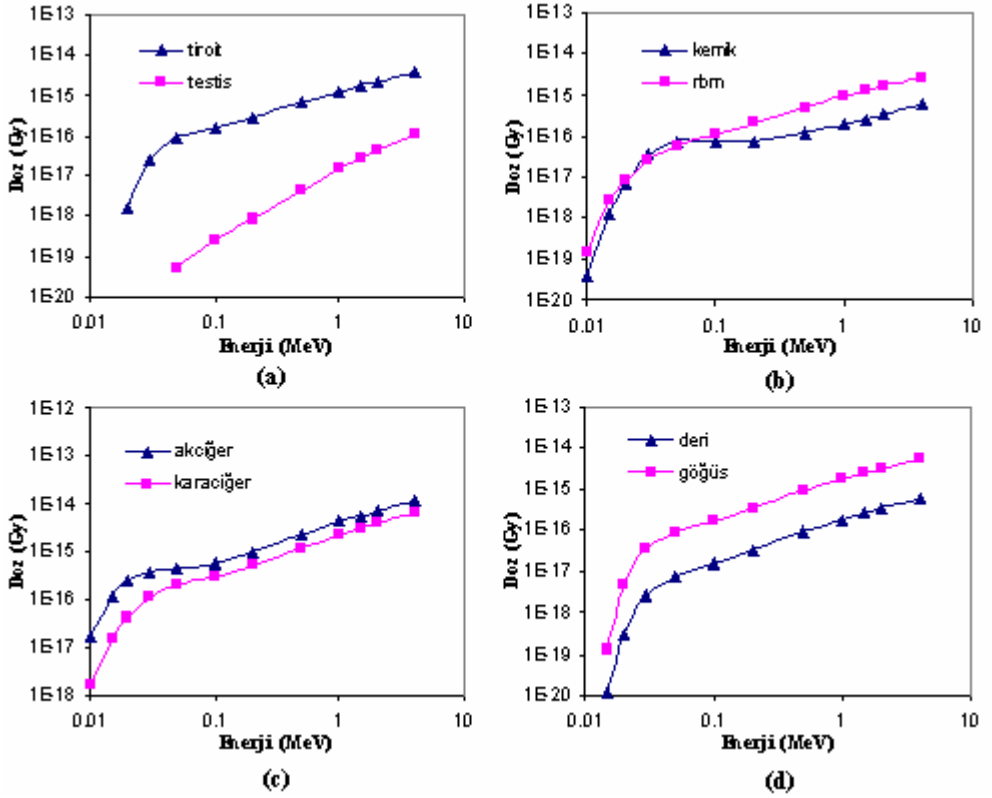
Ek 2.3. Kaynak organ böbrek olduğunda, bazı hedef organların aldıkları dozlar



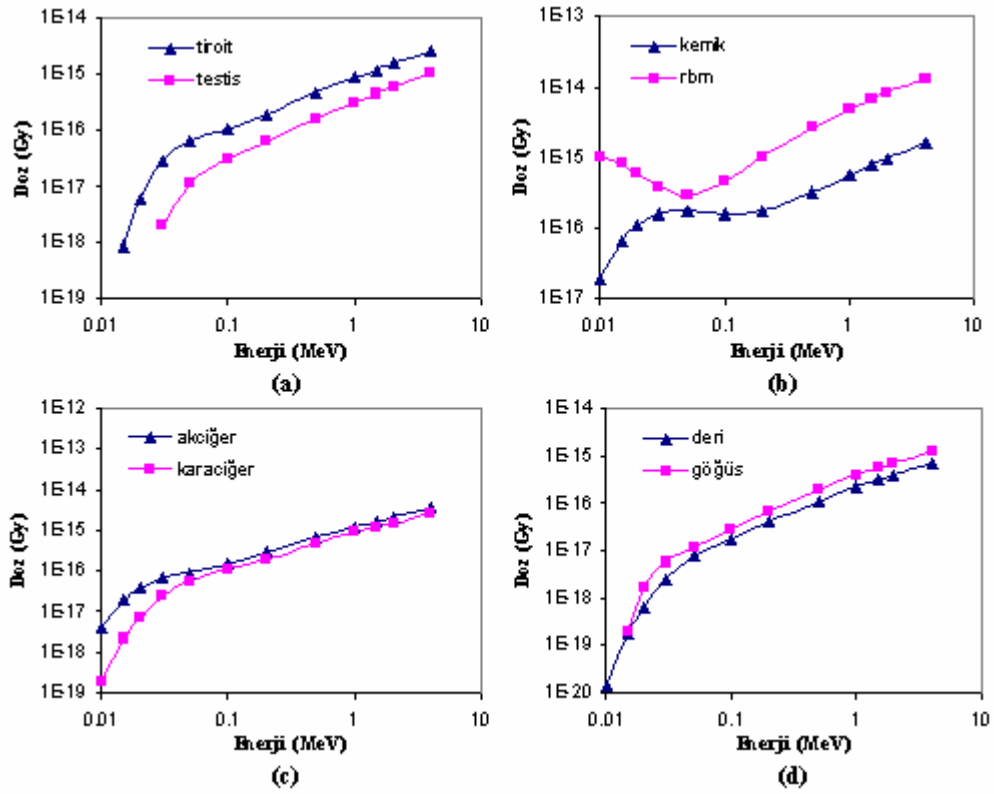
Ek 2.4. Kaynak organ pankreas olduğunda, bazı hedef organların aldıkları dozlar



Ek 2.5. Kaynak organ dalak olduğunda, bazı hedef organların aldıkları dozlar



Ek 2.6. Kaynak organ kalp olduğunda, bazı hedef organların aldıkları dozlar



Ek 2.7. Kaynak organ kırmızı kemik iliği olduğunda, bazı hedef organların aldıkları dozlar

Ek 2.6'da kaynak organ olması sebebiyle kırmızı kemik iliğinin kemik dokusuna göre daha fazla doz aldığı görülmektedir. Yalnız burada dikkat edilmesi gereken nokta, kaynaktan yayılan fotonların enerjileri yükseldikçe, kırmızı kemik iliğindeki soğurulan doz miktarı azalmasıdır. Kaynaktan yayılan fotonların enerjileri arttıkça giricilikleri de artacak ve yoğunluğu 0.98 g/cm^3 gibi düşük bir değere sahip olan kırmızı kemik iliği dokusunda etkileşim geçirme ihtimalinin düşmesi buna neden olarak gösterilebilir. Diğer önemli bir nokta ise belli bir enerjiden sonra bu dokuda biriken doz miktarının tekrar yükselmesidir. Bunun nedeni olarak da, kaynaktan yayılan fotonların, enerjileri yükseldikçe kırmızı kemik iliği dokusunu geçmesi ve değeri 1.55 g/cm^3 olan daha yoğun kemik dokusu içerisinde Compton etkileşimi geçirmesi sonucunda oluşan Compton elektronunun kırmızı kemik iliğine doğru saçılarak enerjisini yitirmesi gösterilebilir.

EK 3. SAF Değerleri

Ek 3.1. Kaynak beyin olduğunda bazı organlar için hesaplanan SAF (I/g) değerleri

Hedef Organlar	Enerjiler (MeV)											
	0.01	0.015	0.02	0.03	0.05	0.1	0.2	0.5	1.0	1.5	2.0	4.0
Adrenal	-	-	-	-	6.82E-09	5.08E-08	8.79E-08	1.5E-07	2.17E-07	2.5E-07	2.7E-07	2.89E-07
Beyin	3.31E-04	2.99E-04	2.58E-04	1.69E-04	8.29E-05	4.98E-05	4.89E-05	4.95E-05	4.57E-05	4.18E-05	3.87E-05	3.12E-05
Göğüs	-	-	-	8.49E-09	4.85E-08	1.26E-07	2.1E-07	3.56E-07	4.67E-07	5.15E-07	5.38E-07	5.38E-07
Safra Kesesi	-	-	-	-	8.61E-09	5.11E-08	8.66E-08	1.51E-07	2.16E-07	2.51E-07	2.72E-07	2.96E-07
Alt Kalın Bağırsak	-	-	-	-	5.13E-09	2.48E-08	4.1E-08	7.53E-08	1.13E-07	1.36E-07	1.5E-07	1.7E-07
İnce Bağırsak	-	-	-	1.32E-10	3.84E-09	1.9E-08	3.26E-08	6.05E-08	9.43E-08	1.17E-07	1.32E-07	1.57E-07
Mide	-	-	-	4.37E-10	2.32E-08	9.57E-08	1.48E-07	2.28E-07	2.99E-07	3.37E-07	3.57E-07	3.73E-07
Üst Kalın Bağırsak	-	-	-	-	7.09E-09	3.32E-08	5.54E-08	9.96E-08	1.49E-07	1.79E-07	1.97E-07	2.22E-07
Kalp	-	-	-	2.48E-09	8.42E-08	2.74E-07	3.68E-07	4.98E-07	6.05E-07	6.55E-07	6.75E-07	6.71E-07
Böbrekler	-	-	-	-	4.87E-09	2.88E-08	5.23E-08	9.89E-08	1.5E-07	1.8E-07	1.99E-07	2.22E-07
Karaciğer	-	-	-	3.79E-10	2.07E-08	9.13E-08	1.44E-07	2.26E-07	3.02E-07	3.4E-07	3.6E-07	3.73E-07
Akciğerler	-	-	-	7.09E-09	1.54E-07	4.19E-07	5.59E-07	7.53E-07	8.82E-07	9.25E-07	9.36E-07	8.93E-07
Kas	5.80E-09	2.74E-08	8.30E-08	3.34E-07	6.08E-07	6.43E-07	6.87E-07	7.52E-07	7.6E-07	7.42E-07	7.18E-07	6.39E-07
Pankreas	-	-	-	-	9.66E-09	5.13E-08	8.56E-08	1.38E-07	1.88E-07	2.19E-07	2.37E-07	2.63E-07
Kırmızı Kemik İliği	7.96E-07	1.73E-06	2.41E-06	3.14E-06	2.84E-06	2.51E-06	2.69E-06	2.83E-06	2.71E-06	2.55E-06	2.41E-06	2.03E-06
Kemik	1.81E-07	7.36E-07	1.66E-06	3.29E-06	3.03E-06	1.34E-06	7.23E-07	5.54E-07	5.09E-07	4.8E-07	4.56E-07	4.03E-07
Deri	3.05E-10	1.10E-08	7.14E-08	4.81E-07	8.93E-07	9.33E-07	1.06E-06	1.18E-06	1.18E-06	1.13E-06	1.07E-06	9.23E-07
Dalak	-	-	-	-	2.03E-08	8.25E-08	1.36E-07	2.29E-07	3.11E-07	3.5E-07	3.69E-07	3.74E-07
Testis	-	-	-	-	-	1.63E-09	1.28E-09	2.08E-09	5.57E-09	9.69E-09	1.49E-08	2.69E-08
Timus	-	-	-	-	1.34E-07	4.53E-07	6.27E-07	8.57E-07	1.02E-06	1.09E-06	1.1E-06	1.06E-06
Tiroit	-	-	-	1.09E-07	1.33E-06	2.49E-06	2.72E-06	3.06E-06	3.19E-06	3.16E-06	3.07E-06	2.73E-06
Mesane	-	-	-	-	-	1.09E-09	2.21E-09	6.19E-09	1.41E-08	2.19E-08	2.92E-08	4.49E-08

Ek 3.2. Kaynak tiroit olduğunda bazı organlar için hesaplanan SAF (1/g) değerleri

Hedef Organlar	Enerjiler (MeV)													
	0.01	0.015	0.02	0.03	0.05	0.1	0.2	0.5	1.0	1.5	2.0	4.0		
Adrenal	-	-	-	5.1E-08	5.23E-07	1.1E-06	1.22E-06	1.26E-06	1.26E-06	1.26E-06	1.23E-06	1.13E-06		
Beyin	-	-	1.07E-10	3.58E-08	4.06E-07	8.41E-07	1.01E-06	1.21E-06	1.28E-06	1.28E-06	1.25E-06	1.12E-06		
Göğüs	-	-	1.63E-08	1.64E-07	7.86E-07	1.34E-06	1.64E-06	2.05E-06	2.28E-06	2.35E-06	2.34E-06	2.18E-06		
Safra Kesesi	-	-	-	3.98E-08	5.82E-07	1.19E-06	1.33E-06	1.46E-06	1.51E-06	1.5E-06	1.47E-06	1.32E-06		
Alt Kalın Bağırsak	-	-	-	3.15E-08	2.55E-07	4.75E-07	5.15E-07	5.6E-07	5.96E-07	6.06E-07	6.06E-07	5.79E-07		
İnce Bağırsak	-	-	-	9.72E-09	1.5E-07	3.63E-07	4.2E-07	4.78E-07	5.36E-07	5.66E-07	5.79E-07	5.74E-07		
Mide	-	-	7.83E-09	3.06E-07	1.42E-06	2.13E-06	2.14E-06	2.13E-06	2.09E-06	2.04E-06	1.98E-06	1.76E-06		
Üst Kalın Bağırsak	-	-	5.68E-10	3.64E-08	3.33E-07	6.88E-07	7.65E-07	8.59E-07	9.29E-07	9.51E-07	9.5E-07	8.95E-07		
Kalp	-	9.92E-09	5.5E-07	5.28E-06	9.95E-06	9.23E-06	8.37E-06	7.98E-06	7.52E-06	7.08E-06	6.7E-06	5.67E-06		
Böbrekler	-	-	-	1.61E-08	2.47E-07	5.93E-07	6.79E-07	7.48E-07	7.94E-07	8.08E-07	8.09E-07	7.67E-07		
Karaciğer	-	-	6.59E-09	3.33E-07	1.6E-06	2.3E-06	2.29E-06	2.25E-06	2.19E-06	2.11E-06	2.02E-06	1.77E-06		
Akciğerler	2.64E-09	1.48E-06	9.34E-06	2.05E-05	1.88E-05	1.44E-05	1.33E-05	1.26E-05	1.14E-05	1.04E-05	9.68E-06	7.87E-06		
Kas	1.53E-06	4.21E-06	5.89E-06	5.52E-06	3.92E-06	3.02E-06	2.96E-06	3.0E-06	2.85E-06	2.68E-06	2.52E-06	2.12E-06		
Pankreas	-	-	-	4.31E-08	5.66E-07	1.16E-06	1.21E-06	1.22E-06	1.23E-06	1.24E-06	1.22E-06	1.14E-06		
Kırmızı Kemik İliği	1.85E-09	3.02E-07	1.65E-06	4.56E-06	5.73E-06	5.52E-06	5.69E-06	5.72E-06	5.36E-06	5.0E-06	4.69E-06	3.92E-06		
Kemik	7.09E-10	1.6E-07	1.55E-06	6.44E-06	7.96E-06	4.1E-06	2.11E-06	1.41E-06	1.22E-06	1.12E-06	1.05E-06	9.09E-07		
Deri	2.71E-09	2.77E-07	1.21E-06	1.94E-06	1.47E-06	1.17E-06	1.25E-06	1.38E-06	1.39E-06	1.35E-06	1.29E-06	1.13E-06		
Dalak	-	-	4.79E-09	2.99E-07	1.24E-06	1.79E-06	1.82E-06	1.83E-06	1.76E-06	1.69E-06	1.61E-06	1.4E-06		
Testis	-	-	-	-	4.31E-09	4.34E-09	5.04E-09	1.13E-08	2.37E-08	3.57E-08	4.71E-08	6.82E-08		
Timus	-	2.16E-07	5.03E-06	2.56E-05	3.31E-05	2.74E-05	2.65E-05	2.62E-05	2.44E-05	2.26E-05	2.12E-05	1.75E-05		
Tiroit	3.09E-02	2.18E-02	1.37E-02	5.6E-03	2.08E-03	1.11E-03	1.14E-03	1.21E-03	1.12E-03	1.03E-03	9.45E-04	7.56E-04		
Mesane	-	-	-	-	2.09E-09	1.03E-08	2.03E-08	4.07E-08	6.82E-08	8.72E-08	1.01E-07	1.29E-07		

Ek 3.3. Kaynak karaciğer olduğunda bazı organlar için hesaplanan SAF (1/g) değerleri

Hedef Organlar	Enerjiler (MeV)											
	0.01	0.015	0.02	0.03	0.05	0.1	0.2	0.5	1.0	1.5	2.0	4.0
Adrenal	1.75E-05	4.43E-05	6.05E-05	6.86E-05	5.48E-05	3.96E-05	3.61E-05	3.39E-05	3.07E-05	2.8E-05	2.6E-05	2.12E-05
Beyin	-	-	-	9.54E-11	6.29E-09	2.94E-08	4.95E-08	8.44E-08	1.17E-07	1.35E-07	1.45E-07	1.54E-07
Göğüs	-	6.7E-09	3.17E-07	2.65E-06	5.06E-06	5.66E-06	6.22E-06	6.74E-06	6.63E-06	6.32E-06	6.01E-06	5.1E-06
Safra Kesesi	3.41E-05	8.85E-05	1.3E-04	1.47E-04	1.04E-04	6.84E-05	6.25E-05	5.95E-05	5.41E-05	4.95E-05	4.58E-05	3.71E-05
Alt Kalın Bağırsak	-	1.96E-09	8.62E-08	1.11E-06	3.1E-06	3.57E-06	3.3E-06	3.11E-06	2.97E-06	2.84E-06	2.72E-06	2.37E-06
İnce Bağırsak	2.79E-08	3.11E-07	1.3E-06	4.99E-06	8.38E-06	7.6E-06	6.65E-06	6.05E-06	5.59E-06	5.22E-06	4.92E-06	4.16E-06
Mide	6.1E-06	1.95E-05	3.17E-05	4.03E-05	3.44E-05	2.51E-05	2.26E-05	2.12E-05	1.93E-05	1.77E-05	1.65E-05	1.35E-05
Üst Kalın Bağırsak	1.18E-06	7.24E-06	1.84E-05	3.54E-05	3.47E-05	2.47E-05	2.15E-05	1.98E-05	1.8E-05	1.66E-05	1.54E-05	1.26E-05
Kalp	1.05E-06	5.98E-06	1.33E-05	2.42E-05	2.56E-05	1.91E-05	1.66E-05	1.52E-05	1.39E-05	1.28E-05	1.2E-05	9.91E-06
Böbrekler	3.04E-07	3.79E-06	1.16E-05	2.37E-05	2.52E-05	1.92E-05	1.68E-05	1.53E-05	1.39E-05	1.28E-05	1.19E-05	9.83E-06
Karaciğer	5.02E-04	4.67E-04	4.13E-04	2.91E-04	1.56E-04	9.45E-05	8.85E-05	8.66E-05	7.93E-05	7.24E-05	6.69E-05	5.4E-05
Akciğerler	1.26E-06	7.02E-06	1.44E-05	2.14E-05	1.96E-05	1.48E-05	1.33E-05	1.23E-05	1.12E-05	1.02E-05	9.53E-06	7.82E-06
Kas	1.79E-07	5.85E-07	1.11E-06	2.16E-06	2.9E-06	2.66E-06	2.5E-06	2.44E-06	2.33E-06	2.21E-06	2.11E-06	1.81E-06
Pankreas	7.87E-08	2.5E-06	1.17E-05	3.37E-05	3.91E-05	2.9E-05	2.47E-05	2.21E-05	1.99E-05	1.82E-05	1.69E-05	1.39E-05
Kırmızı Kemik İliği	9.33E-08	7.67E-07	1.9E-06	4.09E-06	5.73E-06	5.9E-06	5.93E-06	5.79E-06	5.39E-06	5.03E-06	4.74E-06	3.98E-06
Kemik	4.12E-08	4.74E-07	1.79E-06	5.18E-06	6.65E-06	3.91E-06	2.07E-06	1.29E-06	1.08E-06	9.88E-07	9.29E-07	8.09E-07
Deri	-	8.9E-09	1.29E-07	6.78E-07	1.16E-06	1.15E-06	1.17E-06	1.26E-06	1.29E-06	1.26E-06	1.22E-06	1.09E-06
Dalak	-	-	4.7E-08	1.45E-06	5.26E-06	6.47E-06	5.99E-06	5.54E-06	5.18E-06	4.88E-06	4.63E-06	3.97E-06
Testis	-	-	-	-	1.72E-08	5.35E-08	8.51E-08	1.44E-07	2.11E-07	2.48E-07	2.72E-07	2.98E-07
Timus	-	-	4.08E-07	3.8E-06	8.22E-06	8.1E-06	7.43E-06	6.89E-06	6.38E-06	5.97E-06	5.65E-06	4.78E-06
Tiroit	-	-	9.07E-09	3.48E-07	1.74E-06	2.41E-06	2.29E-06	2.22E-06	2.16E-06	2.07E-06	1.99E-06	1.75E-06
Mesane	-	-	-	1.16E-08	1.38E-07	3.52E-07	4.59E-07	5.83E-07	6.66E-07	7.0E-07	7.1E-07	6.87E-07

Ek 3.4. Kaynak böbrekler olduğunda bazı organlar için hesaplanan SAF (1/g) değerleri

Hedef Organlar	Enerjiler (MeV)											
	0.01	0.015	0.02	0.03	0.05	0.1	0.2	0.5	1.0	1.5	2.0	4.0
Adrenal	3.56E-05	1.48E-04	2.07E-04	1.81E-04	1.06E-04	6.96E-05	6.52E-05	6.25E-05	5.68E-05	5.19E-05	4.79E-05	3.87E-05
Beyin	-	-	-	-	1.45E-09	8.43E-09	1.69E-08	3.52E-08	5.73E-08	7.06E-08	7.98E-08	9.15E-08
Göğüs	-	-	-	7.65E-08	6.06E-07	1.15E-06	1.43E-06	1.77E-06	1.92E-06	1.95E-06	1.92E-06	1.75E-06
Safra Kesesi	-	1.45E-07	2.57E-06	1.43E-05	2.13E-05	1.77E-05	1.54E-05	1.38E-05	1.24E-05	1.14E-05	1.07E-05	8.82E-06
Alt Kalın Bağırsak	1.93E-06	1.42E-05	3.41E-05	4.94E-05	3.72E-05	2.46E-05	2.18E-05	2.03E-05	1.84E-05	1.69E-05	1.57E-05	1.29E-05
İnce Bağırsak	2.33E-07	4.41E-06	1.47E-05	3.05E-05	3.03E-05	2.19E-05	1.88E-05	1.71E-05	1.54E-05	1.42E-05	1.32E-05	1.09E-05
Mide	-	1.84E-07	1.92E-06	1.04E-05	1.72E-05	1.5E-05	1.31E-05	1.18E-05	1.07E-05	9.85E-06	9.22E-06	7.68E-06
Üst Kalın Bağırsak	1.14E-06	1.05E-05	2.67E-05	4.13E-05	3.5E-05	2.44E-05	2.13E-05	1.96E-05	1.78E-05	1.63E-05	1.51E-05	1.24E-05
Kalp	-	-	8.32E-09	8.21E-07	3.8E-06	4.76E-06	4.35E-06	4.03E-06	3.82E-06	3.64E-06	3.47E-06	3.01E-06
Böbrekler	2.72E-03	2.25E-03	1.71E-03	9.02E-04	3.62E-04	2.07E-04	2.08E-04	2.12E-04	1.96E-04	1.79E-04	1.65E-04	1.32E-04
Karaciğer	3.12E-07	3.82E-06	1.17E-05	2.38E-05	2.51E-05	1.92E-05	1.67E-05	1.53E-05	1.38E-05	1.28E-05	1.19E-05	9.83E-06
Akciğerler	-	3.32E-10	4.67E-08	1.05E-06	3.25E-06	3.94E-06	3.8E-06	3.66E-06	3.47E-06	3.29E-06	3.13E-06	2.68E-06
Kas	1.21E-07	8.32E-07	2.17E-06	4.07E-06	4.28E-06	3.5E-06	3.23E-06	3.11E-06	2.94E-06	2.78E-06	2.63E-06	2.25E-06
Pankreas	1.73E-07	6.09E-06	2.45E-05	5.54E-05	5.41E-05	3.82E-05	3.27E-05	2.94E-05	2.63E-05	2.4E-05	2.23E-05	1.81E-05
Kırmızı Kemik İliği	4.68E-09	2.41E-07	1.11E-06	3.86E-06	6.56E-06	7.2E-06	7.33E-06	7.15E-06	6.65E-06	6.2E-06	5.84E-06	4.9E-06
Kemik	9.1E-10	1.04E-07	6.86E-07	2.82E-06	4.69E-06	3.33E-06	1.89E-06	1.16E-06	9.74E-07	8.99E-07	8.51E-07	7.51E-07
Deri	-	1.27E-09	6.6E-08	6.68E-07	1.28E-06	1.25E-06	1.24E-06	1.32E-06	1.34E-06	1.32E-06	1.28E-06	1.15E-06
Dalak	2.04E-06	2.16E-05	5.51E-05	8.39E-05	6.28E-05	3.99E-05	3.5E-05	3.27E-05	2.96E-05	2.71E-05	2.51E-05	2.05E-05
Testis	-	-	-	-	5.0E-08	1.68E-07	2.3E-07	3.35E-07	4.32E-07	4.86E-07	5.07E-07	5.15E-07
Timus	-	-	-	4.54E-08	7.89E-07	1.49E-06	1.61E-06	1.65E-06	1.69E-06	1.68E-06	1.65E-06	1.51E-06
Tiroit	-	-	-	1.66E-08	2.57E-07	5.97E-07	6.69E-07	7.29E-07	7.86E-07	7.99E-07	8.06E-07	7.73E-07
Mesane	-	-	-	5.13E-08	5.56E-07	1.18E-06	1.36E-06	1.5E-06	1.54E-06	1.53E-06	1.51E-06	1.37E-06

Ek 3.5. Kaynak pankreas olduğunda bazı organlar için hesaplanan SAF (1/g) değerleri

Hedef Organlar	Enerjiler (MeV)											
	0.01	0.015	0.02	0.03	0.05	0.1	0.2	0.5	1.0	1.5	2.0	4.0
Adrenal	3.74E-05	1.94E-04	3.13E-04	2.90E-04	1.66E-04	1.03E-04	9.57E-05	9.15E-05	8.28E-05	7.54E-05	6.97E-05	5.62E-05
Beyin	-	-	-	-	2.49E-09	1.49E-08	2.71E-08	4.77E-08	6.98E-08	8.44E-08	9.38E-08	1.07E-07
Göğüs	-	-	-	4.58E-07	2.09E-06	3.0E-06	3.45E-06	3.91E-06	4.0E-06	3.91E-06	3.77E-06	3.29E-06
Safra Kesesi	1.82E-04	3.14E-04	2.88E-04	1.89E-04	1.05E-04	6.79E-05	6.4E-05	6.22E-05	5.68E-05	5.19E-05	4.81E-05	3.88E-05
Alt Kalın Bağırsak	3.56E-06	2.01E-05	3.84E-05	4.7E-05	3.53E-05	2.36E-05	2.08E-05	1.93E-05	1.75E-05	1.61E-05	1.49E-05	1.22E-05
İnce Bağırsak	7.35E-06	3.63E-05	7.01E-05	8.55E-05	6.03E-05	3.83E-05	3.36E-05	3.13E-05	2.83E-05	2.59E-05	2.4E-05	1.95E-05
Mide	2.37E-05	9.6E-05	1.56E-04	1.68E-04	1.1E-04	6.92E-05	6.23E-05	5.87E-05	5.31E-05	4.85E-05	4.48E-05	3.63E-05
Üst Kalın Bağırsak	9.09E-07	1.09E-05	3.8E-05	7.26E-05	6.12E-05	3.96E-05	3.39E-05	3.09E-05	2.79E-05	2.55E-05	2.37E-05	1.93E-05
Kalp	-	2.14E-09	5.12E-07	8.46E-06	1.75E-05	1.5E-05	1.26E-05	1.12E-05	1.02E-05	9.48E-06	8.89E-06	7.44E-06
Böbrekler	1.8E-07	6.44E-06	2.59E-05	5.82E-05	5.62E-05	3.86E-05	3.27E-05	2.93E-05	2.62E-05	2.4E-05	2.22E-05	1.81E-05
Karaciğer	8.35E-08	2.65E-06	1.25E-05	3.55E-05	4.03E-05	2.93E-05	2.47E-05	2.2E-05	1.98E-05	1.81E-05	1.69E-05	1.38E-05
Akciğerler	-	2.06E-09	3.12E-07	4.09E-06	8.47E-06	8.14E-06	7.29E-06	6.68E-06	6.13E-06	5.69E-06	5.34E-06	4.47E-06
Kas	4.25E-09	1.13E-07	4.34E-07	1.35E-06	2.37E-06	2.41E-06	2.25E-06	2.17E-06	2.08E-06	1.98E-06	1.9E-06	1.65E-06
Pankreas	1.08E-02	8.21E-03	5.58E-03	2.51E-03	9.09E-04	5.31E-04	5.55E-04	5.8E-04	5.38E-04	4.91E-04	4.53E-04	3.62E-04
Kırmızı Kemik İliği	-	1.01E-07	1.02E-06	4.31E-06	7.11E-06	7.4E-06	7.35E-06	7.06E-06	6.53E-06	6.08E-06	5.71E-06	4.79E-06
Kemik	-	6.98E-09	1.34E-07	1.42E-06	3.76E-06	3.09E-06	1.76E-06	1.05E-06	8.59E-07	7.91E-07	7.48E-07	6.62E-07
Deri	-	-	1.18E-08	2.86E-07	8.52E-07	9.86E-07	1.0E-06	1.09E-06	1.13E-06	1.12E-06	1.09E-06	9.9E-07
Dalak	2.73E-08	3.19E-06	1.86E-05	4.82E-05	4.7E-05	3.22E-05	2.73E-05	2.45E-05	2.21E-05	2.02E-05	1.88E-05	1.54E-05
Testis	-	-	-	-	4.2E-08	1.06E-07	1.5E-07	2.28E-07	3.11E-07	3.52E-07	3.79E-07	4.08E-07
Timus	-	-	-	3.65E-07	2.73E-06	3.87E-06	3.77E-06	3.67E-06	3.55E-06	3.43E-06	3.3E-06	2.9E-06
Tiroit	-	-	-	4.79E-08	6.04E-07	1.18E-06	1.19E-06	1.17E-06	1.2E-06	1.21E-06	1.21E-06	1.13E-06
Mesane	-	-	-	2.64E-08	3.31E-07	7.25E-07	8.56E-07	9.8E-07	1.05E-06	1.07E-06	1.06E-06	9.98E-07

Ek 3.6. Kaynak dalak olduğunda bazı organlar için hesaplanan SAF (1/g) değerleri

Hedef Organlar	Enerjiler (MeV)											
	0.01	0.015	0.02	0.03	0.05	0.1	0.2	0.5	1.0	1.5	2.0	4.0
Adrenal	5.96E-07	8.04E-06	2.3E-05	4.44E-05	4.19E-05	3.16E-05	2.83E-05	2.6E-05	2.34E-05	2.15E-05	2.0E-05	1.63E-05
Beyin	-	-	-	-	6.61E-09	2.8E-08	4.85E-08	8.74E-08	1.23E-07	1.4E-07	1.49E-07	1.54E-07
Göğüs	-	-	5.87E-09	3.19E-07	1.32E-06	1.98E-06	2.31E-06	2.66E-06	2.76E-06	2.71E-06	2.63E-06	2.32E-06
Safra Kesesi	-	-	1.21E-08	6.93E-07	3.32E-06	4.62E-06	4.46E-06	4.24E-06	4.0E-06	3.79E-06	3.6E-06	3.12E-06
Alt Kalın Bağırsak	3.01E-06	2.22E-05	5.46E-05	7.65E-05	5.39E-05	3.37E-05	2.99E-05	2.81E-05	2.56E-05	2.34E-05	2.17E-05	1.77E-05
İnce Bağırsak	-	6.8E-08	1.45E-06	9.13E-06	1.41E-05	1.16E-05	9.98E-06	9.03E-06	8.25E-06	7.66E-06	7.19E-06	6.01E-06
Mide	1.29E-05	4.37E-05	6.51E-05	7.13E-05	5.29E-05	3.65E-05	3.32E-05	3.13E-05	2.85E-05	2.61E-05	2.43E-05	1.98E-05
Üst Kalın Bağırsak	2.38E-09	3.1E-07	1.92E-06	6.02E-06	8.6E-06	7.75E-06	6.92E-06	6.41E-06	5.97E-06	5.59E-06	5.28E-06	4.47E-06
Kalp	-	1.44E-08	4.63E-07	5.48E-06	1.17E-05	1.07E-05	9.17E-06	8.17E-06	7.46E-06	6.94E-06	6.52E-06	5.48E-06
Böbrekler	2.02E-06	2.14E-05	5.42E-05	8.29E-05	6.24E-05	3.99E-05	3.51E-05	3.27E-05	2.96E-05	2.71E-05	2.51E-05	2.05E-05
Karaciğer	-	-	5.21E-08	1.44E-06	5.23E-06	6.5E-06	6.01E-06	5.56E-06	5.19E-06	4.89E-06	4.63E-06	3.97E-06
Akciğerler	2.04E-06	8.41E-06	1.43E-05	1.85E-05	1.59E-05	1.23E-05	1.12E-05	1.04E-05	9.4E-06	8.61E-06	8.01E-06	6.56E-06
Kas	1.71E-07	8.43E-07	1.84E-06	3.35E-06	3.77E-06	3.16E-06	2.96E-06	2.89E-06	2.75E-06	2.59E-06	2.46E-06	2.1E-06
Pankreas	2.53E-08	2.89E-06	1.73E-05	4.53E-05	4.5E-05	3.18E-05	2.73E-05	2.47E-05	2.22E-05	2.03E-05	1.88E-05	1.54E-05
Kırmızı Kemik İliği	8.23E-08	1.26E-06	2.95E-06	5.06E-06	6.1E-06	6.12E-06	6.24E-06	6.15E-06	5.74E-06	5.36E-06	5.04E-06	4.23E-06
Kemik	4.3E-08	1.04E-06	3.93E-06	9.21E-06	9.13E-06	4.58E-06	2.38E-06	1.54E-06	1.31E-06	1.2E-06	1.13E-06	9.76E-07
Deri	-	1.9E-08	2.77E-07	1.18E-06	1.6E-06	1.41E-06	1.4E-06	1.49E-06	1.49E-06	1.45E-06	1.4E-06	1.24E-06
Dalak	3.91E-03	3.34E-03	2.6E-03	1.41E-03	5.7E-04	3.22E-04	3.22E-04	3.29E-04	3.04E-04	2.78E-04	2.56E-04	2.06E-04
Testis	-	-	--	-	9.48E-09	4.06E-08	6.6E-08	1.29E-07	1.93E-07	2.31E-07	2.55E-07	2.87E-07
Timus	-	-	-	4.74E-07	2.45E-06	3.35E-06	3.29E-06	3.16E-06	3.02E-06	2.89E-06	2.77E-06	2.41E-06
Tiroit	-	-	-	2.92E-07	1.34E-06	1.88E-06	1.84E-06	1.8E-06	1.75E-06	1.68E-06	1.6E-06	1.39E-06
Mesane	-	-	-	-	6.7E-08	2.54E-07	3.67E-07	4.97E-07	5.94E-07	6.34E-07	6.48E-07	6.43E-07

Ek 3.7. Kaynak kalp olduğunda bazı organlar için hesaplanan SAF (1/g) değerleri

Hedef Organlar	Enerjiler (MeV)											
	0.01	0.015	0.02	0.03	0.05	0.1	0.2	0.5	1.0	1.5	2.0	4.0
Adrenal	-	-	8.19E-08	3.17E-06	9.36E-06	9.89E-06	8.99E-06	8.22E-06	7.55E-06	7.02E-06	6.62E-06	5.58E-06
Beyin	-	-	-	8.46E-10	2.53E-08	8.93E-08	1.31E-07	1.9E-07	2.41E-07	2.64E-07	2.76E-07	2.79E-07
Göğüs	-	5.07E-08	1.37E-06	7.29E-06	1.04E-05	1.03E-05	1.11E-05	1.17E-05	1.11E-05	1.04E-05	9.8E-06	8.13E-06
Safra Kesesi	-	-	5.97E-08	2.73E-06	8.81E-06	9.19E-06	8.34E-06	7.76E-06	7.22E-06	6.78E-06	6.41E-06	5.44E-06
Alt Kalın Bağırsak	-	-	1.64E-07	2.33E-06	5.04E-06	4.73E-06	4.16E-06	3.86E-06	3.63E-06	3.44E-06	3.27E-06	2.82E-06
İnce Bağırsak	-	9.73E-10	1.03E-07	1.77E-06	4.56E-06	4.61E-06	4.12E-06	3.86E-06	3.67E-06	3.49E-06	3.32E-06	2.87E-06
Mide	1.63E-07	8.27E-06	2.99E-05	5.67E-05	5.06E-05	3.52E-05	3.14E-05	2.94E-05	2.67E-05	2.45E-05	2.28E-05	1.86E-05
Üst Kalın Bağırsak	-	3.13E-08	5.87E-07	3.97E-06	7.85E-06	7.33E-06	6.5E-06	6.08E-06	5.72E-06	5.39E-06	5.1E-06	4.34E-06
Kalp	2.22E-03	1.74E-03	1.3E-03	7.14E-04	3.09E-04	1.77E-04	1.75E-04	1.79E-04	1.65E-04	1.51E-04	1.4E-04	1.12E-04
Böbrekler	-	-	7.7E-09	7.97E-07	3.77E-06	4.75E-06	4.36E-06	4.04E-06	3.83E-06	3.64E-06	3.48E-06	3.01E-06
Karaciğer	1.02E-06	5.85E-06	1.3E-05	2.36E-05	2.51E-05	1.89E-05	1.65E-05	1.52E-05	1.39E-05	1.28E-05	1.2E-05	9.9E-06
Akciğerler	1.11E-05	4.55E-05	7.53E-05	8.11E-05	5.34E-05	3.4E-05	3.07E-05	2.89E-05	2.61E-05	2.38E-05	2.2E-05	1.78E-05
Kas	8.59E-08	3.31E-07	8.31E-07	1.99E-06	2.73E-06	2.48E-06	2.32E-06	2.23E-06	2.11E-06	1.99E-06	1.88E-06	1.61E-06
Pankreas	-	-	4.71E-07	7.97E-06	1.68E-05	1.48E-05	1.26E-05	1.13E-05	1.03E-05	9.53E-06	8.94E-06	7.46E-06
Kırmızı Kemik İliği	8.87E-08	1.08E-06	2.7E-06	5.65E-06	6.99E-06	6.55E-06	6.48E-06	6.29E-06	5.83E-06	5.42E-06	5.08E-06	4.24E-06
Kemik	2.25E-08	5.02E-07	2.25E-06	7.22E-06	8.95E-06	4.76E-06	2.4E-06	1.47E-06	1.22E-06	1.11E-06	1.04E-06	8.9E-07
Deri	-	5.11E-09	9.1E-08	5.34E-07	9.49E-07	9.73E-07	1.02E-06	1.11E-06	1.14E-06	1.12E-06	1.08E-06	9.63E-07
Dalak	-	1.38E-08	4.54E-07	5.39E-06	1.15E-05	1.06E-05	9.12E-06	8.16E-06	7.46E-06	6.93E-06	6.53E-06	5.49E-06
Testis	-	-	-	-	6.33E-09	1.65E-08	2.71E-08	5.33E-08	9.31E-08	1.18E-07	1.39E-07	1.72E-07
Timus	9.04E-05	1.99E-04	2.41E-04	2.02E-04	1.15E-04	7.44E-05	7.26E-05	7.25E-05	6.69E-05	6.14E-05	5.69E-05	4.62E-05
Tiroit	-	-	5.29E-07	5.21E-06	1.08E-05	9.68E-06	8.51E-06	7.98E-06	7.53E-06	7.1E-06	6.71E-06	5.7E-06
Mesane	-	-	-	-	2.11E-08	8.49E-08	1.33E-07	2.08E-07	2.79E-07	3.14E-07	3.35E-07	3.55E-07

Ek 3.8. Kaynak kırmızı kemik iliği olduğunda bazı organlar için hesaplanan SAF (1/g) değerleri

Hedef Organlar	Enerjiler (MeV)											
	0.01	0.015	0.02	0.03	0.05	0.1	0.2	0.5	1.0	1.5	2.0	4.0
Adrenal	-	2.46E-06	6.97E-06	1.28E-05	1.45E-05	1.31E-05	1.26E-05	1.21E-05	1.1E-05	1.02E-05	9.5E-06	7.82E-06
Beyin	4.48E-07	9.33E-07	1.28E-06	1.65E-06	1.44E-06	1.16E-06	1.17E-06	1.22E-06	1.16E-06	1.09E-06	1.03E-06	8.72E-07
Göğüs	-	7.9E-08	5.32E-07	1.17E-06	1.53E-06	1.83E-06	2.13E-06	2.42E-06	2.46E-06	2.4E-06	2.31E-06	2.01E-06
Safra Kesesi	-	1.58E-07	6.31E-07	2.23E-06	4.48E-06	5.04E-06	4.77E-06	4.51E-06	4.23E-06	3.97E-06	3.75E-06	3.19E-06
Alt Kalın Bağırsak	8.66E-09	3.43E-07	1.5E-06	5.04E-06	8.42E-06	8.42E-06	7.81E-06	7.23E-06	6.62E-06	6.14E-06	5.76E-06	4.81E-06
İnce Bağırsak	2.05E-09	9.47E-08	5.54E-07	2.88E-06	6.29E-06	6.8E-06	6.26E-06	5.76E-06	5.3E-06	4.95E-06	4.67E-06	3.94E-06
Mide	1.15E-08	2.47E-07	1.05E-06	3.5E-06	5.99E-06	6.15E-06	5.75E-06	5.38E-06	4.97E-06	4.63E-06	4.36E-06	3.68E-06
Üst Kalın Bağırsak	-	6.08E-08	3.53E-07	1.92E-06	4.54E-06	5.13E-06	4.77E-06	4.46E-06	4.17E-06	3.92E-06	3.72E-06	3.17E-06
Kalp	1.12E-07	1.26E-06	3.23E-06	7.01E-06	8.84E-06	7.58E-06	6.86E-06	6.39E-06	5.86E-06	5.44E-06	5.1E-06	4.26E-06
Böbrekler	4.3E-09	2.7E-07	1.29E-06	4.73E-06	8.46E-06	8.57E-06	7.9E-06	7.3E-06	6.7E-06	6.24E-06	5.86E-06	4.91E-06
Karaciğer	1.13E-07	8.85E-07	2.21E-06	4.93E-06	7.16E-06	6.89E-06	6.33E-06	5.89E-06	5.43E-06	5.06E-06	4.75E-06	3.99E-06
Akciğerler	2.42E-06	8.52E-06	1.23E-05	1.36E-05	1.15E-05	9.33E-06	8.89E-06	8.46E-06	7.68E-06	7.04E-06	6.53E-06	5.33E-06
Kas	5.67E-07	1.3E-06	1.83E-06	2.92E-06	3.9E-06	3.9E-06	3.85E-06	3.78E-06	3.55E-06	3.33E-06	3.14E-06	2.65E-06
Pankreas	-	1.14E-07	1.14E-06	5.05E-06	8.81E-06	8.68E-06	7.91E-06	7.23E-06	6.61E-06	6.13E-06	5.75E-06	4.81E-06
Kırmızı Kemik İliği	6.37E-04	3.38E-04	1.85E-04	7.74E-05	3.59E-05	2.86E-05	3.13E-05	3.25E-05	3.02E-05	2.77E-05	2.56E-05	2.07E-05
Kemik	1.24E-05	2.72E-05	3.37E-05	3.29E-05	2.23E-05	9.86E-06	5.49E-06	4.09E-06	3.59E-06	3.27E-06	3.04E-06	2.56E-06
Deri	9.01E-09	7.52E-08	1.97E-07	5.02E-07	9.42E-07	1.13E-06	1.23E-06	1.35E-06	1.38E-06	1.35E-06	1.31E-06	1.17E-06
Dalak	9.7E-08	1.47E-06	3.47E-06	6.1E-06	7.6E-06	7.1E-06	6.62E-06	6.24E-06	5.78E-06	5.38E-06	5.05E-06	4.23E-06
Testis	-	-	-	4.15E-07	1.41E-06	1.93E-06	1.94E-06	1.98E-06	1.94E-06	1.88E-06	1.8E-06	1.59E-06
Timus	1.42E-06	6.44E-06	1.13E-05	1.57E-05	1.35E-05	1.09E-05	1.08E-05	1.07E-05	9.85E-06	9.06E-06	8.44E-06	6.92E-06
Tiroit	-	3.67E-07	1.91E-06	5.57E-06	7.93E-06	6.64E-06	6.05E-06	5.76E-06	5.38E-06	5.01E-06	4.71E-06	3.93E-06
Mesane	3.79E-07	2.63E-06	5.28E-06	1.08E-05	1.37E-05	1.31E-05	1.27E-05	1.2E-05	1.09E-05	1.0E-05	9.33E-06	7.66E-06

ÖZET

Nükleer Tıp prosedürlerinde tanı, teşhis veya tedavi alanında vücuda çeşitli yollarla verilen radyoaktif izotopların, söz konusu organ dışında diğer hayati öneme sahip organlara etkisi hasta sağlığı açısından önemli bir risk faktörüdür. Prosedür uygulanmadan önce bu risk faktörü göz önüne alınarak, söz konusu organa uygun radyoaktif izotop ve miktarı seçilmelidir. Tabi bu risk tespiti için canlı denekler kullanmanın kısmen zor ve imkansız olmasının yanında, tehlikeli sonuçlar doğurabileceğinden, genellikle simülasyon adı verilen bilgisayar ortamında yapılan ölçmeler tercih edilir. Bu tür simülasyonlarda gerçek insan, organ ve doku özelliklerine sahip görüntüsel vücut modelleri kullanılarak yardımcı bir bilgisayar programı ile ölçümler alınır. Kullanılacak bilgisayar programında iyonize edici radyasyonun maddesel ortamda geçirecekleri fiziksel etkileşimlerin bire bir modellenmesi ölçümlerin doğruluk derecesi açısından önemlidir.

Monte Carlo Yöntemi, genel olarak çeşitli istatistik teknikler kullanarak bir olayı veya deneyi sayısal olarak modeller. Bu çalışmada bir Monte Carlo metodu olan ve radyasyon taşınması ile ilgili MCNP programı kullanılmıştır. MCNP programında simüle edilecek olay için kullanılacak görüntüsel vücut modeli olarak, bir insanın gerçek anatomisine dayanılarak oluşturulmuş VIPMAN kullanılmıştır. Radyasyon kaynağının vücut dışında bulunduğu VIPMAN ile ilgili çalışmaların dışında, VIPMAN vücut modelinin kullanıldığı bu çalışmada ilk defa radyasyon kaynağı vücut içerisinde düşünülmüştür.

Yapılan simülasyonlarda bir nükleer tıp prosedürü sırasında söz konusu organ dışında, diğer hayati öneme sahip organların radyoaktif kaynaktan yayılan radyasyon enerjisini soğurma oranları belirlenmiştir. Bu değerlere özgül soğurma oranı (Specific Absorbed Fraction, SAF) adı verilmektedir. Aynı zamanda kaynağın aktivitesi ile ilgili olarak, her birim kümülatif aktiviteye karşılık, hedefte biriken doz olarak tanımlanan ve S-değeri olarak adlandırılan diğer önemli bir risk faktörünün ölçümleri de yapılmıştır.

Bu alışma sonucunda elde edilen sonuçlar literatürde bulunan değerlerle kıyaslanarak, nükleer tıp prosedürlerinde kullanılan radyoaktif izotopların insan sağlığı açısından risk dereceleri belirlenmiştir. Ayrıca her simülasyon için organ dozları tespit edilerek her sintigrafi çeşidi için vücudun aldığı etkin doz değeri hesaplanmıştır.

SUMMARY

In nuclear medicine procedures, effects of radioisotopes injected or orally administered into patient's body are important risk factors for critical organs other than the organ of interest. Before the procedure, the type and amount of the radioisotope convenient for the organ under study is selected. However, determining the risk involved using human subjects is difficult or impossible and may cause unwanted results and therefore computer simulations are usually employed for this purpose. In such studies, body models based on the anatomy of real persons are used to compute the quantities of interest and the computer programs take into account the correct representation of the physical interactions of the ionizing radiation with body structures.

The Monte Carlo method numerically models an event or an experiment using some statistical techniques. In this study, the Monte Carlo code MCNP was used to transport the photon radiation within human body, which was represented by the whole-body model VIP-Man. It is the first time that this model was used for internal dose calculations.

The simulations involved computing the fraction of radiation energy absorbed by critical organs and tissues other than the one containing the photon source. These values are called specific absorbed fraction (SAF). In addition, the radiation absorbed in target organs per unit of cumulated source activity (S-value) was also determined.

The results obtained from this study are compared with those from the literature to obtain information on the risk factors involved in using radioactive isotopes in a nuclear medicine procedure. In addition, organ doses were determined for each simulation to calculate the effective dose involved in such a procedure.