

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
(YÜKSEK LİSANS TEZİ)

114101

**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

SU VE Li, Al, Pb VE Cu İÇEREN SOĞURUCULAR İÇİN
EGS4 MONTE CARLO METODU İLE YIĞILMA
FAKTÖRLERİNİN EFFEKTİF ATOM NUMARASI İLE
DEĞİŞİMİNİN İNCELENMESİ

Berkay CAMGÖZ

Nükleer Bilimler Enstitüsü

Nükleer Bilimler Anabilimdalı



Bilim Dalı Kodu: 622.01.01

Sunuş tarihi: 12.04.2001

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mehmet N. KUMRU

Sayın Berkay CAMGÖZ tarafından YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak sunulan “ Al, Pb, Cu, Li ve Su İçeren Soğurucular İçin Egs4 Monte Carlo Metodu ile Yığılma Faktörlerinin Effektif Atom Numarası İle Değişiminin İncelenmesi” adlı bu çalışma, “ Lisansüstü Eğitim Ve Öğretim Yönetmeliği” nin 12. madde (c) ve (d) bentleri ve Enstitü yönetgesinin ilgili hükümleri dikkate alınarak tarafımızdan değerlendirilmiş olup yapılan sözlü savunma sınavında aday oy birliği ile başarılı bulunmuştur. Bu nedenle Berkay CAMGÖZ’ün sunduğu metnin yüksek lisans tezi olarak kabulüne oy birliği ile karar verilmiştir.

12 Nisan 2001

Jüri Başkanı : Prof. Dr. GÜNGÖR YENER Raportör : Doç. Dr. Mehmet N. KUMRU Üye : Prof. Dr. Saim SELVİ 

Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 25.06.2001 gün ve 25./40...sayılı kararı ile onaylanmıştır


Dr. Süleyman BORUZANLI
Prof. Dr. Alaettin TAYSUN

Enstitü Sekreteri

Enstitü Müdürü

ÖZET**SU VE Li, Al, Pb VE Cu İÇEREN SOĞURUCULAR İÇİN EGS4
MONTE CARLO METODU İLE YIĞILMA FAKTÖRLERİNİN
EFFEKTİF ATOM NUMARASI İLE DEĞİŞİMİNİN
İNCELENMESİ**

CAMGÖZ, Berkay

Yüksek Lisans Tezi, Nükleer Bilimler Enstitüsü (Fizik)

Tez Yöneticisi: Doç. Dr. Mehmet N. Kumru

0.2, 0.5, 1, 3, 5, 10, 20 ve 50 MeV enerjili gama ışınları için yığılma faktörünün etkin atom numarasına bağımlılığı, EGS4 Monte Carlo Kodu kullanılarak incelendi. Farklı etkin atom numarasına sahip materyallerin hazırlanmasında değişik oranlarda ve homojen olarak Li, Al, Cu ve Pb elementlerinin karışımları kullanıldı. Tüm EGS4 hesaplamaları her bir karışım için bir boyutlu düzlem geometrisinde gerçekleştirildi. Ek bir çalışma olarak EGS4 hesaplamalarının güncelliğinin kontrol edilmesi amacı ile Pb, Fe ve su için yığılma faktörleri hesaplandı. Sonuçların yayımlanmış verilerle uyumlu olduğu görüldü.

Hesaplamalarda yığılma faktörü, foton akısı ve havanın enerji soğurma katsayısı kullanılarak elde edildi. Çalışmada Rayleigh saçılması etkisi göz önünde bulunduruldu fakat Bremstrahlung ve floresans ışınları ihmal edildi. Tüm hesaplamalar exponansiyel dönüşüm ile gerçekleştirildi. Elde edilen datalar gösterdi ki; yığılma faktörü artan etkin atom numarası ile düzgün azalmaktadır. Derin

etkileşimler için yığılma faktörü değışimi daha hızlı olmaktadır. Herhangi bir atom numarası için elde edilen veriler kullanılarak bir yığılma faktörü değeri belirlendi.



ABSTRACT**FOR MATERIALS CONTAINS WATER AND Li, Al, Pb AND Cu
EXAMINING OF BUILD UP FACTORS CHANGE WITH
EFFECTIVE ATOMIC NUMBER USING EGS4 MONTE CARLO
METHOD**

CAMGÖZ, Berkay

MSc in Nuclear Sciences (Physics)

Super Visor: Assoc. Prof. Mehmet N. KUMRU

The Z_{eff} dependence of exposure buildup factors for plane incident source gamma rays of 0.2, 0.5, 1, 3, 5, 10, 20 and 50 MeV have been investigated by using electron gamma shower Monte Carlo code, EGS4. To prepare materials with different Z_{eff} , homogen mixtures composed of Li, Cu, Al and Pb were used in different ratios. All the EGS4 calculations were made in one dimensional plane geometry for each mixture. To check the accuracy of EGS4 calculations, an extra work has been performed for the exposure buildup factors of Pb, Fe and water. Results of these calculations are agreed well with the published data.

In the EGS4 calculations, the exposure was obtained from the photon flux and the energy absorption coefficient of air. The effect of Rayleigh scattering was included but effects of bremstrahlung and fluorescent radiation were not taken into account. All calculations were performed with the exponential transform. The calculated data showed

that buildup factors vary smoothly with increasing Z . At deep penetration depths, variation of buildup factors is more rapid. The value of the buildup factor for an arbitrary atomic number can be obtained by using data resulted from this calculations.

Key words: Buildup, Z_{eff} , EGS4





TEŞEKKÜR

Geniş bir çalışma ve uygulama alanına sahip ve teknoloji ile paralel olarak gelişen bir konunun belirlenmesinde, çalışmamı başarı ile tamamlamamda ve bu alanda kendimi geliştirmemde yardım ve desteğinden dolayı danışmanım Doç. Dr. Mehmet N. Kumru' ya ve çalışma süresince bu konudaki bilgi birikimimde büyük emekleri olan Ar. Gör. Gültekin Yeğın'e saygılarımı ve teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışmam süresince yardımlarından dolayı Enstitümüzün değerli hocalarına, araştırma görevlisi bilimci arkadaşlarıma ve Enstitü çalışanlarına çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	III
ABSTRACT	V
TEŞEKKÜR.....	VII
ÇİZELGELER DİZİNİ	X
ŞEKİLLER DİZİNİ	XII
1. GİRİŞ.....	1
2. FOTON MADDE ETKİLEŞİMİ	5
2.1. FOTOELEKTRİK OLAY	6
2.2. COMPTON SAÇILMASI	8
2.3. ÇİFT OLUŞUMU	10
3. YIĞILMA FAKTORÜ	11
4. EGS4 SİMİLASYON PROGRAMI VE ÇALIŞMA METODU	16
4.1 SİMİLASYON	16
4.2 EGS4 PROGRAMI	16
4.3 PEGS4 VERİ DOSYALARININ HAZIRLANMASI	17
4.4 EGS4 PRENSİBİ - MONTE CARLO METODU.....	19
4.5 SİMÜLE EDİLEN FİZİKSEL PROSESLER	21
4.5.1 EGS4’TE PARÇACIK TAŞINMASI	21
4.5.2 PARÇACIK ETKİLEŞİMLERİ	23
4.5.3. ELEKTRON PROSESİ	24
4.5.4. FOTON PROSESİ	24

5. YIĞILMA FAKTÖRÜ HESAPLAMA METODU	25
SONUÇ	29
KAYNAKLAR	55
ÖZGEÇMİŞ	59



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.1. Yığılmahasaplama programının test edilmesi amacı ile bazı elementlerin mfp-yığılma faktörü değişimlerinin daha önce yapılmış çalışmalara ait değerler ile karşılaştırılması	31
Çizelge 5.2 Herbir karışım için karışımı oluşturan elementlerin karışım oranları	32
Çizelge 5.3 Herbir karışım için 1mfp ortalama serbest yolun cm cinsinden değeri	32
Çizelge 5.4 200 keV enerjili fotonlar için Yığılmafaktörleri	33
Çizelge 5.5 500 keV enerjili fotonlar için Yığılmafaktörleri	34
Çizelge 5.6 1 MeV enerjili fotonlar için Yığılmafaktörleri	35
Çizelge 5.7 3 MeV enerjili fotonlar için Yığılmafaktörleri	36
Çizelge 5.8 5 MeV enerjili fotonlar için Yığılmafaktörleri	37
Çizelge 5.9 10 MeV enerjili fotonlar için Yığılmafaktörleri	38
Çizelge 5.10 20 MeV enerjili fotonlar için Yığılmafaktörleri	39
Çizelge 5.11 50 MeV enerjili fotonlar için Yığılmafaktörleri	40
Çizelge 5.12 200 keV enerjili fotonlar için etkin atom numarasına göre yığılmafaktörleri....	41
Çizelge 5.13 500 keV enerjili fotonlar için etkin atom numarasına göre yığılmafaktörleri	41

Çizelge 5.14 1 MeV enerjili fotonlar için etkin atom numarasına göre yığılmafaktörleri.....	42
Çizelge 5.15 3 MeV enerjili fotonlar için etkin atom numarasına göre yığılmafaktörleri.....	42
Çizelge 5.16 5 MeV enerjili fotonlar için etkin atom numarasına göre yığılmafaktörleri	43
Çizelge 5.17 10 MeV enerjili fotonlar için etkin atom numarasına göre yığılmafaktörleri	43
Çizelge 5.18 20 MeV enerjili fotonlar için etkin atom numarasına göre yığılmafaktörleri	44
Çizelge 5.19 50 MeV enerjili fotonlar için etkin atom numarasına göre yığılmafaktörleri	44

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
Şekil 4.1. EGS4 programının genel akış diyagramı	19
Şekil 5.1.1 Kurşun için ortalama serbest yol – Buildup Faktörü değişimi	45
Şekil 5.1.2 Bakır için ortalama serbest yol – Buildup Faktörü değişimi	45
Şekil 5.1.3 Alimiyum için ortalama serbest yol – Yığılma Faktörü değişimi	45
Şekil 5.1.4 Su için ortalama serbest yol – Yığılma Faktörü değişimi	46
Şekil 5.1.5 Lityum için ortalama serbest yol – Buildup Faktörü değişimi	46
Şekil 5.1.6 Demir için ortalama serbest yol – Yığılma Faktörü değişimi	46
Şekil 5.2 200 keV enerjili fotonlar için etkin atom numarasına göre yığılmafaktörleri	47
Şekil 5.3 500 keV enerjili fotonlar için etkin atom numarasına göre yığılmafaktörleri.....	48

Şekil 5.4 1 MeV enerjili fotonlar için etkin atom numarasına göre yığılmafaktörleri	49
Şekil 5.5 3 MeV enerjili fotonlar için etkin atom numarasına göre yığılmafaktörleri	50
Şekil 5.6 5 MeV enerjili fotonlar için etkin atom numarasına göre yığılmafaktörleri	51
Şekil 5.7 10 MeV enerjili fotonlar için etkin atom numarasına göre yığılmafaktörleri	52
Şekil 5.8 20 MeV enerjili fotonlar için etkin atom numarasına göre yığılmafaktörleri	53
Şekil 5.9 50 MeV enerjili fotonlar için etkin atom numarasına göre yığılmafaktörleri	54

1. GİRİŞ

Yığılma faktörü kavramı ilk kez Co-60'a ait gamaların su ile etkileşiminin incelenmesinde ortaya atıldı (White 1950). Soğurma katsayısı hesaplamalarında yığılma faktörünün önemi Fano tarafından belirtildi (Fano 1953). Goldstein ve Wilkins Point Kernel metodunu kullanarak yığılmafaktörlerinin geniş bir tablosunu oluşturdular (Goldstein ve Wilkins, 1954). Daha sonra yığılma faktörü, nokta izotropik kaynaklar için point kernel kodunda birleştirildi. Yığılma faktörü, gama-soğurulma çalışmalarında pratik olarak kullanıldı. Uzun süredir bu alanda pek çok çalışma yapılmıştır ve elde edilen veriler standart kabul edilerek kullanılmaktadır (Harima,1993). Yakın zamana kadar zırlama hesaplarında düşük enerjiler ve bazı önemli malzemeler için Point kernel yönteminin sonuçları kullanılmakta idi.

Three Mile adası kazasından edinilen tecrübeler gama artış değerlerine ait datalar mühendislikte kaza kontrol ve analizlerinde oldukça yararlı olmuştur. 1980'de hedeflenen standardı geliştirmek için ANS (American Nuclear Society) çalışma grubu kuruldu (Trubey, 1983). ANS'den önce mevcut olan yığılmadeğerleri Ulusal Standartlar Bürosunda var olan momentler metodu ile hesaplanmıştı. Çimento, hava, su ve demir için yığılmadeğerleri mevcuttu (Chilton ve grubu, 1980). Goldstein – Wilkins'e ait hesaplamalar sadece Compton saçılmasını içeriyordu. Bununla birlikte NBS (National Buroue of Standards)'nin elde ettiği değerler fotonların oluşturduğu ikincil kaynaklara ait olayları da içeriyordu; (floresans ışımaya ve anihilasyon). NBS'e ait datalar Monte Carlo ve diğer taşıma teorisi hesaplamaları ile karşılaştırıldı ve bazı değişiklikler yapıldı (Takauchi ve Tanaka, 1981, 1984). Bremsstrahlung

ve flouresans ışımları etkileri de hesaba katılarak ilave malzemeler için yığılmafaktörleri PALLAS kodu kullanılarak hesaplandı (Takauchi ve Tanaka, 1981, 1984). Bu ikincil kaynaklar için özellikle yüksek atom numaralı materyaller önemlidir.

Çalışma grubu en çok kullanılan yığılmafaktörlerinin, bir fantom da enerji absorpsiyonu ve radyasyon sızıntısı varsayımı yapan nokta kernel hesaplamaları için olduğunu gördüler. Zırhlamada, özellikle zırh maddesinin ağır elementlerden oluşması hallerinde sonsuz olarak kabul edilen ortamda, yığılma faktörlerinin belirlenmesi önemlidir. Bu nedenle bir düzeltme faktörü tablosu sunuldu ve standartlara eklendi.

Koherent saçılmaların yığılmafaktörlerini etkilemediği düşünüldüğü için ilk hesaplamalarda koherent saçılmalar ihmal edilmişti. Koherent saçılmalarda foton enerjisinde bir değişme olmamaktadır fakat birkaç yüz keV'in altında yüksek atom numaralı maddeler için fotonun büyük bir açı ile düzgünce saçılması ihtimali mevcuttur (Harima ve arkadaşları, 1991). Bu düzgün saçılmalar nedeni ile yığılmafaktörlerinin düzeltilmesi için yeni değerler standartlara eklenmiştir.

Goldstein ve Wilkins hesaplamalarında yalnızca Compton saçılmasına uğrayan fotonları hesaba katmışlardı. Morris, momentler metodunu kullanarak yok olma fotonlarının etkisini de ilave etti. Subbaiah ASFIT codu üzerinde, Takeuchi ve Tanaka PALLAS kodunda Bremsstrahlung ve floresan ışımlarını hesaba katmak için değişiklikler yaptılar. EGS4 kodu ise tüm ikincil fotonları hesaba katmıştır.

Japon Atom Enerjisi Kurumu, Tanakanın önderliğindeki gama ışını yığılma faktörü çalışma grubu 1950'den 1987'ye kadar yayınlanmış

gama ışını yığılma faktörü datalarının detaylı bir taramasını gerçekleştirdiler (Tanaka ve arkadaşları, 1988).

Sakamoto, Yığılma- etkin atom numarası değişimini incelediği çalışmasında farklı foton enerjilerinde farklı atom numaralarına sahip elementleri soğurucu ortam olarak ele almıştır (Sakamoto 1988). Buna benzer bir çalışmayı Sidhu biyolojik örnekler için yapmıştır (Sidhu 2000). Bu çalışmada ise farklı etkin atom numarasına sahip karışımlar kullanılmıştır. Önceki çalışmalardan farklı olarak daha geniş bir enerji spektrumu içerisinde çalışılmıştır. Bunun yanında yığılma faktörünün deneysel yöntemlerle hesaplanması oldukça güç olduğundan çok az sayıda çalışma mevcuttur.

Yığılma faktörü değeri çeşitli parametrelere bağlı olarak değişir. Bu parametreler, gelen fotonun enerjisi, ortam materyalinin cinsi ve kalınlığı, ortamın geometrik düzeni ve materyalin etkin atom numarasıdır. Şimdiye kadar, herhangi bir enerjideki foton için, bu parametrelere bağlı yığılma faktörü değişimini veren genel bir ifade ortaya konmamıştır. Bu amaçla bir çok yarı ampirik formülasyon (Wilkins 1954) kullanılıyor olmasına rağmen bu ifadeler birtakım deneysel verilerin önceden hesaplanmasını gerektirdiğinden kullanışlı değildir. Bu nedenle gama ışını yığılma faktörlerinin düşük Z değerli materyallerden, yüksek Z değerli materyallere kadar olan geniş bir aralıkta, ortamın etkin atom numarası ile değişimine yönelik hesaplamaların yer aldığı bir veri tabanına büyük ihtiyaç vardır. Yığılma faktörü, foton enerjisi ve soğurucu özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. Soğurucu ortam element, bileşik ve ya karışım olabilir. Foton madde etkileşimlerinde tesir kesitler oldukça önemlidir ve atom

numarası ile değişir. Bu nedenle soğurucu ortamın atom numarası etkileşimlerde oldukęa önemlidir. Her elementin bilinen bir atom numarası olmasına rağmen karışım ve bileşikler için atom numarasından bahsedemeyiz ama bunlar için etkin atom numarası kavramı kullanılmaktadır ve belirlenmesi oldukęa zordur. Karışımlar ve bileşikler birçok farklı cins atomu farklı oranlarda içerirler. Etkin atom numarası sağlık fiziği, maden arama ve jeolojik çalışmalarda, zırhlamada önemli bir parametredir.



2. FOTON MADDE ETKİLEŞİMİ

Radyasyon madde etkileşimi, radyasyonun türüne göre incelenmektedir. Bir radyasyon maddesel bir ortama girdiğinde sahip olduğu enerjiyi bu ortamda diğer parçacıklara aktararak kaybeder ve başka fiziksel olayların gerçekleşmesine neden olur. Fakat meydana gelen fiziksel olaylar radyasyon türü ve enerji değeri ile farklılık gösteren karakterdedir. Yüklü parçacıklar ve fotonların etkileşim mekanizmaları birbirinden farklıdır. Bir farklılık olarak; foton madde etkileşiminde "yığılma faktörü" ortaya çıkmaktadır.

Bilindiği üzere fotonlar durgun kütleleri ve elektrik yükleri sıfır olan elektromagnetik dalgalardır. Gama radyasyonu yüksek enerjili fotonlardır. Radyasyon madde etkileşimini belirleyen bazı parametreler vardır. Radyasyonun türü ve enerjisi, maddesel ortamın özellikleri, etkileşim şeklini belirleyen faktörlerdir. Fotonlar, maddesel ortama girdiklerinde etkin olarak fotoelektik soğrulma, Compton saçılması ve çift oluşumu etkileşimlerinde bulunurlar ancak bu etkileşimlerin maddesel ortamın özelliklerine ve foton enerjisine bağlı, "olma olasılıkları" vardır. Bunu, etkileşime ait "tesir kesitleri" belirlemektedir.

Gamma radyasyonunun madde ile etkileşimi radyasyon zırhlama konuları için önemlidir ve 10 keV ile 10 MeV arasındaki enerji değerlerinde bulunan fotonlar zırhlamada dikkate alınmaktadır. Bu enerji aralığında; fotoelektrik olay, Compton saçılması ve çift oluşumu etkileşimleri gözlenmektedir. Foton madde etkileşiminde ikincil parçacıklar da meydana gelmektedir ve etkileşim mekanizması daha komplike olmaktadır. Etkileşime girecek gamma radyasyonunun enerjisinin artması yada azalması etkileşim türünün gerçekleşme

ihtimalini değiştirecektir. Düşük enerjilerde fotoelektrik etkileşim diğer iki etkileşim türüne göre daha yüksek ihtimallidir. Yüksek enerjilerde Compton saçılması olasılığı daha fazladır ve gamma radyasyonunun enerjisi 1.022 MeV'in üzerinde olması halinde çift oluşumu ihtimali var olacaktır.

2.1. FOTOELEKTRİK OLAY

Düşük enerjilerde daha yüksek olasılıklı olan fotoelektrik etkileşimde foton atomik elektron tarafından soğurular ve elektron yeterince kinetik enerjiye sahipse atomdan fırlatılır. Bu kopan elektrona "fotoelektron" denir. Foton, maddesel ortama girdiğinde öncelikle atomik elektronlarla etkileşime girecektir.(ancak enerjisi yüksek ise çekirdek alanı ile etkileşme ihtimali artar). Elektronun kopması için gelen fotonun enerjisinin elektronun atoma bağlanma enerjisinden büyük olması gerekmektedir. Elektron tarafından soğurulan fotonun enerjisinin belirli bir kısmı bağlanma enerjisini yenmek için kullanılır ve kalan fazla enerji elektronun kinetik enerjisi olur. Elektronunu kaybeden atom uyarılmış olur ve böylelikle momentum korunur.

Fotoelektronun kinetik enerjisi: $T = E_{\text{foton}} - E_{\text{bağlanma}}$

Elektronun atoma bağlanma enerjisi bulunduğu kabuğa göre içten dışa doğru sırası ile K, L, M,... kabukları boyunca azalacaktır. Fotonun enerjisi elektronun K kabuğuna bağlanma enerjisinden az ise, fotonun L,M,... kabuklarının elektronları ile etkileşime ihtimali yüksektir. Ağır çekirdeklerde fotoelektrik etkileşimlerin %80'i genelde K kabuğundan

bir fotoelektronun kopması ile gerçekleşir, hafif çekirdeklerde ise fotoelektrik etkileşimlerin tamamı K kabuğundan elektron kopması ile sonuçlanır. Etkileşim ihtimalini ifade eden fotoelektrik tesir kesit " E^{-n} " ile değişmektedir düşük enerjilerde $n=3$, yüksek enerjilerde $n=1$ (yaklaşık olarak) olur. Atomik tesir kesit Z^m ile değişim göstermektedir. Foton enerjisi $E= 100$ keV iken $m \approx 4$ civarında, $E=3$ MeV iken $m \approx 4.6$ ya kadar çeşitli değerler almaktadır. Fotoelektrik etkileşimin daha etkin olduğu enerji bölgelerinde etkileşimin tesir kesit σ_{ph} :

$$\sigma_{ph}(E) \propto \frac{Z^4}{E^3} \quad 2.1$$

fotoelektrik tesir kesiti bu şekilde E ve Z ile orantılıdır.

Elektron başına ortalama tesir kesit σ_{ph}^e :

$$\sigma_{ph}^e(E) = Z^{-1} \sigma_{ph}(E) \quad 2.2$$

Atomdan ayrılan fotoelektron ardında bir boşluk oluşturur ve bu boşluk dıştaki bir kabuktan gelen bir elektron tarafından doldurulur. Bu nedenle X-ışınları yada Auger elektronları yayınlanabilir. Çeşitli enerjilerde X-ışınları yayınlanabilmesine rağmen genelde fotoelektronun bağlanma enerjisine eşit enerjide X – ışını fotonu ve ya Auger elektronu emisyonu gerçekleştiği yaklaşımları yapılabilmektedir.

2.2. COMPTON SAÇILMASI

Compton saçılması, E enerjili bir fotonun durgun bir elektron tarafından saçılması ile gerçekleşen bir etkileşimdir. Etkileşim sonucunda foton, enerjisinin bir kısmını kaybeder ve geliş doğrultusu ile 0-180 aralığındaki bir açı ile saçılır. m_e kütleli elektron fotonun geliş doğrultusu ile θ açısı oluşturacak şekilde belli bir enerji ile saçılır. E enerjisi ile gelip elektron tarafından E' enerjisi ile saçılan foton için toplam relativistik enerjinin ve lineer momentumun korunumu bağıntıları kullanılarak E' enerjisi

$$E' = \frac{E}{1 + (E / m_e c^2)(1 - \cos^2 \theta)} \quad 2.3$$

olarak hesaplanır.

Foton taşıma hesapları enerjiye değil, gelen ve saçılan fotonun dalga boyuna bağlı olarak elde edilen eşitlikler ile yapılır. Eşitliklerde bir katsayı olarak karşımıza çıkan $hc/m_e c^2$ ifadesi "Compton dalga boyu" olarak adlandırılır. Compton denklemi dalga boyları cinsinden düzenlenirse;

$$\lambda' = \lambda + 1 - \cos \theta \quad \text{eşitliğine ulaşırız.} \quad 2.4$$

λ : gelen fotonun dalga boyu, λ' : saçılan fotonun dalga boyu

Fotonu saçan elektron uyarılmış olur ve bir kinetik enerjisi vardır. Bunu da hesaba katarsak;

$$\frac{m_e c^2}{T} = \lambda \left(1 + \frac{\lambda}{1 - \cos \theta} \right) \quad \text{olur.} \quad 2.5$$

θ açısı ile saçılan fotonun ve ϕ açısı ile (gelen fotonun geliş doğrultusu ile yaptığı açılar) saçılan elektronun saçılma açıları arasında;

$$\cot \phi = (1 + \lambda^{-1}) \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad \text{bağıntısı bulunur.} \quad 2.6$$

$\theta = \pi$ veya $\phi = 0$ iken foton tarafından elektrona maksimum enerji aktarılır.

Fotonların serbest elektronlardan saçılması ile atomik elektronlardan yapacağı Koherent saçılma ortaktır. Rayleigh saçılmasında fotonun aktardığı momentum atom tarafından alınacağı için fotonun enerji kaybı az olur ve küçük bir açı ile saçılır. Koherent saçılma ihtimali inkoherent saçılma ihtimalinden büyüktür yani Koherent saçılmaya ait tesir kesit inkoherent saçılma tesir kesitinden büyüktür. Yüksek Z'li maddelerle etkileşime giren düşük enerjili fotonlar için bu daha belirgindir. Bu nedenle yüksek enerjili fotonlar için Rayleigh saçılması çoğu kez ihmal edilebilmektedir, Koherent saçılma düşük enerjili fotonlar için hesaba katılmaktadır. Koherent saçılmada fotonun enerjisinde ve yayılma doğrultusundaki değişim oldukça küçüktür. Koherent saçılma, elektronun bağlanma enerjisinin dikkate alınmadığı durumlarda da ihmal edilmektedir.

2.3 ÇİFT OLUŞUMU

Fotonun maddesel ortamda atom çekirdeklerinin alanı ile etkileşiminin sonucudur. Çekirdek alanına giren foton soğrulur ve o bölgede elektron - pozitron çifti meydana gelir. Bu etkileşim düşük ihtimalle elektron alanında da gerçekleşir. Nükleer çift oluşumunda fotonun eşik enerjisi $2m_e c^2$ olmalıdır çünkü oluşacak parçacık çiftinin toplam kütle enerjisi buna eşittir ancak olayın gözlenebilmesi için fotonun bu eşik değerden daha fazla enerjiye sahip olması gerekir. Enerjinin $2m_e c^2$ kadarı ile parçacık çifti oluşacak ve geri kalan kısmı parçacıkların kinetik enerjisi olacaktır. Etkileşim sonunda çekirdek ihmal edilebilecek değerde kinetik enerji kazanmaktadır. Sistemin enerji korunumu;

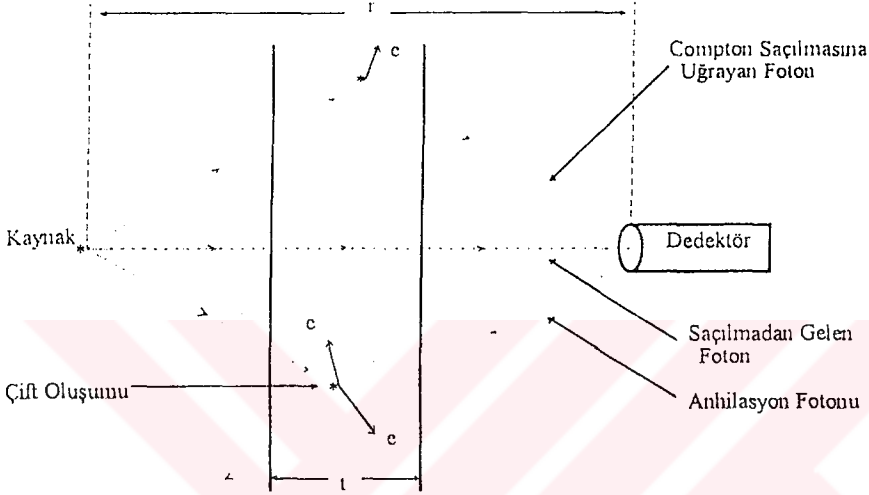
$$T^+ + T^- = E_{\text{foton}} - 2m_e c^2$$

T^+ ve T^- elektron ve pozitronun kinetik enerjileridir

Çift oluşuma ait atomik tesir kesiti Z^2 ile değişmektedir. Tesir kesiti foton enerjisinin artması ile artış gösterir ve yeterince yüksek enerjilerde ise sabit bir değere yaklaşır. Pozitron kinetik enerjisini kaybettiğinde bir elektronla etkileşip anihilasyon ile kaybolur. Bu olay çift oluşumu olayının tersidir.

3. YİĞİLMAFAKTÖRÜ

Yığılmafaktörleri gama radyasyonu zırhlama dizaynında pratik hesaplamalar için oldukça çok kullanılmaktadır



Şekil 3.1. soğurucu ortamdaki saçılmadan geçen ve saçılmış olarak geçen fotonların dedeksiyonu

Basit bir kaynak, soğurucu ortam ve detektör geometrisi düşünelim. Noktasal bir kaynaktan yayılan gama fotonları belirli bir uzaklıkta bulunan belli bir kalınlıktaki soğurucu maddesel ortama gelmektedir ve soğurucunun diğer tarafında yine belirli uzaklıkta bir detektör vardır. Maddesel ortama giren fotonların bir kısmı ortam atomları ve elektronları ile etkileşip daha önce değinilen fiziksel olayları oluşturacaklardır ve etkileşimler ihtimallerle ifade edildiği için bir kısmı

da hiçbir etkileşime girmeden soğurucuyu terk edecektir. Soğurma kanununa göre etkileşmeden (saçılmadan) geçen fotonların şiddeti:

$$I(\gamma / m^2 s) = \frac{S}{4\pi r^2} e^{-\mu r} \quad 3.1$$

S: birim zamandaki yayılan foton sayısı

μ : ortamın soğurma katsayısı

Etkileşimde bulunan foton demeti saçılmaya uğrayan gelen fotonlar ve oluşan ikincil fotonlardan meydana gelmektedir. Saçılan demetin hesabı oldukça önemlidir ve bunun için basit bir hesap yöntemi ya da ifade mevcut değildir. İyi geometri veya dar demet ölçümlerinde kaçak etkileşimler de dedekte edilebilmektedir. Birçok tipte detektör, dedekte ettiği etkileşime girmeyen fotonları ve ikincil radyasyonu ayırt etme yeteneğine sahip değildir. Böylece iyi geometri koşullarında dedekte edilmesi gereken den daha büyük bir sayım değeri elde edilecektir. Bu durumda toplam yayımlanan foton şiddeti başına soğurulmadan geçen foton şiddet için bir ifade yazarız.

$$\frac{I}{I_0} = B(t, E).e^{-\mu t} \quad 3.2$$

μ : metaryelin soğurma katsayısı

I: soğurulmadan geçen foton şiddeti

I_0 : yayımlanan toplam foton şiddeti

B(t,E): t kalınlığı ve E enerjisine bağlı yığılma faktörü

Yığılma faktörünü; ortamdan radyasyon geçişi sırasında belirli bir konumdaki radyasyon miktarının bu konuma etkileşmeden gelen radyasyon miktarına oranı olarak tanımlayabiliriz. Yığılma faktörü etkileşim derinliğinin yani “ortalama serbest yolun” fonksiyonu olarak ifade edilmektedir. (Ortalama serbest yol lineer uzaklıkla değişmektedir, birim “ortalama serbest yol” maddesel ortamın soğurma katsayısına bağlıdır ve lineer bir değere karşılık gelir. Örneğin Kurşun için 1ortalama serbest yol=1.28cm'dir. Prensipde Yığılma faktörü deneysel olarak belirlenir fakat foton taşıma denkleminin çözümünden de elde edilebilmektedir. Yığılma faktörü, hesaplanmada detektör cevap fonksiyonuna bağlıdır. R detektör cevap fonksiyonu olarak tanımlanırsa $-R$ enerjiye bağlı bir ifadedir. Yığılma faktörleri sabit kalmazlar, bir çok parametre ile değişim gösterirler. Detektör cevap fonksiyonu, kaynağın ve soğurucu ortamının geometrik konfigürasyonu, kaynak radyasyonunun enerji değeri ve soğurucu için belli enerjide tanımlanan ortalama serbest yola bağlı olan girme uzaklığı yığılma faktörünü değiştiren parametrelerdir.

Homojen bir ortamda tek enerjili gama kaynağından r kadar mesafede yerleştirilmiş detektörün, etkileşime girmeden gelen fotonlara tepkisi, $R^0(r) = (R_1/r^2).exp(-\mu r)$ olarak yazılmaktadır. R_1 , vakumda nokta kaynağın birim şiddetine karşı birim uzunluktaki detektörün tepkisidir. R_1 , uzaklıkla logaritmik olarak azalmaktadır.

Bir ortamdan radyasyon geçişinde, herhangi bir noktada belirlenen radyasyon miktarının toplam değerinin, etkileşimde bulunmadan o noktaya ulaşan radyasyon miktarı oranını yığılma faktörü olarak tanımlamıştık. R' 'nin uygun değerleri için toplam detektör tepkisinin

etkileşime girmeyen fotonlar için detektör tepkisine oranı yığılma faktörünü verecektir.

Kaynak ile detektör arasında maddesel bir ortamın olması hali için etkileşimde bulunmadan gelen fotonlar için detektör tepkisi:

$$R^0(x) = R_0 \exp(-\mu x) \quad 3.3$$

R_0 : soğurucu yokken detektör tepkisi.

Yığılma faktörü $B(x)$ olsun, böylece detektör tepkisi

$$R(x) = R_0 e^{-\mu x} B(x) \quad 3.4$$

Yığılmafaktörleri prensipte deneysel olarak saptanmaktadır, azalma ve saçılma katsayıları bilindiğinden dolayı foton taşıma denkleminin ve tepki fonksiyonunda detektörün r_d konumundaki (detektörün etkileşim noktasına uzaklığı) foton akı yoğunluğunun çözümü ile elde edilirler. Bu tanım ışığında yığılma faktörü:

$$B = \frac{R}{R^0} = \frac{\int_0^{E_0} dE \mathfrak{R}(E) \phi(r_d, E)}{\mathfrak{R}(E_0) \phi^0(r_d)} \quad 3.5$$

$\mathfrak{R}(E)$ detektör tepki fonksiyonudur R^0 ve $\Phi(r)$, r uzaklığındaki bir noktada etkileşmeden gelen aynı enerjili fotonların detektör tepkisi ve akısıdır.

Yığılma faktörü, fotonların soğurucu içindeki geçiş mesafesine (ortalama serbest yol), soğurucu ortamın ve detektörün geometrik koşullarına ve soğurucu materyalin türüne bağlı bir kavramdır. Ortam türünü belirleyen, Elementler için Z atom numarası (yük sayısı), karışım ve bileşikler için etkin atom numarası değeridir.

Foton taşıma için hesaplamalar çift diferansiyel enerji akı yoğunluğu olan $I(r,E,\Omega) = E \cdot \phi(r,E,\Omega)$ eşitliğine bağlıdır. Eşitliğin E ile çarpımı neticesinde bağıntı aşağıdaki şekilde yazılabilmektedir.

$$\begin{aligned} \Omega \nabla I(r, E, \Omega) + \mu(r, E) I(r, E, \Omega) = \\ \int_0^{\infty} dE' \int_{4\pi} d\Omega' \frac{E}{E'} \mu_s(r, E' \rightarrow E, \Omega' \rightarrow \Omega) \cdot I(r, E', \Omega') + ES(r, E, \Omega) \\ \mu_s(r, E' \rightarrow E, \Omega' \rightarrow \Omega) dE' d\Omega' \end{aligned} \quad 3.6$$

ifadesi r noktasındaki E' civarında dE enerjili ve Ω doğrultusunda hareket eden E' enerjili parçacığın birim yol uzunluğunda ürettiği Ω' civarında $d\Omega'$ doğrultusunda ikincil fotonların muhtemel sayılarıdır ve $S(r,E,\Omega)$ fotonların üretim oranını göstermektedir. μ_s üç baskın foton-materyal etkileşimlerinin katkılarının toplamı olarak yazılabilir.

$$\begin{aligned} \mu_s(r, E \rightarrow E, \Omega \rightarrow \Omega) = \\ \mu_c(r, E \rightarrow E, \Omega \rightarrow \Omega) + \frac{1}{4\pi} \mu_{pp}(r, E) 2\delta(e - mc^2) + \frac{1}{4\pi} \mu_{ph}(r, E) N(r, E, E) \end{aligned} \quad 3.7$$

μ_s : toplam soğurma katsayısı, μ_{ph} : foto elektrik etkileşime ait soğurma katsayısı, μ_{pp} : çift oluşuma ait soğurma katsayısı

4. EGS4 SİMİLASYON PROGRAMI VE ÇALIŞMA METODU

EGS4 (Electron Gamma Shower)

Program 1985'te geliştirilmeye başlandı. Bu yalnızca bir doktora tezi idi fakat bilgisayarların gelişmesi programın da geliştirilebilmesine imkan verdi. Amaç parçacık-madde etkileşimini modellemektir. Bu programı W.R. Nelson, A.F. Bielajew ve D.W.O Rogers, H. Hirayama ve Y. Namito geliştirmişlerdir. EGS4 bir simülasyon programıdır. Elektronların ve gamaların madde ile etkileşimini simüle eder. EGS4 Monte Carlo metodunun kullanıldığı bir programdır.

4.1 SİMİLASYON

Çalışma ortamımız sanal bir ortamdır. Genelde simülasyon, gerçek fiziksel süreçlerin, sebep ve sonuçların bilgisayar ortamında canlandırılması, denenmesidir. EGS4 Simülasyonu ile bizim çalışmamızda foton ve elektron - madde etkileşimi, bu fiziksel prosese ait tüm koşullar, olaylar, etkileşimler, konum ve hareket geometrisi datalar haline getirilerek simüle edilecektir.

4.2. EGS4 PROGRAMI

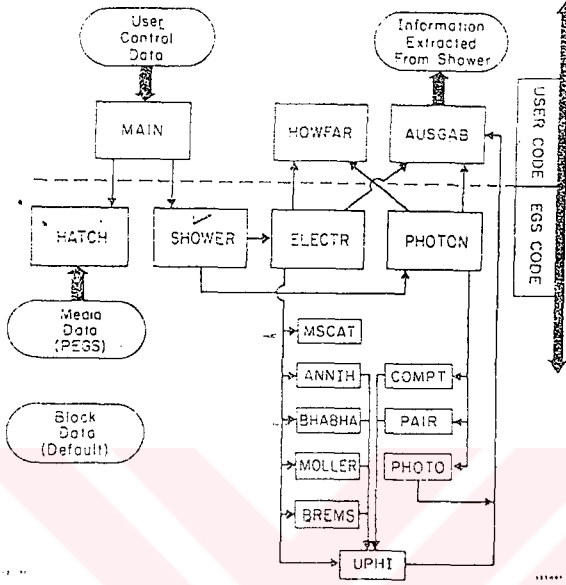
Program temelde iki kısımdan meydana gelmektedir; EGS CODE ve USER CODE. User Code kısmı Main, Howfar ve Ausgab kısımlarından oluşur. Main'de PEGS4 ile oluşturulan ortam datalarını okuyan HATCH, parçacık-madde etkileşimini herbir parçacık için gerçekleştiren SHOWER alt programları mevcuttur. Howfar, geometri alt programıdır. Ausgab ile simüle edilen her bir etkileşime

ait datalar oluşturulur. EGS CODE programın tasarlandığı yani yazılımının gerçekleştirildiği kısımdır. Program çalıştırıldığında simülasyon burada gerçekleşmektedir. Kendi içinde, her bir fiziksel olayın temsiline ait ayrı detaylı bir alt program akışı ve algoritması vardır. Amacımıza uygun olarak programı kullanabilmemiz için USER CODE bölümünde uygun değişiklikler yapmamız gerekmektedir. EGS CODE ancak USER CODE' a ait alt programların hazırlanmasından sonra çalışır. USER CODE; MAIN rutin, HOWFAR ve AUSGAB bölümlerinden oluşmuştur. MAIN sürücü rutindir EGS CODE u aktif hale sokar. Simüle edilecek prosese ait tüm hareket ve konum geometrisi HOWFAR subrutininde kullanıcı tarafından tanımlanmaktadır. Bu tanımlamada; kaynağın fiziksel şekli, kaynak ve maddesel ortamların birbirilerine göre konumları, maddesel ortamların kalınlıkları ve yine fiziksel şekilleri bu ortamların etkileşme yüzeylerinin- tanımlı bir eksen referans olmak üzere- yönelimleri, ortam sayısı, gelen radyasyonun hareketine ait ilk ve son koordinatları, geliş açıları yer almaktadır.

4.3. PEGS4 VERİ DOSYALARININ HAZIRLANMASI

PEGS4, fiziksel ve matematiksel formülleri, simülasyonda kullanılacak fiziksel sabitleri bulundurur. Ortama ait datalar (element, bileşik, karışım ve vakum) oluşturulur. Programın simülasyonu gerçekleştirebilmesi için birçok veri gerekmektedir. Bunların bir kısmını kullanıcı tarafından girilen bilgileri kullanarak kendisi hesaplamaktadır. Bunun için bir data dosyası oluşturulmalıdır. Data dosyaları PEGS4 programı ile hazırlanmaktadır. EGS4 programının

MAIN kısmında gerekli komutlarla(EGS CODE'de HATCH ile çağrılır.) PEGS4 programında HOWFAR'da tanımlı ortamlara ait fiziksel bilgiler, etkileşime ait geometri koşulları bulunur. Programın çalışması esnasında, tesir kesitleri ve bazı büyüklüklerin hesaplanması uzun süre alacağından, bu büyüklüklerin önceden hesaplanarak bir data dosyasında saklanarak program kodunun çalıştırılmasında gerekli durumda çağrılarak kullanılması zamandan kazandırmaktadır. Etkileşim şekilleri için ayrı hesaplamalar yapmaktadır. Hesaplamalarında matematiksel ve fiziksel formüller kullanmaktadır. Tanımlanan ortamlar; element, bileşik, karışım, veya vakum olabilir. Element materyal için; elementin yoğunluğu, atom ağırlığı ve sembolü girilir, bileşik için element sayısı, yoğunluğu, birleşme oranları, bileşiğin ve elementlerin isimleri girilir, karışım için element sayısı, karışım oranları, varsa aynı elementin farklı izotoplarının karışım oranları ve yine element isimleri girilir. Ayrıca elektronlar ve fotonlar için minimum ve maksimum enerji değerleri verilir. Bunlar foton ve elektronlar için kesme enerji değerleri ve parçacık taşıma için üst limit enerjileridir. Gelen ve ortama girip etkileşimlerde bulunan foton yada elektronun enerjisi, girilen kesme değerinin altına düştüğünde artık o parçacık program tarafından izlenmez ve bir sonraki parçacığın etkileşimi izlenir ve simüle edilir. MAIN programı tarafından sürülen, EGS CODE'un SHOWER subrutini, girilen sayıda parçacığın her birini tek tek enerjisi kesme değerinin altına düşene kadar izler ve tüm etkileşimleri simüle eder. PEGS4 verileri kullanarak, radyasyon türüne, etkileşim türüne ve ortamların cinsine ve yapısına göre, "tesir kesitleri hesaplar ve bunları bir tablo halinde saklar.



Şekil 4.1. EGS4 programının genel akış diyagramı

4.4 EGS4 PRENSİBİ - MONTE CARLO METODU

Random değişkenler kullanılarak parçacık taşınması ile ilgili fiziksel değişkenlerin gerçek değerlerle uygun şekilde seçimi yapılır. Parçacığın iki etkileşim arasında aldığı mesafe olan ortalama serbest yol, etkileşim türü ve etkileşim sonrası yayımlanan foton ve elektronların çıkış açıları random olarak simüle edilir. EGS4 programının yaptığı iş parçacık taşımadır. Parçacığı (foton yada elektron - e^+ , e^-) kaynaktan çıkartır ve bu andan itibaren parçacığın içinden geçeceği ortamlarda parçacığı izlemeye başlar. Bunu her

parçacık için ayrı olarak bir kez gerçekleştirir. Radyasyon parçacığı etkileşimler sırasında enerjisini giderek kaybedecektir. Enerjisi, kesme değerinin altına düştüğünde taşıma sona erer. Radyasyonun maddesel ortam ile yapacağı etkileşimler, radyasyonun enerjisine, türüne ve ortam özelliklerine bağlı olmak üzere bir rast gelemlik sergiler. Belirtilen koşullar altında belli bir radyasyon ve etkileşim için bir reaksiyon tesir kesiti vardır ve bu bir olasılığın - reaksiyon olma olasılığının- bir ölçütüdür. Parçacık ortama girdiği andan itibaren meydana gelecek fiziksel olaylar önceden belirlenemez ve bir rast gelemlik gösterirler -burada da bir olasılık dağılımı ve ortalama değerler söz konusudur. Bu özelliğın kullanılması ile simülasyon deneysel sonuçlarla uyum içerisindedir. Bunun için EGS4 programında, parçacık taşımada, prensipte Monte Carlo tekniğı kullanılmıştır. Tesir kesitler kullanılarak bir parçacık için ortalama serbest yol (mfp) hesaplanmaktadır. Bu da dx mesafesinde etkileşme olasılığının oluşturulması için kullanılmaktadır. ortalama serbest yol , parçacık ortam değıştirdiğinde veya enerji kaybettiğinde değışecektir. Olasılık gösteren gerçek fiziksel değışkenlere random değıer ataması yapılır. Bu değıer, verilen bir noktadan bir sonraki etkileşime kadar ki ortalama serbest yola bağılıdır. Ortalama serbest yollar tesir kesitlerle hesaplanmaktadır.

4.5. SİMÜLE EDİLEN FİZİKSEL PROSESLER

Program elektron ve foton için ayrı algoritmalara sahiptir. USER CODE'da parçacığın türünü belirten bir datanın girilmesi gerekir. Parçacık için program içinde ayırt edici data parçacığın yüküdür.

Elektronlar için IQIN= -1, +1 fotonlar için IQIN= 0 olarak girilir. Programda NCASE komutu ile simülasyonun kaç tane parçacık için gerçekleştirileceği belirlenmiş olur. NCASE=1000 gibi.

Bazı yaklaşımlarda Boltzman taşıma denklemi bir sistem için yazılır ve bundan sistemin Monte Carlo simülasyonu türetilir. Bu metod gerçek ortalama değerleri verecektir. Fakat varyans indirgeme teknikleri nedeniyle farklı bir temsil oluşmaktadır.

EGS4 gerçek koşulları doğru bir şekilde temsil etmektedir. Bu, yüksek enerji parçacık detektörleri için oldukça önemlidir. Opsiyonel varyans teknikleri bazı hesaplamaları daha etkin yapmaktadır. EGS4'te kullanılan yöntem analog Monte Carlo'dur. Temel strateji, parçacığı etkileşene kadar taşımaktır. Bu taşıma parçacığın enerjisi belirlenmiş bir değerin altına düşene kadar devam eder. Bundan sonra simülasyon diğer bir parçacıkla devam eder. Bir etkileşimde birden fazla ürün parçacık meydana geldiğinde program en düşük enerjili ürün parçacığı takip eder ve diğer oluşan parçacıkları sıraya koyup simülasyon için bekletir.

4.5.1. EGS4'TE PARÇACIK TAŞINMASI

Parçacığa ait ortalama serbest yol λ toplam tesir kesit yada makroskopik tesir kesit cinsinden verilmektedir.

$$\lambda = \frac{1}{\sum_t} = \frac{M}{N_a \rho \sigma_t} \quad 4.1$$

N_a :Avagadro sayısı

ρ : yoğunluk

M : molekül ağırlığı

σ_t : molekül başına toplam tesir kesit

Etkileşime ait olasılık $P_r \{dx \text{ mesafesindeki etkileşim}\} = dx/\lambda$ ile verilmektedir. Genel olarak ortalama serbest yol parçacık bir ortamdan başka bir ortama geçtiğinde yada enerji kaybettiğinde değişmektedir. Ortalama serbest yolların sayısı,

$$N_\lambda = \int_{x_0}^x \frac{dx}{\lambda(x)} \quad 4.2$$

ifadesi ile verilir.

λ : ortalama serbest yol

Eğer N_λ nın beklenen değeri, bir sonraki etkileşime kadar , ortalama serbest yola bağlı random bir değişken ise ortalama N_λ dağılım fonksiyonu halini alacaktır.

$$P_r \{N_\lambda < N_\lambda\} = 1 - \exp(-N_\lambda) \quad (N_\lambda > 0) \quad 4.3$$

Direk örnekleme metodunun kullanılmasıyla ve $1 - \zeta$ nın $(0,1)$ 'de düzgün olması nedeniyle N_λ 'yı şöyle yazarız

$$N_\lambda = -\ln \zeta \quad 4.4$$

ζ : $(0,1)$ aralığında değişen random bir değişkendir.

Sonlu sayıda, homojen ve sabit yoğunluklu bölgelerde etkileşimler yer aldığıında yukarıdaki integral ifadesi toplam şeklinde yazılacaktır:

$$N_{\lambda} = \sum_{j=1}^{i-1} \left(\frac{x_j - x_i - 1}{\lambda_j} \right) + \left(\frac{x - x_i - 1}{\lambda_i} \right) \quad 4.5$$

Similasyon bundan sonra aşağıdaki basamaklarla devam eder:

1. ortalama serbest yol etkileşimin gerçekleştiği metaryel için hesaplanır.
2. $t_1 = \lambda N_{\lambda}$ olarak belirlenir (t_1 : kalınlık)
3. foton doğrultusu boyunca en yakın sınıra olan d mesafesi hesaplanır.
4. t_2 kalınlığındaki parçacık taşınmasında t_2 t_1 ve d 'ye eşitlenir.
5. $\sigma = 0$, $\lambda =$ sonsuz olan vakum bölgelerinde bu durum için hesaplamada özel bir kodlama kullanılır.

4.5.2. PARÇACIK ETKİLEŞİMLERİ

Etkileşim noktasında hangi prosesin gerçekleşeceğine karar verilir Meydana gelen etkileşime ait olasılık etkileşime ait tesir kesite bağlıdır. 1'den n'e kadar sayıda etkileşim olma olasılığı mümkündür. Bu durumda etkileşim sayısı bir dağılım fonksiyonuna sahip random bir değişken olacaktır.

$$F(i) = \frac{\sum_{j=1}^i \sigma_j}{\sigma_i} \quad 4.6$$

F(i): etkileşim sayısına ait dağılım fonksiyonu

Bu dağılımlarda random sayılar kullanılmaktadır, $F(i-1) < \zeta < F(i)$

4.5.3 ELEKTRON PROSESİ

Programın SHOWER rutini gelen parçacığı elektron olarak tanır ve simülasyonu elektron - madde etkileşimi olarak devam ettirir ve "NCASE" ile belirtilen sayıda simülasyon tekrar edilir. Sonuçlar bir tablo olarak saklanır. Elektron prosesi, bremsstrahlung ışıması, gama ışını oluşumu, çarpışma enerji kaybı, multiple saçılma, anihilasyon, elektrik ve magnetik alanda taşıma alt programları ile gerçekleştirilir. Parçacığa etkiyen elektrik ve magnetik kuvvet Lorentz formülü ile hesaplanmaktadır.

4.5.4. FOTON PROSESİ

Foton - madde etkileşiminin simülasyonu elektron prosesi ile benzer bir algoritma ile yapılır. Elektron prosesine göre daha basittir. Çünkü elektrona ait hareket geometrisi daha komplekstir. Foton taşıma simülasyonunda; çift oluşumu, Compton saçılması, fotoelektrik olay ve düşük enerjilerde Rayleigh saçılması olayları gerçekleştirilir.

5. YIĞILMA FAKTÖRÜ HESAPLAMA METODU

Çalışmada yığılma faktörlerinin etkin atom numaraları ile değişimini incelemek üzere farklı etkin atom numarasına sahip soğurucu ortamlar belirlenmiştir. Etkin atom numarasının etkilerini inceleyebilmek amacı ile soğurucu ortam olarak element yerine karışımlar kullanılmıştır. Belirlenen bir aralıkta düzgün olarak artan etkin atom numaraları için karışımlar ve uygun karışım oranları oluşturulmuştur (çizelge 5.2). Z_{eff} değişim aralığını oluştururken karışımda kullanılan elementler, atom numaralarına göre özellikle seçilmiştir. Yüksek Z değerli Pb, düşük Z değerli Li ve ikisi arasında Z değerleri alan Cu ve Al elementleri seçilerek bunların farklı oranlardaki karışımları ile istenen etkin atom numarasına sahip soğurucu ortamlar simülasyon için hazırlanmıştır. Bu kullanılacak karışımlara ait oranlar etkin atom numaralarına uygun olarak bir bilgisayar programı ile elde edilmiştir. Bunun için programda etkin atom numaraları

$$Z_{eff} = \frac{\sum_i \frac{w_i}{A_i} Z_i^2}{\sum_i \frac{w_i}{A_i} Z_i} \quad 5.1$$

w_i : elementin karışım içindeki yüzdesi

A_i : elementin kütle numarası

Z_i : elementin atom numarası

denklemleri ile hesaplatılmıştır. Elde edilen etkin değerler tam sayı olarak alınabilecek hassaslıkta seçilmiştir. Yığılmafaktörleri, etkin atom numarası 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65 ve 70 olarak saptanan karışımlar için hesaplandı. Bu karışımlar için PEGS4 çalıştırılarak simülasyon için gereken data dosyaları elde edilmiştir.

Simülasyon yazılımı içerisinde yığılma faktörünü hesaplayan bahsettiğimiz integral ifadesi gereken yaklaşım ve formatta yerleştirilmiştir.

$$B = \frac{R}{R^0} = \frac{\int_0^{E_0} dE \mathfrak{R}(E) \phi(r_d, E)}{\mathfrak{R}(E_0) \phi^0(r_d)} \quad 5.2$$

integrali program içerisinde

$$B = \frac{R}{R^0} = \frac{\sum_0^{E_0} \mathfrak{R}(E_i) \phi(r, E_i)}{\mathfrak{R}(E_0) \phi(r, E_0)} \quad 5.3$$

toplam ifadesi olarak, enerji ve bu enerjilere karşılık gelen foton sayısının fonksiyonu olarak yazılmıştır. Bu ifade, şu şekilde yazılabilir:

$$B(E_0, x) = \frac{\sum_0^{E_0} \left(\begin{matrix} \mu \\ \rho \end{matrix} \right)_{\text{hava}} (E) I(x, E)}{\left(\begin{matrix} \mu \\ \rho \end{matrix} \right)_{\text{hava}} (E_0) I(x, E_0)} \quad 5.4$$

Deneysel çalışmalarda yarı-ampirik formüller tercih edilmektedir .

Taylor Formülü:

$$B(E, x) = A \exp(-\alpha_1(E)x) + (1 - A) \exp(-\alpha_2(E)x)$$

5.5

Berger Formülü:

$$B(E, x) = 1 + C(E)x \exp(D(E)x)$$

5.6

Polinomial Formül:

$$B(E, x) = \sum_{n=0}^3 \beta_n(E)(x)^n$$

5.7

Program içerisinde exponansiyel dönüşüm kullanılarak hata hesabı da yapılmıştır. Her bir karışım için incelediğimiz enerjilerde “ortalama serbest yol” değerleri üzerinden işlemler yapılmıştır. Simülasyon bir ortalama serbest yol aralığında gerçekleştirilmiştir. Program içerisinde data olarak gerekli enerjiler için havanın soğurma katsayıları kullanılmıştır (Hubbel 1995). Bu değerler integralin hesabında gereklidir. Çalışmanın bir ön aşaması olarak bazı elementler için belli enerjilerde yığılma faktörleri hesaplatılarak program dizaynının ve denklemlerin güvenilirliği test edilmiştir. Bu, önceki çalışmalarla kıyaslanarak gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyondaki karışımlar doğal olarak bulunan karışımlar olmayıp istenen etkin atom numaraları için saptanan oranlarda oluşturulmuş karışımlardır. Tüm çalışma simülasyon

ortamındadır. Hesaplamalar ortalama serbest yol üzerinden yapılmıştır. Daha sonra her bir karışım için

$$\mu_{mixt} = \sum_i \mu_i W_i \quad 5.8$$

bağıntısı ile soğurma katsayısı hesaplandı ve her karışım için $\tilde{\mu}_r = \{1,5,10\}$ olacak şekilde yığılma faktörleri etkin atom numarasına bağlı olarak tekrar hesaplandı. Bunun için ortalama serbest yol – yığılma faktörü grafikleri uygun bir curve fit programı ile uzaklık cinsinden $B = a+bx+cx^2+dx^3$ polinomu olarak çizildi ve polinom katsayıları saptanıp, elde edilen polinom ifadesinde X değerleri için $\mu_r = \{1,5,10\}$ koşulunu sağlayan r değerleri hesaplanarak etkin atom numarasına bağlı yığılma faktörleri hesaplandı.

SONUÇ

Bu çalışmada yığılma faktörlerinin etkin atom numarasına bağlı olarak değişimi incelendi. 0.2, 0.5, 1, 3, 5, 10, 20 ve 50 MeV enerjili fotonlar için, ortam materyali olarak kullanılan her bir karışımın 0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8,9, 10 mfp kalınlıklarına bağlı olarak yığılma faktörleri Çizelge 5.(5-12) de verilmiştir. Bu elde edilen değerlerle 0.2, 0.5, 1, 3, 5, 10, 20, 50 MeV enerjili fotonlar için karışımların $\mu.r = \{1,5,10\}$ kalınlık değerlerinde yığılma faktörlerinin etkin atom numarasına bağlı elde edilen değerleri Çizelge 5.(13-20)'da verilmiştir. 200 keV, 500 keV ve 1 MeV enerjili fotonlar için çizilen grafikte (Şekil 5.(2-4)) artan Z değerlerine karşın yığılma faktörlerinin azaldığı gözlenmiştir. Sakamoto'nun (Sakamoto 1988) yaptığı benzer çalışmasındaki değerler bu sonuçlarla örtüşmektedir (Şekil 5.10) Sakamoto'nun çalışmasına ait grafiklerde çok belirgin olmayan pikler bu çalışmadaki grafiklerde gözlenmektedir. Ayrıca biyolojik materyaller kullanılarak yapılan teorik bir çalışmada elde edilen buildup-etkin atom numarası değişimine ait grafiklerde de yığılma faktörleri düşük enerjilerde artan Z değerleri karşısında belirgin bir azalma göstermektedir (Sidhu 1999). Farklı enerjiler ve Z değerleri kullanılmış olmasına rağmen yakın değerler göz önüne alındığında yapılan çalışma verilerinin bu grafiklerle uyumlu olduğu görülmektedir. Mersinoğlu'nun yaptığı deneysel çalışmada (Mersinoğlu 1996) 662 keV enerjili fotonlar için su, alüminyum, bakır ve kurşun kullanılarak hesaplanan ortalama serbest yola bağlı yığılma faktörleri Çizelge 5.1.1 de ve aynı enerji ve materyaller için EGS4 ile hesaplanan değerler Çizelge 5.1.2 de verilmiştir. Elde edilen değerler

arasında farklılıklar gözlenmiştir. Fakat yığılma faktörü – ortalama serbest yol değişimi benzer karakterdedir.

3 ve 5 MeV enerjili fotonlar için artan Z değerlerine karşın yığılma faktörü değerlerinin azalması daha yavaştır. Artan Z lere göre yığılma faktörü değerlerinin azalma hızı foton enerjisi arttıkça azalmaktadır ve bu azalma, $\mu.r = 10$ için çizilen grafiklerde daha belirgindir. Bu kalınlıkta, 10 , 20 ve 50 MeV enerjili fotonlar için yığılma faktörü, artan Z değerleri ile bir artış göstermektedir (Şekil5.(7-9)). Soğurucu materyalin kalınlığı arttıkça daha fazla sayıda foton-madde etkileşimi olacaktır. Yığılma faktörleri 200 keV, 500 keV ve 1 MeV enerjili fotonlar için düşük atom numaralarında, azalan Z değerleri ile hızlı bir artış göstermektedir. Düşük Z değerleri için ($Z_{\text{eff}} < 35$) foton madde etkileşimlerinde düşük enerjili ikincil parçacık sayısı artmaktadır ve bu fotoelektrik etkileşimle kıyaslanabilir hale gelir. Bununla birlikte hafif elementlerde enerji akısı, saçılmış düşük enerjili fotonların meydana getirdiği çok yüksek pikler gösterebilmektedir. Büyük mesafelerdeki enerji akısında fotonların çoklu saçılmaları nedeniyle oluşan bir pike karşılık gelen enerji, azalan atom numarası ile birlikte düşer. Bu nedenle yapılan bu çalışmada $\mu.r = 5$ ve $\mu.r = 10$ kalınlık değerlerinde, düşük Z değerlerinde yığılma faktörünün ani değişimler sergilediği gözlenmiştir.

Şekil 5.1.1 662 keV enerjili fotonlar için 1, 2, 3 mfp kalınlıklarında EGS4 ile kurşun, bakır, alüminyum ve su için hesaplanan yığılmafaktörleri

mfp	1	2	3
Kurşun	1.34	1.59	1.87
Bakır	1.82	2.77	3.68
Alüminyum	2.17	3.89	5.81
su	2.37	4.60	7.77

Şekil 5.1.2. 662 keV enerjili fotonlar için 1, 2, 3 mfp kalınlıklarında deneysel olarak kurşun, bakır, alüminyum ve su için hesaplanan yığılmafaktörleri (Ö. Mersinoğlu)

mfp	1	2	3
Kurşun	0.96	0.99	1.04
Bakır	1.67	2.32	3.10
Alüminyum	1.70	2.49	3.13
su	1.42	-	-

Not: suyun etkin atom numarası =2.4

Çizelge 5.2 Yığılma hesaplama programının test edilmesi amacı ile bazı elementlerin mfp-yığılma faktörü değişimlerinin daha önce yapılmış çalışmalara ait değerler ile karşılaştırılması. (E=1 MeV)

mfp	Pb *	Pb**	Cu*	Al*
0,5	1,2137	1,2	1,3968	1,4621
1	1,3856	1,38	1,8057	1,9843
2	1,6831	1,68	2,6924	3,1977
3	1,9442	1,95	3,6815	4,6270
4	2,1828	2,19	4,7566	6,2587
5	2,4052	2,43	5,8930	8,0674
6	2,6173	2,66	7,1328	10,0620
7	2,8250	2,89	8,4914	12,2660
8	3,0247	3,1	9,8785	14,5540
10	3,3984	3,51	12,9120	19,8180

mfp	Li*	Su*	Su**	Fe*	Fe**
0,5	1,9366	1,5121	1,47	1,4070	1,41
1	3,7732	2,1478	2,08	1,8324	1,85
2	11,7690	3,7692	3,62	2,7634	2,85
3	27,5780	5,8318	5,50	3,8036	4,00
4	53,1500	8,3087	7,68	4,9520	5,30
5	88,9270	11,1550	10,10	6,1906	6,74
6	133,8200	14,3190	12,80	7,5343	8,31
7	185,1500	17,7940	15,80	8,9691	10,00
8	246,9600	21,5340	19,00	10,5170	11,80
10	396,3500	30,0680	26,10	13,7490	15,8000

* : tasarlanan program ile elde edilen veriler

** : AEM, « Angular Eigenvalue Method », önceki çalışmalara ait veriler, Akino 2000

Çizelge 5.3 Herbir karışım için karışımı oluşturan elementlerin karışım oranları

Karışım sayısı	Elementlerin karışım oranları (%)					
	Li	Al	Cu	Pb	Z-eff	
1	46	48	4	2	10	
2	38	34	24	4	15	
3	18	52	20	10	20	
4	14	6	78	2	25	
5	28	34	6	32	30	
6	4	18	56	22	35	
7	8	32	20	40	40	
8	12	14	28	46	45	
9	22	14	2	62	50	
10	6	26	2	66	55	
11	16	0	12	72	60	
12	12	4	4	80	65	
13	4	10	0	86	70	

Çizelge 5.4 Herbir karışım için 1 mfp ortalama serbest yolun cm cinsinden değeri

Karışım no	1	2	3	4	5	6
1 mfp (cm)	7,9161	4,598	3,7512	2,3066	3,1009	2,0475
Karışım no	7	8	9	10	11	12
1 mfp (cm)	2,1934	1,9556	2,0202	1,8295	1,649	1,5758
					1,649	1,5758
						1,4834

Çizelge 5.5 200 keV enerjili fotonlar için herbir karışımın ortalama serbest yola bağlı Yığılma faktörleri

Karışım no	1	2	3	4	5	6	7
mfp							
0,5	1,265 ± 0,0004	1,198 ± 0,0003	1,137 ± 0,0001	1,192 ± 0,0002	1,063 ± 0,0002	1,079 ± 0,0002	1,052 ± 0,0001
1	1,519 ± 0,0005	1,368 ± 0,0004	1,246 ± 0,0003	1,356 ± 0,0003	1,109 ± 0,0002	1,138 ± 0,0003	1,089 ± 0,0002
2	2,018 ± 0,0012	1,675 ± 0,0010	1,429 ± 0,0007	1,648 ± 0,0009	1,18 ± 0,0004	1,23 ± 0,0006	1,147 ± 0,0003
3	2,521 ± 0,0024	1,959 ± 0,0011	1,588 ± 0,0007	1,918 ± 0,0011	1,236 ± 0,0006	1,305 ± 0,0004	1,191 ± 0,0005
4	3,03 ± 0,0043	2,226 ± 0,0016	1,727 ± 0,0024	2,176 ± 0,0026	1,284 ± 0,0010	1,367 ± 0,0008	1,228 ± 0,0009
5	3,558 ± 0,0050	2,49 ± 0,0031	1,856 ± 0,0028	2,428 ± 0,0032	1,322 ± 0,0015	1,423 ± 0,0014	1,26 ± 0,0008
6	4,101 ± 0,0092	2,746 ± 0,0068	1,978 ± 0,0026	2,66 ± 0,0065	1,358 ± 0,0014	1,475 ± 0,0025	1,288 ± 0,0015
7	4,657 ± 0,0090	2,996 ± 0,0089	2,099 ± 0,0031	2,9 ± 0,0063	1,394 ± 0,0018	1,519 ± 0,0026	1,313 ± 0,0022
8	5,228 ± 0,0215	3,25 ± 0,0113	2,205 ± 0,0044	3,14 ± 0,0103	1,421 ± 0,0034	1,561 ± 0,0022	1,339 ± 0,0036
9	5,794 ± 0,0210	3,496 ± 0,0118	2,313 ± 0,0055	3,385 ± 0,0112	1,452 ± 0,0048	1,589 ± 0,0039	1,356 ± 0,0020
10	6,386 ± 0,0232	3,777 ± 0,0184	2,419 ± 0,0085	3,635 ± 0,0180	1,482 ± 0,0036	1,639 ± 0,0066	1,384 ± 0,0045

Karışım no	8	9	10	11	12	13
mfp						
0,5	1,049 ± 0,0002	1,035 ± 0,0001	1,034 ± 0,0001	1,03 ± 0,0002	1,027 ± 0,0001	1,026 ± 0,0001
1	1,083 ± 0,0002	1,059 ± 0,0001	1,057 ± 0,0001	1,051 ± 0,0002	1,046 ± 0,0001	1,043 ± 0,0001
2	1,136 ± 0,0003	1,096 ± 0,0002	1,092 ± 0,0002	1,082 ± 0,0004	1,074 ± 0,0002	1,069 ± 0,0002
3	1,177 ± 0,0003	1,124 ± 0,0003	1,118 ± 0,0004	1,106 ± 0,0003	1,095 ± 0,0002	1,089 ± 0,0002
4	1,211 ± 0,0009	1,148 ± 0,0006	1,141 ± 0,0006	1,126 ± 0,0012	1,113 ± 0,0004	1,106 ± 0,0003
5	1,24 ± 0,0008	1,168 ± 0,0007	1,159 ± 0,0006	1,14 ± 0,0009	1,127 ± 0,0006	1,119 ± 0,0007
6	1,266 ± 0,0014	1,185 ± 0,0011	1,176 ± 0,0012	1,155 ± 0,0013	1,14 ± 0,0008	1,13 ± 0,0007
7	1,288 ± 0,0025	1,198 ± 0,0012	1,189 ± 0,0014	1,166 ± 0,0009	1,15 ± 0,0012	1,141 ± 0,0011
8	1,311 ± 0,0033	1,213 ± 0,0010	1,202 ± 0,0016	1,183 ± 0,0020	1,161 ± 0,0017	1,152 ± 0,0019
9	1,327 ± 0,0035	1,223 ± 0,0022	1,212 ± 0,0019	1,189 ± 0,0025	1,17 ± 0,0020	1,16 ± 0,0020
10	1,353 ± 0,0045	1,237 ± 0,0036	1,223 ± 0,0030	1,197 ± 0,0035	1,176 ± 0,0028	1,167 ± 0,0022

Çizelge 5.6 500 keV enerjili fotonlar için her bir karışımın ortalama serbest yola bağlı Yığılma faktörleri

Karışım no	1	2	3	4	5	6	7
mfp							
0,5	1,362 ± 0,0004	1,327 ± 0,0003	1,287 ± 0,0004	1,327 ± 0,0004	1,208 ± 0,0003	1,233 ± 0,0003	1,19 ± 0,0003
1	1,738 ± 0,0004	1,651 ± 0,0008	1,557 ± 0,0007	1,651 ± 0,0006	1,383 ± 0,0004	1,434 ± 0,0003	1,345 ± 0,0004
2	2,562 ± 0,0014	2,326 ± 0,0012	2,087 ± 0,0013	2,328 ± 0,0016	1,694 ± 0,0009	1,804 ± 0,0009	1,615 ± 0,0009
3	3,485 ± 0,0030	3,047 ± 0,0024	2,619 ± 0,0013	3,046 ± 0,0021	1,974 ± 0,0013	2,151 ± 0,0017	1,851 ± 0,0013
4	4,508 ± 0,0061	3,82 ± 0,0047	3,167 ± 0,0019	3,817 ± 0,0037	2,235 ± 0,0031	2,479 ± 0,0019	2,071 ± 0,0014
5	5,629 ± 0,0095	4,635 ± 0,0065	3,717 ± 0,0056	4,633 ± 0,0060	2,482 ± 0,0028	2,796 ± 0,0035	2,274 ± 0,0031
6	6,843 ± 0,0119	5,512 ± 0,0054	4,29 ± 0,0082	5,511 ± 0,0075	2,719 ± 0,0043	3,104 ± 0,0071	2,468 ± 0,0042
7	8,194 ± 0,0218	6,438 ± 0,0201	4,877 ± 0,0137	6,424 ± 0,0190	2,984 ± 0,0081	3,432 ± 0,0086	2,653 ± 0,0062
8	9,622 ± 0,0211	7,387 ± 0,0263	5,483 ± 0,0256	7,396 ± 0,0196	3,181 ± 0,0091	3,724 ± 0,0091	2,844 ± 0,0064
9	11,16 ± 0,0554	8,359 ± 0,0289	6,049 ± 0,0206	8,381 ± 0,0333	3,427 ± 0,0177	4,021 ± 0,0129	3,042 ± 0,0106
10	12,66 ± 0,0570	9,46 ± 0,0462	6,677 ± 0,0361	9,452 ± 0,0648	3,653 ± 0,0157	4,347 ± 0,0229	3,197 ± 0,0227

Karışım no	8	9	10	11	12	13
mfp						
0,5	1,183 ± 0,0003	1,151 ± 0,0002	1,147 ± 0,0002	1,138 ± 0,0002	1,129 ± 0,0003	1,124 ± 0,0002
1	1,331 ± 0,0003	1,269 ± 0,0003	1,261 ± 0,0003	1,242 ± 0,0004	1,226 ± 0,0003	1,216 ± 0,0003
2	1,586 ± 0,0006	1,463 ± 0,0004	1,448 ± 0,0004	1,413 ± 0,0003	1,383 ± 0,0004	1,364 ± 0,0005
3	1,809 ± 0,0013	1,626 ± 0,0006	1,605 ± 0,0008	1,552 ± 0,0012	1,512 ± 0,0013	1,485 ± 0,0013
4	2,014 ± 0,0017	1,775 ± 0,0009	1,745 ± 0,0015	1,679 ± 0,0010	1,625 ± 0,0014	1,591 ± 0,0015
5	2,203 ± 0,0029	1,905 ± 0,0019	1,871 ± 0,0018	1,791 ± 0,0021	1,725 ± 0,0018	1,681 ± 0,0022
6	2,382 ± 0,0037	2,024 ± 0,0024	1,985 ± 0,0014	1,896 ± 0,0015	1,815 ± 0,0018	1,764 ± 0,0025
7	2,55 ± 0,0052	2,138 ± 0,0027	2,095 ± 0,0048	1,989 ± 0,0067	1,905 ± 0,0030	1,848 ± 0,0027
8	2,723 ± 0,0081	2,255 ± 0,0057	2,205 ± 0,0062	2,085 ± 0,0101	1,985 ± 0,0068	1,924 ± 0,0061
9	2,904 ± 0,0120	2,352 ± 0,0076	2,296 ± 0,0081	2,156 ± 0,0143	2,061 ± 0,0093	1,99 ± 0,0077
10	3,068 ± 0,0186	2,469 ± 0,0120	2,398 ± 0,0132	2,267 ± 0,0203	2,132 ± 0,0094	2,054 ± 0,0079

Çizelge 5.7 1 MeV enerjili fotonlar için herbir karışımın ortalama serbest yola bağlı Yığılma faktörleri

Karışım no	1	2	3	4	5	6	7
mfp							
± 0,5	1,414 ± 0,0007	1,389 ± 0,0003	1,361 ± 0,0003	1,389 ± 0,0005	1,305 ± 0,0004	1,323 ± 0,0005	1,29 ± 0,0004
1	1,852 ± 0,0005	1,786 ± 0,0008	1,715 ± 0,0007	1,785 ± 0,0007	1,583 ± 0,0007	1,625 ± 0,0005	1,549 ± 0,0006
2	2,811 ± 0,0012	2,637 ± 0,0015	2,452 ± 0,0012	2,636 ± 0,0012	2,117 ± 0,0015	2,221 ± 0,0021	2,037 ± 0,0014
3	3,883 ± 0,0022	3,564 ± 3,5643	3,234 ± 0,0039	3,576 ± 0,0031	2,641 ± 0,0018	2,818 ± 0,0016	2,514 ± 0,0020
4	5,077 ± 0,0040	4,563 ± 0,0083	4,054 ± 0,0040	4,59 ± 0,0054	3,168 ± 0,0035	3,425 ± 0,0050	2,973 ± 0,0036
5	6,349 ± 0,0054	5,641 ± 0,0143	4,906 ± 0,0060	5,654 ± 0,0048	3,688 ± 0,0055	4,048 ± 0,0082	3,427 ± 0,0061
6	7,746 ± 0,0110	6,766 ± 0,0352	5,799 ± 0,0078	6,806 ± 0,0112	4,215 ± 0,0093	4,687 ± 0,0062	3,884 ± 0,0061
7	9,246 ± 0,0220	8,015 ± 0,0765	6,742 ± 0,0185	8,055 ± 0,0237	4,767 ± 0,0106	5,331 ± 0,0113	4,355 ± 0,0101
8	10,8240 ± 0,0418	9,225 ± 0,1540	7,709 ± 0,0321	9,314 ± 0,0306	5,295 ± 0,0210	5,961 ± 0,0191	4,806 ± 0,0236
9	12,53 ± 0,0342	10,4510 ± 0,2688	8,696 ± 0,0279	10,6660 ± 0,0414	5,802 ± 0,0240	6,613 ± 0,0221	5,24 ± 0,0199
10	14,2 ± 0,0898	11,59 ± 0,4344	9,73 ± 0,0458	11,45 ± 0,3220	6,311 ± 0,0304	7,272 ± 0,0179	5,686 ± 0,0233

Karışım no	8	9	10	11	12	13
mfp						
± 0,5	1,284 ± 0,0003	1,256 ± 0,0004	1,252 ± 0,0003	1,243 ± 0,0003	1,234 ± 0,0003	1,228 ± 0,0003
1	1,537 ± 0,0006	1,475 ± 0,0005	1,467 ± 0,0006	1,446 ± 0,0003	1,428 ± 0,0004	1,416 ± 0,0005
2	2,009 ± 0,0013	1,871 ± 0,0007	1,854 ± 0,0007	1,808 ± 0,0010	1,771 ± 0,0007	1,746 ± 0,0007
3	2,467 ± 0,0017	2,239 ± 0,0016	2,208 ± 0,0014	2,141 ± 0,0021	2,079 ± 0,0014	2,042 ± 0,0010
4	2,905 ± 0,0041	2,588 ± 0,0022	2,546 ± 0,0017	2,447 ± 0,0032	2,366 ± 0,0026	2,312 ± 0,0027
5	3,342 ± 0,0060	2,923 ± 0,0049	2,867 ± 0,0033	2,74 ± 0,0073	2,636 ± 0,0020	2,569 ± 0,0031
6	3,769 ± 0,0063	3,25 ± 0,0051	3,186 ± 0,0060	3,016 ± 0,0143	2,903 ± 0,0054	2,819 ± 0,0057
7	4,22 ± 0,0092	3,584 ± 0,0109	3,506 ± 0,0101	3,314 ± 0,0312	3,164 ± 0,0077	3,063 ± 0,0079
8	4,636 ± 0,0186	3,895 ± 0,0139	3,797 ± 0,0110	3,605 ± 0,0233	3,425 ± 0,0106	3,309 ± 0,0093
9	5,05 ± 0,0153	4,222 ± 0,0146	4,094 ± 0,0165	3,79 ± 0,0594	3,651 ± 0,0137	3,507 ± 0,0156
10	5,499 ± 0,0282	4,519 ± 0,0100	4,393 ± 0,0152	3,804 ± 0,1043	3,882 ± 0,0180	3,734 ± 0,0162

Çizelge 5.8 3 MeV enerjili fotonlar için her bir karışımın ortalama serbest yola bağlı Yığılma faktörleri

Karışım no	1	2	3	4	5	6	7
mfp							
0,5	1,524 ± 0,0004	1,502 ± 0,0006	1,478 ± 0,0003	1,511 ± 0,0004	1,429 ± 0,0004	1,448 ± 0,0004	1,418 ± 0,0003
1	2,034 ± 0,0009	1,981 ± 0,0005	1,922 ± 0,0009	1,996 ± 0,0011	1,803 ± 0,0009	1,845 ± 0,0009	1,774 ± 0,0009
2	3,067 ± 0,0022	2,942 ± 0,0014	2,804 ± 0,0017	2,972 ± 0,0010	2,532 ± 0,0019	2,626 ± 0,0020	2,469 ± 0,0016
3	4,122 ± 0,0016	3,932 ± 0,0030	3,713 ± 0,0030	3,994 ± 0,0048	3,281 ± 0,0023	3,44 ± 0,0026	3,181 ± 0,0017
4	5,21 ± 0,0087	4,961 ± 0,0057	4,657 ± 0,0032	5,066 ± 0,0055	4,042 ± 0,0050	4,281 ± 0,0047	3,907 ± 0,0034
5	6,331 ± 0,0099	5,994 ± 0,0088	5,598 ± 0,0091	6,162 ± 0,0128	4,838 ± 0,0078	5,15 ± 0,0056	4,675 ± 0,0077
6	7,463 ± 0,0125	7,081 ± 0,0127	6,592 ± 0,0146	7,345 ± 0,0128	5,615 ± 0,0114	6,049 ± 0,0113	5,456 ± 0,0114
7	8,612 ± 0,0253	8,185 ± 0,0197	7,633 ± 0,0172	8,53 ± 0,0227	6,428 ± 0,0118	7,017 ± 0,0101	6,273 ± 0,0157
8	9,805 ± 0,0265	9,36 ± 0,0170	8,71 ± 0,0267	9,839 ± 0,0411	7,339 ± 0,0247	7,978 ± 0,0236	7,132 ± 0,0202
9	11,01 ± 0,0629	10,4560 ± 0,0434	9,701 ± 0,0432	11,11 ± 0,0526	8,196 ± 0,0392	9,006 ± 0,0372	8,012 ± 0,0341
10	12,15 ± 0,0819	11,59 ± 0,0537	10,7910 ± 0,0464	12,37 ± 0,0698	9,17 ± 0,0357	10,04 ± 0,0422	8,789 ± 0,0292

Karışım no	8	9	10	11	12	13
mfp						
0,5	1,413 ± 0,0002	1,387 ± 0,0005	1,384 ± 0,0005	1,375 ± 0,0005	1,367 ± 0,0004	1,362 ± 0,0003
1	1,762 ± 0,0008	1,705 ± 0,0006	1,696 ± 0,0008	1,677 ± 0,0009	1,658 ± 0,0005	1,646 ± 0,0004
2	2,443 ± 0,0020	2,314 ± 0,0017	2,297 ± 0,0016	2,253 ± 0,0017	2,215 ± 0,0010	2,189 ± 0,0009
3	3,144 ± 0,0025	2,936 ± 0,0020	2,907 ± 0,0011	2,84 ± 0,0012	2,78 ± 0,0019	2,74 ± 0,0021
4	3,857 ± 0,0034	3,568 ± 0,0059	3,535 ± 0,0038	3,451 ± 0,0063	3,363 ± 0,0045	3,308 ± 0,0045
5	4,606 ± 0,0061	4,237 ± 0,0057	4,199 ± 0,0066	4,082 ± 0,0061	3,976 ± 0,0050	3,904 ± 0,0042
6	5,385 ± 0,0121	4,92 ± 0,0060	4,885 ± 0,0074	4,754 ± 0,0133	4,629 ± 0,0069	4,546 ± 0,0099
7	6,192 ± 0,0168	5,63 ± 0,0145	5,582 ± 0,0103	5,44 ± 0,0129	5,302 ± 0,0099	5,208 ± 0,0142
8	7,045 ± 0,0222	6,38 ± 0,0210	6,332 ± 0,0280	6,187 ± 0,0206	5,968 ± 0,0142	5,865 ± 0,0201
9	7,908 ± 0,0199	7,143 ± 0,0341	7,074 ± 0,0269	6,931 ± 0,0211	6,694 ± 0,0171	6,563 ± 0,0201
10	8,741 ± 0,0370	7,887 ± 0,0400	7,911 ± 0,0471	7,727 ± 0,0380	7,415 ± 0,0356	7,288 ± 0,0341

Çizelge 5.9 5 MeV enerjili fotonlar için her bir karışımın ortalama serbest yola bağlı Yığılma faktörleri

Karışım no	1	2	3	4	5	6	7
mfp							
0,5	1,5812 ± 0,0005	1,5605 ± 0,0005	1,5346 ± 0,0004	1,5856 ± 0,0004	1,4753 ± 0,0004	1,5050 ± 0,0005	1,4660 ± 0,0005
1	2,0944 ± 0,0010	2,0438 ± 0,0010	1,9809 ± 0,0009	2,0851 ± 0,0010	1,8475 ± 0,0008	1,9042 ± 0,0008	1,8192 ± 0,0009
2	3,0611 ± 0,0022	2,9583 ± 0,0017	2,8283 ± 0,0017	3,0315 ± 0,0012	2,5539 ± 0,0016	2,6624 ± 0,0021	2,4925 ± 0,0009
3	4,0191 ± 0,0038	3,8765 ± 0,0032	3,6865 ± 0,0031	3,9986 ± 0,0021	3,2821 ± 0,0025	3,4504 ± 0,0031	3,1977 ± 0,0017
4	4,9625 ± 0,0044	4,8035 ± 0,0051	4,5596 ± 0,0049	5,0028 ± 0,0081	4,0299 ± 0,0014	4,2880 ± 0,0043	3,9401 ± 0,0063
5	5,9095 ± 0,0045	5,7366 ± 0,0117	5,4634 ± 0,0067	6,0689 ± 0,0080	4,8221 ± 0,0079	5,1811 ± 0,0108	4,7331 ± 0,0061
6	6,8530 ± 0,0084	6,6787 ± 0,0164	6,3878 ± 0,0106	7,1625 ± 0,0142	5,6401 ± 0,0102	6,1364 ± 0,0145	5,5684 ± 0,0095
7	7,8011 ± 0,0195	7,6706 ± 0,0116	7,3647 ± 0,0084	8,3856 ± 0,0173	6,4832 ± 0,0183	7,1489 ± 0,0142	6,4839 ± 0,0175
8	8,8004 ± 0,0197	8,6807 ± 0,0213	8,3379 ± 0,0172	9,5232 ± 0,0309	7,3610 ± 0,0288	8,2070 ± 0,0204	7,4204 ± 0,0194
9	9,7752 ± 0,0498	9,6824 ± 0,0317	9,3215 ± 0,0438	10,8660 ± 0,0349	8,2944 ± 0,0493	9,3357 ± 0,0182	8,3990 ± 0,0304
10	10,6950 ± 0,0572	10,6640 ± 0,0701	10,3970 ± 0,0757	12,1690 ± 0,0484	9,2303 ± 0,0527	10,3870 ± 0,0529	9,4592 ± 0,0482

Karışım no	8	9	10	11	12	13
mfp						
0,5	1,4619 ± 0,0005	1,4300 ± 0,0005	1,4276 ± 0,0004	1,4194 ± 0,0004	1,4101 TL ± 0,0005	1,4053 ± 0,0006
1	1,8068 ± 0,0009	1,7397 ± 0,0005	1,7317 ± 0,0006	1,7114 ± 0,0005	1,6904 TL ± 0,0006	1,6785 ± 0,0005
2	2,4660 ± 0,0009	2,3324 ± 0,0015	2,3169 ± 0,0012	2,2736 ± 0,0011	2,2307 TL ± 0,0014	2,2030 ± 0,0014
3	3,1642 ± 0,0017	2,9614 ± 0,0038	2,9390 ± 0,0041	2,8757 ± 0,0068	2,8084 TL ± 0,0027	2,7682 ± 0,0032
4	3,8958 ± 0,0060	3,6219 ± 0,0063	3,6001 ± 0,0044	3,5241 ± 0,0066	3,4389 TL ± 0,0030	3,3892 ± 0,0039
5	4,6979 ± 0,0081	4,3474 ± 0,0069	4,3234 ± 0,0056	4,2323 ± 0,0085	4,1284 TL ± 0,0057	4,0712 ± 0,0058
6	5,5384 ± 0,0160	5,1218 ± 0,0085	5,1082 ± 0,0092	5,0046 ± 0,0160	4,8970 TL ± 0,0138	4,8445 ± 0,0098
7	6,4414 ± 0,0159	5,9462 ± 0,0070	5,9426 ± 0,0140	5,8576 ± 0,0333	5,7349 TL ± 0,0123	5,6692 ± 0,0089
8	7,3830 ± 0,0216	6,7995 ± 0,0140	6,8311 ± 0,0242	6,7630 ± 0,0533	6,5989 TL ± 0,0276	6,5568 ± 0,0241
9	8,4361 ± 0,0372	7,7817 ± 0,0316	7,8681 ± 0,0347	7,8192 ± 0,0657	7,5990 TL ± 0,0419	7,5818 ± 0,0361
10	9,4697 ± 0,0309	8,7330 ± 0,0325	8,9201 ± 0,0400	8,9412 ± 0,0754	8,7606 TL ± 0,0412	8,7210 ± 0,0481

Çizelge 5.10 10 MeV enerjili fotonlar için her bir karışımın ortalama serbest yola bağlı Yığılma faktörleri

Karışım no	1	2	3	4	5	6	7
mfp							
0,5	1,6426 ± 0,0006	1,6312 ± 0,0005	1,6001 ± 0,0010	1,7024 ± 0,0007	1,5278 ± 0,0006	1,5871 ± 0,0004	1,5305 ± 0,0006
1	2,1047 ± 0,0006	2,0708 ± 0,0011	2,0048 ± 0,0009	2,1898 ± 0,0012	1,8525 ± 0,0009	1,9566 ± 0,0012	1,8439 ± 0,0008
2	2,8985 ± 0,0023	2,8340 ± 0,0018	2,7150 ± 0,0019	3,0122 ± 0,0019	2,4403 ± 0,0011	2,5980 ± 0,0021	2,4011 ± 0,0012
3	3,6551 ± 0,0033	3,5752 ± 0,0048	3,4206 ± 0,0029	3,8368 ± 0,0022	3,0528 ± 0,0029	3,2664 ± 0,0023	2,9994 ± 0,0024
4	4,3766 ± 0,0058	4,3268 ± 0,0044	4,1481 ± 0,0038	4,7177 ± 0,0044	3,6926 ± 0,0051	4,0068 ± 0,0043	3,6595 ± 0,0048
5	5,1179 ± 0,0084	5,0864 ± 0,0070	4,9180 ± 0,0076	5,6920 ± 0,0067	4,3990 ± 0,0055	4,8433 ± 0,0063	4,3875 ± 0,0061
6	5,8310 ± 0,0179	5,8766 ± 0,0074	5,6943 ± 0,0109	6,7262 ± 0,0126	5,1548 ± 0,0110	5,7576 ± 0,0117	5,2456 ± 0,0104
7	6,5604 ± 0,0197	6,6646 ± 0,0201	6,5442 ± 0,0160	7,8027 ± 0,0250	5,9838 ± 0,0192	6,7880 ± 0,0173	6,1651 ± 0,0237
8	7,2793 ± 0,0128	7,4916 ± 0,0280	7,4450 ± 0,0278	9,0263 ± 0,0352	6,8450 ± 0,0252	7,9446 ± 0,0306	7,1801 ± 0,0277
9	7,9887 ± 0,0227	8,3193 ± 0,0313	8,3715 ± 0,0426	10,3420 ± 0,0550	7,7601 ± 0,0346	9,2267 ± 0,0688	8,3449 ± 0,0419
10	8,6434 ± 0,0603	9,1602 ± 0,0503	9,1988 ± 0,0706	11,6900 ± 0,0738	8,6737 ± 0,0447	10,4730 ± 0,0781	9,5699 ± 0,0560

Karışım no	8	9	10	11	12	13
mfp						
0,5	1,5287 ± 0,0005	1,4897 ± 0,0005	1,4920 ± 0,0006	1,4868 ± 0,0009	1,4793 ± 0,0005	1,4763 ± 0,0005
1	1,8387 ± 0,0008	1,7610 ± 0,0009	1,7611 ± 0,0008	1,7487 ± 0,0011	1,7289 ± 0,0006	1,7201 ± 0,0008
2	2,3816 ± 0,0012	2,2426 ± 0,0007	2,2339 ± 0,0012	2,1990 ± 0,0025	2,1644 ± 0,0016	2,1440 ± 0,0011
3	2,9778 ± 0,0034	2,7728 ± 0,0011	2,7636 ± 0,0024	2,7154 ± 0,0031	2,6584 ± 0,0025	2,6284 ± 0,0025
4	3,6333 ± 0,0044	3,3766 ± 0,0024	3,3624 ± 0,0020	3,3023 ± 0,0053	3,2321 ± 0,0041	3,1989 ± 0,0033
5	4,3638 ± 0,0068	4,0541 ± 0,0094	4,0565 ± 0,0101	4,0077 ± 0,0128	3,9203 ± 0,0067	3,8806 ± 0,0063
6	5,2135 ± 0,0067	4,8359 ± 0,0119	4,8619 ± 0,0114	4,8299 ± 0,0118	4,7151 ± 0,0119	4,6846 ± 0,0108
7	6,1720 ± 0,0166	5,7332 ± 0,0235	5,8047 ± 0,0189	5,7978 ± 0,0099	5,7199 ± 0,0097	5,6979 ± 0,0120
8	7,2589 ± 0,0193	6,7545 ± 0,0255	6,9137 ± 0,0308	7,0117 ± 0,0292	6,8657 ± 0,0232	6,8476 ± 0,0287
9	8,4794 ± 0,0368	7,9051 ± 0,0355	8,1718 ± 0,0348	8,2780 ± 0,0261	8,1355 ± 0,0322	8,1965 ± 0,0391
10	9,8177 ± 0,0478	9,2250 ± 0,0549	9,5409 ± 0,0657	9,8165 ± 0,0554	9,6605 ± 0,0625	9,7930 ± 0,0590

Çizelge 5.11 20 MeV enerjili fotonlar için her bir karışımın ortalama serbest yola bağlı Yığılma faktörleri

Karışım no	1	2	3	4	5	6	7
mfp							
0,5	1,6767 TL ± 0,0008	1,6859 ± 0,0007	1,6609 ± 0,0004	1,8211 ± 0,0007	1,5831 ± 0,0007	1,6797 ± 0,0009	1,6082 ± 0,0009
1	2,0443 TL ± 0,0009	2,0548 ± 0,0012	2,0045 ± 0,0011	2,3114 ± 0,0011	1,8622 ± 0,0007	2,0357 ± 0,0014	1,9006 ± 0,0012
2	2,6165 TL ± 0,0018	2,6167 ± 0,0011	2,5351 ± 0,0017	3,0043 ± 0,0016	2,2954 ± 0,0011	2,5488 ± 0,0021	2,3297 ± 0,0019
3	3,1571 TL ± 0,0024	3,1605 ± 0,0027	3,0644 ± 0,0037	3,6414 ± 0,0055	2,7547 ± 0,0027	3,0633 ± 0,0030	2,7814 ± 0,0036
4	3,6916 TL ± 0,0054	3,7360 ± 0,0032	3,6332 ± 0,0043	4,3516 ± 0,0055	3,2772 ± 0,0034	3,6701 ± 0,0031	3,3239 ± 0,0030
5	4,2246 TL ± 0,0060	4,3439 ± 0,0058	4,2675 ± 0,0072	5,1644 ± 0,0098	3,8940 ± 0,0094	4,4202 ± 0,0043	3,9916 ± 0,0089
6	4,7685 TL ± 0,0130	4,9597 ± 0,0078	4,9584 ± 0,0126	6,1133 ± 0,0153	4,5979 ± 0,0130	5,3064 ± 0,0135	4,8014 ± 0,0113
7	5,3245 TL ± 0,0138	5,6546 ± 0,0111	5,6997 ± 0,0129	7,1829 ± 0,0155	5,4034 ± 0,0133	6,3806 ± 0,0232	5,8163 ± 0,0127
8	5,8907 TL ± 0,0136	6,3855 ± 0,0272	6,5004 ± 0,0222	8,4892 ± 0,0323	6,3376 ± 0,0253	7,6829 ± 0,0267	7,0574 ± 0,0196
9	6,4325 TL ± 0,0258	7,1350 ± 0,0364	7,4167 ± 0,0408	9,9053 ± 0,0305	7,4405 ± 0,0302	9,2986 ± 0,0591	8,5413 ± 0,0540
10	6,9749 TL ± 0,0638	7,9634 ± 0,0498	8,3336 ± 0,0332	11,6350 ± 0,0574	8,6568 ± 0,0636	11,1790 ± 0,0864	10,3680 ± 0,0468

Karışım no	8	9	10	11	12	13
mfp						
0,5	1,6120 ± 0,0009	1,5686 ± 0,0005	1,5768 ± 0,0005	1,5775 ± 0,0006	1,572 ± 0,0006	1,5717 ± 0,0005
1	1,9080 ± 0,0009	1,8251 ± 0,0008	1,8395 ± 0,0009	1,8367 ± 0,0015	1,826 ± 0,0008	1,8241 ± 0,0006
2	2,3318 ± 0,0009	2,1918 ± 0,0015	2,2091 ± 0,0014	2,1954 ± 0,0020	2,172 ± 0,0012	2,1628 ± 0,0010
3	2,7789 ± 0,0025	2,5918 ± 0,0023	2,6045 ± 0,0018	2,5790 ± 0,0019	2,54 ± 0,0028	2,5272 ± 0,0023
4	3,3205 ± 0,0036	3,0883 ± 0,0041	3,1012 ± 0,0032	3,0740 ± 0,0054	3,013 ± 0,0032	2,9916 ± 0,0030
5	4,0007 ± 0,0060	3,7097 ± 0,0036	3,7404 ± 0,0065	3,6974 ± 0,0034	3,638 ± 0,0052	3,6117 ± 0,0046
6	4,8287 ± 0,0067	4,5048 ± 0,0080	4,5567 ± 0,0084	4,5343 ± 0,0021	4,474 ± 0,0061	4,4690 ± 0,0086
7	5,8880 ± 0,0176	5,5133 ± 0,0110	5,6322 ± 0,0100	5,6555 ± 0,0123	5,615 ± 0,0216	5,6402 ± 0,0239
8	7,2191 ± 0,0203	6,8470 ± 0,0258	7,0138 ± 0,0384	7,1946 ± 0,0324	7,133 ± 0,0445	7,1887 ± 0,0356
9	8,8441 ± 0,0606	8,5029 ± 0,0333	8,8631 ± 0,0429	9,1976 ± 0,0733	9,187 ± 0,0679	9,3585 ± 0,0823
10	10,7470 ± 0,0315	10,5500 ± 0,0728	11,2030 ± 0,0980	11,6740 ± 0,0782	11,83 ± 0,0849	12,2970 ± 0,0691

Çizelge 5.12 50 MeV enrijili fotonlar için herbir karışımın ortalama serbest yola bağlı Yığılma faktörleri

Karışım no	1	2	3	4	5	6	7
mfp							
0,5	1,7472 ± 0,0008	1,7872 ± 0,0007	1,7688 ± 0,0011	1,9998 ± 0,0008	1,6872 ± 0,0008	1,8179 ± 0,0006	1,7329 ± 0,0008
1	2,0321 ± 0,0008	2,1238 ± 0,0010	2,1094 ± 0,0009	2,5678 ± 0,0010	1,9768 ± 0,0010	2,2431 ± 0,0008	2,0744 ± 0,0013
2	2,3861 ± 0,0021	2,5064 ± 0,0019	2,4921 ± 0,0025	3,2477 ± 0,0022	2,2977 ± 0,0021	2,7324 ± 0,0016	2,4482 ± 0,0018
3	2,7224 ± 0,0033	2,8510 ± 0,0027	2,8268 ± 0,0024	3,7391 ± 0,0038	2,5855 ± 0,0023	3,1022 ± 0,0035	2,7450 ± 0,0018
4	3,0867 ± 0,0025	3,2336 ± 0,0045	3,2086 ± 0,0034	4,2516 ± 0,0055	2,9352 ± 0,0028	3,5263 ± 0,0055	3,1047 ± 0,0029
5	3,4654 ± 0,0047	3,6823 ± 0,0073	3,6755 ± 0,0059	4,8828 ± 0,0084	3,3780 ± 0,0057	4,0612 ± 0,0058	3,5883 ± 0,0065
6	3,8942 ± 0,0098	4,1894 ± 0,0116	4,2340 ± 0,0057	5,6844 ± 0,0159	3,9677 ± 0,0078	4,7947 ± 0,0097	4,2766 ± 0,0151
7	4,3583 ± 0,0146	4,7560 ± 0,0112	4,8954 ± 0,0131	6,6781 ± 0,0270	4,7189 ± 0,0111	5,8067 ± 0,0257	5,2033 ± 0,0149
8	4,8740 ± 0,0171	5,4353 ± 0,0225	5,7647 ± 0,0198	8,0052 ± 0,0217	5,7196 ± 0,0340	7,2109 ± 0,0426	6,4864 ± 0,0329
9	5,4151 ± 0,0384	6,2432 ± 0,0292	6,7057 ± 0,0256	9,7265 ± 0,0646	7,0486 ± 0,0297	9,2144 ± 0,0674	8,3479 ± 0,0416
10	5,9819 ± 0,0350	7,1770 ± 0,0349	7,8466 ± 0,0518	11,8240 ± 0,0861	8,7650 ± 0,0424	11,9000 ± 0,0769	10,8660 ± 0,0338

Karışım no	8	9	10	11	12	13
mfp						
0,5	1,7421 ± 0,0011	1,6953 ± 0,0010	1,7091 ± 0,0010	1,7140 ± 0,0006	1,7092 ± 0,0006	1,7118 ± 0,0007
1	2,0947 ± 0,0014	2,0027 ± 0,0010	2,0350 ± 0,0007	2,0467 ± 0,0011	2,0379 ± 0,0015	2,0440 ± 0,0016
2	2,4849 ± 0,0013	2,3310 ± 0,0021	2,3833 ± 0,0017	2,4025 ± 0,0023	2,3911 ± 0,0022	2,4022 ± 0,0019
3	2,7843 ± 0,0016	2,5923 ± 0,0020	2,6512 ± 0,0025	2,6708 ± 0,0025	2,6498 ± 0,0018	2,6604 ± 0,0021
4	3,1459 ± 0,0038	2,9129 ± 0,0032	2,9795 ± 0,0037	2,9903 ± 0,0034	2,9602 ± 0,0042	2,9666 ± 0,0030
5	3,6436 ± 0,0046	3,3897 ± 0,0060	3,4341 ± 0,0066	3,4497 ± 0,0069	3,4080 ± 0,0061	3,4106 ± 0,0036
6	4,3283 ± 0,0146	4,0193 ± 0,0107	4,1002 ± 0,0076	4,1264 ± 0,0124	4,0653 ± 0,0082	4,0653 ± 0,0093
7	5,3056 ± 0,0151	4,9804 ± 0,0145	5,0931 ± 0,0122	5,1031 ± 0,0177	5,0829 ± 0,0193	5,0928 ± 0,0197
8	6,6856 ± 0,0237	6,3218 ± 0,0388	6,5752 ± 0,0242	6,7132 ± 0,0333	6,6882 ± 0,0198	6,7714 ± 0,0257
9	8,7188 ± 0,0576	8,3102 ± 0,0625	8,7921 ± 0,0287	9,0850 ± 0,0631	9,0940 ± 0,0525	9,2863 ± 0,0595
10	11,6400 ± 0,0883	11,3350 ± 0,0973	12,1130 ± 0,1143	12,8840 ± 0,1264	13,0270 ± 0,1429	13,3370 ± 0,1419

Çizelge 5.13 200 keV enerjili fotonlar için etkin atom numarasına göre $\mu_r = \{1, 5, 10\}$ kalınlıkları için hesaplanan yığılma faktörleri

Effective Z	$\mu_r = 1$	$\mu_r = 5$	$\mu_r = 10$
10	1,5454	3,7682	7,6070
15	1,3735	2,5325	3,9389
20	1,2443	1,8602	2,4223
25	1,3538	2,4282	3,6464
30	1,1082	1,3243	1,4837
35	1,1349	1,4215	1,6342
40	1,0832	1,2498	1,3661
45	1,2073	1,3647	1,4746
50	1,0579	1,1668	1,2351
55	1,0545	1,1570	1,2202
60	1,0496	1,1391	1,1958
65	1,0445	1,1254	1,1751
70	1,0415	1,1167	1,1654

Çizelge 5.14 500 keV enerjili fotonlar için etkin atom numarasına göre $\mu_r = \{1, 5, 10\}$ kalınlıkları için hesaplanan yığılma faktörleri

Effective Z	$\mu_r = 1$	$\mu_r = 5$	$\mu_r = 10$
10	1,7898	5,9515	13,5443
15	1,6649	4,6583	9,7685
20	1,5582	3,7424	6,7142
25	1,6521	4,6695	9,5248
30	1,3834	2,4907	3,6695
35	1,4277	2,7842	4,3131
40	1,3227	2,1988	3,0811
45	1,3239	2,1858	3,0410
50	1,2634	1,8990	2,4570
55	1,2519	1,8538	2,3730
60	1,2345	1,7834	2,2451
65	1,2197	1,7141	2,1267
70	1,2088	1,6461	1,8649

Çizelge 5.15 1 MeV enerjili fotonlar için etkin atom numarasına göre $\mu_r = \{1, 5, 10\}$ kalınlıkları için hesaplanan yığılma faktörleri

Effective Z	$\mu_r = 1$	$\mu_r = 5$	$\mu_r = 10$
10	1,9957	6,7381	15,1897
15	1,8152	5,7979	11,9022
20	1,7186	4,9428	9,8143
25	1,8145	5,6553	11,5310
30	1,5852	3,7101	6,3419
35	1,6169	4,0393	7,4872
40	1,5110	3,2669	5,3738
45	1,5250	3,3082	5,4213
50	1,4694	2,9067	4,4922
55	1,4519	2,8266	4,3094
60	1,4471	2,7018	3,8189
65	1,4151	2,6070	3,8317
70	1,4050	2,5336	3,6695

Çizelge 5.16 3 MeV enerjili fotonlar için etkin atom numarasına göre $\mu_r = \{1, 5, 10\}$ kalınlıkları için hesaplanan yığılma faktörleri

Effective Z	$\mu_r = 1$	$\mu_r = 5$	$\mu_r = 10$
10	2,0938	6,6434	12,8137
15	2,0088	6,1527	11,9063
20	1,9264	5,6437	10,8565
25	2,0010	6,1911	12,4250
30	1,7960	4,5779	11,3822
35	1,8331	5,1058	9,9412
40	1,7238	4,3850	9,2222
45	1,7496	4,5374	8,6040
50	2,3043	4,8067	8,4277
55	1,7068	4,2182	8,6157
60	1,6897	4,1661	8,7329
65	1,6644	4,0586	8,4785
70	1,6544	3,9746	8,3661

Çizelge 5.17 5 MeV enerjili fotonlar için etkin atom numarasına göre $\mu_r = \{1, 5, 10\}$ kalınlıkları için hesaplanan yığılma faktörleri

Effective Z	$\mu_r = 1$	$\mu_r = 5$	$\mu_r = 10$
10	2,1484	6,1704	11,2137
15	2,0662	5,8666	10,9419
20	1,9761	5,4992	10,4626
25	2,0772	6,0887	12,2301
30	1,8434	4,8467	9,3003
35	1,8903	5,1307	10,2910
40	1,7610	4,4447	8,7042
45	1,7871	4,6210	9,2941
50	1,7263	4,3087	8,6445
55	1,7068	4,2182	8,6154
60	1,6925	4,1661	8,7328
65	1,6643	3,9606	6,9053
70	1,6529	3,5245	6,0247

Çizelge 5.18 10 MeV enerjili fotonlar için etkin atom numarasına göre $\mu_r = \{1, 5, 10\}$ kalınlıkları için hesaplanan yığılma faktörleri

Effective Z	$\mu_r = 1$	$\mu_r = 5$	$\mu_r = 10$
10	2,1385	5,3132	8,9827
15	2,0756	4,9723	9,7832
20	2,0007	4,9246	9,2641
25	2,1653	5,6980	11,7542
30	1,8467	4,4218	8,7381
35	1,9355	4,7831	10,3655
40	1,5051	4,1416	8,6955
45	1,7364	3,9946	8,9919
50	1,7402	4,1653	11,3997
55	1,7350	3,9448	9,1447
60	1,7244	3,9326	9,5290
65	1,7039	3,8306	9,2959
70	1,6940	3,7685	9,2938

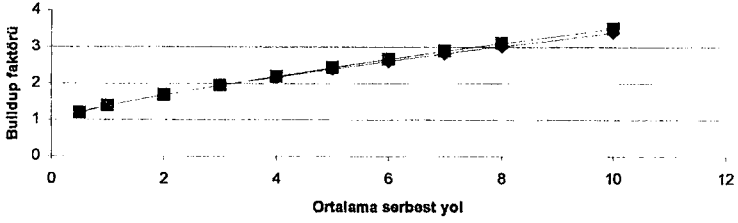
Çizelge 5.19 20 MeV enerjili fotonlar için etkin atom numarasına göre $\mu_r = \{1, 5, 10\}$ kalınlıkları için hesaplanan yığılma faktörleri

Effective Z	$\mu_r = 1$	$\mu_r = 5$	$\mu_r = 10$
10	2,0571	4,3762	7,2428
15	2,0421	4,4204	8,1889
20	1,9805	4,2842	8,4015
25	2,2679	5,1819	11,6971
30	1,8406	3,9086	8,7468
35	1,9935	4,3682	10,9815
40	1,8363	3,7355	9,0388
45	1,8722	3,9216	10,4072
50	1,7932	3,3222	9,8007
55	1,7947	3,6251	10,3121
60	1,8031	3,5395	9,8014
65	1,7854	3,5511	11,1626
70	1,7741	3,5166	11,3309

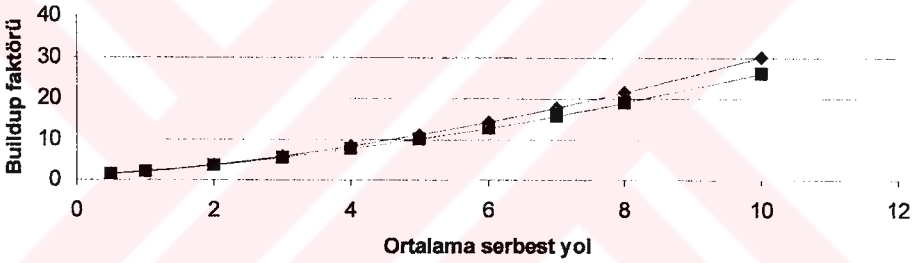
Çizelge 5.20 50 MeV enerjili fotonlar için etkin atom numarasına göre $\mu_r = \{1, 5, 10\}$ kalınlıkları için hesaplanan yığılma faktörleri

Effective Z	$\mu_r = 1$	$\mu_r = 5$	$\mu_r = 10$
10	2,0212	3,5788	6,2799
15	2,0862	3,7387	7,4509
20	2,0672	3,6814	7,9202
25	2,5167	4,8809	8,9187
30	1,9347	3,3943	6,9984
35	2,1850	4,9726	10,6981
40	1,9880	3,4108	8,9969
45	2,0284	3,5994	11,0757
50	1,9393	3,3549	10,9868
55	1,9639	3,3702	11,0689
60	1,9707	3,4148	12,0901
65	1,9596	3,3659	11,9845
70	1,9659	3,3447	11,9705

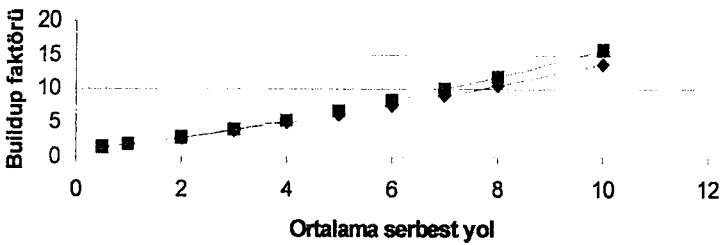
Şekil 5.1.1 Kurşun için mfp - Buildup faktörü değişimi



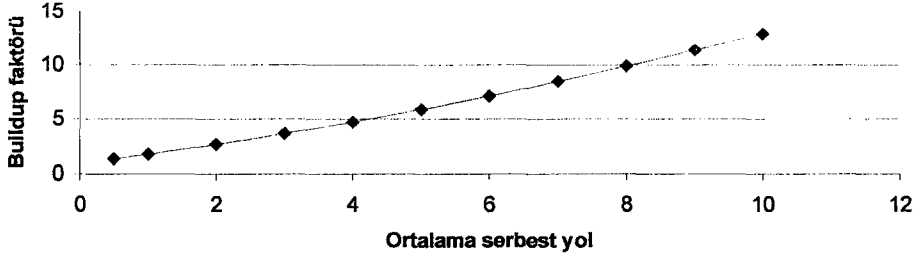
Şekil 5.1.4 Su için mfp - Buildup faktörü değişimi



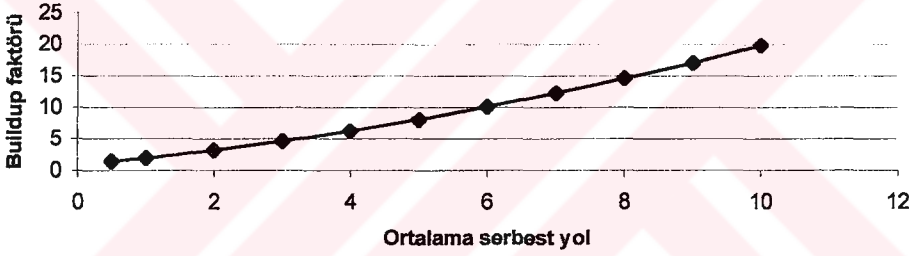
Şeki 5.1.6 Demir için mfp - Buildup faktörü değişimi



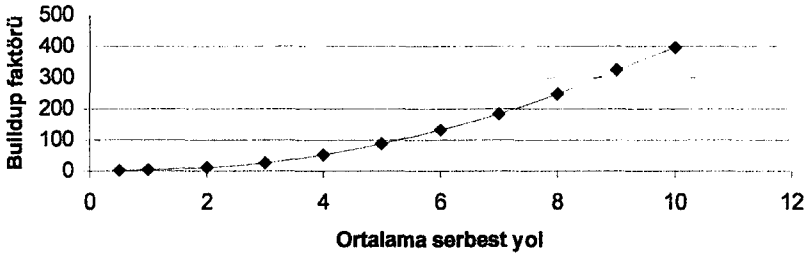
Şekil 5.1.2 Bakır için mfp - Bulldup faktörü değişimi



Şekil 5.1.3 Alliminyum için mfp - Bulldup faktörü değişimi

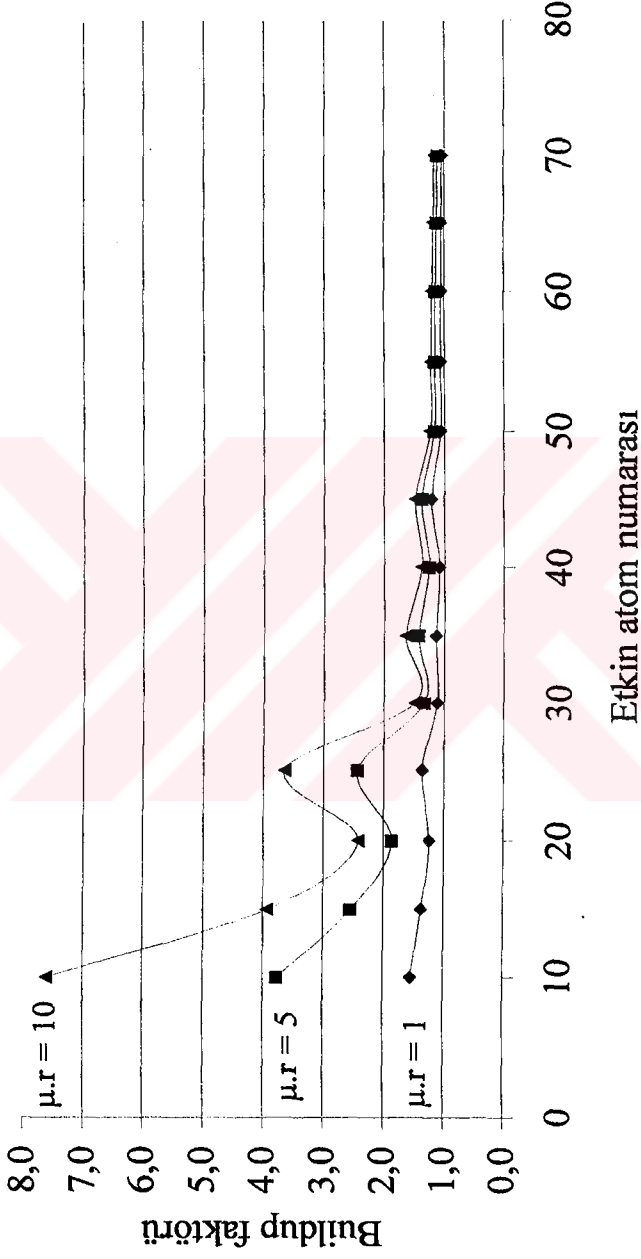


Şekil 5.1.5 Lityum için mfp - Bulldup faktörü değişimi

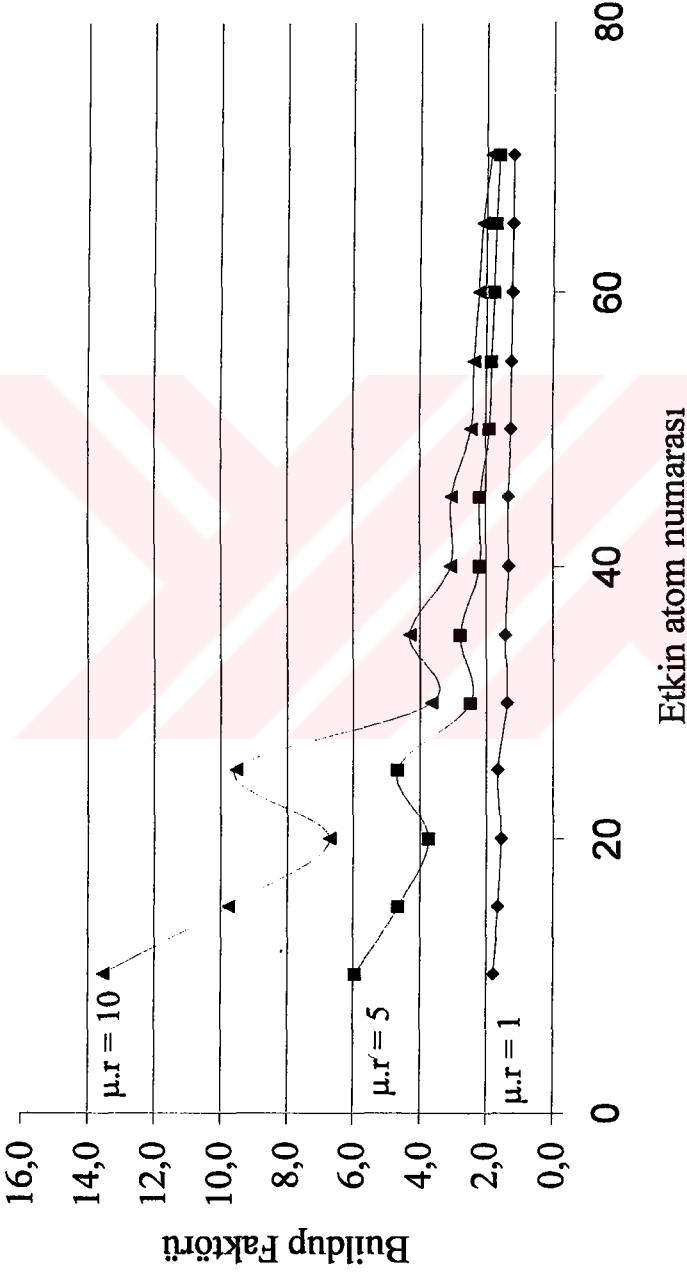


Not: "kare" ile noktaları belirlenmiş eğriler önceki çalışmalara ait verilerle çizilmiştir.

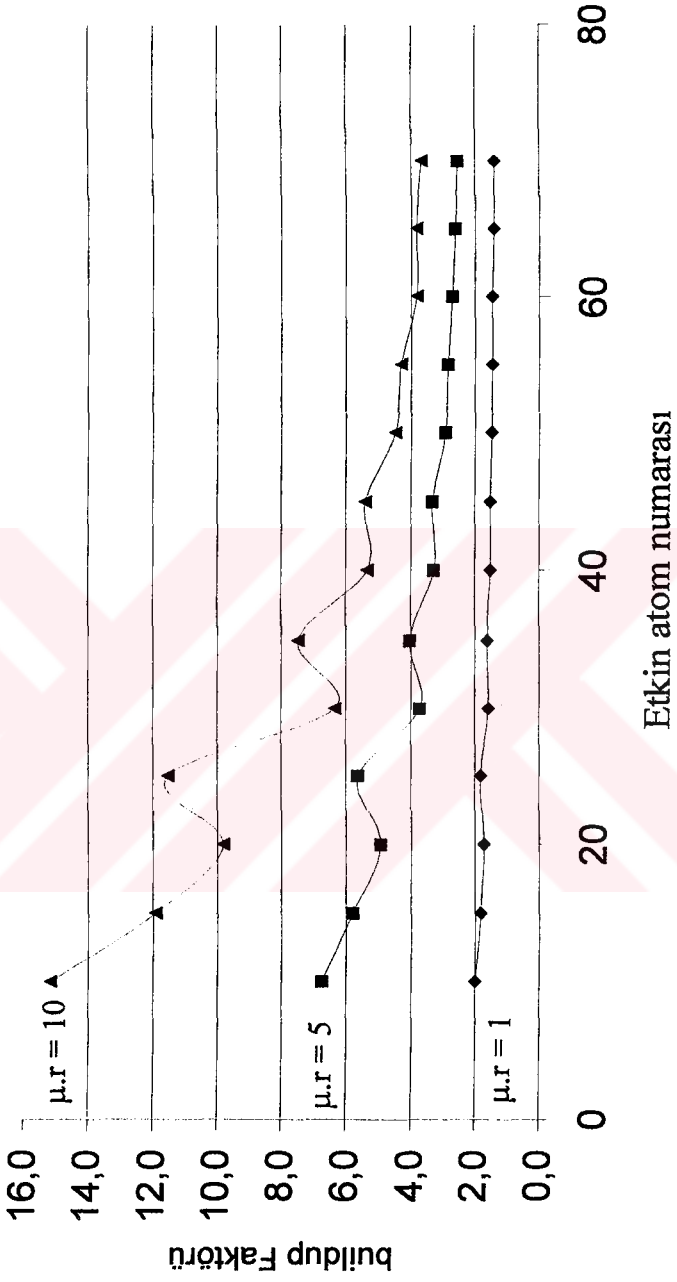
Şekil 5.2 200 keV enerjili fotonlar için Buildup-Zeff değişimi



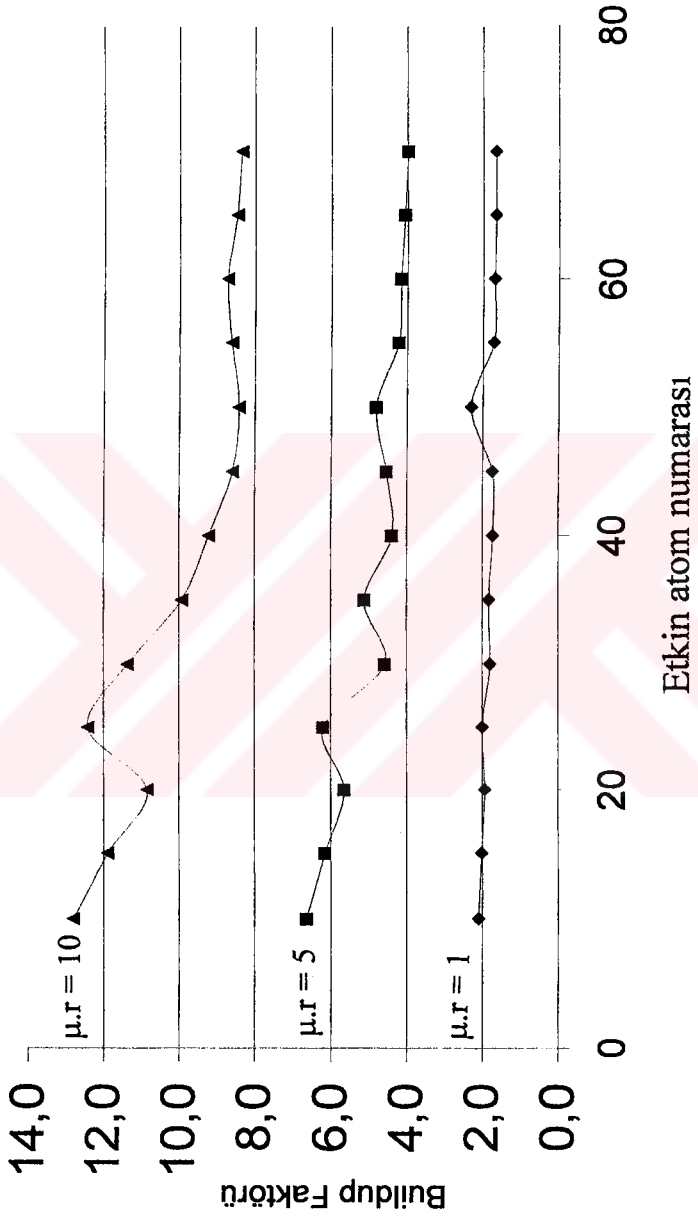
Şekil 5.3 500 keV enerjili fotonlar için buildup-Zeff değişimi



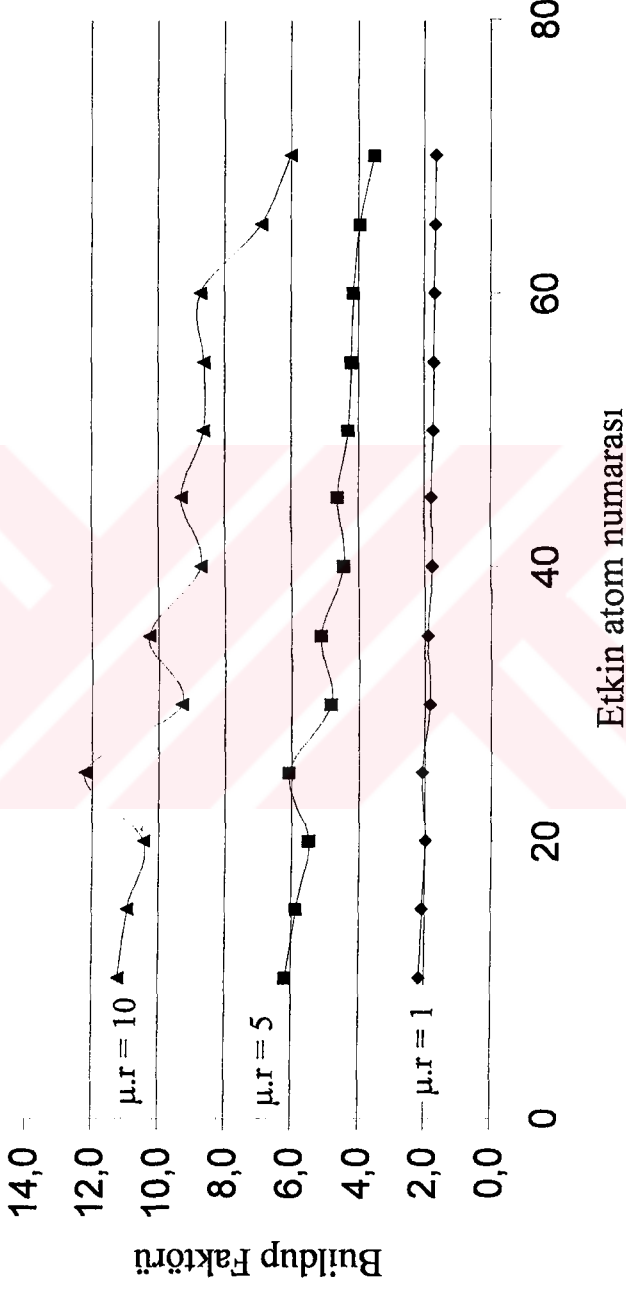
Şekil 5.4 1 MeV enerjili fotonlar için Buildup-Zeff değişimi



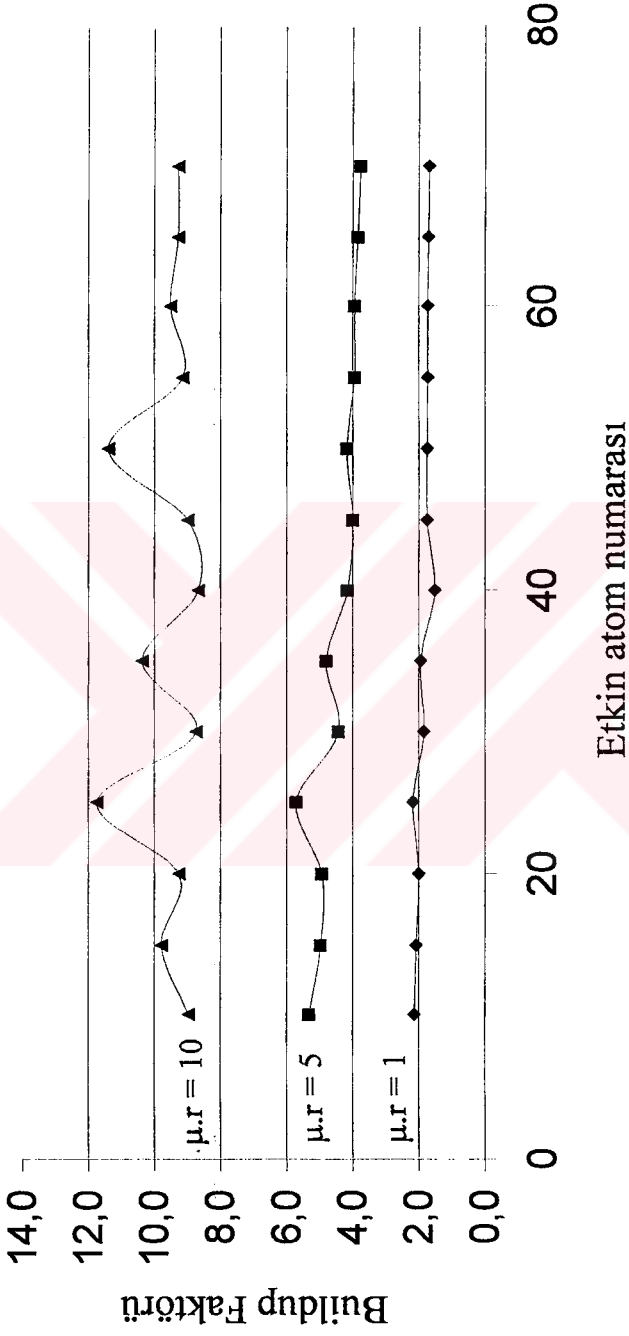
Şekil 5.5 3 MeV enerjili fotonlar için Buildup-Zeff değişimi



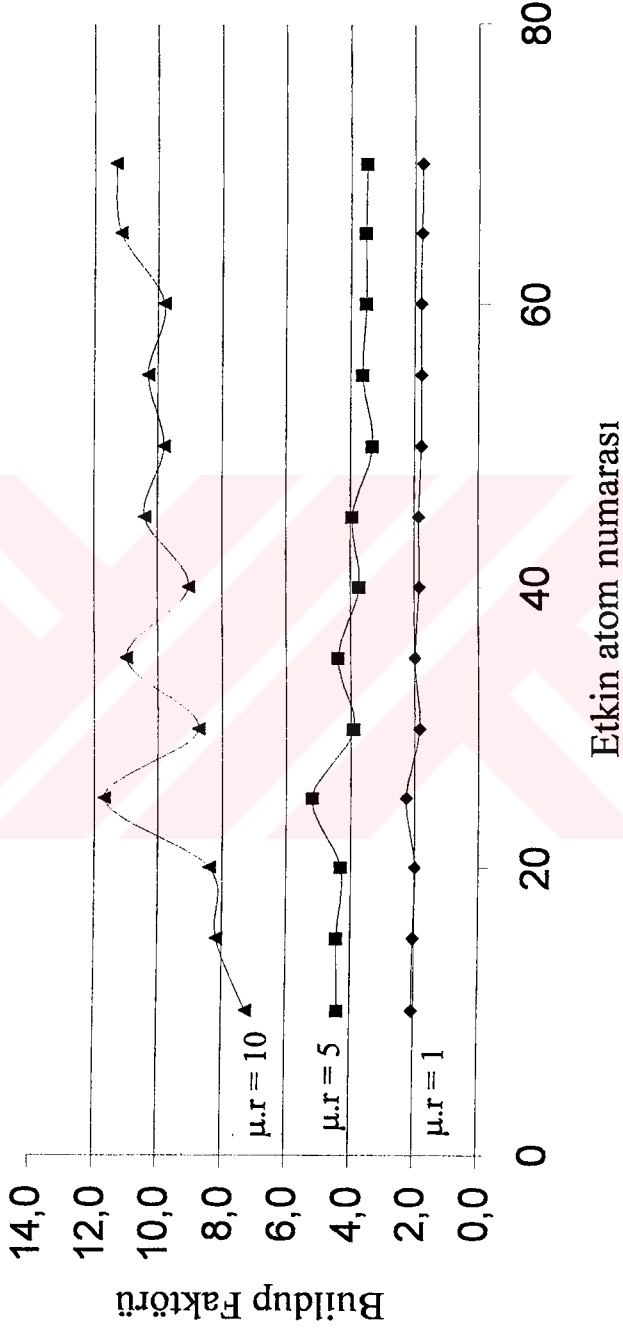
Şekil 5.6 5 MeV enerjili fotonlar için Buildup-Zeff değişimi



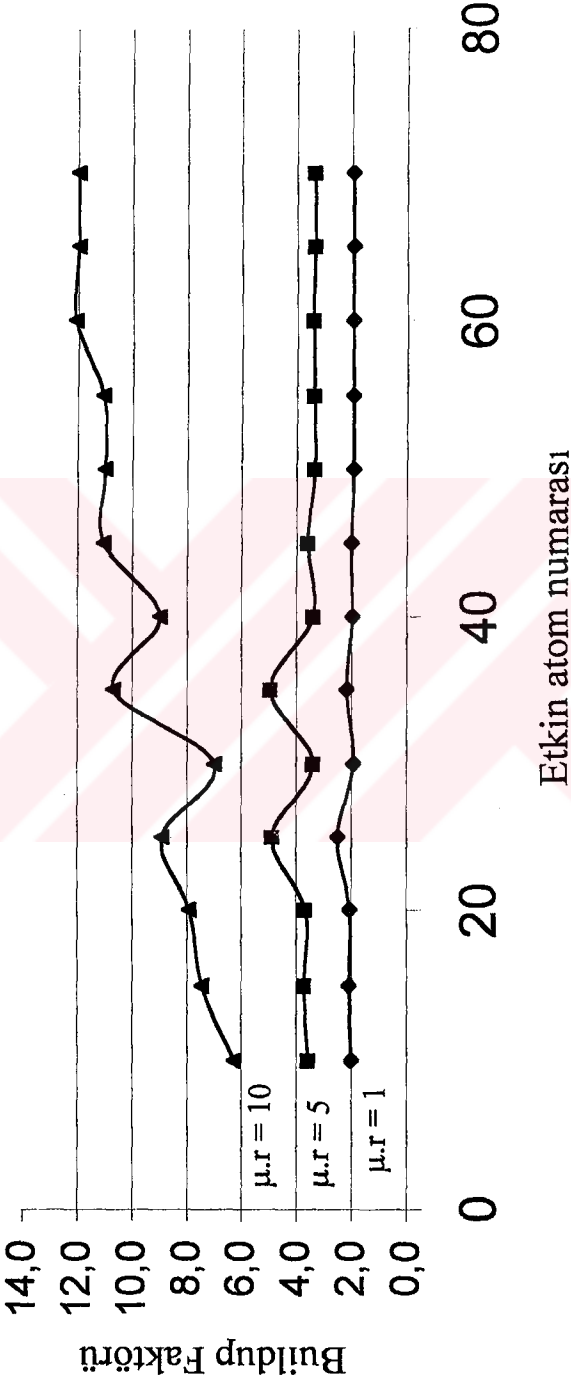
Şekil 5.7 10 MeV enerjili fotonlar için Buildup-Zeff değişimi



Şekil 5.8 20 MeV enerjili fotonlar için Buildup-Zeff değişimi



Şekil 5.9 50 MeV enerjili fotonlar için Buildup-Zeff değişimi



KAYNAKLAR

A. B. Chilton G. L. Simmons, (1980), "Photon Point Source Buildup Factors for Air, Water and Iron", Nucl. Sci. Eng. 73, 97-107

American National Standard, (1991), "Gamma-ray Attenuation Coefficients and Buildup Factors for Engineering Material", ANSI / ANS-6.4.3, American Nuclear Society.

ANSI/ANS ANS-6.4.3, (1991), "Gamma-ray attenuation Coefficient and Buildup Factors for Engineering Materials", American Nuclear Society, La Grange Park Illinois.

E. STORM and H. I. ISRAEL, (1970), "Photon Cross Section from 1 keV to 100 MeV for Elements Z=1 to Z= 100," At. Data Nucl. Dta Tables, 7, 565

G. C. Bakos, (1993), "Buildup Factors for Two Energies (1.43 and 2.75 MeV) of Photon Penetration Through Single and Double-Layer Shielding Slabs", Nucl. Energy. Vol.20 No.4 pp.255-263,

G. R. White, (1950), "The penetration and Diffusion of Co-60 Gamma Rays in Water Using Spherical Geometry", Phys. Rev. 80, 154

- G. S. Sidhu**, (2000), "A Study of Energy and Effective Atomic Number Dependence of the Exposure Build-up Factors in Biological Samples", *J. Radiol. Prot.* 20, 53-68.
- H. Goldstein and J. E. Wilkins**, (1954), "Calculation of the Penetration of Gamma Rays," NDA/AEC Report NYO-3075, U.S. Government Printing Office, Washington, D. C., Chem. Vol.41, pp. 631-672.
- H. Hirayama**, (1988), " Effects of Incoherent and Coherent Scattering on the Exposure Buildup Factors of Low-Energy Gamma Rays", *Nuclear Science and Engineering*, 99, 145-156.
- H. Hirayama**, (1996), " Effect of the Photon Cross Sections and Energy-Absorption Coefficients of Air to the Gamma-Ray Point Isotropic Exposure Buildup Factors", *Nuclear Science and Engineering*, 124, 258-270.
- H. Hirayama**, (1987), "Exposure Buildup Factors of High-Energy Gamma Rays for Water, Concrete, Iron and Lead", *Nuclear Technology* Vol. 77.
- J. HUBBEL**, (1969), "Photon Cross Section , Attenuation Coefficients and Energy Absrbtion Coefficients from 10 keV to 100 GeV," NSRDS-NBS 29, National Bureau of Standards

- J. HUBBEL**, (1995), "Tables of X-ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients 1 keV to 20 MeV for Elements Z=1 to 92 and 48 Additional Substances of Dosimetric Interest" NISTIR, 5632
- K. Shin**, (1997), "Application of the EGS4 Monte Carlo Code to a study of Multilayer Point Isotropic Gamma-Ray Exposure Buildup Factors up to 40 mfp", KEK Reprint 96-175.
- M. B y kata**, (1996), "Buildup Faktörlerinin Monte Carlo Y ntemi İle Hesaplanması", Yüksek Lisans Tezi, E. . Nükleer Bilimler Enstitüsü-İzmir.
- M. Sobol**, (1975), "The Monte Carlo Method", Rus adan  eviren V.I. Kisin, Mir, Moscow,.
- M. J. Berger.**, (1956), "Effect of Boundaries and Inhomogeneities on the Penetration of Gamma Radiation," Report NBS-4942, U.S. National Bureau of Standards Washington D. C.,
- M. Metghalchi**, (1979), "On the Polynomial Form of Gamma-Ray Buildup Factor Functions," Nucl. Sci. Eng. 70, 207.
- O. Klein, Y. Nishina**, (1929) Z Phys. 52, 853

Ö. Mersinoğlu, (1986), “Gama Işınlarına Ait Sayısal Yığılma Faktörlerinin Soğurucunun atom Numarasına Göre Değişiminin İncelenmesi” Yüksek Lisans Tezi, E.Ü. Nükleer Bilimler Enstitüsü-İzmir.

S. Akinao, (2000), “Development of Angular Eigenvalue Method for Deep Penetration problems of Gamma Rays,” The Wakasawan Energy Research Center, Journal of Nuclear Science and Technology, Supplement 1, p. 454-458.

U. Fano, (1953), “Gamma Ray Attenuation, Part II-Analysis of Penetration”, Nucleonics 11, 55

W. R. NELSON, H. HIRAYAMA, and D. W. O. ROGERS, (1985), “The EGS4 Code System,” SLAC-265, Stanford Linear Accelerator Center.

W.R. Nelson, (1988), “Writing Subroutine Howfar for EGS4”, SLAC tn-

Y. Harima, (1992), “An Historical Review and Current Status of Buildup Factor Calculations and Applications” Radiat. Phys. 87-4.

ÖZGEÇMİŞ

20.06.1975 Bursa/Gemlik doğumlu. İlkokulu ve Orta okulu Umurbey Abdullah Fehmi İlköğretim okulunda, liseyi Gemlik lisesinde okudu. 1997 de Ege üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümünden mezun oldu. 1997 de E.Ü. Nükleer Bilimler Enstitüsünde yüksek lisans öğrencisi oldu. 27.07.1999 dan beri aynı enstitüde araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır.

