

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GAMA IŞINI BÜİLDUP FAKTÖRLERİNİN MONTE CARLO
SİMÜLASYONU VE YAPAY SİNİR AĞLARI İLE MODELLENMESİ

Bayram BİLMEZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Fizik Anabilim Dalı

Fizik Programı

Danışman

Prof. Dr. Orhan İÇELLİ

Aralık, 2021

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**GAMA IŞINI BÜLDUP FAKTÖRLERİNİN MONTE CARLO
SİMÜLASYONU VE YAPAY SİNİR AĞLARI İLE MODELLENMESİ**

Bayram BİLMEZ tarafından hazırlanan tez çalışması 31.12.2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı, Fizik Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Orhan İÇELLİ
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Orhan İÇELLİ, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Mustafa DEMİR, Üye
İstanbul-Cerrahpaşa Üniversitesi

Doç. Dr. Mehmet KILIÇ, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Danışmanım Prof. Dr. Orhan İÇELLİ sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Gama Işını Buildup Faktörlerinin Monte Carlo Simülasyonu ve Yapay Sinir Ağları ile Modellenmesi başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Bayram BİLMEZ

İmza

Eşime

ve

kızlarıma

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans çalışmalarımı gerçekleştirmem için tecrübesiyle, birikimiyle ve çalışma ahlakıyla her daim örnek olan, her türlü maddi ve manevi desteğini esirgemeyen, mesafe olarak uzak olsak da gönülden ırak etmeyen kıymetli Hocam Prof. Dr. Orhan İÇELLİ'ye teşekkürü bir borç bilip şükranlarımı sunarım.

Sayırsız kereler kendi işini bırakıp benim dertlerimle uğraşan, bilgi birikimini paylaşmaktan hiç geri durmayan ve birlikte çalışmaktan onur duyduğum değerli Hocam Dr. Özgür AKÇALI' ya teşekkürü bir borç bilirim.

Her türlü desteğini esirgmeden çalışmalarına yardım etmesinin yanı sıra dost olarak da beni yüksek lisans boyunca yalnız bırakmayan, birlikte çalışmaktan keyif aldığım kıymetli dostum Ozan TOKER'e teşekkür ederim.

Çalışmalarım boyunca görüş ve önerileriyle yardımlarını esirgemeyen, fikri ve bilgi desteğini eksik etmeyen saygıdeğer Hocalarım Prof. Dr. Ersoy ÖZ'e ve Doç. Dr. Selçuk ALP'e desteklerinden ötürü minnetlerimi sunarım.

Hakları ödenmeyecek, hayatım boyunca beni her daim destekleyen ve kararlarım hep saygı duyan anneme ve babama da teşekkürü borç bilirim.

Tüm bu yüksek lisans çalışması sürecinde benim yanımda olup desteklerini eksik etmeyen, dertlerimi ve üzüntülerimi paylaşan sevgili eşim Gizem'e ve canım kızlarım Yağmur ile Duru'ya iyi ki varsınız diyorum.

Bayram BİLMEZ

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	viii
KISALTMA LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
TABLO LİSTESİ	xi
ÖZET	xiii
ABSTRACT	xiv
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti.....	1
1.2 Tezin Amacı	4
1.3 Hipotez	4
2 GENEL BİLGİLER	6
2.1 Radyoaktivite ve Radyasyon Kavramları.....	6
2.1.1 Gama Işınları.....	8
2.1.2 Etkileşim Sabitleri	11
2.1.3 Radyasyon Tepkisi.....	13
2.2 Buildup Faktörleri	15
2.2.1 Eşdeğer Atom Numarası.....	17
2.2.2 Fit Fonksiyonları	18
2.3 Monte Carlo Yöntemi	19
2.3.1 MCNP 6.2.....	21
2.4 Makine Öğrenmesi	26
2.4.1 Yapay Sinir Ağları	28
3 METOT	36
3.1 Simülasyon Detayları	36
3.2 Yapay Sinir Ağları	40
3.3 Bileşik ve Karışımlar.....	40
4 BULGULAR	44
4.1 Hesaplanan EBF ve EABF değerleri	44
4.2 Bulunan Buildupların Teyit Edilmesi.....	57
4.3 Yapay Sinir Ağları	61
4.4 Bileşik ve Karışımlar için Buildup Faktörü	66

5 SONUÇ VE ÖNERİLER	75
5.1 Sonuçlar.....	75
5.1 Öneriler.....	78
KAYNAKÇA	79
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	84

SİMGE LİSTESİ

ϕ	Ak1
α	Alfa Parçacığı
β	Beta Parçacığı
$Z_{eş}$	Eşdeğer Atom Numarası
ρ	Kütle Yoğunluğu
μ_{En}	Lineer Enerji Soğurma Katsayısı
μ	Lineer Soğurma Katsayısı
σ	Varyans

KISALTMA LİSTESİ

BF	Buildup Faktörü
BR	Bayesian Regularization
EABF	Energy Absorption Buildup Factor
EBF	Exposure Buildup Factor
FOM	Figure of Merit
GP	Geometrik Progresyon
keV	Kiloelektronvolt
MCNP	Monte Carlo N-Particles
MeV	Megaelektronvolt
MSE	Mean Squared Error
LM	Levenberg-Marquardt Algoritması
mfp	Mean Free Path
VSEA	Vanadyum slag/Epoksi/Antimon Oksit
YSA	Yapay Sinir Ağları

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Kobalt-60 radyoizotopu için temel bozunum şeması	8
Şekil 2.2 Demir elementi için foton etkileşim tesir kesitleri [33]	11
Şekil 2.3 Kurşun için kütle azaltma ve kütle enerji soğurma katsayıları [36]	13
Şekil 2.4 Buildup faktörü geometrileri	17
Şekil 2.5 Foton takibi için Monte Carlo akış şeması	20
Şekil 2.6 Bir hacimden geçen parçacıkların yol uzunluğu	23
Şekil 2.7 Makine öğrenmesi türlerinin sınıflandırılması	27
Şekil 2.8 Tek bir yapay sinir ağı nöronunun işleyişi	29
Şekil 2.9 İleri beslemeli çok katmanlı yapay sinir ağları mimarisi	30
Şekil 2.10 Sıklıkla kullanılan aktivasyon fonksiyonu türleri	32
Şekil 3.1 Kullanılan simülasyon geometrisi	37
Şekil 3.2 VsEA, su ve beton için enerjiye karşılık eşdeğer atom numaraları	43
Şekil 4.1 Berilyum elementi için EABF değerleri	46
Şekil 4.2 Berilyum elementi için EBF değerleri	47
Şekil 4.3 Alüminyum için EABF değerleri	49
Şekil 4.4 Alüminyum için EBF değerleri	50
Şekil 4.5 Demir için EABF değerleri	52
Şekil 4.6 Demir için EBF değerleri	53
Şekil 4.7 Kurşun için EABF değerleri	56
Şekil 4.8 Kurşun için EBF değerleri	61
Şekil 4.9 Tek gizli katmanlı YSA için katman sayısına karşılık MSE grafiği	63
Şekil 4.10 LM algoritması için çevrim sayısı ile MSE değişimi	63
Şekil 4.11 BR modeli için gerçek değerler ile öğrenilen değerlerin arasındaki fark	66
Şekil 4.12 Su için EABF değerleri	67
Şekil 4.13 Su için 1 mfp'de EBF değerleri karşılaştırması	67
Şekil 4.14 Su bileşiğinin 5 mfp için EBF değerleri kıyaslaması	68
Şekil 4.15 Su bileşiğinin 40 mfp için EBF değerleri kıyaslaması	69
Şekil 4.16 Standart beton için seçilen mfp'lerde EABF değerleri	70
Şekil 4.17 Standart beton için 1 mfp'de YSA ve ANSI değerleri	71

Şekil 4.18	Standart beton için 20 mfp’de YSA ve ANSI değerleri	71
Şekil 4.19	VsEA için 1-40 mfp arası EABF değerleri	73
Şekil 4.20	VsEA kompoziti için 1 mfp’de YSA ANSI arasındaki karşılaştırma	73
Şekil 4.21	VsEA kompoziti için 40 mfp’de YSA ANSI arasındaki karşılaştırma ...	74

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1	Kullanılan radyasyon tepki fonksiyonları	15
Tablo 2.2	MCNP içindeki fiziksel nicelikler ve standart birimleri	22
Tablo 3.1	Hava için MCNP’de yapılan malzeme tanımı.....	39
Tablo 3.2	YSA ile BF değerleri belirlenen bileşik ve karışımların içeriği.....	42
Tablo 4.1	Berilyum için MCNP’den bulunan EABF değerleri	45
Tablo 4.2	Berilyum elementi için seçilen mfp’lerde EBF değeri.....	46
Tablo 4.3	Alüminyum elementi için MCNP’den elde edilen EABF değerleri	48
Tablo 4.4	Alüminyum için MCNP’den bulunan EABF değerleri.....	49
Tablo 4.5	Demir elementi için MCNP’den elde edilen EABF değerleri.....	51
Tablo 4.6	Demir için MCNP’den elde edilen EBF değerleri	52
Tablo 4.7	Kurşun için MCNP ile bulunan EABF değerleri.....	54
Tablo 4.8	Kurşun için MCNP’den elde edilen EBF değerleri	55
Tablo 4.9	Alüminyum için 100 keV enerjide EBF değerleri	58
Tablo 4.10	Demir için 10 MeV enerjili fotonlar için EBF değerleri kıyaslaması ..	59
Tablo 4.11	Demir için 100 keV enerjide EBF karşılaştırması	59
Tablo 4.12	Kurşun için 100 keV fotonlar için EBF değerleri kıyaslaması.....	60
Tablo 4.13	Kurşunun 10 MeV’de hesaplanan EBF’leri ile literatür kıyaslaması...	60
Tablo 4.14	YSA ile tahmin edilen EBF’lerin ortalama ve en yüksek hataları.....	64
Tablo 4.15	BR ve LM algoritmaları için temel parametreler.....	65

Gama Işını Buildup Faktörlerinin Monte Carlo Simülasyonu ve Yapay Sinir Ağları ile Modellenmesi

Bayram BİLMEZ

Fizik Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Orhan İÇELLİ

Bu tez karışım ve bileşikler için buildup faktörlerinin yapay sinir ağları kullanarak belirlenmesini kapsamaktadır. YSA algoritmalarını eğitmek için gerekli olan kapsamlı veri kümesi MCNP 6.2 simülasyonu ile elde edilmiştir. Bu veri kümesi elde edilmesinde atom numaraları 4 ile 92 arasında değişen 37 element, 15 keV ile 10 MeV aralığında 16 farklı kaynak fotonları ve 1 ile 40 mfp arası malzeme kalınlıkları için simülasyon yapılmıştır. Simülasyonlarda gama ışını bölgesinde etkili olan, Rayleigh ve Compton saçılmaları, çift oluşumu ve fotoelektrik etki dikkate alınmıştır. MCNP 6.2'den elde edilen EBF ve EABF değerleri daha önceden bildirilmiş değerler ile karşılaştırılmış ve karşılaştırılan değerler ile uyumlu olduğu görülmüştür. Enerji, atom numarası ve mfp değerleri girdi değişkenleriyken, hesaplar sonucunda elde edilen EBF ve EABF ise hedef değişkenleri olacak şekilde YSA algoritmaları eğitilmiştir. Yapılan denemeler sonucunda üç gizli katmanlı algoritma en başarılı sonuçları sağlamış ve gizli katmandaki en uygun nöron sayıları 10, 25, 50 olarak belirlenmiştir. Belirlenen nihai modellerin hatalar karesi ortalaması 0.005'in altındayken, korelasyon katsayılarının 0.999'un üzerinde olduğu ve oldukça düşük hata ile çalıştığı görülmüştür. Elementler üzerinden eğitim tamamlandıktan sonra elde edilen nihai modelde bileşik ve karışımlara ait

EBF ve EABF değerleri tahmin edilmiştir. Deęerlendirilmede bileşik ve karışımlar olarak su ve vanadyum cürufu/epoksi/antimon kompoziti ile standart beton kullanılmıştır. Bileřiklerin tahmin edilen değerleri BXCOM verileri ile karşılaştırılmış ve yapay sinir ağları sonuçları ile dūřuk enerjilerde farklı sonuçlar bulunmuştur. Bu farkların sebebinin bu çalışmada kullanılan detaylı foton etkileşimleri olduğu dūřünölmektedir. Kurulan model sayesinde karışım ve bileşikler için son derece hızlı ve gūvenilir sonuçlar alındığından ötürü, yeni nesil radyasyon zırhlayıcılar içeren çalışmalarda kullanılması önerilebilir.

Anahtar Kelimeler: Gama ışınları, monte carlo simölasyonu, makine öğrenmesi, yapay sinir ağları, buildup faktörleri

Monte Carlo Simulation and Artificial Neural Network Modelling of Gamma Ray Buildup Factors

Bayram BİLMEZ

Department of Physics

Master of Science Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Orhan İÇELLİ

This thesis covers the determination of buildup factors for mixtures and compounds using artificial neural networks. The comprehensive data set required to train ANN algorithms was obtained using MCNP 6.2 simulation. To get the data set, simulations were conducted for 37 elements with atomic numbers between 4 and 92, at 16 different source photon energies between 15 keV and 10 MeV, and material thicknesses between 1 and 40 mfp. In the simulations, Rayleigh and Compton scattering with bound electron corrections, pair production and photoelectric effect are taken into account. Emission of fluorescence and Bremsstrahlung photons were included. The buildup factor values obtained from MCNP were compared with previously reported values and were found to match with the reported values. ANN algorithms are trained with energy, atomic number and mfp values as the input variables, whereas EBF and EABF are the target variables. After tryouts optimal parameters were determined, and three hidden layers were found to fit the data best, and their respective neuron numbers were found to be 10, 25, 50. While the mean squared errors of the final models was below 0.005, it was observed that the correlation coefficients were above 0.999

and produced very low errors. EBF and EABF values of compounds and mixtures were estimated from the final model after completing the training on pure elements. The compounds and mixtures were selected as water, vanadium slag/epoxy/antimony and standard concrete. The predicted values of the compounds were compared with ANSI data calculated with BXCUM. While there are discrepancies in the low energy region, especially at 40 mfp depth, the general buildup trend is seen to be consistent. Thanks to the established model, fast and reliable results can be obtained for mixtures and compounds, so it can be recommended to be used with new generation radiation shielding materials.

Keywords: Gamma-rays, monte carlo simulations, buildup factors, machine learning, artificial neural networks.

1.1 Literatür Özeti

Gama ışınlarının giricilikleri yüksek olduğu için içinde ilerledikleri ortamda ölçüm sınırının altında kalana kadar durdurulmadan önce çok yüksek derinliklere ulaşabilirler. İlerlerken çok kereler saçılmaya uğrar ve radyasyon şiddetinde üstel azalma ile beklenenden daha yüksek bir şiddet gözlenir. Bu durumdan ötürü yüksek malzeme kalınlıklarında radyasyon şiddetindeki artışı açıklamak üzere bir düzeltme çarpanı kullanma fikri ortaya atılmıştır. Bu düzeltme çarpanı olarak kullanılacak buildup faktörü (BF) hesaplarının ilk kez yapıldığı yer 1940'lardaki Manhattan projesi olarak bilinmektedir [1]. Konu ile alakalı olarak halka açık olarak ilk yayın 1950 yılında White'ın [2] yaptığı deneysel çalışmadır. Bu ilk çalışmada Co-60 radyoizotopuna ait gama ışınlarının su dolu bir kürenin dışında yol açtığı radyasyon şiddeti ölçülmüş ve saçılmaların etkisinin 252.8 cm kalınlıkta (16mfp), üstel azalmadan beklenen değerden 33.8 kat fazla olduğu tespit edilmiştir.

Küresel geometride gamma ışını enerjilerinde derin nüfuz çalışmaları yapmak çoğu materyal için pratik olarak imkânsızdır. Gelişen nükleer endüstri ile birlikte ihtiyacın artmasıyla birlikte çalışmalar deneysel çalışmaların yanında sayısal çözümlere kaymaya başlamıştır. BF'lerin belirlenmesi için sıklıkla kullanılan metotlar momentler metodu, kesikli koordinatlar (discrete ordinates), değişmez gömme (invariant embedding) ve Monte Carlo (MC) metotlarıdır [1].

BF konusunda en önemli dönüm noktalarından birisi momentler metodunu kullanarak hazırlanan Goldstein ve Wilkins'e ait çalışmadır [3]. Bu çalışmada Compton saçılmasının gama ışınlarının nüfuzu için etkileri su, hava, demir ve kurşun için belirlenmiştir. Uzun zaman boyunca başvuru kaynağı olarak kullanılan çalışma, Compton saçılması dışındaki etkileri hesaba dâhil etmemektedir. Bu da

bulunan buildup faktörlerinin ölçülenden daha düşük olmasına sebep vermektedir.

Kesikli koordinatları kullanan kodlar yaygın olarak gama ışını BF'leri hesabında kullanılmış ve hem hızlı hem de geniş bir geometri yelpazesi için sonuçlar üretebilmektedir [4, 5]. Kullanılan yöntem doğası gereği enerji, uzay ve açısal olarak kesikli aralıklarda çalıştığı için verdikleri sonuçlar radyasyonun sürekli doğasını tam anlamıyla ifade etmekte yetersiz kalmaktadır.

BF hususunda bir diğer mihenk taşı ANSI/ANS 6.4.3 çalışmasıdır [6]. Nükleer mühendislik malzemeleri için EBF ve EABF bulunmasını içeren bu standart atom numarası 4 ve 92 arasında değişen 23 element ve hava, su ve betonu içerecek şekilde 1 ortalama serbest yol (mfp) kalınlıktan 40 mfp kalınlığa kadar değerleri içermektedir. ANSI/ANS 6.4.3 standardında küçük atom numaralı elementler (Be ile Cu arasındaki) için BF değerleri momentler metodu ile hesaplanmıştır. Moment metodunda, yani küçük atom numaralı elementlerde, Bremsstrahlung hesaba dâhil edilmemiştir. Büyük atom numaralı elementler için BF değerleri (Mo ile U arasındaki) ise kesikli koordinatlar metodu ile hesaplanmıştır. Ayrıca bu standart oluşturulurken elde edilen sonuçları karşılaştırmak ve teyit etmek amacıyla, belli başlı element ve kaynak enerjileri için MC kullanılmıştır [7].

Değişmez gömme metodu Shimizu tarafından BF'lerinin hesabına uyarlanmıştır [8]. Bu metodun avantajı çok yüksek derinliklere (100 mfp) uzanabilmesi ve hesaplamının oldukça hızlı olabilmesidir [9].

Monte Carlo yöntemi diğer yöntemlerden daha fazla işlem gücü gerektirdiği için bilgisayar teknolojisi tam gelişme sağlayana kadar kapsamlı bir Monte Carlo buildup çalışması yapmak mümkün olmamıştır. Bununla birlikte radyasyon zırhlama için en mühim element, bileşik ve karışımlar için belli başlı enerjilerde pek çok Monte Carlo hesabı sonucu bildirilmiştir [10-15].

ANSI/ANS 6.4.3'ün 2001'de geliştirilmeyi durdurulmasını takiben yeni standart oluşturmak amacı ile ortaya konan çalışmalarda BF değerleri kesikli koordinatlar metodu ile hesaplanmış ve MC simülasyonu ile teyit etme yoluna gidilmiştir [4, 5, 16]. Bahsi geçen çalışmalar halen yeni standart olarak onay beklemektedir.

Geliştirilmekte olan yeni nesil nükleer reaktörler, nükleer araştırma tesisleri, radyasyonun tıbbi uygulamaları ve endüstriyel uygulamalar için yeni nesil zırhlayıcı malzemeler tasarlamak adına pek çok çalışma bulunmaktadır [17, 18]. Bu yeni nesil radyasyon zırhlayıcı malzemeler fiyat, erişilebilirlik, daha iyi mekanik özellikler ve toksik etki taşımama gibi çeşitli sebeplerle eski zırhlayıcılara alternatif olmaktadır. Önerilen yeni malzemelerin saf element formundan ziyade, karışım, bileşik veya kompozit malzemeler olması sebebiyle BF değerlerinin belirlenmesi adına elementlere ait BF verilerinden faydalanılmaktadır.

BF değerlerinin hesaplanan veya ölçülen enerji, malzeme türü ve kalınlığı dışındaki durumlar için de kullanılabilmesi için yıllar içinde çeşitli eğri uydurma (fitting) yöntemleri kullanılmıştır ve ara değerler edilerek bulunmaya çalışılmıştır [19-22]. İlk başlarda üstel fonksiyonlar toplamı şeklinde yapılan uygulama Taylor fit şekli olarak bilinmektedir. Harima tarafından ortaya konan G-P (geometric progression) fit türü önceki yaklaşımlara göre daha az bir hata ile çok geniş bir bölgede çalışabildiği için bu alanda standart uygulama haline gelmiştir [23]. ANSI-ANS standardında da G-P fit parametreleri bildirilmiş olup bu fit parametreleri kullanılarak bileşik ve karışımlar için EBF ve EABF belirlemek üzere çok sayıda çalışmalar yapılmıştır. 2018 yılında kullanıma sunulan BXCUM programı G-P fit işlemini oldukça kolaylaştırmış ve daha sonra benzer başka programlar da bileşik ve karışımlar için BF hesaplamak için kullanılmaktadır [20].

Son yıllarda gelişen hesaplama teknolojisi ve makine öğrenmesi algoritmaları ile son derece karmaşık fonksiyonların matematiksel olarak modellenmesi mümkün olmuştur. Gama ışınlarının madde etkileşimini ifade eden parametrelerin de makine öğrenmesi metotları ile modellenebileceği ve bu metotların kullanışlı olabileceği gösterilmiştir [24-28]. BF değerleri bilgisine sahip olmanın ortamdaki radyasyon etkisini belirlemek için hızlı bir yöntem olan nokta çekirdek kodları için kullanışlı olduğu uzun zamandır bilinmektedir [29, 30]. Bunun yanında gelişen makine öğrenmesi metotları ile analitik yaklaşımların ötesine geçip önerilecek yeni nesil malzemeler için de radyasyon madde etkileşimini son derece hassas ve hızlı bir şekilde belirlemek mümkün olacaktır.

1.2 Tezin Amacı

Gama ışınlarının madde ortamından geçişlerini üstel azalma kanunu ile modellemek gama ışınlarının etkilerini gerçekte oluşturacağı etkiye göre önemli ölçüde az göstermektedir. Bu hatayı düzeltmek üzere kullanılan en temel yaklaşım BF denilen çarpanları kullanmaktır. Bu bağlamda en çok kullanılan EBF ve EABF bilgisine sahip olmak derin nüfuz içeren problemleri çözmeyi çok kolaylaştıracaktır. BF geleneksel olarak zırhlayıcı malzemenin atom numarası, gelen gama ışınının enerjisi ve ortalama serbest yola bağlı bir fonksiyon olarak ifade edilmektedir. Saf elementlerin yanı sıra karışım ve bileşikler için de bilinmesi gereken durumda ilgili karışım veya bileşik için atom numarası yerine geçecek eşdeğer atom numarası üzerinden hesaplama yapılmaktadır. Ayrıca genelde ölçülen veya hesaplanan buildup tabloları standart enerji ve ortalama serbest yollar için bildirilmektedir. Bu tezde bileşik ve karışımların EBF ve EABF değerlerinin 1 mfp ile 40 mfp kalınlıklar arasında, 15 keV ile 10 MeV kaynak fotonları için bulunabilmesi adına yapay sınır ağları ile modellenmesi ve ara değerlerin yüksek doğrulukla bulunabilmesi amaçlanmaktadır. Yapay sınır ağlarının BF değerlerini öğrenmesi için gerekli veri kümesi, atom numarası 4'ten 92'ye kadar olan elementleri kapsayacak şekilde, 15 keV ile 10 MeV arasında foton enerjileri için, 1 mfp kalınlıktan 40 kalınlığa kadar EBF ve EABF değerlerinin bulunmasını içermektedir.

Tezin amacı, öncelikle saf elementler için EBF ve EABF değerlerini MCNP 6.2 simülasyonu ile bulmak ve sonrasında elde edilen bu verileri kullanarak makine öğrenmesi algoritması ile modelleyerek bu modelden bileşik ve karışımlar için EBF ve EABF değerlerini tahmin etmektir.

1.3 Hipotez

Radyasyonun zırhlaması amacıyla geleneksel olarak kullanılan malzemelerin yanı sıra yeni nesil zırhlayıcı malzemeler önerilmektedir. Buildup faktörleri zırhlayıcı malzemelerin yüksek enerjili fotonlar için değerlendirilmesinde ve ortamdaki soğurulan enerjinin belirlenmesinde kullanılan önemli parametrelerdir.

Yapay sinir ağıları kullanarak çok girdili ve lineer olmayan bir davranış gösteren buildup faktörlerinin modellenebileceği ve bu modellemenin bileşik ve karışımlar için hızlı ve yüksek doğrulukta sonuçlar vereceği bu tezin temel hipotezidir.

2.1 Radyoaktivite ve Radyasyon Kavramları

Dünyada şimdiye kadar 118 elementin toplamda 3400'ü aşkın izotopu gözlenmiştir. Yalnızca 80 elementin 253 izotopu kararlı durumdayken geri kalanları kararsızdır. Kararsız durumda bulunan izotoplar kararlı duruma geçebilmek üzere radyoaktif bozunuma uğrarlar. Bozunum sonucunda açığa çıkan parçacıkların türüne göre bu bozunumlar sınıflandırılır. En temel radyoaktif bozunum türleri, α ve β^- bozunumları, proton ve nötron salınımı ile birlikte fisyon ve elektron yakalama olarak verilebilir. Bu bozunumlar sonucu ortaya çıkan ürün çekirdekler genelde uyarılmış enerji seviyelerinde oluşurlar ve sahip oldukları enerji fazlalığını γ ışınması olarak yayarlar. Radyoaktif izotopların bozunma süreçleri tek tek atomlar incelendiğinde rastgeledir, yani tek bir atom çekirdeği incelendiğinde ne zaman bozunacağını bilmek mümkün değildir. Ancak ortamda çok sayıda aynı izotop çekirdeği mevcutsa bu durum istatistiki bir davranış gösterir ve bozunumlar için bir bozunma sabiti ve yarı ömürden söz edilebilir. Radyoaktif elementlerin yarı ömürleri saniyenin küçük bir kesrinden evrenin yaşından daha büyük zamana kadar uzanabilir.

Radyasyon kavramına gelirsek, geniş anlamıyla enerji taşıyan her türlü parçacık ve dalga için radyasyon kavramı kullanılabilse de bu tez çalışması boyunca radyasyondan kastedilen atom ve moleküllerdeki yörünge elektronlarını iyonlaştıracak kadar yüksek enerjiye sahip olan, yani iyonlaştırıcı radyasyon olacaktır. Radyoaktif izotoplardan yayınlanan parçacık ve dalgaların hepsi oldukça yüksek enerjili olup iyonlaştırıcı radyasyon sınıfına girerler. Belirtildiği üzere farklı izotopların farklı yarı ömürleri vardır. Daha düşük yarı ömürlü izotoplar daha hızlı bozunurlar. Bir radyoaktif madde içeren numune için radyoaktivite, birim zamanda yaptığı bozunma sayısı ile ölçülür.

Radyoaktif kaynakların gücü zamana göre üstel azalma gösterir. Ancak numunenin yarı ömrü gözlem süresine göre çok uzun ise o numunenin aktivitesi sabit kabul edilebilir [31].

Radyoaktif izotoplarından yayımlanan parçacıkların hepsi de iyonlaştırıcı radyasyon sınıfına girmekle birlikte, bu iyonlaştırıcı etkinin gerçekleşme mekanizması bakımından ikiye ayrılır.

- **Direkt İyonlaştırıcı Radyasyon:** Yüklü parçacıklardan oluşan, yörünge elektronları ile direkt olarak Coulomb etkileşimine girerek iyonlaştıran radyasyondur [32]. α , β , proton, döteryum, trityum, yüklü pionlar ve ağır iyonlar direkt iyonlaştırıcı radyasyona örnek verilebilir. Direk iyonlaştırıcı radyasyon madde içerisinde geçerken sürekli enerji kaybeder ve durur. Bu enerji kaybetme ve durma sürecinde de genelde düz bir doğrultuda değil karmaşık bir yörüngede gider. Parçacığın durmadan önce gidebildiği mesafeye parçacığın menzili denir ve parçacık türüne ve enerjisine göre değişir. Düşük ve orta enerjilerde bu radyasyon tipinin giriciliği oldukça düşüktür.
- **Dolaylı İyonlaştırıcı Radyasyon:** Yüksüz parçacıklardan oluşan, çekirdek ve elektronlarla Coulomb etkileşimi dışında mekanizmalarla etkileşerek meydana getirdikleri yüklü parçacıklar üzerinden iyonlaşmayı sağlayan radyasyondur. Nötron, X-Işınları, gama ışınları ve yüksüz pionlar bu tip radyasyona örnektir. Direkt Coulomb etkileşimi yapamadıklarından dolayı enerji kayıpları büyük parçalar halinde gerçekleşir. Malzeme içindeki ilerlemeleri bir menzil üzerinden değil, etkileşmeden geçtikleri ortalama yol üzerinden ölçülür.

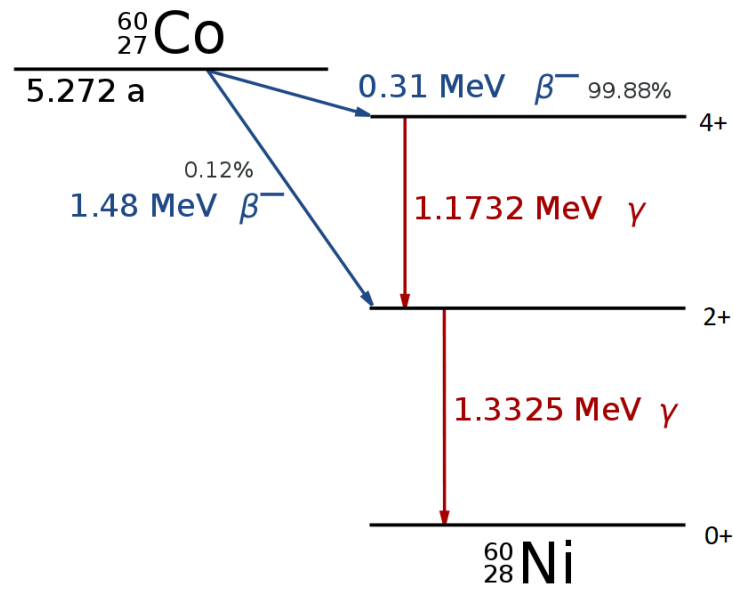
Bir iyonlaştırıcı radyasyon alanının karakterizasyonu o radyasyon alanının akısı üzerinden yapılır. Radyasyon akısı birim yüzey alanından, birim zamanda geçen parçacıkların sayısı ile ölçülür. Radyasyon akısı şu şekilde formüle edilir:

$$\phi = \frac{N}{A \cdot t} \quad (2.1)$$

Burada ϕ radyasyon akısını, N yüzeyden dik şekilde geçen parçacık sayısını, A yüzey alanını, t ise zamanı göstermektedir. Radyasyon akısının birimi *parçacık cm⁻² s⁻¹*'dir.

2.1.1 Gama Işınları

Radyoaktif çekirdeklerin bozunum şemaları izotopa göre değişkenlik gösterir. Ancak bozunuma uğradıktan sonra ortaya çıkan ürünler hemen her zaman uyarılmış durumda üretilirler. Bu uyarılmış durumdan temel enerji düzeyine geçmek için iki durum arasındaki enerji farkına eşit bir foton yayınlarlar. Çekirdeklerin enerji seviyeleri büyük farklar içerdikleri için açığa çıkan bu fotonlar çok yüksek enerjilidir. Ürettiği gama ışını yüksek enerjili ve çok belirgin piklere sahip olan Co-60 izotopuna ait bozunum şeması Şekil 2.1’de gösterilmektedir.



Şekil 2.1 Kobalt-60 radyoizotopu için temel bozunum şeması

Burada görülebileceği üzere kararsız olan Co-60 izotopu %99.88 ihtimalle 0.31 MeV enerjili beta parçacıkları yaymaktadır. Ürün olan Ni-60 izotopu 4+ uyarılmış durumunda oluşmakta ve önce 1.1732 MeV enerjili foton yayarak 2+ durumuna geçip sonrasında 1.3325 MeV enerjili foton yayarak temel enerji düzeyine inmektedir. Gama ışınları enerji düzeyleri arası geçiş enerjilerine tekabül ettiği için kesikli enerjilerdedir. Nadiren bu geçiş enerjisi yörünge elektronlarından birisine aktarılabilir, bu durumda çıkan elektrondan yayılan frenleme radyasyonu da nükleer bozunmayı takiben yayınlandığı için gama ışıması olarak kabul edilebilir. Ancak bu tez çalışması boyunca gama ışını kavramından kastedilen tek enerjili fotonlar olacaktır. Gama ışınlarının enerjileri 15 keV ile 2.5 MeV arasındadır.

Gama ışınları yüksüz oldukları için iyonlaştırıcı etkileri dolaylıdır. Önce atom veya atomun yörünge elektronları ile etkileşime girerek, bu etkileşimden meydana gelecek yüklü parçacıklarla iyonlaşmayı sağlarlar. Gama ışınlarının enerji aralığını kapsayan 1 keV ile 10 MeV enerji aralığında temel etkileşimler 4 tanedir. Bu etkileşimlerden kısaca söz etmek ve atom numarası ile foton enerjisine bağlı olarak etkileşim ihtimallerini açıklamak yerinde olacaktır.

Fotoelektrik Etki: Fotonun enerjisinin tümünü atomun etrafındaki bir elektrona aktarması hadisesidir. Fotoelektrik etki bilhassa yüksek atom numaralı elementler için ve düşük gama enerjilerinde en olası etkileşim mekanizmasıdır. Fotoelektrik etkileşim için yaklaşık olarak tesir kesiti ortamdaki atomların atom numarası ve gelen fotonun enerjisi cinsinden

$$\sigma_{FE}(E) \propto \frac{Z^4}{E^3} \quad (2.2)$$

olarak verilebilir. Gelen fotonla etkileşme ihtimali en yüksek olan yörünge elektronları çekirdeğe en kuvvetli bağlı olan K-kabuğu elektronlarıdır [33]. Sonrasında L ve M kabuklarındaki elektronlar takip eder. Fotoelektrik etkileşim gerçekleştikten sonra boş kalan yörüngeye daha üst yörüngelerden bir elektron geçiş yapar ve bu geçiş esnasında atomun enerji seviyelerine bağlı bir karakteristik X-Işını yayınlar. Fotoelektrik olayı takiben gerçekleşen bu fotonlara flüoresans fotonları denir. Enerji seviyeleri arasındaki fark daha dış yörüngelerden bir elektrona aktarılırsa bunlara da Auger elektronu denir.

Compton Olayı: Bir fotonun yörünge elektronlarından birisi ile esnek olmayan saçılma yapması olayıdır. Bu saçılma sonucu gelen foton enerjisinin bir kısmını kaybeder ve bir elektron yörüngeden atılır. Serbest bir elektron için bir fotonun saçılma tesir kesiti Klein-Nishina formülü ile verilir [34]. Atomik yörüngedeki elektronlar için ise serbest elektron tesir kesiti inkoherent saçılma fonksiyonu ile düzeltilir. Toplam Compton tesir kesiti yaklaşık olarak atom numarası ve enerjiye şu şekilde bağlıdır.

$$\sigma_C \propto \frac{Z}{E} \quad (2.3)$$

Compton etkileşimi gama ışını bölgesinde çoğunlukla en olası ve önemli etkileşimdir. Compton etkileşiminde, atom çekirdeğine uzak dış yörünge elektronları iç kabuklardan daha fazla girme ihtimaline sahiptir.

Rayleigh Saçılması: Fotonun atomun tamamı ile etkileşerek esnek olarak saçıldığı etkileşime Rayleigh (koherent) saçılması denir. Gelen ve giden fotonun enerjisinde bir değişme olmaz, sadece yönünde sapma gerçekleşir. Rayleigh saçılması düşük enerjilerde fotoelektrik etkinin, orta ve yüksek enerjilerde ise Compton saçılmasının yanında çok daha düşük ihtimalle gerçekleşir, bundan ötürü gama bölgesinde en baskın etkileşim olmaz. Atom numarasına bağlı olarak tesir kesiti için yaklaşık ifade

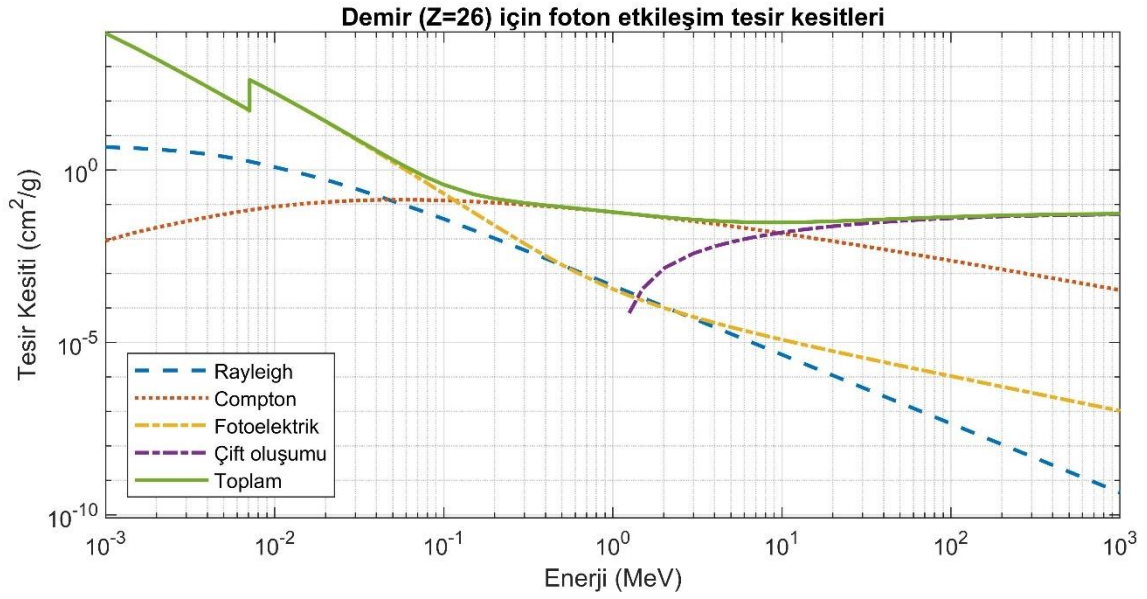
$$\sigma_R \propto \frac{Z^2}{E^2} \quad (2.4)$$

olarak verilebilir. Rayleigh saçılması enerji bakımından önemsiz olsa da özellikle düşük enerjili gamaların yüksek atom numaralı ortamlarda ilerlediği durumlarda demetin akısında ihmal edilemeyecek etkide bulunurlar.

Çift Oluşumu: Fotonun bir çekirdeğin elektrik alanı içinde kaybolup enerjisi ile bir elektron pozitron çifti oluşturması olayıdır. Bu çiftin oluşması için gereken minimum enerji elektronun durgun kütlelerinin iki katı kadardır. Dolayısı ile eşik enerjisi 1.022 MeV'dir. Çift oluşumu toplam tesir kesitinin atom numarasına bağlılığı:

$$\sigma_{\text{ç}} \propto Z^2 \quad (2.5)$$

şeklinde yaklaşık olarak verilebilir. Çift oluşumu eşik enerjisi 1.022 MeV olsa da dominant süreç olması için daha yüksek enerjiler ($E > 5$ MeV) gerekir.



Şekil 2.2 Demir elementi için foton etkileşim tesir kesitleri [33]

Tüm bu etkileşimler için kısmi ve toplam tesir kesitleri demir elementi ($Z=26$) için Şekil 2.2 ile verilmiştir. Bu tesir kesiti gösteriminden hareketle, denilebilir ki fotoelektrik etki düşük enerjilerde (100 keV ve altında) en yüksek tesir kesitine sahip süreçtir. Compton etkileşimi 100 keV 9 MeV arası baskınken, çift oluşumunun etkisi anca 5 MeV foton enerjisinden sonra Compton ile kıyaslanabilir düzeye gelmektedir. 9 MeV sonrasında ise çift oluşumu en yüksek tesir kesitine ulaşmaktadır.

2.1.2 Etkileşim Sabitleri

Fotonlar için bahsedilen dört etkileşim ile birlikte artık toplam etkileşim tesir kesitinden bahsetmek mümkündür. Toplam atomik tesir kesiti şu şekilde

$$\sigma_T(E) = \sigma_{FE} + \sigma_C + \sigma_R + \sigma_{\text{ÇO}} \quad (2.6)$$

ifade edilir. Bu toplam tesir kesiti fotonun bir atomla etkileşime girme ihtimalinin bir ölçüsüdür. Ortamdaki birim hacim başına düşen atom sayısını n ile gösterirsek lineer azaltma katsayısı

$$\mu = n\sigma_T \quad (2.7)$$

ile bulunur. Lineer azaltma katsayısı fotonların bir maddeden geçerken etkileşmesini açıklamak üzere kullanılabilecek bir makro büyüklüktür birimi cm^{-1}

'dir. Bir foton demetinin μ lineer azaltma katsayısına sahip bir ortamda küçük bir dx kalınlığından geçerken etkileşime girecek fotonların sayısı

$$dN = -N\mu dx \quad (2.8)$$

ile bulunabilir. Burada N demetteki foton sayısını, x ise fotonun ilerlediği kalınlığı gösterir. Bu ifadenin integrali alınırsa

$$N(x) = N_0 e^{-\mu x} \quad (2.9)$$

sonucuna ulaşılır. Bu çok bilinen Lambert-Beer yasasıdır.

Yüksüz radyasyonun etkileşmeden gidebildiği mesafe olan ortalama serbest yol (mfp):

$$mfp = \frac{1}{\mu} \quad (2.10)$$

şeklinde bulunur.

Lineer azaltma katsayısı birim hacimdeki atom sayısına bağlı olduğundan, bunu yoğunluktan bağımsız bir büyüklüğe dönüştürmek için çoklukla ortamın yoğunluğuna bölünür. Elde edilen büyüklük kütle azaltma katsayısıdır (μ/ρ) ve birimi cm^2/g 'dır. Bu büyüklük malzemenin fiziksel fazından bağımsız ve makroskopik bir büyüklükle çalışma imkânı tanıdığından önemlidir.

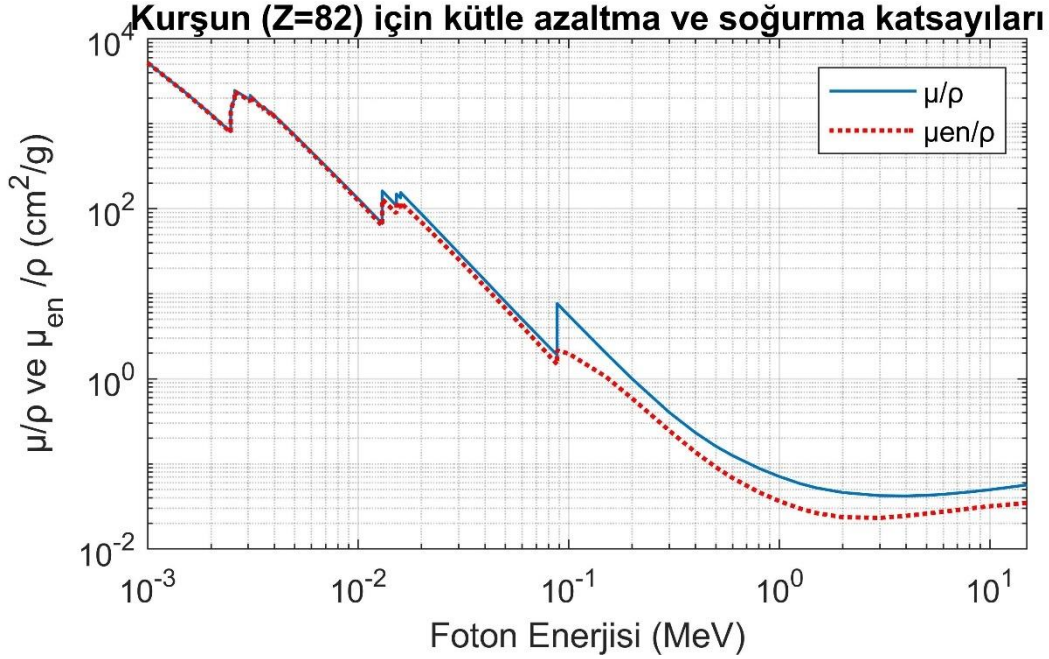
Bir başka kullanışlı büyüklük de kütle enerji soğurma katsayısıdır (μ_{en}/ρ). Fotonların etkileştiği materyalde soğurulan kısmını ifade eder [35].

$$\frac{\mu_{en}}{\rho} = (1 - g)(f_{FE}\sigma_{FE} + f_C\sigma_C + f_{\gamma O}\sigma_{\gamma O}) \quad (2.11)$$

Burada f_{FE} fotoelektrik olayda yüklü parçacıklara aktarılan enerji yüzdesini, f_C Compton saçılmasında yüklü parçacıklara aktarılan enerji yüzdesini, $f_{\gamma O}$ çift oluşumunda yüklü parçacıklara aktarılan enerji yüzdesini göstermektedir. Ayrıca g ile gösterilen Bremsstrahlung verimi olup, yüklü parçacıklara aktarılan enerjinin foton oluşturma yüzdesini ifade etmektedir. Rayleigh saçılması enerji aktarımı yapmadığı için bu formüle dâhil edilmesine gerek kalmamaktadır [35].

Kütle azaltma ve kütle enerji soğurma katsayılarına dair yüksek enerjili fotonlara ait pek çok tesir kesiti kütüphanesi bulunmakla birlikte XCOM [36] Kütüphanesi ve ENDF'e ait kütüphaneler [37, 38] bilhassa gama ışınları bölgesinde en sık

kullanılan iki kütüphane olarak sayılabilir. XCOM kütüphanesinden elde edilen kurşun için kütle azaltma ve kütle enerji soğurma katsayılarına ait veriler Şekil 2.3'te verilmektedir.



Şekil 2.3 Kurşun için kütle azaltma ve kütle enerji soğurma katsayıları.

Şekil 2.4'ten görülebileceği üzere kurşun için μ/ρ ve μ_{en}/ρ değerleri 20 keV (kurşun için L kabuğu enerjisi) enerjili fotonlara kadar neredeyse aynı değerde olup, 20 keV ile 88 keV (kurşun için K soğurma kenarı) arasında flüoresans fotonlarına bir miktar enerji aktarımı varken, bu aktarılan oran 88 keV sonrasında daha yüksek bir yüzdeye çıkmaktadır. 1 MeV foton enerjisinden itibaren μ/ρ ve μ_{en}/ρ değerleri arasındaki fark daha da açılmaktadır.

2.1.3 Radyasyon Tepkisi

Gelen bir radyasyon sonucunda ortamdaki etkileşimler sonucu meydana gelecek fiziksel büyüklükleri açıklamak için ortamın radyasyon tepkisinden bahsedilebilir. Elde edilmek istenen büyüklük radyasyonun soğurulması ise burada kerma kavramı sıklıkla kullanılmaktadır [39]. Kerma, ortamda yüksüz parçacıklar tarafından harekete geçirilen yüklü parçacıklara aktarılan kinetik enerjilerin ortamın kütlesine bölünmesi ile bulunur. Ortamda soğurulan enerjiyi daha doğru ifade edebilmek için yüklü parçacıklara aktarılan kinetik enerjinin fotona dönüşen kısmı hariç tutulursa bu büyüklüğe çarpışma kerması (collision kerma) denir.

Kaynak fotonların 10 MeV enerjiden daha yüksek enerjilerde olması durumunda aralarındaki fark büyük olsa da toplam kerma ile çarpışma kerması düşük enerjilerde hemen hemen eşit iki büyüklüklerdir. Çarpışma kerması, ya da kısaca kerma tek enerjili fotonlar için şöyle hesaplanabilir

$$K = \phi E \left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_E \quad (2.12)$$

Burada K kerma, ϕ foton akısı, E fotonların enerjisi ve μ_{en}/ρ kütle enerji soğurma katsayısıdır. Kermanın birimi J/kg'dır. Radyasyonun çok enerjili olması durumunda kerma

$$K = \int \phi(E) E \left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right) dE \quad (2.13)$$

ile bulunur. Görülebileceği üzere ortamın kerma cinsinden radyasyon tepkisi hem foton enerjisine hem de ortamın kütle soğurma katsayısına bağlıdır. Gelen bir radyasyon akısı ile çarpılarak istenen fiziksel büyüklüğü veren fonksiyonlara radyasyon tepki fonksiyonu denir.

Radyasyonun ölçülmesinde sıklıkla kullanılan bir büyüklük olan maruz kalma radyasyonun birim kütleyle sahip kuru havada meydana getirdiği aynı işaretli iyonların toplam yüküdür. Eski birimi Röntgen, SI birimi ise C/kg olup 1 Röntgen $2.580 \times 10^{-4} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1}$ 'dir. Kuru havada bir iyon çifti oluşması için 33.97 eV enerji gerekmektedir. Bundan ötürü soğurulan gama enerjisinden her 33.97 eV başına bir iyon çifti oluşur. Havadaki çarpışma kerması ile maruz kalma arasındaki oran sabittir ve Röntgen biriminden Gy birimine dönüşürken $8.79 \times 10^{-3} \text{ Gy/R}$ olarak kullanılır.

Havadaki kerma büyüklüğü gaz dolgulu detektörlerdeki iyonlaşma ölçümü için kullanılır. Eğer ölçüm yüksek radyasyon alanında zırh malzemesindeki ısınma ve soğurulan enerji cinsinden isteniyorsa bu sefer materyale ait kerma bilinmelidir. Bu çalışmada ilgilenilen fiziksel büyüklükler için radyasyon tepki fonksiyonları Tablo 2.1'de gösterilmektedir.

Tablo 2.1 Kullanılan radyasyon tepki fonksiyonları

Büyüklik	Radyasyon Tepki Fonksiyonu
Maruz kalma (C/kg)	$\frac{1}{33.97 eV} E \cdot \left(\frac{\mu_{En}}{\rho} \right)_{hava}$
Enerji soğurulması (Joule)	$E \cdot \left(\frac{\mu_{En}}{\rho} \right)_{ortam}$
Akı (parçacık/cm ²)	1
Enerji akısı (Joule/cm ²)	E

Burada bahsedilen büyüklüklerin hesaplanışını bir kaynak ve ölçüm noktası örneği üzerinden izah etmek faydalı olacaktır. Homojen bir ortamda noktasal bir kaynağın belli bir uzaklıkta oluşturacağı radyasyonun etkisini bulmak için iki tane büyüklüğü hesaba katmak gerekir. Bunlardan ilki malzeme içinde ilerleyen radyasyonun etkileşime girmesinden ötürü lineer azaltma katsayısından kaynaklı şiddette görülen azaltmadır. Bunun yanında radyasyon kaynaktan uzaklaştıkça ortaya çıkacak olan, ters kare kanununa göre işleyen bir geometrik azaltmaya uğrayacaktır. İkisi birden hesaba katılırsa bulunmak istenen radyasyon büyüklüğü

$$D_0(r) = \frac{S \cdot R}{4\pi r^2} e^{-\mu r} \quad (2.14)$$

ifadesi ile elde edilir. Burada $D_0(r)$, büyüklüğü istenen etkileşmeden r noktasına ulaşmış olan radyasyonu, S kaynak gücünü, R radyasyonun tepki fonksiyonunu göstermektedir.

2.2 Buildup Faktörleri

Gelen bir gama ışını demetinin bir ortamdaki etkileşime girmesi sonucu demetin etkileşime girmeyen kısmının üstel azalma kanununa uyacağı daha önceden gösterildi. Buna göre demet içinde etkileşime giren her parçacık demetten ayrılmakta ve etkileşmeyenler yola devam etmektedir. Bunun sağlanması için ise gerekli 3 koşul vardır. Bunlar:

-Kaynağın kolime edilmesi

-Detektörün kolime edilmesi

-Saılan fotonların demetle arasındaki açının büyük olmasıdır.

Bu şartların sağlandığı durumlara dar ışın geometrisi denir. Bu şartlar sağlanmadığı takdirde etkileşime giren gama fotonu etkileşim türüne bağlı olarak bir veya daha çok yeni parçacık üretilmesine katkıda bulunur. Bundan dolayı ilerlerken ortaya çıkan ikincil parçacıklar da hesaba katılmak durumundadır. Etkileşen gamaların oluşturduğu ikincil parçacıkları hesaba dâhil etmek üzere geliştirilen en temel yaklaşım buildup faktörü kullanmaktır. Bu sayede Lambert-Beer yasası bir çarpan ile düzeltilir. Yani

$$I = BI_0 e^{-\mu x} \quad (2.15)$$

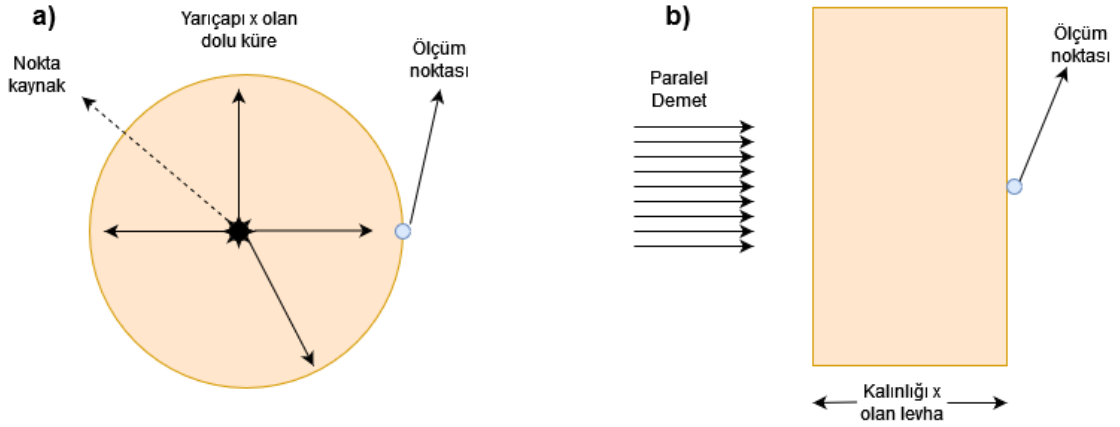
olarak yazılabilir. Burada I ile belirtilen demet şiddetinin tek bir tanımı yoktur. Radyasyonun oluşturacağı etkileri ölçme yöntemine göre bu büyüklük radyasyon alanının oluşturacağı maruz kalma, malzemede soğurulan enerji, ortam dozu eşdeğeri, geçen fotonların sayısı gibi farklı büyüklükler olabilir.

Bulunmak istenen büyüklüğe göre buildup faktörünün tanımını yazacak olursak

$$B(r) = \frac{\int \phi(r,E)R(E)dE}{\phi(r,E_0)R(E_0)} \quad (2.16)$$

ifadesine ulaşılır [29]. Burada $B(r)$ ilgili buildup faktörü $\phi(r,E)$ enerjiye göre diferansiyel olan foton akısı, $R(E)$ bulunmak istenen büyüklüğe ait enerjiye bağlı radyasyon tepkisidir. En sık kullanılan buildup faktörleri EBF ve EABF'dir. Bunun yanında enerji akısı BF, ortam dozu eşdeğeri BF gibi başka büyüklükler de mevcuttur. [40, 41]

Radyasyon yanıtına göre türlerin yanı sıra buildup faktörünün belirlendiği geometriye ve kaynağın türüne göre de değişik buildup faktörleri bulunabilir. Buildup hesabı için iki temel geometri bulunmaktadır. Bunlardan ilki sonsuz noktasal izotropik kaynak ve küresel geometri için buildup faktörüdür. Diğeri de eş yönlü paralel foton demeti için levha geometrisidir [29]. Bu geometriler Şekil 2.4'te verilmektedir.



Şekil 2.4 Buildup faktörü geometrileri a) nokta kaynak ve küresel b) düzlem kaynak ve levha

İki geometri tipinin kendi açısından avantajları mevcuttur. Küresel geometri nokta kaynak kullandığı için doğal kaynakları modellemekte daha doğru seçimdir. Levha geometrisinde ise örneğin açısal etkileri gözlemlemek mümkün olmaktadır. Bunların yanında çizgisel ve disk kaynaklar için silindirik ve küresel kabuk zırhlar için de buildup faktörleri bildirilmiş olup bu geometrilerin genelleştirmeye ve uygulamaya yönelik kullanımları daha zordur [42-44].

2.2.1 Eşdeğer Atom Numarası

Buildup faktörleri belirtildiği üzere kaynak foton enerjisinin, atom numarasının ve zırh kalınlığının fonksiyonu olarak verilir. BF değeri bulunmak istenen ortamın bileşik veya karışım olması durumunda atom numarası yerine eşdeğer atom numarasından söz edilebilir. Bu eşdeğer atom numarası karışım veya bileşiği oluşturan elementlerden hesaplanabilir. En temel yaklaşım, bileşiğin veya karışımın Compton saçılma tesir kesitinin toplam tesir kesitine oranını ara değerleri bulmakta kullanmaktır [20, 45]. Tesir kesitleri oranı

$$R = \frac{\sigma_C}{\sigma_{Toplam}} \quad (2.17)$$

ifadesi ile gösterilir. Sonrasında ara değer bulma işlemi logaritmik olarak yapılmaktadır. Z_1 ve Z_2 atom numarasına sahip iki bileşenden oluşan bir bileşik için eşdeğer atom numarası

$$Z_{eş} = \frac{Z_1(\log R_2 - \log R) + Z_2(\log R - \log R_1)}{\log R_2 - \log R_1} \quad (2.18)$$

formülüne göre bulunur. R değeri ilgilenilen karışım veya bileşiğin saçılma ve toplam tesir kesiti oranını gösterirken, bu R değerinin hemen üstünde olan element Z_1 ; hemen altında bulunan element Z_2 kabul edilerek Z_1 ve Z_2 elementlerine tekabül eden saçılma ve toplam tesir kesiti oranları sırasıyla R_1 ve R_2 olarak alınır.

Örneğin Fe_2O_3 bileşiğinin 1 MeV fotonlar için R değeri 0.99592 olup bu değer vanadyum ($Z=23$) elementinin R değeri ile krom ($Z=24$) elementinin R değeri arasındadır. Denklem 2.18 uygulanırsa Fe_2O_3 bileşiği için 1 MeV enerjideki eşdeğer atom numarası 23.48 olarak bulunacaktır.

2.2.2 Fit Fonksiyonları

EBF ve EABF değerlerinin elementler haricinde değerlerinin bulunabilmesi adına pek çok metot geliştirildiğinden bahsedilmiştir. Bu metotların en sıklıkla kullanılanı G-P fit metodudur [19]. G-P fit metodu:

$$B(E, x) = 1 + \frac{(b-1)(K^x-1)}{K-1}, K \neq 1 \text{ için} \quad (2.19a)$$

$$= 1 + (b-1)x, K = 1 \text{ için} \quad (2.19b)$$

$$K(E, x) = cx^a + d \frac{\tanh\left(\frac{x}{X_k}-2\right) - \tanh(-2)}{1 - \tanh(-2)} \quad (2.19c)$$

Şeklinde ifade edilir. Burada x mfp cinsinden malzeme derinliğini, b malzemedeki 1 mfp derinlikteki BF değerini, K parametresi ise fotonun spektrumundaki kaynak fotonları haricinde gelen katkıyı temsil eden parametrelerdir [1, 23]. Sonuç olarak G-P fit metodunda BF değerinin bulunabilmesi için a, b, c, d X_k parametrelerinin bulunması gerekmektedir. Karışım ve bileşikler için $Z_{eş}$ için yapıldığına benzer şekilde fit parametrelerinin ara değerleri bulunur. Bahsedilen 5 parametre için ara değerler

$$C = \frac{C_1(\log Z_2 - \log Z_{eş}) + C_2(\log Z_{eş} - \log Z_1)}{\log Z_2 - \log Z_1} \quad (2.20)$$

formülü uyarınca hesaplanır. Bu tez çalışmasında ANSI-ANS 6.4.3 verilerine ait ilgili EBF ve EABF değerlerinin hesaplanması için BXCUM programı kullanılmıştır [20].

2.3 Monte Carlo Yöntemi

Monte Carlo rastgele sayılarla analitik çözümü zor olan problemleri çözmeye yarayan bir yaklaşımdır. Basit bir örnek olarak pi sayısının MC yöntemi ile bulunması gösterilebilir. Burada üretilen rastgele sayılar arttıkça pi sayısını daha doğru tahmin etmeye başlayacaktır. MC ile pi sayısı hesaplamak yöntemin ne kadar kuvvetli ve verimli olduğunu anlama bakımından yetersiz kalmaktadır. Bulunmak istenen fonksiyon karmaşıktıkça ve çalışılan boyut arttıkça klasik yaklaşımlara olan üstünlüğü ortaya çıkar.

1940'larda atom bombası üzerinde çalışan Los Alamos ekibi tarafından nötron difüzyonu problemini çözmek için fiziksel problemlere uygulanmaya başlamıştır. İlk bilgisayarlardan olan ENIAC ilk MC program örneğini çalıştırılan yer olmuştur. Nötron takibinden sonra foton ve elektron takibine de başarıyla uyguladıktan sonra MC simülasyonu endüstriyel uygulamalar, parçacık hızlandırıcısı geliştirilmesi ve tıbbi fizik için de yeri doldurulmaz bir öge olmuştur [46].

MC simülasyonunda genel amaç bir büyüklük için beklenen değeri bulmaya çalışmaktır. Bu beklenen değeri şöyle ifade edebiliriz:

$$B(x) = \int x f(x) dx \quad (2.21)$$

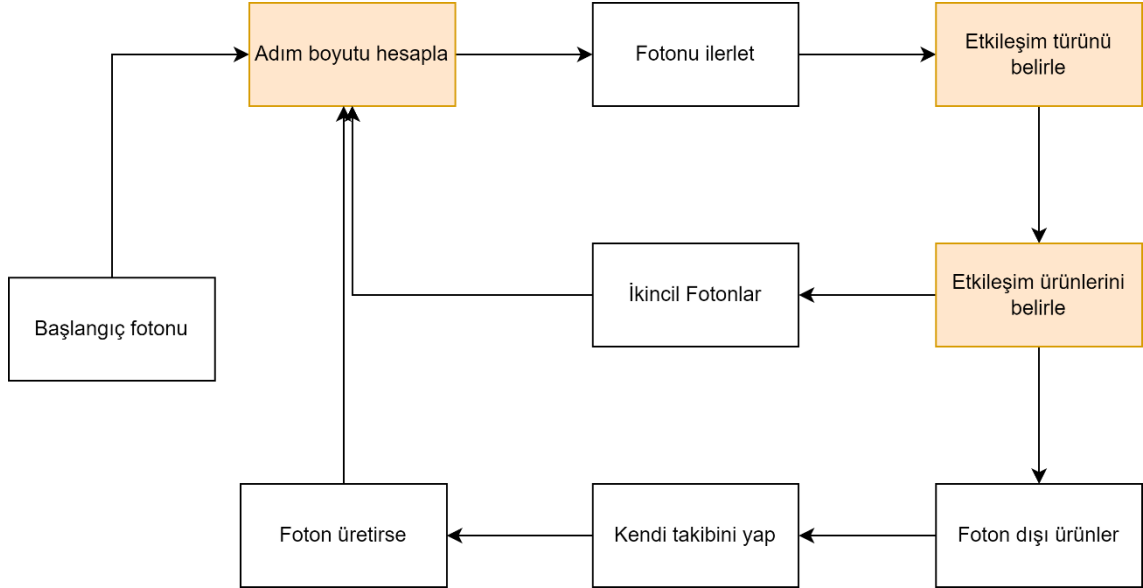
burada $B(x)$ bulunmak istenen beklenen değeri, $f(x)$ ise bu beklenen değeri oluşturacak olasılık yoğunluğu fonksiyonunu ifade eder. Çok temel problemler dışında olasılık yoğunluğu fonksiyonu belirli değildir, bundan dolayı bir Monte Carlo simülasyonunda yapılan, beklenen değeri bulmak için rastgele yürüyüş (random walk) gerçekleştirmektir. Sonuçta bulunacak olan beklenen değer değil, örneklem ortalaması olacaktır:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (2.22)$$

burada $\bar{x}$ örneklem ortalamasını, N hesap edilen parçacık sayısını ve x_i ise i 'inci parçacığın bulunacağı katkıyı gösterir. Bulunan ortalamanın doğruluğunu ölçmek amacıyla varyans büyüklüğü kullanılır. Varyans şu şekilde tanımlanır:

$$S = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2 - \bar{x}^2 \quad (2.23)$$

Takip edilen parçacık sayısı çok yüksek olunca, varyans düşecek ve ortalama değer beklenen değere yakınsayacaktır. Bunun sonucunda elde edilen sonuçlar güvenilir olacaktır.



Şekil 2.5 Foton takibi için Monte Carlo yöntemi akış şeması

Foton takibi özelinde MC simülasyonu Şekil 2.5'te gösterilmektedir. Burada renkli kutucuklardaki adımlarda ne yapılacağına üretilen rastgele sayılar ile karar verilir. Parçacık enerjileri sıfır olunca veya parçacık geometri dışına çıkıncaya kadar bu işleme devam edilir. İlgilenilen bölgelere giren parçacıkların sayısı, enerjisi ve yönü kaydedilir. Bu işlemi birden fazla başlangıç parçacığı için tekrar ettikçe elde edilen süreçler rastgele çok kereler modellenen ve gerçek değere yakınsayacaktır. Baştan belirlenen sayıda foton için takip yapılır, ancak burada dikkat edilmesi gereken durum simülasyon sonucunda tek bir foton için ortalama değere denk gelecek bir büyüklük bulunur. Gerçek fiziksel niceliklere geçiş yapabilmek için bu değer gerçekteki kaynak aktivitesi ile genişletilmesi gerekir.

Radyasyon parçacıklarının simülasyonunda kullanılan pek çok farklı Monte Carlo kodu vardır. Bunlardan en yaygın olarak kullanılanları şöyle sıralanabilir:

- FLUKA: Yüksek enerji parçacık simülasyonları yapmak üzere ortaya çıktıysa da zamanla genel kullanıma yönelik özellikler eklemiştir [47].

- GEANT4- Yüksek enerji fiziği simülasyonları ile başlamış ancak daha sonraları sağlık fiziği ve uzay araştırmalarında da kullanılmaya başlamıştır. Simülasyonlarda son derece esnek enerji aralığı, geometri ve detektör tanımları imkânı sunar [48].
- EGSnrc- Sağlık fiziği ve bilhassa medikal doğrusal hızlandırıcı modellemesi üzerine yoğunlaşmış bir koddur [49].
- PENELOPE- Sağlık fiziği ve düşük enerjili parçacık takibi konularında özelleşmiş bir kod sistemidir. Bilhassa elektron takibi konusunda en güvenilir kodlardan biridir [50].
- MCNP- Nötron ve foton transportu ve özellikle radyasyon zırhlama alanlarında çok yoğun kullanılmakla birlikte 6.2 versiyonu itibarıyla çok daha geniş bir kullanım alanına da hitap etmeye başlamıştır [51].

Bu tez çalışmasında MCNP versiyon 6.2 kullanılmıştır. MCNP 6.2'nin diğer kodlara göre en önemli avantajı çok detaylı varyans düşürme tekniklerini kullanma imkânı vermesidir. Bu sayede analog olarak çok uzun sürecek hesaplar yüzlerce kat daha hızlı yapılabilmektedir [52]. Bunun yanında bu tez çalışmasında irdelenen problem özelinde, etkileşen ve etkileşmeyen parçacıkların ayrı ayrı detaylı takiplerini yapmayı mümkün kılması da MCNP 6.2 kodunun tercih edilmesinin başka bir sebebidir.

2.3.1 MCNP 6.2

Manhattan Projesindeki nötron problemi tecrübesinin devamı niteliğinde sayılabilecek MCNP kodu ilk sürümünü 1977 yılında yayımlanmıştır [46]. O yıllarda sadece nötron ve foton takibi yapabilen kod, sonradan diğer parçacıkların eklenmesi ile iki temel kola ayrıldı. MCNP5 kolunda foton ve elektron takibi yapılabilirken MCNPX sürümünde nötronlar ve diğer parçacıklar inceleniyordu [53]. MCNP 6.2 sürümü bu iki sürümü bünyesinde toplayan sürüm olarak 2017 yılında kullanıma sunuldu. MCNP sürüm 6.2'de önceki versiyonlara ek olarak pek çok hem fiziksel modelleme iyileştirmeleri hem de kodun altyapılarında iyileştirmeler yapılmıştır.

MCNP 6.2 sürümünde:

- 3 boyutlu ve çok detaylı geometrilerde

- 100 farklı element için hem tesir kesiti kütüphanesi ve 3475 izotop için bozunma kütüphanesi için
- Nötron, foton, elektron, proton döteryum, trityum, alfa, müonlar ve daha ağır iyonlar için
- Çok geniş bir enerji aralığında

radasyon takibi yapmak mümkündür. Detektör çeşitleri ile pek çok deneyi gerçeğe yakın olarak simüle etmek mümkündür. Bundan ötürü sağlık fiziği, uzay bilimleri, nükleer santraller, endüstriyel uygulamalar ve parçacık hızlandırıcılarına kadar geniş alanlarda kullanılmaktadır [54, 55].

Girdi Dosyası oluşturma: MCNP programı bir girdi dosyası üzerinden çalıştırılır. Simülasyonun yapılacağı geometriyi oluşturan şekiller, malzemeleri, kullanılacak radyasyon kaynağı, ölçülmek istenen büyüklükler ve diğer detayları belirli bir format dâhilinde bu girdi dosyasına yazmak gerekir. Bir MCNP girdi dosyası 3 temel kısımdan oluşur, MCNP terminolojisinde bu kısımlara kartlar (cards) denir.

Hücre Kartı: Geometrideki yüzeylerin hangilerinin nasıl bir araya geleceği ve hücreleri oluşturan maddeler belirtilir

Yüzey Kartı: Geometriyi oluşturacak yüzeyler belirtilir.

Data Kartı: Kaynak parçacıklar ve detayları, hücrede kullanılacak malzemeler için kullanılacak tesir kesitleri, ölçüm için detektör detayları ve diğer detaylar bu kısımda bulunur.

Girdi dosyası bu kartlar aralarında birer satır boşluk bırakılarak hazırlanır. MCNP içinde kullanılan fiziksel büyüklükler ve birimler Tablo 2.2’de gösterilmektedir.

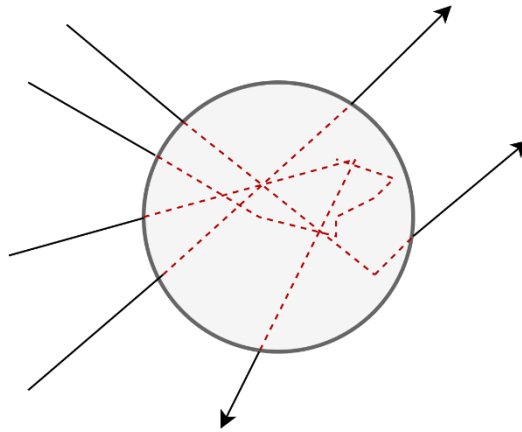
Tablo 2.2 MCNP içindeki fiziksel nicelikler ve standart birimleri

Fiziksel nicelik	Birimi
Uzunluk	Cm
Enerji	MeV

Tablo 2.2 MCNP içindeki fiziksel nicelikler ve standart birimleri (devamı)

Zaman	shake (10^{-8} s)
Tesir kesiti	barn
Atomik Yoğunluk	Atom/barn-cm
Kütle yoğunluğu	g/cm ³

MCNP simülasyonundaki detektörler gerçek detektörlerden farklıdır. Esasında detektör denilen parçacık sayıcıları radyasyon simülasyon terminolojisinde tally olarak isimlendirilir. Bir tally istenen yüzey veya hacme giren belirtilen parçacığın sayısını (F1), akısını (F2 ve F4) veya bırakacağı dozu (F6) bulmaya yarar. Tally sonuçlarının birimleri başlangıç parçacık sayısına göre verilir. MCNP’de parçacık akısını bulmak için sıklıkla yol uzunluğu (track length) kullanılır. Bu F4 tally’nin temelini oluşturur. Bir hacim için parçacık akısı ile parçacığın hacimde aldığı yolların toplamı arasındaki ilişki Şekil 2.6’da verilmiştir. Burada kırmızı renkli gösterilen hacim içindeki yol uzunluğu toplamının hacme bölümü akıyı verir.



Şekil 2.6 Bir hacimden geçen parçacıkların yollarının gösterimi

Yüzeyden geçen akı hesaplanırken de bu hacmin kalınlığının sifıra gittiği limit durumu bulunur.

Sonuç olarak F2 için tally sonucu şu şekilde hesaplanır:

$$F2 = \frac{1}{A} \int_A dA \int_E dE \int_{4\pi} d\Omega \frac{n(E)}{\cos \theta} \quad (2.24)$$

burada A yüzeyin alanını, $n(E)$ enerjiye göre diferansiyel olarak parçacıkların sayısını, $\cos \theta$ ise gelen parçacıkların yüzey normali ile yaptıkları açının kosinüsüdür. F2 tally için yüzeye neredeyse paralel geçen ve kosinüs değerinin sıfıra yakınsadığı durumlar için işlem sonucunun ıraksak çıkmaması adına çok küçük bir kosinüs değerinin ($\cos \theta < 0.0001$) altında giren parçacıkları için ortalama değer kullanılır.

Tally sonucundan elde edilen değerler bir hata tahmini ile birlikte verilir. Bu verilen hata MCNP için 1σ güven aralığındadır. Bunun yanında yararlılık katsayısı (figure of merit- FOM) denilen bir ölçü ile de simülasyonun verimliliği bulunur. FOM şu şekilde tanımlanır.

$$FOM = \frac{1}{H^2 T} \quad (2.25)$$

Burada H tally sonucundaki hatayı, T ise simülasyon süresini göstermektedir. Simülasyon süresi donanımına bağlı bir büyüklük olup aynı hesap farklı bilgisayarlarda farklı sürelerde çalışacaktır. Bu değer yüksek olması gerçekleştirilen simülasyonun tally skorlarının çok alındığını ve tally'lenmeyen etkileşimlere ne kadar hesap ayrıldığına bir göstergesidir. Daha yüksek FOM değeri daha verimli bir simülasyona işaret eder. Bundan ötürü benzer sonuçları veren simülasyonlardan FOM değeri daha büyük olanı yapmak tercih edilir.

MCNP simülasyonun sonuçlarının güvenilirliği için 10 tane istatistik test gerçekleştirilir, bunlardan hepsini geçen sonuçlar güvenilir olurken, simülasyonun geçemediği istatistik test mevcutsa bu simülasyondaki sonuçlara olan güveni azaltabilir. MCNP'de kullanılan 10 istatistik test:

- Tally ortalaması problemin son yarısında düzgün artış veya azalış göstermemelidir
- Tally hatası 0.1 değerini geçmemeli
- Tally hatası problemin ikinci yarısında düzgün şekilde azalış göstermeli
- Tally hatası problemin ikinci yarısında $\sqrt{1/N}$ ile orantılı azalmalı
- Varyansın varyansı 0.1 değerini geçmemeli

- Varyansın varyansı problemin ikinci yarısında düzgün şekilde azalmalı
- Varyansın varyansı problemin ikinci yarısında $1/N$ ile orantılı azalmalı
- FOM problemin ikinci yarısında sabit kalmalı
- FOM düzgün artış veya azalış göstermemeli
- En yüksek skor üreten olaylardan elde edilen istatistik dağılım fonksiyonunun eğimi 3'ten büyük olmamalı

Varyans Düşürme

Monte Carlo simülasyonu ile gerçeğe olabildiğince yakın geometriler ve güvenilir tesir kesitleri ile çalışıldığında radyasyon transportunu son derece yüksek doğrulukta gerçekleştirir. Yüksek doğruluğa ulaşmanın önündeki en büyük engel ise simülasyon sürelerinin çok uzun sürmesidir [56]. Kaynağa uzak olan ve boyut olarak küçük yüzey ve hacimlerde tally sonuçları alınmaya çalışıldığında doğru örneklem oluşturmak için yeterince parçacık akısı oluşmayacaktır. Az sayıda örneklem olunca sonuçların hatası yüksek olacaktır. MCNP kılavuzuna göre F2 ve F4 tally'leri için sonucun anlamlı olması için hatanın 0.1'den düşük olması önerilmektedir [51]. Yapılan bir simülasyonda en önemli sorunlardan birisi bulunmak istenen büyüklüğe ait varyansı kabul edilebilir seviyeye düşürmektir. Bunu sağlamak üzere geliştirilen problemlere özel yöntemler ile alınacak sayımı varyans düşürme teknikleri kullanılır [57].

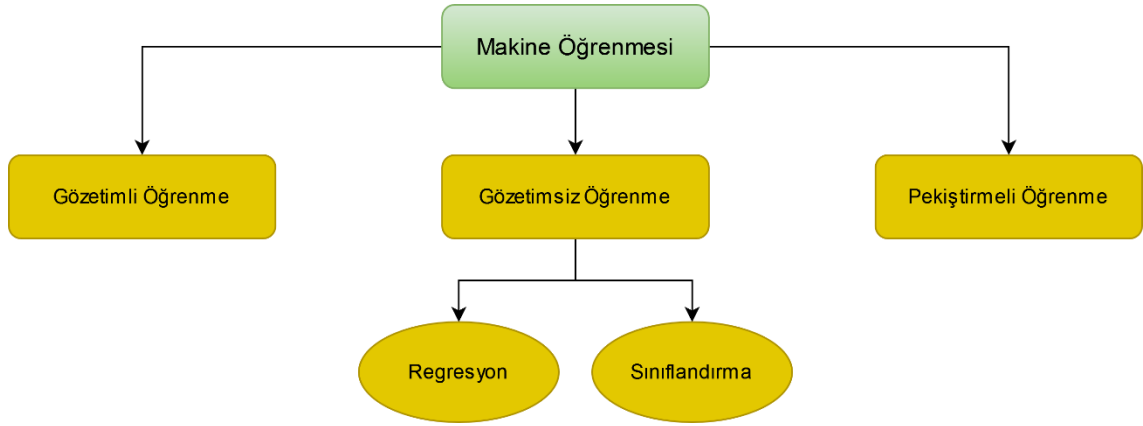
En temel varyans düşürme tekniği çok sayıda kaynak parçacığı ile başlamaktır. Bir tally'de ölçüm yapılırken N kat daha fazla parçacık ile başlatılırsa hata yaklaşık $\sqrt{N}$ kadar düşer. Ancak bu metot her zaman yeterli gelmez. Örneğin çok uzaktaki bir nokta etrafında oluşacak parçacık akısı bulmak istenmekteyse, tek bir noktadan ölçüm yapmak yerine geometride bu noktaya göre simetrik noktalardan oluşacak bir halka üzerinden akı bulunup noktaya ait akı çok daha net şekilde bulunabilir.

Başka bir örnek vermek gerekirse, söz gelimi 15 mfp kalınlığında bir yüzeyden geçen başlangıç parçacıklarının sayısı, üstel azalma kanununa göre e^{-15} oranında azaltılacaktır. Bundan dolayı 10^7 parçacıkla başlatılan bir simülasyonda 15 mfp kalınlığa neredeyse hiç parçacık ulaşmayacaktır. Bu şekilde gerçekleşmesi belki çok uzun sürecek hesaplar yerine kullanmanın mantıklı olduğu varyans düşürme metodu, geometriyi kısımlara ayırmak ve her kısma belli bir önem sayısı

tanımlamaktır [32]. Her giren parçacık bu önem sayısı kadar alt parçacığa bölünür ve hepsi ayrı ayrı takip edilir ve oluşturacakları etkiler önem sayısına bölünür. Bu metot parçacık bölme veya rulet olarak bilinir ve derin nüfuz problemlerinde sıklıkla kullanılmaktadır [4, 5]. Birbirine komşu olan hücreler arasında önem sayısının çok farklı olması istenmeyen bir durumdur, çünkü sonucu gerçek değerden saptırabilir. Bundan ötürü komşu hücreler arasındaki 10 kattan fazla önem sayısı kullanırken dikkatli olunmalıdır.

2.4 Makine Öğrenmesi

Gerçek hayatta karşılaşılan fenomenleri matematiksel olarak modellemek doğa bilimlerinin en temel amaçlarından biridir. Görece daha kolay olan problemler için analitik çözümler bulunmuş ancak çoğu problem için de yaklaşık çözümler bulunmuştur. Gerçek hayat problemlerinin bazılarını çözmek değil, ifade etmek bile mümkün olmayabilir. Son 40 yılda bilgisayar teknolojisindeki inanılmaz hızlı gelişme ile birlikte eskiden yapılması mümkün olmayan pek çok işlemi yapmak mümkün olmaya başlamıştır. Makine öğrenmesi de bu noktada ivmeli bir şekilde yükselişini sürdüren bir çalışma alanıdır [58]. Tek tek problemlere has bir çözüm bulmak ve program yazmak yerine problemdeki girdi ve çıktılar arasındaki bilinmeyen ilişkiyi, eldeki verilerden kurmayı amaç edinir. Karşılaşılan problemlere yönelik elde mevcut olan verilerin niteliği ve niceliği de makine öğrenmesinin odak noktası olmaktadır. Problem karmaşıktıkça, olabildiğince az gürültü içeren sayıca çok veri ile birlikte makine öğrenmesi ideal çalışacaktır.



Şekil 2.7 Makine öğrenmesi türlerinin sınıflandırılması

Makine öğrenmesi alanında en temel yaklaşımlar üçe ayrılmaktadır. Bunlar Şekil 2.7’de gösterilmektedir.

- **Gözetimsiz Öğrenme:** Verilerin girdileri mevcuttur ancak bu girdilere tekabül eden çıktılar bilinmemektedir. Algoritmaların birbirinden farklı olan girdileri, verilerin arasında mevcut bulunan doğal örüntülerden çıkarması gerekir. Bu metotla verilerdeki gruplar ayrıştırılabilir. Ayrıca veri kümesi için önemli olan öznitelikler seçilebilir. Temel bileşen analizi ve kümeleme algoritmaları ile karmaşık mimarili kimi yapay sinir ağları bunlara örnek verilebilir.
- **Pekiştirmeli Öğrenme:** Bu tip makine öğrenmesi türünde öğrenme deneme yanılma yöntemi ile doğru olan bulguların ödüllendirilmesi şeklinde ilerler. Çıktılar bellidir ancak öğrenme sürecinde algoritmaya tanıtılmaz, algoritma eğitildikten sonra doğru modelleme için ödüllendirilip yanlış modellemeler için cezalandırılarak ideal model kurulur.
- **Gözetimli Öğrenme:** Verilerin girdileri ve bunlara denk gelen çıktıları önceden bellidir. Yani veriler etiketlenmiştir. Algoritmalar bu girdi-çıkı bağlantısını en doğru haliyle modellemeye çalışırlar. Destek vektör makineleri, ileri beslemeli yapay sinir ağları, karar ağaçları gibi algoritmalar en bilinen gözetimli öğrenme algoritmalarıdır.

Gözetimli öğrenme problemde bulunmak istenen çıktıların mahiyetine göre ikiye ayrılır. Bunlar

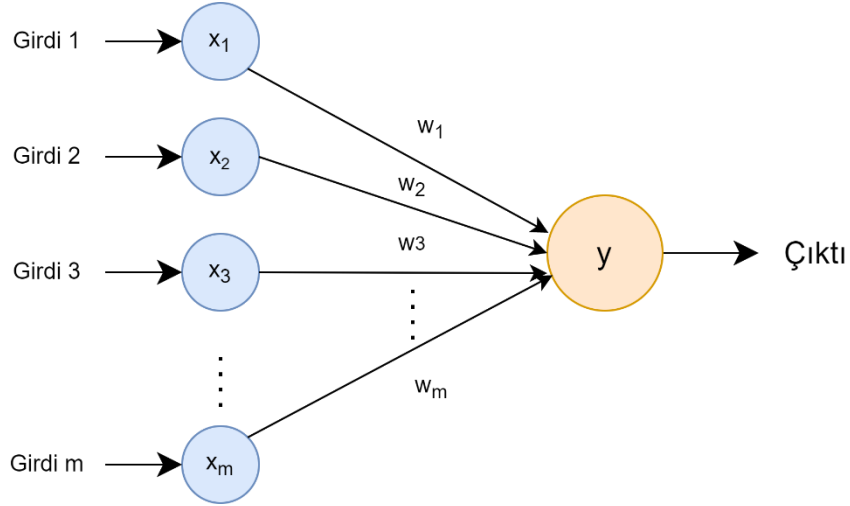
- Regresyon: Ulaşılmak istenen çıktıların sürekli bir değişkenle temsil edildiği modellerdir. Bağımlı değişkenler ile sonuç değişkenleri arasındaki bağlantıyı hatayı minimize edecek şekilde kurmaya çalışırlar.
- Sınıflandırma: Veride çıktıların belirli alt gruplar halinde sınıflara ayrılmış olduğu ve modelin sınıfları birbirinden ayırmaya çalıştığı öğrenme türüdür. Eldeki verilerden bir kişinin hasta olup olmadığını tahmin etmek, bir e-mailin içeriğinden o mailin spam olup olmadığını bulmak veya ölçülen bir spektrumun hangi elemente ait olduğunu tespit etmek için kullanımı [59] en bilinen örneklerindendir.

Makine öğrenmesi temel metotları ve kullanılan algoritma çeşitleri çok fazladır. Çoğunlukla uygulamanın özelinde metot seçimi yapılması gerekir. Sıklıkla kullanılan Makine öğrenmesi algoritmaları şöyle sayılabilir, Destek Vektör Makinaları, Regresyon Ağaçları, Gaussyen Süreçler ve Yapay Sinir Ağları. Bunların içinde yapay sinir ağları hem tarihsel olarak ilk bulunan olması hasebiyle hem de çok çeşitli problemlere adapte edilebilmesiyle öne çıkmaktadır. Ayarlanabilir parametrelerinin fazla olması çok sayıda birbirinden farklı uygulamalar için kullanılabilmesinin en temel sebebi olarak gösterilebilir. Eğer çok düşük hata hedefleniyorsa diğer metotlara göre daha avantajlı olmakla birlikte eğitim süreci uzun olabilmektedir. Bu tez çalışmasında da hata hedefi düşük tutulduğu için YSA algoritmalarına yoğunlaşmıştır. Eğitim süresinin uzun sürmesi ilk başta dezavantaj olmakla birlikte, bir kez eğitildikten sonra yeni tahminler almak son derece çabuk gerçekleşebilmektedir.

2.4.1 Yapay Sinir Ağları

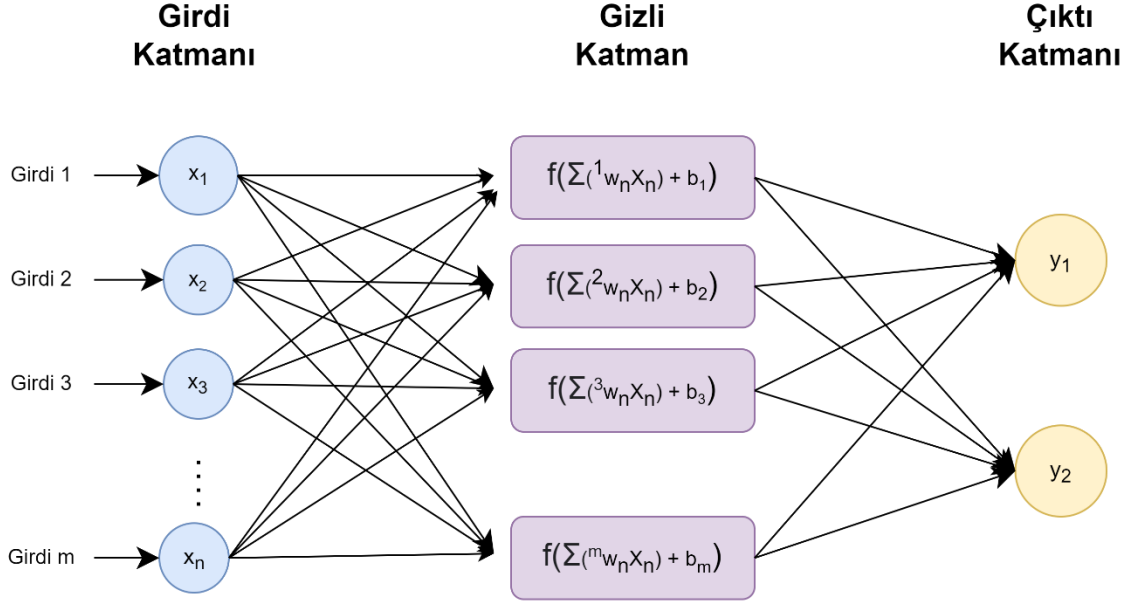
Yapay sinir ağları biyolojik sinir sisteminden esinlenerek ortaya atılmış bir makine öğrenmesi yöntemidir. Canlıların beyinlerinde bulunan en temel hücreler olan nöronlar basit bir işleyiş biçimine sahiptirler. Bağlı bulundukları diğer nöronlardan ve dış çevreden gelen uyarımlar neticesinde eğer gelen sinyaller belirli bir sinyal eşiğinin üzerindeyse kendisi de sinyal ateşler, eşiğin altındaysa durgun konumda bekler. Bu süreç elektrokimyasal olarak işler. İnsan beyinde 8×10^{10} nöron bulunduğu bilinmektedir. Her bir nöron ortalama 10^4 başka nöron ile bağlantılıdır. Bu sayıların büyüklüğü sayesinde basit bir şekilde ateşleme ya da

bekleme durumları çok fazla sayıda işleme denk gelmektedir. Yapay sinir ağları da temelde bu nöron fikrinden yola çıkarak işler. Bir yapay sinir ağının en küçük yapı taşına da sinir hücresine atfen nöron veya algılayıcı anlamına gelen perceptron denmektedir [60, 61].



Şekil 2.8 Tek bir yapay sinir ağı nöronunun işleyişi

Yapay sinir ağlarının öğrenme süreci biyolojik sürece benzemektedir. Bir YSA nöronuna bağlantılardan gelen tüm girdiler bir bağlantı ağırlığı ile çarpılır ve birbirlerine eklenir [62]. Toplam büyükse dış bağlantılara güçlü bir çıktı, küçükse zayıf bir çıktı üretilir. Tek bir nöronun çalışma sistemi Şekil 2.8’de verilmiştir. Nöronun yaptığı bağlantıların ağırlıkları değiştirilerek davranışı değiştirilebilir. Bu temelin üzerine biyolojik sistemlerdeki eşik kavramını da eklemek mümkündür, bunun için aktivasyon fonksiyonu denilen fonksiyonlar kullanılarak belli bir eşiğin altındaki sinyallerin değeri sıfırlanabilir. Yapay sinir ağları bu nöronların birbirlerine bağlantı şekilleri ile çok farklı mimarilere sahip olabilir. Dağınık halde, yinelemeli, birbirini takip eden katmanlar halinde gibi pek çok uygulaması olmakla birlikte, regresyon problemleri için en sıklıkla kullanılan çeşitleri ileri beslemeli çok katmanlı yapay sinir ağlarıdır. İleri beslemeli çok katmanlı YSA’ların temsili Şekil 2.9’da gösterilmektedir. Burada bir girdi katmanı, bir gizli katmanı bir de çıktı katmanı görülmektedir.



Şekil 2.9 İleri beslemeli çok katmanlı yapay sinir ağı mimarisi

İleri beslemeli olması, girdilerden çıktılara doğru geri beslemenin olmaması, iletimin sonraki katmana doğru olması sebebiyledir. Şekildeki okların yönü girdi katmanından çıktı katmanına doğrudur. Çok katmanlı olması ise girdi katmanı, gizli katman ve çıktı katmanı olması sebebiyledir. Belirtmek gerekir ki gizli katmanların sayısı birden fazla olabilir. Katmanları birbirine bağlayan bağlantı noktalarında ağırlıklar bulunmaktadır.

Nihayetinde yapay sinir ağları girdi verilerini ağırlıklarla çarpıp, bir sapma (bias) ekleyerek sonuçlara aktivasyon fonksiyonu uygular ve çıktılara ulaşmaya çalışır. YSA için önemli olan doğru ağırlık ve sapma katsayılarını belirlemektir [61]. Burada ise öğrenme kısmı devreye girer. Öğrenme için en temel yöntem ise geriye yayılımdır.

Geriye Yayılım: Yapay sinir ağları genelde ağırlık ve sapma katsayılarını rastgele olacak şekilde başlatır. Bunun sonucunda çıktıları belirler. Belirlenen çıktıları ile gerçek hedef çıktıları arasındaki fark büyükse bu farkı azaltmak üzere katsayıların değişmesi gerekir. Bu katsayıları düzenleme işlemi geri yayılım ile yapılır. Fonksiyonların köklerini bulmak için matematikte çokça kullanılan Newton yöntemi geri yayılımın temelini oluşturur. Hesaplanan çıktıları ile hedef çıktıları arasındaki farkı ifade eden maliyet fonksiyonu belirlenir ve amaç bu maliyet fonksiyonunu minimize ederek hedef çıktıları ile hesaplanan çıktıları birbirine

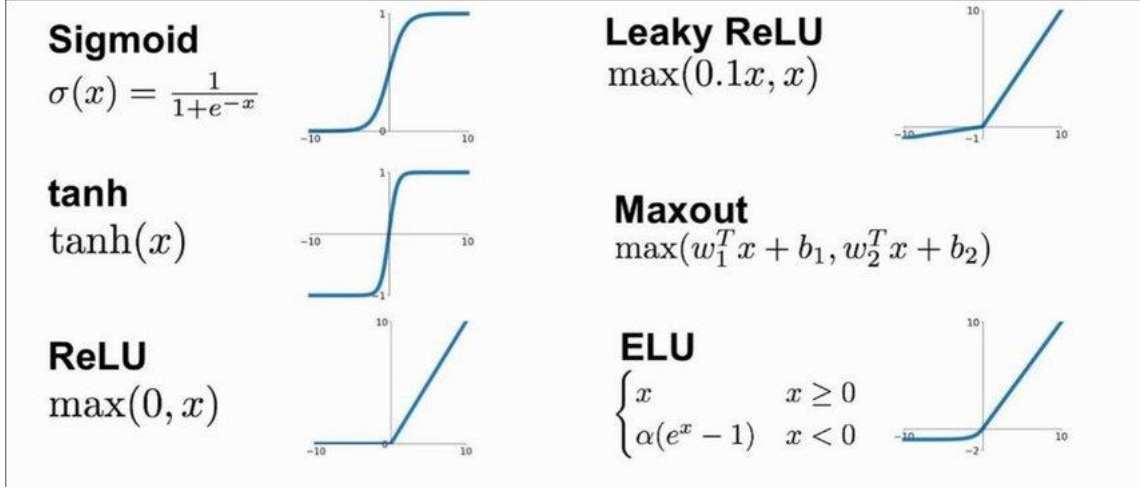
eşitlemeye çalışmak olur. Maliyet fonksiyonu olarak hatalar toplamının karesi (MSE) maliyet fonksiyonu regresyon problemleri için uygundur. Bu işlemler matematiksel olarak matris çarpımı ve toplamına indirgenebilir. İki girdili ve tek çıktılı bir problem için,

$$g(w_2 \cdot f(w_1 \cdot x + b_1) + b_2) = y' \quad (2.26)$$

ifadesi şeklinde yazılabilir. Burada w_1 birinci, w_2 ikinci ağırlıklar matrisi, b_1 ilk, b_2 ikinci sapma vektörü, f ile g aktivasyon fonksiyonları ve y' hesaplanan çıktı değişkenidir. Çıktı değişkenini hedef değere bağlayan maliyet fonksiyonunu minimum yapan ağırlık matrisi ve sapma vektörünü bulmak için maliyet fonksiyonunun türevinin sıfıra eşit olduğu yerin aranması gerekir. Bu şekilde çok sayıda çevrim (iterasyon) yaparak en ideal katsayıların bulunması işlemine yapay sinir ağlarının eğitilmesi denir. Eğitim süresi girdi boyutuna ve gizli katman boyutuna bağlı olarak çok uzun sürebilir. Ancak bir kere eğitildikten sonra yapay sinir ağlarından sonuç üretmek hızlı bir işlemdir [63].

Aktivasyon Fonksiyonları

Biyolojik beyindeki eşik değerini geçen sinyaller için aktif olma durumuna benzetmek amacıyla YSA nöronlarında da benzer bir şekilde aktivasyon fonksiyonları kullanılmaktadır. Bir aktivasyon fonksiyonun en önemli özelliği eşik değerinden sonra ateşleme gücünde hızlı değişim olmasıdır. Ayrıca daha önce görüldüğü üzere türevlenebilir olması da eğitim süreci için önemlidir. En sık kullanılan aktivasyon fonksiyonu çeşitleri Şekil 2.10'da verilmektedir.



Şekil 2.10 Sıklıkla kullanılan aktivasyon fonksiyonu çeşitleri

Genel bazı kabuller olsa da aktivasyon fonksiyonu seçimi diğer pek çok makine öğrenmesi konseptinde olduğu gibi deneme yanılma ile tespit etmeye açıktır. Önceki denemelerden elde edilen tecrübelerle göre sigmoid ve tanh aktivasyon fonksiyonları lineer olmayan regresyon problemleri için iyi sonuçlar vermektedirler. Çıktıların 0 ile 1 aralığında çıkmasının uygun olduğu durumlar için sigmoid, -1 ile 1 arasında çıkmasının daha uygun olduğu yerlerde ise tanh kullanılırlar. ReLU ve türevleri ise sıklıkla derin öğrenme ve görüntü işleme alanında kullanılmaktadır.

Öğrenme Algoritmaları

Geri yayılım ile ağırlık ve sapma katsayılarının belirlenmesi gerektiğinden önceki kısımlarda bahsedilmekle birlikte bu alanda en önemli hususlardan birisi de öğrenme fonksiyonu seçimidir. Öğrenme fonksiyonları katsayıların her bir iterasyonda nasıl değiştirileceğini belirler. Newton metodu temelli Levenberg-Marquardt (LM) öğrenme algoritmasının hem hızlı olduğu hem de regresyon için oldukça iyi sonuçlar verdiği bilinmektedir [64]. Bununla birlikte dezavantajı yüksek miktarda bilgisayar hafızası kullanması ve çok yüksek boyutlu girdiler için boyut sorunu yaşamasıdır. Sınıflandırma problemleri için kötü sonuçlar verdiği bilinmektedir.

Bir diğer denetimli regresyona elverişli öğrenme algoritması ise Bayes düzenlileştirme (Bayesian Regularization, BR) algoritmasıdır [65]. BR metodu yavaş olmasına rağmen oldukça yüksek doğrulukla sonuç verebilmektedir. Ayrıca

LM metoduna göre daha az hafıza kullanımı yapar. BR metodu her iterasyonda katsayıları yenilemek için istatistikteki Bayes Teoremini kullanır. Bu sayede ağırlıklar yenilenirken istatistiki olarak seçim yapıp, tek yönlü bir hata birikimi ve aşırı öğrenme tuzağına düşülmekten kurtarılır.

Aşırı Öğrenme

Çoklukla makine öğrenmesi için sunulan veriler gerçek durumlara karşılık gelen, içerisinde bir miktar belirsizlik ve hata içeren verilerdir. Makine öğrenmesi algoritmalarının eğitilmesi esnasında kullanılan veri kümesindeki değerlere uygun olacak şekilde ayarlanırken bazen bu ayarlama aşırıya kaçarak noktaların anlatıyor olduğu fenomenin davranışını modellemek yerine noktaların yerlerini ezberleme şekline dönüşür. Bu duruma aşırı öğrenme (overfitting) denir. Bu durumdan kaçınmak için uygulanabilecek çeşitli yaklaşımlar vardır.

- Basit modeller kurmak. Bu yolla bulunmak istenen fonksiyonun çok çabuk değişen noktaları az sayıda olacaktır.
- Eğitimin çevrim (epoch) sayısını azaltmak.
- Eğitim verisini eğitim ve doğrulama kısımlarına ayırmak. Bu sayede eğitim kısmında kurulan model doğrulama verileri ile sınanarak eğitimde kullanılan kısmın aşırı öğrenmeye kaymasının önüne geçilir. LM algoritması aşırı öğrenmenin önüne bu metotla geçer. Kurulan model eğitim verisi ile performans artırırken doğrulama kümesinde performans azalıyorsa algoritma durdurulur.
- Aşırı öğrenmeyi önlemek için düzeltmeyi maliyet fonksiyonunun ve ağırlık katsayılarının lineer kombinasyonu alınır ve toplam maliyet fonksiyonu olarak bu minimize edilir. Bu yöntemi BR algoritması kullanmaktadır. BR algoritmasında bahsedilen lineer kombinasyon, Bayes kuralına göre seçilir [66].

Eğitim, doğrulama ve deneme setine ayrıştırırken pratik bir kabul olarak yüzde 70/15/15 yaygındır. Daha farklı yüzdelerde ayırmalar modelin genelleştirilebilir olduğunu göstermek için gerekebilir.

Modellerin Performans Değerlendirmesi

Elde edilen modellerin performans değerlendirme, eğitim verileri ile kurulan modelin test verileri sonucuna göre yapılmıştır. Burada değerlendirme kriterleri olarak hataların kareleri toplamı (MSE) ve korelasyon katsayısı R^2 kullanılmıştır. MSE için ifade,

$$MSE = \sum_i (y_i - y'_i)^2 \quad (2.27)$$

şeklinde ifade edilir. Burada y_i hedef değeri, y' ise modelden elde edilen değeri göstermektedir.

Korelasyon katsayısı ise hedef değerler ile modelin tahminlerini karşılaştırır. Bu karşılaştırma sonucu korelasyon katsayısı 1'e ne kadar yakınsa tahminler o derecede iyi demektir. Korelasyon katsayısının 1 olması hedef ile tahmin arasında mükemmel doğrusal bir ilişki olduğunu gösterir. Korelasyon katsayısını hesaplamak için

$$R^2 = 1 - \sum_i \frac{(y_i - y'_i)^2}{y_i^2} \quad (2.28)$$

İfadesi kullanılır. Burada görülebileceği üzere hatalar toplamı sıfıra giderken korelasyon sabiti 1'e yaklaşmaktadır.

Ön İşleme

Verilerin yapay sinir ağlarında daha verimli kullanılabilmesi için ideal aralıkta bulunması faydalıdır. Öncelikle verilerde eksiklik varsa bunların giderilmesi işlemi yapılmalıdır. Bu eksikliği giderme işlemi için çeşitli yaklaşımlar bulunmaktadır. Çoğunlukla eksik olan verilerin diğer verilerin ortalaması ile değiştirilmesi ve istatistik yaklaşımlar ile diğer verilerden tamamlama yapmak gibi yollar izlenir.

Ayrıca verimli hesaplama yapabilmek için eldeki veriler algoritmaya sürülmeden önce normalleştirilir veya standardize edilir. Bu işlem için ayrı ayrı metotlar bulunmaktadır. Bir tanesi değerleri 0 ile 1 arasında uzanacak şekilde ölçeklendirir.

Bu ölçeklendirme işlemi

$$x' = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (2.29)$$

Şeklinde yapılır. Burada x' ölçeklenmiş değeri, $x_{\min}$ ölçeklendirilecek öz niteliğin en küçük değerini, $x_{\max}$ ise en büyük değerini gösterir. Kimi durumlarda algoritmalar -1, 1 aralığında daha iyi çalışırlar. Bu durumda ikinci bir ölçeklendirme işlemi yapılması gerekir. Bu ikincil ölçeklendirme işlemi

$$x'' = 2x' - 1 \quad (2.30)$$

İfadesine göre yapılır. Burada x'' -1 ile 1 arasındaki değere denk gelirken, x' 0 ile 1 arasında bir değere denk gelmektedir.

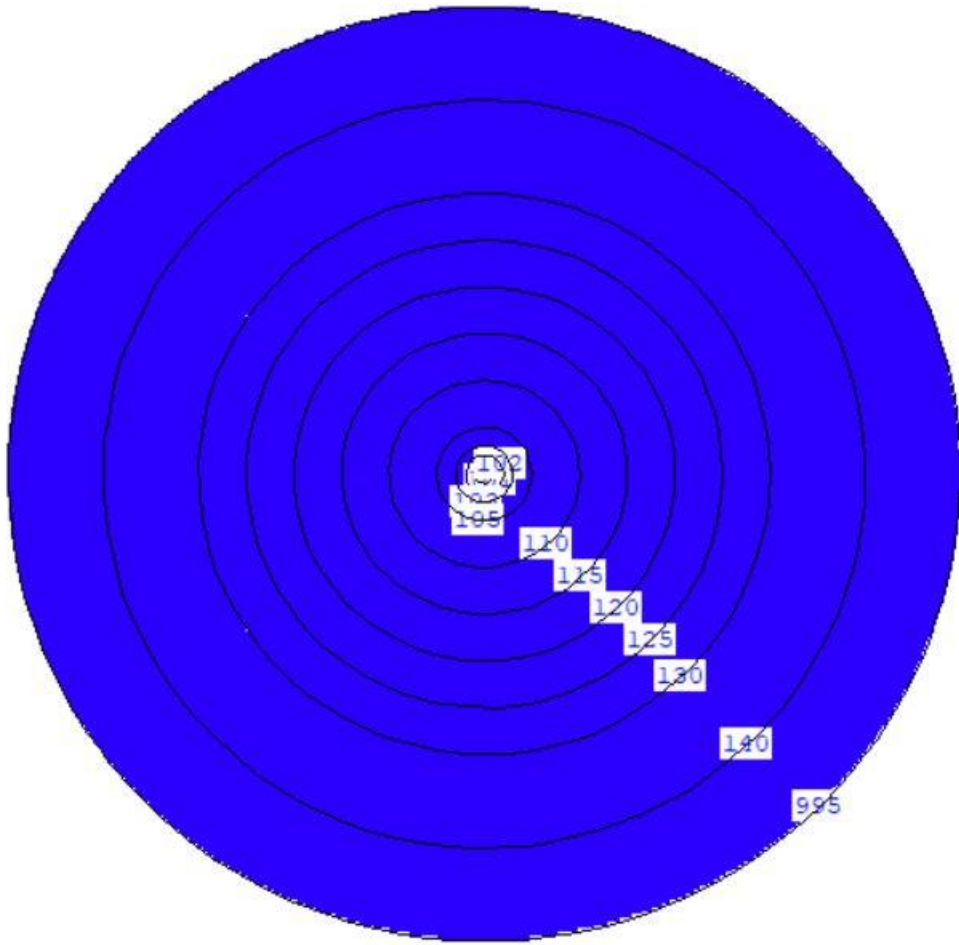
Bunların haricinde lineer olmayan ölçeklendirme işlemleri de mevcuttur [67]. Eldeki veri kümesinin standart sapması 1 ve ortalaması 0 olacak şekilde standardize edilmesi de çok kullanılan bir metottur. Bu metot ile de ikincil ölçeklendirmeye benzer sonuçlar elde edildiği bilinmektedir. Standardize etme işlemi az sayıda aykırı değer (outlier) içeren veri kümeleri için daha uygundur.

Bu çalışma YSA'ları eğiterek geniş bir enerji, element, bileşik ve karışım aralığı için EBF ve EABF değerlerini modellemeyi amaçlamaktadır. EBF ve EABF oldukça karmaşık yapılara sahip olduklarından modellenmesi için geniş bir örnek veri kümesine ihtiyaç duyulacağı açıktır. Bu amaca ulaşmak üzere önce EBF ve EABF değerlerini içeren bir veri kümesi oluşturmak adına MCNP 6.2 simülasyonları yapılmıştır. Kullanılacak malzemeleri ve simülasyonun gerçekleştirileceği kaynak enerjilerini seçerken geniş bir aralık tercih edilmiştir. Daha önce ANSI standardında atom numaraları 4'ten 92'ye kadar uzanan 23 elemente karşılık bu çalışmada 37 ayrı element seçimi yapılmıştır. Bu elementleri seçerken bütün atom numaralarına denk gelecek şekilde homojen bir örneklem oluşturulmaya çalışılmıştır. Seçilen elementlerin atom numaraları, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 13, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 25, 26, 29, 32, 35, 38, 41, 42, 44, 47, 50, 53, 56, 60, 64, 69, 74, 79, 82, 86, 90 ve 92'dir. Aynı zamanda elementlerin seçilmesi sırasında hâlihazırda nükleer tekniklerin endüstriyel uygulamalarında kullanılması ve doğadaki bolluklarının görece yüksek olması tercih sebebi olmuştur.

3.1 Simülasyon Detayları

EBF ve EABF değerlerini hesaplamak için seçilen geometri küresel tek tip malzemeden oluşmuş sonsuz bir ortamdır. Kaynak olarak seçilen fotonlar tek enerjilidir ve tek bir noktadan izotropik yayılmaktadır. Birden fazla enerji değerine sahip kaynakların farklı enerjilerini ve nokta kaynak harici kaynakların uzaysal dağılımlarını tek tek süper pozisyon prensibi ile toplamak mümkün olduğu için bir temel oluşturmak niyetiyle bu kaynak tipi kullanılmıştır. Bu geometride BF değerlerinin bulunması için kaynağı çevreleyen eş merkezli ve kalınlıkları belli mfp aralıklarla artan kürelerin yüzeyleri tally bölgesi olarak belirlenmiştir. Bir nokta kaynaktan çıkan fotonların uzaktaki bir ölçüm noktası etrafında oluşturacağı akı değerini bulmak simülasyon ile çok verimsiz olmaktadır. Bunu

engellemek için küresel geometrinin simetrisinden faydalanılmış ve tek bir nokta yerine, kaynağa eşit uzaklıktaki tüm noktaların toplamı olarak kürenin yüzeyinden sayım alınmıştır. Bu sayede çok daha verimli bir simülasyon gerçekleştirilmiş olup, geometriden çıkan ve yüzeye ulaşan foton sayıları istenen hata ve varyans değerlerine ulaşmayı mümkün kılmıştır. Simülasyon geometrisi MCNP'nin VisEd yardımcı programı ile görselleştirilmiştir, elde edilen çizim Şekil 3.1'de verilmektedir. Burada içteki küreler 1, 2, 3, 5, 10, 15, 20, 25, 30, ve 40 mfp kalınlıklarında olup en dışarıdaki küre sonsuz ortamı sağlamak üzere 50 mfp'ye kadar uzatılmıştır.



Şekil 3.1 Kullanılan simülasyon geometrisi

Geometri tüm simülasyonlar için benzer olsa da her element ve enerji kombinasyonu için mfp değerleri değiştiğinden çevreleyen küresel kabukların boyutları değişmektedir. Bunun için önce simülasyonda kullanılacak element enerji değerleri için mfp değerleri hesaplanmıştır. Bu hesaplamayı yapmak için

kullanılan veriler, saf elementlere ait yoğunluklar ve ilgili enerji değeri için kütle soğurma katsayısıdır. Kütle soğurma katsayıları MCNP hesapları için kullanılan EPDL97 tesir kesiti kütüphanesinden elde edilmiş olup, 15 keV ile 10 MeV arası enerjilere denk gelmektedir. Bu kütüphanede Rayleigh ve Compton saçılma tesir kesitleri atomik elektronların perdelemelerini hesaba dahil eder. Fotoelektrik etki için K ve L kabuğundan yayılacak olan flüoresans fotonların üretilme oranları da bu kütüphanede mevcuttur. Bu kütüphanedeki tesir kesitleri 1 keV enerjiye kadar mevcut olup enerjisi bu değerin altına inen fotonun takibi sonlandırılır ve yerel enerji birikimine dahil edilir.

Buildup faktörlerini bulmak üzere bilinmesi gereken etkileşmeden gelen kaynak fotonları akısı ve toplam foton akısıdır. Bunu sağlamak üzere F2 yüzey tally'leri FT2 inc anahtarı ile parçacıkların etkileşime girme sayısı kaydedilmektedir. FU2 0 100 anahtarı ile hiç etkileşmeyenler ve 100 defaya kadar etkileşime girenler olacak şekilde ayrı ayrı sayılmıştır. Bütün fotonların etkisinin hiç etkileşmeyenlerin etkisine oranı ilgili buildup faktörünü vermektedir. Burada belirtmek gerekir ki hiç etkileşime girmeyen parçacıkların sayılması MCNP 6.2 öncesindeki versiyonlarda yeni üretilen her parçacık için yapılmaktadır. Bundan dolayı üretilen flüoresans, yok olma ve Bremsstrahlung fotonları da ileri yüzeylerde etkileşmeyen parçacık olarak sayılacaktır. Bunun önüne geçmek için UNC anahtarı kullanılmış ve sadece kaynağın içinde tanımlandığı hücre içinden gelen parçacıkların etkileşmemiş parçacıklar olarak sayılması sağlanmıştır.

Tally sonucunda elde edilen akı değerlerinden fiziksel büyüklüklere geçmek için FM kartı oluşturulurken EBF ve EABF için farklı yöntemler izlenmiştir. Eldeki akıdan maruz kalma büyüklüğü elde etmek için radyasyonun hava kerması bilinmelidir. Simülasyonda kullanılan malzemeler arasında hava bulunmamasına rağmen materyal tanımında hava da kullanılmıştır. Bu tanım EBF hesabında kullanılmıştır. MCNP'de simülasyon geometrisinde mevcut olmayan maddeler için kullanılabilen FM çarpan kartı kullanılmıştır. Bu durumda ilgili malzemenin atomik yoğunluğunu da FM çarpanında belirtmek gerekmektedir. Tanımlanan havanın element içeriği ve yoğunluğu Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1 Hava için MCNP’de yapılan malzeme tanımı

Element	Kütlece oranı
C	0.00014
N	0.75519
O	0.23179
Ar	0.01288
Yoğunluk = $1.205 \times 10^3 \text{ g/cm}^3$	

EABF hesabında ise, ilgilenilen malzeme geometride halihazırda mevcut bulunduğu için atomik yoğunluk hesabı yapılmasına gerek olmamıştır, g/cm^3 cinsinden olan yoğunluğu atomik yoğunluk cinsine çevirme işlemi MCNP’de otomatik yapılmaktadır.

Kullanılan FM kartları ile malzemede soğurulan enerjiyi bulmak için sadece foton akısını bilmek yeterli olacağından simülasyon foton modunda çalıştırılmıştır. Elektronların menzilleri 10 MeV enerji altında fotonlara göre çok düşük olduğundan ötürü bu yaklaşıklık gerekçelendirilmiştir. Ayrıca nötron transportunun da açılmamış olmasının sebebi incelenen enerjilerin foto-nötron oluşumu için düşük enerjide kalmasıdır. Özellikle 10 MeV’den daha büyük enerjili fotonlar için foto-nötron etkilerini hesaba dâhil etmek elzem olacaktır.

Yapılan simülasyonlarda hücrelere farklı önem sayısı atama işlemi data kartındaki imp:p anahtarı ile gerçekleştirilmiştir. Bu kısım her bir enerji ve element için saçılma ve soğurulma oranına bağlı olduğu için birbirine komşu olan hücreler arasındaki toplam etkileşim sayısını yaklaşık sabit tutmak üzere simülasyonları çok kereler tekrarlamak gerekmektedir. İlk denemede standart önem sayıları ile başlayıp sonra hücrelerdeki foton aktivitesi sayısını sabit tutmak üzere, çok fazla etkileşim gerçekleşen hücrelerin önem sayısı azaltılmış, az etkileşim yapan hücrelerin önem sayısı artırılmıştır.

Simülasyonların durması için iki kıstas konulmuştur. Bunlardan ilki başlangıç foton sayısı olup NPS anahtarı ile 1×10^7 olarak belirlenmiştir. Bu sayı hücreler için uygun önem çarpanları mevcutsa 10 istatistik testten geçmek için yeterlidir. Bunun yanında tally'ler için hatanın alt limiti STOP kelimesi ile bildirilmiş ve belirtilen tally'lerin hatası 1×10^{-4} mertebesine geldiğinde simülasyonun durdurulması sağlanmıştır. Bu sayede saçılmanın az, soğurulmanın çok gerçekleştiği simülasyonlar daha az sayıda başlangıç fotonu simüle ederek daha hızlı bir şekilde bitirilebilmektedir. Simülasyonların istatistik testten geçmeleri denetlenmiş ve olasılık dağılımı fonksiyonunun eğimi haricindeki istatistik testlerden tüm enerjilerde tüm malzemelerin geçmesi sağlanmıştır. Kullanılan varyans düşürme metotlarının bir yan etkisi olarak standart istatistiki testlerin çalışmaması daha önce de bildirilmiştir.

3.2 Yapay Sinir Ağları

3.2.1 Verilerin Ön İşlenmesi

Makine öğrenmesi algoritmalarında kullanılacak verilerin belli bir formda bulunması algoritmaların optimum şekilde çalışması bakımından önemlidir. Bu algoritmalar özelinde değişse de yaklaşım algoritmaya verilen değerlerin aynı aralıkta ve birimde olmasıdır. Simülasyon sonucu elde edilen EBF ve EABF değerleri, atom numarasının, mfp'nin ve enerjinin bir fonksiyonudur. Atom numarası ve mfp yaklaşık lineer değişmekte ve en büyük ve en küçük değerler arasındaki fark görece az iken, enerji ve buildup değerleri arasında büyük bir uçurum vardır. Bu mertebe ve dağılım farkını azaltmak üzere enerji ve buildup değerlerinin logaritması alınmıştır. Ayrıca algoritmalara sunulmadan önce BF değerleri ortalaması 0 standart sapması 1'e denk gelecek şekilde standartlaştırma işlemine tabi tutulmuştur. Bu işlem sonucunda hepsi de birimden ayrıştırılmış büyüklükler haline gelmektedir. Algoritma çıktıları bu ölçeklendirme işleminin tersi alınarak geri normal değerlerine getirilmiştir.

3.2.2 Yapay Sinir Ağları Parametreleri

Yapay sinir ağlarının problemin çözümü için belirleyeceği ağırlık ve sapma katsayılarına ek olarak bir de bunları belirlemede kullanacağı algoritmaya ait üst parametreleri vardır. Bu parametrelerin belirlenmesi için bir tarama uzayı

gerçekleştirilmiş ve en iyi sonucu veren parametre değerleri kullanılmıştır. Bunlar arasında öğrenme fonksiyonu, aktivasyon fonksiyonu ve ilgili öğrenme fonksiyonuna ait aşırı öğrenmeyi engelleme parametreleri bulunmaktadır.

Gizli katmanların sayısı ve gizli katmandaki nöronların sayısı için farklı değerler karşılaştırılmıştır. Burada hem yüksek doğrulukla model kurabilecek kadar karmaşık aynı zamanda da aşırı öğrenmeye kaçmayacak bir modelin belirlenebilmesi için tek gizli katmanlı modellerde 10'dan 100'e kadar nöron sayısı beş nöron aralıklarıyla incelenmiştir. Daha sonra ise birden fazla gizli katmanlı algoritmalar çalıştırılmış ve ilk baştaki belirlenen en uygun tek katmanlı model ideal ikinci katman büyüklüğünü tayin etmede kullanılmıştır. Benzer şekilde bulunan birinci ve ikinci katman büyüklüğü üçüncü katmanın en uygun değerini belirlemede kullanılmıştır.

3.2.3 Performans Değerlendirme Ölçütleri

Yapay sinir ağlarının kurdukları modellerin başarımlarını ölçmek için MSE, göreceli hata ve R^2 değerleri dikkate alınmıştır. Bu performans parametreleri bu çalışmada kullanılan Newton tabanlı algoritmalar için en uygun performans değerlendirmesini sunmaktadır. Bunlar arasında nihai değerlendirmeyi yaparken eğitim, doğrulama ve test kümelerine ait toplam MSE ve R^2 değerleri incelenmiştir. Ayrıca modeller arası karşılaştırma yapmak için eğitim ve test kümelerinin ulaştıkları başarılar ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Öğrenme algoritması özelinde karşılaştırma yapıldıktan sonra detaylı analiz daha sonrasında en başarılı algoritma için yapılmıştır.

3.3 Bileşik ve Karışımlar

Eğitilen modellerin bileşik ve karışımlar için de kullanılabildiğinin gösterilebilmesi adına radyasyon zırhlıyıcı olarak kullanılan ve kullanılmak üzere önerilmiş olan bileşik ve karışımlar için EBF ve EABF değerleri tahmin edilmiştir. Denemelerde

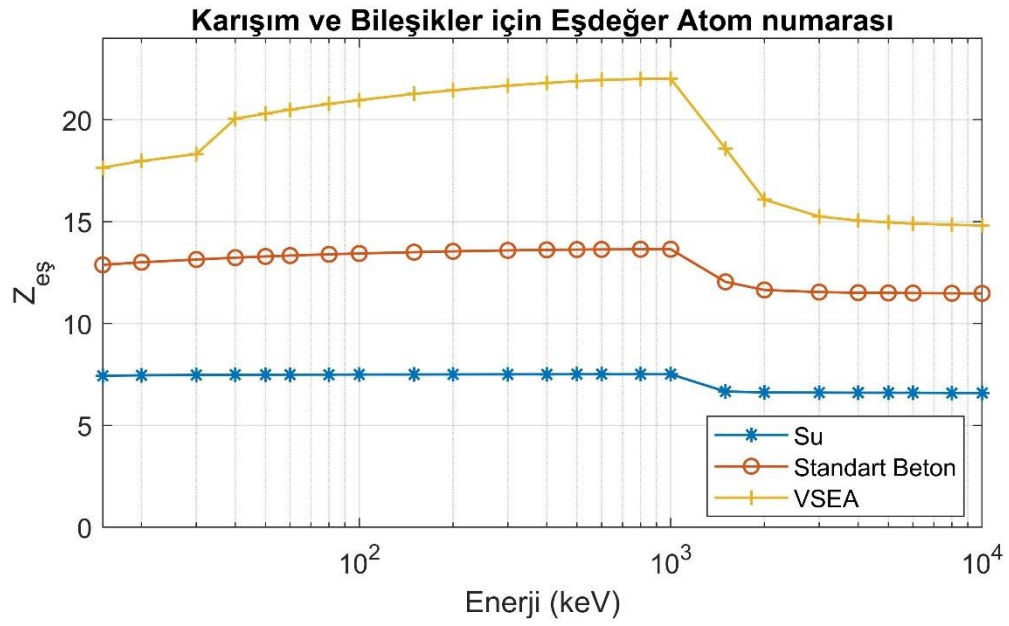
bileşik olarak su, karışım olarak ise standart beton ve vanadyum slag/epoksi /antimon camsı kompoziti kullanılmıştır. Su ve standart beton EBF ve EABF hesapları için klasik zırhlayıcı malzemeler sınıfındadır. İkinci karışım olarak kullanılan vanadyum slag/epoksi/antimon (VSEA) ise yeni nesil zırhlayıcı olarak önerilen bir camsı kompozit olup hem kendi başına kullanılabilir hem de mevcut beton zırhlardaki çatlaklara uygulanabilme özelliğine sahiptir. Radyasyon zırhlama özelliğinin yanı sıra ulaşılabilirlik ve yanmazlık özellikleri ile öne çıkan bu malzeme kompozit formda üretilerek istenen mekanik özelliklere de sahip olabilmektedir. Burada incelenecek olan kompozitteki bileşenlerden, vanadyum slag/epoksi kütleleri oranı 900/160 iken antimon (III) oksit ise kütlece %3 oranında bulunmaktadır. Su, standart beton ve VSEA'nın element içeriği Tablo'da verilmektedir.

Tablo 3.2 YSA ile EBF ve EABF değerleri belirlenen bileşik ve karışımların içeriği

VsEA				Standart Beton		Su	
Element	Kütle Yüzdesi	Element	Kütle Yüzdesi	Element	Kütle yüzdesi	Element	Kütle Yüzdesi
O	0.4321	Mg	0.014	O	0.4983	O	0.8889
Fe	0.2358	Al	0.0124	Si	0.3158	H	0.1111
C	0.1107	Ca	0.0124	Ca	0.0826		
Si	0.065	N	0.0048	Al	0.0456		
Ti	0.0539	P	0.001	K	0.0192		
Mn	0.0509	K	0.0009	Na	0.0171		
V	0.0471	S	0.0005	Fe	0.0122		
Sb	0.0277	Nb	0.0002	H	0.0056		
Cr	0.0274	Co	0.0001	Mg	0.0024		
H	0.0182			S	0.0012		

Bu tahminde bileşik ve karışımların eşdeğer atom numaraları BXCÖM programı ile hesaplanmıştır. Kullanılan bileşik ve karışımlar için enerjiye bağlı eşdeğer atom numaraları Şekil 3.2'de verilmektedir. Burada VsEA malzemesi için düşük enerjilerde düşük atom numaralı O elementinin Compton saçılma tesir kesiti daha belirgin olup diğer elementlerin katkılarını azaltmaktadır. Benzer şekilde 1.5 MeV enerjiden sonra da çift oluşumunun atom numarasına bağlılığı daha az

olduğundan ağır atom numaralı elementlerin etkinliği düşerek eşdeğer atom numarası azalmaktadır.



Şekil 3.2 VsEA, su ve standart beton için enerjiye karşılık eşdeğer atom numaraları

Burada verilen eşdeğer atom numaralarına göre yapılan tahminler ile G-P fit ile bulunan EBF ve EABF değerleri ve mevcutsa literatürde mevcut olan diğer çalışmalar ile karşılaştırılacaktır.

Bu bölümde ilk olarak MCNP sonucundan belirlenen EABF ve EBF değerlerini göstermek amacıyla berilyum, alüminyum, demir ve kurşun için EBF ve EABF değerleri sunulmaktadır. EBF ve EABF parametreleri saf elementlerin atom numarası, kaynak foton enerjisi ve nüfuz derinliğine bağlı olarak ifade edilmektedir. EBF ve EABF değerleri verildikten sonra ise YSA modeli oluşturulurken yapılan verilerin ön işlenmesi ve parametre optimizasyonu süreci ele alınmıştır. Belirlenen en uygun parametrelerden nihai modellerin oluşturulması ve bu nihai modellerden karışım ve bileşikler için edilen EBF ve EABF değerleri en sonda verilmektedir.

4.1 Hesaplanan EBF ve EABF değerleri

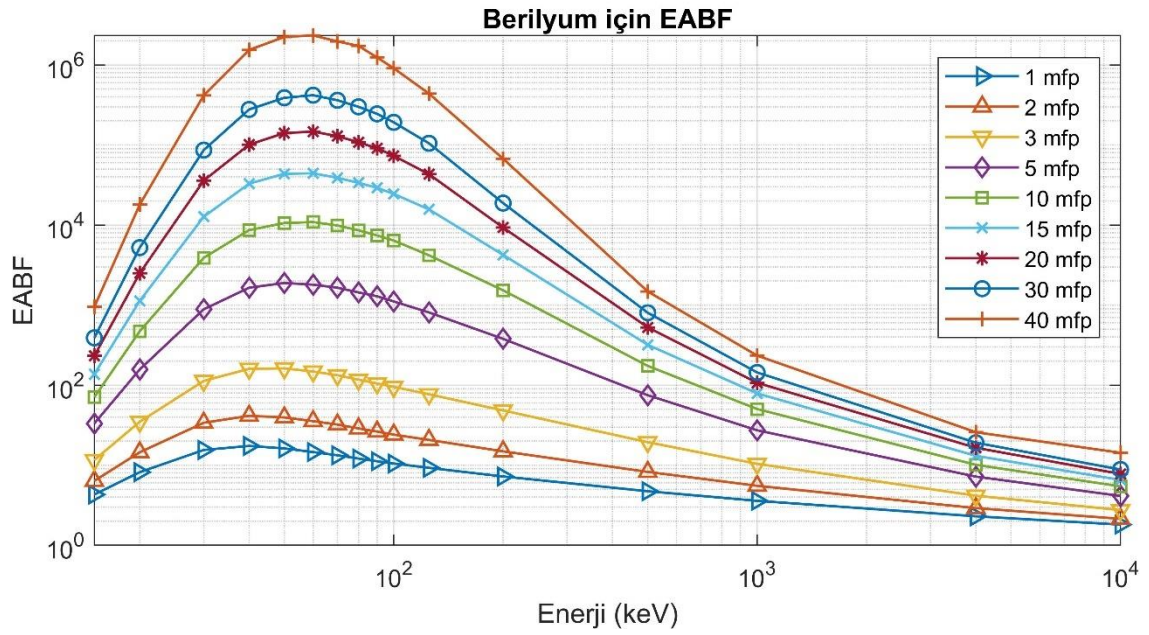
Simülasyon sonucu elde edilen maruz kalma ve malzemeye ait çarpışma kerması değerlerinden hesaplanan EBF ve EABF değerleri 15, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 125, 200, 500, 1000, 4000 ve 10000 keV standart enerji aralığında sunulmaktadır. Ortam kalınlığı olarak 1, 2, 3, 5, 10, 15, 20, 25, 30 ve 40 mfp değerlerine karşılık gelen BF değerleri bulunmuştur. Gösterilen değerler küçükten büyüğe doğru atom numarası aralığını kapsayacak şekilde seçilmiştir.

Berilyum için elde edilen EABF değerlerine ait sonuçlar Tablo 4.1'de verilmektedir. Buradaki değerler daha önceden belirlenen standart aralıktaki hesaplara dayanmaktadır. Berilyum elementine düşük atom numaralı element olarak yer verilmiştir.

Tablo 4.1 Berilyum için EABF değerleri

E(keV)	1mfp	5mfp	10mfp	15mfp	20mfp	30mfp	40mfp
15	2.56E+00	1.16E+01	3.32E+01	7.08E+01	1.37E+02	3.90E+02	9.48E+02
20	3.82E+00	3.49E+01	1.57E+02	4.71E+02	1.13E+03	5.22E+03	1.80E+04
30	5.52E+00	1.13E+02	8.86E+02	3.90E+03	1.27E+04	8.63E+04	4.17E+05
40	5.66E+00	1.60E+02	1.65E+03	8.64E+03	3.29E+04	2.78E+05	1.54E+06
50	5.28E+00	1.62E+02	1.89E+03	1.06E+04	4.37E+04	3.89E+05	2.24E+06
60	4.84E+00	1.48E+02	1.80E+03	1.09E+04	4.43E+04	4.19E+05	2.34E+06
70	4.51E+00	1.33E+02	1.65E+03	9.88E+03	3.89E+04	3.62E+05	1.97E+06
80	4.24E+00	1.17E+02	1.44E+03	8.59E+03	3.37E+04	3.00E+05	1.73E+06
90	4.04E+00	1.05E+02	1.29E+03	7.42E+03	2.92E+04	2.45E+05	1.24E+06
100	3.89E+00	9.53E+01	1.11E+03	6.41E+03	2.45E+04	1.92E+05	9.09E+05
125	3.58E+00	7.69E+01	8.10E+02	4.19E+03	1.57E+04	1.05E+05	4.39E+05
200	3.07E+00	4.83E+01	3.79E+02	1.53E+03	4.24E+03	1.88E+04	6.73E+04
500	2.39E+00	1.94E+01	7.49E+01	1.74E+02	3.19E+02	8.02E+02	1.48E+03
1000	2.06E+00	1.04E+01	2.73E+01	5.03E+01	7.89E+01	1.44E+02	2.34E+02
4000	1.65E+00	4.16E+00	7.20E+00	1.01E+01	1.31E+01	1.91E+01	2.58E+01
10000	1.45E+00	2.75E+00	4.13E+00	5.44E+00	6.54E+00	8.83E+00	1.43E+01

Berilyum elementi için EABF değerleri Şekil 4.1 üzerinde gösterilmektedir. Burada düşük atom numaralı berilyum için EABF değerleri enerji ile birlikte bir miktar artmakta, Compton saçılmasının baskın olduğu bölge boyunca en yüksek değere ulaşmaktadır. Çok yüksek enerjilerde ise Berilyum içinde üretilen ikincil fotonların enerjilerinin tesir kesitlerinin etkileşmeyen parçacıklara göre yüksek olması sebebiyle azalmaktadır.



Şekil 4.1 Berilyum elementi için EABF değerleri

Berilyuma ait EBF değerleri ise Tablo 4.2’de verilmektedir.

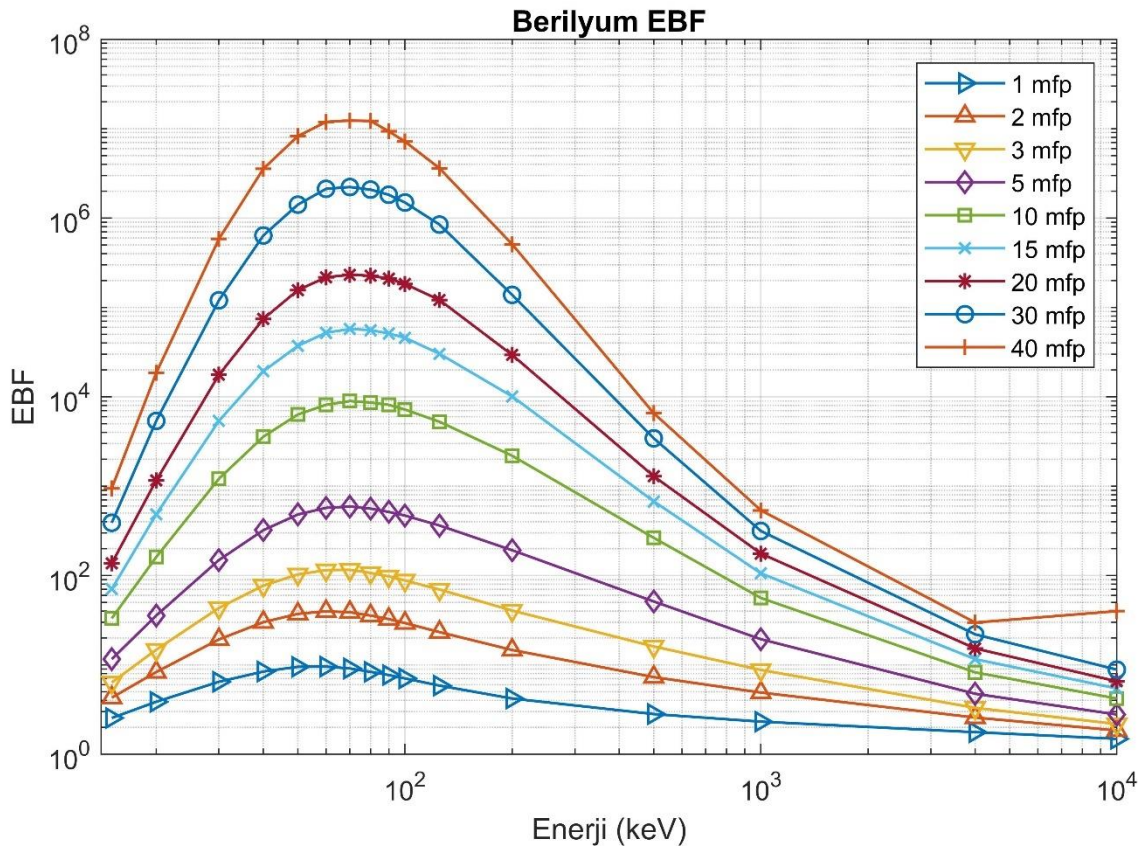
Tablo 4.2 Berilyum elementi için seçilen mfp’lerde EBF değeri

E(keV)	1mfp	5mfp	10mfp	15mfp	20mfp	30mfp	40mfp
15	2.55E+0	1.16E+1	3.32E+1	7.06E+1	1.37E+2	3.89E+2	9.46E+2
20	3.87E+0	3.57E+1	1.61E+2	4.84E+2	1.16E+3	5.37E+3	1.85E+4
30	6.48E+0	1.49E+2	1.21E+3	5.38E+3	1.76E+4	1.20E+5	5.83E+5
40	8.44E+0	3.22E+2	3.58E+3	1.93E+4	7.44E+4	6.38E+5	3.56E+6
50	9.54E+0	4.82E+2	6.33E+3	3.71E+4	1.56E+5	1.41E+6	8.23E+6
60	9.58E+0	5.72E+2	8.14E+3	5.21E+4	2.17E+5	2.12E+6	1.19E+7
70	9.13E+0	5.92E+2	8.95E+3	5.73E+4	2.32E+5	2.22E+6	1.23E+7
80	8.38E+0	5.61E+2	8.62E+3	5.58E+4	2.26E+5	2.08E+6	1.22E+7
90	7.71E+0	5.15E+2	8.13E+3	5.11E+4	2.10E+5	1.82E+6	9.33E+6
100	7.07E+0	4.69E+2	7.20E+3	4.57E+4	1.83E+5	1.49E+6	7.16E+6

Tablo 4.2 Berilyum elementi için seçilen mfp'lerde EBF değeri (devamı)

125	5.87E+0	3.63E+2	5.25E+3	3.03E+4	1.21E+5	8.44E+5	3.60E+6
200	4.21E+0	1.92E+2	2.19E+3	1.01E+4	2.94E+4	1.38E+5	5.09E+5
500	2.82E+0	5.13E+1	2.64E+2	6.75E+2	1.29E+3	3.43E+3	6.54E+3
1000	2.32E+0	1.94E+1	5.61E+1	1.06E+2	1.76E+2	3.15E+2	5.36E+2
4000	1.77E+0	4.76E+0	8.26E+0	1.16E+1	1.53E+1	2.20E+1	2.98E+1
10000	1.49E+0	2.79E+0	4.21E+0	5.46E+0	6.56E+0	8.86E+0	4.00E+1

Berilyum için EBF değerleri Şekil 4.2'de toplu halde gösterilmektedir.



Şekil 4.2 Berilyum elementi için EBF değerleri

Berilyum elementi için EBF'nin oldukça büyük değerler aldığı ve maksimum değerine 80 keV dolaylarına ulaştığı görülmektedir. Düşük atom numaralı

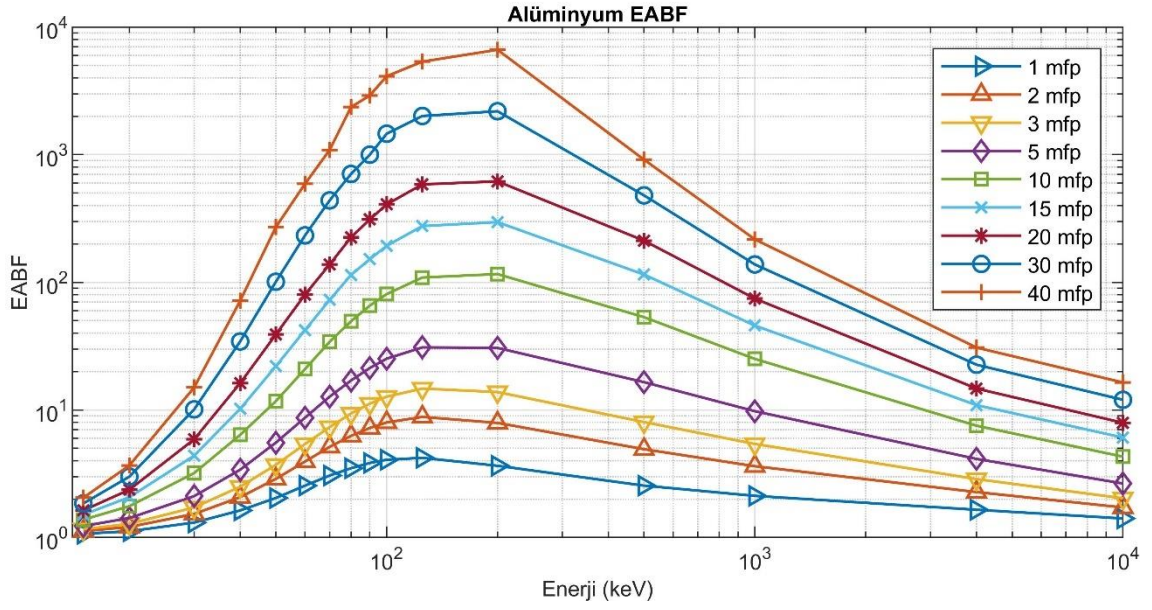
elementleri temsilen gösterilen Berilyum için düşük atom numaralı elementlerin soğuruculukları az olmasına rağmen saçıcılıklarının yüksekliği sebebiyle, Compton etkileşiminden çıkan fotonların etkisini ortaya koymaktadır.

Alüminyum için EABF değerleri yine aynı enerji ve mfp aralığı için Tablo 4.3’de verilmektedir.

Tablo 4.3 Alüminyum elementi için simülasyondan elde edilen EABF değerleri

E(KEV)	1MFP	5MFP	10MFP	15MFP	20MFP	30MFP	40MFP
15	1.07E+0	1.23E+0	1.38E+0	1.51E+0	1.63E+0	1.85E+0	2.05E+0
20	1.12E+0	1.42E+0	1.76E+0	2.07E+0	2.37E+0	3.00E+0	3.67E+0
30	1.31E+0	2.11E+0	3.20E+0	4.38E+0	5.89E+0	1.01E+1	1.50E+1
40	1.63E+0	3.40E+0	6.37E+0	1.02E+1	1.62E+1	3.44E+1	7.17E+1
50	2.04E+0	5.54E+0	1.17E+1	2.20E+1	3.90E+1	1.01E+2	2.71E+2
60	2.55E+0	8.69E+0	2.09E+1	4.22E+1	8.02E+1	2.33E+2	5.91E+2
70	3.06E+0	1.27E+1	3.42E+1	7.28E+1	1.38E+2	4.38E+2	1.09E+3
80	3.49E+0	1.70E+1	4.95E+1	1.14E+2	2.25E+2	7.06E+2	2.36E+3
90	3.84E+0	2.13E+1	6.57E+1	1.52E+2	3.11E+2	1.00E+3	2.91E+3
100	4.07E+0	2.52E+1	8.08E+1	1.93E+2	4.08E+2	1.46E+3	4.12E+3
125	4.21E+0	3.09E+1	1.09E+2	2.76E+2	5.85E+2	2.01E+3	5.36E+3
200	3.65E+0	3.06E+1	1.16E+2	2.96E+2	6.18E+2	2.19E+3	6.64E+3
500	2.55E+0	1.65E+1	5.33E+1	1.15E+2	2.12E+2	4.80E+2	9.14E+2
1000	2.12E+0	9.77E+0	2.51E+1	4.58E+1	7.45E+1	1.38E+2	2.17E+2
4000	1.65E+0	4.13E+0	7.52E+0	1.09E+1	1.47E+1	2.26E+1	3.08E+1
10000	1.41E+0	2.65E+0	4.30E+0	6.07E+0	7.92E+0	1.20E+1	1.64E+1

Alüminyum için EABF değerleri Şekil 4.3’te verilmektedir



Şekil 4.3 Alüminyum için EABF değerleri

Alüminyum elementine ait seçili EABF değerleri Tablo 4.4'te verilmektedir.

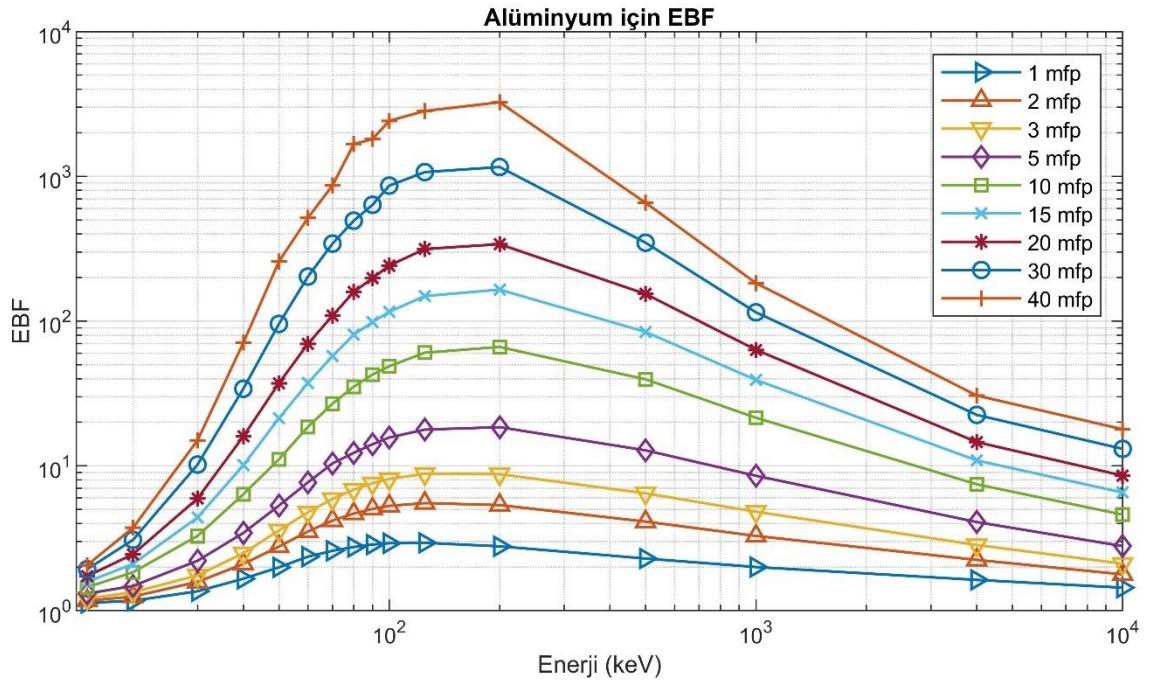
Tablo 4.4 Alüminyum elementine ait EABF değerleri

E(KEV)	1MFP	5MFP	10MFP	15MFP	20MFP	30MFP	40MFP
15	1.13E+00	1.31E+00	1.45E+00	1.58E+00	1.73E+00	1.93E+00	2.06E+00
20	1.17E+00	1.48E+00	1.84E+00	2.10E+00	2.45E+00	3.08E+00	3.73E+00
30	1.36E+00	2.21E+00	3.28E+00	4.40E+00	5.95E+00	1.02E+01	1.50E+01
40	1.66E+00	3.44E+00	6.36E+00	1.01E+01	1.60E+01	3.41E+01	7.09E+01
50	1.99E+00	5.31E+00	1.11E+01	2.13E+01	3.72E+01	9.56E+01	2.58E+02
60	2.36E+00	7.69E+00	1.86E+01	3.74E+01	6.97E+01	2.03E+02	5.17E+02
70	2.59E+00	1.04E+01	2.69E+01	5.72E+01	1.09E+02	3.43E+02	8.65E+02
80	2.75E+00	1.23E+01	3.52E+01	8.05E+01	1.59E+02	4.94E+02	1.67E+03
90	2.86E+00	1.41E+01	4.27E+01	9.85E+01	1.98E+02	6.36E+02	1.81E+03
100	2.92E+00	1.57E+01	4.88E+01	1.16E+02	2.42E+02	8.63E+02	2.42E+03

Tablo 4.4 Alüminyum elementine ait EABF değerleri (devamı)

125	2.94E+00	1.78E+01	6.05E+01	1.49E+02	3.15E+02	1.07E+03	2.83E+03
200	2.78E+00	1.85E+01	6.63E+01	1.65E+02	3.40E+02	1.16E+03	3.25E+03
500	2.29E+00	1.28E+01	3.96E+01	8.42E+01	1.54E+02	3.48E+02	6.57E+02
1000	2.00E+00	8.54E+00	2.15E+01	3.92E+01	6.33E+01	1.15E+02	1.83E+02
4000	1.63E+00	4.09E+00	7.46E+00	1.09E+01	1.46E+01	2.25E+01	3.06E+01
10000	1.44E+00	2.79E+00	4.60E+00	6.54E+00	8.56E+00	1.31E+01	1.79E+01

Alüminyum için EBF değerlerini Şekil 4.4 toplu olarak göstermektedir.



Şekil 4.4 Alüminyum için EBF değerleri

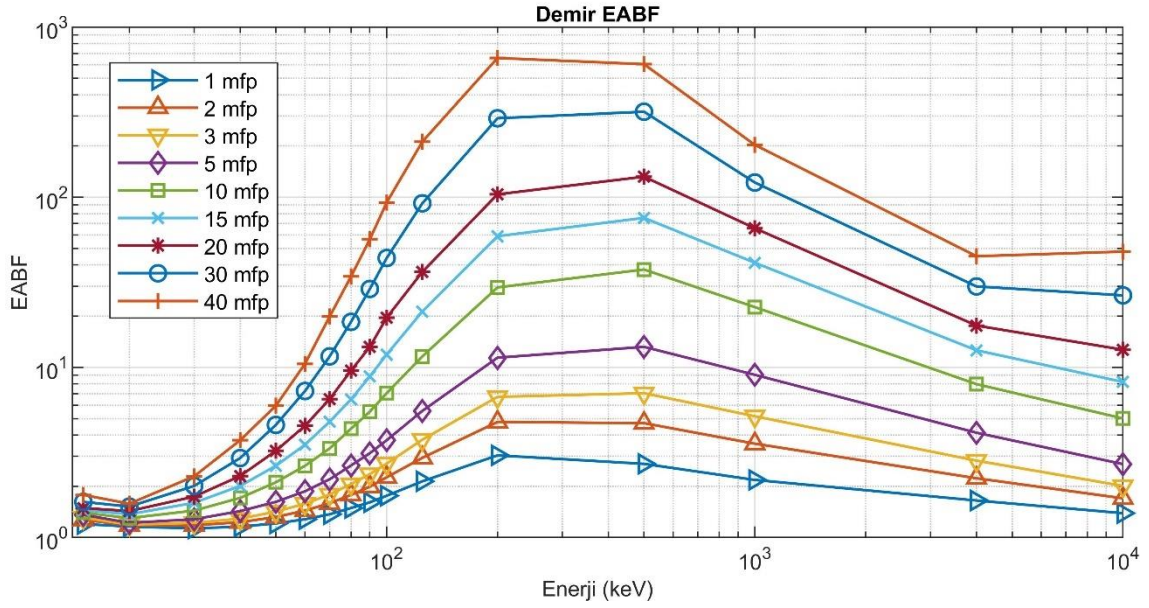
Şekil 4.3 ve 4.4 değerlendirildiğinde, alüminyum için EABF büyüklüğünün davranışı berilyum elementine benzemektedir. Alüminyum elementinin atom numarası daha büyük olduğu için daha fazla soğurucu davranış göstermekte ve dolayısı ile berilyuma nazaran daha düşük BF değerleri ortaya çıkmaktadır. Ayrıca en yüksek EABF değerlerine berilyum 100 keV foton enerjisinden daha aşağıda ulaşırken alüminyum 200 keV foton enerjisinde maksimum değerine

ulaşmaktadır. Bunu tesir kesitlerinin atom numarasına olan bağılılıkları ile izah etmek mümkündür. Compton saçılması berilyum için daha düşük enerjilerde baskın olurken, alüminyum elementinde bu durum ancak 100 keV enerjiden itibaren ortaya çıkmaktadır. Ayrıca salt değer olarak berilyum elementinin EBF değerleri 1000 kat daha yüksek değerlere ulaşmaktadır. Bu durum düşük atom numarasına sahip olan elementlerin EBF ve EABF değerlerinde esas rol oynayanın Compton etkileşimi olduğunu göstermektedir.

Demir elementine ait simülasyonundan elde edilen EABF değerleri sonuçları Tablo 4.5'te gösterilmektedir. Zırlama açısından önemine binaen seçilmiştir.

Tablo 4.5 Demir elementi için simülasyondan elde edilen EABF değerleri

E(KEV)	1MFP	5MFP	10MFP	15MFP	20MFP	30MFP	40MFP
15	1.20E+00	1.36E+00	1.40E+00	1.45E+00	1.49E+00	1.62E+00	1.78E+00
20	1.16E+00	1.22E+00	1.30E+00	1.37E+00	1.43E+00	1.52E+00	1.58E+00
30	1.13E+00	1.28E+00	1.44E+00	1.60E+00	1.74E+00	2.01E+00	2.29E+00
40	1.16E+00	1.43E+00	1.71E+00	2.01E+00	2.30E+00	2.93E+00	3.73E+00
50	1.21E+00	1.62E+00	2.11E+00	2.64E+00	3.23E+00	4.59E+00	5.95E+00
80	1.49E+00	2.65E+00	4.36E+00	6.48E+00	9.57E+00	1.85E+01	3.42E+01
90	1.61E+00	3.13E+00	5.49E+00	8.85E+00	1.32E+01	2.89E+01	5.66E+01
100	1.76E+00	3.73E+00	7.05E+00	1.19E+01	1.96E+01	4.39E+01	9.31E+01
125	2.14E+00	5.55E+00	1.16E+01	2.13E+01	3.64E+01	9.21E+01	2.12E+02
200	3.04E+00	1.14E+01	2.95E+01	5.90E+01	1.04E+02	2.91E+02	6.58E+02
500	2.71E+00	1.32E+01	3.76E+01	7.56E+01	1.32E+02	3.18E+02	6.05E+02
1000	2.18E+00	9.04E+00	2.26E+01	4.12E+01	6.57E+01	1.22E+02	2.03E+02
4000	1.65E+00	4.13E+00	7.97E+00	1.26E+01	1.76E+01	2.99E+01	4.50E+01
10000	1.39E+00	2.70E+00	5.01E+00	8.21E+00	1.27E+01	2.65E+01	4.79E+01



Şekil 4.5 Demir için EABF değerleri

Demir için EABF değerleri Şekil 4.5'te verilmiştir.

Demir elementine ait simülasyondan elde edilen EBF değerleri Tablo 4.6'da verilmektedir.

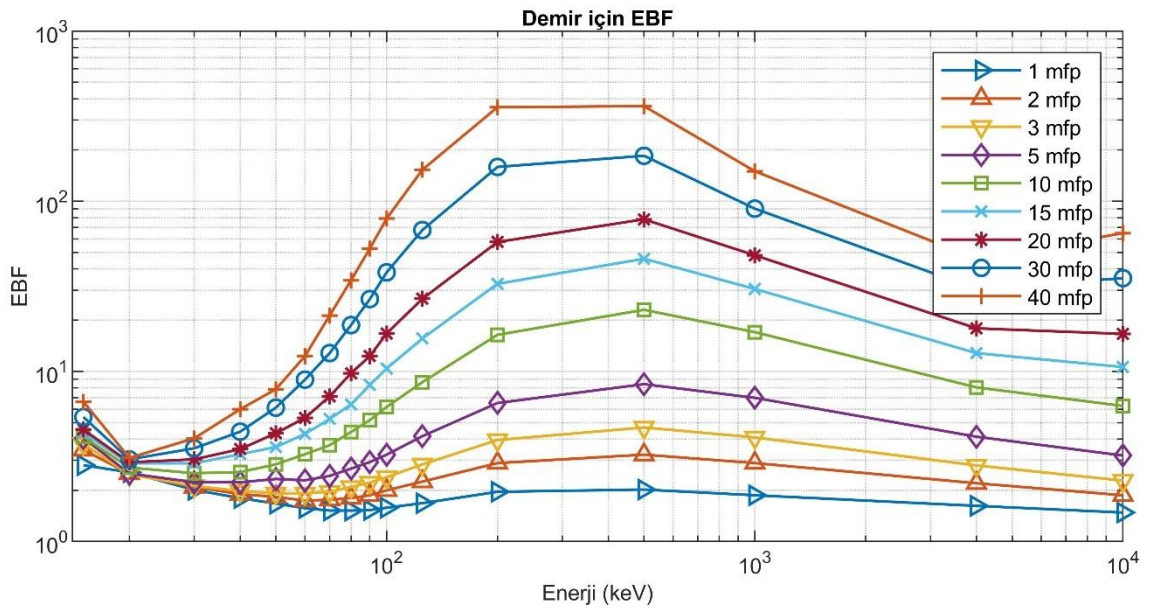
Tablo 4.6 Demir için simülasyondan elde edilen EBF değerleri

E(KEV)	1MFP	5MFP	10MFP	15MFP	20MFP	30MFP	40MFP
15	2.81E+00	4.06E+00	4.12E+00	4.34E+00	4.55E+00	5.39E+00	6.63E+00
20	2.55E+00	2.51E+00	2.72E+00	2.88E+00	2.92E+00	3.04E+00	3.10E+00
30	2.01E+00	2.23E+00	2.52E+00	2.88E+00	3.04E+00	3.53E+00	4.04E+00
40	1.80E+00	2.23E+00	2.56E+00	3.26E+00	3.49E+00	4.42E+00	5.99E+00
50	1.67E+00	2.33E+00	2.84E+00	3.59E+00	4.33E+00	6.12E+00	7.85E+00
60	1.57E+00	2.29E+00	3.26E+00	4.29E+00	5.33E+00	8.94E+00	1.23E+01
70	1.52E+00	2.43E+00	3.68E+00	5.25E+00	7.13E+00	1.28E+01	2.13E+01
80	1.52E+00	2.68E+00	4.40E+00	6.40E+00	9.74E+00	1.87E+01	3.43E+01
90	1.53E+00	2.93E+00	5.17E+00	8.31E+00	1.23E+01	2.66E+01	5.27E+01

Tablo 4.6 Demir için simülasyondan elde edilen EBF değerleri (devamı)

100	1.58E+00	3.24E+00	6.18E+00	1.04E+01	1.67E+01	3.82E+01	7.92E+01
125	1.68E+00	4.16E+00	8.64E+00	1.56E+01	2.67E+01	6.77E+01	1.53E+02
200	1.96E+00	6.52E+00	1.64E+01	3.27E+01	5.76E+01	1.59E+02	3.57E+02
500	2.02E+00	8.41E+00	2.30E+01	4.59E+01	7.83E+01	1.85E+02	3.62E+02
1000	1.87E+00	6.99E+00	1.70E+01	3.05E+01	4.81E+01	9.04E+01	1.50E+02
4000	1.62E+00	4.13E+00	8.05E+00	1.28E+01	1.79E+01	3.05E+01	4.59E+01
10000	1.48E+00	3.20E+00	6.26E+00	1.06E+01	1.66E+01	3.53E+01	6.49E+01

Benzer şekilde Demir için EBF değerleri Şekil 4.6'da gösterilmektedir.



Şekil 4.6 Demir elementi için EBF değerleri

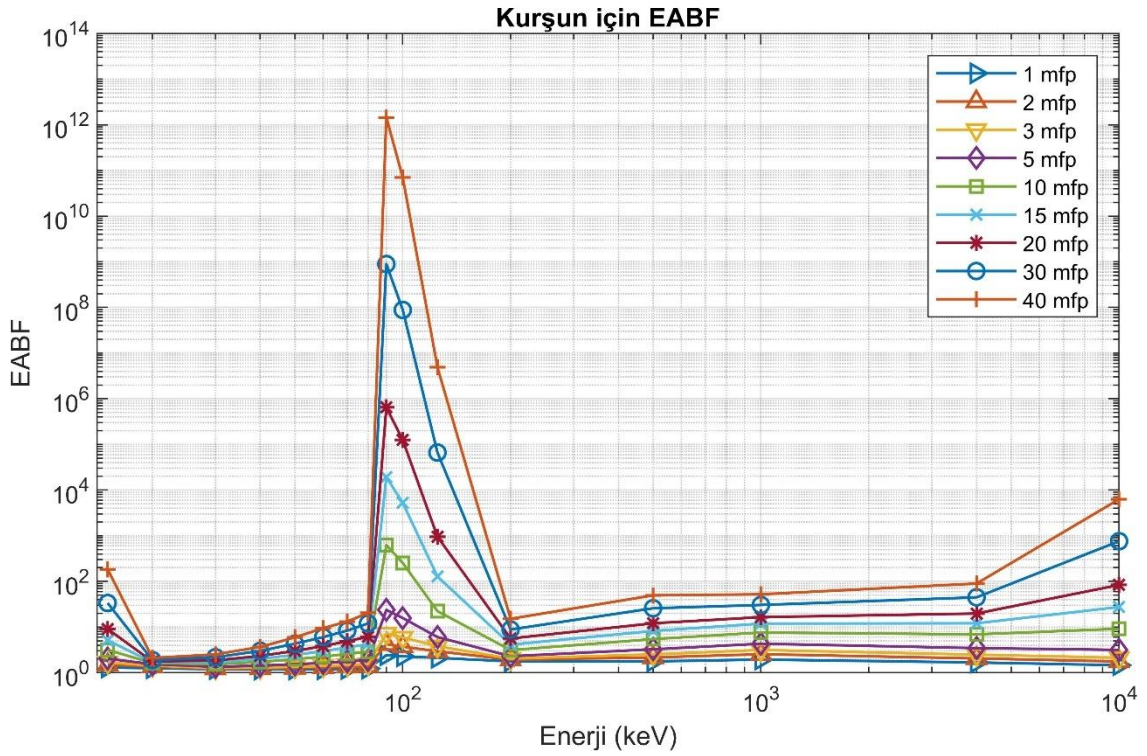
Kurşun elementi radyasyon zırhlama için önemine binaen ve yüksek atom numaralı elementlerin buildup faktörlerinin davranışını göstermesi bakımından tercih edilmiştir. Saf kurşuna ait EABF değerleri Tablo 4.7'de verilmektedir.

Tablo 4.7 Kurşun için MCNP ile bulunan EABF değerleri

E(KEV)	1MFP	5MFP	10MFP	15MFP	20MFP	30MFP	40MFP
15	1.31E+00	2.03E+00	3.15E+00	5.14E+00	9.08E+00	3.36E+01	1.84E+02
20	1.25E+00	1.54E+00	1.64E+00	1.69E+00	1.76E+00	1.89E+00	2.11E+00
30	1.20E+00	1.35E+00	1.53E+00	1.69E+00	1.86E+00	2.18E+00	2.52E+00
40	1.17E+00	1.43E+00	1.72E+00	2.02E+00	2.34E+00	3.01E+00	3.67E+00
50	1.18E+00	1.53E+00	1.98E+00	2.46E+00	3.00E+00	4.32E+00	5.94E+00
60	1.19E+00	1.64E+00	2.25E+00	2.96E+00	3.84E+00	6.04E+00	9.50E+00
70	1.21E+00	1.76E+00	2.58E+00	3.60E+00	4.90E+00	8.37E+00	1.32E+01
80	1.23E+00	1.89E+00	2.88E+00	4.22E+00	6.14E+00	1.20E+01	2.05E+01
90	2.42E+00	2.37E+01	6.24E+02	1.92E+04	6.46E+05	8.89E+08	1.45E+12
100	2.29E+00	1.58E+01	2.53E+02	5.24E+03	1.25E+05	8.81E+07	7.01E+10
125	2.12E+00	6.04E+00	2.23E+01	1.28E+02	9.50E+02	6.63E+04	4.88E+06
200	1.77E+00	2.30E+00	3.13E+00	4.12E+00	5.62E+00	8.85E+00	1.52E+01
500	1.77E+00	3.26E+00	5.45E+00	8.24E+00	1.21E+01	2.58E+01	4.95E+01
1000	1.94E+00	4.33E+00	7.60E+00	1.19E+01	1.65E+01	3.05E+01	5.22E+01
4000	1.68E+00	3.46E+00	6.92E+00	1.21E+01	1.98E+01	4.48E+01	8.97E+01
10000	1.46E+00	3.17E+00	9.19E+00	2.75E+01	8.36E+01	7.60E+02	6.31E+03

Kurşun için EABF değerleri Şekil 4.7’de gösterilmektedir.

Şekil 4.7 Kurşun için EABF değerleri



Kurşun elementine ait EBF değerleri Tablo 4.8’de verilmektedir.

Tablo 4.8 Kurşun için EBF değerleri

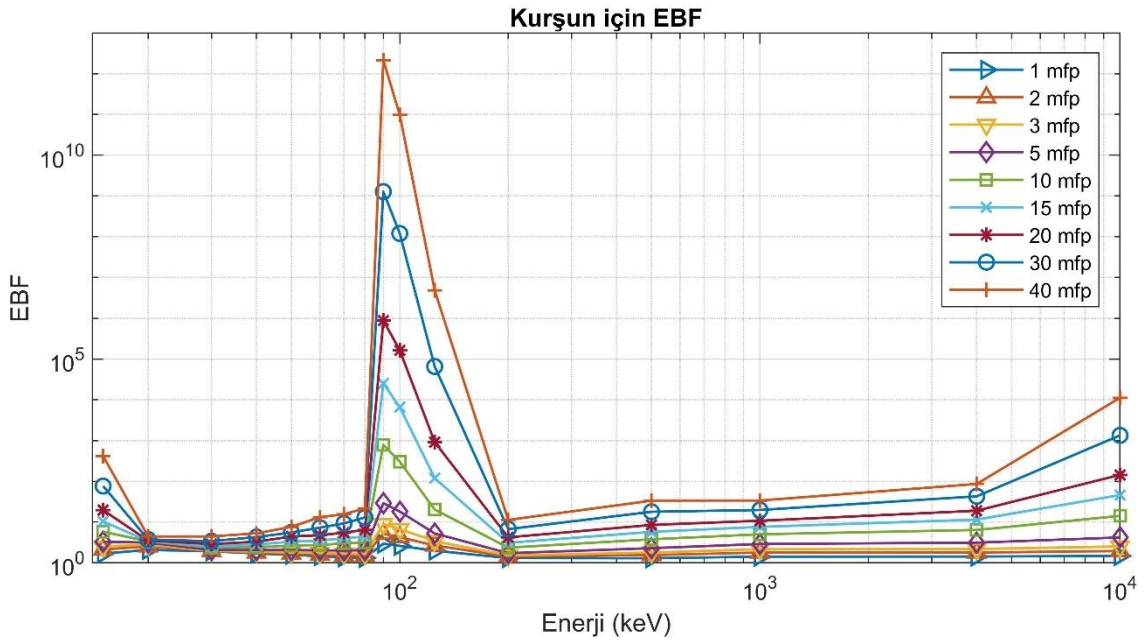
E(KEV)	1MFP	5MFP	10MFP	15MFP	20MFP	30MFP	40MFP
15	1.69E+00	3.30E+00	5.82E+00	1.04E+01	1.96E+01	7.66E+01	4.18E+02
20	2.08E+00	3.14E+00	3.37E+00	3.41E+00	3.54E+00	3.74E+00	4.45E+00
30	1.92E+00	2.06E+00	2.35E+00	2.54E+00	2.89E+00	3.40E+00	4.45E+00
40	1.70E+00	2.07E+00	2.41E+00	2.83E+00	3.30E+00	4.30E+00	5.29E+00
50	1.57E+00	2.07E+00	2.66E+00	3.31E+00	4.43E+00	5.57E+00	7.65E+00
60	1.46E+00	2.02E+00	2.73E+00	3.52E+00	4.76E+00	7.31E+00	1.32E+01
70	1.37E+00	2.01E+00	3.02E+00	4.02E+00	5.51E+00	9.29E+00	1.56E+01
80	1.32E+00	2.03E+00	3.12E+00	4.42E+00	6.47E+00	1.30E+01	2.18E+01

Tablo 4.8 Kurşun için EBF değerleri (devamı)

E(KEV)	1MFP	5MFP	10MFP	15MFP	20MFP	30MFP	40MFP
90	2.95E+00	2.91E+01	7.86E+02	2.53E+04	8.86E+05	1.28E+09	2.14E+12
100	2.61E+00	1.81E+01	3.02E+02	6.59E+03	1.63E+05	1.20E+08	9.69E+10
125	1.99E+00	5.27E+00	2.03E+01	1.20E+02	9.18E+02	6.56E+04	4.85E+06
200	1.31E+00	1.73E+00	2.36E+00	3.10E+00	4.23E+00	6.72E+00	1.13E+01
500	1.30E+00	2.29E+00	3.78E+00	5.76E+00	8.51E+00	1.79E+01	3.35E+01
1000	1.42E+00	2.90E+00	5.03E+00	7.63E+00	1.08E+01	1.98E+01	3.38E+01
4000	1.43E+00	3.13E+00	6.41E+00	1.15E+01	1.90E+01	4.29E+01	8.62E+01
10000	1.48E+00	4.20E+00	1.42E+01	4.60E+01	1.44E+02	1.34E+03	1.12E+04

Kurşun elementine ait EBF değerleri Şekil 4.8'de gösterilmektedir.

Şekil 4.8 Kurşun için EBF değerleri



Kurşun için hesaplanan BF değerlerinde görülen 90 keV enerji dolaylarındaki yükseliş elementin K-soğurma kenarı enerjisi olan 88 keV dolaylarındaki denk gelmektedir. Burada görülebileceği üzere EABF ve EBF değerleri 10^{12} değerini aşmaktadırlar. Bunun haricinde bir de 15 keV dolaylarında görülen 10^3 değerine

kadar görülen artış ise hesaplara L kabuğunun dahil edilmesinden kaynaklanmaktadır. Düşük enerjilerdeki bu ani sıçrama ANSI verilerinde bulunmamaktadır. Belirtildiği üzere soğurma kabuğunun hemen üzerindeki enerjilerde elementlerin fotoelektrik etkileşim tesir kesiti hızlı bir yükseliş gösterir. Bu L kabuğunda K kabuğuna oranla daha düşük olsa da kurşun ve uranyum gibi çok yüksek atom numaralı elementler için oldukça önemli bir buildup oluşuna sebebiyet vermektedir.

Simülasyon sonucunda elde edilen şekiller incelendiğinde 40 mfp derinliklerde MCNP verilerinin bir miktar sapma içeriyor oldukları görünmektedir. Bunun sebebi olarak 40 mfp derinlikteki ölçümler istatistik testleri geçmişken bile ortaya çıkan hataların diğer mfp'lere göre bir miktar daha yüksek çıkmış olması gösterilebilir.

4.2 Bulunan Buildupların Teyit edilmesi

Simülasyon sonucunda elde edilen EBF ve EABF değerleri bölüm 4.1'deki tablolardan ve şekillerden anlaşılabileceği üzere BF için öngörülen genel şemalara uymaktadırlar. Alüminyum için MCNP'den elde edilen EBF değerlerini daha önce bildirilmiş olan literatür değerleri ile karşılaştırmak için birlikte Tablo 4.7'de verilmektedir. Karşılaştırmada ANSI-ANS 6.4.3 (1991) [7], Chibani (2001) [12], Hirayama (1995) [68], Kitsos (1996) [69], Schirmers (2006) [13] ve Shimizu (2002) [9] çalışmaları kullanılmıştır. Bahsi geçen çalışmalarda eksik olan değerler boş bırakılmıştır.

Karşılaştırmadaki ANSI verilerinde Rayleigh saçılması ve bağlı elektron düzeltmeleri dâhil olmadığından dolayı yapılan hesaplarda ANSI mfp'leri diğer çalışmalardaki mfp değerlerinden ayrılmaktadır [70]. 40 mfp kadar derin nüfuz problemlerinde bu etki iyice belirgin olmaktadır. Bu ayrışmanın ikinci önemli sebebi ise mfp hesaplama metodolojisinden kaynaklanmaktadır. ANSI için mfp hesabında koherent hariç veriler kullanılmıştır. Bu da yüksek malzeme mfp'leri için hesaplanan buildup faktörlerinin arasında fark oluşmasına sebebiyet vermektedir. Burada 1 mfp hesaplarının birbirine yakın olması aslında hesaplanan buildupların uyumlu olduğunun göstergesidir. Bu tespiti doğrulayacak şekilde, Rayleigh saçılmasının toplam tesir kesiti içinde önemli bir yer tutmadığı yüksek

enerjilerde iki hesap arasındaki fark mfp ile birlikte açılmamaktadır. Bundan dolayı esasında buildup faktörünün direkt olarak fiziksel bir ölçüm birimine çevrilmeden direkt olarak kıyaslanması sonucu ortaya çıkacak yüksek farkların esasında bir fiziksel büyüklük ölçümüne döküldüğünde yakın değerler alabileceği sonucu çıkarılabilir.

Tablo 4.9 Alüminyum için 100 keV enerjide EBF değerleri

mfp	ANSI (1991)	Chibani (2002)	Schirmers (2006)	Bu Tez
1	2.86	2.93	3.01	2.92
2	4.87	5.37	4.2	5.29
3	7.07	-	7.02	8.12
5	12.1	15.6	17.88	15.66
10	28.7	48.6	49	48.81
40	266.2	2230	-	2407

Literatürde ANSI haricinde, zırhlıyıcı malzeme olarak kullanılan saf elementlere ait EABF değeri bildirilen çalışmalar az sayıdadır. Bundan ötürü karşılaştırmalar kısıtlı kalmıştır. Ancak görülmektedir ki EBF ile EABF değerleri küçük atom numaralı elementler için davranış itibariyle benzemektedirler. Büyük atom numaralı elementlerde aralarındaki fark açılmakta ancak EBF ve EABF değerlerinin enerjiye göre davranışı değişmemektedir.

Demir için 10 MeV enerjili fotonlar için literatürde bildirilen EBF değerleri ile bu çalışmada bulunan değerlerin karşılaştırılması Tablo 4.10'da yapılmaktadır.

Tablo 4.10 Demir için 10 MeV enerjili fotonlar için EBF değerleri kıyaslaması

mfp	ANSI (1991)	Chibani (2002)	Kitsos (1996)	Hirayama (1995)	Shimizu (2002)	Schirmers (2006)	Bu Tez
1	1.33	1.53	1.367	1.51	1.51	1.41	1.48
2	1.59	1.96	1.645	1.93	1.92	1.8	1.87
5	2.5	3.34	2.629	3.27	3.23	2.98	3.20
10	4.69	6.61	5.008	6.14	6.07	5.41	6.26
40	47.6	73.6	-	60	61	-	64.80

Demir için 100 keV fotonlar için literatür değerleri ile MCNP’de hesaplanan değerlerin kıyaslanması Tablo 4.11’de verilmektedir.

Tablo 4.11 Demir için 100 keV enerjide EBF karşılaştırması

mfp	ANSI	Kitsos	Chibani	Hirayama	Shimizu	Schirmers	Bu Tez
1	1.40	1.535	1.58	1.39	1.39	1.41	1.58
2	1.61	1.949	1.96	1.62	1.60	1.72	2.00
3	1.78	2.355	-	1.79	1.78	2.04	2.39
5	2.07	3.224	3.18	2.10	2.06	2.64	3.24
10	2.61	6.018	5.83	2.66	2.60	4.35	6.18
40	42.3	-	69.9	45.1	42.0	-	79.2

Kurşun için literatür değerleri ile bu çalışmada MCNP’den bulunan değerlerin kıyaslaması Tablo 4.12 ve 4.13’de yapılmaktadır. Kurşun elementi için ANSI’den

elde edilen EBF deęerleri dūřuk enerjilerde bir miktar farklıken, yūksek enerjilerde bu tezdeki deęerlere yakınsamaktadır.

Tablo 4.12 Kurşun için 100 keV fotonlar için EBF değerleri kıyaslaması

mfp	ANSI	Chibani	Hirayama	Shimizu	Bu Tez
1	2.04	2.57	2.17	2.15	2.61
2	3.39	4.14	3.53	3.47	4.25
3	5.60	-	5.57	5.48	6.71
5	17.0	17.6	14.8	14.5	18.1
10	320	297	243	237	320

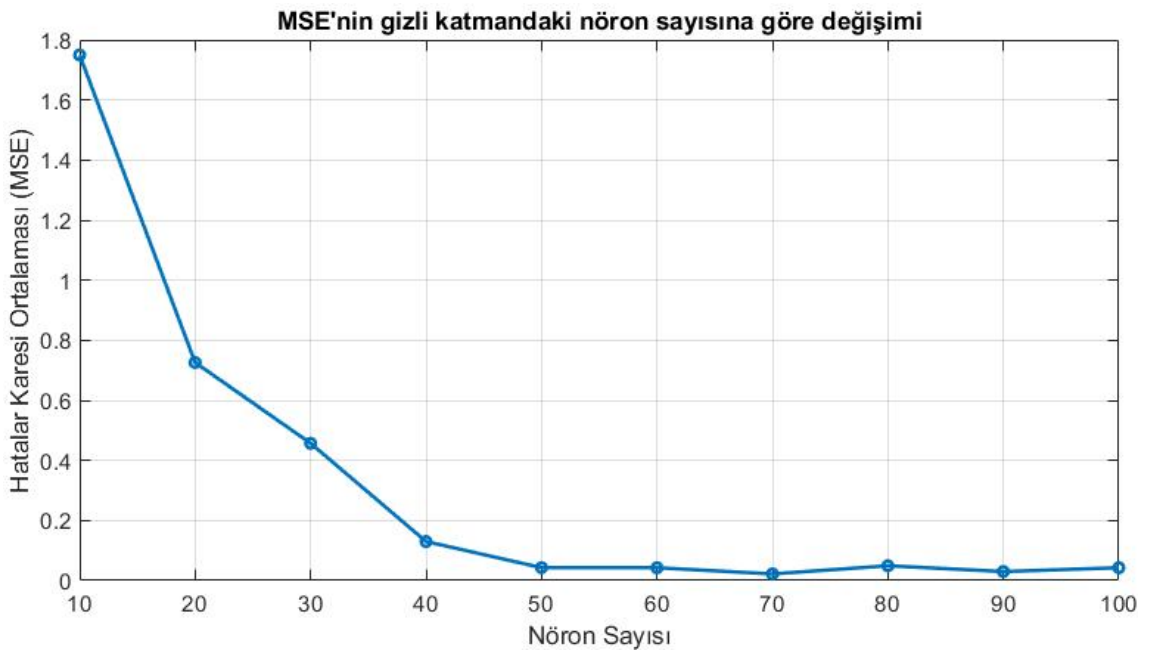
Tablo 4.13 Kurřunun 10 MeV’de hesaplanan EBF’leri ile literatūr kıyaslaması

mfp	ANSI	Chibani	Hirayama	Shimizu	Bu Tez
1	1.51	1.56	1.57	1.55	1.48
2	2.01	2.05	2.04	2	1.95
3	2.64	-	2.59	2.51	2.53
5	4.45	4.17	4.04	3.89	4.2
10	15.4	12.9	12	11.4	14.2
40	12200	10000	7650	6870	11178

4.3 Yapay Sinir Ağları

MCNP'den 37 element için, 16 farklı enerjide ve 10 ayrı mfp noktasının her birisi için EBF ve EABF değerleri belirlendikten sonra bu sonuçları YSA algoritmasına öğretmek için kaynak enerjisi (keV cinsinden), atom numarası ve mfp değerleri girdi değişkenleri olarak belirlenmiştir. Çıktı değişkeni olarak ise EABF ve EBF kullanılmıştır. Verilerin ön işlenmesi adına enerji ve BF değerlerinin doğal logaritması alınmıştır. Doğal logaritması alınmış olan verilerden sonra aktivasyon fonksiyonu ve verilerin nasıl ölçeklendirileceği seçimi aşamasında önce girdi verileri sigmoid aktivasyon fonksiyonu ile birlikte $[0,1]$ aralığına ölçeklendirilmiştir. İkinci sırada ise tanh aktivasyon fonksiyonu ile $[-1,1]$ aralığında sunulmuştur. Bu denemelerin sonucunda diğer değişkenler sabitken tanh aktivasyon fonksiyonunun daha iyi çalıştığı tespit edilmiş ve bundan sonraki adımlarda kullanılmıştır.

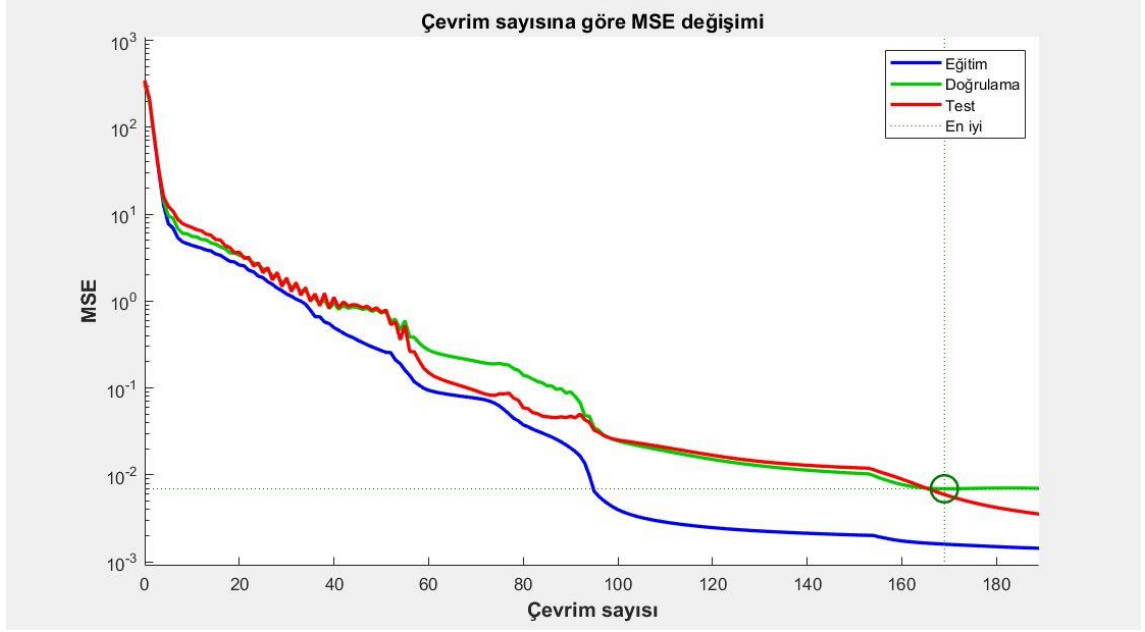
YSA modelinin kurulmasına önemli bir parametre olan gizli katman sayısının belirlenmesinde tek katmanlı modeller için 10 nöron ile başlanmış 100 nöron sayısına kadar MSE değerleri kaydedilmiştir. Eğitim aşamasında girdilerin %70'i eğitim kümesi, %15'i doğrulama kümesi, %15'i de test kümesi olarak kullanılmıştır. Nöron ve katman sayısı tayininde hiperbolik tanjant aktivasyon fonksiyonu ve LM öğretim algoritması kullanılmıştır. Tek katmanlı modeller için elde edilen eğitim MSE sonuçları Şekil 4.9'da verilmektedir.



Şekil 4.9 Tek gizli katmanlı YSA için katman sayısına karşılık MSE grafiği

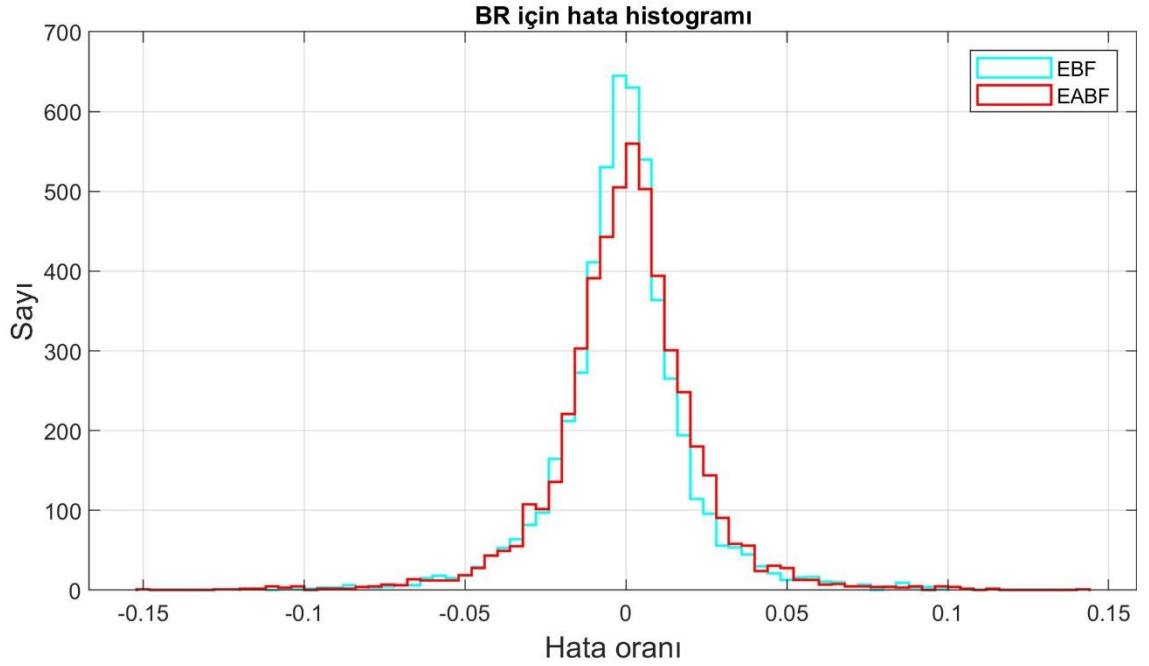
Buradan görülebileceği üzere modelin nöron sayısı artırıldıkça daha düşük hata değerleri vermektedir. Ancak 50 nöron sayısından sonra azalma eğilimi bir doyuma ulaşmış olarak görülmektedir. Buradan hareketle bir sonraki aşamada iki gizli katmanlı modeller denenmiştir. İkinci katmanda 50 nöron sayısı sabit tutulmuş ilk katmandaki nöron sayısı değiştirilmiştir. Bu denemeler sonrasında iki katmanlı ve katmanlarda sırasıyla 25 ve 50 nöron en uygun değerler olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde işlem üçüncü katman için de tekrarlanmış ve üç katmanlı olarak en uygun mimari sırasıyla 10-25-50 nöron içeren üç gizli katmanlı YSA olarak belirlenmiştir. Üretebilecekleri en iyi modellerin hata oranları karşılaştırılabilir olsa da BR algoritmasının LM algoritmasından daha yavaş olduğu bilinmektedir [71]. Buradan hareketle optimizasyon işlemini kısaltmak adına LM ile en uygun değerleri bulunan değerler BR için de kullanılmıştır.

En son olarak değerlendirmeye alınan nihai modeller için LM ve BR algoritmalarından EBF ve EABF için en düşük hata değerini veren model seçilmiştir. BR modeli LM modeline nazaran daha uzun eğitim gerektirmesine rağmen, daha az hata ile sonuçlar üretmiştir. Nihai modellere ait eğitim sürecindeki MSE değerlerinin eğitim süreci boyunca değişimi Şekil 4. 10'da verilmektedir.



Şekil 4.10 LM algoritması için çevrim sayısı ile MSE değişimi

Elde edilen modelde yapılan hatalar logaritması alınan değerler üzerinden hesaplandığı için bu değerleri bir de gerçek değerlerden sapma olarak ölçmek üzere sonuçlara üstel dönüşüm uygulanmış ve elde edilen sonuçlar gerçek değerler ile karşılaştırılarak elde edilen hata histogramı Şekil 4.11'te verilmektedir.



Şekil 4.11 BR modeli için gerçek değerler ile öğrenilen değerler arasındaki fark

Görülebileceği üzere elde edilen sonuçlardaki hatalar yaklaşık olarak bir normal dağılım göstermektedir ve %68'i yüzde 2 hatadan daha düşük hata ile belirlenmiştir. Bulunan değerlerin %99.7'si yüzde 6'dan daha düşük hata ile belirlenmiştir. Tüm veriler içinde ortalama hata %1.4 olarak bulunmuştur. Bu durumda modelin öğrenme işlemini yerine getirdiği sonucu çıkarılabilir. Tespit edilen en yüksek hatalar %15 dolaylarındadır. Elementler için Tablo 4.14'te MCNP sonuçları ile YSA tarafından tahmin edilen EBF sonuçları arasındaki ortalama hata ve en yüksek hataları verilmektedir.

Tablo 4.14 YSA ile tahmin edilen EBF'lerin ortalama ve en yüksek hataları

Atom No	Ortalama mutlak hata	En yüksek Hata	Enerji (keV)	mfp
4	1.30%	15.40%	20	40
5	1.30%	12.30%	15	40
6	1.50%	13.00%	30	25
7	1.20%	8.20%	80	25
8	1.30%	7.40%	80	25
10	1.40%	11.00%	90	40
12	1.30%	8.50%	500	20
13	1.40%	14.08%	200	40
14	1.80%	7.08%	100	40
16	1.70%	12.80%	100	40
18	1.60%	9.10%	40	40
20	1.60%	9.78%	60	40
22	1.70%	15.20%	200	15
24	1.50%	4.00%	1000	30
26	1.20%	6.00%	15	10
29	1.50%	8.64%	500	40
32	1.40%	10.20%	500	40
35	1.60%	6.20%	4000	40
38	1.50%	14.40%	200	40
41	1.50%	8.80%	100	40
44	1.30%	6.80%	60	40
47	1.40%	7.20%	500	40
50	1.40%	6.06%	100	5
53	1.30%	6.03%	10000	15
56	1.00%	4.60%	200	40
60	1.30%	5.50%	1000	30
64	1.30%	8.02%	100	40
69	1.50%	5.50%	100	30
74	1.60%	6.30%	125	40
79	1.00%	6.11%	20	40
82	1.20%	5.70%	30	40
90	1.60%	8.10%	50	20
92	1.70%	6.76%	50	20

En yüksek hata veren değerler modelde eğitim kümesinde az sayıda veri ile temsil edilen yüksek atom numaralı elementlerin soğurma kabuğu enerjilerine yakın değerlerin yüksek nüfuz kalınlıklarındadır. Ayrıca YSA ile yapılan eğri oturtma işlemlerinin genel karakteri gereği çoğunlukla sınır değerlerde daha ziyade bir sapma meydana gelmektedir. Bundan dolayı yüksek mfp'lerdeki hataların diğerlerinden daha yüksek olduğu gözlenmektedir.

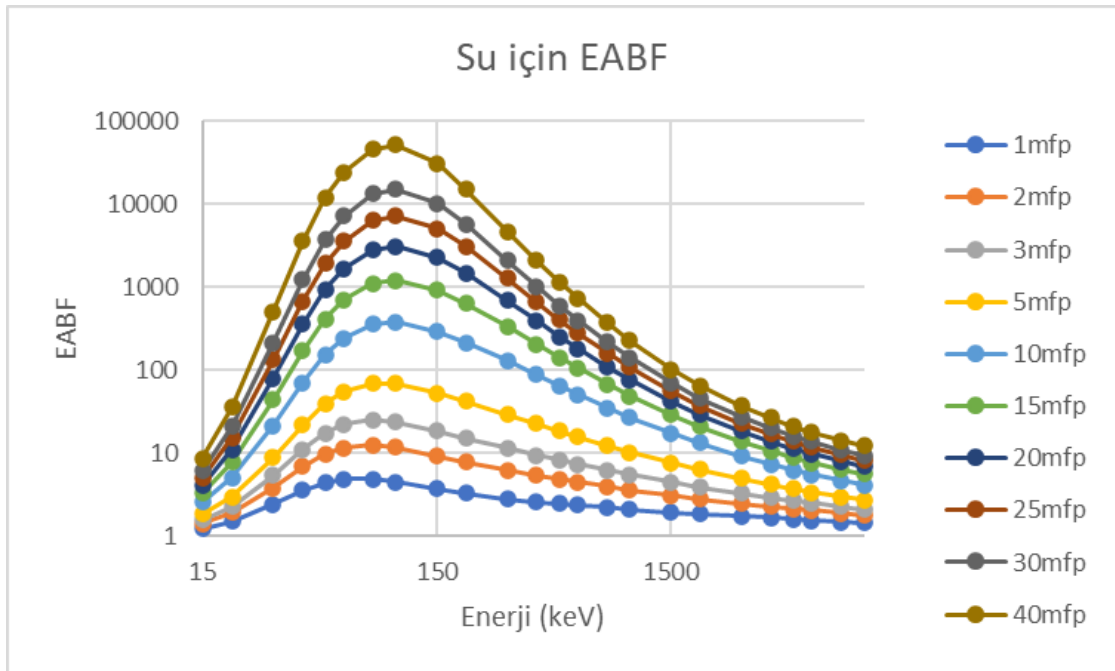
Seçilen modellere ait nihai parametreler Tablo 4.15'te verilmektedir.

Tablo 4.15 BR ve LM algoritmaları için temel parametreler

BR modeli için önemli parametreler		LM modeli için önemli parametreler	
Eğitim Parametresi	Değeri	Eğitim Parametresi	Değeri
Toplam çevrim sayısı	1000	Toplam çevrim sayısı	1000
Zaman kısıtı	Sonsuz	Zaman kısıtı	Sonsuz
Hata hedefi	0	Hata hedefi	0
En düşük gradyan	1E-07	Durmadan önce doğrulama sayısı	6
Öğrenme katsayısı	0.005	En düşük gradyan	1E-07
Azaltma oranı	0.1	Öğrenme katsayısı	0.005
Artırma oranı	10	Azaltma oranı	0.1
En yüksek öğrenme katsayısı	1E+10	Artırma oranı	10

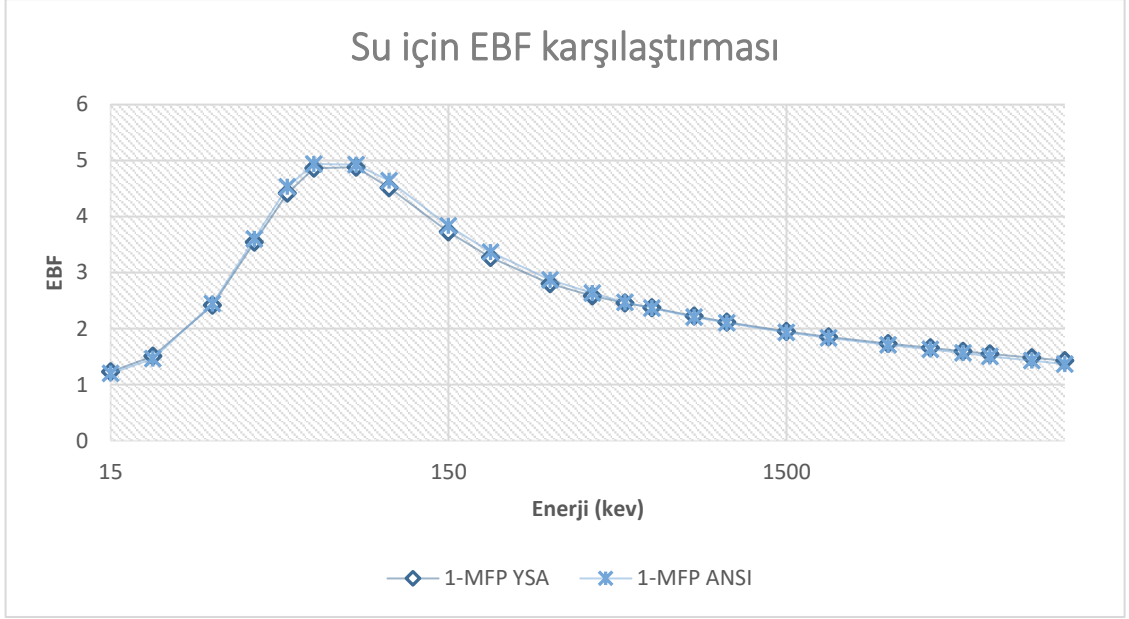
4.4 Bileşik ve Karışımlar için Buildup faktörü

Su için YSA'dan elde edilen EABF değerleri toplu halde Şekil' 4.12'de gösterilmektedir. EABF değerleri Compton saçılmasının en etkili olduğu bölgede yüksek değerlere çıkmaktadır. 40 mfp malzeme kalınlığında ise en yüksek değerine ulaşmaktadır. Daha küçük malzeme kalınlıklarında ise daha küçük değerler almaktadır. YSA'dan elde edilmiş olan verilerin son derece düzgün ve sürekli eğriler üretmiş olması aslında öğrenme sürecinin başarısını ortaya koymaktadır.



Şekil 4.12 Su için EABF değerleri

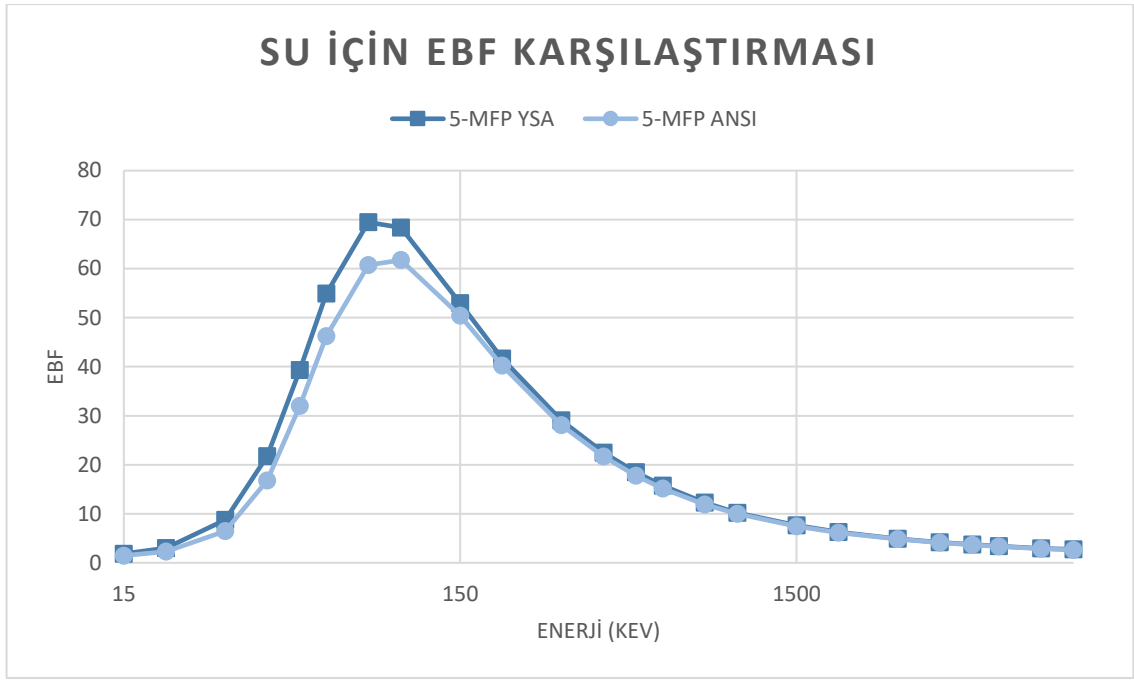
Su için elde edilen 1 mfp malzeme kalınlığındaki EBF değerleri Şekil 4.13'te gösterilmektedir.



Şekil 4.13 Su için 1 mfp’de EBF değerleri karşılaştırması

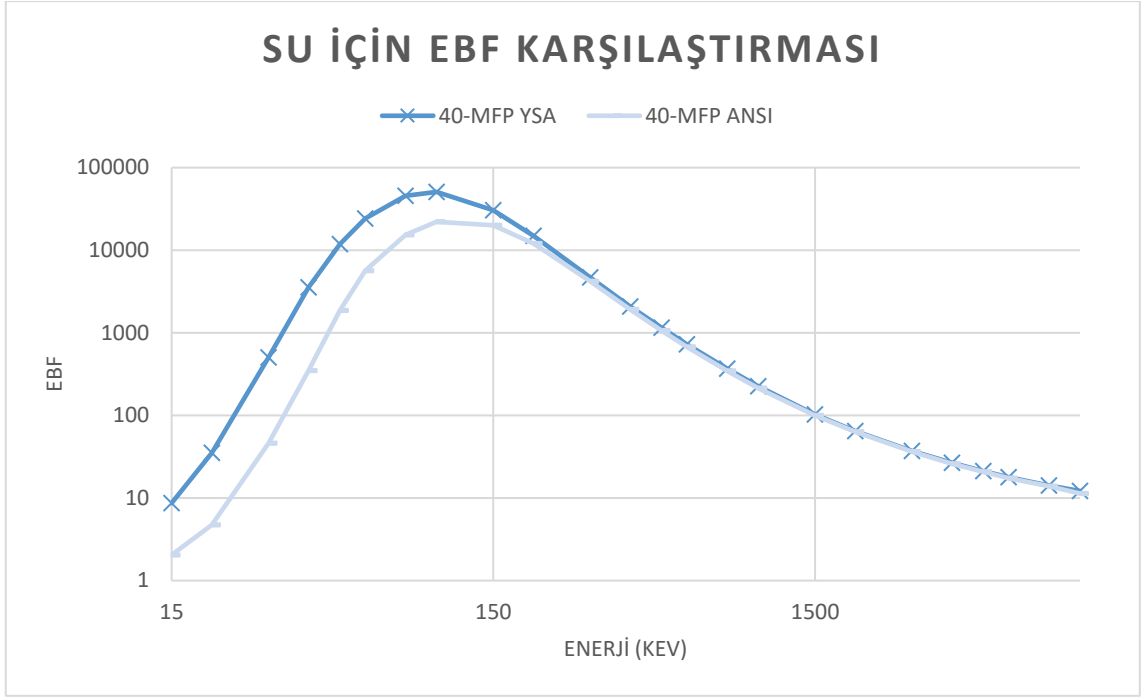
Su için 1 mfp kalınlıkta BXCOM değerleri ile YSA değerleri arasında tam bir uyum gözlenmektedir. Compton saçılmasının etkisinin en belirgin olduğu 30 keV ile 200 keV enerjiler arasında, gelen foton çoklu saçılmalara uğramakta ve EBF değerleri daha 1 mfp kalınlıkta bile 5 değerine ulaşmaktadır. Burada 1 mfp kalınlıkta etkileşmeyen radyasyon şiddetinin 1/e oranında azaldığı hatırlanırsa, esasında buildup faktörünün etkisi anlaşılacaktır. Burada 40 keV ile 200 keV arasındaki foton enerjileri için ortamda suyun bulunması gamaları durduraktan ziyade, daha fazla maruz kalmanın göstergesidir. Yüksek enerjili fotonlar için aynısını söylemek mümkün değildir çünkü onların EBF değerleri e sayısından küçüktür. YSA ile ANSI verileri arasındaki uyum benzer şekilde 2 ve 3 mfp kalınlıklarda da gözlenmektedir.

Su için 5 mfp malzeme kalınlığındaki YSA ve ANSI verileri karşılaştırılması Şekil 4.14’de gösterilmiştir. Bu kalınlıkta düşük enerjilerde EBF değerleri arasında ayrışma belirgin hale gelmiştir. Bunun nedeni olarak buildup hesaplamasında kullanılan metodoloji farkından ileri gelmektedir. Öncelikle MCNP’de dikkate alınan bağlı elektron Compton saçılmasına karşılık ANSI verilerinde serbest elektrona ait Compton saçılma tesir kesiti kullanılmıştır. Bundan ötürü saçılmaların tesir kesitleri farklıdır ve bu düzeltme ANSI verilerinde yapılmadığı için foton akısında bilhassa düşük enerjilerde farklı sonuçlar türetmektedir.



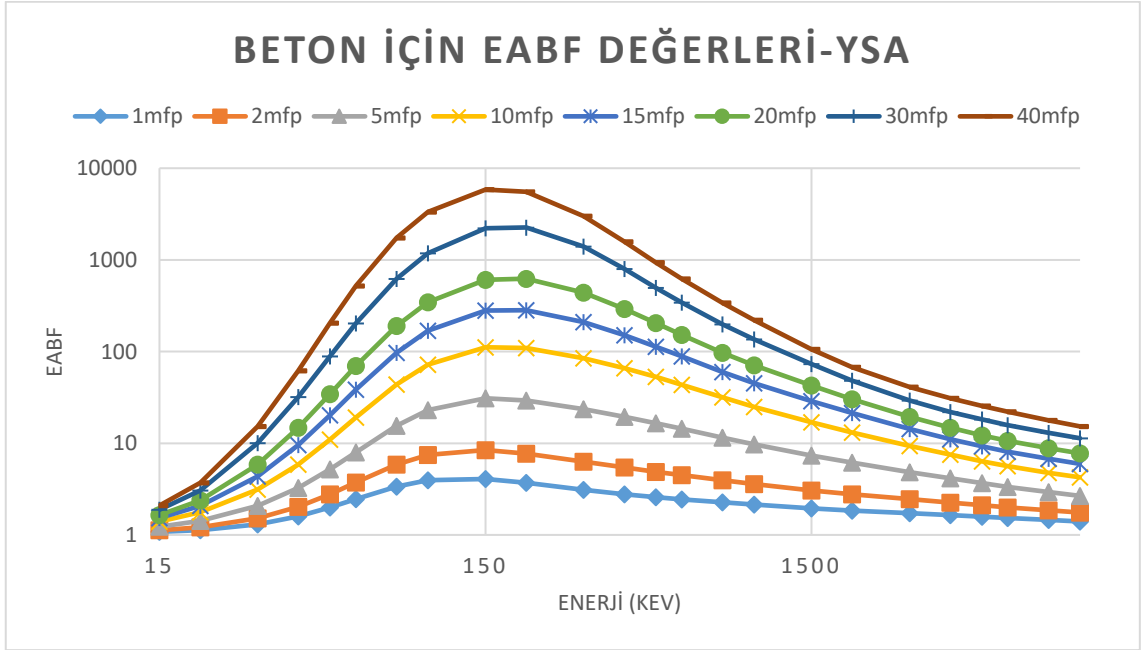
Şekil 4.14 Su bileşiğinin 5 mfp için EBF değerleri kıyaslaması

Su için 40 mfp’de YSA ve ANSI verilerinin karşılaştırılmasını Şekil 4.15’de sunmaktayız. Burada iki değer arasındaki fark açıkça ortaya çıkmıştır. Bilhassa 150 keV’den küçük enerjilerde aralarında 2.5 kata kadar fark oluşmaktadır. Bu izaha ihtiyaç duyan durumu açıklamak üzere daha önceden bahsedilen iki etkileşimi hatırlamak gerekecektir. Öncelikle ANSI datasında Compton etkileşimi, serbest elektrona ait tesir kesiti üzerinden yapılmış olup, atomik etkileri dışlamaktadır. Bunun önüne geçmek için standart içinde bağlı elektron düzeltmesi uygulanmasını önermektedir. Bu düzeltme çarpanı 100 keV enerji için 5 mfp kalınlıkta 1.07, 10 mfp malzeme kalınlığında ise 1.28 olarak belirtilmiştir. 40 mfp için düzeltme çarpanı bildirilmemiş olsa da çarpanın yüksek bir değer alacağı aşıkardır. Bunun yanında ANSI verilerinde kullanılan mfp’ler Rayleigh saçılma tesir kesiti eksik olarak hesaplanmıştır. Bu da yüksek farkın gözlendiği 40 mfp kalınlık için büyük bir farka yol açmaktadır. 35 mfp’de hesaplanan YSA değeri ile 40 mfp’de hesaplanan ANSI değerleri arasındaki fark yüzdesi azalmaktadır.



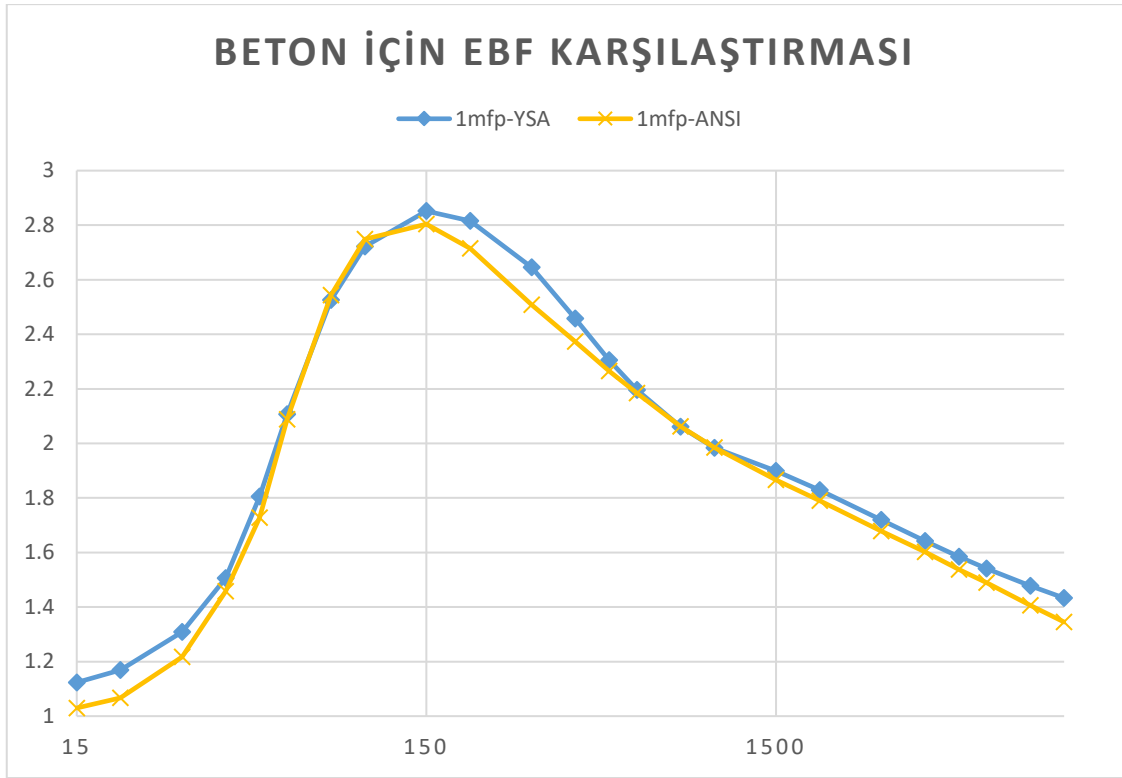
Şekil 4.15 Su bileşiğinin 40 mfp için EBF değerleri kıyaslaması

Standart beton için YSA ile elde edilen EABF değerleri Şekil 4.16’da verilmiştir.



Şekil 4.16 Standart beton için seçilen mfp’lerde EABF değerleri

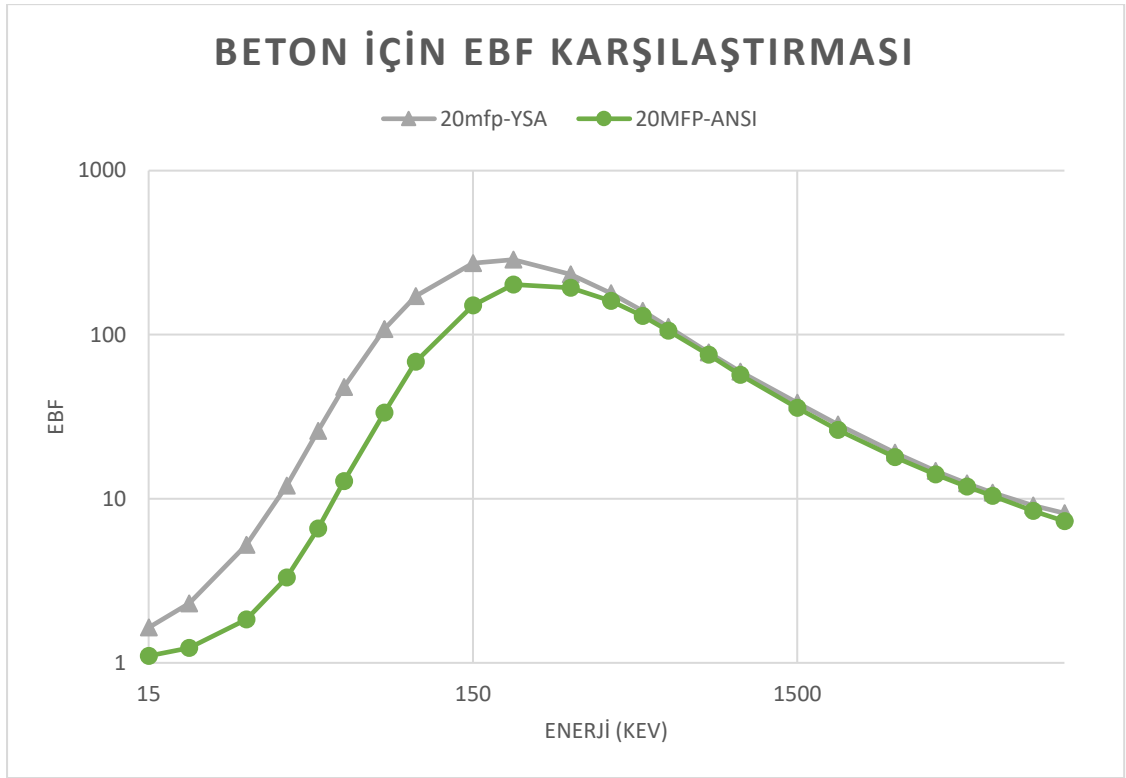
Standart beton için 1 mfp’de YSA sonuçlarından bulunan EBF değerleri ANSI değerleri ile birlikte Şekil 4.17’de verilmiştir.



Şekil 4.17 Standart beton için 1 mfp’de YSA ve ANSI değerleri

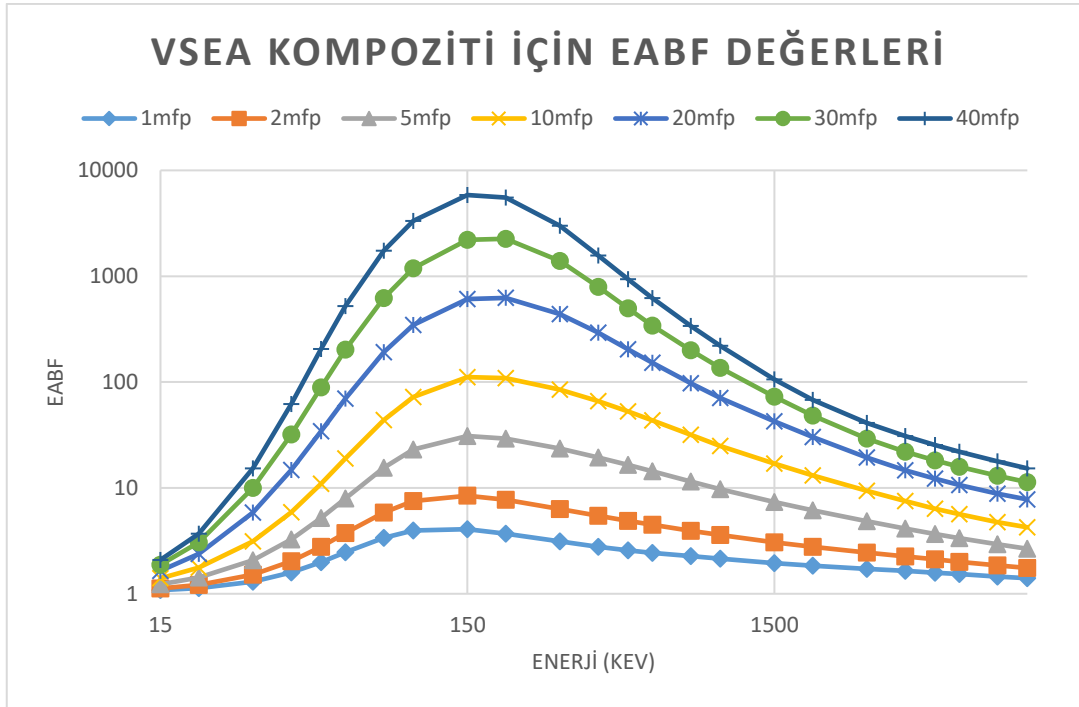
Şekil 4.18’de görülebileceği üzere beton için 1 mfp’de değerler yakın sonuçlar vermektedir. YSA sonuçlarının bir miktar daha yüksek olması da sudakine benzer şekilde yorumlanabilir ve fark bağlı elektron düzeltmesine atfedilebilir.

Betona ait 20 mfp’deki EBF değerleri Şekil 4.21’de gösterilmektedir. Burada 20 mfp derinlikte farkların düşük enerjilerde belirgin olmasına karşın yüksek enerji değerlerinde uyum yüksektir.



Şekil 4.18 Standart beton için 20 mfp'de YSA ve ANSI değerleri

Vanadyum slag/epoksi/antimon camı kompoziti için EABF değerleri şekil 4.19'de verilmektedir.

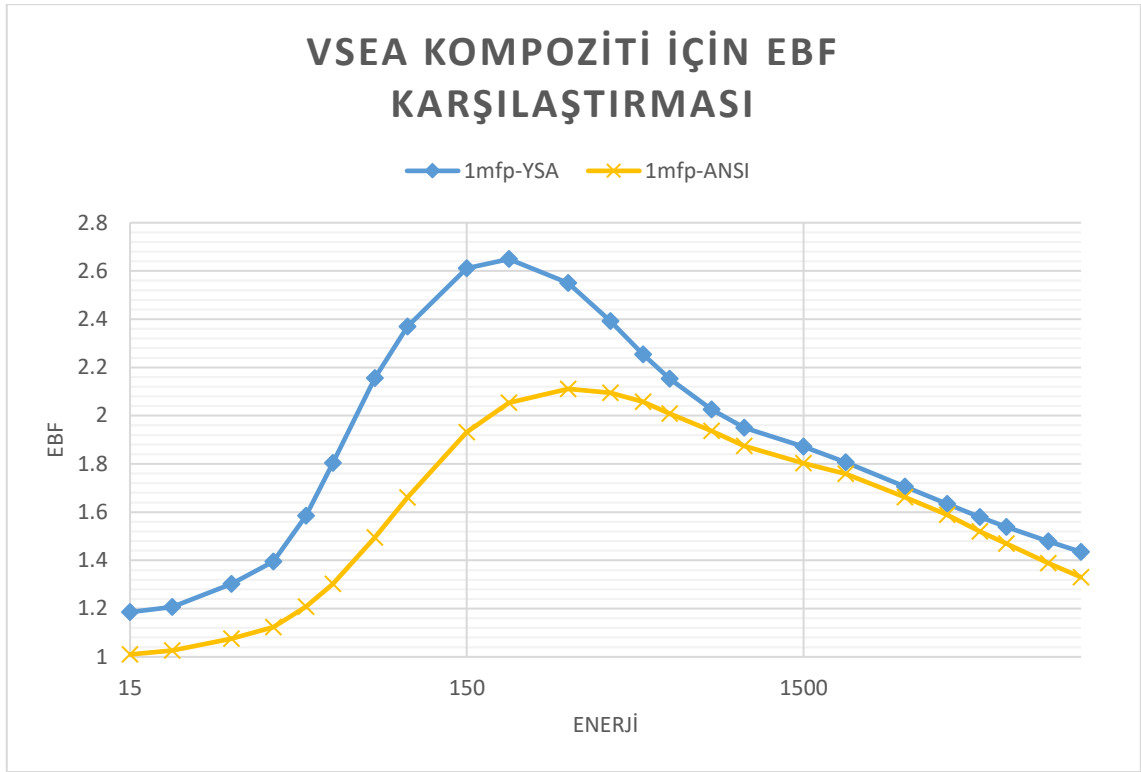


Şekil 4.19 VsEA için 1-40 mfp arası EABF değerleri

Burada da EABF deęerleri en dūřuk enerjilerde 1'e yakın deęerlerden bařlamakta, oklu Compton saılımlarının etkisi ile orta enerjilerde yūksek deęerlere ulařmaktadır. En yūksek enerjilerde ise tekrardan bir dūřuř gōstermektedir.

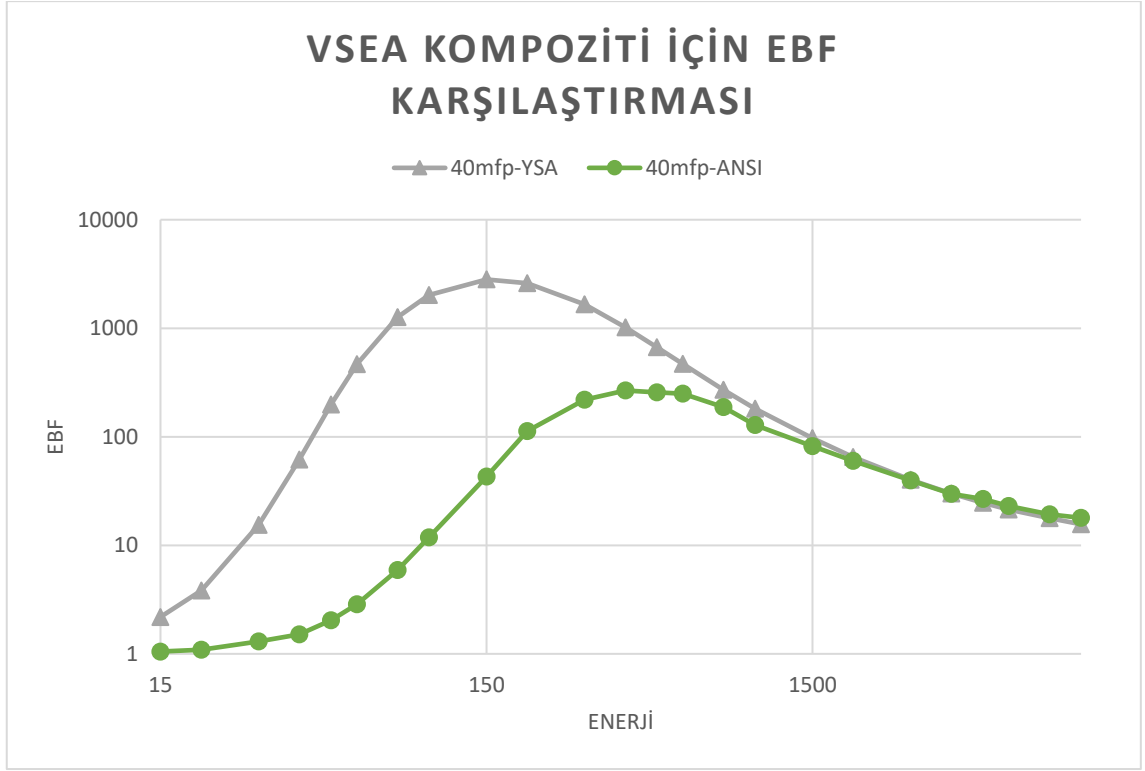
VsEA materyali için YSA ile hesaplanan EBF değerleri ile BXCOM'dan GP fit ile bulunan EBF değerleri 1 mfp malzeme kalınlığı için şekil 4.20'de gōsterilmiřtir. Bulunan değerler arasındaki fark oldukça özellikle dūřuk enerjiler için oldukça yūksektir. Bu farklılığın oluşması için sōylenebilecek şeylerden ilki karışımların enerji bōlgelerine gelen eşdeğer atom numaraları ile açıklanabilir.

Dūřuk enerjilerde ($E < 100$ keV) ANSI datası Rayleigh saçılmasını ve baęlı elektron dūzeltmesini gōz ardı ettięinden dolayı farklar meydana gelmektedir. Bu farkların özellikle en dūřuk enerjilerde olmasının bir bařka sebebi de hesaplarda kullanılan foton akısının mahiyetinden kaynaklanmaktadır. Bu alıřmamızda fotonları 1keV enerjiye kadar takip ederken, ANSI deęerleri hesaplanırken 10 keV enerji sınır deęer olarak belirlenmiřtir. Bu yūksek enerjilerde kayda deęer bir farklılık oluřturmasa da dūřuk enerjili kaynak parçacıklar için ortaya dikkate deęer bir fark çıkmaktadır. Yūksek enerjilerde farkların az olmasının sebebi ihmal edilen Rayleigh saçılması ile Compton için baęlı elektron dūzeltmesinin 1 MeV enerjiden itibaren birbirinin tersi řekilde çalıřması ve etkilerin birbirini gōtūrmesi sebebiyledir [12].



Şekil 4.20 VsEA kompoziti için 1 mfp’de YSA ile ANSI arasındaki karşılaştırma

VsEA için 40 mfp kalınlıktaki EBF değerleri birlikte Şekil 4.25’te verilmiştir. Burada 1mfp için gözlenen farkların çok daha ileri boyutta olduğu gözlenmektedir. Rayleigh saçılması ve Compton etkileşiminin etkisi açıkça ortaya konmaktadır. Burada söylemek gerekir ki incelenen bileşiklerde çok yüksek atom numaralı katkılar olmadığı için düşük enerjilerdeki karşılaştırmalar değer olarak farklı olsa da davranış olarak benzer değişim göstermektedir. Bileşiklerde L kabuğu enerjisi 15 keV’i geçen atom numarası 70’in üzerinde element bulunması halinde buradaki farklara bir de L kabuğu etkisi eklenecek ve farklar daha da büyüyecektir [1].



Şekil 4.21 VsEA kompoziti için 40 mfp’de YSA ANSI arasındaki karşılaştırma

Gösterilen sonuçlara göre bulunan EBF değerlerinin oldukça düzgün ve sürekli fonksiyonlar ürettiği gözlenmiştir. Bu anlamda ANSI verileri ile aralarındaki farkların yüksek (10 katı geçen) olmasına rağmen BF davranışlarının benzer olması açıklandığı üzere hesaplama metodolojisindeki farklılara dayandırılmıştır.

5

SONUÇ VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Bu tezde bileşik ve karışımlar için buildup faktörlerinin yapay sinir ağları ile modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Yapay sinir ağlarına öğretilecek verileri sağlamak üzere MCNP 6.2'de atom numaraları 4 ile 92 arasında değişen toplam 37 element için, 1 ortalama serbest yoldan 40 ortalama serbest yol malzeme kalınlığına kadar, 15 keV ila 10 MeV kaynak foton enerjilerine denk gelecek şekilde simülasyonlar çalıştırılmıştır. Bu simülasyonlarda form faktörü ile düzeltilmiş Rayleigh saçılması, atomik kabuk etkileri dahil edilmiş Compton saçılması, K ve L kabuklarının flüoresans etkilerinin dahil edildiği fotoelektrik olay ve çift oluşumu dahil edilmiştir. Bu detaylı simülasyon sonucu elde edilen veri kümesi, önce literatürdeki çalışmalarla karşılaştırılmış, hesaplanan değerler ile büyük oranda uyum tespit edilmiştir. Uyumun daha az ve farkların yüksek olduğu çalışmalarda uyumsuzluğun sebepleri irdelenmiştir. Özellikle bu tezdeki ile benzer bir yöntem kullanan Chibani [12] çalışması ile uyum son derece yüksek bulunmuştur. Aradaki küçük farklar ise kullanılan tesir kesiti kütüphanelerindeki farklardan ve Bremsstrahlung yayılımı için kullanılan farklı algorithmadan kaynaklanmaktadır. Diğer çalışmalardaki farklı yöntemler ile hesaplanmış olan değerler için ise bu farkların oluşmasındaki en büyük role sahip olan etmenler açıklanmıştır.

Elde edilen EBF ve EABF değerleri yapay sinir ağları algoritmasına enerji, ortalama serbest yol ve atom numarası girdi değişkenleri, EBF ve EABF değerleri hedef değişkenleri olarak tanımlanmıştır. Yapay sinir ağlarının öğrenme sürecine başlamadan önce veriler ön işleme sürecine tabii tutulmuştur. Öncelikle enerji ve BF değerlerinin doğal logaritması alınmıştır. Ardından verileri uygun formatta yapay sinir ağlarına sağlamak adına, standardize etmenin 0,1 aralığına

ölçeklendirmeye göre daha başarılı sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Yapay sinir ağları modelinin parametrelerinin uygun hale getirilmesinde adım adım ilerlenmiş, önce en uygun tek katmandaki nöron sayısı, ardından en uygun ikili katmanlar belirlenmiş ve nihayetinde üç katmandan oluşan ve sırasıyla 10, 25, 50 nöronlardan oluşan modellerin en başarılı sonuçları verdiği görülmüştür. Öğrenme algoritması olarak denenilen LM ve BR algoritmalarından, LM algoritması daha hızlı öğrenme sürecini tamamlamasına rağmen, BR algoritması daha dengeli ve daha düşük hata payına sahip sonuçlar üretmiştir, ki bu da literatürde belirtilen ile uyumludur. Elde edilen nihai modellerde hataların kareleri ortalaması değeri 0.005 düzeyinde bulunmuştur. Aynı zamanda elde edilen modellerin öğrenme ve deneme aşamasındaki korelasyon katsayısı 0.999'un üzerinde bulunmuştur. Buradan hareketle kurulan modellerin yeterince iyi kurulduğuna kanaat getirilmiştir. Elde edilen verilerin ön işleme süresince yapılan doğal logaritma dönüşümlerinin geri alınmasıyla elementler için MCNP'den hesaplanan BF değerleri ile yapay sinir ağlarından elde edilen değerlerin aralarındaki yüzdelik hataları için ortalaması 0 olan bir standart dağılım elde edilmiştir. Mutlak yüzdelik hataların ortalaması yüzde 1.4 olarak bulunmuştur. Bulunan hataların en yüksek değeri yüzde 15 olup, değerlerin yüzde 99.7'si yüzde 6'dan daha az hataya sahiptir. Literatürde en sık kullanılan ve diğer fit fonksiyonlarına üstünlüğü defalarca gösterilmiş olan G-P fit fonksiyonu için de benzer düzeyde sapmalar görülmektedir. Bu anlamda yapay sinir ağlarının BF değerlerini modelleme gücünün G-P fit metoduyla benzer olduğu sonucu çıkarılabilir [1, 19]. Burada belirtmek gerekir ki, yapay sinir ağlarını eğitmek de sonrasında sonuçları elde etmek de G-P fit fonksiyonuna göre daha hızlı olacaktır.

Son olarak, eğitim süreci tamamlanan modellere bileşik ve karışımların BF değerleri tahmin ettirilmiştir. Buradan elde edilen sonuçlar BXCOM sonuçları ve diğer literatür değerleri ile karşılaştırılmıştır. Buna göre, düşük enerjilerde ($<60\text{keV}$), özellikle yüksek mfp'lerde bu çalışmada elde edilen değerler ile BXCOM sonuçları arasında kayda değer farklılıklar gözlenirse de yüksek enerjilerde yüksek bir uyum gözlenmiştir. Ayrıca yapay sinir ağlarından elde edilen BF değerlerinin MC simülasyonu ile elde edilmiş olan diğer literatür değerleri arasında 20 mfp'ye kadar yüzde 5, 40 mfp'ye kadar ise yüzde 15 dolaylarında

farklar mevcuttur. Denilebilir ki, en yüksek hataların olduğu 15 ile 100 keV arasındaki bölgedeki farklar, yüksek atom numaralı elementler için Rayleigh saçılmasının dâhil edilmesine ve Compton tesir kesitinin bağlı elektron düzeltmesine bağlanabilir. Ayrıca çok yüksek atom numaralı ($Z > 70$) elementler için L kabuğundan kaynaklanacak flüoresans fotonlarını hesaba dâhil etmenin de gerekli olduğu değerlendirilmektedir. L kabuğundan gelecek olan fotonların alınmadığı durumda örneğin kurşun elementi için EABF değerlerindeki farklar 300 kat kadar yüksek olmaktadır. Bu bağlamda eğer L kabuğunun hemen üzerinde enerjiler içeren kaynak fotonu mevcutsa L kabuğu flüoresans etkisinin dahil edilmesinin gerektiği sonucu çıkarılabilir.

Bu bilhassa yüksek eşdeğer atom numaralı bileşikler için doğru görünmekle birlikte düşük eşdeğer atom numaralı bileşiklerde de 40 mfp derinlikte 10 kata kadar farklar bulunmuştur. Belirtmek gerekir ki, yüksek mfp'lerdeki ayrışmanın bir sebebi de ANSI-ANS verilerindeki mfp hesabının Rayleigh saçılması olmadan yapılmış olmasıdır [7]. Bundan ötürü, ANSI verileri için hesaplanan mfp değerleri koherent saçılma hariç tesir kesiti üzerinden bulunmuştur. Koherent dahil tesir kesiti ile hariç tesir kesiti arasındaki yüzde 3'lük bir fark varsa bu 40 mfp hesabında buildup değerleri arasında 12.64 kat bir farka denk gelecektir.

Bu anlamda esasında mfp üzerinden değil de gerçek fiziksel uzunluklar üzerinden hesap yapıldığında gidiş yolları farklı olsa da elde edilen sonuçların çok yakın çıkacağı beklenmektedir. Bu durumda ortadaki farkların esasında ilk başta görülen kadar yüksek olmadığı anlaşılmaktadır. Bu çalışma sayesinde belirlenen buildup faktörlerinin elementler içim koherent saçılma düzeltmesi çarpanına ihtiyaç duymadan kullanılabilmesi sağlanmıştır. Ayrıca su ve beton dışındaki karışım ve bileşikler için de bağlı atom düzeltmesi hesapların içine dahil edilmiş olup, bu anlamda geniş kapsamlı ilk çalışmadır.

Bu tez çalışmasından elde edilen nihai sonuç ise elementlere ait buildup faktörleri ile eğitilen yapay sinir ağlarının bileşik ve karışımlara ait buildup faktörlerini yüzde 10'un altında hata ile ve anlık bir şekilde belirleyebileceği olmuştur. Bu çalışma sayesinde belirlenen buildup faktörleri endüstriyel uygulamalarda, nükleer tesislerde ve yüksek aktiflikte kaynaklar ile çalışılan diğer alanlarda ortam

izleme ile radyasyonun doz dağılımı klasik zırhlayıcı malzemelerin yanı sıra yeni tip malzemeler için de belirlenebilecektir.

5.2 Öneriler

Çalışmanın sonucunda elde edilen BF değerleri bileşik ve karışımlar için 40 mfp malzeme kalınlığına sonuçlar. Ancak daha yüksek nüfuz derinlikleri için model eğitilememiştir. Ayrıca 30 mfp kalınlıktan sonraki değerlerin 1 standart sapma güven aralığındaki istatistiki hataları yüzde 10'un altında olana kadar simülasyonlar çalıştırıldığından, bu aralıktaki sonuçların güvenilirliği daha düşüktür. Buradan hareketle yüksek mfp'ler için hesapları hızlandıracak yeni varyans düşürme metotları uygulayarak daha güvenilir sonuçlar elde edilebilir.

Ek olarak, bu çalışmada 37 adet saf elemente ait buildup değerlerini bulmak için kaynak fotonların enerjileri 15 keV ile 10 MeV arasında 16 enerji seçilmiştir. Bu aralıkta daha fazla enerji ile çalışmak ve elementlerin soğurma kabuklarına denk gelen enerjilerde daha detaylı ve ince yapıya sahip bir enerji bölmesi kullanmak, BF değerlerinin en çabuk artış gösterdiği soğurma kabuğu civarı enerjiler için daha doğru değerler bulunmasına imkân sağlayacaktır. Ayrıca veri kümesini oluştururken 37 element yerine tüm elementlere ait hesaplar yaparak tamamlanmış bir veri kümesi üzerinden daha yüksek doğrulukta ve daha kapsayıcı sonuçlar elde edilmesi planlanmaktadır.

Son olarak, BF değerleri modellenirken eşdeğer atom numarası bulunması konusunda da makine öğrenmesi metotlarından faydalanmak makul görünmektedir. Bu sayede hem sonuçların elde edilmesi daha hızlanacaktır hem de modelin ürettiği sonuçların güvenilirliği artırılabilir.

- [1] Harima, Y., An historical review and current status of buildup factor calculations and applications. *Radiation Physics and Chemistry*, 1993. 41(4-5): p. 631-672.
- [2] White, G.R., The penetration and diffusion of Co 60 gamma-rays in water using spherical geometry. *Physical Review*, 1950. 80(2): p. 154.
- [3] Goldstein, H. and J.E. Wilkins Jr, Calculations of the Penetrations of Gamma Rays. Final Report. 1954, Nuclear Development Associates, Inc.
- [4] Durani, L., Update to ANSI/ANS-6.4. 3-1991 for low-Z and compound materials and review of particle transport theory. 2009.
- [5] Ruggieri, L.P., Update to ANSI/ANS-643-1991 for high-Z materials and review of particle transport theory. 2008.
- [6] Trubey, D.K., et al., Gamma-ray attenuation coefficients and buildup factors for engineering materials. 1991.
- [7] American Nuclear Society. Working Group ANS-6.4.3. American National Standard for Gamma-ray Attenuation Coefficients and Buildup Factors for Engineering Materials. 1991: American Nuclear Society.
- [8] Shimizu, A., Calculation of Gamma-Ray Buildup Factors up to depths of 100 mfp by the method of Invariant Embedding,(I) Analysis of accuracy and comparison with other data. *Journal of nuclear science and technology*, 2002. 39(5): p. 477-486.
- [9] Shimizu, A., T. Onda, and Y. Sakamoto, Calculation of gamma-ray buildup factors up to depths of 100 mfp by the method of invariant embedding,(III) generation of an improved data set. *Journal of nuclear science and technology*, 2004. 41(4): p. 413-424.
- [10] Bozkurt, A. and N. Tsoulfanidis, Exposure buildup factors of UO₂ using the Monte Carlo method. *Nuclear technology*, 1996. 116(2): p. 257-260.
- [11] Rafiei, M.M., H. Tavakoli-Anbaran, and M. Kurudirek, A detailed investigation of gamma-ray energy absorption and dose buildup factor for soft tissue and tissue equivalents using Monte Carlo simulation. *Radiation Physics and Chemistry*, 2020. 177: p. 109118.
- [12] Chibani, O., New photon exposure buildup factors. *Nuclear science and engineering*, 2001. 137(2): p. 215-225.
- [13] Schirmers, F.G., Improvement of photon buildup factors for radiological assessment. 2006.
- [14] Hernández, G., A. Canas-Junquera, and F. Fernández, The differential build-up factor. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2019. 935: p. 69-74.

- [15] Vahabi, S. and M.S. Zafarghandi, Build-up factors for water and soft tissue by MCNP using a co-centric multilayer model: comparative study. *Journal of Instrumentation*, 2020. 15(05): p. P05018.
- [16] Ryman, J., et al., Revision of ANSI/ANS-6.4. 3. Transactions of the American Nuclear Society, 2008. 99: p. 613-614.
- [17] Reda, A. and A. El-Daly, Gamma ray shielding characteristics of Sn-20Bi and Sn-20Bi-0.4 Cu lead-free alloys. *Progress in Nuclear Energy*, 2020. 123: p. 103304.
- [18] Al-Hadeethi, Y. and S. Tijani, The use of lead-free transparent 50BaO-(50-x) borosilicate-xBi₂O₃ glass system as radiation shields in nuclear medicine. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019. 803: p. 625-630.
- [19] Harima, Y., An approximation of gamma-ray buildup factors by modified geometrical progression. *Nuclear Science and Engineering*, 1983. 83(2): p. 299-309.
- [20] Eyecioğlu, Ö., et al., BXCOM: a software for computation of radiation sensing. *Radiation Effects and Defects in Solids*, 2019.
- [21] Foderaro, A. and R. Hall, Application of three-exponential representation of photon buildup factors to water. *Nuclear Science and Engineering*, 1981. 78(1): p. 74-78.
- [22] Chilton, A., Tchebycheff-fitted berger coefficients for eisenhauer-simmons gamma-ray buildup factors in ordinary concrete. *Nuclear Science and Engineering*, 1979. 69(3): p. 436-438.
- [23] Harima, Y., et al., Validity of the geometric-progression formula in approximating gamma-ray buildup factors. *Nuclear Science and Engineering*, 1986. 94(1): p. 24-35.
- [24] Gencel, O., The application of artificial neural networks technique to estimate mass attenuation coefficient of shielding barrier. *International Journal of Physical Sciences*, 2009. 4(12): p. 743-751.
- [25] Kucuk, N., Computation of gamma-ray exposure buildup factors up to 10 mfp using generalized feed-forward neural network. *Expert Systems with Applications*, 2010. 37(5): p. 3762-3767.
- [26] Kucuk, N., et al., Modeling of gamma ray energy-absorption buildup factors for thermoluminescent dosimetric materials using multilayer perceptron neural network: A comparative study. *Radiation Physics and Chemistry*, 2013. 86: p. 10-22.
- [27] Chen, R., et al., Calculation of gamma-ray exposure buildup factor based on backpropagation neural network. *Expert Systems with Applications*, 2021. 177: p. 115004.
- [28] Singh, V.P., N. Badiger, and J. Kaewkhao, Radiation shielding competence of silicate and borate heavy metal oxide glasses: comparative study. *Journal of non-crystalline solids*, 2014. 404: p. 167-173.

- [29] Shultis, J.K. and R.E. Faw, Radiation shielding. Vol. 555. 2000: American Nuclear Society La Grange Park, Illinois.
- [30] Harima, Y., et al., New gamma-ray buildup factor data base for point kernel method and application to shielding calculation. Nippon Genshiryoku Gakkai-Shi, 1989. 31(4): p. 477-486.
- [31] Attix, F.H., Introduction to radiological physics and radiation dosimetry. 2008: John Wiley & Sons.
- [32] Shultis, J.K. and R.E. Faw, Radiation shielding and radiological protection. 2010.
- [33] Carron, N.J., An introduction to the passage of energetic particles through matter. 2006: CRC Press.
- [34] Klein, O. and Y. Nishina, Über die Streuung von Strahlung durch freie Elektronen nach der neuen relativistischen Quantendynamik von Dirac. Zeitschrift für Physik, 1929. 52(11-12): p. 853-868.
- [35] Hubbell, J.H., Review and history of photon cross section calculations. Physics in Medicine & Biology, 2006. 51(13): p. R245.
- [36] Berger, M., XCOM: photon cross sections database. <http://www.nist.gov/pml/data/xcom/index.cfm>, 2010.
- [37] Cullen, D.E., J.H. Hubbell, and L. Kissel, EPDL97: the evaluated photo data library97 version. 1997, Lawrence Livermore National Lab., CA (United States).
- [38] Brown, D.A., et al., ENDF/B-VIII. 0: the 8th major release of the nuclear reaction data library with CIELO-project cross sections, new standards and thermal scattering data. Nuclear Data Sheets, 2018. 148: p. 1-142.
- [39] Shultis, J.K. and R.E. Faw, Fundamentals of nuclear science and engineering. 2016: CRC press.
- [40] Atak, H., O.Ş. Çelikten, and M. Tombakoğlu, Finite and infinite system gamma ray buildup factor calculations with detailed physics. Applied Radiation and Isotopes, 2015. 105: p. 11-14.
- [41] Duckic, P. and R.B. Hayes, Total Ambient Dose Equivalent Buildup Factor Determination for Nbs04 Concrete. Health physics, 2018. 114(6): p. 569-581.
- [42] Rafiei, M., S. Parsaei, and M. Kurudirek, A Monte Carlo study on the gamma-ray buildup factors for the linear sources embedded in a cylindrical shield. Journal of Instrumentation, 2020. 15(11): p. T11004.
- [43] Bishop, G., Angular properties of 6.13 MeV source photons penetrating lead, steel and concrete. Annals of Nuclear Energy, 1985. 12(11): p. 633-638.
- [44] Geguchadze, R., Angular exposure build up factors for combined energy source photons penetrating aluminium, steel and lead shielding slabs. Annals of Nuclear Energy, 1999. 26(16): p. 1509-1515.

- [45] Eyecioglu, O., Karabul, Y., El-Khayatt, A. M., İçelli, O. ZXCOM: a software for computation of radiation sensing attributes. *Radiation Effects and Defects in Solids*, 2016. 171(11-12), 965-977.
- [46] Brown, F.B., Monte Carlo Techniques for Nuclear Systems-Theory Lectures. 2016, Los Alamos National Lab.(LANL).
- [47] Battistoni, G., et al., Overview of the FLUKA code. *Annals of Nuclear Energy*, 2015. 82: p. 10-18.
- [48] Allison, J., et al., Recent developments in Geant4. *Nuclear instruments and methods in physics research section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2016. 835: p. 186-225.
- [49] Kawrakow, I. and D. Rogers, The EGSnrc code system. NRC Report PIRS-701, NRC, Ottawa, 2000: p. 17.
- [50] Salvat, F., J.M. Fernández-Varea, and J. Sempau. PENELOPE-2006: A code system for Monte Carlo simulation of electron and photon transport. in *Workshop proceedings*. 2006. Nuclear Energy Agency, Organization for Economic Co-operation and
- [51] Werner, C.J., et al., MCNP version 6.2 release notes. 2018, Los Alamos National Lab.(LANL), Los Alamos, NM (United States).
- [52] Booth, T.E., R.A. Forster, and R.L. Martz, MCNP variance reduction developments in the 21st century. *Nuclear technology*, 2012. 180(3): p. 355-371.
- [53] Pelowitz, D.B., et al., Mcnpx 2.7 e extensions. 2011, Los Alamos National Lab.(LANL), Los Alamos, NM (United States).
- [54] Goorley, T., et al. Features of MCNP6. in *SNA+ MC 2013-Joint International Conference on Supercomputing in Nuclear Applications+ Monte Carlo*. 2014. EDP Sciences.
- [55] Mashnik, S.G., et al. Current status of MCNP6 as a simulation tool useful for space and accelerator applications. in *AIP Conference Proceedings*. 2013. American Institute of Physics.
- [56] Hendricks, J. and T. Booth, MCNP variance reduction overview, in *Monte-Carlo Methods and Applications in Neutronics, Photonics and Statistical Physics*. 1985, Springer. p. 83-92.
- [57] Booth, T.E., MCNP variance reduction examples. 2012, Los Alamos National Lab.(LANL), Los Alamos, NM (United States).
- [58] Carleo, G., et al., Machine learning and the physical sciences. *Reviews of Modern Physics*, 2019. 91(4): p. 045002.
- [59] Sahiner, H. and X. Liu, Gamma spectral analysis by artificial neural network coupled with Monte Carlo simulations. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2020. 953: p. 163062.
- [60] Rosenblatt, F., Principles of neurodynamics. perceptrons and the theory of brain mechanisms. 1961, Cornell Aeronautical Lab Inc Buffalo NY.

- [61] Sarle, W.S., Neural networks and statistical models. 1994.
- [62] Lapedes, A. and R. Farber, How neural nets work, in Evolution, learning and cognition. 1988, World Scientific. p. 331-346.
- [63] Bishop, C.M., Neural networks for pattern recognition. 1995: Oxford university press.
- [64] Moré, J.J., The Levenberg-Marquardt algorithm: implementation and theory, in Numerical analysis. 1978, Springer. p. 105-116.
- [65] Williams, P.M., Bayesian regularization and pruning using a Laplace prior. Neural computation, 1995. 7(1): p. 117-143.
- [66] Burden, F. and D. Winkler, Bayesian regularization of neural networks. Artificial neural networks, 2008: p. 23-42.
- [67] Kuźniar, K. and M. Zając, Some methods of pre-processing input data for neural networks. Computer Assisted Methods in Engineering and Science, 2017. 22(2): p. 141-151.
- [68] Hirayama, H., Calculation of gamma-ray exposure buildup factors up to 40mfp using the EGS4 Monte Carlo code with a particle splitting. Journal of nuclear science and technology, 1995. 32(12): p. 1201-1207.
- [69] Kitsos, S., et al., Improvement of gamma-ray Sn transport calculations including coherent and incoherent scatterings and secondary sources of bremsstrahlung and fluorescence: Determination of gamma-ray buildup factors. Nuclear science and engineering, 1996. 123(2): p. 215-227.
- [70] Hirayama, H. and D. Trubey, Effects of incoherent and coherent scattering on the exposure buildup factors of low-energy gamma rays. Nuclear Science and Engineering, 1988. 99(2): p. 145-156.
- [71] Payal, A., C. Rai, and B. Reddy. Comparative analysis of Bayesian regularization and Levenberg-Marquardt training algorithm for localization in wireless sensor network. in 2013 15th International Conference on Advanced Communications Technology (ICACT). 2013. IEEE.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Makaleler

1. Kavanoz, H. B., Akçalı, Ö., Toker, O., Bilmez, B., Çağlar, M., İçelli, O., 2019. A novel comprehensive utilization of vanadium slag/epoxy resin/antimony trioxide ternary composite as gamma ray shielding material by MCNP 6.2 and BXCUM. Radiation Physics and Chemistry, 165, 108446.