

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

FİZİK ANABİLİM DALI

**DOĞU KARADENİZ BÖLGESİNDE ^{137}Cs 'nin EKOLOJİK YARIÖMRÜNÜN
BELİRLENMESİ ve ^{137}Cs ÜZERİNE ÇEŞİTLİ MODELLEMELER**

DOKTORA TEZİ

Necati ÇELİK

**HAZİRAN 2010
TRABZON**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

FİZİK ANABİLİM DALI

**DOĞU KARADENİZ BÖLGESİNDE ¹³⁷Cs'nin EKOLOJİK YARIÖMRÜNÜN
BELİRLENMESİ ve ¹³⁷Cs ÜZERİNE ÇEŞİTLİ MODELLEMELER**

Necati ÇELİK

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
“Doktor (Fizik)”
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 01. 06. 2010
Tezin Savunma Tarihi : 17. 06. 2010**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Uğur ÇEVİK
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Belgin KÜÇÜKÖMEROĞLU
Jüri Üyesi : Doç. Dr. Kamil COŞKUNÇELEBİ
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Ali İhsan KOBYA
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Gökhan BUDAK**

Enstitü Müdürü: Prof. Dr. Salih TERZİOĞLU

Trabzon 2010

ÖNSÖZ

Doğu Karadeniz Bölgesinde karayosunu ve liken örneklerinde ^{137}Cs radyoizotopun aktivite konsantrasyonunun ve ekolojik yarı ömrünün belirlenmesi, ^{137}Cs radyoizotopunun topraktaki dikey ilerleyişinin modellenmesi, herhangi bir nükleer kaza durumunda toprak numunelerinin kurutulmadan ölçülebilmesine olanak sağlayan bir çözüm sunulması ve toprakta ^{137}Cs radyoizotopundan kaynaklanan doz oranının belirlenmesi için yapılan bu çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında Doktora Tezi olarak hazırlandı.

Aktivite konsantrasyonu ölçümleri ve analizler, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Atom ve Çekirdek Fiziği laboratuvarında, tezde bazı hesaplamalar için kullanılan Monte Carlo tekniğinin öğrenilmesi Belçika'nın Geel kentinde yer alan IRMM (Institute for Reference Materials and Measurements)'de gerçekleştirildi.

Doktora tez çalışmamda deneysel ve teorik bilgi yönünden yararlandığım ve öğrenciliğimin her aşamasında maddi ve manevi desteğini esirgemeyen saygı değer danışman hocam Prof. Dr. Uğur ÇEVİK'e en içten teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Karayosunları ve likenlerdeki ^{137}Cs aktivite konsantrasyon değerleriyle ilgili değerli yorumlarından dolayı sayın Doç. Dr. Kamil COŞKUNÇELEBİ'ye, tezi okuyup yorumlarıyla tezin kalitesini yükseltmede önemli katkıları olan hocalarım Sayın Prof. Dr. Ali İhsan KOBYA ve Prof. Dr. Belgin KÜÇÜKÖMEROĞLU'na teşekkürlerimi bildiririm.

Yurtdışına bir yıllık süreyle burslu gönderilmeme imkan tanıyan Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK)'na; yurtdışında bulunduğum sürece Monte Carlo simülasyon tekniği konusunda her türlü yardımlarını esirgemeyen Prof. Dr. Mikael HULT ve Dr. Joël GASPARRO'ya, laboratuvarında her türlü imkandan yararlanmama yardımcı olan Gerd MARISSSEN'e teşekkürlerimi sunarım.

Akademik çalışmalarım süresince maddi ve manevi destekleriyle sürekli beni cesaretlendiren ve yanımda olan aileme en içten saygı ve sevgilerimi iletirim.

Necati ÇELİK
Trabzon 2009

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET	VI
SUMMARY	VII
ŞEKİLLER DİZİNİ	VIII
TABLolar DİZİNİ.....	X
SEMBOLLER DİZİNİ	XII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Birimler ve Tanımlar	2
1.1.1. Radyoaktivite.....	2
1.1.2. Enerji	3
1.2. Hızlı Elektron Kaynakları.....	3
1.2.1. Beta Bozunması.....	3
1.2.2. İç Dönüşüm Olayı.....	4
1.2.3. Auger Elektronları	5
1.3. Ağır Yüklü Parçacık Kaynakları	6
1.3.1. Alfa Bozunması	6
1.3.2. Kendiliğinden Bozunma	7
1.4. Elektromanyetik Radyasyon Kaynakları	7
1.4.1. Beta Bozunması Sonucu Yayınlanan Gama-Işınları	7
1.4.2. Yok Olma Radyasyonu.....	9
1.4.3. Nükleer Reaksiyonlar Sonucunda Yayınlanan Gama Işınları	9
1.4.4. Frenleme (Bremsstrahlung) Işıması.....	10
1.4.5. Karakteristik X-ışınları	10
1.4.6. Radyoaktif Bozunma Sonucunda Uyarılma	10
1.4.7. Dış Kaynaklar Tarafından Uyarılma	11
1.4.8. Hızlandırıcı (Cyclotron) Radyasyonu.....	12
1.5. Nötron Kaynakları	12
1.5.1. Kendiliğinden Salınma	12
1.5.2. (α , n) Reaksiyonları	13
1.5.3. Fotonötron Kaynakları.....	13

1.5.4. Hızlandırılmış Yüklü Parçacık Reaksiyonları	13
1.6. Ağır Yüklü Parçacıkların Madde ile Etkileşimi	14
1.6.1. Etkileşimin Doğası	14
1.7. Gama Işınlarnının Madde ile Etkileşimi.....	15
1.7.1. Fotoelektrik Soğurma	15
1.7.2. Compton Saçılması.....	16
1.7.3. Çift Oluşumu	17
1.7.4. Koherent Saçılma	18
1.8. Gama Işınlarnının Soğrulması.....	18
1.9. Radyasyona Maruz Kalma ve Doz Kavramı	20
1.9.1. Gama Radyasyonuna Maruz Kalma	20
1.9.2. Alınan Doz.....	21
1.9.3. Doz Eşdeğeri	21
1.9.4. ICRP Doz Birimleri	23
1.10. Radyasyon Dedektörlerinin Genel Özellikleri	24
1.10.1. Basitleştirilmiş Dedektör Modeli	24
1.10.2. Enerji Rezolüsyon	25
1.10.3. Dedeksiyon Verimi.....	28
1.10.4. Ölü Zaman	31
1.11. Monte Carlo Yöntemi.....	31
1.11.1. Temel Monte Carlo İlkesi.....	31
1.11.2. Reddetme Yöntemi	33
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	36
2.1. Çalışma Alanı	36
2.2. Karayosunları	38
2.3. Likenler.....	40
2.4. Numunelerin Toplanması	41
2.5. Numunelerin Teşhis Edilmesi	46
2.6. Kimyasal Analiz	47
2.7. Toprak Numunelerinin Toplanması	49
2.8. Radyoaktivite Ölçümü.....	50
2.9. Enerji Kalibrasyonu.....	53
2.10. Verim Kalibrasyonu	55
2.11. Spektrumların Alınması.....	57

2.12.	Pik Belirleme ve Değerlendirme	57
2.13.	Aktivite Hesabı	57
3.	BULGULAR VE TARTIŞMA	58
3.1.	¹³⁷ Cs Aktivite Konsantrasyonu değerleri	58
3.2.	¹³⁷ Cs İçin Ekolojik Yarı-Ömür	66
3.3.	Su Konsantrasyonunun Gama-Işını Verimi Üzerine Etkisinin İncelenmesi	79
3.3.1.	Toprak Numunesi	80
3.3.2.	Monte Carlo Dedektör Modeli	81
3.3.3.	Simülasyon Sonuçları	83
3.3.4.	DeneySEL Doğrulama	87
3.4.	¹³⁷ Cs'un Toprağa Difüzyonunun Modellenmesi	87
3.4.1.	¹³⁷ Cs Aktivite Konsantrasyonu Ölçümü	88
3.4.2.	¹³⁷ Cs Difüzyon Modeli	93
3.4.3.	Difüzyon Katsayısının (<i>D</i>) Elde Edilmesi	94
3.4.4.	Difüzyon Katsayısının Literatürdeki Değerlerle Karşılaştırılması	102
3.5.	¹³⁷ Cs'dan Dolayı Alınan Doz Miktarı	103
3.5.1.	Doz Dönüşüm Katsayısının Hesaplanması	104
3.5.2.	Doz Dönüşüm Oranının Elde Edilmesi	106
4.	SONUÇLAR	109
5.	ÖNERİLER	111
6.	KAYNAKLAR	112
7.	EKLER	117
	ÖZGEÇMİŞ	

ÖZET

26 Nisan 1986 tarihinde meydana gelen Chernobyl nükleer santral kazası sonucu reaktörün çekirdeğinde bulunan radyoaktif maddelerin tamamı (50 milyon Curie) patlama sonucu atmosfere karışmıştır. Reaktörden salınan radyoaktif gazlar ve radyoaktif maddelerin karışımı, 1200 m'yi aşan yüksekliklere çıkmıştır. Reaktörden ilk salınan radyoaktif maddelerin oluşturduğu bulut güneyden esen rüzgârlarla Chernobyl'den kuzeye doğru hareketle İskandinav ülkelerinin güney ve orta bölgelerine 28 Nisan'da ulaşmıştır. Meteorolojik olaylarla yön değiştiren radyoaktif bulut daha sonraki günlerde Avrupa'nın çeşitli ülkelerine ve 30 Nisan/5 Mayıs 1986 tarihlerinde de yurdumuza ulaşmıştır. Chernobyl'den önceleri doğuya doğru hareket eden hava kütlesi daha sonra esen rüzgârlarla Karadeniz'i geçerek özellikle Doğu Karadeniz bölgesinde yağan şiddetli yağmurlarla bu kıyı şeridini kirlenmeye maruz bırakmıştır. Çalışmalar, çevreyi kirleten radyoaktif maddeler arasında, ^{137}Cs 'un yarı ömrünün (~30 yıl) diğerlerine göre daha uzun olmasından dolayı hala bölgedeki varlığını devam ettirmekte olduğunu göstermiştir.

Bu çalışmada 1) Doğu Karadeniz Bölgesi'nde çeşitli istasyonlarda toplanan karayosunu ve likenlerdeki ^{137}Cs aktivite konsantrasyonu; 2) ^{137}Cs radyoizotopunun karayosunu ve likenlerdeki ekolojik yarı-ömrü; 3) ^{137}Cs radyoizotopunun topraktaki dikey ilerleyişi modellenerek difüzyon katsayısı belirlenmiştir. 4) Ayrıca herhangi bir nükleer kaza durumunda toprakta radyoaktivite ölçümü için numunelerin kurutulma işlemi vakit kaybına sebep olduğu için, bu işlemin yapılmaması için bir çözüm önerilmiş ve 5) Toprakta bulunan ^{137}Cs radyoizotopundan gelen doz oranı hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: ^{137}Cs , Radyoaktivite, Chernobyl Nükleer Santral, Liken, Karayosunu, Monte Carlo Metodu

SUMMARY

As a result of the Chernobyl accident happened in 26th April 1986, all the radionuclides in the reactor core (50 million Curie) contaminated the atmosphere. Radioactive gas and materials reached the altitude of 1200 meters. The radioactive cloud from the Chernobyl reactor reached the northern and central Scandinavian countries on 28th April 1986 due to the wind from south. As a result of the atmospheric changes, this radioactive cloud contaminated many European countries and on 30th April/5th May finally contaminated our country. The radioactive cloud changed the direction and passing the Black Sea, it also contaminated the Eastern Black Sea Region of Turkey due to the heavy rain on those days. It has been shown that ^{137}Cs is still eminent in that region because of its relatively long half-life (~ 30 years).

In this theses, 1) activity concentrations of ^{137}Cs in mosses and lichen samples collected from different sampling points have been determined; 2) Ecological half-life of ^{137}Cs in mosses and lichen species have been determined; 3) Vertical migration of ^{137}Cs through soil matrix has been modeled and as a results, diffusion coefficients have been determined; 4) As drying of soil samples takes a lot of time before measurements, in an emergency case like nuclear power plant accident, a solution has been proposed to skip the drying process for soil samples and 5) Dose rate due to ^{137}Cs in soil has been calculated.

Key Words: ^{137}Cs , Radyoactivity, Chernobyl Nuclear Power Plant, Lichen, Moss, Monte Carlo Method

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. 1. Bazı genel gama referans kaynaklarının bozunma şemaları	8
Şekil 1. 2. Belirli bir hedef materyalden karakteristik X- ışını üretme metodu	11
Şekil 1. 3. Compton saçılmasının şematik gösterimi.....	16
Şekil 1. 4. Soğurma olayının şematik gösterimi.....	18
Şekil 1. 5. Basit dedektör modeli.....	25
Şekil 1. 6. Zaman-Akım grafiği.....	25
Şekil 1. 7. Çözünürlük eğrileri.....	26
Şekil 1. 8. Dedektör-kaynak geometrisi	29
Şekil 1. 9. Genişletilmiş kaynak	30
Şekil 1. 10. Olasılıklar bölgesi	32
Şekil 1. 11. Reddetme yöntemi.....	34
Şekil 2. 1. Çalışma alanı	38
Şekil 2. 2. Numune toplama yöntemi	41
Şekil 2. 3. Elek seti	47
Şekil 2. 4. Pres seti	48
Şekil 2. 5. X-ışını ölçüm sisteminin genel görünüşü.....	49
Şekil 2. 6. Toprak numunelerini almak için kullanılan boru.....	49
Şekil 2. 7. Gama spektrometre sisteminin genel görünüşü.....	51
Şekil 2. 8. Gama spektrometre sisteminin blok diyagramı.....	51
Şekil 2. 9. Enerji-Kanal grafiği.....	55
Şekil 2. 10. Verim kalibrasyonu eğrisi	56
Şekil 3. 1. Karayosunlardaki ¹³⁷ Cs aktivite konsantrasyonunun frekans dağılımı	64
Şekil 3. 2. Likenlerdeki ¹³⁷ Cs aktivite konsantrasyonunun frekans dağılımı	64
Şekil 3. 3. Karayosunu ve likenlerdeki ¹³⁷ Cs aktivite konsantrasyonu değerleri	65
Şekil 3. 4. 1997 ve 2007 yıllarında karayosunlardaki ¹³⁷ Cs değerleri.....	69
Şekil 3. 5. 1997 ve 2007 yıllarında likenlerdeki ¹³⁷ Cs değerleri.....	69
Şekil 3. 6. Karayosunlarında ¹³⁷ Cs aktivite konsantrasyonunun azalması	73
Şekil 3. 7. Likenlerde ¹³⁷ Cs aktivite konsantrasyonunun azalması	73
Şekil 3. 8. Karayosunlarında ¹³⁷ Cs aktivite konsantrasyonunun yüksekliğe göre değişimi	77

Şekil 3. 9. Likenlerde ^{137}Cs aktivite konsantrasyonunun yüksekliğe göre değişimi	77
Şekil 3. 10. Karayosunlarında ^{137}Cs ile ^{40}K aktivite konsantrasyonu değişimi	78
Şekil 3. 11. Likenlerde ^{137}Cs ile ^{40}K aktivite konsantrasyonu değişimi	79
Şekil 3. 12. Simülasyonda kullanılan dedektör modeli	81
Şekil 3. 13. Enerjiye göre çeşitli su konsantrasyonları için yüzdelik gama dedeksiyon verimi	83
Şekil 3. 14. Kuru toprak ile çeşitli su konsantrasyonlu topraklar arasındaki yüzdelik fark	84
Şekil 3. 15. Hesaplanan yüzdelik dedeksiyon verim değerlerinin yüzdelik su konsantrasyonuna göre değişimi	85
Şekil 3. 16. Monte Carlo ile hesaplanmış düzeltme faktörleri	86
Şekil 3. 17. Birinci tüpten elde edilen topraktaki derinliğe bağlı ^{137}Cs aktivite konsantrasyonu değerleri	90
Şekil 3. 18. İkinci tüpten elde edilmiş toprak numunesinde ^{137}Cs aktivite konsantrasyonu değerleri	90
Şekil 3. 19. Üçüncü tüpten elde edilmiş toprak numunesinde ^{137}Cs aktivite konsantrasyonu değerleri	91
Şekil 3. 20. Dördüncü tüpten elde edilmiş toprak numunesinde ^{137}Cs aktivite konsantrasyonu değerleri	91
Şekil 3. 21. Beşinci tüpten elde edilmiş toprak numunesinde ^{137}Cs aktivite konsantrasyonu değerleri	92
Şekil 3. 22. Altıncı tüpten elde edilmiş toprak numunesinde ^{137}Cs aktivite konsantrasyonu değerleri	92
Şekil 3. 23. Birinci tüp için deneysel veriler ve fit eğrisi	95
Şekil 3. 24. Birinci tüp için iki farklı difüzyon bölgesi	95
Şekil 3. 25. Birinci tüp için birinci difüzyon bölgesi	96
Şekil 3. 26. Birinci tüp için ikinci difüzyon bölgesi	97
Şekil 3. 27. İkinci tüp için deneysel veriler ve fit eğrisi	98
Şekil 3. 28. Üçüncü tüp için deneysel veriler ve fit eğrisi	98
Şekil 3. 29. Dördüncü tüp için deneysel veriler ve fit eğrisi	99
Şekil 3. 30. Beşinci tüp için deneysel veriler ve fit eğrisi	100
Şekil 3. 31. Altıncı tüp için deneysel veriler ve fit eğrisi	100
Şekil 3. 32. Doz dönüşüm faktörü hesabı için kullanılan geometri	104
Şekil 3. 33. Doz dönüşüm oran fonksiyonu	106

TABLULAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. 1. Bazı saf beta yayıcı çekirdekler	4
Tablo 1. 2. Bazı iç dönüşüm elektron kaynakları	5
Tablo 1. 3. Bazı alfa parçacık kaynakları	6
Tablo 1. 4. Gama ışını üreten bazı radyoaktif kaynaklar için maruz kalma sabitleri	21
Tablo 1. 5. Farklı radyasyon tipleri için kalite faktörleri	22
Tablo 1. 6. Enerji aralıkları ve radyasyon tiplerinin sahip olduğu radyasyon ağırlık faktörleri	23
Tablo 2. 1. Chernobyl kazası sonrası belirlenen izotoplar ve yarı ömürleri	37
Tablo 2. 2. Karayosunlarının örnekleme yerleri ve türleri	42
Tablo 2. 3. İstasyonlar ve liken türleri	44
Tablo 2. 4. Difüzyon modeli için toplanan toprak numuneleri	50
Tablo 2. 5. Standart kaynakların özellikleri	54
Tablo 3. 1. Toplanan karayosunu numunelerindeki ¹³⁷ Cs aktivite konsantrasyonu sonuçları	58
Tablo 3. 2. Liken türlerindeki ¹³⁷ Cs aktivite konsantrasyonu sonuçları	61
Tablo 3. 3. Karayosunu ve likenlerdeki ¹³⁷ Cs aktivite konsantrasyonları için açıklamalı istatistikler	63
Tablo 3. 4. Karayosunu toplanan yerler, karayosunu türleri ve örneklendiği yükseklikler	67
Tablo3. 5. Liken toplanan yerler, karayosunu türleri ve örneklendiği yükseklikler	68
Tablo 3. 6. Karayosunları örneklerinde hesaplanan ¹³⁷ Cs ekolojik yarı-ömürleri	71
Tablo 3. 7. Liken örneklerinde hesaplanan ¹³⁷ Cs ekolojik yarı-ömürleri	72
Tablo 3. 8. Karayosunu ve likenlerde ⁴⁰ K aktivite konsantrasyonu ve K element konsantrasyonu sonuçları	75
Tablo 3. 9. Açıklamalı istatistikler	76
Tablo 3. 10. Toprak numunesindeki kimyasal bileşenler ve yüzdelik konsantrasyonlar	81
Tablo 3. 11. Kullanılan dedektör modeli	82
Tablo 3. 12 Monte Carlo ile hesaplanan ve deneysel olarak ölçülen verim değerleri arasındaki yüzdelik farklar.	87
Tablo 3. 13. Altı ayrı tüpten alınan toprak numunelerinde derinliğe bağlı ¹³⁷ Cs aktivite konsantrasyonu değerleri	89

Tablo3. 14. Difüzyon katsayıları ($\text{cm}^2 \text{ yıl}^{-1}$) ve korelasyon katsayıları (R^2).....	101
Tablo 3. 15. ^{137}Cs için ölçülen difüzyon katsayısı değerleri ve literatürle karşılaştırılması.....	102
Tablo 3. 16. Hesaplanan Doz Dönüşüm Faktörleri	105
Tablo 3. 17. Farklı tüpler için doz dönüşüm katsayıları ve alınan yıllık doz miktarları ...	107
Tablo 3. 18. Topraktaki ^{137}Cs aktivite konsantrasyonuna bağlı çeşitli ülkeler için alınan yıllık etkin doz değerleri.....	108

SEMBOLLER DİZİNİ

A	: Aktivlik
Bq	: Becquerel
Ci	: Curie
D	: Soğurulan doz
k	: Doz Dönüşüm Katsayısı
EC	: European Commission
Gy	: Gray
KF	: Kalibrasyon faktörü
N	: Radyoaktif çekirdek sayısı
N_0	: İntegrasyon sabiti
Sv	: Sievert
$T_{1/2}$: Fiziksel Yarı ömür
$T_{E1/2}$: Ekolojik Yarı ömür
UNSCEAR:	United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation
ICRP	: International Commission on Radiological Protection
YED	: Yıllık etkin doz
Q	: Radyoaktif bozunma sonucu açığa çıkan enerji
λ	: Fiziksel Bozunma sabiti
λ_e	: Ekolojik Bozunma sabiti
τ	: Ortalama ömür

1. GENEL BİLGİLER

Radyasyon kavramı, atomik veya nükleer olaylar sonucu açığa çıkan enerji anlamında kullanılır ve birçok alt gruplara ayrılabilmesi yanı sıra aşağıdaki gibi dört temel grup altında toplanabilirler:

1. Hızlı elektronlar
2. Ağır yüklü parçacıklar
3. Elektromanyetik radyasyon
4. Nötronlar

Hızlı elektronlar ve ağır yüklü parçacıklar yüklü parçacık radyasyonu grubuna; elektromanyetik radyasyon ve nötronlar ise yüksüz parçacıklı radyasyon grubuna girerler. Hızlı elektronlar nükleer bozunma sonucu yayınlanan pozitif veya negatif beta parçacıklarını içerir. Ağır yüklü parçacıklar ise bir atomik kütle birimi veya daha büyük kütleyle sahip bütün iyonları içerir. Örneğin alfa parçacıkları (4_2He), protonlar, fisyon ürünleri ve nükleer reaksiyonlar sonucu açığa çıkan diğer parçacıklar bu gruba girerler. Elektromanyetik radyasyon ise, atom kabuğundaki elektronlarının yeniden düzenlenmesi ile yayınlanan X-ışınlarını ve atom çekirdeğinin kendisinden yayınlanan gama-ışınlarını içerir. Nötronlar, yavaş nötronlar ve hızlı nötronlar diye iki alt başlığa ayrılan, yüksüz parçacıklardır. Yüksüz olduklarından en zor dedekte edilen parçacıklar olarak ta bilinirler.

Çeşitli enerjilerde üretilebilmelerine karşın, genel olarak radyasyon enerjisi 10 eV ile 20 MeV arasında değişir. Belirli bir materyalde en düşük enerji seviyesinden bir elektron koparmak için harcanması gereken enerjiden daha büyük enerjili radyasyonlar, iyonlaştırıcı radyasyon olarak adlandırılır.

Radyasyon ayrıca madde içine nüfuz edebilme yeteneğine göre de sınıflandırılırlar. Yumuşak radyasyonlar olarak bilinen radyasyonlar örneğin düşük enerjili X-ışınları ve alfa parçacıkları, maddenin sadece küçük bir kalınlığına nüfuz edebilirler. Buna karşın beta parçacıkları daha girgin parçacıklar olarak bilinirler. Gama ışınları ve nötronlar ise en çok girgin radyasyon çeşitidir.

1.1. Birimler ve Tanımlar

1.1.1. Radyoaktivite

Bir radyoizotopun aktivitesi onun bozunma oranı olarak tanımlanır ve aşağıdaki gibi temel radyoaktif bozunma yasasıyla verilir.

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad (1.1)$$

Burada N radyoaktif çekirdek sayısı, λ ise bozunma sabiti olarak tanımlanır. Aktivitenin tarihsel birimi *Curie (Ci)* olarak bilinir ve 1 gram saf ^{226}Ra 'ın aktivite değeri olan $3,7 \cdot 10^{10}$ bozunma/saniye olarak tanımlanır. Fakat laboratuvar düzeyindeki çalışmalarda mCi veya μCi daha kullanışlı birimler olduğundan tercih edilirler (Knoll., 2000).

Hala geniş ölçekte kullanılıyor olmasına karşın, Ci, SI birim sisteminde ifade edilen Becquerel (Bq) ile yavaş yavaş yer değiştirmiştir. 1975'teki konferansta (General Conference of Weights and Measures) Becquerel, 1 bozunma/saniye aktivite birimi olarak kabul edilmiştir. Böylece Becquerel ve Curie arasında $1 \text{ Bq} = 2,703 \cdot 10^{-11} \text{ Ci}$ şeklinde bir bağıntı vardır.

Spesifik aktivite (massic activity), bir radyoizotopun birim kütlesi başına ölçülen aktivite olarak tanımlanır. Eğer saf bir radyoizotopun (herhangi başka bir maddeyle karışmamış ise) spesifik aktivitesi ölçülmek istenirse aşağıdaki bağıntıyı kullanmak gerekir:

$$\text{spesifik aktivite} = \frac{\text{aktivite}}{\text{kütle}} = \frac{\lambda N}{NM / A_v} = \frac{\lambda A_v}{M} \quad (1.2)$$

Burada M numunenin moleküler ağırlığı, A_v Avagadro sayısı, λ ise radyoizotopun bozunma sabiti ($\ln 2/\text{yarı-ömür}$) olarak tanımlanır.

1.1.2. Enerji

Radyasyon enerjisinin geleneksel birimi *elektron volt* veya *eV* olarak bilinir. 1 eV, bir elektronun 1 V potansiyel altında hızlandırılması sonucu elde edilen enerjidir. İyonlaştırıcı radyasyonlar için keV veya MeV daha genel kullanımlardır.

Buna karşın enerjinin SI birim sistemindeki karşılığı *joule* (J)' dür. Radyasyon enerjisiyle uğraşılıyorsa, fJ (femto joule) daha kullanışlı bir birim olarak karşımıza çıkmaktadır. Elektron volt ve joule arasında $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$; $1 \text{ fJ} (= 10^{-15} \text{ J}) = 6,241 \cdot 10^3 \text{ eV}$ şeklinde bir bağıntı vardır. Öte yandan bir X- ışını veya gama-ışınının enerjisi ise radyasyon frekansıyla ilişkili olarak;

$$E = h\nu \quad (1.3)$$

şeklinde verilir. Burada h , Plank sabiti ($6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$ veya $4,135 \cdot 10^{-15} \text{ eV.s}$); ν ise frekanstır.

1.2. Hızlı Elektron Kaynakları

1.2.1. Beta Bozunması

Radyasyon ölçümlerinde en genel hızlı elektron kaynağı β^- bozunmasıdır. Bu bozunma aşağıda şematik olarak yazılmıştır:



burada X ve Y sırasıyla başlangıçki ve sonraki radyoaktif çekirdekler, $\bar{\nu}$ ise antinötrinodur. Nötrinolar ve antinötrinolar maddeyle çok zayıf bir etkileşme ihtimaliyetine sahip olduklarından dedekte edilmeleri çok zor hatta imkânsız gibidir. Y çekirdeği ise çok az bir geri tepme enerjisiyle görüldüğünden o da dedekte edilememektedir. Dolayısıyla böyle bir bozunmada üretilen tek iyonlaştırıcı radyasyon hızlı elektron veya beta parçacığıdır.

Birçok beta bozunması olayında ürün çekirdek bir uyarılmış seviyede kalır ve sonuç olarak bir beta parçacığıyla beraber bir gama-ışını da yayınlanır. Bazı durumlarda da beta bozunması direk olarak ürün çekirdeğin taban seviyesine olur ve bunlar, *saf beta yayıcılar*

olarak adlandırılırlar. Bazı saf beta yayıcı çekirdekler Tablo 1.1'de gösterilmiştir (Knoll., 2000).

Tablo 1. 1. Bazı saf beta yayıcı çekirdekler

Çekirdek	Yarı-Ömür	Son nokta enerjisi (MeV)
³ H	12,26 yıl	0,0186
¹⁴ C	5730 yıl	0,156
³² P	14,28 yıl	1,710
³³ P	24,4 gün	0,248
³⁵ S	87,9 gün	0,167
³⁶ Cl	3,08.10 ⁵ yıl	0,714
⁴⁵ Ca	165 gün	0,252
⁶³ Ni	92 yıl	0,067
⁹⁹ Tc	2,12.10 ⁵ yıl	0,292
¹⁴⁷ Pm	2,62 yıl	0,224
²⁰⁴ Tl	3,81 yıl	0,766

Her bir spesifik beta bozunması, belirli bir bozunma enerjisiyle veya Q-değeriyle tanımlanır. Geri tepen ürün çekirdeğin enerjisi hemen hemen sıfır olduğundan, bu enerji beta parçacığı ve nötrino tarafından paylaşılır. Bu yüzden beta parçacığının enerjisi, sıfırdan son nokta enerjisine kadar değişik enerjilerde gözlemlenebilir (sayısal olarak Q-değerine eşittir).

1.2.2. İç Dönüşüm Olayı

İç dönüşüm olayı, beta bozunması sonucu çekirdek ürünün bir uyarılmış seviyeye bırakılması ile başlar. Bundan sonra çekirdek genel olarak bir gama-ışını yayarak kararlı hale gelir. Fakat bazı durumlarda gama-ışınması yayınlanması bir şekilde mümkün olmaz ve bu çekirdeğin uyarılma enerjisi (E_{uyar}), direk olarak atomun yörünge elektronlarında birine transfer edilir ve sonuç olarak bir elektron aşağıda yazılan enerjiyle yayınlanır.

$$E_e = E_{uyar} - E_b \quad (1.5)$$

Burada E_b elektronun bağlanma enerjisidir. İç dönüşüm elektronları atom kabuğundaki herhangi bir elektronun koparılmasıyla üretilebileceğinden, bir nükleer bozunma sonucunda değişik enerjilerde birçok elektron üretilebilir. Bu durumda spektrum daha da karmaşık olabilir. Bazı yararlı iç dönüşüm elektron kaynakları Tablo 1.2' de verilmiştir (Knoll., 2000).

Tablo 1. 2. Bazı iç dönüşüm elektron kaynakları

Ana Çekirdek	Yarı-Ömür	Bozunma Şekli	İç Dönüşüm Elektron Enerjisi (keV)
^{109}Cd	453 gün	EY	62 84
^{113}Sn	115 gün	EY	365 389
^{137}Cs	30.2 yıl	β^-	624 656
^{139}Ce	137 gün	EY	126 159
^{207}Bi	38 yıl	EY	482 554 976 1048

1.2.3. Auger Elektronları

Auger elektronları kaba olarak iç dönüşüm elektronlarının aynısıdır. Aralarındaki tek fark, uyarılma enerjisi çekirdekten ziyade atomun kendisinden gelir. Bir başlangıç olayı (örneğin elektron yakalama) atomun yörüngelerinde bir boşluk bırakır. Bu boşluk bir üst katmandaki elektronlardan biri tarafından doldurulur ve sonuç olarak bir karakteristik X-ışını yayınlanır. Buna bir alternatif olarak, atomun uyarılma enerjisi direk olarak dış kabuktaki elektronlardan birine transfer edilebilir ve bu da bir elektronun kopmasına sebep olur. Bu elektronlar Auger elektronları olarak bilinirler. Auger elektronları kesikli bir spektrum oluştururlar. Auger elektronları genel olarak iç dönüşüm elektronlarından veya beta parçacıklarından daha az enerjiktirler çünkü bu olay daha çok atom numarası (Z) düşük olan elementlerde yüksek olasılıkla meydana gelirler. Birkaç keV' e sahip Auger elektronları dedektörün penceresinde kolaylıkla durdurulabilirler.

1.3. Ağır Yüklü Parçacık Kaynakları

1.3.1. Alfa Bozunması

Ağır çekirdekler enerjik olarak kendiliğinden bir alfa bozunması yapmaya (4_2He) meyillidirler. Alfa bozunması, aşağıdaki şekilde şematik olarak gösterilmiştir.



burada X ve Y sırasıyla başlangıç ve ürün çekirdekleridir. Alfa parçacıkları bir veya birden fazla enerji grupları şeklinde gözlenebilirler. Q değeri alfa parçacıklarını karakterize eder ve aşağıdaki şekilde verilir. A kütle numarası olmak üzere, yayımlanan her bir alfa parçacığı tek bir enerjiye sahiptir ve bu enerji aşağıdaki ifadeyle verilir.

$$E=Q(A-4)/A \quad (1.7)$$

Tablo 1.3' te bazı alfa parçacık kaynakları verilmiştir (Knoll., 2000).

Tablo 1. 3. Bazı alfa parçacık kaynakları

Kaynak	Yarı - Ömür	Alfa parçacık enerjisi (MeV)
${}^{232}_{90}Th$	$1,4 \cdot 10^{10}$ yıl	4,012
${}^{238}_{92}U$	$4,5 \cdot 10^9$ yıl	4,196
${}^{235}_{92}U$	$7,1 \cdot 10^8$ yıl	4,598
${}^{236}_{92}U$	$2,4 \cdot 10^7$ yıl	4,494
${}^{230}_{90}Th$	$7,7 \cdot 10^4$ yıl	4,687
${}^{243}_{95}Am$	$7,4 \cdot 10^3$ yıl	5,275
${}^{241}_{95}Am$	433 yıl	5,485
${}^{238}_{94}Pu$	88 yıl	5,499

Alfa parçacıkları diğer parçacıklarla kıyasla daha ağır ve madde içerisindeki girginlikleri son derece zayıftır böylece enerjilerini çok çabuk kaybederler. Bundan dolayı alfa parçacık kaynakları üretilirken çok ince bir tabakayla kaplanmalıdırlar.

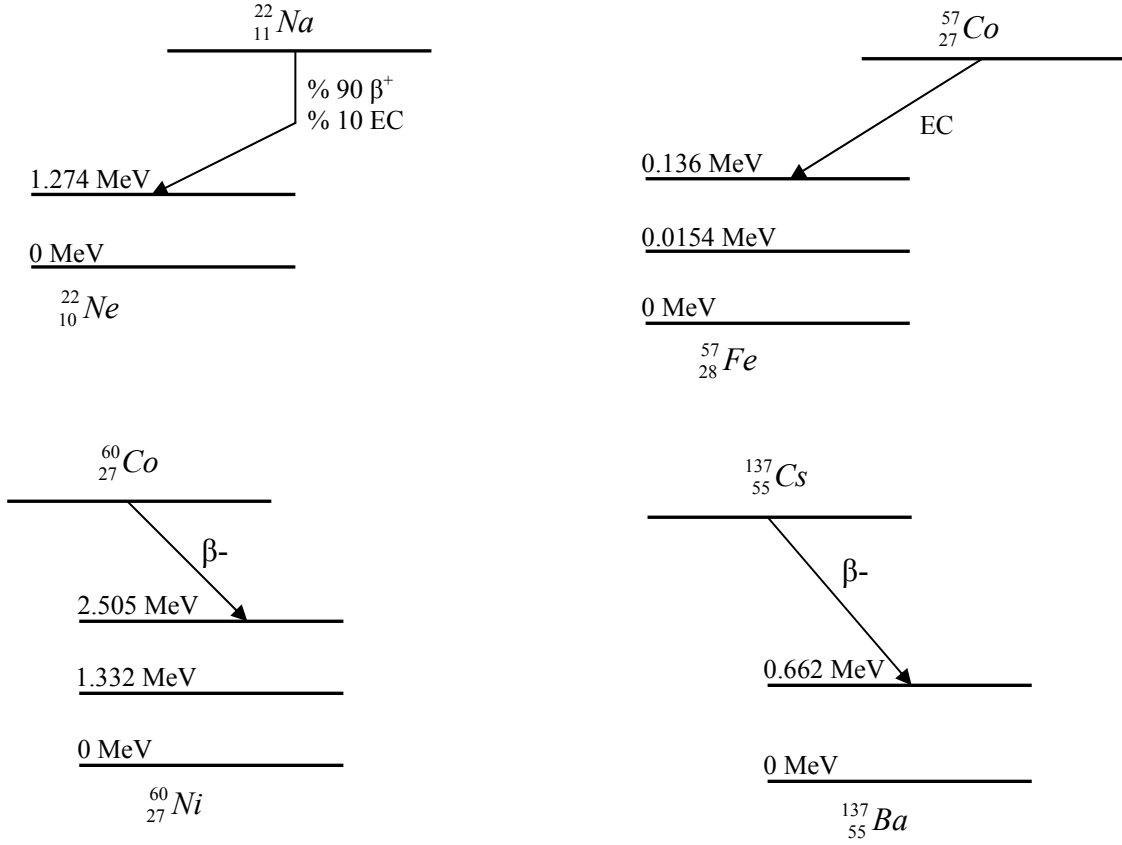
1.3.2. Kendiliğinden Bozunma

Bütün ağır çekirdekler prensip olarak kendiliğinden bozunmaya karşı kararsızdırlar ve bu olaya karşı koyan potansiyel engeli aşıldığında daha hafif iki çekirdeğe dönüşürler. Bu yüzden atom numarası çok büyük olan birkaç transuranik elementler dışında, bu olay çok olası bir bozunma değildir. Kendiliğinden bozunmaya gösterilebilecek en genel örnek ^{252}Cf çekirdeğidir. Bu çekirdek her 85 yılda bir kez bozularak daha hafif iki çekirdeğe dönüşür. Fakat bununla birlikte her ^{252}Cf çekirdeğinin bir alfa parçacığı yayma olasılığı, kendiliğinde bozunma olasılığından daha büyüktür. Bu yüzden bu elementin gerçek yarı ömrü 2,65 yıldır ve 1 mikrogram ^{252}Cf çekirdeği saniyede $1,92 \cdot 10^7$ alfa parçacığı yayıp $6,14 \cdot 10^5$ kez kendiliğinden bozunmaya uğrar (Knoll., 2000; Debertin ve Helmer., 1988).

1.4. Elektromanyetik Radyasyon Kaynakları

1.4.1. Beta Bozunması Sonucu Yayınlanan Gama-Işınları

Gama ışınları, nükleer seviyeler arasındaki geçişler sonucu yayınlanan radyasyon çeşitidir. Gama ışınları genellikle bir nükleer bozunma sonucu uyarılmış seviyede bırakılan ürün çekirdeğin kararlı duruma geçmesiyle beraber yayınlanır.



Şekil 1. 1. Bazı genel gama referans kaynaklarının bozunma şemaları

Şekil 1.1’de gama-dedektörleri kalibrasyonunda kullanılan dört temel gama-ışını kaynağı verilmiştir. Her durumda bir β bozunması, bir veya birçok gama-ışını yayınlanmasını başlatan bir süreçte rol oynar. Beta ışımalarının yarı ömürleri (birkaç yüz gün veya daha uzun), uyarılmış nükleer durumun yarı ömrüyle kıyaslandığında (piko saniye mertebesinde) çok büyük olduğundan, yayınlanan gama-ışınının yarı ömrü ana çekirdeğin yarı ömrüyle, enerjisi ise ürün çekirdeğin enerjisiyle karakterize edilir.

Nükleer enerji seviyeleri çok spesifik olduklarından, bu seviyelerden yayınlanan gama enerjileri de çok spesifik olur. Nükleer seviyelerin herhangi birinden yayınlanan gama enerjileri hemen hemen tek enerjilidirler. Bu nedenle gama spektroskopisinde gözlenen gama çizgilerinin düz bir çizgi şeklinde gözlenmesi beklenir. Ancak çoğu durumda dedektörün rezolüsyonundan dolayı bu pikler bir Gauss dağılımı şeklinde gözlenirler.

Beta bozunması sonucu yayınlanan gama ışınlarının enerjileri genellikle 2,8 MeV’ den daha düşüktür. Bu enerjiden daha yüksek bir gama ışını (3,55 MeV) yayınlayan bir

kaynak ^{56}Co olabilir. Ancak bu radyoizotopun kısa yarı-ömrü (77 gün) onun laboratuarda pratik amaçlar için kullanılmasını sınırlandırmaktadır. Aynı şekilde, iki farklı enerjide (6, 13 MeV ve 7,11 MeV) gama ışını üreten bir diğer radyoizotop ^{16}N dur. Ancak bu radyoizotopun da oldukça kısa yarı-ömrü (7 saniye) onun kullanılmasını oldukça zorlaştırmaktadır.

1.4.2. Yok Olma Radyasyonu

Eğer bir ana çekirdek bir β^+ ışınması yaparsa, bununla beraber diğer bir radyasyon da yayınlanır. Bu radyasyonun kaynağı, temel bozunmada açığa çıkan pozitrona dayanır. Pozitronlar bütün kinetik enerjilerini kaybetmeden önce sadece birkaç milimetre yol alabilirler ve ana çekirdeği saran materyalin elektronlarından biriyle birleşerek yok olurlar. Bunu sonucunda orijinal elektron ve pozitron kaybolur, buna karşın zıt yönlerde yönlenmiş her biri 0,511 MeV olan ve yok olma radyasyonu olarak adlandırılan iki foton yayınlanır.

1.4.3. Nükleer Reaksiyonlar Sonucunda Yayınlanan Gama Işınları

Eğer beta ışınmasını takip eden gama ışınlarından daha yüksek enerjili gama ışınlarına ihtiyaç duyulursa, bu ışınları üretmek için nükleer reaksiyonlara ihtiyaç duyulur. Bu reaksiyonlardan bir tanesi aşağıda verilmiştir.



Burada reaksiyon sonucunda $^{12}\text{C}^*$ ürün çekirdeği uyarılmış bir seviyede bırakılır. Bu seviyenin bozunması sonucu 4,44 MeV enerjisinde bir gama ışını yayınlanır. Ancak ne yazık ki bu uyarılmış seviyenin ömrü o kadar kısadır ki (61 fs) üretilen gama enerjisi Doppler etkisi altında genişler. Bu enerji birçok dedektörün kalibrasyonu için yeterince monoenerjiktir ancak rezolüsyonu çok iyi olmayan dedektörlerin kalibrasyonunda pek kullanılmazlar.

Diğer bir gama ışını üreten nükleer reaksiyon aşağıda verilmiştir.



Burada $^{16}\text{O}^*$ ürün çekirdeği taban durumundan 6,13 MeV seviyesine uyarılabilir ve buradaki ömrü yaklaşık 2.10^{-11} saniyedir. Bu ortalama ömür, Doppler etkisini yok edecek kadar yeterince uzundur ve bu enerjideki foton monoenerjiktir.

1.4.4. Frenleme (Bremsstrahlung) Işıması

Hızlı elektronlar maddeyle etkileştikleri zaman enerjilerinin bir kısmını elektromanyetik radyasyona dönüştürürler. Bremsstrahlung türüne dönüştürülen bu enerji, elektronun artan enerjisiyle beraber artar. Bu işlem X- ışını tüplerinde X-ışını üretmek için kullanılır.

Madde içerisinde yavaşlatılan ve sonuçta durdurulan bu monoenerjik elektronlardan üretilen Bremsstrahlung, sürekli bir spektrum verir. Bu sürekli radyasyon türü, radyasyon dedektörlerinin kalibrasyonunda kullanılamaz.

1.4.5. Karakteristik X-ışınları

Eğer bir atomun orbital elektronlarının düzeni herhangi bir uyarılma şekliyle bozulursa, atom bu uyarılma seviyesinde çok kısa bir süre için kalabilir. Ancak atomda doğal olarak kendini tekrar en düşük enerji seviyesine veya taban durumuna getirme eğilimi vardır ve nanosaniye mertebesi kadar kısa bir sürede atom elektronik konfigürasyonunu tekrar düzenler. Bunun sonucunda son enerji seviyesiyle ilk enerji seviyesi arasındaki fark kadar bir enerji, karakteristik X- ışını olarak yayınlanır. Eğer bu geçici boşluk atomun K tabakasında meydana getirilirse bunun sonucunda yayınlanan ışın karakteristik K X- ışını adını alır. Adından da anlaşıldığı gibi karakteristik X- ışınları her element için tek değere sahip olduğundan, bilinmeyen maddelerin element analizinde genişçe kullanılmaktadırlar (Debertin ve Hemler., 1988).

Birçok fiziksel süreç X- ışınlarının üretilmesine sebep olabilir. Ancak aşağıda en genel olan iki fiziksel süreç verilmiştir.

1.4.6. Radyoaktif Bozunma Sonucunda Uyarılma

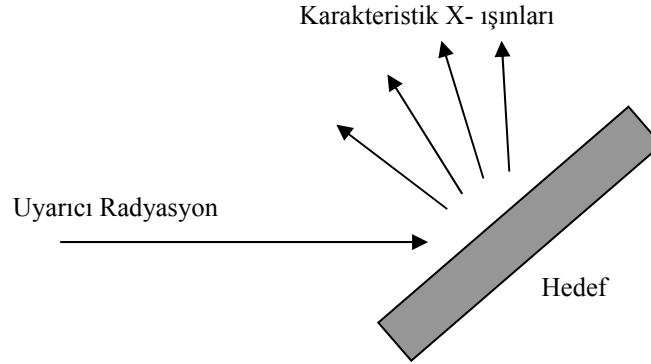
Elektron yakalama olayında, atom çekirdeği orbital elektronlarından bir tanesini (genellikle K tabakasından) yakalar ve böylece atomun elektronik konfigürasyonunda

geçici bir değişiklik meydana gelir. Bu boşluğun doldurulması sonucunda bir karakteristik X-ışını yayınlanır. Bu gibi olaylarda ürün çekirdek bir uyarılma seviyesine bozunduğundan karakteristik X-ışınına aynı zamanda gama ışını da eşlik eder.

İç dönüşüm olayı da aynı zamanda karakteristik X- ışını üretebilir. Daha önce açıklandığı gibi, iç dönüşüm olayı atomun iç yörünge elektronlarından birini kopararak (genellikle K tabakasından) orada bir boşluk oluşturmaya ve sonuç olarak karakteristik X- ışını yayınlanmasına sebep olur. İç dönüşüm olayı sonucunda üretilen elektronun enerjisi yeterince büyük ise, ölçülebilir seviyede Bramsstrahlung olayı da gözlenebilir. Bu olay İç Bramsstrahlung olarak da bilinir.

1.4.7. Dış Kaynaklar Tarafından Uyarılma

Şekil 1.2’de gösterildiği gibi, herhangi bir dış kaynaktan dolayı (X-ışınları, elektronlar, alfa parçacıkları, v.b.) karakteristik X- ışınları üretilebilirler.



Şekil 1. 2. Belirli bir hedef materyalden karakteristik X- ışını üretme metodu

Uyarıcı radyasyon X-ışınları, elektronlar, alfa parçacıkları veya diğer herhangi bir formdaki radyasyon çeşidi olabilir.

1.4.8. Hızlandırıcı (Cyclotron) Radyasyonu

Radyasyonun diğerk bir formu, enerjik elektronların dairesel bir yörüngede bükülmeleri sonucu elde edilirler. Elektromanyetik teoriye göre, elektronun sahip olduğu enerjinin bir kısmı her bir dönüşte harcanır. Üretilen elektromanyetik radyasyonun enerjisi, görünür ışıktan (birkaç eV) 10^4 eV' e kadar üretilebilirler. Hızlandırıcı radyasyonu yüksek şiddette ve ayarlanabilir özelliklerinden dolayı laboratuvar deneylerinde kullanılmaları açısından çok faydalı bir elektromanyetik radyasyon türüdür.

1.5. Nötron Kaynakları

Nötronların yayınlanması, bir beta bozunması sonucu yayınlanan gama ışını ile aynı mekanizmaya sahip olmasına rağmen, böylesi bir yayınlama çok olası bir durum değildir. Aşağıdaki bozunma, nötron salınmasına bir örnektir.



Burada uyarılmış seviyede bırakılan Kr elementi bir nötron salarak kararlı hale gelir. En genel nötron elde etme yöntemleri ya kendiliğinden salınma olayı ya da nükleer reaksiyonlardır.

1.5.1. Kendiliğinden Salınma

Birçok transuranik (yüksek atom numaralı) ağır çekirdek kendiliğinden salınmaya karşı kararsızdır. Her bir bozunma olayında birçok nötron salınımı olur, dolayısıyla böylesine basit bir salınma olayı temel nötron üretiminin kaynağıdır. En çok bilinen kendiliğinden salınım yapan element ${}^{252}\text{Cf}$ çekirdeğidir. Bu elementin yarı ömrü 2,65 yıl olup, en olası bozunma olayı alfa salınımıdır ve alfa salınım olasılığı kendiliğinden salınım olasılığından yaklaşık 32 kat daha büyüktür. Bu elementten salınan nötronların enerjisi 0,5 ile 1 MeV arasında değişir.

1.5.2. (α , n) Reaksiyonları

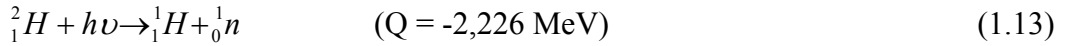
Alfa parçacığı üreten birçok radyoizotop mevcut olduğundan, uygun hedef seçilerek nötronlar üretilir. Hedef malzeme olarak berilyum seçildiğinde maksimum oranda nötron elde edilebilir. Bu reaksiyon şematik olarak aşağıda gösterilmiştir.



Bu reaksiyonda Q değeri +5,71 MeV'dir.

1.5.3. Fotonötron Kaynakları

Gama ışını yayan bazı radyoizotoplar uygun bir hedef element kullanılarak nötron üretimde kullanılabilirler. Burada temel faktör, gama fotonunun hedef çekirdekte bir serbest nötron üretebilecek enerjide olmasıdır. En çok kullanılan hedef çekirdekler ${}^9\text{Be}$ ve ${}^2\text{H}$ çekirdekleridir. İlgili reaksiyonlar aşağıdaki gibi şematik olarak gösterilebilirler.

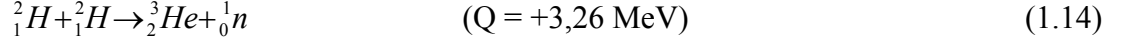


Fotonötron kaynaklarının en büyük dezavantajı, nötronların yüksek bir gama ışını backgroundu ile beraber gözlenebilmeleridir. Kullanılan 10^5 veya 10^6 gama fotonundan yalnızca bir tanesi hedef çekirdekle etkileşip bir nötron üretebilir. Dolayısıyla dedekte edilebilir bir oranda nötron üretebilmek için çok sayıda gama ışını fotonu kullanmak gerekir ki bu da spektrumda gama ışını backgroundunu artırmaktadır (Knoll., 2000).

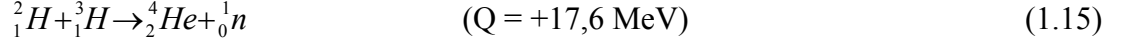
1.5.4. Hızlandırılmış Yüklü Parçacık Reaksiyonları

Nötron üreten iki temel reaksiyon mevcuttur. Bu reaksiyonlar aşağıda şematik olarak gösterilmişlerdir.

D-D reaksiyonları:



D-T reaksiyonları:



Nötron üretebilmek için döteronların yüksek potansiyel fark altında hızlandırılması gerekir (100- 300 kV).

1.6. Ağır Yüklü Parçacıkların Madde ile Etkileşimi

1.6.1. Etkileşimin Doğası

Ağır yüklü atomların örneğin alfa parçacıklarının madde ile etkileşimi, kendi pozitif yüküyle ve etkileştiği maddenin elektronlarıyla olmak üzere Coulomb etkileşimidir. Bu tür etkileşmelerde çekirdekler arasında da bir etkileşme mümkün olmasına rağmen (örneğin Rutherford saçılması gibi), radyasyon dedektörlerinin cevap fonksiyonunu çok az etkiledikleri için çok ta önemli değildir.

Madde içerisine girer girmez, ağır yüklü parçacık, maddenin birçok elektronuyla etkileşir. Böyle bir etkileşimde elektron, yakınından geçen parçacıktan dolayı bir impuls kuvveti hisseder. Bu etkileşimin şiddetine bağlı olarak impuls kuvveti elektronu ya bir üst enerji seviyesine çıkarır (uyarma), veya atomdan tamamen koparır (iyonizasyon). Bu enerji transferinden dolayı parçacığın enerjisinde ve dolayısıyla hızında bir azalma gözlenir. Tek bir çarpışma için E enerjili ve m kütleli bir parçacığın m_0 kütleli bir elektrona transfer edeceği maksimum enerji $4Em_0/m$ veya parçacığın enerjisinin $1/500$ 'ü kadardır. Bu enerji, parçacığın toplam enerjisinin çok küçük bir oranı olduğu için, parçacık durana kadar birçok elektronla etkileşime girer.

Bu etkileşimlerin ürünleri ya uyarılmış atomlar ya da iyon çiftleridir. Her bir iyon çifti bir serbest elektrondan ve ona karşılık gelen pozitif iyonize olmuş bir atomdan oluşur. İyon çiftleri doğal olarak birleşip nötr atomlar oluşturma eğilimindedir.

Yüklü parçacıkların elektronlarla çok yakın etkileşmeleri sonucunda bir elektron yeterince büyük bir enerjiye sahip olup iyon çiftleri oluşmasına sebep olabilir. Bu yüksek enerjili elektronlara *delta ışınları* denir. Delta ışınlarının menzilleri gelen parçacığın menziliyle karşılaştırıldığında her zaman daha küçüktür. Dolayısıyla iyon çiftleri ana hat boyunca dağılmışlardır. Mikroskobik boyutta bu sürecin bir sonucu olarak, iyon çiftleri gelen parçacığın etkileşim hattı etrafına gelişi güzel dağılmaktan ziyade, hep bir arada olma eğilimlidir.

1.7. Gama Işınlarının Madde ile Etkileşimi

Gama ışınlarının maddeyle etkileşimi birçok şekilde olabilirken, en çok bilinen üç tip etkileşim ele alınacaktır. Bunlar fotoelektrik soğurma, Compton saçılması ve çift oluşum olayıdır. Bu etkileşimlerin sonucunda, foton enerjisinin bir bölümü ya da tamamı elektrona transfer edilir. Bu enerji transferi, fotonda büyük değişiklikler oluşturur, örneğin foton tamamen kaybolabileceği gibi, belli bir açıyla da saçılabilir.

1.7.1. Fotoelektrik Soğurma

Fotoelektrik soğurma olayında foton tamamen kaybolacak şekilde soğurucu bir atomla etkileşime girer. Bunun yerine atomun orbital elektronlarında bir tanesi koparılır. Bu etkileşim, serbest bir elektronla değil, atomun kendisiyle (yani iç yörünge elektronlarıyla) meydana gelir. Yeterince enerjik bir fotoelektron için en muhtemel etkileşim atomun K tabakasındaki elektronla olur ve elektron aşağıdaki enerjiye sahip olur.

$$E_{e^-} = h\nu - E_b \quad (1.16)$$

burada E_b elektronun orijinal kabuğuna bağlanma enerjisini gösterir. Enerjisi birkaç yüz keV olan bir gama ışınının ürettiği elektron, bu enerjinin hemen hemen hepsini taşır. Enerjisi yaklaşık 30 keV olan gama ışını fotonlarının xenon atomuyla etkileşimi, sonucunda, etkileşimin %86'sı xenonun K tabakasındaki elektronlarıyla olur. Bu etkileşimin %87,5'i karakteristik K-ışınlarının yayınlanmasıyla, %12,5'i de Auger elektronlarının yayınlanmasıyla sonuçlanır. K tabakasıyla etkileşime girmeyen %14'lük bir kısım ise L veya M tabakasındaki elektronlarla etkileşime girer.

Fotoelektrik soğurma olayı, düşük enerjili gama ışınları için olasılığı yüksek bir etkileşim olayıdır. Bu ihtimaliyet soğurucu atomun atom numarasının artmasıyla artar. Bu olasılık için kesin bir matematiksel bağıntı olmamakla beraber, aşağıdaki gibi yaklaşık bir ilişki yazılabilir (Knoll., 2000):

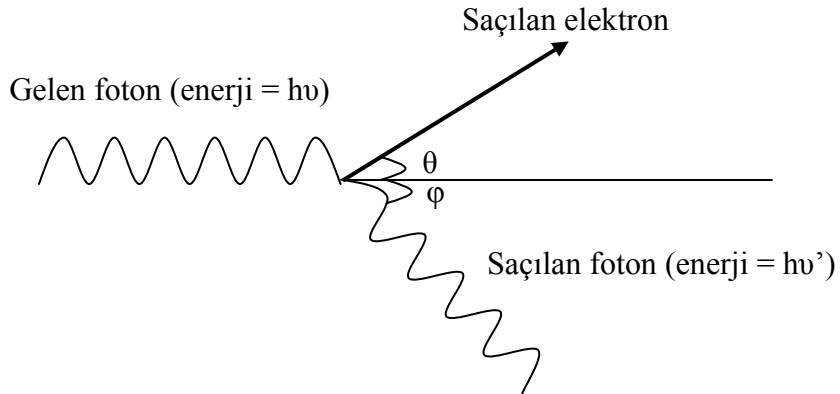
$$\tau \cong \text{sabit} \frac{Z^n}{E_\gamma^{3,5}} \quad (1.17)$$

Burada n sayısı 3 ile 4 arasında değişen bir parametredir. Gama ışınlarının soğurulmasının atom numarasına bu denli sıkıca bağlı olması, gama dedektörlerinin atom numarası yüksek elementlerden üretilmesini gerektirir.

1.7.2. Compton Saçılması

Compton saçılması gama ışınlarıyla soğurucu atomun çok zayıf bağlı elektronları arasında gerçekleşen bir etkileşim türüdür. Compton saçılmasında gelen foton, elektronla etkileştikten sonra (elektrona belli oranda enerji transfer ederek) geliş yönünden belli bir açı kadar saçılır. Enerjik olarak bütün açılarda saçılma gerçekleşebileceğinden, elektrona transfer edilen bu enerji sıfırdan, çok büyük oranlara kadar değişebilir.

Herhangi bir etkileşimde enerji transferini veren ifade, basitçe enerji ve momentumun korunumu ifadelerini veren denklemlerin aynı anda çözülmesiyle elde edilir. Şekil 1.3 dikkate alındığında;



Şekil 1. 3. Compton saçılmasının şematik gösterimi

aşağıdaki bağıntı kolaylıkla çıkarılabilir:

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{m_0c^2}(1 - \cos\varphi)} \quad (1.18)$$

Burada m_0c^2 elektronun durgun kütle enerjisidir (0,511 MeV). Küçük saçılma açıları için, enerjinin küçük bir kesri transfer edilecektir.

Compton saçılmasının meydana gelme ihtimaliyeti, ortamda bulunan saçıcı elektron sayısı ile orantılı olduğundan Z ile doğrusal olarak artar.

Çeşitli saçılma tesir kesitleri için saçılan gama ışınlarının açısal dağılımı, *Klein-Nishina* formülüyle tahmin edilmektedir:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = Zr_0^2 \left(\frac{1}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)} \right)^2 \left(\frac{1 + \cos^2\theta}{2} \right) \left(1 + \frac{\alpha^2(1 - \cos\theta)^2}{(1 + \cos^2\theta)[1 + \alpha(1 - \cos\theta)]} \right) \quad (1.19)$$

burada $\alpha \equiv h\nu / m_0c^2$ ve r_0 ise klasik elektron yarıçapıdır.

1.7.3. Çift Oluşumu

Eğer gama ışını enerjisi, elektronun durgun kütle enerjisinin iki katını (1,02 MeV) aşarsa, çift oluşum olayı enerjik olarak mümkün hale gelir. Fakat pratikte bu enerjinin birkaç MeV olduğu durumlarda ancak çift oluşum olayı gözlenir. Bu yüzden bu etkileşim olayı ancak çok yüksek enerjili fotonlar için olası bir etkileşim biçimidir. Çekirdeğin Coulomb alanıyla etkileşim sonucu foton kaybolarak bir elektron-pozitron çifti oluşur. Daha sonra pozitron soğurucu atomun dış kabuk elektronlarından biriyle etkileşerek yok olduğundan, yok olma fotonları bu etkileşimle beraber yayınlanır.

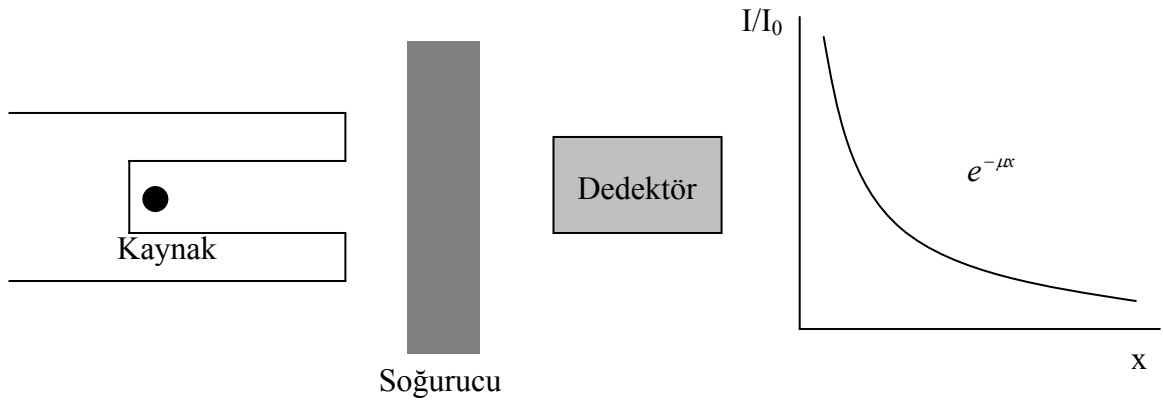
Çift oluşum olayı için herhangi bir matematiksel bağıntı yoktur. Ancak bu olayın olma ihtimali soğurucu atomun atom numarasının karesiyle arttığı gözlemlenmiştir.

1.7.4. Koherent Saçılma

Compton saçılması yanı sıra Koherent veya Rayleigh saçılması denen diğer bir saçılma olayı daha vardır. Bu saçılma olayında etkileşme sonucunda foton başlangıçtaki enerjisini aynen koruduğundan, etkileşime giren atom ne uyarılır ne de iyonize edilir. Herhangi bir enerji transferi söz konusu olmadığından, bu etkileşim türü genellikle ihmal edilir veya hiç bahsedilmez. Ancak, koherent saçılmada, gelen fotonun yönü değişir. Bu saçılma daha çok enerjisi düşük fotonlarda (birkaç yüz keV) yüksek ihtimalle olur ve yüksek Z değerli atomlarda daha olasıdır. Ortalama saçılma açısı artan enerjiyle beraber azalır.

1.8. Gama Işınlarmın Soğrulması

İnce bir demet şeklinde kolime edilmiş gama ışınlarının şiddeti, değişik kalınlıklarda soğurucu bir madde içinden geçtikten sonra bir dedektör üzerine düşürüldüğü zaman eksponansiyel olan bir azalma şeklinde gözlenecektir. Her bir etkileşim, demet içinde bir miktar gama fotonunun, belli bir ihtimaliyet dâhilinde gerçekleşen soğurma veya saçılma şeklinde dedektöre gitmesini engelleyecektir. Bu ihtimaliyetlerin her birinin toplamı, birim kalınlık başına toplam soğrulma ihtimaliyetini verir ve lineer soğurma katsayısı olarak tanımlanır. Şekil 1.4'te bu olay şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 1. 4. Soğurma olayının şematik gösterimi

Soğurucu maddeden geçen foton sayısı I , gelen foton sayısı da I_0 olmak üzere;

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\mu x} \quad (1.20)$$

bağıntısı yazılabilir. Gama ışını fotonları aynı zamanda herhangi bir etkileşme meydana gelmeden önce aldıkları ortalama serbest yolları (λ) bakımından da karakterize edilebilirler. Bu ortalama serbest yolun değeri aşağıdaki şekilde elde edilebilir:

$$l = \frac{\int_0^{\infty} x e^{-\mu x} dx}{\int_0^{\infty} e^{-\mu x} dx} = \frac{1}{\mu} \quad (1.21)$$

Gama ışınları için katı içinde ortalama serbest yolun (l) tipik değeri birkaç mm ile birkaç cm arasında değişir. Aynı malzeme için bile olsa, lineer soğurma katsayısı yoğunlukla değiştiği için kütle soğurma katsayısının kullanılması daha kullanışlıdır (μ/ρ), burada ρ malzemenin yoğunluğudur. Bir gama fotonu için, kütle soğurma katsayısı malzemenin fiziksel fazıyla değişiklik göstermez. Yani, kütle soğurma katsayısı su için sıvı veya buhar fazında olması önemsenmeden aynıdır. Herhangi bir bileşik veya karışımın kütle soğurma katsayısı ise aşağıdaki denklemle elde edilebilir.

$$\left(\frac{\mu}{\rho}\right) = \sum_i w_i \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i \quad (1.22)$$

Burada w_i i elementinin bileşik içindeki ağırlık faktörüdür. Soğurma olayı başka bir formatta aşağıdaki şekilde de ifade edilebilir:

$$\frac{I}{I_0} = e^{-(\mu/\rho)\rho x} \quad (1.23)$$

burada ρx çarpanı kütle kalınlığı olarak bilinir ve soğurmanın derecesini veren faydalı bir ifadedir ve birimi g/cm^2 'dir. Radyasyon ölçümlerinde soğurucu malzemenin fiziksel kalınlığı yerine kütle kalınlığı tercih edilen bir parametredir.

1.9. Radyasyona Maruz Kalma ve Doz Kavramı

1.9.1. Gama Radyasyonuna Maruz Kalma

Gama ışınlarına maruz kalma, birim kütleye (dm) sahip birim hacimdeki havada ikincil elektronlar tarafından iyonizasyondan dolayı oluşturulan dQ yükü olarak tarif edilir. O halde maruz kalma değeri dQ/dm olarak tanımlanabilir. SI birim sistemindeki karşılığı *Coulomb/kilogram*' dır. Tarihsel olarak buna *Roentgen* denir ve 0,001293 g havada oluşturulan $2,08 \times 10^9$ iyon çifti olarak tanımlanır.

Işıması bilinen bir radyoaktif kaynağın maruz kalma oranı aşağıdaki şartlar altında kolayca ifade edilebilir:

1. Kaynak yeterince küçükse ve dolayısıyla küresel geometri bozulmamışsa, (foton akış oranı $1/d^2$ ile azalır, burada d kaynaktan ölçülen mesafedir)
2. Kaynak ile, ölçülmek istenen mesafe arasında hiçbir soğurma meydana gelmiyorsa,
3. Sadece kaynaktan çıkan fotonlar maruz kalmaya katkıda bulunuyorsa ve diğer herhangi bir saçılma ihmal edilirse.

O halde maruz kalma oranı aşağıdaki şekilde verilir.

$$X = \Gamma_{\delta} \frac{\alpha}{d^2} \quad (1.24)$$

Burada α kaynağın aktivitesi, Γ_{δ} ise verilen spesifik bir radyoizotop kaynağın maruz kalma sabiti olarak tarif edilir. Bazı radyoizotopların Γ_{δ} değerleri Tablo 1.4'te verilmiştir.

Tablo 1. 4. Gama ışını üreten bazı radyoaktif kaynaklar için maruz kalma sabitleri

Çekirdek	Γ_{δ}
Antimon-124	9,8
Sezyum-137	3,3
Kobalt-57	0,9
Kobalt-60	13,2
Iyot-131	2,2
Mangan-54	4,7
Radyum-226	8,25
Sodyum-22	12,0
Sodyum-24	18,4
Çinko-65	2,7

1.9.2. Alınan Doz

İki farklı madde aynı radyasyon kaynağına maruz bırakılırlarsa, bu radyasyon kaynağından farklı miktarda enerji soğurlar. Çünkü malzemenin fiziksel ve kimyasal yapısı, reaksiyona girme özellikleri gibi kimyasal özellikler de dahil olmak üzere birçok nicelik birim kütle tarafından soğrulan bu enerjiyi belirler. Herhangi bir radyasyon kaynağından birim kütle başına absorbe edilen enerji miktarı *soğrulan doz* olarak tarif edilir. Soğrulan dozun tarihsel birimi, 100 erg/gram olan *rad* olarak belirtilir. Daha sonra bu nicelik SI birim sistemindeki değeriyle yer değiştirmiş ve 1 joule/kilogram olan *gray* (Gy) olarak tanımlanmıştır. Bu iki birim basitçe $1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$ şeklinde birbirine dönüştürülebilir.

1.9.3. Doz Eşdeğeri

Radyasyonun yaşayan canlılar üzerindeki biyolojik etkileri incelendiğinde, farklı ışınma koşulları altında birim kütle başına soğrulan eşit miktardaki enerjinin aynı biyolojik

etkiyi oluşturacağı garanti edilemez. Gerçekte oluşan biyolojik etki, hangi tür ışıma türüne maruz kalındığıyla ilişkilidir.

Radyasyon tarafından oluşturulan biyolojik hasarlar, biyolojik moleküllerdeki kimyasal değişimler incelenerek belirlenebilir. Bu değişikliklerin çeşitliliği ve kalıcılığı, organizmaya verilen ve *lineer enerji transferi (L)* olarak bilinen ($-dE/dx$) nicelikle ilişkilidir. Birim kütle başına transfer edilen enerji miktarı eşit olmasına rağmen, L'si büyük olan radyasyonlar (ağır yüklü iyonlar gibi) L'si küçük olan radyasyonlardan (elektronlar gibi) daha ağır biyolojik hasarlara neden olur.

Bu yüzden doz eşdeğeri kavramı, oluşan biyolojik hasarı belirlemek için kullanılır. O halde doz eşdeğeri (H), absorbe edilen dozla (D), radyasyon çeşidini tanımlayan kalite faktörünün (Q) çarpımıyla elde edilir:

$$H=DQ \quad (1.25)$$

Tablo 1.5'te de görüldüğü üzere Q, lineer enerji transferi L ile doğru orantılı olarak değişir.

Tablo 1. 5. Farklı radyasyon tipleri için kalite faktörleri

L	Q
< 10	1
10-100	$0,32L-2,2$
>100	$300/\sqrt{L}$

Doz eşdeğeri (H) için kullanılan birimler, D'nin birimine bağlıdır. Eğer D *rad* biriminde ifade edilirse, H *rem* olur. SI birim değişimi altında D, *gray* (Gy) olarak ifade edilirse doz eşdeğeri *seivert* (Sv) halini alır. Örneğin 5 kalite (Q) değerine sahip bir radyasyondan absorbe edilen 2 Gy'lik doz, 10 Sv'lik doz eşdeğerine sahip olur. Aynı şekilde doz eşdeğeri birimleri arasında $1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$ ilişkisi vardır.

1.9.4. ICRP Doz Birimleri

ICRP (International Commission on Radiological Protection) 60 baskısında, radyasyondan korunma literatüründe kullanılan birçok tanımlar yapılmıştır. Örneğin *equivalent dose* ($H_{T,R}$) denilen yeni bir birim tanıtılmıştır. Bu nicelik, herhangi bir T organı tarafından R radyasyonundan dolayı absorbe edilen $D_{T,R}$ ile değişik radyasyon tiplerinin radyasyon ağırlık faktörü w_R 'nin çarpımıyla elde edilir:

$$H_{T,R} = w_R \cdot D_{T,R} \quad (1.26)$$

Tablo 1.6'da enerji aralıkları ve radyasyon tiplerinin sahip olduğu radyasyon ağırlık faktörleri gösterilmiştir.

Tablo 1. 6. Enerji aralıkları ve radyasyon tiplerinin sahip olduğu radyasyon ağırlık faktörleri

Radyasyon Tipi, Enerji Aralığı	Radyasyon Ağırlık Faktörü, w_R
Fotonlar, bütün enerjiler	1
Elektronlar ve Müonlar, Tüm enerjiler	1
Nötronlar, <10 keV	5
10 keV'den 100 keV'e	10
> 100 keV'den 2 MeV'e	20
> 2 MeV'den 20 MeV'e	10
> 20 MeV	5
Protonlar, > 2 MeV	5
Alfa Parçacıkları, Ağır Çekirdekler	20

Absorbe edilen doz Gy olarak ifade edilirse, doz eşdeğeri Sv olur. Eğer bir radyasyonun karışımından bahsediliyorsa, o halde toplam doz eşdeğeri H_T , bütün radyasyon tipleri üzerinden toplam alınarak elde edilir:

$$H_T = \sum_R H_{T,R} = \sum_R w_R \cdot D_{T,R} \quad (1.27)$$

Burada w_T değişik organların değişik radyasyon tiplerine karşı hassasiyetlerini tanımlar. Efektif doz ise,

$$E = \sum_T \sum_R w_T \cdot w_R \cdot D_{T,R} = \sum_T w_T \cdot H_T \quad (1.28)$$

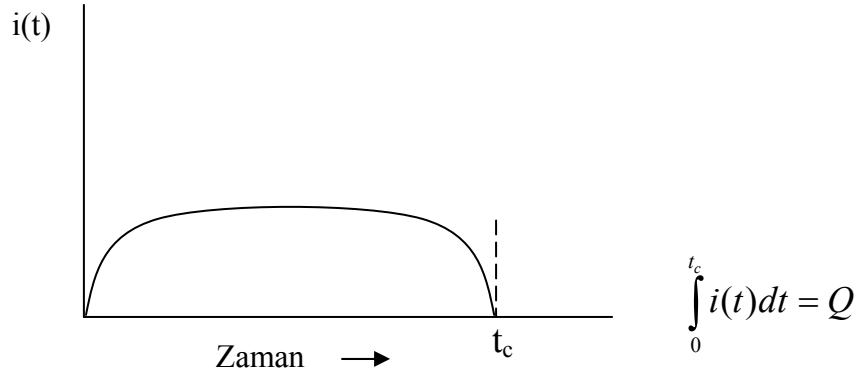
şeklinde ifade edilir.

1.10. Radyasyon Dedektörlerinin Genel Özellikleri

1.10.1. Basitleştirilmiş Dedektör Modeli

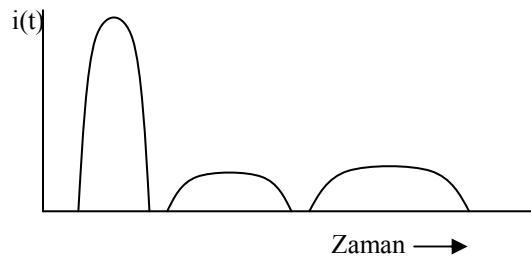
Tek bir parçacığın veya bir radyasyon kuantasının bir radyasyon dedektörüne geldiğini varsayalım. Dedektörün buna bir cevap üretebilmesi için bu radyasyonun fotoelektrik olay, Compton olayı veya çift oluşumu olaylarından herhangi biri veya birkaçı yoluyla dedektörle etkileşmesi gerekmektedir. Her bir etkileşme sonucunda belirli oranda enerji dedektöre depo edilir. Bu etkileşme süresi o kadar küçüktür ki (tipik olarak gazlarda birkaç milisaniye, katılarda ise birkaç pikosaniye) enerjinin dedektöre eş zamanlı depo edildiği kabul edilebilir. Bu radyasyon etkileşmesinin net sonucu dedektörün aktif hacminde bir elektrik sinyali olarak ortaya çıkar.

Bir parçacığın veya radyasyon kuantasının dedektörle etkileşmesi sonucunda oluşan Q yükünün $t=0$ anında üretildiğini varsayalım. Net bir elektrik sinyalinin üretilebilmesi için, bu yükün bir yerden başka bir yere toplanması gerekmektedir. Bu yük toplanması, dedektör içerisinde net bir elektrik alanı oluşturularak gerçekleştirilebilir. Yükleri toplamak için gerekli zaman (yük toplama zamanı), dedektörden dedektöre değişen bir parametredir. Örneğin bu zaman bir iyon çemberinde birkaç milisaniye iken, katıhal dedektörlerinde birkaç nanosaniye olabilir. Yük toplama zamanı, aynı zamanda yüklerin dedektör içindeki mobilitelerini ve elektrotlara ulaşmadan önce kat ettikleri yolu veren bir parametredir. Böylece dedektör modelimizin bir parçacığa veya bir radyasyon kuantasına verdiği cevap, verilen bir yük toplama zamanı için dedektörde oluşturulan Şekil 1.5'te gösterilen bir akım şeklinde olacaktır.



Şekil 1. 5. Basit dedektör modeli

Gerçek bir durum göz önüne alındığında, belli bir zaman aralığında birden fazla radyasyon kuantası dedektörle etkileşime girer. Böyle bir durumda her bir etkileşime ürünü olan akımlar birbirine karışarak durum daha da karmaşık hale gelebilir. Ancak bizim basit dedektör modelimizde, etkileşime oranını her bir etkileşmeyi birbirinden ayırt edebilecek kadar düşük olduğu varsayılmaktadır. Böylece akan akımın şiddetinin ve süresinin Şekil 1.6'da gösterildiği gibi etkileşmenin türüne bağlı olarak değişiklik gösterdiği kolayca gözlenebilir.

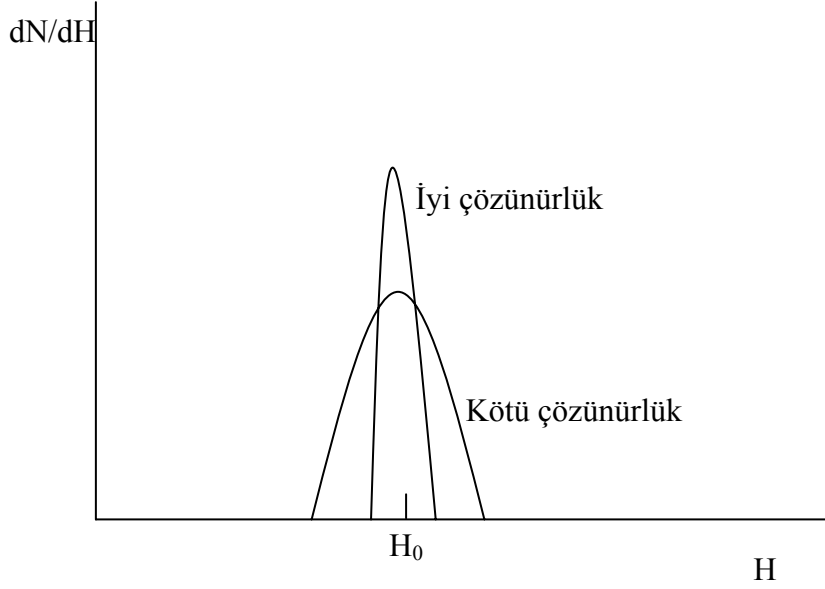


Şekil 1. 6. Zaman-Akım grafiği

1.10.2. Enerji Rezolüsyon

Radyasyon dedektörlerinin diğer önemli bir özeliği de monoenerjik bir radyasyon kaynağına karşı verdiği cevaptır. Şekil 1.7'de bir dedektörün puls yükseklik dağılımı iki ayrı durum için gösterilmiştir. Bu dağılım dedektörün cevap fonksiyonu olarak adlandırılır.

Şekil 1.7’de gösterildiği gibi *iyi çözünürlük* diye adlandırılan birinci eğri ortalama bir puls yüksekliği etrafındaki dağılımı gösterirken, *kötü çözünürlük* olarak adlandırılan ikinci eğri, aynı dağılımın daha kötü performansını göstermektedir.



Şekil 1. 7. Çözünürlük eğrileri

Her iki durum için de eğrilerin altında kalan alanlar eşittir. Her iki dağılım ortalama bir puls yüksekliğinde merkezlenmesine rağmen (H_0), ikinci durumda daha geniş bir puls yüksekliği görülmektedir. Bu genişlik, her bir durumda dedektöre eşit miktarda enerji kaydedildiği halde, daha fazla dalgalanmanın olduğunu gösterir. Eğer bu dalgalanma miktarı azaltılırsa, dağılımın genişliği de azalacak ve daha keskin bir pik elde edilecektir.

FWHM (Full Width at Half Maximum) parametresinin H_0 'a bölünmesiyle bir dedektörünün rezolüsyonu hesaplanabilir. Yani rezolüsyon bir oranı belirten boyutsuz bir büyüklüktür. Alfa spektroskopisinde kullanılan yarıiletken diyot dedektörlerinin rezolüsyonu %1'den küçükken, gama ışını spektroskopisinde kullanılan sintilasyon dedektörlerinin %5-10'dan daha fazla olabilir. Bir dedektörün enerji rezolüsyonu ne kadar iyiyse, o dedektörün birbirlerinin çok yakınına konuşlanmış iki piki birbirinden ayırma yeteneği de o kadar iyi olur.

Kötü rezolüsyona sebep olan birçok fiziksel parametre vardır. Bunlar, yüklerin toplanması sonucunda oluşan kayıplar, elektronik gürültüden kaynaklanan enerjideki dalgalanmalar ve radyasyonun doğasında var olan istatistiksel dalgalanmalardır.

Bir radyasyon kuantasının dedektörle etkileşmesi sonucunda N tane yük taşıyıcısının olduğu varsayılırsa, bu sayıyla ilişkili standart sapmanın \sqrt{N} olması beklenir. Enerji dağılımının sadece bu parametreden kaynaklandığı varsayılırsa, dağılım bir Gauss dağılımı şeklinde olur ve aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$G(H) = \frac{A}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(H - H_0)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1.29)$$

Genişlik parametresi (σ) herhangi bir Gauss dağılımında FWHM ile $FWHM = 2,35\sigma$ şeklinde ilişkilidir. A ise eğrinin altında kalan alandır.

Birçok dedektörün cevap fonksiyonu yaklaşık lineer bir fonksiyon şeklinde olduğundan, H_0 ile N arasında $H_0 = KN$ gibi bir bağıntı vardır. Burada K orantı sabitidir. Bu ilişkiyle alakalı standart sapma ise $K\sqrt{N}$, FWHM ise $2,35K\sqrt{N}$ şeklinde olacaktır. Bu bağıntılar kullanılarak rezolüsyondaki limit değeri aşağıdaki şekilde bulunabilir.

$$R = \frac{FWHM}{H_0} = \frac{2,35K\sqrt{N}}{KN} = \frac{2,35}{\sqrt{N}} \quad (1.30)$$

Yukarıdaki denklemden de görüleceği gibi %1'den daha iyi bir rezolüsyon elde etmek için N 'nin en az 55.000 olması gerekmektedir. Yani ideal bir radyasyon dedektöründe yük taşıyıcılarının mümkün olduğu kadar çok oluşturulması gerekir.

Eğer enerji dağılımına katkıda bulunan diğer parametreler de hesaba katılırsa FWHM aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$(FWHM)_{toplam}^2 = (FWHM)_{istatistik}^2 + (FWHM)_{gürültü}^2 + (FWHM)_{sürüklenme}^2 \quad (1.31)$$

1.10.3. Dedeksiyon Verimi

Prencip olarak her radyasyon dedektörü kendi aktif hacmiyle etkileşime giren bir radyasyon kuantasına karşı bir çıkış pulsu üretir. Dedeksiyon verimi genel olarak “*mutlak verim*” ve “*intirinsik verim*” olarak iki genel başlık altında toplanabilir.

$$\varepsilon_{mut} = (N_k)/(N_y) \quad (1.32)$$

$$\varepsilon_{int} = (N_k)/(N_g) \quad (1.33)$$

Burada N_k , N_y ve N_g sırasıyla kaydedilen puls sayısı, kaynak tarafından yayınlanan foton sayısı ve dedektöre gelen foton sayısıdır. İzotropik kaynaklar için her iki verim aşağıdaki şekilde birbiriyle bağlantılıdır.

$$\varepsilon_{int} = \varepsilon_{mut} (4\pi / \Omega) \quad (1.34)$$

Burada Ω dedektörün katı açısıdır. Dedektörler için genellikle intirinsik verim daha çok kullanılır. Bu verim dedektör materyaline, radyasyon enerjisine ve dedektörün gelen radyasyon yönündeki kalınlığına bağlıdır.

Bir dedektörün verimi toplam verim ve pik verimi olarak iki başlık altında toplanabilir. Toplam enerjinin ne kadar küçük olduğuna bakılmaksızın bütün etkileşimin kaydedildiği varsayılır. Ancak pratikte bir pulsun kaydedilebilmesi için belli bir eşik değerin üstünde olması gerekir. Pik veriminde bu eşik değerin üstündeki değerler kaydedilir ve bu iki verim aşağıdaki şekilde ilintilidir.

$$r = \frac{\varepsilon_{pik}}{\varepsilon_{top}} \quad (\text{peak-to-total ratio}) \quad (1.35)$$

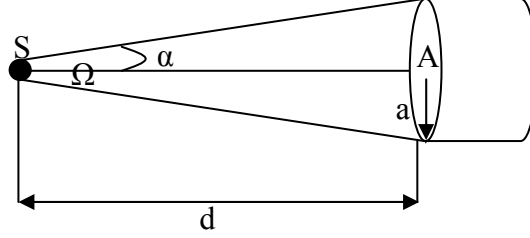
Verimi bilinen bir dedektör, radyoaktif bir kaynağın aktivitesinin belirlenmesinde kullanılabilir. İntirinsik pik verimine sahip bir dedektörün full enerji piki altında kaydedilmiş N tane olay olduğunu farz edelim. Şekil 1.8’de gösterildiği gibi, basitlik için radyoaktif kaynağın izotropik olduğunu ve dedektörle kaynak arasında herhangi bir

soğuma olmadığını kabul edelim. Belli bir sayma süresi boyunca S tane radyasyon kuantasının kaynaktan yayıldığını varsayarsak,

$$S = N \frac{4\pi}{\varepsilon_{\text{int}} \Omega} \quad (1.36)$$

yazılabilir. Burada Ω katı açıdır ve aşağıdaki formülle belirlenir.

$$\Omega = \int_A \frac{\cos \alpha}{r^2} dA \quad (1.37)$$



Şekil 1. 8. Dedektör-kaynak geometrisi

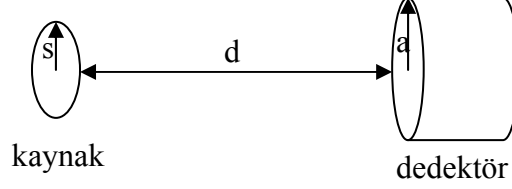
Burada r kaynaktan yüzey elemanı (dA) arasındaki mesafe, α ise yüzey elemanın normaliyle kaynağın doğrultusu arasındaki açıdır. Yukarıdaki şekildeki bir nokta kaynak için katı açı aşağıdaki şekilde verilir.

$$\Omega = 2\pi \left(1 - \frac{d}{\sqrt{a^2 + d^2}}\right) \quad (1.38)$$

Burada d kaynaktan dedektör arasındaki mesafe, a ise şekilde de gösterildiği gibi dedektörün yarıçapıdır. $d \gg a$ limit durumunda katı açı yaklaşık olarak

$$\Omega \cong \frac{A}{d^2} = \frac{\pi a^2}{d^2} \quad (1.39)$$

yazılabilir. Şimdi kaynağın Şekil 1.9'da gibi s yarıçapında bir disk şeklinde olduğunu varsayalım. Bu durumda katı açı aşağıdaki şekilde yazılır.



Şekil 1. 9. Genişletilmiş kaynak

$$\Omega = \frac{4\pi a}{s} \int_0^{\infty} \frac{\exp(-dk) J_1(sk) J_2(ak)}{k} dk \quad (1.40)$$

Burada J_1 ve J_2 Bessel fonksiyonlarıdır. Yukarıdaki integralin analitik olarak çözümü yoktur. Nümerik yöntemlerle çözüm elde edilebilir. Aşağıda faydalı bir yaklaşım verilmiştir.

$$\Omega = 2\pi \left[1 - \frac{1}{(1+\beta)^{1/2}} - \frac{3}{8} \frac{\alpha\beta}{(1+\beta)^{5/2}} + \alpha^2 [F1] - \alpha^3 [F2] \right] \quad (1.41)$$

$$F1 = \frac{5}{16} \frac{\beta}{(1+\beta)^{7/2}} - \frac{36}{16} \frac{\beta^2}{(1+\beta)^{9/2}} \quad (1.42)$$

$$F2 = \frac{35}{128} \frac{\beta}{(1+\beta)^{9/2}} - \frac{315}{256} \frac{\beta^2}{(1+\beta)^{11/2}} + \frac{1115}{1024} \frac{\beta^3}{(1+\beta)^{13/2}} \quad (1.43)$$

$$\alpha = \left(\frac{a}{d}\right)^2 \quad \beta = \left(\frac{s}{d}\right)^2 \quad (1.44)$$

1.10.4. Ölü Zaman

Bütün dedektör sistemlerinde meydana gelen iki olayın ayrı pulslar halinde kaydedilebilmesi için bu iki olay arasında minimum bir zaman aralığının bulunması gerekir. Bu zaman aralığı, sayma sisteminin ölü zamanı olarak adlandırılır. Radyoaktif bozunmanın rasgele doğasından dolayı, çok kısa zaman aralıklarıyla peş peşe meydana gelen iki olaydan biri kaydedilmeden kaybolabilir. Olay sayısının fazla olduğu durumlarda ölü zaman önemli hale gelebilir. Bu durumda hesaplamalara ölü zamanla ilgili düzeltme faktörü eklenmelidir.

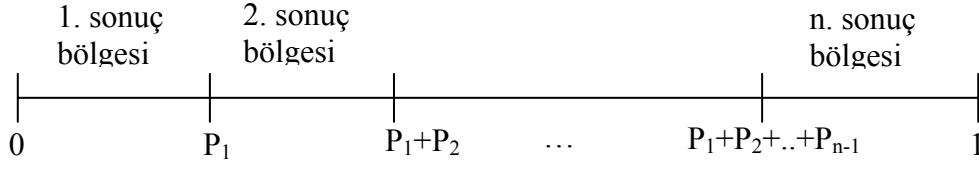
1.11. Monte Carlo Yöntemi

Monte Carlo yöntemi, istatistiksel teknikler kullanılarak bir olayı veya deneyi taklit etmektir. Bu yöntem bilimin hemen hemen her alanında geniş kullanım alanı bulmuştur.

Belli bir ölçme veya deneyde elde edilen değerler bir gelişigüzel sayılar kümesi oluşturur. Gelişigüzel sayılar kümesinde herhangi bir sayının gelme olasılığı ötekilerden farklı olabilir. Olasılıklar aynı ise böyle bir kümeye düzgün dağılımlı sayılar kümesi denir. Sayısal olarak bir deneyi veya olayı taklit etmek için $0-1$ arasında değerler alan düzgün dağılımlı gelişigüzel sayılar kullanarak, ele alınan olayla ilgili olasılık dağılımına sahip, belli bir $a-b$ aralığında değerler alabilen gelişigüzel sayılar üretmek gerekmektedir. $0-1$ aralığında değerler alabilen düzgün dağılımlı gelişigüzel sayıları ξ temsil etsin.

1.11.1. Temel Monte Carlo İlkesi

Belli bir ölçme veya deneyi bir olay olarak isimlendirelim. Herhangi bir olayın belli olasılıklarla meydana gelen çeşitli sonuçları vardır. Bu sonuçlar da ayrı ayrı birer olay olarak düşünülebilir. Örneğin fotonun bir ortamda etkileşmesi bir olay, fotoelektrik olay, Compton olayı veya çift oluşumu ise birer sonuçlardır. Bu üç sonuç da birer olaydır. n -tane sonucu ve bu sonuçların meydana gelme olasılıkları P_1, P_2, \dots, P_n olan bir olay tasarlayalım. Tasarladığımız bu olayı gelişigüzel sayılar kullanarak taklit etmek istediğimizi varsayalım. Gelişigüzel sayı eksenini Şekil 1.10'da görüldüğü gibi n -tane bölgeye ayıralım.



Şekil 1. 10. Olasılıklar bölgesi

Şekil 1.10'da gösterilen gelişigüzel sayıları sonuç bölgelerine ayırmakla, gelişigüzel sayıların P_1 olasılıkla belirlenen miktarını 1. sonuç, P_2 olasılıkla belirlenen miktarını 2. sonuç, ... P_n olasılıkla belirlenen miktarını da n. sonuç için ayırmış olduk. Böylece, türetilen bir gelişigüzel sayı hangi sonuç bölgesine düşerse olayda o sonuç meydana gelmiştir. Yani,

$0 < \xi < P_1$ ise 1. sonuç

$P_1 < \xi < P_1 + P_2$ ise 2. sonuç

...

$P_1 + P_2 + \dots + P_{n-1} < \xi < 1$ ise n. sonuç

meydana gelir.

Şimdi de, $a \leq x \leq b$ aralığında, her bir x sonucunun ortaya çıkma olasılığı, $f(x)$ sıklık fonksiyonu ile belirlenen bir olayı taklit etmek isteyelim. Olayda sonucun x ile $x+dx$ aralığında gelme olasılığı,

$$p(x)dx = \frac{f(x)}{\int_a^b f(x)dx} \quad (1.45)$$

şeklindedir. Burada $p(x)$ fonksiyonuna olasılık yoğunluk fonksiyonu denir. Toplam olasılık yoğunluk fonksiyonu veya olasılık dağılım fonksiyonu,

$$P(x) = \int_a^x p(x')dx' \quad (1.46)$$

şeklinde tanımlanır (Almaz, 2000). $a \leq x \leq b$ aralığında, her x değerine karşılık $P(x)$ fonksiyonu 0-1 aralığında gelişigüzel değerler alır. $P(x)$ değerinin ortaya çıkma sayısı yani

sıklık fonksiyonu düzgün bir dağılım gösterir (Cashwell ve Everet 1959, Almaz, 2000). O halde $P(x)$ 'i ξ 'e eşitleyebiliriz. Yani

$$\xi = \frac{\int_a^x f(x')dx'}{\int_a^b f(x)dx} \quad (1.47)$$

ifadesi elde edilir. Buna Temel Monte Carlo İlkesi denir. Yukarıdaki denklem tersine çevrilerek ξ değerlerine bağlı olarak x değerleri,

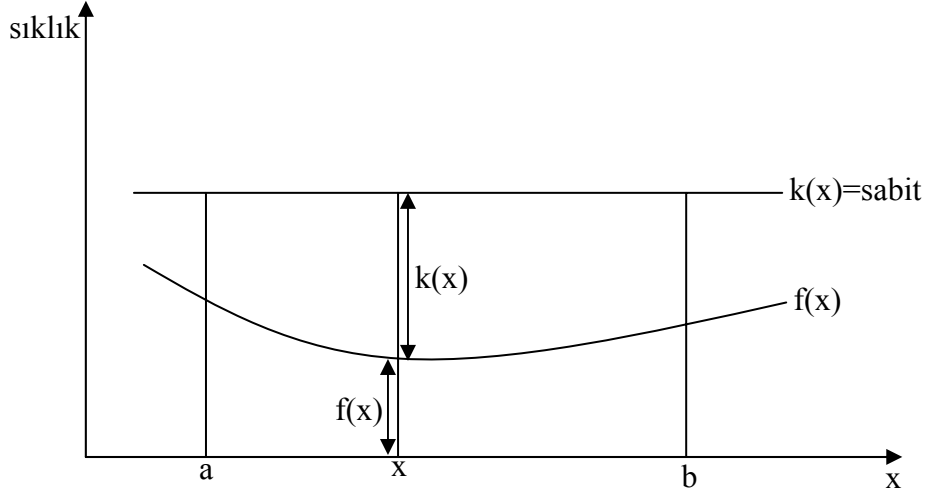
$$x=P^{-1}(\xi) \quad (1.48)$$

şeklinde elde edilir. Türetilen her bir ξ 'a karşılık gelen x değerleri yukarıdaki denklemden hesaplanır. Böylece $0-1$ arası düzgün dağılımlı ξ değerleri kullanılarak $a-b$ aralığında $f(x)$ dağılımlı x değerleri elde edilir.

1.11.2. Reddetme Yöntemi

Bir dağılımın örneklenmesinde Denk (1.46)'daki integralin analitik olarak alınamadığı ve bu ifadenin tersine çözümünün analitik olarak mümkün olmadığı durumlarda Temel Monte Carlo ilkesi kullanılamaz. Böyle bir durumda “Reddetme Yöntemi” kullanılır.

$a \leq x \leq b$ aralığında $f(x)$ sıklık fonksiyonu ile belirlenen bir olayı “Reddetme Yöntemi” ile örnekleyelim. Bunun için $k(x)=sabit$ dağılımından yararlanılır. Şekil 1.11'de $f(x)$ ve $k(x)=sabit$ dağılımları gösterilmektedir.



Şekil 1. 11. Reddetme yöntemi

$k(x)=sabit$ dağılımına Temel Monte Carlo İlkesi'ni uygulayabiliriz. Şekil 1.11'de görüldüğü gibi türetilen bir ξ ile $k(x)$ dağılımının örneklenmesinden elde edilen bir x değerinin sıklığı $k(x)=sabit$ 'tir. Bu sıklığın $f(x)$ olma olasılığı $f(x)/k(x)$ 'dir. Düzgün dağılımlı olarak türetilen x değerlerinin $f(x)/k(x)$ olasılığıyla belirlenen miktarı $f(x)$ dağılımlıdır. Böylece $f(x)$ dağılımı Şekil 1.11'de görülen $k(x)=sabit$ dağılımının örneklenmesiyle elde edilen düzgün dağılımlı x değerlerinden, $f(x)$ ile x eksen arasında kalanları kabul edilip, diğerleri reddedilerek örneklenir.

Yöntemin verimi,

$$\varepsilon = \frac{\int_a^b f(x)dx}{\int_a^b r(x)dx} \quad (1.49)$$

şeklinde tanımlanır. Verimi yükseltmek ve fazla hesaplamalardan kurtulmak için (dolayısıyla bilgisayar zamanını minimuma indirmek için) sıklık fonksiyonu $f(x)$, maksimum değerine bölünerek $g(x)=f(x)/f(x)_{max}$ fonksiyonu elde edilir ve bu $g(x)$ dağılımını örten $k(x)$ dağılımı da $k(x)=1$ şeklinde seçilir. $k(x)=1$ dağılımına Temel Monte Carlo İlkesi uygulanırsa,

$$x=a+(b-a)\zeta \quad (1.50)$$

ifadesi elde edilir. Bir ζ üretilerek yukarıdaki denklemden bir x değeri bulunur. Bulunan bu x değerinin sıklığı $f(x)$ olma olasılığı $g(x)/k(x)=g(x)$ 'dir. İkinci bir ζ türetilerek,

$$\zeta \leq g(x) \quad (1.51)$$

şartına bakılır. Elde edilen x , bu şartı sağlanırsa kabul edilir, sağlanmazsa reddedilir ve işlemler tekrarlanır. Böylece, düzgün dağılımlı x değerlerinden $f(x)$ dağılımlı x değerleri elde edilir.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Çalışma Alanı

Bağımsız Devletler Topluluğu'nda 26 Nisan 1986 tarihinde meydana gelen Chernobyl nükleer santral kazası sonucu reaktörün çekirdeğinde bulunan radyoaktif maddelerin tamamı (50 milyon Curie) patlama sonucunda atmosfere karışmıştır. Reaktörden salınan radyoaktif gazlar ve radyoaktif maddelerin karışımı, 1200 m'yi aşan yüksekliklere çıkmıştır. Havaya salınan radyoaktif maddelerden, çapları 10 µm veya daha büyük olanları hemen reaktör çevresine, bir mikrona kadar olanların ise 30 km çapında bir alana dağıldıkları belirlenmiştir. Radyoaktif madde salınması yaklaşık 10 günlük bir süre boyunca devam etmiş ve bu arada 5 Mayıs'ta ikinci büyük radyoaktif madde salınması meydana gelmiştir.

Reaktörden ilk salınan radyoaktif maddelerin oluşturduğu bulut güneyden esen rüzgârlarla Chernobyl'den kuzeye doğru hareketle İskandinav ülkelerinin güney ve orta bölgelerine 28 Nisan'da ulaşmıştır. Meteorolojik olaylarla yön değiştiren radyoaktif bulut daha sonraki günlerde Avrupa'nın çeşitli ülkelerine ve 30 Nisan/5 Mayıs 1986 tarihlerinde de Türkiye'ye ulaşmıştır. Bulgaristan ve Yunanistan üzerinden Trakya bölgesine giren radyoaktif bulut özellikle Edirne civarında sınıra yakın bölgelerde 30 Nisan/1 Mayıs tarihlerinde değişik miktarlarda yağmur ile bu bölgenin radyoaktif kirlenmesine sebep olmuştur. Ayrıca Chernobyl'den önceleri doğuya doğru hareket eden hava kütlesi daha sonra esen rüzgârlarla Karadeniz'i geçerek özellikle Doğu Karadeniz bölgesinde yağın şiddetli yağmurlarla bu kıyı şeridini kirlenmeye maruz bırakmıştır.

Batı ülkelerinde olduğu gibi reaktör ile buna bağlı ana devre ya da sistemlerin tümünü içine alabilecek bir güvenlik küresi yapılmamış, bu da radyoaktifliğin çok uzaklardaki birçok ülkeyi etkilemesine sebep olmuştur.

Radyoaktif bulutun geçişi sırasında toprak, bitki, bina vb. canlı ve cansız yüzeylerde kuru birikim yoluyla tutulan radyoaktif madde miktarının, yağış yoluyla gelen ıslak birikime oranla çok daha az olduğu kabul edilmektedir. Yağış yoluyla alınan radyoaktif madde miktarının da yağmur bulutunun kirlilik durumuna, yağışın özelliklerine ve yağmur düşen alanların özel durumlarına göre değişebileceği bilinmektedir. Örneğin yağış alan arazinin topoğrafik özellikleri, bitki örtüsü, türü, tek veya çok yıllık oluşu,

toprağın fiziksel ve kimyasal özellikleri gibi çevre şartlarına ve neticede gıda zinciri aracılığı ile insanlara geçmesini etkilemektedir.

Chernobyl nükleer kazası sonrası Avrupa'nın değişik ülkelerinde atmosfer ve toprak yüzeyinde sıkça ölçülen izotoplar ve bunların yarı ömürleri Tablo 2.1'de verilmektedir.

Tablo 2. 1. Chernobyl kazası sonrası belirlenen izotoplar ve yarı ömürleri

Radyoizotop	Yarı-Ömür
^{131}I	8 gün
^{134}Cs	767 gün
^{137}Cs	30 yıl
^{141}Ce	33 gün
^{144}Ce	285 gün
^{95}Nb	35 gün
^{103}Ru	40 gün
^{95}Zr	65 gün
^{90}Sr	28 yıl

Bunlar arasında insan sağlığı, uzun vadede meydana getireceği çevre sorunları ve troposfere salınan miktarlar açısından en önemli olanları ^{131}I , ^{134}Cs ve ^{137}Cs 'dir. Ancak ^{131}I ve ^{134}Cs radyoizotoplarının kısa yarı ömürlerinden dolayı kaza sonucu kirletilen çevrelerde gözlenmesi beklenmemektedir. Öte yandan, ^{137}Cs , fiziksel yarı ömrü yaklaşık 30 yıl olmasından ve kazanın üzerinden 24 yıl geçmesinden dolayı, yaşadığımız çevrede hala varlığını devam ettirmektedir.

Kazanın meydana geldiği tarihlerde, Türkiye için Trakya-Edirne-Kapıkule arası ve Doğu Karadeniz sahil kesimi kritik bölgeler ve bu bölgelerde yaşayan halk da kritik gruplar olarak nitelendirilmiştir.

Aradan 24 yıl geçtikten sonra bölgedeki ^{137}Cs radyoizotopunun varlığını ve ne kadar miktarda olduğu anlamak için çalışma alanı Şekil 2.1'de verilen bölge olarak seçilmiştir. Çalışma alanını bu bölge olarak seçmemizin sebepleri, bu bölgenin Chernobyl

kazası sonrası en çok kirlenen bölgelerden biri olması ve daha önce bu bölgenin bazı yerlerinde yapılan çalışmalar sayesinde verilerimizi karşılaştırma imkanının olması olarak sıralanabilir.



Şekil 2. 1. Çalışma alanı

2.2. Karayosunları

Karayosunları, eğreltiotları, açık tohumlu bitkiler ve kapalı tohumlu bitkiler karada gelişmiştir. Bunun sonucu olarak da kütikül (epiderma), stoma ve vasküler (iletim) dokuları gelişmiştir. Karasal ortamın önemi, bitkilerin yaşama ortamı olması yanında, evrimlerinde de etkili olması açısından önemlidir. Bütün kara bitkileri embriyo meydana getirir. Bunun için de *Embriophyta* (embriyolu bitkiler) olarak da adlandırılırlar. İstisnai durumlar da vardır. Örneğin; bazı algler toprak üzerinde yaşar fakat embriyo meydana getirmezler. Bunun yanında embriyolu bitkilerden sucul ortamda yaşayanlar da mevcuttur. Kısaca kara bitkileri, ister suda yaşasın isterse karada yaşasın *Embriophyta* adı altında sınıflandırılırlar.

Embriyofitler, klorofil a, b, karotenler ve birkaç ksantofil ile lutein içerirler. Kloroplastları her bir bantta 3-6 tilakoid lameline sahiptir ve fotosentez sırasında O_2 üretirler. Hücre duvarları selüloz içerikli olup glikolat oksidaz enzimi de dahil pek çok

enzim içeren peraksisomerlere sahip olan nişastayı depo eder ve hücre bölünmesi sırasında bir fragmoplast oluştururlar (Smith, 1980).

Dünya üzerindeki yaşam tarihinin en önemli olaylarından biri, kökeni yeşil alglere dayanan karayosunlarının kara ortamına geçişidir. Eğreltiotları, açık tohumlu bitkiler ve kapalı tohumlu bitkiler karada gelişmiştir. Karayosunları ise üremelerinin suya bağımlı olması fakat gelişmelerini farklı ortamlarda sürdürebilmelerinden dolayı bitkiler dünyasının amfibileri olarak adlandırılabilirler. Karayosunları *Thallophyta* dediğimiz alglere, mantarlar ve likenlere göre daha gelişmiş yapıdadırlar. Özellikle bazı gelişmiş gruplarında gözlenen ve bir bakıma iletim demetli bitkilerin iletim demetlerini hatırlatan bazı özel hücrelerin (leptoidler ve hidroidler) varlığı su ortamından kara ortamına geçişi göstermektedir (Smith, 1980).

Bryophitler kara bitkilerinin yaklaşık 23 bin kadar türünü ihtiva eden bir gruptur. Bitki hayatının devamını sağlayabilecek kadar yeterli miktarda nemin var olduğu, tropikal bölgelerden subarktik bölgelere kadar, dünyanın bütün iklimlerinde geniş bir yayılışa sahiptir. Bu nedenle karayosunları tropikal ve mutedil ormanlarda, bataklık alanlarda ve subarktik bölgelerde, ekosistemin son derece önemli bir parçasını oluşturmaktadırlar (Nyholm, 1981).

Bryophyta (Karayosunları), ciğerotları, boynuzsuotlar ve yapraklı karayosunları (gerçek karayosunları, *Musci*) olmak üzere 3 kısma ayrılır. Hepsi küçük yapılı, yeşil renkli ve gerçek köksüzdür, çoğu epifittir. Kara ortamına uyum sağlamışlar, sadece küçük bir grubu ikincil olarak sucul ortamlara adapte olmuştur. Bütün karayosunları heteremorfik döl almaşı gösterir. Karayosunu fertleri tek başlarına olduklarında pek dikkat çekmezler ancak içiçe kümeler halinde oldukları zaman oldukça geniş alanları kaplarlar ve dikkat çekerler. Haploid olan gametofit, yeşil renkli ve hayat devresinde bağımsız durumdadır. Sporofit bütün hayatı boyunca gametofite bağımlı yaşar. Birkaç türün sporofiti fotosentez yapabilmesine karşın yine de su ve mineraller için gametofite bağımlıdır. Bryofitlerin gametofiti *Riccia* L. ve *Marchantia* L.'da olduğu gibi basit tallussu yapıda olabildiği gibi gövdemsi, yapraksı ve köksü yapılar şeklinde yüksek organizasyonlu yapılara da sahip olabilmektedirler (Smith, 1980, Watson,1981, Schofield, 1985).

Bryofitlerin yaprak ve gövdeleri, vasküler bitkilerin yaprak ve gövdeleriyle homolog değildir. Vasküler bitkilerde gövdeler ve yapraklar sporofitin bir parçasıdır, gametofite ait değildir. Ayrıca vasküler bitkilerin yaprakları da tipik vasküler yapıya sahiptir. Bryofitlerin emici ve tutunucu organları (köksü yapıları-rizoidleri) tam bir köksü yapıda değildir, ancak

tek hücreli veya çok hücreli yapıda saçsı şekilde rizoid adı verilen köksü yapılara sahiptirler. Karayosunları dışındaki diğer bütün bitkilerin iletim dokuları, ksilem ve floem'den oluşmuş olması belki de karayosunlarıyla diğer bitkiler arasındaki en önemli farktır (Özdemir vd.,1999, Henderson, 1963, Smith, 1980, Nyholm, 1981, Çetin, 1988).

2.3. Likenler

Yeryüzünde son derece geniş yayılım alanına sahip olan ve ülkemizde de günümüze kadar pek fazla araştırma yapılmamış bir bitki grubu olan likenlerin 18. yüzyıldan bu yana 17000' den fazla türünün tespit edildiği ve 2000' den fazla türünün de kuzey Amerika'da tanımlandığı bildirilmektedir (Scagel vd., 1966).

Gerçek anlamda ilk kez liken terimi M.Ö. 371–284 yılları arasında yaşayan Theophrastus tarafından kullanılmıştır. Fakat Theophrastus'un liken olarak adlandırdığı bu bitkiler liken olmayıp ciğer otları (*Hepatices*) grubuna aittiler. Likenler daha sonra M.S. 68 yılında Dioscorides ve 512 yılında Byzantine'nin yapıtındaki tablolarla açıklanmaktadır (Abbeyes, 1951).

1753 yılında Linne, likenleri bir cins altında toplamış ve morfolojik yapılarına göre de 7 bölüme ayırmıştır. Daha sonra İsveçli Botanikçi Acharyus “Lichenography universalis” adlı eserinde üreme organlarına dayanarak yaptığı sınıflandırmada likenleri 41 cinse çıkarmıştır (Szatala, 1927a).

1867 yılında Alman botanikçisi Schwendener, likenlerin alg ve mantardan meydana geldiğini ilim dünyasına tanıttıktan sonra değişik araştırmacılar bu özellikleri göz önüne alarak çeşitli sistemler geliştirmişlerdir. 19. yüzyıldan sonra likenlerin biyolojisi ve sistematigi üzerine Nylander, Quispel, Zopf, Asahina, Naren, Wainio, Hesse, Waren, Raths, Thomas, Moeller, Tobler, Stahl, Werner gibi araştırmacılar likenler üzerinde birçok araştırma yapmışlardır (Abbeyes, 1951).

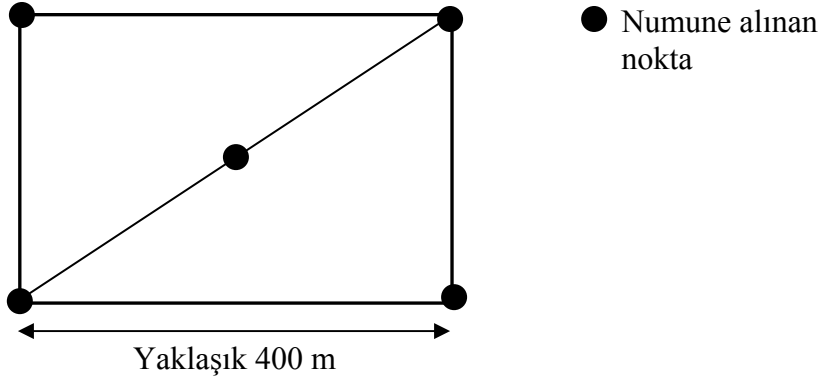
Likenlerin tanısının zor oluşu ve 19. yüzyılda sentetik boyaların bulunup da likenlerden elde edilen doğal boyaların ekonomik öneminin azalması nedeniyle, likenlerin sınıflandırılması konusundaki çalışmalar gerilemeye başlamıştır. Bu yüzyılın başından itibaren elektron mikroskoplarının bulunması, yeni fitokimyasal analiz yöntemlerinin geliştirilmesi, radyoaktif işaretlemenin kullanılması, gibi yöntemler likenlerin sınıflandırılması konusunda çok yönlü incelemenin yapılmasına imkân tanımıştır. Ayrıca hava kirliliği ile ilişkisinin belirlenmesi, tıpta ve diğer alanlarda öneminin vurgulanması,

likenlerin tekrar ilgi çekmesine neden olmuştur (Hale, 1974). Günümüzde ekonomik kullanımları yanında hava kirliliği ile ilgili çalışmalarda biyoindikatör ve biyomonitör olarak kullanılabildikleri için birçok araştırmaya konu olmuşlardır (Kauppi vd.,1992, Holopainen, 1984, Sloof vd., 1991, Mendil D., 2005).

Likenler radyoaktif maddeleri biriktirme özelliğine sahiptirler. Bu özelliklerinden dolayı özellikle Chernobyl olayından sonra ülkemiz de dahil olmak üzere birçok ülkede radyoaktif kirliliğin belirlenmesi çalışmalarında likenler bol miktarda kullanılmışlardır (Steinnes vd., 1993, Sloof vd., 1992).

2.4. Numunelerin Toplanması

Her bir istasyon, Şekil 2.2’de gösterildiği gibi 5 numune ile temsil edildi. Numuneler spatula yardımıyla toplandı ve polietilen torbalara konuldu. Bu torbaların üzerine sınıflama bakımından numaralar verildi ve bu numaralarla ayrı bir dosyaya materyalin alındığı ortamın özellikleri, alanın yüksekliği, toplanma tarihi bilgileri not edildi. Çalışma alanından toplanan karayosunlarının listesi ve istasyonları Tablo 2.2’de görülmektedir.



Şekil 2. 2. Numune toplama yöntemi

Tablo 2. 2. Karayosunlarının örnekleme yerleri ve türleri

Örnekleme Yerleri	Karayosunu Türleri
Hopa (Sarp)	<i>Hypnum cupressiforme</i> Hedw.
Hopa (Kemalpaşa)	<i>Hypnum sp.</i> Hedw.
Hopa (Güneşli)	<i>Pleurochaete squarrosa</i> (Brid.) Lindb.
Arhavi	<i>Thuidium tamariscinum</i> (Hedw.) Schimp.
Fındıklı (Aslandere)	<i>Pseudoscleropodium sp.</i> M. Fleisch.
Fındıklı (Çınarlı)	<i>Homalothecium lutescens</i> (Hedw.) H. Rob.
Fındıklı	<i>Pseudoscleropodium sp.</i> M. Fleisch.
Fındıklı	<i>Hypnum sp.</i> Hedw.
Fındıklı (Tatlısu)	<i>Hypnum sp.</i> Hedw.
Fındıklı (Çağlayan)	<i>Brachythecium starkei</i> (Brid.) Schimp.
Ardeşen (Doğanköy)	<i>Brachythecium starkei</i> (Brid.) Schimp.
Ardeşen (Seslikaya)	<i>Thuidium tamariscinum</i> (Hedw.) Schimp.
Ardeşen (Ortaalan)	<i>Brachythecium sp.</i> Schimp.
Çamlıhemşin	<i>Brachythecium sp.</i> Schimp.
Pazar (Hemşin)	<i>Isothecium striatulum</i> (Spruce) Kindb.
Pazar	<i>Isothecium striatulum</i> (Spruce) Kindb.
Pazar (Hilalköy)	<i>Rhynchostegiella sp.</i> (Schimp.) Limpr.
Çayeli (Kaptanpaşa)	<i>Rhynchostegiella sp.</i> (Schimp.) Limpr.
Çayeli (Büyükköy)	<i>Rhynchostegiella sp.</i> (Schimp.) Limpr.
Çayeli (Madenli)	<i>Rhynchostegiella sp.</i> (Schimp.) Limpr.
Rize (Akınar)	<i>Thuidium delicatulum</i> (Hedw.) Schimp.
Rize (Veliköy)	<i>Homalothecium sp.</i> Schimp.
Rize (Salarha)	<i>Brachythecium sp.</i> Schimp.
Rize (Küçükköy)	<i>Hypnum cupressiforme</i> Hedw.
Derepazarı (Korona)	<i>Thuidium tamariscinum</i> (Hedw.) Schimp.
Kendirli	<i>Rhynchostegiella sp.</i> (Schimp.) Limpr.
İyidere	<i>Homalothecium lutescens</i> (Hedw.) H. Rob.
Kalkandere (Y.başıköyü)	<i>Plagiomnium undulatum</i> (Hedw.) T.J.Kop.
İkizdere (Çağrankaya)	<i>Hypnum sp.</i> Hedw.
Of (Kadınlaryaylası)	<i>Dicranum scoparium</i> Hedw.
Of (Bölümlü)	<i>Sphagnum cuspidatum</i> Ehrh. ex Hoffm.
Of (Klavuz)	<i>Isothecium myurum</i> Brid.
Çaykara (Uzuntarla)	<i>Hypnum sp.</i> Hedw.
Çaykara (Çamlıbel)	<i>Isothecium myurum</i> Brid.
Çaykara (Uzungöl)	<i>Isothecium myurum</i> Brid.
Sürmene (Taşlıyayla)	<i>Brachythecium starkei</i> (Brid.) Schimp.

Tablo 2.2'nin devamı

Sürmene (Büyükdoğanlı)	<i>Eurhynchium pulchellum (Hedw.) Jenn.</i>
Sürmene (Ormanseven)	<i>Dicranum scoparium Hedw.</i>
Araklı (Pazarcık)	<i>Isothecium myurum Brid.</i>
Araklı (Taştepe)	<i>Isothecium myurum Brid.</i>
Araklı	<i>Homalothecium lutescens (Hedw.) H. Rob.</i>
Araklı (Dağbaşı)	<i>Dicranum scoparium Hedw.</i>
Araklı (Oğulkaya)	<i>Homalothecium lutescens (Hedw.) H. Rob.</i>
Arsin (Çubuklu)	<i>Eurhynchium pulchellum (Hedw.) Jenn.</i>
Yomra (Gülyurdu)	<i>Eurhynchium pulchellum (Hedw.) Jenn.</i>
Maçka (Zarişa)	<i>Eurhynchium pulchellum (Hedw.) Jenn.</i>
Maçka (Ormaniçi)	<i>Brachythecium starkei (Brid.) Schimp.</i>
Maçka (Esiroğlu)	<i>Isothecium myurum Brid.</i>
Maçka (Sümela)	<i>Plagiomnium undulatum (Hedw.) T.J.Kop.</i>
Trabzon (Yeşilyurt)	<i>Brachythecium starkei (Brid.) Schimp.</i>
Trabzon (Akyazı)	<i>Rhynchostegiella sp.(Schimp.) Limpr.</i>
Trabzon (Kireçhane)	<i>Isothecium myurum Brid.</i>
Akçaaabat (Akçaköy)	<i>Eurhynchium pulchellum (Hedw.) Jenn.</i>
Akçaaabat (Karasu)	<i>Pleurozium schreberi (Willd. ex Brid.)Mitt.</i>
Akçaaabat (Çalköy)	<i>Eurhynchium pulchellum (Hedw.) Jenn.</i>
Akçaaabat (Karaçayır)	<i>Brachythecium starkei (Brid.) Schimp.</i>
Tonya (Yakçukur)	<i>Rhynchostegiella sp.(Schimp.) Limpr.</i>
Tonya (Rosoda)	<i>Hypnum sp. Hedw.</i>
Tonya (Çayırıçi)	<i>Pleurozium schreberi (Willd. ex Brid.)Mitt.</i>
Şalpazarı (Karakaya)	<i>Hypnum sp. Hedw.</i>
Giresun (Merkez)	<i>Hypnum cupressiforme Hedw.</i>
Piraziz	<i>Hypnum sp. Hedw.</i>
Bulancak	<i>Pleurochaete squarrosa (Brid.) Lindb.</i>
Keşap	<i>Thuidium tamariscinum (Hedw.) Schimp.</i>
Yağlıdere	<i>Pseudoscleropodium sp. M. Fleisch.</i>
Espiye	<i>Homalothecium lutescens (Hedw.) H. Rob.</i>
Güce	<i>Pseudoscleropodium sp. M. Fleisch.</i>
Tirebolu	<i>Hypnum sp. Hedw.</i>
Görelle	<i>Hypnum sp. Hedw.</i>
Çanakçı	<i>Brachythecium starkei (Brid.) Schimp.</i>
Eynesil	<i>Brachythecium starkei (Brid.) Schimp.</i>
Doğankent	<i>Thuidium tamariscinum (Hedw.) Schimp.</i>
Dereli	<i>Brachythecium sp. Schimp.</i>

Tablo 2.2'nin devamı

Şebinkarahisar	<i>Brachythecium sp. Schimp.</i>
Alucra	<i>Isothecium striatulum (Spruce) Kindb.</i>
Çamoluk	<i>Isothecium striatulum (Spruce) Kindb.</i>

Çalışma alanından toplanan likenler için istasyonlar ve türler Tablo 2.3'te verilmektedir.

Tablo 2. 3. İstasyonlar ve liken türleri

Örnekleme Yerleri	Liken Türleri
Hopa (Sarp)	<i>Parmelia caperata (L.) Hale</i>
Hopa (Kemalpaşa)	<i>Parmelia caperata (L.) Hale</i>
Hopa (Güneşli)	<i>Parmelia caperata (L.) Hale</i>
Arhavi	<i>Parmelia caperata (L.) Hale</i>
Fındıklı (Aslandere)	<i>Parmelia caperata (L.) Hale</i>
Fındıklı (Çınarlı)	<i>Parmelia sulcata</i>
Fındıklı	<i>Parmelia sulcata</i>
Fındıklı	<i>Parmelia sulcata</i>
Fındıklı (Tatlısu)	<i>Parmelia sulcata</i>
Fındıklı (Çağlayan)	<i>Parmelia caperata (L.) Hale</i>
Ardeşen (Doğanköy)	<i>Parmelia sulcata</i>
Ardeşen (Seslikaya)	<i>Parmelia caperata (L.) Hale</i>
Ardeşen (Ortaalan)	<i>Parmelia caperata (L.) Hale</i>
Çamlıhemşin	<i>Parmelia caperata (L.) Hale</i>
Pazar (Hemşin)	<i>Parmelia caperata (L.) Hale</i>
Pazar	<i>Parmelia caperata (L.) Hale</i>
Pazar (Hilalköy)	<i>Parmelia caperata (L.) Hale</i>
Çayeli (Kaptanpaşa)	<i>Parmelia caperata (L.) Hale</i>
Çayeli (Büyükköy)	<i>Parmelia caperata (L.) Hale</i>
Çayeli (Madenli)	<i>Parmelia caperata (L.) Hale</i>
Rize (Akpınar)	<i>Parmelia caperata (L.) Hale</i>
Rize (Veliköy)	<i>Parmelia caperata (L.) Hale</i>
Rize (Salarha)	<i>Parmelia caperata (L.) Hale</i>
Rize (Küçükköy)	<i>Parmelia caperata (L.) Hale</i>
Derepazarı (Korona)	<i>Parmelia caperata (L.) Hale</i>
Kendirli	<i>Parmelia caperata (L.) Hale</i>
İyidere	<i>Parmelia caperata (L.) Hale</i>

Tablo 2.3'ün devamı

Kalkandere (Y.başıköyü)	<i>Parmelia caperata</i> (L.) Hale
İkizdere (Çağrankaya)	<i>Usnea flipendula</i>
Of (Kadınlaryaylası)	<i>Usnea flipendula</i>
Of (Bölümlü)	<i>Usnea flipendula</i>
Of (Klavuz)	<i>Usnea flipendula</i>
Çaykara (Uzuntarla)	<i>Parmelia caperata</i> (L.) Hale
Çaykara (Çamlıbel)	<i>Laboria pulmonaria</i>
Çaykara (Uzungöl)	<i>Usnea florida</i>
Sürmene (Taşlıyayla)	<i>Usnea florida</i>
Sürmene (Büyükdoğanlı)	<i>Usnea rigida</i>
Sürmene (Ormanseven)	<i>Parmelia sulcata</i>
Araklı (Pazarcık)	<i>Parmelia sulcata</i>
Araklı (Taştepe)	<i>Usnea florida</i>
Araklı	<i>Usnea flipendula</i>
Araklı (Dağbaşı)	<i>Xanthoria parietina</i> (L.) Th. Fr.
Araklı (Oğulkaya)	<i>Parmelia caperata</i> (L.) Hale
Arsin (Çubuklu)	<i>Parmelia caperata</i> (L.) Hale
Yomra (Gülyurdu)	<i>Parmelia caperata</i> (L.) Hale
Maçka (Zarişa)	<i>Usnea flipendula</i>
Maçka (Ormaniçi)	<i>Usnea flipendula</i>
Maçka (Esiroğlu)	<i>Usnea flipendula</i>
Maçka (Sümela)	<i>Usnea flipendula</i>
Trabzon (Yeşilyurt)	<i>Parmelia sulcata</i>
Trabzon (Akyazı)	<i>Usnea flipendula</i>
Trabzon (Kireçhane)	<i>Parmelia caperata</i> (L.) Hale
Akçaaabat (Akçaköy)	<i>Parmelia caperata</i> (L.) Hale
Akçaaabat (Karasu)	<i>Parmelia caperata</i> (L.) Hale
Akçaaabat (Çalköy)	<i>Usnea rigida</i>
Akçaaabat (Karaçayır)	<i>Usnea rigida</i>
Tonya (Yakçukur)	<i>Usnea flipendula</i>
Tonya (Rosoda)	<i>Parmelia caperata</i> (L.) Hale
Tonya (Çayırıcı)	<i>Parmelia caperata</i> (L.) Hale
Şalpazarı (Karakaya)	<i>Parmelia caperata</i> (L.) Hale
Giresun (Merkez)	<i>Flavoparmelia caperata</i>

Tablo 2.3'ün devamı

Piraziz	<i>Xanthoparmelia conspersa</i>
Bulancak	<i>Flavoparmelia caperata</i>
Keşap	<i>Flavoparmelia caperata</i>
Yağlıdere	<i>Physcia adscendes</i>
Espiye	<i>Physcia adscendes</i>
Güce	<i>Parmotrema perlatum</i>
Tirebolu	<i>Flavoparmelia caperata</i>
Görece	<i>Flavoparmelia caperata</i>
Çanakçı	<i>Xanthoria parietina</i>
Eynesil	<i>Physcia adscendes</i>
Doğankent	<i>Parmotrema perlatum</i>
Dereli	<i>Flavoparmelia caperata</i>
Şebinkarahisar	<i>Flavoparmelia caperata</i>
Alucra	<i>Physcia adscendes</i>
Çamoluk	<i>Flavoparmelia caperata</i>

2.5. Numunelerin Teşhis Edilmesi

Laboratuvarında karayosunu örnekleri makroskobik ve mikroskobik çalışmalara tabi tutularak çeşitli flora eserleri yardımıyla teşhisleri gerçekleştirildi. Karayosunu örneklerinin teşhis edilmesinde, The Moss Flora of Britain and Ireland (Smith, 1980), British Mosses and Liverworts (Watson, 1981), Illustrated Moss Flora of Fennoscandia and Grasses (Nyholm, 1981), Introduction to Bryology (Schofield, 1985) gibi flora eserlerinden faydalanıldı.

Liken örnekleri toplanırken liken tallusunun morfolojik yapısının zedelenmemesine özen gösterilerek kabuksu likenlerin tayini aşamasında kullanılan karakterlerden biri olan kenar kısımlarını içerecek biçimde parçalanmadan alınmasına özen gösterildi. Aynı şekilde yapraksı likenlerinde tallus yapıları bozulmadan ve üreme organlarını içerecek biçimde toplanmasına özen gösterildi.

Liken örneklerinin tayininde liken asitleri ile renk reaksiyonu vererek tayinde kolaylık sağlayan bazı reaktifler, ışık mikroskobu, stereomikroskop, çeşitli flora kitapları (Lichens of North America (Brodo vd., 2001), Bestimmungsschlüssel europaischer Flechten (Poelt, 1974) ve liken tayin anahtarları kullanıldı.

2.6. Kimyasal Analiz

Laboratuvarında teşhisleri gerçekleştirilen türler direkt güneş ışığı almayan gölge bir yerde iki hafta süreyle kurutuldu. Kurutulan numuneler yıkanmadan bütün yabancı maddelerden temizlendi ve 105 °C'lik inkübatör'de 24 saat süreyle kurutuldu. Kurutulan numuneler steril bir şekilde Spex marka değirmende öğütülerek toz haline getirildi. Toz haline getirilen numuneler parçacık büyüklüğü etkisini ihmal etmek için 400 Mesh'lik elekte (Şekil 2.3) elendi ve 38 µm çapında parçacıklar elde edildi. Elementel analiz için kurutulan ve eleklerden geçirilen numuneler 10⁻⁴ g hassasiyete sahip terazi yardımıyla 40 mg kadar ayrılarak press yardımıyla basınç uygulanarak 13 mm çapında tabletler oluşturuldu. Şekil 2.4'te press makinesi görülmektedir.



Şekil 2. 3. Elek seti



Şekil 2. 4. Pres seti

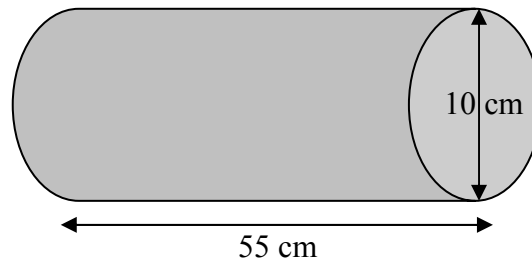
Oluşturulan tabletler Şekil 2.5'te gösterilen EDXRF (Enerji Ayrımlı X Işını Floresans Spektrometresi)'de sisteminde saydırıldı. X-Işını floresans tekniği, yayınlanan karakteristik X-ışınının dalga boyu veya enerjisinin ölçülmesiyle element hakkında bilgi verir. Bu metod, önce, yayınlanmış karakteristik çizginin enerjisinin veya dalga boyunun ölçülmesiyle verilen bir elementin nitel (kalitatif) tayininin yapılmasını ve sonra bu çizginin şiddetinin ölçülmesiyle de elementel konsantrasyonun tayin edilmesini sağlar (kantitatif analiz). Bu metotla karayosunu ve liken örneklerindeki K element analizi gerçekleştirildi.



Şekil 2. 5. X-ışını ölçüm sisteminin genel görünüşü

2.7. Toprak Numunelerinin Toplanması

^{137}Cs radyoizotopunun toprağa difüzyonunun modellenmesi için Tablo 2.4'te verilen yerlerden çeşitli derinliklerden toprak numuneleri toplandı. Toprak numuneleri çapı 10 cm olan demir tüpler (Şekil 2.6) vasıtasıyla toprağa saplanarak elde edildi. Böylece toprak numuneleri çeşitli derinlikler için birbirlerine karışmadan elde edilmiş oldu.



Şekil 2. 6 Toprak numunelerini almak için kullanılan boru

Tablo 2. 4. Difüzyon modeli için toplanan toprak numuneleri

İstasyon	Derinlik (cm)	Alınan numune sayısı
Artvin (Hopa)	0-43	1
Rize (Ardeşen, Ortaalan)	0-55	1
Trabzon (Maçka, Esiroğlu; Akçaabat, Düzköy)	0-37, 0-45	2
Giresun (Bulancağ)	0-30	1
Ordu (Kabadüz)	0-40	1

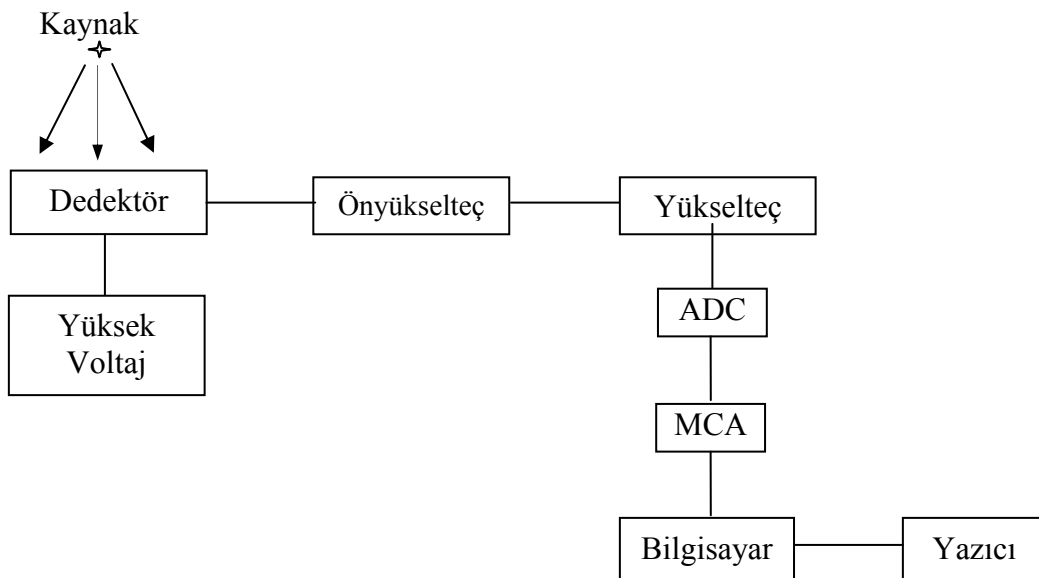
2.8. Radyoaktivite Ölçümü

Kurutulup toz hale getirilen numuneler radyoaktivite ölçümü için çapı 6 cm, yüksekliği 5 cm olan plastik kutulara konup ağızları kapatılarak ölçüme hazır hale getirildi. Numunelerin radyoaktivite ölçümleri için 1332,5 keV'de 1,9 keV rezolüsyona ve % 15'lik relatif verime sahip olan Canberra, GC 1519 model HPGe dedektörü kullanıldı. Şekil 2.7'de gama spektrometre sisteminin genel görünüşü verilmektedir.



Şekil 2. 7. Gama spektrometre sisteminin genel görünüşü

Dedektör sistemi, önyükselteç, spektroskopi yükselteci, analog sayımları elektronik sinyallere dönüştüren ADC sistemi, çok kanallı analizörden (MCA) ibarettir. Bu çalışmada kullanılan gama spektrometre sisteminin şeması Şekil 2.8’de gösterilmiştir.



Şekil 2. 8. Gama spektrometre sisteminin blok diyagramı

Sistemde bulunan üniteler ayrı ayrı aşağıda açıklanmıştır.

a) Dedektör

Gama ışınlarının ölçülmesinde kullanılan dedektörlerde, gelen foton kristalle etkileşerek enerjisini kaybeder. Bu etkileşmeler sonucunda, kristalde elektron-boşluk çiftleri meydana gelir ve dedektöre uygulanan yüksek voltajın oluşturduğu elektrik alanı ile yükler toplanır. Gelen radyasyonun enerjisi ile orantılı olarak biriken bu yük, analizörde ölçülebilen bir voltaj pulsu meydana getirir.

b) Yüksek Voltaj Ünitesi

Dedektörün yük birikimi için gerekli elektrik alanı oluşturmak üzere, (-) veya (+) 5000 V 'a kadar gerilim sağlayan ünitelerdir.

c) Önyükseltici

Önyükseltici, dedektörden gelen pulsları depolanan enerji ile orantılı olarak voltaj sinyaline dönüştürür. Elektronik katlar için pulsları şekillendirir ve büyütür. Dedektör ile elektronik devre arasında empedans uyumu sağlar. Önyükselticinin ilk devresi dedektöre çok yakın yerleştirilmiş bir alan etkili transistör (FET)'tir. Elektronik gürültüyü en düşük seviyeye indirmek için, genellikle bir alan-etkili transistör (FET) olan ön yükselticinin girişi dedektörle aynı oranda soğutulur, yani sıvı azot kaynama sıcaklığında (-196 °C) muhafaza edilir.

d) Yükseltici

Önyükselticiden gelen pulsların, puls yüksekliği analizi yapılabilecek kadar yükseltilmesini ve en iyi enerji ayrılmasını sağlayacak şekillendirmeyi sağlar. Modern sistemler için maksimum çıkış pulsunun genliği 2 V'tan 10 V'a kadar değişir. Çoğu yükselticiler hem unipolar çıkış (yani, sinyalin pik kısmı tamamen pozitif veya tamamen negatiftir) hem de bipolar çıkış (yani, sinyal hem pozitif hem de negatif bileşene sahiptir) ile donatılmıştır. En iyi sinyal-gürültü oranını elde etmek için, yükselticinin unipolar çıkışı seçilir. Kullanıcının bilerek seçmesi gereken başka bir yükseltici denetimi puls genişliğini belirleyen "Shaping time" sabitidir. Bir spektrumdaki pikler için en iyi rezolüsyon genellikle sistem daha uzun bir zaman üzerinden gürültünün ortalamasını alabileceği için daha uzun zaman sabitiyle elde edilebilir. Bununla birlikte, daha uzun zaman sabitleri daha fazla rastgele toplanmaya neden olur. Eğer sistem 2,000 s'lik sayma hızlarında çalıştırılabilecekse daha kısa zaman sabitleri kullanılabilir.

e) Analog Dijital Çevirici (ADC)

Analog dijital dönüştürücünün (ADC) amacı yükselticiden gelen analog pulsu, onun genliği ile orantılı X ve gama ışını fotonunun enerjisiyle orantılı tamsayıya çevirmektir. Sayılmış olan bir puls yüksekliği kadar sayı analizörün hafızasında biriktirilir. Sonuçta bu bilgi bir enerji spektrumu olarak ekrana aktarılır. Burada ölü zaman (dead time) çok önemlidir. Ölü zaman, birim zaman başına veya dönüşümün artmasıyla orantılı olarak artar. Yani ADC'nin meşgul olduğu zamandır. ADC genellikle puls yüksekliği analizinde kullanılır.

f) Çok Kanallı Analizör (MCA)

Çok kanallı analizörler, gelen pulsları enerjisiyle orantılı olarak kanallara yerleştiren cihazlardır. MCA'da en önemli devre veya bileşen, örneksel/sayısal dönüştürücüdür (analog to digital converter (ADC)). Burada, gelen her puls, sayısal hale çevrilir ve genliği ile orantılı olarak bir hafıza kanalına yerleştirilir. Her kanal belli bir enerjiye karşılık gelir ve sayım süresince gelen pulsların birikmesiyle pikler oluşur.

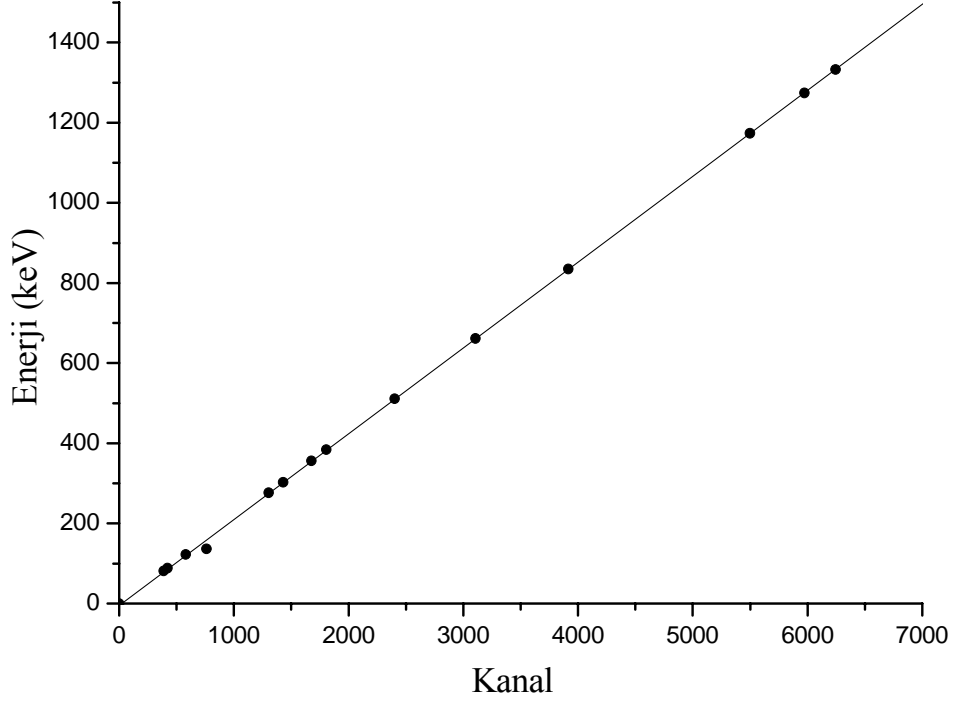
2.9. Enerji Kalibrasyonu

Çok kanallı analizörde toplanan spektrumların analiz edilebilmeleri için, hangi kanalın hangi enerjiye karşılık geldiğinin bilinmesi gerekir. Her kanal bir enerji değerine karşılık gelmektedir. Böylece numunede bulunan radyoaktif çekirdek türleri bulunabilir. Enerji kalibrasyonunun yapılabilmesi için önceden enerjileri bilinen çekirdeklerden oluşmuş standart bir kaynağa (kaynaklara) ihtiyaç vardır. Enerji ve verim kalibrasyonu için enerjileri 80–1400 keV arasında değişen ^{109}Cd , ^{57}Co , ^{133}Ba , ^{22}Na , ^{137}Cs , ^{54}Mn ve ^{60}Co 'ın piklerini içeren standart nokta kaynaklar kullanıldı. Çalışma süresince enerji kalibrasyonu periyodik olarak kontrol edildi. Tablo 2.5'te kalibrasyon için kullanılan standart kaynaklara ait bilgiler verilmektedir.

Tablo 2. 5. Standart kaynakların özellikleri

İzotoplar	Enerji (keV)	Yarı-ömür (gün)	Bolluk (%)
¹³³ Ba	81	3830	33
¹⁰⁹ Cd	88	464	3,72
⁵⁷ Co	122,1	271	86
⁵⁷ Co	136,5	271	11
¹³³ Ba	276,4	3830	6,9
¹³³ Ba	302,8	3830	19
¹³³ Ba	356	3830	62
¹³³ Ba	383,8	3830	8,7
²² Na	511	946	180
¹³⁷ Cs	661,6	11022	85
⁵⁴ Mn	834,8	313	100
⁶⁰ Co	1173,2	1922	100
²² Na	1274,5	946	100
⁶⁰ Co	1332,5	1922	100

Enerji kalibrasyonu için dedektörün önüne yerleştirilen standart kaynağın spektrumu elde edilerek enerjilerin hangi kanallara geldiği tespit edildi. Enerjinin kanallara göre değişim grafiği Şekil 2.9'da gösterilmiştir.



Şekil 2. 9. Enerji-Kanal grafiği

2.10. Verim Kalibrasyonu

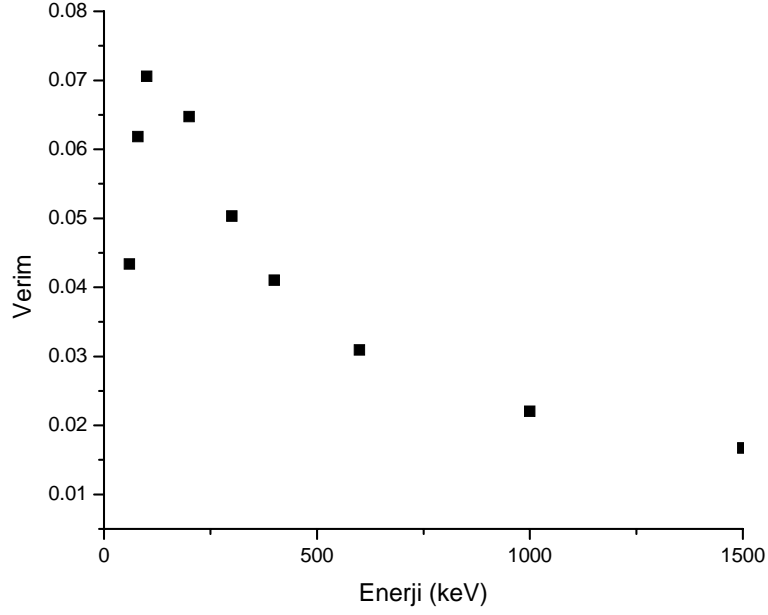
Dedektör verimi, dedektörde sayılabilir büyüklükte puls üreten fotonların sayısının, dedektöre gelen fotonların sayısına oranı ya da dedektörde sayılabilir büyüklükte puls üreten fotonların yüzdesi olarak tanımlanır. Dedektörün saydığı gama fotonlarının gerçek sayısal değerini bulabilmek için dedektöre ait verim düzeltmesinin yapılması gerekir.

Verim tayini doğru ölçüm yapmak için en önemli adımlardan bir tanesidir. Verim kalibrasyonu ölçülecek numuneyle mümkün olduğu kadar aynı kimyasal bileşene, aynı geometriye ve aynı yoğunluğa sahip referans materyallerle yapılmalıdır. Standard geometride ölçüm yapan laboratuvarlar için referans materyal kullanmak oldukça yaygın ve faydalıdır. Çok çeşitli geometrilerde ölçümler yapan laboratuvarlar için referans materyal bulmak sorun olabilir. Çünkü referans materyal üretmek hem zor, hem de çok pahalıdır. Alternatif bir teknik olarak ve bu tezde kullanılan ve aşağıda kısaca açıklanan *Verim Transferi* metodu iyi bir çözüm olabilir.

Bu metot için herhangi bir referans materyale ve nokta kaynaklara ihtiyaç vardır. Aşağıdaki formül kullanılarak ölçülmek istenen enerjiye ait verim elde edildi.

$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{exp}}^{\text{ref}} \frac{\varepsilon_{MC}^s}{\varepsilon_{MC}^{\text{ref}}} \quad (2.1)$$

Burada $\varepsilon_{\text{exp}}^{\text{ref}}$ referans materyal kullanılarak deneysel olarak elde edilmiş verim, ε_{MC}^s ve $\varepsilon_{MC}^{\text{ref}}$ ise Monte Carlo tekniğiyle elde edilmiş sırasıyla numuneye ve referans materyale ait verimlerdir. Yukarıdaki formül kullanılarak farklı geometrilere verim hesaplanarak radyoaktivite ölçümleri doğru ve hassas bir şekilde yapıldı. Verim eğrisi Şekil 2.10'da verilmiştir.



Şekil 2. 10. Verim kalibrasyonu eğrisi

2.11. Spektrumların Alınması

Numune, dedektörün hemen önündeki kurşunla kaplı numune odasına konulduktan sonra, bilgisayardan Genie-2000 programı çalıştırıldı. Sonra dedektör sistemi çalıştırılarak yüksek voltaj kaynağı +3600 V'a çıkartıldı. Numune sayım süresi 80000 s olarak ayarlandı. Sayıma hazırlanan numune, seçilen süre kadar sayılarak spektrumlar elde edildi.

2.12. Pik Belirleme ve Değerlendirme

Spektrumdaki her bir pik için ilgili alan bölgeleri seçilerek en küçük hataya sahip net alanı verecek şekilde pik alanı işaretlendi. Daha sonra kalibrasyon katsayıları bilgisayar programına verilerek piklerin merkez kanalına karşılık gelecek enerji değerleri bulundu.

^{137}Cs için bozunma olasılığı % 85 olan 661,657 keV'lik enerji kullanılarak bu pikin altında kalan alan hesaplandı.

2.13. Aktivite Hesabı

^{137}Cs aktivite konsantrasyonu hesaplanırken aşağıdaki formül kullanıldı.

$$C = \frac{N}{P_{\gamma} t m \varepsilon} \quad (2.2)$$

Burada C aktivite konsantrasyonu (Bq kg^{-1}), N 661 keV'lik pikin altında kalan sayım sayısı, P_{γ} ^{137}Cs için bozunma ihtimali veya bolluk oranı, t sayım süresi, m numune kütlesi ve ε ise 661 keV'lik enerjiye ait pikin verimidir. Verim, kullanılan deney geometrisine, enerjiye ve numunenin özelliklerine bağlıdır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. ¹³⁷Cs Aktivite Konsantrasyonu Değerleri

Toplanan karayosunu örneklerindeki ¹³⁷Cs aktivite konsantrasyonu değerleri Tablo 3.1’de verilmiştir. Tabloda numunelerin toplandığı istasyonlar türlerle beraber verilmiştir.

Tablo 3. 1. Toplanan karayosunu numunelerindeki ¹³⁷Cs aktivite konsantrasyonu sonuçları

Örnekleme Yerleri	Karayosunu Türleri	¹³⁷ Cs (Bq kg ⁻¹)
Hopa (Sarp)	Hypnum cupressiforme Hedw.	105±8
Hopa (Kemalpaşa)	Hypnum sp. Hedw.	377±23
Hopa (Güneşli)	Pleurochaete squarrosa (Brid.) Lindb.	402±27
Arhavi	Thuidium tamariscinum (Hedw.) Schimp.	309±24
Fındıklı (Aslandere)	Pseudoscleropodium sp. M. Fleisch.	765±34
Fındıklı (Çınarlı)	Homalothecium lutescens (Hedw.) H. Rob.	844±43
Fındıklı	Pseudoscleropodium sp. M. Fleisch.	605±36
Fındıklı	Hypnum sp. Hedw.	918±45
Fındıklı (Tatlısu)	Hypnum sp. Hedw.	627±36
Fındıklı (Çağlayan)	Brachythecium starkei (Brid.) Schimp.	1396±46
Ardeşen (Doğanköy)	Brachythecium starkei (Brid.) Schimp.	714±31
Ardeşen (Seslikaya)	Thuidium tamariscinum (Hedw.) Schimp.	140±11
Ardeşen (Ortaalan)	Brachythecium sp. Schimp.	399±27
Çamlıhemşin	Brachythecium sp. Schimp.	426±24
Pazar (Hemşin)	Isothecium striatulum (Spruce) Kindb.	716±32
Pazar	Isothecium striatulum (Spruce) Kindb.	231±20
Pazar (Hilalköy)	Rhynchostegiella sp.(Schimp.) Limpr.	138±11
Çayeli (Kaptanpaşa)	Rhynchostegiella sp.(Schimp.) Limpr.	265±21
Çayeli (Büyükköy)	Rhynchostegiella sp.(Schimp.) Limpr.	129±7
Çayeli (Madenli)	Rhynchostegiella sp.(Schimp.) Limpr.	626±35
Rize (Akpınar)	Thuidium delicatulum (Hedw.) Schimp.	335±22
Rize (Veliköy)	Homalothecium sp. Schimp.	116±9

Tablo 3.1'in devamı

Rize (Salarha)	Brachythecium sp. Schimp.	231±21
Rize (Küçükköy)	Hypnum cupressiforme Hedw.	265±21
Derepazarı (Korona)	Thuidium tamariscinum (Hedw.) Schimp.	197±12
Kendirli	Rhynchostegiella sp.(Schimp.) Limpr.	1353±52
İyidere	Homalothecium lutescens (Hedw.) H. Rob.	245±20
Kalkandere (Y.başıköyü)	Plagiomnium undulatum (Hedw.) T.J.Kop.	106±8
İkizdere (Çağrankaya)	Hypnum sp. Hedw.	266±20
Of (Kadınlaryaylası)	Dicranum scoparium Hedw.	191±11
Of (Bölümlü)	Sphagnum cuspidatum Ehrh. ex Hoffm.	96±6
Of (Klavuz)	Isothecium myurum Brid.	121±9
Çaykara (Uzuntarla)	Hypnum sp. Hedw.	392±25
Çaykara (Çamlıbel)	Isothecium myurum Brid.	107±8
Çaykara (Uzungöl)	Isothecium myurum Brid.	538±26
Sürmene (Taşlıyayla)	Brachythecium starkei (Brid.) Schimp.	219±20
Sürmene (Büyükdoğanlı)	Eurhynchium pulchellum (Hedw.) Jenn.	265±23
Sürmene (Ormanseven)	Dicranum scoparium Hedw.	167±11
Araklı (Pazarcık)	Isothecium myurum Brid.	133±10
Araklı (Taştepe)	Isothecium myurum Brid.	125±8
Araklı	Homalothecium lutescens (Hedw.) H. Rob.	99±7
Araklı (Dağbaşı)	Dicranum scoparium Hedw.	93±6
Araklı (Oğulkaya)	Homalothecium lutescens (Hedw.) H. Rob.	170±20
Arsin (Çubuklu)	Eurhynchium pulchellum (Hedw.) Jenn.	262±24
Yomra (Gülyurdu)	Eurhynchium pulchellum (Hedw.) Jenn.	86±5
Maçka (Zarişa)	Eurhynchium pulchellum (Hedw.) Jenn.	119±7
Maçka (Ormaniçi)	Brachythecium starkei (Brid.) Schimp.	95±5
Maçka (Esiroğlu)	Isothecium myurum Brid.	230±23
Maçka (Sümela)	Plagiomnium undulatum (Hedw.) T.J.Kop.	236±24
Trabzon (Yeşilyurt)	Brachythecium starkei (Brid.) Schimp.	183±19
Trabzon (Akyazı)	Rhynchostegiella sp.(Schimp.) Limpr.	162±11
Trabzon (Kireçhane)	Isothecium myurum Brid.	67±7
Akçaaabat (Akçaköy)	Eurhynchium pulchellum (Hedw.) Jenn.	203±18
Akçaaabat (Karasu)	Pleurozium schreberi (Willd. ex Brid.)Mitt.	106±8
Akçaaabat (Çalköy)	Eurhynchium pulchellum (Hedw.) Jenn.	661±35

Tablo 3.1'in devamı

Akçaabat (Karaçayır)	Brachythecium starkei (Brid.) Schimp.	317±35
Tonya (Yakçukur)	Rhynchostegiella sp.(Schimp.) Limpr.	965±46
Tonya (Rosoda)	Hypnum sp. Hedw.	102±7
Tonya (Çayırıçi)	Pleurozium schreberi (Willd. ex Brid.)Mitt.	1003±48
Şalpazarı (Karakaya)	Hypnum sp. Hedw.	982±46
Giresun (Merkez)	Hypnum cupressiforme Hedw.	63±10
Piraziz	Hypnum sp. Hedw.	72±12
Bulancak	Pleurochaete squarrosa (Brid.) Lindb.	121±14
Keşap	Thuidium tamariscinum (Hedw.) Schimp.	49±13
Yağlidere	Pseudoscleropodium sp. M. Fleisch.	85±17
Espiye	Homalothecium lutescens (Hedw.) H. Rob.	103±21
Güce	Pseudoscleropodium sp. M. Fleisch.	78±11
Tirebolu	Hypnum sp. Hedw.	77±15
Görece	Hypnum sp. Hedw.	176±17
Çanakçı	Brachythecium starkei (Brid.) Schimp.	135±19
Eynesil	Brachythecium starkei (Brid.) Schimp.	49±13
Doğankent	Thuidium tamariscinum (Hedw.) Schimp.	23±09
Dereli	Brachythecium sp. Schimp.	36±08
Şebinkarahisar	Brachythecium sp. Schimp.	95±11
Alucra	Isothecium striatulum (Spruce) Kindb.	46±13
Çamoluk	Isothecium striatulum (Spruce) Kindb.	112±16
Ortalama	-	303±35

Toplanan liken numuneleri için ^{137}Cs aktivite konsantrasyonları Tablo 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3. 2. Liken türlerindeki ¹³⁷Cs aktivite konsantrasyonu sonuçları

Örnekleme Yerleri	Liken Türleri	¹³⁷ Cs (Bq kg ⁻¹)
Hopa (Sarp)	Parmelia caperata (L.) Hale	256±21
Hopa (Kemalpaşa)	Parmelia caperata (L.) Hale	256±21
Hopa (Güneşli)	Parmelia caperata (L.) Hale	365±24
Arhavi	Parmelia caperata (L.) Hale	785±39
Fındıklı (Aslandere)	Parmelia caperata (L.) Hale	613±37
Fındıklı (Çınarlı)	Parmelia sulcata	456±25
Fındıklı	Parmelia sulcata	540±31
Fındıklı	Parmelia sulcata	879±44
Fındıklı (Tatlısu)	Parmelia sulcata	255±21
Fındıklı (Çağlayan)	Parmelia caperata (L.) Hale	867±41
Ardeşen (Doğanköy)	Parmelia sulcata	287±22
Ardeşen (Seslikaya)	Parmelia caperata (L.) Hale	76±6
Ardeşen (Ortaalan)	Parmelia caperata (L.) Hale	175±10
Çamlıhemşin	Parmelia caperata (L.) Hale	234±20
Pazar (Hemşin)	Parmelia caperata (L.) Hale	342±23
Pazar	Parmelia caperata (L.) Hale	371±24
Pazar (Hilalköy)	Parmelia caperata (L.) Hale	89±6
Çayeli (Kaptanpaşa)	Parmelia caperata (L.) Hale	101±9
Çayeli (Büyükköy)	Parmelia caperata (L.) Hale	760±36
Çayeli (Madenli)	Parmelia caperata (L.) Hale	349±24
Rize (Akpınar)	Parmelia caperata (L.) Hale	655±39
Rize (Veliköy)	Parmelia caperata (L.) Hale	543±31
Rize (Salarha)	Parmelia caperata (L.) Hale	236±20
Rize (Küçükköy)	Parmelia caperata (L.) Hale	355±23
Derepazarı (Korona)	Parmelia caperata (L.) Hale	316±23
Kendirli	Parmelia caperata (L.) Hale	763±38
İyidere	Parmelia caperata (L.) Hale	132±9
Kalkandere (Y.başıköyü)	Parmelia caperata (L.) Hale	47±5
İkizdere (Çağrankaya)	Usnea flipendula	320±22
Of (Kadınlaryaylası)	Usnea flipendula	214±22
Of (Bölümlü)	Usnea flipendula	87±8

Tablo 3.2'nin devamı

Of (Klavuz)	<i>Usnea flipendula</i>	65±8
Çaykara (Uzuntarla)	<i>Parmelia caperata</i> (L.) Hale	267±20
Çaykara (Çamlıbel)	<i>Laboria pulmonaria</i>	101±8
Çaykara (Uzungöl)	<i>Usnea florida</i>	290±24
Sürmene (Taşlıyayla)	<i>Usnea florida</i>	341±23
Sürmene (Büyükdoğanlı)	<i>Usnea rigida</i>	219±22
Sürmene (Ormanseven)	<i>Parmelia sulcata</i>	307±22
Araklı (Pazarcık)	<i>Parmelia sulcata</i>	270±24
Araklı (Taştepe)	<i>Usnea florida</i>	319±19
Araklı	<i>Usnea flipendula</i>	32±4
Araklı (Dağbaşı)	<i>Xanthoria parietina</i> (L.) Th. Fr.	125±10
Araklı (Oğulkaya)	<i>Parmelia caperata</i> (L.) Hale	312±24
Arsin (Çubuklu)	<i>Parmelia caperata</i> (L.) Hale	195±20
Yomra (Gülyurdu)	<i>Parmelia caperata</i> (L.) Hale	29±5
Maçka (Zarişa)	<i>Usnea flipendula</i>	370±25
Maçka (Ormaniçi)	<i>Usnea flipendula</i>	94±7
Maçka (Esiroğlu)	<i>Usnea flipendula</i>	128±9
Maçka (Sümela)	<i>Usnea flipendula</i>	215±21
Trabzon (Yeşilyurt)	<i>Parmelia sulcata</i>	108±7
Trabzon (Akyazı)	<i>Usnea flipendula</i>	219±21
Trabzon (Kireçhane)	<i>Parmelia caperata</i> (L.) Hale	56±5
Akçaaabat (Akçaköy)	<i>Parmelia caperata</i> (L.) Hale	608±32
Akçaaabat (Karasu)	<i>Parmelia caperata</i> (L.) Hale	186±19
Akçaaabat (Çalköy)	<i>Usnea rigida</i>	571±35
Akçaaabat (Karaçayır)	<i>Usnea rigida</i>	210±21
Tonya (Yakçukur)	<i>Usnea flipendula</i>	791±39
Tonya (Rosoda)	<i>Parmelia caperata</i> (L.) Hale	125±10
Tonya (Çayırıçi)	<i>Parmelia caperata</i> (L.) Hale	660±35
Şalpazarı (Karakaya)	<i>Parmelia caperata</i> (L.) Hale	832±40
Giresun (Merkez)	<i>Flavoparmelia caperata</i>	210±41
Piraziz	<i>Xanthoparmelia conspersa</i>	76±18
Bulancak	<i>Flavoparmelia caperata</i>	120±43
Keşap	<i>Flavoparmelia caperata</i>	127±45

Tablo 3.2'nin devamı

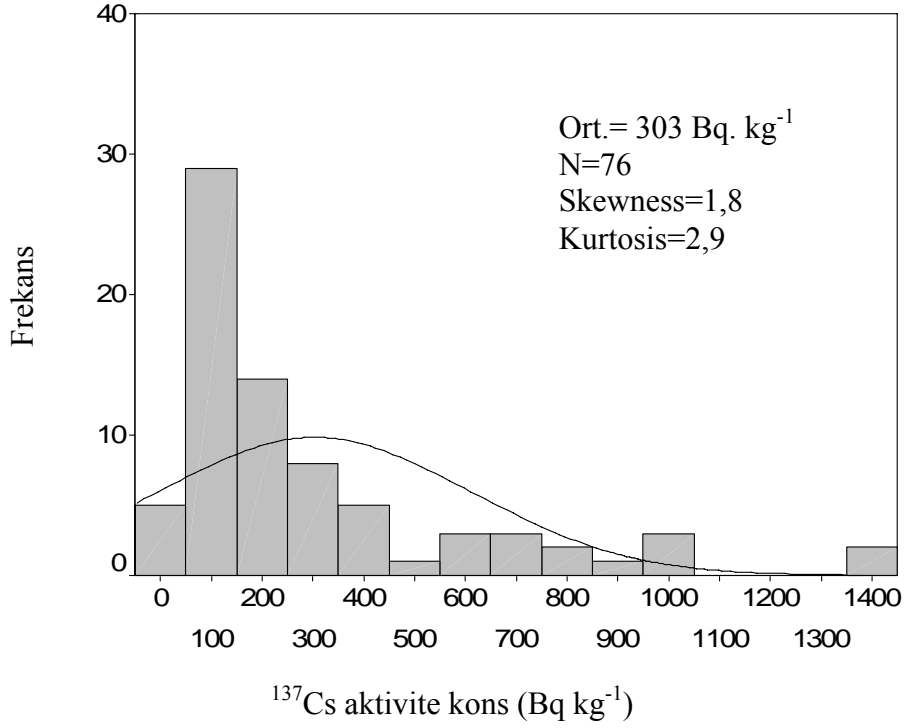
Yağlidere	Physcia adscendes	175±13
Espiye	Physcia adscendes	24±05
Güce	Parmotrema perlatum	254±18
Tirebolu	Flavoparmelia caperata	27±10
Görele	Flavoparmelia caperata	66±09
Çanakçı	Xanthoria parietina	167±32
Eynesil	Physcia adscendes	150±54
Doğankent	Parmotrema perlatum	73±17
Dereli	Flavoparmelia caperata	176±35
Şebinkarahisar	Flavoparmelia caperata	80±19
Alucra	Physcia adscendes	120±21
Çamoluk	Flavoparmelia caperata	93±22
Ortalama	-	286±26

Tablo 3.1 ve Tablo 3.2'den görüleceği gibi ^{137}Cs aktivite konsantrasyonu karayosunlarında 23 ile 1396 Bq kg⁻¹ arasında değişirken (ortalama değer: 303 Bq kg⁻¹), bu değişim likenlerde 24 ile 879 Bq kg⁻¹ arasındadır (ortalama değer: 286 Bq kg⁻¹).

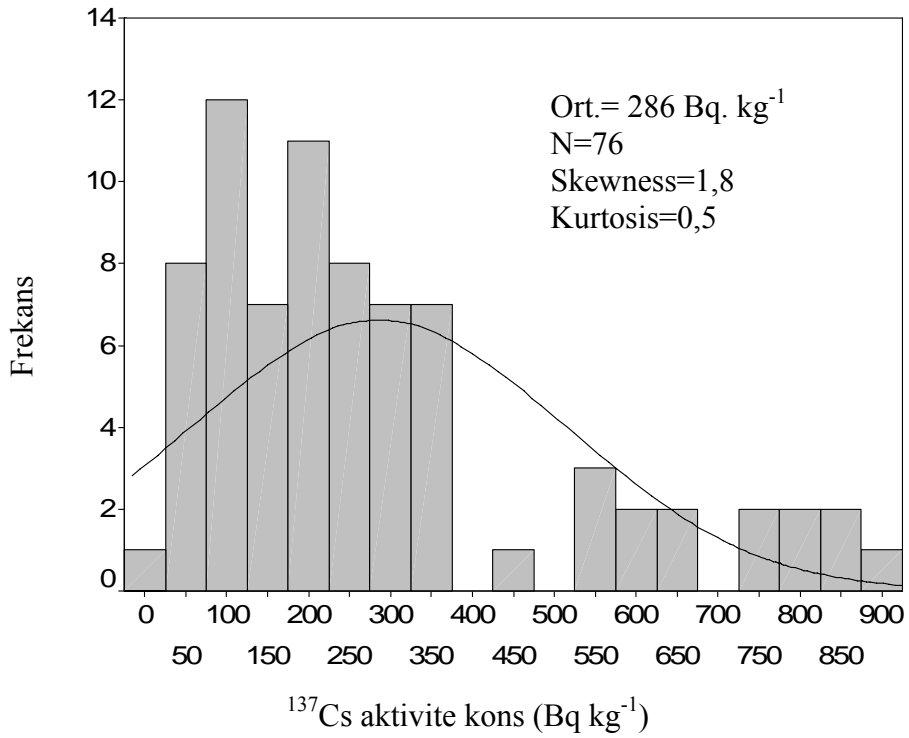
Tablo 3. 3. Karayosunu ve likenlerdeki ^{137}Cs aktivite konsantrasyonları için açıklamalı istatistikler

	Karayosunu				
	Min.	Mak.	Ortalama±SS	Skewness	Kurtosis
^{137}Cs	23	1396	303±35	1,8	2,9
	Liken				
	Min.	Mak.	Ortalama±SD	Skewness	Kurtosis
^{137}Cs	24	879	286±26	1,8	0,5

Skewness ve Kurtosis katsayıları karayosunu ve liken numunelerindeki ^{137}Cs için sırasıyla 1,8 ve 2,9; 1,8 ve 0,5 olarak bulunmuştur (Tablo 3.3). Dağılımlar pozitif skewness katsayılarına sahiptir. Bu katsayının pozitif olması, dağılım fonksiyonunun sağ kanadının sol kanattan daha uzun olduğunu göstermektedir.



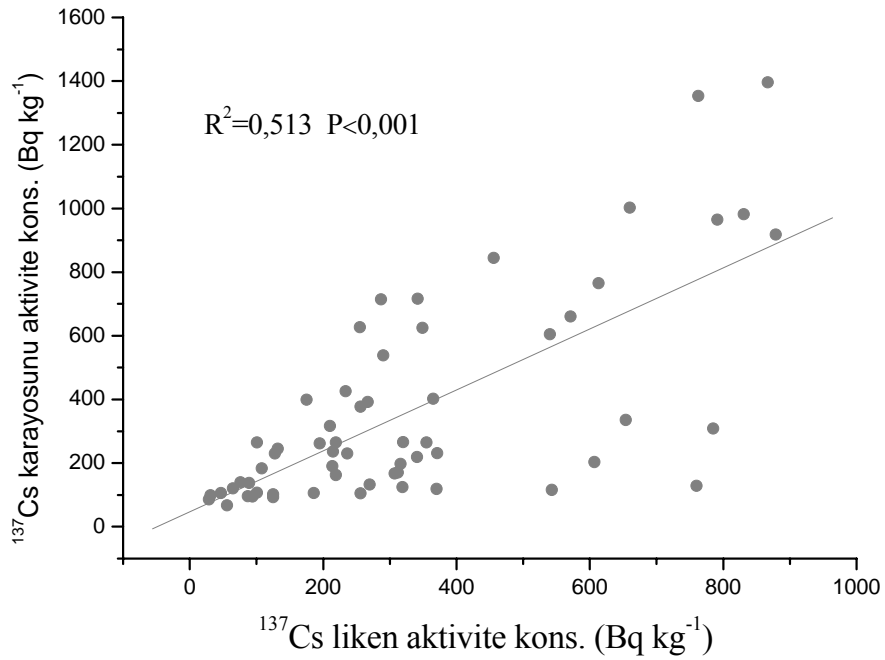
Şekil 3. 1. Karayosunlardaki ¹³⁷Cs aktivite konsantrasyonunun frekans dağılımı



Şekil 3. 2. Likenlerdeki ¹³⁷Cs aktivite konsantrasyonunun frekans dağılımı

Şekil 3.1 ve Şekil 3.2’de ^{137}Cs karayosunu ve likenlerdeki aktivite konsantrasyonun dağılım fonksiyonu normal ve log-normal dağılımdan hangisine uyduklarını anlamak için skewness ve kurtosis katsayılarıyla birlikte verilmiştir. Şekil 3.1 ve Şekil 3.2, ^{137}Cs aktivite konsantrasyonlarının karayosunlarında ve likenlerde log-normal dağılıma daha yakın olduklarını göstermiştir. Her iki dağılımın skewness katsayılarının pozitif olması da bunu göstermektedir. Kurtosis katsayıları dağılımın basıklık derecesi hakkında bilgi vermektedir.

Pearson korelasyon analiz sonucunda karayosunlarındaki ve likenlerdeki ^{137}Cs aktivite konsantrasyonları arasında bir ilişki olduğu gözlenmiştir. İlişki anlamlı ($P=0,001$) ve korelasyon katsayısı $R^2=0,513$ dir (Şekil 3.3’e bakınız).



Şekil 3. 3. Karayosunu ve likenlerdeki ^{137}Cs aktivite konsantrasyonu değerleri

3.2. ¹³⁷Cs İçin Ekolojik Yarı-Ömür

Saka ve arkadaşları (Saka vd, 1997) 1997 yılında Ordu ilinde belirli yerlerden toplanmış liken ve karayosunu örneklerinde ¹³⁷Cs radyoizotopunun tayinini gerçekleştirdiler. Sonuçlar oldukça yüksek bulunmuş ve en büyük değerin 4 kBq kg⁻¹'in üzerinde olduğu gözlemlenmiştir. 1997 sonuçları, bölgenin 1986 yılında meydana gelen Chernobyl kazasından ciddi bir şekilde kirlendiğini bir kez daha teyit etmiştir.

¹³⁷Cs fiziksel yarı-ömrü yaklaşık 30 yıl olan bir radyoizotoptur. Bu, her 30 yılda bir mevcut radyoaktivite değerin yarisına düşmesi anlamına gelir. Ancak biyolojik sistemlerde radyoizotoplar canlı hücrelerden fiziksel, kimyasal ve/veya biyolojik sebeplerden dolayı daha çabuk uzaklaştırılır ve mevcut değerin yarisına fiziksel yarı-ömrülerinden daha kısa bir sürede ulaşırlar. Bu bilgi, radyoaktif kirleticilerin kirlenme işlemini gerçekleştikten sonra çevrede ne kadar etkili olduğu konusunda bilgi vermeleri açısından son derece önem arz eder. Bu tür çalışmalar dünyanın çeşitli yerlerinde birçok araştırmacı tarafından gerçekleştirilmiştir (Paller vd., 1999; Peles vd., 2002; Brohl vd., 2006; Marchard vd., 2007).

Bu bölümde Ordu ilindeki liken ve karayosunlarında ¹³⁷Cs radyoizotopunun ekolojik yarı-ömrü belirlenmiştir. 1997 yılında toplanan numunelerin Mayıs-Haziran 2007 yılında da mümkün olduğu kadar aynı yerlerden toplanmasına azami özen gösterilmiştir.

Ordu ilinde toplanan karayosunu ve liken örneklerinin örnekleme noktaları, türleri ve örneklendiği yükseklikler Tablo 3.4 ve Tablo 3.5'te verilmişlerdir.

Tablo 3. 4. Karayosunu toplanan yerler, karayosunu türleri ve örneklendiği yükseklikler

Örnekleme Noktaları	Örnekleme yerleri	Karayosunu Türleri	Yükseklik (m)
1	Boyadi (Kabadüz- Ordu)	Homalothecium sericeum	230
2	Kabadüz (Ordu)	Hypnum cupressiforme	620
3	Akpınar (Ulubey)	Tomentypnum nitens	370
4	Aynalar (Perşembe)	Platygyrium repens	460
5	Radar (Perşembe)	Jungermannia atrovirens	500
6	Samsunkıran (Perşembe)	Eurhyncium pulchellum	500
7	Sirakovanci (Perşembe)	Jungermannia atrovirens	480
8	Yeşilköy (Perşembe)	Homalothecium lutescens	370
9	Ulubey	Homalothecium lutescens	590
10	Gölköy	Tomentypnum nitens	780
11	Bolaman (Yalıköy-Fatsa)	Homalothecium sericeum	380
12	Çatalpınar (Fatsa)	Homalothecium sericeum	130
13	Gülyanı (Gürgentepe)	Homalothecium sericeum	1100
14	Gürgentepe	Tomentypnum nitens	1220
15	Kurşunçal (Fatsa)	Homalothecium sericeum	680
16	Kurşunçal (Fatsa)	Jungermannia atrovirens	1020
17	Örmeli (Çamaş- Fatsa)	Homalothecium lutescens	480
18	Çamaş (Fatsa)	Homalothecium lutescens	600
19	Ilıca (Fatsa)	Homalothecium sericeum	280
20	Perşembe (Fatsa)	Hypnum cupressiforme	800
21	Yeni ağçalan (Kumru)	Homalothecium sericeum	630
22	Kuşçulu (Ünye)	Homalothecium sericeum	400
23	Çubuklu (Ünye)	Drepanocladus fluitans	600
24	İncirli (İnkur-Ünye)	Homalothecium sericeum	420
25	İnkur (Ünye)	Jungermannia atrovirens	450
26	Tekkiraz (Ünye)	Homalothecium sericeum	530
27	Çaybaşı (Ünye)	Hypnum cupressiforme	480
28	Köklük (Çaybaşı-Ünye)	Homalothecium sericeum	730
29	Karlıtepe (İkizce-Ünye)	Homalothecium sericeum	90
30	İkizce (Ünye)	Homalothecium sericeum	125

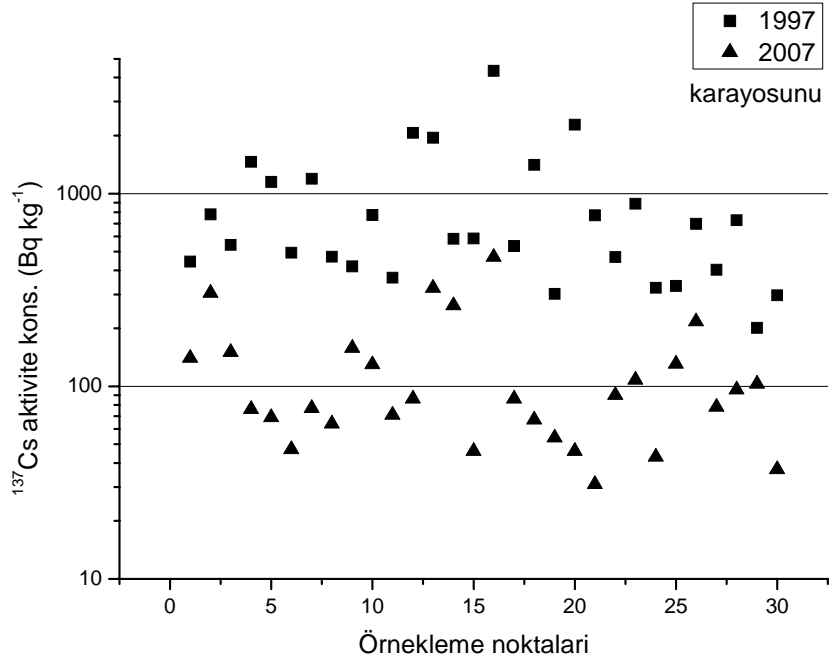
Tablo3. 5. Liken toplanan yerler, karayosunu türleri ve örneklendiği yükseklikler

Örnekleme noktaları	Örnekleme yerleri	Liken Türleri	Yükseklik (m)
2	Maraşlı (Kabadüz-Ordu)	Flavoparmelia caperata	550
3	Kabadüz (Ordu)	Flavoparmelia caperata	620
4	Akpınar (Ulubey)	Flavoparmelia caperata	360
5	Aynalar (Perşembe)	Parmotrema perlatum	460
6	Sirakovanci (Perşembe)	Flavoparmelia caperata	480
7	Ortatepe (Perşembe)	Parmotrema perlatum	480
8	Ulubey	Parmotrema perlatum	590
9	Gölköy	Parmotrema perlatum	780
10	Gülyanı (Gürgentepe)	Parmotrema perlatum	1160
11	Gürgentepe	Parmotrema perlatum	1220
12	Çamaş (Fatsa)	Flavoparmelia caperata	500
13	Ilıca (Fatsa)	Flavoparmelia caperata	270
14	Çubuklu (Ünye)	Flavoparmelia caperata	600
15	Tekkiraz (Ünye)	Flavoparmelia caperata	530
16	Çaybaşı (Ünye)	Flavoparmelia caperata	480
17	Köklük (Çaybaşı- Ünye)	Flavoparmelia caperata	760
18	Çatak (İkizce-Ünye)	Parmotrema perlatum	90
19	Karlitepe (İkizce-Ünye)	Flavoparmelia caperata	120
20	İkizce (Ünye)	Parmotrema perlatum	130

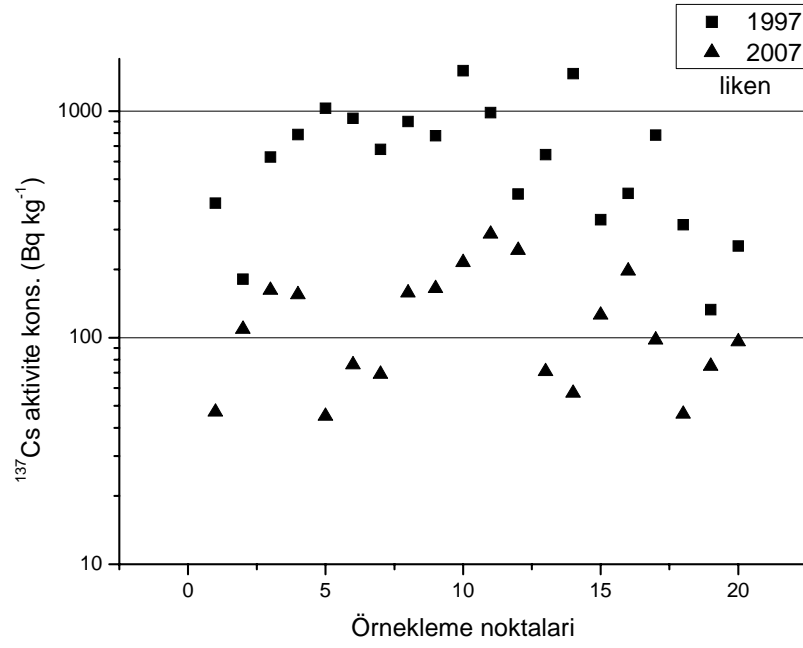
^{137}Cs radyoizotopunun ekolojik yarı-ömrü aşağıdaki bağıntıyla tespit edilmiştir.

$$T_{E1/2} = 0,693 / \lambda_e \quad (3.1)$$

burada $T_{E1/2}$ ekolojik yarı ömür (yıl), λ_e ise ^{137}Cs için belli bir biyolojik sistemdeki ekolojik kayıp oranıdır. Burada λ_e , ^{137}Cs radyoizotopunun 1997 ve 2007 yıllarında elde edilmiş aktivite konsantrasyonu değerlerinden elde edilmiştir.



Şekil 3. 4. 1997 ve 2007 yıllarında karayosunlardaki ^{137}Cs değerleri.



Şekil 3. 5. 1997 ve 2007 yıllarında likenlerdeki ^{137}Cs değerleri.

Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'ten görüldüğü gibi 1997 ve 2007 yıllarına ait ^{137}Cs aktivite konsantrasyonları benzer oranlarda azalış göstermektedir. Yatay eksen örnekleme noktalarını, düşey eksen ise aktivite konsantrasyonunu logaritmik ölçekte göstermektedir.

Tablo 3.6 ve Tablo 3.7, örnekleme noktalarını, karayosunları ve likenlerde ^{137}Cs aktivite konsantrasyonlarını ve hesaplanan ekolojik yarı-ömürleri göstermektedir.

2007 yılında elde edilen aktivite konsantrasyonu değerlerinin 1997 yılındaki değerlere göre (10 yıllık periyot boyunca) azalma oranı, ^{137}Cs radyoizotopunun karayosunlarda ekolojik yarı-ömrünün 1,8 ile 10,4 yıl (ortalama değer: 4,4 yıl); likenlerde ise 2,1 yıl ile 13,7 yıl (ortalama değer: 5,6 yıl) arasında olduğunu göstermiştir. Bu azalma oranları Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'te gösterilmiştir. İstatistiksel olarak ekolojik yarı-ömürler arasında herhangi bir anlamlı ilişki bulunamamıştır. Karayosun ve likenlerdeki farklı ekolojik yarı-ömürler onların morfolojik ve anatomik gibi özelliklerine bağlı olabilir. Karayosunlarında ekolojik yarı-ömrün likenlere kıyasla daha az olması şu şekilde açıklanabilir: Karayosunları daha çok sulak alanlarda yaşarlar. Su ise radyasyonu soğurduğundan dolayı ortamda daha fazla radyasyon olmasına sebep olur. Karayosunu bu radyasyondan kurtulmak için bünyesinde bulunan ^{137}Cs radyoizotopundan kurtulmak isteyecektir. Bu da ekolojik yarı-ömrün küçük olması anlamına gelir.

Tablo 3. 6. Karayosunları örneklerinde hesaplanan ^{137}Cs ekolojik yarı-ömürleri

Örnekleme noktaları	$^{137}\text{Cs}^a$ (Bq kg ⁻¹)	^{137}Cs (Bq kg ⁻¹)	Ekolojik Yarı-Ömür (y)
1	442	140±13	6,0
2	779	305±27	7,4
3	542	150±13	5,4
4	1460	76±6	2,3
5	1150	69±6	2,5
6	493	47±4	2,9
7	1194	77±6	2,5
8	470	64±5	3,5
9	419	158±14	7,1
10	774	130±11	3,9
11	365	71±6	4,2
12	2067	86±7	2,2
13	1950	324±29	3,9
14	583	263±23	8,7
15	586	46±4	2,7
16	4335	469±42	3,1
17	535	86±7	3,8
18	1411	67±6	2,3
19	302	54±5	4,0
20	2276	46±4	1,8
21	772	31±3	2,2
22	467	90±8	4,2
23	886	108±9	3,3
24	324	43±4	3,4
25	332	131±12	7,5
26	696	217±20	5,9
27	401	78±7	4,2
28	726	96±9	3,4
29	201	103±9	10,4
30	295	37±3	3,3
Ortalama	908	122±13	4,3

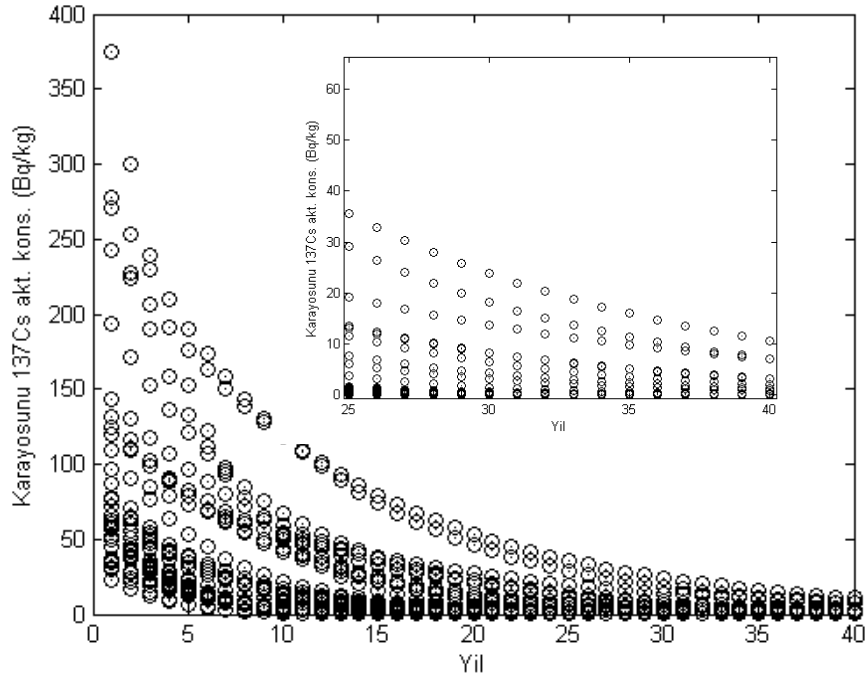
^aSaka ve arkadaşları

Tablo 3. 7. Liken örneklerinde hesaplanan ^{137}Cs ekolojik yarı-ömürleri

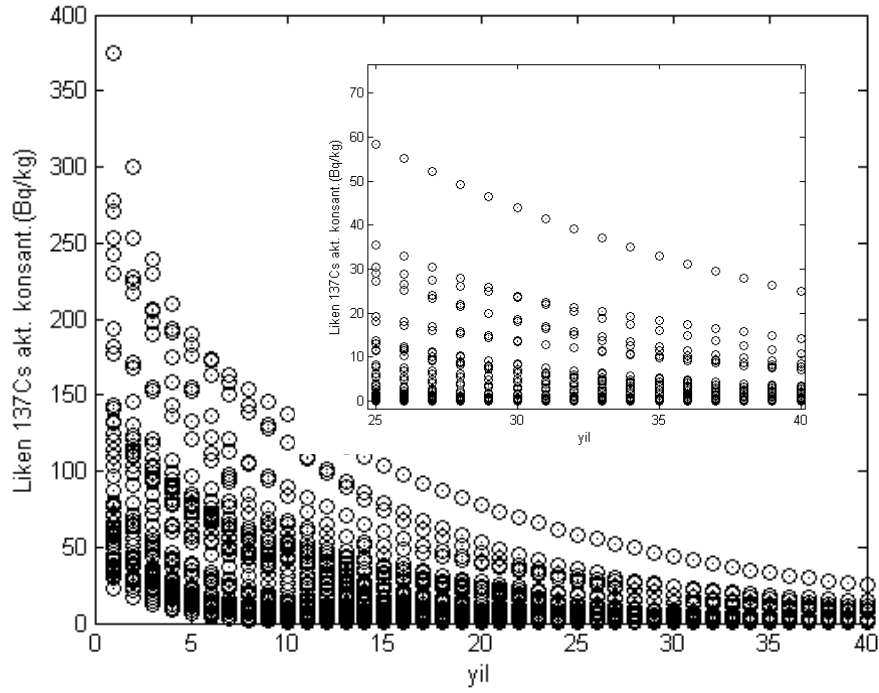
Örnekleme noktaları	$^{137}\text{Cs}^a$ (Bq kg ⁻¹)	^{137}Cs (Bq kg ⁻¹)	Ekolojik Yarı-Ömür (y)
2	180	109±9	13,7
3	626	162±15	5,1
4	787	155±14	4,3
5	1028	45±4	2,2
6	930	76±6	2,8
7	677	69±6	3
8	899	158±14	3,9
9	779	165±15	4,5
10	1508	215±19	3,6
11	984	287±25	5,6
12	431	243±21	12,1
13	641	71±6	3,2
14	1461	57±5	2,1
15	330	126±11	7,2
16	433	197±18	8,8
17	781	98±9	3,3
18	315	46±4	3,6
19	132	75±7	12,1
20	253	96±9	7,1
Ortalama	693	129±17	5,7

^aSaka ve arkadaşları

Tablo 3.6 ve 3.7’de verilen ekolojik yarı-ömür değerleri kullanılarak karayosunu ve likenlerdeki ^{137}Cs aktivite konsantrasyonu değerlerinin zamanla nasıl azalacağı tahmin edilmiştir. Bu azalmalar karayosunları ve likenler için sırasıyla Şekil 3.6 ve 3.7’de verilmiştir.



Şekil 3. 6. Karayosunlarında ^{137}Cs aktivite konsantrasyonunun azalması



Şekil 3. 7. Likenlerde ^{137}Cs aktivite konsantrasyonunun azalması

Şekil 3.6 ve 3.7'den görüldüğü gibi yaklaşık 40 yıl kadar sonra bölgedeki ^{137}Cs aktivite konsantrasyonunun önemli bir ölçüde azalacağı ve hatta sıfıra yaklaşacağı tahmin edilmektedir. ^{137}Cs radyoizotopunun fiziksel yarı-ömrünün yaklaşık 30 yıl olduğu göz önüne alındığında, ekolojik sistemlerin radyoizotopları temizleme mekanizmalarının daha hızlı olduğu görülmektedir. Karayosunlarındaki azalmanın, likenlere göre daha hızlı olduğu görülmektedir. Bunun sebebi, karayosunlardaki ^{137}Cs radyoizotopunun ekolojik yarı-ömrünün daha kısa olması veya bozunma oranının daha yüksek olmasıyla açıklanabilir. Bu durum, likenlerin radyasyonu karayosunlara göre daha iyi tuttuğunu göstermektedir.

^{40}K , kimyasal olarak ^{137}Cs 'a benzediğinden dolayı iki radyoizotop arasında herhangi bir ilişkinin olup olmadığını gözlemlemek için ^{40}K radyoizotopunun aktivitesi ve K elementinin konsantrasyonu bu numunelerde ölçülmüştür. Sonuçlar Tablo 3.8'de verilmiştir.

Tablo 3. 8. Karayosunu ve likenlerde ^{40}K aktivite konsantrasyonu ve K element konsantrasyonu sonuçları

Örnekleme noktaları	^{40}K (Bq kg $^{-1}$)		K (mg g $^{-1}$)	
	Karayosunu	Liken	Karayosunu	Liken
1	1440±130	800±70	39±2	32±2
2	1200±110	650±60	24±1	20±1
3	630±60	770±70	21±1	24±1
4	750±70	1460±130	32±2	39±2
5	580±50	1290±120	22±1	54±3
6	670±60	1300±120	33±2	43±1
7	1120±100	560±50	29±1	14±1
8	1090±100	870±80	35±2	26±1
9	980±90	1480±130	24±1	35±2
10	550±50	1200±110	11±1	42±2
11	1290±120	650±60	56±3	23±1
12	390±40	2100±190	17±1	34±2
13	880±80	1320±120	32±2	13±1
14	790±70	350±30	42±2	23±1
15	1390±120	880±80	44±2	28±1
16	540±50	1380±120	14±1	40±2
17	610±50	710±60	42±2	34±2
18	750±70	1410±130	36±2	21±1
19	650±60	970±90	22±1	25±1
20	980±90	-	30±2	-
21	1420±130	-	35±2	-
22	350±30	-	23±1	-
23	450±40	-	13±1	-
24	870±80	-	30±1	-
25	550±50	-	18±1	-
26	540±50	-	19±1	-
27	1100±100	-	32±2	-
28	510±50	-	18±1	-
29	610±60	-	21±1	-
30	750±70	-	30±2	-

Tablo 3.6, Tablo 3.7 ve Tablo 3.8’de verilen verilere ait istatistiksel açıklamalar Tablo 3.9’da verilmiştir.

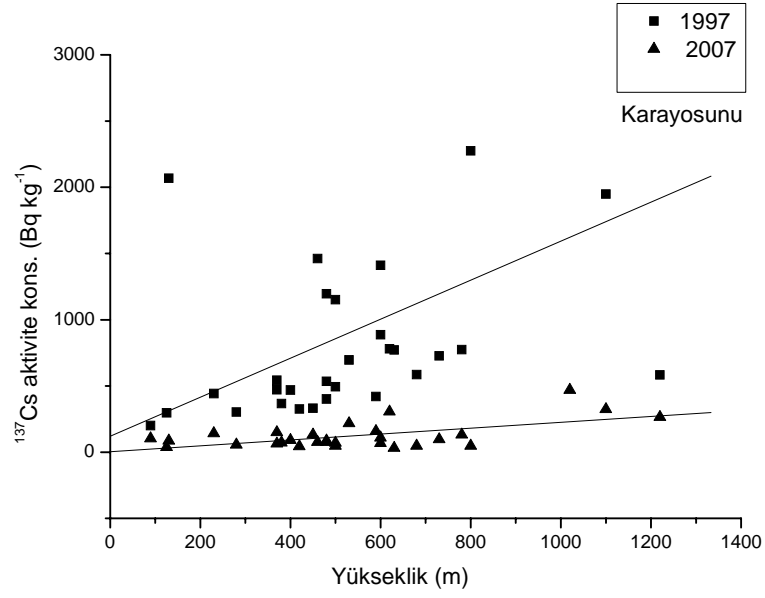
Tablo 3. 9. Açıklamalı istatistikler

	Karayosunu				
	Min.	Mak.	Ortalama±SS	Skewness	Kurtosis
¹³⁷ Cs ^a	201	4335	908±848	2,7	8,6
¹³⁷ Cs	31	469	122±100	2	4,2
⁴⁰ K	345	1435	814±317	0,6	-0,7
K	11	56	28±11	0,6	0,3
	Liken				
	Min.	Mak.	Ortalama±SS	Skewness	Kurtosis
¹³⁷ Cs ^a	132	1508	678±387	0,7	0
¹³⁷ Cs	45	287	125±71	0,8	-0,2
⁴⁰ K	347	2103	1073±420	0,4	0,3
K	13	54	30±10	0,3	-0,1

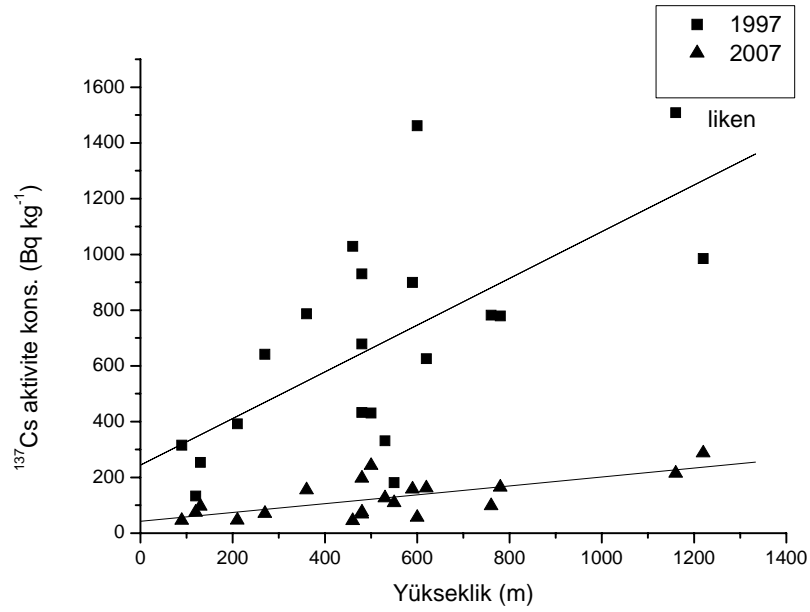
^a Saka ve arkadaşları

Skewness ve Kurtosis katsayıları karayosunu numunelerindeki ¹³⁷Cs ve ⁴⁰K için sırasıyla 2 ve 4,2 olarak bulunmuştur. Aynı katsayılar liken numuneleri için sırasıyla 0,8 ve -0,2 olarak gözlemlenmiştir. Bütün dağılımlar pozitif skewness katsayılarına sahiptir. Bu katsayının pozitif olması, dağılım fonksiyonunun sağ kanadının sol kanattan daha uzun olduğunu göstermektedir. Karayosunlarında ölçülen ¹³⁷Cs aktivite konsantrasyonu değerleri 31 ile 469 Bq kg⁻¹ arasında (ortalama değer: 122 Bq kg⁻¹) değişmektedir. Likenlerde ise bu değerler 45 ile 287 Bq kg⁻¹ arasındadır (ortalama değer: 125 Bq kg⁻¹). *One-Sample T test* istatistik analiz sonucuna göre karayosunu ve likenlerdeki ¹³⁷Cs aktivite konsantrasyonunun ortalama değerleri arasında bir fark bulunmuştur (P=0,001). Bu testin sonucuna göre likenlerin karayosunlarına göre ¹³⁷Cs'yi daha çok akümüle ettikleri anlaşılmıştır. 1997 verileri incelendiğinde karayosunlarındaki ¹³⁷Cs aktivite konsantrasyonunun likenlerdekinden daha yüksek olduğu görülür. Bu sonuç, ¹³⁷Cs radyoizotopunun karayosunlarındaki azalma oranının likenlerdeki orana daha hızlı olduğunu göstermektedir. ⁴⁰K aktivite konsantrasyonu değeri ise 347 ile 2103 Bq kg⁻¹ arasında değişmektedir. K element konsantrasyonu değerlerinin 13 ile 54 mg g⁻¹ olduğu görülmektedir.

¹³⁷Cs radyoizotopunun örnekleme noktalarına göre yükseklikle değişimi de incelenmiştir. Sonuçlar Şekil 3.8 ve Şekil 3.9'da sırasıyla karayosunları ve likenler için verilmiştir.



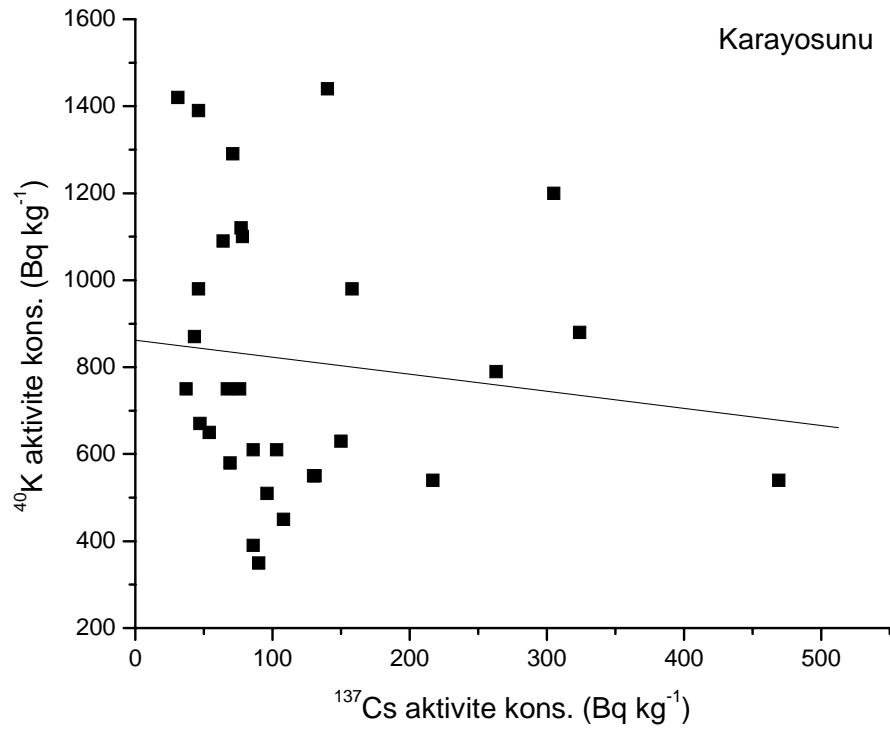
Şekil 3. 8. Karayosunlarında ^{137}Cs aktivite konsantrasyonunun yüksekliğe göre değişimi



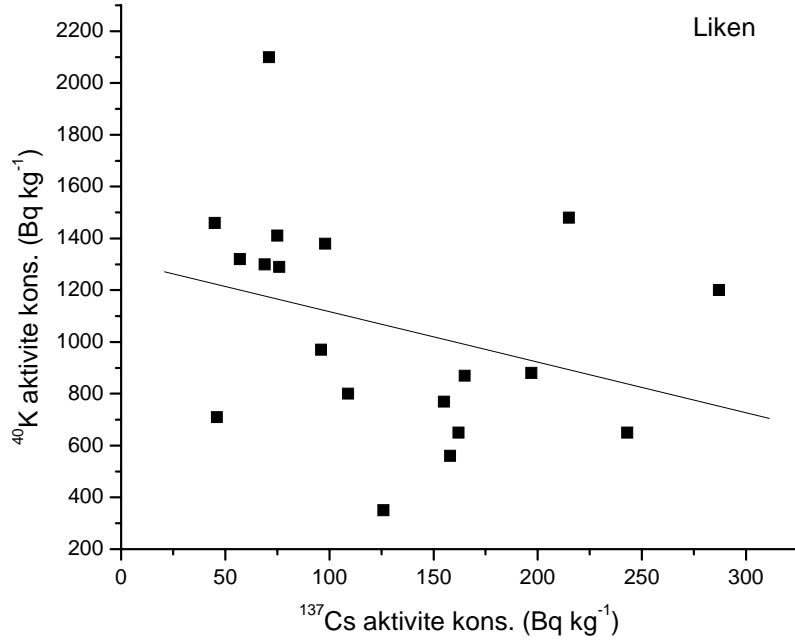
Şekil 3. 9. Likenlerde ^{137}Cs aktivite konsantrasyonunun yüksekliğe göre değişimi

Şekil 3.8 ve Şekil 3.9, 1997 yılında karayosunu ve likenlerdeki ^{137}Cs aktivite konsantrasyonunun yükseklikle beraber arttığını göstermektedir. Bu durum kirlenmenin yüksek bölgelerde daha etkili olduğu anlamına gelir. Yükseklikle beraber artış bu tezdeki verilerde de gözlenmiştir ancak bu artış 1997 yılına ait verilerdeki artış kadar keskin değildir. Bu durum ekolojik temizlenmenin yüksek bölgelerde daha etkili olduğu anlamına gelebilir.

^{137}Cs ile ^{40}K radyoizotopları arasındaki ilişki Şekil 3.10 ile Şekil 3.11’de sırasıyla karayosunları ve likenler için verilmiştir.



Şekil 3. 10. Karayosunlarında ^{137}Cs ile ^{40}K aktivite konsantrasyonu değişimi



Şekil 3. 11. Likenlerde ¹³⁷Cs ile ⁴⁰K aktivite konsantrasyonu değişimi

Şekil 3.10 ve Şekil 3.11, ¹³⁷Cs aktivite konsantrasyonunun ⁴⁰K aktivite konsantrasyonu ile ters orantılı olarak azalır veya artma eğiliminde olduklarını göstermektedir. Ancak bu negatif korelasyon karayosunlarında çok güçlü olmadığı gibi ($R=-0,256$) anlamlı da değildir ($P=0,176$). Likenlerde bu korelasyonun biraz daha güçlü olduğunu görmekteyiz ($R=-0,627$; $P=0,03$). ¹³⁷Cs ile ⁴⁰K arasındaki negatif korelasyon, bu iki radyoizotopun aynı bitki üzerinde birbirlerinin konsantrasyonlarını azaltma girişiminde buldukları söylenebilir. Aynı zamanda ¹³⁷Cs aktivite konsantrasyonunun K element konsantrasyonu ile de ters orantılı olarak değiştiği gözlemlenmiştir ($R=-0,498$ $P=0,05$ karayosunları için; $R=-0,481$ $P=0,32$ likenler için)

3.3. Su Konsantrasyonunun Gama-Işını Verimi Üzerine Etkisinin İncelenmesi

Geleneksel olarak toprak numunelerinde radyoaktivite tayini toprakların kurutulmasıyla başlar. Böylece suyun soğurma etkisinin ortadan kaldırılması hedeflenir. Bu konuda literatürde yapılmış birçok çalışmaya rastlamak mümkündür (Degerlier vd, 2008; Ajayi vd., 2008; Murty vd., 2008; Bikit vd., 2004; Bolca vd., 2007; Farai vd., 2006;

Higgy ve Pimpi., 1998; Ibrahim ve Mohammad., 2009; Malczewski vd., 2004). Numunelerin kurutulması bir fırında birkaç on gün kadar bekletilerek sağlanır. Az sayıda numune için herhangi bir sorun yokmuş gibi görünse de, acil durumlarda örneğin bir nükleer kaza durumunda bir laboratuvar çok sayıda numunede radyoaktivite tayinini kısa bir zamanda rapor etmek zorundaysa kurutma işlemi (çok zaman aldığından dolayı) problem haline gelir. Bu tezde böyle bir probleme karşı çözüm yolu araştırılmış ve bir çözüm önerilmiştir.

Günümüzde toprak gibi numunelerde su konsantrasyonunu çok kısa zamanda ve hassas bir şekilde ölçen cihazlar geliştirilmiştir. Bu cihazlar kullanılarak herhangi bir toprak numunesindeki su konsantrasyonu kısa zamanda hassas bir şekilde belirlenebilir. Su konsantrasyonunun gama-ışını dedeksiyonu üzerine etkisi belirlenebilirse acil durumlarda toprak numunelerinde radyoaktivite tayini için kurutma işlemi atlanabilir. Deneysel olarak böyle bir etkiyi saptamak mümkündür. Önce kuru bir toprak numunesi dedektörde ölçülür daha sonra adım adım bilinen oranlarda su katılarak her defasında verimdeki değişim izlenirse böyle bir katsayı bulunabilir. Ancak, bu yolla birçok sistematik hatanın sonuçları olumsuz etkilemesi beklenir. Çünkü su katılan toprak numunesi bir önceki gibi homojen olmayacaktır ve su konsantrasyonu arttıkça homojenlik daha çok bozulacaktır. Homojen olmama durumunun dedektörün verimi üzerine olan etkisi başka bir çalışmada belirlenmiştir (Çelik ve Çevik, 2010). Bu amaç için alternatif bir metodun kullanılması son derece avantajlı olacaktır.

Monte Carlo simülasyon tekniği, bu amaç için kullanılmıştır (Ayrıntılı bilgi için Monte Carlo Yöntemi'ne bakınız).

3.3.1. Toprak Numunesi

Gerçeği mümkün olduğu kadar taklit edebilmek için gerçek bir toprak numunesi parametreleri kullanılmıştır. Topraktaki elementler WDXRF (wavelength dispersive X-ray fluorescence) metoduyla belirlenmiş ve Tablo 3.10'da verilmiştir.

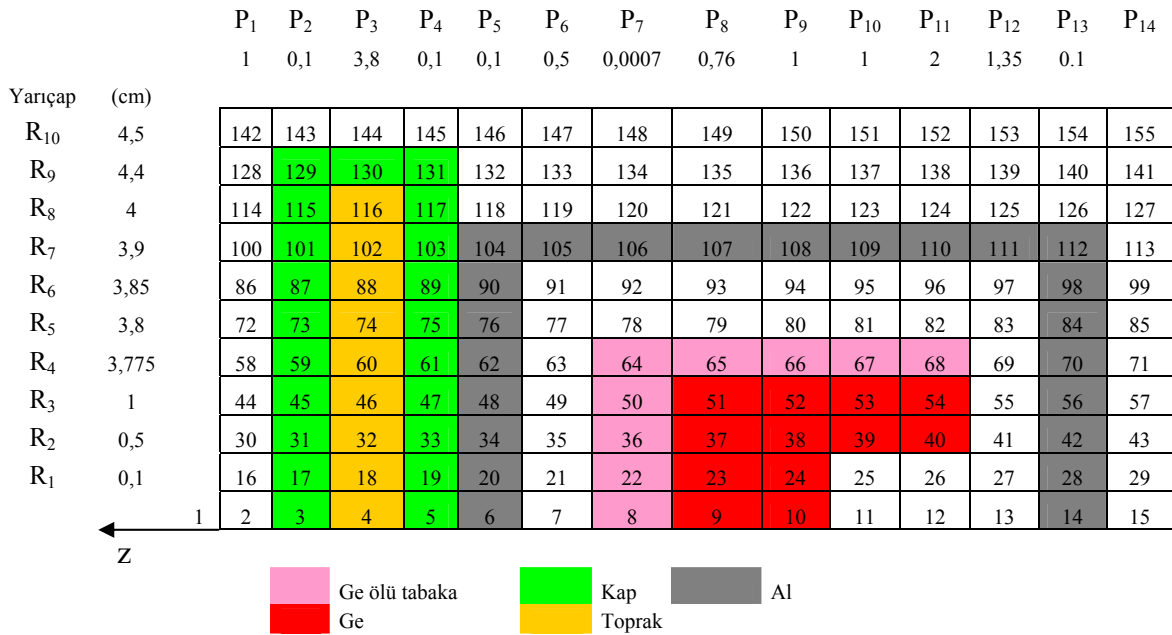
Tablo 3. 10. Toprak numunesindeki kimyasal bileşenler ve yüzdelik konsantrasyonlar

Kimyasal bileşen	SiO ₂	CO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	B ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂
Konsantrasyon (%)	43,4	21,8	13,8	6,7	3,6	2,9	2,3	2,1	1,7	1,0

Tablo 3.10’da verilen kimyasal bileşenlerle temsil edilen toprak numunesine her defasında ağırlığının (270 g toprak) %10’u kadar su (H₂O) katılarak program koşturulmuş ve bu işlem %40 kadar su ilave edilinceye kadar devam etmiştir. Deneysel olarak gözlemlenmiştir ki, %40 su ilave edildiğinde toprak doyma noktasına ulaşmış ve su toprağın üzerinde birikmeye başlamıştır. İlave edilen su miktarları ile birlikte simülasyonda kullanılan toprak numunesinin yoğunluğu ve kimyasal bileşenleri değiştirilmiştir.

3.3.2. Monte Carlo Dedektör Modeli

Bütün simülasyonlar EGS4 (Electron Gamma Shower) (Nelson ve Hirayama, 1985) sisteminde gerçekleştirilmiştir. Dedektör modeli Şekil 3.12’de görüldüğü gibi 155 bölgeye ayrılmıştır.



Şekil 3. 12. Simülasyonda kullanılan dedektör modeli

Şekil 3.12, z eksenine göre silindirik simetriye sahiptir. R_1, R_2, \dots yarıçaplar ve cm cinsinden değerleri gösterilmektedir. P_1, P_2, \dots değerleri de her bir bölgenin uzunluğunu cm cinsinden göstermektedir. Böylece şekil 3.12 z eksenini etrafında 180° döndürüldüğünde iç içe geçmiş silindirik kabuklar elde edilmektedir.

Şekil 3.12’de gösterilen modelde toprak numunesinde çıkan 661 keV enerjideki her bir gama fotonu bütün bölgelerde taşınmakta, hangi etkileşim (fotoelektrik, Compton veya çift oluşum olayı) yaptığı örneklenmekte ve Ge kristaline ulaşanlar kaydedilmektedir. Bu dedektör parametreleri, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fizik Bölümü’nde bulunan ORTEC yapımı %55 relatif verime sahip HPGe dedektörüdür. Dedektör parametreleri Tablo 3.11’de verilmiştir.

Tablo 3. 11. Kullanılan dedektör modeli

Dedektör Tipi	n-tipi Ge
Kristal Çapı	7,5 cm
Kristal Aktif Hacmi	213,1 cm ³
Kristalin dedektör penceresine uzaklığı	0,4 cm
Pencere Tipi	Al
Pencere Kalınlığı	1,0 mm
Ge ölü tabaka kalınlığı	700 μ m
Bağıl verim	%55

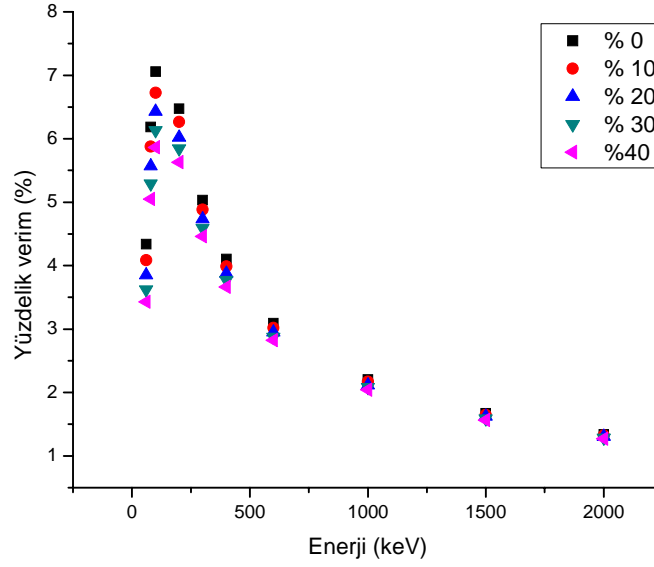
Rastgele sayı üretmek için 800 Milyona kadar farklı sayı üretebilen RANLUX (Gasparro vd., 2008) rastgele sayı üretici kullanıldı. Verim değerleri elde etmek için 10010 tane kanal (bin) seçildi ve her bir bin’in genişliği 0,3 keV olarak seçildi. Simülasyonlar kozmik ışınlar veya çevreden gelen ve backgroundta katkıda bulunan kaynakları dikkate almamaktadır. Ayrıca elektronik gürültü ve elektron-delik çiftlerindeki istatistiksel dalgalanmalar da hesaba katılmamıştır.

Programaya tanıtılan foton enerjileri, her zaman kendi enerjilerinden 10 eV daha düşük olarak seçilmiştir. Böylece sayı yuvarlamalarından gelen hataların önlenmesi sağlandı.

3.3.3. Simülasyon Sonuçları

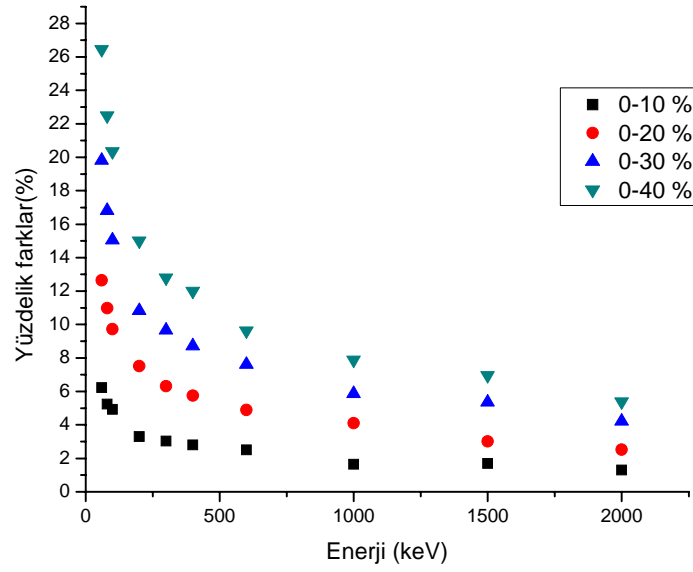
Simülasyonda elde edilen verilerdeki hatalar %1 istatistiksel hata ve %2 programda kullanılan tesir kesiti hatalarıdır. İstatistiksel hatanın %1 ve daha küçük olması için her bir enerji değerinde 10^7 tane foton örneklenmiştir. Dolayısıyla sonuçlarımızdaki toplam hata oranı yaklaşık %3 civarında olması beklenmektedir.

Şekil 3.13, enerjiye göre hesaplanan gama dedeksiyon yüzdelerinin çeşitli su konsantrasyonlarına göre göstermektedir.



Şekil 3. 13. Enerjiye göre çeşitli su konsantrasyonları için yüzdelerdeki gama dedeksiyon verimi.

Şekil 3.13'ten görüldüğü gibi düşük enerjili gama fotonları için verim değeri düşmekte, yüksek enerjiler için ise (özellikle 1 MeV ve sonrası için) önemli ölçüde değişmemektedir. Verimdeki düşüşün oranını da iyi görmek için Şekil 3.14'te çeşitli su konsantrasyonları için verim değerleri arasındaki yüzdelerdeki fark hesaplanmıştır.



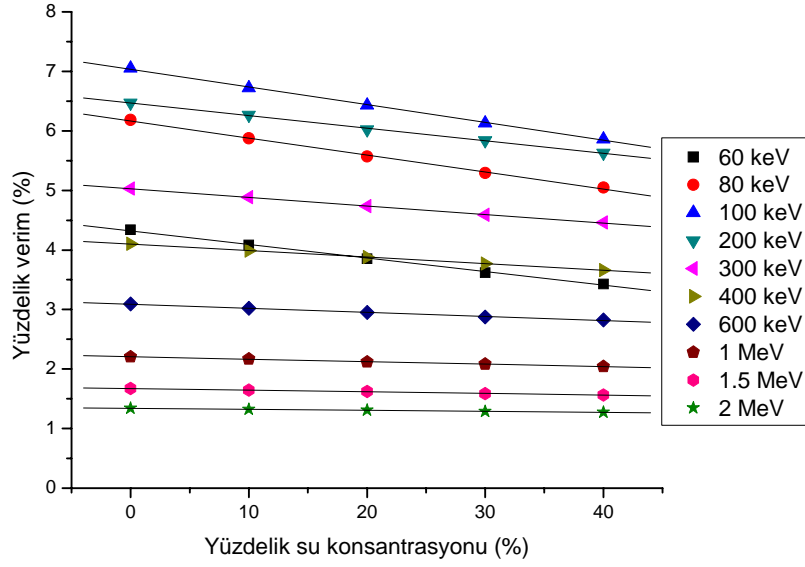
Şekil 3. 14. Kuru toprak ile çeşitli su konsantrasyonlu topraklar arasındaki yüzdellik fark.

Şekil 3.14'ten görüldüğü gibi düşük enerjilerde %10 su konsantrasyonu için yüzdellik fark yaklaşık %4 civarındayken, yüksek enerjilerde yaklaşık bu fark yaklaşık %1 gibidir. En yüksek su konsantrasyonu için (%40 su), düşük enerjiler için yüzdellik fark yaklaşık %18 iken, bu fark yüksek enerjilerde yaklaşık %8 kadardır.

Dedeksiyon verimi ile su konsantrasyonu arasında bir ilişki kurabilmek için hesaplanan dedeksiyon verimi yüzdellik su konsantrasyonuna karşı Şekil 3.15'te görüldüğü gibi çizilmiştir. Şekil 3.15'ten kolayca görüldüğü gibi dedeksiyon verimi ile su konsantrasyonu arasında yaklaşık lineer bir bağıntı vardır. Lineer fit denklemlerinde korelasyon katsayısı çoğu durumlar için $P < 0,05$ önem derecesinde $R^2=0,97$ civarındadır. O halde bu ilişki analitik olarak aşağıdaki bağıntıyla kolayca temsil edilebilir.

$$\varepsilon = aw + b \quad (3.2)$$

Burada ε dedeksiyon verimi, w yüzdellik su konsantrasyonu, a ve b ise kullanılan dedektör modeline ve geometriye göre değişen parametrelerdir. Bir düzeltme faktörü üretebilmek için referans bir toprağa ihtiyaç duyulmaktadır. Tamamen kuru olan (%0 su konsantrasyonu) toprak bu durumda referans materyal olarak kullanılabilir.

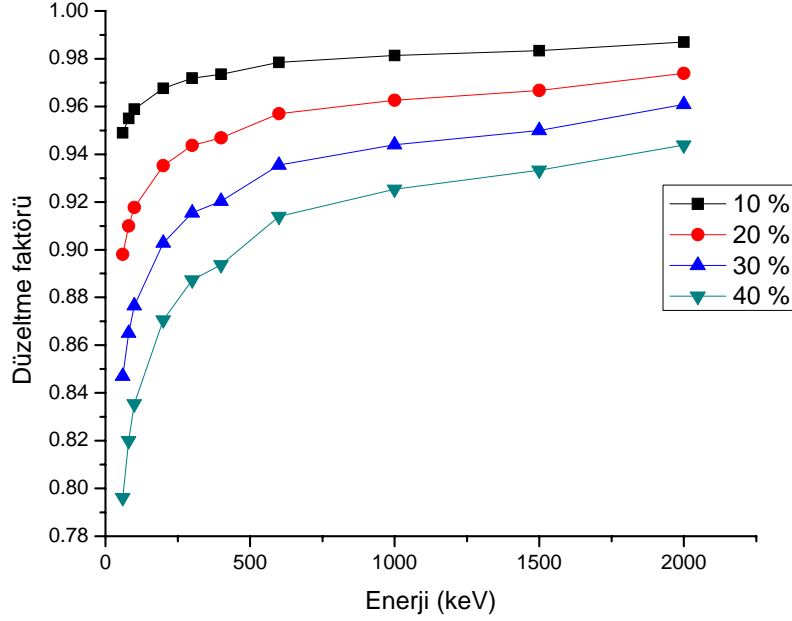


Şekil 3. 15. Hesaplanan yüzdelik dedeksiyon verim değerlerinin yüzdelik su konsantrasyonuna göre değişimi

Yukarıda verilen bilgiler ışığında düzeltme faktörü aşağıdaki ifadeyle bulunabilir.

$$CF = (aw_n + b)/(aw_r + b) \quad (3.3)$$

Burada CF , düzeltme faktörü w_n ve w_r sırasıyla numunedeki ve referans materyaldeki yüzdelik su konsantrasyonlarıdır. Yukarıdaki bağıntıyla hesaplanan düzeltme faktörleri Şekil 3. 16'da gösterilmektedir. Şekil 3. 16'dan görüldüğü gibi düzeltme faktörleri (CF) düşük enerjiler ve yüksek su konsantrasyonları için düşük, yüksek enerjiler ve düşük su konsantrasyonları için ise bire yaklaşmaktadır. Yani CF , düşük enerjiler ve yüksek su konsantrasyonları için daha etkilidir.



Şekil 3. 16. Monte Carlo ile hesaplanmış düzeltme faktörleri

Herhangi bir toprak numunesinde dedektöre giden foton sayısı N aşağıdaki gibi hesaplanır

$$N = A \cdot \varepsilon \cdot t \cdot P_\gamma \quad (3.4)$$

Burada A aktivite (Bq), ε dedeksiyon verimi, t sayım süresi ve P_γ gama bozunma ihtimalidir. Kurutulmuş bir toprak numunesinde aktivite hesaplanması yukarıdaki denklemlerle gerçekleştirilir. Toprakta belli bir oranda su olduğunu varsayalım. Dedektöre giden foton sayısında bir azalma olacaktır. Bu azalma gama fotonlarının bir kısmının su molekülleri tarafından soğurulması sonucudur. Gama fotonlarının soğurulması enerjisiyle logaritmik olarak azaldığından, soğurmanın miktarı düşük enerjilerde daha fazla olacaktır. Aktivite hesabı kuru kütle üzerinden rapor edilecekse, N sayısının düzeltilmesi gerekmektedir ve aşağıdaki gibi yapılır.

$$N = \frac{1}{CF} (A \cdot \varepsilon \cdot t \cdot P_\gamma) \quad (3.5)$$

Burada CF , yukarıda Monte Carlo tekniğiyle hesapladığımız düzeltme faktörüdür.

3.3.4. Deneysel Doğrulama

Monte Carlo ile hesaplanan düzeltme faktörlerini (CF) sınamak için aşağıda anlatılan deney gerçekleştirilmiştir. Bir toprak numunesine ^{99m}Tc ($T_{1/2}=6,0058$ saat, $E=140$ keV, $A=3500$ μCi) ve ^{131}I ($T_{1/2}=8,02$ gün, $E=364$ keV, $A=500$ μCi) ile kirletilmiş %10, %20, %30 ve %40 oranlarında su ilave edilerek her defasında dedektörün cevap fonksiyonu belirlenmiştir. Sıvı radyoaktif kaynaklar Karadeniz Teknik Üniversitesi Tıp Fakültesi Nükleer Tıp anabilim dalından temin edilmişlerdir. ^{99m}Tc sadece 6 saatlik yarı ömre sahip olduğu için, ölçüm süreleri kaydedilerek bozunma düzeltmesi gerçekleştirilmiştir. ^{131}I 'in yarı ömrü (8,02 gün) ^{99m}Tc 'a göre çok daha uzun olduğundan, bir düzeltme ihtiyacı hissedilmemiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 3.12'de verilmiştir.

Tablo 3. 12 Monte Carlo ile hesaplanan ve deneysel olarak ölçülen verim değerleri arasındaki yüzdellik farklar.

	Yüzdellik Fark			
	%10 su	%20 su	%30 su	%40 su
^{99m}Tc (140keV)	-16,28	-12,21	15,59	17,37
^{131}I (364 keV)	-10,11	-6,47	10,09	11,44

Tablo 3.12'den görüldüğü gibi deneysel değerlerle Monte Carlo simülasyon değerleri arasında yüzdellik fark sınırları içerisinde bir uyum görülmektedir. Bu farklılığın numuneye su konduktan sonra eski homojenliğini biraz olsun kaybetmesinden kaynaklanabilir. Monte Carlo hesaplamalarında numunenin her durumda homojen olduğu kabul edilmiştir. Ayrıca Tablo 3.12, ^{131}I için hesaplanan yüzdellik farkın ^{99m}Tc için hesaplanan yüzdellik farktan daha büyük olduğunu göstermektedir. Bu durum ^{99m}Tc radyoaktif kaynağın ^{131}I 'a göre daha düşük enerjide gama fotonu yaymasından kaynaklanabilir.

3.4. ^{137}Cs 'un Toprağa Difüzyonunun Modellenmesi

Radyosezyum, dış gama dozuna ve yiyecek zincirinden de insan vücuduna girerek iç gama ışınımına sebep olduğundan en tehlikeli radyoaktif atıklardan biri kabul edilir. Bu yüzden ^{137}Cs 'un toprağa difüzyonunun incelenmesi, bu radyoizotopta gelecek doz hesabı için son derece önemlidir. ^{137}Cs 'nin topraktaki dikey ilerleyişi, toprağın yapısına bağlıdır.

Derinliğe bağlı deneysel ölçümler ^{137}Cs 'nin derinlikle yaklaşık olarak eksponansiyel azaldığını göstermiştir ve birçok model bu gerçeği açıklamak için geliştirilmiştir (Velasko vd, 1993; Antonopoulos vd., 1995; Blagoeva vd., 1995).

Türkiye, özellikle Doğu Karadeniz ve Trakya Bölgesi, 6 Mayıs 1986 yılında meydana gelen Chernobyl kazasıyla ciddi bir şekilde kirlenmiştir. Kazadan hemen sonra Çekmece Nükleer Araştırma Merkezi çeşitli numunelerde ^{137}Cs aktivite konsantrasyonu ölçümü gerçekleştirmiştir. Yayınlanan rapora göre Doğu Karadeniz dağlarındaki toprağın ilk 5 cm tabasında ^{137}Cs aktivite konsantrasyonu 4-4,5 kBq kg⁻¹ olarak belirtilmiştir (TAEK raporu, 1988). Ayrıca Doğu Karadeniz Çaylarında 44 kBq kg⁻¹'lık ^{137}Cs aktivite konsantrasyonu da belirtilmiştir (Unlu vd., 1995). 1997 yılında yapılan bir çalışmada Giresun ilindeki likenlerde ^{137}Cs aktivite konsantrasyonu değeri 373 Bq kg⁻¹ olarak belirtilmiştir (Gedikoğlu ve Sipahi, 1989). Bütün bu bilgiler bölgenin kirlilik derecesini açıkça gözler önüne sermektedir. Ancak şimdiye kadar bu bölgede ^{137}Cs difüzyonu sistematik bir şekilde modellenmemiştir. Bu eksikliği gidermek için tezde bu konu da göz önüne alınmıştır.

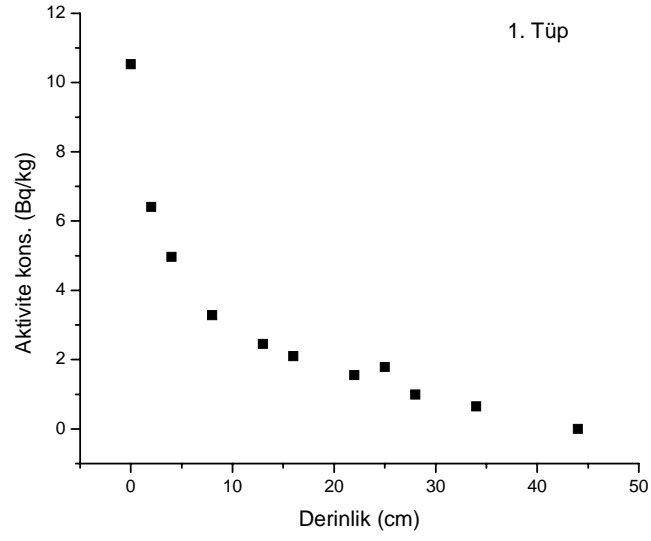
3.4.1. ^{137}Cs Aktivite Konsantrasyonu Ölçümü

Doğu Karadeniz Bölgesi, 1986 yılında meydana gelen Chernobyl kazasıyla kirlendiğinden, bu bölge ^{137}Cs radyoizotopunun dikey hareketini gözlemlemek için mükemmel bir doğal laboratuvar gibidir. Bu yüzden ^{137}Cs radyoizotopunun derinliğe bağlı deneysel değerlerini elde etmek için çalışma alanından iki farklı bölgeden sırasıyla 30 cm ile 45 cm arasında değişen derinliklerden demir tüp vasıtasıyla toprak numuneler alınmıştır. Alınan toprak numunelerinin derinlikleri ve ^{137}Cs aktivite konsantrasyonu değerleri Tablo 3.13'te verilmiştir.

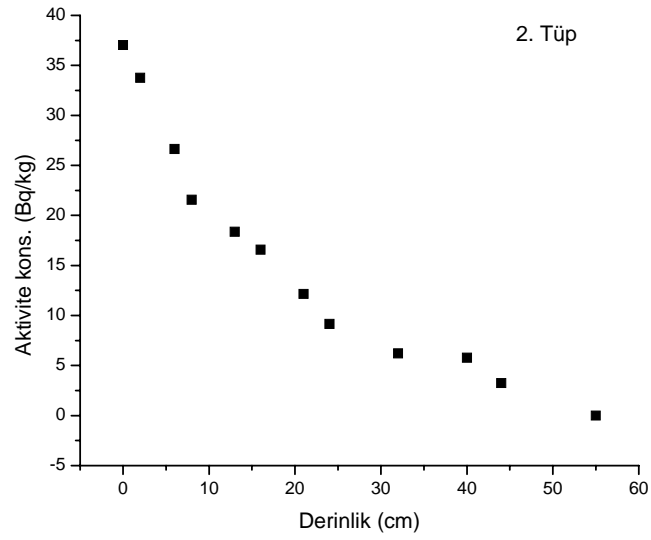
Tablo 3. 13. Altı ayrı tüpten alınan toprak numunelerinde derinliğe bağlı ¹³⁷Cs aktivite konsantrasyonu değerleri

Derinlik (cm)	Aktivite (Bq kg ⁻¹)	Hata (Bq kg ⁻¹)	Derinlik (cm)	Aktivite (Bq kg ⁻¹)	Hata (Bq kg ⁻¹)
1. Tüp			2. Tüp		
0	10,5	0,4	0	37,0	0,3
2	6,4	0,2	2	33,8	0,8
4	4,9	0,1	6	26,6	0,3
8	3,3	0,2	8	21,6	0,8
13	2,5	0,1	13	18,4	0,3
16	2,1	0,2	16	16,6	0,6
22	1,6	0,2	21	12,2	0,5
25	1,8	0,1	24	9,2	0,3
28	1,1	0,3	32	6,2	0,3
34	0,6	0,2	40	5,8	0,3
43	DLA	-	44	3,2	0,2
			55	DLA	-
3. Tüp			4. Tüp		
0	56,4	1,2	0	92,2	1,1
5	32,1	0,8	5	56,2	1,3
10	21,4	0,7	10	40,3	0,9
15	15,4	1,4	15	39,6	0,8
20	13,1	0,5	20	23,1	0,4
25	6,2	0,3	25	18,7	0,2
30	2,2	0,2	30	11,2	0,1
37	DLA	-	35	9,7	0,2
			40	3,1	0,5
			45	DLA	-
5. Tüp			6. Tüp		
0	26,8	0,9	0	42,4	0,3
5	18,0	1,3	5	27,7	0,2
10	9,2	0,5	10	24,1	0,1
15	7,1	0,7	15	21,1	0,1
20	2,6	1,1	20	13,4	0,5
25	1,2	0,6	25	8,7	0,5
30	DLA	-	30	6,5	0,7
			35	2,1	0,7
			40	DLA	-

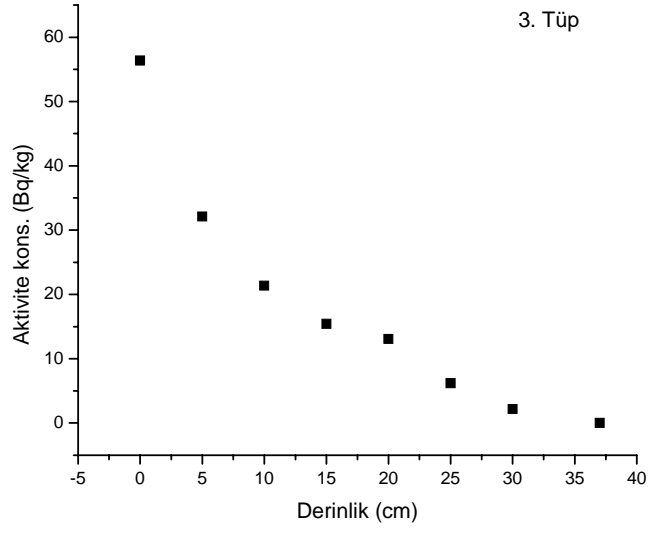
Aktivite konsantrasyonlarının derinliğe bağlı değişimleri Şekil 3.17-Şekil 3.22'de verilmiştir. Tablo 3.13'te DLA, Dedeksiyon Limiti Altında anlamına gelir.



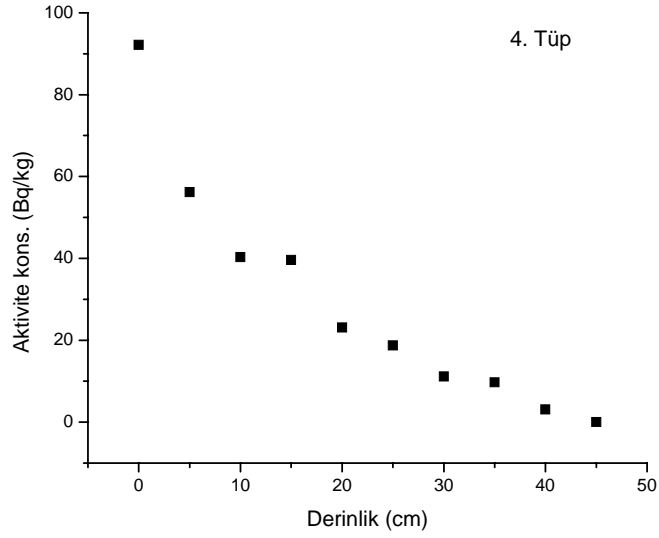
Şekil 3. 17. Birinci tüpten elde edilen topraktaki derinliğe bağlı ^{137}Cs aktivite konsantrasyonu değerleri



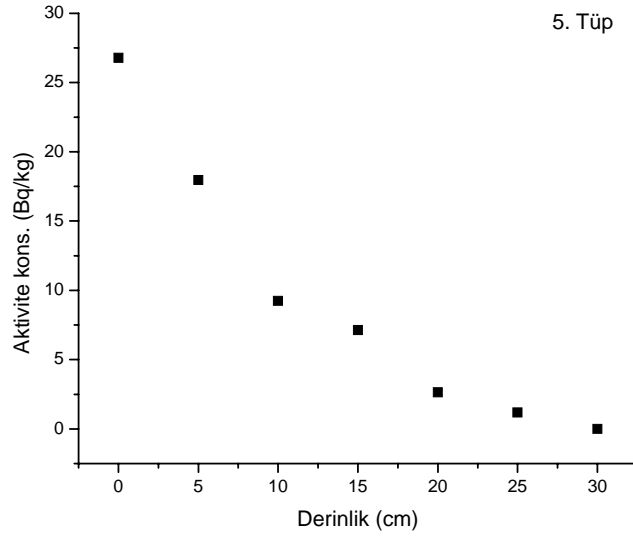
Şekil 3. 18. İkinci tüpten elde edilmiş toprak numunesinde ^{137}Cs aktivite konsantrasyonu değerleri



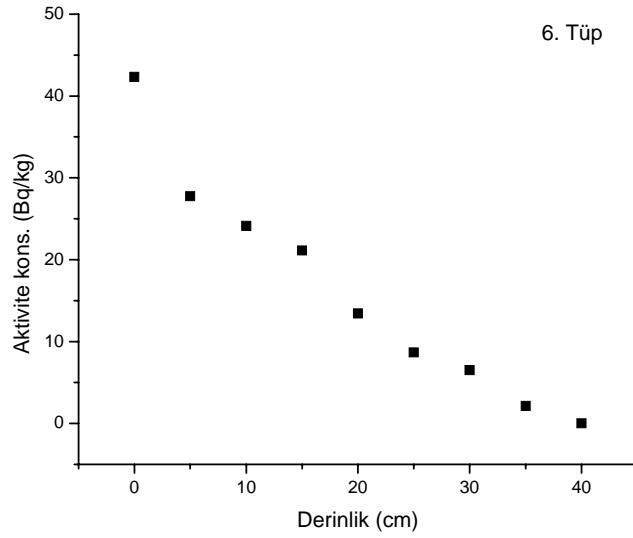
Şekil 3. 19. Üçüncü tüpten elde edilmiş toprak numunesinde ^{137}Cs aktivite konsantrasyonu değerleri



Şekil 3. 20. Dördüncü tüpten elde edilmiş toprak numunesinde ^{137}Cs aktivite konsantrasyonu değerleri



Şekil 3. 21. Beşinci tüpten elde edilmiş toprak numunesinde ^{137}Cs aktivite konsantrasyonu değerleri



Şekil 3. 22. Altıncı tüpten elde edilmiş toprak numunesinde ^{137}Cs aktivite konsantrasyonu değerleri

3.4.2. ^{137}Cs Difüzyon Modeli

^{137}Cs 'nin bozulmamış topraktaki dikey hareketi difüzyon ve taşınma süreçlerini kapsar. Difüzyon olayında ^{137}Cs 'un dikey hareketi konsantrasyon farkından kaynaklanır. Burada hareketin sadece yüksek konsantrasyondan düşük konsantrasyona olmasına izin verilmiştir. ^{137}Cs 'nin topraktaki dikey ilerleme olayı (migrasyon) ise mekaniksel bir taşınmayla gerçekleşmektedir. Yani toprak parçacıkları üzerine yapışan ^{137}Cs molekülleri toprak parçacıklarının hareketiyle hareket eder. Bu süreçte ^{137}Cs , yüksek konsantrasyondan düşük konsantrasyona veya düşük konsantrasyondan yüksek konsantrasyona hareket edebilir. Mevcut literatür, yüksek aktivite konsantrasyonun toprağın yüzeyinde gerçekleştiği ve bu konsantrasyonun derinlikle azaldığı toprak profilleri için difüzyon olayı daha baskın olduğunu göstermektedir (Bossew, vd., 2001; Schuller v.d, 1997; Shinonaga vd., 2005; Szerbin vd., 1999; Zhang vd., 2008). Bu bölümde ^{137}Cs dikey hareketinin sadece difüzyon mekanizması şeklinde gerçekleştiği farz edilerek, ilgili model geliştirilmiştir.

Sadece difüzyon mekanizması hesaba katılırsa ^{137}Cs 'in dikey hareketi aşağıdaki diferansiyel denklemle tasvir edilebilir.

$$\frac{\partial C(z,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C(z,t)}{\partial z^2} - \lambda C(z,t) \quad (3.6)$$

Burada $C(z,t)$ ^{137}Cs konsantrasyonu (Bq cm^{-3}), z derinlik, D difüzyon katsayısı, λ ise ^{137}Cs 'nin bozunma sabitidir ($0,023 \text{ y}^{-1}$). Burada en yüksek konsantrasyonun toprağın yüzeyinde gerçekleştiği ve 1986 yılında bölgeye gelen ^{137}Cs 'nin tamamen toprakta toplandığı farz edilmiştir. MATHEMATICA programı kullanılarak (3.6) numaralı denklemin çözümü aşağıdaki gibi bulunmuştur.

$$C(z,t) = J_0 \frac{e^{-\lambda t}}{\sqrt{\pi D t}} e^{-z^2/4Dt} \quad (3.7)$$

Burada J_0 1986 yılında toprakta toplanmış ^{137}Cs miktarıdır (Bq cm^{-2}). Yüzeydeki konsantrasyonu belirlemek için z 'yi sıfıra götürelim. Yani

$$z \rightarrow 0, \quad C(0,t) = \frac{J_0 e^{-\lambda t}}{\sqrt{\pi D t}} \quad (3.8)$$

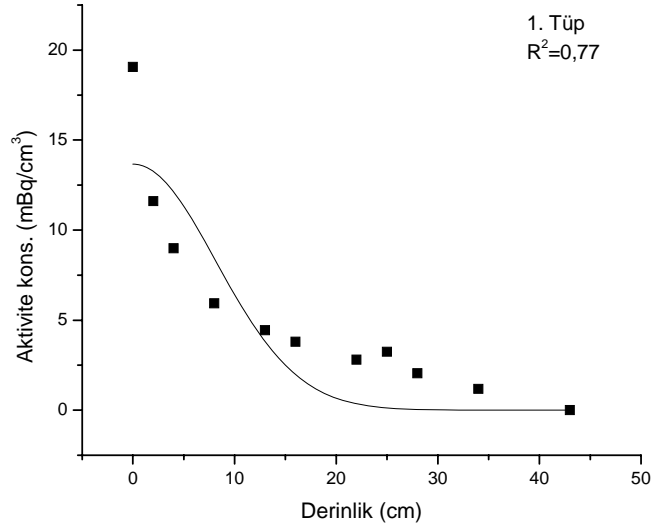
bulunur. (3.7) denklemini yeniden yazarsak

$$C(z,t) = C(0,t) e^{-z^2/4Dt} \quad (3.9)$$

elde edilir. (3.9) denklemi, bozulmamış topraklarda (alt üst edilmemiş) ^{137}Cs radyoizotopunun zamanla derinliğe bağlı değişimini sadece difüzyon mekanizmasını hesaba katarak göstermektedir.

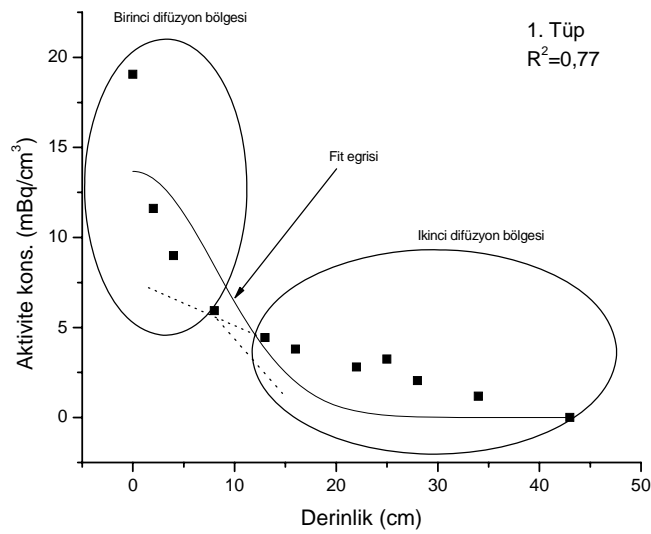
3.4.3. Difüzyon Katsayısının (D) Elde Edilmesi

Difüzyon katsayısını, Denklem (3.9) ile verilen ifadeyi deneysel olarak ölçülen değerlere fit yaparak bulabiliriz. Denklem (3.9)'da verilen $C(z,t)$ ifadesindeki aktivite konsantrasyonu biriminin Bq cm^{-3} olduğunu hatırlayalım. Deneysel olarak ölçülen değerlerimiz ise Bq kg^{-1} cinsinden elde edilmişlerdir. Kütleli aktivite konsantrasyonu (Bq kg^{-1}) yoğunluk değeri (g cm^{-3}) ile çarpıldığında hacimsel aktivite konsantrasyonu (mBq cm^{-3}) elde edilir. Gerekli dönüşüm yapıldıktan sonra deneysel veriler denklem (3.9)'a fitlenmiştir. Şekil 3.23'te birinci tüp için deneysel veriler ve fit eğrisi görülmektedir.



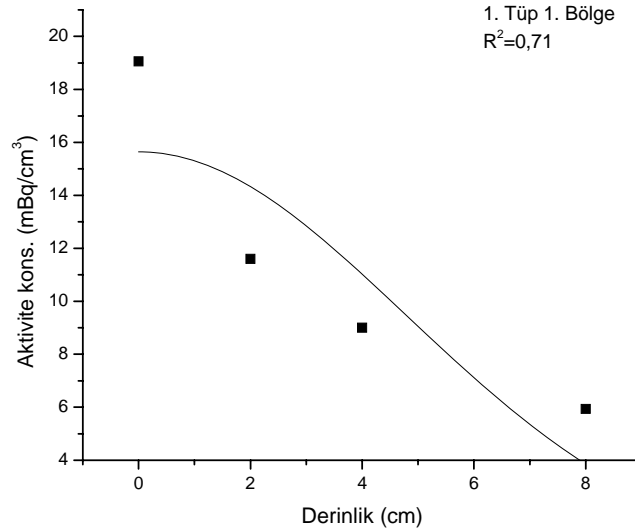
Şekil 3. 23. Birinci tüp için deneysel veriler ve fit eğrisi

Şekil 3.23'ten görüldüğü gibi, mevcut model deneysel verileri üretme konusunda yetersiz kalmaktadır. Fit denklemindeki R^2 değeri de bunu göstermektedir. Şekil 3.24 incelendiğinde, aktivite konsantrasyonunun 10 cm'ye kadar hızlı bir şekilde düştüğü, daha sonra düşme hızında bir yavaşlama olduğu görülmektedir. Bu bize iki farklı difüzyon katsayısı belirlemenin daha doğru olacağını göstermektedir.



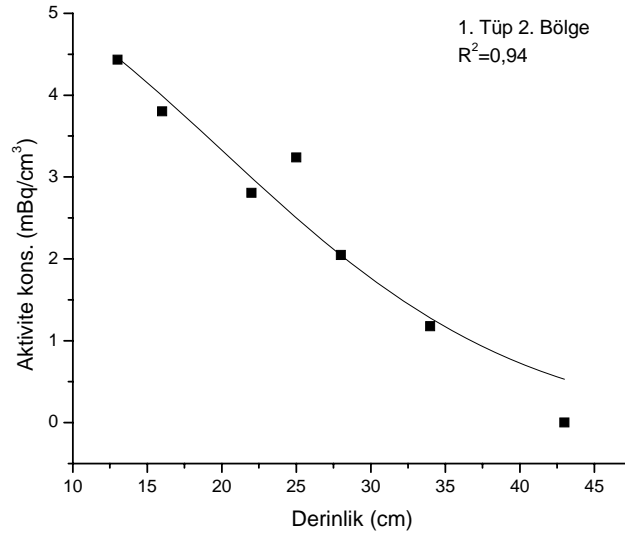
Şekil 3. 24. Birinci tüp için iki farklı difüzyon bölgesi

Şekil 3.24'te iki ayrı difüzyon bölgesi belirlenmiştir (1. Difüzyon bölgesi ve 2. Difüzyon bölgesi). Kesikli çizgiler birinci ve ikinci difüzyon bölgelerinde deneysel değerlerin normalde nasıl gitmesi gerektiğini tahmin etmektedir. Birinci difüzyon bölgesini dikkate alırsak, Şekil 3.25 eğrisini çizmek mümkündür.



Şekil 3. 25. Birinci tüp için birinci difüzyon bölgesi

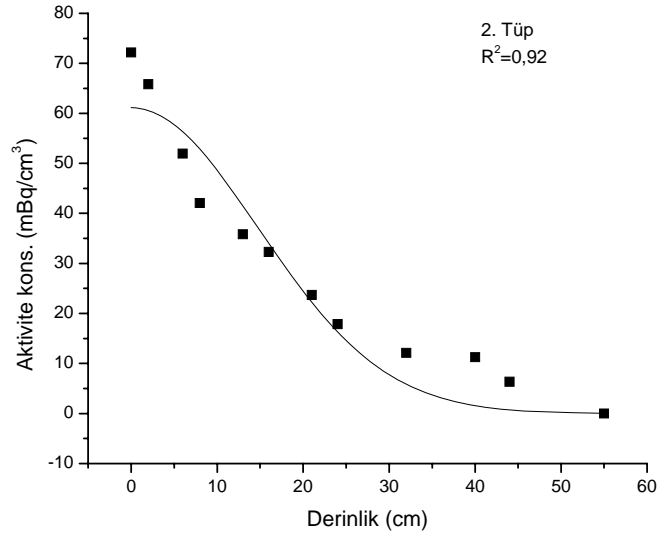
Bu fit sonucunda gerekli parametreler $C(0,t)=15,64$; $-1/4Dt=-0,022$ olarak elde edilmişlerdir. Burada t , ^{137}Cs konsantrasyonunun toprağa ilk olarak karıştığı andan (kirlenmenin sadece Chernobyl'den kaynaklandığını varsayarsak) ölçüm yapılan zamana kadar geçen süredir (bizim durumumuz için bu süre 21 yıldır). Bu şartlar altında hesaplanan difüzyon katsayısı $D_{11}=0,54 \text{ cm}^2 \text{ yıl}^{-1}$ olarak bulunmuştur. Birinci tüp için ikinci difüzyon bölgesi dikkate alındığında, Şekil 3.26 grafiğini çizmek mümkün olur.



Şekil 3. 26. Birinci tüp için ikinci difüzyon bölgesi

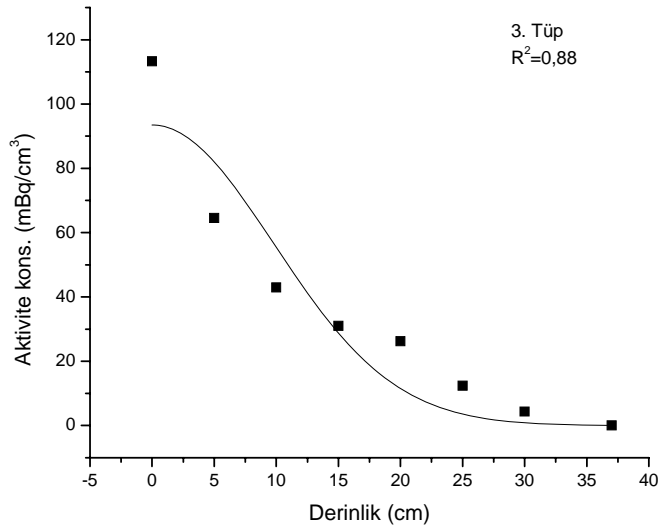
Bu fit sonucunda gerekli parametreler $C(0,t)=5,52$; $-1/4Dt=-0,0013$ olarak elde edilmişlerdir. Aynı şekilde burada t , ^{137}Cs konsantrasyonunun toprağa ilk olarak karıştığı andan (kirlenmenin sadece Chernobyl'den kaynaklandığını varsayarsak) ölçüm yapılan zamana kadar geçen süredir (bizim durumumuz için bu süre 21 yıldır). Bu şartlar altında hesaplanan difüzyon katsayısı $D_{I2}=9,37 \text{ cm}^2 \text{ yıl}^{-1}$ olarak bulunmuştur. Korelasyon katsayılarından da görüleceği üzere, difüzyon modeli birinci tüpün birinci bölgesi için iyi bir fit eğrisi vermezken, ikinci bölge için daha iyi bir fit eğrisi elde edilmiştir.

Birinci bölgede difüzyon katsayısı ikinci bölgedekine göre daha düşük çıkmıştır. Bu, birinci bölgede difüzyonun daha yavaş olduğunu göstermektedir. Toprağın ilk katmanında daha çok bitkilerin olması ^{137}Cs radyoizotopunun daha yavaş bir şekilde düşey olarak ilerlemesine sebep olmuş olabilir. Difüzyon katsayısına bakılarak, ikinci bölgedeki toprağın daha gözenekli ve daha geçirgen bir özellik gösterdiği söylenebilir.



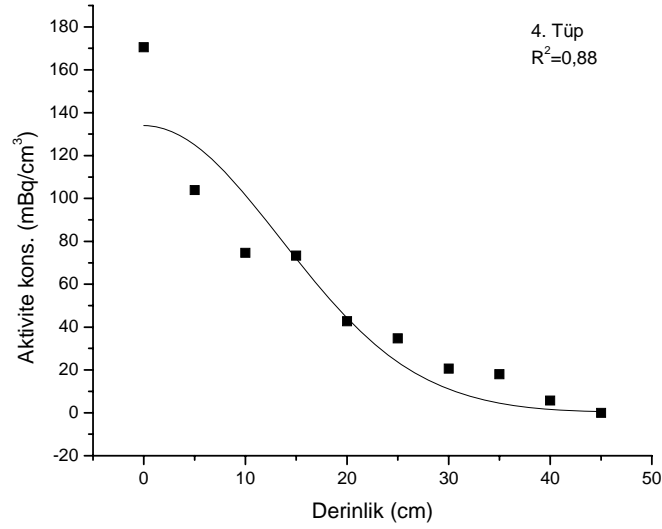
Şekil 3. 27. İkinci tüp için deneysel veriler ve fit eğrisi

Şekil 3.27, ikinci tüp için ölçülen aktivite konsantrasyonu değerlerini ve bu değerlere yapılmış fit eğrisini göstermektedir. Bu fit sonucunda elde edilen parametreler $C(0,t)=61,15$; $-1/4Dt=-0,0023$ olarak elde edilmişlerdir. 1. tüp için yapılan işlemler 2. tüp için de yapılırsa, difüzyon katsayısı $D_2=5,20 \text{ cm}^2 \text{ yıl}^{-1}$ olarak bulunur.



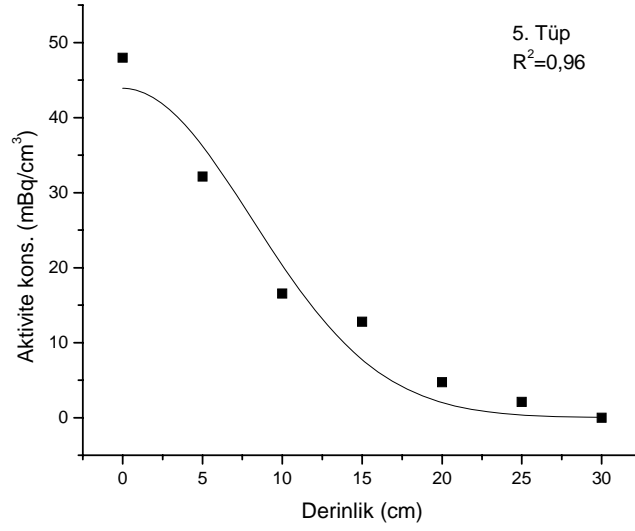
Şekil 3. 28. Üçüncü tüp için deneysel veriler ve fit eğrisi

Şekil 3.28, üçüncü tüp için ölçülen aktivite konsantrasyonu değerlerini ve bu değerlere yapılmış fit eğrisini göstermektedir. Bu fit sonucunda elde edilen parametreler $C(0,t)=93,47$; $-1/4Dt=-0,0052$ olarak elde edilmişlerdir. Aynı işlemler 3. tüp için de yapılırsa, difüzyon katsayısı $D_3=2,27 \text{ cm}^2 \text{ yıl}^{-1}$ olarak bulunur.



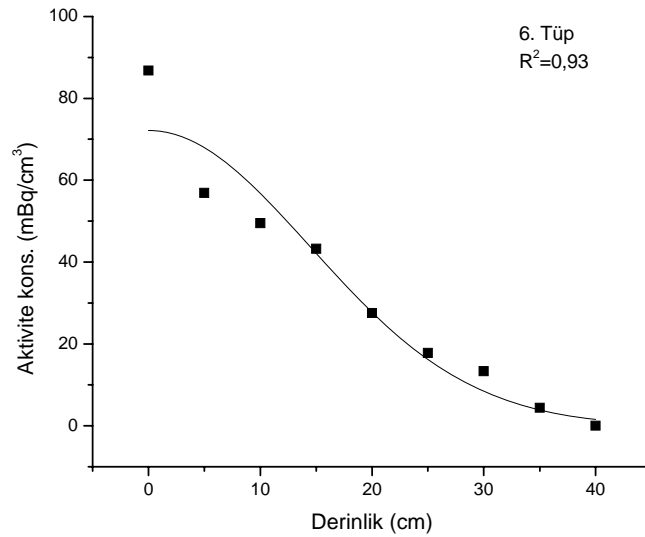
Şekil 3. 29. Dördüncü tüp için deneysel veriler ve fit eğrisi

Şekil 3.29, dördüncü tüp için ölçülen aktivite konsantrasyonu değerlerini ve bu değerlere yapılmış fit eğrisini göstermektedir. Bu fit sonucunda elde edilen parametreler $C(0,t)=133,93$; $-1/4Dt=-0,0027$ olarak elde edilmişlerdir. Aynı işlemler 4. tüp için de yapılırsa, difüzyon katsayısı $D_4=4,30 \text{ cm}^2 \text{ yıl}^{-1}$ olarak bulunur.



Şekil 3. 30. Beşinci tüp için deneysel veriler ve fit eğrisi

Şekil 3.30, beşinci tüp için ölçülen aktivite konsantrasyonu değerlerini ve bu değerlere yapılmış fit eğrisini göstermektedir. Bu fit sonucunda elde edilen parametreler $C(0,t)=43,89$; $-1/4Dt=-0,0077$ olarak elde edilmişlerdir. Aynı işlemler 5. tüp için de yapılırsa, difüzyon katsayısı $D_5=1,54 \text{ cm}^2 \text{ yıl}^{-1}$ olarak bulunur.



Şekil 3. 31. Altıncı tüp için deneysel veriler ve fit eğrisi

Şekil 3.31, altıncı tüp için ölçülen aktivite konsantrasyonu değerlerini ve bu değerlere yapılmış fit eğrisini göstermektedir. Bu fit sonucunda elde edilen parametreler $C(0,t)=72,14; -1/4Dt=-0,0024$ olarak elde edilmişlerdir. Aynı işlemler 6. tüp için de yapılırsa, difüzyon katsayısı $D_6=4,98 \text{ cm}^2 \text{ yıl}^{-1}$ olarak bulunur.

Fit sonucu elde edilen $C(0,t)$ katsayısından faydalanarak ve denklem (3.8)'i kullanarak 1986 yılında topraktaki ^{137}Cs yüzeysel aktivite konsantrasyonu (Bq cm^{-2}) tahmin edilmiştir ve bu değerler birinci tüpün birinci bölgesi için $0,15 \text{ Bq cm}^{-2}$, birinci tüpün ikinci bölgesi için $0,22 \text{ Bq cm}^{-2}$, ikinci tüp için $1,84 \text{ Bq cm}^{-2}$, üçüncü tüp için $1,86 \text{ Bq cm}^{-2}$, dördüncü tüp için $3,66 \text{ Bq cm}^{-2}$, beşinci tüp için $0,72 \text{ Bq cm}^{-2}$ ve altıncı tüp için $2,12 \text{ Bq cm}^{-2}$ olarak elde edilmiştir. Elde edilen difüzyon katsayıları ve korelasyon katsayıları Tablo 3. 14'te özetlenmiştir.

Tablo3. 14. Difüzyon katsayıları ($\text{cm}^2 \text{ yıl}^{-1}$) ve korelasyon katsayıları (R^2)

Difüzyon katsayısı ($\text{cm}^2 \text{ yıl}^{-1}$)		Korelasyon katsayısı (R^2)
D_{11}	0,54	0,71
D_{12}	9,37	0,94
D_2	5,20	0,92
D_3	2,27	0,88
D_4	4,29	0,88
D_5	1,54	0,96
D_6	4,98	0,93
Ortalama	4,03	-

Tablo 3.14'ten görüldüğü gibi difüzyon katsayısı 0,54 ile 9,37 arasında değişmektedir. Difüzyon katsayısının büyük olması ^{137}Cs radyoizotopunun daha hızlı toprağın derinliklerine ilerlediğini göstermektedir. Difüzyon katsayısının yüksek veya düşük olması toprağın cinsine, porozitesine, geçirgenlik gibi birçok parametreye bağlıdır. Difüzyon katsayısı yüksek olan topraklarda ^{137}Cs daha hızlı ilerlediğinden, yer altı sularına karışma riski de artmaktadır.

3.4.4. Difüzyon Katsayısının Literatürdeki Değerlerle Karşılaştırılması

Bu çalışmada bulunan difüzyon katsayısı (D) dünyanın diğer yerlerinde yapılan çalışmalar sonucu bulunan difüzyon katsayılarıyla karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucu Tablo 3.15'te özetlenmiştir.

Herhangi bir radyoizotopun toprakta dikey ilerleyişi, toprağın cinsine, içerdiği su miktarına, geçirgenliğine, bölgenin yağış alma oranına gibi birçok parametreden etkilenir. Literatürdeki farklılıklar bu faktörlerden kaynaklanabilir.

Tablo 3. 15. ^{137}Cs için ölçülen difüzyon katsayısı değerleri ve literatürle karşılaştırılması

Ülkeler	^{137}Cs toprağa difüzyon katsayısı aralığı D ($\text{cm}^2 \text{ yıl}^{-1}$)	Referans
Güney Şili	0,2-3,8	Schuller vd., 1997
İsveç	0,06-2,63	Almgren ve Isasksson, 2006
Avustralya	0,1-3,1	Shinonaga vd., 2005
İngiltere	0,04-7,67	Timms vd., 2004
Çek Cumh.	0,63-3,45	Hölgge ve Maly., 2000
Almanya	0,0-2,7	Schimmack ve Marquez., 2001
Avustralya	0,02-0,13	Bossew vd., 2004
Türkiye, Doğu Karadeniz	0,54-5,56	Bu çalışma

Bu çalışmada hesaplanan difüzyon katsayılarıyla literatürde bulunan difüzyon katsayıları arasında genel olarak bir uyum vardır. Bazı durumlarda bu çalışmada hesaplanan difüzyon katsayılarının daha büyük olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum bölgenin yıl boyunca diğer bölgelere göre daha fazla yağış almasıyla açıklanabilir. Bu durumda yağış miktarı, ^{137}Cs radyoizotopunun difüzyonunu hızlandırmıştır.

3.5. ^{137}Cs 'dan Dolayı Alınan Doz Miktarı

UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation)'ın tanımına göre toprakta bulunan radyoaktif elementlerden dolayı havada (yerden 1 m yükseklikte) soğurulan toplam doz oranı D (nGy h^{-1}) = $aC_{\text{Ra}} + bC_{\text{Th}} + cC_{\text{K}}$ şeklinde verilir. Burada C_{Ra} , C_{Th} ve C_{K} sırasıyla ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K radyoaktif izotoplarına ait aktivite konsantrasyonları, a , b ve c katsayıları da doz dönüşüm katsayıları olarak bilinir. Bu katsayılar UNSCEAR tarafından sırasıyla a , b ve c için 0,427; 0,662 ve 0,043 (nGy h^{-1})/(Bq kg^{-1}) olarak verilmiştir. ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K aktivite konsantrasyonları toprakta düzlemsel olarak dağıldıkları için (konsantrasyon derinlikle değişmez) verilen doz değişim katsayıları kullanılarak herhangi bir konsantrasyon değeri için 1 m yükseklikte soğurulan doz oranı kolaylıkla hesaplanabilir.

^{137}Cs için böyle bir doz dönüşüm katsayısı verilmemiştir. Çünkü ^{137}Cs radyoizotopu toprakta derinliğe göre belli oranda bir azalma gösterir. Bu azalma bölgeden bölgeye, toprağın cinsine göre ve toprağa depolanan ilk değere göre değişiklik gösterir. Yerden 1 m yükseklikte soğurulan toplam doz oranının doğru bir şekilde hesaplanması için eğer ^{137}Cs toprakta ölçülebilir bir düzeyde ise ^{137}Cs 'den gelen katkı da mutlaka hesaba katılmalıdır. Doğu Karadeniz Bölgesi için, bölgenin Chernobyl kazasından etkilenmesinden dolayı ^{137}Cs 'den gelen katkı dikkate alınmalıdır. Tezin bu bölümünde topraktaki aktivite konsantrasyonu dikey olarak azalan ^{137}Cs için havada 1 m yükseklikte soğurulan toplam doz oranı hesaplanmıştır.

Kesim 3.4.3'te gösterilmiştir ki ^{137}Cs aktivite konsantrasyonu denklem (3.9) ile derinliğe bağlı olarak azalmaktadır. O halde yoğunluğu dz kalınlığında ve ρ yoğunluğunda, bir toprak katmanında ölçülen aktivite konsantrasyonu değeri

$$dC(z,t) = C(0,t)e^{-z^2/4Dt} \rho dz \quad (3.10)$$

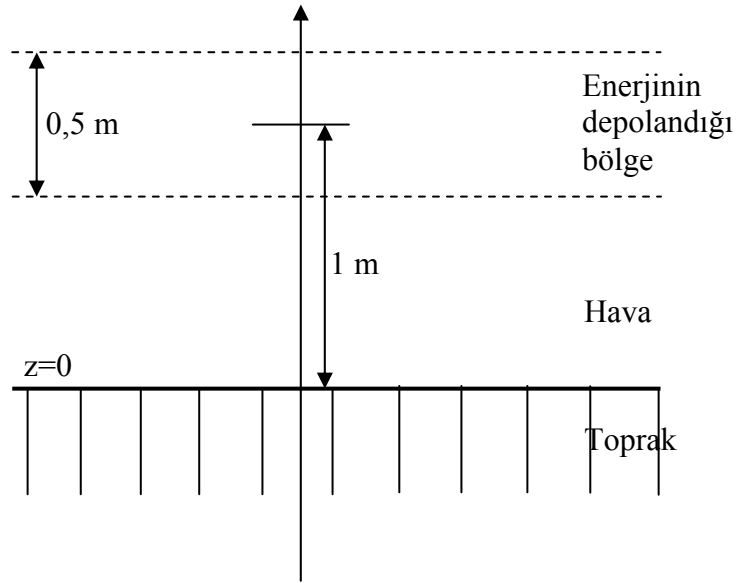
şeklinde değişim gösterir. Böyle bir değişim için doz dönüşüm faktörü aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$k = \int_{-\infty}^0 k(z) dC \quad (3.11)$$

Burada $k(z)$ derinliğe bağlı doz dönüşüm katsayısıdır. Bu katsayı Monte Carlo metoduyla hesaplanmıştır.

3.5.1. Doz Dönüşüm Katsayısının Hesaplanması

^{137}Cs için doz dönüşüm katsayısı Monte Carlo metodu ile hesaplanmıştır. Kullanılan geometri Şekil 3. 32’de verilmiştir.



Şekil 3. 32. Doz dönüşüm faktörü hesabı için kullanılan geometri

Şekil 3.32’de, yerden 1 m yüksekliğe merkezlenmiş, 0,5 m kalınlığındaki hava enerji depolanması için seçilmiştir. Hava tabakasının 0,5 m alınmasının sebebi, gama fotonlarının havada pek az soğurulması ve bu tabakaya depolanan enerjinin bu kalınlık boyunca pek fazla değişmemesindedir. Toprak numunesi için Tablo 3.10’da verilen kimyasal bileşenler ve konsantrasyon değerleri kullanılmıştır. Toprağın herhangi bir yerinde yayınlanan noktasal bir kaynaktan çıkan gama fotonunun takibi yayınlanma noktasından başlanıp, enerjisi 10 keV’in altına veya foton inceleme alanını terk edene kadar devam etmiştir. Bütün üretilen ikincil elektronlar, pozitronlar ve yok olma fotonları enerjinin depolandığı bölgeye enerji depolarlarsa doz dönüşüm faktörüne katkıda bulunmuş kabul edilmiştir. Hava tabakası saçılan tüm fotonların depoladığı enerjiyi toplayabilme için 2 km kadar geniş seçildi.

Şekil 3.32 dikkate alındığında, aktivite konsantrasyonu başına doz dönüşüm faktörü aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\frac{k}{C} = \frac{Eh_0\rho_0}{\rho hN} \quad (3.12)$$

Burada E 0,5 m kalınlığındaki havaya depolanan ortalama enerji, h_0 toprağın içinde fotonun yayınlandığı derinlik, h enerjinin depolandığı havanın kalınlığı, ρ havanın yoğunluğu, ρ_0 toprağın yoğunluğu ve N ise üretilen foton sayısıdır. Her bir enerji için 10^7 tane foton takip edilmiştir.

Tablo 3.16'da Monte Carlo yöntemiyle hesaplanan doz dönüşüm faktörleri derinliğe bağlı olarak 661 keV için hesaplanmıştır.

Tablo 3. 16. Hesaplanan Doz Dönüşüm Faktörleri

Derinlik (cm)	k [nGy h ⁻¹]/(Bq kg ⁻¹)
0,0	29,85
0,5	18,05
1,0	13,97
1,5	11,75
2,0	10,98
2,5	9,31
3,0	8,35
3,5	7,45
4,0	6,32
4,5	5,99
5,0	5,76
6,0	4,91
7,0	4,27
8,0	3,75
9,0	3,12
10,0	2,25
12,0	2,13
14,0	1,63

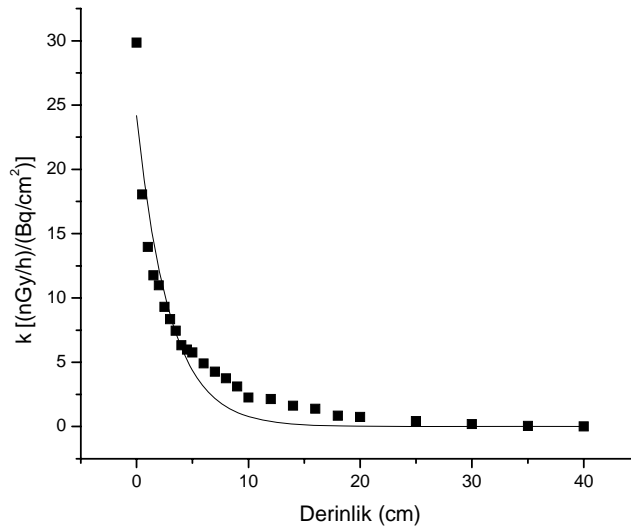
Tablo 3.16'nın devamı

16,0	1,38
18,0	0,85
20,0	0,75
25,0	0,43
30,0	0,18
35,0	0,05
40,0	0,01

Tablo 3.16'daki değerler Şekil 3.33'te gsterilmiŐtir. Doz dnŐm faktrlerinin derinliğe bağlı olarak azaldığı grlmektedir. Bu sonuç, toprağın derinlerine gidildikçe soğurma oranının artmasından dolayı ŐaŐırtıcı değildir.

3.5.2. Doz DnŐm Oranının Elde Edilmesi

Denklem 3.11'de integralin alt sınırı için lm yapılan toprağın en derin noktası seçilmelidir. Doz nŐm katsayısının (k) derinliğe bağlı bir fonksiyon olduğu Şekil 3.33'te grlmektedir. Bu bağımlılığı ifade etmek için k değerleri z değerlerine fit edilmiş ve fit denklemi Şekil 3.33'te grldğu gibi elde edilmiştir.



Şekil 3. 33. Doz dnŐm oran fonksiyonu

Bu fit sonucunda elde edilen denklem:

$$k(z) = 24,18e^{-0,34z} \quad (R^2=0,92) \quad (3.13)$$

(3.13) denklemi (3.11) denkleminde yerine yazılırsa,

$$k = \int_{-a}^{-b} 24,18e^{-0,34z} C(0,t)e^{-z^2/4Dt} \rho dz \quad (3.14)$$

elde edilir. Burada $C(0,t)$ toprağın yüzeyinde ölçülen aktivite konsantrasyonu (Bq kg^{-1}), ρ ise toprağın yoğunluğudur (g cm^{-3}). Denklem (3.14)'teki integralin analitik çözümü olmadığından sayısal olarak çözülmüştür. İntegralin alt sınırı, ölçüm yapılan en alt noktanın yüzeye olan uzaklığı olarak alınmalıdır. Denklem (3.14)'teki intagral sonucunda hesaplanan doz dönüşüm katsayısı (k) ve alınan yıllık etkin doz (YED) miktarı bütün difüzyon katsayıları için hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 3.17'de verilmiştir.

Tablo 3. 17. Farklı tüpler için doz dönüşüm katsayıları ve alınan yıllık doz miktarları

Tüpler	k (nGy h ⁻¹)	YED (μSv y ⁻¹)
1. Tüp 1. Bölge (D ₁₁)	0,82	1,0
1. Tüp 2. Bölge (D ₁₂)	1,22	1,5
2. Tüp (D ₂)	22,23	26,6
3. Tüp (D ₃)	14,56	17,4
4. Tüp (D ₄)	41,77	50,0
5. Tüp (D ₅)	44,17	52,8
6. Tüp (D ₆)	25,35	30,3
Ortalama	21,45	25,66

Yıllık alınan doz miktarları hesaplanırken doz dönüşüm katsayısı UNSCEAR (UNSCEAR, 2000)'in belirlediği $0,7 \text{ Sv Gy}^{-1}$ kullanılmıştır. Kullanım faktörü (occupancy factor) bina içleri için 0,8 bina dışı için ise 0,2 olarak aynı kuruluş tarafından belirlenmiştir.

ICRP (ICRP, 1990), dış gama dozu için alınabilen en yüksek limit doz değerini 1,1 mSv y⁻¹ olarak belirlemiştir. Bu çalışmada hesaplanan yıllık etkin doz değerlerini göz önüne aldığımızda (Tablo 3.17), Doğu Karadeniz Bölgesi nüfusunun ¹³⁷Cs radyoizotopundan dolayı aldığı dozun bu değerin çok altında olduğu görülür. Bu da şunu göstermiştir ki, topraktaki ¹³⁷Cs radoizotopundan alınan doz miktarı halk için ciddi bir tehdit oluşturmamaktadır.

Bu çalışmada topraktaki ¹³⁷Cs radyoizotopundan dolayı alınan yıllık etkin doz değerleriyle dünyanın değişik yerlerinde hesaplanan yıllık alınan doz değerleri karşılaştırılmış ve sonuçlar Tablo 3.18’de verilmiştir.

Tablo 3. 18. Topraktaki ¹³⁷Cs aktivite konsantrasyonuna bağlı çeşitli ülkeler için alınan yıllık etkin doz değerleri

Ülkeler	YED ($\mu\text{Sv y}^{-1}$)	Referans
Mısır	9,1	Shawky ve Tahawy, 1999
Ürdün	2,8	Hamarnah vd., 2003
Suriye	60,4	Othman vd, 1990
Fransa	1500	Rezzoug vd, 2006
Bu Çalışma	25,7	Bu çalışma

Tablo 3.18’den görüldüğü gibi, Karadeniz nüfusunun toprakta bulunan ¹³⁷Cs radyoizotopundan dolayı aldığı ortalama yıllık etkin doz değeri Mısır ve Ürdün nüfusundan daha fazla, Suriye ve Fransa nüfusundan ise daha azdır. Fransa için hesaplanan yıllık etkin doz değeri bütün değerlerden çok daha büyüktür. Doğal kaynaklardan yıllık alınan doz miktarının 2,4 mSv olduğu düşünülürse, Fransa nüfusunun sadece ¹³⁷Cs’den aldığı doz 1,5 mSv’dir. Alınan doz miktarının miktarı, toprağa depolanan ¹³⁷Cs aktivite konsantrasyonuna bağlıdır. Fakat, Tablo 3.18’de ülkelerden Fransa hariç hiçbiri ICRP’nin belirlediği limit değeri aşmamışlardır.

4. SONUÇLAR

1. Doğu Karadeniz Bölgesi'nde belirlenen istasyonlardan alınan karayosunu ve liken örneklerinde ^{137}Cs aktivite konsantrasyonu ölçümleri gerçekleştirilmiş ve bu değerler ortalama olarak karayosunları için yaklaşık 303 Bq kg^{-1} , likenler için ise yaklaşık 286 Bq kg^{-1} bulunmuştur.
2. Karayosunlarında ve likenlerde ölçülen ^{137}Cs aktivite konsantrasyonları arasında pozitif bir korelasyon gözlemlenmiştir.
3. Fiziksel olarak yaklaşık 30 yıl yarı-ömre sahip olan ^{137}Cs radyoizotopunun karayosunlardaki ve likenlerdeki ekolojik yarı-ömürleri hesaplanmış ve bu değerler karayosunları için ortalama olarak yaklaşık 4 yıl, likenlerde ise yaklaşık 6 yıl olarak bulunmuştur. Bu bilgi likenlerin radyasyonu daha iyi tuttuğunu göstermiştir.
4. Yapılan ölçümler, karayosunlardaki ve likenlerdeki ^{137}Cs aktivite konsantrasyonlarının yükseklikle beraber arttıklarını göstermiştir. Bu davranış 1997 yılında Saka ve arkadaşları tarafından yapılan ölçümlerle benzerlik arzettiği gözlemlenmiştir. Böylece yüksek yerlerin Chernobyl kazası sonucu daha çok kirlendiği belirlenmiştir. Bu davranışın liken numuneleri için daha belirgin olduğu belirlenmiştir.
5. Karayosunlarında ve likenlerde ölçülen ^{137}Cs ve ^{40}K aktivite konsantrasyonları arasında negatif bir korelasyon gözlemlenmiştir. Bu korelasyonun karayosunlarında daha güçlü olduğu belirlenmiştir. ^{40}K ve ^{137}Cs kimyasal olarak birbirine benzeyen, biri doğal diğeri ise yapay bir radyoizotoptur. Gözlenen negatif korelasyon, bu radyoizotoplardan birinin bitkiler tarafından alınması, diğeri alınmasının engellenmesiyle açıklanabilir.
6. Toprak numunelerinde aktivite konsantrasyonu ölçümleri geleneksel olarak numunelerin kurutulmasıyla başlar. Fakat herhangi bir nükleer kaza sonrası (Chernobyl gibi) çok sayıda numunenin kısa sürede ölçülüp sonuçların rapor edilmesi kurutma işleminin zaman alması bakımından problem teşkil eder. Bu probleme bir çözüm önerisi olarak numunelerin kurutulmadan ölçülmesi önerilmiştir. Bu amaçla bir düzeltme faktörünün üretilmesi gerektiği belirlenmiştir. Bunun için topraktaki su konsantrasyonunun dedektör verimi üzerine olan etkisi Monte Carlo tekniği ile belirlenmiştir. 500 keV'den daha küçük enerjiler için

- düzeltilme faktörünün kullanılmasının önemli olduğu tespit edilmiştir. Düzeltme faktörü 60 keV'den 2 MeV'e kadar olan enerjiler için hesaplanmış ve bu değerlerin 0,85 ile 0,99 arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Artan enerjiyle beraber düzeltme faktörünün bire yaklaştığı görülmüştür.
7. ^{137}Cs aktivite konsantrasyonunun derinliğe bağlı değişimi modellenmiş ve bu model sonucunda çeşitli bölgeler için difüzyon katsayıları hesaplanmıştır. Difüzyon katsayılarının hesaplanması, yapay radyonüklitlerin yer altı sularına karışma ihtimalinin belirlenmesinde büyük önem arzeder. Belirlenen difüzyon katsayılarının dünyanın diğer bölgelerinde ^{137}Cs için belirlenen difüzyon katsayılarıyla uyum içinde olduğu gözlenmiştir. Bu çalışmada belirlenen difüzyon katsayılarıyla, diğer bölgelerde belirlenen difüzyon katsayıları arasındaki farklar ise, değişen toprak özellikleriyle (toprağın porozitesi, su muhtevası, pH değeri v.b) açıklanabilir.
 8. Oluşturulan modele bağlı olarak yerden 1 m yükseklikte derinliğe bağlı olarak ^{137}Cs radyoizotopu için doz dönüşüm faktörleri $[(\text{nGy h}^{-1})/(\text{Bq cm}^{-2})]$ Monte Carlo tekniğiyle hesaplanmış ve ^{137}Cs radyoizotopundan dolayı alınan yıllık doz miktarı ($\mu\text{Sv y}^{-1}$) belirlenmiştir. Belirlenen yıllık doz değerlerinin ICRP'nin sınır değerlerini aşmadığı gözlenmiştir.

5. ÖNERİLER

1. Bu çalışma Türkiye'nin Chernobyl kazasından etkilenen diğer bölgeleri için de yapılmalı, 1986'dan beri ^{137}Cs radyoizotopundaki azalma miktarı tespit edilmeli ve ^{137}Cs radyoizotopunun ekolojik yarı-ömrü kullanılarak yıllara göre hangi miktarda azalacağı tahmin edilmelidir.
2. Bu çalışmalar periyodik olarak yapılarak, tahmin edilen azalma miktarlarının doğruluğu test edilmelidir.
3. Difüzyon katsayısı hesaplanırken kullanılan modele toprağın çeşitli parametreleri (porozite, pH seviyesi v.b.) eklenirse, difüzyon katsayısının bu parametrelere bağımlılığı da incelenmiş olacaktır.

6. KAYNAKLAR

- Abbayes, H.D., 1951. Traite'de Lichonologie, Correspondant du Museum National d'Historre Naturelle, Lavreat de l'institut,
- Arapis, G.D. ve Karandinos, M.G., Migration of ^{137}Cs in the soil of sloping semi-natural ecosystems in Northern Greece. Journal of Environmental Radioactivity, 77, (2004) 133-142.
- Almgren, S., and Isaksson, M. Vertical migration studies of ^{137}Cs from weapons fallout and the Chernobyl accident. Journal of Environmental Radioactivity, 91, (2004) 90-102-107.
- Ajayi, O.S., Ibikunle. S.B. ve Ojo. T.J., An assessment of natural radioactivity of soils and its external radiological impact in south-western Nigeria. Health Physics, 94, 6, (2008) 558-564.
- Antonopoulos, M.D., Clouvas, A., Hiladakis A. ve Kadi, S., Radiocaesium distribution in undisturbed soil: Measurements and diffusion –advection model. Health Physics, 69, (1995) 949-953.
- Bikit, I., Slivka, J., Conkic, L., Krman, M., Veskovic, N., Todorovic, Z.N., Varga, E., Curcic, S. ve Mrdja, D., Radioactivity of the soil in Vojvodina (northern province of Serbia and Montenegro). Journal of Environmental Radioactivity, 78 1, (2004) 11-19.
- Bolca, M., Saç, M.M., Çokursay, B., Karalı, T. ve Ekdal, E., Radioactivity in soils and various foodstuffs from the Gediz River Basin of Turkey. Radiation Measurements, 42, 2, (2007) 263-270.
- Brodo I.M., Sharnoff S.D. ve Sharnoff S., 2001. Lichens of North America. Yale University Press. New Haven and London
- Bossew, P. ve Strebl, F., Radioactive contamination of tropical rainforest soil in Southern Costa Rica. Journal of Environmental Radioactivity, 53, (2001) 199-213.
- Bossew, P., Gastberger, M., Gohla, H., Hofer, P. ve Hubmer, A., Vertical distribution of radionuclides in soil of grassland site in Chernobyl exclusion zone. Journal of Environmental Radioactivity, 73, (2004) 87-99.
- Blagoeva, R. ve Zikovsky, L., Geographic and vertical distribution of ^{137}Cs in soils in Canada. Journal of Environmental Radioactivity, 27, (1995) 269-274.
- Celik, N ve Cevik, U., 2010. Monte Carlo determination of inhomogeneity effect on gamma-ray detection efficiency in soil samples. Radiation Protection Dosimetry, (baskıda).

- Çetin, B., Checklist of the Mosses of Turkey. Lindbergia, 14, (1988)15-23.
- Debertin, K. ve Helmer, R., 1988. Gamma-and-X-Ray Spectrometry with Semiconductor Detectors. North Holland.
- Degerlier, M., Karahan, G. ve Ozger, G., Radioactivity concentrations and dose assessment for soil samples around Adana, Turkey. Journal of Environmental Radioactivity, 99, 7, (2008) 1018-1021.
- Farai, I.P., Obed, R.I. ve Jibiri, N.N., Soil radioactivity and incidence of cancer in Nigeria. Journal of Environmental Radioactivity, 90, 1 (2006) 29-36.
- Gasparro, J., Hult, M., Jonston, P.N. ve Tagziria, H., Monte Carlo modelling of germanium detectors that are tilted and have rounded front edges. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 594, (2008) 196-201.
- Gedikoglu, A. ve Sipahi, B. L., Chernobyl Radioactivity in Turkish Tea. Health Physics, 56, (1989) 97-111.
- Hale, M. E., 1974. The Biology of Lichenes, Second Edition, Department of Botany, Smithsonian Institution, London.
- Hamarneh, I.A.I., Wreikat, A. ve Toukan, K., Radioactivity concentrations of ^{40}K , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am , ^{238}Pu and $^{239+240}\text{Pu}$ radionuclides in Jordanian soil samples. Journal of Environmental Radioactivity, 67, (2003) 53-67.
- Henderson, D.N., Contributions to the Bryophyte Flora of Turkey VI. Notes R.B.G. Edinb, 25, (1963) 279-291.
- Higgy, R.H. ve Pimpi, M., Natural and man-made radioactivity in soils and plants around the research reactor of Inshass. Applied Radiation and Isotopes, 49, 12, (1998) 1709-1712.
- Holopainen, T.H., Types and Distribution of Ultrastrac-Tural Symptoms in Epiphytic Lichens in Several and Industrial Environments in Finland. Annales Botanici Fennici, 21, (1984) 213-229.
- Hölgye, Z. ve Maly, M., Sources, vertical distribution, and migration rates of $^{239,240}\text{Pu}$, ^{238}Pu , and ^{137}Cs in grassland soil in three localities of central Bohemia. Journal Environmental Radioactivity, 47, (2000) 135-147.
- Ibrahim, F.A.H. ve Mohammad, I.A., Soil radioactivity levels and radiation hazard assessment in the highlands of northern Jordan. Radiation Measurements, 44, 1, (2009) 102-110.
- Internaional Commision on Radiological Protection (ICRP), 1990. Recommendations of the international commision on radiological protection. ICRP yayınları 60 Ann. ICRP 21(1-3) (Oxford Prgaman Press) (1991).

- Kauppi, M. and Halonen, P., Lichens as Indicators of Air Pollutions in Oulu, Northern Finland. Annales Botanici Fennici, 29, (1992) 1-9.
- Knoll, F., 1999. Radiation Detection and Measurements. 3rd Edition.
- Machart, P., Hofmann, W., Turk, Roman. ve Steger, F., Ecological half-life of ^{137}Cs in lichens in an alpine region. Journal of Environ Radioactivity, 97, (2007) 70-75.
- Malczewski, D., Teper, L., ve Dorda, J., Assessment of natural and antropogenic radioactivity levels in rocks ans soils in the environs of Swieradow Zdroj in Sudetes, by in situ gamma-ray spectrometry. Journal of Environmental Radioactivity, 73, (2004) 233-245.
- Murty, V.R.K. ve Karunakara, N., Natural radioactivity in the soil samples of Botswana. Radiation Measurements, 43, 9-10 (2008) 541-545.
- Mendil. D., Tuzen, M., Yazıcı, K. ve Soylak, M., Heavy Metals in Lichens from Roadsides and an Industrial Zone in Trabzon, Turkey. Environmental Contamination and Toxicology, 74, (2005) 190-194.
- Nelson, W.R. ve Hirayama, H.R., 1985. SLAC Report 265.
- Nyholm, E., 1981. Illustrated Moss Flora of Fennoscandia, Swedish Naturel S.R.C. Fasc. 1-6.
- Othman, I., The impact of the Chernobyl accident on Syria. Journal of Radiological Protection, 10, (1990) 103-108.
- Özdemir, T. ve Çetin, B., The Moss Flora of Trabzon and Its Environ. Turkish Journal of Botany, 23, (1999) 391-404,
- Paller, M.H., Littrel, J.M., Peters ve Eric, L., Ecological half-lives of ^{137}Cs in fishes from the Savannah River site. Health Physics, 77, (1999) 392–402.
- Peles, J.D., Smith, M.H. ve Bristin, I.L., Eological half-life of ^{137}Cs in plants associated with a contaminated stream. Journal of Environmental Radioactivity, 59, (2002) 169–178.
- Poelt J., 1974. Bestimmungsschlüssel europaischer Flechten, J. Cramer, Lehre.
- Prohl, G., Ehlken, S., Fiedler, I., Kirchner, G., Klemt, E. ve Zibold, G., Ecological half-lives of ^{90}Sr and ^{137}Cs in terrestrial and aquatic ecosystems. Journal of Environmental Radioactivity, 91, (2006) 41-72.
- Rezzoug, S., Michel, H., Fernex, F., Barci-Funel, G. ve Barci, V., Evaluation of ^{137}Cs fallout from the Chernobyl accident in a forest soil and its impact on Alpine Lake sediments. Journal of Environmental Radioactivity, 85, (2006) 369-379.

- Saka, A.Z., Cevik, U., Bacaksız, E., Kopya, A.I. ve Tıraşoğlu, E., Levels of cesium radionuclides in lichens and mosses from the province of Ordu in the Eastern Black Sea area of Turkey, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 222, (1997) 87-92.
- Schuller, P., Ellies, A. ve Kirchner, G., Vertical migration of fallout ^{137}Cs in agricultural soils from Southern Chile. The Science of the Total Environment, 193, (1997) 197-205.
- Shawky, S. ve El-Tahawy, M., Distribution pattern of ^{90}Sr and ^{137}Cs in the Nile delta and the adjacent regions after Chernobyl accident. Applied Radiation and Isotopes, 50, (1999) 435-443.
- Shinonaga, T., Schimmack, W. ve Gerzabek, M.H., Vertical migration of ^{60}Co , ^{137}Cs and ^{226}Ra in agricultural soils as observed in lysimeters under crop rotation. Journal of Environmental Radioactivity, 79, (2005) 93-106.
- Schimmack, W. ve Marquez, F.F., Migration of fallout radiocaesium in a grassland soil from 1986 to 2001. Part II: Evaluation of the activity –depth profiles by transport models, Science of the Total Environment, 368, (2006) 863-874.
- Sloof, J.E. & Wolterbeek, H.Th., National Trace-Element Air Pollution Monitoring Survey Using Epiphytic Lichens. Lichenologist, 23, 2, (1991) 139-165.
- Sloof, J.E. ve Wolterbeek, B.T., Lichens as Biomonitors for Radiocaesium Following the Chernobyl Accident, Journal of Environmental Radioactivity, 16, (1992) 229-242.
- Steinnes, E. ve Njastad, O., Use of Mosses and Lichens for Regional Mapping of ^{137}Cs Fallout from the Chernobyl Accident, Journal of Environ. Radioactivity, 21, (1993) 65-73.
- Szatala, Ö., Lichenes in Asia Minore ab Dre. Stefano Gyrörfy de Szigeth (Budapest) et Dre. Andrasosvszky Collecti. Folia Cryptog, 1, (1927) 272-278.
- Szerbin, P., Koblinger, B.E. ve Koblinger, L., Caesium-137 migration in Hungarian soils. Science of the Total Environment, 227, (1999) 215-227.
- Smith, A.J.E., 1980. The Moss Flora of Britain and Ireland, Cambridge Univ. Press, London
- Schofield, B.W., 1985. Introduction to Bryology
- Timms, D.N., Smith, J.T., Cross, M.A., Kudelsky, A.V. ve Horton, G., A new method to account for the depth distribution of ^{137}Cs in soils in the calculation of external radiation dose-rate. Journal of Environmental Radioactivity, 72, (2004) 323-334.
- Türk Atom Enerjisi Kurumu (TAEK), 1998. Türkiye’de Chernobyl Sonrası Radyasyon ve Radyasyon Çalışmaları. TAEK raporu, Nisan 1988.

- Unlu, M.Y., Topcuoğlu, S., Kucukcezzar, R., Varinlioglu, A., Gungor, N., Bulut, A.M., ve Gungor, E., Natural effective half-life of ^{137}Cs in tea plants. Health Physics, 65, (1995) 94–99.
- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), 2000. Exposures to the public from man-made sources of radiation. Tablo 16, 74-75.
- Valesco, R.H., Belli, M., Sansone, U. ve Menegon, S., Vertical transport of radiocesium in surface soils: Model implementation and dose-rate computation. Health Physics, 64, (1993) 37-44.
- Valesco, R.H., Toso, J.P., Belli, M. Ve Sansone, U., Radiocesium in the northeast part of Italy after Chernobyl accident: Vertical transport and soil-to-plant transfer. Journal of Environmental Radioactivity, 37, (1997) 73-83.
- Watson, E. V., 1981. British Mosses and Liverworts, Cambridge Univ. Press, London
- Zhang, X., Higgitt, D.L. ve Walling, D.E., A preliminary assessment of the potential for use caesium-137 to estimate rates of soil erosion in the Loess Plateau of China. Hydrological Sciences Journal, 35, 3, (1990) 243-252.

7. EKLER

7.1. Ek-1 Kullanılan Monte Carlo Kodu

```
"VERSION FROM SLAC"
%L
%E
!INDENT M 4;
!INDENT F 2; "
*****
" Model Necati ÇELİK TARAFINDAN ADAPTE EDİLDİ"
*****
"-----"
"STEP 1: USER-OVERRIDE-OF-EGS4-MACROS          "
"-----"
REPLACE {$MXREG} WITH {155} "similasyon bölgesini 155 bölgeye ayırdık"
REPLACE {$MXSTACK} WITH {100}
REPLACE {$EBIN} WITH {100000} "enerji için kullanılan bin sayısı"
REPLACE {$MXMED} WITH {11}
" RASTGELE SAYI URETECI OLARAK RANLUX KULLANILDI "
;COMIN/RANDOM/;
REPLACE {$DEFAULT-LL} WITH {1}

REPLACE {;COMIN/SCORE/;} WITH {;COMMON/SCORE/EHIST,EBIN($EBIN);}

;COMIN/CYLDTA,BOUNDS,MEDIA,MISC,PLADTA,SCORE,UPHIOT,THRESH/; " "
REPLACE {;COMIN/SCORE/;} WITH {;COMMON/SCORE/EHIST,EBIN($EBIN);}

COMMON/PASSIT/IRDISC($MXREG),NR,NZ;

;COMIN/EDGE/;
" REPLACE {;COMIN/EDGE/;} WITH { "
" ;COMMON/EDGE/IEDGFL($MXREG),$LGN(EKALPH,EKBETA,BKR1,BKR2($MXMED)); } "

REAL CYRAD($MXCYLS);
REAL VOL($MXREG);
REAL XENER(9); "Gamma energies"

"-----"
"STEP 2 PRE-HATCH-CALL-INITIALIZATION          "
"-----"
$TYPE MEDAR1(24) /$S'SOILERZ',17*' /;
"          $$ IS A MORTRAN MACRO TO EXPAND STRINGS"
"          $TYPE IS INTEGER (F4) OR CHARACTER*4(F77)"
$TYPE MEDAR2(24) /$S'TEFLON',18*' /;
"          $$ IS A MORTRAN MACRO TO EXPAND STRINGS"
"          $TYPE IS INTEGER (F4) OR CHARACTER*4(F77)"
$TYPE MEDAR3(24) /$S'AL',22*' /;
"          $$ IS A MORTRAN MACRO TO EXPAND STRINGS"
"          $TYPE IS INTEGER (F4) OR CHARACTER*4(F77)"
$TYPE MEDAR4(24) /$S'GE',22*' /;
"          $$ IS A MORTRAN MACRO TO EXPAND STRINGS"
"          $TYPE IS INTEGER (F4) OR CHARACTER*4(F77)"

NMED=4; "NUMBER OF MEDIA"

DO I=1,24 [MEDIA(I,1)=MEDAR1(I);]
DO I=1,24 [MEDIA(I,2)=MEDAR2(I);]
DO I=1,24 [MEDIA(I,3)=MEDAR3(I);]
DO I=1,24 [MEDIA(I,4)=MEDAR4(I);]
```

```
IPLAN=14;      "MODELDEKI DUZLKEM SAYISI"
IRADII=10;     "IC ICE GIRMIS SILINDIR SAYISI"
"SILINDIRIK BOLGELER NOT: SON SILINDIRIN CAPI SONSUZ ALINDI"
```

```
NZ=IPLAN;     " SLAB SAYISI"
NR=IRADII+1;  "SILINDIRIK KABUK SAYISI"
NREG=NZ*NR+1; "BELIRLENEN BOLGE SAYISI"
```

```
DO I=1,NREG,1 [ECUT(I)=0.521; PCUT(I)=0.001; IRAYLR(I)=0; IEDGFL(I)=0;]
" Elektron Cutoff enerjisi 0.010 MeV olarak secildi"
" Foton Cutoff enerjisi 0.001 MeV olarak secildi"
" Rayleigh sacilmasi hesaba katildi"
" K-kabugu fluorescence etkisi hesaba katildi"
```

```
"DEDEKTOR VE ORTAM MADDELERINI TANIT"
```

```
MEDTOPRAK=1;
MEDTEFLON=2;
MEDAL=3;
MEDGE=4;
```

```
DO I=1,NREG,1 [MED(I)=0;] "ONCE BUTUN ORTAMI VAKUM YAP"
```

```
"SIMDI MALZEMELERI (MEDIUM) TANIT"
```

```
DO I=3,129,14 [MED(I)= MEDTEFLON;];
DO I=5,131,14 [MED(I)= MEDTEFLON;];
MED(130)=MEDTEFLON;
```

```
DO I=4,116,14 [MED(I)= MEDTOPRAK;];
```

```
DO I=6,104,14 [MED(I)= MEDAL;];
DO I=14,98,14 [MED(I)= MEDAL;];
DO I=105,112,1 [MED(I)= MEDAL;];
```

```
DO I=8,64,14 [MED(I)= MEDGE;];
DO I=9,65,14 [MED(I)= MEDGE;];
DO I=10,66,14 [MED(I)= MEDGE;];
DO I=39,67,14 [MED(I)= MEDGE;];
DO I=40,68,14 [MED(I)= MEDGE;];
```

```
"-----"
"STEP 3  HATCH-CALL                               "
"-----"
```

```
;OUTPUT;('1START ES//' CALL HATCH TO GET CROSS-SECTION DATA');
CALL HATCH;  "PICK UP CROSS SECTION DATA FOR NAI"
"DATA FILE MUST BE ASSIGNED TO UNIT 12"
```

```
;OUTPUT AE(1)-0.511, AP(1);
(' KNOCK-ON ELECTRONS CAN BE CREATED AND ANY ELECTRON FOLLOWED DOWN TO'
/T40,F8.3,' MeV KINETIC ENERGY'/
' BREM PHOTONS CAN BE CREATED AND ANY PHOTON FOLLOWED DOWN TO',
/T40,F8.3,' MeV ');
```

```
"-----"
"STEP 4  INITIALIZATION-FOR-HOWFAR                 "
"-----"
"ONCE BUTUN BOLGELERI DISCARD OLMAYAN BOLGE YAP"
```

```
DO IRL=1,$MXREG,1 [IRDISC(IRL)=0;]
```

```
"SIMDI DISCARD BOLGESINI BELIRLE"
```

```
IRDISC(1)=1;
DO IRL=15,141,14 [IRDISC(IRL)=1;];
DO IRL=142,155,1 [IRDISC(IRL)=1;];
```

```
DO J=1,IPLAN [
  PCOORD(1,J)=0.0; PCOORD(2,J)=0.0;
  PNORM(1,J)=0.0; PNORM(2,J)=0.0; PNORM(3,J)=1.0;
]
```

"DUZLEM DEGERLERINI GIR"

```
P1=1.0;
P2=0.1;
P3=3.8;
P4=0.1;
P5=0.1;
P6=0.5;
P7=0.0007;
P8=0.76;
P9=1.0;
P10=1.0;
P11=2.0;
P12=1.35;
P13=0.1;
```

"SILINDIRLERIN CAP DEGERLERINI GIR "

```
R1=0.1;
R2=0.5;
R3=1.0;
R4=3.775;
R5=3.8;
R6=3.85;
R7=3.9;
R8=4.0;
R9=4.4;
R10=4.5;
```

"BOLGELERI TANIT"

```
PCOORD(3,1)=0.0;
PCOORD(3,2)=PCOORD(3,1)+P1;
PCOORD(3,3)=PCOORD(3,2)+P2;
PCOORD(3,4)=PCOORD(3,3)+P3;
PCOORD(3,5)=PCOORD(3,4)+P4;
PCOORD(3,6)=PCOORD(3,5)+P5;
PCOORD(3,7)=PCOORD(3,6)+P6;
PCOORD(3,8)=PCOORD(3,7)+P7;
PCOORD(3,9)=PCOORD(3,8)+P8;
PCOORD(3,10)=PCOORD(3,9)+P9;
PCOORD(3,11)=PCOORD(3,10)+P10;
PCOORD(3,12)=PCOORD(3,11)+P11;
PCOORD(3,13)=PCOORD(3,12)+P12;
PCOORD(3,14)=PCOORD(3,13)+P13;
```

"SILINDIR CAPLARINI VER (CM OLARAK)"

```
CYRAD(1)=R1;
CYRAD(2)=R2;
CYRAD(3)=R3;
CYRAD(4)=R4;
CYRAD(5)=R5;
CYRAD(6)=R6;
CYRAD(7)=R7;
CYRAD(8)=R8;
CYRAD(9)=R9;
CYRAD(10)=R10;
```

OUTPUT; ('CYLINDER RADII:./');

```
DO I=1,IRADII [
```

```

CYRAD2(I)=CYRAD(I)*CYRAD(I);
OUTPUT I,CYRAD(I); (' CYRAD(' ,I2,')=' ,G15.7);
]

OUTPUT; ('1PCOORD AND PNORM VALUES FOR EACH J-PLANE (I=1,3):,//);
DO J=1,IPLAN [
OUTPUT J,(PCOORD(I,J),I=1,3),(PNORM(I,J),I=1,3);
(I5,6G15.7);]

"BUTUN SILINDIRLERIN HACIMLERINI HESAPLA VE YAZDIR"
" NOT: VOL=-1.0 SONSUZ HACMI GOSTERMEKTEDIR"

OUTPUT; ('1VOLUME (CM**3) OF EACH REGION:',//);

DO IRL=1,NREG ["HACIM HESABINA BASLA"
IF(IRDISC(IRL).EQ.1) [VOL(IRL)=-1.0; GO TO :ENDVOL:;]
JR1=(IRL-2)/NZ;
JR=JR1+1; "CYLINDER INDEX (1 THRU IRADII)"
JZ=IRL-1-JR1*NZ; "LOWER PLANE INDEX (2 THRU NZ-1)"

BIGH=PCOORD(3,JZ+1)-PCOORD(3,JZ);

IF(JR.EQ.1) [CYRLO2=0.0; "INNER CYLINDER"]
ELSE [CYRLO2=CYRAD2(JR-1); "CYLINDRICAL SHELL"]
VOL(IRL)=PI*(CYRAD2(JR)-CYRLO2)*BIGH;

:ENDVOL:

OUTPUT IRL,MED(IRL),VOL(IRL),IRDISC(IRL);
(' IRL=',I3,5X,'MED=',I3,5X,'VOL=',G15.5,5X,'IRDISC=',I2);
"END OF VOLUME CALCULATION"]

"-----"
" gama enerjilerinin hesaplanması "
"-----"
"enerji degerlerini gir "

XENER(1)=0.060001;
XENER(2)=0.080001;
XENER(3)=0.100001;
XENER(4)=0.200001;
XENER(5)=0.300001;
XENER(6)=0.400001;
XENER(7)=0.600001;
XENER(8)=1.00001;
XENER(9)=1.50001;
XENER(10)=2.00001;
XENER(11)=0.1400001;
XENER(12)=0.3640001;
NCASE=1000000;

OUTPUT MEDAR1; (1X,15A1);
OUTPUT NCASE; (' FOTON SAYISI:',I9);
OUTPUT; (//T6,'ENERJI SAYIM/GELEN FOTON');

"loop "
DO I2=11,12 [

"-----"
"STEP 5 INITIALIZATION-FOR-AUSGAB "
"-----"
DO I=1,$EBIN [ EBIN(I) = 0.0;] "BASLAMADAN ONCE SIFIR ENERJIYI KAYDET"
BWIDTH = 0.00003; "ENERJİ SPEKTRUMU 0.3 KEV DEGERLER ALACAK"

"-----"
"STEP 6 PARCACIK PARAMETRELERININ TANITILMASI "
"-----"

```

"DEFINE INITIAL VARIABLES FOR EIN MEV PHOTONS GENERATED IN THE SOURCE"

```

IQIN=0;          "GELEN YUK - FOTONLAR"
EIN=XENER(I2);  "MEV CINSINDEN KINETIK ENERJİ"
$RANDOMSET XX1;
WTIN=1.0;
DO I=1,NCASE [EHIST = 0.0;   "BU BOLUME SIFIR ENERJİ DEPOLANIR"

NEWDIR=0;
LOOP [
  $RANDOMSET XX1;
  $RANDOMSET XX2;
  $RANDOMSET XX3;
  XX1=2.0*XX1-1.0;      "YENİ YON BELİRLE"
  XX2=2.0*XX2-1.0;
  XX3=2.0*XX3-1.0;
  XX12=XX1*XX1;XX22=XX2*XX2;XX32=XX3*XX3;XX42=XX12+XX22+XX32;
  "OUTPUT XX1,XX2,XX3,XX4; (G15.6,X,G15.6,X,G15.6,X,G15.6),"
  IF XX42<1.0 [NEWDIR=1;XX4=SQRT(XX42);]
] WHILE NEWDIR=0;

"OUTPUT NEWDIR; (' YENYON = ',I4); "
UIN=XX1/XX4;
VIN=XX2/XX4;
WIN=XX3/XX4;

XIN=0.0; "SİMETRİDEN DOLAYI BUNU İHMAL ET"
$RANDOMSET XX1;
YIN=0.0;
IF XX1.NE.0.0 [YIN= R9*SQRT(XX1);]
IRIN=4; "NUMUNE İCİNDEN BASLA"

IF (YIN.GT.R1) [IRIN=IRIN+IPLAN;] "RADYASYON DEPOLAYAN BÖLGE"
IF (YIN.GT.R2) [IRIN=IRIN+IPLAN;]
IF (YIN.GT.R3) [IRIN=IRIN+IPLAN;]
IF (YIN.GT.R4) [IRIN=IRIN+IPLAN;]
IF (YIN.GT.R5) [IRIN=IRIN+IPLAN;]
IF (YIN.GT.R6) [IRIN=IRIN+IPLAN;]
IF (YIN.GT.R7) [IRIN=IRIN+IPLAN;]
IF (YIN.GT.R8) [IRIN=IRIN+IPLAN;]

$RANDOMSET XX1;
ZIN=PCOORD(3,3)+P3*XX1;

" OUTPUT IQIN,EIN,XIN,YIN,ZIN,UIN,VIN,WIN; "
" ('0 IN Q E X Y Z U V W',I X,I2,7(F7.4,I X)); "

CALL SHOWER(IQIN,EIN,XIN,YIN,ZIN,UIN,VIN,WIN,IRIN,WTIN);

IBIN= MIN0 (IFIX(EHIST/BWIDTH + 0.999), $EBIN);
IF (IBIN.NE.0) [EBIN(IBIN)=EBIN(IBIN)+1;]
]
"-----"
"STEP 8  SONUCLARIN YAZDIRILMASI          "
"-----"
I=XENER(I2)/BWIDTH;
I=I+1;
OUTPUT BWIDTH*I,EBIN(I)/FLOAT(NCASE);(F10.4,F12.6);
SUMMA=0.0;
DO ITSİ=1,$EBIN [SUMMA=EBIN(ITSİ)+SUMMA;]
OUTPUT SUMMA/FLOAT(NCASE);(F14.6);

"DO I3=1,4000 ["
"OUTPUT BWIDTH*I3,EBIN(I3)/FLOAT(NCASE);(F11.5,F12.6);"
"]"

```

```

DO I3=(I-3),(I+3) [
OUTPUT BWIDTH*I3,EBIN(I3)/FLOAT(NCASE);(F11.5,F12.6);
]

OUTPUT; ('-----');
OUTPUT; (' ');
]
"-----"
"RPOGRAMIN SONU %55 verimli KTU labdaki ugur hoca dedektor      "
"-----"
STOP;END;

%E
"*****"

SUBROUTINE AUSGAB(IARG);

" bu bolgede dedektor bolgesine gelen fotonlari kaydediyoruz      "
" digger bolgelere gelen fotonlar"
" ornegin olu tabalaya veya kroyostata gelenler degil"
"*****"

;COMIN/EPCONT,SCORE/;
COMIN/STACK/;

IRL=IR(NP);
" IQLL=IQ(NP); ELL=E(NP); XLL=X(NP); YLL=Y(NP); ZLL=Z(NP); "
" ULL=U(NP); VLL=V(NP); WLL=W(NP); "
" OUTPUT IARG, IRL; ('0 AUSGAB - IARG, IRL', I5,2X,I5); "
" OUTPUT IQLL,ELL,XLL,YLL,ZLL,ULL,VLL,WLL; "
" ('0Q E X Y Z U V W',1X,I2,7(F7.4,1X)); "

IF(IARG.LE.2 .OR. IARG.EQ.4) [ "DISCARD BOLGE DEGIL"

"ENERJININ DEPOLANDIGI BOLGELER"

IF(IRL.GE.9.AND.IRL.LE.10) [EHIST=EHIST + EDEP;];
IF(IRL.GE.23.AND.IRL.LE.24) [EHIST=EHIST + EDEP;];
IF(IRL.GE.37.AND.IRL.LE.40) [EHIST=EHIST + EDEP;];
IF(IRL.GE.51.AND.IRL.LE.54) [EHIST=EHIST + EDEP;];

]
" OUTPUT EHIST, EDEP; ('0 REGION 7 EHIST, EDEP ', F8.4, 2X, F8.4); "

RETURN;END;"AUSGAB SON"

"*****"
"KTU Fizik Bolumu"
SUBROUTINE HOWFAR;
" %55 verim HPGe dedektor      "
"*****"

;COMIN/CYLDTA,DEBUG,EPCONT,PLADTA,STACK,USER/;
COMMON/PASSIT/IRDISC($MXREG),NR,NZ;

IRL=IR(NP); "SET LOCAL VARIABLE"
IF(IRDISC(IRL).EQ.1) [IDISC=1; "DISCARD BOLGELER"]

ELSE ["GEOMETRY CHECKING REGIONS"

JR1=(IRL-2)/NZ;
JR=JR1+1; "SILINDIR INDEX NUMARASI"
JZ=IRL-1-JR1*NZ; "SLAB INDEX NUMARASI"

"ONCE DUZLEMLERI KONTROL ET"

IF(JZ.EQ.1) [IRBACK=1;] ELSE [IRBACK=IRL-1;]

```

```

$PLAN2P(JZ+1,IRL+1,1,JZ,IRBACK,-1);

"SIMDI SON DEFA KONTROL ET"
IF(JR.EQ.1) ["INNER CONE/CYLINDER"
  $CYLNDR(1,1,IHIT,TVAL);
  IF(IHIT.EQ.1) [$CHGTR(TVAL,IRL+NZ);]
"END OF INNER CONE/CYLINDER LOOP"]
ELSE ["CYLINDRICAL SHELL"
  $CYLNDR(JR1,0,IHIT,TVAL);
  IF(IHIT.EQ.1) [$CHGTR(TVAL,IRL-NZ);]
  ELSEIF(JR.NE.NR) [
$CYLNDR(JR,1,IHIT,TVAL);
IF(IHIT.EQ.1) [$CHGTR(TVAL,IRL+NZ);]
  ]
"SİLİNDİRİK HALKALARIN DÖNGÜ SONU"]

"GEOMETRİYİ KONTROL EDEN DÖNGÜNÜN SONU"]

RETURN;
END; "SUBROUTINE HOWFAR IN SONU"
%E
"*****"
" STANFORD LINEAR ACCELERATOR CENTER"
SUBROUTINE PLAN2P(NPL1,NRG1,ISD1,NPL2,NRG2,ISD2);
"VERSION 4.XX -- 8 JUN 1985/1845"
"*****"
" AUXILIARY (GEOMETRY) SUBPROGRAM FOR USE WITH EGS4 CODE SYSTEM "
"-----"
" DESCRIPTION - PLAN2P is generally called from subroutine HOWFAR "
" whenever a particle is in a region bounded by two planes that "
" ARE parallel. Both subroutines PLANE1 and CHGTR are called "
" by PLAN2P (the second PLANE1 call is not made if the first "
" plane is not hit, or if the trajectory is parallel). "
"-----"
" NPL1 = ID number assigned to plane called first (input) "
" NRG1 = ID number assigned to region particle trajectory "
" will lead into "
" ISD1 = 1 normal points towards current region (input) "
" = -1 normal points away from current region (input) "
" NPL2 = Same (but for plane called second) "
" NRG2 = Same (but for plane called second) "
" ISD2 = Same (but for plane called second) "
"-----"
" NOTE: A macro-version of this subroutine is also defined in the "
" EGS4 Code System (see file EGS4MAC). "
"-----"
;COMIN/DEBUG/; "SEE MACRO DEFINITION IN EGS4MAC "

CALL PLANE1(NPL1,ISD1,IHIT,TVAL);
IF(IHIT.EQ.1) ["HITS FIRST PLANE"
  CALL CHGTR(TVAL,NRG1); "CHANGE REGION IF NECESSARY"]
ELSEIF(IHIT.EQ.0) ["HEADING AWAY FROM FIRST PLANE, MAY HIT SECOND"
  CALL PLANE1(NPL2,ISD2,IHIT,TVAL);
  IF(IHIT.EQ.1) [CALL CHGTR(TVAL,NRG2); "CHANGE REGION IF NECESSARY"]]
ELSEIF(IHIT.NE.2) [OUTPUT NPL1,NRG1,NPL2,NRG2,IHIT;
(' STOPPED IN SUBROUTINE PLAN2P WITH NPL1,NRG1,NPL2,NRG2=',
4I6,',' AND WITH IHIT=,I6); STOP;]
"ELSE PARTICLE TRAVELING PARALLEL TO PLANES IN ORIGINAL REGION"

RETURN;
"END OF SUBROUTINE PLAN2P" END;
%E
"*****"
" STANFORD LINEAR ACCELERATOR CENTER"
SUBROUTINE PLANE1(NPLAN,ISIDE,IHIT,TVAL);
" VERSION 4.XX -- 8 JUN 1985/1845"
"*****"

```



```

" AUXILIARY (GEOMETRY) SUBPROGRAM FOR USE WITH EGS4 CODE SYSTEM  "
"-----"
" DESCRIPTION - A plane is defined relative to a coordinate system "
" by means of a point on its surface (PCOORD-array) and a unit "
" vector normal to its surface (PNORM-array). Both PCOORD and "
" PNORM are defined in COMMON/PLADTA/ by means of a macro in the "
" EGS4 Code System (see file EGS4MAC). The user must assign "
" appropriate values to PCOORD and PNORM in the User Code. "
"
" PLANE1 is called whenever the user wants to determine: "
" a) whether or not the straight trajectory of a particle at "
" (X,Y,Z) traveling with direction cosines (U,V,W) inter- "
" sects a plane, and (if it does) "
" b) what is the trajectory distance. "
"-----"
" NPLAN = ID number assigned to plane (input) "
" ISIDE = 1 normal points towards current region (input) "
" = -1 normal points away from current region (input) "
" IHIT = 1 trajectory will strike plane (output) "
" = 2 trajectory parallel to plane (output) "
" = 0 trajectory moving away from plane (output) "
" TVAL = distance to plane (when IHIT=1) (output) "
"-----"
" NOTE: A macro-version of this subroutine is also defined in the "
" EGS4 Code System (see file EGS4MAC). "
"-----"
;COMIN/DEBUG,PLADTA,STACK/; "SEE MACRO DEFINITION IN EGS4MAC  "

UDOTA=PNORM(1,NPLAN)*U(NP)+PNORM(2,NPLAN)*V(NP)+PNORM(3,NPLAN)*W(NP);
UDOTAP=UDOTA*ISIDE;
IF(UDOTA.EQ.0.0) [IHIT=2; "TRAVELING PARALLEL TO PLANE"]
ELSEIF(UDOTAP.LT.0.0) [IHIT=0;"TRAVELING AWAY FROM PLANE"]
ELSE [
IHIT=1; "TRAVELING TOWARDS PLANE---DETERMINE DISTANCE"
TNUM=PNORM(1,NPLAN)*(PCOORD(1,NPLAN)-X(NP))
+PNORM(2,NPLAN)*(PCOORD(2,NPLAN)-Y(NP))
+PNORM(3,NPLAN)*(PCOORD(3,NPLAN)-Z(NP));
TVAL=TNUM/UDOTA;]

RETURN;
"END OF SUBROUTINE PLANE1" END;
%E
"*****"
" STANFORD LINEAR ACCELERATOR CENTER"
SUBROUTINE CHGTR(TVALP,IRNEW);
" VERSION 4.XX -- 8 JUN 1985/1845"
"*****"
" AUXILIARY (GEOMETRY) SUBPROGRAM FOR USE WITH EGS4 CODE SYSTEM  "
"-----"
" DESCRIPTION - The purpose of CHGTR is to change USTEP to TVALP "
" and IRNEW to IRNEW if and when USTEP is larger than TVALP. "
" (Both USTEP and IRNEW are available in COMMON/EPCONT/). "
"-----"
" TVALP = Straight trajectory distance to a boundary surface "
" IRNEW = New region that particle may possibly go into "
"-----"
" NOTE: A macro-version of this subroutine is also defined in the "
" EGS4 Code System (see file EGS4MAC). "
"-----"
;COMIN/DEBUG,EPCONT/; "SEE MACRO DEFINITION IN EGS4MAC  "

IF(TVALP.LE.USTEP) [USTEP=TVALP; IRNEW=IRNEW];
RETURN;

"PROGRAM SONU" END;

```

ÖZGEÇMİŞ

1981 yılında Kars'ın Kağızman ilçesinde doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Sarıkamış'ta tamamladı. 1999 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi (K.T.Ü) Rize Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümüne yerleşti. 2004 yılında aynı bölümden bölüm ikinciliği ile mezun oldu. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi yabancı diller bölümünde bir yıl hazırlık okuduktan sonra doktora tezine başladı. 2005-2006 yılları arasında Belçika'nın Gent üniversitesinde Department of Subatomic and Radiation Physics bölümüne K.T.Ü tarafından görevlendirilerek bir yıl çalıştı. 2008-2009 yılları arasından Belçika'nın Geel kentinde bulunan Institute for Reference Materials and Measurements (IRMM)'e Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından görevlendirilerek bir yıl süreyle çalıştı. Necati ÇELİK evli ve iyi derecede İngilizce bilmektedir.