ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ferhat GEZER

FOSFOJİPS'İN DOĞAL RADYOAKTİFLİĞİNİN BELİRLENMESİ

FİZİK ANABİLİM DALI

ADANA, 2011

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FOSFOJİPS'İN DOĞAL RADYOAKTİFLİĞİNİN BELİRLENMESİ

Ferhat GEZER

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FİZİK ANABİLİM DALI

Bu Tez **27/06/2011** Tarihinde Aşağıdaki Jüri Üyeleri Tarafından Oybirliği/~~Oyçokluğu~~ ile Kabul Edilmiştir.

…….....	……..	…….....
Yrd.Doç Dr. M.Zeki KURT	Yrd.Doç Dr. F.Aysun UĞUR	Prof. Dr. Metin ÖZDEMİR
DANIŞMAN	ÜYE	ÜYE
...…….....	**...**……..	
Doç. Dr. Şeref TURHAN	Yrd.Doç. Dr. Mehmet TEKDAL	
ÜYE	ÜYE	

Bu Tez Enstitümüz Fizik Anabilim Dalında hazırlanmıştır.
Kod No:

Prof. Dr. İlhami YEĞİNGİL
Enstitü Müdürü

Bu Çalışma Ç. Ü. Araştırma Projeleri Birimi Tarafından Desteklenmiştir.
Proje No: FEF2010YL48

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

ÖZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FOSFOJİPS'İN DOĞAL RADYOAKTİFLİĞİNİN BELİRLENMESİ

Ferhat GEZER

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI

Danışman :Yrd.Doç. Dr. M.Zeki KURT
Yıl: 2011, Sayfa: 77
Jüri :Prof. Dr. Metin ÖZDEMİR
:Doç. Dr. Şeref TURHAN
:Yrd.Doç. Dr. F.Aysun UĞUR
:Yrd. Doç. Dr.Mehmet TEKDAL
: Yrd.Doç.Dr. M. Zeki KURT

Fosfatlı gübreler, doğal olarak var olan uranyum-radyum, toryum radyoaktif serilerine ait radyonüklitleri ve radyoaktif potasyumu içeren toz hâline getirilmiş fosfat kayası ile sülfirik asitin tepkimesi sonucunda üretilmektedir. Fosfojips, fosforik asit üretim sürecinden yan ürün veya atık olarak elde edilmektedir. Fosfojipslerin artan üretimi, Türkiyedeki gübre sanayinde uzun zamandan beri teknolojik ve ekonomik etkilere eşlik eden çevre ve radyolojik problemlere sebep olmaktadır. Bu tür problemler, fosfojipslerin yapı katkı ham maddesi olarak kullanılması gibi değişik seçeneklerin uygulanmasını kaçınılmaz hâle getirmektedir. Bu çalışmanın amacı, Mersin ve Bandırma Gübre fabrikalarından temin edilen fosfojips örneklerindeki ^{226}Ra, ^{232}Th ve ^{40}K radyonüklitlerinin aktivite derişimlerini, gama spektrometrik teknik kullanarak ölçmek ve incelenen fosfojips örneklerinin yapı katkı ham maddesi olarak kullanılmasından kaynaklanan radyolojik riskleri değerlendirmektir. Fosfojips örneklerinde ölçülen ve her bir gübre fabrikası için tablo hâlinde verilen ^{226}Ra, ^{232}Th ve ^{40}K'ın aktivite derişimlerinin ortalama değerleri, sırasıyla Mersin Gübre Fabrikası (MGF) için 250,8 Bq/kg, 14,6 Bq/kg ve 10,1 Bq/kg ve Bandırma Gübre Fabrikası (BGF) için 826,6 Bq/kg, 9,0 Bq/kg ve 8,6 Bq/kg olarak bulunmuştur. Radyum eş değer aktivite (Ra_{eq}), aktivite derişim indisi ($I\gamma$), alfa indisi ($I\alpha$), dış ışınlama sebebiyle kapalı ortamda soğurulan gama doz hızı (D_R) ve bu doz hızına karşılık gelen etkin doz hızı (H_R) değerleri, bu tür ham maddelerin kullanımından kaynaklanan ışınlama riskini değerlendirmek için hesaplandı. BGF fosfojips örnekleri için hesaplanan ortalama Ra_{eq} değeri, yapı malzemelerinin güvenli kullanıımı için tavsiye edilen 370 Bq/kg sınır değerden daha büyük iken, MGF fosfojips örnekleri için hesaplanan ortalama Ra_{eq} değeri, sınır değerden daha küçüktür.

Anahtar Kelimeler: Fosfojips, ^{226}Ra, ^{232}Th, ^{40}K, gama spektrometresi.

ABSTRACT

Msc THESIS

DETERMINATION OF NATURAL RADIOCTIVITY AT PHOSPHOGYPSUM

Ferhat GEZER

ÇUKUROVA UNIVERSITY
INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
DEPARTMENT OF PHYSICS

Supervisor : Asst.Prof. Dr. M. Zeki KURT
Year: 2011, Pages: 77
Jury :Prof. Dr. Metin ÖZDEMİR
:Assoc. Prof. Dr. Şeref TURHAN
:Asst. Prof. Dr. F. Aysun UĞUR
:Asst. Prof. Dr. Mehmet TEKDAL
:Asst.Prof. Dr. M. Zeki KURT

Phosphate fertilizers are produced by the reaction of sulphuric acid with pulverized phosphate rock which contains naturally occurring radionuclides of the uranium-radium, and thorium series and radioactive potassium. Phosphogypsum are derived from the process production of phosphoric acid as a by-product or waste. The growing production of phosphogypsum has long caused on environmental and radiological problems with technological and economic effects in the phosphate industry in Turkey. These problems become inevitable to the implementation of various alternative in which phosphogypsums are utilized as a building raw materials. The aim of this study is to measure the activity concentrations of ^{226}Ra, ^{232}Th and ^{40}K radionuclides in phosphogypsum samples obtained from Mersin and Bandırma fertilizer factories by using gamma spectrometric technique and to assess the radiological impacts from the utilization of phosphogypsum samples examined as a building raw material. The activity concentrations of ^{226}Ra, ^{232}Th and ^{40}K measured in phosphogypsums samples and tabulated for each fertilizer factory were found as 250.8 Bq/kg, 14.6 Bq/kg and 10.1 Bq/kg for Mersin Fertilizer Factory (MFF) and 826.6 Bq/kg, 9.0 Bq/kg and 8.6 Bq/kg for Bandırma Fertilizer Factory (BFF), respectively. Radium equivalent activity (Ra_{eq}) and activity concentration index ($I\gamma$), alpha index ($I\alpha$), absorbed gamma dose rate in indoor due to the external exposure (D_R) and corresponding effective dose rate (H_R) were calculated to evaluate the exposure risk arising due to the use of these raw materials. For the BFF phosphogypsum samples, the mean value of Ra_{eq} is above the limit of 370 Bq/kg recommended for the safe use of construction materials, while for the MFF phosphogypsum samples, the mean value of Ra_{eq} is lower than the limit.

Key Words: Phosphogypsum, ^{226}Ra, ^{232}Th, ^{40}K, gamma ray spectrometry.

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans tezimde bana rehberlik eden danışman hocam, Yrd. Doç. Dr Zeki KURT'a, yüksek lisans ders aşamasında her türlü ilgi ve desteğini benden esirgemeyen hocam Prof. Dr. Yüksel UFUKTEPE'ye teşekkür ederim.

Tez konumu seçmemde, gama spektrometresini öğrenmemde ve analizleri yapmamda bana her türlü desteği sağlayan hocam Doç. Dr. Şeref TURHAN'a, konu seçmemde ve tezimi oluşturmamda hiçbir fedakârlığını esirgemeyen ikinci danışman hocam Yrd. Doç. Dr. F. Aysun UĞUR'a, çalışma arkadaşlarım Elif GÖREN ve Semra SOLAK'a, temel eğitimleri aldığım sırada yardımcı olan Abdullah ZARARSIZ'a teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca her türlü desteğini yaşamım boyunca benden esirgemeyen sevgili aileme sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER **SAYFA**

ÖZ I
ABSTRACT II
TEŞEKKÜR III
İÇİNDEKİLER ..... …..IV
ÇİZELGELER DİZİNİ VI
ŞEKİLLER DİZİNİ VII
SİMGELER VE KISALTMALAR IX
1. GİRİŞ 1
1.1. Radyoaktivite ve Radyoaktif Bozunma Yasası 4
1.2. Radyoaktivitenin Keşfi ve Kısa Tarihçesi 5
1.3. Doğal Radyoaktivite 7
1.4. Radyoaktif Bozunma Yasası 11
1.5. Radyoaktif Bir Numunenin Yarı ve Ortalama Ömrü 13
1.6. Zincirleme Bozunum Süreci 14
1.7. Bozunum Türleri 18
1.7.1. Alfa Bozunumu 18
1.7.2. Beta Bozunumu 19
1.7.3. Gama Bozunumu 23
1.8. Radyasyonun Madde İle Etkileşimi 23
1.8.1. Fotoelektrik Olay 25
1.8.2. Compton Saçılımı 26
1.8.3. Çift Oluşumu 27
1.9. Radyasyon Birimleri 28
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR 31
3. MATERYAL VE METOD 37
3.1. Gama Spektrometresi 37
3.1.1. Yüksek Saflıkta Germanyum Yarı İletken Dedektörleri 38
3.1.2. Ön Yükselteç 39
3.1.3. Yükselteç 40

3.1.4. Çok Kanallı Analizör 40
3.1.5. Analog Sayısal Dönüştürücü 42
3.1.6. ADC Ayırma Gücü 42
3.1.7. ADC Dönüşüm Kazancı 43
3.2. Gama Spektrometrik Analizler 43
3.2.1. Pik Alanı Hesabı 44
3.2.2. Standartla Karşılaştırma Yöntemi 46
3.2.3. HPGe Dedektörünün Enerji Kalibrasyonu 49
3.2.4. HPGe Dedektörünün Mutlak Verim Kalibrasyonu 49
3.3. Örneklerin Toplanması ve Analize Hazırlanması 51
3.4. Ölçme İşlemi 52
4. BULGULAR VE TARTIŞMA 55
4.1. Ölçülebilir En Düşük Değerinin Hesaplanması 55
4.2. Fosfojips örneklerindeki ^{226}Ra, ^{232}Th ve ^{40}K Aktivite Derişim Değerleri Mutlak Yöntem İle Elde Edilen Aktivite Derişim Değerşleri 55
4.3. Radyum Eşdeğer Aktivite 57
4.4. Harici ve Dahili Aktivite İndisleri 59
4.5. Soğurulmuş Gama Doz Hızı ve Yapı İçi Etkin Doz Hızı 61
4.6. Fosfojipsin X-Işını Spektrometresiyle Elementsel Analizi 65
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 69
5.1. Verilerin Değerlendirilmesi 69
KAYNAKLAR 73
ÖZGEÇMİŞ 77

ÇİZELGELER DİZİNİ **SAYFA**

Çizelge 1.1. Doğada Bilinen Dört Doğal Radyoaktif Seri 9
Çizelge 1.2. SI Birim Sistemindeki Radyoaktivite Birimleri 29
Çizelge 3.1. Yüksek Saflıkta Germanyum Dedektörün Özellikleri 44
Çizelge 3.2. IAEA/RGU–1 (Uranyum Standardı) 48
Çizelge 3.3. IAEA/RGTh–1 (Toryum Standardı) 48
Çizelge 3.4. IAEA/RGK–1 (Potasyum Standardı) 48
Çizelge 3.5. Standartların Kütle ve Sayım Süreleri 49
Çizelge 3.6. Standart Kalibrasyon Kaynaklarının Özellikleri 50
Çizelge 3.7. Verim Kalibrasyonu Verileri 56
Çizelge 4.1. I.(M) Gübre Fabrikasından temin edilen fosfojips örneklerinde ölçülen ^{226}Ra, ^{232}Th ve ^{40}K aktivite derişim değerleri 56
Çizelge 4.2. II.(B) Gübre Fabrikasından temin edilen fosfojips örneklerinde ölçülen ^{226}Ra, ^{232}Th ve ^{40}K aktivite derişim değerleri 56
Çizelge 4.3. Doz ölçütünün kontrolüne yönelik aktivite derişim indisi değerleri 60
Çizelge 4.4. MGF $I_{\square}$, I_{α}, indisleri ve DR, HR değerleri 63
Çizelge 4.5. BGF $I_{\square}$, I_{α}, indisleri ve DR, HR değerleri 64
Çizelge 4.6. I.(M) Gübre Fabrikasından temin edilen fosfojipsin XRF metoduyla elementsel analiz sonuçları 66
Çizelge 4.7. II.(B) Gübre Fabrikasından temin edilen fosfojipsin XRF metoduyla elementsel analiz sonuçları 67
Çizelge 5.1. Fosfat Kayalarındaki Radyonüklitlerin Fosforik Aside ve Fosfojipse Geçme Oranı (%) 71
Çizelge 5.2. Çeşitli Ülkelerde Üretilen Fosfojips Örneklerinin Aktiviteleri 71

ŞEKİLLER DİZİNİ **SAYFA**

Şekil 1.1. N-Z Kararlılık Grafiği 5
Şekil 1.2. ^{238}U'in Bozunum Serisi 9
Şekil 1.3. ^{235}U' in Bozunum Serisi 10
Şekil 1.4. ^{232}Th' in Bozunum Seris 10
Şekil 1.5. Radyoaktif Bir Numune Miktarının Zamanla Değişimi 12
Şekil 1.6. Alfa Bozunumu 19
Şekil 1.7. β^- Bozunumu 20
Şekil 1.8. β^+ Bozunumu 21
Şekil 1.9. Elektron Yakalama Olayına Bir Örnek (^{7}Be) 22
Şekil 1.10. β^- Bozunumu Sonrasında Yayımlanan Elektronların Enerji Spektrumlarına Bir Örnek (^{210}Bi) 22
Şekil 1.11. Gama Bozunumu 23
Şekil 1.12. Elektromanyetik Radyasyonun Alüminyum ile Etkileşimi 24
Şekil 1.13. Fotoelektrik Olay 25
Şekil 1.14. Compton Saçılması 26
Şekil 1.15. Çift Oluşumu 27
Şekil 3.1. Yarıiletken Dedektör Şeması 37
Şekil 3.2. Yüksek Saflıktaki Germanyum Dedektörlü Gama Spektrometresi 38
Şekil 3.3. Yüke Hassas Ön yükseltecin Şematik Görünümü 39
Şekil 3.4. Çok Kanallı Analizörde Kanal Numarası ve Puls Yüksekliği Arasındaki İlişki 41
Şekil 3.5. Analog Sayısal Dönüştürücünün Şematik Görünümü 42
Şekil 3.6. Pik Alanı Hesabı 45
Şekil 3.7. % 50 Bağıl Verimli HPGe Dedektörün Mutlak Verim Eğrisi 51
Şekil 3.8. Kalibrasyon ve Ölçümler için Kullanılan Plastik Örnek Kabı 52
Şekil 4.1. Doğal radyonüklidlerin yerkabuğu ve AB ortalamaları ile MGF ve BGF örneklerinin karşılaştırılması 58
Şekil 4.2. MGF ve BGF fosfojips örneklerinin radyum eş değer aktivite değerlerinin sınır değeri ile kıyaslanması 58

Şekil 4.3. MGF I_γ, I_α indisleri ve DR, HR değerleri 64
Şekil 4.4. BGF I_γ, I_α indisleri ve DR, HR değerleri 65
Şekil 5.1. Fosforik Asit Üretim İşlemi 70

SİMGELER VE KISALTMALAR

A	: Aktivite
A_s	: Standardın aktivitesi
A_x	: Örneğin aktivitesi
B	: Doğal fon
Bq	: Becquerel
C	: İntegral sabiti
C_K	: K derişimi (Özgül aktivite)
C_{Th}	: Th derişimi (Özgül aktivite)
C_U	: U derişimi (Özgül aktivite)
D	: Radyasyon dozu
dt	: Küçük zaman aralığı
E	: Elektrik alan
E_i	: İlk enerji
E_f	: Son enerji
E_{γ}	: Gama enerjisi
f_{γ}	: Gama yayınlanma olasılığı
G	: İlgilenilen bölgedeki pikin toplam alanı, sayım sayısı
g	: Gram
h	: Planck sabiti, saat
K	: Potasyum
keV	: Kiloelektronvolt
kg	: Kilogram
m	: Güven katsayısı
m_s	: Standardın kütlesi
m_x	: Örneğin kütlesi
N	: Radyoaktif çekirdek sayısı, ilgilenilen pikin sağında ve solundaki kanal sayısı
n	: E enerjili fotopikin altındaki net alan, seçilen uç kanal sayısı
nGy	: Nanogrey

N_0	: Başlangıçtaki çekirdek sayısı, kaynağın aktivitesi
N_p	: Pik alanı
P	: Bozunma olasılığı
P_2O_5	: Fosforik asit
$P_{\square}$ (E)	: E enerjili gama fotopikinin yayınlanma olasılığı,
S	: Net pik alanı
t	: Zaman, sayım zamanı
$t_{1/2}$	: Yarı ömür
t_d	: Bozunum süresi
t_s	: Standardın sayım süresi
t_x	: Örneğin sayım süresi
Th	: Toryum
X	: X-ışını
Z	: Atom numarası
α	: Alfa
β	: Beta
ΔE	: Enerji Farkı
□	: Verim
□	: Gama
µCi	: Mikrocurie
µSv	: Mikrosievert
τ	: Ortalama ömür
U	: Uranyum
ν	: Frekans
ADC	: Analog sayısal dönüştürücü
EPA	: Amerikan Çevre Örgütü
HPGe	: Yüksek saflıkta germanyum dedektörü
IAEA/RGK-1	: UAEA Potasyum standardı
IAEA/RGTh-1	: UAEA Toryum standardı
IAEA/RGU-1	: UAEA Uranyum standardı

MCA	: Çok kanallı Analizör
MDA	: Minimum dedeksiyon aktivitesi
NaI(Tl)	: Talyum aktive edilmiş sodyum iyodür dedektör
PG	: Fosfojips
UNSCEAR	: Birleşmiş Milletler Radyoaktivite Etkileri Bilimsel Komitesi
XRF	: X-Işını flüoresans

1. GİRİŞ

İnsanoğlu yaşadığı kapalı ve açık ortamlarda sürekli olarak doğal ve yapay radyasyon kaynaklarından yayınlanan iyonlaştırıcı radyasyona (alfa, beta, gama ve X-ışınları vb.) maruz kalmaktadır. Doğal ve yapay radyonüklitlerden yayınlanan gama radyasyonu dış ışınlamaya sebep olurken, solunum ve sindirim yolu ile vücuda alınan radyonüklitlerden yayımlanan alfa ve beta radyasyonu iç ışınlamayı önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır. Bireylerin, yaşam standartlarına, yaşadığı ortamların fiziksel özelliklerine ve coğrafi şartlara bağlı olarak değişiklik göstermekle birlikte maruz kaldığı yıllık ortalama 2.8 mSv'lik radyasyon dozunun yaklaşık %85'i doğal radyasyon ve %15'i ise yapay radyasyon kaynaklarından ileri gelmektedir (UNSCEAR, 2000).

Yerkabuğunda bulunan uranyum (^{238}U), toryum (^{232}Th) ve aktinyum (^{235}U) doğal radyoaktif serilerine ait radyonüklitler ve bu serilerin dışında yerkabuğunda doğal olarak var olan radyoaktif potasyum (^{40}K) vb. radyonüklitler çevredeki radyoaktivitenin en önemli kaynaklarını oluşturmaktadır. Bu radyonüklitlerin aktivite derişimleri, bölgenin jeolojik ve jeokimyasal yapısına bağlı olarak bölgeden bölgeye farklılık göstermektedir. Uranyum, toryum, radyum ve radyoaktif potasyumun aktivite derişimleri sırasıyla 16-110 Bq/kg, 11-64 Bq/kg, 17-60 Bq/kg ve 140-850 Bq/kg arasında değişmektedir (UNSCEAR, 2000).

Doğada bulunan fosfat madeni yerkabuğu kökenli olduğu için doğal radyoaktif serilerine ait radyonüklidleri içermektedir. Fosfatta bulunan ^{238}U, ^{232}Th ve ^{40}K radyonüklitlerinin aktivite derişimi kayaların çeşidine bağlı olduğundan fosforik kayanın bulunduğu bölgeye göre radyoaktivitesi değişmektedir. Fosfatlı gübre üretiminde kullanılan bir hammadde olan fosfatik kayalar, fosforik veya sülfürik asitle ıslak işlem tepkimesi sonucunda işlenmektedir. Bu işlem sonunda fosfojips atık madde olarak elde edilir. Kimyasal analizler bu atık malzemenin yaklaşık % 93'ünün fosfojips, geri kalan % 7'sinin safsızlıklar olarak adlandırılan fosfat, florid ve organik maddeler olduğunu göstermiştir.

Fosfatik kayada bulunan ^{238}U ve ^{232}Th'nin radyoaktif dengesi işlem sürecince bozulur ve fosforik asit veya fosfojips içinde çözünürlüğe bağlı olarak kısımlara

ayrılır. Üretim sürecinde, radyum (^{226}Ra)'un % 85-90'ı ve ^{238}U'nin de % 10 'u fosfojipse geçer. İşlem sonucunda, çok büyük oranlarda fosfojips yan ürün (atık) olarak elde edilmektedir. 1 ton P_2O_5 üretilmesi için yaklaşık 4,3 ton fosfojips atık olarak açığa çıkar. Bir yılda üretilen P_2O_5 0,76 milyon ton ise oluşan fosfojips yılda 3.3 milyon tonu bulur. Bu atıkların etrafa yayılmadan biriktirilmesi veya atılması, tozlanma, tarım ürünlerinin zarar görmesi, hava, su ve toprağın kirlenmesi gibi çevre problemlerine yol açabilmektedir. Bu tür çevre problemlerinin azaltılması veya ortadan kaldırılması, atık olarak elde edilen fosfojipslerin değişik alanlarda değerlendirilmesi ile mümkündür. Fosfojipsler dünyada, inşaat, kağıt, seramik, cam ve tarım gibi sektörlerde ve jeoteknik uygulamalarda katkı ve dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır. Ülkemizde ise fosfojipslerin, inşaat sektöründe çimento, beton vb. yapı malzemelerinin üretilmesinde katkı maddesi olarak kullanılması yaygınlaşmaktadır. Ancak içerdiği radyonüklitler, fosfojipsin yapı malzemesi ve gübre olarak kullanılmasını sınırlamaktadır.

Fosfojips üreten işletmelerin yakınında atık madde stoku yapılmakta ve bu durum radyonüklitlerin toprağa sızarak yeraltı su kaynaklarını kirletmesi ve radon gazı yayarak insan sağlığını etkilemesi gibi pek çok problemin kaynağını oluşturmaktadır. Fosfojipsin uygulandığı arazilerde içerdiği radyonüklitlerin yerüstü ve yeraltı sularında hareketi söz konusu olabileceğinden besin zinciriyle bu radyonüklitlerin canlılara ulaşma olasılığı da vardır. Radyonüklitlerin ne kadarının bitkilere, besin zinciriyle ne kadarının hayvanlara ve insanlara geçtiği, hayvansal ürünlerin alınmasıyla insanın alabileceği radyoaktivite dozu, araştırılması gereken diğer önemli konulardır. Bu nedenle son yıllarda Batı Avrupa ülkeleri fosfat kayası talebini ve fosforik asit kapasitesini önemli miktarda azaltıp, ham cevher olan fosfat kayası yerine mamul gübre veya fosforik asit kullanma yoluna gitmektedirler. Çünkü fosfojips atık ürünü ile ilgili önemli çevresel baskı mevcuttur ve bunun sonucu olarak ta bazı fabrikalar kapanmaktadır. Dolayısıyla fosfojipslerin kullanılmasının, çevre ve insan sağlığı üzerindeki etkilerinin radyolojik açıdan değerlendirilmesi için içerdikleri radyonüklitlerin aktivite derişimlerinin bilinmesi büyük önem arz etmektedir.

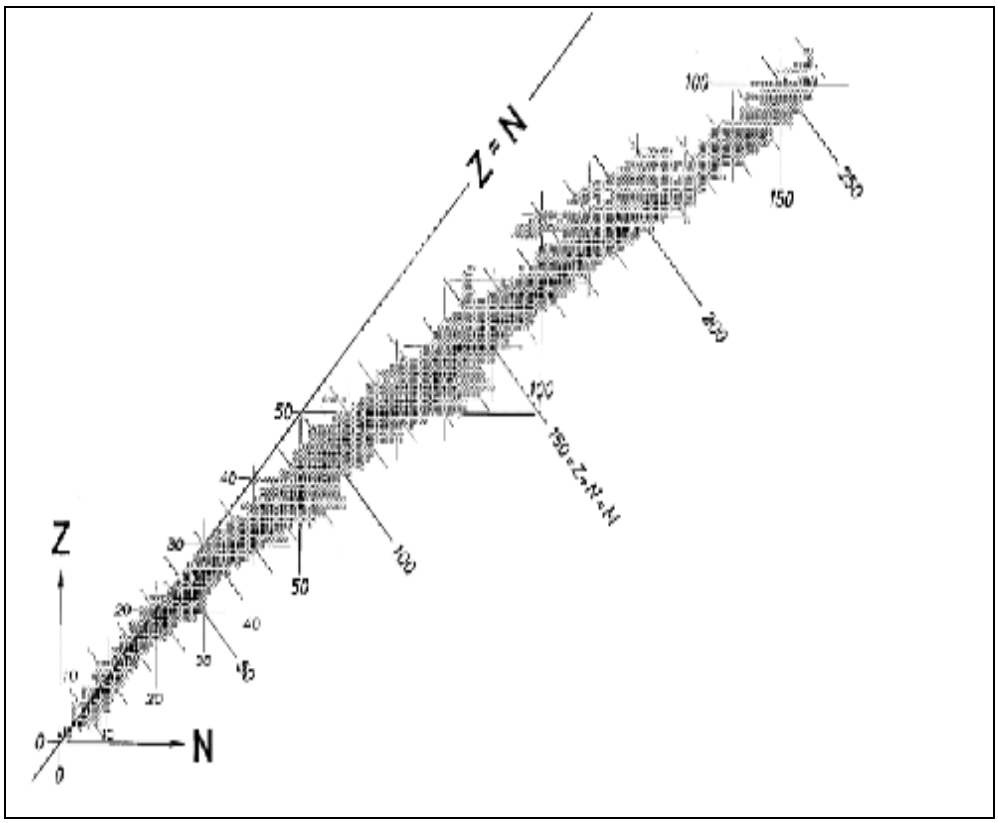
Bu çalışmada, fosfojipslerin, inşaat sektöründe katkı ham maddesi, tarımsal alanlarda iyileştirme çalışmalarında ve yol köprü yapımı gibi jeoteknik uygulamalarda kaplama veya dolgu malzemesi olarak kullanılabilirliğini radyolojik açıdan değerlendirmek amacıyla fosfojipslerin içerdiği ve bölgeden bölgeye değişiklik gösteren doğal radyonüklitlerin dağılımlarının belirlenmesi, izlenmesi ve bu radyonüklitlerden kaynaklanan ilave dozun değerlendirilmesine ilişkin çalışmaların sonuçları sunulmuştur. Çalışmanın birinci bölümünde radyoaktivite, doğal radyoaktif seriler, kalıcı denge, radyasyon, radyasyonun madde ile etkileşmesi ve doz birimleri hakkında kurumsal bilgi verilmiştir. İkinci bölümde, fosfojiplere yönelik literatürde yer alan çalışmalar özetlenmiştir. Üçüncü bölümde, ülkemizde bulunan iki farklı gübre fabrikasından temin edilen fosfojips örneklerinin kimyasal özelliklerine ve fosfojips örneklerindeki radyonüklitlerin aktivite derişiminin ölçülmesinde kullanılan Çukurova Üniversitesi Fizik Bölümü Gülten Günel Nükleer Fizik Araştırma Laboratuvarındaki gama spektrometresi ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Gama spektrometresi kullanılarak elde edilen spektrumun değerlendirilmesi ve aktivitenin hesaplanmasına yönelik olarak fotopik alanı ve hatasını hesaplama yöntemi, yüksek saflıkta germanyum (HPGe) dedektörü için yapılan mutlak verim ve enerji kalibrasyonu, mutlak aktivite ve standart karşılaştırma yöntemleri ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Dördüncü bölümde, elde edilen aktivite sonuçları çizelge hâlinde verilmiş ve gerekli hesaplamalar yapılmıştır. Fosfojips örneklerinim yapı malzemesi olarak kullanılmasını, radyolojik açıdan değerlendirmek amacıyla radyum eşdeğer aktivite (Ra_{eq}), aktivite derişim indisi (I_γ), alfa indisi (I_α), kapalı ortamda soğurulan radyasyon doz hızı (nGy/h) ve yıllık etkin radyasyon dozu (E_{eff}) hesaplanmıştır. Beşinci bölümde ise elde edilen veriler değerlendirilmiş ve bu tür katkı malzemelerinin kullanılabilirliğine ilişkin yol gösterici bilgiler özetlenmiş ve diğer ülkelerin fosfojips örnekleri ile karşılaştırılmıştır.

1.1. Radyoaktivite ve Radyoaktif Bozunma Yasası

Radyoaktivite ilk kez 1896 yılında H. Becquerel tarafından keşfedilmiş ve 1911 yılında E.Rutherford'ın çekirdekli atom teorisi ile bu alandaki çalışmalar ivme kazanmıştır. Radyoaktivite karasız olan bir elementin, çeşitli parçacıklar salarak veya ışıma yaparak kararlı ve başlangıçtakinden fiziksel ve kimyasal olarak farklı bir elemente dönüştüğü bir süreç olarak tanımlanabilir. Her atomun çekirdeği şüphesiz kararsız değildir; yani radyoaktivite çekirdek için ayırt edici fiziksel bir özelliktir. Kararsız olan çekirdekler alfa (α), beta (β) ve gamma (γ) gibi yüksek enerjili parçacıklar salarak kararlı hale gelirler. α parçacıkları iki nötron ve iki protonlu Helyum ($_2He^4$) çekirdekleridir. β parçacıkları yüksek enerjili elektronlardır. Bazı radyoaktif süreçlerde elektronların karşıt parçacıkları olan ve pozitron (β^+) adı verilen ürünler ortaya çıkmaktadır. γ ise bildiğimiz manada fotonlardır ve oldukça yüksek enerjilidirler. Bu üç radyasyon türü hakkında daha ayrıntılı bilgi ileriki bölümlerde verilecektir (Krane, 1998).

Radyoaktivitenin atom çekirdeğinin "kararlılığı" ve "kararsızlığıyla" ilişkili olduğu açıktır. O zaman kararlılık ve kararsızlığı Çekirdek Fiziği açısından incelemek gerekmektedir. Bir atomun çekirdeğinin Çekirdek Fiziği açısından temel yapı taşları nükleon adı verilen, doğadaki temel yük birimi olan +e yüküne sahip proton (p) ve yüksüz nötronlardır (n). Çekirdek içerisinde nükleonlar çeşitli etkileşmeler neticesinde bir arada bulunurlar. Kütle çekim etkileşmesi çekirdek boyutlarındaki etkisi ihmal edilebilir mertebededir. Protonları bir arada tutan güçlü etkileşme, yine sadece protonlar arasında olan elektromanyetik etkileşme ve radyoaktiviteden sorumlu olan zayıf etkileşmedir. Atom çekirdeğinde nötronların varlığı dengeyi artırmaktadır. Kararlılık bir genelleme değildir ancak bazı çekirdeklere özgüdür ve (nötron sayısı)/(proton sayısı) yani N/Z' nin değerine bağlıdır. Şekil 1.1' de bilinen çekirdeklerin n ve p sayılarına göre dağılımı verilmiştir. Görüldüğü gibi kararlılık eğrisi ve civarındaki dar kararlılık bölgesi N=Z olan hafif çekirdekleri temsil ederken daha ağır çekirdeklere gidildikçe N/Z>1 olmaktadır.

Kararlı en ağır çekirdek ^{209}Bi için bu oran yaklaşık 1,5'tir. N/Z>1,5 olan diğer tüm çekirdekler ise kararsızdırlar. Kararlı çekirdeklerin toplam sayısı 300 kadardır ve yalnız 40 tanesi doğaldır. Bilinen 274 kararlı izotoptan 162 tanesinin proton ve nötron sayıları çifttir. N ve Z 2, 4, 8 gibi çift sayılar olduğunda bunlara "çift-çift" çekirdekler denir. Kararlı izotopların 53'ünde N çift, Z tek; 55'inde N tek, Z çift ve yalnızca 4'ünde N ve Z tektir (tek-tek çekirdekler). Birkaç istisnai hal dışında çift-çift çekirdekler tek-tek çekirdeklerden daha kararlıdır Krane, 1998).



Şekil 1.1. N-Z Kararlılık Grafiği (Krane, 1998)

1.2. Radyoaktivitenin Keşfi ve Kısa Tarihçesi

1802 yılında İngiliz kimyacı ve meteorolog John Dalton o zamana kadar maddenin yapısıyla ilgili ortaya atılmış fikirlerden ve kendi çalışmalarından yola çıkarak ilk atom modelini geliştirdi. J. Dalton' un modeline göre madde küçük

parçalardan oluşuyordu ve bu yapı taşları her element için farklı kütleye sahipti. Yani atom kütlesi maddenin fiziksel bir karakteriydi. Elementlerin birbirleriyle yaptıkları basit bağlanmaları açıklaması açısından Dalton Atom Modeli bir basamak teşkil etti ancak atomu bölünemez kabul etmesi kuramının eksik yanıydı.

Dalton Atom Modeli'nin atomun bölünemezliğine dair varsayımı 1897 yılına kadar kabul gördü. Bu dönemde atomların kütleleri ve yarıçapları yaklaşık olarak biliniyordu 1897'de İngiliz deneysel fizikçi Joseph John Thomson eksi (−) yüklü elektronu keşfetmesi bu varsayımı çürütmüş oldu. Thomson yüksek vakumlu katot ışını tüpünde elektriksel boşalmanın doğası üzerine çalışmalar sonucunda, ışınların elektrik ve manyetik alanlar tarafından saptırılmasını gözlemledi ve bu sonuç "atomdan daha küçük parçacıkların" varlığının kanıtı olarak yorumlandı. Daha sonra Joseph John Thomson elektronun e/m oranını hesapladı ve bunun oldukça yüksek bir oran olduğunu buldu. Elektron gibi eksi (−) yüklü bir parçacığın varlığı yüksüz oldukları önceden de bilinen atom içerisinde zıt yüklü başka çeşit parçacıkların da olması gerekliliği düşüncesini doğurdu. J.J. Thomson bu çalışmaları ile atom içersinde negatif yüklü ve atomdan çok daha küçük parçacıkların bulunduğunu göstermiştir ve 1904 yılında kendi adı ile anılan atom modelini önermiştir. Bazen bu modelden bahsedilirken üzümlü kek modeli de denilmektedir. Modele göre; madde, küre şeklindeki atomlardan teşekkül eder. Atomda negatif yüklü elektronlar vardır ve elektronların kütlesi atomun kütlesinden çok küçüktür. Elektriksel bakımdan yüksüzlüğü sağlamak için atomun geri kalan kısmı artı yüklü olmalıdır. Artı yük kütlenin çok büyük bir kısmını oluşturduğuna göre atom, artı yüklü kütlenin homojen olarak dağıldığı bir küredir. Elektronlar bu küre içinde elektriksel yüksüzleşmeyi sağlayacak şekilde serpilmişlerdir.

1896 senesi Mart ayında, o sıralar hem Uranyum tuzlarının fosfor esanslığı üzerinde ve hem de yeni keşfedilen röntgen ışınları üzerinde çalışan ve bazı kimyasallar yardımıyla bunların yayılmalarını sağlamaya uğraşan Fransız fizikçi Henri Becquerel, laboratuarındaki çekmecesini açtığında büyük bir sürprizle karşılaştı. Kapkaranlık bir ortamda olmasına rağmen bazı fotoğraf camları bulanıklaşmıştı. Bunu açıklamak ilk aklına gelen, güneş ışığının etkisiyle kristallerin ışını yaydığı ve fotoğraf camını sislendirdiğiydi. İlk deneyleri onun doğru yolda

olduğunu desteklese de hava bozunca olayın seyri birdenbire değişti. Becquerel, kristallerin güneş ışığından etkilenmesini engellemek için kimyasallar kullanarak camları tekrar çekmeceye koydu. Camları dışarı çıkardığında, Uranyumlu kristallerden oluşan camlarda artık sisin bulunmayışına oldukça şaşırdı. Ancak bu durum, bugün bir atom çekirdeğinin tanecikler veya elektromanyetik ışımalar yayarak kendiliğinden parçalanması olarak bilinen radyoaktivitenin keşfedilmesiydi.

Becquerel'in radyoaktiviteyi buluşu atomun proton ve elektronlardan oluşturduğunu doğrulamıştır. Ayrıca 1909' da iki bilim adamı H.Geiger ve E.Marsden alfa taneciklerinin ince metal levhalardan saçılmalarını araştırırken, alfa parçacıklarından bir çoğunun sadece küçük sapmalara metal levhayı delip geçtiğini, ancak 10.000'de birinin neredeyse gerisin geriye saçıldıklarını deneysel olarak gözlemlemişlerdir. Bu gözlemler Thomson atom öngörüsüne pek uymuyordu çünkü kütle bakımından bir elektronun 7300 katı olan alfa parçacıklarının kendisine nazaran çok küçük olan elektronlar nedeniyle 180 derecelik açılarla saçılmaları mümkün değildi. Thomson modeline göre alfa tanecikleri sadece küçük açılarla saçılmalıydı.

Bu gelişmeler ışığında olaya en uygun açıklama 1911 yılında Rutherford tarafından yapılmıştır. Rutherford benzeri bir deneyi ince altın yapraklarını alfa tanecikleriyle bombardıman ederek gerçekleştirmiş ve meşhur deneyi sonucunda Geiger ve Marsden ile aynı sonuca ulaşmıştır. Rutherford, atomun artı yükünün ve kütlesinin neredeyse tamamının çekirdek adı verilen küçük bir hacimde toplandığını ve çekirdek çevresindeki kısmın boş olduğu tezini ileri sürmüştür. Böylece alfa taneciklerinin küçük ve büyük açılı saçılmalarının açıklaması yapılabilmiştir. Böylece atomun yapısı konusunda yeni bir anlayış doğmuştur (Krane, 1998).

1.1. Doğal Radyoaktivite

Bilimsel bulgulara göre Dünya ve Güneş Sistemi'nin diğer gezegenleri yaklaşık dört buçuk milyar yıl önce Demir (Fe), Karbon (C), Oksijen (O), Silikon (Si) bakımından zengin maddeler, diğer ortam ve ağır elementler olmadan oluşmuşlardır. Bu elementler ise yaklaşık on beş milyar yıl önce gerçekleştiği

düşünülen Büyük Patlama (Big Bang) sonucunda oluşan hidrojen ve helyumdan sırayla oluşmuşlardır. Büyük Patlama'dan Güneş Sistemi'nin oluşmasına kadar geçen on milyar yıl boyunca Hidrojen ($_1H^1$) ve Helyum ($_2He^4$) yıldızlar ve süper novalardaki ağır elementleri oluşturmuşlardır. O zamandan bu yana da kararlı çekirdeklere bozunmaktadırlar. Bir kaç radyoaktif elementin yarı-ömrü dünyanın yaşına kıyasla çok uzundur ve bugün hâlâ bunların radyoaktiviteleri gözlenebilmektedir. Bunun gibi dışarıdan herhangi bir etki olmadan bozunan elementlere doğal radyoaktif elementler; bu olaya da doğal radyoaktivite denir. Yani bozunuma uğrayan radyoizotop doğada mevcuttur veya doğada bulunan diğer radyoizotopların bozunması sonucu ortaya çıkar. Doğal radyoaktiflik çevresel radyasyonun esas kısmını oluşturmaktadır ve muhtemelen dünyaya benzer gezegenlerin iç sıcaklığından sorumludur.

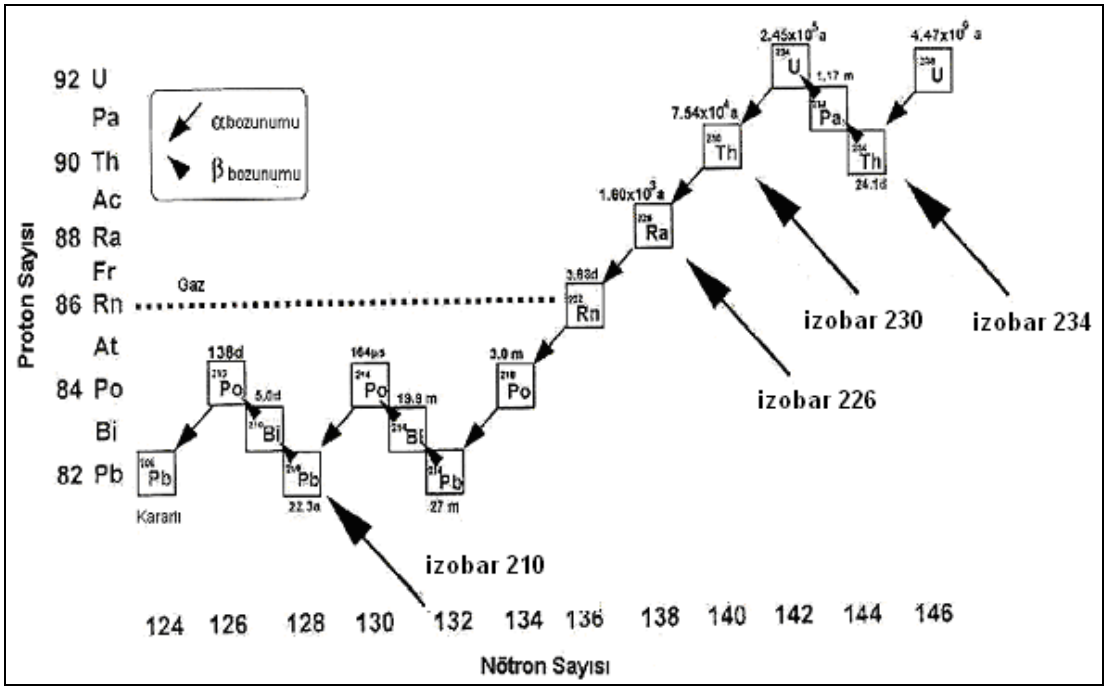
Her ne kadar diğer türlerin de uzun ömürlü doğal radyoaktif elementleri varsa da günümüzde gözlenenlerin çoğu çok ağır elementlerden oluşmuşlardır ve hiç kararlı izotopları yoktur. Bu radyoaktif çekirdekler α ve β yayınlayarak Z ve A sayılarını azaltarak sonuçta kararlı bir çekirdeğe ulaşırlar. Alfa bozunması A' yı dört birim azaltırken, beta bozunması ise A sayısını değiştirmez. Bozunma süreci çekirdeği, zincirin en uzun ömürlü üyesine götürme eğilimindedir ve eğer bu çekirdeğin ömrü en azından Dünya'nın yaşı mertebesindeyse bu aktiftik bugün de gözlenebilir. Genellikle ağır çekirdekleri olan doğal radyoizotoplar şu radyoaktif serilere üyedir: Toryum (^{232}Th), Neptünyum (^{237}Np), Uranyum (^{238}U) ve Aktinyum (^{235}U). Tarihsel sıralama söz konusu olduğunda en son keşfedilen seri Neptünyum serisidir. n bir tamsayı olmak üzere bu doğal radyoaktif seriler sırayla 4n, 4n+1, 4n+2 ve 4n+3 ile temsil edilirler. Bozunma zinciri sonucunda yukarıdaki kararsız çekirdeklerden Toryum, Uranyum ve Aktinyum sırasıyla kurşunun kararlı olan ^{208}Pb, ^{206}Pb ve ^{207}Pb çekirdeklerine ulaşırken Neptünyum kararlı en ağır çekirdek olan ^{209}Bi Bizmuta dönüşür.

Neptünyum serisinin en uzun ömürlü üyesinin yarı ömrü diğerlerininkine nazaran Dünya'nın oluşumundan bu yana geçen süreye göre çok kısa olduğundan bu seri doğal maddelerde gözlenmez. Aşağıdaki çizelgede dört seriye ait bazı temel özellikler verilmektedir. Ayrıca Şekil 1.2' de ve Şekil 1.3' de bu serilerden en

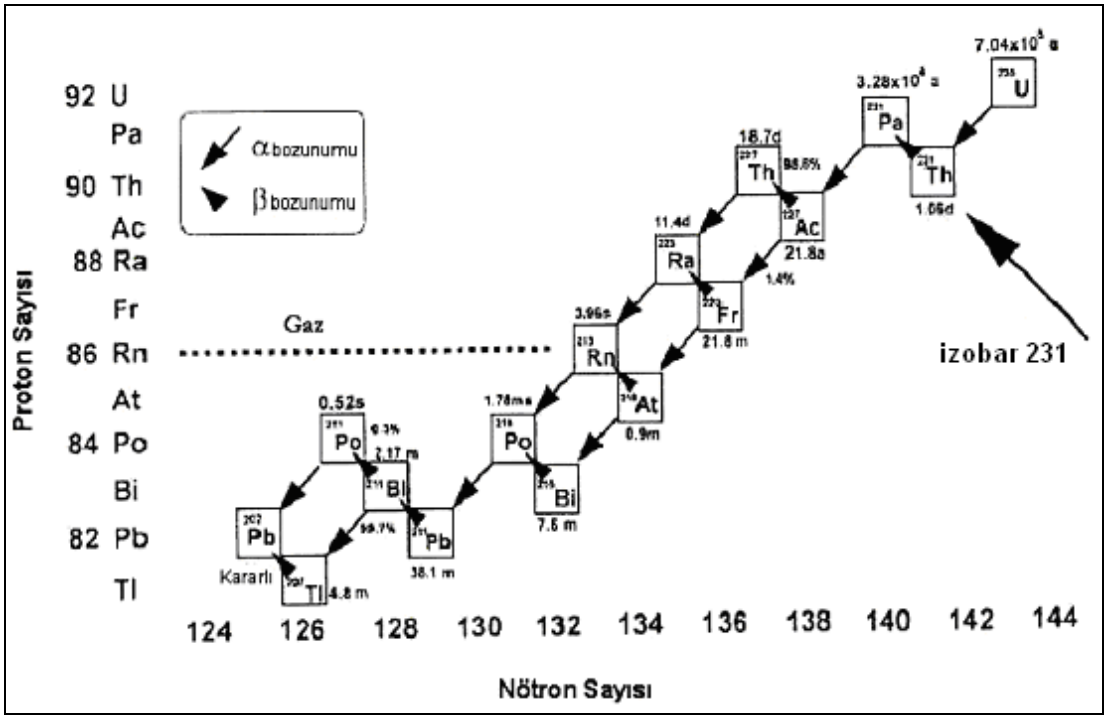
tanınanı ve ürünler arasında ^{222}Rn‘ nın da bulunduğu Uranyum serisi gösterilmektedir.

Çizelge 1.1. Doğada Bilinen Dört Doğal Radyoaktif Seri (Krane, 1998)

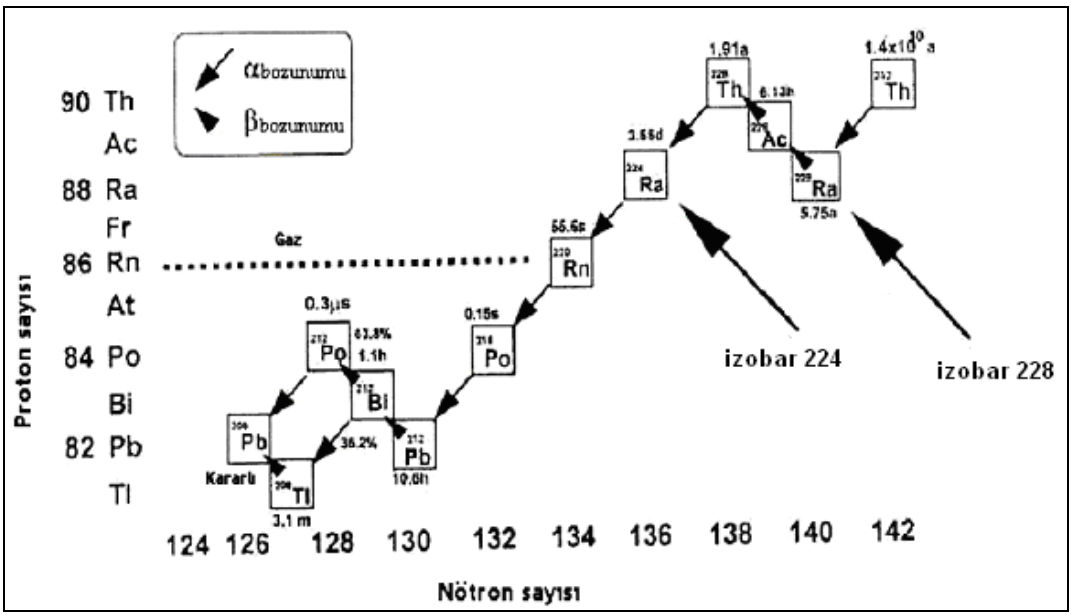
		En uzun Ömürlü Üyesi	
Seri Adı	**Son Çekirdek (Kararlı)**	**Çekirdek**	**Yarı-Ömür (yıl)**
Toryum	^{208}Pb	^{232}Th	1.41×10^{10}
Neptünyum	^{209}Bi	^{237}Np	2.14×10^{6}
Uranyum	^{206}Pb	^{238}U	4.47×10^{9}
Aktinyum	^{207}Pb	^{235}U	7.04×10^{8}



Şekil 1.2. ^{238}U’in Bozunum Serisi (Krane, 1998)



Şekil 1.3. ^{235}U' in Bozunum Serisi (Krane, 1998)



Şekil 1.4. ^{232}Th' in Bozunum Serisi (Krane, 1998)

1.4. Radyoaktif Bozunma Yasası

Fiziksel açıdan, bir radyoaktif numune içindeki herhangi bir atomun ne zaman bozunacağını bilmek imkânsızdır. Radyoaktif bozunma, zamana göre gelişigüzel ve rastgele gerçekleşir ancak istatistik ve de olasılık kuramları çerçevesinde bazı özellikleri bulunabilir. Önemli bir yaklaşım tek tek çekirdeklerle ilgilenmek değil zamana göre daima sabit kalan bir nicelik olan bir kavramı, bir radyoaktif çekirdeğin birim zamanda bozunma olasılığını incelemektir. Bu olasılık radyoaktif bozunma sabiti olarak adlandırılır ve genellikle λ ile gösterilir. Radyoaktivitenin sönüm yasasına göre, radyoaktif çekirdeğin yaşı ne olursa olsun bozunma olasılığı λ sabittir.

λ radyoaktif çekirdekler için ayırt edici bir özelliktir. Mesela Radon için değeri
λ = 0,0075/ saat= 0,000125/ dakika ‘dır.

Radyoaktif bir çekirdekte birim zaman aralığında meydana gelen bozunma sayısı çekirdeğin bozunma hızı veya aktivitesi olarak tanımlanır. Eğer herhangi bir t anında N tane radyoaktif çekirdek varsa ve numuneye dışarıdan çekirdek ilave edilmiyorsa sonsuz küçük dt zaman aralığı içinde bozunan çekirdek sayısı N ile orantılı olacaktır.

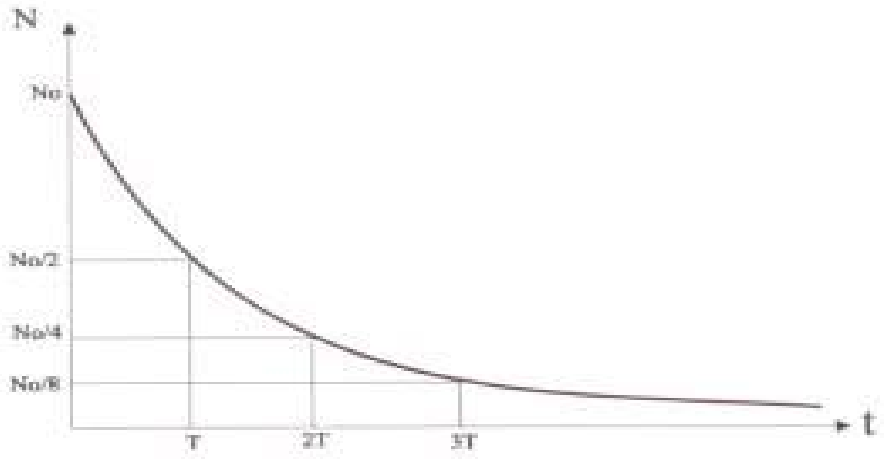
$$\frac{dN(t)}{N(t)} = -\lambda N(t) \qquad (1.1.)$$

Denklemdeki eksi işareti çekirdek sayısının zamanla azaldığını haber verir. Denklem (1.1)’teki diferansiyel denklem çözülerek üstel radyoaktif bozunma yasası elde edilir.

$$\frac{dN(t)}{N(t)} = -\lambda\, dt \quad \rightarrow \quad \int \frac{dN(t)}{N(t)} = -\int \lambda\, dt \quad \rightarrow \quad N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \qquad (1.2.)$$

Denklemde t zamanı, N(t); t zamanı sonunda arta kalan çekirdek sayısını, N_0 başlangıçtaki (t = 0 iken) çekirdek sayısını ve λ radyoaktif numunenin bozunma

sabitini gösterir ve birimi s^{-1}'dır. Aşağıdaki grafik üstel bozunma denklemine ait değişimi vermektedir.



Şekil 1.5. Radyoaktif Bir Numune Miktarının Zamanla Değişimi (Krane, 1998)

Bozunma yasası denkleminin her iki tarafı λ ile çarpılırsa yukarıda bahsedilen aktivite için bir ifade bulunur.

$$\lambda N(t) = \lambda N_0 e^{-\lambda t} \qquad (1.3.)$$

İfadede ki Nλ' ya numunenin bozunma hızı ya da aktifliği denir ve birim zaman başına bozunma sayısını verir. I ile gösterilir ve birimi bozunma/saniye'dir.

$$I = I_0 e^{-\lambda t} \qquad (1.4.)$$

Burada I (= N λ) t anındaki ve I_0 (= N_0 λ) da t = 0 anındaki bozunma hızlarıdır (Krane, 1998)

.

1.5. Radyoaktif Bir Numunenin Yarı ve Ortalama Ömrü

Radyoaktif bozunma yasasını ifade eden denklem herhangi bir t anında bozunmadan kalabilen çekirdek sayısını verir. Kuramsal olarak bakıldığında numunedeki tüm çekirdeklerin bozunması için sonsuz zaman geçmesi gerekir. Yani ancak $t \rightarrow \infty$ için $N(t) = 0$ olur. Bununla ilgilenmek yerine radyoaktif maddenin ayırt edici bir özelliği olan yarı ömür kavramı kullanılır. Yarı ömür radyoaktif bir elementin başlangıçtaki çekirdek sayısının yarıya inmesi için geçen zamandır. $T_{1/2}$ ile gösterilen yarı ömrü bulmak için $N = N_0/2$ alırsak,

$$N_0/2 = N_0\, e^{-\lambda t} \qquad (1.5.)$$

$$e^{-\lambda t} = \frac{1}{2} \qquad (1.6.)$$

$$T_{1/2} = \frac{0{,}693}{\lambda} \qquad (1.7.)$$

elde edilir. Yarı ömür çekirdeğin kimyasal ve fiziksel etkilerle değişmeyen bir özelliğidir. Buradan bozunma kanununu $\lambda = 0{,}693/T_{1/2}$ yazarak yeniden tanımlayabiliriz.

$$N = N_0 \exp\,(- 0{,}693/T_{1/2}) \qquad (1.8.)$$

Bilinen radyoaktif izotopların yarı ömürleri oldukça geniş bir aralıktadır. En kısa yarı ömürlü çekirdek 10^{-21} s ile $^{4}_{2}He$, en uzun yarı ömürlü çekirdek ise 1017 yıl ile ^{204}Pb'dir.

Eğer radyoaktif bozunmaya bir olasılık fenomeni olarak bakılırsa bozunma olasılık yoğunluğu fonksiyonu tanımlanabilir.

$$P(t)\, dt = \lambda\, e^{-\lambda t}\, dt \qquad (1.9.)$$

Çekirdeğin bir t ile t+dt zaman aralığındaki bozunma olasılığını veren yukarıdaki ifadeden radyoaktif bir çekirdeğin bozunması için geçen ortalama zaman hesaplanabilir (Krane, 1998).

$$T_{ort} = \int_0^{\infty} P(t)t\,dt = \int_0^{\infty} t\,\lambda\, e^{-\lambda t}\,dt \quad \rightarrow \quad T_{ort} = \frac{1}{\lambda} \tag{1.10.}$$

1.6 Zincirleme Bozunum Süreci

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda radyoaktif bozunumun üstel bir yasaya göre değiştiği gözlenmiştir. Bu yasanın türetilmesi de; hangi anda hangi atomun bozunuma uğrayacağının bilinmesinin mümkün olmadığı, rastgele bir tabiata sahip olması kabul edildiğinde mümkündür. Bu yasaya göre hangi çekirdeğin ne zaman bozunuma uğrayacağı bilinemez. Ancak toplam çekirdeklerin zamana bağlı olarak bozunma olasılıkları, buna bağlı olarak ta sayıları bulunabilir.

Bozunuma uğramış bir çekirdeğin gelecek bir saniye içindeki bozunma olasılığı λ ile gösterilir ve $\lambda \cong 1$ olarak alınırsa, istatistik kuramın temel varsayımı; λ'nın zamandan ve mevcut diğer çekirdeklerin tip ve sayılarından bağımsız olmasını gerektirir. Bu durumda bir dt zaman aralığında her bir atomun bozunma olasılığı $P(t)=\lambda.dt$ ile verilir. Verilen bir t zamanında şayet N sayıda bozunuma uğramamış atom varsa, dt gibi küçük bir zaman aralığında bozunuma uğrayacakların sayısı;

$$dN = -\lambda\, N\, dt \tag{1.11.}$$

olur. Bu eşitlikten anlaşılacağı üzere kısa bir dt süresindeki bozunma sayısı, bozunmamış atomların sayısıyla (N) ve dt zaman aralığıyla doğru orantılıdır. Eksi işareti, (t) arttıkça N'nin azaldığını göstermektedir. Bu takdirde bağıntı;

$$-\frac{dN}{N} = \lambda dt \tag{1.12.}$$

şeklinde yazılıp, t = 0 iken radyoaktif atomların sayısı N_0 olduğu kabul edilerek integral alınırsa;

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \tag{1.13.}$$

elde edilir. Burada N(t); t anındaki mevcut radyoaktif atomların sayısını λ ise radyoaktif çekirdeklerin bozunma ihtimalini veya kısaca bozunum sabitini ifade eder. Denklem (1.13)'teki radyoaktif atomların sayısı yerine aktivite (A) yazılırsa:

$$A = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = \lambda N \tag{1.14.}$$

eşitliği elde edilir. Böylece bir örneğin aktivitesi; A, radyoaktif atomların sayısına (N) ve bozunma sabitine (λ) bağlı bir niceliktir.

Herhangi bir t anında λ_i bozunum sabitiyle ürün çekirdeğe bozunacak ana çekirdek atom sayısı N_i olsun. Ürün çekirdek atomlarının sayısı N_2 ile gösterelim. Bunlarda λ_2 bozunum sabitiyle başka bir çekirdeğe bozunacaklardır. λ_3 bozunum sabitiyle bozunacak çekirdeklerin sayısı ise N_3 olsun. Bunlara ilaveten t = 0 iken $N_1 = N_{10}$, $N_2 = N_{20}$ ve $N_3 = N_{30}$ olduğu kabul edilirse, zincirleme radyoaktif parçalanma aşağıdaki gibi temsil edilebilir.

$$\begin{array}{ccccc} (^{238}U) \rightarrow & (^{234}Th) \rightarrow & (^{234m}Pa) & \rightarrow \ldots \\ \lambda_1 & \lambda_2 & \lambda_3 & \\ N_1 & N_2 & N_3 & \\ N_1 = N_{10} & N_2 = N_{20} = 0 & N_3 = N_{30} = 0 & \end{array}$$

Aktivite, saniyedeki bozunma sayısı olduğuna göre; $N_1(^{238}U)$, $N_2(^{234}Th)$ ve $N_3(^{234m}Pa)$ çekirdekleri için;

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda_1 N_1 \tag{1.15.}$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \qquad (1.16.)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = \lambda_2 N_2 - \lambda_3 N_3 \qquad (1.17.)$$

bozunma eşitlikleri yazılır. Bu ifade N_1'in bozunma hızını verir.

Denklem (1.16) N_2 tipindeki nüklitlerin $\lambda_1 N_2$ hızıyla üretildiklerini $\lambda_1 N_2$ hızıyla bozunduklarını göstermektedir. Denklem (1.17) ise N_3 çekirdeklerinin üretim hızını verir.

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1 \qquad (1.18.)$$

eşitliğinin t=0, $N_1 = N_{10}$ şartlarıyla integrali alındığında;

$$N_1 = e^{-\lambda_1 t}$$

bu değer Denklem (1.16) da yerine konulduğunda;

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_{10} e^{-\lambda_1 t} - \lambda_2 N_2 \qquad (1.19.)$$

veya

$$\frac{dN_2}{dt} + \lambda_2 N_2 = \lambda_1 N_{10} e^{-\lambda_1 t} \qquad (1.20.)$$

elde edilir. Bu bağıntının her iki tarafı $e^{-\lambda_2 t}$ ile çarpılarak

$$e^{\lambda_2 t}\frac{dN_2}{dt}+\lambda_2 N_2 e^{\lambda_2 t}=\lambda_1 N_{10} e^{-\lambda_1 t} e^{\lambda_2 t} \tag{1.21.}$$

veya

$$\frac{d}{dt}\left(N_2 e^{\lambda_2 t}\right)=\lambda_1 N_{10} e^{(\lambda_2-\lambda_1)t} \tag{1.22.}$$

bulunur. Bu eşitliğin integrali alındığında;

$$N_2 e^{\lambda_2 t}=\frac{\lambda_1}{\lambda_2-\lambda_1} N_{10} e^{(\lambda_2-\lambda_1)t}+C \tag{1.23.}$$

elde edilir. Buradaki C integral sabitinin değeri ve t = 0 da $N_2 = N_{20} = 0$ değeri yerine konularak,

$$C=-\frac{\lambda_1}{\lambda_2-\lambda_1} N_{10} \tag{1.24.}$$

elde edilir. C'nin bu değeri Denklem (1.23)'de yerine konulup her iki taraf $e^{\lambda_2 t}$'ye bölündüğünde;

$$N_2=\frac{\lambda_1}{\lambda_2-\lambda_1} N_{10}\left(e^{-\lambda_1 t}-e^{-\lambda_2 t}\right) \tag{1.25.}$$

olur. Benzer şekilde (1.18) bağıntısı t = 0 da $N_3 = N_{30} = 0$ şartıyla çözülürse,

$$N_3=N_{10}\left[1+\frac{\lambda_1}{\lambda_2-\lambda_1} e^{-\lambda_2 t}-\frac{\lambda_2}{\lambda_2-\lambda_1} e^{-\lambda_1 t}\right] \tag{1.26.}$$

bulunur. Böylece (1.18), (1.25), (1.26) eşitlikleri yardımıyla herhangi bir t anında mevcut olan atomların sayısı bulunabilir. Bu eşitlikler, t = 0 da $N_1 = N_{10}$ ve $N_{20} = N_{30} = 0$ özel durumları için türetildi. Bundan sonra N_{20} ve N_{30}, t = 0 iken sıfır olmasalar bile N_1, N_2 ve N_3 için genel bağıntılar aşağıdaki şekilde türetilebilirler (Krane, 1998).

$$N_1 = N_{10} e^{-\lambda_1 t} \tag{1.27.}$$

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{10} \left(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t} \right) + N_{20} e^{-\lambda_2 t} \tag{1.28.}$$

$$N_3 = N_{30} + N_{20} \left(1 - e^{-\lambda_2 t} \right) + N_{10} \left(1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_2 t} \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_1 t} \right) \tag{1.29.}$$

şeklinde olacaktır. Denklem (1.27), Denklem (1.28) bağıntılarıyla örneğin; ^{238}U, ^{234}Th ve ^{234m}Pa nüklitlerinin zincirleme bozunma durumunda, $A(^{238}U) = \lambda_1 N_1$, $A(^{234}Th) = \lambda_2 N_2$ ve $A(^{234m}Pa) = \lambda_3 N_3$ aktivitelerinin zamanla değişimini verir.

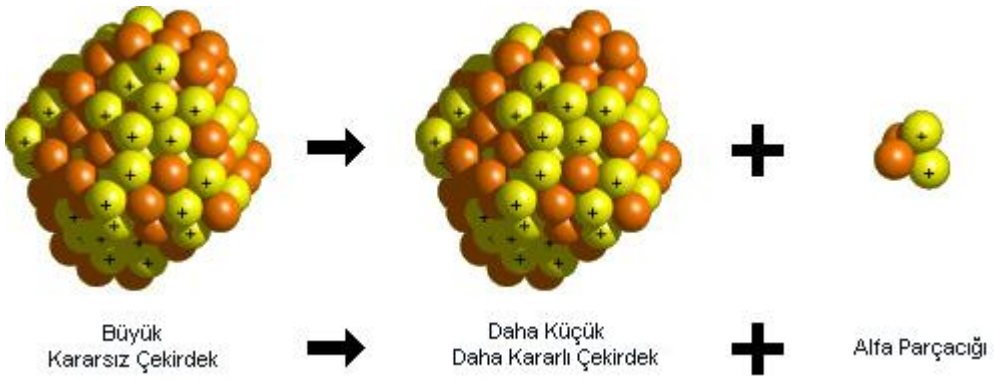
1.7. Bozunum Türleri

Radyoaktif çekirdekler kendiliğinden bozunuma uğrarlar. Bu süreç üç şekilde gerçekleşebilir. Alfa ve beta bozunumlarında kararsız bir çekirdek, alfa ya da beta parçacıkları yayarak daha kararlı bir çekirdek haline gelmeye çalışır. Gama bozunumu ise çekirdeğin cinsi değişmeden uyarılmış bir durumdan taban duruma bozunmasıdır.

1.7.1 Alfa Bozunumu

Çekirdeğin kararsızlığı hem proton hem de nötron fazlalığından ileri geliyorsa, çekirdek iki proton ve iki nötrondan oluşan bir alfa parçacığı yayımlayarak bozunur Şekil 1.6. Böylece Denklem (1.30)'de görüldüğü gibi bozunan çekirdeğin

atom numarası 2, kütle sayısı ise 4 azalır. Rutherford alfa parçacığının gerçekte He çekirdeği olduğunu göstermiştir. Bu bozunumda proton ve nötron sayıları ayrı ayrı korunur. Ayrıca toplam enerji de korunmalıdır Denklem (1.31).



Şekil 1.6. Alfa Bozunumu(Tüysüz, Yorulmaz, Bozkurt, 2004).

$$ {}^{A}_{Z}X_{N} \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}X'_{N-2} + {}^{4}_{2}He \qquad (1.30.) $$

$$ Q = \Delta mc^2 = [\, m(X) - m(X') - m({}^{4}_{2}He) \,].c^2 \qquad (1.31.) $$

Bozunum nedeniyle ortaya çıkan enerjinin büyük kısmını, momentumun korunumu gereğince küçük kütleye sahip olan alfa parçacığı alır. ${}^{4}_{2}He$ Çekirdeği yüksek enerjiye sahip olsa da ağır kütlesi nedeniyle menzili çok kısadır. Alfa bozunumu genellikle kütle numarası 190'dan büyük çekirdeklerde daha sık görülür. Enerji spektrumu kesiklidir ve 4 ile 10 MeV arasında değişim gösterir. Çünkü yüklü bir parçacık olduğundan içerisinden geçtiği maddenin elektronları ile yoğun bir şekilde etkileşir (Görür, 2006).

1.7.2 Beta Bozunumu

Beta bozunumunun üç farklı türü vardır. Bunlar : β^- bozunumu, β^+ bozunumu, Elektron Yakalama Olayı.

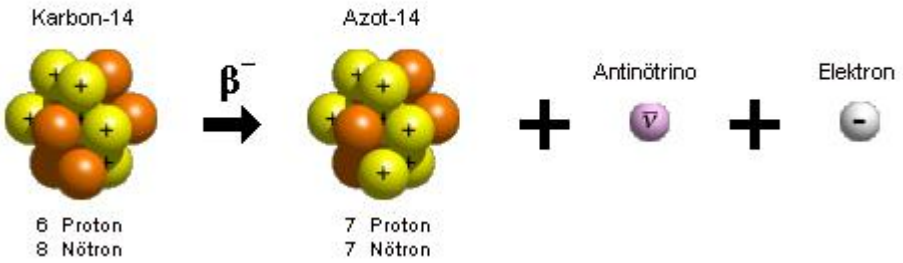
1.7.2.1.β^- bozunumu

Eğer bir radyonüklidin kararsızlığı çekirdekteki nötron fazlalığından ileri geliyorsa, çekirdeğindeki enerji fazlalığını gidermek için nötronlardan birini proton ve elektron haline dönüştürür Denklem (1.32). Proton çekirdekte kalırken, elektron hızla atomdan dışarı atılır.

$$n \rightarrow p + e^- + \overline{n} \qquad (1.32.)$$

Bu yüksek hızlı elektrona beta parçacığı (veya negatron) adı verilir. Bu şekilde beta emisyonu yapan radyonüklidin atom numarası bir artarak kendinden bir sonraki elementin izobar atomuna dönüşür. Bu bozunuma da kütle sayısı değişmediği için izobarik bozunma adı verilmiştir Denklem (1.33) (Tüysüz, Yorulmaz, Bozkurt, 2004).

$$^{A}_{Z}X_{N} \rightarrow {}^{A}_{Z+1}X'_{N-1} + e^- + \overline{n} \qquad (1.33.)$$



Şekil 1.7. β^- Bozunumu (Tüysüz, Yorulmaz, Bozkurt, 2004).

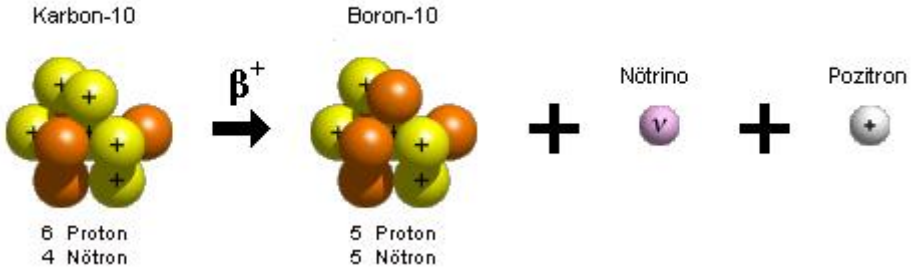
1.7.2.2.β^+ bozunumu

Atomun kararsızlığı nötron azlığından veya proton fazlalığından ileri geliyorsa protonlardan biri nötron ve pozitif yüklü elektrona (pozitrona) dönüşür (Denklem (1.34)).

$$p \rightarrow n + e^+ + n \qquad (1.34.)$$

Nötron çekirdekte kalır, pozitron dışarı fırlatılır. Böylece pozitron yayımlayan radyonüklidin Şekil 1.8 proton sayısı (atom numarası) bir eksilerek kendinden bir önceki elementin (izobar) atomuna dönüşür, fakat kütle sayısı değişmez (Denklem (1.35)) (Tüysüz, Yorulmaz, Bozkurt, 2004).

$$ {}^{A}_{Z}X_{N} \rightarrow {}^{A}_{Z-1}X'_{N+1} + e^{+} + n \qquad (1.35.) $$



Şekil 1.8. β^{+} Bozunumu(Tüysüz, Yorulmaz, Bozkurt, 2004).

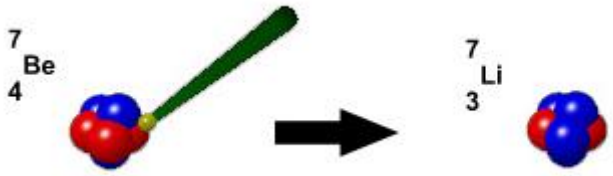
1.7.2.3.Elektron Yakalama Olayı

Çekirdek proton fazlalığından dolayı kararsız ise atomun çekirdeğe yakın (K, L) yörüngelerine yakın elektronlarından biri çekirdek tarafından yakalanır. Elektronla bir proton birleşerek nötron ve nötrino haline dönüşür (Denklem (1.36)).

Bu bozunumda çekirdekten parçacık salınmaz ancak pozitron bozunmasında olduğu gibi proton sayısı bir eksilir. Kütle numarası ise aynı kalır (Denklem (1.37)). Bu olayda boşalan elektron yörüngesine üst yörüngelerdeki başka bir elektron geçer ve bremmstrahlung (frenleme) radyasyonu adı verilen x ışınları yayınlanır.

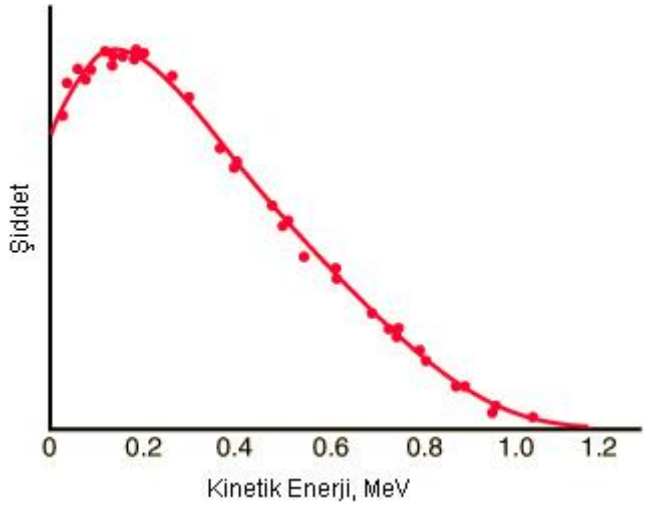
$$ p + e^{-} \rightarrow n + \nu \qquad (1.36.) $$

$$ {}^{A}_{Z}X_{N} + e^{-} \rightarrow {}^{A}_{Z-1}X'_{N+1} + n \qquad (1.37.) $$



Şekil 1.9. Elektron Yakalama Olayına Bir Örnek (^{7}Be) (Tüysüz, Yorulmaz, Bozkurt, 2004).

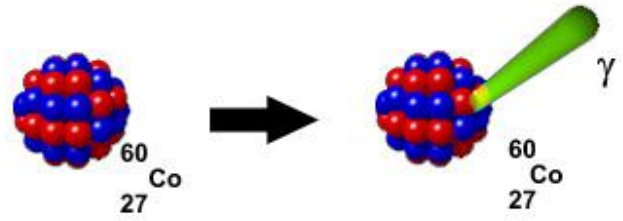
Yukarı da bahsedilen her üç beta bozunumunda da proton ve nötron sayıları bir birim değişmesine rağmen kütle numarası sabit kalır. Ayrıca her üç bozunumda nötrino ve anti-nötrino denilen yüksüz ve kütlesiz parçacıkların yayımlandığı görülmektedir. Bu parçacıkların varlığı ilk olarak Pauli tarafından 1930'da önerilmiş ve daha sonra Fermi tarafından nötrino olarak adlandırılmışlardır. Beta bozunumunda yayımlanan elektronların enerjileri sürekli bir spektruma sahiptir (Şekil 1.10) (Tüysüz, Yorulmaz, Bozkurt, 2004).



Şekil 1.10. β^- Bozunumu Sonrasında Yayımlanan Elektronların Enerji Spektrumlarına Bir Örnek (^{210}Bi) (Krane, 1998)

1.7.3 Gama Bozunumu

Çekirdekteki enerji fazlalığı dolayısıyla veya nüklit bozunma olayı ile radyasyon yayınladıktan sonra çok defa hemen kararlı (temel enerji seviyesi) durumuna geçemez, bozunmada oluşan nüklit hala yarı kararlı durumdadır. Bu fazla kalan uyarılma enerjisini hemen elektromanyetik özellikte olan bir gama radyasyonu şeklinde yayımlar Şekil 1.11. Bu şekilde bozunan yarı kararlı nüklidin atom ve kütle sayılarında bir değişme olmaz, bu nedenle izomerik bozunma adı verilmiştir.



Şekil 1.11. Gama Bozunumu(Tüysüz, Yorulmaz, Bozkurt, 2004).

Gama yayınlanmasının yarı ömrü diğer bozunumlarla kıyaslandığında çok kısadır, genellikle 10^{-9} saniyeden daha küçüktür, ancak saat, hatta gün mertebesinde yarı ömürlü gama yayınlanması da vardır. Enerji spektrumları ise kesiklidir (Tüysüz, Yorulmaz, Bozkurt, 2004)..

1.8. Radyasyonun Madde ile Etkileşimi

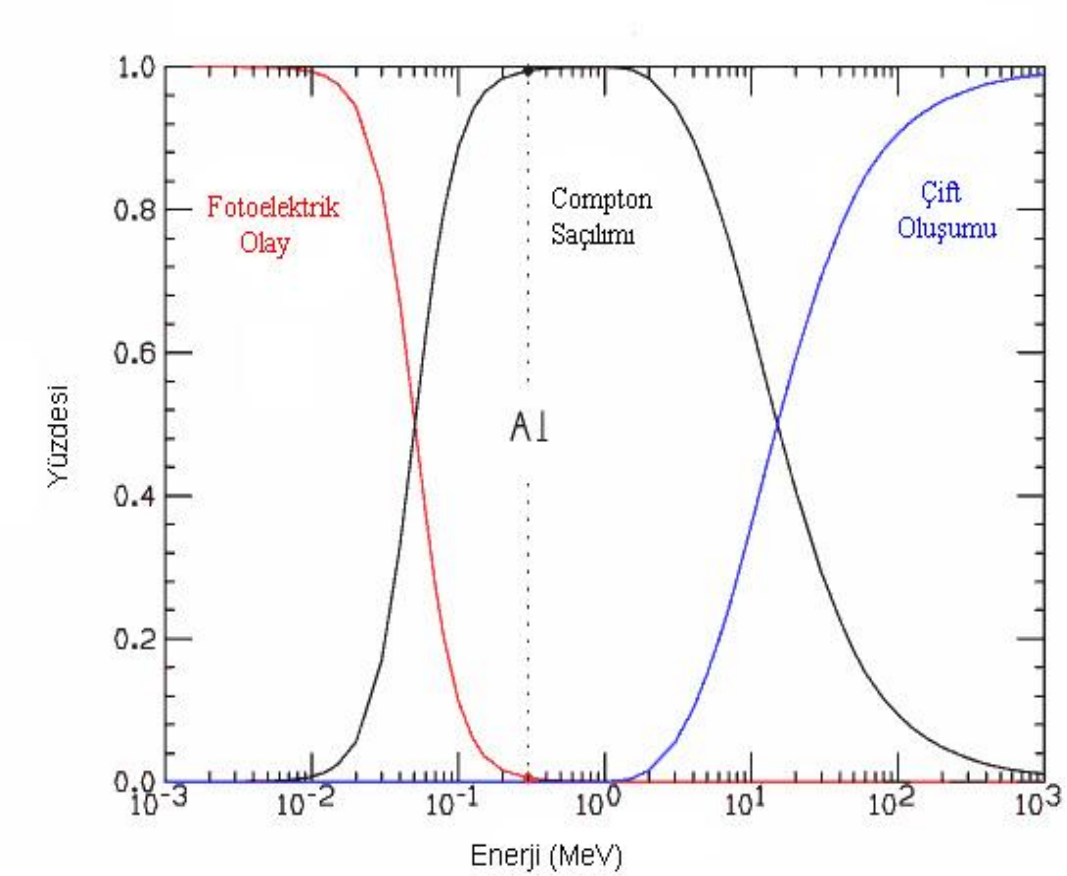
Gama ve X ışını gibi bütün elektromanyetik radyasyonlar birçok olayda parçacıklara benzer davranış gösterdiği için, çok küçük enerji paketleri anlamına gelmek üzere bu radyasyonların birim elemanına foton adı verilmiştir. Radyasyonun belli bir frekansı için bütün paketlerde taşınan enerji aynıdır ve denklem (1.38)'deki gibi ifade edilir.

$$E = h.\nu \qquad (1.38.)$$

Fotonlar, içinden geçtikleri ortamın (maddenin) atomları ile rastgele yaptıkları karşılıklı etkileşimler sonucunda ortama enerji bırakarak absorblanabileceği gibi saçılıma da uğrayabilirler. Elektromanyetik radyasyonun madde ile etkileşiminde rol oynayan en önemli üç olay

- Fotoelektrik Olay
- Compton Saçılımı
- Çift oluşumu

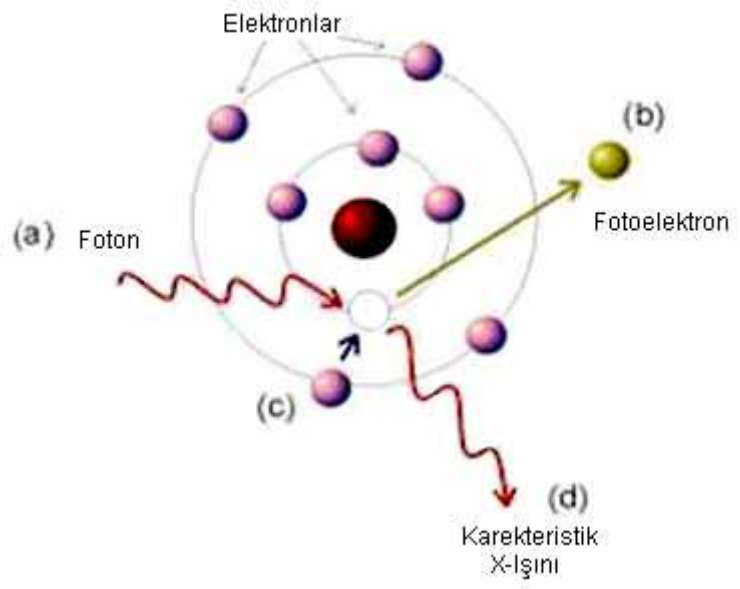
olaylarıdır.



Şekil 1.12. Elektromanyetik Radyasyonun Alüminyum ile Etkileşimi(Krane, 1998)

1.8.1 Fotoelektrik Olay

Düşük enerjili bir foton genellikle içinden geçtiği ortamdaki atomların K veya L yörüngesindeki bir elektrona bütün enerjisini vererek onu pozitif yüklü çekirdeğin bağlayıcı kuvvetinden kurtarır. Dışarıya fırlatılan bu elektrona fotoelektron denir. Bu olay neticesinde oluşan elektron boşluğu dış yörüngedeki başka bir elektron tarafından doldurulur ve bu sırada x ışını yayımlanır. 0,5 MeV'den daha küçük enerjili fotonların ağır elementler tarafından soğurulmasında bu olay oldukça önemlidir.



Şekil 1.13. Fotoelektrik Olay (Lilley, 1991)

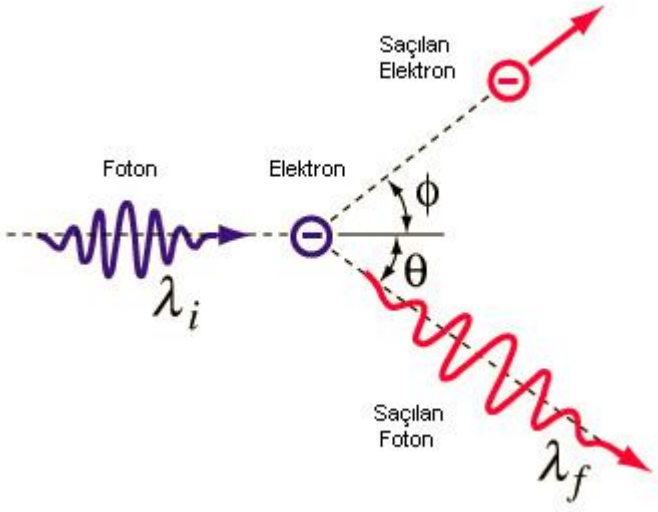
Bu olay sırasında gelen fotonun enerjisinin bir kısmı elektronu bağlı olduğu atomdan koparabilmek için harcanır, geri kalan kısmı ise koparılan elektrona kinetik enerji olarak aktarılır (Denklem (1.39)) (Görür, 2006).

$$h\nu = E_{Bağlanma} + E_{Kinetik} \qquad (1.39.)$$

1.8.2 Compton Saçılımı

Atoma gevşek olarak bağlanmış bir dış yörünge elektronu, enerjisi kendisine kıyasla çok daha büyük olan bir fotonla çarpışması sonucunda meydana gelen olaya Compton Saçılması denir (Şekil 1.14). Elektron kütleli bir parçacık olduğu için fotonun bütün enerjisini absorblaması momentumun korunumu gereği mümkün değildir. Dolayısıyla foton, enerjisinin bir kısmını elektrona aktarıp saçılıma uğrayarak yoluna devam eder. Foton ile elektron arasında oluşan açı fotonun enerjisine bağlıdır. Gelen fotonun dalgaboyu ile saçılan fotonun dalgaboyu arasındaki fark

$$\Delta l = l_f - l_i = \frac{h}{m_0 c}(1-\cos q) \qquad (1.40.)$$



Şekil 1.14. Compton Saçılması (Lilley, 1991)

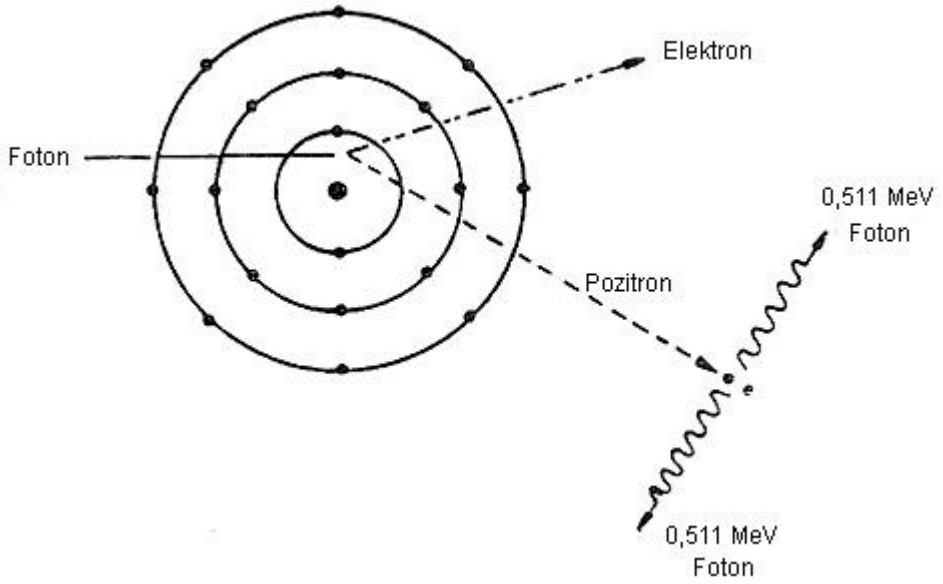
denklem (1.40) bağıntısı ile ifade edilir. Buradaki h/mc Compton dalga boyu olarak adlandırılır. Enerjileri 0,5 - 2,0 MeV arasında olan fotonların hafif elementlerden oluşan ortamlar tarafından soğurulmasında bu olay diğerlerine göre daha önemlidir. Yüksek enerjili fotonlar enerjileri belirli bir seviyeye düşene kadar Compton

saçılışına uğrarlar bu andan sonra da fotoelektrik olayla absorblanırlar. Çünkü sadece Compton saçılımı ile fotonlar tamamen soğurulamazlar (Görür, 2006).

1.8.3 Çift Oluşumu

Eğer, fotonun enerjisi yeteri kadar büyük ise ve bu foton atom çekirdeğinin çok yakınından geçerse, kütlesi olmayan fotonun enerjisinden çekirdek yakınında aynı anda biri negatif yüklü elektron diğeri pozitif yüklü pozitron olmak üzere iki parçacık yaratılır. Böylece elektromanyetik bir dalgadan madde oluşur.

$$h\nu = m_{e+} + m_{e-} + T_{e+} + T_{e-} \qquad (1.41.)$$



Şekil 1.15. Çift Oluşumu(Lilley, 1991)

Teorik olarak böyle bir çift oluşumunun meydana gelebilmesi için, denklem (1.41)'e göre fotonun enerjisinin en az 2×0.511 = 1,022 MeV olması gerekir. Foton enerjisinin daha büyük olduğu durumlarda ise bu enerjinin artakalan kısmı elektron ve pozitrona kinetik enerji olarak aktarılır. Oluşan elektron, atomla serbest elektronlar gibi etkileşirken, pozitron ise bir yörünge elektronu ile birleşir ve zıt

yönlü iki foton salarak yok olur. Bu foton ise fotoelektrik yolla soğurulur. Pratikte çift oluşumu, 2 MeV den daha büyük enerjili fotonlar ve ağır elementler için daha baskındır (Görür, 2006).

1.9 Radyasyon Birimleri

İyonlaştırıcı radyasyonun madde üzerindeki etkisi, radyasyonun maddede ne kadar iyonizasyon meydana getirdiğine bağlıdır. Etki ise radyasyon tipine ve enerjisiyle alakalıdır. Radyasyon etkilerini ve aktiviteyi belirlemek amacıyla çeşitli birimler kullanılmaktadır. ICRU (International Commity of Radiation Units –Uluslar arası Radyasyon Birimleri Komitesi) önce aktivite için Curie (Ci), soğrulan doz için Rad, eşdeğer doz birimi için rem ve ışınlama (poz) için de Roentgen birimlerini kabul etmiştir. 1971 senesinde ICRU MKS birim sisteminin kabulüyle SI birimlerini tanımlamıştır.

Bir radyoaktif madde miktarı saniyede $3{,}7x10^{10}$ bozunma meydana getiriyorsa aktivitesi eski birimlere göre 1 Curie (Ci) olarak tanımlanır. Büyüklüğü nedeniyle genellikle alt birimleri olan µCi ($=10^{-6}$ Ci) ve pCi ($=10^{-9}$ Ci) kullanılır. Yeni birim Becquerel (Bq) olup saniyede 1 bozunma meydana getiren madde miktarı olarak tanımlanır.

Soğrulan doz için eski birim rad (Radiation Absorbed Dose), herhangi bir maddenin gramı başına 100 erg' lik enerji emilmesine eşittir. SI birim sistemine göre soğrulan doz birimi Gray (Gy) olup tanımı 1 kilogramlık herhangi bir maddeye 1 joule enerji verebilen radyasyon dozudur.

Eşdeğer doz birimi, iyonize edici radyasyonların biyolojik madde üzerindeki etkisini belirtmek amacıyla kullanılır. Biyolojik etki radyasyonun geçişte bıraktığı enerjiyle doğru orantılıdır. Eski eşdeğer doz birimi rem' dir (Roentgen Equvalent Man). Yeni birim ise Sievert (Sv)' dir. Boyutu Joule/kg' dir.

Işınlama (doz) birimine SI sisteminde yeni bir isim verilmemiştir. 1 Roentgen (R) Normal şartlarda, yani 760 mmHg ve 0 ^{o}C' de havanın 1 kilogramında $2{,}58x10^{-4}$ Coulomb değerinde artı ve eksi yüklü iyonlar meydana getiren X ışını ve γ miktarı olarak tanımlanır. Bu birim soğurucunun değil radyasyon demetinin niteliği hakkında

bilgi verir. Çizelge (1.2.)' de radyoaktivite birimleri ve aralarındaki ilişki verilmiştir (Atakan, 1990).

Çizelge 1.2. SI Birim Sistemindeki Radyoaktivite Birimleri (Atakan, 1990)

Nicelik	**Ölçülen**	**SI Birimi ve Sembolü**	**Eski Birim**	**Dönüşüm Çarpanı**
Aktiflik	Bozunma hızı	Bq	Ci	$2,7x10^{-11}$
Soğrulan Doz	Enerji soğrulması	Gy	Rad	100
Eşdeğer Doz	Biyolojik etkinlik	Sv	Rem	100
Işınlama	Havadaki iyonlaşma	Roentgen	R	3876

2.ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Bu bölümde, tez konumuzla ilgili daha önce yapılmış çalışmalar özetlenmiştir.

2005' de Güney batı İspanya' da Huelva bölgesinde yapılan çalışmada, bu bölgedeki bazı gübre fabrikalarının ürettiği fosfojips atıkları araştırılmıştır. Bu fabrikalar yıllık yaklaşık 3x109 kg fosfojips atığı üretmektedir. Fosfojipsin Rn–222 yayılımından dolayı Ra–226 ve diğer radyonüklitlerin değerleri diğerlerine oranla daha yüksek konsantrasyona sahip olması fosfojips atığının önemini vurgulamaktadır. Bu atıklar bölgedeki Guadalquivir ırmağının büyük eski bataklık alanındaki zirai toprakların ıslah edilerek iyileştirilmesi için kullanılmaktadır. Bu nedenle, bu alanda fosfojipsin radyoaktif etkisini değerlendirmek, doğal radyonüklitlerin davranışları ve seviyelerini çalışmak ilgi çekici olmuştur. Bu bölgede yapılan çalışmalar şu şekildedir; kanalizasyon suları, topraklar ve sebze dokuları örneklerinde Ra- 226 alfa ve gama spektrometresiyle, Uranyum izotopları ise alfa spektrometresi ve ICP-MS analizi ile ölçülmüştür. Bu işlemler sonucunda kullanılan fosfojipsin Ra- 226 değeri 620±70 Bq/kg bulunmuştur. Kanal (çekilen) suları kontamine olmamış doğal sulara benzer olarak Ra–226 içeriğine sahip ama Uranyum konsantrasyonları büyüklük olarak oldukça yüksektir. Sonuçlarımız sebze dokularında radyonüklitlerin önemli düzeyde olmadığı ve fosfat gübrelerinin iyileştirme uygulamalarından gelen Uranyum içeriğinin önemli olduğunu gösteriyor (R.El Mrabet1 at all).

2005' de Brezilya' da yapılan çalışmada, fosfojipsin atık bir madde olduğundan ve fosfat iyileştirme sanayisi tarafından üretildiğinden bahsedilmiştir. Fosfojips özellikle kalsiyum sülfat dihidrat' tan oluşmasına rağmen, fosforik asit üretiminde kullanılan fosfat kayası kaynağından meydana gelen kirliliğin yüksek düzeylerini içerir. Bu kirlilikler arasında U- 238 ve Th- 232 bozunum serilerinden radyonüklitler olmasından dolayı ilgi çok daha büyüktür. Az bulunan dünya elementleri (REE) ve Ba gibi diğer elementler aynı zamanda fosfojipste zenginleştirilmiştir. Biyo yararlılık sistemi, Brezilya fosforik asit üreticilerinden fosfojips örneklerinin ardışık filtreleme uygulamalarıyla değerlendirildi, Radyum ve

kurşunun çoğunu gösteren ardışık filtreleme sonuçları, demir oksit kısmına yerleştiriliyor ve bu radyonüklitlerin sadece % 13 – 18 i değişken kısmına dağıtılıyor. Sonuç olarak bütün bu elementler fosfojips örneklerinde zenginleştirilmesine rağmen $CaSO_4$ ile birleştirilmedikleri için çevrelenen su ortamı için herhangi bir tehdit oluşturmuyor (A.J.G. Santos at all).

2010' da Latin Amerika' da yapılan çalışmada, fosfojipsin U- 238 ve Th–232 bozunum serilerinden radyonüklidler içerdiğinden bahsedilmiştir. Bu radyonüklitlerin varlığından dolayı birçok ülke tarımda fosfojips kullanımını yasaklamış ancak Brezilya yasaklamayı gerek görmemiştir. Bu çalışmanın ana hedefi toprakta bulunan Ra- 226 (U- 238) ve Ra- 228 (Th- 232) konsantrasyonları üzerine uygulanan fosfojipsin etkisinin Gama spektrometresi HPGe dedektörü kullanılarak değerlendirmektir. Ölçümler sonucunda Ra- 226 ve Ra- 228 için bulunan ortalama değerler sırası ile 387 Bq/kg ve 57 Bq/kg' dır. Sonuçlar, denemenin belirli koşullarda artan fosfojips dozunun önemli bir artışına neden olmadığını göstermiştir (Dias at all).

2010' da Ürdün' de yapılan çalışmada, önce Ürdün Eshidiya madeninde fosfojips stoklarının çevre ekosisteminin olası bozunma sonucunda toksit metaller ve radyonüklitlerle zenginleştirildiği düşünülüyordu. İncelen bu olay için topraklar, alüvyon ve sarı marn ana kaya altında bulunan metaller ve radyonüklitlerin zenginleştirme seviyeleri, dağılım şekilleri belirlendi ve bunlar fosfojips stoklarıyla karşılaştırıldı. Topraktaki Ra- 226, Pb- 210 ve U- 238 pik konsantrasyonları sırasıyla 1.5 pCi/g, 2.0 pCi/g ve 1.1 pCi/g' ye ulaştı. Bu elementlerin konsantrasyonları fosfojipsdeki konsantrasyonlardan yüksek değer gösterirken kirli olmayan topraktaki konsantrasyonlarla benzerdir ve elementlerin konsantrasyonları şu şekildedir, Ra- 226= 18 pCi/g, Pb- 210= 19 pCi/g ve U-238= 4 pCi/g' dır. Toprağın yüzeyinde Cd, Zn ve V elementleri sırasıyla 3 mg/kg, 69 mg/kg ve 62 mg/kg maksimum konsantrasyona sahiptirler ve bu temel konsantrasyonlar kirli olmamış toprak ve fosfojipsten daha düşüktür. Toprakta belirlenen elementlerin değişkenlik derecesi 3 kategoride sınıflandırıldı, yüksek değişkenli elementler Se, Mn, Pb ve Cr, orta (ılımlı) değişkenli elementler Co, Ni, As, Hg, Cu, V ve Zn, düşük değişkenli elementler U, Cd, Pb- 210, Ra- 226 ve U- 238' dır. Genel olarak sonuçlar potansiyel

olarak toksik metaller ve radyonüklitlerin fosfojips stokları ile ilgili topraklarda kirlilik olmadığını ortaya çıkartmıştır ve Eshidiya alanındaki topraklar çevre ekosistemini tehdit eden potansiyel olarak toksik metaller ve radyonüklid içermediği sonucuna varılmıştır (Al-Hwaiti MS at all).

2010' da İspanya' da yapılan çalışmada, fosfat kayası ve fosfojips örnekleri içindeki radyolojik, kimyasal ve morfolojik karakterizasyon özellikleri araştırıldı. Karakterizasyon X-ışın analizleri, (SEM-EDX) enerji-ayırıcıyla, X-ışın kırınımı (XRD), X-ışın floresans (XRF), gama spektrometresi ve saçılan elektron mikroskobu kullanılarak gerçekleştirildi. Sonuçlarımız sadece fosfojipste dihitrat kalsiyum sülfat gösterirken; fosfat kayası flüorapatit, kalsit, perovskit, kuvars, manyetit, pirit ve kaolinitin ana bileşenlerini gösterdi. Fosfat kayalarında Uranyum serileri radyoizotoplarının aktif konsantrasyonu 1640 Bq/kg civarındaydı ve bu Uranyum izotoplarının ayrımı %10 iken Ra- 226 ve Pb- 210 fosfojips içinde %80' e kadar yayılma eğilimindedirler. Ayrıca toksit elementlerinin gösterdiği SEM-EDX sonuçları fosfojipste homojen bir şekilde dağılmıyor bu elementlerin çoğu <20 µm yüksek gözenekli parçacıklarda yoğunlaştırılır ve sızdırması ya da aşınmayla kolay bir şekilde hareketlendirilebilir (Renteria-Villalobos at all).

2008' de Ürdün' de yapılan çalışmada, Ürdün fosfat cevheri, gübre materyali ve fosfojips yığınlarındaki doğal olarak meydana gelen radyonüklitlerin (U- 238, Ra- 226, Ra- 228, Pb- 210 ve K- 40) aktivite konsantrasyonları araştırılmıştır. Sonuçlar fosfojips yığınları ve gübre ürünlerinde radyonüklitlerin kısımlarını gösteriyor ve bu çalışmanın sonucu Ürdün radyolojik harita veri tabanını güçlendirecek ve yakın çevredeki bu sanayi tesisinin radyolojik etkisini değerlendirmede yararlı olacaktır. Pb- 210 un aktivite konsantrasyonu ıslak fosfat kayası örneklerinde 628±7 Bq/kg, ortalama değerle 621±9 Bq/kg ve 637±10 Bq/kg arasında değiştiği bulunurken, gübre örneklerinde 111±14 Bq/kg, ortalama değerle 95±8 Bq/kg ve 129±8 Bq/kg arasında değiştiği ve fosfojips örneklerinde 391± 30 Bq/kg ortalama değerle 364±8 Bq/kg ve 428±10 Bq/kg arasında değiştiği bulunmuştur. Gübre örneklerinde Ra- 226' nın aktivite konsantrasyonu 37±6 Bq/kg ortalama değerle 31±4 Bq/kg ve 42±5 Bq/kg arasında, fosfojips örneklerindeki Ra- 226 aktivite konsantrasyonundan 376±2 Bq/kg ortalama değerle 302±8 Bq/kg ve 442±8 Bq/kg arasında çok küçük değerler

olarak bulunmuştur. Bunun aksine gübre örneklerindeki U- 238 aktivite konsantrasyonu 1033±22 Bq/kg ortalama değerle 1011±13 Bq/kg ve 1061±14 Bq/kg arasında, fosfojips örneklerindeki U- 238 aktivite konsantrasyonundan 22±11 Bq/kg ortalama değerle 14±5 Bq/kg ve 37±7 Bq/kg arasında çok yüksek olduğu bulunmuştur. Bu belirtiler Pb- 210 ve Ra- 226' nın benzer davranışlarla ve fosfojips yığınlarında yoğunlaştığını göstermiştir. Sonuç olarak gübrede U- 238 aktivite konsantrasyonu artarken fosfojips yığınlarında Pb- 210 ve Ra- 226 izotopları artıyor (Al-Jundi at all).

2010' da İspanya' da yapılan çalışmada, Ra- 226, Th- 232 ve K- 40 'ın aktivite konsantrasyonlarının Huelve (İspanya) etrafındaki farklı noktalardan toplanan toprak örneklerinin gama spektrometresi ile ölçülmesi anlatılmaktadır. Aktif fosfojipsdeki Ra- 226 'nın ortalama aktivite konsantrasyonu sırasıyla 647 Bq/kg, 573 Bq/kg ve 83 Bq/kg olarak belirlenmiştir. Th- 232 ve K- 40 için ilgili değerler sırasıyla Th için 8 Bq/kg, 10 Bq/kg ve 25 Bq/kg K için 33, 47 Bq/kg ve 225 Bq/kg olarak belirlenmiştir. Meslek çalışanları ve halk için radyasyon tehlikesinin bir ölçüsü olarak, Ra eşdeğer aktiviteleri yer yüzeyinin 1 m altında doğal radyoniklitlerden dolayı temsilci seviye indisi ve doz oranları değerlendirilmiştir. Fosfojips yığınları için hesaplanan ortalama dış gama radyasyon oranı 0.293 mSv/y, 0.262 mSv/y ve 0.057 mSv/y olarak değerlendirildi, çalışanlar için ise bu değer 20 mSv/y olarak belirtilen uluslar arası sınırın çok altındadır (C. Duenas at all).

1997' de İspanya' da yapılan çalışmada, Huelva kasabası yakınında fosforik asit üretimi için bazı fabrikalara bağlı büyük sanayi tesislerinde aktivite ölçümü yapılmıştır. Fosfojips sülfürik asitle tepkimeye giren fosfat kayaları tarafından üretilmiş fosforik asidin ürünüdür ve yıllık binlerce ton üretilmektedir. Bu miktarın %80 i gyp-stacks olarak adlandırılan sitelerin yakınında depolanmıştır. Fosforik asidin üretimi için bu fabrikalarda işlenen fosfat kayaları 1000 Bq/kg ve 1600 Bq/kg arasında U- 238 aktivitesine sahiptir. Gyp-stack' larda farklı yerlerde toplanan değişik fosfojips örneklerindeki radyonüklit aktivite konsantrasyonları verilip bu alanların 1 m altındaki noktada gama ışınlarından dolayı havadaki ortalama doz oranı belirlenmiştir (J.P.Bolivar at all).

2000’ de Brezilya’ da yapılan çalışmada, Fosfojipsin doğal olarak meydana gelen radyonüklidtleri içeren fosforik asit sanayilerinde yüksek hacimli bir ürün olduğundan bahsedilmektedir. Fosfojips içerisindeki radyonüklitlerin 3 boyutlu dağılımı açısından bu materyallerin karakterizasyonu 2 önemli Brezilya fosforik asit tesislerinin yığınlarından alınan ana örneklerle gerçekleştirilmiştir. Örnekler alfa ve gama spektrometresi kullanılarak U- 238, U- 34, Th- 232, Ra- 226, Ra- 228, Pb- 210 ve Po- 210 radyonüklitleri analiz edilmiştir. Th- 232 ve Ra- 228 için çok yüksek değerler bulunurken, elde edilen U- 238, U- 234, Ra- 226 ve Po- 210 un aktiviteleri fosfojips literatüründe rapor edilen datalar ile karşılaştırılabilmiştir (N.C. Silva at all).

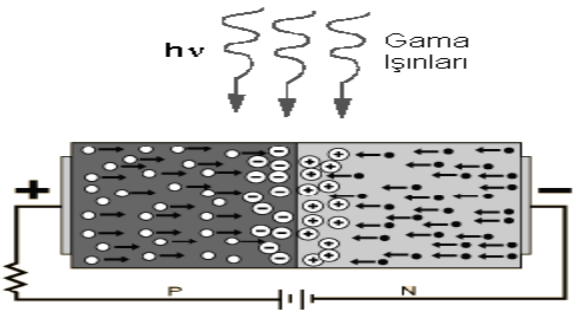
2004’ de Türkiye’ de yapılan çalışmada, fosfatlı gübreler U- 238 gibi ve onun kız ürünleri gibi doğal olarak meydana gelen radyonüklitleri içeren fosfat cevherlerinden üretilmektedir. Fosfojips büyük miktarlarda Ra- 226 ihtiva eder. Fosfojips içerisindeki bu doğal radyonüklit bir gama ışın spektrometresiyle ölçülmüştür. Ra- 226 aktivite konsantrasyonu anlamlı bir değer olan 465 Bq/kg olarak bulunmuştur. Doğal dış gama radyasyon doz oranı ise 1 m^2 lik yüzey alana uygulanmış ve 1- 1.5 kg lık fosfojips seviyesinin 1 m altında 205 nGy/h olarak hesaplanmıştır.

3. MATERYAL VE METOD

3.1. Gama Spektrometresi

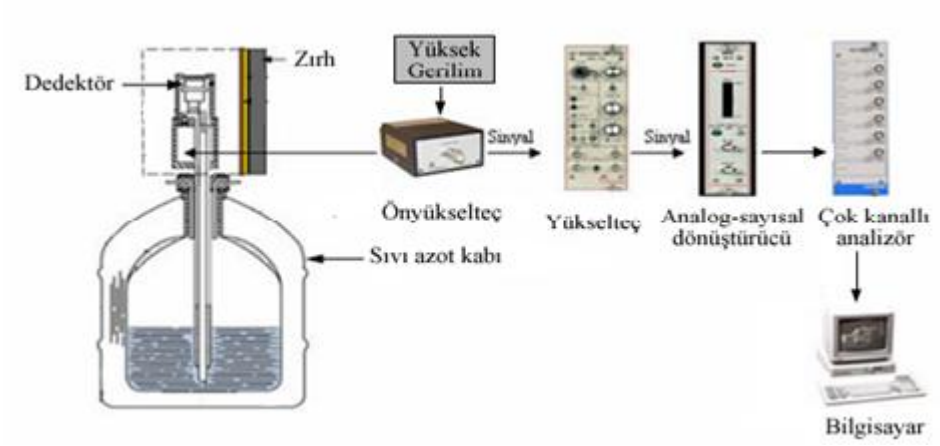
Çevresel örneklerdeki doğal radyoaktif serilere ait radyonüklitlerin belirlenmesi için birçok radyoanalitik yöntem kullanılmaktadır. Bunlardan en yaygın olanları; gama spektrometrisi, alfa spektrometrisi, sıvı sintilasyon sayımı ve orantılı sayaçlar ile α-β toplam sayımı gibi tekniklerdir. Sintilasyon NaI(Tl) dedektörü (verimi yüksek, çözme gücü düşük) ve yarı iletken (HPGe; verimi düşük, çözme gücü yüksek) dedektörlerin kullanıldığı gama spektrometrik yöntem, radyokimyasal ayırma işlemlerine gerek duyulmadan doğrudan, tahribatsız, hızlı ve radyonüklitleri aynı anda ölçme imkânı sağlamaktadır (Gilmore, 2000).

Yarı iletken dedektörler, negatif yük (elektron) veya pozitif yük (deşik) taşıyıcıları fazla olan n ve p tipi materyaller temas ettirilerek elde edilir. Ters besleme altında dedektörde, elektron ve deşikten arınmış bir hassas bölge oluşur. Dedektör veriminin yüksek olması için derin bir hassas bölge, derin hassas bölge elde etmek için de oldukça saf madde gerekir. Bir foton, eklem içinden geçtikçe, bir elektron, valans bandından iletim bandına yükseltilir ve elektron-deşik çifti üretilmiş olur. İçerdeki elektrik alan, elektronları eklemin pozitif, deşikleri de negatif tarafa doğru sürükler. Bu da bir sayıcı ile sayılabilen bir puls meydana getirir. Şekil 3.1'de yarıiletken dedektörlerin basit şematik gösterimi görülmektedir. Yarıiletken dedektörlerin en yaygın kullanılanları, Ge(Li), Si(Li) dedektörleridir.



Şekil 3.1. Yarıiletken Dedektör Şeması (Gilmore, 2000).

Gama spektrometresi, dedektör kristaline ulaşan gama ışınlarının enerjisiyle orantılı olarak oluşan pulsların bir önyükselteç ve yükselteçte işlendikten sonra elde edilen sinyalin analog sayısal dönüştürücüde (ADC) sayısal hale getirilmesi ve çok kanallı analizörün (MCA) hafızasında spektrum olarak kaydedilmesine imkân veren bir sistemdir. Yüksek saflıkta germanyum dedektörlü gama spektrometresi Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Yüksek Saflıktaki Germanyum Dedektörlü Gama Spektrometresi (Solmaz, 2008).

3.1.1. Yüksek Saflıkta Germanyum Yarı İletken Dedektörleri

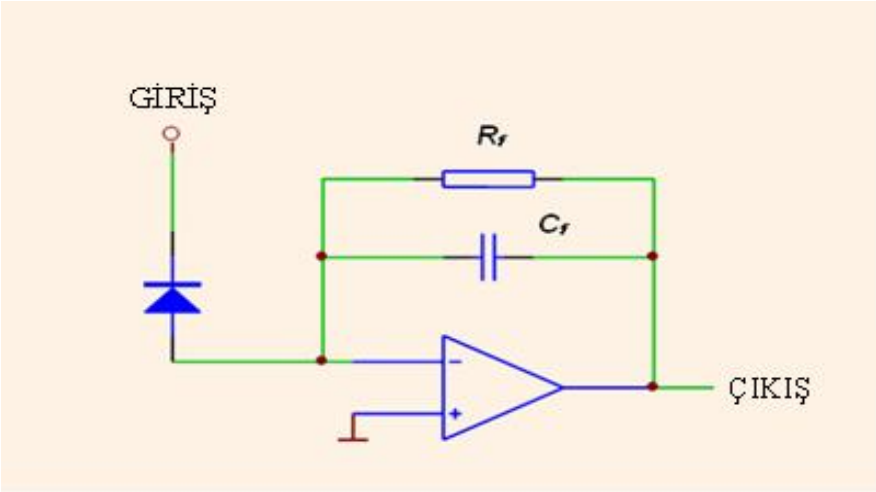
Germanyum dedektörler, iç bölgesi iyonlaşmış radyasyona, özellikle x ışınları ve gama ışınlarına hassas olan P-i-N yapısında yarı iletken diyotlardır. Foton dedektörün boşaltılmış hacmi içerisinde fotonla etkileştiğinde yük taşıyıcıları üretilir ve elektrik alanla P ve N elektrotlarına sürüklenir. Gelen foton tarafından dedektörde depolanan enerji ile orantılı bu yük hassas ön yükselteç ile pulsa dönüştürülür (Gilmore, 2000).

Germanyum düşük bant aralığına sahip olduğu için bu dedektörler yük taşıyıcılarının ısısal üretimini(zıt sızıntı akımı) kabul edilebilir bir seviyeye azaltmak için soğutulmalıdır. Aksi takdirde, sızıntı akımın indüklediği gürültü dedektörün enerji çözünürlüğünü yıkar. 77 K sıcaklığa sahip sıvı azot bu tür dedektörler için yaygın soğutma ortamıdır. Dedektör LN2 kriostata yerleştirilen veya bağlanan

vakum odasına monte edilmiştir. Böylece hassas dedektör yüzeyleri nem ve diğer bulaşmalardan korunur.

3.1.2. Ön yükselteç

Gama-ışınlarının dedektör ile etkileşmesi sonucunda oluşan yük ön yükselteç ile toplanır. Ön yükselteçte puls şekillendirmesi yapılmaz. Dedektöre yüksek empedans vererek yükselteç ve dedektör arasında bir empedans uyuşturucu olarak görev yapar. Ön yükselteçler akıma hassas, gerilime hassas ve yüke hassas olmak üzere farklı şekilde tasarımlanabilirler. Yüksek çözünürlüklü gama spektrometresinde, genellikle kazancın dedektör kapasitansından bağımsız olmasından dolayı **yüke hassas ön yükselteçler** kullanılır (Şekil 3.3) (Gilmore, 2000).



Şekil 3.3. Yüke Hassas Ön yükseltecin Şematik Görünümü (Solmaz, 2008)

Dedektörde oluşan yük, belirli bir süre boyunca C_f kapasitörü ile toplanır. Yük toplandıkça, kapasitördeki gerilim artar. Ön yükselteç girişini bir sonraki pulsa hazırlamak için R_f geri besleme direnci kapasitöre paralel olarak bağlanır. Bu şekilde yapılan ön yükselteçler direnç geri beslemeli ön yükselteç olarak adlandırılır. Çıkış pulsunun doğma zamanı hızlıdır (100–700 ns) ve dedektörün yük toplama

özelliklerine göre çıkış pulsunun azalım zamanı uzundur. Azalım zamanı geri besleme devresinin $R_f C_f$ çarpımı ile verilen zaman sabiti ile belirlenir. Direnç geri beslemeli ön yükselteçlerde iki önemli sorun vardır. Birincisi çıkış pulsunun azalım zamanının uzun olmasından dolayı art arda gelen pulsların üst üste binmesi diğeri ise R_f geri besleme direncinden kaynaklanan gürültüdür. Bu gürültüyü en aza indirmek için direnç değeri büyük seçilir.

3.1.3. Yükselteç

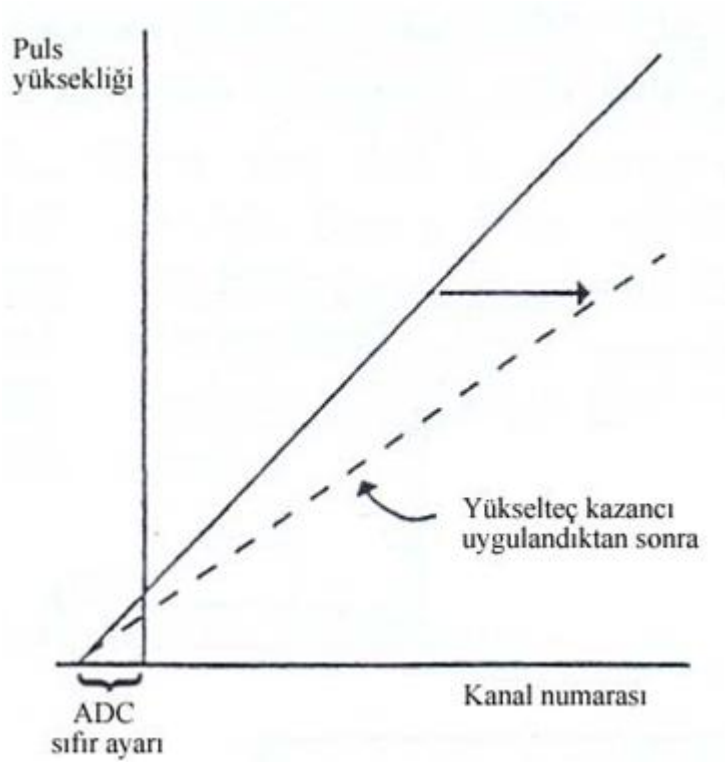
Ön yükselteçten çıkan kuyruklu pulslar, puls yüksekliğinin ölçülmesi için uygun değildir. Bu kuyruklu pulslar yükselteç tarafından büyütülerek daha kısa doğma zamanlı ve çok daha hızlı azalım zamanı olan pulslara dönüştürülürler (Knoll 2000). Şekillendirmenin istenmeyen etkilerini düzeltmek için, yüksek çözünürlüklü gama spektroskopisinde kullanılan yükselteçlerde sıfır-kutup düzeltmesi ve taban seviye düzeltmesi sağlanır.

3.1.4. Çok Kanallı Analizör

Dedektöre gelen gama-ışını enerjisiyle orantılı yükseklikte oluşan pulsların yükselteçte şekillendirilmesinden sonraki işlem bu pulsların çok kanallı analizörde yüksekliklerine göre sıralanmasıdır. Günümüzde 13 bit, 14 bit spektrum kaydetme hafızasına sahip çok kanallı analizörler nükleer spektroskopide yaygın olarak kullanılmaktadır.

Prensipte çok kanallı analizöre gelen pulsun yüksekliği ve bu puls yüksekliğine karşılık gelen kanal numarası arasındaki ilişki doğrusal olmalıdır (Şekil 3.4). Küçük genlikli gürültü pulslarının engellenmesi için, analog-sayısal dönüştürücü sıfır ayarı yapılmasına imkân verir. Çok kanallı analizörde integral ve diferansiyel olmak üzere iki farklı doğrusallık tanımlanır. İntegral doğrusallık, puls yüksekliği ve kanal numarası arasındaki doğrusallıktan sapmanın ölçüsüdür.

Diferansiyel doğrusallık ise kanal genişliklerinin kararlılığını gösterir ve integral doğrusallığa göre daha hassastır.

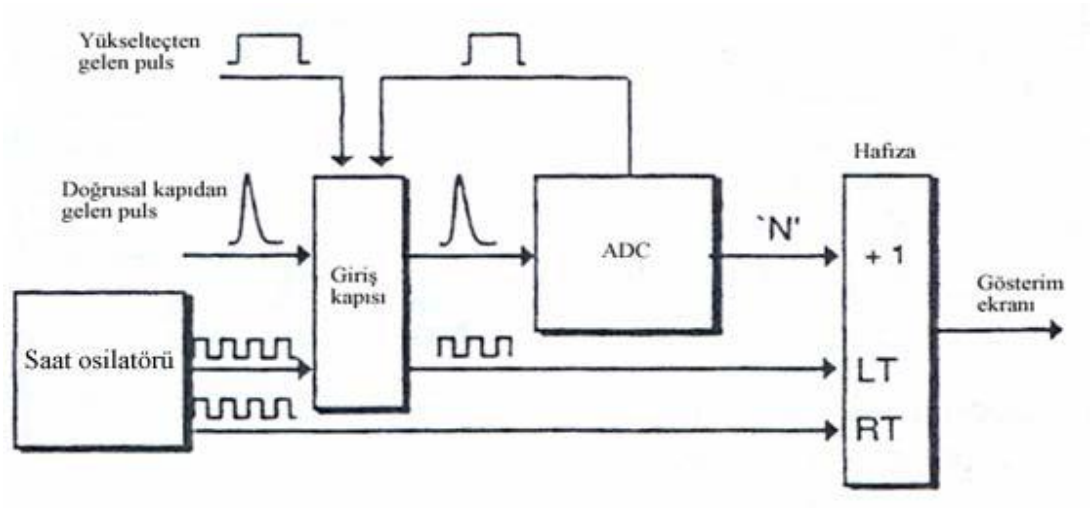


Şekil 3.4. Çok Kanallı Analizörde Kanal Numarası ve Puls Yüksekliği Arasındaki İlişki (Solmaz, 2008)

Spektrum kaydetme hafızası olarak da nitelenen çok kanallı analizörün kanal sayısı 16K'ya kadar çıkmaktadır. Bu hafıza aynı anda veya bölünerek kullanılabilir. Spektrumun elde edilmesinde kullanılacak kanal sayısı dedektörün ayırma gücüne ve ilgilenilen enerji aralığına bağlı olarak seçilir. Genellikle germanyum dedektörlerde yarı yükseklikteki tam genişliğin, YYTG=4 kanala eşit olduğu durum uygun kabul edilir. Germanyum dedektörlerde 1000 keV–1500 keV enerji aralığında YYTG=2 keV olduğundan kanal basına 0,5 keV enerji karşı gelmektedir. Bu nedenle ilgilenilen enerji aralığı 2000 keV'den daha yüksek ise pratikte 4096 veya 8192 kanal seçilmesi gerekmektedir. Bu kanal sayısı, [İlgilenilen enerji aralığı (keV)/YYTG(keV)]x YYTG (kanal) ifadesinden belirlenir (Knoll, 2000).

3.1.5. Analog Sayısal Dönüştürücü

Enerji spektroskopisinde yükselteçten gelen çıkış pulsu (analog sinyal) ADC'de eşdeğer bir sayıya dönüştürülür. Her puls yüksekliklerine göre sıralanır ve uygun bir kanala gönderilir (Şekil 3.5). ADC tarafından kontrol edilen bir giriş kapısı bir önceki pulsun sayısallaştırılması sırasında ADC'ye puls gelmesini engeller. ADC, meşgul olmadığı süre boyunca giriş kapısını açık tutacak mantık pulsu sağlar. Giriş kapısının açık olduğu süre, bu kapıya yönlendirilen saat osilatörü pulsları ile ölçülür. Bu pulsların sayısı sistemin aktif kaldığı sürenin (live time, LT) ölçüsüdür. Giriş kapısına gönderilmeyen saat osilatörü pulslarının sayısı ise geçen gerçek süreyi (real time, RT) belirler. Şekil 3.5'deki sistemin puls işlemediği süreye ise ölü zaman (DT) denilir ve DT= RT-LT ifadesinden hesaplanır (Knoll, 2000).



Şekil 3.5. Analog Sayısal Dönüştürücünün Şematik Görünümü (Solmaz, 2008)

3.1.6. ADC Ayırma Gücü

Kullanılabilecek toplam kanal sayısıdır. Genelde m-bit ADC, 2^m tane kanalı ifade eder. Örneğin 13 bit ADC, 8192 kanalı kaplayacak şekilde bir dönüşüm yapar. Germanyum dedektörlerle kullanılan sistemlerde genellikle 16384 (6K), 8192 (8K)

veya 4096 (4K) kanal bulunur. Ayırma gücü, [İlgilenilen enerji aralığı (keV)/ ADC kanal sayısı] ifadesinden hesaplanır.

3.1.7. ADC Dönüşüm Kazancı

Herhangi bir spektrumun elde edilmesinde kullanılan kanal sayısıdır. Sistemin ayırma gücü 16384 kanal olmasına rağmen, sadece 4096 kanal spektrumda kullanılabilir, bu durumda dönüşüm kazancı 4096 olacaktır ve 0-10V aralığındaki pulslar 1-4096 arasındaki kanallarda kaydedilecektir. Spektroskopi uygulamalarında üç tip ADC kullanılır. Bunlar 1) Wilkinson tipi ADC, 2) Sabit dönüştürme zamanlı ADC ve 3) Ayraçları paralalel bağlı (flash tipi) ADC'dir. Nükleer spektroskopi uygulamalarında yaygın olarak ilk iki tip ADC tercih edilir.

3.2. Gama Spektrometrik Analizler

Ölçümler; Çizelge 3.1'de özellikleri verilen bir kuyu tipi HPGe dedektör (Canberra GX5020) ile yapılmıştır. Dedektör, ortamdaki doğal fon radyasyonunun etkisini en aza indirmek için Canberra Model 747 zırhı ile zırhlanmıştır. Zırh 9,5 mm kalınlığındaki çelik iskelet içinde 100 mm kalınlığında kurşundur. Ayrıca zırhın iç kısmı 72–88 keV enerji aralığındaki Pb X-ışınlarını önlemek amacıyla 1 mm kalınlığında Cd ve Cd X-ışınlarını (24–28 keV) önlemek için 1,6 mm kalınlığında Cu ile kaplanmıştır. Zırhın taban kısmında halka şeklinde bir kurşunla kapatılmış 11,4 cm çapında boşluk vardır. Bu boşluktan dikey geometrili kriyostat ve dedektör kabloları geçmektedir. Zırh içindeki saçılan radyasyonu en aza indirmek için dedektör zırhın merkezine yerleştirilmiştir. Azot soğutması için 50 L hacminde, çift duvarlı (vakumlu) bir sıvı azot kabı kullanılmıştır (Canberre Handbook, 1998).

Çizelge 3.1. Yüksek Saflıkta Germanyum Dedektörün Özellikleri (Canberre Handbook, 1998).

Dedektör modeli	Canberra HPGe Detector
Bağıl verim	%50
Enerji ayırma gücü ve pik/Compton oranı ^{60}Co'ın 1332,5 keV enerjideki yarı maksimumdaki tam genişliği	1,94 keV ve 69.8:1
Dedektör geometrisi ve kristal tipi	Kapalı uçlu, eş eksenli ve p-tipi Ge
Çapı ve yüksekliği	65.5 mm ve 62.5 mm
Pencere malzemesi, kalınlığı	Al, 1 mm ve 15,9 cm^2
Pencereden uzaklık	5 mm
Kriyostat ve azot kabı	Dikey geometrili

3.2.1. Pik Alanı Hesabı

Tek pikin net alanı;

$$S = G - B \quad (3.1.)$$

ile elde edilir.

Burada;

S: Net pik alanı,

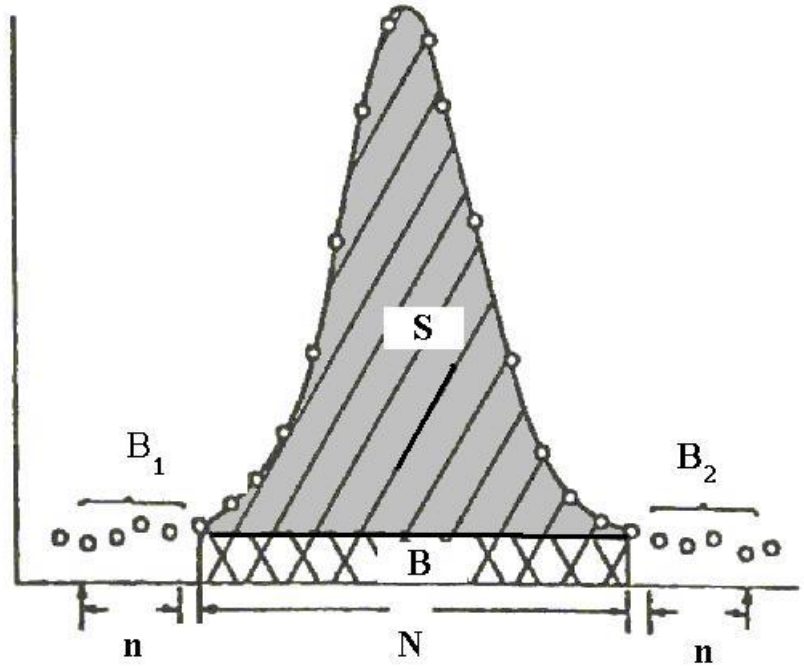
G: İlgili bölgedeki toplam sayım sayısı,

B: Doğal fondur.

Şekil 3.6.'ta gösterilen pikte B alanı,

$$B = \left(\frac{N}{2n}\right)(B_1 + B_2) \quad (3.2.)$$

eşitliğinden elde edilir.



Şekil 3.6. Pik Alanı Hesabı (Solmaz, 2008)

Burada ;

N: İlgili pikteki kanalların sayısı,

n: Pikin sağındaki ve solundaki doğal pik kanal sayısı

$B_1 = \left(\sum_{a=x_1}^{x_1+n-1} x_a \right) \Big/ n$ fotopikin sol tarafındaki doğal fon sayımının ortalaması,

$B_2 = \left(\sum_{a=x_2-n+1}^{x_2} x_a \right) \Big/ n$ fotopikin sağ tarafındaki doğal fon sayımının ortalaması,

Net pik alanındaki belirsizlik Şekil 3.6.'de gösterilen bir fotopik için aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$s = \sqrt{G + \left(\frac{N}{2}\right)^2 \frac{(B_1 + B_2)}{n}} \qquad (3.2.)$$

σ : Standart sapma

G: Pikteki toplam alan (sayım)

N: İlgilenilen pikteki toplam kanal sayısı

n: Seçilen uç kanal sayısı (4 veya 2)

B_1 ve B_2 daha önce tanımlanmıştı. Hesaplanan pik alanındaki sayım istatistiğini yeterli derecede vurgulamak için, "yüzde hatası" aşağıdaki formülle hesaplanır:

$$\%Hata = m\sigma / N_P \qquad (3.3.)$$

N_P: Pik alanı

σ : Standart sapma

m: Güven katsayısı

3.2.2. Standartla Karşılaştırma Yöntemi

Örneklerin aktivitelerinin hesaplanması için alternatif ve güvenilir bir yöntem de, standartla karşılaştırma yöntemidir. Bu yönteme göre, örnekleri ölçeceğimiz geometri ile aynı geometride daha önceden aktivitesi bilinen aktif uranyum, toryum ve potasyum standartları ölçülür, sayım hızları bulunur ve gama spektrumları elde edilir. Daha sonra aynı geometride hazırlanan örnekleri her biri en az 86.000 saniye sayım süresi olacak şekilde ölçülür. Standardın aktivitesi bilindiği için sayım hızları oranından örneklerin aktivitesi kolaylıkla, daha güvenli bir şekilde hesaplanabilir. Spektrumlar ilgili radyonüklitler analizörde seçilerek, bilgisayar ortamına transfer edilmiş, bilgisayar ortamında sayım hızları hesaplanan örnekler standartların sayım hızlarıyla oranlanarak her örneğin özgül aktivitesi hesaplanmıştır.

Bu yöntemin en önemli avantajı, sayım hızları oranlanırken dedektör verimlerinin birbirini yok etmesi ve bunun sonucunda da verime bağlı hataların ortadan kalkmasıdır (Parmaksız, 2004).

A_s: Standartın aktivitesi.

A_x: Örneğin aktivitesi.

m_s: Standardın kütlesi.

m_x: Örneğin kütlesi.

t_s: Standartın sayım süresi.

t_x: Örneğin sayım süresi.

ε : Dedektör verimi.

f_γ : Gama yayınlanma olasılığı.

Sayım / t = Sayım hızı olarak gösterilirse standardın aktivitesi;

$$A_S = \frac{(Sayim)_s / t_s}{ef_g m_s} x1000 \qquad (3.4.)$$

$$A_X = \frac{(\text{Sayim})_x / t_x}{\varepsilon f_\gamma m_x} x1000 \qquad (3.5.)$$

İki bağıntı birbirine oranlandığında;

$$\frac{A_S}{A_X} = \frac{\frac{(\text{Sayim})_s / t_s}{\varepsilon f_\gamma m_s} x1000}{\frac{(\text{Sayim})_x / t_x}{\varepsilon f_\gamma m_x} x1000} \qquad (3.6.)$$

$$\frac{A_S}{A_x} = \frac{(Sayim)_s t_x m_x}{(Sayim)_x t_s m_s} \qquad (3.7.)$$

elde edilir. (Sayım/t) = sayım hızı olduğuna göre, ifade yeniden düzenlendiğinde;

$$\frac{A_S}{A_x} = \frac{(Sayim)_s}{t_s} x \frac{t_x}{(Sayim)_x} x \frac{m_x}{m_s} \quad (3.8.)$$

$$A_s/A_x=(Sayımhızı)_s m_x/(Sayımhızı)_x m_s \quad (3.9.)$$

Buradan A_x çekilirse;

$$A_x = A_s.(Sayım\ hızı)_x.m_s / (Sayım\ hızı)_s.m_x \quad (3.10.)$$

elde edilir.

Çizelge 3.2, Çizelge 3.3, Çizelge 3.4'de bu metotta kullanılan radyoaktif standartlar verilmiştir. Çizelge 3.5'da standartların kütle ve sayım süreleri verilmiştir.

Çizelge 3.2. IAEA/RGU–1 (Uranyum Standardı)

Element	**Derişim**
Uranyum	400± 2 μg/g
Toryum	1 μg/g'dan daha az
Potasyum	20 μg/g'dan daha az

Çizelge 3.3 IAEA/RGTh–1 (Toryum Standardı)

Element	**Derişim**
Toryum	800± 16 μg/g
Uranyum	6,3± 0,4 μg/g
Potasyum	0,02± 0,01 μg/g

Çizelge 3.4 IAEA/RGK–1 (Potasyum Standardı)

Element	**Derişim**
Potasyum	44,8± 0,3 %
Uranyum	0,001 μg/g'dan daha az
Toryum	0,01 μg/g'dan daha az

Çizelge 3.5 Standartların Kütle ve Sayım Süreleri.

	IAEA RGU-1	**IAEA RGTH-1**	**IAEA RGK1**	**IAEA Soil-375**
Sayım Süresi	24154,3	25804,65	5331,525	1309,37
Kütle (g)	130,1	133,6	178,6	172,7302

3.2.3. HPGe Dedektörünün Enerji Kalibrasyonu

Bilgisayar hafızasında toplanan spektrumların analiz edilmesi için, hangi kanalın hangi enerjiye karşılık geldiğinin bilinmesi gerekir. Böylece numunede bulunan radyoaktif çekirdek türleri bulunabilir.

Enerji kalibrasyonu yapılabilmesi için önceden enerjileri bilinen çekirdeklerden oluşmuş standart kaynaklara ihtiyaç vardır. Çizelge 3.6'de genel olarak kalibrasyon için kullanılan standart kaynaklara ait bilgiler verilmektedir. Enerji kalibrasyonu için dedektöre konulan standart kaynağın spektrumu elde edilerek hangi kanallara geldiği tespit edilmiştir.

3.2.4. HPGe Dedektörünün Mutlak Verim Kalibrasyonu

%50 bağıl verimli HPGe dedektörününün verim kalibrasyonunu yapmak için IAEA'dan alınan ve örneklerle aynı geometriye sahip kaplarda hazırlanan RGU (uranyum cevheri), RGTh (toryum cevheri), RGK (K_2SO_4) ve Soil–375 standartları kullanılmıştır.

Çizelge 3.2, Çizelge 3.3, Çizelge 3.4'de bu metotta kullanılan radyoaktif standartlar verilmiştir. Standartlar dedektörün tepesine yerleştirilmiş ve spektrumları elde edilmiştir. Çizelge 3.5' de standartların kütle ve sayım süreleri

Çizelge 3.6. Standart Kalibrasyon Kaynaklarının Özellikleri

Gama Enerjisi (keV)	Radyonüklit	Yarı Ömür	Yayınlanma Olasılığı (%)	Aktivite (µCi)	Saniyedeki Gama Çıkışı	Toplam Belirsizlik (%)
88	Cd-109	462,6±0,7gün	3,63	1,437	1,930	3,1
122	Co-57	271,79±0,09gün	85,6	0,05533	1,752	3,0
159	Te-123m	119,7±0,1gün	84,0	0,06398	1,988	3,0
320	Cr-51	27,706±0,007gün	9,86	1847	6,738	3,1
392	Sn-113	115,09±0,04gün	64,89	0,2767	6,643	3,0
514	Sr-85	64,849±0,004gün	98,4	0,3899	14,200	3,0
662	Cs-137	30,17±0,16yıl	85,1	0,2438	7,677	3,0
898	Y-88	106,630±0,025gün	94,0	0,5472	19,030	3,0
1173	Co-60	5,272±0,001yıl	99,86	0,3055	11,290	3,0
1333	Co-60	5,272±0,001yıl	99,98	0,3055	11,300	3,0
1836	Y-88	106,630±0,025gün	99,36	0,5472	20,120	3,0

verilmiştir. %50 verimli HPGe dedektöründe, standart ile değişik mesafelerden ölçülerek her mesafe için ortalama veriler bulunmuştur Çizelge 3.7. Şekil 3.7'de deneysel olarak bulunan veriler eğriye uyarlanarak dedektörün mutlak verim eğrisi elde edilmiştir.

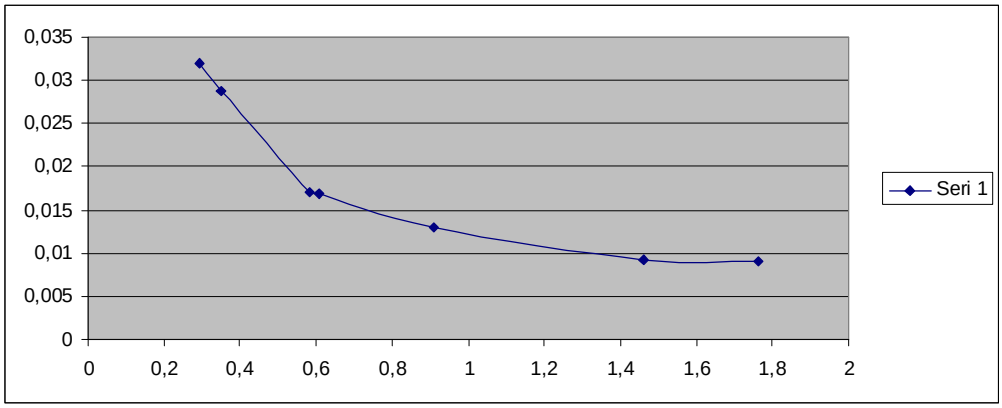
Deneysel olarak bulunan veriler uygun bir fonksiyona uyarlanırsa;

Y= exp(a+b*ln(x)+c*ln(x)^2+d*ln(x)^3) elde edilir. Fonksiyondaki sabitlerin değerleri ise;

a: -4,53 b: $-6,50 \times 10^{-1}$ c: $5,13 \times 10^{-1}$ d: $2,54 \times 10^{-1}$ dir.

Çizelge 3.7. Verim Kalibrasyonu Verileri

Radyoizotop	Enerji (keV)	Deneysel	Verim Fit
Pb-214	295,207	0,031973391	0,032361577
Pb-214	351,925	0,028700041	0,027956064
Tl-208	583,191	0,017090938	0,017142287
Bi-214	609,318	0,0168893	0,01642408
Ac-911	911,16	0,012999298	0,011547408
K-60	1460,83	0,009284926	0,009234669
Bi-214	1764.515	0,009003414	0,009250239



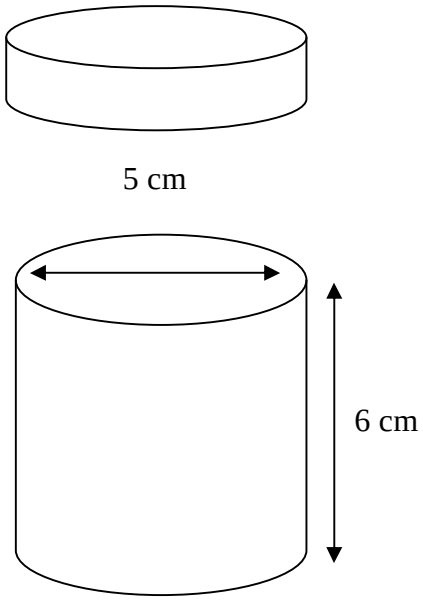
Şekil 3.7. % 50 Bağıl Verimli HPGe Dedektörün Mutlak Verim Eğrisi

3.3. Örneklerinin Toplanması ve Analize Hazırlanması

Mersin ve Bandırma Gübre Fabrikasında üretilmiş olan fosfojips yığınından yaklaşık 20 cm. derinlikten, her biri 0,5 kg olan 20 örnek alınıp torbalara konulmuştur. Bu örnekler Çukurova Üniversitesi Fizik Bölümü Gülten Günel Nükleer Fizik Araştırma Laboratuarı'nda ilk olarak elenmiş sonra fırında 110 $^{\circ}$C sıcaklıkta 24 saatte kurutulmuştur. Tekrar elenen örnekler daha önceden aynı

geometride spektrometrelerin kalibre edildiği plastik kaplar Şekil 3.8. içerisine konularak hassas terazide tartılmıştır.

Daha sonra kapların sızdırmazlığı sağlanarak Ra–226 ve onun ürün çekirdeği olan Rn–222 arasındaki kalıcı dengeyi oluşturmak için 4 hafta bekletilmiştir ve böylece numuneler radyoaktivite ölçme işlemine hazır hâle getirilmiştir.



Şekil 3.8. Kalibrasyon ve Ölçümler için Kullanılan Plastik Örnek Kabı.

3.4. Ölçme İşlemi

Örneklerin aktivitesinin ölçümü iki farklı yöntemle yapılmıştır. Birinci yöntemde örnekler gama spektrometresinde verim kalibrasyonu yapılarak doğrudan ölçmeyle, plastik örnek kaplarında her biri 86.000 saniye sayım süresince spektrumları kaydedildi. Sayım sonuçları çok kanallı analizöre aktarılarak ilgili pikler seçilmiş sonra spektrum verileri bilgisayar ortamına aktarılarak radyonüklitlerin aktiviteleri hesaplanmıştır.

İkinci yöntemde örnekler standartla karşılaştırma yöntemiyle ölçülmüştür. Bu yönteme göre önce aktiviteleri bilinen aktif uranyum, toryum, potasyum ve soil–375 standartları ölçüm yapılacak geometriye göre hazırlanarak dedektöre uygun geometride yerleştirilmiş ve gama spektrumları elde edilmiştir. Standartların sayım

hızları bulunmuş sonra aynı geometride hazırlanan 20 örneğin her biri için 86.000 saniye sayım süresi uygulanmıştır.

Spektrumlarda ilgili radyonüklitler analizörde seçilerek, bilgisayar ortamına transfer edilmiş, bilgisayar ortamında sayım hızları hesaplanan örnekler standartların sayım hızlarıyla oranlanarak her örneğin özgül aktivitesi hesaplanmıştır.

Bu yöntemin en önemli avantajı, sayım hızları oranlanırken dedektör verimlerinin birbirini yok etmesi ve bunun sonucunda da verime bağlı hataların ortadan kalkmasıdır.

Fosfojips numunelerinin analizinde Ra-226 aktivitesi için; 185,7(^{235}U)+186,2(^{226}Ra) keV' lik fotopiki, ^{214}Pb' ün 295,2 keV' lik fotopiki, ^{214}Pb 'ün 351,9 keV' lik fotopiki, ^{214}Bi'ün 609,3 keV' lik fotopiki ve ^{214}Bi'ün 1764,5 keV' lik fotopiki kullanılmıştır. Th-232 aktivitesi için; ^{208}Tl' in 583,2 keV' lik fotopiki ve ^{228}Ac'un 911,2 keV' lik fotopiki kullanılmıştır. ^{40}K aktivitesi için 1460,8 keV' lik fotopik kullanılmıştır. Bu ölçüm sisteminin minimum ölçülebilir aktivitesi aşağıdaki formülle hesaplanmıştır:

$$MDA = \frac{1.64 s_{N_B}}{e.P.t.w} \qquad (3.11.)$$

Burada MDA Bqkg^{-1}(güvenilirlik seviyesi %95), s_{N_B} ilgilenilen bölgede fonun standart sapması ve fon spektrumu için sayımların sayısının karekökünе eşittir, e dedektörün mutlak verimi, P gama bozunumunun mutlak yayınım olasılığı, t saniye cinsinden ölçüm süresi ve kilogram cinsinden kurutulmuş örneğin ağırlığıdır.

4.BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Ölçülebilir en düşük aktivite değerinin hesaplanması

Fosfojips örneklerine ilişkin ölçülebilir en düşük aktivite (ÖEA) değerleri aşağıda verilen eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır (Currie, 1968).

$$\text{ÖEA (Bq kg}^{-1}) = \frac{F_C \cdot \sigma_{NB}}{\varepsilon \cdot P \cdot t \cdot w} \qquad (4.1.)$$

Burada F_C istatistiksel kapsam faktörü (%95 güvenililirlik seviyesinde, 1,64 olarak alınmıştır), σ_{N_B} ise ilgilenilen fotopiklerin arkafondaki (background) standart sapması (arkafon spektrumunda ilgilenilen her bir fotopikteki net sayım değerlerinin karekökü), ε HPGe dedektörünün mutlak verimi, P bozunum başına gama yayınlanma ihtimali, t ölçme süresi (s) ve w kütlesi (kg) dir. I. (M) ve II. (B) Gübre fabrikalarından temin edilen fosfojips örneklerindeki ^{226}Ra, ^{232}Th ve ^{40}K radyonüklitlerine ilişkin ortalama ÖEA değerleri sırasıyla, 0,8, 1,3 ve 2,7 Bq kg^{-1} ve 0,7, 1,2 and 2,8 Bq kg^{-1} olarak hesaplanmıştır.

4.2. Fosfojips örneklerindeki ^{226}Ra, ^{232}Th ve ^{40}K aktivite derişim değerleri mutlak yöntem ile elde edilen aktivite derişim değerleri

^{226}Ra ile ^{222}Rn arasındaki kalıcı dengeyi sağlamak için dört hafta bekletilen fosfojips örneklerindeki ^{226}Ra, ^{232}Th ve ^{40}K aktivite derişim değerleri, aynı geometrideki RGU, RGTh ve RGK standartlarından elde edilen veriler ve Eş. 3.10 kullanılarak hesaplanmıştır. I. (M) ve II. (B) Gübre fabrikalarından temin edilen fosfojips örneklerindeki ^{226}Ra, ^{232}Th ve ^{40}K aktivite derişim değerleri sırasıyla Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2'de verilmektedir.

Çizelge 4.1. I. (M) Gübre Fabrikasından temin edilen fosfojips örneklerinde ölçülen ^{226}Ra, ^{232}Th ve ^{40}K aktivite derişim değerleri

Örnek	**Aktivite Derişimi (Bq kg^{-1} ± 1s)**		
	A_{Ra}	**A_{Th}**	**A_K**
MGF1	160,6 ± 4,6	6,3 ± 2,1	< ÖEA
MGF2	327,1 ± 7,5	23,1 ± 3,0	4,4 ± 0,4
MGF3	312,9 ± 7,2	26,1 ± 3,1	18,5 ± 0,6
MGF4	234,9 ± 5,6	13,4 ± 2,3	8,6 ± 0,6
MGF5	246,0 ± 5,9	14,5 ± 2,4	< ÖEA
MGF6	289,3 ± 6,9	21,4 ± 2,9	15,9 ± 1,1
MGF7	266,5 ± 6,6	11,5 ± 3,5	< ÖEA
MGF8	207,6 ± 5,7	5,1 ± 2,0	< ÖEA
MGF9	209,2 ±5,8	5,9 ± 2,1	< ÖEA
MGF10	247,7 ± 6,2	18,8 ± 2,9	3,2 ± 0,3
Ortalama	250,8 ± 6,2	14,6 ± 2,6	10.1 ± 0,7

Çizelge 4.2. II. (B) Gübre Fabrikasından temin edilen fosfojips örneklerinde ölçülen ^{226}Ra, ^{232}Th ve ^{40}K aktivite derişim değerleri

Örnek	**Aktivite Derişimi (Bq kg^{-1} ± 1s)**		
	A_{Ra}	**A_{Th}**	**A_K**
BGF1	1017,1 ± 21,1	13,9 ± 3,7	26,7 ± 2,0
BGF2	755,0 ± 16,0	6,0 ± 2,1	13,6 ± 1,1
BGF3	909,5 ± 19,1	10,3 ± 2,7	5,1 ± 0,6
BGF4	773,6 ± 16,5	6,4 ± 2,5	4,9 ± 0,6
BGF5	859,3 ± 17,9	14,1 ± 3,0	3,3 ± 0,3
BGF6	799,0 ± 17,0	8,5 ± 2,6	2,1 ± 0,2
BGF7	869,2 ± 18,2	7,8 ± 2,3	< ÖEA
BGF8	599,3 ± 12,9	7,8 ± 2,8	< ÖEA
BGF9	833,8 ± 17,6	5,3 ± 2,4	< ÖEA
BGF10	849,7 ± 18,0	9,8 ± 2,7	4,3 ± 0,6
Ortalama	826,6 ± 17,4	9,0 ± 2,7	8,6 ± 0,8

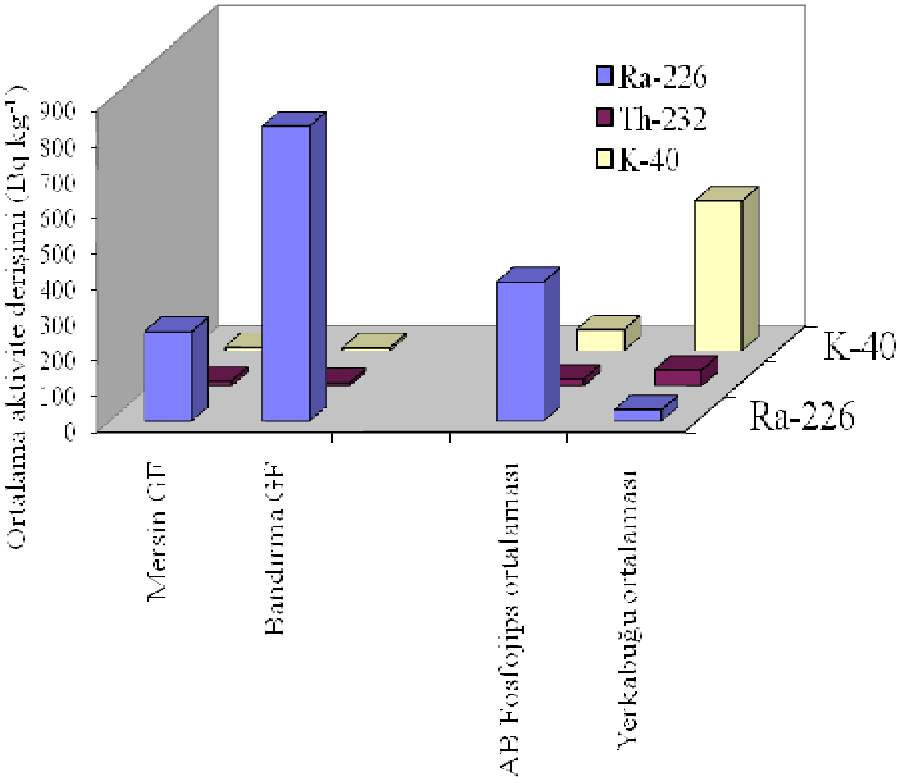
UNSCEAR (2000) raporunda, yer kabuğundaki ^{226}Ra, ^{232}Th ve ^{40}K aktivite derişimlerinin ağırlıklı dünya ortalaması sırasıyla, 32, 45 ve 420 Bq kg-1 olarak verilmiştir (UNSCEAR, 2000). İncelenen örneklerde ölçülen ^{226}Ra, ^{232}Th ve ^{40}K aktivite derişimlerinin ortalama değerlerinin yer kabuğu ortalama değerleri ile karşılaştırılması, Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Şekil4.1'den görülebileceği gibi MGF'dan temin edilen örneklerde ölçülen ^{226}Ra'nın ortalama aktivite derişim değeri, yer kabuğu ortalamasından yaklaşık 8 kat daha büyük iken BGF'dan temin edilen örneklerdeki ortalama aktivite derişim değeri 26 kat daha büyüktür. İncelenen örneklerde ölçülen ^{232}Th ve ^{40}K'un ortalama aktivite derişim değerleri, yer kabuğu ortalamasından önemli ölçüde daha küçüktür.

4.3. Radyum Eşdeğer Aktivite

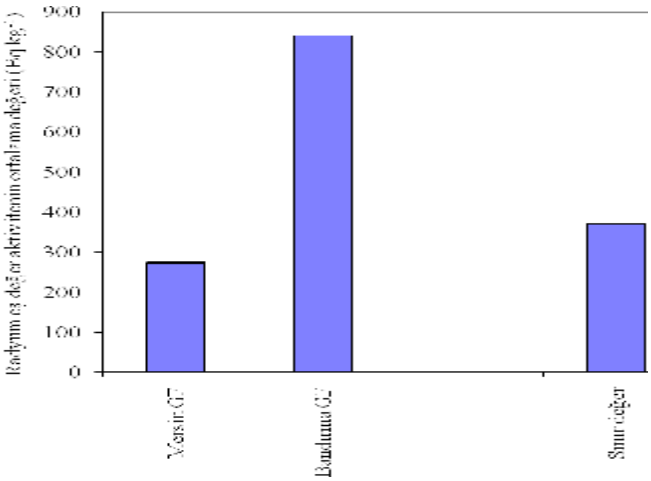
Şekil 4.1'den de görülebileceği gibi yapı malzemesi numunelerindeki doğal radyonüklitler düzgün dağılımlı olmadıklarından, bu radyonüklitlerden kaynaklanan radyolojik tehlikeleri hesaba katmak ve ^{226}Ra, ^{232}Th ve ^{40}K'un aktivite derişim seviyesini temsil etmek amacıyla radyum eşdeğer (Ra_{eq}) aktivite indisi türetilmiştir (Beretka ve ark, 1985). Ra_{eq} aktivite derişimi (veya indisi), aşağıda verilen eşitlik kullanılarak hesaplanmaktadır (Beretka, 1985).

$$Ra_{eq} = A_{Ra} + \left(\frac{10}{7}\right) \cdot A_{Th} + \left(\frac{10}{130}\right) \cdot A_{K} \qquad (4.2.)$$

Burada, A_{Ra}, A_{Th} ve A_K yapı malzemelerindeki ^{226}Ra, ^{232}Th ve ^{40}K'ın sırasıyla, Bq kg^{-1} cinsinden aktivite derişimidir. OECD-NEA tarafından 1979 yılında yayımlanan raporda, ev ve işyeri binalarında kalıcı olarak kullanılmak amacıyla üretilen malzemelere yönelik olarak Ra_{eq} aktivite derişimi için 370 Bq kg^{-1}, müsaade edilen en büyük değeri olarak belirlenmiştir. Ra_{eq} aktivite derişiminin, bu değere eşit veya küçük olması durumda, yapı malzemelerindeki radyonüklitlerin sebep olduğu dış ışınlamadan kaynaklanan yapı içi yıllık etkin doz değerinin 1,5 mSv'in altında olacağı kabul edilmiştir.



Şekil. 4.1. Doğal radyonüklidlerin yerkabuğu ve AB ortalamaları ile MGF ve BGF fosfojips örneklerinin karşılaştırılması



Şekil 4.2. MGF ve BGF fosfojips örneklerinin radyum eş değer aktivite değerlerinin sınır değeri ile kıyaslanması

4.4. Harici ve Dahili Aktivite İndisleri

Yapı malzemelerinden kaynaklanan yapı içi gama radyasyon dozuna; ^{226}Ra, ^{232}Th ve ^{40}K gibi birden daha fazla radyonüklit katkıda bulunduğundan dolayı, bu radyonüklitleri içeren malzemelerin özgül aktivitelerini karşılaştırmak ve uygulama sınırının aşılıp aşılmadığını değerlendirmek amacıyla aktivite indislerinin türetilmesi gereği ortaya çıkmıştır. Aktivite indisinin türetilmesinde, malzemenin tipi ve yapı içindeki miktarı dikkate alınmalıdır. Duvarların kalınlıkları, kapı ve pencerelerin yerleri ve radyonüklitlerin düzgün dağılım göstermesi, farklı doz hızı dağılımlarını oluşturabilir. Bu yüzden farklı modeller kullanılarak farklı indisler elde edilebilir. Bugüne kadar aktivite derişim indisi veya gama indisi (Iγ), temsili (tipik) seviye indisi (Iγr) ve harici indis (H_{ex}) olarak isimlendirilen bir çok aktivite indisi teklif edilmiştir (TAEK, 2009; V. R, 1981; Krisiuk ve ark, 1971; Stranden, E., 1976; Markkanen M., 1995; Report STUK-B- 1995).

Bu çalışmada, Avrupa Komisyonu (AK) tarafından 1999 yılında yayımlanan raporda, tavsiye edilen aktivite derişim indisi dikkate alınmış ve raporda açıklandığı gibi hesaplanmıştır (EC (European Commission), 1999). Aktivite derişim indisi, ev ve iş yeri binalarında kalıcı olarak kullanılmak amacıyla üretilen malzemeler için aşağıda eşitlik kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$I\gamma = \frac{A_{Ra}}{300\ Bq\ kg^{-1}} + \frac{A_{Th}}{200\ Bq\ kg^{-1}} + \frac{A_{K}}{3000\ Bq\ kg^{-1}} \qquad (4.3.)$$

Burada, A_{Ra}, A_{Th} ve A_K yapı malzemelerindeki ^{226}Ra, ^{232}Th ve ^{40}K'ın sırasıyla, Bq kg^{-1} cinsinden aktivite derişimidir. Aktivite derişim indisi, doz sınırına, malzemenin yapı içinde kullanılma şekline ve miktarına bağlı olarak Çizelge 4.3'da verilen değerleri aşmamalıdır. $I\gamma \leq 1$ olduğu durumlarda, yapı malzemesi herhangi bir kısıtlama olmadan kullanılabilir.

Çizelge 4.3. Doz ölçütünün kontrolüne yönelik aktivite derişim indisi değerleri (UNSCEAR, 2000)

Doz ölçütü	**0,3 mSv y^{-1}**	**1 mSv y^{-1}**
Yapısal malzemeler (beton, tuğla, vb.)	$I \leq 0,5$	$I \leq 1$
Yüzeysel olarak ve sınırlı kullanıma sahip diğer malzemeler (kiremit, vb.)	$I \leq 2$	$I \leq 6$

Çizelge 4.4 ve 4.5 MGF ve BGF gübre fabrikaları Iγ değerlerini göstermektedir.

Bu çalışmada I. (M) gübre fabrikasından sağlanan fosfojips numunelerinin ortalama Iγ değeri 0.91±0.06 olarak hesaplanmıştır. Bu durumda I. (M) gübre fabrikası numunelerinin $I\gamma \leq 1$ olduğu için yapı malzemesi olarak kullanılması, herhangi bir radyolojik risk oluşturmamaktadır.

II. (B) gübre fabrikasından sağlanan örneklerin Iγ değeri 2.80±0.09 olarak hesaplanmıştır. Bandırma gübre fabrikası numuneleri $I\gamma \geq 1$ olduğundan dolayı yapı malzemesinde kullanılması radyolojik açıdan uygun değildir.

Uranyum-radyum serisinden radon (^{222}Rn) ve toryum serisinden toron (^{220}Rn), alfa radyasyonu yayınlayan radyonüklitlerdir. Her ikisi de asal gaz olduklarından, yapı malzemeleri gibi gözenekli ortamlarda serbestçe hareket edebilir ve malzemede oluşan ^{222}Rn ve ^{220}Rn'nin bir kısmı yüzeye ulaşır ve ev ve işyeri binalarının içine nüfuz edebilirler. Binalar içindeki en önemli ^{222}Rn ve ^{220}Rn kaynağı, binaların temelinde bulunan topraktır; ancak bazı durumlarda yapı malzemeleri de önemli kaynak hâline gelebilir. Bununla birlikte ^{220}Rn, yarılanma süresinin (55,6 s) çok kısa ve derişiminin de düşük olması sebebiyle genellikle radyolojik değerlendirmelerde dikkate alınmaz.

Ev ve işyeri binalarında kullanılan yapı malzemelerinden kaynaklanan ve solunum yolu ile vücuda giren ^{222}Rn ve kısa ömürlü bozunum ürünlerinin yayınladığı alfa ve beta radyasyonları, iç ışınlamaya sebep olur. Yapı içi radon derişim sınırı, eski binalar için 400 Bq m^{-3} ve yeni binalar için ise 200 Bq m-3 olarak belirlenmiştir (EC , 1990).

Bugüne kadar ^{222}Rn gazının solunmasının sebep olduğu ilave alfa radyasyonunun değerlendirilmesiyle ilgili olarak birkaç indis (alfa-indisleri ve

dâhili indisler (H_{in})) türetilmiştir. Bu çalışmada esas alınan alfa indisi (Iα), aşağıda verilen eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır (Righi ve Bruzzi, 2006; Turhan, 2009).

$$I\alpha = \frac{A_{Ra}}{200\ Bq\ kg^{-1}} \qquad (4.4.)$$

Burada, A_{Ra}, yapı malzemelerindeki ^{226}Ra'nın Bq kg^{-1} cinsinden aktivite derişimidir. Iα > 1 olduğu durumlarda, ev içi ^{222}Rn aktivite derişimi sınırı olan 200 Bq m^{-3} 'ün aşılması olasıdır.

Çizelge 4.4 ve Çizelge 4.5 MGF ve BGF fosfojips örnekleri için Iα değerlerini göstermektedir.

Elde edilen sonuçlara göre Iα değeri hem MGF örnekleri ve hem de BGF örnekleri için > 1 olduğundan dolayı, bu örnekler kullanıldığında, ev içi ^{222}Rn aktivite derişimi sınırı olan 200 Bq m^{-3} 'ün aşılması olasıdır. Dolayısıyla bu malzemelerin sürekli hava solunan yaşam alanlarında (ev, büro, hastane, okul v.s) kullanılması, uygun değildir. Asfalt, baraj, viyadük gibi insan sağlığını doğrudan etkilemeyen alanlarda kullanılması uygun olabilir.

4.5. Soğurulmuş Gama Doz Hızı ve Yapı İçi Etkin Doz Hızı

Yapı malzemelerindeki radyonüklidlerin sebep olduğu dış ışınlamadan kaynaklanan yapı içi soğurulmuş gama doz hızının (D_R) hesaplanmasında, doz hızı dönüşüm kat sayıları olarak; ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K için sırasıyla, 0,92 nGy h^{-1}/Bq kg^{1}, 1,1 nGy h^{-1}/Bq kg^{-1} ve 0,08 nGy h^{1}/Bq kg^{-1} değerleri alınmıştır (AB, 1995; Markkanen, 1995)

Doz hızının yapısal ve kaplama malzemelerindeki radyonüklitlerden kaynaklanan dış ışınlamanın sebep olduğu yapı içi soğurulmuş gama doz hızı,

$$D_R\,(nGy\ h^{-1}) = 0{,}92 \times A_{Ra} + 1{,}1 \times A_{Th} + 0{,}08 \times A_K \qquad (4.5.)$$

eşitliği kullanılarak değerlendirilmiştir. Burada A_{Ra}, A_{Th} ve A_K yapı malzemelerindeki ^{226}Ra, ^{232}Th ve ^{40}K'ın sırasıyla, Bq kg^{-1} cinsinden aktivite derişimidir.

Çizelge 4.4 ve 4.5 MGF ve BGF örnekleri için soğurulmuş gama doz hızı ($D_R(nGyh^{-1})$)değerlerini göstermektedir. MGF örnekleri için ortalama soğurulmuş gama doz hızı 247,60 $nGyh^{-1}$bulunmuştur. BGF örnekleri için ortalama soğurulmuş gama doz hızı 771,06 $nGyh^{-1}$bulunmuştur.

Yer kabuğu kökenli radyonüklitlerden kaynaklanan dış ışınlamanın sebep olduğu yapı içi soğurulmuş gama dozu hızının nüfus ağırlıklı dünya ortalaması, 84 nGy h^{-1} (40 - 200 nGy h^{-1}) olarak verilmiştir (UNSCEAR, 2000).

Bu iki ortalama değer de dış ışınlamanın sebep olduğu yapı içi soğurulmuş gama dozu hızının nüfus ağırlıklı dünya ortalamasını aşmaktadır.

Yapı içi etkin doz hızı (H_R), havada soğurulmuş gama dozundan etkin doza dönüşüm kat sayısı 0,7 Sv Gy^{-1} alınarak ve bireylerin zamanının % 80'nini kapalı mekânlarda geçirdiği kabul edilerek aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmıştır.

$$H_R\,(\mathrm{mSv\ y^{-1}}) = D_R\,(\mathrm{nGy\ h^{-1}}) \times 365{,}25\,\mathrm{gün} \times 24\,\mathrm{h} \times 0{,}8 \times 0{,}7\,\mathrm{Sv\,Gy^{-1}} \times 10^{-6} \qquad (4.6.)$$

Burada, D_R (nGy h^{-1}), Eş. (4)'de verilen soğurulmuş gama doz hızıdır.

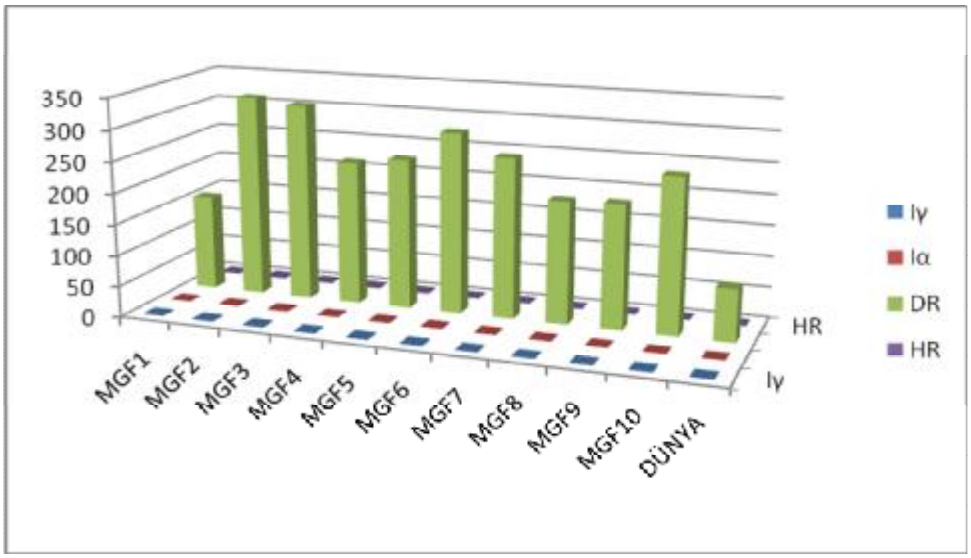
Çizelge 4.4 ve 4. 5 yapı içi etkin doz hızı (H_R) değerlerini MGF ve BGF için ayrı ayrı göstermektedir.

Binalarda kullanılan yapı malzemelerindeki radyonüklitlerden kaynaklanan gama radyasyonu sebebiyle halkın maruz kaldığı yapı içi etkin doz hızı için uygulama sınırı olarak 1 mSv y^{-1} tavsiye edilmiştir (AB, 1999). Raporda, doz hızına yönelik yapılacak kontrollerde, 0,3 - 1 mSv y^{-1} aralığındaki bir değerin esas alınması gereği de tavsiye edilmiştir. AB üye ülkelerinde, radyasyondan korunma açısından 1 mSv y^{-1}'i aşan doz hızları dikkate alınmaktadır. Yapı malzemelerinden kaynaklanan gama radyasyonu, bireyin yapı içi yıllık etkin dozunu en fazla 0,3 mSv y^{-1} kadar artırıyorsa, söz konusu malzemeler radyoaktivite ile ilgili bütün sınırlamalardan muaftır.

Yapısal ve kaplama malzemeleri için değerlendirilen D_R ve H_R sonuçları, Çizelgelerde verilmiştir. Yapısal malzemeler için değerlendirilen D_R'nin ortalama değerleri, çimento, tuğla ve briket hariç ve kaplama malzemeleri için değerlendirilen D_R'nin ortalama değerleri ise granit, seramik, fayans ve karo hariç, ağırlıklı ortalamadan (84 nGy h^{-1}) daha küçüktür. Yapısal malzemeler için değerlendirilen H_R'nin ortalama değerleri, briketin dışında, aşılmaması tavsiye edilen sınır değerden (1 mSv y^{-1}) önemli ölçüde daha küçüktür.

Çizelge 4.4. MGF I_γ, I_α indisleri ve soğurulmuş gama doz hızı ve yapı içi etkin doz hızı değerleri

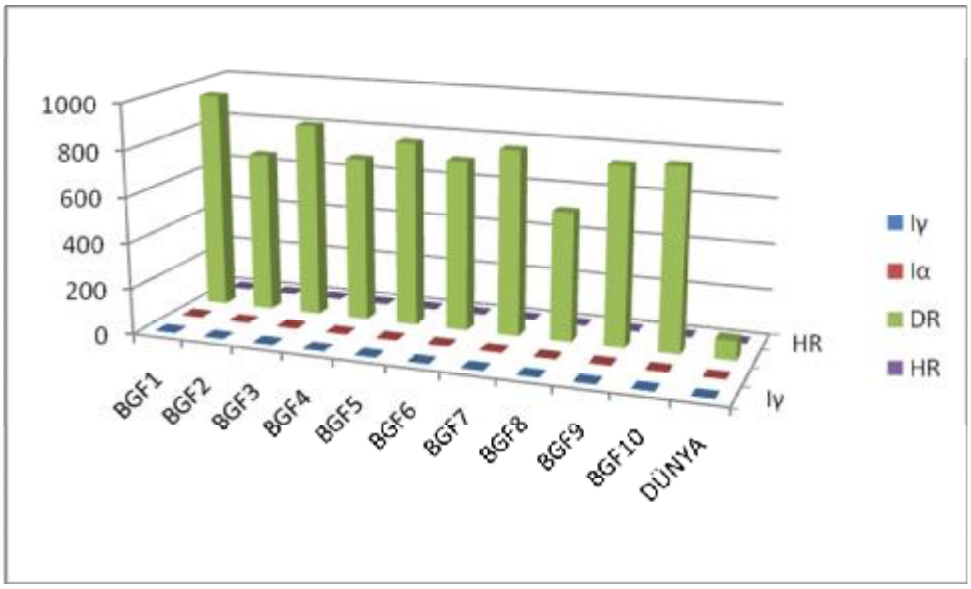
Örnek	**Iγ**	**Iα**	**D_R(nGyh^{-1})**	**H_R(mSv y^{-1})**
MGF1	0,803	0,80	154,682	0,759327
MGF2	1,6355	1,63	326,694	1,603727
MGF3	1,5645	1,56	318,058	1,561334
MGF4	1,1745	1,17	231,536	1,136600
MGF5	1,23	1,23	242,27	1,189293
MGF6	1,4465	1,44	290,968	1,428350
MGF7	1,3325	1,33	257,83	1,265677
MGF8	1,038	1,03	196,602	0,965111
MGF9	1,046	1,04	198,954	0,976657
MGF10	1,2385	1,23	248,82	1,221447
Ortalama	0,9163	1.25	247,60	1,215478



Şekil 4.3. MGF I_γ, I_α indisleri ve soğurulmuş gama doz hızı ve yapı içi etkin doz hızı değerleri

Çizelge 4.5. BGF I_γ, I_α indisleri ve soğurulmuş gama doz hızı ve yapı içi etkin doz hızı

Örnek	**Iγ**	**Iα**	**D_R(nGyh^{-1})**	**H_R(mSv y^{-1})**
BGF1	3,46	5,08	953,158	4,679014
BGF2	2,55	3,78	702,288	3,447503
BGF3	3,08	4,55	848,478	4,165144
BGF4	2,61	3,87	719,144	3,530249
BGF5	2,93	4,29	806,33	3,958241
BGF6	2,70	3,99	744,43	3,654377
BGF7	2,93	4,35	808,412	3,968462
BGF8	2,03	2,99	559,936	2,748703
BGF9	2,80	4,17	772,926	3,794262
BGF10	2,88	4,25	792,848	3,892059
Ortalama	2,80	4,13	771,06	3,785102



Şekil 4.4. BGF I_γ, I_α indisleri ve soğurulmuş gama doz hızı ve yapı içi etkin doz hızı değerleri

4.6. Fosfojipsin X-Işını Spektrometresiyle Elementsel Analizi

Fosfojipslerin elementsel analizi, Sarayköy Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi (SANAEM) de X-Ray Fluorescence Spektrometresi (4 kW gücünde max. 160 mA akıma sahip, PAN alytical marka AXIOS Advance model, dalga boyu dağılımlı detektör) kullanılarak yapılmıştır ve analiz sonuçları çizelge 4.6 ve çizelge 4.7'de verilmiştir.

Çizelge 4.6. I.(M) Gübre Fabrikasından Temin Edilen Fosfojipsin XRF Metoduyla Elementsel Analiz Sonuçları.

1.1.1. Elementler	Derişim (%)
F	1,573
Al	0,095
Si	0,14
P	0,771
S	46,821
Ca	39,51
Fe	0,031
Sr	0,245
Y	0,021
Ce	0,02
(O)	0,333
<C>	Gözlenemedi (yanma kaybı 10,44)

Çizelge 4.7. II.(B) Gübre Fabrikasından Temin Edilen Fosfojipsin XRF Metoduyla Elementsel Analiz Sonuçları.

1.1.2. Elementler	Derişim (%)
<Mg>	0
(O)	0.33
F	2.462
Na	0.014
Al	0.072
Si	0.423
S	39.909
Ca	33.448
Fe	0.024
Sr	0.147
Y	0.009
Ba	0.042
<C>	Gözlenemedi (yanma kaybı 23.12)

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

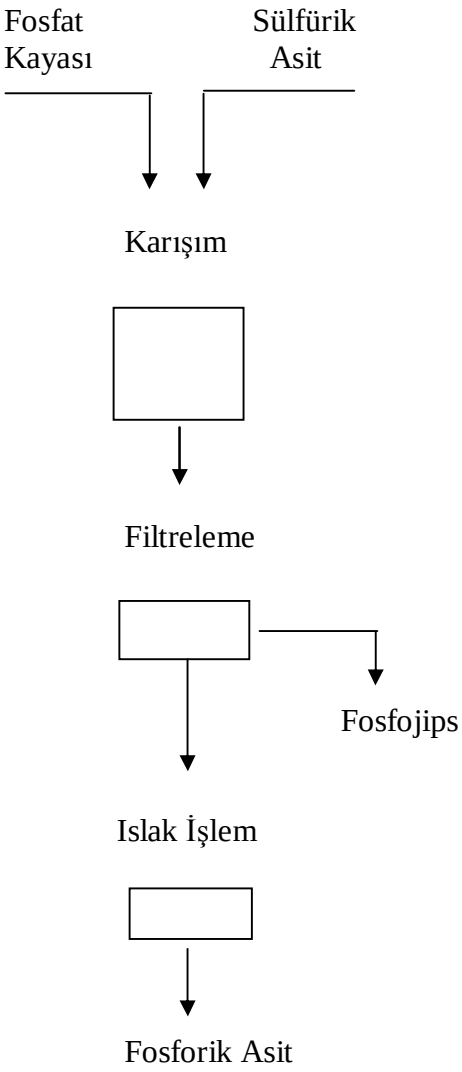
5.1. Verilerin Değerlendirilmesi

Kimyasal işlem sırasında fosfatlı kayaların sülfürik asitle tepkimesi sonucunda, ^{238}U ve ürün çekirdekleri; ^{232}Th ve ürün çekirdekleri arasındaki radyoaktif denge bozulur. Radyonüklitler, fosforik asit veya Fosfojipsteki çözünürlüklerine bağlı olarak ayrılırlar. ^{228}Th ve ^{230}Th'un büyük bir kısmı fosforik aside; ^{226}Ra, ^{210}Pb ve ^{210}Po ise fosfojipse geçmektedir.

Yerkabuğu orijinli uranyum (^{238}U), radyum (^{226}Ra) ve toryum (^{232}Th) doğal radyoaktif çekirdekler, fosfatlı kayalar gibi bazı bölgelerde normal seviyeden daha yüksek oranda bulunurlar. Fosfojips; fosfatlı kayaların sülfürik asitle tepkimesi esnasında ortaya çıkan bir yan üründür.

$$Ca_{10}(PO_4)F_2+10H_2SO_4+20H_2O\rightarrow 10CaSO_4.2H_2O+6H_3PO_4+2HF \qquad (5.1.)$$

Fosfojips; jips ($CaSO_4.2H_2O$), fosfat, florid, organik maddeler ve alkalilerden oluşmaktadır.



Şekil 5.1. Fosforik Asit Üretim İşlemi

Fosfojipsteki gözlenen en aktif radyonüklit ^{226}Ra'dır. Literatürdeki diğer çalışmalarda da farklı orijinli fosfojipsler araştırılmış ve aynı radyonüklit bulunmuştur. ^{226}Ra, fosfatlı kayaların sülfürik asitle reaksiyonu sonucunda atık fosfojipse, toryum ve potasyum ise kimyasal işlemlere, safsızlıklara bağlı olarak genellikle fosforik aside (P_2O_5) geçmektedir.

Çizelge 5.1. Fosfat Kayalarındaki Radyonüklitlerin Fosforik Aside ve Fosfojipse Geçme Oranı (%) (Bolivar ve ark, 2002).

Radyonüklitler	**Fosforik Asit**	**Fosfojips**
^{238}U	97,5	2,5
^{234}U	97,5	2,5
^{232}Th	93,8	6,2
^{230}Th	93,8	6,2
^{228}Th	93,8	6,2
^{210}Po	0,7	99,3
^{226}Ra	0,4	99,6
^{228}Ra	1,4	98,6

Çizelge 5.2. Çeşitli Ülkelerde Üretilen Fosfojips Örneklerinin Aktiviteleri (Silva ve ark, 2001).

Kıta	**Eyalet/Ülke**	**^{226}Ra (Bq.kg^{-1})**
Kuzey Amerika	Florida	907
	Louisiana	1100
	Alberta	910
Güney Amerika	Brezilya	273 - 591
Avrupa	Hollanda	800
	İspanya	508
Afrika	Tanzanya	3219
	Fas	1420

I.Fabrikanın(M) fosfojipsindeki soğurulma doz hızı 247,60 nGy.h^{-1}(yaklaşık 0,117 μSv.h^{-1}) , II. Fabrikanın(B) fosfojipsindeki soğurulma doz hızı 771,06 nGy.h^{-1} (yaklaşık 0,359 μSv.h^{-1}) bulunmuştur. Fosfojips içeriğindeki ^{232}Th ve ^{40}K aktiviteleri ihmal edilecek kadar düşük olduğuna göre doza en büyük katkının radyumdan geldiğini görmekteyiz.

UNSCEAR raporlarına göre dünyadaki ^{238}U, ^{232}Th ve ^{40}K'tan gelen topraktaki ortalama soğurulma doz hızı 43 nGy.h^{-1}'dir (yaklaşık 0,043 μSv.h^{-1})(UNSCEAR, 1988). Fosfojipste hesaplanan gama doz hızı, yeryüzü toprağındaki

dünya ortalama gama doz hızından I. Fabrika için(M) için 5 kat, II. Fabrika için (B) için 17 kat fazla bulunmuştur.

EPA (U.S. Environmental Protection Agency), 1-1,5 kg arasındaki Fosfojipsten yayınlanan radon gazı çıkışı için 2664 $Bq.m^{-2}.h^{-1}$ değerini maksimum limit olarak kabul etmiştir. Buna göre fosfojipslerdeki radon gazı çıkış oranı I. fabrika(M) için 250,18 $Bq.kg^{-1}$ ile 375,27 $Bq.kg^{-1}$, II.(B) için ise 826,55 $Bq.kg^{-1}$ ile 1239,82 $Bq.kg^{-1}$ arasında değişmektedir. Bu durumda I.Fabrika(M)nın örneklerinden yayınlanan radon gazı çıkışı EPA'nın verdiği limitten daha düşükken, II. Fabrikanın örneklerinden yayınlanan radon gazı çıkışı EPA'nın verdiği limitten daha yüksektir. Diğer ülkelerle kıyaslandığında I. Fabrikaya ait değerler limitin altında olduğu için ülkemiz adına sevindiricidir.

EPA'nın tarımda kullanılabilmesi için verdiği aktivite limitinin 370 Bq. kg^{-1} olduğu düşünülürse, tarımda koruyucu tedbirlerle kullanılması (sulandırılarak, radyumun ayrıştırılması vb.), yani aktivitenin 370 Bq. kg^{-1}'lık limitin altına çekilmesi gerekmektedir. Fosfojipsin inşaat sektöründe (yol yapımında vb.) kullanılabilirliğinin ayrıca değerlendirilmesi gerekmektedir. Ancak yinede fosfojips örneklerinin EPA limit değerinin üstünde ^{226}Ra aktivitesi içermeleri, çevresel bir risk kaygısı doğurmaktadır. Bu nedenle, Türkiye'deki tüm Fosforik Asit Gübre Fabrikalarının fosfojips atıklarının daha geniş ölçekli incelenmesinde çevre ve insan sağlığı açısından yarar vardır.

KAYNAKLAR

AL-HWAITI MOHAMMAD S. , RANVILLE JAMES F. Distribution of Potentially Toxic Metal and Radionuclide Contamination in Soils Related to Phosphogypsum Waste Stockpiling in The Eshidiya Mine Jordan, 2010 10 – 88

AL-JUNDI J. , AL-AHMAD N. , SHEHADEH H. , AFANEH F. , MAGHRABI M., GERSTMANN U. , HOELLRIEGL V. , OEH U. Investigations on The Activity Concentrations of U-238, Ra-226, Ra-228, Pb-210 and K-40 in Jordan Phosphogypsum and Fertilizers, 2008 131-16.

A.J.G. SANTOS, B.P. MAZZILLI, D.I.T. FA VARO, AV. PROF. LINEU PRESTES, Partitioning of Radionuclides and Trace Elements in Phosphogypsum and its Source Materials Based on Sequential Extraction Methods, December 2005.

BERETKA, J., MATHEW, P. J., 1985. Natural radioactivity of Australian building materials, industrial wastes and by-product. Health. Phys. 48, 87-95

CANBERRA, MCA Series 95 User's Manual, Canberra Industries, Meriden, CT, U.S.A., (1986).

CURRIE, L. A. Limits for qualitative detection and quantitative determination. Anal. Chem. 40, 586–593 (1968))

C. DUENAS, M. C. FERNANDEZ, S. CANETE, M. PEREZ İspanya Huelva' daki Fosfojips Yığınlarındaki Doğal Radyoaktivitenin Radyolojik Etkileri, 2010.

C. PAPASTEFANOU, S. STOULOS and M. MANOLOPOULOU The Radioactivity of Building Materials, 2004.

DIAS NIVEA M. P. , CAIRES EDUARDO F. , PIRES LUIZ F. , BACCHI MARCIO A. , FERNANDES ELISABETE A. N. Radiological Impact of Phosphogypsum Application in Agriculture, 2010 1265.

EC (European Commission), 1990. Commission recommendation 90/143/Euratom of 21 February 1990 on the protection of the public against indoor exposure

to radon. Official Journal L-80 of 27/03/90. European Commission, Brussels.

EC (European Commission), 1999. Radiation protection 112- Radiological protection principles concerning the natural radioactivity of building materials. Directorate- General Environment, Nuclear Safety and Civil Protection

ERDEM E. , TINKILIC N. , TURAN YILMAZ V. , UYANIK A. , OLMEZ H. , Fertilizer Res. 44, 129 (1996).

FANOS PAPANİCOLAOU, STELLA ANTONİOU, IOANNIS PASHALIDIS Experimental and Theoretical Studies on Physico-Chemical Parameters Affectingthe Solubility of Phosphogypsum, 100 (2009) 854–857.

H. YÜCEL, H. DEMİREL, A. PARMAKSIZ, H. KARADENİZ, İ. ÇAKIR, B. ÇETİNER, A. ZARARSIZ, M. KAPLAN, S. ÖZGÜR, H. KISLAL, M.B. HALİTLİGİL AND İ. TÜKENMEZ Measurement of Natural Radioactivity in Phosphogypsum by High Resolution Gamma Ray Spectrometry, 2004.

KRİSİUK, E. M., TARASOV, S. I., SHAMOV, V. P., SHALAK, N. I., LISA CHENKO E. P., GOMELSKY, L. G., 1971. A study on radioactivity in building materials. Research Institute for Radiation Hygiene, Leningrad.

MARKKANEN M., 1995. Radiation dose assessments for materials with elevated natural radioactivity. Report STUK-B-STO 32, Radiation and Nuclear Safety Authority- STUK, 1995.

M. VILLA, F. MOSQUEDA, S. HURTADO, J. MANTERO, G. MANJON, R. PERIANEZ, F. VACA, R. GARCIA-TENORIO Contamination and Restoration of an Estuary Affected by Phosphogypsum Releases, 408 (2009) 69–77.

N. C. SILYA, E. A. N. FERNANDES, M. CIPRIANI, M. H. T. TADDEİ Brezilya Fosfojipsinin Doğal Radyoaktivitesi, 2010.

PARMAKSIZ A. 2004. Yüksek Çözünürlüklü Gama Spektrometresi ile Fosfojips İçerisindeki Doğal Radyoaktivitenin ölçülmesi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Ankara.

RENTERIA-VILLALOBOS MARUSIA, VIOQUE IGNACIO, MANTERO JUAN, MANJON Guillermo Radiological, Chemical and Morphological Characterizations of Phosphate Rock and Phosphogypsum from Phosphoric Acid Factories in SW Spain, 2010 181–36.

R. EL MRABET, J.M. ABRIL, A. DELGADO, R.G. TENORIO, G. MANJON and R. PERIANEZ Evaluation of The Radioactive Impact of The Phosphogypsum Wastes Used as Amendment in Agriculture Soils, 2005 S335-S341.

SAN MIGUEL EG, J.P. BOLIVAR, GARCIA-TENORIO R. Vertical Distribution of Th Isotope Ratios, Pb- 210, Ra- 226 and Cs- 137 in Sediment Cores from an Estuary Affected by Anthropogenic Releases. Sci Total Environ, 2004(318):143–57.

SOLMAZ NUR A. 2008. Düşük Seviyeli Radyoaktivite Ölçümü için Kuyu-Tipi Ge Dedektörlü Bir Gama Spektrometresinin 40–2000 keV Enerji Aralığında Verim Kalibrasyonunun Yapılması, Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü Ankara.

STRENDEN, E., 1976. Some aspects on radioactivity of building materials. Physica Norvegica 8, 167-177.

TAEK, TR 2008–7. Türkiye' de Kullanılan Yapı Malzemelerindeki Doğal Radyoaktiviteden Kaynaklanan Radyasyon Dozunun Deg˘erlendirilmesi, Ankara, 2009.

VILLA M, MORENO HP, MANJON G. Determination of Ra- 226 and Ra- 224 in Sediments Samplesby Liquid Scintillation Counting, 2005 39 543–50.

ÖZGEÇMİŞ

1982 yılında Adana'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimimi Adana'da tamamladı. 2002 yılında başladığı Selçuk Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümünden 2006 yılında mezun oldu ve aynı yıl Çukurova Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümünde Yüksek Lisans Eğitimine başladı. Halen aynı bölümde Gülten GÜNEL Nükleer Fizik Araştırma Laboratuvarında bilimsel çalışmalarına devam etmektedir.