

T.C.
GİRESUN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ATIK PİL BİLEŞENLERİNİN RADYOAKTİVİTE
SEVİYELERİNİN VE KÜTLE AZALTMA
KATSAYILARININ BELİRLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Öğrencinin Adı SOYADI : Hatice Kübra TAŞKAN

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih :

Enstitü Anabilim Dalı : Fizik Anabilim Dalı

Tez Danışmanı : Dr. Öğr. Üyesi Ahmet ÇELİK

Eylül 2024
GİRESUN

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

**ATIK PİL BİLEŞENLERİNİN RADYOAKTİVİTE
SEVİYELERİNİN VE KÜTLE AZALTMA
KATSAYILARININ BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hatice Kübra TAŞKAN

Enstitü Anabilim Dalı : Fizik

Bu tez 03/10/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.

**Prof. Dr.
Birol ERTUĞRAL
Jüri Başkanı**

**Prof. Dr.
Necati ÇELİK
Üye**

**Dr. Öğr. Üyesi
Ahmet ÇELİK
Üye**

**Prof. Dr.
Bahadır KOZ
Enstitü Müdürü**

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Hatice KÜBRA TAŞKAN

03/10/2024

TEŞEKKÜR

Tez araştırmamın fikir aşamasından tezimin son haline kadar tüm çalışmam boyunca beni dinleyen ve desteklerini esirgemeyen değerli hocam ve tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Çelik’e sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Tüm eğitim hayatım boyunca bana her türlü maddi ve manevi yardımcı olan, hiçbir desteği benden esirgemeyen aileme teşekkür ediyorum.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	I
İÇİNDEKİLER	II
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	IV
ŞEKİLLER LİSTESİ	VI
TABLolar LİSTESİ	IX
ÖZET.....	X
SUMMARY	XI
BÖLÜM 1. GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	4
2.1. Literatür Özeti	4
2.2. Pil ve Genel Yapısı	7
2.3. Pil Çeşitleri.....	8
2.3.1. Şarj Edilemez (Birincil) Piller	8
2.3.2. Şarj Edilebilir (İkincil) Piller	10
2.4. Radyoaktivite	11
2.5. Radyoaktif Bozunum	12
2.6. Elektromanyetik Radyasyonun Madde ile Etkileşmesi	16
2.6.1. Fotoelektrik Olay	17
2.6.2. Compton Saçılması	18
2.6.3. Çift Üretimi	20
2.7. Azaltma Katsayıları.....	21
BÖLÜM 3. MATERYAL VE YÖNTEM	24
3.1. Kullanılan Pil Örnekleri	24

3.2. X ve Gama Işını Ölçüm Sistemi	25
3.3. Radyoaktivite Ölçümleri	26
3.4. Kütle Azaltma Katsayısı Ölçümleri	30
 BÖLÜM 4. ARAŞTIRMA BULGULARI	32
4.1. Radyoaktivite Sonuçları	32
4.2. Kütle Azaltma Katsayısına Ait Bulgular	32
 BÖLÜM 5. TARTIŞMA VE SONUÇ	50
 KAYNAKLAR.....	55
ÖZGEÇMİŞ	59

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

θ	: Saçılma açısı
κ	: Çift üretim tesir kesiti
λ	: Bozunum sabiti
μ	: Lineer azaltma katsayısı
μ/ρ	: Kütle azaltma katsayısı
ρ	: Yoğunluk
σ	: Compton tesir kesiti
τ	: Fotoelektrik tesir kesiti
ϕ	: Eşik enerjisi
A_0	: Başlangıç aktivitesi
ADR	: Soğurulan gama doz hızı
AED	: Yıllık etkin doz değeri
AKÜDER	: Akümülatör ve geri kazanım sanayicileri derneği
$A(t)$	: Galyum Arsenik
c	: Işık hızı
dt	: Sonsuz küçük zaman aralığı
E_f	: Foton enerjisi
h	: Planck sabiti
HPGe	: Yüksek saflıkta germanyum dedektörü
ICRP	: Uluslararası radyoloji korunma komisyonu
m_e	: Elektronun kütlesi
N_0	: Başlangıçtaki radyoaktif çekirdek sayısı
NaI(Tl)	: Talyum katkılı sodyum iyodür dedektör
$N(t)$	: Radyoaktif çekirdeklerin ortalama sayısı
$N(x)$	: Etkileşmeden malzemeyi geçen foton sayısı
PMMA	: Polimetil metakrilat

Si(Li)	: Lityum katkılı silisyum dedektör
TAP	: Taşınabilir pil üreticileri ve ithalatçıları derneği
T_{ort}	: Ortalama ömür
$T_{1/2}$	: Yarı ömür
T_+	: Pozitronun kinetik enerjisi
T_-	: Elektronun kinetik enerjisi



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Compton saçılmasının şematik gösterimi	19
Şekil 2.2. Ge elementinin kütle azaltma katsayılarının foton enerjisine bağlı değişimi	22
Şekil 2.3. Tek enerjili foton demetinin x kalınlıklı plakadan geçişinin gösterimi	23
Şekil 3.1. Radyoaktivite ve radyasyon geçirgenlik ölçümlerinde kullanılan HPGe dedektör sistemi.....	25
Şekil 3.2. ORTEC marka GEM SP7025P4-B model yarı düzlemsel dedektör şeması.....	25
Şekil 3.3. Radyoaktivite ölçümleri için hazırlanan kuru pil örneklerinden bazıları ..	26
Şekil 3.4. HPGe dedektörün enerji kalibrasyon grafiği	27
Şekil 3.5. HPGe dedektörün verim kalibrasyon grafiği.	28
Şekil 3.6. Kütle azaltma katsayıları ölçümü için preslenmiş numune	30
Şekil 3.7. Kütle azaltma katsayısı ölçümleri için tasarlanan dar ışın geometrisi	31
Şekil 4.1. CR2016 – DP1 kodlu düğme pil örneğinin kütle azaltma katsayısının enerji ile değişimi.....	34
Şekil 4.2. CR2016 – DP2 kodlu düğme pil örneğinin kütle azaltma katsayısının enerji ile değişimi.....	34
Şekil 4.3. CR2016 – DP3 kodlu düğme pil örneğinin kütle azaltma katsayısının enerji ile değişimi.....	35
Şekil 4.4. CR2016 – DP4 kodlu düğme pil örneğinin kütle azaltma katsayısının enerji ile değişimi.....	35
Şekil 4.5. CR2016 – DP5 kodlu düğme pil örneğinin kütle azaltma katsayısının enerji ile değişimi.....	36
Şekil 4.6. CR2016 – DP6 kodlu düğme pil örneğinin kütle azaltma katsayısının enerji ile değişimi.....	36
Şekil 4.7. CR2025 – DP7 kodlu düğme pil örneğinin kütle azaltma katsayısının	

enerji ile değişimi	37
şekil 4.8. CR2025 – DP8 kodlu düğme pil örneğinin kütle azaltma katsayısının enerji ile değişimi	37
şekil 4.9. CR2032 – DP9 kodlu düğme pil örneğinin kütle azaltma katsayısının enerji ile değişimi	38
şekil 4.10. CR2032 – DP10 kodlu düğme pil örneğinin kütle azaltma katsayısının enerji ile değişimi	38
şekil 4.11. CR2032 – DP11 kodlu düğme pil örneğinin kütle azaltma katsayısının enerji ile değişimi	39
şekil 4.12. CR2032 – DP12 kodlu düğme pil örneğinin kütle azaltma katsayısının enerji ile değişimi	39
şekil 4.13. CR2032 – DP13 kodlu düğme pil örneğinin kütle azaltma katsayısının enerji ile değişimi	40
şekil 4.14. CR2032 – DP14 kodlu düğme pil örneğinin kütle azaltma katsayısının enerji ile değişimi	40
şekil 4.15. CR2032 – DP15 kodlu düğme pil örneğinin kütle azaltma katsayısının enerji ile değişimi	41
şekil 4.16. CR2032 – DP16 kodlu düğme pil örneğinin kütle azaltma katsayısının enerji ile değişimi	41
şekil 4.17. CR2032 – DP17 kodlu düğme pil örneğinin kütle azaltma katsayısının enerji ile değişimi	42
şekil 4.18. CR2032 – DP18 kodlu düğme pil örneğinin kütle azaltma katsayısının enerji ile değişimi	42
şekil 4.19. CR2032 – DP19 kodlu düğme pil örneğinin kütle azaltma katsayısının enerji ile değişimi	43
şekil 4.20. CR2032 – DP20 kodlu düğme pil örneğinin kütle azaltma katsayısının enerji ile değişimi	43
şekil 4.21. CR2032 – DP21 kodlu düğme pil örneğinin kütle azaltma katsayısının enerji ile değişimi	44
şekil 4.22. Lipo – TP1 kodlu pil örneğinin kütle azaltma katsayısının enerji ile değişimi	44
şekil 4.23. Lipo – TP2 kodlu düğme pil örneğinin kütle azaltma katsayısının enerji ile değişimi	45

Şekil 4.24. Lipo – TP3 kodlu düğme pil örneğinin kütle azaltma katsayısının enerji ile değişimi	45
Şekil 4.25. Lipo – TP4 kodlu düğme pil örneğinin kütle azaltma katsayısının enerji ile değişimi	46
Şekil 4.26. Lipo – TP5 kodlu düğme pil örneğinin kütle azaltma katsayısının enerji ile değişimi	46
Şekil 4.27. KP1 kodlu düğme pil örneğinin kütle azaltma katsayısının enerji ile değişimi	47
Şekil 4.28. KP2 kodlu düğme pil örneğinin kütle azaltma katsayısının enerji ile değişimi	47
Şekil 4.29. KP3 kodlu düğme pil örneğinin kütle azaltma katsayısının enerji ile değişimi	48
Şekil 4.30. KP4 kodlu düğme pil örneğinin kütle azaltma katsayısının enerji ile değişimi	48
Şekil 4.31. KP5 kodlu düğme pil örneğinin kütle azaltma katsayısının enerji ile değişimi	49
Şekil 4.32. KP6 kodlu düğme pil örneğinin kütle azaltma katsayısının enerji ile değişimi	49
Şekil 5.1. Kütle azaltma katsayılarının ortalama değerden sapma oranlarının enerji ile değişimi	52
Şekil 5.2. Kütle azaltma katsayılarının 31 - 81 ve 276 - 1332 keV enerji gruplarındaki değişim oranı.....	53

TABLÖLER LİSTESİ

Tablo 2.1. Şarj edilemeyen pillerin kimyasal bileşenlerinin ağırlık oranları (%).....	9
Tablo 2.2. Şarj edilebilen pillerin kimyasal bileşenlerinin ağırlık oranları (%).....	10
Tablo 2.3. Radyoaktif bozunum türleri ve temel özellikleri	13
Tablo 3.1. Kullanılan pil türleri ve kodları	24
Tablo 3.2. GEM SP7025P4-B model yarı düzlemsel dedektörün fiziksel parametreleri.....	26
Tablo 3.3. Enerji ve verim kalibrasyonu için kullanılan referans kaynaklar	27
Tablo 3.4. Aktivite hesabı yapılan radyoaktif çekirdekler	29
Tablo 4.1. Kuru pil örneklerindeki ^{238}U , ^{232}Th , ^{137}Cs ve ^{40}K aktivite konsantrasyonları (Bq/kg)	32
Tablo 4.2. Pil örneklerinin kütle soğurma katsayıları (cm^2/g)	33
Tablo 5.1. Kuru pillerde soğurulan gama doz hızı ve yıllık etkin doz değerleri.....	51

ATIK PİL BİLEŞENLERİNİN RADYOAKTİVİTE SEVİYELERİNİN VE KÜTLE AZALTMA KATSAYILARININ BELİRLENMESİ

ÖZET

Atık piller üzerine kurgulanan bu çalışma iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci basamakta kuru pil örneklerinde ^{238}U , ^{232}Th , ^{137}Cs ve ^{40}K radyo izotoplarının aktivite konsantrasyonları belirlendi. Örneklerde ^{137}Cs radyoizotopu için herhangi bir aktivite konsantrasyonu belirlenemezken ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K radyoizotopları için ortalama aktivite değerleri sırasıyla $2,42\pm0,22$, $1,71\pm0,15$ ve $12,54\pm0,46$ Bq/kg olarak belirlendi. Pillerin radyoaktif içeriklerinin insan sağlığı üzerindeki etkilerini yorumlamak amacıyla, soğurulan doz hızı (ADR) ve yıllık etkin doz (AED) değerleri hesaplandı. Kuru pil örneklerinin yıllık etkin doz değerlerinin ortalaması 0,003 mSv/y olarak bulundu. Belirlenen yıllık etkin doz değerlerinin ICRP tarafından önerilen 1 mSv/y sınırının oldukça altında olduğu bulundu.

İkinci kısımda ise kuru pil örneklerinin yanı sıra düğme ve lityum polimer pillerin kütle azaltma katsayıları 31 ile 1332 keV enerji aralığında 10 farklı değer için belirlendi. Kütle azaltma katsayılarının belirlendiği enerjileri elde etmek için ^{241}Am , ^{133}Ba , ^{137}Cs ve ^{60}Co radyoaktif kaynaklar kullanıldı.

DeneySEL çalışmaların tamamı ORTEC marka ve GEM-SP7025P4-B model numaralı HPGe dedektör kullanılarak gerçekleştirildi.

Anahtar kelimeler: Atık pil, radyoaktivite, kütle azaltma katsayısı, HPGe dedektör

DETERMINATION OF RADIOACTIVITY LEVES AND MASS ATTENUATION COEFFICIENTS FOR WASTE BATTERY COMPONENTS

SUMMARY

This study, which relates to waste batteries, consists of two parts. In the first part, the activity concentrations of the radioisotopes ^{238}U , ^{232}Th , ^{137}Cs and ^{40}K were determined in dry cell samples. While no activity concentration could be determined for the radioisotope ^{137}Cs in the samples, the average activity values for the radioisotopes ^{238}U , ^{232}Th and ^{40}K were determined to be 2.42 ± 0.22 , 1.71 ± 0.15 and 12.54 ± 0.46 Bq/kg respectively. To interpret the effects of the radioactive contents of the batteries on human health, the absorbed dose rate (ADR) and annual effective dose (AED) values were calculated. The average annual effective dose values of the dry cell samples were determined to be 0.003 mSv/y. It was found that the annual effective dose values determined were well below the limit of 1 mSv/y recommended by the ICRP.

In the second part, the mass attenuation coefficients of button and lithium polymer batteries and of dry cell samples were determined for 10 different values in the energy range from 31 to 1332 keV. ^{241}Am , ^{133}Ba , ^{137}Cs and ^{60}Co were used as radioactive sources to obtain the energies at which the mass attenuation coefficients were determined.

All experimental studies were performed using the ORTEC brand and GEM-SP7025P4-B model number HPGe detector.

Keywords: Waste battery, radioactivity, mass attenuation coefficient, HPGe detector

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Günümüzde kullanılan elektronik cihazların çalışması için gerek duyulan enerji pillerden sağlanmaktadır. Piller; içinde bulunan kimyasal bileşenlerin tepkimeye girmesi sonucu enerji açığa çıkaran aygıtlardır ve elde edilen bu enerji cihazların çalışmasına yardımcı olmaktadır. Piller kullanıldıkları cihazın boyutlarına ve enerji ihtiyacına göre farklı enerji depolama kapasitelerinde, ebatlarda ve geometrik yapıda (düğme, silindir ve dikdörtgen gibi şekillerde) üretilmektedir. Cep telefonlarında kullanılan bataryalar gibi şarj edilebilir pil çeşitleri ve kumanda pilleri gibi tek kullanımlık pil çeşitleri piyasada mevcuttur.

Pil kullanımı arttıkça atık pil oranının da arttığı kaçınılmaz bir gerçek olarak ortada durmaktadır. Her yıl ömrünü tamamlamış çok sayıda pil bilinçsiz bir şekilde çöpe veya çevreye atılarak insan sağlığını tehdit etmektedir. Atık pillerin geri dönüşümü için harcanan çabalar sayesinde aşınma, oksitlenme, patlama ve ihtiva ettikleri kimyasalların toprağa ve suya karışarak ekosistemi etkilemesi gibi sorunlar büyük oranda engellenmektedir. Ayrıca, içerdikleri değerli eser elementlerin tekrar kullanılabilir hale getirilmesi ile ülke ekonomilerine katkı da sağlamaktadır.

Dünya genelinde her yıl çok sayıda atık pil oluşmaktadır. Çevre Koruma Ajansının verilerinde yalnızca Amerika da üç milyardan fazla şarj edilebilen ve şarj edilemeyen pil bilinçsiz bir şekilde çöpe atılmaktadır. Bu miktar dikkate alındığında önemli boyutlarda çevre kirliliğine ve ekonomik kayıplara neden olduğu görülmektedir [1].

Ülkemizde atık pillerin toplanması için TAP (Taşınabilir Pil Üreticileri ve İthalatçıları Derneği) kuruluşu, bitmiş akülerin toplanabilmesi için AKÜDER (Akümülatör ve Geri Kazanım Sanayicileri Derneği) ve TÜMAKÜDER (Tüm Akü İthalatçıları ve Üreticileri Derneği) gibi kuruluşlar faaliyet göstermektedir. TAP kurulduğu günden itibaren yaptığı çalışmalarla toplam 7.000 ton atık pil toplamıştır.

1999 yılında atık pillerin geri dönüşümü için Almanya da kurulan EXİTCOM kuruluşu 2003 tarihinde Türkiye’de de faaliyet göstermeye başlamıştır. Bu kuruluş atık pilleri geri dönüştürerek içindeki kimyasalları yeniden kullanılabilir hale getirmektedir [2,3,4,5].

Doğadaki tüm canlılar ve cisimler elektromanyetik radyasyon yayarlar. Burada önemli olan insan sağlığını olumsuz etkilememesi için alınan doz miktarının düşük olması gerekliliğidir. Doğadaki atom çekirdekleri kararlı veya kararsız bir halde bulunurlar. Kararsız olan çekirdekler ışıma yaparak kendiliğinden izotop atomlarına dönüşürler. Bu olay radyoaktif bozunma (radyoaktivite) olarak adlandırılır [6, 7, 8].

Elektromanyetik spektrumun yüksek enerji bölgesinde bulunan x ve gama ışınları için ışık hızında ilerleyen, durgun kütlesi ve elektrik yükü olmayan parçacıklar olarak düşünüldükleri için foton ifadesi de kullanılmaktadır. Bu yüzden x ve gama ışınları arasında enerjileri dışında herhangi bir ayırım bulunmamaktadır. Yani aynı doğaya sahiptirler. Atomik yörüngelerdeki elektronik ve çekirdek içindeki düzenlemeler sonucu yayınlanan x ve gama ışınları keskin bir spektruma sahipken yüklerin ivmeli hareketi sonucu yayınlanan Bremsstrahlung fotonları sürekli spektruma sahiptir.

X ve gama ışınlarının madde ile etkileşme olasılığının bir ölçüsü olan kütle azaltma katsayısı ve floresans verim gibi temel atomik parametrelerin düşük belirsizliklerle elde edilmesi x ışını floresans analiz tekniklerini içeren element varlığı ve miktarı tayininde belirleyici bir öneme sahiptir. Bu nedenle kütle azaltma katsayılarını sağlayan çeşitli veri tabanları oluşturulmuştur. Bu veri tabanlarına erişim sağlayan geniş kullanıcı kitlesi sonuçlarını kıyaslama imkanı bulmaktadır.

Çalışmanın birinci kısmında, geri dönüşüm kutularından toplanan atık pillerin radyoaktif maddeleri içerip içermediğini belirlemek amacıyla atık piller; sökme, ayırma, parçalama ve toz haline getirme gibi işlemlerden geçerek toz haline getirilip, 100 ml lik plastik kutulara doldurularak ölçümlere hazırlandı. ^{238}U , ^{232}Th , ^{137}Cs ve

^{40}K radyoaktif çekirdeklerin aktivite konsantrasyonları gama spektroskopisi kullanılarak belirlendi.

İkinci kısımda ise atık piller; düğme piller, telefonlarda kullanılan lipo piller ve kuru pil örneklerinin kütle azaltma katsayıları 31 ile 1332 keV enerji aralığındaki 10 farklı enerji değeri için belirlendi. Deneysel ölçümler HPGe dedektör, kurşun kolimatörler ve radyoaktif kaynak kullanılarak tasarlanan dar ışın geometrisinde gerçekleştirildi.



BÖLÜM 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Literatür Özeti

Yeryüzünde bulunan hemen hemen her madde yüksek enerjili elektromanyetik radyasyon grubuna giren fotonları (gama ışını ve x ışını) yayan radyoizotopları içermektedir. Bu yüzden araştırmacılar çeşitli malzemelerin yaydığı radyasyon türünü, miktarını ve insanlar üzerindeki etkilerini araştırmak için çalışmalar gerçekleştirmektedir.

Karalı yaptığı araştırmada, Türkiye’de piyasaya sürülen bazı yerli ve yabancı sigara izmariti ile tütün örneklerindeki ^{210}Po içeriği ve radyoaktivite seviyelerini belirledi [9].

Gelir yüksek lisans tez çalışmasında, Balıkesir’ in Sındırgı İlçesinden aldığı içme suyu örneklerinin radyoaktivite seviyelerini HpGe dedektörü kullanarak gerçekleştirdiği deneyler ile belirledi. Doz hesabı yaparak içme sularından kaynaklı kanser oluşma ihtimallerini araştırdı [10].

Kobyay doktora tez çalışmasında, Doğu Karadeniz bölgesinden alınan maden ve kaynak sularının radyoaktivite konsantrasyonlarını ve yıllık etkin doz değerlerini gama spektroskopisi yöntemini kullanarak hesapladı. Maden suları numunelerinde ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{137}Cs ve ^{40}K radyoaktif izotopları için aktivite konsantrasyonları sırasıyla 129,0, 30,0, 22,0 ve 659,0 mBq/L; kaynak suları için sırasıyla 47,0, 22,6, 17,1 ve 319, 7 mBq/L olarak belirledi [11].

Avacı yaptığı çalışmada, İç Anadolu ve Karadeniz bölgelerinden aldığı 62 kayaç örneğindeki ^{238}U , ^{232}Th , ^{137}Cs ve ^{40}K izotoplarının aktivite konsantrasyonlarını HPGe dedektörü kullanılarak belirledi. Çalışma sonucunda elde edilen veriler bu kayaç

örneklerindeki ^{238}U , ^{232}Th , ^{137}Cs ve ^{40}K izotoplarının aktivite konsantrasyonlarının yüksek olduğunu gösterdi [12].

Çağlar yüksek lisans tez çalışmasında, Kars'ın Sarıkamış ilçesinden aldığı toprak, yem ve bitki örneklerindeki ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{137}Cs ve ^{40}K izotoplarının aktivite konsantrasyonları NaI (TI) sintilasyon dedektörü kullanılarak belirlendi. Toprak numunelerinde ^{238}U , ^{232}Th , ^{137}Cs ve ^{40}K izotoplarının aktivite konsantrasyon değerleri sırasıyla $17,9\pm7,7$, $30,7\pm6,8$, $448,7\pm34,6$ ve $5,8\pm1,0$ Bq/kg olarak buldu. Yem bitkileri ile buğday unu örneklerinde ise ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K aktivite konsantrasyon değerleri sırasıyla $9,9\pm1,6$ ve $34,33\pm6,75$; $4,64\pm2,31$ ve $29,93\pm1,85$; $235,2\pm45,7$ ve $401,5\pm45,1$ Bq/kg olarak buldu [13].

Alemy gerçekleştirdiği çalışmada, Bursa ilinin Keles ve Orhaneli ilçelerinde çeşitli bölgelerden topladığı toprak örneklerinin radyoaktivite seviyelerini NaI(TI) sintilasyon dedektörü kullanılarak belirlendi. Keles ilçesinden alınan toprak örneklerinde ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K radyoizotopları için aktivite konsantrasyonlarını sırasıyla; 46,02, 13,72 ve 148,80 Bq/kg olarak buldu. Orhaneli ilçesinden alınan toprak örneklerinde aktivite konsantrasyonlarını ise sırasıyla 37,35, 9,19 ve 119,76 Bq/kg olarak buldu [14].

Cui ve ark. yaptıkları araştırmada, Çin'de bulunan Daya körfezinden alınan çökeltiler, deniz suyu ve biyota örneklerinin radyoaktivite seviyelerini hesapladılar. Yapılan araştırma sonucunda deniz suyu ve çökeltisinde radyoaktivite seviyeleri normal seviyede çıkarken osteomugil ophuyseni türündeki balıkta diğer türlere oranla radyoaktivite seviyeleri daha yüksek çıkmıştır [15].

Hegati ve ark., dört farklı serada tatlı biber, acı biber, salatalık ve domates yetiştirmişlerdir. Bu bitkilerin meyvelerinden, bitki gövdelerinden, kullanılan sularından ve topraklarından aldıkları 40 örnekteki radyoaktivite konsantrasyonlarını HPGe dedektörü kullanarak belirlemişlerdir [16].

Shvarts ve ark., St. Petersburg bölgesinden aldıkları yeraltı suyunun radyoaktivite seviyelerini ölçmüşlerdir. Ölçüm sonuçlarına göre kuyu sularının kalite standartlarının üzerinde olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Akifer tabakasının güney bölgesindeki çıkan acı su kaynağının radyoaktivite seviyesi, kuzey bölgesinden çıkan tatlı su kaynağının radyoaktivite seviyesinden daha fazla olduğu görülmüştür [17].

Hasabelnaby ve ark., Mısırda yaptıkları bir araştırmada diş tedavisinde kullanılan feldispat ve zirkonya (ZrO_2) maddelerinden 40 örnek alarak radyoaktivite seviyelerini belirlemişlerdir. NaI(TI) dedektörünü kullanılarak ölçümler gerçekleştirildi. Elde edilen sonuçlarda diş yapımında kullanılan feldispat ve zirkonya maddelerinde radyoaktivite seviyeleri normal değerler arasında çıkmıştır [18].

Baltaş yaptığı araştırmada, barit agregadan oluşan, farklı oranlarda 43 adet örnek kullanarak segregasyon dirençleri ve kütle azaltma katsayılarını hesaplamıştır. ^{137}Cs ve ^{60}Co radyoizotopları kullanılarak yapılan deney sonuçları XCOM programından elde edilen teorik değerlerle karşılaştırılmıştır [19].

Damla doktora tez çalışmasında, Türkiye’ de inşaat yapımında kullanılan çimento, kireç, alçı, gazlı beton, tuğla, kum, kiremit ve mermer örneklerinin kütle azaltma katsayıları ve radyoaktivite seviyeleri gama spektroskopisi kullanılarak belirlemiştir. XCOM programı kullanılarak deneysel kütle azaltma katsayıları teorik değerleri ile karşılaştırılmıştır [20].

Yavuz yaptığı araştırmada, Au/n_Si/n+Si/Al, n-tipi Si, n-tipi GaAs ile p-tipi GaAs yarı iletken örneklerin kütle azaltma katsayılarını ^{241}Am radyoaktif kaynak kullanarak belirledi. Çalışmada elektrik alanın yarıiletken malzemenin kütle azaltma katsayıları üzerine etkisini incelemiştir [21].

Ladhaf ve ark., 6 farklı karbonhidratın kütle azaltma katsayılarını hesaplamışlardır. Ölçümleri 122 ile 1330 keV enerji aralığı için NaI(TI) dedektörü kullanarak

gerçekleştirmişlerdir. Bulunan ölçüm sonuçları XCOM programındaki verilerle karşılaştırıldı [22].

Hatipoğlu yüksek lisans tez çalışmasında, Kırklareli mermeri, kalker tozu ve alüminyum örneklerinin kütle azaltma katsayılarını, ^{137}Cs ve ^{60}Co radyoaktif kaynaklarından yayınlanan foton enerjileri için belirledi [23].

Gökçe, $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ ile $\text{Bi}_{1,7}\text{Pb}_{0,3}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ süperiletken numunelerin farklı katı hal formlarının kütle azaltma katsayılarını Si(Li) dedektör kullanarak yaptığı deneylerle hesaplamıştır [24].

Şengül, biyomedikal malzeme yapımında kullanılan P1 koduyla Poli Metil Metakrilat (PMMA), P2 koduyla Cam İyonomer Siman malzemelerinin lineer azaltma katsayılarını belirledi. Deneysel çalışmaları $3'' \times 3''$ NaI(Tl) dedektörü kullanarak 511 ile 1332 keV aralığındaki 6 farklı enerji değeri için gerçekleştirmiştir. Sonuçları GAMOS 6.2 programı ve XCOM programından elde edilen teorik veriler ile karşılaştırmıştır [25].

Singla ve ark., toprağın kütle azaltma katsayısını ve toprak kütle yoğunluğunu belirledi. Araştırmada toprak derinliğinin ve dokusunun kütle zayıflama katsayısına etkisini incelediler. Ölçümler NaI(Tl) dedektörü kullanılarak ^{137}Cs , ^{133}Ba , ^{60}Co kaynaklarından elde edilen 0,356, 0,662 ve 1,332 MeV enerji değerleri için gerçekleştirildi. Çalışmada, alt derinliklerden alınan örneklerin kütle azaltma katsayılarının üst derinliklere oranla daha büyük olduğu bulundu [26].

2.2. Pil ve Genel Yapısı

Piller elektrokimyasal reaksiyonlar yoluyla kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürerek enerjiyi depolayan ve taşınabilen cihazlardır. Bir pilin üç temel bileşeni vardır. Bunlar: anot, katot ve elektrolitlerdir. Anotlar negatif elektrolit, katotlar ise pozitif elektrolittir. Pillerde enerji azalması (deşarj) boyunca yükseltgenme tepkimesi anotta meydana gelmektedir. Tepkime sonunda dış devreye elektron verir. Katotta

ise enerji azalması (deşarj) boyunca indirgenme tepkimesi meydana gelmektedir. Katotta ise dış devreden gelen elektronlar toplanır. Elektrolitler enerji artması ve enerji azalması boyunca iyonların akışını sağlar. Elektrolitler katı veya sıvı iletken malzemelerden oluşmaktadır. Şarj edilebilen pillerde katot dış devreye elektron verir, anot ise dış devreden elektron alır. Elektrotlardaki tepkime sonucunda potansiyel fark oluşur ve gerilim olarak adlandırılır [27,28].

Pil hücrelerinin negatif elektronu metal anottan, pozitif elektronu metal oksit katyondan ve bu elektrolitler arasında kimyasal reaksiyonu sağlayan elektrolitten oluşur. Ayrıca pillerde ayırıcılar ve dış kılıf bulunmaktadır [29,30].

2.3. Pil Çeşitleri

Piller genel olarak şarj edilemeyen (birincil) ve şarj edilebilen (ikincil) piller olmak üzere iki başlık altında incelenebilir.

2.3.1. Şarj Edilemez (Birincil) Piller

Çinko karbon, alkali, gümüş oksit, çinko hava, cıva oksit ve lityum piller bu sınıfa dahildir.

Çinko karbon pillerin dikdörtgen veya silindir şeklinde türleri vardır. Radyolar, TV kumandası, oyuncaklar gibi düşük akım gerektiren cihazlarda kullanılır. Çinko karbon pillerde iki farklı elektrolit bileşik kullanılmaktadır. Bunlar: amonyum klorür veya çinko klorürdür. Ucuz olduğu için en çok tercih edilen pil çeşitlerindendir, kısa ömürlüdür ve tek kullanımlık olarak üretilirler.

Alkali pillerin dikdörtgen, silindir, düğme ve yatsı şeklinde çeşitleri bulunmaktadır. Radyolar, oyuncaklar, hesap makineleri, kameralarda gibi elektronik cihazlarda kullanılmaktadır. Alkali pillerde elektrolitler potasyum hidroksitten, anot yüksek yüzey alanlı çinko tozundan, katot ise mangan dioksitten (MnO_2) oluşmaktadır.

Gümüş oksit piller düğme şeklindedir ve hesap makineleri, kameralar, saatler, işitme cihazları ve bilgisayarlarda kullanılmaktadır. Gümüş oksit pillerin elektrolitinde; sodyum hidroksit veya potasyum hidroksit tercih edilirken, katotta gümüş oksit ve anotta toz çinko kullanılır. Bu pillerin yapımında gümüş kullanıldığı için maliyeti yüksektir.

Çinko hava pilleri düğme şeklindedir ve işitme cihazlarında kullanılmaktadır. Çinko hava pillerinde %20-%40 oranında potasyum hidroksit çözeltisi kullanılır. Katotta oksijen gazı (O_2) anotta ise çinko (Zn) kullanılır.

Cıva oksit piller düğme veya silindir şekillerde üretilirler. İşitme aletleri, hesap makineleri, kameralar, saatlerde kullanılır. Cıvanın canlılara ve çevreye zararlı etkilerinden dolayı bazı ülkelerde üretimi yasaklanmıştır.

Lityum piller düğme ve dikdörtgen şekillerde üretilir. Saatler, hesap makineleri, duman alarm sistemlerinde kullanılır. Lityum anot olarak kullanılırken katot malzemesi olarak CuO , MnO_2 , FeS , $(CFX)_n$, $SOCl_2$ (tiyonil klorür), SO_2Cl_2 (sülfonil klorür) ve SO_2 (kükürt dioksit) kullanılmaktadır [28,29,30].

Tablo 2.1. Şarj edilemeyen pillerin kimyasal bileşenlerinin ağırlık oranları (%) [31]

Kimyasal Bileşen	Şarj Edilemeyen Pil Türleri		
	Çinko	Karbon	Alkali Gümüş Oksit
MnO_2	20	37	3
Zn	23	16	9
H_2O	18	9	2
C	10	4	0,5
Cu	-	-	4
$ZnCl/NH_4Cl$	5	-	-
Fe	4	23	42
KOH	-	5	1
Ag_2O	-	-	33
Ni	-	-	2
Hg	-	-	0,4
Pirinç	-	2	-
Diğer (kağıt, plastik, vb.)	13	4	3,1

Şarj edilemeyen pillerin içerdiği kimyasal bileşenlerin miktarı pil ölçülerine ve üreticilerine bağlı olarak değişmekle birlikte Tablo 2.1’de verilen ortalama değerlere sahiptir.

2.3.2. Şarj Edilebilen (İkincil) Piller

Nikel kadmiyum (NiCd), nikel metal hidrür (NiMh) ve lityum iyon piller bu gruba dahildir. Şarj edilebilen (ikincil) pillerin kimyasal bileşenleri ve ağırlıkça yüzde oranları Tablo 2.2’de verilmiştir.

Nikel kadmiyum piller fotoğraf makineleri, tıraş makineleri, cep telefonları, oyuncaklar ve dizüstü bilgisayarlarda kullanılmaktadır. Elektrolit olarak potasyum hidroksit, katot malzemesi olarak kadmiyum ve anot malzemesi olarak nikel hidroksit kullanılır. Silindirik ve düğme şeklinde üretilirler.

Tablo 2.2. Şarj edilebilen pillerin kimyasal bileşenlerinin ağırlık oranları (%) [31]

Kimyasal Bileşen	Şarj Edilebilen Pil Türleri		
	Nikel Kadmiyum	Nikel Metal Hidrür	Lityum İyon
Fe	40	20	-
Ni	22	33	-
Cd	15	-	-
Cu	-	-	5 - 15
Al	-	-	2,5 - 25
C	-	-	0,1 - 1
KOH	2	2	-
Lantanitler	-	10	-
Grafit	-	-	10 - 30
H ₂ O	-	8	-
Co	-	3	-
Mn	-	1	-
Zn	-	1	-
LiCoO ₂	-	-	25 - 45
F ₆ LiP	-	-	1 - 5
(C ₂ H ₂ F ₂) _n	-	-	0,5 - 2
C ₅ H ₁₀ O ₃	-	-	1 - 10
C ₃ H ₄ O ₃	-	-	1 - 10
C ₄ H ₈ O ₃	-	-	1 - 10
Plastik	5	5	-
Diğer	16	7	Polimer, Fe, Ni

Nikel metal hidrür piller cep telefonlarında ve dizüstü bilgisayarlarda kullanılır. Elektrolit olarak azot metal hidrit kullanılır. Anotta V, Ti, Zr, Cr, Co, Fe metallerinden oluşan metal alaşımlar kullanılır. LiNi₅ metal alaşımı daha fazla tercih

edilir. Anyonda nikel hidroksit, katyonda hidrojen alaşımı kullanılır. Silindirik ve düğme şeklinde üretilirler.

Dikdörtgen, yassı ve düğme şeklinde üretilen lityum iyon piller dizüstü bilgisayarlar ve cep telefonlarında kullanılır. Lityum iyon pillerde, lityum çok aktif metal olduğu için bileşik olarak kullanılmaktadır. Elektrolit lityum tuzu susuz çözücüde çözülerek elde edilir. Anotta grafik karbon, katotta kobalit (LiCoO_2), elektrolizde lityum tuzu kullanılır [28,29].

2.4. Radyoaktivite

Radyoaktif çekirdekler ve yaptıkları ışımlar atom ve nükleer fizikte birçok fikir ve tekniğin temelini oluşturan özelliklere sahiptir. Alfa ve beta parçacıklarının kendiliğinden yayınlanması atomların daha küçük temel birimlerden oluştuğu kavramını ortaya çıkardı. Benzer şekilde, alfa parçacıklarının saçılması, atom fiziğinde kullanılan modellerin temelini oluşturan çekirdek fikrinin ortaya çıkmasına neden oldu. İzotopların keşfi ise çeşitli radyoaktif elementler arasındaki kimyasal ilişkilerin incelenmesi sonucu olmuştur. Çekirdeğin alfa parçacıkları ile bombardımanı, (çekirdeklerin) parçalanmasına neden oldu ve nötronun çekirdeğin bir bileşeni olduğu gerçeğinin keşfedilmesine yol açtı.

Yapay radyoaktivitenin keşfi nükleer araştırmalara yeni bir boyut açtı ve birçok farklı nükleer reaksiyonla çok sayıda yapay çekirdek üretildi. Radyoaktif çekirdeklerden yayınlanan radyasyonun incelenmesi sonucu elektronik enerji seviyelerine benzer nükleer enerji seviyelerinin varlığını göstermiştir. Bu seviyelerin tanımlanması ve sınıflandırılması çekirdeğin yapısı hakkında önemli bilgiler barındırır.

Yeryüzünde doğal olarak bulunan çok sayıda radyoaktif çekirdek vardır. Bunların arasında en yaygın olanlardan birisi %0,012 izotopik bolluğa (olasılığa) ve $1,28 \times 10^9$ yıl yarı ömre sahip $^{40}_{19}\text{K}$ radyoizotopudur. Potasyum bitkilerin ve hayvanların ihtiyacı olan temel bir elementtir ve insanoğlunun maruz kaldığı iç ve dış radyasyonun önemli bir kaynağıdır. Doğal olarak oluşın diğer radyonüklitler

kozmojenik kökenlidir. ${}^3_1\text{H}$ (trityum) ve ${}^{14}_6\text{C}$, üst atmosferdeki kozmik ışın etkileşimleri sonucu üretilir ve aynı zamanda insanların ölçülebilir miktarlarda doza maruz kalmasına neden olabilir. Yarı ömrü 5730 yıl olan ve atmosferdeki ${}^{14}_7\text{N}$ çekirdeğinin bir nötronla etkileşimi sonucu oluşan ${}^{14}_6\text{C}$ fotosentez yoluyla bitkilerde birikir. Bitki fosillerindeki ${}^{14}_6\text{C}$ 'ün bozunumu ölçülerek yaş tayini yapılabilir. Diğer karasal radyasyon kaynakları ise uranyum, toryum ve bunların radyoaktif serileridir. Atom numarası 83'ten büyük olan tüm elementler radyoaktiftir.

2.5. Radyoaktif Bozunum

Radyoaktif çekirdekler kendiliğinden çeşitli dönüşümler (bozunumlar) yaparak kararlı hale gelmeye çalışır. Her dönüşümde ana atom çekirdeği değişir ve bir veya daha fazla parçacık (ek olarak bazen foton) yayınlanır. Çekirdekteki protonların sayısı değişirse ürün atomun yörüngesel elektronların sayısı da ya madde ortamına bir elektron salarak ya da madde ortamından bir elektron soğurarak değişir. En yaygın bozunum türleri Tablo 2.3'de verilmiştir.

Radyoaktif bozunum rastlantısal bir süreçtir, yani radyoaktif çekirdeğin ne zaman bozunacağını tahmin etmek mümkün değildir. Yapılabilecek tek şey bozunumun ne zaman gerçekleşeceğine dair olasılık ifadeleri kullanmaktır. Örneğin sonlu bir t zamanında bozunum veya radyoaktif çekirdeklerdeki azalma olasılığı hesaplanabilir.

Her radyoaktif çekirdeğin kendine özgü bir bozunum sabiti (λ) vardır ve bu sabit değer radyoaktif çekirdeğin sonsuz küçük zaman aralığı için birim zamanda bozunma olasılığıdır. Bozunum sabiti ne kadar küçük ise radyoaktif çekirdeklerin sayısı o kadar yavaş azalır demektir. Kararlı çekirdekler için bu değer sıfıra eşittir. Bir radyoaktif çekirdeğin bozunum sabiti sadece çekirdek içindeki nükleer kuvvetlere bağlı olduğu için sıcaklık ve basınç gibi parametrelerden bağımsızdır.

Bozunum sabiti λ olan ve çok sayıda özdeş radyoaktif çekirdek içeren bir örnek için durumu matematiksel olarak ifade etmek mümkündür. Herhangi bir t anında örnekteki radyoaktif çekirdeklerin ortalama veya beklenen sayısı $N(t)$ olsun. Bu

durumda radyoaktif çekirdeğin dt ile ifade edilen sonsuz küçük zaman aralığında bozunma olasılığı λdt ve örnekteki bozunumların beklenen sayısı ise $\lambda N(t) dt$ olur.

Tablo 2.3. Radyoaktif bozunum türleri ve temel özellikleri

Bozunum Türü	Bozunum Reaksiyonu	Açıklamalar
Gama (γ) bozunumu	${}^A_ZX^* \rightarrow {}^A_ZX + \gamma$	- Uyarılmış bir seviyede kalan çekirdeğin taban durumuna dönmesi sonucu yayınlanır. - Genellikle beta bozunumunu ve ağır çekirdeklerin alfa bozunumunu takip eden bir süreçtir.
Alfa (α) bozunumu	${}^A_ZX \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^4_2\alpha + Q$	- Çekirdekten 2 proton ve 2 nötrona sahip olan ${}^4_2\text{He}$ çekirdeğinin yayınlandığı süreçtir. - Burada Q, ürün çekirdekler arasında bölüşülen kütle farkı enerjisidir. - Yayınlanan alfa parçacıkları keskin bir spektruma sahiptir.
Elektron (β^-) bozunumu	${}^A_ZX \rightarrow {}^A_{Z+1}Y + \beta^- + \bar{\nu}$	- Çekirdekten bir nötronun bir protona dönüştüğü süreçtir. - Dönüşüm sonucu bir elektron (β^-) ve bir anti nötrino ($\bar{\nu}$) yayınlanır. - Beta bozunumu olarak da bilinmektedir. - Yayınlanan elektronlar sürekli spektruma sahiptir.
Pozitron (β^+) Bozunumu	${}^A_ZX \rightarrow {}^A_{Z-1}Y + \beta^+ + \nu$	- Çekirdekten bir protonun bir nötrona dönüştüğü süreçtir. - Dönüşüm sonucu bir elektron (β^+) ve bir nötrino (ν) yayınlanır. - Yayınlanan pozitron çok kısa ömürlüdür.
Elektron Yakalama (EC)	${}^A_ZX + \bar{e} \rightarrow {}^A_{Z-1}Y^* + \nu$	- Orbital elektronlarından bir tanesinin çekirdek tarafından yakalanması olayıdır. - Olay sonucunda çekirdekten bir proton bir nötrona ve nötrinoya dönüşür. - Ürün çekirdek genellikle uyarılmış enerji seviyesinde kalır.
İç Dönüşüm Olayı (IC)	${}^A_ZX^* \rightarrow [{}^A_ZX]^+ + \bar{e}$	- Uyarılmış enerji seviyesinde kalan çekirdeklerin kararlı hale dönüşümleri sırasında yayınlanan gama ışınlarının atomik orbitallerden elektron sökmeye olayıdır. - Yayınlanan elektronlar keskin spektruma sahiptir.

Bozunumların beklenen sayısı ise örnekte bulunan radyoaktif çekirdek sayısındaki azalışa ($-dN$) eşit olur (Denklem 2.1).

$$dN = -\lambda N(t) dt \quad (2.1)$$

Bu diferansiyel denklem çözülürse aşağıdaki ifade elde edilir.

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2.2)$$

Burada N_0 başlangıçtaki yani $t = 0$ anındaki radyoaktif çekirdek sayısıdır. Bu eksponansiyel azalış *radyoaktif bozunma yasası* olarak adlandırılır.

Radyoaktif çekirdeklerin önemli bir karakteristiği olan bozunum sabitinin farklı bir formu *yarı ömür* ($T_{1/2}$) ifadesidir. Yarı ömür bir örnekteki radyoaktif çekirdek sayısının yarıya düşmesi için geçmesi gereken süre olarak tanımlanır. Yarı ömür ifadesi $N(t) = N_0/2$ durumu için Denklem 2.2 çözülerek bulunur.

$$N(T_{1/2}) = \frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}} \quad (2.3)$$

Denklem 2.3'de gerekli sadeleştirme işlemleri ve düzenlemeler yapılırsa $T_{1/2}$ için aşağıdaki ifade elde edilir.

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \cong \frac{0,693}{\lambda} \quad (2.4)$$

Yarı ömür ifadesi bozunum sabitinin farklı bir formu olduğu için radyoaktif çekirdeklerin karakteristik bir özelliğidir.

Bozunum yasasını kullanarak bazı faydalı olasılıklar ve ortalamalar elde etmek mümkündür. Bozunum yasasına göre $t = 0$ anındaki radyoaktif çekirdek sayısı N_0 ise herhangi bir t anındaki çekirdek sayısı $N_0 e^{-\lambda t}$ olması beklenir. Bu durumda t zaman aralığında çekirdeklerin bozunuma uğramama olasılığı ($\bar{P}(t)$) aşağıdaki gibi olur.

$$\bar{P}(t) = \frac{N(t)}{N_0} = e^{-\lambda t} \quad (2.5)$$

Bu zaman aralığında çekirdeklerin bozunuma uğrama olasılığı ise Denklem 2.6'da verildiği gibi olur.

$$P(t) = 1 - \bar{P}(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (2.6)$$

Burada zaman aralığı çok küçük, yani $t \rightarrow \Delta t \ll 1$ olarak alınırsa eksponansiyel terimin seri açılımı yapılarak Denklem 2.6 yeniden düzenlenir.

$$P(\Delta t) = 1 - e^{-\lambda \Delta t} = 1 - \left[1 - \lambda \Delta t + \frac{1}{2!} (\lambda \Delta t)^2 - \dots \right] \cong \lambda \Delta t \quad (2.7)$$

Bu sonuçlar kullanılarak, radyoaktif çekirdeğin bozunumuna ilişkin olasılık dağılım fonksiyonu elde edilir. Başlangıçta ($t = 0$ anında) var olan radyoaktif çekirdeğin t ile $t + dt$ zaman aralığındaki bozunma olasılığı $p(t)dt$ aşağıdaki gibi olur.

$$p(t)dt = [\bar{P}(t)][P(dt)] \cong \lambda e^{-\lambda t} dt \quad (2.8)$$

Bu dağılım fonksiyonu kullanılarak radyoaktif çekirdeğin ortalama ömrü elde edilir (Denklem 2.9).

$$T_{ort} = \int_0^{\infty} tp(t)dt = \int_0^{\infty} t\lambda e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} \quad (2.9)$$

Uygulamada genellikle bir örnek içerisindeki radyoaktif atomların sayısıyla pek ilgilenilmez. Bunun yerine örnekte meydana gelen birim zaman başına bozunumların veya dönüşümlerin sayısıyla ilgilenilir. Bu bozunum oranı örneğin *aktivitesi* olarak adlandırılır ve aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$A(t) = -\frac{dN(t)}{dt} = \lambda N(t) = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t} \quad (2.10)$$

Burada A_0 başlangıçta yani $t = 0$ anındaki aktivite değeridir. Burada, örnekteki radyoaktif çekirdeklerin sayısı zamanla eksponansiyel olarak azaldığı için aktivitenin de aynı eğilime sahip olduğu açıkça görülmektedir.

SI birim sisteminde aktivite için saniye başına 1 bozunum olarak ifade edilen Becquerel (Bq) kullanılır. Eski sistemde ve günümüzde hala kullanılan aktivite birimi ise $3,7 \times 10^{10}$ Bq'e karşılık gelen Curie (Ci)'dir. Bir Ci ise bir gram $^{226}_{88}\text{Ra}$ (radyum) radyoizotopunun aktivitesidir.

2.6. Elektromanyetik Radyasyonun Madde ile Etkileşimi

Elektromanyetik dalga oldukları için x ve gama ışınları ne durgun bir kütleye ne de elektriksel yüke sahip değildir. Sahip oldukları bu özellik madde ile etkileşimini etkiler ve enerjisinin madde içerisine dağılmasını engeller. Bu yüzden x ve gama ışınları, aynı veya daha büyük enerjiye sahip ve elektriksel bakımdan yüklü olan alfa ve beta parçacıklarından daha büyük nüfuz etme gücüne (ya da madde içinde daha büyük menzile) sahiptir. Bununla birlikte bir fotonun ne kadar uzağa nüfuz edeceği, kat edilen ortamın ve foton enerjisinin fonksiyonu olan birim mesafe başına etkileşim olasılığı ile istatistiksel olarak yönetilir. Foton madde ile etkileştiğinde tamamen soğurularak kaybolabilir veya enerji kaybı olsun ya da olmasın hareket yönünü değiştirerek dağılabilir (saçılabilir).

Thomson ve Rayleigh saçılmaları, fotonların kayda değer bir enerji aktarımı olmaksızın madde ile etkileşime girdiği iki süreçtir. Thomson saçılmasında, serbest denilebilecek kadar atoma zayıf bağlı elektron elektromanyetik dalganın elektrik alan vektörü ile etkileşimi sonucu klasik olarak salınır (belirli bir denge konumu etrafında ivmeli hareket yapar). Salınım hareketi yapan elektron etkileşime girdiği elektromanyetik dalga ile aynı frekanslı radyasyon (fotonlar) yayar. Bir elastik saçılma türü olan Thomson olayının en belirgin özelliği, madde ile etkileşmeye giren bazı fotonların ortama enerji aktarımı olmadan yeniden yönlendirilmesidir. Foton elektron etkileşmelerinin kuantum mekaniği teorisinde Thomson saçılması, gelen foton enerjisi sıfıra yaklaşırken Compton saçılmasının düşük enerji sınırını temsil eder.

Rayleigh saçılması ise bir fotonun madde atomunun tamamı ile yani bir bütün olarak etkileşme yaptığı durumdur. Saçılma açısı genellikle çok küçüktür ve fotondan atoma kayda değer bir enerji aktarımı olmaz. Ancak atom momentumun korunumunu sağlayacak kadar bir geri tepme enerjisi kazanır.

Elektromanyetik radyasyonun etkileşme sonucunda maddede enerji biriktirmesinin temel mekanizmaları fotoelektrik soğurma, Compton saçılması, çift üretimi ve fotonükleer reaksiyonlardır.

2.6.1. Fotoelektrik Olay

Elektromanyetik radyasyon (x ve gama ışınları) madde ile etkileşime girdiğinde enerjilerinin tamamı atom tarafından soğurulabilir. Bu durumda soğurulan foton enerjisinin tamamı atomik elektrona aktarılır ve elektron serbest kalır. Olay sonucunda bir iyon çifti oluşur ve yayınlanan elektronun kinetik enerjisi en fazla, etkileşime giren fotonun enerjisinden elektronun atoma bağlanma enerjisi kadar eksiktir. Bu ifade Einstein'ın fotoelektrik denklemi ile açıklanmaktadır (Denklem 2.11).

$$KE_e = E_f - \phi \quad (2.11)$$

Burada KE_e serbest kalan elektronun kinetik enerjisi, E_f etkileşime giren elektromanyetik radyasyonun enerjisi ve ϕ ise fotoelektrik olayın gerçekleşmesi için gerekli olan eşik enerjisi olarak ta tanımlanabilen elektronun bağlanma enerjisidir. Olay sonucunda yayınlanan elektron beta parçacığına özdeştir ve madde içinde ilerlerken ilave iyonizasyonlara neden olur.

Fotoelektrik olay, atomun iç elektron kabuklarında, özellikle de K elektron kabuğunda meydana gelir. Olay sonucunda K veya L gibi iç atomik kabuklarda bir elektron (koparılıp) fırlatıldığında oluşan elektron boşluğu dış kabuk elektronları tarafından doldurulur. Bu enerji durumları arasındaki geçişler sonucunda karakteristik x ışınları yayınlanır. Yayınlanan bu fotonlar özellikleri bakımından

gama ışınları ile aynıdır. Aralarındaki temel fark oluşumlarının kökenidir. Gama ışınları bir atomun çekirdeğindeki enerji durumları arasındaki dönüşümlerden kaynaklanırken, x ışınları ise atomik elektronların enerji durumları arasındaki dönüşümlerden kaynaklanır.

Fotoelektrik etkileşmenin meydana gelme olasılığı *fotoelektrik tesir kesiti* (τ) olarak adlandırılır. Fotoelektrik olay düşük enerjili elektromanyetik radyasyon ve büyük atom numaralı (Z) madde atomları olması durumunda büyük bir olasılığa sahiptir. Foto elektrik tesir kesiti için kesin bir bağıntı olmamakla beraber yaklaşık bir ifade yazmak mümkündür (Denklem 2.12).

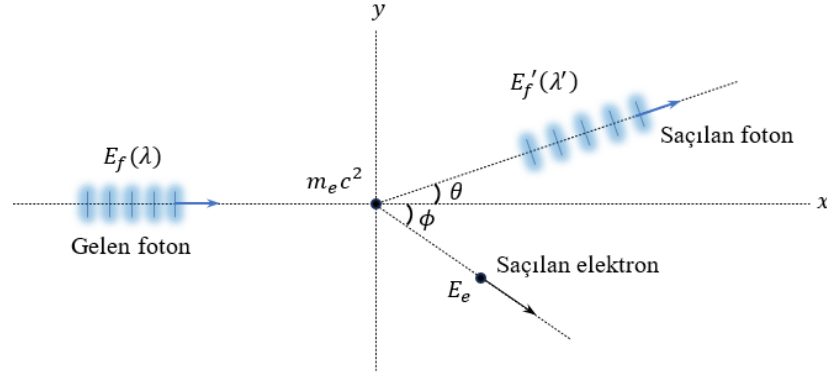
$$\tau (m^{-1}) = \alpha_f \frac{Z^n}{E_f^m} \quad (2.12)$$

Burada α_f atom numarası ve gelen fotonun enerjisinden bağımsız bir katsayı iken m ve n ise gelen fotonun enerjisine bağlı olarak 3 ile 5 arasında değişik değerler alabilen sayılardır.

Fotoelektrik olayda elektromanyetik radyasyon bir parçacık gibi enerji taşıyıp aktarabildiği için ışığın tanecik karakteri gösterdiği fiziksel süreçler arasında bulunur. Bu yönüyle kuantum teorisinin geliştirilmesinde önemli kilometre taşlarından biri olarak görülür.

2.6.2. Compton Saçılması

Işığın tanecikli karakter gösterdiği fiziksel olaylardan bir diğeri de Compton saçılmasıdır. Işığın kuantum teorisine göre fotonlar durgun kütleye sahip olma dışında parçacıklar gibidir. Bu durum, foton ile elektron arasında iki parçacığın çarpışmasına benzer tarzda bir etkileşim olabileceğini ifade eder. Ancak etkileşim, fotoelektrik olayın aksine fotonlar ile atomun çekirdeğine çok zayıf bağlı olan dış yörünge elektronları arasında gerçekleşir (Şekil 2.1).



Şekil 2. 1. Compton saçılmasının şematik gösterimi

Compton saçılmasının teorisi, özel rölativite teorisi ve korunum yasaları birleştirilerek oluşturulmuştur. Etkileşme sonucunda foton ve elektron çok farklı enerji değerlerine ve saçılma açılara sahip olabilir (Şekil 2.1). Saçılma açısına bağlı olarak fotonun dalga boyundaki (dolayısıyla enerjisindeki) değişim aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta) \quad (2.13)$$

Burada λ' ve λ sırasıyla saçılan ve etkileşime giren elektromanyetik radyasyonun dalga boylarını, h değeri ($6,626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$) olan planck sabitini, m_e elektron kütleini, c ışık hızını ve θ ise elektromanyetik radyasyonun saçılma açısını temsil etmektedir. Fotoelektrik olayda olduğu gibi Compton saçılması da etkileşime giren fotonun enerjisine ve madde atomunun atom numarasına bağlı olarak farklı olasılıklarda gerçekleşir. Compton olayının meydana gelme olasılığı *Compton tesir kesiti* (σ) olarak adlandırılır (Denklemler 2.14).

$$\sigma (m^{-1}) = \alpha_c Z f(E_f) \quad (2.14)$$

Burada $f(E_f)$ etkileşime giren elektromanyetik radyasyonun enerjisine bağlı bir fonksiyonu ve α_c ise sabit bir sayıyı temsil etmektedir.

2.6.3. Çift Üretimi

Elektromanyetik radyasyon madde etkileşim mekanizmalarından biri de çift üretim olayıdır. Etkileşime giren fotonların enerjisi elektronun durgun kütle enerjisinin iki katı (1,02 MeV) veya daha büyük olması durumunda atomik çekirdeğin alanında elektron-pozitron çiftine dönüştürülebilir. Bununla birlikte çift üretim olayı fotonların atomik elektronların alanları ile etkileşimler sonucu da gözlemlenebilir. Ancak buradaki eşik enerjisi $4m_e c^2$ 'dir.

Atomik çekirdeğin Coulomb alanı ile etkileşim sonucunda çift üretimi meydana gelirse büyük kütleye sahip olduğu için çekirdek ihmal edilebilir miktarda geri tepme enerjisi kazanır. Ortadan kaybolan fotonun enerjisi ise elektron-pozitron çiftinin oluşumu için harcanır. Fazlalık enerji ise elektron ve pozitrona kinetik enerji olarak aktarılır (Denklem 2.15).

$$E_f = 2m_e c^2 + T_- + T_+ \quad (2.15)$$

Burada T_- ve T_+ sırasıyla elektronun ve pozitronun kinetik enerjisidir. Çift üretim olayı sonucu oluşan pozitron elektronun anti parçacığı olduğu için çok kısa bir ömre ($\sim 10^{-10} s$) sahiptir. Pozitron etkileşime giren madde atomlarının elektronu ile birleşerek çift üretiminin tersine bir süreç olan çift yok olmasına neden olur. Olay sonucunda zıt yönlerde hareket eden 0,511 MeV enerjili iki gama fotonu yayınlanır.

Çift üretimi olayının meydana gelme olasılığı *çift üretim tesir kesiti* (κ) olarak adlandırılır ve aşağıdaki gibi ifade edilir (Denklem 2.16).

$$\kappa (m^{-1}) = \alpha_c Z^2 f(E_f, Z) \quad (2.16)$$

Burada $f(E_f, Z)$ etkileşime giren fotonun enerjisine madde atomunun atom numarasına bağlı bir fonksiyonu ve α_c ise sabit bir sayıyı temsil etmektedir.

2.7. Azaltma Katsayıları

Elektromanyetik radyasyonun madde içerisine nüfuz etme derinliği fotoelektrik, compton ve çift üretimi gibi fiziksel süreçlerin kat edilen birim mesafe başına meydana gelme olasılıkları ile istatistiksel olarak belirlenir. Bu olasılıkların toplamı *lineer azaltma katsayısı* (μ) veya *makroskopik tesir kesiti* olarak adlandırılır ve “cm⁻¹” biriminde ifade edilir. Lineer azaltma katsayısı foton madde etkileşimindeki fiziksel süreçlerin tesir kesitlerinin toplamı olduğu için foton enerjisine ve madde atomlarının cinsine (atom numarasına) bağlı bir parametredir (Denklem 2.17).

$$\mu = \tau + \sigma + \kappa \quad (2.17)$$

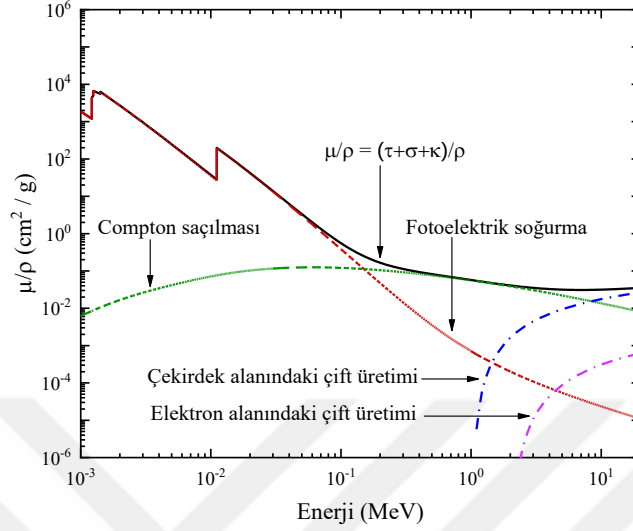
Belirli bir sıcaklıkta (örneğin oda sıcaklığında) farklı maddeler farklı formda (katı, sıvı veya gaz formunda) olabilir. Dolayısıyla maddelerin foton şiddetini azaltma becerilerini kıyaslamak için lineer azaltma katsayısını kullanmak uygun değildir. Bunun için lineer azaltma katsayısı (μ) maddenin yoğunluğuna (ρ) bölünerek normalize edilir. Elde edilen bu yeni ifade ise *kütle azaltma katsayısı* (μ/ρ) olarak adlandırılır ve “cm²/g” biriminde ifade edilir (Denklem 2.18).

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{\tau}{\rho} + \frac{\sigma}{\rho} + \frac{\kappa}{\rho} \quad (2.18)$$

Elektromanyetik radyasyon madde etkileşmelerinde her bir olayın tesir kesitleri ve dolayısıyla kütle azaltma katsayıları da foton enerjisine bağlı olarak değişmektedir. Bu durum Şekil 2.2’de, Ge elementi için kütle azaltma katsayılarının foton enerjisine bağlı değişimini gösteren grafikte açıkça görülmektedir. Foton enerjisi yaklaşık 100 keV mertebesine kadar fotoelektrik soğurmanın, 100 keV ile 4 MeV aralığında Compton saçılmasının ve daha büyük enerjilerde ise çift üretimi olayının baskındır.

Şekil 2.2 incelenirse, düşük foton enerjilerinde kütle azaltma katsayılarında ani sıçramalar olduğu görülmektedir. Bu sıçramanın meydana geldiği foton enerjileri soğurucu atomun yörünge elektronlarının atoma bağlanma enerjisine denk gelmektedir. Bu bölgelerde foton madde etkileşim olasılığı yüksek olduğu için

soğurucu maddenin karşı tarafına geçen foton sayısı da düşük olacaktır. Bu bölgeler *soğurma kıyısı* olarak adlandırılır.



Şekil 2.2. Ge elementinin kütle azaltma katsayılarının foton enerjisine bağlı değişimi

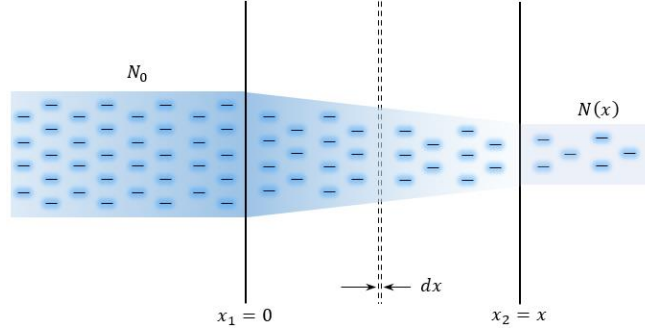
Bileşikler ve karışımlar için belirli bir foton enerjisindeki kütle azaltma katsayısı, bileşenlerin yapı içerisindeki ağırlıkça yüzdeleri dikkate alınarak hesaplanır (Denklem 2.19).

$$\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_c = \sum_i \omega_i \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i \quad (2.19)$$

Burada $(\mu/\rho)_c$ bileşiğin ya da karışımın kütle azaltma katsayısı, ω_i i 'nci bileşenin yapıdaki ağırlıkça yüzdesi ve $(\mu/\rho)_i$ ise i 'nci bileşenin kütle azaltma katsayısıdır.

Kütle azaltma katsayıları için matematiksel bir ifade elde etmek için Şekil 2.3'de gösterilen düzenek kullanılabilir. Şekilde gösterilmese de uygulamada foton demetleri özel olarak tasarlanan kolimatörler kullanılarak elde edilir ve düzeneğin tamamı dar ışın geometrisi olarak adlandırılır.

Tek enerjili N_0 tane fotondan oluşan demet Şekil 2.3'de gösterildiği gibi bir plakaya dik doğrultuda gönderildiğinde fotonların bir kısmı soğrulur, bir kısmı saçılır ve kalan kısmı da plaka atomları ile etkileşmeden karşı tarafa ulaşır.



Şekil 2.3. Tek enerjili foton demetinin x kalınlıklı plakadan geçişinin gösterimi

Plakanın dx gibi küçük bir kalınlığa sahip kısmında etkileşen foton sayısı N ve dx ile orantılıdır.

$$dN = -\mu N dx \quad (2.20)$$

Denklem 2.20 sonlu bir x kalınlığı üzerinden integrali alınacak şekilde düzenlenip çözümlerse Lambert-Beer yasası elde edilir (Denklem 2.21).

$$N(x) = N_0 e^{-\mu \cdot x} \quad (2.21)$$

Burada $N(x)$ kalınlığı x olan madde ile etkileşmeden karşı tarafa geçen foton sayısını ya da şiddetini ifade etmektedir. Bu denklem plaka kalınlığı x yoğunluğa bölünerek kütle azaltma katsayısı formunda yeniden yazılırsa aşağıdaki ifade elde edilir.

$$N(x) = N_0 e^{-(\mu/\rho)d} \quad (2.22)$$

Burada d plakanın kalınlığı ile yoğunluğunun çarpımı olan birim yüzey başına kütle olarak ifade edilir.

BÖLÜM 3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Kullanılan Pil Örnekleri

Bu çalışma kapsamında, farklı üreticiler tarafından üretilip tüketici kullanımına sunulan atık düğme pillerin, lityum polimer telefon pillerinin ve kuru pillerin radyoaktif izotop içerikleri ve 31 ile 1332 keV enerji aralığındaki fotonlara (x ve gama ışınlarına) karşı geçirgenlikleri incelenmiştir. Kullanılan pil çeşitleri ve bu çalışmada karşılığı olan kodlar Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1. Kullanılan pil türleri ve kodları

Pil Türü	Kodu	Pil Türü	Kodu
Düğme pil	CR2016 DP1	Düğme pil	CR2032 DP17
Düğme pil	CR2016 DP2	Düğme pil	CR2032 DP18
Düğme pil	CR2016 DP3	Düğme pil	CR2032 DP19
Düğme pil	CR2016 DP4	Düğme pil	CR2032 DP20
Düğme pil	CR2016 DP5	Düğme pil	CR2032 DP21
Düğme pil	CR2016 DP6	Lipo pil	TB1
Düğme pil	CR2025 DP7	Lipo pil	TB2
Düğme pil	CR2025 DP8	Lipo pil	TB3
Düğme pil	CR2032 DP9	Lipo pil	TB4
Düğme pil	CR2032 DP10	Lipo pil	TB5
Düğme pil	CR2032 DP11	Kuru pil	KP1
Düğme pil	CR2032 DP12	Kuru pil	KP2
Düğme pil	CR2032 DP13	Kuru pil	KP3
Düğme pil	CR2032 DP14	Kuru pil	KP4
Düğme pil	CR2032 DP15	Kuru pil	KP5
Düğme pil	CR2032 DP16	Kuru pil	KP6

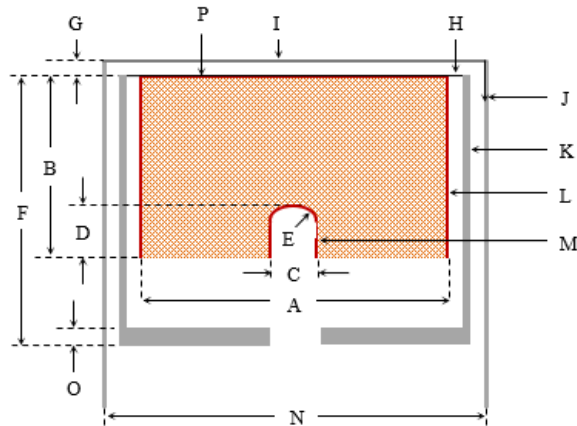
3.2. X ve Gama Işını Ölçüm Sistemi

Atık pillerin radyoaktivite ve radyasyon (x ve gama ışını) geçirgenlik ölçümleri, Giresun Üniversitesi Uygulama ve Araştırma Laboratuvarında bulunan ORTEC marka ve GEM-SP7025P4-B model ve yarı düzlemsel Ge kristale sahip HPGe dedektörü kullanılarak gerçekleştirildi (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Radyoaktivite ve radyasyon geçirgenlik ölçümlerinde kullanılan HPGe dedektör sistemi

Dedektörün şematik yapısı ve fiziksel parametreleri Şekil 3.2 ve Tablo 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2. ORTEC marka GEM SP7025P4-B model yarı düzlemsel dedektör şeması

Tablo 3.2. GEM SP7025P4-B model yarı düzlemsel dedektörün fiziksel parametreleri

Simge	Fiziksel Parametre	Boyutu (mm)
A	Kristal çapı	69,60
B	Kristal uzunluğu	27,80
C	Kristal boşluğunun çapı	5,30
D	Kristal boşluğunun uzunluğu	3,10
E	Kristal boşluğunun eğrilik yarıçapı	5,00
F	Kristal haznesinin uzunluğu	53,00
G	Kristal ile Be pencere arasındaki boşluğun genişliği	4,00
H	Kristal yüzeyindeki Al koruyucunun kalınlığı	0,03
I	Be pencere kalınlığı	0,50
J	Dış yanal yüzeydeki Al kılıf kalınlığı	1,00
K	İç yanal yüzeydeki Al kılıf kalınlığı	1,50
L	Kristalin dış yanal yüzeyindeki Ge/Li ölü tabaka kalınlığı	0,70
M	Kristal boşluğundaki Ge/B ölü tabaka kalınlığı (μm)	0,70
N	Dış kılıf çapı	83,00
O	İç Al kılıfın alt çerper kalınlığı	11,00
P	Kristal yüzeyindeki Ge ölü tabaka kalınlığı	< 0,01

3.3. Radyoaktivite Ölçümleri

Tablo 3.1’de verilen KP1, KP2, KP3, KP4, KP5 ve KP6 kodlu örnekler için radyoaktivite ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Diğer örnek içerikleri numune hazırlama işlemini oldukça güçleştirdiği için radyoaktivite ölçümleri sadece kuru pil örneklerine uygulandı.



Şekil 3.3. Radyoaktivite ölçümleri için hazırlanan kuru pil örneklerinden bazıları

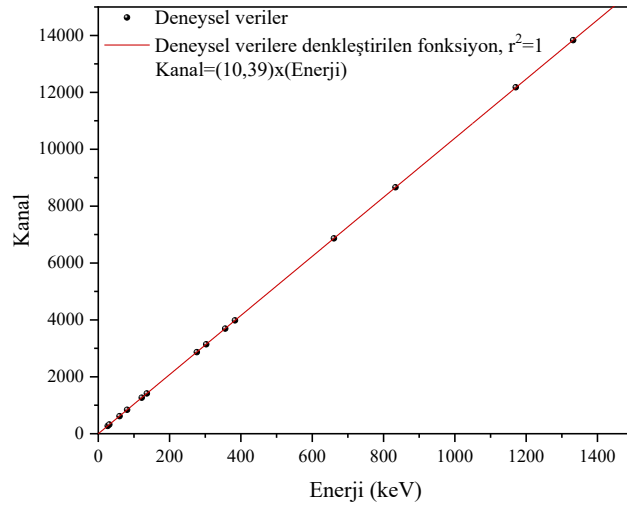
Kuru pil örnekleri koruyucu kılıflarından ayrıştırıldıktan sonra havanda öğütülerek toz haline getirildi. Toz hale getirilen örnekler duvar kalınlığı 1mm, çapı 6 cm ve yüksekliği 5 cm olan plastik kutulara dolduruldu. ^{238}U ve ^{232}Th radyoizotopları

arasındaki radyoaktif dengenin sağlanması için kutular sıkıca kapatıldı ve 1 ay bekleme süresinin ardından ölçüme hazır hale getirildi (Şekil 3.3).

Tablo 3.3. Enerji ve verim kalibrasyonu için kullanılan referans kaynaklar

Çekirdek	Enerjisi (keV)	Olasılığı	Yarı ömrü	Aktivitesi (kBq)	Ürün çekirdek
²⁴¹ Am	59,5	35,9	432,2 yıl	442	²³⁷ Np
⁵⁷ Co	122,0	85,51	271,80 gün	413	⁵⁷ Fe
	136,5	10,71	271,80 gün		
¹³³ Ba	81,0	32,90	10,54 yıl	460	¹³³ Cs
	276,4	7,16	10,54 yıl		
	302,8	18,39	10,54 yıl		
	356,0	62,05	10,54 yıl		
	383,8	8,94	10,54 yıl		
¹³⁷ Cs	661,6	85,00	30,05 yıl	473	¹³⁷ Ba
⁵⁴ Mn	834,8	99,97	312,13 gün	378	⁵⁴ Cr
					⁵⁴ Fe
⁶⁰ Co	1173,0	99,85	5,27 yıl	424	⁶⁰ Ni
	1332,0	99,98	5,27 yıl		

Örnek hazırlama işlemleri akabinde ölçüm sisteminin yani HPGe dedektörünün enerji ve verim kalibrasyonları yapıldı. Her iki işlem için de yayınladıkları foton enerjileri ve üretim tarihlerindeki aktivite değerleri iyi bilinen referans kaynaklar kullanıldı. Referans kaynaklar Eckert&Ziegler firmasından temin edilmiş olup, özellikleri Tablo 3.3’de verilmiştir.



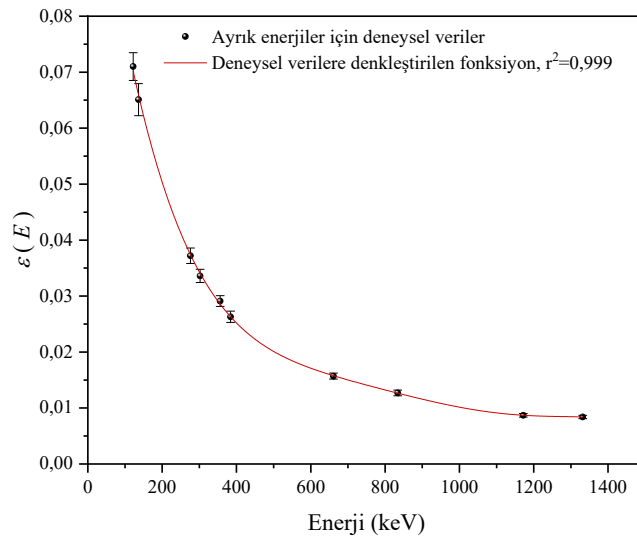
Şekil 3.4. HPGe dedektörün enerji kalibrasyon grafiği

Öncelikle, dedektör elektroniğinde yer alan çok kanallı analizörde hangi enerjinin hangi kanala denk geldiğini belirlemek için enerji kalibrasyonu işlemi gerçekleştirildi. Tablo 3.3’de verilen referans kaynaklar ile kısa süreli ölçümler yapıp, spektrumda gözlenen tam enerji piklerin enerji ve kanal numaraları sisteme kaydedilerek enerji kalibrasyonu tamamlandı. Ölçüm sisteminin enerji kalibrasyon grafiği Şekil 3.4’de verilmiştir.

Verimi, dedektörde sayılabilecek büyüklükte anlamlı puls üreten fotonların, kaynaktan yayınlanan fotonların sayısına oranı olarak tanımlamak mümkündür. Kullanılan örnek ve dedektör parametrelerine göre değişkenlik arz eden verim kalibrasyonu daha zorlu ve dikkatli bir yöntem gerektirir. Öncelikle, Tablo 3.2’de verilen ^{57}Co , ^{133}Ba , ^{137}Cs , ^{54}Mn ve ^{60}Co radyoizotopları ile 1000 s’lik ayrı ölçümler alındı. Denklem 3.1 kullanılarak referans kaynaklar için verim değerleri hesaplandı.

$$\varepsilon(E) = \frac{N_{fp}}{A \cdot I_{\gamma} \cdot t} \quad (3.1)$$

Burada $\varepsilon(E)$, ilgili E enerjisinde oluşan foto piki için dedektör verimini, N_{fp} foto pik altındaki net alanı, A referans kaynağın verim ölçümünün yapıldığı tarihteki aktivitesini, I_{γ} ilgili gama fotonunun kaynak tarafından yayınlanma olasılığını ve t ise ölçüm süresini (1000 s’yi) ifade etmektedir.



Şekil 3.5. HPGGe dedektörün verim kalibrasyon grafiği

Referans kaynaklar için elde edilen verim kalibrasyon değerlerini, Şekil 3.2’de gösterilen şematik yapıya bağlı olarak Tablo 3.2’de verilen dedektör parametrelerini, örnek kaynak geometrisi ve örnek içeriği gibi değişkenleri girdi olarak kabul eden ve Tim Vidmar tarafından geliştirilen EFFTRAN_4.7.1 verim transfer programı kullanılarak ayrık enerjiler için dedektör verimi belirlendi (Şekil 3.5).

Enerji ve verim kalibrasyonu işlemleri yapıldıktan sonra kuru pil örneklerinin radyoaktivite ölçümleri gerçekleştirildi. Her örnek için 86400 s (1 gün) ölçüm alındı. Ölçümler sonucunda elde edilen spektrumlar ORTEC firmasından sağlanan MAESTRO programı kullanılarak analiz edildi. Kuru pil örneklerindeki ^{238}U (^{226}Ra), ve ^{232}Th aktivite konsantrasyonlarını belirlemek için spektrumlarda, Tablo 3.4’de gösterilen ve bu serilere ait olan radyoizotoplardan yayınlanan gama fotonu enerjilerinde oluşan pikler incelendi. ^{137}Cs ve ^{40}K aktivite konsantrasyonlarını belirlemek için sırasıyla 661,6 ve 1460,8 keV enerjilerinde oluşan pikler incelendi ve net alanları belirlendi.

Tablo 3.4. Aktivite hesabı yapılan radyoaktif çekirdekler

Seri	^{238}U (^{226}Ra)			^{232}Th			^{137}Cs	^{40}K
	^{214}Pb	^{214}Pb	^{214}Bi	^{212}Pb	^{208}Tl	^{228}Ac		
Enerjisi (keV)	295,22	351,93	609,31	238,63	583,19	911,20	661,66	1460,82
Olasılığı (%)	18,50	35,60	45,49	43,60	30,60	25,80	84,99	10,66

Radyoizotoplar için ilgili pik alanları belirlendikten sonra Denklem 3.2 kullanılarak kuru pil örneklerindeki ^{238}U (^{226}Ra), ^{232}Th , ^{137}Cs ve ^{40}K aktivite konsantrasyonları hesaplandı.

$$A = \frac{N_{fp}}{\varepsilon(E) \cdot I_{\gamma} \cdot t} \prod_i C_i \quad (3.2)$$

Burada C_i terimleri bozunma, ölçüm süresi, soğurma ve çakışma (koinsidans) etkileri için düzeltme faktörleridir. Diğer parametreler ise daha önce Denklem 3.1’de açıklandığı gibidir. Aktivite değerlerindeki belirsizlikler ise Denklem 3.3 kullanılarak hesaplandı.

$$\frac{u(A)}{A} = \left(\frac{u^2(N_{fp})}{N_{fp}^2} + \frac{u^2(\varepsilon)}{\varepsilon^2} + \frac{u^2(I_\gamma)}{I_\gamma^2} + \sum_i \frac{u^2(C_i)}{C_i^2} \right)^{1/2} \quad (3.3)$$

Burada, $u(X)$ şeklinde ifade edilen terimler sırasıyla spektrumda ilgili enerjide (Tablo 3.4'teki enerjilerde) oluşan foto pik alanındaki, verim değerindeki, yayınlanma olasılığındaki ve diğer düzeltme faktörlerindeki belirsizliklerdir.

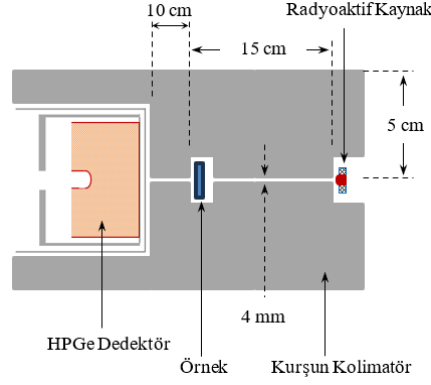
3.4. Kütle Azaltma Katsayısı Ölçümleri

Tablo 3.1'de verilen 21 adet düğme, 5 adet lipo ve 6 adet kuru pil örneklerinin kütle azaltma katsayıları, 31 ile 1332 keV enerji aralığındaki 10 farklı enerji değeri için yarı deneysel model olan Lambert-Beer yasası kullanılarak hesaplandı. Kütle azaltma katsayıları örnek hazırlama, ölçümler ve hesaplamalar olmak üzere üç aşamada gerçekleştirildi.



Şekil 3.6. Kütle azaltma katsayıları ölçümü için preslenmiş numune

Düğme ve lipo pil örnekler sahip oldukları düzgün geometrik yapıları ve içeriklerinin standart numune hazırlama yöntemlerine uygun olmaması nedeniyle herhangi bir özel işleme tabi tutulmamışlardır. Radyoaktivite ölçümleri için daha önce toz haline getirilen kuru pil örnekleri ise preslenerek 13 mm çapında silindirik yapılara dönüştürülerek ölçümlere hazır hale getirildi (Şekil 3.6). Bu pil örneklerinin kütle, en, boy ve yarı çap gibi fiziksel parametreleri hassasiyetleri sırasıyla 0,0001 g ve 0,0005 m olan analitik terazi ve kumpas kullanılarak ölçüldü.



Şekil 3.7. Kütle azaltma katsayısı ölçümleri için tasarlanan dar ışın geometrisi

Pil örneklerinin kütle azaltma katsayılarını belirlemek için yapılan deneyler, Şekil 3.1’de gösterilen HPGe dedektör ve ^{241}Am , ^{133}Ba , ^{137}Cs ve ^{60}Co radyoaktif kaynakları kullanılarak gerçekleştirildi. Şekil 3.7’de gösterilen dar ışın geometrisi oluşturularak gerçekleştirildi. Çakışma ve saçılmalardan meydana gelebilecek sayım kayıplarını ve pik şekillerindeki bozulmaları en az düzeye indirmek için dedektör-kaynak ve örnek-dedektör arasındaki mesafe ve kolimatör çapları dikkatle belirlenmiştir [32]. Her örnek için ölçümler 3000 s’lik sürelerde ve 3 kez tekrarlanarak gerçekleştirildi.

Öncelikle her enerji için dar ışın geometrisindeki kaynaktan çıkan ve örnek ile etkileşime girmeden dedektöre ulaşan kolime edilmiş demet şiddetleri (I_0 ve I) ve örneklerin yüzey yoğunlukları belirlendi. Elde edilen veriler Denklem (2.22)’de yerine yazılarak kütle azaltma katsayıları hesaplandı. Elde edilen bu sonuçlardaki belirsizlikler ise Denklem 3.4 kullanılarak hesaplandı.

$$\frac{u(\mu/\rho)}{(\mu/\rho)} = \left(\frac{u^2(m)}{m^2} + \frac{u^2(s)}{s^2} + \frac{\left(\frac{u(T)}{T}\right)^2}{(\ln(T))^2} \right)^{1/2} \quad (3.4)$$

Burada m ve s sırasıyla örneğin kütlesi ve yüzey alanıdır; T ise ilgili enerjide örnek için foton geçirgenliğidir ve (I/I_0) şeklinde tanımlanır. Denklemde $u(X)$ ile ifade edilen terimler ise sırasıyla kütle azaltma katsayısındaki ve geçirgenlikteki belirsizliklerdir.

BÖLÜM 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1. Radyoaktivite Sonuçları

KP1, KP2, KP3, KP4, KP5 ve KP6 kodlu kuru pil örneklerindeki ^{238}U , ^{232}Th , ^{137}Cs ve ^{40}K radyoizotoplarının aktivite konsantrasyonları Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1. Kuru pil örneklerindeki ^{238}U , ^{232}Th , ^{137}Cs ve ^{40}K aktivite konsantrasyonları (Bq/kg)

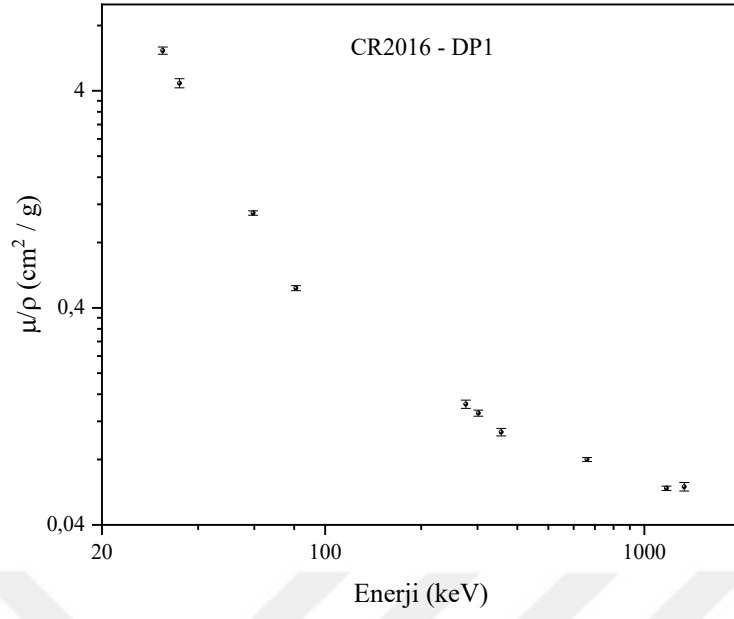
Örnek	^{238}U	^{232}Th	^{137}Cs	^{40}K
KP1	ND	2,80±0,20	ND	ND
KP2	2,43±0,22	ND	ND	23,70±0,83
KP3	3,82±0,32	ND	ND	11,00±0,43
KP4	3,14±0,29	4,13±0,38	ND	11,20±0,50
KP5	2,21±0,23	ND	ND	11,00±0,33
KP6	2,94±0,25	3,33±0,32	ND	18,34±0,66
Ortalama	2,42±0,22	1,71±0,15	-	12,54±0,46

4.2. Kütle Azaltma Katsayısına Ait Bulgular

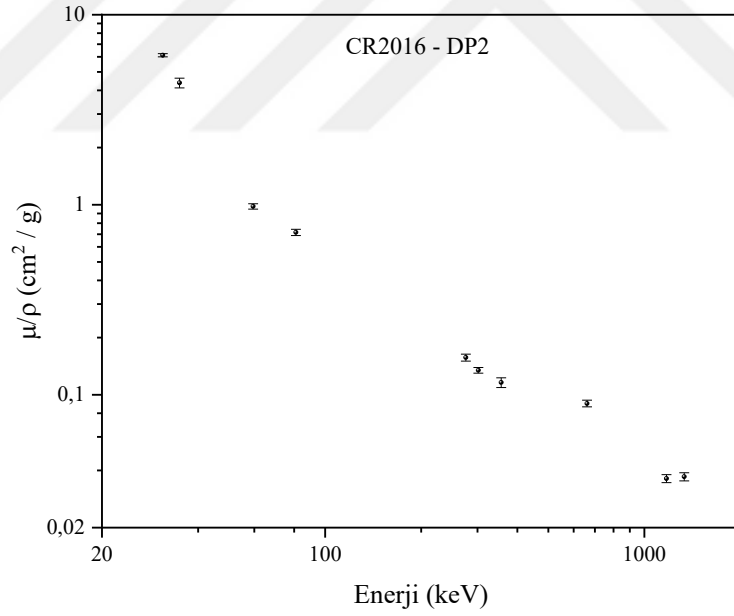
Atık pil örneklerinin kütle azaltma katsayıları için Şekil 3.1’de verilen deneysel düzenekte (dar ışın geometrisinde) gerçekleştirilen ölçümlerde kaynaktan çıkan ve örnekten geçen foton demetlerinin şiddeti (I_0 ve I) belirlendi. Her bir örnek için şiddet belirlenen şiddet verileri Denklem 2.22’de yerine koyularak kütle azaltma katsayıları hesaplandı. Her örnek için 31 ile 1332 keV enerji aralığındaki 10 farklı enerji değeri için hesaplanan kütle azaltma katsayıları Tablo 4.2’de verilmiştir. Tablo 4.2’de bulunan değerlere bağlı olarak, düğme pillerin kütle azaltma katsayılarının enerji ile değişimi Şekil 4.1 – Şekil 4.21’de, lipo pillerin kütle azaltma katsayılarının enerji ile değişimi Şekil 4.22 – Şekil 4.26’da ve kuru pillerin kütle azaltma katsayılarının enerji ile değişimleri ise Şekil 4.27 – Şekil 4.32’de verilmiştir.

Tablo 4.2. Pil örneklerinin kütle azaltma katsayıları (cm²/g)

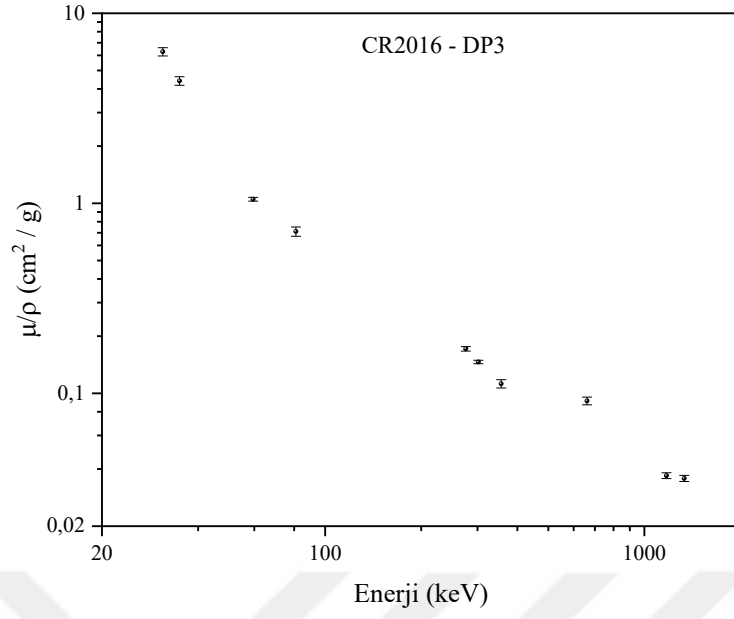
Pil Kodu		Enerji (keV)									
		31	35	59,5	81	276	302	356	661	1172	1332
CR2016	DP1	6,131±0,238	4,336±0,210	1,094±0,025	0,493±0,013	0,144±0,006	0,131±0,004	0,107±0,004	0,080±0,002	0,059±0,001	0,060±0,003
	DP2	6,122±0,123	4,379±0,260	0,981±0,032	0,716±0,027	0,157±0,007	0,135±0,005	0,116±0,007	0,090±0,004	0,036±0,002	0,037±0,002
	DP3	6,281±0,314	4,408±0,232	1,051±0,025	0,711±0,040	0,172±0,005	0,146±0,003	0,112±0,006	0,091±0,004	0,037±0,001	0,036±0,001
	DP4	5,948±0,210	4,236±0,242	1,040±0,039	0,665±0,034	0,168±0,009	0,152±0,005	0,111±0,005	0,084±0,002	0,079±0,005	0,071±0,003
	DP5	5,968±0,283	4,124±0,150	1,021±0,026	0,661±0,038	0,168±0,003	0,131±0,005	0,110±0,006	0,088±0,003	0,072±0,003	0,074±0,003
	DP6	6,472±0,264	4,529±0,186	1,045±0,031	0,642±0,021	0,164±0,004	0,131±0,007	0,120±0,006	0,094±0,006	0,086±0,004	0,086±0,003
CR2025	DP7	5,731±0,165	4,045±0,166	0,942±0,025	0,499±0,016	0,130±0,008	0,129±0,003	0,115±0,005	0,093±0,003	0,069±0,004	0,068±0,002
	DP8	4,124±0,144	2,971±0,166	0,981±0,029	0,383±0,018	0,133±0,003	0,115±0,004	0,101±0,005	0,083±0,002	0,061±0,002	0,061±0,002
CR2032	DP9	5,088±0,202	3,664±0,102	0,902±0,022	0,432±0,013	0,126±0,003	0,122±0,006	0,113±0,003	0,093±0,003	0,074±0,002	0,072±0,002
	DP10	4,983±0,210	3,541±0,167	0,862±0,031	0,507±0,020	0,142±0,005	0,121±0,007	0,108±0,004	0,083±0,004	0,063±0,003	0,063±0,003
	DP11	5,033±0,114	3,510±0,128	0,689±0,024	0,431±0,019	0,129±0,006	0,117±0,004	0,111±0,004	0,090±0,005	0,071±0,002	0,068±0,002
	DP12	5,180±0,247	3,563±0,203	0,858±0,031	0,433±0,010	0,129±0,007	0,125±0,003	0,111±0,002	0,093±0,005	0,076±0,004	0,070±0,003
	DP13	3,904±0,134	3,123±0,089	0,732±0,029	0,460±0,011	0,138±0,003	0,125±0,005	0,102±0,005	0,089±0,003	0,075±0,004	0,073±0,003
	DP14	3,887±0,084	2,503±0,144	0,886±0,034	0,451±0,009	0,113±0,004	0,111±0,004	0,087±0,004	0,086±0,004	0,071±0,003	0,065±0,002
	DP15	4,847±0,236	3,504±0,075	0,919±0,048	0,455±0,021	0,146±0,008	0,125±0,004	0,110±0,005	0,093±0,004	0,066±0,004	0,061±0,003
	DP16	4,679±0,177	3,315±0,101	0,843±0,019	0,450±0,010	0,119±0,004	0,108±0,005	0,101±0,003	0,086±0,003	0,058±0,002	0,058±0,002
	DP17	5,323±0,181	3,652±0,138	0,772±0,019	0,494±0,020	0,128±0,003	0,122±0,003	0,107±0,004	0,083±0,005	0,056±0,002	0,052±0,001
	DP18	5,304±0,207	3,671±0,082	0,881±0,020	0,443±0,023	0,126±0,004	0,125±0,005	0,115±0,007	0,084±0,002	0,068±0,002	0,074±0,004
	DP19	4,179±0,169	2,820±0,151	0,888±0,026	0,422±0,025	0,114±0,007	0,103±0,002	0,099±0,002	0,085±0,003	0,058±0,002	0,056±0,002
	DP20	5,806±0,285	3,951±0,134	0,922±0,030	0,508±0,016	0,137±0,006	0,129±0,007	0,122±0,003	0,092±0,003	0,060±0,003	0,059±0,002
	DP21	3,844±0,127	2,751±0,085	0,908±0,026	0,514±0,019	0,106±0,005	0,105±0,005	0,093±0,004	0,084±0,004	0,065±0,002	0,060±0,002
Lipo	TB1	3,395±0,168	2,480±0,101	0,648±0,030	0,364±0,015	0,139±0,007	0,132±0,007	0,115±0,003	0,083±0,005	0,056±0,002	0,055±0,002
	TB2	3,455±0,193	2,688±0,106	0,615±0,016	0,410±0,020	0,117±0,006	0,108±0,004	0,097±0,005	0,054±0,002	0,035±0,002	0,035±0,001
	TB3	3,511±0,105	2,644±0,095	0,501±0,023	0,378±0,019	0,137±0,008	0,127±0,004	0,117±0,004	0,074±0,003	0,048±0,003	0,046±0,001
	TB4	2,678±0,134	2,454±0,099	0,525±0,020	0,262±0,007	0,126±0,005	0,116±0,004	0,105±0,004	0,085±0,004	0,056±0,002	0,054±0,002
	TB5	3,230±0,110	2,456±0,050	0,381±0,009	0,319±0,013	0,125±0,006	0,114±0,003	0,103±0,006	0,071±0,003	0,045±0,002	0,044±0,001
Kuru Pil	KP1	2,977±0,116	2,137±0,098	2,690±0,074	0,274±0,009	0,090±0,003	0,085±0,002	0,081±0,003	0,058±0,002	0,043±0,002	0,040±0,001
	KP2	2,736±0,083	2,154±0,056	2,975±0,104	0,267±0,014	0,085±0,003	0,078±0,004	0,064±0,002	0,055±0,003	0,038±0,001	0,037±0,001
	KP3	0,247±0,014	0,203±0,006	2,323±0,054	0,412±0,019	0,125±0,004	0,108±0,004	0,074±0,002	0,061±0,002	0,043±0,001	0,043±0,002
	KP4	2,700±0,065	2,405±0,069	2,925±0,073	0,278±0,011	0,089±0,005	0,079±0,004	0,076±0,002	0,061±0,003	0,043±0,002	0,043±0,002
	KP5	0,379±0,018	0,290±0,014	2,276±0,044	0,781±0,038	0,153±0,006	0,143±0,003	0,136±0,008	0,072±0,001	0,054±0,002	0,053±0,003
	KP6	1,744±0,044	1,470±0,049	3,888±0,106	0,412±0,015	0,092±0,003	0,085±0,004	0,077±0,002	0,068±0,002	0,048±0,001	0,048±0,002



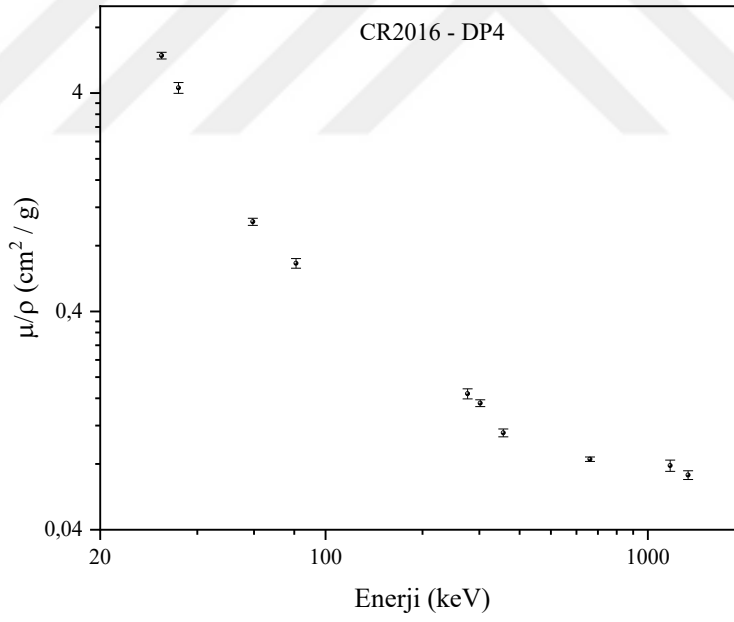
Şekil 4.1. CR2016 – DP1 kodlu düğme pil örneğinin kütle azaltma katsayısının enerji ile değişimi



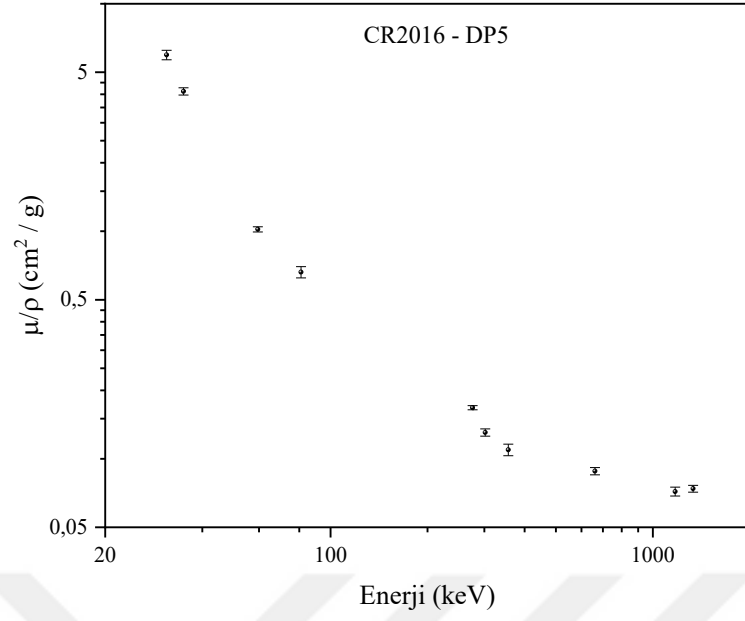
Şekil 4.2. CR2016 – DP2 kodlu düğme pil örneğinin kütle azaltma katsayısının enerji ile değişimi



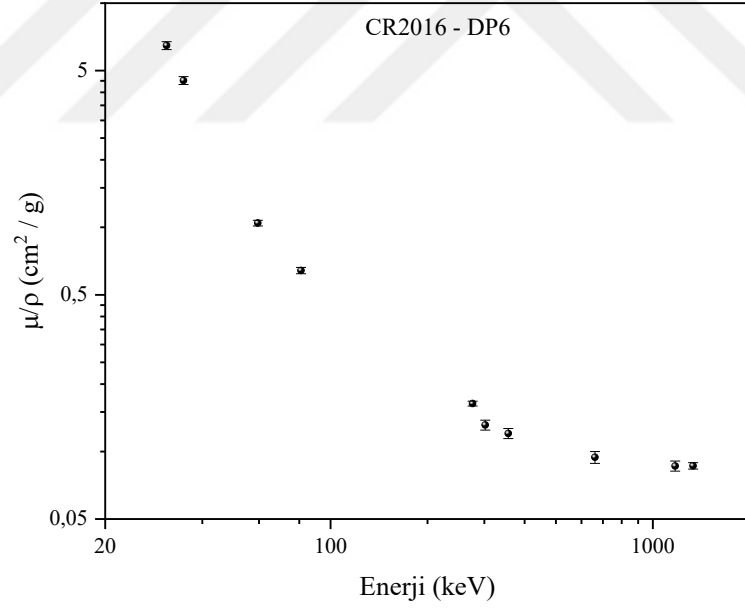
Şekil 4.3. CR2016 – DP3 kodlu düğme pil örneğinin kütle azaltma katsayısının enerji ile değişimi



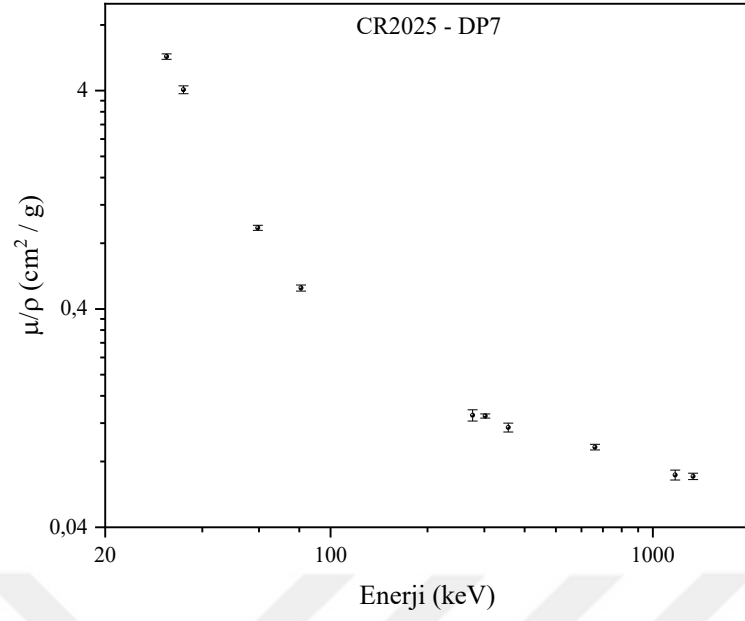
Şekil 4.4. CR2016 – DP4 kodlu düğme pil örneğinin kütle azaltma katsayısının enerji ile değişimi



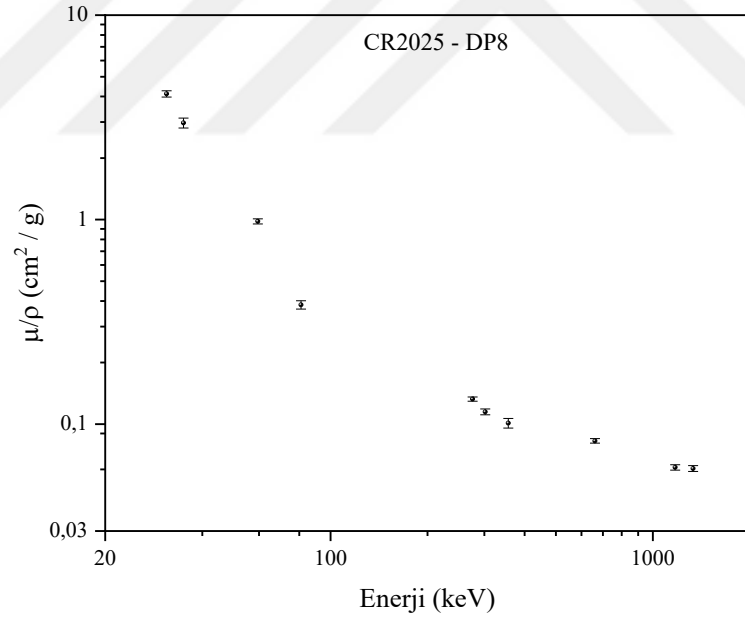
Şekil 4.5. CR2016 – DP5 kodlu düğme pil örneğinin kütle azaltma katsayısının enerji ile değişimi



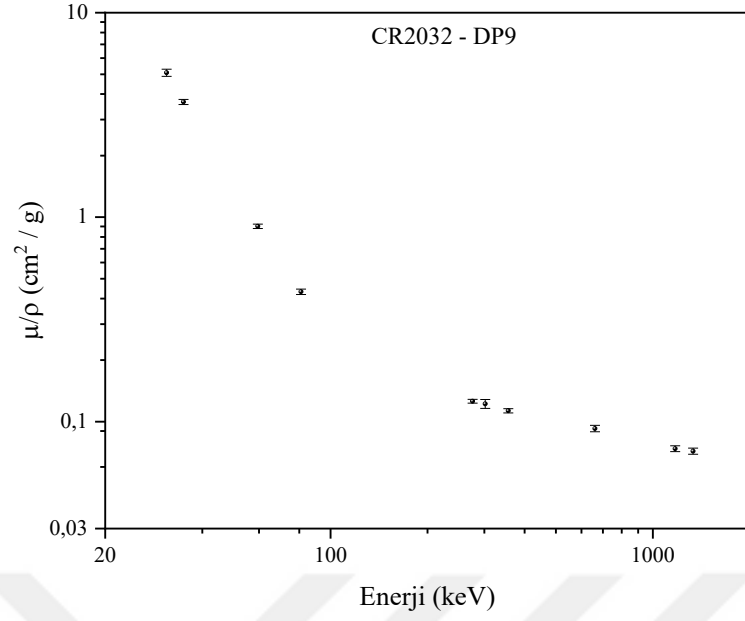
Şekil 4.6. CR2016 – DP6 kodlu düğme pil örneğinin kütle azaltma katsayısının enerji ile değişimi



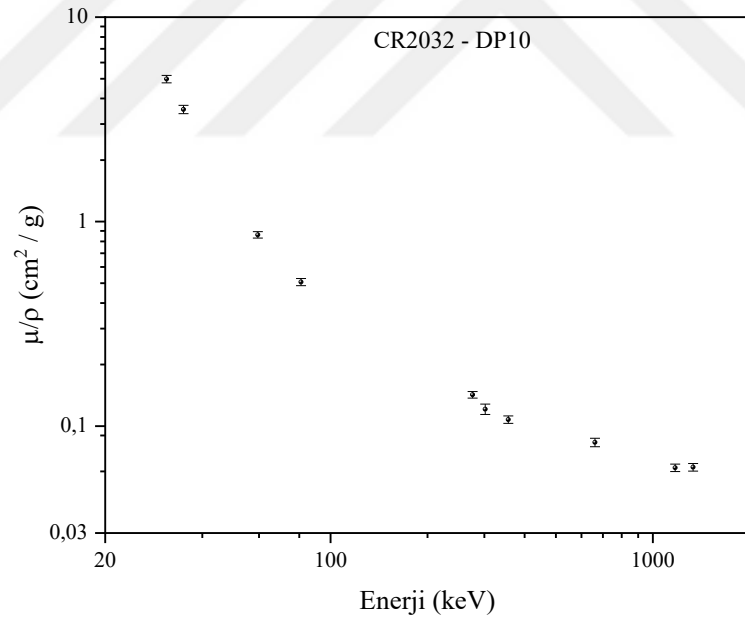
Şekil 4.7. CR2025 – DP7 kodlu düğme pil örneğinin kütle azaltma katsayısının enerji ile değişimi



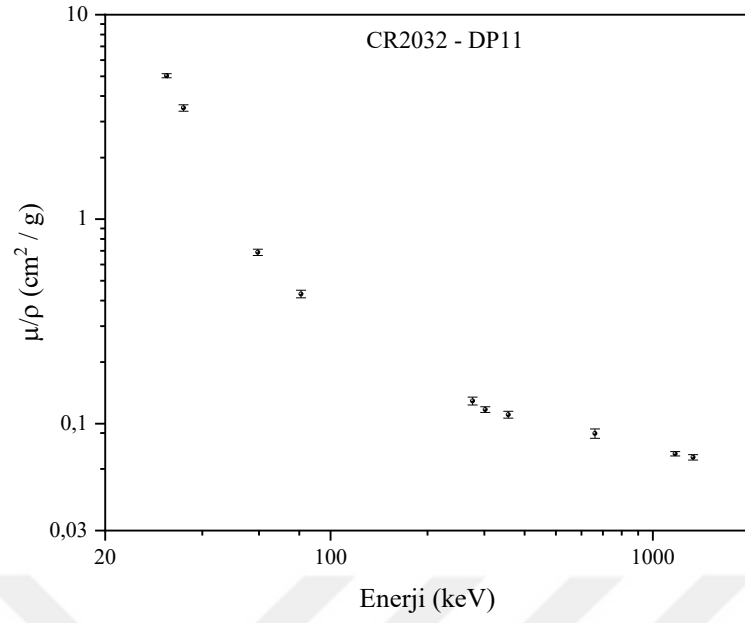
Şekil 4.8. CR2025 – DP8 kodlu düğme pil örneğinin kütle azaltma katsayısının enerji ile değişimi



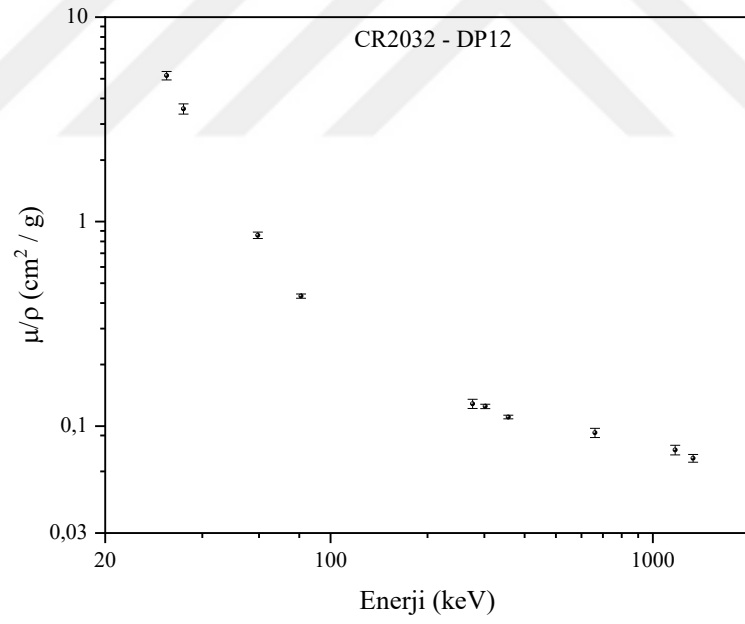
Şekil 4.9. CR2032 – DP9 kodlu düğme pil örneğinin kütle azaltma katsayısının enerji ile değişimi



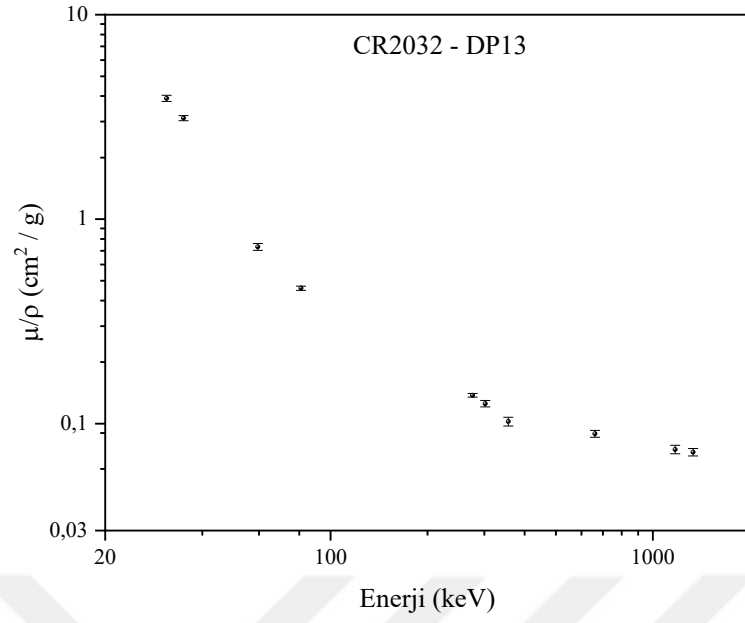
Şekil 4.10. CR2032 – DP10 kodlu düğme pil örneğinin kütle azaltma katsayısının enerji ile değişimi



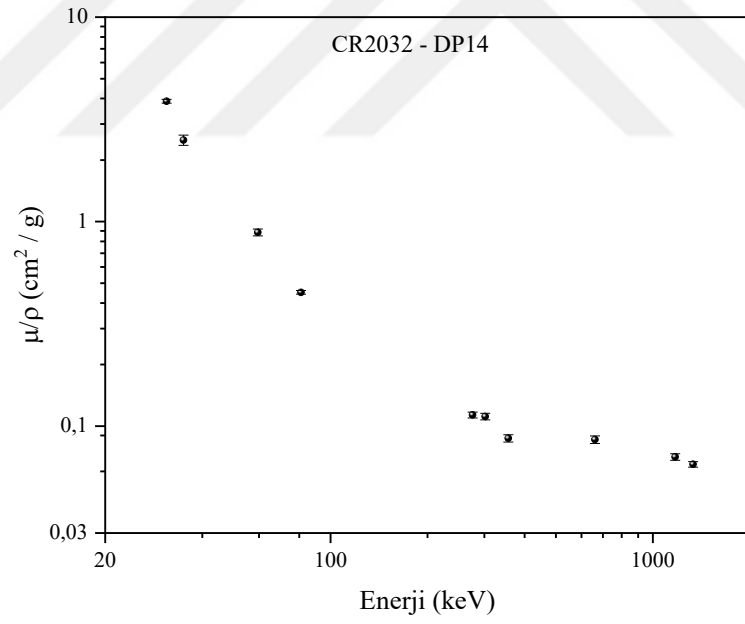
Şekil 4.11. CR2032 – DP11 kodlu düğme pil örneğinin kütle azaltma katsayısının enerji ile değişimi



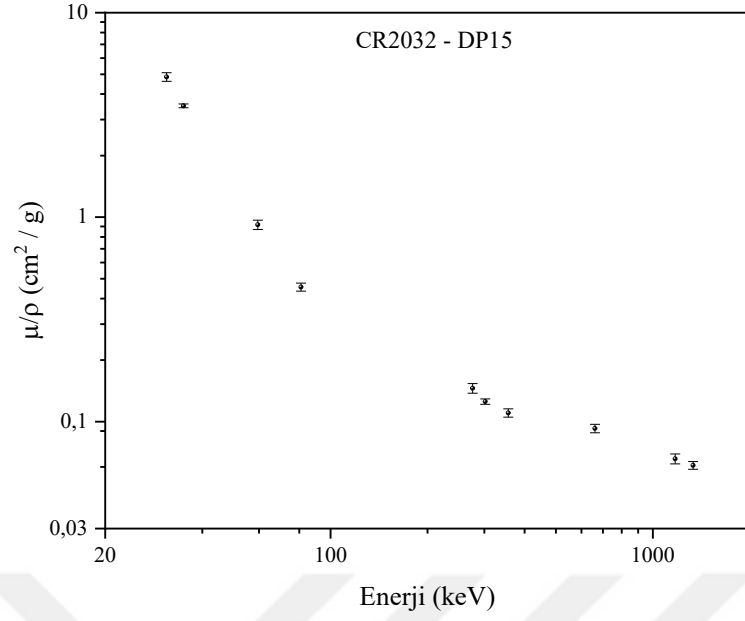
Şekil 4.12. CR2032 – DP12 kodlu düğme pil örneğinin kütle azaltma katsayısının enerji ile değişimi



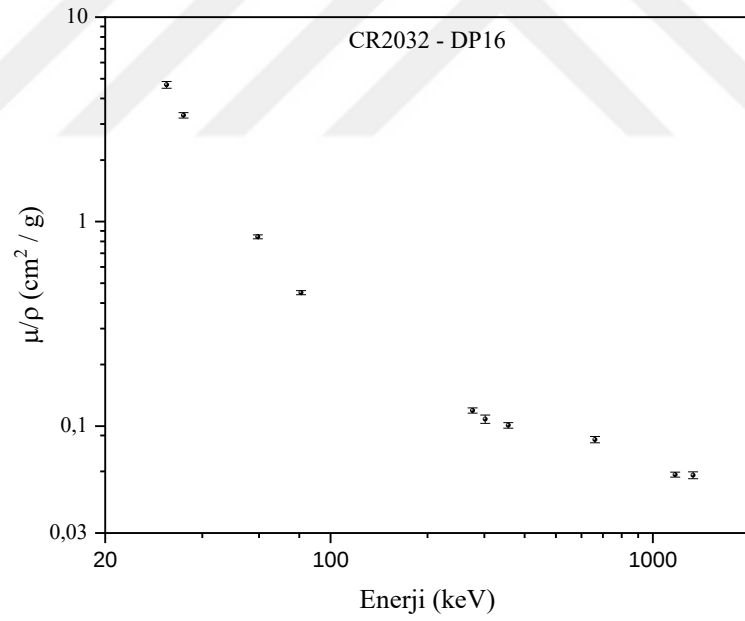
Şekil 4.13. CR2032 – DP13 kodlu düğme pil örneğinin kütle azaltma katsayısının enerji ile değişimi



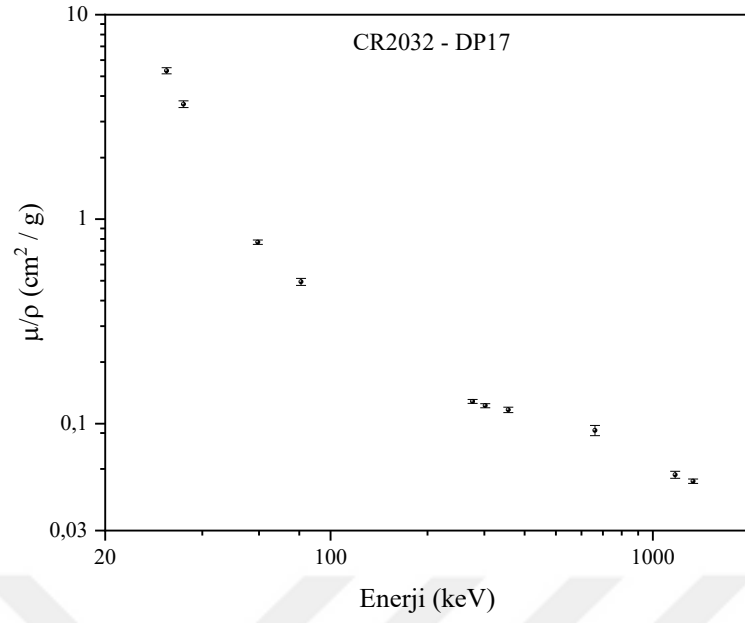
Şekil 4.14. CR2032 – DP14 kodlu düğme pil örneğinin kütle azaltma katsayısının enerji ile değişimi



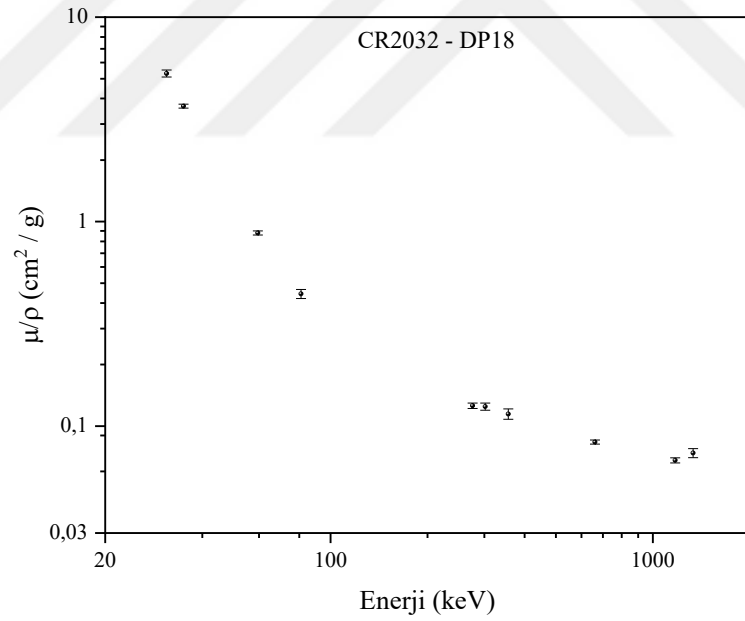
Şekil 4.15. CR2032 – DP15 kodlu düğme pil örneğinin kütle azaltma katsayısının enerji ile değişimi



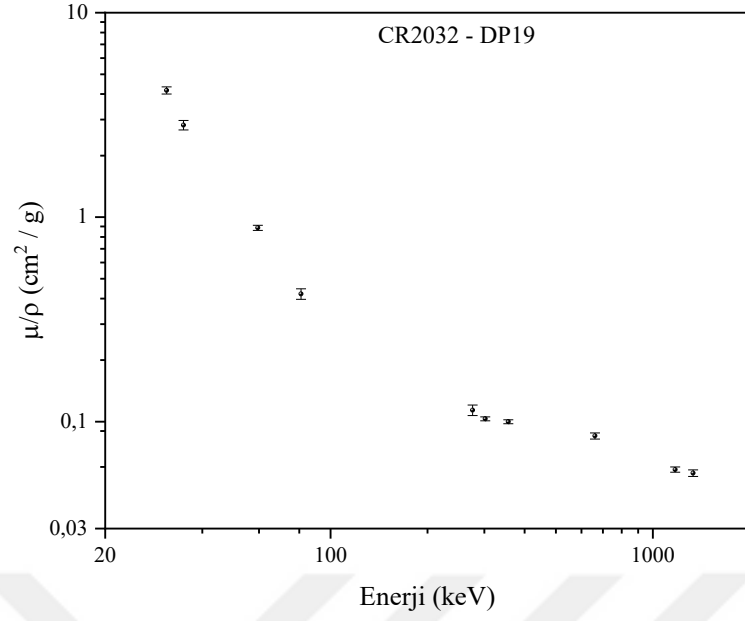
Şekil 4.16. CR2032 – DP16 kodlu düğme pil örneğinin kütle azaltma katsayısının enerji ile değişimi



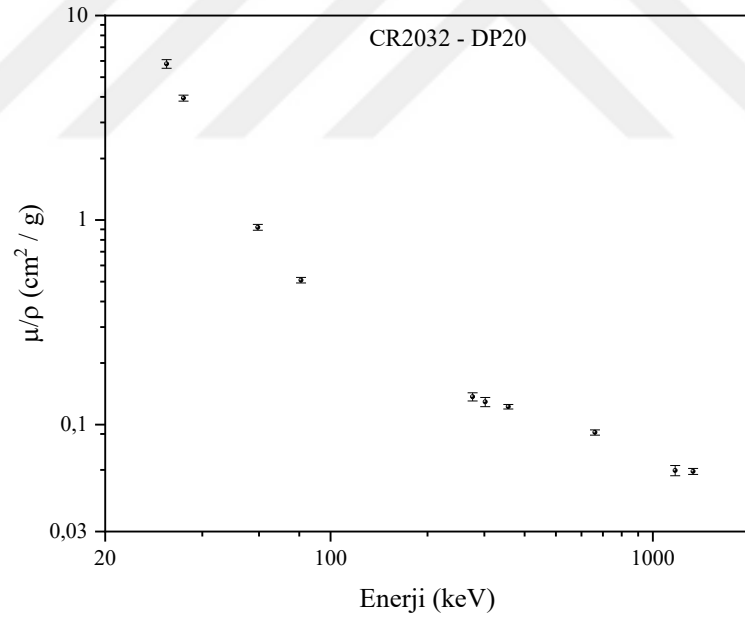
Şekil 4.17. CR2032 – DP17 kodlu düğme pil örneğinin kütle azaltma katsayısının enerji ile değişimi



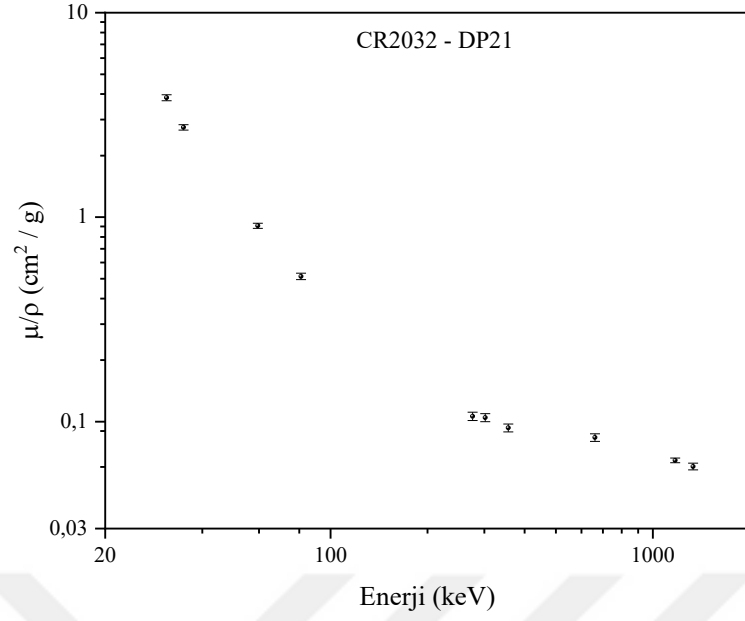
Şekil 4.18. CR2032 – DP18 kodlu düğme pil örneğinin kütle azaltma katsayısının enerji ile değişimi



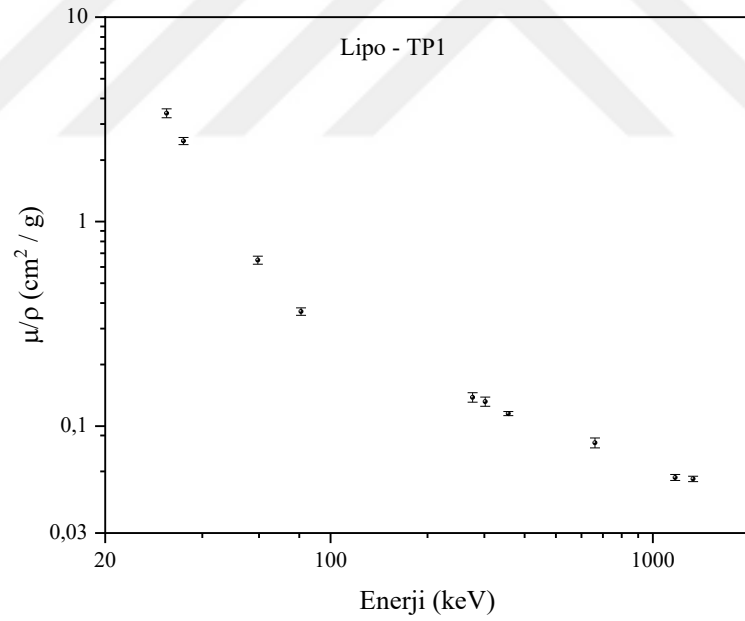
Şekil 4.19. CR2032 – DP19 kodlu düğme pil örneğinin kütle azaltma katsayısının enerji ile değişimi



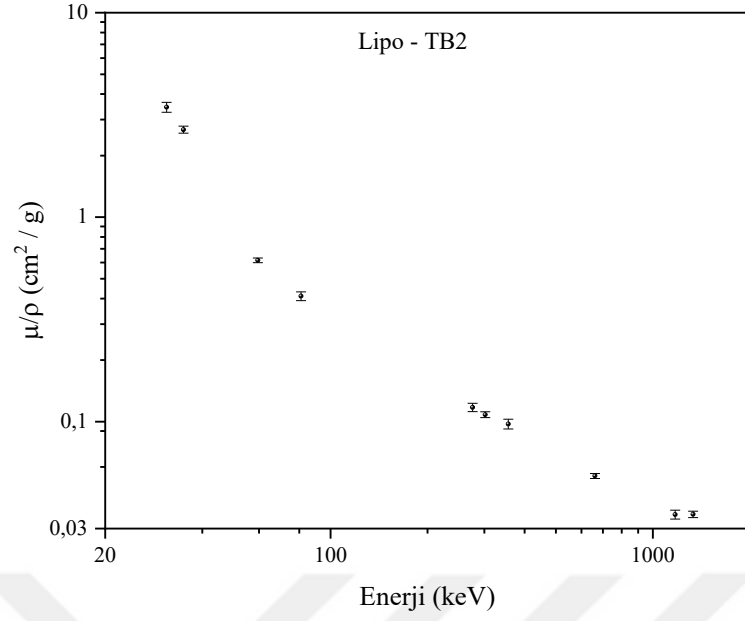
Şekil 4.20. CR2032 – DP20 kodlu düğme pil örneğinin kütle azaltma katsayısının enerji ile değişimi



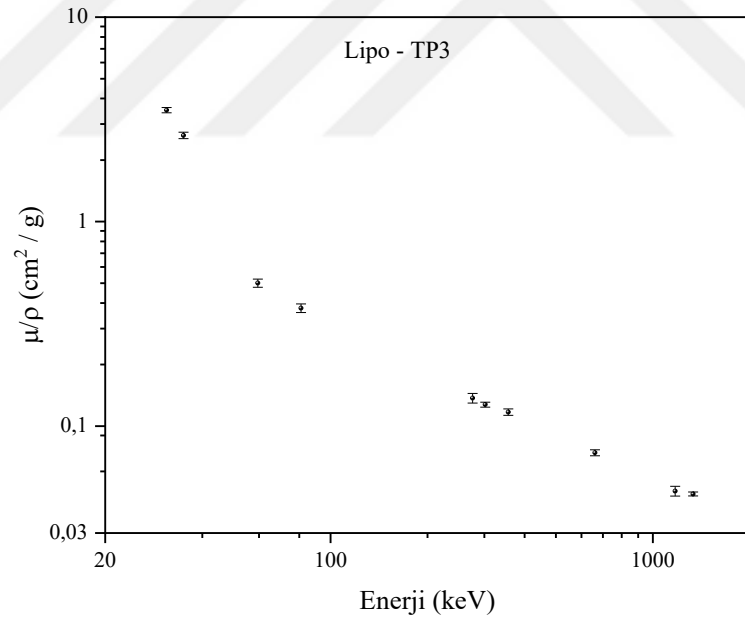
Şekil 4.21. CR2032 – DP21 kodlu düğme pil örneğinin kütle azaltma katsayısının enerji ile değişimi



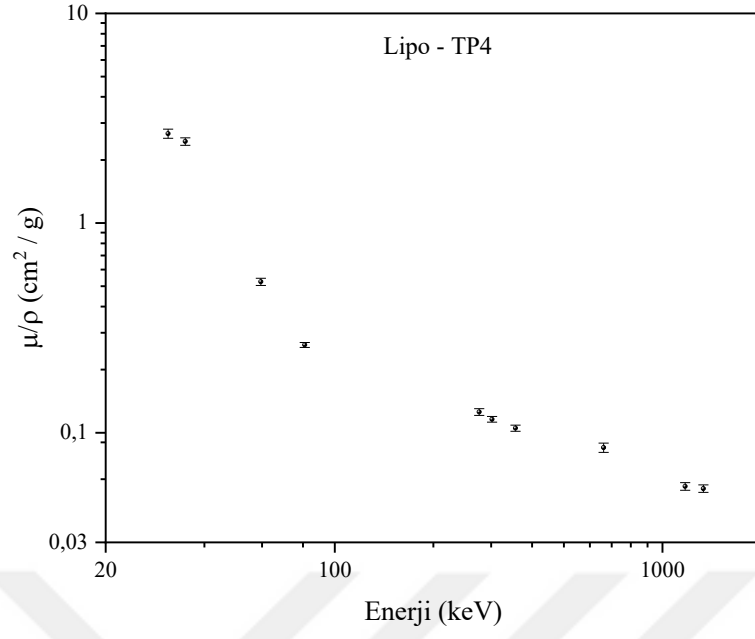
Şekil 4.22. Lipo – TP1 kodlu pil örneğinin kütle azaltma katsayısının enerji ile değişimi



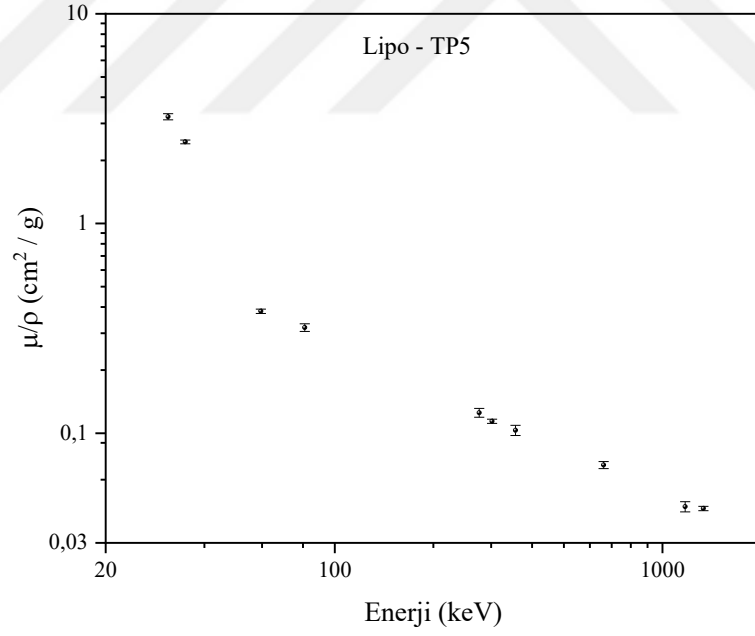
Şekil 4.23. Lipo – TP2 kodlu pil örneğinin kütle azaltma katsayısının enerji ile değişimi



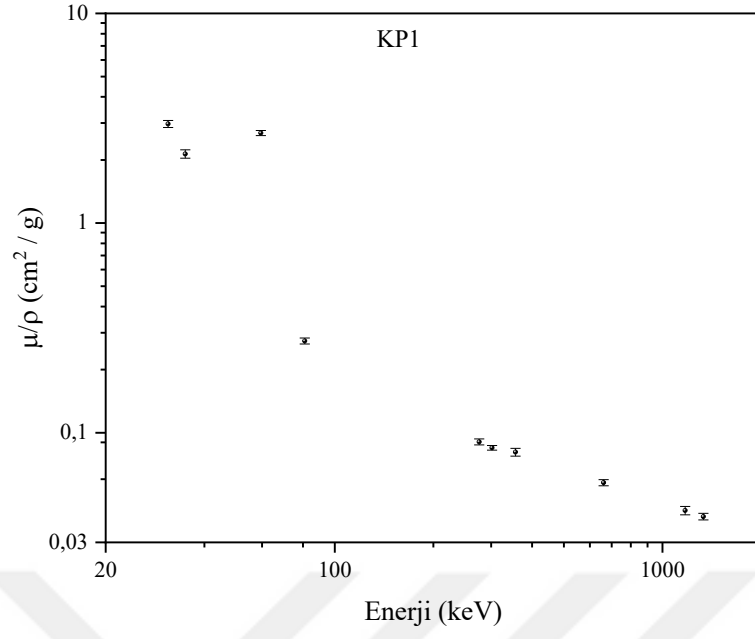
Şekil 4.24. Lipo – TP3 kodlu pil örneğinin kütle azaltma katsayısının enerji ile değişimi



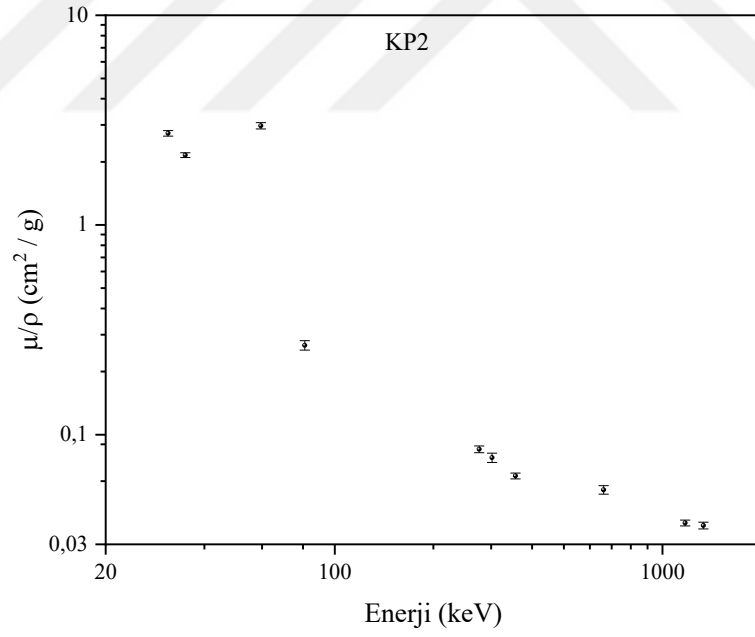
Şekil 4.25. Lipo – TP4 kodlu pil örneğinin kütle azaltma katsayısının enerji ile değişimi



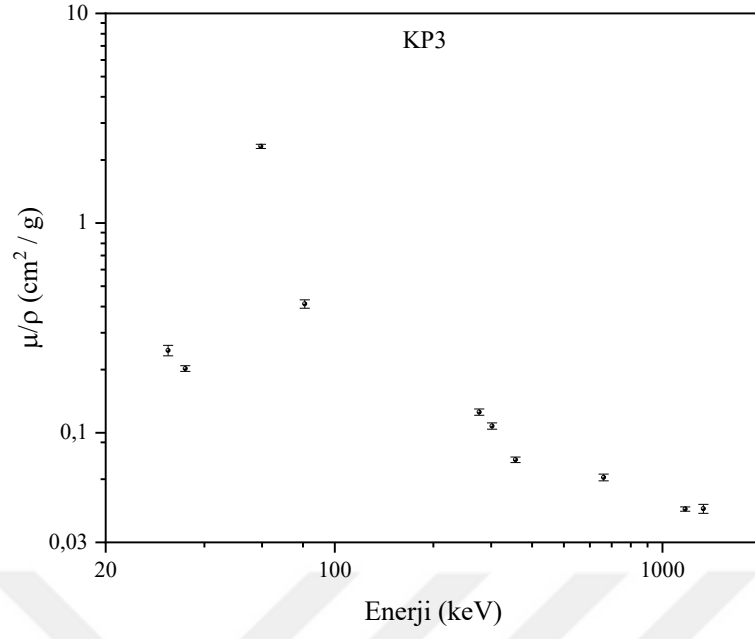
Şekil 4.26. Lipo – TP5 kodlu pil örneğinin kütle azaltma katsayısının enerji ile değişimi



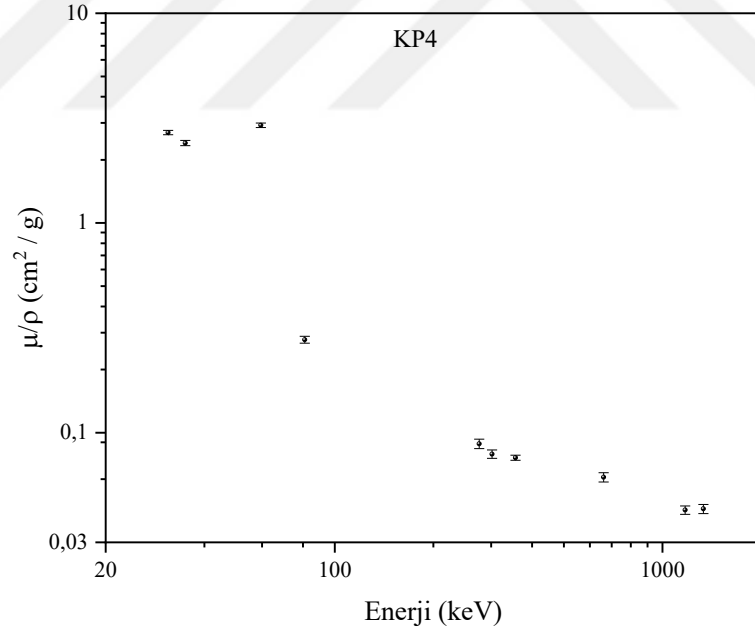
Şekil 4.27. KP1 kodlu kuru pil örneğinin kütle azaltma katsayısının enerji ile değişimi



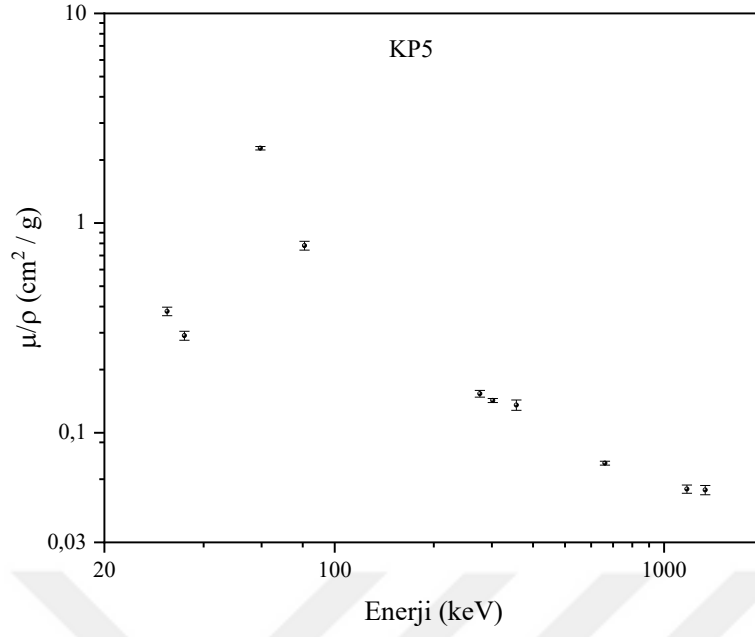
Şekil 4.28. KP2 kodlu kuru pil örneğinin kütle azaltma katsayısının enerji ile değişimi



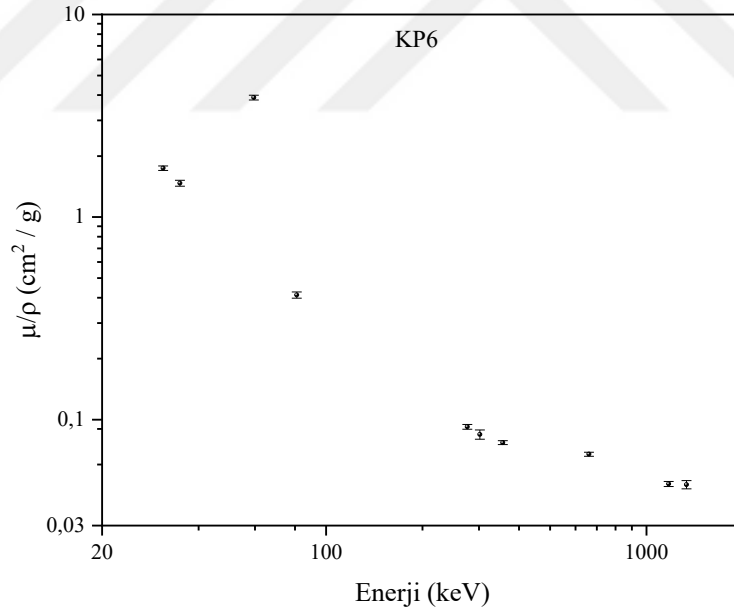
Şekil 4.29. KP3 kodlu kuru pil örneğinin kütle azaltma katsayısının enerji ile değişimi



Şekil 4.30. KP4 kodlu kuru pil örneğinin kütle azaltma katsayısının enerji ile değişimi



Şekil 4.31. KP5 kodlu kuru pil örneğinin kütle azaltma katsayısının enerji ile değişimi



Şekil 4.32. KP6 kodlu kuru pil örneğinin kütle azaltma katsayısının enerji ile değişimi

BÖLÜM 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu tez çalışmasında kullanılmış atık pillerin radyoaktivite seviyeleri, 31 ile 1332 keV aralığındaki 10 farklı enerji için gama ışınlarına karşı soğurma özelliklerinin incelenmesi üzerine olup iki kısımdan oluşmaktadır.

İlk kısımda kullanılmış kuru pillerin ^{238}U , ^{232}Th , ^{137}Cs ve ^{40}K aktivite konsantrasyonları belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlardan da (Tablo 4.1'den) açıkça görüleceği gibi kuru pil örneklerinin hiçbirinde yapay bir radyoizotop olan ^{137}Cs için aktivite değeri ölçülememiştir. Benzer durum KP1 kodlu örnekte ^{238}U ve ^{40}K için; KP2, KP3 ve KP5 kodlu örneklerde ^{232}Th için gözlenmiştir. ^{238}U radyoizotopu için aktivite konsantrasyonu 2,21 ile 3,82 Bq/kg arasında değişirken 2,42 Bq/kg'lık ortalama değere sahiptir. ^{232}Th radyoizotopu için aktivite konsantrasyonu 2,80 ile 4,13 Bq/kg aralığında değişmektedir ve 1,71 Bq/kg'lık ortalama değere sahiptir. ^{40}K radyoizotopu için aktivite konsantrasyonu ise 11,00 ile 23,70 Bq/kg aralığında değişmekte ve 12,54 Bq/kg'lık ortalama değere sahiptir.

Atık pillerin radyoaktif içeriğinin insan sağlığına etkileri üzerine daha anlamlı yorumlar yapabilmek için yıllık etkin doz değerlerinin (AED) hesaplanması gerekir. Bunun için öncelikle soğurulan gama doz hızı (ADR) aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\text{ADR}(\text{nGy/h}) = (0,462 \times A_U) + (0,604 \times A_{Th}) + (0,042 \times A_K) \quad (5.1)$$

Burada A_U , A_{Th} ve A_K sırasıyla ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K aktivite değerleridir. Yıllık etkin doz değerleri ise Denklem 5.2 kullanılarak hesaplandı.

$$\text{AED}(\text{mSv/y}) = \text{ADR}(\text{nGy/h}) \times 8760(\text{h/y}) \times 0,2 \times 0,7(\text{Sv/Gy}) \times 10^{-6} \quad (5.2)$$

Burada 0,7(Sv/Gy) doz dönüşüm faktörü, 8760(h/y) bir yılın saat karşılığı ve 0,2 ise maruz kalma faktörüdür. Soğurulan gama doz hızı ve yıllık etkin doz değerleri Tablo 5.1’de verilmiştir. Tablo incelendiğinde soğurulan gama doz hızı değerlerinin UNSCEAR (The United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation) tarafından 2008 yılında yayınlanan raporda belirtilen sınır değerden (59 nGy/h) oldukça küçük olduğu görülmektedir [33]. Yıllık etkin doz değerlerinin de Uluslararası Radyoloji Korunma Komisyonu (ICRP) tarafından 1993 yılında yayınlanan raporda yer alan sınır değerin (1 mSv/y) çok altında olduğu görülmektedir [34].

Tablo 5.1. Kuru pillerde soğurulan gama doz hızı ve yıllık etkin doz değerleri

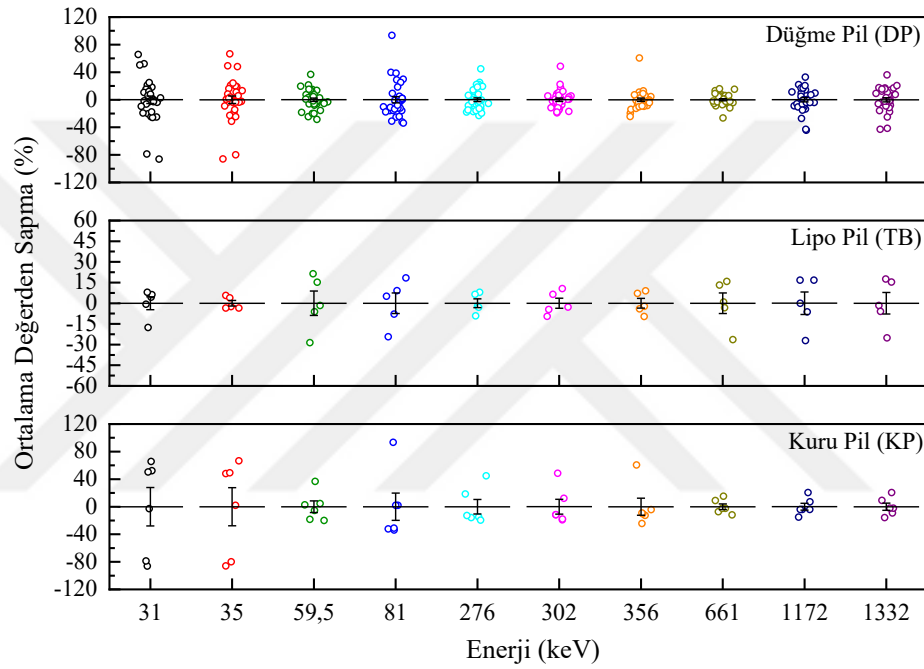
	KP1	KP2	KP3	KP4	KP5	KP6	Ortalama
ADR(nGy/h)	1,69	2,12	2,23	4,42	1,48	4,14	2,68
AED(mSv/y)	0,002	0,003	0,003	0,005	0,002	0,005	0,003

Tezin ikinci kısmında ise 21 adet düğme, 5 adet lityum polimer (lipo) ve 6 adet kuru pil örneklerinin kütle azaltma katsayıları 31 ile 1332 keV enerji aralığında bulunan 10 farklı enerji değeri için belirlendi. Elde edilen sonuçlar Tablo 4.2 ve Şekil 4.(16-32)’de verilmiştir.

Tabloda yer alan verilerden ve grafiklerden de açıkça görüleceği gibi tüm pil çeşitlerinde kütle azaltma katsayıları foton enerjisi arttıkça azalmaktadır. Bununla birlikte kuru pil örneklerinde azalma eğilimi 59,5 keV enerjisi için keskin bir artış göstermektedir. Bunun nedeni olarak kuru pillerin elementel içeriği söylenebilir. Çünkü bir atomun soğurma kıyısına yakın enerjiye sahip fotonların o atomu ihtiva eden soğurucu madde ile etkileşime girme olasılığı oldukça yüksektir. Bunun sonucu olarak soğurucu maddenin karşı tarafına etkileşmeden geçen foton sayısında keskin bir düşüş meydana gelir. Bu da o enerjide maddenin kütle azaltma katsayısında keskin bir artışa neden olur.

Düğme pillerin kütle azaltma katsayıları 31 ile 81 keV enerji aralığında $6,472 \pm 0,264$ ile $0,383 \pm 0,018 \text{ cm}^2/\text{g}$ arasında değerler aldığı bulundu. Nispeten yüksek enerji bölgesi olan 276 ile 1332 keV enerji aralığında ise $0,172 \pm 0,005$ ile $0,036 \pm$

0,001 cm²/g arasında değerler almaktadır. Lityum polimer (lipo) pillerde, 31 ile 81 keV enerji aralığında $3,511 \pm 0,105$ ile $0,262 \pm 0,007$ cm²/g; 276 ile 1332 keV enerji aralığında $0,139 \pm 0,007$ ile $0,035 \pm 0,001$ cm²/g arasında değerler alır. Kuru pillerde ise 31 ile 81 keV enerji aralığında $2,977 \pm 0,116$ ile $0,267 \pm 0,014$ cm²/g; 276 ile 1332 keV enerji aralığında $0,153 \pm 0,006$ ile $0,037 \pm 0,001$ cm²/g arasında değerler alır. Bu verilerin ortalama değerden sapma oranlarının dağılımı Şekil 5.1’ de verilmiştir.

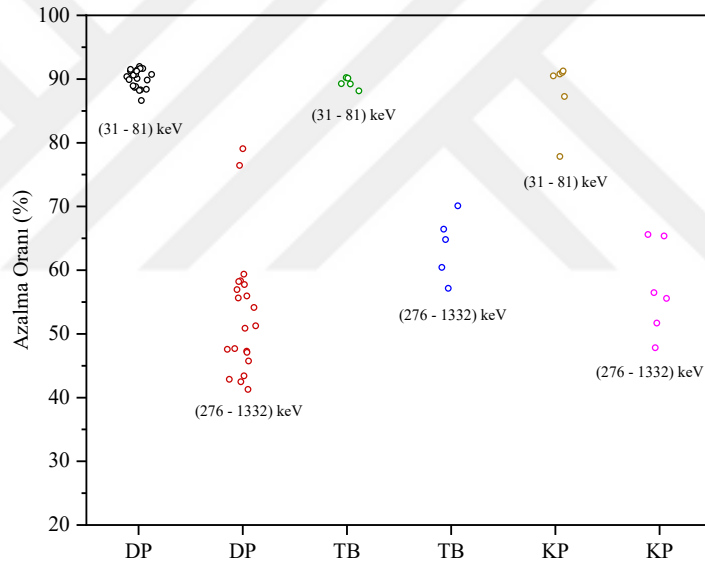


Şekil 5.1. Kütlesi azaltma katsayılarının ortalama değeri den sapma oranlarının enerji ile değışimi

Şekilden de görüleceğ i gibi ortalama değeri den sapma oranları düşme ve kuru pil örneklerinde daha geniş bir dağılıma sahiptir. Pil örneklerinin tamamı ele alındığında en dar dağılımın 661 keV’de olduğ u görülmektedir. Yapılan ölçümlerde elde edilen spektrumlarda 31, 35 ve 81 keV enerjilerinde gözlemlenen piklerin çoklu yapıya sahip olduğ u görülmüştür. Bundan dolayı bu enerjilerdeki dağılımların daha geniş olduğ u düşünülmektedir.

Foton madde etkileşmelerinde etkileşme olasılığ ının göstergesi olan tesir kesiti foton enerjisine ve malzemenin yoğunluğ una yani atomik içeriğ ine bağı ldır. Çalışma aralığımız ı dikkate alındığında 31 ile 81 keV enerji aralığında fotoelektrik olay baskın

iken 276 ile 1332 keV enerji aralığında Compton saçılması baskındır. Literatürde de rastlanacağı gibi fotoelektrik tesir kesitindeki ($\tau = sbt \cdot Z^{4,5}/E^3$) değişim artan foton enerjisine, Compton ($\sigma = sbt \cdot Z/E$) tesir kesitine kıyasla, daha fazladır [35]. Bu durum piller için elde edilen kütle azaltma katsayılarındaki azalma oranlarını gösteren grafikte açıkça görülmektedir (Şekil 5.2). Düğme pillerin kütle azaltma katsayılarındaki azalma oranı 31 ile 81 keV enerji aralığı için % 86,6 – 92 arasında iken 276 ile 1332 keV enerji aralığı için % 41 – 79,1 arasındadır. Lityum polimer pillerde 31 ile 81 keV enerji aralığı için % 88,1 – 90,2 arasında iken 276 ile 1332 keV enerji aralığı için % 57,1 – 70,1 arasındadır. Kuru pillerde 31 ile 81 keV enerji aralığı için % 77,8 – 91,3 arasında iken 276 ile 1332 keV enerji aralığı için % 47,8 – 65,4 arasındadır.



Şekil 5.2. Kütle azaltma katsayılarının 31-81 ve 276-133 keV enerji gruplarındaki değişim oranı

İki kısımdan oluşan bu tez çalışmasının ilk kısmında kullanılmış pillerdeki ^{238}U , ^{232}Th , ^{137}Cs ve ^{40}K radyoizotoplarının aktivite konsantrasyonları belirlenerek yıllık etkin doz değerleri hesaplandı. Elde edilen sonuçlar radyolojik açıdan pillerin insan sağlığına önemsenmeyecek kadar az etkisinin olduğunu göstermiştir. İkinci kısımda ise atık pillerin kütle azaltma katsayıları 31 ile 1332 keV enerji aralığındaki 10 farklı enerji için yarı deneysel yöntem kullanılarak belirlendi. Atık piller içerdiği ağır metallerden ötürü özellikle düşük enerjilerde radyasyon zırhlamada kullanılabilecek alternatif bir katkı maddesi olarak değerlendirilebilir. Bununla birlikte çalışma, atık

pillerin elementel analizleri ve farklı malzemelere değişik oranlarda katkılanması ile elde edilen örneklerin zırhlama özellikleri incelenerek geliştirilebilir.



KAYNAKLAR

- [1] Küçük, E. F., Durmaz, S., “Pillerin Çalışan, Çevre ve Halk Sağlığına Etkileri”, Sağlık Bilimleri Alanında Akademik Çalışmalar, C., Evereklioglu, Ç., Karaca, Gece Kitaplığı, Ankara, 133-154, 2020.
- [2] <https://tap.org.tr/pil-atik-pil/sss/atik-pil-konusunda-yasal-yukumlulukler/>, Erişim Tarihi: 11.01.2024.
- [3] <https://tap.org.tr/pil-atik-pil/sss/atik-pillerin-bertaraf-ve-geri-donusumu/>, Erişim Tarihi: 11.01.2024.
- [4] <https://tap.org.tr/kurumsal/hakkimizda/kurulus/>, Erişim Tarihi: 11.01.2024.
- [5] <https://exitcom.com.tr/hakkimizda/>, Erişim Tarihi: 25.02.2024.
- [6] <https://bilimgenc.tubitak.gov.tr/makale/insan-vucudu-radyasyon-yayar-mi/>, Erişim Tarihi: 25.02.2024.
- [7] <https://www.tenmak.gov.tr/2016-06-09-00-43-46/1087-dogal-radyasyon-kaynaklari.html>, Erişim Tarihi: 28.02.2024.
- [8] Çelik, A., “HPGe Gama Dedektörlerinde Soğurma Parametrelerinin ve Kristal Kalınlığının Belirlenmesi”, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik, Doktora Tezi, 2017.
- [9] Karalı, T., Türkiye de Tüketilen Yerli ve Yabancı Sigaralardaki Radyoaktif Polonyum Düzeyinin Elektodepozisyon ve Alfa Spektroskopisi ile Ölçülmesi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Nükleer Bilimler, Yüksek Lisans Tezi, 1994.
- [10] Gelir, A., İçme Suyundaki Radyoaktivitenin Belirlenmesi ve Yıllık Doz Eşdeğerinin Hesaplanması, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi, 2001.
- [11] Kobyay, Y., Doğu Karadeniz Bölgesindeki Doğal Kaynak ve Maden Sularında Radyoaktivite Tayini, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik, Doktora Tezi, 2009.

- [12] Avcı, D., Ankara, Çankırı, Çorum, Kastamonu, Kırıkkale, Samsun, Sinop ve Tokat İllerinden Alınan Kayaç Örneklerinin Radyoaktivite Seviyelerinin Belirlenmesi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik, Yüksek Lisans Tezi, 2019.
- [13] Çağlar, A., Kars İli, Sarıkamış İlçesi Toprak ve Yem Bitkilerindeki Radyoaktivite Dağılımının ve Radyolojik Etkilerinin Belirlenmesi, Kafkas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik, Yüksek Lisans Tezi, 2019.
- [14] Alemy, R., Bursa İli Orhaneli ve Keleş İlçelerindeki Toprakların Doğal Radyonüklid Düzeyinin Belirlenmesi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik, Yüksek Lisans Tezi, 2023.
- [15] Cui, F., Huang, H., Shen, Y., Tan, Z., Qu, P., Dai, M., Yu, H., Huang, W., Wu, Z., Chen, H., Guo, W., Jia, Y., Liu, Y., Investigation on The Radioactivity Levels of Seawater, Sediments, and Biota in Daya Bay, Radiation Medicine and Protection, 4(3), 165-169, 2023.
- [16] Hegazi, A., Salama, M.A., Kassab, M.F., Abdou, N.Y., Natural radioactivity levels in some vegetable crops under greenhouse conditions, Applied Radiation and Isotopes, 197, 110833, 2023.
- [17] Shvarts, A.A., Kaplan, E.M., Rumynin, V.G., Yu Borovitskaya, E., Erzova, V.A., Natural radioactivity of groundwater in Vientian deposits in St. Petersburg Region, Journal of Environmental Radioactivity, 264, 107189, 2023.
- [18] Hasabelnaby, M., Hanfi, M.Y., El-Gamal, H., El Gindy, A. H., Khandaker, M.U., Salaheldin, G., The Radioactivity Levels And Beta Dose Rate Assessment From Dental Ceramic Materials In Egypt, Nuclear Engineering and Technology, 56(9), 3898-3903, 2024.
- [19] Baltaş, H., YBaCuO ve BiPbSrCaCuO Süper İletkenlerinin Soğurma Katsayılarının İncelenmesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik, Doktora Tezi, 2006.
- [20] Damla, N., Türkiye'deki Bazı İnşaat Malzemelerinde Doğal Radyoaktiflik Seviyelerinin ve Kütle Soğurma Katsayılarının Belirlenmesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik, Doktora Tezi, 2009.
- [21] Yavuz, S., Dış Elektrik Alanın Bazı Yarı İletkenlerin Kütle Soğurma Katsayısına Etkisi, Rize Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik, Yüksek Lisans Tezi, 2011.
- [22] Ladhaf, B.M., Pawar, P. P., Studies on Mass Energy-Absorption Coefficients and Effective Atomic Energy-Absorption Cross Sections for Carbohydrates, Radiation Physics and Chemistry, 109, 89-94, 2015.

- [23] Hatipoğlu, D., Kalker Tozu, Kırklareli Mermeri ve Alüminyum için Gama Zayıflatma Katsayılarının Hesaplanması, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik, Yüksek Lisans Tezi, 2017.
- [24] Gökçe, S. H., Yüksek Kıvama Sahip Barit Agregalı Ağır Betonların Segregasyon Özellikleri ve Gama Işını Soğurma Katsayılarının Belirlenmesi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği, Doktora Tezi, 2018.
- [25] Şengül, A., Gamma-ray attenuation properties of polymer biomaterials: Experiment, XCOM and GAMOS results, Journal of Radiation Research and Applied Sciences, 16(4), 100702, 2023.
- [26] Singla, A., Dhingra, N., Investigation of Impact of Soil Texture, Depth and Gamma Ray Energy on The Mass Attenuation Coefficient and Determination of Soil Bulk Density Using Gamma-Ray Spectrometry, Optical Materials, 216, 111400, 2024.
- [27] Akbulut Uludağ, A., Lityum Hava Pillerinde Enerji Depolama ve Yaşam Döngüsü Analizi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği, Doktora Tezi, 2021.
- [28] Shoshen, U. M. A., Sodyum İyon Pillerde Katot Aktif Madde Olarak Kullanılan Tabakalı Yapıdaki $P_2-[Na_{2/3}Ni_{1/3}Mn_{1/2}Ti_{1/6}]O_2$ Bileşiğinin Elektrokimyasal Özelliklerinin İyileştirilmesi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya, Yüksek Lisans Tezi, 2017.
- [29] Öztürk, M., Pil/Akü Kullanımı ve Atık Piller ile Akülerin Zararları, Yıldız Teknik Üniversitesi, Çevre ve Orman Bakanlığı, 2004.
- [30] Dönmez, M., Türkiye de Atık Pillerin Değerlendirilmesi ve Örnek Bir Tesiste İncelenmesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi, 2011.
- [31] Kurşunoğlu, S., Atık/Kullanılmış Çinko-Karbon ve Alkali Pillerden Çinko ve Manganın Geri Kazanılması, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi, 2010.
- [32] Çelik N., Cevik U., Çelik A., Effect of detector collimation on the measured mass attenuation coefficients of some elements for 59.5-661.6 keV gamma-rays, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research B, 281, 8-14, 2012.
- [33] UNSCEAR, Sources and Effects of Ionizing Radiation, Report to the General General Assembly with Scientific Annexes. United Nations, New York, 2008.

- [34] ICRP, "Protection against Radon-222 at Home and Work". ICRP Publication 65. Ann ICRP 23. Pergamon, Oxford, 1993.
- [35] K. Debertin and R.G. Helmer, Gamma- and X-Ray Spectrometry with Semiconductor Detectors, North-Holland, 31 – 399, 1988.



ÖZGEÇMİŞ

Hatice Kübra TAŞKAN, ilkokul ve orta okulunu Merkez Atatürk İlköğretim okulunda okudu. Lise eğitimini Kızılcahamam Lisesinde 2014 yılında tamamladı. Lisans eğitimini 2016 yılında girdiği Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Öğretmenliği bölümünü 2020 yılında bitirdi. Yüksek lisans eğitimini Giresun Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalında 2024 yılında tamamladı.